

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 4 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26242065

研究課題名(和文) スポーツスキル学習における運動イメージの役割と脳機構の解析

研究課題名(英文) The analysis of the role and its brain mechanism of motor imagery in motor skill learning

研究代表者

彼末 一之 (Kanosue, Kazuyuki)

早稲田大学・スポーツ科学大学院・教授

研究者番号：50127213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,000,000円

研究成果の概要(和文)：新しい運動の習得はその能力に個人差が大きい。その原因の一つは運動の習得には動作そのものばかりでなく、その動作の運動イメージを正しく持つことができるようになる必要があるが、それが難しいことが挙げられる。本研究の目的は「運動学習とは、客観的な三人称運動イメージを主観的な一人称運動イメージに翻訳するプロセスを含む」という仮説の下に運動学習過程における脳の活動を解析して、運動学習と運動イメージの関連を検討することである。研究の結果、学習初期には三人称運動イメージが優位で、三人称運動イメージの質が運動パフォーマンスと関連することが示唆され、学習に伴って一人称運動イメージが優位になる可能性が考えられた。

研究成果の概要(英文)：Personal difference in the ability of learning of new motor skill, especially that of difficult action, is big. One of the reason of this is that motor learning involves not only gaining the motor action itself, but also having appropriate motor image of the action. In this research we analyzed brain activities during the process of motor learning under the hypothesis that motor learning is the process of interpreting motor images of objective third-person perspective into the motor images of first-person perspective. As results, it was suggested that at the initial stage of learning third-person perspective images are dominant and strongly related to the quality of motor performance, and as the learning progresses, first-person perspective images become dominant.

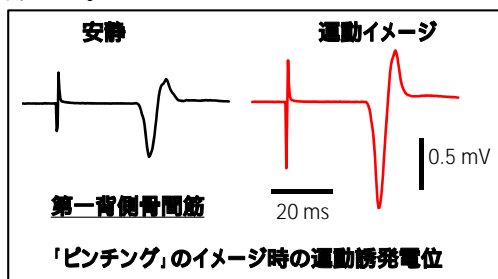
研究分野：スポーツ神経科学

キーワード：運動イメージ 運動学習 協調運動

1. 研究開始当初の背景

最初はできない新しい運動スキルも練習により意識せずともできるようになる。**運動学習**は体育やスポーツの根幹で、その機序を明らかにすることは教育・コーチング領域の大切な課題である。運動学習には**運動イメージ**が重要な役割を果たすと考えられる (Pascual-Leone1995; Gentili 2010)。また、運動イメージには2種類あることが知られている (Guillot 2009)。先ず、「**三人称運動イメージ**」は客観的に他人の動作を見るときのような視覚的な表象である。これに対し「**一人称運動イメージ**」は自分が動作したときに感ずる、主として筋・関節や前庭器官などからの「**感覚**」に基づく主観的な身体表象である。最近では運動イメージを客観的に脳活動と関連づける研究が進んできた。例えば、上の2種類の運動イメージは運動前野などの共通する部位に加え、一人称では下頭頂葉、三人称では視覚野など異なる脳部位が関係する (Binkofski 2000; Solodkinet 2004)。新しい動作を覚えるとき、最初は一人称イメージを持っていないため、まずは三人称イメージを持つであろう。そして練習により動作ができるにつれ、一人称運動イメージに必要な感覚の表象も形成されるようになるのではないかと。そこで、「運動学習とは三人称運動イメージを一人称運動イメージに翻訳するプロセスを含む」という仮説が立てられる。本研究は運動学習過程の脳活動を解析してこの仮説を検証し、運動学習と運動イメージの関連を検討することが目的である。

スポーツスキルは長期間 (週~年) で習得されるが、運動学習の研究は短時間 (数十分から数時間) の練習効果を検討したものが大部分である (Catmur 2007; Sakamoto 2012)。また、スポーツスキルの多くは**全身運動**であるのに対し、運動イメージの研究は**手の運動**を扱ったものが多い (Hanakawa 2008; Michelon 2006)。運動イメージの観点から見ると両者は大きく異なる。つまり、一人称運動イメージは全身運動では上述のように主として筋・関節や前庭器官などの感覚情報によって形成される。これに対し、手の運動では、自分の手は見えるのでたとえ一人称運動イメージでも視覚情報が重要となろう。そこで、運動学習や運動イメージについての知見を体育やスポーツの現場に直接応用するのは難しい。



