

静的作業中の血流阻止が作業後 血流量に及ぼす影響について

The Effect of Arterial Blood Occlusion during
Isometric Exercise on Post-Exercise Hyperemia

Yoshifumi Yasuda

Summary

The purpose of this study was to examine the effect of arterial blood occlusion during exercise on post-exercise hyperemia. The blood flow after exhaustive sustained isometric exercise of forearm was compared at three different loads with and without occlusion. Six healthy male students participated in this experiment. The blood flow was measured by venous occlusion plethysmography using a mercury-in-rubber strain-gauge. The three exercise loads were 1/3, 1/2 and 2/3 of maximum strength of forearm muscle for each subject.

The forearm blood flow after exhaustive exercise was decreased with increasing exercise load in the case of occlusion of arterial blood flow during exercise, and there were statistical differences in the blood flow during the time between 15 sec and 2 min after exercise between 1/3 and 2/3 of maximum strength. However, no significant difference was found between the three different loads without occlusion during exercise. There was no significant difference at 2/3 of maximum strength when blood flow after exercise at the same load with and without occlusion was compared, but significant differences were found in excess blood flow during the time between 15 sec and 3 min and total excess blood flow at 1/3 load.

It was suggested that increment of the blood flow after exhaustive

isometric exercise may be due to the vasodilation not only by the metabolites produced in exercise but also the reactive hyperemia.

目 的

これまで筋の活動に伴う血流量の増大は、中枢神経 (Central Nervous System) からの制御によるよりもむしろ代謝の亢進による O_2 分圧の低下、 CO_2 分圧の上昇、乳酸やピルビン酸等の代謝産物の産生、各種ホルモンの活性や PH 値の低下が直接血管を刺激して起こる局所性の調節によるものと考えられている¹。このため動的作業における作業中や作業後の血流量の増加は、先に述べた血管拡張作用の強さによって決定されると推測されることから、代謝量や作業の強さを示す指標と考えられている。しかし静的作業時においては、筋作業に伴って血管の拡張が起こるにもかかわらず、筋の収縮が筋内圧を上昇させ、血管を圧迫するために、必要な血流量が供給されなくなるものと考えられる。従って、血流阻止が起こるような作業強度における作業中の血流量は、代謝の指標とは考えられない。このため静的作業においては、筋が完全に弛緩する回復期の血流量を検討することが、作業の強さを推定する上で必要なことと考えられる。

筆者ら¹⁵ は、先に、作業強度を変えて前腕の静的最大作業を行なわせた時の作業後血流量に有意の差が認められなかったこと、そしてその原因として、作業中の血流阻止の影響が大きく関与していることが示唆されたことを報告した。そこで本研究では、作業中の血流を Cuff を用いて物理的に阻止した場合と阻止しない場合における異なる強度の静的作業後の血流量を比較することにより、作業中の血流阻止が作業後血流量に及ぼす影響について検討しようとした。

方 法

表 1 に示したように、健康な男子学生 6 名を被検者とし、作業中の血流を阻止した場合と阻止しない場合の二方法で、各被検者の静的な最大筋力の $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{2}$ および $\frac{2}{3}$ の 3 種の強度で前腕の静的最大作業を行なわせたが、血流を阻止しない場合を前期 (1980年 1～2 月) に、作業中の血流を物理的に阻止した場合を後期 (1980年 6 月) に行なった。なお環境温の変化によ

Table 1. Physical characteristics and maximum strength of forearm muscle of subjects.

