

●原 著

閉鎖循環式呼吸器における酸素供給量と 二酸化炭素吸収能力の決定

高橋 正好* 眞野 喜洋** 芝山 正治*** 山見 信夫**

閉鎖循環式呼吸器の安全性を検討する目的で、吸気中の酸素や二酸化炭素濃度の増加が、人体の呼吸や代謝活動に与える影響について調べた。吸気中のガス組成は次の四つの条件である。すなわち、A) 空気、B) 酸素濃度40%、C) 二酸化炭素濃度3%、D) 酸素濃度40%かつ二酸化炭素濃度3%。実験は自転車エルゴメーターの使用により、40~50%VO₂maxの運動条件にて行った。被験者は13名であり、各条件での測定値を統計的に比較した。その結果、呼吸器への影響については、高濃度酸素は1割程度減少させたが、二酸化炭素は4割程度増加させた。しかし、高濃度酸素や二酸化炭素が酸素摂取量に与える影響は認められなかった。また、二酸化炭素排出量については、吸気中の酸素濃度が増加した場合にこれを有意に減少させた。

キーワード：閉鎖循環式呼吸器、高濃度酸素、二酸化炭素、呼吸量、代謝量

Effects of elevated inhaled oxygen and carbon dioxide concentrations on respiration and metabolism during moderate exercise

Masayoshi Takahashi*, Yoshihiro Mano**,
Masaharu Shibayama***, Nobuo Yamami**

*National Institute for Resources and Environment

**Tokyo Medical and Dental University

***Komazawa Women's University

Thirteen healthy subjects performed bicycle-ergometer cycling at approximately 50% of their maximum working capacity while inhaling four different gas compositions: 1) Normoxia and Normocapnia (room air); 2) Hyperoxia (40%O₂); 3) Hypercapnia (3%CO₂); 4) Hyperoxia and Hypercapnia (40%O₂ and 3%CO₂). Hyperoxia decreased the ventilation rate about 7% with normocapnia and about 6% with hypercapnia. It also decreased the carbon dioxide output rate about 5% under both normocapnia and hypercapnia. Hyperoxia had no significant effect on the oxygen uptake rate. Hypercapnia increased the ventilation rate approximately 40% compared to normocapnia, but it did not change the rates of oxygen uptake or carbon dioxide output significantly.

Keywords :

Closed-Circuit-Breathing-Apparatus
Hyperoxia
Hypercapnia
Ventilation rate
Oxygen uptake
Carbon dioxide output

はじめに

閉鎖循環式呼吸器は、呼気ガスを再び吸気ガスとして利用するため、開放式に比べて小型で長時間の利用が可能であり、潜水作業などにおいても重要な呼吸器の一つである。この呼吸器は、回路内において酸素の添加と、二酸化炭素の除去を行うことが必要である。酸素の供給源としては、圧縮酸素を充填した高圧ボンベや、超酸化カリウム(KO₂)などを利用した酸素発生剤が利用されている。また、二酸化炭素の除去には、ソーダライムや水酸化ナトリウムなどの化学薬剤が利用されている。ところで器具の設計においては、使用される状況下での運動量などを考慮して、酸素の供給量や二酸化炭素吸収剤の充填量を決定する必要

*資源環境技術総合研究所

**東京医科歯科大学

***駒沢女子大学

表 1 各条件での試験におけるガス濃度試験

試験条件	吸気ガス濃度 (%)	
	酸素	二酸化炭素
A	20.9	trace
B	40.0	trace
C	20.9	3.0
D	40.0	3.0

がある。この決定には、運動時の呼吸量や代謝量の測定が不可欠であるが、これらの測定値は空気を呼吸した条件で得られたものが大部分であり、実際の呼吸器使用時に想定される高い酸素濃度や二酸化炭素の存在下での測定はほとんどなされていない。近年、運動生理学の分野では、高濃度酸素の影響について、ある程度信頼性の高いデータが得られるようになってきた¹⁻³⁾。しかし、高濃度酸素と二酸化炭素が複合した条件下での影響は未知であり、呼吸器に必要な酸素供給量や二酸化炭素吸収剤の分量を決定する上での大きな課題である。

本研究では、呼吸量や代謝量を高精度に計測するシステムを構築するとともに、運動条件での被験者試験を実施し、吸気のガス組成の変化が呼吸量や代謝量に与える影響を明らかにした。また、閉鎖循環式呼吸器の性能基準としてJISなどの規準では吸気中の二酸化炭素濃度を3%以下と規定しているか、その妥当性についても検討した。

