

## 酸素自己救命器の安全性と性能の評価に関する研究

高橋, 正好

<https://doi.org/10.11501/3166938>

---

出版情報 : 九州大学, 1999, 博士 (工学), 論文博士  
バージョン :  
権利関係 :

## 第4章 吸気ガス組成の変化が呼吸量や代謝量に与える影響

### 4.1 緒言

酸素自己救命器は、閉鎖循環式呼吸用保護具に属するため、吸気中の酸素や二酸化炭素濃度が空気に比べて高い。このような吸気ガス組成の特徴は、新鮮な空気を呼吸して生活している我々に様々な影響を与えられられる。特に、酸素自己救命器は活動下で使用されるため、運動時における呼吸量や代謝量に与える影響の把握は、合理的な基準を確立するために非常に重要である。

JISなどの基準は、吸気中の二酸化炭素濃度を3%以下と定めている<sup>1, 2)</sup>。この許容値の正確な由来は不明であるが、短時間であれば、3%以下の二酸化炭素は生理的には悪影響を及ぼさないと言われている<sup>3-5)</sup>。しかし、二酸化炭素は低濃度であっても呼吸を刺激して呼吸量を増加させることが知られており、呼吸量の増加は人体にとって負担であることから、この点についても十分な配慮が必要である。二酸化炭素による呼吸の刺激の程度を評価する指標としては換気応答曲線の傾きが利用されており、安静時には非常に大きな個人差が存在することが知られている<sup>6, 7)</sup>。一方、運動時の影響については不明な部分が多い。いくつかの研究報告は認められるが、安静時に比べて換気応答曲線の傾きが大きくなるとの報告<sup>8-11)</sup>や、安静時と変わらないとの報告<sup>12-17)</sup>があり、統一的な見解に至っていない。また、対象としている運動強度も極めて緩やかなものが多く、酸素自己救命器の評価基準の参考にはならない。そのため、ある程度強い運動下での二酸化炭素の影響を正確に把握しておく必要がある。

閉鎖循環式呼吸用保護具は、回路内において酸素を添加し、二酸化炭素を除去する必要がある。器具の設計においては、酸素の供給量や二酸化炭素吸収剤の充填量を決定する場合に、使用者の運動時の呼吸量や代謝量の測定値が利用されている。しかし、これらの測定値は空気を呼吸している条件において得られたものが大部分であり、吸気中の酸素や二酸化炭素濃度が高い条件での値は非常に限られている。近年、高濃度酸素の影響についてはある程度信頼性の高いデータもいくつか得られている<sup>18-20)</sup>。しかし、酸素自己救命器において問題となる高濃度酸素と二酸化炭素が複合した影響は未知であり、酸素自己救命器の安全性を検討する上で大きな障害となっている。

本章では、以上のような観点から、吸気組成に関するより適切な評価基準を確立するため、まず運動時での二酸化炭素による呼吸の刺激特性について調べた。次に、吸気中のガス組成の変化が運動時での呼吸量や代謝量に与える影響を明らかにした。また、その結果を基に安全性の高い評価基準の提案を行った。

### 4.2 運動時での二酸化炭素による呼吸の刺激特性

#### 4.2.1 目的

酸素自己救命器の吸気中二酸化炭素の許容濃度は、呼吸器が活動下で使用されることを考慮して

規定されるべきことは当然である。しかし、二酸化炭素が人体に及ぼす顕著な影響である呼吸の刺激については、運動下での作用が明らかになってはいない。そこで本節では運動下での二酸化炭素による呼吸量の増加特性について明らかにするため、13名の被験者により換気応答曲線の傾きの変化を調べた。

#### 4. 2. 2 試験方法

二酸化炭素による呼吸量の増加の特徴は、換気応答曲線の平均的な傾きにより表現される。通常問題となるレベルでは、呼気終末二酸化炭素濃度の変化に対して呼吸量は直線的に増加するため、曲線の傾きは次式によって与えられる<sup>6, 7)</sup>。

$$S = \Delta V_E / \Delta P_{ET}CO_2$$

ここで、Sは二酸化炭素に対する換気応答曲線の傾き(L/min%)、 $\Delta V_E$ (L/min)は呼吸量の増加分、 $\Delta P_{ET}CO_2$ (%)は呼気終末二酸化炭素濃度の増加分である。

この換気応答曲線の測定法には、再呼吸法(Rebreathing method)と恒常法(Steady-state method)の2種類がある<sup>2)</sup>。再呼吸法は医療分野を中心に一般的に利用されているが、運動時の測定においては精度に疑問が残るため、本研究では恒常法を用いた。恒常法は一定組成の気体を実験中呼吸する方法であり、一連の実験において、二酸化炭素濃度の違う気体を呼吸することにより、換気応答特性を求めることが可能である。吸気ガスとしては、空気と、空気に3%の二酸化炭素を混入した気体の2種類を利用した。それぞれについて呼吸量と呼気終末二酸化炭素濃度の測定を行い、安静時と運動時での換気応答曲線の傾きを計算した。

被験者は、呼吸器および循環器系に障害のない13名であり、想定されるリスクを予め説明した上で同意を得た。表4-1に被験者の身体的な特徴を示す。被験者の平均年齢は約34歳である。各被験者は、半面マスクを装着した上で試験ガスを呼吸しながら、エルゴメータ(日本光電社製、STB-1400)に乗り運動を行った。運動の負荷パターンを図4-1に示す。すなわち、2分間静止の後、20Wの負荷強度において毎分60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%  $V_{O_{2max}}$ に相当する運動強度とした。

表4-1 被験者の特徴

被験者	性別	年齢 (才)	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

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、測定値としては、安静時での値と、最終的な運動強度での値を採用した。

図4-2に測定装置を示す。これは半面マスクや吸気管、呼気管、各種測定器、パソコンなどから構成されている。測定器からの信号はA/D変換(33Hz)後、パソコンに送り呼吸量などを計算した。被験者は半面マスクを装着して調整箱の気体を吸気したが、これはブローアからの空気に酸素や二酸化炭素を混合した気体である。呼吸袋を呼吸運動に対するバッファとし、入気の余剰分は逆止弁から外気に廃棄した。調整箱の酸素濃度と二酸化炭素濃度は、分析計(AIC社製RAS-31/41)により連続的に測定した。また、吸気流量は、Fleish型通気流量計(日本光電社製VT-112T)により測定した。この流量計の通過気流は層流であり、流量と圧力損失の間には、次式に示すHagen-Poiseuilleの法則が成り立つ<sup>22)</sup>。

$$Q = \pi R^4 / 8 \mu L \times \Delta P$$

ここで、Qは、通過流量(L/min)。RとLは、経路の半径と長さ。 $\mu$ は、気体の粘性係数(Pa·s)。 $\Delta P$ は、経路の前後で生じる圧力損失である。粘性係数は温度

やガス組成によって変化するため、測定毎に値を求めた。温度による影響は次式を利用した<sup>23)</sup>。

$$\mu(n) = \mu_1(n) \times (T_1 + C) / (T_2 + C) \times (T_2 / T_1)^{3/2}$$

ここで、 $\mu(n)$ は、温度 $T_2$ (°C)における成分ガスnの粘性係数である。温度 $T_1$ での粘性係数 $\mu_1(n)$ と定数Cは表4-2による。吸気は酸素や窒素などの混合気体であるため、その粘性係数は成分ガスの値とその組成比を基に、次式により計算した。

$$\mu = \sum P(n) \mu(n)$$

ここで、 $\mu$ は、混合ガスの粘性係数。 $P(n)$ と $\mu(n)$ は、各成分ガスの体積比率と粘性係数である。呼吸運動によって生じる気流は時間によって変動しているため、呼吸量の計算には台形則を利用した。すなわち、A/D変換によって周期的に送られてくるデータから、流量の瞬間値を求め、次式を利

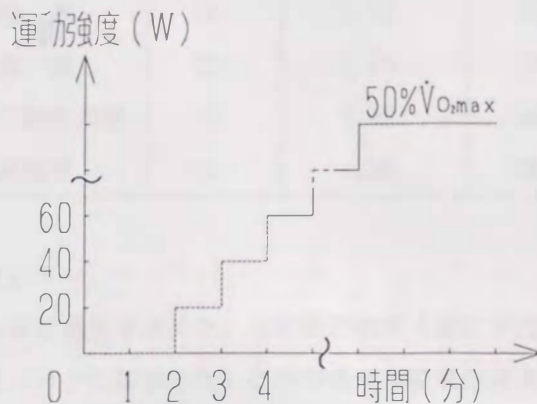


図4-1 運動の負荷パターン

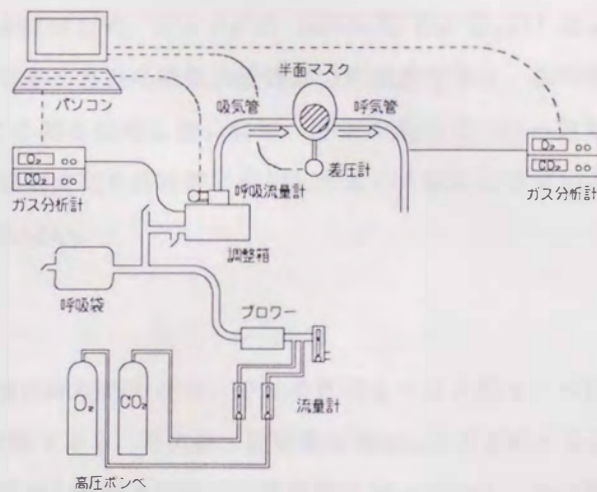


図4-2 呼吸量および呼気終末二酸化炭素濃度の測定システム

用して一呼吸毎の値を計算した。

$$V_t = \sum (V_n + V_{n-1}) / 2 \times \Delta t$$

ここで、 $V_t$  (l) は、一回呼吸量。  
 $V_n$  (L/min) は、瞬間値。 $\Delta t$  (min) は  
 A/D変換での変換時間である。積算は吸  
 気の期間中継続した。なお、呼気と吸気  
 の切り替わりは、マスク内圧の正負によ  
 り判断した。解析のソフトはN88Basicで

作製して、コンパイル後、MS-DOS上で使用した。

人工肺を利用して、呼吸運動に対する装置の測定精度を求めた。人工肺の模型人頭に半面マスクを装着して、2分間呼吸させ、呼気はダグラスバックに採取した。この方法で、吸気的气体組成や人工肺の設定を変えて測定したところ、被験者試験において対象となる範囲の試験条件で、測定装置のデータはダグラスバックの値に対して1%以内の誤差であった。

呼気的气体濃度は、呼気管から呼気の一部を採気して、ガス分析計 (AIC社製 RAS-31/41) により連続計測した。呼気終末二酸化炭素濃度は、吐き出される呼気最終部分の濃度であり、各呼吸毎の濃度変化の最大値に対応しているため、この値を採用した。なお、呼気最終ガスは一定期間 (次の吸気の間) 呼気管内に留まっており、濃度変化を経時的に解析しても一定値になっているため応答速度による大きな誤差の発生は考えられない。

#### 4.2.3 試験結果

被験者bの呼吸量と呼気終末二酸化炭素濃度の時間的変化を、それぞれ図4-3と図4-4に示す。両者ともに安静時 (0~2分) はほぼ一定値である。その後、運動量の増加により変動するが、一定負荷になって2分 (試験開始から9分) 経過した時点でほぼ定常状態に至っている。他の被験

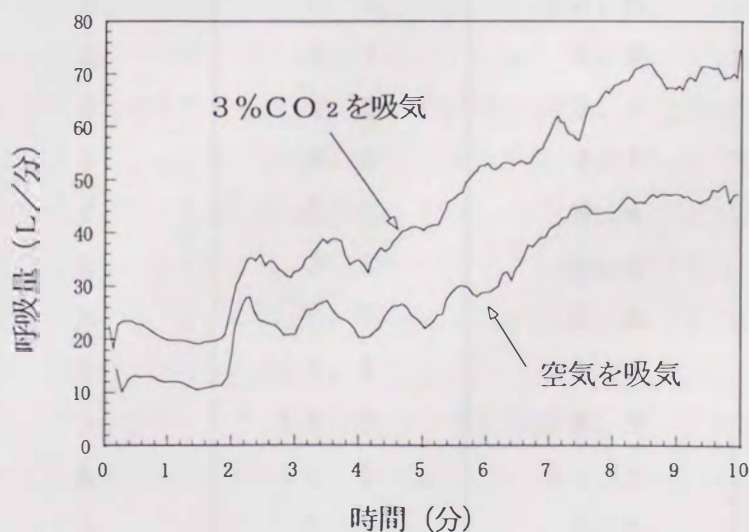


図4-3 呼吸量の変化 (被験者b)

表4-2 成分ガスの粘性係数

成分ガス n	T <sub>i</sub> (°C)	$\mu_i(n)$ ( $\times 10^{-5}$ )	C
酸素	20	2.00	125
窒素	20	1.74	104
二酸化炭素	20	1.46	240
水蒸気	100	1.28	650

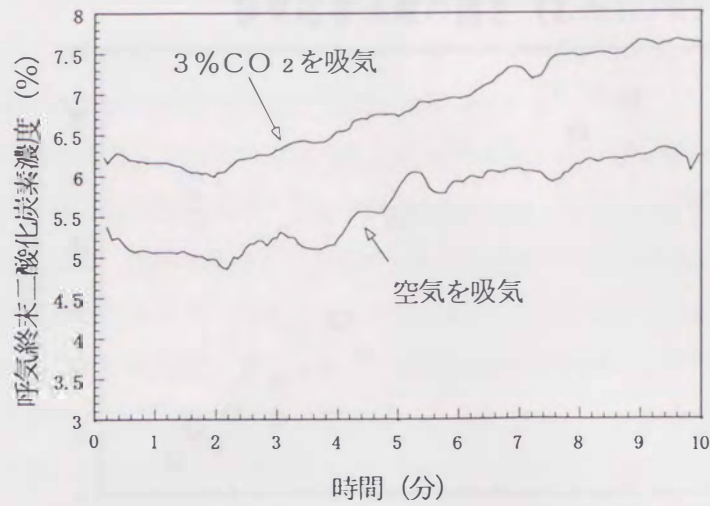


図4-4 呼気終末二酸化炭素濃度の変化(被験者b)

者も同様の傾向が認められたため、安静時の値としては試験開始から最初の2分間、運動時の値としては一定負荷となって2分経過した時点から1分間について、呼吸量と呼気終末二酸化炭素濃度の平均値を求めた。また、これらの値を基に、安静時と運動時の換気応答曲線の傾きを計算した。その結果を表4-3に示す。静止時の値としては2.9~20.0(L/min·%)、運動時の値は2.6~31.0(L/min·%)であり、ともに非常に大きな個人差を示している。次に、静止時と運動時の関連性を調べるため、横軸と縦軸にそれぞれの値を取ったものを図4-5に示す。この結果より、両者には強い

表4-3 安静時と運動時での二酸化炭素に対する換気応答曲線の傾き

被験者	換気応答曲線の傾き (L/min·%)	
	安静時	運動時
a	20.0	31.0
b	9.0	13.6
c	6.7	8.6
d	3.6	5.4
e	4.4	4.1
f	5.0	6.4
g	3.8	4.0
h	6.7	5.9
i	11.1	21.4
j	18.0	28.3
k	10.0	11.1
l	3.1	5.7
m	2.9	2.6

換気応答曲線の傾き (L/min/%)

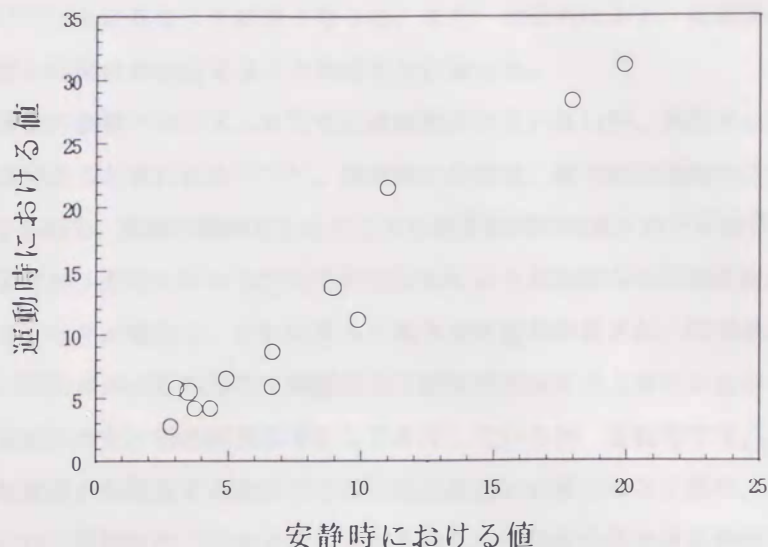


図 4-5 二酸化炭素による換気応答曲線の傾き (安静時と運動時の比較)

関連性 (相関係数0.97) があり、安静時において高い換気応答特性を示す被験者は、運動時にも同様な結果を示す。また、直線回帰を取ったときの傾きは1.67であり、安静時に比べて運動時の方が、二酸化炭素に対して強く反応する傾向がある。

#### 4. 2. 4. 考察

二酸化炭素による呼吸の刺激特性の測定法としては、一般的にはReadによって確立された再換気法<sup>6)</sup>が利用される。これは呼吸袋に酸素濃度50%、二酸化炭素濃度7%の混合気体を5L程度入れて、被験者が繰り返し呼吸を行う方法である。この方法は、呼吸袋、肺胞気、動脈血、および中枢化学受容器の二酸化炭素分圧が敏速に平衡に達するとの仮定に基づいており、呼吸袋の二酸化炭素分圧の上昇に対する呼吸量の上昇率を求めることにより、二酸化炭素に対する換気応答曲線の傾きを測定可能である。この方法を利用して運動時の換気応答特性を測定した研究も存在するが、いくつかの問題点が考えられる。すなわち、吸気中の二酸化炭素濃度が開始時でも7%と非常に高いため、ある程度の強い運動ではすぐに最大換気量に至ってしまい、二酸化炭素に対する換気応答特性を過小評価する可能性がある<sup>9, 11, 12, 24)</sup>。また、運動時では、呼吸袋の大きさの選定が難しく、中枢化学受容器や呼吸袋などとの二酸化炭素分圧の平衡に不具合が生じる可能性がある<sup>10, 12)</sup>。これに対して定常法では、動脈血と中枢化学受容器の二酸化炭素分圧が平衡になるまでにある程度の時間が必要であり、また実験回数も多くなる欠点があるが、誤差要因は少ないと考えられる。また、吸気中の二酸化炭素濃度をさほど高く設定する必要がないので、ある程度強い運動下での応答特性を求められる。

