

# 産業技術大学院大学 紀 要

Bulletin of  
Advanced Institute of Industrial Technology

第 2 号

2008年12月

産業技術大学院大学

## 目 次

## 作 品

観光路線バスのデザイン開発 .....	福 田 哲 夫	1
---------------------	---------	---

## 総 論

集合教室における授業進捗の同期ずれ対策にゲームデザイン手法を用いた 技能習得教材の開発 .....	網 代 剛	11
--	-------	----

インタラクティブ製品に対する利用自己効力感尺度の信頼性の検討 .....	安 藤 昌 也	17
--------------------------------------	---------	----

技能レベルおよび習熟忘却の影響を考慮した作業配分のための シミュレーション手法 .....	館 野 寿 丈子 清 水 慶 子	23
--	---------------------	----

同一テーマを異なる PBL チームが扱った場合の違いについて .....	戸 沢 義 夫	31
--------------------------------------	---------	----

情報システムアーキテクチャとモデリングにもとづく SOA の設計 .....	南 波 幸 雄	49
--	---------	----

高齢化社会における快適生活ネットワーク空間の技術展望 .....	橋 本 洋 志	61
----------------------------------	---------	----

Eye-in-Hand システムに対する安定化予測ビジュアルフィードバック制御 .....	村 尾 俊 幸之 河 合 宏 之 藤 田 政 之	71
---	--------------------------------	----

## 論 文

スーパープログラマ育成のための PBL .....	秋 口 忠 三	79
---------------------------	---------	----

三角形メッシュのためのバーチャルクレイモデリング .....	大 坪 克 俊	85
--------------------------------	---------	----

産業技術大学院大学情報アーキテクチャ専攻の教育体系に関する研究 .....	加 藤 由 花 土 屋 陽 介 村 尾 俊 幸	91
---------------------------------------	-------------------------------	----

場面遷移ネット GUI シミュレータによるマルチエージェントサービス フローシミュレーション .....	川 田 誠 一 館 山 武 史 下 村 芳 樹 新 井 民 夫 梅 田 靖 行 久保田 直 行	101
---	--	-----

3次元 CAD と品質工学を組み合わせた統計的デザイン手法 －腕時計のデザインを例に－ .....	越 水 重 臣	109
--	---------	-----

中等・高等教育における ICT インフラの活用に関する研究 .....	小 山 裕 司 加 藤 由 花 長 尾 雄 行	115
-------------------------------------	-------------------------------	-----

Summary of International Comparative Research on Decision-Making in the Design Development Processes.....	Noboru Koyama Mikio Yamashita Mikio Fujito Keiichiro Kawarabayashi Yasufumi Morinaga Yoji Kitani	123
ユビキタス DB レプリケータの開発とプローブビデオサービスへの 適用検討 .....	嶋 田 茂	131
バイオメトリック認証システムに対する FTA を用いたリスク評価 .....	清 水 将 吾 瀬 戸 洋 一	141
IT セキュリティ評価・認証に関する e-learning 教材の大学院教育への 適用検討 -大学での試行講義およびその評価- .....	瀬 戸 洋 一	147
イノベーション研究の再考 -コンカレント探索の必要性をめぐって- .....	陳 俊 甫 吉 田 敏	155
JavaScript と非同期 HTTP リクエストによる共同作業支援 ミドルウェアの構築 .....	長 尾 雄 行 土 屋 陽 介 森 本 祥 一 中 鉢 欣 秀	165
企画型 PBL の実現と考察 .....	成 田 雅 彦	175
最適化アルゴリズムと離散凸構造 .....	森 口 聡 子	183
シナリオの図解化による業務フロー分析 .....	森 本 祥 一 中 鉢 欣 秀	193
建築生産システムにおける各様相の構成要素からみる基礎的考察 .....	吉 田 敏 甫 陳 俊 甫	209

## CONTENTS

**Works**

Design Development for Tourist Route Bus .....	Tetsuo Fukuda	1
--	---------------	---

**Review**

A development of teaching materials to learn skills without disorder of synchronization with game design methods .....	Tsuyoshi Aziro	11
---	----------------	----

Verification of Reliability of Self-efficacy Scale in Interactive Product Use .....	Masaya Ando	17
---	-------------	----

Simulation Method for Work Dispatching in Consideration of Skill Level and Learn-and-Forget Effects .....	Toshitake Tateno Keiko Shimizu	23
--	-----------------------------------	----

Analysis of the differences of PBL teams on the same PBL theme .....	Yoshio Tozawa	31
--	---------------	----

Designing SOA Based on Information Systems Architecture and Modeling ..	Yukio Namba	49
---	-------------	----

Perspective of Comfortable Living Network Space in Aging Society .....	Hioroshi Hashimoto	61
--	--------------------	----

Stabilizing Predictive Visual Feedback Control for Eye-in-Hand Systems .....	Toshiyuki Murao Hiroyuki Kawai Masayuki Fujita	71
--	--	----

**Regular Papers**

PBL for Developing Super-Programmers .....	Chuzo Akiguchi	79
--	----------------	----

Virtual Cray Modeling for Triangular Meshes .....	Katsutoshi Ootsubo	85
---	--------------------	----

A Study of an Educational System on the Course of Information System Architecture of AIIT .....	Yuka Kato Yosuke Tsuchiya Toshiyuki Murao	91
--	---	----

Multi-Agent Service Flow Simulation Using Scene Transition Nets GUI Simulator .....	Seiichi Kawata Takeshi Tateyama Yoshiki Shimomura Tamio Arai Yasushi Umeda Naoyuki Kubota	101
--	--	-----

Statistical Design Method Using 3D CAD and Quality Engineering – Case Study of Wristwatch Design – .....	Shigeomi Koshimizu	109
---	--------------------	-----

A Study of Applications of ICT Infrastructure to Secondary and Higher Education .....	Hiroshi Koyama Yuka Kato Takeyuki Nagao	115
--	---	-----

Summary of International Comparative Research on Decision-Making in the Design Development Processes.....	Noboru Koyama Mikio Yamashita Mikio Fujito Keiichiro Kawarabayashi Yasufumi Morinaga Yoji Kitani	123
Development of Ubiquitous DB Replicator, and Examination of Applicability to Probe Video Services .....	Shigeru Shimada	131
Risk Evaluation for Biometric Authentication Systems with Use of Fault Tree Analysis .....	Shogo Shimizu Yoichi Seto	141
Application examination of e-learning instructional materials concerning IT security evaluation and certification to the graduate education .....	Yoichi Seto	147
Reconsideration of Innovation Studies: Over the Necessity of a Concurrent Approach .....	Junfu Chen Satoshi Yoshida	155
Development of a Middleware for Web Based Cooperative Work Using JavaScript and Asynchronous HTTP Requests .....	Takeyuki Nagao Yosuke Tsuchiya Shoichi Morimoto Yoshihide Chubachi	165
Realizing Product Planning type PBL and its consideration .....	Masahiko Narita	175
Optimization Algorithms Based on Discrete Convexity .....	Satoko Moriguchi	183
Scenario-Based Visual Analysis for Business Process Modeling .....	Shoichi Morimoto Yoshihide Chubachi	193
Basic study of construction system with analysis of Architecture of each aspect .....	Satoshi Yoshida Junfu Chen	209

# 観光路線バスのデザイン開発

福田 哲夫\*

## Design Development for Tourist Route Bus

Tetsuo Fukuda\*

### 概要

既存のバス車体を再利用して、この観光路線バスはデザインされた。外装はステンレス製である。塗装面積を減少し環境負荷の低減効果につなげている。内装デザインは、座席配置と握り棒を含む全面的な改装により、開放的なイメージとしてリニューアルすることができた。その内装デザインはお客様のマナーを促し、そして乗客を前部から後部へと誘導する。混雑はデザインにより緩和することができるのである。

### Abstract

The existent bus body was reused, and this tourist bus on a regular route was designed. An exterior is made of the stainless steel. Decrease coating areas, and it is being connected to effect on a decrease of the environment load. The interior design could be renewed as an open image by the complete remodeling which included seat arrangement and a grip stick. That interior design suggests guest's manners, and then leads a passenger from the front to the back. Congestion can be eased by the design.

Keywords : aerodynamics body, environmental materials, comfort seat arrangement, pole design.

#### 1. はじめに

この観光路線バスのデザイン開発プロジェクトは、東京都交通局と公立大学法人首都大学東京との連携によるもので、本稿はデザイン領域からの考察をまとめたものである。

#### 2. 背景と設計目標

このプロジェクトは、東京都の施策である「10年後の東京」の実行プログラムに基づくもので、目標の第一番目は、外国人旅行者誘致目標 1,000 万人を掲げる観光産業への啓発である。東京を訪れるすべての旅行者への利便性を考えた車両であること。二番目には、審美的形態として都市景観に配慮し調和する車両デザインの提案であること。また三番目には、環境対応型車両としての考察により、利用者に長く愛される車両デザインであることなどが挙げられる。

さらには、2016年のオリンピック誘致を視野に入れた観点からも、本プロジェクトの役割と目標は明確であった。

また、交通局からの設計要件は「わかりやすさ」であり、ひと目でわかる外観形状や、多言語による情報案内をすることなどであった。この他設計にあたっては、完成ま

での時間的な制約から、法規性や諸条件など、最適解が求められることとなる。

デザイン対象車両は既存車であることから、基本構造はすでに「公共交通機関の車両等に関する移動等円滑化整備ガイドライン」に添い設計されている。そのため人間工学、安全性、ユニバーサルデザインへの配慮など、機能面での基本性能はクリアしている。したがって、観光客への利便性として提供できる付加価値や魅力づくりが問われることになる。

#### 3. 路線の特徴と景観

運用路線は、首都東京の玄関口である東京駅を出発する。そして外国人旅行者の訪問も多い人気名所である日本橋・秋葉原・上野・合羽橋・浅草・両国まで、都内下町地区を巡るバスとして計画された。

路線の起点は、公共交通の要である東京駅丸ノ内北口。周辺には皇居の緑地帯ほか、丸の内・大手町の複合オフィスや商業施設群が集中している。近代的なビル群の大型壁面等の組み合わせにより、メリハリのある陰影景観を有する。

この印象はさらに日本橋の目抜き通り周辺まで続いている。高島屋や三越など大型老舗百貨店、再開発ビルや複合商業施設が混在し軒を連ねる。

神田須田町,万世橋,秋葉原駅前周辺は,電気街のほか,日本のアニメやキャラクターなどの発信地として,一躍世界的に有名となった場所である.必然のように風景は派手な意匠がソデ看板や壁面を飾る.

さらに上野駅前界限は,多種多様な商業用看板が沿道両側を取り囲み,普段から賑わいを見せている.周辺には,動物園をはじめ美術館,博物館,文化会館,など文化芸術の拠点が集中するが,上野公園には緑も多く路線の雑踏風景からは読み取れない.

合羽橋道具街を経て,浅草雷門へ続く沿道は,浅草寺本堂や五重塔,また隅田川対岸には,モニュメンタルな建築物など,日頃より外国人旅行者で賑わいを見せている街である.土産物店をはじめ下町の商店街が軒を連ね,景観としては次第に陰影の細かい店舗が多くなってくる.

JR 両国駅界限は,大相撲の国技館や江戸東京博物館などの大型建造物と,中小駅前商業施設とのコントラストで周辺景観を構成している.

このように路線は,高層で陰影が大胆な構成となるビル群から,低層で陰影が細かい構成となる商店街まで,まさに大都市における多様な特徴的景観を呈しており,未来的な都市景観にも主張し過ぎることなく,下町の雑踏にも埋没することのない,安心のデザインを探ることになる.

運行計画は,一時間に二本,30分間隔で定時運行され,約10kmに7停留所を配置し,利用し易くなっている.

また,運賃は普通の路線バスと同じ大人200円,小児100円の設定である.したがってこの金額での“差別化”と“満足感”を設計目標とした.

#### 4. 設計要件と改造範囲の確認

この計画に使用する車種は「日野製 HR1JNEE 型」,五年経経過の既存車両で,仕様および保安基準上の許容寸法など,その改造範囲は以下の通りである.

既存車両仕様:( )内は保安基準上の許容値

1. 全高:2,885mm (3,800mm未滿)
2. 全幅:2,120mm (2,500mm以下)
3. 全長:10,490mm (12,000mm未滿, 但しフロントオーバーハング制限なし. リアオーバーハングは780mm以下)
4. 車両重量:12,670kg  
(前輪許容荷重:4,480kg, 後輪許容荷重:8,480kg, 最大荷重:12,960kg)

したがって,改造による許容増加重量は290kg以下と少なく,当初の乗車定員数68人(内訳:座席25人+立席42人+乗務員1人)について,定員減少を前提での

設計対応としている.

その他の特記事項としては,以下の通りである.

1. 坂道での走行に支障のないこと
2. 車高の延長の際は,転角に配慮のこと
3. エンジン扉や点検扉他の整備性についての配慮
4. 打ち合わせにあたっては,以下の関連書類をもとに改造設計を進めることなどであった.
  - a. 内装材難燃基準適合検討書
  - b. 交通バリアフリー法の概要
  - c. 灯火器法規制等々



図1-2 改造前の車両

しかしながら,他にシャシー図や概念図はあるものの,肝心な車体外観に関する詳細図が存在しないため改造設計には困難を極めた.

その理由は,バス固有の外板組立てなどの製作工程にあると考えられる.一般的に乗用車などはモノコック構造が多いことや,複雑な成型品の取り付け,外板面の連続性が問われるものなど,外板基準の寸法管理であるものが多い.

一方バスでは伝統的なシャシー・フレームを基本とする構造から,全体で強度を管理するスケルトン車体構造に変わっている.このような外観の流線形再現以前での寸法管理上は,骨基準による方が容易なためである.

したがって本改造に際しては,外観の流線形再現に適した外板基準の寸法管理として進行させていった.

#### 5. デザイン開発工程

当初改造の範囲は,1.駆動系は現状維持,2.重量的な制限,3.定員減の考え方,4.ワンマン運転による運用方法などはすでに決まっていた.したがってデザインの作業範囲と工程は,

1. 図面と書類による設計要件の確認
2. 改造用車両への改造前現車確認
3. デザインの企画立案と概念設計
4. 外装設計に基づく外観造形と色彩計画案検討
5. 外装素材の選択と構体構造との関係性検討
6. 内装設計に基づく座席配置案の策定と艤装案検討
7. 床・壁・天井に関する各部位の詳細案検討

8. サービス部品等の設計と選択等々にまで及んでいる。

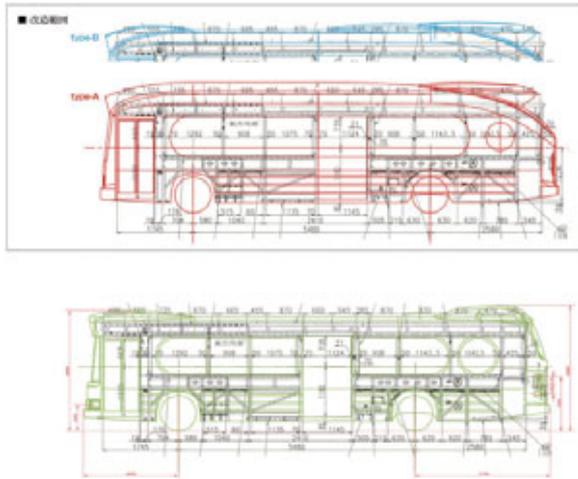


図3-4 初期の改造範囲検討図

また利用客の立場から、路線バスに期待されるサービス等については、プロジェクトメンバーによる国内外の体験や定性的意見を踏まえた上で、以下のキーワードを設定しデザイン提案の目安とした。

1. 安心感：(目的地まで確実に行けそうな…)
  - ・特徴ある色彩と形態で誤乗車防止策による安心感
  - ・英語など四カ国語案内による安心感
  - ・目的地の景色が見える安心感
  - ・いつでもどこからでも乗降しやすい安心感
2. 効率的：
  - ・いつでもどこからでも乗降しやすい座席配置
  - ・30分に一本の運行で、観光予定が組みやすい
3. 印象的：
  - ・旅から帰っても思い出に残る車体のデザイン
  - ・小学生でも理解できる、シンプルな形態と色彩



図5-6 オリジナルのサムネイルとイメージスケッチ

導き出すテーマは“東京発 江戸再発見 未来行き”。東京の過去・現在・未来を歩き来し、散歩感覚で楽しめる“タイムマシン”のような存在として、外国人旅行客は勿論、“次世代を担う子供たちに夢を”との思いでデザインをした。

その後、開発半ば頃には交通局主催の検討会により“「東京→夢の下町」バス”と命名される。単なる江戸趣

味ではなく、また超未来の先端を狙うものでもない。流れる風景とそこに住む人たちの活気を感じることできる乗り物をイメージしてデザインを提案した。

### 6-1. 外観は“流線型”で環境に配慮

改造対象車両は、スケルトン車体構造のため、主要骨格である強度部材に及ぶ改造申請については、認可までの時間的條件が読めないことにより断念した。したがって、デザインイメージの再現には、改造範囲に制限が多く困難であった。

1. 風の抵抗を減らし省エネ運転につながる空力的形態を目指し、新たな有機的三次曲面の組み合わせを模索した。結果としては、流線型とすることにより、改造前の営業車とは違う丸味を帯びたイメージに変身させ、柔らかな量感造形とすることができた。

2. 屋根前方部の膨らみは、室内側に設けられた情報表示器や運転周辺機器の取り付け用空間として、また乗降客頭上にゆったりとした天井までの寸法を確保している。有機的三次曲面はシェル構造で軽量化にも有利であると判断した。成形方法は、金型を必要としないダイレス方式の鉄板簡易プレスである。

3. 屋根後方部の膨らみは、室内後方の高床部における頭上空間を確保するために設置された空間であり、天井までの床上寸法は180mm増の2,020mmとしている。外観は、空調機の筐体および換気扇を被覆した形態として、一体感ある有機的三次曲面としてまとめている。

このように、デザインは機能と形態との一致を図り、外観の屋根形状と、室内外機器や座席配置などとの整合性をとりながら進められた。

車体の前部および後部の造形は、張出し寸法を延長することにより、丸味を帯びた形状とし、審美的調整を施した。その際、前照灯と後部尾灯などの灯具形態などについては、全体として円形の造形言語を用いて整理し、形態の調和を図っている。特に、外部演出照明として、後方側面上部に橙色の標識灯を設けた。これは装飾灯ながら、基本骨構造の凸部や折れ、面のつなぎを隠蔽する役割を担っている。造形要素は他に倣い、紡錘型の流線形としている。



図7 初期案の簡易イメージモデル (1/20)

本来であれば、その効果について風洞実験により空力的考察をして判断をするべきであるが、それらの比較を検討している時間的・費用的な問題で実現はしていない。



図8 初期案のイメージモデル

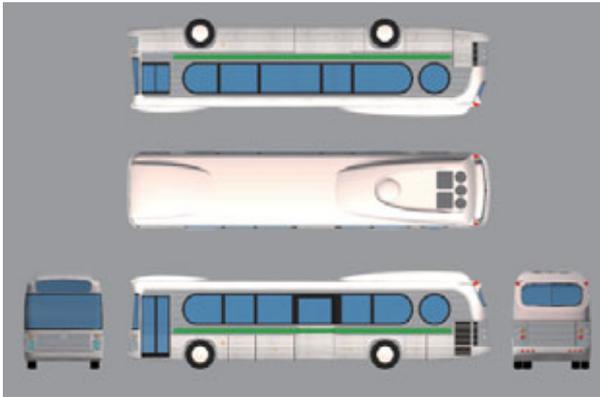


図9 最終案の三面レンダリング



図10 最終案の前部イメージ図



図11 最終案の後部イメージ図



図12 最終案の後部イメージモデル

## 6-2. 外観前面造形

スペースユーティリティの高い基本形のスケルトン車体構造では、いかに室内空間を確保しながら、前後の形状で空気抵抗を低減できるかが解決の鍵である。

前面のスタイルは、以下のような最適化を図った。

改造前に曲面ガラス窓以外の外装パネルは、平面的な折り曲げ面の組み合わせであった。したがって、改造にあたっては、変更の利かない曲面ガラス窓に合わせて、他の構成部品を曲面とすることにより整合性を取り、全体に丸味のある表情とし、六面体から空力上省エネに効果的な流線型イメージへと印象を変えている。

中央車体正面パネルには、東京都のシンボルマークである銀杏のエンブレムを配置した。これは既存部品をそのまま研磨し、再利用というかたちで環境に配慮している。

正面の行先表示器は、白い屋根とのコントラストをつける意味と、視認性の高い黒地に白文字として、誰にでも見易い明度差のあるものとしている。形態処理は側方向窓と同様の小判型造形言語を用いている。



図13 前部外観



図14 後部外観

### 6-3. ステンレス鋼板による構成

全体に丸味を帯びた車体形態は、柔らかな有機的三次曲面構成とし、冷たいステンレスの金属色を緩和する形態としている。

側面のステンレス鋼板による構成は、全体にリブ構造を基本とし、質感の違うステンレス鋼板を組み合わせ使用した。このことは、機能的には平面性の維持と傷が目立たない工夫でもあり、感性面では退屈で無表情な車体にならぬよう配慮し選択をした。

側面下部のステンレス鋼板には、若干の防眩処理としてヘアライン仕上げを施した。平面性を考慮し、紐出し加工で太めのリブ断面を構成し、アクセントとしている。

車体側面には、これも東京都のシンボルカラーである緑色帯を配し、都バスとして必要最低限の視覚的メッセージを発しながら、無機的になりがちな車体側面の表情を和らげている。



図 15 改造中の車体



図 16-17 屋根構成部品

### 6-4. 窓形状の改造と造形言語

側方向窓形状は、小判型を造形言語として、後方位置に丸型側方向窓を設け、乗車前から“丸窓のところへ座りたい、乗りたい”と思わせる動機付けの設計とした。窓構成には、車体の左右で骨組の位置が異なるため一部工夫を必要とした。

後方向窓は、費用対効果との関係で平面ガラスの二枚組ながら、丸味を帯びた三次曲面との調和を目指し、表示器の視認性確保のため、その上部には防眩対策の庇を設け、初期段階のイメージに近づけることとした。

### 6-5. 外観の色彩計画と質感

車体の色彩計画案は、無塗装化を目指して、環境負荷低減につなげるということにある。

外板はステンレス鋼板を基本とした。ステンレス鋼板

は錆び難いため、塗装をなくすことも可能となり、環境問題のひとつである VOC（揮発性有機化合物）対応としている。製作上やむを得ずステンレス鋼板に置き換えられない部位や、塗装の必要な箇所には、低 VOC 型塗料やエコ塗料など環境配慮型塗装を施している。

上屋および屋根上部塗料は、白色系塗料として遮熱効果を期待しており、このことによる空調機やエンジンの負荷低減など、環境性能にも配慮している。

また、この白色塗料は、光源の角度によって発色が変化する偏光塗料を使用している。この発色における色相の変化は、パール系の白を中心にして、やや暖かみのある極淡いピンク系色から、東京都のシンボルである銀杏をイメージした極淡い緑系色に至るよう調整を施してある。この塗料による色彩効果は、改造前バスの持つ箱形六面体の平板な形態に対して、有機的な三次曲面構成による豊かなボリューム感を、さらに増幅する効果を発揮している。



図 18 改造後の外観見付

### 7-1. 内装の設計概念は安心感

内装改造の設計概念は、

1. 明瞭な配色計画、高視認性の標記類、車椅子への対応など“バリアフリーについての対応”
2. モニター画面による多国語情報案内や、解りやすい標記類など“利用客への安心設計”
3. 物理的限界空間から心理的開放空間へ“広々とした車内空間の確保”

以上、三項目を指針とした。



図 19-20. 改造前の車両室内

## 7-2. 座席配置と新感覚空間の提供

これまで、改造用車体の中扉から後方にかけての床面は、その下にある車両懸架装置や、車両駆動系の配置構造条件により、階段差として二段分の高床構造となっているため、乗降用には抵抗感ある配置となっていた。さらに、これまでの座席数確保のための前向き座席配置では、後輪覆いの張り出しとの関係により位置決めも難しかった。このような足下が狭く、前後幅は勿論、高さも揃わない現状では、乗降の際の窮屈感は拭えないものであった。



図 21 改造前の確認

図 22 改造中の様子

そこで、座席の改造にあたっては、これまでの前向き配置から中向き配置へと変換した。また天井高を180mm上方へ延長して天井高は2,020mmとすることにより広々とした空間を生み出している。

しかしその際、単純に直線型中向き配置では、どうしても中央座席付近の足下に後輪覆いの張り出しが大きくなり、腰掛けた際には足を投げ出す姿勢となってしまう。そこで、この中央部分の座席位置をせり出し、足下の寸法を確保した。その結果として、それらを繋ぐ座面前縁の線は柔らかな曲線となり、それまでの堅いイメージも緩和され、新感覚の空間として蘇らせることができた。特に、前方展望の良い座席の創出と、後方では出入りし易い座席の創出に繋がる成果を上げることができた。この円弧型座席の配置は、単なる見付け上の審美的座席形態や配置だけではなく、奥行きにしたがい傾斜させた握り棒の設計とともに相乗効果を狙い、乗降を容易にすることができた。

車両後部にも円弧型座席を配置した。最後部の座席は、これまでも最大の長椅子型座席であったが、両端座席の足下が狭く、乗降性に難があった。この両端座席からも乗降が容易になるよう、座面部分にも曲線を用いることで、足下寸法の確保とともに工夫をした。

すなわち、最後部の両端座席は、正面に対して約5度程度外側へ向くこととなり、外界景色の眺望には有利な配置としている。またこの両端座席には、丸型側方向窓に沿わせた一体型の肘掛けを設け、造形言語を絞り込むことで形態の一致を図り、ノイズの少ない整理された空間として馴染ませている。



図 23 室内配置計画案



図 24 CGによる内装検討図



図 25 後方座席の見付

このような各部に曲線を配した座席形態は、良好な視界を確保しつつ、今までの路線バスにはなかったような広々とした快適空間を創出し、全体としても豊かな印象

の室内とすることができた。勿論、これらの座席配置とすることにより、定員数は68名から約50名へと減少したが、それらを凌駕する新しい着座作法を促す空間のデザインとして結実させることができた。

### 7-3. 一般座席の配置

改造前の車両前方低床部における座席配置については、複雑な組合せであった。車椅子対応の座席配置は、跳ね上げ式で前向きとなっていた。優先席は中向きの長椅子型座席、さらには前車輪覆い上部への高い座席配置などである。

また見付の印象としても、座席数の確保など、機能優先のアプローチによる設えには、苦勞の跡が残されており、理解はできるものの視覚的・審美的整理や調整のあとは感じられない。

改造後は、これら複雑な座席配置を整理し、前車輪覆い上部への高い座席配置以外には横向き座席として統一した。また跳ね上げ式、固定式双方とも、基本座席シェル本体を共通にして、見付の視覚的整理を施した。この座席の設置方向を中向きにすることにより、展望性は若干難しくなるものの、乗車時の着座の際、あるいは離席時の立ち上がりなど、楽な姿勢とすることができるようになった。

かつて中向き座席は、握り棒がなかったため、つり革につかまれない子供や高齢者には評価が低かったようで、車内事故防止の観点から70年代には消えている。復活してきた理由としては、座席定員の増加策や優先座席のあり方が示す通り、バリアフリー法を背景にした握り棒や肘掛けの工夫や組み合わせによる設置で、着座時安全性の確保ができたことなどが大きい。

この中向き座席用として選択した基本シェル本体は、寸法的・機能的基準を満たすものとして、米国製FREEDMAN社製を輸入、取付け部および新柄の特注生地とともに張り込み加工を施し設置をしている。



図26 前方座席の見付

### 7-4. 握り棒の最適配置

座席の配置変更とともに握り棒のデザインにも工夫を施した。

これまでは、握り棒が垂直に林立しており、奥に行くに従って狭く見えてしまう。このため降車しにくいイメージとなっていた。握り棒と天井との組付け位置については、前方より後方への見付が、徐々に車体中央から側寄り方向へ曲線加工を施し傾斜させた構成としている。このことにより後方へ向うに従い逆遠近法となり、錯覚効果を生み出すことにより後部座席周辺には広々とした空間を創出している。

### 7-5. つり革

2007年度グッドデザイン賞受賞の汎用品で、アサヤマ製吊り手OA型を選択した。透明感のある乳半色の色彩は柔らかく、断面は、単純な割に真円から楕円へと微妙に変化する握り易い形態である。このつり革は広告取り付けスペースがないため、あまり一般には使われていない。簡素で室内見付の雰囲気壊さないことにより、今回の改造には最適であると判断し選択採用した。この仕様に対する問題点は、広告収入が得られない点であるが、新設の情報表示器と運用ソフトの議論などにより、スポンサーが十分可能なはずであり、今後の運用上の課題としている。



図27 つり革

### 7-6. 車椅子への対応

前方低床部における車椅子優先の考え方は、改造前と同等とし、跳ね上げ式座席により2台分の空間を確保しており、基本的仕様に変わりはない。

乗降口は、低床式で段差が少なくなっているものの車椅子単独での乗降は難しい。実際に運用中の観察調査によれば、このような場合、運転手は一旦バスの運行を停車させた後に、車内中扉脇に設置されている介助用傾斜床をセットすることで対応している。対応には時間が掛かるが、安全で確実な操作が要求される。

この件に関しては、一般営業車についても言えることで、運転手の作業負担を軽減し、安全運転に繋がる改良を考えれば、乗降用電動床などによる最適化も望まれるところである。

### 7-7. 室内照明灯具

室内用天井照明としてはLEDを積極的に採用した。照度は天井の白い反射板により確保できているが、一部に補助照明用として装飾灯具が配置されている。乗降用ステップ灯、通路用誘導灯、天井照明など安全性の高い照明として、また省電力・長寿命でメンテナンスフリーなど、トータルエネルギーの削減とランニングコストの低減を目指している。さらに、後方高天井部にはLEDをランダム配置にして新鮮な座席配置とともに柔らかな空間構成を引き立てるための装飾照明としている。

### 7-8. 明瞭な室内配色計画

握り棒被覆素材の色彩選定については、現状で使用されているオレンジ色から、新たに黄色仕様を標準品の中より選択した。理由は、オレンジ色よりも黄色の方が新柄の布地に採用した青系統の色との明度差が大きいことにある。したがって、色弱視の方々にも握り棒が認識しやすくするなど、ユニバーサルデザインへの配慮である。

降車用釦は、量産標準品の中から、握り棒の黄色に合わせ選択をした。このことにより、釦取り付けのための筐体が握り棒と一体化した色相に整理され、押し釦の機能だけが際立つことになる。

車両室内の見付としても全体を統合整理し色彩計画を立てることができた。

室内で大きな面積を占めるものは床材の濃紺色系と、天井／壁面の白色系、そして座席の背座面に張り込んでいる青系の布地である。したがって、その図柄や色彩は空間イメージに大きく影響を及ぼす。

一般的に、青系統の色は後退色で弛緩色、落ち着きがあり、室内色としては爽やかで広々としたイメージを持つ。また自然界を表す流れの色でもあり、大海原より出て雲となり再び青空へと消えてゆく、空なる色でもある。コンセプトにある“時空を移動するイメージ”として選択をした。

背景としての白色系は、清らかで理知的なイメージや、心理的に移動時間を短く感じさせる色のため、単調になりやすいバスの客室空間には適していると判断した。

アクセント色の黄系色については、軽い表情ながら彩度のある進出色として、青系の沈静色との対比的調和により、効果的な配色をイメージし選択している。

幾何学的な模様については、東京都交通局のシンボルでもある“銀杏の葉”を象るモチーフを使いながら、日本の伝統柄のひとつである“青海波”文様をイメージした。また布地の色彩については、数種類の青系色を組み合わせ、図柄をまとめている。色相での同系色による調

和を図りながら、明度差による微妙な組み合わせにより、深味のある風合いとなるよう調整をした。アクセントには、黄色系の銀杏型グラデーション模様を散りばめて、図柄の繰り返しが単調にならないよう配色にひと工夫を施した。

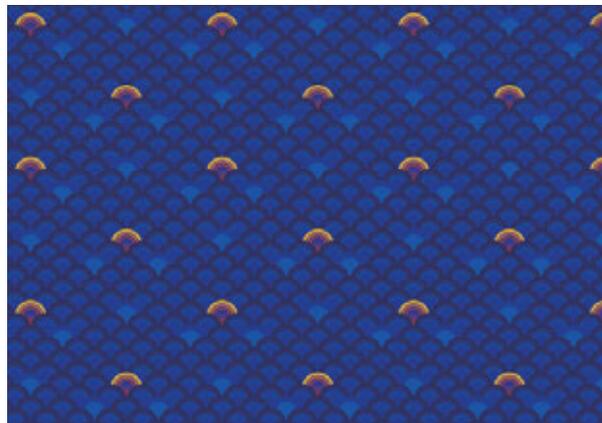


図 28 座席布地全体イメージ

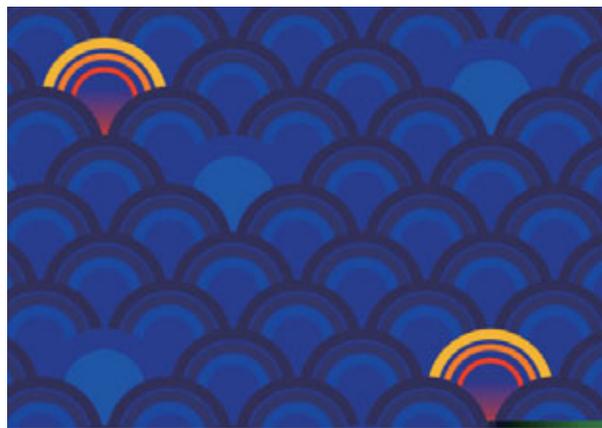


図 29 座席色柄と模様イメージ

### 7-9. 高視認性の標記類

標記デザインでは、内装から複雑な要素を排除して、すっきりとした室内空間となるよう構成に留意した。また広告枠をなくして情報の整理を図り、基本的には路線図のみの標記とした。外装でも一般の広告枠を取り去ることとした。広告収入の減少する分については、室内に設けた二画面情報表示器の運用により増収が期待できる。

既存の標記類は、これまで注意事項、案内事項、誘導事項、広告宣伝用、整備点検用など、事例発生順に製作された様子が伺われる。機能説明の文字についても視認性ある書体の選択や大きさなど、必ずしも吟味されていなかった様子で不統一のままであった。

また、色彩や図表の扱い、取り付け位置の違いなど種類も多く、整理統一されないままに貼られていた。これらの問題点については、以下のように考察し整理した。

走行中の路線バスでは、危険回避のため着座が前提で

あり、どこの席からも座ったままでの可読性が求められるはずである。しかし、これまでの営業用車両における路線図については、いずれも表示が極端に小さく、揺れる車内では近づいて見るわけにもいかず、実用的ではなかった。

今回の提案は、路線の運用上、停留所に変則的な部分が多く、また四カ国語での表示は、文字数も多く困難を極めたが、大型路線図の考え方により視認性を確保しながら解決し整理することができた。



図 30 初期提案時の路線図



図 31 最終案の路線図

#### 7-10. 情報表示器の設置

本改造プロジェクトでは、前方座席用として運転席天井付近と、後方座席用として乗降用中扉付近の頭上二箇所に二画面の情報表示器が配置され、カラー画面による多面的な情報表示の可能性を残している。いずれも画面に直接手が触れぬように、表示器の下方周囲には、リング状に握り棒を設けている。

海外からの旅行者に対しては、英語を含み韓国・台湾・中国の四カ国語表示としている。内容は、各停留所の観光案内が中心で、文字情報だけでなく写真など画像情報との組み合わせにより、初めて訪れる外国人旅行者への理解を助けるよう、安心への気配りがしてある。いわゆるバリアフリー法成立の2000年以来、次駅の表示が義務付けられているが、この情報表示器にも対応している。



図 32 二面情報表示器と降車用釦

一般標記文字については、書体（和文：新ゴシック体 英文：フルティガ）を統一し、ガラス面に表示することにより、白色文字として整理した。さらに、貼る位置についてもバラバラで、見え難かった腰部箇所から、見易い眼の高さへと貼る位置を統一させて合わせるよう工夫をした。

乗降用扉付近などは、バリアフリー化を進めるが、ステップ周辺や段差部には、黄色の床材とともに、扉周辺の注意を促す工夫と、各種ピクトグラムによる視認性や文字の最適化で可読性向上に務めた。

改造前の料金収集箱は、筐体の色彩が内装の配色計画と特別の関係はなく、また雑多な種類の案内文字表記類があり読み取りにくく、何処から料金を投入してよいか解らない程であった。

したがって、改造にあたっては、周辺の運転席と同色の黒灰色として色彩の整理をした後に、必要なピクトグラムと、表示文字によって統一し、解りやすい案内標記としている。

#### 8. 次世代型路線バス車両のデザインについて

本プロジェクトでの車体改造を通じて、次世代型観光用路線バス車両のあるべき姿が見えてきた。

1. 持続的価値のある長寿命車両と循環型設計
2. 駆動系および動力系配置と居住性空間の最適化
3. バリアフリーなデザインへの積極的取り組み
4. 軽量座席と素材の選択・吟味
5. 運賃精算システムの最適化
6. 双方向次世代型情報提供システム
7. 運転席および周辺機器のモジュール化

等々、大都市を背景に環境、安全、安心などをキーワードにした、更なる進化が望まれる。

#### 9. まとめ

研究成果としては、一番目に既存のバス車両を用いて車体の延命改造工事をしたもので、ステンレス素材の使用ほか、環境に配慮したロングライフデザインとしてまとめることができた。

また二番目には当初の改造にあたって懸念していた車両重量について、結果として軽量化することができ、環境負荷の少ない省エネ運転にもつながるはずである。

外観の屋根部形態や展望窓形態が、室内の快適性を考えることで生み出されるなど、機能と形態の調和を図ることにより、内外装機能が融合された有機的デザインとしてまとめることができた。

特に、三番目としては、内装デザインにより“機能は形態を求め、形態は作法を促す”ことをその後の運用開始によって実証できたことである。

すなわち、内装の機能的曲面座席配置や、逆遠近法による錯覚を利用した握り棒の傾斜的配置との組み合わせは、人の心理的行動に影響を与えることを確認。前方出入口付近に留まらず、後方座席からの着座で分散乗

車を促し、“利用者の作法（マナー）を促すデザイン”として完成させることができた。

以上、利用に際して選択の自由がない公共交通機関のデザインには、利用客の立場に立脚したデザインが不可欠である。利用者側から見た車両としての価値は、運賃200円にたいする満足度による。またラッピングバスによる広告収入という呪縛から解放し、バス本来の乗り心地の追求で“付加価値”を高めるといふこの提案が、積極的インフラ整備による都市の活性化という“基本価値”を高めることにつながれば幸いである。



#### 参考文献

- [1] 「10年後の東京」(東京都)
- [2] 「路線バスの現在・未来」鈴木文彦 グランプリ出版
- [3] 「自動車のデザインと空力技術」小林敏雄, 農沢隆秀 (朝倉書店)

#### 10. 作品概要

作品名／観光路線バス“「東京▶夢の下町」バス”  
運用主体／東京都交通局  
運用開始／平成20年4月26日  
車両形式／KL - HR1JNEE  
床形式／ノンステップバス  
定員／運転手1名, 座席24名, 立席26名  
車椅子／2台乗車可能  
車両重量／9,820kg (空車時)  
車内表示器／2画面液晶ディスプレイ15インチ×2台

#### 謝辞

このプロジェクトのデザイン作業には、「東京▶夢の下町」ロゴ制作及び車体への標記類について首都大学東京システムデザイン学部助教相野谷威雄氏のご協力をいただきました。またリサーチアシスタント (RA) としてインテリアを中心にプロジェクト全体を陰で支えてくれた渡辺雅広氏に心より感謝申し上げます。

# 集合教室における授業進捗の同期ずれ対策に ゲームデザイン手法を用いた技能習得教材の開発

網代 剛\*

## A development of teaching materials to learn skills without disorder of synchronization with game design methods

Tsuyoshi Aziro\*

### Abstract

This paper introduce an example of teaching material for learning skills, designed with game design methods, for the purpose of preventing disorder of synchronization among students at class. The author apply game design to teaching materials as the solution for preventing disorder of synchronization among students at class, because game design is the methods to produce entertainment, but also to provide information accurately.

Keywords: teaching material, game design, teaching method

#### 1. 背景：ゲームの教育への応用

本稿では、ゲームデザイン手法を用いた技能習得型教材の開発事例を報告する。はじめに、本稿の背景として、ゲームの教育への応用を概観する。

ゲームの教育への応用は、目的と、目的を達成するための手段、その中でゲームに期待される機能を明確にすることが大切である。ここでは、目的が明確なゲームの教育への応用例を3例紹介する。

はじめの例は、シミュレーションゲーミングである。シミュレーションゲーミングとは、ゲームを未だ解法の確立されていない複雑な社会的問題の解決に用いようとするものである。この例におけるゲームに期待される機能は次の通りである（図1参照）。

・ゲームのプレーおよび事後のディスカッションにおけるプレーヤ間のコミュニケーションによる相互作用によって、新たな知の創造を期待する（Duke, 2001）

目的：新たな知の創造

目的実現の手段：プレーヤ間のコミュニケーション

ゲームの役割：相互に比較可能で具体的な「選択肢と結果」の提供

二つ目の例は、ゲームのプレーから、現実に利用できる意思決定についての知見を得ようとするものである。例えば、加来（1992）は、エンタテインメントゲームである「信長の野望」（コーエー 1983）のプレーを、現実の経営に利用可能なリスク環境下における経営の資源配分の演習と位置付けている。この例におけるゲームに期待される機能は次の通りである（図2参照）。



図1 知の創造

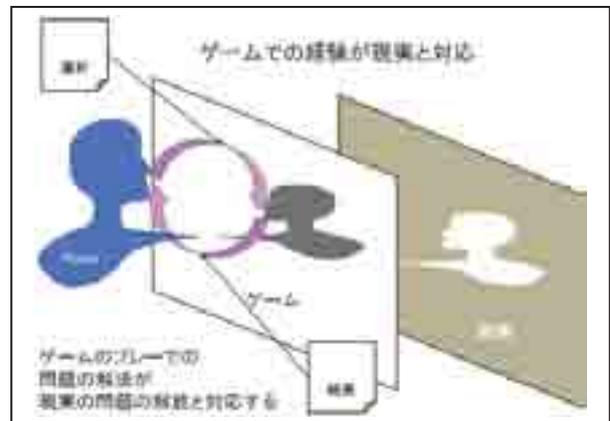


図2 知見の獲得

・ゲームのプレーから、現実の意思決定についての知見を得る

目的：現実利用できる知見の獲得

目的実現の手段：プレーヤによる意思決定

ゲームの役割：より現実に即した環境の再現（ゲームの提供する環境≒現実の環境）

三つ目の例は、例えば「脳を鍛える大人のDSトレーニング」（任天堂、2005）に見られる、特定の課題にくりかえしとりくむことで、技能の向上を期待するものである。この例においてゲームに期待される機能は次の通りである（図3参照）。

・特定の課題にくりかえし取り組むことで、例えば処理速度など課題達成の技能向上を期待する。

目的：技能の向上

目的実現の手段：くりかえし

ゲームの役割：成果の可視化（点数や偏差値など）

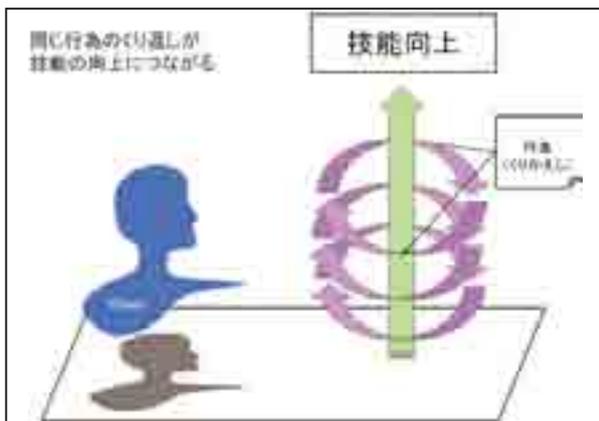


図3 技能の向上

このように、ゲームの教育への応用は、様々な形態が存在し得る。当然、目的に応じてゲームに求められる役割も異なってくるので、ゲームの教育への応用を考える際には、目的とゲームの役割を明確にするべきである。

## 2. 想定する技能と環境

本稿で紹介する教材が想定する、習得する技能と、使用環境を記す。

### 2. 1 習得する技能

本稿で紹介する教材で習得する技能は、一定の手続きを滞りなく行える技能を想定した。具体的には、PCアプリケーションの操作、プログラミング、数学的な手続きなどである。これらの技能は、新たな製品やサービスを開発するような時に求められる概念や複雑な構造を伝達し理解するコミュニケーション手段である。

これらのコミュニケーション手段は、新たな製品やサービスを開発するような創造的な作業において、次の

ような意味を持つ。コミュニケーション手段自身は、既に定められた手続きであり、新たな知を創造することはないが、手続きが不正確だと、円滑なコミュニケーションの妨げとなり、結果として新たな製品やサービスの開発を阻害する要因となるものである。

こうしたコミュニケーション手段は、新たな製品やサービスを開発するような創造的なプロジェクトに参加する場合は、当然身につけておくべきであるが、本質的には、製品やサービスを創造するものではない点に注目すると、実用に耐える最低限度の技能をできるだけ短時間で習得できるような教材の開発は、創造技術の教育への寄与が期待できる。

### 2. 2 使用環境

本稿で紹介する教材は、次のような、集合教室での一斉授業での使用を想定した（図4参照）。

- ・授業は予め決められた進捗で進行する
- ・各単元において受講者は、時間内に理解に到達する

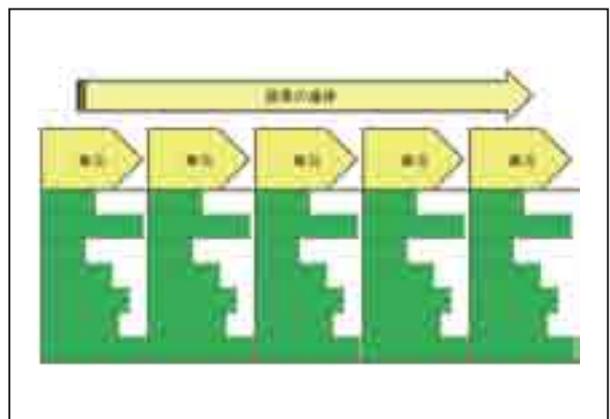


図4 集合教室での一斉授業

図4はn人（図の例では7人）の受講者からなる集合教室での一斉授業を表している。左から横方向の長さは時間を表す。緑色のバーは各受講者が授業で提供される情報の理解に要した時間である。授業は予め計画された進捗で進行し、各受講者は、計画された時間内に理解に到達することで、授業が遅滞なく進行する。

このような集合教室での一斉授業は、個室での個別授業や独習と異なり、授業の進捗が教室全体で同期していることが望ましい。教室全体で同期が取れていないことが原因で、次に記すように授業の効率が悪化する可能性があるからである。

同期の崩れが発生した場合、授業者、受講者双方に、同期を取り直す追加的な手間が発生する。同期を回復するためには、授業者は、進捗を遅くする、一時進行を止める、場合によっては、同期から外れた受講者に個別に対応するといった対処が求められる。また、受講者は、発生した同期のずれを取り戻すためには、教室全体とは

異なる手順で情報処理を行わなければならない。しかし、これらの授業者、受講者による対処は、二次災害とも言うべき同期のずれをさらに拡大させる可能性を持っている。

例えば、PCアプリケーションの操作の授業では、授業者が個別に対応している間は教室全体の進捗管理をすることができない。この時、手の空いた受講者が、授業者の指導なしに独自で機器の操作をしてしまったために、さらに追加的な手間が発生するといった二次的な同期のずれが発生する可能性がある。

また、受講者が独自に進度の遅れを取り戻そうとする場合も、授業は進行しているので、受講者は「遅れた部分の取り戻し+現在の授業の追いかけ」を同時に行わなければならない。通常の状態に比べて、失敗や誤解のリスクが高まることも容易に想像ができる（図5参照）。

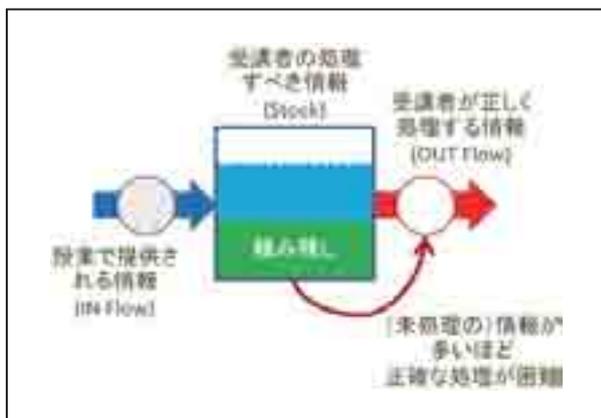


図5 同期ずれの拡大

このような同期のずれの発生（特に二次的な同期のずれ）は、必ずしも受講者に固有の情報処理能力の水準にばかり依存するものではない。実際の授業では偶発的な事象から、生じたわずかな同期のずれが、累積的に拡大してゆくような状態も十分考えられる。そこで、本稿で紹介する教材では、集合教室での一斉授業における「進捗の同期ずれ」に対処すべきリスクと捉え、次の点を開発の要件とした。

- ・同期ずれが発生しにくい
- ・同期ずれからの回復が容易

### 2. 3 ゲームデザインの応用

第1節でみたように、ゲームの教育への応用は様々な形態が考えられるが、本稿では、ゲームを先の要件である「同期ずれの発生防止」と「同期ずれからの回復支援」として応用した。この例においてゲームに期待される機能は次の通りである。

- ・技能をできるだけ短時間で習得する。
- 目的：集合教室での効率的な技能習得
- 目的実現の手段：教室全体で同期の取れた進捗

ゲームの役割：同期ずれ発生の防止、同期ずれからの回復支援

### 3. ゲームデザイン

集合教室における一斉授業の進捗について教室内の受講者間での「同期ずれ」を授業実施時のリスクと捉え、同期ずれが発生しにくく、同期ずれが発生しても回復が容易な教材を実現する機能としてゲームデザインの技法に注目する。

ゲームとは現実には存在しない仮想の世界で迷いを楽しむ行為であるので、プレーヤがゲームをプレーするためには、仮想世界についてできるだけ具体的なイメージを持つことが望ましい。特にプレーヤ同士のコミュニケーションを重要視するシミュレーションゲーミングや、エンタテインメントにおけるリアルタイム型ネットワークゲームでは、様々な属性を持つ多数のプレーヤが、できるだけ短時間の準備で、同時にゲームがプレーできる環境の整備がゲームの成否に大きな影響を持つ。この意味で優れたゲームデザインとは、同じプレーの環境を、結果的により短い時間で、プレーヤに提供できるゲームである（図6参照）。

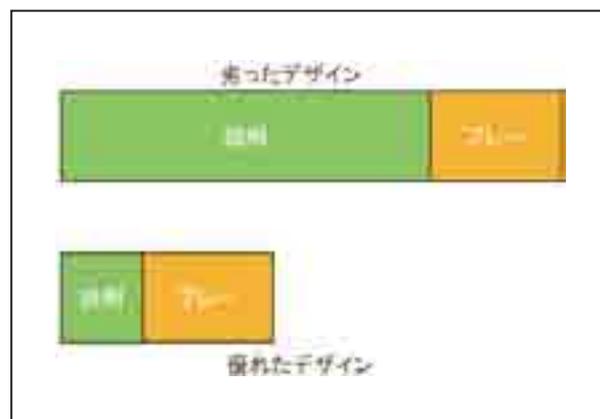


図6 優れたゲームデザイン

本稿では、こうした情報を誤解なく短時間で伝達するゲームデザインの技法を、集合教室での一斉授業において教室全体で同期がとれた進捗を実現する機能として、教材の作成に応用する。できるだけ短時間で正確な情報伝達の技法によって、一斉授業における同期ずれを防止し回復する効果が期待できるからである。

#### 3. 1 ゲームの基本形

ゲームは、仮想世界で迷いを楽しむ行為である。プレーヤを心地よく迷わせるためには、相応の仕掛けが必要である。特にゲームが仮想世界の表現である点に注目すると、ゲームの描く世界は、プレーヤの解釈に委ねられる部分を完全には排除しきれないことが問題となる。例え

ば、ゲーム全体が迷いだらけであったら、プレーヤは落ち着いて迷えないばかりでなく、デザイナーもプレーヤがどこでどのように悩むかを想定することが困難になってしまう。この意味で、ゲームで心地よくプレーヤを悩ませるためには、悩んで欲しくない箇所ではプレーヤを悩ませない描写が不可欠である。一般的なゲームでは、達成すべき課題、現状、そして複数ある選択肢それぞれに対応する結果を、できる限り具体的に描写することで多義性を排除し、プレーヤが選択肢同士を比較し快適に悩める仕組みを実現する。(図6参照)

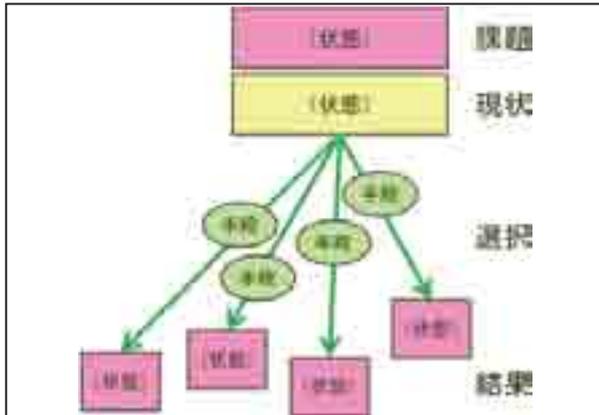


図7 ゲームデザインの基本形

例えば「エアーマネジメント」(コーエー, 1991)では、次のようにゲームの概要を紹介している。

あなたは航空会社の社長。世界22都市を航路で結ぶことが目標です。新たな航路の開設を待ち望む人々のためにも、世界の航空王の座を目指し、大空をあなたの手でひとつにしてください。

このようにして「エアーマネジメント」では実際には存在しない世界において、プレーヤに「航路を開設したい」と素早く思わせる。仮想世界において「何をすれば良いか」を素早く伝えるゲームデザインの好例である。(ゲームの課題は世界22都市を航路で結ぶことであり、現状は航路の開設を待ち望む人々がいる状態、すなわち航路が開設されていない状態である、課題達成の手段は航路の開設であり、結果は、22都市に対して何都市であるかで課題達成の進捗が明確に確認できるという仮想世界である。)

### 3.2 具体性の付与

ゲームデザインでは、表現する対象に具体性を付与することで、誤解の余地を減じ、同じ内容をくりかえし説明する必要性を低くすることができる。例えば、図5における描写を比較する。「A. 具体的描写」では、火災であり、コンビナートが燃えていることが分かるが、「B. 抽象的描写」では、危機があることは分かるのみである。両者を比較した場合、Aの方が誤解の余地が少なく、追

加的な説明が少なくてすむことは想像に難くない(図8参照)。



図8 ゲームの具体性

### 3.3 例外への対処

ゲームのルールが複雑になると、ルールの例外が発生しやすくなる。例外への対処方法として、次の2つを比較する。

第一の対処法は、手段に注目する方法である。手段に注目して説明しようとする、必ず例外を説明しなければならない。しかし、全ての例外を明確に説明するのは困難であり、抽象的な説明になりがちである(抽象の具体への翻訳はプレーヤに委ねられる)(図9参照)。

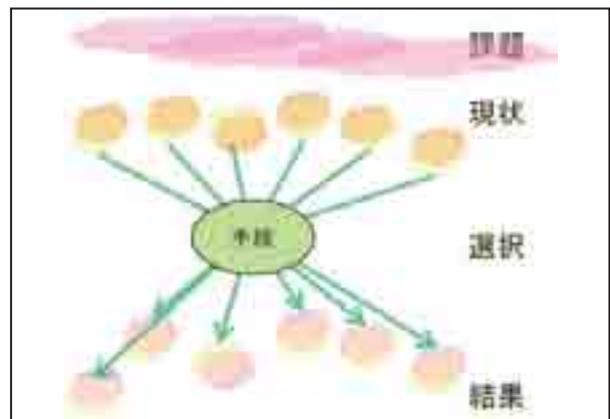


図9 手段に注目した説明

一方、課題に注目して説明すると、例外を包括的に説明するのではなく、選択の結果のみを具体的に提示するだけで足りる(課題をよりよく達成する手段の選択はプレーヤに委ねられる)(図7参照)。

通常、ゲームでは後者の対処法がとられることが多い。ゲームの目的は、課題の達成であり、包括的な理論の構築ではないからである。

### 3.4 違和感の排除

ゲームでは、プレーヤの関心がデザイナーの意図しない方法に向いてしまうと、円滑なプレーが困難となる場合が少なくない。プレーヤが仮想世界の成り立ちに違和感

や疑問を持ってしまう場合などである。こうした違和感  
は、小さな事象が契機となることがある。例えば、デザ  
イナの意図ではなく制作上のミスで、ゲーム中のある場  
面から、登場人物の纏う衣装が理由なく変わった場合、  
プレイヤーが登場人物を違う人物とってしまうことがあ  
る。ゲームは描写が具体的になるので、こうした細かい  
部分にも配慮が必要である。

### 3. 5 随時に参照できる情報の提供

ゲームでは、すごろくなどボードゲームのボード、デ  
ジタルゲームであればメイン画面（図 10 参照）など、  
プレイヤーが必要に応じて随時に情報を参照できる仕組  
みを持っている。これはゲームをより有利に進めるため  
の意思決定のための情報源であるばかりでなく、仮想世  
界におけるプレイヤーの置かれた状況を常に確認できる役割  
もはたしている。図 10 はたぬきの村を育てるデジタル  
ゲームのメイン画面である。村にたぬきが集う様子が一  
目で理解できる。



図 10 メイン画面の例

## 4. カリキュラムデザイン事例

これまで見てきたゲームデザインの技法に照らしつつ  
筆者が作成し実践した教材の事例を紹介する。事例は、  
毎週 1 回、全 7 回行われたグラフィックスデザインの機

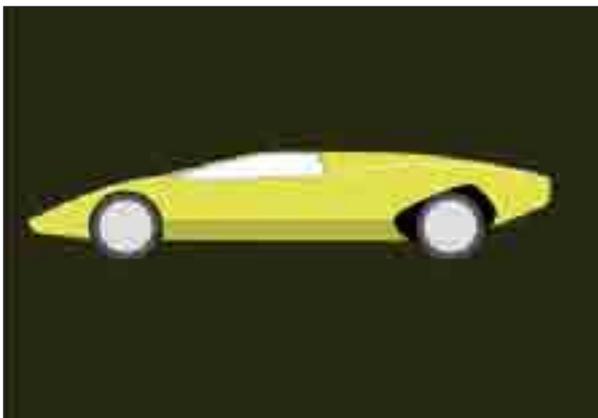


図 11 第 5 回カリキュラム課題

材（Adobe Illustrator CS3）操作技能の獲得を目指した  
もののうち、第 5 回のものである（図 11 参照）。

### 4. 1 ゲームの基本形

カリキュラム全体の課題は、エギゾチックカーのサイ  
ドビューを描くことである（図 12 参照）。現状は、機材  
（Adobe Illustrator CS3）の起動直後の状態である。課  
題達成の手段は、曲線による形状の描画である。通常ゲー  
ムでは、複数の選択肢を用意してプレイヤーを迷わせるが、  
カリキュラムの目的は誤解がなく、くりかえしての説明  
の必要性を低めることで効率的な技能習得を目指すもの  
なので、課題に到達できる選択をただ一つ示した。今日  
の PC アプリケーションは、多様な用途に対応するため  
と思われるが、同じ結果を得るにも、複数通りの操作手  
順が存在する 경우가少なくない。こうした手順を網羅的  
に説明すると、より多様な場合に対処できる技能の獲得  
が期待できる半面、その分記憶すべき情報が増えること  
で受講者の負荷が高くなる。受講者の負荷増は、混乱や  
記憶漏れ、誤操作の原因となるからである。

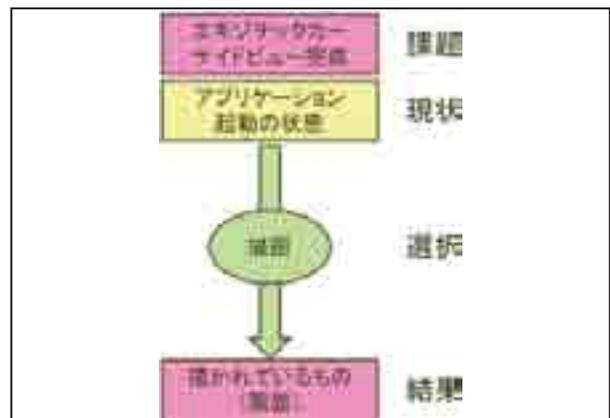


図 12 カリキュラムの全体像

### 4. 2 具体性の付与と例外への対処

カリキュラムでは、個々の操作を具体的に記述した。  
特に操作の手順は、できる限り省略せず 1 操作で画面が  
変わるときにキャプチャ画像を添えて説明した。こう

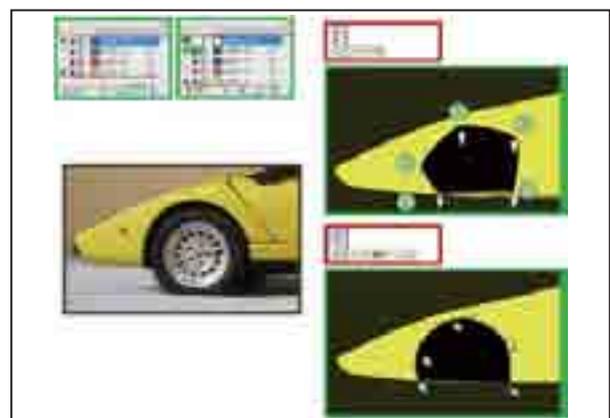


図 13 具体的な記述

した記述は、課題と課題達成の手段をひとつに限定したことによって、適切な分量での情報提供が可能となる。例外を考慮しなくて済むからである（図13参照）。

#### 4.3 違和感の排除

カリキュラムでは、画面キャプチャにおいて、インタフェースの違いにも注意を払った。図14と図15は、インタフェースの配列が微妙に異なる（ソフトウェアのデフォルト状態は図14である）。仮想といえども未経験の世界に足を踏み入れるのは不安を伴うものであり、僅かな違和感が、学習を阻害する要因にもなり得るからである。まして、進捗の同期が求められる教室ではなおさらである。

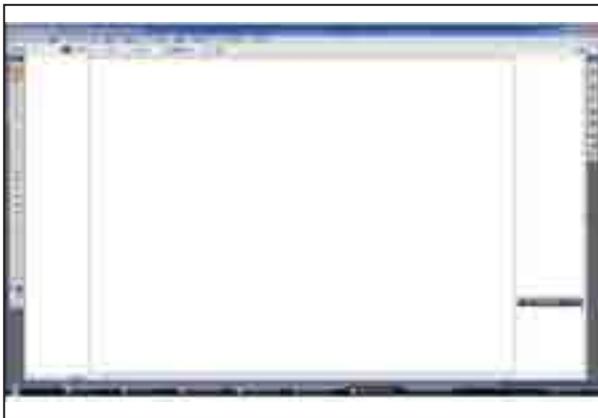


図14 ソフトウェアデフォルト状態

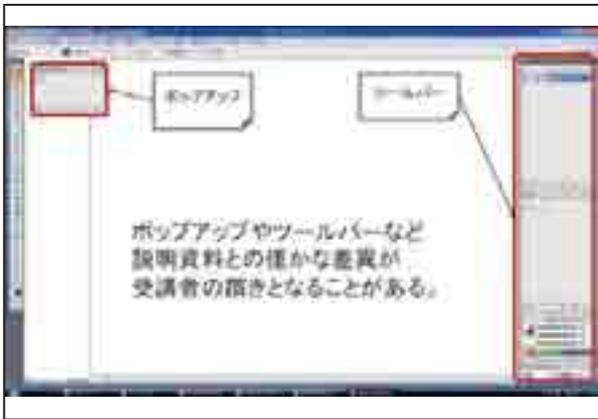


図15 例外的状態

#### 4.4 随時に参照できる情報の提供

事例では、受講者が情報を随時に参照できるよう、紙媒体の資料を用意し全受講者に配布した。これにより、受講者は、教室での授業の進捗と受講者各自の進捗とを随時に対比し確認できる。加えて、偶発的事象でわずかな同期のずれが発生した場合にも、軽い負荷で同期が回復できる効果も期待できる。

## 5. 評価と今後の研究課題

感想を求めたところ、受講者からは、おおむね好印象で受け入れられたようであった。しかし、カリキュラムの目的は技能の獲得である。より有効なカリキュラムを目指して評価方法を検討してゆきたい。現在は、プログラミングの技能獲得を目的とした講座を開講中である。課題は、簡単なゲームが完成することとした。さらには、品質管理に必要な確率、制御に必要な微積分、リサーチに必要な統計などのカリキュラムを、順次開発、実施してゆきたい。

「ゲームを用いる」と言う言葉は、受ける人によって大きく解釈が異なる。例えば、ゲームから「アニメーション」を連想する人もいるかも知れない、真剣ではないという意味で「あそび」と判断する人もあるだろう。しかし、ゲームデザインは、不定形の反応をする人を相手に、誤解なく論理体系を提供するという面も持っている。本稿では、そうしたゲームデザインの論理性に注目し、知識や技能の習得を目的としたカリキュラムの事例を報告した。ゲームデザインの新たな応用形として、今後も開発と実践を重ねてゆきたい。

#### 参考文献

- [1] Richard D Duke (中村美枝子 市川新訳(2001)『ゲーミングシミュレーション未来との対話』, アスキー
- [2] 加来耕三 (1992)『信長の野望』, プレジデント社
- [3] コーエー (1983)『信長の野望』, コーエー
- [4] コーエー (1989)『エアーマネジメント』, コーエー
- [5] 環境省 (2003)『ポンポコ理想郷』, 環境省

# インタラクティブ製品に対する利用自己効力感尺度の信頼性の検討

安藤 昌也\*

## Verification of Reliability of Self-efficacy Scale in Interactive Product Use

Masaya Ando\*

### Abstract

In this paper, I introduce the study of user's psychological factors on use of an interactive product and verify of reliability of "self-efficacy scale in interactive product use". According to my past study result, the user's psychological factor has "self-efficacy" and "product involvement." I developed the psychological scales to measure these two factors. In order to verify of reliability of self-efficacy scale, I conducted investigations twice based on test-retest method to 30 persons. As a result, it shows the high coefficient of reliability.

Keywords: self-efficacy, product involvement, interactive product, scale reliability

### 1. はじめに

#### 1. 1 研究の背景

携帯電話やデジタルカメラ、DVDレコーダなど、我々の身の回りにある家電製品の中において、インタラクティブな操作が必要な製品（以下、インタラクティブ製品と呼ぶ）が増えている。インタラクティブ製品は通常、複数の機能が提供されており、これらの機能はユーザが意図を持って積極的に働きかけ、操作しなければ機能しない。ユーザは自分が達成したい目標を想定し、それに必要な機能を選択したり、設定を変更したりする操作を行う必要がある。そのため、製品の利用に対する意欲やモチベーション、信念や態度などの心理的要因がインタラクティブ製品の使い方や評価に影響を与えているものと考えられる。

ユーザの態度や信念がシステムに及ぼす影響に関する先行研究として、情報システム研究分野 (Information Systems Research) における、コンピュータの技術受容性 (technology acceptance) に関する研究がある。

コンピュータ技術の受容性における個人的な信念や特性の影響に関する研究は、1970年代半ばから始まっている。当初は、コンピュータスキルに関する指標化の試みとして行われており、ユーザの態度や信念というよりも、実際の能力を測ることに主眼が置かれていた<sup>[e.g. 1]</sup>。その後、コンピュータ操作に対する自己効力感 (Self-efficacy)

が、コンピュータ技術に対する個人的受容において、重要な影響力があることを示した研究が相次いで発表された<sup>[e.g. 2-6]</sup>。

コンピュータ技術の受容性を説明するモデルには、数多くの論文で妥当性の検証が行われている Davis らの Technology Acceptance Model (TAM) がある<sup>[7,8]</sup>。この TAM に基づいた Venkatesh & Davis の研究によると、知覚された使いやすさは、一般的なコンピュータ自己効力感によって、常に影響を受けることが示された<sup>[9]</sup>。

自己効力感 (SE: Self-efficacy) とは、モチベーションに類する信念であり、「それぞれの課題が要求する行動の過程を、うまく成し遂げるための能力についての個々の信念<sup>[10]</sup>」と定義される。Bandura は、特定の場面における自己効力感の強さは、① 個人が特定の状況を克服しようとするか否かに影響を与えること、② 自己効力感は、個人がどれくらい努力を払おうと思うか、あるいは嫌悪的な状況にどれほど長く耐えることができるかを決定する、という2つの点で個人の行動に長期的に影響を及ぼすと指摘している。

コンピュータ自己効力感を測定する尺度には、Gist, et al.<sup>[3]</sup> や Burkhardt & Brass<sup>[4]</sup> らの尺度が作られたが、これらはユーザの一般的な自己効力感の測定を目的としたものでなかった。その後、Compeau & Higgins<sup>[11]</sup> が、より一般的なコンピュータ自己効力感として、10項目の尺度を開発し、多くの研究に引用されるようになった。

また、最近では Compeau & Higgins らの尺度を参照にした上で、インターネット利用に特化したインターネット自己効力感に関する研究と尺度の開発がなされている<sup>[12-14]</sup>。

## 1. 2 インタラクティブ製品に対するユーザの心理的要因に関する研究概要

しかしコンピュータ技術受容性の研究は、コンピュータもしくはインターネットに限定したものであり、家電などを含むインタラクティブ製品全般を対象としたものではない。そのため著者は、インタラクティブ製品に対するユーザの心理的要因の構成概念を明らかにする研究に取り組んできた。これまでの研究で、10名の被験者に対するデプスインタビューおよび修正版グラウンデッド・セオリー・アプローチ (M-GTA) による分析を行った。その結果、ユーザのインタラクティブ製品の利用における心理的要因には、「インタラクティブ製品に対する製品利用自己効力感 (以下、自己効力感と略す)」と「利用対象製品に対する関与 (以下、製品関与と略す)」の、2つの要因があることを明らかにした (図1)<sup>[15]</sup>。自己効力感と製品関与は独立でありながら、実際に利用対象となる製品に対するユーザの製品関与の度合いによって、利用意欲の意識づけが大きく左右されることを示した。

著者は、M-GTA による分析に続いて自己効力感尺度および製品関与尺度の構成を行った<sup>[15]</sup>。これにより実際にユーザのインタラクティブ製品に対する心理的要因を測定可能になった。特に、自己効力感尺度については、確率標本サンプリングに基づく、全国15～79歳の男女1200サンプルを対象にした調査を実施し、その得点の標準化を試みている<sup>[15-17]</sup>。

しかし自己効力感尺度には、安定的に概念を測定できるという、信頼性の検討に課題があった。Banduraによると、自己効力感はある程度長期にわたり個人に影響を与える要因であるとしている<sup>[10]</sup>。インタラクティブ製品利用に対する自己効力感も、ユーザ自身の過去の経験や価値観、認識などによって形成されたものであり、長期的に影響する要因であると考えられる。そのため構成した尺度は、個人の自己効力感を安定的に測定できる必要がある。

## 1. 3 本研究の目的

本研究では、著者が構成したインタラクティブ製品に対する「製品利用自己効力感尺度 (自己効力感尺度と略す)」の尺度信頼性を再テスト法により検討するために、検査を2回実施し信頼性を検討する。

## 2. 自己効力感尺度の概要

### 2. 1 調査方法

調査は、代表性のあるサンプリング方法による訪問留置法によって実施した。回答数は1200件だった。被調査者は、全国を対象に、15～79歳の男女とした。

サンプリングは、住宅地図データベースから世帯を抽出し、個人を割り当てる方法を採用した。この方法は、従来の手法と同様の代表性があることが確認されたものである。標本数の配分は、全国から調査地点を地域・市群規模別の各層に比例配分し、200地点を抽出した。各地点6サンプルの回収を行った。

調査の際、インタラクティブ製品の説明は、「電子機器」とし、調査の教示部分で以下のように具体的な説明を行った。

「このアンケートは、あなたの身の回りにある電子機器について、操作を覚えたり、普段操作したりする時に感じる、自信の度合いや考え方をお伺いするものです。このアンケートでいう電子機器とは、液晶などの画面表示の指示に従ってボタンやリモコンで操作するタイプの機器のことで、家電製品、携帯電話、パソコン、ソフトウェアなどが対象です。(例：ビデオ、パソコン、デジタルカメラ、DVDレコーダなど)」

### 2. 2 分析

回収された回答の中から、欠損値のある回答を除いた1031件に対して行った。因子分析および項目分析を行った結果、表1に示す20項目で1因子構造の尺度を構成した (分析の詳細は文献15-17を参照)。

### 2. 3 構成概念妥当性

20項目の素点を合計した得点を自己効力感尺度得点とし、その得点と家電製品に対する自信度 (10段階評価) およびパソコン操作に対する自信度 (10段階評価) との相関関係により構成概念妥当性を検討した。その結果、家電操作では、 $r = .68$ 、パソコン操作では  $r = .65$  で、1%水準で有意に高い相関があった。

また、自己効力感が高い人ほどインタラクティブ製品との接触機会も多いと考えられることから、19種類のインタラクティブ製品の個人での製品保有数の分布に基づいて三分位数を計算し、回答者を3群に分けた。その上で、自己効力感尺度得点に対して1要因の分散分析を行った。その結果、有意な差があった ( $F(2, 1028) = 99.7, p < .001$ )。

これらのことから、本尺度の妥当性が確認できた。

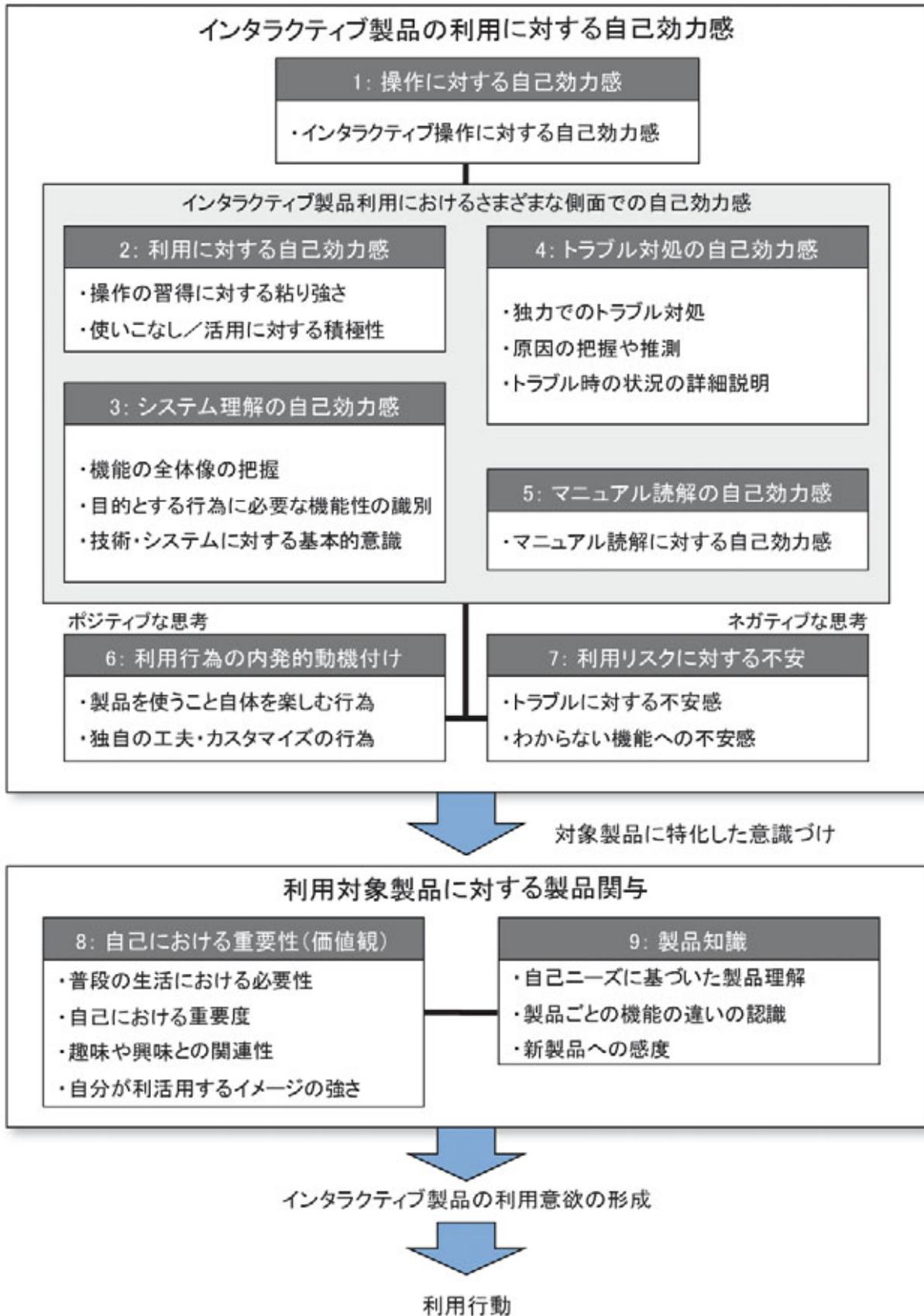


図1 インタラクティブ製品の利用に関するユーザの心理的要因の構造 (安藤, 2008)

表1 製品利用自己効力感尺度の因子分析結果（主因子法）

項目	因子1	因子2	因子3
1. 製品の使い方を覚えるのが難しい	.82		
2. 製品の操作が複雑でよくわからない	.82		
3. 製品の使い方を覚えるのに時間がかかる	.86		
4. 製品の操作が難しく感じる	.85		
5. 製品の使い方を覚えるのが面倒	.81		
6. 製品の操作がわからない	.81		
7. 製品の使い方を覚えるのが大変	.81		
8. 製品の操作がわからない	.80		
9. 製品の使い方を覚えるのが難しい	.80		
10. 製品の操作がわからない	.84		
11. 製品の使い方を覚えるのが難しい	.82		
12. 製品の操作がわからない	.80		
13. 製品の使い方を覚えるのが難しい	.82		
14. 製品の操作がわからない	.81		
15. 製品の使い方を覚えるのが難しい	.79		
16. 製品の操作がわからない	.78		
17. 製品の使い方を覚えるのが難しい	.75		
18. 製品の操作がわからない	.75		
19. 製品の使い方を覚えるのが難しい	.71		
20. 製品の操作がわからない	.69		

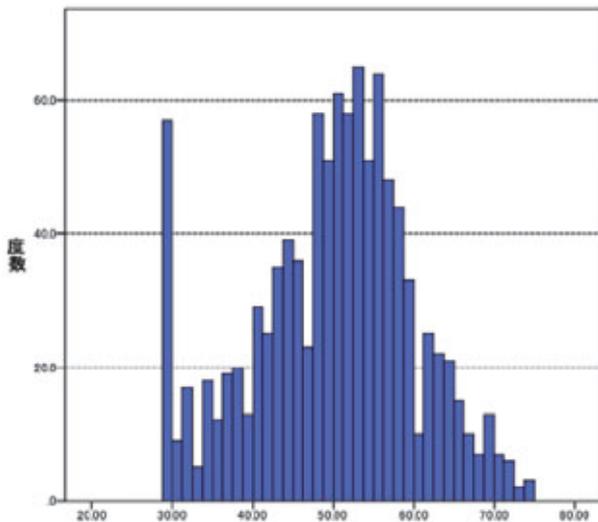


図2 自己効力感尺度得点（標準得点）の分布

2. 4 得点分布

自己効力感尺度の20項目に対する回答の合計点 (Mean= 65.53, SD=22.63) を元に、標準得点を計算した。図2にその分布を示す。

分布の特徴は、平均値の周辺にピークがあるほか、最低得点でも2つ目のピークがあることである。これは、インタラクティブ製品に関心がない、主に60歳以上の人が存在するためである。

3. 再テスト法による尺度信頼性の検討

3. 1 方法

大学院生30名（男性23名、女性7名）に対して、自己効力感尺度検査を3週間のインターバルをおいて2度実施した。

なお大学院生には、社会人学生も多数含まれており、平均年齢は、31.7歳 (Max: 69歳, Min: 22歳) だった。

4. 分析

4. 1 尺度得点による信頼性の検討

回答から、1回目および2回目の自己効力感得点を算出し、検査・再検査間のPearsonの相関係数を算出した。また、尺度項目の内的一貫性についても検討を行うため、20項目に対してCronbachの $\alpha$ 係数を各回で算出した。

表2 検査・再検査の得点の平均、SD、 $\alpha$ 及び相関係数

項目	平均	SD	$\alpha$	相関係数
検査	34.5	6.5	.84	.87**
再検査	39.6	8.0	.85	

(\*\* $p < .01$ )

1回目より2回目の方が、平均値がやや上昇しているものの、再テストによる相関係数（信頼性係数）は $r = 0.87$ とかなり強い相関が認められた。

また、Cronbachの $\alpha$ も2回とも十分な値となり、内的一貫性についての信頼性も確認された。

4. 2 各項目の回答傾向

次に、20項目それぞれの回答状況を元に、検査・再検査間のSpearmanの順位相関係数を算出した(表3)。その結果、ほとんどの項目が安定的な順位相関係数であったものの、 $\rho = .4$ 程度の項目も3項目あった。これらの項目の内容は、回答する際に思い浮かべる製品によって判断が異なる可能性があるものであり、検査・再検査間での回答の一致度が低くなったものと考えられる。

表3 項目ごとのSpearmanの順位相関係数

項目	Spearmanの順位相関係数
1	.71
2	.72
3	.73
4	.74
5	.75
6	.76
7	.77
8	.78
9	.79
10	.80
11	.81
12	.82
13	.83
14	.84
15	.85
16	.86
17	.87
18	.88
19	.89
20	.90

5. まとめと今後の課題

本研究では、インタラクティブ製品の利用に対する自己効力感尺度の信頼性について検討を行うため、3週間の期間をおいた再テスト法を実施した。その結果、再テスト法による信頼性係数は、0.87と非常に高い値を示した。また、尺度項目の一貫性に対する信頼性係数である $\alpha$ 係数も、検査・再検査とも0.9以上の高い値を示した。これらのことから、自己効力感尺度は高い信頼性を備

えたものであるということが出来る。

ただし、項目の中には必ずしも安定的でない項目が含まれていることも明らかになった。今後、これらの項目を含めるべきかどうかを慎重に検討し、より精度の高い尺度を構成することが課題である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、産業技術大学院大学 産業技術研究科 創造技術専攻の皆さんのご協力を得ました。また、調査の実施・取りまとめには、同専攻の廣瀬優平さん、斎藤祐基さんの協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Cheney, P. H. and Nelson, R. R. (1988), "A Tool for Measuring and Analyzing End-user Computing Abilities," *Information Processing and Management*, 24, 2, pp199-203.
- [2] Hill, T., Smith, N. D. and Mann, M. F. (1987), "Role of Efficacy Expectations in Predicting the Decision to Use Advanced Technologies: The Case of Computers," *Journal of Applied Psychology*, 72, 2, pp307-313.
- [3] Gist, M. E., Schwoerer, C. E. and Rosen, B. (1989), "Effects of Alternative Training Methods on Self-efficacy and Performance in Computer Software Training," *Journal of Applied Psychology*, 74, 6, pp884-891.
- [4] Burkhardt, M. E. and Brass, D. J. (1990), "Changing Patterns of Patterns of Change: The Effects of a Change in Technology on Social Network Structure and Power," *Administrative Science Quarterly*, 35, 1, pp104-127.
- [5] Webster, J. and Martocchio, J. J. (1992), "Microcomputer Playfulness: Development of a Measure with Workplace Implications," *MIS Quarterly*, 16, 2, pp201-226.
- [6] Webster, J. and Martocchio, J. J. (1993), "Turning Work into Play: Implications for Microcomputer Software Training," *Journal of Management*, 19, 1, pp127-146.
- [7] Davis, F.D. (1989), "Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology," *MIS Quarterly*, 13, 3, pp319-340.
- [8] Davis, F.D., Bagozzi, R.P. and Warshaw, P.R. (1989), "User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models,"

Management Science, 35, 8, pp982-1003.

- [9] Venkatesh, V. and Davis, F.D. (1996), "A Model of the Antecedents of Perceived Ease of Use: Development and Test," Decision Sciences, 27, 3, pp451-481.
- [10] Bandura, A. (1977), Social Learning Theory; Englewood Cliffs, Prentice-Hall, NJ, USA.
- [11] Compeau, D.R. and Higgins, C.A. (1995), "Computer Self-Efficacy: Development of a Measure and Initial Test," MIS Quarterly, 19, 2, pp189-211.
- [12] Eastin, M.S. and LaRose, R. (2000), "Internet self-efficacy and the psychology of the digital divide," Journal of Computer-Mediated Communication, 6, 1, pp25-56.
- [13] Torkzadeh, G. and Van Dyke, T.P. (2002), "Effects of training on Internet self-efficacy and computer user attitudes," Computers in Human Behavior, 18, 5, pp479-494.
- [14] Hsu, M.H. and Chiu, C.M. (2004), "Internet self-efficacy and electronic service acceptance," Decision Support Systems, 38, 3, pp369-381.
- [15] 安藤昌也 (2008), "人工物の利用におけるユーザ要因の分析とその測定", 黒須正明 (編) 人工物発達研究, 1 (1), pp135-170.
- [16] 安藤昌也, 黒須正明, 高橋秀明 (2008), "インタラクティブ製品の利用におけるユーザ要因の分析とその測定", ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008, pp761-768.
- [17] 安藤昌也 (2008), "家電製品利用に対するユーザの内的要因の影響", 日本応用心理学会第 75 回大会発表論文集, pp29.

# 技能レベルおよび習熟忘却の影響を考慮した 作業配分のためのシミュレーション手法

館野 寿丈\*・清水 慶子\*\*

## Simulation Method for Work Dispatching in Consideration of Skill Level and Learn-and-Forget Effects

Toshitake Tateno\* and Keiko Shimizu\*\*

### Abstract

This paper introduces a computer simulation method for work dispatching in complex situation, in which workers' skill and performance are always changing. Some examples of such work are in maintenance of trains and airplanes. Workers have to learn many kinds of work with OJT and perform the work periodically to keep the skill level. However, because one worker cannot deal with the same kind of work regularly, the performance about a kind of work after a long separation usually get down. It is important to plan work dispatching in considering long-term work efficiency of the organization. In this paper, a simulation method that uses a learn-and-forget curve model and an agent-based mechanism is introduced and discussed.

Keywords: Work dispatching, Skill, Learning and forgetting curve, Simulation, Agent system

### 1. 緒論

#### 1. 1 研究背景

複数種類の作業を複数の作業者に配分するジョブの割り当ては、通常のライン生産現場ではスケジューリングを含めて計算機を用いて行なわれている。このような現場では、作業者は技能教育を受けた後に一定の作業を繰り返し作業するので、作業時間は一定とみなして見積りがされる。一方、大型機械や設備のメンテナンス現場では、作業が複雑で、高度な技能が必要とされることから、作業を行なうにあたって技能免許のようなものの取得を要する場合がある。そのため、技能教育を受けた後、さらにOJT (On the Job Training) による実務教育が課せられ、作業に習熟することで技能免許を取得できたならば、単独で実務を行なえるようになる。OJTによる技能教育は長期の教育期間を要する上に、メンテナンスの場合、定期的に一定量の受注があるわけではないため、いつでもOJTを行なえるわけではない。OJTでは習熟の影響で毎回作業時間は大きく変化する。さらに、長期間作業を行わない場合、忘却により次回の作業時間は長くなり、場合により技能免許は剥奪されることもある。

一般にOJTを増やせば作業時間は長くなるので、作業員には決まった作業をさせたくないが、柔軟な受注への

の対応に向けた作業員の多能工化や、習熟により将来的な作業効率の向上につながるため、長期的な教育への配慮と納期との関係を見極めながら適度にOJTを選択して作業を割り当てる必要がある。

スケジューリングの研究は以前から盛んに行なわれている。しかし多くの研究では、作業員の技能を一律とするか、もしくは個人の技能に差を設けても、経験に応じた技能の変化を考慮したものは少なく、OJT計画のような教育計画を生産スケジュールに組み込んで考える例はほとんど見当たらない。これは短期的な視点で最適なジョブの割り当てを行なう研究が多いためである。そこで著者らは、長期的な視点でシステムが最適解を得ることができる作業配分を行うための計算機シミュレーション手法について研究を進めてきた[1]。本解説では、この手法について説明する。

### 2. 問題の設定

本研究では、特に作業の割り当てが複雑な航空機エンジンのメンテナンス現場を対象として問題設定する。

#### 2. 1 現状

航空機エンジンのメンテナンスは一定の稼働時間毎に

分解検査することが義務付けられている。その作業方法は機種によって異なる。作業対象（エンジン）の数に対する作業の種類が多く、一人の作業者が何種類もの作業を処理する必要がある。複数の作業対象を同時に受けることもあるが、作業管理の都合から、作業対象毎に作業者のグループを構成して基本的には一つの作業対象での作業をグループの作業者に割り当てている。

個人に割り当てられた作業を一人で実施するためには規定のOJTによる訓練を済ませ、技能レベル（免許に相当する）を取得していることが義務付けられている。そうでない場合は、指導者と共にOJTをしながら作業しなければならない。この場合、必然的に処理時間は長くなり、また指導者はその間拘束されることになる。よって、作業効率はOJTが少ないほうが良いが、それでは割り当てる作業の固定化につながる。さらに、技能レベルを取得していても、訓練が不十分である場合や、長期間その作業に携わらない場合には、忘却を考慮して技能レベルは剥奪されることになっている。技能レベル取得には、再度、指導者のもとでOJTを受けながら作業を行わなければならない。つまりOJTを無視した作業の割り当ては、将来的に技能者数の減少や作業効率の悪化に繋がる。さらに、定期的に一定量の受注があるとは限らず、いつでもOJTを行えるわけではないので、長期的な計画に基づいてOJTを実施していく必要がある。

OJTの実施を検討する際の評価項目は、作業時間が第一となるがそれだけではない。作業を行うにあたって技能レベルが必要であることから、技能者を余裕を持って複数人確保しておくことも重要である。これは、技能レベルを保有する作業者が1人の場合、その作業者が欠勤や退職をすると、その作業は作業不可能になってしまうためである。その人数的な余裕も計画上の評価項目となる。

スケジューリングシステムに代表される作業割り当ての従来の計算機支援は、作業時間が最短になる割り当て方法を示すもので、かつ短期的なスケジューリングである。これは従来のシステムは、処理時間が一定であること、作業者の技能レベルは一定であることを前提としていたためである。しかし、航空機エンジンのメンテナンスの場合、作業時間を抑えながら、OJTを行ない、技能レベルを保有する作業者を維持できるように、長期的な予測をするという新たな課題が生ずることになる。

## 2. 3 本研究における問題設定

本研究では、航空機エンジンのメンテナンス現場を例に、大型機械や設備のメンテナンス現場に見られる特徴を抽出し、次のように問題設定する。

(1) 作業内容：1台の作業対象における作業は多数の

ジョブからなり、それぞれのジョブに対し、技能レベルが設定されている。一定の技能レベルに達した作業員（技能者と呼ぶ）のみ一人で作業することが認められる。そうでない作業員はOJTによって作業することになる。

(2) 作業員の技能：作業員には各ジョブに対する技能レベルがつけられている。技能レベルは一定の教育によって上位のレベル（技能者のレベル）に昇格するが、一定期間その作業に携わらなかった場合は降格する。本研究において、上位のレベルをレベル2、下位のレベルをレベル1と呼ぶ（図1）。

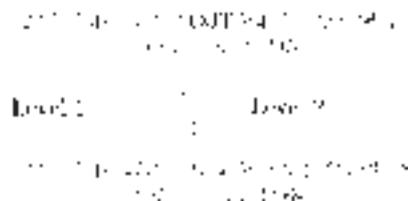


図1 技能レベル

(3) 習熟と忘却

作業の処理時間は、その作業の経験を短期間に重ねるに従って短くなり、長期間作業しなければ長くなるものとする。その程度に関しては、次節で示す習熟忘却のモデルに従うものとする。

(4) 教育：教育はOJTによって実施される。OJTではそのジョブに対する十分な技能を持った指導者の監督のもとで、学習者が作業を実施する。OJT業務においては、通常よりも処理時間が長くなることから作業効率は悪くなる。指導者は技能レベルの資格を持つ作業員が兼務する。つまり指導者となった作業員は自らに割り当てられた作業を進めることはできない。

(5) 作業計画：一連のジョブを完了する納期が定められている。特にメンテナンス作業は修理内容が作業中に確定するので、動的な計画変更が要求される。また突然の作業員の退職や休暇に備えて、複数の技能者を維持していることが望まれる。

## 3. モデリング

第2章で示した問題設定に沿ってシステムのモデリングを行なう。

### 3. 1 対象システムのモデル化

(1) 作業と作業員

作業対象の受注1台単位にタスクが発生する。実際には異なる種類の作業対象がランダムに受注されるが、本研究では、1台の作業対象のタスクが終了した直後に次の作業対象が受注されるとする。そして同じ種類の作業対象が無制限に発注されるものとする。ま

ず、 $r$  番目のタスク  $N_r$  ( $r = 1, 2, 3, \dots$ ) に  $j$  種類のジョブ  $J_{r,j}$  ( $j = 1, 2, \dots$ ) を仮定する。本来であれば、ジョブ間に順序関係を持つものがあるが、まずは順序の拘束を考慮しないことにし、その代わりに優先順位が存在するものとする。優先順位が早いジョブとは、処理時間が大きく変わる可能性のあるものや、技能を持つ作業者が少ないジョブであり、作業への割り当てを先に行うことを意味する。ただし、この優先順位の設定の仕方によって、タスクの終了時刻が大きく変化することはない。優先順位を持たせる理由は、リスクの観点でのスケジュール評価をできるようにするためである。本論文の範囲では特に問題にならないが、重要な観点であり、今後の研究課題としているため本論文でも採用する。

また、各ジョブには、それぞれに標準的な処理時間が定められているものとする。ジョブ  $J_{r,j}$  に定められた初回の標準処理時間を  $T_{r,j}$  とする。(ジョブの種類によらず共通する性質として説明する時には単に  $T$  と記す。)

作業者は、いくつかの班に分かれており、原則として班を単位に1つの作業対象の作業をする。班の作業者数は一定とする。すなわち、 $N_r$  番目の班  $B_r$  の作業者が  $n_r$  人の場合、 $N_r$  種類のジョブ  $J_{r,j}$  に対して、 $T_{r,j}$  を設定する。すなわち、 $N_r$  種類のジョブ  $J_{r,j}$  に対して、 $T_{r,j}$  を設定する。すなわち、 $N_r$  種類のジョブ  $J_{r,j}$  に対して、 $T_{r,j}$  を設定する。

(2) 技能レベル

技能レベルを定義する。技能レベルの段階はいくつあっても良いが、ここでは、レベル1とレベル2の2種とする。レベル1は単独では作業を行えず、OJTを受けながらのみ作業できるレベルとし、レベル2は単独での作業が認められるレベルとする。各作業者  $B_r$  に対して、ジョブ  $J_{r,j}$  ごとに技能レベル  $L_{r,j}$  を設定する。すなわち、 $L_{r,j} = 1$  となる。

(3) 習熟と忘却

習熟曲線は Wright[2] の論文から 60 年以上も前から、議論されているのに対し、忘却に関して扱われるようになったのは最近になってからである。

Jabor と Sikstrom[3] は忘却モデルを下記の3種類に整理した。

- ① the learn-forget curve model (LFCM)
- ② the recency model (RC)
- ③ the power integration diffusions (PID)

本研究において、これらの違いは議論しないが、作業の習熟および忘却を考慮してシミュレーションを行なうことから、LFCM モデル [3] を採用する。LFCM モデルでは、習熟忘却曲線は図2のように定義される。

図2はLFCMにおける習熟と忘却の関係を描いたも

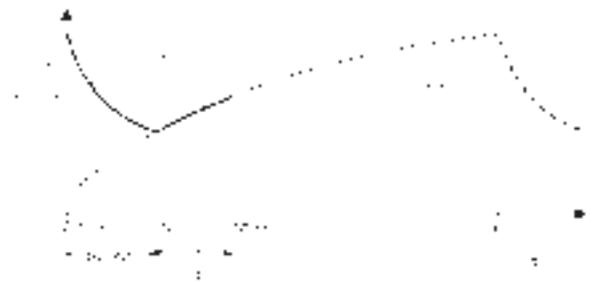


図2 習熟忘却曲線モデル (LFCM)

のである。縦軸  $T$  は作業時間を、横軸  $n$  は作業台数を表している。また横軸の下段  $t$  は、作業台数を時間に換算したものである。LFCM は、 $n$  ロットが第  $r$  サイクルで連続的に製造されること、および作業の中断が起こることを仮定している。本研究において、ロットサイズを  $n = 1$  とすることで、LFCM をメンテナンス作業に適応させる。つまり、1 サイクルにつきジョブ数は1つで、作業の中断が発生する。また第  $r$  サイクルはジョブの集合  $N_r$  に対応する。

Wright の習熟曲線 (WLC) は式 (1) で表される。

$$T_r = T_1 \cdot n^{\beta} \tag{1}$$

ここで、 $T_r$  は  $r$  回目の作業を行なった作業時間、 $T_1$  は初めて作業を行なう場合の作業時間、 $n$  は累積作業台数、 $\beta$  は習熟係数  $(0 < \beta < 1)$  である。WLC は広く知られているモデルとして使用されている。

一方、忘却曲線は式 (2) で表される。

$$T_r = T_1 \cdot e^{-\alpha n} \tag{2}$$

ここで、 $T_r$  は忘却曲線において  $r$  回作業を行なわなかった場合の作業時間、 $n$  は累積作業台数に相当するものである。式 (2) は、何も生産しない中断期間に用いられるので、作業が中断している場合には、 $n$  は実際にはない潜在的なジョブ数である。 $\alpha$  は忘却曲線の切片、 $\alpha$  は忘却係数である。なお、 $\alpha$  は作業者および作業内容、作業経験によって変化する値で、毎回計算される。

第  $r$  サイクルで1つのジョブが実行されると、習熟曲線は忘却曲線に切り替わる。中断点で、習熟曲線の作業時間は忘却曲線の作業時間と一致する。忘却係数  $\alpha$  はサイクルごとに算出される。したがって、式 (3) が成り立つ。

$$T_{r+1} = T_1 \cdot e^{-\alpha n} \tag{3}$$

$n = 1$  であるから、中断点は式 (4) によって示される。仮想のユニット数である  $n_r$  は、前回の作業である  $(r-1)$  サイクルの経験から算出される。

$$T_r = T_1 \cdot e^{-\alpha n_r} \tag{4}$$

一方、 $r$  ユニットは作業を全く行わない場合に、その

作業を完全に忘れる時間経過を作業数に換算したものである。

$$f_{i,t} = f_{i,t-1} \cdot (1 - \beta_i)^t \quad (5)$$

式(4)と(5)から、 $f_{i,t}$ は消去され、 $\beta_i$ サイクルの忘却係数は式(6)で計算される。

$$\beta_i = \frac{\log_{10}(f_{i,t})}{\log_{10}(1 - \beta_i)^t} \quad (6)$$

また、 $f_{i,t}$ を用いることで、次のサイクルの作業時間は式(7)で計算される。

$$t_{i,t} = t_{i,t-1} \cdot (1 - \beta_i)^t + \beta_i \cdot t_{i,t-1} \cdot (1 - \beta_i)^{t-1} \quad (7)$$

ここで、作業を行なわない時間  $\beta_i$  を失われたユニット数に換算した  $\beta_i$  を導出するためには、式(8)を用いる。

$$\beta_i = \frac{t_{i,t} - t_{i,t-1}}{t_{i,t-1}} \quad (8)$$

ここで、 $t_{i,t} - t_{i,t-1}$  は初回から  $u_{i,t} + 1$  ロットまで作業したとするのにかかる時間を意味し、 $t_{i,t-1}$  は  $i$  サイクルが終わった時間から、次の  $i$  サイクルが始まる時間までの作業中断時間である。

次のサイクルの作業時間を算出するのに必要となる仮想のユニット数  $u_{i,t}$  は式(1)と(7)から算出される。

$$u_{i,t} = \frac{t_{i,t} - t_{i,t-1}}{t_{i,t-1}} \cdot (1 - \beta_i)^{t-1} \quad (9)$$

これらの変数は作業者ごとに、およびジョブごとに抽出可能である。このように、次の作業時間を算出することが、 $\beta_i$  を導出するための  $u_{i,t}$  と、最新の作業時間  $t_{i,t}$  を保持することで可能になる。

#### (4) 教育

レベル1の作業者はOJTによる作業を一定回数  $n_{i,t}$  行くとレベル2になり、レベル2が一定期間  $R_{i,t}$  の間そのジョブを請け負わなかった場合はレベル1にレベルが下がるとする。このプロセスを図3に示す。

これを管理するには、各作業者  $W_{i,t}$  ごとに、各ジョブ  $J_{i,t}$  に関して最近の期間  $Be$  に実施した累積のOJT回数  $OJT_{i,t}(W_{i,t}, J_{i,t})$  と、実施した作業日時の記録  $W_{i,t}(J_{i,t}, Be)$  を常に更新する必要がある。

レベル1の作業者は、OJTを伴わない作業が認められないので、作業を受け持つとすれば必ずOJTによる作業に限られる。指導者は指導を専門に行う者が担当するのではなく、班内の技能レベルをもつ作業者が担当することとする。したがって、指導を行う間は、割り当てられている自分の作業はできない。

図4はシミュレーションにおけるスケジューリングと作業者モデルの関係を示したものである。スケジューラーは作業記録を参照して処理時間を算出し、作業者に

ジョブを割り当てる。そして短期スケジュールを済ませるごとに作業者モデルを更新する。これを繰り返すことでシミュレーションをすすめていく。

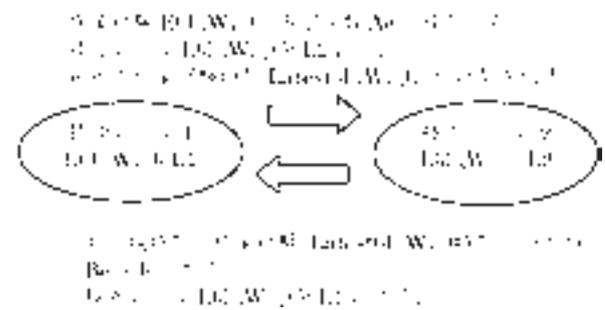


図3 技能レベルの変化およびジョブ  $J$  と作業者  $W_{i,t}$  の状態



図4 スケジューリングと作業者モデルの関係

#### (5) 作業計画

作業対象を単位に作業が発生し、ジョブ内容と標準的な処理時間、および作業記録にもとづいて、ジョブを作業者へ割り当てる。本研究では、最適な作業の割り当てを行なう短期的なシミュレーションではなく、様々な条件下で長期的な予測を行なう。さらに評価項目として平均作業時間だけではなく、平均的な技能者数をもとり、これらの関係を示す。

### 3.2 エージェントの定義 (動作のモデル化)

前章で述べたように、本研究ではスケジューリングシステムの実装にエージェントシステムを用いる。エージェントはジョブエージェント、作業者エージェント、管理者エージェントの3種類を定義する。スケジューリングは契約ネットプロトコル [4] に基づいた処理によって行われる。

