解　説

楽器演奏のパフォーマンスを阻害する筋収縮

古屋晋一[12†]
[1]ミネソタ大学 神経科学部 博士研究員，[2]日本学術振興会 特別研究員 PD

要旨　楽器演奏者は，反復性の高い動作を，長時間に渡って行うことが求められる．そのため，演奏時の筋肉の疲労によるパフォーマンスの低下や，楽器演奏による身体の故障発症といった問題は，古今東西を問わず，多くの演奏者を悩ませてきた．これらの問題と密接に関係する，演奏時の筋収縮についての理解を深めることは，楽器演奏者が生涯に渡り，健やかな演奏活動を行う上で不可欠である．本稿では，楽器演奏のパフォーマンスを阻害しうる筋収縮を引き起こす要因について，バイオメカニクスおよびモーターコントロールの観点から概説する．

キーワード：多関節運動，剛性制御，使い過ぎ症候群，逆・順動力学，機械学習

1. はじめに

ウラディミール・ホロヴィッツやヤッシャ・ハイフェッツの演奏に代表されるように，音楽家は高速度かつ正確な動作を何千，何万回と反復することが可能である．例えば，ピアノの楽曲の中には，わずか 1 分間に数千打鍵を要するものも少なくない[1]．これらの楽曲を正確に演奏するスキルを維持するためには毎日数時間に及ぶ練習が必要であり[2]，さらに，一流の音楽家になるためには，二十歳までに合計一万時間以上の練習時間が不可欠であるとさえ言われている[3]．

しかし，楽器演奏における「動作の反復性の高さ」と「膨大な練習時間」は，二つの問題を引き起こす危険性をはらんでいる．一つ目の問題は，長時間に及び，末梢部の筋が力を発揮し続ける結果，筋疲労が起こり，音楽のテンポや音量，正確性の低下といった形で，時間とともに音楽の芸術性が次第に損なわれてしまうことである．特に，コンクールや演奏会など，数十分から数時間におよぶ演奏を継続して行う場合，筋疲労によって引き起こされる音楽の芸術性の低下は，演奏者にとって軽視できない問題である．二つ目の問題は，過度の筋収縮を長期間に渡り続けた結果，末梢の筋骨格系や中枢神経系の疾患が引き起こされる“使い過ぎ症候群”である[4]．例えば，フォーカル・ジストニアという脳神経疾患は，主に演奏時にのみ，ピアニストや弦楽器奏者の手指の筋，あるいは管楽器奏者の唇周りの筋を不随意に収縮させる難治性の疾患であり，過度の楽器練習によって，運動制御に関連する脳部位（運動野，感覚野，大脳基底核）に解剖学的および機能的な変化が起こる[5, 6]．こうした音楽家特有の身体の問題は，古くは 19 世紀から報告されているが，21 世紀になった現在も，音楽家の 3 人に 1 人が，楽器の演奏や練習によって上肢を傷めた経験があると報告しており，未解決のままである[7, 8]．

楽器演奏によって起こり得るこれら 2 つの問題を解決し，音楽家が生涯に渡って健やかに演奏活動を行うためには，どうすればよいのであろうか？動作の反復性が高く，練習時間が長いということは，ある一つの動作の筋収縮を僅かに減らすだけで，総体的な筋肉の負荷量を大きく軽減することにつながり，ひいては，筋疲労によるパフォーマンスの低下や故障発症のリスクを低減することが可能となる．本稿では，楽器演奏において筋疲労や故障発症を助長するリスクのある筋収縮を「楽器演奏のパフォーマンスを阻害する筋収縮」と定義し，第二章では，非熟達者に特徴的に見られる筋収縮の特徴について，第三章では，演奏者の筋収縮の個人差について，第四章では，音楽表現に伴う筋収縮の特徴について紹介し，音楽家の Quality of Life（QOL）の向上に寄与することを目指す．

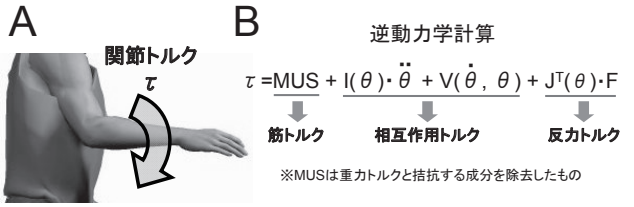
2. 非熟練者に見られる楽器演奏のパフォーマンスを阻害する筋収縮

楽器演奏に不必要な筋収縮を理解する上で有効なアプローチの一つとして，熟練度の異なる音楽家の身体運動や筋収縮の特徴を比較することが挙げられる．例えば，ピアニストはピアノ初心者に比べて，長時間に渡って演奏し続けても疲労しにくいことが知られている[9]．これは，長年のピアノ練習により筋の耐疲労性が向上していることに加えて[10]，たとえ同じ音を鳴らしていても，ピアニストの方がより少ない筋収縮量で打鍵していることを示唆している．したがって，非熟達者に特徴的に見られる筋収縮は，練習や技能の熟達に伴って軽減されうる「音楽を奏でる上で必ずしも必要ではない筋収縮」であると考えられる．本章では，これらの筋収縮は演奏時の疲労や故障発症のリスクを助長する可能性があるとみなし，その特徴や対策について紹介する．

