慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	平成時代 : 音楽と神経科学の邂逅
Sub Title	The Heisei era : the encounter of music and neuroscience
Author	藤井, 進也(Fujii, Shin'ya)
Publisher	慶應義塾大学湘南藤沢学会
Publication year	2018
Jtitle	Keio SFC journal Vol.18, No.1 (2018.) ,p.186- 201
JaLC DOI	10.14991/003.00180001-0186
Abstract	平成時代は、筆者にとって「音楽 (Music)」と「神経科学 (Neuroscience)」とが邂逅した時代である。なぜ、音楽と神経科学の研究は、平成時代に飛躍的に進展したのだろうか。本稿では、脳計測解析技術の進展と音楽家の脳、音楽神経科学会議の開催とブラームス研究所の設立、音楽家の身体運動科学研究の開拓、音楽リズム・拍子に関する神経科学研究の新展開、音楽の感動とグルーヴ感の神経科学研究を取り上げつつ、1990年代、2000年代、2010年代の各時代において、国内外でどのような音楽神経科学研究が世界を賑わせたのか、各時代の重要文献をレビューし、平成時代の音楽神経科学研究について概説する。最後に、平成時代の音楽神経科学研究史を踏まえ、次の音楽神経科学研究について展望する。
Notes	特集 平成が生んだもの、残したもの 招待論文
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=0402-1801-0186

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

［招待論文］

平成時代：音楽と神経科学の邂逅
The Heisei Era: The Encounter of Music and Neuroscience

藤井 進也
慶應義塾大学環境情報学部専任講師
Shinya Fujii
Assistant Professor, Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

Abstract:　平成時代は、筆者にとって「音楽（Music）」と「神経科学（Neuroscience）」とが邂逅した時代である。なぜ、音楽と神経科学の研究は、平成時代に飛躍的に進展したのだろうか。本稿では、脳計測解析技術の進展と音楽家の脳、音楽神経科学会議の開催とブラームス研究所の設立、音楽家の身体運動科学研究の開拓、音楽リズム・拍子に関する神経科学研究の新展開、音楽の感動とグルーヴ感の神経科学研究を取り上げつつ、1990 年代、2000 年代、2010 年代の各時代において、国内外でどのような音楽神経科学研究が世界を賑わせたのか、各時代の重要文献をレビューし、平成時代の音楽神経科学研究について概説する。最後に、平成時代の音楽神経科学研究史を踏まえ、次の音楽神経科学研究について展望する。

Here I call the Heisei Era as the encounter of music and neuroscience. Why neuromusic research has been developed rapidly during the Heisei Era? In this article, I review important research articles published in 1990s, 2000s, and 2010s including the topics of non-invasive neuroimaging technologies, the musician's brain, the international neuromusic congress, the International Laboratory for Brain, Music and Sound Research (BRAMS), motor control research on drummers and pianists in Japan, and recent neuromusic research on rhythm, beat, groove, and chills. At the end, I propose a direction for next neuromusic research.

Keywords: 音楽、神経科学、脳、リズム、拍子、グルーヴ
music, neuroscience, brain, rhythm, beat, groove

1　はじめに

「音楽神経科学」とは、「The Neurosciences and Music」の和訳であり、日本国内ではまだ十分に浸透していない学問分野である。国外には、モントリオールのブラームス研究所（International Laboratory for Brain, Music, and Sound Research）、ハーバード大学の音楽神経画像ラボ（Music and Neuroimaging

Lab)、マクマスター大学のライブラボ (LIVE Lab)、デンマーク・オーフス大学の脳内音楽研究所(Center for Music in the Brain)など、音楽と脳を専門に研究する著名なラボや研究所が存在し、未来を見据えた政府や企業、富裕層や投資家が多額の資金をこれらのラボや研究所に投資している。興味深いことに、これらは全て、平成時代に設立された研究機関である。なぜ、音楽と神経科学の研究は、平成時代に飛躍的に進展したのだろうか。本稿では、1990 年代、2000 年代、2010 年代の各時代において、どのような音楽神経科学研究が世界を賑わせたのか、各時代の重要文献をレビューしつつ、平成時代の音楽神経科学研究の発展について概説する。

2　脳計測解析技術の進展と音楽家の脳

平成時代の神経科学(Neuroscience)を語る上で欠かせないのは、非侵襲の脳計測解析技術の飛躍的な進展である。核磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging: MRI)、脳磁図 (Magnetoencephalography: MEG)、脳波計(Electroencephalography: EEG)、ポジトロン断層法(Positron Emission Tomography：PET)、経頭蓋磁気刺激法 (Transcranial Magnetic Stimulation: TMS)、Voxel Based Morphometry: VBM、拡散テンソル画像法 (Diffusion Tensor Imaging: DTI)など、脳の機能構造を計測・解析するための様々な技術が、ヒトを対象とした神経科学研究によく用いられるようになった。これら非侵襲の脳計測解析技術は、神経科学研究に革命をもたらした。今までは哲学や心理学の分野で扱われてきた人間の心や意識、感情や思考などの主観的な現象を、客観的な数値としてデータ化し、解析の対象とすることを可能にした。

人間の心や意識、感情や思考などの主観的な現象を神経科学のフレームワークで研究できるとしたら、一体何を対象として研究すると面白いだろうか。ここで神経科学と奇跡的なマッチングをするのが、音楽ではないかと筆者は考えている。「音を楽しむ」という脳内現象は、人間の心や意識、感情や思考の本質を探る上で、この上なく魅力的な研究対象である。

