

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 :

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 三好

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

目次

第1章 緒論	
1. 1. 酸素自己救命器の特徴と本研究の背景	1
1. 2. 本研究の目的と概要	2
第2章 酸素自己救命器の評価基準とその問題点	
2. 1. 緒言	5
2. 2. 呼吸用保護具と酸素自己救命器	5
2. 3. 性能試験と性能基準	11
2. 4. 既往研究と解明すべき課題	13
2. 5. 結言	17
第3章 吸気の熱的な条件が人体に与える影響	
3. 1. 緒言	20
3. 2. 吸気の乾球および湿球温度と体感温度との関係	20
3. 3. 呼吸量の変化と体感温度との関係	24
3. 4. 酸素自己救命器における吸気の湿球温度の測定	30
3. 5. 結言	34
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	36
4. 2. 運動時での二酸化炭素による呼吸の刺激特性	36
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	42
4. 4. 結言	52
第5章 呼吸抵抗が人体に与える影響	
5. 1. 緒言	56
5. 2. 運動の制限要因としての呼吸抵抗	57
5. 3. 呼吸抵抗と二酸化炭素の複合的な影響	62
5. 4. 結言	68
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	70
6. 2. 現行の基準に基づく評価試験（人工肺試験）	70
6. 3. 過激な運動下での性能試験（被験者試験）	74
6. 4. 結言	79
第7章 結論	81
謝辞	84

第1章 緒論

1.1 酸素自己救命器の特徴と本研究の背景

我々が生命を維持するためには、新鮮な空気を呼吸する必要がある。災害などにより空気中に有害な成分が含まれたり、酸素濃度が適正でなくなると、生命や健康を維持できなくなる¹⁾。このような汚染された環境から身を守る手段の一つが呼吸用保護具の利用である。呼吸用保護具には目的や対象の違いにより多数の種類があり、その性能は、国や公的な機関の行う試験によって保証されている²⁻⁴⁾。この試験は評価基準にもとづいて実施され、呼吸用保護具としての適正が評価される。使用者は呼吸用保護具を介して呼吸を行うため、その基準は人の生理的な特徴を十分に反映している必要がある。しかし、現実には基礎的なデータの不足などにより、適正な評価がなされていない可能性がある。

石炭鉱山（坑内）は非常に閉鎖性の高い空間であるため、火災やガス突出などの災害は環境空気を著しく汚染させ、多くの場合には作業者を危機的な状況に至らしめる^{5, 6)}。坑内火災では死者の約9割が呼吸器系の障害であったとの報告がある⁷⁾。このような偶発的な事故に対して、作業者が安全に避難する方法の一つが酸素自己救命器の利用である^{5, 9)}。酸素自己救命器は閉鎖循環式呼吸器の一種であり、使用者は呼吸袋の内部の気体を繰り返し呼吸する。この呼吸回路内には酸素発生源と二酸化炭素吸収剤が備えられており、一定時間の呼吸の継続を可能としている。しかし、この機構的な理由により酸素自己救命器を介した呼吸は、通常の呼吸とは著しく異なった特徴を持つ¹⁰⁾。その主なものは次の通りである。

- ① 吸気温度が高い。
- ② 吸気の酸素濃度が高い。
- ③ 吸気中に二酸化炭素が混入する。
- ④ 呼吸抵抗が存在する。

ところで、石炭鉱山の坑内作業員には自己救命器の常時携帯が義務づけられている¹¹⁾。このため、酸素自己救命器に対しては小型・軽量化の要求が強く、呼吸器としての性能がその犠牲にされることも希ではない。そこで、日本工業規格²⁾や鉱山坑内用品検定試験法³⁾などの基準は、人体に対する安全性を確保するため、性能試験の方法や合格のための許容値を規定している。しかし、人の生理的な特徴に対する配慮が十分ではないため、不合理な点が認められる。その重要なものは次の通りである。

- ① 吸気の熱的な条件を乾球温度のみによって評価しており、湿度に対する配慮が不十分である。そのため、人の熱さ感覚を正しく考慮した評価方法とは言えない。
- ② 高濃度酸素や二酸化炭素が代謝量に及ぼす影響が十分には明らかにされていない。そのため、適切な酸素供給量や二酸化炭素吸収剤の充填量が確定できない。
- ③ 二酸化炭素が人体に与える影響の一つは呼吸量の増加である。これまで安静下での呼

吸量の増加については多くの研究がなされているが、酸素自己救命器の使用時に想定されるような、活動下での影響については不明な部分が多い。そのため、二酸化炭素の許容値を適切に規定できていない可能性が高い。

④ 呼吸抵抗が人体に与える影響を評価する適切な指標がない。また、運動や吸気中の二酸化炭素による呼吸量の増加は、差圧変動を大きくして、呼吸抵抗による負担を増大させるが、この点に関する配慮が不十分である。そのため、許容値の設定に疑問が残る。

⑤ 酸素自己救命器が必要となるような災害時の避難では、強い精神的ストレスが生じる可能性が高く、使用者は性急な避難を試みると考えられる。ところが、現行の基準では中程度の運動に対する器具の性能が調べられているのみであり、過激な運動下での安全性は確認されていない。そのため、過激な運動下での使用時に重大な欠陥が現れる可能性がある。

