

持続的作業による人体骨格筋の随意性疲労

第1報 作業時間と疲労とについて

(人体の筋・神経の興奮性の研究 第LI報)

昭和34年12月26日受付

信州大学医学部第一生理学教室(主任: 和合卯太郎教授)

研究生 吉原達雄

Voluntary Fatigue by Continuous Work of a Skeletal Muscle in Man: 1st Report: the Relationship between the Duration of Work and the Fatigue,

(Studies on the Excitabilities of Nerve and Muscle in Man, LI)

Tatsuo YOSHIHARA

Department of Physiology, Faculty of Medicine, Shinshu University

(Direct. Prof.: U. Wago)

I 緒言

猫^{①②③}及び人体^{④⑤⑥}の骨格筋疲労には、主として、neuromuscular junctionに於ける acetylcholine, Ach 不足に因る transmission fatigue と、muscle fibre そのものの収縮能力欠乏に因る contraction fatigue がある。

更に和合^{⑥⑦⑧⑨⑩}が、人体骨格筋疲労を V/Vr 法で追求したところによると、骨格筋疲労は、原因である作業の様式によつて、種々相違のあることが判つた。即ち、上記の分類の他に、作業に随意努力 voluntary, efforts が関係するかどうかによつて、異つた性質をもつ随意性疲労と不随意性疲労とがある。

作業が持続して行われるか、反復繰返えされるか、によつても相違することも報告されている^{⑥⑦}。又懸垂運動を短時間持続して実施したとき、下肢骨格筋に、transmission fatigue の出現することも報告されている^⑫。

本実験では、主として、負荷なしで骨格筋に持続的作業を行わせ、作業時間の大小が、発生する疲労に如何に関係するかを調べた。又負荷したときの疲労及び反復して同様の作業を行かせた際の疲労との比較も実施したので報告する。

II 実験方法

A. 測定方法

人体で、一側の下肢を随意的に伸展させ、同一下肢の m. rectus femoris に現れる興奮性の変動を、作業直後から、この筋直接(「筋」)、又は間接(「神経」)に、 $0.75\mu\text{F}$. V/Vr 法^{④⑤}に依つて測定した。

B 測定装置その他

測定回路、刺激及び不閉電極、及び測定時必要な注意は、全て和合^{⑥⑦}の原法に従つた。

C 疲労を起す方法

疲労を起すため、被験者に下記の種々の作業をさせた。何れの場合も、終始 bed に仰臥させ、出来るだけ心身の安静を保つ様に努めさせた。1) 負荷のない持続拳上運動 仰臥位のまま、一側の下肢を bed 外側に出し、出来るだけ体の他の部位に力が入らない様に注意して、5分間、10分間、15分間、20分間、30分間及び40分間の種々の時間、随意性出来るだけ強く伸展させた。作業終了直後から、この下肢の m. rect. fem. の V/Vr 値を測定した。2) 負荷のない反復拳上運動 仰臥位のまま、bed 外側に出した一側の下肢を、毎分58~60回の頻度で、随意的に反復して、出来るだけ強く伸展させた。作業直後から、その側の m. rect. fem. の V/Vr 値を追跡した。3) 負荷のある持続拳上運動 1) 項の実験条件と略々同様であつたが、この場合、特に作業開始直前に、足関節に 5.02kg の重りを掛け、このまま、下肢を持続して出来るだけ強く伸展させた。その他の事項については 1) 項と全く同様であつた。

D 被験者

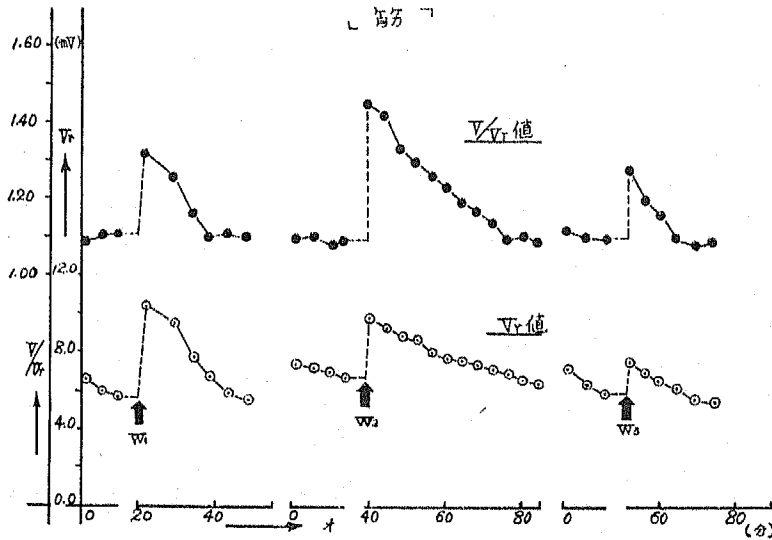
健康な男子学生10名を使い、実験に際しては、測定開始前少くとも1時間は休息させ、2時間は、絶対に飲食物をとらせない様注意した。