2011 年 3 月 28 日受付
† 6-145 Jackson Hall 321 Church St. SE, Minneapolis, MN 55455, USA
ミネソタ大学　神経科学部　博士研究員，日本学術振興会
特別研究員 PD
古屋　晋一
Tel: +1-612-625-1425　Fax: +1-612-625-1425
E-mail: auditory.motor@gmail.com

2.1 身体の動きを生成する筋収縮

手や指先を楽器上の狙った位置まで移動させるためには，上肢の複数の関節が回転する必要がある．関節を回転させるために，筋肉は収縮し，回転力（トルク）を発揮する（図1A）．この時，各関節には，関節を回転させるための筋収縮（動的な筋収縮）によって生じるトルク（筋トルク）に加えて，隣接する関節周りの筋が収縮することによって生じるトルク（関節間相互作用トルク）や，重力によって生じるトルク（重力トルク），さらには楽器と指先との相互作用によって生じるトルク（外力トルク）といった筋力以外の力によるトルクが複雑に作用する（図1B）．したがって，ある関節の運動を生成する関節トルクの組み合わせは無数に存在する．筆者らは，4リンクから成る上肢剛体リンクモデルを作り，逆動力学計算を用いてピアノ打鍵動作時に上肢関節に作用する個々のトルクを計算した[9]．その結果，演奏者の熟練度に応じて，どのトルクをどの程度用いるかに差があることが明らかとなった（図1 C）．



C

	筋トルク	相互作用トルク	反力トルク
肩	P ＞ N	P ＝ N	P ＝ N
肘	P ＜ N	P ＞ N	P ＝ N
手首	P ＜ N	P ＞ N	P ＝ N
指	P ＜ N	P ＝ N	P ＜ N

P: ピアニスト，N:ピアノ初心者

図1：（A）関節トルク．（B）逆動力学計算の運動方程式．τ：関節に生じる総トルク，MUS：筋トルク，I：慣性行列，V：速度依存性トルク，J：ヤコビ行列，F：鍵盤反力．（C）打鍵時に上肢各関節に生じるトルクの大きさの比較．P：ピアニスト，N：ピアノ初心者．

打鍵に際し，腕を振り下ろしている間，ピアニストは初心者に比べて，肩の屈筋をより強く収縮させることにより，肘と手首関節周りにより大きな関節間相互作用トルクを生成していた．さらに，音量を増大するにつれて，ピアニストは肩の屈筋をより強く収縮し，肘と手首関節に作り出す関節間相互作用トルクの大きさを増大していたのに対して，初心者では関節間相互作用トルクの大きさの変化は見られず，音量に比例した筋トルクの増大のみが観察された．これらの結果は，手先を加速させるために，ピアニストは効果的に関節間の力学的な相互作用を利用し，より筋力が弱く疲労しにくい遠位の筋の仕事量を減らしていたことを示唆している．事実，打鍵動作時の上肢の運動エネルギーを算出すると，ピアニストとピアノ初心者の間で差が認められなかったことから[11]，関節間相互作用トルクの利用は，動作の機械効率を高めるよりもむしろ，生理学的効率を高めることに貢献していると推察される．したがって，ピアノ打鍵時の動的な筋収縮は，関節間相互作用トルクを利用するスキルを獲得することにより軽減することが可能である．

ある関節動作を生み出す関節トルクの組み合わせが無数に存在するように，関節には冗長な数の筋が付着しているため，ある筋トルクを生み出す筋肉の収縮パターンの組み合わせも無数に存在する．筆者らの研究の結果，ある筋トルクを生成する筋収縮のパターンも，ピアニストとピアノ初心者では異なることが明らかとなった[12]．打鍵に際して腕を振り下ろしている間，肘の伸展動作を生み出すために，肘関節を伸展させる筋トルクが生成される．この背後にある筋肉の働きを，表面筋電図を用いて調べたところ，初心者は肘の伸筋である上腕三頭筋を収縮していたのに対して，

