

ピアニストの身体運動制御 音楽演奏科学の提案

古屋 晋一*

1. はじめに

音楽家は、幼少期からのトレーニングによって類稀なる運動能力を身につけた典型ともいえる存在であろう。たとえば、ピアニストは、一分間に数百から数千個の音から成る楽曲を、長時間にわたって高速度かつ正確に演奏し続けることが可能である。このような高い運動能力が、長年にわたる訓練の賜物であることは疑う余地のないところであるが、その反面、誤った身体の使い方で練習を続けると、腱鞘炎やジストニアといった深刻な障害を発症することが報告されている。したがって、音楽家の身体運動制御の仕組みを科学的に解明することは、優れた運動能力の背景にある脳神経メカニズムを理解する手がかりとなるだけでなく、「正しい演奏法の確立」といった観点からも、重要性・緊急性の高い課題といえよう。

音楽家の身体運動制御を探るうえでの一つの典型的な方策は、脳イメージングである。手指の運動制御に関わる脳領域やその関連脳領域を調べることで、音楽家の卓越した運動能力を支える脳の仕組みを明らかにしようという研究アプローチは、90年代以降数多く行われてきた。これらの研究の結果、音楽家の脳は、形態、機能ともに、音楽訓練を行ったことのない人とは大きく異なっていることがわかりつつある。しかし、このような「脳を調べることで音楽家の身体運動制御を理解しようとする」トップダウン的なアプローチでは、音楽家がどのような運動制御の方略を用いて優れた運動技能を実現しているかを明らかにすることは困難である。近年、音楽家の身体動作を詳細に調べることで、その背景にある運動制御の仕組みを解明しようとするボトムアップ的なアプローチも報告されつつある。

本稿では、音楽家の中でも特にピアニストに焦点を当て、まず2.でトップダウン的な研究アプローチの代表例である脳イメージングに基づいたピアニストの運動制御研究の最新動向を概説する。その後、3.で動作分析やロボティクスの手法を用いてピアニストの優れた運動制御の仕組みについて調べたボトムアップアプローチによる研究例として、筆者らの打鍵動作研究を紹介する。最後

* 関西学院大学

Key Words: motor control, motor learning, motor skill, musician, expertise.

に、音楽家の身体運動制御研究の意義と今後の展望について述べる。

2. 長期的な音楽演奏訓練がもたらす脳の変化

2.1 運動関連脳領域の可塑的变化

ピアニストは、卓越した運動能力を獲得するために、幼少期より毎日数時間に及ぶ練習を積み重ねており、一流とよばれる水準に達するためには、二十歳までに一万時間に及ぶ練習が必要との報告もある[9]。したがって、長年にわたる運動訓練が脳中枢神経系に及ぼす影響を調べるための優れたモデルとして、ピアニストの脳の特徴について調べた研究がこれまで数多くなされている。たとえば、Gaserと Schlaug は、核磁気共鳴画像法(MRI)を用いて、手指の運動制御に関わる脳領域(運動野)や、力やタイミングの調節や運動の学習に関与するといわれている小脳の体積を計測し、ピアニストと非音楽訓練経験者で比較した[5,18]。その結果、双方の脳領域ともに、ピアニストの方が非音楽訓練経験者よりも大きいことが明らかとなった。さらに、ピアニストの中でもその大きさには個人差があり、練習時間や音楽訓練を開始した年齢と相関を示す結果が報告されている[1,20]。これらの結果は、幼少期からの長年にわたる指運動訓練の結果、より高速かつ複雑な指さばきを可能にするために、ピアニストの指運動の制御に関わる神経細胞が増大していることを示唆している。

一方、ピアニストの脳の機能が変化しているという知見も、これまでに数多く報告されている。たとえば、ある複雑な指運動課題を行う際の運動野や運動前野といった運動関連脳領域の神経細胞の賦活量は、ピアノ初心者に比べてピアニストの方が少ないことが知られている[21,25]。これら運動関連脳領域の賦活量は、指運動の速度[28]や複雑度[2]に比例して増大することが知られているため、複雑な指運動の制御に用いられる神経細胞数が少ない音楽家は、より一層複雑かつ高速度の指運動を行うための神経細胞を有していることを示唆している。事実、あらゆる楽器演奏で不可欠となる、5本の指をそれぞれ独立に動かす運動技能は、他の指が同時に動かないように制御しながら、ある特定の指だけを動かすという複雑な運動制御が求められるが、ピアニストはピアノ

初心者に比べ、個々の指をより独立に、かつ素早く動かすことが可能であることが知られている [3] .

