

前腕の律動的作業中血流量と作業 終了直後血流量の関係

北 村 潔 和

富山大学教養部運動生理学教室

Relationship between Forearm Blood Flow during and after Rhythmic Hand-grip Exercise

Kiyokazu Kitamura

Laboratory for Work Physiology, College of Liberal Arts, Toyama University,
Toyama 930

ABSTRACT Forearm blood flow was measured with a mercury-in-rubber strain gauge venous occlusion plethysmography before, during and after rhythmic hand-grip exercise. The hand-grip exercise was performed on a hand-ergometer with the loads of 10 and 30% of maximal voluntary contraction (MVC) of each subject, at the rate of 60 contractions/min as timed with a metronome.

The following results were obtained;

- 1) The forearm blood flow immediately after rhythmic hand-grip exercise at a load of 10% of MVC was close correlated to peak blood flow during exercise ($r=0.91$, $p<0.001$) and to the blood flow immediately before stopping the exercise ($r=0.92$, $p<0.001$).
- 2) The forearm blood flow immediately after rhythmic hand-grip exercise at a load of 30% of MVC was close correlated to peak blood flow during exercise ($r=0.49$, $p<0.05$). However, no relationship was observed between the blood flow immediately before stopping the exercise and the blood flow immediately after exercise.
- 3) From these results, it is concluded that the blood flow determined immediately after exercise is reliable index for the estimated the peak blood flow during the rhythmic hand-grip exercise.

I. 目 的

作業筋への血流量は、筋の作業能力を決定する重要な要因の一つとして注目されている。

ヒトの作業時の作業筋への血流量を測定する方法には、静脈阻止プレチスモグラフ法、色素希釈法、キセノン 133 クリアランス法などがある。その中でも、ヒトの四肢への血流量の測定には、指示薬の注入や採血の必要がなく、非観血的・量的に血流量が測定できることから、静脈阻止プレチスモグラフ法が適用されてきている^{2,7,9,12,13,16)}。しかし、この方法を用いて、律動的作業中の血流量を測定するには、Barcroft と Dornhorst¹⁾ が示した複雑な手続をとる必要があると考えられてきたことから、静脈阻止プレチスモグラフ法を用いた、これまでの多くの報告は、作業後の血流量の測定から作業中の血流量が推定され検討されてきた^{2,7,16)}。

最近、Kitamura⁸⁾、北村と有沢¹⁰⁾は下腿について、北村は前腕¹¹⁾について、律動的作業中の血流量が、Barcroft と Dornhorst¹⁾ の示した複雑な手続をとらなくとも、従来よりの静脈環流を阻止するのみの方法によって測定できることを報告している。その中で、彼らは、作業中血流量（作業終了直前血流量）と作業終了直後血流量との間に密接な関係のみられることを示し、これまで測定されてきた作業終了直後血流量の意義を明らかにしている^{8,10)}。

しかし、彼らが実験に用いた作業が、膝窩に表在する外側腓腹皮神経を皮膚表面上から電気刺激することによって、足関節の背屈を行わせ、1～3 kg の負荷を 0.5 cm の高さに持ち上げるものであり、負荷が最大筋力の何 % に相当するのか明らかでなく、この結果を一般化することには難がある。

さらに、筋収縮による機械的な血管圧迫が下腿と前腕では異なることが指摘されており¹¹⁾、前腕の作業については、律動的作業中血流量と作業後血流量との関係が確かめられているとはいえない。

本実験は、最大筋力の 10% と 30% の負荷を用いて、前腕の律動的な把握作業を行わせたときの作業中と回復期の血流量を静脈阻止プレチスモグラフ法を用いて連続的に測定し、作業終了直後血流量との関係を明らかにし、これまで測定されてきた、作業終了直後血流量の意義を検討しようとしたものである。

