■原 著

非利き手による箸操作の運動時, イメージ時, 模倣時の脳内機構の比較

—機能的MRIの検討—

*Neural Correlates of Chopsticks Exercise for the Non-Dominant Hand; Comparison Among
the Movement, Images and Imitations*

—A Functional MRI Study—

松田 雅弘¹⁾ 渡邊 修²⁾ 来間 弘展²⁾ 村上 仁之³⁾
渡邊 壘⁴⁾ 妹尾 淳史²⁾ 米本 恭三²⁾

TADAMITSU MATSUDA, RPT, PhD¹⁾, SHU WATANABE, MD, PhD²⁾, HIRONOBU KURUMA, RPT, PhD²⁾,
YOSHIYUKI MURAKAMI, RPT, MS³⁾, RUI WATANABE, RPT, MS⁴⁾, ATSUSHI SENOO, RT, PhD²⁾,
KYOZO YONEMOTO, MD, PhD²⁾

¹⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Ryotokuji University: 5-8-1 Akemi, Urayasu, Chiba 279-8567,
Japan. TEL +81 47-382-2598 E-mail matsuda@ryotokuji-u.ac.jp

²⁾ Graduate School of Human Health Sciences, Tokyo Metropolitan University

³⁾ Department of Physical Therapy, Uekusa Gakuen University

⁴⁾ Department of Physical Therapy, Kiyose Rehabilitation Hospital

Rigakuryoho Kagaku 26(1): 117-122, 2010. Submitted Aug. 18, 2010. Accepted Sep. 26, 2010.

ABSTRACT: [Purpose] After stroke with dominant hand paralysis, patients practice chopstick movements with the non-dominant hand. The aim of this study was to investigate neural activities of chopstick movements, imaging and imitations with the non-dominant hand by functional MRI. [Subjects] The subjects were 5 right-handed healthy adults (mean age, 20.7 yrs) with no significant medical history or current medical problems. [Methods] We compared neural activities in the brain by 3.0T functional MRI during a chopsticks task performance, imaging and imitations. [Results] The chopsticks task activated the bilateral sensorimotor cortex (SMC) and supplementary motor area, cerebellum, inferior parietal lobule, basal ganglia and right Brodmann area 44. The imaging task activated similar parts, but not the left SMC and cerebellum. The imitation task activated bilateral SMC, SMA, inferior/superior parietal lobule and Brodmann area 44. [Conclusion] The motor image and imitation task both induced activities in the areas stimulated when performing the actual task. We conclude that rehabilitation exercises should include motor imaging and imitation of chopsticks movement.

Key words: functional MRI, chopsticks movement, motor image, imitation

要旨: [目的] 脳卒中により利き手側の片麻痺を呈した場合, 利き手交換練習を行うことが多い。そのため健常者における非利き手での箸操作の運動時, イメージ時, 模倣時の脳神経活動を明らかにした。[対象] 神経学的な疾患の既往のない右利き健常成人5名(平均年齢20.7歳)とした。[方法] 課題は, 左手箸操作運動課題, 左手箸操作イメージ課題, 左手箸操作の映像をみながら箸操作運動課題(模倣課題)の3種類とし, その間の脳内活動を3.0T MRI装置にて撮像した。[結果] 運動課題では左右感覚運動野・補足運動野・小脳・下頭頂小葉・基底核・右Brodmann area 44が賦活した。イメージ課題では, 運動課題と比べ左感覚運動野・小脳の賦活が消失していた。模倣課題では, 左右感覚運動野・補足運動野・上下頭頂小葉・Brodmann area 44が賦活した。[結語] イメージ課題と模倣課題には, 運動課題時に賦活する領域を両課題とも補う傾向にあることから, 箸操作訓練の際には運動課題のみではなく両者を取り入れて行う意味があることが示唆された。

キーワード: 機能的MRI, 箸操作, 運動イメージ

¹⁾ 了徳寺大学 健康科学部理学療法学科: 千葉県浦安市明海5-8-1 (〒279-8567) TEL 047-382-2598

²⁾ 首都大学東京 人間健康科学研究科 ³⁾ 植草学園大学 保健医療学部 理学療法学科 ⁴⁾ 清瀬リハビリテーション病院

I. はじめに

脳卒中において利き手側の脳卒中片麻痺を呈した場合、麻痺の程度が重度であれば非利き手側でADL動作を遂行することとなるため、リハビリテーションの一環として利き手交換練習が実施されている。特に日本人は食事動作で箸を利用するために、食事動作の自立を目標にして非利き手による箸操作の練習を行う。非利き手動作は利き手による運動が成熟した後の運動学習であり、利き手側で同様の運動を獲得していたとしても新規動作の獲得と同様に時間を要する。利き手の変さらにより、食事動作の自立が可能となる報告もみられる¹⁾。このように、利き手交換練習は、ADL動作の自立に寄与することが知られている。

