

FDM 式 3D プリンタを活用したロストワックス鑄金による大型作品の造形

Large-scale artwork modeling by lost wax casting using FDM 3D printer

五十嵐 俊治^{1*}
Toshiharu Igarashi^{1*}

¹東京都立産業技術大学院大学 Advanced Institute of Industrial Technology
*Corresponding author: Toshiharu Igarashi, igarashi-t@aait.ac.jp

Abstract This study explored the fusion of technology and art, focusing on the rich history and transition of Shinagawa, and produced a large-scale artwork using the lost-wax casting process with an FDM 3D printer. The process was capable of modeling complex shapes and proved to be more accurate and time-efficient compared to traditional manual methods. Environmental considerations were also taken into account, such as the use of recycled copper and the use of old wood for molding in refractory plaster. Importantly, this technology expands the possibilities for artwork, enabling the creation of more complex and large-scale works. In particular, it has been shown that it is possible to realize designs that are difficult to reproduce with conventional techniques, such as this work, which has a complex spiral structure and layered structure. In the future, it will be important for society to further develop this technology and link it to sustainable art production, including consideration for the environment.

Keywords cast metal; 3d printing; fused deposition modeling

1 はじめに

鑄造は、古代から現代に至るまで広く使用されている金属加工プロセスの一つである。このプロセスは、金属や他の材料を液体状態から固体状態へ変え、所望の形状を作成するために使用される。金属鑄造は金属製品を製造するための主要な技術の一つとして認識されており、現在でも建設、自動車、航空宇宙、医療機器などの業界で広く使用されている。その技術は時代の中でより効率的かつ精密なプロセスに発展してきており、Holtzer らの研究では、金属製品の生産手段として鑄造産業のシェアが絶えず拡大していることが示されている[1]。

2010 年の世界の鑄物業界の生産量は、ねずみ鉄の生産量が 4,400 万トンであるのに対し、非鉄金属の生産量は 1,500 万トン、鉄鋼の生産量は 1,000 万トンとされており、自動車、一般エンジニアリング、建設業界が主要な市場プレーヤーであることがわかる。さらなる開発における最優先事項は、モデリング、プロトタイピング、および生産とされており、ラピッドプロトタイピングやラピッドキャストイング (RC) などの分野の進歩は鑄造産業の競争力向上に繋がる。

2 関連研究

鑄造のプロセスでは、まず金属を溶かし、次に準備した型に流し込み、金属が凝固して冷却された後、型を割り、鑄造された部品を取り出す。部品表面に粗がある場合は、さらに機械での研磨が行われるが、インベストメント鑄造 (ロストワックス鑄造) では、ダイカストや砂型鑄造などの他の鑄造法と並んで、複雑な形状の金属製品を高い寸法精度と優れた表面仕上げで鑄造できることが知られている[2]。

鑄造によるアートの抱える課題の一つに、アーティストの意図した原型のデザインを再現することが難しいことが挙げられるが、あらかじめ収縮率を考慮して原型を作れば、複雑な形状のものを一体化して鑄造することができるため、加工の工程を減らすことができる利点がある。また、ロストワックス鑄造では、抜き勾配やアンダーカットを考慮する必要がない等の特徴を有する。

ロストワックス鑄造の工程は、まず蠟で原型を作り、原型の周りを型の素材となるシリカ、水ガラス、石膏等で重ねる。型が固まったら、内部に残っている原型の蠟を熱で融かして取り除き、型にできた空洞に溶融金属を流し込む。最後に型を取り除き、形を整える。

ロストワックスの優位性としては、設計の自由度が高く、砂型鑄造やダイカストでは成形できない複雑形状やアンダーカット形状の製品を製作できることが挙げられる。通常の切削加工では、コストに見合った加工時間に収まらないことや、プレス鍛造では、アンダーカット等の形状を再現する型作製が困難な場合がある。また、ロストワックスは、ダイカストと異なり、アルミ合金だけでなくステンレスや鉄、銅など、多様な材質を用いることができる。

このロストワックス鑄造の場合、最も難しいのはワックスパターンそのものの型の製作であるが、3D プリンティング技術の活用が、ワックス パターンの製造プロセスを置き換える可能性がある。3D プリンティングはいわゆるインクジェット技術であり、指定された位置でプリントヘッドからの液滴によって粉末層が結合される[3]。ラピッドプロトタイピング鑄造の効率性のために、3D プリンティングを活用した研究は広く行われている[4-7]。Gill らの研究では、アルミニウム部品が鑄造され、実験の結果、そのほとんどが軽合金の鑄造要件に適合する寸法精度を備えていたことが分かっている。3D プリンティングでは、従来の製造および成形方法よりも複雑な構造を作成することが可能であり[8]、寸法精度の向上により多くの部品を一つの部品に統合できることが示されている[9]。

