多点フリッカを用いた作業負担度の評価法*

大崎 紘一**, 菊池 進**, 三宅 博文***

The Evaluation Method of Workload by the Multi-Point Critical
Flicker Fusion Frequency (MCFF)

by Hirokazu OSAKI, Susumu KIKUCHI, and Hirofumi MIYAKE

As FA and OA have been popularized in various stages of the production system, heavy mental work is extremely increased now. The CFF (critical flicker fusion frequency) measured at the central retina of both eyes has been used widely to evaluate the mental workload. In this paper, we develop the equipment measuring CFF at the central and the peripheral retina (MCFF). The CFFs at the central retina of both eyes, or each eye, show high correlation with each other, as do those at the peripheral retina. But there is a different tendency between the former and the latter. The variation of spectrum of brain waves (α , β , θ , δ) can be estimated from MCFF, except for CFF, at the central retina of both eyes (usual CFF). From these results, it is considered that MCFF proposed can be used to estimate the mental workload more precisely.

Key Words: Production System, Safety Engineering, Man-Machine Interface, Workload, Retina, Visual cortex

1. 緒 言

近年, 人間の行う作業は, 自動組立機構や産業用ロボットの発達によって, 肉体的作業が減少している反面, VDT (Visual Display Terminal)の操作や, VDTによる監視作業などの精神的負担の大きい作業が増加している。そして, 精神的な負担の変化を比較的簡単に調べる有効な方法は少なく, フリッカ値(以下, CFFという)が広く利用されている⁽¹⁾。しかし, 従来のフリッカ測定装置では, 指標が1点であり, 両眼視によるCFFだけを測定しているため, 負担度を詳細に分析するには不十分であった。

ところで, 網膜は, 網膜上の中心窩を通る水平線により, 上部(S)と下部(I), 垂直線により, 耳側(T)と鼻側(N)の4部位に分かれており, 各部位は, 視神経, 神経交差, 外側膝状体を通り, 左右脳の視覚野の異なる部位へつながっている⁽²⁾。そこで, 周辺網膜上4部位でのCFF, 両眼と片眼中心窩でのCFF, 計11個のCFF(以下, MCFFという)を測定する多点フリッカ測定装置を著者らが開発している⁽³⁾。

そこで本研究では, 多点フリッカ測定装置で測定したMCFFの相互関係, MCFFと脳波との関係, そして, 作業を负荷したときの変化について調べた。

2. 実 験 装 置

図1に装置の概略図を示した。装置は, 接眼部, 電源部, 制御と演算を行うマイクロコンピュータ, 結果を出力するプリンタ, 結果の記録を行うフロッピーディスクで構成されている。

図2に接眼部の筒内部を示した。接眼部の視野内には, 5個の指標とその周辺視野を設けた。中心の視標(C)は, 赤色発光ダイオードで直径2.5 mm, 輝度100 cd/m²に設定している。この指標は, 周辺視のCFFを測定する際, 視線を中心に固定するための目標として使用する。他の4視標(P₁, P₂, P₃, P₄)は, 中心視標(C)を中心とした半径30 mmの円周上に位置しており, 中心視標からの視角が5.5°になるように配置した⁽⁴⁾。そして, 視標には緑色発光ダイオードを使用し, 直径2.5 mm, 輝度120 cd/m²に設定している。すべての視標の周辺視野は乳白色で, 直径25 mm, 輝度25 cd/m²に設定している⁽⁵⁾。

本装置では, 片眼のみによる測定を行う場合, 接眼部は, 視標Cを中心窩上に合わせるために左右に

* 昭和59年3月22日 関西支部第59期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和60年6月7日。

** 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

*** 正員, (株)ケラレ (〒713 倉敷市玉島乙島7471)。

移動できる。そして、移動するときの明順応の影響を少なくするために、測定しない目の視野内にも周辺視野（直径 25 mm, 輝度 25 cd/m^2 ）を設けている。

3. 測定方法

まず両眼視による CFF の測定を行う。図 2 の指標 P_1 とその周辺視を点灯して両眼で CFF を測定する。次に、接眼フードを左に移動させ右眼での測定を行う。指標 P_1 とその周辺視野を点灯させ、右眼中心視での CFF を測定する。次に、指標 C とその周辺視野を点灯する。指標 C を中心窩でみながら、 P_1, P_2, P_3, P_4 の順に周辺視での CFF を測定する。そして、接眼フードを右に移動し、左眼での測定を右眼と同様に行う。

