

水素ガスクリアランス法によるヒト下腿筋血流量の筋種差に関する研究

前田 順一・西村 千尋*・竹宮 隆

Difference in blood flow measured by the hydrogen gas clearance method between different muscles of the human lower leg

Jun-ichi MAEDA, Chihiro NISHIMURA*, and Takashi TAKEMIYA

Differences in blood flow among muscles in a human lower leg were investigated using the hydrogen gas clearance method. Fourteen male subjects, aged 21 to 30 yrs, participated in the experiment after giving their informed consent. Muscle blood flow were measured in tibialis anterior (TA), gastrocnemius (GAS) and soleus (SOL) muscles at supine rest and upright rest posture, and after plantar flexion or plantar plus dorsi flexion of ankle joint (5 min duration, 30 frequency/min) at a tension of 25% maximal voluntary contraction (MVC).

The following results were obtained:

1) Blood flow (ml/100g/min, mean \pm SE (n)) of TA, GAS and SOL at supine rest were 5.5 \pm 0.6 (20), 3.8 \pm 0.3 (27) and 4.9 \pm 0.5 (22), respectively. There were no significant differences among them.

2) Muscle blood flow measured at upright posture in TA (4.8 \pm 0.3 (73)) showed no significant changes from the supine posture, whereas in SOL (7.0 \pm 0.8 (73)) increased significantly ($P < 0.05$).

3) Following ankle plantar flexion, there was no change in blood flow of TA, but blood flow of SOL significantly increased ($P < 0.05$). Muscle blood flow of TA and SOL were increased markedly ($P < 0.01$) after ankle plantar plus dorsi flexion.

These results indicate that there were no significant differences in blood flow among muscles in a human lower leg at supine rest posture, and suggest that upright posture and/or muscle exercise produce the enhanced activity of local blood flow redistribution in human lower leg muscles.

Key Words : blood flow distribution, arterioles, postural change, plantar and dorsi flexion of ankle joint

I. 緒言

全身持久力の維持向上や局所疲労の抑制には、筋血流の再配分および運動性高血流 (Exercise hyperemia) を支配する細動脈の機能が密接に関連している³⁾⁷⁾⁹⁾¹³⁾²⁰⁾。実験動物を対象にした研究

では、血流の再配分について各種 indicator 法を用い、単一筋内の筋線維間の血流分布に至るまで詳細な研究が行われている¹³⁾¹⁹⁾。しかし、ヒトでは下肢一上肢間および活動肢一非活動肢間の血流配分の研究に留まっており、運動時の筋種間血流再配分にまで踏み込んだ研究はほとんどない。これはヒトを対象とした研究の測定方法上の限界によ

*筑波大学研究生

るものである。単一筋の血流測定は¹³³Xe クリアランス法により試みられているが⁹⁾¹²⁾, γ 線ディテクターの面積を小さくできないなどの問題から接近した協同筋間の血流の同時測定は行われていない。

本研究の目的は、近接した複数の部位で局所血流量を同時に測定できる水素ガスクリアランス法をヒトの筋血流量測定に応用することであり、さらには径80 μ mの留置型ワイヤー電極を用いることにより運動と筋種間の血流再配分の関係をヒトにおいて検討することである。また、仰臥位安静時と立位時の前脛骨筋とヒラメ筋の血流量を同時に測定することにより、筋血流調節における細動脈での神経性・代謝性機序の優位性を検討した。筋種間における血流配分の定量的研究は、持久性の改善や疲労と筋の細動脈機能の関係の解明に貢献するものと考えている。

II. 方 法

1. 被 験 者

被験者は、21歳から30歳の健康な成人男子14名であった。被験者には実験の目的と方法について予め詳細な説明を行い、実験への参加に同意を得た。

2. 筋組織血流量の測定

下腿の前脛骨筋・腓腹筋・ヒラメ筋の筋組織血流量は、Auklandら²⁾の考案した水素ガスクリアランス法を用いて測定した。筋組織における水素ガスのクリアランス曲線は、水素クリアランス式組織血流計 MHG-D1 (UNIQUE MEDICAL CO.) を用い記録した。クリアランス曲線の解析には Zierler²¹⁾の理論に基づく Height-Area 法を採用し、解析時間を1分間、筋の単位重量を100gとして算出した。

感電極には径80 μ mのワイヤー型 pt-pt black 電極を用い、ガイド針とともに筋中に刺入し感電極のみを筋中に留置した。不感電極には血型 Ag-AgCl 電極を用い、測定肢の膝下部皮膚上に装着した。