本研究では、先ず I) **全身運動**の運動イメージを行っているときの脳活動を解析する。次

に、□) 指導の現場では非常に重要だがこれまであまり研究されていない**運動学習能力の個人差**に注目し、運動パフォーマンスと運動イメージ能力の関連を解析する。

さらに、「**筋弛緩**」は個人差がより顕著になる動作であり (未発表データ)、筋弛緩に関わる運動イメージにも注目する。これまでに様々な研究より、筋弛緩は“単なる収縮の終わりではなく脳活動を伴うアクティブな動作”であるとされ、筋弛緩の運動イメージ時にも脳活動が積極的に抑制されることを我々の研究グループが発表した。さらに、収縮や弛緩の動作時には、他肢の神経機構に影響を与えることも同研究グループで多数報告しており、筋弛緩の運動イメージも他肢の神経機構に影響を与えることが考えられる。本研究では、筋弛緩の運動イメージ能力およびその個人差にも着目する。

2. 研究の目的

本研究では長期の全身運動学習のモデルとして「**体操**」に注目した。クローズドスキルの体操は対戦相手や戦術などの影響がないので、純粹にスキルの学習を解析することができる。**運動イメージは脳活動を記録して評価する**。先ず、**機能的磁気共鳴装置 (fMRI)**を用いて運動イメージ中の BOLD 信号を計測する。しかし、fMRI では皮質興奮性を評価することができない。

そこで、本研究ではもう一つの脳機能測定として**経頭蓋磁気刺激 (TMS) 法**を用いる。申請者のグループは最近この手法を用いて一連の研究を進めてきた (Mizuguchi 2009; 2011; Sakamoto 2012、レビュー: Mizuguchi 2012 参照)。運動イメージ中に経頭蓋磁気刺激で一次運動野を刺激すると、その運動に関係した筋の運動誘発電位が特異的に増強される (左図)。すなわち、運動イメージ中には**皮質脊髄路の興奮性が上昇する** (Sakamoto 2009)。この手法を用いることである動作のイメージによって皮質の興奮性がどのように変化したかを評価することができ、fMRI と合わせることで多角的に脳活動を解析することが出来る。

3. 研究の方法

課題 : 全身運動の運動イメージ中の脳活動の解析

(仮説: 高難度の全身運動の運動イメージでは「三人称運動イメージ」に関連する脳部位が活動する。)

本研究の基礎となる実験で、「大車輪、け上がり」を取り上げる。大車輪は多くの人にとって経験したことすらない技でイメージすることすら困難であると考えられる。またけ上がりも未経験の人が多く比較的難しい動作である。

課題 : 運動学習能力の個人差と運動イメージ形成能力の関係

(仮説：運動学習能力の個人差は一人称の運動イメージ形成能力の違いが要因の一つである。)

体育の現場ではいわゆる「運動神経の悪い子」は置き去りにされがちで、運動嫌いの原因となっている。これに関連して「三人称運動イメージから一人称運動イメージへの翻訳」の質が学習とどう関連するかは興味深い問題である。運動学習能力が高い(運動神経が良い)子は翻訳の質が高く、すぐに手本と似た動作ができる(模倣がうまい)のに対し、能力の低い子は翻訳の質が低く、本人は手本と同じつもりでも、客観的には違う動きになってしまうのかも知れない。

課題：筋弛緩の運動イメージが他肢に及ぼす影響

(仮説：筋弛緩の運動イメージを行うと、他肢を支配する皮質脊髄路興奮性が低下する)筋弛緩動作および筋弛緩イメージを行うと、その筋を支配する皮質脊髄路興奮性が一時的に低下することが明らかになっている。また、足関節筋の収縮や弛緩動作は、手関節筋を支配する皮質脊髄路興奮性を低下させることも明らかになっている。したがって、筋弛緩をイメージする際にも、他肢に抑制性的影響を及ぼすことが考えられる。

