

## 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

古屋 晋一<sup>1†</sup>, 青木 朋子<sup>2</sup>, 木下 博<sup>1</sup><sup>1</sup>大阪大学大学院 医学系研究科<sup>2</sup>熊本県立大学 環境共生学部

**要旨** 本研究は熟練ピアニスト (N=8) が連続オクターブ打鍵動作をする際の音量と打鍵テンポが上肢運動制御に及ぼす影響について調べた。全ての音量と打鍵テンポで、指先と鍵盤が接触する瞬間の上肢関節角度は不変であった。音量と打鍵テンポが上肢の運動に及ぼす影響は、それぞれ異なっていた。即ち、より大きな音量の音を作り出す際には近位の身体部位がより多く打鍵動作に用いられたのに対し、より速いテンポで打鍵する際には近位の運動は減少した。したがって我々は、音量調節は「インパルス方略」によって、打鍵テンポ調節は「慣性モーメント方略」によってなされていると提唱した。音量と打鍵打鍵テンポを同時に制御する場合には、ピアニストは主に肘の動きによって打鍵動作を行うという、上記2つの方略の中間の方法を選択することが明らかとなった。

**キーワード:** ピアノ, 打鍵運動, 音量, 打鍵テンポ, 運動制御

## 1. はじめに

ピアノ演奏において芸術的な表現を実現するには、音楽を構成する様々な音響変量を操作することが不可欠である。それらの中でも、「音量」と「テンポ」は最も重要な変量である。ピアニストは長年の訓練を通してこれらの変量を自由に操作する技術を獲得し、様々な楽曲において幅広い音楽表現を実現している。

ピアノにおける打鍵運動は、主に上肢を中心とした運動諸器官によって成し遂げられる極めて巧緻性に富んだ運動技術である<sup>7)</sup>。それらの運動器官の運動が音量やテンポ調節においてどのように制御されているのかを知ることは、ピアノ演奏における身体運動の仕組みを明らかにするばかりでなく、人間の高度な運動技術を探る上でも極めて重要である。これまでに報告されている打鍵時の手、指および上肢や体幹のバイオメカニクス的研究には、指の独立性の問題<sup>1)</sup>や熟練者と初心者の鍵盤への力発揮の違い<sup>12)</sup>、音量と打鍵力の関係<sup>10)</sup>、打鍵時の関節トルク量<sup>5)</sup>や最適な指の関節角度の計算<sup>8)</sup>、アルペジオ課題時の筋活動<sup>7)</sup>や指の予測的な運動制御<sup>4)</sup>などがある。また、長期的なピアノ訓練による指の筋力発揮特性<sup>13)</sup>や大脳皮質の活動量<sup>9)</sup>の変化についての研究報告もある。さらに、ピアノ演奏を原因とする障害に関する研究も数多く報告されてきたが<sup>6)</sup>、打鍵時の音量とテンポ調節に関する上肢キネマティクスと関連筋活動を詳細に調べた研究は見当たらない。そこで本研究では、熟練ピアニストの打鍵運動において音量とテ

ンポの操作が上肢と体幹のキネマティクスおよび関連筋活動に及ぼす影響について明らかにすることを狙いとした。

## 2. 方法

国内外のコンクールにおいて入賞歴のある18歳から47歳までの熟練男女ピアニスト8名を対象に、右手母指小指を用いてのスタカートでのオクターブ連打(30回)を5段階の音量(pp=89.0, p=92.4, mf=95.8, f=99.2, ff=102.6 dB)と5段階のテンポ(1, 2.25, 3.5, 4.75, 6 Hz)の組み合わせの計25条件下で実施した。指(MP関節)、手首、肘、肩、および股関節の運動をポジションセンサー・カメラセット(浜松ホトニクス社製)により、また浅指屈筋、総指伸筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋、大胸筋、および広背筋の活動を表面筋電位法により各チャンネル900 Hzで取り込んだ(図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・カメラセット(浜松ホトニクス社製)により、またピアノ音を騒音計を介して収録した。各関節中心の変位情報から手首、肘、肩の関節角度、

