

最大等速性膝伸展運動時のピークトルク 低下率と組織酸素化率との関係

河原 弥生¹ 村岡 功²

要 旨：筋収縮間に1秒あるいは3秒の休息をおいた50回の最大等速性膝伸展運動中のピークトルク(PT)の低下率と、近赤外線分光装置による組織酸素化率(SO₂)を測定した。PTの低下率は1秒休息試行で有意に高値を示した一方で、運動終盤における総Hb/Mb量およびSO₂に試行間の差は認められなかった。本研究により、活動筋において利用可能な酸素量が同等であるにも拘わらず、休息間隔が短縮するとPTは低下することが示された。(J. Jpn. Coll. Angiol., 2003, 43: 317-322)

Key words: Near infrared spectroscopy, Isokinetic knee extension, Oxygen saturation, Rate of decline

緒 言

高強度運動時においても、運動初期より有酸素的なエネルギー供給がなされている可能性が示唆されている。KavanaghとJacob(1988)は、30秒間の超最大運動(Wingate test)において、エネルギー需要の約20%がそれ以上が有酸素的にまかなわれている可能性を示唆した。また、Niokaら(1998)は、被験者に同様の運動を30秒間行わせたと、近赤外線分光装置(NIRS)で測定した活動筋の組織酸素化率は、運動初期より低下することを示した。Baeら(2000)も同様の運動を用い、NIRSのパラメータの変化から、このような高強度運動時においても、運動初期より多くの有酸素的エネルギー供給がなされている可能性を示している。

さらに、Bangsboら(2001)は、高強度膝伸展運動時の大腿における酸素摂取量は、運動開始から9秒目までに安静値から有意に上昇し、運動の持続に伴い、有酸素的エネルギー供給への依存が高まることを示している。また、Ivyら(1982)は、被験者の外側広筋より採取した筋サンプルより筋のrespiratory capacity(Q_{O₂})を推定している。そして、最大努力による等速性膝伸展・屈曲運動を45秒間行わせ、5秒、10秒、15秒、30秒および45秒のピークパワーの低下率とそれとの相関関係を検討したところ、運動開始より30秒までは両者に関係は見られなかったものの、45秒においてはQ_{O₂}の高い

被験者ほどピークパワーの低下率が小さかったことを観察した。

これらの結果は、高強度運動時においても、エネルギーは運動初期より有酸素的にも供給され、また、運動の持続に伴い最大パワーは低下するとともに、エネルギーはより有酸素的供給に依存するようになることを示すものである。したがって、活動筋における利用可能な酸素量の変化が筋力の低下に影響を及ぼす可能性も考えられる。

一方、Royceら(1958)は、動脈血流を遮断した状態としない状態での疲労曲線を分析し、血流を遮断した場合には筋力の低下速度はほぼ一定であるのに対し、血液供給がなされている場合には筋力低下速度が変わる時点があることを示した。また、加賀谷と岩村(1989)は、被験者に最大努力での足底屈運動を行わせ、筋力低下速度がある時点で変わることを報告している。そして、これらの低下速度の変化は、大きな筋力が発揮されているときには、筋内圧により血液供給が遮断される一方で、筋力の低下に伴って血液供給がなされることによってもたらされるとした。

ところで、最大等速性膝伸展運動では、最初の25回までは多くの速筋線維が動員されるが、その後は減少する可能性が示唆されている⁸⁾。また、最大肩関節屈曲運動においても、運動開始から40回目以降では速筋線維はほとんど動員されなくなることが報告されている⁹⁾。したがって、活動筋における利用可能な酸素量

¹ 早稲田大学大学院人間科学研究科

² 早稲田大学スポーツ科学部

2003年3月1日受付 2003年9月11日受理

の変化と筋力の低下との関係を検討する場合には、運動が有酸素的エネルギー供給により依存すると考えられる40回以上、あるいは筋の酸化能と筋力の低下率との関係が指摘されている45秒以上⁵⁾の運動を行う必要があるように思われる。

そこで本研究では、被験者に最大等速性膝伸展運動を、2秒に1回のリズムで50回行わせ、近赤外線分光装置を用いてその時の活動筋の組織酸素化率を観察し、ピークトルクの低下率と関わっているか否かについて検討することとした。また、筋収縮間に3秒の休息間隔を置いて休息中により多くの血液供給を行い、1秒休息間隔での結果と比較した。

