

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：63905

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25590211

研究課題名(和文) 脳磁図を用いた注意制御信号の脳領域間伝達様式の解明

研究課題名(英文) Investigation of inter-regional connectivity during attentional control using magnetoencephalography

研究代表者

木田 哲夫 (Kida, Tetsuo)

生理学研究所・統合生理研究系・特任准教授

研究者番号：80419861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では時間動態の検証に優れる脳磁場計測を用いてヒトの脳活動を非侵襲的に計測することにより注意制御中の脳領域間結合の変化を解明することを目的とした。特に、異なる視覚的特徴に注意を向けた時の脳領域間結合状態の変化および異なる感覚系に注意を向けたときの脳領域間結合の変化について検証した。その結果、注意制御区間ではアルファ帯域からベータ帯域にかけて脳磁場信号のパワー低下(脱同期)、誘発反応の増大、前頭前野と頭頂連合野との脳領域間結合強度の変化が確認された。これらの結果は古くから提唱されている前頭前野から感覚野に注意制御のためのトップダウン信号が送られるとの注意制御仮説を支持する。

研究成果の概要(英文)：In this study we used magnetoencephalography (MEG) to investigate changes in inter-regional connectivity underlying attentional control. We analyzed the MEG signal in the cue-target interval in different attention tasks to examine neuronal oscillation and inter-regional connectivity during attentional control. Time-frequency analysis showed that in the cue-target interval, beta activity was desynchronized in the hemisphere contralateral to the attended side. Sensory-evoked responses were increased by spatial attention, irrespective of sensory modalities attended. Also, inter-regional connectivity between prefrontal and parietal regions was increased during attentional control compared with the baseline period. These findings support the hypothesis that early sensory processing in modality-specific cortices is regulated, irrespective of the sensory modality, by attentional control signals from the lateral prefrontal cortex in the human brain.

研究分野：実験心理学

キーワード：注意 脳領域間結合 多感覚 視覚

1. 研究開始当初の背景

(1) 注意による課題遂行成績の向上及び脳活動の増減やその時空間動態はよく知られている。研究代表者はこれまでに非侵襲的脳活動計測法である脳波計測 (Electroencephalography: EEG) と脳磁場計測 (Magnetoencephalography: MEG) を用いて、空間的注意により高次視覚野 (Higher visual area) ならびに 2 次体性感覚野 (Secondary somatosensory cortex: S) の活動が増大すること (Kida et al. 2004; 2007; 2011) 運動動作に注意を向けることにより S の活動が増大することを明らかにしている (Kida et al. 2006)。前者の脳活動の増大は、注意を向けた感覚系に関係なく起こることから、空間的に注意を向けた場所からの感覚入力には注意を向けた感覚系によらずその効果が及ぶような神経機構が存在すると考えられている。このように、感覚情報処理に付随して出現する感覚誘発反応が注意によって増減することがこれまでの研究により詳細に明らかにされている。

(2) 一方、脳は機能的に多数の下位領域から構成されており、それらの領域の間には密な神経線維連絡および階層性がある。そのため、脳の働き of 成立にはその活動量 (の増減) だけでなく、異なる脳領域間での信号の相互伝達も極めて重要な役割を果たす。この点を非侵襲的脳活動計測法により検証するための手段として、近年、脳領域間結合解析が盛んに用いられているが (Siegel et al. 2008) 未解明な点も多い。例えば、注意に関する問題として、前頭前野から感覚野へと注意制御信号が伝達される可能性が古くから指摘されている。この仮説は、脳損傷患者における症例研究、機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) を用いた脳賦活研究および機能結合研究、経頭蓋的磁気刺激法 (Transcranial magnetic stimulation: TMS) を用いた仮想的脳損傷 (virtual lesion) 研究に基づくものであり、未解明な点が多く残されている。とりわけ、その時間動態については不明な点が多い。

2. 研究の目的

そこで本研究課題では、時間分解能の高い脳磁場データに対して、脳領域間結合解析を行うことにより、様々な視覚的特徴ならびに異なる感覚系に注意を向ける際の注意制御信号の脳領域間伝達様式を時間動態に着目して明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 306ch 全頭型脳磁場計測装置により健康成人被験者から脳磁場計測を行う。被験者は脳磁場計測中に視覚性注意課題もしくは異種感覚注意課題を行い、計測した脳磁場信号に対して誘発反応解析、時間周波数解

