

低強度運動時の筋疲労に及ぼす筋血流量と筋内無機リンの影響

086707 菅谷 正人

指導教員 安部 孝 特任教授

The mechanisms of low-intensity resistance exercise with blood flow restriction (BFR) induced muscle fatigue are unknown. Recent studies have suggested that the change in intramuscular metabolism under BFR exercise may contribute to muscle fatigue. In the present study, we investigated the kinetics of intramuscular metabolism during resistance exercise with BFR. Unilateral plantar flexion exercise was performed at 20% of one-repetition maximum with three conditions of BFR [0(no restriction, CON), 180 (BFR-Low), and 230mmHg (BFR-High)]. Change in inorganic phosphate (Pi) and intramuscular pH was recorded continuously during the entire protocol by phosphorus magnetic resonance spectroscopy. During the exercise, Pi was significantly higher in BFR-High than other conditions. The decline in pH was significantly greater in BFR-High than other conditions, but the value did not low level at even BFR-High. Therefore, main contributors of muscle fatigue in low-intensity resistance training with BFR may involve the accumulation of Pi.

Key words: Muscle fatigue, Blood flow restriction, Inorganic phosphate, Intramuscular pH

1 緒言

我々が日常で行う歩行や走行などの全ての動作は、骨格筋の収縮によって成り立つ。連続的な動作による筋のパフォーマンスの低下は筋疲労と呼ばれ、我々にとってきわめて身近な現象である。筋疲労は、『最大筋力の低下』もしくは『最大短縮速度の低下』と定義され、運動強度やそのテンポ、運動時間、あるいは運動間の休息时间などの運動条件が関与している。例えば、一般に行われている筋力トレーニングでは、負荷強度とその反復(筋出力を維持できる)回数との間に反比例の関係が認められ、運動時の筋疲労の程度は運動強度の影響を強く受ける。

ところが、ある特殊環境下では低強度運動においても筋疲労が顕著に生じることが報告されている。閉塞性動脈硬化症の患者では、活動筋への筋血流量が十分に確保されないため、100m程度の歩行運動を行っただけで、強い疲労感を感じる。また、健常者において、外部圧迫(血流制限)を施した状態での最大挙上重量(1RM)の20%1RMの低強度運動においても随意最大筋力の著しい低下を観察したことが報告されている¹⁾。この筋疲労の原因として、中枢性(大脳興奮水準の低下)および末梢性(代謝産物の蓄積)要因の両者が関与している可能性が指摘されているが、中枢性の要因はそもそも末梢の活動筋でのエネルギーの消費および生成時に生じる代謝産物が原因となるため、筋血流量の低下は末梢の代謝産物の蓄積に何らかの影響を与えるものと考えられる。しかし、上述した実験では筋血流量の測定、さらには筋内における代謝産物の測定を行っておらず、筋血流量の低下がどのように筋疲労に関与しているかは定かではない。

そこで、筋血流量が低下した状態で行う低強度運動時の筋疲労について観察するため、異なる2種類の外部圧迫による筋血流量の変化と筋疲労との関連性について検討するとともに(実験1)、筋疲労の原因としてのエネルギー代謝上の代謝産物の動態について観察し(実験2)、筋血流量の低下による筋疲労の原因解明を目的とした。

2 低強度運動時の筋疲労に及ぼす筋血流量の影響

2.1 実験1: 目的

異なる2種類の外部圧迫による筋血流量の変化とそれによって誘発される随意最大筋力の低下(筋疲労)及び実施運動中の筋活動量とエネルギー供給に関与する酸素摂取量との関係について検討することを目的とした。

