二次課題成績と Fm θ による 短期記憶作業の精神的負担の評価

中島 浩二, 佐藤 陽彦

九州芸術工科大学人間工学教室

Evaluation of Mental Workload of Short-term Memory Task by Secondary Task Performance and Frontal Midline Theta Rhythm

Koji NAKASHIMA and Haruhiko SATO

Department of Ergonomics, Kyushu Institute of Design

The purpose of the present study was to evaluate the mental workload of short-term memory task by two objective measures, the secondary task performance and the frontal midline theta rhythm (Fm θ) of the electroencephalogram (EEG). First, to choose Fm θ appearance subjects EEGs were recorded for 18 male students during performing additional task. On Fm θ appearance subjects (8 males) a series of short-term memory task with changed number of memorable figures was imposed as the primary task, and tracking task as the secondary task. The task that presents seven numbers will be over the subjects' limits of short-term memory, and it was the threshold that the subjects' mental workload will be increased.

(Ann. Physiol. Anthropol. 11(2): 97-103, 1992)

Key words: Frontal midline theta rhythm, Mental workload, Short-term memory

現代の労働は VDT 作業などの精神的な作業が増加しており、精神的負担を客観的に捉えることが求められている。その手法の一つとして二次課題法が挙げられる。Broadbent (1958) によれば、ヒトの扱える情報には量的な限界がある。すなわちチャンネル容量に限界がある。二次課題法はこれを根拠に対象とする作業(一次課題)の負担が直接測定できない場合に、別の作業(二次課題)を同時に課し、二次課題のパフォーマンスを評価することによって一次課題の負担を評価する方法である。もし二次課題の要求が一定ならば、二次課題の成績は一次課題における精神的負担を反映していると考えられる。

一方、精神活動と脳波との関連に関する研究は古くから行われてきたが、その中で近年において注目され

ているものの一つが前頭正中線部 θ リズム (Frontal midline theta rhythm, Fm θ) である。石原ら (1970) は、連続加算作業や知能検査などの精神作業中に前頭正中線部で顕著な θ リズムが出現することを報告し、この θ リズムを Fm θ と呼ぶことを提唱した。これまでに行われた報告を山口ら (1990) がまとめたところによると Fm θ の出現者率は 32% から 69% までである。そしてその出現者率に性差がみられないことを西島ら (1980) が報告した。出現者率は年齢と関連があり、石原ら (1974) によると出現者率は 8 歳から 11 歳で最大になり、その後加齢と共に漸次減少する。また、Fm θ の出現と性格特性は密接に関係しており、不安が低く外向的で神経質でないものの方が出現し易いことが丹羽ら (1975)、水木ら (1976) によって報告された。

水木(1982)は不安水準とFm θ の出現との関連について不安が緩和されればされるほど出現し易いことを示唆した。Fm θ は精神作業への動機を高めることによってその出現量が増加すること(谷, 1978), 精神作業の種類によって出現量が左右されること(石原と出海, 1975)などが明らかにされている。これらのことからFm θ が注意集中の程度を表す指標となり得ることが期待される。

本研究においては、精神的負担評価の指標として二次課題(トラッキング作業)における成績とFm θ を用い、数列の短期記憶作業における精神的負担を、記憶する数字の個数と関連づけて検討した。被験者にはFm θ 出現者を用いた。

方 法

脳波電極は国際脳波学会標準電極配置法に従い、Cz, Fz, Fpzに装着した。不関電極は両耳朶結合基準電極とし、単極誘導の脳波を記録した。「Fzの脳波から明瞭に識別できる6~7Hzの波が1秒以上持続するもの」をFm θ とした(図1)。

まず、健康な男子大学生18名についてFm θ 出現の有無を検査した。被験者は電極装着後椅子に座り、内田クレペリン精神検査用紙を用いた連続加算作業を1分間練習した。その後5分間の連続加算作業を行い、その間の脳波を連続的に記録した。ついでにモーズレイ性格検査を行い、モーズレイ性格検査手引き(Eysenck, 1984)に準じて評価した。

