

## B-4

### 事象関連磁場 M170 に対する形態素分割と項構造の影響：

#### 脳磁図による研究

田中 陸<sup>1</sup>、深見 伶那<sup>2</sup>、梁井 一樹<sup>3</sup>、山田 絵美<sup>4</sup>、重藤 寛史<sup>5,6</sup>、太田 真理<sup>4</sup>

<sup>1</sup>長崎県立五島高等学校（九州大学未来創成科学者育成プロジェクト（QFC-SP））

<sup>2</sup>九州大学文学部

<sup>3</sup>九州大学大学院医学系学府 保健学部門 検査技術科学分野

<sup>4</sup>九州大学 大学院人文科学研究院 言語学講座

<sup>5</sup>九州大学 大学院医学研究院 保健学部門 検査技術科学分野

<sup>6</sup>九州大学病院 脳神経内科

ohta@lit.kyushu-u.ac.jp

**要旨：**単語の呈示から約 170ms 後に、左紡錘状回で生じる脳活動 M170 は、語から形態素へ分割する処理を反映することが指摘されている。しかし、項が増える使役接辞を用いた先行研究では項構造が複雑化した結果、M170 が変化した可能性が排除できなかった。本研究では、M170 が形態素への分割を反映するのか、あるいは項構造の複雑さを反映するのか検証することを目的とした。また、使役接辞と受動接辞を用いて形態素間の推移確率が M170 に影響するのか再検証し、形態素処理と M170 の関係を一般化することも目指した。動詞の自他と助動詞の有無の 2 要因反復測定分散分析を行った結果、左紡錘状回では助動詞による項構造の変化が M170 に与える影響が観察されなかった。さらに、線型混合効果モデルを用いて M170 の振幅に影響する要因を検討した結果、語根から動詞語幹への推移確率が低い単語ほど、左紡錘状回で M170 の振幅が増大することが示された。以上の結果は、M170 は項構造の複雑さではなく形態素への分割を反映することを示しており、形態素処理と M170 の関係を一般化することにも貢献するものであった。

**キーワード：**日本語、言語脳科学、実験言語学、形態論、脳磁図、事象関連磁場、形態素分割、項構造

#### 1. 背景

形態素は意味を持つ最小の単位であり、単一もしくは複数の形態素が組み合わさることで語を構成する。語の視覚認知に関わる神経基盤を、脳波 (electroencephalography: EEG) や脳磁図 (magnetoencephalography: MEG) で検討した先行研究では、文字列を語として認知する過程は刺激呈示後 100 ~ 200 ms で行われることが示唆されている。特に、刺激呈示後 170 ms 前後に左の紡錘状回で生じる事象関連電位/磁場 (event-related potential/field: ERP/ERF) の N170/M170 は語の認知の神経指標として長らく研究されてきた。M170 の振幅は、ある形態素と後続する形態素がどれだけ共起しやすいかを反映する形態素間の推移確率と共変するため、語の形態素への分割を反映すると考えられてきた (Solomyak & Marantz 2009)。例えば、日本語の自他交替動詞を用いた Ohta et al. (2019) は、M170 が形態素間の推移確率と文字間の推移確率のどちらと共変するかを調べることで、

M170 が形態素処理と文字処理のどちらを反映するのか検討した。この研究では、自他交替動詞の自動詞、他動詞、自動詞使役、他動詞使役、非単語に対する語彙判断課題中の脳活動を脳磁図で計測し、使役接辞を含む使役形で M170 が増大すること、形態素間の推移確率と M170 の振幅が負の相関を持つ (推移確率が低いと振幅が増大する) が、文字間の推移確率は相関しないことを報告した。しかし、この研究では項が 1 つ増える使役接辞を用いたために項構造が複雑化した結果、M170 が変化した可能性が排除できなかった。本実験では、M170 が形態素への分割を反映するのか、あるいは項構造の複雑さを反映するのか検証することを目的とする。加えて、使役接辞以外を用いた場合も、Ohta et al. (2019) と同様に形態素間の推移確率と文字間の違いが現れるのか再検証し、形態素処理と M170 の関係を一般化することも目指す。具体的には、項を増やす使役接辞と項を減らす受動接辞を用いて、項構造が語の認知過程に影響するのかを検討する。

## 2. 方法

### 2.1. 実験参加者

実験には、九州大学の日本語母語話者である学生 31 名 (男性 18 名、平均年齢  $21.9 \pm 1.6$  歳) が参加した。脳磁図データにノイズが乗っていた 3 名を以下の分析から除外した。全参加者は矯正を含む正常な視力を有し、エジンバラ利き手テスト (Oldfield 1971) の平均スコアは  $0.96$  ( $SD = 0.10$ ) で右利きと判定された。なお、過去に頭部 MRI 構造画像を取得していない参加者に対しては MRI 撮像を実施した。すべての参加者は神経内科的もしくは精神的な疾患の既往がないことを確認した。本研究は九州大学医系地区部局・病院倫理委員会によって承認を得たうえで実施した。

