

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 3 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22240046

研究課題名（和文）

アルファ波および周波数間カップリングの機能解明とデコーディング技術への応用

研究課題名（英文） Functional elucidation of the coupling between intensity and frequency of alpha wave and its application to the decoding technology

研究代表者

武田 常広（TAKEDA TSUNEHIRO）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90292771

研究成果の概要（和文）：

アルファ波のクロック仮説を実証するため、アルファ周波数変化に伴うジッター知覚の計測と MEG データに対する周波数間カップリングの解析を行い、文字のデコーディングに応用可能な結果を得た。α波の成因として、上丘の Corollary Discharge の寄与を始めて同定することに成功した。また、信号パラメータを、ベイズ定理に基づいて推定する方法を確立し、GPU を使って並列計算で実時間に近い推定が可能であることを実証した。

研究成果の概要（英文）：

We conducted the measurement of jitter perception associated with frequency change of alpha wave to prove the hypothesis of alpha wave clock. Then we performed the analysis of coupling between MEG data and jitter frequency. We have acquired promising result for applying the result to decoding the perception of numerical characters. We also succeeded in identification of the contribution of Corollary Discharge for the origin of alpha wave. At the same time, we constructed a method based on the Bayes theory to estimate signal parameters embedded in the noisy data in a real time manner using GPU.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	13,400,000	4,020,000	17,420,000
2011 年度	12,900,000	3,870,000	16,770,000
2012 年度	12,100,000	3,630,000	15,730,000
総計	38,400,000	11,520,000	49,920,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：脳神経学・神経科学一般

キーワード：アルファ波、MEG、心理物理、知覚、カップリング、デコーディング

1. 研究開始当初の背景

外部入力が存在しない状態でも脳から自然に発生する規則正しいリズムの発生については、古くから多くの研究がされてきた。特にアルファ波については、その成分が覚醒状態に応じて顕著に変動することから、多くの

研究者の注意を引き様々な言明がなされてきた。例えば視覚的注意を向けることによって、アルファ波の活動が抑制されることが知られている。しかしながら、脳内情報処理においてアルファ波がどのような機能的役割を果たしているのかについてはほとんど明ら

かになっていなかった。その中で、アルファ波が脳内情報処理のクロック的な役割を果たしているのではないかと、との仮説がある（例えば VanRullen & Koch, 2003）。実験データによる裏づけがまだ少なく、広く受け入れられているとは言いがたい状況であるので、本研究は、MEG（脳磁計）と心理物理計測を組合わせて計測し、解明を行った。

2. 研究の目的

後頭葉に顕著に観察される 10Hz 近傍の自発脳活動であるアルファ波の存在は古くから知られているが、その機能についてはほとんど分かっていない。我々は、アルファ波のリズムで視覚的な揺れ（ジター）が知覚されるアルファジター錯視や、ガンマ波のパワーがアルファ波の位相で変調される周波数カップリングの知見に着目し、アルファ波が情報処理のクロック的役割を果たしているという仮説の検証を行う。本研究ではジター錯視を軸に、心理物理学的手法と、MEG, fMRI 計測を組み合わせることで、アルファ波のクロック仮説を多面的に実証する。具体的にはアルファ周波数変化に伴うジター知覚の計測と、MEG データに対する周波数間カップリングの解析を行い、自発脳活動の本態を解明する。最終的にはそれらの知見を文字のデコーディングに応用する。

3. 研究の方法

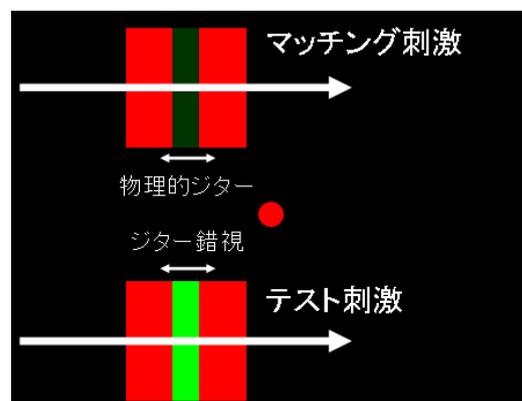
個人間および個人内のアルファ周波数の違いに着目し、アルファ周波数の変動に関連したジター周波数の変動を示すことで、アルファ波が視覚情報処理のクロックとして因果的影響を及ぼしていることを実証を試みた。さらに、アルファ波の位相に応じたガンマ波パワーの変調を調べることで、アルファ波が他の周波数の脳活動に対してもクロックとして働いている可能性を検討した。脳内クロ

