動のおよび静的最大作業における作業後血流量の比較

安 田 好 文 (豊橋技術科学大学, 体育保健センター)

宮 村 実 晴 (名古屋大学, 総合保健体育科学センター)
(昭和55年 9 月22日 受付)

Comparison of Forearm Blood Flow in Maximal Dynamic and Static Work

Yoshifumi Yasuda¹

Miharu Miyamura²

Abstract

The present study was undertaken to compare the effects of maximal dynamic and static work on forearm blood flow. Ten untrained male students, aged 19 to 20 years, participated as subjects. The subjects continued the work at loads of 1/3, 1/2 and 2/3 maximum strength of each subject until he was no longer able to follow the regular rhythm in the dynamic work, and to contract the regular length in the static work, respectively. These six work tests were conducted separately at least one week apart to remove training effects. Blood flow of the right forearm in supine position was determined by venous occlusion method before and after exhaustive dynamic and static work.

It was found that peak blood flow after exhaustive dynamic work was significantly lower at 2/3 maximum strength load than at 1/3 max, while there were no significant differences among the three work loads in the static work. In addition, blood flow after dynamic work at 1/3 max load was significantly higher than the static work at the same load, but it was reversed entirely at 2/3 max load. These results suggested that forearm blood flow after maximal work in the same subject varies not only with the work load, but also with the type of work, i. e., dynamic and static, even if the work load is the same.

(Yoshifumi Yasuda and Miharu Miyamura, "Comparison of forearm blood flow in maximal dynamic and static work", *Jap. J. Phys. Educ.*, 26—3 : 219—25, December, 1981)

-
- 1 *Research Center of Physical Fitness, Sports and Health, Toyohashi University of Technology, Hibari-gaoka, Tenpaku-cho, Toyohashi-shi. (440)*
 - 2 *Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi.(464)*

はじめに

局所における筋の収縮を持続させるためには、酸素の十分な供給が不可欠であることはよく知られている。そして、この酸素供給の中心的役割を果たしているのが血流量であることから、作業中および作業後における血流量を測定することは、作業の強さや筋の持久力を知る上で重要であると考えられている¹³⁾。

一方、作業の強さと作業後血流量に関する研究は多く、一般的には作業強度と作業後血流量との間に密接な関係が存在することが報告されている^{3), 5), 9), 14)}。しかしそれらの報告は、同一作業方法で、作業負荷や作業時間を変えて作業を行なわせたものがほとんどであり、同一被検者に対し、動的作業と静的作業における異なる作業負荷で最大作業を行なわせた時の作業後血流量を検討した報告は見当たらない。

そこで本研究では、各被検者の最大筋力の1/3, 1/2および2/3の3種の負荷で、動的および静的作業を疲労困憊(exhaustion)に至るまで行なわせた際の、作業負荷や作業方法の違いによる作業後血流量への影響について比較検討しようとした。

方 法

健康な男子学生10名を被検者とし(表1), 作

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

Subjects	Age (yr.)	Height (cm)	Weight (kg)	Max. S (kg)
S・K	19	172	70	53.1
A・H	19	172	67	48.9
H・U	20	173	58	55.8
K・Y	20	173	57	50.8
Y・Y	20	172	67	50.4
H・H	19	179	69	65.3
H・S	20	167	60	42.0
N・K	19	157	54	37.2
M・M	20	175	66	49.8
Mean		170	62	50.4
± S D		6.1	5.7	7.1

Max. S : Maximum strength of the forearm flexor muscles

業方法および作業負荷の異なる6種類の手指の掌握作業を疲労困憊(exhaustion)に至るまで行なわせた。すなわち作業方法は、動的反復作業と静的持続作業の2種類とし、作業負荷は各被検者の最大筋力の1/3, 1/2, 2/3の3種類とした。最大筋力の測定は、静的最大掌握作業とし、ハンドエルゴメーター¹¹⁾に接続したロードセル(共和電業LT-200KB)により測定した。