非利き手による箸操作などの運動を教示し、患者が運動学習を進める上で、運動イメージを想起させることや運動を観察しながらの動作遂行が有効であることが脳機能の面から支持されている。特にミラーニューロンの発見により、運動の観察が幅広く脳内活動に影響し、運動前野の活動を向上させることが知られている。近年注目されているAction observation therapy (運動観察療法) は、目的とする動作を観察する手法であり、ミラーニューロンの発見が生理学的基盤となっている²⁾。Ertelt Dら³⁾は中等度運動障害を呈する慢性期脳卒中患者に、他者が実施している上肢の54種類の目的動作をビデオで観察させ、その後観察した動作と同じ動作を反復練習する介入を実施した。その結果、コントロール群と比較して実験群に有意な上肢の機能改善がみられ、さらに機能的fMRI (functional MRI : fMRI) 所見よりミラーニューロンを含む両側腹側運動前野、両側上側頭回、補足運動野、対側縁上回が活性化された。これらの脳活動領域は運動を行う準備に必要であり、動作を観察することで運動関連領域の活動性が向上したものと考えられた。その他にも運動関連領域の活性化には観察を伴う運動が重要であるとする報告³⁾がある。つまり、運動イメージ単独でも運動関連領域の活動は認められている⁴⁾が、観察を組み合わせることによって神経活動のさらなる増加が見込まれている。松尾ら⁴⁾も、運動実行のみならず運動観察・運動イメージでも同様に運動関連領域の活動が起こったことを報告している。動作を観察、模倣する過程は、他者の脳内運動プログラムを自己脳内で再現することであり、ミラーニューロンシステムと運動制御の関わり的重要性を強調している⁵⁾。目的動作を前方で患者にセラピストが直接提示する以外にも、ビデオの使用や写真の使用などで観察を行い、その動きをイメージさせ、実行させることによって目的動作遂行能力の改善に寄与すると考えられる。

その他にも運動学習を行っている際の脳内活動についての報告は数多くある。Jenkinsら⁶⁾は習熟していなく、意識化で学習する場合は、前頭連合野、運動前野、頭頂連合野、小脳が働くが、習熟後の動きのためには海馬、補足運動野、後頭部領域の働きが重要であるとしている。また一方、Raymondら⁷⁾は運動の手続きの学習は大腦基底核と大腦皮質との相互作用で行われ、その学習を繰り返すことで運動の手続きが補足運動野や運動前野に蓄えられるとしている。また、フィードバック機構、フィードフォワード機構などによる協調性は動作の学習として小脳によって獲得されると報告した。また運動学習に関与する脳領域についてスキル獲得前後にfMRIを用いて検討した結果⁸⁾、一次運動野の活性化の低下が起こった。これは、ばらばらの運動ではなく一つのスキルとして実行されるようになったためである。このような報告はfMRIなどによって非侵襲的に脳活動を捉えられるようになることで、加速的に研究が進行している。しかし、その手法は実際のADL動作と直結しているものではなく、閉鎖的な実験環境上の問題でタッピングなどの動作を主体としているため、ADL動作時の脳内活動の検討は不十分である。さらに利き手交換練習の方法は様々な方法がとられているが、脳内活動についての報告は少ない。そこで今回ADL動作の1つとして、箸操作時の運動、運動イメージ、箸操作の観察をしながら運動した時の脳内活動について比較検討を行った。

II. 対象と方法

1. 対象

対象は神経学的な疾患の既往のない健康成人5名(20～21歳、平均年齢20.7歳)であった。利き手は全員、エディンバラ利き手テスト⁹⁾にてラテラリティ係数100%の右利きであることを確認した。また、すべての対象者に実験の趣旨を説明し、参加することの承諾を得た。

2. 方法

課題は3種類設定した。第1課題は開眼にて「運動課題」と記載された画像を見ながら左手にて箸を把持して箸先端を合わせる運動の課題(以下;運動課題)とした。第2課題は左手で箸を持っている映像をみせて実際に箸操作運動を行わずに、箸操作を行っているときをイメージさせる課題(以下;運動イメージ課題)とした。第3課題は左手で箸操作を行っている映像をみながら運動課題と同様の箸操作運動を行う課題(以下;模倣課題)とした。箸操作はどの課題ともできるだけ速い速度で、連続的に箸操作、またはそのイメージをさせる課題とした。MRI装置に入る前にすべての課題

