

■研究と報告

低酸素環境の運動療法への応用に関する研究 —常圧・低酸素室の試作—

Research on application of low oxygen environment to therapeutic exercise
—Trials in normal air pressure and low oxygen room—

大倉 三洋*¹, 吉田 良一*², 山本 巖*³, 藤原 孝之*⁴

Mitsuhiro Ookura *¹, Ryouichi Yoshida *², Iwao Yamamoto *³, Takayuki Fujiwara *⁴

要 旨: 身体に負荷をかける場合「運動負荷」に加え、低酸素環境も「環境負荷」としてトレーニング効果に影響を与えることが知られている。

本研究の目的は、このような環境因子の中で低酸素環境を提供するシステムとしての常圧・低酸素室の試作と低酸素環境の運動療法への応用の可能性について検討するものである。今回試作の常圧・低酸素室には高分子膜を利用した窒素発生器を用い、臨床現場で簡単に設置可能な移動式タイプとした。また、低酸素室の酸素濃度も14.5%（高度3000 m相当）まで任意に設定可能であり、運動療法用の低酸素室として十分機能するものであった。本装置を用いて、健常男性12名を対象に通常環境下と低酸素環境下における呼吸循環応答について比較検討した結果、低酸素環境下では通常環境下よりも軽い物理的負荷で通常環境下と同程度のストレスを呼吸循環系に与えることが可能であり、このことは高齢者や低肺患者、神経・筋疾患などで筋力が弱く通常環境下で十分な全身運動ができない患者の体力維持・改善を目的とする運動療法への応用の可能性を示唆するものであった。

キーワード: 高分子膜, 低酸素環境, 運動療法

I はじめに

身体に負荷をかける場合、どのような運動をどの程度行わせるかといった「運動負荷」の他に運動を行っているときの周囲の気温、湿度、気圧、酸素濃度といった環境因子も「環境負荷」としてトレーニング効果に影響を与えることが知られている。

このような環境因子の中で低酸素環境の利用は、スポーツ分野において高地（低酸素）トレーニングとして試みられている¹⁻³⁾。高所や低圧室では、大気や室内の酸素分圧の低下に伴って肺胞内の酸素分圧が低下しその結果、血液中の酸素飽和度が低下し組織への酸素供給不足をもたらすといった低酸素刺激（環境刺激）が生体に与える

*¹ 高知リハビリテーション学院 Kochi Rehabilitation Institute

*² (有)ワイ. ケー. エス Y.K.S.Inc

*³ 信州大学 Shinshu University

*⁴ 郡山健康科学専門学校 Educational Foundation Koriyama Tohto Academy

表1 高度と酸素分圧, 酸素濃度の関係

高度 (m)	酸素分圧 (mmHg)	酸素濃度 (%)
0	159	20.9
500	150	19.7
1000	141	18.5
1500	133	17.5
2000	125	16.4
2500	117	15.4
3000	110	14.5

酸素運搬能の改善を利用してアスリートの全身持久力や競技力の向上を目指す方法である。

高地トレーニングは、スポーツ選手の呼吸循環機能を高め、競技力向上が期待できるというメリットがある反面、滞在期間中常時低酸素環境にさらされるため疲労が蓄積されやすいこと、トレーニングを行う場所が限られ、渡航費や滞在費がかかり一部の者しか利用できないといったデメリットもある。また低圧室の利用は、装置が大掛かりで高価なことや急激な圧力変動が生じるおそれがあり鼓膜損傷等の危険性を伴う、また緊急時の自力での脱出が困難であるといった安全性の面からも実用的ではない。

高地トレーニングの効果は、気圧の減少によって肺胞内の酸素分圧が低下した環境にさらされることにある。したがって、酸素濃度をコントロールすることによって平地でも低酸素分圧の空気を吸入することは可能である。近年この原理を利用して常圧・低酸素室が作られ主にスポーツの分野において低圧・低酸素環境に代わるトレーニング方法として試みられている^{4~6)}。しかし低酸素環境といった環境負荷の運動療法への応用についてはほとんど行われていない。

