

# C-1 単語内部の階層構造を反映した周期的な脳活動の増大： 脳波による研究

太田真理<sup>1</sup>、中島潤<sup>2</sup>、山田絵美<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院人文科学研究院, <sup>2</sup>九州大学大学院人文科学府

ohta@lit.kyushu-u.ac.jp

**要旨：**本研究では、脳活動が一定のリズムで提示した外部刺激に同期する「引き込み現象」に着目して、複数の形態素からなる語は文と共通するメカニズムで処理されるため階層的な構造を持つ、という仮説を検討した。もし語が文と同様の階層構造を持つのであれば、階層構造を反映した周期的な脳活動が観察されることが予想される。4 Hz で形態素を聴覚提示した際の脳波で、引き込み現象を検討した結果、刺激提示と同期した 4 Hz の脳波の増大が観察された。さらに、2 形態素、3 形態素、4 形態素からなる動詞を連続提示した際の脳波において引き込み現象を検討した結果、2 形態素では 2 Hz、3 形態素では 4/3 Hz、2 Hz、4 形態素では 1 Hz、4/3 Hz、2 Hz の脳波が増大していた。以上の結果は形態素構造を反映した周期的な脳活動の増大が生じていたことを示しており、複数の形態素からなる語においても、文と同様に階層的な構造が作られていたことが示唆された。

**キーワード：**日本語、言語脳科学、形態論、脳波、階層構造、引き込み現象

## 1. 背景

人間の脳では、常に様々なリズムの脳活動 (自発発火) が生じている。近年、一定のリズムの外部刺激を与えると、脳活動が外部刺激に同期する引き込み現象が、人間の認知処理を反映する可能性が提案されている (Buzsáki & Draguhn 2004)。脳の言語処理に関しても、一定のリズムで文を聴かせると、文の階層構造を反映した周期的な脳活動が観察されることが報告されており (Ding et al. 2016)、脳の言語処理を解明する手段として引き込み現象が注目を浴びている (Giraud & Poeppel 2012, Meyer 2018, Meyer et al. 2020)。一方、理論言語学では複数の形態素からなる語は文と同様に階層的な構造を持ち、文と語が同じメカニズムで処理される可能性が示唆されている (Halle & Marantz 1993)。文と語が同じメカニズムで処理されるのか、あるいは異なるメカニズムで処理されるのかは、理論言語学や実験言語学の双方で議論が続いており、言語学における最重要課題の一つである。本研究は、複数の形態素からなる語は文と共通するメカニズムで処理されるため階層的な構造を持つ、という仮説を検討することが目的である。この仮説を検討するために、一定のリズム (4 Hz) で形態素を聴覚提示した際の脳波を計測し、脳波の引き込み現象が観察されるか検討した。複数の形態素からなる語が文と同様の階層構造を持つのであれば、脳波の引き込み現象が生じることで階層構造を反映した周期的な脳活動が観察されることが予想される。

## 2. 方法

### 2.1. 実験参加者

実験には、22 名の右利き日本語母語話者が参加した (男性 10 名、女性 12 名、平均年齢：21.0 ± 3.3 歳)。脳波データにノイズが乗っていた 2 名を以下の分析からは除外した。全ての参加者は正常

な視力 (矯正を含む)・聴力を有していた。実験参加にあたり、全ての参加者から文書による参加の同意を得た。また、本研究は九州大学大学院人文科学研究院の研究倫理審査委員会より承認を得た上で実施した。

