

[原著]

ピアノの打鍵動作に関するキネマティクスの研究

松原 誠仁¹⁾, 原 周生²⁾, 木下 拓朗²⁾,
川口 みさき³⁾, 山田 和慶⁴⁾

Keystroke analysis of kinematics between professional and amateur pianists.

Shigehito MATSUBARA, Syusei HARA, Takuro KINOSHITA,
Misaki KAWAGUCHI, Kazunori YAMADA

1) 熊本保健科学大学, 2) 熊本保健科学大学保健科学部リハビリテーション学科理学療法専攻, 3) 平成音楽大学, 4) 熊本大学医学部附属病院

1) Kumamoto Health Science University, 2) Kumamoto Health Science University
Department of Rehabilitation Division of Physical Therapy, 3) Heisei College of Music,
4) Kumamoto University Hospital

本研究の目的は、熟練および未熟練ピアニストの打鍵動作を分析することにより、動作制御特性に関する基礎的知見を得ることであった。対象は、ピアノを専攻とする音楽大学学生6名とピアノを専攻としない学生5名であった。被験者にピアノを用いて、音階（ドレミファソラシド、CDEFGABC）を可能な限り速く弾かせ、これを打鍵動作とした。評点座標の収集には2台のハイスピードカメラを用いた。分析対象試技において、音階における母指および示指を分析対象とした。その結果、ド（C）における左右方向およびレ（D）における鉛直方向の手関節点速度が未熟練者よりも熟練者の方が有意に大きかった。また、示指先端速度を生成するセグメントの寄与率が熟練および未熟練ピアニストにおいて異なることが明らかとなった。これらことから、熟練者と未熟練者では、手指先端速度を生成するためのセグメントの制御特性が異なることが示唆された。

キーワード：ピアノ 打鍵動作 制御特性 寄与率

I. はじめに

運動学習の判定に利用されるテストは、運動技能（motor skill）を測定していることが多い¹⁾。このとき、正確性（accuracy）、速度（velocity）、大きさ（response magnitude）の3変数が利用されている。特に、最終効果器の位置、速度および操作性などが有効な評価項目とされ、様々な課題のパフォーマンス測定を通じて評価されることが多い。しかしながら、運動の発現には、感覚 - 神経 - 筋骨格系など多岐にわたる器官が関与しており、これらの相互作用機能などはいまだほとんど明らかにさ

れていない。

巧みな手指運動として代表的なのは楽器演奏であり、特にピアノ演奏時の打鍵動作はすべての器官の機能が統合されて出力された結果であり、正確性、速度および大きさの全てが要求される。また、巧みな動作を可能とする手は手根骨、中手骨および指節骨が約27個あり、多くの靭帯および筋腱によって構成されている。さらに感覚 - 神経系の相互作用によって運動を可能とする。

このように複雑な解剖学および生理学的機構によって生成される手指の運動に関する知見は少なく、手指屈曲伸展時における手指独立性についての報

告や²⁾, 最速タッピング課題を用いた手指の動的運動機能に関する報告に限られるようである³⁾。また、実際のピアノ動作における手指の運動に着目した報告は極めて少なく、電子ピアノを用いた報告などがあるのみである⁴⁾。また、古屋らは⁵⁾, 打鍵動作時における筋収縮に着目し、ピアニストと初心者では関節間相互作用トルク（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）を利用するスキルに相違があることを報告している。しかしながら、手指セグメント間の相互作用により生成される手指先端速度に着目した報告はみられない。これらのことが明らかになれば、ピアノ演奏動作の学習支援に多大な貢献をすると考えられる。

そこで、本研究では熟練および未熟練ピアニストの打鍵動作を分析することにより、動作制御特性に関する基礎的知見を得ることを目的とした。

II. 方法

2.1 被験者

被験者はピアノを専攻する18歳から24歳までの音楽大学学生6名とピアノを専攻としない学生5名であった。被験者の中には国内外コンクール優勝者の一流ピアニストが含まれていた（経験歴15年±5.5）。また、被験者は全員右利きであった。実験に先立って被験者に研究目的、実験内容、データの取り扱いなどを説明し、危険や苦痛を感じた際には、自らの意思によって中止できることを伝え、協力の同意と署名を得た。