3 手法

作品テーマ

本制作では、品川の歴史と統合された物語性をテーマに制作を行った。海進期 (10 万年ほど前) の日本列島は、海面が今より 10m ほど高いところにあり、品川地域は古東京湾とよばれ、浅い海が広がっていた。それが、縄文時代の遺跡である大森貝塚であり、大量の貝殻や動物の骨、土器、石器などが出土するなど、約 4,400 年前から生活が営まれていたことが分かる。また、江戸と京都を結ぶ東海道は歌川広重の浮世絵でも知られ、



[左：大森貝塚，中央：東海道五十三次，右：品川停車場]

品川は東海道の最初の宿場町として栄え、外国船の検疫も担っていた。明治維新後、品川は工業地域としての性格を強め、鉄道や工場が次々と建設され始める。特に、日本初の鉄道路線が開通した際、「品川停車場」は「横浜停車場」とともに日本で最初に開業した駅となった。20世紀後半から21世紀にかけては、モノからサービスへの転換が訪れると共に再開発が進められ、オフィスビルや高層マンションが立ち並ぶエリアとなった。全国に様々な地域があるが、品川ほど年代によって役割の変遷があった地域は珍しく、それこそが品川の特徴と考え、海から始まり、様々な変遷を見せてきたこれまでの品川とこれからの品川を表現する方向性とした。

プロジェクト・ディレクション

3D プリントを行った後の樹脂に FRP コーティングを施すなどの手法も考えられるが、耐久性の面から、銅の鑄金として制作することとした。形状としては、複数の螺旋が組み合わさってできる形であるが、突き抜けや重ね構造は、通常は鑄金では再現しにくいとされている。そのため、3D モデリング上で行うことで、複雑な造形を可能にした。

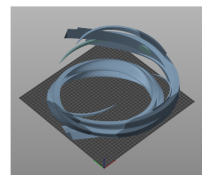
設置スペースはそれほど大きくないため、サイズ感としては成人の1.5倍程度を想定し60cmで制作した。また、設置スペースは白を基調とした背景に、色温度の高いライティングが施されていたため、作品の調和を考えた時に、磨いた銅の発色と、それを際立たせる補色としての藍色を採用した。素材は、再生銅、タンニン鞣し牛革である。銅は、金属の中で最良の部類に入る。耐食性は、“実用性”と“不変性”を示唆しており、補色として挟む革は染色に適し、エイジングによって経年変化を楽しむ“可変性”を示唆している。

また、大型制作を行うにあたっては、小さな作品を制作するよりも資材のロスなどが大きくなるため、環境への配慮が不可欠である。そのため、流し込む銅は、再生銅を活用し、耐火石膏で使用する古材（アンツーカー）を再利用している。また、3Dモデルの印刷後に粘土での成形やシリコンでの型取りを行わないということも、エコに繋がっている。

制作

まず、fusion 360[10]を用いて 3D モデルの作成を行った。その後、FDM 式 3D プリンタを活用して、蠟型をそのまま印刷した。印刷された蠟型に湯道と湯口の取り付けを行い、古材・アンツ

カー・石膏を混ぜた耐火石膏で型取りを行い、大型電気炉で焼成した。48時間の焼成後、土間に設置し銅の流し込みを行った。余熱が引いた後に、石膏型を割り、造形物を取り出し、研磨を行った。研磨に関しては、物理研磨だけでは機材や手が入りにくい部分があるため、塩酸と過酸化水素水を用いた化学研磨を実施した。



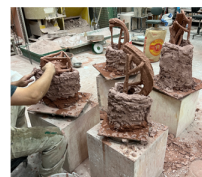
① 3Dモデルの作成



② ろう型の印刷



③ 湯口・湯道の取付



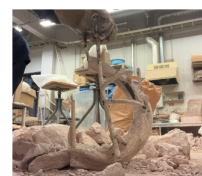
④ 耐火石膏で型取り



⑤ 大型電気炉で焼成



⑥ 鑄造



⑦ 型割り&再利用



⑧ 物理研磨



⑨ 化学研磨

4 結果

本研究では、FDM 式 3D プリンタを活用したロストワックス鑄金によって、人間の手では制作することの難しい複雑な形状の大型アート作品を造形することができることを実証した。

今回の実証を通して、FDM 式 3D プリンタを活用することで、人間が素手で大型の原型を作成し型を取り、蠟を流し込んでロストワックス原型を作成する工程を挟まずにそのまま蠟型を成形し、銅の複雑な形の大型鑄造ができることが確認された。また、造形された作品の評価としては AAC 立体アートコンペティションにおいて優秀賞に選出された。