A 負荷のない持続挙上運動

仰臥位の被験者に、10分間、15分間、20分間、30分間及び40分間の5種類の時間、一側の下肢を bed 外側に持続して伸展させ、その直後から、この下肢の m. rect. fem. の V/V_r 値を、この筋直接又は間接に測定した。

V_r ⑥⑦については、従来の成績⑥⑦と同様、大

III 成績



第1図 負荷のない下肢を種々の時間持続挙上したときの骨格筋疲労 (W_1 , W_2 及 W_3 : 10分間, 20分間及40分間作業)

「筋」

作業時間	10分間			15分間			20分間			30分間			40分間			
	被験者 実験 例数	正常 値	i.r.	Km	正常 値	i.r.	Km	正常 値	i.r.	Km	正常 値	i.r.	Km	正常 値	i.r.	Km
A.A. (17ys) 平均	3	1.10	1.16	0.91	1.09	1.24	0.78	1.10	1.30	0.76	1.10	1.23	0.84	1.10	1.21	0.80
N.K. (17ys) 平均	3	1.12	1.16	0.81	1.10	1.25	0.74	1.08	1.34	0.80	1.10	1.32	0.75	1.09	1.18	0.79
T.M. (17ys) 平均	3	1.09	1.19	0.77	1.11	1.21	0.65	1.10	1.27	0.62	1.10	1.16	0.64	1.10	1.16	0.77
全平均		1.10	1.17	0.83	1.10	1.23	0.73	1.09	1.30	0.73	1.10	1.24	0.74	1.10	1.18	0.79

「神経」

A.A. (17ys) 平均	3	1.04	1.25	0.72	1.04	1.31	0.57	1.03	1.39	0.62	1.04	1.26	0.60	1.04	1.18	0.76
N.K. (17ys) 平均	3	1.04	1.24	0.73	1.05	1.31	0.61	1.04	1.37	0.51	1.04	1.24	0.62	1.03	1.22	0.69
T.M. (17ys) 平均	3	1.04	1.18	0.60	1.03	1.37	0.45	1.03	1.43	0.48	1.04	1.31	0.57	1.04	1.20	0.63
全平均		1.04	1.22	0.68	1.04	1.33	0.54	1.03	1.40	0.54	1.04	1.27	0.60	1.04	1.20	0.69
Km-Kn				0.15			0.18			0.19			0.14			0.10

第1表

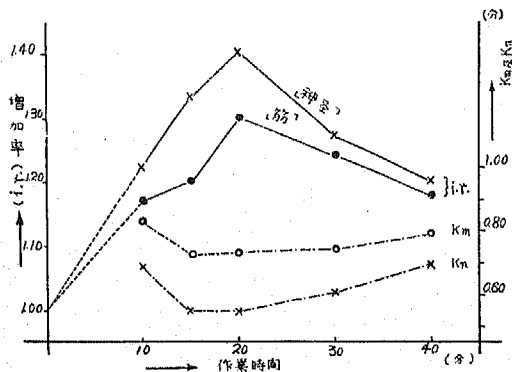
負荷のない下肢持続挙上による骨格筋疲労

多数の実験では運動直後最大値を示したが、然うでない場合も観られ、更に、回復の経過については、全ての測定に於て不明確であつた。

0.75μF の V/Vr 値は、何れの持続時間においても、その直後増大して最大値を示し、後漸次減少して、正常値に戻つた(第1図)(第1表)。

正常値を観ると、被験者別でも、持続時間別でも、「筋」の値は「神経」の値に比べて全て大きかつた。これは従来の成績⁽⁴⁾⁽⁶⁾とよく一致した⁽⁴⁾⁽⁶⁾(第1表)。次に、i.r. と持続時間との関係は、夫々の被験者について、全平均値も、同様に又「筋」でも「神経」でも、持続時間が、20分のとき最大値を示した。「神経」は「筋」に比べて全般的に大きかつた(第2図)。

Km 及び Kn⁽⁶⁾については、持続時間も、夫々の被験者別でも、全平均値について、Km > Kn の関係が一般に認められ、所謂「随意性疲労」⁽⁶⁾⁽⁷⁾の特性を示した(第1表)。次に持続時間と Km 及び Kn との関係は何れの場合も、15分間及び20分間のとき最低値を示した。他の何れの時間についてもより大きな数値を示したが、実験誤差⁽⁸⁾を考慮すると、特に著明な相違と観ることは出来なかつた(第2図)。