このなかでFm θ の出現が認められた男子大学生8名を被験者として実験を行った。8名の年齢は22歳から30歳まで、平均は23.4歳であった。

一次課題である短期記憶作業は小松原と横溝(1989)

図2 本実験における作業の流れ図

の短期記憶保持量と負担との関係に関する実験で詳細に述べられた作業と同じものを用いた。これに二次課題を加えた作業をパーソナルコンピュータ(エプソン PC-286VF + 三洋電気 CMT-147H)を用いて被験者に課した。作業の内容を図2に流れ図で示す。

CRTの中心部に一様乱数系列により発生させた数列を、その桁ごとに決められた時間だけ呈示する。呈示した数字の桁数は1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10の10レベルであった。数列の呈示時間は(0.516sec)×

図1 Fm θ 出現例

(呈示する数字の個数)であった。この時間は数列を一度だけ見たときの記憶についての実験を行うために設定されたもので、予備調査を行ったところ被験者は数列を再度見直すことはできなかった。尚、小松原と横溝(1989)はこの時間を MODAPTS 法(横溝ら, 1987)を参考に、視線移動と瞬間的判断にかかる時間から設定している。被験者はこれを左から読んで記憶する。数列が消失した後すぐに、被験者は呈示された数列を記憶保持しつつ、同時に二次課題のトラッキング作業をキーボードにより10秒間行う。次に再生画面となり、呈示された順序でテンキー入力により数列を再生した。呈示された数字を忘れてしまったときは、忘れてしまった部分の数字の代わりに「. (小数点)」を入力させた。

二次課題は一次元の追跡トラッキング作業を用いた。被験者はキーボードの左右二つのキーによりカーソルを左右に操作し、周期の異なる3種類の正弦波の合成波でCRT上を左右に移動するターゲットを追跡する。ターゲットの移動及びトラッキングエラー(ターゲットとカーソルとの水平方向の位置間の距離の偏差)の計算は40Hzでなされた。

被験者の記憶方法をできるだけ統一するために以下のような指示を与えた。

- 発声による記憶保持を行ってはいけません。
- ゴロ合わせによって数字を憶えてはいけません。
- どの場所にどの数字があったなど視覚的なイメージで記憶してはいけません。
- リズムによる記憶を行ってはいけません。数列をいくつかに分けて憶えてはいけません。

また、一次課題と二次課題を明確にするために以下のような指示を与えた。

- 短期記憶の成績は決して下げることなく、同時にトラッキングもできる限り正確に行うよう努力してください。もしトラッキングを行うことによって憶えた数字を忘れてしまいそうならば、トラッキングをするのをやめて画面を見ていてください。記憶作業を犠牲にしてトラッキングを正確に行う努力をしてはいけません。

作業中の脳波が連続的に記録された。脳波との対応を見るために、トラッキングの開始と終了のとき、及び再生した数字の入力が終了して被験者がリターンキーを押したとき、コンピュータから信号が出力され、

D/A コンバータを介して脳波計(日本光電 EEG-4113)に記録された。

被験者は電極装着後椅子に座り、前述の指示及び実験の内容についての説明を受けた。実験の練習として呈示数1個の10回の作業を行った。呈示した数字の桁数の各レベルに対して図2の実験サイクルを10回繰り返して被験者に行わせた。被験者は一つのレベルの10回の作業を終えると図3に示す100mmスケールの主観申告の五つの質問に矢印の記入によって答えて、数十秒の休憩をした後に次のレベルの作業を開始した。呈示数は1個から始めて10個まで1個ずつ増加した。これは $Fm\theta$ が動機づけに大きく影響される指標であるため、もし困難な課題、すなわち呈示数の大きな課題から、容易な課題、すなわち呈示数の小さな課題へと移行すると、被験者の作業に対する動機づけを低下させる可能性があり、 $Fm\theta$ がその作業の質のみを反映するものではなくなるのではないかという懸念から設定された実験順序であった。実験にかかった時間はどの被験者も約40分であった。

図3 主観申告

一次課題の成績の指標として再生率(呈示した数字に対して正答した割合)、正答率(パスを除く応答に対して正答した割合)、パス率(忘れてしまい小数点で応答した割合)がそれぞれ呈示数レベル毎に計算された。