実験は、トレーニング効果を排除するために最低1週間以上の間隔をおいて実施した。実験の順序は、動的作業の1/3, 1/2, 2/3, 続いて静的作業の1/3, 1/2, 2/3であった。また、環境温の違いによる皮膚血流への影響を排除するために、室温を20~23°Cに保持した。実験は、1979年12月から1980年3月の間に実施した。

被検者は、半袖・長ズボンの服装で、血流用測定器具を装着し、実験台上で20分間の水平仰臥安静を保った後に作業を開始した。

動的反復作業は、ハンドエルゴメーターを用い、ハンドエルゴメーターの先に繋いだ重りを約2cm上げ下げする作業をメトロノームに合わせて1分間に60回の速さで反復させ、規定のテンポで作業を行なうことが不可能に至るまで作業を続けさせ、それまでに重りを引き上げた回数を作業回数とした。また、静的持続作業は、動的作業と同様のハンドエルゴメーターを用い、重りを約2cm引き上げた状態を可能な限り持続させ、作業放棄に至るまでの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²²⁾を用い、静脈阻止法によって測定したが、静脈阻止のために巻いたcuffには、被検者に応じて50~70mmHgの圧を加えた。また血流量の計算方法はWhitneyの方法²²⁾になった。安静時血流量の測定は、被検者を20分間仰臥安静にさせた後、20秒間隔で3回測定し、その平均値を各被検者の安静時血流量とした。また作業後血流量は、作業終了後5秒, 15秒, 30秒, 1分, 2分, 3分, 4分, 5分, 7分, 9分, 11分, 13分, 15分経過時に測定し、その中の最も高い値を最高血流量(Peak Blood Flow)とし、また血流負債量(Blood Flow Debt)は、最小自乗法により、近似式 $y = r + ae^{bx}$ (ただし r は Rest Blood Flow)

の a および b を求め, その ae^{bx} の $0 \sim 30$ 分までの積分値とした。

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, $P < 0.05$ を有意差の基準とした。

結 果

図1は, 動的小および静的最大作業時の各負荷重量と作業時間(または作業回数)との関係を示したものである。動的小作業における作業回数の平均値と標準偏差は, 最大筋力の1/3の負荷の時に 76 ± 8.5 回, 1/2の負荷では 50 ± 3.2 回, そして2/3の負荷の時には 29 ± 3.8 回であった。また, 静的作業における最大筋力の1/3, 1/2および2/3の負荷における作業時間の平均値と標準偏差は, それぞれ 3分25秒 ± 42 秒9, 1分58秒 ± 17 秒4, 1分05秒 ± 12 秒4であった。

Fig. 1 Relation between percentage of maximum strength and number of contractions or duration of sustained contractions.

図2と図3は, 各作業負荷における静的および動的小最大作業前後の10人の被検者の平均血流量を示したものであり, 表2は, これら各作業条件下の安静時血流量, 最高血流量, および血流負債量の平均と標準偏差を示したものである。

静的作業と血流量との関係については, 作業負荷が重くなる程作業後血流量は多くなる傾向がみられた(図2)。しかし, 最高血流量, 血流負債量

ともに, 作業負荷の違いによる有意な差は認められなかった。さらに動的小作業と血流量との関係については, 図3に示されたように, 静的作業とは逆に, 作業の負荷が軽い程作業後血流量は多くな

Fig. 2 Mean values of the forearm blood flow at rest and after maximal static work at load of 1/3, 1/2 and 2/3 maximum muscle strength of the forearm.

Fig. 3 Mean values of the forearm blood flow at rest and after maximal dynamic work at load of 1/3, 1/2 and 2/3 maximum muscle strength of the forearm.

Table 2 Mean and standard deviation of blood flow in the right forearm at rest and after exhaustive exercise.

