

研究種目：若手研究 B
研究期間：2006～2008
課題番号：18700525
研究課題名（和文） 2種類の疑似高所での滞りおよび運動中の生理応答とトレーニング効果の差に関する研究
研究課題名（英文） Differences of physiological responses and training effects in two simulated altitudes. -A comparative study of hypobaric hypoxic environment and normobaric hypoxic environment -
研究代表者 前川 剛輝 (MAEGAWA TAKETERU) 独立行政法人日本スポーツ振興センター・国立スポーツ科学センター・スポーツ科学研究部・研究員 研究者番号：50336351

研究成果の概要：

酸素分圧が同じ低圧低酸素環境と常圧低酸素環境で、生理応答や運動トレーニングの効果に違いが生じるのかを検討した。

その結果、酸素分圧が同じでも気圧が異なると体内に取り込まれる酸素の量に差が生じた。トレーニングの効果では、有酸素能力の改善に気圧の違いによる差はなかったが、無酸素能力の改善は低圧低酸素環境でトレーニングを行った方がその改善の程度が大きかった。

常圧低酸素環境を利用して低圧低酸素環境（≒自然の高所）と同様の効果を得ようとする、トレーニング期間の延長や酸素分圧を更に下げるなどの工夫が必要かもしれない。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,700,000	0	1,700,000
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	180,000	3,780,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：低圧低酸素環境，常圧低酸素環境，高所トレーニング，低酸素トレーニング，動脈血酸素飽和度，自律神経応答

1. 研究開始当初の背景

平地において高所を疑似的に作り出す場合、低圧低酸素環境 (Hypobaric hypoxia) と常圧低酸素環境 (Normobaric hypoxia) の2種類の疑似高所が用いられる。気圧を低くすることにより低酸素環境を作り出すには、一般的に減圧室が用いられる。このような装置は1670年代に製作され、その後多くの改良が加えられ、スポーツのトレーニングへは1960年代の後半に应用された。自然の高所は低圧低酸素環境であり、減圧室ではこの環境をそのまま再現することができる。一方、

気圧を変化させずに(1気圧のまま)低酸素環境を作り出すには、常圧低酸素室が近年よく利用されている。常圧低酸素室は、相対的に窒素濃度が高く酸素濃度が低い1気圧の空気を作り、これを部屋に送り込んで低酸素環境を作るというものであり、1990年代の初頭に開発された。常圧低酸素環境では、自然の高所における酸素分圧 (PO₂) のみを再現している。

従来は低圧低酸素環境での研究やトレーニングが多く行われてきたが、常圧低酸素室の登場以降、それを代用した研究やトレーニング

も行われ始めた。これら研究のほとんどは、低酸素に焦点をあて研究が行われてきた。そのため、「PO₂が同じならば気圧が違っても、つまり低圧低酸素環境下も常圧低酸素環境下も同じ生理応答になるのか?」という疑問に対して未だ統一した見解は得られていない。また、安静時の換気応答や急性高山病の症状の違いを検討したものはあるが、運動中の生理応答やトレーニングの効果に関する研究は非常に少ないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、先ず、同じ PO₂ にコントロールされた 2 種類の疑似高所（低圧低酸素環境下と常圧低酸素環境下）で、気圧の違いによって安静および運動中の生理応答（呼吸循環応答および自律神経応答）にどのような違いが生じるのかを検討することを第一の目的とし、「研究 1：低圧低酸素環境と常圧低酸素環境への急性暴露が安静および運動中の呼吸循環応答に与える影響」と「研究 2：低圧低酸素環境と常圧低酸素環境への急性暴露が運動中の動脈血酸素飽和度と自律神経活動に与える影響」を実施した。そして次に低圧低酸素環境下と常圧低酸素環境下で同じ運動トレーニングを行わせ、その効果の違いを検討することを第二の目的とし、「研究 3：低圧低酸素環境と常圧低酸素環境におけるトレーニング効果の違い」を実施した。