4. 研究成果

(1)

複雑な全身運動のイメージ形成に関わる脳領域の検討のため、一般成人 19 名を対象に、イメージすることすら難しく実行することができない大車輪、イメージすることが難しく実行も難しいけ上がり、および、イメージすることも実行も簡単な懸垂の 3 段階の難易度の運動課題を一人称運動イメージさせた。全被験者は大車輪を一度も行ったことが無い被験者であった。被験者間でイメージの動きや動作速度が同一になるように見本となる映像を見せながら運動イメージを行わせた「運動イメージ+観察条件」。さらに、映像を見ることで賦活した脳活動と運動イメージによって賦活した脳活動を分離するために、映像を見るだけの条件も行った「観察のみ条件」。脳活動は fMRI にて計測した。「運動イメージ+観察条件」の脳活動から「観察のみ条件」の脳活動を引いたところ、いずれの動作のイメージでも補足運動野の活動が観察された。したがって、先行研究と同様に、補足運動野は運動イメージに重要な役割を果たすことが確認された。一方、第一次視覚野の活動は難しい大車輪の運動イメージ時の方が簡単な懸垂の運動イメージ時よりも高かった。第一次視覚野の活動は三人称イメージ形成に重要な役割を果たすことが知られており、一人称運動イメージが難しい場合には三人称イメージが代償的に行われる可能性が示唆された。

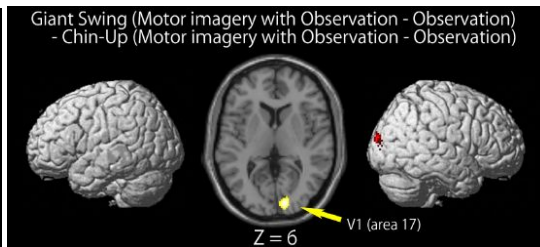


図 1 難しい運動イメージ中に特異的に賦活する脳領域

(2)

第一次視覚野の活動が運動イメージ形成に果たす役割を検討するため、TMS を用いた実験を行った。この実験では被験者は系列指タッピングのイメージを一人称運動イメージもしくは三人称運動イメージで行った。磁気刺激は第一次運動野もしくは第一次視覚野へ行った。第一次運動野の興奮性は第一背側骨間筋に貼付した筋電図上に誘発される運動誘発電位の振幅とした。第一次視覚野の興奮性は視覚野刺激によって誘発される閃光の出現確率とした。それぞれのイメージ中の振幅、出現確率は安静時の値で標準化した。その結果、三人称運動イメージ中には第一次運動野および第一次視覚野の興奮性を高めるが、一人称運動イメージ中には第一次運動野の興奮性のみが高まることが示唆された。この研究成果と先行研究から、一人称運動イメージは運動学習初期に視覚的なイメージを筋感覚的なイメージへ変換するために役割を果たしている可能性が示された。

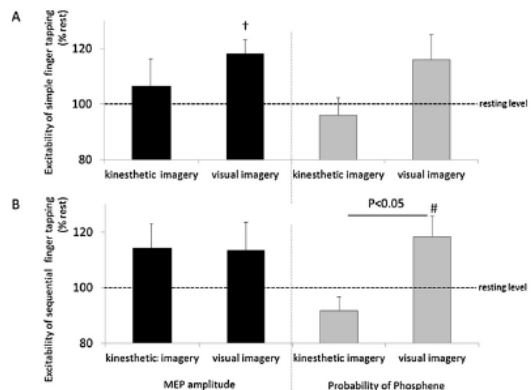


図 2 視覚および筋感覚的運動イメージ中の第一次運動野、第一次視覚野の興奮性

(3)

