

運動練習効果の臨界点を超えるためのトレーニング方法の開発 —運動イメージと運動練習を併用した運動学習効果の検討—

福 本 悠 樹* 東 藤 真理奈* 鈴 木 俊 明*

CHANGES IN SPINAL MOTONEURON EXCITABILITY DURING THE IMPROVEMENT OF FINGERTIP DEXTERITY BY ACTUAL EXECUTION COMBINED WITH MOTOR IMAGERY PRACTICE

Yuki Fukumoto, Marina Todo, and Toshiaki Suzuki

Key words: motor learning, motor imagery, F-wave, fingertip dexterity.

緒 言

何らかの疾病により運動技能が失われた場合、運動の実行 (actual execution; AE) を繰り返し、適切な運動の再学習を図っていく必要がある。運動技能を高めるためには、一般に AE を反復実施することが必要となり、AE 終了時から次の AE 開始時までの試行間間隔が重要になることも知られている。この試行間間隔には、直前に行った運動遂行時の記憶から誤差を考慮して、運動プログラムの修正が行われているとされている。運動遂行時の記憶を再生するという点は、運動イメージ (motor imagery; MI) の定義と共通しており、MI はワーキングメモリー機能を利用した認知過程であり、運動に関連する記憶の再生と定義される¹⁾。したがって、試行間間隔に実施する MI 練習 (MI practice; MIP) は、運動プログラムの修正を補強する可能性が高く、実際に AE と MIP の併用が有用であるとした報告も多数見受けられる。

AE と MIP の併用が有用とされる機序としては、高次レベルの回路の同時強化がもたらされるため

と考えられているが、AE と MIP の併用が特別な効果を有さないとした報告も散見されており、このような結果の不一致は、MIP の実施方法の取り決めが明確に指定されていなかったことに起因すると指摘されている⁸⁾。つまり、AE と MIP の併用が真に有用であるかについては、その実施方法の側面でいまだ解決していない問題となる。

MIP により器質的变化として筋肥大などが生じる訳ではないため、運動技能変化の考察は、神経生理学的な背景とともに議論されるべきである。MIP 中に補足運動野を中心として AE に関与する中枢脳領域の活性化が認められることは既に一定のコンセンサスが得られている。更に、近年では補足運動野を中心とした中枢脳領域が脊髄レベルの興奮性に影響することも示されている^{4,5)}。脊髄運動ニューロンは、運動発現に直接関係する運動指令の最終的な共通経路であり、ここが精密なピンチ力制御スキルの低下を説明する要因の 1 つ⁷⁾ になり得るが、上肢を対象とした MIP 中の脊髄レベルの変調に焦点を当てた報告はごく稀である。加えて、脊髄レベルの興奮性が増大する、あるいは

* 関西医療大学大学院保健医療学研究科 Graduate School of Health Sciences, Graduate School of Kansai University of Health Sciences, Osaka, Japan.

は不変であるとした矛盾する結果も示されている。これについて MIP 中の脊髄運動ニューロンの興奮性変化は、実行される MIP の質的側面（難度や明瞭性）に影響されている可能性があり、明瞭な MIP が実行された場合、MIP 中の脊髄運動ニューロンの興奮性は増大を認めるものの、過度な高まりは認めないことが示されている²⁾。したがって、MIP の実施方法の不透明さが、実行される MIP の明瞭性を変動させ、AE と MIP の併用効果に一貫性のない結果をもたらしていた可能性がある。逆の言い方をすれば、厳格な MIP 実施規定を設けたうえで AE と MIP の併用は、MIP 中に脊髄運動ニューロンの過度な興奮性増大を防ぎつつ、結果的に AE 単独実施の場合よりも高い運動技能水準を獲得させるに至るのではないかと仮説を立てた。本研究の目的は、厳格な MIP 実施規定を設けたうえで AE との併用効果を検討することであり、脊髄運動ニューロンの興奮性変化を踏まえた運動技能変化を追跡した。