産業用の防塵・防毒マスクについては、国際的な統一規格の作成のための検討が国際呼吸保護協会（ISRP）を中心に進められている。酸素自己救命器を含む閉鎖循環式呼吸器についても、同様の活動が近い将来に開始されると予想される。国際規格は各国の国内規格に対しても強い影響力を持つため、合理的な規準であることが望まれるが、この分野では欧州と米国の発言力が強く、現状では両者の規格が国際規格に強く反映される可能性が高い。しかし、両者においても基礎データの蓄積は必ずしも十分ではないため、妥当でない基準が国際規格に含まれる可能性がある。また、国際規格と我が国の国内規格に不整合があった場合、前者に追従して後者の内容が変更されることも予想される。このことは使用者に著しい不利を招くことにもなるため、十分な基礎データをもとにして、合理的な国内規格を制定するとともに、国際規格の制定にも積極的に寄与していく必要がある。

1.2 本研究の目的と概要

本研究の目的は、酸素自己救命器の性能に関する合理的な評価基準を確立することである。このため、従来の評価基準における問題点を抽出し、実験的な検討を加えることにより、より合理的な基準を定めるために必要な基礎資料を求めることとした。具体的には、次の4項目の問題点の解明を目指した。

- ①吸気の熱的な条件に関連した問題点
- ②吸気ガスの組成の変化が人体に与える影響
- ③呼吸抵抗の増加が人体に与える影響
- ④酸素自己救命器を装着して過激な運動を行ったときの諸問題

次に、これらの検討結果をもとにして、酸素自己救命器の適正な評価基準を設定するための提言を行った。

本論文はこれらの研究をまとめたものであり、7章より構成されている。その概要は以下のとお

りである。

第1章では、本研究の背景および目的について述べている。

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、関連した既往研究を検討する。次に、これらを基にして、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を明らかにする。

第3章では、人体に対する吸気の熱的な条件の影響を明らかにする。吸気温度の上昇は酸素自己救命器の負荷因子の一つであるが、現行の基準では適正な評価が行われていない。その原因は、温度や湿度、呼吸量の変化が人体に与える影響の解明がまだ不十分なためである。そこで、この問題点について検討し、吸気の熱的な条件を適正に評価する方法を提案する。

第4章では、吸気ガス組成の変化が人体に及ぼす影響について述べる。酸素自己救命器は構造的な理由から、空気の組成と比較して、吸気の酸素濃度と二酸化炭素濃度が高い。これらは呼吸量や代謝量を変化させる可能性があるが、現行の基準ではこの点の配慮が十分ではない。酸素自己救命器の場合、運動下での影響が特に問題となるため、まず二酸化炭素に対する呼吸の応答特性について、安静時と運動時の比較を行う。次に、高濃度酸素や二酸化炭素が呼吸量や代謝量に与える影響について検討を行う。これらの結果に基づいて、吸気中二酸化炭素の適切な許容濃度を提案する。

第5章では、呼吸抵抗の影響について述べる。まず、最大活動量との関係を検討することにより、人体への影響を評価する指標を確立する。次に、この指標を利用して、運動下で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を考察する。これらの結果に基づいて、呼吸抵抗の適切な評価基準を提案する。

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考察する。まず、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、現行の基準に準拠した方法で性能を評価する。次に、同機種のサンプルにより、過激な運動下で使用した場合に生じる問題点について検討する。これらの結果に基づいて、激しい運動下でも酸素自己救命器の安全性を確保するための評価方法を提案する。

第7章では、本研究の結果を総括する。

参考文献

- 1) 眞野喜洋ほか：“公衆衛生学”，圭文社，(1990)
- 2) 日本規格協会：“閉鎖循環式酸素自己救命器”，JIS M 7651，(1996)
- 3) 公害資源研究所編：“鉱山坑内用品検定試験法”，(1986)
- 4) 三浦豊彦ほか：“現代労働衛生ハンドブック”，労働科学研究所出版部，(1988)
- 5) 石炭技術研究所、資源・素材学会編：“炭鉱保安技術要覧 第4編 坑内火災”，石炭技術研究所，(1990)

- 6) 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)
- 7) 房村信雄：“炭鉱災害について”，労働の科学，20(4)，pp.14~19，(1965)
- 8) Kovac, J.G. and Vaught, C.：“Self-Contained Self-Rescues: New Developments in Technology and Training”，Proc. 23rd Int. Conf. Safety Mine Res. Inst., pp.417~424，(1989)
- 9) 笠原幹夫：“火災時の消防活動用および避難用呼吸用保護具について”，火災，33(6)，(1983)
- 10) Babb, N. et al.：“Physical Performance during Combinations of Hypercapnic, Resistive, and Hot Air Breathing”，Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 50(2)，pp.105~111，(1989)
- 11) 通商産業省立地公害局監修：“石炭鉱山保安規則”，白亜書房，(1992)