このように、ピアニストは長年にわたる演奏訓練によって、手や指の運動に関連した脳領域の形態や機能が変化しており、その結果、華麗な指さばきを実現しているようである。同様の可塑的变化は、聴覚や触覚に関する脳領域でも報告されているが、実際の演奏では、視覚や聴覚、触覚といった様々な感覚情報を、運動の計画や修正に利用するという、感覚と運動の統合が不可欠となる。次節では、ピアニストの聴覚情報と運動情報の統合に関わる脳情報処理の仕組みについて紹介する。

2.2 音楽演奏における聴覚運動統合メカニズム

連続して正確に演奏し続けるためには、予期せぬエラーが生じた際、それを素早く検出し、即時に修正することが求められる。そのためには、自らの運動によってどのような聴覚フィードバックが得られるかを予測し、それを動作遂行後に実際に聴取した聴覚フィードバックと参照することが不可欠である。このような感覚の予測と結果の誤差に基づいてエラーを検出し、次の動作を修正する脳情報処理機構は順モデルとよばれており、発話やつかみ動作などにおける正確な運動遂行や外乱に対する適応に不可欠であることが知られている。

Katahiraらは、音楽演奏時のエラー検出の背景にある聴覚運動統合メカニズムについて調べるために、専門的なピアノ教育を受けたことのある被験者（ピアニスト）と、楽譜は読めるが専門的なピアノ教育を受けたことのない被験者（初心者）を対象に、以下の二つの実験を行った [22]。まず、双方の被験者に楽譜を見ながら簡単な楽曲を弾いてもらい、時折、自分が押さえた鍵盤に対応した音とは異なる音が鳴るように、電子ピアノを外部的に操作した。つぎに、被験者は演奏せず、ただ楽譜を見ながらその曲を聴取し、先の実験同様、時折楽譜に書かれている音とは異なった音を聴かせた。その際の脳活動を脳波を用いて計測した結果、ピアニストが演奏している際においてのみ、押さえた鍵盤と違う音が鳴った約 210ms 後に現れる脳波成分 (N210) が観察された。このような脳波成分は、ピアニストが単に楽曲を聴取している際には観察されなかったこと、さらには、単に楽譜に書かれた情報に基づいて予測された音と異なった音を聴取した際に現れる脳波成分は、演奏時、聴取時ともに、発音の 300ms 後にピアニスト、初心者双方の被験者で観察されたことから、この N210 成分は、単に予測した音と聴取した音の誤差情報を反映したものではなく、「自分が行った運動の結果聴こえると予測された聴覚情報」と、実際に聴取した聴覚フィードバックとの間の誤差によって生じた信号 (Error Related Negativity: ERN) であると推察された。さらに、初心者がピアノを演奏している際にはこの N210 成分は観察されなかったことから、自分の行った運動によってどのような音が聴こえるかを

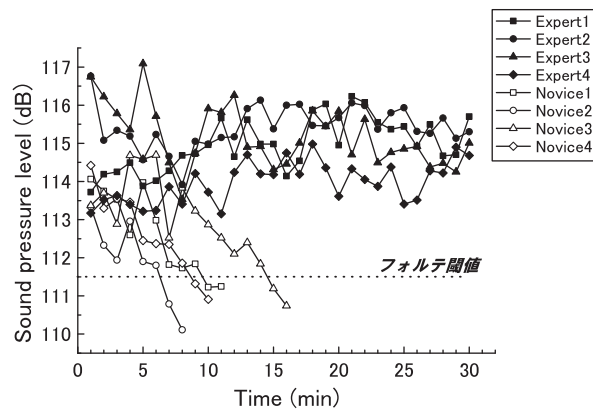
あらかじめ予測する能力は、演奏者の熟練度に依存することが示唆された。事実、音の鳴らない鍵盤を打鍵した際の脳活動を計測した研究によると、非音楽訓練経験者は運動関連脳領域の神経細胞のみが賦活したのに対し、ピアニストでは、聴覚フィードバックがないにもかかわらず、聴覚関連脳領域の神経細胞が賦活することが報告されている [4]。したがって、この「動きから音を想起する」神経回路は、ピアニストが正確かつ適応性の高い演奏を実現するうえで不可欠であると推察される。