方 法

A. 対象者

G*power (version 3.1.9.4) を用いた適正サンプルサイズに基づき、単純無作為抽出法によって右利きの健常者25名を対象とした（男性13名、女性12名、平均年齢 23.8 ± 6.1 歳）。対象者は、介入条件と対照条件の双方を実施することとし、クロスオーバーデザインにて比較検討した。本研究の対象者には、ヘルシンキ宣言に基づいて、本研究の意義・目的などを十分に説明し、文書で同意を得たうえで計測を実施した（関西医療大学研究倫理審査委員会倫理番号：22-04）。

B. プロトコル

まず、Pre Base line Performance (Pre-BP) として、左母指と示指によるつまみ動作課題において手指巧緻性を評価した。次に30秒間の安静背臥位中の脊髄運動ニューロンの興奮性変化を計測した (Rest)。AE と MIP を併用する場合には、AE 後の試行間隔に MIP を挿入するほうが効果を得やすいとされていることから、実施順序として、まず30秒間の AE を設け、AE 中の手指巧緻性を評価、続けて30秒間の MIP 練習³⁾ を実施した（介

入条件）。MIP では直前の AE の記憶を再生するわけであるが、そのイメージ戦略として「ピンチ動作時の母指球の筋収縮をイメージする」ことと「ピンチメータに表示されるピンチ力が数値的に増減する様子をイメージする（＝間接的に筋感覚を連想させるような想起内容）」ことを交互に想起するよう指示し、筋感覚的 MI の実施難易度の調整を行った⁶⁾。そして、厳格な MIP 実施とするためには、上記をどれだけ具体的に口頭指示できるかということになる。この点は先行研究⁶⁾を参考に、「つまむ動作による筋収縮の感覚を、ピンチメータに表示される数字が増減する様子とともに交互に想像してください」とした。対照条件では、MIP は実施せず、再度の安静状態を30秒間とらせた (Without MIP)。MIP と Without MIP 中は脊髄運動ニューロンの興奮性変化を計測した。また各30秒間の AE と MIP（あるいは Without MIP）の実施を1セットとし、AE 単独では天井効果を迎えるとされる6セットを反復実施した。6セットの反復実施後、改めて母指と示指によるつまみ動作課題において手指巧緻性を評価した (Post-BP)。

C. 手指巧緻性の評価

運動課題は50% maximum voluntary contraction (MVC) と10% MVC へ2秒間隔でピンチ力調整を行う交互力量調整課題を採用し、ピンチメータ Digital indicator F340A (Unipulse Inc.) にリアルタイムに表示されるピンチ力を視覚的に確認させるなかで課題を実施させた。発揮ピンチ力切り替えのタイミングは、メトロノームを用いた2秒間隔の聴覚刺激音によって管理した。手指巧緻性の指標は、規定値からの絶対誤差 (kgf) とし、対象者の発揮ピンチ力から規定値として設定している50% MVC（または10% MVC）値を引くことで算出される誤差の値を絶対値に変換し、更に30秒間の運動課題中の絶対誤差を平均化することで算出した。手指巧緻性は Pre と Post-BP、各 AE 課題中に筋電図収録ソフト Vital Recorder2 (KISSEI COMTEC Inc.) にて計測し、多用途生体解析システム BIMUTAS-Video (KISSEI COMTEC Inc.) を用いて解析した。

D. 脊髄運動ニューロンの興奮性評価

脊髄運動ニューロンの興奮性変化の評価指標にはF波を用いた。F波とは、末梢の混合神経線維に最大上の電気刺激を与えることで発生した逆行性のインパルスが軸索を上行し、脊髄前角細胞にて再発火した結果、順行性のインパルスとして軸索を下行し、対応する筋にて記録される複合筋活動電位とされる。F波の記録には、誘発筋電計 Viking Quest Ver 9.0 (Natus Medical Inc.) を用いた。F波記録条件は、刺激電極を左手関節部で正中神経上に、探索電極を左母指球上の筋群に、基準電極を左第1中手骨頭背側に、接地電極を左前腕掌側中央部に貼付した。刺激条件は、刺激強度を最大上刺激とし、持続時間0.2 ms にて1 Hz の頻度で30回刺激した。F波分析項目は、脊髄前角細胞で再発火する筋線維数の増加を反映する振幅F/M比を用いた。F波は、安静時に加えて各MIP(あるいはWithout MIP)中に計測し、各試行時の振幅F/M比を算出した。

