解　説

音楽リズム運動の生成と同期

藤 井 進 也[1, 2, 3 †]

[1] ハーバード大学 医学部，ベスイスラエルディコーネスメディカルセンター

[2] 東京大学大学院 教育学研究科 身体教育学コース　[3] 日本学術振興会 特別研究員 PD

要旨　音楽家は，日々弛まぬ練習を積み重ね，初心者にとっては大変困難なリズム運動の生成と同期を実現することができる．これら音楽家の身体運動には，巧みなリズム運動の神経制御メカニズムや，学習に伴う中枢神経系の適応的変化の仕組みを解くための鍵が多く潜んでいる．本稿では，世界最速ドラマーをはじめとした音楽家の運動制御研究について紹介し，高度なリズム運動の生成と同期を実現する音楽家の身体運動制御戦略について解説する．

キーワード：最速タッピング運動，表面筋電図活動，左右差，両手協調運動，感覚運動同期

1. はじめに

リズムとは，“運動／感覚事象によって区切られた時間間隔のパターン”と定義される[1]．音楽家はリズムの生成と同期を通じて，観客を魅了する芸術的な表現を行う．しかし，これを実現するには，巧みな身体運動の制御が必要とされる．したがって音楽家は，非常に多くの時間を練習に費やす．例えば，一流のピアニストやバイオリニストは，20 歳までに合計 10,000 時間以上の練習を行い[2]，世界的に活躍しているプロドラマーは，8 歳からの 47 歳までの間に約 100,000 時間を超える練習を行う（図 1）．21 世紀以降の神経科学研究分野において，このように激しい練習を積んだ音楽家は，ヒトの神経系の可塑性を調査する上で，貴重かつ魅力的な研究対象であると提唱されている[3, 4]．

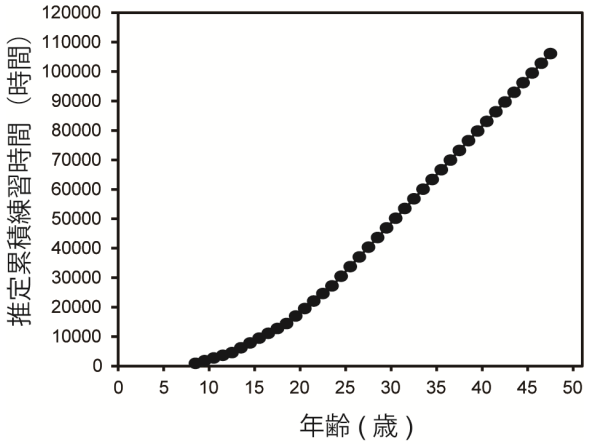


図 1　世界的に活躍している日本人プロドラマー 1 名の推定累積練習時間．質問紙により調査したデータに基づき筆者が作成．

2012 年 1 月 6 日受付

† Shinya Fujii

Music, Neuroimaging, & Stroke Recovery Laboratory, Department of Neurology

Beth Israel Deaconess Medical Center & Harvard Medical School

330 Brookline Avenue - Palmer 127, Boston, MA 02215

Tel : 1-617-632-8929　Fax : 1-617-632-8920

E-mail : sfujii@bidmc.harvard.edu

練習を積み重ねた音楽家は，初心者にとっては大変困難な，高速度の運動パフォーマンスを実現することができる．ピアニストは，1 分間に 1,800 個の音符から成る楽曲を演奏することができ[3]，またアメリカで開催される「世界最速ドラマーコンテスト」の優勝者は，両手で 1 分間に 1,247 回（1 秒間あたり約 20 回），両足で 1 分間に 1,034 回（1 秒間あたり約 17 回）ドラムを叩くことができる．これら音楽家の高度な身体運動には，巧みなリズム運動の神経制御メカニズムや，学習に伴う中枢神経系の適応的変化の仕組みを解くための鍵が多く潜んでいる．

本稿では，世界最速ドラマーをはじめとした熟練音楽家の運動制御研究について紹介し，高度なリズム運動の生成と同期を実現する音楽家の身体運動制御戦略について解説する．本章に続く第 2 章では，世界最速ドラマーの表面筋電図活動について述べ，第 3 章では，音楽家に特徴的にみられる手の運動機能の左右差減少と両手協調性の関連について述べる．第 4 章では，日本トップドラマーの感覚運動同期能力について述べる．