試験方法

13名の被験者が、運動時において、酸素および二酸化炭素濃度の異なる気体を呼吸することにより実験を行った。吸気条件の設定と呼吸量や代謝量の計測には代謝量測定システム（後述）を利用した。吸気の酸素および二酸化炭素濃度は、表1に示す4種類である。酸素濃度40%は、陸上用酸素呼吸器の実測データの最小値を参考にした。二酸化炭素濃度3%は、JISなどにおける閉鎖循環式呼吸器の許容値を採用した⁴⁾。被験者の身体的な特徴を表2に示す。試験の実施に当たっては、想定されるリスクを説明した上で同意を得た。運動負荷としては、自転車エルゴメータを利用して、2分間静止の後、20Wの負荷強度において毎分60

表 2 被験者の特徴

被験者	性別	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)
a	M	38	175	70
b	M	46	180	86
c	M	28	167	64
d	M	30	168	68
e	M	30	163	60
f	F	29	158	52
g	M	35	180	68
h	M	44	170	75
i	M	39	160	63
j	M	37	172	75
k	M	30	170	65
l	M	30	164	60
m	M	28	167	61

回の割合でペダルをこいだ。その後、1分毎に20Wずつ負荷強度を上げていき、最終的に各被験者の40~50%VO₂maxに相当する運動強度としてこれを3分間継続した。被験者によっては最後の負荷の増加量は10Wであった。また、負荷強度は心拍数の値を基に決定し、120回/分程度となることを目安にした。なお、実験開始に当たっては、体が実験条件に馴染むように最低3分間、酸素濃度が高い場合には5分間安静下での呼吸を行った。また、各被験者にとって、4種類の試験の順番は任意とした。原則的には1日1回の実験としたが、2回実施した場合には途中に十分な休息时间を入れた。

図1に代謝量測定装置の模式図を示す。この装置により、吸気ガス組成の調整と、呼吸量や代謝量の計測を行った。被験者は半面マスクを装着して、調整箱の気体を吸気し、混合槽に呼吸を吐き出した。調整箱の気体は、ブローヤから供給された空気（毎分約100L）に、試験条件に応じて酸素や二酸化炭素を混合した気体である。呼吸袋は呼吸運動に対するバッファとして利用した。また、入気の余剰分は逆止弁から外気に廃棄した。半面マスクの死積は約150mLであり、呼吸は混合槽を通過して外気に廃棄した。回路全体の呼吸抵抗は、毎分60Lの呼吸時のピーク値として、吸気、呼気共に約500Paであった。

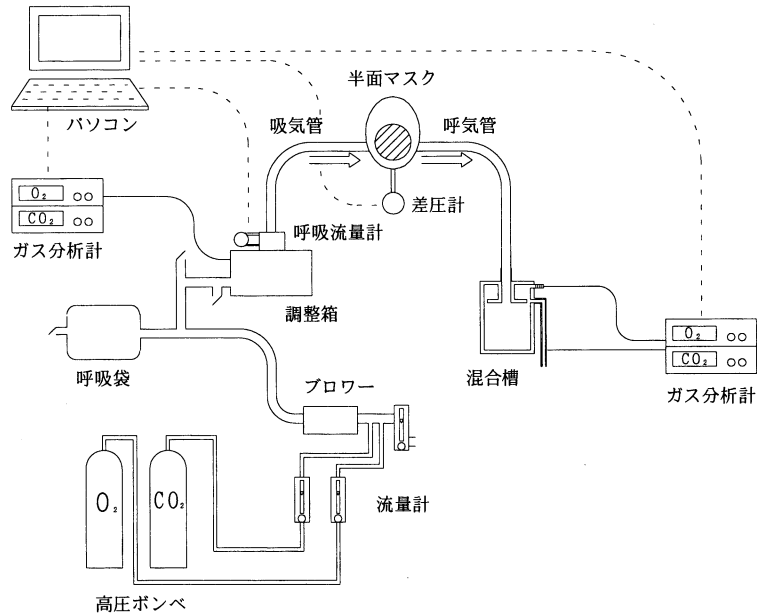


図1 代謝量測定装置の模式図

測定は、調整箱と混合槽の酸素濃度、二酸化炭素濃度をガス分析計（AIC社製RAS-31/41）により行った。また、吸気流量をFleish型通気流量計（日本光電社製VT-112T）により、マスク内の圧力変動を圧力トランスデューサ（豊田工機製PD 104K）により測定した。測定器からの信号はA/D変換した後パソコンに送り、各種測定データの計算に利用した。なお、吸気量の計算においては、粘性係数が温度と混合比の影響を強く受けるため各種補正を行なうとともに、A/D変換の周期と流量の瞬間値から台形則を利用して一呼吸毎の値とした。また、呼気量（以下、呼気量）や代謝量の計算においては、吸気と呼気の窒素分量を等しいと仮定した。

