

経頭蓋磁気刺激法の ヒト運動学習解明への適用

志村 邦義^{*} 矢作 晋^{**} 笠井 達哉^{***}

An Application of Motor Evoked Potential (MEP) Method to Analyzing Human Motor Learning

Kuniyoshi SHIMURA^{*},
Susumu YAHAGI^{**}, and
Tatsuya KASAI^{***}

^{*} Physical Education & Health Center,
Kitasato University

^{**} Department of Sports Sciences,
Hiroshima Shudo University

^{***} Division of Sports Sciences, Graduate
School for International Development
and Cooperation, Hiroshima University

Abstract

Until recently, drastic approach of motor learning in intact humans was not possible. The introduction of noninvasive techniques to stimulate the motor cortex in the present review permitted the testing and investigation of cortical motor outflow related to mechanisms in human motor learning. Human mapping studies, previously performed only during surgical procedures on patients with neurological disorders, can now be done with minimal discomfort. In the present brief review, therefore, we have attempted to introduce and review to use mapping techniques and to study the neurophysiological mechanisms of human motor learning. In particular, we surveyed modulation of cortical motor output during the acquisition

of new motor skills and discussed neuronal plasticity that underlies improvement of voluntary movement in the brain.

I. はじめに

運動発達の問題⁴⁵⁾と同様に運動学習の問題は、ヒトの日常行動に大きく影響する重要な問題であることから、種々の方法を駆使してその解析が試みられてきた。特に、体育科学においては、ヒトを対象とした解析が中心であることから、従来その方法論には必ずから制約を伴い、そのためメカニズムの解析という点で成功したとはいいがたい状況にある。

一方、動物を対象とした運動学習に関する研究では、細胞レベルの解析が可能なることから、その手法を駆使して、神経生理学的機序の解析が進み、最近著しい知識の集積に成功しつつある^{1,2,3,4,14,15,21,26,41,42,53)}。特に、サルを使った報告では、ある運動を長期間学習させ、その学習過程を脳の集合電位を使って解析した報告(玄番²⁷⁾と佐々木⁴⁴⁾の解説参照)や、従来の脊髄反射に対する理解では、それは可塑的变化は示さないとされていたが、その概念を覆し、運動学習の結果として、すなわち上位運動中枢の指令によって、合目的にその応答性(反射の利得)が変化し得ることを示した Wolpaw らの報告⁵⁰⁾は、非常に示唆に富み、運動学習の神経生理学的理解を一段と高めた。これら運動学習に関する細胞レベルの可塑的变化の概要については、すでに優れた総説が出されているので、ここでは取り扱わない(文献22と23の総説を参照)。特に、従来の下等動物で得られた運動学習に関する神経生理学的理解が、ヒトのそれに(特に随意運動について)そのまま普遍化で

^{*}北里大学体育・健康センター
^{**}広島修道大学スポーツ科学研究室
^{***}広島大学大学院国際協力研究科教育開発講座
スポーツ・健康科学教育部門

受付 平成8年2月27日
受諾 平成8年8月22日

きるかどうかについては疑義があったが、最近のサルを使った研究から、ヒトにおいても普遍的に起こる可能性のある機序であることが明らかになりつつある（文献 18 と 43 の総説を参照）。

しかし、運動学習の背景を成す神経生理学的機序は複雑で、動物実験のみで事足りるとは到底思われない。例えば、スポーツ技術のトレーニング方法の中には、メンタル・トレーニングのように、特に高次の神経系機能が関与する学習方法もある。このような運動学習の機序を、動物を使って解析することは至難の技である。そこには、コミュニケーションの可能なヒトを使った研究が不可欠となる。以下に、最近開発された「経頭蓋的磁気刺激法」を使った運動誘発電位 (motor evoked potential: MEP) の研究から、ヒトを対象とした運動学習の機序が解析できるとする最近の知見を短く総説した。

II. 正常者の MEP 記録による運動学習解析の可能性

経頭蓋的磁気刺激法に関する方法論的解説は他に譲る^{24, 25, 40)}として、この方法を使うことによって、ヒトの運動学習の解析が可能であることを最初に示したのは、Gandevia と Rothwell¹⁷⁾であった。彼らは、被験者がある筋の収縮を運動イメージとして思

