

複雑な指運動は本当に脳の活動を促すのか？

大阪大学大学院	青木 朋子
(共同研究者) 河崎医療技術専門学校	津田 勇人
大阪大学大学院	奥 直彦
同	畑澤 順
同	木下 博

Can Complex Finger Movements Facilitate Cortical and Subcortical Activities?

by

Tomoko Aoki

Graduate school of Human Science, Osaka University

Hayato Tsuda

Kawasaki College of medical technology

Naohiko Oku, Jun Hatasawa, Hiroshi Kinoshita

Graduate School of Medicine, Osaka University

ABSTRACT

Using positron emission tomography (PET), the brain regions recruited for the tapping movement by different fingers and different tapping modes were investigated in 10 healthy adult males (20-30yrs). The experimental tasks consisted of auditory-paced (2 Hz) tapping movements by one of the fingers (single-finger tapping) and two of the fingers used alternately (double-finger tapping). Data were obtained from the index and ring fingers for the single-finger tapping conditions, the index-middle finger and ring-little finger pairs for the double-finger tapping conditions, and a resting condition as a control. Each subject also provided a subjective ranking of task difficulty among the tapping tasks.

Brain areas activated with the ring finger or ring-little finger-combination were greater and more distributed than the index finger or index-middle finger-combination. Activation in most of these areas was closely related to perceived task difficulty. These findings thus suggested that the movement of different fingers was supported by a set of different central neural network. A comparison of the two tapping modes revealed that in addition to the brain areas activated during single-finger tapping, the bilateral dorsal premotor and left primary motor/sensory areas, and the right anterior cerebellum were also activated during double-finger tapping, confirming the difference in their neural network. The additionally activated areas can be related to motor sequence operation of the two fingers. The results overall suggest that active use of the ring and little fingers is important for the maintenance of higher cognitive function.

要 旨

ポジトロン断層撮像法 (PET) を用いて, 10名の被験者 (20~30歳) において, 異なる指および異なるタッピング方法による運動時に増大する局所脳血流の観点から, 複雑な運動でより多くの脳領域が動員されるのかどうかについて調べた。実験では, 複雑さの異なる運動課題として, 示指, 環指の1指による運動と, 示指・中指, 環指・小指の2指による交互操作運動を用いた。被験者には, 2 Hzの音刺激に合わせて運動を行うよう指示した。コントロール条件として安静時のデータも収集した。実験収集後に運動の困難さの順位についても報告させた。

示指および示指・中指の条件に比べて, 環指および環指・小指の条件では, より広範な脳領域での高い血流が認められた。また, これらの領域の血流ピーク値は被験者による主観的な困難度と密接に関連していた。1指での運動に比べて2指の場合には, 両側の背側運動前野, 左側の一次運動・感覚野, 右側の小脳により強い賦活が認められた。これらの結果から, 複雑な指運動は高次の運動制御・感覚処理に関わる前頭葉, 頭頂葉, 小脳の活動を促進することが明らかとなった。この

ような結果は, 環指や小指の使用が脳機能維持にとっては極めて重要であることを示唆するものと考えられる。

緒 言

指先の運動を日常生活で頻繁に実施していると呆けないということがよく言われる。また, 高齢者に手指の運動を積極的に行わせると痴呆が改善されるという話もある¹⁾。一方, コンピュータの複数のキーを操作するような複雑な運動中に, 脳のどの部位が活動し, それが一つのキーの打鍵運動のような単純な場合とどの程度異なるのかということについての情報は極めて少ない。

われわれは, これまで1指による最速タッピング課題 (single-finger tapping) および2指の交互操作による最速タッピング課題 (double-finger tapping) を用いた運動学的実験から, 個々の指の運動機能が指によって顕著に異なることを報告してきた^{1, 4, 3)}。運動機能は, 1指を動かした場合には示指が最も高く, 環指で最も低いこと, そして, 2指での運動では組み合わせる指に依存して大きく変化することが明らかとなった。2指の場合には, 示指と中指との組み合わせで最も機能が高く, 環指と小指の組み合わせで最も低かった。さ

らに、これらの運動の困難さに関する主観的尺度評価の結果は、運動機能と相関が高いことも明らかとなった。また、高齢者に同様の課題を行わせた場合には、加齢に伴って2指での操作が極端に遅くなることが明らかとなった。