2.2 実験試技

被験者にピアノを用いて、音階（ドレミファソラ

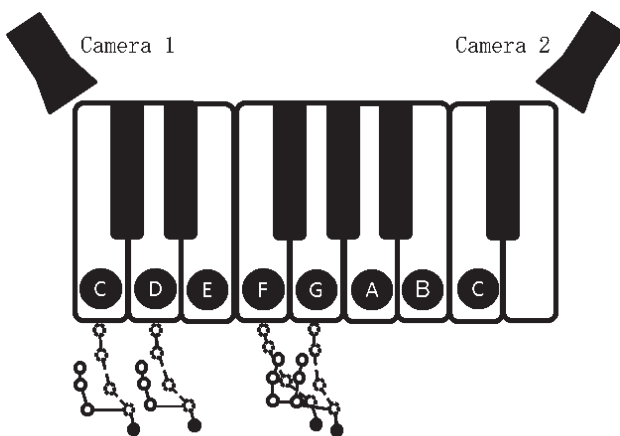


Figure 1 Experimental set up.

シド, CDEFGABC) を可能な限り速く弾かせ、これを打鍵動作とした。実験環境に慣れさせるために十分な練習を行わせたのち、少なくとも3回の試技を行ったが、著しく不自然であると験者および被験者が判断した場合にはやり直させた。

2.3 データ収集

評点座標の収集には、同期させた2台の高速度ハイスピードカメラ（キッセイコムテック社製、サンプリング周波数100Hz、露出時間1/1000s）を使用した。カメラは、ピアノの前上方約1.5mの高さに設置した。

2.4 データ処理

本研究では、2台の高速度ハイスピードカメラのVTR画像を用いて、被験者の身体分析点（10点）および校正マークをデジタル化し、Direct linear transformation method（以下、DLT法）によって分析点の3次元座標値を算出した。得られた3次元座標値は、残差分析法により最適遮断周波数を決定し、Butterworth digital filterにより各分析点に対して6~10Hzの遮断周波数で平滑化を行った。

2.5 測定項目および測定方法

2.5.1 キネマティクスの変数の算出

① 打鍵時間および周波数

音階において分析対象手指である母指および示指により打鍵されるC（ド）、D（レ）、F（ファ）およびG（ソ）に要した時間を打鍵時間とし、その逆数を打鍵周波数とした。

② 分析点の速度

分析点の変位を数値微分することによって速度を算出した。

③ セグメント角度および角速度

手指のセグメント角度を分析点の座標データから算出した。算出した角変位を数値微分することで、セグメント角速度を算出し、手指先端速度に対する

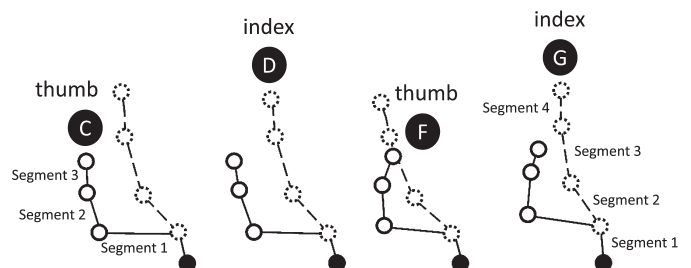


Figure 2 Definition of segments and movement events of the right fingers.

各セグメントの寄与率の算出に用いた。

2.5.2 手指先端速度に対する各セグメントの寄与率の算出

手指先端速度に対する各セグメントの寄与率を式(1)により算出した。

$$v_i = v_{i-1} + \omega_i \times l_i \quad (1)$$

ここで、 v_i は関節点 i の速度ベクトル、 v_{i-1} は関節点 $i-1$ の速度ベクトル、 ω_i はセグメント i の角速度ベクトル、 l_i はセグメント i のセグメント長をそれぞれ示す。式(1)を母指および示指においてまとめるとそれぞれ下記のようになる。

$$v_{thumb\ tip} = v_{wrist} + \omega_{seg1} \times l_{seg1} + \omega_{seg2} \times l_{seg2} + \omega_{seg3} \times l_{seg3} \quad (2)$$

$$v_{index\ tip} = v_{wrist} + \omega_{seg1} \times l_{seg1} + \omega_{seg2} \times l_{seg2} + \omega_{seg3} \times l_{seg3} + \omega_{seg4} \times l_{seg4} \quad (3)$$

ここで、式(2)および式(3)における右辺各項は母指および示指先端速度に対する各セグメントの割合を示すものである。そこで、本研究では母指および示指先端速度に対する各セグメント速度の割合を寄与率として定義した。

2.6 時系列データの規格化

Table 1 Keystroke time and frequency.

