

平成22年4月26日現在

研究種目：若手研究(スタートアップ)

研究期間：2008～2009

課題番号：20800063

研究課題名(和文) ピアノ打鍵動作における熟練運動技能と上肢動力学特性との関係の検討

研究課題名(英文) Expertise-dependent modulation of muscular and non-muscular torques in multi-joint arm movements during piano keystroke.

研究代表者

古屋 晋一 (FURUYA SHINICHI)

関西学院大学・理工学研究科・博士研究員

研究者番号：20509690

研究成果の概要(和文)：本研究は、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特性の違いについて調べた。ピアニスト7名と同数の初心者にスタッカートでのオクターブ打鍵を行ってもらい、その際の上肢の運動を高速カメラおよび表面筋電図によって記録した。逆動力学計算により、肩、肘、手首、指関節に生じる筋力依存性のトルク、運動依存性のトルク、重力依存性のトルクを算出した。その結果、ピアニストは初心者に比べて肘と手首により大きな運動依存性トルクを作り出し、筋トルクを軽減していた。さらに、肘の筋トルクを生成する際、ピアニストは重力に抗する筋である上腕二頭筋を弛緩させていたのに対し、初心者は上腕三頭筋を収縮させていた。したがって、ピアニストは長期的な訓練を通して、筋力以外の力を利用することで打鍵時の筋肉の仕事量を軽減する運動技能を獲得していることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The present study investigated expert-novice differences in the kinetics of upper-limb movement during the keystroke on the piano. Kinematic and electromyographic (EMG) recordings were made while seven experts and seven novices of piano players performed a right hand octave keystroke with staccato articulation. Using the inverse dynamics technique, motion-dependent interaction, gravitational, and muscular torques generated at the shoulder, elbow and wrist joints were computed. The experts produced larger interaction torques at the elbow and wrist joints as compared to the novices, and thereby alleviated muscular torques at these joints. To generate elbow muscular torque, the experts deactivated the biceps muscle, whereas the novices contracted the triceps. These suggest that pianists acquired motor skill of lessening muscular load during a keystroke by utilizing non-muscular torques through long-term piano training.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1340000	402000	1742000
2009年度	830000	249000	1079000
年度			
年度			
年度			
総計	2170000	651000	2821000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：身体教育学

キーワード：神経科学, 生体工学, 制御工学, ロボティクス, モーターコントロール

### 1. 研究開始当初の背景

ピアノ演奏による上肢の故障問題は、古今東西を問わず数多く報告されてきた。我々の調査によると、国内のピアノ演奏者（高校生、音大生、プロ）の6割以上が、ピアノを演奏あるいは練習していて、上肢に痛みや痺れを経験したことがあると回答している (Furuya et al. 2006)。しかし、その故障発症の機序および危険因子は未だ同定されていない。ピアノ演奏による故障発症メカニズムを解明するためには、打鍵動作の運動学および動力学的特性の定量化が不可欠である。

ある関節が動くとき、その回転運動は、筋力だけではなく、重力や慣性力、遠心力といった筋力以外の力の影響も強く受ける。先行研究では、腕到達運動や歩走行動作など既に十分に習熟した運動課題を行う際、脳は慣性力や遠心力といった非筋力によって生じる関節トルク（運動依存性トルク）を効果的に利用したり、適切に相殺したりしていることが報告されている。また、運動制御研究の分野では、「動作の習熟に伴い、脳は運動依存性トルクや重力といった非筋力（筋力以外の力）をより多く運動の生成に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 (Bernstein 1967)。しかし、「熟練に伴い、動作生成に利用される非筋力の大きさが増大し、その結果、動作の効率が向上するか」については、未だ解明されていない。極めて反復性の高い打鍵動作を長年にわたり行なっている熟練ピアニストは、ピアノ初心者に比べて、運動依存性トルクおよび重力トルクをより多く利用することにより、筋肉の仕事量を低減する運動技能を獲得し、それによって打鍵動作のエネルギー効率を高めていると仮説立てた。