2. 世界最速ドラマーの表面筋電図活動

2.1 最速タッピング運動

コンピューターキーボード，電気スイッチ，ドラムパッドなどを数十秒間にできるだけすばやく叩く「最速タッピング運動」は，ヒトの運動機能を評価する課題として広く研究に用いられてきた[5-22]．指動作，手首動作，肘動作，肩動作など，様々な上肢動作の周期速度の限界が調査され[7, 15, 18, 22]，ひとつの運動効果器による周期運動の速度限界は，一般的に約 5-7Hz（1 秒間に 5-7 回のタップ）といわれている[23]．ところが，世界最速ドラマーコンテスト「Battle of the Hands」部門の優勝者は，スティックを持った両手で 1 分間に 1,247 回ドラムが叩けると報道された．これは片手あたり 10Hz の動作（1 秒間に 10 回のタップ）を 60 秒間続けて遂行することに相当する．この世界記録保持者は，世

界的に活躍しているアメリカの超有名プロドラマーである．しかしながら，世界最速ドラマーコンテストではタップ回数しか測定されていないため，この高速リズム運動を実現している筋活動様式は不明であった．

2.2 筋活動の立ち上がり速度

筆者らは，世界最速ドラマーが来日した際に，実験協力の承諾を得て，手首の屈曲／伸展運動による片手最速タッピング課題中の手首屈筋群（尺側手根屈筋）と手首伸筋群（橈側手根伸筋）の表面筋電図活動を測定した（図 2）[8, 11]．

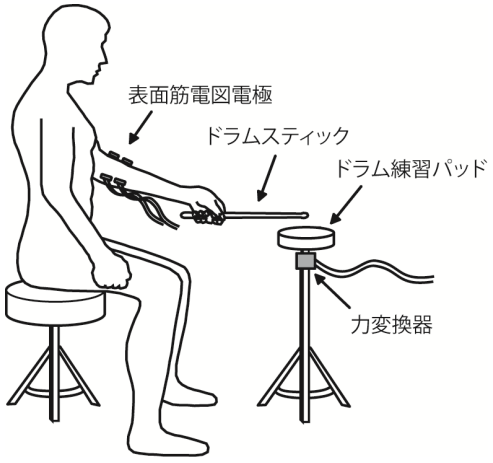


図 2　スティックを用いた片手最速タッピング課題．

比較対象のために，非ドラマー群（ドラム経験のない健常成人）と，一般ドラマー群（健常な音楽学校生徒およびプロドラマー）のデータも取得した．すると，非ドラマーや一般ドラマーのタップ速度は 1 秒間に 6-7 回程度であったのに対し，世界最速ドラマーのタップ速度は，コンテスト時と同様に，1 秒間に 10 回であった（図 3）．世界最速ドラマーの筋電図には，手首屈筋群・伸筋群ともに 1 秒間に 10 回のバーストが見られ，その様相は，非ドラマーや一般ドラマーと大きく異なるものであった．世界最速ドラマーの筋活動のひとつの大きな特徴は，屈筋群・伸筋群ともに

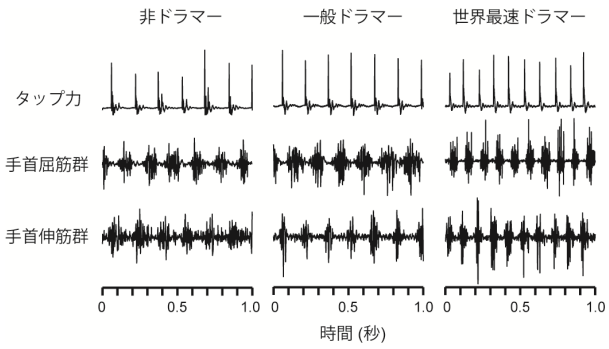


図 3　片手最速タッピング課題における，非ドラマー，一般ドラマー，世界最速ドラマーのタップ力と手首屈筋群・伸筋群の表面筋電図活動（1 秒間）．

立ち上がり速度が非常にすばやく，ごく一瞬で活動を終了している点である [11]．

Van Cutsem らは，「できるだけすばやく筋を収縮させる」という動的な筋収縮トレーニングを行った後に，トルク発揮速度に加え，筋活動の立ち上がり速度が向上したことを報告している [24, 25]．特筆すべきは，この背景に，運動単位の発火頻度増大が認められた点である．特に，時間間隔のごく短い二重発火（Doublet discharge）の頻度が増大していた点が興味深い．例えば，約 82 ミリ秒毎のパルスで筋を電気刺激している最中に，10 ミリ秒というごく短い間隔で電気刺激（Double stimulation）を加えると，筋張力が急峻に立ち上がり，大きな張力が維持される [26]．この特徴的な筋張力発揮は，Catch-like property と呼ばれ，疲労が少なく効率的な筋張力発揮が可能になることが指摘されている [26-28]．世界最速ドラマーは，世界記録時に 10Hz の高速タップを 60 秒間維持した計算になるが，それにはすばやく筋を収縮させると共に，疲労を最小限に抑えることが重要である．世界最速ドラマーの驚異的なパフォーマンスの背景に，Catch-like Property や運動単位の二重発火が関与しているのかもしれない．

