

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月22日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22730596

研究課題名（和文） 脳波の位相同期性解析およびグラフ理論解析を用いた視覚的注意の評価手法の開発

研究課題名（英文） Development of phase synchrony and graph theoretical analyses of electroencephalogram for estimating visual attention

研究代表者

武田 裕司（TAKEDA YUJI）

独立行政法人産業技術総合研究所・ヒューマンライフテクノロジー研究部門・主任研究員

研究者番号：10357410

研究成果の概要（和文）：本研究は、脳内の情報伝達量を反映する脳波の位相同期性に着目し、視覚的注意の状態を客観的に評価するための手法の開発を目指して行われた。研究の結果、トップダウン注意制御を必要とする複数の認知課題において、低γ帯域における強い位相同期性が認められた。また、この位相同期性が脳部位間の双方向的情報伝達を反映していることが示唆された。ただし、注意状態と位相同期性の関係が認められない認知課題もあり、今後も研究を進展させていく必要がある。

研究成果の概要（英文）：The objective of the present study was to develop techniques for estimating visual attentional state by using phase synchronization of electroencephalographic signals, which can reflect the information transfer between brain regions. As the results of the present study, greater phase synchrony in the lower gamma band was found in the various cognitive tasks that require top-down attentional control. In addition, it was clarified that such phase synchrony would reflect the bidirectional information transfer between brain regions. However, in some cognitive tasks, it was failed to show the relationship between attentional state and phase synchronization measures. Thus, further studies are needed to develop the techniques for estimating visual attentional state.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：社会科学

科研費の分科・細目：心理学・実験心理学

キーワード：注意

1. 研究開始当初の背景

日常生活では多くの情報が溢れており、処理すべき情報を効率的に選択する必要がある。この選択機能は「注意」と呼ばれ、我々が適応的に行動する上で最も重要な認知機

能の一つである。注意機能は、刺激によって駆動されるボトムアップ制御と知識によって駆動されるトップダウン制御の交互作用によって実現されると考えられている。注意を必要とする認知課題において、ボトムアッ

プ制御とトップダウン制御がどのようなタイミングで働き、それらが行動にどのような影響を与えるのかを検討することは、注意制御メカニズムを知る上で極めて重要である。

注意の代表的な実験パラダイムである視覚探索課題を用いたサル電気生理学的研究において、ボトムアップ制御のみで標的の検出が可能な刺激セットでは高周波数の γ 帯域(36-56 Hz)の同期性が、トップダウン制御が必要な刺激セットでは低周波数の γ 帯域(22-34 Hz)の同期性が高くなるという報告が2007年に出された。この報告に基づいて我々の研究室でも実験を行い、ヒトの頭皮上脳波の位相同期性においても同様の結果が得られることを確認していた。

最終的な出力のみを観察する行動実験とは異なり、 γ 帯域の位相同期性解析は課題遂行中の情報処理過程を高時間分解能で検討できるため、この指標を適用することで注意制御特性の解明が飛躍的に促進される可能性が考えられた。脳波の位相同期性解析に基づく視覚的注意の評価手法を確立するには、まず高 γ 帯域がボトムアップ制御を、低 γ 帯域がトップダウン制御を反映していることを十分な実験データの積み重ねによって示す必要があった。また、脳波の位相同期性は脳部位間の機能的結合(情報伝達)を反映していると考えられており、グラフ理論に基づいた脳内情報処理ネットワーク効率の評価に発展させることが可能であると考えられた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、トップダウン注意制御およびボトムアップ注意制御の時間的変動を計測する手法として、脳波の位相同期性解析を確立することであった。そのためのステップとして、以下の3つの目標を設定した。

(1) それまでの研究から、高 γ 帯域がボトムアップ注意制御を、低 γ 帯域がトップダウン制御を反映するという仮説を支持する結果は得られていたが、直接的な証拠は視覚探索課題で確認されているのみであった。そこで、注意の制御様式を明確に切り分けることができる複数の認知課題を用いて、 γ 帯域位相同期性と注意制御様式の実験的に検討することを目標とした。

(2) それまでに報告されてきた研究では、脳内のネットワーク効率について、安静時のデータのみで検討されており、認知課題遂行中の効率に関する知見はほとんど存在しなかった。そこで、認知課題遂行中のネットワーク効率に関する知見を蓄積し、グラフ理論解析に基づいた評価手法を確立することを目標とした。

