

左下前頭皮質への経頭蓋電気刺激による文理解の促進効果の検討

太田真理 (九州大学大学院人文科学研究院)

ohta@lit.kyushu-u.ac.jp

要旨：本研究では、脳活動を安全に変化させることができる経頭蓋電気刺激を用いて、文の理解に関わる左下前頭皮質の脳活動を変化させた際に、文の理解が促進されるかどうかを調べた。20名の日本語母語話者に対して、文の意味を判断する文理解課題を経頭蓋電気刺激の前後に行った。線形混合効果モデルにより反応時間を分析した結果、左下前頭皮質への経頭蓋電気刺激は、受動文の反応時間のみを有意に減少させることが明らかとなった。この結果は、左下前頭皮質への経頭蓋電気刺激が、より処理負荷が高い受動文の理解を選択的に促進させることを示しており、左下前頭皮質の活動と文理解の因果関係を示唆するものであった。

キーワード：日本語、言語脳科学、経頭蓋電気刺激、左下前頭回、文理解

1. 背景

従来の心理言語学では、さまざまな刺激文や言語課題に対する行動・脳活動を計測することで、人間の言語処理の解明を進めてきた。例えば、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を用いて文法に関わる脳領域を調べた研究では、受動文やかき混ぜ文などの非定型語順の文を読む際に、左下前頭回や左上側頭回・中側頭回を中心とする言語野が活動することが明らかになっている (Kinno et al. 2008, Kinno et al. 2014, Tanaka et al. 2017, Ohta et al. 2017 など)。特に左下前頭回の活動は、2つの語や句を組み合わせて階層的な統辞構造を作る演算である併合の再起的な適用回数を反映することが報告されており (Ohta et al. 2013a, 2013b, Zaccarella et al. 2017)、人間の言語能力を支える中核的な神経メカニズムであると考えられてきた (Tanaka et al. 2019)。その一方で左下前頭回は、ワーキングメモリ課題などの多様な認知課題に対して活動することが知られており、左下前頭回の機能を巡っては論争が続いてきた (Matchin 2018)。

この原因の一つには、従来の心理言語学では言語と脳活動の相関を調べることはできなかったことが挙げられる。言語の神経基盤を明らかにするためには、言語刺激によって変化する脳活動を計測する研究 (言語と脳活動の相関関係の実証) に加えて、脳活動を変化させた際に言語処理がどう変化するのかを検証する研究 (言語と脳活動の因果関係の実証) が不可欠である。

近年、脳活動と認知処理の因果関係を調べる手法として、微弱な電気刺激 (>4 mA) で一時的に脳活動を変化させる経頭蓋電気刺激が脚光を浴びている (Filmer et al. 2014)。tES で最も広く利用されている手法は、直流電流を用いる経頭蓋直流電気刺激 (tDCS) である。tDCS では微弱な直流電流により、神経細胞の膜電位が一時的に変化することで、神経細胞の活動が促進されたり抑制されたりすると考えられている。一般的に、陽極刺激を行うと脳活動が亢進し、陰極刺激を行うと抑制されることが知られている (Nitsche et al. 2008)。本研究では、tDCS による陽極刺激を左下前頭皮質に行うと文理解が促進されるかどうかを調べることで、左下前頭皮質の脳活動と文理解の因果関係を実証することを目的とした。文理解の促進効果は、処理負荷が高い文 (受動文など) でより顕著に観察されると考えられる。

2. 実験方法

2.1. 実験参加者

実験には 20 名の日本語母語話者 (全員右利き健常成人、男性 10 名、平均年齢 22.5 ± 0.8 歳) が参加した。参加者は全員正常な視力 (矯正を含む) を有していた。実験参加にあたり、

