

運動イメージにおける脳イメージング研究の動向

長谷川 望* 猪俣 公宏** 小山 哲***

Trends of the brain imaging research in the motor imagery.

Nozomu HASEGAWA, Kimihiro INOMATA and Satoshi KOYAMA

Abstract

A number of national level athletes use imagery for enhancement of their performance and preparation of competition. Hence researchers have been striving to understand the use of imagery by athletes with ultimate goal being the development of more effective imagery training intervention. Present finding that motor imagery is a neural process of mental rehearsal of a movement by activating motor-related areas, which are normally engaged in the actual execution of movement. The principle of this functional equivalence suggests that similar neural processes are involved in the physical execution, mental simulation and observation of movement since each operation is proposed to be assigned to the same internal brain representation.

It was proposed that a better understanding of the athletes' images can serve as a guide to future research from a practical perspective, facilitate the development of more effective imagery interventions. What we will present, therefore, is an approach based on fundamental cognitive neuropsychology in an attempt to provide a better understanding of mechanism involved in the motor imagery. If we recognize that sport is not performed in a hyper-relaxed state, we should also recognize that the motor imagery of sport should not be either.

〈はじめに〉

1985年以来、日本体育協会スポーツ医科学委員会におけるメンタルマネジメント研究プロジェクトとして、多くのメンタルトレーニングの技法が取り上げられ、トップレベルを中心とした競技者に実施されたり、また科学的な手法によって効果的な方法を探索するための基礎的研究がなされてきた。

中でもイメージトレーニング（以下ITと略記）について猪俣ら（1997）は、各オリンピック

大会後に参加選手に実施された心理調査の結果、毎回同じように回答した選手の中で約90%の者がこの方法を取り入れ利用していたとしている。故に、ITの効果を検討する実践的な研究が多くなされてきた（Suinn, 1986; Murphy, 1994; 高野ら, 1995; Holmes & Collins, 2001; 長谷川・星野, 2001）。また、ITの効果を証明する様々な理論が提唱されており、その理論を裏づけるための基礎的研究として質問紙法、精神生理学的測定法、神経生理学的測定法などを用いた研究が多くなされてきた（Harris & Rob-

*大学院生, **教授, ***助教授

inson, 1998; Oishi, et all., 1993; 長谷川・星野, 2002)。特に近年では、中枢の特定部位の活動を非侵襲的に計測することが可能なPET (Positron Emission Tomography: 陽電子放射断層撮影装置) や、fMRI (functional Magnetic Resonance Imaging: 機能的磁気共鳴断層撮影装置) を用いた脳イメージング研究により、運動の計画、準備および実行に関わる脳の活動部位、さらには運動イメージ想起中の脳の活動部位が明らかにされてきており (Decety, 1996a, 1996b; Porro et al., 1996; Ehrsson et al., 2000)、実際の運動遂行時と運動イメージ想起中、さらには、運動観察時の神経系メカニズムの機能的等価性についても解明されてきた。本論文においては、より効果的なITの実践方法を探究するための1歩として、機能的等価性という立場から運動イメージにおける非侵襲計測法による脳イメージング研究の成果を検討し、スポーツにおけるITの発展方向について検討をする。

I 運動イメージの概念

運動イメージについて、西田ら (1981, 1986) は、「過去経験 (知覚的、感覚的、感情的経験など) によって、外界の事物の知覚と類同的に習得、保持された情報が、自己の記憶を手がかりとして意識的なレベルで想起あるいは再生されたもので、絵画的な特性を持つものである」とし、因子分析を試みた。結果、第1因子において、様々な動作に関連した視覚因子が抽出され、第2因子には、個々の動作に関連した複合感覚因子が抽出された。つまり、第1因子は、視覚を通して様々な動作を“見ている”イメージであり、第2因子は様々な感覚を総動員して動作を”遂行している“イメージであるとしている。猪俣 (1991) は、前者を外的イメージ、後者を内的イメージとし、「外的イメージは、主として視覚的イメージ想起であるのに対し、内的イメージは、視覚、聴覚、さらに筋感覚などの運動に伴う種々の感覚が関与している複合感覚的なイメージ」としている。上述から、運動イメージが単に絵画的なイメージだけでない

