

## 筋電信号に基づいた示指によるピアノ打鍵時の脱力度評価

為井 智也<sup>†\*</sup> 柴田 智広<sup>†</sup> 石井 信<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

ピアノ演奏で重要と言われる「脱力した」奏法と「力んだ」奏法の比較を、示指の3関節を用いた打鍵動作を対象に行う。本目的のため、示指の関節角度、筋電位、鍵盤の変位を同時に記録することの出来る計測システムを開発した。予備的な実験の結果、脱力した場合と力んだ場合では筋電のパターンに違いが認められ、その結果として鍵盤の挙動にも違いが現れることを示す。特に指が離鍵する際の伸筋の活性化と離鍵速度に強い相関が見られた。得られた結果から、今回開発した計測システムを用いることによって演奏者の熟達度を評価する手法となり得ることが期待される。

### Assessment of muscle relaxation in piano keying by an index finger based on EMG signals

TOMOYA TAMEI<sup>†\*</sup>, TOMOHIRO SHIBATA<sup>†</sup> and SHIN ISHII<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

This study aims at comparing behaviors between two contrasting piano-playing cases: when a player applies significant force to keys and when a player relaxes their muscles as possible as she/he can. For this, we developed an simultaneous measurement system for the motions of an index finger and a key, and for Electromyographic(EMG) signals of the index finger. The results acquired in a pilot study show the clear difference in the key motion and the EMG pattern between those two cases. In particular, the strong correlation between extensor muscle activities and key-release velocities is suggested. The results suggest that the developed measurement system is useful to evaluate the proficiency of pianists.

#### 1. はじめに

スポーツ、楽器演奏等の身体運動において、熟達者は滑らかな動きを見せるが、初心者への動きはどこかぎこちなく硬い印象を受けることが多い。言い換えれば、熟達者の動き、力を入れるタイミングにはメリハリがあり、体幹から末梢へ効率よくエネルギーを伝えているのに対し、初心者は常に力みがちである。また、熟達者の動きを真似ても直ぐには上手くなるわけではない。これは初心者には力の入れ具合が分からないことのみならず、筋肉の力みが動きの邪魔をするためだと考えられる。実際にスポーツなどの指導者が、学習者にまず脱力を指示する様子は多く見受けられる。

このことはピアノ演奏においても同様で、ピアノを演奏する際素早く精妙な動きをするために、あるいは響きのある音を出し豊かな表現を可能にするためには「脱力」した奏法が重要であるといわれている。「脱力」した奏法が出来るか出来ないかで、指1本の打鍵時にも音の違いが出るという。しかし、この「脱力」した状態

がどのような状態であるのかが明らかでなく、言葉で言い表すことが出来ないため指導が難しく、長くピアノを続けた人にとっても習得が困難という。

そこで本研究では特にピアノの打鍵動作に着目し、初心者と熟達者の打鍵技術の違いや、運動熟達のキーワードである「脱力」とは如何なるものであるのかを明らかにすることが目的である。

これまでにピアノ演奏における脱力奏法に関連した研究がいくつか為されてきた。Parlitzらは、圧力センサーを鍵盤の下に引くことにより、プロピアニストおよびアマチュアピアニストの'tied finger exercises'時の、鍵盤に対して発生した圧力を計測した<sup>1)</sup>。その結果、アマチュアピアニストは、プロピアニストと同様のテンポや音量を実現するために、非常に大きな力を出力していることが分かった。大島らは、ピアノ演奏法における脱力の重要性、および脱力と離鍵速度、すなわち打鍵して下においた鍵盤が元の位置に戻る時の速さ、との関連を指摘した上で、離鍵速度と音響や演奏熟達度との関係について研究した<sup>2)</sup>。Parlitzらの研究では、熟達者が非熟達者よりもエネルギー効率良く打鍵をしていることが示されたが、脱力奏法に関して研究したもので

