

[総説]

運動イメージ能力の個人差とリハビリテーション

小手川 耕 平

Individual differences in motor imagery ability and rehabilitation

Kohei KOTEGAWA

和文抄録

人間には、実際の運動を伴わないで心的に動作を想像する能力がある。この心的過程は運動イメージと呼ばれている。運動イメージ能力には個人差があり、課題難易度や年齢など様々な要因が関連していることが知られている。加えて、運動イメージ中の脳活動にも個人差がみられることが分かっている。本稿では、運動イメージに関する研究を概説し、運動イメージの個人差は、実際運動能力や認知機能を含めた運動を内的にシミュレートする神経基盤の個人差に起因している可能性があることが分かった。これらのことは、運動イメージを用いたリハビリテーション介入効果を最大限発揮するには、各個人の運動イメージ能力を的確に把握し、各個人にカスタマイズされた運動イメージ介入が必要であることを示唆する。

キーワード：運動イメージ能力、鮮明度、個人差、加齢、リハビリテーション

I はじめに

現在、我が国の高齢化率は年々増加しており、世界で最も高い高齢化率である。また、それに伴って要介護者も6000万人に達する状況であり、高齢者や要介護者の機能低下予防や転倒リスクの軽減を図り、自立支援を目指すことが急務の課題となっている。加えて、脳卒中を含むリハビリテーションには、根拠のある介入を行うことが強く求められている¹⁾。

近年のリハビリテーションにおいては運動イメージを用いた介入が注目され始めている。Lopezら²⁾のシステムティックレビューによれば、今日の運動イメージ介入には上肢や下肢の機能訓練が併用されており、概ね週3～5回の介入を4～6週間継続することにより、機能回復に効果のある可能性が示されている。しかしながら、介入方法は言語刺激を用いたものや映像を提示する方法など様々であり、確

立した介入手法があるわけではない^{3,4)}。そもそも運動イメージ能力には個人差があることが報告されており⁵⁻⁸⁾、その測定方法や運動イメージの正確さに関する基準は、日々研究が進められている状況である。したがって、本稿では運動イメージの個人差とその神経基盤に関する研究を概説し、運動イメージを用いたリハビリテーション介入の展望について考察する。

II 人間の行為と運動イメージ

私たちが日常生活において様々な行為を遂行するには、脳内における運動の意図・企画、制御、感覚情報処理がそれぞれ密接に連携しながら正常に機能している状態が必要であり⁹⁾、リハビリテーションにおいてはこれらの機能回復を図ることが目的の一つとなる。運動イメージを用いた介入は、主に運動の意図・企画に対するアプローチから機能回復を促

所属

熊本保健科学大学 保健科学部 リハビリテーション学科 生活機能療法学専攻
責任著者：kotegawa@kumamoto-hsu.ac.jp

進しようとする試みである。

人間には、実際に運動を伴わなくても、心的に運動を想像する能力がある。この心的過程が「運動イメージ」と呼ばれ、運動イメージとは「行動する主体がある一定の行為をシミュレートするダイナミックな状態」と定義される¹⁰⁾。Jeannerod¹¹⁾は、運動イメージは通常であれば無意識的に行われる運動準備の意図や内容への意識的な接近の結果を表しているとしている。また、Decetyら¹⁰⁾は、運動準備と運動イメージは異なる脳内過程ではなく、脳内処理の程度（意識もしくは無意識）の差に過ぎないと述べている。事実、運動イメージ中には運動前野、補足運動野、頭頂葉および小脳などが、実際の運動を実行せずとも活動しているため、実際運動と運動イメージの神経基盤は同じようなプロセスで制御されていることが示唆されている^{12, 13)}。加えて、Yueら¹⁴⁾は運動イメージを用いた筋力トレーニングで、実際運動には劣るものの運動イメージトレーニングのみでも筋力増強効果がみられたことを報告している。

これらのことを根拠の一つとして、リハビリテーションでは運動イメージを用いた介入により機能回復を図り、目的とする行為の再獲得を目指している。しかしながら、リハビリテーションの主な対象である高齢者には元々の機能低下があり、個々の機能には大きな個人差があることが知られている。例えば、

高齢者の歩行能力は加齢とともに低下し^{15, 16)}、加齢に伴って歩行スピードは遅くなり¹⁷⁾、バランスなどを含めた歩行能力の個人差は増加する¹⁸⁾。また、高齢者では歩行能力に依存して実際運動中の脳活動が異なることも示されている^{19, 20)}。加えて、若齢者においても各個人のバランス機能や歩行能力に応じて脳活動に個人差がみられることが明らかにされている^{21, 22)}。運動イメージが行為をシミュレートするダイナミックな状態であるならば、若齢者や高齢者の運動イメージやその神経基盤にも個人差が反映される可能性が高い。

Ⅲ 運動イメージの評価と加齢変化及び個人差

運動イメージに関するリハビリテーションの介入効果を示す指標や研究に用いられる運動イメージの測定にはさまざまな方法があり、日々、研究および改変が行われている。ここでは運動イメージの評価、および加齢変化と個人差に関する先行研究を概観する。主な運動イメージの評価についてはTable 1にまとめて示した。

1 運動イメージの評価

運動イメージの質問紙

運動イメージをどれだけ鮮明に描くことができるのかを測定する方法として、Isaacら²³⁾の作成したVividness of Movement Imagery Questionnaire

