

手の心的回転課題遂行時の脳活動—近赤外分光法による検討—

下田 信明^{1,2} 武田湖太郎^{2,3} 加藤 宏之^{2,4}

要 旨：手の心的回転課題とはさまざまな角度で提示された手の写真が左手か右手かを判断する課題である。われわれは手の心的回転課題における反応時間研究を通じて左手利き者・右手利き者の比較を行い、また NIRS による脳機能計測研究を行ったので本稿で紹介する。反応時間は利き手の影響を受け、また、両側大脳半球の頭頂連合野(上頭頂小葉、角回、縁上回)をはじめとし、一次感覚運動野、運動前野、前頭連合野などの広い範囲で脳活動がみられたことから、被験者は自身の手の運動をシミュレートしながら課題を遂行していることが示唆される。

(J Jpn Coll Angiol, 2011, 51: 235–239)

Key words: mental rotation, near-infrared spectroscopy, cerebral activation, motor imagery, left-handers

はじめに

手の心的回転課題とは、手の写真や線画をさまざまな角度で提示し、それが左手か右手かを判断させる課題であり、手の提示から被験者が判断するまでの時間(反応時間)が計測される。その反応時間は、実際に手を動かすときに動かしづらい提示角度のとき遅くなり¹⁻³⁾、また実験中の被験者の上肢肢位に依存するとされる^{1,4,5)}。課題遂行時の脳機能計測では、背側運動前野において左半球優位性がみられ⁶⁾、図形の心的回転課題に比べ手の課題で左中心前回の活動が大きいこと⁷⁾が報告されている。これらの反応時間や positron emission tomography による脳機能計測の結果から、手の心的回転課題遂行時に被験者は自身の手の運動をシミュレートしながら課題遂行している可能性が示唆されてきた。

これまでの手の心的回転課題に関する先行研究では、そのほとんどが右手利き者を対象とし^{1-4,6,7)}、左手利き者を対象とした研究は少ない。これまでの左手利き者を対象にした研究^{8,9)}において左手利き者と右手利き者の反応時間の相違が報告されているが、左手利き者における

手の心的回転課題遂行時の脳機能を計測した研究はない。また手の心的回転課題を臨床応用する試みが報告されはじめており¹⁰⁾、左手利き者における手の心的回転課題に関する反応時間や脳機能を知ることは、今後の臨床応用に向けて重要なことであると考えられる。

近赤外分光法 (Near-infrared spectroscopy; NIRS)は、大脳皮質の神経活動によって誘発される局所脳血流量変化による酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの濃度長変化(それぞれ $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ と $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$)を非侵襲的に計測できる。座位にて計測可能で騒音が少ないことは、心的回転課題のような注意の集中を要する認知課題遂行時の脳機能計測を行う際の大きな利点である。

本稿では、左手利き者を対象とした反応時間研究と NIRS を用いた手の心的回転課題遂行時の脳機能計測について紹介する。

手の心的回転課題における
健常左手利き者を対象とした研究

Gentilucci ら⁸⁾は、右手利き者は右手と左手の運動技能の差が大きいのに比べ、左手利き者はその差が小さいことから、道具を持った手の写真の左右判断における反応時間にも差が生じるという仮説を立て実験を行った。課題は、道具(卓球ラケットなど)を持った手の写真の左右

¹ 杏林大学保健学部作業療法学科² 科学技術振興機構 CREST³ ATR 脳情報研究所⁴ 国際医療福祉大学病院神経内科

2010 年 3 月 4 日受理

判断であり、反応時間が計測された。手の写真は道具と手の形が一致している条件(Congruent 条件)と一致していない条件(Incongruent 条件)が用意された。Congruent 条件とは、例えば卓球ラケットでは、そのグリップを正しく握っている写真であり、Incongruent 条件とは、卓球ラケットのグリップを母指と示指でつまんでいるような写真である。またそれらの Congruent 条件と Incongruent 条件の写真を、機能的に自然な位置(functionally natural position)の写真と機能的に不自然な位置(functionally unnatural position)の写真とに分け提示した。機能的に自然な位置の写真とは、シェークハンドの卓球ラケットを通常使用するときのように、打面をグリップよりも上にしてラケットを握っている写真である。機能的に不自然な位置の写真とは、機能的に自然な位置の写真を 180 度回転させた写真(シェークハンドの卓球ラケットが逆さになっている)である。結果として、右手利き者は右手写真の反応時間が左手写真に比べ速いのに対し、左手利き者はその差がなかった。また右手利き者は、Congruent 条件の右手写真において機能的に自然な位置の写真の反応時間が、不自然な位置の写真よりも速かった。一方、左手利き者は、Congruent 条件の左手写真において機能的に自然な位置の写真と不自然な位置の写真とで反応時間に差がなかった。これらの結果から右手利き者は、利き手である右手の運動をイメージしながらこの課題を遂行しているのに対し、左手利き者はより視覚的分析を用いているのではないかと、著者らは考察している。

