

■原著

鏡模倣に対する解剖模倣の特異的神経基盤

Distinctive neural basis of anatomic imitation compared with specular imitation

宮本 礼子, 菊池 吉晃, 妹尾 淳史

Reiko Miyamoto, Yoshiaki Kikuchi, Atsushi Senoo

要旨: 我々は、解剖模倣（解剖学的に同側の四肢を使用した模倣）よりも鏡模倣を自然に実行する傾向があるが、この神経基盤はいまだに明確ではない。本研究では、fMRIを用い、鏡条件と解剖条件における左右手指運動模倣時の脳活動を比較し、解剖模倣の特性について検討した。

その結果、鏡模倣に比べて解剖模倣で、両側下前頭回（IFG）と右背側運動前野（PMd）の活動が左右どちらの手を被験者が用いているかに関わらず認められた。右PMdは、被験者が解剖模倣でより注意深く、左手あるいは右手での運動表象を調整する必要があったことを示すと考えられた。左のIFGでは、鏡模倣と比較して解剖模倣において、より複雑で困難な動きをコード化している可能性が示唆された。一方、右IFGの活動は、課題の手と鏡の位置関係にある手が自然に運動しようとする動きを抑制している可能性が示唆された。

キーワード: 解剖模倣, 鏡模倣, 下前頭回 (IFG), 背側運動前野 (PMd), fMRI

I 導入

サル脳の Mirror Neuron 発見¹⁾以後、人の模倣に関する neuroimaging 研究が活発におこなわれ²⁾、人の Mirror Neuron System は、communication や共感・他者の心の理解などに関連する可能性が示されている³⁾。

運動模倣は、他者の動作を観察して、自分自身の運動を相手の動作に合わせる必要がある。自身が他者の手の動きを模倣するとき、他者と自身の間で、動作の neural map が脳内に作り出されている可能性があり、この他者動作認知をガイドする役割を持つ神経ネットワークは、communication において必須と考えられている⁴⁾。

我々の日常において比較的単純な運動でも、異なるタイプの模倣がごく自然に起こっている。すなわち、観察者 A が相手 B と向かい合うとき、A が B に対して鏡を見ているような位置関係で運動を実行する鏡模倣と、A が B と同側の手を使用して運動を実行する解剖模倣がある（図 1）。A と B が向い合わせになっているため、解剖模倣では対角線上に位置する側の手を使用することになる。日常生活を考えた際、向かい合わせの人間と communication をとるうえで、鏡模倣は解剖模倣よりも自然な行動である⁵⁾。一方解剖模倣は主観的に難しいと感じるが、この鏡模倣および解剖模倣の行動の特徴は、神経基盤の相違を反映

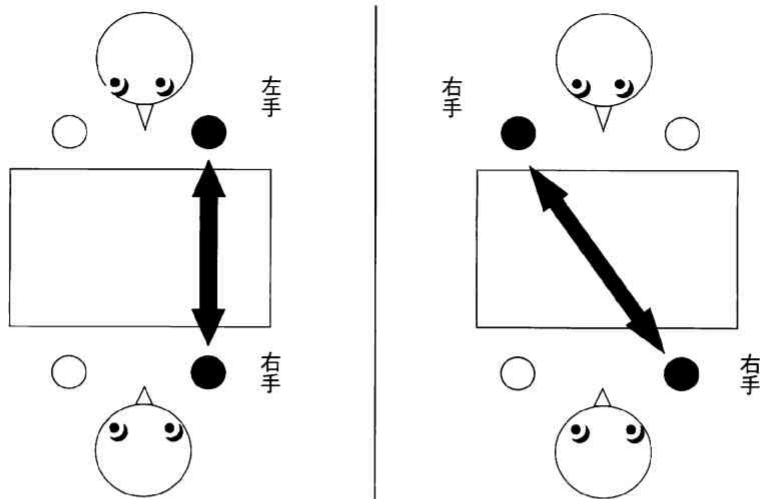


図1 鏡模倣と解剖模倣のそれぞれの位置関係

課題の手に対して鏡を見ているような位置関係で運動を実行する条件を鏡模倣（左図）とし、課題の手と解剖学的に同側の手を使用して運動を実行する条件を解剖模倣（右図）とした。

