

足関節運動時および運動イメージ時の脳賦活部位の比較

— 機能的MRIを用いた検討 —

高橋 亮¹⁾ 河村民平²⁾ 小林康孝³⁾ 鈴木邦明¹⁾
 山川治夫²⁾ 堀江慶一郎⁴⁾ 深田由香里⁴⁾

要旨：本研究の目的は、足関節運動時および運動イメージ時の脳賦活部位について、機能的磁気共鳴画像(fMRI)を用いて比較検証することである。対象は右利き健常成人10名とした。右足関節底・背屈運動を行う条件(運動条件)と運動イメージを行う条件(イメージ条件)を実施し、その間の脳活動をfMRIにて撮像した。また課題終了後、運動イメージの鮮明度をVASによって求めた。運動イメージ鮮明度を表すVASは 66.8 ± 21.6 mmであった。運動条件でのみ有意な賦活が認められたのは、左中心前回・左extra-nuclear・右島・右下前頭回・右橋であった。運動条件とイメージ条件でともに有意な賦活が認められたのは、左右上側頭回・左帯状回・左内側前頭回・左レンズ核・右中心後回・右sub-gyralであった。イメージ条件でのみ有意な賦活が認められたのは左小脳であった。足関節底・背屈の運動イメージにより、運動時と一致した脳賦活を得られることが示唆された。また、運動・イメージのそれぞれに特化した脳賦活を得られることが示唆された。

【Key words】 fMRI, 運動イメージ, 足関節

緒 言

運動イメージは運動実行の伴わない精神的なリハーサルと定義づけられている¹⁾。実際に、運動イメージと運動実行は共通の神経メカニズムであるとされている²⁾。運動実行時と運動イメージ時には、脳領域で賦活する量や神経ネットワーク内での結合の程度に違いがあるものの、運動イメージ時には実際の運動を行った時と同じ運動関連領域が活性化するということがわかっている³⁾。代表的な研究としてNaitoら⁴⁾は、手関節の運動と運動イメージにおいて、共通して中心前回・中心後回・内側前頭回・小脳に賦活が認められたことを報告している。さらにGandeviaら⁵⁾は、運動イメージが運動のパフォーマンスを修正、さらには向上させると述べており、運動イメージは運動学習の手段として用いられている。運動イメージは実際の運動を必要としないため、運動機能の残存程度に

関わらず、すべての回復ステージに可能な手段であり、脳卒中患者に対し発症早期から使いやすいアプローチ方法である。特に、上肢機能障害に対する運動イメージ治療の効果についての文献が散見され、運動イメージが上肢運動障害の治療としてエビデンスが高い治療と報告されている⁶⁾。また、下肢機能障害に対しては、Hwangら⁷⁾が歩行練習に運動イメージを用いた効果を検討しており、コントロール群に比べ運動イメージ群では歩行速度が増加したと報告している。しかしながら、下肢の足関節運動に限定した運動イメージ時の脳賦活についての報告は少ない。

臨床場面では歩行時に足関節の背屈運動が障害された脳卒中患者を目にすることが多い。発症早期の脳卒中後片麻痺患者の特徴的な歩容である反張膝歩行は、足関節背屈制限や痙性、臀筋群・膝屈伸筋群の筋力低下などが原因として挙げられている⁸⁾。また、足関節背屈筋力は脳

¹⁾福井総合病院 リハビリテーション課

²⁾福井医療短期大学 リハビリテーション学科

³⁾福井総合病院 リハビリテーション科

⁴⁾福井総合クリニック 放射線課

卒中患者の歩行速度に影響する最も重要な因子であるといわれており⁹⁾,脳卒中患者に対し発症早期から足関節背屈運動を実施していくことは重要であると考えられる。よって今回、健常者における足関節運動時と運動イメージ時の脳賦活部位の違いを検討する。

方法

1. 対象

対象は、神経学的な疾患の既往のない右利き健常成人10名(平均年齢は 26.4 ± 3.8 歳)である。すべての対象者に本研究の趣旨を説明し、書面にて同意を得た。なお、本研究は新田塚医療福祉センター倫理委員会にて承諾を得ている。

2. 手続き

本研究の流れを図1、測定プロトコルを図2に示す。まず、エジンバラ利き手テスト¹⁰⁾・チャップマン利き足テスト¹¹⁾を実施した。課題の条件は2種類設定した。まず、イメージ条件を実施した。運動イメージは、右足関節にて行い、運動範囲は踵骨を地面に接地した状態で足底を床から離し、その後また足底を床に接地することで一回とした。運動の速度は出来る限り運動に近いように0.5Hzで指定した。また、一人称イメージに近づけるため運動イメージはアクセラ操作を想像するように言語教示した。運動イメージは、実験者が被験者の下腿前部に手を触れることで開始し、また手を触れることで終了した。なお、課題は対象者に十分な理解が得られた後に実施した。次に、運動条件を実施した。イメージ条件と同じ環境設定で施行した。運動は右足関節にて行い、運動範囲は踵骨を地面に接地した状態で足底を床から離し、その後また足底を床に接地することで一回とした。運動の速度は0.5

