

運動イメージ再生法によるトレーニング 効果の運動神経生理学的機序

広島大学 笠井達哉

An Increase in Cortical Excitability with no Change in Spinal Excitability during Motor Imagery

by

Kasai Tatsuya

*Division of Sports & Health Sciences, Graduate School for
International Development and Cooperation, Hiroshima University*

ABSTRACT

This study examined the extent to which motor imagery can facilitate to specific pools of motoneurons. Motor commands induced by motor imagery were sub-threshold for muscle activity and were presumably not associated with any change in background afferent activity. To estimate excitability changes of flexor carpi radialis (FCR) muscle motoneuron in spinal and cortical level, electric stimuli for recording H-reflex and transcranial magnetic stimulation (TMS) for recording motor evoked potentials (MEPs) were used. During motor imagery of wrist flexion, re-markable increases in the amplitude of the MEP of FCR were observed with no change in the H-reflex. Furthermore, facilitation of antagonist (extensor carpi radialis ; ECR) was also observed. Therefore, it is concluded that internal motor command can active precisely cortical excitability with no change in spinal level without recourse to afferent feedback.

要 旨

運動イメージの運動神経生理学的機序を解析する目的で、手首の屈曲運動を想起した時のH反射と運動誘発電位(MEP)の変化を調べた。H反射とMEPの両者が容易に記録できる前腕の屈筋(FCR)を対象とした。H反射の記録には、電気刺激(1ms幅)を用いた。MEP記録には、磁気刺激を用いた。H反射とMEPを指標とした理由は、運動イメージの想起が中枢性(MEP)あるいは、脊髄性(H反射)にどのような異なった効果(影響)を持つかを検討するためであった。

得られたH反射とMEPの変化動態から、運動イメージは脊髄レベルには著明な影響を及ぼさず、中枢レベルで著しい変化をもたらした。これらの結果から、トレーニング効果(運動学習)を高める一つの重要な手段として多用されている「運動イメージ再生法」の運動神経生理学的機序と、その機能的意義について論議した。

緒 言

運動技能の効率的な獲得方法の1つに「イメージ・トレーニング法」がある。従来この方法は、過去の幾多の経験の結果として、とくに選手の「心理的側面」のトレーニング方法として認知されてきた。しかし、その効果に対する評価はまちまちで、非常に有効と評価する者から、それは一時の気休めにすぎないとする者まである。何が原因でこのように評価が極端に異なるのであろうか。

1つには、「イメージ」の実態が漠然としすぎており、その結果この言葉が意味する内容が、個人の間で非常に異なった意味で理解されている結果によるものと思われる。具体的には、「イメージ」の具体的な内容とその機序を科学的に吟味しないで用いられた結果として起こってきた必然的な混乱と考えられる。

2つ目には、前述の「イメージ」の意味する内

容の曖昧さから、その方法論にも確立された手段が存在しないことによるものと思われる。それを使用する手段(教示方法等)が千差万別であれば、得られる結果が異なるのは自明のことで、そこには科学的に確立された方法は永遠に生まれてこない。

そこで、本報告はこれらの点に関して、少しでも科学的な解析を加え、それらの問題を解決する方法を検討した。すなわち、「イメージ」の内容を「具体的な運動のイメージ」に限定し、それを行うことが本当に心理的に効果があるものかどうかを検討した。具体的には、ある運動を想起した時、本当に心理的に効果があるのなら、その効果は上位運動中枢内で何らかの神経生理学的変化をもたらすはずである、と考えた。このために、最近開発された「磁気刺激法」を用いて、「運動イメージ想起」に伴う上位運動関連領野(主に運動野)の興奮性の変化を検討した。同時に、随意運動の遂行に関して、上位中枢とは異なった機能を果たしている脊髄反射機能についても同様の課題を賦与し、それが反射機能(具体的には脊髄運動反射)にどのような効果を及ぼすかを検討した。

1. 実験方法

被験者は、健康な成人7人(男子5名、女子2名;年齢20歳~26歳)であった。これらの被験者は、すべて前腕屈筋(橈側手根屈筋; flexor carpi radialis: FCR)からH反射と運動誘発電位(motor evoked potential; MEP)が導出可能な者であった。被験者には、実験の目的と手順を説明し、了解を得たうえで行った。

被験者は、座位にて前腕を中間位に固定した状態で、手首関節の等尺性最大屈曲を数回行わせた。手首関節の等尺性最大屈曲の練習後、背景筋放電が出現しない状態で、先に練習した手首関節の等尺性最大屈曲を「運動イメージ」として想起させた。背景筋放電の有無をオシロスコープでモニター

