

## 最大下および最大自転車エルゴメーター作業時の 下肢血流量、酸素摂取量、筋電図積分値

北 村 潔 和

富山大学教養部運動生理学教室 〒930 富山市五福3190

### Blood Flow, Oxygen Uptake and Integrated-EMG in Submaximal and Maximal Bicycle Exercise with Constant Loading

Kiyokazu Kitamura

Laboratory for Work Physiology, College of Liberal Arts,

Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama

**ABSTRACT** Thigh and calf blood flow, oxygen uptake and integrated-EMG were determined in submaximal and maximal bicycle exercise in 5 healthy male subjects. The thigh and calf blood flow before and after exercise were determined with mercury-in-rubber strain gauge venous occlusion plethysmography. The oxygen uptake during exercise was determined by Douglas-Bag method. The EMG activity in leg was measured from surface electrodes, and it was integrated by integrater (NIHON KOHDEN, RF-5).

The mean values of resting blood flow of the thigh (3.3ml/100ml · min) and calf (2.4ml/100ml · min) were approximately the same. However, the thigh blood flow after submaximal and maximal exercise was higher than that in the calf.

The thigh blood flow immediately after exercise increased lineally with the increase of the oxygen uptake up to about 90% of maximum oxygen uptake. Beyond this level, the thigh blood flow did not reveal the further increase. On the other hand, it was observed that the calf blood flow immediately after exercise was no change with increase of the oxygen uptake.

The integrated-EMG (M. vastus medialis + M. biceps femoris) during exercise increased lineally with the increase of the oxygen uptake up to about 90% of maximum oxygen uptake. Beyond this level no further increase of the integrated-EMG was seen (Fig. 6). Furthermore, a close relation was found between the thigh blood flow immediately after exercise and integrated-EMG during exercise.

## I. 緒 言

最大酸素摂取量は、全身持久性能力を反映する最もよい指標の一つであるといわれ、この酸素摂取量を制限する要因に関していくつもの研究が報告されている<sup>7,15,16)</sup>。酸素摂取量は、 $\text{心拍出量} \times \text{動静脈酸素較差}$ で示されるように、活動組織への酸素運搬能力と活動組織での酸素消費能力によって制限されると考えられる。したがって、酸素摂取量と活動組織への血流量の関係を明らかにすることは、酸素摂取量を制限する要因の内容的検討という点から興味のある問題である。

作業筋への血流量と酸素摂取量の関係については、Grimby<sup>6)</sup>らは、キセノクリアランス法を用いて自転車エルゴメーター作業中の大腿(大腿四頭筋)の血流量を測定し、大腿血流量は、最大酸素摂取量の発現する作業強度まで酸素摂取量の増大にほぼ比例して増すことを報告している。一方、Clausen & Lassen<sup>4)</sup>は、同様な測定方法を用い、自転車エルゴメーター作業中の大腿血流量(外側広筋)が、最大作業強度の約70%までは作業強度の増加とともに増大するが、それ以上の強度ではもはや増大しないことを報告している。このように、ペダリング作業時の大腿への血流量が、酸素摂取量や作業強度の増大に対してどのように変動するかについては、まだ一致した見解はみられていない。また、これらの報告は大腿の血流量のみについてであり、下肢筋全体へ流入する血流量については、十分解明されていない。

本実験では、最大下および最大自転車エルゴメーター固定負荷作業後の下肢血流量(大腿と下腿血流量の測定から)と作業時の酸素摂取量との関係を明らかにしようとするものである。

## II. 実験方法

### 1. 被検者

被検者は、平均年齢28.0(19.0~41.0)才、身長166.9(163.0~171.0)cm、体重61.4(55.0~68.0)kgの健康な男子5名である。

### 2. 大腿および下腿血流量の測定

安静時および作業後の大腿と下腿血流量の測定は、Whitney<sup>23)</sup>の開発した水銀ラバーストレインゲージを用い、Matsui<sup>15)</sup>らの静脈阻止法によった。血流量は、得られた肢部周径変化の記録からWhitney<sup>23)</sup>の方法にしたがって求めた。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行った。

### 3. 酸素摂取量の測定

酸素摂取量の測定は、ダグラスバッグ法によって行い、作業開始から作業終了まで1分毎に呼気ガスを連続採気した。呼気ガス中のCO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>濃度の分析は、三栄測器製呼気ガス分析装置（IHO2-2）を用いて行い、較正はショランダー微量ガス分析器を用いて行った。

