

精神作業中の前頭部に出現する θ 波・ α 波と集中状態の関係

岡 村 法 宜

愛媛県立医療技術大学紀要 第2巻 第1号抜刷

2005年12月

精神作業中の前頭部に出現する θ 波・ α 波と集中状態の関係

岡 村 法 宜

Relationship between Appearance of Theta and Alpha Rhythms in Frontal Region and State of Concentration during Mental Task in Human Subjects

Noritaka OKAMURA

The purpose of this study is to investigate the state of concentration in a mental task during θ -band and α -band are dominate in frontal region. Six healthy college students were selected as the subjects of this study, who showed high frequency appearance of frontal midline theta rhythm (Fm θ) during a mental task. The sound stimulation was given to the subjects when θ -band or α -band became dominate during the continuous additional task by using a personal computer. In advance, a fake instruction was given to the subjects as follows, "a sound stimulus will be given when the speed of performing the task become falling down". The state of concentration in the task was examined by the change of speed in performing task and the induction rate of sympathetic skin response(SSR).

When θ -band was dominate, the speed of performing the task was not changed by sound stimulation and the rate of SSR induction was low. However, when α -band was dominate, the speed of performing the task shortened by sound stimulation and the rate of SSR induction was high. These results suggest that the amount of the subject is mainly devoted to performing the task during the Fm θ appearance.

Key Words: Fm θ , α wave, SSR, mental task, performance

序 文

性格特性と密接な関係を持つといわれる脳波は数少ない。前頭葉正中線シータ律動(Frontal midline theta rhythm, Fm θ)は、被検者の不安水準や外向性に関連があると考えられ¹⁻³⁾、長年、日本人研究者を中心に様々な研究が行われてきた。一方で、Fm θ は、ほとんど精神作業中に出現することから、精神活動との関連性についても指摘されてきた。また、クレペリン試験や迷路課題などの精神作業中、Fm θ が出現している時に作業を中断させ、被験者から内省報告をとると、「計算に熱中していた」「ふと我に帰った」「ほかのことが考えられない」といったものが多い⁴⁾。このことからFm θ は、課題への注意集中、没頭などの状態に関係するとされてきた^{4,5)}。そのような背景から、精神作業中のFm θ の出現と被験者の性格特性との関連を、作業への「注意集中」や「没頭」といった状態に注目して、多くの研究がなされてき

た。しかし、注意集中や没頭の度合いを客観的に判定することは難しく、これまでの研究は、被験者の内省報告に頼ったものが多い。同様の精神状態でも、その内省報告の内容は、被験者ごとに異なってくる。これらの内省報告を分類整理することによって行う研究には限界がある。

その一方で、近年、機能的磁気共鳴画像(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)や陽電子放出型断層撮影(Positron Emission Tomography, PET)を用いて精神作業時の脳機能の研究が盛んに行われている。確かに、これらの研究は精神作業中の脳の活動部位を高い精度で把握できるが、集中状態を判定しているわけではない。そこで、今回我々は、Fm θ 出現中の被験者の集中状態を音刺激に対する交感神経皮膚反射(Sympathetic Skin Response, SSR)、作業遂行速度の変化から検討した。

方 法

1. 対 象

被験者は、事前に実験内容について口頭及び文書による説明を受け、同意書に署名捺印を行った健康な男女短大生15名中、予備試験として実施した内田クレペリンテストの際に、 $F_m \theta$ が記録された6名(男子3名、女子3名)で、年齢は19~21歳(mean±SD, 19.6±0.8)であった。また、この6名の被験者の予備試験時にFzより記録された α 波および $F_m \theta$ の視察による平均振幅は、ともに $50 \mu V$ であった。