### 2.2. 刺激と課題

実験では、日本語の自他交替動詞を刺激に用いた。条件は、自動詞 (例: 驚く)、他動詞 (驚かす)、自動詞使役 (驚かせる)、他動詞受動 (驚かれる)、非単語 (驚かせく) の 5 条件とした。自他交替動詞の対で自動詞条件と他動詞条件を組み、自動詞に使役の助動詞「セル/サセル」をつけた自動詞使役条件と、他動詞に受動の助動詞「レル/ラレル」をつけた他動詞受動条件を用意した。刺激は、漢字仮名交じりの表記「漢字 1 字 + 送り仮名」に統一している。非単語条件は、送り仮名のうち 1 字の子音を別の子音に置き換えた。単語条件はそれぞれ 112 試行ずつ、非単語条件は単語 4 条件に対応するように 448 個作成した。実験参加者は計 896 試行の課題に回答したが、本研究は M170 における単語処理の機能を明らかにすることが目的であるため、非単語条件は解析対象としない。

### 2.3. 実験方法と手順

実験参加者は呈示された刺激が日本語の単語かどうかを判断する語彙判断課題に回答した。刺激呈示には PsychoPy3 (Peirce 2007, Peirce et al. 2019) を用いた。刺激は、32-inch LCD モニター (Display ++; Cambridge Research Systems Ltd., Rochester, UK) を使ってリフレッシュレート 120 Hz、各試行のはじめに固視点 (+) を 700–1200 ms の間でランダムに呈示した。参加者は呈示された単語刺激が「単語」か「非単語」か判断し、マウスのボタン押しをした。マウスの回答ボタンは、参加者ごとに左右を入れ替えて利き手の影響を受けないようにした。1 セッション 100 試行として計 9 セッション (最終セッションのみ 96 試行) で課題を行い、セッション間に休憩を入れた。

### 2.4. データ記録

脳磁図は、九州大学病院内の 306-channel whole-head MEG system (Neuromag; Elekta Ltd., Helsinki, Finland) を用いて記録した。データはサンプリング周波数 1000 Hz、0.03–330 Hz のオンラインフィ

ルターをかけて記録した。課題のない安静時の脳活動記録 (3 分間) と、課題の練習を行った後、本計測を開始した。計測に際しては、できるだけ頭を動かさず、身体や視線の動きを最小限にするよう教示した。課題については、できるだけ素早く正確に判断するように教示した。

## 2.5. データ分析

### 2.5.1. 行動データの解析

語彙判断課題の行動指標から、条件ごとに正答率と平均反応時間を求めた。正答率が 70%未満の条件が一つでもある参加者は、その後の解析から除外し、30 名 (男性 17 名) のデータが残った。

### 2.5.2. 脳磁図データの前処理

脳磁図データの解析には、MNE Python software 0.24.1 (Gramfort et al. 2013, Jas et al. 2018) を使用した。Maxwell フィルタ、バンドパスフィルタ処理 (1.0 ~ 100 Hz)、独立成分分析 (ICA) の前処理が終了したデータを、刺激呈示の -200 ms から 600 ms の範囲で切り出し、-200 ms から 0 ms をベースラインとした。ここでは、不正解の課題、機器トラブル等による明らかな中断、大きなノイズが残っている試行を除外した。Reject 率 20%以上を除外の基準としたが、除外対象者はいなかった。記録上の不備により 4 名除いたため、最終的に 26 名 (男性 13 名、19-25 歳 (平均 = 21.8, 標準誤差 = 1.47)) のデータを解析対象とした。

### 2.5.3. 信号源の推定

前処理後のデータを用いて、半球に 4098 個の vertices (両半球で 8196 個) を設定し、空間フィルタ法である dSPM (dynamic statistical parametric mapping) 法で信号源の推定を行った。推定後の各 vertices の時系列データから、刺激語ごとに刺激の呈示後 150ms から 200 ms の 50 ms の平均振幅を求めた。