ックがどこから生じているのかを明らかにするため、アルファ波の活動源を Beamformer 等の手法で推定するとともに、その結果を同一の刺激を観察中の BOLD 信号と比較した。最後に、各周波数のパワーの情報のみならず、周波数間カップリングを用いたデコーディング技術を確立する。具体的には、文字の視覚呈示、聴覚呈示および想像時の MEG から文字をデコードし、単語、さらには文章のデコーディングを行い実用的な BCI 技術を考案した。

個人間および個人内のアルファ波周波数の違いを利用して、知覚されるジター周波数とアルファ周波数の相関を検討することで、ジター錯視におけるアルファ波の因果的役割を示した。知覚されるジター周波数を心理物理的に、MEG を用いて閉眼時およびジター知覚時のアルファ波周波数を計測した。

【ジター周波数の計測方法】

ジター周波数の測定には調整法を用いる。すなわち、固視点の下方にジター錯視刺激を、上方には物理的にジターする調整用の刺激を提示し、被験者は調整刺激の周波数を、錯視刺激の知覚と等しくなるまで調整した。アルファ波の変動はその定義上大きくて 5Hz 程度であり（8-13Hz）、精度の高い心理物理計測が不可欠となるため、同一の刺激に対して十分な回数の調整を被験者に行わせ、その平均値を知覚されるジター周波数とした。

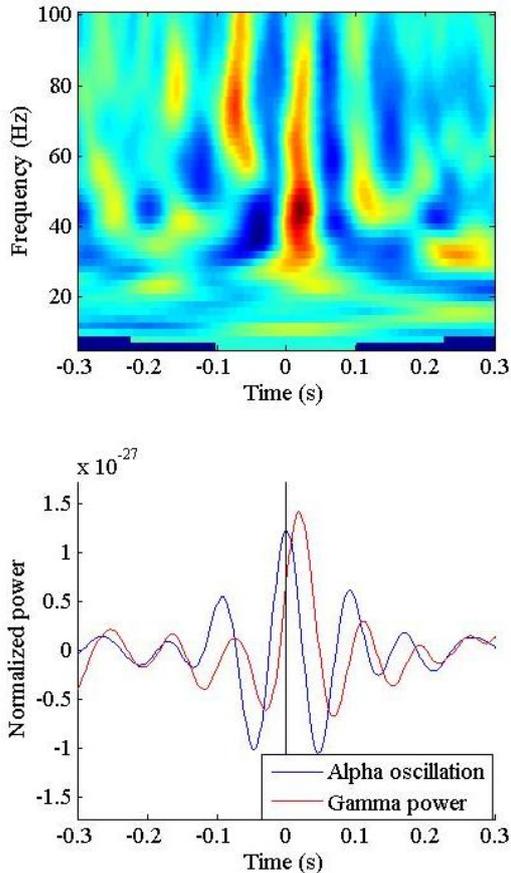


【被験者間変動】

20, 30 代の被験者に加えて, 平均的なアルファ周波数が低いとされる子供あるいは年長者の被験者を用いて, ジター周波数の計測および, 閉眼時, ジター知覚時の MEG 計測を行い, ジター周波数とアルファ周波数の相関を示した.

