各種強度の自転車エルゴメーター作業中の大腿容積 変化と作業終了直後の大腿血流量

北 村 潔 和*

RELATIONSHIP BETWEEN BLOOD FLOW AND VOLUME CHANGE OF THE THIGH IN BICYCLE EXERCISE AT VARYING WORK RATES.

KIYOKAZU KITAMURA

Blood flow and volume change of the thigh were measured in six healthy male subjects in bicycle exercise at varying work rates. Mercury-in-rubber strain gauge plethysmograph technique was used to determine the blood flow and volume change of the thigh.

The thigh blood flow immediately after exercise reached an average of 16.7 ml/100 ml·min when the work load was 30 watt. It rose progressively with the intensity of the exercise so as to attain 24.8, 39.4 and 44.4 ml/100 ml·min at 60, 120 and 180 watt, respectively.

The thigh volume immediately before stopping the exercise at 30, 60, 120 and 180 watt were 2.53, 2.86, 3.68 and 4.33 ml/100 ml, min respectively. Furthermore, there are close relationship between the thigh volume immediately before stopping the exercise and the thigh blood flow immediately after exercise with being statistically significant ($r=0.76$, $P<0.001$).

(J. Physical Fitness Japan 1980, 29 : 92~97)

I. 結 言

活動筋への酸素供給や活動筋で産生される乳酸や炭酸ガス等の除去は、循環血液によって行われることから末梢への血流量が注目されている。したがって、これまでに数多くの測定方法がヒトの活動筋への血流量を測定するために考案されている⁶⁾。しかし、キセノンクリアランス法や静脈阻止プレチスモグラフ法など、これまでに考案されてきた非観血的に血流量を測定する方法では、いずれの方法を適用しても作業中の活動筋への血流量を連続測定することは困難であり、作業中の血流量を非観血的に連続測定することが今後の問題として残されている。

近年、北村ら¹⁾は水銀ラバーストレインゲージを用いて、最大自転車エルゴメーターおよび最大トレッドミル作業中の下腿容積変化を作業開始から終了まで連続記録し、作業終了直前の筋弛緩期

の下腿容積の増加量と作業終了1分後の血流量の間に密接な関係のあることを報告している。これは、作業中の活動肢の容積変化が作業中の血流量を知るためのよい指標になることを示唆しているものと考えられる。しかし、その報告の中でも活動肢の容積変化と作業強度、作業終了直後の血流量の関係についての検討はなされていない。

本実験は、異なる4種類の強度で自転車エルゴメーター作業を行わせた際の作業中の大腿容積変化と作業終了直後の大腿血流量を測定し、これらの関係を明らかにしようとしたものである。

II. 実 験 方 法

1. 被検者：平均年齢19.5 (19.0~20.0) 才，身長 165.5 (160.0~170.0) cm，体重 61.2(55.0~65.0) kg の日常定期的な身体トレーニングを行っていない健康な男子大学生6名である。
2. 作業条件：自転車エルゴメーター作業は、

* 富山大学教養部 Toyama University, The College of Liberal Arts, 3190 Gofuku, Toyama-Shi (930)

スエーデン、モナーク社製の自転車エルゴメーターを用いて1分間に60回転のメトロノームのテンポに合わせてペダリングを行わせた。作業強度は、30, 60, 120, 180 Watt の4種類である。被検者には、各々の強度で4分間の作業を行わせた。なお、作業は30→60→120→180 Watt の順序で行わせ、作業と作業の間には仰臥位で10分間の安静をはさんだ。

3. 大腿血流量の測定：大腿血流量の測定は、Whitney²³⁾の開発した水銀ラバーストレインゲージを用い、Matsui ら¹⁶⁾の静脈阻止法によって行った。すなわち、大腿周径変化は、被検者を仰臥位にし大腿に25gの張力で水銀ラバーストレインゲージを装着した後、鼠径部の大腿静脈を2～3 kg/cm²の圧で圧迫した。血流量は、このようにして得られた大腿周径変化の記録から Whitney²³⁾の方法にならい求めた。

