

乗 用 車 運 転 中 の $F_m\theta$

— 運 転 状 況 と の 関 係 —

岡 村 法 宜

Appearance of $F_m\theta$ in Car Driving

— Relationship between Appearance of $F_m\theta$ and Situation on Car Driving —

Noritaka OKAMURA

In this paper, I examined the pattern of information-processing of a driver in the state where $F_m\theta$ tends to appear. In three kinds of driving courses, in which the stress loaded on a driver differed, EEG, photoelectric plethysmograph in earlobe, and external ocular movement for horizontal direction were recorded during driving a passenger car. On the relationship between these body signals and driving situations, it was shown that appearance of $F_m\theta$ on high frequency might result from (1)relaxation of driver, (2)a certain amount of load on a working memory, (3)concentration on driving.

Based on this study and studies on $F_m\theta$ reported previously, I hypothesise here that $F_m\theta$ is EEG appeared on a scalp when inhibitory neuron intercept positively inflow of excessive informations which were not required for driving.

Key words : $F_m\theta$, attention, car driving, EEG, working memory

序 文

前頭正中線部 θ リズム (Frontal midline theta rhythm, $F_m\theta$) は、精神作業中やある睡眠段階で出現することのある脳波として知られている¹⁾。さらに、 $F_m\theta$ を出現する被験者は不安水準が低く、外向的であると言われて²⁾。このように $F_m\theta$ は、被験者の精神状態や精神活動に関係する非常に稀な脳波単位とされてきた。ただし、先行研究によれば、その出現率は、8～11才で69%と最も高く、年齢が上がるにつれて漸次減少し、22～40才では、32%である³⁾。そして、同一被験者においても、実験ごとにその出現率は多様に変化し、非常な不安定性を有する。これらのことから、初期の $F_m\theta$ 研究では、出来る限り多くの出現例を得るための精神作業の発見に力が注がれてきた。そのような研究の結果、 $F_m\theta$ は、一般的に課題が極端に構造化されていて解が一つの決定された方途で必然的に導き出せるような課題施行中に出現しやすいということが見いだされた⁴⁾。一方、 $F_m\theta$ の電源解析などの研究では、より多くの計算対象が得られることから、内田クレベリン用紙を用いた連続加算作業などの単純な精神作業が利用されてきた。しかし、先に

ふれた $F_m\theta$ の不安定性が、一定の精神活動や精神状況と対応しているのならば、 $F_m\theta$ の出現様式について研究することは、脳波を利用する精神活動の解明に大きな意義を持つと考えられる。その際、 $F_m\theta$ と被験者の状況との対応を研究するために、被験者に課す作業は、ある程度の多様性を有している必要がある。

自動車を運転しているとき、ヒトは信号や標識、周囲の歩行者や他の車など、多くの時々刻々と変化する情報を認知、判断して反応している。このように自動車を運転するという事は、非常に精神的負担の大きい作業である。しかし、日常的に自動車を運転し、しかもその運転経路を何度も経験している者にとっては、必ずしも自動車の運転によって生ずる精神的疲労は大きいとはいえない。それは、日常的に運転経路を経験していることから、様々な情報の認知・判断、そして反応に至るまでの作業課程が高度に自動化されたためと考えられる。そこで、今回、我々は様々な状況下で乗用車を運転する被験者の脳波を記録し、 $F_m\theta$ の出現しやすい運転者の状態を確認した。これより、 $F_m\theta$ の出現と乗用車運転時の運転者の脳内における情報処理の様式について検討したので報告する。

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成人男女10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4名、女子2名）で、年齢は21～30歳(mean±SD, 22.5±3.7)であった。

