

血流を阻止した静的作業時の作業時間と作業後血流量との関係について

Relationship between Working Time and Post Exercise Hyperemia in Continuous Static Work with Occlusion

安田好文
Yoshifumi YASUDA

Summary

The purpose of this study was to examine the relationship between working time and post exercise hyperemia. Six healthy male students participated as subjects. Post ischemic hyperemia and post exercise hyperemia of forearm were measured by plethysmography after anaerobic static work and occlusion. The durations of work and occlusion were 25%, 50%, 75% and 100% of their maximum endurance time in anaerobic static work at 1/3 maximal voluntary contraction of each.

Major results may be summarized as follows:

After arterial occlusion,

1. There was no difference among the durations of hyperemia.
2. The peak blood flow after ischemia increased with increasing occlusion time, but it was not linear.
3. A linear relationship was found between the occlusion time and the blood flow debt.

After exercise with occlusion,

1. The duration of hyperemia and peak blood flow increased with increasing exercise time.
2. A linear relationship was found between the relative exercise time

and the blood flow debt.

From these results, it was suggested that the magnitude of blood flow debt will depend on the level of anaerobic metabolism in the forearm.

はじめに

作業に伴い、作業中だけでなく作業後にも血流量の増加を招くが、その量は、作業強度や作業時間に関係していると考えられている²¹。これまで作業後の血流量の測定については、二つの意味が考えられている。一つは、Barcroft ら² や Lind ら¹⁶ により、動的作業時の弛緩期血流量と作業直後血流量がほぼ一致すると報告されていることから、作業中の血流量を間接的に推測するためのものと言える。すでに、血流量と筋の酸素摂取量との間に有意の相関関係が存在することが報告されていることから^{12, 23}、作業直後の血流量の測定は、作業中の酸素摂取水準、つまりは有酸素的な代謝レベルを示すものと考えられる。しかしこの方法では、筋内圧の上昇によって血管が圧迫され、血流阻止が起こるような作業重量が重い場合や、exhaustion に近い作業では、適用できない。なぜなら、作業中の血流量に比べ、作業後の血流量の方が多くなるためである^{1, 3}。

もう一つは、Blair ら⁴ による血流負債量の考え方である。つまり、作業後の血流量の増加は、作業中における血液供給の不足分を補うために起こるとの考えから、酸素負債 (oxygen debt) の考え方にならない、血流負債量 (blood flow debt) と呼ぶものである。この血流負債量は、酸素負債との関係から、無酸素的な代謝レベルを示すものと考えられるが、この関係については、これまでほとんど検討されてはいない。

先の研究^{26, 27} により、最大筋力の1/3の作業負荷で exhaustion に至る作業を行なわせた時に、静的持続作業に比べて動的反復作業の方が血流負債量が多いこと²⁶、また同じ静的作業でも、作業中の血流を阻止した場合の方が、血流を阻止しない場合に比べて血流負債量が多いこと²⁷ が報告されている。そこで本実験では、作業中の血流を阻止し、作業時間を変えて静的持続作業を行なわせた時の血流負債量を比較することにより、無酸素

血流負債量と作業時間との関係

的な作業時の作業時間と血流負債量との関係について検討しようとするものである。

方 法

被検者は、健康な男子大学生 6 名である(表 1)。まず各被検者の前腕の最大筋力を測定し、この最大筋力の1/3の負荷で、作業中の血流を阻止し、

Table 1. Physical Characteristics of Subjects

Subjects	Age (yr.)	Height (cm)	Weight (kg)	MVC (kg)	Exhaustion time at 1/3 MVC (min)
H . N	19	163.0	55.0	45.0	3'20"
Y . T	19	171.0	62.0	50.5	2'27"
T . K	20	176.8	76.6	56.5	3'02"
M . S	19	166.0	57.0	42.0	3'37"
M . K	20	170.6	66.8	52.5	2'45"
T . S	19	173.0	68.0	41.5	2'21"
Mean (± SD)		170.1 (4.5)	64.2 (7.3)	48.0 (5.6)	2'55" (27"3)

