

手の心的回転課題と運動イメージ明瞭度およびワーキングメモリの関連

田中 睦英 吉田 健

Relationship of mental rotation task with motor imagery vividness and working memory

Mutsuhide TANAKA , Takeshi YOSHIDA

Abstract

Objective : Numerous studies have reported the use of motor imagery as a rehabilitation tool for stroke patients. Here we investigated the relationship of a mental rotation task for assessment of motor imagery ability with motor imagery vividness and working memory.

Methods : Twenty-one healthy subjects (13 women ; mean age, 20.43±0.99 years), all right-handed, were recruited. We measured reaction times and error rates during mental rotation tasks of the hand. We used the Movement Imagery Questionnaire-Revised Second Version (MIQ-RS) for assessment of kinesthetic and visual motor imagery vividness. In addition, we also used digit span visual tapping span and kinesthetic tapping span to assess working memory ability.

Results : The reaction times for both right and left inverted hand stimuli (180°) were significantly longer than those for other stimuli. The error rates were also highest at 180°. The reaction time for left hand stimuli was significantly longer than that for right hand stimuli. There was a negative correlation between the visual tapping span score and reaction time. The visual tapping span score also showed a negative correlation with the error rate.

Conclusions : Visual tapping span as a parameter of visual working memory may be sensitive to the ability of visual motor imagery.

Key words : motor imagery , mental rotation , motor imagery vividness, working memory

キーワード : 運動イメージ, 心的回転, 運動イメージ明瞭度, ワーキングメモリ

緒言

近年, リハビリテーションの補助的手段として運動イメージが注目されている。運動イメージとは, ある特定の運動を実際に遂行することなく, ワーキングメモリ上で内的に再生するプロセスと定義される^{1,2)}。自己の身体活動を関節運動や筋出力量など体性感覚情報で想起したものを体性感覚運動イメージ(=一人称運動イメージ), 自己の身体活動を視覚的, もしくは客観的に観察してい

る状態で想起したものを視覚運動イメージ(=三人称運動イメージ)と呼ぶ³⁾。

機能的磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging, 以下fMRI)を用いた運動イメージ中の脳機能イメージング研究では, 三人称運動イメージに比べ一人称運動イメージ中に一次運動野, 運動前野, 補足運動野などの運動関連領域の活性が増強することが確認されている⁴⁾。これらの領域は実際の運動遂行に関与する領域であることから, 脳内での運動イメージの生成は実際の

運動遂行のプログラミングならびに実行機能とほぼ同等の機序であると考えられ、狭義には一人称運動イメージが真の運動イメージであるといえる。

運動イメージによる運動関連領域の活性は、中枢神経疾患により破綻した運動企図機能と実行機能の可塑性を高める可能性があることから、脳血管障害やパーキンソン病による運動障害改善のプログラムに活用され、一定の成果を上げている^{3,5,6)}。この訓練方法はmental practiceと呼ばれ、発達障害者のスポーツ技能向上やアスリートの競技上のパフォーマンス向上にも応用されている^{7,8)}。

正確な運動イメージが生成できる者は、実際の運動遂行の神経基盤の動員や統合も良好であることが示唆される。実際、脳血管障害患者や高齢者を対象としたmental practice研究では、一人称運動イメージの明瞭度、すなわち運動イメージ想起能力が高いほど、mental practiceの効果も高いことが報告されており^{3,9)}、mental practiceの効果을最大にするには、被験者の運動イメージ能力の正確な評価が必要とされる。

運動イメージの評価法として、一般的には質問紙、心的時間測定、心的回転(mental rotation, 以下MR)が用いられる⁵⁾。運動イメージを定量的に評価するために開発された質問紙としてthe Movement Imagery Questionnaire-Revised Second Version (MIQ-RS)がある¹⁰⁾。これは、検者がある特定の運動パターンを遂行するよう口頭で指示した後、同じ運動をイメージする際の難易度を体性感覚と視覚双方について、被験者が1点(非常に困難)～7点(非常に容易)で評定する方法で、全14項目で構成される。スコアが高いほど運動イメージ明瞭度が高いことを示す。一方、脳血管障害などによる運動障害で実際の運動遂行が困難な被験者用に開発された質問紙が、Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ)である¹¹⁾。いずれも検者間信頼性・妥当性について証明されているものの、被験者の主観的な運動イメージ明瞭度の報告に依存している点では相違なく、実際に脳内で想起したものが何であるかは「ブラックボックス」のままであり、客観性に乏しい点は否めない。