2. 運転経路

それぞれ、およそ30分を要する3種類の運転経路を設定した。コース1：ほぼ毎日のように利用している道路のみを通り、あらかじめ3回の予行運転を実施した運転経路、コース2：ほとんど利用したことのない道路を同乗者の肉声によるナビゲーションを受ける運転経路、コース3：コース2と同様、ほとんど利用したことのない道路を1度助手席に同乗することによって記憶した運転経路。なお、実験時間帯は混雑の少ない午前10時～12時、午後1時から3時の間とした。

3. 測定項目

脳波、水平眼球運動および耳朶容積脈波の測定用センサ類を装着した被験者の状態および測定システムを図1に示す。脳波は右耳朶を基準電極とし、生体電気アンプ(AB-621G, 日本光電工業)を用いて増幅し、時定数0.1sec, 高域遮断周波数30Hzで F_z より記録した。水平眼球運動は、ニスタグモアンプ(AN-601G, 日本光電工業)を用いて増幅し、時定数3.0sec, 高域

遮断周波数5Hzで記録した。耳朶容積脈波は、カプリアンプ(AA-601H, 日本光電工業)と呼吸・プレチスモ用電気カプラ(AR-650H, 日本光電工業)を用いて増幅し、時定数0.3sec, 高域遮断周波数30Hzで左耳朶より記録した。これらの生体信号は12ビットA/D変換カード(ラトックシステム, REX-5054B)とパーソナルコンピュータ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。これらの生体信号と運転状況の対応を分析するために車両前方画像をCCDカメラとデジタルビデオデッキ(DSR-30, ソニー)を用いて、ミニDVテープに記録した。

4. 解 析

1) コース別 $F_m\theta$ 指数

後日、記録した脳波から、視察により $F_m\theta$ 出現部位を抽出した。通常、視察による解析では、 $F_m\theta$ の定義は1秒以上続くことが条件とされているが、より多くの状況を解析対象とするために、0.5秒以上の θ 波を $F_m\theta$ として抽出し、ウェーブレット packets 変換によって、抽出部分がアーティファクトではない律動性の脳波であることを確認した(図2)。ウェーブレット packets 変換は、データ解析プログラム言語ソフトS-Plus(MathSoft, Inc., Washington)を用いて行った。なお、基底関数には、Symletのウェーブレット packets 関数⁵⁾を採用し、解像度6の直交変換を行い算出されたウェーブレット packets 係数の二乗を信号エネルギー(パワー)とした。運転時間に対して $F_m\theta$ が出現している時間を百分率で示し



図1. 測定システムと被験者

①前方画像撮影用CCDカメラ、②確認用モニター、③耳朶用光電脈波ピックアップ、④水平眼球運動導出用電極、⑤脳波導出用電極(F_z)、⑥アンプボックス、⑦入力ボックス、⑧デジタルビデオデッキ、⑨測定用パーソナルコンピュータ。脳波用基準電極は右耳朶に装着した。

