

平圧—低酸素室の使用効果について

前嶋 孝

1. はじめに

高地登山の成功は、高地への順応の程度と密接な関係がある。高地への完全な順応のためには、標高3,000m程度で3～4週間、標高6,000mにいたっては11～12週を要するとされている¹⁾。また、スポーツ選手が行う高地トレーニングにおいては、特に、海拔0mで生活している選手であれば標高3,000m以下の中等度の高地でさえ、最適な血液学的適応を得るには、十分な鉄の補充とともに少なくとも10週間の連続滞在が必要であると言われている。このように高地に順化する日数は、かなり長期間を要するとともに、それは高度が高くなるほど長くなる。従って、これらのことを考慮した登山計画が必要であることは当然であるが、一方、登山の準備として、平地において低圧室を用いた順応のためのトレーニングも試みられている。浅野²⁾は高所順応トレーニングとして低圧室を5,000m～7,000m相当の高度に設定し、1回30分間の運動を週1回の頻度で約3ヶ月(計12回)行った結果、4,000m相当における安静時および運動時のSaO₂が増加し、急性高山病予防に貢献することを示唆した。すなわち、人工的低圧環境における一日の暴露時間がこのように比較的短時間で、しかも、週1回といった間隔をおいたトレーニングでも高地順応を助ける役割を果たす可能性を示したものと思われる。このように、低圧室によって、登山のための身体的準備ができれば、登山における安全性は高まるであろう。しかし、低圧室は設備費が高価であることのほかに、その利用にあたって、減圧や与圧が人体に及ぼす影響、居住空間あるいは使用時間など様々な制約がある。

高地住民は平地住民に比べて、血球の数や赤血球ヘモグロビン含有量が多く、また、心臓が肥大し、心拍出量も多いことが特徴である。すなわち、高地に順応するための重要な要素は酸素運搬能力にあり、そして、それは気圧の低下に伴う肺泡内酸素分圧の低い環境に暴露されていることと密接に関係している。

肺泡内酸素分圧の低下した環境は気圧を変えなくても平地の気圧のまま酸素濃度を減じることで、技術的に可能である。しかも、その装置の費用は低圧室に比べてはるかに安価となる。近年、フィンランドにおいてホテル全体を平圧—低酸素にしたいわゆるアルプスホテルが完成し、研究の成果も出はじめて³⁾いる。しかし、低酸素の供給システムや利用方法の詳細については明らかにされていない。

そこで、筆者は平圧—低酸素室を試作し、それを利用したトレーニングの有効性について検討した。以下に示すデータは、筆者がスピードスケート選手の競技力向上を目的に実施した平圧—低酸素トレーニングの結果(前嶋³⁾) : J. J. Sports Sciences : 1996年15巻5号) である。

4. 論文

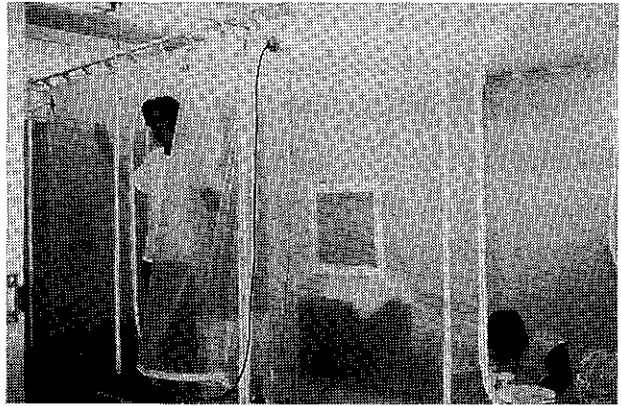
2. 方法

a: 平圧一低酸素室のシステム

平圧一低酸素室（以下低酸素室とする）を作るためには、低酸素の空気を発生しそれを連続的に供給する装置が必要である。試作段階としては窒素発生器（日本酸素製PAL 3）を利用した。この窒素発生器から出る窒素と20.93%の空気とを混合し、互いの流量を調整することによって低酸素を連続供給するのである。試作した低酸素室は高さ1.9m、幅2m、および奥行き1.9m（7.22m³）の気密性の高い塩化ビニール製テントを用い、環境制御室（タバイエスペック社製）内に設置した。なお、低酸素室は2室試作した。

b: 低酸素室の環境

低酸素室は標高2,000mを想定し、O₂濃度を平圧にて16.4%に設定した。7.22m³の面積の低酸素室に1名の被験者が入室した場合、O₂濃度は実験期間を通じて16.40±0.12%、CO₂濃度は0.12±0.02%と比較的に安定に保たれた。但し、低酸素室内の空気はダクトを用いて屋外に排気し、その換気量はほぼ



