

手で操作できる物体の意味処理に対する体勢の影響 : NIRS を用いた活動計測

Effect of postures on semantic processing of hand manipulable objects : A NIRS Study

大西 紗瑛[†], 飛田 国人[†], 牧岡 省吾[†]
Sae Onishi, Kunihito Tobita, Shogo Makioka

[†]大阪府立大学 人間社会システム科学研究科

[†] Graduate School of Humanities and Sustainable System Sciences, Osaka Prefecture University
saa02043@edu.osakafu-u.ac.jp

概要

身体化認知の枠組みに基づいて、意味記憶が運動と処理資源を共有するという考えが提案されてきた。本研究の目的は、手で操作可能な物体の操作的知識に対して運動シミュレーションが与える影響とそのメカニズムを明らかにすることである。本研究では単語刺激を用い、手で操作できる物体の意味処理を行う際に身体拘束がどのような干渉効果を及ぼすのかをNIRS (近赤外分光法) を用いて計測した。

キーワード: 身体化認知(embodied cognition), 意味処理(semantic processing), 操作的知識(manipulation knowledge), 運動シミュレーション(motor simulation)

1. はじめに

我々の身体運動と脳の働きは密接に関連し相互に支え合っている。身体運動に関与する部位である大脳皮質の一次運動野, 運動前野は, 実際に動作を行うときだけではなく, 他者の行動を観察しているとき(Rizzolatti, Fadiga, Gallese & Fogassi, 1996; Grèzes, Armony, Rowe & Passingham, 2003)や, 運動動作に関する表現を含む文章を読むときにも活性化される (Glenberg & Kaschak, 2002; Hauk, Johnsrude & Pulvermüller, 2004; Tettamanti et al., 2005; Zwaan & Taylor, 2006; Lee, Mirman & Buxbaum, 2014). これらの研究の多くは運動と知覚が共通の処理基盤をもち, 相互に共起的な体験であることに着目している。また, 直接的な運動情報が与えられなくても, 手での操作を役割として持っている物体の名前を読み上げる場合に運動前野腹側部及び頭頂間溝を中心とした左下頭頂葉小葉が活性化される (Chao & Martin, 2000) という証拠もある。これまでの脳機能研究においても下頭頂小葉が道具使用行動に関わっていることが繰り返し示されている (Reynaud, Lesourd, Navarro, & Osiurak, 2016). Chao & Martin (2000)が明らかにした脳領域の活性化は, 名前を読み上げる際に, 物体の持つ「運動の可

能性」としての意味に自動的にアクセスされるために起こると考えられる。

近年このような概念的な知識における身体感覚の役割が注目され, 身体化認知として盛んに研究が行われている。Dutriaux & Gyselinck (2016)は概念的知識が身体の感覚や運動と深くかかわっていることを確かめるため, 運動の抑制が概念処理にどのように影響を及ぼすのかを検討した。具体的には, 物体の画像やその名称を表す単語を学習するとき, 背中で手を組んだ状態で学習すると, 手で操作できる物体の記憶が阻害されることを示した。さらに大西・牧岡 (in press) は, Dutriaux & Gyselinck (2016)の体勢の条件をさらに詳細に検討することで, 手の可視性や位置ではなく, 拘束による運動抑制のみが手で操作できる物体の記憶を阻害することを明らかにした。これらの研究で手の拘束によって記憶が抑制されたのは, 運動を妨げる体勢が単語のもつ運動可能性の自動的な活性化を阻害したためではないかと推測される。学習段階での手の拘束が記憶成績に影響を及ぼすことから, 単語を符号化する際に活性化される操作的知識に対して, 手を拘束されているという事実の認識が影響を及ぼした可能性がある (大西・牧岡, in press)。