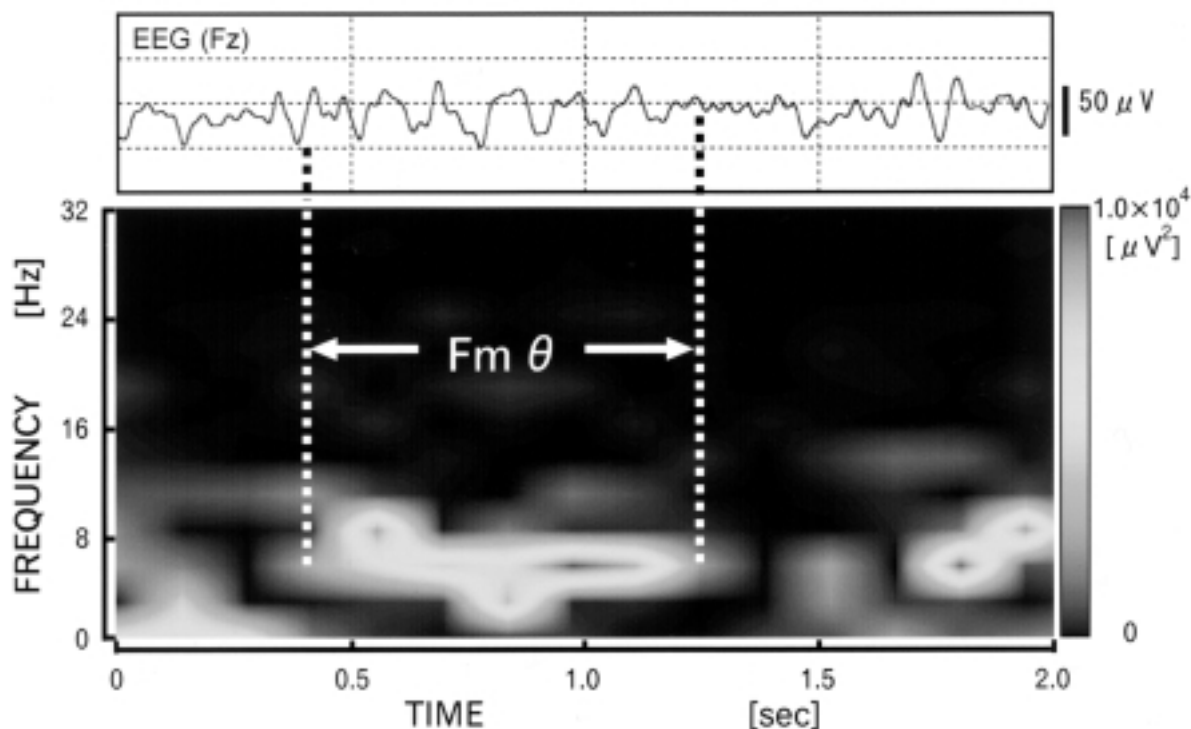


図2. ウェーブレットパケット変換によるFm θ の確認

視察でFm θ と判定した部位を抽出し、ウェーブレットパケット変換後、スケログラム表示し、0.5秒以上の連続性のある θ 活動であることを確認した。

たものを、Fm θ 指数とした。

2) 運転状況別Fm θ 出現率

脳波記録と同期させて記録した車両前方画像から運転状況を判別しうる686シーン全てを対象に運転状況を分類した。分類した運転状況ごとに、(Fm θ の出現を伴ったその状況の回数) / (その状況が観察された全回数) \times 100を運転状況別Fm θ 出現率として算出した。

3) 脈波高変化率

2)で分類した運転状況の中から、1度でもFm θ の出現が認められた運転状況について、その状況に入る前後のそれぞれ5心拍の脈波高の平均値から、脈波高変化率を算出した。これらをFm θ の出現を伴った場合と、Fm θ の出現を伴わなかった場合に分け、それぞれ平均値を算出した。

4) 水平眼球運動

2)で解析対象とした686シーンを対象に、水平眼球運動が多い場合と少ない場合に分類し、さらにそれぞれの場合についてFm θ の出現の有無を確認した。

5. 統計的検索

コース別Fm θ 指数、運転状況別Fm θ 出現率については、Kruskal-Wallis検定を、脈波高変化率については、Nonparametric Student t-testを、Fm θ の有無と水平眼

球運動との関係については、カイ二乗検定を用いて検定した。

結 果

1. コース別Fm θ 指数 (図3)

コース別Fm θ 指数は、次の通りであった。コース1では、 $3.45 \pm 0.65\%$ 、コース2では、 1.48 ± 1.20 、そして、コース3では、 $2.65 \pm 0.71\%$ で、コース1とコース2、3間に有意差が認められた($P < 0.01$)。