この考えと共通するように、音楽家の脳に関する研究が平成時代に急速に進展した。特に 1995 年は、音楽と神経科学の邂逅を語る上で欠かせない年であった。1995 年、ハーバード大学のゴットフリード・シュラウグ博士(写真 1)

写真１　ゴットフリード・シュラウグ博士（左）と筆者（右）
ハーバード大学音楽神経画像研究室にて撮影。

は、*Science* 誌上に「*In Vivo Evidence of Structural Brain Asymmetry in Musicians (音楽家における脳構造非対称性の生体内根拠)*」という論文を発表した（Schlaug, Jancke, Huang, & Steinmetz, 1995）。絶対音感者の脳構造を世界で初めて明らかにした論文である。絶対音感とは、ある音を単独で聞いた時に、他の音との比較なしに、その音の音名または任意の楽器上でそれに対応する位置を指示できる能力のことをいう（Takeuchi & Hulse, 1993）。絶対音感者は、音が音名に聞こえるという主観的な現象を経験する。MRI 脳画像を用いることで、「絶対音感」という主観的な現象が、「聴覚皮質（側頭平面：Planum Temporale）領域のサイズ」という客観的な数値データとして定量化され、神経科学のフレームワークで議論されるようになった。

同じく 1995 年、トーマス・エルバート博士らは、*Science* 誌上に「*Increased Cortical Representation of the Fingers of the Left Hand in String Players (弦楽器奏者における左手指の皮質表象の拡大)*」という論文を発表した（Elbert, Pantev, Wienbruch, Rockstroh, & Taub, 1995）。脳磁図を用いて、右手と左手の指の体性感覚皮質の表象を調査したところ、右手の指の皮質表象に関しては、弦楽器奏者と非音楽家の間に差がなかったのに対し、左手の指の皮質表象に関しては、弦楽器奏者が非音楽家に比べてより拡大しており、特に親指よりも小指の

皮質表象の拡大が顕著であったという。さらに小指の皮質表象の拡大の程度は、音楽トレーニングの開始年齢と関連していることが示された。音楽トレーニングが感覚運動皮質に可塑的変化をもたらす可能性を鮮やかに示した歴史的論文である。

3年後の1998年、クリスト・パンテフ博士らが、今度は*Nature*誌上に「*Increased Auditory Cortical Representation in Musicians (音楽家における聴覚皮質表象の拡大)*」という論文を発表した（Pantev et al., 1998）。ピアノ音を聴取中の聴覚皮質反応を、脳磁図を用いて調査した研究である。この研究では、純音とピアノ音聴取中の音楽家と非音楽家の聴覚皮質応答が報告された。純音聴取時の聴覚皮質応答については、音楽家と非音楽家で差がみられないのに対し、ピアノ音聴取時の聴覚皮質応答に関しては、音楽家と非音楽家で差がみられ、音楽家が非音楽家よりも大きな聴覚皮質応答を示したことが報告された。また、音楽家における聴覚皮質応答増大の程度は、やはり音楽の開始年齢に関係していることが示された。音楽トレーニングが聴覚皮質に可塑的変化をもたらす可能性を鮮やかに示したこれまた歴史的論文である。

音楽家の脳に関する研究が、*Science*誌や*Nature*誌といったトップジャーナルに相次いで発表されたのは、1990年代の大きな出来事であった。その他、この年代の音楽家の脳に関する研究として、音楽家の脳梁構造の拡大（Schlaug, Jancke, Huang, Staiger, & Steinmetz, 1995）、一次運動皮質の拡大と非対称性の減少（Amunts et al., 1997）、絶対音感者と相対音感者の脳活動の相違性と共通性（Zatorre, Perry, Beckett, Westbury, & Evans, 1998）、音楽家の脳波事象関連電位の特徴（Koelsch, Schroger, & Tervaniemi, 1999）、音楽家の運動皮質活動の効率性に関する発見（Jancke, Shah, & Peters, 2000; Krings et al., 2000）、バイオリン奏者やトランペット奏者の音色変化に対する聴覚皮質応答の研究（Pantev, Roberts, Schulz, Engelien, & Ross, 2001）等が挙げられる。これらの研究を受けて、2001年には「*The Brain of Musicians. A Model for Functional and Structural Adaptation (音楽家の脳：機能構造適応のためのモデル)*」（Schlaug, 2001）という総説が発表され、さらに1年後の2002年には「*The Musician's Brain as a Model of Neuroplasticity (神経可塑性モデルとしての音楽家の脳)*」という総説が相次いで発表された（Munte, Altenmuller, & Jancke, 2002）。これら

の総説論文では、幼少期から長時間の感覚運動トレーニングを積み重ねてきた音楽家の脳は、ヒトの脳の神経可塑性を調査する上で大変魅力的な研究モデルであると述べられている。その後も、VBM 解析を用いた音楽家の脳灰白質構造の解明（Gaser & Schlaug, 2003）、音楽家の小脳構造拡大（Hutchinson, Lee, Gaab, & Schlaug, 2003）、DTI 解析を用いた音楽家の白質線維構造の解明等（Bengtsson et al., 2005）、音楽家の脳構造に関して、インパクトある研究報告が相次いだ 。1990 年代、非侵襲の脳計測解析技術の進展と、音楽家の脳に魅せられた研究者の興味とが見事にマッチし、音楽の神経科学研究が急速に芽生えはじめたのである。

