

等尺性最大筋収縮中の筋疲労曲線と血流量

北村 潔 和

富山大学教養部運動生理学教室 〒930 富山市五福3190

Fatigue Curve and Blood Flow during Maximal Isometric Contraction of the Forearm

Kiyokazu Kitamura

Laboratory for Work Physiology, College of Liberal Arts,
Toyama University,
3190 Gofuku, Toyama-shi, 930

ABSTRACT Maximal isometric strength (MIS) and fatigue curve of the forearm muscle during maximal isometric contraction (MIC) were measured by a strain-gauge hand-dynamometer. The MIS was represented by the highest point on the force curve observed during MIC of 3 sec and the fatigue curve was defined as the force curve recorded during MIC for 5 min. Blood flow during MIC of the forearm for 5 min was determined by a mercury-in-rubber strain-gauge venous occlusion plethysmography. The following results were obtained: 1). It is found that the MIS (42.0 ± 2.5 kg) was higher than that the peak strength (34.7 ± 2.4 kg) observed during MIC for 5 min. 2). The force recorded during MIC for 5 min decreased as soon as the contraction started and reached at about $36.2 \pm 3.9\%$ MIS in 1 min, $23.9 \pm 1.7\%$ in 2 min and $15.0 \pm 1.5\%$ MIS in 5 min. 3). The forearm blood flow was depressed and followed by gradual increase. It reached a steady state at about 20.5 ± 2.4 ml/100ml·min approximately in 2 min. 4). The absolute force values observed during MIC for 5 min were correlated with the forearm blood flow during contraction ($r = -0.673$, $p < 0.001$, $Y = 25.15 - 0.727X$). Furthermore, a negative correlation ($r = -0.660$, $p < 0.001$, $Y = 25.14 - 0.308X$) was obtained between the blood flow during contraction and the force of percent of MIS. 5). Muscle blood flow estimated from equation of Kontos et al. were correlated with the force of percent of MIS ($r = -0.568$, $p < 0.001$, $Y = 23.52 - 0.298X$). 6). These results suggested that the blood flow through the forearm is occluded by the force of higher than about 78.3% MIS.

I. 目 的

作業筋への血流量は、作業筋への酸素供給、筋作業によって産出される代謝産物や熱の除去等に重要な役割を担っていることから、筋の作業能力を決定する重要な要因の1つとして注目されている。筋血流量は、ランニングや自転車のペダリングなどのような律動的作業では、最大作業近くまで負荷や代謝水準(HR, $\dot{V}O_2$)^{4,5)}の増大にほぼ比例して増すことが知られている。これに対し、等尺性筋収縮中の血流量は、筋収縮力が低い間は、その増大に伴って増すが、筋収縮力が高くなると制限を受けることが指摘されている。例えば、Lind & McNicol¹³⁾は、前腕筋群を対象に最大筋力の5~30%に相当する負荷で静的作業(Sustained Contraction)を行わせた時の前腕の血流量を測定し、血流量は、負荷の増大に伴って増すことを報告している。また、Humphreys & Lind⁸⁾は最大筋力の30~60%を、また、金子¹¹⁾らは、最大筋力の20~70%に相当する負荷を用いて、先のLind & McNicol¹³⁾と同じ作業を行わせた時の前腕血流量を測定し、血流量が負荷の増大に伴って減少することを報告し、最大筋力の70%に相当する負荷での作業中においても安静時より高い血流量があることを指摘している。

一方、等尺性最大筋収縮を行わせた時の力曲線(筋疲労曲線)から、等尺性最大筋収縮中の血流動態を検討したRoyce¹⁵⁾やStephens & Taylor¹⁶⁾は、筋力が等尺性最大筋収縮中に現われた最大筋力(Peak 筋力とする)の約50~60%に低下すると血流が再開され、それ以上の筋力では、血流が阻止されていたであろうことを指摘している。しかし、彼らの報告は、作業筋への血流を遮断した条件と自由にした条件で作業を行わせた時の筋疲労曲線の相違から推測されたものであり、実際の血流量は測定されていない。

本実験では、前腕筋群を対象に等尺性最大筋収縮を持続的に行わせた時の筋疲労曲線と血流量を同時に測定し、筋疲労に伴う作業筋への血流動態を明らかにするとともに、血流が完全に阻止される筋力水準を推定しようと計画したものである。