Subjects	Age (yr.)	Height (cm)	Weight (kg)	Max. S (1) (kg)	Max. S (2) (kg)
S. K	19	172	70	53.1	54.2
A. H	19	172	67	48.9	53.7
K. Y	20	173	57	50.8	48.6
Y. Ko	20	172	68	50.4	53.7
H. S	20	167	60	42.0	42.0
Y. Ki	20	175	66	49.8	56.9
Mean (± SD)		172 (2.4)	65 (4.6)	49.2 (3.5)	51.5 (4.9)

Max. S: Maximum Strength of Forearm Muscle

(1): The First Measurement

(2): The Second Measurement

る皮膚血流への影響を除外するために、室温をなるべく一定にしたが、前期間中は20～23°C、後期間中は24～26°Cであった。なお実験は、トレーニング効果を排除するために最低一週間以上の間隔をおいて実施した。

作業は、水平仰臥姿勢で、右腕の前方に固定したハンドエルゴメーター⁶のハンドルを握り、重りを約2 cm引き上げた状態を保持する静的持続収縮とし、疲労困憊に至るまで行なわせた時の持続時間を作業時間とした。

血流量は、水銀封入ラバーストレインゲージを用いた静脈阻止法により測定したが、血流測定時には上腕に巻いたCuffに50～70mmHgの圧を加えた。また作業中の動脈血を阻止するために上記Cuffに270～290mmHgの圧を加えた。

安静時血流量は、20分間の仰臥安静後に20秒間隔で3回測定したその平均値とし、作業後血流量は、作業終了後15秒、30秒、1分、2分、3分、4分、5分、7分、9分、11分、13分、15分経過時に計12回測定し、その中の最も高い値を最高血流量 (Maximal Blood Flow)、それら12回の合計を総血流量 (Total Blood Flow) とした。また作業後の血流量から安静時血流量を引いた値を Excess Blood Flow、その合計を Total Excess Blood Flow としたが、これらは作業に伴う作業後血流量の安静時に比べた増加分を示したものである。なお血流量の計算方法は Whitney¹⁶ の方法に従い、有意差の検定方法は t テスト (対応のある場合) を用い、 $p < 0.05$ を

有意差の基準とした。

結 果

表1は、作業強度を決めるために測定した最大筋力の結果である。前期の平均最大筋力は $49.2\text{kg} \pm 3.5\text{kg}$ 、後期のそれは $51.5\text{kg} \pm 4.9\text{kg}$ で、両者の間に統計的な有意の差は認められなかった。

図1は、作業中の血流を阻止した場合と阻止しない場合の各作業強度と作業時間との関係を示したものである。作業中の血流を阻止しない場合の各強度の作業時間の平均と標準偏差は、最大筋力の $\frac{1}{3}$ の強度の時に3分23秒 \pm 36秒4、 $\frac{1}{2}$ の時に1分54秒 \pm 12秒4、 $\frac{2}{3}$ の時に1分3秒 \pm 13秒4であった。また作業中の血流をCuffを用いて阻止した場合、最大筋力の $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{2}$ および $\frac{2}{3}$ の強度における作業時間の平均と標準偏差は、それぞれ2分19秒 \pm 17秒0、1分13秒 \pm 4秒3、そして46秒 \pm 7秒5であった。図1で示したように、両作業方法とも相対的作業強度と作業時間との間には、Monod¹⁰らが観察したように指数関数的関係が認められた。そして作業中の血流を

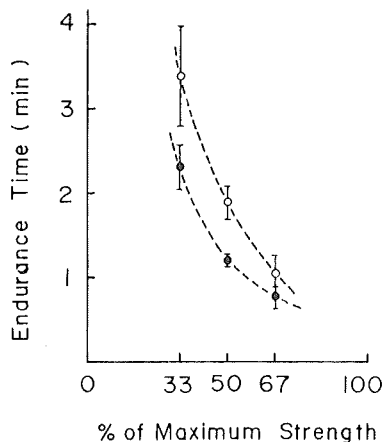


Fig. 1. The relationship between endurance time and percent of maximum strength with (filled circle) and without (open circle) occlusion during exercise.