を行う前に、実験課題をMRI室内で確実に遂行できるため非利き手による箸操作の練習を5分行った。

スキャン時間はこれらの課題および安静を各々30秒間とし、3種類の課題はランダムに配置し、各課題間は安静を挟む（ブロックデザイン）ようにして撮像した。MRIの中では被験者は仰臥位とし、フォームパットで頭部をヘッドレストに固定し、防音用にヘッドホンと、映像を確認するためのゴーグルを装着させた。どの課題時も被験者には開眼にさせ、両上肢は体幹側面に安楽に置くように指示し、課題中は体側側面にて課題を実施させた。

使用装置はPhilips社製3.0T臨床用MR装置（Signa Horizon）を使用した。fMRIの測定には標準ヘッドコイルを用いEcho Planar法（GRE type）にて、TR（ms）/TE/FA（deg）=3000/35/90、FOV230 mm、スライス厚5 mm（スライドキャップ0 mm）、スライス枚数25、マトリックスサイズ128×128の条件で撮像した。

測定データはMatlab（Math Works）上の統計処理ソフトウェアSPM2（Wellcome Department of Cognitive Neurology, London）を用いて解析を行った。解析はまず被験者の体動による位置補正、各被験者のタライラッハ空間への脳の標準化、Gaussian filterによる平滑化（FWHM：8 mm）を実施した。その後、集団解析にて被験者全員（5人）の脳画像をタライラッハ標準脳の上に重ね合わせて、MR信号強度がuncorrectedで有意水準（ $p<0.001$ ）をこえる部位を求めた。

さらに、関心領域（Region of Interests；ROI）は、感覚運動野（Sensorimotor cortex；SMC）、補足運動野（Supplementary motor cortex；SMA）、大脳基底核、小脳、上頭頂小葉（superior parietal lobule；SPL）、下頭頂小葉（inferior parietal lobule；IPL）、Brodmann area44（BA 44）、前頭前野（Brodmann area9, 10, 11, 46）とし、WFU PickAtlas（<http://www.fmri.wfubmc.edu/cms/software>）を用いて抽出した。

III. 結果

集団解析の結果を図1～3に示した。運動課題では両側SMC、両側SMA、両側IPL、右BA 44、両側大脳基底核、両側小脳、両側前頭前野の賦活が認められた（図1）。運動イメージ課題では、右SMC、両側SMA、両側SPL・IPL、両側BA44、両側大脳基底核、前頭前野の賦活がみられ、運動課題でみられた左SMCと両側小脳の活動が消失した（図2）。模倣課題では、両側SMC、両側SMA、両側SPL・IPL、両側BA 44、左前頭前野の賦活が認められた（図3）。

最も広範囲に賦活が認められたのは表1より運動課題で、広く今回定めたROIである運動関連領域での活

図1 非利き手運動課題時の脳内活動の集団解析（n=5）

A：矢状面，B：前額面，C：水平面

図2 非利き手運動イメージ課題時の脳内活動の集団解析（n=5）

A：矢状面，B：前額面，C：水平面

動が認められた。次に活動範囲が広いのは模倣課題であり両側運動関連領域の活動がみられ、運動イメージ課題が最も活動範囲は狭かったが、運動関連領域の活動が認められた。また模倣課題ではROIで定めた領域全てで賦活がみられた。運動イメージ課題時も運動課題時と同様に運動関連領域の活動が広く認められ、さらに模倣課題時・運動イメージ課題時もIPL、BA 44の活動が両側広範囲にみられた。

図3 非利き手模倣課題時の脳内活動の集団解析 (n=5)
A : 矢状面, B : 前額面, C : 水平面

IV. 考 察

科学の発展により非侵襲的な手法を用いて随意運動時、認知課題時の脳内活動が明らかになってきた。しかし、MRIでは装置内の広さや、頭部固定による身体的な拘束が強く運動課題に制限が加えられる。そのためリハビリテーションのADL治療にみられる運動範囲の広い動作はfMRIによる計測は困難であることから、今まで指のタッピングなどの単純動作の研究結果をもとにその脳内活動を推定することが行われてきた。今回取り上げた非利き手による箸操作練習は身体的な拘束があってもfMRIでの実験が可能であり、実際の動作での脳内活動の検出が可能となる。そこで非利き手で箸操作を行う運動課題時、箸の画像をみせ非利き手は箸操作をイメージさせる運動イメージ課題時、実際の箸操作の映像をみながら非利き手の箸操作を行う模倣課題時の脳内活動について定量的・定性的に分析した。