実験研究ではこの客観性を担保するため、身体部位のMR課題の反応時間を用いる場合が少なくない^{9,12-14)}。手や足部などの身体部位を回転させた画像を呈示し、それが右手(足)と左手(足)のいずれかであるかをボタン押しで回答する手法をとることが多く、身体的に不可能な肢位(180°倒立)で反応時間が最大となることが報告されている¹²⁾。また、健常高齢者では健常若年者に比べMR課題の反応時間が遅延するだけでなく、反応時間の

遅延が著明な高齢者ほど転倒リスクが高いことが明らかになっている¹⁵⁾。このように、反応時間の遅延は現実的に実行不可能、または実行困難な動作の運動イメージ処理過程と、脳内での身体部位の心的操作能力の低下=運動イメージ能力の低下の双方を反映していると考えられる。

前述のように、運動イメージの定義では身体部位の心的操作過程への視覚性ワーキングメモリの関与に言及しているが、この点については神経心理学的研究¹⁶⁾だけでなく、神経生理学的手法でも明らかにされている。Lammら¹⁷⁾は運動イメージ中の脳活動をfMRIで計測し、背外側運動前野の活性について報告しているが、Schendanら¹⁸⁾はさらに空間情報処理や視覚性ワーキングメモリの実行に関与するとされる頭頂後頭領域の活性についても報告している。これらの知見は運動関連領域の視空間性注意と運動予測への関与を示唆しており、注意機能の基盤がワーキングメモリであることと併せて考えれば、MR課題はワーキングメモリに基づく視覚-運動プロセスの協応を要求する課題でもあると考えられる。

MR課題は視覚的手がかりにより運動イメージを想起しやすいことに加え、反応時間や誤答率が指標となることから客観性は高いものの、視覚呈示装置や行動指標を記録するシステムなどが必要であり、臨床評価としての汎用性が高いとはいえない。臨床的な運動イメージ能力のスクリーニングにはMIQ-RSやKVIQなどの主観的な運動イメージ明瞭度の評価指標や、ワーキングメモリの神経心理学的評価法が利用しやすいが、MR課題と運動

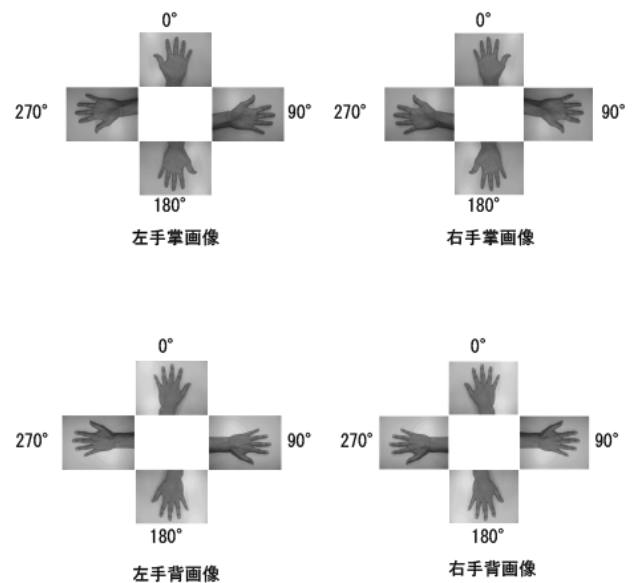


図1 手の刺激画像

イメージ明瞭度, ワーキングメモリとの関連性について精査した研究は渉猟した限り皆無である。

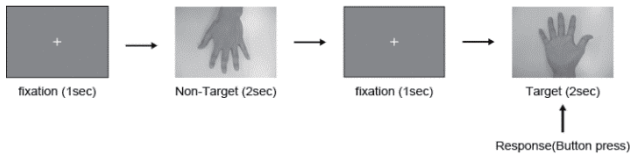


図2 MR課題実施手順 (右手課題例)

目的

本研究は, 手のMR課題と運動イメージ明瞭度評価ならびにワーキングメモリ課題との関連性について明らかにし, 運動イメージ明瞭度評価としての質問紙法や神経心理学的ワーキングメモリ評価法の有用性について検討することを目的とする。