方 法

被験者は健康な成人男女12名(男性8名、女性4名)であり、年齢は 22.4 ± 0.5 歳、身長は 166.9 ± 2.6 cm、体重は 59.0 ± 3.6 kgであった。被験者のいずれにも肥満および肥満化傾向を示す者はいなかった。彼らは予め実験の目的、内容およびそれに伴う危険性について説明を受け、それらを十分に理解し、同意書に署名したうえで実験に参加した。

測定にはCybexII(Lumex社, USA)を用いて、角速度を180度/秒に設定し、膝関節を90度に屈曲した状態からの最大努力での膝伸展運動を50回繰り返して行わせた。被験者は一回の収縮ごとに1秒あるいは3秒間の休息間隔を置いて2試行(それぞれ2秒に1回、4秒に1回の膝伸展運動)を、それぞれ別の日に実施した。実施に際して、装置に慣れ最大筋力が出せるようになるまで十分な練習を行わせた。

試行はランダム順とし、それぞれの試行における最初の5回のピークトルクの平均値(初期値)と、最後の5回のピークトルクの平均値(終末値)から低下率(初期値-終末値) / 初期値 $\times 100$ 」を算出した。また、5回ごとにピークトルクの平均値を算出した。1秒休息試行においては、それぞれの平均値と一つ前の平均値との差から、変化率を算出した。

安静時および運動中の総ヘモグロビン/ミオグロビン量(TotalHb/Mb)、酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン量(OxyHb/Mb)および脱酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン量(DeoxyHb/Mb)の観察には近赤外線分光装置(NIRS, OM-200 島津製作所)を用い、プローブは活動肢の外側広筋筋腹部の表皮上に粘着テープで固定し

た。この装置は、発光部からの距離の異なる2カ所の受光センサーを用いて、光拡散理論に基づいた空間分解法によってヘモグロビン/ミオグロビン濃度を定量的に算出している。プローブの発光部と2カ所の受光センサーとの距離はそれぞれ2.5cmと4.0cmとなっており、レーザー光の波長は830nm, 805nm, 780nm, 690nmであった。なお、本研究では単位は任意単位(AU)とした。

TotalHb/Mbに対するOxyHb/Mbの割合を算出し活動筋の組織酸素化率(SO₂)とした。NIRSで測定した各パラメータは、1回の膝伸展運動ごとのパラメータをそれぞれ平均し、さらに5回の膝伸展運動中のデータを平均した。すなわち、3秒休息試行においては20秒間の平均値を算出し、1秒休息試行においては10秒間の平均値を算出した。また、運動前の1分間の値を平均して安静値とした。

各測定項目の結果は、すべて平均値および標準誤差で示した。各試行における平均値の初期値からの変化と1秒休息試行の平均値の変化率については1元配置の分散分析を行い、有意なものに対しては最小有意差法を用いて対の比較を行った。また、試行間の平均値の差は対応のあるスチューデントのt検定により検討した。いずれも有意水準は5%未満とした。

結 果

1回から5回までのピークトルクの平均値は、1秒休息試行で 77.8 ± 8.4 Nm、3秒休息試行で 77.0 ± 6.3 Nmであり、試行間に有意な差は認められなかった。また、ピークトルクは、運動を継続するにつれ両試行で持続的に初期値から有意に低下し、その低下率は1秒休息試行で有意に高値であった(1秒休息試行: $40.2 \pm 3.8\%$; 3秒休息試行: $10.6 \pm 3.4\%$, Fig. 1)。なお、1秒休息試行についてみると、1元配置の分散分析の結果、平均値の推移に有意な変化は見られなかった。

TotalHb/Mbの初期値は、1秒休息試行で 40.8 ± 3.5 AU、3秒休息試行で 41.6 ± 3.1 AU、OxyHb/Mbの初期値は、1秒休息試行で 27.9 ± 1.8 AU、3秒休息試行で 28.6 ± 1.7 AU、DeoxyHb/Mbの初期値は、1秒休息試行で 13.1 ± 1.7 AU、3秒休息試行で 12.9 ± 2.0 AUであり、いずれにおいても試行間に有意な差はなかった。