第2図 負荷のない下肢持続挙上による骨格筋疲労と持続時間との関係

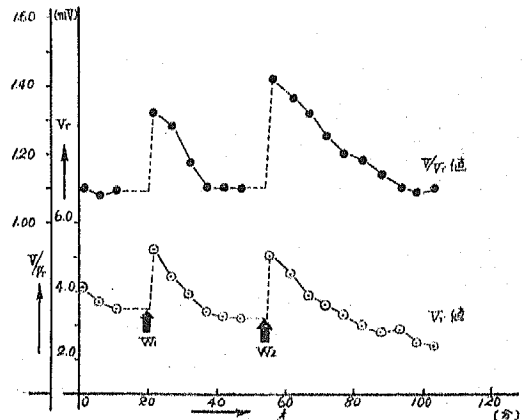
即ち、Km は0.83分(10分)、0.72分(15分)、0.73分(20分)、0.74分(30分)及び0.79分(40分)で、Kn については0.68分(10分)、0.54分(20分)、0.60分(30分)及び0.69分(40分)で、Km-Kn⁽⁶⁾は夫々、0.15分、0.18分、0.19分、0.14分及び0.10分であつた。

B 負荷のない持続挙上と反復挙上運動との比較

同一被験者で、同一測定時に、仰臥位のまま、5分

間負荷なしで一個下肢を bed 外側に持続して伸展挙上したときと、同一時間、毎分58~60回の頻度で反復挙上したときの疲労を、その下肢の m. rect. fem. について「筋」で比較実験を行つた。

V/Vr 値は、何れの実験条件のときも、前項と全く同様な経過を示した(第3図)。



第3図 負荷のない下肢持続挙上するときと、反復挙上するときの骨格筋疲労の相違(W₁:5分間持続挙上; W₂:5分間反復挙上)

被験者	「筋」			Km ₁ -Km ₂			
	反復挙上※	持続挙上+					
	正常値	i.r.	Km ₁	正常値	i.r.	Km ₂	
A. A. (17ys)	1.10	1.24	1.17	1.11	1.09	0.72	0.45
	1.10	1.29	1.27	1.09	1.21	0.75	0.52
	1.11	1.20	1.30	1.11	1.12	0.84	0.46
	1.11	1.19	1.31	1.12	1.11	0.82	0.49
	1.08	1.25	1.12	1.09	1.11	0.82	0.30
平均	1.10	1.23	1.23	1.10	1.13	0.79	0.44
T. M. (17ys)	1.11	1.18	1.35	1.10	1.12	0.83	0.52
平均	1.10	1.25	1.10	1.09	1.17	0.78	0.32
全平均	1.10	1.22	1.23	1.10	1.14	0.80	0.43

第2表 負荷のない下肢の持続及反復挙上による骨格筋疲労の比較(※毎秒58回~60回の頻度で5分間作業; +5分間持続挙上)

i. r. は、夫々の被験者でも、全平均値でも、反復挙上の場合には、持続挙上に比べて大きな測定値を示し、全平均は、前者が1.22であつたのに対し、後者は1.14であつた。従つて、同一運動時間にも拘らず、反復運

「筋」※

動が持続運動に比較して強く疲労を起し易いことが認められた(第2表)。

Km については、i. r. と全く同様で、夫々被験者別でも、全平均値についても、反復掌上のときに大きい値を示した。全平均を觀ると、反復掌上では1.23分、持続掌上では0.84分で、両者の差は0.43分であつた。即ち、前者は後者の約一倍半に相当し恢復時間がそれだけ長かつた(第2表)。

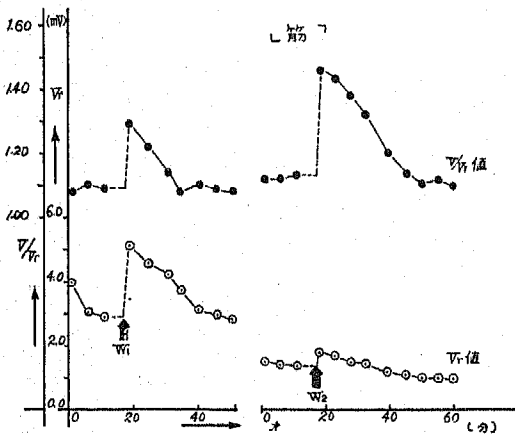
C 負荷のある持続掌上運動

A) 項の實驗条件と、これに足関節に 5.02kg の負荷を与えた場合とについて、同一被験者で同一測定日に「筋」について比較實驗を行つた。

V/Vr 値は前述の成績と全く同様な経過を示し、m. rect. fem. に疲労発生を觀た(第4図)(第3表)。

i. r. は、負荷を与えないときと比較して、被験者別でも、全平均値でも、全て大きな値を示した。時間は同一であるにも拘らず、負荷したときの i. r. は 1.31 で、負荷のないときと比較して約2倍であつた。