しながら、適時H反射を記録するための電気刺激（1ms持続時間で1発刺激）を肘部で正中神経に与えた。この時の刺激強度は、H反射出現の閾値とした。同様の実験条件下で、運動野の前腕屈筋支配領野に磁気刺激（Magstim社製Mag Stim 200）を与えた。磁気刺激強度は、電気刺激と同様、MEP出現の閾値の強度を用いた。

H反射とMEP記録は、安静時（手首関節の最大屈曲を運動イメージとして想起しない時）にそれぞれ10回記録した。同様に、運動イメージ想起時に、それぞれ10回の記録を行った。

また、MEPの記録では、拮抗筋のMEP記録も同時に行えることから、前述の記録終了後、両者のMEPが同時に行える場所を慎重に検索した後、両者のMEP振幅の最大のものが得られるように刺激強度を上げて、運動イメージ想起時の主動筋と拮抗筋（橈側手根伸筋；extensor carpi radialis：ECR）のMEPを同時に記録した。

得られた各個人のH反射およびMEPの振幅値を計測し、統計的処理（差の検定；t検定）を行った。差の有意水準は5%とした。

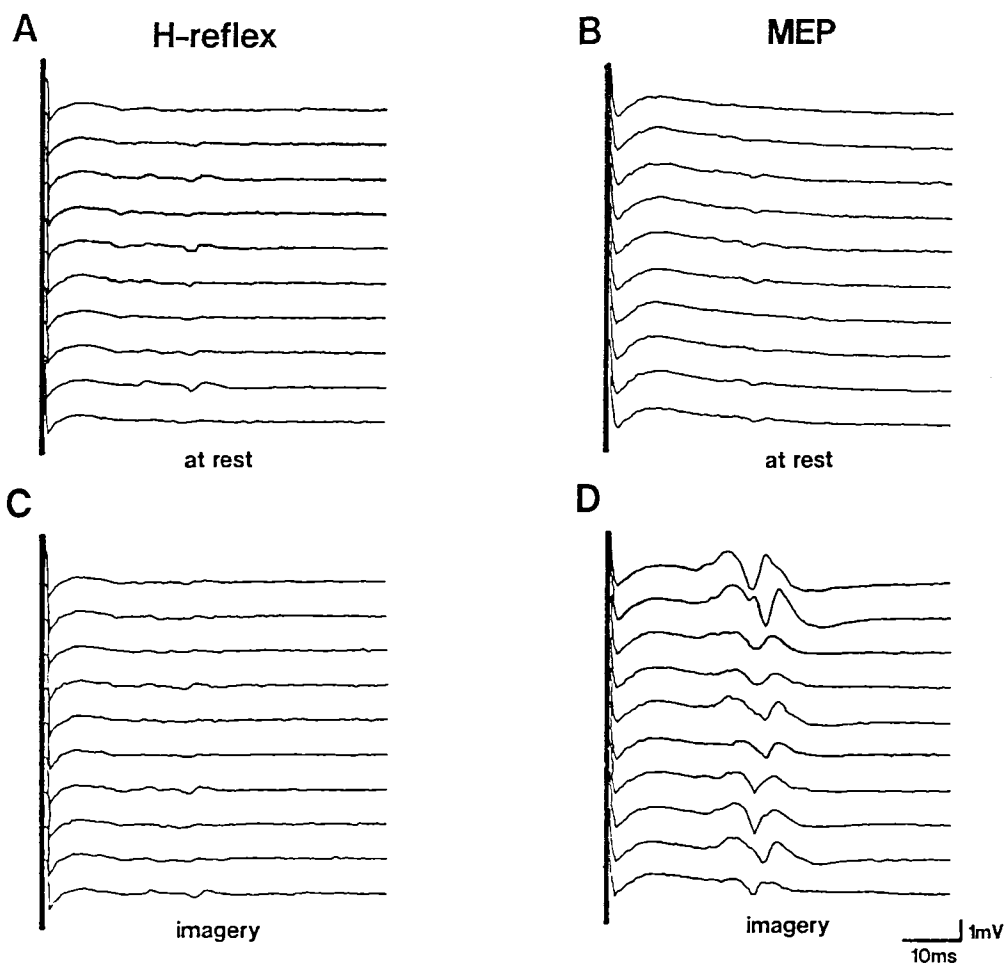


図1 手首関節の等尺性最大筋収縮を運動イメージとして想起した時の前腕屈筋（FCR）で記録されたH反射（AとC）とMEP（BとD）の実際の記録例。at restは安静時（運動イメージを想起しない時）、imageryは運動イメージの想起時。MEPにおいて、運動イメージ想起時に著明な促進が起こったことを示す

