

低酸素環境の運動時エネルギー代謝への影響
—血中 pH と血中乳酸濃度の変化—

松村嘉則*, 原田健**, 塚中敦子**, 松井信夫***

Influence of Hypoxic Environment on the Energy Metabolism During Exercise
— Changes in Blood pH and Lactate Concentration —

Yoshinori MATSUMURA, Takeshi HARADA, Atsuko TSUKANAKA
and Nobuo MATSUI.

Abstract

Since it was found that metabolic alkalosis induced by sodium bicarbonate ingestion enhances lactate diffusion from muscle, we attempted to examine the effect of an hypoxic environment which causes respiratory alkalosis on the changes in blood pH and lactate accumulation by high intensity exercise.

Six young male adult were employed. Each subject performed 3 exercise tests (Max, Hypoxia and Submax) on a bicycle ergometer. In the Max test, subjects performed incremental exercise until exhaustion under air. In the Hypoxia test, a similar test was carried out under low oxygen gas. In the Submax test, the work load was the same as in the Hypoxia test but under air. Blood sample were obtained before, immediately after and at 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20 and 30 min. after exercise. In the Hypoxia test subjects breathed 12% oxygen gas from 60min. before exercise until 30min. after exercise and additional samples were obtained before exercise.

Mean power output in the Hypoxia test and Submax test was about 67% of the Max test. In the Max test, blood pH rapidly fell after exercise and rose towards the initial level thereafter, but it did not reach the initial level 30 min. after exercise. In the Hypoxia test, blood pH elevated slightly by breathing low oxygen gas before exercise, but fell sharply by exercise and returned to the pre-exercise level 30min. after exercise. In the Submax test, the fall and its recovery were slower than in the other tests. Plasma lactate concentration rose after exercise and fell thereafter similarly in both Max and Hypoxia tests without significant differences at any point. Changes in the Submax test were far less than in the other 2. Blood bicar-

* 研究生, ** 大学院生, *** 教授

bonate ion concentration declined significantly by exercise and elevated thereafter in each test, though changes in the Submax test were much smaller than in the other 2. In the Hypoxia test, bicarbonate concentration elevated before exercise and pre-exercise value and the value immediately after exercise were significantly higher than those in Max test. Difference of bicarbonate ion before and after exercise i.e., Δ bicarbonate, tended to be greater in Hypoxia test than in the Max test, indicating greater H^+ efflux in the Hypoxia test. From these results, it may be concluded that under 12% oxygen inhalation maximal power output decreased to 67% of that under air, yet almost a similar blood lactate concentration was reached by this lessened exercise; moreover, recovery from exercise-induced metabolic acidosis is facilitated by respiratory alkalosis due to low oxygen inhalation.

目的

我々は、重曹投与により代謝性アルカローシスを引き起こさせた状態で漸増負荷運動を行わせると血中乳酸の急上昇する所謂ブレイクポイントが低下することを報告し、この乳酸のブレイクポイントの低下に細胞外 pH の上昇による乳酸の細胞外への拡散の促進が関与することを示唆した¹⁾。

高所のような低酸素環境に暴露されると呼吸性の代償作用として過換気が起こる。この過換気により CO_2 が低下するため血液 pH が上昇する。即ち、呼吸性アルカローシスが引き起こされる²⁾。それ故、低酸素環境下でも運動負荷時の代謝に変化が起こることが推定される。また、低酸素環境下の運動では単に酸-塩基平衡の変化のみならず、酸素の利用度の低下がエネルギー産生系を好氣的代謝から嫌氣的代謝へシフトさせることが考えられ³⁾、代謝に対する影響は重曹投与による場合より一層複雑である。

McLella らは高所に馴化していない低地住民の高所における運動時の血中乳酸の変化は、等しい相対強度の運動を負荷すると海面レベルと変わらないことを報告している⁴⁾。しかしながら、先述のごとく乳酸代謝は血液 pH の影響を強く受けるので低酸素環境での運動時の血中乳酸の変動に呼吸性アルカローシスの影響がないとは考えにくい。

そこで本研究では、低酸素ガス吸入による低酸素暴露下で運動を負荷して起こる血液 pH と血漿乳酸濃度の変化を常酸素環境下での変化と

比較して、低酸素環境の影響を明らかにすることを目的とした。

方法

被験者は健康な成人男子 6 名 (年齢: 23.33 \pm 1.03 歳, 身長: 172.5 \pm 2.4cm, 体重: 66.8 \pm 4.4kg) であった。実験は低酸素混合ガスを吸入させ、疲労困憊まで運動をさせる実験 (Hypoxia 実験), 人工気候室内の空気を吸入させ疲労困憊まで運動させる実験 (Max 実験), 人工気候室内の空気を吸入させ, Hypoxia 実験と同じ仕事量を行わせる実験 (Submax 実験) の 3 回の実験を同一被験者にそれぞれ異なった日に行わせた。低酸素混合ガスは O_2 : 約 12%, CO_2 : 約 0.03%, N_2 バランスの混合ガスを使用した。