水素ガスは加湿後に一回換気量の5~10%の濃度になるように吸気中にフラッシングし、自発呼吸により吸入させた。筋組織内の水素ガス濃度が飽和に近い状態に達したことを記録曲線より確認した後、水素ガスの吸入を停止しクリアランス曲線を記録した。クリアランス曲線が連続的に減衰

し基線に復帰した試行のみを解析の対象とした。

3. 筋血流の測定条件

筋血流の測定は、仰臥位安静時、立位姿勢時、仰臥位での5分間の律動的な足関節底屈運動(30回/分)後および足関節底・背屈運動(30回/分)後に行った。足関節の底・背屈運動は、予め測定した足関節底屈による最大筋力(MVC)の25%の重量(25%MVC)を負荷した。測定部位は、仰臥位安静時には前脛骨筋・腓腹筋・ヒラメ筋の下腿筋群から2つの筋を選択し同時に測定した。立位姿勢時・仰臥位での律動的な足関節底屈運動後および足関節の底・背屈運動後には、前脛骨筋とヒラメ筋の筋血流を同時に測定した。

4. 統計的検定

筋組織血流量は、平均値と標準誤差で示した。一人の被験者で複数回測定した筋血流量を筋種毎に統計処理したために、標本数は筋種毎の測定数となっている。3群間の筋組織血流量の差の検定には分散分析を用い、2群間の検定には t-test を用いた。有意水準は危険率5%以下とした。

III. 結 果

1. 仰臥位安静時の下腿筋血流量

仰臥位安静時の前脛骨筋・腓腹筋・ヒラメ筋の血流量(ml/100g/min, mean \pm SE (n))は、それぞれ5.0 \pm 0.6 (20), 3.8 \pm 0.3 (27), 4.9 \pm 0.5 (22)であった。分散分析の結果、安静時の筋組織血流量に有意な筋種差は認められなかった。(Fig. 1)。

2. 立位安静時の下腿筋血流量

立位安静時の前脛骨筋とヒラメ筋の組織血流量は、それぞれ4.8 \pm 0.3 (73), 7.0 \pm 0.8 (73)であった。ヒラメ筋の組織血流量は、立位姿勢への能動的な体位変換により有意(P < 0.05)に増大したが、前脛骨筋では血流量に有意な変化が認められなかった(Fig. 2)。心拍数は仰臥位の55.3 \pm 0.81 拍/分から立位への能動的な体位の変化にともない81.3 \pm 1.4 拍/分へ有意(P < 0.01)に増大した。

3. 仰臥位での下腿筋運動に伴う筋血流量の変化

仰臥位で足関節底屈運動を25%MVCの強度で5分間(30回/分)行わせた結果、前脛骨筋血流量は安静時の5.0 \pm 0.6 (20)から4.8 \pm 0.8 (3)に変化した。しかし、この変化は有意なものでは

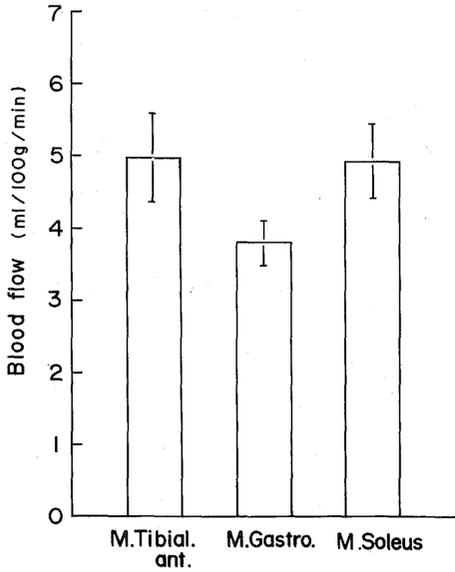


Fig. 1 Resting muscle blood flow in human tibialis anterior (M. Tibial. ant.), gastrocnemius (M. Gastro.) and soleus (M. Soleus) muscles at supine posture.

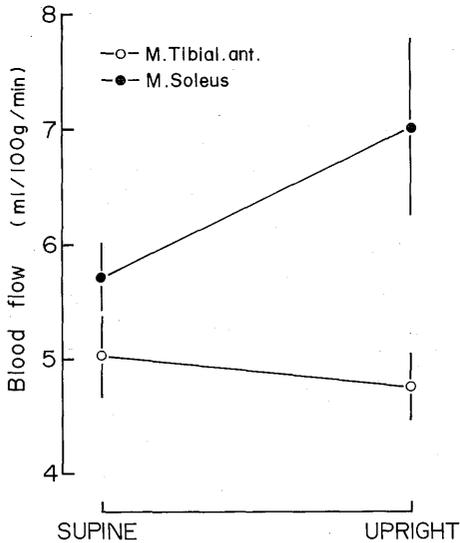


Fig. 2 Resting muscle blood flow at supine posture and at upright posture. Other explanations are the same as in Fig. 1.

