

スタンバーク短期記憶課題遂行中の 記憶検索期間における脳活動の基礎的研究

草薙 卓也[†] 奥畑 志帆^{†‡} 小林 哲生[†]

[†] 京都大学大学院工学研究科 〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂

[‡] 日本学術振興会 〒102-8471 東京都千代田区一番町 6 番地

E-mail: [†] t.kusanagi@kw5.ecs.kyoto-u.ac.jp

あらまし 近年、脳機能計測技術の発展に伴い、脳機能に関する様々な知見が得られている。しかしながら、記憶過程のような高次の認知機能に関しては未だに解明されていないことが多い。そこで本研究では、短期記憶研究で用いられるスタンバーク課題を用い、課題遂行中の脳波(EEG)から記憶負荷が異なる条件における事象関連電位(ERP)を比較した。その結果、テスト刺激呈示時間を0msとしたとき、0ms-1000ms間におけるERP振幅の条件間差は、頭皮上中心部(Cz付近)及び頭頂部(Pz付近)において、テスト刺激呈示後のP300の中でも特に後期に現れるP3bに相当する成分において有意であった。また記憶負荷の低い条件と比較して記憶負荷の高い条件において、ERPのP3bに相当する成分の持続時間が長い傾向がみとめられた。

キーワード スタンバーク課題, 短期記憶, EEG, 事象関連電位, P300

Study on Brain Activity during Memory Retention Phase of Sternberg Short Memory Task

Takuya KUSANAGI[†] Shiho OKUHATA[†] and Tetsuo KOBAYASHI[†]

[†] Graduate School of Engineering, Kyoto University Kyoto-Daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8510 Japan

[‡] Japan Society for the Promotion of Science, 1-6 Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8471 Japan

E-mail: [†] t.kusanagi@kw5.ecs.kyoto-u.ac.jp

Abstract Present study investigated event - related potential (ERP) during the memory retention phase of Sternberg memory scanning task. We compared ERPs of 2 conditions differ in memory load (Memory3 and 5), and 2 conditions differ in memory set size(Control3 and 5). Our result indicated that different memory load was reflected in late P300 component, P3b but not in P3a. Duration of the P3b was suggested to be increased with memory load. In contrast to the previous argument that ERP components to be memory load independent, we suggest analysis limited to the late P300 component and its duration to reveal the memory load related activity in ERP.

Keyword Sternberg task, short term memory, EEG, ERP, P300

1. はじめに

記憶は記憶保持時間に注目した場合、一時的には覚えているが時間が経つと忘れてしまう短期記憶と、それ以上覚えている長期記憶とに分類することができる。Sternberg(1966)は短期記憶の情報検索がどのように行われているかを解明するために、被験者に視覚刺激として 1 - 6 個の数字の系列(メモリセット)を呈示して記憶させ、その後別の数字(テスト刺激)を呈示し、メモリセット内にテスト刺激が含まれていたか否かを

回答させる課題を行った。このような課題を彼の名にちなんでスタンバーク課題という。この実験によって、呈示されるメモリセットの数(メモリセットサイズ)が増加するにつれて回答するまでにかかる反応時間が直線的に増加していくということがわかった[1]。この結果から、短期記憶の情報検索は並列的ではなく直列的探索により行われているという仮説が提唱された。