2.2. 刺激と課題

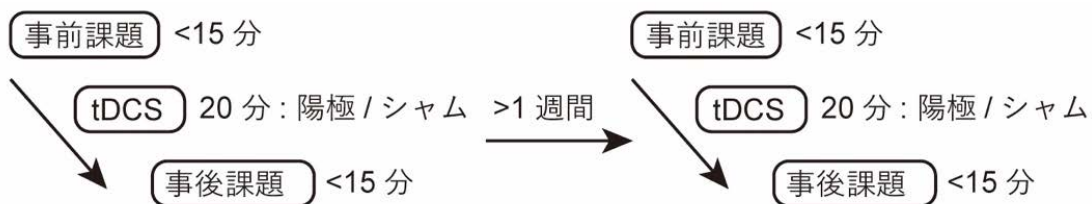
実験では、自動詞能動文 (例: 太郎と花子が歩いた)、他動詞能動文 (太郎が花子を殴った)、自動詞受動文 (花子が太郎に歩かれた)、他動詞受動文 (花子が太郎に殴られた) の各 30 個の日本語刺激文を用いた (計 120 文)。それぞれの文は、2 つの名詞句と 1 つの動詞からなり、直後に主語と動詞からなる疑問文を提示した (例: 太郎が歩いた?)。参加者は文の意味と質問の答えが一致するかどうかを、ボタンを押して判断する文理解課題を行った。

実験文は、画面の中央に 1 文節ずつ呈示した後、直前に呈示した刺激文に関する質問を呈示した。各試行ではまず、凝視点 (+) を 450 ミリ秒 (ms) 呈示し、参加者に試行の開始を意識させた。凝視点が画面から消失して 400 ms 後から刺激文を呈示した。各文節は画面上に 600 ms 呈示され、1 つの文節が画面上から消失して、次の文節が画面上に呈示されるまでに 350 ms の間隔を空けた。

実験参加者は、質問への判断を 2 つのボタンを押すことで回答した。ボタン押しの直後に凝視点を呈示した。120 組の刺激文と質問を、ランダムな順序で呈示した。30 回の試行が終了する毎に、最大 1 分間の休憩をとり、参加者が十分にリラックスできる時間をとった。休憩は参加者が任意のタイミングで終了し、実験を再開することができた。

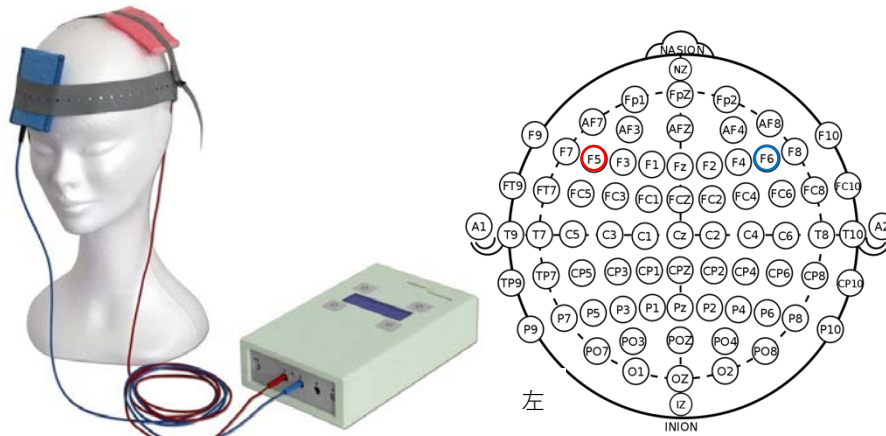
実験参加者への教示を行なった上で、本試行を開始する前に、練習用に別途作成した 4 組の刺激文と質問を呈示した。全てに正解するまで練習を繰り返し、全問正解後に本試行を行った。刺激の呈示および参加者の反応の記録には、PsychoPy (<http://www.psychopy.org/>) を使用した。

2.3. tDCS の刺激プロトコル



実験では、単盲検のシャムコントロールデザイン (陽極刺激条件とシャム刺激条件) を用い、全参加者に陽極刺激セッションと、シャム刺激セッションの両方を行った。

経頭蓋電気刺激には、DC-Stimulator Plus (NeuroConn 製) を用いた。左下前頭回を刺激するため、国際 10/20 法の F5 と F6 (それぞれ左右の下前頭回の近傍) にそれぞれ陽極と陰極を設置し、陽極刺激およびシャム刺激が行われた。陽極刺激では 20 分間の刺激を行った (1 mA, 5 cm x 7 cm の生理食塩水浸漬スポンジ電極)。陽極刺激とシャム刺激の前後に、参加者は文理解課題に回答した (事前課題・事後課題)。シャム刺激とは、プラセボ効果をコントロールするために電極を設置し最初と最後の 30 秒間のみ刺激を行う刺激条件である。シャム刺激では、参加者は行動が変化するのに十