4. 大腿容積変化の測定：作業開始から終了までの大腿周径変化は、血流量測定と同じ水銀ラバーストレインゲージを用いて連続記録した。容積変化($\Delta V/V$)は、 $\Delta l/l$ の約2倍で近似できることが幾何学的に証明されていることから、作業終了直前の筋弛緩期の大腿容積は、得られた大腿周径変化の記録から周径変化(Δl)を計測し、安静仰臥位での大腿周径(l)に対する相対的周径変化($\Delta l/l$)を算出して求めた。ただし、 $\Delta V/V$ は単なる百分率であるから、ml/100mlとして置きかえることができる。なお、水銀ラバーストレインゲージの較正は、マイクロメーターを用いて作業前と後に行った。

5. 測定手順：安静時大腿血流量は、仰臥位で約10分間の安静をとらせたのち大腿に水銀ラバーストレインゲージを装着し、さらにその状態で10分間の安静をとらせたのち30秒間隔で5回測定した。その後、大腿に水銀ラバーストレインゲージを装着した状態で30 Wattの強度に規定された自転車エルゴメーターのペダリングを行わせて作業中の大腿容積変化を記録した。作業終了後すばやく元の仰臥位に戻し、作業終了直後(15秒以内)の大腿血流量を上記の方法で測定した。60, 120, 180 Wattの作業についても同様の手順で作業中の大腿容積変化と作業終了直後の血流量を測定した。なお、全ての実験は室温 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 60

$\pm 5\%$ にコントロールされた人工気候室で実施した。

III. 結 果

安静時および作業終了直後の大腿血流量と作業強度の関係を図1に示した。安静時の大腿血流量は、 $3.4 \sim 4.9 \text{ ml}/100 \text{ ml} \cdot \text{min}$ の範囲にあり、全被検者の平均値と標準偏差でみると $3.8 \pm 0.5 \text{ ml}/100 \text{ ml} \cdot \text{min}$ であった。

30, 60, 120, 180 Wattの作業終了直後の大腿血流量は、全被検者の平均値と標準偏差(被検者の数)でみると 16.7 ± 3.8 (6), 24.8 ± 4.3 (6), 39.4 ± 4.8 (6), 44.4 ± 4.8 (5) $\text{ml}/100 \text{ ml} \cdot \text{min}$ であり、また、両者の間には密接な関係が認められた($r=0.93$, $P<0.001$)。被検者個々について検討してみると、6名の被検者の内3名は180 Wattの作業まで作業強度の増加に伴って大腿血流量は増大したが、他の3名の内2名は180 Wattに強度が増大しても大腿血流量は、それ以上の増大はなかった(Leveling off)。また、1名の被検者については180 Wattの作業での血流量の測定ができなかったため、180 Wattの作業強度で血流量がLeveling offするかは明らかでない。しかしな

Fig. 1 Thigh blood flow before and immediately after bicycle exercise.

Fig. 2 An actual record of volume changes in the thigh during bicycle exercise.

Fig. 3 Thigh volume immediately before stopping the exercise at 30, 60, 120 and 180 watt.

がら、120 Watt の作業強度までは、他の5名の被検者と同様に作業強度の増加とともに血流量はほぼ比例して増大した。

4種類の異った作業強度でペダリングを行なわせた際の作業中の大腿容積変化の記録例を図2に示した。図2でも明らかなように、大腿容積は筋が収縮したとき減少し、逆に弛緩したときは増加する。また、各々の強度で4分間の作業を行わせ

Fig. 4 Relationship between thigh blood flow immediately after exercise and thigh volume during bicycle exercise.

た際の作業中の容積変化は、強度によって異った傾向が認められた。すなわち、30 Watt の強度で作業を行わせた際に認められた大腿容積変化は、筋の収縮期と弛緩期ともに4分間の作業中はほぼ一定であったが、60, 120, 180 Watt の作業強度では、作業時間の経過とともに大腿容積が増大する傾向にあった。さらに、その増加の割合は作業強度が増すにつれて大きくなり、その傾向は全被検

者に共通していた。

仰臥位安静時の大腿容積を基準にして求めた、作業終了直前の筋弛緩期の大腿容積の増加量と作業強度との関係を示したものが図3である。図3でも明らかなように、大腿容積は作業強度とほぼ比例して増大する傾向にあった ($r=0.61$, $P<0.01$)。