物理的に遮断した影響による作業時間の減少は、 $\frac{1}{3}$ の強度では64秒(32%)、 $\frac{1}{2}$ では41秒(36%)、 $\frac{2}{3}$ では17秒(27%)であり、これらの減少はそれぞれ1%、0.1%、5%の水準で統計的に有意であった。

表2は、各作業強度における作業中の血流量を止めた場合と止めない場合の作業後の血流量を比較したものである。また図2は、作業中の血流を止めない場合の各作業強度における最大作業前後の血流量を示したもので

Table 2. The blood flow of right forearm before and after exhaustive isometric exercise at different load with and without occlusion of arterial blood supply during exercise.

		1/3 Max.			1/2 Max.			2/3 Max.		
		Rest	Max.	Total	Rest	Max.	Total	Rest	Max.	Total
Without Occlusion	Mean	2.0	19.7	142.0	1.5	19.6	147.6	1.9	20.6	154.4
	(±SD)	0.6	1.3	14.2	0.2	2.7	16.4	0.6	3.2	22.2
With Occlusion	Mean	3.0	26.3	192.3	3.2	24.6	183.9	3.0	22.1	160.4
	(±SD)	0.9	4.3	31.0	1.6	5.0	35.8	1.1	2.4	13.9

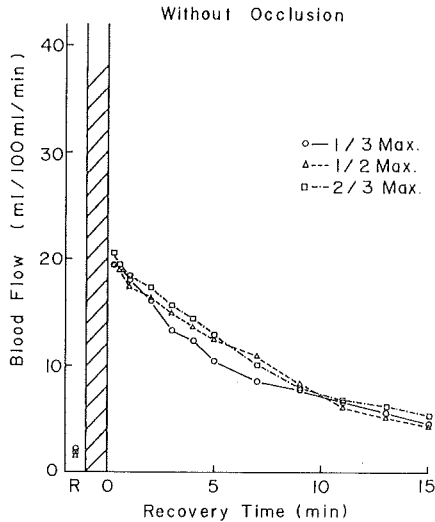


Fig. 2. Blood flow of forearm after maximal isometric exercise at different load without arterial occlusion during exercise.

ある。図2に示したように、安静時血流量、作業後血流量ともに作業強度の違いによる有意の差は認められなかった。

一方、作業中の前腕への血流を物理的に遮断した時の各作業強度における作業前後の血流量を図3に示した。この場合、安静時血流量には差は見られなかったが、作業後血流量は作業強度が軽い程多くなる傾向が認められ、最大筋力の $\frac{1}{3}$ と $\frac{2}{3}$ の強度の15秒から2分までの血流量と最高血流量に5%水準の統計的な有意の差が認められた。ただ総血流量には有意の差が認められなかった。

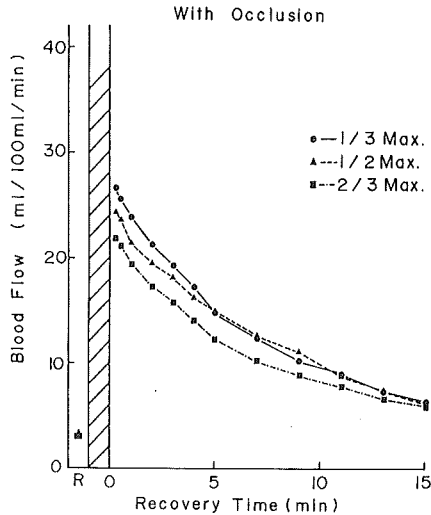


Fig. 3. Blood flow of forearm after maximal isometric exercise at different load with arterial occlusion during exercise.

