

Title	DYNAMIC MOTOR FUNCTION OF HUMAN FINGERS EVALUATED BY MEANS OF TAPPING TASKS
Author(s)	青木, 朋子
Citation	大阪大学, 2004, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/44818">https://hdl.handle.net/11094/44818</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	青木朋子
博士の専攻分野の名称	博士(人間科学)
学位記番号	第18325号
学位授与年月日	平成16年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 人間科学研究科人間科学専攻
学位論文名	DYNAMIC MOTOR FUNCTION OF HUMAN FINGERS EVALUATED BY MEANS OF TAPPING TASKS (タッピング課題からみたヒトの指の動的運動機能)
論文審査委員	(主査) 教授 木下 博 (副査) 教授 生田 香明 教授 熊倉 博雄 助教授 橋詰 謙

### 論文内容の要旨

#### 目的

我々の日常生活にとって手指の巧緻性は不可欠である。これほどまでに発達した手指とそれらを制御する脳機構をもつ動物はヒトに限られ、これらが現在の文化的繁栄に強く影響を及ぼしたと言っても過言ではない。手指の運動制御機構に関する研究は医学や生体工学、神経生理学における中心的な課題の一つである。個々の指の運動機能を静的な側面から調べた報告は数多く見られるが、動的な側面についての報告は極めて少ない。そこで本論文では、タッピング課題を用いてヒトの指の動的運動機能とそれに関わる要因を調べることを目的とした。本論文は4つの実験的研究(研究I~IV)から構成されており、それらによって、①個々の指の動的運動機能評価の手段としてのタッピング課題の有用性、②1指と手首によるタッピング課題の違い、③指の動的運動機能と指間の独立性、④他の指と組み合わせて運動を行った場合の動的運動機能、⑤指の動的運動機能に対する後天的訓練の影響、⑥指の動的運動機能における性差、⑦異なる指によるタッピング課題時の脳活動、⑧1指と2指のタッピング課題時の脳活動を明らかにした。

#### 方法と結果

研究Iでは、11名の右利き一般成人男性を対象に、右手の①示指あるいは中指の1指による最速タッピング課題、②示指と中指の交互操作による最速タッピング課題、③手首動作による最速タッピング課題を行わせた。被験者には7秒間にわたって、できるだけ速くしかも等間隔にタッピングを行うよう指示し、手首以外の課題ではタッピングを行っている以外の指と各指のフォースセンサーとの接触状態を保つようにさせた。タッピングを行っている指が発揮する垂直方向の力と接触時間の測定データに基づいて、タッピングの速さを表すタップ間隔(指がセンサーと接触してから次に接触するまでの時間)、ピーク作用力をはじめとする6つの時間的・力学的指標とそれらの個体内変動を求めた。その結果、同じ指について比較した場合には、1指の課題は2指の場合に比べてタップ間隔が30%程度短く、作用力も40%程度小さかった。また、これらの課題間では時間的指標に有意な相関が認められなかった。示指と中指の比較では、1指による課題時には示指の方が有意にタップ間隔が短かった。2指の課題においては、それぞれのタップ間隔には有意差が認められなかったが、2指と1指のタップ間隔の比率(2指/1指)を算出すると、示指の方が中指に比べて値が大きかった。1指と手首による課題については、時間的・力学的指標の両方において課

題間に高い相関関係が認められた。しかしながら、手首による課題は1指の場合に比べて15%程度タップ間隔が短く、作用力も2倍程度大きかった。

研究Ⅱでは、12名の右利き一般成人男性を対象に、研究Ⅰと同様の1指による最速タッピング課題を右手の示指、中指、環指、小指の各指で、2指による課題をそれらすべての組み合わせで行わせた。各指の発揮力の測定には研究Ⅰと同様の装置を使用した。また、タッピングを行っている指の垂直方向の運動速度と振幅をポジションセンサーによって測定した。課題終了後、被験者には1指、2指それぞれの課題内の各条件について主観的な困難度を順位付けさせた。その結果、1指の課題については、示指のタッピングが最も速く、中指、小指の順に続き、環指が最も遅くなった。作用力についても示指が最も強く、同様の順に減少した。また、タッピングを行っている以外の指においては、タッピング運動に同期して変化する力が観察され、その力の変化量は環指のタッピング時に最も大きく、中指、小指、示指の順に小さくなった。2指による課題では、タッピングの速さが組み合わせによって異なり、示指・中指の組み合わせで最も速く、環指・小指の組み合わせで最も遅くなった。1指・2指のどちらの課題においても、課題の主観的な困難度とタッピングの速さの順序の間には高い相関が認められた。さらに、9名については、実験者が被験者の指を動かす1指での受動的タッピング課題も実施した。その結果、受動的なタッピング課題においても、能動的な課題と同様に、タッピングを行っている以外の指によって発揮される力の変化量が、環指を動かした場合に最も大きくなったが、その値は能動的な場合の3分の1程度であった。