い浮かべることによって、対象とした筋の筋収縮は認められない（背景筋放電はない）にもかかわらず、安静時（その筋の収縮を思い浮かべない時）には記録できなかった MEP が記録できることを報告した。しかも、思い浮かべる筋を変えることによって、自由に目的の筋から MEP を導出することができた。図 1 に、彼らの実際の記録例を示した。このようにして、繰り返し目的とした筋の収縮イメージを思い浮かべることによって、いつでも自由に、そして意のままに目的とした筋の MEP を記録できるようになったと報告した。そこで彼らは、このような現象を運動学習に関わる運動野細胞の興奮性の変化を反映した結果であろうと考えた。この彼らの推察には、MEP は当然上位中枢レベルで起こった現象を反映しているという前提があり、それを妥当なことと考えていたからである。しかし、この点についての確認はまだなされていない。

では、このような MEP の変化は、本当に上位中枢の運動野レベルでのみ起きている現象を現すものであろうか。また、脊髄レベルでは何ら変化は起きていないのであろうか。そこで我々は、脊髄反射 (H 反射) と MEP が両方とも記録可能な上肢の橈側手根屈筋 (flexor carpi radialis: FCR) を被験筋に、この問題を検討した⁵¹⁾。図 2 に実際の記録例を示した。H 反射はその筋の収縮をイメージしても何等変

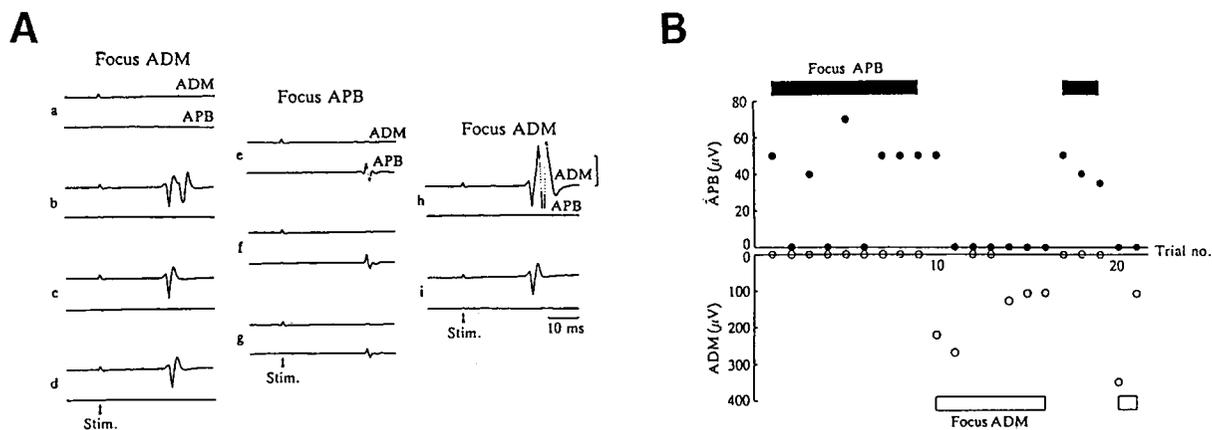


図 1 筋収縮イメージ再生時の MEP の記録
 A : 小指外転筋 (ADM : b, c, d の記録) の筋収縮をイメージした時、安静時 (イメージを行わない時 : a の記録) には記録できなかった MEP が記録できたことを示す (MU として記録したもの)。筋収縮のイメージを短母指外転筋 (APB) に変えると、ADM の MEP は休止して、短母指外転筋の MEP が記録できることを示す (e, f, g の記録)。続いて、再び ADM の筋収縮をイメージすると、APB の MEP は休止し、ADM の MEP が再び発現することを示す (h, i の記録)。B : ADM と APB の筋収縮を交互にイメージすると、イメージした筋の MEP が選択的に記録できるようになることを示す (Gandevia と Rothwell¹⁸⁾による)。