両試行における50回の運動中、TotalHb/Mbは安静値から変化せず、また、試行間の差も認められなかつ

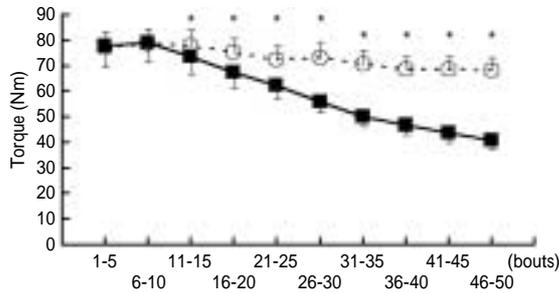


Figure 1 Changes of peak torque during 50 bouts of maximal isokinetic knee extension exercises at 1 sec () or 3 sec () intervals at a velocity of 180 degrees/sec. *Significant difference ($p<0.05$) between 1 sec and 3 sec intervals.

た。OxyHb/Mbについては、両試行において安静値から有意に低下し、その低下率は1秒休息試行で高値であった (Fig. 2)。その後、1秒休息試行の平均値は16~20回目より上昇に転じ、試行間の平均値の差は運動後半にかけて消滅した。また、平均値が上昇に転じた時点のピークトルクの平均値は、初期値の $87.8\pm 2.8\%$ であった。DeoxyHb/Mbは、両試行で安静値から有意に上昇した。また、運動中盤では1秒休息試行でより大きく上昇したものの、運動後半の値は同等であった (Fig. 2)。

SO₂は両試行で有意に低下したが、その低下率は3秒休息試行よりも1秒休息試行で大きかった (Fig. 3)。試行間の差は運動後半にかけて減少し、運動41~45回目および46~50回目の平均値においては、両試行の差は認められなかった。

論 議

本研究では、空間分解法による近赤外線分光法を用いて組織酸素化率を測定した。近年、この方法による測定値の信頼性に関する研究がなされ、測定値が低値である場合には信頼性が低いことが指摘されている¹⁰⁾。しかしながら、本研究での最低値は1秒休息試行での $43.1\pm 3.8\%$ であり、結果の解釈上重要である45~50回目の平均値は3秒休息試行で $57.6\pm 2.8\%$ 、1秒休息試行で $53.2\pm 4.7\%$ であった。それゆえ、本研究におけるNIRSパラメータの結果は信頼性が得られる範囲にあったと思われる。

本研究の結果から、両試行におけるピークトルクの

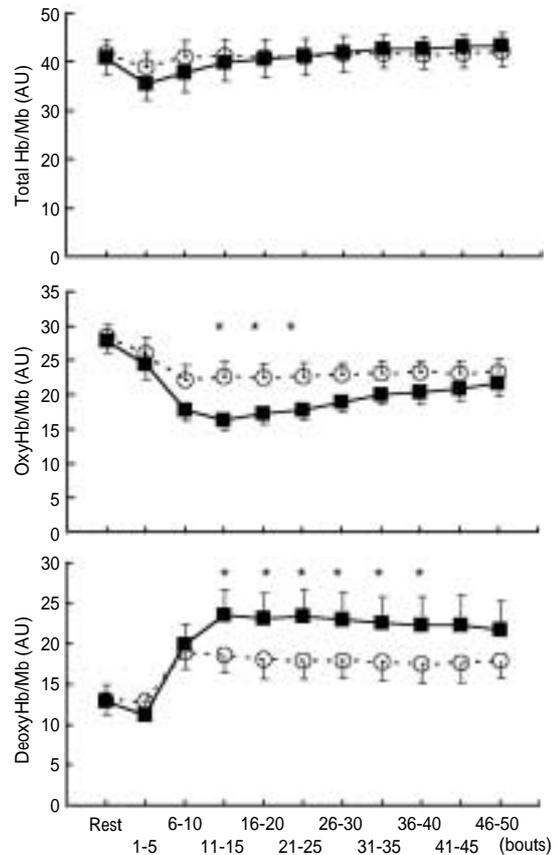


Figure 2 Changes of total Hb/Mb, Oxy Hb/Mb and Deoxy Hb/Mb obtained by near infrared spectroscopy during 50 bouts of maximal isokinetic knee extension exercises at 1 sec () or 3 sec () intervals at a velocity of 180 degrees/sec. * Significant difference ($p<0.05$) between 1 sec and 3 sec intervals.