Km は、i. r. と同様、夫々の被験者についても、又平均値についても、負荷のあるときは、ないときに比べて大きな値を示し、1.03分で、その間に0.20分の差を示した。従つて、以上の成績から、疲労を起し易い傾向は、次の順に著明であつた。即ち、負荷のある持続掌上運動、負荷のない反復掌上運動、次いで、負荷のない持続掌上運動の順であつた。



第4図 負荷の有無によつて、下肢持続掌上のときの骨格筋疲労にみられる相違(W₁:負荷のない5分間作業; W₂:5.02kgの負荷のある5分間作業)

被験者	正常値	i. r.	Km	非負荷
A.A. (17ys)		1.11	1.29	1.04
		1.09	1.38	1.18
		1.12	1.23	1.08
		1.12	1.30	0.98
		1.10	1.28	1.00
平均	1.11	1.29	1.06	i. r. = 1.14 Km = 0.80分
K.A. (18ys)	1.10	1.34	1.00	(11例全平均)
N.T. (18ys)	1.09	1.29	1.03	
平均	1.10	1.31	1.03	

第3表 負荷した下肢の持続掌上による骨格筋疲労(※5分間作業、負荷5.02kg)

IV 討 論

A Km 及び Kn

人体の骨格筋は、60c. p. s. 以上の電氣的刺激を筋直接又は間接に与えると、その筋自体にも、体の他の骨格筋にも、transmission fatigue が発生したが、更に V/Vr 法では、Km=Kn の関係が觀られた^{⑤⑥⑦}。一方、voluntary effort による骨格筋作業では、前者と同様 transmission fatigue が現われたが、この際は Km > Kn と云う事實がみられた^{⑤⑥⑦}。

和田及び代田^⑧によれば、人体に20秒間持続して懸垂運動をさせたとき、Ach によつて抑制出来る transmission fatigue が、m. rect. fem. に現われ Km = Kn の関係を觀た。既報の m. rect. fem. についての Km 及 Kn の一部を示すと下記の様である。

1) 足関節に 5.02kg の負荷、15~90秒間持続的の下肢伸展掌上^⑧。

Km = 0.73~1.02分, Kn = 0.31~0.62分, 即ち Km > Kn

2) 頻度 180c. p. s. で、直接又は間接に、30~90秒間電氣刺激したとき^⑧。

Km = 0.35分, Kn = 0.38分, 即ち, Km = Kn

3) 5.02kg の負荷のある Mosso の ergograph を、10~20秒間反復曳かせたとき^⑧。

$K_m=0.81$ 分, $K_n=0.42$ 分, 即ち, $K_m>K_n$
 本実験では, 種々の時間 負荷なしで下肢を持続上
 上したときの疲労は, K_m は 0.72 分から 0.83 分,
 K_n は 0.54 分から 0.69 分の値を示し, これを持続時
 間別に観ると, 被験者別でも, 全平均値別でも, 全て
 何れもやや $K_m>K_n$ の傾向を示したが K_m-K_n ④
 については, 0.10 分から 0.19 分で特に著明な差異と
 は認められなかつた。

反復挙上運動を 5 分間持続したとき, *i. r.* 及び K_m
 の何れの点でも, 「筋」と「神経」との間に相違があり,
 $K_m>K_n$ の関係が観られた。 $K_m>K_n$ は 0.43
 分であつた。この傾向は被験者別にも認められた。こ
 れは bicycle-ergometer で実施した既報の成績とよ
 く一致した⑤。

足関節に 5.02kg の負荷で, 5 分間持続して挙上し
 したとき, K_m は 1.03 分で, 負荷のない場合に比べて,
i. r. 及び K_m の何れの点でも負荷のないときに比べ
 て著明に大きな値を示した。

以上の事実から, voluntary efforts で, 同一時間,
 一側下肢に作業させたにも拘らず, 運動条件の相違によ
 つて, *i. r.* の点のみならず, K_m 及び K_n の何れの
 点でも, 明かに相違したことは, voluntary efforts
 による骨格筋疲労の発生機序は, 単に peripheral の
 問題のみでなく, 骨格筋作業に対する中枢性の問題で
 あると, 説明することが出来た。