2. 課 題

被験者はシールドルーム内で何も表示されていない15inch液晶ディスプレイの前に座り、ヘッドホンを装着して安静開眼脳波を5分間測定した。次に8000Hz, 0.2secのトーン音に対する感覚閾値を測定した。被験者には、「できる限り正確に早くモニタの二数の和の一位をキーボードで入力してってください。遂行速度が基準値より遅くなるとヘッドホンから音が鳴ります。」という偽教示を与え、閾値の測定終了5分後より、課題を施行させた。被験者に課した作業は、ディスプレイに表示された一桁の二数の和の一位をキーボードで入力していくもので、解の入力から次の問題が表示されるまでを0.5secとした。この作業を200問1セットとし、各セット間に5分の休憩を設け、5セット施行させた。また、Fig.1に示すようにFzより記録した脳波の θ 帯域または α 帯域の積分値が $50 \mu V \cdot sec$ 以上になった際、周波数8000Hz, 音圧5dBSL, 持続時間0.2secの純音刺激を被験者に装着させたヘッドホンから発生させた。

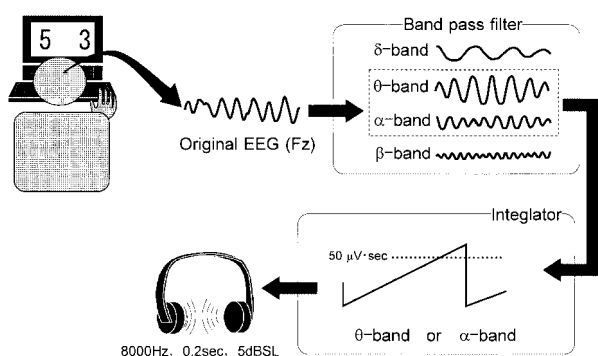


Fig.1 Experimental outline

A subject input the number of single figure of the sum of two numbers which was displayed on a PC display by the keyboard. After an answer had been input, when 0.5 seconds passed, next question was displayed. EEG was recorded from Fz and passed band pass filter. Sound stimuli were given when integral of θ -band or α -band became more than $50 \mu V \cdot sec$.

3. データ記録

脳波は、両耳朶結合電極を基準電極として、Fzより導出した。導出した脳波は、アナログバンドパスフィルターによって、 δ , θ , α , および β 帯域成分に分離した。 θ 帯域と α 帯域の周波数成分の脳波は、積分アンプ(日本光電社製, EI-601)に入力し、積分アンプからの出力は音刺激装置(日本光電社製, SMP-3100)のトリガとして入力した。また、自律神経活動解析のため、I誘導心電図から心拍数を、左手掌よりSSRを、左耳朶より光電脈波を記録した。加えて作業中の水平眼球運動を記録した。

さらに、作業遂行時間をモニタするために、問題の出題時と解の入力時に同期させ、パーソナルコンピュータ(PC)のRS-232C端子より異なる信号パルスを発生させた。

全ての信号は12ビットA/D変換ボード(マイクロサイエンス, ADM-5298BPC)とPCを用いてサンプリング周波数200Hzで光磁気ディスク上に保存した。

4. データ処理

θ 帯域の積分値が $50 \mu V \cdot sec$ を超えて音刺激が発生したときを θ 波優勢時、 α 帯域の積分値が $50 \mu V \cdot sec$ を超えて音刺激が発生した時を α 波優勢時とした。 θ 波、 α 波優勢時のそれぞれの場合について、刺激前後3問ずつの課題遂行時間と正答率、その6問の課題遂行時間の変動係数(CV)を算出した。また、刺激によるSSR誘発率、刺激前5心拍の脈波の平均振幅を100%として、刺激後5心拍の脈波の平均相対振幅を算出した。さらに、視察で20秒以上連続して θ 波および α 波が優勢と認めた区間について、20.48秒間の心拍変動のパワースペクトルを求めた。心拍変動のパワースペクトルは、デジタルフィルタを用いて20.48秒間のデータからDC成分とトレンドを除去した後、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transformation, FFT)法によって算出した。心拍変動のパワースペクトルについて、0.049-0.146Hzのパワーの積分値を低周波(Lo)成分、0.146-0.781Hzのパワーの積分値を高周波(Hi)成分、Lo成分とHi成分の和をTotal成分とした。さらに、Hi/Totalを副交感神経(Parasympathetic Nervous System, PNS)活動指標(PNS値)、Lo/Hiを交感神経(Sympathetic Nervous System, SNS)活動指標(SNS値)として算出した。

5. 統計解析

θ 波、 α 波優勢時の刺激前後の課題遂行速度、作業遂行速度のCVと脈波の平均相対振幅音刺激によるSSR誘発率の統計的検索は、Paired t-testを用いた。一方、PNSとSNSについては、実験全体で得られた区