#### 4. 心拍数の測定

心拍数は、胸部双極誘導により作業中、回復期を通じて連続記録した心電図のR-R波間隔より求めた。

#### 5. 筋電図積分値の測定

被検者3名について内側広筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋より表面電極誘導法で筋電図を作業中連続して導出し、日本光電工業製積分プリアンプ（RFJ-5）を用いて、その積分値を求めた。

#### 6. 自転車エルゴメーター作業

負荷作業は、モナーク社製自転車エルゴメーターによる50rpmのペダリングとし、各々の被検者が約9分で疲労困難になるような負荷量を予備テストにより決定した。すなわち5名の被検者の内4名は、3.0kp（900kp・m/min），他の1名は3.5kp（1050kp・m/min）の負荷であった。なお、静脈阻止プレチスモグラフィ法では、血流量を作業中連続して測定することができないことから、作業時間を0～2、0～4、0～6、0～9分（疲労困憊まで）と分割し、各々の作業終了直後の血流量を途中経過とみなした。酸素摂取量、心拍数、筋電図積分値は、血流量の測定された同じ作業によって得られた各々の作業終了直前の1分間の値を測定値として採用した。

#### 7. 測定手順

安静時血流量の測定は、仰臥位で約20分間の安静をとらせた後、大腿と下腿に水銀ラバーストレインゲージを装着し、さらに、3名の被検者については、筋電図導出のための電極を貼布した状態で、1分間隔で4回行った。その後、呼気ガス採気用マスクを装着し、大腿と下腿に水銀ラバーストレインゲージを装着した状態で自転車エルゴメーター作業を行わせ、作業中の酸素摂取量、心拍数、筋電図の積分値を測定した。作業終了後、被検者を初期の仰臥位に戻し、回復15分間の血流量を測定した。すなわち、作業終了直後（15秒以内）から2分目までは30秒間隔で、それ以後は1分間隔で測定を行った。なお、疲労による影響を避けるために作業と作業の間は、30～40分間の仰臥位または座位による安静をとらせた。2回目以後の作業を開始するにあたっては、回復期心拍数が作業前の安静時心拍数にほぼ回復していることを確認し、さらに、被検者の主観的な疲労感の申告を判断の資料とした。

## III. 結 果

安静時，最大下（2，4，6分の作業）および最大（9分の作業）自転車エルゴメータ

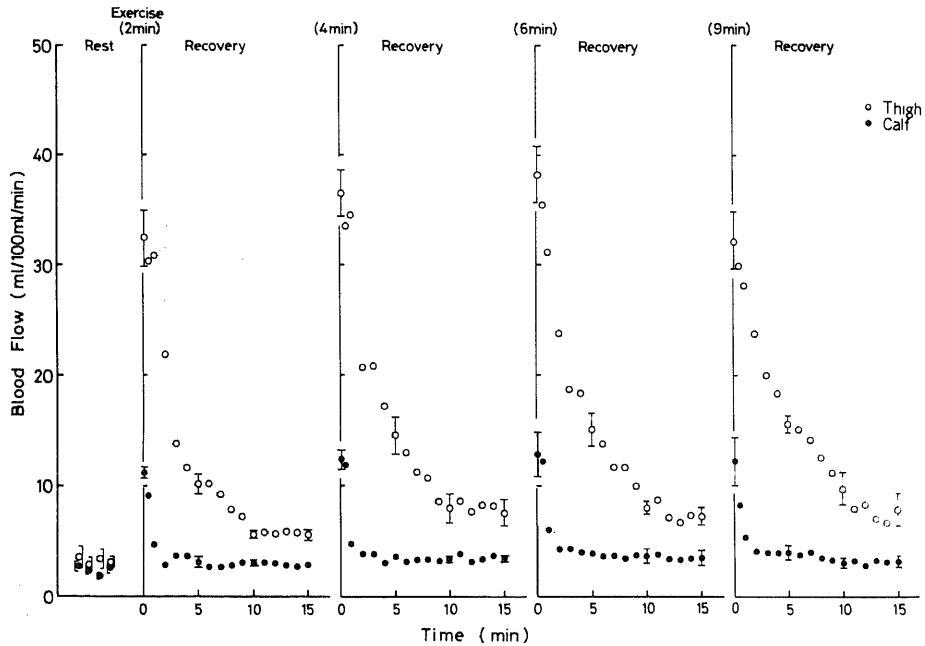


Fig.1. Blood flow of the thigh (white circle) and calf (black circle) before and after submaximal (2,4 and 6 min) and maximal (9 min) bicycle exercise at 900 or 1050 kg·m/min. Standard error are shown with vertical bars.