2.2 実験1: 実験方法

2.2.1 被験者

被験者は健康な成人男性10名(年齢:25±3歳、身長:174±5cm、体重:68±10kg)であった。

2.1.2 実験方法

(a) 実験手順

先行研究¹⁾を参考に、通常ならば筋疲労の起こらない3秒に1回のテンポでの20%強度(1RMの20%)の膝伸展運動(レッグエクステンション)を計4セット(30回の後、15回を3セット)行い、セット間の休憩は30秒とした(Fig.1)。筋疲労の評価は、4セット合計75回の運動の前後に実施した随意最大等尺性筋力によって行った。また、運動中の筋活動及び酸素摂取量は運動前の安静状態から4セットの運動終了まで連続的に記録した。

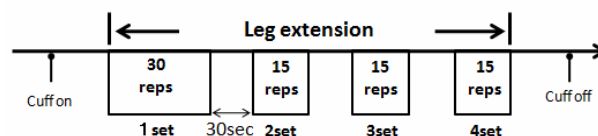


Fig.1 Experimental design

(b) 外部圧迫の条件とその方法(実験1、2共通)

外部圧迫は、大腿部基部に装着した5cm幅の空圧式弾性ベルトを用いて行った。先行研究に習い、外部圧迫の圧条件として、座位安静時の心臓位で測定した上腕部収縮期血圧の1.3倍(BFR-Low条件)と1.6倍(BFR-High条件)の2条件を用い、外部圧迫を行わないコントロール条件(CON条件)と比較した。

(c) 測定項目

(c-1) 最大等尺性筋力(MVC)による筋疲労の評価

筋疲労の評価は、運動前後に測定したMVCの減少率を以下の式から算出した。

$$\text{筋疲労}[\%] = 100 \times (\text{MVC}_{\text{運動前}} - \text{MVC}_{\text{運動後}}) / \text{MVC}_{\text{運動前}}$$

(c-2) 筋の収縮効率

動的な運動時の筋の収縮効率は簡易的に以下の式によって表わすことができる。

$$\text{筋の収縮効率} = \text{仕事量} / \text{筋活動量}$$

本研究で実施した膝伸展運動は強度および動作テンポを一定としたため運動中の仕事量は常に一定であり、筋活動量の増加は筋の収縮効率の低下を意味するものと考え

られた。筋活動量は、主働筋である大腿四頭筋(大腿直筋・内側広筋・外側広筋)を連続的に1セット目から4セット目まで記録された筋電図のデータのうち、筋活動量の分析には伸展位のみを用いた。

(c-3)筋血流量の測定

超音波画像診断装置(SSD-2000、アロカ社製)に内蔵された超音波ドップラー法を用いて、大腿動脈の血流量を測定した。得られた血管径、平均血流速度を用いて以下の式から筋血流量を求めた。

$$\text{筋血流量} = (\pi \times \text{血管径}/2)^2 \times \text{平均血流速度}$$

理想的には筋血流量を運動前の安静状態から運動終了時点まで連続的に測定することが望まれるが、そのためには特殊なコントロール装置が必要で、本研究では連続測定を行うことが出来なかった。運動時の筋血流量は運動開始直後に著しく増加し、運動継続にもなって安定した値を示すが、運動後にはすみやかに安静レベルに回復するため、運動直後に測定する必要があった。このような理由から、同一条件での運動実験を2回ずつ実施し、一方では筋疲労を評価するための随意最大筋力の測定を、もう一方では筋血流量の測定を実施した。

(c-4) 酸素摂取量の測定

運動中に利用されたエネルギー量(需要量)を推定するため、運動中および休息時の酸素摂取量を測定し、以下の式を用いて評価した。

$$\text{エネルギー需要量} = \text{運動時酸素摂取量}$$

$$- \text{安静時酸素摂取量}$$

(d)データ処理(実験1、2共通)

測定値は全て平均値と標準偏差で表わした。統計解析は外部圧迫の条件に関して一元配置の分散分析を用いて比較を行い、交互作用に有意差が認められた場合はTukeyの方法にて多重比較を行った。2変数の関係の強さの検討にはPearsonの相関係数を用いた。統計解析における有意水準は5%とした。

2.3 実験1: 結果

2.3.1 等尺性最大筋力の変化(筋疲労)

