

日本語動詞の脳磁図研究

太田真理^{1,2}、大関洋平^{2,3,4}、アレック・マランツ^{2,5}¹九州大学、²ニューヨーク大学、³早稲田大学、⁴理化学研究所、⁵ニューヨーク大学アブダビ

要旨：脳磁図を用いた先行研究では、複数の形態素でできた英単語を読んだ後に、大脳左側頭葉腹側にある左紡錘状回・左下側頭回 (L. FG/ITG) で、語の形態素への分割を反映する脳活動 (M170) が生じると報告されている。さらに別の脳磁図研究では、M170 の振幅と形態素間の推移確率が相関することも報告されている。しかし M170 が形態素間の推移確率を反映するのか、文字間の推移確率を反映するのか明らかでなかった。本研究では、文字境界と形態素境界が乖離する日本語の子音語幹動詞を対象に、形態素間の推移確率と文字間の推移確率のどちらが、M170 に反映されるのかを、語彙判断課題を用いて検討した。形態的に単純な自動詞・他動詞と複雑な使役形で L. FG/ITG の活動が異なるかを検討した結果、自動詞・他動詞では L. FG/ITG で有意な活動の上昇が観察された。さらに、形態素間の推移確率が L. FG/ITG の活動を変化させるかを検討した結果、形態素間の推移確率と L. FG/ITG の活動の有意な負の相関が観察された。これらの結果は、日本語でも形態的に複雑な語は形態素に分割されており、文字に分割されるのではないことを示しており、英語の先行研究が主張した通り、M170 は形態素への分割を反映することが明らかになった。

1. 背景

脳活動を時間的に高い解像度で計測できる脳磁図を用いた研究では、“predictable” のように複数の形態素 (*predict-able*) から成る英単語を読んだ際に、単語の提示から約170ミリ秒後に、大脳左側頭葉腹側にある左紡錘状回・左下側頭回 (L. FG/ITG) で、語の形態素への分割を反映する脳活動 (M170) が生じることが報告されている (Solomyak & Marantz 2010)。さらに、別の脳磁図研究では、M170の振幅と形態素間の推移確率 (例：*predict* の後に、*-able* が現れる確率) が相関することも報告されている (Lewis et al. 2011)。しかし、これらの先行研究が対象にした英語では、形態素境界と文字境界が必ず一致するため、M170が形態素間の推移確率を反映するのか、文字間の推移確率を反映するのかを区別することが難しかった。

漢字仮名交じり表記を用いる日本語では、子音語幹動詞で形態素境界と文字境界が乖離する。例えば「染まる」では、形態素境界は“*som-ar-u* (√-Voice-Tense)”であるのに対して、文字境界は「染=ま=る」である (=は文字境界、-=は形態素境界を示す) (Oseki 2017)。本研究は、日本語の子音語幹動詞を対象に、形態素間の推移確率 (例：*som-* の後に *-ar* が現れる確率) と文字間の推移確率 (例：「染」の後に「ま」が現れる確率) のどちらが、M170に反映されるのかを明らかにすることを目的とする。さらに、使役形態素“*-(s)ase*”を含むために形態的に複雑な使役形と、より単純な自動詞・他動詞を比較することで、英語の先行研究と同様に、日本語でも形態素への分割を反映するM170が観察されるかを検討することも目的にする。

2. 脳磁図実験

2.1 実験参加者

実験には、ニューヨーク近郊在住の22名の日本語母語話者 (男性9名、女性13名、年齢 35.5 ± 7.1歳 [平均 ± 標準偏差]) が参加した。実験参加者は、エディンバラ利き手テストの結果、全員右利きであった (側化指数 94.1 ± 15.9) (Oldfield 1971)。また、参加者の視力 (矯正視力を含む) は

正常であり、精神疾患の罹患歴もなかった。本実験はニューヨーク大学の研究倫理審査委員会の承認を得て実施された。

2.2 刺激と課題

実験刺激には、「回す」と「回る」のように、語根を共有する自動詞と他動詞のペア (自他對) を用いた。刺激語は以下の手順で選定した。まず、『現代語自他對一覧表 Excel版』に記載された548対の自動詞・他動詞と、以下の基準に該当するものを除外した200対を選んだ。

