

Title	運動イメージによる両側性転移について
Sub Title	Effects of motor imagery on bilateral transfer: a behavioral and NIRS study
Author	雨宮, 薫(Amemiya, Kaoru) 石津, 智大(Ishizu, Tomohiro) 綾部, 友亮(Ayabe, Tomoaki) 小嶋, 祥三(Kojima, Shozo)
Publisher	三田哲學會
Publication year	2009
Jtitle	哲學 No.121 (2009. 3) ,p.207- 231
JaLC DOI	
Abstract	<p>The aim of this experiment was to investigate the imagery effect and the brain areas correlating with it using NIRS (Near Infrared Spectroscopy) and more importantly, to investigate and compare the effects of uni- and contralateral transfer between actual motor execution and motor imagery training.</p> <p>Our results revealed that while execution was effective only in case of trained movement, imagery was effective not only in case of trained movement, but also in case of bilateral transfer. The NIRS data revealed that both motor imagery and execution brought about the same level of activation in the supplementary motor area. Apparently, the SMA activation supports the effect of imagery training; however, the correlation between the degree of both after-effects and SMA activation in imagery training was not significant. On the contrary, the correlation between SMA activation and ipsilateral training effect was significant in case of the execution group.</p> <p>These results suggested that both motor execution and imagery have ipsilateral training effects; however, the areas predicted to be associated with the after-effects of training are different. Furthermore, with regard to the contralateral transfer effect, SMA activation did not predict the contralateral transfer effect in both trainings. This might indicate that the areas predicted to be associated with the after-effects of the training and with the intermanual transfer effect were not identical in case of the actual training. These differences in the after-effects between both trainings might be due to the different neural networks involved.</p>

Notes	特集：小嶋祥三君退職記念 投稿論文
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00150430-00000121-0207

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

投稿論文

運動イメージによる 両側性転移について

雨宮 薫^{1,2}・石津智大¹・綾部友亮³・小嶋祥三⁴

Effects of Motor Imagery on Bilateral Transfer: A Behavioral and NIRS Study

Kaoru Amemiya, Tomohiro Ishizu, Tomoaki Ayabe, Shozo Kojima

The aim of this experiment was to investigate the imagery effect and the brain areas correlating with it using NIRS (Near Infrared Spectroscopy) and more importantly, to investigate and compare the effects of uni- and contralateral transfer between actual motor execution and motor imagery training.

Our results revealed that while execution was effective only in case of trained movement, imagery was effective not only in case of trained movement, but also in case of bilateral transfer. The NIRS data revealed that both motor imagery and execution brought about the same level of activation in the supplementary motor area. Apparently, the SMA activation supports the effect of imagery training; however, the correlation between the degree of both after-effects and SMA activation in imagery training was not significant. On the contrary, the correlation between SMA activation and ipsilateral training effect was significant in case of the execution group.

These results suggested that both motor execution and imagery have ipsilateral training effects; however, the areas predicted to be associated with the after-effects of training are different. Furthermore, with regard to the contralateral transfer effect,

¹ 慶應義塾大学社会学研究科, ² 東京大学医学系研究科, ³ 自然科学研究機構 生理学研究所 感覚運動調製研究部門, ⁴ 慶應義塾大学文学部

SMA activation did not predict the contralateral transfer effect in both trainings. This might indicate that the areas predicted to be associated with the after-effects of the training and with the intermanual transfer effect were not identical in case of the actual training. These differences in the after-effects between both trainings might be due to the different neural networks involved.

1. Introduction

Imagery training

運動イメージは、実際の運動とその運動過程やその経過時間が互いに似ていることが行動・認知実験において示されており (Decety et al., 1989; Sirigu et al., 1995), その類似により「脳内の運動シミュレーション」とも称されていたが、近年のニューロイメージング研究によって運動イメージは最中の賦活が実際運動と重複することも確認されている (Stephan et al., 1995; Lotze et al., 1999; Grezes & Decety, 2001; Jeannerod, 1994; Jeannerod 2001; Kimberley et al., 2006). さらに両者の類似性は運動イメージ中においてのみに限局されておらず、イメージ後の効果においても類似し、運動の学習効果があることが知られている。

運動イメージによる学習の効果 (e.g. Feltz & Landers, 1983) は、現在ではイメージトレーニングとして確立され、臨床においても適用され効果を発揮しているほか、ニューロリハビリテーションとしての応用可能性も注目されている (e.g. Fansler et al., 1985; Lacourse et al., 2004; Cicinelli et al., 2006). しかし、運動イメージの学習効果については、実際の運動による効果より低く、限定的であることがイメージトレーニングに伴う共通概念とされており、さらにリハビリテーションを必要とする脳損傷患者が症状を引き起こした障害により運動イメージを阻害すること (Jackson et al., 2001; Lotze & Halsband, 2006; Li, 2000) なども知られているなど、運動イメージの効果と応用能力は常に限局されていることが

イメージトレーニングにおいて常にある問題とされている。

一方で、運動イメージは実際運動同等かそれ以上に初期学習において効果を持つことや (Ryan & Simons, 1981; Wrisberg & Ragsdale, 1979), シークエンス学習のシークエンス部分に有用であるとする行動実験 (Minas, 1978), 運動群と同様レベルで両側性転移が見られるという報告 (Kohl et al., 1992, Kohl & Roenker, 1983), 一般化に優れているとする報告 (Gentili et al., 2006) もなされている。また脳活動の賦活に関しても、実際運動と運動イメージの賦活部位の若干の相違があることが近年示唆されてきており (Nyberg et al., 2006), イメージ戦略の相違による仕方 (視覚イメージや筋感覚イメージなどのイメージ戦略の相違) により左右されること、ネットワークが異なることも示唆されてきている (Solodkin et al., 2004)。しかし、行動実験そのものの実験数も非常に少なく、予備実験報告にとどまるなど検討があまりなされていない状況であるうえ、イメージと実際運動のイメージ群の相違が、異なる学習効果を生み出すことを検討した実験はいまだない状況である。