		Group				
		Good		Poor		
Unit		Mean ± S.D.		Mean ± S.D.		
TT	S	1.023	0.057	1.498	0.062	**
TC	S	0.118	0.012	0.266	0.013	**
TD	S	0.105	0.023	0.254	0.025	**
TF	S	0.155	0.014	0.240	0.015	**
TG	S	0.165	0.016	0.230	0.017	**
TCD	S	0.090	0.011	0.166	0.012	**
TDF	S	0.227	0.012	0.332	0.013	**
TFG	S	0.098	0.015	0.196	0.016	**
TCF	S	0.317	0.016	0.498	0.017	**
TDG	Hz	0.325	0.013	0.528	0.014	**
TF	Hz	7.892	0.306	5.399	0.335	**
FCD	Hz	11.674	0.989	6.217	1.804	**
FDF	Hz	4.488	0.201	3.025	0.220	**
FFG	Hz	13.782	3.112	5.131	3.409	n.s.
FCF	Hz	3.169	0.084	2.025	0.092	**
FDG	Hz	3.097	0.089	1.900	0.098	**

TT: total time, TC: time at C, TD: time at D, TF: time at F, TG: time at G, TCD: time at C to D, TDF: time at D to F, TFG: time at F to G, TCF: time at C to F, TDG: time at D to G, TF: total frequency, FCD: frequency of C to D, FDF: frequency of D to F, FFG: frequency of F to G, FCF: frequency of C to F, FDG: frequency of D to G.

時系列データを音階 C (ド) から G (ソ) までの時間を 100% として全被験者のデータを規格化した。

2.7 統計処理

熟練者群と未熟練者群間の有意差検定には一元配置分析を用い、有意な差がみられた場合には多重比較 (Turkey 法) を行った。また、有意水準は 5% 未満とした。

III. 結果

3.1 打鍵時間および周波数

Table 1 は、熟練者群と未熟練者群の打鍵動作における時間と周波数の関係を示したものである。打鍵時間では、すべての項目において有意な差がみられ、未熟練者群のほうが熟練者群より打鍵時間が長かった ($p < 0.01$)。周波数では、FFG 以外のすべての項目において有意な差がみられ、熟練者群のほうが未熟練者群より周波数が大きかった ($p < 0.01$)。

3.2 関節点および手指先端速度

Figure 3 は音階における手関節点速度の変化を熟練者群および未熟練者群の平均値で示したものである。手関節点速度では、内外側方向の C (ド) において、熟練者群のほうが未熟練者群よりも有意に小さかった ($p < 0.05$)。また、鉛直方向の D (レ) において、熟練者群のほうが未熟練者群よりも有意に大きかった ($p < 0.05$)。

音階における母指および示指先端速度は、熟練者群および未熟練者群間において有意な差はみられなかった。

3.3 手指先端速度に対する各セグメントの寄与率

Figure 4 は、音階における内外側方向の示指先端速度に対する各セグメントの寄与率を、熟練者群

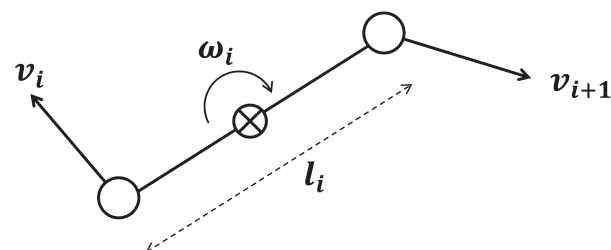


Figure 3 Free body diagrams for calculation of segmental contribution.

v_i : velocity of i th point, v_{i+1} : velocity of $i+1$ point, ω_i : segment angular velocity, l_i : segment length.