* MVC: Maximum Voluntary Contraction of Forearm Muscle

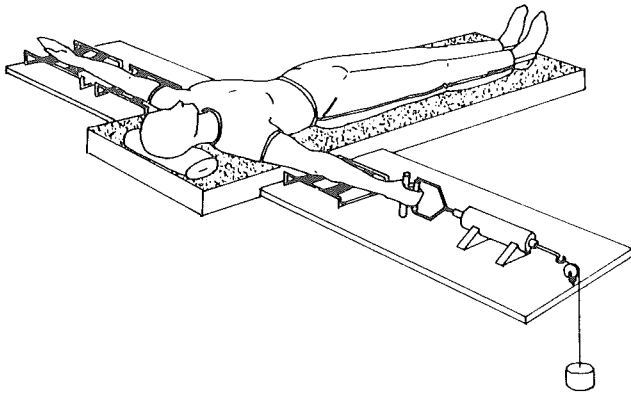


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up.

静的持続作業を行わせたが、作業時間は、疲労困憊 (exhaustion) に至るまで、つまり静的最大持続時間まで、およびその25%、50%、75%の4種類とした。また血流阻止の影響を知るために、血流を阻止して作業させた時と同じ4種類の時間だけ血流を阻止した。そして、作業終了直後および阻止終了直後から前腕の血流量を測定したが、測定時間は、血流阻止のみの場合には阻止後3分まで、また作業後については、ほぼ安静時レベルに戻るまでとした。

図1に示したように、被検者を水平仰臥姿勢で20分間安静にさせた後、胴体から直角に伸ばした腕の前方に固定したハンドエルゴメーター¹³のハンドルを握らせ、錘を約2cm引き上げた状態を保持する静的持続作業を行わせた。そして作業開始直前に、上腕に巻いた血流阻止用のCuffにより、280~300mmHgの圧を加えて血流を阻止したが、作業終了と同時に阻止を解放した。作業はそれぞれ日を変えて実施したが、血流阻止だけを行わせ

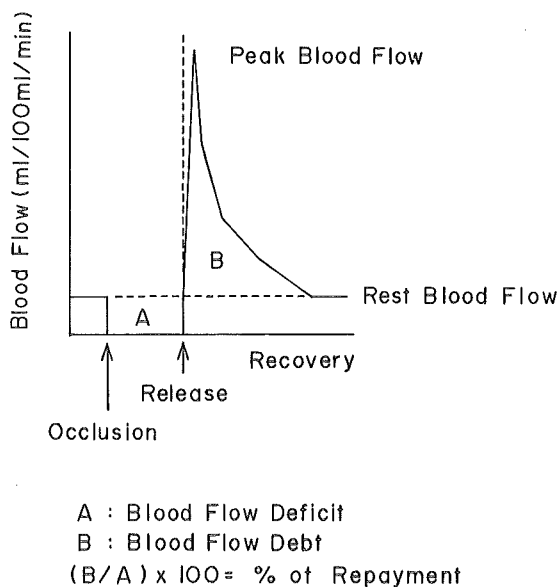


Fig. 2. The method of calculation of reactive hyperemia.

血流負債量と作業時間との関係

た場合は、同一日に、10～15分間の間隔をおいて実施した。

血流量の測定方法は、Whitney²⁴の方法にならい、水銀封入ラバーストレンジを用いて静脈阻止法により行った。測定時には、上腕に巻いたCuffに、被検者に応じ50～70mmHgの圧を加えた。安静時血流量は、20分間の安静後に約20秒間隔で3回測定し、その平均値より求めた。また回復期に測定した血流量の最も高い値を、最高血流量(peak blood flow)とした。さらに血流負債量については、まず血流阻止だけを行った場合には、図2で示したように、ほぼ安静時レベルに回復すると考えられる1分30秒までの回復期血流量の各測定値を直線で結んでできた図形から算出した。そして安静時血流量と阻止時間の積から予想血流負債量(blood flow deficit)を求め、血流負債量の実測値との比を血流負債解消率(% of repayment)として%で示した。また作業を行わせた場合には、各被検者の回復期血流量から、最小自乗法により近似式 $y = r + ae^{bx}$ (ただし r は安静時血流量)の a および b を求め、その ae^{bx} を0分から測定時間まで積分した値とした。