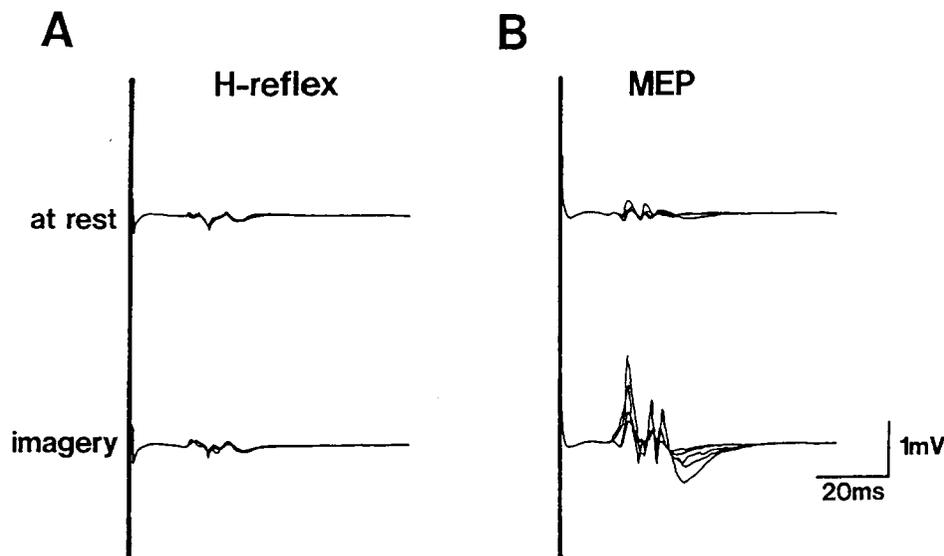


図2 橈側手根屈筋 (FCR) のH反射とMEPに及ぼす筋収縮イメージの影響 (同一被験者の記録)

A: FCRのH反射の記録例 (5回の重ね書き) で, 安静時と手首関節の屈曲イメージの間では著しい電位の変化は見られなかったことを示す. B: MEPの記録例で, 安静時にはH反射と同程度の電位であったにもかかわらず, H反射の場合と相違して, 手首関節の屈曲イメージにより著明な電位の増大が起ったことを示す. これらの結果は, 同一被験者から同じ実験シリーズの中で得られた記録であった. したがって, イメージの想起は脊髄レベルの変化というよりは, もっと上位の中枢レベルで起こる現象であり, MEPはそのような上位中枢レベルの変化を鋭敏に反映することを示す (Yahagiら⁵¹⁾による).

化は示さなかった。しかし、MEPは、その振幅が著明に増大 (促進) した。この結果は、実際には運動 (ここでは目的の筋の収縮) を行わなくても、運動のイメージとして目的の筋の収縮を思い浮かべると、その筋を支配していると考えられる運動野の錐体路細胞は、その閾値が低下することを示しており、PETを使った報告とよく対応する^{13,38)}。また、錐体路細胞の閾値の低下は、その細胞が支配する (シナプス結合をもつ) 脊髄 α 運動細胞にも当然及んでいると考えられるが、その程度は極めて小さく、 α 運動細胞の閾値を越えて、実際に筋電図として記録できるほどにはならないことを示唆していた。したがって、運動学習に関わる細胞レベルでの変化が起こる中心部位は、脳内上位運動中枢レベルと考えたGandeviaとRothwellらの考えは妥当であったといえる。

では、実際の運動学習についてはどうであろうか。MEPの興奮性の変化、および、筋の支配分布を頭蓋上にマッピング(mapping)として表現できるので^{32,47)}、運動学習の結果起きたマッピングの変化

を指標に、運動学習の機序解析の手がかりが得られるのではないかと考えられる。Pascual-Leoneら^{35,36)}はこの考えのもとに、実際の運動 (反応時間課題³⁵⁾ およびピアノ演奏での指の使い方の練習³⁶⁾ の学習過程を、パフォーマンスレベルで記録し、パフォーマンスの改善に対応して、MEPの分布地図がどのような変化を示すかをシステムテックに解析した。その一例を図3に示した。この結果から明らかのように、パフォーマンスの改善に対応して、その運動の遂行に密接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、しかもその興奮性は、周辺に広がり示すようになった。彼らはこれらの結果を、運動の学習に伴って起った脳神経細胞の一過性の可塑的变化 (細胞膜の一過性の抵抗値の変化等) を反映した現象であると解釈した。その証拠に、運動課題によっては、その運動の停止にともなってその変化が急速に元の状態に戻ることを観察している³⁵⁾。学習は、「経験による一時的な変化が永続的な変化に変容すること」として一般的に理解されていることから考えても、Pascual-Leoneら