今回われわれは、高分子膜を利用して、酸素濃度を20.9~14.5%まで制御可能な常圧・低酸素室を試作し、運動療法への応用と可能性について検討したので報告する。

II 装置の概要

1. 常圧・低酸素環境

人工的に低酸素環境を作り出す方法として、従

表2 ボンベ方式, PSA方式, 膜分離方式の比較

	原理	特徴
ボンベ方式	各濃度に調節された酸素ガスをボンベから直接供給する。またはボンベ内の窒素ガスを空気と混合する	<ul style="list-style-type: none"> 安定した濃度のガスが供給できる。 ボンベの容量に限界があり、長時間の供給が困難である。 費用がかかる
PSA方式	各ガス成分の吸着剤に対する吸着速度の違いを利用してガスを分離する。	<ul style="list-style-type: none"> 分離ガスの濃度は調節できず、ほぼ100%のCO₂ガスが生成される。 供給圧力が安定していれば、生成される分離ガス濃度は安定する。 吸着-脱着の切替時にエア-の吐き出し音がある。
膜分離方式	各ガス分子の高分子膜(ポリスルホン、ポリイミド)に対する透過速度の違いを利用してガスを分離する。	<ul style="list-style-type: none"> 供給空気の圧力、流量、温度を変えることによって、分離ガスの濃度が調節できる。 環境温度の影響を受ける。

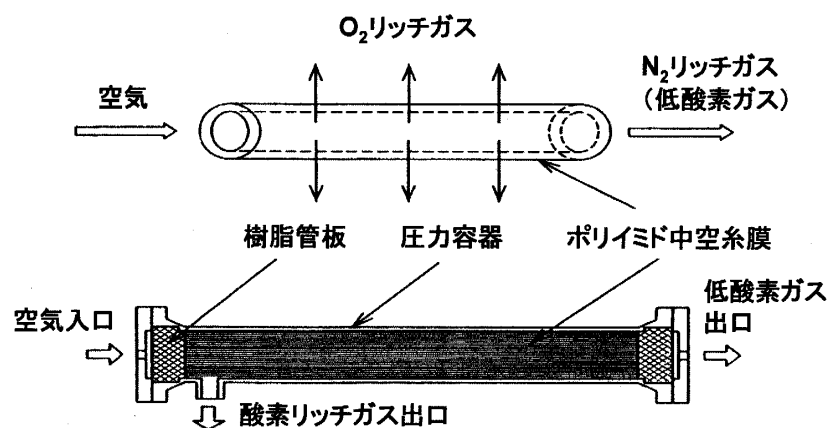
来から利用されている低圧・低酸素環境では、空気の絶対量は減少するが空気組成は変化しない。室内空気の酸素濃度はどの圧力でも20.9%である。一方、常圧・低酸素環境では空気の絶対量は変化しないが、空気組成が変化する。すなわち、室内空気の酸素濃度を目標とする高度の酸素分圧に相当する酸素濃度になるように低酸素空気を供給することにより得られる(表1)。常圧・低酸素環境を作り出す方法について以下に述べる(表2)。

1) ボンベ方式(圧縮ボンベを用いる方法)

目的に合わせた酸素濃度の圧縮ボンベを用意し。これをダグラスバッグにもどしフェイスマスクを介して低酸素の空気を吸入する方法である。この方法では安定した低酸素空気の供給が可能であるが、ボンベやダグラスバッグの容量に限界があり頻繁に低酸素空気の補充や交換が必要であり長時間の実験や訓練には不向きである。

2) 吸着方式(PSA方式)

空気の各ガス成分の吸着剤に対する吸着速度の違いを利用して窒素ガスを分離する方法である。



空気成分の透過速度

透過しにくい

透過しやすい

N_2, CO, Ar

O_2, CO_2, He

図1 膜分離方式による窒素発生装置の構造

環境温度の影響を受けないことや空気回路の簡略化などのメリットはあるが、ほぼ100%の窒素ガスが生成されるため大量の通常空気と混合して目的とする酸素濃度に調整する必要があり非常に効率が悪く、装置が大型化する。また、100%の窒素ガスが供給されるため、装置のトラブルにより直接窒素ガスを吸入した場合には死に至る危険性があり、訓練者の安全性を考えると好ましい方法とはいえない。

3) 膜分離方式

空気は N_2 、 O_2 、 CO_2 、 Ar ガスなどから構成される混合ガスであり、これらのガス分子の高分子膜（ポリスルホン、ポリイミドなど）に対する透過速度の違いを利用してガスを分離する方法である¹¹⁾。例えばポリイミド中空糸膜の中に空気を通すと透過しやすい O_2 ガスや CO_2 ガスは膜外に分離されるため、膜内を通過する空気の酸素濃度は低くなる。この低酸素空気を利用して常圧・低酸素環境を作り出す方法である（図1）。膜分離方式の場合、分離膜で空気を連続的に酸素と窒素に分離し、その酸素/窒素の分離比を調節することができるので、酸素を減じた分以上に窒素が異常に付加されることはない。したがって、設定以下の酸素濃度の空気が供給される危険性は少なく