では, このとき我々の脳の運動関連領域の活動はどのような影響を受けているのか。これまでの研究で体勢が運動野の活動を調節するという知見は既に得られている。Vargas et al. (2004)は, 手での特定の運動をイメージさせるときの皮質脊髄路の活動が, 手の姿勢によって変化することを示した。この研究は手の姿勢と運動イメージの適合性の程度が, 手の動きの心的シミュレーションに干渉することを示している。しかしながら, 手の動きを拘束することが, 物体に関する意味処理を行う時に活性化される脳の運動関連領域にどのような影響を及ぼすのかは未だ明らかではない。

1.1. 本研究の目的

本研究では、手での操作を役割としてもつ物体の意味処理を行うときの運動関連領野の活動が、手の拘束によって受ける影響を明らかにすることを目的とした。具体的には手で操作できる物体の意味処理を行わせるときの頭頂間溝を中心とした左下頭頂小葉の活動が、手の拘束によってどのような影響を受けるのかを調べた。もし運動の制限が手での操作を役割としてもつ物体の意味処理を行うときの運動関連領野の活動に干渉するのであれば、手を拘束した場合に、手で操作できる物体の大きさ判断を行っているときの頭頂間溝を中心とした左下頭頂小葉での血流動態の増加量が低下すると予想される。さらに手で操作できない物体の大きさ判断を行うときの脳活動には、手の拘束による影響は生じないと考えられる。

2. 方法

2.1. 実験参加者

日本語を母語とする大阪府立大学の学生・大学院生 24名(男性11名,女性13名,平均年齢21.5歳,SD=3.027)であり,11名ずつランダムに2つの条件に割り当てられた。実験参加者はNIRS(近赤外分光分析法)のホルダを装着したままPCを用いた課題を行う実験に参加すると説明を受け,口頭反応を記録するため録音を行うことについて書面にて同意を示したのちに実験に参加した。本実験は大阪府立大学人間社会システム科学研究科研究倫理委員会の承認を得て行われた。

2.2. 実験計画

体勢(参加者間要因:無拘束条件,拘束条件)×操作可能性(参加者内要因:操作可能,不可能)の2要因混合計画であった。

2.3. 刺激

刺激として36個の手で操作できる物体の名前(カップ,鉛筆等)と,36個の手で操作できない物体の名前(ダイヤモンド,階段等)を用いた。手で持って操作できることを手で操作できる物体の定義とした。天野・近藤(2000),佐久間 他(2005)に基づいて,それぞれの名称の語彙使用頻度,心象性,文字数が,条件間でできるだけ等しくなるように刺激を選定した。各変数の平均値を表1に示す。t検定の結果,条件間に有意差はみられなかった(使用頻度: $t(70)=0.592, p=.556$; 文字数: $t(70)=1.27, p=.210$; 心象性: $t(70)=1.12, p=.267$)。

2.4. 装置

刺激の呈示には液晶ディスプレイ(ASUS: VG248),

実験の制御にはLinux PC(ubuntu 18.04)上のMATLAB(R2018a)とPsychToolBox-3 toolkit(Brainard, 1997; Pelli, 1997)を用いた。脳の血流状態を簡易的にかつ身体拘束の条件で計測するための装置として,近赤外脳機能イメージング装置NIRS(LABNIRS, Shimadzu Corp., Kyoto, Japan)を用いて,脱酸素化ヘモグロビン(以下oxy-Hb)と脱酸素化ヘモグロビン(以下deoxy-Hb)の変化を計測した。計測には830nm, 805nm, 780nmの3波長が用いられた。測定プローブは国際10-20法基準点を利用して配置した(図1)。送受光のプローブは各8用い,4×4(計24チャンネル)で設計し左下頭頂小葉を覆うように計測した。

