

静的筋持久力に関する研究

(I) 負荷重量と血流量との関係

菊池 武道*

広田 公一*

A Study on the Static Muscular Endurance

(1) Relationship between Weight Loads and the Blood Flow

by

TAKEMICHI KIKUCHI* and KOICHI HIROTA*

The increase of muscular endurance is greatly influenced by the presence or absence of blood flow to a given muscle and it is also said that this blood flow, in the case of static exercises, is obstructed to the extent of the intensity of muscular tension induced.

This study was concerned with the maximally endured static exercises of the forearm flexors which were executed with and without intentional obstruction of blood flow to the muscle. The muscular tension was estimated from the two different patterns of fatigue curves (decreasing trends of muscular strength) obtained in both conditions and in order to get its further assurance the relationships between the statically induced muscular tension and the blood flow were examined in the static exercises executed in accordance to its rates to the maximal muscular strength. Followings are the results obtained.

1. In the maximally endured static exercises it was estimated that the blood flow was present under the induced tension of below 41 to 63 per cent of the maximum.

2. The blood flow into a working muscle was increased in the exercises performed with light loads. The obstructed blood flow was beginning to start with the loadings of over 1/3 of the maximum and strong obstruction was resulted from the loads above 2/3 of the maximum. [Proceedings of Department of Physical Education, College of General Education, University of Tokyo, No. 8, 19-25, 1974]

緒 言

日常、我々が経験する筋運動には、強い力を必要とする筋力的なもの、筋力を持続させる筋持久力的なものがある。筋持久力は、その performance からみて、回数で評価する動的なものと、時間でみる静的なものに分けて考えられる。動的・静的いずれにせよ、長く作業を続けるに

は、その運動に必要な酸素およびエネルギー源の供給ならびに蓄積が大切な因子となる。また、運動による乳酸その他の疲労性物質のすみやかな除去がなされるかどうか重要な因子となっている。したがって、これらにかかわる末梢循環機構の毛細血管床の多少が大きな関連をもってくる。また、このような末梢的因子以外に、猪飼¹⁰⁾らは、中枢神経系統の疲労も重要な因子の一つとし

* 東京大学教養学部体育研究室 (Department of Physical Education, College of General Education, University of Tokyo)

て取りあげている。

末梢の因子においては、酸素の供給や疲労性物質などの代謝を支える血液の流入が、最も重要な要因であり、この筋への血流は、動的運動において筋の pumping action のため促進される。しかし、静的運動では、筋張力の持続発揮による筋内圧上昇によって、筋内血管床が機械的に圧迫され、血流が阻害されるとされている。血流を阻害する筋内圧は、筋張力の大きさ、運動の強度に影響される。これに関して、Barcroft¹⁾らは最大筋力の20~30%、Start²⁾は最大筋力の60%の静的運動で血流阻止が始まると云い、一定していない。

本研究は、最大努力を持続する運動について、人為的に血流を阻止した場合と阻止しない場合とでこない、両者の筋力低下の傾向（いわゆる疲労曲線）をしらべ、両者の傾向の相違から血流の有無に関する筋張力を推定した。この点を明確にするため、更に最大筋力に対する割合の負荷重量の静的運動において、静的な筋張力と血流量との関係についてしらべた。

実験方法

被検者は、年齢22才から26才までの健康な一般青年男子5名である。

各被検者は、右腕で負荷を保持する前腕屈筋群の静的運動をおこなった。運動時の姿勢は、仰臥位で右腕を体幹より直角にのばした手掌に負荷を保持させた。負荷は、ワイヤーで結ばれたベルトを握り、負荷重量に抵抗して手首を水平に維持する静的な運動である。静的運動における測定項目は、つぎの二種類である（図1）。

