

暗算処理における脳磁界コヒーレンス解析に関する研究

Analysis of MEG Coherence with Mental Calculation

田中慶太・渡光次郎・王鋼・湯ノ口万友・渡邊啓太*・川勝真喜**

鹿児島大学 工学部, 鹿児島市郡元 1-21-40 (〒890-0065)

*東京電機大学大学院工学研究科, 東京都千代田区神田錦町 2-2 (〒101-8457)

**東京電機大学情報環境学部, 千葉県印西市武西学園台 2-1200 (〒270-1382)

K.Tanaka, K.Watari, G.Wang, K.Yunokuchi, K.Watanabe* and M.Kawakatsu**

Faculty of Engineering, Kagoshima University, 1-21-40 Korimoto, Kagoshima 890-0065

*Graduate School of Engineering, Tokyo Denki University, 2-2 Kandanishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457

**School of Information Environment, Tokyo Denki University, 2-1200 Muzai Gakuendai, Inzai, Chiba 270-1382

We examined magnetoencephalography (MEG) coherence in the five bands (theta, alpha1, alpha2, beta1, and beta2) while the subjects were performing two different calculation tasks: (i) single-digit subtraction, and (ii) double-digit subtraction. MEG signals were recorded using a whole-head SQUID system. Five healthy males participated. Coherence was used to provide a functional measurement of corticocortical communication. The results showed that coherence in the alpha2 (10 ~ 12.5 Hz) band significantly decreased with increasing memory load during mental calculation tasks. Secondly, in the beta2 (19 ~ 30 Hz) band, significant increase of coherence with increasing memory load during calculation tasks was obtained between regions of left frontal dominance. This result agrees with that obtained in a preliminary study. The results showed that coherence in the beta2 band between regions of left hemisphere dominance significantly increased with increasing memory load during verbal working memory tasks. Therefore, this finding leads to a conclusion that information processing in mental calculation is necessarily a verbal working memory process.

Key words: MEG, mental calculation, coherence

1. はじめに

暗算は、大規模なネットワーク活動を用い、複数のプロセスの統合を必要とする複雑な精神活動であり、長期記憶からの検索と表示にワーキングメモリが重要な役割を果たすことが報告されている¹⁾。このワーキングメモリとは、「課題の効率的な達成を可能にするシステム」であり、その効率的な達成のためには、情報を一時的に保持しつつ、同時にその処理や更新を遂行するアクティブな記憶の働きが必要である。また多数の脳領域が、暗算課題の困難度の増加に対応して活性化することが知られている。これはワーキングメモリが高い負荷感受性を持つことを意味している。例えば、課題の負荷量が低い場合、前頭前野の一部が活性化するだけである。しかし、課題の負荷量が高い場合、前頭前野はもちろん側頭、頭頂、後頭領域までが広く活性化することが PET や fMRI を用いた研究において確かめられている^{2,3)}。このように

PET や fMRI は、脳の活性部位を特定することが可能であるが、脳部位間の機能的な関連性までを検討することは困難である。そのため、脳波や脳磁界を用いて、脳の全体的変化を捉えると同時に、脳の活性部位間の神経システムの結びつきを調べることが要求されている。また、脳磁界は、脳波に比べ、その特性から信号の空間的局在が高い。しかしながら、脳波に比べ脳磁界は S/N 比が悪いと考えられるため、その解析には、注意が必要である。そこで本研究では、2 信号間の周波数律動の同期性を調べる手法であり、その特性からノイズによる影響が受けにくいコヒーレンス解析を脳磁界に適用した。これまでにコヒーレンス解析は、脳波⁴⁾にとどまらず、脳磁界と筋電図間⁵⁾の適用も報告されている。本論文は、暗算タスク遂行時における脳磁界を記録し、脳部位間のコヒーレンス解析を行うことにより、暗算タスクの難度(ワーキングメモリ負荷)に対する脳の各部位間の関連性の検討を行った。なお脳波のコヒーレンスの増加は、脳領域間の機能的関連性が増強したと考えられている⁶⁾が脳磁界でも同様であると考ええる。