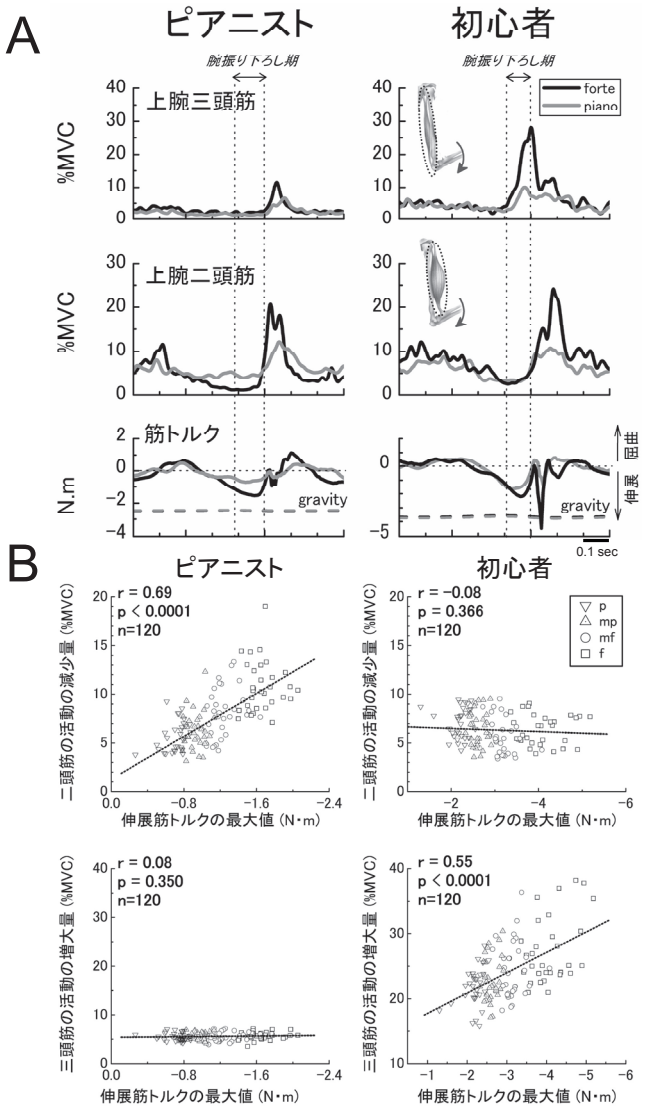


図2：（A）打鍵に際し，手を振り下ろしている間の肘関節周りの伸筋（上腕三頭筋），屈筋（上腕二頭筋），筋トルクの時系列変化．左：ピアニスト，右：ピアノ初心者．（B）伸展筋トルクの大きさと関連筋活動量（二頭筋：減少量，三頭筋：増大量）との相関．左：ピアニスト，右：ピアノ初心者．

ピアニストは肘の屈筋である上腕二頭筋を弛緩していた（図2A）．打鍵動作時の上腕二頭筋は，重力に抗して働く抗重力筋であり，これを弛緩させるということは，重力を利用して肘を伸展させることを意味している．さらに，より大きな音量の音を鳴らすために，初心者は上腕三頭筋をより強く収縮させていたのに対して，ピアニストは上腕二頭筋をより多く弛緩させていた（図2B）．これは，音量の調節を，初心者は発揮する筋力の大きさを変えることによって，ピアニストは利用する重力の大きさを変えることによって行っていることを示唆している．したがって，ピアノ打鍵時の肘関節周りの筋収縮は，重力を利用するスキルを獲得することにより軽減することが可能である．

では，どうしてピアノ初心者は，筋力以外の力を利用できず，打鍵動作に不必要な筋収縮をしてしまうのであろうか？関節間相互作用トルクは，上肢全ての関節角度や角速度，角加速度によって決まるため，そのダイナミクスを正確に予測するためには，トレーニング（による内部モデルの獲得）が必要である[13-15]．したがって初心者は，「打鍵するために，いつどのように腕を動かせば，どのような関節間相互作用トルクが生じるか」を正確に予測することが困難であるため，関節間相互作用トルクを利用できなかったと推察される．重力に関しては，上腕二頭筋を弛緩させながら肘を伸展させる場合，二頭筋は伸張性筋収縮をしているのに対し，上腕三頭筋を収縮させながら肘を伸展する場合，三頭筋は短縮性筋収縮をしている．伸張性筋収縮は短縮性筋収縮に比べて，狙い通りの大きさの筋力を発揮しにくいことが知られているため[16]，ピアノ初心者はより確実に狙った音量の音を鳴らすために，重力を利用しなかったと推察される．さらに，近年の脳イメージング研究によると，ある一定の大きさの力を発揮するよりも，同じ大きさの力を弛める方が，脳の運動関連領域の賦活部位が多いことが知られており[17]，重力を利用するために筋を弛緩するためにはより複雑な脳の情報処理が必要であるため，初心者は筋力を発揮する方略を好んで用いている可能性も考えられる．

2.2 楽器からの反力に抗する筋収縮

楽器を鳴らすために力を加えると，手先には同じ大きさで反対方向の力が作用する（作用反作用の法則）．これらの力によって関節が回転しようとする力（反力トルク）に抗して狙った身体動作を生成し，意図した音を生み出すためには，関節の剛性を高めることが必要となる．この時，ある関節に向かい合って付着する筋同士，すなわち主働筋と拮抗筋は，同時に収縮することが知られている（“同時収縮”）．しかし，同時収縮が抗するべき，反力によって関節に生じる反力トルクの大きさは，手や指，前腕といった上肢のフォーム（姿勢）によって決まる（即ち，$J^T \cdot F$，J：上肢の姿勢を表すヤコビ行列，F：鍵盤反力）．例えば，テニスやバッティングなどの打動作において，球速の同じ球を打ち返す場合でも，フォームによって関節が受ける衝撃が異なるのはこのせいである．したがって，楽器からの反力に抗する同時収縮の役割について理解するためには，演奏時の上肢の姿勢を詳細に調べることが不可欠である．

ピアノ打鍵動作において，指先が鍵盤を押し下げている間，ピアニストは肩を回転させることで，手を前方に押し出すように腕全体を回転させていたが，そのような動作は初心者には見られなかった[9]（図3A）．その結果，ピアニストの指と鍵盤の成す角度は増大し（図3B），それに伴い，鍵盤反力が指関節に生み出す反力トルクは減少した．さらに，指関節の筋トルクおよび指の外在筋の同時収縮量共に，ピアニストの方が初心者よりも小さな値を示した[18]（図3C）．つまり，ピアニストは，反力の影響を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（図1C）．したがって，ピアノ打鍵時の指の筋の同時収縮量は，鍵盤反力の影響が少ない手のフォームで打鍵することにより，軽減することが可能である．