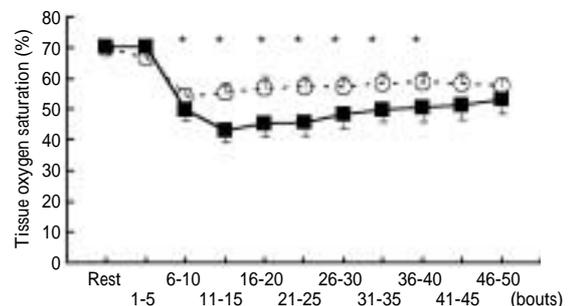


Figure 3 Tissue oxygen saturation obtained by near infrared spectroscopy during 50 bouts of maximal isokinetic knee extension exercises at 1 sec () or 3 sec () intervals at a velocity of 180 degrees/sec. * Significant difference ($p<0.05$) between 1 sec and 3 sec intervals.

平均値の差は運動が持続するにつれて大きくなるのに対し、SO₂は運動中盤においては3秒休息試行でより高かったものの、40回目以降の平均値においては同等であることが示された(Fig. 3)。これらのことから、ピークトルクの低下率とSO₂との関係は低いと考えられた。

また、1秒休息試行においては、OxyHb/Mbが運動後半にかけて上昇していたにも拘わらず、ピークトルクの平均値は一定の割合で低下していた。それゆえ、本研究の結果からは、血液供給の増加に伴う筋力低下速度の変化は認められなかったといえる。さらに、1秒休息試行で観察されたOxyHb/Mbが上昇する時点のピークトルクの平均値は、初期値の87.8±2.8%であり、筋内圧によって血液供給が阻害されなくなるとされる最大筋力の60~72%強度^{6,7)}より高かった。

これらのことから、1秒休息試行で観察されたOxyHb/Mbの上昇は、筋内圧の低下以外の要因によってもたらされ、また、この上昇はピークトルクの低下に影響を及ぼさなかったといえる。いずれにしても、ピークトルクの変化率が一定であった一方でSO₂が上昇していたことは、活動筋に利用可能な酸素が存在するにも拘わらず、酸素は利用されずにピークトルクが低下していたことを示すものである。

静的肘関節運動中の筋電図を分析した研究¹¹⁾によると、40%MVC以上の運動では運動の持続に伴う新たな運動単位の動員は認められないとされている。したがって、本研究においても、運動開始時には動員可能なほとんどの筋線維が動員されていたと考えられる。そのため、運動初期には多くのエネルギーが求められ、しかも高強度運動においても運動初期より有酸素的エネルギー供給がなされることから^{2,3)}、酸素の利用が亢進していたものと思われる。

一方、最大等速性膝伸展運動では、25回目以降は速筋線維の動員が減少する可能性が示唆されており⁸⁾、また、最大肩関節屈曲運動においても、運動が持続するにつれ速筋線維は次第に動員されなくなるといわれている⁹⁾。さらに、高強度運動においても運動の持続に伴い、有酸素的エネルギー供給への依存が高まるとされている^{4,5)}。そのため、本研究における運動後半においてもエネルギーの多くは有酸素系に依存し、活動筋の酸素化率がピークトルクの低下に何らかの関わりを持っているとも考えられた。

しかしながら、1秒休息試行におけるOxyHb/Mbは16~20回目より運動後半にかけて上昇したのに対し、SO₂は、運動中盤には3秒休息試行よりも低値であったものの、40~50回目にかけては同等となった。片脚での膝伸展運動時の脚血流量は運動開始から約30秒の間に血圧と共に上昇する¹²⁾。そして、休息間隔が短縮した場合には代謝産物の蓄積が高まり、さらに血圧を上昇させるものと思われる¹³⁾。本研究においても、このことが、1秒休息試行でのOxyHb/Mbをより大きく上昇させ、運動後半における両試行でのSO₂の差を消滅させていた可能性が考えられる。それにも拘わらず本研究の結果は、1秒休息試行におけるピークトルクの低下率は3秒休息試行に比べて大きいことを示すものであった。