### 2. 研究の目的

本研究では、熟練ピアニストとピアノ初心者が打鍵動作を行う際の身体運動計測を行い、逆力学計算を用いて上肢各関節に生じる筋力および非筋力由来のトルクを算出する。これらを両群で比較することにより、ピアノ打鍵動作における熟練運動技能と上肢多関節運動の力学特性との関係を解明し、さらには、ピアノ演奏の故障発症予防につながる運動技能を同定することを目指す。

### 3. 研究の方法

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 (24.3 ± 3.2歳) およびピアノ学習歴が1年未満のピアノ初心者7名 (21.0 ± 4.6歳) を対象に、ピアノ (YAMAHA

DGP-5) の G3, G4 鍵盤に対し、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段階の音量 (p=92.4, mp=95.8, mf=99.2, f=102.6 dB) で実施した。被験者は、身体の矢状面が鍵盤と直交し、さらに G4 鍵盤と右手小指、前腕、および上腕が同一直線上に位置する姿勢で座った。中手指節関節 (手)、手首関節、肘関節、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・カメラセット (浜松ホトニクス社製: C5949) により各チャンネル 150Hz 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: C5949) 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 (Kinoshita et al. 2007)。さらに、これらの関節運動の生成に関連する筋群の筋活動を表面筋電図 (原田電子工業社製 EMG-025) によって計測した。



図1. 実験時のセットアップ

各関節中心の変位情報から、指、手首、肘、肩関節の角度変位、およびそれらの角速度、角加速度を算出した。本研究では、関節角度変位の正方向を、肩と肘では屈曲方向、手首関節では伸展方向と定義した (図1を用いた逆力学計算により、これら身体運動情報から、手首、肘、肩の3つの関節における、重力によるトルク (GRA トルク)、運動依存性のトルク (INT トルク)、筋活動によるトルク (MUS トルク)、鍵盤反力によるトルク (反力トルク: KEY トルク) およびそれらの総和 (総トルク: NET トルク) を算出した。これらト

ルクの計算の詳細については, Bastian et al. (1996)や Furuya and Kinoshita (2008)を参照のこと. なお, これら4つのトルクの間には次の関係が成り立つ.

$$NET = MUS + INT + GRA + KEY$$

MUS トルクは, GRA トルクに抗する静的な成分と, 運動の生成に寄与する動的な成分を持つため, 本研究では動的な成分 ( $MUS - |GRA|$ ) を, 「MUS+」と表記することとした.

打鍵中に発揮した INT トルクと MUS+トルクの総量を調べるため, これらのトルクを, 手の下降動作の開始 (T1) から鍵盤が底に着く瞬間まで (T2) の区間で積分した ( $INTIm$ ,  $MUSIm$ ).

個々のトルクに対するグループ (被験者間要因: ピアニスト, 初心者), 音量 (被験者内要因: p, mp, mf, f) の主効果および交互作用効果は, 繰り返しのある 2 元配置の分散分析法 (2 × 4 混合要因計画) によって検定した ( $\alpha = .05$ ).

#### 4. 研究成果

##### 【結果】

図 2 は, 1 名のピアニストおよびピアノ初心者が, フォルテの音量で打鍵した際の, 肩, 肘, 手首関節における NET, INT, MUS+トルク, および手と鍵盤の鉛直方向運動変位の時系列データを表す.

肩では, ピアニストは, 指先と鍵盤が接触するおよそ 100ms 前から鍵盤が底面に衝突するまでの間, 屈曲方向の MUS+トルクが増大し, その結果, 屈曲方向の NET トルクが作り出されていた (図 2 “shoulder” 左). 一方で, 初心者は, 打鍵動作を行う間, 常に伸展方向の MUS+トルクを発揮していた. しかし, 屈曲方向の INT トルクが生じていたため, MUS+トルクと INT トルクが相殺しあった結果, 初心者の肩関節の NET トルクに顕著な増大は認められなかった (図 2 “shoulder” 右).