装置の測定精度を、ダグラスバック法を利用して評価した。ダグラスバック法は、呼気をダグラスバックに一定時間採取して、その内容積やガス組成から呼吸量や代謝量を求める方法である^{5) 6)}。これは、時間分解能に乏しく非定常な変化には対応できないが、呼吸が安定した状況での解析には最も信頼性が高い。しかし、Welchら¹⁾によって指摘されているように、コネクター部などからの

わずかな外気の侵入を防止することが困難なため、吸気の組成が空気と異なる場合には代謝量に大きな誤差が生じる。今回の精度試験においても、入念に測定を実施したにもかかわらず、ダグラスバックには漏れの影響が認められた。この漏れは呼吸量の測定値には実質的な誤差を生じないため、まず呼吸量について比較を行った。測定は、混合槽の排気部にダグラスバックをつないで、呼吸が安定した段階で2分間採気を行い、両者の呼吸量の測定値を比較した。その結果、表1に示す吸気組成のガスを呼吸した場合に、ダグラスバックの値に対して、測定装置の値は1%程度の誤差であった。次に代謝量であるが、空気を吸気した場合にはダグラスバックの実測値を基準にできる。そこで、異なる運動強度にて、酸素摂取量や二酸化炭素排出量を比較したところ、ダグラスバックに対する測定装置の値は2%以内の誤差であった。空気と異なる吸気においては、ダグラスバックの酸素や二酸化炭素濃度は信頼性に乏しいが、Welchら¹⁾によれば混合槽自体の呼気ガスの分析値は信頼性が高いため、組成が異なる気体に対しても同程度の誤差で代謝量の測定ができてい

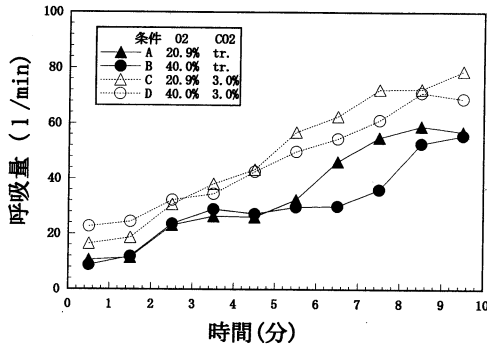


図2 呼吸量の変化 (被験者 a)

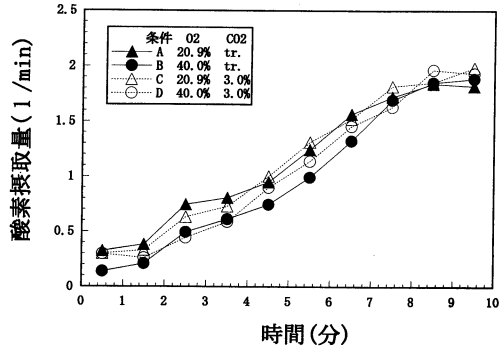


図3 酸素摂取量の変化 (被験者 a)

ると考えられる。

試験結果

図2~4に、被験者aにおける呼吸量、酸素摂取量および二酸化炭素排出量の変化を示す。これらは、条件A~Dの結果を、1分間毎の値で示したものである。試験条件の違いにより値の強度に相違が認められるが、全体的な傾向として、安静時(0~2分)には低いレベルで安定しており、その後の運動強度の増加に伴って各値とも増加している。最終的な運動強度は40~50%VO₂maxであり、一定負荷として3分間継続しているが、最後の測定点の値は直前の値とほぼ同じであり、与えられた運動強度に対して、定常状態に達していると考えられる。他の被験者においても同様な傾向が確認された。そこで、吸気ガス組成の違いが運動時における呼吸量などに与える影響を検討するため、定常状態に達した後の1分間の値を抽出して平均値と標準偏差を求めた。また、酸素濃度や二酸化炭素濃度の変化に対して有意差検定(Student's t-test)を実施した。図5~8に呼吸量、酸素摂取量、二酸化炭素排出量および呼吸商の平均値、標準偏差、有意差の有無を示す。呼吸量は、酸素濃度が20.9%から40%に増加したことにより平均値で約7%の有意な減少を示した。この傾向は吸気中に3%の二酸化炭素が存在した場合でも同様であり、約9%の有意な減少を示した。また、二酸化炭素についてはtraceから3%に濃度上昇したことにより、酸素濃度が20.9%の場合で約35%、酸素濃度が40%の場合では約40%の