### 2.5.4. 推移確率の算出

推移確率の算出には、現代日本語書き言葉均衡コーパス (BCCWJ) のコーパス検索アプリケーション「中納言」 (<https://chunagon.ninjal.ac.jp/>) を利用した。推移確率を求める上で、本実験の刺激は動詞だが、他品詞への派生について考慮する必要がある。例えば、「止める」から「止め」という名詞が派生するように、動詞が名詞化する例は数多く存在する。なお、「高い/高める」のような場合は、形容詞から動詞が派生している。これらは同一の語根を含むと考え、形態素の頻度に加えた。複合により、新たな語が形成される場合もある。例えば、動詞「上がる」は他の動詞と合成して「立ち上がる」「飛び上がる」等の複合動詞を形成する。なお、本論文では、複合動詞を形成する要素については形態素の頻度から除外した。同音異義語 (例：会う/合う/会う/逢う/遭う) については、意味だけでなく、それぞれ語の語根が異なる可能性があり、「中納言」では、語彙素項目は漢字を含めた形で区別している。本実験は視覚呈示による課題であり、視覚情報の違いが認知に対して影響を与えうるため、同音異義語は別単語として区別した。表 1 の項目の頻度 (コーパス検索の該当数) を各単語で求め、推移確率を算出した。統計処理上、正規分布に近づけるために、頻度や推移確率は底 2 の対数に変換した。本論文は、表 2 の 8 つの推移確率を検討した。文字間の推移確率は、漢字から次の仮名に続く確率 ( $\log(\text{bigram}/\text{kanji})$ ) を指す。表 2 に、条件ごとに頻度の傾向をまとめた。単語条件は自他対応で揃えているため、語根の頻度と漢字の頻度は 4 条件で一致している。

表 1 コーパスで求めた頻度の項目		表 2 統計に使用した推移確率	
頻度	例	推移確率の種類	例
語全体 (surface)	“somaraseru”	log(bigram/kanji)	染→染ま
語幹+助動詞接辞 (family)	“somarase-”	log(root/kanji)	染→som-
語幹 (stem)	“somar-”	log(stem/root)	som-→somar
語根 (root)	“som-“	log(family/stem)	somar-→somarase-
2 字 (bigram)	“染ま”	log(surface/family)	somarase-→somaraseru
漢字 (kanji)	“染”	log(family/root)	som-→somarase-
		log(surface/root)	som-→somaraseru
		log(surface/stem)	somar-→somaraseru

### 2.5.5. 統計解析

R studio 4.0.5 (R Core Team, 2019) と MNE Python を用いて、行動指標と M170 平均振幅の統計処理を行った。脳磁図データでは、まず単語条件によって皮質上の活動が時間的、空間的に異なるのかを検討するため M170 の時間帯に相当する刺激呈示後 150–200 ms で動詞の自他と助動詞の有無の 2 要因反復測定分散分析を Spatio-temporal permutation cluster test で実施した。次に、単語刺激による脳活動にはどの変数が寄与しているのか、実験上操作していない変数も含めて分析することが可能な線形混合効果モデル (linear mixed effect model: LME) を用いて脳表面上の vertices 毎に M170 の検討を行った。各種頻度や推移確率、文字数を固定効果、参加者や刺激語による違いを変量効果として含むモデル同士を比較し、脳活動の変動を説明する最適なモデルや変数を検討した。

	表 3 正答率と反応時間の平均、標準誤差			
	正答率(%)		反応時間(ms)	
	平均	標準誤差	平均	標準誤差
自動詞	98.15	0.27	724.72	22.04
他動詞	97.86	0.41	736.45	21.30
自動詞使役	95.54	1.04	1096.0	48.68
他動詞受動	92.32	0.88	1033.2	34.79

## 3. 結果と考察

### 3.1. 行動データ

平均正答率はどの条件も 9 割以上であり、単語の認知処理を見る上で支障のない課題の難度であった (図 1、表 3)。単語条件で、動詞の自他と助動詞の有無を要因として反復測定分散分析を行った結果、正答率と反応時間はいずれも、助動詞の有無に主効果が観察された (正答率:  $F(1, 26) = 3.93, p < 0.001$ , 反応時間:  $F(1, 26) = 3.93, p < 0.001$ )。助動詞を含む条件は正答率が低く、反応時間も長かった。動詞の自他の主効果と (正答率:  $F(1, 26) = 3.93, p = 0.23$ , 反応時間:  $F(1, 26) = 3.93, p = 0.63$ )、交互作用は有意でなかった (正答率:  $F(1, 26) = 3.93, p = 0.09$ , 反応時間:  $F(1, 26) = 3.93, p = 0.33$ )。課