3. 研究の方法

(1) 研究 1：低圧低酸素環境と常圧低酸素環境への急性暴露が安静および運動中の呼吸循環応答に与える影響

①被検者

運動部に所属する 5 名の健康な男子大学生を被検者とした。

②実験手順

被検者は通常酸素環境下 (NN)，高度 3000m 相当に設定された低圧低酸素環境下 (HH) (気圧：701hPa, PO₂：147hPa, O₂ 濃度：20.9%) および常圧低酸素環境下 (NH) (気圧：1013hPa, PO₂：147hPa, O₂ 濃度：14.5%) で 30 分間の安静およびペダリング運動による多段階運動負荷試験を行なった。低圧低酸素環境は低圧室を利用して、常圧低酸素環境は膜分離法を用いた常圧低酸素室を利用して作り出した。

③運動負荷試験

被検者は 3 環境下 (NN, HH, NH) で 30 分間の座位安静の後、自転車エルゴメーターを用いた多段階運動負荷試験を行い、呼気ガス分析 (酸素摂取量 (VO₂), 換気量 (VE_{BTPS}) 終末期酸素分圧 (PETO₂), 終末期二酸化炭素分圧 (PETCO₂) 等) 心拍数 (HR), 動脈血酸素飽和度 (SpO₂), 血中乳酸濃度 (Lac) を測定した。

運動負荷はペダルの回転数を 60rpm に規定し、負荷重量を増加させることにより増加さ

せた。運動負荷は被検者の体重を基準とした相対負荷とし、まず 1watt・kg⁻¹ から開始し、5 分毎に 0.5watt・kg⁻¹ ずつオールアウトに至るまで負荷を漸増させた。

呼気ガス分析は自動呼気ガス分析器を用い、ブレスバイブレス法にて安静から運動終了まで連続的に行った。安静および運動中の HR は胸部双極誘導心電計により、SpO₂ はパルスオキシメーターを用いて測定した。

Lac は、運動中 5 分毎 (運動負荷を増加させる直前) および運動終了直後に、指先をブラッドランセットで穿孔し、20 μl の血液を採取し、自動乳酸分析装置を用いて分析した。

(2) 研究 2：低圧低酸素環境と常圧低酸素環境への急性暴露が運動中の動脈血酸素飽和度と自律神経活動に与える影響

①被検者

7 名の健康な成人男性を被検者とした。

②実験手順

被検者は高度 3000m 相当に設定された低圧低酸素環境下 (HH) (気圧：701hPa, PO₂：147hPa, O₂ 濃度：20.9%) および常圧低酸素環境下 (NH) (気圧：1013hPa, PO₂：147hPa, O₂ 濃度：14.5%) で 30 分間の安静およびペダリング運動による 4 段階の最大下多段階運動負荷試験を行なった。低圧低酸素環境は低圧室を利用して、常圧低酸素環境は膜分離法を用いた常圧低酸素室を利用して作り出した。

③運動負荷試験

被検者は HH と NH で 30 分以上の座位安静の後、自転車エルゴメーターを用いた 4 段階の最大下多段階運動負荷試験を行い、心拍 R-R 間隔, SpO₂, 主観的運動強度 (RPE) の測定をした。

運動負荷はペダルの回転数を 70rpm に規定し、負荷重量を増加させることにより増加させた。運動負荷は被検者の体重を基準とした相対負荷とし、まず 0.5watt・kg⁻¹ から開始し、10 分毎に 0.5watt・kg⁻¹ ずつ 2.0watt・kg⁻¹ に至るまで負荷を漸増させた。

心拍 R-R 間隔は Polar 810s により測定し、そして得られたデータを周波数解析し、自律神経指標 (TP: total spectral power, LF: low frequency, HF: high frequency, VLF: very low frequency) を算出した。SpO₂ はパルスオキシメーターを用いて測定した。また RPE は各ステージ終了直前に、Borg's scale を用いて問診した。

(3) 研究 3：低圧低酸素環境と常圧低酸素環境におけるトレーニング効果の違い

①被検者

大学生の自転車競技選手 (トラック競技が専門) 8 名を被検者とし、そのうち 4 名を常圧低酸素環境下でトレーニングを行う群 (NH 群) とし、残りの 4 名を低圧低酸素環境下で