## 2.2. 刺激と課題

実験では、2形態素 (例：捨て-る)、3形態素 (捨て-させ-る)、4形態素 (捨て-させ-られ-る) からなる日本語動詞を使用した。48個の動詞語幹、時制接辞 (-*ru/-ta*)、使役接辞 (-(*s*)*ase*)、受動接辞 (-(*r*)*are*) を組み合わせ、計384個の音声刺激を用意した。動詞語幹は全て2モーラであり、現代日本語書き言葉均衡コーパス (Maekawa et al. 2013) での出現頻が高い他動詞上位48語を使用した。さらに、以下の非単語検出課題のために、動詞語幹、時制接辞、使役接辞、受動接辞のいずれかで1モーラを別の音に置換することで、非単語刺激を作成した (例：捨む-る、捨て-ませ-る、など)。なお、課題の難度を統制するために、2モーラ以上が置換された非単語刺激は使用しなかった。音声刺激は音声合成ソフトウェア VOICEVOX (ver. 0.11.4: <https://voicevox.hiroshiba.jp/>) を使用して作成した。音声刺激の長さは150msから250ms (平均230ms) であったため、最後に無音区間を挿入することで全ての刺激が250msになるよう調整した。

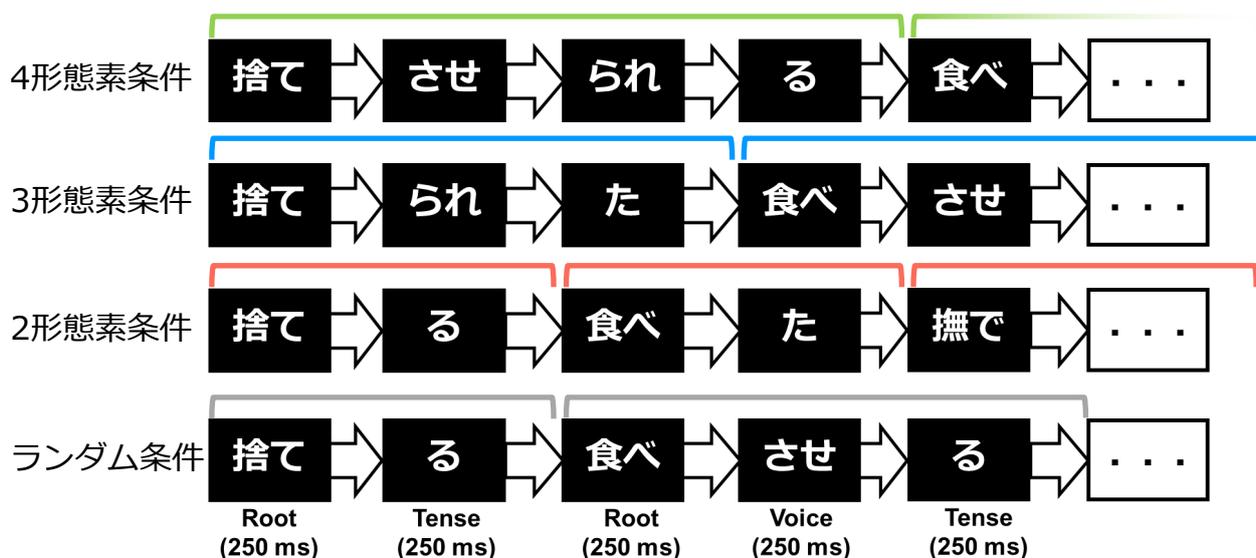


図1. 実験デザイン：2, 3, 4形態素からなる動詞を4Hzで聴覚提示した際に、刺激提示や階層的な形態素構造を反映した脳波の引き込み現象が観察されるかを検討した。

実験では、2形態素からなる動詞を連続提示する2形態素条件、3形態素からなる動詞を連続提示する3形態素条件、4形態素からなる動詞を連続提示する4形態素条件を設け、さらにコントロール条件として、2形態素、3形態素、4形態素からなる動詞をランダムに提示するランダム条件を設けた (図1)。2形態素条件では動詞語幹-時制接辞の組み合わせが、3形態素条件では動詞語幹-使役接辞または受動接辞-時制接辞の組み合わせが、4形態素条件では動詞語幹-使役接辞-受動接辞-時制接辞の組み合わせが連続で提示された。全ての条件で、1試行で24個の音声刺激を連続提示したため (1試行6秒)、2形態素条件では12個の動詞、3形態素条件では8個の動詞、4形態素条件で