II. 実験方法

1) 被検者

被検者は健康な男子6名で、年齢は 21.8 ± 2.5 歳、身長は 175.9 ± 2.9 cm、体重は 68.8 ± 3.1 kg(平均±標準誤差)であった。その中の5名は、バレーボールクラブに所属し、週4回、1回2時間30分程度の練習を行っている学生で、他の1名は体育教官である。

2) 等尺性最大筋力と筋疲労曲線の測定

等尺性最大筋力と筋疲労曲線は、ストレインゲージを内蔵した握力計(ヤガミ ED-100)を用いて測定した。すなわち、等尺性最大筋力は、被検者を木製ベッドに仰臥位にし、右

腕を体測方向肩の高さに伸ばし、その前方に置かれた握力計を最大努力で約3秒間把握し、その力曲線を記録器(渡辺測器株式会社製マルチコーダ MC6600)に記録し、その最大値を読み取った。

筋疲労曲線は、被検者を等尺性最大筋力測定と同じ仰臥位にし、握力計を最大努力で5分間持続して握らせた時の力曲線を記録器に連続して記録した(図1)。得られた筋疲労曲線は、後で述べる血流量測定と同時刻に記録された約3秒間の力曲線の最大値と最小値を読み取り、その平均値をその時点の筋力として分析した。

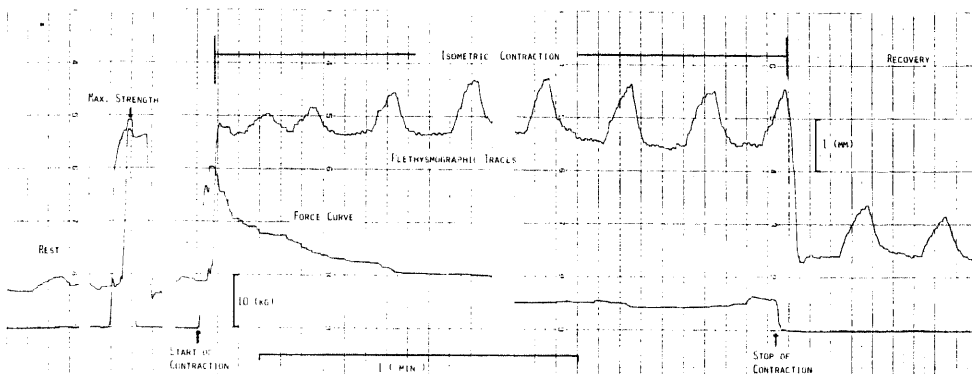


Fig. 1 Top : an actual record of forearm volume changes during and after maximal isometric contraction.
Bottom : an actual record of force curve during maximal isometric contraction.

3) 血流量の測定

安静時、等尺性最大筋収縮中及び回復期の血流量は、水銀ラバーストレインゲージを用いた静脈阻止プレシモグラフ法を適用して測定した。^{8,13,18)}すなわち、前腕最大囲に20gの張力で水銀ラバーストレインゲージを、そして上腕部に幅14cmの静脈阻止用のCuffをそれぞれ装着した。血流量は、上腕部のCuffに60mmhgの静脈阻止圧を5~10秒間加えたときの、前腕周径変化の記録から(図1)Whitney方法にしたがって求めた。¹⁷⁾ただし、図1でも明らかなように、等尺性最大筋収縮中の前腕周径は、筋収縮によって安静時の前腕周径に比べて約1.8~3.0mm(安静時前腕周径の約0.68~1.07%)増大した。したがって、等尺性最大筋収縮中の血流量は、安静時の前腕周径に筋収縮によって生じた前腕周径の増大分を加えて、その前腕周径に対する相対変化として求めた。

安静時血流量は、30秒間隔で4回、等尺性最大筋収縮中血流量は筋収縮開始後5秒、15秒、30秒、45秒、1分、その後は15秒間隔で5分まで測定した。回復期血流量は、等尺性最大筋収縮終了直後(5秒以内)、15秒、30秒、45秒、1分、その後は30秒間隔で5分までと、さらにそれ以後は1分間隔で10分まで測定した。