われわれは⁹⁾、左手利き者、右手利き者を対象として、手の写真の左右判断課題における反応時間を計測した。手の写真は、0 度(直立)、時計回り 90 度、反時計回り 90 度、180 度(倒立)の 4 つの位置で提示された。結果として、右手利き者は右手写真の反応時間が左手写真に比べ速かったが、左手利き者はその差がなかった。また左手利き者・右手利き者ともに、右手写真の反応時間は反時計回り 90 度条件が時計回り 90 度条件に比べ速く、左手写真の反応時間は時計回り 90 度条件が反時計回り 90 度条件に比べ速かった。これは、Gentilucci ら⁸⁾のような道具把持ではなく単純な手の画像の場合には、左手利き者・右手利き者ともに自身の手を回転させるシミュレーションにより課題を遂行していることを示唆する結果であった。

Ionta らは⁹⁾、左手利き者・右手利き者を対象として、実験中の被験者の手の肢位を変化させて、手の写真の

左右判断課題における反応時間を計測した。被験者の手の肢位は、右手を背中に回し左手を膝の上に置いた条件と、左手を背中に回し右手を膝の上に置いた条件とが設定された。結果として、前述した 2 つの研究と同様に右手利き者は右手写真の反応時間が左手写真に比べ速かったが、左手利き者はその差がなかった。また右手利き者において右手写真の反応時間は、右手を背中に回した条件で、右手を膝の上に置いた条件に比べ遅かった。左手利き者における左手写真の反応時間は、左手を背中に回した条件と左手を膝の上に置いた条件とで差はなかった。これらの結果は、右手利き者と左手利き者における利き手の使用頻度の違いなどから生じている可能性があると著者らは考察している。

手の心的回転課題遂行時の脳活動

本実験は、参加同意を得た健常左手利き者(男性 3 名、女性 1 名、年齢：26.3±5.7 歳)・右手利き者(男性 2 名、女性 3 名、年齢：24.2±3.9 歳)を対象とし、手の心的回転課題遂行時の脳機能について NIRS を用いて検討することを目的とした。

前述したわれわれの研究⁹⁾の結果において反応時間が長かった写真から、右手・左手・手掌・手背の画像を提示位置 0 度(直立)、180 度(倒立)、反時計回り 90 度、時計回り 90 度がおのおの 12 枚となるように選択した。

NIRS 計測において、ベースライン条件では注視点を 0.5 秒提示後、矢印を 1.5 秒提示し、被験者には右矢印の場合は右第 2 指、左矢印の場合は左第 2 指でそれぞれの手元に設置したスイッチを押すよう教示した。これを 16 回(32 秒間)繰り返した。課題条件では注視点 0.5 秒提示後、前述した手画像のうちのいずれかの写真を 1.5 秒間提示し、被験者には提示された手の写真を右手と判断したら右第 2 指で、左手と判断したら左第 2 指でスイッチを押すよう教示した。これを 8 回(16 秒間)繰り返した。このベースライン条件と課題条件を各 6 回繰り返して NIRS 計測を行った。

NIRS 計測装置は、日立メディコ製 NIRS 計測装置 ETG-4000 を使用した。照射プローブ(片側 8 本)と検出プローブ(片側 7 本)を頭部へ格子状に配置し(3×5 配置)、片側 22 チャンネル、両側で 44 チャンネルの計測を行った。プローブは国際 10-20 法における C3 および C4 を基準として、前後均等になるように配置した。片側 22 チャンネルのうち前方 10 チャンネルを一次運動野、運動前