安全性が高い。

2. 低酸素発生装置

常圧・低酸素室の心臓部は膜分離方式による低酸素空気発生装置である。本装置はポリイミド中空糸膜を利用した分離膜（宇部興産製 UBE N_2 セパレータ）と分離膜に空気を送り込むコンプレッサー（アネスト岩田製 SLP-22C）、エアークリーンユニットおよび流量調節弁などにより構成されている。

3. 酸素濃度制御装置

常圧・低酸素室の酸素濃度を一定に保つ方法としては、低酸素空気発生装置から供給される空気の酸素濃度を一定の濃度にすればよいが、分離膜の性質上、コンプレッサーの圧力や周囲の温度によって分離される酸素濃度が変化する。すなわち分離膜に供給される空気の圧力および温度が高いほど供給される低酸素空気の酸素濃度は低くなる。そのため低酸素室の酸素濃度を一定に保つために、酸素モニターと自動制御弁を用いた酸素濃度制御装置を制作した（図2）。本装置は低酸素室内の酸素濃度が酸素モニターに設定した濃度より低くなると自動制御弁が開き外気を吸入し酸素濃度を上げ、逆に酸素濃度が上昇すると自動制御弁が閉じて室内の酸素濃度を下げる仕組みになっ

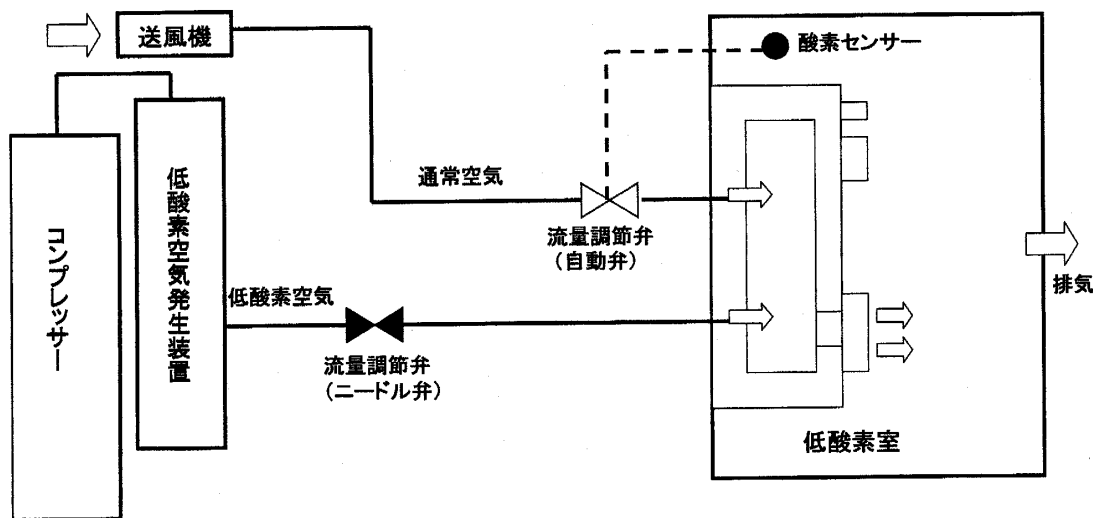


図2 酸素濃度制御システム

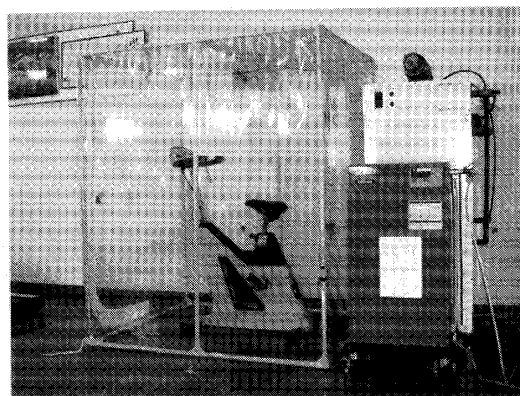


図3 常圧・低酸素室

ている。

4. 常圧・低酸素室の性能

今回試作の常圧・低酸素室は高さ1.9 m, 幅1.3 m, 奥行き1.6 m, 容積約4.0 m³の気密性の高い塩化ビニール製テントを用いた(図3)。温度が一定の場合, 分離膜を通過する酸素濃度と流量は分離膜を通過する空気圧により決定される。今回試作の低酸素発生装置における空気圧と酸素濃度および流量の関係は図4に示すとおりであり理論的には酸素濃度10%程度まで可能であるが実際には数%程度の濃度調整が必要であること, また低酸素室のCO₂濃度の上昇を抑えるためには, 運動の強度や低酸素室に入る被験者やセラピストの人数にもよるが低酸素室内の換気量は150 l/min程度は必要であり, 常圧・低酸素室の酸素濃度は14%が限度である。

