

低酸素環境の運動時エネルギー代謝への影響 (続報)
血漿乳酸と血液アンモニア濃度の変化

松村嘉則, 原田健, 塚中敦子, 本田亜紀子, 松井信夫

Influence of Hypoxic Environment on the Energy Metabolism During Exercise (2nd Report). Changes in Plasma Lactate and Blood ammonia Concentrations.

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

Abstract

Since decreased oxygen transport during exercise may enhance the anaerobic metabolism, we studied the effect of hypoxia on anaerobic glycolysis and adenylate kinase reaction.

Six young non-acclimatized male subjects were employed. Each subject carried out 3 exercise tests (Hypo, Max and Sub) on a bicycle ergometer. In Max or Hypo, an incremental exercise until exhaustion was performed under air or 12% oxygen gas. In Sub, work load was the same as Hypo but under air. The work load of Hypo and Sub was two thirds of that of Max.

Plasma lactate rose after exercise and fell thereafter similarly in both Max and Hypo without significant differences at any points. Its changes in Sub were far less than the other 2. Blood ammonia rose with exercise in all 3 experiments, but the increases differed among experiments; they were largest in Max and smallest in Sub. The increases from pre-exercise levels in Max and Sub were 159% and 63% of Hypo, respectively. The results suggest that (1) the shift of energy metabolism to anaerobic glycolysis takes place more easily than to adenylate kinase process under hypoxia; and (2) while reliance of the energy metabolism on anaerobic glycolysis is mostly determined by relative intensity of exercise, the reliance on the adenylate kinase process is determined not only by relative intensity but also absolute intensity of exercise.

目的

低酸素環境下では平地に比較して酸素不足の

状態にあり, その状態で激運動を行えば, 細胞レベルではさらに厳しい酸素不足の状態になることが予測され, エネルギー代謝の嫌氣的代謝

に対する依存度が増加すると考えられる。事実、先回報告した¹⁾ように、低酸素下での疲労困憊に至る運動は仕事量が常酸素下の67%に低下したにも拘わらず嫌気性解糖により産生される乳酸値には常酸素下の場合と有意な差が認められなかった。他の嫌气的エネルギー生成系であるアデニレートキナーゼ系により産生されるアンモニアに関して、Youngら^{2) 3)}は、高度4300Mと低地で最大下の運動を負荷した際に、同じ相対強度の運動の場合、高地と平地で有意差がないことを報告している。我々は低酸素環境下と常酸素環境下の最大運動及び低酸素下と常酸素下の同じ絶対強度の運動によるアンモニアの変化と乳酸の変化を比較し、低酸素環境下における運動時エネルギー供給の両エネルギー生成系への依存度を明らかにすることを目的とした。

方法

方法は先回の報告¹⁾ですでに述べた通りであるが、以下に簡単に述べる。実験は、低酸素混合ガスを吸入させ、疲労困憊まで運動させ、その後30分間の座位安静をとらせる実験（以下Hypoxia実験）、実験室内の空気を吸入させ疲労困憊まで運動させ、その後30分間の座位安静をとらせる実験（以下Max実験）、実験室内の空気をすわせ、Hypoxia実験と同じ仕事量を行わせ、その後30分間の座位安静をとらせる実験（以下Submax実験）の3実験であった。なお、Hypoxia実験では、呼吸性アルカローシスを引き起こさせるために、運動開始1時間前より低酸素混合ガスを吸入させ、運動終了30分間後まで終始吸入させ続けた。低酸素混合ガスは、O₂約12%の混合ガスを使用した。

既報の実験で採取した血液につき、アンモニアを測定しその変動を検討した。アンモニア濃度は、奥田、藤井法⁴⁾の変法によりアンモニア測定用キット（アンモニアテスト 和光純薬工業）により処理をし生成されるインドフェノールを分光光度計（島津製作所製 UV-2400PC）により波長630nmで測定して求めた。

また、酸素飽和度と心拍数を連続的にモニターした。

統計処理は、先回の報告同様、反復のある二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

酸素飽和度

Hypoxia実験の酸素飽和度の変化を図1に示す。実験開始時は99 ± 1%であり、低酸素混合ガス吸入開始10分後ですでに91 ± 2%へ低下した。運動終了後は85 ± 5%まで低下しその後、上昇し90%前後の値を示した。

血漿乳酸

血漿乳酸濃度の変化を図2に示す。Max実験では運動終了3分後の最大値まで上昇が見られ、その後運動終了まで有意に低下した。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、運動によって前値（安静60分後）から運動終了3分後の最大値まで有意な上昇が見られた。その後は運動終了30分後まで有意に低下した。Submax実験では、運動前から運動終了3分後の最大値まで有意な上昇が見られた。その後は運動終了30分後まで有意に低下した。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どの時点でも有意な差は見られなかった。Hypoxia実験とSubmax実

