

運動イメージの客観的評価法の確立と 新規運動イメージ介入法の効果検証

竹 中 悠 真* 佐々木 亮 樹* 菅 原 憲 一*

ESTABLISHING AN OBJECTIVE EVALUATION METHOD FOR MOTOR IMAGERY AND VERIFYING THE EFFECTIVENESS OF A NOVEL MOTOR IMAGERY INTERVENTION METHOD

Yuma Takenaka, Ryoki Sasaki, and Kenichi Sugawara

Key words: motor imagery, transcranial magnetic stimulation, electroencephalography, motor performance.

緒 言

運動イメージ (motor imagery; MI) は、実際の運動を伴わない、脳内における内的な運動の想起と定義されている。MI は、実際に運動を行う以外の補完的な練習方法としてリハビリテーションやスポーツ等の分野で使用されている。しかし、一般的に実際に練習を行う場合と比較して、MI を用いた練習はその効果が低いことが知られている。この要因の 1 つとして、MI が、その定義から、第三者が知覚することができず、MI の正確性等の評価を行えないことが挙げられる。現状、MI の評価法は、質問紙等による主観的な評価に依存している。したがって、MI の正確性等を客観的に評価する方法を確立することは、MI を用いた練習効果を向上するうえで極めて重要である。

MI に関する神経生理学的研究では、MI が実際の運動と類似する脳領域の活動を引き起こすこと³⁾や MI 中に MI に関与する筋の皮質脊髄路興奮性が増大すること⁹⁾、脳波に特異的な変化を誘発することが報告されている¹⁰⁾。また、特定の運

動スキルをもつ熟練者と非熟練者に関する研究では、MI 中の脳活動や運動パフォーマンスに与える影響が異なることが示されている。これは、MI の正確性等の質がスキルレベルによって異なることを示すと考えられる。

以上のことを踏まえ、本研究では、MI にかかわる神経生理学指標が、MI の正確性等を客観的に評価する手法となる可能性を検証した。この目的のため、3 つの実験系を実施した。実験 1 では、皮質脊髄路興奮性の評価を運動課題の MI を用いた練習前後で行い、練習による運動パフォーマンスの向上の程度と皮質脊髄路興奮性の変化の程度の相関を検討した。実験 2 では、実験 1 の結果を踏まえ、運動課題を修正したうえで、脳波の評価を、MI を用いた練習前後および練習中に実施し、それらの変化と練習による運動パフォーマンスの向上の程度の関連を検討した。実験 3 では、スキルレベルと MI 中の皮質脊髄路興奮性の関連に着目し、任意の 2 時点の MI 中の皮質脊髄路興奮性の比を指標とし、実際に運動課題を練習した前後で評価し、その有効性を検討した。いずれにおい

* 神奈川県立保健福祉大学大学院保健福祉学研究科 Kanagawa University of Human Services, Kanagawa, Japan.

ても、運動パフォーマンスの変化量と神経生理学的指標の変化量には相関および関連があると仮説を立てた。

方 法

A. 対象

対象はすべて若年健常者とした。実験1には合計18名（女性12名：20.7±0.55歳）、実験2には合計38名（女性27名：21.6±1.46歳）、実験3には21名（女性12名：21.0±2.01歳）が参加した。いずれの実験においても対象者は、各実験における運動課題を遂行することができる者とし、該当する手指および腕に怪我など何らかの動かしにくさがある場合は除外した（この基準で除外された者はいなかった）。また、実験1と3においては、経頭蓋磁気刺激（transcranial magnetic stimulation; TMS）を使用するため、その安全な使用に関するスクリーニング質問紙（①幼少期の熱性けいれん、②喘息、③頭部外傷、④脳外科手術、⑤体内に金属がある、⑥呼吸・心疾患、⑦精神疾患、⑧妊婦、⑨喘息のようなストレスで悪化する疾患、⑩心臓ペースメーカー、⑪中枢神経系疾患、⑫整形外科疾患、⑬高血圧の既往がある場合、⑭てんかんの家族歴を有する場合）において該当する場合には除外した。加えて、実験1と2は運動課題が類似するため、実験1に参加した場合は実験2には参加できないものとした。結果として、3件の実験に重複して参加した者はいなかった。それぞれの実験の実施時期については、実験1から3の順に各実験の結果を参照しつつ実施した。本研究に関して、神奈川県立保健福祉大学研究倫理審査委員会および英国 Newcastle 大学研究倫理審査委員会の承認を受けたうえで実施した（承認番号：保大第18-23-46、保大第10-24-8、application reference: 63072）。なお、参加者に対して事前に研究の趣旨と目的を文書および口頭にて説明し、書面による同意を得て実施した。