Table 1. 主な運動イメージ評価の種類と測定方法

評価の名称	測定方法
VMIQ	ジャンプや走るなどの運動に関する項目が24種類あり、それらの運動を一人称イメージおよび三人称イメージで想起してもらい、それぞれ5段階の点数で自己評価する質問紙（得点が低い程、イメージが良くてきたことを示す）。
VMIQ-2	VMIQの運動項目を修正し、実際運動に近い筋感覚的イメージの指標も追加して、それぞれ5段階の点数で自己評価する質問紙（得点が低い程、イメージが良くてきたことを示す）。
JMIQ-R	片脚立ちを含めた比較的簡単な動作が4種類あり、それらの動作を一人称イメージと三人称イメージで想起してもらい、それぞれ8段階の点数で自己評価する質問紙（得点が高い程、イメージが良くてきたことを示す）。
KVIQ	脳卒中既往者などの障害者にも用いることができるように、頸部の屈伸や、肩の挙上など簡単な運動を一人称イメージおよび三人称イメージで想起してもらい、それぞれ5段階の点数で自己評価する質問紙（得点が高い程、イメージが良くてきたことを示す）。20項目あるものと（KVIQ-20）、半分の10項目で評価する簡易版（KVIQ-10）がある。
MR 課題	回転角度に差のある図形の鏡映像弁別を求める課題。呈示される図形が手の場合に右手か左手かを同定する課題において、手の線画が特定の方位で与えられたとき（前額平行面上なら指先が上を向いている線画）に反応時間が一番短くなり、その方位を基準に実際に運動を行った場合の動かしやすい方向の反応時間が速く、動かしにくい方向の反応時間が遅くなる（反応時間が速いほど、イメージ能力が高いことを示す）。

VMIQ = Vividness of Movement Imagery Questionnaire, JMIQ-R = Movement Imagery Questionnaire-Revised Japanese Version, KVIQ = Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire, MR = Mental rotation.

(VMIQ)がある。VMIQはジャンプや走るなどの運動に関する項目が24種類あり、それらの運動をあたかも自分が運動を行っているようにイメージする一人称イメージと、他者が運動を行っているのを観察するようにイメージする三人称イメージで想起してもらい、それぞれ5段階の点数で自己評価する質問紙である(得点が低い程、イメージが良くてきたことを示す)。また、Hallら²⁴⁾の作成したMovement Imagery Questionnaire-Revised (MIQ-R)は、長谷川²⁵⁾によって日本語版(JMIQ-R)が作成されており、VMIQより簡便に測定できるとされている。

Mulderら³⁾は若齢者から高齢者まで333名に対して、VMIQを用いた研究を行っている。結果は、三人称イメージにおいては群間でVMIQの得点に有意差がみられない一方で、一人称イメージは高齢者(67~93歳)で若齢者(19~29歳)やその中間層(30~62歳)と比較してVMIQの得点が有意に高くなり、一人称イメージに低下がみられたことを報告している。また、年齢が増加するにつれて、一人称イメージよりも三人称イメージを想起しやすい傾向にあることを示唆している。この主観的な運動イメージの鮮明さにおける個人差は、若齢者間でもみられることが報告されている。長谷川ら²⁶⁾は、運動能力が運動イメージの鮮明さに及ぼす影響を検討する目的で、不安定で予測が不可能な環境で行う必要のあるオープンスキル競技の選手と、安定して予測が可能な環境で行う必要のあるクローズドスキル競技の選手に分け、JMIQ-Rを測定して比較した。その結果、クローズドスキルの選手はオープンスキルの選手に比べ一人称イメージ能力が高く、オープンスキルの選手は一人称イメージより三人称イメージを想起しやすいことが分かった。このことは、若齢者間においても運動イメージの鮮明さに個人差がみられ、従事するスポーツに必要なとされる運動技能(各個人の経験の差)と密接に関連することを示唆している。ただし、運動イメージの鮮明さに関して個人差はあまりみられないことを報告している研究もある²⁷⁻²⁹⁾。例えば、小手川ら²⁸⁾は、評価法としての有効性と評価法どうしの関係性を明らかにする目的で、若齢者と高齢者に対して運動イメージの主観的な質問紙評価であるJMIQ-Rと、より客観的な評価法の一つであるフィッツの法則を用いたポイントング課題(後で詳述する)を用いた実験を行った。その結果、ポイントング課題には明確な群間

差が認められた一方で、JMIQ-Rには若齢者と高齢者に有意差は認められなかったことを報告している。このことから、運動イメージの鮮明さは質問紙による主観的評価に依存しており、運動イメージ想起者自身の基準に委ねている部分も多いため、各個人の細かな差異まで捉えきれていない可能性がある。その他にも、運動イメージの質問紙として、VMIQを改良したVMIQ-2³⁰⁾や、脳卒中既往者にも用いることができるKVIQ³¹⁾およびその日本語版³²⁾も作成されている(Table 1参照)。

心的回転課題

運動イメージ想起・操作能力をより客観的に捉える手法の一つとして、身体図形を用いた心的回転(Mental rotation: MR)課題がある。MR課題とは回転角度に差のある図形の鏡映像弁別を求める課題である。先行研究において、MR課題で呈示される図形が手の場合には、課題を遂行するために自分の手を心的に動かしてみるような運動イメージが用いられることが示唆されている³³⁻³⁵⁾。例えば、Sekiyama³⁵⁾は手の線画を呈示し、右手か左手かを同定する課題において、手の線画が特定の方位で与えられたとき(前額平行面上なら指先が上を向いている線画)に反応時間が一番短くなり、その方位を基準に実際に運動を行った場合の動かしやすい方向の反応時間が速く、動かしにくい方向の反応時間が遅くなることを示した。これは心的なイメージ操作であっても、実際に自分の手を刺激に合わせようとして動かす場合の動かしやすさ、すなわち生体力学的な要素が影響を与えることを示唆している。

MR課題においては発達や加齢に伴う変化が報告されている。Sekiyamaら³⁶⁾は、6~11歳までの子どもと18~21歳の大学生を対象にMR課題を実施した。その結果、6歳児は課題遂行中も自分の手を動かして実際に確認してみるなどの動作が観察され、この動作がなくなる7~8歳児でも、反応時間が生体力学的な影響を強く受けることが分かった。さらに、成人に近づくほど反応時間は短くなり、生体力学的な影響がみられなくなった。したがって、心的に運動イメージを操作できるようになるのは、7歳前後であることを示唆している。また、成人に近づくほど心的なイメージ操作は上達するものの、三人称イメージのようにより効率的(簡単)な方法でイメージを操作している可能性を指摘している。Saimpontら³⁷⁾は、若齢者と高齢者に手のMR課題