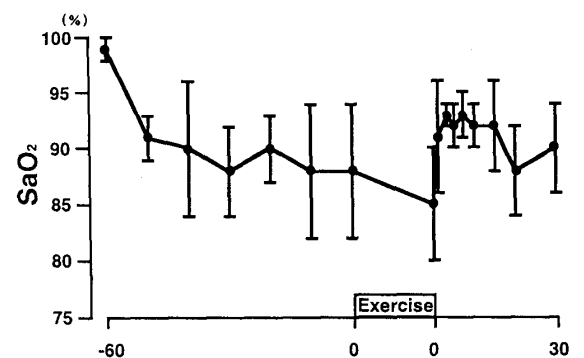


図1 Hypoxia実験における酸素飽和度の変化を示す。

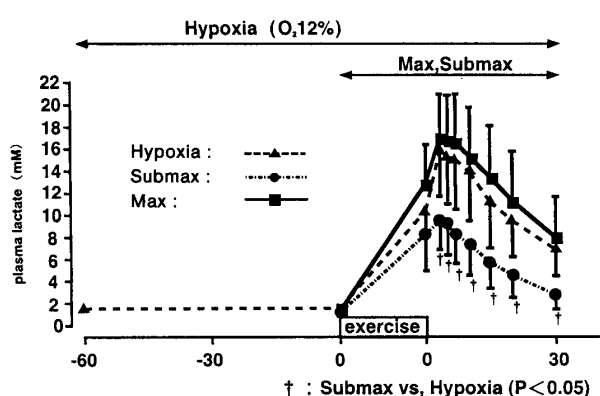


図2 運動負荷による血漿乳酸の変化。
▲は Hypoxia 実験, ■は Max 実験, ●は Submax 実験。
※は Hypoxia 実験と Max 実験の間の有意差を示す。
†は Hypoxia 実験と Submax 実験の間の有意差を示す。

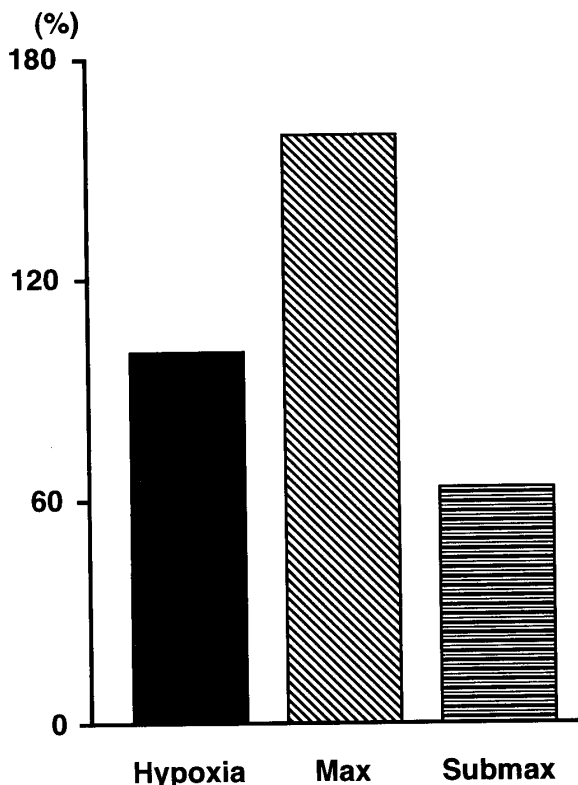


図4 血液アンモニアの運動による安静から最大値までの上昇率。

終了5分後に最大値 $206.3 \pm 70.2 \mu\text{g/dl}$ となった。運動終了5分後から運動終了30分後に有意な低下がみられ $93.7 \pm 28.8 \mu\text{g/dl}$ となった。Hypoxia 実験では、実験開始時(低酸素ガス吸入前) $58.7 \pm 25.8 \mu\text{g/dl}$ から運動開始時 $70.4 \pm 14.3 \mu\text{g/dl}$ まで上昇したがその変化は統計的に有意ではなかった。運動により血液アンモニアは有意に上昇し運動終了7分後には最大値 $159.2 \pm 43.4 \mu\text{g/dl}$ となり、運動終了30分後には、 $74.7 \pm 25.5 \mu\text{g/dl}$ まで低下した。Submax 実験では、運動前 $48.8 \pm 17.3 \mu\text{g/dl}$ から運動により上昇し、運動終了3分後には、 $104.9 \pm 21.7 \mu\text{g/dl}$ の最大値を示した。その後、30分後には $68.7 \pm 20.5 \mu\text{g/dl}$ まで低下した。

Hypoxia 実験と Max 実験を比較すると、運動終了直後、3分後、5分後、10分後、15分後、20分後に Hypoxia 実験の方が有意に低い値を示した。Hypoxia 実験と Submax 実験を比較すると、3分後、5分後、7分後、10分後に、Submax 実験より有意に高い値を示した。

