解 説

音楽演奏技能の洗練と失調の神経機序

古 屋 晋 —*1,*2

ソニーコンピュータサイエンス研究所*1, 上智大学*2

Neural Mechanism Subservicing Sophistication and Degradation of Musical Skills

Shinichi Furuya*1,*2

Sony Computer Science Laboratories Inc.*1
Sophia University*2

概要

音楽演奏に見られる巧緻な運動は、幼少期からの訓練によって獲得される技能である。しかし、膨大な訓練を経てもなお、演奏技能の個人差は大きく、さらには訓練の過程で局所性ジストニア等の脳神経疾患を発症し、技能を喪失することも少なくない。そのため、熟達支援と故障予防の両方の観点から、訓練の量よりも質、すなわち適切な訓練とその機序の理解が求められる。本稿は、脳神経系が筋骨格系の持つ多数の自由度（筋や関節）を協調して制御する仕組みに着眼を置き、このような身体運動の協調構造が演奏技能の洗練や喪失に伴い、どのように変化するのか、さらには協調構造の変容が演奏技能とどのように関わっているのかについて、神経生理学実験と数理手法を組み合わせた近年の研究成果を中心に概説する。

1. 序 論

「音楽を好きですか？」この問いに対する回答は必ずしもイエスでは無い。音楽無快感症（Music Anhedonia）と呼ばれる、音楽聴取に対する情動変化が起らないケースが存在するためである^{1,2)}。しかし、「昔、ギターを演奏していた」「退職後にピアノを習い始めた」といった人は少なくなく、カラオケが世界中に波及していることから、音楽が我々の生活と少なからず密接に結びついていることは、疑いようのない事実であろう。しかし、いざ真剣に、思い描いた通りに歌ったり演奏しようとする、その困難さに直面する。ましてや、プロの演奏家を志すともなると、様々な身体的および心理的な課題が待ち受ける。地道な基礎練習の積み上げ無くして上達は無く、幼少期からの長年にわたるトレーニングが必要となる。かといって、そのような緻密で膨大な練習が、必ずしも演奏家としての成功を約束するわけではないという無情な側面も持つ。

このように、演奏家を取り巻く状況は、アスリートと共通点が多い。アスリートを守り育む学問がスポーツ科学であり、故障の予防や最適なトレーニング法の

提案といった形で、多種多様な競技に携わる選手や指導者に貢献してきた。しかし、音楽演奏において、スポーツ科学に相当する学問領域はこれまで確立されていない。その結果、多くの演奏家が、準最適な動作や練習によって望み通りの演奏表現を創造できないことに苦しみ、さらには、局所性ジストニアや腱鞘炎、手根管症候群、慢性疼痛炎といった疾患を発症することで、時に演奏家生命を絶たれることも少なくない^{3,4)}。

筆者の提唱する「音楽演奏科学」は、演奏家の技能熟達支援とクオリティオブライフ（QOL）向上という2つの目標の実現を目指す学問である。音楽に関連する学問は、音楽を知覚・認知する心の働きや脳の情報処理の仕組みを明らかにする「音楽知覚演奏科学」と、音楽を用いて生体機能回復を目指す「音楽療法」がこれまで存在していた。それらに音楽演奏科学を加えた3つの学問から成る学術領域を「音楽医科学」とリフレーミングすることで、領域内での相乗効果や、神経科学や実験心理学、バイオメカニクスや臨床医学といった様々な領域との相乗効果を生み出すことを目指している。

音楽演奏は、スポーツに比べると、筋力や体力といった生体機能よりも、技能や認知の占める役割が比較的大きい。そのため、音楽演奏科学は、脳神経系の働き

*1 〒141-0022 東京都品川区東五反田 3-14-13

*2 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

に対する理解が不可欠である。事実、音楽家の脳神経系の構造や機能の可塑的变化は、90年代以降、膨大な知見がこれまでに報告されている^{5,6)}。しかし、音楽演奏における運動制御・運動学習に関わる脳神経系の働きや、訓練に伴うその変容について詳細に調べた研究は未だ限られている。その理由の一つに、演奏に動員される自由度（関節や筋）の数が多いため、どの自由度が技能の遂行に関与しているか、技能の変容に寄与する自由度はどれかを同定することが困難な問題が挙げられる。本稿は特に、行動実験と数理手法をシームレスに組み合わせることにより、演奏における高度な技能の獲得や洗練、脳神経疾患による技能失調の機序についての理解が深まり得るかについて、主に我々の研究から得られた最近の知見について概説する。