ネコの手振り動作（Paw-shaking movement）において，10Hz 以上の高速リズム運動が観測されたことを報告した Smith らの研究も示唆深い [29]．Smith らは，7Hz 程度の比較的遅い手振り動作時に比べて，10Hz 以上の高速手振り動作時には，遅筋線維を多く含むヒラメ筋活動の選択的抑制と，速筋線維を多く含む腓腹筋の選択的動員が起こることを報告している．ヒトのリズミカルなつま先ジャンプ中においても，動作速度の増加に応じて腓腹筋の運動ニューロン興奮性が選択的に促通し，ヒラメ筋が抑制を受けることが確認されている [30, 31]．これらの知見を踏まえると，世界最速ドラマーは，10Hz というすばやい動作を実現するために，速筋線維を支配する F タイプの脊髄運動ニューロンを選択的に動員し，遅筋線維を支配する S タイプの脊髄運動ニューロンの興奮性を選択的に抑制していた可能性も考えられる．

核磁気共鳴画像法（Magnetic Resonance Imaging; MRI）を用いた脳構造研究によると，最速指タッピング速度と一次運動皮質サイズ（中心前回の後層の溝間長，Intrasulcul Length of the posterior bank of the Precentral Gyrus; ILPG）の間には相関関係があり，タップ速度の速い音楽家は，一次運動皮質のサイズが大きいことが報告されている [5]．実際に，左半球の一次運動皮質に対して反復的経頭蓋磁気刺激（repetitive Transcranial Magnetic Stimulation; rTMS）を行うと，右手の最速タッピング速度が有意に低下する [17]．また，最速タッピングのトレーニング後には，タップ速度の向上と同時に，皮質脊髄路の興奮性に変化が認められる [19]．すばやい音楽リズム運動の実現には，一次運動皮質の構造や皮質脊髄路の興奮性も関わっていると考えられる．

青木らは，ピアニストが非ピアニストに比べて最速指タッピング速度がすばやかったことを報告しているが，最大指発揮力に関しては，ピアニストと非ピアニストの間で差が

みられなかったことを報告している[6]．すなわち，大きな力発揮を行うための筋特性は，最速タッピング運動の能力に直接影響しない可能性がある．動的トレーニング後の運動単位の発火頻度増大を指摘した Van Cutsem らの研究においても，電気刺激による末梢の筋収縮特性に関しては，動的トレーニング後に変化が認められなかったことが報告されている[24]．音楽家がみせる巧みなリズム運動の実現には，抹消の筋特性よりもむしろ，中枢神経系から適切な運動指令が大きく関与しているように思われる．

2.3 筋活動の共収縮

図 3 をみると，一般ドラマーと非ドラマーの間に，それほど大きなタップ速度の差がないように見える．しかし実際のところ，タップタイミングとタップ力の安定性，そして筋活動タイミングの安定性に関しては，ドラマーと非ドラマーで大きな違いが見られ，ドラマーはタップタイミング，タップ力，筋活動タイミングの安定性が非常に高い[12]．また，ドラマーは非ドラマーに比べて，手首関節運動の主働筋―拮抗筋間の共収縮（co-contraction）水準が低い[10]．すなわち，ドラマーは，非ドラマーに比べて，手首の屈筋群と伸筋群が明確に交互収縮している．世界最速ドラマーもまた，10Hz という高速度の動作下であっても安定したタップタイミングと筋活動タイミングを示し，手首屈筋群・伸筋群間の共収縮水準が非常に低い[8, 11]．世界最速ドラマーをはじめとしたドラマーの手首関節は，非ドラマーに比べて，柔らかくリラックスした状態に保たれていると考えられる．

主働筋―拮抗筋間の共収縮水準の低下は，ドラマーだけでなく，ピアニストにも特徴的に観測される[32, 33]．古屋らは，指先がピアノの鍵盤を押し下げている間，ピアニストの指の外在筋群の共収縮量が初心者に比べて小さかったことを報告している[32]．また，2 つのピアノの鍵盤を親指と小指で交互に打鍵する「トレモロ」という課題を行う際に，演奏テンポを増加すると，アマチュアピアニストでは，総指伸筋―浅指屈筋間の共収縮量が顕著に増大するが，プロのピアニストでは，演奏テンポの増大に伴う筋の共収縮量増大が僅かにしか認められない[33]．ピアニストもまた，柔らかい関節の状態を保ち，リラックスした状態で演奏を行っていると考えられる．