分な刺激を受けないため、刺激前後で脳活動は変化しないと考えられる。実験では、刺激強度は 1 mA とし、実験中は抵抗を 5 kΩ 以下に維持した。

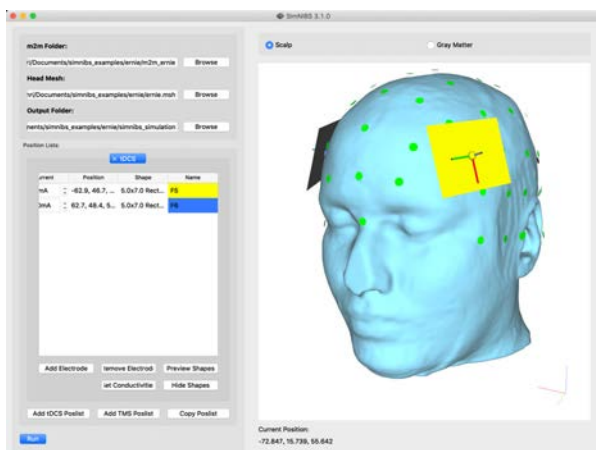
2.3. データ分析

正答率と反応時間の分析には、R 並びに R の lme4 と lmer パッケージを用いた。正答率と反応時間のそれぞれに対して、刺激方法（陽極刺激 vs. シャム刺激）・文条件（自動詞能動文、他動詞能動文、自動詞受動文、他動詞受動文）・課題の前後（事前課題 vs. 事後課題）の 3 要因の反復測定分散分析を実施した。さらに、参加者と刺激のランダムな変動を考慮するために、線形混合効果モデル（R の lme4 と lmerTest パッケージを利用）で反応時間の分析を行なった。線形混合効果モデルの分析では、経頭蓋電気刺激を考慮しない単純モデル、全ての要因を加えた完全モデル、完全モデルからデータの説明に寄与しない要因を除外した最適モデルの 3 つを検討した。最適モデルの決定には、lmerTest パッケージの step 関数を利用した。

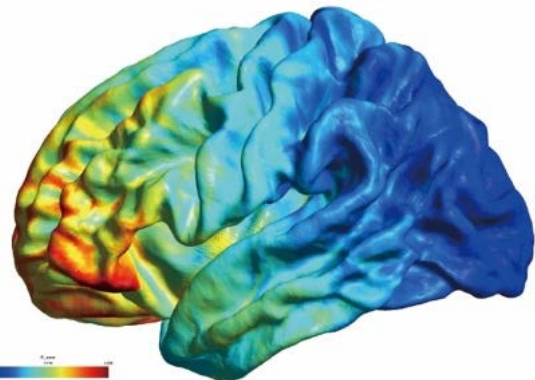
単純モデル： $\log(RT) \sim \text{Pre/Post} * \text{Act} * \text{Tr} + (\text{Stim} * \text{Pre/Post} \mid \text{Subject}) + (1 \mid \text{Sentence})$

完全モデル： $RT \sim \text{Stim} * \text{Pre/Post} * \text{Act} * \text{Tr} + (\text{Stim} * \text{Pre/Post} \mid \text{Subject}) + (1 \mid \text{Sentence})$

最適モデル： $\log(RT) \sim \text{Stim} + \text{Pre/Post} + \text{Act} + \text{Tr} + \text{Stim}:\text{Act} + \text{Pre/Post}:\text{Act} + \text{Pre/Post}:\text{Tr} + \text{Act}:\text{Tr} + \text{Pre/Post}:\text{Act}:\text{Tr} + (\text{Stim} * \text{Pre/Post} \mid \text{Subject}) + (1 \mid \text{Sentence})$