間が θ 波優勢時3区間、 α 波優勢時4区間しか得られなかったため統計的検索を行わなかった。

結 果

1. 作業遂行時間とそのCVおよび正答率

θ 波および α 波優勢時に音刺激が与えられた際の記録例をそれぞれFig.2a,bに示す。音刺激前の θ 波および α 波優勢時の作業遂行時間は、 θ 波優勢時 $0.870 \pm 0.089\text{sec}$ 、 α 波優勢時 $0.885 \pm 0.197\text{sec}$ であった(Fig.3a)。また、刺激後では、 θ 波優勢時 $0.901 \pm 0.146\text{sec}$ 、 α 波優勢時 $0.824 \pm 0.115\text{sec}$ であった(Fig.3a)。 α 波優勢時には、刺激前に比して、刺激後に課題遂行時間は有意に短縮した($p < 0.05$)。Fig.3bに示すように、作業遂行時間のCVは、 θ 波優勢時 $2.75 \pm 0.70\%$ に対し、 α 波優勢時は $4.78 \pm 0.81\%$ で有意に高値を示した($p < 0.05$)。

一方、正答率については θ 波優勢時 $99.3 \pm 0.1\%$ に対し、 α 波優勢時 $99.2 \pm 0.1\%$ で有意差は認められなかった。

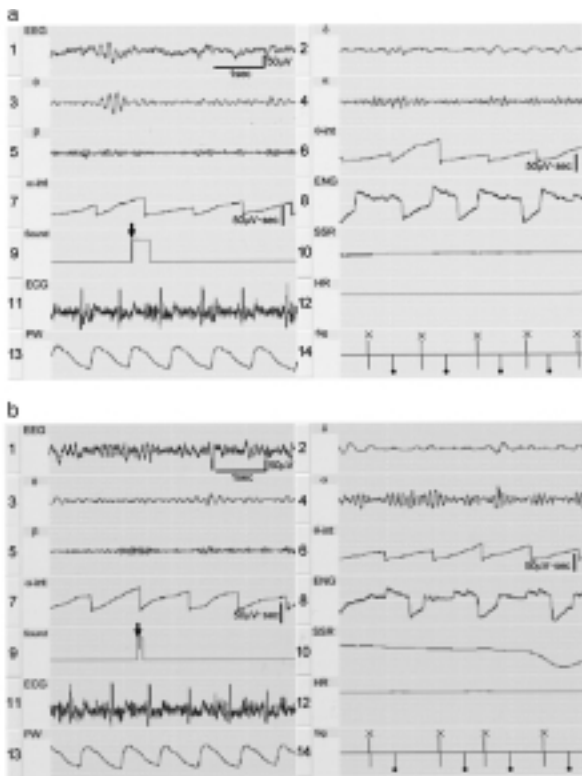


Fig.2 Examples of the polygraphic recordings during the time of θ -band dominance (a) and α -band dominance (b).

ch1: original EEG (Fz), ch2: δ -band of EEG, ch3: θ -band of EEG, ch4: α -band of EEG, ch5: β -band of EEG, ch6: integral of θ -band, ch7: integral of α -band, ch8: ENG of horizontal direction, ch9: mark of sound stimulation (\downarrow : starting point of stimulation), marks the time when θ -band is dominant, and when α -band is dominant differ, ch10: SSR, ch11: ECG (I), ch12: heart rate, ch13: pulse wave of an earlobe, ch14: marks showing setting problems (•) and inputting answers (X).

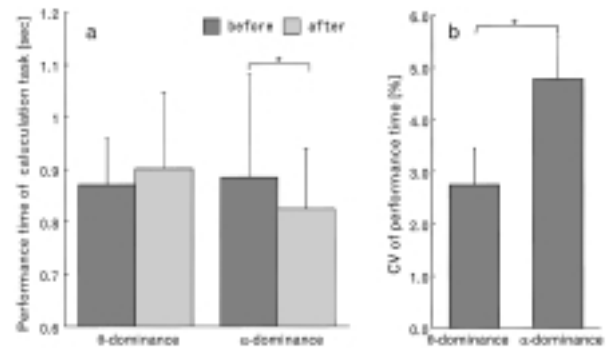


Fig.3 Performance time of calculation task before and after sound stimulation (a), and the CV (b). n=6, *: $p < 0.05$.