運動は、自転車エルゴメーターを用い、自転車漕ぎ運動を漸増負荷で行わせた。Hypoxia 実験では、運動開始 60 分前から運動終了 30 分後までダグラスバッグに詰めた低酸素ガスを蛇管からマスクを介して吸入させ、運動負荷は漸増負荷で疲労困憊まで行った。Max 実験は室内空気吸入下で漸増負荷運動を疲労困憊まで行わせ、Submax 実験は、室内空気吸入下で漸増負荷運動を Hypoxia 実験と同じ仕事量だけ行わせた。

採血は運動開始前、運動終了直後、運動終了後 1 分、3 分、5 分、7 分、10 分、15 分、20 分、30 分に行った。Hypoxia 実験ではこのほかに低酸素混合ガス吸入前、吸入開始 10 分、20 分、30 分、40 分、50 分、60 分にも採血した。

測定項目は、血液 pH、血漿乳酸、血液 HCO_3^- 、心拍数であった。なお被験者の安全を確保するために酸素飽和度、心拍数を連続的にモニターした。

今回、運動終了後の回復過程を比較するために、運動後の最低値もしくは最高値から運動終了 30 分後までの変化量を変化に要した時間で割ったものを回復速度として表した。

統計

血液 pH、血漿乳酸、血液 HCO_3^- 、心拍数は、各実験間で差があるかどうかを反復のある二元配置の分散分析を用いて調べた。回復速度は、各実験間に差があるかどうかを反復のある一元配置の分散分析を用いて調べた。それぞれの有意水準は、危険率 5%未満を採用した。

結果

血液 pH

血液 pH の変化を図 1 に示す。Max 実験では、運動前 7.401 ± 0.016 から運動終了後 5 分後 7.178 ± 0.059 の最低値まで有意な低下が見

られ、運動終了 5 分後から運動終了 30 分後 7.337 ± 0.038 まで有意な上昇が見られた。しかし、運動終了 30 分後の値は運動前の値まで回復しなかった。Hypoxia 実験では、60 分間の低酸素混合ガス吸入により 7.413 ± 0.030 から 7.437 ± 0.053 まで上昇が見られたが、その変化は統計的に有意ではなかった。運動前（安静 60 分後） 7.437 ± 0.053 から運動終了 5 分後 7.246 ± 0.067 の最低値まで有意な低下が見られ、運動終了 5 分後から運動終了 30 分後 7.408 ± 0.029 まで有意な上昇が見られた。運動終了 30 分後の値は運動前の安静レベルまで回復していた。Submax 実験では、運動前 7.396 ± 0.034 から運動終了 1 分後 7.295 ± 0.033 の最低値まで有意な低下が見られ運動終了 1 分後から運動終了 30 分後 7.381 ± 0.027 まで上昇した。だが、その上昇は有意ではなかった。運動終了 30 分後の値は運動前のレベルまで回復していなかった。

Hypoxia 実験と Max 実験を比較すると、運動終了直後、1 分後、5 分後、7 分後、10 分後、15 分後、20 分後、30 分後で Hypoxia 実験の