なお、水銀ラバースインゲージの較正は、実験の前後にマイクロメーターを用いてゲージを引き伸ばすことにより行った。

4) 実験手順

先ず、被検者を室温 $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ に設定された恒温恒湿室(サンヨープレハブ恒温恒湿室)に入れ、ベッドに仰臥位にさせて約30分間の安静を取らせた。その後、水銀ラバーストレインゲージとCuffをそれぞれ装着し、安静時血流量を測定した。次に等尺性最大筋力を測定し、さらに5分間の休息を取らせ、等尺性最大筋収縮を5分間行わせ、筋収縮中及び回復期の血流量を測定した。

Ⅲ. 実験結果

1) 等尺性最大筋力と Peak 筋力

本実験で得られた等尺性最大筋力は、 $42.0 \pm 2.5\text{kg}$ (平均 \pm 標準誤差)であった。また、等尺性最大筋収縮を5分間持続させた時に得られたPeak筋力は、 $34.7 \pm 2.2\text{kg}$ であり等尺性最大筋力の約82.6%であった。

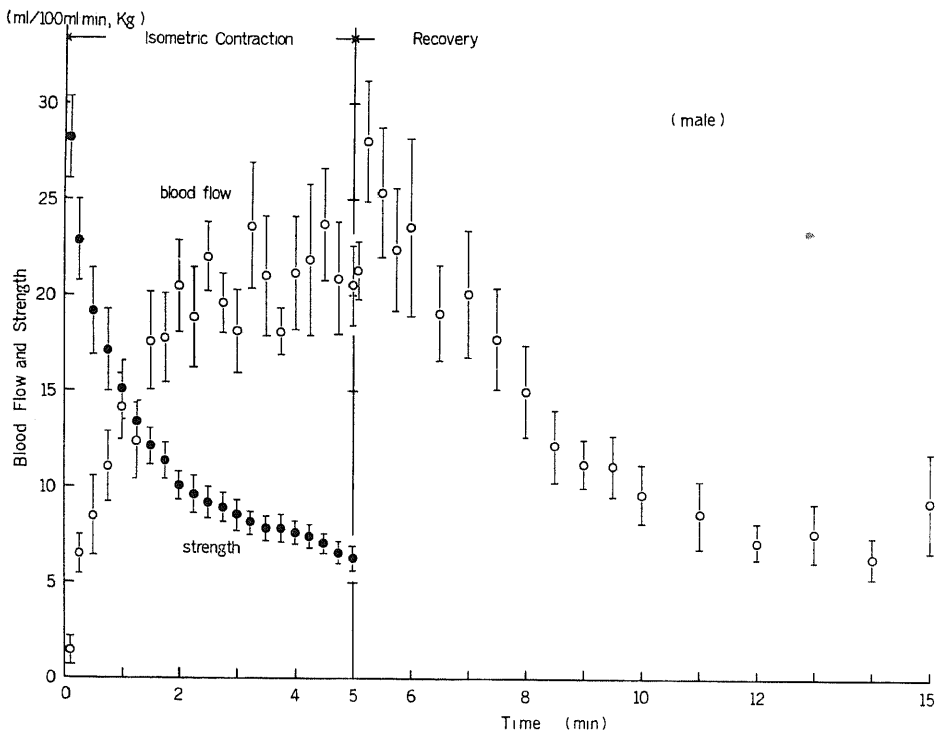


Fig. 2 Time course of strength (black circle) and Blood flow (white circle) during and after contraction of forearm muscles.

2) 筋疲労曲線と血流動態

図2は、等尺性最大筋収縮を5分間持続させた時の筋疲労曲線と血流量を時間経過に対して示したものである。図2でも明らかなように、筋疲労曲線は、時間の経過とともに指

数関数的に低下していく傾向が認められた。すなわち、等尺性最大筋収縮開始直後(5秒後)には、等尺性最大筋力の $67.6 \pm 5.3\%$ であったが、筋収縮開始後1分目には、等尺性最大筋力の $36.2 \pm 3.9\%$ へ、2分目には $23.9 \pm 1.7\%$ へ、そして5分目には $15.0 \pm 1.5\%$ へ低下した。