析、信号源解析、脳領域間結合解析等を行う。

(2) 初年度は、視覚刺激が有する 2 種類の特徴それぞれに注意を向けようとする際 (すなわち注意制御区間) の脳領域間結合強度の変化を比較・検証する。電子機器等の環境ノイズによる影響を避けるため、脳磁場計測は磁気シールドルーム内で行う。シールドルーム外に設置したデジタル光処理 (DLP) プロジェクターからシールドルーム内に設置したスクリーンに視覚画像を投影することにより視覚刺激を提示する。刺激は時間的に間隔を設けたペアとして提示する。第 1 刺激 (手がかり刺激) として 2 種類の特徴のうちどちらの特徴に注意を向けるかを表す文字を提示する。1.5 秒後に第 2 刺激 (標的刺激) として 2 種類の特徴を有する視覚刺激を 1.5 秒間提示する。2 種類の特徴のうちいずれかの特徴が変化するので、被験者はこの特徴の変化を弁別し、標的としてボタン押し反応により検出する。脳磁場信号は continuous データとして継続的に計測し、オフライン解析で各試行のデータを切り出す (epoching)。第 1 刺激提示時点から第 2 刺激提示時間までの区間を注意制御区間とする。第 1 刺激提示前の区間 (ベースライン区間) と注意制御区間などに分けてデータを解析および比較する。解析として時間周波数解析、信号源解析および脳領域間結合解析を行う。解析には、主に数値解析プログラミング言語 Matlab を用いる。誘発反応解析では標的刺激提示時点を基準にして脳磁場データを条件毎に加算平均することにより誘発脳磁場を求める。脳磁場データを解析した結果は、磁気共鳴画像 (MR 画像) 上に重ね書きする。脳磁場計測に先立ち、頭部位置計測コイル (Head position indicator coils: HPI コイル) を頭部に装着し、3 次元デジタイザーを用いて頭部の基準となる 3 点 (nasion、左右の耳介前点) およびそれらに対する HPI コイルの位置をデジタイズする。脳磁場計測装置内で脳磁場センサー (デューワー) 座標に対する HPI コイルの位置を計測し、頭部座標系と脳磁場センサー座標系との対応付けを行う。またこれらの座標と MRI 座標との間の対応付けはオフライン解析において行う。

(3) 2 年目は、異なる感覚系 (聴覚および触覚) それぞれに注意を向けた際の脳領域間結合強度の変化を検証する。初年度同様にシールドルーム外の DLP プロジェクターからシールドルーム内のスクリーンに視覚刺激を提示する。聴覚刺激には脳磁場へのアーチファクト混入が少ない刺激装置を開発して実験刺激提示装置として利用する (Kida et al. 2013 PLoS One)。触覚刺激として電刺激装置からリング電極を介して経皮的電気刺激を提示する。第 1 刺激として視覚刺激を、第 2 刺激として聴覚もしくは触覚刺激を提示する。このペアを 1 試行とし、全部で数百試行

繰り返す。視覚刺激により指示された空間に注意を向け、続けて提示される聴覚もしくは触覚刺激を標的的刺激としてボタン押し反応により検出する。初年度同様の区分けに従い、データ解析および比較を行う。解析として、誘発反応解析、時間周波数解析、信号源解析、脳領域間結合解析を行う。その他の解析に関しても初年度と同様に行う。

4. 研究成果

(1) 初年度は視覚性注意に関する研究を遂行した。2種類の視覚的特徴を有する視覚刺激を作成・提示し、各々の視覚刺激に注意を向けている際の脳活動を計測・解析した結果、アルファ帯域からベータ帯域にかけて、注意制御区間における脳磁場信号のパワーがベースライン区間と比較して低下すること(脱同期化)が確認された。またビームフォーミングによる信号源解析を行ったところ、これらの脱同期化は頭頂葉後部の活動に起因すると推測された。さらに脳領域間結合解析を行ったところ、前頭前野(Prefrontal cortex)と頭頂連合野(Posterior parietal cortex)の結合強度がベースライン区間と比較して注意制御中に増強することが確認された。しかも、この脳領域間結合強度の変化は周波数特異的に生じた。