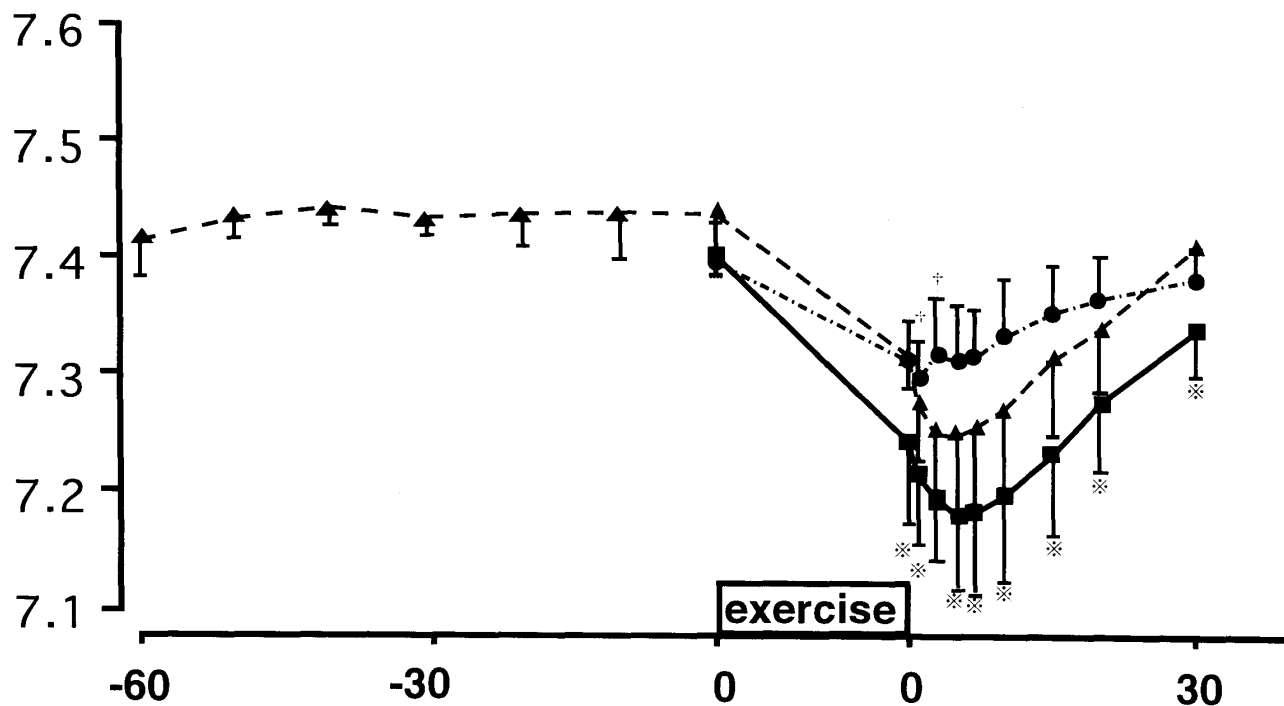


図 1 運動負荷による血液 pH の変化を示す。
 ▲は Hypoxia 実験，■は Max 実験，●は Submax 実験を示す。
 ※は Hypoxia 実験と Max 実験の間の有意差を示す。
 †は Hypoxia 実験と Submax 実験の間の有意差を示す。

方が有意に高い値を示した。両実験間の最低値から30分後までの回復速度に有意な差は見られなかった。Hypoxia実験とSubmax実験を比較すると、Hypoxia実験の血液pHは運動開始時でSubmax実験より高い値であったにもかかわらず、運動終了1分後、3分後で有意に低かった。両実験間の回復速度に有意な差が見られ、Hypoxia実験の方がSubmax実験より回復速度が速かった。Max実験とSubmax実験を比較すると運動終了直後、1分後、3分後、5分後、7分後、10分後、15分後、20分後でMax実験の方が有意に低い値を示した。両実験間の回復速度に有意な差がみられ、Max実験の方がSubmax実験より回復速度が速かった。

血漿乳酸

血漿乳酸濃度の変化を図2に示す。Max実験では運動前 $1.4 \pm 0.4\text{mM}$ から運動終了3分後 $17.1 \pm 3.9\text{mM}$ の最大値まで上昇が見られ、その後運動終了30分後 $8.0 \pm 3.7\text{mM}$ まで有意に低下した。しかし運動開始時の値まで回復しなかった。Hypoxia実験では、低酸素混合ガス

吸入による60分間で有意な変化は見られなかった。しかし、運動によっては前値(安静60分後) $1.6 \pm 0.5\text{mM}$ から運動終了3分後 $15.9 \pm 4.2\text{mM}$ の最大値まで有意な上昇が見られた。その後運動終了30分後には $6.9 \pm 2.3\text{mM}$ まで有意に低下したが、運動前のレベルまで回復しなかった。Submax実験では、運動前 $1.2 \pm 0.3\text{mM}$ から運動終了3分後 $9.6 \pm 2.7\text{mM}$ の最大値まで有意な上昇が見られた。その後運動終了30分後には $3.1 \pm 1.4\text{mM}$ まで有意に低下した。運動終了30分後の値は、運動前のレベルと有意な差は見られなかった。Hypoxia実験とMax実験を比較すると、両実験間の血漿乳酸濃度に有意な差は見られなかった。また、回復速度にも両実験間で有意な差は見られなかった。Hypoxia実験とSubmax実験を比較すると、運動終了3分後、5分後、7分後、10分後、20分後でHypoxia実験の方が有意に高い値を示した。両実験間の回復速度に有意な差は見られなかったが、Hypoxia実験の方がSubmax実験より速い傾向が見られた($P = 0.054$)。Max実験とSubmax実験を