20%強度という低強度運動でも外部圧迫を施すことによって等尺性最大筋力の顕著な減少が観察され、等尺性最大筋力の低下の程度は外部圧迫の強さに応じた反応を示すことが明らかとなった(Fig.2)。

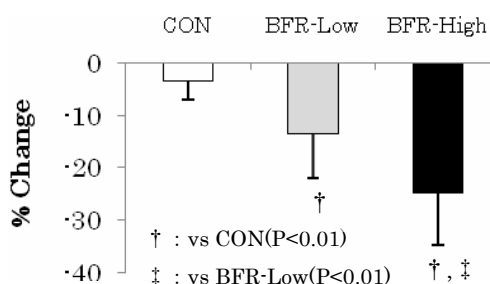


Fig.2 Muscle fatigue

2.3.2 筋の収縮効率の変化

Fig.3は4セット計75回の膝伸展運動中の大腿部の筋活

動量を各セットの最終5試行の平均値でその推移を示したものである。20%という一定の負荷強度にもかかわらず、外部圧迫の程度に応じて筋活動量は時間経過とともに増加し、BFR-High条件では、4セット終了時の筋活動量が初期値の1.65倍となり、コントロール条件(CON条件)でみられた1.37倍に比べ高い値を示した。また、筋活動量が増加した被験者ほど、その後の等尺性最大筋力の低下が観察され、活動筋で生じた筋力を補う為に膝伸展運動中の筋活動量が増加していたものと考えられた。

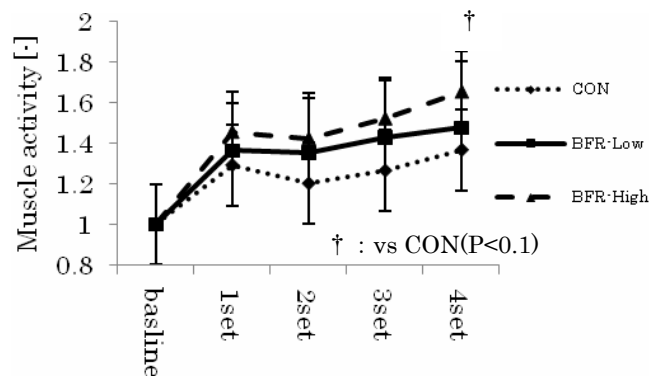


Fig.3 Muscle activity during leg extension

2.3.3 外部圧迫の程度と筋血流量

外部圧迫を行うと筋血流量の増加率は抑えられ、CON条件の筋血流量の増加率を100にすると、BFR-Low条件では66%、BFR-High条件では50%のレベルであった。

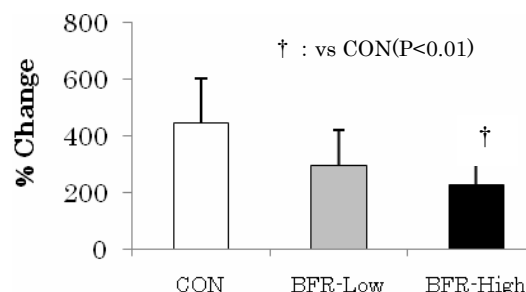


Fig.5 %change of blood flow volume

2.3.4 筋疲労と筋血流量との関係

運動にともなう筋血流量の増加が十分でない者ほど最大筋力の低下率は高く、強い筋疲労を示すことが明らかとなった(Fig.6)。

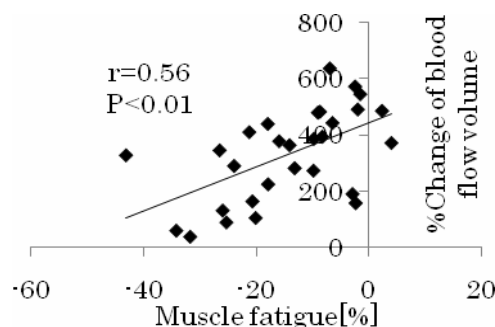


Fig.6 Relationship between blood flow volume and muscle fatigue

2.3.5 運動中の酸素摂取量の変化

Fig.7は、各実験条件での4セット計75回の運動中に測定された酸素摂取量をエネルギー需要量(運動で利用された量として算出)として示した結果である。各条件ともに活動筋の酸素摂取量はセット数を重ねるごとに徐々に増加し、外部圧迫の有無による酸素摂取量に差は認められなかった。