題の正答率は全条件で>90%であったが、自動詞使役と他動詞受動は正答率が低く反応時間も長かったことから、これらの条件は難度が高いと考えられる。

なお、動詞の自他と助動詞の付与が関わる項構造の影響を考慮するため、項数について対応のある  $t$  検定を行った。自動詞と他動詞受動は 1 項、他動詞と自動詞使役は 2 項である。項数による反応時間の差を見た結果、条件間に有意差が得られたため ( $t(30) = 34.65, p < 0.001$ )、項数が増えて項構造が複雑になると、処理負荷が増大することが示唆された。

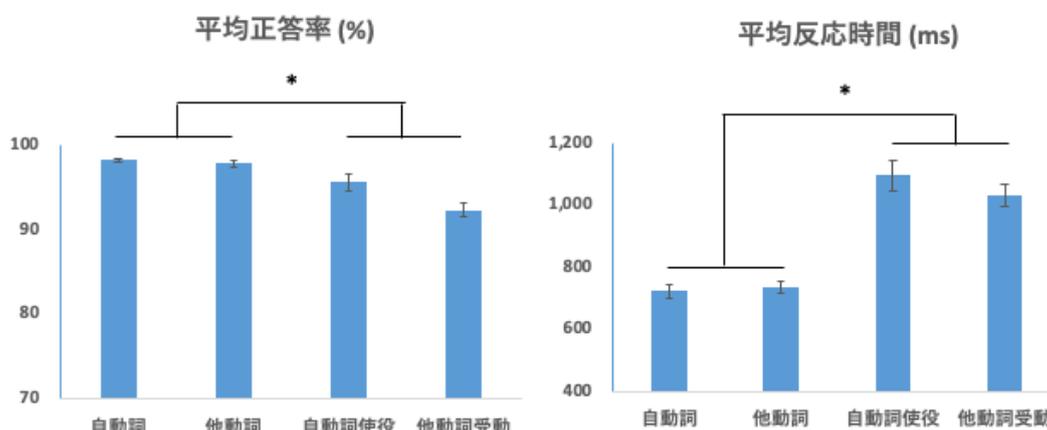


図 1 正答率と反応時間の分散分析の結果：エラーバーは標準誤差。

### 3.2. 脳磁図データ

#### 3.1.1. 皮質活動の時間的、空間的検討

どの条件においても、左下後頭回から紡錘状回中部にかけて皮質の活動が生じていた (図 2)。条件間の違いを検討するため動詞の自他と助動詞の有無の 2 要因分散分析を Spatio-temporal permutation cluster test で実施した結果、時間的、空間的に有意なクラスターは確認されなかった。行動データと異なり、M170 では助動詞の有無や項構造の影響は観察されなかった。



図 2 各条件の活動 (参加者間の平均): 各条件で加算平均した左紡錘状回の M170。

#### 3.1.2. 線形混合効果モデルの適合度検定

続いて、線形混合効果モデルを用いて M170 に影響する要因を検討した。その際、変量効果は実

験参加者のランダム切片とし、実験参加者間で M170 平均振幅 (切片) が異なる可能性、つまり振幅の大きさの個人差を考慮した。まず説明力のある要因を探索するために、固定効果を 1 つだけ含むモデルを調べた。具体的には、(1a) の固定変数  $x$  に、表 2 の推移確率と頻度を 1 つずつ当てはめたモデルの適合度を検討した。適合度検定の結果、モデル内の固定効果  $x$  の傾きが有意だったのは、length, log (family/stem), log (surface/family), log (family/root), log (surface/root), log surface frequency の 6 変数であった。さらに、文字数の差は明らかに脳活動に影響すると考えられるため、文字数を固定効果として (1b) を基準の式に設定した。

(1) SOI: 平均振幅、length: 文字数、subject: 実験参加者

- a.  $SOI \sim x + (1|subject)$
- b.  $SOI \sim length + (1|subject)$
- c.  $SOI \sim length + x + (1|subject)$

これを踏まえて、(1c) の固定効果  $x$  にどの変数を加えた場合に、基準モデル (1b) よりも適切な説明づけができるか、適合度検定によって検討した。変数  $x$  には、(1a) で調べ上げたものと同一の変数を代入した。

モデル間の適合度検定 ((1b) vs. (1c)) で得られた  $p$  値を脳表上に図示 (表示は  $1 - p$  値) したところ、推移確率  $\log(stem/root)$  を加えた (2) のモデルは基準モデル (1b) よりも左紡錘状回の活動を有意に上手く説明できることが確認された (図 3 左)。また (2) のモデルの固定効果である推移確率  $\log(stem/root)$  のベータ値も同様に脳表上に図示した (図 3 右) ところ、同じ部位でベータ値の低下が確認された。