トレーニングを行う群 (HH 群) として振り分けた。

② トレーニング

HH 群は高度 3000m 相当に設定された低圧低酸素環境下 (気圧: 701hPa, PO_2 : 147hPa, O_2 濃度: 20.9%) で, NH 群は同じく高度 3000m 相当に設定された常圧低酸素環境下 (気圧: 1013hPa, PO_2 : 147hPa, O_2 濃度: 14.5%) でそれぞれトレーニングを行った。研究 1 と同様, 低圧低酸素環境は低圧室を, 常圧低酸素環境は常圧低酸素室利用した。

トレーニングは自転車エルゴメーターを用いてインターバルトレーニングを行った。各被検者の通常酸素環境下における 40% VO_{2max} 強度で 5 分間のウォーミングアップを行った後, 80–100% VO_{2max} の強度で 3 分間, つづいて 40% VO_{2max} 強度以下で 2 分間の運動を 5 回反復した。総運動時間は 30 分間であった。トレーニング時のペダルの回転数は 90rpm とし, 運動強度は指定の範囲内で被検者に調節させた。トレーニングは週 3 回の頻度で 8 週間, 合計 24 回行った。

③ トレーニング効果の評価

有酸素性作業能力の評価のため, トレーニングの前後に, 通常酸素環境下で自転車エルゴメーターを用いて多段階運動負荷試験を行い, 最大酸素摂取量の測定および乳酸性作業閾値を算出した。

運動負荷は, ペダルの回転数を 90rpm に規定し, まず 120W (女子は 80W) から開始し, 5 分毎に 40W ずつ, 380W (女子は 320W) 以降は 20W ずつオールアウトに至るまで負荷を漸増させた。

呼気ガス分析は自動呼気ガス分析器を用い, ブレスバイブレス法にて運動開始から運動終了まで連続的に行った。

Lac は, 運動中 3 分毎 (運動負荷を増加させる直前) および運動終了直後に指尖をブラッドランセットで穿刺し, 20 μ l の血液を採取し, 自動乳酸分析装置を用いて分析した。このときの血中乳酸濃度が 4mmol \cdot l $^{-1}$ と 6mmol \cdot min $^{-1}$ に相当する運動強度を算出し, 乳酸性作業閾値 (Work load@LT4, Work load@LT6) とした。

無酸素性作業能力の評価のため, トレーニングの前後に 90 秒間の超最大全力ペダリング運動 (90secWAnT) を行った。運動負荷は, 各被検者の体重の 7.5% とした。その際に発揮された総仕事量とピークパワーを評価した。さらにテスト終了 3, 5, 7, 10 分後に指尖より採血を行い, 血中乳酸値を測定した。そして最高値を最大血中乳酸濃度として採用した。

4. 研究成果

(1) 気圧の違いによる安静および運動中の生理応答の比較

① 安静時の比較

安静時の VO_2 , VE_{BTPS} , HR および SpO_2 において HH と NH の間で有意な差は見られなかった (研究 1 の結果より)。安静時の $PETCO_2$ は HH と NH の間で有意な差は見られなかったが, $PETCO_2$ は HH の方が NH よりも有意に低い値を示した (Fig1)。NN と NH の $PETCO_2$ に差がなかったことから, 高所暴露により一般的に生じる Hypocapnia が NH では生じない (HH と比べ減弱する) ことが明らかとなった。

研究 2 では安静時の SpO_2 は HH の方が NH よりも有意に低い値を示したが, 自律神経指標に両環境間で差はなかった。

同じ PO_2 でも気圧の違いによって, 安静時の血中の酸素分圧や二酸化炭素分圧に差異が生じるが, 自律神経活動に与える影響は小さいようである。

② 運動時の比較

運動時の VO_2 , VE_{BTPS} および HR において HH と NH との間に有意な差は見られなかった。運動時の $PETCO_2$ は全ての運動負荷で HH と NH との間に差は見られなかったが, $PETCO_2$ は全ての運動負荷で HH の方が NH よりも有意に低い値を示した (Fig. 1)。 SpO_2 は, NH が HH より高い値を示し, 運動強度が上がるにつれ, その差は大きくなった (Fig. 2) (研究 2 も同様の結果)。運動時の交感神経活動は HH の方が NH よりも高い傾向にあったが有意ではなかった。