個々の指の運動において運動能力や主観的な困難度に違いが生じる背景には、筋の機能的特性、運動単位の構造、そして隣接指の独立した運動を制限するバイオメカニクス的・解剖学的構造などの身体的要因が挙げられる^{12, 16, 17)}。そして、それらに加えて、中枢神経系での脳機能的要因も重要である⁶⁾。

異なる指の運動に関与する脳活動を調べた先行研究としてはErdler et al.⁸⁾が機能的核磁気共鳴機能画像法 (fMRI) を用いて、示指あるいは小指の1指による運動時の一次運動野と補足運動野の活動を調べたものがある。そして、一次運動野の活動には指間に違いがなかったが、補足運動野については示指に比べて小指の運動時には活動領域が大きくなることを報告している。また、Catalan et al.⁵⁾やHarrington et al.¹⁰⁾は、複雑な順序で母指と他の指の先端部とを順に接触させる運動中 (例えば、示、小、中、環、環、小、中、示指のような順序) の脳賦活を単純な順序での場合 (例えば、示、中、環、小、示、中、環、小指の順) と比較している。そして、単純な順序の場合に比べて、複雑な順序での運動中には両半球の頭頂葉、運動前野、一次感覚・運動野、後頭葉や小脳などのより広い領域においても高い活動が生じることを報告している。このように運動の「順序の複雑さ」が脳活動を促進することはこれまでも報告されているが、使用される指の差がもたらす運動の困難さと脳活動との関係については十分には解明されていない。

われわれが行ったピアニストによるタッピング運動に関する研究²⁾では、ピアニストと一般成人の間で、個々の指の等尺性最大発揮力には差が

認められなかったが、1指での環指や小指のタッピング運動や2指での課題で特にピアニストの方がより素早い運動が可能であることが明らかとなった。筋力的な差異が認められないにも関わらず、主観的に困難度が高い指やその組み合わせでピアニストが素早い運動を行うことができるという結果は、指の特異的な運動訓練によって、末梢の機能よりもむしろ中枢神経系機能がより変化するという可能性を示唆している。

そこで本研究では、ポジトロン (陽電子) 断層撮像法 (PET) を用いて、示指、環指による single-finger tapping と、示指と中指、環指と小指の各組み合わせによる double-finger tapping に関与する全脳各部位の血流を測定し、そこから、使用される指で脳の活動が異なるのか、また主観的により困難だと感じている指運動で実際に簡単な指運動よりもより多くの脳領域での脳血流の増加が認められるのか、について検討することを目的とした。

1. 方法

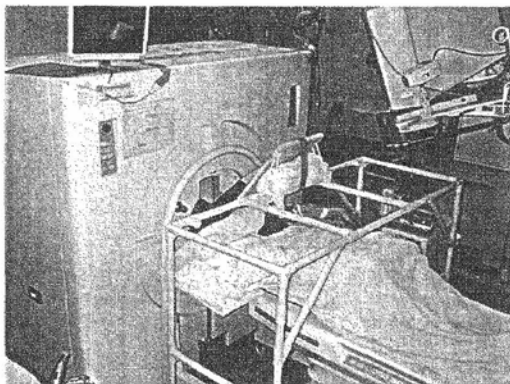
1.1 被験者

被験者は、本研究への参加に同意の得られた10名の右利き健常成人男性 (20~30歳) とした。

1.2 PETによる局所脳血流量の測定

本研究では、(株) 島津製作所製 SET-2400W3-D Headtome IV PET 装置一式を使用した (図1A)。本装置の空間分解能は $4 \times 4 \times 5$ mm であった。データの収集は3D様式とし、スライス間隔は2 mm で計63スライスの撮像を取り込んだ。これによって小脳の約7割のイメージと大脳全域に関するイメージデータが収集された。各立方体 (voxel) の大きさは $2 \times 2 \times 3.1$ mm であった。本研究では、電動式注入器と22ゲージのプラスチック注射針を用いて、左前腕部静脈より ^{15}O で標識された水を含んだ生理食塩水を各スキャン18

A



B



図1 An experimental scene. (A) PET system and subject's body posture. (B) A close-up view of the right hand.

ml 注入した。注入から約25秒後にトレーサーが脳組織に入ったことをモニターで確認し、そこから90秒間のデータ収集を実施した。PETデータは専用標準解析コンピュータソフトSPM (statistical parametric mapping program) 99とMATLABによって分析および統計的処理 (corrected $p < 0.05$) を行った。