II. 実験方法

1) 被検者

被検者は、平均年齢 20.9 歳、身長 167.3 cm、体重 61.1 kg の健康な男子 17 名である。

2) 最大筋力の測定

前腕の最大筋力は、被検者を仰臥位にし、腕を肩の高さに体側方向に伸ばし、バネ式の握力計を用いて、約 3 秒間の最大努力での把握によって測定した。作業負荷には、この最大筋力の 10% と 30% を用いた。

3) 前腕の律動的な把握作業

前腕の律動的な把握作業は、最大筋力測定時と同じ仰臥位で、体側方向前方に固定され

た、ハンドエルゴメーターを用いて、60回/分のメトロノームのテンポに合わせて、負荷を1cmの高さに持ち上げることによって行われた。そのとき、前腕が心臓水準の高さになるように肘関節の下に、木製の台を添えて高さを調節した。最大筋力の10%の負荷では3分間、最大筋力の30%の負荷では疲労困憊まで作業を行わせた。疲労困憊の判定は、作業のテンポが合わなくなることや負荷が持ち上がらなくなることを目安にして検者が行った。

4) 安静時、作業中、回復期血流量の測定

安静時、作業中、回復期の血流量の測定は、水銀ラバーストレインゲージを用いた、静脈阻止プレチスモグラフ法によって行った。すなわち、手頸部に幅4cm、上腕部に幅12cmのCuffを、前腕の最大囲に25gの張力で水銀ラバーストレインゲージをそれぞれ装着した。前腕の周径変化は、手頸部のCuffに240mmHgの圧を加えた後、上腕部のCuffに60mmHgの静脈阻止圧を約10秒間加えて記録した。血流量は、このようにして得られた前腕周径変化の記録から¹⁷⁾Whitneyの方法にしたがい求めた。

作業中の血流量は、作業開始5秒後から15秒間隔で、作業後の血流量は、作業終了直後(5秒後)から15秒間隔で5分まで測定した。

なお、本実験を行うまえに、全被検者に対して、北村が示した¹¹⁾手続によって、律動的作業中に静脈阻止Cuffの下から流出する血液のないことを確かめた。

5) 測定手順

被検者を木製のベッドに仰臥位にし、最大筋力を測定した後、前腕の最大囲に水銀ラバーストレインゲージ、手頸部と上腕部にCuffをそれぞれ装着した。その後、安静時血流量を測定し、最大筋力の10%の負荷での作業を3分間行わせ、作業中血流量と回復期血流量を測定した。回復期血流量の測定後、さらに5分間の安静をとらせた後、最大筋力の30%の負荷での作業を行わせ、作業中と回復期の血流量を測定した。

III. 結果と考察

図1は、最大筋力の10%の負荷を用いて、律動的作業を行わせたときの、安静時、作業中、回復期の血流量を時間経過に対して示したものである。図1でも明らかなように、作業中血流量は、3分間の作業中に一定の値になった。

図2は、最大筋力の30%の負荷を用いて、律動的作業を行わせたときの、安静時、作業中、回復期の血流量を示したものである。作業中血流量は、図2でも明らかなように、作業開始直後から疲労困憊近くまで急激に増大し、疲労困憊近くで減少またはレベリングオフする傾向がみられた。したがって、本実験では、作業終了直後血流量と作業中最高血流量、作業終了直前血流量との関係を検討することにより、これまで測定されてきた、作業終了直後血流量の意義を明らかにしようとした。