第2章 酸素自己救命器の評価基準とその問題点

2.1 緒言

本章では、酸素自己救命器の性能評価基準や試験法に関連した問題点について述べる。まず、酸素自己救命器の構造を示し、そこから必然的に生じる特徴、特に人体への負荷因子を明らかにする。また、現行の基準や既往研究について整理するとともに、合理的な基準を確立するために解明すべき課題を明らかにする。

2.2 呼吸用保護具と酸素自己救命器

2.2.1 呼吸用保護具における酸素自己救命器の位置づけ

酸素自己救命器は、主に石炭鉱山において避難用に利用される閉鎖循環式の呼吸用保護具である。本節では、呼吸用保護具の概要を示すとともに、酸素自己救命器の役割について整理する。

呼吸用保護具は、産業活動の現場や災害箇所などにおいて、外気（環境空気）が人の呼吸に適さない場合に使用されるもので、有害物質や酸素欠乏から着用者の呼吸機能を保護する。図2-1にその分類を示す¹⁾。呼吸用保護具はろ過式と給気式に大別され²⁾、ろ過式は外気の中から有害な成分を取り除いて呼吸する型式であり、給気式は独自の吸気ガスの供給源を持つ型式である。

ろ過式は、除去する対象により、粒子状物質用（防じん用）、ガス・蒸気用、およびその兼用式に分類される。粒子状物質用は空気中の浮遊粒子をフィルターにより捕獲するもので、静電気の効果を利用する場合もある³⁾。ガス・蒸気用は外気中の有毒ガスを吸着や化学反応により除去する呼吸器であり、対象となるガスの種類によって薬剤等の種類が異なる。自己救命器の一種である一酸化炭素用自己救命器（以下、COマスク）はこのタイプに属しており、酸化触媒（ポプカリット）を利用して一酸化炭素を二酸化炭素に変える⁴⁾。炭鉱用のCOマスクは長時間（90分以上）の使用が可能であるが、他の有毒ガスに対しては効果を持たない。建築火災などを対象とした一般避難用には、一酸化炭素に加えてシアン化水素などが除去できるタイプも市販されている。なお、ろ過式は外気を吸気するため、酸素欠乏環境下では使用できない。

給気式の呼吸用保護具は、供給方法の違いにより送気マスクと自給式に分類される。送気マスクは、別室やボンベ等の空気を、ホースやエアラインを通じて着用者に供給するタイプである。これは長時間利用することが可能であるが、活動範囲がホースなどによって制限される。一方、自給式は吸気の供給源を着用者が携行する型式であり、ボンベ等の重量負荷や使用時間の制限が欠点であるが活動の自由度は大きい。自給式は、さらに開放式と閉鎖循環式に細分される。開放式は呼気をそのまま大気に捨てる方式であり、消防用の空気呼吸器や潜水用のSCUBAがこれに属する。一方、閉鎖循環式は呼気を清浄化して再度吸気する方式であり、酸素を有効に利用するため、重量に対して使用時間が長い。主要な構成要素は呼吸袋および酸素供給源、二酸化炭素吸収剤である。使用者は