2. 学習に伴う技能向上と動作の協調構造の変容

中枢神経系は、身体の持つ多数の自由度を個々に制御しているわけではなく、複数の自由度を一つの協調構造として制御し、複数の協調構造をパラメトリックに組み合わせることで多彩な運動を生成していると考えられている⁷⁾。これらの協調構造は、シナジーや運動プリミティブといった言葉で表現され、その存在を示唆する行動学的知見や⁸⁻¹⁰⁾、神経生理学的知見は¹¹⁻¹³⁾、これまで数多く報告されている。また、熟練者と非熟練者を比較した横断研究の結果、皮質脊髄路が符号化している動きの協調構造が両者で異なることが報告されている¹⁴⁾。長期訓練による大脳皮質運動野の神経ネットワークの再組織化と運動技能の獲得との因果関係も近年報告されているが¹⁵⁾、訓練内容の違いが動きの協調構造に及ぼす影響や、その結果獲得されるスキルの違いについて、これまで明らかにされていなかった。

平野らは、連続指運動における implicit learning と explicit learning が、手指の関節間の動きの協調構造に及ぼす影響を、行動実験と神経生理実験を用いて評価した¹⁶⁾。音楽訓練歴の無い被験者に、ピアノを用いた系列反応時間課題を5指で行わせ、連続動作の規則性（シーケンス）を学習させる。その際、シーケンスに関する implicit knowledge を獲得させる条件と、explicit knowledge を獲得させる2条件を設定した。学習課題の前後に、手指の動きをデータグローブで計測し、さらには、大脳皮質運動野を経頭蓋磁気刺激（TMS）を用いて刺激した際に誘発される手指の動きもデータグローブを用いて計測した。計測した手指動作に対して主成分分析（PCA）を行うことで、指関節同士の動きの協調構造を抽出した。研究の結果、系列反応時間課題の反応時間の短縮が、両群において認められた。学

習後の課題中の手指運動を、学習前後に TMS を用いて誘発された動きの協調構造を用いて再構成した結果、implicit 条件では、学習後の協調構造は学習前の協調構造よりも、学習後の手指運動の再現性が高いことが明らかとなった。これは、学習後の動作に特異的な指運動の協調構造を、implicit learning を通して皮質脊髄路が符号化したことを示唆している。一方、explicit 条件では、このような学習前後の皮質脊髄路における運動表現の変化は認められなかった。これらの結果は、運動学習の内容が、皮質脊髄路が符号化する動きの協調構造に異なる影響を及ぼすことを示唆している。

横田らは、運動学習における動作の多様性が、獲得される技能や筋同士の働きの協調構造に特異的な影響を及ぼすと仮説立て、手指の内在筋同士の協調構造をピアノ練習の前後で比較する学習実験を行った¹⁷⁾。ピアニスト 27 名を、同じ音列を異なる 4 つのリズムで練習する群（多様性学習群）、単一のリズムで練習する群（単一学習群）、練習を行わない群（統制群）の 3 群に分け、筋間の協調構造は、非負値行列因子分解（Non-negative Matrix Factorization : NMF）と教師無しクラスタリングを用いて抽出した。その結果、多様性学習群と単一学習群の双方において、練習後の演奏の最速度が向上し、正確性の変化は認められなかった。このことから、最速度の向上は、速度と正確性のトレードオフに伴うものではなく、学習に伴うものであることが示唆された。さらに、多様性学習群のみ、筋間の協調構造が、運動のエネルギー効率を低減するように変容していることが明らかになった。これは、訓練を積んだピアニストにおいて、通常の反復練習では速度は向上してもエネルギー効率は向上しない一方で、多様なリズムで練習する「多様性練習」に伴い、速度とエネルギー効率の両方が向上することが示唆された。同じ訓練量で、より多くの変数を最適化するように学習が進むことは、大局的に見て学習効率が高いと考えられるため、訓練量よりも訓練内容を適切にデザインすることが、巧緻運動技能の洗練に必要であると考えられる。