【被験者内変動】

過呼吸前後でのアルファ波計測とジター周波数の計測を行う. また, 5-15Hz 程度で強度変調した視覚あるいは聴覚刺激による引き込み現象を用いてアルファ波への介入を行い, 刺激呈示中および消去直後のアルファ波計測とジター周波数の計測を行う. 視覚刺激はフラッシュ刺激, 聴覚刺激は強度変調刺激を用いた. 刺激を消去したあと, 刺激の周波数にアルファが引き込まれた状況が何秒間続くのかを MEG を用いて計測し, 視覚刺激の色, 呈示位置等のパラメータを系統的に変化



させて引き込みが最も持続する条件を明らかにした. さらに, アルファジターを生じる刺激の緑のバーにアルファ周波数周辺での物理的ジターを加え, 脳内の振動と視覚刺激の物理的振動の相互作用によってどのような知覚が生じるのかについても調べた.

アルファ周波数の変動に伴うジター周波数の計測をメインとするが, クロック仮説の一般性を示すため, アルファ周波数の変動に伴い, ガボール図形等の単純な視覚刺激に対する検出閾値や反応時間がどのように変化するかを検討した. 例えば, 刺激呈示がどのアルファ波位相で行われたかによって単純反応時間が変化すると報告もあるが, このような特性がアルファ周波数の変動に伴いどのように変化するかを調べた.

【アルファジター錯視時の周波数間カップリング】

計測された MEG データに対して, アルファ波のピーク周波数のみならず, クロス周波数カップリングの解析を行った. まず, MEG 信号に対してアルファ周波数の帯域でのバンドパス処理を行ったデータに対してヒルベルト変換を行い, アルファ波の瞬時位相を求めた. 続いて, この瞬時位相に基づき, 計測された MEG 信号を分類してガンマ周波数のパワーを調べることで, アルファ波の位相とガンマ波のパワーの関係が, 閉眼時およびジター知覚時にどのようなになっているかを明らかにした.

我々は閉眼時の MEG の記録によって, 周波数間カップリングを非侵襲的にも計測できることを確認した. 右図は閉眼時における各周波数パワーの時間変化をアルファ波の位相がピークとなる時刻を基準にして加算平均したものであり, ガンマ帯の強度がアルファ波の周波数で変化していることが見て取れる. 本研究では, この解析を被験者間変動お

よび、過呼吸あるいは引き込み刺激等を用いた被験者内変動の実験双方において適用し、アルファ周波数の変動と周波数間カップリングの関係を明らかにした。

4. 研究成果

後頭葉に顕著に観察される10Hz近傍の自発脳活動であるアルファ波の存在は古くから知られているが、その機能についてはほとんど分かっていなかった。我々は、アルファ波のリズムで視覚的な揺れ（ジター）が知覚されるアルファジター錯視や、ガンマ波のパワーがアルファ波の位相で変調される周波数カップリングの知見に着目し、アルファ波が情報処理のクロック的役割を果たしているという仮説の検証を行ってきた。本研究ではジター錯視を軸に、心理物理学的手法と、MEG, fMRI計測を組み合わせることで、アルファ波のクロック仮説を多面的に実証する実験を行った。

また、アルファ周波数変化に伴うジター知覚の計測と、MEGデータに対する周波数間カップリングの解析を行い、自発脳活動の本態を解明し、最終的にはそれらの知見を文字のデコーディングに応用するための実験を行い、有望な結果をえた。

また、 α 波の成因として、閉眼による視覚刺激の遮断、Microsaccades、上丘のCorollary Discharge等の可能性を心理物理的計測とMEG計測を併用して解析した結果、上丘のCorollary Dischargeの寄与を始めて同定することに成功した。

このようなジター錯視に関連するアルファ波の変動を計測し、その変動量を被験者にニューロフィードバックすることにより、被験者に自らの意思でアルファ波の周波数を制御することを可能にするための実験系を構築し、4名の被験者を用いて予備的実験を実施した。その結果、完全に一致した傾向ではなかったが、ニューロフィードバックによる可能性が高い変動を確認できた。

