

足関節底屈最大筋力発揮後のヒラメ筋および腓腹筋の筋酸素動態差

The differences in muscle oxygenation between the soleus and gastrocnemius muscle after intermittent planterflexor maximum voluntary contraction

石川 成道¹⁾・琉子 友男¹⁾・下山 方子²⁾
小野 晃³⁾・熊谷 賢哉⁴⁾

Narimichi ISHIKAWA¹, Tomoo RYUSHI¹, Masako SHIMOYAMA²
Akira ONO³, Kenya KUMAGAI⁴

Abstract

This study investigated the differences of muscle oxygenation between the soleus (SOL) and gastrocnemius muscle (GAST) after intermittent plantarflexor maximum voluntary contractions. Seven healthy young men participated in this study. The total hemoglobin volume (THb) and the oxygen saturation level of blood (StO₂) in the SOL and GAST were measured using near infrared spectroscopy (NIRS). Muscle tissue blood flow (MTBF) was calculated from the values of THb. Bilateral maximal isometric strength and intermittent maximum voluntary contractions (30 Hz, 90 sec) in the plantarflexor were measured using a newly developed electromechanical dynamometer. The percent decline of the intermittent plantarflexor maximum voluntary contractions was represented as "fatiguability". There was no significant difference between MTBF of SOL and that of GAST at rest. On the other hand, there was a significant difference between MTBF of SOL and that of GAST after intermittent maximum voluntary contractions. A significant correlation coefficient ($r=-0.73$, $p<0.05$) was found between fatiguability and MTBF of SOL at rest. These results suggest that the soleus muscle with more blood flow has higher muscular endurance in plantarflexion compared with the gastrocnemius muscle, and that it is possible to clarify the difference in the muscle tissue blood flow by using near infrared spectroscopy.

Key words : Near Infrared Spectroscopy, Muscle Oxygenation, Ankle Plantarflexors

I. 緒言

近年、近赤外分光 (NIRS) 法を用いて測定した筋酸素動態を筋の代謝能力の指標とする報告が多く見受けられるようになった。NIRS装置の多くは、近赤外線吸収率の異なる酸素化ヘモグロビン量 (O_xHb) と還元ヘモグロビン量 (deO_xHb) から総ヘモグロビン量 (THb) を算出すると同時に、THbに占める酸素化ヘモグロビン

量の%値 (StO₂) を表示出力するものである。一方、これらの測定値については脂肪層など血液以外の成分の影響を完全に除去できないため、個人間での比較が困難であることが指摘されている¹³⁾。したがって筋組織の代謝能力を個人間、あるいは部位間で比較するためには、筋組織血流量 (Muscle tissue blood flow : MTBF) や組織酸素消費量 (MRO₂) を算出する必要がある。また、NIRS装置が開発されたのは最近であるため、筋酸素動態に関する研究は未だ少なく、筋への酸素運搬能力を示

1) 東京都立大学 Tokyo Metropolitan University

2) 職業能力開発総合大学校 The Polytechnic University

3) YMCA福祉スポーツ研究所 The YMCA institute of Human services

4) 長崎国際大学 Nagasaki International University

す酸素動態については、特に協同筋の酸素動態の差に関する報告は少ない。

従来までのNIRS法に関する報告^{1,3,6-8,11,19)}では、動脈を阻血することによって、酸素濃度を低下させ、その最低値を組織での酸素濃度"0"とする方法(阻血キャリブレーション法)が採用されてきた。例えば、弘原海ら⁸⁾は、筋酸素化レベルが最低値になるまで約260mmHgで約10分間のカフ阻血が必要であったと報告している。このような阻血キャリブレーション法を用いた筋酸素動態の測定は、高齢者や疾患を有する者を対象にした場合には血圧上昇、血管損傷、痛みなどを伴うため困難である。そこで本研究は、被験者にとって比較的身体的負担が少ないと思われるVenous Occlusion(静脈阻血)法を用いた斉藤ら¹⁷⁾の方法を採用することにより、安静時および連続的な足関節底屈運動後のヒラメ筋(SOL)および腓腹筋(GAST)における筋酸素動態の差を明らかにすることを目的とした。

