後帯状皮質への超音波刺激が誘発する神経調節：EEG と fMRI による検証

1250356 橋本 純　【 システム神経科学研究室 】

1　初めに

経頭蓋集束超音波（tFUS）は，非侵襲的に脳活動を刺激する手法として近年注目されている．特に，後帯状皮質（PCC）への超音波刺激が脳全体の安静時活動を高める可能性が報告されている [1]．しかし，超音波刺激が安静時脳活動を低下させるという報告もあり，超音波刺激による脳活動の変化について一貫した結果が得られていない．この要因の一つとして，刺激効果を評価するための統一的な基準が確立されていないことが考えられる．そこで本研究では，刺激前の安静時脳活動を基準とし，刺激後の脳活動の変化を評価する手法を検討した．具体的には，機能的磁気共鳴画像法（fMRI）の機能的結合性解析および脳波計測（EEG）の Microstate 解析を用いて，超音波刺激が安静時脳活動に与える影響を解析した．

2　実験方法

2.1　概要

実験参加者は fMRI 実験 6 名（男性 5 名女性 1 名），EEG 実験 6 名（男性 4 名女性 2 名）だった．fMRI，EEG 実験共に超音波刺激前に 1 回安静時脳活動を計測し，超音波刺激後は複数回安静時脳活動を計測した．一回の計測は 5 分間とした．

2.2　安静時脳活動の計測

fMRI 実験ではスクリーンに映した十字を注視した状態で機能画像を撮影した．EEG 実験はシールドルームで計測を行った．

2.3　超音波刺激

Sonic Concepts 社製 Neuro FUS を用いて，両実験共に先行研究と同様に PCC にシータバースト刺激（I_{SPPA} 29.97 W/cm^2, 周波数 500 kHz, パルスデュレーション 20 ms フォーカス 55.0〜63.5 mm 以下）を 80 秒間行った．

2.4　解析

刺激後のデータは被験者ごとに最後に取得したデータを用いた．fMRI 実験の解析は CONN ツールボックスを用いて，標準的な前処理を行った後に，PCC をシードとする Seed-to-voxel 解析と ROI-to-ROI 解析を行った．ROI は同ツールボックス内で定義されているネットワーク単位の ROI を使用した [2]．EEG 実験の解析は，EEGLAB を用いて標準的な前処理を行った後に，MicrostateLab ツールボックスを用いて，Microstate マップの遷移パターンを検証した．Microstate マップ数は 7 とし，MetaMap (2023) のテンプレートマップにバックフィットした後に，各マップの持続時間，出現頻度，カバレッジ，遷移確率などの各指標を評価した [3]．

3　実験結果

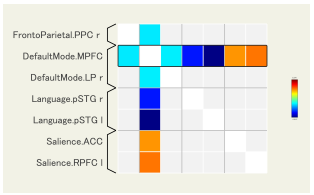

図 1　fMRI の実験結果

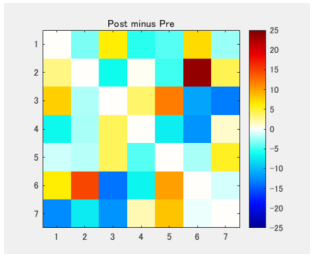

図 2　EEG の実験結果

3.1　結果（fMRI 実験）

刺激後に機能的結合性が増加した脳領域を調べたところ，デフォルトモードネットワーク（DMN）に属する内側前頭前野（MPFC）とサリエンスネットワーク（SN）との機能的結合性が増加していた．一方，MPFC と前頭頭頂ネットワーク（FPN），DMN および言語ネットワーク（LN）との機能的結合性は低下していた（図 1）．刺激部位である PCC との機能的結合性は刺激後に有意に変化した領域は認められなかった（connection threshold:p<0.1,cluster threshold:p<0.1,two-sided,uncorrected）．

3.2　結果（EEG 実験）

7 つの Microstate マップが遷移する確率が刺激後どの程度変化するか解析した結果を図 2 に示す．一部の遷移パターン確率は刺激後上昇していたが，全体としては減少する傾向があった（中央値，-1.5475%）．

4　考察

本研究では，超音波刺激によって MPFC との機能的結合性や Microstate マップの遷移確率が減少する傾向にあることが分かった．この結果は，Microstate マップの遷移パターンが機能的結合性と関連がある可能性を示唆しているが，データ数が少ないため，今後データ数を増やして本研究結果の頑健性を調べる必要がある．

参考文献

[1] Yaakub et al,Nat Commun, Transcranial focused ultrasound-mediated neurochemical and functional connectivity changes in deep cortical regions in humans,2023, 14, 5318.
[2] 菊池吉晃（編），fMRI データの脳活動・機能的結合性の解析，医歯薬出版，2019
[3] Sahana Nagabhushan Kalburgi et al, Brain Topography, MICROSTATELAB: The EEGLAB Toolbox for Resting-State Microstate Analysis,Brain Topography, 2024, 37:621–645