している可能性がある。今までに鏡模倣時の脳活動について報告している研究は多数存在しているが、解剖模倣の神経基盤についてはほとんど明らかにされていない。数少ない解剖模倣に関する報告のうち Koski らの研究では、解剖模倣 vs. コントロール課題時の有意な活動が、右頭頂弁蓋・左中心傍小葉・右中側頭溝で認められている⁶⁾が、その脳内活動の特性については詳しく言及されていない。また、模倣の研究では被験者の利き手使用時の模倣については多く報告されているが、非利き手における模倣時のメカニズムについてはほとんど扱われていない。しかし、実際の communication では利き手のみならず、非利き手、ひいては両手での模倣動作も多く観察される。したがって、利き手と非利き手での模倣実行時の脳活動の違いを明らかにすることは、模倣のメカニズムを理解する上で重要である。

本研究では、利き手または非利き手が解剖模倣を行っている際の脳活動の特徴を明らかにすることを目的として、機能的磁気共鳴画像法（functional Magnetic Resonance Imaging ; fMRI）を用い、左右手指による解剖模倣と鏡模倣の脳活動の違いについて比較・検討した。

II 方法

1. 被験者

11人の健常女性ボランティア（平均年齢 22.2 ± 3.20 歳，18歳～30歳）を対象とした。いずれの被験者も、神経障害または精神医学的な既往歴はなく、裸眼あるいは矯正視力で1.0以上であり、Chapmanの利き手検査⁷⁾により右利きと判断された（平均 13 ± 0 点）。全員に対し事前に口頭と書面で十分に研究内容を説明し、研究協力の承諾を得た。本研究は東京都立保健科学大学研究倫理審査規定に基づくものである。

2. 実験デザイン

刺激は、片手（右もしくは左）がテーブル上に置かれた状態から、示指もしくは中指のもちあげという単純な運動を定期的に行っている動画とした。動画の手は、被験者に対して向い合わせの位置で提示した（図2）。これらの指あげ運動は示指・中指共に2秒ごとに各5回ずつ、計10回（20秒）を1ブロック中ランダムに提示した。1つの課題はrest画面（20秒提示）を挟む4ブロックで構成された（鏡・解剖×右手・左手）。被験者には、動画中で示される運動をできるだけ早く模倣することを要求した。被験者には、課題ごとに使用する手をその都度教示スライドで20秒間指示した。

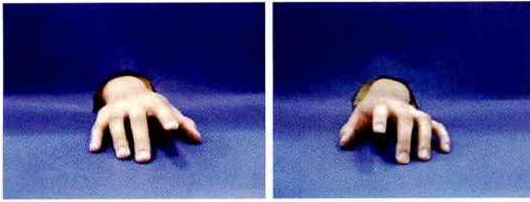


図2 提示画像の一例

動画は、被験者と向かい合わせの位置になるように提示された。

左：右手動作，右：左手動作

被験者がいずれの手で模倣するかによって，解剖条件と鏡条件に分類した。

被験者がビデオ上の左手（右手）の運動を見て，自身の右手（左手）を使用してこれを模倣するとき，この状態を鏡模倣と定義し，一方で被験者がビデオ上の左手（右手）を見て，自身の左手（右手）を使用してこれを模倣する状態を解剖模倣と定義した。これらの条件の提示パターンは，1課題のうちの前半に右手実行課題，後半に左手実行課題の順で提示した。1課題あたり160秒提示とし，fMRI計測で3課題実施した。画像は，MRI撮像室内のスクリーン上に縦36.0cm×横43.0cm，視角度は縦12.9°，横10.8°として液晶プロジェクタによって投射し，被験者はfMRIの頭部付近に設置された鏡を通してスクリーンに投射された画像を見た。