近年では、脳波(EEG)、脳磁図(MEG)、機能的磁気共鳴画像(fMRI)などの様々な非侵襲的脳機能計測法が確

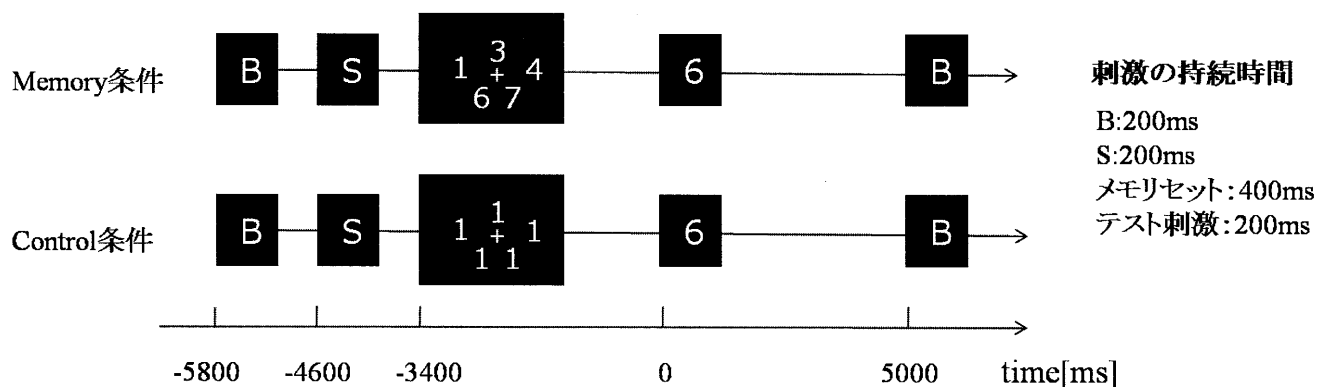


図 1. 実験パラダイム

立されてきており、これらを用いた様々な研究が行われている。中でも EEG は比較的安価で計測が容易であり、高い時間分解能を有することから、脳機能計測の際には広く用いられている。

EEG 計測によって脳活動を調べる指標として事象関連電位(ERP)が用いられることがしばしばある。ERP は誘発電位の 1 つで、自発 EEG の振幅と比較すると 10 分の 1 程度しかないため、1 回の計測で観測することは難しく、計測を数十から数百回繰り返して得られたデータを加算平均することで観測することができる。ERP の中で P300 と呼ばれる成分は、前頭から中心部寄りに分布する P3a と P3b と呼ばれる 2 つの成分によって構成されていることが知られている[3]。P300 成分は刺激の認知的評価にかかる時間に関係があり、反応選択と運動反応とは別の機能が背景にあると考えられてきた[4][5]。

このことから、スタンバーク課題遂行中の記憶探索期間における記憶負荷と P300 成分の関連性を検討する研究が多くなされてきたが、P300 が検出される潜時及び最大振幅と記憶負荷との間に明確な関連性は示されておらず[6]、ERP による記憶走査の研究の難しさが論じられてきた[7][8]。また Schack ら(2002)は、P300 の初期成分 P3a よりも、それに追従する成分 P3b において記憶負荷による影響が反映される可能性を示唆している[9]。

以上のことから、P300 の中でも後期成分に着目し、ERP の持続時間及び最大振幅に加え、他の特徴量を抽出し検討することで、ERP を用いて記憶走査時の記憶負荷量の影響を検討することができると考えられる。

そこで本研究では、刺激として数字を用いた視覚的なスタンバーク課題を遂行中の被験者の EEG を高密度 EEG 計測装置を用いて計測し、記憶負荷による ERP への影響を検討した。その際、記憶負荷以外の要因をできる限り排除する目的でメモリセットサイズを記憶条件と一致させたコントロール条件を導入した。

2. 方法

2.1. 被験者

実験に参加した被験者は正常な視力を有する 21 歳から 33 歳までの健常成人 9 名(男性 8 名：女性 1 名)であった。被験者には事前に実験内容についての説明を行い、実験に参加する同意を得た。

2.2. 課題と実験パラダイム

本研究で用いた実験パラダイムを図 1 に示す。解析対象区間への瞬目の影響を最低限に抑えるため、最初に"B"を呈示し、この間に瞬目するよう被験者に促した。次に、試行開始の合図として"S"を呈示し、その後メモリセットとして重複することのない 1-9 の数字を 3 つあるいは 5 つランダムに同時呈示し、3000ms 間の記憶維持期間(Maintenance 期間)の後、テスト刺激として数字を 1 つ呈示した。実験中は常に固視点を呈示した。この条件とは別に、メモリセット内の数字が全て同じ数字の条件を設定し、前者を Memory 条件、後者を Control 条件とした。