II. 研究方法

1. 被験者

被験者は、日常生活において活動的ではあるが、習慣的な筋力トレーニングを行っていない健康な非喫煙男性7名であった(表1)。測定は、被験者全員に対して測定の意義、方法、安全性等の説明をし、インフォームド・コンセントを得て実施した。

2. 被検筋

被検筋はヒラメ筋(SOL)及び腓腹筋内側頭(GAST)とした。NIRS測定値が筋膜や腱の影響を受けやすいことを考慮して、それぞれの被検筋の同定には、形態計測と同時に超音波診断装置(Aloka社製SSD-500)を用いた。なお、超音波診断装置を用いた同定は、本実験で使用したNIRS(バイオメディカルサイエンス社製PSA-N)の測定範囲が体皮表面より1cm~2.5cmの範囲であることから、特にSOLの正確な位置を確認するために行った。

3. 運動

被験者は簡易型下腿筋力測定装置⁵⁾を用い1回/3secのテンポに合わせて30回、常に最大努力で瞬間的に等尺性最大筋力を発揮するよう指示された。なお、足関節底屈運動にともなう筋力の低下率(Fatiguability)は琉子ら¹⁵⁾の方法により運動開始~5回までの等尺性最大筋力の平均値をVI、26~30回までの等尺性最大筋力の平均値をVFとし、 $(VI-VF)/VI \times 100$ で算出した。

4. 実験プロトコール

図1に示すように、被験者を仰臥位にし、下肢を心臓よりやや高い位置にしたうえで、大腿部用カフおよびNIRSプローブをSOLとGASTに、またパルスオキシメータープローブ(Nonin社製Onyx)を指尖に装着した。まずパルスオキシメーターによって動脈血酸素飽和度(S_pO_2)を計測し、安静5分の後、Venous Occlusion(VO)

表1. 被験者の身体特性

n	年齢	身長(cm)	体重(kg)	最大底屈筋力(kg)	筋力の低下率(%)
7	22.4(3.0)	170.3(4.8)	65.9(6.5)	342.4(49.6)	28.1(7.3)

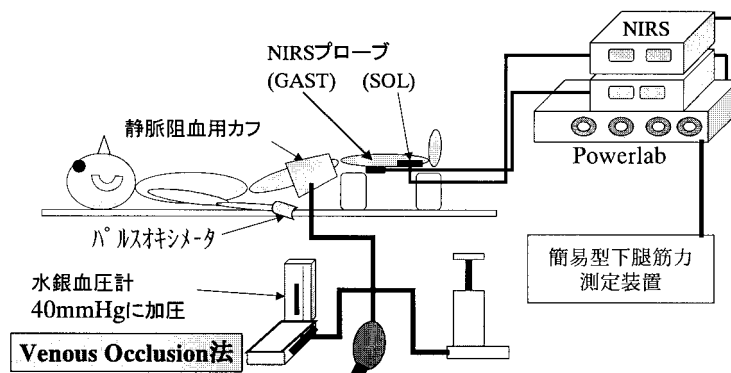


図1. 実験プロトコール

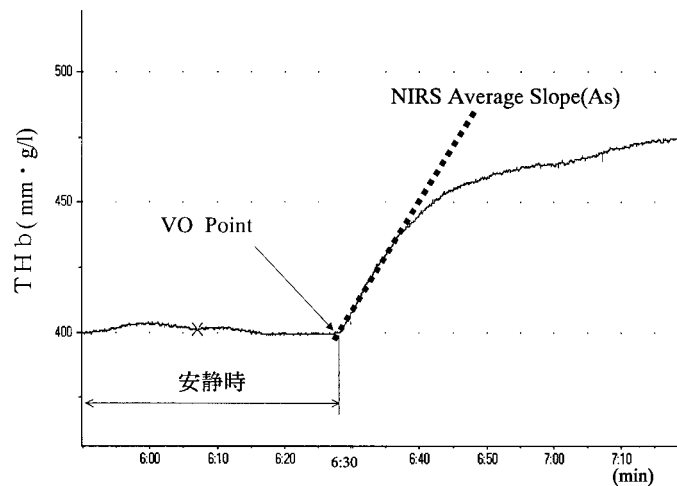


図2 . Venous occlusion 施行時のTHb量曲線

施行時のTHbおよびStO₂を測定した。次に、被験者を椅座位にし、簡易型下腿筋力測定装置を用いて足関節底屈筋力(100% MVC[Maximum Voluntary contraction])を3回測定し、その最大値を最大筋力とした。その後、30回の足関節底屈運動を行わせ、運動直後に再び安静時と同様の方法を用いてTHbおよびStO₂を測定した。なお最大筋力測定前に、軽く筋力を発揮させる著者らの方法⁴⁾によりウォーミングアップを行わせた。

