

人体骨格筋の ergograph による収縮疲労

(人体の筋, 神経の興奮性の研究 第25報)

昭和34年2月12日 受付

信州大学医学部第一生理学教室 (主任: 和合教授)

松 原 幹 彦

Contraction Fatigue of Human Skeletal Muscle caused by Mosso's Ergograph

(Studies on the Excitabilities of Nerve and Muscle in Man: XXV)

Mikihiko Matsubara

1st Institute of Physiology, Faculty of Medicine, Shinshu University

(Director: Prof. U. Wago)

I 緒 言

Mosso の ergograph の作業を, 高頻度でくり返しおこなったとき, 人体の m. ext. poll. long. に随意性の収縮が起こり, このさい, 筋に伝達疲労とよばれる疲労が生じる。この疲労の発生の原因は, neuromuscular junction において, acetylcholine (Ach) 分泌に関係することを前報^①で報告した。

この伝達疲労にたいして, 収縮疲労とよばれる疲労の型がある。すなわち del Pozo^②や Rosenbluth^③らはネコを使用して, 神経を通じて間接に骨格筋に低頻度の刺激を与え, 筋が完全強縮をおこしたときには伝達疲労は生じ難く, 筋線維自体の興奮性の低下した収縮疲労が生じ, 兩種疲労の成因がまったく刺激の頻度に関係するとのべている。

和合^{④⑤}は人体の n. femoralis を通じて, m. rect. femoris を毎秒20回の低頻度で間接に刺激し, また筋を直接に同様な頻度で刺激したとき, 筋に不随意性の収縮疲労の発生することを, V/Vr 法によりみとめ, 高頻度刺激により生じる伝達疲労とことなることを報告した。そしてこの低頻度刺激による収縮疲労は, Ach 投与により抑制されえないとのべている。

また高橋^⑥は同じく V/Vr 法により, 血行のあるヒキガエルを用い, その n. ishiadicus を通じて m. gastrocnemius を, 毎秒20回の低頻度で持続的に刺激し, この疲労は毎秒180回の高頻度で, 同じく刺激したとき生じる伝達疲労とことなることを報告した。

私は前記のごとく ergograph の作業により, m. ext. poll. long. に伝達疲労の発生することをみとめたが, さらにこの作業条件をかえて, 低頻度で随意性の作業をおこなった場合に, 伝達疲労とことなつた型の疲労, すなわち, 前者の実験のように随意性の収縮疲労が発生するか否かについて研究した。さらにこの

さい生じた疲労が, 作業しない側の m. ext. poll. long. の興奮性に, いかなる影響を及ぼすかについても, あわせ検討した。

II 実験装置および実験方法

実験装置は前報告とまったく同じであつた。

被験者としては年齢18~23才までの健康なる男女学生を使用した。実験中被験者は寝台の上に仰臥させ, Moss の ergograph の作業時には被験側の腕のみを横に伸ばして作業させた。

疲労をおこさせる方法: 測定側および非測定側の疲労の分類は前報と同じである。ただし作業頻度のみはメトロノームを用いて, そのリズムに合わせて遅くしたことが前報とことなる点である。

作業頻度は測定側で $1^{\text{回}}/1^{\text{秒}}$, $1^{\text{回}}/2^{\text{秒}}$ および $1^{\text{回}}/3^{\text{秒}}$ の3種に分けて10分間作業させて, 予備実験とした(第1表)。

これによると明らかに, 低頻度作業による疲労後最高値は, 前報にのべた伝達疲労より小さくなつており, したがつて増加率もまた小さくなるが, 疲労の回復に要する時間は逆に比較的長くなるために, 回復時間恒数は大きくなる傾向がある。