そこで、このたびの実験では、イメージと実際運動の学習効果の相違を考慮に入れ、イメージの転移の現象を利用し、両条件の学習がどのように相違し、どのようにイメージングの結果の相違と結びつくのかを脳機能の面から検討することとした。

Transfer

用いた転移という現象は、学習の般化の一つであり、前学習が後学習に影響を与えることを言う。特に、片方の手足から反側への手足への転移の効果は両側性転移 (Bilateral transfer) と呼ばれ、現在までに多々の効果器やさまざまな形態で多数の実験が行われている。脳機能と関連してラテラルリティの問題や利き手の問題、性差の問題、イメージ戦略の違い (e.g. Yáñez et al., 1998) などを含め、さまざまな実験が行われているおり、

現在のところ、そうした問題は未だ論議中であるが(Chase & Seidler, 2008), それに関連して転移にかかわる脳機能についても議論がまだ進行中である。現在までに関連領域として示唆されているのは、脳梁(Gazzaniga & LeDoux, 1979; Hunter et al., 1975; Lange et al., 2006; Thut et al., 1997), 中側頭回, 右下・中前頭領域(Anguera et al., 2007), 前頭-頭頂(Obayashi et al., 2003), 小脳や大脳基底核(Obayashi et al., 2003; Obayashi, 2004)であり、複数領域の重要性が示されてきている(Halsband & Lange, 2006)。さらに、近年のfMRI・経頭蓋磁気刺激法を用いた実験においては、両側性支配として知られる補足運動野(SMA: SMA-proper)の活動が転移中に重要であることが示されている(Perez et al., 2007)。SMAは、高次運動領域であるため、両手協調運動やシークエンス学習に重要な領域であり、SMAの前部(preSMA)とともに、それぞれ運動の前期・後期学習に重要な領域であることが知られている(Hikosaka et al., 2002; Doyon & Benali, 2005; Kelly & Garavan, 2005)。また運動のイメージにおいても重要とされる領域であり、特に指のタッピングシークエンスのイメージにおいては、特異的に活動することが報告されている部位でもある(Roland, 1993)。しかし、SMAに限らず、運動イメージが実際運動との賦活領域が重複していることが言われているように、運動学習の転移に重要であると考えられている部位はイメージにおいても活動することが言われている領域でもある。

本実験では、以上のように両側性転移を用いることで、実際運動と運動イメージの出力の相違を見ることと、学習や転移の責任部位および両者の責任部位の相似がどのように関連するかを行動実験およびイメージング計測結果を比較検討する。イメージングには、非侵襲であり、テスト計測とイメージング計測の姿勢を一定に保つことのできる束縛の少ない近赤外分光法(Near infrared spectroscopy)を用いて、運動関連領域の活動を検討する。

2. Method

Participants

参加者は、エディンバラ利き手検査 (Oldfield, 1971) にて右利きと判定された学部生・大学院生計 33 名 (平均年齢 21.7 歳) であり、ランダムに運動群, イメージ群, コントロール群に 11 名ずつ (うち女性 6 名) になるように振り分けをした。今回のタスクには、後述のとおりタッピングシークエンスを用いているため、ピアノ等指を使用する楽器の経験年数を考慮に入れ、各グループの楽器経験年数の平均分散が等しくなるようにグループ分けをした。

Tapping task

使用したタスクは、左手のタッピングシークエンスであり、テンキー (NT-2U, Sanwa supply) 上の指定した番号の順序を、指定した指遣いにて 30 秒間中にできる限り早く正確に、できるだけ多くタッピングしてもらうこととした (図 1)。タスクのシークエンスおよびそれぞれの指遣いに馴化



図 1. 使用したテンキーと指定したシークエンス (オリジナル左手タスク)

運動イメージによる両側性転移について

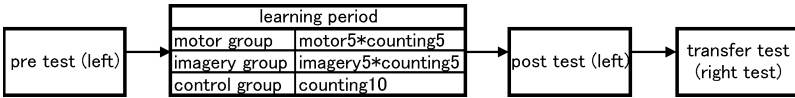


図 2. 実験手続き

後、30 秒間のプレテストを行い、学習前の各個人の成績を計測した。

プレテスト後、各群がそれぞれの学習を 30 秒 5 セット、カウント 30 秒と交互に計 10 セット行うトレーニングフェーズを行い、その学習間に NIRS (Near infrared spectroscopy, ETG-7000, Hitachi Medical Co., Japan) を同時計測した。運動群は、運動とカウント 5 セットずつ計 10 セット、イメージ群は運動イメージとカウントの計 10 セット、コントロール群はカウントのみ 10 セット行っている。カウント効果の減算の目的と、イメージタスク中の他の動作の抑制のために、運動群・イメージ群にはそれぞれタスク中のタッピングの 1 順の回数を数えながらタスクをしてもらっている。

トレーニングフェーズ後、ポストテストを二つ行った。一つはトレーニングで行った左手のタスク、もう一つはトレーニングで行った左手のタスクを鏡像関係になるように右手で行う転移テストである。両ポストテストについては、事前に伝えておらず、テストの意向についても触れていない。また、テスト・学習・コントロールすべてにわたり、タスクは閉眼で行っている (図 2)。

NIRS recording

運動関連領域を中心に、背外側前頭前野 (左右 DLPFC)・背外側運動野 (左右 PM)・補足運動野 (SMA-proper; 以下 SMA とする)・前補足運動野 (preSMA)・感覚運動野 (左右 SMC) を Hatakenaka et al., (2007) に準拠しつつ計測した (図 3)。計測には、NIRS の 4×4 プロブ (計測値 24 チャンネル) を使用し、Oxy-Hb, Deoxy-Hb, Tota-Hb を Sam-

