

49. 非侵襲的脳刺激法を用いた第二言語獲得の神経機構の解明

九州大学大学院人文科学研究院 准教授 太田 真理

概要

本研究では、任意の脳領域の活動を非侵襲的に変化させることができる高密度経頭蓋時間干渉刺激装置を開発し、外国語学習に関わる脳活動を変化させることで、外国語学習を支える神経ネットワークの全容を解明することを目指した。本研究ではまず、多チャンネル経頭蓋時間干渉刺激装置を作成し、同時に、既存のソフトウェアを改修して、構造 MRI に基づいて特定の脳領域を刺激するための最適な電極配置を推定する脳内電流分布シミュレーションプログラムを実装した。続いて、文字処理に関わる左紡錘状回と、母語と外国語の切り替えに関与する左尾状核を刺激するための、最適な電極配置を割り出すシミュレーションを行った。前者は先天性の読み書き障害である発達性ディスレクシアにも関与する領域であるため、左紡錘状回の活動を操作することで言語障害の解明につながる可能性を検討した。並行して、外国語の文を理解する際の脳波を計測する実験によって、外国語の処理に特異的に観察される脳波パターンの検討も進めた。これらの研究を通じて、高密度経頭蓋時間干渉刺激による脳深部の刺激がシミュレーション上では成功すること、外国語学習だけでなく言語障害の治療にも役に立つ可能性があることが示唆された。今後の課題として、さらなる多チャンネル化を進めた際に、現在の手法では計算量・計算時間の関係で最適な電極配置を決定できなくなる点があげられる。

三菱財団様には本研究に不可欠な高密度経頭蓋時間干渉刺激装置の作成費用や MRI 画像の取得費用等への経費をご支援いただき、心より感謝申し上げます。

背景および目的

脳が言語をどう処理するのかという「言語の神経基盤」は、認知科学において最重要の研究課題の一つである。言語の神経基盤を研究する言語脳科学では、文や単語に対する脳活動を、機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) などの非侵襲的な脳機能計測技術で研究してきた。一方で、外国語学習は個人差の影響が大きく、従来の非侵襲的脳機能計測だけで研究することが困難であった。

この限界を克服する手法として、近年、安全に脳活動を変化させることが可能な非侵襲的脳刺激法と脳機能計測を組み合わせ、人間の認知・行動の神経基盤を解明する研究が注目されている。しかし、従来の非侵襲的脳刺激法は脳深部が刺激できないという限界があった。これに対して、周波数がわずかに異なる高周波交流電流 (>1 kHz) で生じる時間干渉波を利用する経頭蓋時間干渉刺激法 (transcranial temporal interference stimulation, tTIS) が提案されているが (Grossman et al. 2017)、外国語の学習に関わる神経基盤の解明に適用した研究は現時点で存在しなかった。

そこで本研究では、任意の脳領域を高精度に刺激できる高密度 tTIS 装置を開発し、外国語学習に関わる脳活動を変化させることで、外国語学習を支える神経ネットワークの全容を解明することを目指した。

方法

マルチファンクションジェネレータ（エヌエフ回路設計ブロック社製 WF1982）とリニアアイソレータ（ユニークメディカル社製 ULI-100-S2）を組み合わせ、4チャンネルからなる高密度 tTIS 装置を作成した。

最適な電極配置を決定するために、非侵襲的脳刺激の研究で広く利用されている脳内電流分布シミュレーションソフトウェア SimNIBS (version 4.1.0) を元に、刺激したい脳領域を MRI 上で設定すると、脳波で広く利用されている国際 10-10 法に含まれる全 64 電極から最適な電極の組み合わせと、電流の刺激強度を特定するプログラムを作成した。このプログラムを用いて、文字処理に関わる左紡錘状回と、母語と外国語の切り替えに関与する左尾状核を刺激するための、最適な電極配置を割り出すシミュレーションを行った。脳の解剖学的な個人差がシミュレーション結果に与える影響を検討するために、個人の MRI を用いてシミュレーションを行った場合と、標準脳と呼ばれる MRI テンプレート上でシミュレーションを行い、その結果を個人 MRI 上に変換した場合を比較した。

さらに、外国語学習と言語障害の双方で重要な役割を果たしている左紡錘状回をターゲットに、高密度 tTIS 装置による非侵襲的脳刺激と、従来法による非侵襲的脳刺激のどちらが高精度の刺激が可能か、シミュレーションによる検討を行った。

加えて、日本語母語話者を中心とする参加者（51 名）に対して、文法・音韻・意味的な誤りのいずれかを含む文を読む際の脳波を計測する実験を行った。母語話者と外国語学習者の違いを検討するために、母語話者で文法・音韻・意味的な誤りに対して典型的に観察される事象関連電位 N400 と P600 を解析した。さらに、N400 と P600 の個人差がどのような脳の解剖学的個人差に由来するのか検討するために、MRI に基づく大脳皮質の皮質厚と事象関連電位 N400 と P600 の相関を調べた。