B. 使用機器

TMS（Magstim Co, Whitland, UK）および表面筋電図（electromyography; EMG, LabChart 8 および Labchart 26T, AD Instruments Pvt Ltd, Bella Vista, NSW, Australia）は実験1、3で使用した。TMS

は一次運動野を刺激し、標的筋（実験1：非利き手、実験3：利き手の第一背側骨間筋）から皮質脊髄路興奮性を反映する運動誘発電位（motor evoked potential; MEP）を記録した。刺激強度は、安静時に50 μ V以上のMEPが10回中5回以上生じる最低強度（安静時閾値）の1.2倍とした。EMGはサンプリング周波数4 kHzで記録し、バンドパスフィルタとして実験1では5～2000 Hz、実験3では機器の制限により5～1000 Hzを適用した。実験2では、64 ch脳波計（electroencephalography; EEG）を用い、課題練習前後の安静時脳活動を記録した。取得したデータはフィルタ処理（0.5～200 Hz およびノッチフィルタ）およびノイズ除去後、 θ 波（5～7 Hz）、 α 波（8～12 Hz）、 β 波（15～29 Hz）の3帯域における平均パワーを算出した。

C. 実験1（図1A, B）：明示的系列反応時間課題とTMSによる皮質脊髄路変化の関連

タッチパネルモニタ上に提示される4つの刺激に対応するボタンを、非利き手の示指から小指までを用いてできるだけ速く押下する系列反応時間課題（serial reaction time task; SRTT）を使用した。16回の点灯を1シーケンスとし、3回の反復を1セット、5セットを1ブロックとした。セット間には12秒の休憩を挟んだ。参加者には、実験開始前に学習可能なシーケンスがあることを明示した。練習はMIを用いて4ブロック実施し（ブロック間休憩2分）、その前後で反応時間（reaction time; RT）とMEPの評価を行った。評価では実動作1セットに加え、自動点滅する刺激に合わせたMI中のMEP（示指対応ボタン点滅時：MI MEP）および安静時（rest MEP）MEPを各16個記録した。また、MI能力の評価としてthe Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaireの短縮版（KVIQ-10）およびJapanese version of the Movement Imagery Questionnaire-Revised second version（JMIQ-RS）を実施し、合計得点、視覚イメージスコア（KVIQ-V, JMIQ-RS-V）、筋感覚イメージスコア（KVIQ-K, JMIQ-RS-K）を算出した。解析では、誤試行を除外したRTの中央値の変化量（difference RT; dRT）、TMSアーチファクト直前100 ms区間のRMS（root mean square）値、練習前後のMEP

振幅比 (MI ratio, rest ratio) を算出した。

D. 実験 2 (図 1 C) : 黙示的 SRTT と安静時 EEG パワー変化の関連

シーケンス (16 点灯 × 6 反復で 1 セット) の存在を伏せた学習条件下での SRTT を実施した。参加者は、MI 練習、ボタン点滅を数える観察、Control (30 分休憩) の 3 条件を 1 週間以上の間隔を空けてすべて実施した。練習ではシーケンスを含む SRTT を 5 セット行い、その前後で安静時脳波を計測した。追加条件として、実際に練習を行う条件 (physical) を実施した。これには当初の 3 条件を実施していない参加者が参加した。この条件では練習において、実際に課題を行うことで練習した。