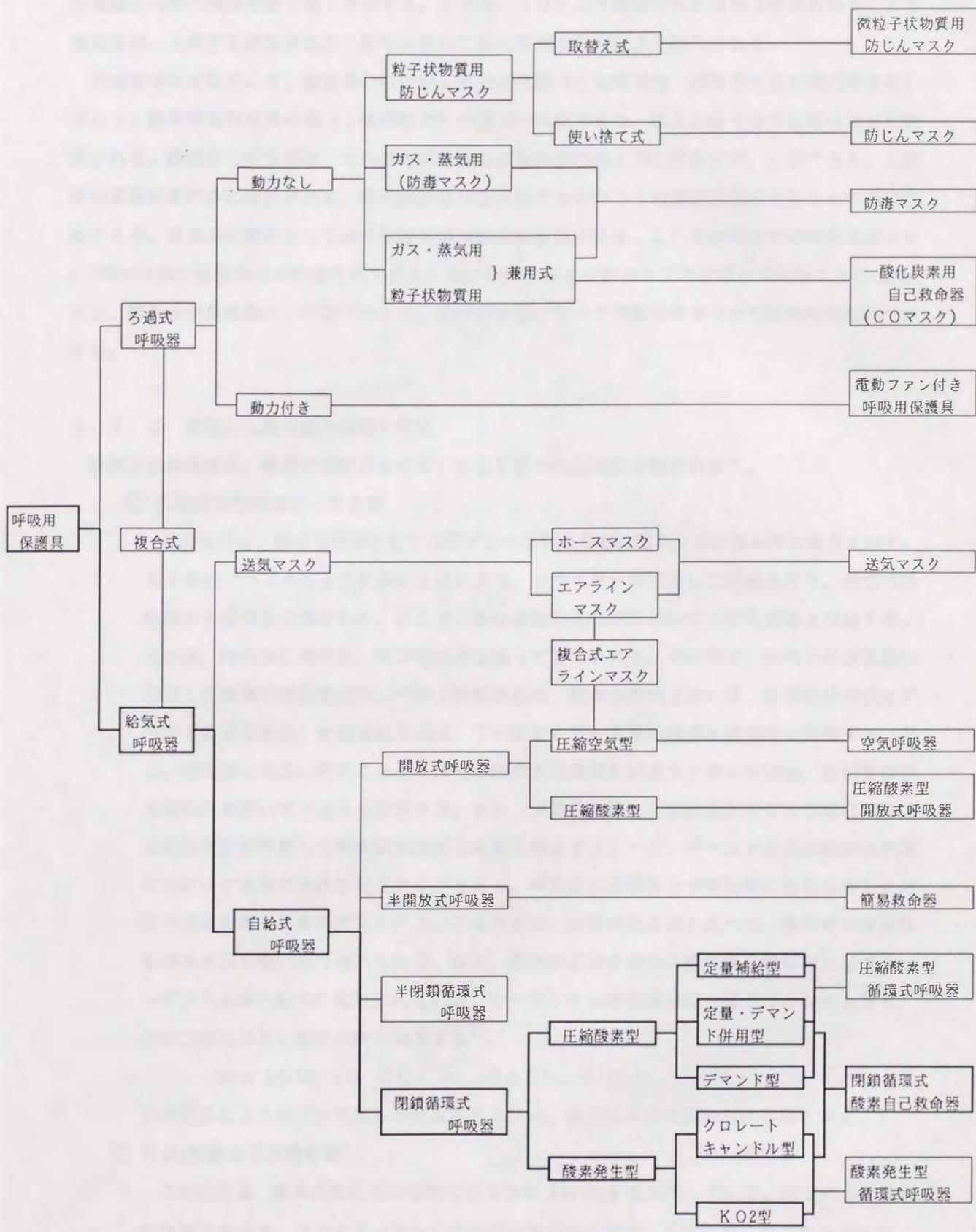


図 2 - 1 呼吸用保護具の分類

呼吸袋の内部の気体を繰り返し呼吸する。この時、人体により消費された酸素は酸素供給源により補給され、人体から排出された二酸化炭素は二酸化炭素吸収剤により除去される。

閉鎖循環式呼吸器には、酸素自己救命器と酸素呼吸器（圧縮酸素型・酸素発生型循環式呼吸器）がある。酸素呼吸器は長時間（1時間以上）の使用が可能であり、消火活動や救護活動などに利用される。酸素自己救命器は、その基本的な構成は酸素呼吸器と同じであるが、小型であり、災害時の避難活動のみに使用される。使用時間は10分未満のものから1時間程度使用できるものまで存在するが、日本の炭鉱用としては公称使用時間30分が主流である。これは切羽などの作業現場から1,000m以内に救護施設が設置されており、30分以内にはこの設備までの避難が可能なことによる。なお、酸素自己救命器は、小型化のため、酸素呼吸器に比べて性能の確保の点で技術的な制約が大きい。

2.2.2 酸素自己救命器の種類と構造

酸素自己救命器は、酸素の供給方式の違いにより3つの型式に分類される⁵⁾。

① 圧縮酸素型酸素自己救命器

この型式は、酸素供給源として高圧ポンペを利用する。図2-2に基本的な構造を示す。使用者はノーズクリップを鼻にはめた上で、マウスピースを通して呼吸を行う。呼気は呼吸管から清浄缶に導かれる。ここで二酸化炭素吸収剤が呼気中の二酸化炭素を除去する。その後、呼吸袋に導かれ、再び呼吸管を通して吸気される。その際に、体内での消費量に相当した酸素が高圧酸素ポンペから供給される。酸素の供給方法には、定量補給方式とデマンド方式がある。定量補給方式は、予め設定した一定量の酸素を連続的に供給する。なお、使用者の活動の程度によって体内の酸素消費量が供給量を上回った場合、使用者は手動補給弁を開いて不足分を確保する。また、消費量に比べて供給量が多すぎる場合には、自動排気弁が作動して呼吸袋の過度な膨張を防止する。一方、デマンド方式は酸素消費量に合わせて酸素の供給を行うタイプである。呼吸袋の容積変化や吸気時に生じる外気との圧力差を利用して弁の開閉を行う。この方式は、定量補給方式と比べて、使用者に余分な動作を要求しない点で優れている。なお、酸素自己救命器の二酸化炭素吸収剤としてはソーダライムが一般的に使用されている。ソーダライムの主成分は水酸化カルシウムあり、次の反応により二酸化炭素を除去する⁶⁾。



この反応により水（水蒸気）が生成されるため、吸気は水分で飽和した状態となる。

② KO₂型酸素自己救命器⁷⁾

この型式は、酸素の供給源に超酸化カリウム（KO₂）を利用している。図2-3に基本的な構造を示す。マウスピースから呼吸管と薬剤層を通過して呼吸袋に導かれた呼気は、同じ経路を逆方向に通過して使用者に吸気される。薬剤層では、以下の化学式により、酸素の発生と二酸化炭素の吸収を行なう。