まず、本節ではスケジューリングシステムにおける各エージェントの役割を述べる。

#### 3.2.1 ジョブエージェント

ジョブエージェントの役割は、ジョブの順序関係およ

び優先順位の情報や標準作業時間など情報を保有し、また作業員全員の作業記録を保有、更新することである。

ジョブエージェントの役割の詳細を述べる。

#### ① 優先順位に合わせてジョブリストを作成

ジョブの優先順位は、処理時間が大きく変わる可能性のあるものや、技能を持つ作業員が少ないジョブを考慮し、あらかじめ設定されているものとする。ただし、ジョブ間の順序拘束はないので、この優先順位の設定の仕方によって、タスクの終了時刻が大きく変化することはない。ジョブエージェントは優先順位に合わせてジョブを並べ替え、ジョブリストを作成する。

#### ② ジョブの情報を1つずつ管理者エージェントに送信する

管理者エージェントからジョブの情報を要求するメッセージを受信したら、優先順位に従い、ジョブの情報を1つ送信する。

#### ③ 作業記録を更新

管理者エージェントから、ジョブを割り当てた作業員と作業終了予定時刻の情報を受信し、該当する作業記録を更新する。

#### ④ ジョブリストの更新

ジョブが作業員に割り当てられた場合、あるいは管理者エージェントから契約変更やキャンセルの情報を受けた場合、ジョブリストを更新する。

ジョブは1つずつ割り当てられるため、②と③の処理を繰り返すことになる。

### 3.2.2 作業員エージェント

作業員エージェントの役割は、2つに分けることができる。

まず、1つ目の役割は管理者エージェントから受信するジョブの情報を基に、作業可能か判断することである。

#### ①自分の作業記録や作業リストを参照

管理者エージェントから受信したジョブ情報を基に、自分の技能レベルを参照する。ここで、作業リストとは、その作業員に割り当てられたジョブをリストアップしたものである。

#### ②作業可能か判別

①で参照した技能レベルから、1人で実務可能か判断する。可能な場合、作業リストを参照し、他のジョブが入っていないか確認する。作業可能な場合は作業記録に従い、習熟および忘却を考慮した作業時間を計算し、作業終了予定時刻を求め、管理者エージェントに返信する。また、作業不可能な場合はその旨を返信する。

#### ③指導可能なジョブか判別

①で参照した技能レベルで、レベル2の場合、その作

業員はOJTの指導者を兼務できる。そこで、レベル2の場合、作業員エージェントは作業リストを参照し、同時にOJTを伴うジョブの割り当てがないか、判断する。もしあれば、指導はできない。一方、OJTを伴うジョブではないが、1人でこなすジョブがある場合は、指導可能である。というのも、作業のうちOJTを伴う作業は、受注の面からも指導者の割り当ての面からも、優先的に行なうべき作業であると考えられる。そうでない場合、OJTによる指導を受ける作業員は指導者が作業を終えるまで待たなければならない等、作業できない時間が生じてしまう。よって、OJTによる指導を受けての作業、あるいはOJTの指導者に割り当てられた作業は、既に割り当てられている1人でこなせる作業を中断あるいはキャンセルし、優先して行なうものとする。以上のことを考慮し、作業員エージェントは指導可能あるいは不可能を管理者エージェントに返信する。

次に、2つ目の役割は割り当てられたジョブを作業リストに追加することである。

#### ①OJTを伴う作業か判断

管理者エージェントからジョブを割り当てられた場合、それがOJTを伴う作業か確認する。OJTを伴わない作業の場合、作業員エージェントは自らの作業リストにジョブを追加する。一方、OJTを伴う作業の場合、次のステップに進む。

#### ②他のジョブの作業を中断、あるいはキャンセルする必要があるか判断

上述のように、OJTを伴う作業は優先される。したがって、同時に1人で作業可能な他のジョブが既に割り当てられている場合、そのジョブの作業を中断あるいはキャンセルする必要がある。その場合、管理者エージェントにその旨を報告し、自分の作業リストを更新する。

### 3.2.3 管理者エージェント

管理者エージェントは職場の管理者に相当し、ジョブの通知や入札の処理を行うメディエータの役割をする。

#### ①ジョブエージェントにジョブの情報を要求

管理者エージェントはジョブエージェントにジョブの情報を1つ要求する。そしてジョブエージェントからの返信を参照し、割り当てのジョブが残っているのか、確認する。ジョブが残っていない場合、割り当ては終了となる。

#### ②作業員エージェントにジョブの情報を送信

ジョブエージェントから受信したジョブの情報を作業員エージェントに送信する。

#### ③契約する作業員エージェントの決定・割り当てメッセージ送信

作業員エージェント全員から入札を受けた後、評価値

の計算を行う。評価値とは、どの作業者にタスクを割り当てれば良いかを判断するものである。評価値に関しては次節で詳細を述べるが、評価値が最小の値をとる作業者エージェントにジョブの割り当てる。

④ジョブエージェントにジョブの作業情報を送信

ジョブエージェントに割り当てたジョブの作業情報を送信し、作業記録を更新するよう要請する。ジョブの割り当ては1つずつ行うため、管理者エージェントはこの工程をジョブの数だけ繰り返す。

3. 3 スケジューリングの概要

前章で述べたように、スケジューリングは契約ネットワークプロトコルに基づいた処理によって行なう。契約ネットワークプロトコルは、ジョブの告知、入札、落札の3種類のメッセージをエージェント間でやりとりして、ジョブの割り当てを行なうものである。以下に手順を示す。図5中の番号は以下のステップと対応する。

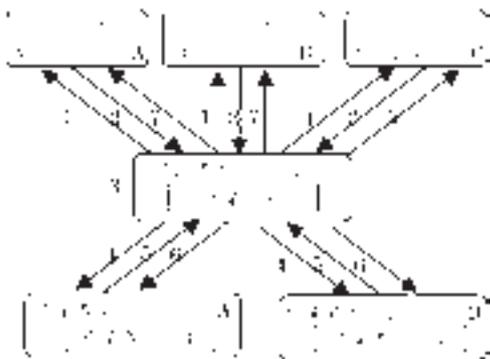


図5 ジョブの割り当て方法

- (Step 1) 管理者エージェントは各ジョブエージェントにジョブの情報を要求する。
- (Step 2) 各ジョブエージェントはジョブの情報を返信する。
- (Step 3) 管理者エージェントはジョブの情報を各作業者エージェントに告知する。
- (Step 4) 各作業者エージェントは仮の作業終了予定時刻を計算し、入札する。
- (Step 5) 管理者エージェントは評価値を計算し、最小値をとる作業者エージェントと契約する。そして他の作業者エージェントにキャンセルメッセージを送信する。
- (Step 6) 管理者エージェントはジョブの情報をスケジュール表に入れ、ジョブエージェントに作業記録の更新を依頼する。

Step 1 から Step 6 の工程を繰り返し、ジョブを全て割り当てる。

3. 4 評価値

本研究では、ジョブを割り当てる作業者を決定する手段として、新たな評価値を定義している。評価値が最小の値をとる作業者にジョブを割り当てることとする。評価値の計算には、作業者エージェントによって計算される作業終了予定時刻、および本研究で新たに定義した値である教育値というものをを用いる。

3. 4. 1 仮の作業終了予定時刻

作業者エージェントはジョブが告知されると、すでに契約済みの作業の終了予定時刻に、自らの経験に応じた処理時間を加えることで告知された作業を請け負った場合の終了時刻を見積もり、管理者エージェントに仮の終了予定時刻として入札する。

概念的には、

$$\begin{aligned} \text{仮の終了予定時刻} = & \\ & \text{契約済みジョブの終了予定時刻} + \\ & \text{告知された作業の処理時間} \end{aligned}$$

といえる。記号で表現すれば、ある作業者  $W_{i,j}$  にすでに割り当てられている  $w$  番目のジョブを、 $JW_{i,j,w}$  とすると、ジョブの終了予定時刻  $T_{ect}$  は、最後のジョブ  $JW_{i,j,w}$  の終了予定時刻に、告知されているジョブ  $J$  の処理時間  $T_p$  を加えることで仮の終了予定時刻を算出する。すなわち、

$$T_{ect} = T_{ect}(JW_{i,j,w}) + T_p(J, W_{i,j})$$

と表現できる。ここで、 $T_p$  は習熟忘却曲線に基づいて算出される値であり、初回の標準作業時間  $T_{std}$  と過去に作業を経験した時刻  $t_{last}(J, W_{i,j})$  で決まる。

管理者エージェントは、それぞれの作業者エージェント  $W_{i,j}$  から入札された終了予測時刻  $T_{ect}$  の中から、ある係数  $EC$  を引いた値を評価値  $V_{i,j}$  とし、最も評価値が小さい作業者エージェントと契約する。

$$V_{i,j} = \min_w \{ T_{ect}(JW_{i,j,w}) - EC \cdot T_{std}(J, W_{i,j}) \} \quad (11)$$

ここで、 $EC$  は作業者がレベル1である場合にのみ値を持つものとし、教育値 (Education Coefficient,  $EC$ ) と呼ぶことにする。

$$EC = \begin{cases} \text{Constant (in case of } L1, W_{i,j} \text{)} & \\ 0 & \text{(in case of } L2, W_{i,j} \text{)} \end{cases} \quad (12)$$

ECの定数が正である場合、評価値は小さくなるので、レベル2の作業者に比べてレベル1の作業者と契約がされやすくなる。このようにECは、OJT作業の計画されやすさを変えるパラメータとして利用できる。

この配分規則にしたがって、ジョブ集合に属する全てのジョブを順に作業者に割り当てることによって、その作業対象に対するタスク終了予定時刻 $T_{ij}$ が予測できる。すなわち $T_{ij}$ は班 $i$ の作業者 $u_{ij}$ の契約の中で最も遅い作業終了予定時刻となる。

$$T_{ij} = \max_{u_{ij}} \{T_{ij}^k\} \quad (12)$$

#### 4. システムの実装とシミュレーション例

##### 4.1 実装

上述のシミュレーションシステムを実装し、実現した例を示す。実装言語はJAVAであり、エージェントシステムは、Agrets[5]を採用した。

入力データに必要なデータはジョブデータと作業者データの2種類である。ジョブデータは、標準処理時間と優先順位があり、作業者データは、作業履歴と技能レベルがある。これらのデータは、企業の協力を得て、実際に近い分布になるような模擬データを構築した。

これにより、各ジョブの標準作業時間(レベル1の作業時間)は60を平均とし、10~120にばらつかせて設定した。作業者は、作業履歴の初期値を持つものとし、すべての作業者においてジョブの75種類をレベル1、残りの25種類をレベル2になるように振り分けて設定した。

また、シミュレーションでは作業者8人で年間10台の対象機械のメンテナンスを10年間行うとする。1台のエンジンには100種類のジョブが含まれ、それぞれを作業者に割り当てる。各ジョブの教育経験が直近4年間で4回未満の場合に技能レベルを下位のレベル1とみなし、OJTで作業を行う。また技能レベルが上位のレベル2であっても、4年間作業を行わなかった場合は、忘却を考慮して下位のレベル1に降格し、昇格には再び4回のOJTを必要とすることとした。

シミュレーションに使用した条件を表1にまとめる。

表1 シミュレーション条件

シミュレーション期間	10年
作業者数	8人
対象機械数	10台
メンテナンス作業回数	100回
教育経験が直近4年間で4回未満の場合に技能レベルを下位のレベル1とみなし、OJTで作業を行う。	
また技能レベルが上位のレベル2であっても、4年間作業を行わなかった場合は、忘却を考慮して下位のレベル1に降格し、昇格には再び4回のOJTを必要とすることとした。	
シミュレーションに使用した条件	10年

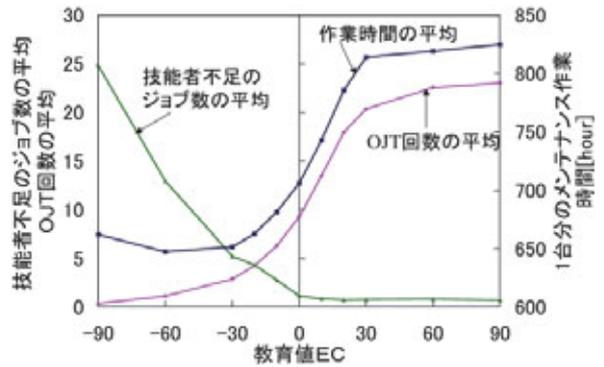


図6 ECの違いが全体の評価項目へ及ぼす影響

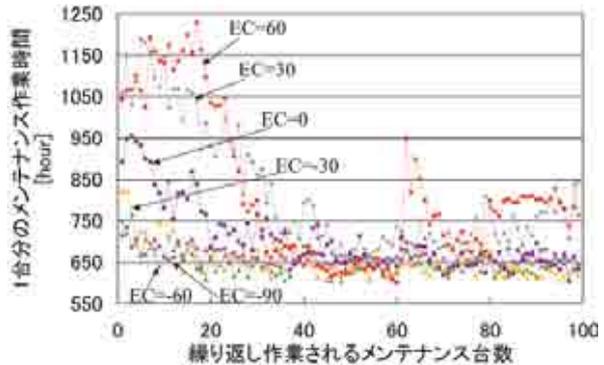


図7 ECの違いが作業時間の推移に及ぼす影響

##### 4.2 シミュレーション例

シミュレーションを行ない得られる出力は、1台分の総作業時間、OJT回数の平均、技能者不足のジョブ数、ガントチャートである。ガントチャート以外は、プログラムによってエクセルに出力させ、その後グラフを作成している。

準備したデータおよびシミュレーション条件で実施したシミュレーション結果のグラフの例(図6, 図7)、およびガントチャートの例(図8)を示す。

図6は100台分のメンテナンスを繰り返し行なった場合の、作業時間の平均(1台分)およびOJT回数の平均を教育値EC別に示したものである。ECが-60よりも大きい場合、ECが大きくなるほどOJT回数が増加し、全体の作業時間を長くすることがわかる。一方で、技能者不足のジョブ数は減少し、技能者数の余裕を持たせることができることがわかる。ECが-60より小さい場合、OJT回数は少なくなっても作業時間は長くなる結果となっている。また、技能者不足のジョブ数も多い。これは、OJT回数が足りないために技能者が育たず、最終的に全体の作業時間を長くしてしまうことを示している。

図7は100台分のメンテナンス作業を行なった場合の1台分(100のジョブ分)の総作業時間の変化を示したものである。ECが大きくなるほど初めに多くのOJTが入ることにより初期に作業時間が長くなるが、多くの技

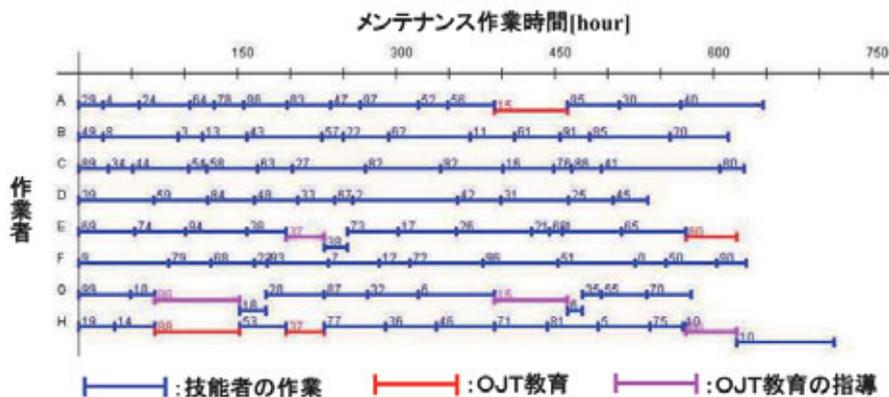


図8 ガントチャートの例

能者が現れる頃に次第に短くなっていくことがわかる。

図8は1台分のジョブを作業者に割り当てる様子を示した、ガントチャートの例である。この結果は長期シミュレーションの結果として示されるもので、必ず守るべきものではないが、管理者がこの結果と自らの直感的判断とを比較することで、長期的な教育効果を考慮したうえでの作業配分を実現できると考えられる。

## 5. 結言

本論文では、作業を作業者に割り当てる問題において、大型機械や設備のメンテナンス作業に特有の特徴となる作業レベルおよび習熟忘却の影響を考慮したシミュレーション手法について述べた。

実際の作業現場では、多くの不確実な条件があるので、必ずしも長期シミュレーション通りの結果が得られるとは限らない。しかし、不確実性を含めた様々な条件でのシミュレーションを繰り返すことで、全体最適化を図るための大変有意義な結果が得られると考えられる。

## 参考文献

- [1] Tateno, T. and Shimizu, K. "Work Scheduling by Use of Worker Model in Consideration of Learning by On-The-Job Training", *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.1, No.3 (2007) pp.430-441.
- [2] Wright, T., "Factors affecting the cost of airplanes", *Journal of Aeronautical Science*, Vol.3 (1936), pp.122-128.
- [3] Jabor, M.Y. and Sikstrom, S., "A Numerical Comparison of Three Potential Learning and Forgetting Models", *International Journal of Production Economics*, Vol.92 (2004), pp.281-294.
- [4] Smith, R.G. "The Contract Net Protocol: High-

level Communication and Control in a Distributed Problem Solver", *IEEE Trans. Computer*, Vol.C-29, No.12 (1980) pp.1104-1113.

- [5] Lange, D., Oshima, M., *Programming and Deploying Java Mobile Agents with Aglets*, Addison-Wesley Professional (1998)

# 同一テーマを異なる PBL チームが扱った場合の違いについて

戸 沢 義 夫\*

## Analysis of the differences of PBL teams on the same PBL theme

Yoshio Tozawa\*

### 概要

PBL (Project Based Learning) では、数人で構成されるチームが、与えられたテーマを解決するためのプロジェクトを実施する。教師はチームに方法論を提示し、チームはそれに従って活動を行う。同一方法論を、同一テーマに適用した場合でも、チームの考え方によって結果は異なってくる。PBL は、元々、正解のない世界でどのような考え方をするのがよいかを学ぶ場でもある。チームにより異なった結果になったとしても教育目標は達成される。チームが方法論を適用していく上で、教師がどの程度チーム活動に関与するかは教育の観点からは重要な問題である。本論文では、実際に全く同じテーマで異なる 2 チームが PBL を実施した場合の結果の違いについて考察する

### Abstract

PBL(Project Based Learning) is an educational method in which a team with several members solves a given problem (theme). The team is given the methodology by a teacher. The team conducts activities along with the methodology. The results of the team may vary depending on how the team plays with the problem, even if the methodology and the problem is the same. This paper analyzes the differences of the results done by two different PBL teams on the same problem.

Keywords: PBL, Project Based Learning, IT Strategy, Business Process Reengineering, Methodology

### 1. 情報戦略 PBL

本学では PBL (Project Based Learning) が 2 年次学生の必修科目になっている。PBL は修士論文の代わりになるカリキュラムであり、本学の長項になっている。大学での従来のコンピュータ科学教育が、企業が求めている人材像に合っていないという批判があり、本学では社会が必要としている高度 IT 人材育成 [1][2][3] を目指して PBL を導入している。PBL では学生に知識修得させることを教育目的とするのではなく、コンピテンシー(業務遂行能力) 修得を教育目的としている。

本学の学生(情報アーキテクチャ専攻)は 90%以上が社会人である。将来キャリアを考えた場合に、現在の仕事では経験できない新しい経験を積んでキャリアアップにつなげたいと考えている学生も多い。筆者が実施する PBL は「情報戦略とシステム化基本構想策定」であり、情報システムの観点では最上流の部分である。図 1 に示すようにプロジェクト発足前の活動になる。情報戦略コンサルタントとしてのスキルが要請される。コンサルタント職種は、IT スキル標準 (ITSS) [4] ではレベル 4 以上でのみ定義されており、大学院での教育として相応しいと考えている。

ITSS ではすべての職種で、リーダーシップ・スキル、コミュニケーション・スキル、ネゴシエーション・スキルが重要であると規定している。これらはソフトスキルと呼ばれることが多いが、大学ではあまり教育の対象と考えられていない。ソフトスキルは知識ではなく、経験に基づく実務的なノウハウに近いからである。企業が求めている人材像はソフトスキルを身につけていることが求められている。企業はソフトスキルを大学で教育して欲しいと思っている。本学ではこれに応えるべく PBL ではソフトスキルの修得を含めたコンピテンシー教育を

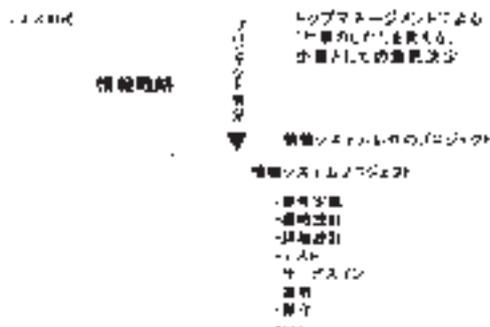


図 1 情報戦略の位置付け

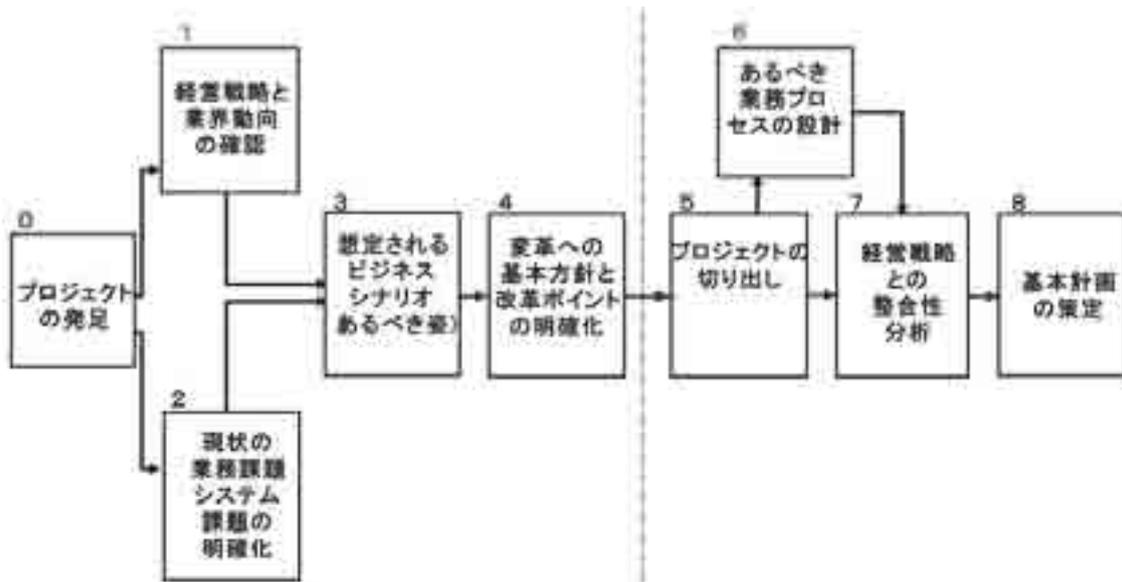


図2 情報戦略方法論

目指している。

筆者のPBLでは、図2に示す方法論が学生に提示される。この方法論に沿って作業を進めると求める成果物が得られるようになっている。実際のコンサルティングでは、ステップ4の後にスポンサーへのプレゼンテーションを行い、OKをもらってから、ステップ5以降を実施する。OKをもらうための説得が重要である。ステップ4までがひとまとまりであるので、本論文で扱う範囲もステップ4までとする。

## 2. PBL テーマ

筆者が実施するPBL「情報戦略とシステム化基本構想策定」は、具体的に何を対象にして情報戦略を策定するかPBLテーマを選定する必要がある。PBLテーマとしては架空のケースを想定して行う方法と、実際のテーマを用いる方法の2通りが考えられる。学生に新しい経験を積んでもらうという観点から、架空のケースではなく、実際のテーマによるPBL実施を方針にした。

実際のテーマでPBLを行うには、PBLに協力してくれる企業（組織）が不可欠である。特に、社会人学生であるので、PBL活動時間が平日の夜間と土曜日・日曜日に限られてしまう。通常の勤務時間帯でないため、協力先を見つけるのはかなり困難である。

本学は東京都が出資している公立大学であるので、最初のPBLの協力先として、東京都の協力を得ることを考えた。

東京都は、毎年、情報化推進リーダー（副参事・課長級）を数名任命し、新たに情報化推進リーダーに任命された人たちに約3ヶ月の専門教育を行っている。本学はこの教育に協力することになっているが、2006年にこ

の教育内容の見直しが検討された。筆者は、情報化推進リーダーには業務改革を実施できる研修を行うべきだと提案し、それが受け入れられた。それは「東京都、今後のIT化取組方針」に反映されている[5]。教育手段としては本学で実施するPBLを提案し、東京都庁組織内にPBL実施に協力してくれる部署を捜して欲しいとお願いした。条件は、情報化推進リーダーの研修と同内容のPBLを本学の学生にも実施することである。情報化推進リーダーだけでなく、学生のPBLにも協力をお願いした。

その結果、東京都のPBLテーマに対して、情報化推進リーダーが行うPBLと学生が行うPBLの2つが実施されることになった。2007年は港湾局のテーマであり、2008年は建設局のテーマである。2009年は情報システム部が管理している都庁職員用グループウェアTAIMSがテーマになる予定である。

本論文では2007年の港湾局のケースについて2つのチームの違いについて分析する。筆者にとってPBLを実施するのは初めて経験であったため、両チームとも実施にあたってはいろいろな試行錯誤があったことを断っておく。

## 3. PBLの進め方

2007年PBLプロジェクトの目的は、港湾局の業務改革である。ITを使うと、現在の仕事のやり方を変えることが可能になり、それがどのようなものかを提言する。港湾局には情報化推進リーダーがいたため、その方に直接的なPBL協力者になってもらった。初めてであるので、港湾局の業務概要について説明してもらい、港湾局総務部長のインタビューのセッティングをお願いした。

総務部長に対しては、PBL の趣旨を説明し、筆者がインタビューを行った。総務部長の問題意識は「縦割り組織の弊害」であった。縦割り組織の弊害が少なくなるような、今の仕事のしかたとは違った仕事のしかたがあるのではないか、というのが総務部長の見解であった。これを PBL の基本テーマとすることにした。

PBL の開始前に、筆者の同席のもとに、港湾局の情報化推進リーダーにより下記のインタビューを実施した。被インタビュー者には自分の所属する部全体について回答して欲しいとお願いし、港湾局全体がカバーされるように人選されている。

- 港湾経営部 経営課長
- 東京港管理事務所 港務課長、施設運営課長
- 臨海開発部 開発整備課長、開発企画課長
- 東京港防災事務所 副所長、庶務係長
- 港湾整備部 建設調整課長、計画課長
- 東京港建設事務所 副所長、港湾整備課長
- 離島港湾部 管理課長、建設課長

これらのインタビューはすべて録音され、PBL チームに資料として提供された。

興味深いことは、上記インタビューで「縦割り組織の弊害として具体的な問題はありますか」と毎回質問したのだが、誰も問題があると指摘しなかったことである。総務部長は「縦割り組織の弊害」をなんとなく感じているのだけれども、現場の人たちは弊害があると思っていないことが判明した。

両 PBL チームには、インタビューの録音以外に、東京都が用意していた「港湾局の事業概要」と「用語集」が渡された。両 PBL チームへのインプット情報は全く同じである。本来ならば、インタビューは PBL の活動の一貫として PBL チームが実施するのが望ましい。しかし、初めての PBL であることや、教師が港湾局の業務を事前に理解しておく必要があったため、PBL 開始前にインタビューを実施した。

PBL 開始時のキックオフでは、最初に図 2 の方法論を説明した。また、テーマが港湾局の業務改革であるため、業務改革とは何か [6] について図 3 を用いて考え方を解説した。業務改革と IT (情報技術) との関係については図 4 を示し、情報戦略の位置付けを明確にした。情報戦略の PBL がなぜ業務改革をテーマにしているかの説明である。IT がビジネスに貢献する際の考え方として図 5 を示した。組織横断的に情報を共有したり、ビジネスプロセスをつなぐこと (図のシャドウ部分) が IT の進歩により可能になっている。組織横断的の視点が重要であることを指摘した。

図 2～図 5 が教師から港湾局の業務改革を実施していく上で PBL チームに与えられた基本知識である [7]。

PBL チームはこれらを活用して業務改革の提言を作成する。

#### 4. PBL 成果

東京都情報化推進リーダー PBL チーム (A チーム 4 名) による成果を図 A - 1～図 A - 11、学生 PBL チーム (B チーム 6 名) による成果を図 B - 1～図 B - 13 に示す。両チームは互いに他チームの活動内容を知らず、成果物も参照していない。

方法論が同じで、インタビューは事前に実施した録音を使用したため、業務改革の提言内容は基本的に同じになるはずであるが、何に重点を置くかの考え方の差により違いが生じてくる。図 A と図 B は方法論のステップの成果物に対応させて、同じステップの成果物を上下に並べて示している。以下は図 A、図 B を参照しながら読んで欲しい。

##### 4. 1 目次

チーム A は改革ポイントを 3 つ設定したが、チーム B は改革ポイントを 5 つ設定した。改革ポイントごとに 1 枚のチャートを用意しているため、チーム B は 2 枚図が多くなっている。チーム B は方法論のステップ 5 以降も実施したため、そのことが目次に反映されているが、図 B - 13 より後のチャートは割愛する。

##### 4. 2 港湾局の業務概要

業務改革の提言は、相手を説得することが主眼になる。相手を説得するためには、相手の業務を正しく理解していることを知ってもらい、最初に安心感を与える必要がある。そのためのチャートであることを指導した結果作成されたものである。チーム A もチーム B もアニメーションを利用したパワーポイントチャートを作成している。

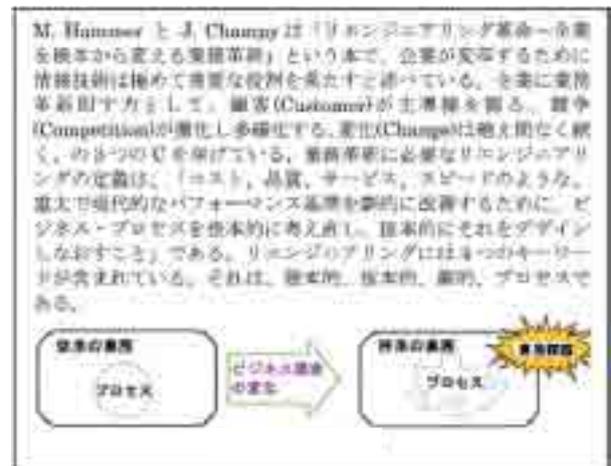


図 3 業務改革

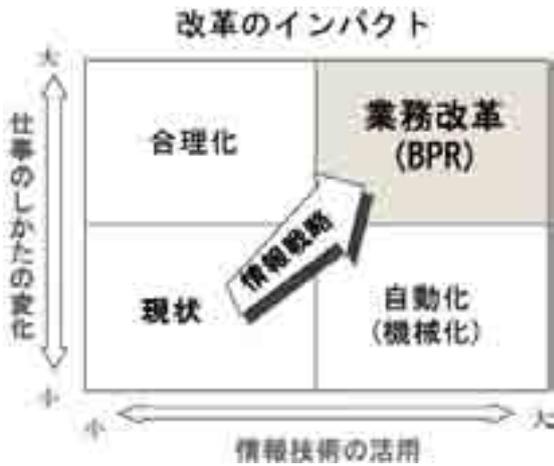


図4 業務改革と情報戦略

#### 4.3 ビジネス環境の変化

このチャートは図3業務改革を理解した上で、必ず作成するように指導している部分である。特に1枚にまとめることを強く要請した。業務改革では仕事のしかたを変えるのであるが、仕事のしかたを変える被対象者にとって、今の仕事のしかたが悪いと言うと反発が予想される。反発は業務改革の抵抗勢力になる危険性がある。そのため、今の仕事のしかたが悪いという言い方はせず、今の仕事のしかたは従来のビジネス環境では良かったのだが、ビジネス環境が変わったため新しいビジネス環境では合わなくなった、というロジックを使用する。ビジネス環境の変化が業務改革のドライバーになる。そのため、どんなビジネス環境の変化が生じているかをはっきり意識させるためのチャートが必要になる。

ビジネス環境変化として何を取り上げるかはチームによって当然異なってくる。数ある変化要因から重要と思われるものを選ぶ。教師はプレゼンテーション時の効果から項目を並べる順序について指導している。チャートの目的は「説得」であるので、プレゼンテーションを聞



図5 ITによるビジネスへ貢献の考え方

いた人がどのように感じるかを考えたチャート作りが求められる。

#### 4.4 港湾局の抱える課題

実際のコンサルティングでは課題の特定は極めて重要な部分になる。しかし、PBLではチームメンバーが直接港湾局職員へのインタビューを実施することはなかったため、課題の掘り下げには限界があった。インタビュー録音などから、想定される事態を仮説として課題を特定している。チームAはチャート化するスキル(パワーポイントスキル)が充分でなかったため、課題は箇条書きになっている。チームBは実際に想定される業務場面を図示し、そこに課題を指摘するチャートにしている。

#### 4.5 あるべき姿

チームAとチームBでは、重点の置き方が大きく異なっている。チームAは東京都職員のチームであるため、港湾局が他の局と比べて特長的な部分を強調している。それは、お客様(利用者)という概念(ステークホルダー)があるという点である。お客様の満足度を上げることが重要であり、そのために効率的でムダのない仕事のしかたをしている状態を示している。

一方、チームBは誰もが同じように業務を遂行することに焦点を当てている。誰が仕事をするかで結果が異なるのは当たり前だと考え方が東京都職員にはあるようだが、そのアンチテーゼである。人の個人能力差に依存しない業務遂行の考え方は図5に含まれている。

チームAもチームBも複数の部署にまたがる仕事がスムーズに流れる部分が共通している。

#### 4.6 改革ポイントの全体

業務改革提案の肝の部分は改革ポイントである。ステップ1,2,3までの結果と改革ポイントを結ぶチャートが「改革ポイントの全体」になる。

チームAでは「取組方針」

- 情報管理の一元化
- 仕事の流れの共有化
- 情報技術の活用

が示され、あるべき姿、課題と3つの改革ポイントが結びつけられている。港湾局全体を第三者視点で見渡した場合、ITの活用度が非常に低いことに気づく。しかし、港湾局で仕事をしている人たちはそのことにほとんど気づいていない。ITがなくても仕事ができるように今の仕事のしかたが設計されており、ITがなくても業務をまわすことができる。ITなしで仕事ができる人たちに、ITを活用した仕事のしかたに変えなさいと説得することになる。そのため取組方針にわざわざ「情報技術の活

用」が明記されることになった。

「情報管理の一元化」と「仕事の流れの共有化」は、図5のシャドウ部分に対応している。ITを活用してビジネスに貢献する場合の基本である。このように、IT活用の最も基本的な部分があるまま業務改革の提言に現れることは少ないのであるが、港湾局でのITの取り組みがそれだけ低いことを意味している。

チームBは、「業務プロセス」が「情報基盤」の上に乗る絵柄により、図5のメッセージを表現している。5つの改革ポイントを「情報基盤」に関係するものと「業務プロセス」に関係するものに分けて分類している。

改革ポイントはプレゼンテーションが終了時点ですべてが記憶に残るように、あまり多くを設定しないように指導している。チームAもチームBもこのチャートを作成する過程で、図5の重要性を学んでくれたと思っている。

#### 4.7 改革ポイント

チームAの改革ポイントは3つで、次のようになっている。

- A1：港湾局全体のデータベースを作ろう  
局全体の情報のデータベース化を通じて、情報の可視化・共有化・管理の一元化を実現し、迅速な利用を可能とする。
- A2：業務プロセスの流れを明らかにしよう  
業務プロセスの流れ全体を定義化し、暗黙知を形式知に転換することにより、仕事の流れを共有化する。
- A3：仕事を進める上でのルールづくりをしよう  
仕事に関する情報の管理や利用のルールを作り、仕事の進め方の可視化を図る。

それに対し、チームBの改革ポイントは5つで次のようになっている。

- B1：情報の一元管理  
人に頼まなくても入手できるように情報をデータベースに集約する。
- B2：情報の整理  
東京都港湾局として管理すべき情報にどのようなものがあるかを整理する。
- B3：ライフサイクルの視点  
施設のライフサイクルに着目することで、計画から保全まで漏れなく仕事を行う。
- B4：情報蓄積時のルール化  
結果だけでなく、過程の情報も記録に残すように仕事の仕方を変える。
- B5：部署間の業務手順確立  
部署間の業務処理手順を明文化し、業務のプロセスを管理する。

これらの改革ポイントをよく見ると、A1と(B1, B2), A2とB5, A3と(B3,B4)がほぼ対応している。また、新たにデータベースを作ると言っても、イメージが必要であるので、チームAは図A-8、チームBは図B-8が作成されている。

改革ポイントのチャートは、左側にAS-IS（現状）、右側にTO-BE（あるべき姿）を並べて描くように指導している。これにより、仕事のしかたのどこが変わるのか、現状のどのような課題を解決しようとしているかが明確になる。個々の改革ポイントのチャートは、それぞれが独立して意味があるように作られている。

#### 4.8 最終チャート

チームAはPBL活動が方法論ステップ4で終了したため、最後はNEXT STEPの活動が書かれている。チームBはステップ5以降の活動を行ったため、改革ポイントを実現するために5つのプロジェクト（PT）を実施するようにと繋げている。このチャートまでの時点で、相手に、仕事のしかたを変えなければいけないと説得したことになる。

### 5. 港湾局 PBL を実施してわかったこと

PBL開始前に総務部長インタビューで挙げられた基本テーマは「縦割り組織の弊害」であった。しかし、その後のインタビューでは、誰も縦割り組織の弊害が実際に存在するとは思っていないことが判明した。そのため、ステップ2の課題に取り上げられることはなかった。

この部分をよく吟味してみたい。港湾局では「調整業務」が非常に多く発生している。誰とどのような調整を行うか、調整のためのミーティングに誰を呼ぶかについて、すべて担当者ノウハウに頼って行われている。担当者の能力によって、調整業務がスムーズに進められたり、そうでなかったりするのだが、それは当然のことと考えられている。担当者が変わる際の引き継ぎがうまくいってなくても、そんなもんだという現状認識がある。港湾局には「お客様」に相当するステークホルダーがおり、担当者の変更により、最初から説明しなおさなければならぬとのクレームは課題として認識されている。

港湾局の業務を、組織と、なぜ調整業務が必要かという観点で見ると、日本組織の特長であるボトムアップの意思決定と関係していることがわかってきた。図6は縦割り組織（部署1、部署2、部署3）の間で調整業務が行われる状況を示している。

例えば、港湾局管理下の護岸に遊歩道を新設するケースを考える。遊歩道建設は護岸に影響を与える。部署1は遊歩道担当、部署2は護岸担当と組織が分かれている

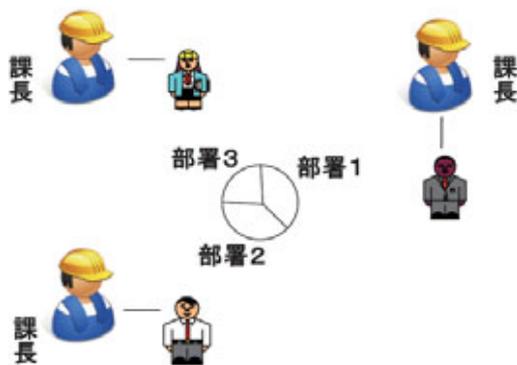


図6 縦割り組織でのボトムアップ意思決定

とする。部署1と部署2は互いに影響があるため調整が必要になる。部署1の担当者は部署2の担当者を捜し出し調整を行う。もし部署3も影響を受けるようであれば、部署3の担当者を加えて調整を行う。

調整が必要になる理由は、港湾局で管理しているもの(図6の丸の部分)が異なる責任を持つ複数の部署にまたがっているからである。部署1の担当者が調整を始めると、通常、課長はそのことを知らない。調整が終わってから課長へ調整結果が報告される。部署2や部署3の担当者も調整が終了するまで課長に報告しない。調整終了後、同一内容が部署1、部署2、部署3の課長に報告される。従って、担当者レベルで調整(意思決定)が行われたあとで課長に報告されるが、調整済みのものに対して原則として課長は異を唱えたりしない。ひとりの課長が異を唱えると他部署の課長へ影響が及ぶからである。調整業務とは担当者が意思決定し、その結果が課長、部長と報告されるボトムアップ意思決定である。

これを、情報管理の視点から図示したのが図7である。各部署は自分の責任を全うするために必要な情報を管理している。あくまでも管理責任を果たすための情報である。図7の点線の丸で示されているモノの情報は、部署A、部署B、部署Cに分散して保管されている。情報システムの情報管理の考え方では、管理されるモノに着目して情報管理するのが普通である。情報システムの立場からは、点線の丸についての情報は一カ所で管理されるべきものである。

縦割り組織の問題は、図7の点線の丸のように、本来管理されるべきものが特定されずに、同じモノについての情報が分散されて保管されていることである。調整業務では各部署が自分の持っている情報を持ち寄って意思決定している。全員が持ち寄らないと全体が見えないのである。

港湾局として管理すべきものを特定し、それに着目して情報を付加していく形の情報管理を行うことが望まれる。これはデータベース構築の際の基本的考え方である。情報がきちんと管理され、共有できるようになれば、調

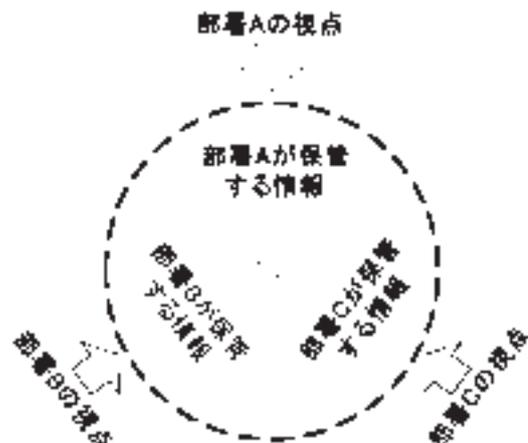


図7 縦割り組織での情報管理

整業務も効率化されるし、港湾局全体の仕事のしかたもスムーズになると思われる。

PBLでは、縦割り組織の弊害について直接的な指摘はしなかったが、港湾局データベースを作成するようにとの提言はなされた。第三者から見れば縦割り組織の弊害は明らかである。しかし、港湾局の当事者は弊害があると思っていない。仕事のしかたを変えるという目的からは、あえてそのことを指摘せず、データベース作成の実をとる形の提言をした。これは情報戦略コンサルタントの立場からは十分に意味あることであった。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省, 情報政策, 高度 IT 人材の育成  
[http://www.meti.go.jp/policy/it\\_policy/jinzai/jinzai.htm](http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/jinzai/jinzai.htm)
- [2] 経済産業省, “高度 IT 人材の育成をめざして”  
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g70418c02j.pdf>, 平成 19 年 4 月 12 日
- [3] 経団連, “高度情報通信人材育成に向けた 経団連の取り組みについて”  
[http://www.soumu.go.jp/joho\\_tsusin/policyreports/chousa/ict\\_ikusei/pdf/071019\\_2\\_si2-1.pdf](http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/chousa/ict_ikusei/pdf/071019_2_si2-1.pdf)
- [4] 情報処理推進機構, IT スキル標準 V3,  
[http://www.ipa.go.jp/jinzai/itss/download\\_V3.html](http://www.ipa.go.jp/jinzai/itss/download_V3.html)
- [5] 東京都, “今後の IT 化取組方針”,  
<http://www.metro.tokyo.jp/INET/KEIKAKU/2007/09/DATA/70h9a100.pdf>
- [6] マイケル・ハマー, ジェイムズ・チャンピー, “リエンジニアリング革命—企業を根本から変える業務革新”, 日経ビジネス人文庫 (2002)
- [7] 戸沢義夫, “情報戦略(情報システムの最上流工程)の教育方法について”, 情報教育シンポジウム, Vol. 2008, No.6, pp.63-70, 2008(8)



図 A-1



図 B-1



図 A-2

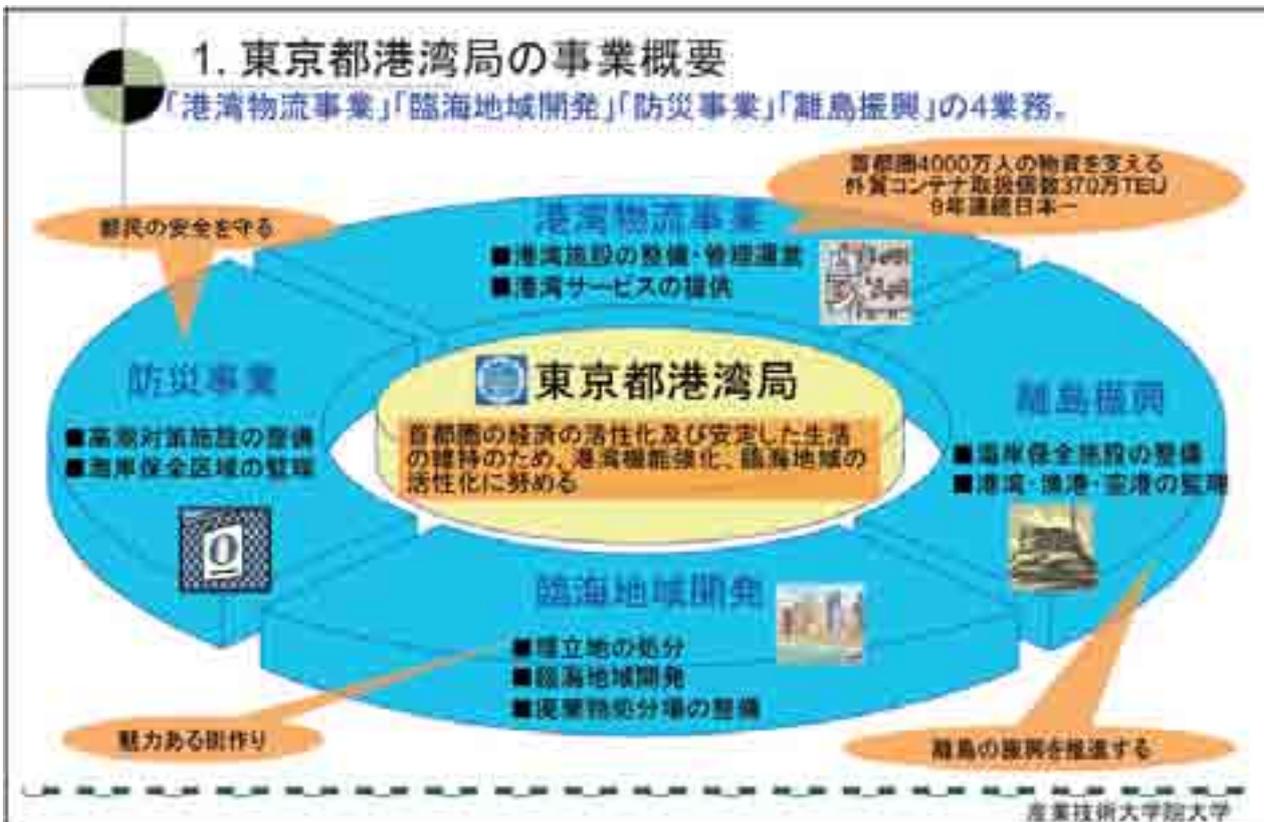


図 B-2



図 A-3

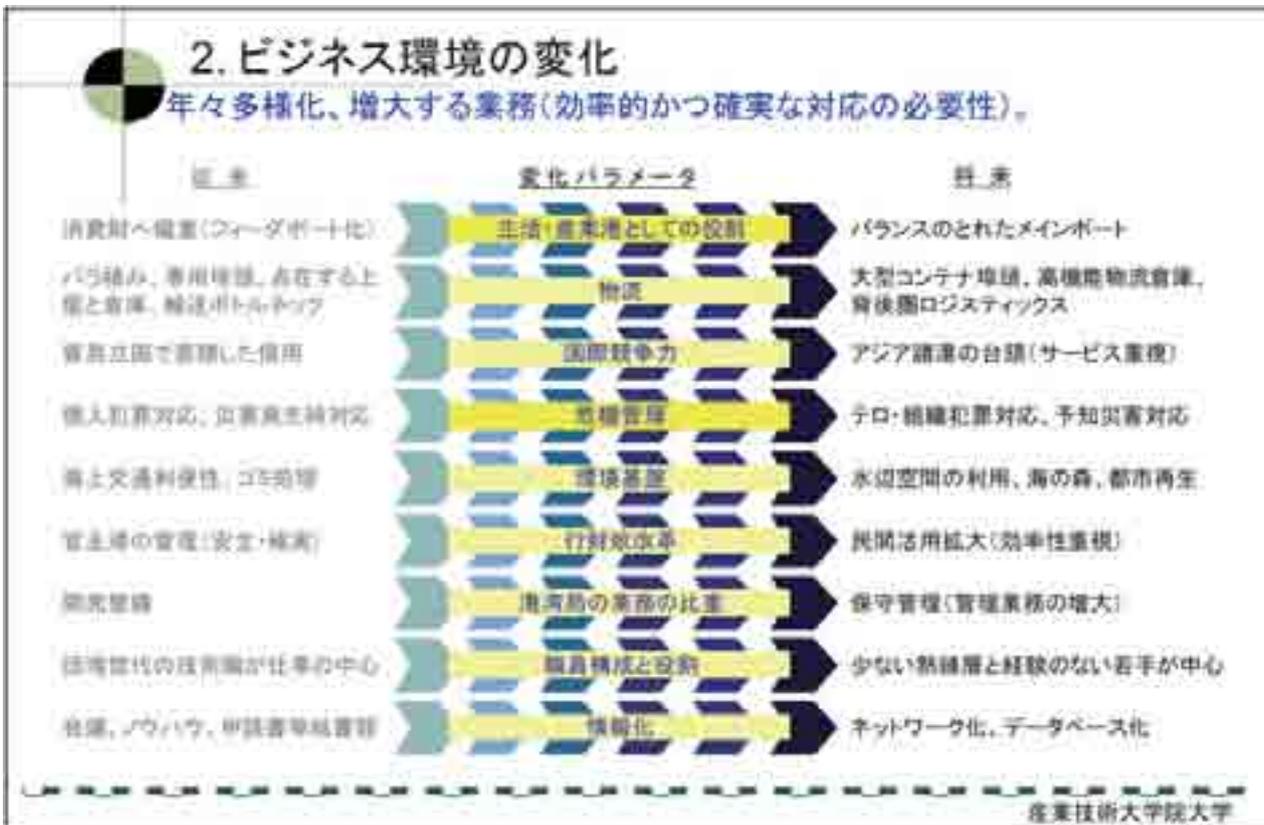


図 B-3

## 港湾局の抱える課題

### 港湾局の事業の特徴

- 東京港及び周辺エリアにおけるすべての活動に関与している(エリア管理)
- ビジネス活動へのサービス提供のため、営業的センスとレスポンスが重要

### 港湾局の仕事の進め方に由来する課題

- 情報の存在が不明確
  - 情報のありかを探すのに時間がかかり、担当者に頼まないと情報が出てこないことがある
  - 情報が存在すること自体を知らない人がいる
- 業務の流れやノウハウが不明瞭
  - 業務の流れは皆が何となく知っている(暗黙知)という前提で仕事が進んでいる
  - 業務が個人のノウハウ(暗黙知)に依存しており、担当者が代われれば成果に差が生じる
  - 課をまたぐ業務プロセスなどのドキュメントがなく、業務全体の流れが見えにくい
- 仕事上の調整が多く非効率
  - 調整は行っているが、調整内容や調整相手に漏れが生じ、手戻りが発生することがある
  - 調整にかかる労力や時間が大きく、仕事の進め方が効率的ではない

図 A-4



図 B-4



図 A-5

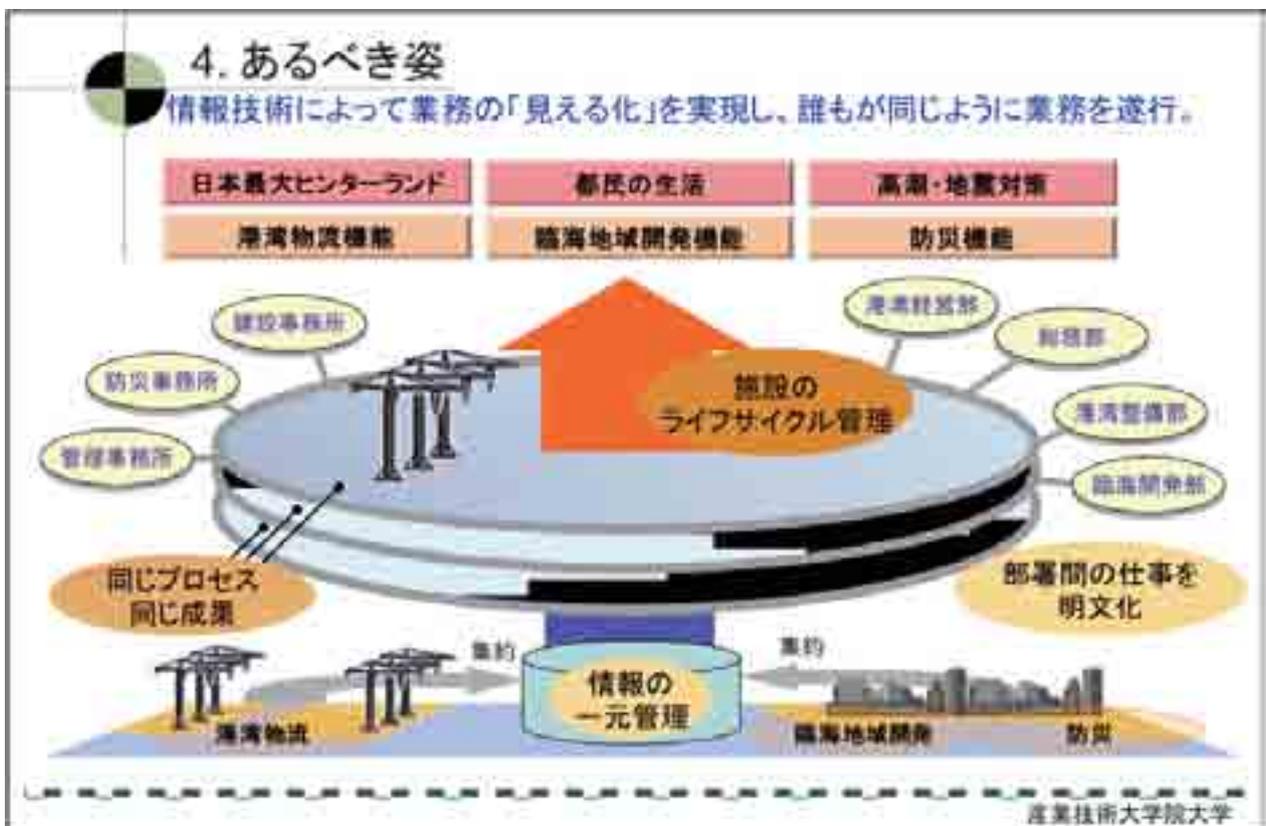


図 B-5

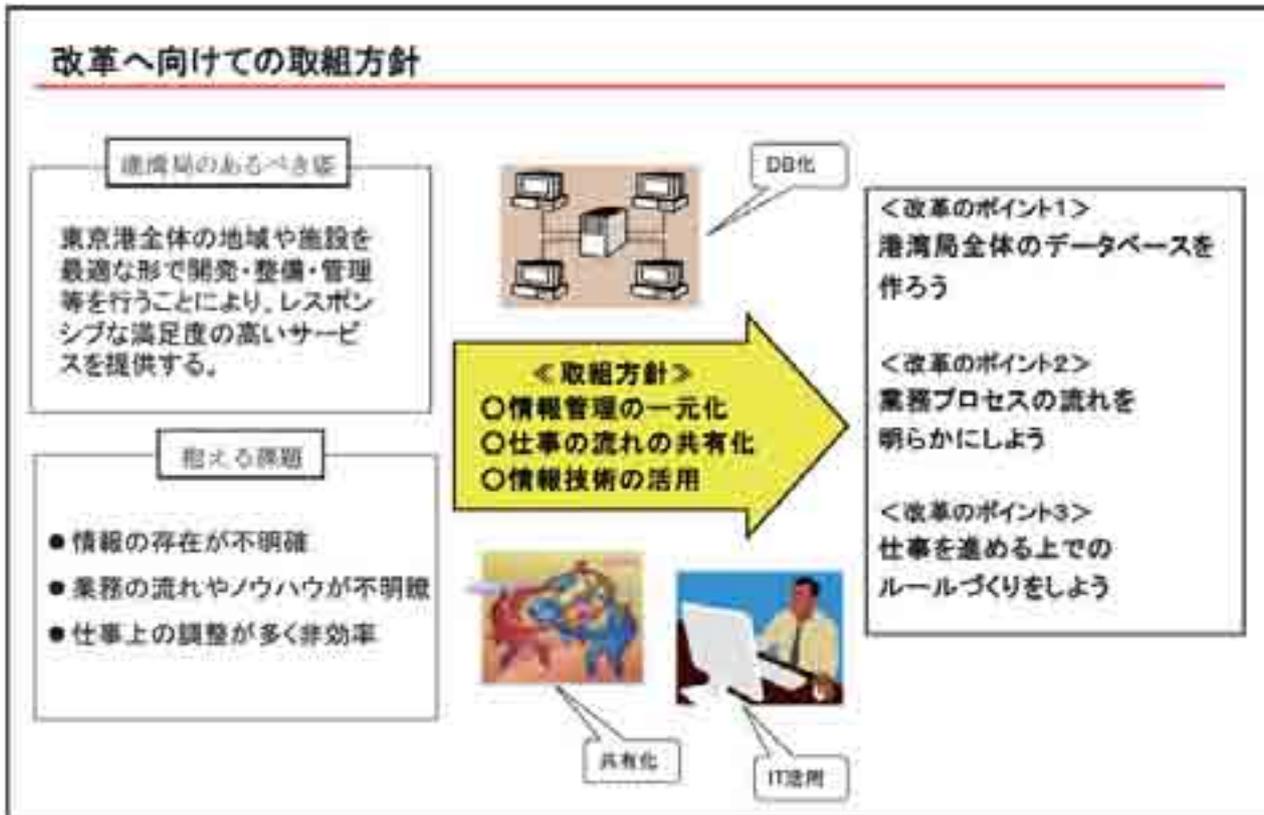


図 A-6

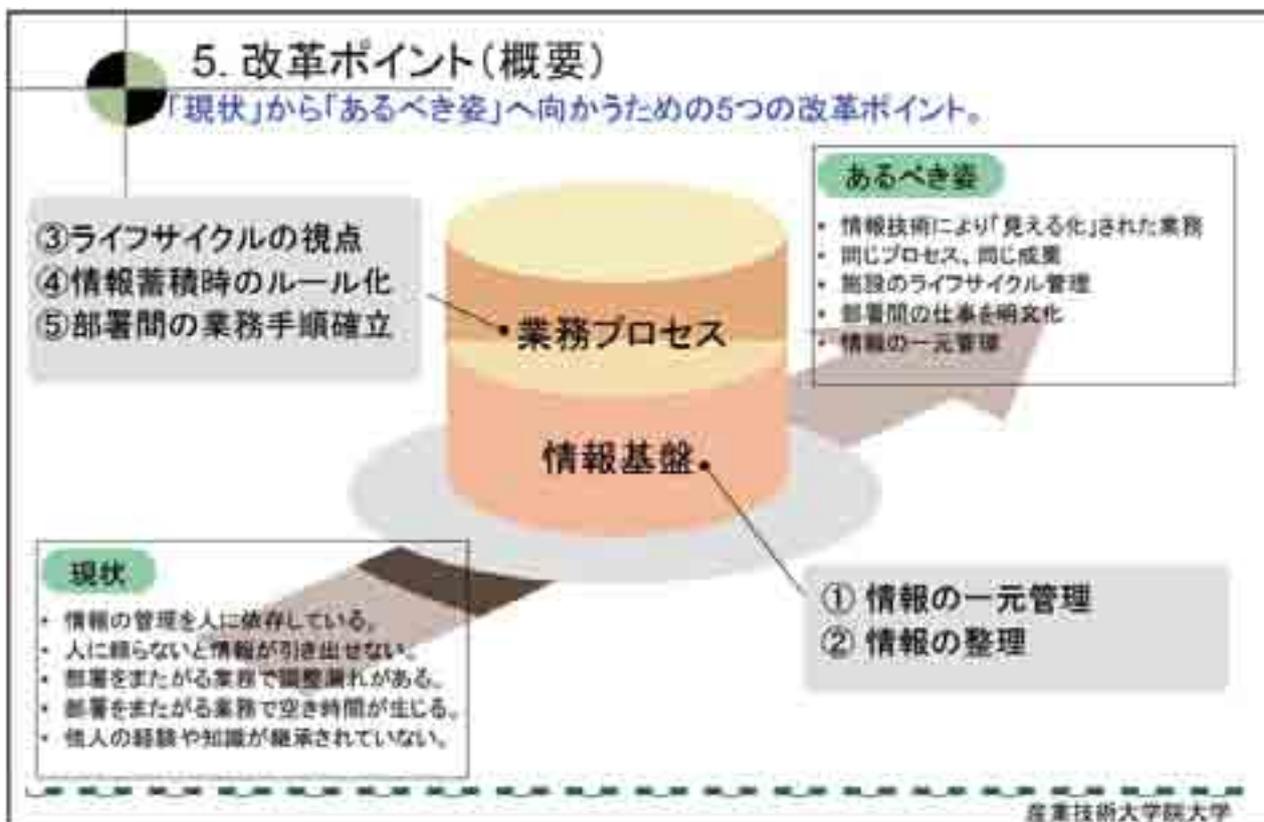


図 B-6



図 A-7

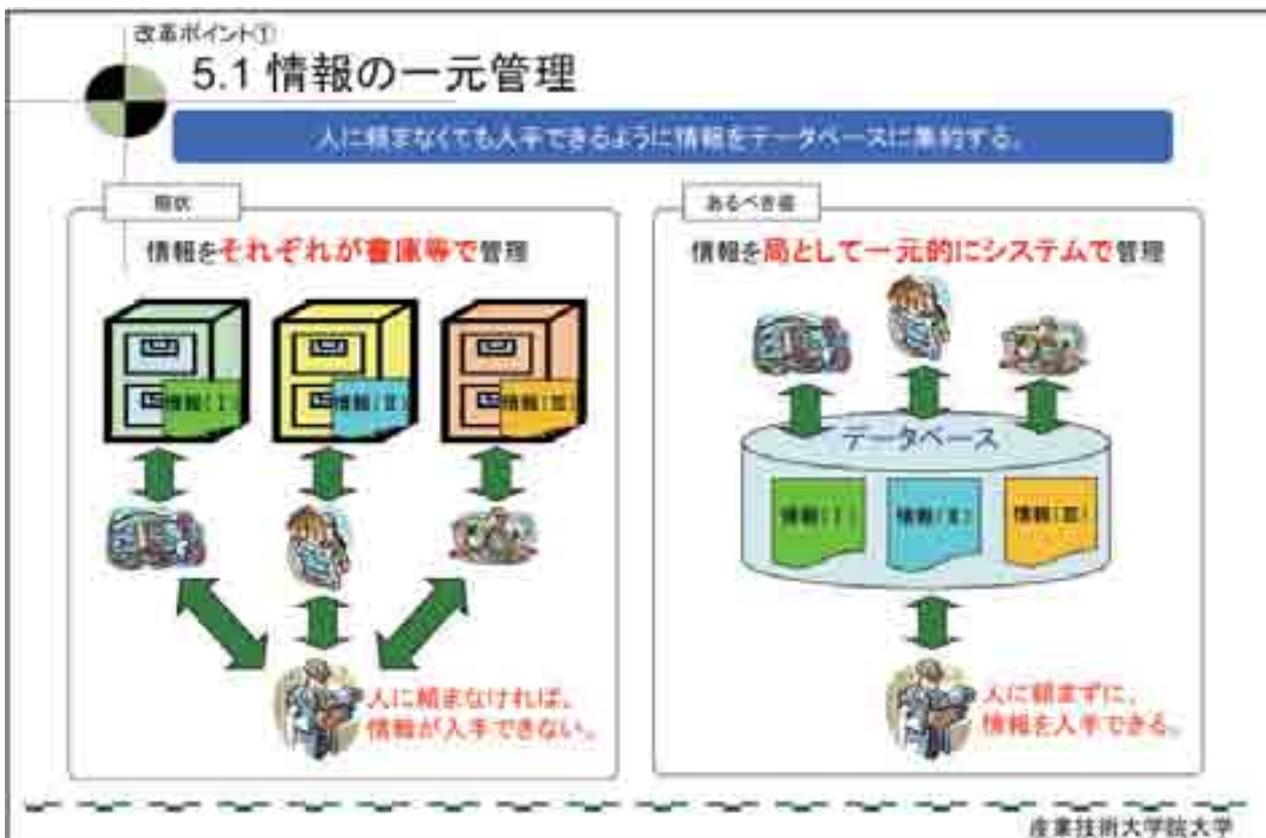


図 B-7

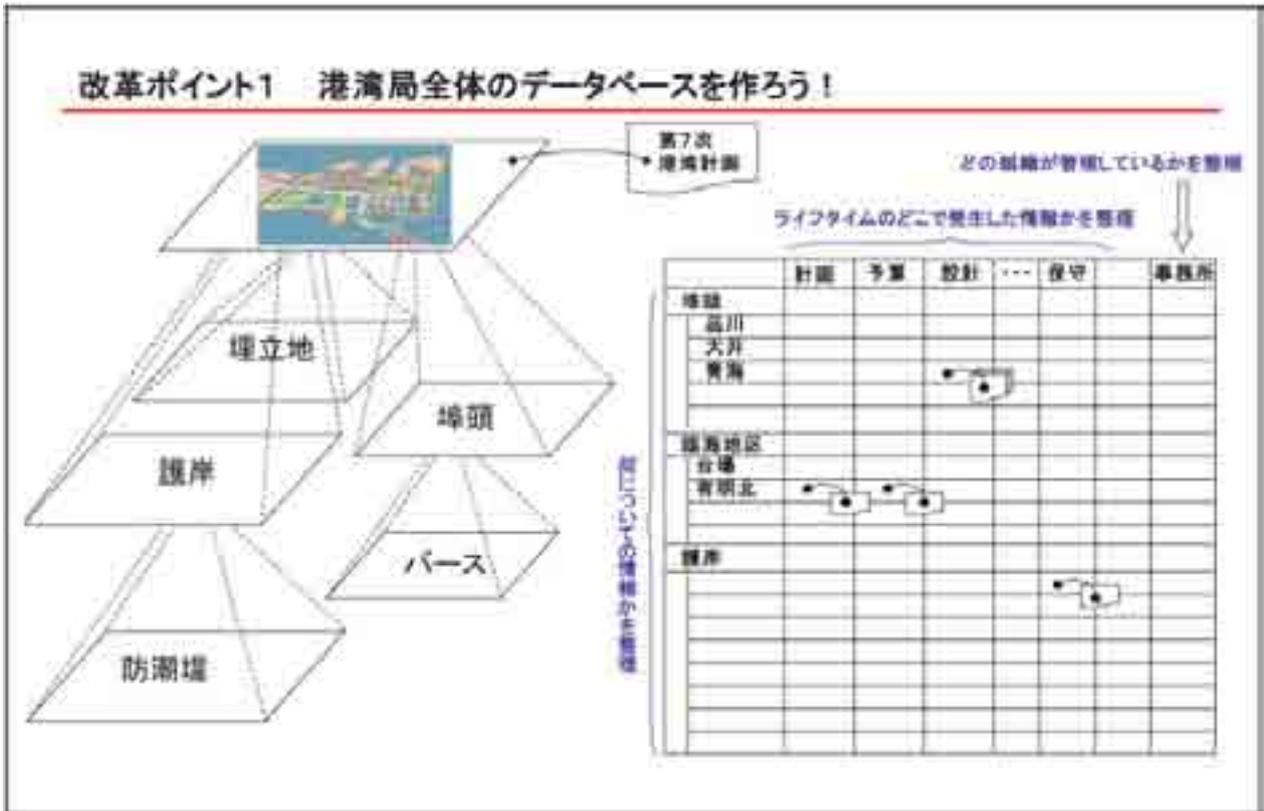


図 A-8

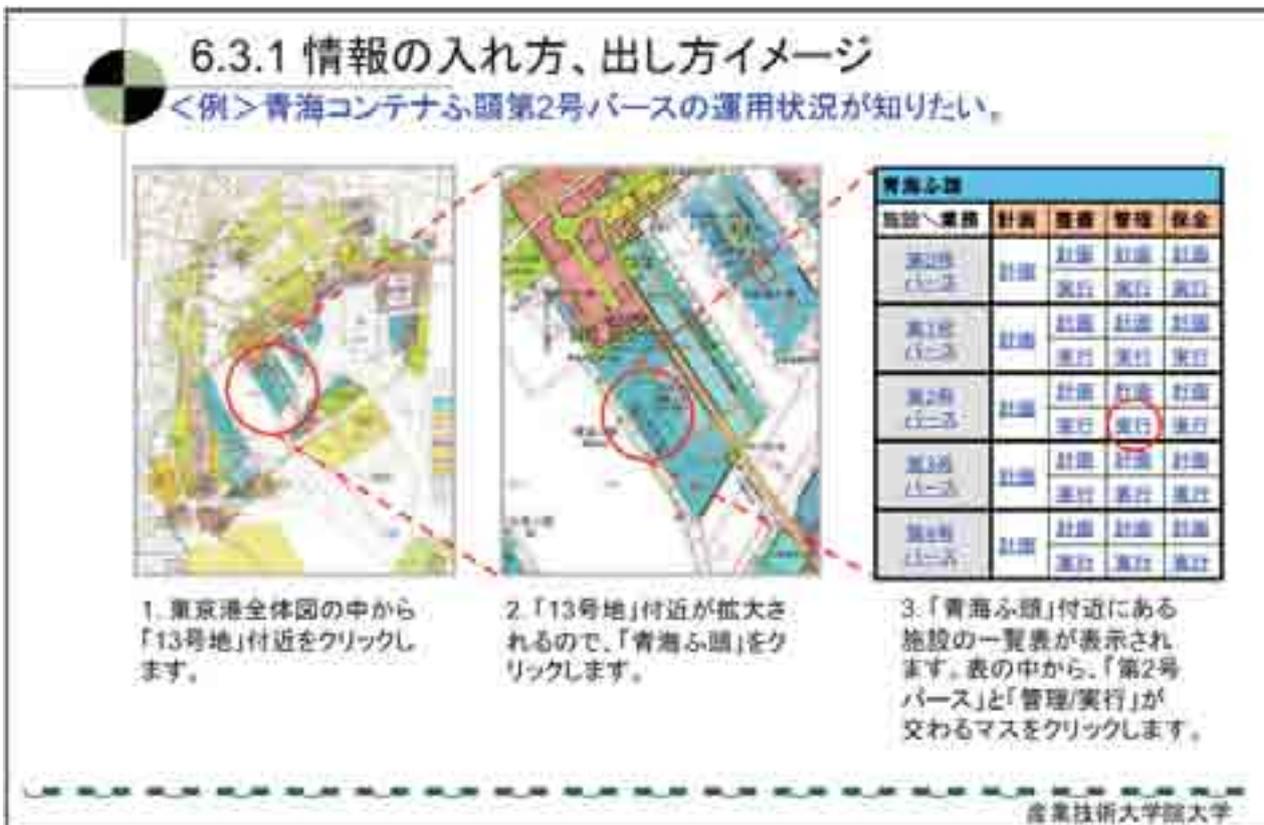


図 B-8

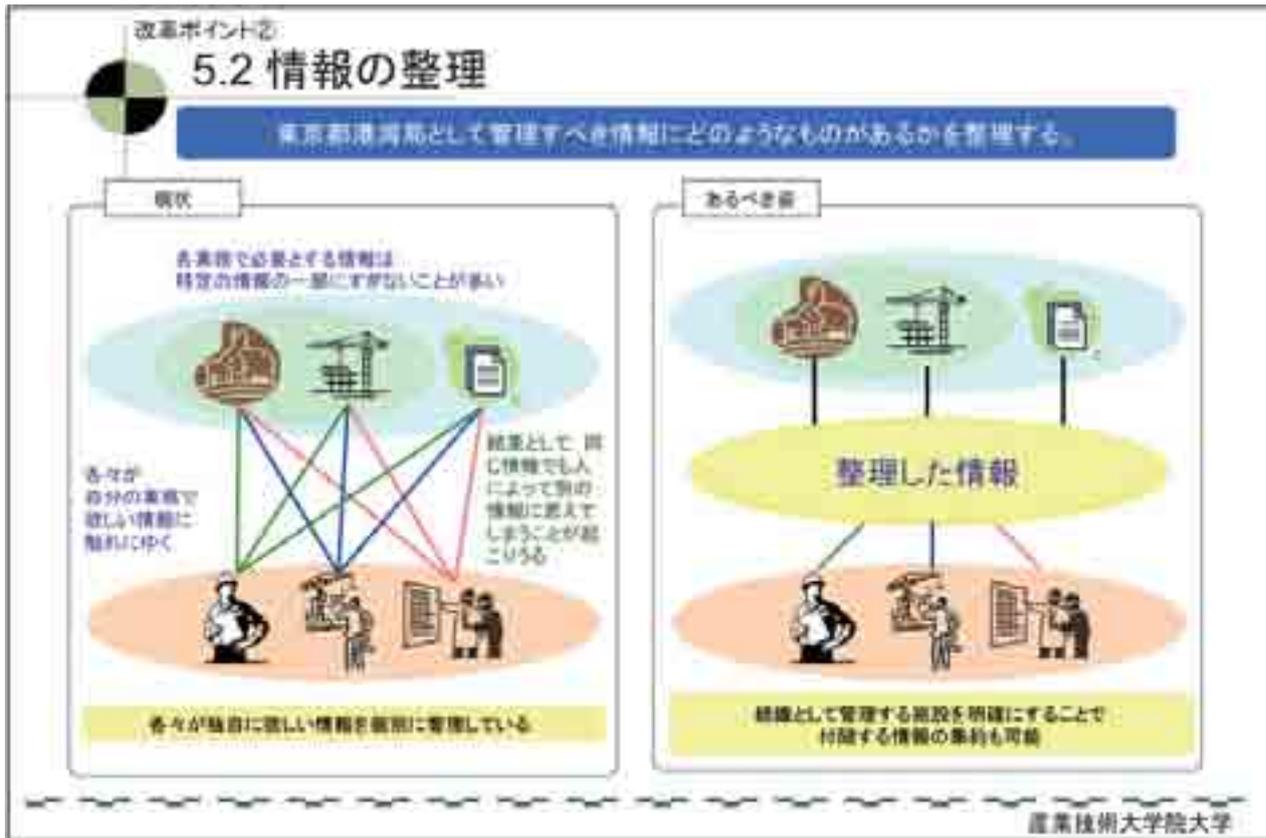


図 B-9

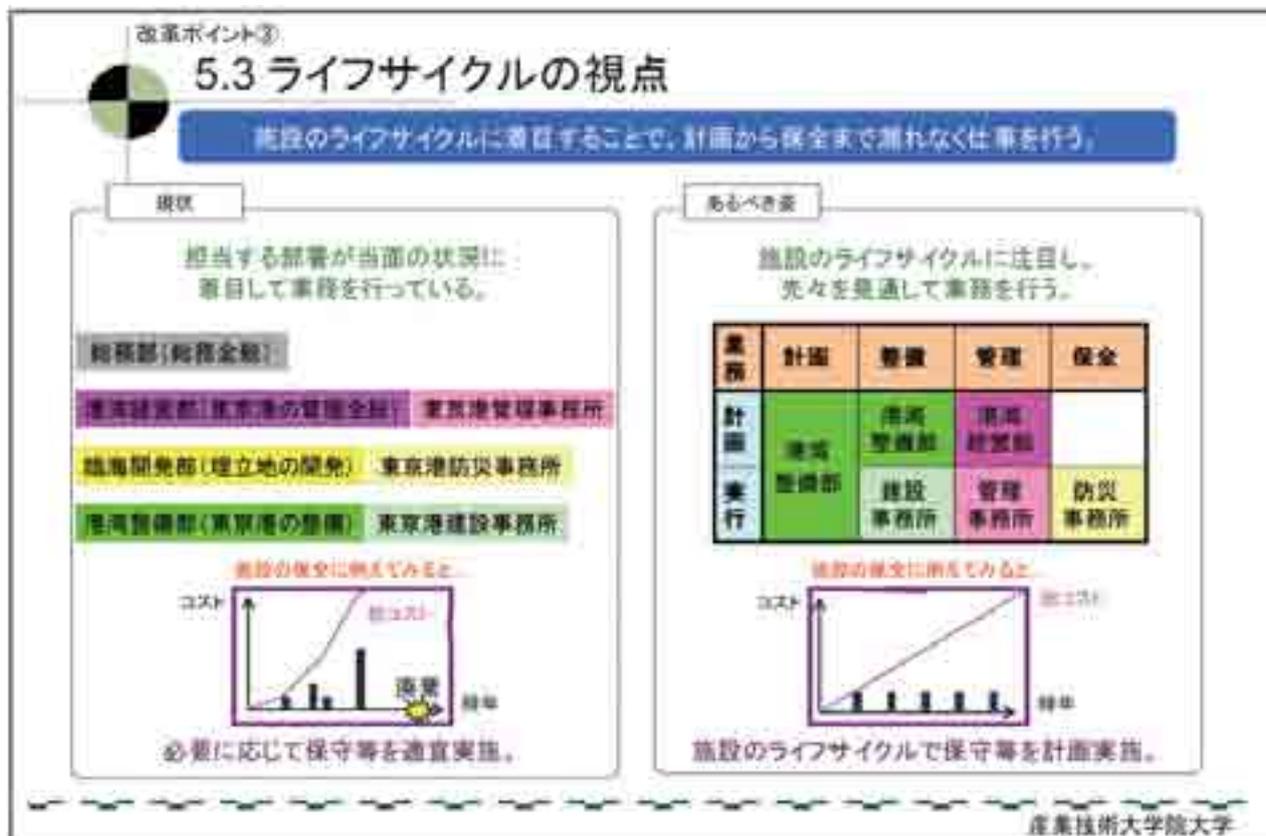


図 B-10



図 A-9

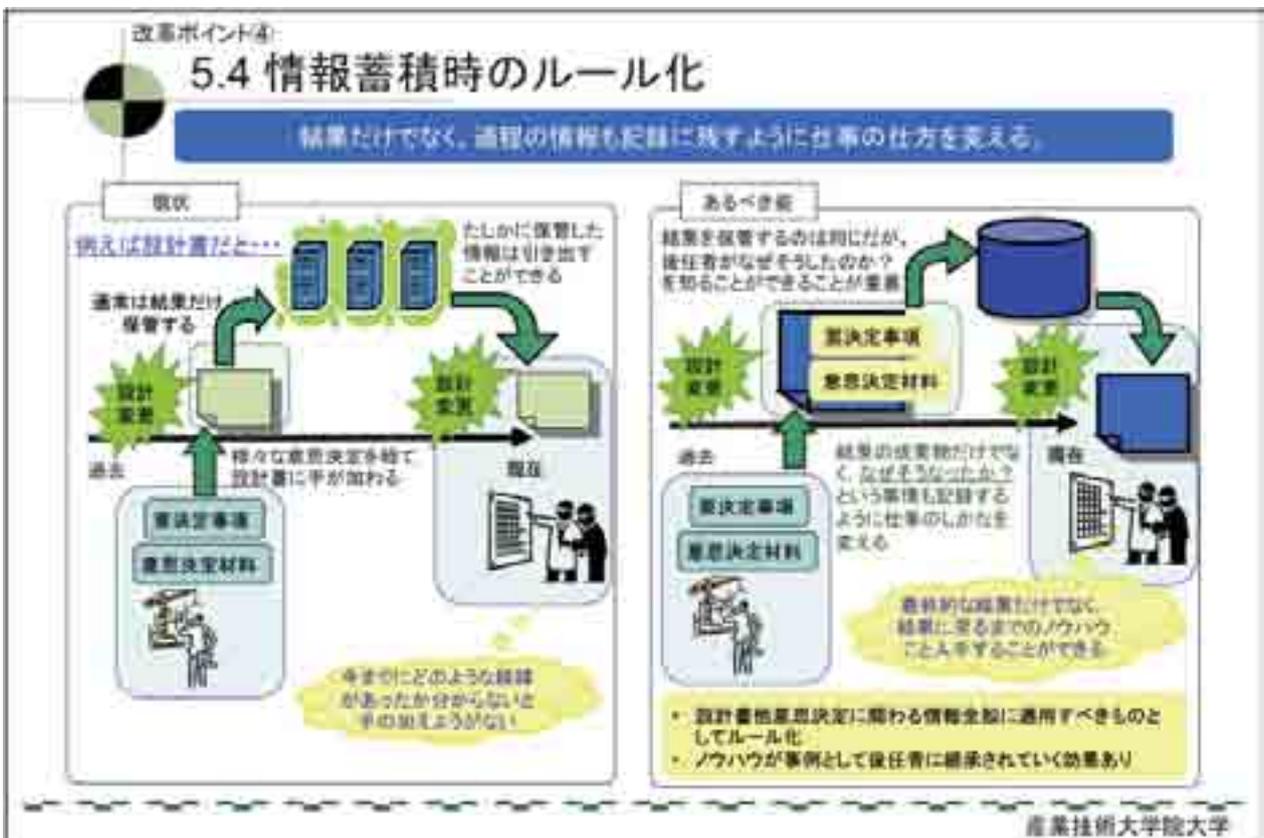


図 B-11

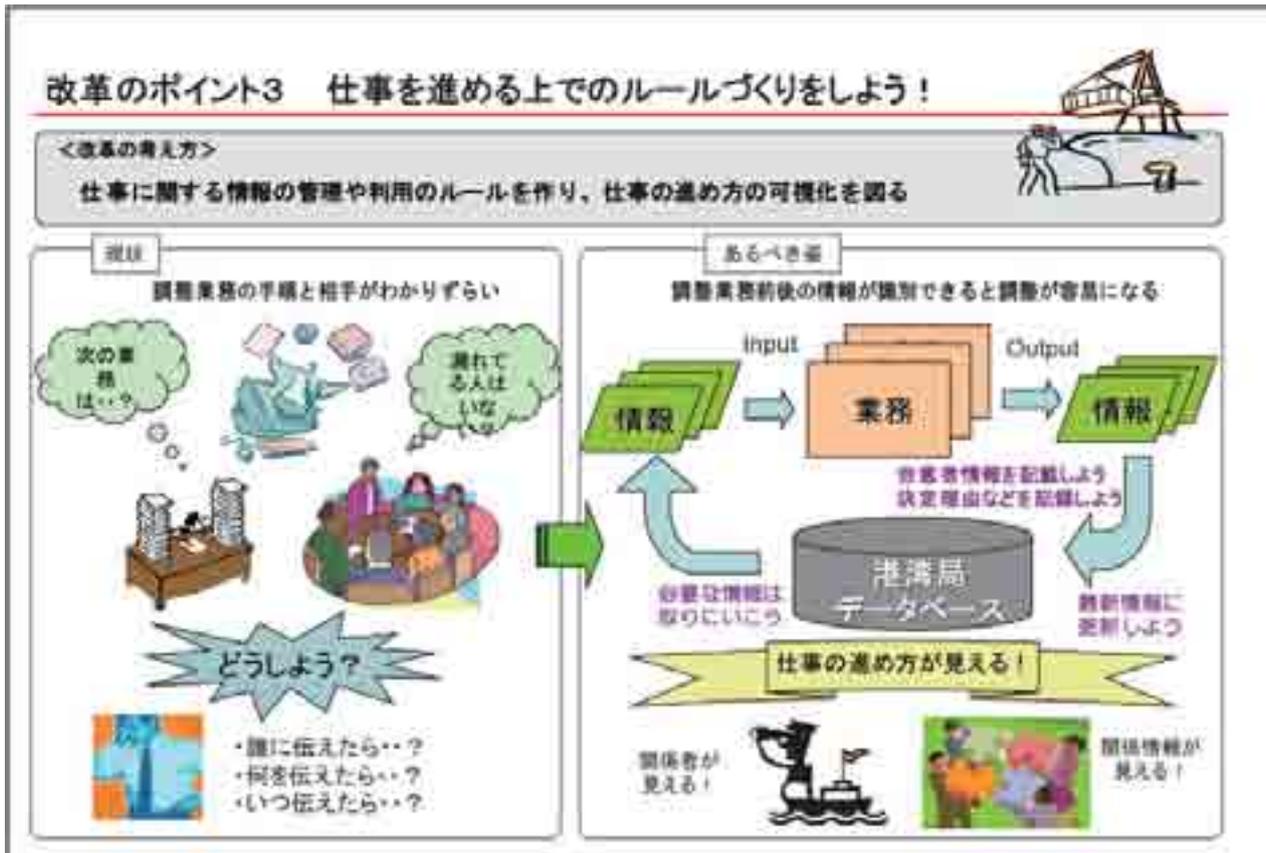


図 A-10

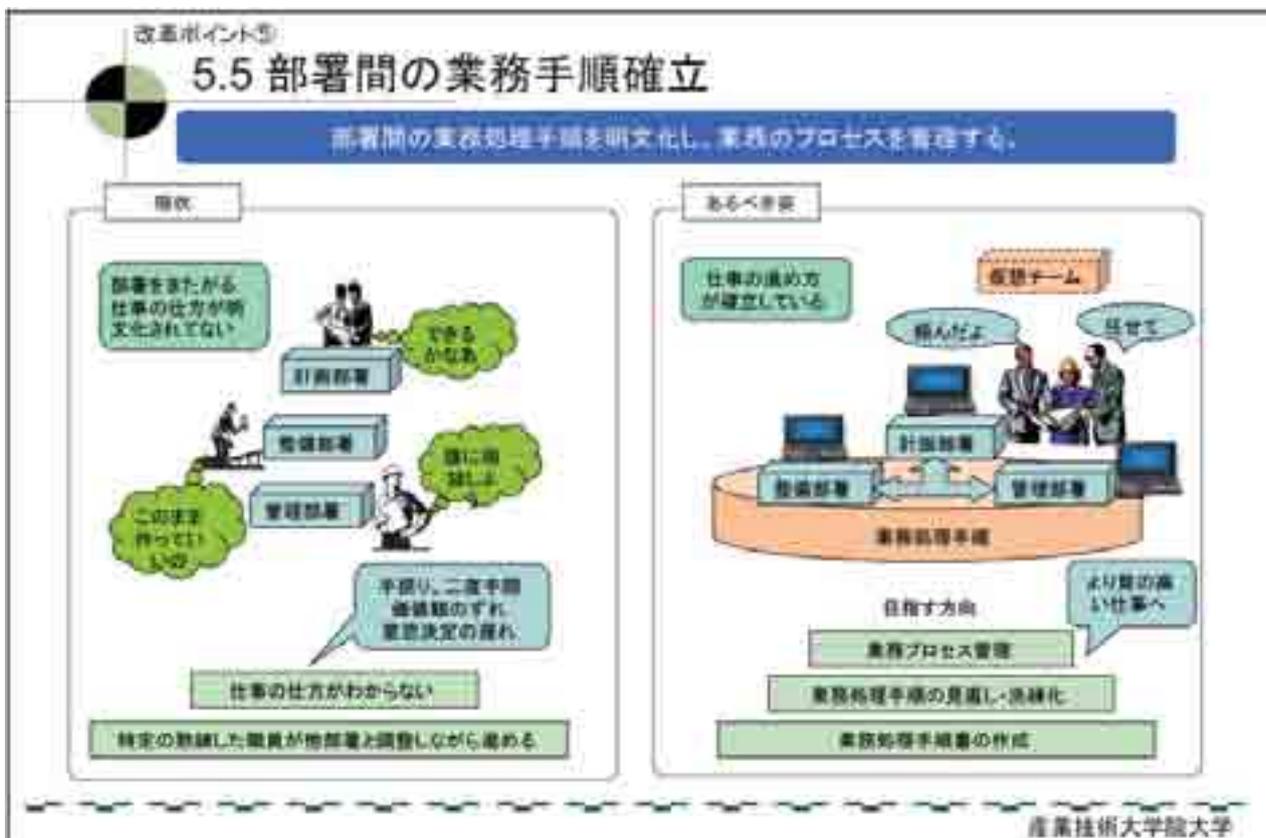


図 B-12

**まとめ**

**改革による業務の変化と効果**

- ・情報技術を活用した改革
- ・業務の効率化・スピードアップ
- ・顧客満足度の向上、サービスの向上

**港湾局全体での取り組みが肝要**

**改革の実施に向けて**

- ・事務事業改善委員会との連携
- ・プロジェクトの切り出し(改革ポイントを実現するためのプロジェクト化)
- ・基本計画の策定(プロジェクト計画、全体像のまとめ)




図 A-11

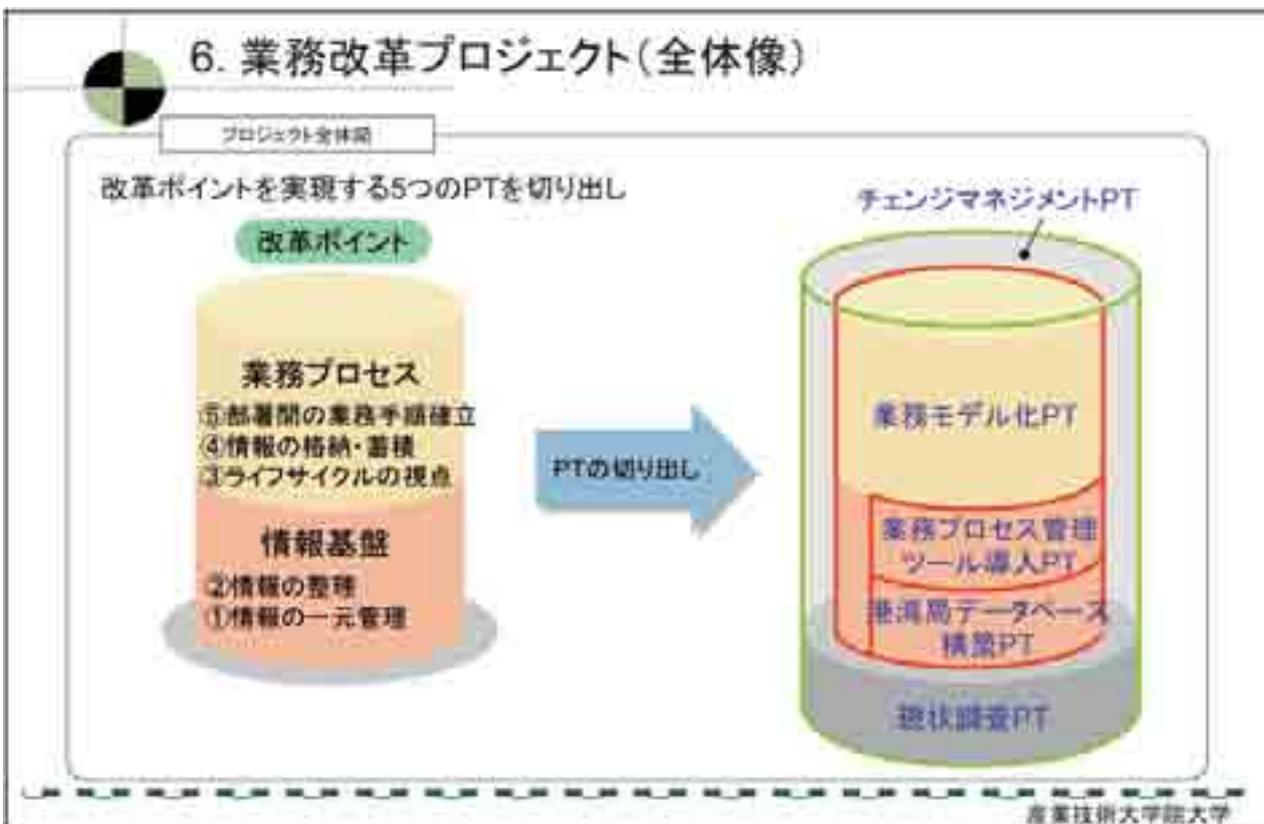


図 B-13

# 情報システムアーキテクチャと モデリングにもとづく SOA の設計

南波 幸雄\*

## Designing SOA Based on Information Systems Architecture and Modeling

Yukio Namba\*

### 概要

SOA が従来の実装中心の構築法ではなく、ビジネスプロセスの変化に柔軟に適合できることへの期待感から注目を集めている。本報告は、まず情報システムアーキテクチャの観点から、SOA はサービスプロバイダとサービスコンシューマとが、1対1の疎結合関係にあるパーティショニングを持つ構造を示すものであることを示す。そして SOA を設計するのに際して、サービスプロバイダはデータモデリングにもとづく、またサービスコンシューマはプロセスモデリングにもとづくべきであることを、簡単な実例をもとに解説する。

### Abstract

SOA now commands much public attention because of its features that can adapt the change of business processes. This report shows that SOA consists of service provider and service consumer with one by one loosely coupled relationship from the view-point of the information systems architecture. And it also shows that the service provider should be designed by data-modeling and the service consumer should be done by the process modeling. Finally this report includes the example to design SOA with primitive models in order to illustrate this concept.