被験者が正しい指運動を行ったかどうか確認するため，模倣動作は2台のビデオカメラでモニターした。被験者には，運動予測を行わない，指あげの回数などをカウントしないことを事前に指示した。

3. データ計測

計測には，1.5TのfMRI装置（Signa Horizon LX, General Electric, Milwaukee, WI）を使用した。受信コイルとして，バードケージ型QDヘッドコイルを用い，撮像範囲は側頭下部から頭頂までを含むようにした。echo-planar imaging (EPI) MR sequenceにより撮像し，そのパラメータは，TR = 4,000 ms, TE = 90.5 ms, flip angle = 80°, matrix size = 128 × 128 pixels, FOV = 240 × 240 mm², slice thickness = 6.0 mmとした。

加えて，解剖画像の撮像は，fast SPGR法によ

るT1強調画像を用いた。撮像パラメータは axial plane, TR = 26.0 ms, TE = 2.4 ms, flip angle = 30°, matrix size = 256 × 256 pixels, slice thickness = 2.3 mm, FOV = 240 × 240 mm²とした。撮像範囲は小脳下部から頭頂までを含むようにした。

4. 統計解析

解剖模倣と鏡模倣の間の誤答率の違いと，左手模倣と右手模倣の間の誤答率の違いについて評価するためにOne-Way ANOVAを用いて分析を行った。

fMRIデータの解析は，MatLab（Math Works社製）上で開発されたSPM99（Statistical Parametric Mapping；<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm99/>）を用いて行った。解析は，fMRIデータの安定性を考慮し，最初の10スキャンを除外して分析した。realign, reslice, normalize, smoothingの後に集団データについて $P < 0.001$ （uncorrected for multiple spatial comparisons）でrandom effects analysisを実施した。本研究では，主効果として解剖模倣 vs. 鏡模倣，さらに実行する手の条件を各々加えた単純主効果の合計3つのコントラストについて分析した。

III 結果

1. 課題誤答率の分析結果

課題遂行中のビデオ観察結果から，誤答率は鏡模倣よりも解剖模倣において高い傾向であったが， $P < 0.05$ で有意差は認められなかった（解剖模倣； $3.33 \pm 1.18\%$ ，鏡模倣； $1.52 \pm 0.52\%$ ）。

2. fMRI データ

1) 鏡模倣と比較した際の解剖模倣の特徴的脳活動（以下，解剖模倣 vs. 鏡模倣とする）

解剖模倣 vs. 鏡模倣の間，両側上前頭回（superior frontal gyrus；SFG），両側下前頭回（inferior frontal gyrus；IFG 右半球 BA45・46，左半球 BA44），両側中前頭回（middle frontal gyrus；MFG），左内側前頭回（medial frontal gyrus；mFG），左下頭頂小葉（inferior parietal lobule；IPL），両側楔前部（precuneus）と左下側頭回（inferior temporal gyrus；ITG）において，脳活動が認められた（表1，図3-A）。

表 1 解剖模倣 vs. 鏡模倣における有意な賦活部位 ($P < 0.001$ uncorrected, $N = 11$)

L/R	Location	BA	MNI			t	voxels
			x	y	z		
R	superior frontal gyrus	10	24	62	-4	6.19	48
R		11	22	50	-8	5.19	48
L		9	-22	48	34	5.26	20
R	inferior frontal gyrus	8, 45, 46	54	24	22	8.42	567
L		44	-48	12	18	5.74	52
R	middle frontal gyrus	6	26	12	46	6.72	567
R		9	42	34	24	5.86	567
R		10	42	54	18	5.33	7
R		12	36	38	-12	5.83	26
L		9	-48	8	38	4.37	10
L		10, 46	-32	42	2	5.55	107
L		10	-32	50	-2	5.06	107
L		10	-38	56	8	4.36	6
L		10, 32	-36	40	10	4.66	107
L		8	-12	16	50	4.4	6
L	medial frontal gyrus	8	-10	32	46	5.23	28
L	inferior parietal lobule	40	-64	-34	32	4.26	1
L		40	-62	-30	32	4.24	1
R	precuneus	7	20	-68	32	4.96	18
R		19	48	-72	34	5.71	27
L		7	-14	-72	40	5.36	43
L	inferior temporal gyrus	20	-56	-50	-18	5.4	17