被験者には、テスト刺激がメモリセットに含まれていたか否かをボタン押しによってできるだけ早く回答するよう教示した。このとき、被験者には両手で反応パッドを持ち、含まれていた場合は右手の親指、含まれていなかった場合は左手の親指でボタンを押すように指示した。また、テスト刺激が呈示されてからボタンを押すまでに要する反応時間を同時に記録した。

"B", "S", テスト刺激をそれぞれ 200ms、メモリセットを 400ms 呈示した。また、Maintenance 期間を 3000ms、試行間間隔を 5000ms と設定した。1 ブロックを Memory 条件 10 試行、Control 条件 5 試行の計 15 試行とし、これをメモリセットが 3・5 のときで 5 ブロックずつ計 150 試行/10 ブロック行った。ここで、メモリセットサイズ 3・5 に対する Memory 条件と Control 条件をそれぞれ Memory3, Control3, Memory5, Control5 とした。

2.3. EEG 計測

EEG 計測には高密度 EEG 計測装置(BioSemi, Active Two System)を使用した。計測には拡張型国際式 10-20 法に準ずる 128 個の電極を使用し、サンプリング周波数を 1024 Hz とし、左乳様突起をリファレンス電極として使用した。被験者とディスプレイまでの距離を 50cm とし、視覚刺激の輝度を 85cd/m^2 、背景の輝度を 0.31cd/m^2 と設定した。実験は外部からの光をできるだけ遮蔽した暗室で行った。各ブロック間に任意時間の休憩を設けつつ計測を行った。

2.4. EEG の処理と解析

EEG の処理と解析には MATLAB(MathWorks, R2011a)を用いた。解析にあたり、計測時のサンプリング周波数 1024Hz から 512Hz にダウンサンプリングした。その後、計測データに 0.1-30 Hz の帯域通過フィルタを適用した。テスト刺激呈示を 0ms とした -500ms - 1000ms を解析対象区間として設定した。また、ノイズが混入した頭部外周電極をあらかじめ除外し、さらに各被験者の EEG を全電極について目視により確認し、瞬目やその他の筋電由来のアーティファクトが混入した試行及び電極を除外した。これらの処理を施した後、-500ms-0ms の期間をベースラインとし、条件ごとに全被験者の試行を加算平均し、電極ごとの ERP を得た。なお、被験者 9 名のうち 2 名は計測時の電極の不具合によるノイズの混入のため、以降の解析から除外した。

アーティファクト混入試行除去後の最終的な加算回数は被験者 7 名分で計 117 試行分となった。この解析手順で条件ごとに全電極における ERP を算出した後、Memory 条件と Control 条件のトポグラフィーを求めた。また、Memory 条件と Control 条件の ERP の差分をトポグラフィーで表示するため、メモリセットサイズごとに Memory 条件から Control 条件の ERP を差し引いた。この条件間差分のトポグラフィーの結果に基づき、最も条件間差が見られた領域に着目し、その領域における代表電極を選択した。この代表電極周辺の電極 5 つと合わせてそれぞれ計 6 電極分の ERP を加算平均し、着目した領域周辺における平均 ERP を求めた。このとき使用した電極を図 2 に示す。

2.5. 統計解析

統計解析にあたり、被験者ごとに ERP を算出した。すべての処理を施した後得られた 7 名の被験者の ERP 波形を用いて対応のある t 検定を用いて、同じメモリセットサイズの条件(Memory3 と Control3, Memory5 と Control5)を比較し、0ms-1000ms の各潜時における ERP 振幅の条件間差を検定した。さらに、記憶負荷による差を検討するため、Memory3 と Memory5 に対しても同様に t 検定を行った。反応時間について