5. データ処理

MTBF(式.1)およびMRO₂(式.2)は、図2に示すようにTHb量曲線のVO pointより、立ち上がり部分5秒間の平均勾配(AS)を用い斉藤¹⁷⁾らの方法を元に、下記の数式より算出した。

$$MTBF(g/100cc/min) = \frac{AS \times 60 \times 10^{-1}}{d \times e} \dots\dots\dots (式.1)$$

但し、AS:平均勾配、60:1分間に換算、10⁻¹:1をccに換算、d:プローブの受光間距離

e:平均光路長係数(4.3)とした。なお平均光路長係数はWrayら²⁰⁾の報告に基づいた。

$$MRO_2(cc/100cc/min) = MTBF \times (S_pO_2 - S_tO_2) \times 1.39 \dots (式.2)$$

但し、SpO₂:動脈血酸素飽和度、StO₂:筋組織酸素飽和度、1.39:ヘモグロビン濃度。

6. 統計処理

データは平均±標準偏差とした。変数間の相関係数はピアソンの積率相関分析によって求め、群間の有意差検定はANOVAを用い、有意水準はすべて5%未満とした。

Ⅲ. 結果

被験者7名の足関節底屈最大筋力は342.4 ± 49.6kgであり、連続的な足関節底屈運動後の筋力の低下率(疲労度)は28.1 ± 7.3%であった(表1)。安静時における筋組織血流量(MTBF)の結果は、SOLで0.84 ± 0.36 g/100cc/minに対し、GASTでは0.67 ± 0.28 g/100cc/minであったが両者の間に有意差は認められなかった。しかし、運動後のMTBFはSOLが1.98 ± 0.74 g/100cc/min、GASTが1.47 ± 0.45 g/100cc/minに増加し両者に有意差(p<0.05)が認められた。運動前後の比較においてはSOLおよびGASTのMTBFは、ともに運動後の方が有意(p<0.01)に増加した(図3)。

筋酸素消費量(MRO₂)の結果は、安静時においてはSOLで28.76 ± 13.7 cc/100cc/min対し、GASTでは24.5 ± 11.63 cc/100cc/minで両者の間に有意差は認められなかった。しかし、MTBFと同様運動後では、SOLが73.13 ± 25.72 cc/100cc/min、GASTが54.08 ± 17.43cc/100cc/minとSOLの方が有意(p<0.01)に大きい値を示した(図4)。

運動によるMTBFの増加率は、SOLが136.5 ± 106.7%、GASTが117.7 ± 63.5%であったが、両者の間に有意差は認められなかった。運動とMTBFの相関関係を調べた結果、MTBFと最大筋力の間には有意な相関関係は得られなかった(図5)。しかし、安静時のSOLにおけるMTBFと筋力の低下率との間に有意な負の相関関係(r=-0.73:p<0.05)が得られた(図6)。なお最大筋力と疲労度の間には有意な相関関係は得られなかった。