5 議論

先行研究の中では、光造形式 3D プリンタでロストワックスレジンを活用した複雑な造形の小型ジュエリーなどの制作事例がある。しかし、光造形式 3D プリンタで出力する場合は、吊り下げ型になるため、小型の安定した形状でないと印刷時にモデルの脱落やラフトしか印刷されないといった印刷不良を起すことが知られている。特に大型造形を意図した場合に、印刷時間だけでなく、レジンの使用量も増加するため、印刷失敗による時間・金銭的成本が大きくなることはアーティストの目線では避けたいリスクである。一方で、FDM 式 3D プリンタではフィラメントを積層していく形でモデルが出力されることがメリットとして挙げられ、今回のモデル形状においても安定した出力を得ることができた点は有意な知見であると考えられる。

今回は、ロストワックス原型を 3D プリンタで出力した後に、湯の流れをシミュレーションしながら湯道・湯口の取り付けを手作業で実施している。しかし、ハンダごてなどを用いて固形の蠟を溶かしながら、湯道・湯口を取り付ける作業は時間を要するだけでなく、滴下した蠟による火傷の危険性もある。そのため、湯道・湯口の取り付けに関しても、3D モデリングの際に行うことで、さらなる工程の簡略化と安全性の向上が期待できると考えられる。

また、FDM 式 3D プリンタを活用した場合、積層痕が蠟型にも残ることが確認された。そのため、作品に積層痕を残す意図がない場合は、耐火石膏で型取り前に積層痕を消した状態で電気炉での焼成を行うことが推奨される。

一方で、人の手では制作しにくい複雑な形状ということは、鋳造した後の工程も難しいということである。特に鋳造した金属の研磨には、ディスクグラインダーやルーターといった研磨機材を用いることがあるが、これらが使用できない部分も今回の形状にはあった。アート作品に研磨機材を用いる場合は、場所によって研磨のムラが見られないよう全ての箇所同等程度の研磨を行うのが一般的である。人手による研磨以外にも今回用いた化学研磨、バレル研磨やウォーターブラストといった手法も考えられるため、研磨を行う手法についてはさらなる研究が必要になると考えられる。

6 結論

本研究では、品川の豊かな歴史と変遷をテーマに、技術とアートの融合を追求し、FDM 式 3D プリンタを用いたロストワックス鋳造法による大型アート作品の制作を行った。このプロセスは、複雑な形状の造形が可能であり、従来の手作業による方法と比較して、より精度が高く、時間効率が良いことを実証した。また、再生銅の使用や耐火石膏での型取りに古材を使用するなど、環境への配慮も行われた。

重要なのは、この技術がアート作品の可能性を広げ、より複雑で大規模な作品の制作を可能にする点である。特に、複雑な螺旋構造や重ね構造を有する本作品のような、従来の技術では再現が困難であったデザインも実現可能であることが示された。今後、この技術をさらに発展させ、環境への配慮を含めた持続可能なアート制作へとつなげていくことが、社会にとっても重要であると考えられる。

7 謝辞

本研究は、東京藝術大学鋳金研究室の協力を得て実施された。

参考文献

- Holtzer, M.; Daňko, R.; Żymankowska-Kumon, S. Foundry industry—current state and future development. *Metalurgija* 2012, 51, 337–340.
- Kalpakjian, S.; Schmid, S.R. *Manufacturing Engineering Technology*; Dorling Kindersley Pvt Ltd.; Pearson Educ.: London, UK, 2009.
- Zhang, H.; Zhu, T.; Cao, S.; Shu, X.; Sun, B.; Hu, Y. 3DP System Development Based on Lnkjet Printer and its Experimental Research. *Mach. Des. Manuf.* 2012, 7. Available online: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-JSYZ201207046.htm (accessed on 12 October 2020).
- Gill, S.S.; Kaplas, M. Efficacy of powder-based three-dimensional printing (3DP) technologies for rapid casting of light alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2011, 52, 53–64.
- Upadhyay, M.; Sivarupan, T.; El Mansori, M. 3D printing for rapid sand casting—A review. *J. Manuf. Process.* 2017, 29, 211–220.
- Marwah, O.M.F.; Sharif, S.; Zainol, M.A.; Ibrahim, M.; Mohamad, E.J. 3D printer patterns evaluation for direct investment casting. *Appl. Mech. Mater.* 2014, 465–466, 1400–1403.
- Seleznov, M.; Shulz, B.; Cornie, J.; Zhang, S.; Sachs, E.; Serdy, J.; Cima, M. Novel Near-Net-Shape Tool-Less Method for Manufacturing of Cast Metal Matrix Composites: Three-Dimensional Printing (3DP) of Ceramic Preforms Combined with Investment Casting Technology. *SAE Trans.* 2000, 109, 235–242.
- Thomas Birtchnell, John Urry, 3D, SF and the future, *Futures*, Volume 50, 2013, Pages 25-34, ISSN 0016-3287, <https://doi.org/10.1016/j.futures.2013.03.005>.
- Wood K, Ravi S (2015) Design considerations for three dimensional printed cores and molds, 119th Metal casting Congress: 24–29
- <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>