

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

江崎 和希^{*1} 武政 徹^{*1} 長田 卓也^{*2} 黒澤 裕子^{*2}
人見 嘉哲^{*3} 木崎 節子^{*3} 大野 秀樹^{*3} 浜岡 隆文^{*2, *4}
勝村 俊仁^{*2} 芳賀 脩光^{*1}

要 旨：本研究は近赤外時間分解分光法を用いて共同筋である外側広筋(VL)、大腿直筋(RF)、内側広筋(VM)の運動時における酸素動態の変化、および、VLの近位部(VL-p)と遠位部(VL-d)の相違について比較検討することを目的とした。対象は成人男性 8 名とし、膝伸展運動(40%WR-peak)を 3 分間実施した。各部位の筋内酸素飽和度(SO_{2-TRS})はいずれも運動時は安静時に比べ、有意な低下を示した。また、3 筋間では VL と VM のみ差がみられた。さらに、VL において VL-d は VL-p より低値を示した。結論として、共同筋といえども運動時の SO_{2-TRS} は異なり、さらに単一筋においても SO_{2-TRS} は遠位部と近位部で異なる可能性が示唆された。(J. Jpn. Coll. Angiol., 2003, 43: 327-330)

Key words: Synergism on quadriceps femoris, Muscle oxygen saturation, Knee extension exercise, Near infrared time-resolved spectroscopy

緒 言

これまで運動時における共同筋群間の酸素動態を比較検討した報告は連続光を使用した近赤外分光法(NIRcws)を用い、1 チャンネルのシグナルで単一筋を測定することにより共同筋群全体の評価を行ってきた^{1,2)}。しかし、2 チャンネルを用いた報告によると共同筋間では酸素動態が異なることが示唆されている^{3,4)}。NIRcwsは安静時からの酸素化ヘモグロビン(HbO₂) 等の変化値で評価しているため、安静時における詳細な情報は得られない。また、NIRcwsは光路長が一定という仮定で測定しているため、絶対値の算出も困難である。そのため、動脈血流遮断法などにより得られた相対値を用いて個人間の比較が行われている⁵⁾。近年、筋内酸素飽和度(SO_{2-TRS})の測定が可能な近赤外時間分解分光法(NIR time-resolved spectroscopy: NIRTRS)が開発され、ヒトを対象とした研究が進められてきている⁶⁻⁸⁾。SO_{2-TRS}は光路長を評価でき、さらにカフを用いて阻血を行う必要がないため、非侵襲的測定がより

容易である。そこで、本研究はNIRTRSを用いて大腿四頭筋の共同筋である外側広筋(Vastus lateralis: VL)、大腿直筋(Rectus femoris: RF)、内側広筋(Vastus medialis: VM)を被検筋とし、膝伸展運動(EX-knee)時におけるSO_{2-TRS}の動態について比較検討を行った。さらに、単一筋における測定部位の相違を検討するために、VLの近位部(proximal regions of VL: VL-p)と遠位部(distal regions of VL: VL-d)についても併せて検討することを目的とした。

方 法

被検者は健康な成人男性 8 名(年齢: 22±3 歳, 身長: 174±8 cm, 体重: 73±12 kg, 最大酸素摂取量: 45.9±5.7 ml·kg⁻¹·min⁻¹)であった。運動は自転車エルゴメータを用いた装置で、前方にけり出す時にのみ大腿四頭筋を使い、ペダルを戻すときはその反動で自動的に引き戻されるシステムとなっているEX-knee⁹⁾を実施した。運動強度は最大仕事量の 40%(40%WR-peak)とした。測定部位は VL, RF, VM の三つの筋腹とした(Fig. 1)。さらに、VL については外側広筋長を 3 等分し、膝蓋骨からの等分点とした VL-p と VL-d の 2 カ所とした。なお RF, VM に対応する VL の測定部位は筋腹に

^{*1} 筑波大学体育科学系

^{*2} 東京医科大学衛生学公衆衛生学教室

^{*3} 杏林大学医学部衛生学公衆衛生学教室

^{*4} 鹿屋体育大学スポーツ医科学研究室

2003 年 3 月 1 日受付 2003 年 8 月 27 日受理

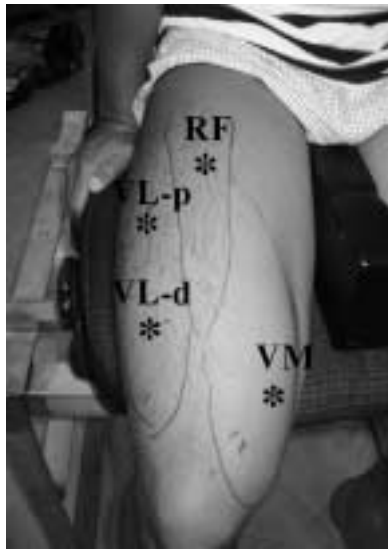


Figure 1 Measurement sites in quadriceps femoris. VL-p: proximal regions of the vastus lateralis, VL-d: distal regions of the vastus lateralis, RF: rectus femoris, VM: vastus medialis.

