7

運動イメージと機能的MRI (fMRI)

濱田 裕 幸^{†1,†2,†3}, 松澤 大 輔^{†1,†2,†4}, 平野 好 幸^{†1,†4},
須藤 千 尋^{†1,†2,†4}, 清水 栄 司^{†1,†2,†4}, 小 畠 隆 行^{†1,†4}

キーワード 機能的MRI (fMRI), BOLD, 脳機能画像, 運動イメージ, メンタルローテーション, リハビリテーション

1 ま え が き

機能的MRI (functional MRI: fMRI) は、磁気共鳴画像 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) 装置を用いた脳機能測定法である。1990年代に初めて脳活動の可視化に成功して以来、そのインパクトは下がることなく脳画像研究の代名詞的存在になっている。筆者らは、運動麻痺をもたらしような脳卒中や脳外科手術後のリハビリテーションに効果的な手法を確立するために、fMRIを用いて課題中の脳活動を評価している。本稿では、fMRIの基礎を簡単に概説し、運動イメージとメンタルローテーションを利用したりハビリ法の先行研究およびfMRIで見られる大脳運動関連領域について解説する。

2 fMRIの生理学的背景

fMRIによる脳機能画像の取得法として一般的には、BOLD (Blood Oxygen Level Dependent) 法が選択されることが多い。BOLD法は血中の酸素レベル、正確にはデオキシヘモグロビン濃度に依存している。ヘモグロビンは赤血球に含まれる色素であり、酸素と結合したオキシヘモグロビン (oxy-Hb) と、酸素と解離したデオキシヘモグロビン (deoxy-Hb) に分かれるが、両者はその磁性が異なり、

deoxy-Hbが血管周囲の磁場に不均一性を与える。その不均一性を鋭敏に捉える画像収集法がfMRIでは用いられ、deoxy-Hbの増加は信号低下をきたす。賦活された脳領域は酸素消費が増すが、一方でそれ以上に脳血流量が増加し、結果としてoxy-Hbの供給量増加につながり、deoxy-Hbが低下することが賦活部位の信号上昇として捉えられる¹⁾²⁾。BOLD法を用いたfMRIによる脳賦活画像は、さまざまな認知課題と組合せて、ヒトの脳活動の局在性を次々に明らかにしてきたが、一方で、神経活動を直接見ているものではなく、間接的な画像化手段であることの限界に留意した上で利用する必要がある。なお、多くのfMRI研究は課題 (Task) を行う中で起こる脳内の処理過程を探る (課題関連型fMRI) が、一般的に、課題を一定時間 (十数秒～数十秒) 行う部分と、安静時もしくは対照課題施行部分とを交互に行うブロックデザイン (図1(a)) もしくは、数秒の短時間の課題をランダムな間隔を置いて実施する事象関連デザイン (図1(b)) が採用される。ブロックデザインは、課題を反復することで課題施行中のBOLD信号を加算するため脳活動の検出力に優れ、事象関連デザインは、課題への慣れを回避でき、柔軟な課題提示を可能としている。本稿で最後に紹介する筆者らの研究では、ブロックデザインを採用しており、その設定例を図に示す (図1(c))。

3 運動イメージとメンタルローテーション

3.1 運動イメージ

運動イメージとは、個人が与えられた動作を心的にシミュレートするダイナミックな状態として定義されている³⁾。例えば、目の前のコップに手を伸ばすといった行為や立ち上がるといった動作を、実際に身体を動かさずに、脳内であたかも動かしているようにイメージする (図2(a))。運動イメージは、スポーツ分野においても、イメージトレーニングやメンタルプラクティスという形で幅広く認知されており、実際の運動に類似した神経活動が生じることが多数報告されている³⁾⁴⁾。運動関連領域の賦活を促すことで、実際の運動能力が向上すればリハビリにも相応しい。例えば、バスケットボールのフリースローを3ヵ月イメージトレーニング