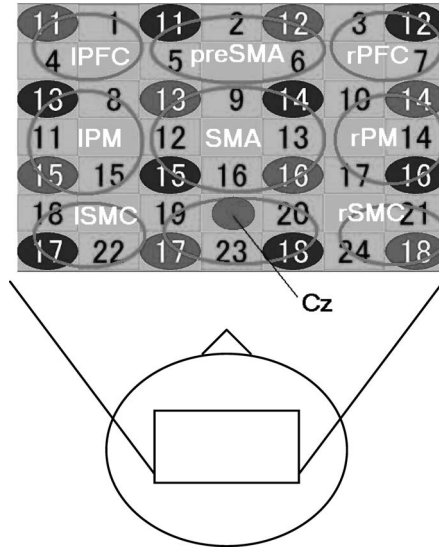


図 3. NIRS 装置位置

pling rate 10 Hz にて計測。装着にはオリジナルキャップを用いて国際 10-20 法に従い (Okamoto et al., 2004), Cz をマークとした。なお、各タスクの開始音には、NIRS のビープ音を使用した。

3. Analysis

Behavioral data

スコアは、(総タッピング数)-(間違えた回数)にて算出し(ポイント)、各個人のプレテストのポイントを基準値として、両ポストテストのポイントから減算して各ポストテストの点数(スコア)を算出した。二つのポストテストのスコアを 2 (テスト)×2 (群) にて分散分析したほか、プレテストからの変化を見るために、群内で Repeated *t*-test を Pre-Post, Pre-Post right で検定(ポイント間での分散分析)を行った。また、成績間の相関を見るために、ピアソンの相関係数を算出した。

NIRS data

最もタスクとの相関が高いとされる Oxy-Hb のみを解析に使用した。解析前の処理として、移動平均 5s をかけ、最も活動の高い Ch を各領野の代表値と決定し、各タスク開始 5s の平均値を基準値として設定した。各 Performance タスクから Counting を引いた値を用いて 3 群間で 2 (タスク)×3 (群)×5 (セッション) の分散分析を行った。

学習度合いと領域の活動度合いの相関を見るための相関係数の算出も行動データ同様行った。

4. Results

Behavioral results

トレーニングフェイズ前のプレテストの結果は 3 群間で有意に差がないことが確かめられた。これにより、ポストテストの差はプレテストによるものと考えることができる。

各群内でのプレテスト、両ポストテストの t 検定の結果、運動群では、左ポストテストのみで有意な成績向上 ($p < .001$) が認められた一方で、右手テストへの有意な転移は認められなかった。反対にイメージ群では、左ポストテストにおいて有意な向上 ($p < .00005$) が見られたと同時に、右ポストテスト (転移テスト) においても、プレテストより有意な成績向上が認められている ($p < .5$)。コントロール群においては、左ポストテストにおいてのみ有意な成績向上 ($p < .5$) が認められた (図 4・5) が、ポストテスト間での群間の差を検討すると、左テストでの向上度合いは、運動群、イメージ群間に差がなく、両群がコントロール群より有意に向上度合いが高いことが示された (運動群; $p < .05$, イメージ群; $p < .005$)。

また、群間でのプレテストからの差を検討するために、プレテストを基準とした各テストスコアでの検定の結果、群間 ($F = 6.53, p < 0.005$)、テスト ($F = 11.65, p < 0.005$) で有意な主効果が得られ、運動群がコントロール

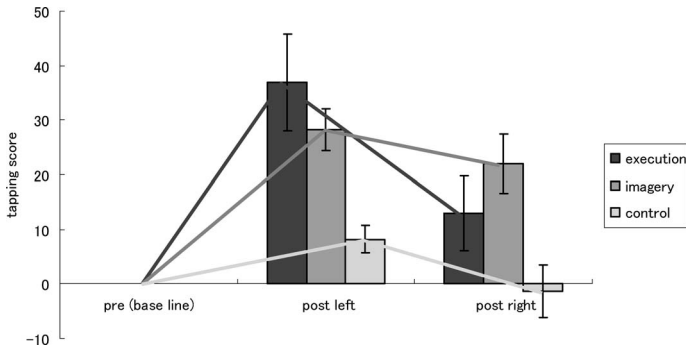


図 4. 行動結果

群より、イメージ群がコントロール群より、成績の向上が有意に高いことが認められ、左手テストは転移テスト（右手テスト）より有意な成績の向上が見られる傾向が一貫して得られた。

以上の結果より、運動群は学習した同側の訓練効果のみが高い一方で、イメージ群は同側の学習効果のみならず、反側への転移効果が運動群やコントロール群より高いことがわかる。この結果より、イメージにおける両側性転移への有用性が示唆され、イメージ群においては、同側・反側ともに同等の成績向上が見られるとした前実験までの結果と一致する (Kohl & Roenker, 1983)。

Correlation (Pretest-Posttest)

同側の学習と反側への転移効果は両者間で相関し、関連性が見られるのか、それとも向上度合いはそれぞれ独立であるのかを検討するため、各群のそれぞれの成績間の相関係数を算出した。さらに、プレテストとの相関を見ることで、プレテストでの成績の低さが、成績向上を有意とさせていないかを確認した。