これら熟練音楽家に見られる主働筋―拮抗筋間の共収縮水準の低下は，到達運動を用いた運動学習研究において得られた知見と一致している[34, 35]．大須らは，筋の共収縮水準の低下は，筋疲労を抑止する効果があるのに加え，関節が柔らかくなることで，外部環境に存在する物体との衝撃力を緩和し，怪我のリスクを低下させる利点があると指摘している[35]．また逆に，共収縮水準が高くなると，運動指令に混入するノイズ量が増大することも示唆される[36]．筋の効率的使用による疲労や怪我の予防，そして動作の安定化は，音楽パフォーマンスの質を向上・維持する上で大変重要である[37-39]．筋活動の共収縮水準の低下は，高度な音楽リズム運動を実現するための身体運動制御戦略の一つと考えられる．

3. 左右差と両手協調運動

3.1 手の運動機能の左右差

音楽トレーニングのない健常人の最速タッピング速度は，利き手と非利き手とで大きく異なり，利き手のタッピングは非利き手のタッピングよりもすばやい[20]．この最速タッピング速度の左右差は，数カ月の練習を行った後でも根強く残存するほどつよい身体的拘束である[21]．ところが，音楽トレーニングを長年積んだ鍵盤楽器奏者や弦楽器奏者は，非音楽家に比べて，最速タッピング速度の左右差が小さい[16]．ドラマーもまた，非ドラマーに比べて最速タッピング速度の左右差が小さい[12]．質問紙による利き手テストのスコアについては，音楽家と非音楽家の間に差がみられないが，最速タッピング速度の左右差については，音楽家と非音楽家の間に違いがみられるのである[9, 12, 16]．世界最速ドラマーに至っては，つよい右利きであるにもかかわらず，タッピング速度の左右差がほとんどみられない[8]．

3.2 音楽家の両手協調性

音楽家にとって，タッピング速度の左右差が小さいことの機能的意義とは一体何であろうか？楽器演奏に両手の協調性が重要であることを踏まえると，手の運動速度の左右差減少は，両手協調運動パフォーマンスの向上に貢献している可能性が高い．そこで，筆者らは「できるだけすばやく，かつできるだけ交互に両手でドラムを叩く」という両手最速交互ドラミング課題を用いて，この可能性について検証した[9]．

図 4 A は，両手最速交互ドラミング課題中における，左右の手のタップタイミングの模式図である．左右の手のタップタイミングが完全に交互である場合，右手に対する左手の相対位相 ϕ は 180°を示す．これに対し，左右の手のタップタイミングが完全に同時である場合，相対位相 ϕ は 0°あるいは 360°を示す．

右利きのプロドラマー群と非ドラマー群に対して両手最速交互ドラミング課題を実施すると，プロドラマー群は非ド

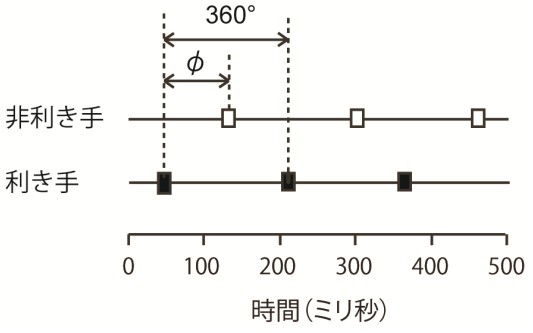


図 4　両手最速交互ドラミング課題における，左右の手のタップタイミングの模式図．左右の手のタップタイミングが完全に交互である場合，右手と左手の相対位相（ϕ）は 180°を示す．

ラマー群よりもすばやく叩くことができる[9]．（プロドラマー群は平均して両手で 1 秒間に約 13 回，非ドラマー群は両手で 1 秒間に約 11 回叩くことができる．）加えて，両手の相対位相 ϕ を算出すると，プロドラマーと非ドラマーとでは，ϕ の時系列パターンに顕著な差がみられる（図 5A）．プロドラマーは，180˚位相を安定して維持できるのに対し，非ドラマーは相対位相が非常に不安定である．注目すべきは，非ドラマーの相対位相が，右肩上がりの特徴的なパターンを示した点にある．この特徴的なパターンは，利き手のタップが非利き手のタップよりもすばやく，時折，利き手のタップが非利き手のタップを追い越すために生じていた．また，片手最速ドラミング課題におけるタッピング速度の左右差（ΔΩ）が大きい非ドラマーほど，両手最速交互ドラミング課題における右肩上がりの相対位相パターンがより顕著であった（図 5A）[9]．