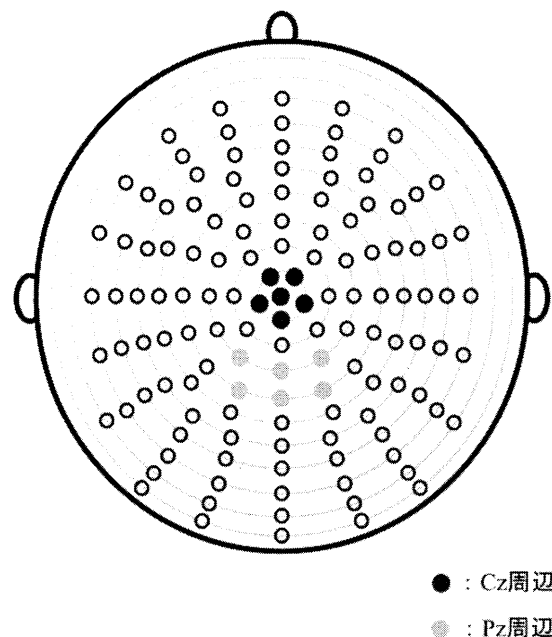


図 2. 使用した電極図

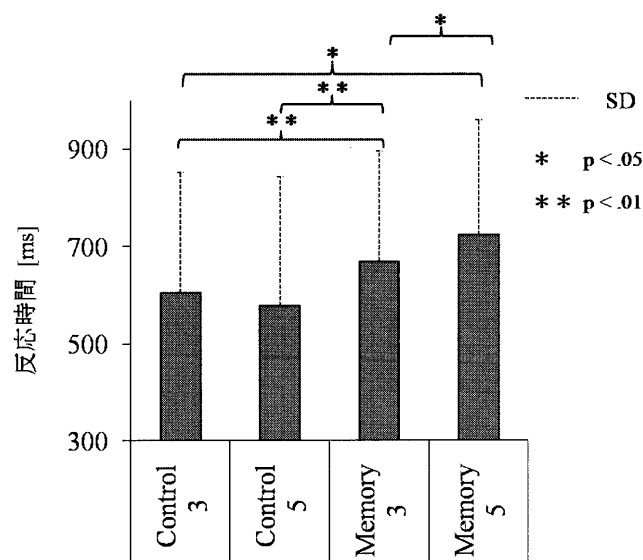


図 3. 条件別の全被験者平均の反応時間

は記憶負荷を要因とする 1 要因の ANOVA を用いた。

3. 結果

3.1. 正答率・反応時間

課題遂行時における全被験者の条件別の平均正答率は、Control3 と Control5 では 100%, Memory3 では 99.1%, Memory5 では 97.3%と、全ての条件において極めて高い正答率となった。このことから、全被験者が課題遂行に従事していたと言える。また、全被験者の条件別の平均反応時間と標準偏差(SD)を図 3 に示す。ANOVA の結果、記憶負荷間に有意な差が確認された ($F_{3,6} = 6.270, p < .01$)。多重比較の結果、Control3 と