それぞれの成績相関表は、表 1 に示すとおりである。

運動イメージによる両側性転移について

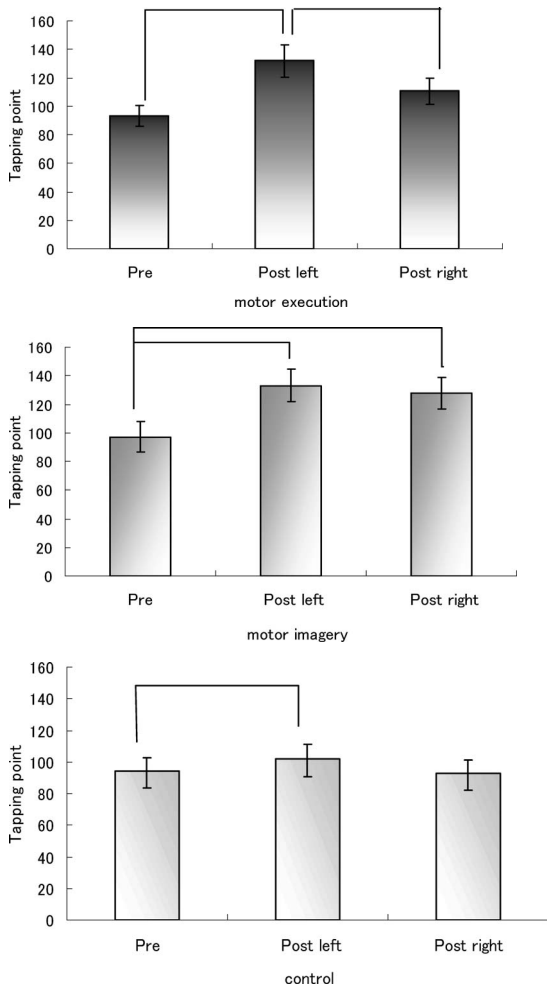


図 5. 運動群 (上)・イメージ群 (中)・コントロール群 (下) のテスト間の点数変遷

表 1. 各群の成績間の相関係数

	pre vs. post left	pre vs. post right	post left vs. post right
motor group	0.71	0.51	0.64
imagery group	0.94	0.87	0.91
control group	0.96	0.84	0.94

表より、プレテストの成績と、成績の向上は、ポストテスト・右手テストともに全群において高い相関を示していることが分かった。特にイメージ群・コントロール群はプレテストの成績が高いほど両ポストテストの成績も高くなっており、両ポストテスト間の相関も高い。このことは、プレテスト時の成績が低いほど、つまり改良の余地があるほど、ポストテストにおいて成績が高くなっているわけではないことが分かる。また、両ポストテスト間での相関が高いことは、オリジナルの成績の向上は右手への成績の向上にも関連していることが示唆される。

一方で、運動群は相関係数が中程度であり、右手テストが関連する相関はイメージ群やコントロール群に比較して低めである傾向が見られた。

NIRS results

分散分析結果、左 SMC・preSMA を除くすべての領域（左右 PFC, SMA, 左右 PM, 右中央 SMC）において群間の主効果が得られた。そして主効果の得られた領域全てにおいて、運動群はコントロール群より有意に高い活動が見られ、また、同領域中、SMA を除くすべての領域で運動群はイメージ群より高い活動が見られた。SMA においては、運動群とイメージ群の活動に有意に差がなく、反対にイメージ群はコントロール群より有意に高い活動を示した（左 PFC; $p < .001$, 右 PFC; $p < .05$, SMA; $p < .01$, 左 PM; $p < .001$, 右 PM; $p < .05$, 右 SMC; $p < .001$, 中央 SMC; $p < .05$) (図 6)。

シークエンス学習、両手協調運動において重要な領域であるとともに、

運動イメージによる両側性転移について

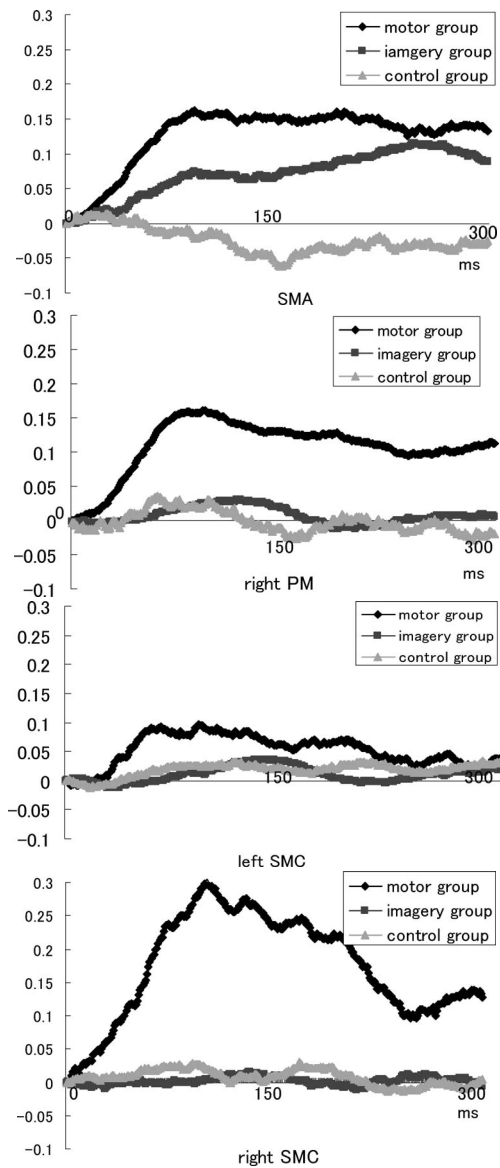


図 6. SMA, 左右 SMC および右 PM における各群のタスク中の加算平均波形

指のシークエンスイメージにおいても重要な部位である SMA が、本実験の運動イメージ中に特異的に賦活していたことが分かる。一方で、SMA と運動イメージやシークエンス学習において重要であると考えられている preSMA には群間において有意な差が得られなかった。また、運動準備に関連し、イメージのシミュレーションの際にも関連すると示唆されている背側の運動前野や前頭部分、SMC においては、イメージ期間中に有意な活動の変化は見られなかった。本実験におけるイメージ運動時の SMA の特異的な活動は、指同士のタッピングシークエンス課題を行った Roland (1993) の実験結果と相似している。

Correlation between NIRS and behavioral date

今回 NIRS を計測しているのは、オリジナル学習期間中であり、示した賦活図は、左手の運動（イメージ）学習に過ぎず、学習による成績の上昇度合いやその後の転移成績を真に説明するものではない。そこで、計測（学習）中の脳活動と、その後の二つのテストの成績の変化の相関係数を算出し、同側の成績向上に関連する領野と転移に関連する領野それぞれの予測性および領野間の相違を検討した。