3　音楽神経科学会議の開催とブラームス研究所の設立

2000 年代、音楽の神経科学研究はさらに加速的に進展した。歴史的に大きなひとつの出来事は、イタリアのマリアーニ財団（*The Mariani Foundation*）とニューヨーク科学アカデミー(*The New York Academy of Sciences*)との出会いであった。マリアーニ財団とニューヨーク科学アカデミーは、音楽に関する神経生物学、生理学、心理学、神経心理学研究の知見を統合し、音楽家の知覚やパフォーマンス、創造、音楽と発達の関わりに焦点を当て、領域横断型の学問として「音楽神経科学分野」を積極的に支援・推進すべきと考えた。神経科学の新規開拓分野として、「*The Neurosciences and Music (音楽神経科学)*」分野を積極的に支援・推進すべきとし、2002 年に「*The Neurosciences and Music*」と題した第 1 回の国際会議をイタリアのヴェニスにて開催した。（その後、2005 年はドイツのライプツィヒ、2008 年はカナダのモントリオール、2011 年はスコットランドのエディンバラ、2014 年はフランスのディジョン、2017 年にはアメリカのボストンにて、国際音楽神経科学会議が 3 年毎に開催されている。）

音楽神経科学分野の急速な進展を踏まえ、2003 年には、*Nature Neuroscience* 誌上でも、「*Focus: Music and the Brain（特集：音楽と脳）*」と題した特集号が出版された。この特集号では、音楽と進化（Hauser & McDermott, 2003）、音楽性の発達起源（Trehub, 2003）、言語と音楽（Patel, 2003）、音楽における系列処理と時間生成（Janata & Grafton, 2003）、音楽処理のモジュール性（Peretz & Coltheart, 2003）、絶対音感の神経基盤（Zatorre, 2003）についての魅力的な総

説論文が発表された。今から振り返ると、著者名を並べるだけでも大変豪華な面々である。

そして 2005 年、音楽神経科学研究の進展を語る上で欠かせない歴史的な出来事が起こった。カナダ・モントリオールに、音楽と脳を専門に研究するための研究所が設立されたのである。この研究所は、「*International Laboratory for Brain, Music and Sound Research*」と名付けられ、一部の頭文字を抜粋して、「BRAMS（ブラームス）研究所」と呼ばれた。ブラームス研究所の研究所長（Co-directors）に就任したのは、2003 年の *Nature Neuroscience* 誌上の特集号で、ラスト２本の総説論文を執筆した、イザベラ・ペレッツ博士とロバート・ザトーレ博士であった。研究所内には、脳イメージング設備、音響スタジオ、残響室などが完備され、20 万ドルのベーゼンドルファー製電子ピアノも導入された。ブラームス研究所は、モントリオール大学とマギル大学、そしてカナダ政府が 1200 ～ 1400 万ドルの資金を投じて設立されたと言われている。2007 年には、*Science* 誌の *News Focus* にブラームス研究所の特集記事が組まれ、世界初の「音楽と脳」に関する研究所が設立されたと話題を呼んだ（Balter, 2007）。

2014 年に、筆者はイザベラ・ペレッツ博士に招かれ、招待講演を行うためにブラームス研究所を訪れたことがある（写真 2）。招待講演後、ペレッツ博士のご自宅のディナーに招いていただき、その時にブラームス研究所の設立経緯について伺う機会があった。「なぜ、どうやって、ブラームス研究所は設立されたのか。」筆者が質問したところ、「全てはタイミングだったのよ」とペレッツ博士は答えてくれた。ペレッツ博士は、ベルギーのブリュッセル出身で、当時モントリオールからベルギーに戻らないかとポジションのオファーがあったという。モントリオール大学は、音楽の認知科学に関して数々の業績を成し遂げてきたペレッツ博士を手放したくないと考え、「あなたが望む研究環境を整備するから、去らないでくれ」とペレッツ博士に逆オファーしたという。ペレッツ博士は、「だったら、音楽と脳の研究所を設立したい」と大学に希望を伝えた。また、一人では実現できないと考えたペレッツ博士は、すぐさまロバート・ザトーレ博士と連絡を取り、研究所設立への協力を依頼し、ザトーレ博士はその考えに快く同意してくれたという。「そこに然るべきタイミングがあり、然るべき人たちがいたから、研究所は設立できたのよ」と、ペレッツ博士は説明してくれた。

写真２　（A）ブラームス研究所の外観、（B）ブラームス研究所内のベーゼンドルファー製電子ピアノ、（C）ブラームス研究所の実験室内に設置されたドラムセット、（D）イザベラ・ペレッツ博士（右）と筆者（左）、（E）ロバート・ザトーレ博士（左）とヴァージニア・ペンヒューン博士（中央）、筆者（右）

４　音楽家の身体運動科学研究の開拓：ピアニストとドラマーの奮闘

世界で音楽の神経科学研究が急速に進展する中、国内の音楽のサイエンスの状況はどうだったか。2000 年代、筆者がドラムや音楽の研究を始めたころ、よく耳にしたのは、「音楽のような複雑すぎる現象をサイエンスできるはずがない」という意見であった。「個人の主観に依存する複雑な現象を、どうやって客観的に科学するのか。」「音楽のような複雑な系でなく、もっと単純な系で実験しないと、何を見ているのかわからない。」という意見を山ほど耳にする機会があった。音楽やドラムなんてサイエンスできないのではないかと、大変落ち込んだことをよく覚えている。