方法

身体疾患や精神・神経疾患の既往のない健常大学生から被験者を募集した。応募のあった22名に対して Edinburgh Handedness Inventory¹⁹⁾ を用いて利き手の判別を実施し, Laterality Quotient (L.Q.) > 0 の右利き被験者21名 (男性9名, 女性13名 平均年齢20.43±0.99歳) を本実験の対象とした。

MR課題の刺激画像として, 時計回りに0°・90°・180°・270°に回転した両手の画像を手掌・手背合わせて16種類作成し, 視覚刺激呈示ソフト (NS Image ver. 2) を用いてPCディスプレイ上にランダムに呈示した (図1)。刺激呈示時間を2secとし, 刺激間隔は1sec, 各刺激について計6回呈示した [刺激16パターン×6回×2条件 (右手課題・左手課題) = 192施行] (図2)。

被験者には, ターゲット画像 (右手もしくは左手) 出現時のみ速やかにボタンを押すgo/no-go課題を課し, 各画像の平均反応時間と誤答率 (Error Rate, 以下ER; 誤反応数/刺激提示回数×100) をPCに記録した。レスポンスボタンはテーブル上に配置し, 手元が見えないようカバーで覆った。ボタン押しをしない手についても同様にカバーの中に隠し, 手を動かさないよう安静位保持を指示した。ボタンを押す手については被験者間でカウンターバランスをとった。第1施行開始前に課題条件 (右手もしくは左手) を口頭で呈示し, 第2施行はもう一方の手の課題を実施した。課題条件の呈示順序についても被験者間でカウンターバランスをとった。

今回は身体運動に問題のない健常学生が対象であるこ

とから, 運動イメージ明瞭度評価としてMIQ-RSを採用し, MR課題前に一人称運動イメージ能力の指標として体性感覚イメージ明瞭度 (Kinesthetic Imagery Ability, 以下KIA) と三人称運動イメージ能力の指標として視覚イメージ明瞭度 (Visual Imagery Ability, 以下VIA) を評価した。

併せてワーキングメモリ課題として, 神経心理検査である標準注意検査法に含まれるDigit Span (以下DS) と Visual Tapping Span (以下VTS) を実施した。DSは検者が読み上げた数字を復唱する課題 (順唱) と逆方向から復唱する課題 (逆唱) からなり, 正答できた桁数を評価スコアとする方法である。VTSはボード上にランダムに配列された正方形を検者が指差した順番 (または逆順) に模倣する課題であり, DS同様正答桁数を評価スコアとする。体性感覚ワーキングメモリの標準化された評価はまだ開発されていないため²⁰⁾, 今回はVTSの検査ボードの正方形上にスポンジの立方体を貼り付け, 閉眼のまま検者が徒手誘導した順序 (または逆順) に身体運動で再現する方法 (Kinesthetic Tapping Span, 以下KTS) で代用した。

統計処理

RTは正答時のデータのみを採用し, 誤答時のRTは解析対象から除外した。MR課題の先行研究では, 適切な反応時間の基準を300ms~3500msの範囲に設定している^{21,22)}。今回, 全被験者のRTはすべてこの範囲内であったので, 正答データはすべて解析対象とした。KIAとVIAは各7項目 (全14項目) の平均スコアを解析対象とした。DS, VTS, KTSはそれぞれ言語・視覚・体性感覚ワーキングメモリ容量の指標と定義し, 各々の順唱・逆唱スコアを解析対象として採用した。

最初に, 手の角度と利き手・非利き手が反応時間に及ぼす影響について解析するため, 左右手と回転角度による反応時間の相違を反復測定分散分析 (手の角度と左右手の2要因) にて検討し, 多重比較検定としてBonferroni法を適用した。同様に手の角度と利き手・非利き手の別が手の判別に及ぼす影響を検討するため, ERも解析対象とした。ERについてはShapiro-Wilkの正規性の検定とLevene検定の結果, 正規性・等分散性とも認められなかったため, 手の左右と手背・手掌の4条件について, 回転角度間のERの相違をノンパラメトリック検定 (Friedman検定とWilcoxon符号付順位検定) にて検討した。

左右手の判別精度と運動イメージ明瞭度, ワーキング

メモリとの関連性を調べるため、各画像のRT・ERと運動イメージ明瞭度 (VIA, KIA), ワーキングメモリ課題 (DS, VTS, KTS) との相関関係についてSpearman順位相関係数を求めた。統計処理には