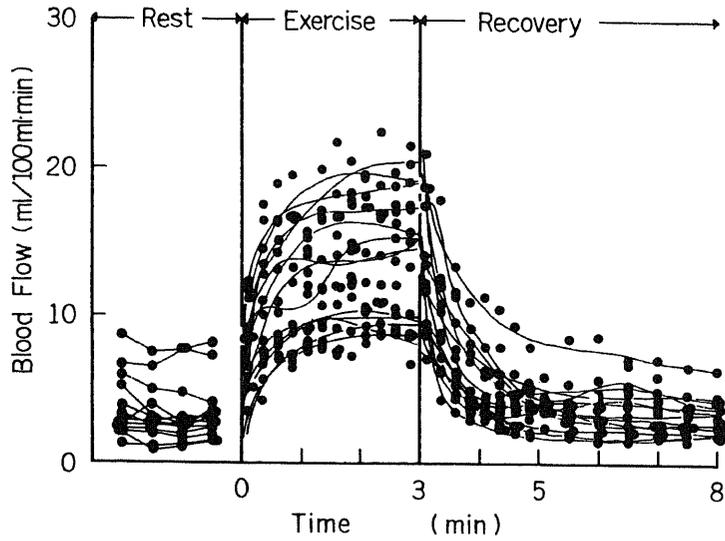


図1 最大筋力の10%の負荷を用いて律動的作業を行わせたときに得られた、安静時、作業中、回復期血流量

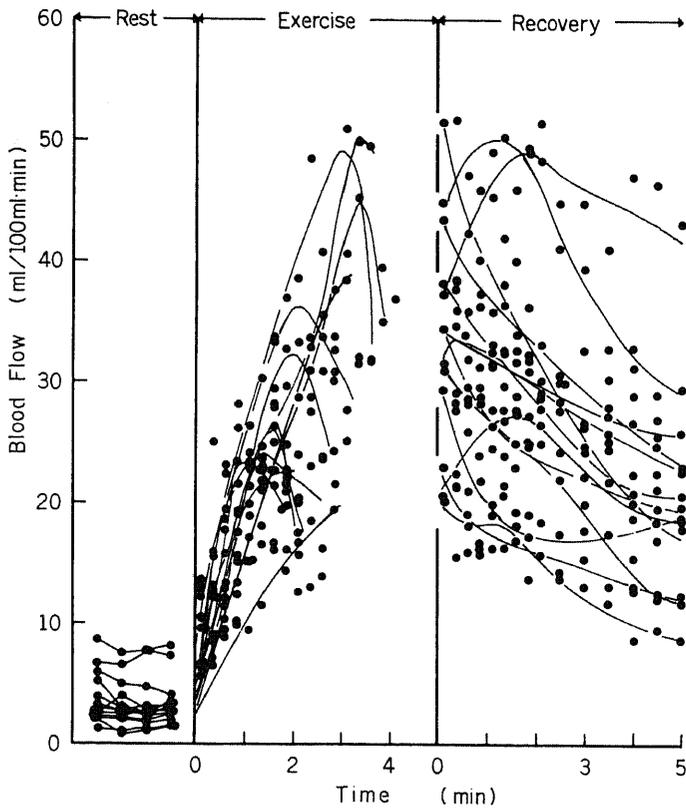


図2 最大筋力の30%の負荷を用いて律動的作業を行わせたときに得られた、安静時、作業中、回復期血流量

前腕の律動的作業中血流量と作業終了直後血流量の関係

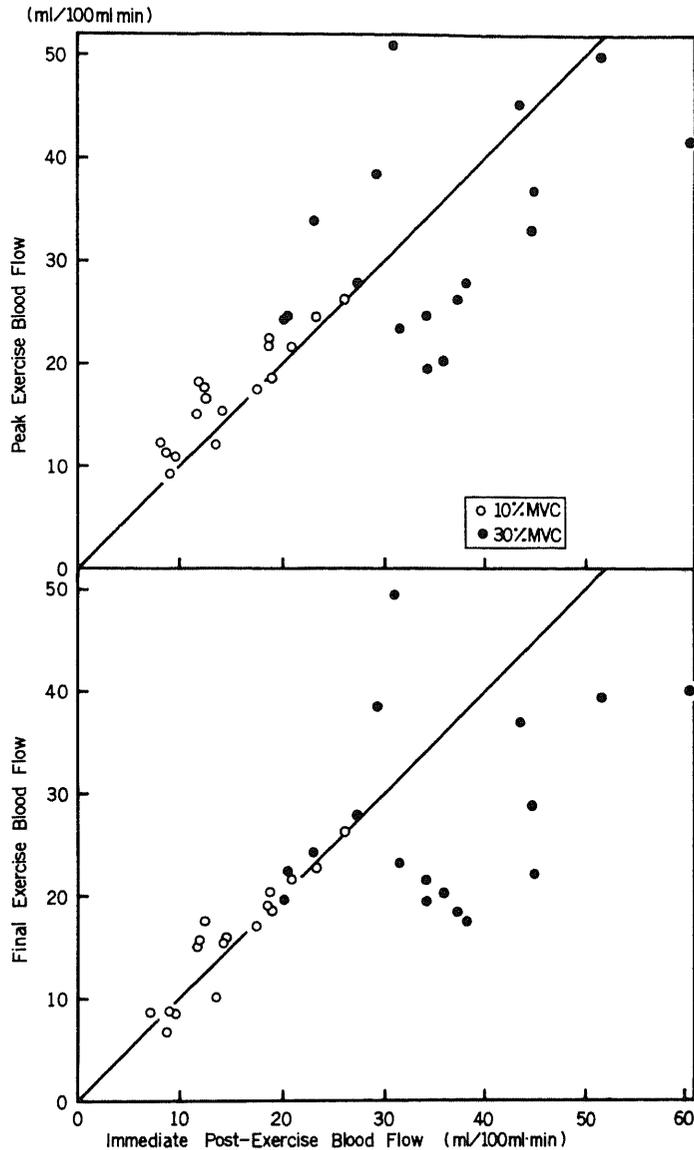


図3 作業終了直後血流量と作業中最高血流量(上段), 作業終了直前血流量(下段)の関係。白丸印は最大筋力の10%, 黒丸印は最大筋力の30%を示す。

図3は、作業終了直後血流量と作業中最高血流量(上段)、作業終了直前血流量(下段)との関係を示したものである。

最大筋力の10%の作業(白丸印)では、作業終了直後血流量と作業中最高血流量の間に相関係数 $r=0.91$ ($p<0.001$)、作業終了直前血流量との間に相関係数 $r=0.92$ ($P<0.001$) と密接な関係が認められた。

また、作業中最高血流量は、作業終了直後血流量に比べて有意に高い値を示した ($p<0.$

01)。しかし、作業終了直前血流量と作業終了直後血流量の間には、有意な差は認められなかった。

