

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24770236

研究課題名(和文)呼吸速度または一回換気量の制御が運動開始時の酸素摂取動態に及ぼす影響の解明

研究課題名(英文)Effects of respiratory rate or tidal volume on oxygen uptake kinetics at onset of exercise

研究代表者

齊藤 直(Saitoh, Tadashi)

山形大学・理工学研究科・助教

研究者番号：20454770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、呼吸性アルカローシスを誘導する過呼吸を引き出す方法の違いが、呼吸性アルカローシス環境下における運動開始時の酸素摂取応答速度にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることであった。結果として、呼吸性アルカローシスの誘導法の違いにより、運動開始時における酸素摂取量の時定数に違いが生じることが示された。この違いには、呼吸性アルカローシスによる血中のpH及び重炭酸イオン濃度の変化、及び運動開始時における乳酸の産生が関与している可能性が考えられた。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to clarify the effects of respiratory alkalosis induction on the kinetics of oxygen uptake at the onset of cycling exercise. We observed a difference in the time constant of oxygen uptake between the methods of respiratory alkalosis induction. It was considered that this difference was in relation to the changes in pH and concentration of bicarbonate ion in blood and the production of nitric acid during exercise.

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：人類学・応用人類学

キーワード：生体・適応 呼吸性アルカローシス 酸素摂取動態

1. 研究開始当初の背景

運動時における肺酸素摂取量の動態は、有酸素性エネルギー代謝によって筋細胞へエネルギー（アデノシン三リン酸）が供給される様子を反映している。また、近赤外分光法により測定される酸素化及び脱酸素化ヘモグロビン濃度変化は、局所的な筋組織における酸素取り込みの様子を反映している。これまでに、これらの指標を用いて解析を行ない、全身の酸素摂取動態や活動筋の酸素取り込みの運動に対する調節メカニズムの解明が目指されてきた。

呼吸速度の増加や呼吸深度の増加により換気量が増加すると呼気終末二酸化炭素分圧が減少して血液 pH が増加する、いわゆる呼吸性アルカローシスが生じる。呼吸性アルカローシスになると、血液 pH のホメオスタシスを維持するため、腎性代謝による重炭酸イオン濃度の減少などの生体現象が起こる。

血液 pH の変化は有酸素性エネルギー代謝や乳酸系エネルギー代謝の活性度に影響を及ぼすことが知られている。しかしながら、呼吸性アルカローシスと運動時の酸素摂取動態との関係に関しては、幾つか研究報告が為されているものの、その詳細に関しては未だ不明な点が残っている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、呼吸性アルカローシスを誘導する過呼吸を引き出す方法の違いが、呼吸性アルカローシス状態下における運動開始時の酸素摂取応答速度にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることであった。

3. 研究の方法

被験者は健康な成人男性 9 名(年齢: 21.7 ± 0.8 歳、身長: 170.6 ± 5.4 cm、体重: 64.9 ± 9.6 kg)であった。被験者は、まず、自転車エルゴメータを使用して漸増負荷運動試験(ペダリング回転数: 60 回/分)を行ない、被験者ごとの最大酸素摂取量と無酸素性作業閾値(anaerobic threshold: AT)を測定した。漸増負荷運動試験のプロトコルは、安静 1 分、10 W でのベースライン運動 4 分の後、20 ~ 35 W/min での漸増負荷運動を回転数 60 回/分の自転車運動を継続できる限界まで行ない(約 10 分)その後 5 W での整理運動を 6 分行なうものであった。本研究では、漸増負荷運動が終了した時点での酸素摂取量を最大酸素摂取量とした。また、無酸素性作業閾値は、漸増負荷運動時の酸素摂取量増加に対する二酸化炭素排出量増加の割合が上方に変化する点から求めた。

漸増負荷運動試験から数日後、被験者は低強度(AT-Δ40%)、中強度(AT)、あるいは高強度(AT+Δ40%)負荷を主運動負荷強度としたステップ運動負荷試験を、自転車エルゴメータを使用して行なった。ここで、中強