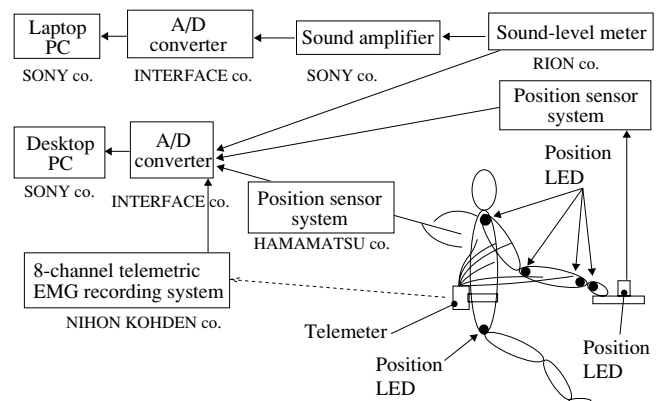


図1 実験装置

2005年9月29日受付 2006年3月10日受理

†〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-17

大阪大学大学院 医学系研究科

古屋 晋一

Tel:06-6850-6035

E-mail: furuya@moted.hss.osaka-u.ac.jp

およびそれらの角速度を算出した。さらに、各関節における打鍵毎の“角速度の最大値”および“手が下降運動を開始してから鍵盤が底に着くまでの間の関節角度変位幅”を各個人で30打鍵での平均値を求めた。それらの被験者全員の平均値を

キネマティクスの評価変量とした。筋電位信号は全波整流後、各筋で測定した最大等尺性筋収縮時の筋活動量によって正規化した。各筋における打鍵毎の“筋活動量の最大値”および“筋活動量の時間平均値”を計算し、それらの30打鍵の平均値を被験者毎に求め、さらにそれらの被験者全員の平均値を筋活動の評価変量とした。各々の評価変量に対する音量とテンポの主効果と相互作用効果は繰返しのある分散分析法によって検定した( $p<0.05$ )。

### 3. 結果

#### 3.1 キネマティクス

音量の増大に伴って各関節での角度変位幅は増加した(図2B)。また、すべての関節における打鍵時の最大角速度も音量の増大に伴って増加した(図2A)。音量の増大に伴う最大角速度および角度変位幅の増分は、低音量域より高音量域の方が手首では小さく、肘と肩では大きい傾向が見られた。一方、各関節での角度変位幅はテンポの増加に対しては減少したが(図2B)、その減少量は手首や肘に比べて肩で顕著であったため、高テンポでは主に手首と肘の運動を主体とすることで対応していた。最大角速度もテンポの増加に伴って手首と肩関節での値が減少した(図2A)。これらの変化は分散分析の主効果でも有意であった( $p<0.01$ )。また、音量とテンポの有意な相互作用効果は肩の角度変位幅(図2B)および肘の最大角速度(図2A)において認められた( $p=0.002, 0.0141$ )。さらに、Tukey法によるpost-hoc分析の結果、各水準間の有意性も認められた( $p<0.05$ )。指先と鍵盤との接触時の手首、肘、肩の関節角度は音量とテンポの影響を受けず、ほぼ一定値となった。

#### 3.2 筋活動

筋活動については、指先と鍵盤の衝突に先行して顕著な肘の筋活動の増大が認められ(図3)、この特徴はすべての筋で認められた。3.5Hz以下の遅いテンポでは各部位の拮抗筋間で時間的に同期した活動様相を呈したが、4.75Hz以上の速いテンポでは交互の活動様相であった(図3)。また、打鍵時の肘および肩の伸展運動に先行した上腕三頭筋および広背筋の相同性筋活動は、4.75Hz以上の速いテンポで打鍵する際にのみ観察された。音量とテンポの増加に伴い、平均筋活動量は拮抗筋、協働筋の双方で増大した(図4)。また、平均筋活動量において音量とテンポの間に有意な相互作用効果が認められた( $p<0.01$ )。即ち、音量の増大に伴う筋活動量の増分は速いテンポほど大きかった。最大筋活動量を評価変数とした場合にも同様の結果であった。