これらの意見の背景には、自然科学が重要とするデカルトの「要素還元主義」の考え方があったように思う（詳細は、本誌に掲載されている内藤泰宏先生の論文「生命の解明にみる科学と技術の往還」をご参照いただきたい）。内藤先生の論文によると、デカルトが提案した真理へ辿り着くための規則には、「明

証の規則：すべての先入観を排除し、自分自身が明晰判明に理解できることのみを真とし、そうでないものを受け容れない」、「分析の規則：対象をできるだけ小さく単純な部分に分割する」、「総合の規則：まず単純な部分を解明し、それらを組み合わせて複雑な部分を解明する」、「枚挙の規則：対象に含まれる事例をすべて列挙し、例外がないか完璧に検討する」の４つがあったという。これらの観点からすると、確かに音楽というのは非常に相性が悪い。音楽は、先入観に溢れており、複雑な現象であり、個人の主観に依存した例外に満ち溢れている。2000 年代の日本には、要素還元主義の自然科学の姿勢が根強く存在しており、音楽家の身体運動研究者にとっては、肩身の狭い思いを痛感することが多かった。

そうした背景の中、筆者はドラマーの身体運動制御に関する論文を、国内のジャーナルでなく、国際誌に投稿し続けた。2006 年には、ドラマーの手の機能的左右差に関する論文を発表した（Fujii & Oda, 2006）。同じく 2006 年には、国外で「*Music, Motor Control, and the Brain（音楽、運動制御、そして脳）*」という書籍が出版された（Altenmüller, Wiesendanger, & Kesselring, 2006）。出版直後に購入し、「*Movement and analysis of drumming（ドラミングの動作と分析）*」という章を開いた瞬間を今でも鮮明に覚えている。胸を踊らせながら、開いたページには「ドラマーの動作研究は、これまでそれほど精力的に進められてこなかった。現在のところ、ほんの少数の出版物しか手に入らない」と記述されていた。愕然とすると同時に、沸々と込み上げるようなやりがいを感じた。その思いを胸に、ドラマーとノンドラマーの手首筋活動に関する研究（Fujii, Kudo, Shinya, Ohtsuki, & Oda, 2009）、ドラマーのスティックの使用の効果（Fujii & Oda, 2009a, 2009b）、世界最速ドラマーの手首筋活動に関する研究（Fujii, Kudo, Ohtsuki, & Oda, 2009; Fujii & Moritani, 2012a, 2012b）、ドラマーの両手協調運動の非線形力学系モデリング（Fujii, Kudo, Ohtsuki, & Oda, 2010）、ドラマーの感覚運動同期誤差に関する研究（Fujii et al., 2011）等を発表し続けた。

筆者がドラマーの運動制御研究分野の開拓に奮闘していた頃、時を同じくして、ピアニストの運動制御学分野を世界に先駆けて開拓した研究者が日本にいた。当時、大阪大学で研究をしていた古屋晋一氏（現ソニーコンピューターサイエンス研究所アソシエートリサーチャー）である（写真 3）。古屋氏は、ピア

写真３　古屋晋一氏（左）と筆者（右）
2017 年の国際神経科学会議（ボストン）にて撮影。

ニストの上肢運動連鎖に関する研究（Furuya & Kinoshita, 2007）、ピアニストの上肢運動の組織化（Furuya & Kinoshita, 2008b）、非筋力トルクの使用（Furuya & Kinoshita, 2008a）、重力トルクの使用（Furuya, Osu, & Kinoshita, 2009）、聴覚フィードバックの影響（Furuya & Soechting, 2010）、手の多関節キネマティクス解析（Furuya, Flanders, & Soechting, 2011）等、ピアニストの身体運動制御に関する重要な研究成果を世に発表し続けた。

2000 年代は、国内のピアニスト研究者、ドラマー研究者にとって、奮闘の時代であった。国外では音楽神経科学研究が急速に進展した一方、国内では音楽をサイエンスするのは難しいという風潮が溢れていた。世界では音楽神経科学会議が開催され、ハーバード大学には音楽神経画像研究室があり、カナダにはブラームス研究所が設立された。世界が音楽の神経科学研究に注目し、優秀な若手研究者が世界から北米・欧州に集結していた一方、日本では音楽のサイエンスを志す若者が肩身の狭い想いをしながら過ごしていた。2000 年代、国外と国内とでは、音楽のサイエンスに対する温度差がとても激しかったように感じる。

5　音楽リズム・拍子に関する神経科学研究の新展開

2000年代後半から2010年代にかけて、音楽リズムに関する神経科学研究が、新たな展開を見せ始めた。代表的な研究として挙げられるのは、ジョイス・チェン博士らの研究と、ジェシカ・グラハン博士らの研究である。ジョイス・チェン博士らは、音楽拍子の明瞭度や複雑性が変化すると、運動前野や前頭前皮質の脳活動に変化が観測されることを明らかにした（Chen, Penhune, & Zatorre, 2008; Chen, Zatorre, & Penhune, 2006; Zatorre, Chen, & Penhune, 2007）。一方で、ジェシカ・グラハン博士らは、音楽拍子の知覚時には、運動前野や補足運動野、そして大脳基底核の脳活動増大が観測されることを明らかにした（Grahn & Brett, 2007; Grahn & Rowe, 2009）。いずれの研究でも驚きであったのは、音楽リズムのパターンを変化させることで、運動関連領域の脳活動に変化が見られた点であった。音楽リズムを聴取すると、身体を動かしたくなるのはなぜなのか、パーキンソン病など運動疾患のリハビリテーションに聴覚リズム刺激が用いられるのはなぜなのか、神経科学的なメカニズムに迫る研究であると、世界から注目を浴びた。