3. ピアニストの身体運動制御方略

これまで、ピアニストの卓越した運動技能の背景にある、脳の形態学的・機能的特徴や情報処理の仕組みについて概説してきた。一方、ピアニストの巧みな身体を使い方について、動作分析や筋電図を用いて調べた研究も、近年報告されつつある。本章では、筆者らの行ってきたピアノ打鍵動作研究を例にあげ、音楽家が優れた運動効率や正確性の高い運動生成を実現するために用いている高度な運動技能と、その背後にある運動制御の仕組みについて紹介する。

あらゆる楽器演奏に共通の特徴として、「動作の反復性の高さ」があげられよう。たとえば、ピアノリサイタルでは、1 分間に数百から数千打鍵に及ぶ楽曲を、およそ 1 時間半から 2 時間もの間、演奏し続けることが求められる。しかし、筋肉が疲労すると、テンポが遅くなる、ミスが増大する、音量のバラつきが増えるといった、音楽の芸術性を著しく損ねる事態を招きかねない。したがって、コンサートの最後の一音まで素晴らしい音楽を奏するためには、ピアニストは筋肉を疲労させない、極めてエネルギー効率の高い運動生成技能を獲得している必要がある。事実、ピアニストはピアノ初心者に比べ、高速度の打鍵動作を長時間にわたり疲労せずに持続できることが知られているが (第 1 図)、その背景にある運動技能については、これまで十分に検討されてこなかった。楽器演奏のように何千、何万回と動作が繰り返される運動課題では、一回の動作における筋肉の仕事量をわずかに軽減するだけであっても、一定時間演奏した後に筋肉に蓄積される負荷は、著しく減少する。したがって、筆者らは「一回の打鍵動作を行う際の筋肉の仕事量を軽減する身体運動技能」に着目し、ピアニストとピアノ初心者の打鍵動作の違いを同定する運動制御学研究を行ってきた。この際、ピアノ打鍵動作の微小な関節の動きや、その背景に潜む力の作用、および筋肉を収縮、弛緩させるタイミングなどは、視覚的に同定することが極めて困難である。そのため、筆者ら [11,13-17,24] は、高速度カメラ、筋電図、および力センサを用いて、ピアニストの身体動作を精緻に計測し、さらに、そこに潜む力学法則を明らかにするために、ロボティクス分野で開発された計算手法を応用するというアプローチを採用した。

筆者らの一連の研究では、国内外のコンクールで入賞



第1図 連続オクターブ打鍵動作を行った際の、ピアニスト（黒）およびピアノ初心者（白）の課題遂行継続可能時間。テンポは4打鍵/秒、音量は111.5dB以上（フォルテ）とした。初心者は次第に音量が減少していき、12分程度で課題を遂行できなくなったのに対し、ピアニストは30分課題を遂行し続けることができた[15]。

歴のあるピアニスト7名およびピアノ初心者7名に対し、右手親指小指で二つの鍵盤を同時に打鍵する「オクターブ打鍵」課題を、4段階の音量（*p*, *mp*, *mf*, *f*）で、各音量40打鍵ずつ行ってもらった。その際の中手指節関節（手）、手首関節、肘関節、および肩関節の関節中心、および指先の運動を、高速度カメラを用いて計測した（第2図）。これらに同期して、鍵盤の鉛直方向運動および鍵盤に加わる力を高速度カメラおよび力センサ実装鍵盤によって収録した。また、肩、肘、手首の屈曲および伸展に関連する筋（三角筋前部・後部、上腕二頭筋、上腕三頭筋、尺側手根伸筋、橈側手根屈筋）の活動を、表面筋電図を用いて計測した。さらに、上肢を上腕、前腕、手、指からなる剛体リンクモデルと仮定し、各関節に生じる回転力（トルク）を推定する非線形運動方程式を、ニュートン・オイラー法とよばれる計算手法を用いて導出した。計測した身体運動情報を得られた式に代入することで、各関節に生じるトルクを算出した（式の詳細については[15]を参照のこと）。その結果、熟練ピアニストは打鍵動作時の筋肉の仕事量を軽減するために、筋力以外の力を効果的に運動生成に利用する運動制御方略を用いていることが明らかとなった。

