

運動時の骨格筋における酸素供給配分

学位論文内容の要旨

1. 緒言

運動を持続するためには骨格筋への酸素供給が必要である。筋酸素供給量は筋血流量で決まる。この筋血流量に関して、複数の筋群が動員される運動を最大強度で行う場合には、最大で約 22 l min^{-1} が骨格筋へ配分される。しかしながら、大腿四頭筋が主に活動する膝伸展運動を最大強度で行った時の活動筋血流量は $3\text{--}4\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ にまで増加することが知られており、この値を大筋群運動時の筋血流量として当てはめると、約 7 kg の筋が動員されただけでも骨格筋全体で利用可能な血流量の最大値を超えてしまう。このため、大筋群運動時には、運動遂行上で不可欠な骨格筋への優先的な酸素供給配分が成され、その結果、ある骨格筋へ供給される酸素量は本来供給されるべき酸素量よりも低下すると仮定できる。

そこで、本研究では大筋群運動時の骨格筋の酸素供給量が低下する条件を明らかにし、この条件から大筋群運動時の酸素供給配分の調節機序を明らかにすることを目的とした。

2. 文献研究

筋交感神経活動 (MSNA) による血管収縮は、筋酸素供給量の制限因子として重要である。MSNA はある運動強度以上で亢進し始めることが知られているが、いかなる運動強度から筋酸素供給量が低下し始めるかは明らかにされていない。近年、運動時に呼吸筋活動が増加すると、体肢骨格筋に優先して酸素が呼吸筋へ配分されるので、体肢骨格筋の酸素供給量が低下することが示唆されている。そこで、本研究では、呼吸筋活動が急増する運動強度から非活動筋の酸素供給量が低下し始める可能性があることを指摘した (課題 1)。

一方、脚自転車運動に腕クランキング運動を加えるような結合運動を用いた際に、一方の筋群の運動が他方の筋群の血流量や筋酸素化レベルにどのような影響を及ぼすか検討されている。この場合、活動脚では、腕運動に伴う交感神経活動が上昇するが、同時に代謝性血管拡張作用が働くため交感神経性血管収縮作用が弱められる。代謝性血管拡張作用は活動筋の代謝率に依存して大きくなるとされるが、実際の運動では、複数ある筋群のそれぞれの代謝率は異なる。そこで、本研究では、結合運動時の活動脚の酸素供給量は、筋群毎に異なる可能性があることを指摘した (課題 2)。

本研究では、酸素供給量の変化の推定を、近赤外線分光法装置 (NIRS) で測定される筋酸素化レベルの変化から行った。これは、筋酸素化レベルは酸素供給量を直接的に表すものではないが、NIRS では筋組織内の酸素化レベルをとらえることができ、筋群別の変化を同時にとらえられるという従来の測定方法には無い利点を有するからである。

3. 実験的検証

脚ランプ負荷運動時では、心拍出量は仕事率に比例して増加するが、換気量 (\dot{V}_E) の仕事率に対する増加率は換気性作業閾値 (VT) から急増し、この増加率は呼吸性代償作用の開始点 (RCP) からよりいっそう大きくなる。この \dot{V}_E は呼吸筋の負荷量に比例して増加するので、VT または RCP からの過換気により呼吸筋への酸素供給配分が急増し、これに伴い非活動前腕筋の酸素供給量が低下するという仮説を立て、この仮説の検討を実験 I で行った。被験者は 9 名であった。非活動筋酸素化レベルは、1 名の被験者では VT の近傍より減少し始め、この減少の傾きは RCP 近傍よりさらに大きくなった。一方、8 名の被験者では RCP 近傍より筋酸素化レベルが低下し始めた。以上より、RCP からの換気亢進に伴い非活動筋の酸素供給量が低下している可能性が確かめられた。