E. MIP 実施状況の内省調査

50% MVC または10% MVC へ調整するイメージ中に意識していたことを自由記述形式で回答させた。

F. 統計学的検討

絶対誤差について、Pre-BP と Post-BP における条件内2群比較を、ウィルコクソンの符号順位検定にて行った。また、各条件における経時的な変化の追跡を目的に、AE 1 回目から6回目までの絶対誤差を、一般化線形混合モデルを用いた二元配置反復測定分散分析にて検討した。最後に、Post-BP での成績から Pre-BP での成績を差し引いた絶対誤差の変化量を用いて、条件間比較をウィルコクソンの符号順位検定にて行った。

脊髄運動ニューロンの興奮性変化について、Rest を対照として、MIP (または Without MIP) 1 回目から6回目の振幅F/M比をSteel検定にて多重比較した。更に、各AEでの手指巧緻性の変化(絶対誤差)と、Restを基準とした各MIP中(またはWithout MIP中)の脊髄運動ニューロンの興奮性変化(振幅F/M比変化量)の関係性をスピアマンの順位相関係数にて検討した。

有意水準はいずれも5%未満とし、Z value に

表1. 運動技能と脊髄運動ニューロンの興奮性の経時的な変化
Table 1. Changes in motor skills and spinal motoneuron excitability over time.

Cndition	Absolute error (kgf)						F/M amplitude ratio (%)			
	Pre-BP	AE1	AE2	AE3	AE4	AE5	AE6	Post-BP		
Intervention	0.55 (0.44-0.60)	0.53 (0.38-0.63)	0.49 (0.37-0.56)	0.48 (0.38-0.56)	0.48 (0.30-0.65)	0.48 (0.35-0.55)	0.47 (0.30-0.53)	0.46 (0.33-0.52)		
Control	0.53 (0.38-0.62)	0.49 (0.39-0.71)	0.44 (0.34-0.55)	0.47 (0.32-0.57)	0.43 (0.36-0.62)	0.45 (0.34-0.56)	0.47 (0.37-0.53)	0.48 (0.35-0.54)		
Cndition	F/M amplitude ratio (%)									
	Rest	MIP1 (Without MIP1)	MIP2 (Without MIP2)	MIP3 (Without MIP3)	MIP4 (Without MIP4)	MIP5 (Without MIP5)	MIP6 (Without MIP6)			
Intervention	0.84 (0.58-1.19)	1.01 (0.75-1.43)	0.93 (0.56-1.39)	0.92 (0.69-1.14)	1.01 (0.92-1.24)	0.97 (0.59-1.17)	1.08 (0.62-1.33)			
Control	0.91 (0.55-1.28)	0.98 (0.66-1.28)	0.88 (0.70-1.29)	0.85 (0.50-1.18)	0.94 (0.60-1.26)	0.90 (0.55-1.38)	0.93 (0.57-1.21)			

BP; baseline performance, AE; actual execution, MIP; motor imagery practice. Median (first quartile – third quartile).

基づいて Effect size (r) の算出を行い、統計学的解析ソフトには SPSS ver.26.0 (IBM, Inc.) とオープンソースソフトウェア R (4.1.0) を用いた。

結 果

A. 手指巧緻性の結果

介入条件では、Pre-BP と比較した Post-BP において絶対誤差が減少した ($P < 0.001, r = 0.84$)。対照条件でも、Pre-BP と比較した Post-BP において絶対誤差が減少した ($P = 0.003, r = 0.59$)。AE 1 回目から 6 回目までの絶対誤差の変化について、両条件間で交互作用は認められなかったが ($F(5,264) = 0.535, P = 0.749$)、Pre-BP を基準とした Post-BP での絶対誤差変化量において、対照条件と比較した介入条件において絶対誤差変化量が更に減少した ($P = 0.019, r = 0.47$) (図 1, 表 1)。