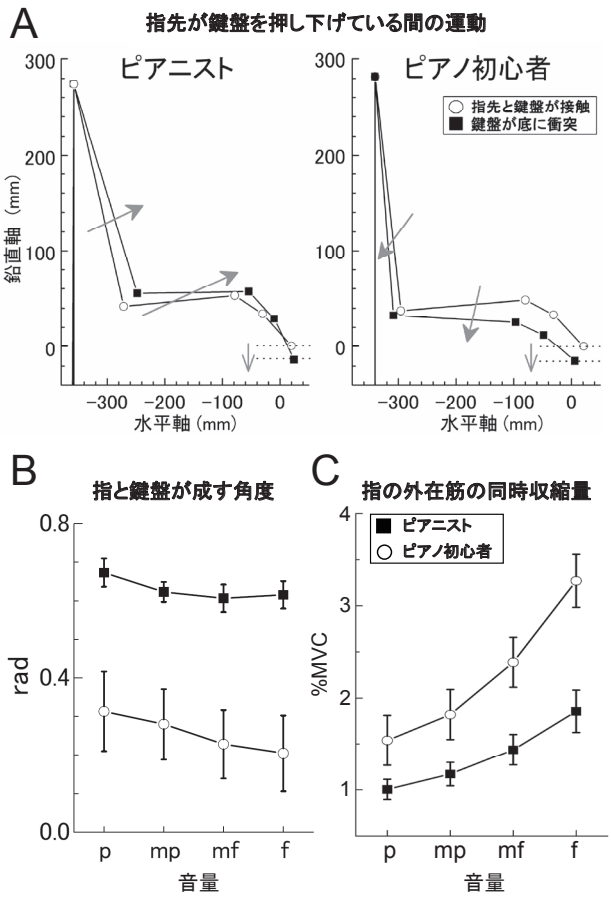


図3 ：（A）指先が鍵盤を押し下げている間の上肢運動のスティックピクチャ．（B）鍵盤が底部に接触した瞬間の指と鍵盤が成す角度．（C）前腕の屈筋・伸筋の同時収縮量．MVC: Maximum Voluntary Contraction

楽器から受ける反力に抗する同時収縮の大きさを左右する要因は，上肢の姿勢だけではない．同時収縮の大きさは，演奏するテンポに比例して増大することも知られている[19]．

その理由の一つは，運動速度の増大に伴って低下する動作の正確性を補償するためであると考えられるが[20, 21]，もう一つの重要な理由として，楽器へ伝達する運動量の効率を高めることが挙げられる．例えば，ピアノの鍵盤を連続して打鍵する際，テンポが速くなるにつれて，指先が鍵盤を押し下げるために加速する時間が短くなることが知られている[22]．鍵盤の動きを加速する時間が短くなると，十分な速度の動きを作り出せないため，狙った音量の音を鳴らすことができなくなる．しかし，同時収縮量を増大すると，手指の剛性が高まるため，打鍵時に手指の運動量を鍵盤に伝達する効率が向上する．その結果，音量を維持しながらテンポを速めることが可能となる．

興味深いことに，プロのピアニストはアマチュアピアニストに比べて，テンポの増加に伴い，同時収縮量は僅かにしか増大させず，一方で，肘の最大角速度を大幅に増大していた[22]．これは，打鍵時に鍵盤に伝達される上肢の運動量は，手指の速度と剛性という二つの変数によって決定されることと関係している．すなわち，打鍵するテンポが速くなるにつれて，プロのピアニストは主に肘の運動速度を増やすことで，アマチュアピアニストは手指の剛性を高めることで，指先から鍵盤に伝達する運動量を増やしていると推察される．したがって，テンポの増加に伴う指の筋の同時収縮量の増大は，近位関節の動きを効果的に利用することにより，軽減することが可能である．

これまで，楽器から受ける反力と，それを抗する同時収縮の大きさについて紹介してきた．では，時間的な側面はどうであろうか？ピアノやドラムといった打楽器において，楽器から受ける反力に抗する筋収縮を発揮する時間は，熟練度によって異なるのであろうか？この問いに答えるために，Parlitz らは，ピアノの鍵盤の底部に圧力センサーを貼り，プロのピアニストとアマチュアピアニストがトリル課題をしている際に，指先が鍵盤を押さえる力の違いについて調べた[23]．その結果，プロに比べてアマチュアピアニストは，鍵盤が最下部に到達した後に指先が鍵盤を押さえる力の量（積分値）がより大きな値を示した．これは，プロのピアニストは，鍵盤が底に着いた直後に脱力しているのに対し，アマチュアピアニストはその後も不必要に鍵盤を加圧し続けていることを意味している．

ドラマーの運動制御について精力的な研究を行っている藤井らは，指およびドラムスティックを用いたタッピング課題時における，熟練度の異なるドラマーの前腕の筋の同時収縮について表面筋電図を用いて調べている[24, 25]．その結果，同時収縮を発揮する時間は，熟練度の高いドラマーの方が短いことを報告しており，これは，熟練に伴い，指先が受ける反力に抗する一瞬の間に限定した力発揮ができるようになることを示唆している．興味深いことに，彼らは被験者のドラム演奏年数に反比例して同時収縮量が減少することを報告しており，これは，長期的な楽器演奏訓練が，不必要な同時収縮量を軽減するために必要であることを示唆している．