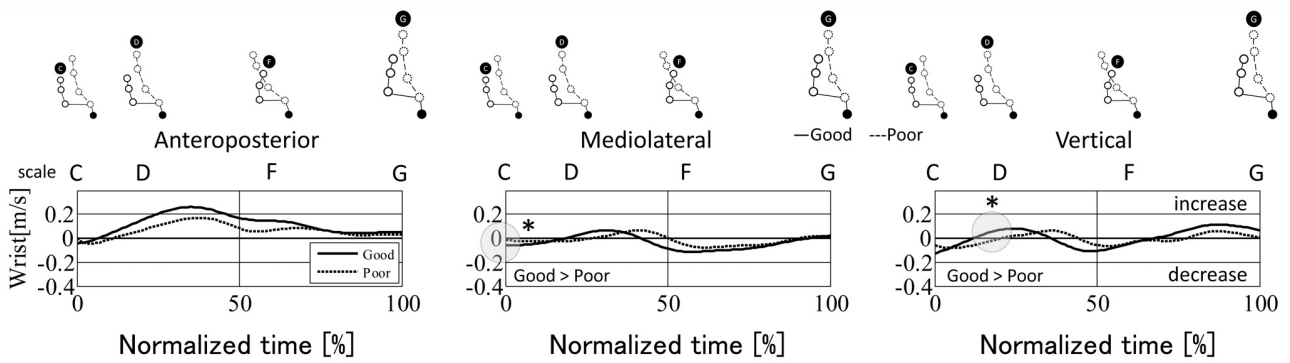


Figure 4 Patterns of the wrist joint velocity during keystroke. * $p < 0.05$

および未熟練者群の平均値で示したものである。C (ド) 時点における示指先端速度は、未熟練者群では正を、熟練者群では負の値を示し、このときセグメント3の寄与率は未熟練者群では正を、熟練者群では負の値を示した。

また、示指ではC (ド) において、示指先端速度に対するセグメント3の寄与率が、未熟練者群のほうが熟練者群より有意に小さかった (Figure 6 A, $p < 0.05$)。

母指では先端速度に対する各セグメントの寄与率

において、未熟練者群と熟練者群間に有意な差がみられなかった。

Figure 5は、音階における鉛直方向の手指先端速度に対する各セグメントの寄与率を、熟練者群および未熟練者群の平均値で示したものである。D (レ) 時点における示指先端速度は、未熟練者および熟練者群ではともに負の値を示し、このときセグメント3の寄与率は、未熟練者および熟練者群ともに負の値を示した。

また、示指ではD (レ) における示指先端速度に対するセグメント3の寄与率が、未熟練者群のほうが熟練者群より有意に大きかった (Figure 6 B, $p < 0.05$)。

母指では先端速度に対する各セグメントの寄与率において、未熟練者群と熟練者群間に有意な差がみられなかった。

IV. 考 察

4.1 打鍵時間および周波数について

打鍵時間は、未熟練者群のほうが熟練者群より長く、周波数は、熟練者群のほうが未熟練者群より周波数が大きかった (Table 1)。このことは、打鍵動作において、熟練者群のほうが未熟練者群よりも鍵盤を押している時間が短く、次の鍵盤まで母指と示指を移動させる打鍵間隔が短いことを示唆する。ピアニストのタップ間隔は一般成人の73%程度であり、素早く動かす能力が高いとされている³⁾。特に、ミ (E) からファ (F) へ移行する際、母指はC (ド) からF (ファ) までの急激な移動を要求される。また、E (ミ) からG (ソ) まで移行する際、示指はD (レ) からG (ソ) までの急激な移動を要求される。これらの局面において、熟練者群で