### 4. 考察

#### 4.1 音量制御について

低音量域(pp ~ mf)では、音量の増大に伴って手首での角度変位幅が増大したが、肘と肩での変化は少なかった。一方、高音量域(f ~ ff)では、音量の増大に伴って肘と肩の角度変位幅に顕著な増大が認められた。これらの結果は、音量

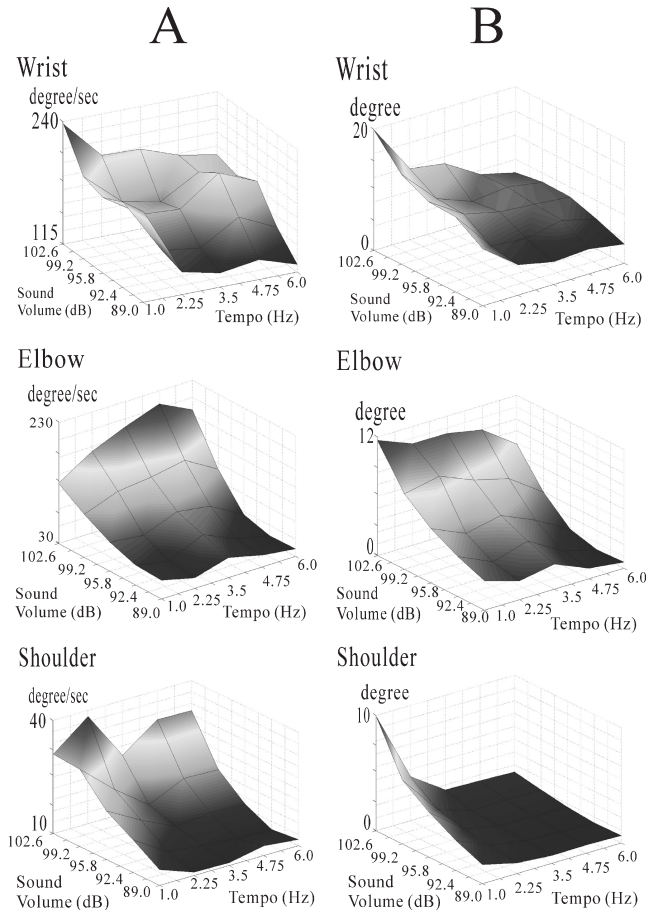


図2 音量と打鍵テンポの変化に伴う、手首、肘、肩の最大角速度の被験者平均 (A, 左) と角度変位幅の被験者平均 (B, 右) の変化。

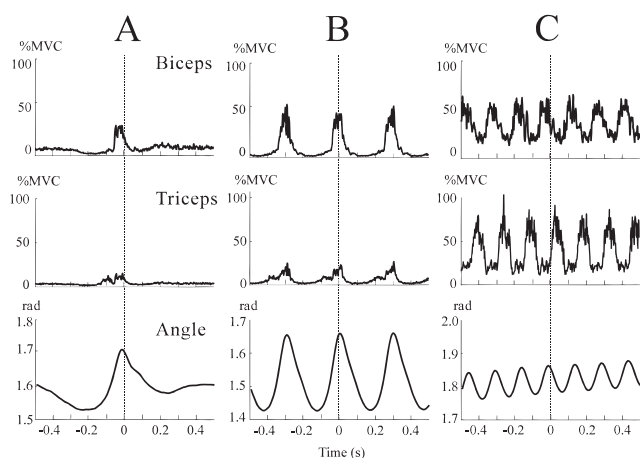


図3 ffで打鍵した際の、打鍵テンポの変化に伴う肘の角度変位、および上腕二頭筋と上腕三頭筋の筋活動パターンの変化。打鍵テンポは、A:1 Hz, B:3.5 Hz, C:6 Hz。時刻0は、鍵盤の下降の開始を表す。

