

疲 勞 の 測 定 (I)

フリッカー法の背景

浜 口 恵 治

(文理学部哲学科心理学研究室)

The Measurement of Fatigue (I)

— The Background of the Flicker Method —

Keiji HAMAGUCHI

1. 序

疲労の概念について、大島⁽⁶⁾は疲労の概念付けの歴史を種々にたどり、「疲労そのものはあくまでも直接我々の計測の対象となるものではなく、『主として主観的な感じ、客観的に計測される種々なる現象、仕事の内容の変化等をもとにして抽象化された一つの約束された概念である。』とすることができる。」と述べ、さらに「疲労は生体におけるなんらかの歪みであって、Disfusion, Disorganizationなどと総括できるものである。そしてこの場合には、人間の生理的活動にも変化をきたし、機能の変化、物質変化、主観的訴え、能率の変化などを生ずるものである。」と付け加えている。これに対して、伊吹山⁽²⁾は、「疲労なる言葉は種々なる意味に取られ問題を明確にするのに不便である。むしろ、いわゆる疲労を生体の機能の低下として扱っていく方が良い。」と主張している。又、内籾⁽¹³⁾は、「疲労は過度の機能行使によって惹起された生体の生理的一過性の機能減退である。」と、生理学の立場で定義している。この様に疲労の概念を一義的に定義することは必ずしも容易でないが、一般に、疲労は肉体的、精神的負荷によって結果する機能低下として論じられているとみてよい。

さて、このいわゆる疲労の測定であるが、「産業疲労検査の方法」⁽⁷⁾、「労働生理ハンドブック」⁽⁸⁾において種々なる機能検査法が提唱されている。そのうち、「フリッカー法」が一般に広く用いられている。フリッカー法とは、光を断続させて、それが連続光としてみえるか、断続光としてみえるかの境目の閾値を、そのときの毎秒当り断続回数でしめたものがCFF (critical flicker frequency)であり、このCFFの変動をもって疲労を測定する方決である。一般に、疲労によりCFFは低下するといわれている。本論では、このフリッカー法がいかなる背景のもとに疲労の測定法として用いられてきたか、又、妥当であるかを論述してゆきたい。

2. 負荷による生体の生理的变化

生体に肉体的、精神的負荷を加えることによりいかなる生理的变化が生じるか。肉体的、精神的とは生体に本質的な差を及ぼすわけではないので、ここでは肉体的負荷に原因を限って論述することとし、以下の記述では単に「負荷」と略す。負荷の方法として実験的には、エルゴメーター (ergometer, 指にて錘を引き上げる装置) や、自転車エルゴメーター (bicycle-ergometer, 自転車の後輪に抵抗が掛るよう工夫された装置) がよく用いられる。Moss, F. A. 等⁽⁴⁾は、自転車エルゴメーターによる15分間負荷条件における生体の種々なる生理的变化を測定した。その結果は(表1)に示す。この結果からみると、脈搏・血圧・呼吸・酸素消費率が増加し、負荷により生体には

酸素及び栄養の補給の増加が行なわれていることがわかる。負荷にもかかわらず、酸素や栄養の消費と補給のバランスが平衡状態にあれば生体の機能低下は結果しないだろう。しかし、消費が補給を上回ればどうなるか。それは、CO₂ 結合力と血糖量の減少によりみることができる。「炭水化物の燃焼により、CO₂ が発生する。普通の状態では、CO₂ は血液により組織 (tissues) から肺 (lungs) へ輸送されて平衡状態にあるが、負荷が続くと CO₂ は次第に組織に蓄積される。その結果組織における酸化の過程 (the processes of oxidation) に支障が起る。」⁽⁴⁾。(表1)をみる

(表1) 負荷による生理的变化の平均 [文献(4)]

脈 搏 (Pulse Count)	+ 112.7%
血 圧 (Pulse Pressure)	+ 77.0%
呼 吸 (Respiratory Rate)	+ 60.5%
酸素消費率 (Metabolic Rate)	+ 43.0%
CO ₂ 結合力 (CO ₂ Combining Power of Blood plasma)	- 41.0%
血 糖 (Blood Sugar)	+ 12.0%

と、CO₂ 結合力が減少している。このことは、その減少に相当する CO₂ の蓄積が組織における酸素供給を阻害していて、組織は酸素欠乏 (anoxia) 状態にあるものと考えられる。又、血糖量においては、「負荷により血糖量は消費されるが、負荷の初期段階では貯蔵のグリコーゲンが動員され、安静時よりかえって上昇する。しかし、負荷が持続すると次第に減少してゆく。」⁽⁴⁾。(表1)では、かえって血糖量は平均では増加しているが、被験者10人中3人に減少がみられるところから、負荷初期における血糖増加から負荷持続により減少に向う時期に個人差があるためと考えられる。

このように、負荷により生体には酸素欠乏血糖量低下が引き起されていることがわかる。

3. 生理的变化とCFFとの関係

負荷により種々なる生理的变化がみられたわけであるが、この生理的变化は、CFFにいかなる影響を及ぼすであろうか。Simonson, E. and Brozek, J.⁽¹¹⁾は、種々なる生理的ストレス状態とCFFの関係について、「たいていのストレス状態に対してまだ探究の段階にあるが、酸素欠乏においてのみは信頼できる。」と述べ、それを支持するいくつかの資料を挙げている(表2)。