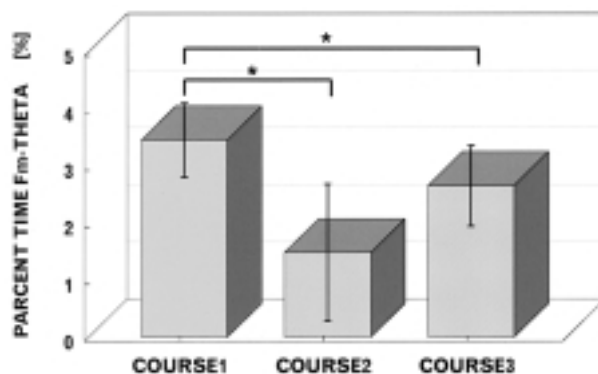


図3. コース別Fm θ 指数
Fm θ 指数(Fm θ 出現時間 / 前運転時間 \times 100)。
*: $P < 0.01$, $n = 6$

2. 運転状況別Fmθ出現率（表1）

車両前方画像より、運転状況を以下の11通りに分類した。

①前車減速のため減速する、②赤信号のため停止する（停止中および停止中から青信号で発車を含む）、③緩やかなカーブを走行する、④駐車中の車をよける、⑤青信号を通過する、⑥左折する、⑦黄信号を通過する、⑧直進する、⑨路上の落下物をよける、⑩右折する（そのために交差点内に進入を含む）、⑪他車に進路を譲る・譲られる、⑫験者の合図で出発する。

状況①～⑦では、Fmθの出現が認められたが、状況⑧～⑫ではFmθの出現は、一度も認められなかった。また、状況別のFmθ出現率は、状況①、②で高値を示し、それぞれ18.0±7.2%、9.8±5.0%で、①—②間を含め、他の運転状況間と有意な差が認められた(P<0.05)。

表1. 運転状況別Fmθ出現率

| 運転状況 | 平均Fmθ出現率 |
|------------------|-------------|
| ① 前車減速のため減速する | 17.9 ± 12.0 |
| ② 赤信号で停止、停止中から発進 | 14.0 ± 4.7 |
| ③ 緩やかなカーブ | 10.8 ± 12.0 |
| ④ 駐車中の車をよける | 16.7 ± 40.8 |
| ⑤ 青信号を通過する | 1.9 ± 4.5 |
| ⑥ 左折する | 6.3 ± 6.1 |
| ⑦ 黄信号を通過する | 2.4 ± 5.8 |
| ⑧ 直進する | 0.0 ± 0.0 |
| ⑨ 路上の落下物をよける | 0.0 ± 0.0 |
| ⑩ 右折するために交差点内に進入 | 0.0 ± 0.0 |
| ⑪ 他者に進路を譲る・譲られる | 0.0 ± 0.0 |
| ⑫ 出発する | 0.0 ± 0.0 |

[*]: P<0.05, n=6

3. 脈波高変化率（図4）

脈波高変化率はFmθ出現時の97.7±4.4%、Fmθ非出現時では、86.5±2.1%で、両者間に有意差が認められた(P<0.05)。

4. 水平眼球運動（表2）

水平眼球運動が、左折する直前までほとんど認められず、対応した動作を起こす直前より、水平眼球運動が記録されたケースを図5aに示す。このように眼球運動の少ないケースは、Fmθ出現時では、42例中38例(90.4%)であったが、Fmθ非出現時では、644例中287例(44.6%)であった。また、図5bに左折する際に、左折動作以前より、多くの水平眼球運動が記録されたケースを示す。このように眼球運動の多いケースは、Fmθ出現時では、42例中4例(9.5%)であったが、Fmθ非出現時では、644例中357例(55.4%)であった。これより、Fmθの有無と眼球運動の多少には、有意差がありFmθの関与が認められた(P<0.01)。