可能性を示しているとも考えられる。

Decety (1996a) は、PET を用いて、運動イメージと運動準備と実行が共通の神経系メカニズムであることを発見した。また、Porro ら (1996) は、運動を最終的に出力する機能を備えている第1次運動野が、運動イメージ中に実際の運動よりは小さいが働いていることを示し、Luft ら (1998) は、運動制御に重要な働きをすると考えられている小脳も、運動イメージに関与することを確認している。つまり、従来ほとんど意識レベルで考えられてきた運動イメージが、意識レベル以外でも関与し、運動の計画や準備、そして実行に伴う運動制御にも関与している可能性を示している。さらに、Naito (2002) は、内的運動イメージ中に、実際の運動をする際に期待される運動感覚をシミュレートしていることを確認している。本論文においては、認知神経心理学の領域で扱われるように、運動イメージを、実際の顕在的な運動を伴わないでワーキングメモリー内において心的にリハーサルしている (シミュレートしている) ダイナミックな状態と定義する (Decety, 1996b)。

II 運動遂行および運動観察中の脳の活動

Hamzei ら (2003) は、把持動作によって、上頭頂葉、補足運動野、内側側頭回後部、下前頭回、外側運動前野の両側で、また、一次運動野および体性感覚野では、把持を行った手と反対側が活動したとしている。また、小脳、頭頂葉では、把持を行った手と同側の活動が見られた。さらに、把持動作の実行および観察において、共通するニューロンが活動する部位 (主に左下前頭回) があることを確認した。

Jeannerod (1999) は、運動イメージや似たようなプロセス (デモストレーションや自分自身のビデオ観察) が、シミュレートされた行動に関与する運動経路において神経活動の選択的な増加を引き起こしたと示している。ここで重要なことは、単に視知覚として、運動しているのを観察しているだけで視覚野以外の部位が賦活されたということである。Decety ら (1997)

は、観察運動の種類とそれを観察する際の被験者の意図がどのように活動部位に影響を与えるかを調べた。その結果、意味のある運動（生活に関連のある意味がわかる動作、例えば蓋を開ける）では、左の前頭側頭系を、意味のない運動（アメリカのサイン言語：被験者にとって意味がわからない）では、右の後頭側頭系を賦活したとしている。また、運動観察後に模倣をする意図があった場合は、中前頭回、前補足運動野に、ただ認識した場合は、海馬傍回に活動部位が同定された。つまり、運動観察という点においては、同様の行為をしているにもかかわらず、観察する構えやその後の実行の有無により活動する部位が異なるということになる。行動のプランニングに関与するような左の前頭側頭系や記憶保持のような右の後頭系をそれぞれ賦活したことから、運動イメージと同様に、視覚フィードバック情報を利用して、運動の計画や準備、そして実行の際に期待される運動感覚を踏まえて運動制御にも関与している可能性を示している。

Ⅲ 運動観察および運動模倣中の脳の活動

手の運動の計画、準備および実行において、実際に動かした側と反対側の帯状回運動野、補足運動野、運動前野背側部、頭頂葉そして、同側の小脳が賦活することが知られている (Luft, et al., 1998 : Ehrsson, 2001)。Tanaka & Inui (2002) は、手や腕の模倣行動と指の配置の再認識課題において、前者は左側の頭頂葉を、後者においては両側の頭頂葉という異なる頭頂部の関与を決定づけた。ブローカ野が、手や腕の模倣よりも指の模倣行動においてより関与することを発見し、その理由として、フィードバックの違いをあげ、手や腕の模倣においては、体性感覚、指の模倣においては視覚フィードバックを利用していると結論づけている。

Ⅳ 運動中および運動イメージ中の脳の活動

先述の通り、手や腕の運動の計画、準備および実行において、実際に動かした側と反対側の帯状回運動野、補足運動野、運動前野背側部、頭頂葉そして、同側の小脳が賦活することが知られているが、運動イメージ中にも同様な部位が賦活することが明らかにされている (Porro, et al., 1996 : Luft, et al., 1998 : Ehrsson, 2001)。また、Grafton & Arbib (1998) は、把握運動などは、単一の指の動きなどの単純な運動とは異なり、複雑で時には精巧な運動制御が求められるため独特の脳内神経回路を用いているとしている。他にも運動課題の複雑さや、動かす部位の増加に伴い、脳の活動領域が増えることが示されている。

Ehrsson (2003) は、手の指、足の指、そして舌の自発的な運動のイメージ中に、それぞれ実際の運動表出に直接関連する部位が活動することを示し、運動イメージが、運動を伴わないで運動を心的にリハーサルしている (シミュレートしている) 動的な状態であることを支持している。