塩化ビニール製の低酸素室

200 l/minであった。アルプスルーム内の温度は約22℃および湿度50%で行った。これらの温度および湿度は、環境制御装置によってコントロールした。

なお、低酸素室の安全性を確保するために、室内のO₂濃度が15%以下になったとき自動的に窒素発生器の駆動が停止するようにした。さらに、被験者が低酸素室に入室中は、監督者が低酸素室内のO₂濃度、CO₂濃度、室温および湿度を原則として1時間おきに監視し、記録するとともに、起床時の心拍数および動脈血酸素飽和度(SpO₂)を測定した。なお、SpO₂はPULSOX-5（ミノルタ社製）を用いて測定した。

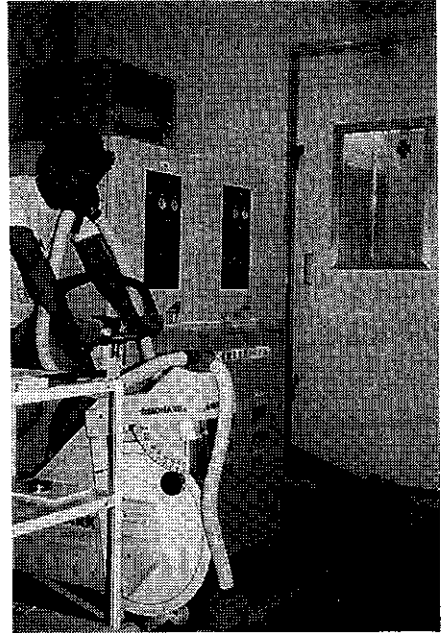
c: 運動中の低酸素吸入

低酸素室内で運動するためには広い床面積と多くの換気が必要となる。そこで、経済性を考えて、低酸素を吸入しながらの運動は低酸素室外においてマスクを介して行った。すなわち、低酸素室の換気ダクトから蛇管を用いてマスクと連結した。運動の内容は自転車エルゴメータを用いて連続1時間行うこととし、その強度は被験者に自由に選択させた。但し、低酸素運動中における生理的变化を知るために、常に同じ負荷方法で行うようにした。さらに、運動中、心拍数、SpO₂およびRPEを10分おきに測定した。なお、運動中の心拍数はPOLAR VANTAGE XL（POLAR CIC、社製）を用いて測定した。

d : 被験者および低酸素トレーニングの内容

被験者は、ワールドカップ大会出場有資格者3名を含むスピードスケート長距離選手8名を用いた。ただし、同じ被験者が時期を変えて異なった条件のトレーニングをしているので延べ人数は12名となった。低酸素トレーニングの内容は、以下の3つのパターンにおいて行った。すなわち、1)低酸素室に1日10時間暴露し、さらに、低酸素を吸入しながら自転車エルゴメータこぎを1時間行う被験者3名。2)低酸素室に1日10時間暴露のみの被験者3名。3)低酸素吸入をしながら自転車エルゴメータこぎを1時間行うのみの被験者1名。4)コントロール群として低酸素暴露なしで同じトレーニングを行う被験者4名であった。

なお、低酸素暴露は原則として、午後9時から翌朝7時までとし、トレーニング期間は10日間とした。



低酸素を吸入しながら運動する選手

e : トレーニング前後の運動負荷実験

低酸素トレーニングを行った結果、平常酸素分圧(159mmHg)下でのperformanceおよび無酸素的代謝に及ぼす影響を知るために、低酸素トレーニングの前後に自転車エルゴメータ(Excalibur Sport: Load社製)による全力こぎ実験を行った。運動負荷実験は、スピードスケートの5,000mレース中における主観的強度の変化を自転車エルゴメータにおいて限再現するかたちで行った。その結果運動負荷は、運動開始から6分12秒間をランプ負荷(運動開始の負荷は294w, 6分12秒目は355w:ただし、回転数は60rpmに固定)とし、その直後から59Nmで30秒間全力こぎを行うという方法となった。そして、その30秒間全力こぎでの平均パワーの変化をperformanceの変化としてみることにした。

無酸素的代謝の指標として血中乳酸濃度を測定(Biosen 5040L: Envitec社製)した。なお、血中乳酸濃度の測定は上述した自転車エルゴメータこぎ中の3分目(323watts), 6分目(348watts)および30秒間全力こぎ運動3分後とした。

3. 結果および考察

a : 低酸素10時間暴露における安静時 SpO_2 の変化

図1に低酸素室(酸素濃度16.4%)に10時間入室することによる起床時の SpO_2 の経日変化を示した。平常酸素濃度(20.93%)下での SpO_2 はいずれの被験者も97%から98%の間であったが、低酸素環境に10時間暴露することによって6名中4名はほぼ95%に低下し、2名の被験者はそれぞれ93%