2. 方法

2.1 暗算タスク

タスクは、一桁と二桁の引き算である。まず一桁の引き算は、93 から 7 ずつ繰り返し引き算を行い、その結果が一桁の数字 9 になるまで行うものである(93, 86, ..., 16, 9)。次に二桁の引き算は、300 から 17 ずつ繰り返し引き算を行い、計算結果が二桁の数字 96 になるまで行うものである(300, 283, ..., 113, 96)。被験者には、閉眼状態を保ち、さらに可能な限り早く計算を行うように指示し測定を開始後、タスクの開始と終了時に右手の人差し指によりリアクションキーを反応させた。各タスクにおいて、桁数以外の条件を揃えるために、最初に設定する数字は、繰り返し引く数字より一桁だけ大きい数字を用い、それぞれ計算を 12 回行ったときに引く数字と同じ桁の数字になるように調節してある。また、コントロール状態としてタスク遂行前に閉眼安静時 1 分間の脳磁界を測定した。

2.2 脳磁界計測

Fig.1 に示すように、上記の暗算タスク遂行時の脳磁界を全頭型脳磁界計測装置(Neuromag-122™, Neuromag Ltd, Finland)を用

い、磁気シールドルーム内において計測した。本システムのピックアップコイルは、プレーナ型であり、全頭 61 部位からの磁界反応を計測することが可能である。計測された脳磁界信号は、0.03 ~ 100 Hz のアナログ帯域通過フィルタを通し、サンプリング周波数 512 Hz で A/D 変換し、遮断周波数 40 Hz のデジタル低域通過フィルタを通した。

対象は、23~27 歳(平均 24 歳)の健康な男子 5 人(うち左利き 1 人)、教育的背景が同じである。また実験にあたって全員に本研究について十分説明し実験の趣旨を理解させて行った。

2.3 コヒーレンス解析

コヒーレンス解析法は、2つの時系列の相関関数を周波数成分ごとに解析する手法であり、一般に時系列 x と y の間のコヒーレンスは

$$C_{xy}(f) = \frac{P_{xy}(f)}{\sqrt{P_x(f)P_y(f)}}$$

で定義される。ここで、 $P_x(f)$ と $P_y(f)$ はそれぞれ時系列 x と y のパワースペクトル、 $P_{xy}(f)$ は時系列 x と y の間のクロススペクトルである。

パワースペクトルとコヒーレンスは、暗算における計算時間のばらつきなどを考慮し、最初の 1 分間に記録した脳磁界に対して、時間間隔 4.0 s (2048 ポイント) で 50 % オーバラップさせ Hanning 窓を適用し、それぞれ加算平均処理を施した。ただし計算時間が 1 分未満のデータに関しては、暗算開始から終了までのデータにパワースペクトルとコヒーレンス解析を行った(10 例中 3 例)。その結果を(1)theta 帯域(4~7.5 Hz)、(2)alpha1 帯域(7.5~10 Hz)、(3)alpha2 帯域(10~12.5 Hz)、(4)beta1 帯域(12.5~19 Hz)、(5)beta2 帯域(19~30 Hz)の 5 つの周波数帯域に分け、帯域ごとの平均のパワースペクトルとコヒーレンス値を算出した。また、コヒーレンスは、左前頭部、右前頭部、左頭頂部、右頭頂部、左後頭部、右後頭部、左側頭部、右側頭部の 8 部位、各々の部位間(28

部位間)において適用した。パワースペクトルとコヒーレンスの結果は、統計的手法である一元配置分散分析法(one-way ANOVA)を適用し、タスク難度に対する検討を行った。

3. 結果

3.1 Behavior

タスク難度を確認するため、Fig.2 に各タスクの正解率と答えを出すまでの時間(calculation time)を示す。この図において、正解率を棒グラフ、計算時間を折れ線グラフで示した。その結果、一桁の引き算は、すべての被験者で正解が得られた。これに対して二桁の引き算は、5 人中 3 人の被験者のみ正解が得られた。また計算時間は、一桁の引き算よりも二桁の引き算において有意に延長した($F(1,8)=8.78$, $P<0.05$)。このことより一桁と二桁の暗算タスクの難度に差があり、一桁より二桁の暗算タスクにおいて暗算負荷が増加したことが示される。なお、タスクに際して、特殊な計算方法を行っていないことを被験者に確認している。

3.2 パワースペクトルとコヒーレンス解析

以上のようなタスクの特性をふまえて、安静時と各暗算タスク遂行中の脳磁界のパワースペクトルとコヒーレンス解析を行った。Fig.3 に暗算タスク遂行時において、タスク難度の増加に伴い、平均パワースペクトルとコヒーレンスに有意差が確認された領域および領域間を帯域ごとに示した。この図において、コヒーレンスがタスク難度に対して有意に増加した部位間を細線、減少した部位間を太線で表した($P<0.05$)。またパワースペクトルが、タスク難度に対して統計的に有意な増加が見られた部位を灰色四角、有意な減少が見られた部位を黒四角で示している($P<0.05$)。さらに暗算タスク時において、他の帯域に比べ、特徴的な結果を示した alpha2 帯域(10.0~12.5 Hz)と beta2 帯域(19~30 Hz)の両帯域において統計的に有意差が得られた部位間の安静時と各暗算タスク時のコヒーレンスの 5 人の被験者の平均値をそれぞれ Table 1, 2 に示す。