は 6 個の動詞が 1 試行で提示された。ランダム条件では、1 試行で 8 個の動詞を提示した。

2 形態素条件、3 形態素条件、4 形態素条件はそれぞれ 30 試行を 2 ブロックに分けて提示し (計 60 試行)、ランダム条件は 30 試行を 1 ブロック提示した。1 ブロックには非単語を含まない試行が 24 試行、含む試行が 6 試行含まれていた。各ブロックの提示順序は、ラテン方格法により、参加者間でカウンターバランスを取った。参加者が刺激に注意を払っていることを確認するため、刺激中に非単語が含まれるかどうかを判断する非単語検出課題を課した。

各刺激は 4 Hz (250 ms) で提示したため、2 形態素が組み合わさる 2 形態素条件では 2 Hz、3 形態素が組み合わさる 3 形態素条件では 4/3 Hz と 2 Hz、4 形態素が組み合わさる 4 形態素条件では 1 Hz、4/3 Hz、2 Hz の脳活動が増大することが予想される (Ding et al. 2017, Lo et al. 2022) (図 2)。

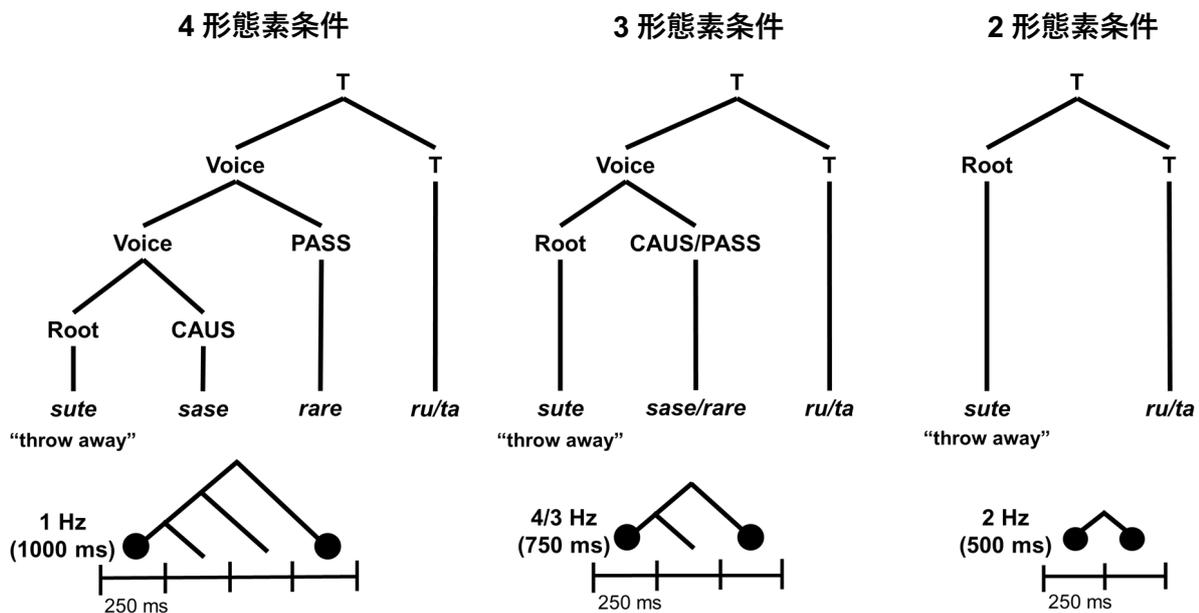


図 2. 形態素構造と対応する脳活動：全ての条件で、右枝分かれ構造を持つ単語を提示した。刺激提示と同期した 4 Hz の脳活動に加えて、4 形態素条件では 1 Hz、4/3 Hz、2 Hz、3 形態素条件では 4/3 Hz、2 Hz、2 形態素条件では 2 Hz、という単語内部の右枝分かれ構造を反映した脳活動が生じることが予想される。