4. 論文

および92%まで低下した。しかし、低酸素室に1日10時間入室することに加えて一日1時間の低酸素トレーニングを連続10日間実施しても低酸素室内における安静時SpO₂に増加傾向は見られなかった。

一般に、SpO₂の低下は肺泡内酸素分圧がある程度低下してからであるとされている⁹⁾。平圧16%の酸素濃度で予想される肺泡内酸素分圧は約75mmHgであるので、この程度の酸素分圧ではSpO₂は急激には変化しない範囲といえる。しかし、上述のようにすべての被験者においてSpO₂は平常酸素濃度時より明らかな低下がみられ、低酸素環境に暴露されたことによる生理的变化として捉えることができる。そして、低酸素室への入室に伴うSpO₂の変化の違いは、高所に対する適応能力に個人差があることを示唆していると思われる。

b：低酸素運動中のSpO₂、心拍数およびRPE

SpO₂は運動強度が高くなるほど低下するが、低酸素環境下においてはその低下はより顕著となる⁹⁾。低酸素運動中、心拍数が140-150拍/分程度でSpO₂は84%まで低下する場合があった。そして、1日10時間の低酸素暴露と低酸素を吸入しながら1時間の自転車エルゴメータこぎを行った場合、低酸素運動中の同一負荷に対し、3名の被験者は低酸素運動に伴い、SpO₂が明らかに増加傾向を示し、心拍数および主観的強度(RPE)は減少した。特に顕著な変化を示した被験者の例を見ると、235Wの運動負荷中のSpO₂は低酸素運動を繰り返すのに伴って86%から92%まで上昇し、RPEは16から13に、そして、心拍数は約10拍/分低下した(図2)。

一方、1日10時間の低酸素暴露のみ、および、1日1時間の低酸素トレーニングのみを行った被験者については、同一負荷に対するSpO₂の増加や心拍数

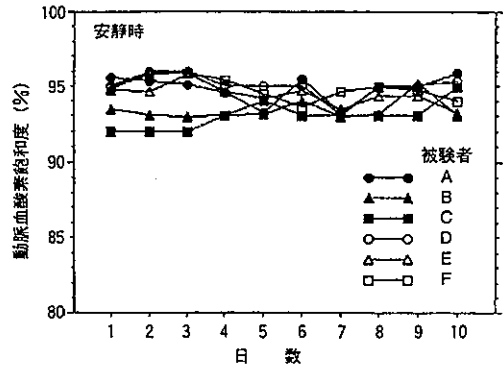


図1 低酸素10時間暴露による安静時SpO₂の経日変化

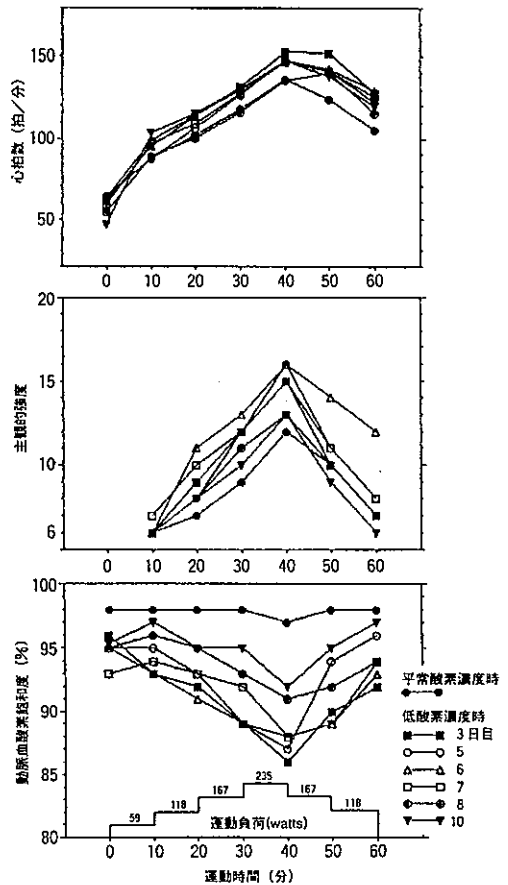
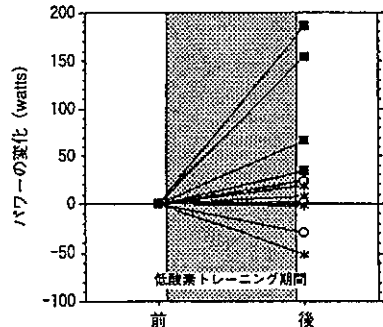