域に応じてピアニストが異なった身体運動制御の方略を用いて音量調節を行っている事を示唆している。即ち、低音量域では指先の微細な力操作が求められるため<sup>10)</sup>、神経支配比の小さい遠位部での筋のみで打鍵運動制御を行っていると考えられる。一方、高音量域ではより大きな打鍵速度と鍵盤への力作用が求められるために<sup>10)</sup>、発揮筋力、質量、慣性モーメント、および筋断面積の大きい近位の身体部位を用いて打鍵運動制御を行うことで、力学的な効率を高め、同時に筋の生理的疲労を減少させていると推察される。運動速度の増大に伴って、より近位の身体部位を運動に動員する方略(“Impulse Strategy”)は、描画運動でより大きな文字や図形を書く場合でも認められている<sup>14)</sup>。

音量の増大に伴って、拮抗筋、協働筋の双方で筋活動量が増加した点、および指先と鍵盤との接触に先行した筋活動がすべての上肢および肩の筋の拮抗筋間で時間的に同期してみられたことは、ピアニストが音量変化に伴う鍵盤との衝突の強さに応じて関節の固定の強さ(スティフネス)を予測的に調節させていたことを示唆している。このことは、腕の下降運動時に蓄えられた運動量を鍵盤に効率よく伝達させる上で重要となる。関節スティフネスは、拮抗筋間での同時収縮の度合いと各関節角度がもたらす上肢の姿勢との双方に依存して変化する。

本研究で見られた衝突時の関節角度が全ての音量でほぼ一定に保たれたという結果は、ピアニストが関節のスティフネス量の制御を筋収縮調節のみで行っていたことを示唆しており、これは打鍵制御を単純化する上で重要であると思われる。

## 4.2 テンポ制御について

テンポの増大は近位部の関節の角度変位幅を減少させ、これに伴い、上肢と肩の全ての筋での活動量が増大した。これは同時収縮によって意図的に近位部の運動を抑制していたことを示唆している。Rosenbaum さんも周期的な腕運動において同様の報告をしており、その理由として、個々の身体部位の固有振動数の平均値に近い周波数で腕全体を振動させることで力学的エネルギー消費を最小にすることができるためと推察している<sup>14)</sup>。事実、運動周波数の高い運動では慣性モーメントの小さい遠位の部位のみでの動作の方が運動方向の切り返しに必要な運動エネルギーは少ない<sup>11)</sup>。したがって、ピアニストは速いテンポでの運動を可能にするために、近位の関節運動を抑制し、主に遠位で慣性モーメントの小さい手部によって振動運動を行う方略(“Moment of Inertia Strategy”)を用いることによって、力学的に効率の良い打鍵動作を実現している可能性が示唆された。このような制御方略は描画運動での速度対応においても観察されている<sup>11)</sup>。

打鍵時の肘および肩の伸展運動に先行した主動筋の活動は、遅いテンポでは認められなかったが、速いテンポでは顕著であった。これは遅いテンポでの腕の下降運動は重力を巧みに利用して行っていたのに対して<sup>5)</sup>、速いテンポでは腕の素早い切り返し運動を肩と肘の主動筋によって能動的に行う必要があったため、および腕振り運動の速度に依存して増大する運動依存性のトルク(相互作用トルク)<sup>3)</sup>を筋力トルクで拮抗的に制御することも必要であったためと考えられる。ゆっくりとしたピッチでの打鍵動作における重力の利用は、熟練したタイピストによるタイピング運動<sup>2)</sup>でも報告されている。