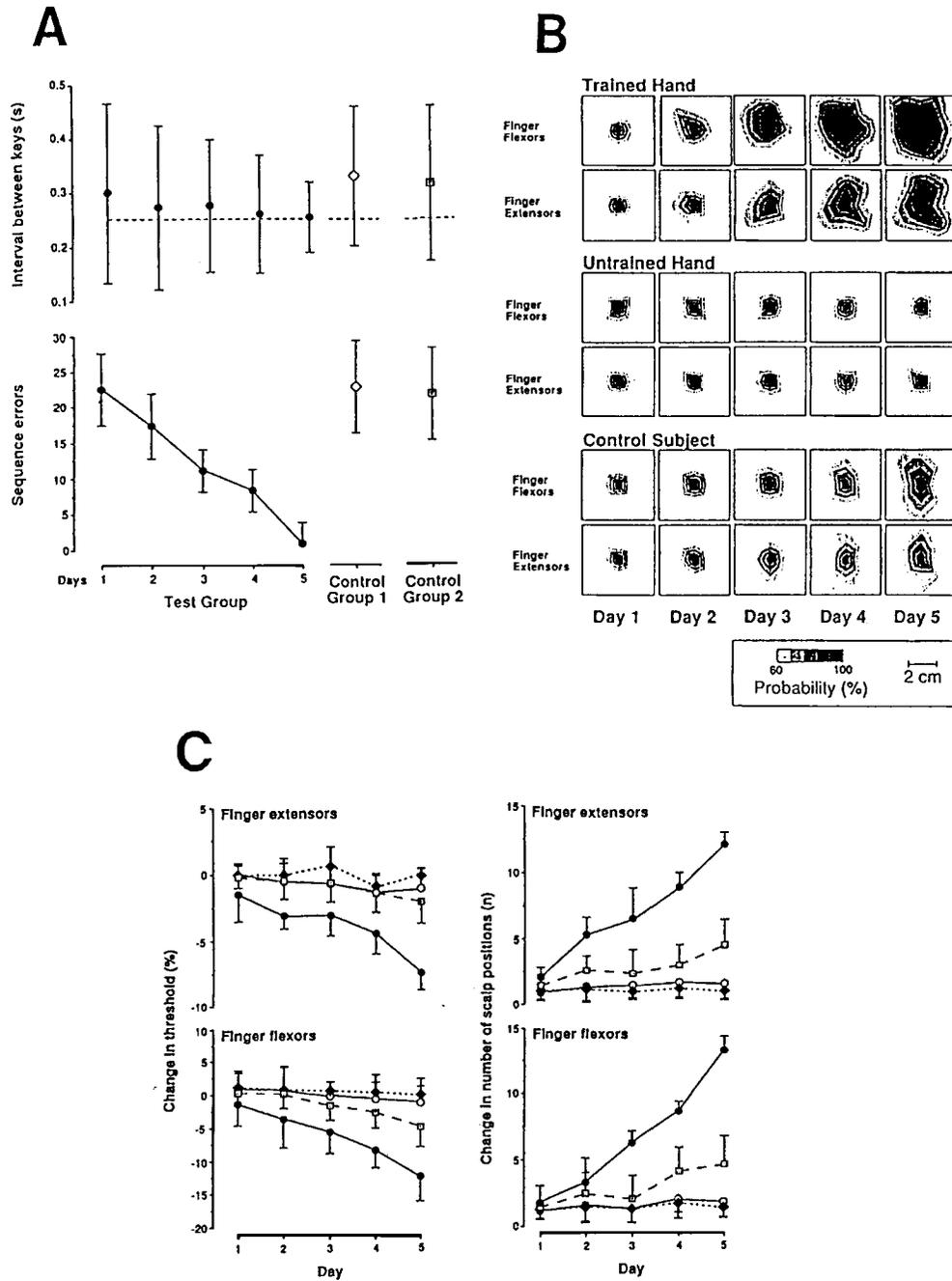


図3 運動学習（ピアノ演奏学習）によるパフォーマンスの変化とそれともなう MEP の出現頻度分布の変化

A：ピアノ演奏の練習により、パフォーマンスが上昇した（キー叩きの時間間隔の減少とエラーの減少）ことを示す（黒丸印）。しかも、ピアノ練習を行わなかった2名の被験者との間に、事前のパフォーマンス能力に差はなかったことを示す（右端の2つの結果）。B：練習が進むに従って、MEPの脳地図上での出現頻度の分布が増大していくことを示す（一番上の結果）。しかし、ピアノ演奏に使わなかった手（真ん中の結果）とピアノ演奏を練習しなかった被験者（一番下の結果）においてはそれらの記録に変化は見られなかったことを示す。C：ピアノ演奏の練習が進むに従って、MEP発現の閾値が低下してくることを示す（左側の結果：黒丸印）。しかし、練習に使わなかった手（白丸印）、ピアノ練習を行わなかった被験者（2名：ダイヤモンド印と四角印）においては、そのような閾値の変化は起こらなかったことを示す。同様に、MEPが60%以上記録できた脳の部位も、練習が進むに従って多くなっていったことを示す（右側の結果）（Pascual-Leone³⁶⁾らによる）。