度負荷は AT 時の酸素摂取量となるような運動負荷強度である。低強度負荷はベースライン運動時の酸素摂取量を 0%、AT 時の酸素摂取量を 100%とした時の 40%に当たる酸素摂取量となるような運動負荷強度である。また、高強度負荷は AT 時の酸素摂取量を 0%、最大酸素摂取量を 100%とした時の 40%に当たる酸素摂取量となるような運動負荷強度である。ステップ運動負荷試験のプロトコルは、安静 1 分、10 W でのベースライン運動 4 分、主運動 6 分、10 W での整理運動 6 分であった。ステップ運動負荷試験中、被験者は呼吸速度を 20、30、あるいは 60 回/分に維持した。また、自転車運動時において、被験者はペダリング回転数を 60 回/分に維持した。ステップ運動負荷試験中、呼吸代謝、心拍数、外側広筋の酸素化・脱酸素化ヘモグロビン濃度変化が連続的に測定された。ステップ運動負荷試験において、同一プロトコルでの測定を各被験者 2 回ずつ実施し、2 回の時系列データを平均したデータを 1 被験者のデータとした。

主運動開始時の酸素摂取応答を解析するために、主運動中の酸素摂取量及び主運動開始 90 秒までの脱酸素化ヘモグロビン濃度変化のデータに対して kinetics 解析を行なった。ここで、高強度負荷運動時の酸素摂取量データに対しては式(1)を採用し、その他のデータに対しては式(2)を採用した。

$$F(t)=BL+A_1[1-e^{-(t-TD_1)/\tau_1}]+A_2[1-e^{-(t-TD_2)/\tau_2}] \quad (1)$$

$$F(t)=BL+A[1-e^{-(t-TD)/\tau}] \quad (2)$$

ここで、BL は主運動開始直前 30 秒間のベースラインの平均値、A は振幅、TD は遅延時間、 τ は時定数を表わす。

4. 研究成果

本研究の結果、呼吸速度 60 回/分の安静時及びベースライン運動時において有意な換気量の増加と呼気終末二酸化炭素分圧の減少が認められた。ヘンダーソン・ハッセルバルヒの式に本研究の結果を当てはめると、呼吸速度 60 回/分における安静時の血液 pH は 7.64 となり(通常の血液 pH は約 7.4)、明らかな呼吸性アルカローシスが確認された。一方、呼吸速度 20 回/分における安静時の血液 pH は 7.48 であり、血液 pH のホメオスタシスがほぼ維持されていた。

酸素摂取量に対する kinetics 解析より、運動負荷強度に関わらず、呼吸速度が速くなるほど遅延時間は大きくなり、時定数は小さくなるという結果が得られた。これらの結果より、本研究における呼吸性アルカローシス環境下での自転車運動時には以下のような現象が生じた可能性が考えられる。

(1) ベースライン運動時において、呼吸性ア

ルカローシスによる血液 pH の増大は筋細胞内の pH の増大を引き起こし、その結果、筋細胞内のピルビン酸脱水素酵素活性を抑制する。また、血液 pH の増大はヘモグロビン酸素解離曲線を左方へシフトし、細胞への酸素供給能を低下させる。従って、主運動開始直後では活動筋のエネルギー需要に対する有酸素性エネルギー代謝によるエネルギー供給の割合が減少し、乳酸系エネルギー代謝によるエネルギー供給の割合が増加したため、呼吸速度が速くなるほど酸素摂取量の遅延時間が大きくなった可能性が示唆される。

(2) 呼吸速度が速くなると、 のメカニズムにより、呼吸速度が遅い場合と比較して主運動開始直後において乳酸系エネルギー代謝がより促進され、その結果、筋細胞内の乳酸濃度が上昇し、細胞内の水素イオン濃度が上昇する可能性がある。呼吸性アルカローシスの環境下では腎性代償により重炭酸イオン濃度が減少するため、通常よりも水素イオンの緩衝能が低下している。従って、呼吸速度が速いと、主運動開始直後において水素イオン濃度の上昇度が、呼吸速度が遅い場合よりも大きくなると考えられる。筋細胞内水素イオン濃度の上昇、つまり細胞内 pH の減少はヘモグロビン酸素解離曲線の右方シフトを生じさせ、細胞への酸素供給能を上昇させる。また、呼吸性アルカローシス環境下における細胞内 pH からの pH 減少はピルビン酸脱水素酵素活性を促進させ、有酸素性エネルギー代謝を有利にする。以上のメカニズムにより、呼吸速度が速くなるほど酸素摂取量の時定数が小さくなった可能性が示唆される。