最左列は大脳半球を示す (L = 左半球, R = 右半球)。

Location は有意な脳賦活部位, BA = Brodmann area, MNI = Montreal Neurological Institute coordinate で, 各領域の座標を示す ($t > 4.15$)。

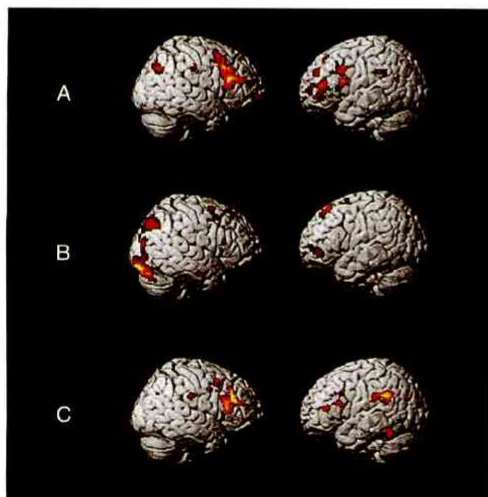


図 3 解剖模倣 vs. 鏡模倣で有意に賦活する領域

($P < 0.005$ uncorrected for illustration)

(A) 解剖模倣 vs. 鏡模倣 (主効果) において, 解剖模倣で賦活した領域。

(B) 右手使用時の解剖模倣 vs. 鏡模倣において賦活した領域。

(C) 左手使用時の解剖模倣 vs. 鏡模倣において賦活した領域。

A では, 両側 IFG や SFG・MFG などの活動のほか, 両側楔前部などの活動が認められた。

B では, 左 SFG, 右 IFG, 右 SPL, 右 IPL や右楔前部の活動が認められた。

C では, 右 MFG, IFG, 左縁上回, 両側 IPL, 左楔前部, 左上側頭回などの活動が認められた。

2) 右手使用時の解剖模倣 vs. 鏡模倣と関連した脳活動

被験者が右手 (利き手) を使用している時の解剖模倣 vs. 鏡模倣の際には, 左 SFG, 左 mFG,

右 MFG, 右 IFG (BA45), 右帯状回, 右上頭頂小葉 (superior parietal lobule; SPL), 右 IPL, 右中心傍小葉 (paracentral lobule), 右楔前部, 右楔部 (cuneus), 左上後頭回 (superior occipital

gyrus ; SOG), 右中後頭回 (middle occipital gyrus ; MOG) と右紡錘状回 (fusiform gyrus) / 舌状回 (lingual gyrus) で有意な活動が認められた (表 2, 図 3-B)。

3) 左手使用時の解剖模倣 vs. 鏡模倣と関連した脳活動

被験者が左手 (非利き手) を使用した際の解剖模倣 vs. 鏡模倣の条件では, 右 MFG, 右 IFG, 右中心傍小葉, 左縁上回 (supramarginal gyrus), 両側 IPL, 左楔前部, 左上側頭回 (superior temporal gyrus ; STG), 左 ITG で脳活動が確認された (表 2, 図 3-C)。