III 常圧・低酸素環境における呼吸循環応答

常圧・低酸素環境の運動療法への応用の可能性について今回試作の常圧・低酸素室を用い, 安静時および運動時の呼吸循環応答について換気量(以下VE), 動脈血酸素飽和度(以下SpO₂), 心拍数(以下HR)の面から検討した。

1. 対象および方法

対象は平均年齢22.8歳(20~26歳)の健常男子学生12名であり, 倫理的配慮として, 実験の主旨および注意事項について説明をし, 同意を得た。

被験者を酸素濃度16.4%(高度2000 m相当)および14.5%(高度3000 m相当)に設定した常圧・低酸素室内で30分間安静にさせた後, 自転車エルゴメータ(コンビ社製エルゴメータ232C)を用い, ペダル回転数を50~60 n/min, 130 Wの負荷で10分間駆動させた。また, 安静5分, 運動10分の計15分間のVE, HRをミナト医科学製エアロモニターAE280Sを用い連続測定した。SpO₂の測定はNELLOR PUPITAN BENNETT社製パルスオキシメータNBP-400を用い安静開始から運動終了まで1分間隔で測定した。なお安静時VE, HR, SpO₂は安静終了前3分目から終了までの3分間, 運動時VE, HR, SpO₂は運動開始5分目から終了までの5分間の平均値とした。また, 同様の実験を通常環境下(酸素濃度20.9%)で行い比較検討した。

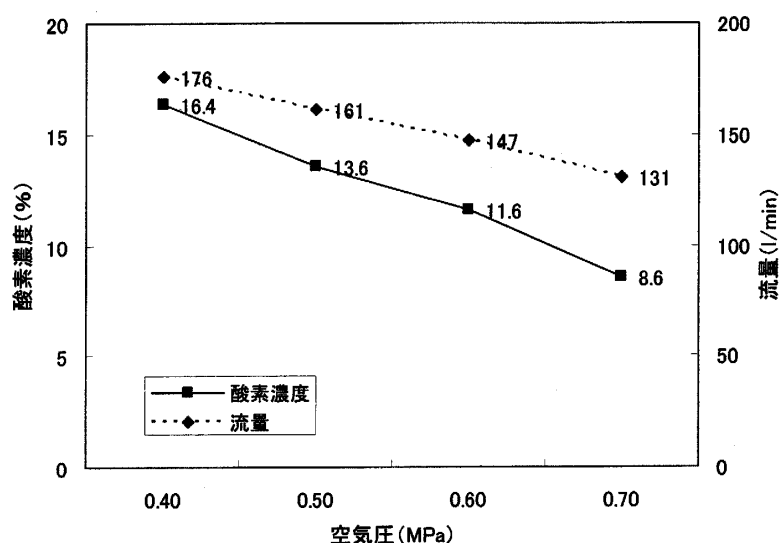


図4 空気圧と酸素濃度・流量の関係

表3 通常環境下と常圧・低酸素環境下における呼吸・循環応答の比較 n = 12

	O ₂ 濃度 (%)	VE (l/min)	SpO ₂ (%)	HR (bpm)
安静時	20.9	10.7 ± 0.5	98.1 ± 1.4	70.1 ± 5.5
	16.4	11.0 ± 0.3	95.8 ± 1.8	74.2 ± 6.3
	14.5	13.1 ± 0.8	93.3 ± 2.2	79.9 ± 7.1
運動時	20.9	53.2 ± 2.6	96.9 ± 1.2	141.8 ± 14.7
	16.4	57.5 ± 4.7	91.0 ± 1.3	150.9 ± 15.8
	14.5	62.3 ± 5.8	85.4 ± 2.5	157.6 ± 16.6