本研究により、運動時には、安静時に比べて二酸化炭素による呼吸の刺激をより強く受けること

が明らかになった。これはClarkらの報告<sup>8~11)</sup>と同じ傾向を示しており、安静時と変わらないとしたDuffinらの報告<sup>12~17)</sup>とは異なった結果となった。また、本研究により、安静時と運動時の換気応答曲線の傾きに強い相関性が存在することが明らかになった。

運動時における呼吸の調整メカニズムは完全には解明されていないが、神経系と体液系の両者が関与した多重制御系であると言われる<sup>25~26)</sup>。神経系の作用は、腱や筋の機械的受容器や右心室の圧受容器が関与するもので、運動の開始とともにこれらの受容器が刺激されて呼吸量を増加させる。一方、体液系の作用では、運動に伴う生化学的な反応により動脈血中の二酸化炭素分圧やカリウムイオン、水素イオンなどが増加し、それに伴って化学受容器が刺激され、呼吸量が増加する。ところで、吸気中の二酸化炭素濃度の増加は動脈血の二酸化炭素分圧の上昇につながる。この場合、安静時には二酸化炭素のみが呼吸の刺激因子として作用しているが、運動時には、上述のような呼吸に対する多数の刺激因子が存在する条件下での二酸化炭素の影響となる。仮に、各刺激因子が独立して作用するならば、運動時の二酸化炭素に対する換気応答曲線の傾きは安静時と等しいか、全体に占める役割が低下するため小さくなると考えられる。しかし、実際には安静時に比べて運動時には7割近くも大きい換気応答曲線の傾きを示した。このことから二酸化炭素に対する感受性が、運動時には高まっている可能性が考えられる。そのため、酸素自己救命器の評価基準においては、この運動下での影響を基礎として許容値を設定する必要がある。

基準の制定においては個人差の問題も重要である。すなわち、二酸化炭素に対する呼吸の刺激特性には、非常に大きな個人差が存在することが明らかになった。個人差の原因は不明であるが、運動時には静止時より更に差が拡大している。そのため二酸化炭素に対する応答特性の高い人は、低い人よりもさらに著しく呼吸量が増加する傾向にある。ところで、消防活動や救護活動に利用される酸素呼吸器においても吸気中の二酸化炭素は問題であるが、この呼吸器は選ばれた特定の人員が使用するため、二酸化炭素に対して刺激特性の高い人は救護隊員に含めないなどの手だてを取ることが可能である。一方、酸素自己救命器は不特定の人が使用する器具であり、予め適応性に応じて選別できないため、二酸化炭素に対する応答特性の高い人を対象として基準を制定する必要がある。

現行の基準は、吸気中の二酸化炭素の許容値を3%と定めている。しかし、運動時における刺激の増加や大きな個人差を考えれば、その妥当性には疑問が残る。この点については、次節において高濃度酸素の影響も考慮して議論する。

#### 4.3 酸素および二酸化炭素濃度の増加が呼吸量や代謝量に与える影響<sup>29)</sup>

##### 4.3.1 目的

吸気ガス組成の変化が呼吸量や代謝量に与える影響の把握は、酸素自己救命器の設計において、酸素供給量や二酸化炭素吸収能力を決定する上で非常に重要である。しかし、空気と異なる組成のガスを吸気している条件下で、呼吸量や代謝量を高精度に測定することは技術的な困難が多く、特



に高濃度酸素と二酸化炭素が複合して与える影響についての測定データは皆無に近い状況である。そこで吸気ガス組成の変化が呼吸量や代謝量に与える影響を把握する目的で、高精度の測定器を制作するとともに、運動下での被験者試験を実施した。

#### 4.3.2 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装置（後述）を利用した。吸気の酸素および二酸化炭素濃度は、表4-4に示す4種類である。酸素濃度40%は、酸素自己救命器の測定データの最小値を参考にした。二酸化炭素濃度3%は、JISなどにおける酸素自己救命器の許容値を採用した<sup>1, 2)</sup>。なお、被験者は前節と同じ（表4-1）であり、想定されるリスクを説明した上で同意を得た。運動負荷も前節と同様であり、エルゴメータを利用して徐々に運動強度を上げていき、各被験者に対して40~50% $\dot{V}O_{2max}$ となった段階でこれを3分間継続した。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あらかじめ行った。また、各被験者において、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で十分な休息時間を入れた。被験者a~f（表4-1）についてはパルスオキシメータ（日本光電社製OLV-1100）によ

表4-4 各条件での試験におけるガス濃度

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

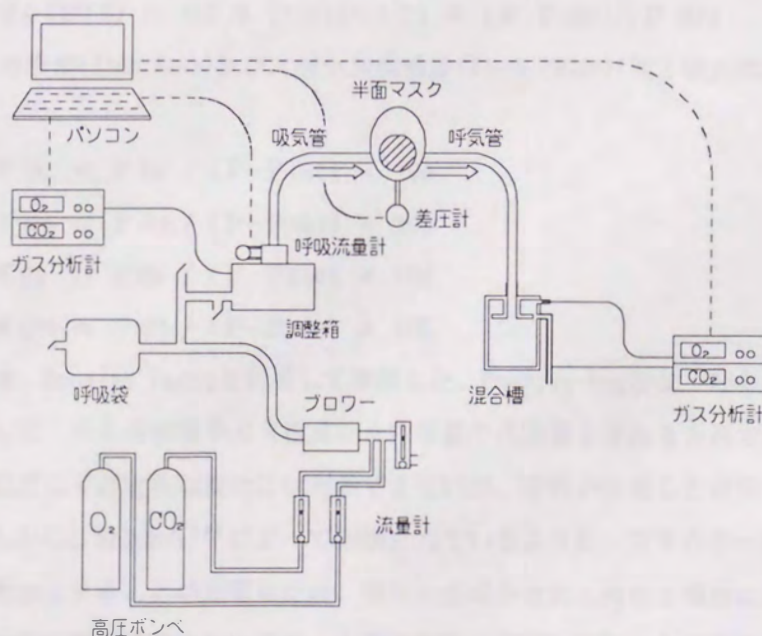


図4-6 代謝量測定装置の模式図

り右手人差し指の動脈血酸素飽和度を実験中連続して測定した。

図4-6に代謝量測定装置の模式図を示す。この装置は、吸気ガス組成の調整と、呼吸量や代謝量の計測が可能である。被験者は半面マスクを装着して、調整箱の気体を吸気し、混合槽に呼気を吐き出す。吸気側の構成は、前節の装置と同一であり、ブローワーにより外気を導入するとともに、必要に応じて酸素や二酸化炭素の添加を行った。また、混合槽(内容積3.6L)に導かれた呼気は、均一に混合して、ガス分析計(AIC社製 RAS-31/41)により測定した。

呼吸量(呼気量)は、吸気と呼気の窒素分量が等しいと仮定して、次式により求めた<sup>21)</sup>。

$$\dot{V}_E = \frac{P - P_{I_{O_2}} - P_{I_{CO_2}} - P_{I_{H_2O}}}{P - P_{E_{O_2}} - P_{E_{CO_2}} - P_{E_{H_2O}}} \times \dot{V}_I$$

ここで、 $\dot{V}_I$ は、吸気の測定値(L/min)。 $\dot{V}_E$ は、呼気量(L/min)。Pは、大気圧(mmHg)。 $P_{I_{O_2}}$ 、 $P_{I_{CO_2}}$ 、 $P_{I_{H_2O}}$ は、吸気の酸素、二酸化炭素、水蒸気の分圧(mmHg)。 $P_{E_{O_2}}$ 、 $P_{E_{CO_2}}$ 、 $P_{E_{H_2O}}$ は、呼気のそれぞれの分圧である。酸素摂取量や二酸化炭素排出量、呼吸商は、次式により求めた<sup>18, 21)</sup>。

$$\dot{V}_{O_2} = (\dot{V}_{I_{O_2}} - \dot{V}_{E_{O_2}}) \times (P/760) \times 273/(273 + T)$$

$$= (P_{I_{O_2}} \times \dot{V}_I - P_{E_{O_2}} \times \dot{V}_E) \times 273/(273 + T)$$

$$\dot{V}_{CO_2} = (\dot{V}_{E_{CO_2}} - \dot{V}_{I_{CO_2}}) \times (P/760) \times 273/(273 + T)$$

$$= (P_{E_{CO_2}} \times \dot{V}_E - P_{I_{CO_2}} \times \dot{V}_I) \times 273/(273 + T)$$

$$R = \dot{V}_{CO_2} / \dot{V}_{O_2}$$

ここで、 $\dot{V}_{O_2}$ と $\dot{V}_{CO_2}$ は、酸素摂取量と二酸化炭素排出量(L/min:STPD(Standard temperature and pressure dry))。Rは、呼吸商。 $\dot{V}_{I_{O_2}}$ と $\dot{V}_{I_{CO_2}}$ は、吸気の酸素量と二酸化炭素量(L/min)。 $\dot{V}_{E_{O_2}}$ と $\dot{V}_{E_{CO_2}}$ は、呼気の酸素量と二酸化炭素量(L/min)。Tは、室温(°C)である。呼吸量(L/min)は、次式によりBTPS(Body temperature and pressure saturated with water vapor)で表現した<sup>21)</sup>。

$$\dot{V}_E \text{ (BTPS)} = \dot{V}_E \times 310/(273 + T) \times (P - P_{E_{H_2O}})/(P - 47)$$

また、吸気と呼気の酸素( $F_{I_{O_2}}$ ,  $F_{E_{O_2}}$ )及び二酸化炭素濃度( $F_{I_{CO_2}}$ ,  $F_{E_{CO_2}}$ )(% : Dry)は、次式により求めた。

$$F_{I_{O_2}} = P_{I_{O_2}} / (P - P_{I_{H_2O}}) \times 100$$

$$F_{I_{CO_2}} = P_{I_{CO_2}} / (P - P_{I_{H_2O}}) \times 100$$

$$F_{E_{O_2}} = P_{E_{O_2}} / (P - P_{E_{H_2O}}) \times 100$$

$$F_{E_{CO_2}} = P_{E_{CO_2}} / (P - P_{E_{H_2O}}) \times 100$$

装置の測定精度を、Douglas bag法を利用して評価した。Douglas bag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<sup>30-32)</sup>。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信頼性が最も高い。しかし、Welchら<sup>16)</sup>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4-4における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、空気を吸気をした条件で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<sup>18)</sup>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ると考えられる。

#### 4.3.3 試験結果

図4-7から図4-9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% $V_{O_{2max}}$ 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。

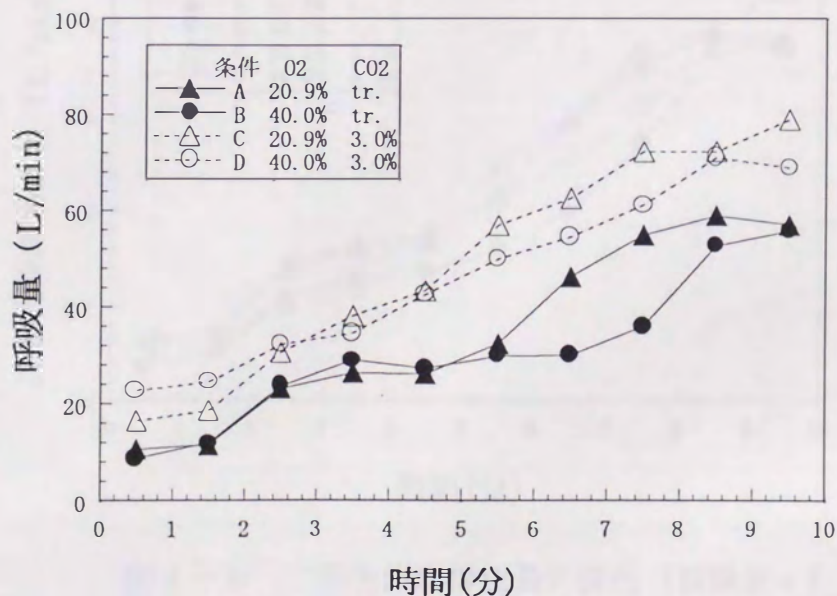


図4-7 呼吸量の変化(被験者a)

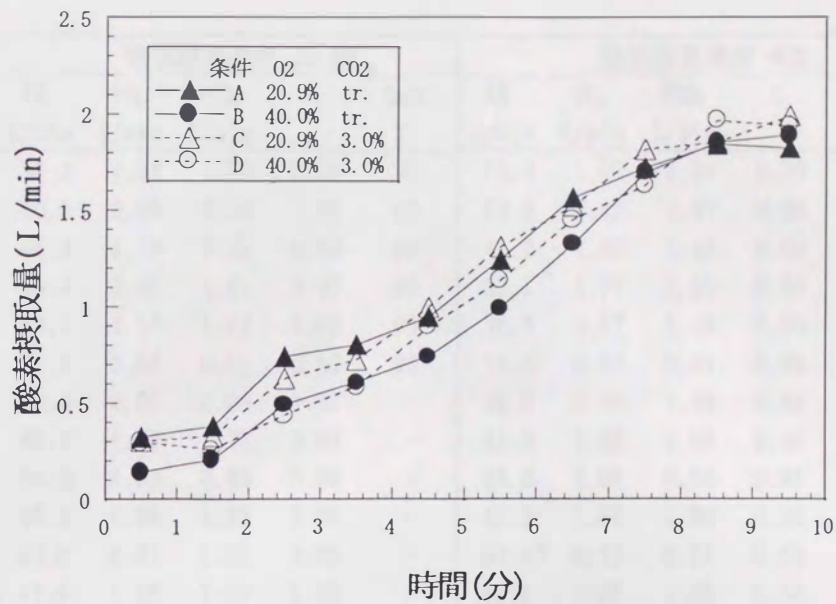


図4-8 酸素摂取量の変化 (被験者 a)

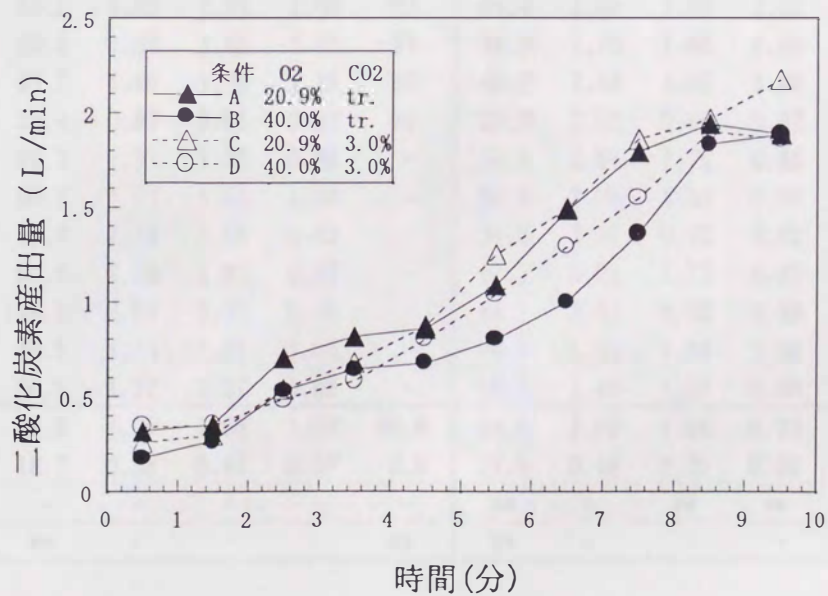


図4-9 二酸化炭素排出量の変化 (被験者 a)

表4-5 各試験条件における運動時の呼吸量と代謝量、動脈血酸素飽和度

吸気 CO <sub>2</sub>	被験者	吸気酸素濃度 20.9%					吸気酸素濃度 40%				
		$\dot{V}E$ L/min	$\dot{V}O_2$ L/min	$\dot{V}CO_2$ L/min	R	SaO <sub>2</sub> %	$\dot{V}E$ L/min	$\dot{V}O_2$ L/min	$\dot{V}CO_2$ L/min	R	SaO <sub>2</sub> %
trace	a	58.8	1.91	1.90	0.99	96	55.7	1.97	1.88	0.95	99
	b	60.5	2.05	2.08	1.01	96	54.3	2.12	1.97	0.92	97
	c	45.3	1.59	1.58	0.99	96	41.2	1.62	1.49	0.92	99
	d	39.4	1.86	1.81	0.97	96	37.1	1.78	1.59	0.89	100
	e	43.0	1.58	1.68	1.06	95	36.4	1.57	1.49	0.94	98
	f	21.5	0.99	0.89	0.89	93	19.4	0.94	0.81	0.86	100
	g	45.3	2.06	2.08	1.01	-	38.0	2.10	1.78	0.84	-
	h	46.1	1.77	1.76	0.99	-	41.9	1.82	1.62	0.88	-
	i	24.4	1.03	0.93	0.90	-	23.8	1.06	0.90	0.85	-
	j	47.1	1.89	1.82	0.95	-	46.0	1.96	1.86	0.95	-
	k	53.6	2.01	1.92	0.95	-	53.47	2.12	2.01	0.95	-
	l	41.9	1.18	1.26	1.06	-	40.0	1.28	1.25	0.98	-
	m	30.7	1.40	1.43	1.02	-	29.2	1.41	1.30	0.92	-
		平均	42.9	1.64	1.63	0.98	95.3	39.8	1.68	1.54	0.92
	標準偏差	11.8	0.38	0.39	0.05	1.2	11.17	0.40	0.38	0.04	1.2
	t-test $\alpha$	-	-	-	-	-	**	-	**	**	**
3%	a	78.9	1.99	2.16	1.08	97	72.0	1.98	1.99	1.00	99
	b	91.2	2.09	2.16	1.03	96	82.1	2.17	1.98	0.91	98
	c	68.2	1.63	1.76	1.08	98	64.4	1.65	1.69	1.02	100
	d	55.8	1.80	1.85	1.02	97	48.9	1.73	1.66	0.96	100
	e	57.7	1.46	1.70	1.16	97	46.9	1.48	1.56	1.05	98
	f	29.4	0.97	0.95	0.97	96	27.2	0.97	0.90	0.92	99
	g	52.7	1.91	1.85	0.96	-	50.8	2.04	1.76	0.86	-
	h	60.7	1.70	1.71	1.00	-	56.8	1.79	1.62	0.90	-
	i	39.4	1.13	1.06	0.93	-	34.7	1.11	0.92	0.82	-
	j	61.0	2.08	1.82	0.87	-	62.7	2.04	1.73	0.85	-
	k	84.5	2.09	2.02	0.96	-	84.1	2.43	2.02	0.83	-
	l	44.5	1.25	1.25	1.00	-	44.1	1.20	1.28	1.06	-
	m	36.5	1.37	1.27	0.92	-	39.5	1.44	1.37	0.95	-
		平均	58.5	1.65	1.66	1.00	96.8	54.9	1.69	1.58	0.93
	標準偏差	18.7	0.38	0.40	0.07	0.8	17.5	0.44	0.36	0.08	0.9
	t-test $\alpha$	-	-	-	-	-	**	-	**	**	**
	t-test $\beta$	**	-	-	-	**	**	-	-	-	-