研究Ⅲでは、10名の右利きピアノ熟練者とピアノ等の楽器の訓練経験のない10名の右利き一般成人（両群とも男女各5名）を対象に、研究Ⅱと同様の1指による最速タッピング課題と、示指・中指、中指・環指、環指・小指の2指の組み合わせによる最速タッピング課題を行わせた。各指のタッピング時の時間と作用力の測定には研究Ⅰ、Ⅱと同様の手法を用いた。課題終了後、被験者に課題の困難度を評価させた。また、各指と母指との間で発揮される最大摘み力と、最大握力の測定も行った。その結果、ピアノ熟練者は、1指での中指、環指、小指と、2指でのすべての組み合わせにおいて、一般成人に比べて速いタッピングが可能であった。そして、特に環指と小指の組み合わせにおいて群間の差が最大となった。また、ピアノ熟練者は、示指、中指の1指によるタッピング時の作用力が一般成人に比べて大きかった。一方、各指の最大摘み力と最大握力には群間に有意差は認められなかった。男女での比較では、タッピングの時間的・力学的指標には有意差は見られなかったが、摘み力と握力については男性の方が女性に比べて強かった。

研究Ⅳでは、ポジトロン（陽電子）断層撮影法を用いて、10名の右利き一般成人男性を対象に、右手の①示指によるタッピング、②環指によるタッピング、③示指・中指の交互操作によるタッピング、④環指・小指によるタッピング、⑤安静のそれぞれの課題時の脳活動を調べた。すべての課題時に2 Hzの電子音を提示し、安静以外の課題ではその音に合わせてタッピングを行うよう被験者に教示した。各被験者につき各課題3スキャンずつ計15スキャンの測定を実施した。その結果、示指によるタッピング課題時に活動が認められたのは左側の一次運動・感覚野のみであったが、環指の場合には、左側の一次運動野、一次・二次感覚野、補足運動野、腹側運動前野、側頭皮質（ブロードマンの22野と島）、そして右側の小脳に活動が認められた。また、示指・中指によるタッピング課題では、左側の一次運動・感覚野、背側運動前野、側頭皮質（ブロードマンの37野と41野）、右側の小脳に活動が見られたが、環指・小指の組み合わせでは、両側の一次運動野、下頭頂皮質（ブロードマンの40野）、および小脳、左半球の一次・二次感覚野、補足運動野、腹側・背側運動前野、側頭皮質（島）に活動が認められた。次に、1指による課題（示指+環指）と2指による課題（示指・中指+環指・小指）の比較では、2指による課題時には、1指の場合に比べて、両側の背側運動前野、左側の一次運動・感覚野、右側の小脳に強い賦活が認められた。

## 論議

### タッピング方法の比較

1指または手首によるタッピング課題は、先行研究や臨床場面において遠位部の運動機能や中枢神経系の機能評価のための簡便な方法として古くから活用されてきた。一方、複数の指を用いたタッピング運動に関する情報は極めて少なく、その運動特性や汎用性、中枢神経系の関わりについてはほとんど明らかにされていない。そこで研究ⅠとⅣにおいて、1指と2指の交互操作によるタッピング運動の特性と脳機構のネットワークの違いについて検討した。その結果、これらのタッピング運動の特性を表す時間的・力学的指標に差異が認められること、双方のデータ間には相

関が認められないこと、運動時の脳の賦活部位が明らかに異なることが示された。これらの結果から、2指によるタッピング運動は1指での場合とは異なる運動特性を有し、中枢神経系の関わりも異なることが示唆された。したがって、これらの課題を併用することによって、指の動的運動機能をより広範に評価することが可能であると考えられる。

1指と手首によるタッピング運動の違いについてもこれまでに十分な検討が成されていない。研究Iの結果は、これらの運動が時間的、力量的に異なることを示しており、そのためこれらを使用する際にはその違いを認識し、区別することが必要である。