3. 心理不安が手指運動の協調構造とパフォーマンスに及ぼす影響

ワールドカップのペナルティキックや国際音楽コンクール、高難度の外科手術など、心理的プレッシャーのかかる場面での緊張や心理不安が、巧緻動作の遂行を妨げることはよく知られている。特に、スピーチや音楽演奏において、発話や演奏といったパフォーマンスの速度が心理不安に伴い意図せず速くなる現象が見

られるが、その背後にある機序については明らかにされていない。心理不安は拮抗筋同士の同時収縮を増大し、関節の剛性を高めることや、関節の可動域を減少させることが報告されているが、関節間の動きの協調構造に及ぼす影響については不明である。そこで小谷らは、ピアニスト 17 名が巧緻性を要する楽曲を演奏中に、データグローブを用いて手指の動きを計測し、心電図を用いて心拍数を計測することで、聴衆の有無が手指の動きや自律神経系の活動に及ぼす影響を評価した¹⁸⁾。その結果、聴衆の前で演奏する緊張条件では、聴衆が居ない非緊張条件と比較して、演奏のテンポが速くなり、心拍数が増大することが明らかになった。しかし、両者の間に相関は認められず、心理不安が演奏テンポと自律神経活動に及ぼす影響の関連を示唆する知見は得られなかった。手指の全関節の運動情報に対して PCA を行った結果、心理不安は指同士の動きの独立性を低下させること、その低下度が大きいピアニストほど、演奏テンポが速くなることが明らかとなった。これらの結果から、心理不安は手指運動の間接間の協調構造に影響を及ぼすことで、動作のテンポの恒常性を妨げることが示唆された。

4. 局所性ジストニアによる動作の協調構造の異常と皮質機能異常

局所性ジストニアは、身体の一部に不随意運動を生じる脳神経疾患であり、書字動作や音楽演奏など、反復度と巧緻性の高い運動課題で発症することが知られている。機能異常を示す神経回路として、大脳皮質運動野の興奮・抑制機能の異常^{19, 20)}、体性感覚野の身体表現の異常²¹⁾、大脳基底核の安静時活動異常²²⁾などが報告されている。しかし、不随意運動を生み出す病態生理学機序や、それが巧緻技能の失調に及ぼす影響については、未解明な点が多い。手指の局所性ジストニアの場合、データグローブと PCA を用いた行動研究の結果、指同士の動きの独立性の低下が、指運動のタイミング制御の失調と関連していることが報告されている²³⁾。しかし、病態を詳細に観察すると、局所性ジストニアを罹患している指と、症状の代償を担う指の両方が、正常な運動と異なる動きや姿勢、筋収縮様式を示すことが見られる。そのため、医師が診断時に罹患指を正確に同定できず、ボツリヌス毒素の投与や CI 療法 (Constraint Induced Therapy) といった介入を罹患指以外の指に対して処置することにより、症状が改善しない問題が世界中で後を絶たない。奥らは、健康なピアニスト、健康な非音楽訓練経験者、局所性ジストニアを罹患したピアニスト計 35 名によるピアノ

演奏中の手指の内在筋および外在筋の筋活動を小型アクティブ電極による表面筋電図を用いて計測し、NMF と教師無しクラスタリングを用いて、筋同士の機能的な協調構造を計 6 パターン抽出した²⁴⁾。その結果、他のジストニアで認められる拮抗筋同士の同時収縮の異常亢進は、音楽家の局所性ジストニアでは認められなかった。また、局所性ジストニア特有に現れる協調構造は存在せず、既存の筋同士の協調構造が局所性ジストニアより変容していることが明らかとなった。さらに、筋同士の協調構造と、打鍵動作のタイミングの正確性を用いた回帰モデルを立てて解析し、タイミングの正確性と正の相関がある筋活動異常と、負の相関がある筋活動異常を分離することに成功した。前者は代償を担い、後者は症状を反映していることから、生理評価と数理手法を組み合わせた当該手法は、臨床において罹患筋を正確に同定することに寄与することが期待される。