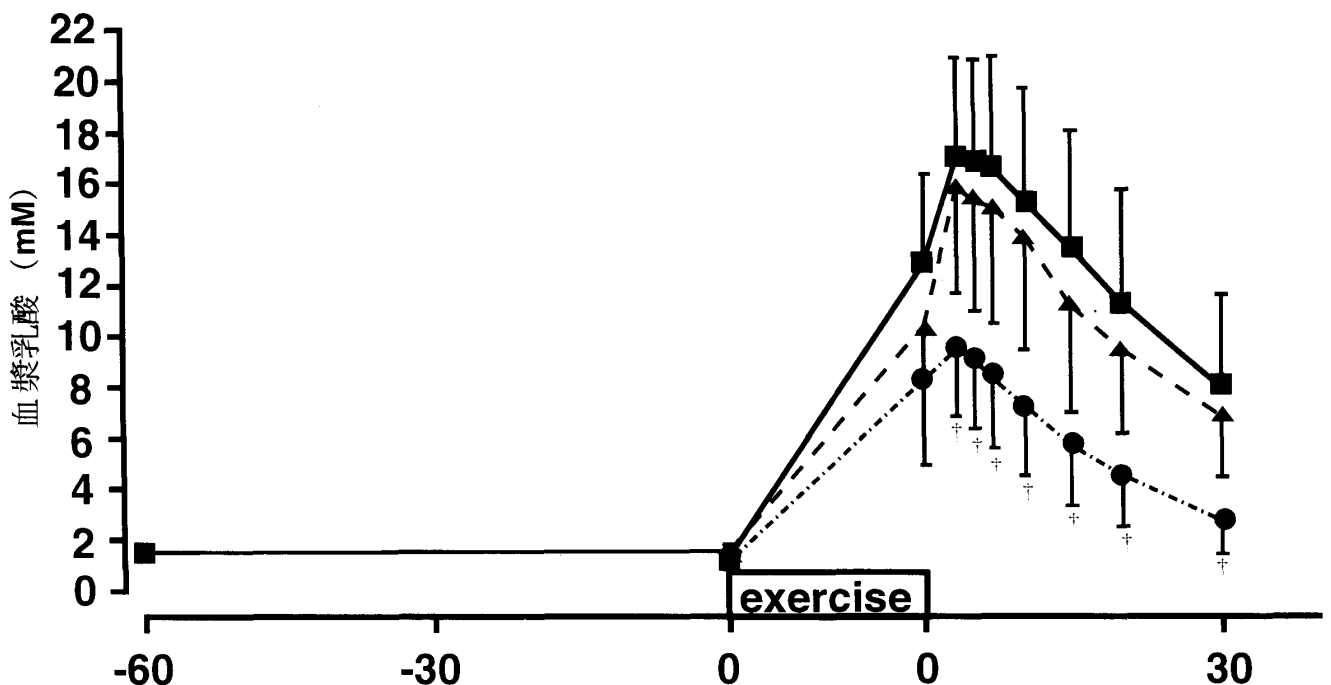


図2 運動負荷による血漿乳酸濃度の変化を示す。

▲は Hypoxia 実験, ■は Max 実験, ●は Submax 実験を示す。

※は Hypoxia 実験と Max 実験の間の有意差を示す。

†は Hypoxia 実験と Submax 実験の間の有意差を示す。

比較すると運動直後、3分後、5分後、7分後、10分後、15分後、20分後、30分後でMax実験の方が有意に高い値を示した。両実験間の回復速度に有意な差は見られなかったが、Max実験の方がSubmax実験より速い傾向が見られた ($P = 0.052$)。

血液 HCO_3^-

血液 HCO_3^- の変化を図3に示す。Max実験では運動前 $23.1 \pm 3.0\text{mM}$ から運動終了7分後 $12.8 \pm 2.7\text{mM}$ の最低値まで有意な低下が見られ、その後回復し、運動終了30分後 $18.7 \pm 3.1\text{mM}$ まで有意な上昇を示した。Hypoxia実験では、低酸素ガス吸入前 (安静0分) $25.93 \pm 2.77\text{mM}$ から吸入60分後 (運動前) $27.10 \pm 2.07\text{mM}$ まで上昇したが、有意な上昇ではなかった。運動前から運動終了7分後 $13.4 \pm 2.8\text{mM}$ の最低値まで低下し、運動終了7分後から運動終了30分後 $19.5 \pm 2.3\text{mM}$ まで有意な上昇を示した。Submax実験では、安静時 $24.9 \pm 3.0\text{mM}$ から運動終了3分後 $18.4 \pm 1.4\text{mM}$ の最低値まで有意に低下し、運動終了3分後から運動終了30分後 $22.3 \pm 5.0\text{mM}$ まで有意に上昇した。Max実験、

Hypoxia実験、Submax実験共に運動終了30分後には運動前のレベルまで回復しなかった。

Hypoxia実験とMax実験を比較すると、運動開始時、運動終了直後、に有意な差がみられ、Hypoxia実験の方が有意に高かったが、最低値には有意差が見られなかった。Hypoxia実験とSubmax実験では、1分後、3分後、5分後、7分後、10分後、15分後、20分後、30分後に有意な差がみられ、Hypoxia実験の方が低かった。Submax実験とMax実験では、運動終了直後、1分後、3分後、5分後、7分後、10分後、15分後、20分後、30分後に有意な差がみられ、Max実験の方が低い値を示した。