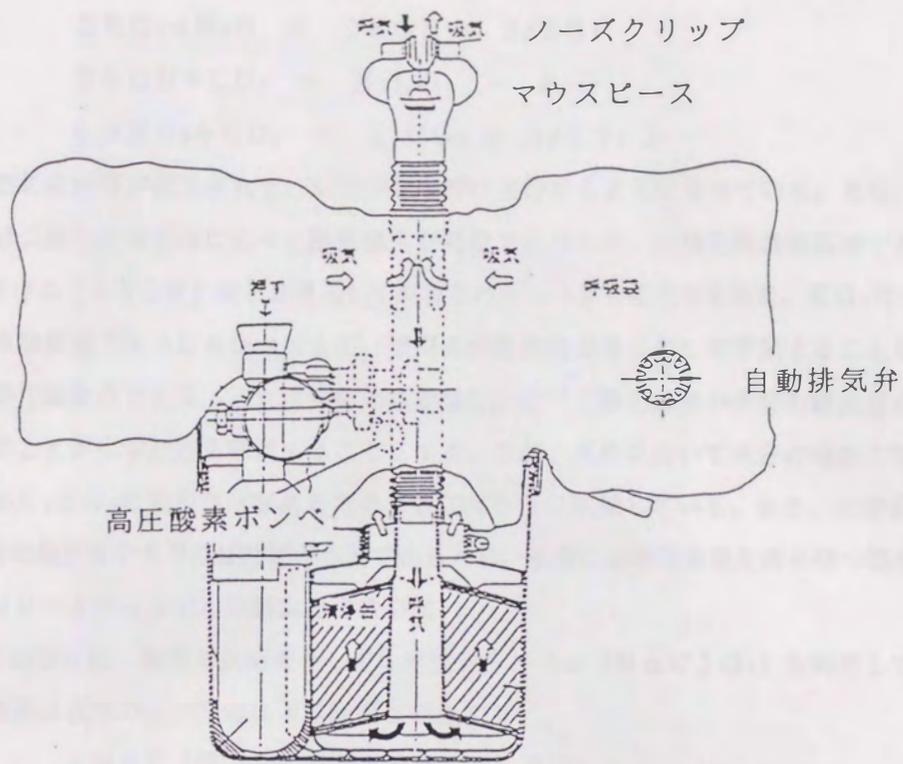


図 2 - 2 圧縮酸素型酸素マスクの構造

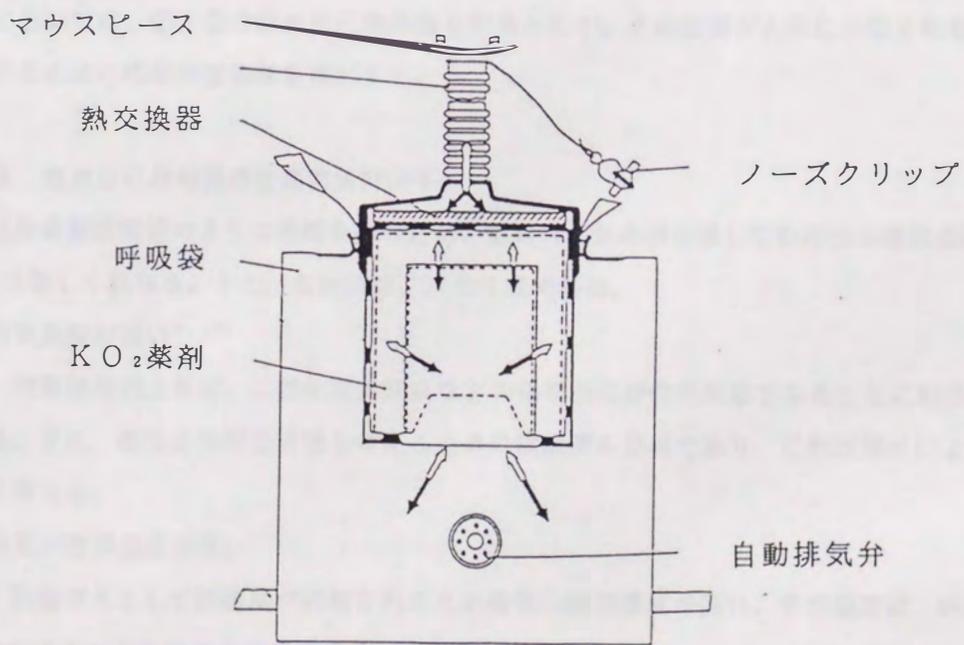
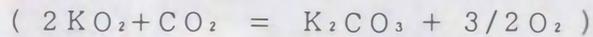
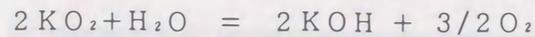


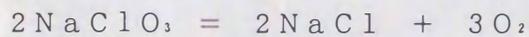
図 2 - 3 KO_2 型酸素マスクの構造



薬剤には触媒が添加されて、反応が効率的に進行するようになっている。また、この反応では二酸化炭素吸収に比べて酸素発生が優位であるため、二酸化炭素吸収剤である水酸化リチウム(LiOH)などを混入して両者をバランスさせる場合もある。K₂O₂型の利点は、簡単な構造であるにもかかわらず、使用者の酸素消費量に対して不足することなく酸素供給が可能な点である。これは身体の活動量に応じて二酸化炭素や水分の排出量の変動し、このことが化学反応を制御することによる。なお、反応において水分の増加はなく、生成物のK₂O₃に吸湿作用があるため、吸気はかなり乾燥している。また、化学反応による酸素の発生開始までには時間が必要であるため、別途に初期酸素発生源を持つ場合もある。