図4は、同一作業強度における作業中の血流を止めた場合と止めない場合の作業後血流量を比較したものである。両作業方法の安静時血流量に統計的な有意の差 ($p < 0.01$) が認められたために、作業後の血流測定値から安静時血流量を引いた Excess Blood Flow を比較した。図4に示したように最大筋力の $\frac{2}{3}$ の強度では、両作業方法による Excess Blood Flow に有意の差は認められなかったが、 $\frac{1}{2}$ の強度では、血流を阻止した場合の

方が阻止しない場合に比べて Excess Blood Flow がやや多くなる傾向を示し、さらに $\frac{1}{3}$ の強度では、この傾向が顕著であった。そしてこの $\frac{1}{3}$ の強度の作業後15秒から3分までの Excess Blood Flow と Total Excess Blood Flow に 5%水準の統計的な有意の差が認められた。

ところで、作業重量(kg)と作業時間(秒)の積として求めた作業量は、いずれの作業方法においても $\frac{1}{3} > \frac{1}{2} > \frac{2}{3}$ の順であり、その差は血流を阻止しない場合の $\frac{1}{3}$ と $\frac{1}{2}$ とを除いて統計的に有意 ($p < 0.05$) であった。しかし各作業方法におけるこの作業量と Total Excess Blood Flow との間には、有意の相関関係は認められなかった。

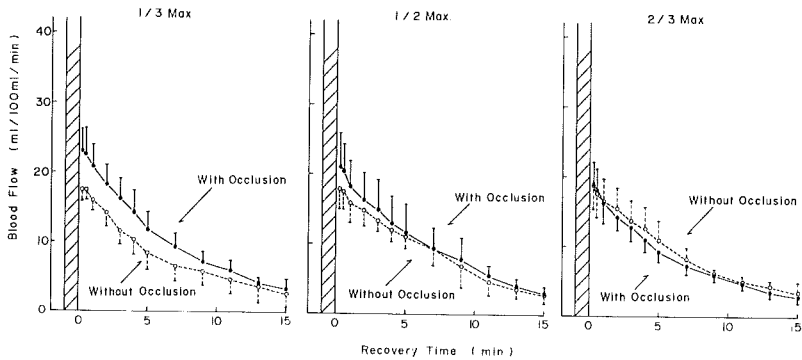


Fig. 4. Comparison of excess blood flow after exhaustive isometric exercise at same load with and without occlusion.

考 察

Humphreys ら⁵ は、二人の被検者について静的作業中の血流を阻止することによる作業時間への影響を知るために、最大筋力の30~70%の強度で静的最大作業を行なわせた時の作業時間を比較した。その結果、作業中の血流を阻止した場合も阻止しない場合においても相対的作業強度と作業時間との間に指数関数的関係が認められ、最大筋力の30%の強度では、作業中の血流阻止による作業時間の大巾な減少(およそ30~35%)が認められたが、最大筋力の60~70%では、その差が少なく(約10%)なると報

告している。これらの傾向は、本実験結果においても同様に認められたが、 $\frac{1}{2}$ および $\frac{2}{3}$ の強度の血流阻止による作業時間の減少は、本実験結果の方が大きい傾向を示した。これらの違いについては、おそらく最大筋力の測定条件や被検者などの差が関係しているものと思われる。

本実験では、作業中の血流を止めない場合と止めた場合のパフォーマンスの差は作業強度が軽くなるにつれて大きくなったが(図1)、この原因は、作業中の血流量と密接に関係しているように思われる。すなわち、静的作業中の血流量は、作業に伴う血管拡張作用と筋内圧の上昇による血管への圧迫作用という相反する作用のバランスによって決まると考えられている^{2,4,8}。この点について、Humphreysら⁵やDonaldら³は、最大筋力の30~60%の強度の静的最大作業を行なわせた時の作業放棄直前の血流量を比較し、30%をピークに作業強度が強くなると血流量は減少する傾向が認められたと報告している。さらにRoyce¹²やStart¹⁴らは、作業強度と作業中の血流量との関係を検討し、最大筋力のほぼ70%以上の強度では作業中の血流が遮断されると報告している。またNilssonら¹¹も、前脛骨筋に頻度を変えて電気刺激を加えた時の刺激頻度と筋内圧、筋張力および血流量との関係を検討しているが、刺激頻度を高めると筋血流もそれに比例して増加するが、6回/秒あたりから減少し始め、50回/秒の頻度では血流は遮断されると報告している。これらの報告から、作業強度が強くなるにつれ、血管拡張作用も促進されるが、同時に筋の内圧も上昇し機械的に血管をより圧迫するために、結果的には血流量も減少することが考えられる。従って $\frac{1}{3}$ の強度の作業では、筋内圧による阻止量が少ないため作業中の血流量は多く、血流阻止を行なうことによる影響が大きくなり、パフォーマンスに大きな差が生じたものと思われる。しかし $\frac{2}{3}$ の強度の時には、作業中の筋内圧の上昇による血流阻止量と物理的に血流を遮断したときの量とは大きな差がないため、パフォーマンスにも大きな差が認められなかったものと思われる。