二次課題の成績の指標であるトラッキングエラーは、各レベル10回の作業の合計が計算された。

今回用いた作業に、どれだけ練習効果があったのかを把握するために、別の被験者群8名を用いて二次課題、すなわちトラッキング作業のみの追実験を行った。被験者の年齢は21歳から23歳まで、平均は22.3歳であった。実験の遂行状態を本実験に近付けるために、追実験は基本的に本実験で用いた作業から短期記憶作業を取り除いたものとした。すなわち、被験者は数列の呈示場面では、ただ画面を眺めているだけで数列を記憶しなかった。また、再生場面に於いては被験者は任意に数字を入力した。その他、電極を装着していなかったこと以外は本実験と追実験とは条件がほぼ一致していたと思われる。

結果

一次課題（短期記憶保持）の成績の諸指標と呈示数との関係を図4に示す。再生率、正答率ともに標準偏差が増え始めたのは呈示数が6個であった。6個を越

図4 短期記憶諸指標と呈示数との関係。縦棒は標準偏差

図5 トラッキングエラー比 (呈示数1個のときとの比) の平均と呈示数との関係。縦棒は標準偏差
A: 本実験における成績 B: 追実験における成績

えると平均再生率、平均正答率は漸次低下し、10個のときはそれぞれ74.3(±13.6)%, 78.8(±9.8)%であった (いずれも±標準偏差)。パスは7個で初めて出現してその後漸次増加し、10個のときは平均パス率6.5(±9.8)%であった。呈示数5個まではほぼ全員が正確に短期記憶保持が可能であったが、8個以降は被験者の短期記憶の容量を完全に越えてしまい、正確な記憶が不可能であったと思われる。

二次課題（トラッキング作業）の成績の指標であるトラッキングエラーを被験者毎に呈示数1個のときとの比で求めた。その平均値を各呈示数毎に図5のAに示す。呈示数1個から6個までトラッキングエラーは漸次低下し、7個以降顕著に増加した。図5のBは追実験の結果を示している。練習効果と思われるトラッキングエラーの低下がみられる。

各呈示数でのFmθの出現時間をそのレベルの10回

の作業にかかった時間に対する割合で求め、これを出
現時間 (%) として呈示数との関係を図6に示す。呈

図6 Fmθの平均出現時間 (%) と呈示数との関係。縦棒は標準偏差

表1 Fmθ出現者率 (山口ら, 1990に追加)

報告者	被験者			
	年齢	性	総数	Fmθ出現者%
谷ら(1968)	11~25	男, 女	49	25 (50%)
石原ら(1972)	14~19	男 (非行少年)	270	186 (69%)
丹羽ら(1975)	18~22	男	90	60 (67%)
水木ら(1979)	18~22	男	30	22 (73%)
山口ら(1980)	19~22	女	175	56 (32%)
西島ら(1980)	19~28	男	30	11 (37%)
	19~20	女	30	10 (33%)
安雲ら(1981)	19~23	男	73	30 (41%)
水谷ら(1982)	19~25	男	36	
		女	49	29 (34%)
浅田ら(1984)	19~22	男	69	
		女	37	42 (40%)
Asadaら(1986)	18~23	男	205	98 (48%)
		女		
山田ら(1987)	大学生	女	58	33 (57%)
本研究	21~30	男	18	8 (44%)

示数1~7個においては呈示数の増加に伴って出現時間
も緩やかに増加し、呈示数8個以降は顕著に増加し
た。ここで標準偏差が大きいのはFmθの出現程度の
個人差が大きかったためで、個人別にみても平均値と
同様、呈示数の増加に伴う出現時間の増加という傾向
がみられた。