一作業後の大腿と下腿血流量を図1に示した。安静時血流量を全被検者の平均値でみると，大腿血流量は 3.3ml /100ml·min ，下腿血流量は 2.4ml /100ml·minであり，大腿血流量は下腿血流量に比べてわずかに高い値を示したが，両者の間には統計的に有意な差は認められなかった。

作業時間に対する各々の作業終了前1分間の酸素摂取量，心拍数，作業終了直後の大腿と下腿血流量の関係を図2に示した。酸素摂取量，心拍数は作業時間の延長にほぼ比例して増大する傾向にあったが，9分目の大腿血流量は，6分目の血流量に比べて有意な増大を示さなかった（Leveling off）。また，下腿血流量は，作業時間の延長に伴う変動はほとんど認められなかった。

酸素摂取量に対する心拍数，大腿と下腿血流量の関係を図3に示した。心拍数は，酸素摂取量の増大にほぼ比例して増す傾向にあった。しかし，大腿血流量は，最大酸素摂取量（9分目の作業で得られた酸素摂取量）の約90%までは酸素摂取量の増大にほぼ比例して増す傾向にあったが，それ以上の強度では血流量の増大はなかった。

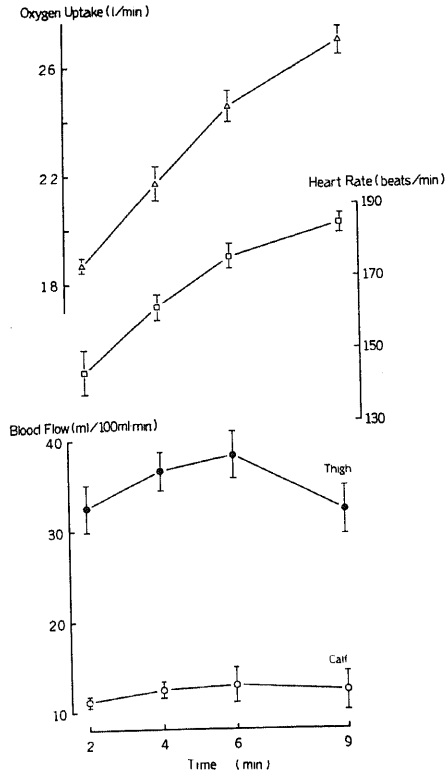


Fig. 2. Oxygen uptake, heart rate, thigh blood flow and calf blood flow in submaximal and maximal bicycle exercise. Standard error are shown with vertical bars.

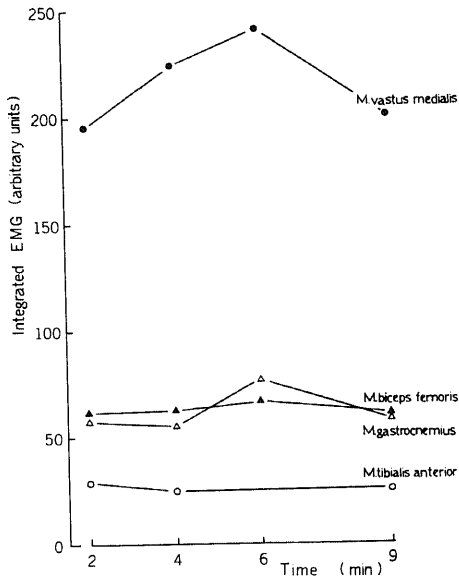


Fig. 4. Integrated-EMG in relation to working time; mean values for three subjects.

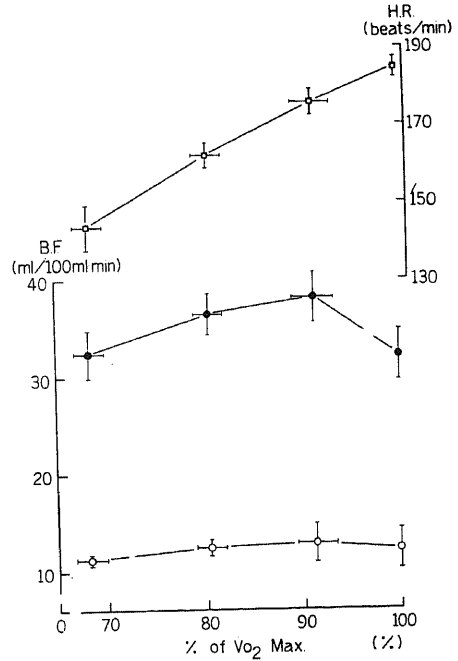


Fig. 3. Heart rate, thigh blood flow and calf blood flow in relation to oxygen uptake in submaximal and maximal bicycle exercise. Standard error are shown with vertical and horizontal bars.