学習初期における三人称運動イメージの質と運動パフォーマンスとの関連を検討するため、系列指タッピング課題のパフォーマンス、一人称運動イメージ中の脳活動、三人称運動イメージ中の脳活動を記録した。被験者は健康成人 34 名とし、脳活動は fMRI を用いて計測した。fMRI 前後に系列指タッピング実行課題、質問紙による内省評価、および、mental chronometry 課題を行い、多角的に脳活動と運動イメージ能力との関係性を検討した。その結果、系列指タッピングパフォーマンスのレベルが高い被験者は三人称運動イ

メージ中の一次運動野、運動前野、一次視覚野の活動が高いことが明らかとなった。このことから三人称運動イメージの質が高い被験者ほど学習初期の運動パフォーマンスが高いと考えられる。一方、一人称運動イメージ中の脳活動量と運動パフォーマンスは相関関係が見られなかった。したがって、新規の手指運動課題では三人称運動イメージが優位である可能性が示された。

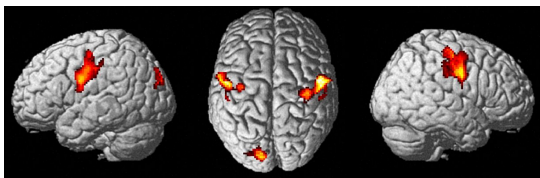


図 3 運動パフォーマンスレベルと相関する活動を示した脳領域

これらの研究成果から、運動学習初期には三人称運動イメージが優位であり、三人称運動イメージの質が運動パフォーマンスと関連することが示唆された。また、学習に伴って一人称運動イメージが優位になってくる可能性が考えられた。これまでの神経生理学的手法や心理学的手法を用いた先行研究から第一次運動野を動員し、アスリートがよく用いる一人称運動イメージが運動学習や運動パフォーマンスに重要であると考えられてきた。しかし、本研究成果により、学習初期や習得前の動作においては三人称運動イメージが重要であることが示唆された。これは、これまでに見落とされてきた三人称運動イメージの役割の重要性を示したものであり、運動が得意ではない人のイメージ能力評価や改善につながるトレーニング開発に貢献できると考えられる。また、本研究の当初の仮説「運動学習とは三人称運動イメージを一人称運動イメージに翻訳するプロセスを含む」を支持する神経科学的知見が得られている。さらに、この一連の研究成果と最新の運動イメージ研究知見をまとめ総説として国際誌に発表した。

さらに、足関節背屈筋の弛緩を実行、及びイメージする際の、手関節伸筋（ECR）および屈筋（FCR）の皮質脊髄路興奮性を明らかにした。その結果、筋弛緩を実行する際には、他肢を支配する皮質脊髄路興奮性が安静時よりも低下し、筋弛緩のイメージを行う際にも同様に低下することが明らかになった（図 4）。したがって、筋弛緩の運動イメージは他肢の神経機構に影響を及ぼすことが示唆された。一方で、他肢への影響に関する顕著な個人差はみられなかった。これらの結果は、トップアスリートのトレーニングに応用出来る可能性を秘めているだけでなく、筋弛緩が困難な神経疾患を有した患者さんへのリハビリ法としても活用できる有用な知見になるだろう。本研究内容をまとめ、国際誌に発表した。

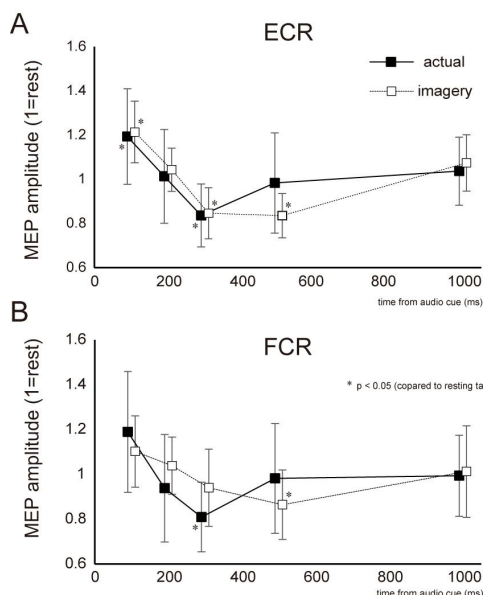


図 4 足関節筋背屈筋の弛緩を実行（actual）、イメージ（imagery）する際の手関節筋を支配する皮質脊髄路興奮性の変化

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 21 件）

Zheng Y, Muraoka T, Nakagawa K, Kato K, Kanosue K. Effect of salient points in movements on the constraints in bimanual coordination. *Exp Brain Res*. 2018. in press. (査読あり)