図2 低酸素10時間暴露および1時間の低酸素運動を行った被験者の低酸素運動中の心拍数、RPEおよびSpO₂の経日変化

の低下といった低酸素への順応を推察するような結果は得られていない。

c: 自転車エルゴメータこぎによるパワーの変化

図3に低酸素トレーニング前値を0としたときのトレーニング後における平均パワーの変化を示した。10時間低酸素暴露および1時間の低酸素運動を実施した被験者は、10時間低酸素暴露のみおよびコントロール群より平均パワーの増加率が高かった。ここで示された平均パワーの変化は、無酸素的エネルギー出力も動員された最大努力での仕事量の変化であると同時に、運動開始から6分12秒間における余裕力の変化であるといえる。この余裕力はもちろん有酸素的エネルギー出力が主体的に関与しているものと考えることができる。



ただし、■低酸素トレーニング群 (10時間暴露+1時間トレーニング)
○低酸素トレーニング群 (10時間暴露)
*コントロール群

図3 低酸素トレーニング前後における自転車エルゴメータこぎによるパワーの変化

d: 血中乳酸濃度の変化

1日10時間の低酸素暴露と低酸素を吸入しながらの自転車こぎ運動を行った4名の運動中の血中乳酸濃度は323,348wattsおよび最大努力後のいずれにおいても低酸素トレーニングによって低下し

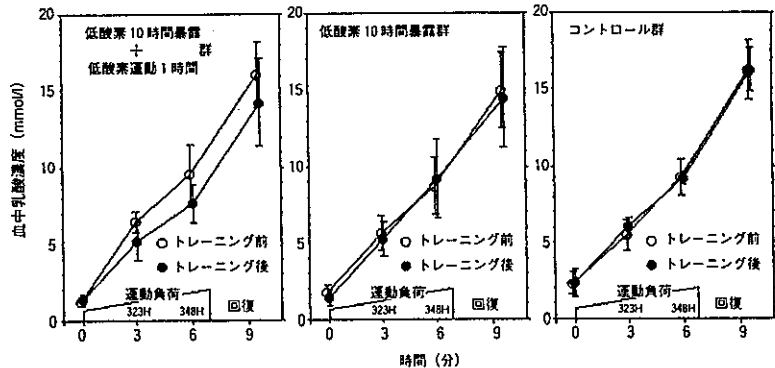


図4 低酸素トレーニング前後における運動中および運動後の血中乳酸濃度の変化

た。一方、10時間の低酸素暴露のみの被験者、およびコントロール群は減少傾向を示さなかった(図4)。

今回の実験において低酸素環境を最も多く利用した被験者達の血中乳酸濃度が運動中および最大運動後に低下する傾向を示したことは、低酸素トレーニングによって末梢における代謝系に変化をもたらされたことを示唆している。

4. まとめ

平圧-低酸素室は、窒素発生器を利用することによって比較的安定した低酸素環境が得られた。試作段階での低酸素室は塩化ビニール製のテントを用いたが、基礎的研究踏して十分に役割を果たしただけでなく、移動式の低酸素室としての利用が可能である。さらに、この実験において用いた低酸素供給システムを大型化すればいわゆるアルプスホテルを作ることも可能であろう。

4. 論文

実験は標高2,000mを想定したものであったが、低酸素環境において1日に安静状態で10時間暴露と1時間の低酸素運動を組み合わせた低酸素トレーニングを10日間継続することによって低酸素への順応を推察する結果が得られ、performanceの向上が認められた。これらの結果は、低酸素室の利用期間や低酸素室の酸素濃度の設定などを検討することによって、様々な高地登山への順応トレーニングとして応用することが可能であると思われる。

文献

- 1) 青木純一郎：登山トレーニングの観点からフィンランドの平圧-低酸素トレーニング施設“アルプスルーム”の可能性を探る。登山研修 11：118-120. 1996.
- 2) 浅野勝己：ニンテンカンサ峰登頂への高山病予防の為の高所順応トレーニングおよび登山中・後の生理学的応答に関する高所生理学研究。登山研修 11：97-109. 1996
Jacobs,I. : Blood lactate. Implications for training and sports performance.,Sports Med.,
3 : 10-25. 1986.
- 3) 前嶋孝：スピードスケート競技における低酸素トレーニングの実際-低酸素室の試作とトレーニング効果-。J. J. Sports Sciences, 15 : 339-344. 1996.
- 4) 大島正光：航空宇宙生理学。吉村寿人ほか編：生理学大系K. 適応協関の生理学。医学書院，
621-707. 1970.
- 5) West,J.B. : Climbing Mt.Everest without oxygen : an analysis of maximal exercise during extreme hypoxia.Respir.Physiol. 52 : 265-279, 1983.

(専修大学)