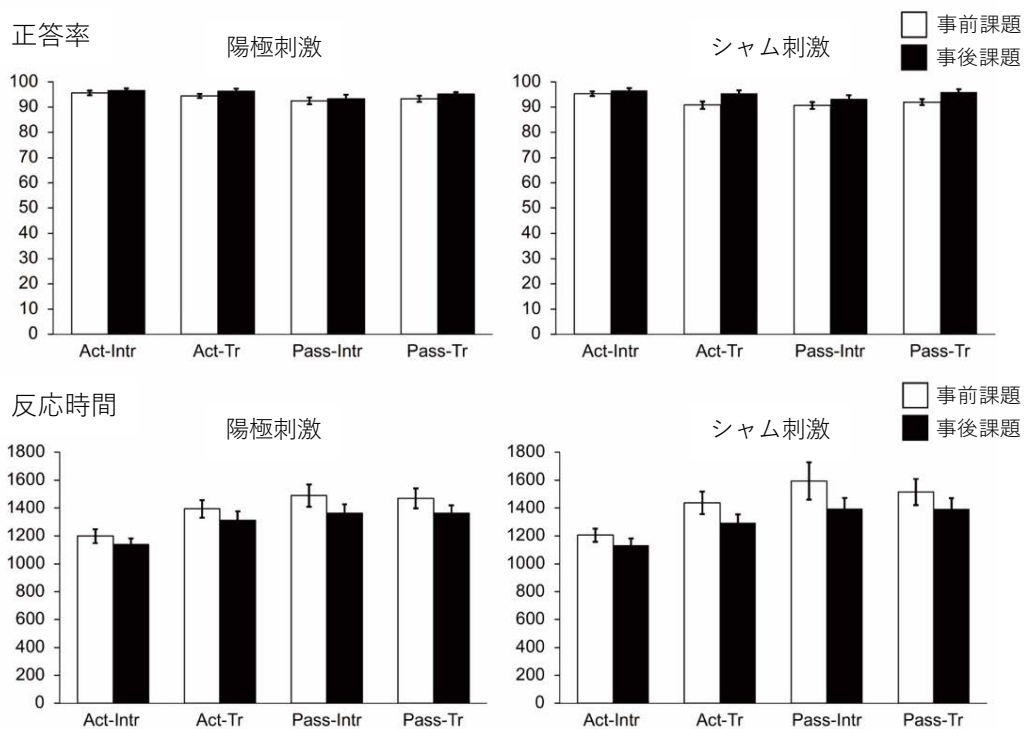
電場強度 (V/m)



大脳皮質上の電流分布を推定できる SimNIBS (ver. 3.2.1) を用いて、経頭蓋電気刺激の影響を受けた脳領域を推定した結果、左下前頭皮質を中心とする脳領域が刺激されていた。