2. 実験結果

図1に、H反射とMEPの実際の記録例を一人の被験者の全試行をトレースして示した。この結果から、H反射もMEPも安静時では同程度の誘発筋放電を示しているにもかかわらず、手首関節の等尺性最大屈曲の運動イメージ想起によって、MEPは著明にその筋放電量が增大した（促通）。それに対して、H反射は、運動イメージ想起時にもその振幅は安静時と変わらず、著明な変化は見られなかった。この事実は、運動イメージ想起は、脊髄レベルの運動細胞の興奮性には効果を及ぼさず、上位運動中枢レベルで著明な促通効果をもたらすことを示していた。同様に調べた他の6名の被験者の結果は、MEPの促通量は個人間で違いはあったものの、運動イメージの想起時には、MEPは著明に促通されるが、H反射には変化が出現しなかった事実は、共通の現象であった。

そこで、運動イメージの想起の対象となったFCRのMEPの促通現象に付随して、その拮抗筋であるECRに、運動イメージがどのような効果

をもたらすか、すなわち手首関節の伸展と屈曲に関わる両筋の相反抑制が、主動筋（FCR）の等尺性筋収縮の運動イメージの想起で惹起されるかどうかを検討した。図2Aに一人の被験者のFCRとECRの実際の記録例を4回の重ね書きで示した。この結果から、拮抗筋関係の筋のMEPには相反抑制（拮抗筋：ECRのMEP）は出現せず、むしろ両筋共に促通現象が観察された（図2B）。

この事実が本当かどうかをより詳細に検討する目的で、全被験者で運動イメージ想起時に記録されたFCRとECRのMEP振幅の相関関係を検討した結果が、図3である。図3Aの結果として示したように、7名中5名は両者に促通が観察され、しかも両者間には有意な相関はみられなかった。しかし、残り2名の被験者では、図3Bに示したように、弱い負の相関関係が存在することが観察された。

3. 考 察

「メンタル・トレーニング」の科学的内容を明

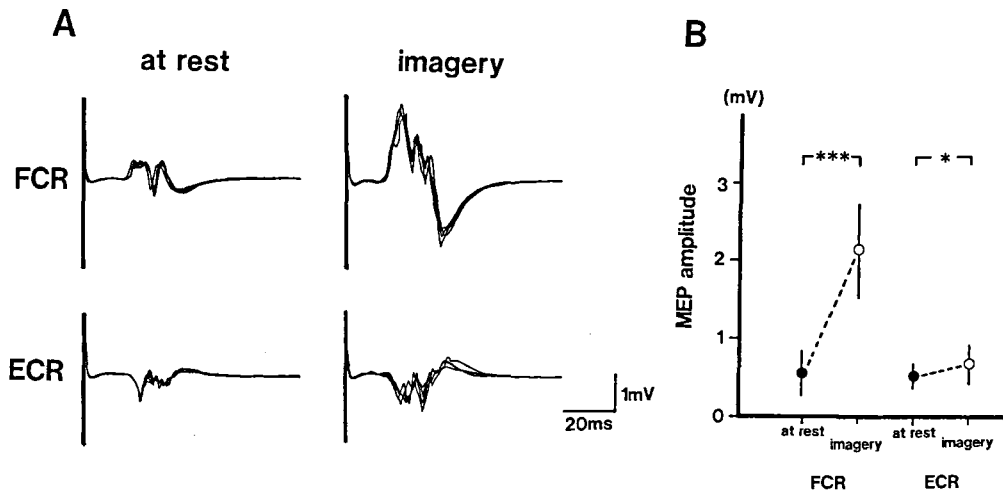


図2 Aは、運動イメージ想起時の前腕屈筋（FCR）と前腕伸筋（ECR）のMEPをそれぞれ4回の重ね書きで示した記録例。運動イメージ想起時に両者とも促通が起こったことを示す。Bは、MEPは安静時（at rest）に比べて運動イメージ想起時（imagery）で両者とも有意に大きくなったことを示す。しかし、その増大はECRに比べてFCRで有意に大きかったことを示す