なお本実験結果における有意差の検定方法は t テストを用い、5%を有意差の基準とした。

結 果

表1に、6人の被検者の前腕の静的最大筋力(握力)と、最大筋力の1/3の負荷で静的持続作業を行わせた時の最大作業時間を示した。最大筋力の平均値と標準偏差は、 48.0 ± 5.6 kgであり、静的最大作業持続時間の平均

Table 2. Post-Exercise Hyperemia at each duration of Exercise with Occlusion

	25% of Exhaustion Time	50% of —	75% of —	100% of —
Rest Blood Flow (Mean \pm SD)	1.7 \pm 0.5	1.6 \pm 0.4	1.8 \pm 0.4	1.6 \pm 0.6
Peak Blood Flow (Mean \pm SD)	16.8 \pm 4.4	19.5 \pm 3.6	22.9 \pm 4.9	24.0 \pm 6.6
Blood Flow Debt (Mean \pm SD)	21.9 \pm 7.2	36.9 \pm 18.3	79.4 \pm 28.1	112.2 \pm 62.7

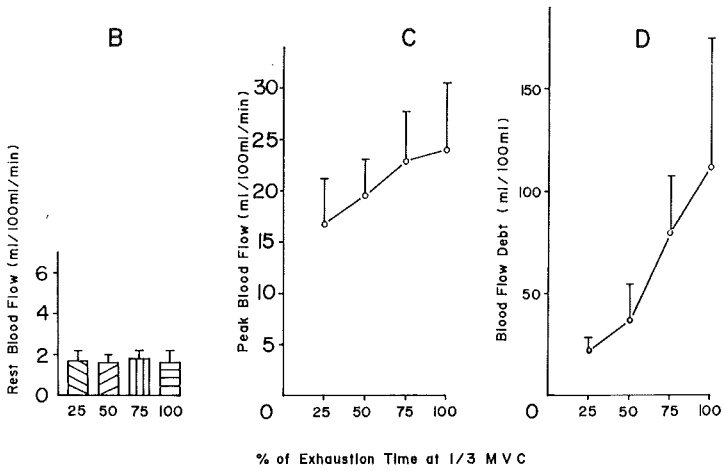
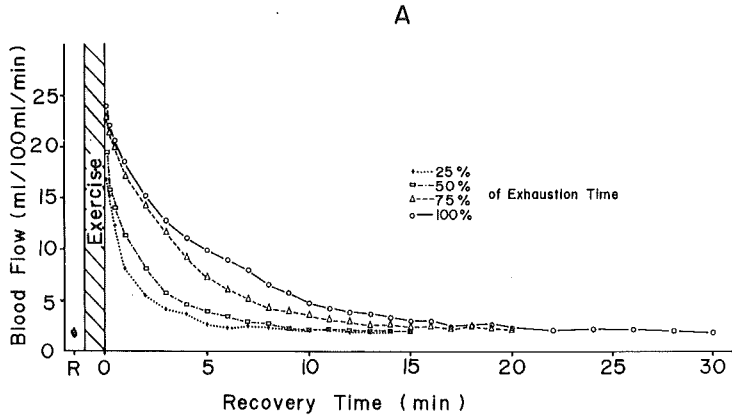


Fig. 3. Post-exercise hyperemia after exercise at different duration.
 A: Mean recovery curves of blood flow after exercise
 B: Resting blood flow
 C: Peak blood flow after exercise
 D: Blood flow debt

血流負債量と作業時間との関係

値と標準偏差は、2分55秒±27秒であった。

表2および図3のA～Dは、作業中の血流を阻止し、各被検者の静的最大作業時間の100%、75%、50%、25%に当たる時間、静的作業を行わせた時の作業前後の血流量を示したものである。図3-Bに示したように、各安静時血流量は1.6から1.8ml/100ml/minの範囲にあり、これらの値に統計的な有意の差は認められなかった。しかし図3-Aに見られるように、作業時間が長くなるにつれて作業直後血流量も高くなり、同時に安静時レベルに回復するまでの時間も長くなる傾向が認められた。最高血流量は、作業終了後5秒または15秒時に認められたが、図3-Cに示したように作業時間に伴いその増加率が減少し、やや levelling-off になる傾向が認められた。そして最大作業時間の75%と100%との間を除いて、各作業条件間に統計的な有意の差が認められた。血流負債量は、作業時間が増加するに伴ってほぼ直線的に増加する傾向にあり(図3-D)、作業時間との間に統計的に有意($r=0.985$, $p<0.05$)の相関関係が認められた。さらに最大作業時間の75%と100%との間を除いて、各血流負債量の間にも統計的な有意の差が認められた。