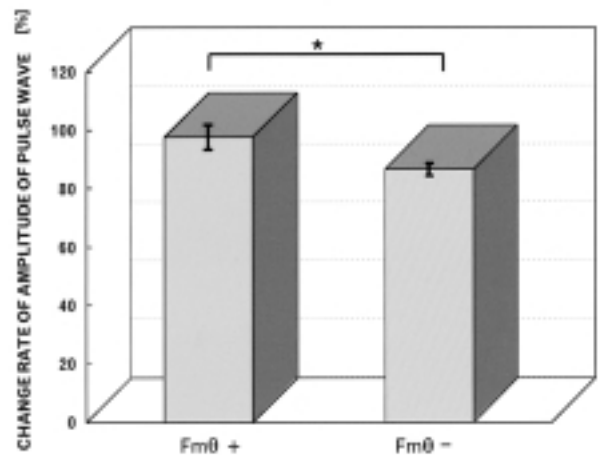


図4. 脈波高変化率

Fmθ+：Fmθの出現が確認された7運転状況について、その状況に入る前5心拍の平均脈波高を100%としたときのその運転状況に入ってからの5心拍の平均脈波高。

Fmθ-：Fmθを伴わないとき。

*：P<0.05, n=7

表2. Fmθと水平眼球運動の関係

| | 眼球運動多 | 眼球運動少 |
|------|-------|-------|
| Fmθ+ | 4 | 38 |
| Fmθ- | 357 | 287 |

Fmθの出現の有無と記録された水平眼球運動の多少には、関与が認められた(P<0.01)。

考 察

今回の結果で、コース別Fmθ指数が、他の2コースよりもコース1で有意な高値を示した。3つのコースの特性を運転者の注意が向けられる対象から、注意が運転自体にのみ向けられやすい場合と、注意が運転自体に加え運転に付随するものにも向けられる場合に大別することができる。コース1は、非常に慣れたコースであるため、コース周囲の景色や状況などの情報は、無意識下で自動的に利用されるため、運転自体に運転者のほぼ全注意が向けられやすい。それに対してコース2では、ほとんど利用していない道路でかつ、同乗者の肉声によるナビゲーションを受けているため、運転者は自分の記憶を利用できず、周囲に注意を向けながら、ナビゲーションの指示通りに運転をしなければならない。また、コース3では、1度目の同乗による記憶のために思い出すという行為自体にある程度の注意が必要で、それらの利用は自動化されず、必ずしも運転者の注意は運転のみに集中できるわけではない。これらのことから、Fmθが出現しやすい運転経路とは、運転者の注意が運転に付随する運転以外の事象に向けられることなく、運転自体に向