\* E-mail: tomo-tam@is.naist.jp

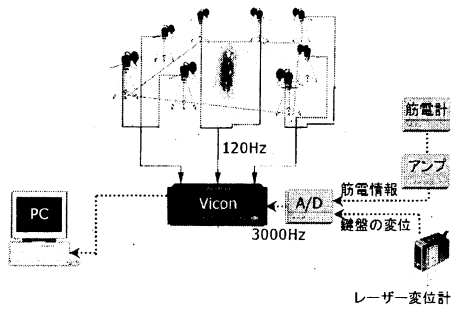


図1 システム構成  
Fig. 1 System configuration

はなく、また演奏者の指の筋肉の活動を捉えたものではない。大島らの研究は、より脱力に着目したものであるが、脱力と離鍵速度との関係は調べられていない。

そこで我々は、ピアノ演奏者の関節角度の変化、表面筋電信号、ピアノの鍵盤の変位を同時に測定できるシステムを開発し、脱力、指の運動、そして鍵盤の運動との関係を調べる予備的な実験を行ったので、ここに報告する。

## 2. 手 法

### 2.1 システム構成

今回の実験で構築したモーション、筋電位、鍵盤の変位を同時に計測するためのシステムの構成図を図1に示す。モーションの計測は光学反射式モーションキャプチャシステム Vicon512 (Oxford Metrics 社製) を使用して、サンプリング周波数 120 Hz で行った。

筋電信号は示指の運動に関係する4つの筋肉(2.3節)について、アクティブ電極タイプの小型筋電アンプ BA1104m(デジテックス研究所製) で計測し、Vicon の A/D 変換機に入力してモーションデータと同期を取り 3000 Hz でサンプリングした。筋電信号の処理に関しては2.3.3節で後述する。

鍵盤の変位はレーザー変位計 CD3-250(SICK OP-TEX 社製) を用いて計測した。レーザー変位計の出力は筋電と同じく Vicon の A/D 変換機に入力しモーションデータと同期を取って 3000 Hz で記録した。

### 2.2 実験条件

右手の示指(第2指)を使い2.3節で述べる3関節を動かしてピアノ鍵盤1音を繰り返し打鍵し、示指のモーション、表面筋電、鍵盤の変位を計測する実験を行った。

被験者には椅子に座り、肩、肘、手首を使わず示指の3関節のみを計測対象とするために右手の肘から手首の先(手根骨付近)までを肘掛台に置き、出来るだけリラックスするよう教示した(図4参照)。

テンポ、長さを変えた以下の4つの条件でメトロノームの音に合わせて打鍵を行った。Task は次に示す

ように4種類をそれぞれ力んだ場合と脱力した場合の2通り、各10回繰り返して打鍵を行った。(表1参照)

- Task1: テンポを M.M.=50 に設定し、自然な指の形(アーチ形)で1拍づつ打鍵
  - Task2: テンポを M.M.=50 に設定し、自然な指の形(アーチ形)で2拍づつ打鍵
  - Task3: テンポを M.M.=50 に設定し、PIP,DIP 関節を伸展させ主に MP 関節を動かして1拍づつ打鍵
  - Task4: テンポを M.M.=50 に設定し、PIP,DIP 関節を伸展させ主に MP 関節を動かして2拍づつ打鍵
- 被験者は健康な成人女子で、音楽大学でピアノ演奏を専攻しピアノ指導者の経験を持つ者であった。また、打鍵直後に脱力を行い音色に変化を持たせるということを理解、実践出来る人物であった。

### 2.3 計測する指の関節・筋肉

本研究で計測する指は右手の示指であり、実験では後述のように示指にモーションキャプチャ用のマーカを取り付け(図3参照)、示指の運動に関わる筋肉の筋電位を4箇所計測した(図4参照)。

#### 2.3.1 関節<sup>3)</sup>

中手指節関節(MP 関節):

中手骨と季節骨の間の関節で0~40°の伸展、85~100°の屈曲が可能(図2参照)

近位指節間関節(PIP 関節):

基節骨と中節骨の間の関節で90~120°の屈曲が可能

遠位指節間関節(DIP 関節):

中節骨と末節骨の間の関節で80~90°の屈曲が可能

#### 2.3.2 筋 肉<sup>3)</sup>

屈筋(flexor)

示指の屈曲に関わる外在筋を以下に挙げる。

浅指屈筋(FDS: flexor digitorum superficialis)

- 停止: 第2~5指の中節骨の両側前方
- 機能: 手の指の屈曲(MP, PIP 関節)、手首の屈曲、肘の屈曲の補助

- 神経支配: 正中神経

深指屈筋(FDP: flexor digitorum profundus)