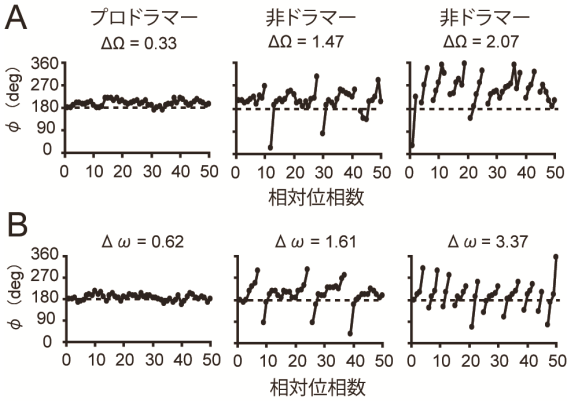


図 5（A）最速両手交互ドラミング課題において観測されたプロドラマーと非ドラマーの両手の相対位相 ϕ．片手最速ドラミング課題において，タッピング速度の左右差（ΔΩ：単位 Hz）が大きい非ドラマーほど，右肩上がりの時系列パターンが顕著になり，相対位相の変動性が大きい．（B）微分方程式（式 1）を用いて再現した相対位相の時系列パターン．システムの非対称性を司るパラメーター を変化させると，実験で観測されたプロドラマーと非ドラマーの相対位相パターンを再現できる．

実験の結果からすると，非ドラマーにとっては，手の運動速度の左右差が，両手協調不安定性の大きな要因となっていると考えられる．また逆に，プロドラマーの巧みな両手最速交互リズム運動は，手の運動速度の左右差減少に起因している可能性が非常に高い．そこで筆者らは，以下の微分方程式を用いて，システムの非対称性が相対位相の時系列パターンの安定性に与える影響について，さらに詳しく検討した[9, 40]．

$$\dot{\phi} = -a\sin\phi - 2b\sin 2\phi - c\sin(\phi - \psi) + \Delta\omega + d\cos\phi + \sqrt{Q}\xi_t \quad (1)$$

上記式において，$\sqrt{Q}\zeta_t$ はホワイトガウスノイズ（$Q > 0$ はノイズの大きさ，ζ_t はガウス分布の確立過程）を表す．興味深いことに，$a = 1$, $b = 0$, $c = 2$, $d = 0.8\Delta\omega$, $\psi = 180°$, $\sqrt{Q} = 20°$ とし，システムの非対称性を司るパラメーター を変化させると，実験で観測されたプロドラマーと非ドラマーの相対位相パターンを再現することができる（図 5B）．このシミュレーション結果は，システムの非対称性が減少することによって，相対位相の時間変化パターン（ダイナミクス）が安定化することを明確に示している．

ドラマーだけでなく，管楽器奏者，弦楽器奏者，鍵盤楽器奏者もまた，非音楽家に比べて安定した両手協調性を発揮する[41, 42]．音楽家は，非音楽家に比べてタップ速度の左右差が小さいだけでなく，脳構造（一次運動皮質サイズ）の左右差も小さい[5]．音楽家は，非対称性という身体システムに内在する制約を克服しているようである．実験と数理シミュレーションの結果を踏まえると，左右差という身体的制約の克服によって，高度な両手音楽リズム運動が実現されていることがつよく示唆される．

4. 日本トップドラマーの感覚運動同期誤差

4.1 指タッピング運動とメトロノームの同期誤差

リズミカルな感覚刺激と運動とを同期させること（感覚運動同期，Sensorimotor synchronization）は，音楽演奏に欠かすことのできない能力である[23]．周期的な指タッピング運動をメトロノームに同期させる場合，指タップオンセットがメトロノームオンセットに対して約 20 ～ 80ms 先行することがよく知られ，負の非同期現象（Negative Asynchrony）と呼ばれている[43]．被験者は，この同期誤差に気付いていないことから，心理学・神経科学的に興味深い現象であるとされ，数多くの研究が行われてきた[43]．過去の研究により，以下の要因が指タッピング中の同期誤差に影響を与えることが確認されている．１つめは音楽経験の影響であり，音楽経験者は非音楽経験者に比べて同期誤差が小さい[43]．２つめは聴覚フォードバックの影響であり，指タップについての音フィードバックがある条件は，フィードバックがない条件よりも同期誤差が小さい[44]．３つめは運動効果器の影響であり，手でのタッピングは足でのタッピングに比べて同期誤差が小さい[44, 45]．４つめはテンポの影響であり，ペース刺激のテンポに依存して同期誤差の程度が変化する[46]．

4.2 楽器演奏とメトロノームの同期誤差

レコーディング現場や音楽教育現場において，メトロノームに合わせて楽器演奏を同期させる光景は頻繁に見受けられる．上記で述べた，指タッピング中の同期誤差に影響する数々の要因は，実際の楽器演奏中の同期誤差にも影響すると考えられる．ところが驚くべきことに，楽器演奏とメトロノームの同期誤差に関する学術的な調査は，これまで非常に限られた数しか行われていない[23]．

プロの音楽家が楽器演奏をメトロノームにどの程度精確に同期させているのか調査することは，音楽教育現場に有意義な情報を提供するはずである．そこで筆者らは，日本のメジャー音楽シーンで活躍するトップレベルのプロドラ

マー 15 名のドラムセット演奏とメトロノームの同期誤差を定量化した [47].

