

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700606

研究課題名(和文) 高強度運動時の努力感が過呼吸を引き起こすメカニズム

研究課題名(英文) Mechanism of the effort-induced hyperventilation during intense exercise

研究代表者

柚木 孝敬 (YUNOKI, TAKAHIRO)

北海道大学・教育学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00352500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：高強度運動(IE)時の努力感増加が過呼吸を誘発するメカニズムを検討した。筋グリコーゲン操作および筋電図解析により、努力感増加時には活動筋への運動指令が低下するが、努力感増加の抑制によって運動指令の低下が抑制されることが示された。このことから、努力感誘発性過呼吸には一次運動野興奮性の低下が関連している可能性が示唆された。その関連性を経頭蓋磁気刺激法を用いて検討したが、上記仮説を実証するに至らなかった。一方、呼吸努力を伴う呼吸によって活動筋の皮質脊髄路興奮性が増加したことから、IE時の過呼吸は恒常性維持機構とは異なるメカニズムで筋活動を支える役割を有している可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：This study determined the mechanism of the effort-induced hyperventilation during intense exercise (IE). Integrated EMG (iEMG) in the active muscle (AM) decreases during IE with reduced muscle glycogen. The first experiment showed that the iEMG decrement was suppressed by carbohydrate supplementation, indicating that the central command (CC) to the AM is decreased when effort sense is increased, while the CC decrement is suppressed when the increase in effort sense is avoided. Thus, this suggests the possibility that the effort-induced hyperventilation is associated with decrease in excitability of the primary motor cortex. Although this association was determined by using TMS, further analysis was needed to verify the above hypothesis. The last experiment showed that ventilation with breathing effort augments the corticospinal excitability of AM, suggesting that hyperventilation during IE have a role of supporting muscle activity by a mechanism differing from a homeostatic mechanism.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・身体教育学

キーワード：運動 呼吸

1. 研究開始当初の背景

高強度運動時に生じる呼吸の亢進 (= 過呼吸) は、pH の低下を抑える (= pH 恒常性を維持する) ための生理的反応であり、自動調節系 (化学性・神経性呼吸調節) によって無意識的・反射的に制御されていると考えられてきた。しかしながら申請者は最近、運動負荷の変化に対する気づき¹⁾や疲労認識²⁾といった意識的知覚 (conscious perception) が呼吸による pH 恒常性維持に貢献している可能性を報告し、さらに高強度運動時の過呼吸が、従来から想定されてきた「pH 低下 化学受容器反射」の結果ではなく、運動に伴う脚努力感 (conscious perception of effort) に強く依存していることを明らかにした^{3) 4)}。

自動性呼吸調節による無意識的・反射的な pH 恒常性維持が合理的な作用であることは間違いなさであろう。しかしながら筋グリコーゲン枯渇時に高強度運動を行う場合、運動時の pH 低下が減弱することが報告されており、そのような状況で pH 低下に対する化学受容器反射のみで呼吸を調節することは、運動強度に対応した呼吸応答を得られないことにつながってしまう。したがって、申請者が明らかにした「過呼吸の努力感に対する依存性」は、努力感のような認知プロセスが呼吸調節機構に統合されることによって、冗長的に pH 恒常性維持が図られていることを示唆するものである。申請者³⁾は、筋グリコーゲンの枯渇を段階的に進めるプロトコル (「段階的グリコーゲン枯渇プロトコル」) を実行し、筋グリコーゲン減少後の高強度運動時には血中 pH の低下が減弱されるものの、脚努力感の増強に応じて過呼吸が増大することを実際に確認した。さらに、筋グリコーゲン減少後の高強度運動時には活動筋 (外側広筋) において速筋線維の動員が相対的に増加していることを筋電図平均周波数 (MPF) の分析から推測した。この速筋線維の動員が「過呼吸の努力感に対する依存性」に関与している可能性はあるが、この因果関係についてはまだ明らかではない。また、一般的に努力感は大脳皮質の一次運動野で形成される運動指令 (セントラルコマンド) に由来すると信じられている。したがって、「過呼吸の努力感に対する依存性」は、従来から議論されているセントラルコマンドによる呼吸の誘発が顕在化したただけであるとも考えられる。この点に関しては、上記先行研究³⁾において、セントラルコマンドの指標とされる積分筋電図 (iEMG) が過呼吸の増大とは逆に低下したことから否定的に捉えられているが、より厳格な検討が必要であると考えられた。すなわち、運動時に誘発される過呼吸がセントラルコマンドと独立した事象であるのか否か、換言すると、過呼吸を誘発する努力感の増加と一次運動野の興奮性との関係性、をより直接的に明らかにすることが重要であると考えられた。

(文献) 1) *Respir Physiol Neurobiol*

169:69-73, 2009. 2) *Eur J Appl Physiol* 111:1769-1775, 2011. 3) *Eur J Appl Physiol* 112:2149-2162, 2012. 4) *J Phys Fitness Sports Med* 1:357-362, 2012.