- 停止: 第2~5指の末節骨底(掌側)
- 機能: 手の指の屈曲(MP, PIP, DIP 関節)、手首の屈曲

表1 タスク

Table 1 Task

		指の形	
		アーチ形	PIP,DIP 関節伸展
打鍵拍数	1拍	Task1	Task3
	2拍	Task2	Task4

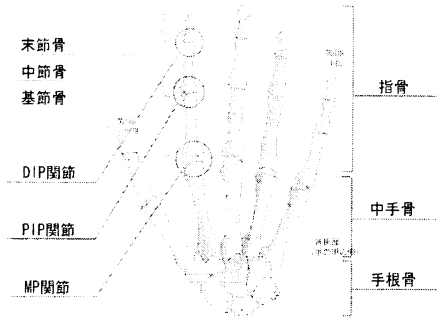


図2 手の骨格<sup>4)</sup>  
Fig. 2 Skeleton of the right hand



図3 マーカ貼付位置  
Fig. 3 Marker locations

- 神経支配：第2・3指は正中神経，第4・5指は尺骨神経

#### 伸筋 (extensor)

示指の伸展に関わる外在筋を以下に挙げる。

(総) 指伸筋 (ED : extensor digitorum (communis))

- 停止：第2～5指の中節骨と末節骨の骨底 (背側)
- 機能：手の指の伸展，手首の伸展，肘の伸展の補助

- 神経支配：橈骨神経

示指伸筋 (EI : extensor indicis)

- 停止：第2指の中節骨と末節骨の骨底 (背側) (指伸筋腱と合流)

- 機能：手の指の伸展，手首の伸展の補助
- 神経支配：橈骨神経

赤外線反射マーカは図3に示すように被験者の右手示指の指先，DIP 関節，PIP 関節，MP 関節，手の甲と，5箇所に貼り付けた。

#### 2.3.3 計測データの処理

示指のモーションデータは，計測した5点のマーカの座標情報からMP，PIP，DIP 関節の各関節角度を計算する。求められた関節角度データは2次の Butterworth フィルタ (カットオフ周波数：3 Hz) で平滑化

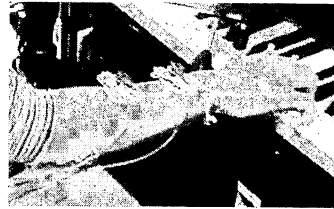


図4 電極貼付位置  
Fig. 4 Electrode locations

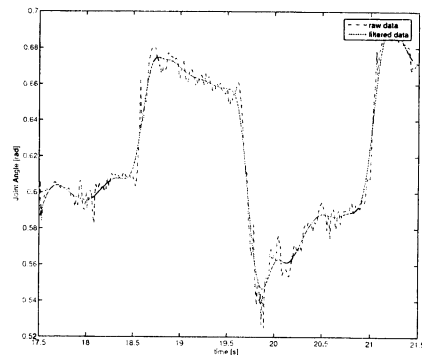


図5 フィルタを掛ける前後の関節角度データ例  
Fig. 5 Sample time course of the joint angle : raw(dash) and filtered(solid)

した。

筋電信号は全波整流した後，25点毎の平均を取ってダウンサンプリングした ( $EMG_{ave}$ )。これによりモーションデータと同じく120 Hzでサンプリングしたことになる。さらに5点毎の移動平均を取った。

$$EMG_{ma}(t) = \frac{1}{5} \sum_{i=-2}^2 EMG_{ave}(t-i) \quad (1)$$

その後，筋肉の張力をよく近似することが示されている Akazawa による2次のローパスフィルタを通した。そのインパルス応答関数  $h(t)$  を次に示す<sup>5)</sup>。

$$h(t) = 6.44 \times (e^{-10.80t} - e^{-16.52t}) \quad (2)$$

鍵盤の変位データもモーションデータと同じく2次の Butterworth フィルタ (カットオフ周波数：10 Hz) で平滑化した。

関節角度と筋電のフィルタを掛ける前と後の信号を比較したものを図5，6に示す。図6で観察される大きな時間遅れは脳から運動指令が発せられて実際に筋肉が力を発揮しだすまでのタイムラグに対応している。

