



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Mental chronometry ability and neural representation of motor imagery [an abstract of entire text]
Author(s)	楊, 惠翔
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(文学)
Dissertation Number	甲第14723号
Issue Date	2021-09-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/82989
Type	doctoral thesis
File Information	Huixiang_Yang_summary.pdf



学位論文内容の要約

博士の専攻分野の名称：博士（文学）

氏名： 楊 惠翔

学位論文題名

Mental chronometry ability and neural representation of motor imagery
(運動イメージの心的時間測定能力と神経基盤)

本研究では、運動イメージの測定法と神経表現を調べ、運動イメージに基づくニューロフィードバックの応用を検討した。運動イメージとは、実際の運動を伴わず、動作を心的シミュレーションまたはリハーサルすることとして定義され、技能習得の促進、スポーツ選手の運動能力の向上、神経疾患患者の治療などに利用されている。これまでの研究では、運動イメージ能力に関するいくつかの測定法が開発されてきたが、これらの測定法間の関係は明らかではない。さらに、全身動作のイメージにかかわる神経表現、そして運動イメージに基づくニューロフィードバックのターゲット領域の影響という点については検討がなされてこなかった。そこで本研究は、行動実験で運動イメージ能力測定法の妥当性を検討し、その後に認知神経科学的手法を用いて運動イメージに関わる脳内機構を検証した。さらに、運動イメージに基づくニューロフィードバック実験を行い、運動イメージの応用可能性について検討を加えた。

本論文は、第1章「序論」、第2章「運動イメージ能力の測定法」、第3章「運動イメージの神経表現」、第4章「運動イメージを用いたニューロフィードバック」、第5章「総合考察」から構成されている。

第1章では、これまでの運動イメージ研究を概観し、運動イメージの定義、神経基盤、応用の3つの側面から運動イメージを紹介した。その結果、本研究ではまず個人の運動イメージ能力に注目し、今後の実験にとって有効な測定法の特定を試みた。従来から用いられてきた心的時間測定法（mental chronometry、以下MCとする）法では、実際の運動実行とイメージの持続時間を比較し、時間の差が小さいほどイメージが正確であると定義している。しかし、MC法での成績は、他の要因にも影響され、また他の運動イメージ測定法または時間知覚能力との関係は不明である。さらに、手運動イメージの脳内基盤が特定されたが、全身動作のイメージにかかわる神経表現に対する検討には不十分なところがまだ残されている。最後に、運動イメージに基づくニューロフィードバック研究につき、フィードバック領域の違いによる制御効果の違いは未だに明らかになっていない。これらの関係性について先行研究を整理し、問題点を明確化した。

第2章では、第1章で指摘した運動イメージの測定法に関する実験的検討を行った。具体的に、時間知覚能力の測定に時間再現課題を用い、MC法のパフォーマンスと時間再現課題との関係を調べた。また、MC法と運動イメージ能力を評価する質問紙を比較した。参加者53名は、運動イメージの鮮明さに関する質問票の改訂版（VMIQ-2）、運動イメージに関する質問票の改訂版（MIQ-R：質問紙を実施する同時に、運動実行とイメージの時間的ずれを記録し、時間差をMC得点として算出）、および時間再現課題に参加した。特にMIQ-Rにおいては、運動を実行した後、観察イメージ（MIQ-V；運動する自分の姿を第3者的に外から見るもの）か体験イメージ（MIQ-K；自分が実際に行っているように見るもの）と2種類のイメージを生成した。実験の結果、同種類の運動に対するMC得点には有意な正の相関が認められ、MC得点は安定していることが示唆された。また、MC得点とMIQ-R評価の間にも有意な正の相関が見られ、運動実行より運動イメージを早く行なった人が、そのイメージはが容易だと判断する傾向があることが判明した。一方、MC得点と時間再現性得点との相関、およびMC得点とVMIQ-2評価との相関は有意ではなかった。運動イメージの鮮明さそして正確に時間を知覚できる能力は、MC成績とは無関係であると解釈できる。MIQ-Rで生成した2種類のイメージ（観察イメージと体験イメージ）でのMIQ-R評価とMC得点の相関を調べた結果、