SPSS ver. 14.0J for Windowsを使用し、有意水準5%とした。

なお本研究は九州保健福祉大学倫理委員会にて審査・承認を受けた上で実施した。

結果

対応のあるt検定の結果、MIQ-RSのKIAとVIAの平均スコア間に有意差はなく、運動イメージ明瞭度の不均衡がMR課題に影響する可能性はないと判断された (KIA vs. VIA = 5.49 ± 0.85 vs. 5.80 ± 0.74, p = 0.57)。

1. 手の回転角度とRT (図3)

手背画像での手の左右に主効果を認め [F (1,20) = 15.50, p < 0.01], 左手画像でRTの有意な遅延を認めた (右手vs.左手 = 967.9 ± 44.3ms vs. 1090.8 ± 39.0 ms, p < 0.01)。回転角度にも主効果を認め [F (3,30) = 45.91, p < 0.01], 正立像 (0°) から回転角度が増すごとにRTは漸増し、倒立像 (180°) で最大となった。手背画像も同様に手の左右 [F (1,20) = 13.66, p < 0.01] と回転角度 [F (3,30) = 25.53, p < 0.01] に主効果を認め、左手画像のRTの有意な遅延と倒立像 (180°) での最大RTを認めた。手背画像, 手掌画像とも交互作用は認められなかった [手背:F (3,60) = 0.05, p = 0.946, 手掌:F (2.57,51.46) = 0.384, p = 0.74]。

2. 手の回転角度とER (図4)

手背画像は右手画像, 左手画像ともに回転角度間で有意差を認めた (右手掌: $\chi^2 = 13.34, p < 0.01$, 左手掌:

$\chi^2 = 23.08, p < 0.01$)。多重比較検定の結果、右手・左手とも倒立像 (180°) のERが最も高かった。右手掌画像では回転角度間の有意差は認められなかったが ($\chi^2 = 7.17, p = 0.67$)。左手掌画像は有意差を認め ($\chi^2 = 13.80, p < 0.01$)、手背画像同様倒立像 (180°) で最大となった。グラフからは左手でERが増加する傾向がみられた。

3. RTと運動イメージ明瞭度, ワーキングメモリとの相関 (表1)

右手画像では, VIAと手背の尺側回転像 (90°) ($r_s = 0.451, p < 0.05$) と橈側回転像 (270°) ($r_s = 0.446, p < 0.05$)、手掌の正立像 (0°) ($r_s = 0.482, p < 0.05$) と橈側回転像 (90°) ($r_s = 0.565, p < 0.01$) に有意な正の相関を認め、左手画像でVIAと相関を認めたのは手掌の橈側回転像 (270°) ($r_s = 0.460, p < 0.05$) のみであった。右手, 左手ともKIAとの相関は認められなかった。VIAが良好なほど、被験者の利き手である右手の画像でRT時間が遅延する傾向であった。

VTSとの相関を示したのは、右手では手背の正立像 (0°) ($r_s = -0.476, p < 0.05$)、橈側回転像 (270°) ($r_s = -0.475, p < 0.05$)、手掌の正立像 (0°) ($r_s = -0.490, p < 0.05$)、橈側回転像 (90°) ($r_s = -0.539, p < 0.05$) であった。左手では手掌の橈側回転像 (270°) ($r_s = -0.482, p < 0.05$)、尺側回転像 (90°) ($r_s = -0.491, p < 0.05$) のみであった。VIAとは対照的に、VTSが高いほどRTは短縮する傾向であった。DS, KTSとは無相関であった。

4. ERと運動イメージ明瞭度, ワーキングメモリとの相関 (表2)

右手画像では, VIAと手背倒立像 (180°) ($r_s = 0.541, p < 0.05$) と右手掌橈側回転像 (90°) ($r_s = 0.455, p < 0.05$) に有意な正の相関を認めたが、左手画像とVIA, KIAに有意な相関はみられなかった。利き手である右手