また3種類の頻度について比較してみると, 疲労後最高値は $1^{\text{回}}/1^{\text{秒}}$ において最高であり, $1^{\text{回}}/3^{\text{秒}}$ において最低となる。増加率も同様な結果を示すが, 回復時間は3者ともほとんど変りはなかつた。そのために回復時間恒数は $1^{\text{回}}/3^{\text{秒}}$ の頻度のときに, $1^{\text{回}}/1^{\text{秒}}$ のときの約2倍の値を示した。 $1^{\text{回}}/1^{\text{秒}}$ の値は前報の伝達疲労の値に近似することからして, むしろ伝達疲労に近いものと考えられ, $1^{\text{回}}/2^{\text{秒}}$ の頻度は $1^{\text{回}}/3^{\text{秒}}$ との中間の値をとるため省略し, $1^{\text{回}}/3^{\text{秒}}$ の頻度についてのみ実験をおこなつた。

なお本研究に使用した薬物は前報と同じく prosti-

Table 1.

Freq.	Exp. No.	normal V/Vr	V/Vr a. w. (max.)	i. r.	r. t.	Km
1/1 sec.	183	1.09	1.45	1.33	39 min.	1.2
"	197	1.08	1.27	1.18	26 min.	1.4
"	202	1.08	1.32	1.22	25 min.	1.1
average		1.08	1.34	1.24	30	1.2
1/2 sec.	151	1.07	1.22	1.14	25 min.	1.8
"	200	1.05	1.27	1.21	36 min.	1.7
"	201	1.06	1.24	1.17	29 min.	1.7
average		1.06	1.24	1.17	30	1.7
1/3 sec.	161	1.07	1.22	1.14	26 min.	1.9
"	166	1.05	1.28	1.22	47 min.	2.1
"	180	1.07	1.24	1.16	27 min.	1.7
"	193	1.08	1.18	1.09	23 min.	2.6
average		1.07	1.23	1.13	31	2.1

Freq.: Mosso の ergograph を使用した作業の頻度
 normal V/Vr: m. ext. poll. long. dext. の V/Vr 値の正常値
 V/Vr a. w. (max.): 作業後の m. ext. poll. long. dext. の V/Vr 値の最高値
 i. r.: 増加率
 r. t.: 回復時間
 Km: 回復時間恒数

gmine (塩野義製薬の Vagostigmine) および Ach (第一製薬の Ovistot) である。

III 実験成績

A. 測定側疲労

右拇指の伸展運動によつて Mosso の ergograph の作業を、10分間おこなわせ、m. ext. poll. long. dext. の V/Vr 値を測定した。作業後の V/Vr 値は第2回目の測定において、最高値を示す例が伝達疲労にくらべて多かつた。また第2表に示すごとく、前報の測定側の伝達疲労の場合と比較して、一般に作業後の V/Vr の最高値も低くなつてゐる。すなわち、同一被験者による最初の例 (A. O.) をくらべてみても、その値は本実験では 1.23 であり、伝達疲労の場合は 1.40 となつてゐる。

回復時間は疲労後最高値が低くなるにもかかわらず、それほど小さくはならず、さきの例 (A. O.) に関しては35分が31分と縮小したにすぎず、他の被験者 (M. O.) のごときは、逆に26分から34分に増加したのものもあり、このために回復時間恒数 Km は増加を示し、低頻度作業による疲労の特徴の一つとなつてゐる。また測定にさいしての V/Vr 値および Vr 値の

時間的変化は第1図左に示すようであるが、Vr 値に関しては一定の傾向を示さなかつたために論議を省略した。V/Vr 値は疲労後ゆるやかな勾配をもつて正常値にもどつてゐる。

なお第1図右方の V/Vr 曲線は作業時間を20分間に延長したものであるが、10分間と類似の曲線を示している。

第3表は、同じ作業を20分間おこなせたときの結果である。疲労後最高値および回復時間はいずれも増加するが、回復時間恒数は10分間のものとひとしく、同じ型の疲労であることを明らかにしている。

B. 測定側疲労にたいする Ach の効果

ergograph 作業開始の10分前に、前報の伝達疲労の実験で使用したと同程度の量の prostigmine を、5分前に同じく Ach を皮下注射し、のち作業をおこなせた場合、全例において、注射をおこなわない場合とまったく同様な V/Vr 値を示した。