Work Load		Rest blood flow (ml/100ml/min.)			Peak blood flow (ml/100ml/min.)			Blood flow debt (ml/100ml)		
		1/3 max.	1/2 max.	2/3 max.	1/3 max.	1/2 max.	2/3 max.	1/3 max.	1/2 max.	2/3 max.
Dynamik Exercise	Mean	2.5	2.4	2.3	24.0	22.1	20.0	232.6	203.3	136.2
	± SD	0.6	0.6	0.7	3.8	4.5	2.7	56.8	50.3	46.3
Static Exercise	Mean	2.3	1.7	2.2	21.9	21.9	22.9	154.2	181.9	177.6
	±SD	0.7	0.4	0.6	2.5	3.3	3.1	63.1	50.0	49.1

る傾向が認められた。そして、最大筋力の1/3の負荷と2/3の負荷との間の最高血流量に5%水準で統計的に有意の差が認められた。さらに血流負債量においては、最大筋力の1/3と1/2負荷との間に5%水準の、また1/3と2/3負荷および1/2と2/3

負荷との間にも0.1%水準の統計的に有意の差が認められた。

一方、同一作業負荷で、動的・静的最大作業と静的最大作業を行なわせた時の作業後血流量を比較したのが図4である。最高血流量は、いずれの負荷に

Fig. 4 Comparison of forearm blood flow after maximal dynamic and static work at load of 1/3 (left), 1/2 (middle) and 2/3 (right) maximum muscle strength.

においても両作業方法間に統計的に有意の差は認められなかった。しかし血流負債量においては、最大筋力の1/3の負荷時に0.1%レベルで動的作業の方が有意に多く、逆に、最大筋力の2/3の負荷時には、静的作業を行なわせた時の方が1%レベルで有意に多かった。しかし最大筋力の1/2の負荷の時には、両者の間に有意の差は認められなかった。

また、最高血流量と血流負債量との間には、有意の相関 ($r=0.31$, $p<0.02$) が認められた。

考 察

猪飼ら¹¹⁾は、腕エルゴメーターを用いて、負荷を変えて1分間に60回の速さで重りの繰り返し持ち上げ作業（動的作業）を exhaustion に至るまで行なわせた時に、各作業負荷（相対的負荷量）と作業回数との間に指数関数的関係が認められたこと、そして最大筋力の1/3、1/2、2/3の負荷における最大作業回数は、それぞれ平均63回、28回、11回であったことを報告している。また静的作業と作業時間との関係について、Monod ら¹⁶⁾は、身体4ヶ所の筋に対し、負荷を変えて静的最

大作業を行なわせた時の相対的作業負荷量と作業時間との関係を検討し、動的作業時と同様に両者の間に指数関数的関係が認められたこと、そして最大筋力の1/3, 1/2, 2/3の各負荷における作業時間は、およそ3分, 1分, 30秒であったと報告している。これらの結果と同様に、本実験においても、図2に示したように動的および静的最大作業時の相対的作業強度と作業回数あるいは作業時間との間に指数関数的関係が認められた。しかし本実験で得られた作業回数や作業時間は、同じ相対的作業強度で得られた猪飼¹¹⁾や Monod¹⁶⁾の結果に比べてわずかに高い傾向を示した。これらの差については、猪飼¹¹⁾が上腕屈筋を、Monod¹⁶⁾も、上腕筋、大腿四頭筋および指の屈筋を用いていることから、使用した筋の差によるものと考えられる。すなわち本実験では前腕の屈筋を用いたが、この筋が日常生活において極めてよく使用されるため、他の筋に比べ筋持久力が高かったためかもしれない。