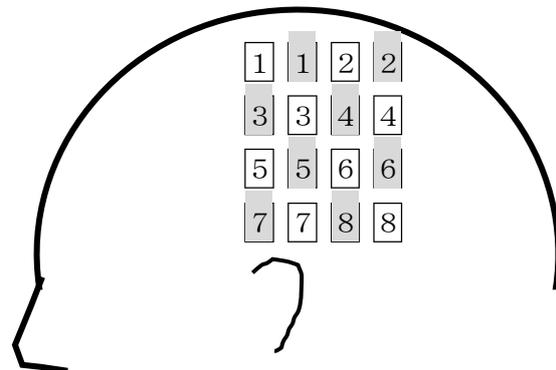


図1 プローブの配置(4×4(計24チャンネル))
照射用ファイバ(白)と検出用ファイバ(黒)
を交互に3cm間隔で正方形格子状に並べた。

2.5. 手続き

実験は個別に行われた。参加者は実験の説明を受けたあと,同意書への記入を行った。その後,参加者は課題に関する教示を受け,問題がなければ指定された体勢をとるよう指示され,練習試行を行った。練習試行終了後,9ブロックで構成される本試行を行った。参加者は手を机に置く条件(無拘束条件),机の上に置いた手を透明のボードで押さえられた条件(拘束条件)にランダム分けられた。拘束条件では,ボードの高さは参加者が強く引けば手が抜ける程度に実験者によって調節され,ボードは4隅をネジで止めて固定された(図2)。

参加者は,NIRSの計測用ホルダを頭部に装着した状態で実験を行った。ホルダの装着は実験者が行い,その際には参加者が圧迫感を感じないように留意した。

実験は偶発的記憶課題を用いて行われ,形態処理を行わせるコントロールフェーズと意味処理を行わせるターゲットフェーズで構成された。コントロールフェーズでは,参加者は,ディスプレイに呈示される非単語刺激が「ひらがな」,「カタカナ」のどちらで書かれたも

表1 単語の使用頻度, 心象性, 文字数の平均値

	手で操作できる物体		手で操作できない物体	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
使用頻度	8,146	25,512	6,896	15,250
文字数	2.972	1.040	2.640	1.158
心象性	5.992	0.510	5.860	0.475

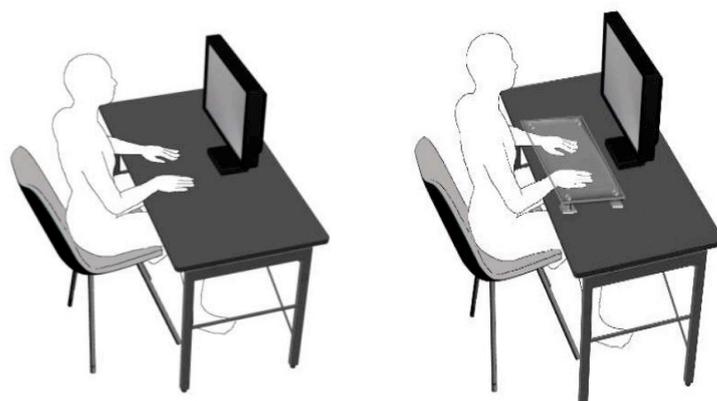


図2 体勢の操作. 左が無拘束条件, 右が拘束条件.

拘束条件は透明のボードで手を押さえることで手が拘束されている状態にした。

のかを判断し、口頭で答えた。ターゲットフェーズでは、ディスプレイに手で操作できる2つの物体、もしくは、手で操作できない2つの物体の名前が呈示され、参加者は実際の大きさはどちらの方が大きいかを判断し、口頭で答えた。

参加者の反応の有無にかかわらず、刺激は3000msずつ、500msの間隔で呈示される。マイクが口頭反応を取得すると、文字の周りに赤色の四角形の枠が呈示された。ターゲットフェーズでは、ディスプレイに2つの物体の名前が呈示され、物体の実際の大きさはどちらの方が大きいかを判断し、口頭で答えた。ものの大きさは一様ではないため、参加者のイメージした物体の大きさに判断するように教示した。刺激呈示の流れはコントロールフェーズと同様だった(図3)。実験は9ブロックで構成された。1ブロックは、コントロールフェーズ、手で操作できる物体のターゲットフェーズ、手で操作できない物体のターゲットフェーズで構成されていた。コントロールフェーズはターゲットフェーズの