心拍数
心拍数の変化を図4に示す。Max実験では、安静時 75 ± 9 拍/分から運動直後 195 ± 5 拍/分の最大値まで有意に上昇した。運動直後から運動終了30分後 102 ± 9 拍/分まで有意に減少した。Hypoxia実験では、低酸素吸入前 69 ± 12 拍/分から低酸素吸入後 (運動前) 79 ± 15 拍/分へと増加傾向を示した。運動前から運動直後 183 ± 5 拍/分の最大値まで有意に増加した。運動直後から運動終了30分後 $98 \pm$

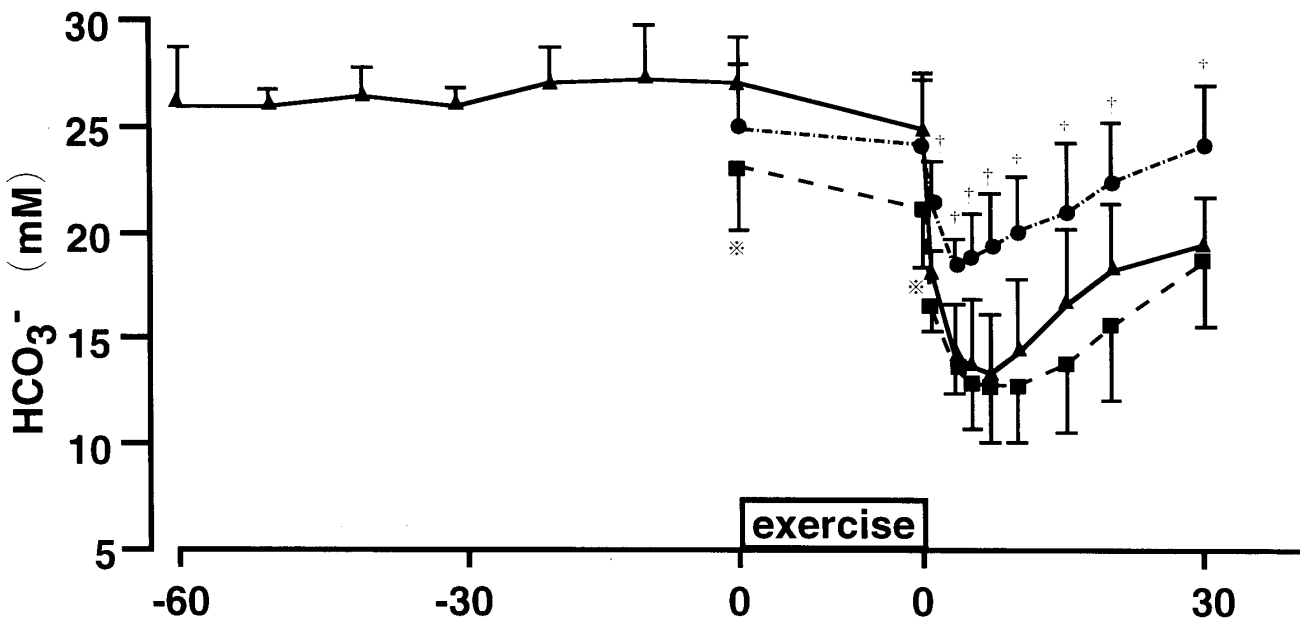


図3 運動負荷による血液 HCO_3^- 濃度の変化を示す。
▲は Hypoxia 実験，■は Max 実験，●は Submax 実験を示す。
※は Hypoxia 実験と Max 実験の間の有意差を示す。
†は Hypoxia 実験と Submax 実験の間の有意差を示す。