1) 最大努力しての筋緊張持続に伴う筋力低下の推移

最大努力時の筋力の推移は、一端が床に固定されたワイヤーの間に半導体力量計を取りつけ、手首を屈曲させようと最大努力する経過の値をペン書き記録器で記録した。

この静的運動中に運動部位の血流を人為的に阻止した状態と血流を阻止しない状態との二種類を設定して、それぞれの状態において最大努力で筋力を発揮させた。

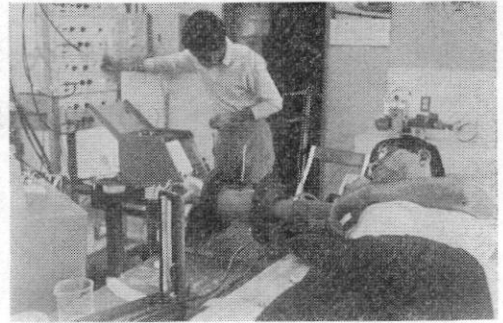


Fig. 1 Apparatus of measurement

この静的最大努力での持続運動をおこなった時に、血圧を測定したとき、運動中の最大血圧の最高値は 192 mmHg であった。このことから、血流の阻止は、220 mmHg の圧でおこなった。血流の阻止は、右腕の上腕中央部にとりつけたマンシットでおこなった。

2) 静的運動時の血流量

運動は、静的最大努力の筋力低下を観察した運動形態と同一のものである。保持する負荷は、最大筋力に対する割合の負荷重量で、最大筋力の $\frac{1}{6}$ 、 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{2}{8}$ 、 $\frac{1}{1}$ である。この5種類の負荷重量による静的運動中の血流を測定した。各負荷重量の運動の持続時間は、 $\frac{1}{1}$ 発揮時が約10秒間、その他の4種類は、約20秒間とした。

血流量の測定は、静脈閉塞プレチスモグラフでおこなった。前腕部位に取りつけた腕プレチスモは、長さ 15 cm のプラスチックの円筒型である。の円筒の中に、厚さ 0.5 mm の生ゴムで覆われた前腕を挿入する。生ゴムのスリーブの両端には硬質ゴムが接着され、この硬質ゴムは、プラスチック製の本体に密着するよう固定され、プラスチック製の本体と生ゴムのスリーブでかこまれた空間は密閉されている。この密閉された空間に温水を満たし、また、温水はチューブで接続したガラス管に達している。

このガラス管には、2本の炭素棒が挿入してあり、ガラス管内の水位の変化を炭素棒の電気的抵抗の変化としてとらえ、この変化を増巾器で増巾し、ペン書き記録器で血流量を測定した。血流量は環境条件の影響を受けやすいので、プレチスモ内の温水は 35°C、また、室温の比較的安定する