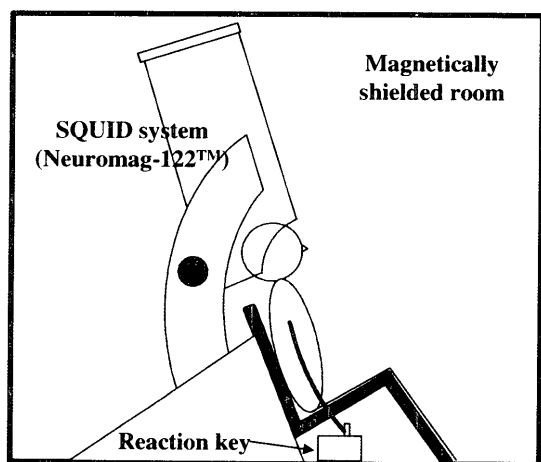


Fig. 1 Experimental setup for MEG measurement.

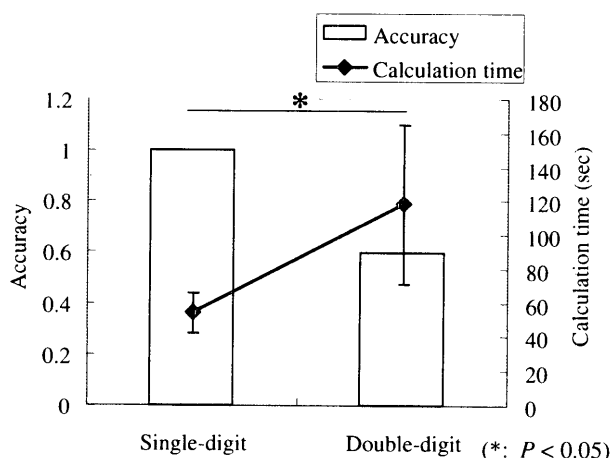


Fig. 2 Averaged calculation time and accuracy for each calculation task. Averaged calculation time and accuracy show as a line graph and bar chart respectively.

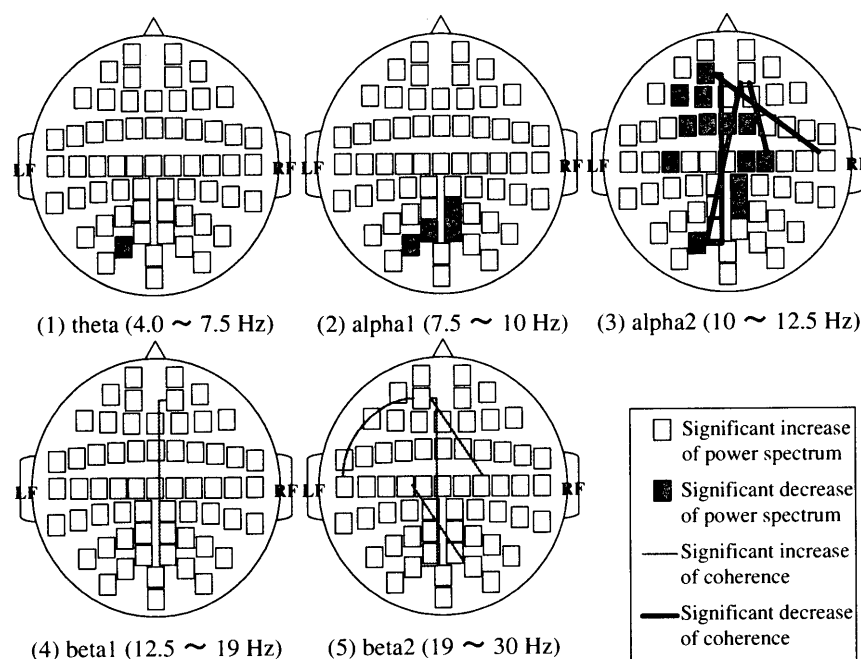


Fig. 3 Significant changes of coherence and power spectrum during mental calculation task. The lines connecting sensor sites indicate significant decreases (thick) and increases (thin) of coherence ($P < 0.05$). Black squares show decreases of power spectrum. Gray squares show increases of power spectrum ($P < 0.05$).