最大運動における筋力の低下に関するこれまでの研究において、代謝産物^{14,15)}あるいは活性酸素種¹⁶⁾の上昇、またこれらの変化に伴う細胞外K⁺の上昇^{17,18)}、筋小胞体からのCa²⁺放出の低下^{19,20)}、また、中枢性疲労¹⁹⁾がその要因として考えられている。これらの要因は興奮収縮連関に関わるものであり、したがって、たとえ利用可能な酸素量が十分にあり、有酸素的エネルギー供給が可能な状態にあったとしても、このような状況下では、エネルギー需要は低下すると考えることができる。それゆえ、このことが、本研究における運動後半の酸素利用を妨げていた要因であるように思われる。

一方で、筋収縮間に3秒の休息間隔において血液供給を増加させた場合、OxyHb/MbおよびSO₂は1秒休息試行と比較し運動中盤においては有意に高値を示し、また、ピークトルクの低下率は低値であった。筋力を低下させる要因であるADPやPiの蓄積に関し、筋収縮間の5秒間といった短時間の休息であっても、これらの物質の酸化的リン酸化がなされる可能性が示唆されており²¹⁾、また、乳酸の除去と張力の回復との関係もいわれている²²⁾。さらに、細胞外に蓄積したK⁺についても筋の弛緩と同時に再取り込みがなされると共に、5秒間といった短時間の休息中、上昇した血流により除去されるとされている²³⁾。

それゆえ、筋収縮間の休息間隔を1秒から3秒間に延長した場合、これらの物質の除去率は高まっていたと考えることができる。このことが、本研究の試行間においてピークトルクの差をもたらした可能性もあ

る。また、本研究では3秒休息試行において、運動中盤における筋の酸素化率が1秒休息試行よりも高値を示していた。このことも代謝産物の除去およびPCrの再合成に有利に働いていたものと思われる。

結論として、本研究により、ピークトルクの低下率とSO₂の関係は低いことが示された。また、運動の持続によるピークトルクの低下に伴い、組織酸素化率のレベルに拘わらず酸素利用が低下することが示唆された。