(表2) CFFに及ぼす模擬標高の影響 [文献(11)] (減少頻度/秒)

	被 験 者	摸 擬 標 高 (単位1,000フィート)						文 献
		10	11	12	14	18	20	
暗所視	4 人					0.3	1.4	(10)
明所視	4 人					2.4	3.0	(10)
明所視	5 人	1.3	2.0	2.1				(3)
明所視	8~24人	1.3			1.2	2.6		(1)
明所視	11 人					4.4		(9)
明所視	13 人	2.3						(12)

Birren, J. E. 等⁽¹⁾によると彼は低圧室 (low pressure chamber) にて、標高10,000・14,000・15,500・18,000フィートに相当する条件により酸素欠乏を操作し、それぞれの模擬標高 (simulated altitudes) におけるCFFと海面レベル (sea level) におけるそれとを比較している(表3)。被

験者は海面レベルで C F F の測定を受けた後、毎分 3,000 フィートの割合である模擬標高に上昇し、そこで 1 時間に等間隔 5 回の測定を受け、その後同割合で下降し海面レベルにもどった後ただ

(表 3) 各模擬標高の 1 時間の C F F [文献(1)]

標 高 (フィート)	被験者	☆	最 初 の 海面水準	1	2	3	4	5	最 終 の 海面水準
				0—9分	10—19分	20—31分	32—43分	44—45分	
頻度/秒									
10,000	24人	\bar{x}	39.9	38.9	38.8	38.7	38.8	39.1	39.8
		σ	1.6	1.8	1.8	1.8	1.7	1.8	1.8
14,000	12人	\bar{x}	40.8	39.1	38.9	39.2	38.8	38.3	40.1
		σ	1.7	1.9	2.0	2.0	2.2	2.0	2.2
15,500	17人	\bar{x}	40.1	39.0	38.6	38.5	38.8	38.8	39.6
		σ	2.6	2.3	2.2	2.2	2.1	2.3	1.9
18,000	4人	\bar{x}	40.9	37.8	36.7	37.0	36.7	36.9	38.1
		σ	1.3	1.7	1.2	0.9	1.7	1.5	1.4

☆ \bar{x} = 平均 σ = 標準偏差

ちに最後の測定を受ける。同様に、各々の模擬標高における測定を 3 日間にわたって繰り返す。その結果をみると、各模擬標高において C F F の下降がみられ、18,000 フィートでは急激な下降を示している。

4. 末梢組織と中枢神経系との関係

一見するに、負荷は一般的末梢組織に関係しており、C F F も視覚的末梢組織に関係しているように思われる。それがどうして一般的末梢組織に加えられた負荷による生理的変化が C F F と関係してくるのか。それには第 1 に、C F F と中枢神経系 (central nervous system, 以下の記述では CNS と略す。) との関係进行明らかにする必要がある。第 2 に、末梢組織の生理的変化と CNS の機能低下との関係を明らかにする必要がある。

Simonson, E. and J. Brozek.⁽¹¹⁾ は、C F F は網膜の機能に依存するのではなく、CNS の機能に依存するのであると、次なる諸事実により証述している。

a) 網膜循環系 (retinal circulation)

105 人の網膜血管の太さを計り、太い順番から 15 人、細い順番から 15 人を選び C F F を比較してみたところ、太さの差にかかわらず (太さの分散に重なりなし) C F F に統計的に有意な差が認められなかった。故に C F F は網膜循環系に依存するとは考えられない。

b) 単眼視と両眼視の比較

in-phase 両眼視条件 (左右眼共同時に明期又は暗期) と、out-of-phase 両眼視条件 (左眼明期のとき右眼暗期又はその逆) における C F F と、単眼視条件における C F F とを比較すると、

$$\text{in-phase 条件} > \text{単眼視条件} > \text{out-of-phase 条件}$$

なることが統計的に明らかである。これは CNS において、in-phase 条件では促進 (facilitation) が起り、out-of-phase 条件では禁止 (inhibition) が起っていると考えられる。

c) 刺激反射作用 (reflex stimulation)

聴覚刺激及びその他の感覚刺激を C F F の測定と同時に与えるとその効果が C F F の変化を引き起す。これは CNS において相互作用 (interact) が起っているためと考えられる。

d (大脳活動電位 (cerebralation potential))

眼へのチラツキ光照射は皮質電位活動 (cortical electrical activation) に変化を生じさせ又、ある頻度の範囲内においてチラツキ光の頻度と同調する。かかる同調は視覚回路 (visual pathway) の種々なる部位でもみられるが、部位により同調の限界が異なる。皮質はそのうち最もその限界の低い部位にあたる。故に、最も同調限界の低い部位がCFFを規定するとの理論的推定がなされ、CFFはCNSの機能に依存しているものと考えられる。しかし、主観の見えのCFFと皮質における同調限界が一致しているというわけではない。実際には皮質の同調限界はいくぶんCFFより低い。その原因として、被験者に痲酔をかけることにより通常状態よりいくぶん活動が低められている可能性が考えられる。