猶, 本実験で観られた疲労は殆んど全て $K_m>K_n$
 の関係を示したので, 所謂「随意性疲労」④⑤⑥と看
 做することが出来た。勿論, 従来成績から④⑤⑦⑧⑨
 全て transmission fatigue と推定出来たが, 未だ,
 Ach の効果を観てないので詳かでなかつた。

B 持続時間について

種々の頻度 (3 c. p. s. から 1250 c. p. s.) で, 直接
 及び間接に種々の時間持続して電氣的刺激した場合,
i. r. と持続時間との間には, 略々直線の関係があり,
 一方, K_m 及び K_n は刺激持続時間の増大にも拘ら
 ず, 換つて減少傾向を示した⑩。

負荷のない下肢持続挙上では, *i. r.* は, 持続時間 20
 分に最大値を示し, その前後では何れも減少を示し,
 一方, K_m 及 K_n は特に著明な変動が認められなかつ
 したが, 略々 *i. r.* と逆の傾向を示した。

この様な事柄からも, voluntary efforts による骨格
 筋疲労は, motor nerve impulses の frequency だけ
 の問題でなく, 中枢性の影響が関係したものである
 ことが判つた。

V 結 論

A) 出来るだけ安静にさせた被験者を, bed に仰臥
 させ, 一側下肢に, a) 負荷なしで, 種々の時間 (10
 分間, 15分間, 20分間, 30分間及び 40 分間) 持続し
 て伸展挙上させたとき, b) 5.02kg の負荷を足関節
 につけ, そのまま 5 分間持続して伸展挙上させたとき,
 及び, c) 負荷なしで, 毎秒 58~60 回の頻度で
 反復伸展挙上したときの三種の運動を行わせ, その下
 肢の m. rectus femoris に現れた興奮性の変動を,
 運動直後から, その筋直接又は間接に刺激して 0.75
 μF V/Vr 法で時間的に追求した。

B) 負荷なしで, 持続して種々の時間, 下肢を伸展挙
 上したとき, *i. r.* は夫々の被験者についても, 全平均
 値についても, 持続時間 20 分に最大値を示した。 K_m
 及び K_n は, 被験者別でも, 全平均値別でも, 上記
i. r. とは逆の傾向を示したが, 特に著明な変動と看做
 することが出来なかつた。持続時間別に, K_m と K_n を
 比較すると, 被験者別でも, 全平均値別でも, $K_m>$
 K_n で, 所謂随意性疲労の特性を示した。

C) 負荷なしで, 5 分間持続して, 反復伸展挙上
 (毎分 58~60 回) したとき, *i. r.* 及び K_m の何れも,
 B) の疲労に比較して, 大きな数値を示した。これは,
 B) の作業に比べて, 本実験の作業が, より強く
 voluntary efforts を必要とするためと思われたが, 特
 に K_m 増大の意義は詳かでなかつた。

D) 5.02 kg の負荷を足関節に与え, 5 分間持続し
 て下肢を挙上したとき, *i. r.* は B) 及び C) の疲労
 に比較して, 著しく増大したが, K_m は, (負荷のない
 持続挙上) < (負荷のある持続挙上) < (負荷のない反
 復挙上) であつた。

E) 本実験で得られた疲労は, 従来報告による
 と, transmission fatigue と推定出来たが, acetyl-
 choline の効果を観なかつたので明かでなかつた。

F) voluntary efforts による骨格筋疲労発生機
 序は, 単に末梢性のみでなく, 中枢性の問題を含むこ
 とがあると結論出来よう。

①Rosenblueth A. & R. S. Morison (1937) Am. J. Physiol. 119, 236
 ②Rosenblueth A. & J. V. Luco (1939) Ibid. 126, 58
 ③del Pozo E. C. (1942) Ibid. 135, 763
 ④和合卯太郎 (1952) 信州大学紀要 2, 17
 ⑤和合卯太郎 (1953) Ibid. 3, 106
 ⑥和合卯太郎 (1954) Ibid. 4, 82
 ⑦和合

卯太郎 (1956) 日本生理誌 18, 965
 ⑧高橋重実 (1957) Ibid. 19, 304
 ⑨岸 茂 (1959) 信州医誌 8, 296
 ⑩松原幹彦 (1959) Ibid. 8, 392
 ⑪松原幹彦 (1959) Ibid. 8, 738
 ⑫和田穆及代田順 (1959) Ibid. 8, 762
 ⑬山村栄 (1959) Ibid. 8, 1206
 ⑭山村栄 (1959) Ibid. 8, 1524