ミラーニューロンシステム (Mirror neuron system : MNS) は、ヒトではブローカー野 (BA 44)、下頭頂葉 (IPL)、上側頭溝領域 (superior temporal sulcus : STS) などで確認され¹⁰⁾、運動の実行時以外にも、その運動をイメージした場合や運動を観察したときにも同様の活動が認められるとされている^{4,11)}。そのため今回の運動イメージ課題、模倣課題時においてもMNSの下頭頂小葉、ブローカー野が賦活したものと思われた。特に運動イメージ課題でのMNSの活動の報告^{4,11)}があることから、実際の動作を想起するなかで、自らの動作に置き換えるためMNSが活動したものと考えられた。また

ミラーニューロンと密接なSMAの活動も運動イメージ課題・模倣課題ともに左右両側にて観察された (図2, 3)。これは動作のイメージ後、運動準備を実行しているSMAで運動をプログラミングすることに役立っているものとして考えられた。また、運動イメージは対象者のイメージ生成能力や注意機能に影響を与え、治療を補完する役割としての介入効果があるとも考えられている^{2,3)}。これは今まで先行研究^{2,4)}にあったように運動イメージ・模倣課題が脳内の運動関連領域に強く影響していることを裏付けた。

今回、運動課題・模倣課題において両側SMCの活動がみられたが、運動イメージ課題では対側SMCの活動しか見られなかった (図1~3, 表1)。Kawashimaら¹²⁾、Kimら¹³⁾は、健常成人が手指対立運動を行った結果、左手運動時では、顕著に同側の脳運動関連領域の賦活がみられたと述べている。さらに、左利き者に焦点をあてた研究もある。fMRIを用いて右利きと左利き健常成人の手指対立運動時の賦活を比較した結果、Andrew¹⁴⁾、Kimら¹³⁾は、右利き者では左手運動時に左大脳半球の賦活が顕著であると報告した。今回運動課題、模倣課題で左手の運動を制御している右SMCの活動以外に左SMCの活動がみられ、同側SMC制御の影響も考えられ、非利き手動作に伴い両側SMCの制御が示唆された。しかし、運動イメージ課題では対側SMCのみの活動で、非利き手の運動のイメージ想起に伴う活動がみられたものと考えられた。かつ、運動を伴わないため同側制御の影響がなく左手運動に関する右SMCのみの活動がみられ、3条件の課題のなかで運動を伴わない課題なので活動が最も少ない結果になったものと考えられた。

運動学習を進める上で小脳の重要性が多く報告されている^{15,16)}。今回、イメージ課題において小脳の活動はなかったが、運動課題、模倣課題では活動がみられた (図1~3)。大脳基底核も運動学習に重要な部位であり、全ての課題で活動がみられたが、前頭前野 (BA 9, 10, 11, 46) の活動は運動課題と運動イメージ課題では両側に、模倣課題では片側に活動が認められた (図1~3)。新規運動学習において前頭葉の役割は、ワーキングメモリー時に活動することで知られているBA 10野以外にも、右頭頂葉は外環境をもとに自ら行為を選択しながら新規の学習の習得に関与するのに対し、左前頭葉は、一度、取り込まれ、ルーチン化された方略を選択、遂行することに関与する¹⁷⁻¹⁹⁾。今回の全ての箸操作課題において、新規運動学習を進めていくうえで前頭葉の活動や、小脳、大脳基底核いずれかの活動が広くみられたものと考えられる。

SPLは体性感覚の連合野であり、BA 5野は空間位置関係や微細運動の統合、認知に関する機能を有し、皮膚、筋肉、深部組織、とくに関節からの興奮に反応す

表1 各課題時の脳内活動の比較 (集団解析 n=5)