(2) 適合度が高いと判断されたモデル式

$$SOI \sim length + \log(stem/root) + (1|subject)$$

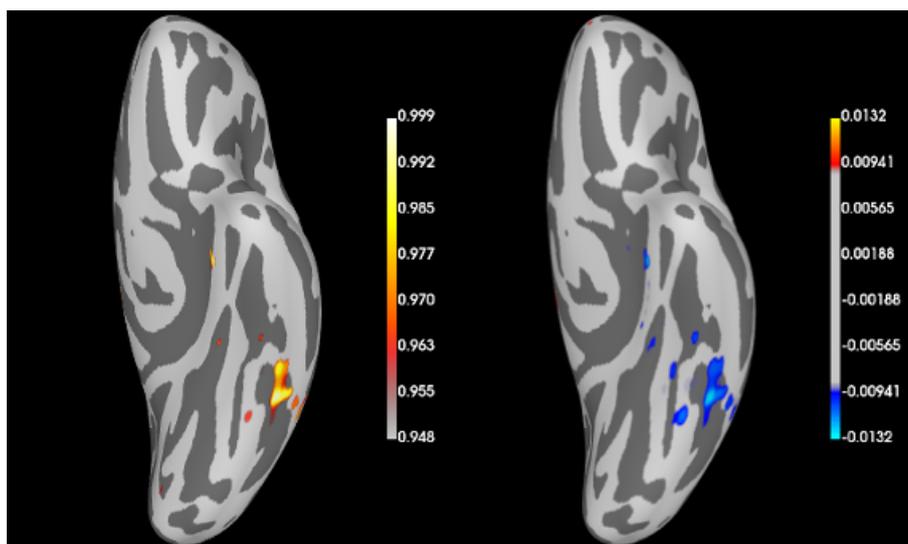


図 3  $\log(stem/root)$  を固定効果に追加した時の適合度検定の  $p$  値とベータ値。  $1 - p$  を表示。

以上の結果は、語根から動词语幹への推移確率が低い単語ほど、左紡錘状回において M170 の活動が増大することを示しており、先行研究で観察された M170 への形態素間の推移確率の影響が再現されたものであった。

#### 4. 参考文献

1. Bates, D., Maechler, M., & Bolker, B., Walker., S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48.
2. Gramfort, A., et al. (2013). MEG and EEG data analysis with MNE-Python. *Frontiers in neuroscience*, 7, 267.
3. Gwilliams, L., Lewis, G. A., & Marantz, A. (2016). Functional characterisation of letter-specific responses in time, space and current polarity using magnetoencephalography. *Neuroimage* 132: 320-333.
4. Jas, M., Larson, E., Engemann, D. A., Leppäkangas, J., Taulu, S., Hämäläinen, M., & Gramfort, A. (2018). A reproducible MEG/EEG group study with the MNE software: recommendations, quality assessments, and good practices. *Frontiers in neuroscience*, 12, 530.
5. Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. (2017). lmerTest package: tests in linear mixed effects models. *Journal of statistical software*, 82(1), 1-26.
6. Ohta, S., Oseki, Y., & Marantz, A. (2019). Disentangling morphological processing and letter recognition: An MEG study of Japanese verbs. SNL 2019. 2019.08.
7. Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9(1): 97-113.
8. Peirce, J. W. (2007). PsychoPy—psychophysics software in Python. *Journal of neuroscience methods*, 162(1-2), 8-13.
9. Peirce, J., Gray, J. R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J. K. (2019). PsychoPy2: Experiments in behavior made easy. *Behavior research methods*, 51(1), 195-203.
10. Pylkkänen, L., & Marantz, A. (2003). Tracking the time course of word recognition with MEG. *Trends in cognitive sciences*, 7(5), 187-189.
11. Rastle, K., Davis, M. H., & New, B. (2004). The broth in my brother's brothel: Morpho-orthographic segmentation in visual word recognition. *Psychonomic bulletin & review*, 11(6), 1090-1098.
12. R Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing (Version 3.6. 1)[Computer software]. R Foundation for Statistical Computing.
13. Solomyak, O., & Marantz, A. (2010). Evidence for early morphological decomposition in visual word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(9), 2042-2057.
14. Stockall, L., Manouilidou, C., Gwilliams, L., Neophytou, K., & Marantz, A. (2019). Prefix stripping re-re-revisited: MEG investigations of morphological decomposition and recomposition. *Frontiers in psychology*, 10, 1964.
15. Tarkiainen, A., Helenius, P., Hansen, P. C., Cornelissen, P. L., & Salmelin, R. (1999). Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain*, 122(11), 2119-2132.
16. Zweig, E., & Pylkkänen, L. (2009). A visual M170 effect of morphological complexity. *Language and Cognitive Processes*, 24(3), 412-439.