MEG や EEG 計測は、脳の神経細胞の活動に伴う電気活動を、磁場あるいは電場の変化として直接的に計測するので、時間分解能は原理的には高い。しかしながら、脳から発生する信号は計測ノイズの数分の1以下なので、通常100回程度の計測データの加算平均を取ることによって漸くデータとなる。従って、実用的な時間分解能はかなり低くなっており、研究上大きな問題とされてきた。我々は、脳細胞が刺激を得た後の反応が2次システムの減衰応答で十分近似できることを確認し、その応答の立上り時間、ピーク値、減衰特性のパラメータを、測定データからベイズ定理に基づいて推定する方法を確立し、近年高速化と低価格化が飛躍的に進んだGPU (Graphics Processing Unit) を使って、並列計算でモンテカルロシミュレーションを行うことにより、実時間に近い推定が可能であることを実証し、特許を出願した。この方法が確立すれば、従来の計測を100倍程度効率良く行うことが可能になり、本研究ばかりでなく、脳研究一般に大きく貢献することが期待される。

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10件)

- ① Amano, K., Takeda, T., Haji, T., Terao, M., Maruya, K., Matsumoto, K., Murakami, I., Nishida, S. (2012): Human neural responses involved in spatial pooling of locally ambiguous motion signals, *J. of Neurophysiology* 107, 3493-3508, 査読有.
- ② Takeda, T., Okamoto, M., Miyazaki, T., Morita, N., Katagiri, K. : A liquid helium circulation system for low temperature physics devices, ICEC24-ICMC 2012, Edited by K. Funaki, A. Nishimura, Y. Kamioka and H. Kumakura, Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, 253-258, 2012, 査読有.
- ③ Takemura, H., Ashida, H., Amano, K., Kitaoka, A. & Murakami, I. (2012): Neural correlates of induced motion perception in the human brain, *The Journal of Neuroscience*, 32(41), 14344-14354, 査読

- 有.
- ④ Kogai, T., Aoyama, A. Amano, K., Takeda, T. (2011): Visual mismatch response evoked by a perceptually indistinguishable oddball, *Neuroreport* 22(11), 535-538, 査読有.
 - ⑤ Shimono M., Takeda T.: Neural processes for intentional control of perceptual switching: An MEG study, *J. of Japan Biomagnetism and Bioelectromagnetics Society*, 24, 125-129, 2011, 査読有.
 - ⑥ Takeda, T., Okamoto, M., Miyazaki, T., Katagiri, K.: Helium Circulation System for the MEG, *Magnetoencephalography* edited by Elizabeth Pang, 195-210, INTECH (2011), 査読有.
 - ⑦ Aoshika, H., Nara, T., Amano, K. and Takeda T. (2011): Computation of multipole moments from incomplete boundary data for Magnetoencephalography inverse problem, *JSIAM Letters* 3, 65-68, 査読有.
 - ⑧ Qi, L., Amano, K., Shimono, M., Takeda, T. (2010): MEG feature selection for motion prediction, *The Journal of Japan Biomagnetism and Bioelectromagnetics Society* 22(2), 3-10., 査読有.
 - ⑨ Maruya, K., Amano, K., Nishida, S. (2010): Conditional spatial-frequency selective pooling of one-dimensional motion signals into global two-dimensional motion, *Vision Research* 50(11), 1056-1064, 査読有.
 - ⑩ Winawer, J., Horiguchi, H., Sayres, R., Amano, K., Wandell, B. (2010), Mapping hV4 and ventral occipital cortex: The venous eclipse, *Journal of Vision* 10(5): article 1., 査読有.

[学会発表] (計 53 件)

- ① Yuasa, K., Amano, K., Aoyama, A., Takeda, T.: The analysis of objective recognition free from stimulus modality, 18th International conference on Biomagnetism, France, Paris, 2012.8.29.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：データ処理装置、及びプログラム
 発明者：武田 常広、宇野 裕、天野 薫
 権利者：東京大学
 種類：特許
 番号：特願 2011-124688
 出願年月日：平成 23 年 06 月 02 日
 国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.brain.k.u-tokyo.ac.jp/people/takeda/takeda-j.html>

<http://www.brain.k.u-tokyo.ac.jp/~amano/amano-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 常広 (TAKEDA TSUNEHIRO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90292771

(2) 研究分担者

天野 薫 (AMANO KAORU)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：70509976

(2011→2012：連携研究者)