†1 放射線医学総合研究所

†2 千葉大学 大学院医学研究院 認知行動生理学

†3 市川市リハビリテーション病院

†4 千葉大学 大学院医学研究院 子どものこころの発達研究センター

"Motor Imagery and fMRI" by Hiroyuki Hamada (National Institute of Radiological Sciences, Chiba/Department of Cognitive Behavioral Physiology, Chiba University Graduate School of Medicine, Chiba/Ichikawa City Rehabilitation Hospital, Ichikawa), Daisuke Matsuzawa and Eiji Shimizu (National Institute of Radiological Sciences, Chiba/Department of Cognitive Behavioral Physiology, Chiba University Graduate School of Medicine, Chiba/Research Center for Child Mental Development, Graduate School of Medicine, Chiba University, Chiba), Yoshiyuki Hirano and Takayuki Obata (National Institute of Radiological Sciences, Chiba/Research Center for Child Mental Development, Graduate School of Medicine, Chiba University, Chiba), Chihiro Sutoh (National Institute of Radiological Sciences, Chiba/Department of Cognitive Behavioral Physiology, Chiba University Graduate School of Medicine, Chiba)

ングしたところ、実際にトレーニングをした群と遜色ない成績向上を認めたという⁵⁾。さらに、小指外転筋の運動イメージを週に5回行うことで、何もなかった対照群の3.7%に対して、運動イメージ群では22.0%の筋力増強が生じた報告がある⁶⁾。また、スポーツ選手の筋の柔軟性に対し、運動イメージ課題を行った報告では、5週間のストレッチングの運動イメージを実施し、ハムストリングスや足関節周囲筋の伸張性が向上することが明らかとなっている⁷⁾。

3.2 メンタルローテーション

メンタルローテーションとは、画像や物体を心的に回転させることであり、日常場面では地図を実際の方向に回転させる時や、他者の手が左右どちらの手かを判断する時に使用される(図2(b))。二つのブロックを2次元に描写した画像を同時に視覚提示して、異同を判断させた最初の報告

の後⁸⁾、身体部位を用いたメンタルローテーションがParsonsらにより最初に報告された⁹⁾。Parsonsらの課題は左右どちらかの手の写真から、その左右をなるべく早く正確に回答するもので、結果は、肢位や回転角度が解剖学的に運動困難な位置の写真である場合に、反応時間が有意に増加した。他に、写真提示が右手なのか左手なのかによって、利き手による成績の差が報告されており¹⁰⁾、難易度が被験者に既知の運動方略に依存している側面もあるようである。面白いことに、手のメンタルローテーション課題を行う際に、被験者が手を前方に位置させた状態と後ろに組んだ状態では、後ろに組んだ条件で反応時間が有意に遅延する¹¹⁾。これらの点は、課題遂行時には身体のオンラインでの位置情報が必要であり、その位置情報から運動のイメージを行っていると考えられる。すなわち、身体部位を心的に回転させる難易度は、実際の身体部位からの運動の行いやすさに依存することが示唆された。実際に、身体部位のメンタルローテーション課題成績の低下が、上肢・下肢の切断患者や¹²⁾運動障害を伴う慢性疼痛患者¹³⁾などの罹患側画像刺激で報告されていることは、同課題が単に過去の記憶や手という視覚的手がかりだけで回答されるのではなく、現在可能な運動によっても規定されていることを示唆しているといえよう。

3.3 リハビリへの応用

脳卒中患者に対する運動イメージを用いたメンタルプラクティスのリハビリへの応用報告は、Braunらの総説に詳しい¹⁴⁾。先駆けとなった報告は、Pageらの発症後平均6.5ヵ月を経過した患者に適応したランダム化試験で、6週間のメンタルプラクティス介入群が対照群に比較して有意

に改善している。その一方で、運動イメージ課題を脳卒中や脳腫瘍術後などの運動機能回復が望まれる患者に適用するにはいくつかの問題点が存在する。①患者が実際に運動イメージを行っているか検証する方法はなく、②心的疲労感が強く、③注意障害など何らかの認知障害があると格段に難易度が高くなる、などである¹⁵⁾。

一方、メンタルローテーション課題は、被験者に、①提示した物体の回答を求める思考過程で運動イメージを用いさせ、②ゲーム性を加味でき、③注意を向けさせやすい、という運動イメージ課題のデメリットを補完できる要素を持つと考えられる。つまり、運動イメージよりも実行が容易で、同等の効果を期待できる可能性がある。

リハビリ課題としての応用は、慢性疼痛患者に対して有効性が報告されている。神経損傷のない慢性疼痛患者では、罹患部位の体性感覚領域・運動関連領域の縮小の関与が知られている。Moseleyは、疼痛改善目的として、運動イメージを想起させる手のメンタルローテーション課題を実施し、疼痛改善のみでなく、罹患部位の機能改善ももたらした¹³⁾。本邦でも肩関節周囲炎患者に対し、手のメンタルローテーション介入を1ヵ月間実施した患者群は、行っていない患者群よりも有意な肩関節の可動域の拡大が見られたという報告がある¹⁶⁾。メンタルローテーション課題は運