一方、等尺性最大筋収縮中の血流量は、筋収縮開始5秒後には $1.4 \pm 0.8 \text{ ml}/100 \text{ ml} \cdot \text{min}$ であったものが、1分目には $14.2 \pm 1.8 \text{ ml}/100 \text{ ml} \cdot \text{min}$ へ、2分目には $20.5 \pm 2.4 \text{ ml}/100 \text{ ml} \cdot \text{min}$ へ筋力の低下に対応するように急激に増大する傾向を示した。しかし、2分目以降はほぼ一定の値を示した。

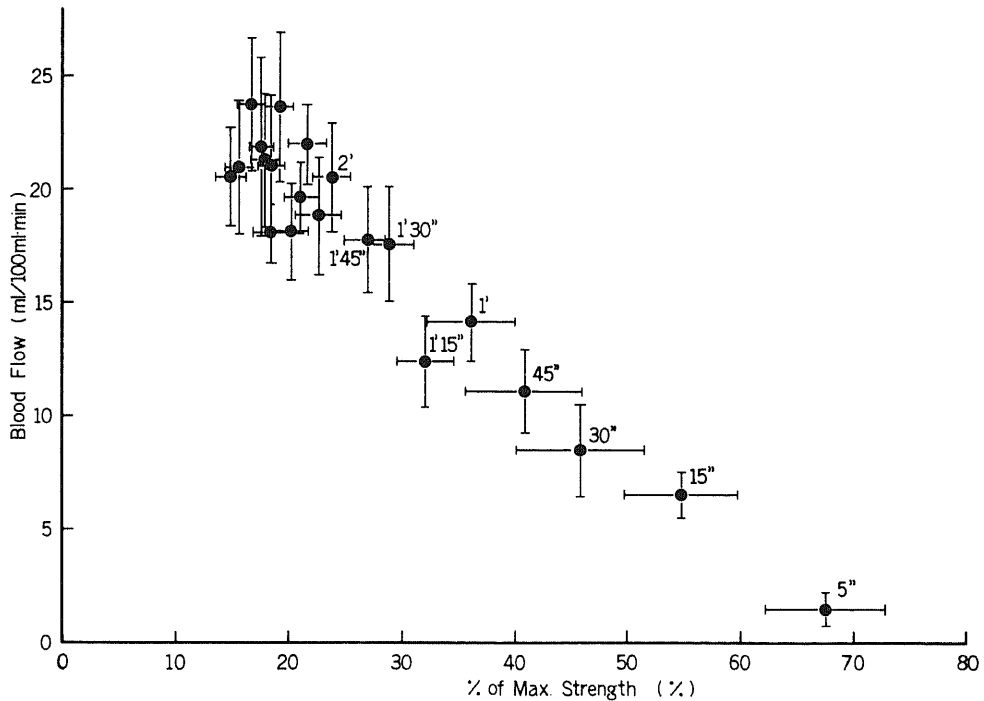


Fig. 3 Average blood flow in relation to strength expressed in percent of maximal isometric strength.

図3は、時間経過に伴う筋力の低下傾向と血流量の増大傾向の関係を明らかにするために、等尺性最大筋力に対する相対的な筋力(%筋力)と血流量の関係を示したものである(ただし、%筋力と血流量は、図2で示された平均値と標準誤差を用いて示した)。図3からも明らかなように、等尺性最大筋収縮開始後2分目までは(等尺性最大筋力の 23.9% まで)、筋力の低下にほぼ比例して血流量が増大し、2分目を過ぎて筋力の低下が弱まると血流量の増大も弱まる傾向が認められた(図中の数字が示されていないプロットは2分目以降の値を示す)。

3) 筋力と血流量の関係

図4は、作業筋への血流が完全に阻止される筋力水準を推定するために、筋疲労曲線から得られた筋力とそれと同時に得られた血流量の関係を示したものである。図4のAは、絶対的筋力と血流量の関係を示したものであり、両者の間には、相関係数 $r = -0.673$, $P < 0.001$ (回帰方程式: $Y = 25.15 - 0.73X$) と密接な関係が認められた。この回帰方程式から血流が完全に阻止される筋力水準を推定すると34.5kgであった。