(3) 選択的注意を必要とする認知課題では、大きな個人差や個人内(試行間)でのばらつきが観察される。そこで、課題成績のばらつきが注意のトップダウン制御およびボトムアップ制御の時間的変動とどのように関係しているのかを検証し、認知課題の成績を予測できる指標の開発を目指した。

3. 研究の方法

本研究は、脳波計測実験による研究とシミュレーションによる研究の2つに分類することができる。以下に各々の方法について説明する。

(1) 脳波計測実験では、トップダウン注意制御が強く関与していると考えられる先行手がかり課題、フランカー課題、条件付き注意捕捉課題、次元加重課題、Nバック課題、注意の瞬き課題、ストップシグナル課題の7課題についてデータの収集を行った。

① 先行手がかり課題では、注視点の左右にボックスが提示され、実験参加者はボックス内に出現するドットに対してキー押し反応することが求められた。ドットが提示される800 msまたは1200 ms前に、ドットの提示位置に関する確率情報を示す手がかりが与えられた。手がかりには2つの条件があり、ボックスがフラッシュすることで情報が与えられる周辺手がかり条件(ボトムアップ注意制御が可能)と注視点の色が変化することで情報が与えられる中心手がかり条件(トップダウン注意制御が必要)が設定された。手がかりが示した位置にドットが出現する有効試行が64%、異なる位置に出現する無効試行が16%、ドットが出現しないcatch試行が20%であった。

② フランカー課題では、7つのアルファベットが提示され、実験参加者は中央のアルファベット(標的)がHまたはKであれば一方のキーを、SまたはCであれば他方のキーを押すことが求められた。提示される7つのアルファベットが全て同じ条件(e.g., HHHHHHH)、標的と同じ反応指の別のアルファベットが周辺に提示される条件(e.g., KKKHKKK)、反応指も異なる条件(e.g., SSSSHSS)、標的と形状は似ているが反応とは無関連のアルファベットが周辺に提示される条件(e.g., NWZHNWZ)、形状も似ていないアルファベットが周辺に提示される条件(e.g., GJQHGJQ)が設定された。異なる反応指のアルファベットからの干渉を回避するには、トップダウン注意制御が必要であることが知られている。

③ 条件付き注意捕捉課題では、3つのアルファベットで構成された刺激が12 Hzで高速継時視覚提示され、実験参加者は中央に提示される特定の色のアルファベットを同定することが求められた。中央のアルファベット

は赤・青・緑・黄・シアン・マゼンダのいずれかで提示され、うち1つが標的色であった。左右のアルファベットが全て灰色で提示される条件(統制条件)、標的の167 ms前に標的色の妨害刺激が左右いずれかに提示される条件(同色条件)、非標的色の妨害刺激が提示される条件(異色条件)が設定された。この課題において、同色条件ではトップダウン制御によって妨害刺激に注意が捕捉され、標的の同定を妨害することが知られている。

④ 次元加重課題では、25本の線分が提示され、実験参加者は色または方位で他の線分と異なる標的が提示されているか否かをキー押し反応することが求められた。色定義の標的のみが提示されるブロック、方位定義の標的のみが提示されるブロック、および等確率で色定義または線分定義の標的が提示されるブロックが設定された。標的の特徴次元が予め分かっているブロックではトップダウン的に注意を特定の特徴次元に向けることができ、反応時間が短縮される。一方、標的の特徴次元が決められていないブロックでは、ボトムアップ注意制御によって標的を探索する必要があると考えられている。

⑤ Nバック課題では、アルファベットが2秒間隔で提示された。実験参加者の課題は、0バック条件では提示されたアルファベットがXであればキー押しを行うこと、1バック条件では提示されたアルファベットが直前の試行と同じであればキー押しを行うこと、2バック条件では提示されたアルファベットが2試行前と同じであればキー押しを行うことであった。このNバック課題では、Nが増加するに伴って、トップダウン注意制御と関連が深い作業記憶の負荷が高くなることが知られている。

⑥ 注意の瞬き課題では、10 Hzで数字およびアルファベットが高速継時視覚提示され、実験参加者は数字の系列の中に提示される2つの標的(アルファベット)を同定することが求められた。第一標的と第二標的の間のSOAは300 msと700 msに設定された。第二標的を見落とすという注意の瞬き現象はトップダウン注意制御が強く働いている時に生じやすいことが知られている。

