

ピアノ打鍵動作の熟練技能：「重量奏法」の科学的検証

Testing the feasibility of “weight play” in piano keystroke.

古屋晋一^{1,2} 片寄晴弘¹ 木下博²

Shinichi FURUYA^{1,2}, Haruhiro KATAYOSE¹, and Hiroshi KINOSHITA²

¹関西学院大学 理工学研究科/JST CrestMuse

¹Kwansei Gakuin University/JST CrestMuse

²大阪大学大学院 医学系研究科

² Graduate School of Medicine, Osaka University

Abstract: It has been shown that exploitation of motion-dependent interaction torques is enhanced with improvement of subject’s expertise in various kinds of motor tasks involving multi-joint movements. However, it is not known whether gravitational force also learns to be effectively exploited for limb movements. The present study attacked this issue by examining the upper-limb movements and muscular activities during piano keystroke in seven expert pianists and seven novice piano players. To initiate the downswing, flexion muscular torque at the elbow that had counteracted with gravity was decreased. Associated with this, activity of the elbow extensors (agonist) occurred much earlier for the novices than the experts. Instead, the experts decreased the postural activity of elbow flexors (antagonist) before anti-gravity torque was decreased. These data indicated that the novices produced joint torque to extend the elbow joint by actively contracting its agonists, whereas the experts made it by releasing postural contraction of the antagonists to take advantage of gravitational force. These differences were noted at all levels of sound loudness. The findings strongly indicated expertise-dependent modulation of agonist-antagonist muscular synergy so as to strike the key with less muscular effort via exploiting gravitational force.

1. はじめに

重力を利用して腕を落下させ、鍵盤を打鍵する、いわゆる「重量奏法」は、20世紀初めにピアノ教師トバイアス・マティ[17]によって提唱されて以来、世界中のピアニスト、ピアノ指導者の間で、演奏時の筋肉の仕事量を軽減する打鍵技術であると考えられてきた[20]。1920年、BernsteinとPopovaは、当時開発された高速度カメラを用いて、ピアニストが実際に重力を利用して打鍵動作を行っているかを検証する実験を行った[13]。打鍵動作時の上肢運動を計測し、逆動力学計算を用いて肩、肘、手首関節に生じるトルクを推定したところ、数名のピアニストの腕降下中の肘関節において、重力によって生じるトルク（重力トルク：GRA）に比べ、筋力によって生じるトルク（筋トルク：MUS）の方が小さいという結果が得られた。MUSがGRAよりも大きい場合、重力を利用してMUSを生成することは不可能であることから、Bernsteinらは、ピアニストは重力を利用して打鍵動作を行っている」と結論付けた。しかし、

MUSがGRAより小さいというだけでは、重力を利用しているという証拠にはならず、MUS生成の背景にある筋活動様式を調べることが不可欠である。また、BernsteinらのMUSの計算方法では、関節間の力学的な相互作用（相互作用トルク）が考慮されておらず、適切な計算方法による再検証が必要である。さらに、彼らの研究はピアニストの打鍵動作のみを対象としたものであり、非熟練者については調べられていない。したがって、現在に至るまで、ピアニストが実際に重力を利用しているか、またそれが演奏者の熟練度を反映した運動技能であるかについては、一切知られていない状況である。

最近、筆者らは、ピアノ打鍵動作時の上肢関節の関節トルクを定量化する逆動力学計算法を開発した[10, 11]。その結果、ピアニストは初心者に比べ、より多くの相互作用トルクを利用することで、肘と手首のMUSを軽減していることが明らかとなった。本研究は、一流ピアニストとピアノ初心者の打鍵動作時のMUSおよび筋活動の違いについて調べることにより、演奏者の熟練度と打鍵動作における重力

の利用との関係について明らかにすることを目的とした。ピアニストは初心者に比べ、長時間に渡り疲労せずに演奏し続けることができることから[11]、ピアニストは重力を効果的に利用した打鍵動作を行っており、それによって筋肉の仕事量を軽減させていると仮説立てた。