Ⅴ 運動錯覚および運動イメージ中の脳の活動

Naito ら (2002) は、健常な右利きの被験者10人に、手首の腱を振動して運動錯覚を起こし、その間に手首の運動イメージをさせて運動錯覚を定量化した。そして、運動錯覚と運動イメージが同じ方向であった場合には経験された運動錯覚の量は増大し、反対方向であった場合には運動錯覚量は減少したとし、運動イメージと運動錯覚は脳内に共通した神経基盤を持ち、実際の動きがあるなしに関わらず、運動感覚を経験するときに利用されていることを示唆している。また、右手の運動イメージと運動錯覚を経験している際の脳内活性部位を解析した。その結果、両者とも大脳皮質および小脳領域において、運動関連部位に脳血流量の増加が認めら

れ、反対側（左側）の帯状回運動野、補足運動野、運動前野背側部そして、同側（右側）の小脳では、両課題で共通して活性の高い部位が存在した。一方、頭頂間溝は運動イメージ中のみで賦活した。つまり、運動イメージ中と運動錯覚中に実際に運動しているときに活動している領域を賦活していること、運動プログラミングに関連した領域と運動の実行に関係した領域、および運動の結果生じる運動感覚を司る領域、あるいはその運動感覚を予測する領域などに細分化できること、これらが統合されて実際の運動が起こることなどを示唆している。このように、運動イメージは実際の顕在的な運動を伴わないで運動をワーキングメモリー内において心的にリハーサルしている（シミュレートしている）ダイナミックな状態であり、特に、自分が行っているかのような内的運動イメージ（1人称的運動イメージ）において、期待される運動感覚を伴っていることが脳イメージング研究においても立証されてきている。

VI スポーツにおける脳イメージング研究

Rossら（2003）は、レベルの異なる6人のゴルファーを対象に、ゴルフのスイングを課題としてコントロール条件と運動イメージ条件の脳活動をfMRIによって計測した。その結果、運動中の脳活動の先行研究が示す通り、ゴルフのスイングイメージ中においても、運動皮質野、頭頂、前頭皮質野、小脳、そして、運動の計画野（前頭および頭頂皮質、補足運動野、小脳）、エラー検出を含んだ領域（小脳）に賦活が見られた。しかし、帯状回や脳幹神経においては、賦活されなかったことを示した。また、ゴルフのスキルレベルが高くなるにつれて補足運動野、小脳の賦活が減少することが示された。

スポーツ活動中の動作は、ダイナミックな動作や複雑な動作が組み合わせられており、また、課題の困難度は個人によって変化する。従って、期待される運動感覚を伴った運動イメージのシミュレートに個人差が生じてくる。

それに加え、解析の問題上、統制条件（主と

して休憩を中心として）と運動イメージ条件との比較により運動イメージ中の賦活部位を測定しなくてはならず、休憩条件中の被験者の思考等の精神活動を統制することの困難さが生じる。また、ある条件について脳全体の賦活領域を示すのに3秒程度必要となり、その条件を繰り返す必要がある。そのため、取り上げるスキルによっては、スポーツスキル遂行中のイメージの課題の選定が困難であると同時に測定された賦活領域は、スキル遂行イメージ中全体を現しており、スポーツスキルの遂行プロセスを分析的に捉えることが難しい。さらに、実際のスポーツスキル遂行中の賦活部位を測定することができないというfMRIのもつ実験方法論的制約について様々な問題を抱えている。そのため、手や腕の単純および複雑な運動イメージの研究に比べて、スポーツ活動中のイメージにおける、fMRIを利用した研究は、まだ開拓的段階にあるといえよう。

〈まとめ〉

脳イメージング研究により、実際の運動遂行時と運動イメージ想起中、さらには、運動観察時の神経系メカニズムの機能的等価性についても明らかになってきた。また、内的運動イメージ中には、実際の運動の際に生じる運動感覚までもシミュレートされることが確認されている。従来、運動イメージは遠心性の機能のみがいわれてきたが、求心性の視覚的フィードバック情報、体制感覚としてのフィードバック情報としての機能も備えていることがわかってきた。さらに、運動イメージと運動錯覚を組み合わせることで実際の運動感覚に近いシミュレーションをすることが可能となることが示されている。これらの認知神経心理学の研究の成果を考慮すると、従来のリラックスを基本としたITの実施方法に疑いが出てくる。また、実際の運動と運動イメージを連続軸と考えると、いかに限りなく実際の運動をシミュレートできる状態でITを実施するかが重要になってくると考えられる、そのため、シミュレーターの開発など