一方、作業を行わせないで、作業と同じ時間血流阻止だけを行わせた時の阻止解放後の血流量をみたのが、表3および図4である。図4-Aで示したように、阻止後の血流量は阻止を解いた直後が最も高く、その後急激に減少し、およそ1分後にはほぼ安静時レベルに戻る傾向が認められた。そしてこの peak の高さは、阻止時間が長くなるにつれて高くなるが、次

Table 3. Reactive Hyperemia at each Duration of Arterial Occlusion

	25% of Exhaustion Time	50% of —	75% of —	100% of —
Rest Blood Flow (Mean ± SD)	2.0 ± 0.5	2.4 ± 0.7	2.1 ± 0.4	1.9 ± 0.6
Peak Blood Flow (Mean ± SD)	9.0 ± 3.1	15.1 ± 3.5	18.3 ± 3.1	20.8 ± 4.1
Blood Flow Debt (Mean ± SD)	1.8 ± 0.7	3.1 ± 0.9	4.1 ± 1.0	5.2 ± 1.4
Blood Flow Deficit (Mean ± SD)	1.4 ± 0.3	3.4 ± 1.0	4.5 ± 1.0	5.3 ± 1.7
% of Repayment	125	92	92	98

第に levelling-off になって行く傾向は、先の場合と同様であった (図 4 - C)。そしてこれら各阻止時間における最高血流量の値は、最大作業時間

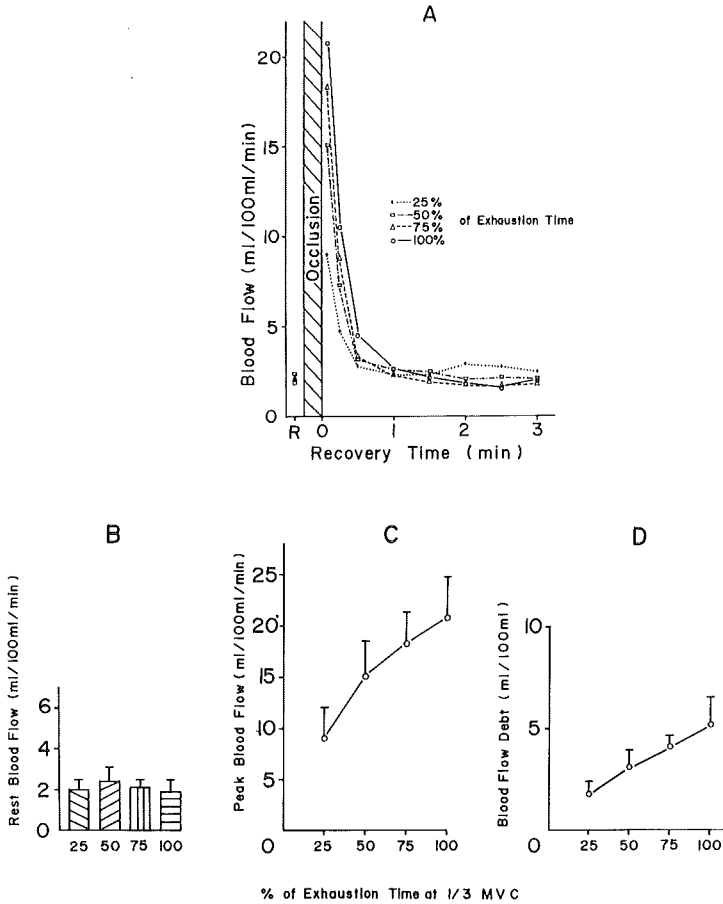


Fig. 4. Reactive hyperemia after occlusion at different duration.
 A: Mean recovery curves after occlusion at different duration
 B: Resting blood flow
 C: Peak blood flow after arterial occlusion
 D: Blood flow debt