Table 1 Means of coherence (S.D.) with mental calculation difficulty for alpha2 band (10 ~ 12.5 Hz).

Sensor pair	Rest	Single-digit	Double-digit
left frontal · right temporal	0.0645 (0.0088)	0.0503 (0.0052)	0.0216 (0.0010)
left frontal · left occipital	0.0839 (0.0087)	0.0684 (0.0188)	0.0372 (0.0125)
right frontal · left occipital	0.0795 (0.0248)	0.0618 (0.0262)	0.0427 (0.00656)
right frontal · right parietal	0.0859 (0.0248)	0.0746 (0.0268)	0.0340 (0.0122)

Table 2 Means of coherence (S.D.) with mental calculation difficulty for beta2 band (19 ~ 30 Hz).

Sensor pair	Rest	Single-digit	Double-digit
left frontal · right parietal	0.0734 (0.0111)	0.0835 (0.0152)	0.1259 (0.0235)
left frontal · left temporal	0.0985 (0.0139)	0.1179 (0.0244)	0.1324 (0.0261)
left frontal · left occipital	0.0400 (0.0108)	0.0533 (0.0148)	0.0567 (0.0076)
left parietal · right occipital	0.0740 (0.0127)	0.0818 (0.0215)	0.1049 (0.0248)

有意差が得られた部位における **alpha1**, **alpha2** 帯域のパワースペクトルは、タスク難度の増加に伴い減少した。これに対し、一部を除く **theta**, **beta1**, **beta2** 帯域のパワースペクトルは増加した。**theta** 帯域は、右前頭部(6 部位)においてタスク難度に伴い有意に増加した。**alpha1** 帯域は、後頭部の一部(4 部位)で有意に減少した。**alpha2** 帯域は、頭頂部を中心に前頭部から後頭部にかけて 13 部位で有意に減少した。これに対して **beta1** 帯域は、左頭頂部の一

部(2 部位)の領域において増加し、**beta2** 帯域は、左半球を中心に 13 部位で有意に増加した(すべて $P < 0.05$)。

タスク難度の増加に伴うコヒーレンスの有意な変化は、**alpha2** 帯域と **beta1** 帯域の一部と **beta2** 帯域において確認された。Fig.3 より **beta2** 帯域において、タスク難度の増加に伴いコヒーレンスが有意に増加した部位間は、パワースペクトルもタスク難度に伴い、1 部位を除いて有意に増加した。**alpha2** 帯域において、統計

的に、左前頭部と右側頭部間($F(2,12)=6.37, P<0.05$)、左前頭部と左後頭部間($F(2,12)=8.02, P<0.01$)、右前頭部と左後頭部間($F(2,12)=4.21, P<0.05$)そして右前頭部と右頭頂部間($F(2,12)=4.75, P<0.05$)におけるコヒーレンスが、タスク難度の増加に伴い有意に減少した。これに対して、**beta2** 帯域における、左前頭部と右頭頂部間($F(2,12)=4.83, P<0.05$)、左前頭部と左側頭部間($F(2,12)=4.52, P<0.05$)、左前頭部と左後頭部間($F(2,12)=5.78, P<0.05$)そして、左頭頂部と右後頭部間($F(2,12)=4.91, P<0.05$)において、コヒーレンスはタスク難度に伴い有意に増加した。最後に Table 2 からわかるように、**beta2** 帯域における左前頭部と左側頭部間のコヒーレンス値は、他の部位間に比べ大きかった(平均値：左前頭部と右頭頂部間 0.094, 左前頭部と左側頭部間 0.116, 左前頭部と左後頭部間 0.05, 左頭頂部と右後頭部間 0.869)。