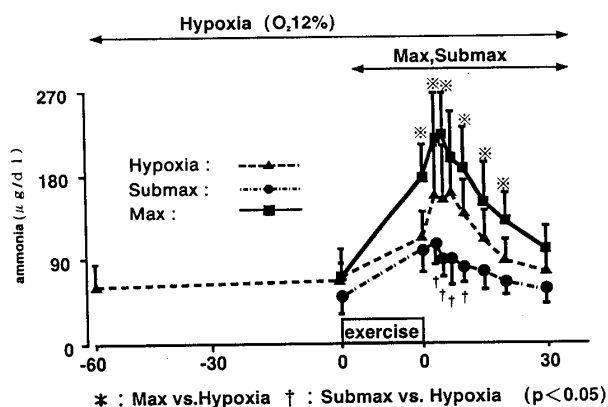


図3 運動負荷による血液アンモニアの変化。
▲は hypoxia 実験, ■は max 実験, ●は submax 実験。
※は hypoxia 実験と max 実験の間の有意差を示す。
†は hypoxia 実験と submax 実験の間の有意差を示す。

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。

血液アンモニア

血液アンモニアの変化を図3に示す。Max 実験では、血液アンモニアは運動前 $65.8 \pm 27.4 \mu\text{g/dl}$ から運動により有意に上昇し、運動

Max 実験と Submax 実験を比較すると運動終了直後、3 分後、5 分後、7 分後、10 分後、15 分後、20 分後に Submax 実験の方が有意に低い値を示した。

アンモニアの上昇率

運動負荷による血液アンモニアの上昇率を図 4 に示す。安静から最大値までの変化量を Hypoxia 実験の値を 100%として示した。Max 実験の上昇率は 159%であり、Submax 実験の上昇率は 69%であった。

考察

Hypoxia 実験では酸素濃度 12%の混合ガスを吸入させたが、図 1 に示したように、酸素飽和度が低酸素ガス吸入時から低下して、低酸素状態になっていることが示された。先回報告した血液 pH の結果から、Hypoxia 実験の運動前 60 分間に上昇傾向が認められた。このことから Hypoxia 実験では呼吸性アルカローシスが引き起こされたことが示唆された。

本研究において、Hypoxia 実験と Max 実験は共に疲労困憊に至る運動で相対的強度は等しいと考えられる。しかし絶対的運動強度を比較すると、Hypoxia 実験は Max 実験の約 2/3 と低かった。この運動負荷による血漿乳酸の変化は両実験間で全く差がなく解糖の決定因子が相対的運動強度であることが示唆された。また、Submax 実験では絶対的運動強度は Hypoxia 実験と同じであるが相対的強度は Hypoxia 実験よりずっと低い運動であった。その血漿乳酸濃度は Hypoxia 実験より有意に低くこの点からも解糖の決定因子が絶対強度ではなく相対強度であることが支持された。

一方血液アンモニア濃度は Hypoxia 実験より Max 実験で高く、Submax 実験では Hypoxia 実験より低かった。即ち、絶対的運動強度の最も大きい Max 実験でアンモニア濃度の上昇が最も大きく、また相対的運動強度の最も低い Submax 実験でのその上昇が最も小さいことが明らかになった。このことからアデニレートキナーゼ系の賦活に相対的運動強度と絶対的

運動強度が共に関与する可能性が示唆された。

低酸素下でのエネルギー供給は好氣的代謝から嫌氣的代謝へ移行してその需要を満たすことになる。その解糖系への依存は絶対的運動強度が低くても相対的運動強度が高ければ強くなることが示されたが、アデニレートキナーゼ系への依存は相対的運動強度が高くても絶対的運動強度が低いと弱くなる。このことから、低酸素下の運動に際しての嫌氣的な ATP 生成系として、解糖系への依存がアデニレートキナーゼ系への依存より大きいことが示唆された。

謝辞

本実験の実施にあたり中京大学体育学部学生の川崎友岐子、加藤貴英、谷口多恵、川越隆、川田茂雄、沢田安代の諸兄(平成 10 年 3 月卒業)の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 松村嘉則, 原田健, 塚中敦子, 本田亜紀子, 松井信夫. 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. 中京大学体育学論叢. 39-2, 111-119. 1998.
- 2) Young PM, Rock PB, Fulco CS, Trad LA, Forte VA, Cymerman A. Altitude acclimatization attenuates plasma ammonia accumulation during submaximal exercise. J. Appl. Physiol. 63: 758-764, 1987.
- 3) Young AJ. Energy substrate utilization during exercise in extreme environments. Exercise and sport sciences reviews. New York, Macmillan, 18, 65-117. 1990.
- 4) 奥田拓道, 藤井節朗. 最新医学. 21, 622-627. 1966.