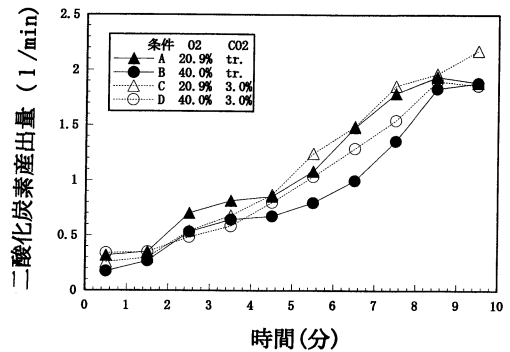


図4 二酸化炭素排出量の変化 (被験者 a)

呼吸量の増加を示した。酸素摂取量は、酸素濃度が20.9%から40%に増えることによりやや増加したものの有意な変化ではなかった。また、3%の二酸化炭素も有意な変化を与えなかった。一方、二酸化炭素排出量は、酸素濃度が20.9%から40%に増加した場合に約5%の有意な減少を示した。しかし、吸気中の二酸化炭素濃度の増加に対しては有意な変化を認めなかった。呼吸商は、高濃度酸素が二酸化炭素排出量に与える影響を反映して、40%の酸素濃度では20.9%に比べて有意に低い値を示した。

考察

吸気中の酸素や二酸化炭素濃度の増加が、呼吸量や代謝量(酸素摂取量、二酸化炭素排出量)に与える影響の把握は、閉鎖循環式呼吸器の安全性を検討する上で重要である。呼吸量への影響は人体の肉体的な負担に関わる問題であり、特に運動

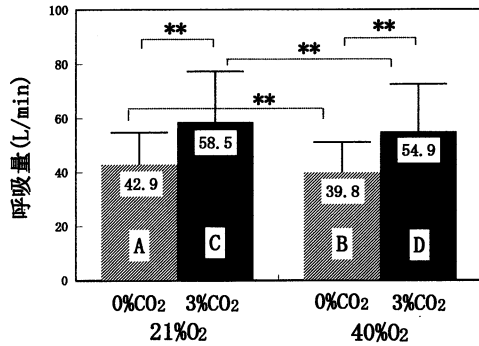


図5 運動時の呼吸量 (平均と標準偏差)

アスタリシスは条件間での有意差の存在を示している。

(** : $p < 0.01$)

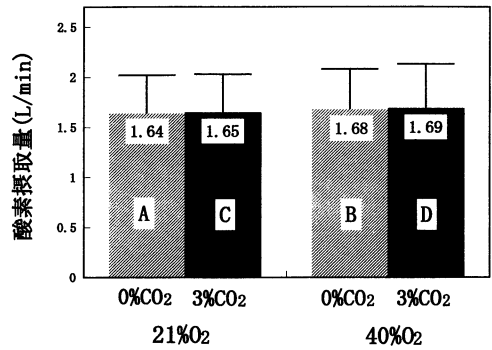


図6 運動時の酸素摂取量 (平均と標準偏差)

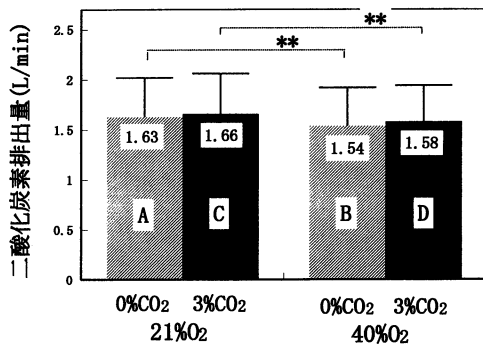


図7 運動時の二酸化炭素排出量 (平均と標準偏差)