3.1 運動依存性の力の利用

ピアノ打鍵動作のように、胴体から指先に至る複数の関節の動きを伴う運動では、ある身体部位の運動が他の身体部位の運動に影響を及ぼすことが知られている。これは、慣性力や遠心力といった運動依存性の力によるものであり、その結果関節に生じるトルクは運動依存性トルクとよばれている[19]。先行研究では、望みどおりの運動を遂行するには、運動依存性トルクの大きさや方向を考慮に入れて、筋肉へ指令を送ることが不可欠であること、投球動作や走動作のような高速度の運動では、身



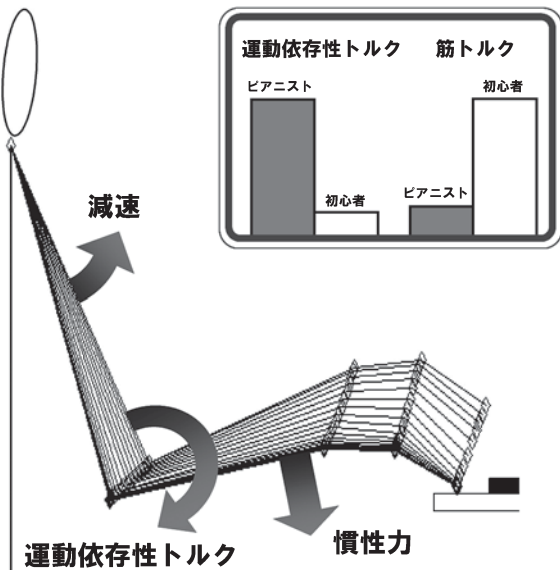
第2図 ピアノ打鍵実験の様子

体部位を加速させるために運動依存性トルクを効果的に利用していることが報告されている[8]。しかし、筋肉の仕事量を軽減するために運動依存性トルクを利用するような身体運動技能については、これまで報告されていなかった。

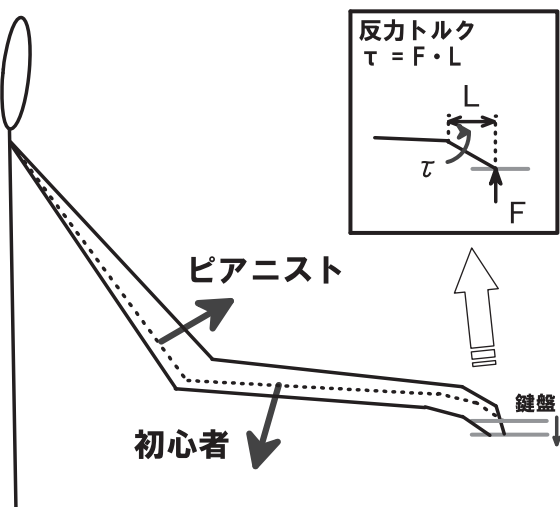
筆者ら[13,15,17]が、ピアニストとピアノ初心者の打鍵動作の運動学的、動力学的特徴について調べたところ、ピアニストにおいてのみ、腕を振り下ろしている最中に、肩関節の回転に急激なブレーキが観察された（第3図）。また、肘および手首関節に生じる運動依存性トルクの大きさを計算したところ、ピアニストの方が初心者よりも大きな値を示した。肩関節が減速すると、前腕および手部を下降させる慣性力が生じることから、ピアニストと初心者の肘や手首に生じる運動依存性トルクの大きさの違いは、肩関節のブレーキの有無に起因すると考えられる。さらに、これらの関節周りの筋肉によって生成されるトルク（筋トルク）の大きさは、ピアニストの方が初心者よりも小さな値を示した。したがって、ピアニストは肘と手首の運動生成に運動依存性トルクを効果的に利用することで、これらの関節周りの筋肉の仕事量を軽減していることが明らかとなった。音量の増大に伴い、ピアニストでは肘および手首関節の運動依存性トルクが増大したのに対し、初心者では筋トルクに増大が認められたことから、手先により大きな速度を生成するために、前者は筋力以外の力を効果的に利用し、後者はより大きな筋力を発揮していることが明らかとなった。

3.2 鍵盤反力の軽減

鍵盤楽器や打楽器、弦楽器では、楽器に対して発揮する力に応じて、音色や音量といった音の特徴が変化する。



第 3 図 腕を振り下ろす際の運動依存性トルクの生成メカニズム。上腕が減速することにより、前腕や手といった遠位部に慣性力が生じ、肘や手首には運動依存性トルクが生成される。初心者ではこのような上腕の減速がほとんど見られず、筋力によって腕を振り下ろしていた [13,15,17]