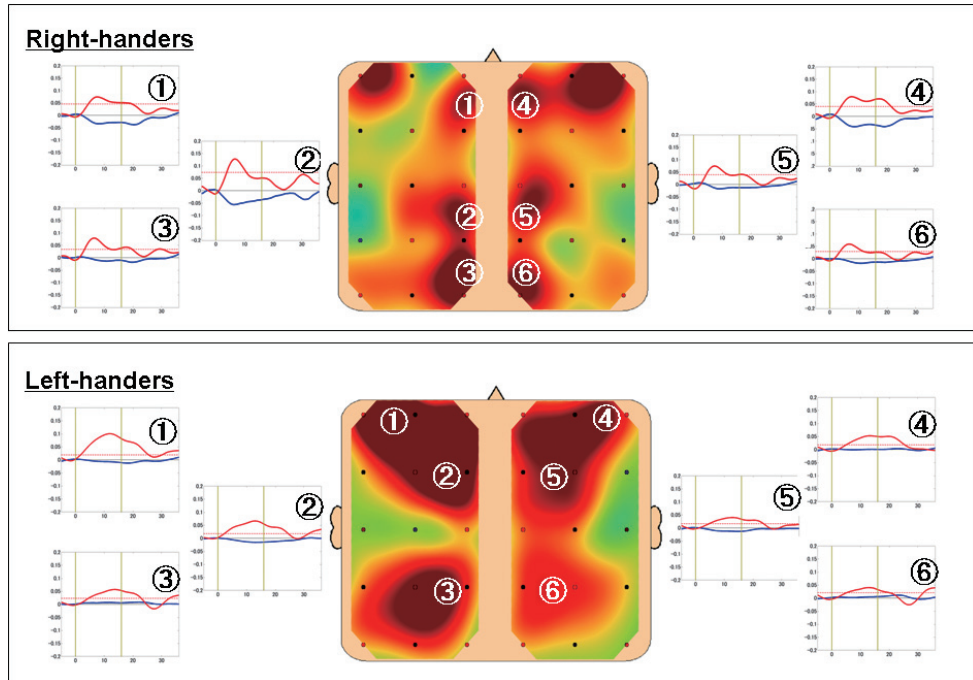


Figure 1 Topography and wave of typical points.

Brain activations were observed in the bilateral sensorimotor (②, ⑤), premotor (①, ④), and frontal association and parietal association (③, ⑥) cortices of all of the participants. Red solid line: $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$, blue solid line: $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$, red dash-dotted line: the Bonferroni-corrected significance levels of $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ in each channel.

野, 前頭連合野を含む前頭葉, 後方 10 チャンネルを一次体性感覚野, 上頭頂小葉, 角回, 縁上回を含む頭頂葉として, 片側 20 チャンネル, 両側 40 チャンネルを関心領域とした。

サンプリング周波数 10 Hz で計測された $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ と $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$ について, 体動によるアーチファクト混入試行回を除外して加算平均を行った。 $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ が脳活動を最も反映していると考えられているため¹¹⁾, $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ を主な分析対象とした。各計測チャンネルにおいて課題開始直前の安静時 5 秒間の $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ データの SD から Bonferroni 補正後の有意水準 ($\text{SD} \times 3.053$, $p < 0.05$) を算出し, 課題遂行中の $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ がこの水準を越えたチャンネルを有意な反応のみられたチャンネルとした。

結果として, すべての被験者において課題依存的な $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ の一過性増加がみられた。 $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$ はほとんど変化しないかわずかに一過性に減少した。代表的な左手利き者・右手利き者各 1 例のトポグラフィと代表的なチャンネルの応答を **Fig. 1** に示す。左手利き者, 右手利き者ともに, 両側大脳半球の頭頂連合野(上頭頂小

葉, 角回, 縁上回), 一次感覚運動野, 運動前野, 前頭連合野などの広い範囲で脳活動がみられた。

頭頂連合野は空間情報の処理¹²⁾や上肢の運動イメージ¹³⁾に関与している。本実験における頭頂連合野の脳活動も手の写真における空間情報の処理や被験者が自身の手の運動をシミュレートしながら課題遂行した結果であると考えられる。

前頭葉についても全員に一次運動野, 運動前野, 前頭連合野を含む領域に活動がみられた。被験者が運動をイメージしている時に運動前野が活動するという報告があり¹³⁾, 本実験においても被験者が自身の手の運動をイメージしながら課題遂行していることが前頭葉の運動関連領域の脳活動を引き起こしていると考えられる。

心的回転課題遂行時においてワーキングメモリが心的回転課題の内的表象の保持や処理に関わることが示唆されており¹⁴⁾, 空間視のワーキングメモリに関与する背側経路は視覚野から頭頂連合野を経て前頭前野に収束する¹⁵⁾。また物体視に関与する腹側経路も前頭前野に収束する¹⁵⁾。本実験の課題遂行時には提示された手の写真の