2. 研究の目的

申請者はこれまでに、高強度運動時の過呼吸が努力感に強く依存しており、そこには速筋線維の動員が関与している可能性を示した。しかしその因果関係については明らかにされておらず、また、高強度運動時の過呼吸がセントラルコマンド (一次運動野) と独立した事象である可能性も浮上した。したがって、本研究では、努力感と過呼吸の関係をさらに直接的かつ明確に検証するために、3つの実験を行った。

(1) 申請者の上記先行研究³⁾とは逆に、筋グリコーゲン減少に伴う速筋線維動員の増加を糖質補給によって抑制した時に脚努力感と呼吸量の段階的な増大が抑制されるか否かを調べ、速筋線維動員と努力感および過呼吸の間の因果関係を明らかにすることを目的とした (実験 1)。

(2) 上記先行研究³⁾では、セントラルコマンドの間接的な指標である積分筋電図 (iEMG) が脚努力感の増大に呼応する形で低下した。これは一次運動野の興奮性が低下していたと同時に、より高次の中枢が努力感の生成に関与している可能性を示唆する。そこで、「段階的グリコーゲン枯渇プロトコル」における複数回の高強度運動時に、活動筋を支配する一次運動野の興奮性が段階的に低下していくか否かを経頭蓋磁気刺激 (TMS) 法を用いることで調べ、過呼吸を誘発する努力感の増加と一次運動野興奮性との関係を明らかにすることを目的とした (実験 2)。

(3) 高強度運動時の過呼吸が、化学性因子や神経性因子とは独立的に、努力感と関連して生じるという事実は、高強度運動時の過呼吸が必ずしも恒常性維持のみのために生じているのではない可能性を示唆する。過呼吸、すなわち、呼吸活動の増加が、恒常性維持とは異なる形で高強度運動を担う下肢筋の活動をサポートしているのかもしれない。したがって、随意的な過呼吸が活動肢の皮質脊髄路興奮性に及ぼす影響を検討した (実験 3)。

3. 研究の方法

実験 1 (図 1 参照)

被験者は健康な成人男性 7 名であり、高強度の脚ペダリング運動 (最大酸素摂取量の約 100%、2 分、60 rpm) を 3 回繰り返した。2 回目および 3 回目の高強度運動開始前に、筋中グリコーゲンを枯渇させる目的で中強度運動 (最大酸素摂取量の約 50%、40 分、60 rpm) を行い、その後は十分な回復 (60 分) をとった。その間 (100 分) 糖質 (マルトデキストリン、1g/体重 1kg) の経口摂取を 20 分間隔

で計 5 回実施した。

実験 2 (図 2 参照)

被験者は健康な成人男性 7 名であり、高強度の脚ペダリング運動 (最大酸素摂取量の約 75%、3 分、60 rpm) を 2 回繰り返した。2 回目の高強度運動開始前に、筋グリコーゲンを低下させる目的で中強度運動 (最大酸素摂取量の約 50%、45 分、60 rpm) を行い、その後は十分な回復 (60 分) をとった。高強度運動中は 10 秒毎に (計 18 回) の経頭蓋磁気刺激 (TMS) を大脳皮質一次運動野の下肢領域に対して行い、外側広筋から表面筋電図により運動誘発電位 (MEP) を評価した。

実験 3 (図 3 参照)

被験者は健康な成人男性 5 名であり、右脚による等尺性膝伸展運動を最大随意収縮力 (MVC) の 10% で行った。図 3 に示されたように、膝伸展運動は 5 秒とし、その間に、自然呼吸、努力吸気、努力呼気のいずれかを行った。それぞれの呼吸のタイミングに合わせて、一次運動野下肢領域に対して経頭蓋磁気刺激 (TMS) を行い、外側広筋において運動誘発電位 (MEP) を評価した。各呼吸条件につき 7 回の膝伸展運動を行った。