### 1. はじめに

サービス指向アーキテクチャ (SOA:Service Oriented Architecture) が、新しい情報システム構築法として注目を集めている。従来の情報システムの観点からの実装中心の構築法に対して、SOA が、単位になるビジネスプロセスを組み合わせて、全体のシステムを構築できるということに対する期待からであろう。言い換えれば、ビジネス観点からの情報システム構築ができるという売り文句が、新鮮な感じを与えていることが大きい。その一方で安易な議論も多くある。たとえば、SOA の技術要素の一つではある ESB (Enterprise Service Bus) さえ導入すれば SOA が実現できるとか、Web サービスの BPEL のようなワークフロー・エンジンを導入すれば柔軟なシステム構築ができるというようなものである。

このような短絡した議論は、本来の技術の展開に対して場合によっては阻害要因になりうる。安易な期待感をあおりすぎると、その反動としての失望感が大きくなり、有効な技術の普及の眼を潰してしまう可能性があるからである。その意味でも、実像をきちんととらえた議論が

必要である。また SOA に関しての解説は多いが、その内容は部分は語られているが、全体を語っているものは少ないといえる。

以上の諸点を踏まえ本報告では、情報システムアーキテクチャの観点から、SOA とは何を意味するものかを論じる。SOA のアーキテクチャ的な側面を明らかにした上で、SOA に適したアプリケーションと適さないもの、SOA の展開における越えなければならない壁などについて考察する。その上で、SOA を設計するために必要なモデリングの考え方を提案し、これらにもとづく具体的な SOA の設計の方法論を示す。

### 2. SOA とは

#### 2.1 SOA 化の背景

経営側と情報システム部門の間には、情報システムの現状に対しての大きな見解の相違がある。経営側は「ビジネス環境の変化のスピードに情報システムが適応できていない」という不満がある。それに対して情報システム部門側からは、「そうは言われても、情報システムが

複雑化し、保守に膨大は費用と時間がかかるので、そう簡単に情報システムを拡張したり変更したりすることは困難である。そもそも情報システムが複雑化した最大の原因は、経営側の要請を実現するために、情報システムを改造し続けてきたことである」という主張になる。それが両者のせめぎあいになっている。

このような状況を打破する手段として、SOA に対す

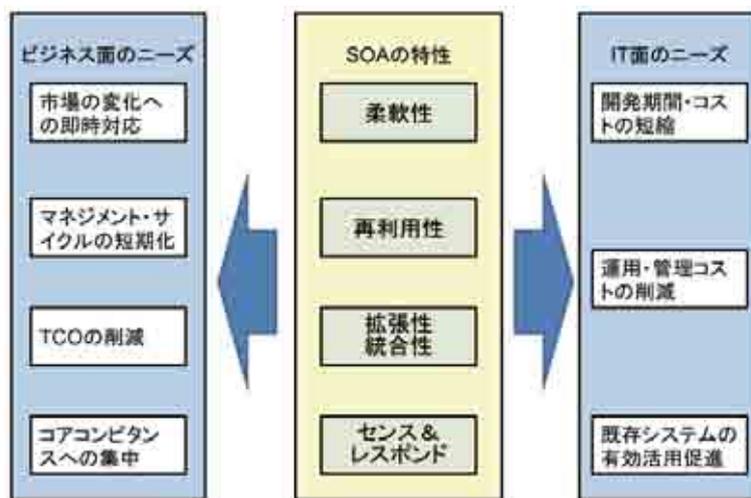


図1 SOAの価値

SOAの特性で示している各特性は以下のような内容を意味している。

- 柔軟性： サービス・コンポーネント単位の組み立て、組み換え
- 再利用性： サービス・コンポーネントの共通仕様、および既存システムのサービス・コンポーネント化
- 拡張性・統合性： 組織会社をまたがったアプリケーション間の連携
- センス & レスポンド： プロセス・イベントのモニターおよびイベント・取得のための標準基盤

SOAが話題になってきたのは、このようなシステム構築の考え方が提示されたことである。それに加えて、この前提になるネットワークの帯域、信頼性などを含めた情報システム基盤技術の性能が向上し、必要とされるメッセージ交換に耐えられる、信頼性の高い環境が提供できるようになってきたということも大きな要因である。

## 2.2 SOAとは何を意味するのか

SOAという用語については、1996年にGartner Group [たとえば1]がこの用語を用いたのが最初であろう。その時はSOAとは、「複数のアプリケーションの使用形態のなかで、組織がロジックやデータを共有・利用できるようにする多層コンピューティングの一形態」だと定義していた。その後各社でこの概念を継承し各社独自の定義をしている。たとえばIBM[2]は「SOAとは、

る関心が高くなってきた。これはSOAが、変化に継続的に対応できる柔軟性を持ち、旧システムの機能を生かしながら、あらたなビジネスプロセスに適合できる手段になりそうな概念(技術)だという期待感からである。図1は、IBMの資料[2]を元に書きなおしたものだが、このあたりの関係をよく表している。

コンピュータのソフトウェア機能を独立したサービスという単位で実装し、それらを組み合わせてシステムを作り上げる考え方」といっている。OASIS[3]は「SOAの設計とは、サービス・インタフェースとサービス間の相互作用について設計することである。SOAは異なったオーナーシップのドメインにより管理されている、分散されたケーパビリティを組織化し活用するパラダイムである」というように、より具体的なものになってきている。

しかし依然としてSOAという言葉の与える多義性・多様性による曖昧性は残っている。Shum & Buzen[4]は、SOAや都市計画などのメタファの価値を論じた論文を“SOA: State of Art or Same Old Architecture?”という表題で始めている。この表題は現在のSOAの状況を象徴している。まさに最先端の技術なのか、単に見かけだけを変えたものなのかという問いかけである。

このようにSOAは、多義性が高い用語であるので、本論の出発点としてまずその定義を明確にしなければならない。ガートナー日本の飯島[5]は、SOAは「業務として完結する機能としてのサービスと、サービスを要求して利用するサービスコンシューマ(クライアント)で構成されるアプリケーションソフトウェア・トポロジーであり、サービスとサービスコンシューマは1対1の疎結合関係を持つ」定義している。本論文の定義としては飯島のものを用いる。このように定義すると、SOAと混同して用いられるWebサービスは、SOAの一つの

実装形態としてとらえれば良い。

### 3. アーキテクチャとしての SOA

#### 3. 1 SOA の構成

SOA の構成は、図 2 にその関係を示すように、サー

ビスコンシューマとサービスプロバイダが、標準インタフェースを介して、1対1の疎結合で連携しているものである。SOA 基盤は、その間にあり、レジストリ機能やリポジトリ機能を提供する。それとともに、メディエーション機能やデータの変換機能、通信プロトコルの変換なども受け持つ。

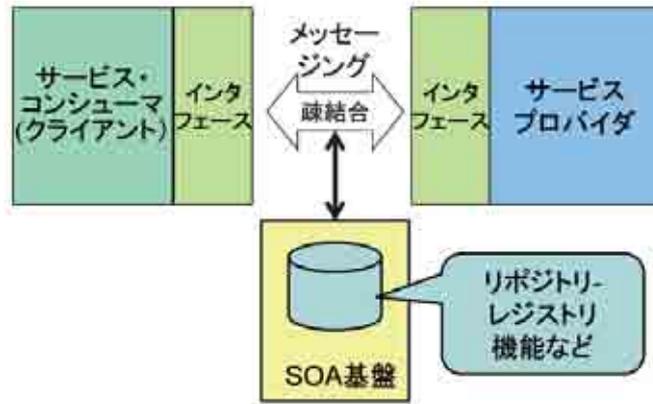


図 2 SOA の仕組み

#### 3. 2 パーティショニング

アーキテクチャの観点からは、アプリケーション・パーティショニングは、アプリケーション機能の論理的な配置である。図 3 に示すように、アプリケーション要素であるプレゼンテーション、ビジネスロジック、データの処理を、すべて一つの機能として集中化したものが集中

処理モデルになる。クライアントサーバー型の 2 階層モデルは、サーバー機能の中にサーバーロジックとデータベース処理を含み、クライアント機能の中にクライアントロジックとプレゼンテーション処理を含む形態である。3 階層モデルは、プレゼンテーションとビジネスロジック、データベース処理がそれぞれ独立した機能として論理的に分離している形態である。

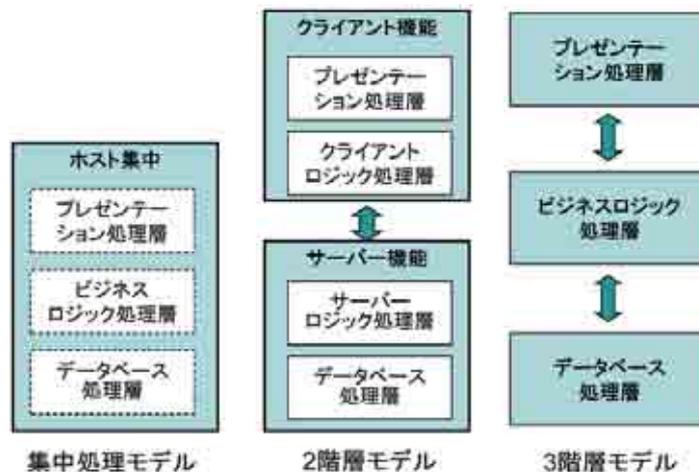


図 3 アプリケーション・パーティショニング

SOA をパーティショニングの観点よりみると、図 4 で示すように、2 層のクライアントサーバーモデルと同一のトポロジーを示している。クライアント機能がサー

ビスコンシューマに相当し、サーバー機能がサービスプロバイダに相当する形になる。そして両者の間に必要に応じて、SOA 基盤が介在する。

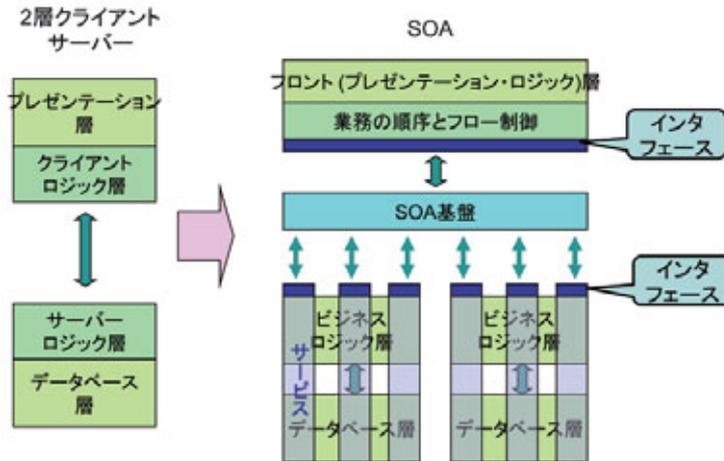


図4 パーティショニングと SOA

ここで通常の2層クライアントサーバーモデルとSOAとの相違点は、前者は同一アプリケーションであるのに対し、後者は必ずしも同一アプリケーションの枠に納まらない構成をとれることである。

必要な順序で、サービスを提供するサービスプロバイダにアクセスして実行するのが特徴である。そのため概念的には、サービスプロバイダはどこにあっても良いし、それぞれが異なったシステムであっても良いはずである。しかし、現実の情報システムに適用することを考えると、対象範囲の拡大とともに、越えなければならない壁がいくつか出てくる。SOAを適用する場合には、その対象範囲の拡大とともに、図5で示すような、いくつかの壁が現れてくる。

#### 4. SOA スコープの拡大

##### 4. 1 SOA 適応段階におけるアーキテクチャの壁

SOAは、サービスコンシューマが必要とする処理を、

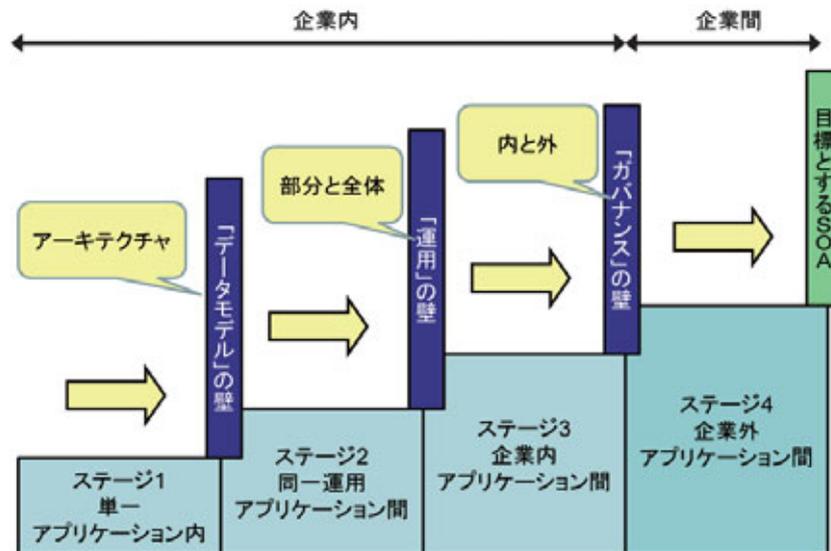


図5 SOA 展開における壁

ステージ1は、同一アプリケーションをSOAのパーティショニングで構築した場合である。この場合の考慮は、サービスプロバイダとサービスコンシューマとが、本来目指している役割分担（パーティショニング）されているかどうかと、サービスの粒度をどのレベルでそろえるかである。

ステージ2は、同一企業内の複数のアプリケーション間を、SOAの考え方で統合しようとする場合である。

ただしこの場合、運用体制は同一である。このステージにおいては、複数のアプリケーションにおけるデータモデルの相違によるデータの整合性が問題になってくる。とくに同じと思われるデータの、シンタックスとセマンティクスが同一であるように見えなければならない。このデータモデルの相違は、更新系のシステムにとっては致命的な問題になりえる。しかし参照系のシステムに適用する場合は、その限界をユーザーが理解して使用する

ことができれば、微妙な不一致に係る問題のデメリットを差し引いても、十分に有効なシステムになりえる。

またこの段階から、情報システム基盤の相違にもとづく問題も出てくる。サービスコンシューマが、アプリケーションをまたいでサービスプロバイダにアクセスしなければならないので、レジストリ情報が必要となる。またサービスコンシューマとサービスプロバイダ間の組み合わせ問題が起きてくると、ハブの機能も必要になってくる。

ステージ3は、企業内のすべてのシステムとの連携が、潜在的なターゲットになる。この場合は、運用管理体制の異なるシステムや、オーナーシップの異なるシステムとの連携が問題になってくる。これは例えば一方が24時間265日体制なのに対して、他方が毎晩バッチ処理を行うために夜間に数時間オンラインを停止するような、運用管理体制が異なる場合である。この空白時間帯に発生することが予想される問題に対して、どのように対処するかである。たとえば一方がサービスを呼び出そうとしても、他方がその状態にない時に、またはその逆に、サービス停止時間帯に送られてきたメッセージに対してどのように対処するかなどである。運用連携がスムーズにできていないと、障害なのか計画停止なのかも判別できなくなる。

このステージでは、ステージ2で問題になり始めた情報システム基盤の問題が、よりクローズアップされてくる。そのため各モジュールの独立性を確保し、疎結合を保つためにも、SOA基盤の整備が必要になってくる。

ステージ4になってくると、内と外の問題[6]が発生する。これは情報システム・ガバナンスの問題として顕在化する。障害が発生したり、何らかのエラーが発生したりした時に、どのように対処するかである。同一企業ならばガバナンスが効くので、最悪マネージメントの権威でなんとこすることも可能である。しかし企業外の場合は、このようなガバナンスは期待できないので、何らかの協定にもとづいた行動しかとれないし、相手に依頼もできないことになる。企業文化に係るような問題もあり得る。特定の問題に対しての、考え方や重要度、プライオリティの付け方なども異なってくる。

ステージ4の場合は、内と外の関係にもとづく、SLAのような事前の取り決めが重要になる。これはインタフェース規約やメッセージ規約、運用連携の取り決めなどを含まなければならない。その上生まれも育ちも、文化も異なる相手と接続する訳であるから、単純なアプリケーションでないかぎり、一定の確率でエラーが恒常的に発生することを前提にしなければならない。このためにはエラー処理も、異常系として扱うのではなく、正常系の一部として扱うようなシステム構成が必要になる。

## 4. 2 SOA ガバナンス

SOAの考え方の基本は、サービスオブジェクトとサービスコンシューマオブジェクトとを分離して配置することにより、サービスの再利用性を高めることである。それとともにサービスコンシューマをワークフローで再構成しやすくできる構造にすることにより、業務プロセスの変更に対して、柔軟に対応できることを合わせて狙っている。

再利用性を高める為にはサービス層は、サービスで使用されているデータの、セマンティクスが整合していることが条件になることは前述した。これを保証するためには、一緒に使用されるサービス間は、データモデルレベルでの同一性が必要になる。しかし実際には、生まれも育ちも異なるシステム間では、同一性が完全に保証されることはありえないので、最低限リポジトリ（データ・ディクショナリー）でデータの定義を明確にすることが求められる。またデータの更新規則についても、厳密に運用されないと、データの整合性が取れなくなってくる。

この部分のガバナンスが保証されないと、システム構築者は再利用することはリスクが伴うので、すべてのサービスを自身で独自に定義したものしか使わなくなってくる。そのためサービスの数が増大し、それに伴って管理されなくなってくる。こうなると設計者は、ますます他者の作ったサービスを再利用しなくなり、その結果とサービスの数が時間とともに増大し、スパゲッティ化を招くことになる。結局、アプリケーションスパゲッティやデータスパゲッティを回避するためにSOAを導入した結果が、サービススパゲッティで終わってしまうことになりかねない。

このような状況になることを避ける意味でも、サービスの管理に関しては、開発部門から独立した部門による厳密な管理が求められる。このあたりがSOAガバナンスの要点の一つになる。

## 5. SOA の設計とモデリング

### 5. 1 SOA とデータモデル

SOAを設計するときにモデリングは有効であり、かつ不可欠な手段になる。SOAにおいてはサービスをブラックボックスとして扱う。そのためには、サービスコンシューマが一連のプロセスとして定義するワークフローの中で、個別のサービス間で使用するデータのセマンティクスが一致していることが条件になる。

たとえば同じ「商品」といっても、営業は型番レベルのものを指し、製造は代替部品毎に付けた製品を指すような話はよくある。これらを区別して扱うためには、データモデルが同一かどうかを調べなければならない。識別

子が同一だったら、基本的に同一のデータと考えられる。そのためにもデータモデリングが重要である。それとともに、その情報を格納しておくデータ・ディクショナリーやリポジトリの整備と維持管理も同様に必須のこととなる。

SOA のモデリングは、サービスコンシューマではビジネスプロセスのモデリングを行い、サービスプロバイダではデータモデリングを行うことが合理的である。再利用を前提とするサービスプロバイダは、極力ビジネスプロセスの変化の影響を受けないことが望まれる。そのためには実世界を写像する概念データモデリングが適している。これに反してサービスコンシューマは、常時ビジネスプロセスの変更に柔軟に適合しなければならないため、ビジネスプロセスモデリングに従う必要がある。その上で、ビジネスプロセスの変化に適合して、柔軟に変更できるような仕組みがあるのが望ましい。

## 5.2 サービスプロバイダの設計

再利用性を前提にするサービスプロバイダの設計は、

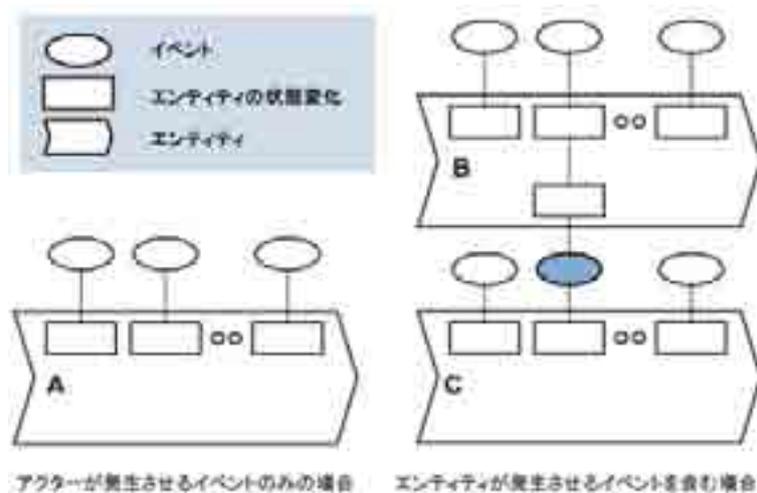


図6 サービスの設計単位

SOA においてサービスの独立性と、コンシューマとプロバイダーとの関係が1対1の疎結合であることを考えると、望ましいのは、サービスプロバイダはサービスコンシューマとのみ会話することである。これは図のAのようなケースである。しかし現実的には、Aのようなエンティティの状態遷移をとる場合は少なく、多くの場合はBとCとの関係のように、サービスがイベントを発生させて、他のサービスに働きかける。このような場合をどのように扱うかが要点になる。

大学の図書館を例にして、方法論を示す。図書館は学生や教員、職員などが蔵書を閲覧したり借りたりするところである。しかし同一の本が何冊かある場合、貸出ししたり閲覧したりするものは個別の本であるが、予約するときには個別の本を指定しない。同じ著者、書名の

ビジネスプロセスやビジネスモデルに依存するプロセスモデルでは達成できないため、実世界をデータモデルとしてマップした概念データモデルにもとづいて設計する。以下に概念データモデリングにもとづくサービスの設計について述べる。なお本論文における概念データモデリングに関しては、NPO 法人技術データ管理支援協会 (MASP) の方法論 [7] に準じる。

サービスプロバイダの設計は、もの (エンティティ) とものとの静的な関係を表す静的モデルおよびもの状態遷移を表現する動的モデルが出発点になる。これらをもとに、サービスを設計するに当たり、サービスの粒度をどの程度にするかが問題になる。あるエンティティの状態遷移 (図6) において、こと (イベント) を発生させるのがアクターだけの場合は、エンティティ A を単独でサービスにすることができる。図6のエンティティ B と C との関係のように、C の状態遷移を促すイベントが B により生成される場合がある。このような場合に、B と C とを一緒にしたものをサービスとして定義するのが自然である。

ものならば、どれを借りても内容は同一だからである。このようなことを考えながら静的モデルを書くと、図7のようになる。なおこの事例では分かりやすくするために、対象は本のみになっている。このモデルでは、「個別の本」は物理的な本を意味し、「本」は論理的に集約された同一書名、同一著者のものを意味している。

静的モデルの中のものである、「貸出された資料」についての動的モデルを書くと、図8が書ける。動的モデルは、ものが生成されてから消滅するまでのライフタイムにおいて、ことにより生起されるもの状態変化を記述する。通常動的モデルはもの毎に書くが、この図はものとの間でのやり取りを理解できるように、複数のものを1枚のモデルとして表している。

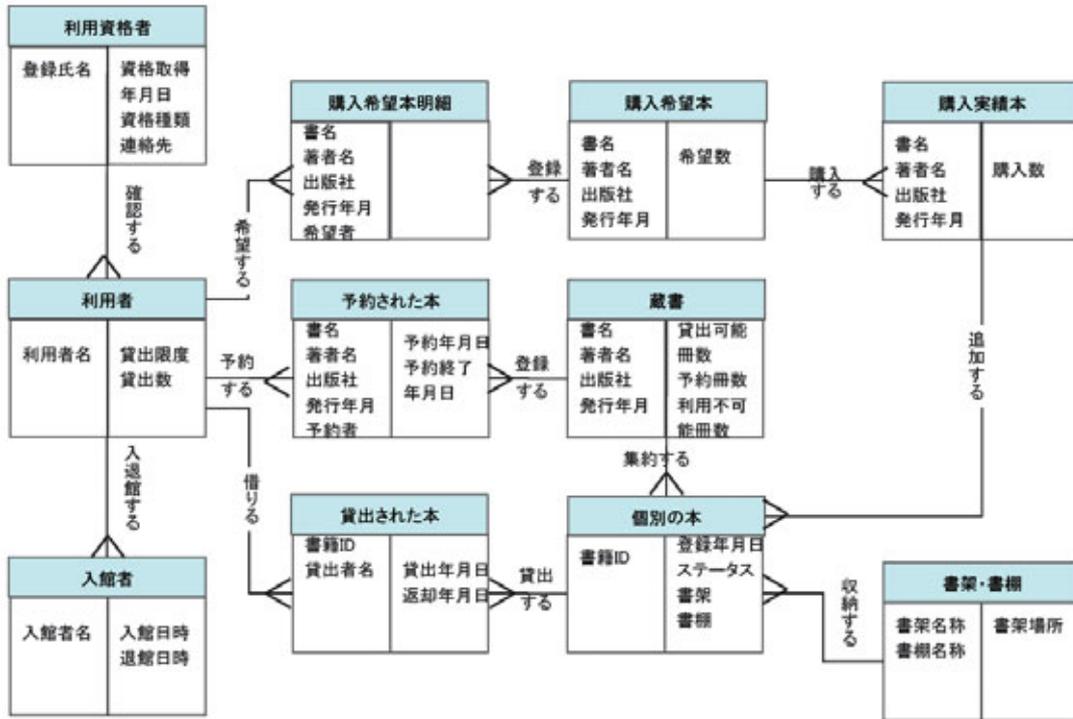


図7 図書館の静的モデル

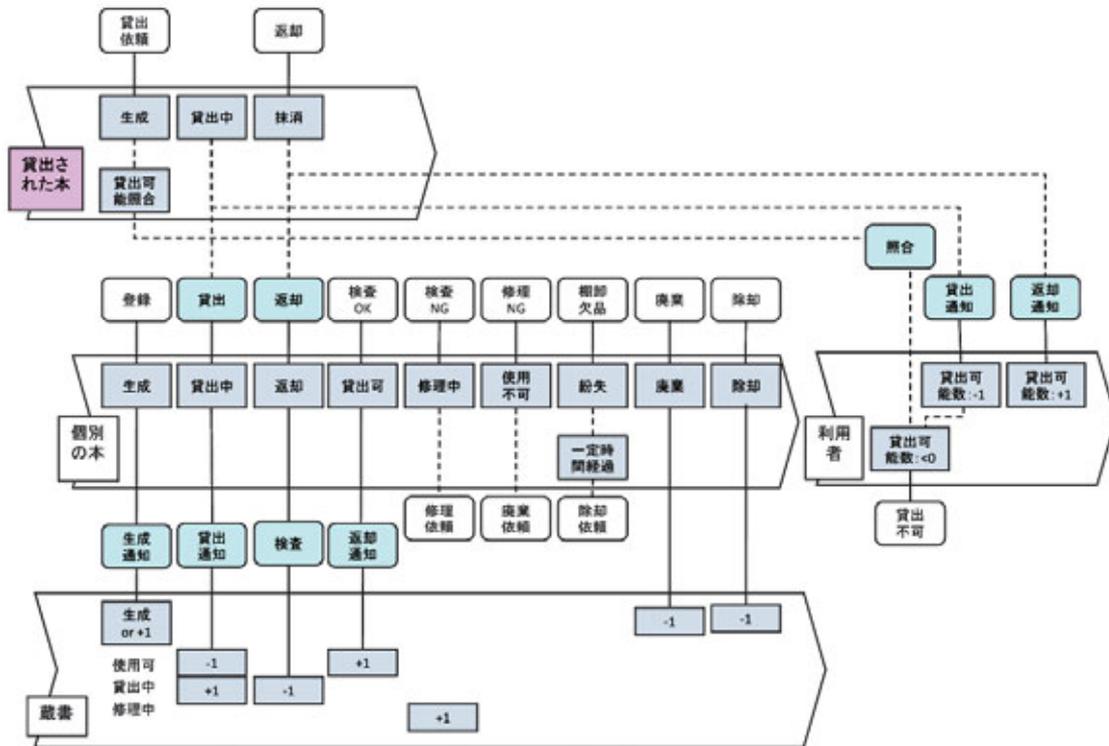


図8 図書館の動的モデルの一例

動的モデルにおいてことは、発生元がもの場合もある。これは、もの状態変化に対応して発生することである。図8においては、「貸し出された本」の貸出中の状態変化が、貸出のことを生成し、これが個別の本に働

きかける。これを受けた「個別の本」は貸出通知を生成し、蔵書の状態遷移を促す。このようにもの同士でも、お互いに状態遷移をさせあったりするのである。

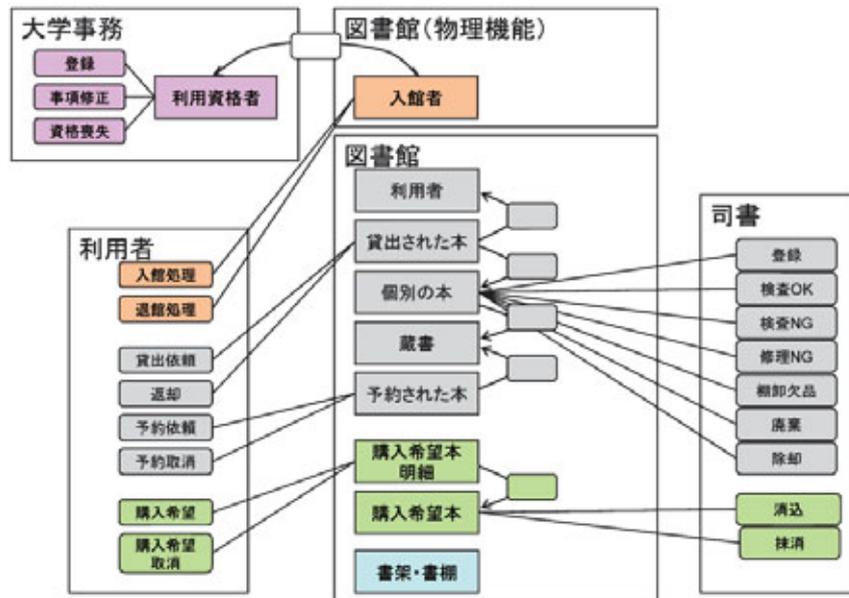


図9 サービスの分割

組織間連携モデルは、この発生元（アクター）を組織としてとらえ、各組織においてどのようなものを管理しているか、またどのようなことを発生しているかを表したものである。これはこととものがどのように連携しているかを表している。図8のような動的モデルをを総合して作成した組織間連携モデルを図9に示す。この

図においては、ものとのものとの間で発生することは、何も説明のない長方形で表し、詳細は省いている。このように分類すると図書館のサービスは、5種類に分類できる。これを整理すると、図10のようなサービスのグルーピングになる。

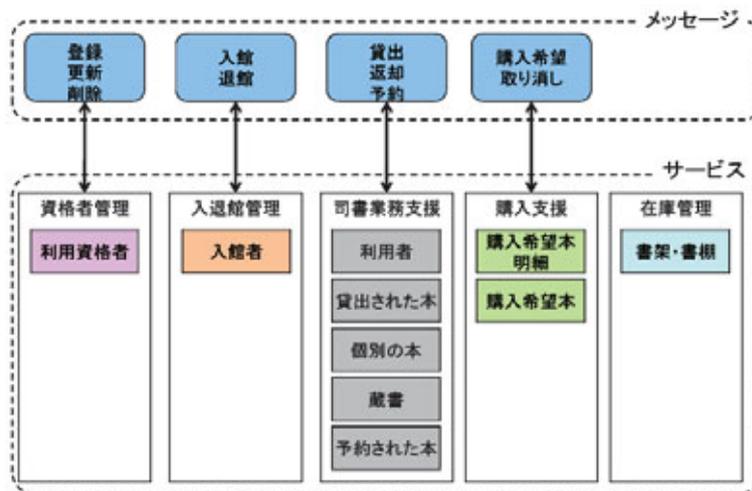


図10 サービスの設計

### 5.2 サービスコンシューマの設計

サービスコンシューマの設計においては、サービスの設計とは逆にプロセスモデルにもとづくべきである。これはSOAの特性を十二分に生かすために、業務プロセスの変更に柔軟に対応するためである。

サービスコンシューマの設計は、プロセスモデルが基本になる。図11に図書館の概念データモデルに対応す

るプロセスモデルとしてのアクティビティ図を示す。このアクティビティ図は、利用者と司書がアクターで、それらが図書館管理と入退館管理システムにアクセスして、業務を行うことを示している。ただし、これらのシステムは必ずしもコンピューター・システムであることは必要ではなく、モデルにあるシステム機能を満たしさえすれば人間系でもかまわない。

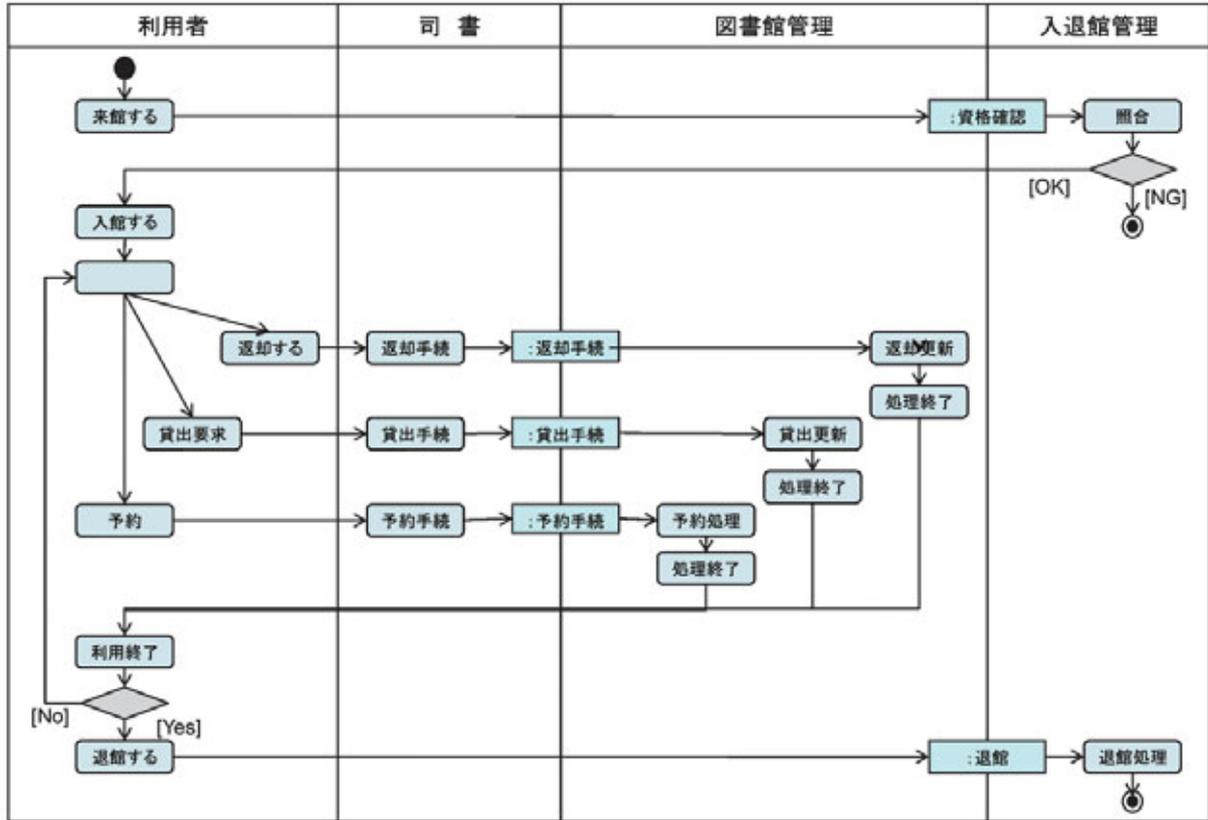


図 11 プロセスモデリング (アクティビティ図)

本来アクティビティ図は、アクターの行為を書くものである。システムは、利用者や司書の行為に従属しているのでレーンは書かないのが約束である。レーンは行為ごとに書くものであるため、この図は入退館の行為と、図書館内での利用行為とは別の図として表現すべきである。しかし今回は SOA の機能を分離し、フロントの一連のプロセスとバックエンドのシステムの動きを分けて書きたいのであえてこのような図を書いている。また実際には貸出処理において、蔵書の有無の確認および蔵書が貸出中で利用できない場合などの対応プロセスなどもある。本来これらも書かなければならないのであるが、図 11 では単純化して書いている。

図 11 でアクターがシステムに渡す依頼 (トークン) を、メッセージで置き換えて、仮想的な図書館管理サービスと入退館管理サービスに渡し、リターンを受け取ることにすると図 12 のようになる。この仕組みを前提とすれば、残るはビジネスプロセスに係る部分をプロセスモデルとして記述し、定義されたサービスに同様に定義されたメッセージを介してやり取りをすれば良いことになる。実際的には、ビジネスプロセス自体を、その時のワークフローですべて記述しようとする、今度は少し異なったビジネスプロセスも異なるワークフローになってしまう危険性がある。これが重なってくるとワークフロー・スパゲッティになりかねない。それを避けるため

には、ワークフローを抽象化してパターン化することが有効になる。実際セガ [7] では、現実システムの BPEL によるワークフロー設計において、この考え方を導入して効果をあげているといっている。

### 5.3 メッセージの設計

メッセージは、サービスコンシューマとサービスプロバイダの間のやり取りを受け持つ。その性質上、ビジネスプロセスの変更に柔軟に対応するためには、プロセスに依存してはならないことになる。そのためには前述したように、メッセージはサービスコンシューマから見ても、サービスプロバイダから見ても、概念スキーマに見えるのが望ましいことになる。しかも SOA の特徴である、疎結合を保証するためには、ステートレスのやり取りが望ましい。ステートレスでメッセージ交換するには、図 13 で示すような汎用化されたメッセージが必要である。これは一つのメッセージが、対象とするサービスが必要とする、すべてのデータ属性を持つことが求められることを意味する。

今回の図書館の事例の貸出処理において、「貸し出された本」の予約処理におけるメッセージは、は「予約された本」識別子の全属性を持っていれば十分である。その上で、メッセージ=トランザクションと考えて、トランザクションの正規化も考えることが必要である。そう

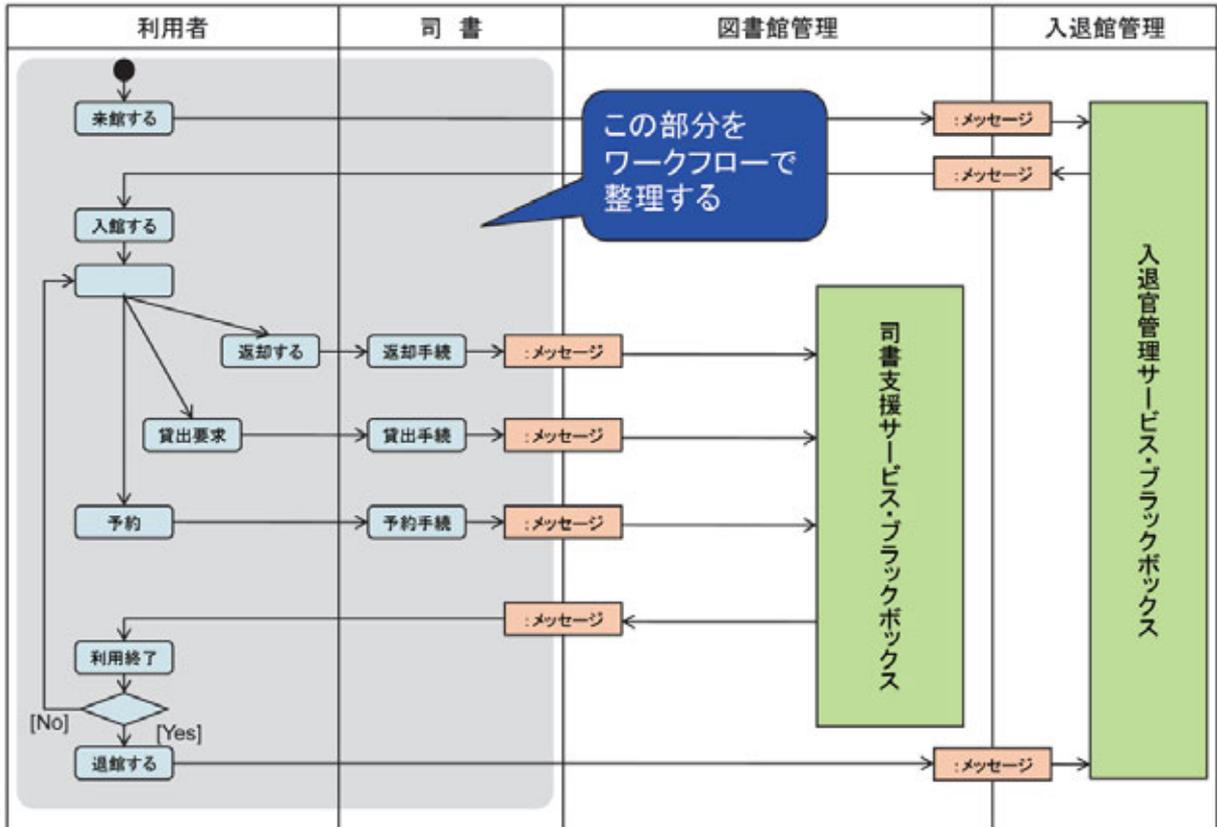


図 12 サービス・コンシューマーの設計

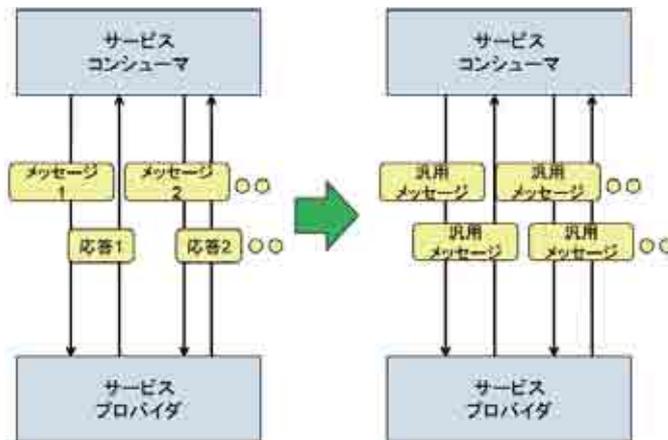


図 13 ステートレス

考えると「貸し出された本」や「予約された本」の概念データモデルのエンティティを、論理モデルとして正規化すれば良いという事になる。このように考えた上でメッセージを、「予約」、「予約変更」、「予約取消」などの機能ごとに分割するかどうかは、実装上の判断になる。

#### 5. 4 サービスの拡張

以上で単一アプリケーションを SOA で構築する場合の設計の考え方を述べた。次の問題は、ステージ 2 以上を目指したスコープの拡張である。ステージ 2 の壁は

データモデルの壁である。これを達成するには、対応するデータ間の関係においてデータモデル上の相違がないことが条件になる。その上で、シンタックスやシノニムの問題を、読み替えることが必要になる。これに関しましては、N 対 N の変換が求められるようなケースを除けば、変換テーブルを用いることにより実現できる。

ステージ 3 やステージ 4 を目指すには、運用の壁やガバナンスの壁を越えなければならない。このあたりの問題になってくると、図 14 で示す ESB のような共用基盤が有効になってくる。

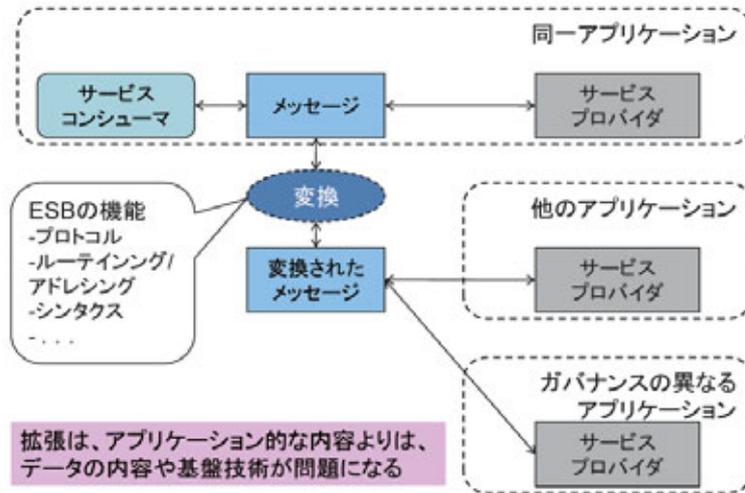


図 14 SOA の設計 (スコープの拡張)

### 5. 5 非機能要求について

非機能要求は、アプリケーションの機能要求以外のシステムの主として品質問題にかかわる要求である。SOA は、独立したパーティショニングのシステムであるが故の、非機能要求に係る問題が発生する。

まずパーティショニングした構成要素の独立性を維持するためには、共通インターフェースが必須になる。そもそも SOA はこのインターフェースにより、サービスをブラックボックス化するのが特徴である。しかしインターフェースを介すると、余分な機能を経由するため、一貫システムに比較すると処理性能の劣化が発生する。性能は通常、レスポンスとスループットで評価される。レスポンスはインターフェースを経由するため、その分悪化する。またスループットは、ボトルネックとなるインターフェースの性能に依存することとなる。これを実用上問題のない範囲に保つためには、運用管理において常にボトルネックを把握しておく必要がある。

SOA 基盤を導入することは、ある程度以上の規模においては必要になる。しかしこの冗長性設計ができていないと、シングルポイント・フェイリヤが発生する。これは SOA 基盤に何らかの異常や障害が発生した場合には、その影響が SOA 基盤を利用している全システムに及ぶことである。そのためには SOA 基盤は可用性設計を十分にしておく必要がある。

とくに性能問題による障害は、一般的にある一定レベル以上の負荷がかかると、突然発生することが多い。このためシステム管理においては、常に性能のボトルネックを把握し、必要に応じてパフォーマンス・チューニングや、場合によっては拡張できるように備えておくことが求められる。

### 6. おわりに

SOA は本来のアーキテクチャに従って設計、導入できれば、より柔軟性の高い、保守の容易なシステムになりえる。そのためのサービスおよびサービスコンシューマ、メッセージの設計は、必要とされるモデリングにもとづいていなければならない。サービスは概念データモデリングにもとづくべきであるし、サービスコンシューマはプロセスモデリングにもとづくべきである。その上で、メッセージは、両者から見た概念スキーマの役割を果たすべく設計しなければならない。それに加えて、トランザクションとしての正規化を意識すべきである。

本報告において、図書館を例に具体的なモデリングから SOA の設計を導く方法論を示した。いかに SOA の概念が優れ、周辺技術が充実していても、その元になるデータの整合性と、ビジネスプロセスの把握ができていなければ、ほとんどその効果は期待できない。そのために、ビジネスモデリングは重要であり有用な手段になりうる。

### 参考文献

- [1] Schulte, R., "Architecture and planning for modern application styles," Strategic Analysis Report, Gartner Group, April 1997.
- [2] 牧野あすか「SOA 入門：第 1 回 SOA って何?」. <http://www-06.ibm.com/jp/software/websphere/developer/soa/1.html>
- [3] OASIS "Reference Model for Service Oriented Architecture 1.0," OASIS Standard, 12 October 2006. <http://docs.oasis-open.org/soa-rm/v1.0/soa-rm.pdf>

- [4] Annie Shum & Jeff Buzen “SOA, City Planning, and Other Metaphors - Why Meta Matters,” Dec. 2005.
- [5] 飯島公彦「テクノロジー中心に進めると SOA が本来持つメリットが発揮できない」, pp.106-109, ビジネスコミュニケーション, Vol.42, No.2, 2005.
- [6] Namba,Y. “City Planning Approach for Enterprise Information Systems,” Bulletin of Advanced Institute of Industrial Technology, Vol.1, pp.49-62, 2008.
- [7] 特定非営利法人 技術データ管理支援協会：概念データモデリング  
[http://www.masp-assoc.org/katsudo/list1\\_Association.html](http://www.masp-assoc.org/katsudo/list1_Association.html)
- [8] 松田雅幸「勇気・業務目線・疎結合を合言葉に, 変化に柔軟な IT 構築を実現しよう」, ガートナー SOA サミット 2008 講演資料, 2008.

# 高齢化社会における快適生活ネットワーク空間の技術展望

橋本 洋志\*

## Perspective of Comfortable Living Network Space in Aging Society

Hioroshi Hashimoto\*

### Abstract

The High-technology Research Center HRC in Tokyo University of Technolog, in which I have standing the position of the project leader, promotes the research project which is development of creating technologies on comfortable life network space for elderly. This paper introduces the supporting technologies, which are the parts of the results of this project., to creative comfortable life space for elderly.

Keywords: life support technology, comfortable life space, supporting elderly, assistive robot technology, cybernetics, huma-machine interface

### 1. はじめに

活力と楽しみに満ちた高齢化社会を築き、高齢者が安全・安心・快適に生活が行えるためには、高齢者同士のみならず高齢者と若者が連携を深め、生活空間を共有できることが必要である。しかし、高齢者は身体的機能低下や新しい技術への心理的バリアーなどの要因から楽しみある生活空間を他者と共有しにくいのが実情である。このため、対面的なコミュニケーションだけでなく、空間的に離れた人同士がネットワークを介して知識活動や運動活動が行われる生活空間を共有できる社会基盤が、社会活動の機会の少ない高齢者に対してこそ必須である。このような社会基盤を本研究では快適生活ネットワーク空間と呼ぶ。

このような空間を形成することは、我が国にとって重要であるという位置づけにおいて、本研究は、文部科学省私立大学高度化推進事業の中でも革新的技術開発の拠点を与えるハイテクリサーチセンター平成15年度～平成20年度の設置を東京工科大学におくことを認可し、本プロジェクトが5年間に渡り実施された。

本プロジェクトは、情報技術、ネットワーク技術、メカトロニクス技術、スポーツ運動学、スポーツインストラクション学、遠隔教育学、医用工学、生体工学、人間工学、認知科学、など多様な分野の研究者により、高齢者が容易に利用できる快適生活ネットワーク空間創成技術の確立をめざす。特に、多摩地区のITボランティア団体と関係して研究を進め、その成果を地域に還元する

ために、本大学内に「高齢者快適生活ネットワーク空間研究センター」を設けた。主な研究分野は、快適生活ネットワーク空間の基盤をなすネットワーク技術とヒューマンインストラクション技術、その応用としてネットワーク介在型メカトロニクスを駆使したハイテク運動インストラクション技術と遠隔コラボレーション作業支援技術である。スタッフは教員15名、外部共同研究機関1名、大学院生39名である。このうち、筆者は後者のサブプロジェクトリーダーとして、研究遂行の統括を行い、幾つかの研究成果を輩出したのでそれを述べる。

### 2. プロジェクトの概要

プロジェクトは、大きく二つのプロジェクト、ヒューマンセンタードネットワーク研究開発サブプロジェクトとヒューマンセンタードメカトロニクス研究開発サブプロジェクトに分かれ、両者とも、人間中心型のネットワークおよびメカトロニクスの革新的基盤技術を確立し、その応用例の新機軸を模索し、この実成果を通して世に新たなネットワークおよびメカトロニクスと社会の在り方の提言を行う。それぞれのプロジェクトの概要を以下に述べる。

#### 2.1 ヒューマンセンタードネットワーク研究開発サブプロジェクト

##### I-1 リアリティ伝達ネットワーク

高齢者が利用しやすく、かつ利用したいと思うように、

人のあらゆる感性や情景など生活空間のリアリティまでを伝達できる、ヒューマンインタフェース、フレキシブルIPネットワークング技術、オプティカルネットワーク技術の研究開発を行う。

#### I-2 ヒューマンインストラクションエージェント

テレビのような簡単な操作でネットワークの利用を可能とするヒューマンメディアプラットフォーム、ワイヤレス技術により家庭内情報機器を簡単瞬時にネットワークに組み込めるワイヤレスソフトウェア接続技術、ネットワーク利用者の状態を学習し最も適したヒューマンインタフェースを自動的に提供する技術の研究開発を行う。

#### I-3 バリアフリーネットワーク社会

ネットワーク社会における弱者である高齢者がネットワーク参加できるための生活空間とネットワーク空間のバリアフリーネットワーク社会構成条件の調査研究を行う。

### 2.2 ヒューマンセンタードメカトロニクス研究開発サブプロジェクト

#### II-1 人間動作自律型モデリング

高齢者向け運動インストラクションや遠隔コラボレーション作業における動作規範を示すためのもので、3次元位置情報に基づく運動機能筋運動、骨格運動の3次元自動計測とその自律運動性を有した高齢者用の自律的に動作するモデルの研究開発を行う。

#### II-2 ハイテク運動インストラクション

高齢者が安心・快適に運動やスポーツを習えることを支援する技術。ネットワークを介した生理機能である呼吸、汗、脈拍、瞳孔などの遠隔モニタリングを行いながら、メカトロニクス機器と人間動作自律型モデルを用いた運動やスポーツの身的矯正技術とデジタルインストラクション技術、および安全・安心・快適さを利用者に提供するウォーキングサポートロボットの研究開発を行う。

#### II-3 遠隔コラボレーション作業支援システム

遠隔地に分散している高齢者同志や若者がネットワークを通して参加して、行動を伴う活動のコラボレーション作業を支援するため、力感の相互作用を伴う分散配置協調型メカトロニクス技術の研究開発を行う。

### 3. 研究施設

本プロジェクトの研究施設床面積：合計 210 平方メートルの施設概要を述べる。

#### 3.1 生理機能計測設備

運動時における生理情報計測システムとして必須の設備である。人間活動とその生理反応の関連性の調査研究

を目的とする。生理反応として、心拍、脈波、脳波などの生体情報をリアルタイムで計測・伝送して、コンピュータにおいてデータ処理を行える計測設備である。現在、多数の研究項目で共通的に使われている。利用時間数：週 20 時間

#### 3.2 トラフィック優先順位付き IP ネットワークシステム

MPLS (MultiProtocol Label Switching) ルータとトラフィック生成・測定装置からなる。本設備を用いて MPLS 網の明示的ラベルスイッチパス網を構築し、優先制御により、帯域予約型ネットワークと同等条件を実現できるようにした。提案した高精細画像など大量の情報を効率よく伝達できるプロトコルを Linux OS の TCP に実装し、トラフィック生成装置で擬似トラフィックを発生させることにより、ネットワークに輻輳状態を発生させ、各種条件の下で提案したプロトコルの性能評価を行った。また、ヒューマンメディアプラットフォームを構成する各種映像装置類を本ネットワークに接続し、品質制御法の実験を行っている。利用時間数：週 20 時間。

#### 3.3 ヒューマンメディアプラットフォーム

超高精細画像システム、プラズマディスプレイ、映像・音声入出力装置、管理・計測・制御 PC 等で構成されている。ヒューマンメディアプラットフォーム上で快適生活ネットワーク空間のモデルシステムの構築作業を行った。

1 ヒューマンインストラクションエージェントの研究の開発環境として利用し、紙面データをテレビ番組化するシステムを構築し、高齢者が使いやすいヒューマンインタフェースの評価実験に用いている。

2 安心・安全生活のためのセンサ活用技術の開発環境として利用し、RFID を利用した想起支援システムを構築し、システムの評価を行っている。

3 超高精細画像システムを用いてバーチャルツアーなど高齢者に喜ばれるサービスの開発を行っている。利用時間数：週 30 時間。

#### 3.4 人体動作計測設備

運動・スポーツの動き計測システムからなり、人間動作モデル構築のため、人体生体計測室内での人間移動動作の3次元位置情報計測を行うことを目的とした設備である。この計測ルームでは、大別して2種類オプティカルセンサ Hiball、超音波線センサ IS900 方式の計測方法

を有する。

精度は、オプティカルセンサ方式は3次元位置について0.5mmRMS, 方位角について0.03degRMS, 超音波センサ方式では4mmRMS, 0.2degRMSである。両方のセンサの総数は2000個である。

移動物体に取り付けられる移動用センサは6個であり、これらは同時に使用できる。電源ON時に全てのセンサ位置の自動キャリブレーションを行う。

センシング時に全てのセンサをアクティブにすることは、信号線の配線, I/O処理能力, CPU計算負荷の観点から現実的でない。そのため、アクティブにするのは少数のセンサのみとしたいため、移動センサを追従するのにカルマンフィルタを用いた予測追従方式を導入したという特徴を有する。利用時間数：週30時間。

### 3. 5 人体動作計測設備と手のサイバーメカトロニクス機器

遠隔コラボレーション作業支援のため手の動作位置検出と力触覚を与える研究に必須の機器である。手の動作として、指の角度などを22箇所センサで計測し、弓道のインストラクションのための動作解析、インテリジェント歩行器における手の握り具合、空間メモリを用いた高度活動支援技術の研究における指差し表現などの動きの解析と特徴量抽出に使用される。これらの手の動作解析の知見をもとに、手の接触を伴うスポーツなどの運動における遠隔コラボレーションの研究に使われる。利用時間数：週30時間。

## 4. 研究成果

本節では、ヒューマンセンタードメカトロニクス研究開発サブプロジェクトの研究成果の一部を述べる。

### 4. 1 身体動作操作に基づく電動車椅子

#### 4. 1. 1 研究の背景と目的

脚の運動機能が低下し、歩行が困難になった場合、一般的に歩行に代わる移動機能として車椅子が用いられる。この際、上肢の運動機能が少なく手駆動により駆動力を発生できない、あるいは上肢を柔軟に動作できない場合には電動型車椅子を利用する機会が多い。一般的な電動型車椅子は、ジョイスティックにより間接的に車輪の駆動を操作する。ユーザはジョイスティックを移動したい方向に倒すことで車椅子を操作する。このとき、ユーザはジョイスティックを操作するために、手首を柔軟に動作させる必要に迫られる。しかし、電動型車椅子を使用するユーザは、手首を柔軟かつ複雑に動かすことが困

難である場合が多い。つまり、従来の電動型車椅子の操作方法は、運動機能が低下しているユーザには不向きであると言える。

そこで、本研究は、ジョイスティックに代わる操作器を持たせた電動車椅子の開発を目的とする。具体的には、ユーザの身体動作を用いることで、簡便な電動車椅子の操作を実現する。

#### 4. 1. 2 システム概要

脚の上半身の傾きを推定するために、重心の動揺を利用する。上半身の傾斜は傾斜計を身体に装着すれば計測可能であるが、ユーザの負担軽減から無拘束に測定するほうが望ましい。そのため、車椅子の座面の圧力分布図1から重心動揺を算出し、上半身の傾斜を推定する。

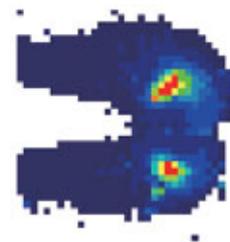


図1 着座時の座面の圧力分布

本システムは、市販の普及型車椅子に電動モータユニットを取り付けた車椅子をベースに構築された。図2が本システムの外観である。また図3がシステム構成図である。



図2 開発した電動車椅子

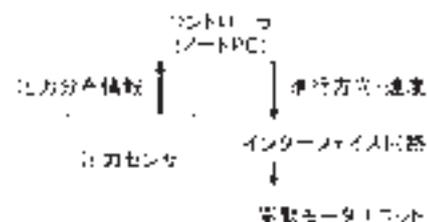


図3 システム構成

コントローラが圧力センサから座面の圧力分布情報を入力し、それに基づいて重心動揺を算出する。そして、

その動揺量から、ユーザの意図する進行方向と速度を導きだし、インターフェイス回路を通じ電動モータユニットにその情報が送られ、車椅子が移動する。

#### 4.1.3 期待される効果

本システムの特徴は、身体動作を利用することで、直感的に電動車椅子を操作できる点にある。ユーザは所望の方向と速度を上半身を傾げることによりシステムに伝えることが可能である。よって、電動車椅子の操作の簡便化が図られる。このことにより、ユーザの移動の機会が増え、本システムがユーザのQOLの向上に寄与することが期待される。

### 4.2 高齢者の知的活動を支援する遠隔研修・実習システム

#### 4.2.1 目的

技術者は、工学の専門的、先端的知識を身につけるだけでなく、組織の中でもものづくりをしてはじめて一人前の技術者になるものである。これは、ものづくりが自己の狭い専門分野だけではなく、工学の多分野の知識や技術を必要としており、チームという組織で必要な知識を共有する仕組みがあって成り立つものであることを物語っている。団塊世代の大量退職で技術者不足という時代を迎えているが、経験豊富な高齢者が現場を離れたあとでも、その経験を特定の組織の内部だけでなく、あらゆる角度から若い技術者を支援できることは、技術者を育てることににおいても、また高齢者自身の社会への貢献という豊かな生活感を得ることができる点でも有用であると考えられる。

一方、コンピュータ技術の発達により、物理現象がかなり正確にシミュレーションできるようになり、ものづくりにおいても、シミュレーションに基づいて製造工程に至ることが一般的である。一人前の技術者になるためには、理論的な知識とともに、常に批判的に実物を観察し、その本質を理解するトレーニングが欠かせないが、今日では、学習時間、実験スペースの確保の点から、座学およびシミュレーションに重点を置き、実物を用いた実験時間は少なくなる傾向がある。

本研究では、このような高齢者の若い技術者への支援という観点と、身近に実験装置がなくても実機のデータを収集できる環境を構築するという観点から、遠隔研修・実習システムの開発を行なった。

#### 4.2.2 リモートラボラトリ

本研究では、ロボットなどのメカトロシステムの基本技術であるばかりでなく、プラント産業やコンピュータ

ネットワークなどあらゆるシステムの基本技術と考えられている制御技術を習得するシステムを構築した。制御技術の学習においては、シミュレーションではうまく制御できても実機に実装するとうまくいかないという、実機に適用してはじめて気がつくなぜという問題発見・解決型の学習が大切である。しかし、必ずしもすべての学習者が手元に実機を置いて、このような学習ができるとは限らないので、本研究では、図4に示すように、インターネットを利用した遠隔実験システムリモートラボラトリを構築した。



図4 リモートラボラトリシステム

これは、学習者がインターネットを利用して実験システムにアクセスし、学習者自身の設計した値で実機を動作させ、その応答を手元のシミュレーション結果と比較するシステムである。これを学習のためのe-learningシステムに組み込むことにより、独学で学習できるとともに、結果を高齢者などの熟練者や他の学習者とWeb上で議論することにより、より効果的に学習することができる。システムの構成図を図5に示す。

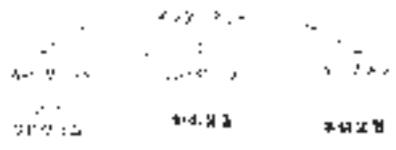


図5 リモートラボラトリの構成図

実験装置を制御するコントローラ、実験状況を配信するWebカメラ、テキストや議論をサポートするWebサーバから構成されている。本研究で学習対象とした実験装置は、

- 1 フィードバック制御の基礎学習としてのアームロボット装置図6写真1
- 2 アドバンスド制御の基礎学習としての倒立振り子装置図6写真2
- 3 制御アルゴリズムの実装技術学習としての組込みの3つである。

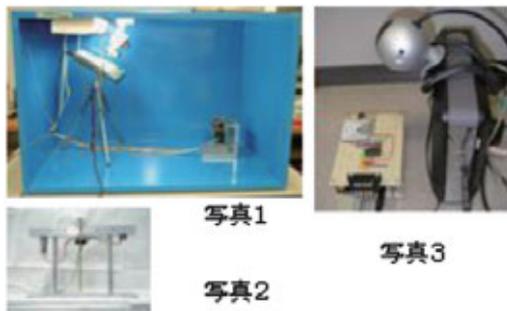


図6 ラボの各要素

1と2では、制御系設計におけるシミュレーションと実験応答の差が体験できることを主眼とし、3においては、組み込みシステムにプログラムを実装するときの動作確認が体験できることを主眼とした。

#### 4.2.3 運用結果

大学の講義で運用した結果では、意図した「応答の差の理由がわからない」「画面上で実物が動くことで実感が沸く」などの意見が多かった。今後、一般学習者向けに適用し、マルチメディアを利用した受身的な学習だけでなく、実験を通してその結果を学習者および講師がWeb上で議論をするという能動的な学習ができ、かつまた場所と時間の制約にとらわれずに技術者がコラボレーションのトレーニングを行なえるシステムとして活用していく。特に、高齢者が経験ある講師として学習者を支援することは学習する技術者にとって重要であるが、一方で高齢者自身が学習者となって未知の技術を学ぶことも高齢者にとって有用であると考えられる。

### 4.3 人間行動の伝達特性の同定とその応用

#### 4.3.1 目的

本研究では倒立振子の安定化を対象として、人間行動の伝達特性、すなわち入力である視覚から出力である手先の運動までの伝達関数を同定し、それをもとにスキルレベルの評価手法の提案、およびスキルレベルの向上手法を提案することを目的とした。

#### 4.3.2 人間行動のモデル化とスキルレベルとの関連性

伝達特性の同定には、一軸の倒立振子装置の物理モデルを用いたシミュレータを使用し、20名の成人男性の被験者による測定実験図7を行った。その結果、倒立振子安定化作業におけるスキルレベルが特定周波数におけるゲインと相関が高いことを明らかにした。通常、あるタスクの上手・下手のような評価を伝達特性から見出すことは行われないが、本研究によってこの点に関して新たな知見が得られたといえる。

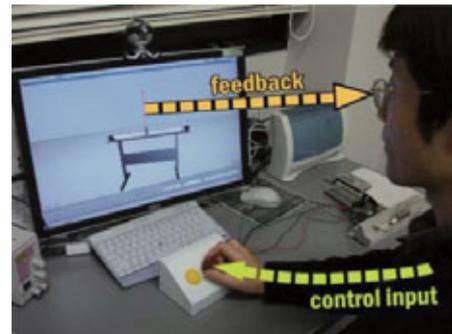


図7 伝達特性同定実験

#### 4.3.3 伝達特性補償に基づく新しいスキル向上手法の提案

4.3.2で述べたスキルレベルを伝達特性から推定する手法を逆に用いて、スキルレベルの向上手法として能力発現器の提案を行った。提案する手法は次のとおりである。まず対象とするタスクに優れた者に特徴的な伝達特性を明らかにする。次に一般的な制御理論の手法に基づき、その特徴を増幅させるような補償器を、人間に前置するかたちで設計する(図8)。すると対象タスクが不得手な者も、この補償器を用いることで一定のスキルレベルの向上を達成する。

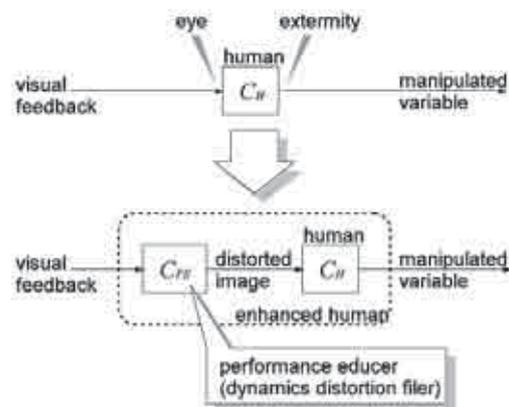


図8 提案した能力発現器のブロック線図

実際に本研究では、上述の結果に基づいた視覚歪曲式的能力発現器を設計し、実験を行ったところ十分なスキルレベルの向上が見られた。スキルレベルの向上は、タスクが不得手な被験者のみならず、もともと十分な能力を持つ被験者もさらにスコアが向上するという効果として現れた。

本研究で提案した能力発現器は人間の能力を向上させるものであるが、いわゆるトレーニングとは明確に異なる特徴を持つ。第1に能力発現器は使用すると直ちに効果が現れる。第2に使用停止とともに効果は直ちになくなる。第3に使用者は相当な努力と労力を強いられる。これらの特徴はまた、従来人間=機械系で提案されてきた「人間を補助し、楽をさせる」という思想とは対

極的なものとも考えられる。高齢社会を迎えた今日、本研究によって、望ましい結果を得るために人間に努力や労力を促すという、機械システムの新しい提案ができたと考える。

#### 4. 4 健康増進車

##### 4. 4. 1 研究概要

高齢者の移動支援のために、様々な電動車が開発され市販されている。しかし、長期間にわたり電動車を使用すると、足を動かさなくなるため、歩行能力の低下を引き起こす恐れがある。

本研究では、移動手段とトレーニング機能を融合した新しいコンセプトの電動車を開発した図9。システム構築において、まず、高齢者に適宜な刺激を与えるために、回転型ペダルと負荷モータからなるペダルユニットを市販の電動カートに取り付け、ペダルを漕ぐ速度に応じて電動カートが移動するように、マスタースレーブシステムを構築する。ドライブのリアリティを実感させるために、ペダルに印加される負荷は路状に応じるものにし、また、主観的運動強度、カルボーネン法と負荷試験によりペダルに印加する最大負荷を決定し、それをもとに、搭乗者の身体状況に応じた負荷をペダルに印加するように負荷印加システムを構築した。電動カートの運転システム設計において、搭乗者の体重変動の影響および人間の乗り心地などを考慮するために、 $H\infty$ 制御理論を用いてシステムを設計した。開発した電動車をいろいろの環境でテスト走行し、その有効性を確認する。

##### 4. 4. 2 得られた成果

本研究に関して、本年度では以下の成果が得られた。

- 等価入力外乱という新しい概念を提案し、それに基づく新しいサーボ系の構造を提案した。
- 等価入力外乱手法をビーグルの操舵系に応用し、ロ

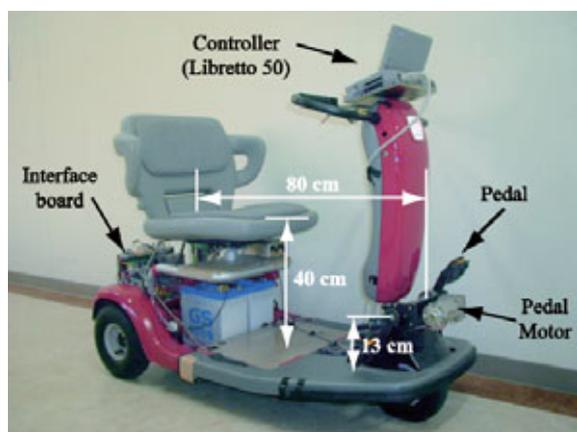


図9 本研究で開発した新しいコンセプトの電動車

バスト操舵制御系を構築した。

- 運動能力の維持・増進手段について検討し、ペダリングの有効性を実験により検証した。
- $H\infty$ 制御理論を用いて電動カートの運転システムを設計した。
- 主観的運動強度、カルボーネン法と負荷試験によりペダルに印加する最大負荷を決定するアルゴリズムを確定した。

#### 5. おわりに

本研究組織で共同研究プロジェクトを推進したことの意義は次のとおりである。

本研究プロジェクトの推進により多様な工学者、スポーツ運動学者、高齢者向けITボランティア団体などの連携により、今後の日本にとって重要な活力ある高齢者社会を実現する快適生活ネットワーク空間設計のガイドラインを先駆的に作成し、研究成果一般公開会1~2回/年、一般人対象、300~500人/回の実績を行い、その成果を提示できた。

社会が要望している真に高齢者に活力と楽しみを提供できる新技術の具現化という社会使命は、本研究組織が有しているような実行力の高かつ学際領域にまたがっている研究組織があり、かつ国内有数のITインフラや映像スタジオ環境をはじめとして、移動ロボットや画像解析施設などの機器が利用できる状態に整備を行い、本プロジェクト内容に関して我が国の拠点として地位を確立した。

大学がある八王子という地域は、ITボランティア活動などに積極的な知的高齢者が多いという地域性を有している。また、大学キャンパスは広大であり、かつ大規模住宅街の近隣に位置していることから、地域ボランティアを多数受け入れやすいという条件を有効活用して、多摩地区高齢者NPO団体のみならず、本研究成果は、子供から一般人にも有用であり、誰でもが活用できるという地域貢献を図った。

以上のことを総合的に研究開発およびその成果の高齢化社会への還元を定期的に行った結果、従来の技術が若者向け重視だったものを生体機能が低下した高齢者向けに視点を向け、これまで気付かなかった人間の活動様式を新たに見直す機会を得て、そこから真に高齢者に優しい技術の見直しを行うのみならず、新たな活動様式スローフードに類似したスローライフなどの提言を国内外に発信を行った。

他の研究成果として、高齢者のワンアクションプロブレム、機器の操作に関するアクセシビリティの定量的表現法、安心・安全ITステッキ、高齢者のためのペーパー

自動読み上げ機, 光ファイバ型防犯システム, 薔薇のにおいセンサ, バーチャルトラベル用高品質画像通信プロトコル技術, などの成果を生み出した。

紹介した研究成果の詳細, および, 他の研究成果については, 次の研究業績を参照されたい。

## 研究業績

### 【査読付き論文】

- [1] 石井, 橋本: 把握物およびオペレータの不確かさとアクチュエータの電気的特性を考慮したマスター・スレイブマニピュレータのロバスト制御, 日本機械学会論文集 C 編, 69 巻, 683 号, pp.1851-1857, 2003
- [2] D. Kurabayashi, K. Noda, H. Asama, K. Kawabata, H. Kaetsu and H. Hashimoto: Information Assistance for search and Rescue by Intelligent Data Carriers and a Data Retrieval Blimp, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 15, No.5, pp.521-527, 2003
- [3] 石井, 橋本, 大森: 可変ピッチマイクロ風力発電機のモデリングおよび適応極値制御手法による出力最適化制御, 日本機械学会論文集 C 編, 69 巻, 687 号, pp.3034-3040, 2003
- [4] 尾崎, 小見, 杉本, 柴, 苗村, 保坂, 板生, 佐々木: ヘル スケア用ウェアラブルセンシングユニットの開発研究, *マイクロメカトロニクス日本時計学会*, 473, pp.12-19, 2003
- [5] K. Naemura, H. Iseki: Vibration isolation for seismocardiogram measurement in the OpenMRI-guided operating theater, *JSME International Journal Series C*, 464, pp.1426-1433, 2003
- [6] 岡田, 植松, 太田, 坪井: ATM リング網におけるマルチキャスト VP 障害切替法, *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol.J86-B, No.8, pp.1607-1619, 2003
- [7] 鈴木, 古川, 齊藤, 上田: B-PON における伝送距離の拡大を実現するレピータの構成法; *信学論 B*, Vol.J86-B, No.10, pp.2053-2064, Oct. 2003
- [8] 坪井, 名取, 三田地: 非対称トラヒックに適した 1 芯ファイバ型オプティカルプロテクションリング, *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol.J87-B, No.2, pp.125-132, 2004
- [9] 河野, 三浦, 黒田, マノス・テンジェリス, 移動境界適合座標系を用いた可動電極をもつ MEMS バリャブルキャパシタの数値解析 *電子情報通信学会誌 C*, Vol.J87-C, No.1, pp.32-38, 2004
- [10] Michiko Kuroda, Noriyuki Miura, Manos M. Tentzeris, A Novel Numerical Approach for the Analysis of 2D MEMS-Based Variable Capacitors Including the Effect of Arbitrary Motions *ACES Journal March*, 2004
- [11] 須藤, 橋本, 小林, 大山, 石井: 顔面方向の画像情報に基づく全方位空間観測システム, *日本 e-Learning 学会誌*, Vol.6, pp. 4-11, 2004
- [12] 大山, 守上, She, 小林: 講義支援 HP における遠隔実験装置の利用について, *日本 e-Learning 学会誌*, Vol.6, pp.27-32, 2004
- [13] 長嶋, 廣瀬, 鈴川, 苗村, 高信, 村垣, 伊関, 梅津, 高倉: OpenMRI 下脳外科手術におけるナビゲーションシステムの精度および操作性向上に関する研究, *日本コンピュータ外科学会誌* 61, pp.5-12, 2004
- [14] H. Takanobu, S. Saito, H. Tsuboi, H. Miura, K. Naemura: Wearable Heart Rate Counter, *JRobotics and Mechatronics*, Vol.16, No.5, pp.520-525, 2004
- [15] 石井, 橋本, 山本: 構造/制御系の同時最適化設計による 2 連倒立振子の重心位置決定およびその安定化制御, *日本機械学会論文集 C 編*, 71 巻, 711 号, pp.32-39, 2005
- [16] 畑山, 関, 石井, 村越, 山口, 橋本: 内観的情報を取り入れた運動学習支援システム, *日本知能情報ファイジイ学会 日本知能情報ファイジイ学会誌*, vol.17, no.5, pp.547-557, 2005
- [17] 余, 大山, 小林, 忻: 等価入力外乱推定による外乱除去性能の向上, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 41, No.10, pp.797-802, 2005.
- [18] 高野, 佐々木, 武藤, 杉本, 三田地: 水晶振動子型においセンサを用いたバラの香りの測定, *におい・かおり環境学会誌*, 36 巻 6 号, pp.345-355, 2005
- [19] 橋本, 竹田, 大山, 石井, 新妻, 橋本秀: まつわりつきロボット動作の心理的評価, *電気学会論文誌 C*, vol.126, no.1, pp.83-90, 2006
- [20] 大山 恭弘, 余 錦華, 小林 裕之, 苗村 潔: 運動能力を維持・増進する電動カートの開発—Part I: 電動カートシステムの設計—, *電気学会論文誌 D*, Vol.126, No.2, pp.174-179, 2006.
- [21] 余, 大山, 鈴木, 小林: 運動能力を維持・増進する電動カートの開発—Part II: 電動カートの  $H_\infty$  制御—, *電気学会論文誌 D*, Vol.126, No.2, pp.180-185, 2006.
- [22] Min Wu, Xian-ming Zhang and Jin-Hua She: Delay-dependent robust control for linear-delay uncertain systems, *Control Theory & Applications*, Vol.22, No.4, pp.619-622, 2005
- [23] Hong Zhao, Min Wu, Guoping Liu and Jin-Hua She

- :  $H^\infty$  control for networked control systems with time-varying delays, *Journal of Control Theory and Applications*, Vol.3, No.2, pp.157-162, 2005.
- [24] Yong He, Min Wu and Jin-Hua She : Delay-dependent robust stability and stabilization criteria for uncertain neutral systems, *Acta Automatica Sinica*, Vol.31, No.4, pp.578-583, 2005.
- [25] Xian-Ming Zhang, Min Wu, Jin-Hua She and Yong He : Delay-dependent stabilization of linear systems with time-varying state and input delays, *Automatica*, Vol.41, No.8, pp.1405-1412, Aug.2005.
- [26] Yong He, Min Wu and Jin-Hua She : Improved Bounded-Real-Lemma Representation and  $H^\infty$  Control for Systems with Polytopic Uncertainties, *IEEE Transactions on Circuits and Systems--II: Express Briefs*, Vol.52, No.7, pp.380-383, July, 2005.
- [27] Jin-Hua She, Yasuhiro Ohyama and Michio Nako : A New Approach to Estimation and Rejection of Disturbances in Servo Systems, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.13, No.3, pp. 378-385, 2005.
- [28] Sho Yokota, Pierre Blazevec, Hisato Kobayashi, A Wheelchair with connected crawlers, *International Journal of Assistive Robotics and Mechatronics*, Vol.7, No.2, pp.57-63, June, 2006
- [29] Xing-Ming Zhang, Min Wu Qing-Long Han and Jin-Hua She, A New Integral Inequality Approach for Delay-Dependent Robust  $H^\infty$  Control, *Asian Journal of Control*, Vol.8, No.2, pp.153-160, June, 2006.
- [30] Jin-Hua She, Yasuhiro Ohyama and Hiroyuki Kobayashi, Master-Slave Electric Cart Control System for Maintaining/Improving Physical Strength, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No.3, pp.481-490, June, 2006.
- [31] Yong He, Min Wu and Jin-Hua She, Delay-dependent Stability Criteria for Linear Systems with Multiple Time Delays, *IEE Proceedings -Control Theory and Applications*, Vol.153, No.4, pp.447-452, July, 2006.
- [32] Yong He, Min Wu and Jin-Hua She, Delay-dependent Exponential Stability of Delayed Neural Networks With Time-Varying Delay, *IEEE Transactions on Circuits and Systems--II: Express Briefs*, Vol.53, No.7, pp.553-557, July, 2006.
- [33] Min Wu, Yong He and Jin-Hua She, Delay-dependent stabilization for systems with multiple unknown time-varying delays, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol.4, No.6, pp.682-688, Dec, 2006.
- [34] Xing-Ming Zhang, Min Wu, Jin-Hua She and Dong Sheng Han, Delay-Dependent Robust  $H^\infty$  Control for Discrete-Time Uncertain Systems with Time-Varying State Delays, *Journal of Control Theory and Applications*, Vol.4, No.4, pp.355-360, 2006.
- [35] Min Wu, Weihua Cao, Weihua Gui, Jun Peng and Jin-Hua She, A New Multi-Agent System Architecture and Its Application in RoboCup, *Acta Automatica Sinica*, Vol.32, No.5, pp.686-694, 2006.
- [36] Xing-Ming Zhang, Min Wu and Jin-Hua She, An Improved Robust Stability and Robust Stabilization Method for Linear Discrete-Time Uncertain Systems, *Journal of Control Theory and Applications*, 2006.
- [37] 高野, 石堂, 松本, 三田地, 高齢者の見守りに適した液流検出センサ, *日本福祉工学会誌*, Vol. 8, No.2, pp.20-28 2006
- [38] 新妻, 橋本洋, 橋本秀, 空間メモリ: 知識活用を支援する空間知能化, *計測自動制御学会, 計測自動制御学会論文集*, vol.42, no.4, pp.367-375, 2006
- [39] Min Wu, Bei He and Jin-Hua She, A Fast LDL-factorization Approach for Large Sparse Positive Definite System and Its Application to One-to-one Marketing Optimization Computation, *International Journal of Automation and Computing*, Vol.4, No.1, pp.88-94, 2007.
- [40] M. Takano, Y. Fujiwara, I. Sugimoto and S. Mitachi, Real-time sensing of roses' aroma using an odor sensor of quartz crystal resonators, *IEICE Electronics Express*, Vol.4, No.1 pp.15-20 2007
- [41] Xuzhi Lai, Simon X. Yang, Guixiu Zeng, Jin-Hua She and Min Wu, New distributed positioning algorithm based on centroid of circular belt for wireless sensor networks, *International Journal of Automation and Computing*, Vol.4, No.2, 2007
- [42] 横田, 川端, 小林, 連結クローラ型移動機構の設計指針のための走破性能評価手法, *日本設計工学会誌『設計工学』* Vol.42, No.1, pp.47-52, January, 2007
- [43] 橋本, 松永, 佐々木, 石井, 新妻, 橋本秀, 手のハブティックインタフェースによる周辺障害物認識システムを用いた歩行器, *計測自動制御学会, 計測自動制御学会論文集*, vol.43, no.3, pp.1-9, 2007
- [44] Mihoko Niitsuma, Hiroshi Hashimoto and Hideki

Hashimoto: Spatial Memory as an Aid System for Human Activity in Intelligent Space, IEEE Transaction on Industrial Electronics, vo.54, No.2, pp.1132-1140, 2007

- [45] Sho Yokota, Yasuhiro Ohyama, Hiroshi Hashimoto, Jin-Hua She, Kuniaki Kawabata and Hisato Kobayashi: 3D measurement sensor system for rough terrain mobile robots, The international journal of sensing for industry, Vol.27, No.3, pp. 224-232, 2007
- [46] Jin-Hua She, Yasuhiro Ohayma, Hiroshi Hashimoto : Improving Disturbance Rejection Performance Based on an Equivalent-Input- Disturbance Approach, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.55, No.1 pp.380-389, 2008
- [47] 朝生信一, 佐々木智典, 橋本, 石井千春: 周波数成分を考慮したEMG信号による電動車駆動, 電気学会論文誌C, vol.127, No.12, pp.2109-2117, 2007

**【図書】**

- [1] Proceedings of the Fourth China-Japan International Workshop on Internet Technology and Control Applications, Edited by Min Wu, Jie Chen, Jin-Hua She and Hui Peng, Central South University, Hunan, China, 2005
- [2] バイオニクス学辞典, 編集: 軽部, 丸善, 担当: 橋本, 大山, 余, 三田地他, January 2005



# Eye-in-Hand システムに対する 安定化予測ビジュアルフィードバック制御

村尾 俊幸\*・河合 宏之\*\*・藤田 政之\*\*\*

## Stabilizing Predictive Visual Feedback Control for Eye-in-Hand Systems

Toshiyuki Murao\*, Hiroyuki Kawai\*\* and Masayuki Fujita\*\*\*

### Abstract

This paper investigates a vision based robot control based on a receding horizon control strategy for eye-in-hand systems, as a stabilizing predictive visual feedback control. Firstly, the brief summary of the three dimensional(3D) visual feedback system with an eye-in-hand configuration is given. Next, a stabilizing receding horizon control for the 3D visual feedback system, a highly nonlinear and relatively fast system, is proposed. The stability of the receding horizon control scheme is guaranteed by using the terminal cost derived from an energy function of the visual feedback system.

Keywords: Visual feedback control, Receding horizon control, Passivity, Stability, Control Lyapunov function

### 1. はじめに

近年、視覚フィードバック制御の研究はますます盛んに行われており、工場だけでなくより複雑なシステムや幅広い分野へも適用されるようになってきている [1][2]. 中でも医療分野における腹腔鏡の制御 [3] や超音波探触子の制御 [4] など、視覚フィードバック制御は少子高齢化社会を迎える日本において必要不可欠な制御技術になりつつある。

著者らは従来研究 [5][6] において、腹腔鏡を把持する手術支援ロボットなどに代表される Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムを幾何学的に表現し、システムの有する受動性に基づくことで、ロボットマニピュレータのダイナミクスを考慮した位置ベース法の3次元視覚フィードバック制御則を提案している。しかし、提案した手法はシステムを安定化させる制御則とはなっていないもの、最適性を考慮した制御則とはなっていない。

一方、オンラインで有限時間区間の最適制御問題を繰り返し解く、モデル予測制御の研究も盛んに行われている [7]. 近年では、ロボットのような非線形でかつ比較的早いダイナミクスを持つシステムに対する応用事例も出始めており、Milam らはその制御則を Caltech Ducted Fan に適用することで拘束条件を満たしながら最適なトラジェクトリーと変わらない動きを実現させている [8].

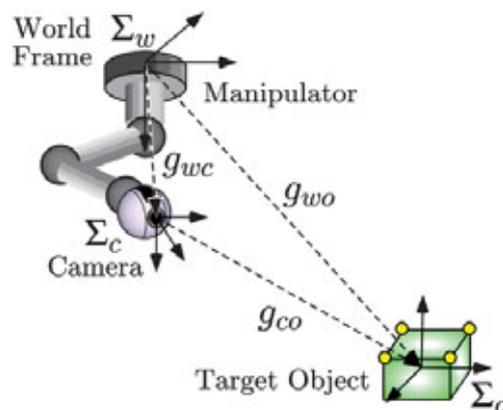


図1 Eye-in-Hand Visual Feedback System

また河合ら [9] はロボットマニピュレータに対して安定化モデル予測制御を適用し、実験的に性能を検証している。

視覚フィードバックシステムにおいて、観測対象の位置を予測し、その予測情報を用いて制御をすることで得られる有益性については古くから述べられてきた [10]. 視覚フィードバック制御とモデル予測制御を結合させた研究として、Sauvée らの角度やトルク、カメラ視野に対する拘束を考慮した手法 [11] や Allibert らの反射屈折カメラを用いた手法 [12] などが挙げられる。しかし、これらの手法は安定性に対しては何も述べられていない。また、著者らは文献 [13] で視覚フィードバックシステム

に対して安定化モデル予測制御を適用しているが, 平面マニピュレータに限定されていた.

そこで, 本研究では安定化予測ビジュアルフィードバック制御として, 比較的高速で非線形性の強い Eye-in-Hand 構造の 3 次元視覚フィードバックシステム [6] に対して, 安定化モデル予測制御則を提案する. 特に, 本研究で提案する制御則は, 視覚フィードバックシステムのエネルギー関数を評価関数の終端コストに用いることで, 安定性を満たしたものとなる. 本論文は, 文献 [9] に対しては視覚情報との融合がされている点と, また文献 [13] に対しては平面マニピュレータに限定せず位置だけでなく姿勢も考慮できる視覚フィードバックシステムに適用可能である点から, 両研究を発展させた研究となっている.

本論文の構成は以下のとおりである. 2 節では, 従来研究 [6] で提案している Eye-in-Hand 構造の 3 次元視覚フィードバックシステムと, 受動性に基づく安定化制御則について述べる. 3 節では, 制御リアプノフ関数を用いることで前節で構成した Eye-in-Hand 構造の 3 次元視覚フィードバックシステムに対して安定化モデル予測制御則を提案する. 最後に 4 節でまとめを行う.

## 2. Eye-in-Hand 構造の 3 次元視覚フィードバックシステム

### 2.1 視覚フィードバックシステムにおける剛体運動の表現

本論文では, 図 1 に示すような, 三つの座標系によって表される Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムについて考える. 図中の座標系をマニピュレータの台座に基準座標系  $\Sigma_0$ , カメラにカメラ座標系  $\Sigma_c$ , 観測対象に観測対象座標系  $\Sigma_o$  として定義する. 本システムの制御目的は運動する観測対象にカメラを追従させることである. 言い換えると, カメラ座標系  $\Sigma_c$  からみた観測対象座標系  $\Sigma_o$  の相対位置姿勢  $\mathbf{g}_{co}$  を目標相対位置姿勢  $\mathbf{g}_{co}^*$  (本稿では一定値であるとする) に常に一致させておくこととなる. ここで,  $\mathbf{g}_{co}$  は同次表現と呼ばれ, 任意の二つの座標系  $\Sigma_i$  から  $\Sigma_j$  の位置  $\mathbf{p}_{ij}$  と姿勢を表す回転行列  $\mathbf{R}_{ij}$  から構成され,  $4 \times 4$  行列として以下のように定義される.

$$\mathbf{g}_{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ij} & \mathbf{p}_{ij} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし, 演算子  $\wedge$  (wedge) は 3 次元ベクトルを  $3 \times 3$  の歪対称行列へ写像する演算子であり, その逆写像は  $\vee$  (vee) で定義される [14].

この相対位置姿勢  $\mathbf{g}_{co}$  と目標値  $\mathbf{g}_{co}^*$  の偏差を, 制御偏差  $\mathbf{g}_{co}^e$  としてつぎのように定義する.

$$\mathbf{g}_{co}^e = \mathbf{g}_{co}^{-1} \mathbf{g}_{co}^* \quad (2)$$

さらに, この制御偏差に対する制御偏差ベクトルを  $\mathbf{e}_{co} = [\mathbf{p}_{co}^e \ \mathbf{r}_{co}^e]^T$  と定義する. ただし  $\mathbf{p}_{co}^e = \mathbf{p}_{co} - \mathbf{p}_{co}^*$ ,  $\mathbf{r}_{co}^e = \mathbf{R}_{co} - \mathbf{R}_{co}^*$  である.

制御目的を達成するために  $\mathbf{g}_{co}^e$  の運動について考える.

$\mathbf{g}_{co}^e$  は図 1 における同次表現の合成則から

$$\mathbf{g}_{co}^e = \mathbf{g}_{co}^{-1} \mathbf{g}_{co}^* \quad (3)$$

で表される. また, カメラ座標系からみた観測対象の相対速度は,  $\dot{\mathbf{g}}_{co}^e$  を時間微分することで,

$$\dot{\mathbf{g}}_{co}^e = -\mathbf{A}_{co} \mathbf{g}_{co}^e \mathbf{r}^T \quad (4)$$

のように導かれる [5]. ここで,  $\mathbf{r} = [\mathbf{p}_{co} \ \mathbf{r}_{co}]^T$  は剛体運動のボディ速度を表しており,  $\mathbf{A}_{co}$  は同次表現  $\mathbf{g}_{co}$  の随伴写像である [14].

### 2.2 非線形オブザーバと推定偏差システム

本節は推定偏差システムについて述べる. 上述の相対位置姿勢  $\mathbf{g}_{co}$  は観測対象の位置姿勢  $\mathbf{g}_{co}$  が測定不可能であるために未知情報となる. そこで, 相対位置姿勢  $\mathbf{g}_{co}$  を含んでいる視覚情報  $\mathbf{f}$  を利用し, 非線形オブザーバを構成することで, 相対位置姿勢の推定値  $\hat{\mathbf{g}}_{co}$  を得ることを考える.

(4) 式に基づき, 推定値  $\hat{\mathbf{g}}_{co}$  の運動モデルをつぎのように構成する.

$$\dot{\hat{\mathbf{g}}}_{co} = \mathbf{A}_{co} \hat{\mathbf{g}}_{co} \mathbf{r}^T - \mathbf{u}_{co} \quad (5)$$

$\mathbf{u}_{co}$  は推定偏差の振舞いを安定にするために加えられる入力であり, 後に制御則の一部として提案する.

ここで, 相対位置姿勢の真値  $\mathbf{g}_{co}$  と推定値  $\hat{\mathbf{g}}_{co}$  の偏差を, 推定偏差  $\mathbf{g}_{co}^e$  として

$$\mathbf{g}_{co}^e = \mathbf{g}_{co}^{-1} \hat{\mathbf{g}}_{co} \quad (6)$$

と定義する. さらに, 推定偏差ベクトルを  $\mathbf{e}_{co} = [\mathbf{p}_{co}^e \ \mathbf{r}_{co}^e]^T$  と定義する. 姿勢推定偏差の回転量  $\mathbf{r}_{co}^e$  を十分に小さいとし, さらにカメラの画像特徴量とその推定値の周りで 1 次テーラー展開することで, この推定偏差ベクトル  $\mathbf{e}_{co}$  は, カメラから得られる視覚情報  $\mathbf{f}$  と推定モデルにより得られる視覚情報  $\hat{\mathbf{f}}$ , さらには画像ヤコビアン  $\mathbf{J}_{co}$  の擬似逆行列  $\mathbf{J}_{co}^{\#}$  を用いることでつぎのように導かれる [5].

$$\mathbf{e}_{co} = \mathbf{J}_{co}^{\#} (\mathbf{f} - \hat{\mathbf{f}}) \quad (7)$$

この推定偏差ベクトル  $\mathbf{e}_{co}$  が 0 になれば, 相対位置姿勢の真値と推定値が一致することとなる.

$\mathbf{e}_{co}$  を時間微分し, (4), (5) 式を用いることで, 推定偏差システムは以下のように導出される.

$$\dot{\mathbf{e}}_{co} = \mathbf{A}_{co} \mathbf{e}_{co} - \mathbf{u}_{co} \quad (8)$$

### 2.3 制御偏差システム

つぎに実際に制御目的を達成するための制御偏差シス

テムについて議論する。(2)式を再考すると、推定偏差  $\hat{x}$  を用いることで  $\dot{x} = -\lambda x$  と擬似的に計算できるため、 $\hat{x}$  は以下のように表すことができる。

$$\dot{\hat{x}} = -\lambda \hat{x} \quad (9)$$

(9)式において、目標値  $x_d$  と推定値  $\hat{x}$  は既知情報であるため、推定偏差  $\hat{x}$  が得られれば相対位置姿勢  $x$  を得なくとも制御偏差  $\hat{x}$  は求まることがわかる。文献[6]より、推定偏差  $\hat{x}$  は  $\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}$  の範囲内で推定偏差ベクトル  $\hat{x}$  から求められることがわかっているため、(9)式より制御偏差  $\hat{x}$  を導出することが可能となる。

(2)式で定義した制御偏差  $\hat{x}$  を時間微分することで、制御偏差システムは以下のように導出される。

$$\dot{\hat{x}} = -\lambda \hat{x} \quad (10)$$

### 2. 4 Eye-in-Hand 構造の3次元視覚フィードバックシステム

本論文では、さらにつきのマニピュレータダイナミクスを考慮する。

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + \tau_d \quad (11)$$

$q, \dot{q}, \ddot{q}$  はそれぞれの各関節の角度、角速度、角加速度を表し、 $\tau$  は入力トルク、 $\tau_d$  はトルク外乱、 $M(q)$  は正定な慣性行列、 $C(q,\dot{q})\dot{q}$  は遠心力・コリオリ力項、 $g(q)$  は重力項を表す。また、カメラの速度はボディマニピュレータヤコビアン  $J(q)$  を用いることで  $\dot{x} = J(q)\dot{q}$  として表される[14]。一方、カメラの速度の目標値を  $\dot{x}_d$  とし、マニピュレータの関節角速度の目標値を  $\dot{q}_d$  で表すと、 $\dot{x} = J(q)\dot{q}_d$  と表すことができる。ここで、関節角速度に関する偏差を  $\hat{q} = \dot{q} - \dot{q}_d$  と定義する。この関節角速度偏差  $\hat{q}$  が0になるとカメラの速度がその目標値に一致することとなる。

このとき、マニピュレータへの入力トルクとして

$$\tau = M(q)\ddot{q}_d + C(q,\dot{q}_d)\dot{q}_d + g(q) + J^T(q)\dot{x}_d + \tau_d \quad (12)$$

を考える。 $\dot{q}_d$  は関節角加速度の目標値である。 $\tau_d$  は関節角速度偏差をなくするための新たな入力であり、後に提案する。このとき、(8)、(10)~(12)式を用いることでEye-in-Hand 構造の3次元視覚フィードバックシステムは

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda \hat{x} \\ -\lambda \hat{q} \end{bmatrix} \quad (13)$$

で表される。ただし、入力、外乱、状態をそれぞれ

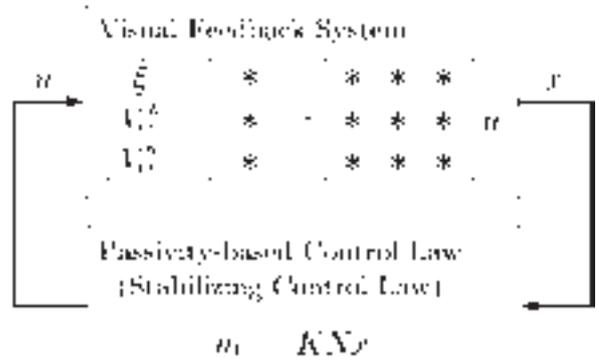


図2 Block Diagram of the Passivity based Visual Feedback Control

$$r = \begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{q}_d \end{bmatrix} \quad (14)$$

と定義している。Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムにおいて、状態  $x$  を0にとどめておくことで制御目的が達成される。

### 2. 5 エネルギー関数と安定化制御則

文献[6]ではさらに、視覚フィードバックシステム(13)のもつ受動性という概念を用いることで安定化制御則を導出している。受動性の証明をおこなうために、次式のエネルギー関数を提案する。

$$E(x, \hat{q}) = \frac{1}{2} \hat{q}^T M(q) \hat{q} + \frac{1}{2} \lambda \hat{x}^T \hat{x} \quad (14)$$

ここで  $\hat{q} = \begin{bmatrix} \hat{q}_1 \\ \hat{q}_2 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n$  であり、関数  $\frac{1}{2} \lambda \hat{x}^T \hat{x}$  は回転行列に対する誤差関数を表す正定関数である[15]。受動性に基づき、制御則をつぎのように提案する。

$$\tau = -K_1 \hat{q} - K_2 \text{diag}\{K_1, K_1, K_1\} \hat{x} \quad (15)$$

$$r = \lambda \hat{x} + \lambda \text{diag}\{K_1, K_1, K_1\} \hat{x} \quad (16)$$

ここで、 $K_1 = \text{diag}\{k_1, \dots, k_n\}$  はマニピュレータの各関節に対するゲインであり、 $K_2 = \text{diag}\{k_1, \dots, k_n\}$ 、 $K_3 = \text{diag}\{k_1, \dots, k_n\}$  は、 $x_1$  軸、 $x_2$  軸、 $x_3$  軸の並進と回転における制御偏差と推定偏差に対するゲインである。ただし、ゲインにおける各要素はすべて正とする。

エネルギー関数を解軌道に沿って時間微分し、提案した(15)式の制御則  $\tau$  を代入すると、外乱がない( $\tau_d = 0$ )ときには、つぎのように計算できる。

$$\dot{E} = -\hat{q}^T K_1 \hat{q} - \hat{x}^T K_2 \hat{x} \quad (17)$$

したがって、エネルギー関数(14)をリアプノフ関数とみなすことで、外乱がない( $\tau_d = 0$ )とき、視覚フィードバックシステム(13)と(15)式の入力  $\tau$  で構成される閉ループ系の平衡点  $(x, \hat{q})$  は漸近安定となり、制御則  $\tau$  は安定化制御則とみなすことができる。受動性に基づく視覚フィードバック制御のブロック線図を図2に示す。

しかし, 提案されている安定化制御則 $\mu$ は陽に最適性を考慮した制御則ではない. したがって, 次節では最適理論に基づいた安定化モデル予測制御則を提案する.

### 3. Eye-in-Hand システムに対する安定化予測ビジュアルフィードバック制御

本節は, 視覚フィードバック制御とモデル予測制御を結びつけることで, 最適理論に基づいた安定化予測ビジュアルフィードバック制御について述べる. 視覚情報は現在の瞬間的な情報以外にも多くの情報を含んでいる. この特性を利用することで観測対象の動きを予測できるなら, より有益な制御手法になると考えられる. 本論文では安定化予測ビジュアルフィードバック制御として, 前節で提案した視覚フィードバックシステムに対し, 最適制御理論から発展したモデル予測制御則を提案する.

#### 3.1 制御リアプノフ関数

本節では, はじめに視覚フィードバックシステム (13) に対するモデル予測制御の問題設定について述べる. 視覚フィードバックシステム (13) に対し, ある時刻  $t$  のとき, 状態  $x(t) = x$ , 入力  $u(t) = u$  に関してつぎの評価関数を最小化する有限時間区間の最適制御問題を考える.

$$J(x, u, T) = \int_t^{t+T} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (18)$$

$$\dot{x} = Ax + Bu + w, \quad x(t) = x, \quad x(t+T) = x_f \quad (19)$$

$$F(x) = x^T P x \quad (20)$$

ただし,  $Q, R, P$  は対角行列とし,  $F(x) = x^T P x$  は  $x_f^T P x_f - x^T P x$  である. 初期状態  $x$  に対して, この評価関数を計算することにより求められる最適な入力を  $u^*(t) = u^*(x, t)$  と表す. モデル予測制御では, 初めのサンプリング周期である  $[t, t+\Delta t]$  だけシステムに  $u^*(t)$  を加える. そして  $t+\Delta t$  後には, その時刻を改めて  $t$  とし直し, 再び最適制御問題を解く. すなわち, モデル予測制御は

$$u^*(t) = u^*(x, t) \quad (21)$$

という入力を, 時刻を進めながら繰り返し加えていくことになる [16]. 図 3 にモデル予測制御の説明図を示す.

本論文では, 視覚フィードバックシステム (13) との閉ループ系を安定化させるモデル予測制御則を提案する. そこで, 安定性に深く関係する制御リアプノフ関数の定義を示す.

定義 1  $Q, R, P$  を正定な関数とし, 微分可能な正定関数

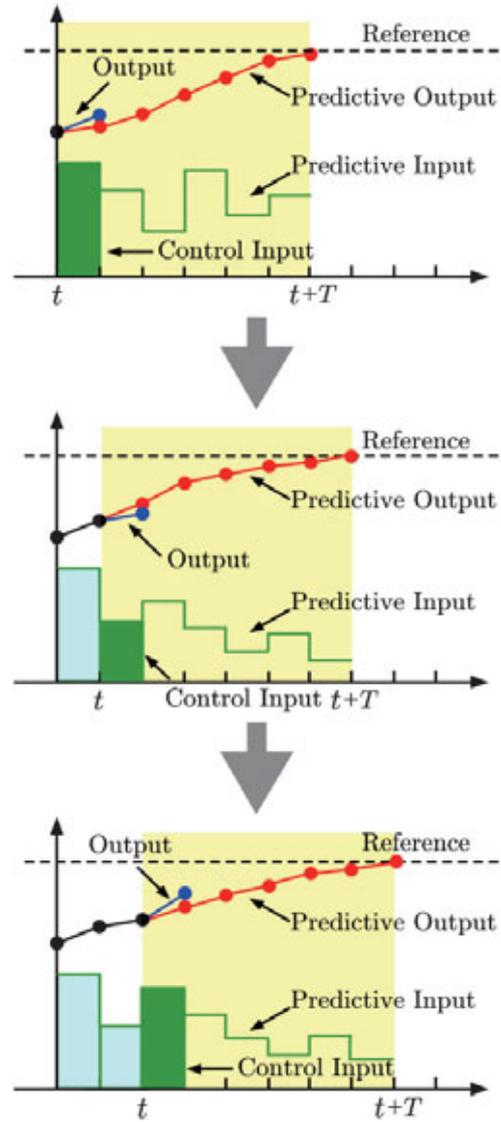


図 3 Receding Horizon Scheme

$V(x, t)$  が以下の条件式を満たすとき,  $V(x, t)$  は制御リアプノフ関数である [16].

$$\inf_{u \in U} [S(x, u, t)] < 0 \quad (22)$$

制御リアプノフ関数について, 係数  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$  と重み行列  $Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_6 \end{bmatrix}$  を用いることで, つぎの補題が示される.

補題 1 外乱がなく ( $w = 0$ ),  $Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_6 \end{bmatrix}$

であり, さらに設計パラメータ  $\rho$  に関して以下の不等式を満たすように設計する.

$$\rho^2 I_6 > 4(Q) \quad (23)$$

このとき, Eye-in-Hand 構造の 3 次元視覚フィードバックシステム (13) のエネルギー関数  $J(x, u)$  は制御リアプノフ関数となる.

(証明) エネルギー関数をシステムの解軌道に沿って時間微分した (17) 式と, (19) 式の正定関数  $V(x, t) = x^T P x$

さらに  $K = \frac{1}{2} R$  とした (15) 式の安定化制御則  $u$  を用いることにより, (22) 式の左辺はつぎのように変形される.

$$\begin{aligned} & \inf_{u} \left[ \dot{V}(x) + h(x, u) \right] \\ &= \inf_{u} \left[ \dot{q}^T \cdot \dot{q} - \frac{1}{2} E \cdot (g_1 + E \cdot (g_1 + u \cdot R_0)) \right. \\ & \quad \left. + \inf_{\tau} \left[ \frac{1}{2} \tau^T A u + \frac{1}{2} \tau^T (-F \cdot (g_1) - F \cdot (g_1 + u \cdot R_0)) \right] \right] \\ &= \inf_{u, \tau} \left[ u^T \cdot \frac{1}{2} R \cdot V \dot{x} + R \cdot u + \frac{1}{2} R \cdot V \dot{x} \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{4} \tau^T V^T R \cdot V \dot{x} + \frac{1}{4} \tau^T (-E \cdot (g_1) - F \cdot (g_1 + u \cdot R_0)) \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{4} \tau^T R \cdot (u + q_1) \cdot \frac{1}{2} (-q_1 - p_1) + q_1 \cdot \phi(u) + \right. \\ & \quad \left. - q_1 \cdot p_1 + q_1 \cdot \phi(u) \right] \quad (24) \\ &= \frac{1}{4} \tau^T V R \cdot V \dot{x} + \frac{1}{4} \tau^T (-E \cdot (g_1) - F \cdot (g_1 + u \cdot R_0)) \\ & \quad - q_1 \cdot p_1 + q_1 \cdot \phi(u) + u^T \cdot \frac{1}{2} R \cdot V \dot{x} \end{aligned}$$

この計算過程において,  $u = \frac{1}{2} R^{-1} V^T \tau$  のとき  $\phi(u) = \phi(\frac{1}{2} R^{-1} V^T \tau)$  となる関係を用いている.  $\tau = \frac{1}{2} R V \dot{x}$  のときに  $\frac{1}{4} \tau^T R \cdot V \dot{x} = 0$  となることから,  $\inf_{u} [\dot{V}(x) + h(x, u)] < 0$  が満たされ (22) 式の制御リアプノフ関数の定義式より, エネルギー関数  $V(x)$  は制御リアプノフ関数とみなすことができる. □

この補題 1 は, 視覚フィードバックシステムが有する受動性の性質を用いたものとなっており, ある条件の下で視覚フィードバックシステム (13) のエネルギー関数  $V(x)$  を制御リアプノフ関数とみなせることが示された.

### 3. 2 Eye-in-Hand システムに対する安定化モデル予測制御

評価関数の終端コスト  $V(x)$  が制御リアプノフ関数であることを利用し, 視覚フィードバックシステムに対するモデル予測制御の安定性に関してつぎの定理を示す.

**定理 1** Eye-in-Hand 構造の 3 次元視覚フィードバックシステム (13) に対して (18) ~ (20) 式の評価関数を考える.

外乱がなく ( $w = 0$ ),  $R_0 = \frac{\sigma}{2} \cdot R_0$ ,  $\rho = \frac{\sigma}{2} \cdot \rho$ ,  $\rho^T \cdot \rho = Q R$  であるならば, 視覚フィードバックシステム (13) と, 評価関数 (18) ~ (20) に対して解かれるモデル予測制御則 (21)

で構成される閉ループ系の平衡点  $x = 0$  は漸近安定である. (証明) 区間  $[t + \delta, t + T + \delta]$  での準最適な入力として次式を考える.

$$u = \frac{1}{2} R^{-1} V^T \tau \quad \tau \in [t + \delta, t + T] \quad (25)$$

ただし, 区間  $[t + T, t + T + \delta]$  の入力  $u$  は  $K = \frac{1}{2} R$  とした視覚フィードバックシステムの安定化制御則 (15) である. この入力  $u$  に対する評価関数は

$$\begin{aligned} & J(x^*(t + \delta), u, T) \\ &= J(x^*(t + \delta), u^*, T) + \rho \left[ V(x^*(t + \delta)) - V(x^*(t + T)) \right] \\ & \quad + \int_{t + \delta}^{t + T} h(x^*(\tau), u^*(\tau)) d\tau + \int_{t + T}^{t + T + \delta} h(x^*(\tau), u(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (26)$$

となる. ここでは最適な状態を表している. さらに  $J(x^*(t + \delta), u^*, T) \leq J(x^*(t + \delta), \bar{u}, T)$  より,

$$\begin{aligned} & J(x^*(t + \delta), u^*, T) - J(x^*(t + \delta), \bar{u}, T) \\ & \leq \rho \left[ V(x^*(t + \delta)) - V(x^*(t + T)) \right] \\ & \quad + \int_{t + \delta}^{t + T} h(x^*(\tau), u^*(\tau)) d\tau - \int_{t + \delta}^{t + T} h(x^*(\tau), \bar{u}, \tau) d\tau \end{aligned} \quad (27)$$

と計算できる. (19) 式のステージコスト  $h(x, u, \tau)$  と (15) 式における安定化制御則  $u$  を用い, さらに両辺を  $\delta$  で割り,  $\delta \rightarrow 0$  の極限をとることで, (27) 式はつぎのように変形される.

$$\begin{aligned} & \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{J(x^*(t + \delta), u^*(\tau), T) - J(x^*(t + \delta), \bar{u}, T)}{\delta} \\ & \leq \frac{1}{4} \tau^T (V^T (0) - F) V R \cdot V \dot{x} + F \cdot (-E \cdot (Q \dot{x} + u) \\ & \quad + u^T R u - q_1 \cdot \dot{z} - F \cdot (-E \cdot (g_1 + u \cdot R_0)) \\ & \quad + E \cdot (g_1 + u \cdot R_0)) \\ & = \frac{1}{4} \tau^T (V^T (0) - F) \frac{1}{2} R \cdot Q \cdot V \dot{x} + F \cdot (-E \cdot (Q \dot{x} + u) \\ & \quad + u^T (Q \dot{x} + u) - u^T R u) \end{aligned} \quad (28)$$

はじめの  $\tau[s]$  は  $u = \frac{1}{2} R^{-1} V^T \tau$  であり, さらに  $\tau = \frac{1}{2} R V \dot{x}$  という条件式により,  $J(x^*(t + \delta), u^*, T)$  の微分値は負定となる. したがって,  $J(x^*(t + \delta), u^*, T)$  をリアプノフ関数とみなすことで, 閉ループ系の平衡点  $x = 0$  の漸近安定性が示される. □

定理 1 により, 終端コストに制御リアプノフ関数を用いることで, 比較的高速で高い非線形性を有する Eye-in-Hand 構造の 3 次元視覚フィードバックシステム (13) に対するモデル予測制御の安定性が証明された. モデル予測制御が最適制御理論を発展させた理論であるということに注目すると, 評価関数のパラメータを適切なものを選ぶことで, 文献 [6] の手法に比べ望まれる制御性能

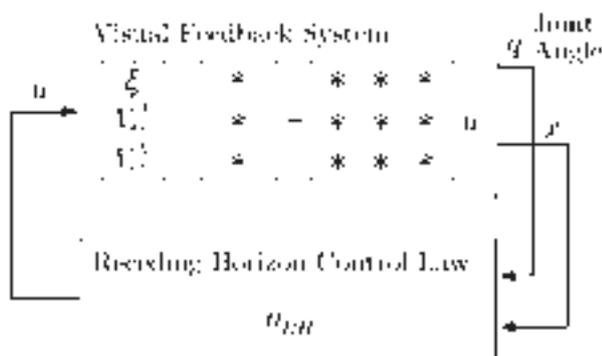


図4 Block Diagram of the Stabilizing Predictive Visual Feedback Control

を陽に得られると考えられる。本手法では、回転行列の誤差関数 $\|e_k\|$ をステージコスト(19)に直接用いたことも特徴となっている。

さらに、同じEye-in-Hand構造の視覚フィードバックシステムに対する制御則でも、文献[13]と異なり、平面マニピュレータに限定されず、位置に加えて姿勢も考慮できる制御則となっている点から、適用範囲は格段に広がると考えられる。また、扱っている問題が異なるために一概には比較できないが、文献[9]や文献[13]の安定性の条件式に比べ本手法で課している条件式は非常に単純であり、評価関数の重みや終端コストに対するパラメータが設計しやすくなっている。安定化予測ビジュアルフィードバック制御のブロック線図を図4に示す。

本節では、視覚フィードバック制御とモデル予測制御を結びつけた予測ビジュアルフィードバック制御の安定性について述べた。

#### 4. おわりに

本論文では安定化予測ビジュアルフィードバック制御として、比較的高速で非線形性の強いEye-in-Hand構造の3次元視覚フィードバックシステムに対する安定化モデル予測制御則を提案した。はじめにEye-in-Hand構造の3次元視覚フィードバックシステムについて述べた。さらに、システムのエネルギー関数を制御リアプノフ関数とみなせることを示し、終端コストにおくことで、モデル予測制御の安定性を示した。

#### 参考文献

- [1] F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual Servo Control, Part I: Basic Approaches", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 13, No. 4, pp. 82-90, 2006 (12).
- [2] F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual Servo Control, Part II: Advanced Approaches", *IEEE*

*Robotics & Automation Magazine*, Vol. 14, No. 1, pp. 109-117, 2007 (3).