伝達疲労においては、この量の作業前注射で、すでに作業後の V/Vr 値の上昇がみられなくなり、明らかな疲労の抑制を示している (第4表)。

このさい、さらに prostigmine および Ach を増量

Table 2.

subject	Times of observ.	normal V/Vr	V/Vr a. w. (maxim.)	i. r.	r. t.	Km
A. O.	14	1.08 (±0.008)	1.23 (±0.021)	1.14	31 min. (±3.5)	2.2
Y. A.	7	1.07 (±0.009)	1.24 (±0.037)	1.16	31 min. (±6.1)	1.9
H. T.	7	1.07 (±0.011)	1.23 (±0.018)	1.15	30 min. (±2.9)	2.0
M. O.	9	1.08 (±0.007)	1.25 (±0.039)	1.16	34 min. (±3.3)	2.1
H. H.	7	1.08 (±0.009)	1.25 (±0.045)	1.16	31 min. (±8.5)	1.9
Y. M.	7	1.07 (±0.012)	1.22 (±0.028)	1.15	32 min. (±4.2)	2.1

Times of observ.: 実験例数
() 中の数字: 標準誤差×2

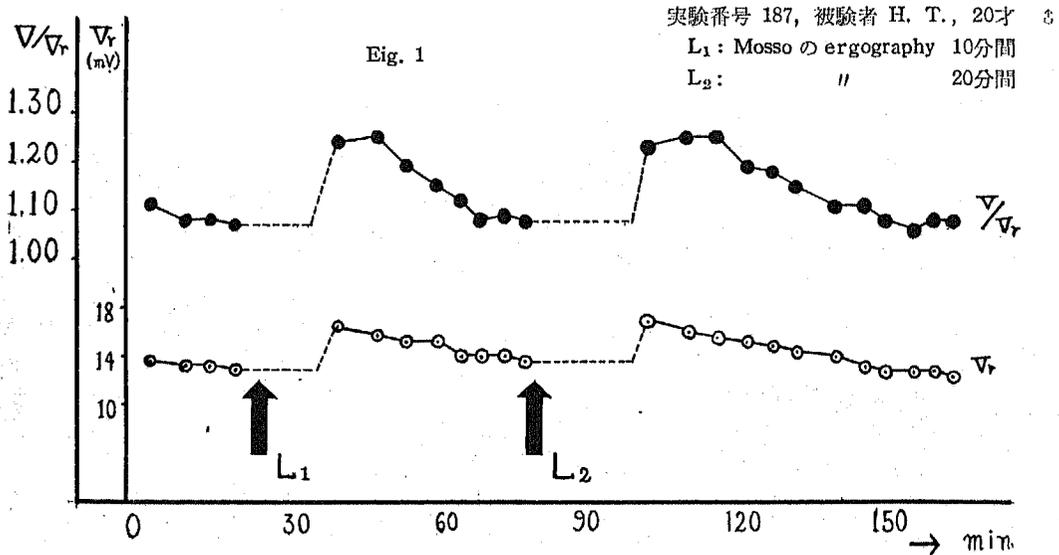


Table 3.

Exp. No.	normal V/Vr	V/Vr a. w. (max.)	i. r.	r. t.	Km
171	1.05	1.41	1.34	77 min.	2.3
172	1.07	1.35	1.26	54 min.	2.1
177	1.04	1.60	1.54	97 min.	1.8
184	1.05	1.39	1.32	64 min.	2.0
190	1.05	1.39	1.32	58 min.	1.8
average	1.05 (±0.009)	1.43 (±0.078)	1.36	70 min. (±13.8)	2.0

しても、疲労後の V/V_r の最高値にも、回復時間にも注射の効果はみられなかった。(第2図)。(第5表)。

以上の結果から、Ach は低頻度の作業により生じる疲労にたいしては抑制作用がないとの結論をえた。

Table 4.