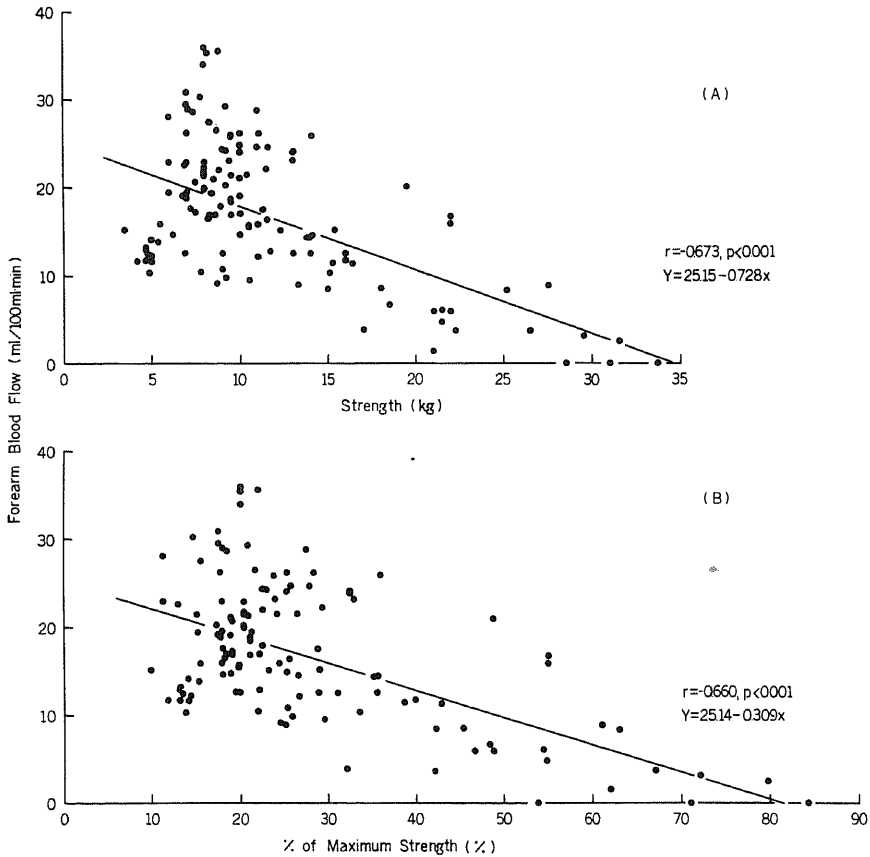


Fig 4 Individual values for blood flow in relation to strength in absolute (upper panel) and in percent of maximal isometric strength (lower panel).

また、図4のBは、%筋力と血流量の関係を示したものであり、両者の間には $r = -0.660$, $P < 0.001$ (回帰方程式: $Y = 25.14 - 0.308X$) と密接な関係が認められた。この回帰方程式から血流が完全に阻止される%筋力水準を推定すると81.3%であった。

4) 回復期血流量

等尺性最大筋収縮終了直後の血流量は $21.3 \pm 1.5 \text{ ml}/100 \text{ ml} \cdot \text{min}$ であり、等尺性最大筋収縮中の5分目の血流量 ($20.5 \pm 2.1 \text{ ml}/100 \text{ ml} \cdot \text{min}$) とほぼ同じ値を示した。しかし、等尺性最大筋収縮終了後15秒目の血流量は、 $28.1 \pm 3.2 \text{ ml}/100 \text{ ml} \cdot \text{min}$ であり、等尺性最大筋収縮

中の5分目の血流量に比べて有意に高い値を示した($P < 0.05$)。

IV. 論 議

被検者には、等尺性最大筋力と筋疲労曲線を測定する場合のどちらにおいても“最大努力で”と指示を与えたにもかかわらず、本実験で得られた等尺性最大筋力は、5分間の等尺性最大筋収縮中に得られたPeak筋力よりも17.4%高い値を示し、石黒と北村¹⁰⁾の報告と一致した。等尺性最大筋力がPeak筋力よりも高くなった原因は明らかでないが、本実験では、等尺性最大筋力を基準に筋疲労曲線を相対評価した。