### 2.3. 脳波計測とデータ分析

脳波は 64 電極の脳波計で測定した (BrainProducts 製 actiCAP、日本光電製 EEG-1200)。サンプリングレートは 1000 Hz で規則し、計測中は各電極のインピーダンスを 10 k $\Omega$  以下に保った。データ分析には脳波解析ソフトウェア MNE-Python を使用した (Gramfort et al. 2013)。独立成分分析により、瞬きと心拍に由来するノイズを除去した上で、各試行の脳波 (6 秒間) を分析対象とした。なお、誤答した試行と大きなノイズが乗った試行 (全試行の 7.51%) は、以下の分析から除外した。時系列信号を様々な周波数の波に分解することができる離散フーリエ変換を用いて、0.5–5 Hz の周波数帯域で周期的な脳活動が生じているのかを検討した。Ding et al. (2017) に従い、周波数帯域ごとに正規化パワーを計算し、1 要因の反復測定分散分析を用いて形態素構造を反映すると考えら

れる周波数帯域 (1 Hz、3/4 Hz、2 Hz、4 Hz) に条件間で差があるのか検討した。

### 3. 結果

#### 3.1. 行動データ

非単語検出課題の正答率は 94.1% であり、反復測定分散分析の結果、条件間で有意な差はなかった ( $F(2.74, 120.57) = 0.049, p = .98$ )。一方で、反応時間では条件間で有意差が観察された ( $F(2.17, 95.61) = 11.2, p < .0001$ )。条件間の下位検定を行った結果、ランダム条件が他の 3 条件に比べて有意に反応時間が短く (corrected  $p < 0.001$ )、2 形態素条件、3 形態素条件、4 形態素条件の間では有意差がなかった (corrected  $p > 0.4$ )。以上の結果から、2 形態素条件、3 形態素条件、4 形態素条件には難度に差がなかったと考えられる。