結果および考察

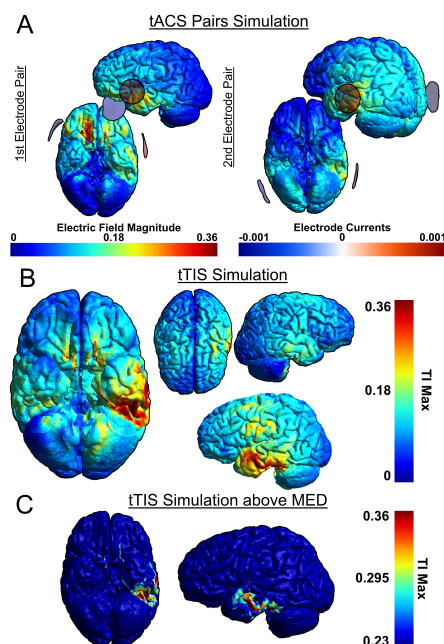


図 1. 高密度 tTIS による左紡錘状回の刺激。

- (A) 左紡錘状回を刺激する最適な電極の組み合わせ。
- (B) 高密度 tTIS による左紡錘状回への刺激（閾値なし）。
- (C) 高密度 tTIS による左紡錘状回への刺激（閾値は脳活動に影響する 0.23 mV/mm）。

MRIに基づくシミュレーションによって、左紡錘状回を刺激する最適な電極配置を推定した結果、FT7-F10、TP7-P10の組み合わせが選択された。これらの電極によって左紡錘状回を刺激した場合と、従来から広く利用されている非侵襲的脳刺激法の結果を比較したところ、脳深部にある左紡錘状回は従来法では全く刺激できないのに対して、我々が開発した高密度 tIS では局所的に刺激できることが明らかとなった。

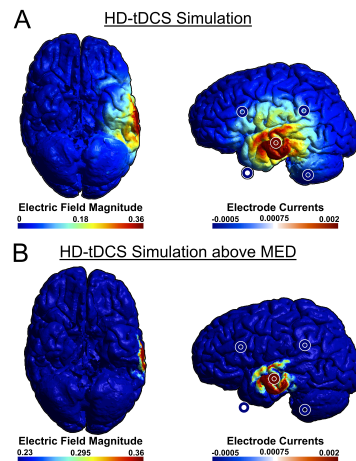


図 2. 従来法による左紡錘状回の刺激

(A) 従来法による左紡錘状回への刺激（閾値なし）。

(B) 従来法による左紡錘状回への刺激（閾値は脳活動に影響する 0.23 mV/mm）

さらに、日本語母語話者が英語の文を理解する際の事象関連電位 N400 と P600 を検討した結果、母語では通常意味的な違反に対して生じる N400 と文法的な違反に対して生じる P600 が、外国語ではこれらの違反に対して生じず、むしろ音韻的な違反に対して生じることが明らかとなった。この結果は、外国語を理解する際に、音韻的な違反は文法や意味の処理を含む広範な言語処理に影響する可能性を示しており、外国語学習を支える神経ネットワークは母語を処理するものとは質的に異なることを示唆するものであった。

加えて、事象関連電位の振幅と脳の体積の相関を調べた結果、大脳左半球の言語野の一部である左下前頭回に加えて、左紡錘状回や右前部帯状皮質、右後部帯状皮質などの左右大脳半球の様々な領域と有意な相関が観察された。これらの結果は、第二言語の処理には言語野に加えて、複数の脳領域が関与することを示唆している。

これらの研究を通じて、高密度経頭蓋時間干渉刺激による脳深部の刺激がシミュレーション上では成功すること、外国語学習だけでなく言語障害の治療にも役に立つ可能性があることが示唆された。また、外国語学習を支える神経ネットワークは、従来考えられていたように母語を処理する神経ネットワークを単に再利用するのではなく、言語以外の高次認知機能の処理に関わる左右大脳半球の広範な領域が含まれることも示唆された。今後の課題として、脳波実験から明らかになった外国語の処理を支える広範な神経ネットワークの全容を解明するために、ネットワークに含まれる複数の脳領域に対して、高密度 tIS で同時に介入した場合にどのような変化が生じるのか（外国語学習のどの側面が促進・抑制されるのか）を検討する必要がある。

加えて、さらなる多チャンネル化を進めると候補となる電極の組み合わせが膨大になるため、個人の MRI 画像に基づく脳内電流分布シミュレーションが計算量・計算時間の制約から不可能になる点も残された課題である。現在、シミュレーションのさらなる高速化・効率化のため、改修を進めている。

(完)

発表論文

- 1) 太田真理、ダニエル・ギャラガー、「非侵襲的脳刺激法を用いた言語機能の向上と回復」、『Medical Science Digest』、ニュー・サイエンス社、51(7)、77-80、2025.
- 2) Gallagher, D., Huang, Z., & Ohta, S., "Modeling dyslexia in neurotypical adults by combining neuroimaging and neuromodulation techniques: A hypothesis paper," *Frontiers in Human Neuroscience*, Frontiers, 19, 1651332, 1-15, 2025. doi: 10.3389/fnhum.2025.1651332

引用文献

- 1) Grossman N, Bono D, Dedic N, ..., & Boyden, E. S., "Noninvasive deep brain stimulation via temporally interfering electric fields," *Cell*, 169, 1029-1041.e16, 2017.