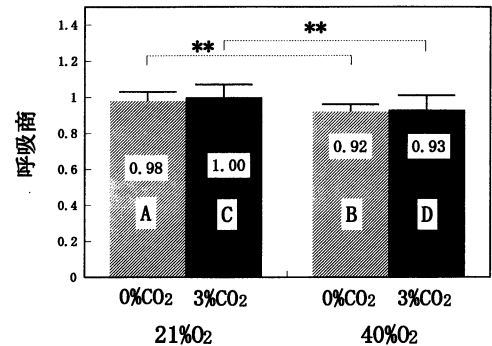


図8 運動時の呼吸商 (平均と標準偏差)

時においては影響が著しい。JISなどの基準⁴⁾では二酸化炭素の許容値は3%であるが、この二酸化炭素濃度では運動時の呼吸量が平均で約4割も増加しており、許容値の妥当性について再検討する必要がある。ところで、閉鎖循環式呼吸器の場合には吸気の酸素濃度が高いが、高濃度酸素には呼吸量を減少させる効果が認められた。ただし、この減少割合は1割未満と少なかった。実験条件AとDを比較した場合においても、呼吸量は3割近く増加しており、高濃度酸素の条件下においても3%の二酸化炭素は許容値として高すぎると考えられる。

次に、酸素摂取量に与える影響であるが、酸素濃度の増加に対しては酸素摂取はわずかに増加したものの有意な変化ではなかった。これはWelchら¹⁾やAdamsら²⁾の報告と同じ傾向を示している。一方、Ekblomら⁷⁾⁸⁾は高濃度酸素の吸気時に酸素消費が増加すると指摘している。Ekblom

らは測定法としてダグラスバック法を利用しているが、Welchらによると、ダグラスバック内への外気の流入を完全に防止することは困難であり、酸素摂取量が過剰に評価されたと考えられる。また、吸気中の二酸化炭素濃度の増加の影響については、酸素濃度が20.9%および40%のいずれの場合においても、酸素摂取量には有意な変化は認められなかった。今回の結果は、閉鎖循環式呼吸器において酸素供給量を決定する場合に、空気を呼吸したときの測定値を利用しても問題ないことを示している。

吸気ガス組成の変化が二酸化炭素排出量に与える影響も、器具の二酸化炭素吸収能力の決定に関係する非常に重要な因子である。今回の研究の結果、高濃度酸素の場合に二酸化炭素排出量が有意に減少することが認められた。これはWelchら¹⁾やAdamsら²⁾によっても認められた結果と等しい。また吸気中の二酸化炭素濃度の増加に対して

は、二酸化炭素排出量の変化は認められなかった。二酸化炭素吸収剤の必要量の点からいえば、吸気中酸素濃度の増加の影響は安全サイドに作用する要因である。従って、閉鎖循環式呼吸器の二酸化炭素吸収能力を決定する上で、空気を呼吸した時の値を採用しても問題はない。

今回の運動強度は40～50% VO_2 maxであり、乳酸の発生による体液中の二酸化炭素放出の影響は少ないと考えられる。そこで、呼吸商を元にエネルギー源としての基質の割合を推定してみた。通常安静時の呼吸商は0.8程度であり脂質代謝の割合が高いが、運動時には1に近く糖代謝が優位になっている。これは酸素当量の高い糖代謝の割合を増加させることで、運動時に想定される末梢組織の酸素欠乏に対処していると考えられる⁹⁾。一方、高濃度酸素の吸気時においては、運動時の呼吸商が、空気呼吸時に比べて有意に低下している。これはWelchら¹⁾によると、高濃度酸素の吸気により末梢の酸素不足が解消されて、脂質代謝の割合がある程度高いレベルで維持されているためと考えられる。なお、高濃度酸素の吸気により脂質代謝の割合が増加するならば、筋組織における糖の消費を節約できるため疲労の予防につながる⁸⁾。高圧環境下での使用においては酸素中毒の危険性を考慮しなくてはならないが、疲労の予防は、ある程度高い酸素濃度の気体を吸気する場合における有利な側面の一つである。

一方、3%の吸気中二酸化炭素濃度は呼吸商に有意な変化を及ぼさない。体内での過剰な二酸化炭素の蓄積は体液を酸性化させ、それが著しい場合には代謝活動に影響を与えることが指摘されている。Ehramら¹⁰⁾によれば、運動時での5%の二酸化炭素の吸気は呼吸商を減少させる。しかし、今回の実験では呼吸商の有意な変化は確認されなかった。このことから、3%の吸気中二酸化炭素は、呼吸量は大きく増加させるものの、代謝作用に変化を与えるほどの影響は生じないと考えられる。