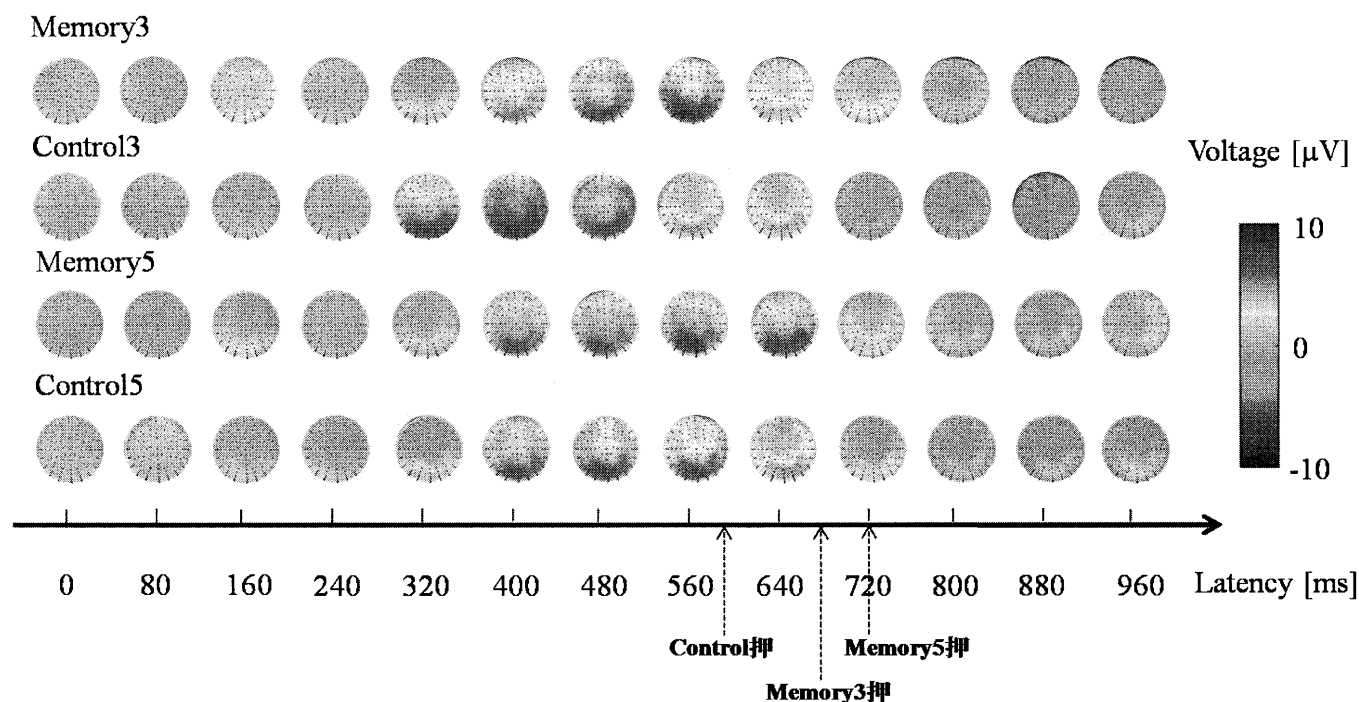


図 4. 潜時 0ms–960ms における Memory 条件と Control 条件のトポグラフィー表示

Control5 の間には有意差はなく、Memory3、Memory5 で線形的に反応時間が延長した。この結果は先行研究の結果に一致した[1]。

3.2. ERP 条件間差分のトポグラフィー

2.4 で述べたように、ベースラインを -500ms–0ms と設定したときの潜時 0ms–960ms において 80ms ごとに Memory 条件と Control 条件のトポグラフィーを図 4 に示す。また、同じ潜時における Memory 条件と Control 条件の差分をトポグラフィー表示した結果を図 5 に示す。その結果、メモリセットサイズ 3 よりもメモリセットサイズ 5 の場合において、主に頭皮上中心 - 頭頂部にわたり Memory 条件と Control 条件の間に ERP の差が認められた。

3.3. 中心 - 頭頂部付近における ERP の条件間差

Memory 条件と Control 条件の間に ERP の差が見られた領域における代表電極として、A1(Cz)、A19(Pz)の 2 つを選択し、それら周辺の電極 5 つと合わせてそれぞれ計 6 電極分(図 3)の ERP を加算平均し、Cz、Pz 周辺における ERP の平均値を求めた。電極 Cz、Pz 周辺において、メモリセットサイズが同じ Memory 条件と Control 条件とを比較した結果を図 6、図 7 に示す。なお、図中の灰色部は t 検定により有意な条件間差が示された潜時を示している ($p < .05$)。両部位において、ERP 初期成分のピーク振幅及び潜時に有意差は見られなかった。しかしながら、P300 成分の中でも先に検出される P3a 成分ではなく、それに追従する P3b 成分が検出される潜時付近において、メモリセットサイズ

が 3・5 いずれの場合も Memory 条件と Control 条件間で ERP の振幅に有意差が認められた。

次に、メモリセットサイズが異なる Memory 条件同士(Memory3 と Memory5)を比較し、この結果を図 8 に示す。この図から、P3a に相当する成分の振幅に有意差は認められない一方で、P3b に相当する成分については Memory3 よりも Memory5 において明確に検出され、振幅の大きさは Memory5 で有意に大きいことがわかった。

4. 検討

ERP の条件間の差分のトポグラフィーから、頭皮上中心 - 頭頂部において、条件間に有意差が認められた。多くの ERP 研究で P300 成分は主にこの領域で検出されることが報告されている。さらに、記憶負荷の影響を受ける頭皮上領域がスタンバーク課題を用いた多くの研究で Pz 周辺とされている結果とも一致した結果であった[2][10]。