練習後のパフォーマンス評価として、シーケンスあり試行とランダム試行を各 1 セット実施し、誤試行を除外した RT の中央値および dRT を算出した。加えて、練習前後で記録した安静時脳波における θ (5 ~ 7 Hz)、 α (8 ~ 12 Hz)、 β (15 ~ 29 Hz) の 3 つの周波数帯の平均パワーを算出し、それぞれの練習前後の差も計算した。

E. 実験 3 (図 1 D-F, 図 2) : スピードスタッキングと TMS による皮質脊髄路変化の関連

右手のみによる 3-6-3 個のカップを用いたス

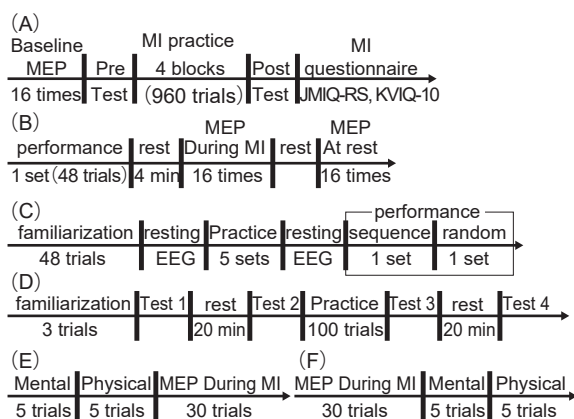


図 1. 実験手順

Fig.1. Experimental procedures.

(A) Overall experimental procedure for Experiment 1. (B) Test procedure for Experiment 1. (C) Procedure for Experiment 2. (D) Overall procedure for Experiment 3. (E) Test procedure for Test 1 of Experiment 3. (F) Test procedure for Tests 2-4 of Experiment 3.

MEP; motor evoked potential, MI; motor imagery, JMIQ-RS; Japanese version of the Movement Imagery Questionnaire-Revised second version, KVIQ-10; the Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire, EEG; electroencephalography.

ピードスタッキング課題を実施した。パフォーマンス指標として、手がタイマーを離れてから課題を完了し戻るまでの時間 (movement time; MT) を計測した。実験は 4 回の評価 (Test 1-4) で構成し、Test 1-2 間および Test 3-4 間に 20 分間の休憩、Test 2-3 間に 100 試行の実動作練習を行った。各評価では、MT、MI による遂行時間 (imagined MT; IMT)、および動画視聴下の MI 中の MEP を記録した。MEP は、開始前の静止タイミング (MEP-imagine rest) と、右側のカップを掴む瞬間 (MEP-imagine active) の 2 時点で各 30 試行 (評価ごとに 60 個) 記録した。なお、失敗試行は解析から除外した。試行ごとに、MEP-imagine active を MEP-imagine rest で除し、MEP ratio を算出した。

F. 統計解析

統計解析には Statistical Package for Social Science (SPSS) ver.26 を使用し、有意水準は 5 % とした。また、多重比較の調整には holm 法を使用した。調整後の P 値は P_{adj} と示した。

実験 1 の RT と MEP、RMS の解析には一般化線形混合モデル (generalized linear mixed model; GLMM) を使用した。RT においては、固定効果を評価時期とし、MEP と RMS では、評価時期に加えて、計測条件 (rest, MI) およびこれらの交互作用とした。変量効果は共通で、対象者とした。また、参加者ごとの評価時期間の dRT と MEP 関連指標 (練習前後の MI MEP, rest MEP, MI ratio, rest ratio) との相関は Pearson の相関係数、dRT と質問紙関連指標との相関は Spearman の相関係



図 2. 実験 3 で使用した動画の一部

Fig.2. A sequence of the video used in Experiment 3.

Participants were required to stack the cups in 3-6-3 formation from the left to right (upstacking), and then return them to their original positions (downstacking).

