

脳の機能局在と音楽の関係

The relationship between brain functional localization and music

田部井 賢一^{1*}

Ken-ichi Tabei^{1*}

¹東京都立産業技術大学院大学 Advanced Institute of Industrial Technology

*Corresponding author: Ken-ichi Tabei, kenichi.tabei@gmail.com

Abstract Listening to and performing music brings about various changes in our brains. For many years, research on music and the brain has primarily focused on individuals with brain injuries. However, since the 1990s, the development of new techniques that allow for the non-invasive measurement of brain activity has led to a rapid increase in studies involving healthy individuals. This advancement has greatly deepened our understanding of the effects of music on the brain. In this paper, I will examine in detail how music influences the brain and the impacts of music therapy, from the perspective of brain function and music. Specifically, we will explore the effects of music on emotions, memory, attention, and motor functions, discussing the underlying mechanisms and presenting practical applications.

Keywords music; brain; functional localization

1 はじめに

音楽を聴いたり演奏したりすることで、私たちの脳には多様な変化が生じる。長年にわたり、音楽と脳に関する研究は、おもに脳に損傷を受けた人々を対象に行われてきた。しかし、1990年代以降、脳の活動を、身体を傷つけずに（非侵襲的に）測定する新しい技術が開発されたことにより、健康な人々を対象とした研究も急増した。これにより、音楽が脳に与える影響についての理解が大きく深まった。

本稿では、音楽が脳にどのように影響を与えるのか、また音楽療法がどのような影響を及ぼすのかについて、脳機能と音楽の視点から詳しく見ていく。とくに、音楽が感情、記憶、注意、運動機能などに及ぼす影響について考察し、その具体的なメカニズムと実際の応用例を紹介する。

2 脳の構造と機能

脳の概要

脳は私たちの体で極めて重要な役割を果たしている。頭部に位置し、大脳半球、間脳、小脳、中脳、橋、延髄、そして脊髄など、いくつかの部分に分かれている。人間の脳の重さは約1400グラムで、大脳半球の表面積は約2200平方センチメートルである。

脳の中には神経細胞と呼ばれる多くの細胞が存在し、これらの細胞が脳の機能を担っている。神経細胞には、中心に核がある細胞体、他の細胞から情報を受け取るための樹状突起、情報を他の細胞へ送る軸索という部分がある。これらの神経細胞は電気信号を介して情報を伝達し合っており、この信号は活動電位と呼ばれる。

さらに、神経細胞同士はシナプスという接点で繋がっており、シナプスにおいて化学物質が放出されることで情報が次の神経細胞へと伝達される。このようにして、脳は私たちの思考、運動、感覚などをコントロールしている。

脳の外側にある灰色の部分を灰白質と言い、ここには神経細胞が集まっている。一方、内側の白い部分は神経纖維が集まっている。これを白質と呼ぶ。灰白質は基本的に6層の構造をしており、部分によって細胞の配置が異なる。この細胞の配置の違いに基づいて脳を区分するのが脳地図であり、ブロードマ

ンの脳地図がその一例である。この脳地図は解剖学的な違いに基づいているが、実際のところ脳の機能による区分ともよく一致している。これは、脳が特定の機能を効率的に行うように特化しているためである。大脳は、大脳縦裂という大脳を左右に分ける深い溝によって右脳と左脳に分かれており、右脳は体の左側を、左脳は体の右側をそれぞれ制御する。たとえば、視覚情報は、私たちが見る世界の左半分を右脳が、右半分を左脳が処理する。これにより、脳は情報を効率的に処理し、私たちが日常生活で体験するさまざまな活動を支えている。

脳の機能局在と音楽の関係

機能局在とは、脳の大脳皮質の各部分が異なる機能を持つことを意味する。たとえば、言語に関する脳の領域として、左半球に位置するブローカ野（話す機能を制御）とウェルニッケ野（話された言葉を理解）が有名である。本節では、大脳を構成する4つの葉（前頭葉、側頭葉、頭頂葉、後頭葉）を簡単に説明したのち、側頭葉にあって音・音楽を処理する聴覚野について、独立して取り上げる。

