

等尺性最大筋力発揮の際の疲労曲線に関する一考察

琉子 友男

A Study on Two Different Types of Fatigue Curve of Maximal Isometric Strength

by

Tomoo Ryushi

Abstract

The purpose of this study is to observe the relationship between per cent decline of maximal isometric strength and static muscular endurance. Eighteen judomen, university students were participated as the subjects.

Linear relationship ($V = -0.660$, $P < 0.01$) was observed between static muscular endurance and percent decline of maximal isometric strength.

The correlation coefficient between maximal isometric strength and percent decline of maximal isometric strength was 0.378 and not statistically significant.

It may be considered that two different types of fatigue curve performing repeated maximal isometric strength with maximal effort are mainly induced by the difference of fiber composition of leg extensor muscle.

緒 言

最大筋力を一定のテンポで連続して発揮すると、それが常に最大努力で発揮されているにもかかわらず筋力は変動を示しながらしだいに低下すること、および、その筋力の低下曲線（Mossoはこれを疲労曲線と呼んでいる。）に2種類の異なる型が存在することが明らかにされている。すなわち、その2種類の異なる型とは、初期には大きな収縮高を示しても、作業回数の増加とともに急激に低下する型と、初期にはあまり大きな収縮高は示さないが、作業回数が増加してもあまり低下しない型とである。⁷⁾

矢部¹⁵⁾(1977)は、運動神経を間接的に電気刺激

することによって等尺性最大筋力を間歇的に発揮した場合、随意的に発揮した場合と同様、筋力値は作業回数の増加とともにしだいに低下すること、また、その筋力の疲労曲線に2種類の型が認められることを報告した。

Thorstensson と Karlsson¹⁴⁾(1976)やTesch¹¹⁾(1978)らは、 180° /秒で等速性に最大努力で脚伸足を繰り返した場合においても、ピーク・トルクの疲労曲線に2種類の型が認められること、および、そのピーク・トルクの低下率と脚伸足の筋線維の占める比率の差異との間に有意な関係があることを報告した。

このようなことから、等尺性に最大努力で脚伸足を繰り返したときに得られる2種類の疲労曲線

もおそらく脚伸筋の筋線維の占める比率の差異と関係があると考えられる。

そこで本研究は、従来、筋線維の占める比率の差異と関係があると報告されている静的筋持久力⁴⁾および等尺性最大筋力^{3) 10)}と等尺性最大筋力の低下率(疲労度)との関係を比較検討することにより、等尺性最大筋力を連続して間歇的に発揮した際の2種類の疲労曲線の発生原因について何らかの確証を得ようとするものである。

研究方法

〈被験者〉

被験者は東京大学柔道部に所属する健康成人男子18名であり、彼らの身体特徴を表1に、作業成績を表2に示した。

〈等尺性最大筋力の測定〉

初験者を測定用椅子にベルトを用いて固定した後、被験者の左脚の足頸部に巻いたベルトとストレンゲージを貼布したロードセルをスチールワイ

ヤーで連結し、膝関節を90°に固定した。被験者は十分な時間間隔をおいて随意最大努力で3回筋力を発揮し、そのうちの最大値を等尺性最大筋力とした。

〈静的筋持久力の測定〉

被験者に等尺性最大筋力の測定と同様の姿勢で等尺性最大筋力の50%の張力を発揮、維持させた。被験者の発揮する張力は記録器に書かれる張力曲線で監視され、被験者が50%の張力レベルを維持できなくなるまでの時間を持久時間とした。なお、被験者は自分の発揮している張力をモニター用ブラウン管で監視しながら作業を続けた。

〈等尺性最大筋力の低下率の測定〉

被験者は50回/分のテンポに合わせて常に最大努力で瞬間的に筋力を発揮するよう指示された。筋の疲労の状態を見る指標として、等尺性最大筋力の低下率(疲労度)を次式を用いて算出した。

等尺性最大筋力の低下率(疲労度)

$$= \frac{V I - V F}{V I} \times 100$$

Table 1. Anthropometric characteristics of subjects

Subj. (No.)	Age (yr)	B. Weight (kg)	B. Height (cm)	Girth of Chest (cm)	Girth of Thigh (cm)
1	21	76.3	176.3	91.5	54.0
2	21	67.9	170.8	90.8	51.0
3	22	71.8	173.7	95.6	52.0
4	21	65.2	171.8	85.5	53.0
5	22	79.7	175.2	94.5	57.0
6	22	62.9	165.1	89.8	52.4
7	22	75.2	177.4	93.6	55.0
8	19	65.9	170.8	87.6	52.0
9	20	76.0	175.7	100.0	57.0
10	20	56.3	157.4	94.0	52.0
11	20	63.4	167.8	89.5	54.0
12	20	68.9	172.8	91.5	54.4
13	22	59.4	158.6	87.0	50.7
14	23	70.9	170.3	94.3	54.2
15	21	65.2	170.6	99.0	54.0
16	23	70.0	169.5	90.5	57.0
17	22	73.0	173.3	93.8	56.0
18	22	89.5	170.1	111.5	65.0
MEAN	21	69.9	170.4	92.2	54.5
S. D.	1	7.6	5.3	6.0	3.2

