運動イメージによる運動誘発電位の出現動態： 剣道の鍛錬者と非鍛錬者の運動誘発電位（MEP）による検討

林司佳子¹⁾ 長谷川善輝¹⁾ 矢作 晋²⁾ 笠井達哉¹⁾

Modulation of motor evoked potentials induced by motor imagery: an analysis of trained and untrained Kendoists using a transcranial magnetic stimulation (TMS) method

Shikako Hayashi¹, Yoshiteru Hasegawa¹, Susumu Yahagi²
and Tatsuya Kasai¹

Abstract

Objective: To understand the neural mechanisms of motor imagery, we examined differences in cortical excitability (primary motor cortex) induced by motor imagery between highly skilled and less skilled exponents of Kendo (Japanese fencing).

Methods: First, to confirm differences in Kendo skills between the highly skilled and less skilled Kendoists, EMGs from four muscles (two intrinsic and two forearm muscles) and grip forces on the left and right sides were recorded simultaneously while performing Kendo. Second, to investigate changes in excitability of the motor cortex induced by motor imagery, motor evoked potentials (MEPs) in response to transcranial magnetic stimulation (TMS) were recorded from the left and right first dorsal interosseous (FDI), abductor digiti minimi (ADM), extensor carpi radialis (ECR) and flexor carpi radialis (FCR) muscles. During motor imagery of Kendo skills, MEPs were recorded under the following three conditions: (1) The subjects imaged Menuchi-movements (hitting the head with a bamboo sword) without a visual aid (V^-), (2) the subjects imaged Menuchi-movements with the aid of a video system (V^+), (3) the subjects imaged the maximum muscle contraction of each of the four muscles, related to Menuchi-movements, respectively.

Results: During motor imagery of Menuchi-movements under condition V^- , MEP amplitudes were larger in the highly skilled Kendoists than those in the less skilled Kendoists. Moreover, MEP amplitudes in the less skilled Kendoists were larger under condition V^+ than under condition V^- , whereas

1) 広島大学大学院国際協力研究科スポーツ・健康科学教育部門

〒739-8529 東広島市鏡山1-5-1

2) 広島修道大学スポーツ科学研究室

〒731-3195 広島市安佐南区大塚東1-1-1

連絡先 林司佳子

1. Division of Sports and Health Sciences, Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima University, 1-5-1 Kagamiyama, Higashihiroshima-shi, Hiroshima 739-8529

2. Department of Sports Sciences, Hiroshima Shudo University, 1-1-1 Ozuka-higashi, Asaminami-ku, Hiroshima-shi 731-3195

Corresponding author shika@hiroshima-u.ac.jp

the opposite was true in the highly skilled Kendoists although the difference did not attain statistical significance. In both sets of subjects, however, the MEP amplitudes during motor imagery of individual muscle contraction were the same, i.e., the differences in MEP amplitude between the highly skilled and less skilled Kendoists disappeared.

Conclusion: The brain function for imaging motor skills differs between highly skilled and less skilled Kendoists. That is, the motor imagery of highly skilled Kendoists involves performing concrete movement (internal imagery) whereas that of less skilled Kendoists involves looking at the movement (external imagery).

Keywords; motor evoked potentials (MEPs), transcranial magnetic stimulation (TMS), kendoist, motor imagery

(Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 46 : 47-59, January, 2001)

キーワード：経頭蓋的磁気刺激法（TMS）、運動誘発電位（MEP）、剣道選手、運動イメージ

はじめに

イメージトレーニング法とは、身体運動を実践しないで、獲得した技能を繰り返し脳内でイメージすることにより、補助的にトレーニング効果を高めるために行われるトレーニング方法のことである。この方法の有効性を検討した報告は数多く、その中には、実際に身体運動を実践して得られた練習効果と同等の効果が得られた、との報告もある (Rawlings et al., 1972)。しかし、その効果は不変的なものではなく、初心者レベルより技能習熟の程度が高いレベルの者でより有効であるとされている (Clark, 1960)。また、イメージトレーニングは有効であるとする報告ばかりではなく、未経験の運動ではその効果はほとんどない、との報告もある (Corbin, 1966)。従って、「イメージトレーニング法」は、技能の習熟程度が相当に高い段階で用いるべきトレーニング方法と評価されている。しかし、具体的なイメージトレーニング法が確立されるまでには至っていない。その主な理由は、イメージトレーニングの遂行には、脳内の高次中枢神経機能が深く関わっていることは承知しているにもかかわらず、その効果を惹起する神経生理学的機序が未だ解明されていないことに起因する。

ヒトの高次中枢神経機能を調べるために、最近、

開発された非侵襲的な運動中枢機能検査法は、前述のイメージトレーニングの中枢性機序を解析する手段として有効である。例えば、PET (positron emission tomography) やfMRI (functional magnetic resonance imaging) を使った解析では、運動イメージ想起中に運動準備状態や運動プログラムの遂行に関係する大脳皮質や皮質下領域、特に運動前野や体性感覚野の働きが深く関わることが報告されている (Decety et al., 1994; Jeannerod, 1994; 木下, 2000; Porro et al., 1996)。さらに、イメージトレーニングを実行しただけでも、高次の運動プログラムを形成する部位の機能変化によって筋力増加がもたらされる、とも報告されている (Yue and Cole, 1992)。しかし、これらの解析結果は、習熟段階に応じてどのようなイメージトレーニング法を用いるのが妥当であるか、といった科学的根拠に基づいた方法論を確立できるだけの十分な知見を得るまでには至っていない。