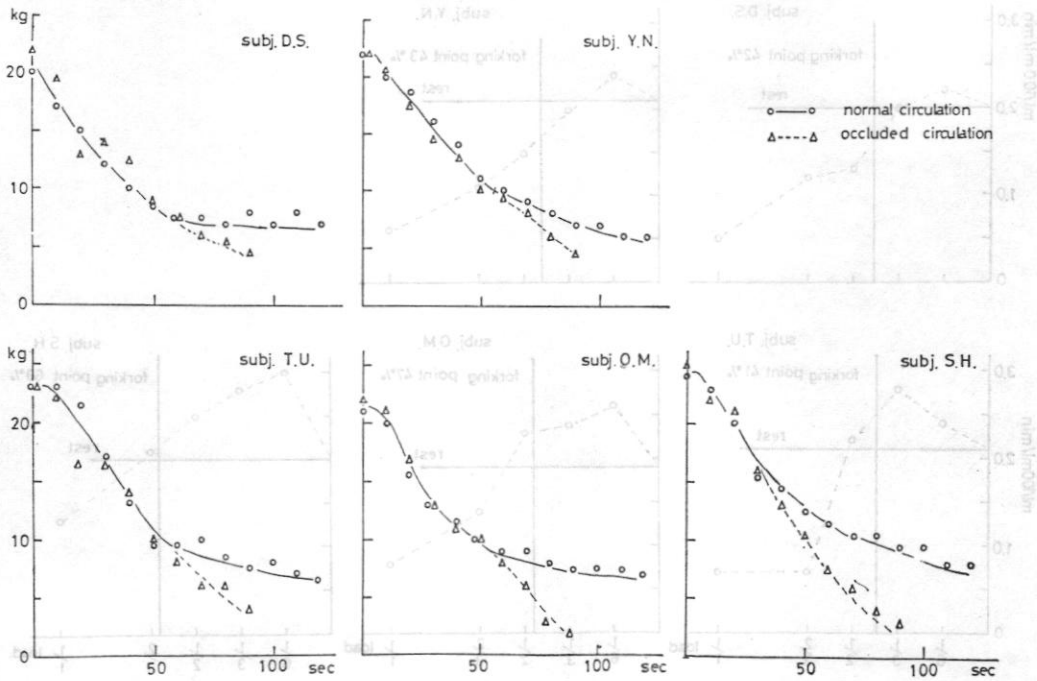


Fig. 2 Isometric fatigue tendency for forearm muscles

午前中に測定し、外的環境条件を一定に保つよう考慮した。

結 果

1) 最大努力しての筋緊張持続に伴う筋力低下の推移

静的最大努力を持続する運動時、発揮された最大筋力は、血流を阻止しない運動が 20.0~24.0 kg、血流を阻止した運動が 21.0~25.0 kg でほぼ一致した。この値は、静的最大努力を持続する運動開始直後に示された(表1)。

各被検者とも、発揮した筋力の最大値を約5~10秒間持続したのち、筋力は急激に低下していった。この筋力の低下傾向は、運動開始以降、被検者 S. H. が約30秒、被検者 D. S., T. U., O. M. が約50秒、さらに被検者 Y. N. が約60秒までは、血流を阻止しない運動と血流を阻止した運動の間に著しい相違がみられず、これらの時点までは、ほぼ同じように低下してゆくのがみられた。

血流を阻止した運動では、この筋力の低下傾向が、それ以降もその延長線をたどり急な勾配で低下していったのに対して、血流を阻止しない運動

Table 1 Maximum strength in isometric contraction

subj.	normal circulation	occluded circulation
	kg	kg
D. S.	20.0	22.0
Y. N.	22.0	22.0
T. U.	22.0	23.0
O. M.	21.0	21.0
S. H.	24.0	25.0
mean	22.0	22.8

では、これらの時点から筋力の低下がゆるやかになり、血流を阻止した場合と阻止しなかった場合の両者の間に、異なった低下傾向がみられた(図2)。

筋力の低下傾向に相違が示された分岐点の筋力は、最大筋力の割合でみると、被検者 D. S. が42%、被検者 Y. N. が43%、被検者 T. U. が41%、被検者 O. M. が47%、被検者 S. H. が63%の値であった。