Table 2. Performance data of subjects

被験者 (No.)	低下率 (%)	静的筋持力 (sec)	脚伸展筋 (kg)	50m走 (sec)	垂直とび (cm)	立ち幅とび (cm)	脚伸展パワー(W)		
							Eq.mass 50kg	200kg	800kg
1	37.6	63	81	7.4	52	243	607	587	408
2	23.3	67	69	7.3	55	238	434	465	370
3	32.2	75	84	7.4	59	258	693	642	460
4	27.9	83	69	7.5	58	237	441	503	355
5	41.4	45	104	7.3	54	252	709	642	533
6	11.1	80	72	7.3	49	217	495	446	340
7	21.6	73	97	7.4	52	228	650	582	438
8	32.2	65	98	7.3	56	253	498	520	438
9	30.2	65	100	7.1	64	252	629	600	320
10	36.7	60	72	7.3	56	280	423	474	378
11	19.8	73	77	7.5	49	208	468	371	255
12	24.2	80	94	7.5	55	223	521	529	373
13	25.0	60	70	7.4	50	227	350	356	285
14	12.0	125	58	7.0	55	244	457	392	280
15	23.0	53	62	7.0	70	262	631	632	323
16	14.1	81	94	7.4	60	256	616	602	483
17	25.0	75	90	7.5	53	222	550	466	318
18	24.9	67	71	7.4	45	194	679	651	473
MEAN	25.7	71	81	7.3	55	238	547	525	379
S.D.	8.2	16	13	0.2	5	20	104	94	76

但し、

V I = 運動開始から 5 回までの等尺性最大筋力の平均値

V F = 46 回から 50 回までの等尺性最大筋力の平均値

結果と考察

本研究における脚伸展筋の間歇的な等尺性最大筋力発揮の際にも、他の報告^{7) 11) 13) 15)}と同様、被験者によって作業回数の増加とともに急激に低下する型と作業回数が増加してもあまり低下しない型があるということが観察された。(図 1)

すなわち、図 1・上は、2 種類の異なる疲労曲線を示した代表的被験者 6 名について、全作業回数の中の 5 回の平均値の最大値を 100% として、その相対的变化を示したものである。また、図 1・下は、各被験者の 46~50 回の平均値を求め、全被験者についての平均値を基準として、その平均値以上の群(G-I)と平均値以下の群(G-II)とに分け、さらにそれぞれの群について平均値と標準

偏差の相対的变化を示したものである。図にも見られるように、両群とも作業回数の増加とともに等尺性最大筋力の相対値は次第に低下するが、その低下の速度は被験者によってかなりのバラツキ

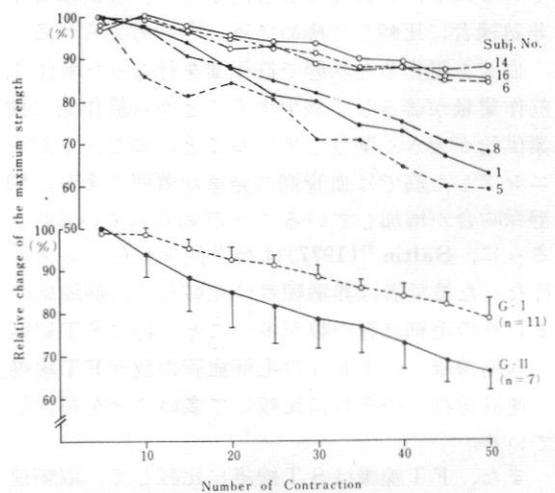


Fig. 1. Relative changes in the maximal isometric strength with number of contraction.

がある。例えば、No.14の被験者は50回の等尺性最大筋力発揮してもその筋力値は12%しか低下しなかったが、No.5の被験者のそれは41%低下した。このような被験者による筋力値の低下速度に差異の生ずる原因として考えられることは、中枢性疲労の個人差によるものと末梢における活動筋への血流量の個人差によるもの、また、筋線維の機能的差異とそれの占める比率の個人差によるものであろう。