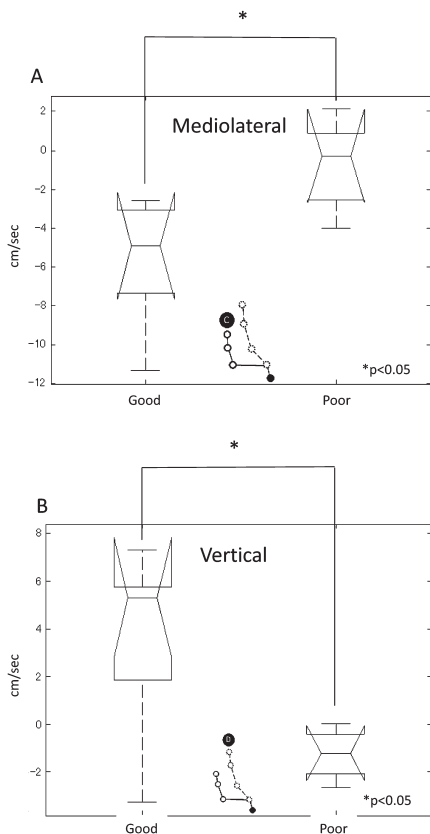


Figure 5 Comparison of the wrist joint velocity between Good and Poor.

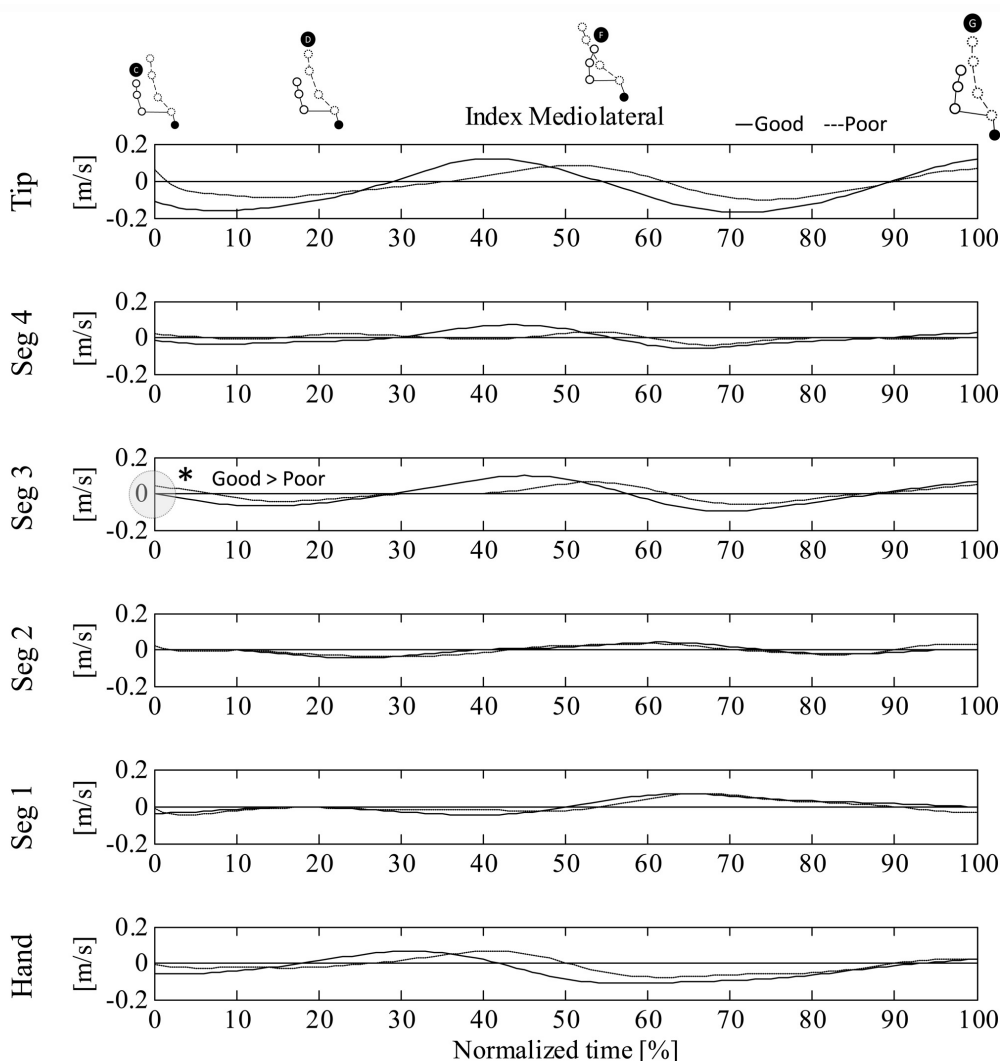


Figure 6 Patterns of mediolateral segmental contribution during keystroke.