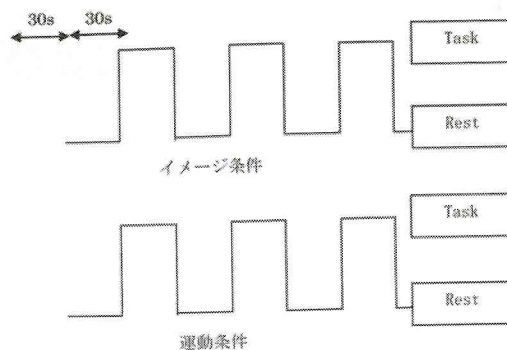


図2：測定プロトコル

Hzとした。運動は自分の足を動かすように言語教示した。運動は、実験者が被験者の下腿前部に手を触れることで開始し、また手を触れることで終了した。なお、課題は対象者に十分な理解が得られた後に実施した。運動および運動イメージは、測定の順序や運動の速度・範囲の統制を行うため、機能的磁気共鳴画像(以下、fMRI)室に入る前に部屋の外で一度練習し、十分な理解を得た。実験デザインはblockデザインを用いた。測定プロトコルは安静30秒、課題30秒を1セットとし、各条件において3セットずつ実施した。また課題終了後、運動イメージの鮮明度をVisual Analogue Scale(以下、VAS)によって求めた。

3. 測定肢位

MRIの中で、被験者の大腿・下腿部の下に三角マットを挿入しセミファーラー位(半坐位)をとった。アイマスクを着用し、開眼・閉眼は実験者の任意とした。また、体動を防ぐために、頭部をスポンジで、体幹・骨盤・大腿部をバンドで固定した。

4. 測定装置

測定装置はoptimaMR360 1.5Tを使用した。fMRIの測定には、標準ヘッドコイルを用いGradient-echo法にて、TR(ms)/TE/FA(deg)=2800/40/90, FOV 240×240mm, スライス厚3mm(スライスギャップ0mm), スライス枚数31~34, マトリックスサイズ64×64の条件で撮像した。

5. 解析方法

測定データはmatlab上の統計処理ソフトウェアSPM8を用いて前処理(位置補正・標準化・平滑化)を実施した。その後、集団解析にて被験者全員の脳画像をモントリオール標準脳の上に重ね合わせ、MR信号がuncorrected

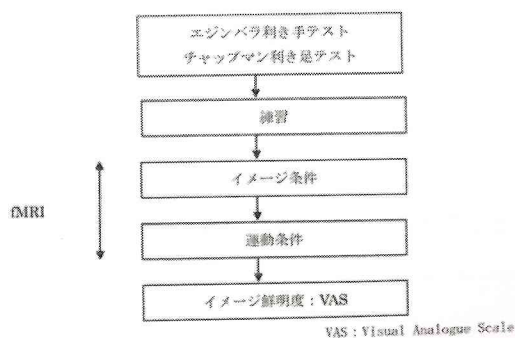


図1：実験手順を示すフローダイアグラム

で有意水準 $p < 0.001$ を超える部位を求めた。さらに, 1voxel を $2.0 \times 2.0 \times 2.0$ とし, 結果からcluster size ≥ 10 voxel を満たす部位を抽出した。その後, モントリオール標準脳の座標を, ソフトウェアTalairach Client¹²⁾にてタライラハ座標¹³⁾に変換し, 脳部位を特定した。

結 果

1. エジンバラ利き手テスト ($85.4 \pm 11.1\%$)・チャップマン利き足テスト (12.4 ± 1.3 点) であり, 有意な右利きを示した (表1)。
2. 全ての対象者の運動イメージ鮮明度を表すVASの平均は 66.8 ± 21.6 mmであった (表2)。
3. 運動条件でのみ有意に賦活した部位は右下前頭回, 右島, 右橋, 左中心前回, 左Extra-nuclearであった。運動条件とイメージ条件で賦活が一致していた部位は左右上側頭回, 左帯状回, 左内側前頭回, 左レンズ核,

右中心後回, 右sub-gyralであった。イメージ条件でのみ有意に賦活した部位は左小脳であった (表3)。

表1: 対象者の詳細 (n = 10)

	年齢	利き手	利き足
A	22	100	13
B	37	78	12
C	28	50	17
D	25	90	13
E	33	78	11
F	25	100	11
G	23	80	11
H	24	89	11
I	23	89	12
J	24	100	13
平均	26.4	85.4	12.4
標準偏差	3.76	11.12	1.28