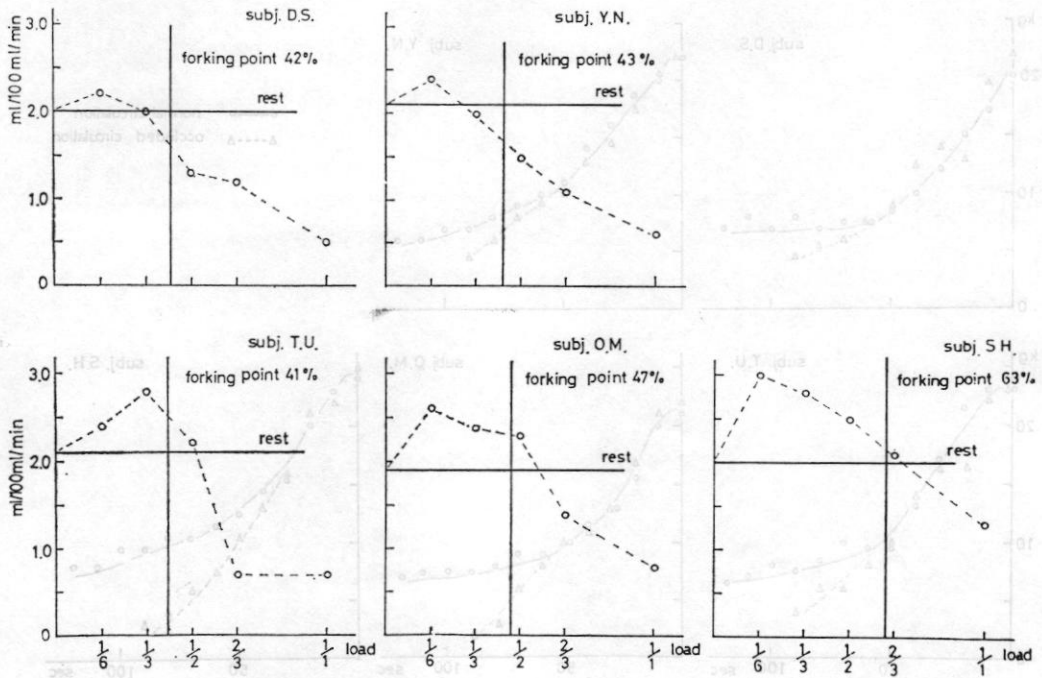


Fig. 3 Relation between forking point and blood flow

2) 静的運動時の血流量

前腕の安静時血流量は、1.9~2.1 ml/forearm 100ml/min であった。

各負荷重量における運動初期の血流量は、最大筋力の $\frac{1}{6}$ と $\frac{1}{3}$ という軽い負荷重量では、全被検者とも安静時血流量とほぼ同じか、それ以上の値を示した。これに対して、最大筋力の $\frac{1}{2}$ の負荷重量では、被検者D. S.が、1.3 ml/forearm 100 ml/min、被検者 Y. N. が 1.5 ml/forearm 100 ml/min、また、最大筋力の $\frac{2}{3}$ の負荷重量で被検者 T. U. と O. M. が 0.7 と 1.4 ml/forearm 100 ml/min、とそれぞれ安静時の血流量より低い値を示した。さらに、被検者 S. H. は、 $\frac{1}{1}$ の運動においてはじめて、1.3ml/forearm 100 ml/min という安静時の血流量より低い値を示した。このように重い負荷重量になると、運動中の血流量が減少するのがみられた (表2)。

つぎに、各負荷重量の運動における血流量と、血流を阻止しない場合および血流を阻止した場合の最大努力で持続した運動時における、筋力の低下傾向にみられた分岐点との関係を被検者別にみると図3のとうりである (図3)。

Table 2 Blood flow during isometric contraction in relation for maximal strength

subj.	fraction for max. str.					
	rest	1/6	1/3	1/2	2/3	1/1
D. S.	2.0	2.2	2.0	1.3	1.2	0.5
Y. N.	2.1	2.4	2.0	1.5	1.1	0.6
T. U.	2.1	2.6	2.8	2.2	0.7	0.7
O. M.	1.9	2.6	2.4	2.3	1.4	0.8
S. H.	2.0	3.0	2.8	2.5	2.1	1.3
mean	2.0	2.6	2.4	2.0	1.3	0.8

ml/forearm 100 ml/min

筋力の低下傾向にみられた分岐点が、最大筋力の42%と43%の被検者D. S., Y. N. は、運動時の血流量において、安静時よりも増加した血流量が低下に移行する点は、最大筋力に対する割合の $\frac{1}{3}$ と $\frac{1}{2}$ の間にあり、また、最大筋力の41%と47%の被検者T. U., O. M. は、最大筋力の $\frac{1}{3}$ と $\frac{1}{2}$ の間であった。これに対して、筋力の低下傾向にみ

られた分岐点が最大筋力の63%の被検者 S. H. は、最大筋力の $\frac{2}{3}$ と $\frac{1}{2}$ の間に、血流量が安静時より低くなるのがみられた。

考 察

前腕屈筋群の最大努力を持続する静的運動をおこなった5人の被検者は、時間の経過とともに、図2のような筋力の低下傾向がみられた。筋力が低下してゆく過程において、血流を阻止しない運動と血流を阻止した運動では、最大筋力の41~63%の値まで筋力が低下したとき、それ以降の筋力の低下傾向に相違がみられた。Royce¹²⁾によると、この筋力低下傾向に相違がみられた分岐点は、最大筋力のおよそ60%である。Royce¹²⁾は、この原因として、最大筋力のおよそ60%以上の筋張力では筋収縮による筋内圧の高まりが、筋の血管を圧迫し、血流を阻害するためであろうと指摘している。また、Hill⁷⁾はfrogのm. gastrocnemiusの最大等尺性収縮の筋内圧は、100~300 mmHgであると云っている。したがって本研究でみると、最大筋力は41~63%の分岐点以上の筋力発揮の場合には人為的に血流を阻止しないで行った運動の際にも高い筋内圧により血流が阻止され、その運動に必要な血流がなされず、血流を阻止した運動と同様な筋力の低下傾向を示したものと思われる。