実験 I の結果は、非活動筋酸素化レベルの低下が過換気の発生と関連して生じる可能性と、RCP に相当する高い \dot{V}_E を閾値として生じる可能性の両方を示している。そこで、実験 II では、どちらの要因に関連して非活動筋酸素化レベルが低下するのか明らかにすることを目的とした。各被験者 ($n=7$) には、6 分間の 2 段階増加型運動を行わせた。この運動の前半 3 分間は VT および RCP の中間に相当する運動強度であり、後半 3 分間は RCP および最高酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2peak}$) の中間に相当する運動強度であった。1 段階中に非活動筋酸素化レベルは低下した。この結果は、非活動筋酸素化レベルの低下が、RCP に相当する \dot{V}_E より低い場合でも生じることを示している。実験 II では、2 段階負荷運動時の過換気量 ($\dot{V}_{E_{hyper}}$) を求めた。 $\dot{V}_{E_{hyper}}$ は、脚ランプ負荷運動時の VT 以前の $\dot{V}O_2$ - \dot{V}_E 関係から予測される \dot{V}_E と 2 段階負荷運動で実際に得られた \dot{V}_E の差分とした。この $\dot{V}_{E_{hyper}}$ と非活動筋酸素化レベルの変化量には、全被験者において有意な負の相関関係が認められた。以上より、過換気量の大きさに応じて非活動体肢骨格筋の酸素供給量は低下することが示唆された。

実験 III では、高強度腕運動の付加が活動脚の酸素供給量に及ぼす影響を検討した。各被験者 ($n=8$) は、はじめに脚運動の 40% $\dot{V}O_{2peak}$ に相当する脚自転車運動 (LC₄₀) を 10 分間行った。その後、腕運動の 60% $\dot{V}O_{2peak}$ に相当する腕クランピング運動 (AC₆₀) を脚自転車運動に加えた。この結合運動 (LC₄₀AC₆₀) は 6 分間行った。また、同様の手順で、強度が 20% $\dot{V}O_{2peak}$ に相当する脚自転車運動 (LC₂₀) に AC₆₀ を加えた結合運動 (LC₂₀AC₆₀) も行った。LC₂₀AC₆₀ 時では、外側広筋および腓腹筋外側部ともに筋酸素化レベルが低下した。一方、LC₄₀AC₆₀ 時では腓腹筋外側部のみで筋酸素化レベルが低下した。外側広筋の筋活動レベルは LC₂₀AC₆₀ よりも LC₄₀AC₆₀ において増加したが、腓腹筋外側部の筋活動レベルは LC₂₀AC₆₀ および LC₄₀AC₆₀ の間で差が無かった。したがって、中強度脚運動に高強度腕運動を加えた際の脚活動筋への酸素供給量の変化は、脚運動に参画する個々の筋群の活動レベルに応じて異なり、筋活動レベルが低い場合には高強度腕運動付加後に酸素供給量が低下することが示唆された。

4. 運動時の骨格筋における酸素供給配分の調節機序

近年、呼吸筋への酸素供給配分は体肢骨格筋に優先して行われ、これは呼吸筋が生命維持に大きく関わる肺換気を支援する部位であるために生じるのであろうと考えられている。本研究では、実験 I および II において、過換気量の大きさに応じて非活動体肢骨格筋の酸素化レベルが低下することを明らかにした。この結果は、過換気に伴う呼吸筋への酸素供給配分の増加で、非活動体肢骨格筋の酸素供給配分が低下することを示唆する。

一方、運動の推進力を生み出す上では体肢骨格筋への酸素供給配分の低下は不利である。実験 III では、高強度運動時に生じる体肢骨格筋の酸素供給配分の低下が、筋活動レベルの高い筋群で抑制され

ることが示唆された。この示唆は同時に、運動の推進力を生むために重要な筋群ほど酸素供給配分が維持されることを意味するものである。

5. 結論

高強度運動 (換気性作業閾値以上) では、過換気量の大きさに応じて非活動体肢骨格筋の酸素供給配分は低下する。ただし、酸素供給配分の低下は活動筋では抑制され、その抑制の度合いは活動筋の個々の筋活動レベルが大きいほど増す。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 矢 野 徳 郎

副 査 教 授 河 口 明 人

副 査 助 教 授 山 田 憲 政

副 査 教 授 齊 藤 満 (豊田工業大学)

学 位 論 文 題 名

運動時の骨格筋における酸素供給配分

活動筋への酸素供給量は、低強度の運動では心拍出量の増加によってまかなわれる。高強度の運動時の活動筋では血管抵抗が低下する。したがって、活動筋への酸素供給量は心拍出量の増加分に影響されるばかりでなく、酸素供給配分の増加分にも影響される。非活動筋への酸素供給量は低強度運動時では変わらない。高強度運動時の非活動筋では血管抵抗が増すので、酸素供給配分が低下する。しかし、これらを成立させている生理的条件は大筋群運動時では未だ十分には明らかにされていない。そこで、本研究ではこの生理的条件を明らかにすることによって、運動時の酸素供給配分に関連する機構を三つの実験から検討している。