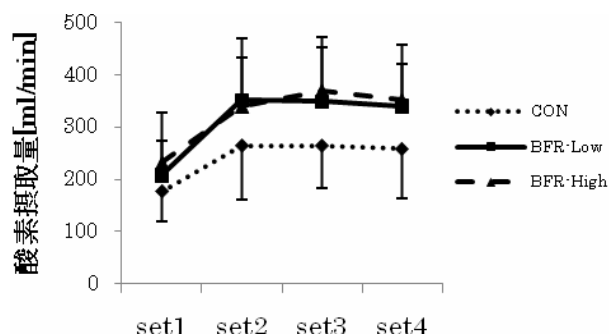


Fig.7 Muscle oxygen uptake

2.4 実験 1 : 考察

運動後の筋血流量はBFR-Low条件でCON条件の66%、BFR-High条件では50%を示し、最大筋力の低下率との間に有意な相関関係を認められ、筋血流量の低下が筋疲労に密接に関係することが示唆された。また、生じた筋疲労と運動中の筋の収縮効率との間には有意な相関関係が認められた。筋血流量の低下によって筋疲労が高まった要因として、筋内に供給される酸素量が低下し、その結果として酸素を介したエネルギー供給機構の十分な機能が損なわれたこと、活動筋にエネルギー代謝上の代謝産物が蓄積し、その結果として筋疲労が促進されたことの2つの要因が考えられたが、前者は、活動筋の酸素摂取量において、外部圧迫の有無による差は観察されなかったことから、筋内の酸素を介したエネルギー供給機構は筋血流量の減少にも関わらず、十分に機能していたものと考えられる。そのため、後者の代謝産物の蓄積が活動筋で生じていることが考えられた。

3 低強度運動時の外部圧迫と筋内代謝産物の動態

3.1 実験 2 : 目的

そこで実験2では、実験1で用いた実験プロトコルにしたがい筋内代謝産物である無機リン(Pi)、pHの測定を磁気共鳴分光法を用いて実施し、実験1で観察された筋疲労の原因物質について同定することを目的とした。

3.2 実験 2 : 実験方法

3.2.1 被験者

被験者は健康な成人男性8名(年齢:25±5歳、身長:174±7cm、体重:71±10kg)であった。

3.2.2 実験手順・外部圧迫の条件とその方法・データ処理

実験手順・外部圧迫の条件とその方法・データ処理に関しては実験1と同様の方法を用いた。ただし、磁気共鳴

分光法での測定の際に、MRI装置内での運動を実施する必要があったため、運動内容のみ膝伸展運動に変わって足関節底屈運動を行った。

3.2.3 測定項目

a) 無機リン(Pi)の定量化

磁気共鳴分光法から得られた無機リン(Pi)及びクレアチンリン酸(PCr)の周波数の曲線下部面積を算出し、安静時におけるPiとPCrの総和は一定となることを利用し、以下の式を用いてPiの定量化を行った²⁾。

$$Pi + PCr = 42.5$$

b) pHの定量化

本研究ではH⁺の変化をpHとして定量化した。pHの値によって、PiおよびPCrの吸収する周波数が異なることから、以下の式を用いてpHの定量化を行った²⁾。

$$pH = 6.75 + (\text{Pos}(Pi) - \text{Pos}(PCr) - 3.27) / \{5.69 - (\text{Pos}(Pi) - \text{Pos}(PCr))\}$$