## 4.3 音量およびテンポの相互作用について

肘の最大角速度と肩の角度変位幅、そして筋活動に関する評価変数において音量とテンポの有意な相互作用効果が認められた。これはピアニストが音量とテンポの両変数を同時に操作することが必要な場合には、それぞれの変数への対応に加えて、双方の変数の相互的な影響を計算に入れて打鍵動作を制御していたことを示している。すなわち、遅いテンポでは打鍵動作を行う上で時間的な余裕があるために、より多くの身体部位を動かすことで運動に加わる身体部の質量を増大し、さらに近位の関節運動の角速度も増大することによって、音量を増大することができる(“Impulse Strategy”)。一方、速いテンポになるほど時間的拘束が増大するため、近位の関節運動を抑制し、運動に動員する身体部位の数を減少させる方略(“Moment of Inertia Strategy”)が必要となるが、同時に大きな音量を出すためには、手首よりも容易に大きな速度を生み出すことができ、肩よりも容易に素早い運動方向の切り返しが行える肘関節の

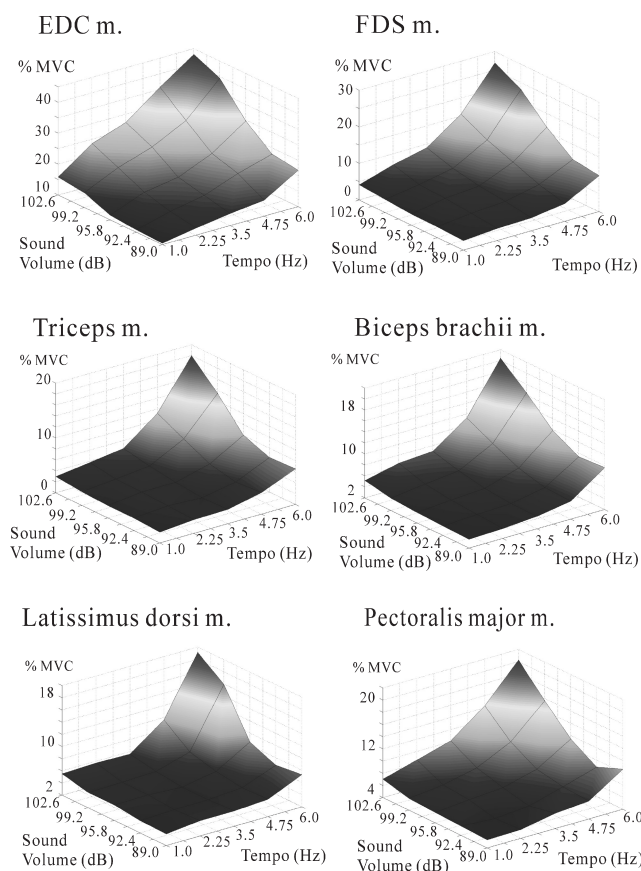


図4 音量と打鍵テンポの変化に伴う、前腕(総指伸筋、浅指屈筋)、上腕(上腕二頭筋、上腕三頭筋)、肩(大胸筋、広背筋)の筋の平均筋活動量の変化。



角速度を増大することによって、双方の方略の特徴をうまく実現しながら打鍵していたものと考えられる。

## 5. 結論

オクターブ連打における上肢の各部位の運動域およびその速度は、音量の増大に伴って増加するが、テンポの増加に対しては肘の最大角速度を除いて減少する。筋活動量は、音量とテンポの双方に対して増加する。動作変量および筋活動変量は音量とテンポの相互的影響も強く受ける。