1. 3 タッピング課題

実験条件は、右手の示指による single-finger tapping, 環指による single-finger tapping, 示指・中指の交互操作による double-finger tapping, 環指・小指の交互操作による double-finger tapping, 安静の5条件であった。実験中、被験者は仰臥位で、胸部付近に設置されたテーブルの上に右手を

置き、これらの課題を行った (図1 B)。すべての条件において2 Hzの電子音を提示し、安静以外の条件ではその音に合わせてタッピングを行うよう教示した。安静条件では他の条件と同様に右手をテーブルの上に置き、その手を正視するよう指示した。各被験者につき各条件3スキャン、計15スキャンの測定を実施した。タッピング動作を確認するために、実験中は被験者の右手の運動をビデオ撮影した。

2. 結果

2. 1 single-finger tapping

安静時に比べて示指のタッピング時により高い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 (図2 A)。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おいて、安静時に比べて有意に高い活動が認められた (図2 B)。指間の比較では、示指の課題に比べて環指の場合には左側の一次運動・感覚野と右側の背側運動前野において有意に高い活動が認められた (図2 C)。

2. 2 double-finger tapping

示指・中指の組み合わせ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)、右側の小脳において安静時よりも高い活動が認められた (図3 A)。一方、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) において安静時よりも有意に強い賦活が認められた (図3 B)。二つの組み合わせ間の比較では、両側の一次運動野、右側の二次感覚野、左側の運動前野、左側の小脳において、環指・小指の課題時の方が示指・中指の課題時に比べて有意に高い

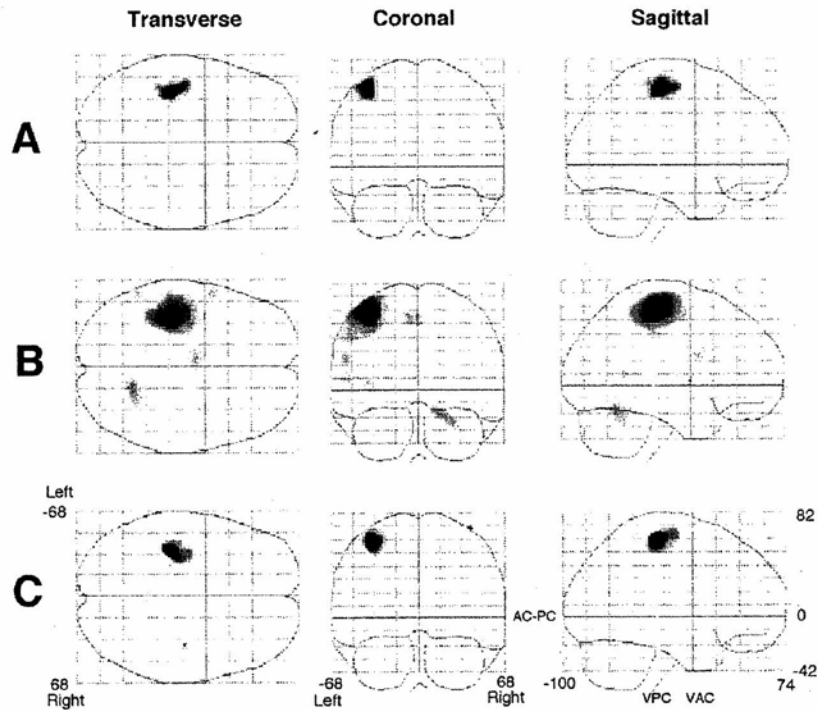


図2 Statistical parametric maps (SPM: MNI template) of orthogonal projections(sagittal, coronal and transverse) describing the adjusted mean rCBF in all 10 subjects for the comparisons between the index finger (I) and rest conditions (A), the ring finger (R) and rest conditions (B), and the R and I conditions (C).VPC and VAC denote the vertical projections of the anterior and posterior commissural, respectively, Distances are in millimeters above (+) and below (-) the intercommissural (ACPC) line, anterior (+) and posterior (-) to the VAC line, and to the right (+) and left (-) of the midline. The dark resigins indicate pixel values significantly higher than $p < 0.05$ corrected for multiple comparisons.