ところで、静的作業における作業強度の違いによる作業中の血流量と作業後の血流量との関係については、Lindら⁹が、最大筋力の10, 20, 30%の強度でそれぞれほぼ作業量が等しくなるように4分, 2分, 1分40秒の作業を行なわせ、作業中に増加した血流量と作業後の血流量の割合を比較している。その結果10%の強度の時には33ml/100ml : 5 ml/100mlで作業中

の供給量の占める割合が多かったが、20%の強度では23ml/100ml : 19ml/100mlとなり、さらに30%の強度では13ml/100ml : 29ml/100mlと作業後の供給量の方が多くなったと報告している。従って、作業強度が強くなるとそれに伴って作業中の血液の供給量が減少するために、作業後の血流量が必然的に増加するものと思われる。さらに作業中の血流を物理的に阻止した場合には、作業中の血流量はほぼ0になると考えられ、このような状態においては、筋は全く無酸素的な代謝を強いられることになり、作業後血流量の増加の大部分はこの酸素負債を解消するためのものと考えられることができる。ただし作業後の血流量の増加は、単に酸素負債を解消するためだけに起こるのではなく、作業に伴って発生した代謝熱の放散のためや、血流阻止による反応性充血なども含まれていることになろう。

さてこの血流阻止と反応性充血との関係については、Grant⁴、Schnizerら¹³やKristensenら⁷の報告がある。すなわちGrant⁴は、安静時に5分間の血流阻止を行い、血流阻止を解くと同時に血流量は急激に増加するが、解放後1分でほぼ元の状態に戻ったと報告している。またKristensenら⁷は、3分、6分、12分、24分間の血流阻止の影響を検討し、阻止時間が長くなればなるほど血流阻止を解いた後の最高血流量は増加するが、12分をピークにlevelling offになることから、ほぼ12分の血流阻止によって血管拡張はピークに至るであろうと推察している。また阻止後の充血時間や総充血量は、阻止時間の長さ按比例して増加したことから、代謝に関係しているであろうと報告している。

以上のことから、20%の強度では、作業中の血流を阻止してもしなくても作業後血流量に差がみられなかったのは、両作業中の血流阻止量および作業時間がほぼ同じであることから、酸素負債量や反応性充血量に差がみられなかったためであろうと思われる。しかし図4の左図に見られるように、最大筋力の20%の強度では、作業中の血流を阻止した場合の方が作業後の血流量が有意に高かったのは、物理的な血流阻止のために筋が無酸素的な作業を強いられるために酸素負債量が増加したことや、阻止時間が長いために反応性充血量も増加したことによるものと思われる。

以上の結果から、本実験のような作業強度の強い静的作業においては、作業中の血流阻止の影響が作業後に出現するため、作業後血流量は単に代謝水準によって決まるのではなく、少なくともこの反応性充血も含まれて

いることが示唆された。

要 約

静的作業中の筋内圧の上昇による血流阻止作用が作業後血流量に及ぼす影響を知るために、作業中の血液を Cuff を用いて物理的に阻止した場合と阻止しない場合の二つの方法で、作業強度を変えて静的最大作業を行なわせた時の作業後血流量を比較検討した。その結果、