動イメージを想起させ、罹患により縮小した体性感覚領域・運動関連領域の回復もしくは再編成が生じて、実際の身体機能の改善に寄与すると推察される。リハビリテーションが必要となる患者は、過去に可能であった動作が外傷や疾病により困難となるため、過去の経験を想起させ、実際の動作に反映させる方法として、メンタルローテーション課題は有効なツールとなると考えられよう。

しかし、運動イメージ課題では、難易度が高すぎる場合に、実際のパフォーマンスの向上に効果が見られないことが知られている。Mulderらは、拇趾の外転運動(足趾を開く運動)が不可能な健常者に対する、2日間の運動イメージの介入効果を検証した¹⁷⁾。すると、運動イメージを行った群では、パフォーマンスの向上は見られず、何もしていない群とほぼ同様の結果であった。運動イメージ課題は、過去に経験がない場合、もしくは、現状の動作と目的とする動作の乖離が大きすぎる場合には効果が認められないようである。これは、メンタルローテーション課題にも言えることであろう。過去に経験がないような動きや、現状で可能な運動と提示された写真の運動が乖離しすぎていると、介入としての効果は困難であろうことが予想される。これらの点は、推察の域を越えないため、今後の検証作業によって明らかになると期待したい。

4 運動イメージ, メンタルローテーションとfMRI

4.1 運動イメージとfMRI

運動イメージを用いたりハビリが果たして実運動と同じ効果を期待できるかには, fMRIによる脳賦活が相似している必要があるだろう。2008年にHanakawaらは指のタッピング課題を用いて, 実運動と運動イメージ両者の脳賦活を比較している(図3(a))。実際の運動で優位な活動領域(図中Ia, Ib), 運動イメージで優位な活動領域(図中III), 両者類似した活動領域(図中II)が認められる。これら大脳皮質の運動関連領域が共通して賦活を認めることが, 運動イメージのリハビリ効果に役割を果たすことが推測される¹⁸⁾。

Szameitatらは2012年に, 手首を使って仰ぐような運動課題を用いて, 実際の運動時, 機器あるいは検査者の操作による関節の受動運動時, 運動イメージ時, 観察による脳賦活の違いをfMRIで検証した結果を報告した¹⁹⁾。対象被験者は健常者21名と, 脳卒中後1年以上経過した5名の患者である。患者群は右側に脳卒中病変を持ち, そのため左の片麻痺を呈した患者で, 運動課題は患側の左を動かすように指示するものである。両群とも, 観察課題では視覚野を中心とした活動が見られただけであるが, 受動運動時, 運動イメージ時には両者とも, 実運動時に類似した運動関連領域の賦活が見られた。興味深いことに, 実運動時に類似した活動に一番近い活動があったのは, 健常者では受動運動時, 脳卒中患者では運動イメージ時(図3(b))で, 両被験者群間の脳賦活に違いが見られた。脳卒中患者では健常被験者と異なり, 課題で動かす左手と同側(すなわち健常側)の1次運動野賦活が, 実運動時と運動イメージ時の両方に強く見られた。このような同側の賦活は健常者では見られず, 本来活動が抑制されているが, 脳卒中患者では病変側を補うように脳活動の再編がされている可能性がある。他者が手を動かす受動運動時には見られないこの脳賦活が, 機能改善に利するものなのか検討する価値があるであろう。

4.2 メンタルローテーションとfMRI

fMRIによるこれまでの実験は, Zacksの総説²⁰⁾によくまとめられているが, 先行研究の多くで身体部位のメンタルローテーション課題時には運動関連領域(運動前野や補足運動野)の賦活が生じており(図3(c)), 運動イメージ時にfMRIで示される領域と重なる。つまり, メンタルローテーションを行うことは, 課題として運動イメージを再現することに類似しているようである。このことは, 例えば, 手のメンタルローテーションを, 字が鏡像であるかを判別する課題を対照とした研究²¹⁾で, 手の課題でのみ運動関連領域の賦活が見られることから, 確かにメンタルローテーションによって, 運動がイメージされていることが推

察される。また面白いことに, 手のメンタルローテーションでは両側の運動前野が賦活される一方で, 道具のメンタルローテーションでは片側に偏っており²²⁾, 道具の場合は頭の中で利き手(右手)を使って課題をこなしていることが推察される。