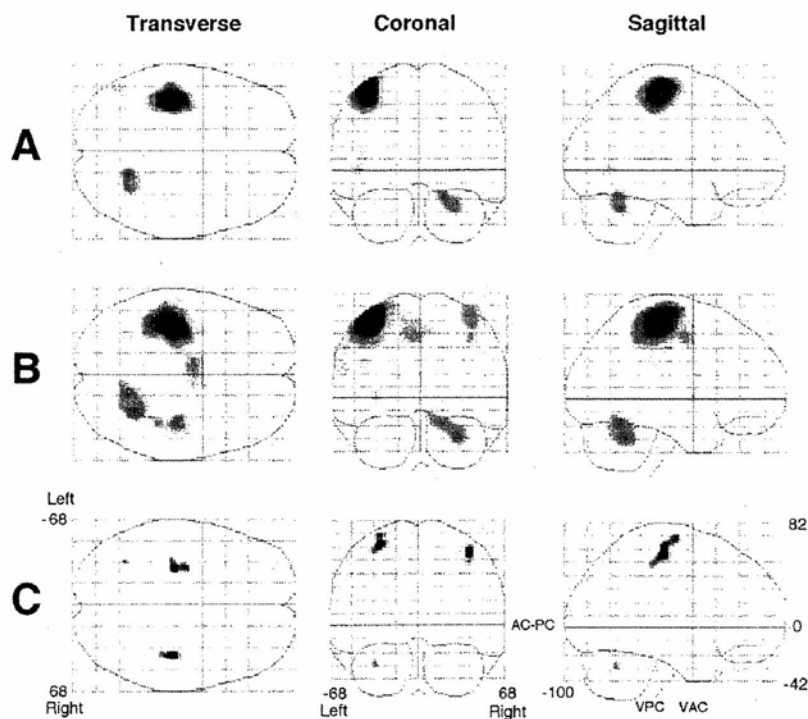


図3 SPMs for the comparisons between the index & middle fingers (IM) and rest conditions (A), the ring & little fingers (RL) and rest conditions (B), and the RL and IM conditions (C) for the 10 subjects.

