

静的膝伸展時の大腿部における酸素動態， 血流量および筋放電量の特性

三浦 哉 渡井口和豪

要 旨：8名の成人男性を対象に，60秒間の静的膝伸展運動をした際の外側広筋および大腿直筋の酸素動態，大腿動脈血流量，筋放電量の相互関係を検討した。その結果，運動強度の増加にともない大腿動脈血流量は増加し，外側広筋と比較して大腿直筋での酸素消費および筋放電量の増加が著しいことが明らかになった。また，回復時の血流量の増加および酸素動態の変化から，大腿直筋への酸素供給の増大が示された。(J Jpn Coll Angiol, 2007, 47: 47-51)

Key words: oxygenation, blood flow, myoelectric activity, knee extended exercise

緒 言

運動時の活動筋への酸素需要を満たすためには酸素供給，つまり血流量の増加が重要である。末梢の循環調節は， K^+ ， H^+ などの代謝性血管拡張因子，NOなどの血管弛緩因子といった血流量の増加に関わる要因と，交感神経の緊張，機械的受容器反射などの神経性血管収縮因子，筋内圧などによる機械的圧迫といった血流量の減少に関わる要因とが相互に作用する¹⁾。循環調節要因のなかでも脈管動態と筋収縮活動の協調は，循環系全体の恒常性の維持に重要であるために，両者の関係を検討することは重要と考えられる。

これまでに動的膝伸展運動時の大腿部の酸素消費が協働筋ごとに異なること²⁾，動的運動と比較して，静的膝伸展運動時の大腿四頭筋群間の血流量は不均一であること³⁾，また，連続的な動的運動では筋還流量が増加すること⁴⁾などが報告されている。

運動時の活動筋での循環調節を明らかにするためには，血流量，酸素消費・供給，および筋活動レベルといった要素についての検討が必要と考えられるが，これまで3つの視点から末梢循環調節について同時に比較検討されていない。現在，わが国では身体活動の減少にともない，高血圧症，動脈硬化症といった循環器系疾患の罹患が増加している。このような状

況のなか，運動時の酸素消費を考慮した酸素供給といった循環調節のメカニズムを解明することは，QOL (quality of life) に貢献する運動の意義を示すうえで重要と考えられる。

そこで本研究では，活動筋への酸素供給および活動筋における酸素消費の両者の関係に着目し，異なる運動強度が活動筋の酸素動態，血流量および筋放電量の相互関係について検討することを目的とした。

方 法

(1) 被検者

被検者は事前に実験の内容を説明し，承諾が得られた健康な男性8名であった(年齢：21.1 ± 1.1歳，身長：172.8 ± 1.9cm，体重：62.9 ± 3.9kg)。

(2) プロトコール

被検者は15分間の仰臥位安静後，右大腿を水平位に維持する静的運動を60秒間行い，その後60秒間の回復を実施させた。運動条件は，負荷を加えない0kg条件および足関節に5.0kgの負荷を加える5kg条件の2条件であった。