プロドラマーは，3 つのテンポ（60, 120, 200 BPM）のメトロノームに合わせて，60 秒間できるだけ精確にドラムパターンを演奏する課題を行った（図 6A）．得られた録音データから，ハイハット（右手），スネアドラム（左手），バスドラム（右足）の演奏タイミングとメトロノームのタイミングの時間差を定量化した．すると，プロドラマーの演奏同期誤差の平均値はおよそ－ 13 ～ +10 ミリ秒の範囲であることが明らかとなった（図 6B）．この同期誤差の程度は，過去の指タッピング研究で報告されてきた値（－ 20 ～－ 80 ミリ秒）よりも小さい．このプロドラマーの同期誤差の程度は，音楽教育現場において，具体的な目標を立てる際の目安として使用できる可能性がある．

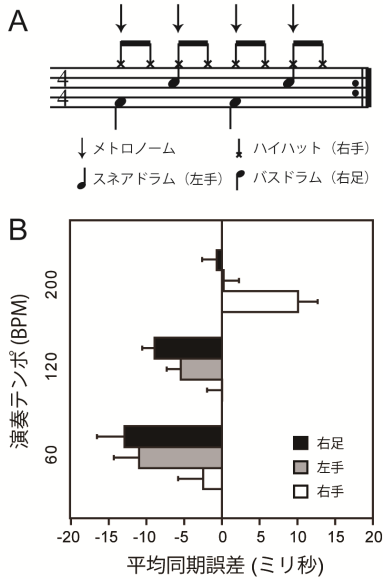


図 6（A）実験に用いたドラムパターン．15 名の日本トップドラマーが，3 つのテンポ（60, 120, 200 BPM）のメトロノームに合わせて出来るだけ精確にこのドラムパターンを演奏した．（B）メトロノームとドラム演奏の平均同期誤差．

4.3 テンポと運動効果器の影響

指タッピングを用いた先行研究と同様に，実際のドラム演奏においても，テンポと運動効果器（右手，左手，右足）の違いが同期誤差の程度に影響していた（図 6B）．60, 120BPM のテンポでは，右手の同期誤差が比較的小さくメトロノームとほぼ一致していたのに対し，左手や右足の同期誤差は比較的大きくメトロノームよりも先行していた．これらのテンポにおいて，右手のタイミング精度が高かった理由としては，1）右手の演奏音符の単位が，左手や右足に比べて細かかった点，2）すべてのプロドラマーは右手が利き手であった点，3）右手で叩くハイハットから，高周波のフィードバック情報が得られた点等が挙げられる [47].

これに対して，200BPM のテンポでは，左手や右足の同期誤差が比較的小さくメトロノームとほぼ一致していたのに対し，右手の同期誤差は比較的大きくメトロノームよりも遅れていた．図 6A のドラムパターンを 200BPM のテンポで演奏する際，右手はおよそ 150 ミリ秒の時間間隔（約 6.7Hz の周期速度）でハイハットを叩く必要がある．この速度は，2 章で述べた一般ドラマーの片手最速タッピング運動の速度限界とほぼ一致する．これを踏まえると，動作速度の生理学的限界が，右手の遅れに影響していた可能性が示唆される．実際にデータを確認すると，15 名中 12 名のプロドラマーは，図 6A のドラム譜に反して，8 分音符ではなく 4 分音符でハイハット（右手）を演奏する箇所が認められた [47]．すなわち，日本トップドラマーといえども，200BPM で 8 分音符の演奏をメトロノームに同期させることはやや困難であったといえる．

また興味深いことに，1，3 拍目における右手と右足の同期誤差の時系列と，2，4 拍目における右手と左手の同期誤差の時系列には，いずれもつよい相関関係が認められた [47]．この結果は，楽器演奏中の四肢の周期運動が，それぞれ独立にメトロノームと同期しているわけではなく，互いに影響しながらひとつのメトロノームと同期していることを示唆している．もしかすると，楽器演奏中の脳には，四肢に共通したひとつの Timekeeper が存在しているのかもしれない．

5. おわりに

本稿では，筆者がこれまで行ってきたドラマーの運動制御研究を中心に，高度なリズム運動の生成と同期を実現する音楽家の身体運動制御戦略について解説を行った．しかしながら現在のところ，音楽家の運動制御研究は，スポーツ科学研究等の分野に比べて，研究が十分に進展していない状況にある [37, 38]．本稿で解説した知見が，音楽家の運動制御学研究の更なる発展と，音楽教育現場での効果的なトレーニング法の確立・怪我の予防に寄与することを期待する．