のこれらの報告は、運動学習にともなう脳内変化（前述の細胞膜の抵抗値の一過性的変化）をよく反映した結果だと思われる。どのような運動学習を行うと、どのようなMEPの変化が惹起し、それが運動学習の神経生理学的側面の何を意味しているのか、といった今後解決しなければならない問題は山積しているものの、ここで紹介したMEPの一時的な変化は、ヒトを対象とした将来の運動学習解析の有力な方法となり得ることを示している。

Ⅲ. 障害者のMEP記録による運動学習解析の可能性

障害をもつ患者から記録されたMEPから、異なった観点で運動学習の機序の解析に一石を投じたのはHallettらのグループであった。彼らは、四肢の切断の後、失われた四肢の代償作用（再構築：re-organization）の結果、その肢を支配していた周辺の運動野のMEPがどのような変化を示すかを調べた^{9,10,16,46,48,49}。その結果、周辺部位の興奮性に変化が起き、しかも、その変化は脳とその部位の支配関係に依存したものであった。言い替えば、脳の支配が強い上肢においては周辺の変化が大きく、下肢においては小さかった。これは、運動学習の機序として大切な脳神経細胞の可塑的变化（前述）の程度を示していると彼らは考えた。また最近、この事実を確認するために、Kewら²⁸は、MEPとPETの同時記録を行いその両者を対比させて検討し、MEPで得られた結果がPETで得られた結果とよく対応することを報告している。

また、盲人は目の代わりに手で字を判読する。したがって、長年の訓練（学習）の結果、彼らは正常なヒトより感覚・運動機能が格段に優れている可能性が考えられる。そこで、実際にこの点を先述のMEPのマッピング法を使って調べたところ、予想通り盲人では字の判読に関わる感覚・運動野の領域が正常人のそれに比べて格段に大きくなっていった³⁴。この事実を実証するために、正常人に手の皮膚感覚による字の判読を訓練すると、この機能に関わる脳の関連領域のMEPが、広い部位で記録されるようになった³³。この事実は、訓練（学習）の結果、感覚・運動機能が高まると、その機能の昂進に比例して、脳の興奮性に変化（可塑的变化）が起こり得ることを示唆している。このことはまた、運動機能の昂進（機能の改善）には脳の感覚野の機能が不可欠

で、その変化が重要な意味をもつという今までの研究結果^{19,20}ともよく符合する。

そこで、この点を実験的に確認するために、阻血法を使って感覚情報の脳内への流入を人工的に制御した時、脳の興奮性に何が起こるかが調べられた。この興味深い問題について最近報告された結果^{5,6,39}では、磁気刺激によるMEPのみが選択的に増大した。その結果を図4に示したが、運動野にある錐体路細胞を、細胞体自体を直接にはなく、シナプスを介して間接的に刺激していると考えられている磁気刺激^{25,40}によるMEPのみが選択的に変化した。この事実から、運動の遂行に関わる広い神経回路網の興奮性が、一過性に変化を起こした結果であることが示唆される¹¹。この方法を踏襲して、再検討したRiddingとRothwell³⁷は、この現象には再現性があることを確認している。しかも、随意筋収縮下で