を実施し、高齢者のみ反応時間に左右差がみられ、非利き手の反応時間が利き手に比べると有意に遅くなることを報告している。加えて、山田ら³⁸⁾は、20～86歳までの333名に手と足のMR課題を実施し、65歳以上の高齢者に対しては、測定日より1年間の観察期間を設け、その間における転倒の有無も調査した。その結果、加齢に伴って反応時間が遅延する傾向にあり、転倒リスクの高い高齢者の反応時間はより遅くなることが分かった。このことは、加齢に伴って運動イメージ操作能力は低下し、転倒リスクの程度と強く関連することを示唆する。このようにMR課題は、発達および加齢に伴う運動イメージの経年的変化を捉えるうえで、有用であると考えられる。しかし、一般的には加齢に伴い情報処理速度は低下し、課題に対する反応時間は遅くなることが知られている³⁹⁾。また、MR課題には性差があることも報告されている（女性が男性と比較してMR課題の成績が低下する）⁴⁰⁾。さらに、MR課題には①対象物を心的にイメージする、②対象物の心的回転を行う、③それらを比較する、④対象物が同じものであるかを判断する、⑤結果を報告する、という認知過程が含まれており⁴¹⁾、運動の意図や内容を意識化した運動イメージ（一人称イメージ）以外の要素（例えば、三人称イメージ）や性差が含まれている可能性があることは考慮しなければならない。

運動イメージの正確さ

もし、実際運動と運動イメージが心的過程を共有しているのなら、その実行時間は一致するはずである。Decetyら¹⁰⁾は若齢者を対象に通路の距離や幅を操作して、実際歩行時間（actual walking time: AWT）および歩行の運動イメージ時間（mental walking time: MWT）を測定した結果、それぞれの時間はほぼ一致していることを報告している。このことを応用して運動イメージと実際運動にかかる時間を比較することにより、運動イメージの操作能力や正確さを測定できる方法として、フィッツの法則を用いたポインティング課題がある⁸⁾。フィッツの法則においては、運動実行時間は標的までの距離と比例、標的サイズと反比例の関係にあることや、運動実行の速さと正確性はトレード・オフの関係にあることが示されている。例えば、同じ標的距離であれば、サイズが小さい（高い正確性を要求され難しい）ほど実行時間は長くなる⁴²⁾。ポインティング課題では、紙に描かれた2つの四角のターゲット間を

実際にポインティングする時間と、ポインティングをしているように運動イメージを行う時間を測定する。その結果は、四角のターゲットが小さくなる（課題が難しくなる）に従って、実際のポインティング時間のみでなく、それに伴う運動イメージの時間も延長することが分かっている⁸⁾。つまり、実際の運動実行時間のみならず、運動イメージ時間もフィッツの法則に従うことが確認されている。

このようなフィッツの法則に基づく運動イメージの特徴は、さまざまな実験設定や実験参加者を用いた研究において報告されている^{6, 34, 43, 44)}。例えば、Personnierら⁶⁾は、歩行運動イメージの加齢変化を調べる目的で、若齢者と高齢者を対象に、3種類の幅（15, 25, 50 cm）で距離5 mの通路を、はみ出さないように自然なスピードで実際に歩く時間であるAWTと、歩行運動イメージの想起時間であるMWTを測定している。その結果、若齢者はAWTとMWTに有意な差は認められず、実際歩行と運動イメージの遂行時間はほぼ同様の傾向がみられた。一方で、高齢者は実際歩行よりも運動イメージの遂行時間を遅く見積もっていた。したがって、高齢者は自己の実際歩行時間に対して歩行の運動イメージ時間を過大評価する（遅く見積もる）傾向にあり、身体の動きを正確にイメージできていないことが示唆される。また、Robinovitchら⁴⁵⁾は、若齢者と高齢者を対象に、手のリーチ課題においてイメージされるリーチ範囲と実際のリーチ範囲を比較し、その差を検討した。その結果、若齢者のイメージしたリーチ範囲は実際のリーチ範囲より小さくイメージする傾向にある一方で、高齢者のイメージしたリーチ範囲は実際のリーチ範囲より大きくなり自己の実際運動よりも良くできると見積もる傾向にあった。加齢に伴う実際運動と運動イメージの解離は前述のポインティング課題でも示されており、高齢者では課題が難しくなるにつれて両者の解離は増大することが明らかにされている⁸⁾。Personnierら⁴⁶⁾は、これらの加齢に伴う実際運動と運動イメージの解離の要因として運動能力や認知機能の低下を挙げており、その結果として運動イメージが不正確になることを示唆している。したがって、高齢者の運動イメージを測定する際には加齢に伴う変化（運動イメージの不正確さ）を考慮しておく必要がある。

2 運動イメージの個人差に影響する要因

運動イメージには、これまで述べてきたような加

齢や各個人の運動能力のみならず、実行機能・ワーキングメモリ機能、課題内容、課題難易度などの様々な要因が関与していることがいわれている^{47, 48)}。

Malouin ら⁴⁹⁾ は、運動イメージと実行機能・ワーキングメモリの関連を調べる目的で、健常成人80名を3つのグループに分け、運動イメージとワーキングメモリ能力をそれぞれ測定した。その結果、高齢者における運動イメージ能力の個人差はワーキングメモリと関連しており、ワーキングメモリ能力が低い高齢者ほど、運動イメージの生成がより困難になることを示した。また、Malouin ら⁵⁰⁾ は、特に視空間ワーキングメモリ能力が高い脳卒中既往者は、運動イメージトレーニングの効果がより顕著にみられたことを明らかにしている。このように、運動イメージとワーキングメモリの関連性は、様々な先行研究により示されてきた^{7, 10, 51)}。したがって、ワーキングメモリ機能は、運動イメージの個人差に影響を与える可能性がある。