これまで作業と血流量との関係については非常に多くの研究が行なわれてきたが、その作業方法により、静的作業を行なった場合と動的作業を行なった場合に大別されるだろう。

まず静的作業における作業中の血流量は、筋内圧の上昇による血流阻止作用と、作業に伴う血管拡張作用という相反する作用のバランスによって決定され则认为られている⁷⁾。この静的作業における筋内圧と血流量との関係について、Lind¹⁵⁾、Barcroft⁴⁾は、最大筋力の10%の負荷では、作業中の血流量はほぼ steady state を保ち、作業放棄に至らないことから、筋内圧の上昇による血流量への影響は認められないと報告している。しかし最大筋力の20%の作業では、作業中の血流量は時間と共に上昇するが、同時に筋は疲労し、作業放棄に至ったこと、および作業終了直前の血流量よりも、作業終了直後の血流量の方が多かったことから、筋内圧の上昇による血流阻止作用の影響が認められたことを報告している。以上のことから、筋内圧の上昇に伴って血流阻止が起り始める作業強度は、最大筋力の10—20%の間と考えられ、この強度を、Monod¹⁶⁾による作業放棄に至らない強度、いわゆる “critical

power” に相当すると考えれば、最大筋力の14—15%と推定される。さらに Donald⁶⁾、Humphreys¹⁰⁾は、最大筋力の30—60%の強度で静的最大作業を行なわせた時の作業中の血流量を測定した結果、作業強度の上昇に伴い作業中の血流量は減少することを観察している。さらに Royce¹⁸⁾、Start¹⁹⁾は、最大筋力のおよそ70%以上の強度では、血流は遮断され、筋への血液の供給は不可能になると報告している。これらのことから、作業の強さが増大するにつれ、血管拡張が促進されるにもかかわらず、作業強度の増大に伴う筋内圧の上昇により血液の供給が阻止されるため、結果的には最大筋力の1/3程度の強度の作業中の血流量が最も多くなるものと思われる。この作業強度の増大に伴う作業中の血流阻止の影響は、当然回復期血流量にも大きな影響を及ぼすものと考えられる。Barcroft⁴⁾は、1分および4—5分で exhaustion に至るような強度の異なる2種の最大作業を行なわせた時の作業後の前腕血流量を測定し、作業直後の血流量にはほとんど差がみられなかったが、作業負荷が重い方が、作業後血流量の回復がわずかに速かったと報告している。本実験では、図2に示したように、最高血流量、血流負荷量ともに作業負荷の違いによる統計的に有意の差は認められなかった。これは、先の Barcroft⁴⁾の報告とおおむね一致するものと考えられる。この作業の重さを変えても作業後の血流量に差が見られなかった原因については、(1) 作業持続時間が異なっても、作業放棄に至った時点での総酸素消費量がほぼ同じであるために、作業後の血流量に差がみられない。(2) 血管拡張には限界があり、exhaustion に至るような静的作業においては、作業負荷を変えても血管拡張はほぼ peak に達しているために差がみられない。

などが考えられる。しかし本実験では作業中の血流量や酸素摂取量を測定しなかったため、上記の原因についてはさらに検討しなければならないだろう。

動的作業と血流量との関係について、Pirnay¹⁷⁾、Tønnesen²⁰⁾、Jorfeldt¹²⁾、Grimby⁸⁾は、クセノンクリアランス法を用い、各種の

強度の全身運動を行なわせた時の脚の血流量を測定し、運動強度の増大と共に、血流量もそれに比例して増加するが、次第に leveling off になることを観察している。しかしながら、上記の方法を用いてヒトの前腕の動的作業中の血流量を頻繁に測定することは困難であり、また Barcroft ら²⁾により、動的作業では作業中の弛緩期血流量と作業直後血流量とがほぼ等しいと報告されている。そこで測定の難しい作業中の血流量の代わりに、作業後の血流量と作業時間や作業強度との関係を検討した報告は多い。例えば、加賀谷¹⁴⁾は、最大筋力の 1/3 の負荷で、下腿の動的作業を作業回数を変えて実施した時の作業直後の血流量を測定し、作業回数に比例して作業後血流量も増加するが、次第にその増加率が低下し、leveling off となることを報告している。Barcroft ら³⁾も、一定強度の脚の作業において、作業時間が長くなると作業後血流量も増加したことを認めている。さらに Halliday⁹⁾や Black⁵⁾は、スピードや距離を変えて歩行やランニングを行なわせた時の運動後の血流量を測定し、スピードを上げたり、距離を長くすると作業後血流量が増加したことを観察している。しかしこれらの結果は、いずれも最大下作業時のものであり、本実験のように作業の負荷を変え、それぞれ exhaustion に至るまで動的作業を行なわせた際の作業後血流量を比較した例は見当たらない。しかしながら、本実験結果においても、作業量（負荷重量×作業回数）が最も多い 1/3 の負荷時が、作業後血流量も最も多かったこと、そして作業量と血流負債量との間に有意の相関関係 ($r=0.62$, $p<0.01$) が認められたことから、最大下作業と同様に最大作業時においても、作業量が増加すると作業後血流量も増加するものと考えられる。