2. 方法

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。手首、肘、および肩関節の関節中心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[14]。

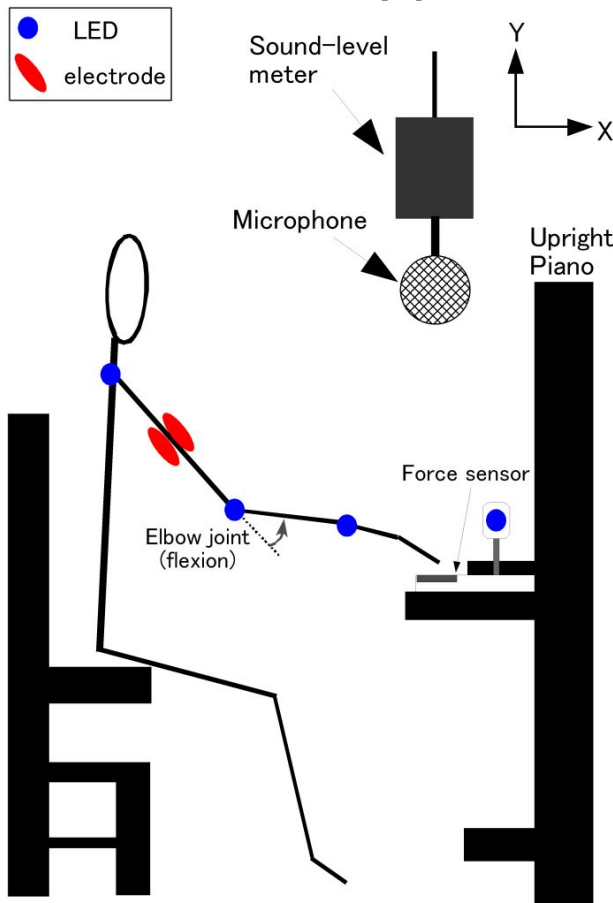


Fig. 1. LED and electrode placements and definition of joint angles. The counterclockwise direction is defined as a positive direction in angular displacement, which describes flexion movement at the elbow joint.

ニュートン・オイラー法により、肘関節の運動方程式を導出し、逆動力学計算によって、肘関節における、MUSとGRAを算出した(“付録”参照)。

肘の主要な屈筋、伸筋である上腕二頭筋、上腕三頭筋の筋活動を、表面筋電図法により各チャンネル900 Hzで計測した。筋電位信号は全波整流を行った後、先行研究で用いられた計算法により、打鍵に関連した筋活動の発火時刻を算出した [19]。

3. 結果

Figure 2は、1名のピアニストおよび初心者が、*p*と*f*の音量で打鍵した際の、鍵盤の鉛直方向の運動、肘の角速度、MUS、上腕二頭筋および上腕三頭筋の筋活動の時系列データを表す。筋活動データは、測定信号に対し、20 HzのButterworth Low-Pass Filterをかけることにより、Linear Envelopを作成した。