結果、運動群は左 PFC ($r=0.45$)、preSMA ($r=0.69$)、SMA ($r=0.55$) の活動が後の左手の成績向上度合いと中程度の相関を持っていることが示された。preSMA と SMA は前述のとおり、シークエンス学習において重要な領域とされており、学習過程にて賦活する場所でもある。反対に転移度合いとの相関は SMA には見られず、同側（左）の SMC との高い逆相関関係が示された ($r=-0.68$) (表 2)。

一方、イメージ群で相関の高かった部位は、すべて逆相関であり、同側との相関は preSMA、右 PM、SMC 全域に見られ、イメージ中に活動の高かった SMA には逆向きにも相関は見られなかった。同側学習同様、また、運動群の転移テスト同様に、転移との相関では SMC の逆相関 ($r=$

運動イメージによる両側性転移について

表 2. 各群の両ポストテストと各領野の相関

Motor	IPFC	rPFC	preSMA	SMA	IPM	rPM	ISMC	rSMC	SMC
left	0.45	0.30	0.69	0.55	0.28	0.16	0.13	0.25	-0.14
right	0.21	0.43	0.30	0.29	0.29	0.15	-0.68	-0.31	0.32
Imagery	IPFC	rPFC	preSMA	SMA	IPM	rPM	ISMC	rSMC	SMC
left	0.17	-0.57	-0.40	-0.37	-0.44	-0.89	-0.88	-0.95	-0.74
right	-0.07	-0.29	0.06	0.24	-0.60	-0.22	-0.82	-0.15	0.35
Control	IPFC	rPFC	preSMA	SMA	IPM	rPM	ISMC	rSMC	SMC
left	0.20	0.29	0.57	0.17	0.00	0.19	-0.81	-0.18	0.54
right	-0.18	0.20	0.78	0.20	0.24	-0.50	-0.66	-0.31	-0.59

-0.82) が得られた。

同側学習効果のみ得られたコントロール群においては、運動群同様に preSMA にて同側運動学習と中程度の相関が見られたほか、左 SMC においては、イメージ群同様同側学習と転移度合いとに逆相関が見られた。コントロール群は、あくまでも学習期間中はカウントのみを行っており、コントロール群全体としては転移効果の有意差も認められなかったが、転移効果の認めら得たイメージ群と同様に、転移効果と左 SMC の活動の低下が学習の促進と相関していた。

5. Discussion

運動群・イメージ群・コントロール群を設けて、運動の学習効果および運動学習の両側性転移の効果を調べた本実験の結果、運動群における高い同側の学習効果、イメージ群における同側・反側への高い学習・転移効果が得られた。本実験で採用した学習時間は 30 秒 5 回、計 2 分半と非常に短い訓練期間であるが、こうした短時間の学習でも非常に高い成績向上が認められること、同様短期間の運動イメージによっても同側の運動学習に

加えて反側への高い転移が得られることが認められた。

Transfer (Behaviore)

運動群の短期間の学習効果は、実際運動により短期間でも運動野の変化が現れることが知られているが (Classen et al., 1998), このたびの運動イメージの短期間での訓練効果は、運動イメージによっても短期間で運動野に変化を起こすことができるとする研究結果とも一致する (Hayashi et al., 2002).

本実験の結果では、運動群の転移効果が認められず、運動による転移を示した先行研究の結果と一致するところではなかった (e.g. Schulze et al., 2002). しかし、イメージ群における転移効果が同側の学習効果と向上のレベルが同等であり、さらにイメージ群の同側の学習度合いが転移度合いと同等であった本実験の結果は、先行研究と一致する (Kohl & Roenker, 1982). 今回の転移テストにおいては、同側の学習と鏡像関係になるようなミラーシークエンスを課した。ミラーシークエンスでの転移課題では、学習したオリジナルのシークエンスから、効果器 (左手) だけでなく、場所においてもすべて異なる。転移学習には、ほかに、指使いが異なるがオリジナルと位置関係が保有するオリジナル転移課題も可能であり、オリジナル転移課題とミラー転移課題を比較した実験では、ミラー課題の方が、転移度合いが低くなる結果もあり (Grafton et al., 2002; van Mier & Petersen, 2006), 本実験における運動群の転移度合いの低さは認知的負荷が高いとされるミラーシークエンスの採用に一因があると考えられる。一方で、イメージ群の転移の高さは、イメージ群における抽象的ルール獲得により優れているとされる柔軟性の高さを示していると示唆される (Wohldmann et al., 2007; Wohldmann et al., 2008), 運動群と比較した場合、より effector-independent である可能性を示唆している。

NIRS

同時計測した NIRS の結果からは、SMA が運動群・イメージ群ともに学習中の賦活が高かったが、行動間との相関では運動群にのみ相関が見られ、イメージ群では相関も見られず、また両群ともに反側への相関も見られなかった。SMA 皮質領域から検出される Oxy-Hb の変化は、両学習ともに活動の変化を示すものの、後の成績との相関を同程度に指し示すものではなく、また、SMA は両群ともに転移の予測因子とはならないことが示された。

転移との関連は同側 SMC の逆相関が全群で見られたが、実際運動をしていない場合の同側学習の予測とも相関した。同側 SMC の活動の抑制が筋出力をしていない場合の学習効果と、学習していない転移効果に相関を示していたと考えられる。このことは、学習中の同側 SMC 領域の活動の抑制が、何らかの学習に影響を与えている可能性を示唆している。

以上より、イメージでの運動学習において最も高い活動を示した領域と、その運動イメージにより般化される学習や転移に重要な領域は予測段階では異なっていることを示唆する。そして、学習の予測となる領域は、学習方法によりその予測度合いが異なっていることを示唆している。