ところで、本実験のような最大動的作業では、図 3 で示したように、作業負荷が軽い程作業後血流量が多くなる傾向が認められ、最大筋力の 1/3 と 2/3 負荷との間の最高血流量と、全ての負荷条件間の血流負債量に有意の差が認められた。これらの結果は、一定作業負荷（絶対的負荷量）で動的最大作業を行なわせ、血流量の面から筋持久力トレーニング効果を考察する上で重要な意味を持つ

ものと思われる。すなわち、isometric や isotonic トレーニングにより、筋力・筋持久力および最大作業後の血流量が増加することはよく知られている。そのため、もしトレーニング前後で同じ負荷で運動を行なわせたとすれば、トレーニング後では最大筋力の増加分だけ相対的負荷量が低くなり、トレーニング効果以上に、この負荷量の違いによる血流量の増加を見込んでしまうことになる。このことから、絶対的負荷法によりトレーニング前後の血流量を比較する場合には、これらのことを考慮しなければならないと言えるだろう。

これまで同一作業負荷における動的および静的最大作業後の血流量を比較検討した報告は見当たらない。本実験では、両作業後における最高血流量は、いずれの作業負荷においても統計的な有意の差は認められなかった。しかし血流負債量は、作業負荷が軽い場合には、動的作業の方が静的作業に比べ有意 ($p<0.001$) に多く、逆に作業負荷が重い場合には、静的作業の方が有意 ($p<0.01$) に多かった。これらの差については、それぞれの作業方法による血流阻止量や代謝産物などの産生量の違いによる影響が大きいと考えられる。つまり、最大筋力の 2/3 負荷のような強い作業では、前にも述べたように筋内圧が上昇し、収縮中の筋への血流は大幅に減少する。従って静的作業では、この血流阻止の影響を強く受け、そのため筋が弛緩する作業後に血流の急激な増加を招くものと考えられる。しかし動的作業では、弛緩期において相当量の血液が流入するため、静的作業に比べてこの血流阻止による作業後流量への影響は少ないと考えられる。以上のことから、最大筋力の 2/3 の負荷において、静的作業後の血流量が動的作業に比べ有意に高かったのは、この作業中の血流阻止量の差によるものと考えられよう。他方、最大筋力の 1/3 の負荷のような軽い負荷では、作業中の血流阻止量も少なくなると考えられることから、静的および動的作業後の血流量の有意の差は、むしろ血管拡張として働く CO_2 や乳酸などの代謝産物の産生量の差に起因していると考えられる。このことについて Wahren²¹⁾は、作業強度がほぼ等しいと考えられる rhythmic isometric な筋作業 (5.6kp, 30mm, 60回/分) と、

rhythmic isotonic な筋作業 (20kp, 60回/分) において, 酸素摂取量や血中乳酸量は, rhythmic isotonic な筋作業の方がわずかに多かったことを観察している。これらの結果は最大下作業時のものであるが, 最大筋力の 1/3 の負荷のように比較的作業重量が軽い最大作業の場合にも, 動的作業の方が静的作業に比べて CO_2 や乳酸の産生量が多くなり, これらが直接血管を拡張させるために, 作業後の血流量が有意に増加するものと思われる。しかし, これら同一作業負荷における両作業後の血流量については, 酸素摂取量や乳酸の産生量の面からさらに検討する必要があると思われる。

