

言語意味処理に関する脳 fMRI データの単変量サーチライト解析 Univariate searchlight analysis of brain fMRI data on language meaning processing

大山 将来[†], 辻田 亜門[†], 粟津俊二^{*}, 赤間 啓之^{†‡}
Taro Ninchi, Hanako Ninchi, Shunji Awazu, Hiroyuki Akama

[†]東京工業大学生命理工学院, [‡]東京工業大学リベラルアーツ研究教育院, ^{*}実践女子大学人間社会学部
Tokyo Institute of Technology, [†]School of Life Science and Technology, [‡]Institute of Liberal Arts,
^{*}Jissen Women's University, Faculty of Humanities and Social Sciences
ohyama.m.ab@m.titech.ac.jp

Abstract

According to the embodiment theory, the motor cortex is believed to be involved in understanding the meaning of action sentences. Our research aims at validating this claim using the technique of univariate searchlight as an integration of voxel-based machine learning (MVPA) and random effect analysis in GLM. The participants of our experiment were requested to read four types of sentences during an fMRI scanning session, where the sentences represent either bimanual actions, unimanual actions, mental states (without motor implications) or nonsense fillers. As a result, significant clusters were found in the left angular gyrus and middle temporal gyrus when subjects were presented with sentences representing hand actions compared to those representing mental states, which can be considered as regions responsible for amodal, but not embodied, cognition processes.

Keywords — embodiment theory, amodal theory, functional MRI

1. はじめに

ヒトの脳は、視覚野・聴覚野・言語野のように、その機能が局在化しているが、各領域は独立しているわけではなく、あらゆる情報の処理のために機能的に連結している。現在では脳機能イメージングにより、言語意味処理における脳領域の機能的連結について様々な立場から研究が行われ、いくつかの意味処理モデルが提唱されている。embodiment 理論[1]によれば、言語理解には脳の知覚・運動系が本質的に関与しており、運動や動作を含意する文を読む時には運動野と言語野が連携して賦活するとされる。一方でこの理論に対立するように、運動

野の関与は本質的でなく、言語の意味理解自体は左中側頭回付近を中心に、運動のモードを超えて処理されるとする amodal 理論を支持する研究も存在する[2]。本研究ではこれらを踏まえ、運動を含意する、あるいはしない文の意味処理領域を特定する。すなわち、手を使う行為を意味する手行為文と、身体動作を伴わない心的行為文を提示した時の脳の賦活を比較し、言語の意味理解に関与する脳領域を同定する。本研究では、広く利用される一般線形モデル(GLM)ではなく、fMRI データの機械学習である多ボクセルパターン分析(MVPA)のうち、“searchlight”[3]の変量効果分析である“univariate searchlight”[4]を用いる。これは MVPA と GLM を融合させた技法と規定できる。本研究では、機械学習モデルの交差評価のため、同意の文刺激を母語(日本語)と第二言語(英語)の双方で提示する。これは embodiment 理論が第二言語の意味処理にも妥当するかどうかを検証する意味合いを持つ。

2. 実験方法

2.1. 実験参加者

本研究の実験参加者は 20 代の日本人 39 名(男 24 名、女 15 名)である。東京工業大学の「人を対象とした研究倫理委員会」の審査・承認を得て募集している。参加者は全て右利きで、利き手指数は平均 47.9、標準偏差 2.62 である。また、参加者の TOEIC の点数は 450 点～960 点の間でおよそ均等に分散しており、平均 662 点、標準偏差 150 点である。

2.2. 実験計画

脳画像データの撮像には、東京工業大学の 3.0T General Electric Signa スキャナーを使用し、機能的磁気共鳴画像法 fMRI を用いた。解剖学的スキャンの撮像条件は、TR 7.284ms、TE 2.892ms、FA 11 度、バンド幅 31.25kHz、ボクセルサイズ 1mm 等方性である。実験では、前半は英語文、後半は意味的に同一の日本語文を

用い、fMRI スキャナーの中で文を提示し、それが意味を為すかどうかを手元のボタン押しで解答させた。刺激の提示には E-Prime 2.0 標準ソフトウェアを用い、fMRI 専用レスポンスパッド 1 ボックス 2 ボタン(Current design HHSC-1X2-BY)により実験参加者の反応を記録した。1 試行の所要時間は 12s(文の表示 5s、解答時間 1.5s、安静 5.5s)であり、30 試行を 1 つのセッションとし、英語文、日本語文でそれぞれ 3 セッションずつ設定した。セッション中の撮像条件は、TR 3000ms、TE 30ms、FOV 24 * 24、Flip 角 90 度であり、1 試行中に 4 ヴォリュームを取得した(図 1)。