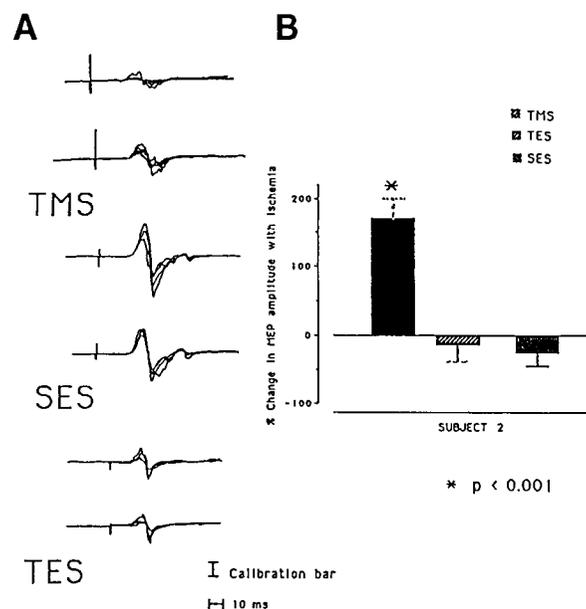


図4 経頭蓋的磁気刺激（TMS）と脊髄への電気刺激（SES）および経頭蓋的電気刺激（TES）によって得られた電位に及ぼす阻血の影響（正常人の大腿四頭筋を対象にして得られた例）

A：4回の実際の記録を重ね書きした記録例で、それぞれ上段は阻血前、下段は阻血中の記録を示す。校正は、TMSとTESは500マイクロボルト、SESは100マイクロボルトを示す。B：Aの記録から、阻血前を基準に阻血後の記録の比を計算して示したものである。TMSにおいてのみ優位に促進が起こったことを示す。阻血によって脊髄レベルではなく、上位中枢内の神経細胞体そのものというよりは、シナプスを介した広い部位で一過性の促進現象が起こることを示す（Cohenら¹¹による）。

は、著しい MEP の増大現象は観察されなかったことから、感覚入力遮断によって起こった MEP の増大は、感覚入力の欠如に付随した脳の一過性の興奮性の上昇（可塑的变化）を反映していると解釈した。このような変化は、先述の実際の運動学習を遂行した際に起こった運動野のダイナミックな興奮性の変化と相対峙する事実であり、実際の運動学習にともなう神経生理学的機序を反映しているものと考えられる。言い換えると、運動学習の神経生理学的機序として、一つには、障害により損傷を受けた部位では長期的変化として、新しい細胞の生成がある。一方、一過性の変化としては、細胞間におけるニューロンレベルでの可塑的な興奮性の変化が起こる。この一過性の変化を繰り返すことによって、いわゆる永続的变化としての「運動の記憶」が固定化されていくのであろう。前述の事実は、状況が変化した（感覚入力減少した）結果、このような一過性の興奮性の変化が起こり、それが MEP の変化として記録できたことを示すものである。

このような MEP の一過性の変化は、運動のトレーニングに伴う「疲労」によっても惹起される。MEP と疲労に関する最近の報告^{7, 8, 29, 30, 31, 52)}では、ある運動課題の遂行を被験者に課し、その結果起こる「疲労」が、MEP の形状にどのような影響を及ぼすものかを検討したものである。運動学習、特に体育科学の分野で取り扱う運動学習課題では、その遂行にともなう疲労をとともなう場合が多いことから、疲労現象が MEP の形状に及ぼす影響を常に考えておかなければならない。得られた MEP の動的变化が、運動学習のそれなのか、それとも疲労の結果のそれなのかを常に吟味し、その評価には細心の注意を払うことが大切である。この注意を怠ると、結果の解釈に重大な誤りを引き起こしかねないことになるからである。

IV. まとめ

以上、ヒトを対象とした MEP の変化から、運動学習の基礎を成す神経細胞の一過性の興奮性変化（可塑的变化）を非侵襲的に測れることを示した。また最近、ヒトを対象として非侵襲的脳機能検査法として、現在研究が進行している PET や脳磁図法³⁸⁾などと対応して、今後磁気刺激法も注目されて行くものと思われる。特に、具体的な運動との対応関係の上で、運動学習の中核メカニズムを解析して行くこ