楽器から受ける力が生体に及ぼす影響を軽減するための人間工学的なアプローチも報告されている．例えば，ヴァイオリンやビオラにおいて，楽器は肩と顎によって保持されるため，演奏時にこれらの身体部位は楽器から反力を受け続ける．レントゲンを用いてバイオリニストやビオラ奏者の顎部や頸部の骨格を詳細に調べた研究によると，幼少期からの長年に及ぶ演奏によって，骨格構造が変化していることが知られており，楽器から受ける反力が生体に及ぼす影響は軽視できない問題である[26, 27]．しかし，顎当てや肩当てのデザインを改良することで，顎部に受ける反力が軽減されることが報告されており，これらの問題の解決への有効性が示唆されている[28, 29]．

2.3 姿勢を保持する筋収縮

ピアノ，ヴァイオリン，フルートなど，多くの楽器演奏では，手指の巧緻な運動制御が不可欠である[30]．手指には多数の関節が存在するため，演奏時に必ずしも全ての関節が音を鳴らすための動きを生成しているわけではなく，多くの関節は，手指がある「フォーム（姿勢）」を保持するように制御されている．関節がある一定の姿勢を保持するには，手指の筋は姿勢に応じた大きさの筋力を発揮し続ける必要がある．したがって，演奏時の手指の姿勢について調べることは，姿勢を保持するための筋活動の役割を理解する上で不可欠である．

例えば，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，示指，中指，薬指は，鍵盤に触れぬよう，ある一定以上の伸展角度を重力に抗して保持し続ける必要がある（図 4A）．筆者らは，これらの指の伸展角度を，高速度カメラを用いて計測したところ，示指と中指の中手指節関節の伸展角度は，プロのピアニストの方がアマチュアピアニストよりも小さいことが明

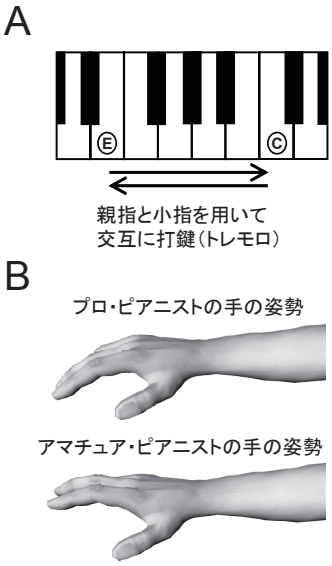


図 4 ：（A）実験課題．2 つの鍵盤を親指と小指で交互に打鍵（トレモロ）．（B）プロピアニストとアマチュアピアニストのトレモロ打鍵時の手指の姿勢の違い．

らかとなった[22]（図 4B）．さらに，指を伸展する筋（総指伸筋）の平均筋活動量も，プロのピアニストの方が小さかったことから，ピアニストは打鍵動作時における手指の姿勢保持のための筋収縮量を軽減していると推察される．打鍵動作に動員されない指の姿勢は，運動課題の遂行と直接関係の無い制御対象であり，演奏者自身が比較的気付きにくい可能性があるため，指導者は特に注意を促す必要がある．

3. 筋収縮の個人差

音楽家が楽器演奏により傷める身体部位には，個人差が少なくない[8]．最も故障の報告が多い部位は，指を動かす筋肉が付着する手や前腕であるが，屈筋側に痛みが出る人もいれば，伸筋側に症状が現れる人もおり，さらには肩や背中に痛みを訴える演奏家も多いことが知られている．したがって，演奏時の筋の負荷量の個人差について理解を深めることは，個々人の故障発症の引き金となる危険因子を同定する上で不可欠である．

筆者らは個々人の演奏時の身体の使い方の違いが筋負荷量に及ぼす影響を同定するために，ピアノ打鍵時の関節運動パターンと筋負荷量の個人差を，重回帰分析とクラスタ分析を用いて定量的に評価する研究を行った[31]．ピアニスト 18 名に親指と小指で 2 つの鍵盤を同時にかつ連続に打鍵する課題を，4 段階の音量と 4 段階のテンポの組み合わせで行ってもらい，その際の上肢の運動を高速度カメラにより，筋活動を表面筋電図により計測した．次に，各関節の最大角速度を音量とテンポを用いて予測する重回帰モデルを以下のように立てた．

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_1 \cdot X_2 + b$$

X_1 は音量，X_2 はテンポ，Y はある関節の最大角速度である．ここで，音量とテンポの双方を同時に変化させる際に，関節の最大角速度がどう変化するかを予測する偏回帰係数（a_3）を，肩，肘，手首，指の 4 つの関節で算出し，それらを 4 次元の超空間内のベクトル v として表現した．すなわち，$v = [a_3^1, a_3^2, a_3^3, a_3^4]$（$a_3^i$: i=1,2,3,4 は，肩，肘，手首，指関節）．ベクトル v は，「音量を大きく，かつテンポを速くするに伴い，上肢全体の使い方がどう変化するか」を意味している．その後，18 名のベクトル v を用いて，K-means クラスタ分析を実施した[32]．

$$\arg\min_{\mathbf{S}} \sum_{i=1}^{k} \sum_{\mathbf{v_j} \in \mathbf{S_i}} \left\| \mathbf{v_j} - \mathbf{c}_i \right\|^2$$

ここで，c_i は i 番目のクラスタ S_i 内におけるデータポイントの重心，k はクラスタ数（2 から 4 に設定）．その結果，音量とテンポを同時に増大する際の上肢の使い方は，シルエット統計量[33]の結果に基づき，3 つのクラスタ（グループ）に分類された．すなわち，18 名のピアニストを，上肢の使い方の異なる 3 つのグループに分類することに成功した．

