

一流ピアニストによる打鍵動作の上肢運動制御

古屋晋一 片寄晴弘 木下博†

(片寄グループ：関西学院大学 理工学部 片寄研究室)

† 大阪大学大学院 医学系研究科

概要 一流ピアニストとピアノ初心者の、ピアノ打鍵動作における上肢関節の動力学特性の違いについて紹介する。ピアニスト7名と同数のピアノ初心者7名に右手親指小指を用いてのスタッカートでのオクターブ打鍵を4段階の音量で打鍵させ、その際の上肢の運動を2次元高速カメラによって記録した。計測した運動データを用いて逆動力学計算を行うことにより、肩、肘、手首関節における「筋力によって作り出されるトルク」と「筋力以外の力によって作り出されるトルク」を算出した。その結果、ピアニストは長期的な運動訓練を通して、筋力以外の力を効果的に利用することで打鍵時の筋肉の仕事量を軽減する打鍵運動技術を獲得していることを示唆する結果が得られた。

キーワード：熟練運動技能、ロボティクス、運動効率、非筋力。

1. はじめに

一流のピアニストは2時間に及ぶ演奏会で、最後の一音まで素晴らしい音楽を奏することができる。そのためには、長時間演奏しても手や腕の筋肉が疲労しない演奏技術を習得していることが必要不可欠である。さらに、身体に無駄な力を入れたまま演奏や練習を続けると、手や腕を故障するリスクが増大することが知られている [1, 2]。では、運動効率の良い打鍵動作技術とはどのようなものだろうか。

我々の先行研究の結果、一流のピアニストは打鍵動作において、慣性力や遠心力といった「筋力以外の力」を効果的に利用していることを示唆する結果が得られた [3, 4]。しかし、打鍵動作時に身体に作用する力を定量的に調べた研究は現在までに報告されていない。したがって、本研究では、上肢関節に作用する回転力(関節トルク)を、ロボティクスで用いられる計算手法を応用することによって算出し、一流のピアニストとピアノ初心者の打鍵動作における上肢関節の動力学な特徴の違いについて調べた。その結果、ピアノ打鍵動作における運動効率の向上を実現する熟練運動技能を明らかにすることに成功した。

2. 手法

国内外のコンクールにおいて入賞歴のあるピアニスト7名、およびピアノ学習歴が1年未満のピアノ初心者7名を対象に、右手親指小指を用いてのスタッカートでのオクターブ連打(30回)を4段階に等分した音量(p, mp, mf, f)で実施した。指(中手指節関節)、手首、肘、および肩関節の関節中心、および指先の運動をポジションセンサー・カメラにより各チャンネル 150Hz で取り込んだ (Figure 1)。これらに同期して、鍵盤の鉛直方向運動を他のポジションセンサー・カメラにより、さらに鍵盤に実装した力センサーによって打鍵時に鍵盤に加わる鉛直方向の力を収録した [10]。

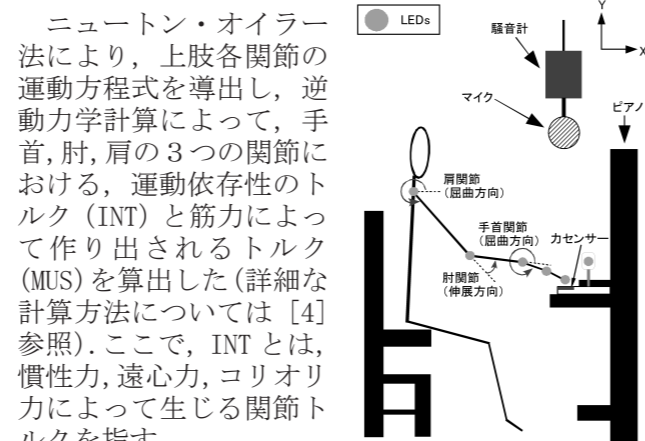


図1 LEDの配置と関節角度の定義

ニュートン・オイラー法により、上肢各関節の運動方程式を導出し、逆動力学計算によって、手首、肘、肩の3つの関節における、運動依存性のトルク (INT) と筋力によって作り出されるトルク (MUS) を算出した (詳細な計算方法については [4] 参照)。ここで、INT とは、慣性力、遠心力、コリオリ力によって生じる関節トルクを指す。

3. 結果

図2の左部は、肩、肘、手首における INT の積分値 (INTIm) を被験者全員で平均した値を、音量毎に示している。分散分析の結果、肘の伸張方向 ($p < 0.05$) と手首の屈曲方向 ($p < 0.001$) の INTIm は、全ての音量でピアニストの方がピアノ初心者よりも有意に大きな値を示した。グループと音量の交互作用効果も、肘の伸張方向 ($p < 0.05$) と手首の屈曲方向 ($p < 0.001$) の INTIm で認められた。また、全関節で有意な音量の主効果が認められた。

図2の右部は、肩、肘、手首における MUS の積分値 (MUSIm) を被験者全員で平均した値を、音量毎に示している。分散分析の結果、肘の伸張方向 ($p < 0.001$) と手首の屈曲方向 ($p < 0.001$) の MUSIm は、全ての音量でピアニストの方がピアノ初心者よりも有意に小さな値を示し、一方で、肩の屈曲方向の

MUSIm は、全音量でピアニストの方がピアノ初心者よりも有意に大きな値を示した ($p < 0.01$)。グループと音量の交互作用効果は、肩の屈曲方向 ($p < 0.01$) と肘の伸張方向 ($p < 0.01$) の MUSIm で認められた。また、全ての関節で有意な音量の主効果が認められた。