メモリセットサイズを統制したコントロール条件を導入した検討の結果から、P300 の後期に検出される P3b 成分が検出される潜時付近においてのみ、条件間で ERP の振幅に有意な差が認められた。また波形からは、Control 条件と比較して Memory 条件において ERP 振幅がベースラインの水準に回復するまでに要する時間が長い傾向にあった。これらの結果から、P3b 成分の持続時間及び振幅と記憶負荷との間に何らかの関係性があることが示唆された。今後は条件ごとに異なる反

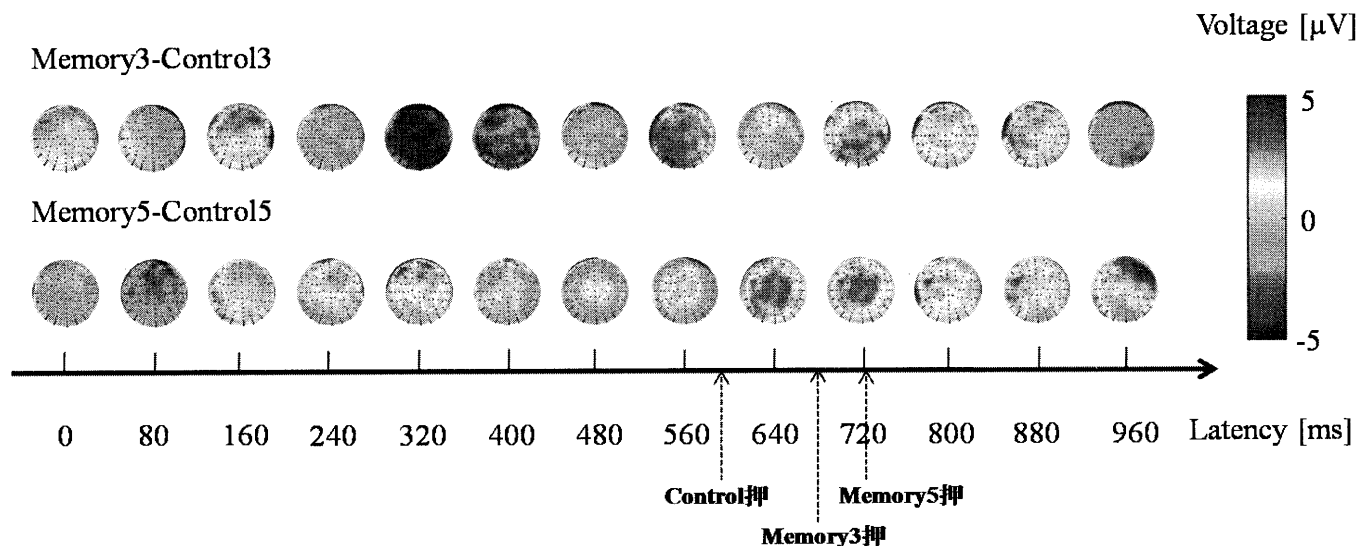


図 5. 潜時 0ms-960ms における Memory 条件と Control 条件の差分のトポグラフィー表示

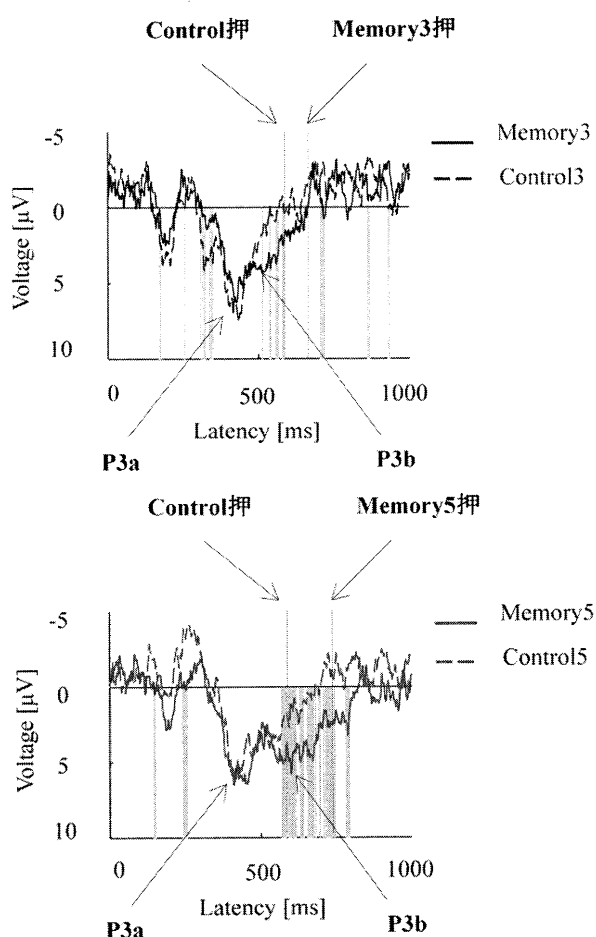


図 6. Cz 周辺の 6 電極を加算平均して得られた ERP

応時間との関連を踏まえた上で P3b 持続時間の検討を行うべきである。

また、条件ごとに比較すると、電極 Cz・Pz 周辺における ERP において、Memory 条件の場合では P3a, P3b 両成分が明確に検出されている一方で、Control 条件の場合では P3a 成分は Memory 条件とほぼ同様に検出されているものの、P3b 成分は明確には検出されなかった。先行研究では記憶負荷が最も低い条件(メモリセットサイズが 1)では P3b 成分が検出されなかったという結果が報告されており [9], 今回得られた結果と一致している。