Area (Hemisphere: R, right; L, left)	運動課題					運動イメージ課題					模倣課題				
	t-value	賦活 範囲	x	y	z	t-value	賦活 範囲	x	y	z	t-value	賦活 範囲	x	y	z
Sensorimotor cortex (R)	12.01	55	40	-20	50	9.37	13	60	-22	28	13.08	10	40	-32	56
Sensorimotor cortex (L)	39.33	65	-40	-22	58	0	0				14.79	9	-60	-10	24
Supplementary motor area (R)	49.13	135	16	0	64	10.89	5	14	10	54	12.09	33	2	6	64
Supplementary motor area (L)	15.69	50	-6	-6	64	13.21	5	-10	4	58	18.37	83	-2	14	52
Brodmann area 9, 10, 11 (R)	9.97	13	6	30	34	11.54	11	46	12	32	0	0			
Brodmann area 9, 10, 11 (L)	27.54	23	-54	8	38	10.72	2	-10	36	30	29.25	20	-50	10	34
Superior parietal lobule (R)	0	0				11.74	7	4	-64	48	13.28	13	34	-52	54
Superior parietal lobule (L)	0	0				22.47	24	-20	-64	54	21.22	20	-36	-60	52
inferior parietal lobule (R)	25.38	221	52	-42	56	16.91	59	52	-42	52	18.39	60	58	-46	40
inferior parietal lobule(L)	16.45	98	-38	-40	34	10.37	23	-28	-52	46	15.39	35	-42	-42	26
basal ganglia(R)	17.71	16	18	0	0	32.79	14	12	-6	6	12.40	4	24	-2	12
basal ganglia (L)	11.88	20	-24	6	10	10.88	18	-10	-18	12	10.81	37	-24	-2	6
Brodmann area 44 (R)	23.87	34	32	26	6	8.76	3	56	26	16	12.19	3	44	18	14
Brodmann area 44 (L)	0	0				10.64	2	-38	22	6	8.63	1	-58	10	8
cerebellum (R)	34.01	71	30	-52	-44	0	0				10.85	2	6	-78	-24
cerebellum (L)	23.53	131	-16	-70	-44	0	0				11.31	5	-18	-48	-38

注：信号強度；t-value, x, y, z 座標；MNI (Montreal Neurological Institute) 座標による脳部位。
各 ROI における賦活範囲と、その ROI 内における最も信号強度の強かった MNI 座標を提示した。

るニューロンが感覚情報を同定する役割を持っている。BA 7野は体性感覚と視覚、さらに聴覚、前庭覚の連合野で、空間知覚にかかわる領域であり、この部位の障害は、体性感覚の統合や、他者や環境に対する身体部位の三次元的な方向づけに障害をきたし、感覚情報の認知障害を起こすこととなる。今回運動イメージ課題、模倣課題時では視覚情報や体性感覚情報を統合するためにSPLの活動が認められたと考えられる。しかし、箸の画像をみせていない視覚的情報が少ない運動課題では自己の運動と体性感覚の統合が十分に機能せず、視覚的情報の多い課題では空間的知覚に有益であったものとして考えられる。

BA 39, 40野はIPLであり体性感覚野と視覚野の間にあり、空間・位置に関する概念と自己の身体イメージが生じると考えられている^{20,21)}。今回の結果では全ての課題時で両側の該当領域に活動が認められた(図1～3)。運動観察・運動イメージ時には体性感覚野と視覚野の間で身体イメージを増幅させるためにこの部位の活動が向上したのと考えられる。また、運動を学習していくなかで、身体状況を空間・位置関係より把握することが重要なことから²¹⁾、この部位の活動が向上したのと考えられる。

運動課題では両側SMCおよび両側小脳、両側SMA、右BA 44、両側IPL、両側大脳基底核が賦活した。これは、左手での複雑な箸動作では、右大脳半球にとどまらない左右の賦活を必要としたためと考えられた。す

なわち、箸動作は、運動の順序、空間的な操作を要し、小脳でさえも両側の活動を伴ったことが考えられる。一方、運動イメージ課題では、右SMC、両側SMA、両側SPL、IPLでの賦活が中心となり、左SMCおよび小脳の賦活は消失した(図2、表1)。すなわち、イメージでは、右SMC、両側SMA、両側SPL、IPLの活動が実際の運動時と共通して活動する。この点で、イメージの重要性が示唆された。さらに観察課題では、両側SMCおよび両側SMA、両側SPL、IPL、両側BA 44が賦活し、イメージ課題とは異なり、左SMCおよび両側BA44が新たに賦活した。運動課題では賦活したがイメージ課題では賦活しなかった右SMCおよび右BA 44が新たに賦活した(図3、表1)。すなわち、イメージ課題と模倣課題には、運動課題が賦活する領域を双方に補う傾向にあることから、箸操作訓練の際には両者を取り入れて行う意味があることが示唆された。