運動イメージの正確さは、課題内容や難易度、知覚された難易度（自己にとってその運動がどの程度難しいと感じられているのか）によって異なることが知られている。Calmels ら⁵²⁾ は、若い体操選手を対象に技の難易度を操作して、その技の実際運動時間と運動イメージ時間を比較した。その結果、難易度の最も高い技では運動イメージにかかる時間が実際運動時間よりも遅くなることが分かった。また、Decety ら⁵³⁾ は、若齢者に対して異なる距離でAWTとMWTを測定したところ両者は一致することを確認した。一方で、同じ若齢者に対して25kgの荷物を持ち歩行運動イメージを想起する課題を実施したところ、実際運動と比較して運動イメージ時間を遅く見積もり、MWTはAWTと解離することを明らかにした。Cerritelli ら⁵⁴⁾ も若齢者を対象にポイントング課題を用いて、2kgの重りの有無による課題遂行の実際運動時間と運動イメージ時間を比較した。その結果、重りが無い場合の実際運動と運動イメージ時間は一致したが、重りをつけた際は両者の遂行時間に解離がみられ、実際運動より運動イメージ時間を遅く見積もることが分かった。これらのことを踏まえると、高齢者のみならず若齢者においても課題内容や課題難易度、知覚された難易度によっては運動イメージが不正確になり、より複雑で注意が必要な運動イメージ時間は延長することが示唆される⁴⁷⁾。したがって、運動イメージ

(の正確さ)の個人差には、加齢、実際運動能力、実行機能・ワーキングメモリ機能、課題内容、課題難易度、知覚された難易度など様々な要因が関係している可能性がある。

IV 運動イメージ中の脳活動の加齢変化及び個人差

ここでは、運動イメージにおける脳活動の研究をいくつか紹介し、運動イメージの脳活動と加齢変化に焦点を当てて概説する。

1 運動イメージ中の脳活動

運動イメージ中の脳活動は様々な分野において盛んに研究されてきた。Ingvar ら⁵⁵⁾ は、入院患者6人に対してポジトロン断層法を用いて右手を握りしめる課題の実際運動と運動イメージ中の脳血流量を測定した。その結果、運動イメージ中には特に前頭前野(prefrontal cortex: PFC)領域や運動前野で脳血流が増加したことを報告している。しかし、実際運動中とは異なる脳領域の賦活もみられたため、運動イメージの神経基盤は実際運動とは部分的に異なることを示すものであった。また、Roland ら⁵⁶⁾ も同様の研究で、ヒトが運動イメージを想起した際には補足運動野の脳血流が増加することを報告している。その後、ニューロイメージングの研究技術の進歩とともに、運動イメージ中には実際運動と同じような脳部位が活動することが分かってきている。Hanakawa ら¹²⁾ は、指のタッピング課題の実際運動および運動イメージ中の脳活動を、機能的磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging: fMRI)を用いて測定している。その結果、運動イメージ中には、補足運動野や運動前野、前頭側頭弁蓋部を含む運動関連領域が賦活しており、運動イメージ中の脳活動は実際運動と共通していることを示した。また、Bakker ら⁵⁷⁾ は歩行運動イメージ中の脳活動を測定するため、fMRIを用いた研究を報告している。著者らは、歩行課題の通路幅を操作(狭い、広い)することによって課題の難易度を調整し、歩行運動イメージと物体が動く視覚イメージ中の脳活動を比較した。その結果、視覚イメージと比較して、歩行運動イメージ中には両側背側運動前野、両側上頭頂小葉、右腹側帯状回、および左被殻において活動の増加を示した。また、より難しい歩行(狭い通路幅の歩行)は、両側上頭頂葉および右

中後頭回の活動を増加させた。これらの結果は、歩行運動イメージには足の運動を制御する領域が関連し、より難しい歩行運動イメージ中には異なる領域も関与しうることを示唆している。

Vryら⁵⁸⁾は、運動イメージ中に賦活する広範なネットワークは2つに分けられることを示している。一つは、運動感覚領域を中心とする背側前頭-頭頂ネットワークで、実際運動と運動イメージの両方に関与するネットワークである。もう一方は、PFCと頭頂間溝を中心とする腹側ネットワークで、純粋にイメージを実行するための運動イメージ特有のネットワークである。特に、左頭頂間溝とPFCは感覚フィードバックやワーキングメモリに関連しており、期待される感覚の予測を操作している可能性が示されている。Solodkinら⁵⁹⁾もfMRIを用いた研究で、運動実行および運動イメージにおいては、補足運動野と一次体性感覚、小脳と上頭頂小葉などに強い結合がみられ、両者におけるネットワークは類似していることを報告している。しかしながら、一次体性感覚野から一次運動野の結合について運動イメージでは運動実行ほど強い結合がみられなかったことから、運動実行と運動イメージのネットワークは必ずしも一致していないことを示唆している。さらに、Wuら⁶⁰⁾は機能的近赤外線分光法 (functional Near-Infrared Spectroscopy: fNIRS) を用いた研究で、実際運動時よりも運動イメージ中にはPFCがより賦活することを示している。この結果は、イメージ特有の認知機能には、PFCを含んだネットワークが関与すること^{58, 61-63)}を示唆している。これら近年の研究も踏まえると、運動実行と運動イメージの神経基盤はほぼ類似しているものの、特に運動イメージ中には、情報の更新や選択、保持を含むワーキングメモリなど高次の統括的認知機能を担っている領域 (例えば、PFC) がより密接に関与する可能性が明らかになりつつある⁹⁾。一方で、食事動作の運動イメージ時には実際運動と比較して、補足運動野や運動前野を含む運動関連領域がより賦活することを示した研究も報告されており⁶⁴⁾、運動イメージ中の脳活動は、イメージの種類やイメージする動作、課題の難易度によって異なる可能性があるため、目的に合わせた測定方法を考慮する必要がある。