数を算出した。

実験2のRTの解析にもGLMMを使用した。固定効果は、課題条件（シーケンス、ランダム）と練習条件（MI, 観察, Control, Physical）およびこれらの交互作用とし、変量効果は対象者とした。安静時脳波については、練習前後の各周波数帯域の平均パワーを permutation 検定で比較した。この比較には Fieldtrip toolbox を使用した。dRT と安静時脳波における、一次運動野周辺領域の9つのチャンネル（FT7, FC5, FC3, FC1, FCz, FC2, FC4, FC6, FT8）の各周波数帯域の練習前後の差については、ロバスト回帰分析を行った。

実験3のMTとIMT、MEP、MEP ratioの解析にもGLMMを使用した。固定効果は、MTとIMTでは、課題条件（MT, IMT）と評価時期（Test 1-4）およびこれらの交互作用とし、MEP振幅では、刺激時期（MEP-imagine rest, MEP-imagine active）と評価時期（Test 1-4）、およびそれらの交互作用、MEP ratio では評価時期（Test 1-4）とした。変量効果はすべてのGLMMで共通して対象者とした。

実験1から3すべてのGLMMにおいて、目標分布はガンマ、リンク関数はlogとし、除外した以外のすべての試行を使用した。反復測定共分散構造は一次自己回帰とした。

結 果

A. 実験1（表1）

RTでは、GLMMの結果、条件の有意な主効果が認められた（ $F(1,327) = 188.7, P_{\text{adj}} < 0.001$ ）。また、RMSについては有意な主効果および交互作用は認められなかった（計測条件： $F(1,32) = 0.03, P = 0.86$ ；評価時期： $F(1,28) = 1.74, P = 0.20$ ；交互作用： $F(1,31) = 0.41, P = 0.53$ ）。MEPについては、計測条件の主効果は有意だったが（ $F(1,203) = 108.7, P_{\text{adj}} < 0.001$ ）、評価時期および交互作用は有意ではなかった（評価時期： $F(1,176) = 4.95, P_{\text{adj}} = 0.05$ ；交互作用： $F(1,199) = 0.90, P = 0.34$ ）。dRTとMEP関連指標および質問紙関連指標との相関はいずれも有意ではなかった（すべて $P > 0.5$ ）。

B. 実験2（図3）

RTは、GLMMの結果、課題条件の主効果と交互作用は有意であったが（課題条件： $F(1,4434) = 44.2, P_{\text{adj}} < 0.001$ ；交互作用： $F(3,4430) = 5.48, P_{\text{adj}} < 0.01$ ）、練習条件の主効果は有意ではなかった（ $F(3,46) = 1.77, P = 0.17$ ）。交互作用についての事後検定の結果、ランダム試行では、Control条件よりもMI条件で有意にRTが短かった。また、観察条件とControl条件のみランダム試行のRTがシーケンス試行よりも有意に増大した。安静時脳波についての比較の結果、いずれの周波数帯域

表1. dRT との相関分析の結果
Table 1. Results of the dRT correlation analysis.

Variables	Pearson's r	P value	Adjusted P value	Variables	Spearman's ρ	P value	Adjusted P value
MEP baseline	$r = 0.41$	0.16	—	JMIQ-RS-V	$\rho = 0.47$	0.05	0.54
Rest MEP at Pre test	$r = 0.27$	0.38	—	JMIQ-RS-K	$\rho = 0.25$	0.32	—
MI MEP at Pre test	$r = 0.35$	0.25	—	JMIQ-RS-total	$\rho = 0.40$	0.10	—
Rest MEP at Post test	$r = 0.40$	0.18	—	KVIQ-V	$\rho = -0.01$	0.96	—
MI MEP at Post test	$r = 0.36$	0.22	—	KVIQ-K	$\rho = 0.16$	0.54	—
Rest MEP ratio	$r = 0.19$	0.54	—	KVIQ-total	$\rho = 0.10$	0.70	—
MI MEP ratio	$r = 0.09$	0.77	—				

P values were adjusted using holm's method. MEP; motor evoked potential, MI; motor imagery, JMIQ-RS; Japanese version of the Movement Imagery Questionnaire-Revised second version, KVIQ; the Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire, V; visual imagery sub-score, K; kinesthetic imagery sub-score.