IV 考察

1. 模倣における下前頭回 (IFG) の役割

解剖模倣 vs. 鏡模倣 (主効果) において, 左の IFG (BA44) と右 IFG (BA45) で脳活動が認められた。Broca 野は, 言語に関与する領域として古くから知られているが, 近年では指運動の実行・想像・模倣・観察を含むいくつかの運動課題を遂行している間, Broca 野の活動が増加するという報告がある^{8,9)}。Mirror Neuron System は, 人間の脳の頭頂領域から IFG (BA44/45) に存在するといわれている¹²⁾。IFG の Mirror Neuron System は模倣する動きの目的や意図をコード化する¹⁰⁾ が, 頭頂領域の Mirror Neuron System は模倣する動きの運動表象をコード化する^{11,12)}。これらのことから, 本研究で認められた左 IFG の活動は, 鏡模倣と比較してより複雑で難しい解剖模倣の対象の動作の目的をコード化する役割を果たしていた可能性が考えられる。

Broca 野の右半球相同部位は, いわゆる“反応抑制 Response Inhibition”との関連性が, neuroimaging 研究において示唆されている^{13~15)}。サルではこの領域 (下前頭葉前部凸面) の相同部位損傷で, 反応抑制の必要な No-Go 課題の成績が下がることが報告されており¹⁶⁾, ヒトでは一側性の右前頭前野損傷患者の神経心理学研究によって, 右 IFG が行動の抑制には欠くことのできない領域であることが示されている¹⁷⁾。本研究では, 鏡模倣で被験者の誤答率がより低い傾向にあったが, これは, 自然な状況下では, 提示さ

れた手と鏡の位置関係にある側の手を使用してしまいうためであると考えられる。実際行動学上では古くから, 鏡の位置関係で手を使用している運動は, より自然に模倣されることが示されている^{18,19)}。そのため, 解剖模倣の条件では, 教示された運動を正確に模倣するために, 自然に起こってしまう運動を抑制する必要があると考えられる。従って, 今回の解剖模倣 vs. 鏡模倣における右 IFG の活動は, 各々の手で解剖模倣を行っている間, 自然に起こってしまう動きを抑制していたと考えられる。

2. 背側運動前野 (PMd) と課題難易度の関連性

単純主効果の結果, 右背側運動前野 (PMd) が被験者の使用している手に関わらず解剖模倣のときに有意に活動していることがわかった。Sadato らは, 左右の指が平行に動く両手指運動と, 鏡を通しているかのように左右対称な動きをする両手指運動中の脳活動を計測した。その結果, 鏡を見ているかのように運動している時よりも, 指同士が平行な運動を実施している時のほうが, 右 PMd がより強く活動した²⁰⁾。Ehrsson らの fMRI 研究²¹⁾ では, precision-grip 課題中に両側の PMd の活動が, power-grip 課題中に左 PMd の活動が認められた。このことから, 細かい, あるいは運動配列情報がより必要とされるような条件の際に, 右 PMd の活動は重要な役割を果たすと考えることができる。またこの部位は, mental rotation 課題において視覚刺激の隠れた部分の明視化に関連して活動することから, 右 PMd が回転次元の高次元化に伴う課題困難性に関係していることも示されている²²⁾。従って今回の解剖模倣時の右 PMd の活動は, 暗示的に左右手の運動表象の綿密な調整が要求されるという, 解剖模倣独特の困難さに対応している可能性がある。

3. 利き手/非利き手使用時の解剖模倣

本研究での楔前部は, 右手と左手のそれぞれの解剖模倣において有意な活動を示した。楔前部が眼球運動を含んだ視空間課題²³⁾, 視覚的注意のシフト²⁴⁾, 立体物または身体部位の mental rotation²⁵⁾, specific mental navigation network²⁶⁾ に関与することが知られている。したがって本研究

表2 右手使用および左手使用における解剖模倣 vs. 鏡模倣の有意な賦活部位
($P < 0.001$ uncorrected, $N = 11$)