の75%と100%との間を除いて、各条件間に統計的な有意の差が認められた。しかしこれらの値は、先の作業と血流阻止を同時に行った場合に比べ低く、その差は阻止時間が短い程（最大作業時間の25%）多く（7.8ml/100ml/min）、阻止時間の延長と共にその差が減少し、最大作業時間の時には、3.2ml/100ml/minであった。また図4-Dに示したように、血流負債量は阻止時間に比例してほぼ直線的に増加する傾向にあり、この関係は統計的に有意（ $r=0.997$ 、 $p<0.01$ ）であった。なお図4-Bに示した安静時血流量には、統計的な有意の差は認められなかった。

考 察

これまで安静時において血流阻止を行った場合の阻止後の充血量は、反応性充血（reactive hyperemia）と呼ばれ²²、阻止時間や安静時血流量との関係から検討されてきた。その結果、阻止時間が長くなるにつれて阻止後の充血量つまり血流負債量は増加し、同時に安静時レベルに回復するまでの時間（充血時間）が長くなることが明らかにされてきた¹⁸。しかし阻止時間と阻止後の最高血流量や血流負債量との関係、または予想血流負債量と血流負債量との関係については、これまで必ずしも一致した見解は得られていない。

まず阻止時間の長さや阻止後の充血量との関係について、Kristensenら¹⁵は、人間の手指に対し3分から24分にわたる血流阻止を行わせた時の阻止後の血流量を観察し、①最高血流量は、3分から12分までは阻止時間の長さに比例して高くなるが、12分をpeakに上昇がみられない。②充血時間は阻止時間の長さに比例して長くなる。③血流負債量も阻止時間の長さに比例してほぼ直線的に増加したと報告している。Nielsenら¹⁹も、人体の皮下脂肪組織に対し2分から30分間の血流阻止をした場合、①最高血流量は、阻止時間につれて増加するが次第にlevelling-offに向かう。②充血時間は、阻止時間が5分以内の場合には阻止時間に比例して増加するが、5分以上の場合にはほとんど変化が見られない。③血流負債量は阻止時間の長さに比例し、直線的に増加したと報告している。本実験結果は、上記の結果とほぼ一致するものであった。しかしHaunsøerら⁹は、犬の冠動脈に対し、3秒から10分間の血流阻止を行い、3秒の血流阻止では心筋に顕著な充血

は認められなかったが、5秒以上の血流阻止では充血が観察され、阻止時間が10秒以内では充血量は時間とともに急激に増加するが、それ以後は増加率が減少し、120秒以後はほとんど増加が見られなかったと報告している。そしてさらに、最高血流量も30秒の阻止の場合を peak に、それ以上阻止時間を長くしても増加せず、プラトーかあるいはやや減少する傾向が認められたと述べている。これらの差の原因については、おそらく人間と動物の差、阻止時間の差や Haunsø¹⁰ が心外膜と心内膜で阻止時間と充血量の関係が異なると述べていることから、対象とした組織の違いなどが関係しているかもしれない。

次に、血流負債量と予想血流負債量の比から求めた血流負債解消率について、Haunsø⁹ は、5秒から10分の血流阻止において、この値が10秒までは増加するが、10秒を peak にしてその後急激に減少したことを報告している。これは、血流負債量と阻止時間との間に直線関係が存在しないことを示唆するものといえる。Freeman⁷、PattersonとWhelan²⁰ も、人間の前腕において、この値は50%から200%の範囲にあったと報告している。しかしNilsen¹⁹ は、5分から30分間の血流阻止において、この値がほぼ80%で一定していることを報告している。またWood²⁵ は人間の手で、またJohnson¹¹ も猫の筋で同様の傾向を認めている。しかしここで問題となるのは、安静時血流量が酸素必要量つまりは代謝レベルに一致しているか否かということである。この点についてBlair⁴ は、左右の腕の血流阻止後の充血の比較から、安静時の血流量は酸素必要レベルよりも高いと報告しているし、Coffman⁵ も、犬の心筋において同様の結果を報告している。この点から考えると、本結果における最大作業時間の50%以上の阻止では、予想血流負債量の方が血流負債量を上回る関係にあり、先のBlair⁴ の結果を間接的に裏付けたことになるかもしれない。しかし最大作業時間の25%の阻止では、逆の傾向が認められた。これについては、Harris⁸ が、安静時における血流阻止と代謝との関係を検討し、筋組織における酸素の貯蔵が、4分間の阻止で半減し、そして約10分で枯竭すること、そして組織内のピルビン酸や乳酸の産生量やピルビン酸/乳酸比が変化するのは、阻止時間が15分を越えてからだとして報告している。このことから、阻止時間が30秒以内のような比較的時間の短い阻止では、阻止後の充血量は、代謝性の調節によるものより、むしろ