は鍵盤を押す時間と次の鍵盤までの移動間隔を短くし、手指を持ち上げた後に振り下ろして打鍵する Struck タッチ⁵⁾を行うことで円滑な動作の切り替えを行っていたと考えられる。また、未熟練者では手指先端が鍵盤に触れた状態のまま鍵盤を押し下げる Pressed タッチ⁵⁾を行っていたため打鍵時間が長かったと考えられた。

4.2 関節点および手指先端速度

内外側方向の C (ド) における手関節点速度は、熟練者群のほうが未熟練者群よりも小さく、鉛直方向の D (レ) では、熟練者群のほうが未熟練者群よりも有意に大きかった (Figure 3)。このことは、未熟練者群は C (ド) における手部の側方速度が大きく、D (レ) における手部の鉛直速度が小さいことを示唆する。手部の側方への移動速度を大きくするためには、手関節は尺屈角度を増加させる必要が

ある。したがって、未熟練者は手指とともに前腕の動きも要求されることになり、エネルギー効率の悪い打鍵動作であったと考えられる。このことから、未熟練者群は熟練者群より手関節尺屈角度を増加させるための時間延長が必要なため Pressed タッチ⁵⁾を行っていたと考えられた。

また、手指を次の鍵盤に移動させるためには、鍵盤と手先間のクリアランス距離が必要となる。熟練者群では鍵盤と手先間のクリアランス距離を確保しながら Struck タッチ⁵⁾を行うために手部の鉛直方向速度を大きくしていたと考えられた。

4.3 手指先端速度に対する各セグメントの寄与率

示指では C (ド) において、示指先端速度に対するセグメント 3 の寄与率が、未熟練者群のほうが熟練者群より小さく、D (レ) における示指先端速度に対するセグメント 3 の寄与率が大きかった