2 運動イメージにおける脳活動の加齢変化と個人差

Guillotら⁶⁵⁾は、若齢者における運動イメージ能力の個人差として、運動イメージの得手不得手による脳活動の違いについてfMRIを用いて調べた。その結果、個人差に関わらず運動イメージ中は頭頂葉および、外側・内側運動前野や小脳、被殻を含む運動関連領域が賦活していることが分かった。また、運動イメージが得意な若齢者は苦手な人達と比較して、頭頂葉と腹外側運動前野がより賦活することが示された。対照的に、運動イメージが苦手な若齢者は得意な人達と比較して、小脳や前頭眼窩野、後帯状回がより賦活することが分かった。このことは、若齢者は運動イメージ能力によって運動イメージに用いられる脳領域やその脳領域の活動の大きさが異なることを示唆する。

また、先に紹介したBakkerら⁵⁷⁾による研究のように運動イメージにおける脳活動の加齢変化を測定するため、課題の難易度を操作している研究がある。Allaliら⁶⁶⁾はfMRIを使用して、歩行運動イメージに関連する脳活動について加齢変化を含めて調査している。その結果、若齢者および高齢者ともに運動イメージ中には、両側の補足運動野、一次運動野、右PFC、および小脳において脳活動の増加がみられた。加えて、著者らはより困難な歩行運動イメージ中における若齢者と高齢者の脳活動の差を報告している。すなわち、若齢者では、難しい課題に関連する活動は、右被殻、両側上頭回、および両側後頭葉でみられ、高齢者では、両側海馬、左一次運動野、右島、左中部下側頭回、および両側後頭皮質でみられた。さらに、Goddeら⁶⁷⁾は、高齢者51名を運動能力により高機能群と低機能群に分け、歩行運動イメージ中の脳活動についてfMRIを用いた測定したところ、高機能群では補足運動野がより賦活したのに対し、低機能群では背外側PFCの賦活がみられたことを報告している。実際歩行においても、歩行能力の個人差で同様の結果が確認されており、補足運動野は主に運動制御や姿勢制御に関与し、PFC活動はワーキングメモリやエピソード記憶の認知機能に負荷がかかった際に賦活することが示唆されている⁶⁸⁾。したがって、補足運動野は運動イメージそのものの制御を担っており、PFC活動は運動イメージに負荷がかかった際に、加齢に伴う機能低下を補うため賦活する可能性がある。これらの研究結果は、実際運動や運動イメージ能力における個人差および加齢変化によって賦活する脳領域や活動の大きさが

異なることを示している。ただし、これらのfMRIやfNIRSを用いた研究において、運動イメージ中に賦活する脳領域は、研究間で必ずしも一致していないため、今後も継続して検討される必要がある⁵⁷⁻⁶⁵⁻⁶⁷。

V 運動イメージを用いたリハビリテーション介入

運動イメージの加齢に伴う変化や個人差については、行動学的な研究やニューロイメージングを用いた研究によって徐々に明らかになりつつある。すなわち、加齢により高齢者の運動イメージは実際運動と解離しており、それに伴って運動イメージの神経基盤も異なる可能性がある。加えて、高齢者では歩行能力の個人差が増加するように¹⁸、運動イメージ能力やその神経基盤にも個人の能力による違いがあると推測される^{6, 8, 27, 63}。リハビリテーションにおいては運動イメージを用いた介入は効果的であることが示されている²。例えば、Pageら⁶⁹は、脳卒中片麻痺患者を二つの群に分け、一つの群にはリラクゼーションと機能訓練（手の運動課題）を行い、もう一方の群には運動イメージ訓練と機能訓練（同じ手の運動課題）を実施した。その結果、運動イメージ訓練と機能訓練を併用して実施した群は、リラクゼーションと機能訓練を実施した群よりも上肢機能が有意に改善したことを報告している。また、Oostraら⁷⁰は通常の介入に運動イメージ訓練を併用した群において歩行スピードが有意に速くなったことを示している。一方で、運動イメージ介入の効果を疑問視する研究も報告されている。Ietswaartら⁷¹は、脳卒中既往者121名を対象として、運動イメージ群、注意プラセボ（コントロール）群、通常介入（コントロール）群の3群に分け、各群に45分の介入を週3回4週間にわたり実施した。介入方法として、運動イメージ群には上肢の動作に関するイメージ介入を実施、注意プラセボ群には、物体や臭いなどを想起する運動イメージ以外のイメージ課題やストループ課題などの注意課題を実施し、通常介入群と比較した。その結果、上肢機能や日常生活の回復において群間差がみられないことが分かった。この報告は、運動イメージ介入の効果に対する否定的な証拠の一つとも考えられるが、運動イメージ能力の個人差に基づく詳細な分析を行ってはおら

ず、そうした個人差によって効果が現れにくくなっている可能性がある。事実、各個人のワーキングメモリ能力と運動イメージトレーニングの効果には関連がみられ、特に視空間ワーキングメモリ能力が高い脳卒中既往者は、運動イメージトレーニングの効果がより顕著にみられることが明らかにされている⁵⁰。

Guillotら⁴⁸は、運動イメージと実際運動にかかる時間の個人差によって、異なる介入を考慮する必要があることを述べている。すなわち、イメージと実際運動に時間的な一致がみられる場合は、イメージそのものを操作することによって実際運動を制御できる可能性がある。一方で、イメージと実際運動の時間的な不一致は、動作を心的に表象することが難しい可能性があるため、イメージ想起そのもののトレーニングが必要である、もしくは、イメージが不正確であると判断する前に、制御する必要のある外部因子が影響している可能性を踏まえて介入することを示している。また、運動イメージに加えて運動観察を用いたトレーニングも運動機能を向上させることが報告されている。運動観察時には、運動イメージと同様に運動前野や下頭頂小葉などの実際運動と同様の脳領域が賦活するが、課題の複雑さや経験による個人差が示されている⁷²。したがって、運動イメージを用いたリハビリテーションは、各個人の運動イメージ能力を十分に考慮し、運動観察なども併用しながら介入していく必要がある⁴¹。