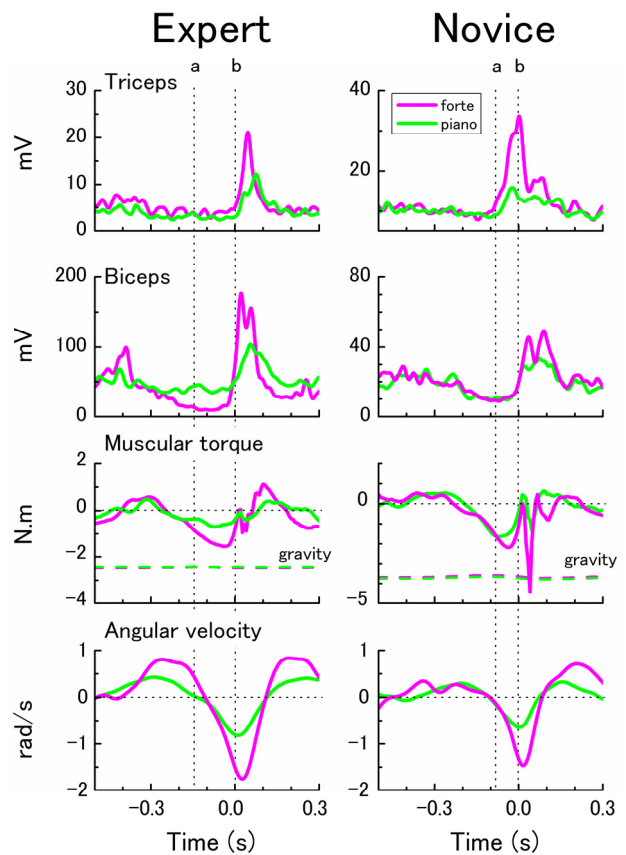


Fig. 2. Time history curves of the full-wave rectified EMGs for the triceps and biceps muscles for one representative expert and novice piano players when striking the keys at *forte* (pink) and *piano* (green) dynamics. MUS after removing its contribution to counteract GRA and the elbow angular velocity are also plotted. a: initiation of arm downswing, b: moment of finger-key contact (Time=0).

打鍵に際し、ピアニスト、初心者双方で、肘関節の伸展動作が認められた。また、肘の伸展動作の開始に先行し、肘の伸展 MUS の生成が認められた。しかし、その背景にある筋活動パターンに関しては、両群の間で顕著な差が認められた。初心者では、肘の伸展動作の開始に先行した上腕三頭筋の活動が認められたが、ピアニストでは、鍵盤が下降動作を開始するまで、上腕三頭筋の顕著な活動は一切認められなかった。一方、肘の伸展動作に伴い、ピアニストでは、上腕二頭筋の顕著な筋活動量の減少が認められた。音量の増大に伴い、肘の伸展速度、伸展 MUS は両群共に増大し、初心者では、上腕三頭筋の活動量の増大が、ピアニストでは、上腕二頭筋の活動量の減少が認められた。

Figure 3 は、ピアニスト、初心者の各筋の発火開始時刻の全員の平均値を表す。繰り返しのある二要因分散分析を行った結果、上腕二頭筋では、両群の発火開始時刻に有意な差は認められなかった。しかし、上腕三頭筋の発火開始時刻は、初心者の方がピアニストよりも有意に早かった($F(1, 12) = 16.34, p = 0.002$)。したがって、ピアニストより初心者の方が、肘の伸展筋の相動性筋収縮の開始が早いことが明らかとなった。

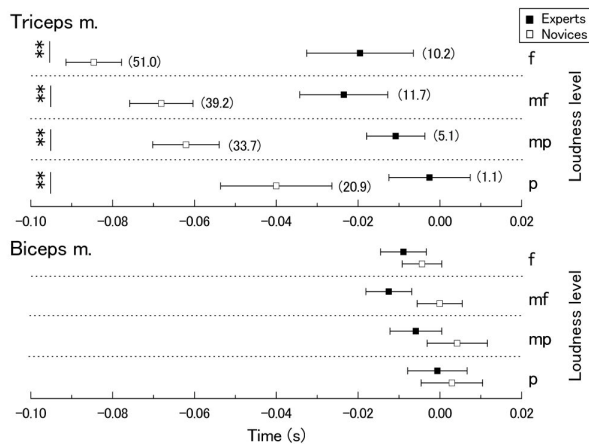


Fig. 3. The group means of the occurrence time of muscular activity during arm downswing in keystroke for the triceps and biceps muscles. Error bars represent ± 1 SD. Time zero indicates the moment of finger-key contact.