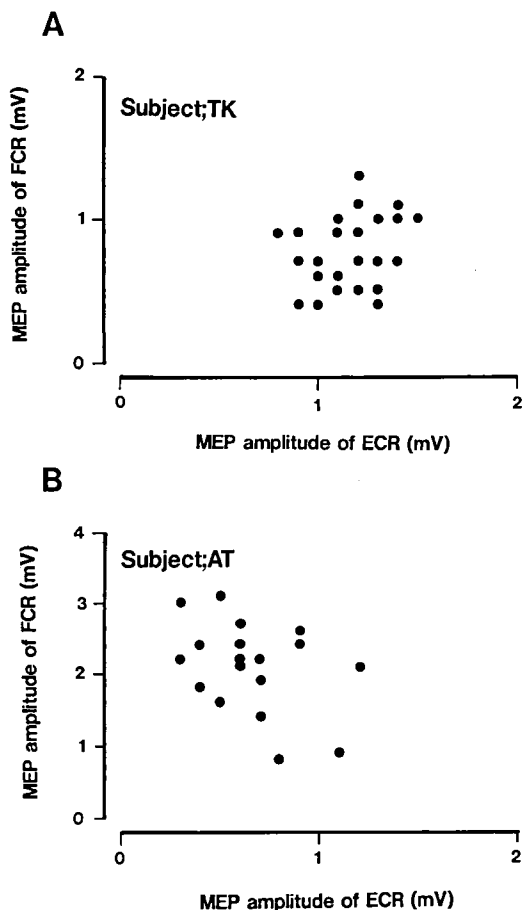


図3 FCRのMEP振幅とECRのそれとの相関関係。両者に相関関係が見られなかった例(A)と、負の相関関係が見られた例(B)を示す

確にする目的で、ここでは「メンタル・トレーニング」の意味する内容を「運動イメージ」と考え、それを行うことによって、脊髄レベルと上位運動中枢レベルでどのような効果の違いを示すかを、それぞれのレベルの興奮性を反映する指標である「H反射」と「MEP」の振幅変化を手がかりにして検討した。その結果、運動イメージ想起時にはH反射は変化せず、MEPは著明に促通された。

この結果から、確かにある運動をイメージとして想起することによって、その筋の活動に主動筋として関わる筋を支配している上位運動中枢（主に皮質運動野）の細胞はその興奮性が上昇する効果のあることが分かった。本実験では、極めて具体

的な運動（手首の屈曲）を運動イメージとして想起させた結果であった。このことは、曖昧なイメージの想起ではその効果は十分には期待できないことを意味していた。このことから、イメージトレーニングの効果을期待するには、そのイメージの内容の具体性を最大限重視することが肝要であることを示唆している。

また、同時に当然予測されたことではあるが、イメージの想起による効果は、脊髄レベルではなく、上位運動関連中枢内の変化を惹起することであった。したがって、反射レベルの下位運動中枢が主たる役割を担っている運動では、イメージ・トレーニングの効果は期待できないことも銘記しておくべきであることが示唆された。

運動イメージの想起は、目的の筋を支配する上位運動中枢を選択的に促通する効果が主で、それは拮抗筋の抑制を同時に伴う現象ではない。これは運動野内の錐体路細胞がモザイク状に形成されているという神経解剖学的知見と、実際の錐体路細胞の活動が脊髄運動細胞をどのように支配しているかに関する最近の知見（具体的には、脊髄運動細胞に促通のみを及ぼす効果を持つ錐体路細胞の数がいばん多く、拮抗筋に相反抑制を同時に及ぼすそれは少ないこと）から考えて、納得のいく結果であった。したがって、複雑なイメージ（たとえば、目的の筋を促通し、拮抗筋を同時に抑制するような）では、自からそのイメージ・トレーニングによる効果は期待できないことが示唆される。

4. まとめ

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、脊髄レベルではなく、中枢レベルで目的の筋を促通する効果のあることが分かった。この結果は、従来言われてきた「イメージ・トレーニング」の運動神経生理学的機序の一端を具体的に示していた。またこの結果から、「イメー

ジ・トレーニング」の効果を期待するなら、その時の「イメージ」の具体的な内容と、期待する効果との因果関係を十分吟味してから施行することの重要性を指摘した。

謝 辞

本研究は広島修道大学矢作 晋先生との共同研究として行われたものである。記して謝意を表します。

文 献

- 1) 笠井達哉；脳は下行性運動指令をどのようにコントロールしているか？—MEPによる解析, *Jpn. J. Sports Sci.*, 8, 876-884 (1989)
- 2) 笠井達哉；ヒトの経頭蓋的磁気刺激法, *Jpn. J. Sports Sci.*, 12, 54-79 (1993)
- 3) 笠井達哉；反応時間法とH反射法を使ったヒト随意運動の解析, *Jap. J. Sports Sci.*, 13, 131-142 (1994)
- 4) Porter, R., Lemon, R.N. ; Corticospinal Function and Voluntary Movement, Oxford, UK : Oxford Univ. Press (1993)
- 5) Rothwell, J.C., Thompson, P.D., Day, B.L., Boyd, S., Marsden, C.D. ; Stimulation of the human motor cortex through the scalp, *Exp. Physiol.*, 76, 159-200 (1991)
- 6) 志村邦義, 笠井達哉；ヒト皮質脊髄路機能の発達, *Jpn. J. Sports Sci.*, 14, 361-369 (1995)
- 7) 志村邦義, 矢作 晋, 笠井達哉；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 (1996)