B. 脊髄運動ニューロンの興奮性変化の結果

介入条件の振幅 F/M 比は、Rest を対照とした各 MIP 間に差は認めなかった (vs MIP1: $P = 0.344$, vs MIP2: $P = 0.892$, vs MIP3: $P = 0.968$, vs MIP4: $P = 0.379$, vs MIP5: $P = 0.984$, vs MIP6: $P = 0.887$)。また各 AE での絶対誤差と Rest を基準とした各 MIP 中の振幅 F/M 比変化量の間に有意な相関は認めなかった ($r_s = -0.130, P = 0.114$)。対照条件の振幅 F/M 比は、Rest を対照とした各 Without MIP 間に差は認めなかった (vs Without MIP1: $P = 0.983$, vs Without MIP2: $P = 0.994$, vs Without MIP3: $P = 1.000$, vs Without MIP4: $P = 0.999$, vs Without MIP5: $P = 0.996$, vs Without MIP6: $P = 0.994$)。また、各 AE での絶対誤差と Rest を基準とした各 Without MIP 中の振幅 F/M 比変化量の間に有意な相関は認めなかった ($r_s = -0.191, P = 0.019$) (図 2, 表 1)。

C. MIP 実施状況の内省調査の結果

自由記述形式で実施した内省調査の結果は表 2 のとおりである。

考 察

手指巧緻性の指標である絶対誤差は、AE を重ねるごとに直線的に漸減するわけではなく、増大や減少あるいは不変といった AE 間での変動を繰り返しながら最終的に運動技能向上へと至ってい

た。ただし、AE に MIP を組み合わせることで、より高い運動技能水準に到達していた。これは MIP が何らかの影響を及ぼしたと考えられるが、安静を対照とした各 MIP 中に統計学的な振幅 F/M 比の増大を認めるには至らず、絶対誤差との有意な相関も認められなかった。

通常、運動の学習は、AE を反復するなかで推し進められるが、運動技能は直線的に向上するわけではない。AE を反復するなかでは、ある程度の探索が生じているとされており、変動 (= 探索) を繰り返しながら向上していくことが一般である。探索は即時的な技能改善には有用とされており、成功報酬情報のみを提示する場合、あるいは誤差情報も提示する場合の双方においてタスク関連の変動が高いほど速い学習率を認めたとされている。更に、試行錯誤のプロセスとして、意図的に運動出力に変動を発生させることで (計画ノイズ)、パフォーマンスを向上させ、コストを削減する運動活動の新しい運動制御方針が生み出されるともされている。したがって、探索や計画ノイズなどの影響で、両条件ともに各 AE 間で差を認めないながらも、最終的な運動技能となる Post-BP の段階では運動技能水準が高まるに至り、Pre-BP よりも手指巧緻性が向上したのだと示唆された。

ただし介入条件では、より高い運動技能水準へと至っているため、MIP が運動学習効果を高めていた可能性がある。これについて、近年では、MIP 単独であっても運動学習が進むことが示されており、MIP 単独の効果として運動技能水準を高めていた可能性がある。更に、MIP は直前の運動記憶の再生であることから、試行間間隔に挿入された MIP が運動プログラムの修正も適正化していた可能性がある。したがって、AE 後に MIP を挿入するという実施順序においては、MIP 単独の効果あるいは AE 効果を増幅させる形で、より高い運動技能水準の獲得へかかわったと示唆された。

一方で、このような運動技能変化に、MIP 中の脊髄運動ニューロンの興奮性変化は相関していなかった。そもそも、本研究においては、MIP 中に脊髄運動ニューロンの興奮性増大も認めていなかった訳であるが、MIP 中の脊髄運動ニューロンの興奮性変化は、直後の運動実行に備えた脊髄の