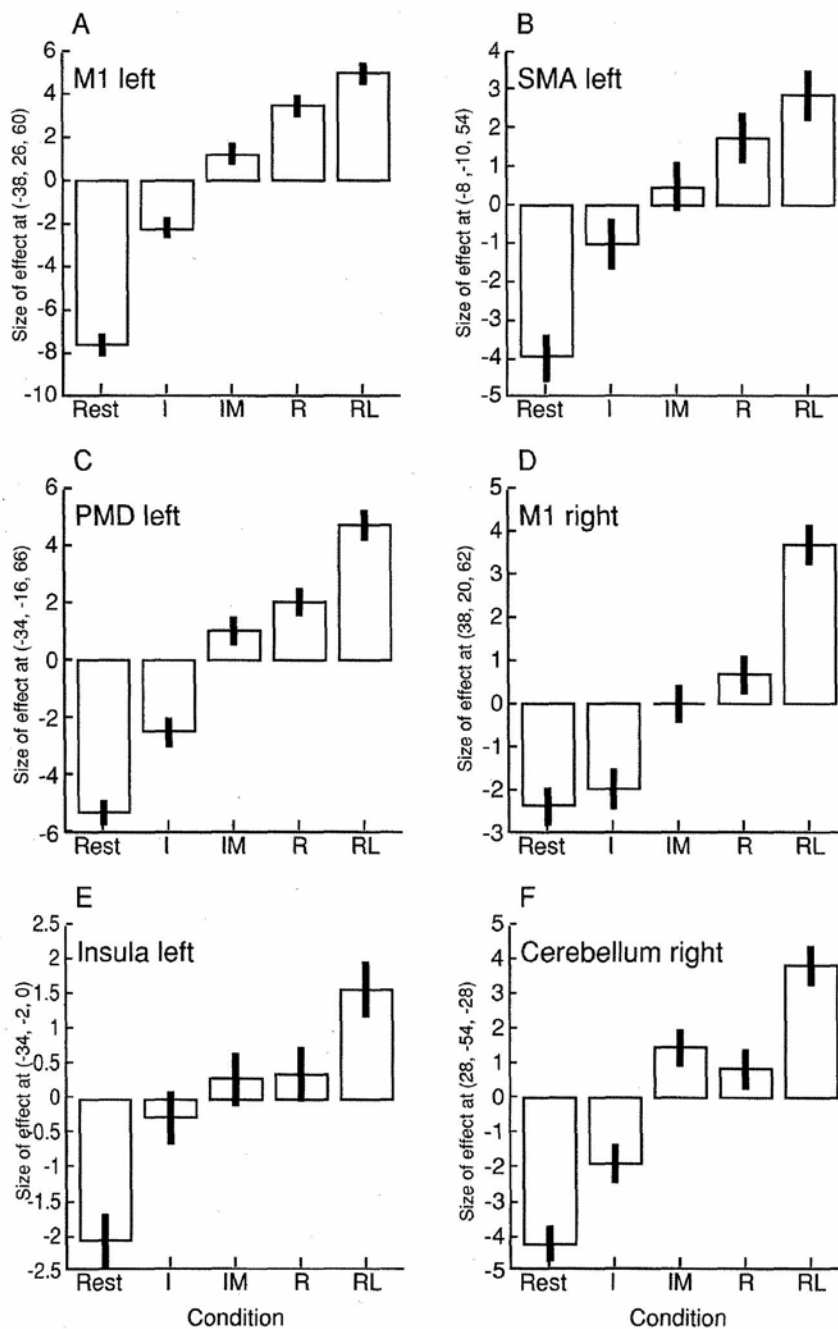


図4 Bar charts representing the mean effect size for all 10 subjects for each condition (\pm standard error) for the left primary motor (A), left supplementary motor (B), left dorsal premotor (C), right primary motor (D) areas, left insula (E), and right cerebellum (F) due to tapping movements. Units of effect size are relative to whole-brain mean activity values and represent the percentage change of whole-brain activity produced by each condition. Coordinate data given are based on the MNI template implemented in SPM 99. For illustrative purposes, the finger conditions are displayed in the rank order of task difficulty.

活動が認められた (図 3 C)。

2. 3 ピーク局所血流量と主観的困難度の関係

活動が認められた主な領域における5つの条件のピーク局所血流量を示した (図 4 A-D)。4つのタッピング条件は、被験者による主観的な困難度

が低かったものから順に並べた。被験者が最も簡単だと評価した条件は示指で、それに示指・中指、環指、環指・小指が続いた。左右の一次運動野 (図 4 A & D)、補足運動野 (図 4 B)、右側の運動前野 (図 4 C) では、課題が難しくなるほど脳活動も高くなることが明らかとなった。また、左

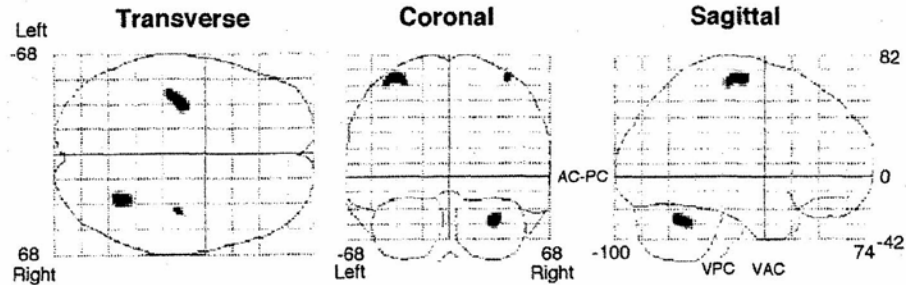


図5 SPMs for the comparison between the double-finger tapping (IM + RL conditions) and single-finger tapping (I + R conditions).

の橋 (図 4 E) においても運動の困難さに関連した血流増加が認められた。一方、右側の小脳 (図 4 F) ではそのような傾向は顕著ではなかった。

2. 4 double-finger tapping と single-finger tapping の比較

二つのタッピング方法間の比較 (図 5) では、double-finger tapping (示指・中指+環指・小指) の場合に、single-finger tapping (示指+環指) に比べて、両側の背側運動前野、左側の一次運動・感覚野、右側の小脳でより強い賦活が認められた。

3. 考 察

3. 1 異なる指によるタッピング時の脳活動

異なる指による課題間の比較では、示指と中指による運動に比べて環指と小指での場合には一次運動・感覚野、補足運動野、運動前野、頭頂および側頭皮質、小脳などでより強い活動が認められた。また、これらの領域における脳活動のピーク値は主観的な困難度の結果と密接に関連することが明らかとなった。

環指あるいは環指・小指による課題時に見られた運動肢と対側の一次運動・感覚野のより強い活動は、これらの課題時に示指あるいは示指・中指の課題に比べてより強い筋活動が生じていたことを反映していた可能性が高い。個々の指を動かす際に他の指で生じる運動および発揮力を調べた研究^{1, 9, 12)}からは、環指での運動中に特に他の指での顕著な運動や力発揮が伴うことが明らかとな