- 1) 読み方が曖昧なもの (空く：あく/すく)
- 2) Jacobsen の分類のうち、自他が非対称でかつ自他對の数が少ないもの (6, 7, 10-16, その他：結ばれる/結ぶ)
- 3) 自他對で異なる漢字を使うもの (尖る/研ぐ)
- 4) 感じを使わないもの (じゃれる)
- 5) 古語 (干る)
- 6) 方言 (慰む)
- 7) 自他對に意味的な対応がないもの (暮れる/暮らす)
- 8) 複合動詞 (巻き上げる)
- 9) 自他の区別が曖昧なもの (休む)

また、200対の自動詞・他動詞のそれぞれに、使役形態素 “-(s)ase” を加えた使役形も刺激語に加えた (合計800語)。これらの日本語動詞のひらがなに含まれる一つの子音を、/k/, /g/, /s/, /t/, /m/, /b/ のいずれかで置き換えることで、「染さる」などの非単語を作成した (合計800刺激)。全ての非単語は、現代日本語書き言葉均衡コーパス中の出現頻度が0であった。以上の刺激に対して、158人を対象に、インターネットを介した語彙判断実験を行った (<http://spellout.net/ibexfarm/>)。行動実験の結果、参加者間の平均正答率が75%以上であった刺激 (自動詞・他動詞・自動詞使役形・他動詞使役形のそれぞれに112個、合計896刺激) のみを脳磁図実験に使用した。形態素間の推移確率と文字間の推移確率は、現代日本語書き言葉均衡コーパスに基づいて以下のように計算した。

形態素間の推移確率：(動詞語幹 + 態) の頻度 / 動詞語幹の頻度

文字間の推移確率：(漢字 + ひらがな) の頻度 / 漢字の頻度

実験では、語彙判断課題を用いた。参加者は画面上に提示された文字列が、日本語の動詞かどうかを判断し、ボタンを押して回答した。

2.3 脳磁図の記録

脳活動の計測前に、全ての参加者の頭部の形状をデジタイザーにより計測した (FastSCAN, Polhemus製)。頭部の形状に加えて、鼻根点、左右耳珠、5点の頭部の位置計測用のコイルの位置を記録した。頭部形状の計測後、参加者は脳磁計室の外で、本番と同様の語彙判断課題を10題練習した。なお、練習課題は本番では使用しなかった。

練習後、参加者は磁気シールドルームに入り、仰臥位で脳磁図の計測を行なった。脳活動の計測には、157チャンネル (軸方向型グラジオメーター) の脳磁計 (金沢工業大学, 金沢) を使用した。サンプリング周波数は2000 Hz、0.1 Hzのハイパスフィルターと200 Hzのローパスフィルター