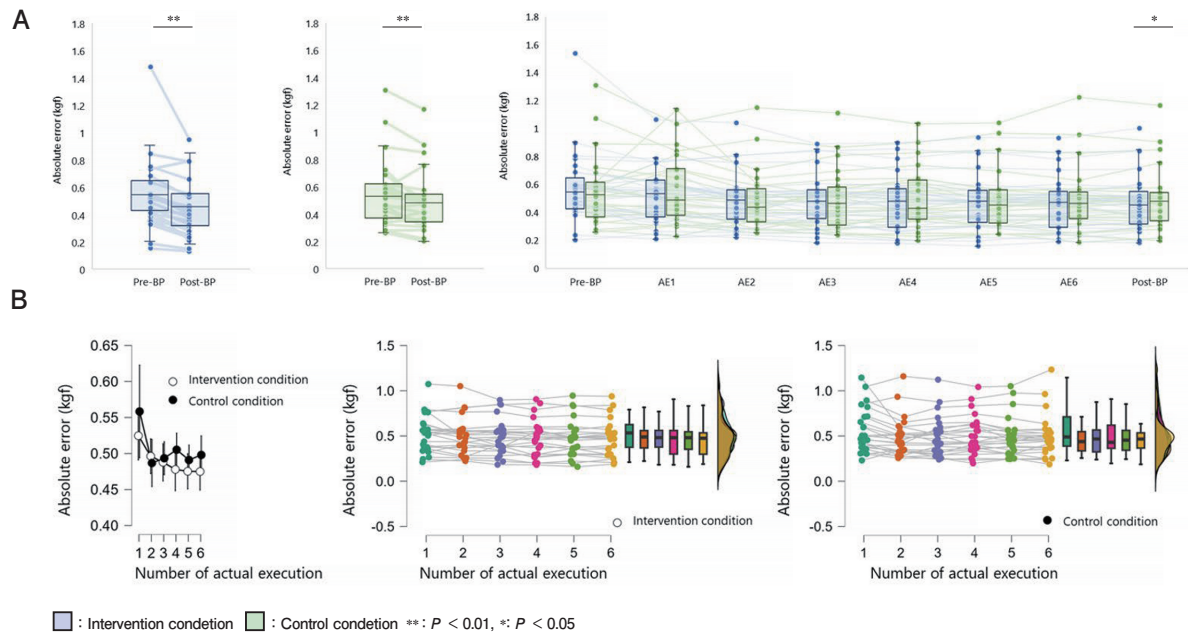


図1. 運動技能の変化

Fig.1. Motor skill changes.

(A) Blue and green boxes indicate the intervention and control conditions, respectively. Motor skills improved after repetition in both conditions. Furthermore, motor skills after repetition of actual execution and motor imagery were at a higher skill level than after repetition of actual execution alone. (B) The insertion effect of motor imagery practice seemed to emerge after a series of actual execution was accomplished, and no change was observed during motor practice.