第 4 図 鍵盤を押し下げている際の鍵盤反力トルクと上肢の姿勢との関係。ピアニストは指関節中心と鍵盤反力との水平距離を短くするように腕全体を回転させることで、指関節周りに生じる鍵盤反力トルクの大きさを軽減している [14,15]

その際、手や指先には、楽器からの反力が作用するため、望みどおりの音を作り出すためには、楽器から受ける反力に抗する力を、筋肉が発揮しなければならない。しかし、指先に作用する反力によって各関節に生じるトルク（反力トルク）の大きさは、反力の大きさだけでなく、手や腕の姿勢に依存して変化するため（第 4 図）、同じ力が指先に作用しても、手や腕の姿勢が異なると、反力に抗するために各関節周りの筋肉が発揮すべき力の大きさも変化する。

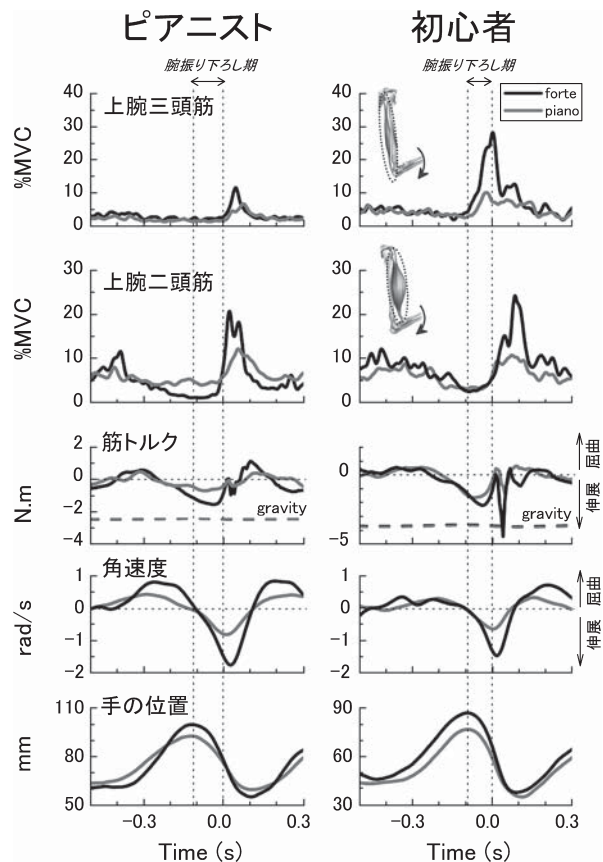
筆者らの研究の結果 [14,15]、指先が鍵盤を押し下げている間、ピアニストは手を前方に押し出すように腕全体を回転させていたが、そのような運動パターンは初心者には見られなかった（第 4 図）。その結果、ピアニストの指と鍵盤の成す角度は増大していき、それに伴い、指関節に作用する反力トルクは減少していった。さらに、指関節の筋トルクおよび筋活動量を算出したところ、ともにピアニストの方が初心者よりも小さな値を示した。つまり、ピアニストは、反力の影響の受けにくい手のフォームを作り上げることによって、指関節に生じる反力トルクを相殺するために必要な筋肉の仕事量を軽減させていたのである。ピアノ演奏に伴う故障問題は、指を動かす筋肉のある手や前腕部で最も多く報告されているため [10,12]、この「力をうまく逃がすスキル」は、これらの故障発症の予防に有効であると考えられる。

3.3 重力の利用

身体運動に影響を及ぼす力は、運動依存性の力や物体から受ける反力だけではない。打鍵動作のように手や腕を振り下ろすような運動では、重力を利用することが可能である。事実、重力によって腕を落下させることによって、鍵盤を打鍵する「重量奏法」といわれる運動技能は、100 年以上前より世界中のピアニストやピアノ教育者の間で筋肉の仕事量を軽減する演奏技術であると考えられてきた [23,27]。しかし、そのような熟練運動技能の存在を科学的に実証する結果は、これまでに一切報告されていなかった。