作業終了直前の筋弛緩期の大腿容積と作業終了直後(15秒以内)に得られた大腿血流量の関係を図4に示した。図4でも明らかなように両者の間には、密接な関係が認められた ($r=0.76$, $P<0.001$)。

IV. 考 察

水銀ラバーストレインゲージプレチスモグラフ法は、現在の活動肢への血流測定法の中で信頼できると考えられているキセノンクリアランス法²¹⁾や希釈法³⁾²²⁾、さらには、流量計¹⁵⁾を用いて測定された血流量と比較され、それらの間に密接な関係のあることが確められている。また、本実験で得られた安静時大腿血流量は、キセノンクリアランス法によって報告されている Grimby ら⁷⁾の値よりも高かったが、指示薬希釈法 (Indocynine Green を指示薬) を用いて報告されている Jorfeldt & Wahren¹⁰⁾の値とよく一致した。

静脈阻止プレチスモグラフ法では、立位または座位の姿勢で下肢への血流量を測定することはできない。そこで、本実験においてもこれまでの報告¹⁵⁾¹⁴⁾¹⁶⁾と同様に作業終了後すばやく被検者を仰臥位にして血流量を測定した。安静時においては、姿勢の変換が前腕血流量に影響をおよぼすことが報告されており¹⁷⁾²⁰⁾、本実験での座位から仰臥位への姿勢の変換が作業後血流量になんらかの影響を与えていることが推測される。しかし、作業後についての報告はなく、作業終了後にすばやく座位から仰臥位に姿勢を変換することによって、それが作業後の血流量に与える影響については明らかでない。本実験で得られた最大下作業終了直後の大腿血流量は、本実験と同一仕事量の作業中に希釈法で得られた Jorfeldt & Wahren¹⁰⁾の値とほぼ一致した。したがって、本実験の作業終了直後に得られた大腿血流量には、姿勢の変換による影響は少なかったものと考えられる。しか

し、これらについては、キセノンクリアランス法などによってさらに検討する必要がある。

作業強度と活動肢への血流量との関係については、多くの研究者によって報告されている。特に自転車エルゴメーター作業時の大腿血流量に関して検討してみると Grimby ら⁷⁾、Pirnay ら¹⁹⁾は、作業中の大腿血流量は最大作業強度まで強度の増加とともに増大することを報告している。これに対し、Clausen & Lassen⁴⁾は、最大作業強度の約70%で大腿血流量が Leveling off することを、Bonde-Petersen ら²⁾は最大酸素摂取量の約50~60%で Leveling off することを報告している。このように、自転車エルゴメーター作業時の大腿血流量が作業強度に対してどのように変動するのかはまだ一致した見解は得られていない。しかし、これらの報告に共通していることは、ある作業強度まではその増加とともに大腿血流量が増大することである。本実験で得られた作業終了直後の大腿血流量は6名の被検者全員が120 Wattの作業強度までその増加に伴って増大した。したがって、ペダリング作業時の大腿血流量は、ある作業強度までは強度の増加とともに増大するものと考えてよいであろう。

本実験では、活動肢への血流量が最大下作業で Leveling off することを明らかにすることはできなかったが、6名の被検者の内2名に Leveling off が認められたことは、Clausen & Lassen⁴⁾の報告のように活動肢の血流量が最大下作業で Leveling off する可能性のあることを示すものと考えられる。しかし、Bonde-Petersen ら²⁾が指摘するように、血流量の測定方法に問題があるとする報告もあり、この点についてはさらに検討する必要がある。

一方、自転車エルゴメーター作業終了直後の大腿血流量が、120 Wattの作業強度まで強度の増加とともに増大したことは、作業中も同様に強度の増加に伴って増大することを示唆するものである。しかし、本実験で用いた静脈阻止法では、作業中の大腿血流量を測定することができない。そこで、本実験では作業中の大腿周径変化(容積変化)を記録した(図2)。