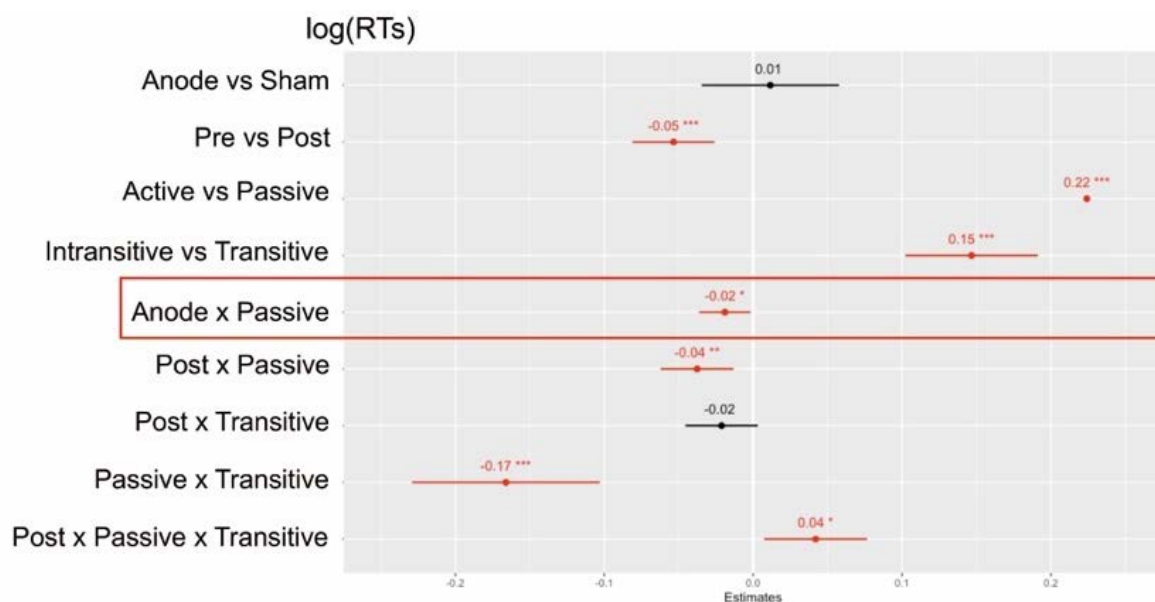
3. 結果と考察

参加者は4条件のすべてにおいて、高い正答率 (>90%) と短い反応時間 (<1600 ms) を示した。正答率についての反復測定分散分析では、文条件の主効果 ($F(3,57) = 11, p < 0.0001$) と課題の前後の主効果 ($F(1,19) = 8.4, p = 0.009$) が有意であったが、刺激方法の主効果と交互作用は有意でなかった ($p > 0.18$)。また、反応時間の反復測定分散分析では、文条件 ($F(3,57) = 42, p < 0.0001$) と課題の前後 ($F(1,19) = 21, p = 0.0002$) の主効果、これらの要因の交互作用 ($F(3,57) = 3.7, p = 0.002$) が有意に認められた。以上の結果は、自動詞能動文が最も簡単で、受動文はより厳しいことを示唆していた。また、課題の前後の主効果が有意であったことから、学習効果があることがわかった。



さらに、反応時間に対する線形混合効果モデルによる分析の結果、刺激方法の効果を考慮した最適モデルは、考慮しない単純モデルよりも有意に適合度が高く ($\chi^2(3) = 38, p < 0.0001$)、陽極刺激の効果を示唆する結果が得られた。

モデル	パラメータ数	AIC	対数尤度	χ^2	自由度	p
単純モデル	20	-2013.6	1026.8			
最適モデル	23	-2045.6	1045.8	38	3	< 0.0001
完全モデル	29	-2036.9	1047.4	3.2	6	0.78



さらに、最適モデルのパラメータを詳細に検討した結果、左下前頭皮質への陽極刺激は、受動文の反応時間を有意に減少させることが明らかとなった。本研究の結果は、左下前頭皮質への陽極刺激が、より処理負荷が高い受動文の理解を選択的に促進させることを示しており、左下前頭皮質の活動と文理解の因果関係が示唆するものであった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19H01256 と JP17H06379 の助成を受けたものである。データ収集にご協力いただいた前野一喜さんと大石和加奈さんに感謝します。

参考文献

- Filmer, H. L., P. E. Dux, & J. B. Mattingley. 2014. Applications of transcranial direct current stimulation for understanding brain function. *Trends Neurosci.* **37**, 742-53.
- Kinno, R., M. Kawamura, S. Shioda, & K. L. Sakai. 2008. Neural correlates of noncanonical syntactic processing revealed by a picture-sentence matching task, *Hum. Brain Mapp.* **29**, 1015-1027.
- Kinno, R., S. Ohta, Y. Muragaki, T. Maruyama, & K. L. Sakai. 2014. Differential reorganization of three syntax-related networks induced by a left frontal glioma, *Brain* **137**, 1193-1212.
- Matchin, W. G. 2018. A neuronal retuning hypothesis of sentence-specificity in Broca's area, *Psychon. Bull. Rev.* **25**, 1682-1694.
- Nitsche, M. A., L. G. Cohen, E. M. Wassermann, A. Priori, N. Lang, A. Antal, W. Paulus, F. Hummel, P. S. Boggio, F. Fregni, & A. Pascual-Leone. 2008. Transcranial direct current stimulation: State of the art 2008. *Brain Stimul.* **1**, 206-23.
- Ohta, S., M. Koizumi, & K. L. Sakai. Dissociating effects of scrambling and topicalization within the left frontal and temporal language areas: An fMRI study in Kaqchikel Maya, *Front. Psychol.* **9**, 748.
- Ohta, S., N. Fukui, & K. L. Sakai. 2013a. Syntactic computation in the human brain: the degree of merger as a key factor, *PLoS One* **8**, e56230.
- Ohta, S., N. Fukui, & K. L. Sakai. 2013b. Computational principles of syntax in the regions specialized for language: Integrating theoretical linguistics and functional neuroimaging, *Front. Behav. Neurosci.* **7**, 248.
- Tanaka, K., I. Nakamura, S. Ohta, N. Fukui, M. Zushi, H. Narita, & K. L. Sakai, 2019. Merge-generability as the key concept of human language: Evidence from neuroscience, *Front. Psychol.* **10**, 2673.
- Tanaka, K., S. Ohta, R. Kinno, & K. L. Sakai, 2017. Activation changes of the left inferior frontal gyrus for the factors of construction and scrambling in a sentence, *Proc. Jpn. Acad. Ser. B Phys. Biol. Sci.* **93**, 511-522.
- Zaccarella, E., L. Meyer, M. Makuuchi, & A. D. Friederici. 2017. Building by syntax: The neural basis of minimal linguistic structures, *Cereb. Cortex* **27**, 411-421.