VI おわりに

本稿では、運動イメージの加齢変化や個人差とその神経基盤について、行動学およびニューロイメージングを用いた研究を概説し、リハビリテーション介入において個人差を考慮する必要性を示した。運動イメージの個人差は、実際運動能力や認知機能（例えば、ワーキングメモリ）を含めた運動を内的にシミュレートする神経基盤の個人差に起因している可能性がある^{63, 73}。したがって、運動イメージを用いたリハビリテーション介入効果を最大限発揮するには、各個人の運動イメージ能力を的確に把握し、各個人にカスタマイズされた運動イメージ介入が展開される必要がある。運動イメージの測定には本稿で紹介した行動学およびニューロイメージングを用いた方法のみならず、運動誘発電位（motor-evoked potential: MEP）を測定する方法が

ある。MEPは直接もしくは経頭蓋的に上位中枢側（主に運動野）を刺激し、末梢側（脊髓硬膜外や筋肉）の電位を記録するもので、運動イメージ時にはMEPの振幅が増大することが知られている⁷⁴⁾。運動イメージ中のMEPの変化は運動イメージ能力と関連することや⁷⁵⁾、一人称運動イメージのみでなく三人称運動イメージ時にも程度は異なるがMEPが増加することが報告されている⁷⁶⁾。加えて、運動イメージを用いた介入の効果の有無についてMEPを測定することによって調べた研究もあり^{77, 78)}、MEPは運動イメージの個人差を測定する指標として注目されている。このように、運動イメージの個人差に関する様々な測定方法を用いた研究はまだ発展途上である。しかしながら、ヒトの行為を再獲得することを目的とした運動イメージ介入が、機能回復促進に有効な手段の一つになることを期待したい。

本論文は、著者が令和2年度に熊本大学大学院社会文化科学教育部に提出した博士論文の一部を加筆・修正したものである。また、本研究における利益相反は存在しない。

文 献

- 1) 黒田敏, 岡田靖, 中瀬裕之, 他: 脳卒中ガイドライン2019 (日本脳卒中学会 脳卒中ガイドライン委員会編). 協和企画, pp2-3, 2019.
- 2) Lopez ND, Pereira EM, Centeno EJ, et al: Motor imagery as a complementary technique for functional recovery after stroke. *Top Stroke Rehabil*, 26: 576-587, 2019.
- 3) Mulder T, Hochstenbach JBH, Heuvelen MJG et al: The relation between age and imagery capacity. *Hum Mov Sci*, 26: 203-211, 2007.
- 4) Page SJ, Peter BA, Leonard A: Mental Practice in Chronic Stroke: Results of a Randomized, Placebo-Controlled Trial. *Stroke*, 38: 1293-1297, 2007.
- 5) Kotegawa K, Yasumura A, Teramoto W: Activity in the prefrontal cortex during motor imagery of precision gait: an fNIRS study. *Exp Brain Res*, 238: 221-228, 2020.
- 6) Personnier P, Kubicki A, Laroche D, et al: Temporal features of imagined locomotion in normal aging. *Neurosci Lett*, 476: 146-149, 2010.
- 7) Saimpont A, Pozzo T, Papaxanthis C: Motor imagery and aging. *J Mot Behav*, 45: 21-28, 2013.
- 8) Skoura X, Papaxanthis C, Vinter A, et al: Mentally represented motor actions in normal aging I . Age effects on the temporal features of overt and covert execution of actions. *Behav Brain Res*, 165: 229-239, 2005.
- 9) 内藤栄一, 水口暢章, 上原信太郎, 他: 運動イメージにおける脳内機構—リハビリテーションへの応用を目指して—. *脳科学とリハビリテーション*, 13: 1-10, 2013.
- 10) Decety J, Jeannerod M: Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitts's law hold in motor imagery? *Behav Brain Res*, 72: 127-134, 1996.
- 11) Jeannerod M: The representing brain, neural correlates of motor intention and imagery. *J Behav Brain Sci*, 17: 187-245, 1994.
- 12) Hanakawa T, Dimyan M, Hallett M: Motor Planning, Imagery, and Execution in the Distributed Motor Network: A Time-Course Study with Functional MRI. *Cereb Cortex*, 18: 2775-2788, 2008.
- 13) la Fougere C, Zwergal A, Rominger A, et al: Real versus imagined locomotion: A [18F]-FDG PET-fMRI comparison. *Neuroimage*, 50: 1589-1598, 2010.
- 14) Yue G, Cole KJ: Strength increases from the motor program: Comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *J Neurophysiol*, 67: 1114-1123, 1992.
- 15) Doherty TM, Connolly MP, Giudice GD, et al: Vaccination programs for older adults in an era of demographic change. *Eur Geriatr Med*, 9: 289-300, 2018.
- 16) Shimada H, Makizako H, Doi T, et al: Incidence of disability in frail older persons with or without slow walking speed. *J Am Med Dir Assoc*, 16: 690-696, 2015.