参考文献

1) Chen, J.L., Penhune, V.B. and Zatorre, R.J.: Moving on time: brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and musical training, J Cogn Neurosci, 20, 226-239, (2008).
2) Ericsson, K.A., Krampe, R.T. and Tesch-Romer, C.: The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance, Psychological Review, 100, 363-406., (1993).
3) Munte, T.F., Altenmuller, E. and Jancke, L.: The musician's brain as a model of neuroplasticity, Nat Rev Neurosci, 3, 473-478, (2002).
4) Schlaug, G.: The brain of musicians. A model for functional and structural adaptation, Annals of the New York Academy of Sciences, 930, 281-299, (2001).
5) Amunts, K., Schlaug, G., Jancke, L., Steinmetz, H., Schleicher, A., Dabringhaus, A. and Zilles, K.: Motor cortex and hand motor skills: structural compliance in the human brain, Hum Brain Mapp, 5, 206-215, (1997).

6) Aoki, T., Furuya, S. and Kinoshita, H.: Finger-tapping ability in male and female pianists and nonmusician controls, Motor Control, 9, 23-39, (2005).
7) Aoki, T. and Kinoshita, H.: Temporal and force characteristics of fast double-finger, single-finger and hand tapping, Ergonomics, 44, 1368-1383, (2001).
8) Fujii, S., Kudo, K., Ohtsuki, T. and Oda, S.: Tapping performance and underlying wrist muscle activity of non-drummers, drummers, and the world's fastest drummer, Neurosci Lett, 459, 69-73, (2009).
9) Fujii, S., Kudo, K., Ohtsuki, T. and Oda, S.: Intrinsic constraint of asymmetry acting as a control parameter on rapid, rhythmic bimanual coordination: a study of professional drummers and nondrummers, J Neurophysiol, 104, 2178-2186, (2010).
10) Fujii, S., Kudo, K., Shinya, M., Ohtsuki, T. and Oda, S.: Wrist muscle activity during rapid unimanual tapping with a drumstick in drummers and nondrummers, Motor Control, 13, 237-250, (2009).
11) Fujii, S. and Moritani, T.: Rise rate and timing variability of surface electromyographic activity during rhythmic drumming movements in the world's fastest drummer, J Electromyogr Kinesiol, 22, 60-66, (2012).
12) Fujii, S. and Oda, S.: Tapping speed asymmetry in drummers for single-hand tapping with a stick, Percept Mot Skills, 103, 265-272, (2006).
13) Fujii, S. and Oda, S.: Effects of stick use on bimanual coordination performance during rapid alternate tapping in drummers, Motor Control, 13, 331-341, (2009).
14) Fujii, S. and Oda, S.: Effect of stick use on rapid unimanual tapping in drummers, Percept Mot Skills, 108, 962-970, (2009).
15) Hermsdorfer, J., Marquardt, C., Wack, S. and Mai, N.: Comparative analysis of diadochokinetic movements, J Electromyogr Kinesiol, 9, 283-295, (1999).
16) Jancke, L., Schlaug, G. and Steinmetz, H.: Hand skill asymmetry in professional musicians, Brain Cogn, 34, 424-432, (1997).
17) Jancke, L., Steinmetz, H., Benilow, S. and Ziemann, U.: Slowing fastest finger movements of the dominant hand with low-frequency rTMS of the hand area of the primary motor cortex, Exp Brain Res, 155, 196-203, (2004).
18) Kimura, D. and Davidson, W.: Right arm superiority for tapping with distal and proximal joints, J Hum Mov Stud, 1, 199-202, (1975).
19) Koeneke, S., Lutz, K., Herwig, U., Ziemann, U. and Jancke, L.: Extensive training of elementary finger tapping movements changes the pattern of motor cortex excitability, Exp Brain Res, 174, 199-209, (2006).
20) Nalcaci, E., Kalaycioglu, C., Cicek, M. and Genc, Y.: The relationship between handedness and fine motor performance, Cortex, 37, 493-500, (2001).
21) Peters, M.: Handedness: effect of prolonged practice on between hand performance differences, Neuropsychologia, 19, 587-590, (1981).
22) Todor, J.I., Kyprie, P.M. and Price, H.L.: Lateral asymmetries in arm, wrist and finger movements, Cortex, 18, 515-523, (1982).
23) Repp, B.H.: Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature, Psychon Bull Rev, 12, 969-992, (2005).
24) Van Cutsem, M., Duchateau, J. and Hainaut, K.: Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans, J Physiol, 513 (1), 295-305, (1998).
25) Duchateau, J., Semmler, J.G. and Enoka, R.M.: Training adaptations in the behavior of human motor units, J Appl Physiol, 101, 1766-1775, (2006).
26) Burke, R.E., Rudomin, P. and Zajac, F.E. 3rd: Catch property in single mammalian motor units, Science, 168, 122-124, (1970).
27) Aagaard, P.: Training-induced changes in neural function, Exerc Sport Sci Rev, 31, 61-67, (2003).
28) Binder-Macleod, S.A. and Barker, C.B. 3rd: Use of a catchlike property of human skeletal muscle to reduce fatigue, Muscle Nerve, 14, 850-857, (1991).
29) Smith, J.L., Betts, B., Edgerton, V.R. and Zernicke, R.F.: Rapid ankle extension during paw shakes: selective recruitment of fast ankle extensors, J Neurophysiol, 43, 612-620, (1980).
30) Moritani, T., Oddsson, L. and Thorstensson, A.: Differences in modulation of the gastrocnemius and soleus H-reflexes during hopping in man, Acta Physiol Scand, 138, 575-576, (1990).
31) Moritani, T., Oddsson, L. and Thorstensson, A.: Phase-dependent preferential activation of the soleus and gastrocnemius muscles during hopping in humans, J Electromyogr Kinesiol, 1, 34-40, (1991).
32) Furuya, S. and Kinoshita, H.: Organization of the upper limb movement for piano key-depression differs between expert pianists and novice players, Exp Brain Res, 185, 581-593, (2008).
33) Furuya, S., Goda, T., Katayose, H., Miwa, H. and Nagata, N.: Distinct Inter-Joint Coordination during Fast Alternate Keystrokes in Pianists with Superior Skill, Front Hum Neurosci, 5, 50, (2011).
34) Thoroughman, K.A. and Shadmehr, R.: Electromyographic correlates of learning an internal model of reaching movements, J Neurosci, 19, 8573-8588, (1999).
35) Osu, R., Franklin, D.W., Kato, H., Gomi, H., Domen, K., Yoshioka, T. and Kawato, M.: Short- and long-term changes in joint co-contraction associated with motor learning as