解剖模倣 vs. 鏡模倣 (右手使用時)							
L/R	Location	BA	MNI			t	voxels
			x	y	z		
L	superior frontal gyrus	8	-14	34	60	5.2	24
L	medial frontal gyrus	8	-2	40	48	6.78	125
L		8	-10	16	52	4.95	43
L		10	-34	44	0	6.06	53
L		10	-38	54	4	4.21	1
R	middle frontal gyrus	6	26	4	64	4.6	7
R		6	28	10	50	4.69	15
R	inferior frontal gyrus	45	54	22	20	5.36	13
R	cingulate gyrus	31	0	-40	44	4.19	1
R	superior parietal lobule	7	28	-78	46	5.26	114
R		7	34	-80	40	5.1	114
R	inferior parietal lobule	7	40	-72	46	4.25	114
R	paracentral lobule	5	4	-42	60	5	13
R	precuneus	7	2	-54	44	4.84	4
R	cuneus	18	10	-90	20	4.92	15
L	superior occipital gyrus	19	-40	-74	28	4.83	5
R	middle occipital gyrus	19	32	-88	16	6.53	36
R		18	34	-86	-2	4.54	15
R	lingual gyrus	18	18	-92	-18	11.81	1702
R		—	6	-78	-18	10.8	1702
R	fusiform gyrus	19	26	-96	-16	9.28	1702
R		—	30	-46	-14	4.39	32

解剖模倣 vs. 鏡模倣 (左手使用時)							
L/R	Location	BA	MNI			t	voxels
			x	y	z		
R	middle frontal gyrus	8	18	18	48	4.96	80
R		10	24	56	-2	4.45	1
R		46	42	34	26	5.25	74
R		9	36	28	38	5.23	22
R		8	28	10	48	4.64	80
R		11	28	34	-22	4.41	2
R		6	26	-12	48	4.2	2
R	inferior frontal gyrus	47	34	32	2	6.62	76
R		47	36	34	-6	5.17	76
R		46	48	24	26	4.91	74
R		45	48	24	14	4.22	1
R	paracentral lobule	6	16	-20	48	4.15	1
L	spramarginal gyrus	40	-60	-46	34	4.16	2
L	inferior parietal lobule	40	-64	-30	30	5.6	24
R		40	64	-26	32	4.57	6
L	precuneus	7	-12	-70	40	6.39	95
L		7	-10	-62	38	5.77	95
L	superior temporal gyrus	40	-50	-46	24	4.67	15
L	inferior temporal gyrus	37	-52	-50	-20	7.29	31

上側は右手使用時の解剖模倣 vs. 鏡模倣の脳賦活を示し、下側は左手使用時の解剖模倣 vs. 鏡模倣を示す。各々の表の最左列は大脳半球を示す (L = 左半球, R = 右半球)。Location は有意な脳賦活部位, BA = Brodmann area, MNI = Montreal Neurological Institute coordinate で、各領域の座標を示す ($t > 4.15$)。

においては、被験者は、鏡模倣より解剖模倣のほうで、示された手の動きに多くの注意をむけていたと考えられる。また、楔前部の活動は使用している手と同側の脳半球で認められたが、これは、以下のように考えることができる。本課題では、被験者が右手で解剖模倣をしていた時には画面上に左から伸びてくる右手が提示されており、左手で解剖模倣をしていた時には右側から伸びてくる左手が提示されている。そのため運動のみならず、提示されている手の空間的な座標に対応して、左側から伸びる手を認知している時には右半球が、右側から伸びる手を認知している時には左半球が、各々の条件で活動した可能性が考えられる。

左手使用時の解剖模倣の際には、左縁上回を含む側頭一頭頂領域 (temporo-parietal junction ; TPJ) の活動も認められた。この活動は両側に存在していたが、左半球の活動が特に有意に認められた。PETを用いた先行論文では、模倣を含んだ条件で左 TPJ と IPL の活動が報告されている²⁷⁾。左半球頭頂領域の活動はジェスチャー模倣にも関係していることが示されている²⁸⁾。また、TPJ は、運動前野 (premotor area ; PM) と双方向性につながっており、運動注意と運動選択が左 TPJ の活動を引き起こすという報告もある²⁹⁾。以上のことから左手使用時における左 TPJ の活動は、提示された手の運動の視覚的分析に関与し、この視覚的情報を運動情報へ変換することに関与している可能性が考えられる。一方右手使用時の解剖模倣 vs. 鏡模倣の条件では、TPJ の活動は認められなかった。これは、右手を使用した模倣が、右利きの被験者にとっては通常の状態であったために、複雑な視覚的分析が必要とされなかったかのではないかと推測される。