- [3] K. Omote *et al.*, "Self-Guided Robotic Camera Control for Laparoscopic Surgery Compared with Human Camera Control", *The American Journal of Surgery*, Vol. 177, No. 4, pp. 321-324, 1999 (4).
- [4] A. Krupa and F. Chaumette, "Control of an Ultrasound Probe by Adaptive Visual Servoing", *Proc. of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2007-2012, 2005 (4).
- [5] M. Fujita, H. Kawai and M. W. Spong, "Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and  $L_2$ -gain Performance Analysis", *IEEE Trans. Control Systems Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 40-52, 2007 (1).
- [6] 村尾俊幸, 河合宏之, 藤田政之, "受動性に基づく視覚フィードバックにおける推定と制御の内部構造", 第36回SICE制御理論シンポジウム資料, pp. 183-186, 2007 (9).
- [7] D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao and P. O. M. Scokaert, "Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality", *Automatica*, Vol. 36, No. 6, pp. 789-814, 2000 (6).
- [8] M. B. Milam, R. Franz, J. E. Hauser and R. M. Murray, "Receding Horizon Control of Vectored Thrust Flight Experiment", *IEE Proc. Control Theory & Applications*, Vol. 152, No. 3, pp. 340-348, 2005 (5).
- [9] 河合康典, 中曾裕次郎, 見本真一郎, 藤田政之, "安定化モデル予測制御を用いたロボットマニピュレータの制御に関する実験的考察", 電気学会論文誌C, Vol. 127, No. 5, pp. 748-754, 2007 (5).
- [10] A. E. Hunt and A. C. Sanderson, "Vision-based Predictive Robotic Tracking of a Moving Target", *Technical Report*, Carnegie Mellon University, 1982 (1).
- [11] M. Sauvée, P. Poignet, E. Dombre and E. Courtial, "Image based Visual Servoing through Nonlinear Model Predictive Control", *Proc. 45th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1776-1781, 2006 (12).
- [12] G. Allibert, E. Courtial and Y. Touré, "Visual Predictive Control for Manipulators with Catadioptric Camera", *Proc. 7th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, pp. 1115-1120,

2007 (8).

- [13] M. Fujita, T. Murao, Y. Kawai and Y. Nakaso, "An Experimental Study of Stabilizing Receding Horizon Control of Visual Feedback System with Planar Manipulators", In : R. Findeisen, F. Allgöwer and L. Biegler (Eds. ), *Assessment and Future Directions of Nonlinear Model Predictive Control*, Springer-Verlag, pp. 573-580, 2007 (8).
- [14] R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 1994 (3).
- [15] F. Bullo and A. D. Lewis, *Geometric Control of Mechanical Systems*, Springer-Verlag, 2004 (11).
- [16] A. Jadbabaie, J. Yu and J. Hauser, "Unconstrained Receding-Horizon Control of Nonlinear Systems", Vol. 46, No. 5, pp. 776-783, 2001 (5).



# スーパープログラマ育成のための PBL

秋 口 忠 三\*

## PBL for Developing Super-Programmers

Chuzo Akiguchi \*

### Abstract

This article describes the overview of Project Based Learning (PBL) in the area of software development conducted at AIIT. Four students got involved in the project for about ten months, performed important roles as developers and completed a software product called SPEED (Software Process Engineering Exercise Director). Based on the experience of the PBL, we consider educational methods for developing software engineers through PBL. We will focus on how to develop highly-skilled pragmatic programmers, titled Super-Programmers.

Keywords: PBL, Software Development, Education

### 1. はじめに

PBL は、教師から提示された実務的プロジェクト課題に対して、学生主体で作業を進め、その解決を目指すことを通じて、実践的な課題遂行能力を習得する教育方法論と位置づけることができる。プロジェクト管理・遂行能力を含めたソフトウェア開発の能力育成を目的とした PBL では、何らかのソフトウェア開発の課題を提示する必要がある。教員の指導のもとに、複数人の学生でチームを編成し、学生が主体となって開発テーマを具体化し、チームとしての開発目標を共有しつつ完成に向けてそれぞれの役割を果たしていく。この過程で、チームによるソフトウェア開発の本質を実体験できる。このような開発課題を用意する必要がある [1]。

プロジェクト課題の解決そのものは一義的な目的ではなく解決に必要な能力の育成が PBL の本来の目的であるが、プロジェクトの最終成果物として動作するソフトウェア製品を完成させることは、学生の能力向上のエビデンスとなり、プロジェクト完成の達成感を得ることで継続的な学習意欲の向上を図る意味からも重要である。限られた時間の中でこの目的を達成するためには、課題の提示、開発計画の策定、開発プロセス全般のガイド、個別具体的な課題の解決方法について適切な指導が求められる。

筆者は以上の問題意識をもって、産業技術大学院大学(以下本学と呼ぶ)における最初の PBL 教育を実施した。PBL を始めるに当たって研究開発的な要素が多いソフトウェア開発を主導できる高い技術力を有するソフトウ

ェア技術者をめざす学生に魅力的な開発課題を提示したいと考えた。本稿で述べるスーパープログラマは、このような志向をもった学生が目指す技術者像を象徴する言葉として使用している。

いくつかの PBL 課題の候補の中から「教育用ソフトウェア開発環境の研究開発」という課題を提示し、PBL 実施のオリエンテーションを行った。その後、学生主体に市場動向と技術動向の調査を実施し、チームによるソフトウェア開発プロセスの学習を支援するツールの開発をターゲットに決定した。これは「ソフトウェア開発特別演習」という演習科目を支援するツールである。自らの演習の受講経験から要件定義を行いやすく、かつ開発成果物がこの演習を効果的に実施するうえで有効であると実感できることから、開発を行う上で良い動機付けになった。その後、要求定義、概要設計、プロトタイプ開発、アーキテクチャ設計、2 回の反復開発を経て、各種ドキュメントの整備と製品のシステムテストを実施した。

本稿では、まず、2007 年度に実施した PBL の概要を述べる。次に、本 PBL の指導経験をもとに、ソフトウェア開発における PBL 教育のあり方について考察する。特に最先端のソフトウェア技術を駆使し、高品質のソフトウェア製品の開発を牽引できるソフトウェア技術者の育成という観点で、PBL 教育の方法を考察する。

### 2. 2007 年度 PBL の実施状況

#### 2.1 PBL 実施方法の概要

本学の PBL では、3 名～6 名程度の学生のチームを、

主担当と副担当の2名の教授と助教1名の3名の体制で指導に当たっている。学生は毎週月曜日に1週間の活動を所定の書式に従って報告し、教員はその内容を確認し適宜学生へのアドバイスをを行う。各教員は、主担当、副担当として、2つのプロジェクトの指導に当たる。教員は他のプロジェクトの報告も参考にしながら、担当プロジェクトの指導に当たることができる。

また、毎週プロジェクト毎に決めた所定の時間に進捗会議を開催し、プロジェクトリーダーの学生を進行役としてプロジェクトの進捗状況の報告を受ける。週報と進捗状況の報告から、課題の処置方法、次週の計画、進め方などのアドバイスをを行う。学生は毎週2回程度全員が集まる時間を決め、計画策定、作業分担調整、技術検討会、レビュー、インスペクション等のグループ活動を行う。教員は適宜これに参加する。

## 2. 2 PBL の評価方法

本学のPBLは通常の大学院の修士課程の修士論文研究に相当する。修士論文に相当する最終成果物はチーム活動としてのプロジェクトの成果物である。ソフトウェア開発をテーマとするPBLでは、動作するソフトウェアと付随するマニュアル、開発の各プロセスで作成される各種ドキュメントがプロジェクト成果物となる場合が多い。

学生の評価は、これらのプロジェクトの成果物とそれぞれの成果物に対する個人の貢献度、その成果物の完成に至るプロセスの妥当性と獲得したコンピテンシーに関する学生の自己評価、毎週報告される週報、および中間発表会と最終成果報告会におけるプレゼンテーションに基づいて実施される。これらの成果物に対する全教員の評価を踏まえ、担当教員が最終評価を行い、全教員の合意の下に決定される。

## 2. 3 2007 年度 PBL の実施状況

2007年度は、「教育用ソフトウェア開発環境の研究開発」というテーマでPBL課題を提示し学生を募集した。この課題は、筆者のこれまでの実務経験と今後の研究活動の観点から実践的な指導を行いやすいという点と、開発の成果物を本学のソフトウェア開発の教育に活かせる可能性を勘案して決めたものである。

学生には、ある程度のソフトウェア開発の経験を有し、ソフトウェア開発の専門家としてのキャリアを発展させることに情熱を持っていることを受講の条件として提示した。このようにしてスーパープログラマを目指すメンバーによるチーム編成ができたと考える。

PBLの活動はクォータ単位で実施される。以下に、各クォータの主な活動と成果物の概要を述べる。

### a) 1 Q の活動の概要

1 Qでは、技術・市場動向調査、テーマ決定、プロジェクト計画書、要求仕様書作成を行った。4月の始業時から4名の学生でプロジェクトを開始した。プロジェクト開始時に、オリエンテーションを実施し、ソフトウェア開発の実践力を養うために、数点の書籍[2][3]の購読と、JUnit[4]等のオープンソースのソフトウェアのソースコードリーディングの指導を実施した。

これと並行して市場動向調査、技術動向調査として、ソフトウェア開発環境展への参加を勧め、製品としてのソフトウェア開発環境の現状理解を促した。品質重視の観点からテスト支援ツールや開発プロセス管理支援ツールを中心に、製品の技術動向と市場動向を調査した。この調査結果をグループミーティングの中で報告することにより、情報共有を図る経験をつんだ。

これらの調査の結果を踏まえ、開発テーマを「ソフトウェア開発経験の浅い学生等がソフトウェア開発の重要なエッセンスを効率的に学ぶことを支援するツールの開発」とした。テーマ決定後、プロジェクト計画書と要求定義書を作成した。

### b) 2 Q の活動の概要

2 Qでは、概要設計、アーキテクチャ基本検討、プロトタイプ開発と開発環境の整備を行った。プロトタイプ開発の目的は、動作するソフトウェアをチームとして開発する経験を持つことにより、製品開発に自信が持てるようにすることである。プロトタイプを開発することで、新しい技術を導入する際のメリットとリスクを的確に予測することが可能になる。また開発するソフトウェアのイメージをチームメンバー間で共有し、3 Qからの最終製品の要求定義を洗練し設計における重要な意思決定を正しく行えるようになる。

またプロトタイプ開発を通じて最終製品開発を行うための開発環境の整備、開発プロセスの細部の確認が行えたことも、不確定要素や不安定要素を低減する効果があったと思われる。このようなプロトタイプ開発の効果を経験する良い機会であったと考える。

### c) 3 Q の活動の概要

3 Qでは、アーキテクチャ設計、データベース設計、ユーザインタフェース設計、クラス設計、第1回反復開発を行った。3 Qで開発するソフトウェア製品の名称を決定した。良い製品名称を決めることは製品の目的や位置づけ、開発目標を明確化する上で重要な意味がある。学生が決めた製品名SPEED (Software Process Engineering Exercise Director) は的確であると思う。

3 Qでは、2 Qのプロトタイプ開発を踏まえ、要求定

義の見直し、アーキテクチャ設計と、ユーザインタフェース設計、データベース設計の見直し、クラス図とシーケンス図の作成を行った。Wikiを導入しプロジェクト情報共有を促進するなど開発環境の整備も進めた。新技術への対応としては、データベース応用アプリケーション開発のフレームワークである Seasar2 や GUI アプリケーション開発のフレームワークである SAF の利用技術を修得した。

#### d) 4Qの活動の概要

4Qでは、プロジェクトの仕上げとして第2回の反復開発と各種ドキュメントの作成を行った。最終成果物としては、プロジェクト計画書、要求仕様書、設計仕様書、開発完了報告書、単体テスト仕様書、シナリオテスト仕様書、ユーザマニュアル、ソースプログラム、実行形式プログラムがある。

### 3. PBL 教育の実施方法に関する考察

本節では、2節で述べた PBL の指導経験に基づき、ソフトウェア開発の PBL を通じて学生のソフトウェア開発の実務能力とスキルの向上がどのように図られたかを分析し、PBL の実施方法と指導方法の改善点を考察する。

#### 3.1 本 PBL の実施方法

具体的なプロジェクトの進め方は個々の PBL 毎に異なるが、ソフトウェア開発をテーマとする PBL では、ある開発プロセスに従ってチームによるソフトウェア開発を実体験し、ソフトウェア開発の実践力を育成することをねらいとしている。筆者の担当した PBL では、以下の特徴がある。

##### a) チームソフトウェア開発の実践能力の向上

従来のチームによるソフトウェア開発では、プロジェクトリーダーに負荷が集中する嫌いがある。TSP[5]では、チームリーダー、開発マネージャ、計画立案マネージャ、品質/プロセスマネージャ、サポートマネージャの5つの役割を定義し、チーム開発における負荷分散の適切なガイドラインを示した。本 PBL でもこの考え方を踏襲した。特にチームリーダーについては、クォータ毎に交代して、全員がチームリーダーを経験できるようにした。各々が自分の適性にあったリーダーシップを発揮し、互いに参考になったのではないかと思う。

##### b) プロトタイピングと反復開発による開発

プロトタイピングと反復開発により、立ち上げ、要求

定義、分析・設計モデリング、構築、テストのソフトウェア開発の上流から下流まで複数回の開発を経験することによって、開発プロセスを改良し、自分とチームのスキルを向上させながらソフトウェアの開発を改善していく開発方法論をある程度体得できたと考える。プロトタイピングにより動作するソフトウェアを早い段階で作成するという開発戦略は要求の明確化、新技術を採用する際のメリットとリスクの評価、メンバー間での開発文化の共有とう観点で有効であったと思う。

##### c) アジャイル開発の試み

プロジェクト発足当初はアジャイル開発 [6] の実践を試みたが、メンバーが集合できる時間の制限からこの試みは必ずしも成功したとは言えなかった。「動作するソフトウェア」と「顧客との協調」の価値については概ね良好であったが、「個人と相互作用」や「変化への対応」の価値を重視する開発は十分な経験を積めなかった。ペアプログラミングの実践等は、次年度には実施してみたい。

##### d) フレームワークを利用したソフトウェア開発の経験

Seasar2 や SAF 等のフレームワーク技術やそのサポートツールを利用したソフトウェア開発を奨励し新しい技術の導入を促した。未知の技術をうまく使いこなすノウハウを修得したことはこれからのソフトウェア技術者のキャリアに大きなプラスになると考える。

##### e) ソースコードリーディングのスキル向上

有望と思われる技術については、十分なドキュメントがなくてもソースコードを読み下すことによりその技術をものにしていくことが必要である。またソースコードを読むことによって、ソフトウェア設計の深い理解が得られる。PBL 開始時にソースリーディングの指導を行い、数 K ラインのソースプログラムからソフトウェア技術の本質を読み解く訓練を行った。これは新技術に挑戦する精神を育てる上で有効に作用したと考えている。

### 3.2 PBL での学生の指導方法

#### a) 基本を学ばせる

ソフトウェア開発は高度な専門能力を必要とする仕事である。ソフトウェア開発の基本的な素養である①プログラミングとテスト、②ソフトウェアの分析と設計、③ソフトウェア開発プロセスの実践は、PBL の早い段階で修得してもらいたかった。JUnit を題材としたソースコードリーディングの実践は、①と②の基本的なスキルを向上させる上で大きな効果があった。③は TSP に基づく 1 年次のソフトウェア開発特別演習を 4 名の学生の

内3名が受講しており、プロジェクト発足時のチームのスキルレベルは十分であると考えた。

#### b) チームの中での役割

ソフトウェア開発のプロジェクトを立ち上げる際に誰をリーダーにするかは重要である。本PBLでは4人の学生がクォータ毎にリーダーを交代し、全員がリーダーの経験できるようにした。必ずしも誰もがチームリーダーとしての資質を持っているとは限らないが、リーダーとしてメンバーの意見をまとめプロジェクトとしての最終判断を下す責任を持ったという経験は、どのような役割でプロジェクトに参加するにしても、意味があると考えたからである。

チームリーダー以外の役割として、TSPでは開発マネージャ、計画立案マネージャ、品質／プロセスマネージャ、サポートマネージャを定義している。これらの役割についても各人が2つ以上の役割を経験できた。自律性のあるチームの構成員として自分の得意とする領域でチームに貢献することが重要であり、多様な役割を経験することにより、自分の適正にあったキャリアパスを計画できるようになるだろう。この意味からも様々な役割を経験する機会を与えることは意味があると考えられる。

#### c) 学生の個性と希望に応じた教育

本PBLでは、新しい技術を採用したソフトウェア製品の開発を通じて、高度なプログラミングスキルの修得とソフトウェア開発のマネジメント力の向上を図ることを目指した。学生の主体性と当事者意識を伸ばすことを第一に考えた。PBLの実施に当たっては、プロジェクトの目的に応じて、最低限守らなければならない規律や最低限残しておくべきドキュメントを定め、チームの自律性を尊重し自由裁量の範囲をできるだけ広く取るようにするのが良いと考えた。

新しい技術の修得にはどの学生も強い関心があり、ともすれば開発プロセスを学ぶことよりも目新しい技術に目を奪われ、プロセスをおろそかにしがちである。規律の厳しい堅苦しいプロセスは敬遠されるがある程度の規律は必要である。教員の適切な指導が必要となるころである。

### 3. 3 PBL テーマの継続性

PBL教育では毎年新しい開発課題を立てプロジェクトを発足させることになる。ソフトウェア開発をテーマとする場合、最終成果物として稼動するソフトウェア製品の完成を目標とする。製品レベルの品質を確保するところまでを目指すとして、実現できる機能レベルは限られてくる。

また実際のソフトウェア開発業務の多くは、既存ソフトウェアの機能強化や保守である。既存プログラムを解読し、その中に新規機能を作りこむ開発形態が多い。このような改造ベースの開発もPBL教育の中で経験できるようにすることは意味がある。

以上の2点から、PBLの成果物を次のPBLに引継ぎ、発展できる開発テーマを構想している。対象領域はソフトウェアエンジニアリングの中のソフトウェア開発環境である。本稿で紹介したPBL成果物もこの領域の中のソフトウェア製品に位置づけられる。ソフトウェア開発プロセスの支援ツールは開発プロセスそのものを深く考察する上でも良い教材になると考えられる。

教育用ソフトウェア開発環境の研究開発というテーマで、GUIツール、データベース、言語、グループウェア、各種フレームワークの活用等、適度な難易度のソフトウェア開発の課題を定義し、発展させることができると考えている。

## 4. スーパープログラマの育成は可能か

これまで、ソフトウェア開発をテーマとしたPBLの実施状況と実施方法に関する考察を行ってきた。本節では、スーパープログラマを育成するという観点でPBL教育の実施方法を考察する。

### 4. 1 スーパープログラマとは

「スーパープログラマ」は一般的な用語ではない。ここでは、「高度なソフトウェア技術者としての専門知識と優れた問題解決能力を有し、自ら高度なプログラミングを行いながらチームを技術的に指導し、プロジェクトを成功に導くことができる技術者」を想定している。高度IT技術者やITアーキテクトという用語が意味する概念とほぼ同じであるが、自らプログラミングすることを強調している点に特徴がある。

### 4. 2 スーパープログラマ育成上の課題

スーパープログラマになるためには、もって生まれた才能・資質と努力、スーパープログラマになろうとする意思、問題解決能力などが必要とされる。プログラミングを中心とするソフトウェア開発の能力は、個人のもって生まれた才能や資質によって大きく異なる。そのような資質をもった人材は多くはない。これらの個人の資質・能力に加えて、スキルを磨く機会と時間、評価しあう仲間など恵まれた環境も必要だろう。

少ない才能を発掘しスーパープログラマに育てるためにはプログラマの職業的な地位を高め、高度専門職としての処遇を見直すなどの制度的な見直しも必要である。

う。一般的傾向として、プログラマは技術レベルの低い職種とみられ、30才代の中頃を境に、優秀なプログラマであっても管理職に転職することが多い。しかし管理職への転向によって生きる才能もあればダメになる才能もある。職業的な地位の問題、企業の中での処遇の問題、育成制度に関する問題等多くの課題がある。

制度面の次には、スーパープログラマを育てられるマネージャの資質が問われるであろう。個々個人の資質を見抜き、可能性を育て、活躍の場を与えなければならない。企業の中での OJT/OJD は、職場の上司をコーチとして、仕事を通じて個人の能力を育成する制度として人事教育制度の柱となっている。業務を通じて、適切な指導の下に、専門知識の獲得、チームによる開発、様々なステークホルダーとの関係構築などを経験できる機会があれば理想であるが、このような恵まれた環境で仕事を行える技術者は多くないと思われる。

#### 4. 3 スーパープログラマ育成のための PBL

PBL 教育は、このようなやる気はあるが機会に恵まれない技術者に、ステップアップの訓練の場を提供するものでなければならない。本稿で述べた PBL 実施方法は、そのような場を提供することを目指したものである。継続しさらに改善したい点を以下に示す。

##### a) ソースコードリーディング

すぐれたプログラムのソースコードリーディングはプログラミングとソフトウェア設計の基礎力を向上するうえで非常に有効であった。教材として使用した JUnit はテストファーストを実践する不可欠のツールとして設計思想に踏み込んで理解する価値があったと思う。

##### b) ソフトウェア開発プロセスの実践

チームによるソフトウェア開発プロセスを最初から最後まで経験し、動作するソフトウェア製品を完成させた。チームとして、プロジェクトの立ち上げ、要件定義、要求分析、設計、プログラミング、テストの一連のソフトウェア開発のプロセスを実践し、ソフトウェア開発における各種役割を体験した。プロジェクトを通じてチームとしてどのように成長していくかについて学習する機会になったのではないか。この経験は何物にも代えがたいものと思う。

##### c) 新技術への取り組み

本 PBL では、未知の技術を積極的に採用し、多少のリスクがあっても新しい技術を取り入れた製品開発を経験することを奨励した。最先端のソフトウェア技術を駆使し高品質なソフトウェア製品の開発を牽引できる人材

の育成という観点で、このような経験はきわめて重要と思われるからである。フレームワークを利用したソフトウェア開発の経験を今後の業務に活かしてほしい。

#### 5. おわりに

適切なコミュニケーションをとりながらチーム活動を遂行することができ、新しい技術に対する継続した学習と研究の能力を有する人材の育成が本学の教育の目的である。本学の PBL 教育は、この能力を体得させるための有効な手段であり、実践を通じてその方法論を洗練している過程にあると考えている。

リーダーとしてチームを牽引する、または有能なメンバーとしてチームに貢献できる高度情報技術者の育成が本 PBL 教育の第一の目標である。ソフトウェア開発の技術者を育成するためには、現実の有益なソフトウェア製品の開発を、チームによる適切なソフトウェア開発プロセスに従って実施することが最も効果的である。本稿ではこの考え方に基づき 1 年間の PBL を実施した経験を報告した。

学生は、新しい技術を採用した開発を経験する中から、新技術に挑戦する意識と現実的なリスクを予見する感覚を経験できたと考えている。チームによるソフトウェア開発のプロセスを実践し、新しいソフトウェア技術を駆使して高品質のソフトウェア製品の開発をチームとして完成させた経験が、今後のソフトウェア技術者としての成長に活かされることを願っている。

ソフトウェアに限らずアジャイル（俊敏）な開発が求められている。確かな技術力に基づき、ユーザ要求や環境の変化に柔軟に対応できる、高度なソフトウェア技術者の価値は今後ますます高まっていくだろう。本稿の表題にあるスーパープログラマは、高度なソフトウェア技術力によってこれを成し遂げる人材を意味している。先端技術の知識を絶えず目を配り、実務に適用できると同時に、その知識をチームメンバーで共有し、チームの技術力の向上に貢献することに価値を見出している人材である。本 PBL を通じて、このようなスーパープログラマを目指す学生が生まれることを期待している。

どのような分野での同じだと思うが、教師は学生から多くのことを学び、新しい発想のきっかけを得るのではないだろうか。筆者も学生から多くのことを学んだ。本 PBL の学生に感謝する。

#### 参考文献

- [1] 秋口忠三, 「PBL 教育に適したソフトウェア開発テーマ」, 第 1 回 IT 専門職養成のための PBL 型教

育シンポジウム論文集, pp 11-14 (2006.09)

- [2] David Thomas, Andrew Hunt, Mike Clark, "The Pragmatic Programmers", 長瀬嘉秀監訳「達人プログラマー」, 株式会社アスキー, 2005年.
- [3] 佐藤匡剛, 「ソースコードリーディングから学ぶJavaの設計と実装」, 技術評論社, 2006年.
- [4] JUnit ホームページ <http://www.junit.org/>
- [5] Watts S. Humphrey, "Introduction to the Team Software Process", Pearson Education, Inc., 2000.
- [6] "Manifesto for Agile Software Development", <http://www.agilemanifesto.org/>

# 三角形メッシュのためのバーチャルクレイモデリング

大坪 克俊\*

## Virtual Clay Modeling for Triangular Meshes

Katsutoshi Ootsubo\*

### Abstract

A new method of “virtual clay modeling” for 3D triangular mesh model is proposed. This method is based on “tensegric modeling”, and the prototype system provides intuitive modeling operations like handling clay in the real world. These operations categorized into two types. One is a geometric deformation, a designer model without topological changes, such as bending, pulling, and twisting. Another is a topological deformation, a designer model with change in topology, so-called “cut & paste”. As a result of these operations, deformed shape of a target model is automatically given by simulating TGM's behavior. In our prototype system, modeling area is easily specified by a designer with click/drag operations by 2D input device, such as a mouse or a pen-tablet, and no special techniques are required.

Keywords: tensegric modeling, TGM, cut & paste, mesh fusion, t-FFD

### 1. はじめに

近年、計算機やグラフィクスハードウェアの性能が革新的に向上し、計算機上で3次元の形状モデルを設計することが容易になってきた。また、実世界の形状をデジタル化するための計測技術や、これを基に試作を行うためのRP技術も発達し、高度なリバースエンジニアリングが可能になってきている。

現在、3次元CADやRPで扱われる最も一般的な形状モデルのデータ形式は、三角形メッシュに代表されるポリゴンデータである。形状の定義やシステム上の扱いが容易であることから非常に有用なデータ形式ではあるが、一般的なCADシステムが提供する形状操作（オイラー操作／パラメトリック変形）では形状変形が容易ではない。従来、設計者にとってより容易な操作による形状変形を可能にするため、モデルの位相変更を伴わない変形（幾何変形）、位相変更を伴う変形（位相変形）として多くの提案手法が存在する。

前者には、FFD[1]、t-FFD[2]、細分割曲面[3][4]などの位相幾何学的処理に基づく手法や、FEM、質点一ばね系[5][6]、Tensegric Modeling[7]などの物理シミュレーションによる手法が挙げられる。これらの手法は、僅かなユーザ入力による効率的な形状変形を可能にしているが、適用可能なモデルの制限や計算の安定性に問題があり、必ずしも設計初心者が扱い易い方法とは言えない。

後者には、ボクセル[8]、陰関数曲面[9][10][11]、メッシュのカットアンドペースト[12][13][14][15]に基づく手法が挙げられる。これらの手法は、形状の一部を任意に切断したり、既存の任意形状同士を融合したりといった、位相変更を伴う直観的な変形操作を可能にする。

以上より、両者はその目的に応じた利用が必要であり、形状モデルを簡単に形状変形するための統一的手法は現時点で存在しない。

そこで我々は、Tensegric Modelingを基本として、現実世界のクレイモデリングのような直観的な変形操作を実現する手法の確立を目的として、研究を進めている。本研究で考えるクレイは、車のデザインに用いられるような硬質材ではなく、クレイアニメに用いられるような軟質材をイメージしている。ここで、本研究で提案する手法を、バーチャルクレイモデリングと呼ぶ。

本手法では、現実のクレイが持つ可塑性などの物理的特徴を扱い厳密にシミュレートすることが目的ではなく、クレイに対して行う変形操作が持つ直観性を計算機上の操作に反映することを目指している。本稿では、手法の概要とアルゴリズム、試作システムによる有効性の検証結果を述べ、本研究の今後の展望を述べる。

### 2. バーチャルクレイモデリング

実世界のクレイモデリングでは、対象であるクレイ

に対して、引っ張りや圧縮などの力を与えたり、除去や付加など粘土の量を増減させたりと、目的の形状に至るまで直観的な成形作業を繰り返す。本研究では、これら実世界の成形作業に対応する変形操作として、幾何変形(2.1節)と位相変形(2.2節)の観点から、ユーザにとって直観的な変形操作を考えた。

本手法では、変形に用いる拘束を解除した後も拘束時の変形形状を保持する、つまりその時点までの変形が塑性変形となるよう処理する。設計者は対象形状の変形(拘束)領域と変形の種類の指定を行い、画面上での直観的なマウス操作のみで所望の変形を行うことができる。

## 2. 1 幾何変形

対象形状に対して、頂点単位の幾何的な拘束、または仮想的な外力を与えることで、形状の一部の“引っ張り”、“曲げ”、“捻り”等の変形を行う。変形させたい領域以外の頂点を全て幾何的に拘束することで、局所的な変形を実現する。

## 2. 2 位相変形

対象形状の部分形状の“切り取り”と任意形状同士の“貼り付け”、所謂“カットアンドペースト”を行う。これらの操作は稜線単位で処理し、“貼り付け”に用いる稜線列同士は同相とする。

## 3. Tensegric Modeling

Tensegric Modeling は、任意の三角形メッシュに物理モデルである Tensegric Model(TGM) を適用し、直観的な変形操作を実現する形状モデリング手法である。本手法は、メッシュの頂点単位で変形操作を行うが、一部の变形が全体に影響を与える TGM の特徴を生かし、複数の幾何拘束を満足しながら比較的滑らかな表面を持つ形状を簡単に得ることができる。

### 3. 1 Tensegric Model

Tensegrity は元々建築構造の一種であり、圧縮力に耐える圧縮部材と張力に耐える張力部材を構成要素とする骨格構造体である。Tensegrity の最大の特徴は、部材に対する曲げ剛性が生じず、外力や幾何拘束に対して構造全体で力のバランスを取り、形状が自己安定化するところにある。我々は、これを計算機上で扱えるよう TGM としてモデル化し、安定形状を求める計算(静定計算)手法を考案した。

本研究では、任意の位相を持つ三角形メッシュに TGM を適用するため、単位構造を考えた。単位構造は、圧縮部材 3、張力部材 9 で構成され、実際の Tensegrity

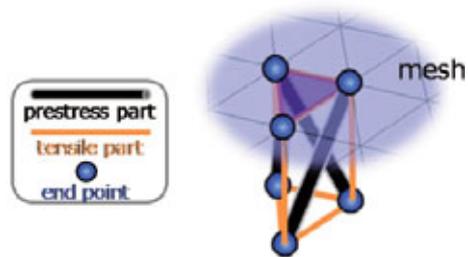
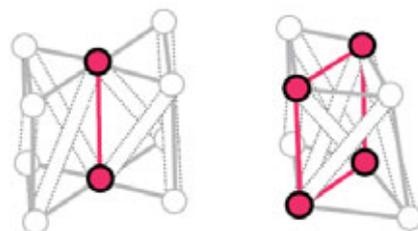


図 1 TGM の単位構造



(a) 頂点を共有する場合 (b) 稜線を共有する場合

図 2 複合構造における部材の共有

と同様に、拘束条件に応じた自己安定化形状を取る特徴を持つ。

ここで、本研究で用いる単位構造を図 1 に示す。また、静定計算は以下の手順で行うものとする。

- (1) 拘束条件の指定： 幾何拘束する頂点や自由な頂点に対して与える外力を指定する。
- (2) 繰り返し計算： 1つの圧縮部材に注目し、他の部材を拘束した状態での安定する姿勢を求める。これを全ての圧縮部材について順不同で行い、全ての姿勢が求まった時点で、隣接する部材によって与えられる頂点位置を平均して求める。
- (3) 計算の打ち切り： 全ての頂点座標の変化量の総和が、指定する閾値以下になった時に計算を終了し、そうでない時は(2)に戻る。

### 3. 2 三角形メッシュへの適用

本研究で用いる TGM の単位構造は、部材を共有する方法で複合構造を構築することができるが、これによって得られる複合構造は、単位構造と同様に拘束状態に応じた安定化形状を得ることができる。

本手法では、三角形メッシュの面単位で単位構造を構築し、部材の一方の端点の幾何を対応する面の頂点座標として更新する。単位構造の構築は、三角形メッシュデータ上の面の順序に沿って行い、単位構造同士の新たな隣接関係が発生する場合(新規に構築する単位構造に対応する面の隣接面に、既存の単位構造が存在する場合)、隣接する単位構造間で部材の共有を行う。

以上により本手法では、対象とする三角形メッシュが空間的に閉じているかどうか、といった位相に関わらず、疑似的な物理モデルとしての変形を可能にしている。

複合構造は、三角形メッシュ上の面間の隣接状態に応じて、次のような部材の共有によって構築する。

- 1 頂点を共有している場合 (図 2(a)) :  
共有する頂点に対応する節点, 垂直方向の節点, これらの節点を繋ぐ張力部材を共有する。
- 稜線を共有している場合 (図 2(b)) :  
共有する稜線を含む垂直方向のループ上の 4 節点, 張力部材を共有する。

### 3. 3 変形特性

本手法を適用した試作システムでは、ユーザが指定できる TGM の特徴量は、圧縮部材の長さ  $lp$  と張力部材の自然長  $lt$  の 2 つであり、これら进行操作することで静定形状を変化させることもできる。本研究では、本手法を構成する変形操作、特に位相変形におけるアルゴリズムを考える上で、これらの特徴量の変化に対する静定形状の変化を調べた。ここで、試作システムによる実行例から得られた結果を述べる。

本研究では、外力や幾何拘束を与えない単位構造に対して、 $lp$  を一様に変化させた場合、 $lt$  を一様に変化させた場合において、静定形状の変化を観測した。正三角形の面に構築した単位構造において、面に対する垂直方向の寸法  $L$ 、三角形の面積  $S$  に関する以下のような変化を確認した。

- $lp$  : (小)  $L$  : 小 (大)  $L$  : 大,  $S$  : 大
- $lt$  : (小)  $L \rightarrow lp$ ,  $S \rightarrow 0$  (大)  $L \rightarrow lp$ ,  $S$  : 大

また、図 3 は閉じたメッシュ (幾何拘束無し)、図 4 は開いたメッシュ (境界稜線を幾何拘束) に対して、これらの特徴量を同時に変化させた場合の実行例を示す。この実行例では、全ての部材の  $lp$ ,  $lt$  を同じ値にしている。図から、幾何拘束の有無に関わらず、 $lt$  を一様に小さくすることで、面のアスペクト比が正三角形に近づく、モデル形状全体が滑らかになっていることが確認できる。

本手法の幾何変形では、TGM 構築時の特徴量を変更せず、拘束条件に対して初期形状を維持しようとする特徴を生かしたアルゴリズムを用いているが、特徴量更新に伴う上記の特徴を位相変形に生かすことを考えた。

### 4. データ構造

本研究では、本手法で提案する位相幾何的な形状変形操作を高速且つ安定的に処理するため、独自の TGM データ構造を考えた。ここで、位相要素と TGM 構成要素の対応を図 5 に示す。本研究では、形状を位相情報と幾何情報で表現する境界表現法 (B-rep)[16] に着想を得て、張力部材 (tensile part) を稜線 (edge)、端点 (end

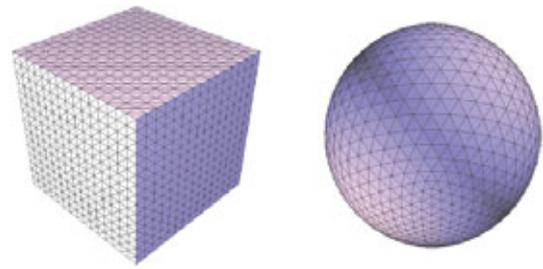
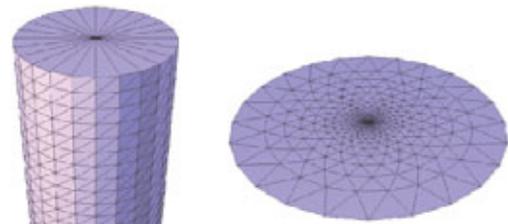
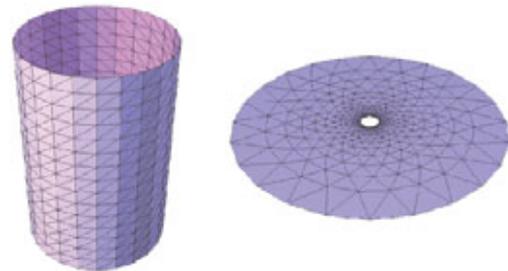


図 3 閉じたメッシュ ( $lp=1.04 \rightarrow 5.0, lt=0.734 \rightarrow 0.01$ )



(a) 円盤



(b) アニュラス

図 4 開いたメッシュ ( $lp=0.659 \rightarrow 0.01, lt=0.454 \rightarrow 0.005$ )

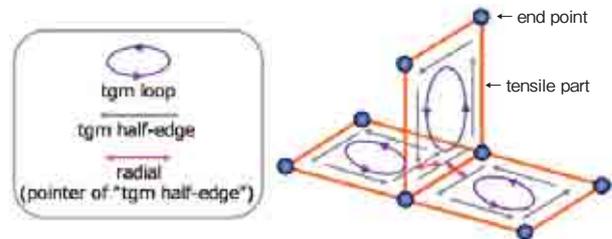


図 5 位相要素と TGM 構成要素の対応

point) を頂点 (vertex) と見立てる Half-edge[16] に基づくデータ構造を考えた。本手法で用いる TGM の位相データは以下の通りである。

- tgm : 位相連続な単位構造群
- unit : 単位構造 (unit structure)
- prest : 圧縮部材 (prestressing part)
- tens : 張力部材 (tensile part)
- tgmhe : 張力部材を稜線に見立てた時の半稜線 (tgm half-edge)
- tgmloop : 半稜線で定義されるループ (tgm loop)
- end : 部材端点 (end point)

更に、非多様体形状を扱うためのデータ構造である Radial-edge[17] を基に、TGM 半稜線 (tgm half-edge)

には、張力部材を介して隣接する半稜線へのポイント (radial) を保持させることを考えた。

本手法の位相変形には TGM の位相変形が含まれるが、B-Rep モデルに対するオイラー操作のように、変形の前後で位相要素間の矛盾が生じないように基本操作群の組合せによって、安定的に処理することができる。

## 5. アルゴリズム

本研究では、本手法を適用したシステムを試作し、実行例によって有効性の検証を行った。試作システムでは、画面上のマウス操作 (クリック/ドラッグ) によって、本手法を構成する幾何変形と位相変形を極めて直観的に実行することができる。次に、これらの操作を実現するためのアルゴリズムについて詳細を述べる。

### 5. 1 幾何変形

本手法では、頂点単位の幾何拘束 (平行移動, 回転) や外力によって、“引っ張り”, “曲げ”, “捻り” といった幾何変形を実現する。TGM はメッシュに適用 (構築) した直後の特徴量を変更せず、変形操作で与えられる拘束条件を満足する静定形状を求め、これをメッシュに反映することで変形形状を得る。本手法では、変形しない部分の頂点群を幾何拘束することで、変形の局所性を確保する。ここで、幾何変形の実行例を図 6 に示す。

また、Tensegric Modeling では、対象形状が密なメッシュの場合、静定に掛る計算コストや収束性に問題があったが、本研究では t-FFD[2] を用いた近似計算によって問題の解消を図り、実際に有効であることを確認した。この方法を用いた実行例を図 7 に示す。

### 5. 2 位相変形

本手法では、対象のメッシュと TGM に対する位相変形を同時に処理することで、“切り取り” と“貼り付け”, つまりカットアンドペーストを実現する。TGM の位相変形におけるデータ上の処理は、メッシュに対するモデル構築時の処理がそのまま“貼り付け”に適用でき、複合構造の TGM を、指定する稜線単位で単位構造に分けることが“切り取り”に該当する。ここで、単純な“貼り付け”の実行例を図 8 に示す。

本研究では、3.3 節で述べた通り、張力部材の自然長を一様に小さくすると、幾何拘束を満足しながら形状が均一で滑らかなメッシュ形状が得られることを確認した。そこで、この特徴を円盤と同相のメッシュのモーフィングを t-FFD に適用し、対象のメッシュ形状に沿って変形させた上で“貼り付け”を行う、“t-FFD 貼り付け”の実現を図った。第 1 章で述べた従来のカットアンド

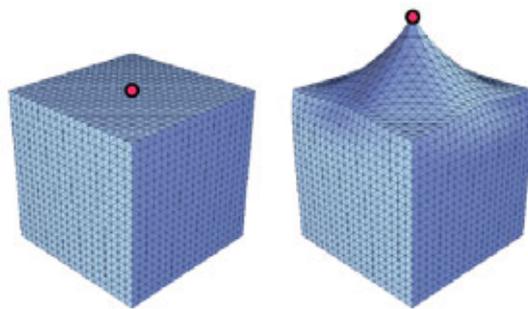


図 6 幾何変形 1

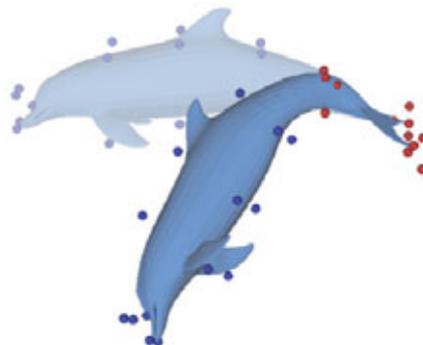


図 7 幾何変形 2

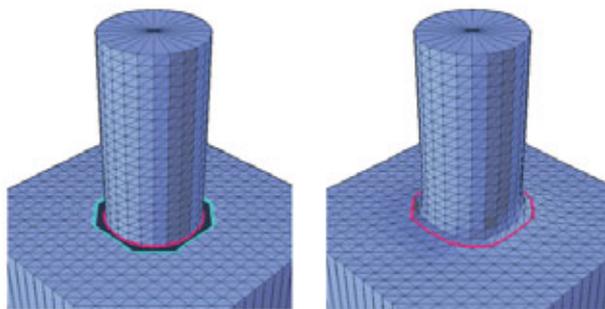


図 8 貼り付け

ペースト手法には、対象形状の位相に制限がある場合が多いが、本手法にはこの問題は存在しない。“t-FFD 貼り付け”は、以下の手順で行うものとする。

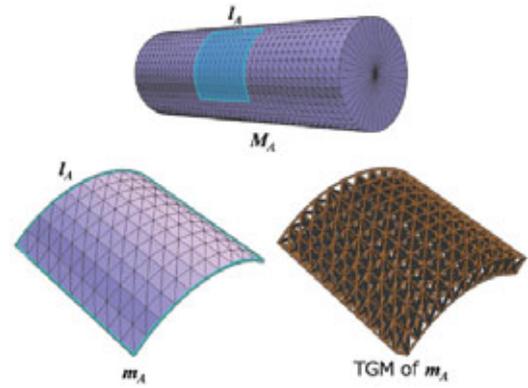
- (1) 貼り付ける先のメッシュ (被ペーストメッシュ)  $M_A$  上で、貼り付ける領域 (中間メッシュ)  $m_A$  を指定し、 $M_A'$  と  $m_A$  に分離する (図 9(a)).
- (2) 中間メッシュに TGM を構築する (図 9(a)).
- (3) 中間メッシュの境界を幾何拘束し、指定した特性値で更新された静定形状  $m_A'$  を求める。(図 9(b))
- (4) 中間メッシュ  $m_A'$  と貼り付けるメッシュ (ペーストメッシュ)  $M_B$  の間で t-FFD の対応付けを行う (図 9(c)).
- (5)  $M_B$  を  $m_A$  で逆変換した形状  $M_B'$  を求める (図 9(c)).
- (6)  $M_A'$ ,  $M_B'$  (片方/両方) に TGM を構築し、境界の稜線列を基準にこれらを貼り付けた形状を求める (図 9(d)).

6. おわりに

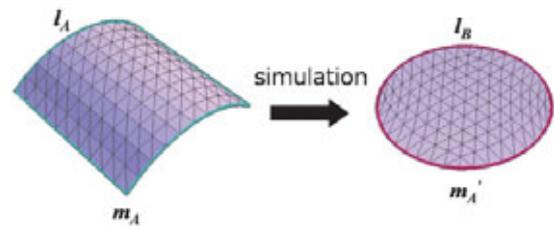
これまで本研究では、任意の三角形メッシュのためのバーチャルクレイモデリング手法の確立を目指し、Tensegric Modeling に基づく直観的な変形操作を提案してきた。本稿では、提案手法を適用した試作システムによる実行例を示し、機能面での有効性を確認した。

現状では、以下の点で実用上の問題があるため、これらの解決を今後の検討課題とする。

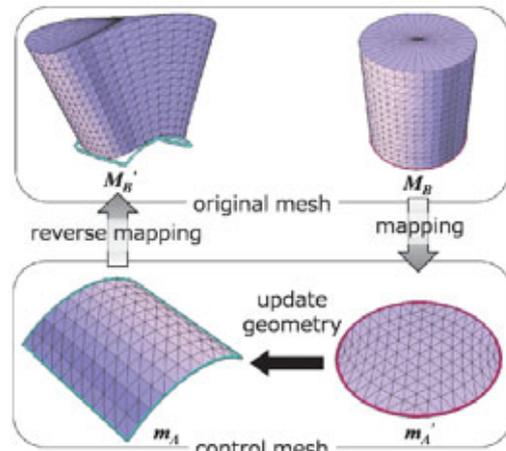
- 所望の変形を行うための最適な特性値を経験的に設定している：
  - ユーザによる判断の負荷を無くすよう、半自動的に求める方法が必要。
- 変形操作単位が頂点/稜線であり、変形意図の反映が不十分：
  - 新しい操作子、変形領域のリメッシュが必要。



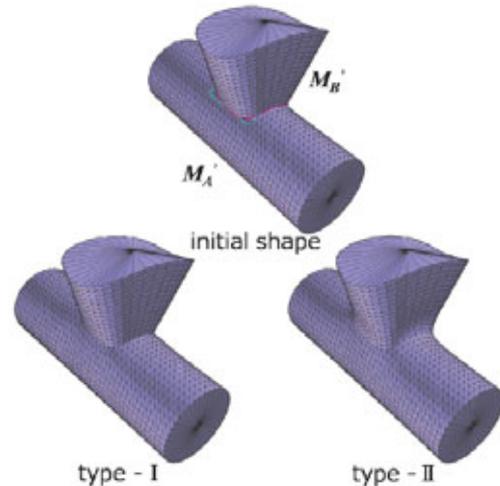
(a) 手順 (1), (2) の実行例



(b) 手順 (3) の実行例



(c) 手順 (4), (5) の実行例



(d) 手順 (6) の実行例

図9 t-FFD 貼り付け

## 参考文献

- [1] Thomas W. Sederburg, Scott R. Parry, "Free-form deformation of solid geometric models", Proc. of SIGGRAPH '86, pp.151-160, 1986.
- [2] Kazuya G. Kobayashi, Katsutoshi Ootsubo, "t-FFD: free-form deformation by using triangular mesh", Proc. of Solid modeling and applications '03, pp.226-234, 2003.
- [3] Catmull, E., Clark, J., "Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes.", Computer Aided Design, No.10, pp.350-355, 1978.
- [4] Loop, C. T., "Smooth subdivision surfaces based on triangles", Master's thesis, Department of Mathematics, University of Utah, 1987.
- [5] Dachille, F., Qin, H., and Kaufman, A. E., "A novel haptics-based interface and sculpting system for physics-based geometric design", Computer Aided Design, No.33, pp.403-420, 2001.
- [6] Kevin T. McDonnell, Hong Qin, Robert A. Wlodarczyk, Virtual clay: a real-time sculpting system with haptic toolkits, Proc. of Interactive 3D graphics '01, pp.179-190, 2001.
- [7] Katsutoshi Ootsubo, Kazuya G. Kobayashi, "Tensegric Modeling for Arbitrary Mesh Models", Proc. of Digital Engineering Workshop 2005, pp.168-171, 2005.
- [8] SensAble Technologies, "FreeForm", <http://www.sensable.com/industries-design-model.htm>.
- [9] Shigeru Muraki, "Volumetric shape description of range data using "Blobby Model"", Proc. of SIGGRAPH '91, pp.227-235, 1991.
- [10] 西村, 平井, 河合, 河田, 白川, 大村, "分布関数による物体モデリングと画像生成の一手法", 電子情報通信学会論文誌, No.4, pp.718-725, 1985(J68-D).
- [11] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, T. R. Evans, "Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions", Proc. of SIGGRAPH '01, pp.67-76, 2001.
- [12] Henning Biermann, Ioana Martin, Fausto Bernardini, Denis Zorin, "Cut-and-paste editing of multiresolution surfaces", Proc. of SIGGRAPH '02, pp.312-321, 2002.
- [13] Takeo Igarashi, Satoshi Matsuoka, Hidehiko Tanaka, "Teddy: a sketching interface for 3D freeform design", Proc. of SIGGRAPH '99, pp.409-416, 1999.
- [14] Takashi Kanai, Hiromasa Suzuki, Jun Mitani, Fumihiko Kimura, "Interactive mesh fusion based on local 3D metamorphosis", Proc. of Graphics Interface '99, pp.148-156, 1999.
- [15] O. Sorkine, D. Cohen-Or, Y. Lipman, M. Alexa, C. Rössl, H. -P. Seidel, "Laplacian surface editing", Proc. of Eurographics 2004, pp.175-184, 2004.
- [16] M. Mantyla, "An Introduction to Solid Modeling", Computer Science Press, 1988.
- [17] K. J. Weiler, "Topological Structures for Geometric Modeling", Ph.D thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 1986.

# 産業技術大学院大学情報アーキテクチャ専攻の 教育体系に関する研究

加藤 由花\*・土屋 陽介\*・村尾 俊幸\*

## A Study of an Educational System on the Course of Information System Architecture of AIIT

Yuka Kato\*, Yosuke Tsuchiya\* and Toshiyuki Murao\*

### Abstract

This paper describes the relationship between the educational system on the course of Information System Architecture, Graduate School of Industrial Technology, Advanced Institute of Industrial Technology and IT skill standards determined by the industrial world. Using the relationship, in this paper, we try to systematize and enhance the educational scheme for professional engineers, and the following two results are shown: (i) we investigate the correspondence between learning units in 2007 version of the curriculum of AIIT and the skill items determined in ITSS (Information Technology Skill Standards) ver. 2 as the skill dictionary, and we design 2008 version of the curriculum based on the investigation results; (ii) we also investigate the correspondence between learning units in 2008 version of the curriculum and the skill items of ITSS ver. 2, and we propose an evaluation method to assess the acquisition level of the skill items for each student according to the correspondence.

Keywords: Professional School, Information Systems, Curriculum, ITSS, Educational System

### 1. はじめに

大学教育においては、これまで、実践的なIT教育の不足が指摘されてきたが、近年、産学協同実践的IT教育訓練基盤強化事業(経済産業省)[1],先導的ITスペシャリスト育成推進プログラム(文部科学省)[2],高度情報通信人材育成拠点大学構想(日本経団連)[3]などにより、産学連携の動きが活発化してきている。また、情報処理学会においては、情報技術の進展に見合った標準カリキュラムを策定するために、米国のCC2005[4]をベースとしたJ-07プロジェクト[5]が進められている。このように、IT教育に対する様々な試みがなされる一方で、ITの基本構造の変革により、高度IT人材の具体像(キャリア、スキル)が見えにくくなっており、その可視化、共有化が望まれている。大学等の教育機関においては、産業界に高度IT人材を供給するという役割を踏まえて、産業界からのスキルの提供を受けつつ、教育方法の高度化を図ることが期待されている。

このような背景から、本稿では、産業技術大学院大学産業技術研究科情報アーキテクチャ専攻の教育体系と、産業界における業界標準との関係を調査することにより、高度専門技術者教育の方法論を体系化、高度化する

ことを目指す。本専攻では、産業界が求める高度IT人材の育成を教育目標としているが、そのためには、具体的なスキルセット獲得のための実践的な手法を開発し、スキルセット獲得状況を客観的に評価できる仕組みを整備していく必要がある。本稿では、ITスキル標準などが定めるスキル体系と、本専攻のカリキュラムにおいて提供可能なスキルとの関係を調査することにより、これらの仕組みの実現を目指す。なお、情報アーキテクチャ専攻では2008年度にカリキュラムの見直しを行った。本稿においては、旧カリキュラム(2007年度カリキュラム)の分析を行うとともに、新カリキュラム(2008年度カリキュラム)の作成に研究成果を反映させ、その結果作成されたカリキュラムの提示も行う。

具体的な研究手順を以下に示す。

- ・ 業界標準の調査：標準スキル体系を調査し、採用する項目を洗い出す。
- ・ 教育体系の調査：採用したスキル標準と、本専攻のカリキュラムにおいて提供可能なスキルとの対応関係を調査する。
- ・ 調査結果の分析：調査結果を分析し、スキルセットを可視化、共有化する。
- ・ 教育手法の提案：分析結果を利用し、スキルセット

の獲得手法, 評価手法を提案する。

本研究成果は, 高度 IT 人材の育成を目指す他の大学や大学院等, 教育機関における利用が期待できる。さらに, 以下の分野への適用が可能である。

- ・ 本研究は, 情報アーキテクチャ専攻におけるカリキュラムを調査対象としているため, 産業技術大学院大学の教育やカリキュラム策定に直接貢献できる。具体的には, 産業界のニーズにあった教育研究の実現が可能になる。
- ・ スキルセットを定義することにより, 学生のキャリアパス設計やスキル診断等が可能になる。
- ・ 産業技術大学院大学の特徴である実践的教育を広報, 宣伝していく機会になる。

## 2. ITSS ver. 2

### 2. 1 スキル体系

大学における情報教育の体系を策定しようとする試みはこれまでも多数行われてきた。主なものを表1にまとめる。ここでは, 大学における情報教育では何を教えるべきかというラーニングユニット (本稿におけるスキル項目とはほぼ同義) が網羅されている。これは, 本学でのカリキュラムを策定する場合にも, 参考とすべき項目である。

表1 情報教育における標準カリキュラムの例

大学	標準カリキュラム
筑波大学	情報教育の標準カリキュラム
慶応義塾大学	情報教育の標準カリキュラム
明治大学	情報教育の標準カリキュラム
立教大学	情報教育の標準カリキュラム

一方, 社会人教育を対象とした場合, 産業界に広く普及し, 利用されている標準スキル体系とカリキュラムとのマッピングを行うことが重要になる。学生にとっては, 獲得したスキルとキャリアとの関係が明確になり, それが学習指針となり得るためである。また, 産業界にとっては, 学生の獲得したスキル項目が明確になり, それを評価指標として利用することが可能になる。主なものを表2にまとめる。ITSS (Information Technology Skill Standards) [6]は, 各種 IT 関連サービスの提供に必要とされる能力を明確化・体系化した指標であり, 産学における IT サービス・プロフェッショナル

ルの育成・教育のために有用な共通フレームワークである。ETSS (Embedded Technology Skill Standards) [7]は, 組込ソフトウェア開発に関する最適な人材育成, 人材の有効活用を実現するための指標である。UISS (Users' Information Systems Skill Standards) [8]は, 情報システムを活用するユーザ企業/組織において必要となるスキルをシステムの企画・開発から保守・運用・廃棄に係るまでのソフトウェアライフサイクルプロセスに基づき体系化した指標である。さらに, これら各スキル標準の整合性を図るために, 参照モデルとして「共通キャリア・スキルフレームワーク」[9]が構築されている。

表2 標準スキル体系の例

標準スキル体系	ITSS	ETSS	UISS
ITSS	ITSS	ETSS	UISS
ETSS	ITSS	ETSS	UISS
UISS	ITSS	ETSS	UISS

### 2. 2 ITSS ver. 2

このように様々なスキル体系が存在するが, 本稿では, 各種 IT 関連サービスの提供に必要とされる能力を明確化・体系化した指標である ITSS を教育体系とのマッピングに利用することとした。これは, ITSS は, 産学における IT サービス・プロフェッショナルの教育・訓練等に有用な「ものさし」を提供しようとするものであり, プロフェッショナルの成長・育成に関連する様々な主体が, 有機的な連携を図る上で必要な辞書的な機能を持つためである。現在のバージョンは3であるが, 調査を行った時点でのバージョンは2であったため, この ITSS ver. 2 において定義されたスキルのうち, 本学で教育対象とする専門分野に関連したスキルを抽出して利用することとした。

#### (1) 職種と専門分野

IT スキル標準では, 職種を「コンサルタント」や「プロジェクトマネジメント」などの11に分類し, 職種ごとに全部で36の専門分野を設けている。また, それぞれの専門分野に対応して, IT 技術者個人の能力や実績に基づいて7段階のレベルを規定している。本学では独自に定義した「情報アーキテクト」と呼ばれる人材の育成を目指しているが, これは IT スキル標準における職種と対応付けると「コンサルタント」「IT アーキテクト」「プロジェクトマネジメント」「IT スペシャリスト」「アプリケーションスペシャリスト」「ソフトウェアデベロップメント」の6種類に相当する。そのため, 以降, この6種類の職種を考察の対象とする。

## (2) スキル項目

次に、教育体系とのマッピングに利用するスキル項目について考える。ITSS ver. 2では、職種と専門分野ごとに必要なスキル項目と知識項目をスキルディクショナリとして定義している。本稿では、このスキルディクショナリをマッピングに利用する。

ITSS スキルディクショナリでは、各スキル項目に対応する知識項目が網羅されており、職種と専門分野ごとに、修得が必要な知識項目が指定されている。例えば、スキル項目「プロジェクト統合マネジメント」における知識項目としては、「プロジェクト憲章作成」「プロジェクト・スコープ記述書暫定版作成」「プロジェクトマネジメント計画書作成」などが定義されている。職種「プロジェクトマネジメント」においてはこれらの項目の修得は必須であるため、この知識項目の修得が指定されている。これらの知識項目は、職種「IT アーキテクト」「コンサルタント」などでも修得が必要な項目として指定されている。

本稿では、このスキルディクショナリにおいて定義された知識項目のレベルで、教育体系とのマッピングを行う。つまり、各講義科目において、抽出された知識項目を取り扱っているかどうかを調査し、修得が必要な知識項目に対する講義で取り扱っている知識項目の充足率を調査する。

## 3. 教育体系（2007年度）の調査

本稿ではまず、2007年度カリキュラムの調査を行った。はじめにカリキュラムの構成（科目群）について簡単に説明した後、本学で提供可能な学修項目と標準スキル体系（ITSS ver. 2）において定義された知識項目とのマッピングを行う。さらに、科目群ごとに修得可能な学修項目を明らかにする。

### 3.1 カリキュラムの構成

本学は2006年4月に開校し、2007年度はその時点で設計されたカリキュラムに従って講義を行っていた。これはITSS ver. 1に従って設計されたものであり、高度な情報通信技術とプロジェクト管理能力および業務遂行能力を持つ「情報アーキテクト」の育成を目指したものである。具体的には、業務遂行に必要となる基礎知識を与える「基礎科目群」、プロジェクト管理を体系的に学習する「プロジェクト管理系科目群」、情報アーキテクトの基本的な考え方を学習する「情報システム系科目群」、および「ネットワーク／サーバ系領域」「ソフトウェア開発系領域」「データベース系領域」の3つのIT系専門科目群から構成されている。学生は、各自の専門性に

合わせて、主に3つの専門領域に沿ったキャリア設計を行っている。

知識項目の網羅性という観点からはさほど問題はないが、現時点では、専門がテクニカルな領域に偏っていること、ITSS ver. 1に準拠しているため、ITSS ver. 2との整合性がとれない部分（専門領域の区分など）が出てきていることなどが問題となっていた。そこで、2007年度カリキュラムとITSS ver. 2の知識項目とのマッピングを行うことにより、その乖離度を調査することとした。

### 3.2 知識項目とのマッピング

調査方法としては、教員ごとに、担当科目（2年次に開講されるプロジェクト型科目を含む）において取り上げている学修項目を抽出してもらい、ITSS スキルディクショナリで定義されている知識項目と対応づけを行ってもらった（具体的な対応表については文献[10]を参照のこと）。前章で述べたように、本稿で取り扱う職種は以下の7種類である。

- ・ 共通
- ・ コンサルタント
- ・ IT アーキテクト
- ・ プロジェクトマネジメント
- ・ IT スペシャリスト
- ・ アプリケーションスペシャリスト
- ・ ソフトウェア開発

まず、全教員分の結果を集計し、本学で教育可能な学修項目を明らかにした。職種ごとのスキル充足率の値を表3に、充足率をプロットした結果を図1に示す。充足率は、ある知識項目を本学の講義で取り扱っているかどうかを基に算出し、一つでも取り扱っている科目があれば、充足していると判断した。この結果から、全職種において比較的高い充足率を達成しているが、コンサルタントやIT アーキテクトの項目がやや低くなっていることがわかる。ここで、学生は全ての科目を履修できるわけではないので、履修科目の組み合わせによって修得可能なスキルセットは異なることに注意が必要である。

次に、より詳細な傾向を分析するために、各職種に対して、スキル項目ごとの充足率をプロットした。グラフは省略するが、まず、コンサルタントの知識項目に関しては、「IT ソリューションの提案」「IT 戦略の策定」「パッケージの適合性評価と適用に関する知識」の充足率が低くなっている。また、IT アーキテクトの知識項目に関しては、「標準化と再利用」の充足率が低い。同様に、IT スペシャリストの知識項目に関しては、「業務分析」「分散コンピューティングシステム構築」の充足率が低くなっている。

一方, プロジェクトマネジメント, アプリケーションスペシャリスト, ソフトウェア開発の知識項目に関しては, 全ての項目で充足率が100%になっている。

表3 職種ごとのスキル充足率

職種	充足率
IT系	100%
システム開発系	100%
プロジェクトマネジメント系	100%
アプリケーションスペシャリスト系	100%
ソフトウェア開発系	100%
その他	100%

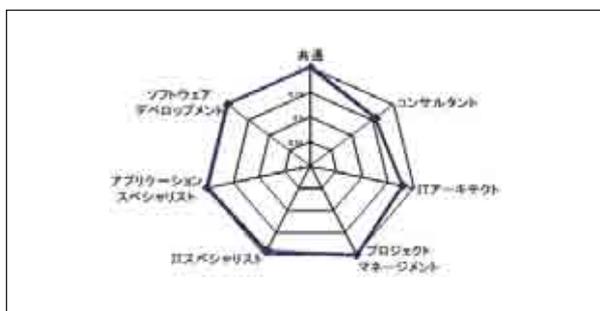


図1 職種ごとのスキル充足率 (本学全体)

#### 4. 教育体系 (2008 年度) の設計

2007 年度カリキュラムの分析結果から, 専門領域に関する知識項目の充足率についての問題は見出せなかった。しかし, 3つの専門領域自体が ITSS ver. 1 に従って定義されており, ITSS ver.2 と整合性が取れないことなどが問題となった。本章では, ITSS ver. 2, 共通キャリア・スキルフレームワーク等を参考にして, 新たに設計した新カリキュラム (2008 年度) の概要を述べる。

##### 4. 1 設計手順

新カリキュラムの設計は, 以下の手順に従って行った。

1. 共通キャリア・スキルフレームワークを参考に, モデルコースおよび科目群を決定する。
2. モデルコースおよび科目群ごとに, 担当教員, 科目数の制約等を考慮して科目を決定する。
3. モデルコースごとに, 学修項目を抽出する。
4. モデルコースごとに, 学修項目を科目に割り当てる。

2007 年度カリキュラムにおける 3つの IT 系専門領域

がここで示すモデルコースに相当するが, 技術領域に偏っていること, ITSS ver. 2 との整合性がとれないことなどから, より汎用的な (ETSS, UISS を含む) 共通キャリア・スキルフレームワークを参考に, モデルコースを決定することとした。モデルコースの提示により, 学生はより明確なキャリアイメージを持ち, 科目を履修することができるようになる。モデルコースがキャリアに対応した概念であるのに対し, 科目群はスキルに対応した概念である。例えば, ソフトウェア開発に関連した科目群としてシステム開発系科目群があるが, ソフトウェア開発コースを選択した学生は, システム開発系科目群の他, プロジェクト管理に関する科目, マネジメント系の科目などを履修することが推奨される。

各科目の設計にあたっては, 学修項目を定義し, 科目間での内容の欠落, 重複を避けることとした。学修項目の抽出には, 標準スキル体系の他, 2章で示した標準カリキュラム等を利用した。科目の決定には, 担当教員の数, 講義時間, 大学の設備, 教員の専門性等, 様々な制約条件が存在するため, まず科目を決定し, 科目に学修項目を割り当てる方式を採用している。

##### 4. 2 新カリキュラムの設計

###### (1) モデルコースと科目群

情報アーキテクチャ専攻では, 情報システムを設計し, その運用を含む全体プロセスを管理する能力を持つ「情報アーキテクト」の育成を目指している。ここでは, 学生が目指す将来キャリアを考慮し, 以下の6つのモデルコースを設定した。これらは, ほぼ ITSS ver.2 に従い, また共通キャリア・スキルフレームワークを参考にして

- ・ プロジェクトマネジメントコース
- ・ セキュリティコース
- ・ ネットワークコース
- ・ データベースコース
- ・ ソフトウェア開発コース
- ・ CIO・マネジメントコース

スキルに対応した概念である科目群としては, 情報アーキテクトの基本的な考え方を学習する IT 基礎科目群と基本共通科目群, それぞれの専門領域について深く学ぶ専門科目群を設定した。専門科目群としては, ICT 系科目群, システム開発系科目群, エンタープライズ系科目群, マネジメント系科目群の4つの専門科目群が用意され, それぞれに対応する PBL (Project Based Learning) 型科目が存在する形態になっている。

###### (2) 科目の決定

次に, 担当教員, 時間割の制約等を考慮して, 科目群ごとに講義科目を決定した。新カリキュラムにおける講

表4 講義科目一覧（新カリキュラム）

専攻	学年	科目名	履修単位
情報システム	1年次	情報システム概論	1
		情報システム概論Ⅱ	1
	2年次	情報システム概論Ⅲ	1
		情報システム概論Ⅳ	1
		情報システム概論Ⅴ	1
		情報システム概論Ⅵ	1
	3年次	情報システム概論Ⅶ	1
		情報システム概論Ⅷ	1
		情報システム概論Ⅸ	1
		情報システム概論Ⅹ	1
情報アーキテクチャ	1年次	情報アーキテクチャ概論	1
		情報アーキテクチャ概論Ⅱ	1
	2年次	情報アーキテクチャ概論Ⅲ	1
		情報アーキテクチャ概論Ⅳ	1
		情報アーキテクチャ概論Ⅴ	1
		情報アーキテクチャ概論Ⅵ	1
	3年次	情報アーキテクチャ概論Ⅶ	1
		情報アーキテクチャ概論Ⅷ	1
		情報アーキテクチャ概論Ⅸ	1
		情報アーキテクチャ概論Ⅹ	1
情報セキュリティ	1年次	情報セキュリティ概論	1
		情報セキュリティ概論Ⅱ	1
	2年次	情報セキュリティ概論Ⅲ	1
		情報セキュリティ概論Ⅳ	1
		情報セキュリティ概論Ⅴ	1
		情報セキュリティ概論Ⅵ	1
	3年次	情報セキュリティ概論Ⅶ	1
		情報セキュリティ概論Ⅷ	1
		情報セキュリティ概論Ⅸ	1
		情報セキュリティ概論Ⅹ	1
データベース	1年次	データベース概論	1
		データベース概論Ⅱ	1
	2年次	データベース概論Ⅲ	1
		データベース概論Ⅳ	1
		データベース概論Ⅴ	1
		データベース概論Ⅵ	1
	3年次	データベース概論Ⅶ	1
		データベース概論Ⅷ	1
		データベース概論Ⅸ	1
		データベース概論Ⅹ	1

義科目の一覧を表4に示す。これらの科目に基づき、モデルコースごとに履修推奨科目を決定した。モデル履修科目を以下に示す。

- ・プロジェクトマネジメントコース
  - プロジェクト管理特論Ⅰ～Ⅲ
  - プロジェクト管理特別講義
  - 情報セキュリティ特論
  - オブジェクト指向開発特論

- CIO 特論
- 情報システム特論Ⅰ
- 情報アーキテクチャ特論Ⅰ～Ⅲ
- 情報ビジネス特別講義Ⅰ,Ⅳ
- 標準化と知財戦略
- ・セキュリティコース
  - 情報セキュリティ特論
  - 情報セキュリティ特別講義Ⅰ～Ⅲ
  - プロジェクト管理特論Ⅰ
  - データベースシステム特論
- CIO 特論
- 情報システム特論Ⅰ
- 情報アーキテクチャ特論Ⅰ～Ⅲ
- 情報ビジネス特別講義Ⅰ,Ⅳ
- 標準化と知財戦略
- ・ネットワークコース
  - ネットワークシステム特別講義Ⅰ～Ⅲ
  - ネットワーク特論Ⅱ
  - 高信頼システム特論
  - プロジェクト管理特論Ⅰ
  - 情報セキュリティ特論
  - ソフトウェア開発特論Ⅲ
- CIO 特論
- 情報システム特論Ⅰ
- 情報アーキテクチャ特論Ⅰ～Ⅲ
- 標準化と知財戦略
- ・データベースコース
  - データベース構築特論
  - マイニング技術特論
  - データベースシステム特論
  - プロジェクト管理特論Ⅰ
  - 情報セキュリティ特論
- CIO 特論
- 情報システム特論Ⅰ,Ⅱ
- 情報アーキテクチャ特論Ⅰ～Ⅲ
- 情報ビジネス特別講義Ⅳ
- 標準化と知財戦略
- ・ソフトウェア開発コース
  - ソフトウェア工学特論
  - 情報システム開発特別講義
  - ソフトウェア開発特論Ⅰ～Ⅲ
  - オブジェクト指向開発特論
  - ソフトウェア開発プロセス特論
  - プロジェクト管理特論Ⅰ,Ⅱ
- CIO 特論
- 情報アーキテクチャ特論Ⅰ～Ⅲ
- 標準化と知財戦略

- ・ CIO・マネジメントコース
  - CIO 特論
  - 情報システム特論 I, II
  - 情報アーキテクチャ特論 I～III
  - 情報ビジネス特別講義 I～IV
  - 標準化と知財戦略
  - 情報セキュリティ特別講義 III
  - データベース構築特論
  - eビジネス論

(3) カリキュラムの設計

科目の決定後, モデルコースごとに学修項目を抽出し, 科目に割り振る作業を行った. 各科目で取り扱う学修項目については, 文献 [10] に示した知識項目との対応表を用いて調べることができる.

5. 教育体系 (2008 年度) の分析

本章では, 4 章で設計した新カリキュラムを対象に, 本学で提供可能な学修項目と標準スキル体系 (ITSS ver. 2) において定義された知識項目とのマッピングを行う. さらに, モデルコースごとに修得可能な学修項目を明らかにする.

5. 1 知識項目とのマッピング

新カリキュラムにおいて提供可能な学修項目と, ITSS ver. 2 で定義された知識項目との対応関係を調査した. 調査方法としては, 教員ごとに, 担当科目 (2 年次に開講されるプロジェクト型科目を含む) において取り上げている学修項目を抽出してもらい, ITSS スキルディクショナリで定義されている知識項目と対応づけを行ってもらった (具体的な対応表については文献 [10] を参照のこと). 2 章で述べたように, 本稿で取り扱う職種は以下の 7 種類である. これらは ITSS ver. 2 において定義された職種であるため, 必ずしも新カリキュラムのモデルコースと 1 対 1 に対応しているわけではない. 本稿では, スキルディクショナリから知識項目を抽出する目的で, これらの職種を利用している.

- ・ 共通
- ・ コンサルタント
- ・ IT アーキテクト
- ・ プロジェクトマネジメント
- ・ IT スペシャリスト
- ・ アプリケーションスペシャリスト
- ・ ソフトウェア開発

まず, 全教員分の結果を集計し, 新カリキュラムにおいて本学で提供可能な学修項目を明らかにした. 職種ごとのスキル充足率の値を表 5 に, 充足率をプロットした

結果を図 2 に示す. 充足率は, ある知識項目を本学の講義で取り扱っているかどうかを基に算出し, 一つでも取り扱っている科目があれば, 充足していると判断した. この結果から, 新カリキュラムでは全職種において 0.88 以上の充足率を達成しており, バランスのとれたカリキュラム構成になっていることがわかる. 2007 年度カリキュラムと比較すると, 特にコンサルタントと IT アーキテクトの充足率が向上しており, より幅広い学修項目の提供が可能になったことがわかる.

表 5 職種ごとのスキル充足率

職種	知識項目	充足率
共通	ITSS-001	1.00
	ITSS-002	1.00
	ITSS-003	1.00
	ITSS-004	1.00
	ITSS-005	1.00
	ITSS-006	1.00
	ITSS-007	1.00
	ITSS-008	1.00
	ITSS-009	1.00
	ITSS-010	1.00
コンサルタント	ITSS-011	0.88
	ITSS-012	0.88
	ITSS-013	0.88
	ITSS-014	0.88
	ITSS-015	0.88
	ITSS-016	0.88
	ITSS-017	0.88
	ITSS-018	0.88
	ITSS-019	0.88
	ITSS-020	0.88
IT アーキテクト	ITSS-021	0.88
	ITSS-022	0.88
	ITSS-023	0.88
	ITSS-024	0.88
	ITSS-025	0.88
	ITSS-026	0.88
	ITSS-027	0.88
	ITSS-028	0.88
	ITSS-029	0.88
	ITSS-030	0.88

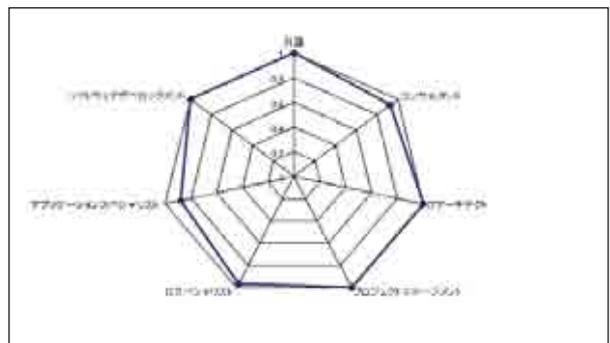


図 2 職種ごとのスキル充足率 (本学全体)

次に, より詳細な傾向を分析するために, 各職種に対して, スキル項目ごとの充足率をプロットした. 結果を, 図 3～図 8 に示す.

まず, 図 3 から, コンサルタントの知識項目に関しては, 「パッケージの適合性評価と適用」の充足率が低い値となっているが, 「IT ソリューションの提案」や「IT 戦略の策定」の充足率が向上し, 結果としてコンサルタントの充足率を高めていることがわかる. また, 図 4 から, IT アーキテクトの知識項目に関しては, 「標準化と再利用」の充足率が向上し, 結果として IT アーキテクトの充足率が 100% になったことがわかる. IT スペシャリスト (図 6) とアプリケーションスペシャリスト (図 7) については, いくつかの項目で充足率が低くなっているが, これらの項目は本学で育成を目指す「情報アーキテ

クト」のスコープ外であると考えられる。

プロジェクトマネジメント（図5）、ソフトウェアデベロップメント（図8）の知識項目に関しては、全ての項目で充足率が100%になっている。

### 5.2 モデルコースごとのマッピング

次に、4章で設計したモデルコースごとに、対象となる科目を履修した上で、対応する教員のPBLを履修した場合に、学生が修得可能なスキル項目を分析した。これは、前述したとおり、学生は本学で提供する全ての科目を履修できるわけではないので、履修科目の組み合わせによって履修可能なスキルセットが異なるためである。なお、それぞれの充足率の詳細については、文献[10]を参照のこと。

#### (1) プロジェクトマネジメント

職種ごとの充足率としては、ITスペシャリスト、アプリケーションスペシャリスト、ソフトウェアデベロップメントに対する知識項目の充足率が低くなっているが、それ以外の職種についての充足率は高くなっている。また、プロジェクトマネジメントに関する知識項目についての充足率は100%になっている。

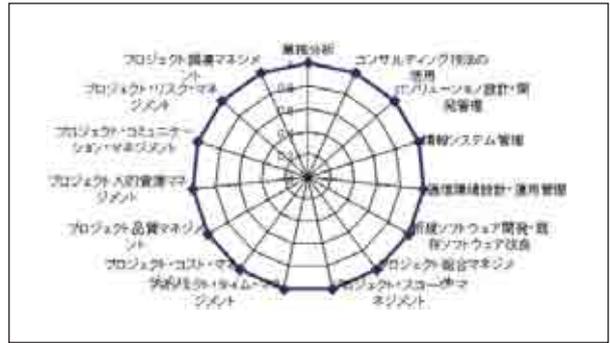


図5 プロジェクトマネジメント（本学全体）

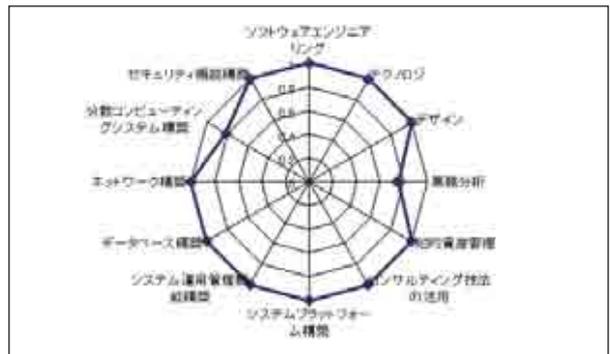


図6 ITスペシャリスト（本学全体）

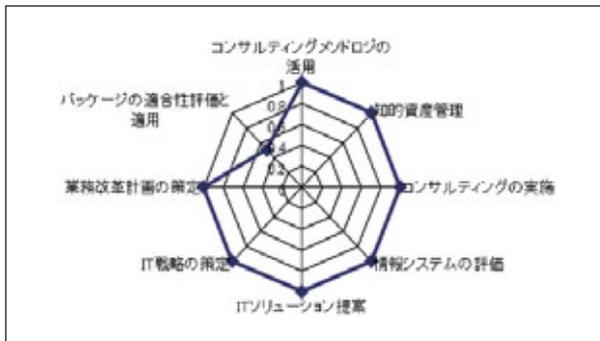


図3 コンサルタント（本学全体）



図7 アプリケーションスペシャリスト（本学全体）

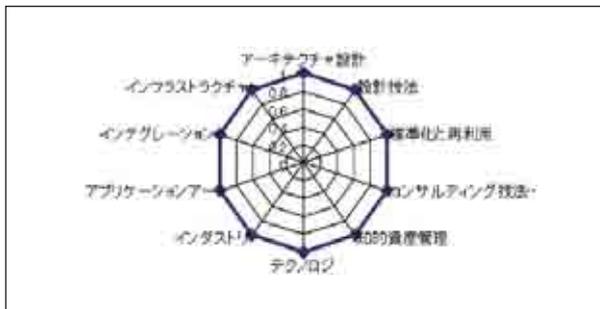


図4 ITアーキテクト（本学全体）



図8 ソフトウェアデベロップメント（本学全体）

(2) セキュリティ

職種ごとの充足率としては、プロジェクトマネジメント、IT スペシャリスト、アプリケーションスペシャリスト、ソフトウェア開発に対する知識項目の充足率が低くなっているが、それ以外の職種についての充足率は高くなっている。IT スペシャリストに関する知識項目については、セキュリティ以外の専門分野についての充足率は低いものもあるが、セキュリティ機能構築に関する知識項目についての充足率は 100% になっている。

(3) ネットワーク

職種ごとの充足率としては、プロジェクトマネジメント、アプリケーションスペシャリスト、ソフトウェア開発に対する知識項目の充足率が低くなっているが、それ以外の職種についての充足率は高くなっている。IT スペシャリストに関する知識項目については、ネットワーク以外の専門分野についての充足率は低いものもあるが、ネットワーク構築に関する知識項目についての充足率は 100% になっている。

(4) データベース

職種ごとの充足率としては、プロジェクトマネジメント、アプリケーションスペシャリスト、ソフトウェア開発に対する知識項目の充足率が低くなっているが、それ以外の職種についての充足率は高くなっている。IT スペシャリストに関する知識項目については、データベース以外の専門分野についての充足率は低いものもあるが、データベース構築に関する知識項目についての充足率は 100% になっている。

(5) ソフトウェア開発

職種ごとの充足率としては、IT スペシャリストに対する知識項目の充足率が低くなっているが、それ以外の職種についての充足率は高くなっている。また、ソフトウェア開発に関する知識項目についての充足率は 100% になっている。

(6) CIO・マネジメント

職種ごとの充足率としては、プロジェクトマネジメント、IT スペシャリスト、アプリケーションスペシャリスト、ソフトウェア開発に対する知識項目の充足率が低くなっているが、それ以外の職種についての充足率は高くなっている。また、コンサルタントに関する知識項目についての充足率は、「パッケージの適合性評価と適用」以外は 100% になっている。

6. 評価手法の提案

ここまでの分析結果から、本学のカリキュラムにおいて提供可能なスキルセット（学修項目セット）が明らか

になった。ここで抽出された学修項目を利用すると、モデルコースごとに学生のスキル修得状況を評価することが可能になる。本章では、知識項目の修得状況を利用した学生評価の手法を提案する。

6. 1 学生評価シート

本稿における調査により、科目ごとに提供可能な知識項目が抽出された。各モデルコースにおける推奨科目と、ここで抽出された知識項目を組み合わせると、学生のスキル修得状況を評価するための評価シートを作成することができる。評価シートは、モデルコースごとの知識項目セットが記述されたもので、知識項目ごとに教員が以下の 3 段階（0～2）で評価を行う。

- ・ 2：完全に活用できる。
- ・ 1：活用できないが、理解している。
- ・ 0：理解していない。

評価は講義科目ごとに行うので、教員は知識項目の修得状況を把握するための手法を用意しておく必要がある。例えば、CIO・マネジメントコースの評価シートは表 6 のようになる。

表 6 学生評価シートの例

知識項目	評価
プロジェクトマネジメントの重要性	2
プロジェクトマネジメントの役割	2
プロジェクトマネジメントの手法	2
プロジェクトマネジメントの課題	2
プロジェクトマネジメントの成果	2
プロジェクトマネジメントのリスク	2
プロジェクトマネジメントのコミュニケーション	2
プロジェクトマネジメントのリーダーシップ	2
プロジェクトマネジメントのチームワーク	2
プロジェクトマネジメントのモチベーション	2
プロジェクトマネジメントの時間管理	2
プロジェクトマネジメントの予算管理	2
プロジェクトマネジメントの品質管理	2
プロジェクトマネジメントの顧客満足	2
プロジェクトマネジメントの持続可能性	2
プロジェクトマネジメントのイノベーション	2
プロジェクトマネジメントのデジタル変革	2
プロジェクトマネジメントの持続可能な開発目標	2
プロジェクトマネジメントの社会貢献	2
プロジェクトマネジメントの倫理観	2
プロジェクトマネジメントのリーダーシップ	2
プロジェクトマネジメントのチームワーク	2
プロジェクトマネジメントのモチベーション	2
プロジェクトマネジメントの時間管理	2
プロジェクトマネジメントの予算管理	2
プロジェクトマネジメントの品質管理	2
プロジェクトマネジメントの顧客満足	2
プロジェクトマネジメントの持続可能性	2
プロジェクトマネジメントのイノベーション	2
プロジェクトマネジメントのデジタル変革	2
プロジェクトマネジメントの持続可能な開発目標	2
プロジェクトマネジメントの社会貢献	2
プロジェクトマネジメントの倫理観	2

教員は、担当科目ごとに各学生の知識項目の修得レベルを評価する。評価シートは、それらの知識項目を集計して作成する。上記の CIO・マネジメントコースの場合、推奨科目は、CIO 特論、情報システム特論 I（情報システムマネジメント）、情報システム特論 II（ビジネスプロセスマネジメント）、情報アーキテクチャ特論 I（情報

システムインフラストラクチャ) など, 14 科目である。これらの科目で取り扱っている知識項目の評価結果を集計したものが, 表 6 に示すようなシートになる。

## 6. 2 スキル修得状況の評価

学生評価シートを利用して, スキルの修得状況の評価する。学生に入学時のスキルレベルを自己申告させ, クォータごとに評価シートに基づいたスキル修得状況のチャートを作成する。その結果, 入学時と修了時のスキル修得状況の比較が可能になる。チャートの例を図 9 に示す。

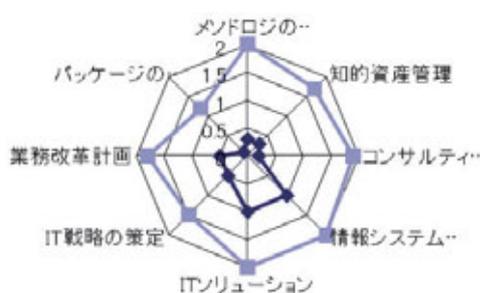


図 9 スキル修得状況の評価の例

## 7. おわりに

本稿では, 「産業技術大学院大学情報アーキテクチャ専攻の教育体系に関する研究」を通じて得られた成果を報告した。研究成果は以下の 2 点である: (i) 情報アーキテクチャ専攻における 2007 年度カリキュラムと標準スキル体系 (ITSS ver. 2 で定義された知識項目) とのマッピングを行い, その調査結果に基づき改訂版の新カリキュラムを設計した; (ii) 設計した新カリキュラムとスキル体系とのマッピングを行うことにより, 学生のスキル修得状況の評価するための評価手法を提案した。

## 参考文献

- [1] 産学協同実践的 IT 教育訓練基盤強化事業:  
<http://www.meti.go.jp/press/20070215003/20070215003.html>.
- [2] 先導的 IT スペシャリスト育成推進プログラム:  
[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/koutou/it/](http://www.mext.go.jp/a_menu/koutou/it/).
- [3] 高度情報通信人材育成拠点大学構想:  
<http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/2005/039/>.
- [4] CC2005:  
<http://www.acm.org/education/curricula.html>.
- [5] 情報専門学科カリキュラム J07:  
<http://www.ipsj.or.jp/12kyoiku/taikai07index.html>.

- [6] IT スキル標準センター:  
<http://www.ipa.go.jp/jinzai/itss/>.
- [7] 組込みソフトウェア開発力強化推進委員会活動報告:  
<http://sec.ipa.go.jp/download/200504eb.php>.
- [8] 情報システムユーザースキル標準:  
<http://www.meti.go.jp/press/20060623003/20060623003.html>
- [9] 共通キャリア・スキルフレームワーク (案):  
[http://www.ipa.go.jp/about/pubcome/200806/index.html](http://www.ipa.go.jp/about/pubcomme/200806/index.html)
- [10] 加藤由花, 土屋陽介, 村尾俊幸, “情報アーキテクチャ専攻の教育体系に関する研究,” 平成 19 年度傾斜的研究費 (一般) 研究成果報告書, 産業技術大学院大学, 2008 (3).



# 場面遷移ネット GUI シミュレータによる マルチエージェントサービスフローシミュレーション

川田 誠一\*・館山 武史\*\*・下村 芳樹\*\*  
新井 民夫\*\*\*・梅田 靖\*\*\*\*・久保田 直行\*\*

## Multi-Agent Service Flow Simulation Using Scene Transition Nets GUI Simulator

Seiichi Kawata\*, Takeshi Tateyama\*\*, Yoshiki Shimomura\*\*  
Tamio Arai\*\*\*, Yasushi Umeda\*\*\*\* and Naoyuki Kubota\*\*

### Abstract

Recently, a new academic field, "service engineering" has been very actively investigated. However, there are few effective software tools to simulate and evaluate services designed based on the concept of service engineering. In the past, the authors proposed a service flow simulation method using scene transition nets(STN) which is a graphic modeling and simulation method for discrete-continuous hybrid system. However, this method does not consider how to simulate complex service flows including interactions between persons in services. In this paper, the authors propose multi-agent service flow simulation method in order to simulate complex services. The experimental results of a restaurant service including agents' interactions showed the availability of our method.

Keywords: Service Engineering, Discrete/Continuous Hybrid Systems, Scene Transition Nets(STN), Service Flow Simulation, Multi-agent Systems, Graphical User Interface(GUI)

### 1. はじめに

近年、産業界ではサービス産業が一層重要視される傾向にあり、サービスの生産性を向上させることが重要な課題となっている。このような背景から、工学的な視点からサービスの設計・製造の方法論を確立することを目的とした新しい学問体系であるサービス工学 [1] が提案され、サービス設計を支援するサービス CAD の開発などが進められている。それに伴い、サービス工学の理論に基づいて設計されたサービスの評価を行うためのシミュレーション技法の確立が求められており、これまでに著者らは、離散・連続混合システムのモデリング・シミュレーション手法である場面遷移ネット (scene transition nets, STN) [2] を用いてサービスの流れをモデル化し、シミュレーションによって評価を行う手法を提案している [3][4]。これらの手法は、サービスの流れを視覚的に確認することを可能にするとともに、顧客満足度などのパラメータの時間的推移をシミュレートしサービスの評価を行うことを可能としている。

しかし、これらの研究は比較的単純な流れで表現され

るサービスを STN でモデル化し、検証することにとどまっておらず、サービスのエージェントの条件分岐等を含む複雑な動作や、複数のアクタ同士の相互作用などが、サービスの成否にどのような影響を及ぼすかについて検証することは考慮していなかった。しかし、サービスの評価は人のふるまいや人同士の相互作用に大きく左右されることが多いため、サービスの評価を行う際は、これらの要素をモデル化し、シミュレーションによって検証を行う必要があると考える。そこで本研究では、複雑なサービスをマルチエージェントシステムとしてとらえ、STN によってモデリングを行い、その動作をシミュレーションによって検証し、評価を行う手順を提案する。本論文では、エージェント同士の相互作用が顧客の満足度に影響するレストランサービスを例題として用い、そのサービスをマルチエージェントシステムとしてモデリングし、シミュレーションを行うことによって本提案手法の有効性を検証する。

本論文の構成を以下に示す。第 2 章では、サービスを離散・連続ハイブリッドシステムとしてモデル化するための手法である、場面遷移ネットの説明を行う。3 章で

は、著者らが開発した、STN によるモデリング・シミュレーションを容易に行うためのツールである STN GUI Simulator[4] について述べる。4 章では、STN によってサービスの流れをモデル化する手法について、5 章では STN の拡張を通してサービスをマルチエージェントシステムとしてモデル化することについて述べる。6 章では例題を用い、本手法の有効性を検証し、考察を行う。最後に、7 章で結論を述べる。

## 2. 場面遷移ネット

本章では、場面遷移ネット (Scene Transition Nets, 以下 STN) の概要とその構成要素について説明する。

### 2.1 STN とは

STN は、アクタとシーンという概念に基づき、離散・連続混合システムを図式的に表現するためのモデルである。また、STN は離散事象システムのモデリングに用いられるペトリネット [5] のコンセプトに基づいており、並列的に動作している複数のサブシステムがどのように関わりあっているかを示すことができる。

### 2.2 STN の構成要素

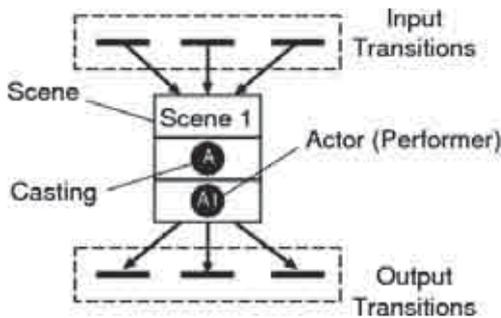


図1 STN の構成要素

図1に示すように、STN はアクタ (Actor)、シーン (場面, Scene)、トランジション (Transition)、そしてシーンとトランジションを結ぶアーク (Arc) で構成される。以下に各構成要素の詳細を示す。

#### (1) アクタ (Actor) とアクタクラス (Actor Class)

アクタはペトリネットのトークン (Token) に相当するが、自らの状態変数を保持している点がトークンとの大きな違いである。図1に示すように、アクタは後述する現行シーン内の図形で表現され (図1では A1 と書かれた黒丸)、現行シーンに記述されたダイナミクスに従って自らの状態変数を動的に変化させる。また、アクタ変数がある条件 (後述する出力トランジションに記述されている条件) を満たすと、アクタは別のシーンに遷移す

る。つまり、アクタは状態変数を変化させながら、ネットワーク内を移動していくことになる。また、オブジェクトとして概念的な共通性を持ち、同一のデータ構造を持つアクタの集合をアクタクラスと呼ぶ。図1では、アクタ A1 はアクタクラス A のインスタンスであり、アクタ A2, A3, ... もアクタクラス A のインスタンスであるとする、それらはアクタ A1 と同一のデータ構造を持つものとする。

#### (2) シーン (Scene)、キャストिंग (Casting)、パフォーマ (Performer)

シーンはペトリネットのプレース (Place) に相当し、図1に示すように上下に三分割された長方形で表される。最上段にはシーン名が記述され、中段にはそのシーンに遷移することができるアクタクラスが表示されている。このアクタクラスを、そのシーンのキャストिंगと呼ぶ。最下段には、現在そのシーンにあるアクタが表示されている。このとき、そのアクタをシーンのパフォーマと呼び、そのアクタにとっては現在のシーンは現行シーン (または現行場面) と呼ぶ。

#### (3) トランジション (Transition) とアーク (Arc)

STN のトランジションは、ペトリネットのトランジションに相当する。トランジションとシーンは図1に示すようにアーク (矢印) で結ばれており、シーンの入力側のトランジションを入力トランジション、出力側を出力トランジションと呼ぶ。また、トランジションにアークを介して入力側となるシーンをそのトランジションの入力シーン、出力側を出力シーンと呼ぶ。各トランジションには入力シーン内のパフォーマとなるアクタが出力シーンに遷移するための発火条件と、遷移時の状態遷移則が記述されている。

### 2.3 STN によるシミュレーション

上記の要素を組合せてネットワークを構築後、シミュレーションを実行する。シミュレーションでは、ユーザーは各アクタの場面遷移の様子を観察することで離散事象システムの解析、またアクタ変数の時間的推移を観察することで連続変数システムの解析が同時に行えることになる。

## 3. STN GUI Simulator の開発

本章では、本研究で開発した STN GUI シミュレータについて説明する。開発言語は JAVA であり、マルチプラットフォームに対応している。図2に、シミュレータの概観を示す。本シミュレータは、GUI によって

STNの構築とシミュレーションの実行が可能となっており、画面は大きく分けて(1)STN構築ツールバー、(2)ワークスペース兼シミュレーション実行スペース、(3)シミュレーションツールバー、の3つの部分で構成されている。以下に、各部の詳細を記す。

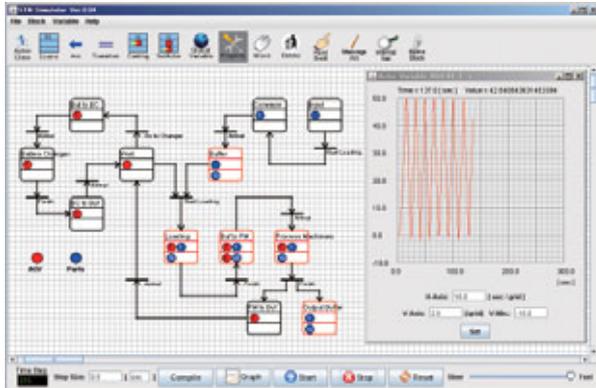


図2 STN GUI Simulator

### 3. 1 STN 構築ツールバー

シミュレータの上部に配置されているツールバーを指す。ツールバーのアイコンをクリックし、必要に応じてワークスペース上のオブジェクトを指定、もしくは配置場所を指定することにより、STNの構築、編集、設定がGUIによって操作可能となっている。

### 3. 2 Actor Class, Scene, Arc, Transition ボタン

ワークスペース上にそれぞれアクタクラス、シーン、アーク、トランジションを配置するボタンである。

### 3. 3 Casting, SetActor ボタン

CastingまたはSetActorボタンをクリックした後、ワークスペース上のアクタクラスをマウスで任意のシーンにドラッグ&ドロップすることにより、それぞれシーンのキャスティングとパフォーマとなるアクタを設定する。なお、パフォーマとなるアクタにはインスタンス番号に相当する番号が表示される。

### 3. 4 Global Variable ボタン

このボタンをクリックすることにより、グローバル変数(定数)の変数名、最大/最小値、整数/実数の指定、初期値、グラフの表示/非表示の設定が可能である。また、グローバル変数の時間的変化を表すダイナミクスも設定できる。

### 3. 5 Property ボタン

Propertyボタンをクリックした後、任意のオブジェクトをクリックすることにより、各オブジェクトの設定を行うことが可能である。

- (1)アクタクラスの名前、変数名、各変数の整数/実数の指定
- (2)アクタの(インスタンスとしての)名前、アクタ変数の最大値、最小値、初期値、グラフの表示/非表示の設定
- (3)シーンの名前、アクタ変数の時間変化のダイナミクスの設定
- (4)トランジションの名前、発火条件、状態遷移則の記述

### 3. 6 Move, Delete ボタン

オブジェクトの移動、削除を行う。

### 3. 7 BPMN Block ボタン

著者らは、複雑な業務手順を分かりやすく図示・可視化するための記述法であるBPMN(Business Process Modeling Notation)で記述されたサービスや業務をSTNの記述に変換し、シミュレーションを行う研究を行っている。このBPMN Blockボタンはそのための作図ツールを起動するボタンであり、この機能の詳細については論文[6]を参照されたい。

### 3. 8 ワークスペース兼シミュレーション実行スペース

シミュレータの中央にあるスペースを指す。設計者はこのスペースにSTNを記述し、シミュレーション実行時にはアクタの状態遷移の様子をアニメーションで観察することが可能である。

### 3. 9 シミュレーションツールバー

シミュレーションのスタート、一時停止、リセットを行うためのボタンが設置されている。また、シミュレーションのスピードをスクロールバーによってシミュレーション中でも変更可能である。また、ツールバーの左側には、シミュレーション時間(Time Step)を表すカウンタが設置されている。

### 3. 10 シミュレーションの実行手順

シミュレーションの実行手順を図3に示す。シミュレータは1ステップごとに、ネットワークの中で発火可能なトランジションを検索する。トランジションは、入力シーンのキャスティングとなっているアクタクラスのアクタがパフォーマとして存在しており、アクタ変数やグローバル変数が発火条件を満たしている場合のみ発火する。トランジション発火後は、その入力シーン内のアクタが次の状態(出力シーン)に遷移し、同時にトランジションに記述されている状態遷移則に従って変数が更新される。そして、アクタがパフォーマとして存在するシーン全てについて、1ステップ分のダイナミクスを計

算し, 変数を更新し, シミュレーション時間を1進めて再び発火可能なトランジションの検索に戻る. 上記の手順により, アクタはネットワーク内のシーンを移動し, アクタ変数とグローバル変数が更新されていく.

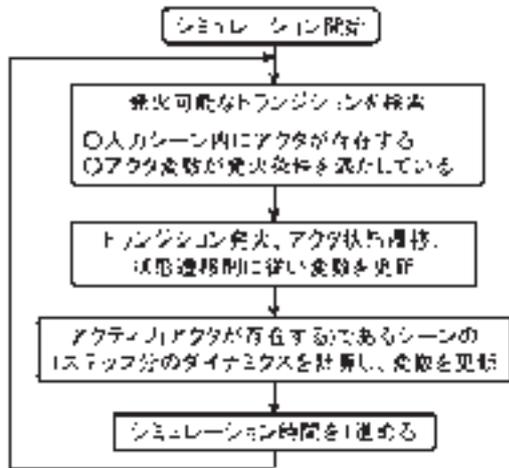


図3 STN GUI Simulator の1[step]の動作手順

### 3. 11 アクタ変数 / グローバル変数のグラフ及び一覧表の表示

シミュレーション中は, 指定したアクタ変数やグローバル変数の時間変移を表すグラフが表示される. また, 一覧表の形式で時間変移を観察することも可能である.

### 3. 12 確率的要素を含むシステムの記述法

実システムでは, 確率的な要素を含む場合が多々あり, 設計したシステムが不確実な事項に対応できるかどうかを検証するためには, このような確率的要素をモデリングすることが不可欠である. 特に, サービスは人為的な要因を多く含むため, 特に確率的で不確実な要素が多いと言える. 本シミュレータでは,  $0 \sim 1$  の実数値の乱数を発生させる関数 `rand` が定義されており, 確率的な状態遷移の分岐などは容易にモデリング可能である. また本シミュレータでは, シーンに微分方程式以外の計算式を記述することが可能であるため, 例えば正規分布に従って決定される変数は, Box-Muller 法の計算式をシーンに記述することで容易に実装可能である. これにより, サービスの確率的な要素を容易にシミュレートすることが可能となる.

## 4. STN によるサービスフロー・シミュレーション

著者らは, STN を用いてサービスの流れのモデリングを行い, シミュレーションを行う手法を提案している [3][4]. 本手法では, サービスの個々のイベントをそれぞれ1つのシーンにより表現する. サービスの流れを表現する STN は, 次のような手順で作成される. まず, 顧

客の行動遷移とプロバイダの行動遷移をそれぞれ STN で表現し, サービス・エンカウンタ [7] と呼ばれる, 顧客とプロバイダが直接的に相互作用を行うイベントのシーンを抽出し, それらを重ね合わせ, 一つのネットとして統合する. 下記に, サービス・エンカウンタと本手法の詳細を記す.

### 4. 1 サービス・エンカウンタ

Rathmell は, サービスを「人間の行為であり, 演技であり, 何かを成し遂げようとする努力である」と定義している [8]. 以上の定義においては, サービス全体の流れの中で, サービス提供者が顧客に対し直接的に「行為し, 演技する期間」が存在するとされ, この期間をサービス・エンカウンタと呼んでいる. サービス・エンカウンタは, 顧客とプロバイダの相互作用が実際に行われるという点で, サービス活動を特徴付ける重要な一要素である. 本手法では, STN によるサービスの流れのモデル化に, このサービス・エンカウンタの概念を取り入れる.

### 4. 2 STN の作成手順とシミュレーション方法

本手法におけるモデリングとシミュレーションの手順を以下に示す.