1. 作業中の血流を阻止することによって作業時間は短縮するが、作業強度が軽い程その影響が大きかった。

2. 作業中の血流を阻止しない場合の作業後血流量は、作業強度を変えても差は認められなかった。

3. 作業中の血流を阻止した場合の作業後血流量は、作業時間が長い程多くなる傾向が認められた。

4. 同一作業強度における作業中の血流を阻止した場合と阻止しない場合の作業後の血流量の増加量は、最大筋力の $\frac{2}{3}$ ではほとんど差が認められなかったが、 $\frac{1}{3}$ では血流阻止を行なった方が有意に高く、その傾向は、作業終了後3分までが顕著であった。

以上のことから、作業後の血流量の増加は、代謝水準つまり代謝産物による血管拡張作用によるものだけでなく、少なくとも作業中の筋内圧の上昇に伴う血流阻止による作業後の充血の影響も含まれていることが示唆された。

稿を終えるに臨み御指導をいただいた名古屋大学総合保健体育科学センター宮村実晴先生に謹んで感謝の意を表します。

References

1. Åstrand, P. O., and K. Rodahl. (著), 朝日奈一男(監訳)「オストランド運動生理学」大修館書店, 1976, pp. 83-136.
2. Barcroft, H., and J. L. Millen. The blood flow through muscle during sustained contraction. *J. Physiol.* 97: 17-31, 1939.
3. Donald, K. W., A. R. Lind, G. W. McNicol, P. W. Humphreys, S. H. Taylor, and H. P. Staunton. *Circul. Res. Suppl.* 21: 15-32, 1967.
4. Grant, R. T. Observations on the blood flow circulation in voluntary

- muscle in man. *Clin. Sci.* 3 : 157-173, 1938.
5. Humphreys, P. W., and A. R. Lind. The blood flow through active and inactive muscles of the forearm during sustained hand-grip contractions. *J. Physiol.* 166 : 120-135, 1963.
 6. 加賀谷淳子：未柏循環と筋持久力，猪飼道夫(編著)「身体運動の生理学」杏林書院，1970，pp. 211-277.
 7. Kristensen, J. K., and O. Henriksen. Excess cumulative blood flow and repayment during reactive hyperemia in human cutaneous tissue. *Acta Physiol. Scand.* 108 : 1-6, 1980.
 8. Lind, A. R., S. H. Taylor, P. W. Humphreys, B. M. Kennelly, and K. W. Donald. The circulatory effects of sustained voluntary muscle contraction. *Clin. Sci.* 27 : 229-244, 1964.
 9. Lind, A. R., and P. G. Schmid. Comparison of volume and strain-gauge plethysmography during static effort. *J. Appl. Physiol.* 32(4) : 552-554, 1972.
 10. Monod, H., and J. Scherrer. The work capacity of synergic muscular group. *Ergonomics* 8 : 329-338, 1965.
 11. Nilsson, B., and D. H. Ingvar. Intramuscular pressure and contractile strength related to muscle blood flow in man. *Scand. J. Clin. Invest., Suppl.* 93 : 31-38, 1967.
 12. Royce, J. Isometric fatigue curves in human muscle with normal and occluded circulation. *Res. Quart.* 29 : 204-212, 1972.
 13. Schnizer, W., H. Hinneberg, H. Moser, and K. Küper. Intra- and extravascular volume changes in the human forearm after static hand grip exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 41 : 131-140, 1979.
 14. Start, K. B., and R. Holmes. Local muscle endurance with open and occluded intramuscular circulation. *J. Appl. Physiol.* 18(4) : 804-807, 1963.
 15. 安田好文，宮村実晴：動のおよび静的最大作業と作業後血流量との関係について，日本体育学会第31回大会号，1980，pp. 343.
 16. Whitney, R. J. The measurement of volume changes in human limbs. *J. Physiol.* 121 : 1-27, 1953.