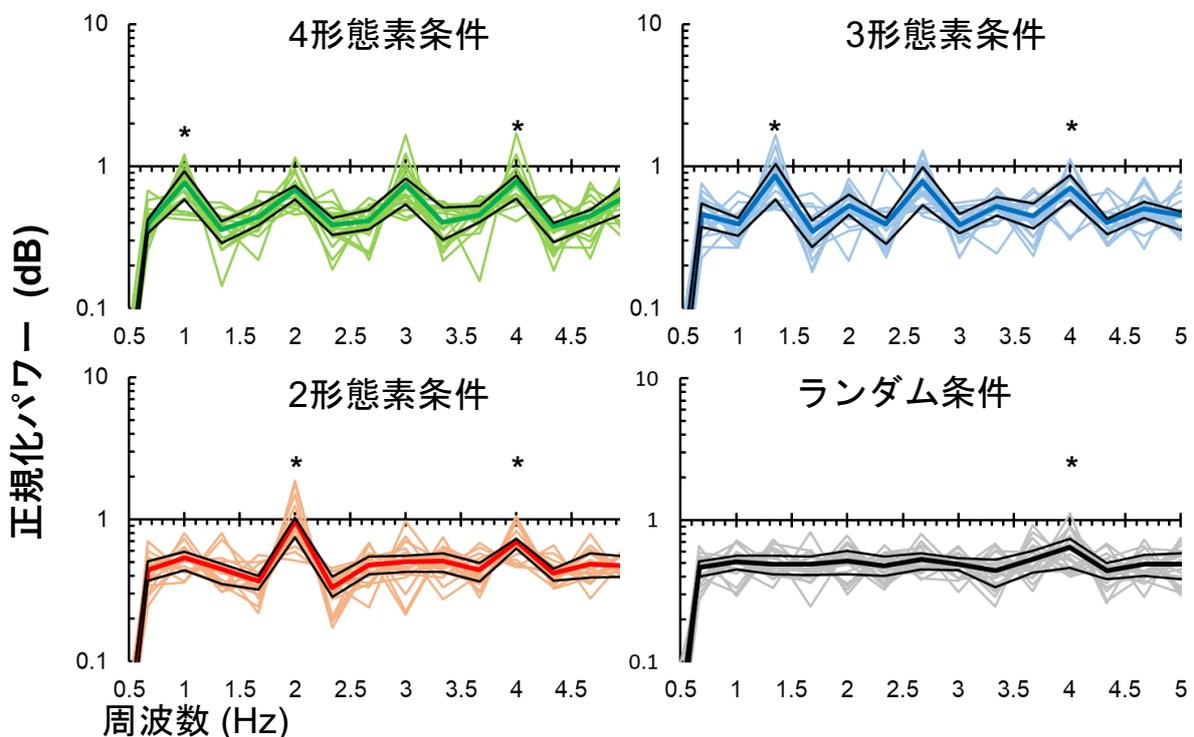


図 3. 形態素構造を反映した周波数の増大：刺激提示と同期した 4 Hz の脳活動に加えて、4 形態素条件では 1 Hz、4/3 Hz、2 Hz、3 形態素条件では 4/3 Hz、2 Hz、2 形態素条件では 2 Hz、という単語内部の右枝分かれ構造を反映した脳活動が生じた。刺激語に含まれる形態素の数がランダムに変化したランダム条件では、形態素構造を反映した周期的な脳活動が観察されなかった。

#### 3.2. 脳波データ

各条件における脳波の正規化パワースペクトラムを調べたところ、全ての条件で刺激提示と同期した 4 Hz の脳波が増大していた (corrected  $p < 0.05$ ) (図 3)。さらに、4 形態素条件では 1 Hz、4/3 Hz、2 Hz、3 形態素条件では 4/3 Hz、2 Hz、2 形態素条件では 2 Hz の周波数帯域で、周囲の周波数帯域に比べて選択的なパワーの上昇が観察された (corrected  $p < 0.001$ )。これらの選択的なパワーの変化

は、刺激語内部の右枝分かれ構造を反映していると考えられる。その一方で、刺激語に含まれる形態素の数がランダムに変化したランダム条件では、形態素構造を反映した周期的な脳活動が観察されなかった。

#### 4. 考察

複数の形態素からなる単語を一定のリズムで提示した際の脳波に対して、離散フーリエ変換による周波数パワースペクトラムを推定した結果、単語の内部の階層構造を反映した脳活動の引き込み現象が生じることを明らかにした。この結果は、文を対象に同様の検討を行った先行研究の結果が (Ding et al. 2016, Ding et al. 2017, Lo et al. 2022)、形態素構造においても再現できることを示しており、分散形態論が提唱する単一駆動仮説 (文と語は同じメカニズムで処理されるという仮説) を支持する結果であると言える。著者らの先行研究から、文の階層構造は脳の左下前頭回を中心とする領域で構築されることが明らかとなっている (Kinno et al. 2014, 2015, Ohta et al. 2013a, 2013b, Ohta et al. 2017, Tanaka et al. 2017, Tanaka et al. 2019)。脳波データは脳活動がどこで生じたのか明らかにすることが難しいため、今後の研究では脳磁図などを用いて、形態素構造を反映する引き込み現象が左下前頭回で生じていたのか、あるいは別の脳領域が関与するのか明らかにしたい。

#### 謝辞

本研究の一部は、MEXT/JSPS 科研費 (JP19H01256、JP21K18560、JP17H06379、JP19H05589 : 太田)、住友財団基礎科学研究助成、吉田学術教育振興会学術奨励金、QR プログラム (九州大学)、SENTAN-Q プログラム (九州大学)、JSPS 科研費 (JP22J111843 : 中島)、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (JPMJSP2136 : 中島) の支援を受けたものです。