したがって, 同じ PO_2 で運動を行っても, 気圧を上昇させることで運動時の Hypoxemia が減弱されると考えられる。また, 安静時と同様に運動時も, 同じ PO_2 でも気圧の違いによって血中の酸素分圧や二酸化炭素分圧に差異が生じるが, 自律神経活動に与える影響は小さいようである。

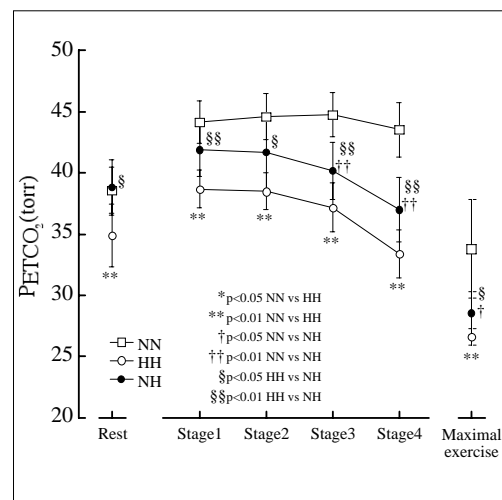


Fig. 1. 安静および運動中の $PETCO_2$ の違い 3 環境間における比較 (研究 1)

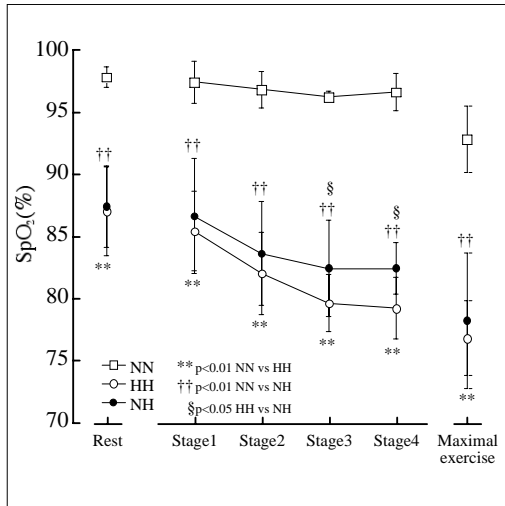


Fig. 2. 安静および運動中の SpO₂ の違い 3 環境間における比較 (研究 1)

(2) 気圧の違いが低酸素トレーニングの効果に与える影響

①有酸素性作業能力に与える効果について

8 週間の低酸素トレーニングの結果, V_{O₂max} は両群とも増加する傾向はみられたが, 有意な変化ではなかった (Fig. 3). LT4 と LT6 における作業負荷は, 両群とも有意に増加した (Fig. 4). したがって標高 3000m 相当での低酸素トレーニングは, 有酸素的な作業能力の改善に寄与するトレーニングであったことがうかがえる. また, 最大および最大下における有酸素性作業能力の改善は, 両群とも同程度であった. したがって有酸素性作業能力に関しては, 気圧の違いが低酸素トレーニングの効果に与える影響は小さいと考えられる.

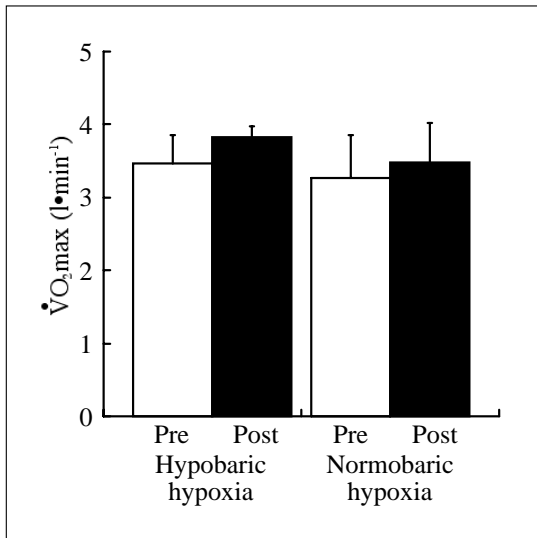


Fig. 3. 低酸素トレーニングによる最大酸素摂取量の変化 (研究 3)