相当するVL-pとした。

測定項目は、酸素化ヘモグロビン濃度 (HbO_2)、脱酸素化ヘモグロビン濃度 (Hb)、総ヘモグロビン濃度 (T-Hb)、および $\text{SO}_2\text{-TRS}$ とした。 $\text{SO}_2\text{-TRS}$ の算出は ($\text{HbO}_2/\text{T-Hb} \times 100$) とした。測定装置は光源にピコ秒パルスレーザー光 2 波長 (780nm, 830nm) を用いた浜松ホトニクス社製近赤外時間分解分光装置 TRS-01 を用いた⁸⁾。なお、データの積算時間は 30 秒であり、光源と受光部の距離は 3 cm とした。同時に心拍数 (Heart Rate: HR) をポラール社製ハートレートモニターで測定し、測定部位の皮脂厚を誠鋼社製 B モード超音波診断計で求めた。

測定プロトコールは安静 3 分間の後 40% WR-peak (平均強度は 29 Watt) で VL-p, VL-d, RF, VM の順番で 3 分間の運動を行った。なお、各部位の測定の間隔は 15 分以上とり、HR, $\text{SO}_2\text{-TRS}$ が安静時レベルへ回復することを確認した。Ex-Knee 時の伸展、屈曲はメトロノームに合わせて 1 秒に 1 回の頻度で行い、膝伸展角度は、90 度屈曲位から 45 度とした。データは安静時 3 分間 (6 ポイント) の平均値、運動時は HbO_2 , Hb , T-Hb と HR の値が安定を示す運動開始 1 分後から運動終了までの 2 分間 (4 ポイント) の平均値で示した。

測定結果は平均値 $\pm$ 標準偏差で示した。各筋のパラ

メータの安静時と運動時の比較および各筋間との比較検討には二元配置分散分析 (Two-way ANOVA) を用いて検定した。さらに有意差が認められた場合、Tukey の Post hoc テストを行い、有意水準は 5 % 未満とした。

結 果

皮脂厚は VL-p : 6 ± 1 mm, VL-d : 5 ± 1 mm, RF : 7 ± 1 mm, VM : 6 ± 2 mm と測定部位によって差はなかった。心拍数は安静時 62 ± 6 拍/分から運動時 95 ± 10 拍/分に上昇した。

安静時および運動時の HbO_2 , Hb , T-Hb 変化は Table 1 に示した。各部位とも HbO_2 は運動時に有意に低下し、 Hb は運動時に有意な増加を示した。しかし、 T-Hb はどの測定部位においても変化はなかった。

各測定部位における $\text{SO}_2\text{-TRS}$ の変化は Fig. 2 に示した。安静時における各測定部位間の $\text{SO}_2\text{-TRS}$ に差はなかった。運動時において同じ筋腹に位置する VL-p, RF, VM の 3 筋群間では VM のみが、VL-p より低下を示した (VL-p : 59 ± 3 % vs. VM : 55 ± 2 %, $p < 0.05$)。また、VL 内においては VL-d は 50 % 近くまで低下を示し、VL-p に対し有意な差を示した (VL-p vs. VL-d : 51 ± 4 %, $p < 0.01$)。

考 察

先行研究¹⁰⁾によると NIRS より得られる値は皮脂厚の影響を受けやすいといわれている。しかしながら、本研究で対象とした各測定部位の皮脂厚は平均 6 mm であり、かつ測定部位間に差がなかったことから $\text{SO}_2\text{-TRS}$ に与える影響はないと考えられる。また Ex-knee における心拍数は 62 拍/分から運動時 93 拍/分に増加を示した。心拍数の上昇から推察すれば筋内の血流量の増加が考えられるが、24% HRreserve [% HRreserve = (運動時心拍数 - 安静時心拍数) / (年齢別予測最高心拍数 (220 - 年齢) - 安静時心拍数) $\times 100$] と低く、大腿部前面を中心的に使用していることから、呼吸循環系への負担は少ないと考えられる。また、本研究の結果、血液量を示す T-Hb はすべての測定部位において安静時と同じ値を示し、変化はなかった。これは同様に、血流量の増加が生じていても、本運動強度のレベルでは筋内の血液量に影響を与えないことを示していると考えられる。

次に、共同筋内において同じ筋腹で測定した VL (VL-p), RF, VM の三つの部位の $\text{SO}_2\text{-TRS}$ は VL-p と VM のみに有意差がみられた。運動時においては、筋組織内の代

Table 1 Changes in HbO₂, Hb, T-Hb concentration during knee extensor exercise.