Supplementary motor area

SMA は、損傷により自発性運動や、エイリアンハンド症候、運動の時間的調節などの障害が現れることが知られており、その機能仮説としては、動作の自発性開始過程、大脳皮質を介する反射の制御、運動の時系列状の構成、左右手の協調、動作遂行、記憶依存による連続動作の企画と構成、複数動作の順序制御などが提唱されている。

SMA の前に位置する preSMA においても動作企画ないしは準備状態で著明であるが、単純動作時の活動は補足運動野よりも少なく、動作の切り替え、新たな作業の開始、動作の順番表現に特化している。本実験にお

いては、実際運動、運動イメージともに、閉眼条件であるため、視覚依存性ではなかったこと、また動作の自発性や運動の時系列学習、連続動作の企画構成、準備にも両条件がかかわっていたことなどが考えられ、SMA の賦活特性を両条件が持ち合わせていたことと考えられる。

しかし、成績との相関関係は両条件間で異なるものであり、このことは、両者間のネットワークの相違が一因となっている可能性が考えられる。Slodokin et al. (2004) の fMRI 実験によると、両者間で同領域の活動が見られても、強さの投射関係が異なっている事が示されている。特に SMA は入力・出力ともに強さの投射が 2 条件間で異なっており、イメージ時には SMA への頭頂からの入力が実際運動よりも強く、また、SMA から M1 に向かう投射がネガティブになっていることが示されている (Solodkin et al., 2004)。

SMA への入力を行う頭頂領域は、小脳や基底核から視床を介してフィードバックの感覚運動情報を得ており、SMA は直接的間接的にそうしたフィードバック情報を受け取り、企画をたてて M1 に出力している。この強い入力と弱い出力の状態は、イメージ状態の現在の運動感覚の情報、つまり動いていないという情報を SMA が強く受け取り、M1 に対しての出力を抑制していることが考えられる。SMA は特に体性感覚に特化しており、こうした体性感覚のデータを実行条件よりも強く受け取っていたと考えられる。

本実験において SMA の賦活が両群間で同等程度であったにもかかわらず、学習度合いの相関と活動の相関が、群間により差が生じていたのは、上記のように SMA の処理が両群間で異なっていたことが原因であるとも考えられる。このことは、実際の運動とイメージが、同領域が同等レベルで賦活しても処理に対して異なる働きをしていることを示唆している。

また、両群ともに SMA の活動は転移予測とならなかったが、そのことは実際運動の学習転移の相関を検討した Perez et al. (2007) の実験におい

て、SMA が後の転移学習の予測因子よりむしろ、転移中において重要であるとする報告とも一致するところである。

Sensory motor cortex

感覚皮質・運動皮質は、感覚運動により同時期に賦活することが多いことから、総じて感覚運動皮質と呼ばれ多い領域である。このたびの実験では、NIRS における計測位置により、感覚運動皮質領域として一括して考えている。運動群のタッピングにより反側の SMC のみ効果的に賦活していることから、細かい手の動きを右 SMC 領域でとらえられていたことを示している。

本実験においては左 SMC では有意な群間差が得られなかったが、運動をしている同側であったことのほか、特に相関が高いことから、個人差が大きく誤差が広がり群間の差として検出できなくなっていた可能性が考えられる。この左 SMC の逆相関は、実際に動かしていない状態での学習と転移に対して見られた。

このたびの NIRS 実験においては深部の賦活は検出できていないが、実際運動を用いた fMRI 実験では、視床の腹外側後部 (VLp) が後の転移予測との相関を呈していることが示されており (Perez et al., 2007), VLp は主に腱などの深部感覚や頭部以外の四肢の感覚機能を感覚野に投射していることが知られている。イメージ中、もしくは運動中の反側の手に関しては、SMC は動いていない手足の状況を受け取っていることとなる。イメージ群の同側の学習、および両群の転移は、現在の感覚運動の情報を活用しないほど、学習の効率が上がっているとも考えることができる。

Bilateral transfer

運動の学習には、運動を行ったフィードバック情報を運動領野で利用する流れが重要になる。しかし、フィードバックを得られないイメージにお

いても運動関連領域は賦活し、また学習も可能でもある。このイメージの学習に重要なのが、高次運動領域の賦活であり、その抽象的ルール獲得であると考えられていた。このたびの実験においては、抽象的ルール獲得にも重要であると考えられている SMA が賦活したが、その賦活度合いと学習度合いは異なるものであった。さらに実際運動・イメージともに SMA は後の転移と相関しなかったが、SMA は視床腹側前部 (VL_a) とともに転移をしている最中に賦活することが示されており (Perez et al., 2007), 上述した VL_p とは投射関係が異なることも知られている。

VL_a は淡蒼球からの投射を受けて 6 野・5 野・7 野に投射しているのに対し、VL_p は小脳を通じて 4 野・5 野・7 野に投射を送っており、基底核が実行中のエラー修正に関連している一方、小脳はトライアルごとのエラー修正に関連していることが知られている。SMA が実験中に重要であり (Perez et al., 2007), 本実験において SMA がイメージ学習や転移と相関しなかった一因として、SMA に投射をしている基底核が実行中エラーとかかわっており、実際の実行においてその活動が重要であることが原因であったと考えられる。

Clinical applicability

運動イメージはプロの音楽家やアスリートに補助的訓練として使用されることが通常多いが、近年リハビリテーションへの臨床的効果も注目されており、単体で劇的な効果を得るのは難しいものの、効果的なリハビリトレーニング方法になりえる可能性が示唆されてきている (e.g. Fansler et al., 1985; Lacourse et al., 2004; Cicinelli et al., 2006)。しかし、運動イメージは損傷により障害を受けることも同時に報告されており、リハビリテーションを最も必要とする脳損傷患者の約半数が、そもそも運動イメージに困難を示すことが報告されている (De Vries et al., in prep)。障害は、頭頂 (Jackson et al., 2001), 前頭 (Lotze & Halsband, 2006), 皮殻や皮質