高次中枢神経機能、特に随意運動の遂行機能を調べるもう一つの重要な方法として、経頭蓋的磁気刺激法 (transcranial magnetic stimulation: 以下TMS) がある。ヒトの大脳皮質に機能局在があることはよく知られているが、TMSを用いることによって、頭蓋外から高圧電流を流したコイルの直下に生じた渦電流によって、直接大脳皮質の運動野細胞を刺激して、運動の遂行に関わる錐体路細胞の活動状況を筋電図の変化として観察することができる。最近、このTMSによって運動野細胞を興奮させて、運動誘発電位 (motor evoked potential: 以下MEP) を記録する方法が確立され

た(笠井, 1993; 志村・笠井, 1995; 志村ほか, 1996). TMSによって導出されるMEPは, 大脳皮質運動野内でいくつかのシナプスを介して錐体路細胞を脱分極させた結果として生じた電位が, その細胞の軸索を下行して脊髄運動細胞に到達し, 単シナプス性にそれらの細胞を脱分極させた結果として惹起した筋収縮の程度を筋電位の変化として記録したものである. 従って, MEPの変化は, 間接的に大脳皮質運動野細胞の興奮性の変化を反映した指標として考えられる. また, 具体的な運動を運動イメージとして想起することによって, 脊髄レベルよりは中枢レベルにおいて, 優位な促進が起こり, それが, 電位の増大(実際には振幅の増大)としてMEPに反映される(Kasai et al., 1997; Yahagi and Kasai, 1996, 1998). さらに, その神経生理学的機序は, 実際の運動の遂行と同じ機序が働いた結果であることがわかっている(Jeanerod and Decety, 1995). 従って, 運動イメージ再生時のMEPの変化には, 筋活動を伴わない条件下での中枢性運動機能遂行の変化が反映されていることになるので, これは, 純粋に主運動野を含む多くの運動関連中枢領域で起こっている運動神経生理学的変化の指標であると考えてよい(Gandevia and Rothwell, 1987; Kasai et al., 1997). すなわち, この指標の変化には, 同一の筋であってもその筋収縮が屈曲, 外転, 伸展のように異なる場合には, その機能の違いが運動イメージの違いとして, MEPに反映される(Yahagi and Kasai, 1998). ごく最近では, 右利きと左利きの例のように, 脳の左右の機能差も, 運動イメージの左右差としてMEPに反映されることが報告されている(Yahagi and Kasai, 1999). この報告は, イメージトレーニング法の背景である運動イメージの再生機序の左右差の一端を, MEPの変化として系統的に明確な形で示した最初の報告である.

このようなTMSを使った最近の研究では, ヒトの運動学習の機序の解析にも適用されている(志村ほか, 1996). その結果, パフォーマンスの改善に相応して, 運動の遂行に関係する指を支配している脳部位のMEPは, 明らかにその興奮性を

高めることがわかってきた(Puscual-Leone et al., 1995). 従って, 運動イメージ再生法を用いて習熟レベルの違いがもたらす運動イメージの差異をMEPの差異として検出できれば, トレーニング(運動学習)の結果として惹起した主運動野の活動状況の違いが解析できると考えた.

そこで, 本報告では, まず, 剣道の鍛練者と非鍛練者を対象として, 面打ち技術の動作分析を行い, 両者の経験の多寡がもたらす運動学的差異を筋電図及び力曲線によって確認した. これは, 習熟レベルの違いによる運動中枢神経系機能を検討するためには, パフォーマンスレベルでの運動技能の違いがどのようなものであるか確認する必要があるためである. 具体的には, 先行研究(林ほか, 1981; 松尾ほか, 1998; 三橋, 1972)を参考にして, 剣道の鍛練者と非鍛練者の間で特徴的な違いがあると思われる竹刀の左右肢(手と前腕)の握りと保持に関わる技能の分析を行った. 特に剣道種目を選んだ理由としては, 剣道は竹刀を両手で操作し, そこに求められる左右手の協応性が, 技能の発揮(上手な竹刀裁き)にとって極めて重要であること. また, この技能は, 他のスポーツにはない剣道特有の技能特性であり, 上手な竹刀裁きのできる鍛練者とそうでない非鍛練者では, この左右の上肢の使い方に明らかな違いがあると考えたからである. そして, 動作分析から得られた運動学的差異は, 習熟レベルの違いによって惹起された運動中枢神経系機能の違いを明確に反映するであろうと考えた.

続いて, その神経科学的な根拠を得る目的で, TMSを用いて解析を行った. 解析の焦点は次の2点であった. 1) 技能習熟レベルの違いにより, 運動イメージ再生機能に神経生理学的な違いが本当にあるか, 2) 運動イメージ再生機能の差異が, 実際に主運動野の活動の違いとして生起しているか. 具体的には, 習熟レベルの異なる被験者に同じ運動イメージを想起させ, その時生起している上位運動中枢内の興奮性の違いを詳細に検討することから, 運動イメージ想起に関わる中枢性機序の一端を知り, 習熟レベルに応じたイメージトレーニング方法の科学的根拠を検証しようとした.