前頭葉は私たちの脳の前部に位置しており、とくに高等ほ乳類ではよく発達している。ヒトの場合、前頭葉は大脳皮質の表面積の約3分の1を占めている。この部分には運動野が含まれており、中心溝に沿って位置している。運動野は私たちの手足の動きを直接コントロールする役割を持っている。運動野の前には運動前野があり、これは動作の流れをスムーズにしたり、動作の計画を立てるのに関与している。たとえば、ヴァイオリンを弾く際の左手の動きは、脳の運動野と感覚野が協力して制御していることが研究で示されている。また、よく練習したピアノ曲を聞くと、その人の運動野の活動が活発になるという研究結果もある。前頭葉のさらに前部には前頭連合野（連合野とは大脳皮質において、感覚情報や運動情報の統合と高次の認知機能に関わる領域のこと）があり、ここは推理、判断、計画、評価といった高次の思考機能に関わっている。さらに、前頭連合野の後部には言葉の発話をコントロールするブローカ野が位置している。これらの領域が複雑に連携して、私たちが日常で行うさまざまな思考や動作を可能にしている。

側頭葉は私たちの脳の一部で、音楽や言語などの重要な機能を担っている。側頭葉の外側には上、中、下の3つの側頭回があり、これらは上側頭溝、中側頭溝、下側頭溝によって分けら

れている。側頭葉の内側には海馬傍回があり、その深部には記憶に関わる海馬や感情を制御する扁桃体が位置している。とくに横側頭回という側頭葉の外側溝下壁には聴覚野があり、これが音を処理する。また、左側の上側頭回後部にはウェルニッケ野があり、これは言葉の理解に特化している。側頭連合野は物を識別したり、人の顔を認識するのに重要で、聴覚に関する短期記憶の保持にも関わっている。側頭葉が音楽の受容にどう関与しているかは、難治性てんかんの患者を対象にした側頭葉切除術の研究からも明らかにされている。たとえば、右側頭葉が切除されると旋律の知覚や記憶に障害が出ることが知られている。左側頭葉が切除されると、音程の弁別に問題が生じることも報告されている。また、側頭葉内での音楽処理の場所を特定する研究では、右上側頭回前部の切除により拍子の感覚が、後部の切除により音程やリズム、拍子の弁別能力が障害されることが示された。これにより、音楽の各構成要素を処理する脳領域が側頭葉内で異なることが示唆されている。

頭頂葉は私たちの脳の上部、中心溝の後方に位置し、おもに体の感覚や空間に関する情報の処理を担当している。頭頂葉の中心後回には体性感覚野があり、身体の感覚を処理する。さらに後部には頭頂連合野があり、この部分の損傷により、身体失認、空間知覚障害、観念失行、構成失行などの症状が生じることがある。頭頂連合野は、空間の視覚情報や体の位置情報を処理することで、運動の制御、注意、眼の動きを助ける。また、音高や時間に基づく旋律の変換にも関与すると考えられている。

後頭葉は、頭頂後頭溝より後方に位置し、おもに視覚機能を担当している。視覚野と視覚連合野があり、視覚伝導路は眼球から始まり、一次視覚野（後頭葉の内側面に位置）で終わる。視覚情報はここから2つの主要な経路に分かれる。背側視覚経路は空間に関わる情報（奥行き、立体感、物の動きなど）を処理し、腹側視覚経路は物体の形や色など、物の同定に関わる情報を処理する。楽譜を読む際には、とくに背側視覚経路が関与していることが示唆されている。これらの視覚経路は、私たちが見たものをどのように認識し、反応するかに大きく寄与している。