律動的作業の特徴は、筋の収縮期と弛緩期の相があり、筋の収縮と弛緩を繰り返しながら作業が遂行される場所にある。したがって、律動的作業中に測定された血流量が、どの相の血流量を示しているかが問題となる。本実験では、筋収縮時に静脈阻止 Cuff の下から流出する血液のないことを確かめていることから、律動的作業中に得られた血流量は、筋の収縮期と弛緩期に流入する平均的な血流量を示しているもの¹¹⁾と考える。

北村は、本実験と同じ方法を用いて、最大筋力の 10% の負荷で律動的作業を行わせたときの、作業中血流量と回復期血流量を連続的に測定し、作業終了直前血流量と作業終了直後血流量がほぼ同じ値であることから、最大筋力の 10% の律動的作業では、筋の収縮期と弛緩期に流入する血流量が、ほぼ同じであろうことを示唆している。また、北村と山地は、最大筋力の 5% ~ 30% の負荷で、前腕の律動的な把握作業を断続的に行わせ、筋の収縮期と弛緩期の血流量を分けて測定し、最大筋力の 10% までの負荷では、筋の収縮期と弛緩期に流入する血流量に有意の差がないことを確かめている。これらの報告は、本実験の結果とよく一致しており、最大筋力の 10% の作業では、筋の収縮時に発揮される筋内圧による、血管への機械的圧迫が、血液の流入量にほとんど影響を及ぼさないことを示唆するもの¹⁴⁾と考える。

したがって、筋収縮期と筋弛緩期に流入する平均的な血流量を示す作業中血流量と筋弛緩期の血流量に相当すると考えられる作業終了直後血流量¹¹⁾の間に密接な関係が認められたことや、作業終了直前血流量と作業終了直後血流量の間に有意の差のみ認められなかった原因の一つには、最大筋力の 10% の作業では、筋収縮による血流阻止作用がほとんどみられず、主に代謝性要因による血流増大の調節機構によって血流量が調節されていたことが推察される。