③ クロレートキャンドル型酸素自己救命器

この型式は、酸素の供給源として塩素酸ナトリウム(NaClO₃)を利用している。この薬剤は次式の化学反応により酸素を発生する⁸⁾。



反応はピンを打撃して火薬を発火させることにより開始させる。また、この反応は二酸化炭素を除去しないため、別途に二酸化炭素吸収剤が必要である。この呼吸器は、使用者の活動量に合わせた柔軟な酸素供給が望めないため、現在ではほとんど使われていない。しかし、塩素酸ナトリウムは酸素発生源として優れているため、K₂O₂型酸素自己救命器の初期酸素発生源などに使われている。

本研究においては、①と②の酸素自己救命器を対象として、その使用が人体に及ぼす影響を合理的に評価するための性能評価基準を検討する。

2.2.3 酸素自己救命器の生理的負荷因子

酸素自己救命器は前述のような機構を持つため、酸素自己救命器を通しての呼吸は通常の呼吸(空気呼吸)とは著しく異なる。その主な特徴は、次の4点である。

① 吸気温度が高い^{9, 10)}

吸気温度の上昇は、二酸化炭素除去などの化学反応が発熱反応であることに起因している。また、吸気の熱的な特徴を考えるとときには湿度も重要であり、これは型式により大きく異なる。

② 吸気の酸素濃度が高い¹¹⁾

供給ガスとして純酸素が利用されるため吸気の酸素濃度が高い。その濃度は、呼吸開始時の体内などの窒素保有量によるが、通常は40%以上である。なお、K₂O₂型において酸素発生量が消費量よりも優位な場合には、時間とともに濃度が上昇して、最終的には100%に近い値となる。

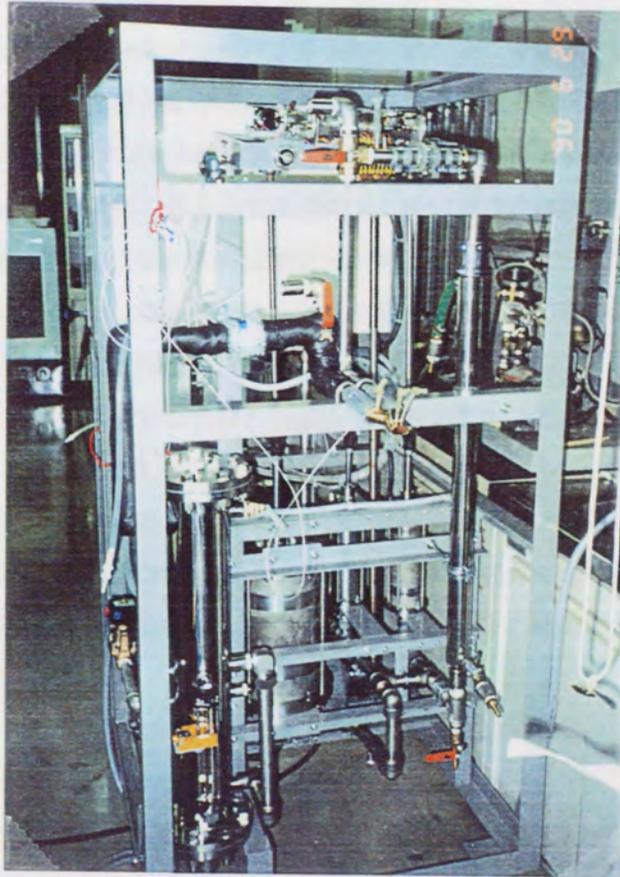


図 2 - 4 人工肺 (呼吸模擬試験装置)