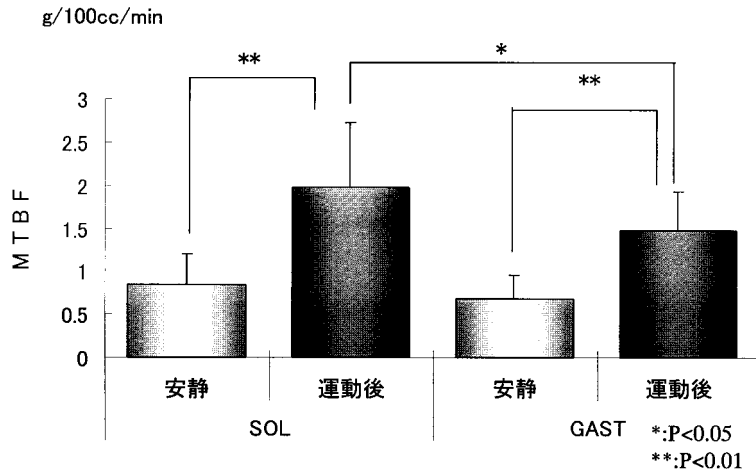


図3．安静時及び運動後の筋組織血流量

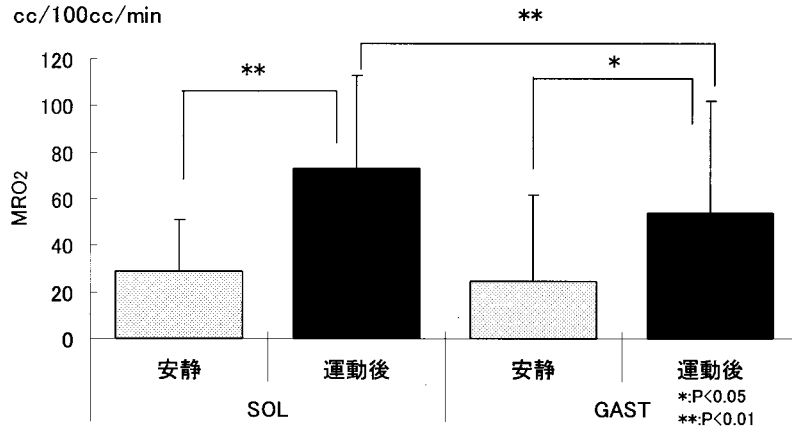


図4．安静時及び運動後の筋酸素消費量

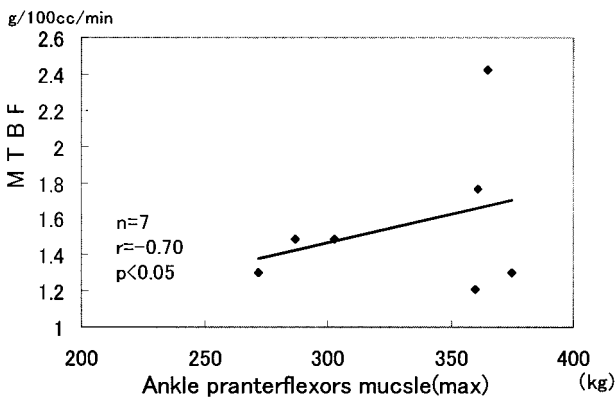


図5．安静時の筋血流量と筋力の相関関係

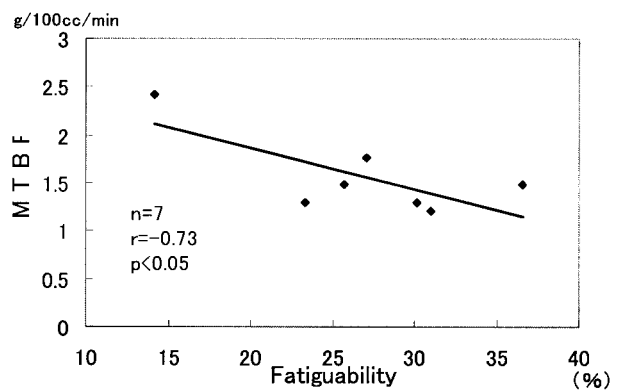


図6．安静時の筋血流量と筋力の低下率との相関関係

IV. 考察

本研究ではNIRS測定値が、筋持久力の指標になりうることを念頭に、筋組織血流量を測定した。従来骨格筋の血流量測定は筋以外の組織、特に皮膚の血流量と分離

して筋血流量を測定することは難しい。この目的に合った測定法としては、放射性同位元素であるXe¹³³を用いたClearance法が信頼性の高いものとされている。また指示薬希釈法を用いることもある。しかしどちらも一般的方法としては技術的に困難である。簡潔な方法として古くから血流量測定に利用されている水銀封入ラバース

トレインゲージ法においても、下腿筋肉の血流量を別々に測定することは不可能であった。しかし、本研究の結果からVOを加えたNIRS法を用いることによって、足関節底屈運動における協同筋のMTBFおよびMRO₂を筋肉毎に測定できることが明らかとなった。