最大筋力の 30% の負荷を用いた作業 (図 3 の黒丸印) では、作業終了直後血流量と作業中最高血流量の間に相関係数 $r=0.49$ ($p<0.05$) と有意な関係が認められた。しかし、作業終了直後血流量と作業終了直前血流量の間には、有意な関係は認められなかった。

また、作業中最高血流量と作業終了直後血流量の間には、有意な差が認められなかったが、作業終了直前血流量は、作業終了直後血流量に比べて有意に低い値を示した ($p<0.05$)。

先の北村と山地は、最大筋力の 30% の負荷での作業では、筋の収縮によって作業筋への血液の流入量が、制限されることを報告している。また、Lind と McNicol¹⁵⁾は、最大筋力の 30% の負荷で前腕の静的作業を行わせたときの作業中血流量は、作業終了直後血流量に比べて低いことを報告している。したがって、最大筋力の 30% の負荷で律動的作業を行わせたときの作業中血流量は、作業終了直後血流量に比べて低いことが推察される。しかし、本実験で得られた作業中最高血流量は、作業終了直後血流量に比べて有意な差が認められず、また、両者の間に有意な関係が認められた。

Humphreys と Lind³⁾は、最大筋力の 30%~60%、金子らは⁶⁾、最大筋力の 20%~70%の負荷を用いて、前腕の静的作業を行わせたときの作業中血流量を測定し、最大筋力の 30%の作業で得られた作業中血流量が最も高い値を示し、それ以上負荷が大きくなっても小さくなくても血流量が低くなることを報告している。また、Jessup⁴⁾は、最大筋力の 30%の負荷での前腕の静的作業中に得られた最高血流量は、作業終了直後血流量に比べて、有意な差のないことを報告している。さらに、加賀谷は、下腿の律動的作業を行わせたときに得られた作業終了直後血流量は、最大筋力の 30%の負荷で得られた血流量が最も高く、それより負荷が小さくなくても大きくなっても血流量は、低くなることを報告している。これらの報告は、最大筋力の 30%の負荷での作業では、作業中に血管拡張が最大になることを示しているものと考えられる。したがって、最大筋力の 30%の負荷で疲労困憊まで律動的作業を行わせたときの作業中に得られた最高血流量が、作業終了直後血流量に比べて有意の差がなく、また、両者の間に密接な関係が認められたという本実験の結果は、作業中に筋の収縮に打ち勝って最大の血管拡張が起っていたことを示唆しているものとする。

また、疲労困憊近くでは、血流増大の調節機構を上回る何らかの血流阻止作用が強まる（律動的作業中血流量が疲労困憊近くで減少またはレベリングオフすることから）ことなどの複雑な要因が血液の流入量に影響を及ぼしていたことが、作業終了直前血流量が作業終了直後血流量に比べて有意に低い値を示し、また、両者の間に有意な関係が認められないという結果を生じさせたものと推察される。しかし、これについては、さらに検討する必要がある。

以上のことから、最大筋力の 10%の負荷を用いて律動的作業を行わせたときに得られる作業終了直後血流量は、作業中血流量を知るためのよい指標となる。また、最大筋力の 30%の負荷を用いて律動的作業を行わせたときに得られる作業終了直後血流量は、作業中最高血流量を知るための指標の一つになることが明らかになった。

IV. 要 約

1. 最大筋力の 10%と 30%の負荷を用いて前腕に律動的な把握作業を行わせたときの、作業中と回復期の血流量を静脈阻止プレチスモグラフ法によって連続的に測定し、作業終了直後血流量と作業中最高血流量、作業終了直前血流量の関係を検討した。
2. 最大筋力の 10%の作業では、作業終了直後血流量と作業中最高血流量との間に密接な関係が認められた ($r=0.91, p<0.001$)。また、作業終了直後血流量と作業終了直前血流量との間にも密接な関係 ($r=0.92, p<0.001$) が認められた。
3. 最大筋力の 10%の作業では、作業中最高血流量が作業終了直後血流量に比べて有意に高い値を示した ($p<0.01$) が、作業終了直後血流量と作業終了直前血流量との間には、有