聴覚野

音楽が耳に届くと、まず音の周波数や強さなどの情報が聴覚野で処理される。聴覚野は音を細かく分解し、音程、リズム、音色といった音楽の要素を識別するためにとても重要である。ここで「どの音が高いか」「どの音が低いか」「どの楽器が鳴っているか」などの基本的な情報を処理する。聴覚野は私たちの脳の側頭葉にある部分で、音を処理する重要な役割を担っている。聴覚野は脳の深部に位置し、外からは見えない内側の構造である。この領域は横側頭回と呼ばれ、側頭葉の一部に属している。聴覚野は、大まかに分けて一次聴覚野、二次聴覚野、そして連合聴覚野という3つの部分に分類される。一次聴覚野（ブロードマンで言う41野）は音の基本的な情報を処理し、二次聴覚野（42野）はより複雑な音の情報を扱う。連合聴覚野（22野の一部）は音の情報をさらに深く解析し、意味を把握するのに関与している。これらの聴覚領域は、音の情報を中継

する部位である視床の内側膝状体から直接情報を受け取る。とくに一次聴覚野では、音の周波数がどのように表現されているかが重要である。聴覚野は、音の位置を特定する背側経路と、複雑な音の分析を行う腹側経路という2つの主要な情報経路に分かれている。ここでさらに高次の聴覚処理が行われる。このように聴覚野は複雑なネットワークを形成し、私たちが聞くすべての音を処理している。

脳の研究が進むにつれて、電気刺激を用いた実験などから、聴覚野の機能についての理解がさらに深まっている。音楽を聴くとき、その分析はまず聴覚伝導路と一次聴覚野で始まる。一次聴覚野では、音の基本的な要素が処理される。その後、音楽のより複雑な側面は聴覚連合野で分析される。ここでは、個々の音がもつニュアンスや、音と音のつながりによって成立する意味合い、感情的な要素が解析されるため、音楽をより深く理解することができる。音声言語の情報処理はおもに脳の左半球で行われるのに対して、音楽の情報処理はおもに右半球で行われるとされている。この違いは、左半球が速い情報処理に優れ、右半球が時間的に変化が緩やかで、全体の雰囲気や感覚を掴むような情報に適しているためかもしれない。この特性の違いは、左右の聴覚野が持つ独特の能力を反映していると考えられる。

このような聴覚野の非対称性は、聴覚情報の処理において非常に重要な役割を果たしている。左半球は音の細かい時間的変化や言語の分析に特化し、右半球は音のスペクトルや感情的な要素の処理に優れていることから、音楽や言語の知覚が左右の脳の異なる働きによって支えられているのである。

3 音楽と脳活動

この節では、これまでの脳機能研究で明らかになった音楽と脳の関係について示す。

前頭葉に対して

感情の調整、認知機能の向上、社会的交流の促進という複数の面で、音楽は前頭葉を活性化し、全体的な生活の質を向上させる手段として有効であることが示されている。とくに高齢者に対しては、前頭葉の健康維持と機能改善に大いに貢献することが期待される。感情制御と前頭葉に関して、Koelsch, Fritz[1]は、音楽が脳の感情処理に与える影響をfMRIを用いて調査した。音楽を聴くことは前頭葉の一部である前部帯状皮質（ACC）や内側前頭前皮質（mPFC）を活性化し、これが感情の調整に関与していることが示された。

認知機能の向上と前頭葉に関して、Thaut, Peterson[2]は、音楽リズムが前頭葉の認知機能に与える影響を検討した。リズムに基づく音楽は前頭前皮質（PFC）の活動を増加させ、とくに作業記憶や注意力の向上に寄与することが示された。また、Sarkamo, Tervaniemi[3]は、音楽が脳卒中患者の認知機能に与える影響を調査した。音楽療法を受けた患者は、前頭葉の活性化に伴い、注意力、記憶力、実行機能の改善が観察された。