筆者らが、ピアニストとピアノ初心者の打鍵動作時の関節トルクおよび筋活動について調べた結果、肘の筋トルクの生成に関わる筋活動様式が、両群では全く異なることが明らかとなった [16]。手を振り下ろす際、初心者は肘の伸筋（上腕三頭筋）を収縮させることによって、伸展方向の筋トルクを作り出していたが、ピアニストは、重力に抗して収縮している屈筋（上腕二頭筋）を弛緩することによって、肘の伸展トルクを生成していた（第 5 図）。これは、肘の伸展動作を、初心者は筋力によって、ピアニストは重力を利用することによって行っていることを示唆している。また、より大きな音量の音を生成する際、初心者は伸筋の活動量を増大させることで、より大きな筋トルクを生成していたのに対し、ピアニストは屈筋の弛緩量を増大させることで、より多くの重力を利用していた。このように、ピアニストは重力を利用することで、打鍵動作を行う際の筋肉の仕事量を軽減していることが明らかとなった。

では、どうして初心者は、筋肉の仕事量を軽減できるという利点があるにもかかわらず、重力を積極的に打鍵動作に利用しなかったのであろうか？これには、筋肉の収縮様式の違いが関与しているようである。重力を利用して打鍵動作を行う際、肘の抗重力筋である上腕二頭筋は、伸びながら力を発揮する（伸張性筋収縮）。一方、筋



第5図 ピアニストとピアノ初心者の打鍵動作時における筋収縮様式の違い。手の位置は、鍵盤表面からの手の鉛直方向位置を、筋活動値は、最大筋収縮時の筋活動量を100として正規化した値を示す(%MVC)。初心者は、腕を振り下ろす際、肘関節の主働筋(上腕三頭筋)を収縮させることで伸展トルクを生成し、肘関節を伸展させていたのに対し、ピアニストは、抗重力筋(上腕二頭筋)を弛緩させることで、重力を利用することにより、肘関節を伸展させていた[16]

力によって肘を伸展させる場合、いわゆる“二の腕”とよばれる上腕三頭筋は、縮みながら力を発揮する(短縮性筋収縮)。伸張性筋収縮は短縮性筋収縮に比べ、発揮力のバラつきが大きいことが知られているため[7]、重力を利用した打鍵動作では、望みどおりの音量の音を正確に作り出すことが難しい。したがって、狙った音量の音を安全に生成するために、初心者は筋力によって打鍵動作を行う方略を選択したものと考えられる。

3.4 運動効率と正確性の向上に関わる運動制御

このように、熟練したピアニストは、打鍵動作時の筋肉の仕事量を軽減するために、運動依存性力や重力を効果的に利用したり、外力の作用を軽減したりしていることが知られている。肩の筋肉によって腕の振り下ろし動作に急激なブレーキをかけ、肘や手首といった末梢部の筋肉の仕事量を軽減する、さらには、鍵盤を押し下げている間に肩の筋肉によって腕全体を前方に回転させ、指

周りの筋肉の仕事量を軽減する、といったピアニストの方略は、言い換えると、筋力が強くて太い肩の筋肉に仕事をさせ、肘、手首、指といった疲労しやすい小さな筋肉の仕事量を軽減させるという、腕全体の疲労を最小限にする運動制御方略といえよう。

ピアノ演奏をはじめとする楽器演奏は、その反復性の高さゆえ、様々な手や腕の故障の発症を引き起こすリスクを内包している。事実、器楽奏者は、腱鞘炎や指のしびれが生じる手根管症候群といった末梢器官の障害や、力の調節が困難になる筋ジストニアのような中枢系の疾患といった、時に演奏家生命を脅かす障害を発症することも少なくない[10,12,26]。本稿で紹介した身体への負荷を軽減するピアニストの熟練運動技能は、こういった故障の発症を予防する画期的な演奏法や指導法の開発につながるものと期待される。

実は、上述のピアニストの運動制御方略には、動作の正確性を向上するという利点も隠されている。近年、運動制御の分野では、脳から筋肉に送られる運動指令に混入するノイズ(Signal Dependent Noise: SDN)が、運動の正確性を低下させる要因であるとして注目を集めている。SDNは、運動指令の増大に伴い増加するが、筋力の強い筋の方が、SDNによって引き起こされる発揮力のバラつきが小さいことが知られている[6]。つまり、筋力の強い肩の筋肉を積極的に用い、筋力の弱い末梢部の筋の発揮力を低減するピアニストの方略は、SDNによる影響を受けにくく、望みどおりの運動生成を実現しやすい運動制御方略でもある。事実、ピアニストは初心者に比べ、試行間の打鍵力のバラつきが小さいという結果が得られている[15]。意図せぬ音量のバラつきは、音楽の芸術性を損ねかねないため、ピアニストはおそらく長年にわたる訓練によって上述のような身体の使い方を習得することにより、芸術性の高い音楽表現を自由自在に創造することが可能なのであろう。