さらに2009年には、オウムなどの音声学習をできる鳥類が、音楽の拍子に合わせて身体の動きを同期させて踊ることが報告された（Patel, Iversen, Bregman, & Schulz, 2009; Schachner, Brady, Pepperberg, & Hauser, 2009）。これらの論文では、「Vocal Mimicry Hypothesis（声まね仮説）」、「Complex Vocal Learning and Rhythmic Synchronization Hypothesis（複雑音声学習とリズム同期仮説）」という魅力的な仮説が提示された。これらの仮説では、リズムに合わせて身体を同期させる神経回路が、ひょっとすると声まねや複雑な音声学習などの言語機能を司る神経回路と共通しているのではないか、と提唱されており、現在も活発な論争が繰り広げられている（Honing, 2018）。

2009年、新生児において音楽の拍子の予測に対応する脳波の応答が観測されるという論文が発表され、話題を呼んだ（Winkler, Haden, Ladinig, Sziller, & Honing, 2009）。2010年には、生後5-24ヶ月の乳幼児が音楽に合わせて自発的にリズミカルな身体運動を増大させることも報告された（Zentner & Eerola, 2010）。ヒトはなぜ発達段階の初期から、音楽の拍子を予測する脳の機能が備わり、音楽に合わせて自発的にリズミカルな運動を生成するのか、大きな問い

が提唱された。このような背景から、筆者も音楽聴取中の生後 3-4 ヶ月の乳児の身体運動を調査した（Fujii et al., 2014）。研究の結果、音楽の拍子に合わせて活発に手足を動かす個人も存在したが、個人差が非常に大きいことが明らかになった。

2011 年には、マーチやワルツの拍子を想起すると、そのイメージに同期した脳波応答が見られると報告され（Nozaradan, Peretz, Missal, & Mouraux, 2011）、音楽リズムの脳内情報処理過程にさらに大きな注目が集まる。同じく 2011 年、失音楽症の中に、音楽のリズムの知覚生成にのみ異変を示す失音楽症の症例（失音楽リズム症）が存在することが報告され話題を呼んだ（Phillips-Silver et al., 2011）。しかしながら、失音楽症の評価に用いられるモントリオール式失音楽症テスト（Peretz, Champod, & Hyde, 2003）では、リズムの知覚能力と生成能力を別々に評価することが困難であった。そこで、筆者はシュラウグ博士と共同で、ハーバード式ビート評価テストを開発した（Fujii & Schlaug, 2013）。今も尚、リズム知覚生成の個人差に関する音楽神経科学研究は続いている。

6　音楽の感動とグルーヴ感の神経科学研究

2010 年代には、音楽の感動とグルーヴ感に関する研究も大きく進展した。1 つの大きなコーナーストーンとなる研究は、2011 年に *Nature Neuroscience* 誌に掲載された、音楽聴取とドーパミン放出に関する研究であった（Salimpoor, Benovoy, Larcher, Dagher, & Zatorre, 2011）。ザトーレ博士らは、PET を用いて、音楽聴取により鳥肌感を伴う快感情が生起している時、大脳基底核の線条体で内因性のドーパミン放出が確認できることを明らかにした。この研究で面白かったのは、音楽の感動を、「報酬予測誤差（Reward Prediction Error）」の文脈で捉えた点である。「報酬予測」とは、以前どのような行動を取ったときに正負の報酬を得たか、今までの経験の蓄積に基づいて、報酬を予測することをいう。「報酬予測誤差」とは、その報酬の予測と照らし合わせて、実際に入力された刺激が正か負か、価値評価された誤差のことをいう。ザトーレ博士らは、この報酬予測誤差の文脈で、音楽聴取時の脳活動を評価し、解釈したのである。MRI を用いた実験の結果、音楽の感動を予測するような報酬予測に関する脳活

動は尾状核で観測され、感動のピークを実際に経験している時の報酬予測誤差に関する脳活動は側坐核で観測されることが明らかにされた。2013 年、さらに驚くべきことに、この音楽聴取中の側坐核の脳活動を用いることで、音楽をいくらで購入するかという購買行動まで予測できると報告された（Salimpoor et al., 2013）。この成果は *Science* 誌に掲載され、脳活動で音楽の購買行動が予測できる日が到来したと、ニュースやメディアで大きく取り上げられた。

2010 年代以降、「グルーヴ感」と呼ばれるリズム聴取に伴う運動意欲や快感情の生起に関する研究も進展し始めている。グルーヴ感とはそもそもどのような言葉で定義され、どのような音楽がグルーヴ感のある楽曲と評価されるのかが調査され（Janata, Tomic, & Haberman, 2012）、グルーヴ感のある音楽を聴取することで皮質脊髄路の興奮性が変化するという報告もある（Stupacher, Hove, Novembre, Schutz-Bosbach, & Keller, 2013）。近年で一つ面白い研究は、リズムの複雑性とグルーヴ感の間に逆 U 字関係があると報告したマリア・ヴィテック博士らの研究である（Witek, Clarke, Wallentin, Kringelbach, & Vuust, 2014）。ヴィテック博士らは、横軸にリズムの複雑さ（シンコペーションの程度）、縦軸にそのリズムを聞いてどれくらい運動意欲や快情動が生起するかを測定すると、逆 U 字関数が得られたことを報告した。すなわち、心地よく運動したくなるリズムは、自分の予測を少し裏切る程度のやや複雑なリズムであり、極度に単純で予測性が高いリズムや、極度に複雑で予測性が低いリズムは、あまり心地よさや運動意欲を生起しないと報告したのである。今後、「報酬予測誤差」の文脈で、グルーヴ感の神経メカニズムが解明されたとしたら、ハイインパクトの研究になるであろう。