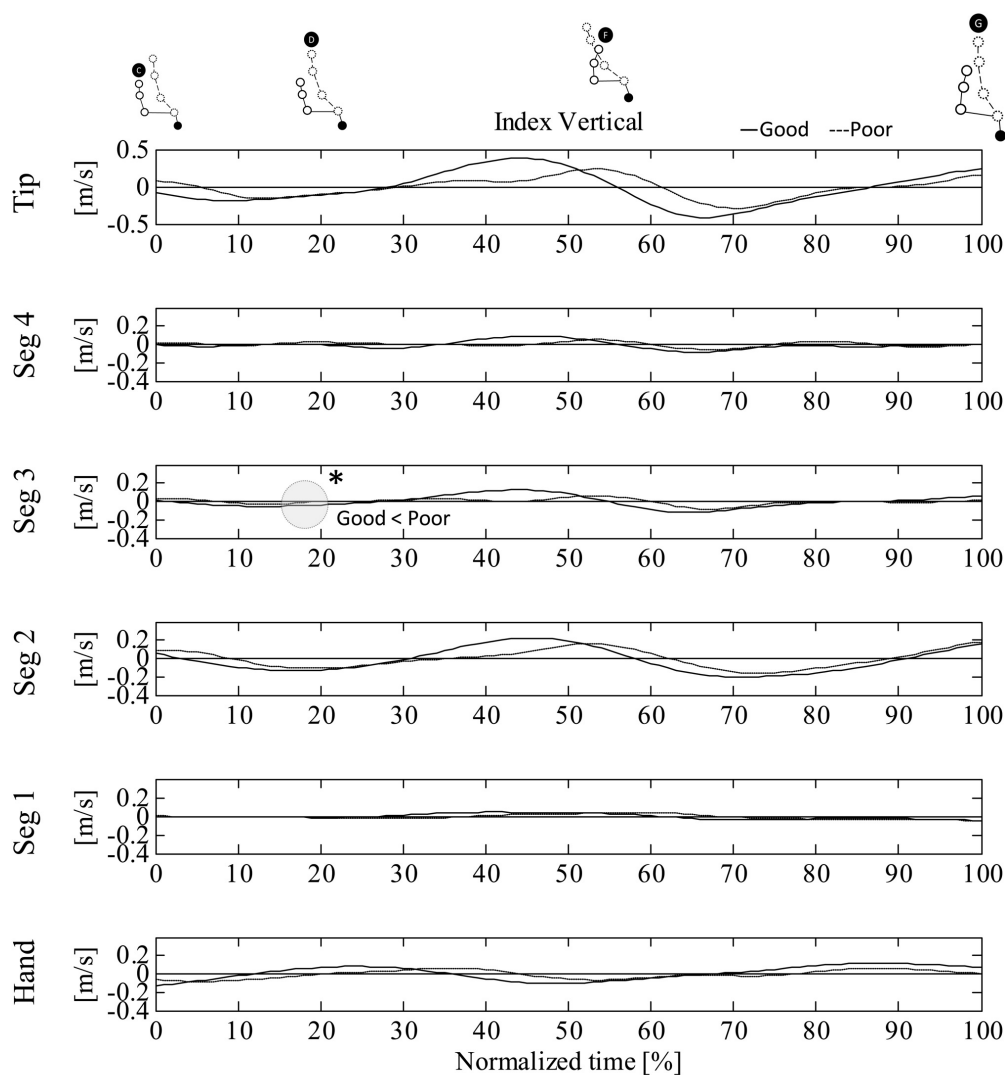


Figure 7 Patterns of vertical segmental contribution during keystroke.

(Figure 6)。これらのことは、手指先端速度に差はみられないが、同じ速度を生成するためのセグメントの寄与率が異なることを示唆する。

また、C (ド) 時点における未熟練者の示指先端速度およびセグメント3の寄与率は正を示していた。このことは、未熟練者のセグメント3は、示指先端速度を増加させるような機能を発揮していたことを示すものである。逆に熟練者のセグメント3は、示指先端速度を減少させるような機能を発揮していたことを示すものである (Figure 6)。

D (レ) 時点における未熟練者の示指先端速度およびセグメント3の寄与率は負を示していた。このことは、未熟練者および熟練者のセグメント3は、示指先端速度を減少させるような機能を発揮していたこと、発揮された機能の度合いが未熟練者および

熟練者群間で異なっていたことを示すものである (Figure 7)。

熟練者では近位関節を用いることで、遠位関節の運動量を低減しているとされている²⁾。これらのことから、セグメント3がC (ド) およびD (レ) における示指先端速度制御に起因するセグメントであり、打鍵動作の相違に関与する要因であると考えられる。

しかしながら、手指先端速度を制御する関節点およびセグメントの動きの原因となるのは力である。本研究では、手指セグメントの慣性係数 (質量、質量中心位置および慣性モーメントなど) が未知であるため動きの原因となる力を推定することができなかった。これらのことは今後の課題である。

以上のことから、熟練および未熟練ピアニストの

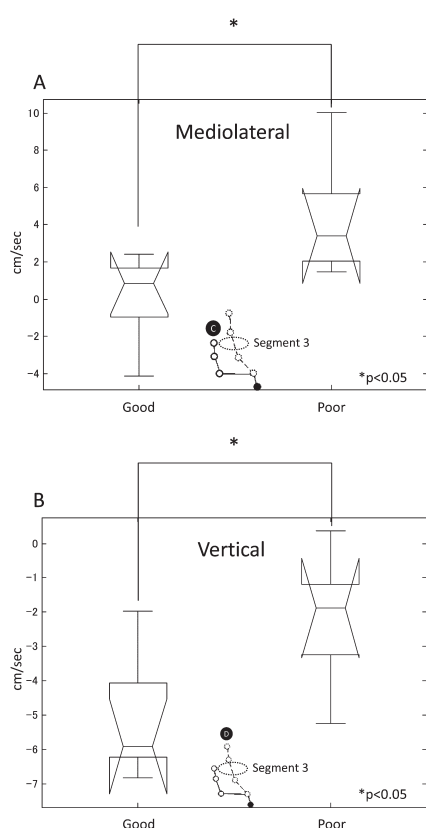


Figure 8 Comparison of segmental contribution between Good and Poor.