注: 年齢; 歳, 利き手; %, 利き足; 点

表2: 運動イメージ鮮明度 (n = 10)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	平均 ± 標準偏差
VAS (mm)	25	70	70	58	12	85	94	90	64	100	66.8 ± 21.6

部位	運動条件					イメージ条件				
	cluster size	Z score	x	y	z	cluster size	Z score	x	y	z
下前頭回	右 25	3.58	26	12	-21					
島	右 77	3.78	45	6	4					
橋	右 11	3.31	12	-38	-30					
中心前回	左 12	3.75	-47	-7	40					
extra-nuclear	左 146	4.14	-45	6	-5					
上側頭回	右					35	3.87	50	12	-5
	左 105	4.01	-52	-36	17					
帯状回	左 295	4.25	-8	-11	34	17	3.89	-15	-23	29
内側前頭回	左 1287	5.18	-10	-17	59	63	4.8	-48	-1	31
レンズ核	左 31	3.83	-24	4	11	53	3.91	-24	-11	4
中心後回	右 30	3.88	52	-27	34	45	4.92	59	-20	25
sub-gyral	右 42	3.57	34	12	18	20	3.28	43	6	14
小脳	左					144	4.18	-3	-71	-13

注: 信号強度; voxel size, 2.0mm^3 . cluster size; 有意な活動を認めた voxel 数。x・y・z; MNI (Montreal Neurological Institute) 座標 (mm)。

考 察

1. 運動条件でのみ賦活した部位

運動条件でのみ有意に賦活した部位は、右下前頭回、右島、右橋、左中心前回、左Extra-nuclearであった。右下前頭回は注意の抑制と分配をすると報告されており14)、右足関節の運動に伴い、空間内での足部の位置やその際にどこに注意を向けるかといった注意の調節に関与したと考える。Williamsonら15)は、島が心血管系の制御と関連があり、運動時に必要な血圧を予測し、調節すると報告している。またその中で、島は他動運動時に賦活は認めず、自動運動時にのみ賦活を認めたと述べており、今回の研究において、島が運動条件で賦活を認め、イメージ条件で賦活を認めなかったことから、先行研究を支持する結果となった。高草木ら16)は、大脳-基底核-小脳との間に運動ループを形成すると報告しており、このループによって随意的、適切な運動が実行されると推測されている。このことから、右橋は大脳-小脳間での情報の伝達を担ったと考える。運動時には、運動と対側の中心前回が賦活することで、筋収縮を引き起こすことが知られている17)。よって今回の足関節運動において左中心前回の賦活は筋収縮を反映するものと考えられる。また、運動条件において小脳が有意に賦活を認めなかったのは、足関節底・背屈運動が既に学習された運動であったためと推測する。

2. 運動条件とイメージ条件で賦活が一致した部位

運動条件とイメージ条件で賦活が一致していた部位は左右上側頭回、左帯状回、左内側前頭回、左レンズ核、右中心後回、右sub-gyralであった。上側頭回は多感覚の統合を担っていることで知られている18)。左帯状回は運動制御や認識に関与すると報告されている19)。内側前頭回は補足運動野に該当し、行動の準備や選択に関与すると報告されている20)。左レンズ核は基底核の一部であることから、大脳-基底核-小脳との間に運動ループを形成し16)、運動制御に関与した可能性が考えられる。以上より、運動条件と運動イメージ条件で賦活が一致していた部位は、多感覚の統合、運動制御・認識、行動の準備・選択などに関与する部位であると考えられる。運動イメージにより、運動時と同じ脳部位の賦活を得られることが示唆された。臨床において、運動が困難な場合でも、運動イメージを利用したりハビリテーションが有効であると考えられる。今回、右中心後回も両条件での賦活が

認められた。中心後回は感覚情報の処理に関与することが確認されており21)、Frithら22)は、精神的イメージは感覚入力がない場合、感覚の処理域に及ぼす予測される効果について前の知識を反映すると報告している。しかしながら、一般的に右の運動時に感覚情報処理を担うのは対側である左中心後回であるため17)、さらなる追跡研究が必要と考える。

3. イメージ条件でのみ賦活した部位

イメージ条件で特化して有意に賦活した部位は左小脳であった。これは、準備段階の運動ループの関与16)が考えられる。今回運動イメージにより運動ループが作用したことが示唆された。また小脳は、意図する運動と実際に起こったことのある運動との比較を行うと報告されている。そしてその比較をもとに小脳は運動学習に関与し、特に学習初期には広範な活動を示すと報告されている23)。これは内部モデル理論に基づいており、感覚フィードバックに依存しなくても早く正確な制御が可能となるように内部モデルを構築していると考えられる。また、右足関節運動時の小脳の賦活は同側であることが一般的であり17)、今回は対側である左が賦活したことから、さらなる追跡研究が必要と考える。