(3) 測定方法

骨格筋の酸素動態は近赤外分光装置(HEO-200，オム

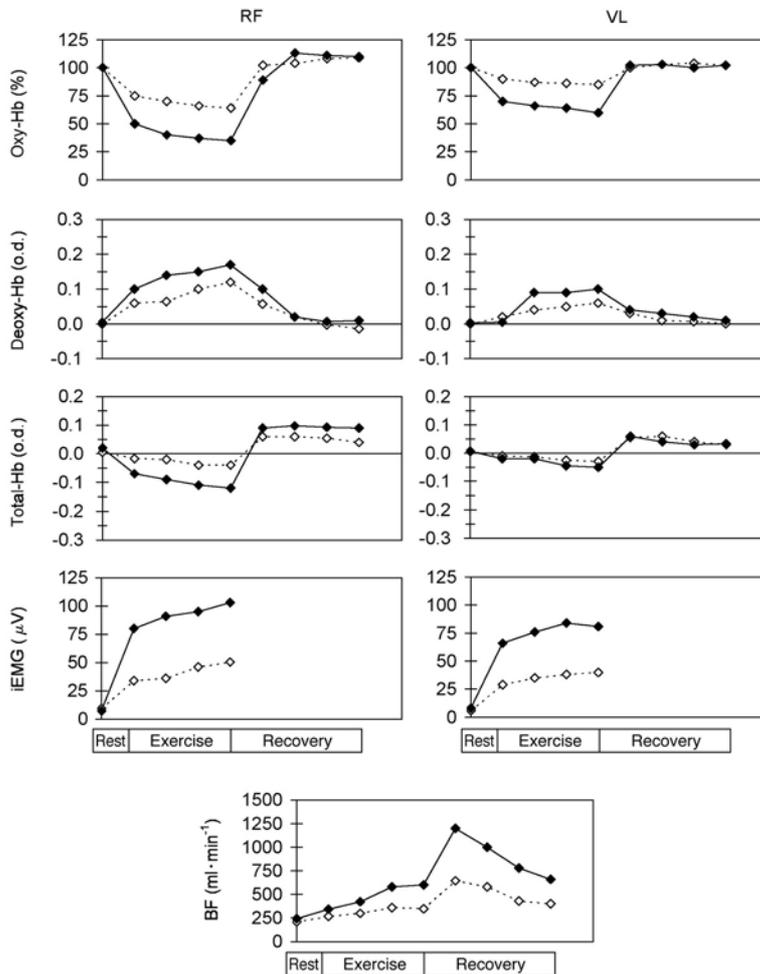


Figure 1 Typical changes of oxygenation, iEMG and carotid blood flow during knee extended exercise.
 ○: 0 kg trial, ●: 5 kg trial
 RF: rectus femoris, VL: vastus lateralis

ロン社製)を用いて, 右脚の大腿直筋(RF)および外側広筋(VL)における酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb), 脱酸素化ヘモグロビン(deoxy-Hb)および総ヘモグロビン(total-Hb)の変化(od値)を測定した。なお, oxy-Hbの相対的評価をするために大腿部上部に血圧用カフを巻き, 250mmHgの圧を約15分間加える阻血キャリブレーションを実施した。加圧はoxy-Hbの最低値が得られるまで続けられ, 最低値を組織での酸素濃度0%, 安静レベルを100%として, 測定中の値を相対値で示した。

血流量の算出のために, 超音波カラードプラ装置(SSA-340A, 東芝メディカルシステムズ社製)を用い

て, 右脚総大腿動脈における平均血流速度(MBV), 心臓収縮期および拡張期の血管縦断画像(血管径)を測定した。これらの画像は, 画像分析ソフトを用いて, 平均血管径(Di)を算出し, 血管が円形であるとの仮定のもとにDiおよびMBVの積から平均血流量(BF)を算出した。

筋電図は, 生体アンブ(BIOPHYSIOGRAPH, NEC三栄社製)を用いて, 右脚のRFおよびVLの筋腹を超音波カラードプラ装置で確認した後に, ディスポーザブル電極を30mm間隔で装着し, 表面双極誘導法により導出した。記録の際の時定数は0.03秒, ハイカット周波数は400Hzで行い, サンプリング周波数は1kHzとした。データは波形解析ソフトを用いて周波数解析の処理を施し, 安静時の15秒間および運動時は15秒ごとに平均振幅(iEMG)を算出した。

(4) 統計処理

本研究の結果はすべて平均値(mean)と標準偏差(SD)で示した。運動および回復時のoxy-

Hb, deoxy-Hb, total-Hb, BFおよびiEMGの値は各時期のラスト15秒間の値をそれぞれ平均したものとした。oxy-Hb, deoxy-Hb, total-Hb, およびiEMGの値はANOVAにて分析した後に, 運動強度および筋群間の違いについてScheffe検定を用いて, BFの値は運動強度の違いについて対応のある*t*-検定でそれぞれ比較した。なお, いずれの検定も危険率5%未満を有意水準とした。