- 17) Tolea MI, Costa PT, Terracciano A, et al: Sex-specific correlates of walking speed in a wide age-ranged population. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*, 65B: 174-184, 2010.
- 18) Osoba MY, Rao AK, Agrawal SK, et al: Balance and gait in the elderly: a contemporary review. *Laryngoscope Investig Otolaryngol*, 4: 143-153, 2019.
- 19) Chen M, Pillemer S, England S, et al: Neural correlates of obstacle negotiation in older adults: an fNIRS study. *Gait Posture*, 58:130-135, 2017.
- 20) Harada T, Miyai I, Suzuki M, et al: Gait capacity affects cortical activation patterns related to speed control in the elderly. *Exp Brain Res*, 193: 445-454, 2009.
- 21) Payne AM, Ting LH: Worse balance is associated with larger perturbation-evoked cortical responses in healthy young adults. *Gait Posture*, 80: 324-330, 2020.
- 22) Takeuchi N, Mori T, Suzukamo Y, et al: Parallel processing of cognitive and physical demands in left and right prefrontal cortices during smartphone use while walking. *BMC Neuroscience*, 17: doi: 10.1186/s12868-016-0244-0, 2016.
- 23) Isaac A, Marks DF, Russell DG: An instrument for assessing imagery of movement: the vividness of movement imagery questionnaire (VMIQ). *J Mental Imagery*, 10: 23-30, 1986.
- 24) Hall CR, Martin KA: Measuring movement imagery abilities: A Revision of the Movement Imagery Questionnaire. *J Mental Imagery*, 21: 143-154, 1997.
- 25) 長谷川望: 日本語版運動心像質問紙改訂版 (JMIQ-R) の作成. *イメージ心理学研究*, 2: 25-34, 2004.
- 26) 長谷川望, 星野公夫: スポーツ選手のスキルと身体運動イメージの関係. *順天堂大学スポーツ健康科学研究*, 6: 166-173, 2002.
- 27) Godde B, Voelcker-Rehage C: More automation and less cognitive control of imagined walking movements in high- versus low-fit older adults. *Front Aging Neurosci*, 2: 1-13, 2010.
- 28) 小手川耕平, 寺本渉, 積山薫: 高齢者のもつ運動イメージ質問紙調査法 JMIQ-R とポイントング課題の比較— 認知心理学研究, 17: 1-10, 2019.
- 29) 梅野和也, 中村浩一: 運動スキルの違いが運動イメージ鮮明度に及ぼす影響—JMIQ-R を用いて—. *理学療法科学*, 31: 409-412, 2016.
- 30) Roberts R, Callow N, Hardy L, Markland D, Bringer J: Movement imagery ability: development and assessment of a revised version of the vividness of movement imagery questionnaire. *J Sport Exerc Psychol*, 30: 200-221, 2008.
- 31) Malouin F, Richards CL, Jackson PL, Lafleur MF, Durand A, Doyon J: The Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ) for assessing motor imagery in persons with physical disabilities: a reliability and construct validity study. *J Neurol Phys Ther*, 31: 20-29, 2007.
- 32) Nakano H, Kodama T, Ukai K, Kawahara S, Horikawa S, Murata S: Reliability and Validity of the Japanese Version of the Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ) . *Brain Sci*, 8: 79, doi: 10.3390/brainsci8050079, 2018.
- 33) Parsons LM: Imagined spatial transformation of one's hands and feet. *Cogn Psychol*, 19: 178-241, 1987.
- 34) Parsons LM: Temporal and Kinematic Properties of Motor Behavior Reflected in Mentally Simulated Action. *J Exp Psychol*, 20: 709-730, 1994.
- 35) Sekiyama K: Kinesthetic aspects of mental representation in the identification of left and right hands. *Percept Psychophys*, 32: 89-95, 1982.
- 36) Sekiyama K, Kinoshita T, Soshi T: Strong biomechanical constraints on young children's mental imagery of hands. *R Soc Open Sci*, 1: 140118, 2014.
- 37) Saimpont A, Pozzo T, Papaxanthis C: Aging

- affects the mental rotation of left and right hands. *PLoS One*, 4: e6714 doi: 10.1371/journal.pone.0006714, 2009.
- 38) 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-手・足の写真によるメンタルローテーションを用いた検討-. *理学療法学*, 23: 579-584, 2008.
- 39) Cerella J, Poon LW, Williams DM: Age and the complexity hypothesis. *Am Psychol*: 332-340, 1980.
- 40) Campos A: Gender differences in imagery. *Pers Individ Dif*, 59: 107-111, 2014.
- 41) 藤本昌央: 運動イメージのアウトカムと臨床適応. *イメージの科学* (森岡周編). 三輪書店, pp191-195, 2012.
- 42) Fitts PM: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J Exp Psychol*, 47: 381-391, 1954.
- 43) Leung HC, Gore JC, Goldman-Rakic PS: Sustained mnemonic response in the human middle frontal gyrus during on-line storage of spatial memoranda. *J Cogn Neurosci*, 14: 659-671, 2002.
- 44) Sirigu A, Duhamel JR: Motor and visual imagery as two complementary but neutrally dissociable mental processes. *J Cogn Neurosci*, 13: 910-919, 2001.
- 45) Robinovitch SN, Cronin T: Perception of postural limits in elderly nursing home and day care participants. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 54B, 124-130, 1999.
- 46) Personnier P, Ballay Y, Papaxanthis C: Mentally represented motor actions in normal aging: III. Electromyographic features of imagined arm movements. *Behav Brain Res*, 206: 184-191, 2010.
- 47) Guillot A, Collet C: Contribution from neurophysiological and psychological methods to the study of motor imagery. *Brain Res Rev*, 50: 387-397, 2005.
- 48) Guillot A, Hoyek N, Louis M, et al: Understanding the timing of motor imagery: Recent findings and future directions. *Int Rev Sport Exerc Psychol*, 5: 3-22, 2012.
- 49) Malouin F, Richards CL, Durand A: Normal aging and motor imagery vividness: implications for mental practice training in rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil*, 91: 1122-1127, 2010.
- 50) Malouin F, Belleville S, Richards CL, et al: Working memory and mental practice outcomes after stroke. *Arch Phys Med Rehabil*, 85: 177-183, 2004.
- 51) O'Shea H, Moran A: Does Motor Simulation Theory Explain the Cognitive Mechanisms Underlying Motor Imagery? A Critical Review. *Front Hum Neurosci*, 17: doi: 10.3389/fnhum.2017.00072, 2017.
- 52) Calmels C, Holmes P, Emilie L, et al: Chronometric comparison of actual and imaged complex movement patterns. *J Mot Behav*, 38: 339-348, 2006.
- 53) Decety J, Jeannerod M, Prablanc C: The timing of mentally represented actions. *Behav Brain Res*, 34: 35-42, 1989.
- 54) Cerritelli B, Maruff P, Wilson P, et al: The effect of an external load on the force and timing components of mentally represented actions. *Behav Brain Res*, 108: 91-96, 2000.
- 55) Ingvar DH, Philipson L: Distribution of cerebral blood flow in the dominant hemisphere during motor ideation and motor performance. *Ann Neural*, 2: 230-237, 1977.
- 56) Roland PE, Larsen B, Lassen NA, et al: Supplementary motor area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man. *J Neurophysiol*, 43: 118-136, 1980.
- 57) Bakker M, Lange FP, Helmich RC, et al: Cerebral correlates of motor imagery of normal and precision gait. *Neuroimage*, 41: 998-1010, 2008.
- 58) Vry MS, Saur D, Rijntjes M, et al: Ventral and dorsal fiber systems for imagined and executed movement. *Exp Brain Res*, 219: 203-216, 2012.
- 59) Solodkin A, Hlustik P, Chen EE, et al: Fine