V 結論

右利き被験者について、鏡条件に対する解剖条件での模倣、および利き手と非利き手での解剖模倣時の脳活動について検討した。その結果、解剖模倣 vs. 鏡模倣における右 IFG の活動は、各々の手で解剖模倣を行っている間、自然に起こってしまう鏡動作の動きを抑制し、一方で左 IFG は、鏡模倣と比較してより複雑で難しい対象の動きを

コード化する役割を果たしていた可能性が考えられた。また、同条件における右 PMd の活動は、暗示的に左右手の運動表象の調整を要求されるという、解剖模倣の特徴的な困難さと関係している可能性を示唆した。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金若手(B) (18700464) の助成を受けたものである。

実験及び論文作成にあたり、多くのご指導をいただいた諸先生方に深謝申し上げます。また、実験を実施するにあたりご協力いただいた被験者の皆様に感謝いたします。

文献

- 1) Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, et al. : Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Res Cogn Brain Res* 3 : 131-141, 1996.
- 2) Schaal S : Is imitation learning the route to humanoid robots? *Trends Cogn Sci* 3 : 233-242, 1999.
- 3) Gallese V, Goldman A : Mirror neurons and the simulation theory of mind reading. *Trends Cogn Sci* 2 : 493-501, 1998.
- 4) Fadiga L, Craighero L, Buccino G, et al. : Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles : a TMS study. *Eur J Neurosci* 15, 399-402, 2002.
- 5) Bekkering H, Wohlschlaerer A, Gattis M : Imitation of gestures in children is goal-directed. *Q J Exp Psychol A* 53 : 153-164, 2000.
- 6) Koski L, Iacoboni M, Dubeau M-C, et al. : Modulation of cortical activity during different imitative behaviors. *J Neurophysiol* 89 : 460-471, 2003.
- 7) Chapman L J, Chapman J P : The measurement of handedness. *Brain Cogn* 6 : 175-183, 1987.
- 8) Binkofski F, Amunts K, Stephan K M, et al. : Broca's region subserves imagery of motion : a combined cytoarchitecnic and fMRI study. *Hum Brain Map* 11 : 273-285, 2000.
- 9) Iacoboni M, Woods R P, Brass M, et al. : Cortical mechanisms of human imitation. *Science* 286 : 2526-2528, 1999.
- 10) Iacoboni M, Molnar-Szakacs I, Gallese V, et al. : Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. *PLOS biology* 3(3), 0529-