$\dot{V}E$ :呼吸量、 $\dot{V}O_2$ :酸素摂取量、 $\dot{V}CO_2$ :二酸化炭素排出量、R:呼吸商、SaO<sub>2</sub>:動脈血酸素飽和度、  
 t-test $\alpha$ : \*\* 吸気酸素濃度が21%と40%の間での有意な変化 (p<0.01) を示す  
 t-test $\beta$ : \*\* 吸気二酸化炭素濃度がtrace(<0.04%)と3%の間での有意な変化 (p<0.01) を示す

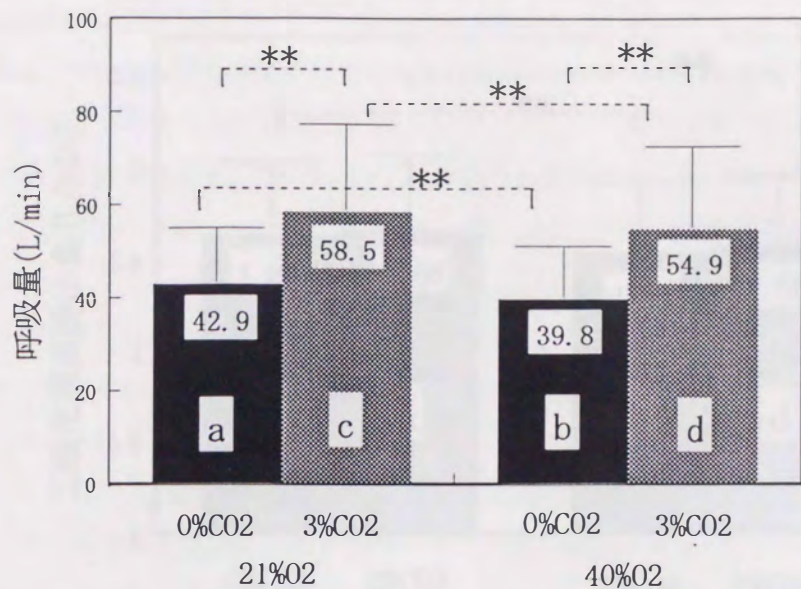


図4-10 運動時の呼吸量 (平均と標準偏差)  
 アスタリシは条件間での有意差の存在を示 (\*\*:p<0.01)

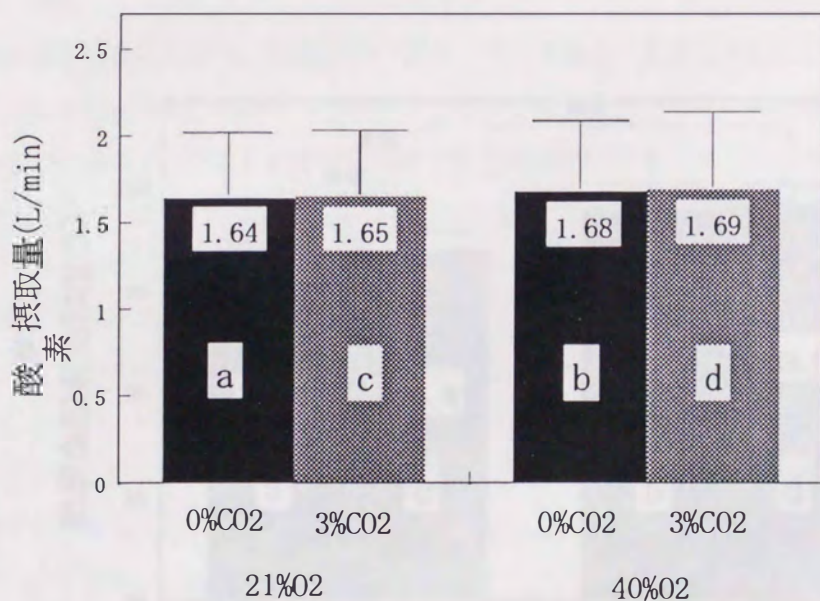


図4-11 運動時の酸素摂取量  
 (平均と標準偏差)

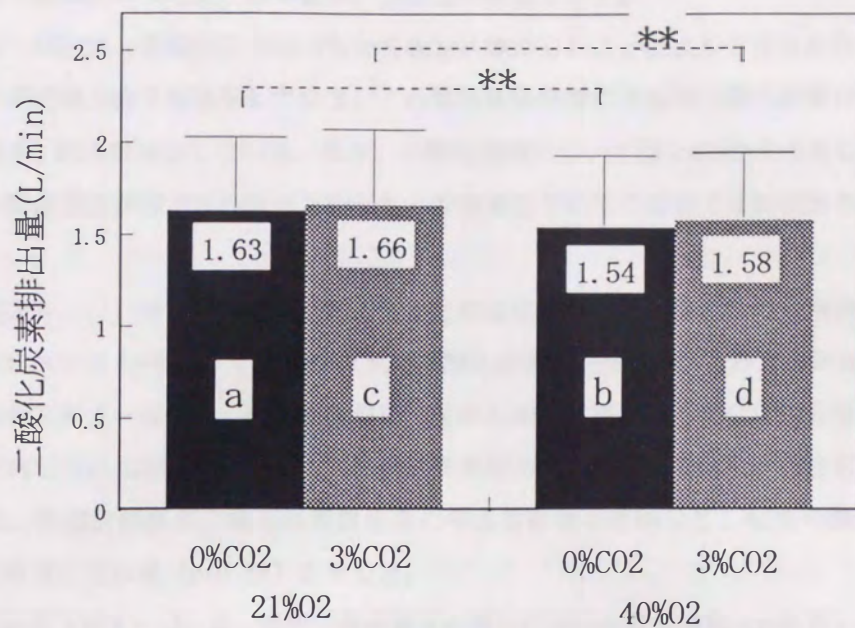


図4-12 運動時の二酸化炭素排出量  
(平均と標準偏差)

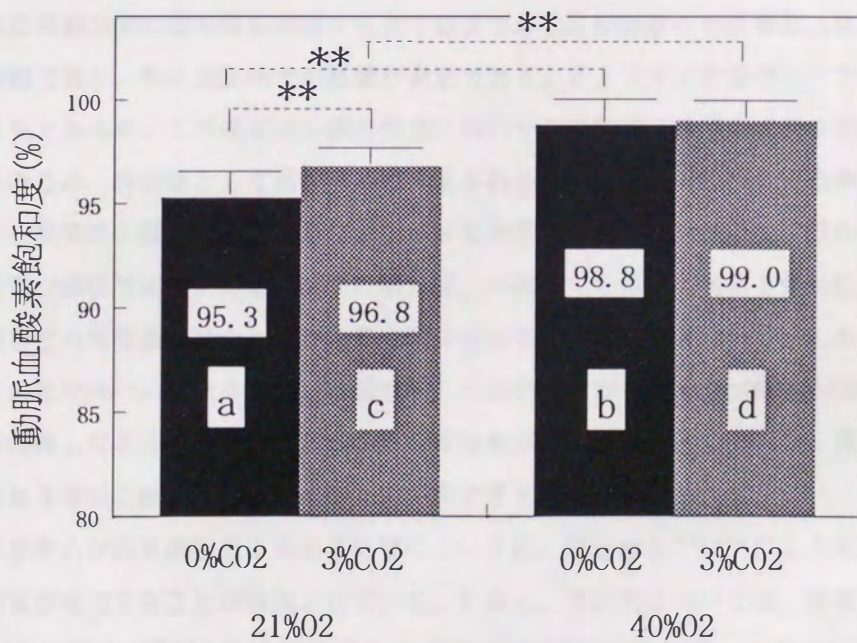


図4-13 運動時の動脈血酸素飽和度  
(平均と標準偏差)

表4-5に全ての測定値を、図4-10から図4-13に呼吸量、酸素摂取量、二酸化炭素排出量および動脈血酸素飽和度の平均値、標準偏差、有意差の有無を示す。

呼吸量(図4-10)は、酸素濃度が20.9%から40%に増加したことにより有意な変化( $p<0.01$ )を示しており、平均値で約7%減少している。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%減少している。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%の呼吸量の増加を示した。

酸素摂取量(図4-11)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( $p>0.05$ )。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(図4-12)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( $p<0.01$ )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( $p<0.01$ )を示した。

動脈血酸素飽和度(図4-13)は、吸気中酸素濃度の増加により有意な増加( $p<0.01$ )を認めた。また、20.9%の酸素濃度において、3%の二酸化炭素吸気は動脈血酸素飽和度を有意に増加( $p<0.01$ )させた。

#### 4.3.4 考察

高濃度の酸素と二酸化炭素が、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、酸素自己救命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、特に運動時での影響が重要である。JISなどの基準<sup>1, 2)</sup>では二酸化炭素の許容値は3%であるが、この濃度の二酸化炭素においても運動時では平均で約4割の呼吸量の増加が認められたため、許容値として高すぎると考えられる。ところで、酸素自己救命器は吸気の酸素濃度が高い。高濃度の酸素には呼吸量を減少させる効果があるため、酸素と二酸化炭素の複合影響としての考察が必要である。高濃度酸素の吸気は、末梢部での酸素の利用を優位にして、運動時における乳酸などの発生量を減らし、呼吸量を減少させると考えられる<sup>19, 20)</sup>。しかし、この減少割合は1割未満と少ない。空気を呼吸した場合と、二酸化炭素が3%でかつ酸素が40%のガスを呼吸した場合を比較してみると、後者は前者よりも呼吸量が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。

吸気ガス組成の変化が酸素摂取量に与える影響については、Ekblomら<sup>33, 34)</sup>により高濃度酸素の吸気時に酸素消費が増加することが指摘されている。しかし、本研究においては、酸素濃度の増加により酸素摂取はわずかに増加したものの有意な変化は認められなかった。これはWelchら<sup>12)</sup>やAdamsら<sup>13)</sup>の報告と同じ傾向を示している。なお、Ekblomら<sup>33, 34)</sup>は測定にダグラスバックを利用しているが、ダグラスバック法では酸素摂取量が過剰に評価される傾向にあるとWelchら<sup>22)</sup>らには指摘している。次に、吸気中の二酸化炭素濃度の増加については、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を与えていない。閉鎖循環式の酸素自己救命器においては酸素供給量の決定は非常に重要な課題であるが、今回の結果は空気を呼吸したときの測定値を基に決定しても問題ないことを示している。

次に二酸化炭素排出量に与える影響であるが、これも閉鎖循環式の呼吸器においては二酸化炭素の吸収能力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<sup>22)</sup>やAdamsら<sup>19)</sup>によっても認められた結果と等しい。一方、吸気中の二酸化炭素濃度の増加は、体内からの二酸化炭素排出量に有意な変化を及ぼさなかった。酸素自己救命器の二酸化炭素吸収能力を決定する上で、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り、二酸化炭素濃度の増加の影響も問題ないため、空気を呼吸した時の値を基にして二酸化炭素吸収剤の必要量を決定しても安全上の問題はない。

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<sup>35)</sup>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、今回の実験において、3%の吸気中二酸化炭素濃度の増加は呼吸商に有意な変化を及ぼしていない ( $p>0.05$ )。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。

呼吸量への影響という観点から考えると、現行の二酸化炭素の許容値である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。そこで、吸気中の二酸化炭素濃度の変化と呼吸量の増加割合を調べた。その結果を、図4-14に示す。試験は、6人の被験者がトレッドミルの上を時速5km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<sup>36)</sup>。これによると

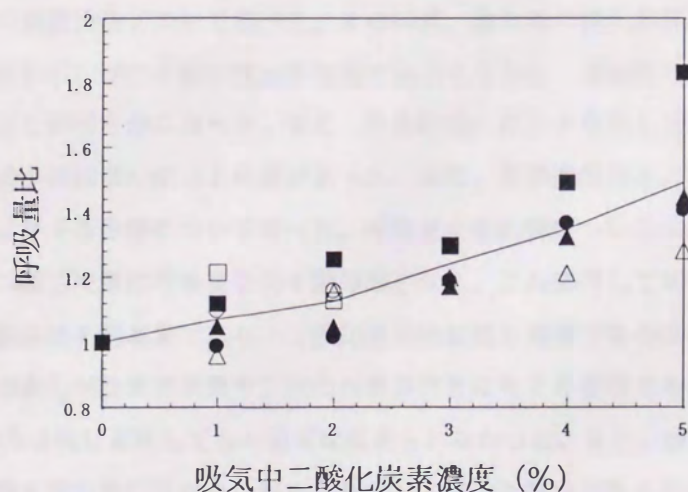


図4-14 吸気中二酸化炭素濃度と呼吸量の関係  
縦軸は呼吸量比であり、各濃度での呼吸量を0%での呼吸量で割った値である。記号の違いは被験者の違いであり、その平均値を曲線で示す。

表4-6 酸素自己救命器の吸気中二酸化炭素濃度

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。

サンプル	型式	公称使用時間	サンプル数	吸気中CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 型	30分	5	0.38 ± 0.03
IV	KO <sub>2</sub> 型	30分	6	0.33 ± 0.15
V	KO <sub>2</sub> 型	30分	5	0.29 ± 0.05

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4-6に、人工肺試験での、酸素自己救命器の吸気中二酸化炭素濃度を示す。人工肺の設定は基準に基づいており、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<sup>37)</sup>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%を提案する。

#### 4.4 結言

吸気ガスの組成変化が運動時での呼吸量や代謝量に与える影響について検討した。まず、二酸化炭素による呼吸の刺激特性について調べた。その結果、運動時の換気応答曲線の傾きは安静時の値と強い相関関係を示し、かつ7割程度大きな値であることから、運動時には二酸化炭素に対する感受性が強くなることが明らかになった。また、応答特性には大きな個人差が存在し、13名の被験者において最大と最小値には10倍以上の差があった。次に、高濃度酸素と二酸化炭素が、運動下での呼吸量や代謝量に与える影響について調べた。呼吸量への影響については、空気を呼吸した場合に比べて、3%の二酸化炭素は呼吸量を約4割増加させた。これに対して40%の酸素は呼吸量を減少させるが、その割合は1割未満であり、二酸化炭素の影響を補償できるほどではなかった。

吸気ガス組成の変化が酸素摂取量や二酸化炭素排出量に与える影響であるが、吸気中の二酸化炭素濃度がtraceから3%に変化しても有意差は認められなかった。また、酸素濃度が21%から40%に増加した場合、酸素摂取量には変化は認められず、二酸化炭素排出量はわずかに減少した。この結果は、酸素自己救命器の設計における酸素供給量や二酸化炭素吸収剤の必要量の決定に、空気を呼吸したときの代謝量の測定値を利用しても安全上の問題はないことを示している。

吸気中のガス組成に関する基準を検討する場合、呼吸量に与える影響が非常に重要である。現行の

許容濃度である3%の二酸化炭素は、運動時の呼吸量を4割近く増加させており、高濃度酸素による補償効果も小さいため、許容値はさらに低い値に押さえるべきである。運動時での二酸化炭素に対する感受性の増加や大きな個人差の存在を考慮すれば、低いほど好ましいが、あまり厳しい基準は非現実的であるため、諸外国の例<sup>37)</sup>などを参考にして、吸気中の二酸化炭素の許容濃度として2%を提案する。

## 参考文献

- 1) 公害資源研究所編：“鉱山坑内用品検定試験法”，(1986)
- 2) 日本規格協会：“閉鎖循環式酸素自己救命器”，JIS M 7651, (1996)
- 3) 東京消防庁消防科学研究所：“火と煙と有毒ガス”，東京法令出版，(1986)
- 4) 関邦博ほか：“人間の許容限界ハンドブック”，朝倉書店，(1990)
- 5) ユージン・メーヤー：“危険物の化学”，海文堂，(1979)
- 6) Read, D.J.C.：“A clinical method for assessing the ventilatory response to carbon dioxide”，*Australas Ann. Med.*, 16, pp.20~32, (1967)
- 7) McGurk, S.P., Blanksby, B.A. and Anderson, M.J.：“The relationship of hypercapnic ventilatory responses to age, gender and athleticism”，*Sports Med.*, 19(3), pp.173~183, (1995)
- 8) Cunningham, D.J.C., Lloyd, B.B. and Patrick, J.M.：“The relation between ventilation and end-tidal PCO<sub>2</sub> in man during moderate exercise with and without CO<sub>2</sub> inhalation”，*J Physiol.*, 169, pp.104~106, (1963)
- 9) Clark, J.M., Sinclair, R.D. and Lenox, J.B.：“Chemical and nonchemical components of ventilation during hypercapnic exercise in man”，*J. Appl. Physiol.*, 48(6), pp.1065~1076, (1980)
- 10) McConnel, A.K. and Semple, E.S.G.：“Ventilatory sensitivity to carbon dioxide: the influence of exercise and athleticism”，*Med. Sci. Sports Exerc.*, 28(6), pp.685~691, (1996)
- 11) McConnel, A.K., Semple, E.S.G. and Davies, C.T.M.：“Ventilatory responses to exercise and carbon dioxide in elderly and younger humans”，*Eur. J. Appl. Physiol.*, 66, pp.332~337, (1993)
- 12) Duffin, J. et al.：“The ventilatory response to carbon dioxide in hyperoxic exercise”，*Respiration Physiol.*, 40, pp.93~105, (1980)
- 13) Mucci, P. et al.：“Ventilatory response to CO<sub>2</sub> and exercise-induced hypoxaemia in master athletes” *Eur. J. Appl. Physiol.*, 77, pp.343~351, (1998)