4.3 fMRIによる両課題の比較

さて, 先行研究によって示唆された脳賦活の共通性からは, 運動イメージおよびメンタルローテーションは課題として相互に代替できると考えるが, 実際に両課題の実験方法(視覚提示や撮像方法)を統制して同じ被験者に行った報告はない。筆者らはfMRIを利用し, 同一被験者を対象に両課題を行って, 脳賦活の共通性を検証した予備的結果を得ているのでここで報告したい。

26人の健常被験者を対象に手の運動イメージ課題とメンタルローテーション課題を両方行い, 課題実行時のBOLD信号をMRI装置にて測定を試みた。運動イメージ課題では, 被験者は事前に左右どちらの手が提示されるのか通知され, 提示された手の写真に合致するように運動をイメージした。メンタルローテーション課題では, 提示された手の左右判断をなるべく早く正確に回答することを被験者に求めた。課題画像は, 両課題同一の独立した手の画像シリーズを用いることによって視覚条件を統一した(図4(a))。両課題ともE-prime (Psychology Software Tools, Inc) ソフトウェアにより, ランダムに, 1枚の画像を3秒提示した。

結果として, 運動イメージ課題時の賦活部位とメンタルローテーション課題時で, 同様の運動関連領域(運動前野と補足運動野), 頭頂葉後部, 視覚野の賦活が確認された(図4(b), (c))。共通に見られたこのような賦活部位からは, メンタルローテーション課題実行中では運動イメージが脳内で再現されており, 実行の容易な同課題が, 運動イメージ

図4 運動イメージおよびメンタルローテーション課題遂行時の脳賦活 (口絵カラー参照)

課題の代用になることが十分に示唆されたと考えている。とはいえ、健常者において見られたこの共通性が、脳卒中患者で同じように再現されるかは現時点では不明である。先に紹介したSzameitatらの研究のように、脳卒中患者では異なる賦活パターンになる可能性も否定できない。今後は、脳卒中患者で両課題時の賦活測定とともに、それが機能回復に相關するのかを検討する必要があるだろう。

5 む す び

本稿では、脳卒中や脳外科手術後の運動麻痺患者に対するリハビリとして、運動イメージやメンタルローテーション活用の可能性について、fMRIの基礎とともに概説した。特に筆者らは、その実行容易性と広範な大脳運動関連領域の賦活可能性からリハビリ法としてのメンタルローテーションに期待できると考えている。今後は、患者への応用が実際に効果を持ちうるかを検証することになるが、fMRIをはじめとした「今の」脳活動を可視化できる脳機能画像を活用し、課題の妥当性や効果を目に見える形で実証していきたい。もちろん、医療現場のみならず、スポーツ領域にもオーバーラップする知見であるため、そちらの面での発展も期待したいところである。

(2013年6月21日受付)

〔文 献〕

- 1) S.A. Huettel, A.W. Song, G. McCarthy: "Functional Magnetic Resonance Imaging", 2nd edition, Sinauer Associates (2008)
- 2) 平野好幸, 小島隆行: "老年精神医学とBrain Imaging 機能的MRIの基礎", 老年精神医学雑誌, 24, pp.289-302 (2013)
- 3) J. Decety: "Do executed and imagined movements share the same central structures?", Cognitive Brain Research, 3, pp.87-93 (1996)
- 4) M. Jeannerod: "Neural simulation of action: A unifying mechanism for motor cognition", NeuroImage, 14, pp.103-109 (2001)
- 5) R. Vandell, R. Davis, H. Clugston: "The function of mental practice in the acquisition of motor skills", J Gen Psychol, 29, pp.243-250 (1943)
- 6) G. Yue, K.J. Cole: "Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions", J Neurophysiology, 67, pp.1114-1123 (1992)
- 7) Guillot et al.: "Does motor imagery enhance stretching and flexibility?", J Sports Sci, 28, pp.291-298 (2010)
- 8) R. Shepard, J. Metzler: "Mental rotation of three dimensional objects", Science, 171, pp.701-703 (1971)
- 9) L.M. Parsons: "Imagined spatial transformations of one's hands and feet", Cognitive Psychology, 19, pp.178-241 (1987)
- 10) K. Takeda, N. Shimoda, et al.: "Reaction time differences between left- and right-handers during mental rotation of hand pictures", Laterality, 15, pp.415-425 (2010)
- 11) S. Ionta, O. Blanke: "Differential influence of hands posture on mental rotation of hands and feet in left and right handers", Exp Brain Res, 195, pp.207-217 (2009)
- 12) N. Daniele, D. Elena, R. Francois: "Left and right hand recognition in upper limb amputees", Brain, 127, pp.120-132 (2004)
- 13) G.L. Moseley: "Graded motor imagery is effective for long-standing complex regional pain syndrome: A randomised controlled trial", Pain, 108, pp.192-198 (2004)
- 14) S.M. Braun, A.J. Beurskens, P.J. Borm, T. Schack, D.T. Wade: "The effects of mental practice in stroke rehabilitation: A systematic review", Arch Phys Med Rehabil, 87, pp.842-852 (2006)
- 15) H.Y. Cho, J.S. Kim, G.C. Lee: "Effects of motor imagery training on balance and gait abilities in post-stroke patients: A randomized