Vogt T, Kato K, 他2名 Nakata H, Kanosue K. Performance control in one consecutive motor task sequence - Approaching central neuronal motor behavior preceding isometric contraction onsets and relaxation offsets at lower distinct torques. *J Musculoskelet Neuronal Interact*. 2018. 18:1-8. (査読あり)

Kato K, Kanosue K. Motor imagery of voluntary muscle relaxation of the foot induces a temporal reduction of corticospinal excitability in the hand. *Neurosci Lett*. 2018. 668, 67-72. (査読あり) doi: 10.1016/j.neulet.2018.01.001.

Mizuguchi N, Katayama T, Kanosue K. The effect of cerebellar transcranial direct current stimulation on a throwing task depends on individual level of task performance. *Neuroscience*. 2018. 371:119-125. (査読あり) doi:

10.1016/j.neuroscience.2017.11.048.

Kato K, Kanosue K. Corticospinal excitability for hand muscles during motor imagery of foot changes with imagined force level. *PLoS One*. 2017. 12(9):e0185547. (査読あり) doi: 10.1371/journal.pone.0185547.
Mizuguchi N, Kanosue K. Changes in brain activity during action observation and motor imagery: Their relationship with motor learning. *Prog Brain Res*. 2017. 234:189-204. (査読あり) doi: 10.1016/bs.pbr.2017.08.008.

Mizuguchi N, Nakamura M, Kanosue K. Task-dependent engagements of the primary visual cortex during kinesthetic and visual motor imagery. *Neurosci Lett*. 2017. 636:108-112. (査読あり) doi: 10.1016/j.neulet.2016.10.064.

Nakagawa K, Kawashima S, Mizuguchi N, Kanosue K. Difference in Activity in the Supplementary Motor Area Depending on Limb Combination of Hand-Foot Coordinated Movements. *Front Hum Neurosci*. 2016. 10:499. (査読あり)

Mizuguchi N, Nakata H, Kanosue K. The right temporoparietal junction encodes efforts of others during action observation. *Sci Rep*. 2016. 6:30274. (査読あり) doi: 10.1038/srep30274.

Kato K, Muraoka T, Mizuguchi N, Nakagawa K, Nakata H, Kanosue K. Muscle Relaxation of the Foot Reduces Corticospinal Excitability. *Front Hum Neurosci*. 2016. 10:218. (査読あり) doi: 10.3389/fnhum.2016.00218.

Kato K, Kanosue K. Effect of muscle relaxation in the foot on simultaneous muscle contraction in the contralateral hand. *Neurosci Lett*. 2016. 633:252-256. (査読あり) doi: 10.1016/j.neulet.2016.09.019.

Mizuguchi N, Nakata H, Kanosue K. Motor imagery beyond the motor repertoire: Activity in the primary visual cortex during kinesthetic motor imagery of difficult whole body movements. *Neuroscience*. 2016. 315:104-113 (査読あり) doi: 10.1016/j.neuroscience.2015.12.013.

Muraoka T, Sakamoto M, 他 3 名 Corticospinal excitability modulation in resting digit muscles during cyclical

movement of the digits. *Front Hum Neurosci*. 2015. 9:607. (査読あり) doi: 10.3389/fnhum.2015.00607.

Mizuguchi N, Yamagishi T, Nakata H, Kanosue K. The effect of somatosensory input on motor imagery depends upon motor imagery capability. *Front Psychol*. 2015. 6:104. (査読あり) doi: 10.3389/fpsyg.2015.00104.