なかった。ヒラメ筋では、安静時の 4.9 ± 0.5 (22) から 8.9 ± 1.4 (4) へ有意 ($P < 0.05$) な増大が

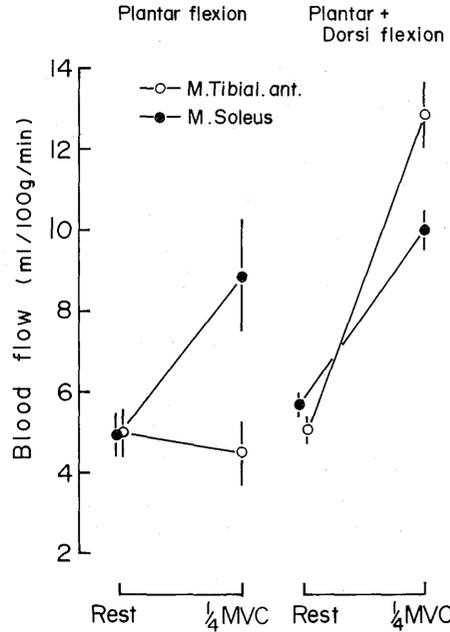


Fig. 3 Resting muscle blood flow and post exercise hyperemia in human lower leg muscles. Plantar flexion, plantar flexion of ankle joint (5 min duration, 30 frequency/min) at a tension of 25% MVC; Plantar + Dorsi flexion, plantar plus dorsi flexion of ankle joint (5 min duration, 30 frequency/min) at a tension of 25% MVC. Other explanations are the same as in Fig. 1.

認められた (Fig. 3, 左側)。

仰臥位での足関節の底・背屈運動 (25%MVC, 30回/分, 5分間) 後の前脛骨筋・ヒラメ筋の血流量は、それぞれ 12.9 ± 0.9 (65), 10.1 ± 0.5 (90) に増大した (Fig. 3, 右側)。前脛骨筋・ヒラメ筋の運動後血流量は、両者とも安静時の筋組織血流量に対し有意 ($P < 0.01$) な増大を示した。筋血流測定時の心拍数 (拍/分) は、足関節の底・背屈運動後に安静時の 55.3 ± 0.8 から 60.5 ± 0.9 へ有意 ($P < 0.01$) に増大した。

IV 考 察

運動にともなう筋種間の血流再配分に関する研究は、ヒトでは測定方法上の限界からほとんど行われていない。本研究では、ヒトにおいて接近した筋群の血流量を複数箇所ですべて同時に測定できる数素ガスクリアランス法¹⁵⁾を用い、姿勢変化と運動

にともなう前脛骨筋・ヒラメ筋の血流応答を検討した。その結果、ヒトの下腿筋群の筋血流量には安静仰臥位の姿勢では有意な差が認められず、下腿筋群の中で拮抗的な関係にある前脛骨筋とヒラメ筋の血流は、筋の活動状況に対応して変化することが明らかになった。

1. 下腿筋群の安静時筋血流量

前脛骨筋・腓腹筋・ヒラメ筋の安静時血流量 (ml/100g/min, mean±SE (n)) は、それぞれ 5.0 ± 0.6 (20), 3.8 ± 0.3 (27), 4.9 ± 0.5 (22) であり、筋種間に有意な差異は認められなかった。これらの血流値は、前報¹⁵⁾の前脛骨筋 5.5 ± 0.8 (21) および腓腹筋 4.3 ± 0.6 (28) と同等のものであった。本研究では遅筋線維の優勢なヒラメ筋の血流量を新たに測定したが、仰臥位安静時の血流量には前脛骨筋・腓腹筋との間に有意な差異はみられなかった。筋線維組成の異なる筋種間の筋血流量の差異については、麻酔下の動物では筋を分離するなどの外科的な処置により筋の赤筋部の血流が選択的に増大するため筋種間の血流に有意な差異が認められるとの報告がある⁴⁾¹⁴⁾。しかし、外科的な処置を加えなければ差が認められないことも知られている¹⁴⁾。本研究では仰臥位安静のヒト下腿筋群には筋種間の血流の有意な差異は認められなかった。このことはヒトにおいても麻酔下の動物と同様に下腿筋群が活動していない状態では、筋線維組成の異なる筋種間に血流の差異が認められないことを示しているものと考えられる。