4. まとめにかえて

“音楽演奏科学”の提案

音楽家の卓越した身体運動技能は、古くから世界中の科学者の興味の対象であった。しかし、その詳細な運動制御メカニズムが明らかになってきたのは、ごく最近のことである。音楽家の脳や身体運動技能について理解を深めることは、従来研究で考えられていたように、長期的な運動訓練が身体器官に及ぼす影響や、複雑な身体運動を制御する脳のメカニズムを解明する手がかりを提供してくれるだけではない。複雑な演奏技術の習得支援や故障発症の予防といった形で、「自らの身体を使って音楽を創造したいと願うすべての人が、身体を傷めることなく、思い描いた音楽表現を行うことを支援する」という文化的に重要な意義を有することを忘れてはならない。本稿で紹介した、脳科学、身体運動学、工学の観点から

音楽家の身体運動制御を解明しようとする「音楽演奏科学」研究は、学術的意義、文化的意義の双方を備えた“芸術と科学をつなぐ新しいアプローチ”として、今後さらなる発展が期待される。

謝 辞

本稿の執筆にあたり、片寄晴弘教授（関西学院大学 / JST CREST CrestMuse）、長田典子教授（関西学院大学）、北原鉄朗博士（関西学院大学 / JST CREST CrestMuse）、片平健太郎博士（JST ERATO 岡ノ谷情報情報プロジェクト）、風井浩志博士（関西学院大学）、田淵規之氏（MIZUNO co.）には大変有益かつ建設的なご意見をいただいた。ここに心からの感謝の意を表したい。

(2009年3月31日受付)

参考文献

- [1] K. Amunts, G. Schlaug, K. Jancke, H. Steinmetz, A. Schleicher, A. Dabringhaus and K. Zilles: Motor cortex and hand motor skills: structural compliance in the human brain; *Hum Brain Mapp*, Vol. 5, No. 3, pp. 206-215 (1997)
- [2] T. Aoki, H. Tsuda, M. Takasawa, Y. Osaki, N. Oku, J. Hatazawa and H. Kinoshita: The effect of tapping finger and mode differences on cortical and subcortical activities: a PET study; *Exp Brain Res*, Vol. 160, No. 3, pp. 375-83 (2005a)
- [3] T. Aoki, S. Furuya and H. Kinoshita: Finger-tapping ability in male and female pianists and nonmusician controls; *Motor Control*, Vol. 9, No. 1, pp. 23-39 (2005b)
- [4] M. Bangert and E. O. Altenmüller: Mapping perception to action in piano practice: a longitudinal DC-EEG study; *BMC Neurosci*, Vol. 4, 26 (2003)
- [5] M. Bangert and G. Schlaug: Specialization of the specialized in features of external human brain morphology; *Eur J Neurosci*, Vol. 24, No. 6, pp. 1832-1834 (2006)
- [6] P. M. Bays and D. M. Wolpert: Computational principles of sensorimotor control that minimize uncertainty and variability; *J Physiol*, Vol. 578(Pt 2), pp. 387-396 (2007)
- [7] E. A. Christou and L. G. Carlton: Motor output is more variable during eccentric compared with concentric contractions; *Med Sci Sports Exerc*, Vol. 34, No. 11, pp. 1773-1778 (2002)
- [8] N. Dounskaia: The internal model and the leading joint hypothesis: implications for control of multi-joint movements; *Exp Brain Res*, Vol. 166, pp. 1-16 (2005)
- [9] K. A. Ericsson, M. J. Prietula and E. T. Cokely: The making of an expert; *Harv Bus Rev*, Vol. 85, No. 7-8, pp. 114-121, 193 (2007)
- [10] 古屋, 木下 (矢部, 笠井, 大築 編): 入門運動神経生理学, 市村出版 (2003)
- [11] 古屋, 青木, 木下: 熟練ピアニストによるピアノの打鍵テンポと音量の調節に関わる運動制御; *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 30, No. 3, pp. 151-155 (2006)
- [12] S. Furuya, H. Nakahara, T. Aoki and H. Kinoshita: 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, No. 3, pp. 112-117 (2006)
- [13] S. Furuya and H. Kinoshita: Roles of proximal-to-distal sequential organization of the upper limb segments in striking the keys by expert pianists; *Neurosci Lett*, Vol. 421, No. 3, pp. 264-269 (2007)
- [14] S. Furuya and H. Kinoshita: Organization of the upper limb movement for piano key-depression differs between expert pianists and novice players; *Exp Brain Res*, Vol. 185, No. 4, pp. 581-593 (2008a)
- [15] S. Furuya and H. Kinoshita: Expertise-dependent modulation of muscular and non-muscular torques in multi-joint arm movements during piano keystroke; *Neuroscience*, Vol. 156, No. 2, pp. 390-402 (2008b)
- [16] S. Furuya, R. Osu and H. Kinoshita: Effective utilization of gravity during arm downswing in keystroke by expert pianists; *Neuroscience*, (in press) (2009)
- [17] 古屋, 木下: 一流ピアニストの打鍵動作における相互作用トルクの利用; *音楽知覚認知学研究*, Vol. 13, No. 1, 2, pp. 1-7 (2007)
- [18] C. Gaser and G. Schlaug: Brain structures differ between musicians and non-musicians; *J Neurosci*, Vol. 23, No. 27, pp. 9240-9245 (2003)
- [19] M. Hirashima, K. Kudo, K. Watarai and T. Ohtsuki: Control of 3D limb dynamics in unconstrained overarm throws of different speeds performed by skilled baseball players; *J Neurophysiol*, Vol. 97, No. 1, pp. 680-691 (2007)
- [20] S. Hutchinson, L. H. Lee, N. Gaab and G. Schlaug: Cerebellar volume of musicians; *Cereb Cortex*, Vol. 13, No. 9, pp. 943-949 (2003)
- [21] L. Jäncke, N. J. Shah and M. Peters: Cortical activations in primary and secondary motor areas for complex bimanual movements in professional pianists; *Brain Res Cogn Brain Res*, Vol. 10, No. 1-2, pp. 177-183 (2000)
- [22] K. Katahira, D. Abla, S. Masuda and K. Okanoya: Feedback-based error monitoring processes during musical performance: an ERP study; *Neurosci Res*, Vol. 61, No. 1, pp. 120-128 (2008)
- [23] B. A. Kay, M. T. Turvey and O. G. Meijer: An early oscillator model: studies on the biodynamics of the piano strike (Bernstein & Popova, 1930); *Motor Control*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-45 (2003)
- [24] H. Kinoshita, S. Furuya, T. Aoki and E. Altenmüller: Loudness control in pianists as exem-