矢部¹⁵⁾(1977)は、随意収縮による最大筋力を反復して発揮する筋作業の経過のうち、自発的な「かけ声」とともに発揮した最大筋力と電気刺激による最大筋力とはともに随意収縮による最大筋力よりも常に高い値を示したことから、随意収縮による最大筋力の低下の原因は末梢性(筋線維、神経筋接合部、運動神経線維、脊髄のシナプス)と中枢性(上位、中位の神経細胞、知覚神経末端)の両者の疲労によるものであるとした。さらに、随意収縮によるものと電気刺激による最大筋力との差は作業時間の経過とともにしだいに大きくなっていくことから、筋作業にもなって筋疲労における中枢性因子の占める割合の増えてきたことを示すものであるが、作業初期、すなわち本研究での50回程程度の作業では、主に末梢性因子によるものが大であると指摘している。また、本研究で採用された被験者は最大筋力を発揮することに熟練しているの、いわゆる心理的限界と生理的限界が非熟練者に比較して極めて近い¹⁵⁾と考えられる。

血流を阻止した状態で筋作業を行なった場合に、筋作業量が著しく減少することから筋作業に酸素供給が大きく関与していること、また、トレーニングした筋では血管網の発達が著明であり、動静脈吻合が増加していることが知られている⁵⁾。さらに、Saltin⁸⁾(1977)は持久的トレーニングを行なった被験者は非鍛練者に比較して、筋線維のまわりの毛細血管の数が多いこと、特にST線維(遅筋線維)のまわりの毛細血管の数がFT線維(速筋線維)のそれに比較して多いことを報告している。

また、FT線維はST線維に比較して、収縮速度が速いこと、疲労の早いことなどが明らかにされている⁹⁾。さらに、それぞれの筋線維の占める

比率は統計的に正規分布を示すが、どちらかの筋線維にその比率の片寄る極端な分布を示す者が居て、かなり個人差があること⁸⁾、および、これらの筋線維の分布状態が異なれば、筋の発揮できる種々の作業能力にも差異の生ずることが明らかにされている。^{1) 4) 10) 12) 14)}

Thorstenson と Karlsson¹³⁾(1976)やTeschら¹¹⁾(1978)によれば、180°/秒の等速性で連続的に最大努力の脚伸展を行なわせた際に、脚筋のFT線維の占める比率と筋出力の低下率(疲労度)との間に有意な関係があることが明らかにされている。このようなことから、本研究で図1に示した疲労曲線の個人差もおそらく脚伸展筋の筋線維の占める比率の差異に関係があると考えられる。

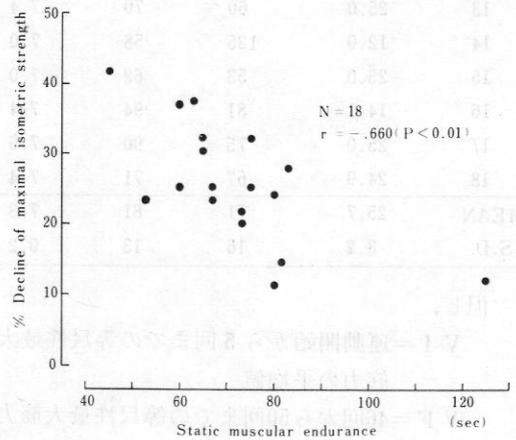


Fig. 2. The relationship between % decline of maximal isometric strength and static muscular endurance.

図2は、等尺性最大筋力の低下率と等尺性最大筋力の50%の負荷での静的筋持久力との関係をみたものである。その結果、両者の間に $r = -0.660$ の相関係数を算出し、1%水準で有意な関係が認められた。また、Hulténら⁴⁾(1975)は脚伸展筋のST線維の占める比率の多い者はそうでない者に比較して、等尺性最大筋力の50%の負荷での静的筋持久力があることを明らかにした。このようなことから、本研究の図2の結果とHulténらの結果は、等尺性最大筋力の低下率の低い者はそうでない者に比較して、静的筋力の持続能力があり、ST線維の占める比率も多いことを示すものであると考えられる。

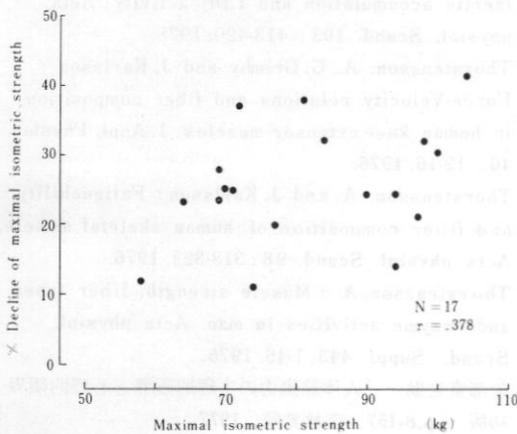


Fig. 3. The relationship between % decline of maximal isometric strength and maximal isometric strength. The correlation coefficient of $r=0.378$ is statistically no significant.