3.3 実験 2 : 結果

3.3.1 筋内無機リンの変化

運動中、クレアチンリン酸の分解によって生じたPi値は3条件ともに増加し、特に外部圧迫が強いBFR-High条件では1セット終了時点で他の2条件よりもその値は有意に高かった(Fig.8)。その後のセット間の休息では、CON条件とBFR-Low条件のPi値は回復傾向を示したのに対し、BFR-High条件では休息期におけるPi値の大きな回復はみられなかった。CON条件とBFR-Low条件では、運動時にPi値が増加し、セット間の休息時に回復するよう増減のパターンが観察された。一方、BFR-High条件ではセット間の休息期にPi値の回復がほとんど起こらないため、2セット目からの運動によって生じたPiは筋内に蓄積する形で段階的に上昇していった。無機リンの変化を各セットの運動中とセット間の休息期にわけて、それぞれの平均値を算出したのがFig.9、10である。運動中に増加した無機リンの量は、外部圧迫の有無にかかわらず3条件間で有意な差は観察されなかった。一方、セット間の休息期にみられた無機リンの回復は、CON条件と比較して、BFR-Low条件、BFR-High条件では有意に低い値を示していた。

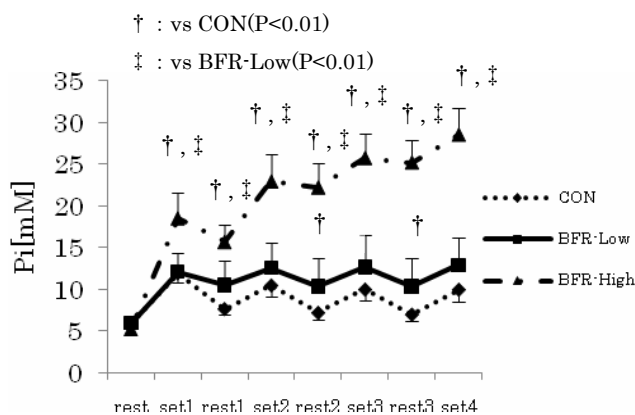


Fig. 8 Accumulation of Pi

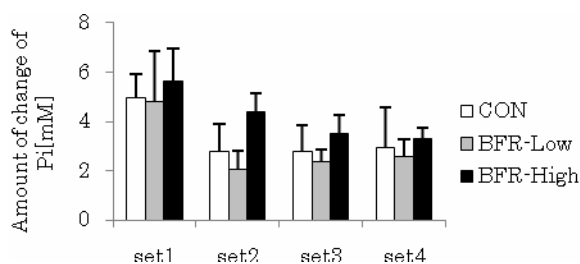


Fig. 9 Amount of change of Pi during exercise

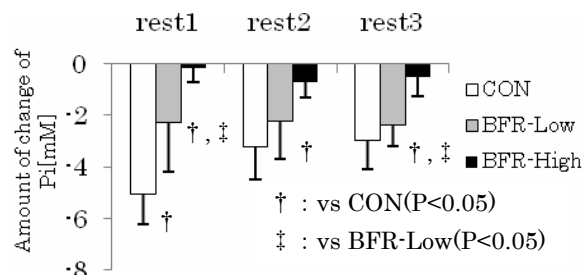


Fig. 10 Amount of change of Pi during rest

3.3.2 pH の変化

BFR-Low 条件では、2 セット目 (90-120s) 以降も運動時に pH 値の回復、セット間の休息期に pH 値の低下を示し、7.0-7.1 の範囲を推移していた。一方、BFR-High 条件では運動中およびセット間の休息期ともに pH 値の低下が起こり、結果的に筋内 pH 値は 6.85 まで低下し、