4. 考察

運動制御の分野では、「学習に伴い、脳は筋力以外の力をよりうまく利用することにより、筋肉の仕事量を軽減させる」というアイデアが古くから提唱されてきた[2]。また、ピアノ演奏においても、重力を利用して打鍵することにより、筋肉の仕事量を減ら

すという打鍵技術は、ピアニスト、ピアノ指導者の間で古くから知られていた[17, 20]。一方、先行研究では、熟練度の向上に伴い、運動依存性の相互作用トルクの利用量が増大することが、複雑な腕運動課題[12, 16]やピアノ打鍵動作[8-11]で報告されている。しかし、重力を効果的に身体運動に利用するような熟練運動技能を実証した研究は、現在までに一切報告されていなかった。

本研究の結果、打鍵に際し肘の伸展筋トルクを生成している間、熟練ピアニストの肘の伸展筋に顕著な活動は一切認められなかった。一方、その間の抗重力筋の筋活動が減少していたことから、ピアニストは重力を利用して前腕を降下させ、打鍵動作を行っていることが示唆された。一方、初心者では、肘の伸展動作の開始に先行し、肘の伸展筋の顕著な筋活動が認められた。先行研究では、下方向への腕到達運動を行う際、肩や肘の伸展動作の開始に先行した筋活動が観察されることが報告されていることから[18, 21]、ピアノ初心者は、日常動作で用いる筋活動様式を利用して打鍵動作を行っていることが示唆された。重力の利用はピアニストのみで認められたことから、長期的な運動訓練の結果、ピアニストは打鍵時の筋肉の仕事量を軽減させるために、重力を利用していることが示唆された。

重力を利用する利点は明らかであるにも関わらず、初心者はなぜ重力を利用しなかったのであろうか？本研究では、肘の伸展 MUS が生成されている間、初心者では上腕三頭筋の短縮性筋収縮が、ピアニストでは上腕二頭筋の伸張性筋収縮が認められた。先行研究では、短縮性筋収縮に比べ、伸張性筋収縮の方が、発揮力のバラつきが大きいことが報告されている[3]。そのため、重力を利用するために上腕二頭筋を短縮性筋収縮させ、ターゲットとなる音量の音を生成することは、上腕三頭筋の短縮性筋収縮を用いるよりも、より正確な運動指令を出力することが求められる。したがって、初心者は、正確にターゲットとなる音量の音を生成するために、正確な力生成が可能である、重力を利用しない運動制御方略を選択したのかもしれない。しかし、先行研究の結果、発揮筋力のバラつきはトレーニングによって減少することが報告されているため[4, 15]、重力を利用した打鍵動作を行うには、一定期間以上の運動訓練が必要であることが示唆された。

5. 演奏・指導現場への提言

リストやラフマニノフといったオクターブの多用される難易度の高いピアノ曲を演奏していると、末梢部の筋肉が疲労してしまうことは少なくない。筋肉の疲労は、演奏テンポの低下やミスタッチの増加

など、パフォーマンスの質を低下させ、さらには、腱鞘炎やジストニアなどの障害を発症する危険因子となる[1, 5-7, 20]。本研究では、ピアニストは腕を振り下ろしている際に、肘の抗重力筋である上腕二頭筋を弛緩させることで、肘の伸展動作を作り出し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の実現が期待できる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、温かい激励と献身的なご指導をいただいたハノーバー音楽大学音楽生理学研究研究所所長の Eckart Altenmüller 教授、ATR 脳情報研究所の大須理英子主任研究員、中西淳研究員、大阪大学医学系研究科の橋詰謙准教授、松尾知之講師、大阪大学工学部・ERATO 浅田プロジェクトの細田耕准教授、東京大学教育学部・JST 学振特別研究員の平島雅也博士、ERATO 下條プロジェクト門田浩二博士に、心よりの感謝の意を表します。本研究の一部は、中山隼雄科学技術文化財団「平成 19 年度研究開発助成 (B)」の支援を受け、実施いたしました。