文 献

- 1 Kavanagh MF, Jacobs I: Breath-by-breath oxygen consumption during performance of the Wingate test. *Can J Sport Sci*, 1988, **13** (1): 91-93.
- 2 Nioka S, Moser D, Lech G et al: Muscle deoxygenation in aerobic and anaerobic exercise. *Adv Exp Med Biol*, 1998, **454**: 63-70.
- 3 Bae SY, Hamaoka T, Katsumura T et al: Comparison of muscle oxygen consumption measured by near infrared continuous wave spectroscopy during supramaximal and intermittent pedaling exercise. *Int J Sports Med*, 2000, **21** (3): 168-174.
- 4 Bangsbo J, Krstrup P, Gonzalez-Alonso J et al: ATP production and efficiency of human skeletal muscle during intense exercise: effect of previous exercise. *Am J Physiol*, 2001, **280** (Endocrinol Metab 6): E956-964.
- 5 Ivy JL, Sherman WM, Miller JM et al: Relationship between muscle Qo₂ and fatigue during repeated isokinetic contractions. *J Appl Physiol*, 1982, **53** (2): 470-474.
- 6 Royce J: Isometric fatigue curves in human muscle with normal and occluded circulation. *Res Quart*, 1958, **29** (2): 204-212.
- 7 加賀谷淳子, 岩村英吉: 筋力低下曲線と1/3MVC負荷による最大作業回数からみた筋持久力の比較. *体育科学*, 1989, **17**: 1-7.
- 8 Tesch P, Sjodin B, Thorstensson A et al: Muscle fatigue and its relation to lactate accumulation and LDH activity in man. *Acta Physiol Scand*, 1978, **103** (4): 413-420.
- 9 Gerde B, Elert J, Henriksson-Larsen K: Muscular fatigue during repeated isokinetic shoulder forward flexions in young females. *Eur J Appl Physiol*, 1989, **58** (6): 666-673.
- 10 Komiyama T, Quaresima V, Shigematsu H et al: Comparison of two spatially resolved near-infrared photometers in the detection of tissue oxygen saturation: poor reliability at very low oxygen saturation. *Clin Sci*, 2001, **101** (6): 715-718.
- 11 Fallentin N, Jorgensen K, Simonsen EB: Motor unit recruitment during prolonged isometric contractions. *Eur J Appl Physiol*, 1993, **67** (4): 335-341.
- 12 Rodegran G, Saltin B: Muscle blood flow at onset of dynamic exercise in humans. *Am J Physiol*, 1998, **274** (Heart Circ Physiol 43): H314-H322.
- 13 Hogan MC, Ingham E, Kurdak SS: Contraction duration affects metabolic energy cost and fatigue in skeletal muscle. *Am J Physiol*, 1998, **274** (Endocrinol Metab 37): E397-E402.
- 14 Jacobs I, Tesch PA, Bar-Or O et al: Lactate in human skeletal muscle after 10 and 30s of supramaximal exercise. *J Appl Physiol*, 1983, **55** (2): 365-367.
- 15 Sahlin K, Tonkonogi M, Soderlund K: Energy supply and muscle fatigue in humans. *Acta Physiol Scand*, 1998, **162** (3): 261-266.
- 16 Reid MB: Redox modulation of skeletal muscle contraction: what we know and what we don't. *J Appl Physiol*, 2001, **90** (2): 724-731.
- 17 Fraser SF, Li JL, Carey MF et al: Fatigue depresses maximal in vitro skeletal muscle Na⁺-K⁺-ATPase activity in untrained and trained individuals. *J Appl Physiol*, 2002, **93** (5): 1650-1659.
- 18 Sjogaard G: Exercise-induced muscle fatigue: The significance of potassium. *Acta Physiol Scand Suppl* 593, 1990, **140**: 1-63.
- 19 Hill CA, Thompson MW, Ruel PA et al: Sarcoplasmic reticulum function and muscle contractile character following fatiguing exercise in humans. *J Physiol*, 2001, **531** (3): 871-878.
- 20 Li JL, Wang XN, Fraser SF et al: Effects of fatigue and training on sarcoplasmic reticulum Ca²⁺ regulation in human skeletal muscle. *J Appl Physiol*, 2002, **92** (3): 912-922.
- 21 Fulco CS, Rock PB, Muza SR et al: Slower fatigue and faster recovery of the adductor pollicis muscle in women matched for strength with men. *Acta Physiol Scand*, 1999, **167** (3): 233-239.
- 22 Tesch PA, Wright JE: Recovery from short term intense exercise: Its relation to capillary supply and blood lactate concentration. *Eur J Appl Physiol*, 1983, **52** (1): 98-103.
- 23 Sjogaard G, Savard G, Juel C: Muscle blood flow during isometric activity and its relation to muscle fatigue. *Eur J Appl Physiol*, 1988, **57** (3): 327-335.

The Relationship Between the Rate of Decline in Peak Torque and Tissue Oxygen Saturation of the Exercising Muscle During Isokinetic Knee Extension

Yayoi Kawahara^{*1} and Isao Muraoka^{*2}

^{*1} Graduate School of Human Sciences, Waseda University,

^{*2} School of Sport Sciences, Waseda University

Key words: Near infrared spectroscopy, Isokinetic knee extension,
Oxygen saturation, Rate of decline

An aerobic energy source is important even in intensive exercise. Therefore peak power of intensive exercise can be influenced by oxygen availability of the exercising muscle. This study examined whether the rate of decline in peak torque of isokinetic exercise is related to oxygen saturation of the exercising muscle. The rate of decline in peak torque and tissue oxygen saturation (SO₂) obtained by near infrared spectroscopy were measured continuously over 50 isokinetic knee extensions at 1 or 3 second intervals. The rate of decline in peak torque was higher in exercise at 1 sec intervals than that at 3 sec intervals, whereas SO₂ at the end of the exercise was the same in both trials. Our study showed that although SO₂ is the same at the exercising muscle, peak torque declines more when contraction intervals are shortened. In conclusion, the relationship between the rate of decline in peak torque and SO₂ of the exercising muscle is low, which suggests that independently of SO₂ oxygen utilization reduces when peak torque declines. (J. Jpn. Coll. Angiol., 2003, **43**: 317-322)