肘では, ピアニストと初心者の双方で, 手を降下させている間は伸展方向の NET トルクが作り出されており, 指先が鍵盤を押さえている間は屈曲方向の NET トルクが作り出されていた. ピアニストでは, 指先が鍵盤を押さえている間, 伸展方向の INT トルクが生じていたが, 伸展方向の MUS+トルクはほとんど認められなかった (図 2 “elbow” 左). 一方で, 初心者ではこの間, 伸展方向の INT トルクの生成はほとんど認められず, 伸展方向に顕著

な MUS+トルクの増大が認められた (図 2 “elbow” 右).

手首では, 指先が鍵盤を押さえている間, ピアニストと初心者の双方で, 屈曲方向の INT トルクと MUS+トルクの発揮が認められた (図 2 “wrist”). しかし, ピアニストの方が初心者に比べてより大きな INT トルクを作り出しており, 一方で MUS+トルクの発揮量はピアニストの方が少なかった.

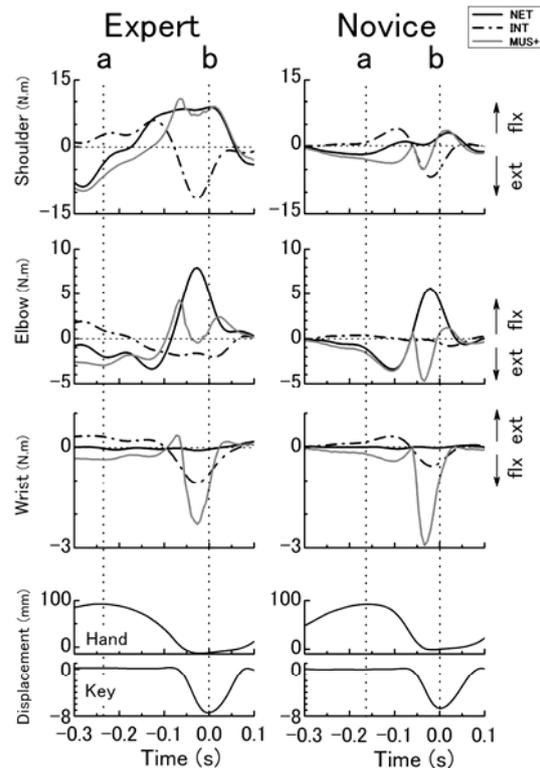


図 2. 関節トルクの時系列変化

図 3 の A, C, E は, それぞれ肩, 肘, 手首関節における INT トルクの積分値 ( $INTIm$ ) を被験者全員で平均した値を, 音量毎に示している. 分散分析を行った結果, 肘の伸展方向 ( $F(1, 12) = 7.04, p = .021$ ) と手首の屈曲方向 ( $F(1, 12) = 33.75, p < .001$ ) 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も, 肘の伸展方向 ( $F(3, 36) = 4.20, p = .012$ ) と手首の屈曲方向 ( $F(3, 36) = 7.28, p < .001$ ) の  $INTIm$  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.