参考文献

- [1] Altenmüller E.: Focal dystonia: advances in brain imaging and understanding of fine motor control in musicians. *Hand Clin*, 19, pp.523-38 (2003)
- [2] Bernstein NA.: The coordination and regulation of movements. Pergamon, London (1967)
- [3] Christou EA, Carlton LG.: Motor output is more variable during eccentric compared with concentric contractions. *Med Sci Sports Exerc*, 34(11), pp.1773-8 (2002)
- [4] Duchateau J, Semmler JG, Enoka RM.: Training adaptations in the behavior of human motor units. *J Appl Physiol*, 101(6), pp.1766-75 (2006)
- [5] 古屋晋一, 木下博.: 入門運動神経生理学, pp. 223-229, 市村出版, (2003)
- [6] 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)
- [7] 古屋晋一, 青木朋子, 木下博.: 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*, 30(3), pp.151-155 (2006)
- [8] 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)

- [9] 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)
- [10] 古屋晋一, 木下博.: 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, *音楽知覚認知研究*, in press (2008)
- [11] Furuya S., Kinoshita H.: Expertise-dependent modulation of muscular and non-muscular torques in multi-joint arm movements during piano keystroke. *Neuroscience*, in press (2008)
- [12] Kadota K, Matsuo T, Hashizume K, Tezuka K.: Practice changes the usage of moment components in executing a multijoint task. *Res Q Exerc Sport*. 75(2), pp.138-47 (2004)
- [13] Kay BA, Turvey MT, Meijer OG.: An early oscillator model: studies on the biodynamics of the piano strike (Bernstein & Popova, 1930). *Motor Control*, 7(1): pp.1-45 (2003)
- [14] Kinoshita H, Furuya S, Aoki T, Altenmüller E.: Loudness control in pianists as exemplified in keystroke force measurements at different touches. *J Acoust Soc Am*, 121(5 Pt1), pp. 2959-2969 (2007)
- [15] Kornatz KW, Christou EA, Enoka RM.: Practice reduces motor unit discharge variability in a hand muscle and improves manual dexterity in old adults. *J Appl Physiol*, 98(6), pp. 2072-80 (2005)
- [16] Marconi NF, Almeida GL.: Principles for learning horizontal-planar arm movements with reversal. *J Electromyogr Kinesiol*, in press (2007)
- [17] Matthey T.: The first principles of pianoforte playing. Longmans, Green, and co., London (1905)
- [18] Papaxanthis C, Pozzo T, Schieppati M.: Trajectories of arm pointing movements on the sagittal plane vary with both direction and speed. *Exp Brain Res*, 148(4), pp.498-503 (2003)
- [19] Santello M, McDonagh MJ.: The control of timing and amplitude of EMG activity in landing movements in humans. *Exp Physiol*, 83(6), pp.857-74 (1998)
- [20] Thomas Mark (著), 小野ひとみ (監訳), 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. 春秋社 (2006)
- [21] Virji-Babul N, Cooke JD, Brown SH.: Effects of gravitational forces on single joint arm movements in humans. *Exp Brain Res*, 99(2), pp.338-46 (1994)