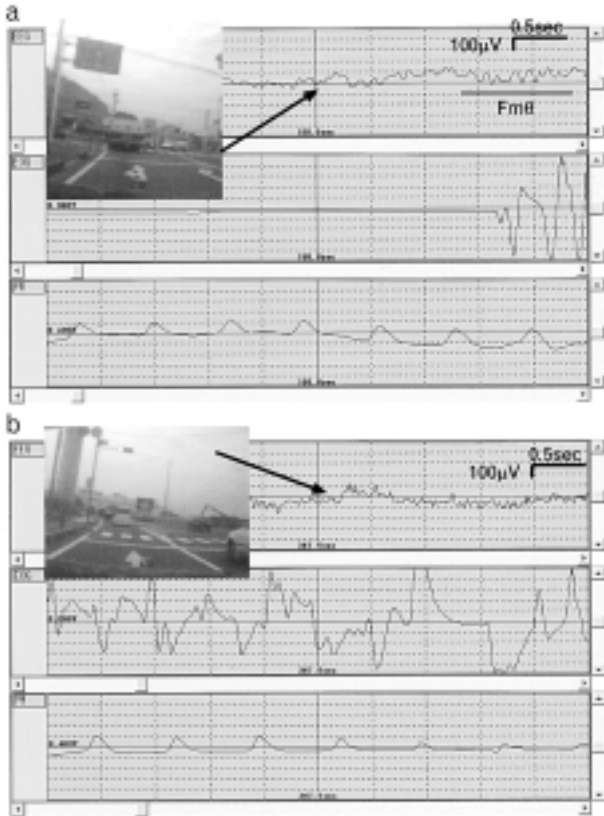


図5. 左折時の水平眼球運動の例

ch1: 脳波, ch2: 水平眼球運動, ch3: 耳朶脈波

a (眼球運動が少ない例): 交差点の50m手前にさしかかった時点(写真→)より1.3秒後にFm θ が出現し, その0.4秒後より眼球運動が記録された。

b (眼球運動が多い例): 交差点にさしかかるかなり前より, 多くの眼球運動が記録された。

けられやすい経路, つまり, 日常的に利用している慣れ親しんだ経路と考えられる。そして, そのような経路を運転するとき, 運転者の脳内で多くの長期記憶がワーキングメモリに複写され円滑に利用されているのかもしれない。これらのことはFm θ が出現しやすい状態として, 被験者が課せられた精神作業に集中していること⁹⁾とする多くの先駆的研究と合致する。

次に運転状況別Fm θ 出現率について, 全くFm θ が出現しなかった運転状況⑧~⑫について着目する。まず, ⑩(右折する, そのために交差点内に進入を含む), ⑪(他車に進路を譲る・譲られる), および⑫(験者の合図で出発する)は, 対向車などの他車の反応や験者の指示に注意を向けなければならない。また, ⑨(路上の落下物をよける)も, 予期せぬ路上の落下物を避けるには, 運転自体に向けられていた注意は, 落下物や, 避ける側の様子を伺うために分散してしまう。つまり, 状態⑨~⑫については, 注意が運転自体に集中せず他の事象に分散するとFm θ は出現しないとするコース別Fm θ 指数の結果より立てた仮説に, 合致する。しかし, 状況⑧は, 「直進する」という最も精神的負担の少ない運転状況である

ことから, 運転自体に運転者の全注意が向けられやすい状況といえるかもしれない。しかし, 「直進する」ことは, あまりにも単純で, 運転自体に使用する注意は少なく済むだろう。そのため, 運転者が所有する注意の僅かしか運転に利用されず, そのためにFm θ が出現しなかったとも考えられる。また, ただ「直進する」ということは, ワーキングメモリがほとんど利用されないために, Fm θ は出現しなかったとも考えられる。この仮説を支持するものとして, リスニングスパンテスト時の脳波研究がある⁷⁾。それによると, リスニングスパンテストの際, ワーキングメモリへの負荷が小さい2文条件ではFm θ の出現は認められないが, 3から5文条件へとワーキングメモリへの負荷が大きくなるにしたがって, Fm θ の出現が認められるようになってくることが報告されている。

一方, 非常に高率にFm θ が出現した運転状況は, ①(前車減速のため減速する)と②(赤信号のため停止する(停止中および停止中から青信号で発車を含む))である。①では, 運転者は, 前車がブレーキを踏んで前車のブレーキランプが点灯したときや, エンジンブレーキなどによる前車の減速を認識したときに, 適切な車間距離を維持し追突を避けるため, 自車のブレーキを踏むという作業を行う。この時, 多くの運転者は, 作業遂行に記憶を利用しているものの, 意識下で必要な記憶を思い出して利用するという形態ではなく, 無意識下で自動的に記憶を引き出して利用している。同様に, ②(赤信号のため停止する(停止中および停止中から青信号で発車を含む))でも, 運転者は, 赤信号を認識して停止したり, 赤信号で停止中から信号が青に変わるのを認識して発車するといった動作は, 多くの運転者が無意識下で, 行っていることが多いのではないだろうか。