呼吸量への影響を考えると、現行の二酸化炭素の許容値(3%)は高すぎる値である。安全性の点から考えれば、二酸化炭素濃度は低いほど好ましい。しかし、技術的な問題を考慮すると、極端に低い許容値は非現実的である。図9に吸気中の二酸化炭素濃度と呼吸量の関係を示す。6人の被

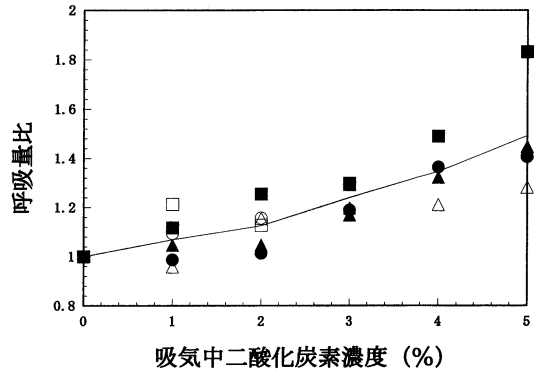


図9 吸気中二酸化炭素濃度と呼吸量の関係

縦軸は呼吸量比であり、各濃度での呼吸量を0%での呼吸量で割った値である。記号の違いは被験者の違いであり、その平均値を曲線で示す。

験者がトレッドミルの上を時速5 kmで歩行しながら、0～5%の二酸化炭素を呼吸したときの結果である。これによると2%を越えた付近から、濃度に対する呼吸量の増加割合が大きくなっている。また、表3に、人工肺試験での、酸素自己救命器(短時間型の閉鎖循環式呼吸器)の吸気中二酸化炭素濃度を示す。人工肺の設定は性能評価の基準に基づいており、呼吸量が30L/分、呼気中の二酸化炭素濃度が4%である。表に示した吸気中の二酸化炭素濃度は公称使用時間内における最大値である。サンプルIIにおいてやや高い値(平均1.73%)を示しているが、他はかなり低い値であり、仮に許容値として2%を採用しても、技術的にさほど困難なレベルとは考えられない。また、英国の基準¹¹⁾では二酸化炭素濃度の許容値は2.5%であるが、呼吸量や呼気中二酸化炭素濃度などの試験条件は我が国よりもかなり厳しい。以上の点を考えて、吸気中二酸化炭素の許容値として2%を提案したい。

【参考文献】

- 1) Welch, H.G. and Pedersen, P.K.: Measurement of metabolic rate in hyperoxia. J. Appl. Physiol. 51 (3): 725-731, 1981
- 2) Adams, R.P. Cashman, P.A. and Young, J.C.: Effect of hyperoxia on substrate utilization during intense submaximal exercise. J. Appl. Physiol. 61 (2): 523-529, 1986

表3 酸素自己救命器の吸気中二酸化炭素濃度

サンプル	型式	公称使用時間	サンプル数	吸気中CO ₂ 濃度 (%) (平均値±標準偏差)
I	圧縮酸素型	30分	3	0.66±0.12
II	圧縮酸素型	30分	5	1.73±0.19
III	KO ₂ 型	30分	5	0.38±0.03
IV	KO ₂ 型	30分	6	0.33±0.15
V	KO ₂ 型	30分	5	10.29±0.05

人工肺試験における値で、公称使用時間内の最大値を示す。

- 3) Plet, J., et al. : Increased working capacity with hyperoxia in humans. Eur.J.Appl.Physiol. 65 : 171-177, 1992
- 4) 日本規格協会 : 閉鎖循環式酸素自己救命器. JIS M 7651, 1996
- 5) 谷口興一 : 心肺運動負荷テスト. 南江堂, 1993.
- 6) 水野康, 福田一蔵 : 循環器負荷試験法. 診断と治療社, 1986
- 7) Ekblom, B. et al. : Effect of changes in arterial oxygen content on circulation and physical performance. J.Appl. Physiol. 39 : 71-75, 1975
- 8) Wilson B.A. et al. : Effects of hyperoxic gas mixtures on energy metabolism during prolonged work. J.Appl.Physiol. 39 : 267-271, 1975
- 9) 池上晴夫 : 運動生理学. 朝倉書店, 1990
- 10) Ehram, R.E. et al. : Effect of respiratory acidosis on metabolism in exercise. J.Appl.Physiol. 53(1) : 63-69, 1982
- 11) British Standards Institution : Specification for closed-circuit escape breathing apparatus. BS 4667 Part 5, 1990