subject	Times of observ.	normal V/Vr	inj. prost. r/kg	inj. Ach mg/kg	V/Vr a. w. (max.)	i. r.	r. t.	Km
A. O.	8	1.07 (±0.013)	7.5	1.0	1.25 (±0.024)	1.17	37 min. (±7.1)	2.1
M. O.	8	1.07 (±0.009)	7.5	1.0	1.32 (±0.039)	1.23	44 min. (±5.5)	1.9
H. H.	8	1.08 (±0.010)	7.5	1.0	1.25 (±0.033)	1.16	32 min. (±5.4)	2.1

inj. prost.: prostigmine の皮下注射量 (対体重 kg)

inj. Ach: acetylcholine の皮下注射量 (対体重 kg)

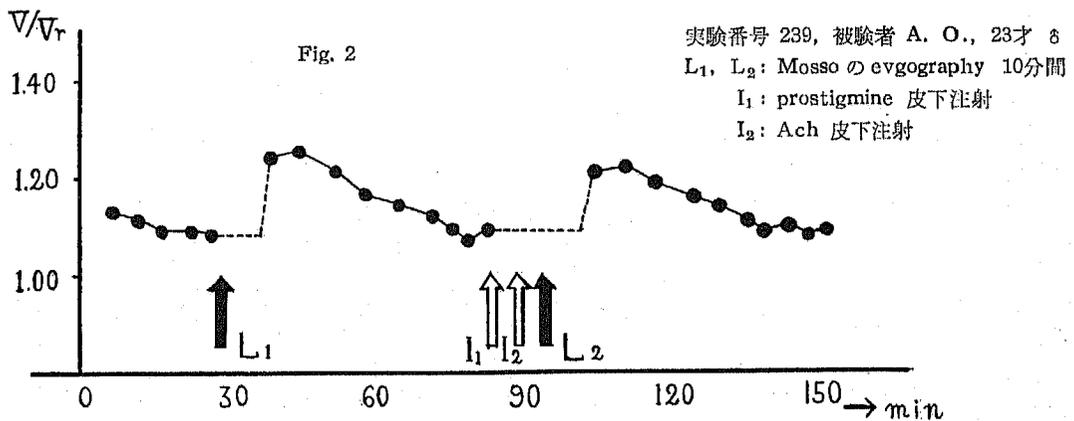


Table. 5

subject	Times of observ.	normal V/Vr	inj. prost. r/kg	inj. Ach mg/kg	V/Vr a. w. (max.)	i. r.	r. t.	Km
A. O.	6	1.09 (±0.008)	7.5	1.0	1.24 (±0.019)	1.14	29 min. (±3.7)	2.0
M. O.	6	1.08 (±0.009)	7.5	1.0	1.22 (±0.031)	1.13	27 min. (±9.6)	2.0
H. O.	6	1.08 (±0.011)	7.5	1.0	1.24 (±0.025)	1.13	38 min. (±5.9)	2.3

C. 非測定側疲労

左拇指で Mosso の ergograph によつて作業をおこなわせ、反対の使用しない m. ext. poll. long. dext. の興奮性を測定した。作業頻度は3秒に1回で、作業時間は10分間および30分間であつた。同じ非測定側の実験で、伝達疲労の場合には測定側と同様に疲労がみられたのに反して、本実験における m. ext. poll. long. dext. には全例を通じて興奮性の変化はみられず、作業指から反対側の m. ext. poll. long. に疲労の伝達はみとめられなかつた。

このことからして頻度の異なる伝達疲労とことな

り、低頻度作業による疲労は局所性であると考えられる (第3図), (第6表)。

IV 総括ならびに考察

随意性の疲労の性状は、不随意性の疲労にくらべてより複雑である。とくに不随意性の筋収縮のように単一の筋、あるいは筋群を一定の頻度で直接に刺激したり、または支配している運動神経を間接に刺激した場合と、Mosso の ergograph の作業をおこなわせたときに生じる随意性の筋収縮とでは、性質がことなるもので、筋収縮に影響する前者の刺激頻度と、後者の作業頻度に関して同一に論ずることはできない。