- (1) サービスのイベントの時間的推移を表すサービス・スクリプト [7] と呼ばれる概念を用い, 顧客のサービスの需給過程を STN で構築する
- (2) 顧客とプロバイダが直接的な相互作用を行うイベントのシーンをサービス・エンカウンタとして抽出する
- (3) 抽出したエンカウンタに対応するプロバイダのシーンを作成する
- (4) エンカウンタ間の遷移を実現するためのプロバイダのシーンを追加作成し, プロバイダのネットワークを構築する
- (5) 顧客のネットとプロバイダのネットをサービス・エンカウンタのシーンを重ねることにより, 1つのネットワークに統合する
- (6) シミュレーションを実行し, アクタの動きを観察することにより, サービスの流れを確認する. また, 顧客満足度の時間的推移を観察し, サービスの評価を行う

## 5. STN によるマルチエージェント・サービスフローシミュレーション

### 5. 1 サービスフローモデルとマルチエージェントシステム

本研究では, 複雑なサービスをマルチエージェントシ

システムとしてとらえ、STNによってモデリングを行い、その動作をシミュレーションによって検証し、評価を行う手順を提案する。サービスをマルチエージェントシステムとしてとらえ、モデリングを行うおおよかな手順は、基本的には4章で述べた手順と同様である。しかし、アクタが複数存在するサービスをSTNでモデリングする際、一つのシーンに同時刻で入れるアクタの数を指定したい場合が多々ある。例えば、あるサービスを同時に受給できる人数などに上限がある場合（レストランのレジ等）などが考えられる。従来のSTNでは、シーンのキャストイングの記述によって、そのシーンに遷移可能なアクタクラス（アクタの種類）を指定することは可能であるが、同時刻で遷移可能なインスタンス（すなわちアクタ）の数の指定については、詳細な議論はほとんどされていなかった。そこで本研究では、マルチエージェントシステムのモデリング及びシミュレーションに必要と思われる上記の機能を実現するために、STNの拡張を行い、その機能をSTN GUI Simulatorに実装する。拡張内容の詳細は、次節で述べる。

5. 2 STNの拡張：キャストイングのキャパシティとアクタの状態遷移の順番の定義

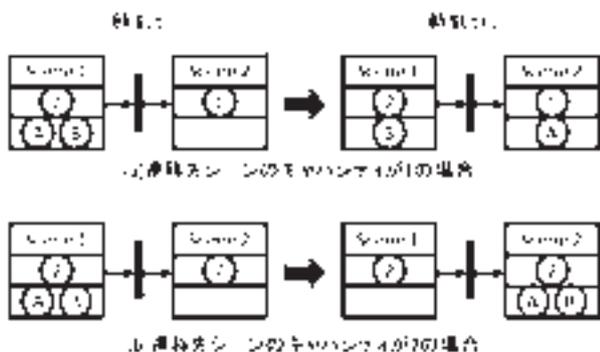


図4 キャストイングのキャパシティの定義

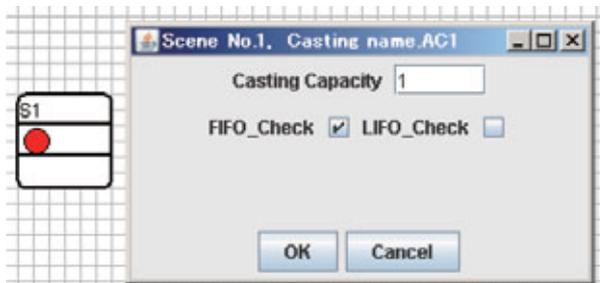


図5 キャストイングのキャパシティ及びFIFO/LIFOの指定

本研究では、シーンのキャストイングにキャパシティ（容量）の概念を追加することにより、個々のシーンに同時に遷移可能なアクタの数を指定可能とすることを提案する。本研究では、図4に示すように、キャストイングを表す図形の中にキャパシティを記述することと

する。図4(a)(b)のように、時刻 $t$ において、同一のアクタクラス $\circ$ のインスタンスであるアクタAとBが共にシーン1からシーン2への遷移条件を満たしている場合、時刻 $t+1$ において(a)の場合はどちらか片方のアクタのみ、(b)の場合は2つのアクタが同時に遷移可能となる。(a)の場合は、アクタBはアクタAがシーン2から他のシーンに遷移するまで、シーン1内で待機することとなる。また、(a)のようにアクタの「待ち」が発生する場合、次のシーンに遷移するアクタの優先順位を指定することが必要となる。そこで本研究では、この優先順位の指定法として、(1)先入れ先出し (First In First Out, FIFO), (2)後入れ先出し (Last In First Out, LIFO)のどちらかを選択することとする。なお、複数のアクタが同時に遷移した場合は、優先順位はランダムに決定することとする。以上のような拡張により、STNで待ち行列などの要素をモデル化することが可能となる。図5に、この機能をSTN GUI Simulatorに実装した結果を示す。シーン内のキャストイングをクリックすると、図5のような設定ダイアログが現れ、本節で定義したキャパシティの数値とFIFO/LIFOの設定を行うことが可能である。

6. 例題による検証：レストランサービスのシミュレーション

本章では、例題を用いて本シミュレーション手法の有効性を検証する。

6. 1 問題設定

ここでは、レストランサービスを例題として用いる。本サービスは、供給者側のエージェントとしてコックとウェイター、受給者側のエージェントとして顧客を定義する。顧客はレストランに入り、料理を注文し、食事を行い、代金を支払い、店を出る。コックは注文された料理を作成し、ウェイターは顧客の席への誘導、注文の受付、料理の運搬及び会計処理を行う。サービスの評価は、離散事象システムとしてのサービスの流れ（デッドロックや不適切な流れの有無）と、顧客の満足度の値によって行う。レストランサービスの評価項目としては、料理の味、店員の態度、店の雰囲気等、さまざまなものが考えられるが、ここでは待ち時間の長さに対する顧客満足度のみを算出し、サービスの評価に用いることとする。本サービスでは、顧客の視点では下記の4種の待ち時間が存在する。

- (1) 顧客が入店してから席に案内されるまでの待ち時間： $t_1$

- (2) 注文する料理を決定後, ウェイターがテーブルに到着し, 注文を受け付けるまでに要する時間:  $t_2$
- (3) 料理を注文後, 到着するまでに要する時間:  $t_3$
- (4) 会計のために顧客がレジに行き, ウェイターがそこに到着するまでに要する時間:  $t_4$

なお, 満足度は下記の待ち時間を引数とする満足度関数によって算出されるが, ここでは待ち時間の合計が短いほど, 満足度が高くなるように満足度関数を設定する(詳細は 6. 3 節で述べる). 上記の待ち時間は, ウェイター, コック, 顧客の人数(店の込み具合)やそれらのエージェントの行動に依存して変化する. 本実験では, このサービスをマルチエージェントシステムとしてとらえてモデル化し, シミュレーションを行うことによりサービスの評価を行うことの有効性を検証する.

## 6. 2 サービスのモデル化

本節では, 4 章で述べた手法を用い, STN によってサービスのモデル化を行う. まず, 本レストランサービスの顧客のサービス・スクリプトを下記のように作成する.

- (1) 入店する
- (2) 席に案内されるまで待つ
- (3) 席に案内してもらい, 席に着く
- (4) メニューを読み, 注文する料理を決定する
- (5) ウェイターを呼び, 到着を待つ
- (6) ウェイターに注文を告げる
- (7) 料理の到着を待つ
- (8) 料理を受け取る
- (9) 食事する
- (10) 食事終了後, レジに向かう
- (11) レジにウェイターが到着するまで待つ
- (12) レジで代金を支払う
- (13) 店を出る

次に, 上記のサービス・スクリプトから, 顧客とウェイターの相互作用が発生するサービス・エンカウンタを抽出する. ここでは, 「(3) 席に案内してもらい」, 「(6) 注文を告げる」, 「(8) 料理を受け取る」, そして「(12) レジで代金を支払う」の 4 つのサービスイベントがサービス・エンカウンタであるといえる. 次に顧客のサービス・スクリプトを参照し, 顧客の STN を作成し, 抽出されたサービス・エンカウンタをもとにウェイターの STN も作成する. ウェイターの STN は, 「待機」のシーンから, 顧客が位置するシーン(サービスイベント)にウェイターが適宜移動し, 顧客に対応するように STN を構築した. コックの STN も同様に作成し, 最後に顧客と

ウェイター, ウェイターとコックのそれぞれのサービス・エンカウンタを重ねることによって 1 つの STN としたものが図 6 である. STN は図の左側に顧客, 中央にウェイター, 右側にコックのネットワークが配置されている. それぞれのネットワークの間に位置する, キャスティングが 2 体あるシーンがサービス・エンカウンタである. 本モデルのシミュレーションは, 複数の顧客を初期シーンである「Start」に配置させた状態からスタートし, 全ての顧客が店を出て終了シーンである「End」に到着した時点で終了とする.

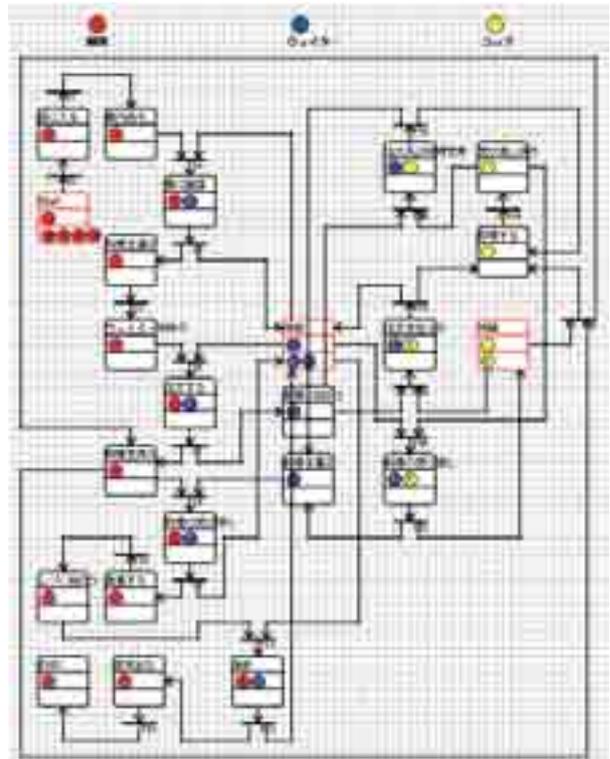


図 6 レストランサービスの STN

## 6. 3 シミュレーションの設定

本節では, シミュレーションの各種パラメータ設定と, 実験で用いる顧客の満足度関数について述べる.

### (1) シミュレーションの単位時間

シミュレーションの単位時間は, 図 3 に示した STN GUI Simulator の処理の 1 サイクルの単位である [step] とする. キャスティングとトランジションの条件が満たされている場合は, 各アクタは各シーン間を 1[step] ごとに遷移していくことになる. ただし, 顧客のシーン「食事をする」のみ, 次のシーン「レジに向かう」に遷移するまでに 10[step] を要することとした.

### (2) キャスティングのキャパシティの設定

顧客とウェイター, 及びウェイターとコックのサービ

ス・エンカウンタに相当するシーンのキャストイングは、全てキャパシティの値は1と設定する。つまり、これらのシーンではアクタ同士の相互作用は常に1人対1人で行うことになる。複数対複数で行う場合も考えられるが、本実験では考慮しないこととする。

(3) 顧客の満足度関数

6. 1節で述べたように、本実験では顧客の待ち時間に対する満足度を算出し、サービスの評価を行うこととする。顧客*i*の満足度は、6. 1節で述べた4種の待ち時間 ( $t_1, t_2, t_3, t_4$ ) を引数とした下記に示す満足度関数によって算出されることとする。

$$S_i = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^4 w_k \cdot t_k} \quad (1)$$

ここで、 $w_k$ は待ち時間  $t_k$  に対する重みであり、上記の式(1)は待ち時間の重み付き平均値の逆数である。実験では、 $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 1$ とした。なお、待ち時間の単位は[step]であり、各待ち時間は顧客アクタが保持するアクタ変数とし、各シーンに記述された更新式によって更新される。

(4) 各アクタの数

本実験では、顧客の数は10人、コックの数は1人とし、ウェイターの数1人の場合と2人の場合についてシミュレーションを行い、ウェイターの数の変化がサービスの流れや顧客満足度にどのように影響するかを観察する。

6. 4 シミュレーション結果と考察

まず、各アクタの状態遷移を観察することにより、サービスの流れを視覚的に確認することができた。しかし、著者らがテストで作成したSTNモデルでは、ウェイターとコックの相互作用において、デッドロックの発生が確認された。これは、ウェイターがコックに注文を伝えるために受付所に到着した時刻と、コックが注文済みの料理を完成させ、料理の受け渡し場所で待機していた時刻が重なったためである。そのため、このような場合には注文の受付と料理の受け渡しを同時に行うシーンにウェイターとコックが遷移するように、ネットワークを修正した(図6のSTNは修正後のもの)。実際にはコックが受け渡し場所で待機することは少ないかもしれないが、このことは、本手法を用いてシミュレーションを実行することにより、サービスの構造上の問題を発見できる可能性を示すものであると考える。

次に、顧客満足度の計算結果について述べる。本研究

で開発したSTN GUI Simulatorでは、図7に示すように、指定したアクタ変数を表形式で表示させ、リアルタイムに時間的推移を観測することが可能である。図7はウェイターが2人の場合の、顧客10人の満足度 ( $S_1 \sim S_{10}$ )の算出結果を示しており、表1はウェイターが1人、2人のそれぞれの場合の満足度の平均値と標準偏差である。これらの結果から、ウェイターを2人に増加させることは、顧客の待ち時間を削減させ、顧客満足度を増加させるために有効な手段であることがシミュレーションで示されたといえる。

ActorClass/Instance	Variable	Init. Value	Current Value	Current Source
顧客 [A1-1]	S	0.0	0.4	19.0
顧客 [A1-2]	S	0.0	0.30769230769230	19.0
顧客 [A1-3]	S	0.0	0.21652831578947	19.0
顧客 [A1-4]	S	0.0	0.12903225806451	19.0
顧客 [A1-5]	S	0.0	0.10256410256410	19.0
顧客 [A1-6]	S	0.0	0.09756097560975	19.0
顧客 [A1-7]	S	0.0	0.08695652173913	19.0
顧客 [A1-8]	S	0.0	0.08	19.0
顧客 [A1-9]	S	0.0	0.07272727272727	19.0
顧客 [A1-10]	S	0.0	0.06349206349206	19.0

図7 アクタ変数(顧客満足度 S)の一覧表

表1 顧客満足度の平均値と標準偏差

	ウェイターの数 [人]	
	1	2
満足度平均値	0.098	0.158
満足度標準偏差	0.079	0.121

7. 結論

本論文では、サービス工学に基づいて設計されたサービスを対象として、STNを用いてサービスのモデリングを行い、シミュレーションを行うことによって評価を行う手法を提案した。また、そのためのモデリング・シミュレーション環境として、STN GUI Simulatorを開発し、その有用性を確認した。また、本稿では特に、サービスを複数の人間が動作するマルチエージェントシステムとして捉え、キャストイングのキャパシティの概念の導入などを通してモデル化し、シミュレーションを行った。本シミュレータを用いてシミュレーションを行うことにより、サービスの流れを視覚的に確認することが可能であり、顧客満足度を容易に算出してサービスの評価を行えることを確認した。本稿の実験では確率的要素のモデリングは行わなかったが、サービスは本来不確定要素を多く含むものである。しかし、本シミュレータでは

確率的要素を容易にモデル化可能であるため, 不確定要素を含んだサービスの検証にも有用であると期待できる.

#### 謝辞

本研究は, 科学研究費基盤 B(1)18360079 「市場表現に離散・連続ハイブリッドモデルを用いたサービス設計支援システムの開発」(研究代表者: 川田誠一) の支援を得て実施した.

#### 参考文献

- [1] 下村芳樹, 原辰徳, 渡辺健太郎, 坂尾知彦, 新井民生, 富山哲男, "サービス工学の提案 - 第1報, サービス工学のためのサービスモデル化技法 -", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.702, pp.315-322 2005.
- [2] 川田誠一, 川田尚吾, 渡辺敦, "場面の概念を用いた離散連続混合システムのシミュレーションモデル", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.59, No.563, pp.10-16 1993.
- [3] 佐藤友亮, 鈴木遼, 原辰徳, 下村芳樹, 新井民夫, "サービス工学に基づくサービス CAD システムの構築 (第 36 報) - サービス・マーケティング手法と場面遷移ネットに基づくサービスフロー・シミュレーション -", 2007 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.941-942, 2007.
- [4] T. Tateyama, S. Kawata and Y. Shimomura, "Development of Scene Transition Net(STN) GUI Simulator for Discrete-Continuous Hybrid Systems", In Proceedings of the 7th Japan Korea Workshop on CAD/CAM -Design Engineering Workshop-, Tokyo, pp.82-87, 2007.
- [5] T.Murata, "Petri Nets, Analysis and Application", Proceedings of the IEEE, Vol.77, No.4, pp.541-580, 1989.
- [6] 陳浩, 下村芳樹, 川田誠一, 館山武史, 新井民生, "ブループリント・スキームに基づくサービスプロセスシミュレーション", 2008 年度精密工学会春季大会学術講演会第 15 回「精密工学会学生会員卒業研究発表講演会」論文集, pp.7-8 CD-ROM, 2008.
- [7] R.P.Fisk, et al, "サービスマーケティング入門", 法政大学出版局, 2005.
- [8] J.M.Rathmell, "What Is Meant by Services?", Journal of Marketing, Vol.30, No.4, pp.32-36, 1996.

# 3次元CADと品質工学を組み合わせた統計的デザイン手法 －腕時計のデザインを例に－

越水重臣\*

## Statistical Design Method Using 3D CAD and Quality Engineering － Case Study of Wristwatch Design －

Shigeomi Koshimizu\*

### Abstract

Since 3-dimensional CAD data provide visual representation of objects, they are expected to be applied to many fields, such as product planning and industrial design. In this study, a statistical design method is proposed that identifies product designs favored by users by combining a questionnaire survey, which uses 3D CAD data and web technology, plus Design of Experiment, which is a statistical technique. This paper uses the example of the design of a wristwatch. Designs of wristwatch were developed using 3D CAD and the CAD data converted into XVL format and uploaded to a website featuring the questionnaire survey. It was found that the three most influential factors on the judgment of the user are "case," "ring," and "color" by the statistical analysis. From the obtained results, the design of wristwatch was optimized.

Keywords: 3D CAD, Web questionnaire, Quality engineering, Design of experiments, Variance analysis

### 1. 緒言

3次元CADは視認性が優れていることから、3次元CADデータは設計・製造という分野だけに留まらず、様々な活動での応用が考えられる。特に、営業、工業意匠、商品企画、各種協調作業といった分野ではコミュニケーションツールとしての役割が注目されている。最近では、3次元CADデータの軽量化フォーマットが登場したため、Web上に3次元CADデータを表示することが容易にできるようにもなった[1]。これにより製品デザインを決定する際に、Web上にデザイン案を示してユーザーの意見を聴取するといったこともできる。これらツールを組み合わせれば、新しいデザイン手法が構築できよう。例えば、CADを用いてデザイン案を創出するシステムに関する研究としては、ファジィ推論を利用したエキスパートシステムが提案されている[6][7]。

一方で、設計の最適化手法として、品質工学のパラメータ設計法がある。パラメータ設計では、統計的手法である実験計画法(直交表実験)を用いて設計パラメータの最適化を図ることと、得られたデータをSN比という評価指標に変換してから解析することが特徴である。これによりロバストな設計を実現している。しかしながら、このパラメータ設計の手法を工業意匠やプロダクトデザ

インの分野に応用した事例は見当たらない。

そこで本研究では、3次元CADデータによるWebアンケートと品質工学のパラメータ設計法を融合したデザイン手法を提案する。具体的には、統計的手法である実験計画法に従いデザインした「腕時計」を軽量化フォーマットであるXVL形式に変換してWeb上にアップロードし、アンケート調査を行う。得られた結果をSN比に変換した後、分散分析を行い、どのようなデザインがユーザーに好まれるのかを解析する。

### 2. 3次元による腕時計モデルの作成

#### 2.1 直交表にもとづくモデルの作成

3次元CADにより時計モデルを作成する。その際、実験計画法の直交表を利用する。直交表とは少ない実験回数で因子の効果を調査することのできる統計解析のツールである。直交表には、L8,L12といった2水準系の直交表やL9,L27といった3水準系の直交表などさまざまな種類が用意されているが、本研究では表1に示すL18直交表を使用しモデルの作成を行った[2]。表1の左端の1から18までの数値はモデルNo.を示している。L18直交表では、最大8個までの因子の効果を調べることができる。因子AからHの欄に因子を割り付けるの

であるが、各欄の数値は、割り付けられた各因子の水準値を示している。本研究では、腕時計を構成する 8 個の部品『A:バックル, B:ベルト, C:文字盤, D:針, E:ケース, F:リング, G:リュウズ, H:色』を直交表に割り付ける因子として取り上げた。因子 A の錠については 2 水準のパーツを、因子 B ~ H については 3 水準のパーツを用意した。表 1 にそれら部品の 3 次元 CAD モデルを示す。これらパーツを L 18 直交表の 8 列に対応させて割り付け、直交表の指示に従い 18 パターンのデザインを完成させた。例として、L18 直交表の No.1 に相当するアセンブリモデルを図 1 に示す。もちろん、パーツの組み換えによるアセンブリ作業は 3 次元 CAD 用いて容易に行うことができる。

表 1 L18 直交表

No	Factors							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3	3	3
4	1	1	2	1	2	1	2	1
5	1	2	1	2	1	2	1	2
6	1	3	1	3	1	3	1	3
7	1	1	3	2	3	2	1	3
8	1	2	2	1	3	2	1	2
9	1	3	3	1	1	3	2	1
10	2	1	1	2	2	2	2	1
11	2	2	2	1	1	3	3	2
12	2	3	3	2	2	1	1	3
13	2	1	1	3	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	3	3	1	2	3	2	1
16	2	1	1	3	2	3	1	2
17	2	2	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

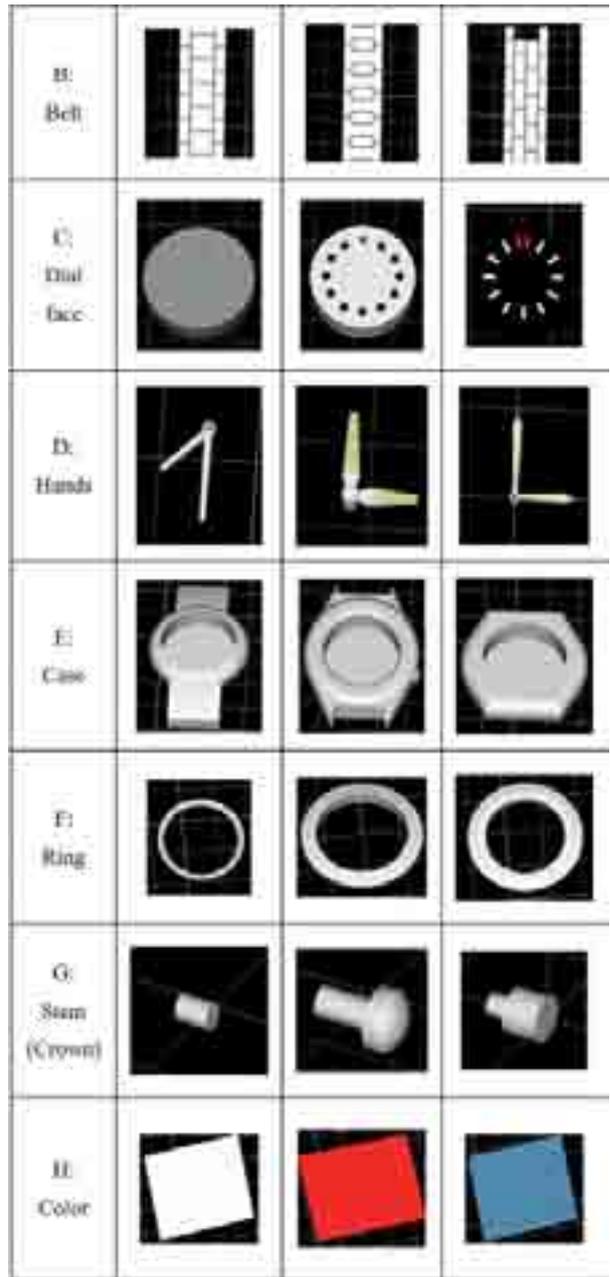


表 2 因子 (腕時計のパーツ)

Factors	Level 1	Level 2	Level 3
A: Buckle			



図 1 3次元モデルの例 (L18 直交表の No.1)

## 2. 2 実験計画法(直交表)を用いる利点

直交表を用いなくて、全部品の組み合わせを調べようとする $2 \times 3^7$ の組み合わせとなり、4374パターンのモデルを作らなければならないが、L18直交表を使えば、わずか18パターンのモデルを作成するだけでよい。これは18パターンのデザインを評価するのみで、効率よく8個の因子の効果をj知ることができるという利点がある。

また、ここでは直交表の指示に従い、デザインするので、これまでデザイナーが思いもよらなかったデザイン(の組み合わせ)を創出していることになる。そういった意味では、ここで用いている方法は、デザインの強制創出の手法とも言えよう。さらには、直交表で作成したモデルから、新たなデザインに展開することも可能であり、発想支援をしていることにもなる。

## 3. Webアンケートによる調査

作成した時計モデルについては3次元軽量フォーマットであるXVL形式に変換し、学内のホームページ上にアップロードした(図2)。XVLのデータはWeb上で回転させたり拡大させたりする表示ができるので、さまざまな角度からデザインの細部までチェックすることができる。また、Webアンケートの形式をとることにより、アンケートの回収も容易となる。アンケート項目として、性別、年齢を加え、ホームページ閲覧者には、18通りの時計モデルに対して自分の好みであるか否かを5点法で投票してもらった。Webアンケートを実施した。得られたデータを性別や年齢により層別すれば、それぞれのユーザー層における最適なデザインを求めることができる。今回は男子大学生86名にアンケート調査に協力してもらい、その回答結果をもとに解析を行った。



図2 Webアンケートのホームページ

## 4. 分散分析による要因効果の解析

### 4. 1 評価指標について

回答のあった86名のアンケート結果を解析する。まず、L18直交表に従い作成した18モデルのデザインについて、86名の評点から平均値と分散を計算する。それぞれのモデルNo.に対する平均 $m$ と分散 $s^2$ が表3にまとめられている。

表3 アンケートの解析結果

No	A	B	C	D	E	F	G	H	Mean	Variance	SN ratio
									$m$	$s^2$	$S$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	3.08	1.07	8.58
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2.53	1.00	6.43
3	1	1	3	3	3	3	3	3	2.91	1.33	6.37
4	1	2	1	2	2	2	3	3	2.85	1.47	5.53
5	1	2	2	2	3	3	1	1	2.71	1.24	5.92
6	1	2	3	3	1	2	2	2	2.51	1.10	6.00
7	1	3	1	2	1	2	2	3	2.76	1.03	7.40
8	1	3	2	3	2	1	2	1	3.11	1.23	8.17
9	1	3	3	3	2	1	2	2	2.53	1.38	4.64
10	2	1	1	3	3	2	2	1	2.85	1.38	5.89
11	2	1	2	1	3	3	2	2	2.65	1.01	6.95
12	2	1	3	2	2	1	1	3	3.14	1.32	7.47
13	2	2	1	2	3	1	1	2	2.43	0.91	6.48
14	2	2	2	3	1	2	1	3	2.45	1.08	5.74
15	2	2	3	2	2	2	1	1	3.46	1.10	7.01
16	2	3	1	3	2	3	1	2	2.76	1.01	7.54
17	2	3	2	3	1	2	3	1	2.31	0.94	5.98
18	2	3	3	2	1	2	3	1	3.21	1.68	6.36
T									2.01	1.18	6.83

平均のデータからは、今回取り上げた8因子(8部品)が評点に及ぼす効果を求めることができる。平均については、当然それを大きくする因子の水準を選ぶことが望ましい。一方の分散は、アンケート回答者の評点のばらつきを示している。言い換えるなら、分散が大きいということは、評点のばらつきが大きく、人によりデザインの好き嫌いが激しく分かれるということの意味している。万人に好まれるデザインを志向するのなら、分散の小さくなる因子の水準を選ぶべきである。そこで、本事例では、平均の2乗と分散の比をとった以下の値を評価指標とすることにした。

$$M = \frac{m^2}{s^2} \quad (1)$$

ここで、 $m$ は平均、 $s$ は標準偏差である。これは、統計量の変動係数の逆数の2乗、あるいは品質工学でいう

ところの「SN比」に相当する概念である[3]。したがって、本論文でも式(1)で与えられる $\mu$ のことをSN比と呼ぶことにする。SN比はロバストネスの測度と言われ、SN比が大きい因子とその水準を選ぶことは、評価点も高く、そのばらつきも小さい、いわゆる万人受けのするデザインを志向していることになる。

アンケート結果からSN比を求めた結果を表3の右端にまとめる。このSN比のデータをもとに要因効果の算出や最適条件の決定を行う。

#### 4.2 分散分析

まず、分散分析により有意となる因子を調べる。

表3のSN比のデータから分散分析を行い、表4に示すような分散分析表(ANOVA)を作成した[4]。具体的な計算方法を因子Eについて示せば、以下ようになる。

まず、18個の全データから全変動STを求める。

$$S_T = 8.58^2 + 6.40^2 + \dots + 6.36^2 \quad (7)$$

続いて、18個の全データから平均変動CTを求める。

$$C_T = \frac{(8.58 + 6.40 + \dots + 6.36)^2}{18} = 832.86$$

例えば、因子Eの変動 $S_E$ は次式で求められる。

$$S_E = \frac{41.03^2 + 46.12^2 + 35.29^2}{6} \quad (7) \quad 9.79$$

他の因子も同様に計算できる。因子E,F,H以外の因子については、その変動が小さいので誤差eにプールすることにした。よって、誤差変動 $S_e$ は

$$S_e = S_T - S_A - S_B - S_C - S_D - S_E - S_F - S_H = 8.45$$

から計算すればよい。

分散Vは変動Sを自由度fで除したものであり、

$$V = \frac{S}{f} = 4.89$$

分散比 $F_0$ は各因子の分散を誤差分散 $V_e$ で除したものである。

$$F_0 = \frac{V_i}{V_e} = 6.37$$

表4 分散分析表(ANOVA)

Source	f	S	V	F
T	17	939	54.6	63.7*
E	1	10.90	10.90	6.71*
H	1	10.98	10.98	6.73*
C	1	8.45	8.45	5.21
D	1	55.10	55.10	33.7

分散比 $F_0$ がF分布表から得られた値より大きければ、その因子は有意である(効果がある)。因子E,F,Hは、危険率5%で有意と判定され、\*印が付けられている。このF検定によれば、本事例の場合、有意な因子は「因子E: ケース」、「因子F: リング」、「因子H: 色」であることが判明した。したがって、腕時計においてはこれら部品のデザインが重要という情報が得られたことになる。

また、デザインの場合、因子の主効果のみでなく、因子間の交互作用も強いことが予想される。そこで、因子間交互作用についても解析し、どの因子とどの因子に交互作用が存在するのかを次に解析した。L18直交表のデータから交互作用を求める方法については、参考文献[5]を見られたい。しかしながら予想に反して、大きな因子間交互作用は認められなかったため、今回は因子の主効果から最適デザインを決定することにした。要因効果(主効果)の推定の方法については次節で述べる。

#### 4.3 要因効果の推定と最適デザインの決定

直交表実験の場合、因子の主効果を求める方法は簡単である。例えば、因子Bの第1水準の効果(以下、B1と記述する)を推定する場合、その条件が出現する実験No.1~3、10~12のデータの平均を求めてやればよい。すなわち、次式のように計算できる。

$$B1 = \frac{8.54 + 6.40 + 6.37 + 5.88 + 6.95 + 7.47}{6} = 6.94$$

第2水準、第3水準の計算も同様である。他の因子についても主効果を求め、それらの結果を表5の要因効果表にまとめた。SN比は大きい値が良いので、値の大きな水準が最適条件となる。したがって、因子Bの第1水準をB1と表記するようにすれば、最適条件の組み合わせは、A2, B1, C3, D1, E2, F3, G2, H1と決定される。ちなみに、最適条件の腕時計モデルを図3に示す。逆に、SN比が最小で、最も不人気になるであろう最悪条件の組み合わせは、A1, B3, C2, D3, E3, F2, G1, H2であり、その3次元CADモデルは図4のようになる。

表5 要因効果の推定(SN比)

Factors	Level 1	Level 2	Level 3
A. Buckle	6.56	7.05	6.68
B. Bezel	6.64	6.78	6.68
C. Dial	6.47	6.54	6.98
D. Needles	7.12	6.67	6.92
E. Case	6.84	7.09	5.88
F. Ring	7.12	5.76	7.51
G. Release	6.65	7.11	6.65
H. Color	7.06	6.54	6.42



図3 最適条件のモデル

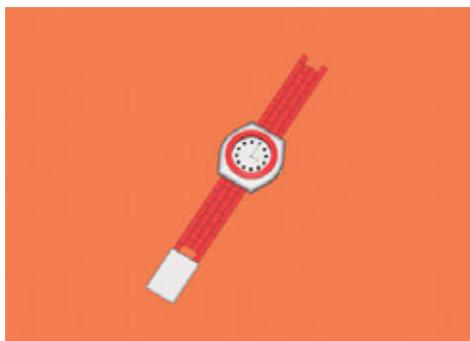


図4 最悪条件のモデル

#### 4.4 アンケート評点の推定

これまでに述べたような要因効果の推定を表2の平均値のデータについても同様に行うと表6に示すような要因効果表が得られる。

表6 要因効果の推定 (平均点)

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
A Backle	2.78	2.85	-
B Hei	2.85	2.76	2.81
C Dial	2.78	2.65	2.98
D Needles	2.82	2.81	2.79
F Case	2.80	2.90	2.65
I Ring	2.79	2.75	2.88
G Rotate	2.78	2.76	2.88
H Case	3.09	2.58	2.78

表6の結果から、最適条件における腕時計モデルの評点Pが何点になるかを推定することができる。推定のしかたは、最適条件とした、A2, B1, C3, D1, E2, F3, G2, H1の要因効果を足し合わせる。しかしその中には、平均の効果が8個分含まれるので、7個分の平均を減算する。

$$P = A2 + B1 + C3 + D1 + E2 + F3 + G2 + H1 - 7 \times 2.78$$

$$= 2.85 + 2.85 + 2.98 + 2.82 + 2.94 + 2.88$$

$$- 2.76 - 3.09 - 7 \times 2.81$$

$$= 3.56$$

したがって、最適条件モデルについて本事例と同様なWebアンケート調査を実施した場合、その評点は3.55点と推定される。また、同様の方法で最悪条件における評点を推定すると2.10点となった。

$$P = A1 + B3 + C2 + D3 + E3 + F3 + G1 + H3 - 7 \times 2.78$$

$$= 2.78 + 2.81 + 2.65 + 2.79 + 2.63 + 2.78$$

$$+ 2.78 + 2.58 - 7 \times 2.81$$

$$= 2.10$$

#### 5. 結言

3次元CADデータは視認性が高いため、設計や製造の部門のみでなく、商品企画や工業デザインなど様々な分野での応用が期待される。本研究では、3次元CADとWeb技術を利用したアンケート調査と品質工学のパラメータ設計という統計的手法を組み合わせ、ユーザーに好まれる製品デザインを決定するための手法を提案した。

今回は、事例として「腕時計」の結果を示した。デザインした「腕時計」を軽量化フォーマットであるXVL形式に変換してWeb上にアップロードし、アンケート調査を行った。そして、得られた結果を分散分析し、どのようなデザインがユーザーに好まれるのかを解析した。その結果、ユーザーの好感度に影響する因子としては、「ケース」、「リング」、「色」の3つの寄与率が高いことが判明した。また、要因効果の解析結果から、ユーザーに最も好まれるであろう部品の水準を組み合わせた最適デザインを決定した。

#### 参考文献

- [1] ラティス・テクノロジー株式会社ホームページ, <http://www.xvl3d.com/ja/index.htm>
- [2] 田口玄一: 実験計画法, 丸善 (1976) 524
- [3] 田口玄一: 開発・設計段階の品質工学, 日本規格協会, (1988) 305.
- [4] 中村義作: よくわかる実験計画法, 近代科学社 (1997) 15
- [5] 高田圭, ほか3名: 直交表を使ったソフトウェアのバグ発見の効率化, 品質工学, Vol.8, No.1, (1999) 60
- [6] 萩原祐志: デザイン支援システムの構築と運用, 海文堂出版, (2003)
- [7] 萩原祐志, 森典彦: ファジィ推論を利用した製品デザイン支援システム, 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.3, (1992) 150



# 中等・高等教育における ICT インフラの 活用に関する研究

小山 裕 司\*・加藤 由 花\*・長尾 雄 行\*

## A Study of Applications of ICT Infrastructure to Secondary and Higher Education

Hiroshi Koyama\*, Yuka Kato\* and Takeyuki Nagao\*

### Abstract

This paper reports the activities of the seminar on applications of ICT (Information and Communication Technology) infrastructure to secondary and higher education, and summarizes the research results obtained from the examination. In the seminar, more than ten people have presented their researches, which relate to secondary and higher education, information technologies and so on, and we have discussed how to conduct ICT education and how to give a class using ICT from various viewpoints. In this paper, we will summarize the discussion results and clarify the subjects of ICT education for improving ICT environment at municipal schools.

Keywords: ICT infrastructure, secondary and higher education, informatics, computer literacy

### 1. はじめに

東京都では、都立学校（東京都立の高等学校および特別支援学校）を対象に、ICT（Information and Communication Technology）を活用した授業力の向上を目指して、都立学校 ICT 計画を推進している。ここでは、「全都立学校への校内 LAN の整備、ICT 機器を活用した授業の促進、ICT の活用による教材作成や校務処理の効率化・高機能化、ICT を活用した教員の指導力の向上など都立学校 ICT 化を推進する」[1] ことが目標となっており、我々は計画策定段階から、都立学校 ICT 化検討委員会メンバーとして活動に参画してきた。その後、この委員会活動を発展させ、より広い分野を研究対象とした「ICT と教育」研究会を発足し、活動を続けている [2]。研究会の目的は、ICT を活用した教育、および ICT 教育に関する議論を深め、ICT インフラの活用事例やサービスに関する提言を行っていくことである。その第一段階として、本稿では、研究会における議論の内容を総括し、今後の都立学校 ICT 化における課題を明らかにしていく。

以下、2 章で学校教育における ICT 活用の現状と課題を概観した後、3 章で研究会における講演内容をまとめる。4 章で様々な議論から得られた知見を明らかにし、5 章で本稿をまとめる。

### 2. 学校教育における ICT 活用の現状と課題

#### 2. 1 ICT とその活用

ICT は Information and Communication Technology（情報通信技術）の略語であり、情報・通信に関連する技術一般の総称である。IT とほぼ同じ意味で使用されることもあるが、ネットワーク通信による情報・知識の共有が念頭に置かれた表現である。公的文書等でも、近年は IT の代わりに ICT を用いるのが一般的になっており、総務省の u-Japan 政策などでも ICT という表現が使用されている。

教育と ICT の関連については、総務省が教育の情報化を推進しており、「我が国の次世代を担う子どもたちが、早い段階から ICT に親しみ、情報活用能力を向上させ、新しい知的価値、文化的価値を創造できる 21 世紀型の社会を構築する」ことを目指している。具体的には、ICT メディアリテラシーの育成や校内 LAN 整備の促進などが実施されており [3]、ICT の活用例としては、総務省のモデル事業である「地域児童見守りシステムモデル事業」[4] や、iPod を活用した e-Learning 実験授業（青山学院大学）[5] などがある。前者は、電子タグや携帯電話等を利用した児童の安心・安全を確保するためのシステムであり、具体例としては、小平地域見守りネットワーク協議会（電子タグをリーダーにかざすことで、登

下校情報を保護者に自動でメール通知する, 不審者情報等を配信する) などがある。後者は, 協調学習型の e-Learning システムと組み合わせ, ゼミ講義をビデオ収録し iPod で視聴するシステムとなっている。

## 2. 2 教育現場と ICT との関わり

教育分野における情報化を推進するためには, まず, 教育現場と ICT との関わりについて考察する必要がある。一般には, 教育現場と ICT との関わりは, 「校務の情報化」, 「ICT を活用した教育 (教育の情報化)」, 「情報教育」の 3 種類に分類される。それぞれの概要を以下に述べる。

### (1) 校務の情報化

学校における業務は, 学校事務 (教務関連, 学籍関連, 出退勤管理, 出張管理など), 事務以外の実務 (見回り, 点検作業など), 授業に分類され, 広い意味ではこれら全てが校務であるが, ここでの考察対象は学校事務である。これは教育の情報化に含まれる概念であり, 教員自身の情報活用能力が極めて重要になる。校務を効率化することにより, 教員が生徒の指導により多くの時間を割けるようになることに加え, 各種情報の分析・共有により, きめ細かな学習指導が可能になる。そのため, 校務の情報化は教育活動の質的改善に関する事項と認識されており, 教育の情報化における重要な要素となっている。ここでは, 学校が非常に重要な個人情報を扱う機関であることに対する考慮が不可欠である。

### (2) ICT を活用した教育 (教育の情報化)

教育において ICT をいかに活用していくかが考察対象となり, e-Learning などがこれに含まれる。ICT を活用した教育については, 2.3 節において詳述する。

### (3) 情報教育

教科としての「情報教育」が考察対象となる。ここでは情報活用能力の育成が目標となっており, 具体的には, 「情報活用の実践」, 「情報の科学的理解」, 「情報社会に参画する態度」の 3 項目の育成が行われている。情報教育については, 2.4 節において詳述する。

ICT 化推進における課題としては, 校務情報化と教育用システムの導入を並行して行うと効率的であるが, 「ICT と教育」研究会では, 主に「ICT を活用した教育」と「情報教育」の 2 点を議論の対象としてきたことから, 本稿ではこの 2 点を考察対象としている。以下, それぞれについて説明する。

## 2. 3 ICT を活用した教育

まず, ICT を活用した教育として, e-Learning についてまとめておく。e-Learning は, 情報通信機器 (PC やコンピュータネットワークなど) を利用した教育の実

施形態であり, 遠隔教育が可能であること, コンピュータを活用した教材の提供が可能であることなどの特徴がある。e-Learning の構成要素は, 学習を行うための教材, 学習管理システム (LMS: Learning Management System), その他のシステム・機材等 (教材作成用システム, 撮影用機材, 電子黒板など) の 3 種類に分類され, 教材の準備以外にも様々な ICT 機器の準備やインフラの構築等が必要になってくる。これらの構成要素のうち, 学校教育においては教材の重要度が最も高く, いかに質の高い教材を効率的に作成・管理していくかが課題となる。教材自体も資料 (テキスト, 写真・動画・音声などマルチメディア型のもの, Web のリンク集など) と学習内容確認のための教材 (ドリル, 小テスト, レポート課題など) の 2 種類に分類され, それぞれの作成支援機能, 管理機能を持ったシステムが必須となる。この役割を担うのが学習管理システムであり, 一般的には, 教材管理機能, 課題管理機能, データベース機能, 自習用教材管理機能, 小テスト機能, アンケート機能, チャット機能, 掲示板機能などを持つ。産業技術大学院大学でも利用している Blackboard[6] や, オープンソースの Moodle[7] などがよく知られている。このように, 教材, 学習管理システムなどを統合した運用形体が e-Learning (ICT を活用した教育) であると考えられる。

本節では, ICT を活用した教育の具体例として, 産業技術大学院大学における講義支援システムと, 学校全体で教育の ICT 化に取り組んでいる東京都立砂川高等学校の事例を紹介する。

### (1) 産業技術大学院大学における事例

産業技術大学院大学では, 通常の講義における学習支援の他, 遠隔学習・自習支援のために講義支援システムを構築し, 活用している。ここでは全ての講義をビデオ撮影し, e-Learning 教材の自動作成を行っている。学習管理システムとしては Blackboard を利用し, 学生は課題の提出, ディスカッション等を行うとともに, 自動生成されたビデオ教材により, 遠隔学習, 自習等を行う。講義支援システムのイメージを図 1 に示す。



図 1 産業技術大学院大学における講義支援システム

## (2) 都立砂川高校における事例

東京都立砂川高校は、「ITを活用した教育推進校」として、学校全体で教育のICT化に取り組んでいる[8]。砂川高校は、単位制の高校であること、通信課程を持ちネットスクーリングを実施していることなどの特徴があり、これらの特徴に合致したICT化が実現されている。原則として、全ての教科で何かしらのICT活用が行われており、具体的には、以下に示すような内容を実施している。

- ・教科書の記述だけではわかりにくい分野の説明に関するコンテンツの作成。
- ・学習の興味付けをするための周辺情報の作成。
- ・学習のポイントや指標に関するコンテンツの作成。

前述したように、砂川高校の特徴の一つに、通信課程を持ちネットスクーリングを実施していることがある。そのため、授業風景のビデオをオンデマンドで配信するとともに、実技を伴う科目（書道など）用の動画コンテンツの作成なども行っている。その他、いくつか特徴的な科目があるので、それらを表1にまとめる。

表1 授業におけるICTの活用例

科目	活用内容
英語	英語の授業風景をオンデマンドで配信する。また、英語の学習教材として、英語のリスニング教材、英語のリーディング教材、英語のライティング教材などを提供する。
音楽	音楽の授業風景をオンデマンドで配信する。また、音楽の学習教材として、音楽の楽譜教材、音楽の演奏教材、音楽の鑑賞教材などを提供する。
美術	美術の授業風景をオンデマンドで配信する。また、美術の学習教材として、美術の制作教材、美術の鑑賞教材、美術の歴史教材などを提供する。
体育	体育の授業風景をオンデマンドで配信する。また、体育の学習教材として、体育の運動教材、体育の健康教材、体育の安全教材などを提供する。
情報	情報の授業風景をオンデマンドで配信する。また、情報の学習教材として、情報の基礎教材、情報の応用教材、情報のセキュリティ教材などを提供する。

砂川高校では、教育におけるICT化の効果を以下のようにまとめている。

- ・マルチメディア教材の活用により、生徒の理解度促進、学習意欲向上が期待できる。
- ・専門分野の教員不足を補うことができる。
- ・成績管理や生徒の習熟度管理を自動化できる。
- ・複数の教員間で情報共有（成績等）が容易になる。
- ・自習型教材の場合、生徒は時間や場所にしばられず、自分のペースで学習できる。
- ・授業補助型と自習型教材を組み合わせることにより、生徒の予習復習を促す。
- ・通信制課程に適用することで、より効果的な教育を

現できる。

これらの効果が期待できる半面、注意事項として以下の事項を挙げている。

- ・生徒用PCの購入、ネットワークの整備等、システムの導入にコストがかかる。
- ・システム導入後の運用管理にも考慮が必要である。
- ・セキュリティ対策を十分に行う必要がある（セキュリティポリシーの策定、ID管理、生徒用PCの管理、教員用PCの管理、ネットワークをサーバの管理、コンテンツ管理など）
- ・教材の作成に多大な労力がかかる。
- ・システム、教材等が数年で陳腐化してしまう。

## 2.4 情報教育

教育のICT化におけるもう一つの観点は、教科としての情報教育である。情報教育は、ICTメディアリテラシー教育として1980～90年代に大学の教養課程教育として始まったが、現在では小学校の段階から教育（特に情報倫理教育）を行うことが学習指導要領に定められている。この分野に関しては、以下に示すように様々な教材が開発されている。

- ・キッズgoo、Yahoo!キッズ、So-netキッズなど、主に小学生を対象としたWebサイト。
- ・伸ばそうICTメディアリテラシー（内田洋行）などの小学生向け学習教材。
- ・国立大学情報教育センター協議会作成の情報倫理ビデオ教材（大学生向けの教材で、ワーム型ウイルス、スパイウェア、メールでのマナーやプライバシー、掲示板管理者の心構えや掲示板での匿名性とマナー、著作権、肖像権、フィッシング、架空請求、振り込め詐欺など、多岐にわたる事項を取り上げている）。

学習指導要領に基づく情報教育では、「情報活用の実践力」、「情報の科学的な理解」、「情報社会に参画する態度」の3つの項目が教育目標として掲げられており、もっぱら情報活用能力の育成を目標とした教科として、高等学校の普通教科「情報」と、中学校の教科「技術・家庭」における「技術分野」の「B 情報とコンピュータ」がある。さらに、その他のあらゆる教科において情報教育が行われることが想定されている。これらの情報教育の内容については、表2に示す内容が、文部科学省の「初等中等教育の情報教育に係る学習活動の具体的展開」[9]に述べられている。一方、各学校段階における教育については、以下のように定義されている。

- ・小学校段階：
  - 関連する教科等で幅広く情報教育を扱っているため、その位置づけが難しいが、児童の実態や児童を取り巻く社会状況等も踏まえ、情報活用の実践力に焦点を当

てつつ、情報社会に参画する態度、さらに情報の科学的な理解を含めて育成が図られることが望ましい。その際、必要に応じて各観点に関連付けられる等のバランスを考慮しつつ取り組まれることが重要である。

・ 中学校段階：

情報活用の実践力、情報の科学的な理解及び情報社会に参画する態度の育成が包括的に扱われることが重要である。その際、情報の科学的な理解の充実が図られることが望ましく、教科「技術・家庭」の「技術分野」における「B情報とコンピュータ」で扱うことができる。

・ 高等学校段階：

情報活用の実践力については、「リテラシー」を小、中学校で習得した「スキル」を活用する総合力として捉え、熟成させることが必要である。また、情報の科学的な理解については、プログラミングを一定程度扱うなど、情報科学、情報技術についての内容をもったものとすべきであり、情報社会に参画する態度については、小、中学校の発展形としての指導が必要である。

・ 特別支援学校：

特別な教育的支援を必要とする児童生徒の教育においても、その教育目標、内容は小学校、中学校、高等学校に準じており、上記の段階を踏まえた指導展開が必要である。また、児童生徒自身が自らの障害等を改善・克服していく「力」ともなりうることから、様々な支援機器及びテクノロジーの知識・技術の普及を図ることが大切である。なお、個々の障害の特性に応じて教育方法の工夫をする必要もある。

人の知らない世界として、学校裏サイト、プロフ、子供向け SNS(ex. モバゲータウン)などがある。さらに、出会い系サイト、有害サイト、アダルトサイトなどはいわゆる ICT リテラシー教育から抜け落ちている部分であり、注意が必要である。

・ このような状況では、小学校からのリテラシー教育が必須であり、その場合、学校と保護者との連携が重要である。学校が自由なコミュニケーションや情報発信の場を提供することも解決策の一つである。

・ 情報教育の重要性はますます高まっているが、高校教科「情報」の未履修問題などが存在する。リテラシー教育の基本は ICT 技術の仕組みを知ることであり、単にコンピュータを使えるようになるための時間ではないことに注意が必要である。

2. 5 今後の ICT 教育

ここまでの内容から、教育の ICT 化を進めていくための注意点を以下にまとめる。

・ 「ICT 化≠教材作成」である。総合的な観点から ICT 化を検討する必要がある。

・ ハードウェアの整備だけでは不十分であり、利用・運用技術が非常に重要な意味を持つ。

・ 変化の激しい領域なので、目先の技術にとらわれず中長期的な視野を併せ持つ必要がある。

今後の ICT 教育の行く末については、ハードウェア的視点とサービスの視点から考察することができる。ハードウェア的な視点としては、m-Learning (mobile)、u-Learning (ubiquitous) などのユビキタス化が進み、PC の代わりに携帯端末を使った教育、コンピュータを意識しないサービスの実現などが期待される。また、サービスの視点としては、コンシューマ参加型サービスの普及により、生徒参加型・保護者参加型のサービス、学校間ネットワーク、小中高大の連携などの推進が期待される。

3. 「ICT と教育」研究会

我々はこれまで (2008 年 8 月から 11 月まで)、教育の ICT 化に関する様々な課題の解決を目指して、ほぼ一月に一度のペースで 5 回の「ICT と教育」研究会を開催してきた。本章では、研究会における講演内容をまとめることにより、ICT 教育における課題の明確化を試みる。研究会参加者は平均 10 ~ 20 名程度であり、本学教員の他、企業の ICT 教育分野担当者、高等学校の教員等様々である。各回 2 件の発表が行われ、具体的には以下に示す 10 件の発表が行われた。教育学の視点、コンテンツサービスの視点など非常に幅広いテーマの講演が

表 2 情報教育の内容

学級段階	内容
小学校	情報活用の実践力、情報の科学的な理解及び情報社会に参画する態度の育成が包括的に扱われることが重要である。その際、情報の科学的な理解の充実が図られることが望ましく、教科「技術・家庭」の「技術分野」における「B情報とコンピュータ」で扱うことができる。
中学校	情報活用の実践力については、「リテラシー」を小、中学校で習得した「スキル」を活用する総合力として捉え、熟成させることが必要である。また、情報の科学的な理解については、プログラミングを一定程度扱うなど、情報科学、情報技術についての内容をもったものとすべきであり、情報社会に参画する態度については、小、中学校の発展形としての指導が必要である。
高等学校	情報活用の実践力については、「リテラシー」を小、中学校で習得した「スキル」を活用する総合力として捉え、熟成させることが必要である。また、情報の科学的な理解については、プログラミングを一定程度扱うなど、情報科学、情報技術についての内容をもったものとすべきであり、情報社会に参画する態度については、小、中学校の発展形としての指導が必要である。
特別支援学校	特別な教育的支援を必要とする児童生徒の教育においても、その教育目標、内容は小学校、中学校、高等学校に準じており、上記の段階を踏まえた指導展開が必要である。また、児童生徒自身が自らの障害等を改善・克服していく「力」ともなりうることから、様々な支援機器及びテクノロジーの知識・技術の普及を図ることが大切である。なお、個々の障害の特性に応じて教育方法の工夫をする必要もある。

情報教育においては、教育上注意すべき点がいくつかあり、例えば以下のようにまとめることができる。

・ 生徒たちは教員より ICT 技術に詳しい場合もあり、大

行われ、それぞれのテーマに関して討論を行った。なお、各講演における発表資料は、文献 [2] において公開されている。(今後、今年度中に2回の研究会を予定しており、合計14件の発表が行われる予定である。)

### 3. 1 教育への ICT の活用 (八木浩雄: 明星大学大学院)

初等中等教育における ICT 活用に関する施策について、文部科学省の取り組みを中心に総括が行われた。文部科学省では、1997年より情報教育の強化を目指しており、校内 LAN の整備等、様々な施策を実行してきた。当初より「情報リテラシー」の必要性が強調されていたが、2008年には「学力向上 ICT 活用指導ハンドブック」を作成し、授業における効果的な ICT 活用を促進している。今後の ICT 教育においては、コンピュータは道具であること認識し、情報源としての複数の選択肢の1つであることを理解させ、まず教員や保護者の理解度向上を目指すべきであることが提案された。

本発表は、まず教育における ICT 化の現状を理解することが目的であったが、情報モラル、倫理に関する問題意識を持つ参加者が多く、様々な観点から活発な議論が行われた。(2008/07/31)

### 3. 2 ICT を利用した教育と制作実習 (安藤尚彦: NICNAC 株式会社)

コンテンツビジネスの観点から、ICT 教育へのコンテンツ制作実習の導入が提案された。校内 LAN の整備と各学校間の相互接続環境が整備されると、学校間の枠を取り払った、教師・学生の交流や情報交換などの活性化が期待され、また、高額な機材、ソフトウェアの共同購入による高度な文化活動が可能になると考えられる。しかし、この ICT インフラが有効に活用されなければ意味をなさず、学生たちが自ら興味を持って学び、成長していけるような魅力のある教材、コンテンツの提供が重要であることが述べられた。運用のアイデアとしては、教員用 SNS、部活動データベース、学習教材のライブラリ化、図書館データベースなどが提案された。さらに、PC を利用した映像制作実習に関するカリキュラムが提案され、発想力とセンスを身につける教育内容が示されている。

情報モラルの啓蒙の必要性に関しても議論が行われ、ネガティブな報道が多い中、ネット上のコミュニティにおいては子どもなりに自浄作用が働く事例等も紹介された。(2008/07/31)

### 3. 3 学校教育における ICT の活用 (加藤由花: 産業技術大学院大学情報アーキテクチャ専攻)

学校教育における ICT 化の現状を再認識した。本講

演における発表内容については、本稿2章にまとめた。(2008/08/26)

### 3. 4 "都市再生"の現状と課題—巨大都市「東京」の一分析 (鈴木淳弘: 東日本電信電話株式会社)

都立学校について、巨大都市「東京」に存在しているという観点から分析が行われた。まず、国の取り組みとしての都市再生本部の概要について解説がなされ、先進的・モデル的な取り組みを支援し、大学との連携による個性・特色のある取組を全国で展開していることが紹介された。東京に関しては、世界的に見ても人口規模が突出しており、それが強みでもあり、弱みでもある。高等学校教育について考えてみると、類まれな大都市に位置し、地域との連携(一つの学校ではなく、全体で一つのコミュニティを形成する)がポイントになると考えられる。良好な都市基盤があり、家庭のブロードバンド普及率も非常に高いこと、また都立高校の対等なライバルとして多くの私立高校が存在しており、これらが強みになると考えられる。課題としては、実際の高校生の交流実態調査が必要であるが、高校生同士の物理的な移動や地域、社会との交流等に関するデータがほとんど存在していない点が指摘された。社会(親、教師、地域、地域企業、行政など)が高校生に何を望むかを考察し、ICT化の方向性を決めていくべきであるという観点から議論が行われた。(2008/08/26)

### 3. 5 ゲームを用いた環境教育コンテンツの事例紹介 (網代剛: 産業技術大学院大学創造技術専攻)

シミュレーションゲーム作成を教育に取り込む可能性についての解説が行われた。ゲームの作成は、現実の世界のモデル化からはじまり、様々な教育要素を包含している。これまでの教育用ゲームの作成から得られた知見を活かし、情報リテラシー教育へのゲームデザインの採用が提案された。具体的には、グラフィックス、プログラミング、数学等、様々な観点からの教育が可能であることが示された。年代による適切なゲームの選択等について、議論が行われた。(2008/09/18)

### 3. 6 教育のための ICT アーキテクチャの考察 (小松宏行: アリエル・ネットワーク株式会社)

近年の ICT 業界における話題を5つのキーワードにまとめ、教育への適用について考察している。5つのキーワードは、ID (匿名性の回避)、Enterprise Architecture (業務自体の見直し+全体最適化)、Data Oriented Approach (データの最適化)、Document-oriented Database (非定型データベースの構築)、Governance, Risk & Compliance (内部統制と監査)で

あり, 教育分野についても当然考慮すべき事項である。さらに, 企業における学習管理項目を網羅し, 都立学校への適用可能性を示唆している。教育においても, 全体最適の視点は必須であるはずだが, 現状はインフラ構築の視点到偏りがちである点などが議論された。(2008/09/18)

### 3. 7 インターネット検索能力評価のための方法論とその課題 (上村圭介: 国際大学グローバルコミュニケーションセンター)

「インターネット検索能力検定試験」の企画, 問題作成などに関わった立場から, 試験の基本的な考え方, 出題範囲, 試験結果を踏まえ, インターネット上の情報検索能力を評価するための方法論とその課題が論じられた。特に, 能力評価手法では, 修得項目の抽出が行われており(検索能力を6つの領域で定義している), 都立高校におけるICT教育を考察する場合にも参考になると考えられる。何をもって能力を評価するか, 能力を高めるためにはどのような項目を身につけるべきか等について議論を行った。(2008/10/14)

### 3. 8 実践女子学園高等学校における情報教育の現状と今後について (佐川大, 光永文彦: 実践女子学園高等学校)

私立高校における先進的な情報教育への取り組み例として, 実践女子学園高等学校における教科「情報」およびキャリア教育について紹介がなされた。高校生は柔軟であり, モチベーションを高めることにより, 集中して積極的に学習する。グループ活動, 他のグループとの競争, 先輩の作品を提示することなどが特に効果的であることが報告された。情報科教員確保の問題は深刻で, 実際には数学科など他教科の教員が兼任していることが多い。私立はまだ恵まれているが, 都立高校では教員確保がより難しい現状がある。授業における工夫点や教科「情報」について様々な観点から議論が行われた。(2008/10/14)

### 3. 9 大学教育でのICT活用事例報告—立命館大学と私立大学情報教育協会での経験を踏まえて (竹田昌弘: 東京工科大学メディア学部)

立命館大学と私立大学情報教育協会での経験を踏まえ, 大学におけるICT教育, 教育のICT化についての事例紹介が行われた。立命館大学の事例は, 大規模教室(750名収容)へのシステムの導入など, 大規模ゆへの工夫がなされている。また, 現在多くの大学で利用されているコースツール(LMS)の導入例等が紹介され, 今後高等学校への導入も進んでいくと考えられる。大学で

は, すでに様々な教育支援のツールが導入されており, それらの知見は都立学校においても積極的に活用していくべきであることなどが議論された。(2008/11/18)

### 3. 10 都立高校における情報教育の現状と工業高校における情報技術教育について (西野洋介: 東京都立府中工業高等学校電気科)

東京都立府中工業高校におけるICT教育事例の紹介が行われた。発表者の西野先生のご尽力もあり, 府中工業高校においては, 組込みシステムの教材等を利用した効果的なICT教育が実施されている。しかし, 個人の力量に依存しがちであり, 授業への活用の他, 校務の情報化についても情報科教員への負荷の偏りの原因となっており, 都立学校全体としての対応が期待されていることなどが議論された。私立学校と同様, 情報科教員の確保についても問題は多い。(2008/11/18)

## 4. 考察

これまで, ICTと教育をキーワードに様々な議論を行ってきたが, 予想以上に幅広い分野が考察対象となることがわかった。議論を深めるにつれ, 教育のICT化を実現するためには, 多角的な検討が必要であり, 特に, サービス, アプリケーションレベルの考察(利用・運用技術の考察)を十分に行わないと, 利用されないシステムになってしまう懸念があることがわかった。

本稿では, 以下の3点を教育のICT化における課題として挙げておく。

#### (1) ICTアーキテクチャ設計の必要性

教育分野においても, 情報システムを構築するという意識は不可欠であり, 全体最適を意識したアーキテクチャの設計が重要である。コンセプトを明確にすること, 教育現場の意見を組み上げることを行った上で, 都立学校ICT化の方向性を決定するべきである。

#### (2) 都立学校ならではの課題の解決

規模の違いもあるが, トップダウンで明確なコンセプトの下, ICT教育のシステムが構築されている私学は, 先進的な取り組みを行っている学校が数多く存在する。都立学校は数も多く, 多種多様な学校が存在するなど難しい面もあるが, 東京都としての明確なビジョンの下, アプリケーション, サービスを検討していくことが重要である。運用面でも問題は多い。情報科教員が他教科を掛け持ちしていることが多く, さらに学校内の情報機器の管理までも担当している現状がある。人材の確保や運用も含めたシステム設計が必要である。

#### (3) 利用技術に関する検討

ICT教育に関しては, 関連分野が幅広く, 様々な観点

からの検討が非常に重要であるが、現状では、インフラ整備の観点からのみ ICT 化が語られている。今後、利用技術に関する検討は不可欠であり、本研究会で得られた知見を活かした提案を行っていきたいと考えている。

## 5. おわりに

本稿では、「ICT と教育」研究会での活動内容を報告し、そこから得られた知見についてまとめた。研究会においては、ICT と教育をキーワードに、これまで10件の発表が行われ（今年度末までに14件を予定）、様々な観点から教育とICTについての議論を重ねてきた。今後、これらの知見を活かし、ICT教育のあり方についてより深く考察していく予定である。

## 参考文献

- [1] 東京都教育ビジョン（第2次）：  
<http://www.kyoiku.metro.tokyo.jp/press/pr080522v.htm>
- [2] ICT と教育研究会：  
<http://pk.aiit.ac.jp/ictedu/>
- [3] 教育の情報化推進ページ（総務省）：  
[http://www.soumu.go.jp/joho\\_tsusin/kyouiku\\_johoka/index.html](http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/kyouiku_johoka/index.html)
- [4] 地域児童見守りシステムモデル事業：  
[http://www.soumu.go.jp/s-news/2007/070330\\_18.html](http://www.soumu.go.jp/s-news/2007/070330_18.html)
- [5] iPod を使った e-Learning 実験授業：  
[http://www.i-collabo.jp/showcase\\_aogaku1.html](http://www.i-collabo.jp/showcase_aogaku1.html)
- [6] Blackboard:  
<http://www.blackboard.com/asia/jp/>
- [7] Moodle: <http://moodle.org/>
- [8] 東京都立砂川高等学校：  
平成18年度ITを活用した教育推進校中間発表会報告資料, 2006.
- [9] 初等中等教育の情報教育に係る学習活動の具体的展開（文部科学省）  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/18/08/06082512.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/18/08/06082512.htm)



# Summary of International Comparative Research on Decision-Making in the Design Development Processes

Noboru Koyama\*, Mikio Yamashita\*\*, Mikio Fujito\*\*,  
Keiichiro Kawarabayashi\*\*\*, Yasufumi Morinaga\*\*\*\*, And Yoji Kitani\*\*

## Abstract

This paper aims at contribution to unfold the logic between a company's design strategy types and its decision-making style, using the difference in decision-making style among automotive and electronics industries in Japan, US, Europe and Korea, based on the results of former research on Brand Management through Design.

The methodology of research was mainly surveying related reports or articles on books and magazines, interviewing to design managers of the current leading automotive firms in Japan, America and Europe and comparing their system, mechanism, and method of product design development. We identified their differences and understood the structure of "Design-Decision-Making" that has been a very important part of design management in the in-house design organization of each company. It was not our intention to rate the best system for design-decision-making because the product development system or decision-making system in each company is based on each corporate culture with historical background that cannot be replaced. However, it should be meaningful for us to understand each difference with deep sights to improve current design management system that will respond to continuous change of market in the global market place.

Keywords: Design Management, Decision-making, Product Design, Design Strategy, Brand Design

## 1. Purpose and Background of Research

First of all, the purpose of this research is to unfold the logic between a company's design strategy types and its decision-making style.

The background of this research is caused by differences in the decision-making style among nations and regions were revealed in the prior research "Brand Management through Design." As part of its research, we investigated the decision-making style of automotive and electronics industries in Japan, the U.S., Europe and Korea.

And while the development process of design itself was similar among all nations and regions, a big difference was found between their decision-making styles. Also, big differences in the character of created design and design strategy that decides the character of design were revealed.

In this research, typifying of the design strategy is discussed and conducted for those adopted by companies in each nation and region.

Specifically, we unfold indicators that decide the decision-making style, as well as differences in decision-

making styles among nations and regions. Based on these findings, we will discuss the relationship between the types of design strategies and decision-making styles.

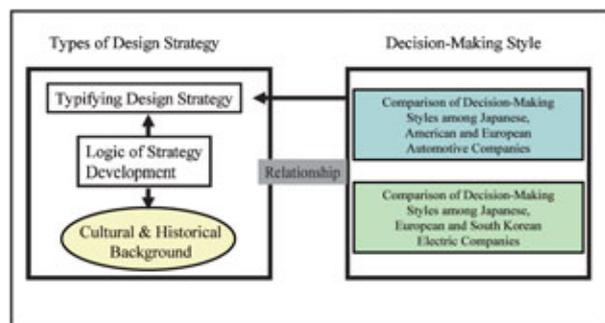


Fig. 1 Overall Picture of the Research

## 2. Typifying of Design Strategy

### 2-1. Typifying of Design Strategy in Automotive Industry

We unfold the typifying of design strategy and logic of strategy development. In this research, typifying of design strategy follows the following two major rules. The first rule is to classify and define the design strategy based on the pure observation of character of

product design, through which design characteristics of companies in each nation and region are assessed. The second rule is to classify the design strategy based on the classification criteria, (which is) different among each industry.

This research analyzes two industries – automotive industry and electronic industry -, and we classify each industry’s design strategy based on the different criteria. since, there exists certain differences in management environment and product characteristics among the two industries, thus the same criteria cannot be used in discussing the differences in design strategies.

First, classification of design strategies for automotive companies follows the two classification criteria: “Standardization strategy, which means the strategy not to change designs according to markets, or Adaptation strategy, which means the strategy to change designs according to markets”, and “degree of design consistency, whether designs are consistent or not”.

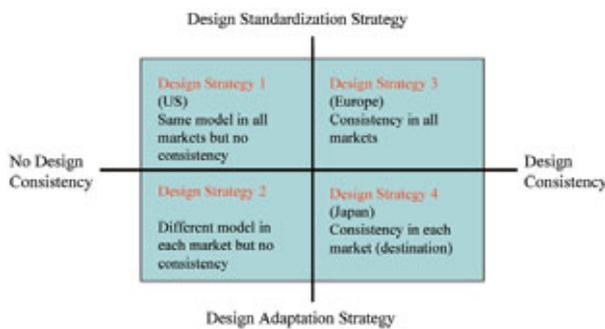


Fig. 2 Classification and Defining of Design Strategy in Automotive Industry

This chart leads to following classification and defining of design strategies: Japanese companies – change designs according to markets but place importance on their consistency in the market. In short, positively making use of design as a weapon for design identification, yet pursues Adaptation strategy. European companies – do not change designs according to market and maintain design consistency, in short, positively making use of design as a weapon for design identification, and pursues Standardization strategy. The U.S. companies – do not change designs according to market and do not place importance on their consistency, in short, pursues Standardization strategy, yet do not make positive use of design as a weapon for brand identification.

## 2-2. Typifying of Design Strategy in Electronics Industry

Second, as to electronic companies, classification of design strategies follows these two criteria: “degree of individual design characteristics, which means distinctive or non-distinctive, and degree of design consistency, which means consistent or not consistent. This distinctiveness merely refers to the difference from others, thus does not necessarily suggest positive implication. Since the patterns of projected design varies according to products in most electronic companies, clear typifying as in automotive companies proves to be difficult, thus mapping-type classification is chosen for this case.

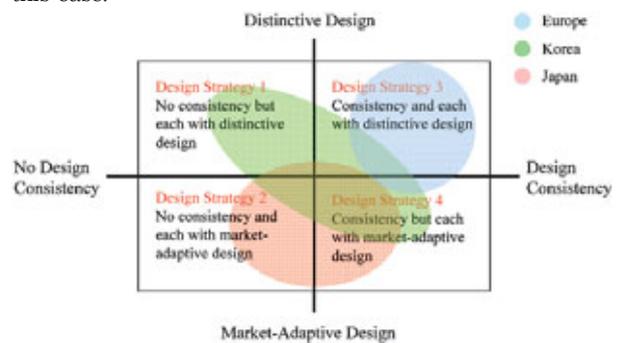


Fig. 3 Classification and Defining of Design Strategy in Electronics Industry

The result of this classification of main design strategies are as follows:

Japanese companies – spanning from “not seeking design consistency within product categories yet each design is to be non-distinctive” to “seeking design consistency within product categories yet each design is to be non-distinctive”.

European companies – “seeking design consistency within product categories and each design to be distinctive”.

Korean companies – spanning from “seeking design consistency within product categories yet each design is to be non-distinctive” to “not seeking design consistency within product categories yet each design is to be distinctive”.

## 3. Logic of Design Strategy Development

### 3-1. Logic of Design Strategy Development in Automotive Industry

□ Japanese Manufacturer

According to Fig. 2, it shows why the Japanese

automotive manufacturers follow this design strategy like changing designs according to intended market, but placing importance on their consistency in each market.

- 1) Japanese automotive industry was established behind America and Europe.
- 2) In the past, as their development and manufacturing levels were low to produce luxury cars, and had no chance to enter into the premium car market, but room in the mass-market.
- 3) Promoting the strategy to produce acceptable and affordable cars by reflecting requirements from much more customers in each intended market. (Order-taker type business style)
- 4) As a result, similar, and no consistency designs/models flooded in the market.
- 5) Management did not pay attention to design or brand value, giving priority to technology and product reliability.
- 6) Since 1990s management shifted from market-adaptation to brand establishment.
- 7) Design also shifting from marketing design to brand design.
- 8) Starting to pursue identity and consistency, but still limited within intended market level.

#### European Manufacturer

According to Fig. 2, it shows why the European automotive manufacturer follow this design strategy like not changing designs according to intended market and maintaining design consistency globally.

- 1) Birthplace of automobile, but many small makers appeared in each country.
- 2) Even now many manufacturers share a market with each distinctiveness.
- 3) Place importance on identity and consistency in design to keep distinctiveness.
- 4) Even in big manufacturers the owner-family is still influential to management including paying a role for design-decision because of strong attachment to brand and design.
- 5) Consumers and users also place importance on tradition rather than change in a class-structured society and take consumption behavior based on own social status, lifestyle or identity.
- 6) Manufacturers attitude to select customers rather than respond to originality and distinctiveness oriented design.
- 7) Pursuing higher profit based on distinctive value

rather than 'Low margin, High volume' policy.

#### American Manufacturer

According to Fig. 2, it shows why the Japanese automotive manufacturer follow this design strategy like not changing designs according to destinations and not placing importance on their consistency.

- 1) Birthplace of mass-production business model.
- 2) No need to look for export market due to huge domestic market.
- 3) Manufacturer don't have the idea of exporting US models since it is designed for their domestic market No doubt to export US model as it is the reason
- 4) Manufacturers do not place importance in consistency even inside domestic market. This is because of the reliance of marketing research oriented business style.
- 5) With the background of rich material society, design job has played its role together with marketing activity since the beginning of the 20th century.
- 6) Management tend to pursue short-term profit (due to pressure from stockholders) rather than development of brand that need long time.
- 7) Manufacturers adopt design adaptation strategy for domestic market and design standardization (product out) strategy for export market.

### 3-2. Logic of Design Strategy Development in Electronics Industry

#### Japanese Manufacturer

According to Fig. 3, it shows why the Japanese electric manufacturer follow this design strategy between areas of "not seeking design consistency within product categories yet each design is to be market-adaptive" and "seeking design consistency within product categories yet each is to be market-adaptive.

- 1) One of the reasons for Japanese electric manufacturers non-distinctive designs (e.g. slender figure, neutral, yet high-quality design) in relation to European counterparts is because both consumers and developers share the sensibility to acknowledge subtle difference as "difference". (Reflecting Japanese culture and sense of value)
- 2) Tendency to choose safer design that everybody accept than distinctive one that only few appreciate due to market-share oriented strategy.
- 3) Same as automotive industry the business started to approach export rather than limited domestic market

with “take-order style business”.

- 4) Design placed priority on market-adaptability than distinctiveness and consistency.
- 5) Hard to keep distinctiveness and consistency under the circumstance of frequent model-change to keep competitive advantage.
- 6) Shifting from mass-production/mass-sales business to brand-oriented and non-price-competition strategy.

□ European Manufacturer

According to Fig. 3, it shows why the European electric manufacturer follow this Design strategy like seeking design consistency within product categories and each design to be distinctive.

- 1) Same as automotive industry manufacturers keep consistency against the backdrop of owner-family’s influence, consumers’ preference of tradition than change, attachment to own identity.
- 2) Tendency to compete not by price but by design and brand.
- 3) Competent to brand management to keep brand values after experiencing business development by frequent M&A.
- 4) With culture to show respect for artisans including designers, manufacturers establish and keep originality and consistency by accepting designer’s intention.
- 5) Hard to adopt standardization design strategy especially in the white-goods business because of diversified market with different culture and sense of value in each European country.
- 6) Preference to choose single-function products that work well during long time unlike Japanese preference to choose multi-function products that can do anything.

□ Korean Manufacturer

According to Fig. 3, it shows why the Korean electric manufacturer follow this Design strategy between areas of “seeking design consistency within product categories yet each design is to be market-adaptive” and “not seeking design consistency within product categories yet each design is to be distinctive”.

- 1) The reason why manufacturers have not kept design consistency is seen in the fact that they have followed Japanese business model.
- 2) Like Japan, Korea is single-race nation and has nationality to show interest to new products immediately. Business behavior like typified models

under frequent model-changes have been marketed is also same as Japan.

- 3) But in recent years Korean manufacturers place importance to consistency and distinctiveness in design than Japanese makers because of avoiding price competitive business like China and seeking a business model by developing design and brand values.
- 4) After the IMF crisis clear management strategy with “Choice and Concentration” and well as “Significant concern to brand” has been successfully carried out.
- 5) Under such management strategy not only industries but also the government has invested a lot to design that shows great contribution to success.

4. Decision-Making Style

The term “Decision-making style” is used to refer to the composition of members, the size and the processes (eg. frequency of decision-making, criteria for decision-making), etc.

This research do not discuss “When and what decision to be made?”, or “What model to be used to make a right decision” but we focus on “a framework of decision-making”.

We adopted 4 indicators as below.

- a) Frequency of decision-making (Both formal and informal)
- b) Diversity of decision-making members
- c) The number of decision-makers
- d) Criteria for decision-making

4-1. Difference in decision-making style in automotive industry

	Japan	Europe	US
1. Frequency of Decision-making	Annual 2-3 times Adjustment in Case Joint venture: 0.5 Special: 0.2	Annual 1-4 times Adjustment in Case Special: 0.5 Special job	Annual 1-4 times Review by top Case Special: 0.5 Special job
2. Elements of Decision-making	Engineering, Planning (Marketing, Finance) *Reviewed by top?	Design executive & Top of R&D No other formal	Design executive & Top management Not involved
3. The number of Decision-makers	Many *Several dozens	Few *Five people	Not many but few *Around 10 people
4. Criteria of Decision-making	Customer-wishes Related executives (including top) Consultative used	Reviewed by top All the executives Planning/Design Brand executives (including...)	Chosen by the result of trial Design executive & top Top-only method

Fig. 4 Difference in decision-making style in automotive industry

This chart shows the difference in decision-making style in automotive industry.

Let me explain a couple of indicators.

As for the first indicator, "frequency of Decision-making", Japan is the highest, followed by the U.S. and Europe.

It is characteristic of Japanese automotive manufacturers frequency of formal decision-making is low but that of informal decision-making is high.

Also, in European automotive manufacturers, the number of formal decision-making is the highest. This is because they take a longer period for development, compared to two other regions.

As for the second indicator, "diversity of members", too, Japan is the most diversified, followed by the U.S. and Europe. In Japanese automotive manufacturers, a lot of departments participate in decision-making, such as Engineering, Planning, Sales and Accounting.

Also the members that participate in decision-making are not limited to top executives. In contrary, in the U.S. automotive manufacturers, representatives of Sales department as well as director in charge of design and a few of top executives participate in the decision-making. The members represent a wide variety of groups same as Japan, but what is characteristic is a small variety of their ranks.

Those who participate in the meeting are limited to top executives.

On the other hand, in European automotive manufacturers, directors in charge of design and development-related top executives constitute the members and personnel related to sales do not participate in the meeting in many cases.

4-2. Difference in decision-making style in electronics industry

	Japan	Europe	Keens
1. Frequency of Decision-making *Meeting/Clinic	Formal: 2-3 times Informal: many Clinic Limited operation	Formal: 4-5 times Informal: few Clinic Middle seat	Formal: 1-2 times Informal: middle Clinic Limited operation
2. Diversity of Decision-makers	Engineering, Planning, Marketing, Financial *Reviewed by top.2	Design executive & Product manager	Design executive & Head of each BU Reviewed by top
3. The number of Decision-makers	Many *Several dozens	Few *Few people	Few *Few people
4. Criteria of Decision-making	Consensus within Each BU Strategic products Reviewed by top Guideline existing but not used well.	Led by product & brand managers Guideline maintained And used well.	Led design executive & head of each BU Strategic products Reviewed by top Only few evaluate designs inside

Fig. 5 Difference in decision-making style in Electronics industry

Also, this slide shows the difference in decision-making style in electronics industry.

We can find out similar differences exists among the regions as well as the automotive one.

5. Relation between Type of Design Strategy and Decision-Making Style

5-1. Case of automotive industry

In the previous chapter, we have looked at types of design strategy and decision-making style separately, but now we will clarify how these are related to each other.

When we focus on the relations between degree of design consistency and decision-making style, no correlation is seen between degree of design inconsistency and indicator 1, 2 and 3.

	No Consistency ← Consistency		
	US	Japan	Europe
1. Frequency of Decision-making	Intermediate Formal:high Informal:intermediate	High Formal:low Informal:high	Low Formal:high Informal:low
2. Diversity of Decision-makers	Intermediate	High	Low
3. The number of Decision-makers	Intermediate	Large	Small
4. Criteria of Decision-making	Clinic Survey	Consensus Guidelines	Top-down Guidelines

Fig. 6 Relations between Degree of Consistency and Decision-Making Style

On the other hand, indicator 4 seems to have a correlation with design inconsistency because the higher consistency it is, the more centralized the authority for decision-making is.

In Europe, where the consistency is the highest, the authority is centralized to top executive.

Meanwhile, in the U.S., where the consistency is the lowest, the authority for decision-making is diversified to general public in the market.

	Adaptation Strategy ← Standardization Strategy		
	Japan	US	Europe
1. Frequency of Decision-making	High Formal:low Informal:high	Intermediate Formal:high Informal:intermediate	Low Formal:high Informal:low
2. Diversity of Decision-makers	High	Intermediate	Low
3. The number of Decision-makers	Large	Intermediate	Small
4. Criteria of Decision-making	Consensus Guidelines	Clinic Survey	Top-down Guidelines

Fig. 7 Relations between Standardization/ Adaptation Strategy and Decision-Making Style

5-2. Case of electronics industry

When we focus on the relations between standardization/adaptation strategy and decision-making style, indicator 4 seems to have no correlation with type of strategy.

On the other hand, indicator 1,2 and 3 seem to have correlations. In the regions, where adaptation strategy is taken, frequency of decision-making, the number of decision-making members and diversity of the members generally tend to increase.

In fact, in Japan and the U.S., where adaptation strategy is taken, manufacturers intend to reflect a variety of discussions and more information in design by involving a great number of people in decision-making process.

	No Consistency ←————→ Consistency		
	Japan	Korea	Europe
1. Frequency of Decision-making	High Formal:low Informal:high	Low Formal:low Informal:Intermediate	Low Formal:high Informal:low
2. Diversity of Decision-makers	High	Low	Low
3. The number of Decision-makers	Large	Small	Small
4. Criteria of Decision-making	Consensus	Top-down Guidelines	Top-down Guidelines

Fig. 8 Relations between Degree of Consistency and Decision-Making Style

To the contrary, in Europe, where standardization strategy is taken, manufacturers intend to reduce risks that design is affected by opinions of others than design department, by limiting the frequency of decision-making, the number of members and diversity of members. This is because they think that in the end nobody but designers know designs.

	Adaptation Strategy ←————→ Standardization Strategy		
	Japan	Korea	Europe
1. Frequency of Decision-making	High Formal:low Informal:high	Low Formal:low Informal:Intermediate	Low Formal:high Informal:low
2. Diversity of Decision-makers	High	Low	Low
3. The number of Decision-makers	Large	Small	Small
4. Criteria of Decision-making	Consensus	Top-down Guidelines	Top-down Guidelines

Fig. 9 Relations between Standardization/ Adaptation Strategy and Decision-Making Style

6. Findings in the research

What can be found from this research is shown below.

- 1) The factor that affects largely to Design Consistency is “Criteria of Decision-making”. Clear criteria and simple structure in decision-making contribute to achieve higher consistency.
- 2) The factors that relate to “Design Standardization Strategy” and “Design Adaptation Strategy” are “Frequency of Decision-making”, “Diversity of Decision-makers” and “The number of Decision-makers”.

The higher these numbers, the easier Design Adaptation Strategy is possible to carry out.

- 3) Distinctiveness of design relate to all indicators. But, the fewer the frequency of decision-making, and the fewer the number of decision-makers are, the clearer the design distinctiveness is.

7. Subjects for the next stage of the research

The subjects for the next stage of the research is shown below.

- 1) Current researches on competitiveness between companies have been described from the viewpoints like technology, financial positions or human resources. However, it is quite rare to find researches based on competence in design or power of brand. We would like to focus more on the relations between profitability and design/brand to develop the research.
- 2) We have carried out comparative research based on typifying like Japanese style or European style in current researches. But in the next stage we would like to clarify the most suitable decision-making model in each style in order to contribute improvement in design management in each industry.

REFERENCES

1. Noboru Koyama Mikio Yamashita Mikio Fujito Keiichiro Kawarabayashi Yasufumi Morinaga Yoji Kitani, *Differences of Design Decision on Product Design Development through Comparative Research on Japanese, European and American Automobile Industries*, ISES 2008
2. Mikio Fujito , Noboru Koyama , Yoji Kitani , Katsuhiko Kushi, Yasufumi Morinaga, Mikio Yamashita,

and Keiichiro Kawarabayashi, IASDR07,2007.11, Comparative Research on Japanese, *European and American Automobile Industries in Product Design Development*, IASDR, 2007

3. Keiichiro Kawarabayashi, Mikio Yamashita, Mikio Fujito, Youji Kitani, Noboru Koyama , Enlargement of the Design Domain and Front-loading of Design Decision-Making in a Product Development Process, IASDR07, 2007
4. Yoji Kitani, Keiichiro Kawarabayashi, Mikio Yamashita , Noboru Koyama, Katsuhiko Kushi, Mikio Fujito, Proposal title: Basic research on transition of design domain and design role in Japanese electric industry -By the use of "Design domain map, IASDR, 2007
5. Yasufumi Morinaga, Shigeo Kuroda, Tomoaki Itoh, Atsunori Akaishi, Naoki Shimomura, Yoshiaki Satoh, Section No.5 of *Management aiming Market*, pp. 169-242, 2007.
6. Keiichiro Kawarabayashi, MOD(Management of Design) and Production Management, pp.199-201, 2007.



# ユビキタス DB レプリケータの開発と プローブビデオサービスへの適用検討

嶋田 茂\*

## Development of Ubiquitous DB Replicator, and Examination of Applicability to Probe Video Services

Shigeru Shimada\*

### Abstract

The storage of a large capacity comes to be installed in the mobile device such as car navigation systems and cellular phones, and the demand of the ubiquitous multimedia processing between mobile devices have risen. To cope with this demand, the ubiquitous DB replicator of which composed of the super-light DBMS and the distributed management of multimedia for the mobile devices, has been developed. This mechanism is applied to the probe video service that circulated the video data from the mobile camera under the ad hoc communication environment, and get the prospect for the practicality.

Keywords: Ubiquitous system, DB replicator, ad-hoc communication, video service, probe video

### 1. はじめに

#### 1. 1 ユビキタス DB の状況

携帯電話やカーナビゲーションシステムに代表されるモバイル機器にも、超小型 HDD や Flash メモリ等の大容量ストレージが搭載され、各種のマルチメディアを格納管理する要求が多くなっている。特に最新のカーナビゲーションシステムでは、ほとんどの製品が大容量ストレージを前提にしたシステム構成となっており、従来の地図データの他に画像・映像・音楽など多様なコンテンツを格納して、各種のマルチメディアアプリケーションに対応するシステム構成が主流となっている。このシステム構成は、多様なニーズに対応するように構成された汎用のパーソナルコンピュータのシステム構成とほぼ同等である。それにもかかわらず各種のモバイル機器では旧態依然とした組込み専用機として開発されており、現在の組込みアプリケーションの開発方式では限界が来ていることが指摘されている。

例えば、カーナビゲーションシステムに新たな機能を装備することを要求しても、システム修正に長時間かかり安定した品質のよいものがなかなか開発できない問題や、道路や店舗などの地図情報コンテンツが最新のものに更新されない問題が発生している。その原因を探ると、組込みアプリケーションの 50% は、データ管理機能に費やされしかも 90% のバグが専用データ型の統合処理に起

因していると言われている [1]。

このような場合に有効なのが、データベース管理システム (DBMS) の導入であり、アプリケーションプログラムからデータ管理を独立化させデータアクセス処理を共通化することにある。そこでこれらの要求に対応するため、超軽量で個人利用のユビキタス環境に対応した超小型のデータベース管理システム ( $\mu$  DBMS) の検討を行ってきた。本報告では更なるユーザ要求に対応するための新たな機能を提案する。

#### 1. 2 新たなニーズと動向

ソフトウェア無線やアドホック通信技術等の登場により、モバイル端末でのネットワークアプリケーションの高度化の期待が高まりつつある。特にアドホック通信環境下では、モバイル端末同士が直接データを交換し共有することができるようになるため、自律分散的なデータベース形成が可能となり、ITS・防災・医療等のユビキタス環境でのデータベース構築への応用が期待できる。このような新たなニーズに対応するため、 $\mu$  DBMS をモバイル端末に搭載し、それらを複数台使ってデータベースのレプリケーション (複製と同期) を行い、それらを連鎖してデータベースの集約化を図る方式が考えられる。この場合のレプリケーションメカニズムは、従来のマスタスレーブの階層型とは異なり、モバイル端末同士が対等に DB レプリケーションを行うアドホック型と

なる。この新しいメカニズムを以降「ユビキタス DB レプリケータ」と命名して、詳細なメカニズムの検討を行うことにする。

更にこのような新たな技術開発を推進するためのベークルが必要と考え、ITS 分野での活用を図ることを考えた。その場合の有望なアプリケーションとして、車載カメラから撮影されたプローブ映像データの配信サービスがある。この要求に対応する方法として、上記の無線通信環境を使ったリアルタイム表示が考えられ、車載のストレージは不要とする方式がある。ところが、マルチメディアコンテンツを中心とした観点で考えると、検索対象とするサイトには必ずしもユーザが要求するものがあるとは限らず、しかもそのアクセスには待ち時間が発生することは必至であり、車両の運転など急務を要する目的には必ずしも適合しない場合が多い。そこで本技術開発では、このようなプローブビデオサービスにユビキタス DB レプリケーションの適用性を検討することにし、新たな  $\mu$  DBMS のための基幹技術開発を行うことを目的とした。

## 2. ユビキタス DB レプリケータ

### 2.1 従来の DB レプリケーションの概要

データベース間のレプリケーション技術は既に確立されているとよく、エンタープライズ DBMS の業界ではデータベース性能チューニングを行う常套手段になっている。マスタデータベースのレプリカをスレーブデータベースに作成して多量のクライアントアクセスの負荷分散を図る方式は、古くからビジネスシステムの分野では行われていた。例えばマスタスレーブ環境下での DB レプリケーションシステムとして、HiRDB Data replicator が製品化されている [2]。その機能の概要は次のようになる。

- ・ OS を超えたデータベース間の同期機能  
メインフレームから大規模サーバ、及び PC に至るまでの複数種類 OS 間のシームレスなデータベース同期機能。
- ・ マスタスレーブ DB 間のデータ抽出と反映機能  
マスタ DB からスレーブ DB への方向を持ったデータベース連携。レプリケート範囲は表単位として、必要な列の指定から列単位のレプリケートや、SQL の where 句を用いて行単位のレプリケートが可能。又データ抽出の条件設定により、複数表を結合（マージ）しての連携が可能。これらのレプリケーション動作は予め記述された手続に従って、スレーブからのプル型要求により動作する。
- ・ データ連動機能

レプリケーションの方向は片方向で、多段階のレプリケーションが可能。但し、レプリケーション連鎖がループや双方向となる場合はデッドロックの原因になるので禁止する。データの連動単位はトランザクションで、障害時にはリカバリーのためのレプリケーションの履歴管理機能を有する。

#### ・用途別構成

レプリケーション方式は、用途別のサーバ構成（水平・垂直分散、負荷分散、SAN 連携、ディザスタリカバリ用、他社 DBMS との連携用など）に適合するよう、予め変えておくことが可能。

このように、HiRDB Datareplicator の機能は、マスタ・スレーブ DB 間の階層的なレプリケーションにあり、特に中央のメインフレームで高信頼性管理が要求されるマスタ DB を、支部のサーバにレプリケートして、多量のクライアントアクセスに耐えるようなシステム構成をとる場合に有効である。

### 2.2 ユビキタス DB レプリケータの機能要件

モバイル環境における DB レプリケーションの機能としては、カーナビゲーションシステムのようなモバイルホストにおける車載 DBMS に格納・管理されているコンテンツを、他の車載 DBMS から同期更新して共有するような要求に適合し、このようなコンテンツの分散管理の特性から、新たに「ユビキタス DB レプリケーション機能」と命名して、上記の従来からのレプリケーション機能と区別する。

上記の Datareplicator 機能を直接用いてユビキタス DB レプリケーションに適用するには、種々の問題点が発生する。まず、モバイルホスト間では同位レベルでのレプリケーションの要求がある。即ち、各モバイルホストの DBMS が相互にマスタスレーブの関係を取り、双方向にしかも動的にレプリケーションを行なう要求がある。これは、上記 Datareplicator におけるマスタスレーブ DB 間の階層的なレプリケート機能に反する。又データ連動機能におけるレプリケーションの方向が固定したマスタからスレーブへの片方向に制限されていることに反する機能である。

次に、データレプリケーションの機能が動的に変化する動作要求に関する問題がある。これは、あるモバイルホストからレプリケーションの対象や範囲を規定して、他のモバイルホストへリクエストの形式でブロードキャストして、動的にレプリケーションを行なう機能要求である。これは無線通信方式にも依存し、レプリケーションを求めるモバイルホストから近隣のモバイルホストに対してアドホック通信要求をかけ、その連鎖により目的とするレプリケーション対象を見つけて行くような自律

連鎖的なレプリケーション機能が要求される。これは、上記 Datareplicator におけるデータ連動機能の規定に反する。

カーナビゲーションシステムは、車両に標準装備されることから、PC に代表される一般の情報機器に比べて使用期間が長く、しかもその長い期間におよぶカスタマイズが行われやすい環境にある。従って、レプリケーション対象とするデータベースに対して、同一のデータであっても DB スキーマが異なり、従来の固定したレプリケーションプロトコルを直接適用できない問題が発生しやすい。このようなデータベーススキーマが異なる場合の対応も Datareplicator では考えられていない。

以上の従来の DB レプリケーション機能の問題点の抽出から、今回新たにユビキタス DB レプリケータが備えるべき機能要件の概要をまとめると次のようになる。

- ・モバイルホスト間接合の多様なトポロジモデルの変化への対応；ネットワーク接続の自由度が多いモバイルホストでは、モバイルホスト間のネットワーク接続形式（これを以降トポロジモデルと称する）が、クライアント・サーバ型の他に、ブロードキャスト型やアドホック型など多様になる。これらのトポロジモデルに適合した DB レプリケーション機能が必要
- ・アドホック通信による自律連鎖的なレプリケーション機能；モバイルホスト間の通信には、アドホックな無線通信網の形成による連鎖的な情報転送が用いられる。このような通信環境下では、必要とする情報とその条件とを纏めたレプリケーション要求を隣接のモバイルホストへブロードキャスト的に行い、その条件に合致した情報を各モバイルホストから自律的に転送するような方式が求められる。
- ・レプリケーション対象とするデータベース間のスキーマ差異の吸収；モバイルホストのデータベースは、それを供給するベンダーが異なることや、システム運用がそれを使用する各個人に任される事などから、データベーススキーマは統一化されないでローカライズされることが多くなる。従ってこのようなデータベースを複数用いてレプリケーションの対象とした場合、レプリケーション要求を行う時点での DB 間のスキーマが異なる可能性が高くなる。このような場合においても、スキーマの差異を吸収して DB レプリケーションが実行される機能が要求される。

## 2.3 ユビキタス DB レプリケータの機能詳細

ユビキタス DB レプリケータは、ユビキタス通信環境下において複数の異種データベース間におけるデータの交換・同期・部分同期を効率的に行なうことを目的に構成されたミドルウェアとする。その構成は、モバイルホ

スト内に設置された  $\mu$  DBMS にて内部ストレージの管理を行い、ユーザアプリケーションから与えられるコマンドを受け取り、その解析から必要に応じて他のレプリケータとの通信を行い、スキーマ変換やデータ同期を行なうものとする。

### 2.3.1 スキーマ変換機能

通信する相互のモバイルホスト間のデータベーススキーマの差異を吸収するため、次のような機能を用意する。

テーブル・カラム名称変換：レプリケート対象となる 2 つのデータベース間のテーブル名称及びカラム名称の差異を吸収する

射影変換：テーブルの一部の列（カラム）を選択してレプリケーションの対象とする

条件変換：カラムに条件を設定して、レプリケーション対象となる行の選択を行なう

テーブル結合：結合したテーブルをメッセージ上で 1 つのテーブルとして扱う外部ファイル参照：データベース内のファイルパスを外部ファイルとして扱い文字列表現に変換する

### 2.3.2 トポロジモデルの差の吸収機能

レプリケータ同士のネットワーク接続関係のモデルをトポロジモデルと命名すると、そのトポロジモデルとして、{クライアント・サーバ、ブロードキャスト、アドホック、カスケード 等} を考える。これらの各モデルの差により、双方向 / 片方向、完全同期 / 部分同期（条件付）、追加許可、削除許可、変更許可などの設定により最適な同期プロトコルが異なるため、各モデルに最適な同期マネージャを用意する必要がある。以降この同期マネージャの詳細について、レプリケーションパターン（形式）とそこで用いられる各プロトコルについて詳細に説明する。但し本報告では、従来のレプリケーション動作とは異なるトポロジモデルを重点的に説明する。

#### （1）クライアント・サーバモデル

従来のレプリケーションで前提としていたように、1 つのサーバに複数のクライアントが接続される構成である。レプリケーションの条件の有無、双方向性、部分更新性等の選択による多様なモデルが考えられるが、ここでは従来とは異なる双方向性と条件を備えたモデルを中心に説明する。

#### 条件無しダウンロードモデル

従来のサーバから片方向のレプリケーションモデル。

#### 条件無し双方向モデル

クライアント・サーバ双方向のレプリケーションモデルで、クライアントでのレコード追加を行なわないモ

デル。プロトコル的には下記の場合を簡略化したもの。  
条件無し双方向 ID マッピングモデル

[レプリケーションパターン]

サーバクライアント双方でレコードの追加を行なうモデル。追加レコードの管理を行なうためレコード識別子のマッピングテーブル (ID-Mapping テーブル) を必要とする。

[レプリケーションプロトコル]

クライアントでサーバ ID とクライアント ID のマップを管理する。クライアントは追加されたレコードをそのままサーバに送信し、サーバでは受信したレコード ID をサーバ ID に差し替えてデータベースに追加する。そして、差し替えた前後の ID マッピングを返信する。

条件無し双方向部分レプリケートモデル

[レプリケーションパターン]

クライアントがサーバテーブルの行又列のサブセットを持つ場合で、クライアント毎にどのサブセットを持つかを予め定義しておく。

[レプリケーションプロトコル]

レプリケーションの対象とするどの行・列を選択するか、レコード追加時にサブセット以外のカラムをどのように処理するかを定義して、スキーマ変換機能により処理が行なわれるようにする。

条件有りダウンロードモデル

[レプリケーションパターン]

サーバからクライアントへの片方向レプリケーションであるが、条件を指定してクライアントがサーバの部分コピーを保持するパターン。条件カラムは予め決めておくが、条件自体は動的に変化しても対応できるようにする。

[レプリケーションプロトコル]

クライアントは条件別に最終同期時刻を保持しておき、リクエスト時に条件と最終同期時刻を送信する。サーバは条件を満たす最終同期時刻以降の更新を更新ログから検索し、最終同期時刻を更新する。

(2) ブロードキャストモデル

[レプリケーションパターン]

サーバから複数のクライアントに対し、同時に同じ差分データを送信する形式。

[レプリケーションプロトコル]

サーバは不特定多数のクライアントに対し、ある時点以降の更新差分を送信する。クライアントは特に受信の確認メッセージを送信しない。

(3) アドホックモデル

サーバを持たず、複数のクライアントが直接通信するモデル。各クライアントには階層関係は存在せず、デー

タ交換は双方向に行われる。但し必要に応じて、一方的に送信するパターンも用意される。

条件無し双方向アドホックモデル

下記条件付きモデルと同等で、簡略化したものなので説明省略。

条件有り双方向アドホックモデル

[レプリケーションパターン]

各々のクライアントがレコードを作成し、各々のクライアントが自分の欲しいデータを相手にリクエストを行い、リクエストを受け取ったクライアントが該当するレコードを返却する。テーブルの更新は insert のみで、update、delete は行わない。

[レプリケーションプロトコル]

前提として、リクエストを行うクライアントを A、リクエストを受けるクライアントを B とし、A、B は共に同じテーブル構造を持つとする。1つのデータテーブルに対し、1つの同期用テーブルを持ち、既得レコードおよび既得レコードのメタ情報の送受信を減らすために時間、空間をブロック化し、ブロック単位で既得レコードのメタ情報を管理するものとする。

- ・A は B に対し、リクエスト対象となる条件と、その条件にマッチする保持ブロックのメタ情報を送信する。ただし、自身が作成者であるメタ情報は送信しない。
- ・B は A から受信した条件を満たす全てのレコードを検索し、そのうち、A の保持ブロックに該当するものを除いたデータレコードと、B の保持ブロックテーブルから A の条件を満たす、保持ブロックのメタ情報を A に返信する。さらに B も A と同様に自分の望む条件のリクエストをレスポンスと同じメッセージに添付して送信する。
- ・B からデータレコードを受信した A はそのデータレコードをデータテーブルに追加する。また、受信した保持ブロックレコードも保持ブロックテーブルに追加する。
- ・B は A のリクエストに対する返信を行う。レスポンスを受信した B は A と同様にデータベースの更新を行う。

### 2.3.3 リプリケータメッセージの形式と構造

レプリケータの条件や制御を定義するメッセージには XML 形式を採用して拡張性と汎用性に対応している。そのレプリケータメッセージ及び設定ファイルの XML スキーマを図 1 に示す。

以降、これらの各要素の具体的な記述方法について説明する。まず、レプリケータメッセージの XML 記述内容について、上位階層から下位階層に向けて説明する。



図1 レプリケータメッセージのXMLスキーマ

**message 要素**：レプリケータメッセージの根幹となるルートを規定する。

**header 要素**：メッセージヘッダ部分を記述し、同期マネージャーに渡される前の段階で処理される。

**request 要素**：送信元から送信先への要求を保持する。パーサで読み込まれた request 要素は同期マネージャーに渡され、処理を行う。

**response 要素**：要求に対する応答を保持する。パーサで読み込まれた response 要素はマネージャーに渡され処理を行なう。

以降の階層の要素に関してはこれらの記述と同様なので、記述説明を省略する。

次に、設定ファイルのXML記述について説明する。

**profile 要素**：設定ファイルの根幹を与えるルートを規定する。

**database 要素**：データベース設定を保持する。ユーザ名やパスワード、運用ディレクトリなどのデータベース固有の設定は property 子要素に保持する。

**dbAccessor**：データベースにアクセスするためのDBアクセスハンドル。

### 3. プローブビデオサービスへの適用

本章では、今まで機能を中心に説明してきたユビキタスDBレプリケータを実用的なシステムへ適用する方式についての検討の一環として、次世代ITS分野におけるプローブビデオサービスへ適用する方式について説明する。

#### 3.1 プローブビデオサービスの要件

次世代ITSの位置づけで、車載の情報装置を高速の無線ネットワークで接合して、各種のブロードバンド情報サービスを企画することが多くなっている。この中で、各車両に搭載されたビデオカメラの映像を、遠隔の車両から車車間アドホック通信を介してモニタリングするプローブビデオサービスの構想が多く提案されるようになってきている。例えば、国交通省のASV3プロジェクトでは、見通しの悪い交差点における車両間の出会いがし

ら衝突事故を防止するため、車車間通信を用いた情報交換により、互いの車両の位置と状況を車載モニターで確認できるシステムの実用化が検討されている[3]。一方総務省のワイヤレスブロードバンド研究では、車両の交通渋滞によるストレス緩和を目的にして、渋滞車両列を成す車載装置を無線基地局として利用したホッピング無線通信により、渋滞先頭車両の車載カメラが撮影したビデオ映像を後方車両からモニタリングできる機能の検討が行なわれている[4]。

これらの機能はいずれも、個々の車両に搭載されたビデオカメラをプローブセンサーとして使い、複数の車両間に形成されるアドホック無線通信網を介して、遠隔の車両に対してビデオデータの転送と表示をリアルタイムに行なうことが技術の中心となっている。ところがこのようなリアルタイム性を求めても、サービスを受けるユーザの観点から考えると、そのビデオサービスを受けたい地点やエリアには、プローブを形成する車両が存在しないことが多く、たとえその場所近くに車両がいたとしても通信チャネルの混雑からビデオ転送に時間がかかるなどの問題が発生して実用にならないことが予想される。

このような問題を解決するための手段として、車載のストレージ装置に蓄積されたビデオデータを活用する方法が考えられる。この方法は、図2に示すように、タクシーやバス等、道路を常時走行している車両にHDDなどの大容量ストレージを搭載し、車載カメラのビデオデータを蓄積しておき、それを交差点の信号待合わせなどで集合したタイミングで、ビデオデータのサービスを求める車両へ転送する方式である。機能的には、一旦ストレージに蓄積されたデータであるため、即時性に欠ける問題はあるものの、サービスを受けたい位置や範囲に該当するビデオデータが存在する確率が向上するため、サービス範囲が広がる効果を持ち実用性が高まると判断される。又このような蓄積ビデオデータは、事故や事件の原因分析の場合に決定的な証拠を提供する可能性があり、しかも多数のモバイルホストによる異なった視点位置から供給されることによりその効果は更に向上する。

このような利点が考えられるストレージ型プローブビデオサービスは、その利用者の観点からサービス要件をまとめると次のようになる。

- ・ビデオサービスを受けたい位置や範囲及び時間の指定が容易に出来ること。この場合の指定方法として、サービス位置・範囲・カメラ方向・時間などが道路地図を背景にしたGUIにて容易に指定できること。
- ・情報サービスを受けるモバイルホストの指定を行なう必要が無く、できるだけ広い範囲からビデオ提供を受けることができ、しかもそれら複数から提供される断