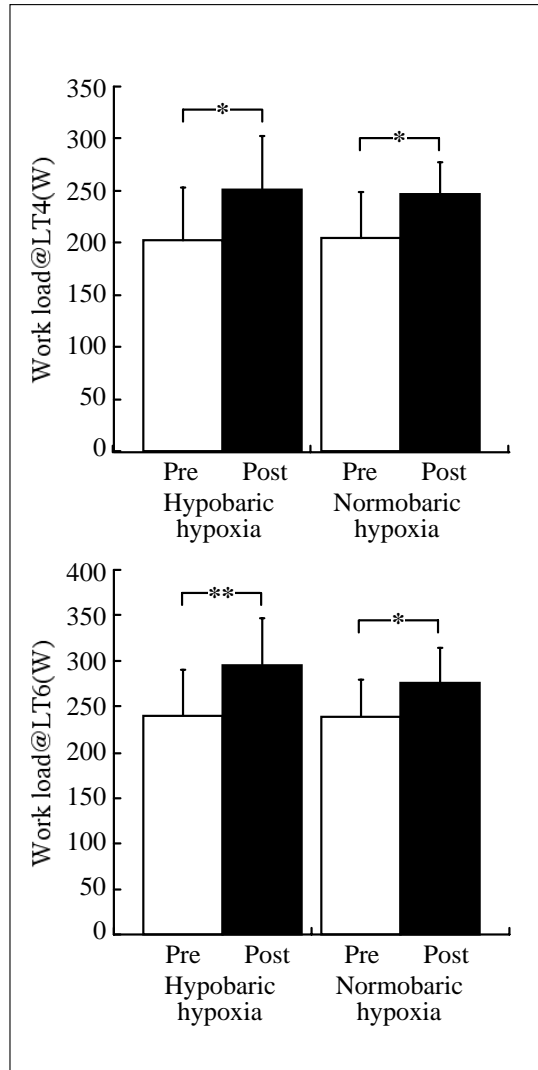


Fig. 4. 低酸素トレーニングによる LT4 と LT6 の変化 (研究 3)

②無酸素性作業能力に与える効果について

8 週間の低酸素トレーニングの結果, 90secWAnT のピークパワーおよび平均パワーは HH 群では有意な増加を示した. 一方, NH 群では増加する傾向はみられたが, 有意な変化ではなかった (Fig. 5). また, 90secWAnT 後の最大血中乳酸濃度は, HH 群ではトレーニングにより有意な増大を示した. しかし, NH 群では増大する傾向はみられたが, 有意な変化ではなかった (Fig. 6). したがって, 同じ PO₂ の低酸素環境下でトレーニングを行っても, 気圧の違いによって無酸素的な作業能力に与える効果に差が生じると考えられる. また, 高強度の持久性運動を低酸素環境下で行うという低酸素トレーニングは, 無酸素的な作業能力の改善に寄与するトレーニングである可能性が示唆された. そしてこの改善一つの要因として, 糖代謝 (解糖系) の促進が考えられる.