空間的位置情報とともに、手や指の形を認知しその情報を一時的に保持しながら処理する必要があると推察される。よって背側経路、腹側経路の両方の関与が必要であり前頭連合野の活動の要因になったと考えられる。

今後は健常者だけでなく脳卒中者における手の心的回転課題遂行時の脳機能を検討し、手の心的回転課題の臨床応用につなげていきたい。

謝 辞

本実験は科学技術振興機構 CREST の助成によって行われた。

文 献

- 1) de Lange FP, Helmich RC, Toni I: Posture influences motor imagery: an fMRI study. *Neuroimage*, 2006, **33**: 609–617.
- 2) Parsons LM: Temporal and kinematic properties of motor behavior reflected in mentally simulated action. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 1994, **20**: 709–730.
- 3) Sekiyama K: Kinesthetic aspects of mental representations in the identification of left and right hands. *Percept Psychophys*, 1982, **32**: 89–95.
- 4) Ionta S, Fourkas AD, Fiorio M et al: The influence of hands posture on mental rotation of hands and feet. *Exp Brain Res*, 2007, **183**: 1–7.
- 5) Ionta S, Blanke O: Differential influence of hands posture on mental rotation of hands and feet in left and right handers. *Exp Brain Res*, 2009, **195**: 207–217.
- 6) Parsons LM, Fox PT, Downs JH et al: Use of implicit motor imagery for visual shape discrimination as revealed by PET. *Nature*, 1995, **375**: 54–58.
- 7) Kosslyn SM, DiGirolamo GJ, Thompson WL et al: Mental rotation of objects versus hands: neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology*, 1998, **35**: 151–161.
- 8) Gentilucci M, Daprati E, Gangitano M: Right-handers and left-handers have different representations of their own hand. *Brain Res Cogn Brain Res*, 1998, **6**: 185–192.
- 9) Takeda K, Shimoda N, Sato Y et al: Reaction time differences between left- and right-handers during mental rotation of hand pictures. *Laterality*, in press.
- 10) Moseley GL: Graded motor imagery is effective for long-standing complex regional pain syndrome: a randomised controlled trial. *Pain*, 2004, **108**: 192–198.
- 11) Strangman G, Culver JP, Thompson JH et al: A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation. *Neuroimage*, 2002, **17**: 719–731.
- 12) Petersen SE, Corbetta, M, Miezin, FM et al: PET studies of parietal involvement in spatial attention: comparison of different task types. *Can J Exp Psychol*, 1994, **48**: 319–338.
- 13) Stephan KM, Fink GR, Passingham RE et al: Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *J Neurophysiol*, 1995, **73**: 373–386.
- 14) Cohen MS, Kosslyn SM, Breiter HC et al: Changes in cortical activity during mental rotation: a mapping study using functional MRI. *Brain*, 1996, **119** (Pt 1): 89–100.
- 15) Haxby JV, Grady CL, Horwitz B et al: Dissociation of object and spatial visual processing pathways in human extrastriate cortex. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1991, **88**: 1621–1625.

Cerebral Hemodynamic Responses in Frontal and Parietal Cortices during Mental Rotation of Hand Pictures: A Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) Study

Nobuaki Shimoda,^{1,2} Kotaro Takeda,^{2,3} and Hiroyuki Kato^{2,4}

¹Department of Occupational Therapy, Kyorin University, Hachioji, Japan

²CREST, Japan Science and Technology Agency, Kawaguchi, Japan

³ATR Computational Neuroscience Laboratories, Kyoto, Japan

⁴Department of Neurology, International University of Health and Welfare Hospital, Nasushiobara, Japan

Key words: mental rotation, near-infrared spectroscopy, cerebral activation, motor imagery, left-handers

This review summarizes behavioral and cerebral activation studies of tasks involving the mental rotation of hand pictures. We also introduce our mental rotation studies that compared the reaction times between left- and right-handers and recorded cerebral activations using near-infrared spectroscopy. The reaction time was influenced by the participant's handedness, and cerebral activations were observed in the bilateral sensorimotor, premotor, frontal association, and parietal association cortices. These findings suggested that the participants made left-right judgments by mentally rotating their own hands to the orientation of the hand pictures presented at various angles. (J Jpn Coll Angiol, 2011, **51**: 235–239)