- 14) Mercier, J., Ramonatxo, M. and Prefaut, C. : " Hyperpnoea and CO<sub>2</sub> sensitivity of the respiratory centers during exercise" , Eur.J.Appl.Physiol., 59, pp.411~415, (1990)
- 15) Martin, B.J. et al. : " Exercise ventilation correlates positively with ventilatory chemoresponsiveness" , J.Appl.Physiol., 45(4), pp.557~564, (1978)
- 16) Duffin, J. and Mcavoy, G.V. : " The peripheral-chemoreceptor threshold to carbon dioxide in man" , J.Physiol., 406, pp15~26, (1988)
- 17) Kelley, M.A., Owens, G.R. and Fishman, A.P. : " Hypercapnic ventilation during exercise: effects of exercise methods and inhalation techniques" , Respiration Physiol., 50, pp.75~85, (1982)
- 18) Welch, H.G. and Pedersen, P.K. : " Measurement of metabolic rate in hyperoxia" , J.Appl. Physiol., 51(3), pp.725~731, (1981)
- 19) 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), pp.523~529, (1986)
- 20) Plet, J., et al. : " Increased working capacity with hyperoxia in humans" , Eur.J.Appl. Physiol., 65, pp.171~177, (1992)
- 21) 吉良枝郎, 太田保世 : " 呼吸" , 医学書院, (1986)
- 22) 小林清志 : " 移動論" , 朝倉書店, (1987)
- 23) 東京天文台 : " 理科年表" , 丸善, (1981)
- 24) Mercier, J., Ramonatxo, M. and Prefaut, C. : " Breathing pattern and ventilatory responses to CO<sub>2</sub> during exercise" , Int.J.Sports Med., 13, pp.1~5, (1992)
- 25) 飛田涉ほか : " 運動時換気応答の基礎と臨床" , 呼吸と循環, 35(5), pp493~500, (1987)
- 26) 宮村実晴, 本田良行 : " 運動時の中枢性呼吸・循環調整" , 呼吸と循環, 36(1), pp.3~11, (1988)
- 27) 本田良行 : " 運動と呼吸" , 体力科学, 41, pp.425~435, (1992)
- 28) 吉田敬義, 福場良之 : " 運動時の呼吸調整" , 生理人類学会誌, 11(5), pp.479~493, (1992)
- 29) 高橋正好ほか : " 閉鎖循環式呼吸用保護具の使用が呼吸量や代謝量に与える影響" , 産業衛生学雑誌, 40(1), pp.1~6, (1998)
- 30) 谷口興一 : " 心肺運動負荷テスト" , 南江堂, (1993)
- 31) 水野康, 福田一蔵 : " 循環器負荷試験法" , 診療と治療社, (1986)
- 32) 日本生理人類学会計測研究部会 : " 人間科学計測ハンドブック" , 技報堂, (1996)
- 33) Ekblom, B et al. : " Effect of changes in arterial oxygen content on circulation and physical performance" J.Appl.Physiol. 39, pp.71~75, (1975)
- 34) Wilson B.A. et al. : " Effects of hyperoxic gas mixtures on energy metabolism during prolonged work" J.Appl.Physiol. 39: pp.267~271, (1975)

- 35) Ehrsam, R.E., et al.: "Effect of respiratory acidosis on metabolism in exercise",  
J. Appl. Physiol., 53(1), pp.63~69, (1982)
- 36) 高橋正好, 滝口郁英: "吸気中の二酸化炭素が人の呼吸に及ぼす影響", 資源, 3(3),  
pp.108~115, (1989)
- 37) British Standards Institution: "Specification for closed-circuit escape breathing  
apparatus", BS 4667 Part-5, (1990)

## 第5章 呼吸抵抗が人体に与える影響

### 5.1 緒論

酸素自己救命器のような閉鎖循環式呼吸器では、使用者は呼吸袋の内部の気体を繰り返し呼吸する。その際に気流は呼吸管や二酸化炭素吸収剤などを通過するが、これらは気流に対して抵抗として働き圧力損失を生じる。使用者は呼吸筋の力によって圧力損失を補い、必要な通気量を確保しなくてはならない。このような気流に対する抵抗（以下、呼吸抵抗）は使用者にとって肉体的な負担の原因となる<sup>1-5)</sup>。また、閉鎖循環式呼吸器は吸気中に二酸化炭素が含まれるが、これは呼吸量を増加させるため、より大きな圧力損失の原因となる。仮に、呼吸抵抗のため必要な呼吸量が確保できない場合、生理的な負担の原因にもなる。すなわち、呼吸の目的は体内への酸素の取り込みと二酸化炭素の排出であるが、これは十分な呼吸量の確保によって維持されるため、呼吸量の不足は体内での酸素不足や二酸化炭素過多につながる可能性がある<sup>6-9)</sup>。これは生理的な負担として作用し、程度によっては苦痛の原因となる。このため、呼吸抵抗について検討する場合、吸気中二酸化炭素と呼吸抵抗の複合した影響の把握が重要である。

JISなどの基準<sup>10, 11)</sup>においては、呼吸抵抗はマウスピース部での差圧により評価する。差圧は大気とマウスピース内との圧力差であり、呼気時にはプラス、吸気時にはマイナスの値となる。人工肺を利用して正弦波に近い形の呼吸を行った場合に、吸気時と呼気時のピーク値を利用して吸気抵抗および呼気抵抗を評価できる。この差圧は、酸素自己救命器内部の吸気および呼気経路全体の圧力損失に相当しており、抵抗が強いほどその値も大きい。現行の基準では、30(L/min)での呼吸量で、吸気および呼気抵抗の許容範囲を750Pa以下と定めている。この許容値の由来は不明であるが、英国の基準<sup>12)</sup>では40(L/min)の呼吸量で650Pa以下であり日本の基準よりかなり厳しく、その他の基準と比較しても我が国の基準はゆるやかである。このような基準の妥当性は被験者試験による基礎データに基づいて評価するべきであるが、呼吸抵抗が人体に与える影響を定量的に把握することは難しい。差圧の大小は抵抗の大きさを示す指標の一つであるが、呼吸量にも依存するため、大きな値が必ずしも大きな負担を示すわけではない。このため、呼吸抵抗が人体に与える影響を適切に評価できる指標を求める必要がある。その上で、酸素自己救命器の基準の妥当性について検討するために、吸気中の二酸化炭素と呼吸抵抗との複合した影響について解明する必要がある。

本章では、被験者試験により呼吸抵抗が人体に与える影響について調べた。まず、吸気ガス組成と呼吸抵抗の変化が最大運動能力に与える影響について検討した。人体に何らかの負荷が加わり、その影響で最大運動能力が変化した場合に、その変化量の大小により負荷の程度を評価できると考えられる。そこで、最大運動能力の低下から呼吸抵抗の負担の程度を把握するとともに、得られた生理量を検討することで負担の評価指標を求めた。次に、この結果を参考にして、呼吸抵抗と二酸化炭素が複合して人体に及ぼす影響を解明した。最後に、呼吸抵抗に関する妥当な許容値についての提言を行った。

## 5.2 運動の制限要因としての呼吸抵抗

### 5.2.1 目的

人体に生理的な負担が加わった場合には、その程度に応じて運動能力が低下すると考えられる。そこで、呼吸抵抗が人体に与える負担の程度を定量的に評価する指標を求める目的で、呼吸抵抗による運動能力の低下とその時に認められる各種生理量の変化について検討した。

### 5.2.2 実験方法

2名の被験者に対して漸増運動負荷試験を実施し、疲労困憊に至るまで運動を継続させた。試験条件としては、吸気抵抗や、吸気の酸素および二酸化炭素濃度を変化させた。測定項目は、運動の継続時間、呼吸量、呼気終末二酸化炭素濃度などである。

呼吸量などの測定には図4-2(第4章)に示した測定装置を利用した。試験条件を表5-1に示す。吸気としては、空気および、空気に酸素や二酸化炭素を添加した気体を利用した。3%の二酸化炭素濃度は現行の基準<sup>9,10)</sup>を参考にした。また、40%の酸素濃度は、酸素自己救命器の測定データの最小値を参考にした。呼吸抵抗については、大小2つの条件で試験した。試験条件A~Cでは、呼吸抵抗は小さく、代謝量測定装置の回路内の抵抗のみである。人工肺を利用して呼吸量30(L/min)でのマスク内の差圧変動を調べたところ-160Pa~+150Paであった。一方、試験条件D~Fについては、代謝量測定装置のもつ呼吸抵抗に加えて、吸気管の内部に抵抗体(オリフィス:内径8mm)を挿入して呼吸抵抗(吸気抵抗)を大きくした。人工肺により吸気時の差圧ピーク値を求めたところ-980Paであった。なお、呼気抵抗が大きくなることは耳に障害をおよぼす可能性があったため、漸増運動負荷試験であることを考慮して、呼気管にはオリフィスを挿入していない。

被験者は2名(表5-2)であり、想定されるリスクを予め説明した上で同意を得た。被験者試験では、表5-1に示す吸気ガスおよび呼吸抵抗の条件で、トレッドミル上を歩行した。トレッドミルの設定条件は表5-3に示すとおりであり、被験者は可能な限り長い時間にわたって運動を継続した。各試験条件の順序は任意であり、試験は1日に1回とした。また、前回の試験との間には

表5-1 試験における呼吸抵抗の大小とガス組成

項目 試験条件	オリフィス (吸気側)	二酸化炭素 濃度 (%)	酸素濃度 (%)
A	—	Trace	20.9
B	—	3.0	20.9
C	—	3.0	40.0
D	有	Trace	20.9
E	有	3.0	20.9
F	有	3.0	40.0

表 5-2 被験者の体躯と運動能力

被験者	年齢 (才)	身長 (cm)	体重 (kg)	V <sub>O</sub> max (L/min)	最大心拍 数 (bpm)
a	37	175	70	3.4	185
b	33	170	56	3.2	190

表 5-3 トレッドミルによる運動負荷条件

時間 (分:秒)	傾斜 (%)	歩行速度 (km/h)
0:00~1:00	0	0
1:00~2:40	0	0→5.5
2:40~4:40	0	5.5
4:40~6:40	4	5.5
6:40~8:40	8	5.5
8:40~10:40	12	5.5
10:40~12:40	16	5.5
12:40~14:40	20	5.5
14:00~16:40	20	6.4
16:40~18:40	20	7.3
18:40~20:40	20	8.2
20:40~22:40	20	10.1

3日間以上の間隔をおいた。試験は呼吸の安定を待って開始したが、吸気の二酸化炭素や酸素濃度が高い条件では3~5分間の安静下での呼吸を予め行ない体を慣らした。

### 5.2.3. 実験結果

運動の中止時における測定値を表5-4に示す。継続時間が長いほど、より強い運動強度まで達したことを示す。両被験者とも条件A（空気呼吸、抵抗小）のときに最長の継続時間を示している。これに対して二酸化炭素濃度や吸気抵抗の増加は運動の中止を早めており、最大下運動時の運動能力が低下している。このことは条件Aと比べて付加された要因が運動の制限因子として機能したことを示している。条件Aでの各被験者の継続時間は17分と21分であるが、条件Bでは1.5~2.5分間短縮している。一方、条件Cでは、酸素濃度の増加により、継続時間が1~1.5分間回復している。条件D~Fは、吸気抵抗が増加した条件での結果である。同一の吸気ガス組成と比較した場合に、吸気抵抗の増加により2.5~5分間の継続時間の短縮を示している。条件Eは吸気抵抗が高く、かつ



3%の二酸化炭素が含まれる条件であるが、条件Aに比べると5.5~6.5分も運動の中止が早い。

運動を中止した時点での呼吸量は、吸気抵抗が小さい場合にはほぼ一定を示している。被験者aでは約150(L/min)、bでは約110(L/min)である。吸気抵抗が高い場合には呼吸量はかなり低い値となっており、被験者aでは90~100(L/min)程度、被験者bでは70~80(L/min)程度である。一方、差圧のピーク値は吸気抵抗が大きい場合に著しく大きい。吸気抵抗の大小で吸気時のピーク値を比較すると、被験者aでは抵抗の増加により約-2kPaが約-5kPaとなっている。また、被験者bでは、約-1kPaが約-3kPaと増加している。呼気終末二酸化炭素濃度については、吸気中の二酸化炭素や酸素濃度が高いほど大きな値を示しているが、同じガス組成での比較においても、吸気抵抗が大きい場合の方が高い値を示している。

表5-4 運動中止時における各測定値

被験者	試験条件	継続時間 (min)	呼吸量 (L/min)	呼吸頻度 (回/min)	差圧ピーク値 (kPa)		呼気終末二酸化炭素濃度 (%)
					吸気	呼気	
a	A	17.0	150	57	-1.66	+2.14	4.8
	B	15.5	150	62	-2.19	+2.66	6.3
	C	16.5	151	65	-2.28	+3.42	7.0
	D	14.5	100	54	-4.59	+1.53	5.3
	E	10.5	88	50	-4.66	+1.25	6.5
	F	13.5	97	64	-5.63	+1.98	7.5
b	A	21.0	111	60	-0.86	+0.94	5.4
	B	18.5	104	44	-0.99	+1.20	8.6
	C	20.0	107	47	-1.34	+1.38	9.0
	D	18.0	78	43	-2.85	+1.35	7.3
	E	15.5	78	40	-3.16	+1.32	8.8
	F	17.0	68	40	-2.60	+0.98	9.7

#### 5.2.4. 考察

条件Aに比べて他の試験では運動の継続時間が短縮しており、二酸化炭素や呼吸抵抗が人体に対する負荷因子として作用したと考えられる。一方、酸素濃度の上昇は、短縮された継続時間を回復させており、これらの負荷に対する補償効果を示している。ところで、運動時の呼吸抵抗の影響に対する考えとしてPressure ceiling説<sup>2, 6, 8, 13)</sup>がある。これは呼吸筋によって発生する差圧に限界があり、呼吸量の増加により差圧がその値に達したとき運動の継続が不可能になるとの考えである。この説は、大きな呼吸抵抗(条件D、E、F)の場合では、運動中止時の差圧のピーク値にさほど

差がないことから妥当のようにも思われる。しかし、呼吸抵抗の影響としては、差圧変動のみでなく、呼吸量の減少による体内での酸素不足と二酸化炭素の蓄積も考慮する必要がある。大きな差圧変動は呼吸量の確保に対する肉体的な負担が大きいことを意味しており、酸素不足や二酸化炭素の蓄積は体内の恒常性の乱れによる生理的な負担を意味している。ところで、従来はこれらの複合した影響は考慮されなかったが、Poon<sup>14)</sup>による最適制御理論を参考にこの問題を検討してみる。この理論は、制御工学の考えを基本にして、人体の呼吸調整のメカニズムを解釈したものである。このなかでPoonは、呼吸量の決定因子として機械的な負担(Mechanical cost)と生化学的な負担(Chemicalcost)を考えており、これらの和が最小になるように呼吸量が決定されると仮定している。機械的な負担は、呼吸量の確保に必要なエネルギーなどの力学的な側面を示し、呼吸抵抗による差圧変動の増大もこの負担に関係している。一方、生化学的な負担は、体内における二酸化炭素の蓄積を示しており、呼吸抵抗の影響で呼吸量が不足した結果としての体液の恒常性の乱れに関連している。なお、酸素欠乏は対象となっていないが、これは二酸化炭素に比べてその影響が顕著に現れにくいと考えられる。Poonはこれら2つの負担として、次式を定義している。

$$J = J_c + J_m$$

$$J_c = \alpha^2 \times (P_{I_{CO_2}} + 863 \times \dot{V}_{CO_2} / \dot{V}_E \times (1 - V_D / V_T) - \beta)^2$$

$$J_m = 2 \times \ln(\kappa \times \dot{V}_E / (1 - \dot{V}_E / \dot{V}_{max}))$$

ここで、 $J$ は全体的な負担を示し、 $J_m$ は機械的な負担、 $J_c$ は生化学的な負担である。これらは無次元量である。 $\dot{V}_E$  (L/min) は呼吸量であり、 $J_c$ や $J_m$ は $\dot{V}_E$ の従属変数として示されている。 $\alpha$ や $\beta$ は二酸化炭素に対する呼吸の応答性能や閾値に関連した定数であり、 $P_{I_{CO_2}}$ (mmHg)は吸気中の二酸化炭素濃度。 $\dot{V}_{CO_2}$  (L/min) は、二酸化炭素排出量。 $V_D$ と $V_T$ (L)は、死積量と一回呼吸量。 $\kappa$ は、呼吸抵抗の大きさに関連した定数。 $\dot{V}_{max}$  (L/min) は、最大呼吸量である。

呼吸抵抗が増加した場合における各負担の変化の特徴を図5-1と図5-2に示す。ここでは吸気ガス組成や運動強度(二酸化炭素排出量)は等しいと仮定している。計算式での定数は適当に選んだが、呼吸抵抗に関連した定数 $\kappa$ については、呼吸抵抗が小さい場合を1、大きい場合を20とした。呼吸量( $\dot{V}_E$ )の変化に対して、 $J_m$ は単調増加、 $J_c$ は単調減少を示しており、両者の和である全体的な負担( $J$ )は下に凸な曲線となっている。最適制御理論にもとづけば、この最小点をとるように呼吸量が決定される。例では、呼吸抵抗が小さい場合が約18 (L/min)、大きい場合が約11 (L/min)となる。ところで、呼吸抵抗の大小で比較した場合に、 $J_m$ の変化曲線は大きく異なり、 $J_c$ は同一の変化量である。呼吸量が同じであれば $J_c$ は同一の値を保つことができるが、呼吸抵抗が大きい場合には $J_m$ の負担が大きすぎるため、呼吸量を減少させることで全体の負担( $J$ )を低下させている。その結果、 $J_c$ は呼吸抵抗が小さい場合に比べて増加することになる。このことは機械的な負担が非常に大きい場合には、その一部が生化学的な負担として転化させることで全体的な負担を減少させることを示している。

表5-4において、同じ吸気ガス組成での呼吸抵抗の大小(AとC、BとD、CとE)を比較し

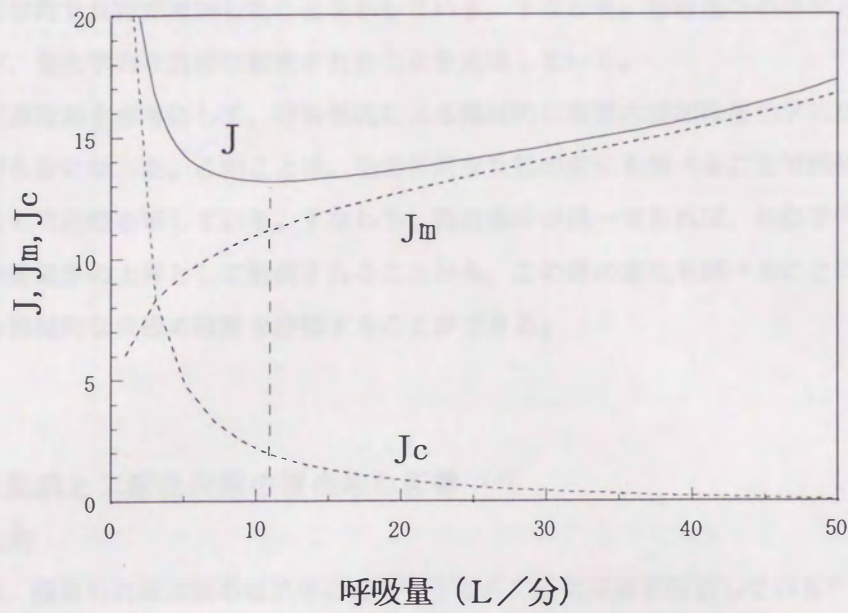


図5-2 呼吸抵抗が大きい場合の機械的、生化学的、およびトータルの負担

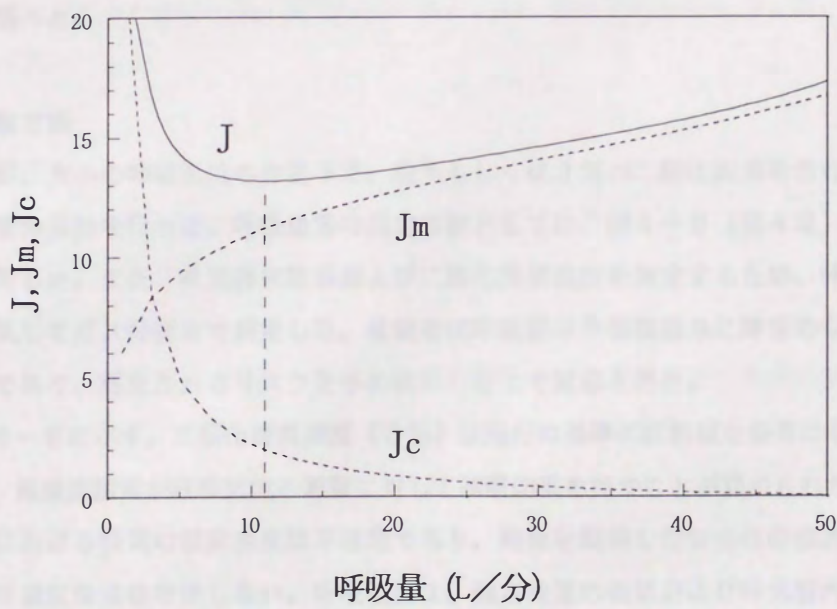


図5-2 呼吸抵抗が大きい場合の機械的、生化学的、およびトータルの負担

た場合に、呼吸抵抗が大きい方が呼気終末二酸化炭素濃度が高い値を示している。中止時の運動強度が異なるため一概には言えないが、呼気終末二酸化炭素濃度の増加は、体内の二酸化炭素の蓄積が進行して生化学的な負担が増加したことを示している。すなわち、呼吸抵抗の増加という機械的な負担の増大が、生化学的な負担に転化されたことを意味している。