グループ 1 は，全被験者の 3 分の 2 が属しており，音量とテンポの双方が増大するに伴い，肘の速度が減少する一方で，指と手首の速度は増大した．その結果，指の平均筋活動量および同時収縮量は，他のグループに比べて大幅に増大した．これは，なぜ指の外在筋の付着する手や前腕部が，ピアノ演奏による故障の報告の多い身体部位であるかを説明する結果である．

グループ 2 は，音量とテンポの増大に伴い，肩と指の平均筋活動量および同時収縮量が減少するという，興味深い傾向を示した．さらに，指の速度が減少する一方で，肩，肘，手首の速度は増大した．したがって，このグループに属するピアニストは，疲労しやすい末梢部の筋の仕事量を減らし，より疲労しにくい肘の筋肉の仕事量を増やすことで，音量とテンポを増大させるという，生理学的に効率の良い方略を用いていたと推察される．

グループ 3 は，音量とテンポの増大に伴い，他のグループに比べて肘の速度が大幅に減少し，同時に肘の同時収縮量が大幅に増大した．これは，肘の剛性が高まった結果，肘の速度を向上させられなくなったことを示唆している．さらに，肩の速度が音量とテンポに比例して増大していたことから，肘の速度が減少した分を，肩関節の回転動作が補償していたと推察される．

前述の通り，筋の負荷量は，その筋が付着している関節の動きのみならず，他の関節の運動や姿勢などによって規定される．したがって，必ずしも回転速度の大きい関節の周りの筋の負荷量が大きいとは限らず，身体動作と筋負荷量の間には複雑な非線型の関係性が存在する．本研究は，演奏者や指導者が視覚的に情報を得ることができる身体の動き（キネマティクス）から筋負荷量を推定するための手法と情報を提供しており，演奏による故障発症の予防や正確な診断に不可欠となる生体力学的危険因子の同定に役立つと考えられる．さらに，テンポと音量を増大する身体の使い方のパターンが複数存在するということは，ある筋を傷めた演奏家は，その筋に負荷の少ない新しい身体の使い方を再訓練によって獲得することで，故障発症の再発を予防できる可能性を示唆している．

4. 音楽表現に伴う筋収縮

楽器演奏では，時に生理学的効率を犠牲にしても，表現を優先する動作を選択することは少なくない．また，演奏の目的が音楽の表現創出である以上，演奏家は聴衆の前で演奏することが求められるため，それに伴って様々な生理反応や筋収縮が起こる．これらの筋収縮は，容易に回避することは困難であるが，筋疲労を助長するなどといった形で，演奏に好ましくない影響を及ぼし得るものである．本章では，音楽表現と密接な関係を持つ筋収縮の特徴について紹介する．

4.1 音色の変化に伴う筋収縮

豊かな音楽表現を実現する上で，音色を変化させることは不可欠である．音色を変えるためには，楽器への触れ方や押さえ方を巧みに操作しなければならない．楽器の音色

を変化させようとするとき，上肢の筋が発揮する力はどのように変化するのであろうか？筆者らは，ピアニストが異なるタッチで打鍵する際の，上肢の筋収縮によって生じる関節トルク（筋トルク）の特徴について調べた[19]．実験では，熟練ピアニストに，手を持ち上げた後に振り下ろして打鍵するタッチ（Struck）と，指先が鍵盤に触れた状態のまま，鍵盤を瞬発的に押し下げるタッチ（Pressed）の２種類のタッチで打鍵してもらい，鉛直面内における上肢の運動および鍵盤反力[34]を計測した（図 5）．得られたデータを用いて，肩から指までの関節に生じるトルクが関節を回転させる加速度にどの程度貢献するか，Induced Acceleration Analysis と呼ばれる逆動力学計算と順動力学計算を組み合わせた手法を用いて算出した[35]．即ち，

$$\mathbf{MUS} = \mathbf{I}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{V}(\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}}) - \mathbf{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{F}$$

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{MUS} = \mathbf{I}(\boldsymbol{\theta})^{-1}\,\mathbf{MUS}$$

ここで，I は上肢の姿勢によって変化する慣性行列，$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{MUS}$ は各関節の筋トルクによって生み出される関節角加速度から成るベクトルである．