前後に実施する必要があるため、実験の最初と最後もコントロールフェーズとした。1ブロックのコントロールフェーズでは8個ずつ、ターゲットフェーズでは16個(1度に2つ)ずつ刺激が呈示され、30秒間で終わるよう統制されていた。

コントロールフェーズで呈示される非単語は重複がなく、実験全体で8個×20回(フェーズの試行回数)=160個(ひらがな, カタカナ各80個)を使用した。ターゲットフェーズでは手で操作できる物体と手で操作できない物体を表す各36個の単語が、実験全体で合計4回ずつ呈示された。4ブロック目と5ブロック目の間に参加者は2分間の休憩をとった。NIRSの装置を付けたままとなるが、体勢は自由に動かしてもよいと教示された。ブロックの構成を図4に示した。

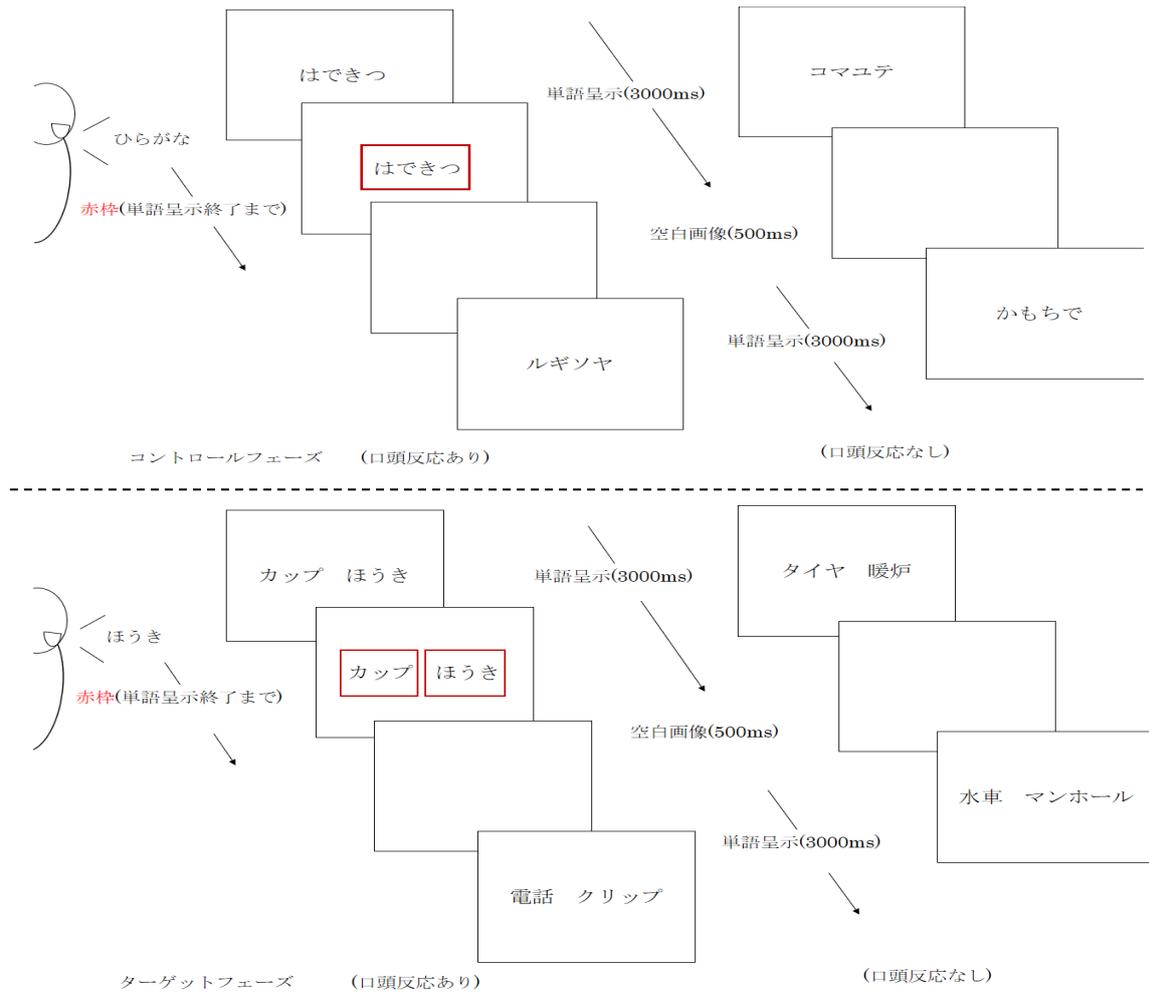


図3 試行の流れ：上がコントロールフェーズ，下がターゲットフェーズ

1blok				4blok					5blok					
30秒	30秒	30秒	30秒	...	30秒	30秒	30秒	120秒	30秒	30秒	30秒	...	30秒	30秒
コントロール	ターゲット①	コントロール	ターゲット②	...	コントロール	ターゲット②	コントロール	休憩	コントロール	ターゲット①	コントロール	...	ターゲット②	コントロール

図4 実験ブロックの構成

ターゲット①は手で操作できるものの単語を，ターゲット②では手で操作できないものの単語を呈示し，各ブロックにおけるターゲットの呈示条件はカウンターバランスをとった。

2.6. fNIRS の分析

fNIRS の生データにはさまざまなアーティファクトが含まれ，個人ごとの脳の形状も異なるため，そのままの形で分析することはできない．データの分析に先立って，これらの問題を前処理によって補正し，ある時点でインパルス的に脳活動が生じた時の周囲組織の血流信号の時間的変化を模擬した HRF (Hemodynamic