血流負債量と作業時間との関係

神経性の調節や物理的な血圧などによる調節かも知れない。そしてこのことが、代謝レベル以上の血液の供給を招いているのではないだろうか。

一方、血流を阻止し、時間を変えて静的作業を行わせた時の作業後血流量に関する報告は見当たらない。Lind ら¹⁷ は、最大筋力の10%、20%、30%の負荷で、作業量がおおよそ等しくなるようにそれぞれ4分、2分、1分40秒間の静的作業を行わせた時の作業中と作業後の血流量の合計は、ほぼ一致したと報告している。また Kontos ら¹⁴ も、安静時と静的作業時において、血流量と酸素摂取量および二酸化炭素産生量との間に、直線関係が存在したことを、また Coles ら⁶ も、作業中の血流を阻止し、負荷を変えて30秒間の動的作業を行わせた時に、仕事量と血流負債量との間に直線関係が認められたと報告している。これらはいずれも、血流量が代謝レベルの反映であることを示すものと言えよう。本実験において、相対的な作業時間と血流負債量との間に有意の直線関係が認められたことから(図3-D)、作業中の血流を阻止した無酸素的な作業においても、作業後血流量は、主に代謝の反映と考えることができるであろう。

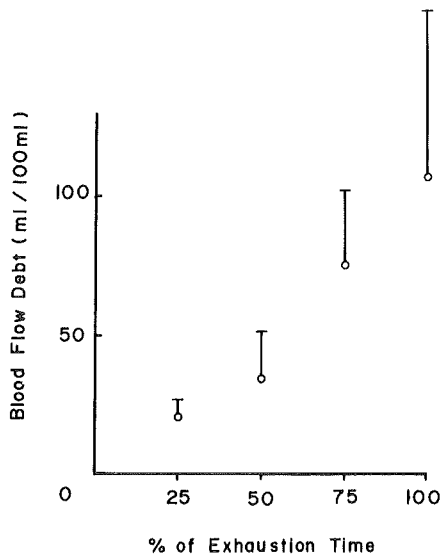


Fig. 5. Relationship between real blood flow debt and exercise time.

ところで、図3-Dに示した血流負債量の中には、作業によるものと、血流阻止によるものとが当然含まれていると考えられることから、真の作業による血流負債量は、作業後の血流負債量から血流阻止による血流負債量を差し引いたもの、つまり図3-Dから図4-Dを引いたものと考えられる。この結果を示したのが図5である。作業後の血流負債量に比べ、血流阻止だけによる血流負債量は極めて少ないため、全体としては図3-Dのように、作業時間の増大に伴い、ほぼ直線的に増加する傾向が認められた。そしてこの関係は統計的に有意 ($r=0.983$, $p<0.05$) であった。このことから、無酸素的な作業においても、作業時間と血流負債量との間に有意な関係が存在し、従って、作業後の血流量は無酸素的な代謝レベルの指標となり得ることを示すものと考えられる。しかし、各被検者の最大筋力の1/3の負荷における静的最大作業持続時間と、最大血流負債量との間に有意の相関は認められなかった。このことは、血流量だけが作業能力を規定するものでないことを示唆するものであり、この筋の無酸素的持久力と最大血流負債量との関係については、代謝産物等との関係から今後さらに検討する必要があると思われる。

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助教授・宮本実晴先生、並びにデータ整理等で御協力いただいた本学・吉田幹夫、岡本欣吾両君に感謝の意を表します。