### 3. 結果

計測したモーションデータから計算した関節角度，筋電値，鍵盤の変位の結果を図7～10に示す。各図とも1段目がMP関節の角度，2段目が屈筋 (FDS:浅指屈筋, FDP:深指屈筋)，3段目が伸筋 (ED:指伸筋, EI:示指

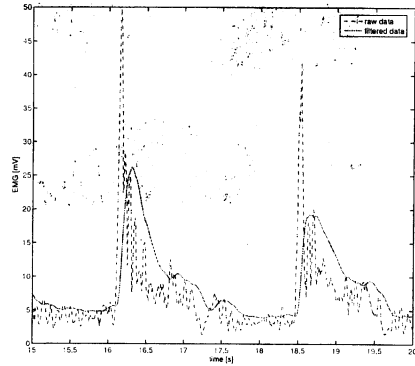


図 6 フィルタを掛ける前後の筋電データ例  
Fig. 6 Sample time course of the EMG : raw(dash) and filtered(solid)

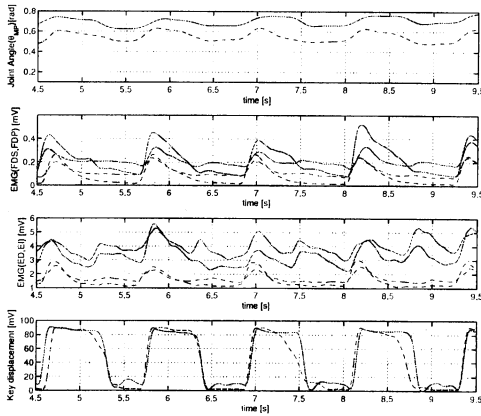


図 7 結果 (Task1)  
Fig. 7 Result(Task1)

伸筋), 4 段目が鍵盤の変位を示す。鍵盤の変位については, グラフ上で値が大きくなった時が, 実際の鍵盤が下がった時に対応する。全て横軸は時間で, 実線がカんだ時, 破線が脱力した時の結果である。

各 Task とも筋電はカんだ時の値が脱力時よりも総じて高い, どちらの場合も鍵盤が下がるタイミング, 即ち 4 段目のグラフが立ち上がるタイミングで屈筋, 伸筋の両方が活性化している。更にカんだ時は脱力した時に比べて, 鍵盤が上がるタイミングでも伸筋が活性化している。一方, 脱力時にはそれがない。

カんだ時と脱力した時の鍵盤の変位のグラフ形状は打鍵時には違いはないが, 離鍵時の様相は明らかに異なる。脱力時の方が鍵盤が緩やかに変位している。カんだ時と脱力した時で打鍵速度, 離鍵速度に相違があるのかを調べるために, 鍵盤の変位の時間差分をとって鍵盤の速度を算出した。例として図 11 に Task1 に関する結果を示す。上段は鍵盤の変位で, 下段は鍵盤の速度である。横軸が時間で, 縦軸が正のピークが各打鍵時にお

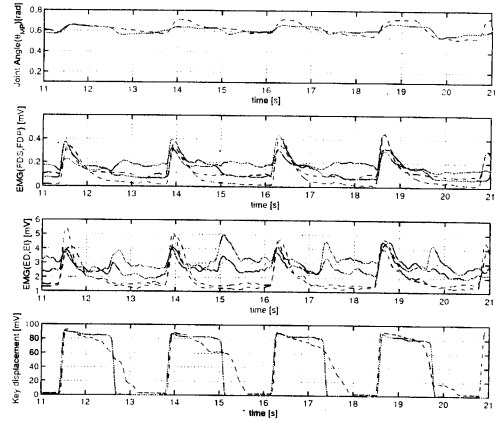


図 8 結果 (Task2)  
Fig. 8 Result(Task2)