Humphreys⁹⁾らは、静的な運動による血圧の増加は、疲労困憊直前で、最大血圧が170~190 mmHgであったと云っている。また、本研究の最大努力を持続する運動において、最も高い値を示した被検者 T. U. の最大血圧の最高値が、運動開始約50秒に192 mmHgを示した。このような systemic blood pressure の増加は、筋への血液の流入に少なからず貢献するものと思われる。循環機能のこのような反応にもかかわらず、最大努力で持続する運動における筋力の分岐点以上の筋張力では、筋力の低下の傾向に相違がみられないのに対して、分岐点以下の筋力の低下傾向に相違がみられた。このことから、強い筋張力では、運動による生理的反応で増加しようとする血流以上に、筋内圧の機械的圧迫が強く働き、血流を阻止するものと思われる。

最大努力を持続する運動で、血流を阻止しない場合と血流を阻止した場合では、筋力低下の傾向に相違がみられ、その原因として、筋への血流が関係するものと推察された。この筋張力にもなる筋内圧と血流の関係を明確にするため最大筋力に対する割合の負荷重量の運動をおこない、その運動時における血流量の検討をおこなった。

Grant⁶⁾らは、前腕の筋量は全体の約85%であり、このように筋量の多い前腕での血流増加は、主に筋の血流量が増加したものだと言っている。また、Greenfield⁶⁾によれば、筋活動では筋内の血管の拡張を引き起こし、血流を増加させると云っている。すなわち、前腕部位において運動による血流の変化は、筋血流量の変化と考えられる。

安静時における血流量については、Stein¹⁴⁾らは、下腿において1.5~3.0 ml/100 ml/min、Barcroft³⁾らは、前腕において3~4 ml/100 ml/minであったと云っている。我々の前腕における安静時の血流量は、各被検者の平均で1.9~2.1 ml/100 ml/minであった。

安静時の血流量に比較して、運動時の血流量は、最大筋力の $\frac{1}{3}$ 以下という軽い負荷重量では、増加しているのがみられる。これに対し、負荷重量が増すにつれ、特に最大筋力の $\frac{1}{2}$ から $\frac{2}{3}$ 以上の負荷重量では、負荷重量が重い運動ほど、安静時の血流量に比較して減少してゆくのがみられる。Gaskell⁴⁾は、筋収縮にともない血管拡張が存在するにもかかわらず、収縮筋の筋張力による血管への機械的圧迫により、この生理的反応は、やや妨げられると云っている。さらに、Humphreys⁹⁾らは、最大筋力の70%以上の負荷重量、また、Start¹³⁾らは、最大筋力の60%の負荷重量、Barcroft²⁾らは、強い筋収縮により血流阻止が起こるであろうと云っている。

一方、Barcroft¹⁾らは、最大筋力の5~10%という軽い負荷重量では、血流量が増加すると云っている。また、Start¹³⁾らは、最大筋力の $\frac{1}{3}$ 負荷重量、Myers¹¹⁾らは、最大筋力の25%の負荷重量、さらに猪飼、田口⁹⁾らは、最大筋力の $\frac{1}{3}$ 負荷重量においては、血流が全く阻止されないだろうと云っている。このように、重い負荷重量の運動では、筋への血流が阻止され、その反面軽い負

荷重量の運動では、血流が阻止されないばかりか、かえって増加するであろうという研究は、数多くみられる。本研究でも、静的運動という持続的な筋緊張にもかかわらず、軽い負荷重量の場合には血流量の増加がみられる。

被検者により個人差があるが、図2にみられるように、最大努力を持続する運動における筋力の分岐点は41~63%、また、血流量を測定した結果からすると、最大筋力の $\frac{1}{3}$ と $\frac{1}{2}$ 間ならびに $\frac{2}{3}$ と $\frac{1}{2}$ の間に安静時より増加した血流量が低下に移行しはじめ、これらはほぼ一致した割合の筋張力であった。すなわち、本研究においては、最大筋力の $\frac{1}{3}$ 以上の負荷重量が、筋内圧による血流量の減少に少なからず関与する筋張力であった。

血流量を阻害する筋張力は、被検者により異なるが、矢部¹⁵⁾らによれば、筋力発揮において心理的限界は生理的限界より低い値を示し、また、この値は被検者により12~32%とかなりの巾がある。これが血流量を減少させる筋張力の臨界レベルについて、被検者による相違をきたさしめたものと思われる。