実験 I ; 動作分析

方 法

健康な右利き成人 5 名 (年齢 20 歳 ~ 42 歳) であり, 内訳は鍛錬者 3 名 (男子 1 名, 女子 2 名, 剣道歴 10 ~ 15 年, 3 ~ 4 段), 非鍛錬者男子 2 名 (経験年数 1 年未満) を被験者とした。被験者は, 座位にて竹刀を保持した状態 (構え) から, 面打ち動作を行った。その時の筋電図と力曲線 (以下 Grip force) を記録した。筋電図は, 表面電極法により左右の手及び前腕の握りと保持に関わる第 1 背側骨間筋 (first dorsal interosseus : 以下

FDI), 小指外転筋 (abductor digiti minimi : 以下 ADM), 前腕伸筋 (extensor carpi radialis : 以下 ECR), 前腕屈筋 (flexor carpi radialis : 以下 FCR) から記録した。筋放電は, 生体増幅器 (日本光電社, AB-621G) で時定数 0.03 秒で増幅し, AD 変換ボード (カノーブス社, ADX-98E) により 5kHz のサンプリング周波数で AD 変換し, コンピューターに記憶した。力曲線は, 竹刀の握り位置 (右手の親指, 左手の小指) に, ストレンゲージを張り, Grip force を記録した。ストレンゲージの歪みは, 歪みアンプ (NEC 社, AS1302N9167) で 30Hz のフィルタを通して, 筋電図と同様に AD 変換し, コンピューターに記憶した。試行回数は 15 回であった。筋電図は, すべて整流したものを解析の対象とした。最大 Grip force 量は, 構えの状態における Grip force 量を基準にピーク値を計測し, 事前に求めた更正值により力 (N) に換算した。運動時間の解析は, 動作開始から打撃までの左右の手の運動開始時間差 (左手 - 右手) を計測した。Grip force 量と運動時間は, 左右の手の差を比較するために, 統計的处理 (差の検定: t 検

図 1 面打ち動作の遂行に伴う手と前腕筋の筋電図と Grip force の記録例

鍛錬者 (A) と非鍛錬者 (B) (各代表例) の面打撃時の筋電図と Grip force をそれぞれ 3 回の重ね書きで示した記録例。上段から左手及び前腕の筋電図, 右手及び前腕の筋電図, 左手の Grip force, 右手の Grip force, の例を示す。最下段は打撃点の force を示し, 縦の線は竹刀が目標物を打撃した時点 (onset) を示す。筋電図は左右手及び前腕共に上から順に第一背側骨間筋 (FDI), 小指外転筋 (ADM), 前腕伸筋 (ECR) 及び前腕屈筋 (FCR) を示す。Grip force は + が加重, - が抜重を示す。Grip force (L) の▲印, Grip force (R) の●印は, 鍛錬者と非鍛錬者を比較した場合に, 特に違いのあったことを示す。

図 2 面打ち動作の再現性

鍛錬者 (A) と非鍛錬者 (B) の面打撃時の Grip force をそれぞれ 15 回の重ね書きで示した記録例。上段から左手の Grip force, 右手の Grip force の例を示す。最下段は打撃点の force を示し, 縦の線は竹刀が目標物を打撃した時点 (onset) を示す。Grip force は + が加重, - が抜重を示す。非鍛錬者は鍛錬者に比べてばらつきが大きかったことから, 動作の再現性が乏しいことを示す。

定)を行った。

結果

図1に典型的な鍛練者と非鍛練者の面打撃時の左右の手及び前腕の筋電図と、Grip forceの記録例をそれぞれ3回の重ね書きで示した。この結果から、筋電図に関しては、両者の間に顕著な違いを見いだすことは困難であった。しかし、Grip forceに関しては、運動の再現性と左右手の使い方に顕著な違いが見られた(▲と●印)。このような鍛練者と非鍛練者の差異は、他の被験者においても共通に見られた現象であった。

図3 面打ち動作の遂行に伴うGrip forceとその開始時間

A: 面打撃時におけるGrip forceの実際の記録例。この記録から左右手の竹刀に加わった力(Force)と動作の開始時間(ms)を竹刀が目標物に当たった時点をもととして図中に示したように計測した。B: 面打ち動作における左右の最大Grip force量を典型的な右利きの鍛練者、非鍛練者(各1名、試行回数n=15)の平均値と標準偏差で示す。縦軸はGrip force量をNで示し、横軸はTが鍛練者、UTが非鍛練者を示す。非鍛練者に比べて鍛練者の方が、Grip forceの左右差は顕著に見られた。C: 面打ち動作における左右の手の振り上げ開始時点から竹刀が面を打撃した瞬間時点(0)までの時間(Preceding time)とその左右手の差(左手の時間量-右手の時間量)を鍛練者、非鍛練者の平均値と標準偏差で示す。縦軸はTが鍛練者、UTが非鍛練者、L-Rが左右手の時間差を示し、横軸は時間量をmsで示す。鍛練者は左手から、非鍛練者は右手から動作を開始し、面打ちを遂行していることを示す。***
 $p < 0.001$

そこで、運動の再現性について詳しく検討するために、図1で示したGrip forceを全試行(15回)の重ね書きで示したものが図2である。その結果、非鍛練者に比べて鍛練者の方が運動の再現性が高く、Grip forceのばらつきは少なかった。