* P < 0.05 ** P < 0.01

統計解析は、一元配置分散分析を行い、その後の多重比較はFisherのPLSDを用いて行った。全ての検定において、有意水準は5%未満とした。

2. 結果

1) VEの変化

安静時VEの平均値±標準偏差は酸素濃度20.9%で10.7 ± 0.5 l/min, 16.4%で11.0 ± 0.3 l/min, 14.5%で13.1 ± 0.8 l/min, 運動時VEの平均値±標準偏差は酸素濃度20.9%で53.2 ± 2.6 l/min, 16.4%で57.5 ± 4.7 l/min, 14.5%で62.3 ± 5.8 l/minであり、安静時VEでは20.9%と14.5%, 16.4%と14.5%の間において危険率1%で有意差が認められた。運動時では20.9%と14.5%の間において危険率1%で有意差が認められ、常圧・低酸素環境でのVEは安静時、運動時とも14.5%において通常環境下よりも低くなるこ

とが確認された(表3)。

2) SpO₂の変化

安静時SpO₂の平均値±標準偏差は酸素濃度20.9%で98.1 ± 1.4%, 16.4%で95.8 ± 1.8%, 14.5%で93.3 ± 2.2%, 運動時SpO₂の平均値±標準偏差は酸素濃度20.9%で96.9 ± 1.2%, 16.4%で91.0 ± 1.3%, 14.5%で85.4 ± 2.5%であり、それぞれ危険1%で有意差が認められ、常圧・低酸素環境ではSpO₂が通常環境下よりも低くなることを確認された(表3)。

3) HRの変化

安静時HRの平均値±標準偏差は酸素濃度20.9%で70.1 ± 5.5 bpm, 16.4%で74.2 ± 6.3 bpm, 14.5%で79.9 ± 7.1, 運動時HRの平均値±標準偏差は酸素濃度20.9%で141.8 ± 14.7 bpm, 16.5%で150.9 ± 15.8 bpm, 14.5%で157.6 ± 16.6であ

り、安静時では20.9%と14.5%、16.4%と14.5%、運動時では20.9%と14.5%においてそれぞれ危険率5%で有意差が認められた(表3)。

IV 考察

低酸素環境のトレーニングへの応用はローマ(1960)および東京(1964)オリンピックのマラソン競技での高地民族の活躍、また1968年のオリンピックが標高2290mのメキシコで開催されたことが契機となり、以来世界各国で陸上競技をはじめ多くの競技のトレーニング方法として高地トレーニングが導入されて、今日まで多くの研究と実践がなされてきた⁷⁾。

これまでの高地トレーニングの実践研究は、平地住民が高地へ行って一定期間トレーニングをするか、高地と同じ条件を設定した低圧室を利用してトレーニングが行われてきた。しかし臨床現場で低酸素環境を利用する場合、患者を高地へ移すことは困難であり現実的ではない。また、低圧・低酸素環境ではその設置コストやランニングコストが高く、出入りが容易でないこと、実施に当たっての安全性などを考慮すると実施が困難である。

高地や低圧・低酸素環境(低圧室)でのトレーニング効果は、気圧の減少に伴って肺胞内の酸素分圧が減少することが、環境負荷として作用することにある。したがって平地においても、室内の酸素濃度を目標とする高度の酸素分圧に相当する酸素濃度にコントロールすれば、平地においても低酸素分圧の空気を吸入することが可能である⁸⁾。今回試作の常圧・低酸素室はこの原理を応用したもので、高分子膜を利用した窒素発生装置を用いて分離される低酸素空気をテント内に供給し、常圧下での低酸素環境を作るものであり室内の酸素濃度を20.9%から14.5%まで調節可能である。

低酸素室といった狭い室内で運動させることから低酸素室のCO₂濃度の上昇をいかに抑えるかが問題となってくる。CO₂ガスそのものは強度の有害ガスではないが空気衛生学上0.35%以下に抑えることが望ましいとされている⁹⁾。低酸素室内のCO₂濃度は低酸素室への低酸素空気供給量

(流量)によって決定される。今回試作の低酸素発生装置は院内での移動性を考え、分離膜とコンプレッサーの小型化を図ったため低酸素空気供給量が176 l/min(酸素濃度16.4%)~131 l/min(酸素濃度8.6%)と制限された。しかし、一般の健常成人の安静時毎分換気量は5~8 l/min¹⁰⁾、運動時最大毎分換気量は男子で110~130 l/min、女子で80~100 l/min¹¹⁾といわれており、今回試作の常圧・低酸素室ではCO₂濃度は特に問題とはならないと考える。