5. 今後の展望

複数の筋や関節の協調構造を抽出するだけではなく、個々の協調構造の機能的役割を理解するために、速度や正確性といったパフォーマンスを説明する回帰モデルを立てることは有効である。筆者らは、身体運動や筋活動の情報に対して PCA や NMF といった多変量解析を行い、得られた特徴抽出の結果に基づいてパフォーマンスとの間で回帰モデルを立てているが^{18, 23-25)}、近年はリッジ回帰をはじめとする機械学習を用いた新しいアプローチやその有効性も報告されている²⁶⁾。本稿で概説した運動技能のパフォーマンスやその変容を身体協調構造によって説明する試みは、中枢神経系が様々な運動技能をどのように生成しているか、訓練や疾患に伴う技能の向上や失調が何故生じるか、自律神経系と中枢神経系の相互作用が技能にどのような影響を及ぼすかを理解する上で有効である (図 1)。そのため、今後、スポーツ科学や身体教育学、リハビリテーション医学の分野におけるさらなる展開が期待される。特に、音楽演奏科学においては、局所性ジストニアによる身体協調構造の異常変容を正常化する介入法の開発が急務である。さらに、滑らかで効率の良いロボットの制御をはじめとする産業面への潜在的な応用可能性も有する。

謝辞

筆者が神経科学や身体運動学に基づいた研究を行うことができた理由の一つに、日本神経回路学会オーストラリアムスクール ASCONE へ参加させていただいた経験が

図1 中枢神経系が表現する身体の自由度の協調構造と運動技能との関係および技能や疾患による変容。皮質脊髄路を経頭蓋磁気刺激を用いて非侵襲的に刺激し、誘発される運動や筋活動に対して多変量解析（PCA, NMF など）を用いて解析することにより、神経系に表現される身体運動の協調構造を抽出する。さらに、筋骨格系における身体運動の協調構造のうち、速度や正確性といった運動技能と関連する少数の協調構造を、回帰モデルを用いて同定する。これらの協調構造は身体運動の制御単位であると考えられており、学習内容（例：Implicit Learning, 多様性学習）や、心理不安、局所性ジストニアの発症に伴い、変容する。しかし、これら技能の洗練や喪失において、新規な協調構造の発現や、既存の協調構造の喪失は見られず、既存の協調構造の変容（重み付けの変化）を伴う。

挙げられる。学生やポスドクとして、第1回、第2回に受講生およびチューターとして参加させていただき、運営に携わった先生方や講師の先生方、受講生である同年代の学生らと共に学び、他では得られぬ刺激を受けていなければ、今日の自分はおろか、音楽演奏科学という学問すら存在しなかったと言っても過言ではない。筆者はヒトの身体運動制御が専門ではあったが、知覚や認知、情動といった異なる専門性や、動物や細胞といった異なる研究対象など、幅広いバックグラウンドの研究者らから受けた影響は計り知れない。このような機会を惜しみなく与えて下さった ASCONE 運営委員の先生方および神経回路学会の先生方への深謝を、本稿の謝辞と代えさせていただく。

参 考 文 献

- 1) Martinez-Molina, N., et al. (2016): Neural correlates of specific musical anhedonia, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol.113, No.46, pp.E7337–E7345.
- 2) Mas-Herrero, E., et al. (2014): Dissociation between musical and monetary reward responses in specific musical anhedonia, *Curr. Biol.*, Vol.24, No.6, pp.699–704.
- 3) Furuya, S., Altenmüller, E. (2015): Acquisition and reacquisition of motor coordination in musicians, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, Vol.1337, pp.118–124.
- 4) Furuya, S., et al. (2006): Prevalence and causal factors of playing-related musculoskeletal disorders of the upper extremity and trunk among Japanese pianists and piano students, *Med. Probl. Perform. Art*, Vol.21, pp.112–117.
- 5) Munte, T.F., Altenmüller, E., Jancke, L. (2002): The musician's brain as a model of neuroplasticity, *Nat. Rev. Neurosci.*, Vol.3, No.6, pp.473–478.
- 6) 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.*, Vol.8, No.7, pp.547–558.
- 7) Bernstein, N.A. (1967): The coordination and regulation of movements, Pergamon,