社会的交流の促進と前頭葉に関して Rabinowitch, Cross[4]は、合奏活動が前頭葉の社会的認知に与える影響を検討した。

合奏活動は前頭前皮質の社会的認知領域を活性化し、共感や協調行動を促進することが示された。

側頭葉に対して

音楽が側頭葉に与える影響が明らかになっている。音楽は、聴覚情報の処理、記憶の保持、感情の認識、認知機能の向上、社会的交流の促進という複数の面で側頭葉を刺激し、高齢者を含む多くの人々の生活の質を向上させる手段として有効であることが示されている。これにより、音楽は健康維持と機能改善に大いに貢献することが期待されている。聴覚情報の処理と側頭葉に関して、Zatorre, Chen[5]は、音楽聴取が側頭葉の活動に与える影響を fMRI を用いて調査した。音楽を聴くことで、側頭葉の一次聴覚野 (A1) や連合聴覚野 (A2) が活性化され、音のピッチやリズム、メロディの処理が行われることが示された。

記憶の保持と側頭葉に関して、Samson, Dellacherie[6]は、側頭葉が音楽に関連した記憶に与える影響を調査した。音楽療法は、とくに側頭葉の海馬や側頭極の活動を促進し、音楽に関連するエピソード記憶や作業記憶を強化し、また側頭葉を活性化することで記憶機能の維持・改善に寄与することが示唆された。

感情の認識と側頭葉に関して、Blood and Zatorre[7]は、音楽による感情の認識が側頭葉に与える影響を PET スキャンを用いて調査した。感動的な音楽 (特定の音楽ジャンルや曲ではなく、聴く人にとって感情的な意味や深い共鳴を持つ音楽) を聴くと、側頭葉の内側側頭回や扁桃体が活性化され、強い感情反応が引き起こされることが示された。

認知機能と側頭葉に関して、Thompson, Schellenberg[8]は、音楽トレーニングが側頭葉の認知機能に与える影響を調査した。長期間の音楽トレーニングは、側頭葉の灰白質の密度を増加させ、言語能力や空間認知能力の向上に寄与することが示された。

社会的交流と側頭葉に関して、Wan, Bazen[9]は、音楽活動が自閉症スペクトラム障害 (ASD) 児の社会的交流能力に与える影響を調査した。音楽療法は、側頭葉の聴覚処理領域の活動を高め、ASD 児のコミュニケーションスキルや社会的反応性を改善することが示された。

後頭葉に対して

音楽は、空間認知、感覚統合、運動機能の調整、注意力の強化、社会的認知の向上という複数の面で頭頂葉を刺激し、とくに高齢者の認知機能や運動機能の維持・改善に効果的であることが示されている。これにより、音楽は頭頂葉の健康維持と機能改善に大いに貢献することが期待される。

空間認知と頭頂葉に関して、Janata, Birk[10]は、音楽と空間認知の関連性を調査した。音楽を聴くことが頭頂葉を活性化し、音楽の旋律やリズムが空間的なイメージを喚起することが示された。とくに右頭頂葉の活動が顕著であったことが示された。

感覚統合と頭頂葉に関して、Schürmann, Raij[11]は、音楽聴取が頭頂葉の感覚統合機能に与える影響を調査した。音楽を聴くことは、頭頂葉の感覚統合領域 (とくに左頭頂葉) の活動を高めることが示された。これにより、異なる感覚情報 (視覚、

聴覚、触覚) の統合が促進されることが示された。

運動機能の調整と頭頂葉に関して、Brown, Martinez[12]は、音楽に合わせた運動が頭頂葉の運動計画に与える影響を調査した。音楽に合わせた運動は、頭頂葉の運動計画および実行に関連する領域を活性化し、運動制御の精度が向上することが示された。

注意力と頭頂葉に関して、Husain, Thompson[13]は、音楽が注意力と頭頂葉の関係に与える影響を調査した。本研究ではモーツアルトのソナタを熟練したピアニストが演奏し、MIDI ファイルとして録音した。このファイルを編集し、テンポ (速いまたは遅い) と調性 (長調または短調) の異なる 4 バージョンを作成した。音楽を聴くことで、頭頂葉の注意力制御に関連する領域が活性化され、とくに選択的注意力の向上が観察された。