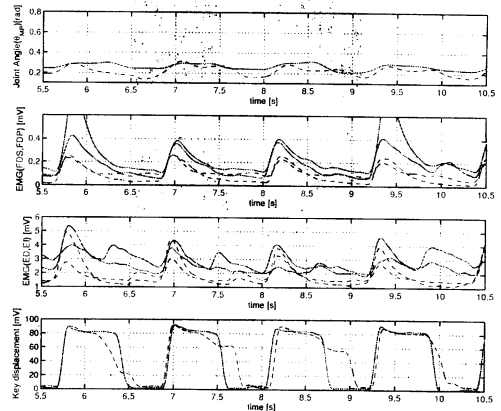


図 9 結果 (Task3)  
Fig. 9 Result(Task3)

る打鍵速度の最大値, 負のピークが各打鍵時の離鍵速度の最大値である。

ここで, 1 回の打鍵における打鍵速度の最大値について, カんだ場合, 脱力した場合毎に一つの Task 全体に渡って平均をとったものを, 平均最大打鍵速度と呼ぶこととする。各 Task でカんだ場合, 脱力した場合それぞれ 10 回の打鍵を行っているので, 平均最大打鍵速度は鍵盤速度のピーク値 10 個の平均値となる。離鍵速度についても同様にして平均最大離鍵速度を定義する。そして, Task1 のカんだ時の平均最大打鍵速度を 1 として, 各 Task の平均最大打鍵速度を正規化したものを計算した。離鍵速度についても同様に, Task1 のカんだ時の平均最大離鍵速度を 1 として正規化平均最大離鍵速度を求めた。これを表 2 に示す。

上で述べたように, カんだ時と脱力した時では離鍵時に伸筋の活性度のパターン, 離鍵速度に特徴が現れている。このことに着目し, 各 Task で離鍵する際の(総)

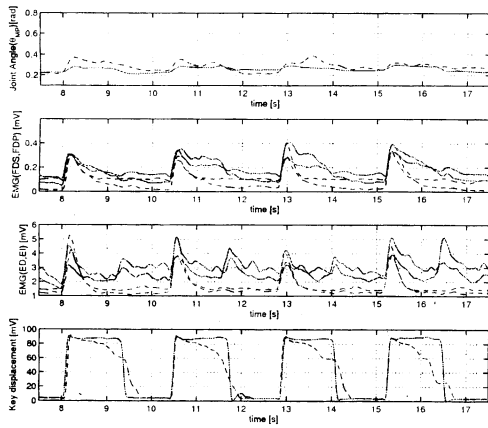


図 10 結果 (Task4)  
Fig. 10 Result(Task4)

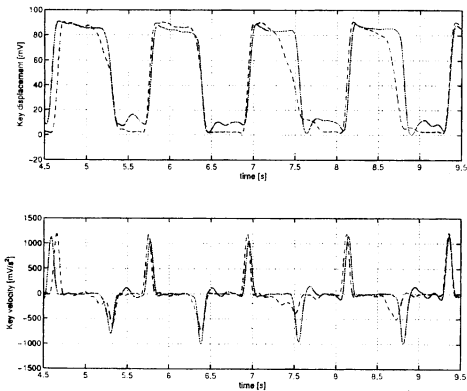


図 11 打鍵速度, 離鍵速度 (Task1)  
Fig. 11 Key-touch and key-release velocities(Task1)

指伸筋の活性度と離鍵速度との関係を見るため, 図 12 に離鍵時の指伸筋のピーク値に対し, Task1 の力んだ時の最大平均最大離鍵速度を 1 として正規化した最大離鍵速度をプロットしたグラフとその相関係数, 及び回帰直線を示す.

#### 4. 考 察

本研究ではピアニストの言う「脱力」とは如何なる状態か, また脱力することで鍵盤の挙動にどのような変化が現れるのかを, 指のモーションや指を動かす筋肉の筋電信号, 鍵盤の変位を計測・解析することにより調査

表 2 正規化平均最大鍵盤速度

Table 2 Normalized maximum velocity of the key

		Task1	Task2	Task3	Task4
正規化最大平均 打鍵速度	力んだ時	1.00	1.03	1.05	1.06
	脱力した時	1.08	1.07	1.06	1.08
正規化最大平均 離鍵速度	力んだ時	1.00	1.11	1.02	1.04
	脱力した時	0.568	0.413	0.602	0.343