BFR-High 条件でのみ運動時に pH 値がむしろ低下するという明らかな違いが観察された。

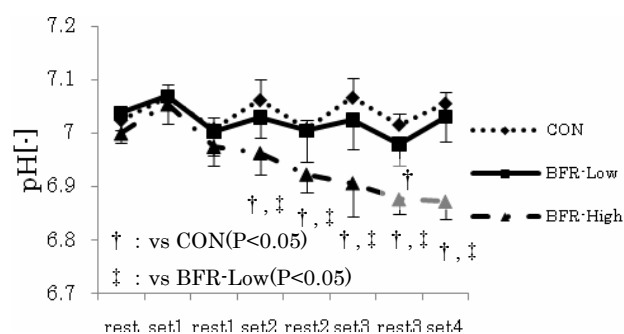


Fig.11 Change of pH

3.4 実験 2 : 考察

本実験で得られた 4 セットの運動終了時点での無機リン (Pi) および pH の値を Table.1 にまとめた。実験 1 では、この 4 セット終了時点での等尺性最大筋力を測定し、その値を用いて筋疲労を評価している。したがって、各条件におけるそれぞれの値が等尺性最大筋力の低下を考える上で有効な要因となるものと思われる。

Table.1 Pi & pH (end of the exercise)

外部圧迫	Pi[mM]	pH[-]
CON	10.0	7.06
BFR-Low	12.9	7.03
BFR-High	28.5	6.87

ラットの摘出筋を用いた研究では、筋内Piの上昇が筋疲労に及ぼす影響について報告されている³⁾。筋内のPi値がゼロ 0 [mM]から 30[mM]になると筋出力が約 20%低下することを報告している。したがって、クレアチンリン酸の分解によって生じる筋内Pi値の上昇は、実験 1 で生じた最大筋力の低下に関与していたものと考えられる。また、筋内pH値の変化が筋疲労に及ぼす影響についても報告されており⁴⁾、筋内pHが 7.0 の時と 6.2 の時の発揮張力が比較され、筋内pHの低下すると発揮張力が明らかに低下することが確認されている。しかし、本研究で得られた筋内 pH 値の低下は、外部圧迫が強いBFR-High条件でも 6.85 程度であり、摘出筋を使った実験のような極めて低いレベルまで低下することはなかった。したがって、本研究で観察された最大筋力の低下 (筋疲労) を筋内のエネルギー代謝にかかわる代謝産物から考察すると、筋疲労には筋内無機リン (Pi) の蓄積が強く関与している可能性が考えられた。

4 まとめ

- 筋血流量の低下は筋疲労と密接な関係を示し、筋血流量の低下に応じて筋疲労は高まった。

- 筋血流量の低下による筋疲労の要因は、無機リンの蓄積が主に関与し、筋血流量の低下によって休息時の無機リンの回復が阻害されることが示された。

5 今後の展望

本研究では、筋血流量の減少による筋疲労には主に無機リンの蓄積が関与すること、そして、その蓄積の要因として、セット間の休息期に運動で高まった無機リンがうまく回復しないことが強く関与しているものと考えられた。したがって、筋血流量が低下した状態で運動を行った時の筋疲労をできるだけ抑えるためには、運動のテンポをできるだけゆっくりにし、強い筋疲労が起こる前に長めの休息時間を確保することが有用であると考えられた。今後、これらのことを確認するためにも、運動時間やそのテンポ、セット間の休息時間などを変えた一連の実験を進めることで、活動筋への筋血流が低下した状態で行う運動時の筋疲労について、さらにその解明が進むものと期待される。

参考文献

- 1) Karabulut et.al (2009) Neuromuscular fatigue following low-intensity dynamic exercise with external applied vascular restriction. J Electromyogr Kinesiol Jul27
- 2) Ko et.al (2008) 31PMRS Spectroscopic Assessment of Muscle in Patients with Myasthenia gravis before and after Thymectomy.Radiology:volume 247:Number 1
- 3) Debold et.al (2004) Fiber type and temperature dependence of inorganic phosphate: implications for fatigue. Am J Physiol Cell Physiol 287:C673-C681
- 4) Knuth et.al (2006) Low cell pH depresses peak power in rat skeletal muscle fibers at both 30 degrees C and 15 degrees C: implications for muscle fatigue. J Physiol 575(Pt 3):887-899