4. 解析方法

両眼視による CFF を BCF, 左眼中心視と右眼中心視の CFF をそれぞれ LCF, RCF とする。左眼中心視

図 2 接眼筒内部

図 2 接眼筒内部

では、左眼耳側下部の CFF を LTICF, 左眼耳側上部を LTSCF, 左眼鼻側上部を LNSCF, 左眼鼻側下部を LNICF とする。右眼周辺視についても同様に RTICF, RTSCF, RNSCF, RNICF とする。これらの周辺視の CFF と接眼筒内視野の対応関係を図 3 に示した。

左眼耳側 (LTICF, LTSCF) と右眼鼻側 (RNICF, RNSCF) は左脳視覚野へ、左眼鼻側 (LNICF, LNSCF) と右眼耳側 (RTICF, RTSCF) は右脳視覚野へ入っている⁽⁶⁾。

4.1 MCFF チャート これら 11 個の CFF を表示した図を MCFF チャートという。MCFF チャートは二つの部分からなり、一方は、BCF を中心として左側に左眼中心視と左眼周辺視、右側に右眼中心視と右眼周辺視の CFF, または変動率を示したもので、他方は、大脳視覚野別に周辺視を示したものである。

4.2 MCFF と脳波との関係 脳波は大脳皮質, その他の脳の神経活動から導出される電位変動であり, 脳の活動状態を知る手掛かりを与えるので, 臨床診断に広く利用されている。そこで, CFF は大脳の興奮度を示す尺度と考えられているので, MCFF と脳波との関係を明らかにすることができれば, MCFF から大脳の活性度を推定することが可能となる⁽⁷⁾。

現在脳波は、周波数から次の四つに分類されている。

- (1) δ 波 (δ -wave): 0~4 Hz の波で、深い睡眠時に現れる。
- (2) θ 波 (θ -wave): 4~8 Hz の波で、浅い睡眠時に現れ、 δ 波とあわせて徐波という。

図 3 接眼筒内視野と視覚系との関係

- (3) α 波 (α -wave): 8~13 Hz の波で, 正常覚醒時に現れる。
- (4) β 波 (β -wave): 13 Hz 以上の波で, 正常活動時に現れる。

脳波測定に際して, 被験者は安静, 覚醒の状態とし, 開眼状態では α 波が著しく減少するため閉眼とした。脳波測定用電極は, 単極誘導として, 視覚野に近い後頭の頭頂部に左右 1 箇所ずつと, 両耳たぶに付け, 左右の脳の脳波を測定した。脳波出力は A-D 変換の後, スペクトル分析をして, 0.5 Hz ごとのパワースペクトラムを 0.5 Hz から 50 Hz の間で求め, 各脳波 (δ , θ , α , β) の比率をパーセントで求めてデータとした。そして, 各脳波の比率と MCFF との関係は脳波の比率を従属変数として MCFF から重回帰分析によって調べた。被験者は, 年齢 21~24 歳の工学部男子学生 14 人であった。測定は任意の時間帯で行い, 脳波測定後ただちに MCFF を測定した。

4.3 MCFF からみた作業負担度について 作業負担度を推定するための指標として, 作業前後に MCFF を測定し, 次の式で示す変動率を用いた。

$$\text{変動率}(\%) = \frac{\text{作業後の CFF} - \text{作業前の CFF}}{\text{作業前の CFF}} \times 100$$

変動率が正で大きい場合を上昇形といい, 負荷により一時的に活性度が高くなる。負で大きい場合を下降形といい, 負荷により活性度が低く (一般的な言葉では疲労という) なる。そして, 変動率が零に近い場合を恒常形といい, 負荷に対して活性度があまり変化していないと評価している⁽⁸⁾。その際, 変動率が大きく変化するほど小さな作業負担も検出でき, 検出感度が高くなる。

MCFF の中には, 検出感度の高いものもあるので, 従来の CFF, すなわち BCF の変動率を含めて, 11 個の変動率から作業負担度の評価を行う。

著者らの従来からの研究では, 数学問題のレベルによる差を, CFF の変化からはっきりと見る事ができなかった。そこで MCFF では, どのように数学問題のレベル差が現れるかを見るために, 作業として次の 3 種類の問題とした。

M-1: 四則演算のみ

M-2: 中学校数学程度

M-3: 高等学校数 I 程度

M-2, M-3 は, 文章題を含んでいるが, 図形, 関数の問題を除き, 代数問題を多く含む問題とした。

これらの作業を, M-1 で 34 人, M-2, M-3 で 21 人の工学部男子学生 (年齢 21~24 歳) に行わせた。また, M-1 の作業時間は 20 min, M-2, M-3 の作業時間は