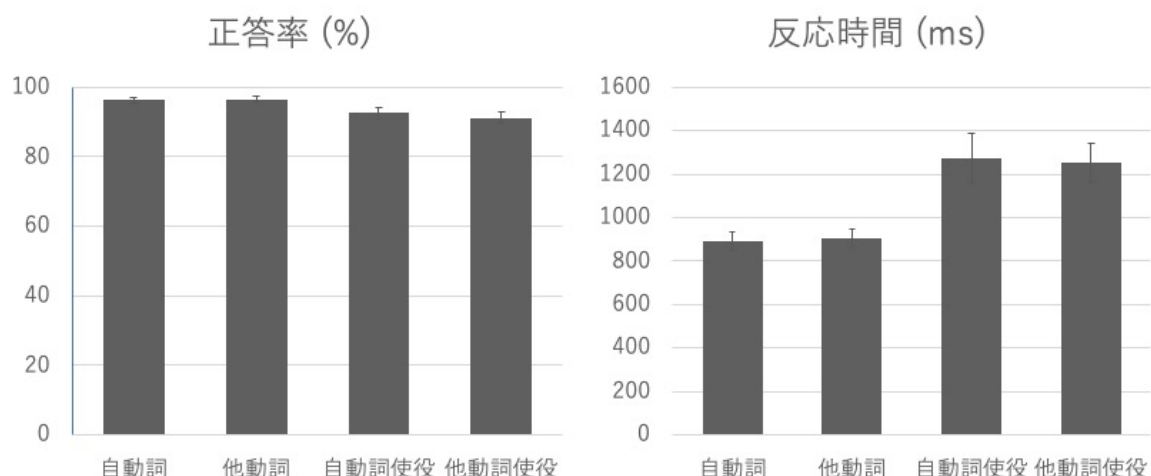


図1. 行動データ

でオンラインフィルタリングを行なった。各参加者は、全体で90分 (データの取得は30分から40分) 程度の時間、実験に参加した。

2.4 脳磁図の解析

まず、MEG160ソフトウェアに実装されたノイズ除去アルゴリズムにより、脳磁図データのノイズを除去した (Adachi et al. 2001)。以降の脳磁図データ解析には、MNE-Pythonとeelbrainパッケージを使用した (Gramfort et al. 2013, 2014)。1 Hzのハイパスフィルターと40 Hzのローパスフィルターをオフラインでかけ、独立成分分析により眼球運動や心拍などの脳活動以外の信号を除去した。その後で、脳磁図データは動詞提示の100 ms前から600 ms後までエポック化した。 ± 2000 fTを超える信号値を含む試行は、アーチファクトが混入していると考えられるため解析から除外した。信号源の推定にはdSPMを用いた (Dale et al. 2000)。

解析では、ノンパラメトリック時空間クラスター分析を行った (Gwilliams et al. 2016)。本研究では、先行研究で報告されたM170を研究対象としたため、PALS-B12に基づいて左紡錘状回・下側頭回を関心領域とし (Van Essen 2005)、動詞提示後50-250 msの脳活動を調べた。

3. 結果

3.1 行動データ

自動詞・他動詞・自動詞使役形・他動詞使役形の各条件で、平均正答率は90%以上であったため、実験参加者は正確に語彙判断課題を解答していた。正答率に対して、他動性と使役の2要因反復測定分散分析を行った結果、他動性の主効果、使役の主効果、交互作用は全て有意であった (使役: $p = 0.0001$; 他動性: $p = 0.046$; 交互作用: $p = 0.042$) (図1)。一方、反応時間では使役の主効果のみが有意であった (使役: $p < 0.0001$; 他動性: $p = 0.39$; 交互作用: $p = 0.34$)。使役形の正答率は有意に低下しており、反応時間も有意に上昇していたため、使役形の処理は負荷が高かったことを示唆している。

3.2 脳磁図データ

脳磁図データに対して、形態的により複雑な使役形と単純な自動詞・他動詞では、L.FG/ITGの活動が異なるかを検討した。その結果、自動詞・他動詞では、動詞の提示後 71-128 ms で、L.FG/ITG 後部に有意な活動の低下 (M100) が観察された (corrected $p = 0.035$) (図2)。さらに、自動詞・他動詞では、動詞の提示後 148-198 ms で、L.FG/ITG に有意な活動の上昇 (M170) が観察