作業中に得られた大腿周径変化は、ラバーストレインゲージの抵抗変化を記録したものであり、

この抵抗変化を引き起す要因の中には、①筋収縮にともなう皮膚の移動、②ペダリング中の膝関節屈伸動作にともなう大腿筋群の筋長変化など直接大腿容積の増大に結びつかないものもある。自転車のペダリングは、クランクの長さやサドルの高さによって動作が制限されており、仮に、皮膚の移動や筋長の変化によってのみゲージの抵抗変化が生じていたとするならば、同一作業時間内での作業開始時と終了時の抵抗変化は同じであると考えられる。とくに、筋弛緩期の抵抗変化においては、作業強度の影響を受けることなく作業開始から終了まで一定の水準を示すものと考えられる。しかし、本実験で得られた作業中の大腿周径変化の記録は、筋弛緩期、収縮期ともに作業強度の増大や作業時間の経過にともなって増大する傾向を示した(図2)。したがって、本実験で得られた作業中の大腿周径変化(とくに筋弛緩期)は、おもに大腿容積の増大と直接かかわりのある要因によって引き起こされていたものと考えられる。

ところで、本実験で得られた大腿容積は作業強度の増大とともに増大した(図2, 3)。Jacobson & Kjellmer⁹⁾、Kjellmer¹²⁾は、電気刺激を用いてネコの下腿に作業を行わせた際の下腿容積の増加量は、作業強度(刺激頻度)と密接な関係にあることを報告している。仮にこの結果がヒトの活動肢についてもあてはまるとするならば、本実験の結果は、Jacobson & Kjellmer⁹⁾、Kjellmer¹²⁾の報告とよく一致するものである。

Kjellmer¹³⁾は、作業中の活動組織容積の増加は、局所血流量の増大と組織水分量の増大によることを報告している。さらに、Jacobson & Kjellmer⁹⁾は、筋作業を遂行することによってリンパ液量もわずかに増大することを見つけている。したがって、本実験で得られた大腿容積の増加量は、組織水分量とリンパ液量の増大や局所血流量の増大を含むものと考えられる。しかしながら、Kjellmer¹²⁾の結果に見られるように、血流量と組織容積の増加量の間に密接な関係に認められることや本実験で得られたように作業終了直後の大腿血流量と作業終了直前の筋弛緩期の大腿容積との間に密接な関係があったことを考え合わせると、作業中に記録された大腿容積の増加量は、作業中の活動肢への血流量を知るためのよい指標である

と考えられる。したがって、作業中の大腿容積が作業中の血流量の指標になるものと仮定するならば、本実験の大腿血流量は、作業中も同様に作業強度の増大とともに増大していたものと考えられる。しかし、筋収縮時の筋内圧が上昇することにより作業中の血流量は減少し、作業後に作業中を上回る血流量の増大があるという報告も¹⁸⁾あり、最大作業については、さらに検討する必要がある。

作業中の筋弛緩期および筋収縮期の大腿容積が、30 Wattの作業では4分間の作業中はほぼ一定であったことは、大腿への血流量が作業時間中はほぼ一定であったことを示唆しているものと考えられる。それに対し、60, 120, 180 Wattの作業では、大腿容積は4分間の作業中一定にならず、時間経過とともに増大することが認められた(図2)。この結果は、これらの作業強度では、4分間の作業中、大腿への血流量が一定にならないことを示しているものと考えられる。

以上の検討から、自転車エルゴメーター作業直後の大腿血流量は、ある作業強度(120 Watt)までは、その増大とともに増大する。また、作業中の大腿容積の増加量は、作業強度や作業直後の大腿血流量と密接な関係にあり、作業中の活動肢の容積変化は作業中の血流量を示す有用な指標の一つになることが示唆された。

V. 要 約

異なる4種類の強度で自転車エルゴメーター作業を行わせた際の大腿血流量と大腿容積変化を測定した。

作業終了直後の大腿血流量は、ある作業強度(120 Watt)までは強度の増大に伴って増大した。

作業終了直前の大腿容積の増加量は、作業強度の増大に伴って増大した。

作業終了直後の大腿血流量と作業終了直前の大腿容積の増加量との間には、密接な関係が認められた($r=0.76$, $P<0.001$)。

(受付 昭和54年12月12日)

文 献

- 1) Black, J.E.(1959) : Blood flow requirements of the calf muscles after walking and runn-