さらに、具体的に両者の差異を検討する目的で、左右のGrip force量とGripの開始に関する時間経過を図3Aに示した変数として、両者で数量的な計測を行った。図3BとCに代表的な両者の15試行のGrip force量と時間量の計測結果を示した。Grip forceに関しては、左(L)右(R)差が鍛練者(T)において顕著であった(TのLとR; $t = 9.81$, $df = 14$, $p < 0.001$: 図3B)。運動の開始(Grip forceの発現時間)に関しては、鍛練者は左手から動作を開始するが(TのLとR; $t = 5.41$, $df = 14$, $p < 0.001$)、非鍛練者は、鍛練者とは異って右手から動作を開始していた(UTのLとR; $t = 4.17$, $df = 14$, $p < 0.001$: 図3C)。

実験II: 運動誘発電位(MEP)

方法

被験者は、健康な右利き成人11人(年齢20歳~42歳)であり、内訳は鍛練者6名(男子4名、女子2名、剣道歴12~15年、3~4段)、非鍛練者5名(男子2名、女子3名、経験年数1年未満)であった。被験者は、動作分析の時と同様に座位にて竹刀を保持させた。運動イメージ課題は、(1)被験者が独自に面打ち動作を想起する条件(以下: V⁻)、(2)ビデオで面打ち画像を見ながら、被験者が面打ち動作を想起する条件(以下: V⁺)、(3)手と前腕のそれぞれ4つの筋に焦点を当て、個別に最大努力で収縮すること(FDIの屈曲、ADMの屈曲、手首の屈曲及び進展)を想起する条件、であった。この3課題を行わせた理由は、前者2つの条件は、鍛練の多寡がもたらす運動イメージ再生機能の違いは、具体的な運動イメージ情報がある場合と無い場合に顕著に出現するであろうと想定したためである。そして、その違いが、鍛練の有無の違いとしてMEPに反映されるであろうと考えた。(3)の条件は、運動イメージ再生機能の違いが、運動野の興奮性(MEP)の違いとして反映されているかどうかを確かめるために、複数の筋

の統合作用の結果である運動スキル（面打ち）課題に対して、そのスキル発揮の構成要素である個々の筋の単純な筋収縮課題が妥当と考えた結果である（Garloff et al., 1997；Yahagi and Kasai, 1998）。すなわち、運動イメージ再生機能の違いが忠実に運動野の興奮性の違いとして反映されているならば、両者共に日常生活の中で頻繁に経験し、よく鍛錬されている個々の筋を単独で収縮する運動イメージでは、面打ち動作のスキル発揮の場合とは違って、両者のMEPにはさほど差は出現しないはずであると考えた。そして、単純な筋収縮課題と運動スキル課題とでは、たとえ同じ筋が関わっていても、その運動イメージ想起に関わる機序に質

的な差異があることをMEPの違いとして検出できると考えた。

MEPは、安静時（運動イメージを想起しない時）と運動イメージ想起時に、動作分析実験の場合と同様に、4つの筋（FDI, ADM, ECR, FCR）から導出した。MEPの記録には磁気刺激装置（Magnetic stimulator：Magstim社Magstim 200）を使用した。使用した磁気コイルは、脳の複数の筋の支配領野を同時に刺激可能な円形コイルを用いた。刺激場所は、国際脳波記録法に基づき、安静時で4つの筋全てからMEPの記録が可能な場所を選んだ（概ね、CZ近辺）。刺激強度は、安静時に4つの筋からMEPが50%の確率で出現する強

図4 面打ちイメージ想起時のMEP振幅の変化

AとB：鍛錬者（A）と非鍛錬者（B）の代表的なMEPの記録例。安静時（At rest）と面打ちイメージ想起時（During motor imagery）に記録された運動誘発電位（MEP）をそれぞれ3回の重ね書きで示した。上段から左右の手及び前腕の4つの筋（FDI, ADM, ECR, FCR）を示す。非鍛錬者（○印）に比べて鍛錬者（●印）の方が、安静時に比べて、面打ちイメージ想起時のMEPは増大する傾向にあった。C：安静時と面打ちイメージ想起時に記録されたMEPの最大振幅値を図中に示したように計測し、鍛錬者6名、非鍛錬者5名の平均と標準偏差を示す。黒抜きが鍛錬者、白抜きが非鍛錬者を示す。横軸はMEPの振幅を、安静時を100%とした時の相対値で示し、縦軸は左右の手及び前腕の4つの筋を示す。AとBの結果同様に、左右の筋すべてにおいて、非鍛錬者より鍛錬者のMEPの振幅の方が大きかったことを示す。しかし、個人差が大きく、有意な差は検出できなかった。

度（閾値）の1.1～1.2倍で、常に4つの筋からMEPを導出できる強度とした。MEPの記録は、背景筋放電が無い状態で安静時、運動イメージ想起時にそれぞれ5回ずつ記録した。得られた各個人のMEPの振幅値（図4Cの上段の模式図）は、安静時を100%としての相対値で示した。MEPの振幅値の違いを比較・検討するために統計的処理

（差の検定：クラスカル・ウォリス検定）を行った。具体的には、V⁻条件及び各筋の筋収縮イメージ時の鍛錬者と非鍛錬者の差、鍛錬者と非鍛錬者それぞれにおけるV⁻条件とV⁺条件におけるMEPの差の検定を行った。