2. 立位姿勢持続時の筋血流量

意識下の動物では姿勢維持に関与する抵重力筋の血流が有意に高く、ヒラメ筋では腓腹筋に比べ3倍ほど血流量が多いとの報告¹⁷⁾や安静時(姿勢維持時)の筋血流量と遅筋線維の割合(%SO線維)との間には正の相関が存在するとの報告¹¹⁾がある。これらの筋種間における血流の差異は、筋の組織化学的な代謝特性によるものではなく、筋の活動水準の相違に起因するものであると考えられている¹³⁾。

本研究において、安静仰臥位の姿勢では下腿筋群の筋種間に血流の有意な差異は認められなかった。しかし、立位姿勢への体位変化にともないヒラメ筋の筋血流量は有意に増大するものの前脛骨筋の血流量は有意な変化を示さなかった。仰臥位から立位への体位の変換にともない下肢の静水圧

は増大することが知られている。前脛骨筋では立位姿勢時に筋活動がほとんど認められないことから、細動脈の血管内圧の増大に呼応した交感神経性血管収縮線維の活動水準の増大や筋原性血管収縮反応⁸⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹⁶⁾が血流の低減に作用し、静水圧の増大にも拘らず筋血流量は有意な変化を示さなかったものと考えられる。しかし、姿勢維持の主動筋として機能するヒラメ筋では細動脈に対する代謝性の血流調節が静水圧の増大にともなう交感神経性・筋原性の血管収縮反応より優位に機能し⁵⁾、細動脈の弛緩傾向を惹起した結果、血流の増大が観察されたものと考えられる。

3. 足関節運動後の筋血流量

筋の活動水準と血流の再配分の関係をさらに検討するために、本研究では仰臥位の姿勢でヒラメ筋と腓腹筋を主動筋とする足関節の底屈運動とこれに前脛骨筋の活動を加えた足関節の底・背屈運動の二種類の作業を負荷し前脛骨筋とヒラメ筋の筋血流量を同時に測定した。筋電図による観察から、足関節の底屈運動では、前脛骨筋が活動していないことを確認し、足関節の底・背屈運動では前脛骨筋とヒラメ筋がともに活動していることを確認した。その結果、足関節の底屈運動後にはヒラメ筋の血流量が有意に増大するのに対し前脛骨筋の血流には変動が認められなかった。一方、足関節の底・背屈運動では前脛骨筋とヒラメ筋の両者の筋血流量が有意に増大した。この時、筋の血流配分は筋の活動水準に応じて調節され、活動している筋のみに細動脈の代謝性血管拡張¹⁸⁾が生じているものと考えられる。

以上の結果は、筋が活動していない状態ではヒトの下腿筋群に筋種間の血流差が認められないこと、姿勢の維持や局所の筋運動時にはその筋の活動状況によって血流に再配分が生じ、この調節には細動脈での神経性・代謝性機序が関与することなどを示している。また、筋血流を研究する際には安静時であっても姿勢による影響が大きく関与することから、実験時の姿勢や測定肢の位置を考慮することが重要であると思われる。

V. 結 語

本研究では、局所的な筋血流量を接近した部位で測定できる水素ガスクリアランス法をヒトに応用し、ヒトにおける筋活動と筋種間の血流再配分との関連を検討した。その結果は以下の通りで

あった。

1) 仰臥位安静時の前脛骨筋・腓腹筋・ヒラメ筋の血流量 (ml/100g/min, mean±SE (n)) は、それぞれ 5.0 ± 0.6 (20), 3.8 ± 0.3 (27), 4.9 ± 0.5 (22) であり、安静時の筋組織血流量に有意な筋種差は認められなかった。

2) 立位安静時の前脛骨筋とヒラメ筋の組織血流量は、それぞれ 4.8 ± 0.3 (73), 7.0 ± 0.8 (73) であった。ヒラメ筋の組織血流量は、立位姿勢への能動的な体位変換により有意 ($P < 0.05$) に増大したが、前脛骨筋血流量の変化は有意ではなかった。

3) 仰臥位での足関節底屈運動によりヒラメ筋の筋血流量は 8.9 ± 1.4 (4) へ有意 ($P < 0.05$) に増大したが、前脛骨筋血流量は有意な変化を示さなかった。仰臥位での足関節の底・背屈運動後には前脛骨筋・ヒラメ筋の血流量は、それぞれ 12.9 ± 0.9 (65), 10.1 ± 0.5 (90) へ有意 ($P < 0.01$) に増大した。