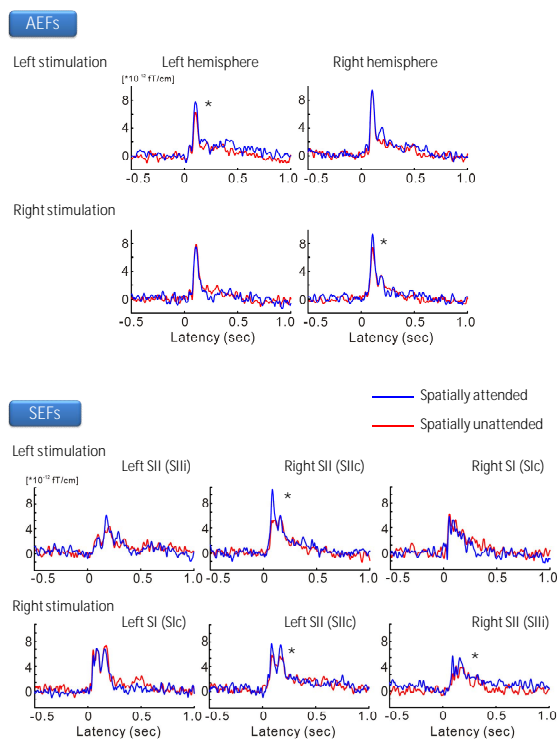


図1 AEFsおよびSEFs

(2) 2年目は視覚、聴覚、体性感覚刺激を用いた異種感覚注意課題遂行中の脳磁場信号を解析することにより、注意による脳領域間結合状態の変化を検証した。初年度に行った視覚性注意実験同様、アルファ帯域およびベータ帯域ではベースライン区間と比較して注意制御区間において脳磁場信号のパ

ワー低下が生じた。聴覚誘発反応(Auditory evoked magnetic fields: AEFs)のN1m成分は空間的注意により増大し(図1)、信号源推定の結果、聴覚野に信号源を有することが確認された。また触覚誘発反応(Somatosensory evoked magnetic fields: SEFs)のうち、シルビウス裂周囲のセンサーで計測された反応も、注意により増大することが確認された。信号源推定の結果、この反応は2次体性感覚野(Secondary somatosensory cortex: S₂)から発生すると推測された。一方、1次体性感覚野(Primary somatosensory cortex: S₁)から生じると推測される早期反応には注意による変化は認められなかった。このようなアルファ帯域とベータ帯域の脳磁場信号のパワー低下及び標的刺激に対する感覚誘発反応の増大に関しては、先行研究でもたびたび報告されており、これを再確認できた。脳領域間結合解析を行った結果、前頭前野と頭頂連合野との間の結合強度はベースライン区間と比較して注意制御区間において増大した。この現象は周波数特異的に起こった。

(3) 以上より、注意制御中には前頭前野と頭頂連合野との間の結合強度が高まることが明らかとなった。これらの知見は、古くから提唱されている前頭前野から感覚野に注意制御のためのトップダウン信号が送られるという注意制御仮説を支持するものであった。この仮説は背景で述べた通り、脳損傷患者症例研究、機能的磁気共鳴画像法を用いた脳賦活研究および機能結合研究、仮想的脳損傷研究に基づくものであったが、本研究では健常被験者において脳活動の時間動態からこの仮説を支持する結果を提示することができた。

(4) 標的刺激に対する聴覚誘発反応および触覚誘発反応が空間的注意により増大した。上述の脳領域間結合解析の結果と併せて考えると、空間的な注意制御中には前頭前野から後方の感覚連合野へ注意制御のための信号が送られ、標的刺激に対する皮質反応性が高まると推測される。注意を向けた刺激に対する皮質反応性が高まることは古くから報告されており、利得調節機構と呼ばれる(Hillyard 1999)。また、この仮説は数理的な面から乗算的利得調節機構とも呼ばれる(Kanwisher and Wojciulik 2000)。これを支持する結果も報告されている。本研究で確認された誘発反応の増大がこの調節機構によって説明できれば、その利得は前頭前野からの注意制御信号により調節される可能性を示すことができる。ただし、詳細を明らかにするには今後さらなる研究が必要である。このように誘発反応解析、時間周波数解析および脳領域間結合解析によって得られる結果を統合的に結びつけることにより、注意およびその他の様々な脳機能に関してより深い洞察が可能となると考えられる。