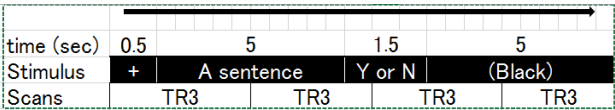


図 1：1 試行の流れ

2. 3. 実験刺激

fMRI スキャナー内で参加者に提示した文は 4 種類(両手行為文、片手行為文、心的文、意味が通らない文)であり、英語文と日本語文でそれぞれ意味的に同一の文を用いた(表 1)。ここで、両手行為文とは、通常は両手を使う行為を表す文であり、片手行為文とは通常はどちらか一方の手のみを使う行為を表す文である。文の内訳は、両手行為文 20 個、片手行為文 20 個、心的文 20 個、意味が通らない文 30 個の計 90 個である。これらの刺激は、各文につき、fMRI 実験に参加していない日本語母語話者 19~20 人が、親密度(英語・日本語刺激)、イメージしやすさ、経験、両手かどうか(日本語刺激)、わかりやすさ(英語刺激)の観点から評定し、ノルミングを行っている。また、文は参加者ごとにランダムな順に提示し、各セッションの文の内訳も異なるようにした。

表 1：実験刺激として使用した文

文の種類	例文	個数
両手行為文	I wash the dishes. 皿を洗う。	20
片手行為文	I use the spoon. スプーンを使う。	20
心的行為文	I make a judgment. 判断を下す。	20
意味が通らない文	I wash a judgment. 判断を洗う。	30

意味が通らない文は、実験参加者に実験の目的を隠した状態でタスクに取り組んでもらうためのフィラーであり、この文に対する反応は解析には用いない。また、意味的に同一な英語文と日本語文を用いるという性質上、先に日本語文を提示してしまうと、英語文の理解に影響を与えてしまう可能性があるため、本実験では英語文

セッションと日本語文セッションを交互に繰り返すようなオーソドックスな順序効果の相殺は行わなかった。

2. 4. 分析方法

脳の血流動態応答のピークは、刺激の提示から数秒遅れることが知られているので、分析には各試行の 4 回の撮像のうち、3 番目と 4 番目のデータの平均を用いた。分析の前に、画像データは connectivity toolbox 2017a(CONN)を用いて前処理、すなわち、画像同士の位置合わせ(realignment)、歪み補正 (unwarp)、スライスタイミング補正(slice timing correction)、解剖学的標準化(normalization)を行った。ボクセル値の平滑化(smoothing)は、多ボクセルパターン分析(MVPA)においては精度を低下させるため、行わなかった。MVPA の機械学習モデルの計算には、PyMVPA 2.0 という、fMRI データの機械学習のため開発された Python 2.7 のパッケージを利用した。また、機械学習モデルの計算には、PyMVPA 2.0 パッケージ内の”ペナルティ付きロジスティック回帰分析(PLR)”を使用した。

“searchlight”では、脳画像データの任意のボクセルに対し、その周辺のボクセルで形成される立方体の小領域を考え、その領域内で機械学習を行う方法である。ここでは、各条件(両手行為文 vs 心的行為文、片手行為文 vs 心的行為文、両手行為文 vs 片手行為文)での賦活パターンの違いを判別する機械学習モデルを計算する。小領域とは、radius = 1 の場合、対象とするボクセルを中心にした 3 ボクセル立方(27 ボクセル)、radius = 2 の場合、対象とするボクセルを中心にした 5 ボクセル立方(125 ボクセル)となる。この小領域内で、英語セッションの結果から文条件の判別モデルを作成し、日本語セッションの結果を用いてモデリング精度を計算する。次いでセッション間で学習とテストの役割を交換した交差評価を行い、両者の平均をその小領域の最終的なモデリング精度の値として、初めに対象としたボクセルに格納する。ここで radius の大きさは GLM におけるスムージングと比較しうる効果をもつ。

さらに、“searchlight”の結果のグループ解析として、“単変量サーチライト(univariate searchlight)”[4]を行った。すなわち、ボクセル毎の精度を z-スコアに変換した後、SPM 12 の変量効果分析により、集団レベルで t 検定を行った。

3. 結果

CONN のアトラスと同じボクセルサイズ 2mm × 2mm × 2mm で、radius = 3 における”univariate searchlight”の結果を、条件ごとに 3D 画像と横断面の 2D 画像で示す(両手行為文 vs 心的行為文(図 2)、片手行為文 vs 心

的行為文(図 3)、両手行為文 vs 片手行為文(図 4)である)。赤く塗られた部分は p 値が 0.01%水準で有意なボクセルである。

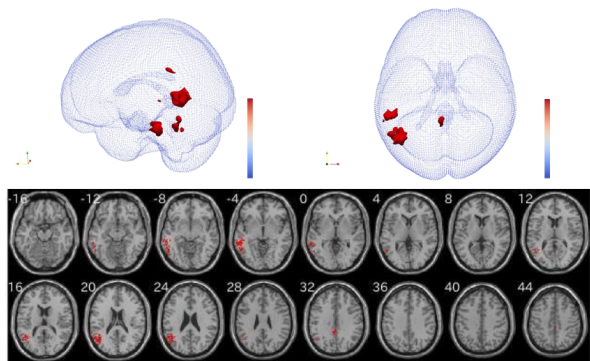


図 2：両手行為文 vs 心的行為文
($p < 0.0001$, radius = 3)