っている。解剖学的所見や神経支配に関する報告^{13, 16)}では、環指において特に隣接指との強固な腱結合が見られること、また指間で共通する神経支配も密であることが明らかとなっている。そのため、環指を独立に動かそうとした場合、隣接する指での運動を阻止するための拮抗筋群の活動が必要となることが考えられる。

本研究では環指での運動や環指と小指の組み合わせでの運動においては、補足運動野での活動が高まることも明らかとなった。Erdler et al.⁸⁾が、fMRIを用いて環指での運動中の補足運動野の活動をピアニストと一般成人とで比較した結果、その運動がより困難だと感じていた一般成人の方が血流が高いことが明らかとなった。補足運動野が円滑な運動の実施に関わる運動プログラムと関わる重要な働きを果たしていることは、これまで多くの動物実験などの結果からも明らかとなっている¹⁵⁾。したがって、本研究での結果も、十分な運動プログラムが構築されていない環指による運動を実行するために、補足運動野のより強い関与があったことを示唆している。

環指が関連する運動で運動前野、ブロードマンの22野、40野、島、二次感覚野、および小脳などで血流が増加したことは、おそらく、その運動中により高次の感覚処理機構が関与したことを示しているものと考えられる。サル¹⁷⁾の神経解剖学的研究からは、これらの脳領域へは多くの体性感覚の入出力経路の存在が確認されている。また、Ehrsson et al.⁷⁾がfMRIによって精密把握と強力

把握での脳活動領域を比較した研究においても、これらの脳領域の活動が精密把握で有意に高かったことが報告されている。彼らは、この結果について、指先での微量な力調節を必要とする運動では体性感覚入力を処理する回路が重要となるためであると推察している。さらに、ブロードマンの40野は空間情報への注意や認知・記憶の座としてもよく知られている。この部位での顕著な活動の増大は、環指や小指の運動時には空間認知機能がより必要とされたことを示唆している。おそらく、日常場面で環指や小指を独立的に動かし、それらの指でターゲットを触るような機会が少ないために、これらの運動時にはより注意を要したことが原因として考えられる。

3. 2 異なるタッピング方法時の脳活動

1指と2指でのタッピング方法の比較からは、2指の方が両側の運動前野や対側の一次運動・感覚野、同側の小脳により血流が高まることが明らかとなった。対側の一次運動・感覚野での活動は、運動指が増えたことに伴う筋活動量の増大が関連したものと考えられる。Takasawa et al.¹⁴⁾ がPETを用いて2指での摘み運動と手全体での把握運動中の脳活動を比較した研究においても、全指の方が2指の場合よりも対側の一次運動・感覚野、同側の小脳でのより高い活動が報告されている。一方、両側の背側運動前野は、順序性や連続性を伴う運動時に活動することが報告されており^{5, 10)}、本研究でもdouble-finger tappingの指の交互操作の特徴を反映していたものと思われる。また、同側の小脳の活動からは、2指での運動実行のためには、より多くの感覚処理やそれに基づく運動の修正が必要であったことを示していると考えられる。

3. 3 複雑な指運動の脳活動負荷

本研究から、同じ運動でも使用される指によっ

て脳各部の血流が異なること、そしてその血流変化が使用される指の数によっても異なること、さらに被験者の主観的な困難度と脳の活動領域との間には、密接な関連性があることが明らかとなった。これまでの運動の複雑さに関連するPET研究やfMRI研究においては、運動の順序性が複雑になると、多くの脳領域での血流が増加することから、それらの脳部位の機能的な関わりについて論議されてきた。本研究の結果は、運動の困難さを使用される指の違いおよびその数の観点から検討したものであり、その点では新たな情報の提供ができたものと思われる。すなわち、比較的単純なタッピング運動においても環指あるいは環指と小指での交互操作で行う場合には、環指の運動に付随して隣接指に発生する運動を阻止するために必要な脳機能や、運動プログラムに関わる脳機能、多くの体性感覚や空間認知情報を処理するための機能、また運動修正のための脳機能などの積極的な関与が必要となることを本研究の結果は示唆している。少なくともこれらの脳機能を維持・向上させるためには、環指や環指と小指の組み合わせでの運動が重要であると考えられる。