本研究では、被験者に対して呼吸速度以外は制限を設けなかった。その結果、呼吸速度の違いによる呼気終末二酸化炭素分圧の差異は安静時とベースライン運動時のみ現われ、主運動時には呼気終末二酸化炭素分圧において有意差は認められなかった。このことが、前述した、 の現象を引き起こした重要な要因であると考えられる。従って、呼吸性アルカローシスと運動時の酸素摂取動態との関係を詳細に解明するためには、更に細かい条件設定によるデータの蓄積が必要であると思われる。

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)

[雑誌論文](計 4 件)

K. Niizeki, T. Saitoh. Cardiocomotor phase synchronization during rhythmic exercise. The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine 3: 11-20, 2014. 査読有

H. Kobayashi, J. Yanai, K. Niizeki, T. Saitoh. Effects of a respiratory rate on phase II pulmonary oxygen uptake kinetics during exercise. Proceedings of Life Engineering Symposium 2013: 197-198, 2013. 査読無

T. Saitoh, K. Niizeki. Effect of hyperventilation on oxygen uptake kinetics during cycling exercise. Proceeding of 27th Symposium on Biological and Physiological Engineering: 461-462, 2012. 査読無

K. Niizeki, S. Kusakabe, M. Onodera, K. Kouhata, T. Saitoh. Effects of cardiocomotor coupling on gas exchange efficiency and energy metabolism. Proceeding of 27th Symposium on Biological and Physiological Engineering: 280-284, 2012. 査読無

[学会発表](計 7 件)

H. Kobayashi, J. Yanai, K. Niizeki, T. Saitoh. Effects of a respiratory rate on phase II pulmonary oxygen uptake kinetics during exercise. ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2013. 2013/9/12-14. 慶応義塾大学 日吉キャンパス, 神奈川.

T. Saitoh, H. Kobayashi, J. Yanai, R. Nomura, H. Tsutsui, H. Takana, K. Niizeki. Effect of a controlled respiratory rate on oxygen uptake kinetics during cycling exercise. The 37th Congress of the International Union of Physiological Science. 2013/07/21-26. International Convention Centre, Birmingham, UK.

T. Saitoh, K. Niizeki. Comparison of oxygen utilization during magnetic muscle stimulation with that during handgrip exercise. The 60th Annual Meeting of the American College of Sports Medicine. 2013/5/29-6/1. Indiana Convention Center, Indianapolis, Indiana, USA.

K. Niizeki, M. Onodera, K. Kouhata, T. Saitoh. Effect of work rate on oscillations of respiratory sinus arrhythmia during submaximal graded exercise. 第 90 回 日本生理学会大会. 2013/3/27-29. タワーホール船堀, 東京.

T. Saitoh, K. Niizeki. Effect of hyperventilation on oxygen uptake kinetics during cycling exercise. 第27回 生体・生理工学シンポジウム. 2012/9/19-21. 北海道大学 学術交流会館, 北海道.

K. Niizeki, S. Kusakabe, M. Onodera, K. Kouhata, T. Saitoh. Effects of cardiocomotor coupling on gas exchange efficiency and energy metabolism. 第27回 生体・生理工学シンポジウム. 2012/9/19-21. 北海道大学 学術交流会館, 北海道.

齊藤 直, 新関 久一. 受動的筋収縮時における収縮筋酸素摂取動態. 第67回日本体力医学会大会. 2012/9/14-16. 長良川国際会議場・岐阜都ホテル, 岐阜.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 直 (SAITOH, TADASHI)
山形大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：20454770