とが求められている¹²⁾。したがって、磁気刺激法はこの課題へのアプローチの有効な手段として、今後一層注目されていくであろう。

文 献

- 1) Aou, S. A., et al.: Increases in excitability of neurons of the motor cortex of cats after rapid acquisition of eye blink conditioning. *J. Neurophysiol.*, 68: 560-569, 1992.
- 2) Asanuma, H., et al.: Direct and indirect sensory input pathways to the motor cortex: Its structure and function in relation to learning of motor skills. *Jpn. J. Physiol.*, 39: 1-19, 1989.
- 3) Asanuma, H. and A. Keller: Neuronal mechanisms of motor learning in mammals. *NeuroRep.*, 2: 217-224, 1991.
- 4) Asanuma, H. and A. Keller: Neurobiological basis of motor learning and memory. *Concep. Neurosci.*, 2: 1-30, 1991.
- 5) Brasil-Neto, J. P., et al.: Rapid reversible modulation of human motor outputs after transient deafferentation of the forearm: A study with transcranial magnetic stimulation. *Neurol.*, 42:1302-1306, 1992.
- 6) Brasil-Neto, J. P., et al.: Rapid modulation of human cortical motor outputs following ischaemic nerve block. *Brain*, 116: 511-525, 1993.
- 7) Brasil-Neto, J. P., et al.: Postexercise depression of motor evoked potentials: a measure of central nervous system fatigue. *Exp. Brain Res.*, 93: 181-184, 1993.
- 8) Brasil-Neto, J. P., et al.: Central fatigue as revealed by post-exercise decrement of motor evoked potentials. *Muscle & Nerve*, 17:713-719, 1994.
- 9) Cohen, L. G., et al.: Magnetic stimulation of the human cerebral cortex, an indicator of reorganization in motor pathways in certain pathological conditions. *J. clin. Neurophysiol.*, 8: 56-65, 1991.
- 10) Cohen, L. G., et al.: Motor reorganization after upper limb amputation in man. *Brain*, 114: 615-627, 1991.
- 11) Cohen, L. G., et al.: Plasticity of cortical motor output organization following deafferentation, cerebral lesions, and skill acquisition. In: electrical and magnetic stimulation of the brain and spinal cord. Raven Press, 1993, pp. 187-200.
- 12) Conway, B. A., et al.: Synchronization between motor cortex and spinal motoneuronal pool during the performance of a maintained motor task in man. *J. Physiol.*, 489: 917-924, 1995.
- 13) Decety, J., et al.: Mapping motor representations with positron emission tomography. *Nature*, 371: 600-602, 1994.
- 14) Donoghue, J. P. and J. N. Sanes: Organization of adult motor cortex representation patterns following neonatal nerve injury in rats. *J. Neurosci.*, 8: 3221-3232, 1988.
- 15) Donoghue, J. P., et al.: Dynamic organization of primary motor cortex output to target muscles in adult rats. II. Rapid reorganization following motor nerve lesions. *Exp. Brain Res.*, 79: 492-503, 1990.
- 16) Fuhr, P., et al.: Physiological analysis of motor reorganization following lower limb amputation. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 85: 53-60, 1992.
- 17) Gandevia, S. C. and J. C. Rothwell: Knowledge of motor commands and the recruitment of human motoneurons. *Brain*, 110:1117-1130, 1987.
- 18) Garraghty, P. E., et al.: Plasticity of sensory and motor maps in adult and developing mammals. *Adv. Neuro. Behav. Dev.*, 4:1-36, 1994.