Response Function: 血流動態反応関数) を出力した．発話にともなう側頭筋の活動は，筋肉活動による血流変化のみならず，プローブの物理的移動にともなうアーティファクトを生成してしまうが，このアーティファクトによるシグナル変化は，血流動態とはまったくことなる時間的構造を持っているため，発話によるアーティファクトを取り除くのに有効と考えられる (檀・佐

野・檀& 渡辺,2012). 分析の前処理は, NFRI と, MATLAB の NIRS データ処理パッケージ関数である Homer2 を使用して行なった. NFRI は MRI を使用せずに, 実際の座標で取得された個々の被験者の NIRS プロブ位置を標準脳座標系 (MNI 空間) に確率的に登録するためのツールであり, 各参加者の頭頂間溝の位置を特定する目的で使用した. 10-20 基準点を介して, 取得したプローブの位置・チャンネル位置について推定誤差 (標準偏差) を含む MNI 座標 (x, y, z) のセットを計算した. 推定精度は領域によって異なるが概ね 1cm 以内とされている (Okamoto, Dan, Sakamoto, Takeo, Shimizu, Kohno, …, & Dan, 2004). NFRI を用いて出力した各参加者の MNI 座標の中から, Chao& Martin (2000); Bugden, Price, McLean, & Ansari (2012); Choi, Zilles, Mohlberg, Schleicher, Fink, Armstrong & Amunts (2006); Shikata, McNamara, Sprenger, Hamzei, Glauche, Büchel & Binkofski (2008) で得られた頭頂間溝における MNI 座標を参考に, 頭頂間溝と推定されるチャンネルを選出した. 手で操作できる物体の名前を読み上げる時の左下頭頂小葉を含む頭頂間溝の活性化を fMRI を用いて取得した Chao & Martin (2000) における頭頂間溝の Talairach 座標を MNI 座標へと変換し, 本実験の参加者