主観申告と呈示数との関係を図7に示す。「易しい

図7 主観申告尺度の平均値と呈示数との関係

A: 易しい—つらい B: 疲れない—疲れる C: 眠い—さえた D: 退屈な—忙しい E: リラックスした—緊張した

一つらい」の項目をみると呈示数の増加と共に徐々につらくなり、7個から「つらい」側へと移っている。一方、「疲れない—疲れる」の項目で「疲れる」側へ移ったのは呈示数8個であった。「退屈な—忙しい」及び「リラックスした—緊張した」の項目も同様の傾向を示し、呈示数6個から「忙しい」及び「緊張した」側へと移行している。また、「眠い—さえた」の項目では、常に「さえた」側に位置しており、呈示数1～4個までは呈示数の増加と共に徐々に覚醒度は減少しているが、呈示数8個以降は再び上昇している。

考 察

今回の研究においては、 $Fm\theta$ を精神的負担の指標として用いたため、 $Fm\theta$ 出現者のみを被験者とした。 $Fm\theta$ 出現者は18名中8名で、出現者率は44.4%であった。現在までの報告による $Fm\theta$ の出現者率を表1に示す。 $Fm\theta$ の出現者群(8名)と非出現者群(10名)におけるモーズレイ性格検査の違いについてt検定を行ったところ、神経症的傾向尺度(N尺度)において統計的に有意な差がみられた($Fm\theta$ 出現者群: 30.0 ± 6.4 点, $Fm\theta$ 非出現者群: 27.7 ± 11.1 点, $P < 0.01$)。 $Fm\theta$ が出現した被験者の方が出現しなかった被験者よりも神経症的傾向が低かった。内向性—外向性尺度(E尺度)には有意な違いをみることができなかった($Fm\theta$ 出現者群: 13.9 ± 6.8 点, $Fm\theta$ 非出現者群: 24.7 ± 7.2 点, いずれも平均±標準偏差)。これまで $Fm\theta$ と性格特性に関して丹羽ら(1975)、水木ら(1976)が報告している。いずれの報告にもモーズレイ性格検査が使用され、 $Fm\theta$ 出現者の方が非出現者よりも外向的で神経症的傾向が弱いことで一致している。

二次課題法は一次課題の成績から直接負担をみることが不可能な場合に有効である。今回の実験においては、一次課題(短期記憶作業)ではほぼ再生可能であった呈示数1個から5個までの負担を二次課題の成績によって考察できる。呈示数1個から6個までの二次課題のトラッキング作業におけるエラーは漸減していた。これは練習効果のせいだと考えられ、主観申告の「眠い—さえた」の項目の低呈示数における変化もそのことを示唆している。本実験のトラッキング成績(図5A)から練習効果(図5B)を差し引いたものを想像すると、もし練習効果がなかったら呈示数1個から6個までの変化は呈示数の増加と共に緩やかに増加し

ているのではないだろうか。更に呈示数7個以降の顕著なトラッキングエラーの増加は練習効果に勝る負担の増加があったものと思われる。主観申告の「易しい—一つらい」の項目で呈示数1個から6個までは徐々に変化し、7個以降やや傾きが急になっているのがみられた。以上のことから短期記憶作業の負担について考察すると、呈示数1個から6個までは一定ではないが緩やかにしか変化せず、呈示数7個以降は負担は急増しているのではないだろうか。

図6から呈示数の増加に対応して $Fm\theta$ の出現時間が増加しているように見える。丹羽と山口(1975)は15分間の連続加算作業において作業時間の経過と共に $Fm\theta$ が増加する傾向があることを報告している。これから作業の難易度が一定でも作業に対する集中の度合が時間の変化に伴って変化していることが考えられる。今回の実験が呈示数1個から始めて10個まで増やす方向のみで行われたために出現時間の増加が呈示数の増加によるものか、あるいは作業時間の経過によるものなのかは判断できない。しかし一つのレベルの作業が終了して次のレベルの作業を開始するまでは、主観申告に答える時間があつたので、連続的な作業中の時間経過による $Fm\theta$ の増加はないと考えてよいであろう。