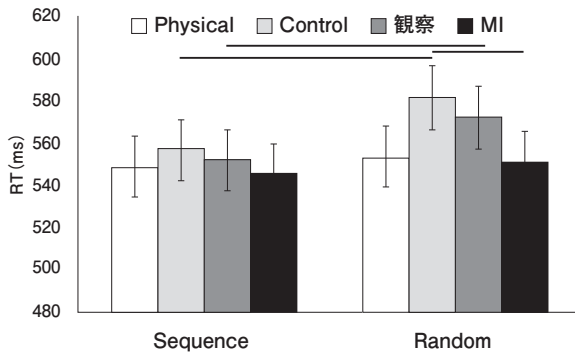


図3. 実験2の反応時間

Fig.3. RTs in Experiment 2.

The black lines on the bars indicate significant difference ($P < 0.05$). MI; motor imagery.

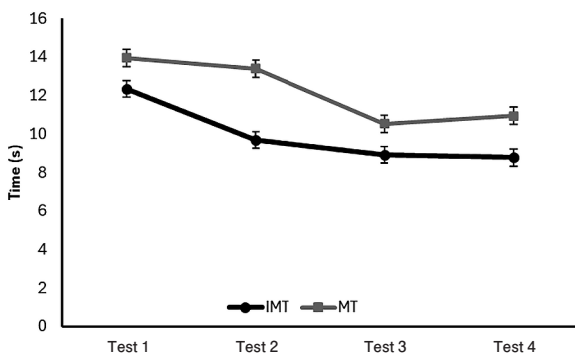


図4. 実験3の動作時間(MT)とイメージによる動作時間(IMT)

Fig.4. Movement time(MT) and imagined MT(IMT) in Experiment 3.

The black line with circles represents MT, while the gray line with squares represents IMT.

においても練習前後における有意な変化は認められなかった(すべて $P_{adj} > 0.05$)。ロバスト回帰分析の結果、MI条件の練習前後のFC5の β パワーの差とdRTの間にのみ有意な関連を認めた($P_{adj} < 0.05$)。

C. 実験3 (図4)

MTとIMTのGLMMの結果、課題条件、評価時期、および交互作用すべてが有意であった(課題条件: $F(1,563) = 206.68$, $P_{adj} < 0.001$; 評価時期: $F(3,188) = 60.77$, $P_{adj} < 0.001$; 交互作用: $F(3,392) = 7.93$, $P_{adj} < 0.01$)。事後検定の結果、MTでは、Test 3およびTest 4がTest 1およびTest 2よりも有意に短かった(すべて $P_{adj} < 0.05$)。IMTにおいては、Test 2、Test 3がTest 1よりも有意に短縮し、Test 4はTest 2よりも短縮した(すべて $P_{adj} < 0.05$)。一方で、Test 2とTest 3およびTest 3とTest 4の間では有意な変化は認められ

なかった($P_{adj} > 0.05$) (図4)。MEPについては、有意な刺激時期と評価時期の主効果が認められたが(課題条件: $F(3,1034) = 8.35$, $P_{adj} < 0.001$; 評価時期: $F(1,1149) = 73.43$, $P_{adj} < 0.001$)、交互作用は有意ではなかった(交互作用: $F(3,1098) = 0.38$, $P = 0.77$)。事後検定の結果、刺激時期では、MEP-imagine restが、有意に振幅が大きく、評価時期では、Test 1が他のTestよりも大きく(すべて $P_{adj} < 0.05$)、Test 2とTest 3、Test 4の間では有意な変化は認められなかった($P_{adj} > 0.05$)。MEP ratioでは、有意な主効果を認めなかった($F(3,741) = 1.70$, $P = 0.167$)。