運動イメージ課題時・模倣課題時には先行研究²⁻⁴⁾にあるようにMNSの広い活動が確認された。SMA、前頭葉の活動などSMCに入力する前運動野の活動が広く確認され、運動学習を遂行する上で必要な部位の活動が確認された。模倣課題時は脳の広範囲に活動が認められ、見本を教示しながら動作を指導するほうが、活動範囲が広範囲でリハビリテーションに有用であることが示唆された。イメージ動作でも同様に狭小ではあるが運動関連領域の活動が認められ、運動開始以前に運動イメージを行わせることが重要であることが示唆さ

れた。これらの結果はリハビリテーション医療の箸操作練習方法について脳機能からの裏付けに有用な結果だと考えられる。運動実行と運動感覚フィードバック情報処理が同じ領野で行われており²²⁾、運動学習されている過程でこれらの関連領野の活動性を向上させることが運動機能の改善に寄与するものと考えられた。運動イメージで運動を開始する準備を行い、模倣動作を促すことで広く運動関連領野の活動性を向上させることから、リハビリテーション医療の治療のなかで運動の実行のみではなく画像を提示したり、イメージを繰り返合わせた方法が有用であることが示唆された。

引用文献

- 1) 渡邊裕志：利き手交換訓練を実施した患者の退院後の箸の使用状況。リハビリテーション医学，2001，**38**(7)：597.
- 2) Ertelt D, Small S, Solodkin A, et al.: Action observation has a positive impact on rehabilitation of motor deficits after stroke. *Neuroimage*, 2007, **36**: 164-173.
- 3) Buccino G, Solodkin A, Small SL: Functions of the mirror neuron system: implications for neurorehabilitation. *Cogn Behav Neurol*, 2006, **19**(1): 55-63.
- 4) 松尾 篤，森岡 周：運動観察と運動イメージ中の脳波 Mu リズム変化。総合リハ，2005，**33**(11)：1067-1069.
- 5) 村田 哲：手操作運動のための物体と手の脳内表現。Vision, 2004, **16**(3)：141-147.
- 6) Jenkins IH, Brooks DJ, Nixon PD, et al.: Motor sequence learning: a study with positron emission tomography. *J Neurosci*, 1994, **14**: 3775-3790.
- 7) Raymond JL, Lisberger SG, Mauk MD: The cerebellum: a neuronal learning machine? *Science*, 1996, **272**: 1126-1131.
- 8) Karni A, Meyer G, Jezzard, et al.: Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. *Nature*, 1995, **377**: 155-158.
- 9) Oldfield RC: The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 1971, **9**: 97-113.
- 10) Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, et al.: Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Res Cogn Brain Res*, 1996, **3**: 131-141.
- 11) Grezes J, Decety J: Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: a meta-analysis. *Hum Brain Mapp*, 2001, **12**: 1-19.
- 12) Kawashima R, Yamada K, Kinomura S, et al.: Regional cerebral blood flow changes of cortical motor areas and prefrontal areas in humans related to ipsilateral and contralateral hand movement. *Br Res*, 1993, **623**: 33-40.
- 13) Kim SG, Ashe J, Hendrich K, et al.: Functional magnetic resonance imaging of motor cortex: hemispheric asymmetry and handedness. *Science*, 1993, **261**: 615-617.
- 14) Li A, Yetkin Fx, Cox R, et al.: Ipsilateral hemisphere activation during motor and sensory tasks. *Am J Neuroradiol*, 1996, **17**: 651-655.
- 15) 長谷公隆：運動学習の神経機構とその障害。理学療法，2005，**22**(7)：966-974.
- 16) 永雄総一：運動学習における小脳の役割。Brain Medical, 2007, **19**(1)：35-38.
- 17) 渡邊 修，来間弘展，松田雅弘・他：新規学習における前頭葉の役割。理学療法学，2009，**36**(8)：436-439.
- 18) Podell K, Lovell M, Zimmerman M, et al.: The cognitive bias task and lateralized frontal lobe functions in males. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci*, 1995, **7**(4)：491-501.
- 19) 星 英司，丹治 順：前頭葉における随意運動の企画・実行のメカニズム。実験医学，2006，**24**(15)：2425-2433.
- 20) 筒井健一郎：頭頂連合野における三次元的視覚認知のメカニズム。実験医学，2006，**24**(15)：2317-2325.
- 21) 泰羅雅登：頭頂連合野の機能—運動制御と奥行き情報処理—。脳科学とリハビリテーション，2003，**3**：1-9.
- 22) 内藤栄一：ヒトの身体像の脳内表現と身体運動制御との関係。現代思想，2006，**34**：163-173.