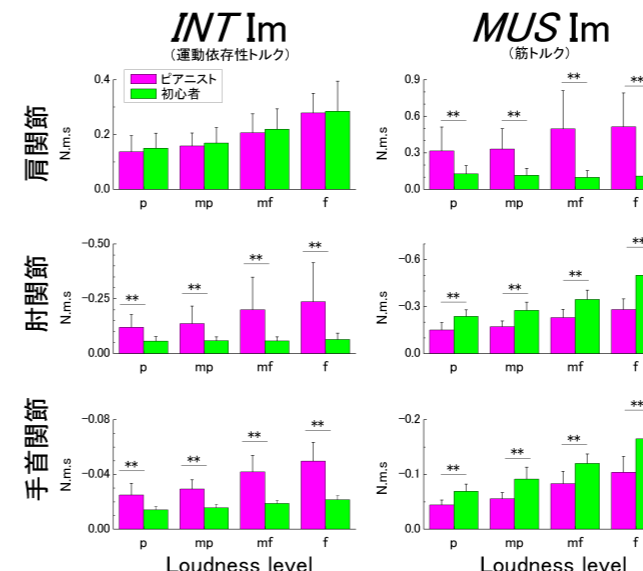


図2 ピアニストと初心者の関節トルクの積分値。左：運動依存性トルク、右：筋トルク。
*: $p=0.05$, **: $p=0.01$

4. 考察

本研究の結果、ピアニストは初心者に比べて、より多くの運動依存性のトルクを肘と手首に作り出していることが明らかとなった。我々の先行研究の結果、ピアニストは初心者に比べて、打鍵時の肩関節伸張運動の減速度が有意に大きな値を示した [3]。また、肩の伸張動作のブレーキングに先行して、肩の屈曲筋の筋活動の増大が、ピアニストにおいてのみ認められた [4]。本研究ではさらに、肩の屈曲方向の筋トルクは、ピアニストの方が初心者よりも大きな値を示すことが明らかとなった。したがって、ピアニストは近位の身体部位(肩)の運動を屈曲筋の収縮によって意図的に減速させることで、遠位の身体部位(肘、手首)に運動依存性のトルクを作り出しており、一方で初心者は、腕の降下中に肩関節の回転運動をほとんど減速させておらず、そのため、遠位の身体部位において運動依存性のトルクをほとんど利用していないことが明らかとなった。以上の結果は、長期的なピアノ訓練によって、ピアニストはより効果的に運動依存性のトルクを利用することが可能な上肢運動制御方略を獲得したことを示唆している。

ピアニストは初心者に比べ、筋トルクは肘と手首ではより小さな値を、肩ではより大きな値を示した。これは、ピアニストは肩の屈曲筋を用いて打鍵中の腕の振り下ろし動作にブレーキをかけることで肘と手首に運動依存性のトルクを作りだし、それによって、肘と手首の筋トルクを軽減させているこ

とを示唆している。人間の身体構造は、体幹から指先の方に向かうにつれて、筋肉の太さ(横断面積)が小さくなるという性質を持つ。また、筋肉の疲労のしやすさは、筋肉の横断面積の大きさに反比例することが知られている。したがって、肩の筋トルクを増やすことで、肘と手首の筋トルクを減らすというピアニストの方略は、「疲労しやすい筋肉の仕事量を軽減させ、その代わりに、疲労しにくい筋肉の仕事量を増大させている」と解釈することができる。演奏中に前腕や上腕の筋肉が疲労すると、打鍵動作は不正確になり、また筋肉が発揮できる力も低下する。その結果、ミスタッチは増加し、演奏テンポは遅くなるなど、時間と共にパフォーマンスの質は低下していく。さらに、数時間に及ぶ練習の間、手や腕に負担のかかる打鍵動作を続けると、腱鞘炎や局所ジストニアといったピアニストにとって職業病といわれる故障が発症するリスクが増大する [1, 2]。これらの問題を回避するために、ピアニストは長期的な訓練を通して、運動依存性のトルクを利用することで上肢の筋の疲労を軽減する打鍵運動制御方略を獲得したものと推察される。

5. 演奏・指導現場への提言

高度な演奏技巧が求められるピアノ曲を演奏していると、手や前腕の筋肉が疲労してしまうことは少なくない。本研究では、ピアニストは腕を振り下ろしている際に肩の屈曲筋を適切なタイミングで収縮させることで、運動依存性トルクを効果的に作り出し、上腕部および前腕部の筋肉の仕事量を初心者の約3分の2程度にまで軽減させていることが明らかとなった。したがって、初学者から中級者はその使い方を習得することで、運動効率の良い打鍵動作が可能になる。

参考文献

- [1] 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, pp.112-117 (2006).
- [2] 古屋晋一 (訳)、小野ひとみ (監訳)、Thomas Mark (著): 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)
- [3] Furuya, S., Kinoshita, H.: Roles of proximal-to-distal sequential organization of the upper limb segments in striking the keys by expert pianists. *Neurosci Lett* 421, pp.264-269 (2007).
- [4] Furuya, S., Kinoshita, H.: Organization of the upper limb movement for piano key-depression differs between expert pianists and novice players. *Exp Brain Res*, 185, pp.581-593 (2008).
- [5] Furuya, S., Kinoshita, H.: Expertise-dependent modulation of muscular and non-muscular torques in multi-joint arm movements during piano keystroke. *Neuroscience*, to appear (2008)