打鍵動作をキネマティクスの分析することにより、鍵盤を打鍵する方法と手指先端速度を制御するセグメントの機能特性が明らかとなった。最大速度での打鍵動作における手部の側方および鉛直速度および示指のセグメント3は、熟練度向上のために着目すべき動きおよび部位であることが示唆された。

V. 結 語

本研究では、熟練および未熟練ピアニストの打鍵動作をキネマティクスのように検討した。本研究では得られた知見をまとめると以下のようなになる。

- ① 打鍵時間は、未熟練者群のほうが熟練者群より長く、周波数は、熟練者群のほうが未熟練者群より周波数が大きかった。これは、熟練者群は Struck、未熟練者群は Pressed タッチを行っていたと考えられた。
- ② 内外側方向の C (ド) における手関節点速度は、熟練者群のほうが未熟練者群よりも小さく、鉛直方向の D (レ) では、熟練者群のほうが未熟練者群よりも大きかった。これは、熟練者群で

は鍵盤と手先間のクリアランス距離を確保するために手部の鉛直方向速度を大きくしていたと考えられた。また、未熟練者群では手関節尺屈角度を増加させるために Pressed タッチを行っていたと考えられた。

- ③ 示指では C (ド) において、示指先端速度に対するセグメント3の寄与率が、未熟練者群のほうが熟練者群より小さく、D (レ) における示指先端速度に対するセグメント3の寄与率が大きかった。これは、セグメント3が示指先端速度制御に起因するセグメントであり、打鍵動作の相違に関与する要因であると考えられる。

以上のことは、ピアノ演奏動作の学習支援に対する多大な貢献が期待できるであろう。

文 献

- 1) 中村隆一：基礎運動学. 齋藤宏, 長崎浩, 運動学習, 医歯薬出版, pp447-469, 2007.
- 2) Schieber MH, Santello M: Hand function peripheral and central constraints on performance. *J Appl Physiol*, 96(6):2293-2300, 2004.
- 3) 青木朋子：指の運動機能に及ぼすピアノ長期訓練の影響. 電子情報通信学会誌, 108 : 107-109, 2008.
- 4) 合田竜志, 古屋晋一, 片寄晴弘 他：モーションキャプチャと筋電図計測を用いたピアノ演奏における連続指運動スキルの解明. 映像情報メディア学会誌, Vol.35, No.8 : 77-80, 2011.
- 5) 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, Vol.35, No.3 : 168-175, 2011.
- 6) 永田晨, 鈴木薫：ピアノ打鍵動作の手指運動分析. 体育学研究, 第20巻, 第1号 : 15-29, 1975.
- 7) 木下博, 小幡哲史：バイオリン奏者の身体運動科学. 日本音響学会誌, 67巻, 9号 : 4409-414, 2011.
- 8) Michael Dimitriou, Benoni B. Edin: Discharges in human muscle spindle afferents during a key-pressing task. *J Physiol*, 586.22:5598-5470, 2008.

(平成25年1月31日受理)

Piano keystroke analysis of kinematics.

Shigehito MATSUBARA¹⁾, Syusei HARA²⁾, Takuro KINOSHITA²⁾,
Misaki KAWAGUCHI³⁾, Kazunori YAMADA⁴⁾

¹⁾Kumamoto Health Science University, ²⁾Kumamoto Health Science University
Department of Rehabilitation Division of Physical Therapy, ³⁾Heisei College of Music,
⁴⁾Kumamoto University Hospital

Abstract

The purpose of this study was to investigate differences in keystroke of piano with a view to determine control characteristics of movement in hand and fingers. The keystroke of 6 pianists was analyzed. Three dimensional coordinates of 10 reflective markers attached to subjects were obtained with two high speed cameras operating at 100Hz. Each subject's kinematics of hand and fingers during keystroke were calculated. As a result, vertical hand velocity of professional was greater than that of amateur. And, segmental contribution to tip velocity of index was different between professional and amateur. The results indicated the professional tended to be different strategy during piano keystroke.