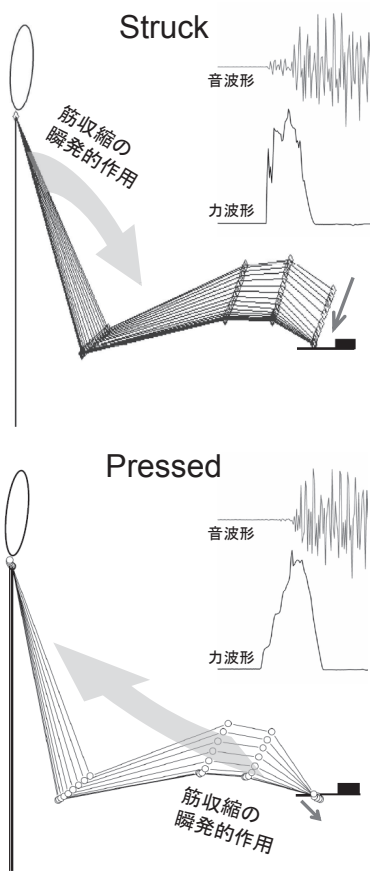


図 5 ：打鍵動作のスティックピクチャ，打鍵時の力波形，音波形．
（上）Struck タッチ，（下）Pressed タッチ

実験の結果，Struck タッチで打鍵する際には，肩周りの筋収縮によって生成される関節間相互作用力を利用して肘と手首を加速させていたのに対し，Pressed タッチでは，指の瞬発的な筋収縮によって，指関節と肩関節の屈曲動作を生み出していることが明らかとなった（図 5）．指の筋は肩の筋に比べて疲労しやすいため，特に大きな音量を作り出す際に Pressed タッチを用いることは，動作の生理学的効率の面から好ましくない．しかし，これら 2 つのタッチによって作り出された音の印象評価を行う心理物理実験を行った結果，Pressed タッチは Struck タッチに比べて，生成された音が柔らかく知覚されることが明らかとなった．これは，ピアノ演奏では，音色を変えるために，動作の生理学的効率が犠牲にされ得ることを示唆している．一見，非効率的な筋収縮が，単に演奏者の非熟達度を反映しているわけではない点は，楽器演奏に特徴的な性質と言えよう．

4.2　舞台での演奏による筋収縮

コンサートやコンクールで演奏する際には，聴衆や審査員を前にすることによって起こる緊張により，普段の練習時には起こらない筋収縮が引き起こされ，望ましいパフォーマンスを発揮できないことは少なくない．ピアノ演奏時の緊張による心理的ストレスが演奏に及ぼす影響について調べた研究によると，舞台での緊張に伴い，前腕の筋の収縮量や打鍵の強さが増大することが報告されている[36]．さらに，舞台で演奏する際には，ホールやピアノの音響特性をあらかじめ演奏者は知ることができないため，演奏者は意図した音と異なる音を聴取しながら演奏することになる．筆者らが，ピアノ演奏時に聴こえる音の特性（聴覚フィードバック）をリアルタイムで変化させた結果，一時的に打鍵の強さが強まることが明らかとなった[37]．先行研究によると，強く打鍵するほど，演奏テンポのバラつきが減少することが知られており[38]，舞台上で普段以上に強く打鍵する傾向があるという現象は，心理的ストレスによる影響に加えて，予測した聴覚フィードバックが得られないことに起因している可能性も考えられる．

舞台緊張を和らげる薬理処置の代表的なものとして，β ブロッカの投与が挙げられる．しかし，音楽を演奏する際には，感情の変化に伴い，交感神経活動が亢進することが知られており[39, 40]，β ブロッカの投与はそれを抑制してしまう可能性もあるため，音楽表現への影響が懸念される．

5. まとめ

本稿は，楽器演奏における不必要な筋収縮の特徴，およびそれを引き起こす様々な要因について概説した．これらの知見は，楽器演奏者のパフォーマンスを向上し，故障発症を予防する上で，演奏者自身や指導者のみならず，整形外科医や理学・作業療法士といった医療従事者にとって不可欠な情報である．しかし，スポーツの分野に比べ，楽器演奏のバイオメカニクスやモーターコントロールについては，未だ十分な研究がなされていない現状である．音楽家の健やかな演奏活動をサポートし，ひいては素晴らしい音楽が溢れる芸術文化に満ちた世の中を創造するために，生