部位 (Li, 2000) など、運動関連の麻痺を生じる関連領域に多岐にわたり、また、運動イメージが今の姿勢に依存した形で促進・抑制されることも報告されていることから (Vargas et al., 2004; Mercier et al., 2007)、現状の姿勢がイメージする先の姿勢と乖離している損傷患者には運動イメージのリハビリテーションが困難であることが理解できる。

本実験で示したイメージによる両側性転移の可能性は、こうした運動イメージ療法が直面する困難に対する一つの可能性を指し示すことができるのではないかと考えられる。脳損傷によるイメージ障害は麻痺側にあるため、健常側をイメージする事でその効果の転移が期待できるのではないかと示唆される。

また、転移には両側性に限局されず異なる効果器間での転移も示されており、リハビリの可能性は広がると考えられる。しかし、転移には前述のとおり側性化の問題や性差、利き手非利き手の問題がいまだ論議中であり、イメージに関しての転移の現れ方の違いなどは、今後検討していく必要があると考えられる。しかし、少なくとも本実験で指し示した右利き健常者による非利き手から利き手への効果に対し、また手指の細かいタッピングという効果に関してはイメージの転移を示唆できるものと言える。

6. Conclusion

本実験により、限定的であると考えられている運動イメージの効用について、実際運動とは異なる応用可能性があることを示唆することができたと考えられる。少なくとも、短い期間での非利き手から利き手への、細かい手指運動については、イメージのミラー転移効果は実際運動より高くなること示唆している。また、実際運動と運動イメージはともに同様領域の賦活が知られるところであったが、学習の度合いに対する賦活との相関は学習間で異なることがあるという示唆している。

運動イメージ、また両側性転移に関しても、イメージの仕方、転移の方

向性により学習度合いや転移の度合いが異なることが知られており、利き手、転移の順序や性差の問題、効果器の問題など、結果を左右する要因は多岐に渡る。このたびの実験の一般性を調べるためには、さらなる検証が必要とされる。

7. Acknowledgement

小嶋祥三先生御退官記念号に寄稿させて頂くにあたり学部時代よりお世話になりました小嶋先生に、この場をお借りしまして感謝の意を表させて頂きたく存じます。小嶋先生には研究だけではなく、研究者としての姿勢やお人柄など多くのことを学ばせて頂きました。本当に有難うございました。

References

- Anguera, J. A., Russell, C. A., Noll, D. C., & Seidler, R. D. (2007). Neural correlates associated with intermanual transfer of sensorimotor adaptation. *Brain Research*, **1185**, 136–151.
- Chase, C. & Seidler, R. (2008). Degree of handedness affects intermanual transfer of skill learning. *Experimental Brain Research*, **190**, 317–328.
- Cicinelli, P., Marconi, B., Zaccagnini, M., Pasqualetti, P., Filippi, M. M., & Rossini, P. M. (2006). Imagery-induced cortical excitability changes in stroke: A transcranial magnetic stimulation study. *Cerebral Cortex*, **16**, 247–253.
- Classen, J., Liepert, J., Wise, S. P., Hallett, M., & Cohen, L. G. (1998). Rapid plasticity of human cortical movement representation induced by practice. *Journal of Neurophysiology*, **79**, 1117–1123.
- Decety, J., Jeannerod, M., & Prablanc, C. (1989). The timing of mentally represented actions. *Behavioral Brain Research*, **34**, 35–42.
- De Vries, S. J. & Mulder, T. (2007). Motor imagery and stroke rehabilitation: A critical discussion. *J. Rehabil. Sci.*, **39**, 5–13.
- Doyon, J. & Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Current Opinion in Neurobiology*, **15**,

161-167.

- Fansler, C. L., Poff, C. L., & Shepard, K. F. (1985). Effects of mental practice on balance in elderly women. *Physical Therapy*, **65**, 1332-1338.
- Feltz, D. L. & Landers, D. M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance: A meta-analysis. *Journal of Sports Psychology*, **5**, 25-57.
- Gazzaniga, M. and LeDoux, J. E. (1979). *The Integrated Min*, New York: Plenum Press.
- Gentili, R., Papaxanthis, C., & Pozzo, T. (2006). Improvement and generalization of arm motor performance through motor imagery practice. *Neuroscience*, **137**, 761-772.
- Grafton, S. T., Hazeltine, E., & Ivry, R. B. (2002). Motor sequence learning with the nondominant left hand. A PET functional imaging study. *Experimental Brain Research*, **146**, 369-378.
- Grezes, J. & Decety, J. (2001). Functional anatomy of execution, mental simulation, observation and verb generation of action: A meta-analysis. *Human Brain Mapping*, **12**, 1-19.
- Halsband, U. & Lange R. K. (2006). Motor learning in man: a review of functional and clinical studies. *Journal of physiology*, **99**, 414-424.
- Hatakenaka, M., Miyai, I., Mihara, M., Sakoda, S., & Kubota, K. (2007). Frontal regions involved in learning of motor skill —A functional NIRS study. *Neuroimage*, **34**, 109-116.
- Hayashi, S., Hasegawa, Y., & Kasai, T. (2002). Transcranial magnetic stimulation study of plastic changes of human motor cortex after repetitive simple muscle contractions. *Perceptual and Motor Skills*, **95**, 699-705.
- Hikosaka, O., Nakamura, K., Sakai, K., & Nakahara, H. (2002). Central mechanisms of motor skill learning. *Current Opinion in Neurobiology*, **12**, 217-222.
- Hunter, M., Ettliger, G., & Maccabe, J. J. (1975). Intermanual transfer in the monkey as a function of amount of callosal sparing. *Brain Research*, **93**, 223-240.
- Jackson, P. L., LaFleur, M. F., Malouin, F., & Richards, C. (2001). Potential role of mental practice using motor imagery in neurologic rehnhabilitation. *Arch. Physi. Med. Rehabil.*, **82**, 1133-1141.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain. Neural correlates of motor inten-