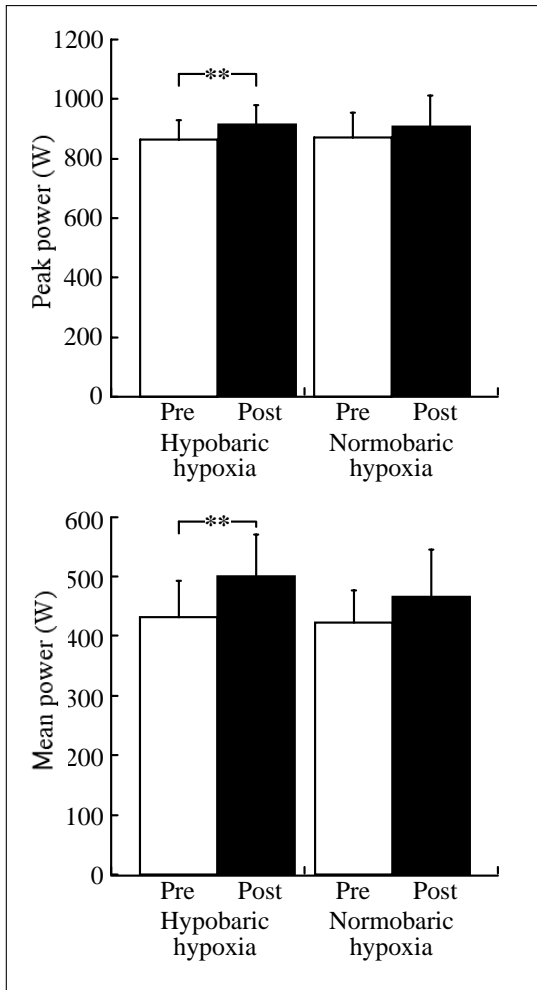


Fig. 5. 低酸素トレーニングによる 90secWAnT 時のピークパワーと平均パワーの変化 (研究 3)

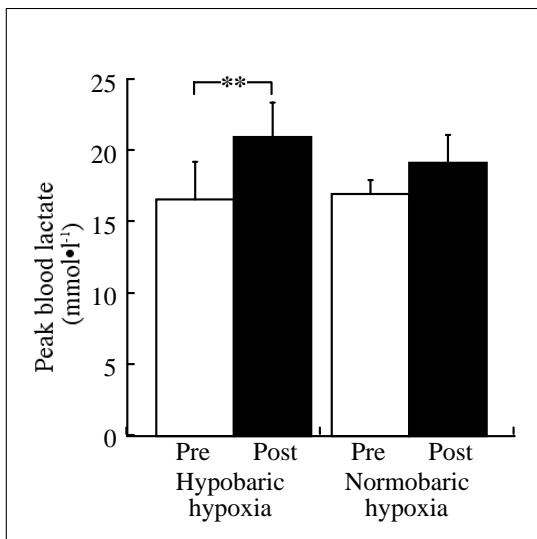


Fig. 6. 低酸素トレーニングによる 90secWAnT 後の最大血中乳酸濃度の変化 (研究 3)

(3) まとめ

本研究では、同じ PO₂ にコントロールされ

た 2 種類の疑似高所 (低圧低酸素環境下と常圧低酸素環境下) において、気圧の違いによる生理応答の違いと、運動トレーニングの効果の違いを検討した。結果は以下の通りである。

- ① PO₂ が同じにも関わらず、HN と HH では血中の酸素分圧や二酸化炭素分圧に差が生じる。
- ② HN は HH と比べ安静時の Hypocapnia が減弱する。
- ③ NH は HH と比べ運動時の Hypoxemia が減弱する
- ④ 気圧の違いが自律神経活動に与える影響は小さい。
- ⑤ PO₂ が同じ環境でトレーニングをおこなっても、気圧の違いによりその効果に差が生じる。

以上のことから、常圧低酸素環境を利用して低圧低酸素環境 (≒自然の高所) と同様の効果を得ようとする、トレーニング期間の延長や酸素分圧を更に下げるなどの工夫が必要かもしれない。

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 1 件)

1. Taketeru Maegawa, Emi Hashimoto, Katsuyuki Kondo, Takayuki Sugo. Differences in heart rate variability during exercise between hypobaric and normobaric hypoxia. Wilderness Environ. Med., 2007, 18(3):245-246. (proceeding) (査読無)

[学会発表] (計 2 件)

1. 前川剛輝, 斉藤陽子, 平島美樹, 長谷川絢子, 川原貴: 肺動脈圧からみた高地トレーニングの至適高度について, 第 21 回日本トレーニング科学学会大会, 2008 年 12 月, 埼玉.
2. Taketeru Maegawa, Emi Hashimoto, Katsuyuki Kondo, Takayuki Sugo. Differences in heart rate variability during exercise between hypobaric and normobaric hypoxia. Mountain & Wilderness Medicine World Congress 2007, 2007 年 10 月, Aviemore, Scotland.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前川 剛輝 (MAEGAWA TAKETERU)
 独立行政法人日本スポーツ振興センター
 国立スポーツ科学センター・スポーツ科学研究部・研究員
 研究者番号: 50336351