そして, Fm θ の出現が中等度であった運転状況は, Fm θ 出現率が非常に高率であった運転状況の性質と, 全くFm θ が出現しなかった運転状況の性質を併せ持っているようである。状況③(緩やかなカーブを走行する)と⑤(青信号を通過する)は, ワーキングメモリを利用してはいるが, その負荷があまりにも小さく, 状況⑧に近い状態と考えられる。また, 状況④(駐車中の車をよける)と, ⑥(左折する)は, 状況⑨(路上の落下物をよける)や⑩(右折する, そのために交差点内に進入を含む)の要素を含み, 駐車中の乗用車や左折時に直進するオートバイや歩行者を巻き込まないようにするため, 注意は分散するだろう。さらに, 状況⑦(黄信号を通過する)では, 運転者が, いくらかでも停車するか通過するか葛藤した場合, 無意識下の処理や円滑なワーキングメモリの利用は阻害され, 運転自体から注意も逸れてしまうだろう。

脈波高の変化率からは, その運転状況に入る際にどれだけ運転者が緊張したかが推測できる。一般的に, 緊張

により自律神経系は交感神経優位に働き、末梢の細動脈が収縮することによって、脈波は減高する。したがって、今回、Fm θ 出現時には、その運転状況に入った後に脈波高がほとんど変化しなかったということは、運転者は、そのとき精神的な緊張をほとんど感じていなかったと考えられる。一方、同じ運転状況に入る際でも、Fm θ の出現を伴っていないときには、脈波高は大きく減高したことから、このとき運転者は、緊張することが多かったと考えられる。これはFm θ 出現時には、ワーキングメモリの円滑な利用と、無意識下での反応を支持する結果といえる。

最後に水平眼球運動であるが、必ずしも結果が正確に定量的な解析がなされたとは言い難く、それを明確に評価することはできない。しかし、同じ「左折する」という状況下において、Fm θ の出現を伴っている場合(図5a)と伴っていない場合(図5b)の違いは、非常に魅力的なものではないだろうか。図5aに示すように、左折する際に、Fm θ の出現を伴っている場合、左折する直前まで水平眼球運動は記録されず、左折直前にFm θ が出現してから、水平眼球運動が数回記録され、左折に至っている。このときの運転者の動作を推測すると、前方に集中している状態から、ルームミラー、サイドミラーおよび目視で左側方に直進するオートバイや歩行者等がないことを確認し、左折の動作をおこなっているようである。また、同時に記録されている脈波は、呼吸性に僅かに脈波高が変化しているのみである(図5a)。つまり、Fm θ の出現を伴っている左折時では、一つ一つの動作に無駄がなく、その状況に精神的緊張を伴っていないといえよう。これは、あたかもFm θ が水平眼球運動を誘発し、左側方を確認させ、左折しているかのように受け取られる。一方、図5bの左折する際にFm θ の出現を伴わない場合では、運転時の運転者の視線は、左折動作のかなり前から前方以外に向けられているだけでなく、かなり動揺していることが、記録された水平眼球運動から伺える。このときの運転者は、左折するために必要な事象以外にも注意を向け、左折に必要な情報も認知・判断し、左折していると推測される。さらに、図5aより、左折動作後の脈波の減高は著しい。つまり、図5bのFm θ の出現を伴っていない左折時では、何らかの理由で周囲や運転に直接関係ない事象にも注意を向けながら左折し、その状況に際し、精神的緊張を伴っているのかもしれない。しかし、Fm θ を伴わない場合には、ほとんど眼球運動が観察されないケースも、かなりの頻度で認められたことからFm θ が出現していない時を、必ず何らかの理由で周囲や他の事象に注意を向けていると結論することは、性急であろう。

これまで本稿で論じてきた仮説をまとめると、Fm θ が出現しやすい運転状況とは、運転者はリラックスし、

無意識下で記憶が利用され、ワーキングメモリにある程度の負荷がかかるような状況で、注意が分散することなく運転自体に向けられているときと考えられる。この仮説は、Fm θ に関するこれまでの研究結果に矛盾すること無く、「Fm θ は集中と深く関与する脳波で、注意を遂行すべき一つの課題などに集中させているときに出現しやすい脳波」という知見⁶⁾を補強するものとなった。