の MNI 座標とのユークリッド距離を算出した. 各参加者において NFRI を用いて推定された頭頂間溝のチャンネルの中から, Chao& Martin (2000) の頭頂間溝の MNI とのユークリッド距離が最も小さくなるものを, 各参加者の頭頂間溝の MNI 座標とした. MNI 座標に変更した際に頭頂間溝と推定されるチャンネルが存在しない参加者 2 名は分析から除外した. 頭頂間溝の MNI 座標を取得できた 22 名 (各体勢条件 11 名ずつ) を分析の対象として, HOMER2 で HRF (血流動態反応関数) を算出した. モーションアーティファクトは, Homer2 に備わっているウェーブレット関数のモーション補正技術を適用することで補正した. 残留運動の影響は, Dirosa (2019) を参考に, 振幅の変化の域値 (AMPthresh = 1), 標準偏差の域値 (STDEV thresh = 20) を決め, 設定時間 (tMotion = 0.5s) を超える信号をモーションアーティファクトとして識別した. 不要な周波数成分を取り除くために, バンドパスフィルター (highpass: 0.01Hz および lowpass: 3 Hz) を設定し, 平滑化を行なった. 図 5 には, 体勢条件別の各 1 名の参加者から得られた平滑化済みの HRF を示した.

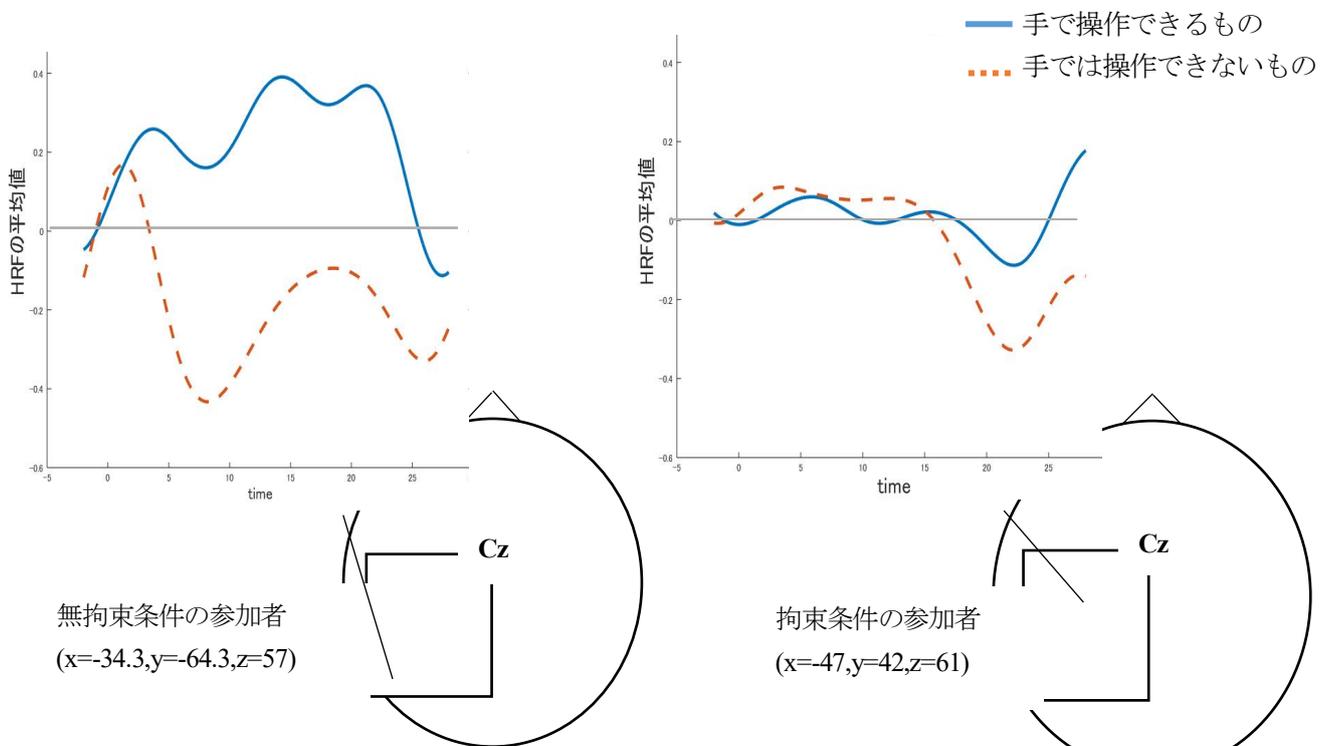


図 5 頭頂間溝を含んだ左下頭頂小葉での血流動態の変化 (左が無拘束条件の参加者, 右が拘束条件の参加者)