Poonの最適制御理論を参考にして、呼吸抵抗による機械的な負担の増加は生化学的な負担として表れることが明らかになった。このことは、生化学的な負担の変化を調べることで機械的な負担の程度を評価できる可能性を示している。すなわち、他の条件が同一であれば、生化学的な負担は呼気終末二酸化炭素濃度の上昇として計測されることから、この値の変化を調べることにより、人体に加わっている機械的な負担の程度を評価することができる。

### 5.3 呼吸抵抗と二酸化炭素の複合的な影響<sup>14)</sup>

#### 5.3.1 目的

現行の基準は、酸素自己救命器の吸気中に最大で3%の二酸化炭素を許容している<sup>9, 10)</sup>。第4章で示したように、吸気中の二酸化炭素濃度の増加は呼吸量を増加させる。呼吸量の増加は、呼吸抵抗によって生じる圧力変動を大きくさせるため、人体への負担が著しく増加する可能性がある。このため呼吸抵抗が人体に及ぼす影響を考える場合には、二酸化炭素の存在下での影響を考える必要がある。そこで本節では、現行の基準の妥当性を検討するため、二酸化炭素存在下での呼吸抵抗の人体への影響を調べた。

#### 5.3.2 実験方法

8人の被験者が、大小の呼吸抵抗の存在下で、空気もしくは3%の二酸化炭素を含む気体を呼吸しながら一定強度の運動を行った。呼吸量等の測定装置としては、図4-6(第4章)に示す代謝量測定装置を利用した。また、呼気終末酸素および二酸化炭素濃度を測定するため、呼気管から連続的にガスを採気してガス分析計で測定した。被験者は呼吸器系や循環器系に障害のない8名の男性(表5-5)であり、想定されるリスクを予め説明した上で同意を得た。

試験条件を表5-6に示す。二酸化炭素濃度(3%)は現行の基準の許容値を参考にした<sup>10, 11)</sup>。前節においては、高濃度酸素が呼吸抵抗の影響に対して補償効果を持つことが認められた。しかし、酸素自己救命器における吸気の酸素濃度は不確定であり、効果を期待した安全性の検討はできないため、ここでは高濃度酸素は考慮しない。呼吸抵抗は、測定装置の吸気および呼気管内にオリフィス(内径9mm)を挿入して大きくした。人工肺により毎分30(L/min)で呼吸してマスク内の差圧変動を調べたところ、オリフィスなしでは吸気と呼気のピーク値が-160~+150Paであり、オリフィスの挿入時には-730~+740Paとなった。後者の値はJIS等の基準<sup>10, 11)</sup>で規定されている上限値(±750Pa)にほぼ相当している。

表 5 - 5 被験者の特徴

被験者	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)
a	39	175	70
b	39	172	74
c	39	172	78
d	26	170	80
e	40	162	63
f	41	170	71
g	38	182	78
h	45	171	70

表 5 - 6 試験での呼吸条件

試験条件	吸気中の 二酸化炭素 濃度	オリフィス の挿入 (吸気と呼気)
A	Trace	無
B	Trece	有
C	3 %	無
D	3 %	有

被験者は自転車エルゴメータを利用して、与えられた呼吸条件の下で運動を行った。無酸素性作業閾値を超えるような強い運動強度では乳酸の影響<sup>16-18)</sup>が加わり、呼気終末二酸化炭素濃度が適切な指標になり得ない可能性があるため、運動強度は中程度(40~50%V<sub>O<sub>2</sub>max</sub>)のレベルとした。運動の負荷パターンとして、まず安静状態で呼吸の安定を待った後、一定運動負荷の条件下で最低4分間運動を継続した。ペダルの回転速度は毎分約60回であり、負荷強度は被験者によって異なり60~100Wであった。この運動強度は心拍数が110~120を目安に決定した。また、各被験者とも条件の異なる4回の試験を行ったが、一連の試験は同一日に行い、途中で十分な休憩を取った。なお、各試験の順序は任意とした。

### 5.3.3. 試験結果

図5-3および図5-4に被験者aが空気を呼吸した場合(条件AとB)の呼吸量と呼気終末二酸化炭素濃度の変化を示す。また、図5-5および図5-6には、吸気中に3%の二酸化炭素が存在する場合(条件CとD)の結果を示す。空気を呼吸した条件ではオリフィスの有無により顕著な差は認められないが、二酸化炭素が混入した場合には呼吸量、呼気終末二酸化炭素濃度ともに明瞭な差が認められた。すなわち、運動時における呼吸量の減少と、呼気終末二酸化炭素濃度の増加である。

表5-7に全被験者の運動時における測定結果を示す。各測定値は、40~50%V<sub>O<sub>2</sub>max</sub>の運動負荷に対して呼吸が安定した後の1分間の平均値である。また、呼吸抵抗などの影響を統計的に評価するため、Student's t-testにより有意差検定を行った。これらの結果から、呼吸抵抗の増加の影響について検討してみると、差圧のピーク値については、吸気ガス組成に関係なく、呼吸抵抗の増加により著しい増加を示している。呼吸量や呼吸頻度については、呼吸抵抗の増加により有意に変化しているものの、空気を呼吸した条件では変化は小さい。酸素摂取量や二酸化炭素排出量については、呼吸抵抗の増加は有意な変化を生じない。一方、呼気終末酸素濃度および二酸化炭素濃度につ

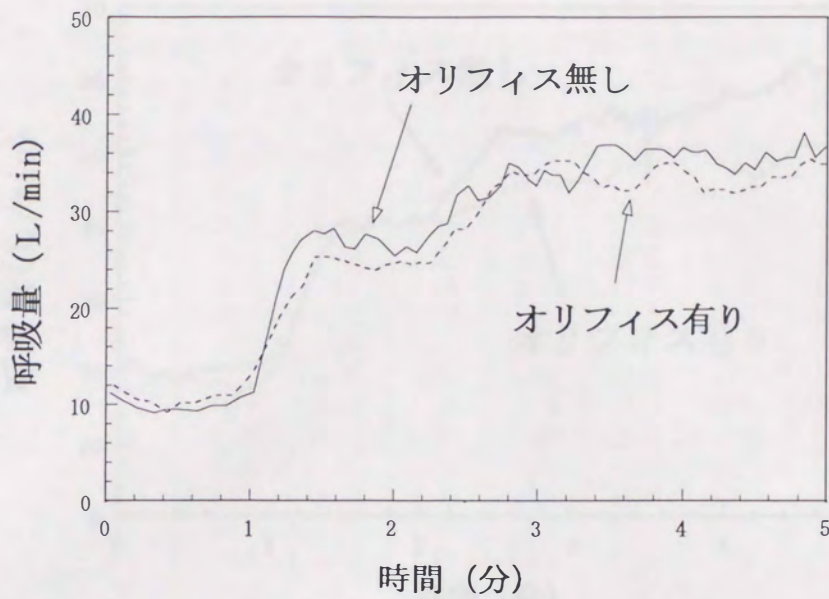


図5-3 空気を呼吸した条件での呼吸量に対するオリフィス有無の影響。運動は1分の時点で開始。(被験者a)

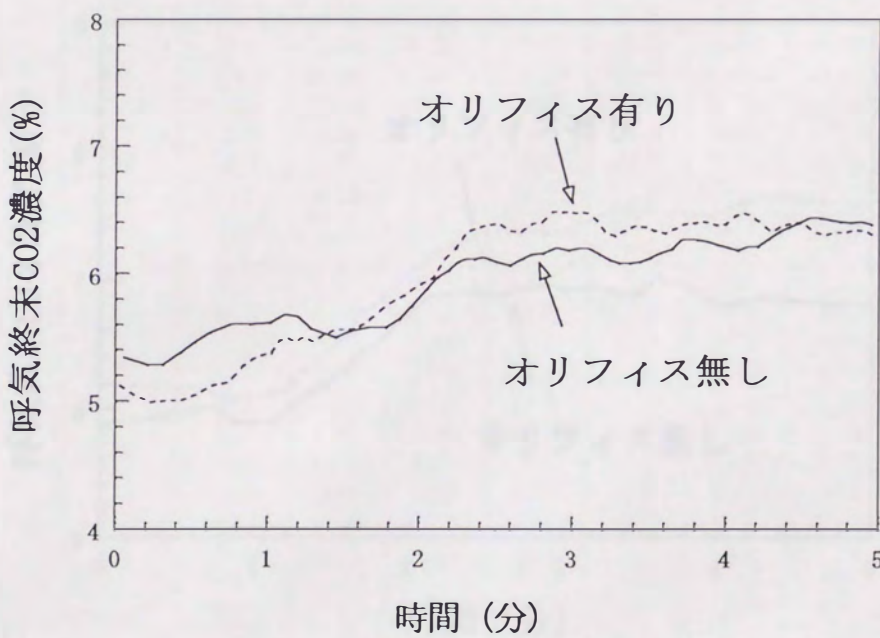


図5-4 空気を呼吸した条件での呼気終末二酸化炭素濃度に対するオリフィス有無の影響

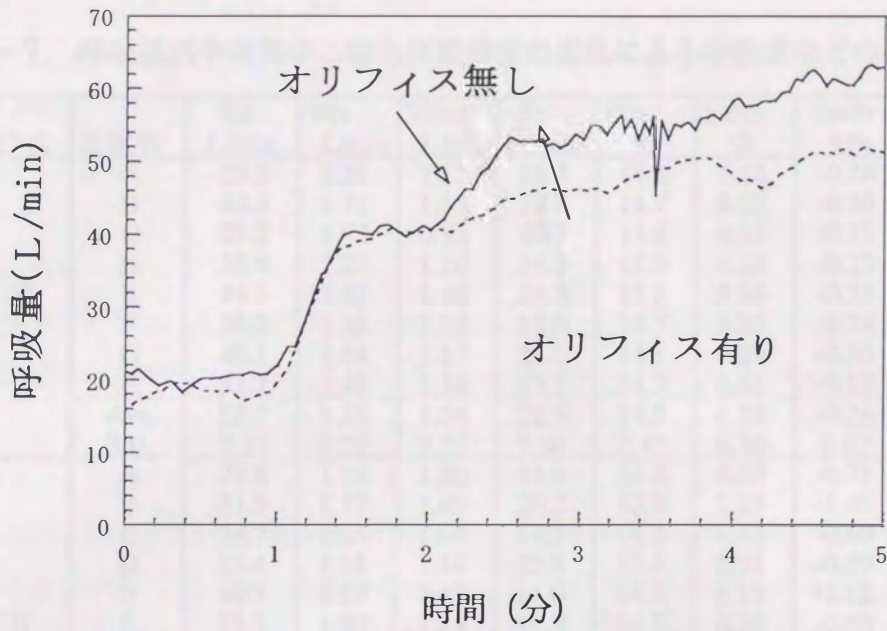


図5-5 吸気中に3%の二酸化炭素が混入した条件での呼吸量に対するオリフィス有無の影響

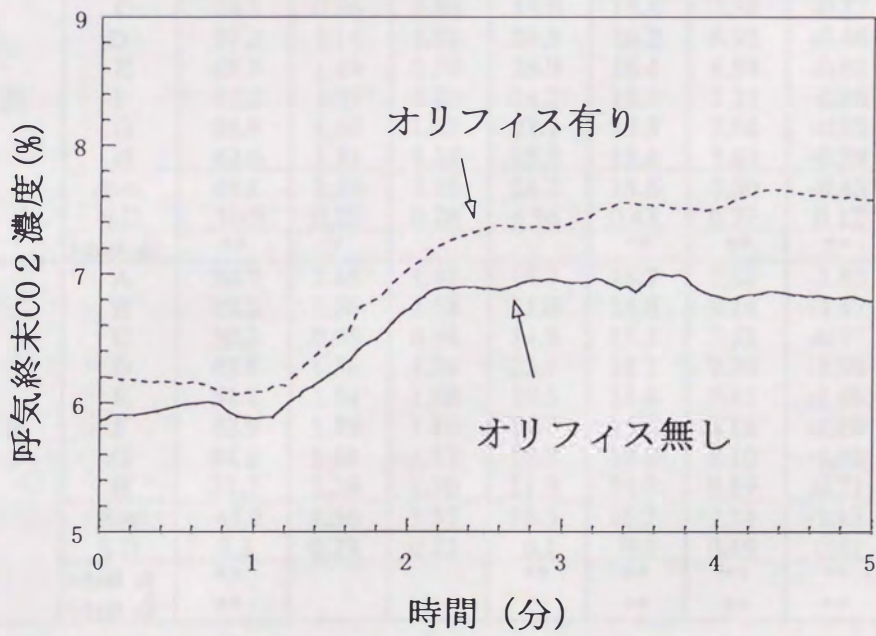


図5-6 吸気中に3%の二酸化炭素が混入した条件での呼気終末二酸化炭素濃度に対するオリフィス有無の影響

表5-7 呼吸抵抗や吸気中二酸化炭素濃度の変化による呼吸量などの変化

吸気 CO <sub>2</sub>	オリフィス	被験者	$\dot{V}_E$ L/min	$\dot{V}_{O_2}$ L/min	$\dot{V}_{CO_2}$ L/min	Fr 回/min	EtO <sub>2</sub> %	EtCO <sub>2</sub> %	In-Pr kPa	Ex-Pr kPa
Trace	無	A	29.5	1.21	1.12	16.2	14.4	6.16	-0.28	0.26
		B	43.5	1.71	1.65	39.7	14.7	6.20	-0.30	0.27
		C	23.2	1.03	0.93	20.7	13.8	6.58	-0.15	0.10
		D	35.9	1.27	1.26	25.3	15.0	6.28	-0.23	0.18
		E	44.5	1.50	1.48	26.1	15.3	5.56	-0.35	0.24
		F	35.2	1.35	1.35	15.5	14.7	6.35	-0.24	0.24
		G	40.3	1.64	1.47	22.5	14.1	6.29	-0.30	0.20
		H	33.7	1.42	1.44	17.1	14.3	6.81	-0.19	0.16
		Ave.	35.7	1.39	1.34	22.9	14.5	6.28	-0.26	0.21
	S.D.	7.15	0.22	0.22	7.90	0.49	0.36	0.07	0.06	
	有	A	29.0	1.26	1.20	15.6	14.2	6.50	-0.71	0.86
		B	31.5	1.57	1.40	28.2	12.9	7.13	-1.05	0.77
		C	24.7	1.05	1.00	14.7	14.2	6.41	-0.60	0.55
		D	35.4	1.18	1.14	25.3	15.1	5.91	-0.89	0.81
		E	40.3	1.57	1.49	21.0	14.5	6.15	-1.12	0.95
		F	33.3	1.30	1.28	14.9	14.5	6.38	-0.70	0.61
		G	34.3	1.70	1.53	22.0	13.2	6.69	-0.86	0.76
		H	27.4	1.26	1.21	12.2	13.7	7.16	-0.53	0.59
Ave.		32.0	1.36	1.28	19.2	14.0	6.12	-0.81	0.74	
S.D.	4.94	0.22	0.18	5.72	0.71	0.43	0.21	0.14		
t-test $\alpha$	*			*			**	**		
3%	無	A	57.0	1.27	1.40	26.4	16.3	6.91	-0.44	0.46
		B	53.6	1.60	1.65	33.8	15.4	7.66	-0.46	0.40
		C	28.3	0.86	0.80	15.0	15.5	7.30	-0.27	0.21
		D	51.2	1.14	1.22	29.9	16.2	6.92	-0.46	0.35
		E	63.3	1.44	1.56	26.9	16.4	6.88	-0.62	0.52
		F	42.2	1.27	1.20	24.2	15.9	7.33	-0.36	0.42
		G	53.9	1.60	1.61	21.1	15.3	7.64	-0.55	0.38
		H	42.6	1.33	1.37	15.8	15.4	7.80	-0.29	0.27
		Ave.	49.1	1.32	1.35	24.2	15.8	7.30	-0.43	0.37
	S.D.	10.9	0.25	0.28	6.56	0.43	0.37	0.12	0.10	
	t-test $\beta$	**	*			**	**	**	**	
	有	A	50.7	1.45	1.47	14.7	15.7	7.60	-1.63	1.63
		B	45.2	1.56	1.55	31.0	14.8	8.14	-1.47	1.30
		C	30.3	0.95	0.94	14.8	15.3	7.53	-0.97	0.85
		D	45.8	1.16	1.24	23.1	15.7	7.30	-1.50	1.17
		E	54.1	1.54	1.58	19.5	15.4	7.45	-1.98	2.29
		F	42.9	1.29	1.19	14.7	15.5	7.16	-1.69	1.81
		G	44.2	1.61	1.57	16.5	14.6	8.10	-1.52	1.09
H		31.7	1.26	1.20	11.9	14.0	8.59	-0.71	0.72	
Ave.		43.2	1.36	1.35	18.3	15.2	7.74	-1.43	1.35	
S.D.	8.3	0.23	0.23	6.1	0.6	0.49	0.41	0.53		
t-test $\alpha$	**			**	**	**	**	**		
t-test $\beta$	**				**	**	**	**		