## 参考文献

- 1) Aoki, T., Furuya, S. and Kinoshita, H.: Finger tapping ability in male and female pianists and non-musician controls, *Motor Control*, 9(1), 23-39, (2004).
- 2) Dennerlein, J.T., Mote Jr, C.D. and Rempel, D.M.: Control strategies for finger movement during touch-typing, the role of the extrinsic muscles during a keystroke, *Experimental Brain Research*, 121, 1-6, (1998).
- 3) Dounskaia, N.A., Swinnen, S.P., Walter, C.B., Spaepen, A.J. and Verschueren, S.M.P.: Hierarchical control of different elbow-joint coordination patterns, *Experimental Brain Research*, 121, 239-254, (1998).
- 4) Engel, K.C., Flanders, M. and Soechting, J.F.: Anticipatory and sequential motor control in piano playing, *Experimental Brain Research*, 113, 189-199, (1997).
- 5) Furuya, S., Aoki, T., Tsuda, H. and Kinoshita, H.: Kinematics and kinetics of a simple octave keystroke movement in the piano, *Proceedings of neurosciences and music II*, (2005, in press).
- 6) 古屋晋一, 木下博: 第16章「手指での動作」第3節「打鍵運動」, 矢部京之助, 大築立志, 笠井達哉(編): 入門運動神経生理学, 223-229, 市村出版, (2003).
- 7) Grieco, A., Occhipinti, E., Colombini, D., Menoni, O., Bulgheroni, M., Frigo, C. and Boccardi, S.: Muscular effort and musculo-skeletal disorders in piano students: electromyographic, clinical and preventive aspects, *Ergonomics*, 32, 697-716, (1989).
- 8) Harding, D.C., Brandt, M.D. and Hillberry, B.M.: Finger joint minimization in pianists using optimization techniques, *J. Biomechanics*, 26, 1403-1412, (1993).
- 9) Jancke, L., Shah, N.J. and Peters, M.: Cortical activations in primary and secondary motor areas for complex bimanual movements in professional pianists, *Cognitive Brain Research*, 10, 177-183, (2000).
- 10) Kinoshita, H., Furuya, S., Aoki, T. and Tsuda, H.: Keystroke force in the piano, *Proceedings of neurosciences and music II*, (2005, in press).
- 11) Meulenbroek, R.G.J., Rosenbaum, D.A., Thomassen, A.J.W.M. and Schnomaker, L.R.B.: Limb-segment selection in drawing behavior, *Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 46, 273-299, (1993).
- 12) Parlitz, D., Peschel, T. and Altenmüller, E.: Assessment of dynamic finger forces in pianists: Effects of training and expertise, *J. Biomechanics*, 31, 1063-1067, (1998).
- 13) Penn, I-W., Chuang, T-Y. and Hsu, T.C.: EMG power spectrum analysis of first dorsal interosseous muscle in pianists, *Medicine & Science in Sports and Exercise*, 31: 1834-1838, (1999).
- 14) Rosenbaum, D.A., Slotto, J.D., Vaughan, J. and Plamondon, R.: Optimal movement selection, *Psychological Science*, 2, 86-91, (1991).

# Control of upper extremity movements in expert pianists when striking the piano keys at various combinations of sound volume and striking tempo

Shinichi FURUYA<sup>1†</sup>, Tomoko AOKI<sup>2</sup>, Hiroshi KINOSHITA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Medicine, Osaka University

<sup>2</sup>Department of Environmental and Symbiotic Sciences, Prefectural University of Kumamoto

**Abstract** This study investigated the effects of sound volume and striking tempo on control of upper extremity movements in expert pianists (N=8) when they performed repetitive octave keystrokes. It was found that at all levels of sound volume and striking tempo, the upper limb angles at the moment of finger-key contact were invariant. The effects of sound volume and striking tempo on limb movements were revealed differently. The proximal segments contributed more to the movement of the limb for the production of larger sound, whereas they contributed less for increasing striking tempo. We propose that sound volume control is achieved by an “impulse strategy”, whereas striking tempo control is made by a “moment of inertia strategy”. To control sound volume and striking tempo simultaneously, pianists selected an intermediate way of these two strategies where movements at the elbow joint played a major role in keystroke.

**Key Words:** Piano, Key-striking movement, Sound volume, Striking tempo, Motor control

---

Received Sep 29, 2005 Accepted Mar 10, 2006

<sup>†</sup> Shinichi Furuya

Graduate School of Medicine, Osaka University

Health and Sports Sciences Building, 1-17 Machikaneyama, Toyonaka,

Osaka 560-0043, Japan

Tel: 06-6850-6035

E-mail: furuya@moted.hss.osaka-u.ac.jp