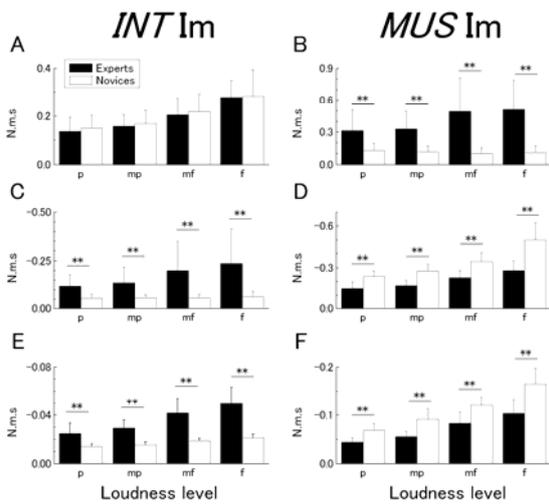


図3. 肩, 肘, 手首関節における筋トルクおよび運動依存性トルクの積分値

図3のB, D, Fは, それぞれ肩, 肘, 手首関節における MUS+トルクの積分値 (MUSIm) を被験者全員で平均した値を, 音量毎に示している. 分散分析を行った結果, 肘の伸展方向 ( $F(1, 12) = 24.67, p < .001$ ) と手首の屈曲方向 ( $F(1, 12) = 27.73, p < .001$ ) 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 ( $F(1, 12) = 12.97, p = .004$ ). グループと音量の交互作用は, 肩の屈曲方向 ( $F(3, 36) = 4.56, p = .008$ ) と肘の伸展方向 ( $F(3, 36) = 4.77, p = .007$ ) 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.

MUSIm は打鍵動作中の筋トルクによる仕事量の総和と力学的に等価であるため, パフォーマンスの向上と障害予防の両方の観点から重要な情報である. したがって, 各関節において, まず, 各音量における MUSIm のピアニストと初心者の比率をそれぞれ算出し, 次に, それらの値の音量間の平均値を求めた. その結果, 肩関節では, ピアニストの MUSIm は初心者の 377.4%, 肘関節では 61.9%, 手首関節では 64.3% であった.

図4は, ピアニストとピアノ初心者の打鍵時の肘関節の角速度, 筋トルク, 屈筋 (上腕二頭筋), 伸筋 (上腕三頭筋) および手の鉛直方向の位置の時系列変化を示す. 手を振り下ろす際, 初心者は肘の伸筋 (上腕三頭筋) を収縮させることによって, 伸展方向の筋トルクを作り出していたが, ピアニストは, 重力に抗して収縮している屈筋 (上腕二頭筋) を弛緩することによって, 肘の伸展トルクを生成していた. これは, 肘の伸展動作を, 初心

者は筋力によって, ピアニストは重力を利用することによって行っていることを示唆している. また, より大きな音量の音を生成する際, 初心者は伸筋の活動量を増大させることで, より大きな筋トルクを生成していたのに対し, ピアニストは屈筋の弛緩量を増大させることで, より多くの重力を利用していた.

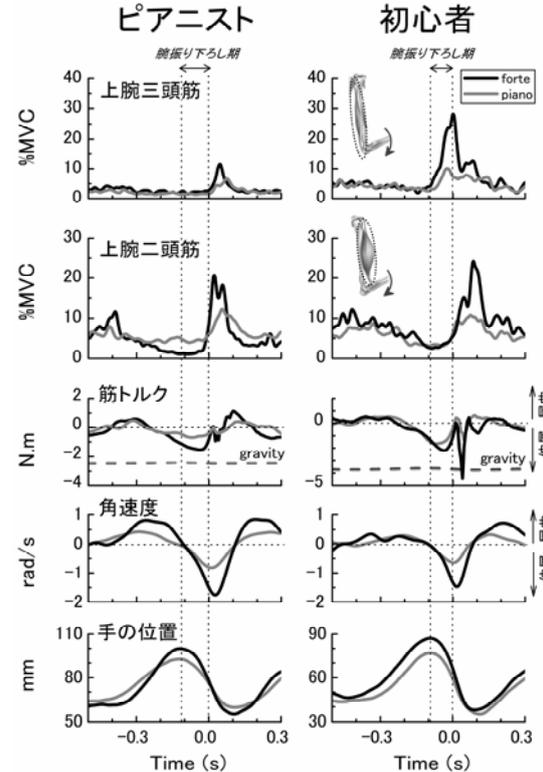


図4. 肘関節における筋活動, 筋トルク, 関節角度, および手の鉛直位置の時系列変化

【考察】  
本研究は, 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特性の違いについて調べた. その結果, 全ての音量域において, ピアニストは初心者に比べて, より多くの運動依存性トルクを肘と手首に作り出していた. 我々の先行研究の結果, ピアニストは初心者に比べて, 打鍵時の肩関節伸展運動の減速度が有意に大きな値を示した (Furuya and Kinoshita, 2007). また, 肩の伸展動作の減速に先行して, 肩の屈筋 (三角筋前部) の筋活動の増大が, ピアニストにおいてのみ認められた (Furuya and Kinoshita, 2008). 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) の運動を三角筋前部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。さらに、音量の増大に伴って、ピアニストは肘と手首の運動依存性トルク量を増大させていたのに対し、初心者の運動依存性トルク量には顕著な変化が認められなかった。これらの結果は、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。