結果

鍛錬者と非鍛錬者の運動イメージ再生機能の違いを検討するために、図4に代表的な鍛錬者（A）と非鍛錬者（B）のV⁻条件下での安静時（At rest）と面打ちイメージ想起時（During motor imagery）に、左右の手及び前腕から記録されたMEPを3回の重ね書きで示した。その結果、左右の手及び前腕共に鍛錬者（図4A●印）も非鍛錬者（図4Bの○印）も安静時に比べてMEPは増大する傾向にあったが、その増大量は鍛錬者の方が大きかった。そこで、鍛錬者6名、非鍛錬者5名のV⁻条件下での左右のMEPの振幅値を計測し、その平均値と標準偏差を計算した結果を図4Cの下の方の棒グラフで示した。その結果、図4のAとBで示した結果と同様に、左右の手及び前腕共に非鍛錬者に比べて鍛錬者の方がMEPは増大する傾向にあった。しかし、個人間の変動が大きく、有意水準には達しなかった。

次に、V⁻とV⁺条件下でのMEPの平均値と標準偏差を両者別々に比較した結果を図5のAとBに示した。そして、両者のV⁻条件とV⁺条件でのMEPの差を図5Cに示した。その結果、非鍛錬者では、左右の手及び前腕共にV⁺条件の方がMEPは増大した（ $H = 5.91$, $df = 1$, $p < 0.05$ ）。一方、鍛錬者は、左右の手及び前腕共にV⁻条件の方がMEPは大きい傾向を示したものの統計的に有意な増大ではなかった。

そこで、両者のV⁻とV⁺条件下におけるMEPの変化を詳細に検討するために、各個人内でのMEPの変化をそれぞれ4つの筋ごとに比較し、統計的処理（差の検定：t検定）を行った。その結果、各鍛錬者においては、V⁺条件に比べてV⁻条件でMEPは大きくなる（+で表示）場合が多く、そのような場合には両条件下で統計的に有意であった。また、各非鍛錬者においては、V⁺条件の方が大きい場合（-で表示）に統計的に有意な差がみられ

図5 ビデオによる視覚入力の有無が面打ちイメージ想起時のMEP振幅へ与える影響

AとB：鍛錬者(A)と鍛錬者(B)のビデオを介した視覚入力の有無条件下での面打ちイメージ想起時のMEP振幅の平均値と標準偏差。白抜き(V⁻)はビデオによる視覚入力なしで被験者が独自に面打ち動作をイメージする条件(鍛錬者6名、非鍛錬者5名)、黒抜き(V⁺)はビデオで面打ち画像を見ながら、面打ち動作をイメージする条件下でのMEP振幅値(鍛錬者4名、非鍛錬者4名)を示す。縦軸はMEPの振幅を安静時を100%とした時の相対値で示し、横軸はそれぞれ4つの筋(FDI, ADM, ECR, FCR)を示す。C：鍛錬者と非鍛錬者のV⁻とV⁺条件における面打ちイメージ想起時のMEPの振幅の差を(V⁻-V⁺)を示す。鍛錬者はV⁻条件の方がMEPの振幅は大きく、非鍛錬者はV⁺条件の方がMEPの振幅は大きい傾向にあったことを示す。

表1 各個人におけるビデオによる視覚入力の有無によるMEPの差

各個人内で V^- 及び V^+ 条件でのMEPの振幅を各筋ごとに比較し、統計処理（差の検定：t検定）を行った結果を示す。上段が上から鍛錬者、非鍛錬者の右の手及び前腕の各4つの筋の結果を示す。

下段が上段同様に左の手及び前腕の結果を示す。鍛錬者は、 V^- 条件より V^+ 条件でのMEPの振幅が左前腕のFCRの2例以外は大きくなり（括弧内+で表示）、統計的に有意であった。一方、非鍛錬者では V^- 条件より V^+ 条件でのMEPの振幅が大きくなり（括弧内-で表示）、すべて統計的に有意な差がみられた。

Defferent (V^- - V^+)の値

Right hand and forearm				
Trained	FDI	ADM	ECR	FCR
S.1		(+) p<0.001	(+) p<0.001	
S.2			(+) p<0.001	
S.3			-	
S.4			(+) p<0.05	
Untrained				
S.1				
S.2				

Left hand and forearm				
Trained	FDI	ADM	ECR	FCR
S.1		(+) p<0.05		
S.2	(+) p<0.051			(-) p<0.05
S.3			(+) p<0.001	(+) p<0.05
S.4				(-) p<0.01
Untrained				
S.1				(-) p<0.001
S.2	(-) p<0.05	(-) p<0.05	(-) p<0.001	

た。

考 察

図5の結果から、鍛錬者と非鍛錬者の運動イメージ再生機能の差異が、本当に運動イメージの質的差異として運動野の興奮性に反映されているかどうかを検討した結果を図6に示した。図6の結果は、代表的な鍛錬者(A)と非鍛錬者(B)の安静時(At rest)と個々の筋の具体的な収縮イメージ想起時(Focused muscle)に記録したMEPの5試行を加算平均して示した。その結果、技能習熟レベルの違いに関係なく、安静時に比べて、4つの筋を個別に最大収縮するイメージ想起時(※印)にはMEPは顕著に増大し、先述の運動スキルの想起時に認められた鍛錬者と非鍛錬者のMEPの差は消失した。