これまで、記憶負荷と ERP の関連性を論じることが困難であると報告されてきたが [7][8], 本研究では ERP の後期成分に着目し、さらにメモリセットサイズを統制した Control 条件を設定することで、記憶負荷の影響が ERP に反映される可能性を示した。しかしながら、本研究で用いた EEG には時間分解能が高いが空間分解能が低いという欠点が存在する。また、時間分解能は EEG と同レベルだが、EEG よりも頭骨等による影響が少なく信号源推定にも有利な MEG を用いた研究も行われている [10][11]。本研究で ERP による記憶負荷の影響を検討できる可能性が示されたことを踏まえ、各計測手法の利点を活かし限界点を補う fMRI - EEG 統合解析による解析手法を開発することで、複雑な認知過程である記憶過程についてより詳細に検討できると考えられる。

5. むすび

本研究では、スタンバーク課題遂行中の EEG を計測して ERP を求め、記憶負荷が異なる条件を比較しその影響を検討した。ERP による記憶負荷の影響の検出が

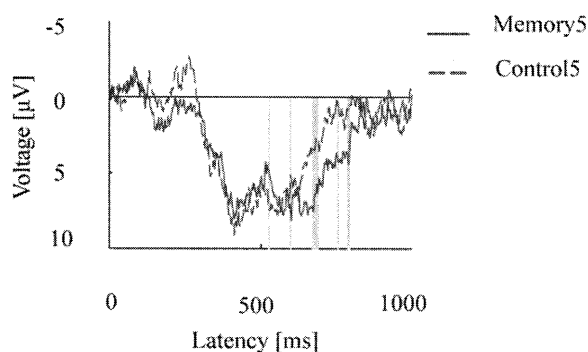
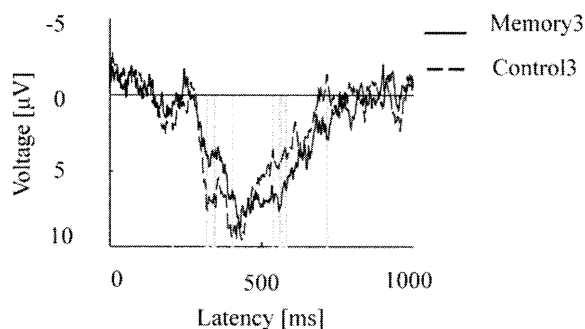