図2 交差点におけるビデオデータサービス

片的なビデオデータを自動的に統合できること。

- 指定された位置及び範囲に対応するビデオデータが正確に抽出でき、抽出されたものが複数ある場合には、それらの撮影時期が新しいものが優先されること。但し、ユーザから時間指定がある場合には、その限りではない。

これらの要件を満足するプローブビデオサービスのシステム実現方法について、次節で詳細に説明を行なう。

### 3. 2 ユビキタス DB レプリケーション適用方式の検討

前節で纏められたプローブビデオサービスの要件を満足するシステムの実現方法としては、前提とする通信システムの利用により大きく異なる。例えば、インターネットを利用するならば、携帯電話網を用いたゲートウェイサーバ経由の情報サービスの構成が考えられる。または無線 LAN ホットスポットを用いるならば、クライアント・サーバの階層型の構成が考えられる。これらの構成のいずれも、情報センターとなるマスタ DB にビデオデータを集約化させ、クライアントの検索要求にサーバから集中的に回答する方式である。ところがこのサーバ集中型の構成では、処理データ容量が膨大になることからレスポンスが遅くなる上に、サーバのうんえい運用の負荷が大きくなる問題が発生する。又無線通信につきまとう接続の途切れが原因となり、トランザクションの回復処理などの負荷が増大し、通信ネックにも陥りやすくなる。

これに対して、今後車載情報装置への大容量ストレ

ージ搭載と超軽量 DBMS が搭載されると、車載カメラのビデオデータ等のプローブデータは、センタサーバに集約させることなくローカルに管理され、ローカルな範囲で処理が完結するようなユビキタス処理特性を備えるようになる。しかもこのようなユビキタスな処理システムの構成は、大容量ストレージの車載化や新たな通信方式の進展等により今後大幅に増加すると考えられる。

この動向を踏まえて、今回検討するプローブビデオサービスのシステム構成としては、ビデオカメラと超軽量 DBMS を搭載したカーナビゲーションシステム同士を、アドホック通信を介してユビキタス DB レプリケーションにより行なうものとし、センタサーバを必要としない構成とする。図3にそのシステム概要を示す。この図では、信号待合などで交差点に集結する車両群には、アドホック無線通信クラスタが形成され、そのクラスタ内の車両間のアドホック通信による時空間データベースのレプリケーションの様子が示されている。

この関係で更に詳細な動作を説明すると、次のようになる。クラスタ内の車両の中には車載カメラが装備されて、撮影されたビデオデータが大容量ストレージ内に時空間データベースとして蓄積管理されているものがあるとする。それをあるユーザからターゲット付近のビデオのサービス要求として時空間条件が指定され、クラスタ内の隣接する車両に向けブロードキャストモードのメッセージによる問い合わせを行なう。これを受けた

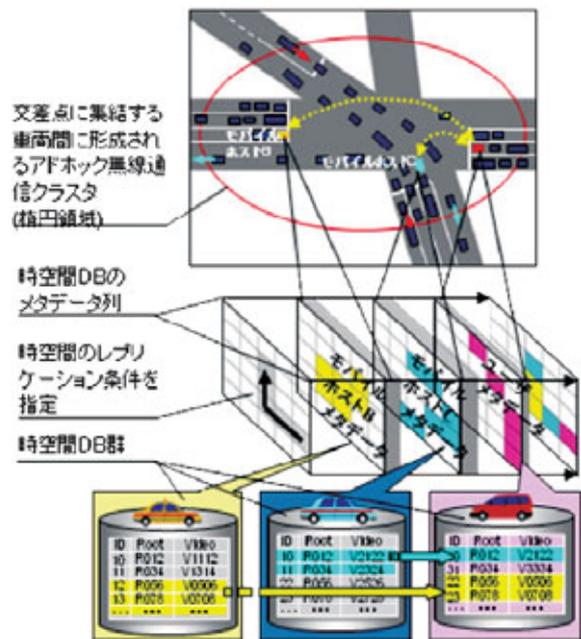


図3 プローブビデオサービスのシステム構成

車両の中に、サービス要求に適合するビデオデータを保有するものとすると、その車両では時空間条件に適合するデータを抽出した後、ユーザ車両に向け条件付双方向レプリケーションメッセージをビデオデータと共に転送し、最新のビデオデータを提供する。

このような構成により、時空間条件に適合するビデオデータを抽出する処理が、各カーナビゲーションシステム内部のローカルな処理範囲で完結するため、センタサーバを介することなく高速に処理することができ、ユーザへの迅速な情報サービスが期待できる。このメカニズムの更なる適用分野として、事故解析や・災害救助・営業流通など一時的に集積する移動体間のデータ共有に有効で、今後ユビキタス情報環境を先取りしたサービス構想といえる。

#### 4. プローブビデオサービスの実装

今まで検討してきたユビキタス DB レプリケータを用いたプローブビデオシステムのアーキテクチャの有効性を確認するため、 $\mu$  DBMS の搭載された実際のモバイル端末へユビキタス DB レプリケータのアーキテクチャの実装を行い、その動作状況の確認と評価を行なった。

##### 4. 1 プロトタイプの構成方法

今回の開発したプロトタイプでは、モバイルホストに複数の PDA を、無線通信環境としては Wireless LAN を用いるといった簡単な構成のものとなっており、ホストコンピュータを必要としない点が特徴となっている。この PDA に車載用の DBMS である  $\mu$  DBMS と、今回提案しているユビキタス DB レプリケータとを実装して、モバイルホスト間直接の無線通信により、各ホストに蓄積されているビデオデータをレプリケートすることにより、プローブビデオサービスを実現する方式となっている。

モバイルホストの選定：

実際のシステム実装の対象とするモバイルホストとして PDA を用いることにした。本来ならば、実際のカーナビゲーションシステムを直接用いるべきであるが、無線通信環境の設定やアプリケーション実行領域の設定など膨大な修正を必要とするため、断念せざるを得なかった。その代わりに、VC++ などの組込みソフト開発が容易で表示画面サイズも同等な VGA サイズ (640 × 480) を有し、WindowsCE の搭載された PDA を用いることにした。又この PDA を用いるもう 1 つの理由として、欧州や韓国におけるカーナビゲーションシステムとして、この PDA ベースで構成されているものが多い。今後日本のカーナビゲーションシステムの新たな展開として、

専用機ではなくこのような汎用の端末でも動作するシステムも考えておくべきと考えているためである。

無線通信環境：

現段階の市販の機器を用いてモバイルホスト間にアドホック通信を実装するためには、IEEE802.11b の無線 LAN 規定を用いるのが限界であった。最近この規定よりも長距離でモバイル特性が考慮された IEEE802.16e (WiMAX) や、更に高速の移動特性にも耐えられる IEEE802.20 (MBWA) 等の新しい規定が提案されているが、これらが市販の機器に組み込まれ一般の無線サービスとして利用できるようになるのは、まだ相当時間がかかると判断した。

又アドホックネットワークのメッセージルーティングに関する詳細な実装も、今回省略した。その理由として、隣接モバイルホスト間のメッセージの伝達方法を今回のアプリケーション向けに変更するためには、物理層における制御プログラムを追加実装する必要があり、その部分の詳細な知識を持っていなかったことにある。なお、その無線 LAN を用いたアドホックネットワーク形成に関する研究開発は、既に多数行なわれている [5]。

##### 4. 2 実装内容とその評価

PDA には、本来車載カメラで撮影された風景映像をリアルタイムに取込んで、車載 DBMS に構造化して記憶させるべきであったが、撮影環境の整備に実際の車両を必要とすることや無線環境の設定も公道では出来ないことから、あらかじめ車載カメラで撮影されたビデオデータを前処理的に構造化したものを PDA の  $\mu$  DBMS に登録しておき、そのデータベースのコンテンツの範囲でのレプリケーションが可能とするような限定された実装となった。

プロトタイプシステムとして実装した機能は次の通りで、PDA 単体のローカル処理系として実行可能となっている。

- 背景地図の描画
- 自車位置アイコン表示
- 目的地アイコン表示
- 経路表示
- 目的地選択
- 通信可能エリア表示
- レプリケーションエリアの表示
- データテーブルの表示
- 連続ビデオ再生
- 各種の初期化処理

各モバイルホストの  $\mu$  DBMS に格納されるデータベースのデータスキーマ (構造) は次の通りで、本体データテーブルとメタデータテーブルとで構成される。

表1 本体データテーブル

id	name	parent_id	data
1	1	0	1
2	2	1	2
3	3	1	3
4	4	2	4
5	5	2	5
6	6	3	6
7	7	3	7
8	8	4	8
9	9	4	9
10	10	5	10
11	11	5	11
12	12	6	12
13	13	6	13
14	14	7	14
15	15	7	15
16	16	8	16
17	17	8	17
18	18	9	18
19	19	9	19
20	20	10	20
21	21	10	21
22	22	11	22
23	23	11	23
24	24	12	24
25	25	12	25
26	26	13	26
27	27	13	27
28	28	14	28
29	29	14	29
30	30	15	30
31	31	15	31
32	32	16	32
33	33	16	33
34	34	17	34
35	35	17	35
36	36	18	36
37	37	18	37
38	38	19	38
39	39	19	39
40	40	20	40
41	41	20	41
42	42	21	42
43	43	21	43
44	44	22	44
45	45	22	45
46	46	23	46
47	47	23	47
48	48	24	48
49	49	24	49
50	50	25	50
51	51	25	51
52	52	26	52
53	53	26	53
54	54	27	54
55	55	27	55
56	56	28	56
57	57	28	57
58	58	29	58
59	59	29	59
60	60	30	60
61	61	30	61
62	62	31	62
63	63	31	63
64	64	32	64
65	65	32	65
66	66	33	66
67	67	33	67
68	68	34	68
69	69	34	69
70	70	35	70
71	71	35	71
72	72	36	72
73	73	36	73
74	74	37	74
75	75	37	75
76	76	38	76
77	77	38	77
78	78	39	78
79	79	39	79
80	80	40	80
81	81	40	81
82	82	41	82
83	83	41	83
84	84	42	84
85	85	42	85
86	86	43	86
87	87	43	87
88	88	44	88
89	89	44	89
90	90	45	90
91	91	45	91
92	92	46	92
93	93	46	93
94	94	47	94
95	95	47	95
96	96	48	96
97	97	48	97
98	98	49	98
99	99	49	99

表2 メタデータテーブル

id	name	parent_id	data
1	1	0	1
2	2	1	2
3	3	1	3
4	4	2	4
5	5	2	5
6	6	3	6
7	7	3	7
8	8	4	8
9	9	4	9
10	10	5	10
11	11	5	11
12	12	6	12
13	13	6	13
14	14	7	14
15	15	7	15
16	16	8	16
17	17	8	17
18	18	9	18
19	19	9	19
20	20	10	20
21	21	10	21
22	22	11	22
23	23	11	23
24	24	12	24
25	25	12	25
26	26	13	26
27	27	13	27
28	28	14	28
29	29	14	29
30	30	15	30
31	31	15	31
32	32	16	32
33	33	16	33
34	34	17	34
35	35	17	35
36	36	18	36
37	37	18	37
38	38	19	38
39	39	19	39
40	40	20	40
41	41	20	41
42	42	21	42
43	43	21	43
44	44	22	44
45	45	22	45
46	46	23	46
47	47	23	47
48	48	24	48
49	49	24	49
50	50	25	50
51	51	25	51
52	52	26	52
53	53	26	53
54	54	27	54
55	55	27	55
56	56	28	56
57	57	28	57
58	58	29	58
59	59	29	59
60	60	30	60
61	61	30	61
62	62	31	62
63	63	31	63
64	64	32	64
65	65	32	65
66	66	33	66
67	67	33	67
68	68	34	68
69	69	34	69
70	70	35	70
71	71	35	71
72	72	36	72
73	73	36	73
74	74	37	74
75	75	37	75
76	76	38	76
77	77	38	77
78	78	39	78
79	79	39	79
80	80	40	80
81	81	40	81
82	82	41	82
83	83	41	83
84	84	42	84
85	85	42	85
86	86	43	86
87	87	43	87
88	88	44	88
89	89	44	89
90	90	45	90
91	91	45	91
92	92	46	92
93	93	46	93
94	94	47	94
95	95	47	95
96	96	48	96
97	97	48	97
98	98	49	98
99	99	49	99

このような構成において、モバイルホスト間で実行可能なビデオデータのレプリケーション機能は次の通りとなっている。

レプリケーション初期状態：

図4の左側2台のPDAには、駅前のタクシーを想定して、それぞれ別の場所を走行中に得られたプローブビデオデータがDBMSに格納されているものとする。これを、右側1台のPDAに示されるモバイルホストAからレプリケーション要求を左側2台に向け発信を行なうものとする。

ビデオ要求を行なうターゲット位置の指定：

モバイルホストAでは、レプリケーション要求を行なうターゲット位置の指定を行い、現在位置からそのターゲット位置までの経路を表示すると共に、自己の保有するビデオデータの存在範囲をビデオリンクの図形として地図上に表示する。

レプリケーション結果：

ターゲット位置までのビデオデータのレプリケーション



図4 リプリケーションを行う3台のPDA

ン要求を行なったモバイルホストAに対して、モバイルホストB,Cから対応するビデオストリームパーツがレプリケートされる。そのレプリケートされたビデオリンクを地図上に線図形で示す。

経路に沿ったビデオリンクの再生：

モバイルホストB,Cからレプリケートされたビデオリンクと自己の蓄積しているビデオリンクを用いて、経路に沿ってビデオストリームパーツを順に再生して、目標位置までのプローブビデオのサービスを受ける。

これら一連のリプリケート処理に要する時間について、評価を行なう。今回、2つのモバイルホスト間でやり取りされるビデオデータの容量は1MB以下であり、無線通信の転送レートである10Mbpsにおいては、十分1秒以下に収まるレベルにある。それよりも、時間のかかる処理部分としては、レプリケーション条件として要求先に送るXML形式のメタデータのパーズング処理とそれを基にしたRDBMSの検索・格納処理時間である。この部分に関する実績としては、2~5秒を達成しており、実用上問題ないレベルに達していると判断される。



図5 ターゲット位置の指定



図6 レプリケートされたビデオのリンク表示

## 5. おわりに

本報告はユビキタスネットワーク環境下におけるデータベースのレプリケーション方式とそのプローブビデオサービスへの実装方式の検討と評価についてまとめたものである。特に前者に関しては、自律分散型データベースシステムを実現するための基本メカニズムを扱っており、今後のユビキタス環境下におけるデータベース管理システムの方向付けを与えようとするものである。今回は、ユビキタス DB レプリケーションと命名したレプリケーション方式の検討の結果、次のような結論を得た。

- ・従来のクライアント・サーバ型の階層的な構成だけでなく、アドホック通信による等位な構成や放送型による1対多の構成に至るまでのホスト構成をトポロジモデルとして纏め、各ホスト構成に対して最適な同期プロトコルが発揮できるようなレプリケーション方式を開発した。
- ・レプリケーションの対象とするデータベース間に存在するデータベーススキーマの差異を吸収するスキーマ変換機能を開発し、処理効率を向上させることが可能となった。

## 参考文献

- [1] エンサーク株式会社 : <http://www.encirq.co.jp/>.
- [2] HiRDB Datareplicator <http://www.hitachi.co.jp/Prod/comp/soft1/hirdb/info/lineup.html>
- [3] 国土交通省 ASV 推進検討会編「先進安全自動車情報交換型運転支援システム」2005年.
- [4] 総務省ワイヤレスブロードバンド推進委員会編「ワイヤレスブロードバンド研究報告書」2005年
- [5] OMA Technical Section Affiliates - SyncML, <http://www.openmobilealliance.org/tech/affiliates/syncml/syncmlindex.html>



# バイOMETリック認証システムに対する FTA を用いたリスク評価

清水 将吾\*・瀬戸 洋一\*

## Risk Evaluation for Biometric Authentication Systems with Use of Fault Tree Analysis

Shogo Shimizu\* and Yoichi Seto\*

### Abstract

There are various countermeasures against impersonation attacks, such as liveness detection, encryption, and cancelable biometrics. However, the effectiveness of these countermeasures has not been discussed from the point of view of total security in biometric authentication systems. In this paper, we conduct a risk evaluation for biometric authentication systems with use of fault tree analysis (FTA).

Keywords: biometric authentication system, risk evaluation, fault tree analysis, impersonation attack

### 1. はじめに

本論文では、バイOMETリック認証システムにおけるなりすまし攻撃に関する安全性について、定量的なリスク評価を行うことを目的とする。なりすまし攻撃に有効な対策技術として、生体検知、暗号化、キャンセルブルバイOMETリクス等複数の技術が挙げられる。しかし、バイOMETリック認証システムを導入する利用者は、これらすべての機能を実装することは費用対効果の観点から不可能な場合があり、実装に優先順位を付ける必要がある。このためには、各対策技術およびそれらの組合せについて安全性に関してどの程度の効果が得られるのかを定量的に評価できることが望ましい。

しかし、現在はこれらの技術の有効性が別々に論じられており、バイOMETリック認証システム全体の安全性の確保という観点からの対策技術の適用効果や効果的な組合せについての議論がなされていない。そこで、本論文では、代表的な信頼性解析手法であるフォールトツリー分析（以下、FTA）を用いて、バイOMETリック認証システムの安全性に対するリスク分析を行う。更に、本分析において作成したフォールトツリー（以下、FT）により対策技術の有効性を定量的に評価する。これにより、バイOMETリック認証システムに実装されている機能の効果を定量的に示すことができる。

本論文の構成は以下の通りである。まず、2章でバイ

OMETリック認証システムの脅威と対策技術について述べる。次に、3章でFTAによるリスク評価を行い、対策技術の優先順位付けを行う。最後に、4章でまとめと今後の課題について述べる。

### 2. 脅威と対策技術

本論文で対象とするバイOMETリック認証システムの処理モデルを図1に示す。

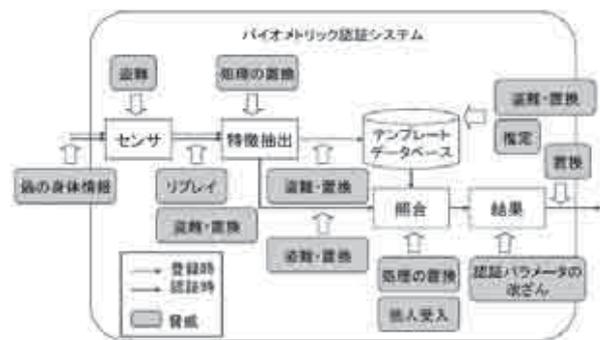


図1 処理モデル

まず、センサを通して利用者から身体情報を取得する。入力される身体情報は身体的な変動または装置側の変動によって毎回変動する。これらの変動条件の補正も含め、入力された身体情報から個人特有の特徴を抽出する処理を行う。登録処理においては、個人特有の特徴量をテンプレートデータとしてデータベースに保管する。認証処

理においては, 利用者者を特定する利用者識別子を入力し, 対応するテンプレートを求め, 類似度がある決められた閾値以上の場合は認証が成功したとしてアプリケーションの利用権限が与えられる. 図1に示すように, バイオメトリック認証システム内外の様々な箇所に脆弱性が存在し, これを利用した脅威が存在する. バイオメトリック認証システムの脆弱性と脅威は文献[1]に基づく.

なりすまし攻撃に対する対策技術として, 生体検知技術が挙げられる. 生体検知技術はバイオメトリック認証システムのセンサに対して提示された生体情報が偽造されたものであるかどうかを検知する技術であり, なりすまし攻撃に対して直接的な効果をもつ.

その他に, バイオメトリック認証システム内部からのデータの漏洩防止を目的とした, 暗号化やキャンセルラブルバイオメトリクスといった技術もなりすまし防止に有効である. キャンセラブルバイオメトリクスは生体情報の特徴量を秘匿化するとともに, テンプレートが漏洩した際にそれを何度でも無効化・再発行可能にする技術[2]であり, 近年, 多くのアルゴリズムが提案されている. これらの技術は生体情報から生成される個人の特徴量を秘匿化するものであり, 元の生体情報への復元が困難であることから, プライバシー保護の効果とともに, なりすまし攻撃を間接的に予防できるという効果をもつ.

なりすまし攻撃に対して有効な対策技術の一覧を表1に示す.

次章では, これらの対策技術の有効性の定量的評価を支援するための一手法について考察する.

表1 なりすまし攻撃に対する対策技術

対策技術	概要
生体検知	センサへ提示された生体情報と本人の生体情報とを比較し, 類似度が閾値以下の場合, 認証を拒否する
キャンセルラブルバイオメトリクス	本人の生体情報から生成された特徴量を秘匿化し, テンプレートとして保存する. 本人の生体情報と一致しない場合, 認証を拒否する
暗号化	本人の生体情報から生成された特徴量を暗号化し, テンプレートとして保存する. 本人の生体情報と一致しない場合, 認証を拒否する
生体検知	本人の生体情報から生成された特徴量を暗号化し, テンプレートとして保存する. 本人の生体情報と一致しない場合, 認証を拒否する
暗号化	本人の生体情報から生成された特徴量を暗号化し, テンプレートとして保存する. 本人の生体情報と一致しない場合, 認証を拒否する
キャンセルラブルバイオメトリクス	本人の生体情報から生成された特徴量を秘匿化し, テンプレートとして保存する. 本人の生体情報と一致しない場合, 認証を拒否する

### 3. 安全性に関するリスク評価

対策技術の有効性の評価を行うために, まず, バイオメトリック認証システムのリスク分析を行う. リスク分析の手法として, FTAを採用する. FTAは故障解析に

広く用いられており, 情報システムのセキュリティ対策立案等にも応用されている[3]. 次に, FTAの結果から対策技術の有効性を評価する方法について述べる.

#### 3.1 FTAによるリスク分析

FTAでは, 脅威の発生過程の因果関係を表したFTと呼ばれる木構造の論理図を作成し, この論理図を基に脅威の発生確率を算出してリスク評価を行う. FTAの網羅性を明確にするために事象分割型のFTA手法[3][4]が提案されており, 本論文でも同様の方針で行う.

まず, who (攻撃の行為者), when (脅威が発生する時点), where (脅威が発生する場所), what (攻撃の目的)の組合せによってすべての事象を抽出する. それぞれの項目の具体的な事象を以下に示す.

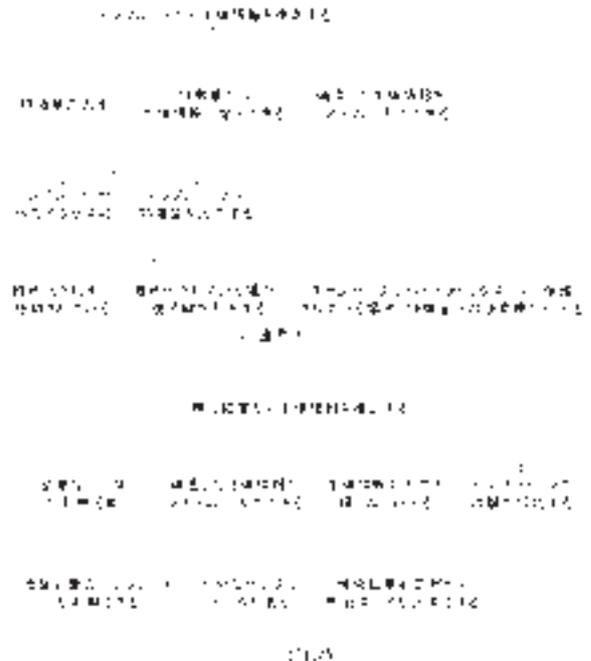


図2 FTの例

- who: システム管理者 (内部犯), 利用者
  - when: 登録時, 運用時
  - where: センサ, 特徴抽出部, テンプレートデータベース, 照合部, 転送部, 認証結果判定部, システム外部
  - what: 本人の生体情報と登録済みテンプレート以外の組合せを使用して認証に成功する, または, そのためのバックドアを生成する.
- これら4Wの組合せを考慮して, なりすましが起こる事象を抽出する. 本分析では22種類の脅威を抽出した. 抽出された脅威の例を以下に示す.
- 利用者が認証時に転送部でデータの改ざんができれば, センサでは本人の生体情報を入力し, 通信路上

で他人の生体情報またはテンプレートに置き換えることによって他人になりすますことができる。

- 管理者が運用時にテンプレートデータベースから他人のテンプレートを盗み出し、それを生体情報に復元して認証に使用することによってなりすましが行える。
- 管理者が運用時に照合部からログデータを入手することができれば、それから他人受入の高い利用者を特定し、認証が成功するまで偽生体情報を提示することによってなりすましが行える。

次に、抽出された各事象を頂上事象として、脅威の発生過程に基づいて中間事象、基本事象に分割することで FT を作成する。例として、who= 利用者、when= 運用時、where= テンプレートデータベースの場合の FT を図 2(a) に、who= 利用者、when= 認証時、where= 認証結果判定部の場合の FT を図 2(b) に示す。なお、図 2(b) の FT は文献 [5] を参考に定義した。例えば、図 2(a) においてテンプレートから生体情報に復元するには、テンプレートから特徴量を入手でき、かつ、特徴量から生体情報に復元でき、かつ、偽造した生体情報をシステムに入力できる必要がある。更に、生体情報に復元するためには、テンプレートデータベースにアクセスでき、テンプレートに格納されている特徴量等のデータから対応する生体情報に復元する必要がある。

### 3. 2 対策技術の有効性評価

作成した FT の葉にあたる各基本事象に発生確率を与え、論理和・論理積の計算を頂上事象に向かって行うことで脅威の発生確率を求められる。リスクは脅威の発生確率に被害額を掛けることで定量化される。

対策技術の適用は、基本事象の発生確率を低下させることに相当する。例えば、図 2(a) において、テンプレート保護にキャンセルバイOMETRICS を適用した場合、テンプレートから特徴量を入手できる確率を下げることにつながる。従って、対策技術の有効性は、それらを適用した場合の事象発生確率に基づくリスク評価値と適用しない場合の事象発生確率に基づくリスク評価値との差分によって測ることができる。

定量的評価の例として、なりすまし攻撃への一次的な対策技術である生体検知と、再利用防止の効果をもつテンプレート保護技術である暗号化とキャンセルバイOMETRICS の有効性を比較する。これらが対策技術として有効である FT の範囲を図 3 に示す。生体情報を推定してなりすまし攻撃を行うには、(i) テンプレートから生体情報を推定する場合、(ii) 照合スコアから山登り法により生体情報を推定する場合、(iii) システムの外部に露出している残留指紋等から生体情報を推定する場合の

3 通りがある。

(i) テンプレートを基点に攻撃を行う場合は、まずテンプレートをデータベースまたは通信路から盗み出し、テンプレートに格納されている特徴量を抽出する必要がある。このとき、テンプレートに特徴量が生データとして格納されている場合、暗号化されている場合、キャンセルバイOMETRICS によって秘匿化されている場合の 3 通りが考えられる。生データとして格納されている場合は特徴量の抽出は容易であるが、暗号化されている場合は何らかの方法で鍵を入手しなければ復元は困難である。キャンセルバイOMETRICS の場合は、それぞれのアルゴリズムによって定められた一方向性関数を逆変換する必要がある、何らかの方法で変換パラメータを入手しなければ復元は困難である。

次に、特徴量から生体情報へ復元する必要がある。

最後に、復元した生体情報をシステムへ提示して認証をすり抜ける必要があるが、これにはセンサに偽の生体情報を提示する場合と通信路でデータを置換する場合の 2 通りがあり、これらのいずれかが可能である場合になりすまし攻撃が成功する。

(ii) 照合スコアから生体情報を推定する場合は、推定アルゴリズムに必要な情報がすべて利用可能であり、それらから山登り法を用いて推定した偽の生体情報がシステムに提示可能である必要がある。更に、山登り法では攻撃が成功するまで何回か試行を繰り返す必要があるため、システムが同じ利用者からの入力を繰り返し受け付ける必要がある。これらの条件がすべて満たされたとき、山登り法によるなりすまし攻撃は成功する。

(iii) システム外部に露出した生体情報を基点に攻撃を行う場合は、まず残留指紋等を入手し、それを元に作成した人工指等の偽生体情報をシステムに提示できればよい。



図 3 生体情報の推定によるなりすましの FT

ここで、生体検知が有効であるのは、センサに偽生体情報が提示され、かつ生体検知機能が有効に機能する場合である。図 3 に示すように、システム内部のデータか

ら偽生体情報を生成する場合と外部に露出した情報から偽生体情報を生成する場合の両方に対して有効である。暗号化やキャンセラブルバイオメトリクスは元の特徴量を秘匿化する機能を持ち、結果としてシステム内部のデータを利用したなりすましを困難にする。

表2に計算に使用した脅威の発生確率を示す。本分析は対策技術の相対的な優劣を定量化する目的であるために発生確率は相対値で十分であると考え、基本事象の発生確率を3段階の数値として与えた。

表2 脅威の発生確率

脅威	発生確率	対策技術	脅威の発生確率
なりすまし	高	暗号化	中
なりすまし	高	キャンセラブルバイオメトリクス	中
なりすまし	高	テンプレート保護技術	中
なりすまし	高	暗号化	低
なりすまし	高	キャンセラブルバイオメトリクス	低
なりすまし	高	テンプレート保護技術	低
なりすまし	中	暗号化	低
なりすまし	中	キャンセラブルバイオメトリクス	低
なりすまし	中	テンプレート保護技術	低
なりすまし	低	暗号化	低
なりすまし	低	キャンセラブルバイオメトリクス	低
なりすまし	低	テンプレート保護技術	低

表2において、行が図3の基本事象、列が適用する対策技術、各セルの値が脅威の発生確率である。生体検知を適用すれば、偽生体情報を用いてセンサをすり抜けることが不可能になる。暗号化、キャンセラブルバイオメトリクスを適用すれば、特徴量の復元が不可能になる。最下段の値がそれぞれの場合の発生確率をもとに頂上事象の発生確率を計算した値である。

この結果、生体検知技術の効果と比較として、暗号化やキャンセラブルバイオメトリクスのようなテンプレート保護技術による再利用防止効果は実質的に非常に低いものとなった。これはシステム内部のデータから再利用につなげるためには、テンプレートから特徴量へ復元するだけではなく、テンプレートデータベースまたは通信路からテンプレートを盗み出す、特徴量から生体情報へ復元する、偽造生体情報を作成してセンサを通過する等、他に多くのステップを必要とするためである。データベースからの盗難は内部犯であれば可能であるが、アクセス制御、物理セキュリティによって発生を抑えることができる。システムの通信路からパケットを盗聴することも内部犯でなければ通常困難である。このため、テンプレートを保護することの効果は相対的に小さくなる。

一方、システム外部の残留指紋等から生体情報を偽造する攻撃は、残留指紋の入手が比較的容易であるため、偽造指紋を作る手間だけでよく、このステップについて

は安価な材料とわずかな時間で偽造指の製造に成功した事例が報告されている[6]。従って、なりすまし攻撃を防ぐためには偽造生体情報の入力を防ぐことが最も効果的である。

### 3.3 キャンセラブルバイオメトリクスに対する考察

キャンセラブルバイオメトリクスは内部犯によるテンプレートの持ち出しに対して有効であるが、内部犯であれば認証パラメータの変更等より容易な攻撃手段が可能である場合が考えられ、内部犯対策としての効果は十分とは言えない。

テンプレートの盗難は安全性を阻害する脅威である他に、個人情報の漏洩というプライバシーの問題がある。しかし、テンプレートに格納されている情報は指紋や静脈等の画像特徴量であり、名前等の個人を特定する情報と関連付けられなければ暗号化やキャンセラブルバイオメトリクスにより秘匿化されていなくても問題にならないと考える。

更に、秘匿化の強度という意味では、評価方法が確立されていないキャンセラブルバイオメトリクスよりも客観的な評価が行われている標準化された暗号化方式の方が安全である。

## 4. おわりに

本論文では、バイオメトリック認証システム全体の安全性を確保するという観点から、なりすまし攻撃に対する各対策技術の有効性をFTAを用いて定量的に評価する手法を提案した。また、脅威の相対的な発生確率を与えた結果から、生体検知技術と比較して、暗号化、キャンセラブルバイオメトリクス等のテンプレート保護技術はなりすまし攻撃防止への貢献度は低いことを示した。

今後の課題としては、より正確な発生確率による評価、可用性に対するリスク評価が挙げられる。

### 参考文献

- [1] 瀬戸洋一編著, “ユビキタス時代のバイオメトリックセキュリティ,” 日本工業出版, 2003.
- [2] N. Ratha, J. Connell, and R. Bolle, “Enhancing security and privacy in biometrics-based authentication systems,” IBM systems J., Vol.40, No.3, pp.614-634, 2001.
- [3] 織茂昌之, 津原進, 山本倫子, 佐々木良一, “情報システムにおけるセキュリティ対策立案のための計画手法,” 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.1, pp.177-187, 2000.
- [4] 白井佑真, 間形文彦, 勅使河原可海, 佐々木良一,

西垣正勝, “事象分割型 FTA を用いたセキュリティ対策評価モデルの提案,” 2008 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2008), 4B1-4, 2008.

- [5] A. Adler, “Sample image can be independently restored from face recognition template,” Can. Conf. Electrical Computer Eng., Vol.2, pp.1163-1166, 2003.
- [6] T. Matsumoto, H. Matsumoto, K. Yamada, and S. Hoshino, “Impact of artificial gummy fingers on fingerprint systems,” Proc. SPIE Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques IV, 2002.



# IT セキュリティ評価・認証に関する e-learning 教材の 大学院教育への適用検討 － 大学での試行講義およびその評価 －

瀬戸 洋一\*

## Application examination of e-learning instructional materials concerning IT security evaluation and certification to the graduate education

Yoichi Seto\*

### Abstract

The information security technology needs wide-ranging knowledge from the encryption to the legislation. Even if a part of technology is understood, the security of the organization is not secure. Advanced Institute of Industrial Technology (AIIT) have gone in a concrete curriculum development of the technical personnel training based on international standard by the part of Faculty Development to understand the important skill of information security in a limited schedules in the graduate university. ISO/IEC 15408 is a standard that the user who actually uses it by the project of the products should also learn, and the function of security and the idea of the guarantee can be master. We developed the e-learning instructional materials concerning ISO/IEC 15408 that considered the curriculum in the graduate school in associate with the cooperation of the Information-technology Promotion Agency, Japan and Hitachi,Ltd.. AIIT took charge of the development of the curriculum based on Instruction Design and the evaluation of the instructional materials.

Keywords: Instructional Design, Information security technology, ISO/IEC 15408, e-learning, Information technology security evaluation

### 1. はじめに

政府はセキュアジャパン政策において、情報セキュリティ人材の育成を重要事項としてあげている [1]。情報セキュリティを専門とする大学院も設置されて、積極的な人材育成も行っているが、一般の大学、大学院、および行政・企業では、限られた時間の中で有効な情報セキュリティ教育を行うカリキュラム開発に苦慮している。

情報セキュリティは、ネチケット、コンプライアンス、暗号、PKI、認証、不正アクセス、マルウェア、情報ハイディング、物理アクセスなど、広範囲の技術および法的知識を必要とする。一部の技術を把握していても、組織を高いレベルでセキュリティを確保するための技量を修得したことはない。そのカリキュラムは技術的な要素から法的な要素まで広範囲にわたる [2][3]。

このため、産業技術大学院大学（以下本学）では、限られた時間で、実践的な情報セキュリティ技術の要諦

を修得するため、国際標準化規格 ISO/IEC15408 および ISO/IEC27001 をベースにした人材育成の具体的なカリキュラム開発を Faculty Development の一環で行っている。

情報セキュリティの応用に相当する部分のカリキュラム開発が急務であるが、この部分は企業などの組織で保有する技術であり、大学独自で開発することは人材的・予算的に難しい。社会で必要とされる技量の人材育成に大学が寄与できていない。このため、教材開発には、実務経験のある専門家の協力が必要である。

以上を背景に、独立行政法人情報処理推進機構および株式会社日立製作所の協力を得て、国際標準 ISO/IEC 15408 をベースにした情報セキュリティ保証に関する e-learning 教材を開発した。本学は Instruction Design (ID) に基づくカリキュラムの開発と教材の評価を担当した [4]。情報処理推進機構および日立製作所は e-learning のコンテンツ開発を担当した。

本論文では、本学で担当した部分 (ID および講義評価) に関し報告する。

## 2. 情報セキュリティ保証とは

情報セキュリティ機能や保証の重要性に関する例として、湯沸し器やエレベータで起った事故がよく挙げられる。湯沸し器の安全装置が不正改造されて動作しなかった、あるいは、エレベータの安全装置が正常に動作しなかったなどにより、人命が失われるという事故が起っている。ほとんどは、安全装置(機能)は装備されていたが、それが正常に動作しなかったことによる事故である。

利用者は、製品のカタログを見れば、安全機能が装備されていることを理解できる。しかし、それが正常に動作することまでは確認していない。例え確認しようとしても、利用者が、すべての異常状態を引き起こすことは困難である。まして不正改造されたものであるかを確認するには専門的な知識が必要であり、素人が対応するには無理がある。事故が発生してはじめて、安全装置が正常に動作していないことが分る。安全機能は、単に装備するだけでは不十分であり、いざというときに間違いなく動作することを十分に確認することが、製造者の責務である。

情報システムの安全機能をセキュリティ機能と呼ぶ。情報システムは、エレベータやガス湯沸し器よりも直感的に安全性を確認することが困難である。例えば、個人情報情報が暴露されてしまったからでは取り返しがつかない。また、企業の戦略的情報が破壊されたり、漏えいしたりして、企業経営に影響でてしまったからでは、取り返しがつかないと言える。このため、情報処理製品やシステムの開発者、運用者は、その責務としてセキュリティ機能を装備するだけではなく、いざというときに間違いなく動作することを確認した後に、利用者に提供しなければならない。確認が完了してはじめて、利用者に使ってもらえる状態になる。一方、利用者はセキュリティ機能が間違いなく動作することが確認された情報処理システム(製品)を利用しなければならない。ITセキュリティ評価・認証を規定する ISO/IEC 15408 は、製品の情報セキュリティ機能の実装と保証を取り決めた国際標準である [5][6]。

## 3. 情報セキュリティの教育カリキュラム

図 1 に示すように、情報セキュリティは、ネチケット、コンプライアンス、暗号、PKI、認証、不正アクセス、マルウェア、情報ハイディング、物理アクセスなど、広範囲の技術および法律的知識を必要とする。一部の技術

を把握していても、組織を高いレベルでセキュリティを確保するための技量を修得したことにはならない。そのカリキュラムは技術的な要素から法律的な要素まで広範囲にわたる [2][3]。

このため、本学では、限られた時間で、実践的な情報セキュリティ技術の要諦を修得するため、国際標準規格 ISO/IEC15408 および ISO/IEC27001 をベースにした人材育成の具体的なカリキュラム開発を Faculty Development の一環で行っている。

ISO/IEC 15408 は、システム開発者や管理者はもとより、製品の導入企画などで、実際に利用するユーザも知るべき規格であり、セキュリティの機能と保証の考え方を修得できる [5][6]。また、ISO/IEC27001 は、情報セキュリティ・マネジメントへの経営者のかかわり、リスク・アセスメント、内部監査の位置付けなど、今後対策が急務な IT ガバナンス、CISO (Chief Information Security Officer) へのキャリアパスにも有効であり、リスク管理、内部統制の観点からのセキュリティ技術を修得できる [3]。



図 1 情報セキュリティ教育がカバーしなければならない領域

従って、限られた講義時間の中で効率的にセキュリティリテラシーの基本を学び、さらに専門家になるための基本技量として、ISO/IEC15408, 27001 を修得することは有意義と考える。

本学で検討している、セキュリティに関するカリキュラム案を図 2 に示す。本学ではスペシャリストコース、例えば、ソフトウェア、あるいは、ネットワークの専門技術者にセキュリティ素養を身に着けることを目的とするコースと、組織の IT 部門の責任者にセキュリティマネジメント素養を身に着けることを目的とする CIO 養成コースを考えている。

その中で情報セキュリティの応用に相当する部分のカリキュラム開発が急務である。この部分は企業などの組織で保有する技術であり、大学と企業の協力で実践的な情報セキュリティ教材を開発した。

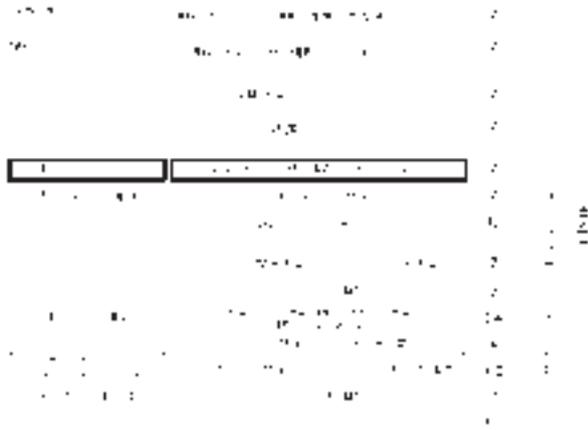


図2 情報セキュリティ教育カリキュラム

#### 4. ITセキュリティ評価・認証教材の概略

開発した教材は、6コマ（1コマ90分）の講義相当の内容である（演習を含めず）。

e-learning としてのナレーション入りタイプと、講師が利用できるパワーポイントタイプ（約150枚）の2つの形態の教材を開発した。開発した教材の章立てを以下に示す。

- ① ITセキュリティ評価および認証制度
- ② ISO/IEC 15408 (CC) 概説
- ③ ISO/IEC 15408 に基づく設計・開発プロセス生成ドキュメントの概要
- ④ ST (Security Target) の構成と論理的構造
- ⑤ ST 作成のポイントと事例紹介（その1）
- ⑥ ST 作成のポイントと事例紹介（その2）
- ⑦ ST 作成のポイントと事例紹介（その3）
- ⑧ 保証要件と EAL.CEM による評価の概要
- ⑨ 全体理解度テスト

#### 5. ITセキュリティ評価・認証教材を利用した試行講義

##### (1) 実施日時・場所

2007年7月14日（土）13:00～17:30 於 産業技術大学院大学 408 会議室

##### (2) 参加者（敬称略）

- ・株式会社日立製作所 コンサルタント2名（講師）
- ・産業技術大学院大学 瀬戸（コーディネータ、評価者）
- ・被験者：慶應義塾大学工学部情報工学科 学部生2名、大学院生1名、産業技術大学院大学学生6名

被験者は、セキュリティ技術の修得に関心の強い産業技術大学院大学、慶應義塾大学工学部より募集した。慶應義塾大学の学生は大学院に進み企業の

研究者、開発技術者に進む者が多い。一方、産業技術大学院大学の学生は社会人であり業務経験がある事務職、営業職、技術職とその業務範囲は広。被験者の学生は情報セキュリティ技術の概論を受講し、暗号、情報ハイディング、生体認証、マルウェア、不正アクセス、ISMS、15408などのセキュリティ技術の基本を学習済みである。

##### (3) 学生による教材評価

###### (ア) 教材に関するコメント

3章で述べたように開発した教材は、正式には6コマ（1コマ90分）の講義相当の内容であるが、試行講義はその半分の時間で対応した。時間の都合上③、⑦、⑧、⑨に関し、講義を省略した。

- ① ITセキュリティ評価および認証制度
- ② ISO/IEC 15408 (CC) 概説
- ③ 省略
- ④ STの構成と論理的構造
- ⑤ ST作成のポイントと事例紹介（その1）
- ⑥ ST作成のポイントと事例紹介（その2）
- ⑦ 省略
- ⑧ 省略
- ⑨ 省略

講義は e-learning 教材資料を OHP として、講師が直接説明する形式をとった。単元（章）ごとに、e-learning でも用いている簡単な確認テストを行った。

受講者による教材へのコメントを表1に記載する。なお、受講後に行ったアンケートは、決まった項目に対する記述ではなく、フリー形式での意見収集であった。提出後、カテゴリ化した。

- ① コメントした受講者6名のうち、4名が用語について問題提起をしている。用語参照機能について考慮すべきかと考える。特にセキュリティターゲット (ST) の概念が掴みにくいようである。横文字用語の理解で、学生は、最初につまづいてしまう。
- ② 図表を多用すれば、15408の概要は理解できるようであるが（表面的な理解）、STの利用場面、本当のSTドキュメントを具体的に提示しないと、実感として理解できていない。一時的な知識教育ならば問題ないが、将来利用場面で、学んだ技術が、基礎として活用できる能力を身に付けさせるには、教材に対し工夫が必要である。
- ③ 学部生と社会人大学院生が混在しての試行授業であったが、双方の理解度に大きな格差はなかったと思う。ただし、社会経験のない学生は概念として技術を学ぶことになれているが、社会人学生の場合、いかに活用できるのかといった実利用に関し疑問をもち受講する傾向があることが判明した。



習に入れることは現時点では困難と考えるが、ST 開発の背景、ST 構成のポイントなどを分析させることは可能であり、実開発された ST を読ませる演習は、より理解を深め、15408 に対する学習の興味を深めるためにも必要と考える。

⑤ 15408 の講義の前にリスク評価の講義が必要という認識である。脅威分析、セキュリティ機能、保証要件などの理解を深めるために必要である。

(4-2) 講義の進め方・教材の利用の仕方

① 講義の進め方についての受講者 1, 3 と 5 (表 2 に記載の受講者の番号) からどこがポイントか分からないという指摘があった。教材の構成における受講者 2 による解説についてのまとめが欲しいという指摘と共通する。受講者 1 のコメント原文では、「個人的な感想としては、“全てが重要であって重要でない”，という感じです。授業中に特別に，“重要な点”，というものが存在しないため、大雑把な理解になりました。(全てが重要なんだ、とおっしゃられるかもしれませんが…) 従って“要するに今日の授業は何だった？”と聞かれた時に一言で表す事ができませんし、まとめることができません。つまるところ緩急やもっと詳細なまとめが欲しいと思いました。」と記述している。

② 実際の業務に必要な学生 (社会人) であれば、逆に業務上の重要な点を自身が教材から読み取ることも可能であり、緩急がついた受講状態になるが、本技術に白紙の状態を受講する学生は、どこがポイントか分からないという感想は当たり前かもしれない。これは、受講者 5 の受講者像 (前提条件) に関するコメントからも推察できる。

③ 学部生と社会人大学院生が混在しての評価授業であったが、双方の理解度大きな格差はなかったと思う。

ただし、社会経験のない学生は概念として技術を学ぶことに慣れているが、社会人学生の場合、いかに活用できるのかといった実利用に関し疑問をもち受講する傾向があることが判明した。

④ 企業内教育と異なり、大学院教育は将来必要になる知識と技量を教授することを目的としている。企業の場合は業務において 15408 を必要とし、そのために学ぶということが多く、なぜ 15408 が重要なのかという観点での説明は軽くていいが、大学 (院) 教育では、その必要性を具体的、論理的に説明する必要があることを再認識できた。

⑤ 15408 は国際標準によるフレームワークが明確であり、その技量を客観的にどこまで理解すればいいのかは、明確である一方、横文字概念が多いのと、実際の局面を実感しにくいのが問題であり、この観点での教育的配慮が必要である。したがって、用語に関しては、繰り返し説明する。また、実際の PPST ドキュメントを教材として用い、その開発の背景や企業戦略の位置づけなども含め説明を行う必要があると考える。

6. インストラクショナルデザインにおける分析

カリキュラムのシステムの開発手法としてインストラクショナルデザイン ID が有効である [5]。ID 分析により学習目標分析を行い、カリキュラム開発における達成目標 (何について、どの方法で、どのようにできるようになるか) を明確化し、学生への説明責任と、教育のレベルを明確にする必要がある。

今回開発した IT セキュリティ評価・認証に関する e-learning 用教材を大学 (院) の教育に適用した場合の学習目標分析の結果の抜粋を表 3 に示す。

表 3 開発した ISO/IEC15408 学習目標分析表 (抜粋)

編成進行目標番号	学習目標名	学習領域	レベル	学習進行目標				学習目標		学習到達度
				対象	状況	制約条件	行為動向	習得能力	最終目標 (知識、スキル、態度セット) ※学習終了後に実施可能な項目を一覧	
1	ITセキュリティ評価および保証制度の概要	認知	教授促進	ITセキュリティ評価および保証制度について	具体的に	ITセキュリティの概要、説明を聞く。内容でなくてもわかるような	説明ができる。	ITセキュリティ評価および保証制度について具体的にITセキュリティの専門家でなくてもわかるような説明ができる。	ITセキュリティ評価および保証制度について具体的にITセキュリティの専門家でなくてもわかるような説明を聞く。	○
1-1	概要 1	認知	問題解決	ITセキュリティ評価の必要性と第三者評価について	学習課題に依り	決められた時間内、問題を論議する。	問題を論議できる。	ITセキュリティ評価の必要性と第三者評価について学習課題に依り決められた時間内で問題を論議できる。	ITセキュリティ評価の必要性と第三者評価について学習課題に依り決められた時間内で問題を論議する。	○
2	ISO/IEC15408 (CC) 概観	認知	教授促進	CCの構成 (セキュリティ機能、セキュリティ保証、保証レベル) について	具体的にパート別に	技術的な正確さを説明を聞く。もって	説明ができる。	CCの構成 (セキュリティ機能、セキュリティ保証、保証レベル) について具体的にパート別に技術的な正確さを説明ができる。	CCの構成 (セキュリティ機能、セキュリティ保証、保証レベル) について具体的にパート別に技術的な正確さを説明を聞く。	○
2-1	概要 2	認知	問題解決	CCの構成 (セキュリティ機能、セキュリティ保証、保証レベル) について	学習課題に依り	決められた時間内、問題を論議する。	問題を論議できる。	CCの構成 (セキュリティ機能、セキュリティ保証、保証レベル) について学習課題に依り決められた時間内で問題を論議できる。	CCの構成 (セキュリティ機能、セキュリティ保証、保証レベル) について学習課題に依り決められた時間内で問題を論議する。	○
3	ISO/IEC15408に基づく設計・開発プロセスと生成ITセキュリティの概要	認知	教授促進	ISO/IEC15408評価監査資料に關し	開発ドキュメントの概要と評価監査資料のイメージを具体的に	技術的な正確さを説明を聞く。もって	説明ができる。	ISO/IEC15408評価監査資料に關し開発ドキュメントの概要と評価監査資料のイメージを具体的に技術的な正確さを説明ができる。	ISO/IEC15408評価監査資料に關し開発ドキュメントの概要と評価監査資料のイメージを具体的に技術的な正確さを説明を聞く。	○

例えば、本教材を用いることにより

- ・ITセキュリティ評価の必要性を理解し説明できる
- ・認証制度のフレームワークを理解し説明できる
- ・CCの構成(パート2, 3)を理解し, セキュリティ機能要件, 保証要件, 保証レベルについて説明できる.
- ・具体的なSTサンプルの記述内容を把握することにより, CCに則りSTとはなにかを説明できる.
- ・利用者(調達者), 開発者の立場でSTを理解でき, STドキュメントを分析し説明できる.
- ・ST開発の専門家になるためのエントリーレベルを修得する.

など, 今回の教材開発で, IDを利用することにより学習の達成項目とそのレベルを明確にできた.

## 7. 大学院教材としての提案

### (1) 講義構成

情報セキュリティを専門としない一般的なIT関係大学(院)において確保できる情報セキュリティに関係する講義時間は, 4-6単位(30-45週)程度である.

①情報セキュリティ基礎(2単位): 情報セキュリティの機能と技術体系

②情報セキュリティ応用(2単位): リスク評価の観点からのシステム実装, 組織運用

情報セキュリティ応用に関し15週の講義を想定した場合, 第1週はガイダンス, 第2, 3週はリスク評価, 第4~15週(6週分相当講義, 5週分相当演習)ITセキュリティ評価・認証という構成になる.

今回のITセキュリティ評価・認証e-learningベースで開発した教材を, 大学(院)講義に用いる場合, 試行講義の結果,

- ・用語の説明を十分に行う
- ・講義毎に確認小テストなどを行う
- ・ITセキュリティ評価の位置づけを明確にする
- ・演習において実際のSTを分析することにより実感を持たせる

以上ことを講義の中で意識して教授する必要がある.

### (2) 評価の方法

成績評価の方法としては, 確認小テスト, 演習, 発表に関し平均をもって最終評価とする. 特に確認小テストにより, 用語の理解などをこまめに対応することが必要であり, 小テストを確実に理解させ講義を進める必要がある. また, STには正解というものがなく, 開発した技術者の考えが反映される. このためST分析においては, 学生の理解を深めるため討論が重要である.

①確認小テスト 8回相当

②総合演習(ST分析など) 5回相当

③総合演習の発表・討論 5回相当

今回開発したe-learning教材は, 講義後の復習の位置づけで対応するのが有効と考える. 特に確認小テストを100点クリアするために利用するのが適切と考える.

### (3) その他

今回開発したカリキュラムを大学教育の標準とすべく, 大学教員の育成の仕組みを作る必要がある.

このために,

- ・テキストの開発
- ・普及のための教員向け講習会

が必要である.

また, 教材の内容を陳腐化させないためにも, 先端的な技術を活用している企業側の情報, ノウハウの教育現場へのフィードバックが重要であり, 産学連携のフレームワークも必要である.

## 8. まとめ

大学(院)における情報セキュリティ教育は, 企業および行政組織より強く要望され, カリキュラムの分析報告書は発行されているが, 公開された講義コンテンツは, ほとんど見当たらない. また, 教育の効率化, 修得技量の保証の観点からの検討は行われていない.

今回の大学と, 国の独立法人, 民間企業とのコラボレーションは, 先駆的な取り組みである.

開発した教材は, 書籍として発行する予定であり, 教育ノウハウを広く公開する方針である.

開発した教材を用いた講義は, 本学で2008年度より実施する.

## 謝辞

教育教材を開発評価する上で, 独立行政法人情報処理推進機構および(株)日立製作所の協力を得ました. また, 2007年秋には, 本学において, 経済産業省 情報セキュリティ政策室 三角育夫室長, (財)日本情報処理開発協会 ISMS推進室長 高取俊夫氏, (株)日立製作所 織茂昌之氏の協力を得て, 情報セキュリティ教育に関するオープンインスティテュートを開催し, 議論を深めることができました. ここに感謝の意を表します.

## 参考文献

- [1] 情報セキュリティ政策会議: セキュアジャパン  
2008年6月19日
- [2] 情報セキュリティ, JISハンドブック67-1, 日本規格協会 2007年

- [3] 瀬戸洋一ほか：情報セキュリティ概論，日本工業出版，2007年11月
- [4] ウォルターディックほか，角行之監訳：はじめてのインストラクションデザイン，ピアソンエデュケーション，2006年8月
- [5] 田淵治樹：国際規格による情報セキュリティ保証手法，日科技連，2007年7月
- [6] 宇賀村直紀：ISO15408セキュリティ実践解説，ソフトリサーチセンター，2006年12月



# イノベーション研究の再考 —コンカレント探索の必要性をめぐって—

陳 俊 甫\*・吉 田 敏\*

## Reconsideration of Innovation Studies: Over the Necessity of a Concurrent Approach

Junfu Chen\* and Satoshi Yoshida\*

### Abstract

The purposes of this paper is to clarify a gap between today's innovation and the existing innovation studies, and to discuss the necessity of a novel way of innovation studies which is called "concurrent approach". The main message here is as follows: while emerging technologies are hard to leads to competitiveness, it is necessary to pay attention to innovation process and competitive action. And then a concurrent approach will be important.

Keywords: Technology, Competitiveness, Innovation, Retrospective approach, Concurrent approach

### 1. はじめに

産業革命から今日に至るまで、技術は新しい価値を創る競争力の象徴である。技術を軽視したり、その研究開発を怠ったりすることは、国にせよ企業にせよ、決して明るい将来が期待できない。これが歴史的な教訓であり、疑う余地のない事実であろう。

しかし他方、技術は必然的に競争力を導くわけではない。同様に技術を重視しているにもかかわらず、2007年の世界競争力ランキングでは、米国は首位を維持しているのに対して、日本は前年の16位から24位に後退していることから明らかである[38]。また、企業の競争力にしても同様な傾向が観察される。これらのことから、技術と競争力の因果性を当然視することができない。両者を結び付けさせるために、何らかの工夫を施さなければならぬことが理解できよう。

現実のなかで、競合主体によってこの工夫は必ずしも一様ではないが、よく広く知られた概念のひとつには「イノベーション」がある。「イノベーション」は、ラテン語の「innovare」に由来し、何かを「新たにすること」が本来の意味である。この概念は、1930年代にSchumpeterの著書『経済発展論』で提起されて以来、多くの研究者の関心を引き寄せ、盛んに研究されてきた[13][21][30]。本稿では、これらの先達の知見を踏まえ、イノベーションを次のように定義する。

「イノベーションとは、新しい発明や技術の商業化で

あり、新しい経済的価値と企業の競争力を創り出す経済的活動のことである」。

本稿の目的は、イノベーションの課題と既存の研究アプローチとの間のギャップに着目し、リアルタイムに近い研究アプローチの必要性を検討することである。

本稿のメイン・メッセージを先取りするならば、次のように記すことができる。すなわち、「新技術と競争力の関係を探るために、新技術によるイノベーション創出のプロセスとそこに内包される行為主体間の競争的行動により一層注目する必要がある。そのための工夫として、従来のようなレトロスペクティブ探索のみならず、リアルタイムに近いコンカレント探索も求められる」ということである。

ここでいう「新技術」とは、既存製品を改良するための新しい技術ではなく、これまでない製品を創り出すための新しい技術のことを意味する。そして、ここで注目するイノベーションのタイプというのは、既存研究という漸進的イノベーション(Incremental innovation)ではなく、既存産業の競争構図やサプライシステムなどに徹底的な変化を引き起こす急進的イノベーション(Radical innovation)である。

以下の展開は、次のように構成される。まず第2節では、イノベーション過程における問題点を明らかにする。次いで第3節では、既存のイノベーション研究を批判的に検討し、イノベーションの課題と既存の研究アプローチとのギャップについて議論する。そして、第4節では、

コンカレント探索の必要性を検討したうえで、最後の第5節で本稿の意義と残された課題について述べる。

## 2. イノベーションの主要課題

今日、新技術によるイノベーション創出の気運がかつてないほど高まっている。しかし実際、新技術のブレイクスルーから生み出す事業機会は、即座に明白になったり、期待通りに結実したりするとは断定できない。

第1に、技術の多義性、補完技術の展開、市場ニーズの如何によって、新技術の展開は予期せぬ方向に転じることがあり、極めて高い不確実性を有するからである。未来の展開が不確かというのは、良い方向へ向かう場合もあれば、逆の場合もあることを意味する。しかし残念ながら、現実のなかで、新技術が期待されるイノベーション成果に実を結ぶどころか、市場に登場せず未結実のまままで消えてしまうことが少なくない。この事象自体はよく指摘されたものだが、なぜそうなったのか、いつ、どのような条件のもとでそうなりやすいのかについては、必ずしも十分に解明されていない。

第2に、一般的に、新技術が平均以上の高利潤を約束しようと判明されれば、新技術をめぐる競争がすぐに熾烈になり、事業機会の魅力も目減りする。いわゆる高利潤の機会は、他の追随者の「戦略的模倣」を誘発し、それによって高利潤の機会が瞬く間に消え去っていく「効率市場 (efficient market)」固有のジレンマに似通う問題である [17][25]。通常、「戦略的模倣」は、オリジナリティをフルに引き出そうとする競合主体の個別的意図を強く反映し、大局の配慮を欠如している。そのため、それが頻発することによって、新技術をめぐる競争は、次のような状況を呈するようになると考えられる。すなわち、技術開発の着手時期に多少の時間的なズレがあるものの、同一機能やサービスを提供する類似的技術が、同一市場で同時期に多数乱立する状況のことである。これが重要なのは、この状況のもとで、技術間の競争が激化し、市場ニーズに適した技術選択もますます難しくなるからである。たとえば、今日の半導体産業、記録媒体（光ディスク）産業、ディスプレイ産業の実態を思い出せば明らかであろう<sup>1</sup>。

もちろん、「戦略的模倣」の差別化がきちんと成立していれば、さらなる事業機会の出現が期待され、同質的競争の懸念も解消する。しかし、オリジナリティに富ん

<sup>1</sup> 類似的技術の頻発という事象は、特に近年のエレクトロニクス分野で観測されることが多い。分野が異なれば、この事象が観測されない場合もあり得る。よって、本稿で指摘する戦略的模倣による類似的技術の頻発という事象は、あらゆる産業に当てはまるものではない可能性を含むものである。

だアイデアが安易に生まれにくいこと（発想の貧困）や、科学技術の展開はその時代の「規範」のような枠組みに左右されること（パラダイムの束縛 [19]) は広く知られた事実である。こうした「発想の貧困」や「パラダイムの束縛」の制約のもとで、競合主体間の発想が似たりする傾向が加速され、情報社会の普及とともに、次第に主体間の技術水準の近似性という状況に導かれると考えられる。問題となるのは、競合主体間の技術水準が近似するなかで、次のような皮肉な結果をもたらしかねないからである。(1) 競合主体が先発による不確実性のリスクを回避し、意図的に二番手戦略をとることに傾き、自ら新技術の事業化を押し控えてしまうことである。(2) 競合間の技術水準の近似性が浸透すれば、その波及効果として、事業化の意思決定のパラメーターが、技術の革新性ではなく競合相手の特徴に変わり、結果的に、技術はイノベーションの源泉であったとしても、競争優位の源泉にはならない実態を招くということである<sup>2</sup>。

要するに、誤解を恐れず簡潔に言うならば、今日のイノベーションが抱える主な課題は、新技術が競争力につながらないことにある。それは一方で技術の多義性など技術の進化における不確実性に起因し、他方では、行為主体間の戦略的模倣や技術水準の近似性の浸透にともなう技術間競争の多元化に帰するということである。

## 3. 既存研究の検討

イノベーション研究は、Schumpeter から今日まで、半世紀以上の叢智が蓄積されてきた。ここではそのすべてを網羅することができないが、上記の課題に深くかわる論説を中心にレビューし、そこに潜在する分析的バイアスを明らかにする。

### 3.1 イノベーション・インパクトに注目した研究

まず、従来のイノベーション研究では、新技術がたどる技術変化のプロセスより、むしろ新・旧技術間の技術代替や技術転換にともなう既存企業の凋落に関心を示すものが多い [6][7][12] [34][37]。

そのなかで、Cooper and Schendell [7] は、蒸気機関車からディーゼル電気機関車への転換、真空管からトランジスタへの移行などを取り上げ、新技術の脅威に直面する際に既存企業が3つの戦略的対応をとりうることを明らかにしている。ひとつは新技術を採用しないが、徹底的に新技術の展開をモニタリングしたり、公的機関や法的対策を活用して脅威を抑えたりするなどに努めること

<sup>2</sup> ここでいう競合相手の特徴とは、既存ビジネス上における競合相手との関係、競合相手との規模の格差、競合相手がもつ経営資源などのことを指している。

である。もうひとつは、新技術を採用するタイミングと手段を慎重に吟味しながら、積極的に取り入れることである。そして、3つ目は既存技術の改善・改良を強化し、新技術に対抗することである。

他方、技術代替の現象そのものを掘り下げたのは Foster[12]である。FosterはS曲線の概念を用いて、技術転換に伴う競合企業の栄枯盛衰を説明している。彼はプロペラ機からジェット機への転換、天然の繊維や洗剤から合成の繊維・洗剤への移行、従来のテニスラケットからプリンスラケットに代わる現象を例に引きながら、新技術が既存技術と全く異なる知識ベースに基づくような断絶が生じるたびに、業界のトップが首位の座から転落する現象が観察されると指摘する。そしてこの現象から、彼は技術の物理的限界を認識する重要性を説き、産業界の主役の交代をもたらす主要因のひとつは「技術の変化」にあると主張する。

その後、既存企業が直面する意思決定の困難さに焦点を当てながら、技術転換に伴う既存企業の失敗についての研究も行われてきた[6][37]。例えば、Utterback[37]によると、イノベーションが産業界に波乱を引き起こす時期は、同時に既存企業が既得権益を守るための反撃を試みる良い時期でもある。しかしながら、実際に大胆な戦略をとれるのは既存企業ではなく、該当産業の外部者たる新規参入者である。なぜなら、これが次の3つの要因に影響されるからである。第1に、革新的なイノベーションの初期段階において、長期的に生き残れるだけの質をもった新技術がかなり少ない。第2に、既存技術に対する莫大な投資を行ってきたがゆえに、資源シフトの際にかなりの経済的負担を背負っている。第3に、既存企業が現状での成功に満足し、自分たちの技術は絶大だと過信する傾向がある、ということである(pp.162-163)。それゆえ、イノベーションが起きると産業のリーダー企業が凋落し、代わりに新しいリーダー企業が出現するとUtterbackは強調する。

それに対して、Christensen[6]は、米国のHDD産業の事例を取り上げ、既存企業と市場・顧客との相互関係から新旧技術の代替に伴う企業の栄枯盛衰を分析している。Christensenによると、技術転換の結果である既存企業の失敗は、それらの企業が新技術に対応できないからではない。本当の原因は、既存企業内における資源配分の正当性や、既存ビジネス上の顧客との関係が足枷となったことにあるとしている。それが、最終的な結果として、既存企業の新技術に対する適応力を低下させ、優良な既存大企業を主役の座から転落させる結果をもたらしたという。

これらの研究は着眼点こそ異なるものの、分析の前提およびアプローチには、ある共通点を垣間見ることがで

きる。それは、新技術と既存技術間の技術的非連続性に着目し、分析方法は、結果からのレトロスペクティブ探索に基づくものである。ここでいう技術的非連続性とは、ある新しい技術は既存技術と同様なサービスを提供するものの、それが基づく科学知識ベースから、求められるスキル・能力・設備という資源的側面まで、両技術の間にギャップが存在することを意味する。そして、こうした非連続性があるときに、イノベーションの結果として企業の栄枯盛衰が現れる、とこれらの研究者は結論づける。

これは最もな結論であり、数多くの産業や事例で実証されている[1][15][32][36]。しかし一步を踏み込んで、これらの新技術はどのような商業化の過程をたどり、どのように形成されたのかを考えると、どこか腑に落ちないところがある。

特に、ここで注目すべき問題は2つある。第1に、これらの研究で検討された事例は、いずれも技術的にある程度確立された新技術の話であり、研究開発の揺籃期にあるものではない。次世代DVDやディスプレイを巡るドミナント・デザインの争奪にみられるように技術間競争は、既に研究開発段階から始まっている。そのため、これらの研究は複数の技術が併存する競争の多元化を想定されず、そこから得られた新技術と競争力の関係は今日も適用しうるかどうかが疑う余地がある。

第2に、これらの研究焦点はイノベーションの結果、あるいはそのインパクトの解析においているため、結果に結びつかなかった事例は、最初から除外されていることが懸念されることである。これが重要なのは、前述したように、イノベーションの根本的な問題は、(1)そのプロセスがリアルタイムで行われるものであり、必ずしも先に結果が見えるわけではない。(2)戦略的模倣や技術水準の近似性という不安定要素の影響を受け、イノベーションと競争優位の源泉は必ずしも同一ではない、からである。

したがって、上記の研究結果から得られた教訓は、新技術と競争力の関係究明やイノベーションの本質である「不確実性」の導出にヒントを与えていることは否めないが、今日のイノベーションをとりまく環境、および競合主体が現場でリアルタイムに接する不確実性との間になお距離があると考えられる。そして、このような距離を縮めるためにイノベーションの結果からのレトロスペクティブな探索のみならず、その結果に至るまでのプロセスの解明が一層期待されると主張できる。

### 3.2 イノベーション・プロセスに関する探究

ところで、これまでイノベーション・プロセスに関する研究がないわけではない。(1)イノベーション・プロセスに内包される規則性を探索する研究や、(2)技術論

の視座に立脚し、技術の変遷にみる社会との関わりに注目する研究がある。

まず、イノベーション・プロセスに内包される規則性の探求からみることにしよう。長い間、イノベーションの規則性を探ろうと、技術進化がたどるトラジェクトリーを中心に多くのすぐれた研究が行われてきた[3][5][9][20][22]。その中で、最初に、技術トラジェクトリーの概念に注目したのはNelson and Winter[22]である。彼らは、技術自体の論理的進化と経済社会におけるコスト削減や機械化・自動化の趨勢などに一致する技術進歩の方向性を、ナチュラル・トラジェクトリー (Natural trajectories) と定義し、その規則的特徴を捉えている。

Dosi[9][10]は、科学哲学における「パラダイム [19]」の概念をもとに、ナチュラル・トラジェクトリーを発展させ、イノベーションの累積性と飛躍性の両方に適用するフレームワークを提示している。すなわち、技術パラダイム (Technological paradigms) と技術トラジェクトリー (Technological trajectories) の概念である。Dosiによれば、技術パラダイムとは、イノベーションの機会やその機会を利用するための基本的手順を規定し、強い排他性と選択性を有するものである。技術トラジェクトリーとは、技術パラダイムに基づく通常の問題解決の活動である。そして、そこでいう累積性は、ある技術パラダイムに沿って生じる恒常的な変化であり、飛躍性は新しい技術パラダイムが出現する際に生じる劇的な変化である。その上、技術トラジェクトリーの形成は、技術自体の論理性のみならず、経済的、制度的、社会的な要因に影響される、とDosiは指摘する。

その後、Dosiの研究を踏まえ、Biondi and Galli[5]は、技術変化の目的に注目し、製品パフォーマンスの改善の視点からその規則性を捉え、技術トラジェクトリーの類型化を提示している。それは、(1)コスト削減、資本集約型への進化、(2)製造設備の小型化・軽量化、(3)資源の有効利用、(4)製品ライフサイクルの改善、(5)問題の解決・予防・診断、(6)規模の経済と範囲の経済の追求、というものである。

しかしながら、技術トラジェクトリーは、産業の技術的特徴によって多岐にわたり、すべての産業をカバーしう一般化が得にくい。とはいえ、このような多様性に固執すると、逆に以下のような2つのリスクが懸念される[35]。1つは、特定の産業や企業の分析に基づく結論が一般化されたものと誤解されることである。もう1つは、多様性に偏執することが一般化の努力を損ない、有益な知識が蓄積されないことである。

技術トラジェクトリーの一般化と多様性の折衷を求め、Pavitt[26]は各産業間の技術的変化の源泉や方向性

の恒常的な違いに留意し、(1)サプライヤー支配型、(2)規模集約型、(3)専門化サプライヤー型、(4)科学依拠型、(5)情報集約型という5つの広義的な技術トラジェクトリーを提示したのである。この5つの広義的なパターンによって、特定産業における技術展開の方向性が示され、個別企業の技術戦略の策定がより容易になる。

さらに、近年では、技術トラジェクトリーの形成当初こそプレイヤーによる作為的なものであるものの、イノベーション・プロセスの中で、それが次第に自己組織化への一途をたどるようになると主張される。例えば、Jenkins and Floyd[18]は、F1レーシングカーの主要技術の進化を取り上げ、その技術移転にともなうコストや難易度 (技術透明性) に注目したうえで、技術トラジェクトリーは分析レベル (システム・コミュニティ/会社/コンポーネント) 間の経験共有の結果であると指摘する。彼らによると、技術透明性が高ければ、企業間における技術の共進化や補完技術の登場が見られ、潜在的に業界におけるドミナント・デザインを獲得する技術トラジェクトリーが形成される。逆に、透明性が低ければ、該当技術が企業内における支配的地位の形成という軌跡をたどることになる。

これらの研究によって、イノベーション・プロセスにおける技術展開の規則性の把握と技術の役割の解明が前進し、産業社会におけるイノベーション・プロセスへの理解をより一層深めることができた。その上、次の諸点で理論的及び実践的な意義が極めて大きいといえる。第1に、産業社会における技術進歩の経路がより鮮明に理解できるようになってきたことである。第2に、企業における技術選択や技術戦略の策定に有用な道具たてを提供していることである。第3に、新技術によるイノベーションの目的 (効率性の達成、新たな付加価値の創造) がより明白に認識されるようになってきたことである。

しかしながら、Dosiの議論は、技術特性に基づく競合技術間の累積性や飛躍性の認識に有益であるが、同時期に併存する類似技術間の熾烈な競争とそれにとまなう技術の進化経路の移転が看過されている。Pavittは、産業特性の違いに着目しているものの、その関心は、諸産業における技術トラジェクトリーの累積性にある。彼は同一産業内の新・旧技術間の応酬にとまなう技術トラジェクトリー間の収斂について言及していない。またその定義の範囲も広すぎた感が拭い切れない。なぜなら、同一産業においても、多様な製品が存在し、種類が違えばそれがたどる技術トラジェクトリーも異なるからである。それに対して、Jenkins and Floydは、技術トラジェクトリーを自己組織化のプロセスとして捉えており、その内在するダイナミックな特徴をより鮮明に浮き彫りにしてきた。しかし、技術の透明性は業界のドミナント・

デザインを獲得するための要件の1つにすぎない。まして技術の透明性が高ければ、行為主体間における知識の流用を後押し、戦略的模倣や技術水準の近似性の浸透をさらに加速させることさえ考えられる。彼らの研究貢献は高く評価されるべきだが、本稿で注目するイノベーションに潜在する問題を必ずしもカバーしていない、と指摘できよう。

他方、技術論の視座に立ち、技術自体の変遷に注目するイノベーション研究もある。その代表格は技術の社会的構成 (The social construction of technology) といわれる研究である。たとえば [2][3][4][20] があげられる。

この種の研究では、技術の進化過程を技術決定論ではなく、技術と社会的コンテキストの関係性に注目する社会構成主義 (Sociology of Scientific Knowledge: SSK) の立場をとっている。そのエッセンスは、技術の形成過程における技術の解釈にある。すなわち、技術の形成過程における技術の解釈は、単一なものではなく、行為者の認識の相違によって解釈が異なってくるということである。いわゆる解釈の柔軟性 (Interpretative flexibility) といわれるものである。

例えば、その代表的論者である Pinch and Bijker[4] は、自転車の変遷をたどり、車輪の大きさおよび前後車輪の対比という変化は、その展開プロセスにおける社会的コンテキストの変化や異なる行為者による異なる意味解釈に主導された結果であると主張する。

Latour[20] は、ディーゼルエンジンの開発経緯を顧みながら、科学技術、イノベーションおよび社会システムの間を強調している。それによれば、技術によるイノベーション創出の初期段階から社会システムが関与し、イノベーションの結果は、開発者や関係者によって意味解釈され形成されていくものである。それゆえ、科学技術からイノベーションへの流れは「普及 (diffusion)」ではなく、社会的コンテキストにおける「翻訳 (translation)」のプロセスであると Latour は指摘する。

しかし、この考え方に対する異論もないわけではない。例えば、綾部 [2] は次のように指摘する。

「社会構築主義はわれわれが使用する言語そのものが世界をありのままに写し取るモノではなく、むしろ人々の相互作用によって作られるモノであるという前提に立つという点にある。そうであるならば、言語を下に成り立っている知識というモノさえも、唯一無二で不変の存在であるといえなくなるし、しかもそれは確固として信頼できる真理などどこにもないという不安をわれわれに対して与える。特に科学・技術に対して社会構築主義を適用した場合、そ

れは往々にして科学的真理というものとは人々の交渉次第でいかようにも作られうるということになり、激しい反発を引き起こすモノとなる。」(p.4)

たしかに、科学的真理を求める観点に視座を置くならば、綾部 [2] の指摘通りかもしれない。しかし、イノベーションを経済的活動とみなされる場合、2つの特徴が浮かび上がる。

第1に、イノベーションは、技術、競合主体、市場が織りなすシステムであり、とりわけイノベーションの「場」となる市場があることである。市場は取引相手ないしは競合相手から成り立つものであり、市場における技術の価値はその本来の物理的・機能的特性のみならず、市場での認知やニーズへの充足度に決められるものである。それゆえ、経済活動としてのイノベーションの最終結果は、必然的に競合主体間のインタラクションに規定されると考えられる。

第2に、市場メカニズムに沿った経済活動の場合、資源の希少性や全体として配分可能なパイが限られているため、競合主体間で繰り広げられる競争の想定が欠かせないことである。しかし、競争は一方的な行動でもなければ、その結果もある主体が最初にとった行動によって決定されるものではない。それが、イノベーション・プロセスのなかで絶えず競合相手の動きを読み、相手との駆け引きによって形成されるものである [8][28][24][31]。つまり、イノベーションの結果は、競合主体間の競争的インタラクションによって規定されるということである。したがって、これらの特徴に鑑みれば、技術の社会的構成を技術論から企業の成長戦略としてのイノベーション論に援用する際に、競争的な前提を取り入れることが適切であると考えられる。

要するに、これらのイノベーション・プロセスに関する研究は、技術進化の方向性やその展開過程における社会との関わりに焦点を当ててきた。それは高く評価されるべきことである。しかし、本稿のように、イノベーションが技術と競争力を結びつける経済活動とみなす場合、これらの研究ではイノベーション・プロセスにおける最も大事な行為主体間の競争的インタラクションの視点が欠落することになる、ということである。

#### 4. コンカレント探索に向けて

上記の議論から、本稿でいうイノベーションの課題と既存の研究アプローチの間に潜在するギャップが明らかになったはずであろう。

あらためて強調すると、それは、技術と競争力のつな

がりが当然視できなければ、新技術がイノベーションの源泉であっても、競争優位の源泉にはならない可能性もある。しかし、既存研究では、結果が先ありきのレトロスペクティブ探索に基軸をおくがために、両者の関係があたかも必然的なものとして論じられている、ということである。

本稿では、このギャップを縮めるために、イノベーション活動とそこに内包される行為主体間の競争的インタラクションにより一層注目する必要があると強調したが、具体的にはどのような対策をとればよいかという問題がなお残されている。

本稿の残りの部分では、新たな研究アプローチの可能性に絞り、若干の検討を加えておきたい。

#### 4. 1 コンカレント探索とレトロスペクティブ探索

ここでは、研究アプローチの工夫として、レトロスペクティブ探索を補完する研究アプローチの必要性について検討する。このアプローチとは、すなわち「コンカレント探索」というものである。この2つの研究手法をあらためて定義すると、次のようになる。

レトロスペクティブ探索とは、現実の時間的流れと逆行するベクトルをたどり、歴史的考察を通して現実や未来に対する洞察を引き出そうとする研究手法である。それに対して、本稿でいうコンカレント探索とは、実際のビジネスと同様な時間的ベクトルをたどり、現場に近い感覚で実際の問題点を探り解決しようとする研究手法である。もちろん、学術研究である以上、「コンカレント」と言えども厳密に実践と同時進行することが考えにくい。したがって、本稿で使用するコンカレントという用語は、リアルタイムに近い意味で使っていることに留意していただきたい。

両アプローチの違いは、上記のような分析起点にあるほかに、探索的アプローチの根底に横たわる行為主体の行動的合理性の追求と非合理性の対処にも表れる。つまり、レトロスペクティブな探索は、結果が既に明確であり、その結果にかかわる不確実性の絞り込みやそれに至る行為システムの因果性を究明すれば事象に関する事後的合理性が明らかにされるのである。それに対して、コンカレント探索は、最初からさまざまな不確実性に直面し、行動をとる前にその行動の合理性がわからない。しかもある不確実性への対応は本当に期待される結果に結びつくかどうかについて見当もつかない。そのため、行動過程における合理性のみならず、非合理的な要素への対処にも細心の注意を払う必要性が求められる。

しかしながら、レトロスペクティブ探索とコンカレント探索は、決して矛盾しあう関係にあるわけではない。なぜなら、現実のなかで前者の成果である事後的合理性

が、後者における判断基準のひとつとして十分考えられるからである。よって、両アプローチは矛盾しあう関係ではなく、補完しあう関係にあると主張できる。

#### 4. 2 コンカレント探索の必要性

コンカレント探索の必要性について、主に2点が考えられる。

第1に、競争とイノベーションの性質に由来するものである。オーストリア経済学派の代表者である Hayek[14]によれば、競争は意見形成の過程であり、与件の絶えざる変化を含む過程である。高度に成熟した市場では、与件が既に明確化されていたため、競争の必要性や作用する場面はほとんどない。しかし、そうでない市場においては、競合主体間の競争が連続的に作用する。つまり、成熟していない市場における競争は、行為主体間の反復的過程であり、高い不確実性が内包されるということである。それに対して、イノベーションは、成熟した市場を再活性化させたり、競争が収まっていた市場の均衡を打破したりすることが多い[30]。また、イノベーターと既存市場の利得権益者の間に、激しい競争上の応酬が推測しうる。こうした競争とイノベーションの性質が相まって、イノベーションと与件の明確化がほとんど不可能に近いと主張できる。たとえ事前にその与件の特定ができたとしても、競争にともなう行為主体の内省的行動によって、イノベーションが直面する状況は次第に変化していくことが予測される[23]。

こうした競争とイノベーションの性質に鑑みれば、レトロスペクティブ探索で導出される規則性は、行為主体が変われば通用しなくなる可能性が極めて大きいと言えよう。なぜなら、前述したようにレトロスペクティブな探索は、競争的活動における合理性の究明に効果的であるが、非合理性についてはほとんど何も教えてくれないからである。しかし、イノベーションと与件が絶えず変化し、かつ競争の合理性と非合理性が錯綜するなかで、往々にしてイノベーションの現場で戸惑いが生じ、対処しにくいのは非合理性についてである。

したがって、技術と競争力の関係を明らかにし、新技術がイノベーションの源泉であると同時に、競争優位の源泉でもある状況を創り出すために、行為主体間に繰り広げる競争的インタラクションとその結果の両方に注目することが求められる。そのための最善の研究手法の1つは、本稿で提示するコンカレント探索である、とわれわれが考える。

第2に、現場感覚でのアブダクションに強いことである。従来、経営学に立脚するイノベーション研究では、ある成功したイノベーション事例を研究対象として定め、それに関する数十年のデータを集めたり、関係者に

よる回想を頼ったりするトレースバックが主流である。その手法から得られる知見は、現実を見据える論理的思考のベースとして、また歴史的経験から引き出される「法則」として、理論的にも実践的にも大きな貢献を寄与していることが否めない事実である。

しかし、沼上 [23] に指摘されるように、「いったん「法則」が公表してしまえば、その「法則」を知った行為主体は知識と信念の体系を変革してしまう。その信念体系の変化パターンまで予測できればよいのだが、行為主体が反省的思考の能力を備える人間である限り、ほぼ不可能である」(pp.117-118)。

そうだとすれば、常に現実のイノベーション状況に適合し、かつ実践に役立つイノベーション理論を構築するためには、レトロスペクティブな探索もさることながら、現実に近い立場で常に「未知の不確実性」を発見する努力も大事であると主張できる。とりわけ、理論的価値が実践上に役立つと軽視される現今では、イノベーションの根底にある不確実性を究明し、理論と実践の格差を縮めさせる観点から、リアルタイムに近いコンカレント探索の必要性が高まってくると主張できる。

#### 4. 3 コンカレント探索の実行困難性

それでは、コンカレント探索が必要であるにもかかわらず、なぜこれまでこのアプローチが軽視されてきたかという疑問が浮上するであろう。これに答えるには2つの側面から検討する必要があると考える。1つは現場サイドの事情であり、もう1つは研究サイドに関するものである。

まず、現場サイドからみれば、コンカレント探索は進行中の事業やプロジェクトそのものが研究対象となるため、このような研究には興味を持つものの、それに深く関わることは、それ自身の核心戦略についての情報が漏えいされる恐れがある。それゆえ、このようなアプローチをとる研究調査に対して、現場サイドは基本的に受け入れない姿勢を示すことが一般的である。また、たとえ受け入れたとしても、所属機関や取引関係などの職務上の守秘義務があり、問題の核心に触れることを避けざるを得ない。このような事情から、このアプローチをとる学者にとって、情報源の確保が困難であり、必要性を感じているにもかかわらず、近寄りがたいと考えられる。

他方、研究サイドにおいては、学者自身のスキルや職務上の倫理に起因する難しさがある。すなわち、現場サイドの積極的な協力を得た学者は、協力者の立場を考慮することは最低に守る義務ともいえる。そのため、どこまで調査内容を開示すべきか、その内容をどのように理論的に整理し、公表すべきかについて常に悩みの種である。もちろん、これは学者による情報の恣意的操作の口

実にはならないが、学術研究を進めていく際に乗り越えなければならないハードルの1つになっていることは否めない事実である。

言うまでもなく、理想的なのは、現場サイドと研究サイドが協力し、新技術はイノベーションの源泉であると同時に、競争優位の源泉でもある状況を創り出すことである<sup>3</sup>。しかし残念ながら、その最善の処方箋が未だに見つかっていないのは現状である。

#### 4. 4 コンカレント探索の意義

以上では、コンカレント探索とレトロスペクティブ探索の相違、コンカレント探索の必要性、およびその実行困難性を検討してきた。しかし、コンカレント探索の妥当性と重要性を理解するために、このアプローチの意義を整理する必要がある。簡潔にまとめるならば、主に次の3点があげられる。

第1に、イノベーション過程における不確実性の理解に資することである。前述したように、イノベーション過程は複雑であり、高度の不確実性を有するものである。コンカレント探索は、そのプロセスにある複雑性をありのままに見据え、事後的な合理性のみならず、実際に何が不確実であるかも分析の射程にのびている。

第2に、コンカレント探索では、現実のビジネス展開と時間的ベクトルを合わせているため、イノベーション過程における製品の特性、行為主体の特性に対する理解を強調し、実践に役立つ仮説構築に有利である。第1点目は、イノベーション過程を究明するにあたっての理論上のメリットであれば、この第2点目は実践上に意味をもつということである。

そして第3に、コンカレント探索は、常に行為主体の意思決定の合理性と非合理性に立ち向かわざるを得ないため、イノベーション過程で求められる変化を具に追いかけることや、市場におけるデマンドの分析が要請される。それゆえ、このアプローチは、イノベーション過程に内包するダイナミクスそのものをうまくとらえることができると言える。

#### 5. おわりに

本稿では、新技術が競争力につながらない傾向に注目しながら、従来のイノベーション研究における分析上の限界を検討した。そのうえで、研究サイドにおける実践

<sup>3</sup> そもそも学者の役割は、既知の出来事を体系的な理論にまとめ、後世に伝えることであり、必ずしも実践に近寄る必要はないという考えもある。しかし、これは学者それぞれの価値観によるもので、とりたてて批評するべきものではないと考える

に近いコンカレント探索の必要性を強調した。

本稿における理論的・実践的意義があるとすれば、次の3点があげられる。第1に、今日のイノベーションが抱える主な課題を明示した。第2に、既存研究を批判的に検討し、その分析視点におけるバイアスを明らかにした。第3に、上記の議論を踏まえ、イノベーション研究における「産学連携」の必要性を訴え、コンカレント探索による非合理性の対処の重要性を喚起した、ということである。

しかしながら、同時に本稿に残された課題も大きい。1つは、技術と競争力の関係に関する議論は、終始抽象的なものであり、実例を用いた例証と立ち入った考察が必要不可欠である。もう1つは、ここでコンカレント探索の必要性を訴えたものの、実際にこのアプローチを実行に移す際の具体的な方策を提示していないことである。そして3つ目は、ここで言及したコンカレント探索の特徴と長所は、このアプローチがもつ可能性の一角に過ぎず、研究を進めることによって更なる発見が得られる可能性が大きいことである。

本稿は1つの試論であるが、今後、上記に取り上げた課題をはじめ、さらに研究を進めていきたい。

#### 参考文献

- [1] Abernathy, W. J. and K. B. Clark (1978). "Patterns of Industrial Innovation." *Technology Review*, June-July: 40-47.
- [2] 綾部広則 (2006). 技術の社会的構成とは何か. 赤門ビジネス・レビュー 5 (1) : 1-18.
- [3] Bijker, W. E. and J. Law (1997). *Shaping Technology / Building Society*, MIT Press.
- [4] Bijker, W. E., T. P. Hughes, et al. (1987). *The Social Construction of Technological Systems*, MIT Press.
- [5] Biondi, L. and R. Galli (1992). "Technological trajectories." *Futures* July-August: 580-592.
- [6] Christensen, C. M. (1997). *The Innovator's Dilemma: When new technologies cause great firms to fail*. Boston, Harvard Business School Press. (伊豆原弓訳, イノベーションのジレンマ, 翔泳社, 2000年)
- [7] Cooper, A. C. and D. Schendel (1976). "Strategic responses to technological threats." *Business Horizons* February: 61-69.
- [8] Day, J. and D. J. Reibstein. (1997). *Wharton on dynamic competitive strategy*. John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Dosi, G. (1982). "Technological paradigms and technological trajectories." *Research Policy* 11: 147-162.
- [10] Dosi, G. (1988). The nature of the innovative process. *Technical Change and Economic Theory*. G. Dosi, C. Freeman, R. Nelson, G. Silverberg and L. Soete. London and New York, Pinter Publishers: 221-238.
- [11] Ferrier, W. J., K. G. Smith and C. M. Grimm (1999). "The Role of Competitive Action in Market Share Erosion and Industry Dethronement: A Study of Industry Leaders and Challengers." *Academy of Management Journal* 42(4): 372-388.
- [12] Foster, R. N. (1986). *Innovation: The attacker's advantage*, Mckinsey and Co., Inc.
- [13] Freeman C and L. Soete (1997), *The Economics of Industrial Innovation* (3rd), MIT Press.
- [14] Hayek, F. A. (1948). *The meaning of competition. Individualism and Economic Order*. University of Chicago Press: 92-106. (嘉治元郎・嘉治佐代訳, 個人主義と経済秩序, 春秋社, 1997年 : 127-145)
- [15] Henderson, R. M and K. B. Ckark (1990). "Architectural Innovation: The reconfiguration of existing systems and the failure of established firms." *Administrative Sciences Quarterly* 35: 9-30.
- [16] 弘岡正明 (2007). イノベーションと新産業の創造. 化学経済 2月号 : 39-47.
- [17] Jacobson, R. (1992). "The Austrian School of Strategy." *Academy of Management Review* 17(4): 782-807.
- [18] Jenkins, M. and S. Floyd (2001). "Trajectories in the evolution of technology: A multi-level study of competition in formula 1 racing." *Organization Studies* 22: 945-969.
- [19] Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, The University of Chicago Press. (中山茂訳, 科学革命の構造, みずす書房, 1971年)
- [20] Latour, B. (1983). *Science in Action*. Cambridge, Harvard University Press: 103-144.
- [21] Lynn, L. H. (1982). *How Japan Innovates: A Comparison with the U.S. in the Case of Oxygen Steelmaking*, Westview Press.
- [22] Nelson R. and S.G. Winter (1977), "In search of useful theory of innovation," *Research Policy*, Vol.6, pp.36-76.
- [23] 沼上幹 (2000), 行為の経営学, 白桃書房.
- [24] 沼上幹・浅羽茂・新宅純二郎・網倉久永 (1992). 対話としての競争. *組織科学*, 26 (2): 64-79.
- [25] Oster, S. M. (1998). *Modern Competitive Analysis*

(Third Edition), Oxford University Press.

- [26] Pavitt, K. (1984). "Sectoral patterns of technical change: Toward of taxonomy and a theory." *Research Policy* 13: 343-373.
- [27] Pinch, T. J. and W. E. Bijker (1983). *The social construction of facts and artifacts: Or how the sociology of science and the sociology of technology might benefit each other. The social construction of technological systems.* W. E. Bijker, T. P. Hughes and T. J. Pinch. Cambridge Massachusetts, MIT Press: 17-50.
- [28] Porter, M. E. (1996). "What is Strategy." *Harvard Business Review* November-December: 61-78.
- [29] Rosenberg, N. (1969). "The direction of technological change: Inducement mechanisms and focusing devices." *Economic Development and Cultural Change* 18: 1-24.
- [30] Schumpeter, J. A. (1934). *Theory of Economic Development.* Harvard University Press. (塩野谷祐一・東畑精一・中山伊知郎, 経済発展の理論, 岩波文庫, 1977年)
- [31] 新宅純二郎・網倉久永 (2001). 戦略スキーマの相互作用. 競争戦略のダイナミズム. 新宅純二郎・浅羽茂編, 日本経済新聞社: 27-64.
- [32] 新宅純二郎 (1994). 日本企業の競争戦略: 成熟産業の技術転換と企業行動, 有斐閣.
- [33] 鈴木光男 (2007). 社会を展望するゲーム理論, 勁草書房.
- [34] 武石彰 (2001). イノベーションと企業の栄枯盛衰. イノベーション・マネジメント入門. 一橋大学イノベーション研究センター, 日本経済新聞社: 99-126.
- [35] Tidd, J., J. Bessant and K. Pavitt. (2001). *Managing Innovation: Integrating technological, market and organizational change* 2nd, John Wiley & Sons, Ltd. (後藤晃・鈴木潤訳, イノベーションの経営学, NTT出版, 2004年)
- [36] Tushman, M. L. and P. Anderson (1986). "Technological discontinuities and organizational environments." *Administrative Science Quarterly* 31: 439-465.
- [37] Utterback, J. M. (1994). *Mastering the Dynamics of Innovation.* Boston, Harvard Business School Press: 162-163.
- [38] IMD World Competitiveness Yearbook 2007: 50.



# JavaScript と非同期 HTTP リクエストによる 共同作業支援ミドルウェアの構築

長尾 雄行\*・土屋 陽介\*・森本 祥一\*・中鉢 欣秀\*

## Development of a Middleware for Web Based Cooperative Work Using JavaScript and Asynchronous HTTP Requests

Takeyuki Nagao\*, Yosuke Tsuchiya\*, Shoichi Morimoto\* and Yoshihide Chubachi\*

### 概要

ネットワーク環境下において協調作業を実現する試みは従来から様々なアプローチがなされているが、ファイアウォールやプロトコル制限といったセキュリティ上の制約から、今日のような多様なインターネット接続形態から利用できるツールを構築することは難しい。よって本稿では、インターネット上で最も汎用的なプロトコルである HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) を用いて、協調作業の要となる複数ユーザのマウスカーソルを Web アプリケーションにおいて実時間で可視化する Multiple Pointers System (MPS) を提案する。MPS はミドルウェアであり、Web ブラウザ上で動作するクライアントモジュールと Web サーバで稼動するサーバモジュールから成る。クライアントモジュールには JavaScript と非同期 HTTP リクエストのみを利用するため、端末側に追加のドライバやプラグインをインストールする必要がなく、様々なインターネット接続環境において利用可能な協調作業用 Web アプリケーションを構築できる。本研究で実装した MPS が、リアルタイムに更新される多数のマウスカーソルを見ながら Web ページ上で共同作業ができる十分な性能を備えることを、実験により確認した。

### Abstract

Various approaches which implement multi-user collaboration via the computer network have been proposed. However, it is difficult to develop them on diverse connection environments of the today's internet because of the security restrictions such as firewalls and limited availability of network protocols. Thus, we propose a middleware, named Multiple Pointers System (MPS), which is the base of the realtime collaboration. MPS using HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) enables a web application to visualize multiple mice on a single web page. MPS consists of the client module and the server module. The client module is a JavaScript application that runs on a web browser and uses asynchronous HTTP requests to communicate with the server module. End users do not have to install dedicated plugins or drivers. It is shown by experiments that MPS, designed and implemented in this work, can display mice of multiple users simultaneously and update them with high enough frequencies required for web based cooperative work.

### 1. はじめに

インターネット技術を用い、創造的な作業を行うためのコラボレーション環境を構築する試みは従来から数多くなされている。多人数が一斉に行うマウス操作を、実時間で全員が共有できるようなシステムも開発されている [1]。このような環境を社会人教育の場に導入すれば、業務の都合で教室での演習に参加できない学生であっても、他の学生・教員とのグループワークが可能になることが期待できる。

ところが、社会人学生が職場のネットワークから共同

作業に参加しようとする、セキュリティ上の制約から外部との接続に利用できるプロトコルに制限があることが多い。このような制限は、出張先のホテル等から接続しようとする場合にも同様に発生しうる。したがって、そのようなネットワーク環境においては独自プロトコルを用いる共同作業ツールを利用することはできない。

現状において、最も安定的に他ネットワークとの接続が可能なプロトコルとしては HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) があげられる。しかしながら、従来型の HTTP 通信のみでは、サーバの情報は非同期的に共有されるのみであり、リアルタイム性を確保しながら

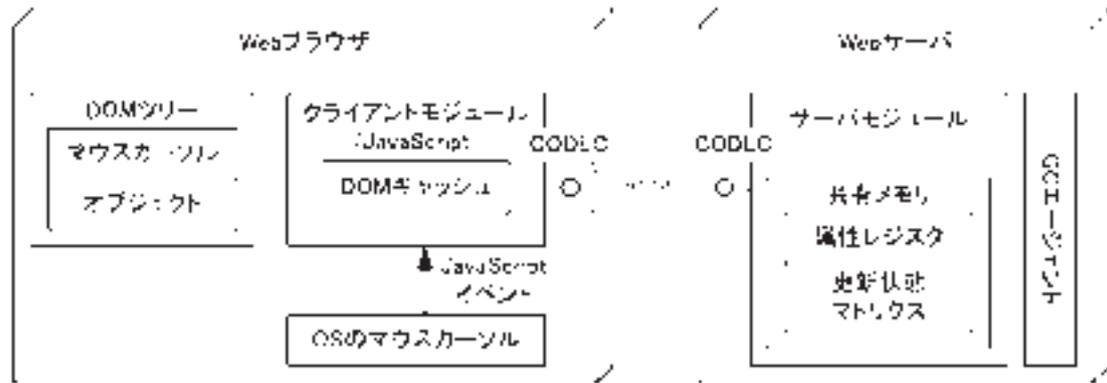


図1 Multiple Pointers System の概要

Fig. 1 Schematic Diagram of Multiple Pointers System.

創造的な共同環境を構築するには不向きである [2]. そのため, 多ユーザが行うマウス操作を全員で共有するようなアプリケーションを, HTTP ベースで構築するような試みはなされていない.

そこで, 我々は様々なネットワーク環境からでも共同作業に参加できるように, HTTP の利点を活かしたりリアルタイム・コラボレーション環境の構築を目標とした. これには, Web アプリケーションのユーザビリティを向上させるための Web クライアントの構築手法である Ajax を利用した. また, 大量のマウス操作を中継する際にボトルネックとなりうる Web サーバについても独自の高速モジュールを開発した. これらのクライアント・サーバからなるシステムを Multiple Pointers System (MPS) と呼ぶ. MPS の実装はインターネットで公開中である☆.

## 2. 関連研究

本稿では, Web ページ上で多数のマウスカーソルをリアルタイムに共有表示するミドルウェア MPS (Multiple Pointers System) を提案する. このような複数のマウスカーソルを可視化して画面に表示するためのミドルウェアは, 既に幾つか提案されている. しかし既存のミドルウェアでは, OS に依存したり [3][4], 端末に専用のソフトウェアや Java をインストールする必要があったり [5][6], Web ブラウザに追加のプラグインをインストールしなければならない [7] という制限があり, 利用できる環境が限られている.

これに対し MPS では, ユーザの端末に特別なソフトウェアやドライバ, プラグインなどを導入することなく, Web ページ上で複数ユーザのマウスカーソルを共有表示できる. Web ブラウザの実装の違いを吸収するモ

ジュールを用意することで, 複数の Web ブラウザに対応している. Web サーバ側にもロードバランサなどの特殊な機材は必要なく, 一般的に入手可能な安価な計算機が一台あればよい.

教育機関などに設置されている計算機には, 再起動時にソフトウェア構成を復元する仕組みが用意されていることが多い. こうしたシステムを利用している環境では, インストール作業が必要ないという点は管理者と利用者のどちらにとっても有意義である.

## 3. MPS の構成

最初に, MPS の構成を述べる. MPS は大きく分けて Web ブラウザに組み込むクライアントモジュールと Web サーバ上で動作するサーバモジュールから成る. クライアントモジュールとサーバモジュールは HTTP を利用して通信を行う. クライアントモジュールの実体はサーバモジュールから配信される JavaScript プログラムである. サーバモジュールは Web サーバの配下で動作するサーバアプリケーションである (図 1).

### 3.1 クライアントモジュール

クライアントモジュールの主たる機能の一つは, Web ブラウザに表示されているマウスカーソルの位置情報をサーバモジュールに送信することである. クライアントモジュールは Web ブラウザの `mousemove` イベントを常に監視する. そして, マウスカーソルの動きを検出すると最新の位置情報を非同期 HTTP リクエストを利用してサーバモジュールに送信する.

複数のマウスカーソルを可視化するという事は, Web ブラウザを実際に操作しているユーザ以外のユーザ (以下, ピアと呼ぶ) のマウスカーソルも表示することを意味する. ピアのマウスカーソルを可視化するために, ビットマップ画像などを利用して擬似的なマ

☆ <http://mps.shib.aist.ac.jp/>



図 2 MPS におけるマウスカーソル可視化のためのシーケンス図

Fig. 2 A sequence diagram of the visualization of multiple mice in MPS.