さらに、大腿血流量は、下腿血流量に比べて全ての作業で高い値を示した。

3名の被検者から得られた筋電図積分値を図4に示した。大腿二頭筋、腓腹筋、前脛骨筋の積分値は、作業時間や酸素摂取量の増大に対して顕著な変動は認められなかった。それに対し、内側広筋の積分値は6分目の作業(最大酸素摂取量の約90%)までは、その強度の増大に伴って増大した。しかし、9分目の筋電図積分値は6分目のそれに比べて増大しなかった。

大腿血流量は、大腿全体の血流量を示していることから、大腿二頭筋と内側広筋の筋電図積分値を加算し、大腿血流量との関係を3名の平均値で示したものが図5である。図5でも明らかのように、大腿血流量は、筋電図

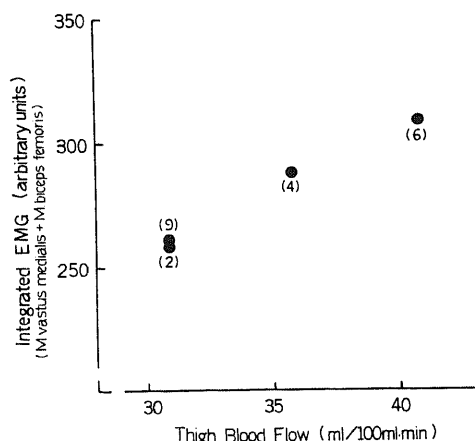


Fig. 5. Relationship between integrated-EMG (M. vastus medialis + M. biceps femoris) and thigh blood flow immediately after bicycle exercise. Mean values for three subjects.

積分値の増大にもなって増大する傾向を示した。

#### IV. 論 議

本実験で大腿と下腿血流量を同時測定するために用いた静脈阻止法は、北村ら<sup>12)</sup>によって下腿血流量のみについてはあるが、従来のcuffによる静脈阻止法とよく一致することが確められている。さらに、本実験で得られた安静時および作業終了直後の大腿と下腿血流量は、これまで静脈阻止プレチスモグラフィやキセノンクリアランス法を用いて測定されている値ともよく一致した。<sup>5,6,10,11)</sup>

ところで、本実験で得られた安静時における大腿と下腿血流量の間に有意の差は認められなかったが、最大下および最大自転車エルゴメーター作業後の大腿血流量は、下腿血流量に比べて高い値を示した。これらの結果は、最大自転車エルゴメーター作業後の大腿と下腿血流量について報告している Matsui らの結果とよく一致した。<sup>14)</sup> 北村は、膝窩の外側腓腹皮神経を皮膚表面から電気刺激し、下腿に律動的作業を行わせた際の同側肢の大腿と下腿血流量を同時測定し、血流量の増大は、主に活動部位である下腿に起っていることを報告している。さらに、Humphreys & Lind<sup>9)</sup>は、筋電図学的手法を用いて作業中の活動筋と非活動筋を区別し、活動筋の筋温の上昇から作業中の血流量の増大は、主に活動筋で起っていることを報告している。したがって、本実験で自転車エルゴメーター作業後の大腿血流量が下腿血流量に比べて高かった理由の一つには、作業中の大腿筋群の活動水準が下腿筋群に比べて高く、その結果、大腿への血配分が下腿に比べて高くなったものと考えられる。

作業肢への血流量と作業強度や酸素摂取量との関係については、多くの研究者によって報告がなされている。前腕や下腿の局所的作業については、Wahren<sup>22)</sup>、田口ら<sup>20)</sup>、Tønnesen<sup>21)</sup>の報告がみられる。全身的な作業については、自転車エルゴメーター作業中の大腿血流量について、Grimby<sup>6)</sup>、Pirnay<sup>19)</sup>、Clausen & T-Jensen<sup>3)</sup>、Clausen & Lassen<sup>4)</sup>、B-Petersen<sup>2)</sup>ら、北村<sup>13)</sup>、さらに、走行・歩行後の下腿血流量については、Black<sup>1)</sup>によって報告されている。作業形態、測定部位、測定方法などの違いがあるにもかかわらず、これらの報告に共通していることは、作業肢への血流量がある水準までは、作業強度や酸素摂取量の増大にほぼ比例して増すということである。本実験においても、自転車エルゴメーター作業直後の大腿血流量は、酸素摂取量が最大値の約90%に達するまでは、酸素摂取量