- tion and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, **17**, 187–245.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage*, **14**, 103–109.
- Kelly, A. M. & Garavan, H. (2005). Human functional neuroimaging of brain changes associated with practice. *Cerebral Cortex*, **15**, 1089–1102.
- Kimberley, T. J., Khandekar, G., Skraba, L. L. Spencer, J. A., VanGorp, E. A., & Walker, S. R. (2006). Neural substrates for motor imagery in severe hemiparesis. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, **20**, 268–277.
- Kohl, R. M., Ellis, S. D., & Roenker, D. L. (1992). Alternating actual and imagery practice: Preliminary theoretical considerations. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **63**, 162–170.
- Kohl, R. M. & Roenker, D. L. (1983). Mechanism involvement during skill imagery. *Journal of Motor Behavior*, **15**, 179–190.
- Lacourse, M. G., Turner, J. A., Randolph-Orr, E., Schandler, S. L., & Cohen, M. J. (2004). Cerebral and cerebellar sensorimotor plasticity following motor imagery-based mental practice of a sequential movement. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, **41**, 505–524.
- Lange, R. K., Braun, C., & Godde, B. (2006). Coordinate processing during the left-to-right hand transfer investigated by EEG. *Experimental Brain Research*, **168**, 547–556.
- Li, C. R. (2000). Impairment of motor imagery in putamen lesions in humans. *Neuroscience Letter*, **287**, 13–16.
- Lotze, M., Montoya, P., Erb, M., Hulsmann, E., Flor, H., Klose, U., Birbaumer, N., & Grodd W. (1999). Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: an fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **11**, 491–501.
- Mercier, C., Aballea, A., Vargas, C. D., Paillard, J., & Sirigu, A. (2007). Vision without proprioception modulates cortico-spinal excitability during hand motor imagery. *Cerebral Cortex*, in press.
- Minas, S. C. (1978). Mental practice of a complex perceptual-motor skill. *Journal of Human Movement Studies*, **4**, 102–107.
- Nyberg, L., Eriksson, J., Larsson, A., & Marklund, P. (2006). Learning by doing versus learning by thinking: An fMRI study of motor and mental training. *Neuropsychologia*, **44**, 711–717.
- Obayashi, S. (2004). Possible mechanism for transfer of motor skill learning: im-

- plication of the cerebellum. *Cerebellum*, **3**, 204–211.
- Obayashi, S., Suhara, T., Kawabe, K., Okauchi, T., Maeda, J., Nagai, Y., & Iriki, A. (2003). Fronto-parieto-cerebellar interaction associated with intermanual transfer of monkey tool-use learning. *Neuroscience Letters*, **339**, 123–126.
- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., Oda, I., Isobe, S., Suzuki, T., Kohyama, K., and Dan, I. (2004). Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10–20 system oriented for transcranial functional brain mapping. *Neuroimage*, **21**, 99–111.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, **9**, 97–113
- Perez, M. A., Tanaka, S., Wise, S. P., Sadato, N., Tanabe, H. C., Willingham, D. T., & Cohen, L. G. (2007). Neural substrates of intermanual transfer of a newly acquired motor skill. *Current Biology*, **17**, 1896–1902.
- Roland, P. E. (1993). *Brain Activation*, New York: Wiley-Liss.
- Ryan, E. D. & Simons, J. (1981). Cognitive demand, imagery, and frequency of mental rehearsal as factors in influencing acquisition of motor skills. *Journal of Sport Psychology*, **3**, 35–45.
- Schulze, K., Lüders, E., & Jäncke, L. (2002). Intermanual transfer in a simple motor task. *Cortex*, **38**, 808–815.
- Sirigu, A., Cohen, L., Duhamel, J. R., Pillon, B., Dubois, B., Agid, Y., & Pierrot-Deseilligny, C. (1995). Congruent unilateral impairments for real and imagined hand movements. *Neuroreport*, **6**, 997–1001.
- Solodkin, A., Hlustik, P., Chen, E. E., & Small, S. L. (2004). Fine modulation in network activation during motor execution and motor imagery. *Cerebral Cortex*, **14**, 1246–1255.
- Stephan, K. M., Fink, G. R., Passingham, R. E., Silbersweig, D., Ceballos-Baumann, A. O., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. (1995). Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *Journal of Neurophysiology*, **73**, 373–386.
- Thut, G., Halsband, U., Regard, M., Mayer, E., Leenders, K. L., & Landis, T. (1997). What is the role of the corpus callosum in intermanual transfer of motor skills? A study of three cases with callosal pathology. *Experimental Brain Research*, **113**, 365–370.

- vanMier, H. I. & Petersen, S. E. (2006). Intermanual transfer effects in sequential tactuomotor learning: evidence for effector independent coding. *Neuropsychologia*, **44**, 939-949.
- Vargas, C. D., Olivier, E., Craighero, L., Fadiga, L., Duhamel, J. R., & Sirigu, A. (2004). The influence of hand posture on corticospinal excitability during motor imagery: A Transcranial Magnetic Stimulation study. *Cerebral Cortex*, **14**, 1200-1206.
- Wohldmann, E. L., Healy, A. F., & Bourne, L. E., Jr. (2007). Pushing the limits of imagination: Mental practice for learning sequences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **33**, 254-261.
- Wohldmann, E. L., Healy, A. F., & Bourne, L. E., Jr. (2008). A mental practice superiority effect: Less retroactive interference and more transfer than physical practice. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **34**, 824-833.
- Wrisberg, C. A. & Rasdale, M. R. (1979). Cognitive demand and practice level: Factors in the mental rehearsal of motor skills. *Journal of Human Movement Studies*, **5**, 201-208.
- Yáguiez, L., Nagel, D., Hoffman, H., Canavana, A. G. M., Wist E., & Hömberg, V. (1998). A mental route to motor learning: Improving trajectorial kinematics through imagery training. *Behavioural Brain Research*, **90**, 95-106