1. 運動学的差異について

運動学的差異を検討するために動作分析を行った結果、鍛錬者と非鍛錬者では、効率的な運動を遂行するための左右肢の使い方が明らかに違っていた。剣道の指導場面でも、「竹刀の握り方は右手は添えるのみで、左手の、特に小指で握りしめる!」と教示する。また、竹刀で打突する際、主に左手を中心とした竹刀裁きを教え、実際に左手のみで打突する練習が行われている。また、剣道書にも「布巾を絞るように左手で打て!」とあり(三橋, 1972)、左右の把持力の使い方を分りやすく教える工夫がされている。このような竹刀の操

図6 個々の筋の単独筋収縮イメージ想起時のMEP

鍛錬者(A)と非鍛錬者(B)の安静時(At rest)と運動イメージ想起時(During motor imagery)に記録された手及び前腕の4つの筋(右手のFDI, ADM, ECR, FCR)のMEPの代表的な記録例(5回の加算平均)。During motor imagery(Focused muscle)では、4つの筋それぞれを個別に最大努力で筋収縮をする運動イメージの想起を課した。非鍛錬者も鍛錬者も安静時に比べて、4つの筋を個別に筋収縮する運動イメージ想起時(※印)においてMEPは顕著に増大した。しかも、鍛錬者と非鍛錬者のMEPの増大に差はなく、この条件下でのMEPのイメージ想起による増大には、剣道の鍛錬の有無は無関係であった。

作に関する教へは、経験から得たものを抽象的に示しているが、竹刀の扱い方に関する先行研究(林ほか, 1981; 松尾ほか, 1998)が、具体的な形でこれらを実証済みである。剣道の素振りにおける前腕筋群の筋活動の左右差に関する研究では、前腕筋群の形態と筋活動パターンに左右差が認められ(松尾ほか, 1998), 打撃動作時のGrip forceを

分析した報告も、Grip forceに左右差のあることが報告されている(林ほか, 1981)。本実験の動作分析で得られた結果でも、これらの結果が確認することができた。すなわち、習熟レベルの違いによるこのような運動学的差異は、その運動を司る中枢神経系の機能的差異が、運動の再現性の違いと左右肢の協応動作の違い(運動の遂行効率の

違い)としてパフォーマンスに反映されている。

II. 中枢神経機能の差異について

前述の鍛錬者と非鍛錬者の明らかな運動学的差異について、両者間には運動の習熟レベルの差として、その差異を惹起させる機能的差異の一つが中枢神経内に存在すると確信した。そこで、この差異を検討するために、鍛錬者と非鍛錬者の運動イメージの差異が運動野の興奮性 (MEP) にどのような違いをもたらすかを検討した。その結果、V⁻条件では左右の手及び前腕共に非鍛錬者に比べて鍛錬者の方がMEPは増大する傾向にあった。この結果から、面打ちを習得している鍛錬者は、非鍛錬者に比べて、複数の筋が統合された結果として発現する運動スキルの運動イメージ再現機能が優れていると考えられる。すなわち、MEPの変化として記録できる運動野の興奮性は、下位運動ニューロンに随意運動の最終指令を送る錐体路細胞の興奮性を反映している。この最終運動指令は、運動連合野、大脳基底核、小脳などを經由して生成された緻密な運動制御指令 (運動プログラム) である (彦坂, 1998)。従って、非鍛錬者に比べて鍛錬者は、鍛錬の結果として面打ちに関わる効率的な運動制御指令が生成され、運動イメージが優れていると考えられる。しかし、鍛錬者のMEPの方が増大する傾向はみられたものの統計的に有意なものではなかった。この原因としては、MEPは一連の面打ちスキルイメージ想起中の一瞬の運動野の興奮性を反映する指標である。従って、一連の共通したスキルの遂行ではあっても、被験者間で記録した運動イメージ場面が、時間的にズレを生じている可能性がある。このことがMEPにばらつきを生じさせ、結果として運動野の興奮性が正しくMEPに反映されなかったと考えられる。今後の課題として、運動イメージ開始前に予備刺激を与えるなどの工夫をして、被験者間での運動イメージの内容に統一性 (同一性) をもたせるなどの工夫が必要であると考えられる。

次に、ビデオで面打ち画像を見せることによって、鍛錬者は面打ちを習得しているためV⁻条件と変わらない条件だと考えられ、非鍛錬者ではV⁻条

件よりも面打ちイメージを想起しやすい条件と考えられ、この結果が両者のMEPに反映されるだろうと考えた。その結果、予想通り、非鍛錬者では、V⁺条件でのMEPの方がV⁻条件下でのMEPの増大量は顕著であった。一方、鍛錬者は、統計的には2つの条件下でのMEPに有意な差はみられなかったものの、V⁺条件よりもV⁻条件下の方がMEPは増大する傾向にあった。統計学的に有意な水準に達し得なかったのは、前述通り、運動イメージの想起のタイミングに時間的な幅があり、その結果と考えられる。この結果から、鍛錬者と非鍛錬者では運動イメージ再生機能に違いがあることが示唆される。すなわち、両者の間では運動スキルの再生イメージに関わる中枢性神経機能が本質的に異なっている可能性が考えられる。