- controlled trial", Clin Rehabil, 27, pp.675-680 (2013)
- 16) 山田実, 樋口貴広, 森岡周: "肩関節周囲炎患者における簡易型メンタルローテーション介入の効果", 理学療法科学, pp.459-46 (2009)
- 17) T. Mulder, S. Zijlstra, et al.: "The role of imagery in learning a totally novel movement", Exp Brain Res, 154, pp.211-217 (2004)
- 18) T. Hanakawa, M. Dimyan, M. Hallett: "Motor planning, imagery and execution in the distributed motor network: A time-course study with functional MRI", Cereb Cortex, 18, pp.2775-2788 (2008)
- 19) A.J. Szameitat, S. Shen, A. Confort, A. Sterr: "Cortical activation during executed, imagined, observed and passive wrist movements in healthy volunteers and stroke patients", Neuroimage, 62, pp.266-280 (2012)
- 20) J.M. Zacks: "Neuroimaging studies of mental rotation: A meta-analysis and review", J Cogn Neurosci, pp.20:1-19 (2008)
- 21) F. de Lange, P. Hagoort, I. Toni: "Neural topography and content of movement representations", J Cogn Neurosci, 17, pp.97-112 (2005)
- 22) G. Vingerhoets, F.P. de Lange, P. Vandemaele, K. Deblaere, E. Achten: "Motor imagery in mental rotation: An fMRI study", Neuroimage, 17, pp.1623-33 (2002)

濱田 裕幸 2008年、千葉県医療技術大学校卒業。同年より、市川市リハビリテーション病院に勤務。2012年、千葉大学医学薬学部を卒業(医学修士)し、同大学博士課程に入学。専門はリハビリテーション。理学療法士。

松澤 大輔 2000年、千葉大学医学部卒業。2007年、千葉大学医学薬学部卒業。同年より、千葉大学医学部認知行動生理学(助教)。2013年より、同大学講師。専門は神経心理学、分子生物学、精神科医。医学博士。

平野 好幸 2003年、岐阜大学大学院連合獣医学研究科博士課程修了。放射線医学総合研究所、米国立衛生研究所を経て、2011年より、千葉大学大学院医学研究科子どものこころの発達研究センターに勤務し、精神疾患を対象としたfMRIの研究に従事。2012年より、特任講師。専門は神経科学。

須藤 千尋 2006年、山口大学医学部卒業。2011年、千葉大学大学院特任助教(子どものこころの発達研究センター)。2012年、同大学院博士課程修了。2013年より、同医学部助教(認知行動生理学)。2010年より、放射線医学総合研究所客員協力研究員を兼務。専門は脳画像解析。

清水 栄司 1990年、千葉大学医学部卒業後、同大学附属病院に精神科医として勤務。1997年、同大学院修了。同大学精神科助手、同大学精神医学講師、同大学助教授を経て、2006年より、同大学大学院認知行動生理学教授。2011年より、同大学大学院医学研究科附属子どものこころの発達研究センター長を兼務。専門は、精神医学。医学博士。

小島 隆行 1991年、横浜市立大学医学部卒業。1996年、同大学大学院医学研究科(生理学)修了。現在、放射線医学総合研究所重粒子医科学センター応用診断研究(MRI)チームのチームリーダーとして勤務。千葉大学大学院医学研究科子どものこころの発達研究センター、横浜市立大学大学院医学研究科生体機能科学専攻放射線医学分野、首都大学東京人間健康科学研究科の客員教授を兼務。専門は、磁気共鳴医学。