結 果

静的膝伸展運動時の酸素動態, iEMGおよびBFの典型的な例はFig. 1に示すとおりである。VLおよびRFに

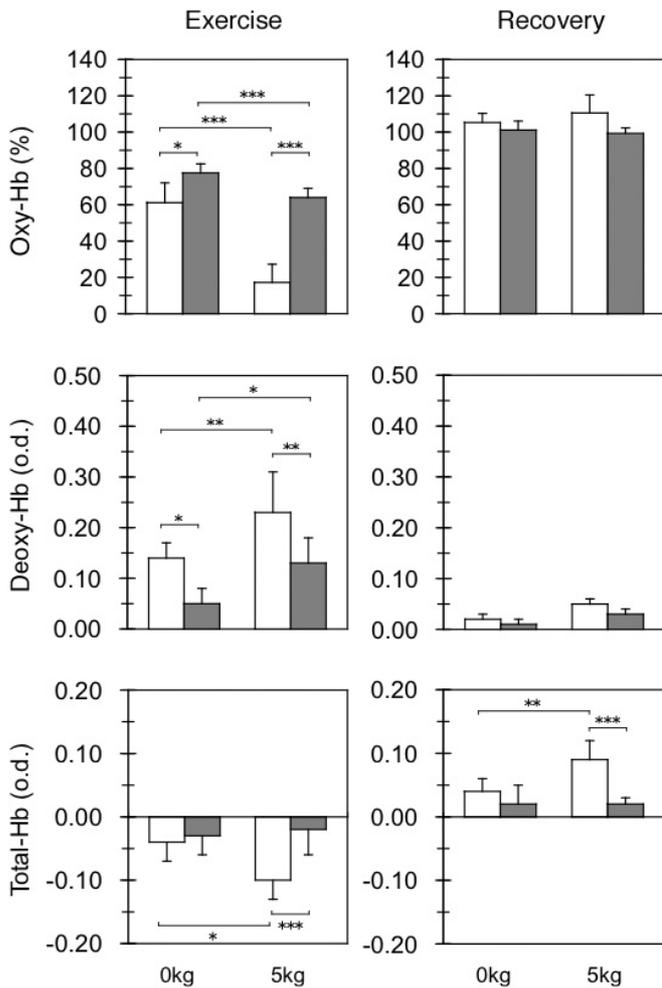


Figure 2 Changes in oxygen status at RF () and VL () during knee extended exercise. Values are mean \pm SD. * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$), *** ($p < 0.001$)

における酸素動態についてはFig. 2に示すとおりであり、運動時のoxy-Hbおよびdeoxy-Hbについては、0kgおよび5kgの各条件ではRFとVLとの間、VL、RFの各筋群では0kg条件と5kg条件との間に、それぞれ有意な差が認められた。total-Hbについては、運動および回復時ともに、5kg条件のRFとVLとの間、RFの0kg条件と5kg条件との間に、それぞれ有意な差が認められた。

BFの変化はFig. 3に示すとおりであり、運動および回復時ともに、0kgおよび5kg条件との間に、それぞれ有意な差が認められた。

VLおよびRFのiEMGの変化はFig. 4に示すとおりであ

り、運動時について、0kgおよび5kgの各条件ではRFとVLとの間、VL、RFの各筋群では0kg条件と5kg条件との間に、それぞれ有意な差が認められた。

考 察

本研究の運動様式は大腿を水平に維持する静的運動であり、最大筋力の測定が困難なために同一相対強度ではなく、0および5.0kgの絶対強度による条件を設定した。

(1) 大腿部における運動時の酸素消費

静的な膝伸展運動時の協働筋であるRFおよびVLのoxy-Hbおよびdeoxy-Hbは0kg条件と5kg条件との間に有意な差が認められた。このような運動強度の増加に伴うoxy-Hbの低下およびdeoxy-Hbの増加は骨格筋での酸素消費の増大に関連し、本研究結果はRichardsonら⁵⁾の研究結果を支持するものであった。一方、運動時のoxy-Hbおよびdeoxy-Hbの変化を筋群間で比較したところ、各条件でRFおよびVLの両筋群間に有意な差が認められた。このように両筋群間の酸素消費の不均一性がみられた原因の一つとして、筋活動量の違い、それに伴う筋内圧の違いなどが考えられる。運動時のVLおよびRFのiEMGは0kgおよび5kgの各条件で両筋群間に有意な差が認められた。これまでに運動時の筋放電量とoxy-Hbの変化との間に有意な相関関係が認められており⁶⁾、

また、筋断面積の小さい筋ほど活性化の程度が大きい⁷⁾と報告されている。これらのことから、膝伸展運動時では運動強度の増加に伴いRFでの筋活動量が増大したことが、酸素消費の増加、つまりoxy-Hbの低下、deoxy-Hbの増加につながったと考えられる。

(2) 大腿部における運動時の酸素供給

BFは運動強度の増加にともない、運動および回復時に顕著に増加することが認められた。total-Hbはoxy-Hbとdeoxy-Hbの総和であり、血流量の直接的指標ではないが、両者の間には相関関係が認められ、total-Hbは測