前述したように、V⁻条件のように被験者が独自に面打ち動作をイメージする際には、過去の鍛錬の結果として蓄積されたその運動の遂行に必要な運動記憶の再現機能が重要な働きをする (Mushiake et al., 1991)。運動記憶に基づく運動イメージの再生には、補足運動野 (Garloff et al., 1997) と大脳基底核 (Jackson et al., 1995) が重要な役割を果たしているが、具体的には動員すべき筋肉とそうでない筋肉とを選別し、動員された多数の筋の収縮と弛緩のタイミングと強さの決定を行う運動前野 (蔵田, 1998) や小脳 (彦坂, 1998; 蔵田, 1997) などが同時に関わって、面打ちを遂行する具体的な運動イメージを再生しているものと考えられる。このように記憶に基づいて行われる複雑な動作を実現するために、補足運動野が特に重要な役目を担っていることは、最近のPETやfMRIの研究で実証されている (Garloff et al., 1997; Jennerod, 1994, 1995)。

V⁺条件のような視覚情報による外的な運動イメージ想起時には、外界からの刺激に従って動作を組み立てる時に働く運動前野、ここで組み立てられた運動プログラムを遂行前にチェックしているといわれている小脳 (蔵田, 1997) などが重要な役割を果たしていると考えられる。視覚情報は網膜で電気的信号に変換され、外側膝状体を經由して第一次視覚野へ、さらに視覚連合野に伝えられ

ることは概知の通りである。しかし、最近の知見によると、視覚連合野の前方には高次連合野が広がり、大脳皮質内での情報処理過程には2つの経路があることがわかってきた(岩田, 1998)。1つは側頭葉に向かう腹側経路であり、形の識別を行い、過去の視覚体験内の記憶を呼び起こす役割を担っている。もう1つは、頭頂葉に向かう背側経路であり、運動や場所、奥行きなどの情報を処理する。また、視覚的なイメージにおける大脳皮質内での情報処理過程は、脳のモジュール(機能分化)構造に基づく分業体制によって処理される。従って、視覚的なイメージは過去の体験記憶や位置、形など様々な部分的な情報が複雑に組み合わせられているために、非常に複雑であり、運動野がどの程度それに関わっているのかは今のところ明らかではない。しかし、最近、運動野には視覚刺激の方向を表現している細胞集団が存在することがサルを使った実験結果で示されており、実際に物を見ているときに特異的に活動する(Fadiga et al., 1995)。従って、物を見ているイメージの再生時には、このような細胞群が活発に活動し、重要な機能を担っているものと考えられる(Fadiga et al., 1999)。

得られた結果と以上のような報告を考え合わせると、 V^- 条件と V^+ 条件では、運動イメージ再生に関与する運動中枢機能が異なっているものと考えられる。その結果、面打ちを習得していない非鍛錬者では、視覚入力によって引き起こされた運動野の興奮性の促通現象の方を優位に惹起し、それがMEPに反映されているものと考えられる。一方、面打ちを習得している鍛錬者は、記憶に基づく内的な運動イメージによる再生機能に依存している傾向はみられたが、統計的に有意な差ではなかった。この理由としては、鍛錬者は運動を習得しているため、鍛錬者の中には V^+ 条件と V^- 条件が非常に近い条件下で運動イメージを行っている者もいると考えられる。すなわち、鍛錬者の V^+ 条件下での運動イメージは、非常に個人差が大きいことが理由の一つとして挙げられる。また、前述した通り、MEPは、連続的な運動スキルイメージ想起中の一時的な運動野の興奮性の変化を反映し

ている。従って、ビデオによる運動イメージ想起時でも、個人によってMEPのばらつきが大きいことも理由として挙げられる。しかし、非鍛錬者では V^+ 条件で顕著に運動野の興奮性に促通がみられ、一方、鍛錬者では V^+ 条件と V^- 条件でその差がみられないことから、両者の運動イメージ再生機能に違いがあることが示唆される。

そこで、両者の運動イメージ再生機能の違いの有無を検討するために、面打ちのような運動スキルの運動イメージ課題とは異なった個々の筋の収縮イメージ課題でのMEPを両者間で検討した。この課題は、日常生活経験から考えて、両者の間で運動スキルの差はないと考えられる課題である。その結果、単純な個々の筋収縮課題では、剣道の鍛錬の多寡に関係なく両者のMEPは促通され、両者の間で差はなかった。従って、先述の運動の習熟レベルの違いに依存して運動野の興奮性の起こり方に差異が認められた原因は、両者に機能的差異があり、その違いがMEPの起こり方に違いを惹起した結果であると結論した。

まとめ

剣道の鍛錬者と非鍛錬者に面打ちイメージを想起させる課題を行わせ、鍛錬の多寡により運動イメージ再生機能に差異が生じてくることを明らかにした。すなわち、運動スキルイメージ課題では、習熟レベルの違いによって、MEPに差が認められたが、個々の筋収縮イメージ課題では、両者のMEPに差は無くなった。この結果から、運動の習熟レベルの違いが、運動野の機能的差異を生じさせ、その興奮性の違いを惹起させると考えられた。また、鍛錬するということは、運動学的には「協同筋の統合機能の獲得」である。従って、今後の課題は、1つの筋に焦点を当てて、その主動筋及び協同筋の活動(筋収縮トレーニングなど)の多寡によるMEPの変化を観察し、習熟メカニズムを解析することである。