⑦ ストップシグナル課題では、左右いずれかを向いた緑色の矢印が提示され、実験参加者は矢印の向いた位置のキーを押すことが求められた。全試行の25%では、矢印が提示されてから一定時間後に矢印が赤色に変化した。この試行では、キー押しを止めることが求められた。矢印が提示されてから色が変わるまでの時間を系統的に操作し、この時間と平均反応時間との差分によって、ストップシグナル反応時間(SSRT)を算出した。このSSRTは注意のトップダウン抑制が適切に働いている場合に短くなることが知られて

いる。

(2) 脳波の位相同期周波数と情報伝達様式の関係を検証するため、2つの細胞群を仮定したニューラルマスモデルによるシミュレーション実験を行った。各細胞群は、錐体細胞、興奮性介在細胞、およびインパルス応答特性が異なる2種類の抑制性介在細胞から構成された(図1A)。細胞群*i*の錐体細胞におけるスパイク密度 z_{0i} は $D_i = w_i(z_{0i}(t-\tau)-\beta_i)$ として細胞群*j*に、細胞群*j*の z_{0j} は $D_j = w_j(z_{0j}(t-\tau)-\beta_j)$ として細胞群*i*に伝達された。一方向結合条件の情報伝達の重み付けは $w_i = 0.5, w_j = 0$ とし、双方向性結合条件の情報伝達の重み付けは $w_i = w_j = 0.33$ とした。また、伝達時間の時間遅れ τ は10 msとした。各細胞群の錐体細胞の膜電位 v_0 を脳波信号と同一であるとみなし、位相同期性を算出した。

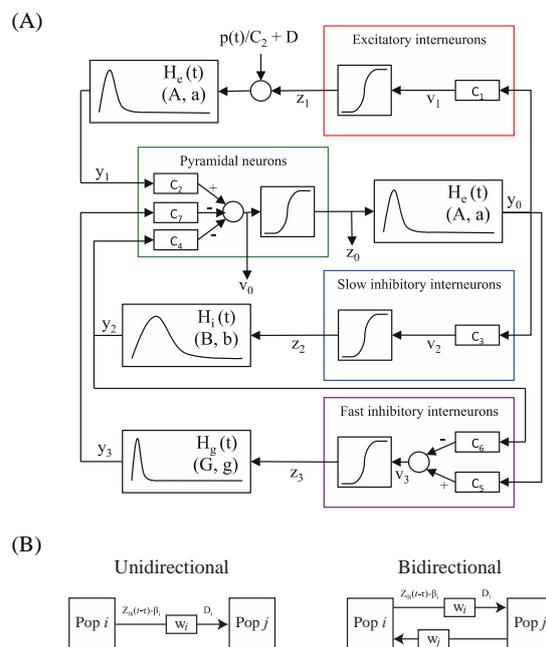


図1 本研究で用いたニューラルマスモデルの模式図。(A)各細胞群内の構成。(B)細胞群間の接続様式。

4. 研究成果

(1) 一連の脳波計測実験のデータについて、脳部位間の位相同期性を反映する phase-locking value (以下、PLV と呼ぶ) を求めた。

条件付き注意捕捉課題では、標的のオンセットから100-200 ms後の40-50 Hz帯域PLVは同色条件および異色条件で統制条件よりも低く、標的のオンセットから200-300 ms後の22-34 Hz帯域PLVは同色条件で他の2条件よりも高いことが明らかになった(図2A)。この結果は、妨害刺激の出現によるボトムアップの注意捕捉が高 γ 帯域PLVに反映されており、標的色の知識に基づいたトップ

ダウンの注意捕捉が低 γ 帯域 PLV に反映されることを示していると考えられ、本研究の仮説と一致している。

また、次元加重課題では、刺激提示から 0-100 ms 後の 22-34 Hz 帯域 PLV は標的の次元に関する知識がないブロックよりも知識があるブロックにおいて高くなること明らかになった(図 2B)。この結果は特定の次元に対してトップダウン的に注意を向ける過程が低 γ 帯域 PLV に反映されることを示していると考えられ、本研究の仮説と整合している。

注意の瞬き課題では、トップダウン注意制御が強く働いている時ほど第二標的を見落としやすいことが知られている。裏を返せば、第二標的を見落とした試行では正答した試行と比べてトップダウン注意制御が強く働いていたという個人内(試行間)でのばらつきを反映していると考えられる。第二標的を見落とした試行の PLV と正確に同定できた試行の PLV の差分を算出した結果、第二標的を見落とした試行では、第一標的出現直前の PLV が高いことが明らかになった(図 2C)。この結果は、本研究の仮説と整合しており、低 γ 帯域 PLV によって認知課題成績の個人内でのばらつきを評価できる可能性を示している(詳細は、木原・武田, 2013 を参照)。