3. 結果

図5に示された各条件1名ずつの参加者では、体勢の条件によって、刺激が呈示されたときの頭頂間溝の血流動態の推移に違いがあるように見える。手で操作できるものを呈示した時、無拘束条件の参加者の方が拘束条件の参加者と比較して活性化が大きい。

出力した各参加者の呈示刺激別のHRFの平均値を図6に示す。体勢（無拘束条件，拘束条件）×操作可能性（手で操作できる物体の単語，手で操作できない物体の単語）の2要因混合計画の分散分析を行ったところ、体勢の主効果 ($F(1,22)=0.037, p=.8503, \eta^2_g=0.001$)，操作可能性の主効果 ($F(1,22)=2.9104, p=.102, \eta^2_g=0.051$) および体勢と操作可能性の交互作用 ($F(1,22)=2.898, p=.103, \eta^2_g=0.051$) は有意ではなかった。操作可能性の主効果および体勢と操作可能性の交互作用では p 値が比較的小さく、また現時点ではサンプルサイズが十分ではないため、効果が存在しないと結論づけることもできない。一方、体勢と操作可能性の交互作用の効果量 η^2_g と操作可能性の効果量 η^2_g は共に 0.051 であり、中程度に近い効果の大きさを示していた。体勢の主効果の効果量 η^2_g は 0.001 であった。

次に下位検定として単純主効果の検定を行った。分析の結果、無拘束条件において、呈示刺激の効果は5%水準に達していないものの ($t(11)=2.1997, p=.05011$)，効果量 Hedges' g は 0.969 であり、大きな効果(Cohen,1992)を示していた。一方拘束条件においては、呈示刺激によって HRF の平均値に有意な差がなく ($t(11)=0.003, p=.998$)，効果量 Hedges' g も 0.001 で効果が見られなかった。これらの結果は、手の拘束が無い場合は、手で操作できる物体の意味処理において頭頂間溝が活性化し、手が拘束されると抑制されるという予想と整合する。

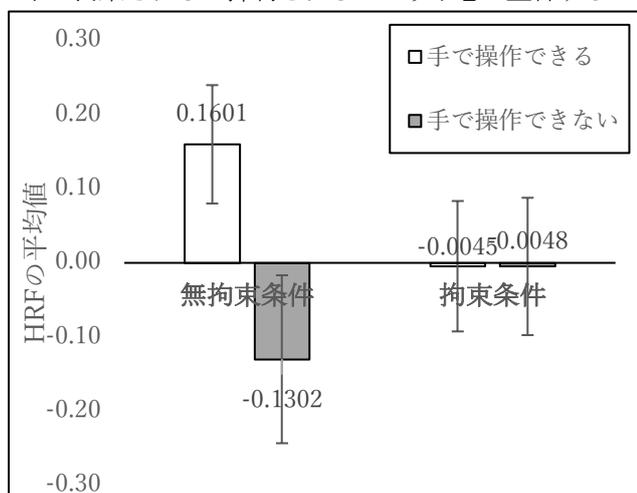


図6 条件別のHRFの平均値

4. 考察

本研究では、手で操作できる物体の意味処理を行わせるときの頭頂間溝を中心とした左下頭頂小葉の活動が、運動の制限によってどのような影響を受けるかを検討した。現状ではサンプルサイズが小さく、明確な結論を得ることができないが、手で操作できる物体に関する意味処理による頭頂間溝付近の活動が、手の拘束の影響を受けるという予想と整合する結果が得られた。Dutriaux & Gyselinck (2016)および大西・牧岡 (in press) では手の拘束が手で操作できる物体の記憶成績を低下させることが確かめられたが、本研究の結果は、その原因が手の拘束によって頭頂間溝付近の脳活動が低下することに由来するという仮説と整合している。今後はサンプル数を増やすと共に分析対象とするチャンネルを増やし、より厳密な検証を行う予定である。