7　おわりに：次の音楽神経科学、音楽と人類の起源と未来

最後に、平成時代のミュージックシーンにおける、もうひとつの大きな革命について言及したい。それは、コンピューターミュージックの誕生である。情報処理技術の発展により、あらゆる音波をゼロから波形合成してデジタル処理し、音楽を制作できるようになった。今まで、アコースティック楽器で制作していた音楽は、デスクトップミュージックへと変遷し、コンピューターミュージックの誕生によって、表現の幅が爆発的に拡張した。表現の幅が爆発的に拡張し

た今、数多ある可能性の中で何を「音楽」と呼ぶのか。どんな音を制作し、何を表現するのか。「音楽とは一体何か」という「問い」が、今、改めて音楽家、芸術家たちの眼前に突きつけられている。

音楽研究者も、今、全く同じ「問い」を眼前に突きつけられている。平成時代には、非侵襲の脳計測解析技術が飛躍的に進展し、人間の心や意識、感情や思考などの主観的な現象を、客観的な数値としてデータ化し解析できるようになった。音楽と神経科学は奇跡的な出会いを遂げ、「音楽神経科学」という新たな研究分野が開拓され、飛躍的な進展があった。

その歴史を踏まえて、今、音楽研究者は、一体何を調べ、何を分析し、何を明らかにすべきなのか。次の音楽神経科学とは一体何か。人類は、一体どこからやって来て、どこへ向かっているのか。今こそ、音楽とは一体何かという問いに正面から向き合い、音楽と人類の起源と未来、その本質に迫る研究を行うことが重要ではないだろうか。ブラームス研究所は設立 15 年に差し掛かり、ペレッツ博士とザトーレ博士は Co-directors を退くと言われている。次の 15 年、音楽のサイエンスの次世代を担うのは、世界の一体どこの研究機関なのであろうか。これからの音楽の「実学（サイエンス）」は、SFC が牽引していくという未来予想を述べて、本論文の結語とする。

参考文献

Altenmüller, E., Wiesendanger, M., & Kesselring, J. (2006), *Music, Motor Control and the Brain*. UK: Oxford University Press.

Amunts, K., Schlaug, G., Jancke, L., Steinmetz, H., Schleicher, A., Dabringhaus, A., & Zilles, K. (1997), “Motor cortex and hand motor skills: structural compliance in the human brain.” *Hum. Brain Mapp.*, 5(3), pp. 206-215. doi:10.1002/(SICI)1097-0193(1997)5:3<206:AID-HBM5>3.0.CO;2-7.

Balter, M. (2007), “Brain, Music, and Sound Research Center. Study of music and the mind hits a high note in Montreal.” *Science*, 315(5813), pp. 758-759. doi:10.1126/science.315.5813.758.

Bengtsson, S. L., Nagy, Z., Skare, S., Forsman, L., Forssberg, H., & Ullen, F. (2005), “Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development.” *Nat. Neurosci.*, 8(9), pp. 1148-1150. doi:10.1038/nn1516.

Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008), “Moving on time: brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and musical training.” *J. Cogn. Neurosci*., 20(2), pp. 226-239. doi:10.1162/jocn.2008.20018.

Chen, J. L., Zatorre, R. J., & Penhune, V. B. (2006), “Interactions between auditory and dorsal

premotor cortex during synchronization to musical rhythms." *Neuroimage*, 32(4), pp. 1771-1781. doi:10.1016/j.neuroimage.2006.04.207.

Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., & Taub, E. (1995), "Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players." *Science*, 270(5234), pp. 305-307.

Fujii, S., Hirashima, M., Kudo, K., Ohtsuki, T., Nakamura, Y., & Oda, S. (2011), "Synchronization error of drum kit playing with a metronome at different tempi by professional drummer." *Music Perception*, 28, pp. 491-503.

Fujii, S., Kudo, K., Ohtsuki, T., & Oda, S. (2009), "Tapping performance and underlying wrist muscle activity of non-drummers, drummers, and the world's fastest drummer."*Neurosci. Lett.*, 459(2), pp. 69-73. doi:10.1016/j.neulet.2009.04.055.

Fujii, S., Kudo, K., Ohtsuki, T., & Oda, S. (2010), "Intrinsic constraint of asymmetry acting as a control parameter on rapid, rhythmic bimanual coordination: a study of professional drummers and nondrummers." *J. Neurophysiol.*, 104(4), pp. 2178-2186. doi:10.1152/jn.00882.2009.

Fujii, S., Kudo, K., Shinya, M., Ohtsuki, T., & Oda, S. (2009), "Wrist muscle activity during rapid unimanual tapping with a drumstick in drummers and nondrummers." *Motor Control*, 13(3), pp. 237-250.

Fujii, S., & Moritani, T., (2012a) "Rise rate and timing variability of surface electromyographic activity during rhythmic drumming movements in the world's fastest drummer." *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 22(1), pp. 60-66. doi:10.1016/j.jelekin.2011.10.004.