- ing. Clin. Sci. **18**, 89-93.
- 2) Bonde-Petersen, F., Henriksson, J. and Lundin, B. (1975) : Blood flow in the thigh muscle during bicycle exercise at varying work rates. Eur. J. Appl. Physiol. **34**, 191-197.
- 3) Burger, H.C., Horemien, H.W. and Brakkee, A.J.M. (1959) : Comparison of some methods of measuring peripheral blood flow. Phys. Med. Biol. **4**, 168-175.
- 4) Clausen, P. and Lassen, N.A. (1971) : Muscle blood flow during exercise in normal man studied by the 133 xenon clearance method. Cardiovascular Res. **5**, 245-254.
- 5) Elsner, R.W. and Carlson, L.A. (1962) : Postexercise hyperemia in trained and untrained subjects. J. Appl. Physiol. **17**, 436-440.
- 6) Folkow, B. and Neil, E. (1971) : Circulation, Oxford University Press, Inc., 78-90.
- 7) Grimby, G., Häggendal, H. and Saltin, B. (1967) : Local xenon 133 clearance from the quadriceps muscle during exercise in man. J. Appl. Physiol. **22**(2), 305-310.
- 8) Jacobson, S. and Kjellmer, I. (1964) : Flow and protein content of lymph in resting and exercising skeletal muscle. Acta Physiol Scand. **60**, 278-285.
- 9) Jacobson, S. and Kjellmer, I. (1964) : Accumulation of fluid in exercising skeletal muscle. Acta Physiol. Scand. **60**, 286-292.
- 10) Jorfeldt, L. and Wahren, J. (1971) : Leg blood flow during exercise in man. Clin. Sci. **41**, 459-473.
- 11) 北村潔和, 山田昭子, 宮村実晴, 松井秀治 (1978) : 下腿容積変化からみたトレッドミル運動と自転車エルゴメーター運動の比較, 総合保健体育科学 **1**, 53-58.
- 12) Kjellmer, I. (1964) : The effect of exercise on the vascular bed of skeletal muscle. Acta Physiol. Scand. **62**, 18-30.
- 13) Kjellmer, I. (1965) : Studies on exercise hyperemia. Acta Physiol. Scand. **64**, Suppl. 244.
- 14) Livingstone, R.A. (1961) : Blood flow in the calf of the leg after running. Am. Heart J. **61**(2), 219-224.
- 15) Longhurst, J., Capone, R.J., Mason, D.T. and Zelis, R. (1974) : Comparison of blood flow measured by plethysmograph and flowmeter during steady state forearm exercise. Circulation **49**, 535-540.
- 16) Matsui, H., Kitamura K. and Miyamura, M. (1978) : Oxygen uptake and blood flow of the lower limb in maximal treadmill and bicycle exercise. Eur. J. Appl. Physiol. **40**, 57-62.
- 17) Mengesha, Y. A. and Bell, G. (1979) : Forearm and finger blood flow responses body tilt. J. Appl. Physiol. **46**(2), 288. 292.
- 18) Nilsson, B. and Ingvar, D. H. (1967) : Intramuscular pressure and contractile strength related to muscle blood flow in man. Scand. J. Clin. Lab. Invest. Suppl. **93**, 31-38.
- 19) Pirnay, F., Marechal, R., Radermecher, R. and Petit, J.M. (1972) : Muscle blood flow during submaximum and maximum exercise on a bicycle ergometer. J. Appl. Physiol. **32**, 210-212.
- 20) Roddie, I.G., Shepherd, J.T. and Whelen, R.F. (1957) : Reflex changes in vasoconstrictor tone in human skeletal muscle in response to stimulation of receptors in a low-pressure area of the intrathoracic vascular bed. J. Physiol. **139**, 369-376.
- 21) Tønnesen, K.H. (1968) : Simultaneous measurement of the calf blood flow by strain-gauge plethysmography and the calf muscle blood flow measured by 133 xenon clearance Scand. Clin. Lab. Invest. **21**, 65-76.
- 22) Wahren, J. (1965) : A dye dilution method for the determination of brachial artery blood flow during forearm exercise in man. Acta Physiol. Scand. **64**, 477-478.
- 23) Whitney, R.J. (1953) : The measurement of volume change in human limbs. J. Physiol. **121**, 1-27.