2. 自律神経活動の指標

Fig.4aに示すように刺激によるSSR誘発率は、 θ 波優勢時が $32.6 \pm 11.5\%$ で、 α 波優勢時の $64.3 \pm 28.4\%$ より有意に低い確率であった($p < 0.05$)。また、Fig.4bに示すように刺激後の脈波の平均相対振幅は、 θ 波優勢時が $99.1 \pm 6.1\%$ 、 α 波優勢時は $98.5 \pm 6.7\%$ で、両者に有意差は認められなかった。

視察で θ 波が20秒以上優勢と判定された区間は3区間得られた。この時の心拍スペクトルを5点ずつの単純移動平均により平滑化した一例をFig.5aに示す。また、視察で α 波が20秒以上優勢と判定された区間は4区間得られ、Fig.5bにこのときの心拍スペクトルを平滑化した一例を示す。全ての場合で、 θ 波優勢時にはFig.5aのようにHi成分に1つのピークが認められたが、 α 波優勢時には、Fig.5bに示すように、そのようなHi成分のピークは不明瞭であった。また、Fig.6に示すようにSNS値は、 θ 波優勢時 0.645 ± 0.360 、 α 波優勢時 0.849 ± 0.516 で、 α 波優勢時で若干高く、PNS値は θ 波優勢時、 0.633 ± 0.137 、 α 波優勢時 0.516 ± 0.117 でほぼ同程度の値であった。

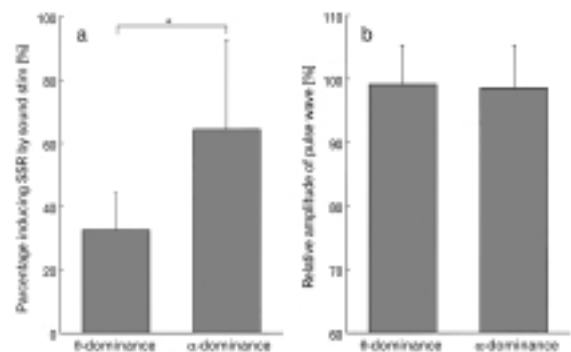


Fig.4 Percentage of SSR induced by sound stimulation (a), and relative amplitude of pulse wave after sound stimulation (the amplitude of the pulse wave before sound stimulation is taken into 100%). (b). n=6, *: $p < 0.05$

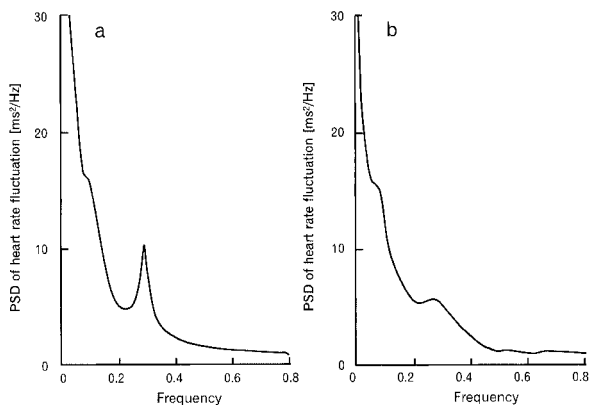


Fig.5 An example of spectrum of heart rate fluctuation. Spectrum of heart rate fluctuation when θ -band of EEG was dominant (a), or α -band was dominant (b).

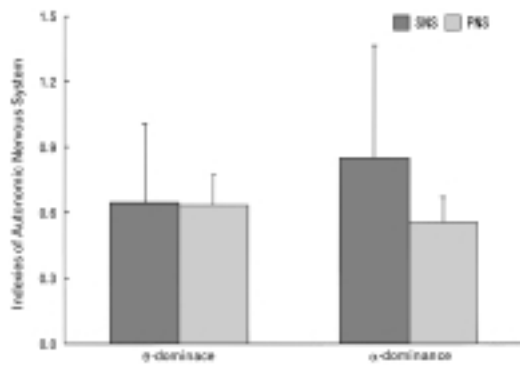


Fig.6 Indices of parasympathetic nervous system (PNS) and sympathetic nervous system (SNS) calculated from spectrum of heart rate fluctuation. θ -band dominance : n=3, α -band dominance : n=4.