- plified in keystroke force measurements on different touches; *J Acoust Soc Am*, Vol. 121(5 Pt1), pp. 2959–2969 (2007)
- [25] T. Krings, R. Töpper, H. Foltys, S. Erberich, R. Sparing, K. Willmes and A. Thron: Cortical activation patterns during complex motor tasks in piano players and control subjects: A functional magnetic resonance imaging study; *Neurosci Lett*, Vol. 278, No. 3, pp. 189–193 (2000)
- [26] トーマス・マーク (著), 小野 (監訳), 古屋 (訳): ピアニストならだれでも知っておきたい「からだ」のこと, 春秋社 (2006)
- [27] T. Matthey: *The First Principles of Pianoforte Playing*, Longmans, Green, and co. (1905)
- [28] N. Sadato, V. Ibañez, G. Campbell, M. P. Deiber, D. Le Bihan and M. Hallett: Frequency-dependent changes of regional cerebral blood flow during finger movements: functional MRI compared to PET; *J Cereb Blood Flow Metab*, Vol. 17, No. 6, pp. 670–679 (1997)

著者略歴

ふるや しんいち
古屋 伸一

1980年3月8日生。2002年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業，2004年同大学大学院人間科学研究科博士前期課程修了，2008年同大学大学院医学系研究科予防環境医学専攻博士課程修了。関西学院大学大学院理工学研究科ヒューマンメディア研究センター博士研究員を経て，現在，ミネソタ大学神経科学部にて博士研究員。ピアノを愛するすべての人が，心に思い描いた音楽表現を身体に無理なく創造することを支援するために，ピアノ演奏の運動制御およびバイオメカニクスに関する研究に従事。博士（医学）。2008年日本音楽知覚認知学会研究選奨受賞，2009年大阪大学共通教育賞受賞，2009年 Society for Neural Control of Movement, Scholarship Winner。日本神経回路学会，計測自動制御学会，日本音楽知覚認知学会，Society for Neural Control of Movement，各会員。