30 min とした。

5. 結果ならびに考察

5.1 MCFF の平均値と標準偏差 年齢 21 歳から 24 歳の工学部学生 41 人, のべ人数 390 人について MCFF を測定し, 各部位の CFF の平均値と標準偏差を図 4 に MCFF チャートで示した。

MCFF の分散についての均一性を, Bartlett の検定法⁽⁹⁾を用いて解析した結果, MCFF 全体では, 有意差があった。そして, 中心視である BCF, RCF, LCF と周辺視の RTSCF の 4 部位で等分散 (10.03~12.68) となった。また, RTSCF を除いた周辺視の 7 部位で等分散 (17.50~20.28) となり, 中心視の分散の方が周辺視の分散より小さくなることが示された。

また, 分散が等しくない場合の平均値差の検定⁽⁹⁾を行った結果, MCFF 全体では有意となり, 平均値に差のあることが示された。中心視の 3 部位間, 周辺視の 8 部位間, 左眼および右眼の周辺視の各 4 部位間でも有意となり, 中心視間, 周辺視間でも平均値に差のあることが示された。

以上の結果から BCF は, 43.56 ± 3.26 Hz で最も高く, つづいて RCF (42.25 ± 3.17 Hz), LCF (40.78 ± 3.53 Hz) の順に低くなり, 平均値には有意差があるが, 分散は等しくなることが示された。そして, 周辺視の CFF は 36.92~39.37 Hz の間にあり, 中心視よりも平均値が有意に低くなり, また分散も中心視より有意に大きくなった。また周辺視間では, RTSCF と RTICF の平均値は他の周辺視の CFF の平均値より有意に高くなるが, RTSCF を除く部位の分散では, 互いに等分散となることが示された。

5.2 MCFF の相互関係 MCFF 間の相関係数

図 4 MCFF の平均値・標準偏差の MCFF チャート

表 1 MCFF と脳波との関係

Brain wave	MCFF	Left cerebrum				Right cerebrum			
		δ	θ	α	β	δ	θ	α	β
Left visual retina	LTI	7, 0.78	8, 0.89	5, 0.79	10, 0.87	6, 0.83	6, 0.82	5, 0.87	4, 0.74
	LTS	9, 0.90	3, 0.65	10, 0.97	7, 0.81	7, 0.87	7, 0.86	6, 0.88	9, 0.86
	RNI	4, 0.66	10, 0.90	2, 0.58	6, 0.77	4, 0.82	10, 0.95	8, 0.89	6, 0.81
	RNS	1, 0.32	7, 0.87	1, 0.47	9, 0.86	8, 0.88	8, 0.88	7, 0.88	1, 0.34
Central retina	LCF	5, 0.69	1, 0.49	7, 0.86	1, 0.28	9, 0.93	3, 0.77	10, 0.90	2, 0.55
	BCF	11, 0.97	11, 0.90	11, 0.99	8, 0.82	10, 0.94	1, 0.45	3, 0.75	10, 0.87
	RCF	2, 0.53	5, 0.81	8, 0.88	11, 0.87	2, 0.69	11, 0.96	2, 0.64	11, 0.87
Right visual retina	LNS	8, 0.81	6, 0.85	9, 0.91	4, 0.64	1, 0.48	4, 0.80	1, 0.50	7, 0.82
	LNI	10, 0.95	2, 0.61	3, 0.63	2, 0.54	11, 0.94	9, 0.94	4, 0.83	8, 0.84
	RTS	6, 0.74	9, 0.90	6, 0.81	5, 0.73	5, 0.83	2, 0.67	9, 0.89	5, 0.79
	RTI	3, 0.63	4, 0.70	4, 0.74	3, 0.58	3, 0.77	5, 0.81	11, 0.90	3, 0.70
mean (%)		66.29	9.69	20.36	3.66	60.09	11.14	24.85	3.92
s.d. (%)		10.83	3.11	8.79	2.25	10.81	3.47	9.60	1.83

a : Selected order
 b : Multiple correlation coefficient

図 5 MCFF の相関係数

を図 5 に示した。両眼および片眼中心視での BCF, LCF, RCF の間では相関係数が高く、BCF と RCF で 0.88, RCF と LCF で 0.88 と最も高い値を示した。BCF と LCF では 0.82 となり、少し低い値を示した。両眼中心視の BCF と片眼中心視の LCF, RCF は、いずれも網膜の中心窩近傍で測定しているため、このような結果となったと考えられた。

中心視の CFF と周辺視の CFF の間では、相関係数が 0.49~0.71 で、中心視の CFF 間よりも低くなり、両者間の関係はあまり高くないことが示された。