$\dot{V}_E$ , 呼吸量;  $\dot{V}_{O_2}$ , 酸素摂取量;  $\dot{V}_{CO_2}$ , 二酸化炭素排出量; Fr, 呼吸頻度;  
 EtO<sub>2</sub>, 呼気終末酸素濃度; EtCO<sub>2</sub>, 呼気終末二酸化炭素濃度;  
 In-Pr, 吸気時差圧ピーク値; Ex-Pr, 呼気時差圧ピーク値.; Ave, 平均;  
 S.D., 標準偏差; t-test  $\alpha$ , オリフィス有無に対する有意差検定;  
 t-test  $\beta$ , 二酸化炭素濃度差に対する有意差検定 (\*, p<0.05; \*\*, p<0.01)



いては、空気を呼吸した条件では有意差を生じないが、吸気中に二酸化炭素が3%混入した条件では呼吸抵抗の増加により有意な変化が生じた。

被験者による主観的な評価としては、呼吸抵抗が高い条件でも、空気を呼吸した場合には運動の継続にさほど困難を感じていない。しかし、吸気に二酸化炭素が混入した場合には、呼吸抵抗の増加により大部分の被験者が強い苦痛を訴えた。

#### 5.3.4. 考察

現行の基準値<sup>10, 11)</sup>は、人工肺試験により呼吸量30(L/min)の条件下で±750Pa以下と定められている。これは諸外国の基準<sup>12, 19, 20)</sup>と比較して許容の範囲がかなり広いが、その妥当性については検討されていなかった。また、酸素自己救命器の吸気中には二酸化炭素が含まれ、呼吸抵抗の影響を強める因子として作用している<sup>21, 20)</sup>。これは呼吸抵抗の人体への影響をより著しいものにする要因であるため、基準の妥当性を検討するためには、二酸化炭素が存在した条件下での呼吸抵抗の影響を捉える必要がある。しかし、諸外国を含めて、この種の研究は十分にはなされていない。安全性に関する基準は危険因子として予想されるものを考慮して検討する必要があることから、呼吸抵抗の基準は二酸化炭素との複合した影響において、人体に悪影響を及ぼさない範囲内で許容値を設定するべきである。

前節では、機械的な負担が著しい場合には、その負担の一部が生化学的な負担として転化されることを示した。すなわち、吸気ガス組成と運動強度が等しい場合、呼気終末二酸化炭素濃度の上昇量が大きいほど、呼吸抵抗による機械的な負担がより強く人体に加わっていたことを意味している。つまり、定量的な評価が困難であった機械的な負担の程度を、呼気終末二酸化炭素濃度の変化により推測可能である。

今回の実験において、空気を呼吸した条件では、呼吸抵抗の増加は差圧のピーク値を大幅に増加させており、呼吸量や呼吸頻度にも影響を与えている。しかし、呼気終末二酸化炭素濃度には有意な変化が無いため、生化学的な負担の増加につながる程の機械的な負担は人体に加わっていないと考えられる。これに対して、吸気中に3%の二酸化炭素が混入した条件では、呼吸抵抗の増加は、呼吸量などのみでなく、呼気終末二酸化炭素濃度も大きく増加させている。この場合、同じ吸気ガス組成同士を比較しているため、生化学的な負担を増加させた原因は呼吸抵抗の増加であり、そのことによる機械的な負担の増加が生化学的な負担として転化された結果であると考えられる。このことは、吸気中に3%の二酸化炭素が存在する条件では、許容レベルの呼吸抵抗であっても、体液の恒常性に影響を与えるほどの負担が加わっていることを示している。また、主観的な感覚としても、大部分の被験者が苦痛を感じている。このことから、現行の基準はより厳しい許容値に改定することが望ましい。

#### 5. 4. 結言

呼吸抵抗が最大運動能力に与える影響を検討することによって、呼気終末二酸化炭素濃度の変化により呼吸抵抗が人体に与える影響を把握できることを示した。また、この結果を基にして、吸気中の二酸化炭素と呼吸抵抗が複合して人体に及ぼす影響について調べた。その結果、3%の二酸化炭素の存在下では、現行の許容範囲内の呼吸抵抗であっても、体液の恒常性に影響を及ぼすほどの負担が加わっていることが明らかになった。そのため、現行の許容値、すなわち人工肺試験での30(L/min)の呼吸量において、吸気および呼気が750Pa以下は基準として妥当ではないと結論できる。第4章で述べたように吸気中の二酸化炭素の基準値を2~2.5%程度まで下げたと仮定しても、呼吸の刺激因子として作用することには変わりはなく、また酸素自己救命器が運動時に使用されることも考慮して、呼吸量30L/minで試験する場合、呼吸抵抗の基準を現行の±750Paから、欧米なみに±500Pa程度の値に改訂することを提案する。

#### 参考文献

- 1) Hermansen, L., Vokac, Z. and Lereim, P. : " Respiratory and circulatory response to added air flow resistance during exercise" , Ergonomics, 15(1), pp.15~24, (1972)
- 2) Deno, S.D., Kamon, E. and Kiser, D.M. : " Physiological responses to resistance breathing during short and prolonged exercise" , Am.Ind.Hyg.Assoc.J., 42, pp.616~623, (1981)
- 3) Burdon, J.G.W., et al : " Effect of ventilatory drive on the perceived magnitude of added loads to breathing" , J.Appl.Physiol., 53(4), pp.901-907, (1982)
- 4) Dahlback, G.O. and Balldin, U. : " Physiological effects of pressure demand masks during heavy exercise" , Am.Ind.Hyg.Assoc.J., 45(3), pp.177~181, (1984)
- 5) Killian, K.J., et al. : " Effect of frequency on perceived magnitude of added loads to breathing" , J.Appl.Physiol., 58(5), pp.1616~1621, (1985)
- 6) Wilson, J.R. et al : " Effects of pressure-demand respirator wear on physiological and perceptual variables during progressive exercise to maximal levels" , Am.Ind.Hyg. Assoc.J., 50(2), pp.85-94, (1989)
- 7) Demedts, M., et al : " Effects of increased external airway resistance during steady-state exercise" , J.Appl.Physiol., 35(3), pp.361-366, (1973)
- 8) Flook, V. and Kelman, G.R. : " Submaximal exercise with increased inspiratory resistance to breathing" , J.Appl.Physiol., 35(3), pp.379-384, (1973)
- 9) Dressendorfer, R.H. : " Combined effects of breathing resistance and hyperoxia on aerobic work tolerance" , J.Appl.Physiol., 42(3), pp.444-448, (1977)

- 10) 公害資源研究所編：“鉍山坑内用品検定試験法”，(1986)
- 11) 日本規格協会：“閉鎖循環式酸素自己救命器”，JIS M 7651, (1996)
- 12) British Standards Institution：“Specification for closed-circuit escape breathing apparatus”，BS 4667 Part-5, (1990)
- 13) Cerretelli,P., Sikand,S. and Farhi,L.E.：“Effect of increased airway resistance on ventilation and gas exchange during exercise”，J.Appl.Physiol.,27(5),pp.597~600, (1969)
- 14) Poon,C.：“Ventilatory control in hypercapnia and exercise: optimization hypothesis”，J.Appl.Physiol.,62(6),pp.2447-2459,(1987)
- 15) Takahashi,M., et al.：“Effects of breathing resistnace while inhaling 3% carbon dioxide during steady-state exercise”，J.Occu.Health, (掲載待)
- 16) 宮村実晴, 本田良行：“運動時の中枢性呼吸・循環調整”，呼吸と循環, 36(1), pp.3~11, (1988)
- 17) 本田良行：“運動と呼吸”，体力科学, 41, pp.425~435, (1992)
- 18) 吉田敬義, 福場良之：“運動時の呼吸調整”，生理人類学会誌, 11(5), pp.479~493, (1992)
- 19) US National Archives and Records Administration：“Self-Contained Breathing Apparatus”，Coad of Federal Regulation 30 Subpart H, (1991)
- 20) D.Bernhad Prinz：“Gerate und systeme fur die selbstrettung nach brand-oder explosionsunglucken in steinkohlenbergwerken”，Gluckauf, 127(7/8), pp.278~285, (1991)
- 21) Craig,F.N., Blevins,W.V. and Cummings,E.G.：“Exhausting work limited by external resistance and inhalation of carbon dioxide”，J.Appl.Physiol.,29(6),pp.847~851, (1970)
- 22) Babb,T. et al：“Physical performance during combinations of hypercapnic,resistive and hot air breathing”，Am.Ind.Hyg.Assoc.J.,50(2),pp.105-111,(1989)

## 第6章 過激な運動下での酸素自己救命器の安全性

### 6.1 緒言

酸素自己救命器の性能評価は人工肺を利用して行われる。基準<sup>1, 2)</sup>によれば人工肺の設定は呼吸量が30(L/min)であり、また代謝量は1.2(L/min)である。日本人男性の平均の最大酸素摂取量を3.2(L/min)<sup>3)</sup>とした場合、この値は最大値の38%となり、運動強度としては早足歩行に相当する。しかし、実際の災害発生時には作業者は過度な精神的ストレス状況下に置かれ、性急な避難を試みることも予想される。また、坑内では上向き避難が必要な場合も想定され、歩行速度が遅くても運動量は大きくなる可能性がある。米国の鉱山で行われた避難試験の結果<sup>4)</sup>では、地下坑内からの約1時間の退避活動における運動量は平均値として最大酸素摂取量の64%であり、ピーク値としては76%となっている。ところが、現行の試験基準においてはこのような状況下での酸素自己救命器の安全性は確認されていない。すなわち、過激な運動下で使用した場合に、酸素自己救命器にどのような問題点が存在し、それに対してどのような対策をとるべきであるかが明らかではない。

そこで本章では、地下作業現場で利用される酸素自己救命器から代表的な3機種をサンプルに選び、現行の基準に基づく人工肺試験および過激な運動下での被験者試験を行なうとともに、その結果から基準の持つ問題点を明らかにした。

### 6.2 現行の基準に基づく評価試験（人工肺試験）<sup>5)</sup>

#### 6.2.1 目的

過激な運動時での酸素自己救命器の安全性を評価し、その結果を基準に反映させるためには、まず実際に利用されている酸素自己救命器が現行の基準によってどのように評価されているかを明らかにしておく必要がある。そこで、鉱山からの避難用として開発された3機種の酸素自己救命器を対象として人工肺試験を実施した。3機種は、日本の炭鉱で使用された経緯のあるもの、もしくは使用が検討されたものであり、動作時に手動補給弁等の操作を必要としないものを選定した。

#### 6.2.2 試験方法

人工肺は一定の試験条件で酸素自己救命器の性能を評価できる。このため再現性に優れており、性能基準での評価試験に適している。また、人が関与しないため、未知な製品に対して安全である。基準<sup>1, 2)</sup>に定められた人工肺の設定は、呼吸量が30(L/min) (1.2 L/回×25回/min)、呼気の二酸化炭素濃度は4%、温度は37°C、湿度は95%以上である。呼吸は正弦波形であり、吸気と呼気のピーク流量は約95(L/min) (呼吸量の $\pi$ 倍)となる。また、酸素消費を模擬するため、呼吸に同期させて吸気ガスの一部(毎分1.2 L)を外部に廃棄している。

試験は基準での性能評価法に基づいて行った。使用したサンプルはK O<sub>2</sub>型2機種、圧縮酸素型

1機種であり、公称使用時間は全て30分である（表6-1）。試験はウォーミングアップの完了した人工肺にサンプルを接続して公称使用時間中継続した。試験の期間中、吸気温度、マウスピース内外の差圧、吸気中の酸素および二酸化炭素濃度の変化を記録した。吸気温度の測定には、マウスピースと人工肺との接続管内部に固定した直径0.2mmのK型熱電対を利用した。差圧変動は、接続管内部と大気との圧力差を差圧トランスデューサ

（日本光電社製、TP-603）により測定した。

また、吸気管の内部から採気したガスの酸素及び二酸化炭素濃度をガス分析計（AIC社製、RAS-31、41）により測定し、測定後は吸気管の下流側に戻した。測定した各データはペンレコーダ（理科電機社製、R-50）により連続的に記録した。

表6-1 試験に利用した酸素自己救命器

サンプル	型式	公称使用時間
I	K O <sub>2</sub> 型	30分
II	K O <sub>2</sub> 型	30分
III	圧縮酸素型	30分

### 6.2.3 試験結果

図6-1に全サンプルの吸気温度の変化を示す。測定は通常の熱電対で行ったため、乾球温度により表現されている。上昇率に違いがあるものの、サンプルIとIIはともに連続的な温度上昇を示した。これに対して、IIIは急激な温度上昇後に一定値を維持している。最高温度はK O<sub>2</sub>型であるサンプルIとIIが53℃と48℃、圧縮酸素型であるサンプルIIIは49℃であった。J I Sにおける吸気温度の基準は、湿度の違いを考慮して圧縮酸素型が50℃以下、K O<sub>2</sub>型が65℃以下である。よって全サンプルとも規定を満たしているが、検定試験法の基準では一律に50℃以下と規定されているため、サンプルIは不合格となる。

図6-2にマウスピース内外の差圧の変化を示す。時間に対する変化は、サンプルIIIがほぼ一定値であるのに対して、IとIIにおいては連続的な差圧の増加が認められる。薬剤層の構造の違いなどを反映してサンプル間に値の違いが認められるが、吸気および呼気のピーク値は全サンプルともに±750Pa以下であり、J I Sや検定試験の基準を満たしている。

図6-3に吸気中の二酸化炭素濃度の変化を示す。サンプルIとIIはK O<sub>2</sub>薬剤の特性として途わずかに上昇するが、全体的には非常に低いレベルである。IIIも低いレベルを維持しているが、後半に吸収能力の低下により連続的な濃度上昇を示している。公称使用時間中における値は各サンプルとも3%以下であり、基準を満たしている。また、サンプル間の比較ではIIが特に低い値を示している。

### 6.2.4 考察

鉾山からの避難用酸素自己救命器を対象にして現行の基準にもとづいた評価試験を実施した。

吸気温度については、圧縮酸素型のサンプルIIIは10分程度まで急激な温度上昇を示した後、ほぼ一定値を示すのに対して、K O<sub>2</sub>型のサンプルIとIIは連続的な温度上昇を示している。このよう

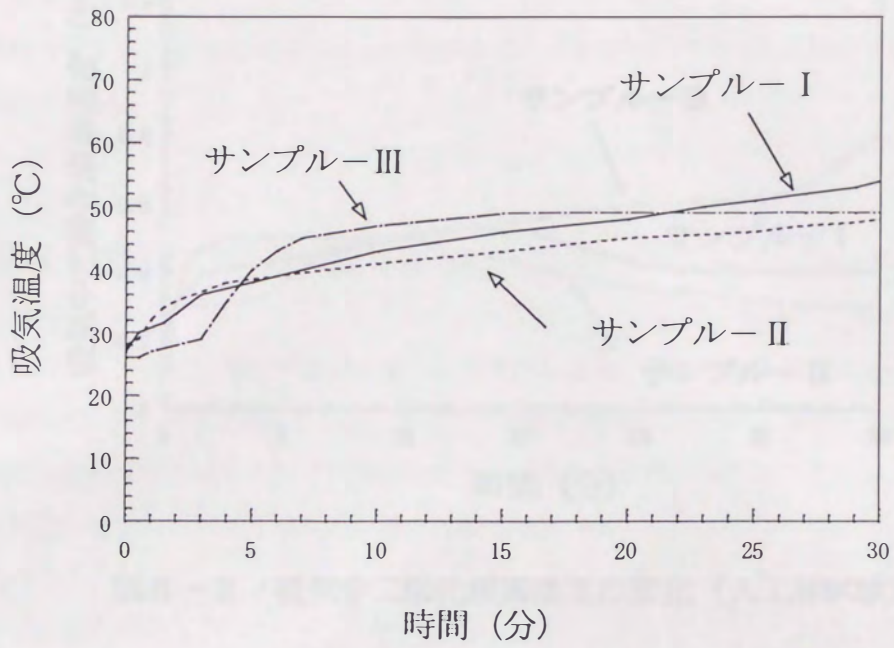


図6-1 吸気温度の変化 (人工肺試験)

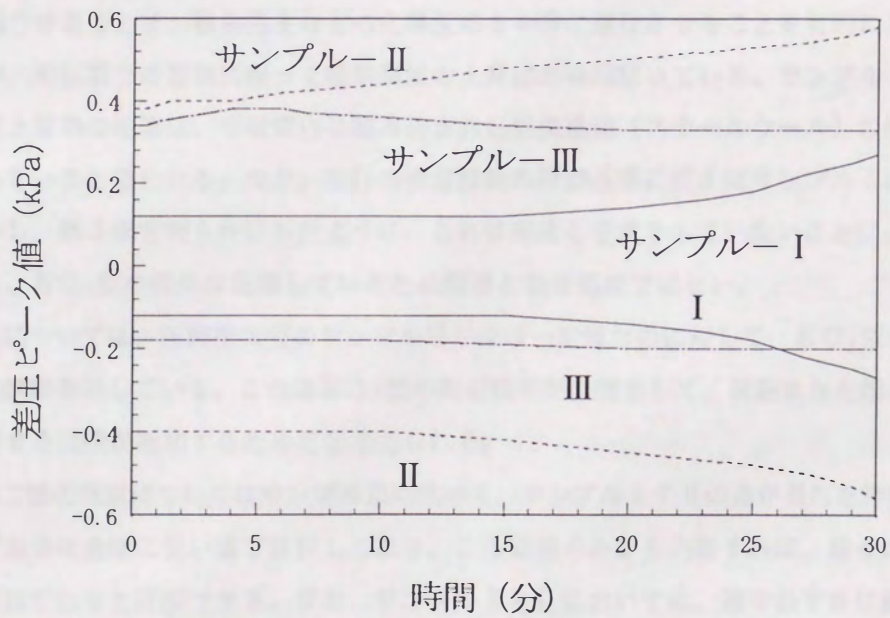


図6-2 差圧ピーク値の変化 (人工肺試験)

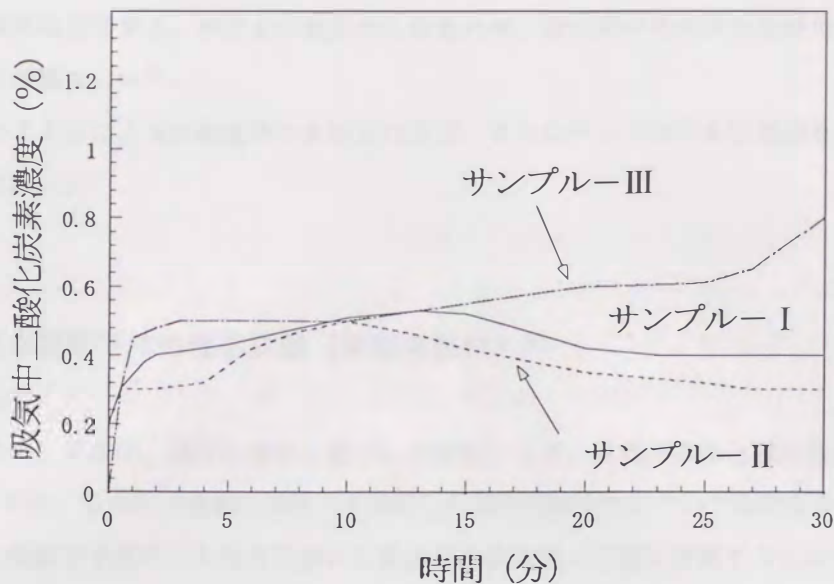


図6-3 吸気中二酸化炭素濃度の変化 (人工肺試験)