- 19) *Hasan, Z.* and *D. G. Stuart*: Animal solutions to problems of movement control: The role of proprioceptors. *Ann. Rev. Neurosci.*, 11: 199-223, 1988.
- 20) *Hasan, Z.*: Role of proprioceptors in neural control. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 2: 824-829, 1992.
- 21) *Iriki, A.*, et al.: Long-term potentiation in the motor cortex. *Science*, 245: 1385-1387, 1989.
- 22) *Ito, M.*: The cellular basis of cerebellar plasticity. *Curr. Opin. Neurobiol. Aging*, 1: 616-620, 1991.
- 23) *Kaas, J. H.*: Plasticity of sensory and motor maps in adult mammals. *Ann. Rev. Neurosci.*, 14: 137-167, 1991.
- 24) 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.
- 25) 笠井達哉: ヒトの経頭蓋的大脳皮質刺激法. *Jpn. J. Sports Sci.*, 12: 54-70, 1993.
- 26) *Kimberle, M. J.* and *J. P. Donoghue*: Reshaping the cortical motor map by unmasking latent intracortical connections. *Science*, 251: 944-947, 1991.
- 27) 玄番央恵: 運動学習と中枢のメカニズム. 発達と脳のメカニズム. ミネルヴァ書房, 1994, pp. 99-119.
- 28) *Kew, J. J. M.*, et al.: Reorganization of cortical blood flow and transcranial magnetic stimulation maps in human subjects after upper limb amputation. *J. Neurophysiol.*, 72: 2517-2524, 1994.
- 29) 前原利彦ほか: 手関節の等尺性最大筋収縮持続後の脊髓反射(H反射)と運動誘発電位. *Jpn. J. Sports Sci.*, 14: 647-656, 1995.
- 30) *McKay, W. B.*, et al.: Focal depression of cortical excitability induced by fatigue muscle contraction: a transcranial magnetic stimulation study. *Exp. Brain Res.*, 105: 276-282, 1995.
- 31) *Mills, K. R.*, et al.: Human muscle fatigue investigated by transcranial magnetic stimulation. *NeuroRep.*, 6: 1966-1968, 1995.
- 32) *Mortifee, P.*, et al.: Reliability of transcranial magnetic stimulation for mapping the human motor cortex. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 93: 131-137, 1994.
- 33) *Pascual-Leone, A.* and *F. Torres*: Plasticity of the sensorimotor cortex representation of the reading finger in Braille readers. *Brain*, 116: 39-52, 1993.
- 34) *Pascual-Leone, A.*, et al.: Modulation of motor cortical outputs to the reading hand of Braille readers. *Ann Neurol.*, 34: 33-37, 1993.
- 35) *Pascual-Leone, A.*, et al.: Modulation of cortical motor output maps during development of implicit and explicit knowledge. *Science*, 263: 1287-1289, 1994.
- 36) *Pascual-Leone, A.*, et al.: Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *J. Neurophysiol.*, 74: 1037-1045, 1995.
- 37) *Ridding, M. C.* and *J. C. Rothwell*: Reorganization in human motor cortex. *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, 73: 218-222, 1995.
- 38) *Roland, P. E.*: Brain activation. Wiley-Liss, Inc., 1993.
- 39) *Rossini, P. M.*, et al.: Short-term brain 'plasticity' in humans: transient finger representation changes in sensory cortex somatotopy following ischemic anesthesia. *Brain Res.*, 642: 169-177, 1994.
- 40) *Rothwell, J. C.*, et al.: Stimulation of the human motor cortex through the scalp. *Exp. Physiol.*, 76: 159-200, 1991.
- 41) *Sanes, J. N.*, et al.: Dynamic organization of primary motor cortex output to target muscles in adult rats. I. Long-term patterns of re-organization following motor or mixed peripheral nerve lesions. *Exp. Brain Res.*, 79: 479-491, 1990.
- 42) *Sanes, J. N.* and *J. P. Donoghue*: Immediate and delayed changes of rat motor cortical output representation with new forelimb configurations. *Cereb. Cortex*, 2: 141-152, 1992.
- 43) *Sanes, J. N.* and *J. P. Donoghue*: Organization and adaptability of muscle representations in primary motor cortex. *Exp. Brain Res.*, 22: 105-127, 1992.
- 44) 佐々木和夫: 大脳皮質における運動の準備状態. 新生理学体系, 10. 運動の生理学. 医学書院, 1988, pp. 37-51.
- 45) 志村邦義, 笠井達哉: ヒト皮質運動脊髓路機能の発達. *Jpn. J. Sports Sci.*, 14: 361-369, 1995.
- 46) *Topka, H.*, et al.: Reorganization of corticospinal pathways following spinal cord injury. *Neurol.*, 41: 1276-1283, 1991.
- 47) *Wassermann, E. M.*, et al.: Noninvasive mapping of muscle representations in human motor cortex. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 85: 1-12, 1991.
- 48) *Weiller, C.*, et al.: Functional reorganization of the brain in recovery from striatocapsular infarction in man. *Ann. Neurol.*, 31: 463-472, 1992.
- 49) *Weiller, C.*, et al.: Individual patterns of functional reorganization in the human cerebral cortex after capsular infarction. *Ann. Neurol.*, 33: 181-189, 1993.
- 50) *Wolpaw, J. R.* and *J. S. Carp*: Memory traces in spinal cord. *TINS*, 13: 137-142, 1990.
- 51) *Yahagi, S.*, et al.: An increase in cortical excitability with no change in spinal excitability during motor imagery. *Percept. Mot. Skills*, 83: 288-290, 1996.
- 52) *Zanette, G.*, et al.: Long-lasting depression of motor-evoked potentials to transcranial magnetic stimulation following exercise. *Exp. Brain Res.*, 107: 80-86, 1995.
- 53) *Zohary, E.*, et al.: Neuronal plasticity that underlies improvement in perceptual performance. *Science*, 263: 1289-1292, 1994.