図 7. Pz 周辺の 6 電極を加算平均して得られた ERP

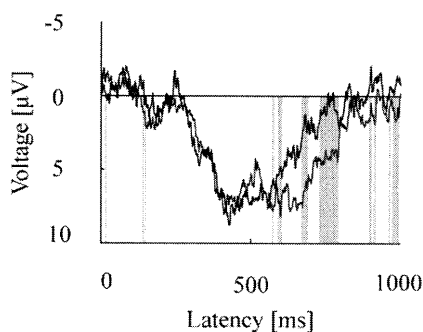
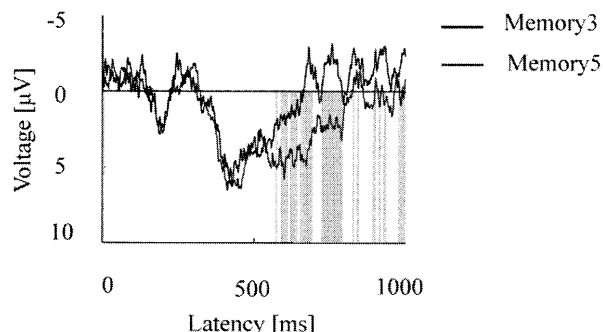


図 8. Cz(図上), Pz(図下)周辺の Memory 条件同士の ERP の比較

困難であると先行研究で報告されていたが[7][8], 本研究では ERP 後期成分に着目しメモリセットサイズを統制した Control 条件と比較することで, テスト刺激が呈示された後に検出される P3b 成分の振幅に有意差がみとめられ, P3b 成分に記憶負荷の影響が反映される可能性を示唆した。

謝辞 本研究の一部は科研費(特別研究員奨励費: 23・40064)の補助を受けたものであり, 付記して謝意を表す。

文 献

- [1] S. Sternberg, High-Speed Scanning in Human Memory, *Science*, vol.153, no.3736, pp.652 - 654, 1966
- [2] O. Jensen, J. Gelfand, J. Kounios, and J. E. Lisman, Oscillations in the Alpha Band (9–12 Hz) Increase with Memory Load during Retention in a Short-term Memory Task, *Cerebral Cortex*, vol.12, no.8, pp.877-882, 2002
- [3] 入野宏, “事象関連電位(ERP)と認知活動: 工心理学での利用を例に,” 行動科学, 42 巻, 1 号, pp.25-35, 2003
- [4] G. McCarthy, and E. Donchin, A Metric for Thought: A Comparison of P300 Latency and Reaction Time, *Science*, vol.211, no.4477, pp.77-80, 1981
- [5] A. Magliero, T. R. Bashore, M. G. H. Coles, and E. Donchin, On the Dependence of P300 Latency on Stimulus Evaluation Processes, *Psychophysiology*, vol.21, no.2, pp.171-186, 1984
- [6] L. Pelosi, M. Hayward, and L. D. Blumhardt, Is “Memory-Scanning” Time in the Sternberg Paradigm Reflected in the Latency of Event-Related Potentials?, *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, vol.96, no.1, pp.44-55, 1995
- [7] 小林哲生, 土屋憲晃, 栗城真也, “仮名短期記憶走査に関連する脳磁界 α リズムの時空間的変動,” 電気学会論文誌 C, 116 巻, 2 号, pp.217-222, 1996
- [8] L. Kaufman, S. Curtis, J.-Z. Wang, and S. J. Williamson, Changes in Cortical Activity when Subjects Scan Memory for Tones, *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, vol.82, no.4, pp.266-284, 1991
- [9] B. Schack, and W. Klimesch, Frequency Characteristics of Evoked and Oscillatory Electroencephalic Activity in a Human Memory Scanning Task, *Neuroscience Letters*, vol.331, no.2, pp.107-110, 2002
- [10] O. Jensen, and C. D. Tesche, Frontal Theta Activity in Humans Increases with Memory Load in a Working Memory Task, *European Journal of Neuroscience*, vol.15, no.8, pp.1395-1399, 2002
- [11] A. M. Tuladhar, N. ter Huurne, J.-M. Schoffelen, E. Maris, R. Oostenveld, and O. Jensen, Parieto-Occipital Sources Account for the Increase in Alpha Activity with Working Memory Load, *Human Brain Mapping*, vol.28, no.8, pp.785-792, 2007