の増加と共に増大した。したがって、作業肢への血流量は、ある作業強度水準までは負荷や酸素摂取量の増加に比例して増すものと考えてよいであろう。

田口<sup>20)</sup>らは、前腕の作業を行わせた際の前腕への血流量は、作業強度が約20kg・m/minを越えると、Tønnesen<sup>21)</sup>は下腿に作業を行わせた際の下腿への血流量は、最大作業強度の約50%でLeveling offすることを報告している。全身的作業について、Clausen & Lassen<sup>4)</sup>は、自転車エルゴメーター作業中の大腿血流量は最大作業強度の約70%、B-Petersen<sup>2)</sup>ら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。さらに、Black<sup>1)</sup>は歩行・走行終了直後の下腿血流量が約107ml/minのスピードでLeveling offすることを報告している。これに対し、Grimby<sup>6)</sup>ら、Pirnay<sup>19)</sup>らのように自転車エルゴメーター作業中の大腿血流量が、最大酸素摂取量の発現する作業強度まで作業強度の増加にほぼ比例して増すという報告もある。本実験で得られた自転車エルゴメーター作業直後の大腿血流量は、最大酸素摂取量の約90%を越えるとLeveling offする傾向を示し、これは先のClausen & Lassen<sup>4)</sup>、B-Petersen<sup>2)</sup>、Black<sup>1)</sup>の報告とほぼ一致した。

作業肢への血流量がLeveling offする要因については、血流量の測定方法に問題があるとする報告もみられる<sup>2)</sup>が、先のClausen & Lassen<sup>4)</sup>は、①最大作業近くでは、それまでその作業に参加していなかった筋群が作業に参加してくること、②最大作業近くでは、筋の収縮時に発揮される筋の張力により筋内圧が上昇し、作業筋への血流量が阻止されるためであろうと推論している。②については、Nilsson & Ingvar<sup>17)</sup>も作業中の筋肉圧の上昇による血管閉塞によって作業筋への血流量の減少することを報告している。しかし、本実験で測定された血流量は、作業終了直後であるため筋収縮による筋内圧の上昇によって大腿への血流量がLeveling offしたとは考えられない。

本実験では、大腿血流量がLeveling offする要因を筋の活動状態から検討するために、3名の被検者の大腿筋群（内側広筋・大腿二頭筋）から筋電図を導出し、その積分値を求めた（図4）。大腿二頭筋は、作業時間の延長にともなう顕著な変動は認められなかったが、ペダリング作業の主動筋である内側広筋の積分値は、6分目の作業（最大酸素摂取量の約90%）まで作業時間の延長（酸素摂取量の増大）にともなって増大した。しかし、9分目（最大作業）で得られた筋電図の積分値は、6分目のそれに比べて増大はなかった。この結果は、大腿筋群の活動水準が6分目と9分目の作業でほぼ同じであったことを示している。また、筋電図積分値（大腿二頭筋+内側広筋）と大腿血流量の間に密接な関係（図5）が認められたことを考えると、本実験の大腿血流量が6分目の作業（最大酸素摂取量の約90%）でLeveling offした要因の一つは、大腿筋群の活動水準がLeveling offしていたことによるものであろう。

本実験では、下肢筋群の活動水準が6分目の作業でLeveling offしていたにもかかわらず酸素摂取量は、9分目の作業まで漸次増大した。岡本<sup>18)</sup>らは、自転車エルゴメーター作業時の下肢筋群と上肢筋群の筋電図を記録し、作業強度が大きくなると、ペダリングに必要な

な踏力を得るため上肢にハンドルを引き上げる動作が起り、上肢筋群に筋放電が認められることを報告している。したがって、本実験の9分目の疲労困憊近くでの作業では、上肢筋群など本実験で測定されなかった筋群がペダリングに参加するようになり、下肢筋群の活動水準がLeveling off していたにもかかわらず、酸素摂取量が増大したものと考えられる。