社会的認知と頭頂葉に関して、Molnar-Szakacs and Overy[14]は、音楽とミラーシステム (社会的認知) の関連性を調査した。音楽活動 (とくに合奏や歌唱) は、頭頂葉を含むミラーシステムの活動を促進し、他者の行動理解や共感能力を高めることが示された。

後頭葉に対して

音楽が後頭葉に与える影響が明らかになっている。音楽は、視覚情報の処理、視覚的イメージの生成、視覚と聴覚の統合、感覚補完、視覚記憶の強化という複数の面で後頭葉を刺激し、高齢者を含む多くの人々の視覚機能や全体的な感覚体験を向上させる手段として有効であることが示されている。これにより、音楽は後頭葉の健康維持と機能改善に大いに貢献することが期待される。

視覚情報の処理と後頭葉に関して、Zatorre and Halpern[15]は、音楽が視覚イメージの生成に与える影響を調査した。音楽を聴くことで、後頭葉の視覚野 (とくに一次視覚野) が活性化され、音楽に対応する視覚的イメージが生成されることが示された。音楽療法は後頭葉を刺激し、視覚的想像力を高める効果がある可能性が示唆されている。

音楽の視覚化と後頭葉に関して、Janata, Birk[10]は、音楽を聴く際の脳の活動パターンを調査した。音楽を聴くとき、後頭葉の活動が見られ、これは音楽のリズムやメロディが視覚的に表現される際に関与することが示された。

視覚と聴覚の統合と後頭葉に関して、Hickok, Buchsbaum[16]は、視覚と聴覚の統合が後頭葉に与える影響を調査した。音楽に伴う視覚情報 (たとえば楽譜や映像) は、後頭葉を含む視覚処理領域を活性化し、視聴覚情報の統合が強化されることが示された。

感覚補完と後頭葉に関して、Koelsch[17]は、音楽と視覚情報の感覚補完についての研究を行った。音楽が視覚障害者の視覚イメージを補完する手段として有効であることが示され、後頭葉の活動がこれに関連していることが確認された。

視覚記憶と後頭葉に関して、Kraus and Chandrasekaran[18]は、音楽訓練が視覚記憶に与える影響を調査した。音楽訓練を受けた個人は、後頭葉の視覚処理領域が強化され、視覚記憶能力が向上することが示された。

4 まとめ

本稿では、音楽が脳の各部位に与える影響について詳しく考察した。音楽は前頭葉、側頭葉、頭頂葉、後頭葉に対してそれぞれ異なる刺激を与え、感情の調整、認知機能の向上、社会的交流の促進、記憶の強化、空間認知の改善など、多岐にわたる効果が示されている。特に、音楽療法や音楽トレーニングは、脳の健康維持や機能改善に有効な手段として期待されている。これらの知見は、音楽が人間の脳機能に深く関与し、その活用が医学や教育分野で大きな可能性を秘めていることを示唆している。本稿は貫、田部井[19]に改変を加えたものである。