参考文献

- Bugden, S., Price, G. R., McLean, D. A., & Ansari, D. (2012). The role of the left intraparietal sulcus in the relationship between symbolic number processing and children's arithmetic competence. *Developmental cognitive neuroscience*, 2(4), 448-457.
- Chao, L. L., & Martin, A. (2000). Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. *Neuroimage*, 12, 478-484. doi: 10.1006/nimg.2000.0635
- Choi, H. J., Zilles, K., Mohlberg, H., Schleicher, A., Fink, G. R., Armstrong, E., & Amunts, K. (2006). Cytoarchitectonic identification and probabilistic mapping of two distinct areas within the anterior ventral bank of the human intraparietal sulcus. *Journal of Comparative Neurology*, 495(1), 53-69.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological bulletin*, 112(1), 155.
- 檀一平太, 佐野俊文, 檀はるか, & 渡辺英寿. (2012). NIRS 脳機能計測におけるノイズとの戦い: 嚙下研究応用への示唆. *臨床神経学*, 52(11), 1188-1190.
- Dutriaux, L., & Gyselinck, V. (2016). Learning is better with the hands free: The role of posture in the memory of manipulable objects. *PloS one*, 11, e0159108. doi: 10.1371/journal.pone.0159108
- Glenberg, A. M., & Kaschak, M. P. (2002). Grounding language in action. *Psychonomic bulletin & review*, 9, 558-565. doi: 10.3758/BF03196313
- Grèzes, J., Armony, J. L., Rowe, J., & Passingham, R. E. (2003).

- Activations related to “mirror” and “canonical” neurones in the human brain: an fMRI study. *Neuroimage*, 18, 928-937. doi: 10.1016/S1053-8119(03)00042-9 3445.135.1.1
- Hauk, O., Johnsrude, I., & Pulvermüller, F. (2004). Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex. *Neuron*, 41, 301-307. doi: 10.1016/S0896-6273(03)00838-9
- Lee, C. I., Mirman, D., & Buxbaum, L. J. (2014). Abnormal dynamics of activation of object use information in apraxia: Evidence from eyetracking. *Neuropsychologia*, 59, 13–26. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.04.004
- 大西 紗瑛・牧岡 省吾 (in press). 手で操作できる物体の記憶に対する手の拘束の干渉効果：手の位置と可視性に関する検討 認知科学
- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., ... & Dan, I. (2004). Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10–20 system oriented for transcranial functional brain mapping. *Neuroimage*, 21(1), 99-111.
- Reynaud, E., Lesourd, M., Navarro, J., & Osiurak, F. (2016). On the neurocognitive origins of human tool use: A critical review of neuroimaging data. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 64, 421-437. doi: 10.1016/j.neubiorev.2016.03.009
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive brain research*, 3, 131-141. doi: 10.1016/0926-6410(95)00038-0
- Shikata, E., McNamara, A., Sprenger, A., Hamzei, F., Glauche, V., Büchel, C., & Binkofski, F. (2008). Localization of human intraparietal areas AIP, CIP, and LIP using surface orientation and saccadic eye movement tasks. *Human brain mapping*, 29(4), 411-421.
- Tettamanti, M., Buccino, G., Saccuman, M. C., Gallese, V., Danna, M., Scifo, P., ...Perani, D. (2005). Listening to action-related sentences activates fronto-parietal motor circuits. *Journal of cognitive neuroscience*, 17, 273-281. doi: 10.1162/0898929053124965
- 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. doi: 10.1093/cercor/bhh080
- Zwaan, R. A., & Taylor, L. J. (2006). Seeing, acting, understanding: Motor resonance in language comprehension. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135, 1. doi: 10.1037/0096-