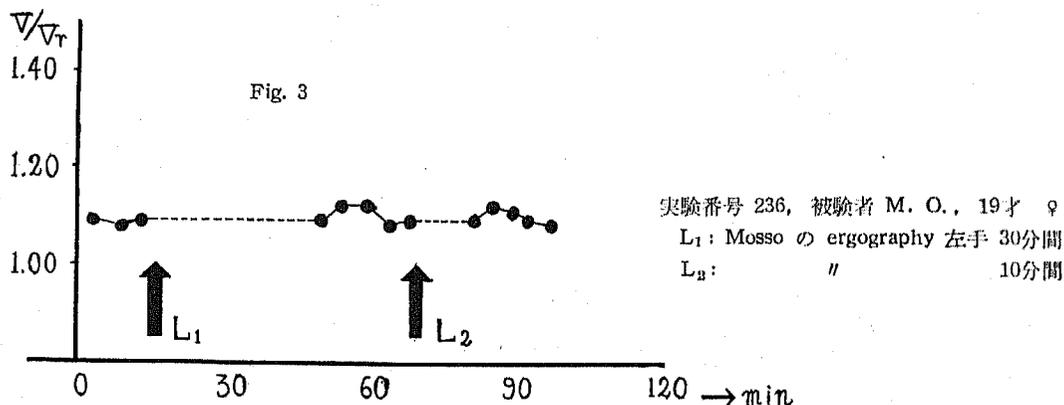


Table 6.

subject	Times of observ.	normal V/Vr	V/Vr a. w. (max.)	duration
A. O.	6	1.07 (±0.006)	1.08 (±0.007)	10 min.
	6	1.07 (±0.013)	1.10 (±0.011)	30 min.
M. O.	6	1.09 (±0.008)	1.10 (±0.015)	10 min.
	6	1.08 (±0.010)	1.11 (±0.013)	30 min.
H. H.	6	1.08 (±0.008)	1.09 (±0.009)	10 min.
	6	1.08 (±0.008)	1.09 (±0.011)	30 min.

duration: 作業時間

しかしながら、一定の条件のもとに、一定の作業をくり返すときは、作業頻度と筋収縮との間には、一定の関係が存することは考えられる。それゆえ刺激頻度の多少によつて、不随意性の筋疲労に伝達疲労と収縮疲労の二つの型があるように、作業頻度の差異により、随意性の筋疲労にも性質のことなつた型の疲労の生じうることは推察できる。

また不随意性の収縮疲労にさいして、nerve endingに回復過程が生じるように、随意性の筋疲労にさいしても nerve endingに humoralの回復過程がおきることが考えられる。

私は前報で 3~4回/毎秒の頻度で ergographの作業をさせたとき、被験者の m. ext. poll. long.において、一定の型の筋疲労を生じ、この疲労の型は、諸家^{②③}のいう不随意性の伝達疲労と、同一のものであることをみとめた。

そこで今回は作業頻度をより少くすることにより、

これとはことなつた型の随意性の疲労、いいかえれば、諸家^{②③}ののべた低頻度の刺激により生じる収縮疲労と、同一の型の疲労が生じうるか否かを研究した。

その結果、本実験成績に示すように、V/Vr法にて測定すれば、Mossoの ergographのごとき軽作業でも、低頻度(4回/秒の頻度)、かつ長時間(10分間以上)の作業では、作業に使われた筋の興奮性は明らかに低下しており、筋の興奮性が正常値にもどるためには、高頻度、短時間作業により生じた筋の興奮性の低下にくらべ、はるかに長い時間を要した。また回復時間恒数 Kmも2倍となつている。