参考文献

- Koelsch S, Fritz T, DY VC, Muller K, Friederici AD. Investigating emotion with music: an fMRI study. *Hum Brain Mapp.* 2006;27(3):239-50. Epub 2005/08/04. doi: 10.1002/hbm.20180. PubMed PMID: 16078183; PubMed Central PMCID: PMCPMC6871371.
- Thaut MH, Peterson DA, McIntosh GC. Temporal entrainment of cognitive functions: musical mnemonics induce brain plasticity and oscillatory synchrony in neural networks underlying memory. *Ann N Y Acad Sci.* 2005;1060:243-54. Epub 2006/04/07. doi: 10.1196/annals.1360.017. PubMed PMID: 16597771.
- Sarkamo T, Tervaniemi M, Laitinen S, Forsblom A, Soinila S, Mikkonen M, et al. Music listening enhances cognitive recovery and mood after middle cerebral artery stroke. *Brain.* 2008;131(Pt 3):866-76. Epub 2008/02/22. doi: 10.1093/brain/awn013. PubMed PMID: 18287122.
- Rabinowitch T-C, Cross I, Burnard P. Long-term musical group interaction has a positive influence on empathy in children. *Psychology of Music.* 2013;41(4):484-98. doi: 10.1177/0305735612440609.
- Zatorre RJ, Chen JL, Penhune VB. When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production. *Nat Rev Neurosci.* 2007;8(7):547-58. Epub 2007/06/23. doi: 10.1038/nrn2152. PubMed PMID: 17585307.
- Samson S, Dellacherie D, Platel H. Emotional power of music in patients with memory disorders: clinical implications of cognitive neuroscience. *Ann N Y Acad Sci.* 2009;1169:245-55. Epub 2009/08/14. doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.04555.x. PubMed PMID: 19673788.
- Blood AJ, Zatorre RJ. Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2001;98(20):11818-23. Epub 2001/09/27. doi: 10.1073/pnas.191355898. PubMed PMID: 11573015; PubMed Central PMCID: PMCPMC58814.
- Thompson WF, Schellenberg EG, Husain G. Decoding speech prosody: do music lessons help? *Emotion.* 2004;4(1):46-64. Epub 2004/04/01. doi: 10.1037/1528-3542.4.1.46. PubMed PMID: 15053726.
- Wan CY, Bazen L, Baars R, Libenson A, Zipse L, Zuk J, et al. Auditory-motor mapping training as an intervention to facilitate speech output in non-verbal children with autism: a proof of concept study. *PLoS One.* 2011;6(9):e25505. Epub 2011/10/08. doi: 10.1371/journal.pone.0025505. PubMed PMID: 21980480; PubMed Central PMCID: PMCPMC3183050.
- Janata P, Birk JL, Van Horn JD, Leman M, Tillmann B, Bharucha JJ. The Cortical Topography of Tonal Structures Underlying Western Music. *Science.* 2002;298(5601):2167-70. doi: doi:10.1126/science.1076262.
- Schürmann M, Raij T, Fujiki N, Hari R. Mind's Ear in a Musician: Where and When in the Brain. *NeuroImage.* 2002;16(2):434-40. doi: https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1098.
- Brown S, Martinez MJ, Parsons LM. The neural basis of human dance. *Cereb Cortex.* 2006;16(8):1157-67. Epub 2005/10/12. doi: 10.1093/cercor/bhj057. PubMed PMID: 16221923.
- Husain G, Thompson WF, Schellenberg EG. Effects of Musical Tempo and Mode on Arousal, Mood, and Spatial Abilities. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal.* 2002;20(2):151-71. doi: 10.1525/mp.2002.20.2.151.
- Molnar-Szakacs I, Overy K. Music and mirror neurons: from motion to 'e'motion. *Soc Cogn Affect Neurosci.* 2006;1(3):235-41. doi: 10.1093/scan/nsl029. PubMed PMID: 18985111; PubMed Central PMCID: PMCPMC2555420.
- Zatorre RJ, Halpern AR. Mental concerts: musical imagery and auditory cortex. *Neuron.* 2005;47(1):9-12. Epub 2005/07/06. doi: 10.1016/j.neuron.2005.06.013. PubMed PMID: 15996544.
- Hickok G, Buchsbaum B, Humphries C, Muftuler T. Auditory-motor interaction revealed by fMRI: speech, music, and working memory in area Spt. *J Cogn Neurosci.* 2003;15(5):673-82. doi: 10.1162/089892903322307393. PubMed PMID: 12965041.
- Koelsch S. Neural substrates of processing syntax and semantics in music. *Curr Opin Neurobiol.* 2005;15(2):207-12. Epub 2005/04/16. doi: 10.1016/j.conb.2005.03.005. PubMed PMID: 15831404.
- Kraus N, Chandrasekaran B. Music training for the development of auditory skills. *Nat Rev Neurosci.* 2010;11(8):599-605. Epub 2010/07/22. doi: 10.1038/nrn2882. PubMed PMID: 20648064.
- 貫 行子, 田部井 賢一, 北脇 歩, 阿部 真貴子, 押山 千秋. 最新研究による高齢者音楽療法: 音楽之友社; 2024.