従来のITをさらに発展させていく可能性があると考えられる。

文献

- 1) Decety, J. 1996a Do imagined and executed actions share the same neural substrate? *Cognitive Brain Research*, **3**, 87-93.
- 2) Decety, J. 1996b The neurological basis of motor imagery. *Behavioral Brain Research*, **77**, 45-52.
- 3) Decety, J., Grezes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M., Procyk, E., Grassi, F. & Fazio, F. 1997 Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain*, **120**, 1763-1777.
- 4) Ehrsson, H.H., Naito, E., Geyer, S., Amunts, K., Zilles, K., Forssberg, H., Roland, P.E. 2000 Simultaneous movements of upper and lower limbs are coordinated by motor representations that are shared by both limbs: a PET study. *Eur Journal of Neuroscience*, **12**, 3385-33981.
- 5) Ehrsson, H.H., Geyer, S., and Eiichi, Naito. 2003 Imagery of Voluntary movement of fingers, toes, and tongue activates corresponding body-part-specific motor representations. *Journal of neurophysiology*, **90**, 3304-3316.
- 6) Hamzei, F., Rijntjes, M., Dettmers, C., Glauche, V., Weiller, C., & Buchel, C. 2003 The human action recognition system and its relationship to Broca's area: an fMRI study. *NeuroImage*, **19**, 637-644.
- 7) Harris, D.V., & Robinson, W.J. 1986 The effect of skill level on EMG activity during internal or external imagery. *Journal of Sports Psychology*, **8**, 105-111.
- 8) 長谷川望・星野公夫 2001 体験イメージに及ぼす動作法の影響 順天堂大学スポーツ健康科学研究, **5** 133-139.
- 9) 長谷川望・星野公夫 2002 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.
- 10) Holmes, P.S., & Collins, D.J. 2001 The PET/TEP approach to motor imagery: A functional equivalence model for sport psychology. *Journal of Applied Sport Psychology*, **13**, (1), 60-83.
- 11) 猪俣公宏 1991 イメージトレーニングの応用原理 体育の科学, **41**,(2),119-121.
- 12) 猪俣公宏 1997 選手とコーチのためのメンタルマネジメント・マニュアル. 大修館書店 pp.53-65.
- 13) Jeannerod, M. 1999 The 25th Bartlett Lecture- To act or not to act: Perspectives on the representation of actions. *Quarterly Journal of Experiment Psychology*, **52**, 1-29.
- 14) Luft, A.R., Skalej, M., Stefanou, A., Klose, U. & Voigt, K. 1998 Comparing motion-and imagery-related activation in the human cerebellum: a functional MRI study. *Hum. Brain Mapp* , **6**, 105-113.
- 15) Naito, E. & Matsumura, M. 1994 Movement-related slow potential during motor imagery and motor suppression in humans. *Cognitive Brain Research*, **2**, 131-137.
- 16) 内藤栄一・定藤規弘 2002. 身体図式(ボディスキーマ)と運動イメージ 体育の科学, **52**, (12), 921-928.
- 17) Naito, E., Kochiyama, K., Kitada, R., Nakamura, S., Matsumura, M., Yonekura, Y., & Sadao, N. 2002 Internally simulated movement sensations during motor imagery active cortical motor imagery active cortical motor areas and the cerebellum. *The journal of Neuroscience*, **22**, (9), 3683-3691.
- 18) 西田 保・勝部篤美・猪俣公宏・小山 哲・岡沢祥訓・伊藤政展 1981 運動イメージの明瞭性に関する因子分析的研究. 体育学研究, **26**,(3), 189-205.
- 19) 西田 保・勝部篤美・猪俣公宏・岡沢祥訓・伊藤政展・小山 哲・鶴原清志・吉沢洋

- 二 1986運動イメージの統御可能性テスト
作成の試み 体育学研究, 31,(1),13-22.
- 20) Oishi, K., Kimura, M., Yasukawa, M., Yoneda, T., & Maeshima, T. 1994 Amplitude reduction of H-reflex during mental movement simulation in elite athletes. *Behavioural Brain Research*, 62, (1),55-61.
- 21) Porro, C.A., Francescato, M.P., Cattolo, V., Diamond, M.E., Baraldi, P., Zuiani, C., Bazzocchi, M & di Prampero, P.E. 1996 Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery : a functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience*, 16, 7688-76989.
- 22) Ross, J.S., Tkach, J., Ruggieri, P.M., Lieber, M., and Lapresto, E. 2003 The Mind's eye: Functional MR Imaging evaluation of golf motor imagery. *American Journal of Neurodiology*, 24, 1036-1044.
- 23) Suinn, R.M. 1986 Seven steps to peak performance. Hans Huber Publishers.
- 24) Tanaka, S. and Inui, T. 2002 Cortical involvement for action imitation of hand/arm postures versus finger configurations: an fMRI study. *Cognitive Neuroscience and Neuropsychology*, 13, (16), 1599-1602.