以上の結果は、筋が活動していない状態ではヒトの下腿筋群に筋種間の血流差が認められないこと、姿勢の維持や局所の筋運動時には筋の活動状況により血流に再配分が生じ、その調節には細動脈での神経性・代謝性機序が関与することを示している。また、筋血流を研究する際には安静時であっても姿勢による影響が大きく関与することから、実験時の姿勢や測定肢の位置を考慮することが重要であると思われる。

〈付記〉

本研究は、1988年度文部省科学研究費補助金奨励研究 (A) 63780142および1988年度筑波大学学内プロジェクト奨励研究により行われた。

参 考 文 献

- 1) Armstrong, R.B. and Laughlin, M.H.: Blood flows within and among rat muscles as a function of time during high speed treadmill exercise. *J. Physiol.* 344: 189—208, 1983.
- 2) Aukland, K., Bower, B.F. and Berliner, R.W.: Measurement of local blood flow with hydrogen gas. *Circ. Res.* 14: 164—187, 1964.
- 3) Barcroft, H.: Circulation in skeletal muscle. In *Handbook of Physiology II*. Sect. 2. Baltimore, Williams & Wilkins, pp 1353—1385, 1963.
- 4) Folkow, B. and Halicka, H.D.: A comparison between "Red" and "White" muscle with respect to blood supply, capillary surface area and oxygen uptake during rest and exercise. *Microvasc. Res.* 1: 1—14, 1968.
- 5) Folkow, B. and Neil, E.: *Circulation*. 593 pp, Oxford University Press. 1971. "循環" 入内島十郎訳, 517pp, 真興交易医書出版部, 東京, 1973.
- 6) 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—310, 1967.
- 7) Haddy, F.J., Scott, J.B. and Grega, H.J.: Peripheral circulation; Fluid transfer across the microvascular membrane. *Cardiovascular Physiology II* (9), 63—109, 1976.
- 8) Henriksen, O.: Local sympathetic reflex mechanism in regulation of blood flow in human subcutaneous adipose tissue. *Acta Physiol. Scand.* 101 (Suppl. 450): 1—48, 1977.
- 9) Hudlická, O.: Effect of training on macro- and microcirculatory changes in exercise. *Exercise Sport Sci. Rev.* 5: 181—230, 1977.
- 10) Johnson, P.C.: The myogenic response. In: *Handbook of Physiology*, ed. by Bohr, D.F., Somlyo, A.P., and Sparks, H.V., Sect. 2, The Cardiovascular System, Vol. 11, Vascular Smooth Muscle, American Physiological Society, Bethesda, Maryland, pp. 409—442, 1980.
- 11) Johnson, P.C.: Myogenic mechanisms of blood flow regulation. In: *Vasodilatation*, ed. by Vanhoutte, P.M. and Leuse, I. Raven Press, New York. pp. 255—262, 1981.
- 12) Lassen, N.A., Lindbjerg, J. and Munck, O.: Measurement of blood flow through skeletal muscle by intramuscular injection of xenon-133. *Lancet* 1: 686—689, 1964.
- 13) Laughlin, M.H. and Armstrong, R.B.: Muscle blood flow during locomotory exercise. *Exercise Sports Sci. Rev.* 13: 95—136, 1985.
- 14) Mackie, B.C. and Terjung, R.L.: Blood flow to different skeletal muscle fiber types during contraction. *Am. J. Physiol.* 245: H265—H275, 1983.
- 15) 前田順一, 竹宮 隆: 水素ガスクリアランス法によるヒト下肢筋血流量の研究. 筑波大学体育科学系紀要11: 323—328, 1988.
- 16) Mellander, S.: Myogenic mechanisms in local vascular control. *Acta Physiol. Scand.* 133 (Suppl. 571): 25—42, 1988.

- 17) Reis, D.J., Wooten, G.F. and Hollenberg, M.: Differences in nutrient blood flow of red and white skeletal muscles in the cat. *Am. J. Physiol.* 213: 592—596, 1967.
- 18) Spark, H.V.Jr. and Belloni, F.L.: The peripheral circulation; Local regulation. *Ann. Rev. Physiol.* 40: 67—92, 1978.
- 19) 竹宮 隆, 橋爪和夫, 田中幸夫, 橋羽裕規男, 高瑞鐘: 水素ガスクリアランス法による家兔後肢骨格筋とその腿の組織血流について. *体力科学*31(1): 41—50, 1982.
- 20) 竹宮 隆, 前田順一, 樋口雄三: 末梢循環適応の限界と疲労について. *疲労と休養の科学*4:35—46, 1989.
- 21) Zierler, K.L.: Equations for measuring blood flow by external monitoring of radioisotopes. *Circ. Res.* 16: 309—321, 1965.