考 察

A. 実験1: MEPの変化と明示的SRTTのパフォーマンスの変化は関連しない

実験1では、MI中の皮質脊髄路興奮性の変化(MEPの変化)が、MIを用いた明示的SRTTの練習による運動パフォーマンスの変化と関連するかを検証した。その結果、MIによる練習で、RTが有意に短縮し、MEPにおいては、MI中に安静時よりも振幅が増大したことから参加者がMIを実施していたと考えられた。しかし、練習前後でMEPは変化せず、パフォーマンスの指標であるdRTとMEPに相関は認められなかった。これは、明示的SRTTが、運動出力そのものよりも、そのシーケンスの順序の記憶や予測といった認知的な処理に多分に依存する課題であることに起因すると考えられた。これは、MIが認知的な要素を含む課題の学習初期でも明示的な知識の獲得を通じて運動パフォーマンスを向上させることに有効であるとする報告²⁾からも支持される。同様にdRTと質問紙の結果についても相関は認められなかった。MI能力が高い人ほど、MIによる練習の効果も高いと報告⁴⁾があるが、この実験における課題の認知的要素の影響によりマスクされた可能性がある。したがって、実験2においては、参加者に事前にシーケンスがあることを伝えない黙示的SRTTを実施した。

B. 実験2: MIによる練習で黙示的SRTTのパフォーマンスは向上しない可能性

実験2では、課題練習前後の安静時脳波の変化

が、黙示的 SRTT のパフォーマンスの変化と関連するかを検証した。前提として、課題の練習においては、シーケンス試行を用いることで、パフォーマンスの評価において、シーケンス試行の RT が短縮し、ランダム試行の RT はシーケンス試行よりも長くなる。しかし、この実験のパフォーマンスの評価において、シーケンス試行の RT は、練習条件による差が認められず、Physical 条件および MI 条件ではシーケンス試行とランダム試行の RT にも差が認められなかった。シーケンス試行において練習を実施していない Control 条件と有意な RT の差が認められないことから、MI 条件に期待していた潜在的な系列学習が生じていない可能性が考えられた。一方で、Physical 条件と MI 条件でシーケンス試行とランダム試行に差がないことは、系列学習ではなく、刺激反応連関の強化が生じている可能性を示すものと考えられた。脳波についても評価した各周波数帯域において、いずれの練習条件でも練習前後で有意な変化が認められなかった。練習の前後、つまり運動学習によって、安静時脳波に変化が生じることが報告されている⁶⁾が、本実験での練習量や課題の難易度、安静時の覚醒度の影響によりばらつきが増大した可能性がある。MI 条件において dRT と FC5 の β パワーに有意な関連が認められ、MI を用いた練習における効果の指標として、FC5 の β パワーの変化が有効である可能性がある。しかし、上述のように、MI 条件では系列学習が生じたかどうか不明であること、練習前後で安静時脳波パワーに有意な変化がないことから、解釈には慎重になる必要がある。実験 1 および 2 を踏まえて、MI 中に神経生理学的指標の記録が行える TMS を使用し、SRTT よりも運動の要素が大きく、1 試行の時間が相応に長いスピードスタッキング課題¹⁾を採用し、最終的な検討を実施した。

C. 実験 3 : MEP を用いた MI の評価では評価のタイミングが重要

MT は Test 2 と比較して Test 3 で有意に短縮し、練習によるパフォーマンス向上が確認された。一方、IMT は Test 1 から 2、更に 3 にかけて段階的に短縮した。これは、Test 1 時点では試行回数が少なく未習熟であったのに対し、Test 2 時点では