本研究において、最大努力を持続する運動において、血流を阻止しない場合と血流を阻止した場合の筋力の低下の傾向は、最大筋力の41~63%の筋力値までは相違がみられず、この時点以下の筋力値に筋力低下の傾向に相違がみられたことについては、その際の筋力発揮による血流の阻害の有無が直接的に関係することがわかった。筋張力の血流阻害への影響をみると、軽い負荷重量では血流量が増し、そして最大筋力の $\frac{1}{3}$ 以上の負荷重量において血流阻害が始まり、最大筋力の $\frac{2}{3}$ 以上の筋張力で、強い血流阻害が引き起される。

結 論

前腕屈筋群の最大努力で持続する静的運動において、血流を人為的に阻止した時と血流を阻止しない時の筋力が低下する傾向を比較した。

また、最大筋力の各割合の負荷重量を保持する運動時の血流量の変化をみた。

その結果、つぎのような知見を得た。

1) 前腕の最大筋力は、血流を阻止しない時に平均 22.0 kg であり、血流を阻止した時が平均

22.8 kg とほぼ同じ値を示した。

2) 筋力の低下する傾向は、血流を阻止しない時も、血流を阻止した時も最大筋力の41~63%の値まで、同じように低下して来たものが、それ以降血流を阻止した時の傾向に比較し、血流を阻止しない時の筋力はゆるやかな減少となり、両者の筋力の低下する傾向に相違がみられた。

3) 運動時の血流量を安静値と比較すると、軽い負荷では増加し、最大筋力の $\frac{1}{3}$ 以上の負荷重量では、筋内圧上昇による血流阻害が起こり始め、最大筋力の $\frac{2}{3}$ 以上の負荷重量では、強い血流阻害がおこる。

4) 最大努力を持続する運動で、血流を阻止した場合と阻止しなかった場合の筋力の低下傾向に相違がみられた分岐点と、血流量が安静値より低い値を示す負荷重量とは、ほぼ一致する。このことから、筋内血流の有無が筋力の低下の傾向に直接的に影響するものと思われる。

文 献

- 1) Barcroft, H., and J.L.E. Millen: The blood flow through muscle during sustained contraction. *J. Physiol.* 97, p. 17-31, 1939.
- 2) Barcroft, H., and A.C. Dornhorst: The blood flow through the human calf during rhythmic exercise. *J. Physiol.* 109, p. 402-411, 1949.
- 3) Barcroft, H., B. Greenwood and R.F. Whelam: Blood flow and venous oxygen saturation during sustained contraction of the forearm muscles. *J. Physiol.* 168, p. 848-856, 1963.
- 4) Gaskell, W.H.: On the changes of the blood stream in muscles through stimulation of the nerves. *J. Anat.* 11, p. 360-402, 1877.
- 5) Grant, R.T.: Observations on the blood circulation in voluntary muscle in man. *Clin. Sci.* 3, p. 157-173, 1938.
- 6) Greenfield, A.D.M.: The peripheral circulation. *Ann. Rev. Physiol.* 27, p. 323-350, 1965.
- 7) Hill, A.V.: The pressure developed in muscle during contraction. *J. Physiol.* 107, p. 518-526, 1948.
- 8) Humphreys, P.W. and A.R. Lind.: The blood flow thorough active and inactive muscles of the forearm during sustained hand-grip contraction. *J. Physiol.* 166, p. 120-135, 1963.
- 9) 猪飼道夫, 田口貞善: 筋の酸素消費量からみた筋持久力, 日本体力医学総会抄録集(第21回), p. 24-25, 1967.

- 10) 猪飼道夫：矢部京之助：最大筋力と疲労，体育の科学，17(3)，p. 166-172, 1967.
- 11) Myers, S.J., and W.P. Sullivan: Effect of circulatory occlusion on time to muscular fatigue. *J. Appl. Physiol.* 24(1) p. 54-59, 1968.
- 12) Royce, J.: Isometric fatigue curves in human muscle with normal and occluded circulation. *R.Q.* 29(2), p. 204-212, 1958.
- 13) Start, K.B. and R. Holmes.: Local muscle endurance with open and occluded intramuscular circulation. *J. Appl. Physiol.* 18 (4), p. 804-807, 1963.
- 14) Stein, I.D., K. Harpuder and J. Byer.: Effect of sympathectomy on blood flow in the human limb. *Am. J. Physiol.* 152 (3), p. 499-504, 1948.
- 15) 矢部京之助：最大筋力と疲労，体育学研究，vol. 11, No. 2, p. 77-85, 1966.