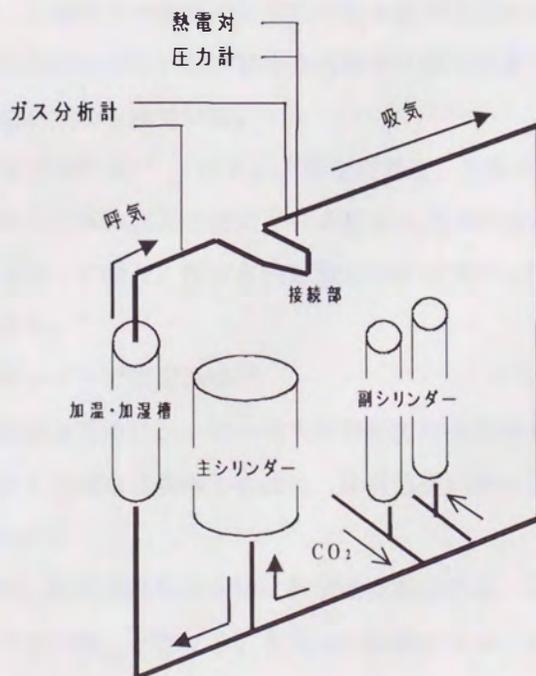


図 2 - 5 人工肺の構造

③ 吸気中に二酸化炭素が混入する¹²⁾

吸気中の二酸化炭素が上昇する要因は、次の2点である。一つは、死積 (Dead space) の存在である。死積とは呼気と吸気が経路を共有する領域 (酸素自己救命器では主に呼吸管) であり、その体積分の呼気ガスを吸気することになる。これにより呼気ガスに含まれる二酸化炭素が吸気される。二点目は、二酸化炭素吸収剤の充填量などに関連した吸収能力の問題である。人体からの二酸化炭素排出量が多くなった場合、二酸化炭素の吸収能力が不十分であると、薬剤層で除去できなかった分量の二酸化炭素が吸気に含まれる。

④ 内部の気流に対して呼吸抵抗が存在する^{13~15)}

呼吸抵抗は、気流が呼吸管や薬剤層などを通過するとき、これに対する摩擦力が壁面に発生することに起因している。それによって生じる圧力損失は呼吸器系の負担となる。その程度が著しい場合には必要な呼吸量の確保を困難にすることも考えられる。

以上の項目の中で、吸気の酸素濃度の問題 (②) 以外は基準における評価の対象となっている。なお、吸気の高濃度な酸素の影響については、後述するように短時間の呼吸では問題がないと見なされている。

2.3 性能試験と評価基準

2.3.1 我が国の試験基準

我が国には、酸素自己救命器に対して次の3つの性能評価基準がある。

① 日本工業規格 (J I S M 7 6 5 1)⁵⁾ (以下、「J I S」と称する)

鉱山、隧道、工場等での避難用に使用される酸素自己救命器の性能を規定した国家規格である。法的な強制力はないが、日本を代表する標準であり、国内の他の規格はこれに準拠して試験方法が定められている。

② 鉱山坑内用品検定試験法¹⁶⁾ (以下、「検定試験法」と称する)

検定試験法は、日本の炭鉱で使用される酸素自己救命器の性能を規定している。これは法的な強制力を持っており、指定された検定試験機関での性能試験に合格した型式のみが坑内で使用できる。

③ 消防設備安全センターの認定基準¹⁷⁾

ビルなどの建築火災等において一般人が避難用に使用する呼吸用保護具の性能を規定している。J I Sと同様な試験項目の他に、接炎燃焼試験などの項目もある。法的な強制力は持っていない。

性能の評価項目の中で、吸気温度など人体に対する負荷因子は、人の肺を機械的に模擬した呼吸模擬試験装置 (以下、「人工肺」と称する) を使って試験される。これにより再現性の高い試験が可能である^{11, 18, 19)}。図2-4、5に、検定試験で利用している人工肺の写真と模式図を示す。な

お、試験における人工肺の設定値は以下の通りである^{5, 16)}。

- ・呼吸量は 30 ± 1.5 L/min (1.2 L/回 \times 25 回/min) を試験中維持する。なお、気流はシリンダー内のピストン運動により発生するが、この呼吸波形を正弦波と仮定すると、吸気と呼気のピーク流量は呼吸量 (分時換気量) の π 倍 (約 95 L/min) となる。
- ・呼気の二酸化炭素濃度は、酸素自己救命器を装着する前の条件 (外気を吸気) において $4 \pm 0.2\%$ とする。また、このときの人工肺への二酸化炭素供給量を試験中継続する。
- ・呼気の温度は 37 ± 1 °C、湿度は 95% 以上とする。
- ・酸素消費を模擬するため、酸素自己救命器の呼吸袋、もしくは人工肺の吸気回路内からガスの一部 (1.2 ± 0.06 L/min) を外部に廃棄する。

また、測定に関しては、次のことが規定されている。

- ・吸気温度は、マウスピースと人工肺の間の接続管内部 (接続部から約 20 mm) に固定した直径 0.2 mm の K 型熱電対によって測定される。
- ・吸気の二酸化炭素に関しては、人工肺の吸気管内部の気流の一部を採気して、その濃度を測定する。なお、測定後の気体は吸気管の下流側に返す。
- ・呼吸抵抗は、接続管内部の圧力を精密微差圧計 (95% 応答が 0.4 秒以下) によって測定され、大気圧との差圧のピーク値で判断される。

以上の条件で、公称使用時間中連続して試験を行う。現行の検定試験における酸素自己救命器の合格条件は以下の通りである。

- ・吸気温度は 50 °C (呼気温度 $+13$ °C) 以下であること。
- ・吸気中の二酸化炭素濃度は 3% 以下であること。
- ・呼吸抵抗によって生じる差圧は、吸気、呼気ともに 750 Pa 以下であること。

吸気温度は、熱電対による計測であり、乾球温度の値を意味している。なお、人工肺を利用した試験以外の項目としては、酸素自己救命器の気密性を調べる漏れ試験などがある。漏れ試験では、呼吸回路の内部に 600 Pa の気圧を加えた上で、開口部を密閉し、その後の圧力の変化を計測する。基準では、3 分間放置した時点での圧力降下が 100 Pa 以下の場合を合格と規定している。