安静時のTHbは、被験者の姿勢による影響を受けやすく変動が大きいことから本研究では、仰臥位で測定したところ安定したTHbが得られた。THbより算出した安静時におけるSOLのMTBFおよびMRO₂は、GASTと比較して高い値を示したが、両筋肉の間に有意差は認められなかった。しかしながら、運動後のSOLにおけるMTBFとMRO₂はGASTのそれらに比較して有意に高い値が得られた(図3, 4)。

本研究で用いたような最大筋力発揮時には、収縮中の筋に大量の血液負荷⁹⁾と血流の停滞¹⁰⁾が生ずることが考えられ、運動後に再還流が引き起こされたことが推察される。SOL,GASTともに運動後のMTBFが増加した原因は、血液負荷による再還流によるものと考えられる。また、運動後のMTBFはGASTよりSOLの方が有意に高い値を示したことは、股関節・膝関節・足関節屈曲の椅座位姿勢による底屈筋力発揮の場合SOLの方がこの運動に多く動員され組織内の血流が増加したことを裏付けている。足関節底屈最大筋力の結果については、吉村ら²¹⁾の報告した片足測定値から換算したところ、ほぼ同様の値であった(表1)。また本実験で採用した運動による疲労度と最大筋力との間には有意な相関関係は認められなかった。これは琉子ら¹⁷⁾の報告する、等尺性最大筋力発揮の際、筋力値の低下速度の速い者が、その初期に発揮した筋力値が高いとは限らないとするものと同様であった。この運動とMTBFの相関を調べたところ、足関節底屈最大筋力とMTBFとの間に有意な相関関係は得られなかった。しかし、運動による筋力の低下率との間には、有意な負の相関関係が得られた。このことは足関節底屈筋群の中でもSOLのMTBFが疲労の影響を反映していることが示唆された。この結果は、無酸素的で高度な虚血を伴うような運動がST繊維を増加させ筋の酸化能力を向上させるというEikenら²⁾の報告からもST線維の多いとされるSOLが、疲労と関係が深いことが理解できる。MRO₂は、MTBFに動脈血酸素飽和度(S_pO₂)と局所筋酸素飽和度(StO₂)の差を乗じて算出しているため、MTBFとほぼ同様の結果であったことから、今後足関節底屈筋力における筋酸素動態の調査にはSOLのMTBFを知ることが有効であることが示唆された。

VO₂maxやVTは、呼吸循環機能や、末梢での代謝機能が総合的に反映されていると考えられているが、NIRS

を用いた局所筋酸素動態の観察により呼吸循環機能と筋での代謝機能が必ずしも一致するとは限らないことを塩崎ら¹⁶⁾は報告している。そして前記の動脈血流遮断法同様、高齢者や障害者にとって負担が大きい。今後骨格筋の筋酸素動態を筋肉別に観察する方法として、我々が行ったNIRSを用いた方法が有効であることが示唆された。NIRS測定値については、開発段階初期ではヘモグロビンの酸素化、脱酸素化を大きく反映している¹²⁾とされてきたが、最近運動強度依存的にミオグロビンの脱酸素化が観察できる¹⁸⁾、という報告もあり一致した結果は得られていない。しかし、もしミオグロビンの反映度が高いとするならば、筋の酸素利用能力をよりの確に判断でき、持久性の評価の一指標として有効に利用できると思われる。今後は、運動時と測定時の肢位を統一するなど、実験方法を改善していきたい。

V. まとめ

本研究ではNIRSを用いて足関節底屈筋群のSOLとGASTの筋組織血流量(MTBF)を同時に測定し比較した。安静時および運動後の変化を観察したところ、安静時のMTBFおよびMRO₂は、ともにSOLの方が高い値であったが、有意差は認められなかった。運動後については、GASTよりSOLの方が有意に高い値を示した。足関節底屈筋力とMTBFとの間には相関関係は得られなかったが、安静時のSOLと疲労度との間には、有意な負の相関関係が得られSOLのMTBFが、疲労度を反映していることが示唆された。