以上の検討から、自転車エルゴメーター固定負荷作業時の大腿血流量は、最大作業近くでLeveling off するものと考えられる。また、その要因の一つには、大腿筋群の活動水準が最大作業近く（最大酸素摂取量の約90%）でLeveling off することが明らかとなった。

## V. 要 約

- 1) 健康な男子5名に最大下および最大自転車エルゴメーター作業を行かせた際の大腿および下腿血流量、酸素摂取量、筋電図積分値を測定した。
- 2) 最大下および最大自転車エルゴメーター作業直後の大腿血流量は、下腿血流量に比べて高い値を示した。
- 3) 作業終了直後の大腿血流量は、最大酸素摂取量の約90%でLeveling off する傾向を示した。
- 4) 内側広筋の筋電図積分値は、最大酸素摂取量の約90%でLeveling off する傾向がみられた。

## 文 献

- 1) Black, J. E. (1959) Blood flow requirements of the human calf after walking and running. *Clin. Sic.* **18**:89-98.
- 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) Clausen, J. P. and Trap-Jensen, J. (1970) Effects of training on the distribution of cardiac output in patients with coronary disease. *Circul.* **42**:611-642.
- 4) Clausen, J. P. and Lassen, N. A. (1971) Muscle blood flow during exercise in normal man studied by the 133 xenon clearance method. *Cardiovas. Res.* **5**:245-254.
- 5) Elsner, R. W. and Carlson, L. D. (1962) Postexercise hyperemia in trained and untrained subjects. *J. Appl. Physiol.* **17**:436-440.
- 6) Grimby, G., Haggendal, E. and Saltin, B. (1967) Local xenon clearance from the quadriceps muscle during exercise in man. *J. Appl. Physiol.* **22**:305-310.
- 7) Hermansen, L. and Saltin, B. (1969) Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise. *J. Appl. Physiol.* **26**:31-37.
- 8) Henriksson, J. and Bonde-Petersen, F. (1974) Integrated electromyography of quadriceps femoris muscle at different exercise intensities. *J. Appl. Physiol.* **36**:218-220.



- 9) Humphreys, P. W. and Lind, A. R. (1963) The blood flow through active and inactive muscle of the forearm during sustained handgrip contractions. *J. Physiol.* **166**:120-135.
- 10) 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, *体育研究*, **21**:87-93.
- 11) Kitamura, K., Miyamura, M. and Matsui, H. (1976) Blood flow of the lower limb in maximal treadmill and bicycle exercise. *J. Physiol. Soc. Japan.* **38**:457-459.
- 12) 北村潔和, 宮村実晴, 山本親, 松井秀治 (1979) 異なる2つの静脈阻止プレチスモグラフ法による下腿血流量の比較, *体育学研究*, **23**:315-320.
- 13) 北村潔和 (1980) 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, *体力科学*, **29**:92-97.
- 14) 北村潔和 (1981) 下腿の律動的作業にともなう活動肢および非活動肢への血流量, *体力科学*, **30**:240-245.
- 15) 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.
- 16) Miyamura, M., Kitamura, K., Yamada, A. and Matsui, H. (1978) Cardiorespiratory responses to maximal treadmill and bicycle exercise in trained and untrained subjects. *J. Sports Med.* **18**:25-32.
- 17) Nilsson, B. and Ingvar, D. H. (1967) Intermuscular pressure and contractile strength related to muscle blood flow in man. *Scand. J. Clin. Lab. Invest. (Suppl. 93.)*:31-38.
- 18) 岡本勉, 高木公三郎, 熊本水頼, 他4名 (1968) 自転車エルゴメーターの筋電図的研究, *体育学研究*, **12**:18
- 19) Pirnay, F., Marechal, R., Radermecker, R. and Petit, J. M. (1972) Muscle blood flow during sub-maximal and maximal exercise on a bicycle ergometer. *J. Appl. Physiol.* **32**:210-212.
- 20) 田口貞善, 猪飼道夫, 金子公宥 (1970) 筋血流量からみた局所作業能について, *呼吸と循環*, **18**:332-333.
- 21) Tønnesen, K. H. (1964) Blood flow through muscle during rhythmic contraction measured by  $^{133}$  xenon. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* **16**:646-654.
- 22) Wahren, J. (1966) Quantitative aspects of blood flow and oxygen uptake in the human forearm during rhythmic exercise. *Acta Physiol. Scand. (Suppl. 269)*:1-93.
- 23) Whitney, R. J. (1953) The measurement of volume changes in human limbs. *J. Physiol.* **121**:1-27.