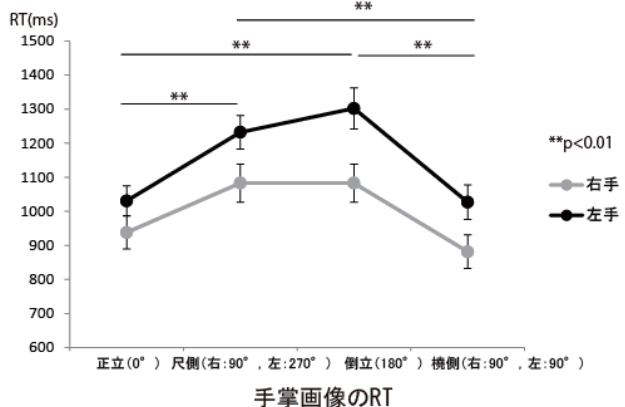
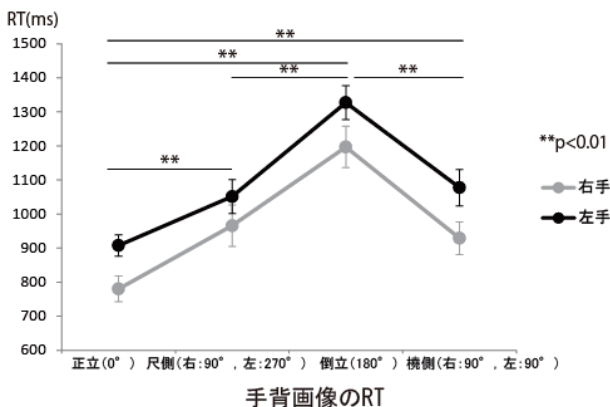


図3 手の回転角度とRT

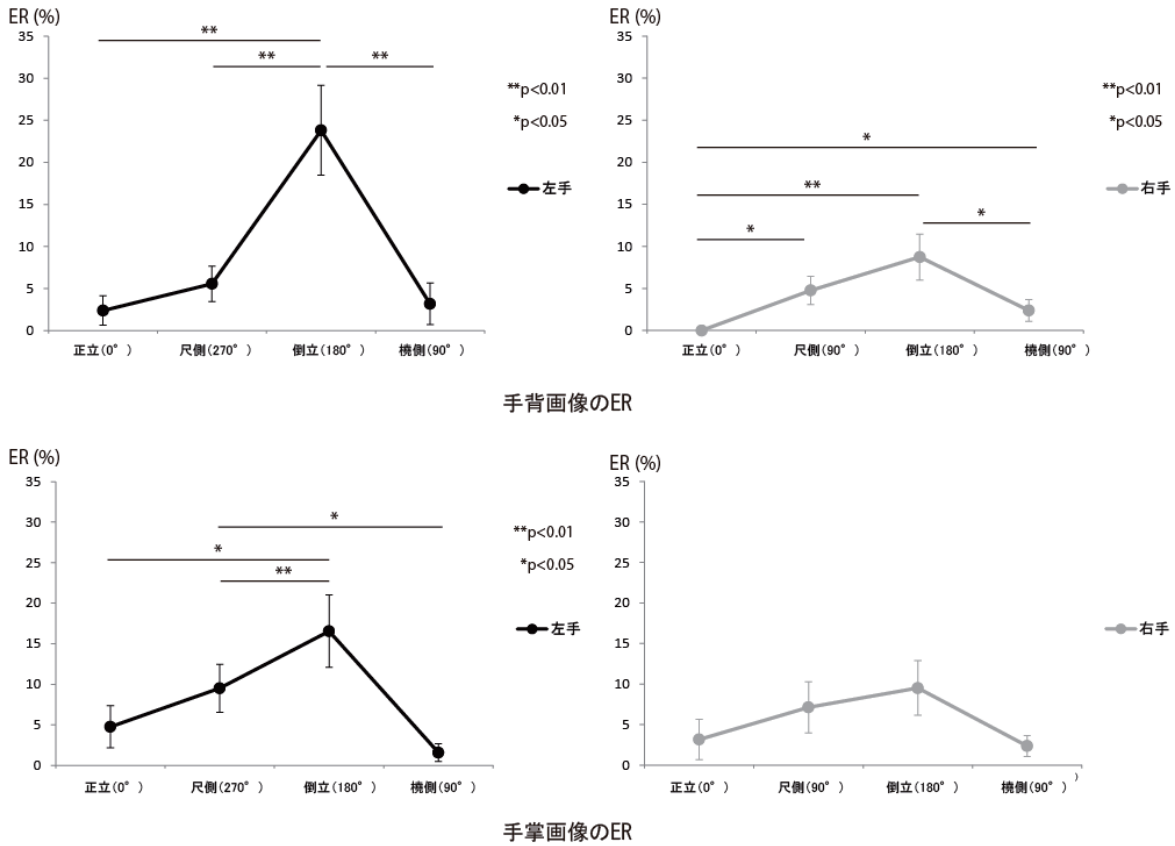


図4 手の回転角度とER

では, VIAが良好なほど不自然な肢位での誤答率が高くなる傾向となった. 右手, 左手ともKIAとは無相関であった.