ウスカーソル（以下、擬似マウスカーソルと呼ぶ）を表示することにする。

同一のサーバモジュールに接続しているピアからのマウスカーソルの位置情報を受信して、適切な位置に擬似マウスカーソルを表示するのがクライアントモジュールのもう一つの機能である。多数の擬似マウスカーソルを遅延なく描画するためには、以下に示すように、様々な工夫が必要である。

### 3.1.1 擬似マウスカーソルの取り扱い

擬似マウスカーソルは DOM エlement として実装する。実用的な速度で擬似マウスカーソルの更新を行うために、クライアントモジュールの初期化時にあらかじめ擬似マウスカーソルのための DOM Element を確保して初期化しておく。JavaScript を使って頻繁に多数の擬似マウスカーソルを移動させる場合には DOM キャッシュが必要である。これは、識別子に基づく DOM Element やその属性への参照をキャッシュするために利用する。

### 3.1.2 ポーリング

擬似マウスカーソルを遅延なく描画するためにはポーリングを利用するのがよい。ポーリングの詳細は次のとおりである。クライアントモジュールは一定間隔でサーバモジュールに対して HTTP リクエストを行う。HTTP リクエストの際にパラメタとして最新のマウスカーソルの位置情報を送信する。その応答としてサーバモジュールが送信する HTTP レスポンスには、当該サーバモジュールに接続しているピアのマウスカーソルの位

置情報が含まれる。クライアントモジュールはその位置情報に基づいて擬似マウスカーソルの位置を最新の状態に更新する。以上の流れを図 2 に示す。

このポーリングは JavaScript のタイマー処理によって実行する。ポーリング間隔としては、人間の目で見て表示遅延が感じられない程度の短い間隔で、しかも、Web ブラウザと Web サーバの間のパケット往復時間よりも十分大きい値が望ましい。MPS では 30 ms のポーリング間隔を採用する。このポーリング間隔は設定により変更可能とする。

通常の Web アプリケーションの構築方法では、HTTP を利用したこの種のポーリングに耐えられる実装を得るのが非常に困難であるが、以下に示す通信プロトコルと Web サーバに関する工夫を行うことで、ロードバランサなどの高価な機材を利用することなく、単一の Web サーバでも十分な性能を持った実装が可能である。

### 3.1.3 イベントの捕捉と通知

MPS では JavaScript のマウスイベントを捕捉して、イベント発生時のマウスカーソルの位置情報を計算し、非同期 HTTP リクエストによってサーバモジュールに位置情報を送信する。Web ブラウザ上でマウスカーソルを移動した際に発生する `mousemove` イベントの頻度は、Web ブラウザの種類と実行環境に依存するが、おおむね 1 秒間に 60 ~ 120 回程度である。Web ブラウザ上でマウスカーソルの移動を常にサーバモジュールに送り続けるには、非同期 HTTP リクエストを利用して毎秒 120 回程度の位置情報を送信する性能がクライアントモジュールに必要である。サーバモジュール側では、このリクエスト回数に最大接続数を乗じたリクエスト数を単位時間当たりに処理可能となるシステム構成にしなければならない。

### 3.1.4 通信量を抑える工夫

マウスカーソルの位置情報の一対多の分配を HTTP 上で効率よく行うためには、データ交換形式にも工夫が必要である。位置情報はマウスカーソルの画面上的座標で成り立っている。したがって、整数型のデータをできるだけ小さいバイト列にエンコードした上で HTTP で送信するのがよい。Ajax[8] (Asynchronous JavaScript and XML) でよく利用される、XML や JSON (JavaScript Object Notation) などの高機能なデータ交換形式は今回の目的には不適切である。データ量が必要以上に増大することと、構文解析のオーバーヘッドが無視できないためである。

JavaScript ではバイト列を取り扱うのが困難であるため、Base64[9] のように ASCII 文字を利用してデータを

エンコードするのが良い。本稿では、クライアントモジュールとサーバモジュールの間で交換するデータは座標情報などの数値データのみであるため、構文解析が簡単となるように Base64 を利用する。例えば、マウスカーソルの移動の場合、クライアントモジュールは表 3 のインストラクションを使って座標情報更新用バイトコードを作成する。引数のエンコードに Base64 を利用する (表 5 を参照)。サーバモジュールではこのバイトコードを受信及び実行して、画面描画等に必要の処理命令をクライアントモジュールに返す。その際にクライアント用のインストラクション (表 4) を使う。

### 3. 2 サーバモジュール

Web サーバの配下で動作し、クライアントモジュールからマウスカーソルの位置情報を受信して、すべてのピアへ位置情報を分配するのがサーバモジュールの主な役割である。HTTP による多数のクライアントモジュールからの高頻度のポーリングに耐えるために、マルチスレッドかつ遅延の少ない実装が容易となるように設計の際に考慮すべきである。ここでは、アトミック演算に基づくノンブロッキングな排他処理を設計段階で取り入れ、マウスカーソルの共有表示に必要な性能を得る方法を示す。

#### 3. 2. 1 接続管理とユーザの判別

サーバモジュールはクライアントモジュールの接続状態を管理し、HTTP クッキーに基づいてユーザの判別を行う。新規に接続してきたクライアントモジュールに対して識別用の HTTP クッキー (識別用クッキー) を発行して、共有メモリ内のデータ領域 (以下、属性レジスタ) を割り当てる。クライアントモジュールは次回以降の接続時に、識別用クッキーを送信する。サーバモジュールは識別用クッキーの完全性を確認して、その内容が正しいものであると確認された場合にのみ処理を継続する。

#### 3. 2. 2 識別用クッキーとメッセージ認証

識別用クッキーにはクライアントモジュールを識別するためのクライアント識別子を保存する。識別用クッキーの完全性を保証するために HMAC[10] (Keyed-Hashing for Message Authentication) あるいは同等のものを利用したメッセージ認証を利用する。本稿では、簡単のため、クライアント識別子は正の整数であると仮定する。

#### 3. 2. 3 属性レジスタ

Web サーバの共有メモリに配置される属性レジスタ

にはクライアント識別子  $id$  とマウスカーソルの位置情報  $(x, y)$  を紐づけて記録する。位置情報としては、マウスカーソルの  $x$  座標と  $y$  座標を記録する必要がある。排他処理を簡単にするため、 $id$  には  $x$  と  $y$  がベクトルとして保存され、 $id$  は処理系のアトミック演算を利用した書き換えが可能であるとする。位置情報の他に、属性レジスタの割り当て状態を管理するための状態情報  $status$  と当該クライアントモジュールが最後にポーリングを実施した時刻  $timestamp$  を記録する。

以上をまとめると、一つの属性レジスタは

$(id, x, y, status, timestamp)$

というデータの組である。クライアントモジュール 1 個につき 1 個の属性レジスタを割り当てる。ただし、属性レジスタの数には上限を設ける。属性レジスタがすべて利用中であれば、新たなクライアントモジュールの接続はできない。GC エージェント (単独のプロセスとして稼働) は一定時間利用されていない属性レジスタを回収して、再利用できるようにする。

#### 3. 2. 4 位置情報の分配

サーバモジュールの重要な機能のとして、位置情報を一対多に分配する機能がある。一つのクライアントモジュールから送信された位置情報を別のピアに転送する機能である。サーバモジュールは位置情報を共有メモリ内の属性レジスタに保存する。一対多の配信を行うためには、この属性レジスタとは別に、どのクライアントモジュールにどんな情報を配信したのかを管理する機構が必要である。MPS では、以下の更新状態マトリクスを利用した分配方法を採用する。

#### 3. 2. 5 更新状態マトリクス

共有メモリ上に十分な大きさの 2 重配列  $matrix$  を用意する。 $matrix$  を更新状態マトリクスと呼ぶ。クライアントモジュール  $i$  と  $j$  があるとき、それぞれの識別子 (正の整数値) を  $i$  と  $j$  とする。そして、 $i$  から見て  $j$  の状態が最新であれば、 $matrix[i][j] = 1$  それ以外なら  $matrix[i][j] = 0$  とする。

更新状態マトリクスは単純であるが、ノンブロッキングな排他処理を行いやすいという利点がある。CPU にアトミックなプリミティブが用意されていると仮定すれば、更新状態マトリクスの要素の変更と参照をノンブロッキングとすることができるからである。

#### 3. 2. 6 位置情報の更新と変更通知

クライアントモジュールは HTTP リクエストによってサーバモジュールへマウスカーソルの位置情報を送信する。サーバモジュールはクライアントモジュールが送

信する識別用クッキーを元にユーザを識別して、位置情報を当該ユーザの属性レジスタ内に保存する。次に、当該ユーザのクライアント識別子を『』として、すべての』について、『』とする。これは、すべてのピアに、クライアント識別子『』のユーザの位置情報を更新した、ということ伝えることを意味する。

サーバモジュールの返す HTTP レスポンスの内容は、『』の値が 1 に等しいすべての』について、『』で指定される属性レジスタの内容を直列化して連結したものとす。直列化には前述の様に Base64 を基本としたデータ交換形式を利用する。

## 4. 実験

### 4.1 実装

サーバモジュール (C 言語) とクライアントモジュール (JavaScript) を実装した。評価実験のために、図形オブジェクトを複数人で操作できるサンプル Web アプリケーションも作成した (図 3)。このサンプルではユーザが数種類の図形の作成、削除、移動を行うことができる。ただし、移動は単一のユーザだけが排他的に行えるものとした。本実装では、最大 768 人のユーザが同時接続し、最大で 1024 個のオブジェクトが画面に表示できるように属性レジスタの大きさを設定した。実装と実験に利用した環境を表 2 に示す。MPS サーバとして選んだのは計算機 2 の内の 1 台である。

サーバモジュールは HTTP サーバのモジュールとして HTTP サーバに組み込んだ。特定の HTTP サーバへの依存を避けるために、サーバモジュールを HTTP サーバ接続部と MPS コアに分割した。HTTP サーバ接続部は HTTP リクエストを解析して MPS コアが必要とする情報 (識別用クッキーとクエリ文字列) を MPS コアに引き渡す。MPS コアはその入力に対して適切な処理を行って応答 (識別用クッキーと HTTP リクエストボディ) を返す。今回は、Apache 用と RHCA[11] 用の 2 種類の HTTP サーバ接続部を作成した。

また、ユーザの動作をシミュレートするために、次の 4 種類のロボットを Java 言語で実装した。実装の際には、ロボットがサーバモジュールへ送信するリクエストがおおよそ 30ms 毎になるようにウェイトを入れた。

- **ロボット A** 特定の領域内で動くクライアントを検出して、そのクライアントと y 座標を一致させるように移動する。
- **ロボット B** ロボット A が監視する領域内を上から下に 1 ドットずつ移動する。ただし、自身の y 座標と領域内の全てのクライアントの y 座標が一致した場合にのみ移動を行う。

- **ロボット C** 図形オブジェクトを一つずつ特定の位置へ移動する。
- **ロボット D** サーバモジュールへの位置情報要求を繰り返し実施して、その応答時間を計測する。

### 4.2 マウスイベント発生回数の測定

Web ブラウザ上で発生するマウス移動イベントの発生回数を測定した。測定方法は実験者が机上でマウスを 1 秒間に 2 回転程度の速さで円状に動作させて Web ブラウザ上の JavaScript プログラムで当該イベントの発生回数をカウントするというものである。実験結果は表 1 の通りである。マウスを移動させる速さをさらに速くしても当該イベントの発生頻度の上昇は見られなかった。

この実験結果から、マウスイベントを漏れなく同期するにはサーバモジュールに対してユーザー一人あたり 130 回の位置情報更新が必要であることがわかる。

### 4.3 マウスカーソルの位置情報受信性能の測定

クライアントがサーバモジュールへ位置情報を要求してから応答を受信するまでの経過時間を測定する実験を行った。実験環境は、図 5 の通りである。HTTP サーバとして Apache 2.2.6 を利用した。ロボットはロボット稼働ホスト (10 台) で動作する。ロボットの起動と停止はロボット制御用 PC で行う。ロボット稼働ホストとロボット制御用 PC は、表 2 の計算機 (0~7) の中から無作為に選んで利用した。

本実験では、ロボット C を利用して MPS サーバに対して多数のユーザがアクセスする状況をシミュレートした。一つのロボット稼働ホストで動作するロボットの数を 1 から 10 (全クライアント数 10~100) まで変化させた。ただし、1 つのロボットにつき 1 スレッド、1 コネクションを利用した。

計測用 PC (計算機 8) では、他クライアントのカーソル位置情報をサーバに要求してから応答が返ってくるまでの時間差 (ms) を 10 回測定して平均したものを擬似的な応答時間とした。この応答時間を 100 回に渡って平均したものを平均応答時間とした。平均応答時間を記録した結果が図 4 である。

クライアント数の増加につれ応答時間も増えているが、100 台のクライアントが接続していたとしても高々 3.5 ms であった。表 1 の結果から、マウスイベントの平均発生間隔はおおよそ 7.9 ms 程度と考えられるので、位置情報の受信性能に関しては、MPS サーバは 100 人の同時接続についても十分な性能を持っていることがわかる。



る事が読み取れる。ロボット B が位置情報をサーバモジュールに送信してからロボット A がその位置情報を取得するまでにポーリング間隔の 30 ms 程度を要する。そして、ロボット A の移動がロボット B に伝わるまでも 30 ms 程度の時間が必要である。図 6 の結果によると、位置情報同期のための遅延時間は 60 ms 前後であるから、サーバ上では遅延がほとんど発生していない。参考までに、ロボット A の数を増やして 395 とした場合の遅延時間は 449 ms であった。

#### 4. 5 実証実験

実証実験のシナリオとして、初等教育などの PC 教室において 70 台の端末が配置され、70 人の生徒が同時にサンプルアプリケーションに接続して、マウスカーソルを動かし続ける状況を想定して実験を行った。実験に利用したクライアント端末は表 2 の計算機 9 と 10 である。サーバとしては計算機 5 を利用した。HTTP サーバとして RHCA を選択した。

実験方法は以下のとおりである。まず、マウスカーソルの移動を記録及び再生するソフトウェアを使い、70 人分のサンプルデータを作成した。70 台の端末それぞれに対してサンプルデータを設定し、Web ブラウザを起動してサンプルアプリケーションの Web ページを表示した。そして、70 台の端末一つ一つについて、マウスカーソルの移動状況を再生し始めた。その結果、70 台すべてのマウスカーソルが 70 台すべての端末に表示され、滑らかに移動する様子が視認によって確認できた。70 台の端末からのアクセスを継続しながら、3 人の操作者が同時にオブジェクトの移動を行っても、処理に遅延はなく、全く問題なく利用可能であることが確認できた。

実験中は SNMP (Simple Network Management Protocol) エージェントを利用して 10 秒毎に Web サーバのロードアベレージ・CPU 使用率・TCP コネクション数を記録した。Web サーバのロードアベレージはピーク時で 0.41、最大 CPU 使用率は 3.55%、最大 TCP コネクション数は 106 であった。これは、Web サーバに対する負荷が非常に少ないことを意味する。

MPS のようにポーリングを行わずに、HTTP 経由で擬似的なプッシュ配信を行う仕組みとして、Comet[12]という方法がすでに良く知られている。我々は DWR[14] (Direct Web Remoting) を利用して複数のクライアントの画面を共有する方法を提案した [13]。DWR による実装では、クライアント数が 40 になった際には 10 秒に 2 回ほどしかマウスカーソルの描画が行えず、多数のクライアントに対応する事ができなかった。今回の MPS では、データ転送量を抑える工夫を行い、実装言語も Java ではなく C 言語に取り替えるなどの工夫を行えば、

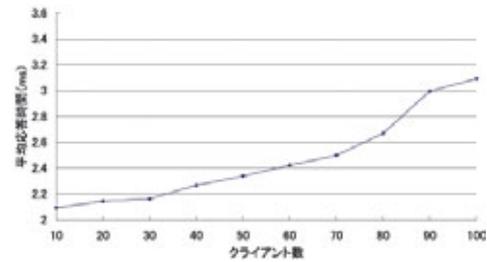


図 4 マウスカーソルの位置情報の要求に対する平均応答時間

Fig. 4 The average response time of the client request to retrieve coordinates of all mice.

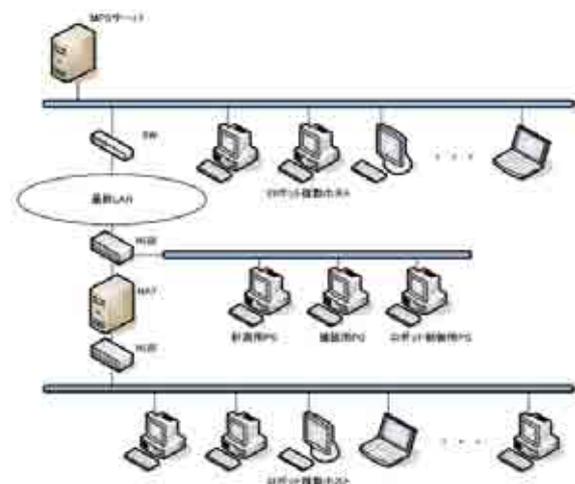


図 5 ロボットによるシミュレーションの実験環境

Fig. 5 The experiment environment for the simulation by robots.

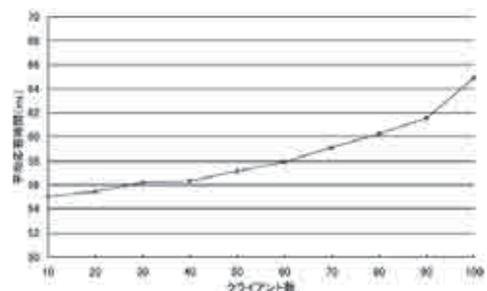


図 6 全マウスカーソルを同期するための平均所要時間

Fig. 6 The average time to synchronize coordinates of all mice.

70 クライアントでも滑らかにマウスカーソルを同期できるということが明らかになった。

## 5. おわりに

本論文では, 様々なネットワーク環境下での複数ユーザの協調作業を支援するミドルウェア Multiple Pointers System (MPS) を提案し, そのアーキテクチャと実装技術について述べた. また, MPS を利用した Web アプリケーションを実装し, 実際にネットワーク環境で協調作業が行えることを確認した. 従来のリアルタイム性の高いコラボレーションツールは独自プロトコルを用いるものが多く, セキュリティの制限などによっては利用できないことが多かった. これに対して, 本論文で提案した MPS は HTTP のみを用いており, ファイアウォールのあるネットワークでも使用でき, ユーザのネットワーク接続環境に依存せずに複数ユーザのマウスカーソルをリアルタイムに Web ブラウザ上に表示し, 複数ユーザが同時に操作できる.

また MPS を利用することで, 複数のマウスを用いて画面を共有する仕組み [7][15] やこれを応用した教育システム [16], Web 上で複数人が描画できる簡易共有ホワイトボード [17] などの通信性能と応答速度を大きく向上させることができる. 更に, ネットワーク版 KJ エディタ [18] や UML モデリング支援システム [19] といった協調作業ツールを Web アプリケーションとして実装することも可能である.

## 参考文献

- [1] 山之上卓: P2P 技術を利用した分散システム上の実時間操作共有システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 2, pp. 392-402 (2005).
- [2] 中川健一, 國藤進: アウェアネス支援に基づくリアルタイムな WWW コラボレーション環境の構築, 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 10, pp. 2820-2827 (1998).
- [3] Wallace, G., Bi, P., Li, K., and Ashus, O.: A Multi-Cursor X Window Manager Supporting Control Room Collaboration, In *Proceedings of the 2004 ACM Conference on Supporting Groupwork*, pp. 707-705, 2004.
- [4] Hutterer, P. and Thomas, B. H.: Groupware Support in the Windowing System, In W. Piekarski and B. Plimmer, Eds. *Proceedings of the 2007 Australian Computer Society*, Vol. 241, pp. 39-46, Australian Computer Society, 2007.
- [5] 上田真史: MMTk マルチマウスミドルウェア, <http://ne.cs.uec.ac.jp/masa-u/mmtk/index-ja.html>
- [6] 西村真一, 由井蘭隆也, 宗森純: 複数のネットマウスにより大きな共同作業空間構築を支援するミド

ルウェア GLIA, 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 7, pp. 2278-2290 (2007).

- [7] Moock, <http://moock.org/unity/clients/uSharedPointer/>
- [8] Garrett, J. J.: Ajax: A New Approach to Web Applications, <http://www.adaptivepath.com/publications/essays/archives/000385.php>
- [9] Borenstein, N. and Freed, N.: MIME (Multipurpose Internet Mail Extensions) Part One: Mechanisms for Specifying and Describing the Format of Internet Message Bodies, RFC1521, (1993).
- [10] Krawczyk, H., Bellare M. and Canetti R.: HMAC: Keyed-Hashing for Message Authentication, RFC-2104, (1997).
- [11] Molnar, I.: TUX web server, <http://people.redhat.com/mingo/TUX-patches/>
- [12] Alex Russell: Comet — Low Latency Data for the Browser, <http://alex.dojotoolkit.org/?p=545>
- [13] 長尾雄行, 土屋陽介, 森本祥一, 中鉢欣秀: Ajax によるリアルタイム分散 MVC アーキテクチャ, 情報処理学会論文誌 (トランザクション), Vol. 48, No. SIG10, p. 200 (2007).
- [14] DWR — Direct Web Remoting, <http://getahead.ltd.uk/dwr/>
- [15] Bier, E. A. and Freeman, S.: MMM: a user interface architecture for shared editors on a single screen, In *Proceedings of the 1991 ACM Conference on Supporting Groupwork*, pp. 79-86, (1991).
- [16] Pawar, U. S., Pal, J., and Toyama, K.: Multiple Mice for Computers in Education, 1st International Conference on ICT and Development, UC Berkeley, (2006).
- [17] WebBrush — Active Collaboration Tool, <http://www.stanfy.com/dev/webbrush/>
- [18] 大見嘉弘, 河合和久, 竹田尚彦, 大岩元: カード操作ツール KJ エディタを用いた協調作業における指示操作に関する考察, 情報処理学会論文誌, Vol. 36, No. 11, pp. 2720-2727 (1995).
- [19] 徐冬梅, 黒木純, 大瓶佳秀, 樫山淳雄: UML ダイアグラムを対象とした分散共同モデリング支援システム, 海谷治彦, 山本修一郎編, ソフトウェアエンジニアリング最前線 2007, pp. 131-139 (2007).

表 3 MPS サーバ用バイトコードの定義

Table 3 Definition of Bytecodes for the MPS server.



表 4 MPS クライアント用バイトコードの定義

Table 4 Definition of Bytecodes for the MPS client.



表 5 引数の定義

Table 5 Definition of the parameters.





# 企画型 PBL の実現と考察

成 田 雅 彦\*

## Realizing Product Planning type PBL and its consideration

Masahiko Narita\*

### Abstract

It is a key to success in software business to plan and make proposals for software products with considering business model. Therefore, it is required strongly to educate engineers on the software product planning. This paper proves that an education thought PBL (Product Based Learning) method with real world theme is feasible to educate competencies required in planning and making proposal on software products, though our experience of PBL education in 2007. And this paper also proposes the educational methods, identifies issues which will happen during this kind of PBL process and its resolution.

Keywords: Software development, PBL, Product planning, practice result, Internet, Competency

### 1. はじめに

ソフトウェア開発において、ビジネスモデルを含めた企画・提案が必須になっており、これを実践できる企画マン・エンジニアの養成が重要な課題である。

これに対して、産業技術大学院大学では、卒業年次である2年次に、情報アーキテクト育成のためのPBLを行っているが、そのPBL群の1つとして、企画をテーマにしたPBLを実施している。

本論文では、実課題をテーマとして採用した企画・提案を目的としたPBLを通して企画・提案に必要なコンピテンシが獲得できることを、PBLテーマの設定・指導方法などPBLの設計の観点で述べ、2007年度に実施したPBLにより検証する。また、これらの経験に基づき、従来曖昧であった提案検討活動の定量化の試みや、競争力の高い提案作成のために、魅力ある要素技術の供給、企画プロセスのなかで壁になる競合者への対応の提案を行い、より充実した指導方法の確立を目指す。

### 2. PBLの設計

本章では、企画・提案に必要なコンピテンシを、PBLを通して獲得するために、どのようにプロジェクトテーマを設定し、どのような指導方法を採用すべきかについて論じる。

#### 2. 1 企画・提案に必要なコンピテンシ

ソフトウェアの製品開発の困難さは、ソフトウェアの開発そのものだけでなく、ビジネスモデルを含めた企画・提案・販売計画など、設計・設計前段階に集中している。したがって、この企画・立案・提案能力、その背景となる、社会の構造、特許や収益構造を教育することが極めて重要といえる。このために、企画型PBLで獲得を目標とすべきコンピテンシとしては、技術動向・市場調査、設計・開発能力、専門分野のスキル、ノウハウ、及び、これらに裏打ちされた企画・提案・普及活動の能力である。

#### 2. 2 プロジェクトのテーマの設定

PBLのプロジェクトテーマは、教育すべきコンピテンシである設計前段階で重要とされる企画・立案・提案能力が、引き出しうるものを選択するべきである [1]。

##### (1) 実証済みの課題と実課題

プロジェクトテーマは、既に実証済みの課題か、実課題に分けられる。既に実証済みの課題とは、実際に実施されたプロジェクトの課題であり、プロジェクトを疑似体験するためのものである。複数のプロジェクトの重要部分を取り出し課題として組み合わせたり、一部に実際の課題を取り入れたりすることにより、実際よりリアルな課題にすることもできる。一方、良質な疑似体験教材の作成には蓄積が必要である。

実課題とは、現在の企業が抱えているテーマや、業界が取り組んでいる、解かれていない課題である。実課題

だけに、選択にあたっては、企業機密・知的財産権への配慮が必要であるが、多方面からのリアルタイムの意見が収集でき、学生なりのオリジナルな検討も要求される。結果、成果は社会還元やたり、学生が卒業後、活用することもできる。

実証済み課題と実課題を比較すると、一般に、前者は広い認識を得るために教育の初期段階に行うのが適切である。一方、実課題は上級者を対象としており、教育の後期段階向きであり、修士2年で行うPBLとしての企画・立案・提案能力の開発には相応しいといえる。

## (2) 技術分野

ソフトウェア開発に関連する企画・立案・提案能力の養成に向けた実課題向きの技術分野を検討する。

現在、IT技術は、ネットワークの急速な発展をベースに、Web 2.0・Webサービスなどのインターネット技術、モバイル技術、SOA(Service Oriented Architecture)・SaaS(Software as a service)などサービスビジネス志向の考え方が提唱されているとともに、多くの産業分野に多大が影響を及ぼしている[2]。同時にソフトウェアも高度なネットベースアプリケーションに移りつつある。従って、このような活発な分野をテーマとして提示し、この中から、PBL活動を通して企画提案を検討することとした。

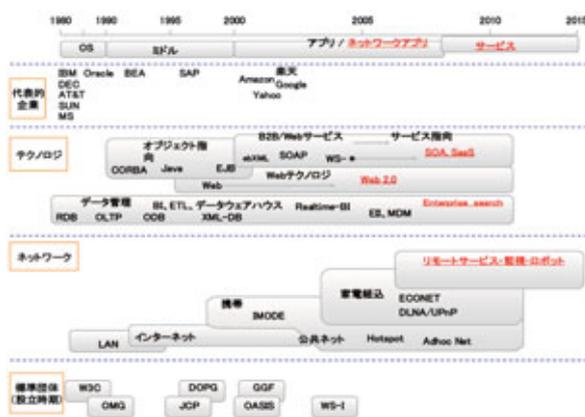


図1 ソフトウェアテクノロジーロードマップ [2]

## 2.3 プロジェクトの進め方

### (1) 従来のPBLの方法

従来の大学院教育の主目的は研究者の育成であったが、教育する側からの明確なロードマップの提示がなく、また、個々の教員の方法論に依存して汎用性がないという反省にたち、産業技術大学院大学は、PBLが導入された経緯[3]がある。従って、教育プロセスの明確化と学生への提示は、今回、PBL教育方法論を考える上の要件と言える。

PBLの方法論は、学生に課題を提供し、学生の自主性に期待し、問題解決能力の向上に主眼をもの[3]、企業内

教育に多く見られる、ケーススタディに基づき課題提示とグループによる解決を繰り返すもの[4]、[5]がある。前者は、学生の問題解決能力の向上に貢献するが、後者は、教育プロセスが見えやすく、さまざまな場面を体系的に体験でき、初心者に大きなメリットがある。ただし、実際に遭遇する多様な課題の解決能力の向上には適さない。また、個々の教員への依存性が少ない反面、教員の豊富な実践経験を活かしにくい。

2つの典型的な方法論を比較したが、教育とプロジェクトのプロセスが分かりやすく、教員への依存性が少なく、かつ実践経験の豊富な教員がより発揮しやすい方法論としては、これらは力不足で、新たな方法論が必要とされていることが分かる。

### (2) 公開例を活用した方法論

企画・計画立案・販売計画・提案・プロジェクト運営・立案等のノウハウは、企業内では、a. プロセスとして定着したもの、b. 既存提案資料など章立てや記述項目にも半ば暗黙知として分散して存在している。公的なプロジェクトについては、公開されているものも多い。c. 個人・組織に、暗黙知として存在するものもある。

前節の要件を満たす方法論として、公開例を活用した以下の方法を提案する。

- a. プロセスについては、従来用いられているプロジェクト管理を用いる。
- b. 既存資料に埋め込まれた知識については、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）が管理している国家プロジェクトに関連したプレゼンテーションや、自治体が開発したアプリケーションの基本設計書などが、公開されているものが多い。これらの中から、実践経験にもとづき取捨選択を行い、適切な既存資料を例として活用することで、章立てや記述項目を設定する。
- c. 暗黙知については、実践経験豊富な教員との技術検討を通して、ノウハウを引き出ししていく

### (3) プロジェクトの進め方とスケジュール

本提案に沿ったプロジェクトの進め方を以下に示す。ただし、産業技術大学院大学では、1年を四分の一に分けたクォータ制を採用しているため、スケジュールはクォータ単位（Qと略記）に表してある。

- ・プロジェクトは調査検討・提案作成、基本設計、機能設計、詳細設計、プログラミング、テスト、評価の各フェーズに分け、従来のプロジェクト管理手法にもとづき管理する。
- ・提案候補は各自が複数作成し、評価項目を作成した上で、複数案を競争的に評価して提案を絞ることとする。
- ・アウトプットは、報告、提案書、評価、基本設計書など各フェーズで適切なものを設定する。

- ・スケジュールは、第一クオータに、業界動向調査・提案作成、第二クオータに提案選択/見直し・開発環境整備・試作を行う。第三クオータに基本設計・機能設計・イベント出展を行い、最後の第四クオータに評価とまとめを行い十分、調査と評価の時間を確保する。
- ・プロジェクトは、スケジュールに沿って、各フェーズのアウトプットを、テンプレートを活用しながら学生グループが検討・作成し、定期的な技術検討会をつうじた教員とのレビュー・討論により完成させることで進行する。
- ・提案検討における作成候補案の数・規模は現状適切な数が不明だが、今後の検証による、定式化・定量的を行っていく。

### 3. プロジェクトによる検証

2007 年度に実施した企画型 PBL[6] を通して 2 章で述べた企画型 PBL が実践できることを検証し、課題とその解決について考察する。

#### 3. 1 実施の概要

##### (1) テーマ

携帯や画像技術を用いたインターネットサービスの企画

##### (2) 参加メンバ

積極的な学生 4 名が参加した。ただしソフトウェア開発の経験者は 1 名。他はソフトウェア開発プロセス・ソフトウェア開発の講義未修得者であり、経験・スキルについて大きく異なっている。

##### (3) 当初想定スケジュールと現状スケジュール

しかしながら、5 月にイノベーションジャパン 2007 出展（9 月）の勧誘があり、学生が賛同し参加を決定した。このために工程を約 1/2 クオータ前進し、第一クオータに、提案選択までを行い、第二クオータと夏休み中に一部の基本設計・機能設計・開発環境整備を行った。第三クオータでは、イベント出展の結果をフィードバックした基本設計・機能設計と試作を行った。

イノベーションジャパン 2007 出展は後述するように収穫が大きかったが、テーマ検討時間が減少し開発工程を圧迫したため、学生には強い圧力になった。

##### (4) プロジェクト成果と主なアウトプット

第三クオータまでの、主な成果とアウトプットは以下の通りである。

- ・提案書（複数）
- ・試作物（1 次）
- ・基本・機能設計書（一部）ドラフト版。
- ・イノベーションジャパン 2007 出展による対外活動。このための、申し込み関連書類、プロモーション資料、発

表資料 [7]。

- ・特許出願 1 件。及び特許関連資料 [8]。

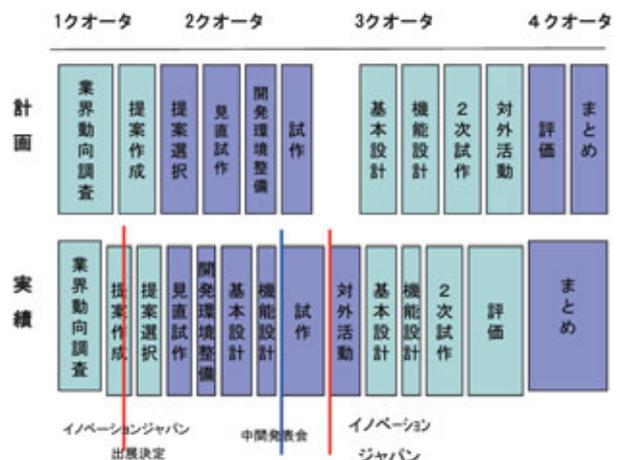


図 2 プロジェクト想定 / 現状スケジュール

##### (5) 教員による指導

プロセスに応じて適切な指導を実施した。例えば、第一クオータ・第二クオータでは、大局的な業界の動向を提示して目的意識の向上を図り、調査・アーキテクチャ設計等のノウハウ・検討のベース資料の提供を行った。特に、検討が行き詰まった時点での指導は 4. 4 で詳述するように効果的であった。調査から試作までの一ラウンドの企画プロセスを完了した後の第三クオータ以降は、学生による自主運営を中心とし、教員による指導は、発表の課題・方法の提示の提示と 質疑応答を中心とした。

本 PBL では主担当教員と 2 名の副担当教員が指導した。副担当は主担当の指導とは異なった観点での指摘、特許関連の指導、開発技術に関する質疑応答や例題の提示等を行い、主担当の指導と合わせて広い範囲の指導を行うことができた。

#### 3. 2 調査と提案・提案の選択プロセス（第一フェーズ）

##### (1) 調査と提案

初めに、学生の問題意識の向上と大局的な業界の動向を把握するために、市場調査資料 [9] を手始めにインターネット関連業界全体を調査した。この結果、学生の意識を高めることができた。各自が選んだ 22 トピックスについて調査しプレゼンテーション形式で発表を行った。その後、各自が合計 17 の提案を作成し、グループで評価し、有望なものについてブラシアップした。結果、各人 2～3 件の提案が残った。

##### (2) 提案の評価項目

提案の作成プロセス中にあらかじめ以下の提案評価を提示した。

- コンセプト・メリットが明確か
- 技術的実現性があるか

- 自分たちのPBLで実現できるか
- 競合状態
- 自分の強みはあるか
- 市場性はあるか・規模は大きい

### (3) 選択のプロセスと選択結果

最終的な提案は各自が候補を2つ提示し、先の評価項目に基づき、グループメンバーと教員2名が評価を5点満点で行い上位2件に絞った後、PBLでの実現性に配慮して1件に決定した。表1に各PBL参加者が作成した提案の評価結果を示す。この表により、各人が作成した最良も提案は、互いにはほぼ同等レベルに達していることがわかる。

表1 作成したPBL参加者の提案の評価結果  
黄色部分を書く提案者の最良の提案

学生	提案	コンセプト・メリットが明確	技術的実現性	PBL	競合	自分の強み	市場性・規模	合計
A	A-1	5	5	3	4	3	5	4.2
	A-2	4	2	1	1	2	4	2.3
B	B-1	4	2	1	3	2	5	2.8
	B-2	2	2	1	3	2	3	2.2
	B-3	5	5	4	3	2	3	3.7
C	C-1	4	5	4	2	2	3	3.3
	MRS	4	5	4	3	4	4	4.0
D	D-1	3	2	1	3	2	2	2.2
	D-2	3	2	1	3	3	2	2.3
	D-3	4	4	3	4	3	4	3.7

これらを通して、各種調査活動の遂行能力、対象分野の理解、企画提案と評価のコンピテンシを向上させることができた。

当初、学生の一部が文書ベースの検討に不慣れなため、議論に支障がでた。検討の進め方は基本的なスキルなので一年次に解決するよう連携した指導を実現していきたい。

### 3.3 第一次提案と評価（第二フェーズ）

#### (1) 第一次提案

前節で述べた調査と提案プロセスを経て最終的に選択した提案をもとにブラッシュアップした一次提案は以下の通りである。

- ・提案名：インターネット上のメタデータを活用したデータ共有／配信システム。システム名は、MRS (Message Relay System)。
- ・目的：メタデータを付加することで設計負担の少ない効率的なデータ整理・活用の方法とインターネット経由で情報の交換・外部機能の利用手段をプラットフォームとして提供することにより、インターネットサービスの構築に貢献する。
- ・技術概要：Web 2.0 技術を活用した効率的なメタデー

タの付加の仕組みをもつデータベースと周辺システム。インターネットで利用されるテキスト・画像等を扱え、携帯等ネット経由の各種入出力デバイスをサポートして広く使われるように配慮した。また、プラットフォームのために、アプリケーション開発用のREST APIを提供する(図3)。

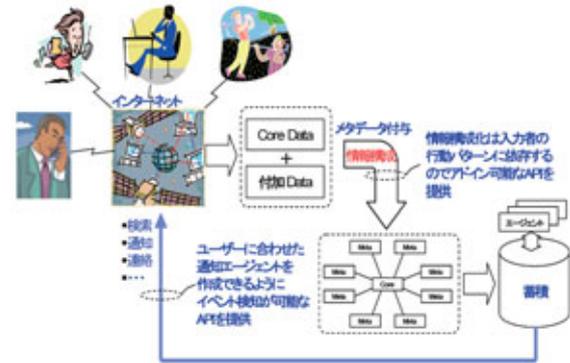


図3 MRSの考え方

従来タグ付けは手動で行われており、タグを如何に効率的に付加するかが技術的な難しさであり、新規技術が要求される。タグ付加はプラグインで提供することとしてあるにも関わらず、これをどう解決するかが、提案の競争力に直接影響する。

- ・利用例：メモ情報の活用、複数プロジェクトの管理、FAQ ツール・タクシー配車・健康／介護など広い。

#### (2) 第一次提案に対する評価

本提案は、タグ、画像、ミニブログと言ったインターネットの方向を的確に捉え、オールインワンで実現しようとする意欲的なものである。更に、こうした機能を1つのサービスで提供することなく、プラットフォームと提供し広く利用できるようにするというコンセプトが新鮮である。この評価は、本提案が、イノベーションジャパン新技術説明会で採択されたことによっても裏付けられる。短期間でこのレベルの物が提案可能なのは、PBLによるグループ検討の結果と考えられる。

### 3.4 設計と試作（第三フェーズ）

#### (1) 概要

第二クォータの設計工程では、アーキテクチャ決定と分担、試作を行った。試作では出展時のアピールを優先し、機能は最小限にとどめた。従って、データ形式はテキストのみとし、データ蓄積、タグ付け、検索、外部API、DBアクセス部分を実装し、外部APIを使って携帯サポートした。

#### (2) 課題と解決

- PBL実施中に生じた課題とその解決について述べる。
- ・アーキテクチャの決定：スキルが不足していたために難

航した。魅力的で効率のよりタグ如何の仕組みを提供することは、本体機能ではないが、提案の競争力に直接影響する。サンプルとしてある程度の機能を試作することとしたが、実装方法の検討が行き詰まった。結果、タグの付加のために web 2.0 機能の利用と、オープンソースによる形態素解析機能 mecab[10] の利用 (図 4) を教員が助言してこの問題を解決した。

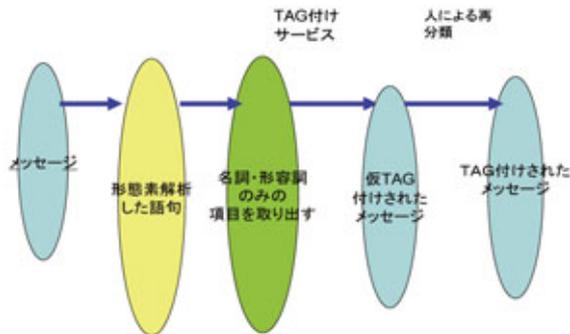


図 4 メッセージへのタグ付けの仕組み

一方、設計工程で、タグ付けは技術的に難易度が高いこと、本プロジェクトのメンバはソフトウェア開発の経験者が 1 名しかいないために、幾つかの問題が生じたが、以下のように解決した。

- ・開発環境の選択・作成に時間を浪費した。初めから言語と環境を決めておき、メンバに自習の指示を出すべきかもしれない。
- ・開発分担とプロジェクト責任：ソフトウェア開発を経験者にすべて依頼しようとする動きが出て、その学生に多大な圧力となった。結果的に教員が分担を明確にして解決したが、学生プロジェクトの場合、企業と違い責任体制があいまいなので、余裕がないプロジェクトの進行には難がある。
- ・技術指導：ソフトウェア開発の熟練者が少ないため、試作時間が長くなり、解決のため、教員の細かい技術指導が必要になった。PBL の主眼は企画の作成だが、試作の比重が大きくせざるを得なかった。

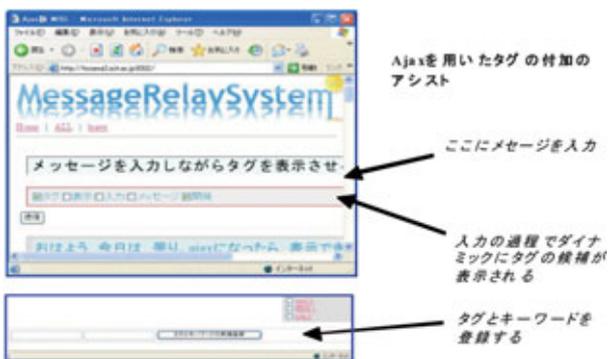


図 5 MRS (一次試作) によるテキスト入力と自動タグ付け機能



図 6 タグによる検索によるデータの絞り込み

### 3. 5 フィードバック (第四フェーズ)

#### (1) 中間発表会

第二クオータ終わりに 2 年次で実施されている PBL 群全体の中間発表会があり、参加学生によるプレゼンテーションを行った。この中で、学生が獲得したコンピテンシを再確認できたこと、他グループの水準を把握し、プレゼンテーションの重要性を体感できたことは学生にとって大きな成果であった。

#### (2) イベント出展

9/12-14 に開催されたイノベーションジャパン 2007 は科学技術振興機構と NEDO が主催する、大学の研究成果の企業向け展示会であるが、そこに、当大学として本 PBL の成果を、首都大学法人産学連携センタの協力を頂き、出展し新技術説明会で説明を行った。展示ブースにてコメント/名刺を頂いた来訪者は、事業会社 21 社、投資会社 4 社であり、新技術説明会へは 50 社程度の参加があった。

この出展を通じて、タグ付けの機能強化への要望やサポートレベルや応用分野への質問等、第三者・競合出展者からの意見を直接受け、周囲の出展を見学することで自分の技術水準を客観的に確認できたことは、本 PBL 参加の学生にとって出展ははじめての経験であったこともあり、大きな刺激になった。



写真 1 イノベーションジャパン 2007 出展中の PBL メンバ

一方、未完成の技術の出展であることから開発工程に対して大きなストレスになった。さらに、出展は夏休み期間に行われたので、これに対する評価制度の不足が明らかになった。以上の出展のメリットとデメリットを比較すると、イノベーションジャパン 2007 への出展はやや不適に思われる。プロジェクト成果が見えた時点で参加の申し込みのできるイベントあるいは学会の研究会での発表がより適切であろう。

### 3. 6 フィードバック・第2次試作・最終提案（第五フェーズ）

PBL メンバ内の討論を通じて、変化する技術やイベント出展の結果をフィードバックし、コンセプトをブラシアップし、基本設計・機能設計、二次試作・評価を行い、最終提案の作成を行った。

コンセプトのブラシアップでは以下のような課題が挙がった。

- 出展を通じて、第三者・競合出展者から、タグ付けの機能強化への要望やサポートレベルや応用分野への質問を受けたが、これらをどう反映するか。
- 調査により、本テーマに類似した OASIS で標準化が進みつつある UIMA (Unstructured Information Managing Architecture) が見つかり、これとの関係の整理する必要が生じた。

これには、一般的で起こり得る大きな困難であるが、以下のように解決した。

- イベントのコメントは有意義であるが、反映にはタグ付け機能本体への変更を伴うもので、技術的に蓄積が要求される。本 PBL では、この部分を外部から調達したので、この方向への展開できない。これはキーテクノロジーを外部調達した場合の課題であり限界である。
- については、有望な技術分野は必然的に競合状態が生じる。実際の製品計画は当然起こり得るので、不可避である。だが、手ごわい競合者は学生に強いストレスを与えた。

学生の検討の結果、利用の重点を立ち上がりつつある画像サービスに集中することで前者を回避し、実際に利用可能なレベルの機能を集めてプラットフォームとし、カバー範囲が広いが、まだ、枠組みだけで実態のない標準仕様との競合を回避した。結果、出来たがったコンセプトは、以下の通り。

- ・インターネットサービスにおける動画、静止画の伸びに注目し、動画や写真データの検索のタグ付けサービスを基本機能とした。
- ・外部サービスとのデータ連係によるデータの参照と、外部情報に対するタグ付けによる統合化とユーザー独自

の検索タグ付け機能の提供を付加価値とする（図 7）。  
・各種の応用シーンを示しプラットフォームへの展開を主張することとした。



図 7 MRS two（第二次試作）のサービス横断検索機能

### 3. 7 最終発表会と PBL の評価

プロジェクトのまとめとして、産業技術大学院大学で実施したすべての PBL と、年度末にプレゼンテーションを行い PBL の評価を行った。10 件の PBL を 17 人の教員により 3 段階（3 点が好評価）で評価したところ、平均値は、2.6 点となった。これは、本 PBL は 2.8 で他 1 PBL と同点で 1 位であり、PBL としての指導方法としても有効であることがわかる。

## 4. 課題と解決の提案

第 3 章で述べた実際の PBL の経験・検証に基づき、テーマ及び、プロジェクトの進め方について課題とその解決のための提案を述べる。

### 4. 1 テーマ

2007 年度の企画型 PBL では、PBL の成果として競争力のある企画提案を作成し、特許出願・イベント出展もこなすことができた。これは、時流にあった分野に於ける企画・開発を実課題とし PBL のテーマとして可能であることを示している。

Google がプラットフォームビジネス進出する等、インターネット企業の躍進は、企業システム構築の観点でも目が離せない分野であり、携帯とインターネットとの融合も注目度が高い。また、企画・普及活動の重要性は不変であり、このコンピテンシを教育することは意義がある。

PBL 参加の学生からは、提案検討に際して、より検討範囲を絞ると検討に集中できるとの指摘があった。2007

年度のテーマは、「携帯や画像を用いたインターネットサービス」であり、各分野の調査を行い、且つ、参加者の意識あわせを行うためにはやや時間が不足していた感がある。テーマ範囲を絞ると、検討が深まり、教員側も事前に予想される機材や要素技術の手配ができるというメリットがある。反面、動向調査によって広い見識が得られなかったり、企画に新鮮味がなくなったり、更に、学生の興味と合致しなくなる可能性も高くなる。したがって、テーマの範囲/制約条件は依然大きな課題である。

従って、2008年度は、2007年度よりやや範囲を絞り、検討範囲を限定する。例えば、携帯電話に搭載が義務付けられたGPSや、急速に立ち上がりつつ画像サイトに関連して、カメラを用いたインターネットサービスとし、テーマを深く検討して提案を作成できるようにした。

#### 4.2 調査・提案活動の定量化

調査・提案の適切な規模や期間を定めることは困難であるが、2007年度のPBLの経験を踏まえ、設定した調査・提案活動のスケジュールが適切かを検討し、提案活動の進捗を測る定量化を試みる。

##### (1) 調査・提案活動のスケジュール

調査・提案活動は、提案の選択を含めて、2007年度では4月から5月半ばまでの1.5ヶ月であった。結果的に最終案は、競合力のあるものとなったが、調査のドキュメント化が十分なされていない。提案作成としては十分であったが、調査活動の文書化を含めると、当初、計画していた1クォータは適切だったといえる。

##### (2) 提案活動の定量化

提案活動期間中の提案数の実績は、各自17の提案で、ブラッシュアップした2提案を作成し、最終投票を行った。この数字を元に、以下を「調査・提案活動のマイルストーン」として定量化することを提案する。

##### a. 1行プレゼン

期間中に、グループへ提示できるレベルのラフな案（これを1行プレゼンと呼ぶ）を、各自、20件提案する。

##### b. 1枚プレゼン

これらの中で有望なものを3件に絞り、1枚のプレゼンテーションにまとめ、1件3分程度、グループに提示する。

##### c. 3枚プレゼン

上述の1枚プレゼンのなかでグループの評判の良かったものを、さらにブラッシュアップし3枚のプレゼンテーションにまとめ、これを10分程度、グループに提示し、最終評価を行う。

ここで提案した定量化の有効性の検証は今後のPBLで実施していく。

#### 4.3 魅力的な要素技術の供給

魅力的な要素技術を持ち合わせていると競争力が高い企画提案が期待できる。実際、実際の企画作業に於いても必要が技術を他から供給することもありうる。4.2(2)で述べたように、2007年度のPBLにおいては、形態素解析をオープンソースとして外部から導入することで、競争力のある提案を作成できた。この様に、企画提案がテーマのPBLでは、魅力的な要素技術の供給があることが望ましい。必要とされる技術は、今回のように検討中に特定される場合もあるが、事前に教員側が要素技術の候補として準備しておくことも考えられる。後者を実現するには、教員の研究蓄積によるものを利用するか、企業の協力を得て要素技術を提供してもらう方法が考えられる。後者は特に、企業との協力は最新動向を得るという意味でも、実課題を得るという意味でも有効である。

したがって、今後、積極的に、企画提案に関連要素技術を提供することで、最新動向を反映した競争力のある提案の検討を促進したい。

#### 4.4 競合者への対応

3.6で述べたように、開発中のテーマに類似した手ごわい相手が見つかることがあり、学生は戦意を失ってしまうことがある。だが、強力な競合者は、有望な技術分野は不可避であるので、PBLとしては極めて現実的な典型的な課題を提供できたことになる。競合者への対抗については、予め可能性と必要性を強調し、PBLの企画・開発のフェーズの中に位置付けておくことで、学生の同様に軽減するべきである。

#### 4.5 スケジュール

PBLによるグループによる共同作業は、一人一人で行う研究活動に比較して、より大きい規模のコンセプトやより大きなプロジェクトの成功体験を獲得できる。また、イベントへの参加は、モチベーション向上や視野の拡大に役立つ。

一方、チームへのストレスは、スケジュールの圧迫やプログラミングスキルに因るところが多く、一部のスキルの高いメンバに集中し易い。しかし、事前に、ソフトウェア開発プロセスを理解し、プログラミングを習得し、利用言語や開発環境は事前に提示して準備を促し、サーバ環境は教員側が準備しておくことで、適切に管理することでこれらを回避できると思われる。9月開催のイベントへの参加は、プロジェクト成果が不安定な時期でのコミットメントになるので、学生へのプレッシャが高くなりやすい。参加イベントの時期は2月あたりがふさわしい。

## 5. まとめ

本論文では、実課題をテーマとして採用した企画・提案を目的としたPBLを通して企画・提案に必要なコンピテンシが獲得できることを、PBLテーマの設定・指導方法などPBLの設計の観点で述べ、2007年度に実施したPBLにより検証した。

2007年度にプロジェクトへ参加した学生は、競合相手の手ごわい動きを感じ、実践に近い環境での活動を体験できただけでなく、当初、計画していたビジネスモデルを含めた企画・提案・普及活動の能力、技術動向・市場調査、設計・開発能力、専門分野のスキル、ノウハウ等、教育したいコンピテンシが獲得されつつある。

このように、総合的なスキルの要求される企画業務での成果は、業界動向と比較して実戦レベルに近いと思われる。

一方、本論文では、プロジェクト中に発生する課題と解決方法について提案した。これらに経験と知見にもとづき、前年度に比べてより充実し教育効果の高いPBLとすべく次年度以降も企画型PBLを実施中である。

### 参考文献

- [1] 成田 「ソフトウェア開発を中心とした情報アーキテクト向けPBL (Project Based Learning) 教育実施計画」日本 e-Learning 学会 PBL 研究会予稿集, 2006/9
- [2] ソフトウェアプラットフォーム技術専門委員会, 「ソフトウェアプラットフォーム技術に関する調査報告」, JEITA(日本電子工業振興協会), 2006年3月.
- [3] 石島, 「アイントフォーフェン大学の事例に見るPBL法について」日本 eLearning 学会 PBL 研究会予稿集, 2006/9
- [4] 富士通, 「プロジェクトマネジメント研修 ～PBL学習手引き～」 2006年2月
- [5] NRI ラーニングネットワーク, 「授業計画書」2006年3月
- [6] 産業技術大学院大学「PBL説明書」2006/1
- [7] 成田, 戸沢, 長尾, 小澤, 酒井, 八木岡, 「インタネット上のメタデータを活用したデータ共有 / 配信システム」, イノベーションジャパン 2007 新技術説明会配付資料
- [8] 「タグ付与支援システム及びプログラム」特願 2007-235064, 2007/9
- [9] インタネット協会, 「インタネット白書 2006」
- [10] 工藤 拓 「形態素周辺確率を用いた分かち書き一般化とその応用」言語処理学会第11回年次大会 2005

# 最適化アルゴリズムと離散凸構造

森 口 聡 子\*

## Optimization Algorithms Based on Discrete Convexity

Satoko Moriguchi\*

### Abstract

We consider optimization problems with nonlinear discrete functions proposed in the theory of discrete convex analysis. For these problems, fruitful applications and various kinds of algorithms are known. The objective of this paper is to survey basic concepts that have been studied in the optimization theory and some recent developments in the theory of discrete convex analysis. Furthermore, we show a new application model for which an efficient optimization algorithm based on discrete convexity is available.

Keywords: Optimization Theory, Mathematical Programming, Optimization Algorithms, Convex Analysis, Combinatorial Optimization, Discrete Convex Analysis

### 1. はじめに

与えられた許容集合の中から、ある基準に関して最も良い要素を求める問題である最適化問題は、実社会や様々な研究分野において現れる。この最適化問題は、特に計算機科学・情報数理の分野では、解法・アルゴリズム構築のために、許容集合が連続的な場合の連続最適化と、離散的な場合の離散（組合せ）最適化の二つに大きく分類されて取り扱われる。

実数変数に関する最適化（連続最適化）では、凸計画問題が理論的にも実際的にも扱いやすいということが良く知られている。「凸解析」によってその理論体系が完成しており、厳密解法に関する多くの研究成果も得られている。また実社会で現れる問題に対して、凸計画問題を用いたモデル化と求解に関する多くの成功事例が報告されている。

一方、整数変数に関する最適化である離散最適化（組合せ最適化）の分野では、解きやすい問題に現れる構造を「凸性」の観点から捉えようとする研究が展開されてきた。離散格子点上で定義された関数に対して、様々な研究者により「離散凸性」の定義がなされてきたが、中でも、マトロイド・劣モジュラ関数の研究の流れを汲んだ離散凸解析による統一的枠組みが1990年代以降注目され、今や多くの成果が報告されている[16][27][28]。連続最適化で凸関数の持つ良い性質が活かされているように、離散最適化において同様の議論を展開しようというのが、離散凸解析の狙いの一つである。別の見方をすると、「離散最適化問題を解く」という目的に対して、解

の精度の保証がなくても、実用的な解を求めようとするヒューリスティクスを『トップダウン的アプローチ』と解釈するならば、離散凸解析は、同じ目的に対して、効率良く厳密解を求められる問題の構造を理論的に積み上げていく『ボトムアップ的アプローチ』と捉えられよう。

工学[26]やオペレーションズ・リサーチ[15]、経済学[2][31][32]等において様々な形で実在する最適化問題に対して、これまで、離散凸解析の理論、離散凸構造に着目した最適化アプローチについて研究がなされてきた。本稿ではこれらの成果について述べる。

### 2. 最適化問題と離散凸解析

最適化問題は一般的に「Minimize  $f(x)$  subject to  $x \in S$ 」の形に記述され、 $f(x)$  という制約の下で関数値  $f(x)$  を最小にする  $x$  を求める問題である。ここで、関数  $f$  は目的関数、集合  $S$  は実行可能領域と呼ばれる。 $S$  は制約条件を満たす解の全体を表し、個々の解  $x \in S$  を実行可能解と呼ぶ。目的関数  $f$  は、実数値あるいは整数値をとる関数である。 $f(x)$  を最小にする実行可能解を最適解と呼ぶ。そのような解を見つけることが、最適化問題の目標である。

最適化問題を解くアルゴリズムを構築する際、問題の構造によって解法を選ぶ必要がある。最適化問題は、目的関数や制約条件の違いによって分類されることが一般的である。

連続変数に関する最適化問題では、目的関数が実数上で定義された関数  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  (ただし、 $\mathbb{R}$  は実数

の集合)であり, 実行可能領域は実数ベクトルの集合  $S \subseteq \mathbb{R}^n$  である. 特に,  $S$  が凸集合,  $f$  が凸関数の場合は, 凸計画問題と呼ばれ, 理論的にも実際的にも扱いやすい問題であることが知られている.

一方, 整数ベクトルを変数とする問題である離散最適化問題あるいは組合せ最適化問題では,  $S$  が組合せ的な構造を持つ場合や, 目的関数が整数格子点上で定義された関数  $f: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R}$  (あるいは  $\mathbb{Z}$ ) (ただし,  $\mathbb{Z}$  は整数の集合) である場合が当てはまる. 現実問題から生じる最適化問題は離散最適化問題であることが多いが, 多くの離散最適化問題に対し, 問題の規模が大きくなると, 厳密な最適解を求めることが極めて困難であることが, 計算の複雑さの理論により明らかにされてきた. その一方で, ネットワークフローを代表例とするマトロイド的な問題が扱いやすい離散最適化問題として認知されてきた. この扱いやすさを「凸関数の離散版」として統一的枠組みにまで発展し, 離散凸解析の理論と応用が確立されてきた.

### 2.1 連続変数の凸関数

まず, 通常の凸関数について説明する. より詳しくは [3] を参照されたい.

連続関数  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  の実効定義域を  $\text{dom} f := \{x \in \mathbb{R}^n \mid f(x) < \infty\}$  とする. 関数  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  は, 任意の  $x, y \in \text{dom} f$  と  $\alpha \in [0, 1]$  に対して, 不等式

$$f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y) \quad (1)$$

を満たすときに凸関数と呼ばれる.  $f$  が連続である場合は, この凸性の定義は次の中点凸性と等価であることが知られている:

$$f\left(\frac{x+y}{2}\right) \leq \frac{f(x)+f(y)}{2}, \quad \forall x, y \in \text{dom} f \quad (2)$$

また, 凸関数  $f$  は, 任意の  $x, y \in \text{dom} f$  と  $\alpha \in [0, 1]$  に対して, 不等式

$$f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y) \quad (3)$$

が成り立つ. この不等式 (2) は, 2点  $x, y$  における関数値の和  $f(x) + f(y)$  が, 2点を結ぶ線分上で同じ距離だけ近づいた2点  $x', y' := \alpha x + (1 - \alpha)y, \alpha y + (1 - \alpha)x$  における関数値の和  $f(x') + f(y')$  以上であることを示している (図1 参照).

凸関数の大域的な最小性は局所的な最小性により保障されるという, 最適化において非常に使いやすい性質がある. この性質から, 現在の点の関数値と近傍内の関数値を比較し, 近傍内に関数値が小さくなる点があれば移動するという降下法により, 凸関数  $f$  の最小化が行える

ことがわかる. また, 凸関数は, この他にも双対性と密接な関係がある分離定理などの良い性質をもち, 凸解析の理論が連続最適化で用いられている.

次節以降で, 凸解析の離散版, 離散凸解析において中心的な役割を担っている M/L凸関数について述べる.

### 2.2 M凸関数

本節では交換公理に基づく M凸関数を説明する. なお, M凸関数の「M」は Matroid の頭文字である.

これ以降, 離散関数  $f: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  に対して,

$$\text{dom} f := \{x \in \mathbb{Z}^n \mid f(x) < \infty\}$$

として,

$$\sup_{x \in \mathbb{Z}^n} f(x) = \max\{f(x) \mid x \in \text{dom} f\}$$

$$\sup_{x \in \mathbb{Z}^n} f(x) = \max\{f(x) \mid x \in \text{dom} f\}$$

とする.  $\chi \in \{0, 1\}^n$  は,  $\{x \in \mathbb{Z}^n \mid x \leq \chi\}$  に対する特性ベクトル, すなわち

$$\chi = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \leq \chi_i \\ 0 & \text{if } x_i > \chi_i \end{cases}$$

とする. また, 便宜上,  $x \leq 0$  のときは  $x \in \mathbb{Z}^n$  と約束する.

関数  $f: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  が M凸関数であるとは,  $f$  が次の交換公理 (M-EXC) を満たすことである.

$$\begin{aligned} \text{(M-EXC)} \quad & \forall x, y \in \text{dom} f, \forall \chi \in \{0, 1\}^n \\ & \text{ある } x', y' \in \text{dom} f \text{ が存在し,} \\ & f(x') + f(y') \leq f(x) + f(y) \end{aligned}$$

ここで, 上記の不等式は,  $f|_{\mathbb{Z}^n}$  か  $f|_{\text{dom} f}$  が  $\mathbb{R}^n$  であるとき成立していると約束する.

式 (2) を離散関数  $f: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  に対して考えると, 接近後の点  $x', y'$  が整数ベクトルになるとは限らないため, 右辺が定義されないことがある. そこで, 座標軸に沿った接近による整数ベクトルを  $x', y'$  として採用すると, 交換公理は不等式 (2) の離散版とみなすことができる (図2 参照).

定義より, M凸関数  $f$  の実効定義域は成分和が一定の超平面の上に乗っていること, つまり, ある整数  $l$  に対して

$$\text{dom} f = \{x \in \mathbb{Z}^n \mid \sum_{i=1}^n x_i = l\}$$

が成り立つことが導かれる. したがって,  $\mathbb{R}^n$  変数の M凸関数  $f$  の定義域をある座標軸方向に沿って射影した  $\mathbb{R}^1$  変数の関数を考えても情報は失われない. M凸関数とを射影して得られる等価な概念は,  $M^1$ 凸関数と呼

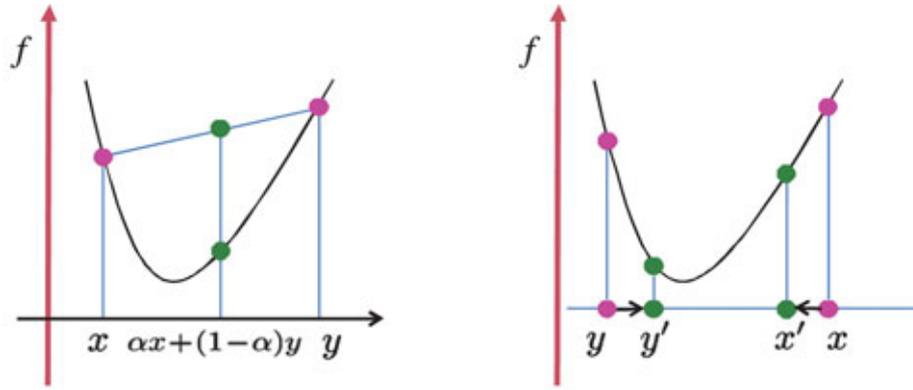


図1 凸関数の定義と性質

ばれている。両者に本質的な差はないので、M凸関数がM凸関数かは、場合に応じて使い分ければ良い。

M凸関数の最小値は整数格子点上で局所的に特徴付けられる。連続の凸関数のもつ良い性質の代表である「局所最小性=大域的な最小性」のM凸関数版は、下記の定理で与えられている。

**定理 2.1 (M凸関数最小性規準).**  $f: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  はM凸関数とする。任意の  $\mu \in \text{dom} f$  に対し

$$f(\mu) \leq f(\mu + \alpha v) + (1-\alpha)f(\mu - \alpha v) \quad \forall v \in \mathbb{Z}^n, \alpha \in [0, 1]$$

上記の局所最小性を判定するには、 $(\mu, v)$  回の関数値評価を行えば良い。

連続の凸関数が降下法により最小化が行えたように、定理 2.1 を用いて、最急降下法が提案された ([28, Sec.10.1.1])。最急降下法は擬多項式時間アルゴリズムであるので、スケールリング技法と近接定理を組み合わせることにより、効率的な多項式時間アルゴリズムも提案された [20][36][38] ([28, Sec. 10.1.2] も参照)。また、最近、筆者らのグループにより、連続緩和を用いたより現実的な高速アルゴリズムが開発された [22]。

### 2.3 L凸関数

本節では劣モジュラ性に基づくL凸関数を説明する。なお、L凸関数の「L」はLatticeの頭文字である。

ベクトル  $\mu, q \in \mathbb{Z}^n$  に対して、成分ごとに最大値、最小値をとって得られるベクトルを  $\mu \vee q, \mu \wedge q$  と書くことにし、 $\mathbb{1} = (1, \dots, 1), \mathbb{0} = (0, \dots, 0) \in \mathbb{Z}^n$  とする。関数  $\varphi: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  がL凸関数であることは  $\varphi$  が2条件

(SBF)  $\varphi(\mu \vee q) + \varphi(\mu \wedge q) \leq \varphi(\mu) + \varphi(q) \quad \forall \mu, q \in \mathbb{Z}^n$   
 (TRF)  $\varphi(\mu + \mathbb{1}) + \varphi(\mu - \mathbb{1}) \leq \varphi(\mu) + \varphi(\mu + \mathbb{e}_i) + \varphi(\mu - \mathbb{e}_i) \quad \forall \mu \in \mathbb{Z}^n$

を満たすことと定義される (図3 参照)。ここで不等式

(SBF) は、 $\mu, q$  が  $\pm \mathbb{1}$  であるときには成立していると約束する。

L凸関数は1方向の線形性 (TRF) をもつので、ある一つの座標値が0に等しい超平面に制限した  $n-1$  変数の関数を考えても本質的な情報は失われない。このように導出されるL凸関数と等価な概念はL<sup>+</sup>凸関数と呼ばれている。

L<sup>+</sup>凸関数は式(1)の離散版と言え、離散中点凸性により定義される。すなわち、関数  $\varphi: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  が離散中点凸性

$$\varphi(\mu + \alpha v) + \varphi(\mu - \alpha v) \leq \varphi(\mu) + \varphi(\mu + v) + \varphi(\mu - v) \quad \forall \mu \in \mathbb{Z}^n, v \in \mathbb{Z}^n, \alpha \in [0, 1]$$

をもつとき、 $\varphi$  はL<sup>+</sup>凸関数である。離散中点凸性を図4に示す。

L<sup>+</sup>凸関数は、並進劣モジュラ性により特徴付けることが可能である。すなわち、関数  $\varphi: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  が並進劣モジュラ性

$$\varphi(\mu + q) + \varphi(\mu - q) \leq \varphi(\mu) + \varphi(\mu + \mathbb{1}) + \varphi(\mu - \mathbb{1}) \quad \forall \mu \in \mathbb{Z}^n, q \in \mathbb{Z}^n \quad (3)$$

をもつとき、 $\varphi$  はL<sup>+</sup>凸関数である (ただし、 $\mathbb{Z}^n$  は非負整数全体を表す)。 $\mu = \mathbb{0}$  のとき、式(3)は劣モジュラ性に一致する。

$\mathbb{1}, \mathbb{0} \in \mathbb{Z}^n$  を集合  $\mathbb{N} = \{1, 2, \dots, n\}$  に対する特性ベクトルとする。L凸関数の最小性規準は以下の定理で与えられている。

**定理 2.2 (L凸関数最小性規準).** 関数  $\varphi: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  はL凸関数で、(TRF)において  $\mu = \mathbb{0}$  とする。任意の  $\mu \in \text{dom} \varphi$  に対し

$$\varphi(\mu) \leq \varphi(\mu + \mathbb{1}) + \varphi(\mu - \mathbb{1}) - \varphi(\mu + \mathbb{e}_i) - \varphi(\mu - \mathbb{e}_i) \quad \forall i \in \mathbb{N}$$

ここで、上記の局所最小性の判定は劣モジュラ集合関数

$$\mu \in \mathbb{N} : \varphi(\mu + \mathbb{1}) + \varphi(\mu - \mathbb{1}) - \varphi(\mu + \mathbb{e}_i) - \varphi(\mu - \mathbb{e}_i)$$

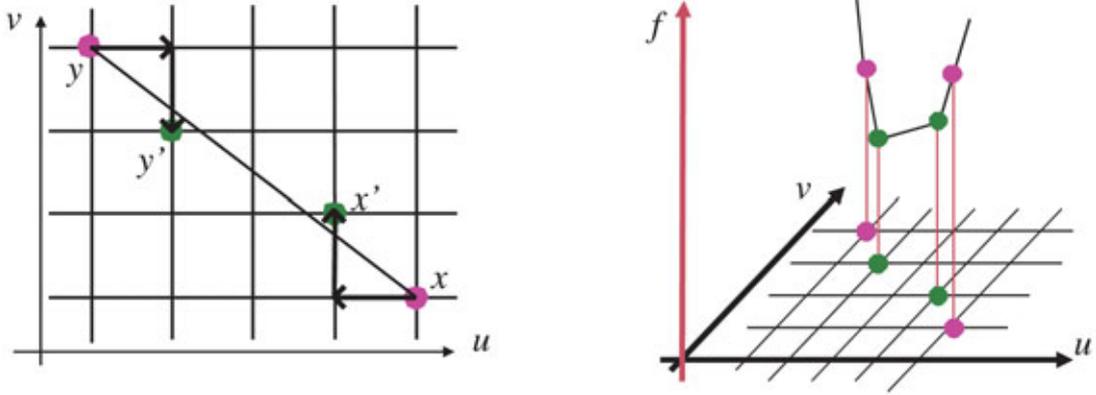


図2 M凸関数の定義

の最小化に帰着できる。すなわち、劣モジュラ集合関数最小化アルゴリズム [6][34][35] を用いて、多項式時間で調べることができる。

連続の凸関数が降下法により最小化が行えたように、定理 2.2 を用いて、最急降下法が提案された ([28,Sec.10.3.1])。最急降下法は擬多項式時間アルゴリズムであるので、スケーリング技法と近接定理を組み合わせることにより、効率的な多項式時間アルゴリズムも提案された ([28,Sec. 10.3.2])。また、最近、筆者らのグループにより、連続緩和を用いたより現実的な高速アルゴリズムが開発された [23]。

## 2. 4 組合せ構造を有する連続凸関数と連続 / 離散ハイブリッド凸関数

離散関数に対する M凸性, L凸性についてはすでに述べたが、これらの概念は連続変数を持つ関数にも拡張されている [29]。さらに、混合整数計画問題で出現する連続 / 離散ハイブリッド関数にも拡張されている [17][37]。これらの文献では、それぞれの関数のクラスに対する最小性規準も示されている。

まず、組合せ構造を有する連続凸関数について述べる。

関数  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  が次の (SBC-EXC) を満たすとき、M凸関数であるという：

(SBC-EXC) 任意の  $u, v \in \text{supp } f$  と  $u \cdot \text{supp } f \cap v \cdot \text{supp } f$  に対して、 $u \cdot \text{supp } f \cap v \cdot \text{supp } f$  と正の数  $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$  が存在し、

$$f(u) + f(v) + \alpha \sum_{i \in I} (u_i - v_i) + \beta \sum_{i \in J} (v_i - u_i) \leq f(u + \alpha e_i - \beta e_j) + f(v - \alpha e_i + \beta e_j)$$

連続関数に対する L凸性は以下のように定義される。関数  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  が次の並進劣モジュラ性 (SBC<sup>L</sup>) を満たしているとき、L凸関数であるという。

$$(SBC^L) \forall u, v \in \text{supp } f, \exists u', v' \in \mathbb{R}^n, \exists \alpha, \beta \in \mathbb{R}, \exists i, j \in [n], u' = u + \alpha e_i - \beta e_j, v' = v - \alpha e_i + \beta e_j, f(u') + f(v') \leq f(u) + f(v)$$

以下の議論では、連続関数に対する閉真凸性を仮定しておく。

関数  $f: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  が次の条件を満たすとき、ハイブリッド L凸関数であるという。

ある L凸関数  $\tilde{f}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ 、

ある正則行列  $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、ベクトル  $b \in \mathbb{R}^n$

が存在して、

$$f(u) = \tilde{f}(Au + b) \quad \forall u \in \mathbb{Z}^n, u \in \text{supp } f$$

が成り立つ。

ハイブリッド M凸関数を以下で定義する。関数  $f: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  が次の条件を満たすとき、ハイブリッド M凸関数であるという。

ある M凸関数  $\tilde{f}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ 、

ある正則行列  $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、ベクトル  $b \in \mathbb{R}^n$

が存在して、

$$f(u) = \tilde{f}(Au + b) \quad \forall u \in \mathbb{Z}^n, u \in \text{supp } f$$

が成り立つ。

連続変数に対する M凸性, L凸性により、連続凸性がこれまでより詳細に理解できるだけでなく、離散関数最小化において連続緩和を試みることができる [22][23]。また、離散凸解析の理論を混合整数計画問題へと発展することができた。

## 3. 離散凸関数の諸例

### 3. 1 在庫管理と離散凸関数

在庫管理の理論は、古くから多くの研究がなされており、理論面・実用面ともに多くの教科書、参考書 [1][4][5][14][39] が出版されている。現代の企業活動の管理手法のひとつで、原材料調達から生産・物流・販売を経て消費者に渡る全体プロセスを扱う SCM (Supply

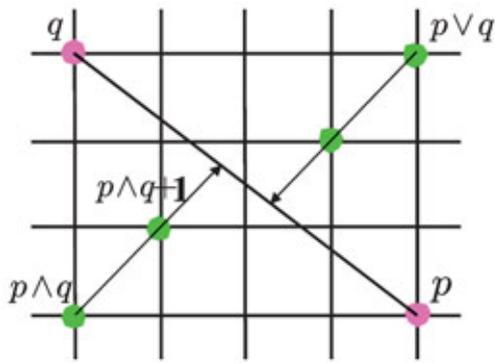


図3 L凸関数の定義

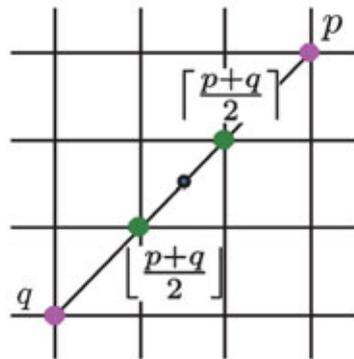
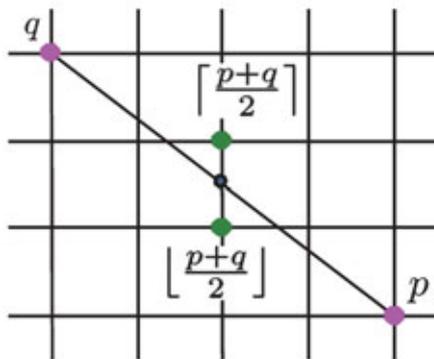
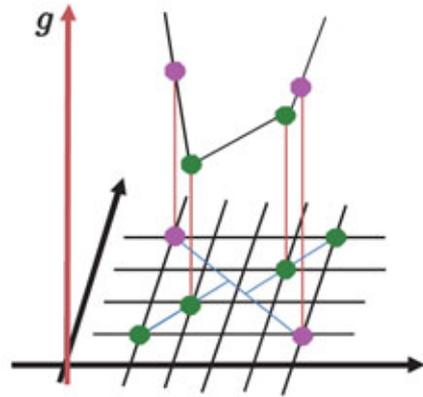


図4 離散中点凸性

Chain Management) を実践する上でも、在庫管理はその基礎的な中核の一端を担っている。

本節では、文献 [15] で解説された、離散凸関数の理論研究が、在庫管理理論にもたらした成果について述べる。

在庫理論は、製品の需要を効率的に満たすことを目的とし、在庫水準の管理を扱う。供給者側は、消費者の需要に応じるために必要な商品を仕入れたり、製品加工のための材料を発注し、それらを適当な期間、倉庫に貯蔵する。ここで、正の在庫量には保管在庫費用、負の在庫量には品切れ損失費用、そして発注して在庫量を増やすことには発注費用といった、各種の費用が生じる。また発注された商品や材料は通常、配達に時間を要する。この発注から受入れまでの時間はリードタイムといわれ、確定的な場合と確率的な場合に区別される。発注量や需要量が連続値をとるか離散値をとるかについても分類される。さらに、限りある施設、時間、資金による制約や、在庫の管理の仕方、ルールによる制約・費用など、在庫の問題を取り巻く要因は多数存在する。

たとえば、一口に品切れ損失費用といっても、扱う品目や在庫管理業務の運用方法により、未納注文（あるいは繰越注文）を許すバックオーダーモデルと、許さない売り損じ (lost-sales) モデルという異なるモデルとそれに伴う費用が考えられる。両者とも、予測よりも需要量が大きく、在庫切れを起こした場合はモデル化しているが、

バックオーダーモデルでは、在庫切れ時の需要は顧客が待ってってくれるため将来満たされるのに対し、売り損じモデルでは、顧客は他社に囲い込まれてしまうため、在庫切れ時の需要が満たされることはない。

在庫が多品種から成るとき、しばしば同時に管理調整を行う必要があり各品種を個別に取り扱うことができないため、一品種の場合と区別してモデル化される。また対象計画期間は一期間なのか、多期間なのか、あるいは無限期間なのか、という観点からも区別される。

以上の要因のいくつかを取り上げ、総費用を最小にするような在庫方式を検討する際に、離散凸関数とその理論が貢献していることを解説していく。

### 3.1.1 在庫管理に関連する離散凸性

すでに M/L 凸関数の定義と基本的な性質、最小化アルゴリズムについては前節で述べたが、離散凸関数に纏わる概念や定理はこの他にも多数存在する。ここでは在庫管理の研究に関係するものを追加で取り上げることにする。

点  $z \in \mathbb{R}^n$  の整数近傍を

$$N(z) = \{x \in \mathbb{Z}^n \mid x_i - z_i \in \mathbb{Z}, \forall i = 1, \dots, n\}$$

と定義する。関数  $f: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R}$  は任意の  $z, z' \in \mathbb{Z}^n$  と任意の  $\alpha \in \mathbb{R}, 0 \leq \alpha \leq 1$  に対して

を満たすとき、Miller の離散凸関数といわれる。

関数  $q: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}$  が  $L^*$ 凸関数であるとは

$$q(x) + q(y) \geq q(x-1) + q(y+1) \quad (4)$$

となる  $L^*$ 凸関数  $q(x), q(y), q(x-1), q(y+1)$  が存在することである。 $L^*$ 凸関数は Miller の離散凸関数である。

連続空間上の  $L^*$ 凸関数、 $L^*$ 凸関数に対しては、通常のヘッセ行列を用いて  $L^*$ 凸性の特徴付けができる [30]。しかし、離散空間上の  $L^*$ 凸関数、 $L^*$ 凸関数に対してはそのまま適用することはできない。次に、 $L^*$ 凸性に対する離散ヘッセ行列の概念とこれを用いた新たな  $L^*$ 凸性の特徴付け [19] を紹介する。

離散関数  $q: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}$ 、 $p \in \mathbb{Z}$ 、 $i, j = 1, 2, \dots, n$  に対して、

$$\Delta_{i,j} q(p) = q(p + \delta_{ij}) - q(p - \delta_{ij})$$

と定義する。ここで  $\delta_{i,j}$  は  $\mathbb{Z}$  における  $\delta_{i,j}$  方向への 2 次前進差分を、 $\delta_{i,j}$  は  $\delta_{i,j}$  方向への 2 次前進差分を意味している。離散関数  $q: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}$  と  $\mathbb{Z}$  に対して、離散ヘッセ行列  $H_{i,j}(q, p) = H_{i,j}(q, p)$ 、 $i, j = 1, 2, \dots, n$  を以下で定義する：

$$H_{i,i}(q, p) = \Delta_{i,i}^2 q(p) - \Delta_{i,i} q(p)$$

$$H_{i,j}(q, p) = \Delta_{i,j} q(p) - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta_{i,k} q(p)$$

$$H_{j,i}(q, p) = \Delta_{j,i} q(p) - \sum_{k=1}^{j-1} \Delta_{j,k} q(p)$$

上記の定義と、連続変数の凸解析におけるヘッセ行列が、同等な基本的性質を備えていることが確認されている。よって、ヘッセ行列の離散版というに相応しい。次の定理は、 $L^*$ 凸関数に対する離散ヘッセ行列による特徴付けを与える。

定理 3.1  $q: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}$  に対して、次の 2 条件は同値である。

- (a)  $q$  は  $L^*$ 凸関数。
- (b) 各  $p \in \mathbb{Z}$  に対して、 $H_{i,j}(q, p)$  は以下を満たす。

$$H_{i,i}(q, p) \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

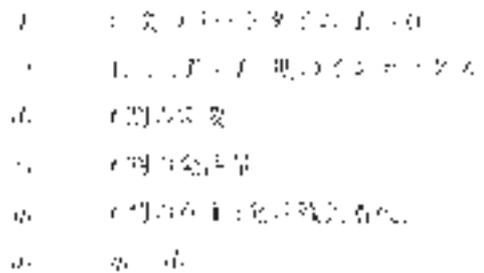
$$\sum_{i=1}^n H_{i,i}(q, p) \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

連続  $L^*$ 凸関数の特徴づけは、通常のヘッセ行列が (5)、(6) を満たすことである [30]。

### 3.1.2 一品種モデル

売り損じを考慮した一品種の離散時間モデル [9][24][40] を考える。需要量、発注量、在庫量が連続値をとると仮定したモデルに対して、連続空間上の通常の凸関数との関連がこれまで論じられてきたが、[40] で連続  $L^*$ 凸関数とその理論に基づいた解析がなされている。さらに、需要量、発注量、在庫量について整数性を仮定したモデルに対しても、同様の議論が展開できることに言及している。

まずは需要量や発注量が連続値をとるものとする。各期では、(i) その期に納入されることになっていた発注残（発注してあったが、正のリードタイムにより納入されなかった未納入残）の納入、(ii) 新規の発注、(iii) 需要の発生、の順で起こるものとする。



として、 $t$  期のシステムの状態を  $n$  次元ベクトル  $x_t = (x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^n) \in \mathbb{R}^n$  で表現する。このとき、次期  $t+1$  期の状態  $x_{t+1} \in \mathbb{R}^n$  は

$$x_{t+1} = (1-\alpha)A x_t + \alpha \begin{pmatrix} z_{t+1} \\ q_{t+1} \\ -d_{t+1} \\ -h_{t+1} \\ -g_{t+1} \end{pmatrix}$$

と表わされる。

$c_i$  を単位量当たりの発注費用、 $h_i$  を単位量当たりの在庫保管費用、 $g_i$  を単位量当たりの売り損じペナルティとする。将来のコストは、各期に割引率  $\beta, \dots, \beta$  をかけて割り引かれるものとする。当然、割引を考えない場合は  $\beta = 1$  とすればよい。

$q_t$  が与えられている時、 $t$  期末の在庫保管あるいは売り損じにより生じるコストは

$$q_t(x_t) = \sum_{i=1}^n (c_i + h_i x_t^i + g_i \max\{0, -x_t^i\})$$

であるので、 $q_t$  が与えられている時、 $t$  期初（発注残到着直後）に見積もれるコストの期待値は  $\sum_{i=1}^n (c_i + h_i x_t^i + g_i \max\{0, -x_t^i\})$  なる。

$J_t(x_t)$  を、 $t$  期に状態  $x_t$  から始めた最適費用（最適な発注を行った際の総費用）と定義すると、次の漸化式が成り立っている：

† ここでは対象計画期間が有限であるモデルを考えている。無限期間の場合は、割引率は 1 より小さい ( $\beta < 1$ ) と仮定する [4]。

$$f(x) = \sum_{j=1}^n \left( \frac{c_j}{x_j} + \frac{d_j}{x_j} \right) \quad (7)$$

$$f(x) = \sum_{j=1}^n \left( \frac{c_j}{x_j} + \frac{d_j}{x_j} \right) \quad (8)$$

有限の期間  $T$  に対して、最後の発注は  $T$  期になされるが、在庫保管あるいは売り損じにより生じるコストは  $T$  期まで計上されるとする。つまり、 $f(x) = \sum_{j=1}^n \left( \frac{c_j}{x_j} + \frac{d_j}{x_j} \right)$  と仮定する。この  $f(x)$  を最適政策、すなわち、(8) 式の右辺で最小値を達成する  $x$  とする。

これまで、通常の凸関数であることは知られていたが、 $f$  と  $f_j$  に対して、Zipkin [40] は変数変換を施すことにより、これらの持つ  $L^*$  凸性を示している。その証明は  $f$  に関する帰納法による。さらにこの事実を利用し、 $f$  の非増加性と下界を導いている。また、需要がマルコフ変調型である場合や、リードタイムが確率的に与えられている場合、顧客にクラス分けが存在しコストに差が生じる場合などの各種拡張モデルについても議論している。さらに、需要量、発注量、在庫量が整数値をとるモデルに対しても、同様の議論が展開できることに言及している。

### 3.1.3 多品種・バックオーダーモデル

Miller [13] は需要量、発注量が離散値をとるバックオーダーを考慮した多品種モデルを扱い、その在庫費用関数最小化のため、「Miller の離散凸関数」を定義した。離散凸解析研究の進展により、この在庫費用関数が  $L^*$  凸関数であることもわかった。離散凸関数と密接な関係にあるこのモデルと、需要量、発注量が連続値をとるモデルを、本節では解説する。

品種数が  $n$  で、バックオーダーを許し、バックオーダーによる罰金とスペアの購入コストの和をできるだけ減らしたいという在庫モデルを考える。  $r_j$  を、品種  $j$  の単価とし、  $x_j \in \mathbb{Z}$  を品種  $j$  の発注量とする。  $F_j(x_j)$  は品種  $j$  の需要に対する非負離散確率変数の累積分布関数で、  $F_j(x_j) = \sum_{k=0}^{x_j} p_{j,k}$  を用いて

$$F_j(x_j) = \sum_{k=0}^{x_j} p_{j,k}$$

と書き表されるものとする。このモデルでは  $x_j \in \mathbb{Z}$  で

$$x_j \geq 0$$

である。

次の関数  $f: \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{R}$  が最小化すべき目的関数である:

$$f(x) = \sum_{j=1}^n \left( r_j \sum_{k=0}^{x_j} p_{j,k} + \frac{c_j}{x_j} \right) + \lambda \sum_{j=1}^n c_j \quad (9)$$

ここで  $\lambda \in \mathbb{R}$  とする。

†  $f$  の最小値を達成する  $x$  が複数個あった場合は、最小の  $x$  を  $x^*$  とする。

(9) 式の最初の項は定常状態におけるバックオーダーが最大となる品種のバックオーダー量の期待値を表している。(9) 式の第二項は、スペアの購入コストを表している。  $\lambda$  をバックオーダーによる罰金の逆数として、二つの項を結合し、(9) 式は、バックオーダーによる罰金とスペアの購入コストの和を表すことになる。

(9) 式は「Miller の離散凸関数」である [13]。

(9) 式に対して、  $f_j(x_j) = \sum_{k=0}^{x_j} p_{j,k} + \frac{c_j}{x_j}$  の非負性が示せるので、定理 3.1 より、  $f_j$  は  $L^*$  凸関数である [19]。このことから、  $f$  の最小化は  $L^*$  凸関数の最小化アルゴリズム [28, Sect.10.3] を用いることで、 [13] の方法より効率的に行えることがわかる。

Miller は、多品種モデルに対し、在庫量が離散値をとる場合だけでなく、連続値をとる場合も議論している [12]。 [13] と同様に、品種  $j$  に対する需要の非負連続確率変数の累積分布関数を  $F_j(x_j)$  とする。品種  $j$  に対する連続値発注量を  $x_j$  であらわすことにする。この論文で、最小化すべき目的関数

$$f(x) = \sum_{j=1}^n \left( r_j \int_0^{x_j} F_j(x_j) dx_j + \frac{c_j}{x_j} \right) \quad (10)$$

(バックオーダーが最大となる品種のバックオーダーの期待値) が  $x_j$  について凸であることを示し、

$$f(x) = \sum_{j=1}^n \left( r_j \int_0^{x_j} F_j(x_j) dx_j + \frac{c_j}{x_j} \right)$$

とおくと、  $f(x)$  のヘッセ行列が

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n \frac{r_j}{x_j^2} & & & & \\ & \sum_{j=1}^n \frac{r_j}{x_j^2} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \sum_{j=1}^n \frac{r_j}{x_j^2} & \\ & & & & \sum_{j=1}^n \frac{r_j}{x_j^2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

となることを示している。明らかに  $r_j > 0$  は非負であり、  $\sum_{j=1}^n \frac{r_j}{x_j^2} > 0$  より  $r_j$  も非負なので、これは、ヘッセ行列の非対角非正性 (5) と、対角優位性 (6) に他ならない。すなわち、離散凸解析の成果で明らかになった事実より、この目的関数が連続の  $L^*$  凸関数であることが導ける。

### 3.2 資源配分への応用

資源を色々な活動にできるだけ公平に配分したり、また配分によって生じるコストを最小にしたいという要求はしばしば生じる。たとえば、選挙の際に生じる一票の重みの格差をできるだけ小さくするように選挙定数を配分する場合や、生産計画を構築する場合が考えられる。

その他、負荷配分、株の取引におけるポートフォリオ取引など、様々な分野に応用される。このようにコストを最小にするような資源の最適な配分を考える問題を資源配分問題という。

1953年に、Koopman [11] は、物体の位置がランダムな値をとる探索問題における、最適な労力の分配の研究を行った。これが資源配分問題の最初の研究である。それ以来、あらゆる目的関数や、制約条件、連続値をとるか離散値をとるかという変数の種類に対して、効率の良い算法が考えられてきた。それと同時に新しい応用分野も開発されてきている。また、資源配分問題は非線型計画問題や非線型整数計画問題の特殊な形として扱われている。資源配分問題に関する詳細な解説は [10] に述べられている。

### 3.2.1 資源配分問題と離散凸関数

見通しをよくするため、まずは最も簡単な形の資源配分問題をここに記述する。資源配分問題の最も簡単な形は、資源の総量が  $N$  であるという制約のもとで、分離可能凸関数であらわされる配分に伴うコストを最小化するという分離凸型資源配分問題である。

$$\begin{aligned}
 & \text{SC-RESOURCE} \\
 & \text{Minimize } \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \\
 & \text{subject to } \sum_{i=1}^n x_i = N \\
 & \quad \quad \quad x_i \geq 0, \forall i \in \{1, \dots, n\}
 \end{aligned} \tag{12}$$

ここで、 $f_i(x_i)$  は、配分先  $i = 1, \dots, n$  に配分量  $x_i$  を配分した際に生じるコストで、一変数凸関数とする。問題 SC-RESOURCE に対して、貪欲解法である逐次増分法など、様々なアルゴリズムが提案されてきた。さまざまな応用分野への展開のため、SC-RESOURCE の一般化が求められる。ここで、SC-RESOURCE の目的関数である分離凸関数は M 凸性を有しており、問題 SC-RESOURCE は M 凸関数最小化問題であることがわかる。すなわち、M 凸関数最小化問題は SC-RESOURCE の一般化である。この事実より、資源配分問題に対して離散凸解析理論によるアプローチがなされてきた [21] [22]。

### 3.2.2 混合整数整数型資源配分問題

実社会で現れる問題を考える際、配分する資源が配分先によって連続値をとる場合と離散値をとる場合の両者が混在することがある。たとえば、複数の発電施設から電力の調達を行う際、施設毎の契約内容・設備の差により、調達量を連続値で設定できる施設と離散値でしか設

定できない施設が混在し得る。そこで、連続/離散ハイブリッド M 凸関数を用い、非線形混合整数計画問題として定式化し、最適化を行うことを試みる。

#### HYBRID-RESOURCE

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } f(x, y) \\
 & \text{subject to } \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m y_j = N \\
 & \quad \quad \quad x_i \geq 0, \forall i \in \{1, \dots, n\} \\
 & \quad \quad \quad y_j \in \{0, 1, \dots, u_j\}, \forall j \in \{1, \dots, m\} \\
 & \quad \quad \quad x_i, y_j \in \mathbb{R}^+
 \end{aligned} \tag{13}$$

ここで、 $f(x, y)$  は 2.4 節で述べた連続/離散ハイブリッド M 凸関数とし、 $x_i$  は配分量の下限、 $u_j$  は配分量の上限として与えられているものとする。

再び、電力調達の問題に話を戻そう。日本の電力部分自由化は、特別高圧需要家を対象に 2000 年にスタートし、電気事業法の改正による電力自由化により、従来の供給区域を越えた既存電力会社同士による販売競争や、他業種の電力販売への新規参入が可能になった [33]。このような状況下では、複数の発電施設から所望の電力量を調達することが考えられ、その際の調達コストをできるだけ抑えたいという要求が生じるだろう。これは、HYBRID-RESOURCE でモデル化されることを以下に示す。簡単のため、HYBRID-RESOURCE における目的関数  $f(x, y)$  が分離凸型の連続/離散ハイブリッド M 凸関数である場合を取り上げる。すなわち、

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{j=1}^m g_j(y_j)$$

であらわされる場合である。決定変数  $x_i, y_j$  は各発電施設  $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$  から調達する電力量を表すものとし、 $N$  が調達したい電力量の総量である。 $f_i(x_i)$  は各発電施設における、調達量に対するコストを表し、これは燃料費特性などを要因として決定している。このコスト関数は一般に単調増加凸関数であらわされる（供給量に余裕がある場合は安価なレートで取引されるが、余裕がない場合はより高いレートで取引されるという自然な状況を想像していただきたい）。各発電施設の制約により、取引量に実数値が認められている施設  $i = 1, \dots, n$  と、離散値での取引しか認めない発電施設  $j = 1, \dots, m$  の混在を含めて、この定式化ではモデル化がなされている。なお、ここではコスト関数が分離凸型の場合を取り上げて説明したが、M 凸関数は分離凸型よりも広いクラスなので、発電施設間の相互作用を考慮に入れなくてはならないより一般的な場合も取り扱うことができる。

このように、HYBRID-RESOURCE でモデル化できるので、連続 / 離散ハイブリッド M 凸関数最小化を行えば、コストを抑えた調達配分が決定できる。文献 [17] では、連続 / 離散ハイブリッド M 凸関数に対する最小性規準が示されている。この最小性規準と連続凸関数最小化アルゴリズムを組み合わせることで、新たに連続 / 離散ハイブリッド M 凸関数最小化アルゴリズムを構築できるだろう。

#### 4. おわりに

本稿では、離散凸関数の理論に基づいた最適化アルゴリズムに関する研究と、その様々な応用について触れてきた。これまでに提案されてきた応用だけでなく、新たな応用の可能性として、電力自由化に伴い生じる電力調達問題への展開についても述べた。離散凸解析理論に基づくアプローチは、本稿で述べた以外にも、ネットワークフローへの展開 [7][8][18][25] や、離散凸関数の各種拡張など、より深遠で拡大された分野へと続いている。継続的な理論研究の進展とともに、開発したアルゴリズム・ソルバーに対するユーザビリティの整備が、今後の応用の充実の為に課された課題である。

#### 参考文献

- [1] K. Arrow, S. Karlin, and H. Scarf (eds.), "Studies in the Mathematical Theory of Inventory and Production," Stanford University, Stanford, 1958.
- [2] V. Danilov, G. Koshevoy, and K. Murota, "Discrete Convexity and Equilibria in Economies with Indivisible Goods and Money," *Math. Social Sci.*, Vol. 41, pp. 251—273, 2001.
- [3] 福島雅夫, "非線形最適化の基礎," 朝倉書店, 2001.
- [4] D.P. Heyman and M.J. Sobel (eds.), "Stochastic Models," *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 2, Elsevier Science Publishers, 1990. 伊理正夫, 今野浩, 刀根薫 (監訳), "確率モデルハンドブック," 朝倉書店, 1995.
- [5] 人見勝人, "新・生産管理工学," コロナ社, 1997.
- [6] S. Iwata, L. Fleischer, and S. Fujishige, "A Combinatorial Strongly Polynomial Algorithm for Minimizing Submodular Functions," *J. ACM*, Vol. 48, pp. 761—777, 2001.
- [7] S. Iwata, S. Moriguchi, and K. Murota, "Capacity Scaling Algorithm for M-Convex Submodular Flow," *Mathematical Programming*, Vol.103, No.1, pp. 181—202, 2005.
- [8] S. Iwata and M. Shigeno, "Conjugate Scaling Algorithm for Fenchel-type Duality in Discrete Convex Optimization," *SIAM J. Optim.*, Vol. 13, pp. 204—211, 2003.
- [9] S. Karlin and H. Scarf, "Inventory Models of the Arrow-Harris-Marschak Type with Time Lag," Chapter 10 in [1].
- [10] N. Katoh and T. Ibaraki, "Resource Allocation Problems," in: D.-Z. Du and P. M. Pardalos (eds.), *Handbook of Combinatorial Optimization*, Vol. 2, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- [11] B.O. Koopman, "The Optimum Distribution of Effort," *Operations Research*, Vol. 1, pp. 52—63, 1953.
- [12] B.L. Miller, "A Multi-Item Inventory Model with Joint Backorder Criterion," *Operations Research*, Vol. 19, pp.1467—1476, 1971.
- [13] B.L. Miller, "On Minimizing Nonseparable Functions Defined on the Integers with an Inventory Application," *SIAM J. on Appl. Math.*, Vol. 21, pp.166—185, 1971.
- [14] 水野幸男, "在庫管理入門," 日科技連, 1974.
- [15] 森口聡子, "—OR 研究の最前線 - 在庫管理と離散凸関数," *オペレーションズ・リサーチ*, Vol. 52, No.7, pp. 416—420, 2007.
- [16] 森口聡子, "離散凸解析 - 離散最適化に対するボトムアップ的アプローチ -," *オペレーションズ・リサーチ*, Vol. 52, No.9, pp.526—530, 2007.
- [17] 森口聡子, 原辰次, 室田一雄, "連続 / 離散ハイブリッド M 凸関数に関する一考察," *システム制御情報学会論文誌*, Vol. 20, No. 2, pp. 84—86, 2007.
- [18] S. Moriguchi, K. Murota, "Capacity Scaling Algorithm for Scalable M-convex Submodular Flow Problems," *Optim. Methods Softw.*, Vol. 18, pp.207—218, 2003.
- [19] S. Moriguchi and K. Murota, "Discrete Hessian Matrix for L-convex Functions," *IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. E88-A, pp. 1104—1108, 2005.
- [20] S. Moriguchi, K. Murota, and A. Shioura, "Scaling Algorithms for M-convex Function Minimization," *IEICE Transactions on Fundamentals*, Vol. E85-A, pp. 922—929, 2002.
- [21] S. Moriguchi and A. Shioura, "On Hochbaum's Proximity-Scaling Algorithm for the General Resource Allocation Problem," *Mathematics of Operations Research*, Vol. 29, pp. 394—397, 2004.

- [22] S. Moriguchi, A. Shioura, and N. Tsuchimura, "M-convex Function Minimization by Continuous Relaxation Approach – Proximity Theorem and Algorithm –," Mathematical Engineering Technical Reports METR 2008-38, University of Tokyo, 2008.
- [23] S. Moriguchi and N. Tsuchimura, "Discrete L-Convex Functions Minimization Based on Continuous Relaxation," Pacific Journal of Optimization, to appear.
- [24] T. Morton, "Bounds on the Solution of the Lagged Optimal Inventory Equation with no Demand Backlogging and Proportional Costs," SIAM Review, Vol. 11, pp.572–596, 1969.
- [25] K. Murota, "Submodular Flow Problem with a Nonseparable Cost Function," Combinatorica, Vol. 19, pp. 87–109, 1999.
- [26] K. Murota, "Matrices and Matroids for Systems Analysis," Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [27] 室田一雄, "離散凸解析," 共立出版, 2001.
- [28] K. Murota, "Discrete Convex Analysis," SIAM, 2003.
- [29] K. Murota and A. Shioura, "Conjugacy Relationship Between M-convex and L-convex Functions in Continuous Variables," Mathematical Programming, Vol. 101, pp. 415–433, 2004.
- [30] K. Murota and A. Shioura, "Fundamental Properties of M-convex and L-convex Functions in Continuous Variables," IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E87-A, pp.1042–1052, 2004.
- [31] K. Murota and A. Tamura, "New Characterizations of M-convex Functions and Their Applications to Economic Equilibrium Models with Indivisibilities," Discrete Appl. Math., Vol. 131, pp.495–512, 2003.
- [32] K. Murota and A. Tamura, "Application of M-convex Submodular Flow Problem to Mathematical Economics," Japan J. Indust. Appl. Math., Vol. 20, pp. 257–277, 2003.
- [33] 岡崎志朗, シナジー・ベンチャー企業エネットの企業理念とビジネス展望, オペレーションズ・リサーチ, Vol.46, No.8, pp.416–422, 2001.
- [34] J.B. Orlin, "A Faster Strongly Polynomial Algorithm for Submodular Function Minimization," in Integer Programming and Combinatorial Optimization, 12th International IPCO Conference, Ithaca, NY, USA, June 25-27, 2007, Proceedings, Lecture Notes in Computer Science 4513, eds. M. Fischetti and D. Williamson, pp. 240–251, Springer, Berlin, 2007.
- [35] A. Schrijver, "A Combinatorial Algorithm Minimizing Submodular Functions in Strongly Polynomial Time," J. Comb. Theory, Ser. B, Vol. 80, pp.346–355, 2000.
- [36] A. Shioura, "Fast Scaling Algorithms for M-convex Function Minimization with Application to Resource Allocation Problem," Discrete Appl. Math., Vol. 134, pp. 303–316, 2003.
- [37] 高松吉郎, 原辰次, 室田一雄, "連続/離散ハイブリッド凸最適化とその最適性規準," システム制御情報学会誌, Vol. 17, No. 9, pp. 47–49, 2004.
- [38] A. Tamura, "Coordinatewise Domain Scaling Algorithm for M-convex Function Minimization," Math. Prog., Vol. 102, pp. 339–354, 2005.
- [39] P.H. Zipkin, "Foundations of Inventory Management," McGraw-Hill, New York, 2000.
- [40] P.H. Zipkin: "On the Structure of Lost-Sales Inventory Models," Operations Research, Vol. 56, No. 4, pp. 937–944, 2008.

# シナリオの図解化による業務フロー分析

森本 祥一\*・中鉢 欣秀\*

## Scenario-Based Visual Analysis for Business Process Modeling

Shoichi Morimoto\* and Yoshihide Chubachi\*

### Abstract

A systematic design method which analyzes workflow scenarios to obtain software requirements as use case models has been proposed. This paper extends the method so that it can model not only use cases but also business processes. Moreover, we show a comparison experiment of the analysis and its quantitative results. With the results, we evaluate the advantage and the effects of our proposed process. The method enables requirement analyzers, software designers, and customers to smoothly communicate. The customers themselves can schematize their workflow with the method. The customers can also join and understand system design, thus they can easily decide the specification of developing systems.