ところで、Stephens & Taylor¹⁶⁾は、等尺性最大筋収縮を3～4分持続させた時の筋疲労曲線が、筋収縮開始後1分目には、Peak筋力の50%へ、2分目には25%へ急激に低下し、その後はほぼ一定の値を維持することを、また石黒と北村¹⁰⁾は、筋疲労曲線は、指数関数的に急激に低下し、等尺性最大筋力の13～22%でほぼ一定の値を示すことを報告しており、本実験の結果とほぼ一致した。

一方、等尺性最大筋収縮中の血流動態を検討してみると、血流は筋収縮中に完全に阻止されることなく流入し、筋力の低下にほぼ比例して増大する傾向が認められた。また、筋力の低下が弱まると血流量の増大も弱まる傾向が認められた(図1, 2)。これらの結果は、Royce¹⁵⁾やStephens & Taylor¹⁶⁾が、作業筋への血流を遮断した条件と自由にした条件で等尺性最大筋収縮を持続して行かせた時の筋疲労曲線から指摘した血流動態とは一致しなかった。すなわち、彼ら^{15, 16)}は、上記の2条件で筋疲労曲線を検討し、Peak筋力の約50～60%へ筋力が低下するまでの筋疲労曲線には、両条件で相違が認められず、それ以降の筋疲労曲線は、血流を遮断した条件では筋力の低下が続くのに対し、血流を自由にした条件では筋力の低下が弱まったことから、Peak筋力の約50～60%以上の筋力では血流量が完全に阻止され、この筋力水準を下回ると血流が再開されるであろうことを指摘している。

本実験の結果とRoyce¹⁵⁾やStephens & Taylor¹⁶⁾の報告を考え合わせると、等尺性最大筋収縮を持続して行かせた時の筋収縮開始初期の筋疲労は、作業筋への酸素運搬能力等の有酸素的要因よりも、筋中のATPやCPの含有量等の無酸素的要因に関係することが考えられる。

次に、作業筋への血流が完全に阻止される筋力水準について検討すると、Barcroft & Millen¹⁾は、下腿に最大筋力の5～30%に相当する負荷で静的作業を行かせた時の筋温を測定し、最大筋力の20%の負荷では、血流が阻止されていることを指摘している。また、Bonde-Petersen²⁾らは、最大筋力の15～75%に相当する負荷で上腕屈筋群、上腕伸筋群あるいは背筋に静的作業を行かせた時の作業中の血流量をXe₁₃₃クリアランス法で測定し、血流が完全に阻止される負荷は、上腕屈筋群、上腕伸筋群及び背筋でそれぞれ最大筋力の50%、25%、40%であったことを報告している。これに対し、Humphreys & Lind⁸⁾及び、

金子らは、前腕筋群について最大筋力の20~70%に相当する負荷で静的作業を行わせた時の血流量を静脈阻止プレチスモグラフ法を用いて測定し、最大筋力の70%の負荷での作業中においても、血流は完全には阻止されていないことを報告している。本実験の筋疲労曲線から得られた筋力と血流量の関係から、等尺性最大筋力の70%に相当する筋力水準における血流量を推定すると3.5ml/100ml・minであり、安静時血流量に比べて0.9ml/100ml・min低い値であったが、本実験の結果は、最大筋力の70%の作業でも血流が完全に阻止されないとするHumphreys & Lind⁸⁾、金子らの報告¹¹⁾とほぼ一致するものと考えられる。また、血流が完全に阻止される筋力水準を筋力と血流量の関係から得られた回帰方程式から検討すると、絶対的筋力では34.6kg、%筋力では81.3%であった。この値(%筋力)は、Barcroft & Millen¹⁾ Bonde-Petersen²⁾らの報告に比べてかなり高い値であった。

本実験の静脈阻止プラチスモグラフ法で測定された血流量は、筋の他にプレチスモに含まれた皮膚や骨等の血流量を含んでいる。これに対し、Xe¹³³クリアランス法で測定された血流量は筋のみの血流量と考えられる。