今回、常圧・低酸素環境が呼吸循環機能に与える影響について本装置を用いて安静時および運動時におけるVE, HR, SpO₂から検討を行った。安静時におけるVE, SpO₂は通常環境下に比べ、酸素濃度が低下するにしたがって減少する傾向が、また、HRは酸素濃度の低下にしたがって増加する傾向が認められ常圧・低酸素室に入室するだけで呼吸循環機能に対しストレスがかかることが示唆された。

運動時においてもVE, SpO₂は通常環境下に比して酸素濃度が低下するにしたがって減少する傾向が、また、HRは酸素濃度の低下に伴い増加する傾向が認められ常圧・低酸素環境では物理的負荷に加え低酸素環境という環境負荷が加わり通常環境下に比して呼吸循環系へのストレスが大きくなることが示唆された。すなわち、常圧・低酸素環境下では通常環境下よりも軽い物理的負荷で通常環境下と同程度のストレスを呼吸循環系に与えることが可能であり、このことは高齢者や低肺患者、神経・筋疾患などで筋力が弱く通常環境下で十分な全身運動ができない患者の体力維持・改善を目的とする運動療法への応用が期待できると考える。

V まとめ

低酸素環境の運動療法への応用を目的に常圧・低酸素室の開発と常圧・低酸素環境が呼吸循環機能に与える影響について検討した。今回試作の常圧・低酸素室は高さ1.90 m、幅1.26 m、奥行き1.56 m、と小型であるが酸素濃度を20.9%~14.5%まで調節可能で患者を対象とした運動療法の実施には十分対応できるものであった。また、

常圧・低酸素環境下では通常環境下よりも軽い物理的負荷で通常環境下と同程度のストレスを呼吸循環系に与えることが可能であり，高齢者や低肺患者，神経・筋疾患などで筋力が弱く通常環境下で十分な全身運動ができない患者の体力維持・改善を目的とする運動療法への応用の可能性が示唆された。

文 献

- 1) 川原 貴：日本陸連での取り組み—長距離・マラソンの高地トレーニング。臨床スポーツ医学, 8: 598-606, 1991.
- 2) 萬久博敏：競泳選手の高所トレーニング。体育の科学, 46: 569-574, 1996.
- 3) 野村武雄, 萬久博敏：水泳競技選手の高所トレーニング。臨床スポーツ医学, 16: 549-553, 1999.
- 4) 前嶋 孝：低酸素環境を利用したトレーニングの実際。体育の科学, 51: 277-280, 2001.
- 5) 狩野和也：常圧低酸素室を用いた“living low, training high”方式の高所トレーニングが自転車競技選手の身体作業能力に及ぼす効果。トレーニング科学, 13: 81-92, 2001.
- 6) 前嶋 孝：スケート選手の高所トレーニング。臨床スポーツ医学, 21: 25-29, 2004.
- 7) 青木純一郎：高地トレーニングガイドラインとそのスポーツ医学的背景：4-5, (財)日本体育協会, 東京, 2002.
- 8) 前嶋 孝：平圧—低酸素トレーニングの有効性。ESPEC技術情報, 8: 1-6, 1997.
- 9) 田辺新一：室内科学汚染：90-91, 講談社, 東京, 1998.
- 10) 猪飼道夫：酸素摂取量と酸素負債。猪飼道夫編著, 身体運動の生理学：174-176, 杏林書院, 東京, 1990.
- 11) 山地哲司：呼吸機能。宮下充正, 石井喜八編著, 運動生理学概論：114-124, 大修館書店, 東京, 2000.

Abstract : It is known that the low oxygen environment in addition to “Exercise” also influences the training effect as “Environmental burden” when the load is put on the body.

At the same time, the influence that the development of low oxygen room and the low oxygen environment gave to the breath circulation function was examined. This examination is used to apply the low oxygen environment to the therapeutic exercise. The small low oxygen room of making this time for trial purposes is 1.9m in height, 1.3m in width, and the depth 1.6m, and the density of oxygen was able to have been adjusted to 20.9% to 14.5%. Also, it was the one that was able to correspond enough to the execution of the therapeutic exercise intended for the patient. Compare to the normal environment, low oxygen environment possibly gave the same degree of the stress to the breath circulatory system under the light-physical load. The possibility of the application to the therapeutic exercise to aim at the physical fitness maintenance and the improvement of the patient, who was not able to do an enough whole body movement i.e. the older person, the low lungs patient, and the nerve and muscle disease, under the normal environment was suggested.

Key Words : high polymer membrane, low oxygen environment, therapeutic exercise

(2006年1月30日 原稿受付)