第1の実験では、漸増運動負荷時の非活動筋の酸素供給の減少が肺換気に関連するかを検討している (J. Physiol. Anthropol. Appl. Human. Sci. 23: 7-17, 2004)。心拍出量は負荷量の増加に応じて比例的に増加する。肺換気量は負荷に比例して増加するが、換氣的閾値以上では指数関数的に増加(過換気)する。この過換気は呼吸筋への過剰な酸素供給を要求する。このために、心拍出量の増加に伴う酸素供給の増加のみでは、呼吸筋の過剰な酸素要求を満たすことが出来ない。そこで、非活動筋の酸素供給を減少させることによって、換氣的閾値から呼吸筋への酸素供給を増やすと考えられる。この仮説を検証している。しかし、本実験では非活動筋の酸素供給の減少が換氣的閾値より高い運動強度である呼吸性代償作用の開始点から始まることを示した。したがって、非活動筋の酸素供給の減少は過換気に関連して起きていると断定できなかった。ただし、このことは、負荷のかけ方が悪かったことから生じていると考えられたので、次に負荷法を変えた実験を行った。

実験2では、換氣的閾値以上の定常運動負荷を用いて、非活動筋の酸素供給の減少が呼吸機能に依存しているのかを検討している(第52回日本生理人類学会発表奨励

賞)。漸増運動負荷時の換氣的閾値以下の酸素摂取量と肺換気量との関係を回帰直線として求め、その直線から変位する肺換気量を過換気量として定義した。そして、定常運動負荷時の過換気量を求めた。その結果、過換気は定常負荷時の運動初期時にはないが、その後に表れることを示した。また、非活動筋の酸素供給の低下は運動初期時には表れないが、その後の負荷時に表れることを示した。このように、非活動筋の酸素供給動態と過換気量とは鏡像的關係であった。したがって、両調節の背景には互いに共通する機構があることが示唆された。これは、従来にはなかった知見である。

第3実験では、下肢の軽運動時(定常運動負荷)の酸素供給動態が上肢の高強度運動(定常運動負荷)を付加した場合に影響されるか否かを検討している (J. Sports Med. Phys. Fitness, Accepted, 2004)。上肢で高強度運動を行うと非活動下肢の酸素供給が減少するが、下肢で軽運動を行うとその減少が抑制される。これは、活動筋で生成される代謝物質によると考えられている。しかし、下肢の運動ではその運動に貢献する量が各筋群で異なるので、代謝物質の生成量も各筋群で異なるはずである。この代謝の差が下肢の筋の酸素供給動態の相違となるのではないかと考えられる。この仮説を検証するために、運動強度の異なる下肢運動を2種類行っている。その結果、大腿の外側広筋では、下肢運動の運動強度の高い時には筋活動量が高くなった。下腿の腓腹筋では、2種類の下肢運動の運動強度が異なっているにもかかわらず、筋活動量は等しかった。下腿の腓腹筋の酸素供給量は上肢の高強度運動が加わると2種類の下肢運動時で共に低下した。大腿の外側広筋の酸素供給は下肢の運動強度が低い時には低下したが、下肢の運動強度が高い時には低下が認められなかった。これらの結果は酸素供給抑制効果が筋群毎に異なり、その調節は筋の活動強度に強く影響されていることを示している。従来は脚全体の血流量を測定する方法を用いていたので、各筋群の差異は検討できなかった。本研究では組織の酸素動態を測定することから酸素供給動態を検討したので、各筋群の差異が明らかとなった。この意味で実験3の成果は高く評価できる。

以上の実験から本研究では次の二つの結論を得た。1) 非活動筋での酸素供給の減少が過換気と関係して起きていること、2) この酸素供給の減少は活動筋で抑制され、この抑制が活動筋群の活動水準で異なることである。これらは全身運動時における複数筋群への酸素供給配分を考える上で貴重な知見である。

よって著者は、北海道大学博士(教育学)の学位を授与される資格があるものと認める。