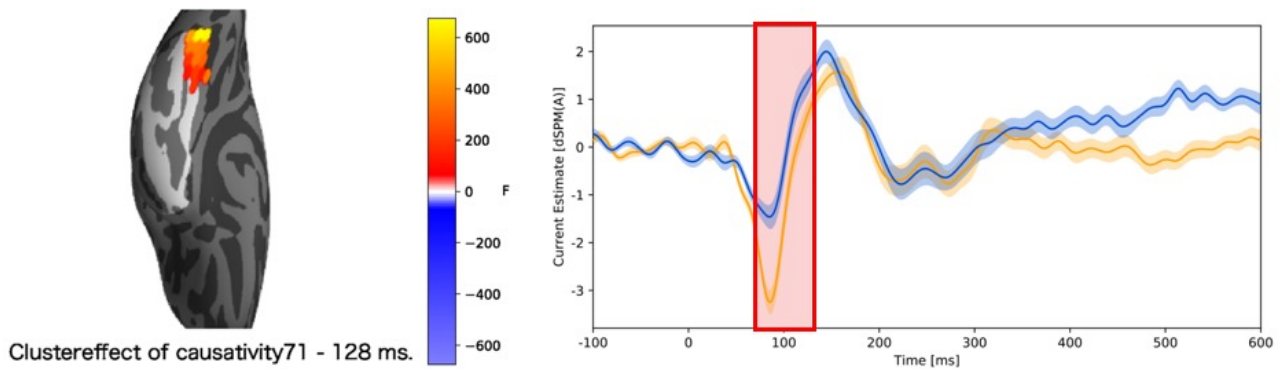


図2. 使役による左紡錘状回・下側頭回の活動 (M100)：黄色が自動詞・他動詞、青が使役形

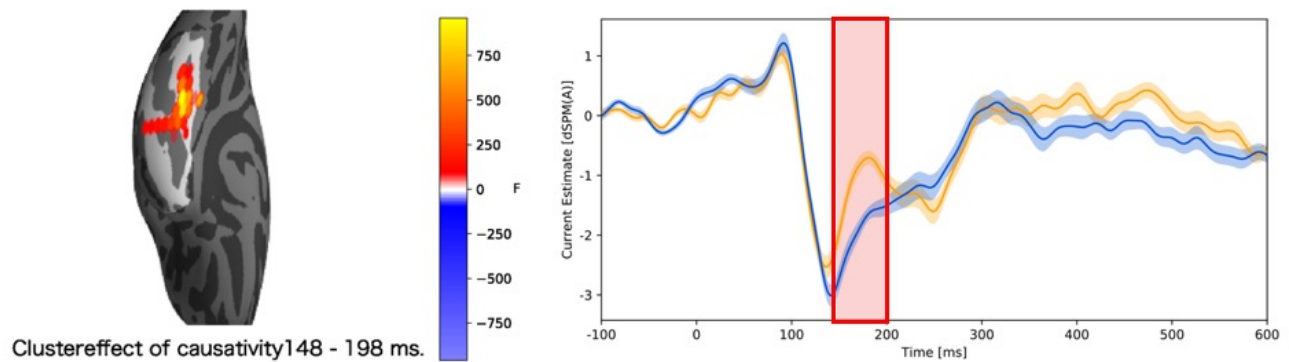


図3. 使役による左紡錘状回・下側頭回の活動 (M170)：黄色が自動詞・他動詞、青が使役形

された ($\text{corrected } p = 0.044$) (図3)。一方で、他動性の主効果、使役と他動性の交互作用は観察されなかった ($\text{corrected } p > 0.2$)。

さらに、形態素間の推移確率がL.FG/ITGの活動を変化させるかを検討した結果、動詞の提示後形 139-201 ms で、態素間の推移確率と L.FG/ITG の活動の有意な負の相関が観察された ($\text{corrected } p = 0.033$) (図4)。形態素間の推移確率と対照的に、文字間の推移確率とは有意な相関は観察されなかった ($\text{corrected } p > 0.2$)。