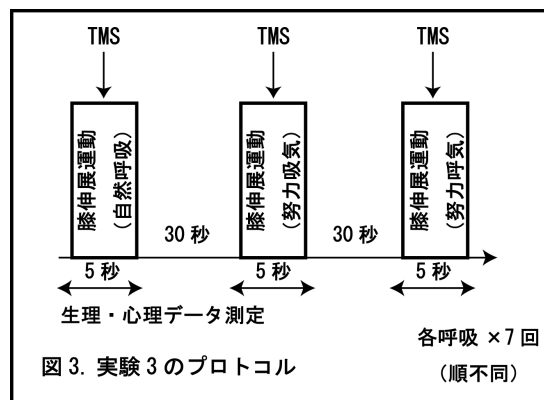
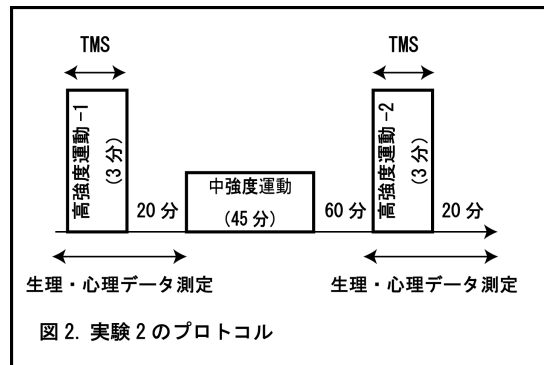
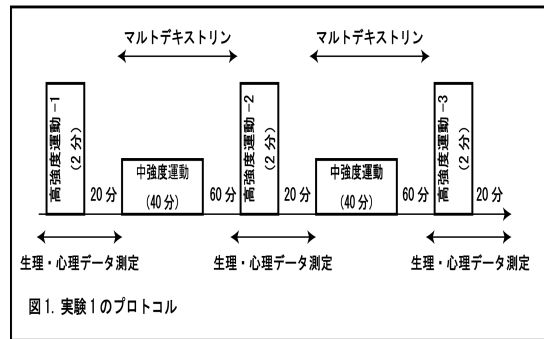
4. 研究成果

実験 1 (図 1 参照)

3 回の高強度運動時における、血中 pH および血中乳酸濃度に有意差は認められなかった。これは、糖質補給により筋グリコーゲンの枯渇が抑制された結果であると考えられる。外側広筋で評価された筋電図平均周波数 (MPF) に有意差は認められなかったことから、高強度運動の反復による速筋線維動員の増加³⁾が糖質補給によって抑制されたと考えられる。脚努力感および換気量にも 3 条件間の差が認められなかった。これらの結果は、高強度運動時の努力感誘発性過呼吸には速筋線維動員が関連している可能性を示唆する。一方、積分筋電図 (iEMG) は、1 回目の運動時に比べて 2 回目まで有意に低下したが、3 回目の値は 1 回目の値と有意差を示さなかった。すなわち、筋グリコーゲン減少時には iEMG が段階的に低下したが³⁾、筋グリコーゲン減少を糖質補給によって回避することによって iEMG の低下が抑制され、脚努力感および過呼吸の増加も抑制されることが確認された。つまり、努力感増加時には活動筋へのセントラルコマンドが低下し、努力感増加の抑制時にはセントラルコマンドの低下が抑制される可能性が示唆された。これらの結果から、努力感誘発性過呼吸には大脳皮質一次運動野興奮性の低下が関連している可能性が推測された。

実験 2 (図 2 参照)

実験 1 で示唆された努力感誘発性過呼吸



と一次運動野興奮性の関連性を確かめるために、経頭蓋磁気刺激法 (TMS) を用いた。外側広筋の皮質脊髄路興奮性を反映する運動誘発電位 (MEP) は 8 名中 7 名において、1 回目の高強度運動時に比べて 2 回目において低い値を示した。しかしながら、予想していたこの MEP の低下に対応した脚努力感の増加および過呼吸の増加は、必ずしも全員で確認されるに至らなかった。したがって、上記仮説を実証するにはさらに詳細な分析が必要であると考えられた。

実験 3 (図 3 参照)

自然呼吸条件に比べて、努力吸気条件と努力呼気条件の運動誘発電位 (MEP) が有意に高い値であった。後者の 2 条件間に MEP の差は認められなかった。また、呼吸努力感と MEP の間に有意な相関関係が認められた。これらの結果から、呼吸努力感を伴う呼吸は、活動筋の皮質脊髄路興奮性を高めることが示唆された。

以上の3つの実験で得られた結果から、高強度運動時の過呼吸には皮質脊髄路興奮性の低下を補うような努力感の生成メカニズムが関与している可能性が推測された。また、高強度運動時の過呼吸は恒常性維持とは異なるメカニズムで筋活動を支える役割を有している可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計2件)

Yunoki T, Lian CS, Afroundeh R, Shirakawa K, Yamanaka R, Yano T. Effects of carbohydrate supplementation on ventilatory response during repetitive intense exercise. The 18th Annual Congress of the European College of Sport Science (National Institute of Physical Education of Catalonia, Barcelona), 26-29 June 2013

白川和希, 柚木孝敬, 松浦亮太, 大塚吉則, 連長順, アフルンデ・ロガイエ, 矢野徳郎. 随意呼吸によって膝伸展筋の皮質脊髄路興奮性は増大する. 第69回日本生理人類学会大会(同志社大学京田辺キャンパス, 京都), 2013年10月27日

6. 研究組織

(1)研究代表者

柚木 孝敬 (YUNOKI TAKAHIRO)

北海道大学大学院・教育学研究院・准教授

研究者番号: 00352500