- London; https://books.google.co.jp/books?id=F9dqAAAAAAAJ&source=gbs_ViewAPI&redir_esc=y.
- 8) Berger, D.J., et al. (2013): Differences in adaptation rates after virtual surgeries provide direct evidence for modularity, *J. Neurosci.*, Vol.33, No.30, pp.12384–12394.
 - 9) Furuya, S., Flanders, M., Soechting, J.F. (2011): Hand kinematics of piano playing, *J. Neurophysiol.*, Vol.106, No.6, pp.2849–2864.
 - 10) Santello, M., Flanders, M., Soechting, J.F. (1998): Postural hand synergies for tool use, *J. Neurosci.*, Vol.18, No.23, pp.10105–10115.
 - 11) Gentner, R., Classen, J. (2006): Modular organization of finger movements by the human central nervous system, *Neuron*, Vol.52, No.4, pp.731–742.
 - 12) Overduin, S.A., et al. (2012): Microstimulation activates a handful of muscle synergies, *Neuron*, Vol.76, No.6, pp.1071–1077.
 - 13) Takei, T., et al. (2017): Neural basis for hand muscle synergies in the primate spinal cord, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol.114, No.32, pp.8643–8648.
 - 14) Gentner, R., et al. (2010): Encoding of motor skill in the corticomuscular system of musicians, *Curr. Biol.*, Vol.20, No.20, pp.1869–1874.
 - 15) Oby, E.R., et al. (2019): New neural activity patterns emerge with long-term learning, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, in press.
 - 16) Hirano, M., et al. (2018): Acquisition of skilled finger movements is accompanied by reorganization of the corticospinal system, *J. Neurophysiol.*, Vol.119, No.2, pp.573–584.
 - 17) Furuya, S., Yokota, S. (2018): Temporal exploration in sequential movements shapes efficient neuromuscular control, *J. Neurophysiol.*, Vol.120, No.1, pp.196–210.
 - 18) Kotani, S., Furuya, S. (2018): State anxiety disorganizes finger movements during musical performance, *J. Neurophysiol.*, Vol.120, No.2, pp.439–451.
 - 19) Furuya, S., et al. (2014): Surmounting retraining limits in Musicians' dystonia by transcranial stimulation, *Ann. Neurol.*, Vol.75, No.5, pp.700–707.
 - 20) Furuya, S., et al. (2018): Aberrant cortical excitability reflects the loss of hand dexterity in musician's dystonia, *J. Physiol.*, Vol.596, No.12, pp.2397–2411.
 - 21) Uehara, K., et al. (2019): Distinct roles of brain activity and somatotopic representation in pathophysiology of focal dystonia, *Hum. Brain Mapp.*, Vol.40, No.6, pp.1738–1749.
 - 22) Kita, K., et al. (2018): Resting-state basal ganglia network codes a motor musical skill and its disruption from dystonia, *Mov. Disord.*, Vol.33, No.9, pp.1472–1480.
 - 23) Furuya, S., et al. (2015): Losing dexterity: patterns of impaired coordination of finger movements in musician's dystonia, *Sci. Rep.*, Vol.5, p.13360.
 - 24) Oku, T., Furuya, S. (2019): Neuromuscular incoordination in musician's dystonia, *Parkinsonism Relat. Disord.*, in press.
 - 25) Tominaga, K., et al. (2016): Kinematic origins of motor inconsistency in expert pianists, *PLoS One*, Vol.11, No.8, p.e0161324.
 - 26) Furuki, D., Takiyama, K. (2019): Decomposing motion that changes over time into task-relevant and task-irrelevant components in a data-driven manner: application to motor adaptation in whole-body movements, *Sci. Rep.*, Vol.9, No.1, p.7246.