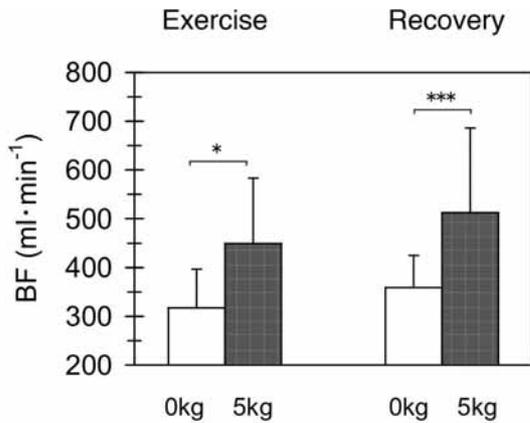


Figure 3 Changes in blood flow during knee extended exercise. Values are mean \pm SD. * ($p < 0.05$), *** ($p < 0.001$)

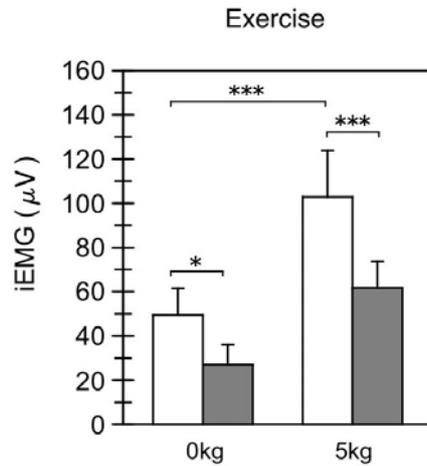


Figure 4 Changes in iEMG at RF () and VL () during knee extended exercise. Values are mean \pm SD. * ($p < 0.05$), *** ($p < 0.001$)

定部位の酸素供給の指標となる可能性が報告されている⁸⁾。各筋群において，total-Hbの変化を比較したところ，5kg条件でRFおよびVLの両筋群間に有意な差が認められた。このように低強度(0kg条件)ではみられない差が5kg条件で認められた原因として，VLと比較してRFでは運動時の筋内圧の上昇に加えて筋交感神経活動の亢進により血管収縮作用が強くなったことなどが推察される。

(3) 大腿部における酸素消費と酸素供給の連関

運動強度の増加に伴い運動時の両筋群におけるoxy-Hbの低下，deoxy-Hbの増加が著しくなり，それらの変化はVLに比較してRFで顕著であることが示された。一方，両筋群の上位に位置する総大腿動脈の運動時のBFは運動強度の増加に伴い増加するが，運動時のtotal-Hbは両筋群ともに低下し，VLに比較してRFで顕著に低下することが示された。これらの結果の解釈として，大腿部での酸素消費が増加し，大腿血流量も増加しているにもかかわらず，局所レベル，つまり，活動筋であるRFおよびVLへの酸素の供給が阻害されていることが示唆された。このような両筋群間におけるtotal-Hbの変化の違いは，運動時には筋内圧の上昇が活動筋内の毛細血管を圧迫し，閉塞が生じたことにより，新たな動脈血流の流入が阻害されていること⁹⁾，さらに，本研究における大腿動脈の測定部位以降の活動筋に隣

接した動脈において，運動時の筋内圧の上昇に加えて筋交感神経活動の亢進¹⁰⁾により血管収縮作用が強くなったことなどが影響したのではないかと考えられる。

一方，回復時のRFでのtotal-HbおよびBFは0kg条件5kg条件との間に有意な差が認められた。回復時のBFおよびtotal-Hbの増加は，運動後にみられる高血流量，運動性充血¹¹⁾との関連が強く，運動時の筋内圧の開放が一要因となり，血管抵抗が低下した下肢および活動筋群への酸素の供給が再開し，運動時における酸素不足および代謝性物質除去などが影響していると考えられる。本研究では回復時のtotal-Hbの変化から，VLと比較してRFで酸素の供給が著しいことが示された。RFでは運動時の酸素消費および筋放電量が多く，また，筋内圧の上昇により毛細血管床レベルでの閉塞などにより，酸素供給が阻害されていること¹²⁾が影響していると考えられる。一方，回復時では筋内圧の減少により，運動時に流入できない血液が供給されたことがRFでのtotal-Hbの増加に関連したと推察される。

結 論

静的膝伸展運動時には運動強度にともない酸素消費および筋放電量が増加するが筋群間で違いがあり，また，活動筋に酸素供給の阻害が示唆された。一方，回復時では運動時に酸素消費および筋放電量が増加した筋群への酸素供給が増大することが示された。