体工学や脳身体運動学の知を活かして，楽器演奏の身体運動の仕組みを学際的に解明する「音楽演奏科学」[41] は，今後一層の発展が不可欠であると確信している．

参考文献

1) Münte, T.F., Altenmüller, E. and Jancke, L.: The musician's brain as a model of neuroplasticity, Nat Rev Neurosci, 3(6), 473-478, (2002).
2) Jabusch, H.C., Alpers, H., Kopiez, R., Vauth, H. and Altenmüller, E.: The influence of practice on the development of motor skills in pianists: a longitudinal study in a selected motor task, Hum Mov Sci, 28(1), 74-84, (2009).
3) Krampe, R.T. and Ericsson, K.A.: Maintaining excellence: deliberate practice and elite performance in young and older pianists, J Exp Psychol Gen, 125(4), 331-359, (1996).
4) Thomas, M., 小野ひとみ（監訳）., and 古屋晋一（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 , 1-177, 春秋社 , (2006).
5) Altenmüller, E.: Focal dystonia: advances in brain imaging and understanding of fine motor control in musicians, Hand Clin, 19(3), 523-538, (2003).
6) Altenmüller, E. and Jabusch, H.C.: Focal dystonia in musicians: phenomenology, pathophysiology and triggering factors, Eur J Neurol, 17 Suppl 1, 31-36, (2010).
7) Bragge, P., Bialocerkowski, A. and McMeeken, J.: A systematic review of prevalence and risk factors associated with playing-related musculoskeletal disorders in pianists, Occup Med (Lond), 56(1), 28-38, (2006).
8) Furuya, S., Nakahara, H., Aoki, T. and Kinoshita, H.: 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, 21, 112-117, (2006).
9) Furuya, S. and Kinoshita, H.: Expertise-dependent modulation of muscular and non-muscular torques in multi-joint arm movements during piano keystroke, Neuroscience, 156(2), 390-402, (2008).
10) Penn, I.W., Chuang, T.Y., Chan, R.C. and Hsu, T.C.: EMG power spectrum analysis of first dorsal interosseous muscle in pianists, Med Sci Sports Exerc, 31(12), 1834-1838, (1999).
11) Furuya, S. and Kinoshita, H.: Roles of proximal-to-distal sequential organization of the upper limb segments in striking the keys by expert pianists, Neurosci Lett, 421(3), 264-249, (2007).
12) Furuya, S., Osu, R. and Kinoshita, H.: Effective utilization of gravity during arm downswing in keystrokes by expert pianists, Neuroscience, 164(2), 822-831, (2009).
13) Dounskaia, N.: The internal model and the leading joint hypothesis: implications for control of multi-joint movements, Exp Brain Res, 166(1), 1-16, (2005).
14) 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, J Neurophysiol, 88(2), 991-1004, (2002).
15) Sainburg, R.L., Ghez, C. and Kalakanis, D.: Intersegmental dynamics are controlled by sequential anticipatory, error correction, and postural mechanisms, J Neurophysiol, 81(3), 1045-1056, (1999).
16) Christou, E.A. and Carlton, L.G.: Motor output is more variable during eccentric compared with concentric contractions, Med Sci Sports Exerc, 34(11), 1773-1778, (2002).
17) Spraker, M.B., Corcos, D.M. and Vaillancourt, D.E.: Cortical and subcortical mechanisms for precisely controlled force generation and force relaxation, Cereb Cortex, 19(11), 2640-2650, (2009).
18) 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(4), 581-593, (2008).
19) Furuya, S., Altenmüller, E., Katayose, H. and Kinoshita, H.: Control of multi-joint arm movements for the manipulation of touch in keystroke by expert pianists, BMC Neurosci, 11, 82, (2010).
20) Fitts, P.M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, J Exp Psychol, 47(6), 381-391, (1954).
21) Harris, C.M. and Wolpert, D.M.: Signal-dependent noise determines motor planning, Nature, 394(6695), 780-784, (1998).
22) Furuya, S., Goda, T., Katayose, H., Miwa, H. and Nagata, N.: Distinct interjoint coordination during fast alternate keystrokes in pianists with superior skill, Front Hum Neurosci , 5, 50, (2011).
23) Parlitz, D., Peschel, T. and Altenmüller, E.: Assessment of dynamic finger forces in pianists: effects of training and expertise, J Biomech, 31(11), 1063-1067, (1998).
24) 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(2), 69-73, (2009).
25) 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(3), 237-250, (2009).
26) Kovero, O., Kononen, M. and Pirinen, S.: The effect of violin playing on the bony facial structures in adolescents, Eur J Orthod, 19(4), 369-375, (1997).
27) Kovero, O., Kononen, M. and Pirinen, S.: The effect of

professional violin and viola playing on the bony facial structures, Eur J Orthod, 19(1), 39-45, (1997).
28) Norris, R.N.: Applied ergonomics: adaptive equipment and instrument modification for musicians, Md Med J, 42(3), 271-275, (1993).
29) Okner, M.A.O., Kernozek, T. and Wade, M.G.: Chin rest pressure in violin players: musical repertoire, chin rests, and shoulder pads as possible mediators, Med Probl Perform Art, 12(4), 112-121, (1997).
30) Aoki, T., Furuya, S. and Kinoshita, H.: Finger-tapping ability in male and female pianists and nonmusician controls, Motor Control, 9(1), 23-39, (2005).
31) Furuya, S., Aoki, T., Nakahara, H. and Kinoshita, H.: Individual differences in the biomechanical effect of loudness and tempo on upper-limb movements during repetitive piano keystrokes, Hum Mov Sci, in press, (2011).
32) MacQueen, J.: Some methods for classification and analysis of multivariate data, Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1, 281-297, (1967).
33) Rousseeuw, P.J.: Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis, J Comput Appl Math, 20, 53-65, (1987).
34) Kinoshita, H., Furuya, S., Aoki, T. and Altenmüller, E.: Loudness control in pianists as exemplified in keystroke force measurements on different touches, J Acoust Soc Am, 121(5 Pt1), 2959-2969, (2007).
35) Hirashima, M. and Ohtsuki, T.: Exploring the mechanism of skilled overarm throwing, Exerc Sport Sci Rev, 36(4), 205-211, (2008).
36) Yoshie, M., Kudo, K. and Ohtsuki, T.: Effects of psychological stress on state anxiety, electromyographic activity, and arpeggio performance in pianists, Med Probl Perform Art, 23(3), 120-132, (2008).
37) Furuya, S. and Soechting, J.F.: Role of auditory feedback in the control of successive keystrokes during piano playing, Exp Brain Res, 204(2), 223-237, (2010).
38) Goebl, W. and Palmer, C.: Tactile feedback and timing accuracy in piano performance, Exp Brain Res, 186(3), 471-479, (2008).
39) Nakahara, H., Furuya, S., Francis, P.R. and Kinoshita, H.: Psycho-physiological responses to expressive piano performance, Int J Psychophysiol, 75(3), 268-276, (2010).
40) Nakahara, H., Furuya, S., Obata, S., Masuko, T. and Kinoshita, H.: Emotion-related changes in heart rate and its variability during performance and perception of music, Ann N Y Acad Sci, 1169, 359-362, (2009).
41) 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(10), 419-425, (2009).



古屋　晋一（ふるや　しんいち）
1980 年生まれ．2002 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業後，2008 年同大学大学院医学系研究科予防環境医学専攻にて博士（医学）を取得．関西学院大学理工学部博士研究員を経て，現在，ミネソタ大学神経科学部博士研究員および日本学術振興会特別研究員 PD．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．計測自動制御学会，日本音楽知覚認知学会，Society for Neural Control of Movement，Society for Neuroscience 各会員．