筋収縮によって血流が完全に阻止される筋力を推定する場合には、皮膚血流量を考慮する必要がある。本実験では、筋血流量と皮膚血流量を分けて考える資料はないが、Cooper⁶⁾ら、Kontos¹²⁾らは、アドレナリン導入法により、皮膚血流量を遮断した実験を行い、静脈阻止プラチスモグラフ法で得られた血流量から筋血流量や皮膚血流量を求める回帰方程式を報告している。また、Hyman⁹⁾らは、皮膚血流量は、局所的な作業によってほとんど変化しないことを報告している。したがって、本実験ではKontos¹²⁾らの皮膚血流量を求める回帰方程式を用いて皮膚血流量を算出し、本実験の筋収縮中に得られた血流量から皮膚血流量を除き、筋血流量を求めた。このようにして、得られた筋血流量と筋力及び%筋力との関係から、血流が完全に阻止される筋力水準を再検討した。その結果、絶対的筋力と筋血流量の間には、相関係数 $r = -0.586$, $p < 0.001$ (回帰方程式: $Y = 23.80 - 0.737X$) の関係が認められた。この回帰方程式から、血流が完全に阻止される筋力水準を推定すると32.2kgであった。また、%筋力と筋血流量の間には、相関係数 $r = -0.568$, $p < 0.001$ (回帰方程式: $Y = 23.52 - 0.298X$) の関係が認められた。この回帰方程式から血流が完全に阻止される%筋力水準は、78.3%であった。このように、皮膚血流量を考慮しても、血流量が完全に阻止される筋力水準は、Barcroft & Millen¹⁾ Bonde-Petersen²⁾らの報告に比べて高いものであった。この結果は、Bonde-Petersen²⁾らの報告でも明らかのように、血流が筋収縮によって完全に阻止される筋力水準は、対象にした筋群によって相違することを示唆するものと考えられる。そして、前腕筋群への血流量が筋収縮によって完全に阻止される筋力水準は、下腿筋群、上腕屈筋群、上腕伸筋群及び背筋に比べて高いものといえよう。

Lind & McNicol¹³⁾は、静的作業を行わせた場合、その作業に必要な血液量が作業筋へ供給されていると、作業中の血流量は一定になり、いわゆる血流負債も小さく、また作業筋へ

の血液量が十分でないとして作業中血流量は作業時間経過に伴って増大し、血流負債も大きくなることを報告している。

本実験の回復期の最高血流量は、等尺性最大筋収縮終了直前に得られた血流量に比べ有意に高い値を示し($P < 0.05$)、筋収縮開始初期に生じた負債を回復期で消却していることが推測された。しかし、等尺性最大筋収縮開始2分目以降の血流量が筋収縮終了までほぼ一定であったことや、筋収縮終了直前(等尺性最大筋収縮の約15%の筋力水準であった)の血流量($20.5 \text{ ml}/100 \text{ ml} \cdot \text{min}$)¹³⁾が、これまで、その負荷で静的作業を行わせた時に測定されている血流量(約 $15 \text{ ml}/100 \text{ ml} \cdot \text{min}$)に比べて高い値を示したことを考えると、本実験のような作業では、筋収縮中(筋力の低下が弱まり、作業筋への血流がほぼ一定になる期間)に作業筋で負債を消却しながら作業が遂行されていたことが推測される。しかし、この仮説については、さらに検討する必要がある。

V. 要 約

等尺性最大筋力及び等尺性最大筋収縮を5分間持続して行わせた時の筋疲労曲線と血流量を測定した。等尺性最大筋力と筋疲労曲線は、ストレインゲージを内蔵した握力計を用いて、また安静時、等尺性最大筋収縮中及び回復期の血流量は、水銀ラバーストレインゲージ静脈阻止プレチスモグラフ法を用いて測定した。

等尺性最大筋力は、等尺性最大筋収縮を5分間持続して行わせた時に得られた最大筋力(Peak筋力)に比べて17.4%高い値を示した。

筋疲労曲線は、等尺性最大筋収縮開始2分目までは急激に低下し、その後は5分目まで緩かに低下する傾向が認められた。

等尺性最大筋収縮中の血流量は、筋収縮開始約2分目までは、筋力の低下に伴って急激に増大し、その後はほぼ一定になる傾向が認められた。

筋疲労曲線から得られた筋力とそれと同時に得られた血流量の間には密接な関係が認められた。絶対的筋力と血流量の間には、 $r = -0.673$, $P < 0.001$ (回帰方程式: $Y = 25.15 - 0.727X$)、等尺性最大筋力に対する相対的筋力(%筋力)と血流量の間には、 $r = -0.660$, $P < 0.001$ (回帰方程式: $Y = 25.14 - 0.308X$)が認められた。これらの回帰方程式から、血流が完全に阻止される筋力水準を検討すると絶対的筋力では34.6kg、%筋力では81.3%であった。さらに、本実験の血流量から皮膚血流量を考慮して血流量が完全に阻止される筋力水準を再検討すると絶対的筋力では32.2kg、%筋力では78.3%であった。