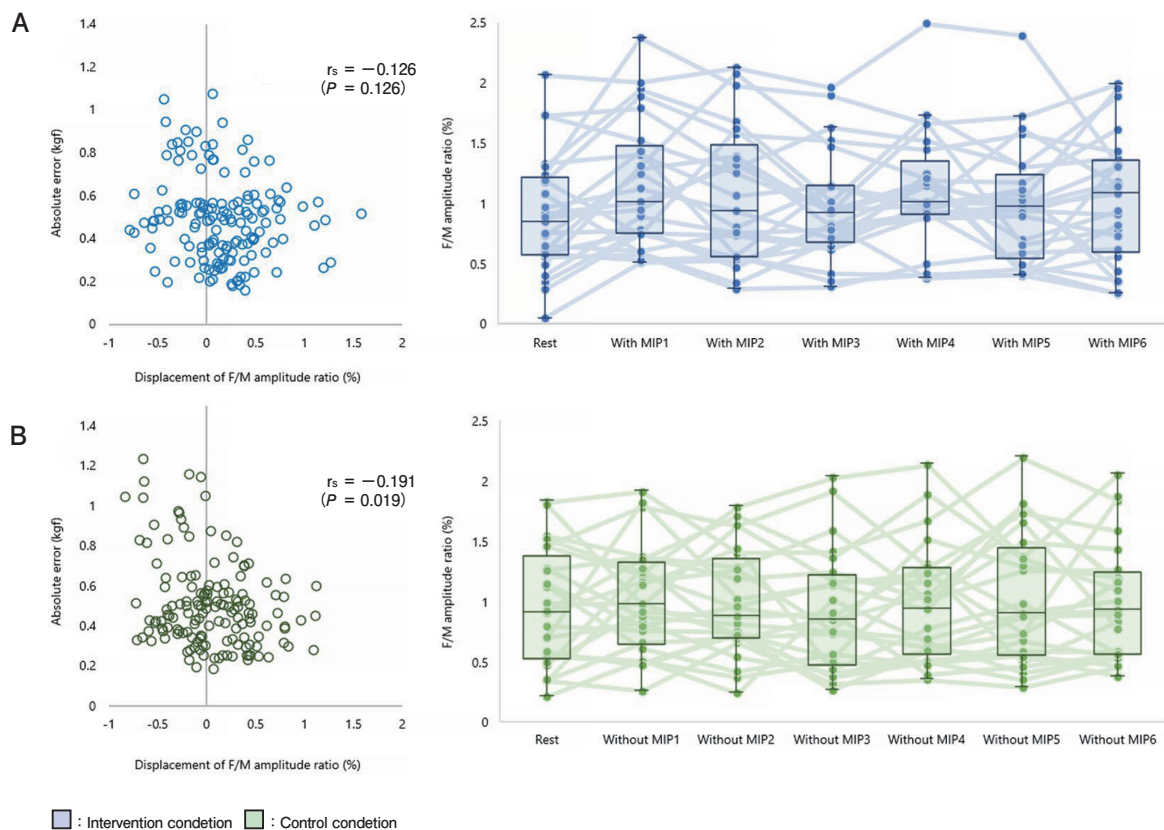


図2. 脊髄運動ニューロンの興奮性変化

Fig.2. Excitability changes in spinal motoneurons.

(A) Intervention condition. There was no difference in the F/M amplitude ratio during each motor imagery session compared to rest. (B) Control condition. There was no difference in the F/M amplitude ratio during each motor imagery session compared to rest. In addition, the relationship between motor skills during each actual execution session and the F/M amplitude ratio during no motor imagery showed no correlation (Spearman's rank correlation coefficient).

表 2. 内省調査の結果
Table 2. Results of the internal survey.

What did you consciously imagine in the process of having the force adjusted to 50%MVC?	What did you consciously imagine in the process of having the force adjusted to 10%MVC?
N1 Gradually exerted force and aimed at 50% value	Gradually relaxing, I aimed for a value of 10%
N2 To apply force more strongly	To pinch lightly
N3 How to apply force to the thumb	Than 50%, while relaxing the thumb while putting more force into it
N4 Remembering the amount of force when you actually worked on it	Remembering the amount of force when you actually worked on it
N5 Image of mother and index finger strongly together	Imagine slowly releasing the thumb and index finger
N6 Numbers	Numbers
N7 Muscle contraction and the number	Numbers
N8 Do not relax too much	Image as if you hold it lightly
N9 The number	The number
N10 Image of muscle contraction	Imagine that the muscles relax
N11 So that the nails turn white	How much force can be weakened
N12 Image of gradual contraction of the ball of the thumb	Image of gradually relaxing the thumb ball
N13 Grip stronger than you think	Grip the pinch meter just enough not to drop it
N14 The amount of force	How much you can weaken the force
N15 Muscle contraction during actual adjustment	Sense of relaxing the whole body
N16 Image of applying force	Image of relaxing
N17 Muscle contraction	Relaxation of muscles
N18 Muscle contraction	Imaged to bring the strength to 10%MVC while relaxing
N19 Image of exerting force strongly	Image of 10% strength softly
N20 Contraction of the muscle	Do not relax too much
N21 Put in about 60% of the force	Put in about 15% strength
N22 Putting in the force	I was able to do it well from the beginning, so I need to be able to keep it up
N23 Do not overdo it	It's like being in a sauna to get in shape
N24 Imagine pinching something delicate	I'm going to put some strength in my fingertips
N25 Try to grip it a little tighter	Let's relax the hands a little bit