revealed from surface EMG, Journal of Neurophysiology, 88, 991-1004, (2002).
36) Harris, C.M. and Wolpert, D.M.: Signal-dependent noise determines motor planning, Nature, 394, 780-784, (1998).
37) 古屋晋一: 楽器演奏のパフォーマンスを阻害する筋収縮, バイオメカニズム学会誌 , 35, 168-175, (2011).
38) 古屋晋一 : ピアノ演奏の身体運動制御―音楽演奏科学の提案 , システム／制御／情報 , 53, 419-425, (2009).
39) Furuya, S., Osu, R. and Kinoshita, H.: Effective utilization of gravity during arm downswing in keystrokes by expert pianists, Neuroscience, 164, 822-831, (2009).
40) Kelso, J.A.S.: Dynamic patterns, MIT Press, Cambridge, (1995).
41) Verheul, M.H. and Geuze, R.H.: Bimanual coordination and musical experience: the role of intrinsic dynamics and behavioral information, Motor Control, 8, 270-291, (2004).
42) Yamanishi, J., Kawato, M. and Suzuki, R.: Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands, Biol Cybern, 37, 219-225, (1980).
43) Aschersleben, G.: Temporal control of movements in sensorimotor synchronization, Brain and Cognition, 48, 66-79, (2002).
44) Aschersleben, G. and Prinz, W.: Synchronizing actions with events: the role of sensory information, Perception & Psychophysics, 57, 305-317, (1995).
45) Billon, M., Bard, C., Fleury, M., Blouin, J. and Teasdale, N.: Simultaneity of two effectors in synchronization with a periodic external signal, Human Movement Science, 15, 25-38, (1996).
46) Peters, M.: The relationship between variability of intertap interval and interval duration, Psychological Research, 51, 38-42, (1989).
47) Fujii, S., Hirashima, M., Kudo, K., Ohtsuki, T., Nakamura, Y. and Oda, S.: Synchronization error of drum kit playing with a metronome at different tempi by professional drummers, Music Perception, 28, 491-503, (2011).



藤井 進也（ふじい しんや）
2005 年京都大学総合人間学部卒業後，2010 年京都大学大学院人間・環境学研究科にて博士（人間・環境学）を取得．現在，ハーバード大学医学部ベスイスラエルディコーネスメディカルセンター博士研究員，東京大学大学院教育学研究科博士研究員，および日本学術振興会特別研究員 PD．熟練ドラマーの身体運動制御および音楽リズムの知覚同期に関する研究に従事．日本体育学会，Society for Neuroscience, Organization for Human Brain Mapping 各会員．