な違いは基本的な構造の相違が反映していると考えられる。圧縮酸素型では、呼気は薬剤層を通過して呼吸袋に導かれ、吸気ガスは呼吸袋から呼吸管を介して直接吸引される。そのため、薬剤層からの発熱量と呼吸袋での放熱量が等しくなった段階で温度が定常化している。これに対して、 $KO_2$ 型では、呼気と吸気の両者を薬剤層に通す構造になっている。これは呼吸ガスを薬剤層にできるだけ長時間接触させることで、酸素発生などの化学反応を十分に進行させることを目的にしていると考えられるが、薬剤層での蓄熱に伴って吸気温度の上昇は長時間続いている。サンプル I と II に認められる温度上昇率の相違は、呼吸管内に組み込まれた熱交換機 (スチールウール) の性能の違いなどが反映していると思われる。なお、現行の検定試験の評価基準に従えばサンプル I は基準に満たない。しかし、第3章で明らかにしたように、これは湿度を考慮をしていないことによる基準側の問題であり、 $KO_2$ 型の吸気は乾燥しているため問題となる温度ではない。

呼吸抵抗については、圧縮酸素型のサンプル III がほぼ一定値なのに対して、 $KO_2$ 型のサンプル I と II は増加傾向を示している。これは  $KO_2$ 型の薬剤粒子が崩壊をして、目詰まりを起こすことにより気流に対する抵抗が増加するためだと考えられる。

吸気中の二酸化炭素についてはサンプル III に比べて、サンプル I や IIの方が優れた特性を示した。特にサンプル II は全体に低い値で推移しており、この結果のみから判断すれば、最も二酸化炭素吸収能力に優れていると評価できる。また、サンプル I と II においては、途中わずかに濃度の増加がみられたが、これは反応の過程において認められる  $KO_2$ 型の特徴と考えられる。その後、再び低い値を示しているが、さらに長時間実験を続けた場合にはサンプル III と同様に吸気中の二酸化炭素の上昇を示すと考えられる。上昇の特徴として、時間の経過とともにその上昇曲線は上向き傾向にある。現行の基準は吸気中の二酸化炭素濃度を3%と規定しているが、この値は通常の酸素自己救命

器においては二酸化炭素吸収剤の能力がほぼ終わりに近づいた時点で相当しており、その後の時間経過に対して濃度は急増する。安全性の観点から考えれば、吸収剤の寿命は公称使用時間よりも長めに設定した方が望ましい<sup>6)</sup>。

なお、現行のJISによる評価基準の点からいえば、3つのサンプルともに規定を満たしており性能上の問題はない。

## 6.3 過激な運動下での性能試験（被験者試験）<sup>5)</sup>

### 6.3.1 目的

前節の3つのサンプルは、現行の基準に基づいた評価により、避難用の自己救命器としての十分な機能が保証された。しかし、過激な運動下で使用した場合の安全性については明らかではない<sup>7)</sup>。そこで、過激な運動下で使用した条件における酸素自己救命器の性能を評価するため、前節と同機種の酸素自己救命器を対象として被験者試験を実施した。

### 6.3.2 試験方法

酸素自己救命器を装着した被験者が、徐々に運動強度を上げていって、感覚的な限界に至るまで、実験を継続した。この試験に人工肺を利用しなかった理由は、現行の人工肺では人の代謝活動を完全には模擬できない点と、酸素自己救命器の性能に対して感覚的な評価が行えない点である。また、漸増運動負荷試験として実施することにより、呼吸量や代謝量の増加に対する酸素自己救命器の特徴を明らかにすることができる。

被験者試験での運動条件の設定にはトレッドミルを使用した。被験者は呼吸の安定を待って、酸素自己救命器を装着して呼吸（以下、マスク呼吸）を開始した。実験開始から1分間の静止後、2分40秒かけて時速5.5kmまで徐々に速度を上げてゆき、その状態を2分間持続した。その後、2分間隔で傾斜を4%ずつ増加させた。また、傾斜が20%となった後は速度を0.9kmずつ増加させた。被験者は心電図等に異常が認められない限りにおいて、自覚的に限界となるまで運動を継続した。また、運動中止後もマスク呼吸を可能な限り続けた。

酸素自己救命器の吸気温度の測定はマウスピース内に固定した熱電対（K型、線径0.2mm）により行った。呼吸抵抗はマウスピース内部と大気との差圧を半導体トラスデューサ（日本光電社製、TP-603）により測定した。吸気および呼気の酸素と二酸化炭素濃度は呼吸管からの採気によりガス濃度計（AIC社製、RAS-31/41）により分析し、呼吸管に戻した。また、心電図と心拍数の測定を心電計（日本光電 AC-601G）で行った。

被験者は呼吸用保護具に関連した負荷試験に経験豊富な37才の男性（身長175cm、体重70kg）であり、呼吸器系や循環器系に障害を持たない。また、試験に伴うリスクを十分に理解した上で同意を得た。各試験は1日1回とし、途中3日以上の間隔をおいて3つのサンプル（表6-1）に対する



試験を実施した。また、予備試験（コントロール）として、上記と同様の運動負荷パターンにて空気を呼吸した試験を行った。この時の呼吸量や代謝量は代謝量測定装置（第4章参照）により測定した。

### 6.3.3 実験結果

図6-4および図6-5にコントロールでの被験者の呼吸量と代謝量の変化を示す。被験者は試験開始から17分の段階で疲労困憊により運動を中止しており、その時の心拍数は183回/分であった。また、呼吸量や代謝量は運動強度の増加とともに連続的に増加しており、試験開始から約5分経過した段階で人工肺試験の設定条件（呼吸量30 L/min、代謝量1.2 L/min）を上回った。

表6-2に被験者試験での運動およびマスク呼吸の中止時間と、運動中止時の心拍数を示す。サンプルIはコントロールと同じ運動の継続時間と心拍数を示しており、活動能力の限界まで運動を継続できたと考えられる。一方、IIとIIIはかなり早い段階で運動を中止しており、何らかの負荷因子が作用した可能性が考えられる。また、

表6-2 運動およびマスク呼吸の中止時間

サンプル	運 動		マスク呼吸
	中止時間 (分：秒)	心拍数 (bpm)	中止時間 (分：秒)
Control	17:00	183	—
I	17:00	182	27:00
II	14:30	170	15:00
III	13:30	168	14:00

運動停止後のマスク呼吸において、サンプルIは酸素濃度が20%程度になるまで10分間呼吸が可能であったのに対して、IIとIIIは著しい苦痛のため、運動中止後30秒しかマスク呼吸を継続出来なかった。なお、呼吸が落ちつくのを待って再びマスク呼吸を再開したところ、IIとIIIともに5分以上にわたって呼吸が可能であった。

図6-6に運動中止までの酸素自己救命器の吸気温度の変化を示す。サンプルIは運動継続中連続的に温度が上昇しており最高値は85°Cとなったが、運動停止後はほぼ80°Cで安定した。サンプルIIも連続的な温度上昇を示したが、上昇率はIよりも低く、また中止時間が早かったため最大値は50°C程度であった。サンプルIIIは約50°Cをピークに若干の温度降下を示した。被験者の熱感覚としては、呼吸に支障はないもののIとIIIでは上気道が熱く不快であった。一方、IIは最終的にIIIとほぼ同じ温度であるが低湿度であるため吸気の熱さは気にならなかった。

図6-7は差圧の変化を示す。全サンプルとも運動に伴う呼吸量増加の影響を受けて、運動継続中は時間とともに増加している。感覚的にはサンプルIにおいて運動中止後にかなりの呼吸抵抗を感じたが、運動中は全サンプルとも気になるほどの抵抗はなかった。

図6-8に吸気中二酸化炭素濃度の変化を示す。サンプルIが全体にわたって低いレベルを維持しているのに対して、IIとIIIは途中で急激な上昇を示しており、最終的には6%を大きく超えている。また、その時点は運動の中止と一致している。ただし、休憩後に静止状態でマスク呼吸を再開

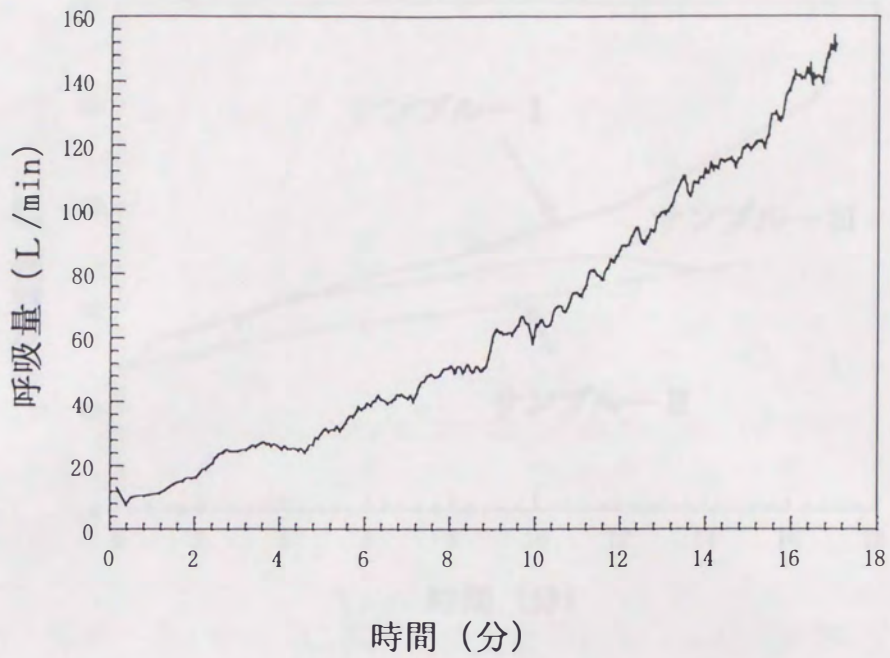


図6-4 コントロール試験における呼吸量の変化

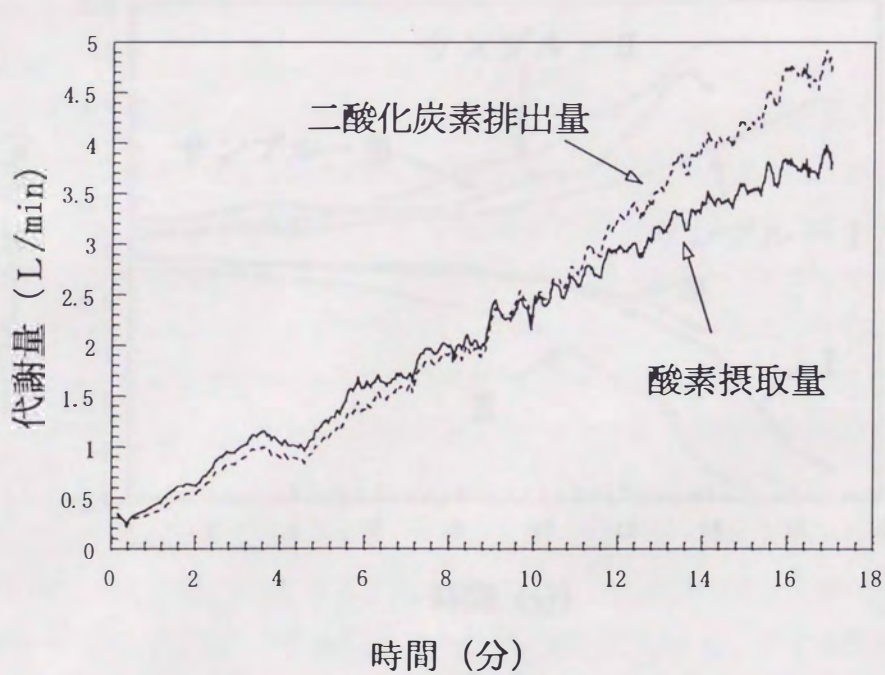


図6-5 コントロール試験における代謝量の変化

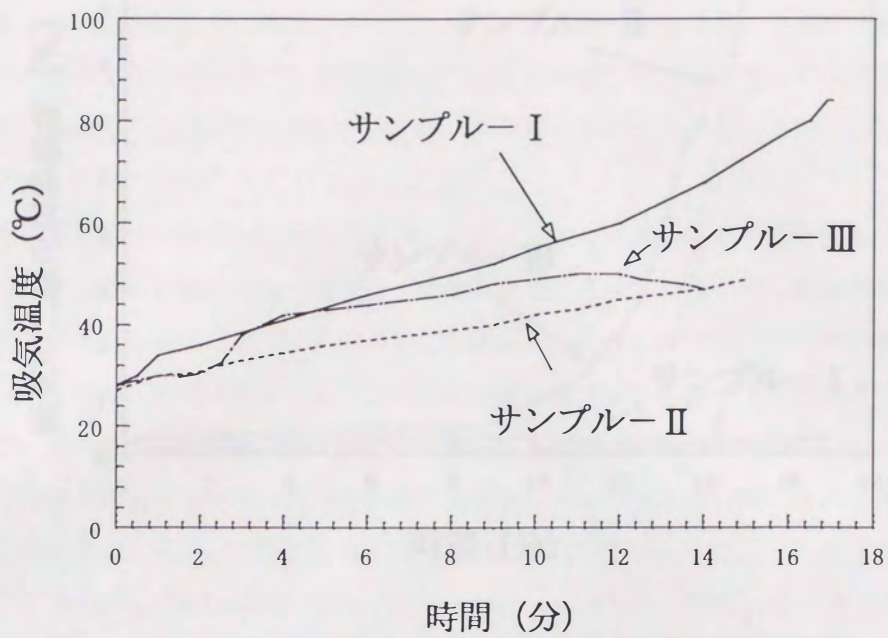


図6-6 吸気温度の変化 (被験者試験)

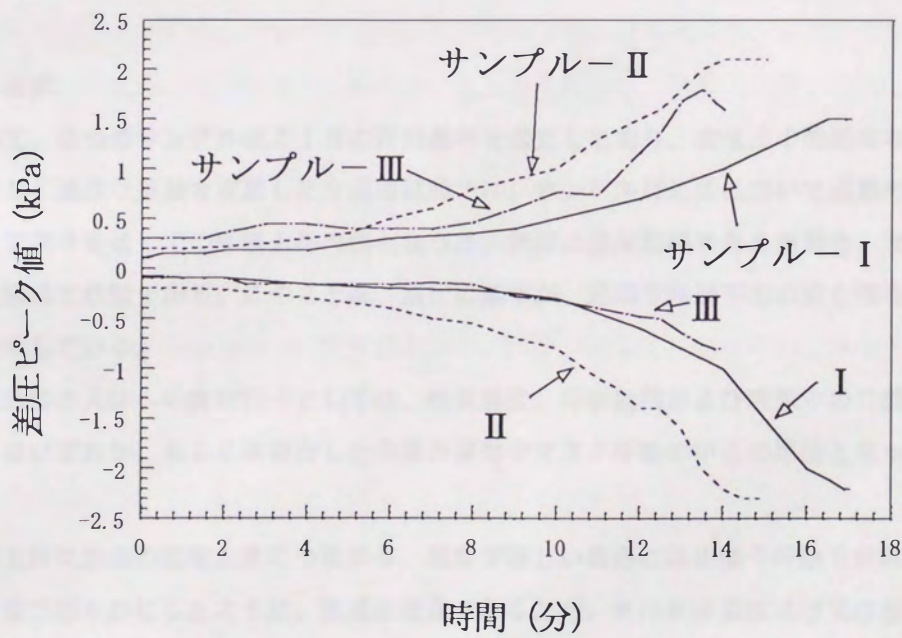


図6-7 差圧ピーク値の変化 (被験者試験)

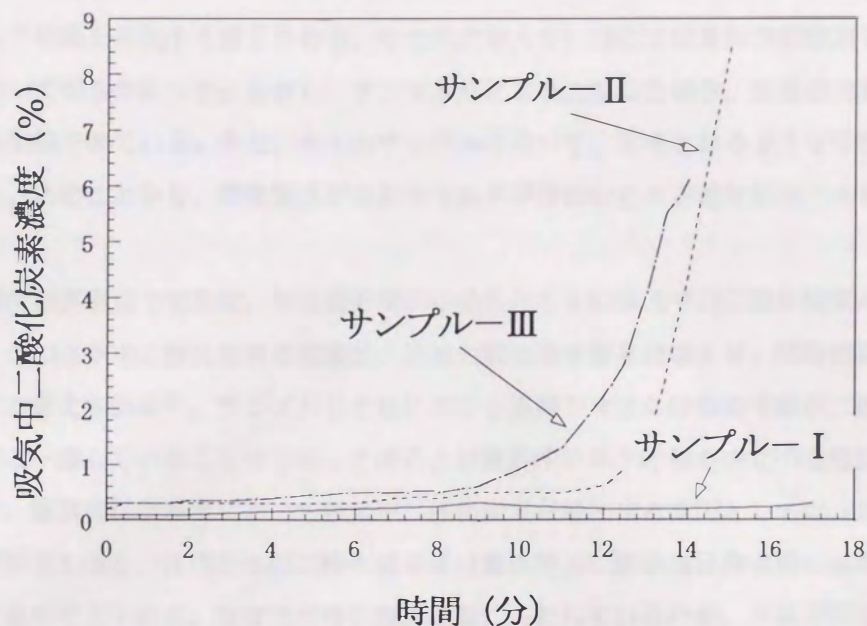


図6-8 吸気中二酸化炭素濃度の変化 (被験者試験)

した時点では0.3%程度の値であった。なお、吸気中の酸素濃度は、運動継続中は全サンプルとも50%以上の値を示した。

#### 6.3.4 考察

前節において、3つのサンプルはJISの評価基準を満たしており、安全上の問題はないと評価された。しかし、過激な運動を実施した今回の試験では、サンプルIIとIIIにおいて運動の制限が認められ、またマスクを通しての呼吸も不可能となった。実際の使用環境を考えた場合、マスクを取り外す事態は極めて危険である。このことは、現行の基準が、過激な運動下での安全性を保証していないことを示している。