- 0535, 2005.
- 11) Iacoboni M, Koski L, Brass M, et al. : Reafferent copies of imitated actions in the right superior temporal cortex. *Proc Natl Acad Sci USA* 98 : 13995-13999, 2001.
 - 12) Koski L, Wohlschlagel A, Bekkering H, et al. : Modulation of motor and premotor activity during imitation of target-directed actions. *Cereb Cortex* 12 : 847-855, 2002.
 - 13) Bunge S A, Dudukovic N M, Thomason M E, et al. : Immature frontal lobe contributions to cognitive control in children : evidence from fMRI. *Neuron* 33 : 301-311, 2002.
 - 14) Garavan H, Ross T J, Murphy K, et al. : Dissociable executive functions in the dynamic control of behavior : inhibition, error detection, and correction. *Neuroimage* 17 : 1820-1829, 2002.
 - 15) Rubia K, Smith A B, Brammer M J, et al. : Right inferior prefrontal cortex mediates response inhibition while mesial prefrontal cortex is responsible for error detection. *Neuroimage* 20 : 351-358, 2003.
 - 16) Iversen S D, Mishkin M : Perseverative interference in monkeys following selective lesions of the inferior prefrontal convexity. *Exp. Brain Res* 11 : 376-386, 1970.
 - 17) Aron A R, Fletcher P C, Bullmore E T, et al. : Stop-signal inhibition disrupted by damage to right inferior frontal gyrus in humans. *Nat Neurosci* 6 : 115-116, 2003.
 - 18) Kephart, N C : The slow learner in the classroom. Columbus, Charles E. Merrill Publishing Company, 1971.
 - 19) Schofield W N : Do children find movements which cross the body midline difficult? *Q J Exp Psychol* 28 : 571-582, 1976.
 - 20) Sadato N, Yonekura Y, Waki A, et al. : Role of the supplementary motor area and the right premotor cortex in the coordination of bimanual finger movement. *J Neurosci* 17 : 9667-9674, 1997.
 - 21) Ehrsson H H, Fagergren A, Jonsson T, et al. : Cortical activity in precision-versus power-grip tasks : an fMRI study. *J. Neurophysiol* 83 : 528-536, 2000.
 - 22) Kawamichi H, Kikuchi Y, Noriuchi M, et al. : Distinct neural correlates underlying two- and three-dimensional mental rotations using three-dimensional objects. *Brain Res* 1144 : 117-126, 2007.
 - 23) Kawashima R, Naitoh E, Matsumura M, et al. : Topographic representation in human intraparietal sulcus of reaching and saccade. *Neuroreport* 7 : 1253-1256, 1996.
 - 24) Corbetta M, Kincade J M, Ollinger J M, et al. : Voluntary orientating is dissociated from target detection in human posterior parietal cortex. *Nat Neuroscience* 3 : 292-297, 2000.
 - 25) Richter W, Somorjai R, Summers R, et al. : Motor area activity during mental rotation studied by time-resolved single-trial fMRI. *J Cogn Neurosci* 12 : 310-320, 2000.
 - 26) Ghaem O, Mellet E, Crivello F, et al. : Mental navigation along memorized routes activated the hippocampus, precuneus, and insula. *Neuroreport* 8 : 739-744, 1997.
 - 27) Decety J, Chaminade T, Grezes J, et al. : A PET exploration of the neural mechanisms involved in reciprocal imitation. *Neuroimage* 15 : 265-272, 2002.
 - 28) Muhlau M, Hermsdorfer J, Goldenberg G, et al. : Left inferior parietal dominance in gesture imitation; an fMRI study. *Neuropsychologia* 43 : 1086-1098, 2005.
 - 29) Decety J, Grezes J : The power of simulation ; imagining one's own and other's behavior. *Brain Res* 1079 : 4-14, 2006.

Abstract : Imitation plays a very important role in human cognition and communicative competence. Individuals tend to imitate the hand actions of another person as if looking in a mirror (specular imitation) than with the anatomically congruent hand (anatomic imitation). We focused on the problem why anatomic imitation is more difficult than specular imitation. To understand the neural substrates of the anatomic imitation versus the specular imitation with the left or right hand, eleven normal female subjects who imitated the finger movements of an actor using the anatomically congruent or incongruent hand were examined using functional magnetic resonance imaging (fMRI). As a result, the error rate tended to be higher for anatomic imitation than for specular imitation, and the bilateral inferior frontal gyri (IFG) and the right dorsal premotor cortex (PMd) were activated during anatomic imitation versus specular imitation, irrespective of the hand used. Especially the right IFG activity may inhibit the motor representation associated with the preferred movement of imitating the actor's hand movement as if looking in a mirror. The right PMd which was activated during anatomic imitation might be involved in some difficulties associated with the imitation in which the subjects were required to carefully and internally coordinate the motor representation of the left and right hands. On the other hand, the left IFG might encode more complex and difficult goal compared with that in the specular imitation.

Key words : anatomic imitation, specular imitation, inferior frontal gyrus (IFG), dorsal premotor cortex (PMd), mirror neuron

(2008年8月1日 原稿受付)