引用・参考文献

- 1) Barcroft, H. and Millen, J.C., "The blood flow through muscle during sustained contraction," *J. Physiol.*, 97 : 17-31, 1939.
- 2) Barcroft, H. and Dornhorst, A.C., "The blood flow through the human calf during rhythmic exercise," *J. Physiol.*, 109 : 402-11, 1949.
- 3) Barcroft, H., Dornhorst, A.C., Maclatchey, H.M., and Tanner, J.M., "On the blood flow through rhythmically contracting muscle before and during release of sympathetic vasoconstrictor tone," *J. Physiol.*, 117 : 391-400, 1952.
- 4) Barcroft, H., Greenwood, B., and Whelan, R.F., "Blood flow and venous oxygen saturation during sustained contraction of the forearm muscle," *J. Physiol.*, 168 : 848-56, 1963.
- 5) Black, J.E., "Blood flow requirements of the human calf after walking and running," *Clin. Sci.*, 18 : 89-93, 1963.
- 6) Donald, K.W., Lind, A.R., McNicol, G.W., Humphreys, P.W., Taylor, S.H., and Staunton, H.P., "Cardiovascular responses to sustained (static) contractions," *Circul. Res. Suppl.*, 20 : 15-32, 1967.
- 7) Grant, R.T., "Observation of the blood flow circulation in voluntary muscle in man," *Clin. Sci.*, 3 : 157-73, 1938.
- 8) Grimby, G., Häggendal, E., and Saltin, B., "Local xenon 133 clearance from the quadriceps muscle during exercise in man," *J. Appl. Physiol.*, 22-2 : 305-10, 1967.
- 9) Halliday, J.A., "Blood flow in the human calf after prolonged walking," *Amer. Heart J.*, 60-1 : 110-15, 1960.
- 10) Humphreys, P.W. and Lind, A.R., "The blood flow through active and inactive muscle of the forearm during sustained hand-grip contractions," *J. Physiol.*, 166 : 120-35, 1963.
- 11) 猪飼道夫・石井喜八・中村淳子「血流量からみた筋持久力(Ⅱ)」*体育の科学*, 15-5 : 281-87, 1967.
- 12) Jorfelt, L. and Wahren, J., "Leg blood flow during exercise in man," *Clin. Sci.*, 41 : 459-73, 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. 211-77.
- 14) 加賀谷淳子「作業時下腿血流量の時間的変化」第34回日本体力医学会予稿集, No. 263, 1979.
- 15) Lind, A.R., Taylor, S.H., Humphreys, P.W., Kennelly, B.M., and Donald, K.W., "The circulatory effects of sustained voluntary muscle contraction," *Clin. Sci.*, 27 : 29-44, 1964.
- 16) Monod, H. and Scherrer, J., "The work capacity of synergic muscular group," *Ergonomics*, 8 : 329-38, 1965.
- 17) Pirnay, F., Marechal, R., Radermecker, R., and Petit, J.M., "Muscle blood flow during submaximum and maximum exercise on bicycle ergometer," *J. Appl. Physiol.*, 32-2 : 210-12, 1972.
- 18) Royce, J., "Isometric fatigue curves in human muscle with normal and occluded circulation," *Res. Quart.*, 29 : 204-12, 1972.
- 19) Start, K.B. and Holmes, R., "Local muscle endurance with open and occluded intramuscular circulation," *J. Appl. Physiol.*, 18-4 : 804-07, 1963.
- 20) Tønnesen, K.H., "Blood flow through muscle during rhythmic contraction measured by xenon 133," *Scand. J. Clin. Invest.*, 16 : 646-54, 1964.
- 21) 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.
- 22) Whitney, R.J., "The measurement of volume changes in human limbs," *J. Physiol.*, 121 : 1-27, 1953.