上述の如く、CFFがCNSの機能に依存していることは殆んど決定的であると考えられる。次に末梢組織の生理的变化とCNSの機能の関係について論述する。内田⁽¹³⁾によると、摘出した骨格筋を毎秒1回ぐらいの頻度で連続的に電気刺激を与え、その収縮曲線をゆっくりと回転する煤紙の上に記録すると、刺激の初めには収縮高が次第に増大し(階段現象)、この様な増大はやがて定常状態に達し暫時持続する。刺激をさらに続行すると収縮高は次第に減少しはじめ、終には反応しなくなる。これとよく似た作業曲線はエルゴメーターでも得られる。しかし、階段現象が必ずしも出現しなかったりする。ヒトの作業曲線は摘出した筋肉の場合と異なり、生体に従属した条件のもとで得られたものである。つまり、筋肉の他に神経系の参加が考えられる。カエルの神経筋標本を作り、坐骨神経を刺激して間接的に筋収縮を起させる。毎秒1~2回の頻度で刺激を長くつづけていると筋の収縮高が次第に減少し、終には収縮が起らなくなる。このとき支配神経を介することなく筋肉を直接的に刺激すると、初めと殆んど同じ高さの強い筋収縮が起る。筋肉にはまだこの様に余力が残っているにもかかわらず収縮が起らなくなるということは、その原因が神経系にあると考えられる。神経筋標本をつくり、神経線維の終板近傍に微小電極を刺入し、その活動電位と筋細胞の活動電位を記録すると、神経の刺激反復によりやがて後者は記録できなくなるが、前者はまだ記録できる。このことから、神経筋接合部にその原因が求められる。又、節後線維を逆向性に刺激反復して節前線維からの反応の記録と、逆に節前線維を刺激して節後線維からの反応の記録とを比較すると、後者においてより速やかなる反応の減弱が見られる。前者は神経節でシナプスを形成していないが、後者ではシナプスを形成しているところから、神経線維は疲労しにくくシナプスが疲労しやすいことを示している。CNSは多数のシナプスからなる無数の神経系の回路網であるから、末梢組織に比較してきわめて疲労しやすいものと考えられる。

又、物質代謝においてもCNSは、本川⁽⁵⁾によると、ブドウ糖および酸素の消費が目立った代謝であって、しかも肝臓や筋肉とは異なりグリコーゲンやブドウ糖の貯蔵が少ないから、後から後から供給がなければ予備のブドウ糖はわずか40秒、予備の酸素はわずか10秒の間に消費し尽されてしまう。

以上、この様なことから、末梢組織を負荷した場合真先にCNSにその影響が現われてくると考えらる。

5. ま と め

上述の背景から、フリッカー法による疲労の測定は妥当性のあるものと結論できる。つまり、一般的末梢組織に加えられた負荷は生体に生理的变化、とくに酸素欠乏、血糖量低下を引き起す。この変化は末梢よりも先ずCNSに影響を及ぼしその機能を低下させる。その機能低下はCFFに反映されCFFの低下となって現われる。

REFERENCE

1. BIRREN, J. E., M. B. FISHER, E. VLLMER, AND B. G. KING. Effects of anoxia on performance at several simulated altitudes. *J. Exper. psychol.* 1946, 36, 35-49.
2. 伊吹山太郎 Personal communication. 1966.
3. LILIENTHAL, I. L. AND C. H. FUGITT. Effect of low concentrations of carboxyhemoglobin on the 'altitude tolerance' of man. *Am. J. Physiol.* 1946, 145, 359-364.
4. MOSS, F. A., J. H. ROE, O. B. HUNTER, L. FRENCH. AND T. HUNT. The measurement of fatigue by physiological methods. *J. of Exper. Psychol.* 1931, 14, 423-438.
5. 本川弘一 大脳生理学 中山書店 1968, 67-74.
6. 大島正光 疲労の研究 同文書院 1964.
7. 労働の科学特集 産業疲労検査の方法 労働科学研究所 1952, 7, No. 6.
8. 労働生理ハンドブック 労働科学研究所 1962, 540-542.
9. SCOW, I., L. R. KRASNÓ, AND A. C. IVY. Immediaie and accumulative effect on psychomotor performance of exposure to hypoxia, high altitude and hyperventilation. *J. Aviation Med.* 1950, 21, 79-81.
10. SEITZ, C. P. Effect of anoxia on visual function; A study of critical frequency. *Arch. Psychol.* 1940, 257. 38.
11. SIMONSON, E. AND J. BROZEK. Flicker fusion frequency; Background and application. *Physiol. Rev.* 1952, 32, 349-378.
12. SIMONSON, E. AND P. WICHELL. Effect of high carbon bioxid and low oxygen concentration oh fusion frequency of flicker. *J. Applied. Physiol.* 1951, 3, 637-641.
13. 内齒耕二, 問田直幹 新生理学 上巻 第2版 医学書院 1968, 1177-1198.

(昭和45年9月28日受理)