<引用文献>

- Kida T, Nishihira Y, Wasaka T, Nakata H, Sakamoto M. Differential modulation of frontal and temporal component of the somatosensory N140 and the effect of interstimulus interval in a selective attention task. *Brain Research Cognitive Brain Research* 19 (1), 2004, 33-39
- Kida T, Inui K, Wasaka T, Akatsuka K, Tanaka E, Kakigi R. Time-varying cortical activations related to visual-tactile cross-modal links in spatial selective attention. *Journal of Neurophysiology* 97 (5), 2007, 3585-3596
- Kida T, Inui K, Tanaka E, Kakigi R. Dynamics of within-, inter-, and cross-modal attentional modulation. *Journal of Neurophysiology* 105 (2), 2011, 674-686
- Kida T, Wasaka T, Inui K, Nakata H, Akatsuka K, Kakigi R. Centrifugal regulation of human cortical responses to a task-relevant somatosensory signal triggering voluntary movement. *NeuroImage* 32 (3), 2006, 1355-1364
- Siegel M, Donner TH, Oostenveld R, Fries P, Engel AK. Neuronal synchronization along the dorsal visual pathway reflects the focus of spatial attention. *Neuron* 60(4), 2008. 709-719
- Hillyard SA, Vogel EK, Luck SJ. Sensory gain control (amplification) as a mechanism of selective attention: electrophysiological and neuroimaging evidence. In *Attention, Space, and Action*. Studies in Cognitive Neuroscience, edited by Humphreys GW, Duncan J, Treisman A. Oxford, UK: Oxford University Press, 1999, 31-53.
- Kanwisher N, Wojciulik E. Visual attention: insights from brain imaging. *Nature Review Neuroscience* 1, 2000, 91-100

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4件)

- Kida T and Kakigi R. Neural mechanisms of attention involved in perception and action: From neuronal activity to network. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine* 査読無, 4(2), 2015, 161-169 (review)

- 木田哲夫. ネットワーク科学: 脳科学・神経心理学への応用. *神経心理学*, 査読無. 30(4), 2014, 251-258 (review)
- Kida T. Attentional modulation and control in the human somatosensory system. *Advances in Exercise and Sports Physiology* 査読無, 20(3), 2014, 51-56. (review)
- Kida T and Kakigi R. Task-related changes in functional properties of the human brain network underlying attentional control. *PLoS One* 査読有, 8 (11), 2013, e79023

[学会発表](計 5件)

- Kida T, Tanaka E, Kakigi R. Task-related changes in functional properties of the human brain network underlying attentional control. 17th World Congress of Psychophysiology (IOP2014), International Conference Center Hiroshima, Hiroshima, Japan, 2014.9.23-27
- Kida T, Tanaka E, Kakigi R. Task-related changes in functional properties of the human brain network underlying attentional control. 30th International Congress of Clinical Neurophysiology (ICCN2014) of the IFCN, Estrel Hotel & Convention Center Berlin, Berlin, German, 2014.3.19-23
- Kida T, Tanaka E, Kakigi R. Task-related changes in functional properties of the human brain network. Neuroscience 2013 SfN 43th Annual Meeting, San Diego Convention Center, San Diego, USA, 2013.11.9-13.
- 木田哲夫. 注意および随意運動による体性感覚系の修飾. 第21回日本運動生理学会. シンポジウム「運動に伴う体性感覚情報が脳機能に及ぼす影響」(東京国際大学、埼玉). 2013.7.27-28
- 木田哲夫. 触覚および視覚性注意による体性感覚野活動の修飾. 第28回日本生体磁気学会. シンポジウム「脳磁場から探る体性感覚情報処理の神経機構」(朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター、新潟). 2013.6.7-8

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

木田 哲夫 (Kida, Tetsuo)

生理学研究所・統合生理研究系・特任准教授

研究者番号：80419861

(2)研究分担者

なし ()

研究者番号：

(3)連携研究者

なし ()

研究者番号：