付録

肘関節の運動方程式

$$\begin{aligned}
 \mathbf{MUS} = & \ddot{\phi}_1 \left[\begin{aligned} & I_2 + I_3 + I_4 + m_2 r_2^2 + m_3 (l_2^2 + r_3^2) + m_4 (l_2^2 + l_3^2 + r_4^2) \\ & + (m_2 r_2 l_1 + m_3 l_1 l_2 + m_4 l_1 l_2) \cos \phi_2 + (m_3 r_3 l_1 + m_4 l_1 l_3) \cos(\phi_2 + \phi_3) + (m_4 r_4 l_1) \cos(\phi_2 + \phi_3 + \phi_4) \\ & + 2(m_3 r_3 l_2 + m_4 l_2 l_3) \cos \phi_3 + 2(m_4 r_4 l_2) \cos(\phi_3 + \phi_4) + 2(m_4 r_4 l_3) \cos \phi_4 \end{aligned} \right] \\
 & + \ddot{\phi}_2 \left[\begin{aligned} & I_2 + I_3 + I_4 + m_2 r_2^2 + m_3 (l_2^2 + r_3^2) + m_4 (l_2^2 + l_3^2 + r_4^2) + \\ & + 2(m_3 r_3 l_2 + m_4 l_2 l_3) \cos \phi_3 + 2(m_4 r_4 l_2) \cos(\phi_3 + \phi_4) + 2(m_4 r_4 l_3) \cos \phi_4 \end{aligned} \right] \\
 & + \ddot{\phi}_3 \left[\begin{aligned} & I_3 + I_4 + m_3 r_3^2 + m_4 (l_3^2 + r_4^2) \\ & + (m_3 r_3 l_2 + m_4 l_2 l_3) \cos \phi_3 + (m_4 r_4 l_2) \cos(\phi_3 + \phi_4) + 2(m_4 r_4 l_3) \cos \phi_4 \end{aligned} \right] \\
 & + \ddot{\phi}_4 \left[I_4 + m_4 r_4^2 + (m_4 r_4 l_2) \cos(\phi_3 + \phi_4) + (m_4 r_4 l_3) \cos \phi_4 \right] \\
 & + \dot{\phi}_1^2 \left[(m_2 r_2 l_1 + m_3 l_1 l_2 + m_4 l_1 l_2) \sin \phi_2 + (m_3 r_3 l_1 + m_4 l_1 l_3) \sin(\phi_2 + \phi_3) + (m_4 r_4 l_1) \sin(\phi_2 + \phi_3 + \phi_4) \right] \\
 & - \dot{\phi}_3^2 \left[(m_3 r_3 l_2 + m_4 l_2 l_3) \sin \phi_3 + (m_4 r_4 l_2) \sin(\phi_3 + \phi_4) \right] \\
 & - \dot{\phi}_4^2 \left[(m_4 r_4 l_3) \sin \phi_4 + (m_4 r_4 l_2) \sin(\phi_3 + \phi_4) \right] \\
 & - \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_3 \left[2(m_3 r_3 l_2 + m_4 l_2 l_3) \sin \phi_3 + 2(m_4 r_4 l_2) \sin(\phi_3 + \phi_4) \right] \\
 & - \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_4 \left[2(m_4 r_4 l_3) \sin \phi_4 + 2(m_4 r_4 l_2) \sin(\phi_3 + \phi_4) \right] \\
 & - \dot{\phi}_2 \dot{\phi}_3 \left[2(m_3 r_3 l_2 + m_4 l_2 l_3) \sin \phi_3 + 2(m_4 r_4 l_2) \sin(\phi_3 + \phi_4) \right] \\
 & - \dot{\phi}_2 \dot{\phi}_4 \left[2(m_4 r_4 l_3) \sin \phi_4 + 2(m_4 r_4 l_2) \sin(\phi_3 + \phi_4) \right] \\
 & - \dot{\phi}_3 \dot{\phi}_4 \left[2(m_4 r_4 l_3) \sin \phi_4 + 2(m_4 r_4 l_2) \sin(\phi_3 + \phi_4) \right] \\
 & + g \left[(m_2 r_2 + m_3 l_2 + m_4 l_2) \sin(\phi_1 + \phi_2) + (m_3 r_3 + m_4 l_3) \sin(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) + (m_4 r_4) \sin(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4) \right] \\
 & - F \left[l_2 \cos(\phi_1 + \phi_2) + l_3 \cos(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) + l_4 \cos(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4) \right]
 \end{aligned}$$

SYMBOLS. I_i = moment of inertia about the center of gravity, r_i = distance to center of gravity from proximal joint of the segment, l_i = length, m_i = mass ($i = 1$: upper arm, 2: forearm, 3: hand, 4: finger). The hand was defined as a portion from the wrist joint center to MP joint center, while the finger was from the MP joint center to the fingertip. ϕ_i = joint angle ($i = 1$: shoulder, 2: elbow, 3: wrist, 4: MP). To approximate the sum of key reaction forces applied at the thumb and little finger, the measured key reaction force were doubled and inputted into the value of F in equations of motion [11]. The tangential force was set to nil for simplicity of computation.