	VL-p		VL-d		RF		VM	
	Rest	Exe.	Rest	Exe.	Rest	Exe.	Rest	Exe.
HbO ₂	0.070 ±0.015	0.063** ±0.012	0.080 ±0.010	0.062*** ±0.009	0.067 ±0.009	0.057** ±0.009	0.079 ±0.014	0.064*** ±0.012
Hb	0.037 ±0.007	0.045*** ±0.011	0.041 ±0.005	0.059*** ±0.012	0.033 ±0.005	0.043** ±0.009	0.040 ±0.008	0.052*** ±0.010
T-Hb	0.107 ±0.022	0.108 ±0.023	0.121 ±0.015	0.121 ±0.018	0.100 ±0.014	0.100 ±0.017	0.119 ±0.021	0.116 ±0.022

(μM)

Values are mean±SD. VL-p: proximal regions of the vastus lateralis, VL-d: distal regions of the vastus lateralis, RF: rectus femoris, VM: vastus medialis, **p<0.01, ***p<0.001: Rest versus Exercise.

謝は高まり、酸素の抽出が増大したことが考えられる。また、VMにおいては遅筋線維比率がVL, RFに比べて多い¹¹⁾ことから、筋組成の違いによる影響も考えられる。さらに、VL-dは他の測定部位に比べ50%近くまで低下を示した。これはVL-dの代謝亢進によるものと思われるが、他の要因として、筋の収縮による筋の形状変化やそれに伴う筋内圧上昇により一時的に血流制限等の影響を受け、酸素の抽出がより大きく反映した可能性も考えられる。先行研究¹²⁾によるとEX-knee時におけるVLとRFの筋内圧はVLの方がRFより高いことが報告されている。さらにMiura et al¹³⁾は多チャンネルNIRSイメージング装置を用い、運動時における腓腹筋酸素動態は遠位部において低下を示しており、本研究と同様な結果であった。しかしながら、彼らの用いたNIRS装置は光路長を一定として評価しているため、必ずしも十分とはいえない。Ferrari et al⁷⁾は、NIR_{TRS}を用いて掌握運動を行った時の光路長は個人間で異なると示唆している。それに対し、本研究では光路長の変化を確認しながら実施したもので、HbO₂, Hb, T-Hb, SO₂を正確に測定した。その結果、共同筋間のみでなく単一筋内においてもSO₂に相違が生じるものと考えられる。しかしながら、筋電図を用いてEx-kneeのVL, RFをみた報告¹⁴⁾では筋放電量に個人差が大きいことを観察しており、今後、各個人間における負荷強度と筋内酸素動態の分布について、さらに検討していかなければならないと思われる。

結 論

本研究では40%WR-peakのEx-knee時において、大腿

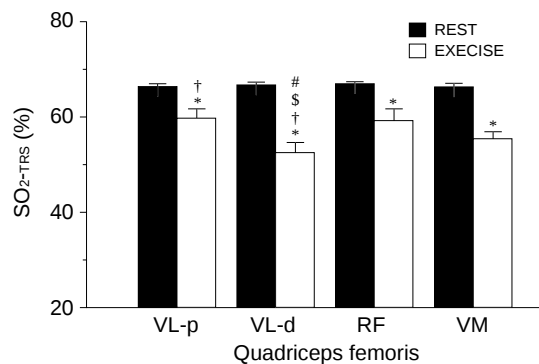


Figure 2 SO₂-TRS in each muscle of quadriceps femoris. Values are mean±SD. VL-p: proximal regions of the vastus lateralis, VL-d: distal regions of the vastus lateralis, RF: rectus femoris, VM: vastus medialis. *p<0.01: rest versus exercise, #p<0.01: versus exercising RF, \$p<0.01: versus exercising VL-p, †p<0.05: versus exercising VM.

四頭筋の共同筋であるVL, RF, VMのSO₂-TRSについて比較検討した結果、VMはVLに対し有意に低い値を示した。さらに、VL-pとVL-dのSO₂-TRSについてはVL-dにおいて有意に低い値を観察した。したがって、中程度の運動強度であっても共同筋間におけるSO₂-TRSは異なり、同時に単一筋においてもSO₂-TRSは遠位部と近位部で異なる可能性が示唆された。

本研究は平成14年度筑波大学学内プロジェクト研究 (University of Tsukuba Research Projects) および平成15年度文部科学省科学研究費(基盤研究A: 15200048, 研究代表: 芳賀脩光)の一部からの助成にもとづくものである。