一方で、Fm θ とは、このような運転状況の際に受動的に出現しやすい脳波なのだろうか。それとも、このような運転状況を実現するための神経活動の結果として、Fm θ が出現しているのだろうか。我々は、後者のメカニズムによってFm θ は出現していると考えている。その理由の一つとして、過度のDopamine神経の興奮を抑制するために、DiazepamによってGABA作動性神経の活動を促進させると、精神作業中のFm θ 出現率が有意に上昇することがあげられる⁸⁾⁹⁾。これより、我々は、課題遂行に不要な内界および外界からの余計な情報の入力を抑制性神経の活動促進によって、積極的に遮断できているときの神経電気活動が頭皮上で記録されたものこそFm θ ではないかと推測する。さらに研究を進め、このことが確定できれば、疾患とは無関係な脳波であるためこれまで軽視されてきたFm θ に、新たな意義が加わるであろう。その意義とは、Fm θ による精神作業時の疲労蓄積を軽減するための新しい対処法の提供である。バイオフィードバック訓練によりFm θ の出現をある程度調整できること¹⁰⁾が知られており、これを応用すれば、長時間の精神作業中に作業を妨害するような不要な情報の入力を抑制することによって、リラックスした状態で無意識下の処理を増加させて、精神疲労の蓄積を防止できるかもしれない。

本稿の要旨は、第29回日本脳波・筋電図学会学術大会(東京)において発表した。

引用文献

- 1) 山口雄三：Fm θ (Ⅲ)，臨床脳波，25，425-431，1983
- 2) Mizuki, Y., Kajimura, N., Nishikori, S., Imaizumi, J., Yamada, M. : Appearance of Frontal Midline Theta Rhythm and Personality Traits. *Folia Psychiatrica et Neurologica Japonica*, 38, 451-458, 1984
- 3) 山口雄三：Fm θ (Ⅱ)，臨床脳波，25，276-281，1983
- 4) 石原務：Fm θ の出現要因について，臨床脳波，33，96-100，1991
- 5) Daubechies, I. : The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Trans. Information Theory*, 36, 961-1005, 1990
- 6) 浅田博，福田淳：前頭正中部 θ 律動と能動的注意の

- 持続機能, 日本神経回路学会誌, 8, 147-152, 2001
- 7) 苧坂真里子: ワーキングメモリと脳波, ワーキングメモリの認知神経心理学的研究, pp.98-113, 風間書房, 1994
 - 8) Suetsugi, M., Mizuki, Y., Ushijima, I., Kobayashi, T., Tsuchiya, K., Aoki, T., Watanabe, Y. : Appearance of Frontal Midline Theta Activity in Patients with Generalized Anxiety Disorder. *Neuropsychobiology*, 41, 108-112, 2000
 - 9) 岡村法宜: Fm θ の出現に及ぼす塩酸チアプリドの影響, 愛媛県立医療技術短期大学紀要, 11, 19-27, 1998
 - 10) Inanaga, K. : Frontal midline theta rhythm and mental activity. *Psychiatry Clin Neurosci*, 52, 555-566, 1998
-

要 旨

車の運転者にかかる精神的負荷が異なる3種類の運転経路について, 乗用車を運転中の運転者より, 前頭正中線部の脳波, 耳朶容積脈波および水平眼球運動を記録した。運転状況と上記の生体信号を解析して, Fm θ が出現しやすい状態における運転者の脳内情報処理様式について検討した。運転者がリラックスし, 注意が運転自体から逸れにくい状況で, ワーキングメモリにある程度の負荷がかかるような処理が必要なとき, 高率にFm θ は出現していることが推測された。これらの推測とこれまでの研究結果をもとに, 作業遂行の妨害となる情報が脳内の実行系に流入することを, 抑制性神経活動の促進によって積極的に遮断している際に, 頭皮上で記録される脳波活動こそFm θ であるとする新しい仮説を立てた。