References

1. Barcroft, H., and J. L. Millen. The Blood Flow through muscle during sustained contraction. *J. Physiol.* 97: 17-31, 1939.
2. Barcroft, H., and A. C. Dornhorst. Demonstration of the 'muscle pump' in the human leg. *J. Physiol.* 108: 39-43, 1949.
3. Barcroft, H., and A. C. Dornhorst. The blood flow through the human calf during rhythmic exercise. *J. Physical.* 109: 402-411, 1949.
4. Blair P. A., W. E. Glover, and I. C. Roddie. The abolition of reactive and post-exercise hyperemia in the forearm by temporary restriction of arterial inflow. *J. Physiol.* 148: 648-658, 1959.
5. Coffman, J. D., and D. Gregg. Oxygen metabolism and oxygen debt repayment after myocardial ischemia. *Am. J. Physiol.* 201 (5): 881-887, 1961.
6. Coles, D. R., and K. E. Cooper. Hyperemia following arterial occlusion or exercise in the warm and cold human forearm. *J. Physiol.* 145: 241-250, 1959.

7. Freeman, N. E. Effect of temperature on the rate of blood flow in the normal and in the sympathectomized hand. *Am. J. Physiol.* 113: 384-387, 1935.
8. Harris, R. C., E. Hultman, L. Kaijser, and L. -O. Nordesjö. The effect of circulatory occlusion on isometric exercise capacity and energy metabolism of the quadriceps muscle in man. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 35: 87-95, 1975.
9. Haunsø, S., and O. Amtorp. Regional blood flow during reactive hyperemia in canine myocardium as determined by local washout of Xenon-133. *Acta Physiol. Scand.* 110: 285-293, 1980.
10. Haunsø, S. Distribution of coronary blood flow across the canine left ventricular free wall during reactive hyperemia. *Acta Physiol. Scand.* 112: 225-232, 1981.
11. Johnson, P. C., K. S. Burton, H. Henrich, and U. Henrich. Effect of occlusion duration on reactive hyperemia in sartorius muscle capillaries. *Am. J. Physiol.* 230 (3): 715-719, 1976.
12. Jorfeldt, L., and J. Wahren. Leg blood flow during exercise in man. *Clin. Sci.* 41: 459-473, 1971.
13. 加賀谷淳子：末梢循環と筋持久力，猪飼道夫（編著）「身体運動の生理学」，杏林書院，1970，pp 211-277。
14. Kontos, H. A., D. W. Richardson, and J. L. Patterson. Blood flow and metabolism of forearm muscle in man at rest and during sustained contraction. *Am. J. Physiol.* 211 (4): 869-876, 1966.
15. 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.
16. Lind, A.R., and G. W. McNicol. Circulatory responses to sustained hand-grip performed during after exercise, both rhythmic and static. *J. Physiol.* 192: 595-607, 1967.
17. Lind, A. R., and P. G. Schmid. Comparison of volume and strain-gauge plethysmography during static efforts. *J. Appl. Physiol.* 32 (4): 552-554, 1972.
18. Montgomery, M. L., J. M. Moore, and J. S. McGuinness. Reactive hyperemia: Relation of duration of increased blood flow to length of circulatory arrest. *Am. J. Physiol.* 108: 486-497, 1934.
19. Nielsen, S. L., and P. Sejrnsen. Reactive hyperemia in subcutaneous adipose tissue in man. *Acta Physiol. Scand.* 85: 71-77, 1972.
20. Patterson, G. C., and R. F. Whelan. Reactive hyperemia in the human forearm. *Clin. Sci.* 14: 197-211, 1955.
21. Richardson, D., and R. Shewchuk. Effects of contraction force and frequency on postexercise hyperemia in human calf muscle. *J. Appl. Physiol.* 49 (4): 649-654, 1980.
23. Wahren, J. Quantitative aspects of blood flow and oxygen uptake in the human forearm during rhythmic exercise. *Acta Physiol. Scand. Suppl.* 269: 1-93, 1966.

24. Whitney, R. J. The measurement of volume changes in human limbs. *J. Physiol.* 121: 1-27, 1953.
25. Wood, J. E., J. Litter, and R. W. Wilkins. Mechanism of limb segment reactive hyperemia in man. *Circul. Res.* 3: 581-587, 1955.
26. 安田好文, 宮村実晴「動のおよび静的最大作業における作業後血流量の比較」*体育学研究*, 第26巻3号(1981)に掲載予定。
27. 安田好文「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」*豊橋技術科学大学人文・社会工学系紀要*, 3: 117-127, 1981。