図3は、等尺性最大筋力と等尺性最大筋力の低下率との関係を見たものである。その結果、両者の間に $r=0.378$ の相関係数を得たが、有意な関係は得られなかった。Gollnick ら³⁾(1974)は組織化学的観察の結果、等尺性最大筋力発揮の際には、主にFT線維が動員されると報告している。また、TeschとKarlsson¹⁰⁾もFT線維の占める比率と等尺性最大筋力との間に0.1%水準で有意な関係があったことを報告している。しかし、逆にThorstensson¹⁴⁾(1976)は、等尺性最大筋力発揮の際、FT線維の多い者と少ない者との間に有意な差が認められないという結果を得ているし、またClose²⁾(1972)は筋線維の単位断面積あたりの張力の大きさはすべての線維で等しいと報告した。このように、研究者によって必ずしも一致した結果が得られてないので、筋線維の占める比率の差異と等尺性最大筋力の関係は未だ明らかでない。ゆえに、本研究の図3の結果と上記の研究者の報告は、等尺性最大筋力の低下率の高い者が必ずしも等尺性最大筋力が高いとは限らないことを示すものである。

以上の結果から、等尺性最大筋力発揮の際の筋力の低下速度の個人差は、中枢性疲労の個人差、活動筋への血流量の個人差などが影響して生ずるものと考えられるが、主に筋線維の機能的差異(収

縮特性と代謝特性)とそれの占める比率の個人差による影響の方が大であると考えられる。しかし、初期の筋力値の個人差に関しては、筋線維の機能的差異とそれの占める比率の個人差の影響がどの程度かは明らかでない。

また、さらに確証を得るためには、筋生検法を用いて測定した筋線維比率と等尺性最大筋力の低下率との関係を調査する必要があると思われる。

結 論

18名の健康成人男子を用いて、等尺性最大筋力の低下率と静的筋持久力および等尺性最大筋力の関係について調査した。また、その結果から、2種類の疲労曲線の生ずる原因について検討し、次の結果が得られた。

1. 等尺性最大筋力を連続して間歇的に発揮した際の筋力の低下速度の個人差は主に筋線維の占める比率の個人差によるものであると考えられる。
2. 等尺性最大筋力発揮の際の筋力値の低下速度の速い者がその初期に発揮した筋力値が高いとは限らない。

引用文献

- 1) Costill, D.L., J. Daniels, W. Evans, W. Fink, G. Krahenbuhl and B. Saltin: Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes. *J. Appl. Physiol.* 40: 149-154, 1976.
- 2) Close, R.I.: Dynamic properties of mammalian skeletal muscles. *Physiol. Rev.* 52: 129-197, 1972.
- 3) Gollnick, P. D., J. Karlsson, Karin Piehl and B. Saltin: Selective glycogen depletion in skeletal muscle fibers of man following sustained contractions. *Med. Sci. in Sports* 241: 59-67, 1974.
- 4) Hultén, B., A. Thorstensson, B. Sjodin and J. Karlsson: Relationship between isometric endurance and fiber types in human leg muscles. *Acta physiol. Scand.* 93: 135-138, 1975.
- 5) 猪飼道夫編著: 「身体運動の生理学」初版: pp. 211-277, 杏林書院, 1973.
- 6) Komi, P. V., H. Rusko, J. Vos and V. Vihko: Anaerobic performance capacity in athletes. *Acta physiol. Scand.* 100: 107-114, 1977.
- 7) Mosso, A.: Ueber die Gesetze der Ermüdung. *Untersuchungen an Muskeln des Menschen.*

- Arch. f. Physiol. 89-168, 1890. 矢部京之助：「人体筋出力の生理的限界と心理的限界」杏林書院，1977. より引用
- 8) Saltin, B., J. Henriksson, E. Nygaard, P. Andersen and E. Jansson: Fiber types and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 301: 3-29, 1977.
 - 9) Steg, G.: Efferent muscle innervation and rigidity. *Acta physiol. Scand.* 61: Suppl. 225, 1964.
 - 10) Tesch, P. and J. Karlsson: Isometric strength performance and muscle fiber type distribution in man. *Acta physiol. Scand.* 103: 47-57, 1978.
 - 11) Tesch, P., B. Sjödén, A. Thorstensson and J. Karlsson: Muscle fatigue and its relation to lactate accumulation and LDH activity. *Acta physiol. Scand.* 103: 413-420, 1978.
 - 12) Thorstensson, A., G. Grimby and J. Karlsson: Force-Velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. *J. Appl. Physiol.* 40: 12-16, 1976.
 - 13) Thorstensson, A. and J. Karlsson: Fatiguability and fiber composition of human skeletal muscle. *Acta physiol. Scand.* 98: 318-322, 1976.
 - 14) Thorstensson, A.: Muscle strength, fiber types and enzyme activities in man. *Acta physiol. Scand. Suppl.* 443, 1-45, 1976.
 - 15) 矢部京之助：「人体筋出力の生理的限界と心理的限界」初版：pp.6-157, 杏林書院，1977.