酸素自己救命器の人体への負荷因子としては、吸気温度、呼吸抵抗および吸気中の二酸化炭素があり、これらのいずれか、もしくは複合した作用が運動やマスク呼吸の中止の原因と考えられる。

吸気温度の上昇は気道の温度上昇につながり、程度が著しい場合には火傷や呼吸を制限する原因となる。第3章で明らかにしたように、気道は湿潤であるため、その皮膚温度は吸気の湿球温度に左右され、また体感される熱さもこの湿球温度に依存する。被験者試験では、応答速度の関係から湿球温度の計測は不可能であったが、サンプルIIIは圧縮酸素型であり、水分に飽和しているため、乾球温度は湿球温度に等しい。この値は約50°Cであり、またピーク値を示した時点では運動やマスク呼吸を中止していないことから、吸気温度が中止の原因とは考えられない。一方、 $KO_2$ 型のサンプルIIは乾燥空気であり、湿球温度は乾球温度(50°C)よりもかなり低いことから、同様に吸気

温度が中止の原因ではない。

呼吸抵抗は人の呼吸を抑制する働きがあり、その程度が大きい場合には運動の制限因子となることを第5章において明らかにした。しかし、サンプルIIとIIIを比較した場合、差圧の大きいIIの方が長時間運動を継続できている。また、全てのサンプルにおいて、苦痛となるような呼吸の抵抗感を感じなかった。このことから、呼吸抵抗が運動やマスク呼吸の中止の主要な原因とは考えられない。

吸気中の二酸化炭素濃度の増加は、呼吸量を増加させるとともに体内での二酸化炭素の過剰な蓄積につながる。このような二酸化炭素の蓄積は、体液の酸塩基平衡を崩壊させ、呼吸困難感などの弊害をもたらすと考えられる<sup>9)</sup>。サンプルIIとIIIにおける運動やマスク呼吸の中断が二酸化炭素濃度の急激な上昇と一致していることから、このことが運動やマスク呼吸の中止の主要因と考えられる。ところで、酸素自己救命器において吸気中二酸化炭素が増加する原因としては、二酸化炭素吸収剤の寿命が尽きた点と、体内からの二酸化炭素排出量の増加に酸素自己救命器の処理能力が対応できなかった点が考えられる。前者では吸収能力は既に失われているため、マスク呼吸の再開時においても二酸化炭素濃度は高い値を示すはずである。しかし、実際には非常に低い値であるため、吸気中二酸化炭素の増加の原因は、二酸化炭素排出量の増加に酸素自己救命器の吸収能力が対応できなかったためと考えられる。なお、前節の試験の結果と比較した場合、サンプルIとIIは全く異なる大小関係になっている。吸気中の二酸化炭素濃度は、薬剤層の吸収能力と、死積量の大小で決定される。死積量とは吸気と呼気が経路を同一にする部分の体積であり、吸気時にはこの容積分の呼気ガスを体内に取り込むため、死積量の増加は吸気中の二酸化炭素濃度の上昇につながる。ところで、死積量と一回呼吸量の関係を考えて場合に、死積量の影響は一回換気量が小さいほど強く現れる。すなわち、ある酸素自己救命器の死積量に対して一回換気量が十分に大きくないと、吸気全体に占める死積量分の呼気の割合が高く、吸気中の二酸化炭素濃度が高くなる。人工肺試験においては一回換気量が1.2(L)であり、十分に大きな値ではないため、死積量の大小が吸気中の二酸化炭素濃度に大きく反映したと考えられる。これに対して、運動時には一回換気量が2(L)以上になることも希でなく、薬剤層の吸収能力の大小が問題となる。過激な運動時に吸気中の二酸化炭素が急増した原因はサンプルIIやIIIの二酸化炭素吸収能力が十分ではなかったことが原因であり、この点を適切に評価する試験法を確立する必要がある。

#### 6.4 結言

3つの酸素自己救命器を対象に、現行の基準に基づいた人工肺試験と、過激な運動下での被験者試験を行った。その結果、現行の基準では過激な運動を行った状況下での性能が評価できないことが明らかになった。

現行の試験基準に相当する運動量は早足歩行程度であり、呼吸量や代謝量としてさほど大きな値ではない。今回対象とした酸素自己救命器は、人工肺試験の結果、避難用の呼吸用保護具として十

分な機能を有していると判断された。しかし、過激な運動条件での被験者試験では、2つの酸素自己救命器において激しい苦痛のため呼吸が不可能となった。この苦痛の原因は吸気中の二酸化炭素濃度の急増である。吸気温度や呼吸抵抗については特に問題を生じていない。避難時においては強い精神的なストレスのため、過激な運動を行うことも予想される。このため、酸素自己救命器の安全性をより高めるためには、過激な運動下での二酸化炭素吸収特性も評価する必要がある。そこで、現行の評価試験に加えて、過負荷試験の実施を提案する。現行の試験が公称使用時間中の性能確保を目的とした時間試験であるのに対して、過負荷試験では短い時間を対象として過激な運動下での二酸化炭素吸収特性を評価する。その場合、人工肺の利用が可能であるが、課題は過剰要求とはならない設定条件の決定である。人工肺の設定値として、仮に最大運動能力の70%を想定すると、日本人男性の平均値<sup>3)</sup>から二酸化炭素産出量は2.24(L/min) (呼吸商を1と仮定)となる。これはサンプルⅢの吸気中二酸化炭素濃度が増加を始めるレベルに相当しているが、地下作業現場を対象とする酸素自己救命器においては必要な能力と考えられる。提案としては、人工肺の設定が容易であることも考慮して、呼吸量60(L/min)にて呼気中の二酸化炭素濃度を4%とする。この場合、相当する二酸化炭素排出量は2.4(L/min)である。また、死積の影響を少なくするため、一回呼吸量は2(L)とする。試験時間は、二酸化炭素吸収剤の処理能力の評価が目的であるため、公称使用時間の1/3とする。また、吸気中の二酸化炭素濃度は、現行の許容値を参考にして3%以下とする。

#### 参考文献

- 1) 公害資源研究所編：“鉱山坑内用品検定試験法”，(1986)
- 2) 日本規格協会：“閉鎖循環式酸素自己救命器”，JIS M 7651，(1996)
- 3) 佐藤方彦：“日本人の生理”，朝倉書店，(1988)
- 4) Kamon, E., Doyle, D. and Kovac, J.: “The oxygen cost of an escape from an underground coal mine”, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 44(7), pp.552~555, (1983)
- 5) 高橋正好ほか：“酸素マスクの安全性評価”，産業衛生学雑誌，98(4)，pp.149~155，(1996)
- 6) 高橋正好，滝口郁英：“吸気中の二酸化炭素が人の呼吸に及ぼす影響”，資源，3(3)，pp.108~115，(1989)
- 7) 高橋正好，滝口郁英，中山紀夫：“人工肺およびマンテストによる酸素マスクの性能試験”，資源，1(10)，pp.452~461，(1989)
- 8) 吉良枝郎，太田保世：“呼吸”，医学書院，(1986)

## 第7章 結論

本研究は、酸素自己救命器の使用が人体に与える影響を明らかにし、その性能を評価するための合理的な基準を確立することを目的としている。そのため、吸気温度の上昇や吸気ガス組成の変化、呼吸抵抗の増加が人体に与える影響について検討を加えた。また、過激な運動下での酸素自己救命器の安全性について検討した。各章において得られた結論を要約すると以下のようである。

第1章は緒論であり、本研究の背景および目的について述べた。

第2章では、酸素自己救命器の特徴や現行の性能試験法を整理するとともに関連した既往研究について検討した。その結果、酸素自己救命器の安全性を向上させる上で取り組むべき課題として、体感温度に及ぼす吸気の温度や湿度などの影響の把握、高濃度酸素や二酸化炭素が運動下で呼吸量や代謝量に与える影響の把握、二酸化炭素が存在する状況下での呼吸抵抗の影響の把握などを検討する必要があることが明らかになった。

第3章では、人体に対する吸気の熱的な影響を明らかにした。現行の基準では、吸気の熱的な特性を乾球温度により評価している。しかし、乾球温度では人が体感する熱さを的確に表現できないため、吸気が乾燥した $KO_2$ 型の酸素自己救命器に対しては非常に不利な評価を行っていたことが明らかになった。また、吸気の湿球温度と体感する熱さの間に密接な関係が存在することを明らかにし、この湿球温度を指標とすることによって、人が実際に体感する熱さに基づいて吸気の熱的な特性を評価することが可能であることを示した。さらに評価基準における許容値として $48^{\circ}C$ を提案した。これは人が呼吸可能な上限の湿球温度が約 $53^{\circ}C$ であったため、安全面を考慮して $5^{\circ}C$ 程度低い値とした結果である。なお、酸素自己救命器の湿球温度の計測は、測定器の応答速度の関係から困難であると考えられていたが、人工肺の吸気管の内部で計測することにより正確な測定が可能であることを明らかにした。

第4章では、酸素自己救命器の使用による吸気ガス組成の変化が人体に及ぼす影響を明らかにした。現行の基準では、吸気中の二酸化炭素濃度の許容値を3%と規定している。これは生理的には悪影響がないとされる濃度であるが、呼吸量を増加させる作用があり、呼吸器の使用時においては人体にとって大きな負担となる。そこで、運動下での二酸化炭素による換気の応答特性について調べた。その結果、運動下では二酸化炭素に対する感受性が増加する傾向があり、個人差も大きく現われた。また、高濃度酸素には呼吸量を減少させる効果があるが、その程度は二酸化炭素の影響を補償するほどではなく、許容値として二酸化炭素濃度3%は高すぎる値であることを明らかにした。許容値は低いほど好ましいが、呼吸器の技術的な側面に配慮して、許容値として2%を提案した。また、基準に直接的には関係しないが、吸気のガス組成の変化が代謝量に与える影響の把握も重要であった。これは、酸素自己救命器の設計において、酸素供給量や二酸化炭素吸収能力を決定する上で不可欠である。吸気ガス組成の変化が代謝量に与える影響は測定を行う上で困難が多く、特に高濃度酸素と二酸化炭素が複合して与える影響については測定データが皆無に近い状況であった。そこで代謝量を精度よく測定できる装置を制作し、運動下での被験者試験を実施した結果、酸素自

己救命器で対象となる範囲の高濃度酸素や二酸化炭素は、酸素摂取量には有意な変化を与えないことを明らかにした。また、二酸化炭素排出量に対しては、吸気中の二酸化炭素濃度の増加は影響ないが、酸素濃度の増加はこれを有意に減少させることを明らかにした。この結果から、酸素自己救命器の酸素供給量や二酸化炭素吸収能力の必要レベルを設定する場合に、空気を呼吸したときの代謝量の測定値を基礎にして安全上問題ないことを明らかにした。

第5章では、呼吸抵抗の増加が人体に与える影響を明らかにした。これまで呼吸抵抗が人体に及ぼす影響を適切に表現する指標が存在しなかったが、呼気終末二酸化炭素濃度の変化によってこの影響を定量的に評価できることを明らかにした。これを利用して吸気中に二酸化炭素が存在する条件下での呼吸抵抗の影響について検討した。その結果、空気を呼吸した条件では現行の基準値で問題は生じないが、吸気中に3%の二酸化炭素が混入した場合には、体液の恒常性に影響を与えるほどの負担が人体に加わることを明らかにした。吸気中の二酸化炭素濃度を低いレベルに押さえることも対策の一つであるが、2%程度でも呼吸量を増加させる作用は存在するため、運動時での使用であることを考慮して、呼吸抵抗の許容範囲として-500~+500Pa（呼吸量30L/min）を提案した。

第6章では、過激な運動下での酸素自己救命器の安全性について検討した。酸素自己救命器は緊急時の避難に使用するため、強い精神的なストレスにより、使用者は過激な運動を試みる可能性が高い。しかし、現行の基準ではこのような条件下での安全性は保証されていない。そこで代表的な3機種の酸素自己救命器をサンプルとして選び、被験者試験によって過激な運動下での性能を調べた。その結果、現行の基準に合格しているにもかかわらず、過激な運動時には吸気中の二酸化炭素が急増して呼吸が困難になる製品も存在することが明らかになった。有害な環境下で呼吸器を取り外すような事態は極めて危険である。そこで過激な運動時での安全性を保証するため、現行の時間試験に加えて、過負荷試験の実施を提案した。

本研究の結果として提案した酸素自己救命器の新しい評価基準を表7-1に示す。呼吸用保護具については近い将来に国際規格を設定する動きがでてくることが予想される。しかし、海外におい

表7-1 酸素自己救命器の性能評価基準（提案）

		現行の基準		提案の基準	
		時間試験		時間試験	過負荷試験
設定 条件	試験時間	公称使用時間		公称使用時間	公称使用時間×1/3
	呼吸量	30 L/min (1.2 L/回×25回/min)	30 L/min (1.2 L/回×25回/min)	30 L/min	60 L/min (2 L/回×30回/min)
	呼気CO <sub>2</sub> 濃度	4 %		4 %	4 %
合格 条件	吸気温度	50℃以下 (乾球温度による評価)		48℃以下 (湿球温度による評価)	—
	吸気CO <sub>2</sub> 濃度	3 %以下		2 %以下	3 %以下
	呼吸抵抗	±750Pa以下		±500Pa以下	—



ても、検討資料となる生理学的なデータは十分ではない。本研究での成果は、国際的な基準を確立  
する上においても有効な基礎資料となり得る。

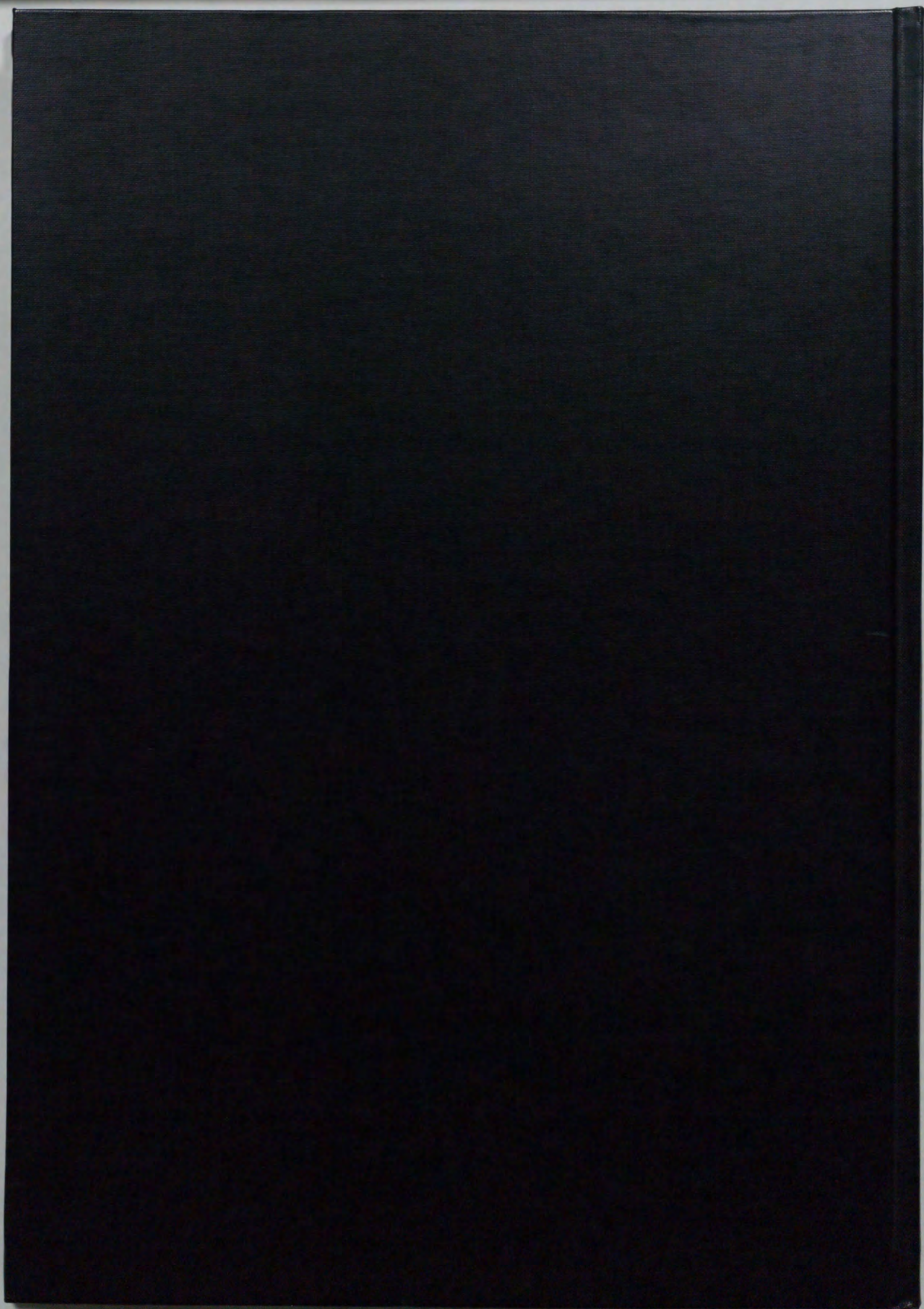
## 謝 辞

本論文の執筆に当たり、終始懇切丁寧にご指導ご教示を賜った九州大学大学院工学研究科地球資源システム工学内野健一教授に深甚なる感謝の意を表します。

また、貴重なご助言とご指導を賜った医学系研究科構造機能医学講座高橋成輔教授、工学研究科地球資源システム工学松井紀久男教授に深甚なる感謝の意を表します。

さらに、研究遂行全般にわたってご指導ご教授を賜った東京医科歯科大学医学部保健衛生学科眞野喜洋教授、山見信夫講師、駒沢女子大学人文学部芝山正治教授、労働科学研究所木村菊二名誉研究員、米国労働安全衛生研究所 (NIOSH) Nicholas Kyriazi氏に深甚なる感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり、深いご理解と多大なご支援を頂いた資源環境技術総合研究所厨川道雄所長、水野建樹次長、同安全工学部井清武弘部長、梅津実元部長、山尾信一郎元部長、北原良哉主任研究官、同システム安全研究室小杉昌幸室長、高木英夫元主任研究官、滝口郁英元主任研究官に深甚なる感謝の意を表します。また、実験の遂行に当たり多大なるご協力を頂いた資源環境技術総合研究所地核工学部松永烈部長、清野文雄主任研究官、同安全工学部駒井武室長、中山紀夫主任研究官、田中敦子主任研究官、歌川学主任研究官、同熱エネルギー利用技術部三島寛研究官、同素材資源部菅澤正己主任研究官、同環境影響予測部吉門洋主任研究官、同エネルギー資源部匂坂正幸室長、同温暖化物質循環制御部忽那周三主任研究官、同総務部青木一彦氏に深甚なる感謝の意を表します。



inches 1 2 3 4 5 6 7 8  
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



# Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

**A** 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