文 献

- 1) 加賀谷淳子：運動時の筋血流量．体育学研究，2001，
46：429-442．
- 2) 江崎和希，武政 徹，長田卓也 ほか：膝伸展運動時の
共同筋内における筋内酸素飽和度の相違．脈管学，
2003，43：327-330．
- 3) Laaksonen MS, Kalliokoski KK, Kyrolainen H et al: Skel-
etal muscle blood flow and flow heterogeneity during dy-
namic and isometric exercise in humans. *Am J Physiol*
Heart Circ Physiol, 2003, **284**: H976-H986.
- 4) Kalliokoski KK, Laaksonen MS, Takara TO et al: Muscle
oxygen extraction and perfusion heterogeneity during con-
tinuous and intermittent static exercise. *J Appl Physiol*,
2003, **94**: 953-958.
- 5) Richardson RS, Knight DR, Poole DC et al: Determinants
of maximal exercise VO₂ during single leg knee-extensor
exercise in humans. *Am J Physiol*, 1995, **268**: H1453-
H1461.
- 6) 三浦 哉，荒木秀夫，的場秀樹：自転車こぎ運動時の
外側広筋および腓腹筋外側部における酸素化と筋放電
量との関係．体力科学，1999，48：413-420．
- 7) 秋間 広，高橋英幸，久野譜也 ほか：膝伸展運動にと
もなう大腿四頭筋の活動部位のマッピング．筑波大学
体育科学系紀要，1997，20：145-151．
- 8) Homma S, Eda H, Ogasawara K et al: Near-infrared esti-
mation of O₂ supply and consumption in forearm muscles
working at varying intensity. *J Appl Physiol*, 1996, **80**:
1279-1284.
- 9) Emerson GG, Segal SS: Alignment of microvascular units
along skeletal muscle fibers of hamster retractor. *J Appl*
Physiol, 1997, **82**: 42-48.
- 10) Saito M, Mano T, Abe H et al: Responses in muscle sym-
pathetic nerve activity to sustained hand-grips of different
tensions in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*,
1986, **55**, 493-498.
- 11) Saltin B, Radegran G, Koskolou MD et al: Skeletal muscle
blood flow in humans and its regulation during exercise.
Acta Physiol Scand, 1998, **162**: 421-436.
- 12) Miura H, McCully K, Nioka S et al: Relationship between
muscle architectural features and oxygenation status deter-
mined by near infrared device. *Eur J Appl Physiol*, 2004,
91, 273-278.

Muscle Oxygenation, Myoelectric Activity and Oxygen Supply in the Thigh Area during Isometric Knee-extended Exercise

Hajime Miura and Kazutake Toiguchi

Faculty of Integrated Arts & Sciences, University of Tokushima, Tokushima, Japan

Key words: oxygenation, blood flow, myoelectric activity, knee extended exercise

We investigated the relationship among muscle oxygenation, myoelectric activities (EMG), and blood flow in the thigh area during isometric knee-extended exercise of various intensities. Eight healthy adult men performed the 60 second-isometric knee-extended exercises in two different intensities: no load (0 kg-trial) and 5.0 kg load hanging at the ankle (5 kg-trial). We measured the level of oxygenated Hb (oxy-Hb), deoxygenated Hb (deoxy-Hb) and total-Hb (sum of oxy- and deoxy-Hb) with a near infrared spectroscopy and the integrated EMG (iEMG) with surface electrodes at the rectus femoris (RF) and vastus lateralis (VL) muscles. Femoral blood flow (BF) was calculated using artery diameter and mean flow velocity with an ultrasound colored Doppler imaging device. With intensity increasing (0 to 5 kg), oxy-Hb decreased whereas deoxy-Hb and iEMG increased at both muscles. Compared with VL, larger decrement of oxy-Hb and total-Hb, and larger increment of deoxy-Hb and iEMG were found in RF during both trials. Despite an increase after exercise in both trials, total-Hb at RF was larger than VL. With intensity rising, BF increased throughout the trails. Although more oxygen was consumed in the RF area, less oxygen was supplied there during the isometric knee-extended exercise. Compensation for this deficit of oxygen caused more oxygen supply to RF after exercise. (*J Jpn Coll Angiol*, 2007, **47**: 47-51)

Online publication March 22, 2007