4. 考察

本研究において **alpha2** 帯域は、暗算負荷の増加に伴いパワースペクトルとコヒーレンスともに減少した。これは、Krause らのタスク要求(記憶負荷)が増加すると、**alpha2** 波活動は、コヒーレンスが減少する結果と一致する⁷⁾。これに対して、**beta2** 帯域のパワースペクトルとコヒーレンスは、逆に増加した。このことから、暗算負荷が増加するに従い、全体的に **alpha** 帯域が抑制され、**beta2** 帯域優勢に脳磁界が変調することが示唆される。また **beta2** 帯域におけるパワースペクトルとコヒーレンスの増加は、左半球が中心であった。著者らの先行研究^{8,9)}において、ワーキングメモリタスク遂行時の脳磁界⁹⁾を計測した。使用したワーキングメモリタスクは、連続呈示される刺激中、1~3 トライアル前に呈示された刺激と同じ(Match)であるか、異なっている(No-Match)かを判断するものである。したがって、ワーキングメモリの負荷は、1 トライアル前(1-back)、2 トライアル前(2-back)、3 トライアル前(3-back)の順で重くなる。このタスクにおいて言語性ワーキングメモリタスクは、文字名の一致を問うタスクである。その結果、言語性ワーキングメモリタスク時において、ワーキングメモリ負荷の増加に伴い **beta2** 帯域のコヒーレンスは、前頭部-左側頭部-左後頭部-右頭頂部間において増加を示した。本暗算タスクとは、タスク内容、開眼と閉眼状態、視覚刺激などが異なるにも関わらず、言語性ワーキングメモリの結果と、左前頭部から左側頭部、右頭頂部、左後頭部の結果が一致している(ここで先行研究⁹⁾の被験者と本研究における被験者は、同一人物であり、等しい条件で結果を比較することが可能である)。このことから、暗算と言語性ワーキングメモリの負荷に対して、ほぼ同じ領域を同期させることを示唆すると同時に、暗算タスクがワーキングメモリを使用する事を裏付ける結果である。暗算は、複数の処理過程を成す数学的論理思考であり、本研究に用いたタスクも、単純な引き算を繰り返し行うものであるが、絶えず更新される被演算子、計算結果の記憶および更新の処理を常に行う必

要がある。したがって、この暗算タスクには、ワーキングメモリの頻繁な使用が必要である。ワーキングメモリの観点から暗算タスクと言語性ワーキングメモリの違いは、数と文字の情報の違いにある。しかし、被演算子を想起し演算子に含まれる量の意味を把握する前に、言語処理と同様に、一旦、音韻的符号化を行った後に計算処理を行うと推察される。そのため、暗算負荷と言語性ワーキングメモリ負荷に対する変化は、**beta2** 帯域に同様な結果をもたらしたと示唆される。

5. まとめ

本研究は、暗算処理時における脳の機能的な関連性を検討するため、脳磁界を用いて、暗算負荷に対するパワースペクトルとコヒーレンス解析の結果を検討した。その結果、各周波数帯域により、それぞれ特有の変化を示した。特に、**beta2** 帯域におけるパワースペクトルとコヒーレンスの左前頭部を中心とした増加は、著者らの先行研究における言語性ワーキングメモリの結果とタスク内容が異なるにも関わらず、よく一致した。このことは、暗算と言語性ワーキングメモリの処理に共通する部分の存在を示唆する。さらに、脳磁界の **beta2** 帯域のコヒーレンスを調べることにより、ワーキングメモリ負荷による脳内プロセスの違いを検討できる可能性が示唆される。

謝辞 脳磁界計測は、東京電機大学超電導応用研究所にて行われたものである。脳磁界計測において被験者などのご協力を頂いた武田和也君をはじめとする超電導応用研究所の学生諸氏、鹿児島大学工学部の藤原健一君へここに記して感謝の意を表す。

文 献

- 1) J. G. Hitch : *Cogn. Psychol.*, **10**, 302 (1978).
- 2) S. Dehaene, E. Spelke, P. Staanesu R and S. Tsivkin: *Science*, **284**, 984 (1999).
- 3) M. Pesenti, M. Thioux, X. Seron and A. Volder: *Cogn. Neurosci.*, **12**, 461 (2000).
- 4) G. Wang, M. Takigawa and T. Matsushita: *Jap. J. of phy.*, **42**, 1 (1992).
- 5) R. Hari and S. Salenius: *Neuroreport*, **10**, 1 (1999).
- 6) Miltner.W.H.R, Braun.C, Arnold.M, Witte.H and Taub.E: *Nature*, **397**, 434 (1999).
- 7) C.M. Krause, L. Sillanmaki, M. Koivisto, C. Saarela, A. Haggqvist, M. Laine, and H. Hamalainen: *Clin. Neurophys.*, **111**, 2071 (2000).
- 8) K. Tanaka, G. Wang, K. Yunokuchi: *BME*, **40-1**, 7 (2002).
- 9) K. Tanaka, K. Fujiwara, G. Wang, K. Yunokuchi, M. Kawakatsu, M. Saito: *IEE Japan*, **122- C**, No. 9, 1529 (2002).

2002 年 10 月 7 日受理, 2003 年 1 月 17 日採録