Keywords: Business Process Modeling, KJ Method, SBVA Method

### 1. はじめに

要求分析は、ソフトウェア開発の初期段階で行われるもので、ソフトウェアで何を実現すべきかを明らかにする作業である。この要求分析の質の良否がソフトウェア開発全体に大きく影響を与えるため、最も重要な作業となる [9]。要求分析フェーズでは、ユーザの問題領域を分析し、ソフトウェアの要求仕様を決定する。この要求分析を体系的に行う技法として、オブジェクト指向による分析 [3] がある。オブジェクト指向開発プロセスでは、問題領域を UML でモデル化し理解・分析して要求仕様を体系的に決定する [5]。しかしながら、この方法ではオブジェクト指向により仔細にドメイン分析を行わなければならない。要求分析が上手くいくかどうかは、その分析者の能力に依存する、いわゆる『職人芸』となっている。

このような問題を解決するため、システム自然言語により業務モデルを記述したシナリオを用いて、ソフトウェアの発注者である顧客とソフトウェア開発者が協調的に要求分析を進めていく SBVA 法が提案された [13]。SBVA 法は、新規にシステムを導入し業務改善を図ろうとする顧客の業務を UML よりも記述し易い自然言語で記述して、顧客と分析者が顧客の問題領域を図解化して整理し、相互理解を深めながら新規システムへの要求仕様を決定していく。これにより、業務シナリオからソフトウェア化すべき範囲を決定した上で、ソフトウェアの利用者であるアクターとソフトウェアが提供する機能

(ユースケース) を識別し、ユースケース図を得ることができる。

一方で、ユーザの問題領域を分析しシステムとユーザの相互作用、つまりユースケース図が定義できれば、これを詳細化することでシステム利用のためのユースケースシナリオを得ることができ、システム導入後の業務フロー設計へと繋がる [12]。しかしながら、現状では SBVA 法の分析ではユースケース分析しか行うことが出来ない。

よって本研究では、SBVA 法を拡張し自然言語によるシナリオを元にして、システムとユーザ領域の相互作用とシステム導入後の業務フローを一括して体系的に分析できるようにする。

本研究が実現することにより、UML による緻密なドメイン分析に精通していない技術者でも、自然言語によるシナリオを用いて、ユースケースから業務フローまでを正確に分析できるようになる。

更に、ユーザの問題領域の分析・把握からユーザとシステムの境界・相互作用の分析、業務フロー分析までを一貫して行うことにより、顧客と開発者の双方が俯瞰的に開発プロジェクトを捉えることができ、成功を促す効果が期待できる。

### 2. SBVA 法による業務フロー分析

従来の SBVA 法では、まずソフトウェアの発注側である顧客自身が記述者となり、現在の業務 (問題領域)

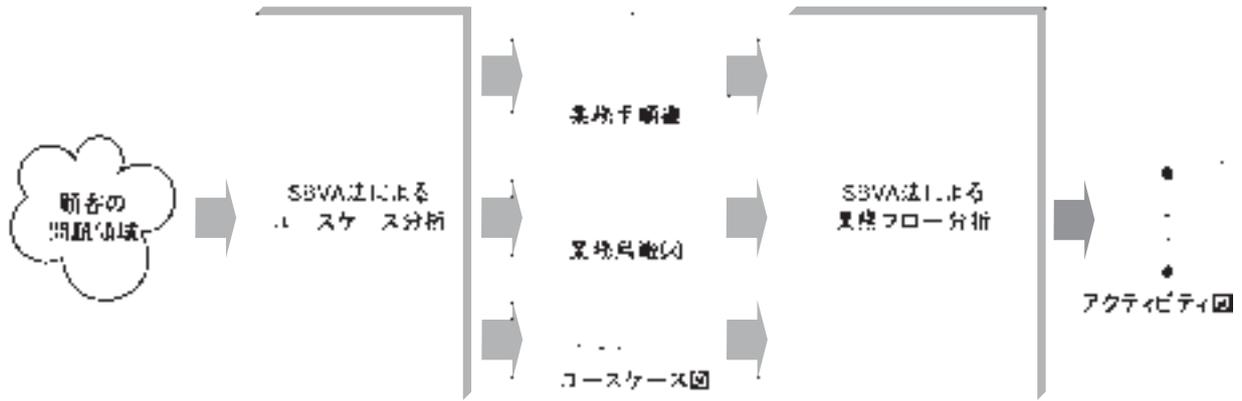


図 1 SBVA 法による分析の流れ

の流れを SBVA 法が定めたルールに従ってシナリオ化する。出来上がったワークフローシナリオを業務手順書と呼ぶ (図 2)。受注側である分析者は、この業務手順書の各作業記述文における名詞 (主語・述語・目的語) と動詞の関係を図式化し、業務鳥瞰図という図を作成する (図 3)。名詞要素は長方形、動詞要素は楕円で表す。主語である名詞と動詞は実線で結び、それ以外の名詞と動詞は破線で結ぶ。同じ名詞要素については 1 つのみ作成する。その後は、業務鳥瞰図を編集しながら顧客の問題領域に対して顧客と分析者が合意を形成しつつ分析を進めていき、最終的には業務鳥瞰図上にシステム化する境界を設定し、そこからアクターとユースケースを得てユースケース図を導出できる。SBVA 法によるユースケース分析の詳細については、付録 A.1 に掲載した。

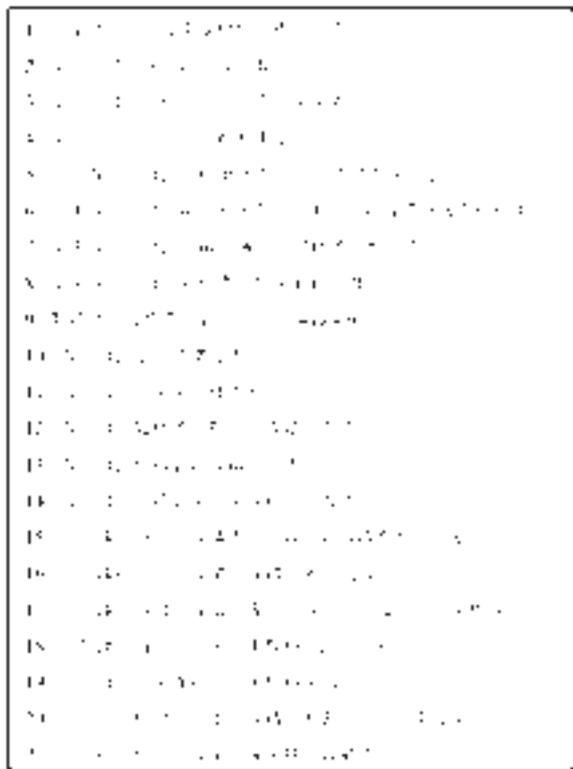


図 2 業務手順書の例

本稿では、この SBVA 法によるユースケース分析の成果物として得られた業務手順書、業務鳥瞰図、ユースケース図を入力とし、業務フロー分析を行うプロセスを新たに提案する (図 1)。

### 2. 1 業務フロー分析プロセスの成果物

UML により業務フローを記述するには、通常相互作用図やアクティビティ図が用いられる。相互作用図は、オブジェクト同士の自律分散協調動作をモデル化したものであり、アクティビティ図は、一般的にビジネスプロセスモデリング、1 つのユースケースまたは利用シナリオに記述されたロジックのモデリング、ビジネスルールの詳細ロジックのモデリングなどに使われる [1]。アクティビティ図は、ひとまとまりの業務や処理を表すために関連する複数のアクティビティを時間的に順序だてて表現する。アクティビティとは、業務や処理を構成する 1 単位に相当する。また、アクターごとにレーンを設定することができ、これによって各アクティビティの実行責任主体やオブジェクトのやりとりを明示できる。

本研究では、自然言語によるシナリオとアクティビティ図の関係に着目し、SBVA 法による業務フロー分析の成果物として、UML の振る舞い図のうちアクティビティ図を得ることを目標とした。

### 2. 2 業務手順書の拡張

SBVA 法では、業務手順書の記述者にとって作業が簡単になるよう例外処理や繰り返し、分岐といった論理構造をあえて導入していない。例えば、業務フローの 1 ~ 5 までが同じで 6 以降が別の処理になるのであれば、1 ~ 5 までの作業記述文が全く同じで 6 以降の文が異なる 2 つの業務手順書を作成する。その後、業務鳥瞰図を作成するプロセスにおいて、全ての業務手順書を統合して 1 つの業務鳥瞰図を描く。そのため、同じ意味として使われている名詞と動詞は 1 つの要素としてまとめられるため、重複した作業記述文の要素が業務鳥瞰図上に現れ



図3 業務鳥瞰図の例

ることではない。

現状の記述ルールでは、例外フローが多いほど同じ作業記述文を何度も書くことになる。また、条件による分岐なのか並列処理なのかを判断することができない。更に、複数枚の業務手順書に渡ってフローが書かれていると、業務全体の流れを把握することが難しい。よって、SBVA法による業務フロー分析ではまず以下のルールにより複数の業務手順書をマージして論理構造を得ることから始める。

- 全てのフローを1つの業務手順書に記述し、重複する作業記述文は省略する。
- 条件により分岐する場合には、作業記述文の前に[]で条件を記述する。
- メインフローのどの部分の例外であるか、分岐が複数あった場合にどのフローであるかを示すため、分岐先の作業記述文の番号は、対応するメインフローの番号の後にフローごとに同じアルファベットの小文字をaから順に付与する。
- 例外フロー終了後メインフローに戻る場合は、最後の作業記述文にメインフローのどの部分に戻るのかを明示する。

以上のルールを適用し、業務手順書を作成した場合の様子を図4にまとめた。

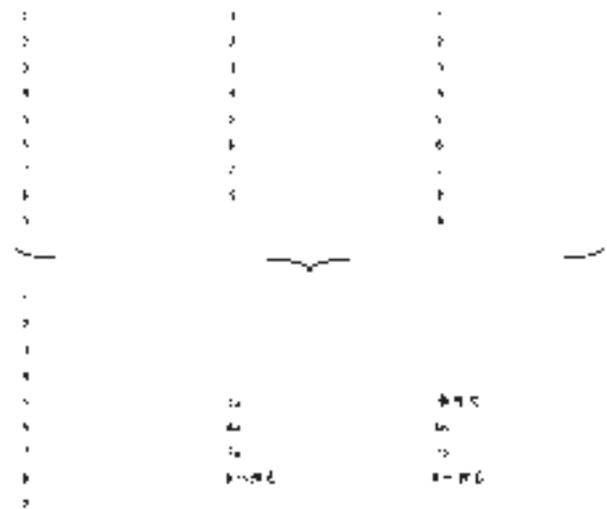


図4 業務手順書の統合

## 2.3 業務フロー分析プロセス

本稿で提案する業務フロー分析プロセスは、処理1：配置、処理2：連結、処理3：分離、処理4：展開の4つの手順からなる。以下にその詳細を示す。

### 処理1：配置

まず、業務手順書における各作業記述文の主語をレーンとし、アクティビティ図上に配置する。同じ主語につ

いては1つのみレーンを作成する。そして、業務手順書におけるフローの番号と主語以降の文を一旦そのままアクティビティとし、対応する主語のレーンに番号順に配置する。以上が処理1：配置である。

**処理2：連結**

次に、処理2：連結を行う。1番のアクティビティの上に開始ノードを作成し、そこから番号順にアクティビティを上から順に矢印で結んでいく。まずは分岐は無視しメインフローのアクティビティを最後まで結んでしまう。最後に終了ノードを描き、最後の作業記述文から作成したアクティビティと結ぶ。

続いて分岐先のアクティビティを結んでいく。アクティビティに付いている番号が5a, 5bのように分岐している部分を見る。[]書きで条件が付いていない場合にはフォークを描き、条件が付いていた場合にはひし形を描き条件文を付ける。分岐している1つ前のアクティビティから出ている矢印をフォークまたはひし形と繋ぐ。そして、それぞれ分岐先のアクティビティと繋ぎ、以降のアクティビティについては先程と同様に順番に繋いでいく。途中、更に分岐があった場合は無視し、同じアルファベットが付いた番号のアクティビティを最後まで結んでいく。分岐の最後のアクティビティに、戻り先の

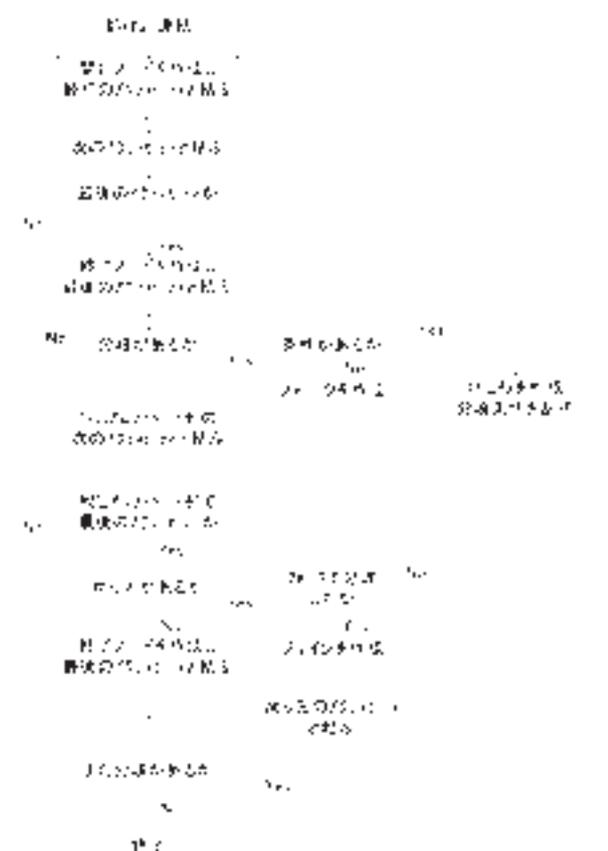


図5 処理2：連結のフローチャート

番号が記述されていない場合は、そこでフローは終了となるため、終了ノードを描き矢印で結ぶ。戻り先の番号が記述されていた場合で、条件分岐の場合はそのまま最後の作業記述文に書かれている戻り先の番号のアクティビティへ繋ぐ。フォークで分岐を開始していた場合は、ジョインを描きメインフローにおける戻り先のアクティビティの1つ前のアクティビティと分岐フローの最後のアクティビティを集約した後戻り先のアクティビティへ繋ぐ。全ての分岐がなくなるまで上記の手順を繰り返す。全てのアクティビティを繋ぎ終えたら、アクティビティ内の文からフロー番号を削除する。以上が、処理2：連結である。処理の流れを図5にまとめた。

**処理3：分離**

次に、処理3：分離を行う。アクティビティ図上のアクティビティを1つずつ確認していき、アクティビティ内の文に処理1：配置で既にレーンとした名詞要素が含まれるものを探す。更に、そのアクティビティの元となる作業記述文が主語以外で名詞要素が2つ以上含む（英文でいうSVOOの文型で記述されている）場合、レーンとなった名詞ではない方の名詞をオブジェクトとして、オブジェクトフローを描き、アクティビティ内の文からレーンとなった名詞を削除する（図6）。

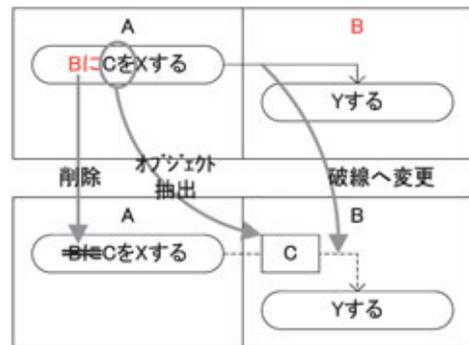


図6 処理3：分離の編集作業

**処理4：展開**

SBVA法によるユースケース分析が完了した時点で、図3のように既に業務鳥瞰図上でシステム境界が決定している。決定した境界上の動詞要素がユースケースに、そこに繋がっている境界外の名詞要素がアクターになり、これらを出しユースケース図が完成する。

本稿で提案する業務フロー分析の処理4：展開は、更に展開作業A：「選択」、B：「抽出」、C：「分解」に分かれる。まず業務鳥瞰図で設定したシステム境界上の動詞要素、つまりユースケースとなった動詞要素を含む作業記述文を探す。そしてアクティビティ図上で、その作業記述文から作成されたアクティビティをマークする（図

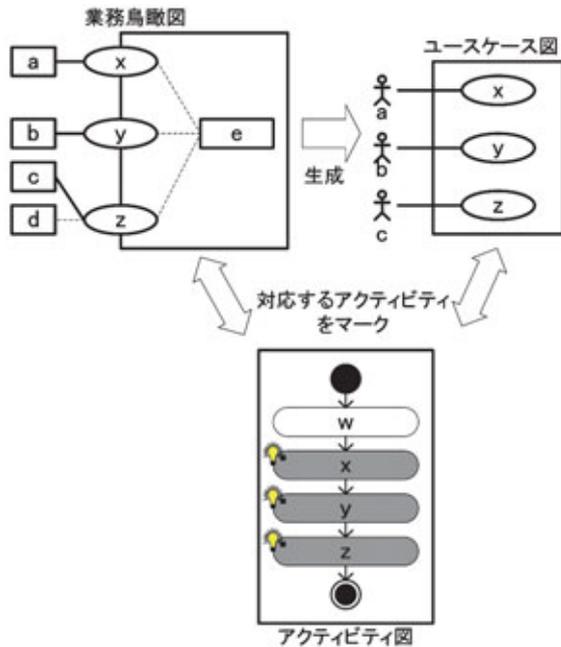


図7 システム境界と展開可能なアクティビティ

7). つまり識別したユースケースに対応するアクティビティがシステム化されることになるため、これらのアクティビティについて、更にサブアクティビティを作成し詳細に展開していく。

展開作業A:「選択」において、ユースケース図と業務鳥瞰図を参考にアクティビティ図でシステム化が決定しているアクティビティをマークし、そのうちの1つを選択する。

続いて展開作業B:「抽出」において、選んだアクティビティの元になった業務鳥瞰図上の動詞要素を探す。そして、この動詞要素に実線ではなく破線で直接繋がっている名詞要素を全て洗い出す。実線で繋がっている名詞要素は、選んだユースケースに繋がるアクターであるため、無視する。図7では、dとeの名詞要素が該当する。

展開作業C:「分解」では、まず選んだアクティビティの元となった作業記述文を業務手順書から探す。そして、記述されている作業を遂行するために必要なアクティビティを、抽出した名詞要素1つ1つに対して作成していく。業務鳥瞰図から抽出した名詞要素は、システム境界内の名詞要素であれば電子化されるものであり、システム境界外であれば物理的なものを指す。外の名詞から内の名詞へ何か作業をしているのであれば、外の名詞の情報をシステムへ入力していることを示す。逆に、内の名詞から外の名詞へ何か作業をしているのであれば、システムからのアウトプットを示す。内の名詞同士、つまりシステム内での情報のやりとりも考えられる(図8)。外の名詞同士の作業は、ユースケースとして識別されていないため、これらが抽出されることはない。この3通

りのいずれかのアクティビティを、抽出した名詞の数だけ作成する。そして作成したアクティビティを時系列に並べたものが、「選択」で選んだアクティビティのサブアクティビティとなる。

システム化する全てのアクティビティに対して、上記のA～Cを繰り返す。以上が処理4:展開である。

展開作業A, Bは分析者が、Cは顧客と分析者で行う作業である。展開作業Cを顧客とともに行うことで、システム化した後の業務がどのようなようになるかを顧客自身を知ることができる。

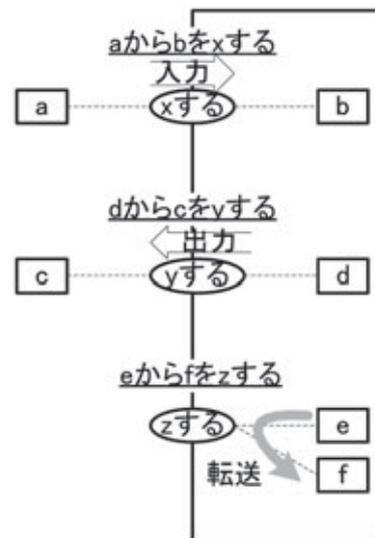


図8 「分解」におけるアクティビティの分類

### 3. 適用例

本章では、前章で説明した業務フロー分析プロセスの処理1～5までを実施した具体例を示す。この例は、「大学における成績処理業務の情報化」であり、成績処理をシステム化することが目的である。この成績処理システム導入後の業務フローを記述したアクティビティ図を得ることが最終目的である。紙面の都合上、全ての過程を示すことは難しいため、上記の業務のうち「履修登録から成績証明書発行」までについてのみを分析対象とした。また、本稿はSBVA法による業務フロー分析の提案を目的としているため、ユースケース分析については、各手順で得られた結果のみを示し、結果を得るまでの過程の詳細については省略した。

#### 3.1 ユースケース分析作業

まず、ユースケース分析の手順1:記述を実施し、業務手順書を作成する。図9のような業務手順書が得られたとする。

次に、ユースケース分析の手順2:総合と手順3:編集を実施し、図9の業務手順書から図3の業務鳥瞰図を得

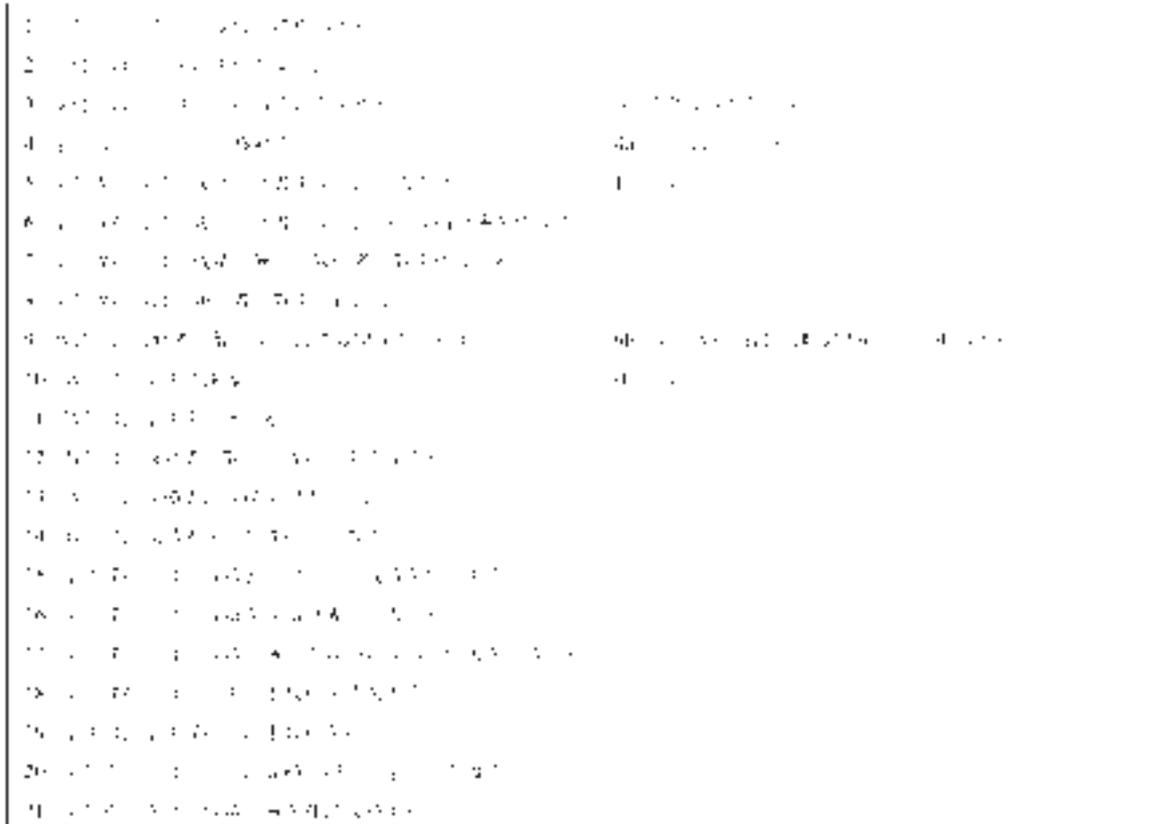


図9 拡張した記法による成績処理業務の業務手順書

たとする。本来ならば、手順2～4を繰り返し行い、業務手順書を修正しつつ業務鳥瞰図を完成させていくが、ここでは省略する。

但し、図3における各ロール(何々係)は、手順3:編集において名詞要素「受付係」「学生課担当」「教員」の役割を分析し、分解した結果である。

最後に、手順5:構成を実施し、図3の業務鳥瞰図から図10のユースケース図が得られる。以上でユースケース分析の作業は終了となる。

### 3.2 業務フロー分析作業

ユースケース分析において得られた成果物である業務手順書、業務鳥瞰図、ユースケース図から、2.3節で示した手順で業務フロー分析を行う。

まず、処理1:配置を行う。図9の各文における主語をレーンとして、フローの番号と主語以降の文をアクティビティ内に記述し、番号順に配置する。図11に結果を示す。

次に、処理2:連結を行う。4a, 9bのアクティビティはひとまず置いておき、メインフローのアクティビティを順番に矢印で結んでいく。その後、4のアクティビティの部分に戻る。4aでは括弧書きで条件が記述されているため、条件による分岐である。よって、3のアクティビティの下にひし形を描き矢印で結び、更に4へ矢印を、

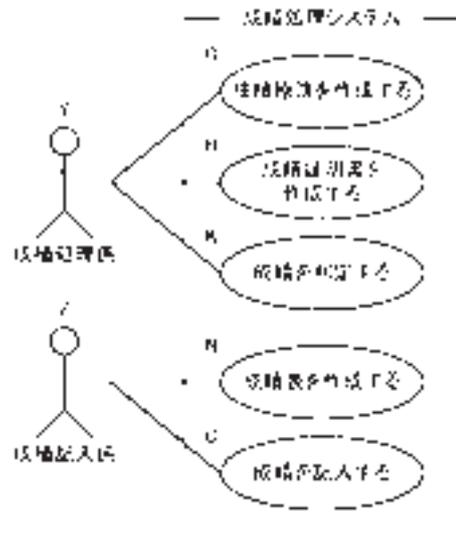


図10 成績処理システムのユースケース図

4aへ分岐条件を記述した矢印を結ぶ。4aの後は、戻り先の番号が書いてあるためフロー終了とはならず、1のアクティビティへ戻る矢印を描く。同様に、9の部分を見る。9bには条件が記述されていないため、フォークによる分岐となる。よって8の下にフォークを描き、9と9aへそれぞれ矢印を結ぶ。9bの後は、戻り先の番号が書いてあるためフロー終了とはならず、10のアクティビティへ戻る矢印を描くが、フォークにより分岐したた



図 11 成績処理業務のアクティビティ図 (処理 1: 配置)

め、戻り先のアクティビティの前にジョインを描き、9b からの矢印と戻り先の 1 つ手前のアクティビティ 9 からの矢印を集約して、戻り先である 10 への結ぶ。最後に、アクティビティ内の文から番号を削除する。図 12 に結果を示す。

続いて処理 3: 分離を行う。アクティビティ内の文に、レーンとなった「学生」「受付係」「学生課担当」「教員」のいずれかを含むものを探す。まず一番最初の「学生証を受付係に提示する」が見つかる。そしてレーンとなっている「受付係」ではない方の名詞「学生証」をオブジェクトとして識別し、そのアクティビティから「受付係」へオブジェクトフローを描く。同様に「履修申込書を学生に記入させる」「履修者一覧を教員に渡す」「成績表を学生課担当に渡す」「学生に手数料の請求書を渡す」「学生課担当に手数料を払う」「学生に成績証明書と学生証を渡す」についても、同じ手順でオブジェクトフローを描くことができる。図 13 に結果を示す。

図 13 においてグレーに塗られているアクティビティが、図 10 の各ユースケースに対応する。これら 1 つ 1 つを展開していく。

まず、分析するアクティビティを選ぶ。図 13 の「成績原簿を作成する」から分析していく。この「成績原簿を作成する」は、図 3 の (G) の部分から得られたユースケースである。(G) の動詞要素「作成する」に破線で直接繋がっている名詞要素は、「学生証」、「履修申込書」、「成績原簿」の 3 つである。以上が展開作業 A「選択」B「抽出」である。

次に、展開作業 C「分解」を行う。まず「抽出」で挙げた要素の元となった作業記述文を見る。図 9 の「6. 学生課担当は、履修申込書と学生証から成績原簿を作成する。」がこれに該当する。この作業記述文から「成績原簿を作成する」には「履修申込書」と「学生証」の情報が必要であることが分かる。システム境界外から境界内の名詞への入力である。よって、アクティビティ「履修申込書の情報を入力する」と「学生証の情報を入力する」を得る。また、それぞれの入力先として、境界内の「成績原簿」が必要となるため、「成績原簿を新規作成する」アクティビティを作成する。これで「抽出」で挙げた名詞を全て使い切ったので、得られたアクティビティを時系列に並べ、「成績原簿を作成する」のサブアクティ

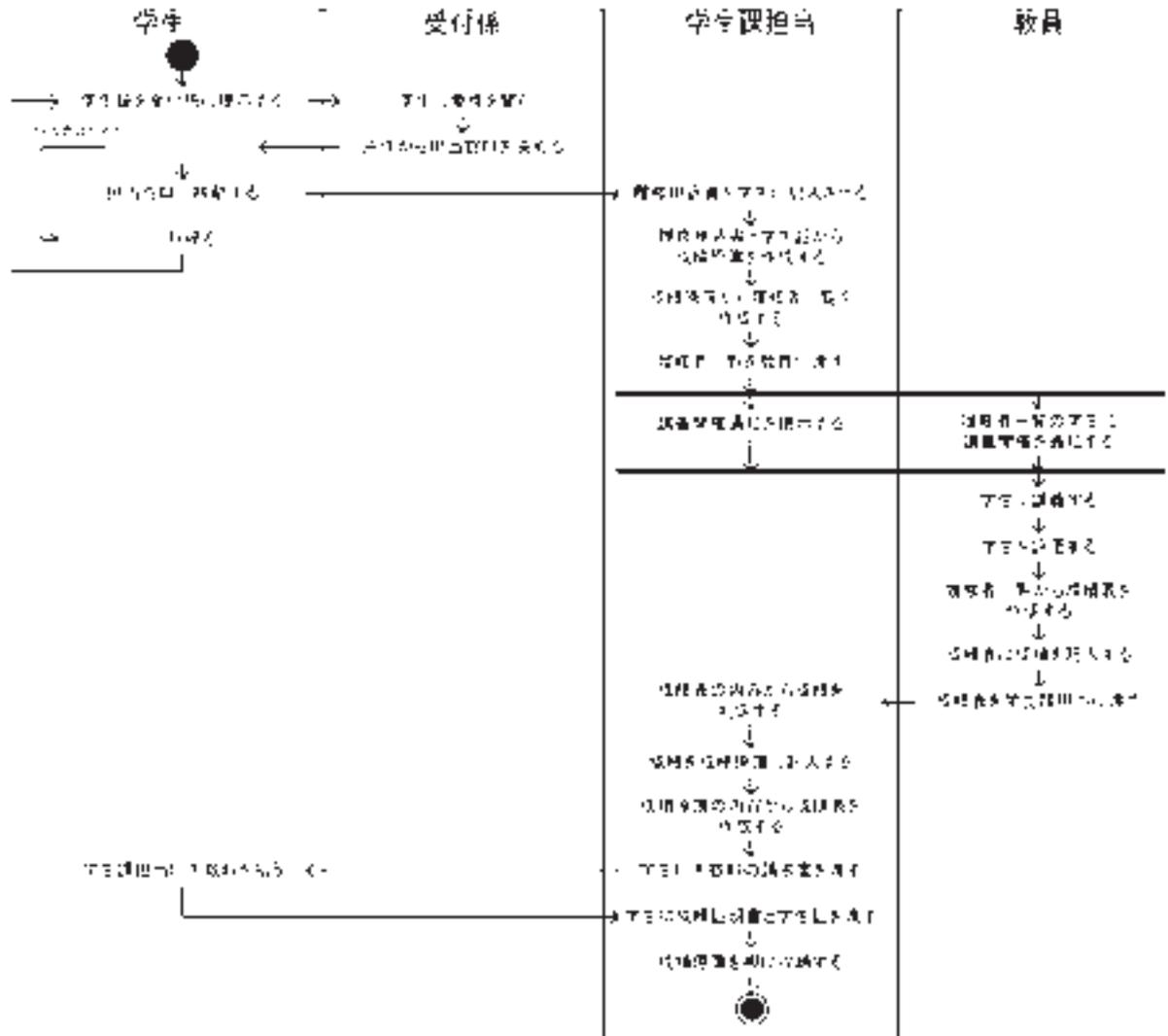


図 12 成績処理業務のアクティビティ図 (処理 2: 連結)

ビティが完成となる。

同様の手順で、アクティビティ「成績証明書を作成する」を分析する。「成績証明書を作成する」は図3の(H)部分から得られたので、これに繋がっている名詞要素「成績証明書」、「成績原簿」を抽出する。これらの要素の元となっている作業記述文は「17. 学生課担当は、成績原簿から成績証明書を作成する。」である。「成績証明書」を作成するためには、「成績原簿」の情報が必要であることが分かる。これより、アクティビティ「成績原簿の情報を入力する」を得る。システム境界内から境界外の名詞への出力であるため、何らかの物理的な「成績証明書」を「学生」に渡すことが必要である。よって、アクティビティ「成績証明書を印刷する」を作成する。

以上で抽出した名詞を全て使い切ったので、得られたアクティビティを時系列に並べ、「成績証明書を作成する」のサブアクティビティが完成となる。

アクティビティ「成績を判定する」、「成績表を作成する」、「成績を記入する」についてもそれぞれ同様の手順

によりサブアクティビティを得ることができ、最終的に図 14 を得る。

以上で、ユースケース図における全てのユースケースについて業務フロー分析が完了となる。

#### 4. 評価実験

我々はSBVA法の有効性を示すために、適用実験を行った。本実験では、従来手法でユースケース図とアクティビティ図を作成した場合と、SBVA法で作成した場合の時間や成果物の比較を行った。以下に、その詳細を示す。

##### 4.1 実験方法

被験者は日常業務でコンピュータを利用している技術者で、プログラミングも理解しており、UMLが何であるかはなんとなく知っているが実際に使用したことはなく、大規模なシステム開発プロジェクトには参加した経

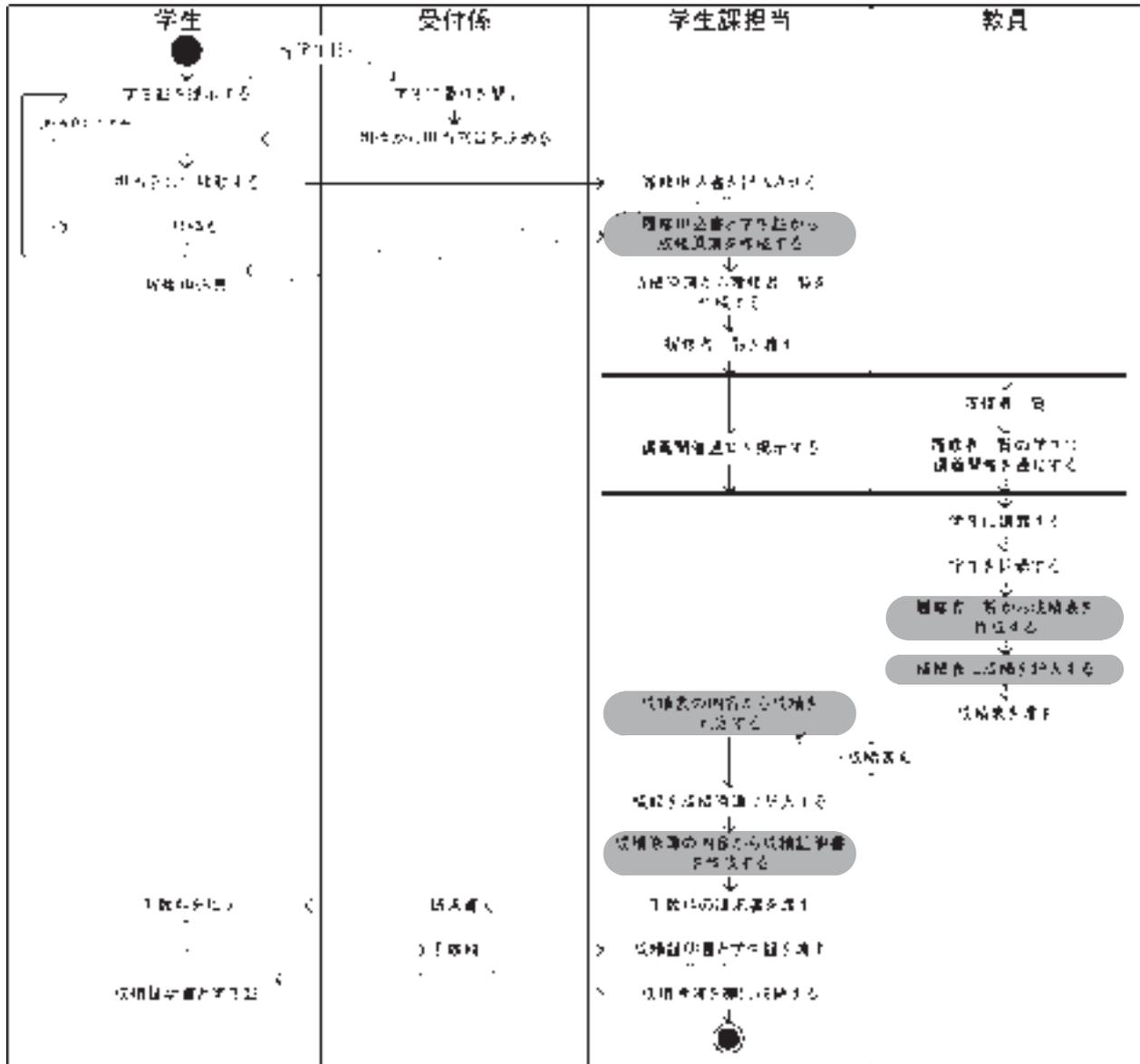


図 13 成績処理業務のアクティビティ図 (処理 3: 分離)

験がない4名を対象として実験を行った。この4名が分析者となり、文章量がほぼ同じの3種類の問題文(問題領域)を与え、それぞれについてユースケース図とアクティビティ図を作成してもらった。SBVA法の最も重要なメリットは、業務を最も良く理解している顧客自身が問題領域を業務手順書として記述し、分析者は顧客とコミュニケーションを取りながら相互理解を深めつつ分析を進めていける点である。但し今回の実験では、与えられた問題文を既にある程度分析が進んだ問題領域とみなし、分析者自身が与えられた問題文を整理して業務手順書を作成し、以降の分析も分析者1人で行うこととした。

まず初めに、30分程度ユースケース図とアクティビティ図の記法と従来手法による作成法について講義し、その後一つ目の問題文を与えて、作図してもらった。この時点では、SBVA法については全く教授していない。

一つ目の問題文の分析が終わった後、今度はSBVA法について30分程度講義した。その後二つ目の問題文を与えて、SBVA法を用いて作図してもらった。そして二つ目の分析が終わった後、三つ目の問題文を与えて再びSBVA法を用いて作図してもらった。そしてそれぞれの分析にかかった時間と、成果物に含まれる図の構成要素の数をカウントした。

全く同じ問題文に対して従来手法とSBVA法を用いた場合の比較ができれば最も良い比較となるが、2回同じ問題文に対して分析を行うと、1回目で問題領域を理解してしまっているため必然的に2回目の方が良い結果になってしまう。よって内容は異なるが、文字数と分析の難易度がほぼ同じである問題文を用いて、従来手法とSBVA法を用いた場合の比較を行った。また実験に用いた問題文は、公平さを期すため一般に流通している書籍

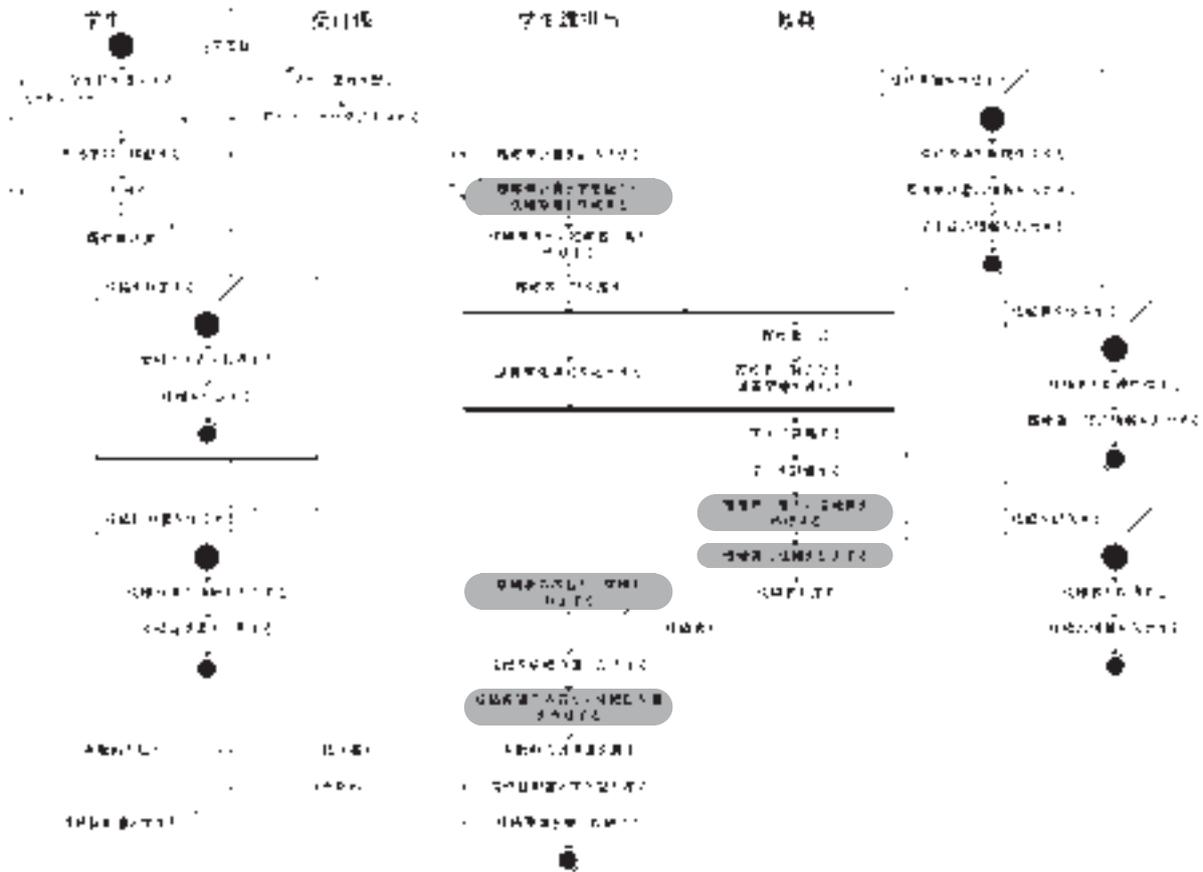


図 14 成績処理業務のアクティビティ図 (処理 4: 展開)

から引用したものをそのまま用いた。作図に際しては、フリーハンドで紙面に描きとめてもよいし、ツールを使用してもよいとし、分析者のやりやすい方法で作図してもらった。

#### 4.2 実験結果

実験結果は図 15～17 と表 1～4 のようになった。図 15～17 では縦軸は凡例に示した内訳の分析時間、横軸は左から分析者 1～4 のデータを示している。表 1～4 は、各問題文の分析での成果物に含まれるアクター、ユースケース、アクティビティの個数と、そのばらつき具合を表す分散の値を示している。

問題文 1 は文献 [11] から、問題文 2 は文献 [7] から、問題文 3 は文献 [8] からの引用である。実験で用いた各問題文については、付録 A.2 に掲載した。

表 2 実験結果 (ユースケース数)

問題文	分析者 1	分析者 2	分析者 3	分析者 4
問題文 1	3	4	12	16
問題文 2	11	12	13	12
問題文 3	10	16	10	10

表 3 実験結果 (アクティビティ数)

問題文	分析者 1	分析者 2	分析者 3	分析者 4
問題文 1	18	8	17	16
問題文 2	18	16	18	17
問題文 3	26	16	22	16

表 1 実験結果 (アクター数)

問題文	分析者 1	分析者 2	分析者 3	分析者 4
問題文 1	2	2	2	2
問題文 2	3	2	3	3
問題文 3	3	4	3	4

表 4 実験結果 (抽出要素数のばらつき)

問題文	分析者 1	分析者 2	分析者 3	分析者 4
問題文 1	0	0.1429	0.3929	0
問題文 2	0.5875	0.175	0.675	0.675
問題文 3	0	0	1.75	0

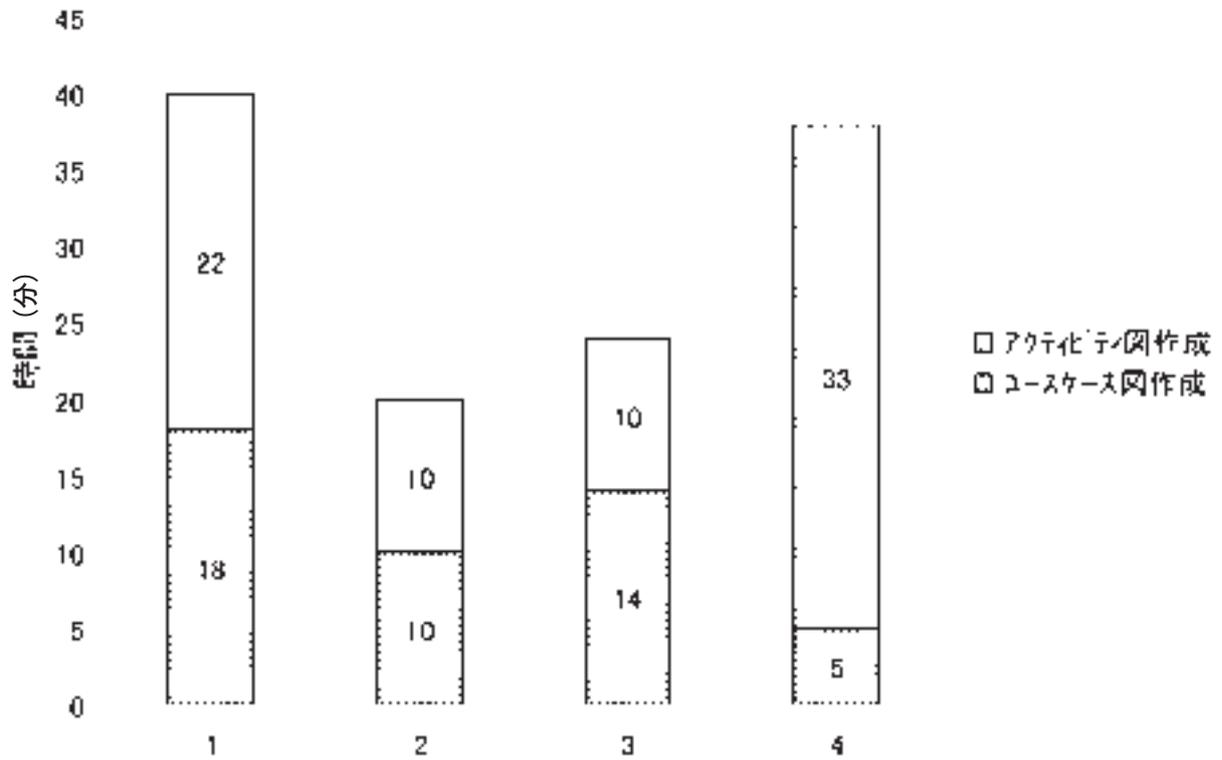


図 15 問題文 1 の分析にかかった時間

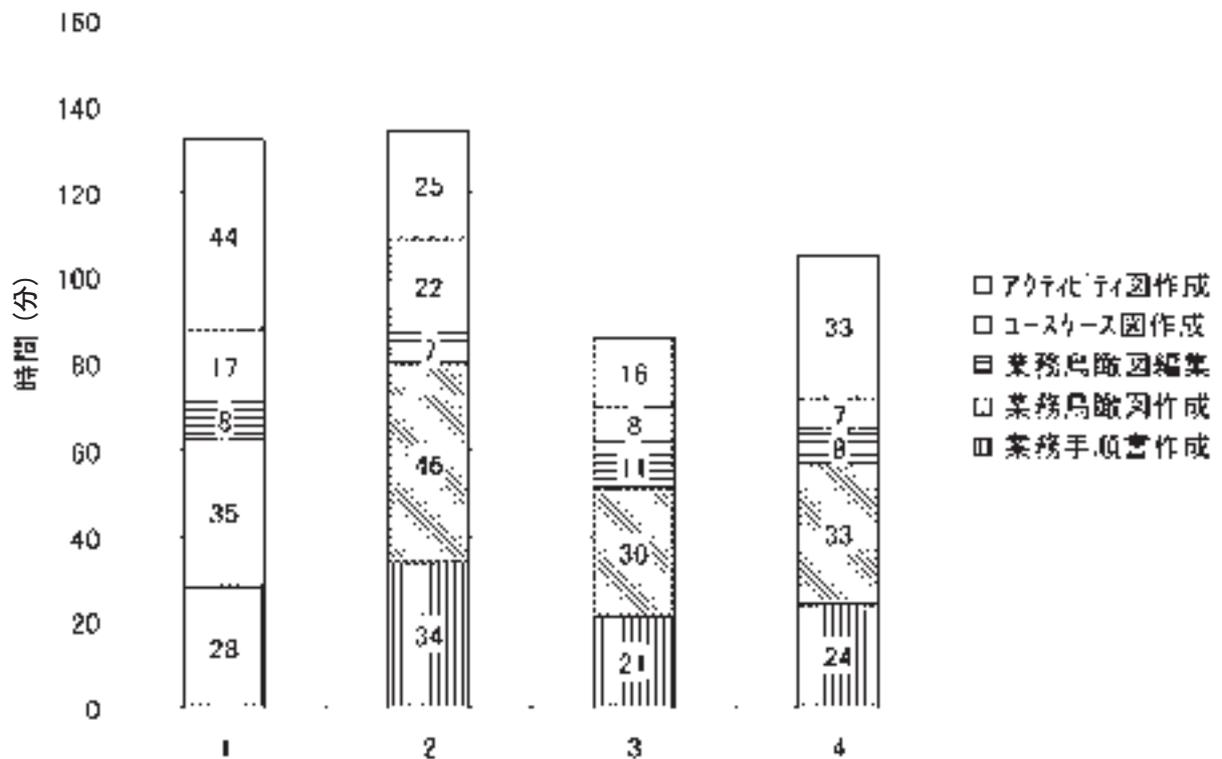


図 16 問題文 2 の分析にかかった時間

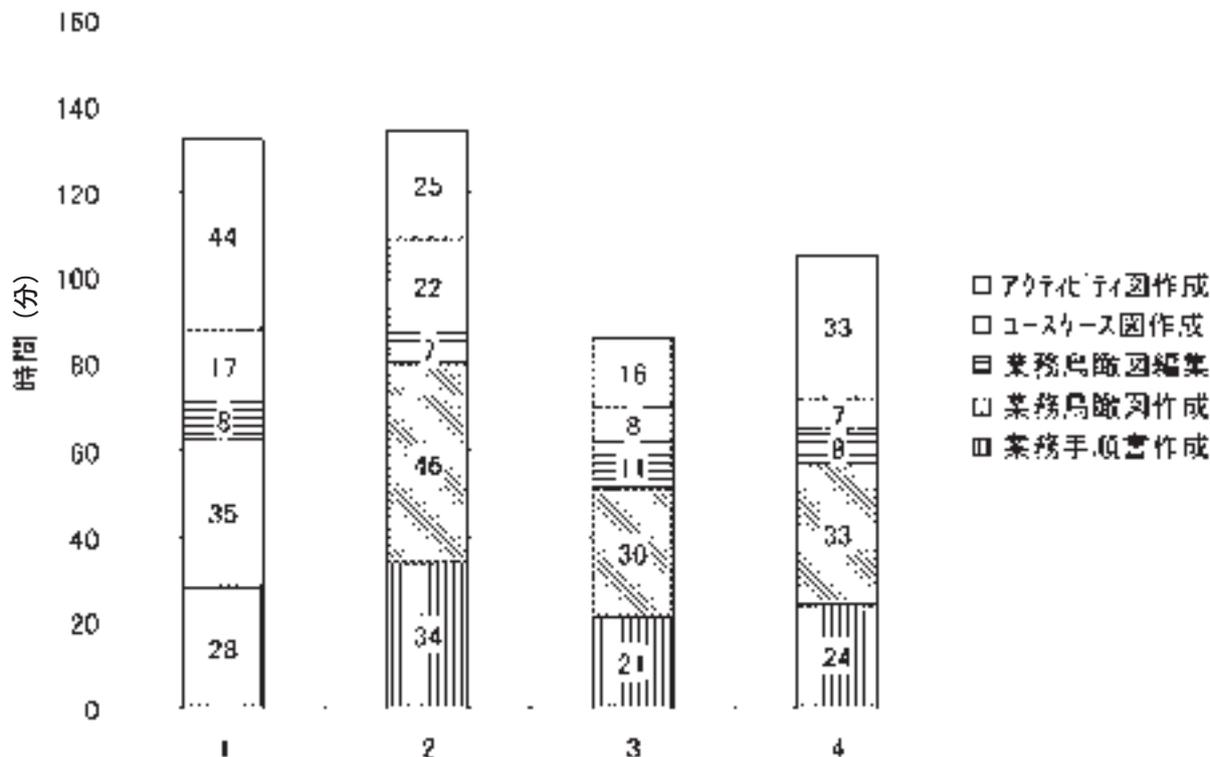


図 17 問題文 3 の分析にかかった時間

#### 4. 3 実験結果についての考察

まず、図 15～17 に示した分析時間を見てみると、明らかに SBVA 法を用いた問題文 2, 3 の分析の方が時間がかかっている。SBVA 法を用いずに分析を行った場合（図 15）では、最長でも分析者 1 の 40 分に対し、SBVA 法を用いた場合では、問題文 2 では最長 134 分（図 16）、問題文 3 では最長 106 分（図 17）となっている。図 16 と図 17 の時間の内訳を見てみると、問題文からの業務手順書の作成、業務鳥瞰図の作成が分析時間全体の半分以上を占めている。その後、業務鳥瞰図を編集しシステム境界を決定し、ユースケース図、アクティビティ図を作成する時間は問題文 1 の場合と大差がない。更に、図 16 と図 17 を比較してみると、SBVA 法による分析に慣れたためか、問題文 3 の分析時間の方が全体的に短くなっている。

次に、表 1～4 に示した成果物についての結果を比較してみる。ユースケース図におけるアクターの識別については、比較的簡単ということもあり、表 4 を見ると各問題ともばらつきはほとんどない。しかし、表 2 と表 3 のユースケース数やアクティビティ数については、SBVA 法を用いなかった問題文 1 の分析では、ばらつきが大きく、SBVA 法を用いた問題文 2, 3 の分析ではばらつきがほとんどない、つまり成果物の粒度が統一されている。

また、実験後に各分析者にインタビューしたところ、SBVA 法を用いなかった問題文 1 の分析では、どこまで詳しく描いていいのかわからない、主観が入ってしまう、といった意見を得た。SBVA 法を用いた場合は、とにかく業務鳥瞰図の作成が大変だった、業務鳥瞰図さえできてしまえば、あとは迷うことなくほぼ機械的に図が作れてしまう、業務手順書から業務鳥瞰図を自動で作ってくれれば良かった、問題文 2 より問題文 3 の分析の方が手法に慣れてきたためスムーズに行えた、といった意見を得た。

以上の結果から、SBVA 法における業務手順書や業務鳥瞰図を作成するには非常に手間がかかるが、作成さえしてしまえば、分析者の技量によらず機械的にユースケース図やアクティビティ図が作成でき、粒度も一律となる、ということが出来る。

#### 5. 考察と今後の課題

SBVA 法は、顧客の業務を大局的に捕らえることを目的としており、顧客と分析者が相互理解を深めるためのコミュニケーションツールとして有効である。これはシナリオに記述した未整理の要素を、SBVA 法のプロセスで整理する過程において、顧客と分析者の両者が分析結果に対する合意を形成していくからである。但し、本

手法を大規模なシステム開発に適用しようとした場合には、分析の初期の段階においては業務鳥瞰図における未整理の名詞・動詞・依存関係のモデルは複雑になる。前章の実験結果からも分かるように、SBVA法では業務鳥瞰図の作成・編集を通じて顧客と分析者が問題領域に対する合意を形成していく過程を重視している。いかに業務鳥瞰図の作成を支援するかが本手法の課題である。既に支援ツールである「SBVA エディタ」[2], [14]を開発しているが、更なる改善が必要である。

また、SBVA法による分析の後工程として、統一プロセスやICONIX法で提示されているロバストネス分析[6]が利用できる。ロバストネス分析は、ユースケース記述や概念モデルからシステムの基本的な構造を抽出する分析作業である。SBVA法によるユースケース分析や業務フロー分析における各要素がロバストネス図を描くための手掛かりとなる。業務鳥瞰図上に設定したシステム境界上の動詞要素に繋がる名詞要素がロバストネス分析におけるバウンダリに、システム境界内部の名詞要素がエンティティに、業務フロー分析で得られたアクティビティがコントローラになり得る。

今後は、SBVA法によりロバストネス分析まで行えるよう、更に改良していく。

更に、SBVA法では、動詞を中心にユースケース分析を行うが、業務鳥瞰図の名詞に着目することによりオブジェクト（もの）の分析も可能である。

業務鳥瞰図は、単に業務手順書における名詞要素と動詞要素を抜き出しそれらの関係を線で結んだだけであり、クラス図へ至るまでには抽象化されていないが、その名詞要素がクラスの候補となり得る。

但し、クラスを分析するためには、業務手順書、業務鳥瞰図だけでは情報が不足しており、クラス図を作成することは難しい。例えば、本稿で取り上げた大学の成績処理業務の例では、「成績証明書」の写真などがドキュメントとして添付されていれば、成績証明書クラスの属性を決定することができるようになり、クラス間の関連は、業務鳥瞰図を分析することで得られる可能性がある。今後は、シナリオからオブジェクトモデリングまでを統括的に行えるよう拡張していく。

加えて、本手法は自然言語により記述したシナリオを用いているため、アジャイルな開発にも適用できる可能性がある[1]。この応用についても、今後検討していく。

## 6. おわりに

本稿では、業務シナリオからユースケース分析とシステム導入後の業務フロー分析を行うSBVA法について述べた。SBVA法では、手軽なシナリオにより業務をモ

デル化し、分析者の技量によらず体系的にユースケースや業務フローを分析することができる。分析者は、業務シナリオを図解化する作業を通じ、顧客の業務を理解することができる。顧客は、分析作業に参加することでシステム仕様を理解することができる。また、分析に利用するシナリオは、最も業務を理解している顧客自身が簡単に作成することができる。分析過程における各作業は、分析者と顧客が業務手順書と業務鳥瞰図をコミュニケーションツールとして協調的に行うため、随時不備を発見・修正でき、また必要な情報を補うことができる。今後は、より実用的な手法にして実務への普及を目指す。

また、近年要求分析をソフトウェア開発プロセスの初期工程の一部としてではなく、独立した「要求開発」と捉えるべきだという動きがある[10], [16]。超上流と呼ばれる工程で、経営者らも要求開発に参画し、プロジェクトを成功に導くという考え方である[15]。このような要求開発を、本手法が促進できることを期待する。

## 参考文献

- [1] Ambler, S. and Jeffries, R.: Agile Modeling, Wiley (2002).
- [2] Chubachi, Y., Matsuzawa, Y., and Ohiwa, H.: Scenario-Based Visual Analysis for Static and Dynamic Models in OOA, Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Modeling and Simulation (AMS2002), pp. 495-499, ACTApress (2002).
- [3] Jacobson, I., Booch, G., and Rumbaugh, J.: The Unified Software Development Process, Addison-Wesley (1999).
- [4] Jacobson, I., Ericsson, M., and Jacobson, A.: The Object Advantage - Business Process Reengineering with Object Technology, Addison-Wesley (1996).
- [5] Kruchten, P.: The Rational Unified Process: An Introduction, Addison-Wesley (2003).
- [6] Rosenberg, D. and Scott, K.: Use Case Driven Object Modeling with UML: A Practical Approach, Addison-Wesley (1999).
- [7] 浅井 麻衣, 重田 正俊, 橋本 大輔, 浜口 弘志, 藤井 啓詞 (著), 桐越 信一, 長瀬 嘉秀 (監修): 現場のUML モデルベース開発のすべて, p. 52, ソーテック社 (2006).
- [8] アリスター・コーバーン (著), ウルシステムズ (監訳), 山岸 耕二, 矢崎 博英, 水谷 雅宏, 篠原 明子 (訳): ユースケース実践ガイド, p. 18, 翔泳社 (2001).
- [9] 小泉 寿男, 辻 秀一, 吉田 幸二, 中島 毅: ソフト

- ウェア開発, オーム社 (2003) .
- [10] 清水 吉男: 要求を仕様化する技術・表現する技術, 技術評論社 (2005) .
  - [11] スコット・W・アンブラー (著), オージス総研 (監訳), 越智 典子 (訳): オブジェクト開発の神髄, p. 102, 日経 BP 社 (2005) .
  - [12] 中鉢 欣秀, 大岩 元: シナリオと図解を利用するソフトウェアデザイン手法, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol. 6, No. 5, pp. 75-76 (2004) .
  - [13] 中鉢 欣秀, 小林 孝弘, 松澤 芳昭, 大岩 元: シナリオの図解化によるユースケースモデリング, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J88-D1, No. 4, pp. 813-828 (2005) .
  - [14] 中鉢 欣秀, 松澤 芳昭, 大岩 元: シナリオ図解化分析法によるオブジェクトモデリング, 情報処理学会第 44 回プログラミングシンポジウム報告集, pp. 169-180 (2003) .
  - [15] 独立行政法人 情報処理推進機構 ソフトウェア・エンジニアリング・センター: 経営者が参画する要求品質の確保, オーム社 (2005) .
  - [16] 山岸 耕二, 安井 昌男, 萩本 順三, 河野 正幸, 野田 伊佐夫, 平鍋 健児, 細川 努, 依田 智夫: 要求開発, 日経 BP 社 (2006) .

付録

A. 1 SBVA 法によるユースケース分析

SBVA 法では, 以下のような手順でユースケース分析を行う.

- 「記述者」による記述
- 「分析者」による総合
- 「分析者」による編集
- 「記述者」による修正
- 「分析者」による構成

手順 1 の記述では, 業務従事者である顧客自身, 又は業務に精通する者が「記述者」となり, 分析対象の業務シナリオである「業務手順書」を作成する. 手順 2 の総合では, 要求分析者が業務手順書から業務全体を構成する動詞と名詞の関係を図的に表現した「業務鳥瞰図」を作図する. 手順 3 の編集では, 分析者が業務鳥瞰図を編集しながらアクターとユースケースを識別する. この作業中に分析者が業務手順書の不備を発見することができ, 不備があった場合には記述者に修正を依頼する (手順 4 の修正). 修正後は, 再度手順 2, 3 を行い, 不備がなくなるまでこの一連の作業を繰り返す. 最後に, 手順 5 の構成で分析者は業務鳥瞰図の編集により得られたア

クターとユースケースから UML のユースケース図を構成する (図 18). 手順 2~4 は, 記述者と分析者がインタラクティブに作業を進めていくため, 問題領域の相互理解を可能にする. 更に詳しい内容については, 文献 [13] の 3 章を参照のこと.



図 18 SBVA 法によるユースケース分析の手順

A. 1.1 業務手順書の記述

自然言語により自由に記述したシナリオから体系的にユースケース分析を行うことは難しい. そこで, SBVA 法ではシナリオ記述のための簡単なルールを定めている. これにより, 記述内容が限定されてしまい, 分析に必要な情報が損なわれる可能性があるが, 顧客と分析者がコミュニケーションを取りながら共同で作業を進めることでこれを防ぐことができる. 業務手順書には, 業務全体の作業手順を記述する. 明らかにシステム化できない作業を含んでもよい. 作業記述文には「誰が, 何を, どうする」を書く. 作業の主体を示す主語と, 一つの動詞からなる単文に限定する. また, 動詞, 名詞, 助詞のみを用いる. よって作業記述文は「～は, ～を～する」, 「～は, ～から～を～する」, 「～は, ～に～を～する」等の形式となる. 作業記述文の粒度は, 後の工程で調整するため, 考慮する必要はない. 更に詳しい内容については, 文献 [13] の 4.1 を参照のこと.

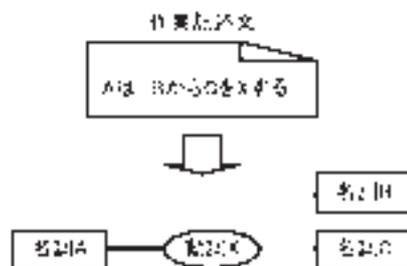


図 19 作業要素間関係図の記法

A. 1.2 業務鳥瞰図の作成

ユースケース図を作成するためには, どの範囲をシステム化するか境界を定義しなければならない. これには, 業務全体を俯瞰する必要があるが, 業務手順書では一覽性に欠ける. そこで SBVA 法では, 業務シナリオを構成する要素とそれらの関連を極めて単純な記法によ

り図解化し、業務全体を俯瞰できるようにする。この図を業務鳥瞰図と呼ぶ。

手順2の総合において、手順1で記述した全ての業務手順書における全ての作業記述文を1枚の業務鳥瞰図として総合する。まず、作業記述文から名詞と動詞を抜き出し、図19に示すように名詞を長方形、動詞を楕円で表現して作業要素間関係図を作図する。次に動詞を中心に全ての名詞要素に対して破線を引く。但し、主語となる名詞に対しては実線を引く。

以上の作業を全ての作業記述文に対して行う。全ての作業記述文を作業要素間関係図に図解化した後は、これらを1つの図に総合する。同じ意味を持つ名詞や動詞の重複を取り除き、関係線を引き直す(図20)。これにより、業務鳥瞰図が完成する。更に詳しい内容については、文献[13]の4.2, 4.3を参照のこと。

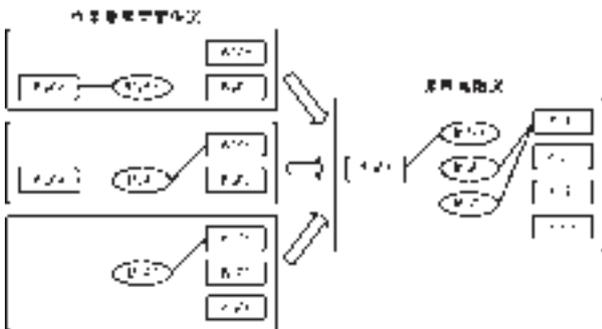


図 20 業務鳥瞰図の作成

### A. 1.3 業務鳥瞰図の編集によるユースケース分析

手順3の編集では、更に「配置」、「統合」、「分解」、「境界」の4つの手順を踏んでアクターとユースケース、システム境界を決定する。

「配置」では、分析者が業務鳥瞰図における各要素の配置を変更し、見やすく整理する。「統合」では、分析者が業務鳥瞰図における粒度の細かい要素について統合し、粒度を粗くする。「分解」では、「統合」とは逆に粒度の粗い要素を分解し、粒度を細かくする。「境界」では、分析者が顧客とともに業務鳥瞰図の上にシステム化の対象となる範囲を設定・変更する。以上のような操作で、ユースケース図を構成する要素を分析していく。更に詳しい内容については、文献[13]の4.6, 4.7を参照のこと。

### A. 1.4 ユースケース図の構成

手順3の編集で得たシステム境界に基づいて、アクターとユースケースを抽出する。まず、定めたシステム境界上にある動詞要素のうち、実線で結ばれた名詞要素がシステム境界の内部にあるものは除外し、それ以外のものがユースケースとなる。ユースケースとなった動詞要素と実線で結ばれている名詞要素のうち、システム境

界の外部にあるものがアクターとなる(図21)。抽出したアクターとユースケースに、業務手順書の内容理解に基づいて適切な名前を付け、ユースケース図が完成する。更に詳しい内容については、文献[13]の4.8を参照のこと。

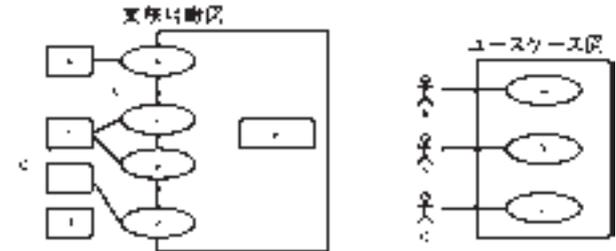


図 21 業務鳥瞰図からユースケース図への構成

## A. 2 実験データ

### A. 2.1 問題文 1

文献[11]からの引用(351文字)。

学生は登録の準備をする。学生は登録したい3つのゼミを決める。学生はゼミの前提条件を調べ、自分に登録資格があることを確認する。学生は各ゼミに空きがあることを確認する。学生はゼミを自分のスケジュールに組み込めることを確認する。学生はゼミに登録するために学籍係のところに行く。学生はゼミに登録する。学生は学籍係にゼミに登録したいと申し出る。ゼミそれぞれに対して学籍係は空きがあることを確認する。学籍係は学生がゼミを取る資格があることを確認する。学籍係は学生をゼミに登録する。登録分の合計が計算され、学生の未払い額(現在はゼロ)に追加される。未払い額が学生に提示される。学生は金額の半分をその場で払うことに決め、支払う。学籍係は支払いを受領する。支払いが記録される。学生の未払い額が計算され、学生に提示される。

### A. 2.2 問題文 2

文献[7]からの引用(350文字)。

営業は、説明に行った電器店や家電量販店を拡販資料の配付先として配付依頼書を作成し、配付担当者に送付する。拡販資料の配布担当者は、営業から複写式の配付依頼書を受け取ると、既存の顧客管理システムを利用して電器店や家電量販店の住所や宛先を調べ、必要事項を書き込んで集荷指示書を作成する。配付担当者は集荷指示書を運送業者に送付し、集荷を指示する。拡販資料の在庫が配付依頼書の数量に満たない場合、配付担当者は配付依頼書を営業に差し戻し、在庫の範囲内に修正後、再依頼してもらう。配付担当者は、運送業者が集荷に来る

前までに集荷してもらう拡販資料を準備しておく。拡販資料を運送業者に渡したら、配付担当者は配付台帳に記帳すると同時に集荷指示書をファイルする。運送業者は、街の電器店や大型家電量販店に拡販資料を配送する。

### A. 2. 3 問題文 3

文献 [8] からの引用 (339 文字)。

依頼者は依頼を作成し、承認者に送付する。承認者は予算があることを確認し、商品価格を確認し、依頼を承認して購買担当者に提出する。購買担当者は在庫を確認し、商品のベンダーを選定する。決裁者は承認印を確認する。購買担当者は注文書を作成し、ベンダーに送付する。ベンダーは商品を受取人に引き渡し、受領書を受け取る(設計対象システムの範囲外)。受取人は受け取りを登録し、商品を依頼者に送付する。依頼者は依頼したものが届いたことを記録する。商品を受け取る前であればいつでも、依頼者は依頼内容の変更や依頼のキャンセルができる。キャンセルすると、その依頼は処理対象でなくなる(システムから削除するか?)。価格が下がった場合、処理はそのまま続けられる。価格が上がった場合、依頼は承認者まで戻される。

# 建築生産システムにおける 各様相の構成要素からみる基礎的考察

吉田 敏\*・陳 俊甫\*

## Basic study of construction system with analysis of Architecture of each aspect

Satoshi Yoshida\* and Junfu Chen\*

### Abstract

It is difficult to describe artificial system in these days, because development of fundamental technology such as computer and internet accelerates rapidly. Construction mechanism is one of the typical artificial systems, and this paper proposes to describe this mechanism.

Construction is complicated system, and it is difficult to understand without any information of every kind of aspect such as function, structure, process and organization. The point is to understand the reason why these aspects change the style, and to understand the logic of the relationship between construction technology and organizational configuration. It is important to make a method to analyze whole of the system at once. Architecture is one of the ways to analyze artificial actions, and the general concept of Architecture is the composition of system that is based on the pattern of relationship among elements. This paper proposes to create the new viewpoint about the analysis of construction system with Architecture.

Keywords: Architecture, artifact, system, element, dynamics

### 1. はじめに

現在、基盤技術が著しい速さで変化しつつある（参考文献[12],[14]）。社会における人工物の生産活動の多くは、この基盤技術の変化に影響を受け、多くの様相が関連しながら動的な特性を得ることが考えられる。

本稿では、建築生産システムを取り上げ、各様相に関する記述方法を提示しながら、動的な特性を記述していくものである。

### 2. 人工物の創造

#### 2.1 人工物の特性

建築生産の基本的特徴の一つに、一つ一つのプロジェクトに対して固有の条件が与えられることを挙げる事が出来る（参考文献[3]）。各プロジェクトにおいて、既成の手法や過去の経験から学ぶことによって、全ての局面において新しい生産システムを作り上げる必要はない。しかし、それぞれプロジェクトにおいて、何かしらの固有の要素が加わり、それが特有の組み合わせり方を

繰り返すことにより、これまでの手法では合理的にことを進めることが出来ない局面が少なからず出てくる事が予測できる。例えば、敷地が持つ固有の条件だけでも大変に多くの事柄が含まれている。敷地面積、土地の形状、方位、接道条件、近隣環境、自然環境、地質、地下水位など、それぞれの敷地によって異なる事柄が無数に挙げられる。その他、気候条件、施主要求仕様、行政指導、近隣対策、ロジスティクスなど、様々な要素がプロジェクト固有の内容であり、場合によってはそれがプロジェクトの途中に変化していくこともあるため、常に状況に合った対応を考えていかなければならない。そのためには、いずれのプロジェクトにおいても、過去の経験に頼るのみではなく、既成の手法を見直しながら何かしら新しい生産システムを構築する必要がある。

新しい生産システムの開発には、対応しなければならない条件に沿って、主に二つの側面があると考えられている。まずは、様々な局面において何らかの新しいアイデアを導き出すという、「創造」の側面である。もう一方は、頭の中で抽象的に思い描いているアイデアを現実社会の中で機能する具体的な生産物やサービスとして実

現させる「ものづくり」の側面である。本論文では、この「ものづくり」の側面に関して、現状の問題点を指摘し、これから目指すべき方向性を導き出すことができるツールを明示していくものである。

H.Simon は、複雑なシステムとは、非単純化された方法で相互の関連性を持つ複数の部分によって構成されたものであって、それぞれの部分の特性は全体の特性に必ずしも影響を与えないものであると述べている（参考文献 [11]）。建築は、このような複雑なシステムのひとつと考えることができる。そのために、生産物としての建築の一つ一つの部分における技術的進化を、伝統的既存技術の新技术への単純な置き換えによる理解だけでは、今日の全体像を把握することは難しいと考えられる。なぜなら、例えば一つの部品が変化した場合、周囲の部品との関係も変化することが予想できるからである。

Simon の指摘は、複雑性の源が部分間の相互関係性の強さにあるという視点に基づいたものであるが、このような視点をヒントにしながら、複雑性を持つ建築産業における技術的進化について、どのような理論が支配的に働くのかという点について理解を深めることが必要であると考えられる。そのために、建築生産システム全体を分析していくことになるが、まず考えられるのが建築生産物において部分間の相互関係性は、何に影響を受け、どのような傾向を持つことになるかを理解していくことである。このように生産物に注目していくのは、実際に造られる建築はそれを造り出す背景に様々な内容が含まれており、それが具体化したものの一つが生産物であるため、生産システムのある側面を捉えることができると考えられるためである。

このような分析を進めていく上で重要になるのが、どのような理由でシステムや生産物などが塊ごとに分かれているのかという点である。対象が人工物である以上、何らかの理由や傾向があることが予想され、それを分析していくことで、そこに込められた恣意を読み解いていくことが出来る可能性がある。そのための手法の一つに「アーキテクチャ」概念があると考えられる。この概念については、定義などを明示して使っていくことになるが、基本となるのは、システムを要素ごとに分け、その要素間の相互依存性の強さに着目することである。

## 2.2 人工物に関する設計情報

一般的に、人工物をつくる時、目標とする望ましい対象の「機能」を達成するために、複数の部位を連結させて対象の「構成」をつくり上げることになる。これは、まず対象となる人工物に要求される基本機能を達成するために、複数のサブ機能の束へ展開し、それらの機能群を生産物の構成要素に対応させていくことになる。生産

物である建築を対象とした場合も、基本的には「機能」と「構成」の対応関係を調整していくことになる。

建築を対象とした場合、この調整作業だけでは実現しない。建築の設計作業は、主に施主の求める「生産物機能」を達成させるために、敷地条件・法規的条件・コスト面の条件・施工上の技術的条件・素材や部品の条件などを総合的に検討し、より良い解を創造していくことになる。この場合、直接的な目的は生産物としての建築を構築することであるが、そのためには「生産物構成」だけでなく、生産を可能とする「生産プロセス」や、その生産活動を担う「生産組織」についても調整しておかなければ生産活動に問題が生じることになる。

つまり、建築を設計する行為は、生産行為全般に関して最適化した情報をつくり出そうとするものであると考えられる。言い換えれば、つくり出される設計情報は、「構法」にあたる「生産物機能」や「生産物構成」を生み出すだけでなく、「工法」に該当する、どのように生産していくかという「生産プロセス」や、どのような組織で生産していくかという「生産組織」についての情報も含まれることになる。つまり、設計段階において、既にどのような組織がどのような能力を持ち、どのような部品をどのように組み合わせることができるか、という内容を含んだ設計情報がつくられることになる。

ここで注目すべき点は、つくり出される設計情報が、どのように生み出され、どのように生産物である建築を完成させるのか、その経緯を観察していくことによって、つくり手の持っている設計思想の傾向を知り得ると考えられる点である。これは、設計情報が、つくり手の組織やシステムの持つ独自の知識・慣行・規範を含める経営的資源に基づいたものであるためである。そのために、この独自性を変更することは難しいと考えられ、他者の独自性を単純にコピーすることも困難であると考えられる。

## 2.3 複雑な人工物の解釈

H.Simon によると、人工物システムがしばしば階層的な形態に解釈できると述べている。そして、システムを記述できる以上、ある特性が見出せると語っている（参考文献 [11]）。

階層的解釈とは、ある要素を実現させるために相互に関連するいくつかの下位システムが構築され、その下位システムも、順次その下位システムより低いレベルのシステムによって成り立たされ、最も低いレベルに至るまでそれぞれ階層的な構造を保っている側面を持つタイプのシステムである。人工物を対象とする場合、このような階層的に記述できるほとんどのシステムで、どのように分解や結合に関する作業を行っていくかについて、あ

る程度の恣意性を見出すことが出来、そこから対象となる人工物のある側面に関する特性を理解することが可能であると考えられる。これは、前述のように、生産物をつくる場合などはその生産組織などが持つ恣意に関する傾向が見出せることを指している。

## 2. 4 「アーキテクチャ」概念の定義

人工物システムを分析する手法の一つに「アーキテクチャ」概念がある。「アーキテクチャ」概念は、システムの構成要素間の相互依存パターンに着目した概念であり、現在では多くの産業において現状の産業構造の把握、産業構造における問題点の発見、ビジネスの展開に関する戦略の立案などを目的として、人工物システムの分析に使用されている。1990年代前半に、MIT、ハーバード大学、ペンシルベニア大学などの米国のいくつかの大学の経営学者の間で提唱されたものであり（参考文献 [4],[17]）、国内では東京大学経済学部の藤本隆宏によって、自動車産業を中心に産業構造論と経営戦略論に応用され（参考文献 [2],[8],[13]）、この分野での用語として定着するまでにいたったものである。この概念は、システムの「分け方」と「つなぎ方」に着目した考え方であり、全体をどのように切り分け、切り分けられた部分をどのように関係付けるかという視点に立ち、そのパターンによって表されるシステムの性質を広く「アーキテクチャ」と呼んでいる（参考文献 [1]）。ここでは「アーキテクチャ」概念を、以下のように定義する。

『人工物である対象を、どのように要素（モジュール）に切り分け、どのようにそれらの継ぎ手（インターフェイス）を設計するか、という観点から対象を認識することによって得ることができる、構成に関する基本的なルール（構法）と手法（工法）。』

人工物のものづくりには、様々なシステムが係わることになる。生産物の機能システム、生産物の構成システム、生産プロセスのシステム、生産組織のシステムなどが考えられる。「アーキテクチャ」はこれらの様々なシステムのデザインやマネジメントを考えるとときに有効な概念であると考えられる。なぜなら、複雑で高度な機能を持つシステムを限られた経済的資源で実現させるためには、各要素の役割分担と要素の相互調整を、どのように工夫するかという点が重要な問題となると考えられる。それに対し「アーキテクチャ」は、システム内の要素間相互依存性を浮き彫りにするために、どこでどのような調整を必要とされているかというシステムの特徴を決定づける要点の一つを明確化させることができる。

また、この概念は、人工物をつくる過程において行われる思考、判断を描写した内容の「見える化」したものと考えることができる。これは、人工物をつくるときに

は、意識的か無意識的にかかわらず、一体不可分であるシステムの「アーキテクチャ」を考えることを捉えている考え方ということが出来るためである。

「アーキテクチャ」に注目することによって、全体を部分に分割し、部分と部分の間に新しい関係性を構築してゆくことになり、技術的な革新の可能性を理解することが出来る機会を獲ることになる。個々の部分の技術革新には、比較的大きなエネルギーの投入が必要となる。しかし、一つ一つの部分の技術的革新が行われない状態でも、それぞれの既存技術に基づく部分間に新しい関係性を構築することによって、全体としての革新を実現することが出来る可能性を持っている。つまり、この場合の革新は、技術の革新というより、関係性による革新ということになる。つまり、「アーキテクチャ」で技術革新を見ていくと、各部分の技術革新に大きなエネルギーを払う必要がなくなることで、関係性の革新という新しいマネジメントの方向性を示すことになることの、二つの可能性を見出すことが出来ると考えられる。

## 2. 5 モジュラー型とインテグラル型の特性

「アーキテクチャ」のタイプとして、特に構成要素の相互依存性に基づくタイプ分けをした場合、モジュラー型とインテグラル型を挙げることが出来る。

モジュラー型の特徴を考えた場合、モジュラー化によって、独立性の高い部分に切り分け、そのインターフェイスのルールを固定すると、複雑な調整は各部分の内部で完結し、部分間の調整を省くことが出来るようになるということがいえる。つまり、他の部分で起こる現象に対して、調整する必要が基本的に無くなる。さらにインターフェイスのオープン化が進めば、ある特定部分のつくり手は対象部分に特化して発展させていくことが出来る。人工物の生産の場合、一つ一つの部品のつくり手から見ると、他の部分に対して考慮をばらう必要ない状況で製品開発が可能となり、市場からみると同様の複数の製品、部品から自由に取捨選択することが出来るようになる。

しかし、モジュラー化は、デメリットもあわせもつことになる。要素間相互依存関係性を無くすようにシステムを切り分ける場合、対象となるシステムに対する深い知識が必要となる。つまり、要素間相互依存関係性を抑えるということは、要素の切り分け方と要素間の相互作用を同時に整理する必要があり、対象についての十分な情報が必要不可欠となる。構成要素間相互依存関係が残る方法で切り分けた場合、各要素はその内部の調整と要素間インターフェイスの調整を行うことになり、常に相互関係がある他の要素のことを同時に検討していく必要が出てくる。また、インターフェイスのルール化を

行うことは複雑性を抑える手法の一つであるが、一般的に個々の要素にとっては望ましくないもの、不要なものが含まれる可能性が生じることになる。つまり、要素内部では自由度が高く保たれ、その反面、要素の切り分け方や関係性に無駄や不合理性を生じさせる可能性を含むことになる。一旦オープン化した場合、社会的な仕組みや産業構造に関するルールを前提としたものとなり、根本的な変化に対してかなり広い範囲での対応するエネルギーが必要となるため、切り分け方やインターフェイスのルールを見直すことは困難となる場合が考えられる。

モジュラー型に対して、要素間のインターフェイスをルール化せず、多くの要素間の最適な相互調整を一度に行う傾向をもつのが一般的にインテグラル型と呼ばれるシステムである。要素間の最適な相互調整を摺り合せ行為によって実現させていくことは、より良いシステムを得るために有効な手段であると考えられる。しかし、システムの複雑性の度合いによっては、必要となる資源や能力が膨大になる場合が考えられ、それだけのエネルギーをかけるべき経済的・社会的価値を生み出すことが出来るかどうか問題となってくる。

インテグラル型のメリットとデメリットは、一般的にモジュラー型のそれらと表裏の関係になっている。ただし、型による優位性は環境や状況などによるものであり、良し悪しの問題ではない。ここで重要なのは、それぞれの型が異なったメリット、デメリットを持っていることであり、それを状況や環境に応じて的確に使い分けることができるかどうかである。

以上の要点をまとめたものが図1である。時間や労力などの経済的資源に対し、製品品質や製品使用などの得られるパフォーマンスを、モジュラー型、インテグラル型に分け、図示したものである。最終的に求められるパフォーマンスが不明な場合、P2がどのレベルに來ても対応できるインテグラル型が選択されるべきであるということが出来る。また、求められるパフォーマンスがP1のレベルであると固定できる場合、モジュラー型を選択することにより、投入される経済的資源を押さえることが可能となることが示されている。

## 2. 6 生産活動における様相

建築生産システムなどの全体を一度に理解することが困難であると考えられる複雑なシステムは、基本的には抽象的であり、その構造を具体的に示すことは極めて困難である。ここでは、様相という概念を用いてシステム全体を切り分け、それぞれの様相を理解していくことによって、全体システムの特質を探るものである。ここで言う様相とは、システム全体を、その構成上の特質を見

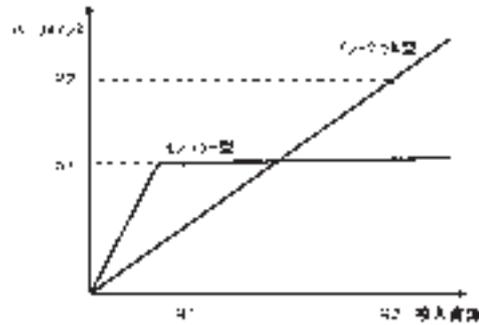


図1 モジュラー型とインテグラル型の関係性

極めることによりいくつかに分解したものである。各様相は通常複数の要素で構成されているため、それぞれの「アーキテクチャ」を議論することができる。

また、建築生産システムの「アーキテクチャ」の特性を把握するためには、構工法を一貫として把握していく必要がある。しかし、対象の建築生産システム全体は要素数が多く直接的な把握が極めて困難である場合が考えられる。そのために前記のように生産物の機能、生産物の構成、生産プロセス、生産組織などの各様相の「アーキテクチャ」を理解し、同時にその関係性も検討していくことによって全体像を理解することを試考していくものである(参考文献[6])。建築生産システムのような、主な様相(生産物の機能、生産物の構成、生産プロセス、生産組織)の比較的要素数が多く複雑性の高い人工物は、一般的に全体システムが持続的に成立していくために各様相が階層的な構造を持つ傾向があると考えられており、それを利用する手法を使い「アーキテクチャ」の型を理解することを前提とするものである(参考文献[7])。対象システムの「アーキテクチャ」の型の把握については、厳密な測定によって明示することは難しいが、少なくとも比較的上位の階層において強いモジュラー性が表れる場合、モジュラー型であると考えられる。また、「インターフェイスのルール化」と「各様相間の関係性」の二つの面によってインテグラル型かモジュラー型かを判断していくことによって、理解を深めることが出来ると考えられる(参考文献[1])。

## 3. 「アーキテクチャ」の動的な分析

### 3. 1 「アーキテクチャ」の変化

建築生産物「アーキテクチャ」を考えると、継時的に変化していることが観察できる。特に、比較しやすい建築部品に関して考えるとあきらかである。例えば、コンピューター機器の導入に伴う、当初の浮き床からOAフロアへの生産物「アーキテクチャ」の変化は、構成材がインテグラルからモジュラーへ変化しており、仕上材のカーペットもインテグラルからモジュラー(タイルカー

ペット化)へ変化している。

このとき、どのようなきっかけで「アーキテクチャ」に変化が生じるのかを考えていくと、大きく分けて「生産物機能」、「生産物構成」、「生産プロセス」の三つの要因を考えることができる。また、「アーキテクチャ」がインテグラル型からモジュラー型に変化するのには、当初システム全体の把握が困難な場合はインテグラル型の「アーキテクチャ」によって構成要素を擦り合わせながらつくり込まれていき、システムの理解が深まれば切り分けることができる部分が明示され、徐々にモジュラー化が進むことが考えられることになる。逆に、モジュラー型がインテグラル型に変化する要因を考えた場合、何らかの新しい要素が組み込まれることが考えられる。例えば、建築部品の生産物「アーキテクチャ」がこのような変化を起こすには、これまでは無かった施主からの要求機能や要素技術の革新などが取り込まれる場合などが考えられる。

一方、スタティックな組織のあり方については、先行研究の中で、「技術は組織のあり方を規定する」(参考文献[7])という議論や、「組織のあり方は対象とする技術のタイプに適合する必要がある」(参考文献[15])という議論がなされてきている。また他産業の時間軸上の導体的な技術と組織の関係性の研究(参考文献[10])も進められている。しかし、総括的に理解していく必要のある建築生産活動においては、時間軸に沿ったシステムの変化を深く理解していく必要があるが、現状では成熟した議論がなされるまでには至っていない。

「アーキテクチャ」が各様相において変化していくのには、大きく分けて二つのパターンが考えられる。一つは、経済的な理由などにより生産組織が変更される場合である。結果的に、各様相の「アーキテクチャ」が全て調整され、変化していくことが考えられる。もう一つは、生産物そのものが持つ特性の変化により、生産物「アーキテクチャ」が変化し、それが各様相に影響を及ぼす場合である。当初、全体の生産物構成が理解できていない状態で個々の要素の擦りあわせによって生産物がつくられていくことになる。そして、生産物に対する継時的学習によって全体構成についての理解が高まり、合理的理論に基づき要素の塊と切れ目が設定できるようになり、モジュラー化していくことが考えられ、モジュラー化した場合はそのメリットを受けることができる。例えば、モジュールごとに「生産物機能」、「生産物構成」、「生産プロセス」を独立させて、他のモジュールを意識せずに生産していくことが可能になる点などが該当するが、そのために、「生産組織」もモジュール化している場合は、生産物情報を他組織と擦り合わせることなく、独自に発展

させていくことが可能になる。このような関連性により、生産物「アーキテクチャ」が変化する場合、静的には生産組織の「アーキテクチャ」も変化した方が経済的合理性を得ることになる。

### 3.2 生産物構成と生産組織の「アーキテクチャ」

建築生産物に対する技術的特性が変化することについては、内田祥哉が著書(参考文献[16])の中で既に指摘しており、クローズド部品のオープン化に着目している。つまり、当初特定の建物のためにつくられた部品が、やがて独立した市販を視野に入れるような製品となり、競合する他製品の生産を誘発し、複数の製品が共通のインターフェイスを持つことで互換性がある部品が市場に認められていくことを説明している。ここでは「アーキテクチャ」概念から各部位の技術的特性の動的な変化を理解し、内田が指摘した変化に注目しながら、無数にある建築生産物の部位を標準化していくことによって特性を見極め、生産組織との関係性を考えていく。

一方、他産業についての研究では、生産物「アーキテクチャ」のインテグラル化とモジュラー化の往復するような変化による一種のサイクルの存在の指摘がなされている。例えば、ハードディスクの開発に注目した楠木・チェスブロウの内容が、「アーキテクチャ」のダイナミック・シフトとして図2のような内容を説明している。対象となる生産物が時間と共に成熟してくると、その生産物のニーズと技術特性が進化していくことにより、多様性・自由度が求められる場合と、統合性・高品質が求められる場合が起こるに基づいている。つまり、どちらに重心が移動するかによって、対応する生産物の「アーキテクチャ」もインテグラル型からモジュラー型へ、またモジュラー型からインテグラル型へ移行する可能性があることになる。建築生産では極めて多様な要素を含むために、このような指摘を参考にしながら、生産技術的な側面から分析が必要であると考えられる。

一般的に、対象となる産業・業種が未成熟の場合、生産物の「アーキテクチャ」はインテグラル型であると考えられる。これは、生産物のシステムを構成する諸要素について、どのような相互依存性が内包されているのかを明確に理解されておらず、各要素技術がどのように組み合わせられているかを定義しきれない状況が考えられるからである。生産物「アーキテクチャ」がインテグラル型の場合、生産物の技術的革新のための問題解決は、関係する諸要素との相互依存関係により複雑になる。技術的革新の実現のためには、このような不明確な位置づけの技術的要素について緻密で包括的な調整を行うことが必要となる。そのためには、対応する生産組織の情報を

統合する必要性が生じる。このとき、一つの組織内部によって生産活動が完結している場合は、その活動を統合することにより必要な情報の集約が可能となる。つまり、生産物「アーキテクチャ」がインテグラル型の場合、一般的にインテグラル型生産組織が有利であると考えることができる。

多くの場合、当初インテグラル型だった生産物「アーキテクチャ」は、徐々にモジュラー化していくと考えられる。生産物「アーキテクチャ」がモジュラー化した状況では、諸要素の切り分け方とインターフェイスに関する標準化がなされる。このような標準化によって複雑な要素であってもシステムの中に容易に出し入れが可能となり、市場メカニズムに基づくものづくりの効率を高めることが出来る。また、この標準化は相互代替可能なコンポーネントとしての生産物を供給する企業間では競争を引き起こし、これがさらに技術的革新・コスト面の抑制を誘引することになる。

このモジュラー化についての内容は、内田がオープン化によって説明した内容と重なる部分があるが、オープン化とモジュラー化との関係性は基本的に重なるものであると考えることが出来る。ここで述べたように、技術面での発展により、一般的にインテグラル型生産物はモジュラー型へと移行する。このとき生産物がインテグラル型である場合は、通常クローズ型でもありとされる。これは、諸要素の切り分け方が不明確であり要素間相互依存性が強く働き、要素間のインターフェイスが標準化されていないことによって、オープン型化させることが困難な場合が多いからである。それに対し、クローズ型でありながらモジュラー化している生産物がある。建築部位で例示するならばOAフロアなどを挙げることができる。これは、モジュラー化している生産物において、製品戦略としてインターフェイス（OAフロアでいえば支柱部分の形状）のクローズ化を選択していると見なすことができる。つまり、生産物がインテグラル型の場合はオープン化が難しいが、モジュラー化されたものであればオープン型かクローズ型かの選択は技術的な面より企業戦略などによって成されている場合が多く、最終的にはニーズによりオープン化することが考えられる。

ここでの重要な点は、インテグラル型とモジュラー型のダイナミクスの理論的合理性であり、単純化を恐れなければ、各システムは図2のようにモジュラー型とインテグラル型の間を移行する可能性を持っていると考えることができる。

生産物「アーキテクチャ」がオープン化したモジュラー型の場合、それを担う生産組織は、統合型組織よりモジュラー型組織、つまり水平分業した複数の組織が要

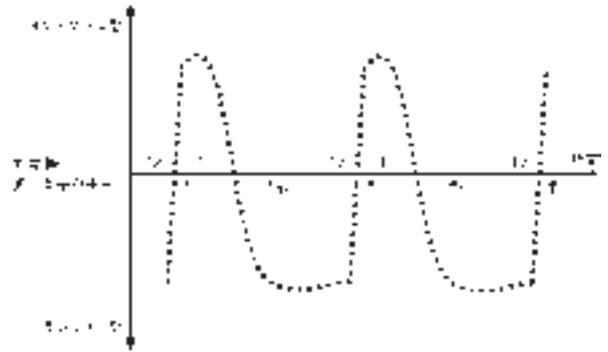


図2 生産物アーキテクチャのダイナミクス

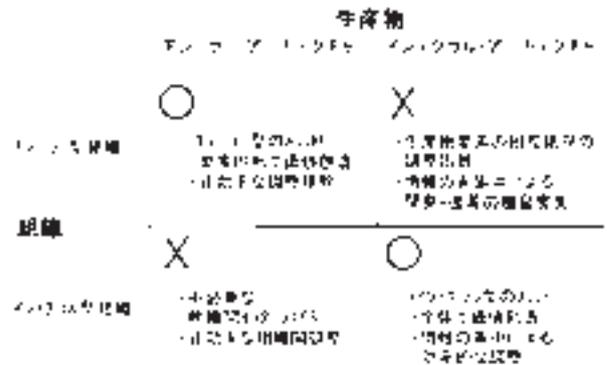


図3 生産物構成「アーキテクチャ」と生産組織「アーキテクチャ」の適合関係

素技術やそれを反映させたコンポーネントを持ち寄ることによって対象となる生産物をつくりあげることの方が有利性を保つこととなる。このような状況では、数多くの組織が技術開発上の様々な規模の投資を行うことが可能となり、このような多様性は一つの組織が内部で行える開発行為を遥かに凌ぐ多様性があると考えられる。つまり、生産物「アーキテクチャ」がクローズのモジュラー型からオープンなモジュラー型へ移行することは、生産組織の目標が、複雑な生産物システムの最適化から、部品や製品上の機能的単位などの個別の構成要素レベルでの開発に移ることを意味している。

生産物「アーキテクチャ」と生産組織「アーキテクチャ」の関係性は図3のように整理することができる。左上のセルでは、生産物「アーキテクチャ」がモジュラー型であることに対し、モジュラー型組織は非効率な内部調整を排除し、対象に対する技術的な特化が可能となる。右下のセルでは、インテグラル型生産物に対してインテグラル型組織は、組織内部の調整機能を高めていくことによって、複数組織では難しいような複雑な技術的要素の相互依存性を整理しながら最適化を目指して調整していくことが可能となる。

逆にセルの右上と左下では、生産物と組織の型の不適

合が認められる。まず、左下のセルのインテグラル型の組織を考えた場合、要素間の相互依存性に関する知識の蓄積と集約により生産技術や生産知識の統合にかかわる情報を蓄積していくことが可能となる特性を持つ。このとき、各組織は相対的に長い時間をかけた推察・実験・試行などを経て、徐々に情報を蓄積していくことになり、この経緯において諸要素間の相互依存性を理解していくことになる。この相互依存性の理解を通して、実験・試作・シミュレーションなどが行われ、結果として要素間の技術的な相互依存性を小さくしていくことができ、インターフェイスを計画にしていけることができる。このような視点から見ると、生産物のインテグラル型からモジュラー型への移行は一つの流れとして認められると考えられる。このように変化した生産物の「アーキテクチャ」は生産技術と生産組織の不適合をおこす可能性を含むことになる。要素技術のインターフェイスが明確になるにつれて生産物「アーキテクチャ」がモジュラー化し、統合型組織戦略を基本とするインテグラル型組織は、情報の統合によって構築される生産価値を産み出し難くなっていくことになる。つまり、組織間の調整を市場を使い効率的に可能になったにもかかわらず、内部調整に頼ることにより限界が顕在化してしまうことになる可能性がある。

右上のセルでは、モジュラー型の組織が生産物に対して型としての不適合をおこしている。これは、モジュラー型組織であるため、生産物の要素間相互依存関係の総括的な情報が入手できず、インテグラル型生産物の「アーキテクチャ」を的確に構成する術を持ち合わせない状況に陥る可能性がある。そして、一つの組織が外部機関に対して何を供給してほしいかという根本的な情報も得ることが困難となり、開発・改善が難しくなる場合が考えられる。これは、インテグラル型生産物の「アーキテクチャ」に対して、重要な調整に関する問題を解く情報を欠如してしまっている状態である。

### 3.3 システムの複雑性

前述のように、生産物の構成「アーキテクチャ」は、一般的にその対象によって固定されるものではなく、変化していく可能性を含むものである。多くの産業で、生産物の構成「アーキテクチャ」は初期の段階ではインテグラルである場合が多い。この段階では、生産物の構成に関する各要素がどのように作用するのが明確に定義できず、要素間の相互依存関係や相互作用も十分には把握できないと考えられる。楠木建によれば、一般的に生産物の構成「アーキテクチャ」は開発当初はインテグラル型であり、それが生産物の成熟度に伴いモジュラー型へと変化することが指摘されている（参考文献 [5]）。建

築生産物などのきわめて複雑な生産物においては、システムの進化に関与する要素とその間の関係性に関する情報量が膨大になるため、システムの熟成が進んでいくという要因だけで、単純にインテグラル型からモジュラー型に移行するとは、必ずしも必然的とはいえないと考えられる。

また、生産物「アーキテクチャ」がインテグラル型であれば、生産物の技術的革新・変化において、それに係わる問題解決は複雑になる傾向が強い。さまざまな要素とそれらの要素間相互依存関係による相互作用が不明確なので、実際の生産活動に際して、各様相だけでなく様相間の関係性も同時に複雑化させる可能性が高い。国内の建築生産システムがインテグラル型であるという仮説が成り立つ場合（参考文献 [18],[19]）、各要素について、要素そのものだけでなく様相間の関係性も理解していく必要があることになる。

### 3.4 組織のダイナミクスの可能性

ここで考えるべきことは、生産組織「アーキテクチャ」が変化する可能性である。各生産組織は、独自の「アーキテクチャ」を構成している。これは、各生産組織における過去の製品生産活動に基づいたものであり、その前提として、組織が存続してきた理由としてある固有の設計思想、生産思想が存在していたと考えられる。その上で、これらの経緯を持つ各組織は、何らかの成功体験を蓄積しながら今日に至っていると考えられる。

組織は、複数の構成員によって成り立っており、特に方向性を打ち出す経営担当者の思想が組織の独自性をつくり出す重要な一要素となる。この思想を構成してきたのが、その組織における成功体験であり、それを否定することは極めて困難であると考えられる。また、その成功体験は経営担当者だけでなく、成功を体験した全ての構成員の思想に少なからず影響を及ぼしていると考えられる。また、その思想に則り、新規に加入した構成員の教育がなされることになり、重層的に組織内の共通思想として根づくことになる。そのために、組織構成員が生産活動において拠り所とする共通思想としての傾向が生まれ、生産活動における内部変化に対して対応することが困難になっていく。

このように論理的に試考すると、生産組織の基本的思想、そしてそれを反映した「アーキテクチャ」を変更することは容易なことではないと考えることができる。つまり、生産物「アーキテクチャ」のダイナミクスに合わせて、常に生産組織「アーキテクチャ」を変化させていくことができる可能性は極めて小さく、前項の議論における合理性の確保が困難なことを示すことになる。

## 4. まとめ

ここでは、建築生産システムを取り上げ、各様相に関する記述方法を提示しながら、動体的な特性を記述し、そこから導かれる課題の抽出を行なった。

ここまで述べてきたように、生産物はダイナミクスが起こりえる理論的可能性を見出すことができたが、精査すべき点は、実社会の生産活動に内包される多種多様な外部環境による要素の影響である。つまり、一面から見た理論展開だけでは解ききれない結果が導き出されている可能性が高く、実際の社会活動の観察による矛盾を前向きに捉える必要がある。また、生産組織「アーキテクチャ」の変化の難しさによる、生産物「アーキテクチャ」との不適合の問題が抽出された。

今後、これらの課題に対する有効な解を導くべく、実際の建築生産活動を観察・分析し、他産業の生産活動との比較を行ないながら、研究を進める必要があると考えられる。

## 参考文献

- [1] 青島矢一, 武石彰:「アーキテクチャという考え方」, 藤本隆宏, 青島矢一, 武石彰編, 『ビジネス・アーキテクチャ』, 有斐閣, pp27-70, 2001.4
- [2] 青木昌彦, 安藤晴彦, 『モジュール化』, 東洋経済, 2002.3
- [3] ベネット J., 『建設プロジェクト組織』, 鹿島出版会, 1994.2
- [4] ボールドウィン C.Y., クラーク K.B., 『デザイン・ルール』, 東洋経済, 2004.4
- [5] Chesbrough, Henry W. and Ken Kusunoki, “The Modularity Trap: Innovation, Technology Phase Shifts and the Resulting Limits of Virtual Organization,” in I. Nonaka and D. Teece eds., *Managing Industrial Knowledge*, London: Sage Press, 2001
- [6] 藤本隆宏:「アーキテクチャの産業論」, 藤本隆宏, 青島矢一, 武石彰編, 『ビジネス・アーキテクチャ』, 有斐閣, pp3-26, 2001.4
- [7] 藤本隆宏, 『能力構築競争』, 中公新書, 2003.6
- [8] 藤本隆宏, 安本雅典編著, 『成功する製品開発』, 有斐閣, 2000.3
- [9] Jenkins, David eds., *Architects' Working Details*, London: The Architects' Journal, 1989
- [10] 楠木建, チェスブロウ H.W., 「製品アーキテクチャのダイナミック・シフト」, 藤本隆宏, 青島矢一, 武石彰編, 『ビジネス・アーキテクチャ』, 有斐閣, pp263-285, 2001.4
- [11] Simon H., *The Science of the Artificial -3rd Edition-*, [1996], The MIT Press
- [12] スライウォツキー A.J., モリソン D.J., 『デジタル・ビジネスデザイン戦略』, ダイヤモンド社, 2001.11
- [13] 武石彰, 藤本隆宏, 具承, 「自動車産業におけるモジュール化」, 藤本隆宏, 青島矢一, 33) 武石彰編, 『ビジネス・アーキテクチャ』, 有斐閣, pp101-120, 2001.4
- [14] Tidd, Joe, John Bessant, Keith Pavitt, *Managing Innovation*, New York, John Wiley & Sons Ltd., 1997
- [15] Tushman, Michel and Charles O'Reilly, *Winning through Innovation*, Harvard Business School Press, 1997
- [16] 内田祥哉, 『建築生産のオープンシステム』, 彰国社, 1977.8
- [17] Ulrich, Karl T., “The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm,” *Research Policy*, 24, pp.419-440, 1995
- [18] 吉田 敏, 野城智也, 「アーキテクチャ」概念による建築の設計・生産システムの記述に関する考察, 計画系論文集 NO.589 pp.169 - 176 2005年3月
- [19] 吉田敏 野城智也, Study on the Concept of “Architecture” to Describe Construction Products, THE 10th ANNUAL CONFERENCE, CIB W104 Open Building Implementation, 2004

## 編集委員会

委員長	川田誠一	産業技術大学院大学産業技術研究科長
委員	酒森 潔	産業技術大学院大学産業技術研究科 情報アーキテクチャ専攻 教授
委員	成田雅彦	産業技術大学院大学産業技術研究科 情報アーキテクチャ専攻 教授
委員	吉田 敏	産業技術大学院大学産業技術研究科 創造技術専攻 教授
委員	越水重臣	産業技術大学院大学産業技術研究科 創造技術専攻 准教授
委員	中鉢欣秀	産業技術大学院大学産業技術研究科 情報アーキテクチャ専攻 准教授
委員	大坪克俊	産業技術大学院大学産業技術研究科 創造技術専攻 助教
委員	清水將吾	産業技術大学院大学産業技術研究科 情報アーキテクチャ専攻 助教
委員	森本祥一	産業技術大学院大学産業技術研究科 情報アーキテクチャ専攻 助教

---

### 2008年度 産業技術大学院大学紀要

2008年12月 発行

編集・発行 産業技術大学院大学

東京都品川区東大井1-10-40

電話 03(3472)7834

URL <http://aiit.ac.jp/>

---