- Modulation in Network Activation during Motor Execution and Motor Imagery. *Cerebral Cortex*, 14: 1246-1255, 2004.
- 60) Wu S, Li J, Gao L, et al: Suppressing Systemic Interference in fNIRS Monitoring of the Hemodynamic Cortical Response to Motor Execution and Imagery. *Front Hum Neurosci*, 85: 1-10, 2018.
- 61) Fiehler K, Burke M, Engel A: Kinesthetic working memory and action control within the dorsal stream. *Cerebral Cortex*, 18: 243-253, 2007.
- 62) Kotegawa K, Yasumura A, Teramoto W: Activity in the prefrontal cortex during motor imagery of precision gait: an fNIRS study. *Exp Brain Res*, 238: 221-228, 2020.
- 63) Kotegawa K, Yasumura A, Teramoto W: Changes in prefrontal cortical activation during motor imagery of precision gait with age and task difficulty. *Behav Brain Res*, 399: 113046, doi: 10.1016/j.bbr.2020.113046, 2021.
- 64) Matsuo M, Iso N, Fujiwara K, Moriuchi T, Matsuda D, Mitsunaga W, Nakashima A, Higashi T: Comparison of cerebral activation between motor execution and motor imagery of self-feeding activity. *Neural Regen Res*, 16: 778-782, 2021.
- 65) Guillot A, Collet C, Nguyen VA, et al: Functional neuroanatomical networks associated with expertise in motor imagery. *Neuroimage*, 41: 1471-1483, 2008.
- 66) Allali G, Meulen M, Beauchet O, et al: The neural basis of age-related change in motor imagery of gait: an fMRI study. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 69: 1389-1398, 2014.
- 67) Godde B, Voelcker-Rehage C: More automation and less cognitive control of imagined walking movements in high- versus low-fit older adults. *Front Aging Neurosci*, 2: 1-13, 2010.
- 68) Harada T, Miyai I, Suzuki M, Kubota K: Gait capacity affects cortical activation patterns related to speed control in the elderly. *Exp Brain Res*, 193: 445-454, 2009.
- 69) Page SJ, Peter BA, Leonard A. Mental Practice in Chronic Stroke: Results of a Randomized, Placebo-Controlled Trial. *Stroke*, 38: 1293-1297, 2007.
- 70) Oostra KM, Oomen A, Vanderstraeten G, Vingerhoets G: Influence of motor imagery training on gait rehabilitation in sub-acute stroke: a randomized controlled trial. *J Rehabil Med*, 47: 204-209, 2015.
- 71) Ietswaart M, Johnston M, Dijkerman HC, et al: Mental practice with motor imagery in stroke recovery: randomized controlled trial of efficacy. *Brain*, 134: 1373-1386, 2011.
- 72) Mizuguchi N, Kanosue K: Changes in brain activity during action observation and motor imagery: Their relationship with motor learning. *Prog Brain Res*, 234: 189-204, 2017.
- 73) Kotegawa K, Teramoto W: Association of executive function capacity with gait motor imagery ability and PFC activity: An fNIRS study. *Neurosci Lett*, 13: 136350, doi: 10.1016/j.neulet.2021.136350, 2021.
- 74) Li S, Stevens JA, Rymer WZ: Interactions between imagined movement and the initiation of voluntary movement: a TMS study. *Clin Neurophysiol*, 120: 1154-1160, 2009.
- 75) Williams J, Pearce AJ, Loporto M, Morris T, Holmes PS: The relationship between corticospinal excitability during motor imagery and motor imagery ability. *Behav Brain Res*, 226: 369-375, 2012.
- 76) Fourkas AD, Avenanti A, Urgesi C, Aglioti SM: Corticospinal facilitation during first and third person imagery. *Exp Brain Res*, 168: 143-151, 2006.
- 77) Crews RT, Kamen G: Motor-evoked potentials following imagery and limb disuse. *Int J Neurosci*, 116: 639-651, 2006.
- 78) Foyals KMR, Baker SN: Induction of plasticity in the human motor system by motor imagery and transcranial magnetic stimulation. *J Physiol*, 598: 2385-2396, 2020.

(令和3年11月30日受理)

Individual differences in motor imagery ability and rehabilitation

Kohei KOTEGAWA

Abstract

Humans can mentally simulate movements without actual motor execution. This mental process is called motor imagery. It is known that the differences between individuals regarding motor imagery ability are related to various factors such as task difficulty and aging. In addition, brain activity during motor imagery confirms these individual differences. This report outlines research on motor imagery and shows that individual differences in motor imagery may be due to variations in the neural basis that internally simulates movement, including actual motor abilities and cognitive functions. These findings suggested that to maximize the effect of rehabilitation intervention using motor imagery, it is necessary to accurately understand the motor imagery ability of each individual and perform motor imagery interventions customized for each person's ability.