意な差は認められなかった。

4. 最大筋力の30%の作業では、作業終了直後血流量と作業中最高血流量の間に有意の関係が認められた ($r=0.49, p<0.05$) が、作業終了直前血流量との間には有意の関係が認められなかった。
5. 最大筋力の30%の作業では、作業中最高血流量と作業終了直後血流量との間に有意の差が認められなかった。しかし、作業終了直後血流量は、作業終了直前血流量に比べて有意に高い値を示した ($p<0.05$)
6. 以上の結果から、最大筋力の10%の作業で得られた血流量は、作業中血流量を知るための良い指標となる。また、最大筋力の30%の作業で得られた作業終了直後血流量は、作業中最高血流量を知るための良い指標となることが明らかになった。

文 献

- 1) Barcroft, H. and A. C. Dornhorst (1949): The blood flow through the human calf during rhythmic exercise. *J. Physiol.*, **109**, 402-411.
- 2) Elsner, R. W. and L. D. Carlson (1962): Postexercise hyperemia in trained and untrained subjects. *J. Appl. Physiol.*, **17**, 436-440.
- 3) Humphreys, P. W. and A. R. Lind (1963): Blood flow through active and inactive muscles of the forearm during sustained handgrip contractions. *J. Physiol.*, **166**, 120-135.
- 4) Jessup, G. T. (1973): Changes in forearm blood flow associated with sustained handgrip performance. *Med. Sci. Sports*, **5**, 258-261.
- 5) 加賀谷淳子 (1972): 脚の動的作業に対する循環系の反応, 東京家政学院大学紀要, **12**, 75-84.
- 6) 金子公有, 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.
- 7) 北村潔和, 松井秀治 (1976): 鍛練者と非鍛練者の作業後下腿血流量, 体育学研究, **21**, 87-93.
- 8) Kitamura, K., M. Miyamura and H. Matsui (1979): Comparison of calf blood flow during and immediately after rhythmic exercise. *Nagoya J. Health, Physical Fitness, Sports*, **2**, 61-63.
- 9) Kitamura, K., Y. Yasuda, M. Miyamura and H. Matsui (1980): Blood flow of the ipsilateral and contralateral lower limbs after isometric contraction. *Jpn. J. Physiol.*, **30**, 301-304.
- 10) 北村潔和, 有沢一男 (1981): 静脈阻止プレチスモグラフ法による律動的作業中および作業後下腿血流量の測定, 富山大学教養部紀要 (自然科学編), **14**, 17-24.
- 11) 北村潔和 (1983): 各種負荷強度の律動的作業中にみられる前腕血流量の変動, 体力科学, **32**, 66-75.
- 12) Kitamura, K., H. Matsui and M. Miyamura (1983): Comparison of blood flow in the ipsilateral and contralateral lower limbs after isometric exercise. *J. Coll. Lib. Arts, Toyama Univ. (Nat. Sci.)*, **16**, 67-75.
- 13) Kitamura, K., M. Simaoka, H. Matsui and M. Miyamura (1983): Thigh and calf blood flow after isometric contraction in untrained and trained subjects. *Jpn. J. Physiol.*, **33**, 449-458.
- 14) 北村潔和, 山地啓司: 筋収縮が作業筋への血流量に及ぼす影響, 投稿中
- 15) Lind, A. R. and G. W. 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**, 575-598.
- 16) Matsui, H., K. Kitamura and M. Miyamura (1978): Oxygen uptake and blood flow of the lower limb in maximal treadmill and bicycle exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **40**, 57-62.
- 17) Whitney, R. J. (1953): The measurement of volume changes in human limbs. *J. Physiol.*, **121**, 1-27.