Nakagawa K, Muraoka T, Kanosue K. Potential explanation of limb combination performance differences for two-limb coordination tasks. *Physiol Rep*. 2015. 22;3(2). (査読あり)

Kato K, Watanabe T, Kanosue K. Effects of muscle relaxation on sustained contraction of ipsilateral remote muscle. *Physiol Rep*. 2015. (11). (査読あり)

Kato K, Watanabe J, Muraoka T, Kanosue K. Motor imagery of voluntary muscle relaxation induces temporal reduction of corticospinal excitability. *Neurosci Res*. 2015. 92:39-45. (査読あり) doi: 10.1016/j.neures.2014.10.013.

Mizuguchi N, Nakata H, Kanosue K. Activity of right premotor-parietal regions dependent upon imagined force level: an fMRI study. *Front Hum Neurosci*. 2014. 8:810. (査読あり) doi: 10.3389/fnhum.2014.00810.

Mizuguchi N, Nakata H, Kanosue K. Effector-independent brain activity during motor imagery of the upper and lower limbs: an fMRI study. *Neurosci Lett*. 2014. 581:69-74. (査読あり) doi: 10.1016/j.neulet.2014.08.025.

Uchida Y, Mizuguchi N, Honda M, Kanosue K. Prediction of shot success for basketball free throws: visual search strategy. *Eur J Sport Sci*. 2014. 14:426-32. (査読あり)

²¹ Kato K, Muraoka T, Higuchi T, Mizuguchi N, Kanosue K. Interaction between simultaneous contraction and relaxation in different limbs. *Exp Brain Res*. 2014. 232:181-189. (査読あり) doi: 10.1007/s00221-013-3730-y.

[学会発表](計3件)

Mizuguchi N. The right temporoparietal junction encodes efforts of others during action observation. *Neuroscience2016* (2016)

Mizuguchi N. Motor imagery beyond the

motor repertoire: V1 activity predicts capability of kinesthetic motor imagery of complex whole body movements. Neuroscience2015. (2015)

Mizuguchi N. Somatosensory signals influence motor imagery of a complex tool-using action. Neuroscience2014 (2014)

〔図書〕(計5件)

彼末一之 (2015) スポーツと脳機能
「新・スポーツ生理学」(村岡功編), 13
章、市村出版、東京、pp.137-147

水口暢章、彼末一之 (2015) 「スポーツと
脳」「スポーツバイオ科学と先進スポー
ツギアの開発」第1編、第9章

水口暢章、彼末一之 (2014) トップアス
リートの身体運動解析 「進化する運動科
学の研究最前線」、NTS、東京、pp.133-141
Kanosue K (Ed) (2014) *eBooks "Sports
Sciences for the Promotion of an Active Life"*
Elsevier, Tokyo.

彼末一之 (2013) 運動と神経系 「スポ
ーツ指導者に必要な生理学と運動生理学
の知識」(村岡功編)、市村出版、東京、
pp.40-49

〔その他〕

ホームページ等
<http://kanosue.com/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

彼末 一之 (KANOSUE, Kazuyuki)
早稲田大学スポーツ科学学術院・教授
研究者番号：50127213

(2)研究分担者

村岡 哲郎 (MURAOKA, Tetsuro)
日本大学・経済学部・准教授
研究者番号：30398929

中田 大貴 (NAKATA, Hiroki)
奈良女子大学・生活環境科学系・准教授
研究者番号：40571732

藤本 浩志(FUJIMOTO, Hiroshi)
早稲田大学・人間科学学術院・教授
研究者番号：60209103

土屋 純(TSUCHIYA, Jun)
早稲田大学・スポーツ科学学術院・教授
研究者番号：60236908

正木 宏明(MASAKI, Hiroaki)
早稲田大学・スポーツ科学学術院・教授
研究者番号：80277798

坂本 将基(SAKAMOTO, Masanori)
熊本大学・教育学部・准教授
研究者番号：80454073

水口 暢章(MIZUGUCHI, Nobuaki)
慶應義塾大学・理工学部(矢上)・訪問研究
員
研究者番号：80635425

小川 哲也(OGAWA, Tetsuya)
早稲田大学・スポーツ科学学術院・
研究者番号：60586460