文 献

- 1 Costes F, Barthelemy J-C, Feasson L et al: Comparison of muscle near-infrared spectroscopy and femoral blood gases during steady-state exercise in humans. *J Appl Physiol*, 1996, **80**: 1345-1350.
- 2 MacDonald MJ, Tarnopolky MA, Green HJ et al: Comparison of femoral blood gases and muscle near-infrared spectroscopy at exercise onset in humans. *J Appl Physiol*, 1999, **86**: 687-693.
- 3 Azuma K, Homma S, Kagaya A: Oxygen supply-consumption balance in the thigh muscles during exhausting knee-extension exercise. *J Biomed Opt*, 2000, **5**: 97-101.
- 4 Van beekvelt MCP, Colier WJNM, Wevers RA et al: Performance of near-infrared spectroscopy in measuring local O₂ consumption and blood flow in skeletal muscle. *J Appl Physiol*, 2001, **90**: 511-519.
- 5 Hamaoka T, Iwane H, Shimomitsu T et al: Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscles by near-infrared spectroscopy. *J Appl Physiol*, 1996, **81**: 1410-1417.
- 6 Chance B, Nioka S, Kent J et al: Time-resolved spectroscopy of hemoglobin and myoglobin in resting and ischemic muscle. *Anal Biochem*, 1988, **174**: 698-707.
- 7 Ferrari M, Wei Q, Carraresi L et al: Time-resolved spectroscopy of the human forearm. *J Photochem Photobiol B*, 1992, **16**: 141-153.
- 8 Hamaoka T, Katsumura T, Murase N et al: Quantification of ischemic muscle deoxygenation by near infrared time-resolved spectroscopy. *J Biomed Opt*, 2000, **5**: 102-105.
- 9 Andersen P, Adams RP, Sjøgaard G et al: Dynamic knee extension as model for study of isolated exercising muscle in humans. *J Appl Physiol*, 1985, **59**: 1647-1653.
- 10 McCully K, Hamaoka T: Near-infrared spectroscopy: What can it tell us about oxygen saturation in skeletal muscle? *Exerc Sport Sci Rev*, 2000, **28**: 123-127.
- 11 Johnson MA, Polgar J, Weightman D et al: Data on the distribution of fiber type in thirty-six human muscles an autopsy study. *J Neurol Sci*, 1973, **18**: 111-129.
- 12 Sadamoto T, Bonde-Petersen F and Suzuki Y: Skeletal muscle tension, flow, pressure, and EMG during sustained isometric contractions in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1983, **51**: 395-408.
- 13 Miura H, McCully K, Hong L et al: Regional difference of muscle oxygen saturation and blood volume during exercise determined by near infrared imaging device. *Jpn J Physiol*, 2001, **51**: 599-606.
- 14 Laaksonen MS, Kalliokoski KK, Kyrolainen H et al: Skeletal muscle blood flow and flow heterogeneity during dynamic and isometric exercise in humans. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2003, **284**: H979-986.

Regional Differences of Muscle Oxygen Saturation in Synergism on Quadriceps Femoris During Knee Extension Exercise

Kazuki Esaki^{*1}, Tohru Takemasa^{*1}, Takuya Osada^{*2}, Yuko Kurosawa^{*2}, Yoshiaki Hitomi^{*3}, Takako Kizaki^{*3},
Hideki Ohno^{*3}, Takafumi Hamaoka^{*2,*4}, Toshihito Katsumura^{*2}, and Shukoh Haga^{*1}

^{*1} Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan

^{*2} Department of Preventive Medicine and Public Health, Tokyo Medical University, Tokyo, Japan

^{*3} Department of Molecular Predictive Medicine and Sport Science, Kyorin University, School of Medicine, Tokyo, Japan

^{*4} Department of Sports Science, National Institute of Fitness and Sports, Kagoshima, Japan

Key words: Synergism on quadriceps femoris, Muscle oxygen saturation, Knee extension exercise, Near infrared time-resolved spectroscopy

The purpose of this study was to evaluate regional differences of muscle oxygen saturation (SO₂) in synergism on quadriceps femoris during knee extension exercise (EX-knee) at moderate intensity. The changes in muscle SO₂ of quadriceps femoris were measured using near infrared time-resolved spectroscopy. Eight healthy male subjects performed one-legged dynamic knee-extension exercise every second at 40% intensity of peak work rate for 3 minutes. The measurement sites were the proximal region of the vastus lateralis (VL-p), the distal region of the vastus lateralis (VL-d), the rectus femoris (RF), and the vastus medialis (VM). The SO_{2-TRS} showed a significant decrease in the three muscles at 40% WR-peak during EX-knee. The differences of decreases in SO_{2-TRS} among three muscles were only found between VL and VM. Furthermore, a significant decrease was observed in SO_{2-TRS} at VL-d as compared with VL-p. In conclusion, these results suggest that there is a possibility of the regional difference of oxygen saturation even within a single muscle in quadriceps femoris during EX-knee.

(J. Jpn. Coll. Angiol., 2003, **43**: 327-330)