#### 参考文献

- Buzsáki, G., & Draguhn, A. (2004). Neuronal oscillations in cortical networks. *Science*, 304(5679), 1926-1929.
- Ding, N., Melloni, L., Yang, A., Wang, Y., Zhang, W., & Poeppel, D. (2017). Characterizing neural entrainment to hierarchical linguistic units using electroencephalography (EEG). *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 481.
- Ding, N., Melloni, L., Zhang, H., Tian, X., & Poeppel, D. (2016). Cortical tracking of hierarchical linguistic structures in connected speech. *Nature Neuroscience*, 19(1), 158-164.
- Giraud, A. L., & Poeppel, D. (2012). Cortical oscillations and speech processing: Emerging computational principles and operations. *Nature Neuroscience*, 15(4), 511-517.
- 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.
- Halle, M., & Marantz, A. (1993). Distributed Morphology and the Pieces of Inflection. In K. Hale & S. J. Keyser (Eds.), *The View from Building 20: Essays in Linguistics in Honor of Sylvain Bromberger* (pp. 111-176). MIT Press.
- Kinno, R., Ohta, S., Muragaki, Y., Maruyama, T., & Sakai, K. L. (2014). Differential reorganization of three syntax-related networks induced by a left frontal glioma. *Brain*, 137(Pt 4), 1193-1212.
- Kinno, R., Ohta, S., Muragaki, Y., Maruyama, T., & Sakai, K. L. (2015). Left frontal glioma induces functional connectivity changes in syntax-related networks. *SpringerPlus*, 4, 317.
- Lo, C.-W., Tung, T.-Y., Ke, A. H., & Brennan, J. R. (2022). Hierarchy, not lexical regularity, modulates low-frequency neural synchrony during language comprehension. *Neurobiology of Language*, 3(4), 538-555.

- Maekawa, K., Yamazaki, M., Ogiso, T., Maruyama, T., Ogura, H., Kashino, W., Koiso, H., Yamaguchi, M., Tanaka, M., & Den, Y. (2013). Balanced corpus of contemporary written Japanese. *Language Resources and Evaluation*, 48(2), 345-371.
- Meyer, L. (2018). The neural oscillations of speech processing and language comprehension: State of the art and emerging mechanisms. *European Journal of Neuroscience*, 48(7), 2609-2621.
- Meyer, L., Sun, Y., & Martin, A. E. (2020). Synchronous, but not entrained: exogenous and endogenous cortical rhythms of speech and language processing. *Language, Cognition and Neuroscience*, 35(9), 1089-1099.
- Ohta, S., Fukui, N., & Sakai, K. L. (2013a). Computational principles of syntax in the regions specialized for language: integrating theoretical linguistics and functional neuroimaging. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 7, 204.
- Ohta, S., Fukui, N., & Sakai, K. L. (2013b). Syntactic computation in the human brain: The Degree of Merger as a key factor. *PloS One*, 8(2), e56230.
- Ohta, S., Koizumi, M., & Sakai, K. L. (2017). Dissociating effects of scrambling and topicalization within the left frontal and temporal language areas: An fMRI study in Kaqchikel Maya. *Frontiers in Psychology*, 8, 748.
- Poeppel, D. (2012). The maps problem and the mapping problem: Two challenges for a cognitive neuroscience of speech and language. *Cognitive Neuropsychology*, 29(1-2), 34-55.
- Tanaka, K., Nakamura, I., Ohta, S., Fukui, N., Zushi, M., Narita, H., & Sakai, K. L. (2019). Merge-generability as the key concept of human language: Evidence from neuroscience. *Frontiers in Psychology*, 10, 2673.
- Tanaka, K., Ohta, S., Kinno, R., & Sakai, K. L. (2017). Activation changes of the left inferior frontal gyrus for the factors of construction and scrambling in a sentence. *Proceedings of the Japan Academy Series B: Physical and Biological Sciences*, 93(7), 511-522.