#### 個々の指の動的運動機能

指の運動機能については、従来から等尺性発揮力を測定することによってその静的な側面を評価する試みが成されてきたが、日常での運動は静的な側面と動的な側面の両方によって構成されていることから、動的な運動機能に関する情報も重要である。研究Iの結果は、1指および2指のタッピング課題によって指の動的運動機能の評価が可能であることを示唆していた。それに基づき、研究IIでは、4指の動的運動機能差とその差をもたらしている諸要因について検討を加えた。その結果、動的な運動機能は示指が最も高く、中指、小指、環指の順に低くなること、そして2指で運動を行った場合にはこれらは同時に使用される指に大きく依存して変化することが明らかとなった。また、1指で運動を行った場合の動的運動機能の結果は静的機能とは必ずしも一致しなかった。動的運動機能に指間差をもたらす要因としては、まず中枢神経系の適応的变化が挙げられる。日常生活において示指や中指は、質的にも量的にも訓練の機会に恵まれている。訓練に依存して脳機能が変化することはよく知られ、それが指の動的運動機能差に影響を及ぼした可能性は高い。研究IVにおいてタッピング運動に使用する指によって皮質および皮質下の活動領域に違いが認められたことはこの可能性を支持するものである。第二の要因としては、指間での生来の解剖学的・神経生理学的結合によって独立した運動が制限されていることが挙げられる。研究IIにおいては、タッピング運動時に隣接する指で運動に同期した力の変化が観察され、しかもその変化量は環指が最も大きいことが明らかとなった。これらの結果は、個々の指によって完全に独立した運動を行うことが不可能であることを示唆している。そして、それが動的運動機能に影響を及ぼした可能性が考えられる。第三の要因としては、筋の構造や特性の影響が挙げられる。筋線維の長さは筋の収縮速度と、そして筋の横断面積は等尺性の発揮力と比例することが知られる。先行研究においては、示指と中指の腱に付着する筋は環指と小指に比べて筋線維が長く、横断面積も大きいことが報告されている。運動単位の発火パターンや動員、筋組成などの筋の特性による影響も十分に考えられるが、個々の指の運動機能とこれらの関係については全く解明されていない。

#### 指の動的運動機能における後天的訓練の影響

ピアノ熟練者と一般成人の比較から、動的運動機能の指間差に対する訓練の影響について検討を加えた。研究IIIの結果から、示指を除くすべての指で訓練の影響が認められること、2指による運動の場合にはすべての組み合わせで訓練の影響が認められるが、特にそれは環指と小指の組み合わせで最大となることが明らかとなった。一方、指の静的運動機能については、訓練の影響が認められなかった。これらの結果は、一般成人における動的運動機能の指間差が日常の訓練による影響を強く受けていることを示している。また、主観的にも困難度の高い複雑な課題において訓練の効果がより顕著であったことは、訓練の影響が指運動を制御する脳機能の変化に強く依存している可能性を示唆している。研究IVにおいて異なる指でタッピングを行った際の脳の賦活領域に明らかな差異が認められたことや、同じ指運動を行った場合にもピアノ熟練者と一般成人とでは脳の活動領域に明らかな差異がみられるという先行研究の結果もこの仮説を支持するものである。

#### 指の動的運動機能における性差

指の動的運動機能の性差についてはこれまでに多くの研究報告があるが、その結果は必ずしも一致していない。研究IIIでは、握力や握力には性差が顕著であったが、タッピング運動に関連する評価指標には性差が認められなかった。これらの結果から、指の動的運動機能に性差は影響を及ぼさないことが明らかとなった。

#### タッピング運動を司る脳機構

異なる指や1指と2指によるタッピング運動を制御している脳機構の違いに関する情報は極めて少ない。研究IVでは、タッピング運動に使用する指によって脳の活動領域が異なること、そして1指と2指による運動時の脳の賦活部位に違いが見られることが明らかとなった。示指と中指による運動に比べて環指と小指での場合の方が一次運動野、

補足運動野、運動前野、頭頂および側頭皮質、小脳などで活動が強かったことには、運動実行に関わる筋活動量の差異、習熟度と運動プログラムの完成度の違い、感覚入力依存度の違いとその処理機構の違いなどの関与が考えられる。また、2指の運動時には1指の場合に比べて、両側の運動前野や左側の一次運動・感覚野、右側の小脳に強い賦活が認められた。このことは2指での運動の時間的・空間的な複雑さを反映しており、その実行のためにはより高次の運動・感覚処理機構の関与が必要であったことを示唆している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、運動力学的および脳科学的観点から、個々の指の運動機能とそれを制御する脳機構の解明を目指して、4つの実験研究を実施し、それらの結果をすべて英文でまとめた力作である。研究Ⅰでは、全研究を通して使用した1指と2指交互操作でのタッピング運動の力学的特性を明確にし、運動機能評価のための指標の作成に成功している。研究Ⅱでは個々の指の動的運動機能差、指間の独立性および運動相性を明らかにし、それらの解剖学的、神経生理学的背景について詳細な考察を展開している。研究Ⅲでは、ピアノの長期的訓練によって指の筋力の向上は認められないが、動的運動機能は向上し、その指間差がほぼ消失することや、複雑な運動ほど長期的訓練の影響を強く受けることを明らかにしている。研究Ⅳでは、ポジトロン断層撮影法（PET）を用いて、使用される指および指の数で脳の活動領域が異なることを明らかにし、指の運動機能差が中枢神経系の機能差を強く反映していることについて考察している。これら4つの研究はすべて欧文国際誌（*Experimental Brain Research*に2編、*Ergonomics*と*Motor Control*に各1編）にて掲載済み、および掲載予定のものであり、研究の独創性およびその実験方法の斬新性、考察の高水準性は証明済みである。本論文の研究成果は、人類が長年に亘って獲得してきた手と指の機能やその制御系を知る上で重要な基礎的資料である。

以上の理由から本論文は博士（人間科学）の学位授与に十分に値するものと判定した。