近年、高齢者や脳機能障害者のQOLを支える身体的な健全性に関連して筋骨格組織や心肺機能の維持ばかりでなく脳機能の維持についても盛んに論じられるようになってきた。そして、日常場面での様々な運動が脳のどの部位の機能によって支えられているのか、また、その機能を高めるためには、どのような運動を行うべきなのかという疑問に対する研究が数多くなされるようになってきた。本研究もそのような観点からの貢献を目指したものであり、個々の指の使用に関する新たな情報の提供を試みた。本研究の結果が高齢者や脳機能障害者の脳機能評価やその改善のためのリハビリテーション器具開発や脳機能トレーニング方法考案に一助となることを願う次第である。

謝 辞

本実験に御協力いただきました大阪大学大学院医学研究科の大崎康宏医師, 高澤正志医師, 医学部附属病院RI管理・検査室技師の皆様に深く感謝致します。また, 本研究を遂行するにあたり, 研究助成を授与していただいた石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝致します。

文 献

- 1) Aoki T., Francis P.R., Kinoshita H.: Differences in the abilities of individual fingers during the performance of fast, repetitive tapping movements. *Exp. Brain Res.* 152, 270-280 (2003)
- 2) Aoki T., Furuya S., Kinoshita H.: Finger tapping ability in male and female pianists and non-musician controls. *Motor Control* (in press) (2005)
- 3) Aoki T., Kinoshita H.: Temporal and force characteristics of fast double-finger, single-finger and hand tapping. *Ergonomics* 44, 1368-1383 (2001)
- 4) 青木朋子, 津田勇人, 木下 博.: 個々の指の運動機能の加齢的变化と, その機能維持に及ぼす運動習慣の効果. 大阪ガスグループ福祉財団研究・調査報告書 17, 65-71 (2003)
- 5) Catalan M.J., Honda M., Weeks R.A., Cohen L.G., Hallett M.: The functional neuroanatomy of simple and complex sequential finger movements: a PET study. *Brain*, 121, 253-264 (1998)
- 6) Doyon J., Penhune V., Ungerleider L.G.: Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*, 41, 252-262 (2003)
- 7) Ehrsson H.H., Fagergren E., Forssberg H.: Differential fronto-parietal activation depending on force used in a precision grip task: an fMRI study. *J. Neurophysiol*, 85, 2613-2623 (2001)
- 8) Erdler M., Windischberger C., Lanzenberger R., Edward V., Gartus A., Deecke L., Beisteiner R.: Dissociation of supplementary motor area and primary motor cortex in human subjects when comparing index and little finger movements with functional magnetic resonance imaging. *Neurosci Lett.* 313, 5-8 (2001)
- 9) Hager-Ross C., Schieber M.H.: Quantifying the independence of human finger movements: comparisons of digits, hands, and movement of frequencies. *J. neurosci.* 20; 8542-8550 (2000)
- 10) Harrington D.L., Rao S.M., Haaland K.Y., Bobholz J.A., Mayer A.R., Binderx J.R., Cox R.W.: Specialized neural systems underlying representations of sequential movements. *J. Cogn Neurosci.* 12, 56-77 (2000)
- 11) 金子満雄.: 呆けない生き方革命, 海竜社 (1996)
- 12) Schieber M.H., Chua M., Petit J., Hunt C.C.: Tension distribution of single motor units in multitendoned muscles: comparison of a homologous digit muscle in cats and monkeys. *J. Neurosci.* 17, 1734-1747 (1997)
- 13) Schieber M.H., Gardinier J., Liu J.: Tension distribution to the five digits of the hand by neuromuscular compartments in the Macaque Flexor Digitorum Profundus. *J. Neurosci.*, 21, 2150-2158 (2001)
- 14) Takasawa M., Oku N., Osaki Y., Kinoshita H. et al.: Cerebral and cerebellar activation in power and precision grip movements: an H₂¹⁵O positron emission tomography study. *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 23, 1378-1382 (2003)
- 15) 丹治 順.: 脳と運動: アクションを実行させる脳, 共立出版 (1996)
- 16) Von Schroeder H.P., Botte M.J.: The functional significance of the long extensors and juncturae tendinum in finger extension. *J. Hand Surg.* 18, 641-647 (1993)
- 17) Zatsiorsky V.M., Li Z.M., Latash M.L.: Coordinated force production in multi-finger tasks: finger interaction and neural network modeling. *Biol. Cybern.* 79, 139-150 (1998)