考 察

計算などの精神作業中の脳波記録時に、しばしば α 波の出現を認め、その振幅が後頭部より頭頂部で高いことに気付く時がある。しかし、このようなときの注意集中状態について、論じられてきたことは少ない。Lozeら⁶⁾は、指標追跡作業時の脳波解析で進路の予測可能な指標追跡時には、予測不可能な指標追跡時に比較して α 帯域のパワーが有意に高いことを示している。また、Kafryら⁷⁾は、注意という心的資源量には限界があることを示唆している。進路の予測不可能な指標を追跡するためには、予測可能な指標を追跡するときよりも、指標に向けてより多くの注意を集中しなければならない。つまり、進路の予測可能な指標追跡の際には、予測不可能な指標追跡時よりも注意という心的資源の使用量は少ないと考えられる。今回の結果では、 α 波優勢時に、音刺激によって作業遂行時間が有意に短縮した。このことは、被験者が作業を遂行しながらも、音刺激を認知し得たため、作業前に受けた教示から、作業遂行時間が延長してしまっ

ていると思ひ込み、より早く解を打ち込む努力をした結果と推測できる。 α 波優勢時に被験者が音刺激を認知し得たという推測は、このときのSSR誘発率が高率であることから支持されるだろう。つまり、計算一解の打ち込みという作業中にもかかわらず、被験者の所有する注意がこの作業遂行のみに使用されていなかったために、音刺激を認知し得たと考えられる。ただし、本研究における α 波優勢時は、精神作業中であり、安静閉眼時に後頭部で α 波優勢である状態とは、異なった特別な状態と考えられる。

一方、 θ 波優勢時に、音刺激の前後で作業遂行時間に変化が認められなかったのは、音刺激自体を認識していない場合が多かったと推測できる。これは、 θ 波優勢時の音刺激に対するSSR誘発率が $32.6 \pm 11.5\%$ で、 α 波優勢時の $64.3 \pm 28.4\%$ と比較して、極めて低いことから支持される。この状態を注意という心的資源の配分の面から表現すると、計算一解の打ち込みという作業に、大部分の注意が配分され、音刺激に対して注意が向けられなかったために、音刺激を認知し得なかったということではないだろうか。今回、脳波の測定部位がF_zのみであるため、本研究で θ 波優勢時としている際に出現した θ 波を全てF_m θ と判断することはできないが、精神作業中に前頭正中線部で記録された高振幅な θ 波であることから、その大部分はF_m θ であったと考えられる。山口⁴⁾はF_m θ が出現している被験者の内省報告に「計算に熱中していた」「ほかのことが考えられない」といったものが多いことを示した。また、石原⁵⁾はF_m θ を出現させるバイオフィードバック訓練法として、「視野を限定して不必要なものを見ない」といった方法を紹介した。この両研究のF_m θ 出現時と本研究の θ 波優勢時の被験者に共通することは、注意を対象以外に向けない、または向けられない状態であったといえる。つまり、注意という心的資源が遂行すべき作業に集中しているときと考えられる。

ここで、精神作業遂行中の θ 波優勢時という状態を考える上で、F_m θ の出現量と抗精神薬との関連性について調査した研究に着目したい。Nakamuraら⁸⁾はClotiazepamの投与により、Mizukiら³⁾はDiazepamの投与により、それぞれ精神作業遂行時のF_m θ 出現量が増加することを報告している。F_m θ が不安水準の低い者で出現しやすいことから、抗不安効果を有するBenzodiazepin (BDZ)系薬物の投与により、F_m θ の出現量が増加することは、予測されてきたことである。不安水準が高い状態とは、本来実行しなければならない事象以外の自己に不利益を及ぼす可能性がある様々な事象に注意が向けられている状態と考えることができる。本研究の推測を当てはめると、BDZ系薬物の効果は、抑制性神経を亢進させることによって、注意という心的資源自体を減少させ、実行す