Fujii, S., & Moritani, T., (2012b) "Spike shape analysis of surface electromyographic activity in wrist flexor and extensor muscles of the world's fastest drummer." *Neurosci. Lett.*, 514(2), pp. 185-188. doi:10.1016/j.neulet.2012.02.089.

Fujii, S., & Oda, S. (2006), "Tapping speed asymmetry in drummers for single-hand tapping with a stick."*Percept. Mot. Skills*, 103(1), pp. 265-272. doi:10.2466/pms.103.1.265-272.

Fujii, S., & Oda, S., (2009a) "Effect of stick use on rapid unimanual tapping in drummers." *Percept. Mot. Skills*, 108(3), pp. 962-970. doi:10.2466/PMS.108.3.962-970.

Fujii, S., & Oda, S. (2009b). "Effects of stick use on bimanual coordination performance during rapid alternate tapping in drummers." *Motor Control*, 13(3), pp. 331-341.

Fujii, S., & Schlaug, G. (2013), "The Harvard Beat Assessment Test (H-BAT): a battery for assessing beat perception and production and their dissociation." *Front Hum. Neurosci.*, 7, p. 771. doi:10.3389/fnhum.2013.00771.

Fujii, S., Watanabe, H., Oohashi, H., Hirashima, M., Nozaki, D., & Taga, G. (2014), "Precursors of dancing and singing to music in three- to four-months-old infants." *PLoS One*, 9(5), p. e97680. doi:10.1371/journal.pone.0097680.

Furuya, S., Flanders, M., & Soechting, J. F. (2011), "Hand kinematics of piano playing." *J. Neurophysiol.*, 106(6), pp. 2849-2864. doi:10.1152/jn.00378.2011.

Furuya, S., & Kinoshita, H. (2007), "Roles of proximal-to-distal sequential organization of the upper limb segments in striking the keys by expert pianists." *Neurosci. Lett.*, 421(3), pp. 264-269. doi:10.1016/j.neulet.2007.05.051.

Furuya, S., & Kinoshita, H., (2008a) "Expertise-dependent modulation of muscular and non-muscular torques in multi-joint arm movements during piano keystroke." *Neuroscience*, 156(2), pp. 390-402. doi:10.1016/j.neuroscience.2008.07.028.

Furuya, S., & Kinoshita, H., (2008b) "Organization of the upper limb movement for piano key-depression differs between expert pianists and novice players." *Exp. Brain Res.*, 185(4), pp. 581-593. doi:10.1007/s00221-007-1184-9.

Furuya, S., Osu, R., & Kinoshita, H. (2009), “Effective utilization of gravity during arm downswing in keystrokes by expert pianists.” *Neuroscience*, 164(2), pp. 822-831. doi:10.1016/j.neuroscience.2009.08.024.

Furuya, S., & Soechting, J. F. (2010), “Role of auditory feedback in the control of successive keystrokes during piano playing.” *Exp. Brain Res*., 204(2), pp. 223-237. doi:10.1007/s00221-010-2307-2.

Gaser, C., & Schlaug, G. (2003), “Brain structures differ between musicians and non-musicians.” *J. Neurosci*., 23(27), pp. 9240-9245.

Grahn, J. A., & Brett, M. (2007), “Rhythm and beat perception in motor areas of the brain.” *J. Cogn. Neurosci*., 19(5), pp. 893-906. doi:10.1162/jocn.2007.19.5.893.

Grahn, J. A., & Rowe, J. B. (2009), “Feeling the beat: premotor and striatal interactions in musicians and nonmusicians during beat perception.” *J. Neurosci*., 29(23), pp. 7540-7548. doi:10.1523/JNEUROSCI.2018-08.2009.

Hauser, M. D., & McDermott, J. (2003), “The evolution of the music faculty: a comparative perspective. ”*Nat. Neurosci*., 6(7), pp. 663-668. doi:10.1038/nn1080.

Honing, H. (2018), “Musicality as an upbeat to music: Introduction and research agenda.” In H. Honing (Ed.), *The Origins of Musicality* (pp. 3-20), Cambridge, Mass: The MIT Press.

Hutchinson, S., Lee, L. H., Gaab, N., & Schlaug, G. (2003), “Cerebellar volume of musicians.” *Cereb Cortex*, 13(9), pp. 943-949.

Janata, P., & Grafton, S. T. (2003), “Swinging in the brain: shared neural substrates for behaviors related to sequencing and music.” *Nat. Neurosci*., 6(7), pp. 682-687. doi:10.1038/nn1081.

Janata, P., Tomic, S. T., & Haberman, J. M. (2012), “Sensorimotor coupling in music and the psychology of the groove.” *J. Exp. Psychol. Gen*., 141(1), pp. 54-75. doi:10.1037/a0024208.

Jancke, L., Shah, N. J., & Peters, M. (2000), “Cortical activations in primary and secondary motor areas for complex bimanual movements in professional pianists.” *Brain Res. Cogn. Brain Res*., 10(1-2), pp. 177-183.

Koelsch, S., Schroger, E., & Tervaniemi, M. (1999), “Superior pre-attentive auditory processing in musicians.” *Neuroreport*, 10(6), pp. 1309-1313.