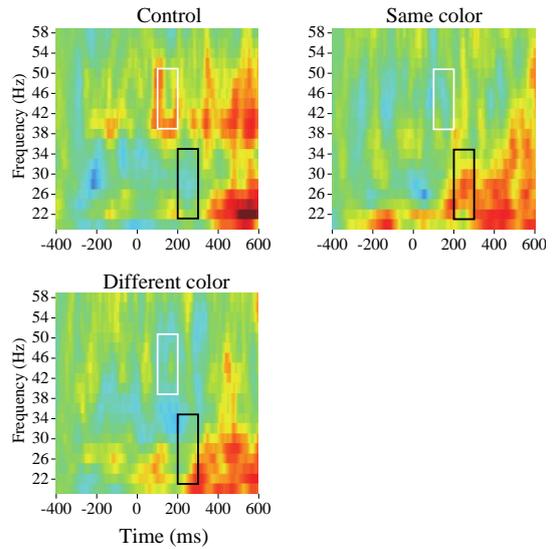
ストップシグナル課題では、平均 SSRT が短い(トップダウン抑制能力が高い)実験参加者群と平均 SSRT が長い(トップダウン抑制能力が低い)実験参加者群に分割し、個人差について検討した。その結果、長 SSRT 群と比べて、短 SSRT 群は低 γ 帯域および高 γ 帯域 PLV が高いことが明らかになった(図 2D)。この結果は、高 γ 帯域=ボトムアップ制御、低 γ 帯域=トップダウン制御という関係性については明確でないものの、トップダウン抑制能力の個人差が脳部位間の情報伝達に依存しており、PLV のような位相同期性解析で評価ができる可能性を示している。

上記の条件付き注意捕捉課題、次元加重課題、注意の瞬き課題、およびストップシグナル課題においては注意制御と位相同期性の間に一定の関係性が認められた。その一方で、先行手がかり課題、フランカー課題、および N バック課題においては位相同期性に明確な傾向が認められなかった。また、注意制御と関連して低 γ 帯域位相同期性の増強が認められた 4 つの課題について、本研究の目的の一つであるグラフ理論解析によるネットワーク効率の解析を行った結果、注意制御様式によってネットワーク構造が系統的に変化しているという証拠は得られなかった。

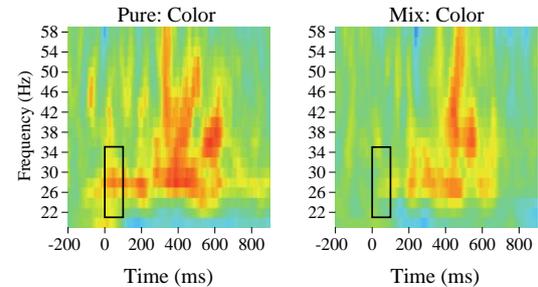
今後、位相同期性解析やグラフ理論解析を注意制御状態の指標として確立するには、より多くの実験データの収集を行い、各課題で想定される認知プロセスに応じた結果の整