VTSと有意な相関を示したのは, 右手画像では手背の倒立像(180°) ($r_s = -0.585, p < 0.01$), 橈側回転像(270°) ($r_s = -0.589, p < 0.01$), 手掌の正立像(0°) ($r_s = -0.468, p < 0.05$) 倒立像(180°) ($r_s = -0.679, p < 0.01$) であり, 左手画像では手掌倒立像(0°) ($r_s = -0.460, p < 0.05$) のみであった. この結果から, 利き手ほど課題遂行の正確性に視覚ワーキングメモリが影響する傾向が示された.

考察

手背・手掌とも右手画像のRTは左手画像に比して有意に短縮し, 機能的肢位ではない倒立像や手背尺側回転像・手掌橈側回転像(手の外側方向に回転した状態)において有意なRTの遅延やERの増加を認めた. 手のMR課題のRTは回転角度に依存することは既知の事実であることに加え²³⁾, Takedaら¹²⁾の近年の実験ではERも回転角度の増加に比例することが報告されており, これらの結果とも一致していた. fMRIを用いて右利き被験者

の手のMR課題中の脳活動を計測した実験では, 左半球の運動前野と一次運動野, 一次体性感覚野が活性することが明らかになっており²⁴⁾, 右利き者は呈示された手の画像を回転させる(=三人称運動イメージ)のではなく, 自身の手を脳内で回転させている(=一人称運動イメージ)ことが示唆される. 利き手は日常的に使用頻度が高く, 非利き手に比べ運動関連領域と体性感覚, 視覚領域との統合が良好であることは容易に推察できることから, 日常的に使用する正立~手の内側90°までの回転範囲内の自然な肢位では運動イメージが容易に惹起されることが示唆された.

しかし運動イメージ明瞭度との相関関係の結果は, 一人称運動イメージではなく, むしろ三人称運動イメージとの関連を示唆している. 右手, 左手ともにRTは一人称運動イメージの指標であるKIAとは無相関であり, 左手画像についてはVIAが高いほど難易度の高い手掌橈側回転像(270°)(手の外側方向に90°回転した不自然な肢位)でRTが遅延する結果となった. また右手画像については不自然な肢位だけではなく, 日常的に使用頻度の極めて高い手掌正立像(0°)でも同様の結果が得られた.

その一方で, 右手・左手画像ともにVTSが良好であるほど, RTは短縮する傾向が認められた.

表1 RTと運動イメージ明瞭度・ワーキングメモリとの相関

	左手背				左手掌				
	運動イメージ明瞭度		VTS		運動イメージ明瞭度		VTS		
	VIA	KIA	forward	backward	VIA	KIA	forward	backward	
正立(0°)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
尺側回転(270°)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	460*	n.s.	-482*	n.s.	n.s.
倒立(180°)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
橈側回転(90°)	n.s.	n.s.	n.s.	-452*	n.s.	n.s.	-491*	n.s.	n.s.

	右手背				右手掌				
	運動イメージ明瞭度		VTS		運動イメージ明瞭度		VTS		
	VIA	KIA	forward	backward	VIA	KIA	forward	backward	
正立(0°)	n.s.	n.s.	-476*	n.s.	482*	n.s.	-490*	n.s.	n.s.
尺側回転(90°)	451*	n.s.	n.s.	n.s.	565**	n.s.	-539*	n.s.	n.s.
倒立(180°)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
橈側回転(270°)	446*	n.s.	-475*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

表2 ERと運動イメージ明瞭度・ワーキングメモリとの相関

	左手背				左手掌				
	運動イメージ明瞭度		VTS		運動イメージ明瞭度		VTS		
	VIA	KIA	forward	backward	VIA	KIA	forward	backward	
正立(0°)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
尺側回転(270°)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
倒立(180°)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-460*	n.s.
橈側回転(90°)	n.s.	n.s.	-474*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