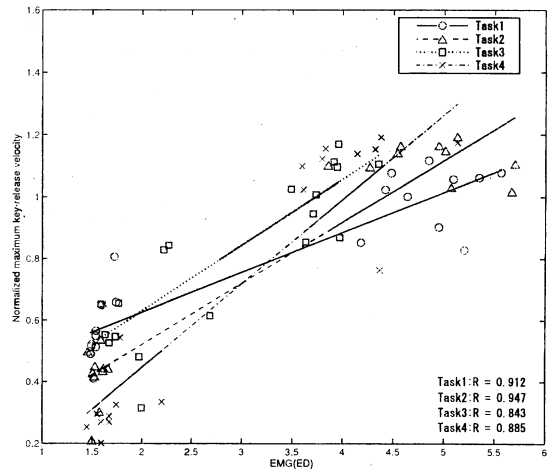


図 12 最大離鍵速度と伸筋の相関

Fig. 12 Correlations between the extensor muscle and the maximum key-release velocity

した. そして指の各関節の使い方, 鍵盤を押さえる長さで鍵盤の挙動に変化が出ることも考えられるため, 指の形, 鍵盤を抑える拍数を変えた Task で実験を行った (表 1 参照).

#### 4.1 脱力と筋電信号との関係

第 3 章で述べたように, 今回実施した全ての Task において, 打鍵の瞬間に屈筋, 伸筋ともに活性化しピークを迎える一方, 鍵盤を押さえている間に関しては, 力んでいる時は脱力時よりも屈筋が高いレベルを保っていることが分かった (図 7~10 参照). ピアノの機構では打鍵時の鍵盤の変位がハンマーに伝わるが, エスケープメント機構によってすぐにハンマーは鍵盤から外れてしまう. 従って, 打鍵後に鍵盤を強い力で抑えても音に影響を及ぼすことはなく<sup>6)</sup>, エネルギー的に見ても非効率的であるため, 脱力時に観測された鍵盤を押さえている間の屈筋の低い活性度は合理的である.

また, 伸筋に関しては脱力した時, 力んだ時ともに打鍵時に屈筋とほぼ同時に活性化し, ピークを迎える. この後力んだ場合が高い活性度を保つのは屈筋と同様であるが, 力んだ時の伸筋は離鍵時にもう一度ピークを迎える. それに対し, 脱力した場合は次の打鍵まで伸筋の活性化がほとんど見られない. つまり, 鍵盤が戻る力に任せて離鍵を行っていると考えられる<sup>7)</sup>. すなわち, 本研究によって, ピアニストやピアノ指導者がしばしば口に「鍵盤の戻る力を感じる」という感覚に対応した量を数値化することができたと考えられる.

#### 4.2 脱力と離鍵速度との関係

今回の実験により, いずれの Task でも脱力した時には力んでいる時より離鍵速度が遅くなっていることが明らかとなった (表 2 参照). 特に離鍵時の伸筋の脱力度

合いと離鍵速度には図 12 に示されたような関係があり、より離鍵時に伸筋を脱力させるほど離鍵速度が遅くなること分かった。すなわち、離鍵速度が速いということは脱力の度合いが低いと考えられる。また、打鍵から離鍵までの間隔が短い(図 1 参照)Task1 と Task3 では被験者が素早い脱力の難しさを訴えていたが、表 2 の値でも Task1 と Task3 の正規化離鍵速度が Task2、Task4 よりも大きくなっている。つまり、脱力度合いが低いと言える。さらに、図 7~10 を見ても Task1 と Task3 は Task2、Task4 に比べると、力んだ時の屈筋の筋活性度がピーク値を含めて脱力時を大きく超えている。以上の 2 点は、素早い脱力が難しかったという被験者の内観と符合する。Task1 と Task3 は Task2、Task4 より鍵盤を抑える拍数が短いため、より素早く脱力する必要があるが、これが困難であったと考えられる。

今回の実験 Task では脱力したほうが離鍵速度が遅くなるという結果であったが、この結果は一般には演奏の目的に依存するものであると考えられる。熟達者は非熟達者よりも速い速度で離鍵することが出来るという報告<sup>8)</sup>もある。また、敢えて脱力をしないことによる演奏表現もあるだろう。脱力することによりピアノ演奏時のどのような動き、表現が可能となるのかも今後考慮していく必要がある。