理を進めていく必要があると考えられる。

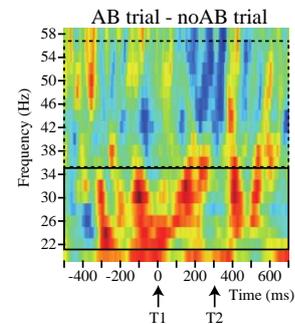
(A) Contingent capture task



(B) Dimension weighting task



(C) Attentional blink task



(D) Stop-signal task

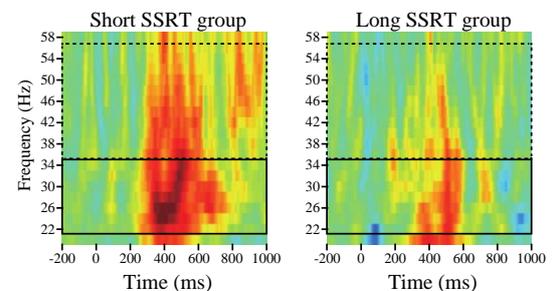


図 2 条件付き注意捕捉課題(A)および次元加重課題(B)、注意の瞬き課題(C)、およびストップシグナル課題における位相同期性の

結果。

(2) ニューラルマスモデルによるシミュレーション実験の結果、細胞群を一方向的に結合した場合には高 γ 帯域(34-52 Hz)のPLVが高く、双方向的に結合した場合には低 γ 帯域(22-34 Hz)のPLVが高いことが示された(図3)。この結果は、高 γ 帯域の同期性は一方向の情報伝達・非再帰的处理を、低 γ 帯域の同期性は双方向の情報伝達・再帰的な処理を反映することを示唆している。実際の視覚課題において、ボトムアップ制御のみで遂行可能な場合には、頭頂→側頭/後頭→前頭への一方向的な情報伝達が行われていると考えられる。一方、トップダウン制御が必要な場合には、ボトムアップ情報の伝達に加えて、前頭→頭頂/側頭→後頭へのトップダウン情報の伝達が必要であると考えられる。この視点に立つと、本シミュレーションの結果は実際の認知処理プロセスと整合性が高いと考えられる(詳細は、Takeda, 2011を参照)。

ニューラルマスモデルを拡張して、3つの脳部位間の情報伝達を仮定した場合のシミュレーションを行い、脳部位間の位相同期性を検討した。その結果、時間遅れを考慮した解析を行った場合でも、接続様式によって同期性のパターンが非線形的に変化することが示された。このことは、3つ以上の部位が相互関係をもつと想定される認知課題では位相同期性による情報伝達量の評価が難しいことを示している。本研究の脳波計測実験において、先行手がかり課題、フランク課題、およびNバック課題で位相同期性に明確な傾向が認められなかった背景に、これらの課題遂行時に3つ以上の部位で頻繁な情報伝達を行っていた可能性が考えられる。複数の部位間での情報伝達を明らかにできる指標の開発が本研究課題の発展におけるブレイクスルーになると考えられる。

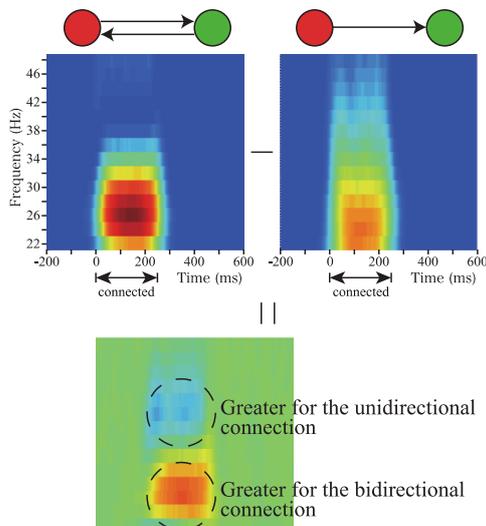


図3 ニューラルマスモデルにおけるシミュ

レーションの結果。

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2件)

- ① 木原健・武田裕司、The relationship between phase synchronization frequency and temporal attention in the attentional blink、生理心理学と精神生理学、査読有、Vol. 30、2013 (印刷中)
- ② Takeda, Y.、Influence of connection type on phase synchrony: analysis of a neural mass model、*Biological Cybernetics*、査読有、Vol.105、2011、349-354、DOI 10.1007/s00422-011-0470-6

[学会発表] (計5件)

- ① 武田裕司、構えと一致しない妨害刺激に対する脳内情報処理過程の検討、日本基礎心理学会第31回大会、2012年11月04日、九州大学(福岡県)
- ② 武田裕司、脳部位間の機能的結合と位同期:Neural massモデルによる検討、日本心理学会第76回大会、2012年09月12日、専修大学(神奈川県)
- ③ 武田裕司、ストップシグナル反応時間の個人差-脳部位間機能的結合の検討、日本基礎心理学会第30回大会、2011年12月4日、慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県)
- ④ 武田裕司、空間手がかり課題における脳波位相同期性の検討、日本心理学会第75回大会、2011年9月17日、日本大学文理学部キャンパス(東京都)
- ⑤ 武田裕司・紙上敬太、顔の既知性判断における脳内部位間の機能的結合、日本基礎心理学会第29回大会、2010年11月27日、関西学院大学(兵庫県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 裕司 (TAKEDA YUJI)

独立行政法人産業技術総合研究所・ヒューマンライフテクノロジー研究部門・主任研究員

研究者番号: 10357410