周辺視の CFF では、右眼において相互間の相関係数が 0.80~0.88, 左眼において、0.82~0.88 となり、各眼の周辺視の CFF 間で高い相関係数のあることが示された。しかし、右眼周辺視と左眼周辺視の CFF の間では、相関係数が 0.73~0.83 となり、少し低い値を示した。このことから、同一網膜上で測定した CFF であっても、中心視の CFF と周辺視の CFF との関係よりも、周辺視相互の関係の方が高くなることが示された。

5.3 MCFF と脳波との関係 左右の各脳波 (δ , θ , α , β) の比率を MCFF で重回帰分析を行い、前進選択法⁽¹⁰⁾によって選択された CFF の順位と重相関係数の値、および、各脳波の比率の平均値と分散を表 1 に示した。

脳波のスペクトラム比率を MCFF から推定する際

に変数選択された 5 CFF を用いると、重相関係数は右脳で 0.79~0.87, 左脳で 0.69~0.81 となり、MCFF すべてを用いると重相関係数は、右脳で 0.87~0.96, 左脳で 0.87~0.99 となり、左右の後頭、頭頂部での各脳波比率を MCFF で予測することの可能性が示された。

右脳の各脳波比率を MCFF で説明する場合、右脳視覚野の CFF の内で上位に選ばれたものが、LNSCF (1 位が 2 回), LNICF (4 位が 1 回), RTSCF (2 位が 1 回), RTICF (3 位が 2 回)であり、右脳の脳波では右脳に関する CFF が重要となった。また左脳の脳波比率では、左脳視覚野の CFF の内で上位に選ばれたものが、LTSCF (3 位が 1 回), RNICF (2 位が 1 回), RNSCF (1 位が 2 回)であり、左脳に関する CFF が重要となった。しかし、他の CFF も無視できない。例えば、LCF は 1 位で 2 回、2 位で 1 回、3 位で 1 回選ばれており、RCF は 2 位で 3 回選ばれている。つまり、脳波の比率は、MCFF 全体で説明可能であると考えられた。従来の CFF である BCF は選ばれる順位が遅く、10 位で 2 回、11 位で 3 回選ばれており、従来の BCF の変化では、脳波比率を説明できないことが明らかになった。

5.4 MCFF からみた作業負担度について 負荷した数学作業、M-1, M-2, M-3 の 3 作業での変動率の平均値を、図 6 に MCFF チャートで示した。

BCF の変動率は、四則演算のみの (M-1) で -1.96 % と最も低い値を示し、中学校程度の問題 (M-2) で -0.57 %, そして、高等学校程度の問題 (M-3) で -0.15 % という順に、問題のレベルが高くなるに従って、変動率は高い値になった。この傾向は、LCF, RCF でも同様であり、結局、両眼および片眼の中心視での変動率は、M-1, M-2, M-3 の順に問題の程度が難しくなるほど高い値を示した。また、3 作業とも中心視では BCF の変動率が低く、RCF, LCF の順に高くなった。BCF が従来の CFF であり、問題の程度が高く

図 6 数学作業による変動率の MCFF チャート

なるほど変動率が低くなる理由を説明することはできない。

周辺視での変動率は、 -3.76% から 2.90% の間にあり、中心視で示された M-1, M-2, M-3 の順に高い値となる傾向ではなく、作業間の差が顕著になった。

左脳視覚野では、LTICF での変動率が、M-1 で -0.81% 、M-2 で -0.51% 、M-3 で -0.63% と、3 作業とも近い値となった。LTSCF では、M-2 と M-3 の変動率が 2.0% 近傍であるのに対し、M-1 の変動率は逆に、 -2.0% 近傍となった。M-2 の変動率はすべての部位で最も高く、LTICF を除くとすべて正值となった。また、M-3 では LTSCF を除いて負値、M-1 ではすべて負値となっているが、RNSCF を除くと、M-2, M-3, M-1 の順に変動率が低くなった。

右脳視覚野では、LNSCF の変動率が M-1 で -0.34% 、M-2 で -0.82% 、M-3 で -0.47% と近い値を示した。作業間の差が最も顕著となった RTICF では、M-1 で -0.18% 、M-2 で 2.90% 、M-3 で -3.76% となった。M-2 は LNSCF を除く 3 部位で正值、M-1 はすべての部位で $-0.18\% \sim -0.63\%$ の間で負値、M-3 はすべての部位で負値となっている。そして、LNSCF を除くと M-2, M-1, M-3 の順に変動率が低くなっており、左脳視覚野と異なる傾向を示した。