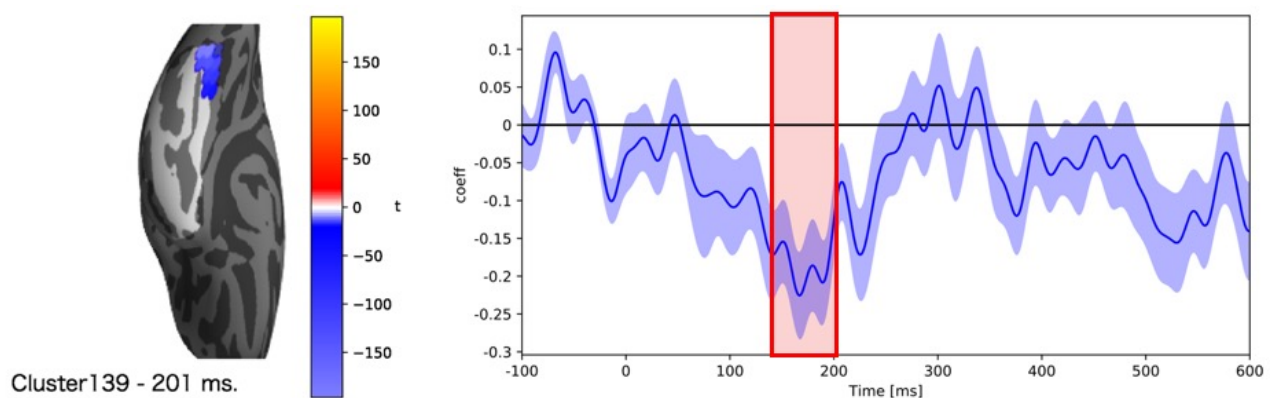


図4. 形態素間の推移確率は左紡錘状回・下側頭回の活動 (M170) を変化させる

4. 考察

本研究では、形態的に単純な自動詞・他動詞では、複雑な使役形よりも L.FG/ITG の活動が有意に上昇することが明らかとなった。動詞語幹から使役形態素への遷移確率は、動詞語幹から時制形

態素への推移確率よりも低いため、この活動は形態素間の推移確率を反映すると考えられる。以上の結果は、形態的により複雑な日本語の使役形でも、英語の場合と同様に形態素への分割が行われていることを示唆する。

さらに、形態素間の推移確率とL. FG/ITGの活動の有意な負の相関が観察されたが、文字間の推移確率とは有意な相関は観察されなかったことから、形態素間の推移確率は L. FG/ITG の活動を変化させたと考えられる。これらの結果は、日本語でも形態的に複雑な語は形態素に分割されており、文字に分割されるのではないことを示しており、英語の先行研究が主張した通り、M170は形態素への分割を反映することが明らかになった。

謝辞

データの収集・解析にご協力いただいた、Jeffrey Walker氏と Ellie Abrams氏に感謝いたします。本研究は科研費 JP19H01256, JP17H06379の助成を受けて行われたものです。

参考文献

- Adachi, Y., Shimogawara, M., Higuchi, M., Haruta, Y., & Ochiai, M. 2001. Reduction of non-periodic environmental magnetic noise in MEG measurement by continuously adjusted least squares method. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 11:669–672.
- Dale, A. M., Liu, A. K., Fischl, B. R., Buckner, R. L., Belliveau, J. W., Lewine, J. D., & Halgren, E. 2000. Dynamic statistical parametric Mapping: Combining fMRI and MEG for high-resolution imaging of cortical activity. *Neuron* 26:55–67.
- Gramfort, A., Luessi, M., Larson, E., Engemann, D. A., Strohmeier, D., Brodbeck, C., Goj, R., Jas, M., Brooks, T., Parkkonen, L., & Hämäläinen, M. 2013. MEG and EEG data analysis with MNE-Python. *Frontiers in Neuroscience* 7:267.
- Gramfort, A., Luessi, M., Larson, E., Engemann, D. A., Strohmeier, D., Brodbeck, C., Parkkonen, L., & Hämäläinen, M. 2014. MNE software for processing MEG and EEG data. *NeuroImage* 86:446–460.
- Gwilliams, L., Lewis, G., & Marantz, A. 2016. Functional characterisation of letter-specific responses in time, space and current polarity using magnetoencephalography. *NeuroImage* 132:320–333.
- ナロック・ハイコ、プラシヤント・パルデシ、影山太郎、赤瀬川史朗 (2015) 『現代語自他対一覧表 Excel版』 (<http://watp.ninjal.ac.jp/resources/>).
- Lewis, G., Solomyak, O., & Marantz, A. 2011. The neural basis of obligatory decomposition of suffixed words. *Brain and Language* 118:118–127.
- Oldfield, R. C. 1971. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9:97–113.
- Oseki, Y. 2017. Voice morphology in Japanese argument structures. <https://ling.auf.net/lingbuzz/003374>
- Solomyak, O., & Marantz, A. 2010. Evidence for Early Morphological Decomposition in Visual Word Recognition: A Single-Trial Correlational MEG Study. *Journal of Cognitive Neuroscience* 22:2042–2057.
- Van Essen, D. C. 2005. A Population-Average, Landmark- and Surface-based (PALS) atlas of human cerebral cortex. *NeuroImage* 28:635–662.