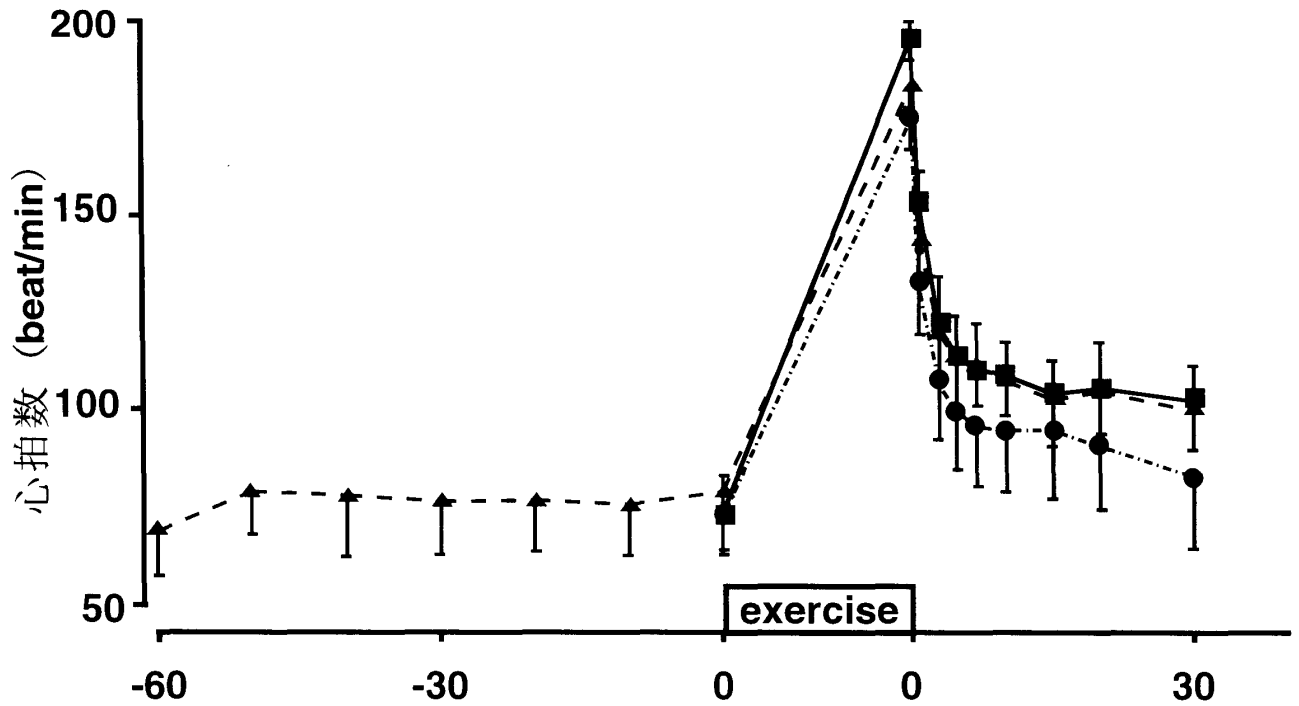


図4 運動負荷による心拍数の変化を示す。
▲は Hypoxia 実験, ■は Max 実験, ●は Submax 実験を示す。
各実験に有意な差は認められなかった。

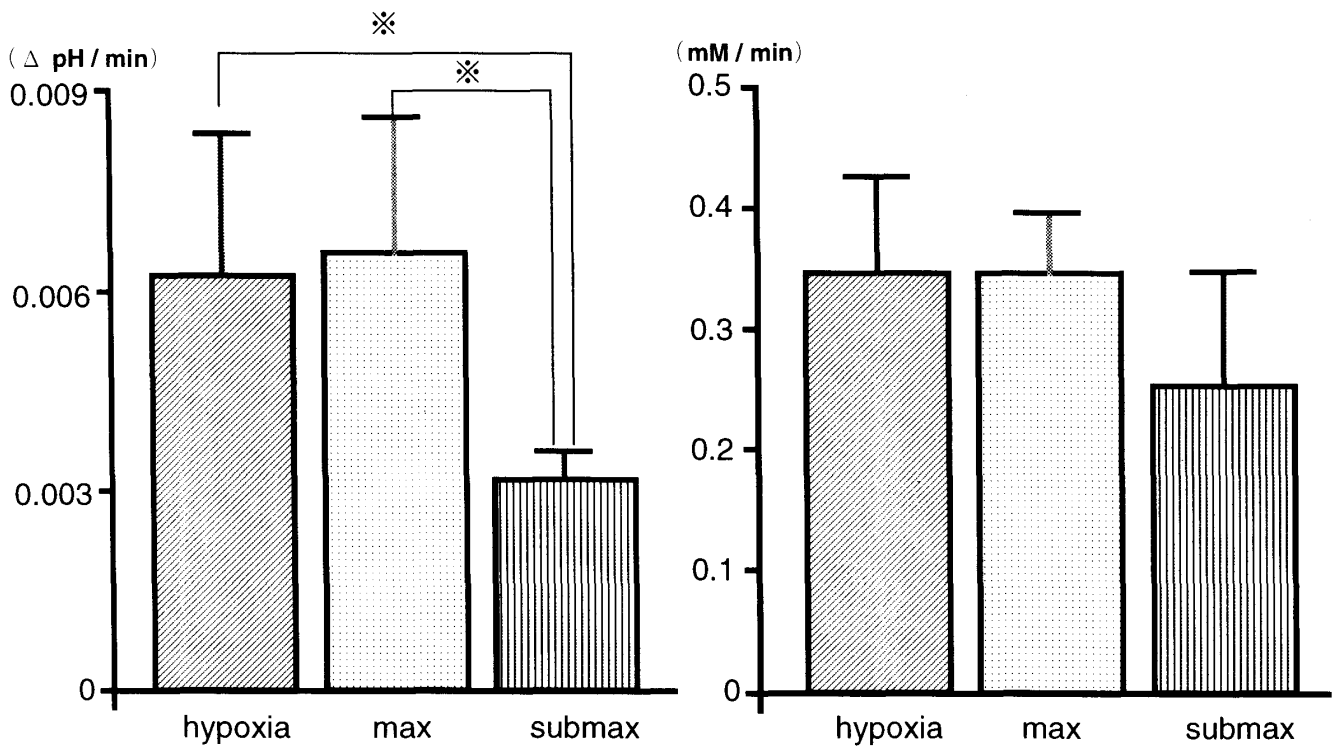


図5 血中 pH の回復速度と血漿乳酸の回復速度を示す。
※は有意差を示す。血中 pH では Hypoxia 実験と Submax 実験の間に、
Max 実験と Submax 実験の間に有意な差が認められた。