以上の結果よりNIRSを用いることにより、SOLとGASTにMTBFの差が存在することを確認できた。

文 献

- 1) Chance B. et al. (1992) Recovery from exercise induced desaturation in the quadriceps muscle of elite competitive rowers. *Am. j. physiol.* 262: c766-c775.
- 2) Eiken O. Wyatt JS. Esbjornsson M. Nygren A. Kaijser L(1991) Effects of ischaemic training on force development and fibertype composition in human skeletal muscle. *Clin Physiol.* 11: 41-49
- 3) Hamaoka T. et al. (1996) Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscles by near infrared spectroscopy. *J. Appl. Physiol.* 81(3):

- 1410-1417.
- 4) 石川成道・峯島孝雄(1997)筋力測定時のウォーミングアップ効果-至適強度の検討-. CIRCULER 58:99-105.
- 5) 石川成道・琉子友男(2000)足関節底屈筋群の最大筋力測定の信頼性に関する研究. CIRCULER 61:201-205.
- 6) 岩川孝志・中村好夫・村岡功(2001)サイクリストと非サイクリストにおけるペタリング運動中の大腿部の筋酸素化動態の比較. 体力科学. 50:491-500.
- 7) Jobsis F.F.(1977)Noninvasive infrared monitoring of cerebral and circulatory parameters. Science. 198:1264-1267.
- 8) 弘原海剛・田中繁宏・三村達也・石原一成・大島秀武・宮本忠吉・藤本繁雄(2000)ランブ負荷運動に伴う近赤外分光法(NIRS)により測定した筋内酸素動態の測定方法に関する検討. 体力科学. 49:129-138.
- 9) Lind AR. McNicol GW (1967)Circulatory responses to sustained contractions and the effect of free or restricted arterial inflow on post-exercise hyperaemia. J Physiol 192: 575-593
- 10) Lind AR. Williams CA (1979) The control of blood flow through human forearm muscles following brief isometric contraction. J Physiol 288: 529-547
- 11) Moritani T. Sherman W. M Shibata M. Matumoto T. Shinohara M. (1992) Oxygen availability and motor unit activity in humans. Eur.j.Appl.Physiol. 64:552-556.
- 12) Mancini DM. Wilson JR. Bolinger L. Li H. Kendrick K. Chance B & Leigh JS (1994) In vivo magnetic resonance spectroscopy measurement of deoxy-myoglobin during exercise in patients with heart failure. Demonstration of abnormal muscle metabolism despite adequate oxygenation. Circulation 90: 500-508.
- 13) 庭山雅嗣・志賀利一ほか(1998)近赤外光を用いた筋組織酸素計測における脂肪層の影響とその補正. 医用電子と生体工学. 36-1:41-48
- 14) 西尾達也・勝村俊仁ほか(1997)自転車運動時の下肢筋の酸素濃度変化の非侵襲的測定. 臨床スポーツ医学. Vol.14. No.6: 659-663
- 15) 琉子友男(1980)等尺性最大筋力発揮の際の疲労曲線に関する一考察. 東京大学教養学部体育学紀要. 14:55-60.
- 16) 塩崎知美・狩野豊 他(1998)近赤外分光法による高齢者の筋酸素動態の検討. 体力科学. 47:393-400.
- 17) 斉藤建夫・酒井秋男(1996)近赤外分光を用いた Veonous Occlusion法による組織血流計測. Therapeutic Research. Vol. 17. No.6:137-140
- 18) Tran TK. Sailasuta N. Kreutzer U. Hurd R. Chung Y. Mol P. Kuno S & Jue T (1999) Comparative analysis of NMR and NIRS measurement of intracellular Po₂ in human skeletal muscle. Am J Physiol 276: R1682-R1690.
- 19) 内山秀一(1996)近赤外分光法によるアイソメトリックトレーニングおよびレジスタンストレーニング時の筋内酸素動態. 東海大学紀要. 26:39-45.
- 20) Wray S. et. al. (1994)Characterization of the near infrared absorption spectra of cytochrome and hemoglobin for the non-invasive monitoring of cerebral oxygenation. Biochimica et Biophysica Acta. 933: 184-192
- 21) 吉村茂和・相馬正之(1998)理学療法における標準値-下肢筋力-. PTジャーナル32:607-614.