関連して、脱力することが実際のピアノ演奏においてどのような意味があるのかを考えたとき、その評価として音響を用いることが必要となってくる。習熟度の評価としても音響を用いることは重要であると考えられる。音響の計測、解析は、大島ら<sup>2)</sup>の研究を参考に現在進行中である。

#### 4.3 脱力した奏法

我々は「脱力」の制御もしくは熟達に興味を持って、ピアノ打鍵を対象に研究を進めている。今回の実験では示指のみを用い、同じ音を一定の力で続けて打鍵し打鍵直後に脱力するというものであったため、通常に楽曲を演奏する状態とは異なっている可能性がある。実際に曲を演奏するときの体の動きを観察して、熟達者は非熟達者よりも演奏時に腕、肩、あるいは上半身全体を柔らかく使っているという報告<sup>8)</sup>がある。また、被験者は自然な状態ではないと感じることが報告されている。従って、この問題を解決するために、あるフレーズを被験者に弾いてもらいそのなかの 1 音を抜き出して解析する方法も検討してゆく必要がある。

また、本稿で指のみを用いた打鍵でも脱力の効果があることが確認されたが、これには個人差があることも十分考えられる。ピアノ熟練者に脱力した状態がどのような感覚かを尋ねたところ、ある人は掌から力がスーッと消えていく感じと答えたが、脱力するのは指先から肩まで全てと答える人もいた。これが個人の感覚の違いなのか、脱力している筋肉に違いがあるのかも調査する必

要があり、必要に応じて計測する筋肉を増やしてゆく必要もあろう。

## 5. まとめ

我々はヒトの運動学習に関して特に脱力の作用や制御に興味を持ち、具体的にピアノの打鍵動作を対象として初心者と熟達者の打鍵技術の違いや、運動熟達のキーワードである「脱力」とは如何なるものであるのかを明らかにすることを目的として研究を進めている。

本研究ではまず、従来調べられていなかった脱力と離鍵速度の関係を始め、手指のモーション、手指の表面筋電との関係をも調べるために開発した計測システムを紹介した。そして、このシステムを用いて、脱力と打鍵との関係を調べる予備的な実験とその結果を述べた。その結果、脱力時に比べて非脱力時には屈筋・伸筋ともに活性化が高いこと、非脱力時には離鍵時の伸筋の活性化も特徴的であること、脱力時には離鍵速度が遅くなること分かった。

今後は第 4 章で述べた考察や改善をまず進めてゆく。将来的には脱力制御の支援手法の研究も視野にいれており、学習と筋肉の固さについて論じているフィードバック誤差学習理論<sup>9)</sup>など、神経科学的な観点からも研究を進めたい。

謝辞 本研究を進めるにあたって貴重なアドバイスを頂いた ATR メディア情報科学研究所 感性・知育メディア研究室研究員 大島千佳氏に謹んで感謝致します。

## 参考文献

- 1) D. Parlitz, T. Peschel, and E. Altenmular. Assessment of dynamic finger forces in pianists: Effects of training and expertise. *J Biomechanics*, Vol. 31, pp. 1063-1067, 1998.
- 2) 大島千佳, 西本一志, 鈴木雅美. ピアノ演奏における音楽表情と離鍵速度の関係に関する考察～低離鍵速度個所の特徴に関する予備的検討～. 情報処理学会 研究報告, No. 2004-MUS-056, pp. 15-20, 2004.
- 3) Thomas Floyd. 身体運動の機能解剖. 医道の日本社, 1997.
- 4) 原島広至著. 骨単. NTS, 2004.
- 5) 小池康晴, 川人光男. 神経回路モデルを用いた表面筋電信号からの人腕の軌道生成. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J77-D-II, No. 1, pp. 193-203, 1994.
- 6) 大島千佳. 演奏構築における音楽表情の形成過程に関する研究. 博士論文, 2004.
- 7) C. ソアレ. 演奏と指導のハンドブック. ヤマハミュージックメディア, 1995.
- 8) 下道郁子. ピアノ演奏にみられる非熟達者と熟達者の相違-MIDI データと画像観察による比較. YAMAHA MUSIC FOUNDATION, 1999.
- 9) 川人光男. 脳の計算理論. 産業図書, 1996.