べき事象以外に向けられていた注意を除去して不安水準を低下させていると言える。

このような推測は、大深度潜水時やそのシミュレーション時に、精神作業によって前頭部で θ 波が優勢となる^{9,10)}ことにも、同様の解釈を与える。大深度潜水時には、眠気が生じ、潜水者の注意という心的資源は減少すると考えられる。さらに、高圧神経症候群による振戦の増強や眩暈の中で、作業を遂行するには、潜水者は所有する注意のほとんどを作業に集中させなければならないだろう。

そこで、これらの推測から θ 波優勢時と α 波優勢時のどちらが、精神作業に適した状態と判断できないだろうか。今回の推測から、前頭部で α 波が優勢な時は、作業遂行時間の延長を知らせる音刺激へ注意を向けるだけの心的資源の予力を備えていると考えられ、他の事象に注意を配分しながらも、作業が遂行できるような状態といえる。一方で、集中状態を、対象となる事象に所有する注意のほとんど全てが分配される状態と定義するならば、注意に余力のある α 波優勢時は集中状態とはいえず、注意に余力のない θ 波優勢時が集中状態と判断される。今回の結果は、自律神経系活動について推測するにはデータが不十分ではあるが、心拍変動スペクトルから、 θ 波優勢時の副交感神経系の活動水準の上昇という可能性も考えられる。この可能性を採用すれば、 θ 波優勢時は、 α 波優勢時と同程度の効率で作業を遂行できるが、精神的緊張は低い状態で作業者の精神的疲労が蓄積しにくい状態といえるかもしれない。しかし、本研究では、被験者の精神的疲労について、評価するような指標を取り入れておらず、更に θ 波優勢時と α 波優勢時の間に、作業遂行時間や正答率に差がなかったことから、どちらが精神作業に適した状態か判断することは差し控えたい。

今回の結果と注意集中というキーワードを用いて、先行するFm θ や α 波に関する多くの研究結果を結びつける一意的な解釈が可能になったのではなからうか。一方で、現在、多くの研究者がFm θ の電源解析に力を注いでいる。Sasakiら^{11,12)}は、MEGで記録されたFm θ は、正中線上ではなく両側の前頭葉で最大振幅を示すことを報告し、前頭葉背外側の広範な領域をFm θ の電流源として推定した。また、Gevinsら¹³⁾は115チャンネルの高密度脳波記録から、Fm θ の電流源として前部帯状回皮質を報告した。さらにIshiiら¹⁴⁾はMEGによって記録されたFm θ についてSynthetic aperture magnetometry (SAM)法によって電源解析を試み、前部帯状回から前頭前野の領域を電源として報告している。また、Asadaら¹⁵⁾はEEGによって記録されたFm θ をトリガーに使用して、MEGによって記録されたFm θ の解析を行い、前部帯状回皮質と前頭葉内側部の一定周期の交互活動という共鳴現象をFm θ の活動源と推定している。これらの報告から、前部帯状回皮質と前頭葉内側部または前頭前野の3部位が最もFm θ の発

生に関与があると考えられる。Cohenら¹⁶⁾によって、前部帯状回の切除は、持続的な注意集中に重大な障害を生じさせることが報告されている。Fm θ が徐波であるため、Fm θ と前部帯状回および注意集中という高次な脳機能との関係について触れられることは少なかった。しかし、帯状回と同様、辺縁系である海馬では、覚醒水準が高いときに θ 律動が著明となることから、帯状回においても θ 波とその活動水準について、Fm θ を中心に再考する必要性があるのではないだろうか。また、Fm θ の発生源に関する報告も、被験者や出現時によって、その推定位置にはかなりの幅がある¹¹⁻¹⁵⁾。したがって、現在、Fm θ と呼ばれている脳波は、単一ではなく多くのサブタイプがあると考えられる。これらのサブタイプは、単に注意の集中や分散といった状態だけでなく、より多様な精神状態に対応しているのかもしれない。それならば、Fm θ が出現する様々な状況の脳の活動をfMRI、PETによって詳細に調査することは、脳波と精神状態の研究に大きく貢献できる可能性がある。