文 献

- Clark, L. V. (1960) Effect of mental practice on the development of a certain motor skill. *Res. Quart.* 31: 560-569.
- Corbin, C. B. (1966) Effect of mental practice on the development of a unique motor skill. *Coll. Phys. Educ. Assoc. Proc.* 69: 100-102.
- Decety, J., Parani, D., Jeannerod, M., Bettinardi, V., Tadini, B., Woods, R., Mazziotto, J.C., and Fazio, F. (1994) Mapping motor representation with positron emission tomography. *Nature* 371: 600-602.
- Fadiga, L., Buccino, G., Craighero, L., Fogassi, L., Gallese, V., and Pavesi, G. (1999) Corticospinal excitability is specifically modulated by motor imagery: a magnetic stimulation study. *Neuropsychol.* 37: 147-158.
- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., and Rizzolatti, G. (1995) Motor facilitation during action observation: A magnetic stimulation study. *J. Neurophysiol.* 73: 2608-2611.
- Gandevia, S. C. and Rothwell, J. C. (1987) Knowledge of motor commands and the recruitment of human motoneurons. *Brain* 110: 1117-1130.
- Garloff, C., Corwell, B., Chen, R., Hallet, M., and Cohen, L. G. (1997) Stimulation over the human supplementary motor area interferes with the organization of future elements in complex motor sequences. *Brain* 120: 1587-1602.
- 林邦夫・堀山健治・山本高司 (1981) 剣道打撃動作時の指力の分析. *体育学研究* 26 : 149-160.
- 彦坂興秀 (1998) 手の順序動作と手続き的学習. *神経進歩* 42 : 106-115.
- 岩田誠 (1998) 見る脳・描く脳. 東京大学出版: pp. 9-62.
- Jackson, G. M., Jackson, S. R., Harrison, K., Henderson, L., and Kennard, C. (1995) Serial reaction time learning and Parkinson's disease: evidence for a procedural learning deficit. *Neuropsychol.* 33: 577-593.
- Jeannerod, M. and Decety, J. (1995) Mental motor imagery: a window into the representational stages of action. *Curr. Opin. Neurobiol.* 5: 727-732.
- Jeannerod, M. (1994) The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Beh. Brain Sci.* 17: 187-202.
- 笠井達哉 (1993) ヒトの経頭蓋的磁気刺激法. *Jpn. J. Sports Sci.* 12 : 54-70.
- Kasai, T., Kawai, S., Kawanishi, M., and Yahagi, S. (1997) Evidence for facilitation of motor evoked potentials (MEPs) induced by motor imagery. *Brain Res.* 744: 174-150.
- 木下博 (2000) 運動を司る脳機能をヒトで探る方法. *体育の科学* 50 : 127-132.
- 蔵田潔 (1997) 運動制御と運動学習. 協同医書出版 : pp. 3-21.
- 蔵田潔 (1998) 運動前野背側部と運動準備活動. *神経進歩* 42 : 59-67.
- 松尾清孝・成澤三雄・村永信吾・関和彦 (1998) 剣道の素振りにおける筋活動様式の左右差. *体育学研究* 43 : 176-184.
- 三橋秀三 (1972) 剣道. 大修館 : pp. 44-130.
- Mushiake, H., Inase, M., and Tanji, J. (1991) Neural activity in the primate premotor, supplementary and precentral motor cortex during visually guided and internally determined sequential movements. *J. Neurophysiol.* 66: 705-718.
- Porro, C. A., Francescato, M. P., Cettolo, V., Diamond, M. E., Baraldi, P., Zuiani, C., Bazzocchi, M., and di Prampero, P. E. (1996) Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery: A functional magnetic resonance imaging study. *J. Neurosci.* 16: 7688-7698.
- Puscual-Leone, A., Dang, N., Cohen, L. G., Brasil-Neto, J. P., Cammarota, A., and Hallett, M. (1995) Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *J. Neurophysiol.* 74: 1037-1045.
- Rawlings, E. I., Rawlings, I. L., Chan, C. S., and Yilk, M. D. (1972) The facilitating effect of mental rehearsal in the acquisition of rotary pursuit tracking. *Psychon. Sci.* 26: 71-73.
- 志村邦義・笠井達哉 (1995) ヒトの皮質脊髄路機能の発達. *Jpn. J. Sports Sci.* 14 : 361-369.
- 志村邦義・矢作晋・笠井達哉 (1996) 経頭蓋的磁気刺激法のヒト運動学習解明への適用. *Jpn. J. Sports Sci.* 15 : 357-363.
- Yahagi, S. and Kasai, T. (1996) An increase in cortical excitability with no change in spinal excitability

during motor imagery. *Percept. Mot. Skills* 83: 288-290.

Yahagi, S. and Kasai, T. (1998) Facilitation of motor evoked potentials (MEPs) in first dorsal interosseous (FDI) muscle is dependent on different motor images. *Electroenceph. Clini. Neurophysiol.* 109: 409-417.

Yahagi, S. and Kasai, T. (1999) Motor evoked potentials induced by motor imagery reveal a functional asymmetry of cortical motor control in left- and right-handed human subjects. *Neurosci. Lett.* 276: 185-188.

Yue, G. and Cole, K. J. (1992) Strength increases

from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *J. Neurophysiol.* 67: 1114-1123.

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究C：10680031 笠井達哉）の交付を受けて行われました。

（平成12年5月29日受付
平成12年10月21日受理）