4. 運動イメージ鮮明度

運動イメージ鮮明度を表すVASは 66.8 ± 21.6 mmであった。健常者においても、主観的なイメージ鮮明度に大きなばらつきを認めた。運動イメージを臨床で用いるためには、主観的なVASの信憑性を明らかとし、VASを用いた運動イメージ能力の評価が実施可能かどうかを判断しなければならない。今後は、主観的な指標のVASと客観的な指標であるfMRIによる賦活の程度を比較していく必要があると考える。

ま と め

健常者において足関節運動時および運動イメージ時の脳賦活部位の比較を行った。その結果、運動および運動イメージにより、中心後回、上側頭回、帯状回、内側前頭回、レンズ核といった運動制御に関与する部位に一致した賦活を認めた。運動イメージによって、上肢だけでなく、足関節においても運動と類似した脳部位の賦活が可能であることが明らかとなり、臨床への応用が期待できる。

文 献

- 1) Alkadhi H, Peter B, Sabina H, et al : What disconnection tells about motor imagery, evidence from paraplegic patients, *Cerebral cortex* 15 : 131–140, 2004
- 2) Decety J : The neurophysiological basis of motor imagery, *Behavioural Brain Research* 77 : 45–52, 1996
- 3) Solodkin A, Hlustik P, Elinor E, et al : Fine modulation in network activation during motor execution and motor imagery, *Cerebral cortex* 14 : 1246–1255, 2004
- 4) Naito E, Kochiyama T, Kitada R, et al : Internally simulated Movement Sensations during Motor Imagery Activate Cortical Motor Areas and the Cerebellum, *The Journal of Neuroscience* 22 : 3683–3691, 2002
- 5) Gandevia SC : Mind, muscles and motorneurons, *Journal of Science and Medicine in Sport* 2 : 167–180, 1999
- 6) Langhorne P, Coupar F, Pollock A : Motor recovery after stroke, a systematic review, *Lancet Neural* 8 : 741–754, 2009
- 7) Hwang S, Jeon H, Yi C, et al : Locomotor imagery training improves gait performance in people with chronic hemiparetic stroke, a controlled clinical trial, *Clinical Rehabilitation* 24 : 514–522, 2010
- 8) Bleyenheuft C, Bleyenheuft Y, Hanson P, et al : Treatment of genu recurvatum in adult hemiparetic patients a systematic literature review, *Ann Phys Rehab Med* 53 : 189–199, 2010
- 9) Dorsch S, Ada L, Canning CG, et al : The strength of the ankle dorsiflexors has a significant contribution to walking speed in people who can walk independently after stroke : an observational study, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 93 : 1072–1076, 2012
- 10) Oldfield RC : The assessment and analysis of handedness, the Edinburgh Inventory, *Neuropsychologia* 9 : 97–113, 1971
- 11) Chapman J, Chapman L, Allen J : The measurement of foot preference, *Neuropsychologia* 25 : 579–584, 1987
- 12) Talairach org, [http : //www.talairach.org.index.html](http://www.talairach.org/index.html)
- 13) Talairach J , Tournoux P : Referentially Oriented Cerebral MRI Anatomy, An Atlas of Stereotaxic Anatomical Correlations for Gray and White Matter, Thieme Medical Publishers, New York, 1993
- 14) Hampshire A, Chamberlain S, Monti M, et al : The role of the right inferior frontal gyrus : inhibition and attentional control, *NeuroImage* 50 : 1313–1319, 2010
- 15) Williamson J, Mccoll R, Mathews D et al : Activation of the insular cortex is affected by the intensity of exercise, *Journal of applied physiology* 87 : 1213–1219, 1999
- 16) 高草木薫 : 大脳基底核による運動の制御, *臨床神経*, 49 : 325–334, 2009
- 17) 井上貴央監訳 : カラー人体解剖学, pp299–334, 西村書店, 東京, 2007
- 18) Ghazanfar A, Schroeder C : Is neocortex essentially multisensory? , *Trends in Cognitive Sciences*, 10 : 278–285, 2006
- 19) Paus T : PRIMATE ANTERIOR CINGULATE CORTEX : WHERE MOTOR CONTROL, DRIVE AND COGNITION INTERFACE, *NATURE* 2 : 417–424, 2001
- 20) Rushworth M, Walton M, Kennerley S, et al : Action sets and decisions in the medial frontal cortex, *TRENDS in Cognitive Sciences* 8 : 410–417, 2004
- 21) 加藤宏司, 後藤薫, 藤井聡, et al監訳 : 神経科学 脳の探求, pp368–372, 西村書店, 東京, 2007
- 22) Frith C, Dolan R : Brain mechanisms associated with top–down processes in perception, *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 352 : 1221–1230, 1997
- 23) Imamizu H, Miyauchi S, Tamada T, et al : Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool, *NATURE* 403 : 192–195, 2000