	右手背				右手掌				
	運動イメージ明瞭度		VTS		運動イメージ明瞭度		VTS		
	VIA	KIA	forward	backward	VIA	KIA	forward	backward	
正立(0°)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-468*	-478*	n.s.
尺側回転(90°)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	455*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
倒立(180°)	541*	n.s.	-585**	n.s.	n.s.	n.s.	-679**	n.s.	n.s.
橈側回転(270°)	n.s.	n.s.	-589**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

幾何学図形などのオブジェクトによるMR課題では、視覚ワーキングメモリと視空間処理に特化した頭頂後頭領域でMRを実行していることが示唆されている¹⁸⁾。左手画像についてはVIA, KIAとはほぼ無相関であったことから、本研究の被験者にとって非利き手である左手は、脳内での身体運動の再現よりも視覚的な心的操作が優先されたと考える。

しかし、仮に視覚的な心的操作が優先されたのであれば、倒立像など難易度の高い回転画像とVIAとはむしろ負の相関を示す結果が得られるはずである。日常生活では、下肢についてはほとんど視覚に依存しないが、手については視覚との協応が絶対的に必要であり、獲得された運動パターンの体性感覚情報と視覚情報(特に手で操作する物品との関係)は頭頂側頭接合部で統合され、その運動パターンと体性感覚情報は視覚情報によって自動的に再生される²⁰⁾。前述のfMRI研究の結果を踏まえると、手のMR課題に関しては運動関連領域を基盤とする一人称運動イメージが優先的に惹起されるが、視覚的手が

りを利用するため三人称運動イメージもパラレルに処理されていると考える。本研究でVIAの高い被験者でRTが遅延するだけでなく、KIAとは無相関となった原因として、2つの仮説が考えられる。第1の仮説は、利き手である右手のMR課題は一人称運動イメージ優位の課題であったため、VIAの高い被験者、すなわち三人称運動イメージの想起の方が容易な被験者ほど難易度が高くなった可能性である。第2の仮説として、運動イメージ明瞭度の主観的報告であるVIAとKIAの結果が、脳内の運動イメージ処理を正確に反映していないことが挙げられる。一人称運動イメージと三人称運動イメージ中の脳活動を測定したRubyら⁴⁾の実験では、被験者に対し動画を見せるなどして「あたかも自分自身の身体を動かしているような」一人称運動イメージと、「他人の身体運動を観察しているような」三人称運動イメージを想起するトレーニングを十分行った後に測定している。本実験では両者の違いについて検者のデモンストレーションで説明は行っているが、このようなトレーニングまでは実

施していないので、運動イメージの再現精度が低かった可能性は否定できない。

第2の仮説を裏付けるように、課題難易度の高い倒立像(180°)などのERとVTSは負の相関を示した。この結果は、視覚運動イメージの基盤となる視覚ワーキングメモリの容量または機能水準の高さが、手のMRの処理効率を高めていることを示している。

三人称運動イメージ想起時は上頭頂小葉が活性し、オブジェクトのMR課題時は頭頂後頭接合部が活性することから^{3,4,18)}、視覚ワーキングメモリによる視覚的心的操作と三人称運動イメージの心的操作の神経基盤は、脳部的にも機能的にもオーバーラップしており、遂行する課題に応じて他の脳領域と選択的に結合して情報を処理していると推測される。本研究の結果から、VTSで評価した視覚ワーキングメモリ容量については、手のMR課題時の視覚的処理部分を少なからず反映することが示唆された。体性感覚ワーキングメモリ能力についてはその評価法が確立されていないため独自にKTSを行ったが、得られたデータに妥当性があるとはいえない。今後の課題として方法論の再考と、信頼性と妥当性について検証が必要と考える。またMIQ-RSなど質問紙による評価法については、運動イメージを正確に再現するためのインストラクションの方法についても検討の余地が残された。

結語

右利き者の手のMR課題は、左手に比して右手で判別精度が高く、反応時間も速かった。利き手の心的操作時は、画像を脳内で回転操作するのではなく、自己身体運動の想起が優先的に実行されていることが示唆された。また視覚ワーキングメモリの神経心理検査であるVTSは、MR時の三人称運動イメージ能力と関連することが示された。

文献

- 1 Decety, J., Jeannerod, M. & Prablanc, C.: The timing of mentally represented actions. *Behav. Brain Res.* 34: 35-42, 1989.
- 2 Jeannerod, M. & Frak, V.: Mental imaging of motor activity in humans. *Curr. Opin. Neurobiol.* 9: 735-9, 1999.
- 3 Sharma, N., Pomeroy, V. M. & Baron, J.-C.: Motor imagery: a backdoor to the motor system after stroke?