$Fm\theta$ 出現時間における呈示数7個までの緩やかな増加と8個以降の急増という傾向はトラッキングエラーにみられた傾向と類似している。ただし急増が始まるのが $Fm\theta$ の出現時間では呈示数8個、トラッキングエラーでは7個という差はある。 $Fm\theta$ の出現時間と主観申告の「眠い—さえた」の項目から、作業によって要求される注意集中の度合が呈示数8個から増したと考えられる。更に一次課題において呈示数7個でパスが現れている。従って、呈示数7個の作業は $Fm\theta$ を誘発するほど難しくないのだが、二次課題の成績に影響する程度に負担が増加していると考えられる。あるいは $Fm\theta$ が余り出現していないことから、被験者の注意集中のレベルが呈示数7個の作業を正確に行うことができる程度のレベルに達していなかったために、二次課題の成績の悪化を招いたとも考えられる。いずれにせよ、本研究の呈示数7個の作業は、負担が大きく変化する閾値であった。呈示数8個以降は $Fm\theta$ が急増しており、注意集中の度合が増したが、すでに短期記憶容量の限界を越えており、負担は二次課題の成

績が反映するように呈示数の増加と共に増加している
のであろう。

小松原と横溝(1989)は短期記憶容量について、完全な短期記憶再生を期待できるのは5項目までで、主観申告により5項目以下でも負担は一定ではないと報告した。Miller(1956)によると、ヒトの短期記憶の限界容量はさまざまな実験における記憶の成績から (7 ± 2) 項目であると考えられ、この容量を越えての短期記憶保持はできない。精神的負担を評価した本研究の結果はこのMillerの知見と一致するものであった。

引用文献

- Asada, H., M. Mizutani, W. Yasumo and Y. Yamaguchi, 1986: Frontal theta rhythms in the normal EEG of the waking adults. *J. Physio. Soc. Japan*, 48: 273.
- Broadbent, D. E., 1958: Perception and communication. Pergamon Press, London, 297-316.
- Eysenck, H. J., MPI 研究会訳編, 1984: モーズレイ 性格検査手引き。
- 石原 務, 出海光子, 1975: $Fm\theta$ と想像的課題。臨床脳波, 17(6): 381-384.
- 石原 務, 梅本倭子, 中野 実, 1974: $Fm\theta$ の発達的な調査。臨床脳波, 16(12): 740-743.
- 石原 務, 作田 齊, 町原 英, 吉井直三郎, 1970: 精神活動と脳波活動について(I)分散分析による検討。臨床脳波, 12(4): 102-108.
- 小松原明哲, 横溝克巳, 1989: 短期記憶保持による負担について。人間工学, 25(5): 277-286.
- Miller, G. A., 1956: The magical number seven plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63: 81-97.
- 水木 泰, 1982: 問題の脳波パターン $Fm\theta$ について。脳波と筋電図, 10(3): 203-208.
- 水木 泰, 田中正敏, 磯崎 宏, 稲永和豊, 1976: $Fm\theta$ と性格特性について。脳波と筋電図, 4(4): 182-191.
- 西島英利, 向笠広和, 松木武敏, 水木 泰, 稲永和豊, 磯崎 宏, 田中正敏, 1980: 精神作業中の脳波($Fm\theta$)の性差について。臨床脳波, 22(3): 167-173.
- 丹羽健一, 山口雄三, 1975: 精神作業時前頭シート突発波の精神生理。臨床脳波, 17(3): 173-177.
- 丹羽健一, 山口雄三, 日野頌三, 辻本太郎, 1975: 前頭シート突発波と性格特性。臨床脳波, 17(11): 661-668.
- 谷嘉代子, 1978: 作業への動機づけと $Fm\theta$ 。臨床脳波, 20(2): 115-120.
- 山口雄三, 津田久美, A. Remond, 1990: $Fm\theta$ —日仏比較の試み—。臨床脳波, 32(2): 73-79.
- 横溝克巳, 三浦達司, 河原 巖, 宮代信夫, 小松原明哲, 1987: 新しいワーク・スタディ。技報堂出版, 85-100 (1991年10月31日受付)

佐藤 陽彦
Haruhiko SATO

〒815 福岡市南区塩原4丁目9番1号 九州芸術工科大学人間工学教室
Department of Ergonomics, Kyushu Institute of Design
4-9-1, Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka 815, Japan