この仕事量は、Max 実験の約 67%と有意に低い値であった。

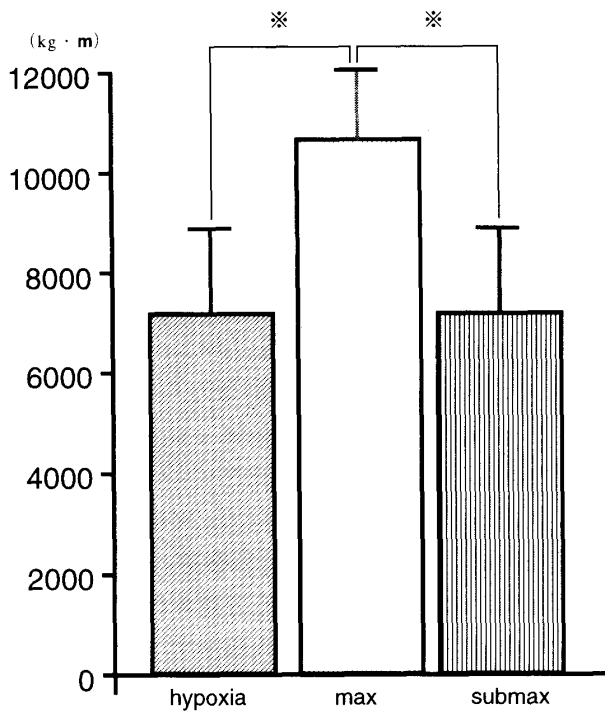


図6 各実験の仕事量を示す。※は有意差を示す。

11 拍 / 分まで有意に減少した。Submax 実験では、安静時 76 ± 12 拍 / 分から運動直後 175 ± 7 拍 / 分の最大値まで有意に増加し、運動直後から運動終了 30 分後 83 ± 18 拍 / 分まで有意に減少した。各実験間に有意な差は認められなかった。

回復速度

血液 pH と血漿乳酸値の回復速度を図 5 に示す。血液 pH では Hypoxia 実験と Submax 実験の比較で Hypoxia 実験の方が速く、Max 実験と Submax 実験の比較では Max 実験の方が速かったが、Hypoxia 実験と Max 実験の間には有意な差が認められなかった。血漿乳酸の回復速度では、どの実験間にも有意な差は見られなかったが、Submax 実験では他の二つの実験より遅い傾向が見られた。

仕事量

各実験の仕事量を、図 6 に示す。Submax 実験は Hypoxia 実験と同じ仕事量に設定したが、

考察

本実験の運動負荷の心拍数の変化は Hypoxia 実験と Max 実験で有意な差がなく共に最大運動であったと考えられるが、仕事量で比較すると Hypoxia 実験は Max 実験の約 67%で、少ない仕事量で疲労困憊になることが示された。Submax 実験での仕事量は Hypoxia 実験と同じであったが、心拍数は統計的に有意差がないものの常に Hypoxia 実験より少なく、特に運動終了後の減少が他の 2 実験より際立って大きかった。これらの結果から、Hypoxia 実験では仕事量が少なくても生体への負荷が Max 実験と同様に大きく、Submax 実験では Hypoxia 実験と同じ仕事量でも生体としての負荷が少なくなっていたものと考えられる。

血液 pH は、Hypoxia 実験では運動負荷前の 60 分間の低酸素ガス吸入により上昇傾向が見られた。この変化は換気量の増大傾向や心拍数の増加傾向とも一致する低酸素環境への適応変化と考えられ、呼吸性アルカローシスを示すものと考えられた。運動負荷による血液 pH の低下は、Hypoxia 実験でも Max 実験でも殆ど同様に認められ、運動前から高い血液 pH を示した Hypoxia 実験では、運動終了 30 分間の回復期の値も Max 実験より高かったが、両実験の血液 pH の変動曲線は大体平行していた。血液 pH の最低値から運動終了 30 分後の値への回復速度には両実験間で有意な差がなかったが、Hypoxia 実験では前値のレベルまで回復していたのに対し、Max 実験では運動終了 30 分後の値は運動前の値まで回復していなかった。Submax 実験では血液 pH の低下が他の 2 実験より遥かに小さく運動後の最低値の出現も早かったが、運動終了 30 分後に運動前の値へ回復していなかった。以上の成績から低酸素環境下による呼吸性アルカローシスが、運動負荷による代謝性アシドーシスを軽減し、回復を促進することが示唆された。