Stroke. 37: 1941-52, 2006.

- 4 Ruby, P. & Decety, J.: Effect of subjective perspective taking during simulation of action: a PET investigation of agency. *Nat. Neurosci.* 4: 546-50, 2001.
- 5 Malouin, F. & Richards, C. L.: Mental Practice for Relearning Locomotor Skills. *Phys. Ther.* 90: 2010.
- 6 Mulder, T.: Motor imagery and action observation: cognitive tools for rehabilitation. *J. Neural Transm.* 114: 1265-78, 2007.
- 7 Hemayattalab, R. & Movahedi, A.: Effects of different variations of mental and physical practice on sport skill learning in adolescents with mental retardation. *Res. Dev. Disabil.* 31: 81-6, 2010.
- 8 Visek, A. J., George, T. & Blom, L. C.: Mental training with youth sport teams: Developmental considerations & best practice recommendations. *J Sport Psychol Action.* 4: 1-8, 2014.
- 9 Skoura, X., Personnier, P., Vinter, A., et al.: Decline in motor prediction in elderly subjects: right versus left arm differences in mentally simulated motor actions. *Cortex.* 44: 1271-8, 2008.
- 10 Gregg, M., Hall, C. & Butler, A.: The MIQ-RS: A Suitable Option for Examining Movement Imagery Ability. *Evid. Based. Complement. Alternat. Med.* 7: 249-57, 2010.
- 11 Malouin, F., Richards, C. L. & Jackson, P. L.: The Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ) for Assessing Motor Imagery in Persons with Physical Disabilities: A Reliability and Construct Validity Study. 31: 20-29, 2007.
- 12 Takeda, K.: Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition Reaction time differences between left- and right-handers during mental rotation of hand pictures. *Sci. Technol.* 415-425, 2010.
- 13 兒玉隆之: Mental rotation課題時における脳内神経活動の空間的解析 - LORETA解析を用いた検討 -. *理学療法科学* 25, 721-727, 2010.
- 14 Ter Horst, A. C., van Lier, R. & Steenbergen, B.: Mental rotation task of hands: differential influence number of rotational axes. *Exp. Brain Res.* 203: 347-54, 2010.
- 15 山田実, 上原稔章: 運動イメージ想起能力の年代別基準値の作成および高齢者における転倒との関係. *理学療法科学* 23, 579-584, 2008.
- 16 Hyun, J. S. & Luck, S. J.: Visual working memory as

- the substrate for mental rotation. *Psychon. Bull. Rev.* 14: 154-8, 2007.
- 17 Lamm, C., Fischmeister, F. P. S. & Bauer, H.: Individual differences in brain activity during visuo-spatial processing assessed by slow cortical potentials and LORETA. *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 25: 900-12, 2005.
- 18 Schendan, H. E. & Stern, C. E.: Mental rotation and object categorization share a common network of prefrontal and dorsal and ventral regions of posterior cortex. *Neuroimage.* 35: 1264-77, 2007.
- 19 Oldfield R. C.: The assessment and analysis of handedness : The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia.* 9: 97-113, 1971.
- 20 Fiehler, K., Burke, M., Engel, A., et al.: Kinesthetic working memory and action control within the dorsal stream. *Cereb. Cortex.* 18: 243-53, 2008.
- 21 Ionta, S. & Blanke, O.: Differential influence of hands posture on mental rotation of hands and feet in left and right handers. *Exp. brain Res.* 195: 207-17, 2009.
- 22 Iseki, K., Hanakawa, T., Shinozaki, J., et al.: Neural mechanisms involved in mental imagery and observation of gait. *Neuroimage.* 41: 1021-31, 2008.
- 23 Parsons, L. M.: Imagined Spatial Transformations and Feet of One 's Hands. 241: 178-241, 1987.
- 24 De Lange, F. P., Helmich, R. C. & Toni, I.: Posture influences motor imagery: an fMRI study. *Neuroimage.* 33: 609-17, 2006.
- 25 Murata, A., Gallese, V., Kaseda, M., et al.: Parietal neurons related to memory-guided hand manipulation. *J. Neurophysiol.* 75: 2180-6, 1996.