引用文献

- 1) Mizuki, Y., Kajimura, N., Nishikori, S., et al (1984): Appearance of Frontal Midline Theta Rhythm and Personality Traits. *Folia Psychiat Neurol Jpn*, 38, 451-458.
- 2) Mizuki, Y., Kajimura, N., Kai, S., et al (1992): Differential responses to mental stress in high and low anxious normal humans assessed by frontal midline theta activity. *Int J Psychophysiol*, 12, 169-178.
- 3) Mizuki, Y., Suetsugi, M., Imai, T., et al (1989): A physiological marker for assessing anxiety level in humans: frontal midline theta activity. *Jpn J Psychiatry Neurol*, 43, 619-626.
- 4) 山口雄三 (1983): Fm θ (II). *臨床脳波*, 25, 352-358.
- 5) 石原務 (1981): バイオフィードバック法によるFm θ 脳波感覚の検討. *臨床脳波*, 23, 191-197.
- 6) Loze, G. M., Collins, D., Shaw, J. C. (1999): EEG alpha rhythm, intention and oculomotor control. *Int J Psychophysiol*, 33, 163-167.
- 7) Kafry, D., Kahneman, D. (1977): Capacity sharing and refractoriness in successive reactions. *Percept Mot Skills*, 44, 327-35.
- 8) Nakamura, J., Mukasa, H. (1992): Effects of thienodiazepine derivatives, etizolam and clotiazepam on the appearance of Fm theta. *Jpn J Psychiatry Neurol*, 927-931.
- 9) Ozawa, K., Tatsuno, J. (1989): Continuous changes in electroencephalographic topograms and auditory reaction time during simulated 21 ATA (atmospheres absolute) heliox saturation dives. *Ann Physiol Anthropol*, 8,

247-266.

- 10) Rostain, J. C., Charpy, J. P. (1976) : Effects upon the EEG of psychometric performance during deep dives in helium-oxygen atmosphere. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 40, 571-584.
- 11) Sasaki, K., Nambu, A., Tsujimoto, T., et al (1996) : Studies on integrative functions of the human frontal association cortex with MEG. *Cognitive Brain Research*, 5, 165-174.
- 12) Sasaki, K., Tsujimoto, T., Nambu, A., et al (1994) : Dynamic activities of the frontal association cortex in calculation and thinking. *Neuroscience Research*, 19, 229-233.
- 13) Gevins, A., Smith, M. E., McEvoy, L., et al (1997) : High-resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: Effects of task difficulty, type of processing, and practice. *Cerebral Cortex*, 7, 374-385.
- 14) Ishii, R., Shinosaki, K., Ukai, S., et al (1999) : Medial prefrontal cortex generates frontal midline theta rhythm, *Neuro Report*, 10, 675-679.
- 15) Asada, H., Fukuda, Y., Tsunoda, S., et al (1999) : Frontal midline theta rhythms reflect alternative activation of prefrontal cortex and anterior cingulate cortex. *Neurosci Letters*, 274, 29-32.
- 16) Cohen, R., Kaplan, R. F., Moser, D. J., et al (1999) : Impairments of attention after cingulotomy. *Neurology*, 53, 819-824.

要 旨

本研究の目的は、精神作業中に被験者の前頭部において α 波が優勢時と θ 波が優勢時の被験者の集中状態について調べることである。被験者として精神作業中に前頭葉正中線シータ律動(Frontal midline theta rhythm, Fm θ)が高率に出現する健常大学生6名を選出した。パーソナルコンピュータを使用した連続加算作業中に、前頭部で θ 波と α 波がそれぞれ優勢時に音刺激を与え、作業遂行の速度変化と交感神経皮膚反射(Sympathetic Skin Response, SSR)の誘発率から、作業への集中状態を検討した。被験者には、事前に「作業遂行速度の低下時に音刺激が発生する」という偽教示を与えた。

前頭部で θ 波が優勢な時には、音刺激によって作業遂行速度が変化せず、SSR誘発率も低率であったのに対し、 α 波が優勢な時には、音刺激によって作業遂行速度が短縮し、SSR誘発率も高率であった。これらの結果からFm θ 出現中は、被験者の所有する注意の大部分が作業の遂行に向けられている状態であることが示唆された。