血漿乳酸濃度は低酸素ガス吸入によって変化がなく、運動開始前の値は3実験間で差がなかった。運動負荷後には血漿乳酸は、Hypoxia実験でもMax実験でもともに高いレベルに達し、両実験間に有意な差が見られず運動終了30分後までの回復期の低下にも差が見られなかった。Submax実験では血漿乳酸の上昇のレベルが低く運動終了30分後までの回復期も低いレベルで推移した。これらの成績から低酸素環境下での最大運動では、運動の仕事量が少ないにも関わらず常酸素環境下での最大運動と同程度の血漿乳酸レベルに達することが示され、McLellanらの成績⁴⁾を追認する結果となった。

血液 HCO_3^- 濃度は低酸素ガス吸入によって上昇し、呼吸性アルカローシスによる血液pHの上昇と合致した。運動負荷によってどの実験でも血液 HCO_3^- 濃度の低下が見られたが、筋細胞からの水素イオンの流出量を示すとされる運動前の値と最低値との差 ΔHCO_3^- ⁵⁾は、Hypoxia実験で 13.7 ± 2.4 mMでありMax実験の 10.3 ± 5.0 mMより多い傾向を示し、Hypoxia実験でMax実験より多量の水素イオンの流出があったことが示唆される。

Hypoxia実験で ΔHCO_3^- が大きく、筋細胞からの水素イオンの流出が多いのに血漿乳酸濃度にMax実験との差がないのは、産生される乳酸の量に殆ど差がないが細胞外のアルカローシスのため水素イオンの流出が増強されたと考えることが出来よう。重曹投与による代謝性アルカローシスを起こさせた実験¹⁾で見られた乳酸の拡散の促進は今回の実験で認められなかったが、その理由は今回の低酸素吸入実験ではアルカローシスの程度が低かったことによるかもしれない。また、Hypoxia実験で ΔHCO_3^- が大きく血液pHの回復の早かったことは呼吸性アルカローシスによって代謝性アシドーシスの是正が促進されたことを示すと思われる。

まとめ

酸素12%の低酸素ガス吸入による低酸素環境下で運動負荷を行い、常酸素環境下での運動

負荷の場合と比較し以下の成績を得た。

(1) 60分間の低酸素ガス吸入により血液pHの上昇傾向、血液 HCO_3^- の増加傾向、心拍数の増加傾向が見られ呼吸性アルカローシスが引き起こされたものと考えられた。

(2) 疲労困憊に至る漸増負荷運動による仕事量は低酸素環境下では常酸素環境下の67%であった。

(3) Hypoxia実験では運動負荷による血液pHの低下と回復時の上昇がMax実験の値より常に高いレベルであった。両実験の成績は大体平行していたが、運動終了時にHypoxia実験では運動前の値までほぼ回復していたのに対し、Max実験やSubmax実験では運動前の値まで回復しなかった。

(4) 血漿乳酸濃度はHypoxia実験、Max実験で運動により共に上昇し、回復期に低下した。どの時点においても有意な差は見られなかった。

(5) 血液 HCO_3^- 濃度は低酸素ガス吸入により上昇した。運動によるこのイオンの低下の程度は、Hypoxia実験の方がMax実験より大きい傾向が見られた。

(6) 以上の成績から低酸素ガス吸入では仕事量が少ないにも関わらず常酸素環境下と同じ程度の乳酸が産生されるが、代謝性アシドーシスからの回復は呼吸性アルカローシスにより促進されることが示唆された。

謝辞

本実験の実施にあたり中京大学体育学部4年生の川崎友岐子、加藤貴英、谷口多恵、川越隆、川田茂雄、沢田安代の諸兄及び、中京大学体育学研究科研究生の本田亜紀子さんの協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Yamauchi T, Matsui N. Effect of blood pH on plasma ammonia and lactate concentration during incremental exercise in men. *Advances in Exercise and Sports Physiology*

- gy 2:73-78,1996.
- 2) Miller AT. Altitude. In Environmental Physiology. Sloim NB. ed. 350-375, St Louis, The CV Mosby Co.,1974.
 - 3) Hogan MC, Cox RH, Welch HG. Lactate accumulation during incremental exercise with varied inspired oxygen fraction. J Appl Physiol 55:1134-1140,1983.
 - 4) McLellan T, Jacobs I, Lewis W. Acute altitude exposure and altered acid-base states. II. Effect on exercise performance and muscle and blood lactate. Eur J Appl Physiol 36:177-182,1974.
 - 5) Matson LG, Tran ZV. Effects of sodium bicarbonate ingestion on anerobic performance : A meta-analytic review. Int J Sports Nutrition 3:3-28.1993.