以上の検討から、等尺性最大筋収縮を5分間持続して行わせた時の血流量は、筋力の低下に伴って急激に増大し、筋収縮によって完全に血流量が阻止される筋力水準は、等尺性最大筋力の78.3%であるものと推定された。

文 献

- 1) Barcroft, H. and J. L. E. Millen (1939) The blood flow through muscle during sustained contraction. *J. Physiol.* 97 : 17-31.
- 2) Bonde-Petersen, F., A. L. Mørk and E. Nielsen (1975) Local muscle blood flow and sustained contraction of human arm and back muscle. *Eur. J. Appl. Physiol.* 34 : 43-50.
- 3) Bonde-Petersen, F., J. Henriksen and B. Lundin (1975) Blood flow in thigh muscle during bicycling exercise at varying work rate. *Eur. J. Appl. Physiol.* 34 : 191-197.
- 4) Clausen, J. P. and Trap-Jensen (1970) Effects of training on the distribution of cardiac output in patients with coronary artery disease. *Circulation*, 42 : 611-642.
- 5) Clausen, J. P. and N. A. Lassen (1971) Muscle blood flow during exercise in normal man studied by the ^{133}Xe clearance method. *Cardiovas. Res.* 5 : 245-254.
- 6) Cooper, K. E., O. G. Edholm and R. F. Mottran (1955) The blood flow in skin and muscle of the human forearm. *J. Physiol.* 128 : 258-267.
- 7) Grimby, G., E. Häggendal and B. Saltin (1967) Local xenon 133 clearance from the quadriceps muscle during exercise in man. *J. Appl. Physiol.* 22 : 305-310.
- 8) Humphreys, P. W. and A. R. Lind (1963) The blood flow through active and inactive muscles of the forearm during sustained hand-grip contractions. *J. Physiol.* 166 : 120-135.
- 9) Hyman, C., T. Greenson, M. Clem and D. Winsor (1964) Capacitance-plethysmograph method for separating blood flow in muscle and skin in the human forearm. *Am. Heart J.* 68 : 508-514.
- 10) 石黒光祐, 北村潔和(1985)競技者と一般学生の最大把握力と最大把握力の持続能力, *J. J. Sports Sci.* 4 : 61-67.
- 11) 金子公宥, 山本恵子, 表富美子(1976)種々負荷強度の静的掌握作業に伴う前腕血流量の動態, 大阪体育大学紀要, 8 : 1-8.
- 12) Kontos, H. A., D. W. Richardson (1966) Blood flow and metabolism of forearm muscle in man at rest and during sustained contraction. *Am. J. Physiol.* 211 : 869-876.
- 13) Lind, A. R. and G. McNicol (1967) Local and central circulatory responses to sustained contractions and the effect of free or restricted arterial inflow on post-exercise hyperaemia. *J. Physiol.* 192 : 575-593.
- 14) Pirnay, F., R. Marechal, R. Redermecker and I. Mpetit (1972) Muscle blood flow during submaximal and exercise on a bicycle ergometer. *J. Appl. Physiol.* 32 : 210-212.
- 15) Royce, J. (1958) Isometric fatigue curves in human muscle with normal and occluded circulation. *Res. Quart.* 29 : 204-212.
- 16) Stephense, J. A. and A. Taylor (1972) Fatigue of maintained voluntary muscle contraction in man. *J. Physiol.* 220 : 1-18.
- 17) Whitney, R. J. (1953) The measurement of volume changes in human limbs. *J. Physiol.* 121 : 1-27.
- 18) Williams, C. A. and A. R. Lind (1979) Measurement of forearm blood flow by venous occlusion plethysmography : Influence of hand blood flow during sustained and intermittent isometric exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 42 : 141-149.