さらに、筋活動と筋トルクとの関連を調べた結果、肘の筋トルクを生成するために、ピアニストは重力を利用しており、ピアノ初心者は筋力を利用していることが明らかとなった。したがって、ピアニストは運動依存性トルクのみならず、重力も効果的に利用することで、筋肉の仕事を軽減し、打鍵動作のエネルギー効率を高めていることが示唆された。このような運動技能は、ピアノ打鍵動作に限らず、熟練動作の運動制御方略を反映していると考えられる。

リストやラフマニノフの楽曲やショパンのエチュードなど、高度な演奏技巧が求められるピアノ曲を演奏あるいは練習していると、手や前腕の筋肉が疲労してしまうことは少なくない。演奏時の筋疲労を回避する一つの方法は、打鍵時の筋肉の仕事を軽減させることである。それを実現する運動技術の一つとして、本研究では、ピアニストは運動依存性トルクを効果的に利用することで、上腕部および前腕部の筋肉の仕事を初心者の約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。肘と手首に生じる運動依存性トルクは、主に腕を振り下ろしている際に肩の屈曲筋（三角筋前部）が適切なタイミングで収縮することによって作り出されているため、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となると期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

【査読あり】

[1] Furuya S, Osu R, Kinoshita H (2009) Effective utilization of gravity during arm downswing in keystroke by expert pianists. *Neuroscience*, Vol.164, pp. 822-831

[2] Furuya S, Kinoshita H (2008) Expertise-dependent modulation of muscular and non-muscular torques in multi-joint arm movements during piano keystroke. *Neuroscience*, Vol.156, pp. 390-402

【査読なし】

[3] 古屋晋一 (2009) ピアノ演奏の身体運動制御—音楽演奏科学の提案. システム/制御/情報, Vol.53, No.10, pp. 419-425

[学会発表] (計6件)

[1] Furuya S, Osu R, Katayose H, Kinoshita H. Expertise-dependent exploitation of gravity during arm downswing in piano keystroke. 19th annual Neural Control of Movement (NCM) meeting, Hawaii, USA, April 29, 2009

[2] 古屋晋一, 片寄晴弘, 木下博. 熟練ピアニストの「しなやかな打鍵動作」の力学メカニズム. 人工知能学会第二種研究会 第二回身体知研究会, 大阪大学, 2008年11月17日

[3] 古屋晋一, 片寄晴弘, 木下博. ピアノ打鍵動作の熟練技能:「重量奏法」の科学的研究. 人工知能学会第二種研究会 第一回身体知研究会, 東京, キャンパスイノベーションセンター, 2008年9月16日

[4] Shinichi Furuya, Tomoko Aoki, Hidehiro Nakahara, Hiroshi Kinoshita. Kinematics and muscular activity of upper extremity movements in piano keystroke by professional pianists. The 10th International Conference on Music Perception and Cognition (ICMPC 10), Hokkaido, Japan, Hokkaido University, Aug 26, 2008

[5] Shinichi Furuya, Hiroshi Kinoshita. Expertise-dependent neural planning of multi-joint arm movements during piano keystroke. *Neurosciences and music III*, Montreal, Canada, McGill University, June 27, 2008

[6] 古屋晋一, 片寄晴弘, 木下博. 熟練ピアニストの打鍵動作における重力の利用. 第2回Motor Control研究会, 岡崎, 生理学研究所, 2008年5月30日

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

古屋 晋一 (FURUYA SHINICHI)

関西学院大学・理工学研究科・博士研究員  
研究者番号: 20509690