以上の事実は不随意性の疲労ではあるが del Pozo^②がおこなつた実験、すなわち、ネコの m. gastrocnemius plantarisを、間接刺激で毎秒180回と毎秒20回の2種の頻度で刺激をしたときに、ことなつた収縮曲線をえたことや、高橋のヒキガエル骨格筋におけ

る実験で、同じ2種の頻度の刺激を与えたとき、 $Km \Rightarrow 4$ の疲労と $Km \Rightarrow 2$ の疲労に分類した結果と一致している。

なお低頻度作業では作業時間を延長しても、作業続行の一時的に不可能となるような急性の疲態は生じなかつた。

del. Pozo^②, Rosenbluth^③, 和合^{④⑤}および高橋^⑥らの主張にしたがえば、不随意性の疲労において、低頻度で神経を介して、間接刺激をおこなったときに生じる疲労は、neuromuscular junctionにおける液性伝達に関係なく、筋線維自身の収縮の結果生じた化学的中間代謝物質の影響、あるいは力源物質の減少によるものと思われ、このさい筋の興奮性は低下している。そしてこの場合 prostigmine および Ach をあらかじめ投与しておいても、伝達疲労の場合とことなつて、疲労抑制作用はみられない。それゆえこの種の疲労を収縮疲労とよんでいる。

私はさきに毎秒3~4回の頻度で ergograph の作業をさせたとき、m. ext. poll. long. に生じた随意性の疲労は非測定側から測定側へ伝達することを報告した。本研究では同じ ergograph の作業を3秒に1回の低頻度でおこなつて、そのさい測定側の m. ext. poll. long. には作業筋から疲労が伝達しないことをみとめた。

また私はさきに随意性の伝達疲労では、測定側疲労の場合でも、非測定側の場合でも、一定量の prostigmine および Ach の前投与によつて、疲労は抑制されることを報告した。今回は前述のごとく、同じ作業をより低頻度でおこなわせ、そのさい生じる随意性の疲労が前実験と同程度の量の prostigmine および Ach の前投与によつて、抑制されうるかどうかをみたが、疲労の抑制はみとめられなかつた。これよりさらに高濃度の prostigmine および Ach の前投与によつても、この種の疲労には無効であつた。

この事実は高橋が収縮疲労は局所性であり、一ヶ所の筋に生じた疲労は、他の部位の筋の興奮性に影響しないとのべた報告とも一致する。

以上のべたごとく、prostigmine および Ach の疲労抑制効果のないこと、液性伝達作用のないこと、および回復時間恒数 Km の値が前報にくらべて大きいことなどから、随意性の疲労においても、不随意性疲労と同様に、収縮疲労というべき型の疲労が存することを確認した。

V 結 論

1) 低頻度の作業によつてひきおこされる、人体骨格筋の随意性疲労について、和合の $0.75 \mu F V/Vr$ 法で研究した。

2) このさい発生する疲労は、伝達疲労にくらべ回復に長時間を必要とした。

3) この型の疲労は非測定側の筋より、測定側の筋へは伝達しなかつた。

4) 同じくこの型の疲労は適量の prostigmine および Ach の前投与によつて抑制されなかつた。

5) 以上の点から考えて、低頻度の作業を一定時間(10分, 20分, 30分)おこなつたときに発生する疲労の型は、低頻度刺激によつて生じる不随意性疲労と、ひとしい性質のものである。それゆえこの型の随意性疲労は収縮疲労と考えられる。

後記: 終りにのぞみ御指導, 御校閲をくださった和合卯太郎教授に深く感謝いたします。

文 献

- ①松原幹彦: 信州医誌 8, 392, (1959). ②del. Pozo, E. C.: Am. J. Physiol. 135, 763 (1942).
③Rosenbluth, A & I. V. Luco: Am. J. Physiol. 126, 58 (1939). ④和合卯太郎: 信州大学紀要 4, 136 (1954). ⑤和合卯太郎: 日本生理誌 18, 12 (1956). ⑥高橋重文: Ibid 19, 4 (1957).