MIQ-V と MC-V（観察ペア）また MIQ-K と MC-K（体験ペア）それぞれの間に有意な正の相関が見られた。これらの結果から、MC 法と質問紙の関係は、質問紙と MC 法で用いる運動課題の組み合わせに依存する可能性がある一方、運動イメージ能力は MC の得点に反映される可能性があることが示唆された。

第 3 章では、関心領域（ROI）内での活動のピーク位置と多ボクセルパターンをもとに、イメージした全身運動がピーク位置及び脳活動パターンによって分類されるのか、また脳のどこから分類できるかを調べた。従来の運動イメージ研究では、領域全体の変化を検出する fMRI データ解析が用いられているが、本実験では多ボクセル（または多変量）パターン解析（multivoxel pattern analysis; MVPA）と呼ばれる fMRI データの新しい解析手法を用いて、異なる動作の運動イメージの解読を試みた。実験で 25 名の被験者は、fMRI スキャン中に、第 2 章で述べた MIQ-R の項目である、膝を上げる、ジャンプ、腕を動かす、腰を曲げるという 4 つの動作をイメージした。ROI 内での fMRI 信号のピーク位置と活動パターンに基づいて、参加者がイメージしている動作を解読するための分類モデルを構築した。その結果、感覚運動野の活性化ピークの位置と、運動イメージネットワークの一部の空間的な活性化パターンに基づいて、イメージ中の動作を分類できることがわかった。また、MVPA を用いた分類器は、活性化ピーク座標を用いた分類器よりもはるかに優れた性能を発揮できることがわかった。さらに、分析段階では、視覚的なイメージを作りやすいか（VI 群、n = 10）、筋感覚イメージを作りやすいか（KI 群、n = 15）で、参加者を感覚モダリティにより 2 群に分け、分類精度の違いを比較した。その結果、KI 群は VI 群と比べて、左の一次体性感覚皮質（S1）における MVPA に基づく分類器で高い精度を達成したということが示唆された。これらの結果から、運動イメージが複数の脳領域内の神経活動から解読でき、また、感覚モダリティは運動イメージの神経表象に影響を与えることが示唆された。

第 4 章では、fMRI を用いたニューロフィードバックという技術を利用し、異なる運動関連領域の違いによる制御効果の違いを調べた。ニューロフィードバックとは、脳の活動をリアルタイムで可視化し、訓練によって脳活動を意識的に制御するプロセスである。フィードバックの対象とする脳領域の影響の違いを検討することで、ヒトが意識的に制御可能な脳領域を知ることが可能であると考えられる。30 名の参加者は、一次運動野からのフィードバックを受けるグループ（M1 群、n = 15）と、腹側運動前野からのフィードバックを受けるグループ（PMv 群、n = 15）に分けられた。この二つのグループとも、右手を握りしめる動作を実行または想像することで、フィードバック領域の平均的な活性化レベルを反映するニューロフィードバック・スコアを増加させるよう指示された。実験の結果、PMv 群ではイメージの際に M1 が負に活性化され、M1 群では負に活性化されなかった。また、PMv 群では PMv が活性化され、一方で M1 群では活性化されなかったことが明らかになった。さらに、スコアに対して、課題とセッション数の 2 要因分散分析を行なった結果、PMv 群のみで、交互作用が観察された。本結果は、異なる運動関連領域からのニューロフィードバックが脳活動の制御に異なる効果をもたらすことを示している。この結果から、ニューロフィードバック実験をデザインする際には、フィードバック領域と心的方略との関係を十分に検討することが重要であることが示された。

第 5 章では、上述した第 2 章から第 4 章の実験結果を整理した上で、運動イメージ能力測定の重要性を論じ、運動イメージを測定する際の注意点を述べた。また、運動イメージに関連する神経表現を検討し、活性化された領域の機能を議論し、運動イメージに基づくニューロフィードバックの応用を展望した。さらに、実験につき残された課題、当該研究領域における研究成果の位置づけや、今後の研究課題に対して考察を行った。