利得条件の調整の結果である。そのため、その後
に実施される運動課題の遂行予測に基づいて脊髄
運動ニューロンの興奮性増大が必要であるか否か
が重要となる。運動の習熟に伴う脊髄レベルの興
奮性変化について、上肢の順序立った運動学習後
の橈側手根屈筋の H 反射振幅が低下したことや、
比較的实施難易度の高い運動課題であっても技能
習熟とともに振幅 F/M 比が低下を認めると報告
されている。加えて、巧緻な運動課題では皮質か
らの制御を強く受けるため脊髄レベルの興奮性が
増大しないことも報告されている。したがって、
本研究での運動課題が手指巧緻動作であったこと
と、反復した AE に伴う運動技能向上が認められ
ていたことから、直後の運動遂行予測に基づいて
MIP 中の脊髄運動ニューロンの興奮性は増大を示
す必要がなかったものと考えられる。加えて、明

瞭な MIP が実行された場合、脊髄運動ニューロ
ンの過度な興奮性増大は抑えられるため、MIP 中
の脊髄運動ニューロンの興奮性増大の程度が大き
いほどに、MIP 後の運動技能向上も大きい訳では
ない。これら要素がかかわり合い、運動技能変化
と MIP 中の脊髄運動ニューロンの興奮性変化に
有意な相関を認めなかった可能性がある。

総 括

MIP の実施方法を厳格に規定した場合、単純な
AE の反復に伴う運動技能向上よりも、高い技能
レベルを獲得させる可能性がある。また MIP 中
には、直後の運動実行に備えた脊髄の利得条件の
調整が求められるため、手指巧緻性を運動課題と
して用いた本研究では、必ずしも脊髄運動ニュー
ロンの興奮性が増大する必要がなかったものと示

唆された。

謝 辞

本研究は、英雑誌 Heliyon へ掲載されました(Fukumoto Y, Todo M, Suzuki M, Kimura D, Suzuki T. (2024): Changes in spinal motoneuron excitability during the improvement of fingertip dexterity by actual execution combined with motor imagery practice. Heliyon, 10(9): e30016.)。研究の遂行から論文掲載に至るまで、多大なる助成を賜りました公益財団法人明治安田厚生事業団に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Farah MJ(1989): The neural basis of mental imagery. Trends Neurosci, **12**, 395-399.
- 2) 福本悠樹ら(2019)：練習時間の違いによって運動イメージが運動の正確さと脊髄前角細胞の興奮性に与える影響は異なる。臨床神経生理学, **47**, 82-92.
- 3) Fukumoto Y, et al.(2017): Effect of motor imagery after motor learning for 30 sec on excitability of spinal neural function and its impact on accurate control of muscle force. J Nov Physiother, **7**, 339.
- 4) Fukumoto Y, et al.(2021): Precision pinch force control via brain and spinal motor neuron excitability during motor imagery. Neurosci Lett, **754**, 135843.
- 5) Fukumoto Y, et al.(2022): Causal relationships between brain and spinal motor neuron excitability during motor imagery: using NIRS and evoked electromyogram study. Neuroimage Rep, **2**, 100083.
- 6) Fukumoto Y, et al.(2022): Differences in motor imagery strategy change behavioral outcome. Sci Rep, **12**, 13868.
- 7) Fukumoto Y, et al.(2023): Decreased nerve conduction velocity may be a predictor of fingertip dexterity and subjective complaints. Exp Brain Res, **241**, 661-675.
- 8) Schuster C, et al.(2011): Best practice for motor imagery: a systematic literature review on motor imagery training elements in five different disciplines. BMC Med, **9**, 75.