経験値の蓄積により MI が鮮明化したためと考えられる。加えて Test 2 から 3 にかけては練習を重ねたことで、課題パフォーマンスの向上に伴い、減少したと考えられた。Test 3 から 4 にかけて変化が認められなかった点については、短時間休憩による early boost⁸⁾を意図した設定であったが、パフォーマンスが限界に達した（天井効果）、あるいは蓄積した疲労が影響した可能性がある。MEP は、まず、MEP-imagine rest が MEP-imagine active よりも有意に大きかった。MI 中の MEP は想起する筋出力に応じて増大する⁷⁾が、一方で、MI を行う直前でも MEP が増大することが報告されている⁵⁾。本結果は、後者の MI を行う直前の MEP 増大の程度が、MI 中の筋出力の差を反映して MEP が増大する程度を上回った可能性が考えられる。また、Test 1、2、3 の順に減少していったことに関しては、課題に慣れ、練習を重ねたことで、対象筋を支配する一次運動野の活動が最適化される神経効率化が考えられる。これは、パフォーマンスに変化がなかった Test 3 と 4 の間で、MEP も同様に変化しなかったことから支持される。MEP ratio については、評価時期間で有意な変化を認めなかった。これは、MEP ratio の算出元である MEP の変化が、MI 開始直前（MEP-imagine rest）が MI 中（MEP-imagine active）よりも増大していたことに起因する結果であると考えられる。一方で、MEP 自体は評価時期に応じて減少したことに対して、いずれの評価時期でも差がなかったことから、評価指標としては安定していることを示唆しているとも考えられる。つまり同じ課題において、MEP-imagine rest のタイミングを、MI 開始直前ではなく、動画上で課題が完了し、スタートポジションに戻り、数秒経過した時点にする等の変更を行うことで、真に MEP が MI の客観的評価法となるかを検討することができる。

本研究全体の限界点として、対象者数が少なく、弱い相関を見逃している可能性がある。しかし、本研究は全体として、MI の正確性等の質を客観的に評価する方法を探索するものであり、その基盤としての役割は十分に果たせると考えられる。また、今後の課題として、上述のように、MEP

が真に MI の客観的評価法となるかを検討する必要があること、そしてその評価指標が試行した運動課題以外でも有効であるかを検討していく必要がある。

総 括

本研究では、TMS および EEG を用いた神経生理学的指標が、MI の客観的評価法となるかを検討した。結果として、運動課題の設定や神経生理学的評価のタイミング等の課題により、客観的評価法の確立には至らなかった。しかし、本研究を通じて、MI の客観的評価に適した運動課題（例：スピードスタッキング課題）と、評価が困難な可能性がある課題（例：SRTT）の特性が明らかになったことは、今後の研究における重要な知見である。今回の実験結果を踏まえ、今後は神経生理学的指標の評価タイミング（特に MEP-imagine rest の設定）を最適化した再検証が必要である。プロトコルの修正により、MI に伴う皮質脊髄路の興奮性変化をより正確にとらえることで、真に実用的な MI 客観的評価法の確立を目指すべきである。

謝 辞

本研究の実施にあたり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) Binks JA, et al. (2023): Motor learning without physical practice: the effects of combined action observation and motor imagery practice on cup-stacking speed. *Psychol Sport Exerc*, **68**, 102468.
- 2) Frank C, et al. (2024): Learning motor actions via imagery - perceptual or motor learning? *Psychol Res*, **88**, 1820-1832.
- 3) Hardwick RM, et al. (2018): Neural correlates of action: comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution. *Neurosci Biobehav Rev*, **94**, 31-44.
- 4) Krüger B, et al. (2024): The multisensory nature of human action imagery. *Psychol Res*, **88**, 1870-1882.
- 5) Kumru H, et al. (2008): Motor cortex excitability changes during imagery of simple reaction time. *Exp Brain Res*, **189**, 373-378.
- 6) Lum JAG, et al. (2023): Resting state electroencephalography power correlates with individual differences in implicit sequence learning. *Eur J Neurosci*, **58**, 2838-2852.
- 7) Mizuguchi N, et al. (2013): Modulation of corticospinal excitability dependent upon imagined force level. *Exp Brain Res*, **230**(2), 243-249.
- 8) Muellbacher W, et al. (2002): Early consolidation in human primary motor cortex. *Nature*, **415**, 640-644.
- 9) Takenaka Y, et al. (2023): Corticospinal excitability changes during muscle relaxation and contraction in motor imagery. *Eur J Neurosci*, **58**(8), 3810-3826.
- 10) Villabona Orozco MP, et al. (2025): Investigating mu and alpha oscillations as indicators of intra-individual success and inter-individual ability in motor imagery performance. *Front Psychol*, **16**, 1598196.