以上の結果から、4 則演算のみを行った場合の脳の活性度は全体に低く、中学校程度の問題を行った場合には、全体的に活性度は高くなる。しかし、高校程度の問題を行った場合には、特に右脳の活性度は低くなっている。

このように、従来の CFF では検出できなかった作業負担を、周辺視野の CFF から脳全体の活性度と

して推定することができるため、今後は、さらに種々の作業において MCFF による分析を行う予定である。

6. 結 論

著者らの開発した多点フリッカ測定装置により測定した多点フリッカ値 (MCFF) について、MCFF の相互関係、MCFF と脳波との関係、および、MCFF からみた作業負担度を調べた結果、次のことが明らかになった。

(1) MCFF の中で、従来のフリッカ値である両眼中心視の CFF (BCF) が最も高い値 (43.56 ± 3.26 Hz) となり、つづいて片眼視の RCF (42.25 ± 3.17 Hz), LCF (40.78 ± 3.53 Hz) となる。そして、周辺視の CFF は、 36.92 Hz から 39.37 Hz の間の値となり、そのうちで、RTSCF (39.37 Hz), RTICF (38.52 Hz) が高い値を示した。

(2) MCFF の相関関係は、両眼および片眼中心視の CFF の間で最も高くなる。また、各中心視の CFF と周辺視の CFF との相関関係は低くなるが、周辺視の CFF の各々の間では、相関関係は高くなることが示された。

(3) δ , θ , α , β 波で示される各脳波の比率の変化は、MCFF を独立変数とした重回帰方程式によって説明可能である。その場合、MCFF の内で特に重要な部位はないが、従来のフリッカ値である BCF だけでは、脳波の比率の変化を説明することは不可能であり、MCFF の有効性が示された。

(4) レベルの異なる数学問題を行うと、四則演算のみでは、MCFF からみた脳の活性度は低く、中学校程度の問題では、全体に高く、高校程度の問題では、右脳の活性度は低くなることが示された。

文 献

- (1) 桐原・ほか 7 名, 機能検査法, (昭 37), 239, 同文書院。
- (2) 石原, 小眼化学, (昭 33), 4, 金原出版。
- (3) Osaki, H., ほか 4 名, *Proc. 8th Cong. Int. Ergonomics Association*, (1982), 23.
- (4) 福田, テレビジョン学会誌, 32-3 (昭 53), 210.
- (5) 大崎・ほか 2 名, 照明学会誌, 61-3 (1977), 152.
- (6) リーガン, D., サイエンス, 10-2 (昭 55), 23.
- (7) 中島・本間, 数理科学, 21-7 (昭 58), 38.
- (8) 大島, 疲労の研究, (昭 39), 70, 同文書院。
- (9) スネデガー, G. W., 統計的手法, (1966), 210, 岩波書店。
- (10) 大崎・ほか 2 名, ベーシックプログラムによる統計手法, (昭 47), 101, 同文書院。

討 論

〔質問〕 西山徳幸・長沢啓行〔大阪府立大学〕

(1) 精神的負担度を従来の1点の値ではなく、11点の値が測定できる装置を開発し、これを用いて得られたデータを解析されていることに興味をもった。しかし、一つの作業に対して一人の作業員から得られる11点の値(変動率)をどのようにまとめて負担度とするのか(作業負担度の評価法)が述べられていない。ご説明願いたい。

(2) MCFFで脳の働き(活性度)を評価しているが、因果関係から見ると逆転しているように思われる。脳の働きとMCFFとが一対一対応であると仮定しなければ、MCFFから脳の働きを評価することは不可能だが、このように仮定される根拠は何か。また、種々の脳波に対して、MCFFを観測されていると思われるが、参考にしうるデータがあれば示していただきたい。

〔回答〕 (1) 本報では、主として測定装置、測定法、従来のCFFおよび脳波との関係を述べている。現在測定している作業の種類や、被験者数が少ないことから、各部位の変動のパターンが確定せず、ご指摘の11個の値からまとめて負担度を示す方法については、検討中である。11個の値を使用した個人の評価法としては、脳の部位別に分類したCFFの変化を示す方法(付図1では9:00, 12:00, 15:00, 18:00のCFFの傾向を示し、値が大きいほど活性度が高い)を

付図 1

現在開発中である。

(2) MCFFは、視覚野を通して大脳の活性度を見るものであり、これで大脳すべての現象を説明できるとは考えていない。しかし、従来のCFFに比べ、MCFFと視覚野に近い脳波との関係が示されたために、従来定性的にいわれていた両者の関係を、定量的に示すことができたと考える。それゆえ、ご指摘のあった両者の因果関係を、現在さらに検討している。