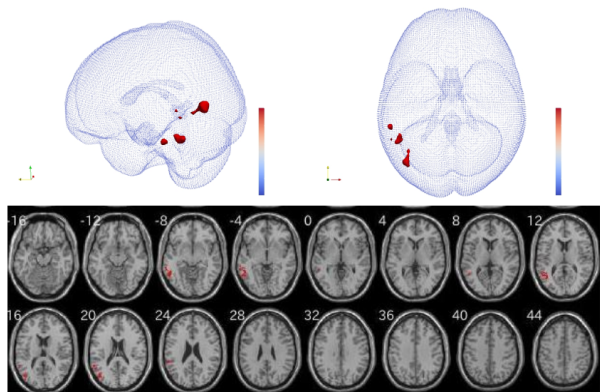


図 3：片手行為文 vs 心的行為文
($p < 0.0001$, radius = 3)

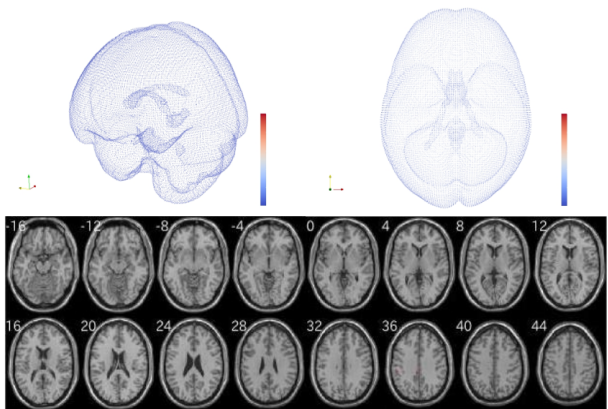


図 4：両手行為文 vs 片手行為文
($p < 0.0001$, radius = 3)

また、各条件において、特に有意なクラスターについて、領域名、ピークの MNI 座標、p-FWE 値などを以下の表 2、表 3 にまとめる(両手行為文 vs 片手行為文では、クラスターは確認できなかった)。

表 2：両手行為文 vs 心的行為文における有意なクラスター

両手行為文 vs 心的行為文

領域名	左角回	左中側頭回	左後帯状皮質
MNI 座標	-52, -56, 24	-44, -60, 20	-4, -42, 32
z-score	1	1	1
クラスターサイズ (ボクセル数)	314	314	41
クラスター p-FWE	0.000	0.001	0.000
ピーク p-FWE	0.046	0.007	0.045

表 3：片手行為文 vs 心的行為文における有意なクラスター

片手行為文 vs 心的行為文

領域名	左中側頭回	左下側頭回
MNI 座標	-50, -50, 10	-54, -52, -8
z-score	1	1
クラスターサイズ (ボクセル数)	174	106
クラスター p-FWE	0.000	0.000
ピーク p-FWE	0.069	0.346

4. 考察

両手行為文と心的文の比較において、左中側頭回、左角回の付近に両者の差について有意な情報をもつクラスターが認められた。これらの領域は、古典的言語野である Wernicke 野の周辺にあり、Binder のレビュー論文[2]に代表されるように、High level convergence モデルにおいて、運動などの特定のモードを超えた意味処理における中心的な役割について、多くの研究がなされている領域である。また、片手行為文と心的文の比較においても、同様の結果が得られた。一方で、両手行為文と片手行為文の比較では、両者を統計的に有意に判別する脳領域は確認できなかった。

本実験の“univariate searchlight”を用いた結果においては、運動野、感覚運動野に判別力をもつボクセルのクラスターは確認できなかった。これは embodiment 理論と対立し、言語の意味理解に運動は本質的ではなく、左中側頭回を中心に運動のモードを越えて処理されるという amodal 理論を支持するものである。ただし“searchlight”に関しては、設定を変更した際の結果の差の評価や、GLM など他の単変量の統計解析結果との比較など、大きな問題が残されている。こうした点に関しては、今後さらなる検討を重ねていく必要があると思われる。

参考文献

- [1] Roel M. Willems, Daniel Casasanto, (2011), Flexibility in embodied language understanding, *Frontiers in Psychology*, v.2, doi: 10.3389/fpsyg.2011.00116
- [2] Jeffrey R. Binder, Rutvik H. Desai, (2011) The Neurobiology of Semantic Memory, *Trends in Cognitive Science*, v.15(11), 527-536
- [3] Nikolaus Kriegeskorte, Peter Bandettini, (2007), Analyzing for information, not activation, to exploit high-resolution fMRI, *Neuroimage*, v.38(4), 649-662
- [4] Koji Jimura, Russell A. Poldrack, (2012), Analyses of regional-average activation and multivoxel pattern information tell complementary stories, *Neuropsychologia* v.50(4), 544-552