Krings, T., Topper, R., Foltys, H., Erberich, S., Sparing, R., Willmes, K., & Thron, A. (2000), “Cortical activation patterns during complex motor tasks in piano players and control subjects. A functional magnetic resonance imaging study.” *Neurosci. Lett*., 278(3), pp. 189-193.

Munte, T. F., Altenmuller, E., & Jancke, L. (2002), “The musician’s brain as a model of neuroplasticity.”*Nat. Rev. Neurosci*., 3(6), pp. 473-478. doi:10.1038/nrn843.

Nozaradan, S., Peretz, I., Missal, M., & Mouraux, A. (2011), “Tagging the neuronal entrainment to beat and meter.” *J. Neurosci*., 31(28), pp. 10234-10240. doi:10.1523/JNEUROSCI.0411-11.2011.

Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L. E., & Hoke, M. (1998), “Increased auditory cortical representation in musicians.” *Nature*, 392(6678), pp. 811-814. doi:10.1038/33918.

Pantev, C., Roberts, L. E., Schulz, M., Engelien, A., & Ross, B. (2001), “Timbre-specific enhancement of auditory cortical representations in musicians.” *Neuroreport*, 12(1), pp. 169-174.

Patel, A. D. (2003), “Language, music, syntax and the brain.” *Nat. Neurosci*., 6(7), pp. 674-681. doi:10.1038/nn1082.

Patel, A. D., Iversen, J. R., Bregman, M. R., & Schulz, I. (2009), “Experimental evidence for synchronization to a musical beat in a nonhuman animal.” *Curr. Biol*., 19(10), pp. 827-830. doi:10.1016/j.cub.2009.03.038.

Peretz, I., Champod, A. S., & Hyde, K. (2003), “Varieties of musical disorders. The Montreal

Battery of Evaluation of Amusia.” *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 999, pp. 58-75.

Peretz, I., & Coltheart, M. (2003), “Modularity of music processing.” *Nat. Neurosci*., 6(7), pp. 688-691. doi:10.1038/nn1083.

Phillips-Silver, J., Toiviainen, P., Gosselin, N., Piche, O., Nozaradan, S., Palmer, C., & Peretz, I. (2011), “Born to dance but beat deaf: a new form of congenital amusia.” *Neuropsychologia*, 49(5), pp. 961-969. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.02.002.

Salimpoor, V. N., Benovoy, M., Larcher, K., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2011), “Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music.” *Nat. Neurosci*., 14(2), pp. 257-262. doi:10.1038/nn.2726.

Salimpoor, V. N., van den Bosch, I., Kovacevic, N., McIntosh, A. R., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2013), “Interactions between the nucleus accumbens and auditory cortices predict music reward value.” *Science*, 340(6129), pp. 216-219. doi:10.1126/science.1231059.

Schachner, A., Brady, T. F., Pepperberg, I. M., & Hauser, M. D. (2009), “Spontaneous motor entrainment to music in multiple vocal mimicking species.” *Curr. Biol*., 19(10), pp. 831-836. doi:10.1016/j.cub.2009.03.061.

Schlaug, G. (2001), “The brain of musicians. A model for functional and structural adaptation.” *Ann. N. Y. Acad. Sci*., 930, pp. 281-299.

Schlaug, G., Jancke, L., Huang, Y., Staiger, J. F., & Steinmetz, H. (1995), “Increased corpus callosum size in musicians.” *Neuropsychologia*, 33(8), pp. 1047-1055.

Schlaug, G., Jancke, L., Huang, Y., & Steinmetz, H. (1995), “In vivo evidence of structural brain asymmetry in musicians.” *Science*, 267(5198), pp. 699-701.

Stupacher, J., Hove, M. J., Novembre, G., Schutz-Bosbach, S., & Keller, P. E. (2013), “Musical groove modulates motor cortex excitability: a TMS investigation.” *Brain Cogn*., 82(2), pp. 127-136. doi:10.1016/j.bandc.2013.03.003.

Takeuchi, A. H., & Hulse, S. H. (1993), “Absolute pitch.” *Psychol Bull*, 113(2), pp. 345-361.

Trehub, S. E. (2003), “The developmental origins of musicality.” *Nat. Neurosci*., 6(7), pp. 669-673. doi:10.1038/nn1084.

Winkler, I., Haden, G. P., Ladinig, O., Sziller, I., & Honing, H. (2009), “Newborn infants detect the beat in music.” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*., 106(7), pp. 2468-2471. doi:10.1073/pnas.0809035106.

Witek, M. A., Clarke, E. F., Wallentin, M., Kringelbach, M. L., & Vuust, P. (2014), “Syncopation, body-movement and pleasure in groove music.” *PLoS One*, 9(4), p. e94446. doi:10.1371/journal.pone.0094446.

Zatorre, R. J. (2003), “Absolute pitch: a model for understanding the influence of genes and development on neural and cognitive function.” *Nat. Neurosci*., 6(7), pp. 692-695. doi:10.1038/nn1085.

Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007), “When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production.” *Nat. Rev. Neurosci*., 8(7), pp. 547-558. doi:10.1038/nrn2152.

Zatorre, R. J., Perry, D. W., Beckett, C. A., Westbury, C. F., & Evans, A. C. (1998), “Functional anatomy of musical processing in listeners with absolute pitch and relative pitch.” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*., 95(6), pp. 3172-3177.

Zentner, M., & Eerola, T. (2010), “Rhythmic engagement with music in infancy.” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*., 107(13), pp. 5768-5773. doi:10.1073/pnas.1000121107.

〔受付日　2018. 6. 18〕