2.3.2 諸外国の基準との比較

海外の主な規格は、米国の CFR30 Subpart-H²⁰⁾、イギリスの BS-4667 Part5²¹⁾、ドイツの SSR-Richtlinien²²⁾ が主なものである。米国とドイツの規格は鉱山用が対象であり、イギリスの規格は一般避難用も含んでいる。なお、国際的な統一規格 (ISO) は制定されていない。

表 2-1 は主な評価項目について、各国の規格の内容を比較した表である。大部分の試験は人工肺を利用して行っているが、米国の規格は被験者試験も一部含んでいる。

試験条件や合格基準は規格により異なる。吸気温度は、多くの規格は乾球温度のみによる評価であるが、英国の規格は湿球温度による評価も行っている。ただし、JIS と米国の規格は、吸気の湿度の違いにより吸気温度 (乾球温度) の許容値を区別している。二酸化炭素濃度に関しては、呼

吸量や呼気中の二酸化炭素濃度の設定値が高いほど、また許容値が低いほど厳しい基準である。日本に比べて、イギリスやドイツはかなり厳しい内容である。なお、米国の規格は異なった概念で試験を行っており、死積の評価を主眼にしていると考えられる。呼吸抵抗は、呼吸量が大きいほど、また許容値が低いほど厳しい基準であり、この点でも日本の規格は製品に対して評価がゆるやかである。

2.4 既往研究と解明すべき課題

酸素自己救命器は人が避難する状況で使用する呼吸器であるため、その評価基準は、生理的な研究データを基にして規定されるべきである。本節では、関連した既往研究について整理すると共に、適切な基準を設定するに当たり、残された課題を明らかにする。

表 2-1 各国の規格の比較対照表

規格		日本 ¹⁶⁾	日本 ⁵⁾	米国 ²⁰⁾	イギリス ²¹⁾	ドイツ ²²⁾
合格基準		検定試験法	JIS M-7651	CFR-30 Subpart-H	BS-4667 Part 5	SSR- Richtlinien
試験 条件	試験方法	人工肺試験	人工肺試験	被験者試験	人工肺試験	人工肺試験
	呼吸量 (VE)	30 L/min	30 L/min	および	40 L/min	35 L/min
	呼気CO ₂ 濃度	4%	4%	人工肺試験	5%	4.5%
吸気 温度	乾球温度	50°C以下 (呼気温度 +13°C以下)	圧縮酸素型 50°C以下 K O ₂ 型 65°C以下	湿度50-100%では 48°C以下 湿度0-50%では 52°C以下 ----- 被験者試験	90°C以下	50°C以下
	湿球温度	—	—	—	50°C以下	—
二酸化炭素濃度		3%以下	3%以下	2.5%以下 ----- 人工肺試験 VE=10.5 L/min 呼気CO ₂ =5%	2.5%以下	1.5%以下
呼吸 抵抗	吸気	750Pa以下	750Pa以下	呼気との差が 1kPa以下	650Pa以下	650Pa以下
	呼気	750Pa以下	750Pa以下	510Pa以下 ----- 人工肺試験 VE=40 L/min	650Pa以下	650Pa以下

2.4.1 吸気の熱的な特性

Killickら²³⁾は、吸気温度と人体との関係についての草分け的研究を行っており、呼吸可能な上限の温度を求めている。その研究によると、安静状態での呼吸可能な上限値は乾球温度では168°C、湿球温度では63.3°Cであり、運動中ではそれぞれ100°Cと57.2°Cであるとしている。また、Lindらの研究²⁴⁾では、被験者が不快感を感じる温度は湿球温度で39°Cである。McCutchanら²⁵⁾は、乾球温度で49°Cの吸気は室温との相違を感じず、71°Cでは暖かい、または乾いたと感じたと報告している。以上の研究結果から、吸気温度の上昇と人体の熱さ感覚についての一般的な結論を求めることは困難である。

酸素自己救命器の基準を考察する上で、参考になる報告はGallagherら^{26, 27)}の研究である。彼らは吸気温度の上昇と口内の皮膚温度の変化、被験者の感じる不快感について研究している。それによると、皮膚温度は吸気の湿球温度に比例して変化している。このことから彼らは評価の指標として湿球温度の利用が妥当であると結論づけている。しかし、人が実際に体感する吸気の熱さと、温度や湿度、呼吸量との詳細な関係は不明であり、安全性の評価において問題が残っている。すなわち、口内が湿った状態では皮膚温度は吸気の湿球温度に支配されるが、乾燥した吸気により口内の水分が奪われた場合には、乾球温度も関連してくる可能性がある。また、同じ温度や湿度であっても、呼吸量が大きい場合には体内に取り込まれる熱量が増加するため、体感温度が変わってくる可能性がある。このことから、乾球温度や湿球温度、呼吸量が、吸気の体感温度に与える影響についての詳細を明らかにする必要がある。

2.4.2 吸気中の酸素濃度

人体に最適な酸素濃度は空気中のそれと同じ値であり、これよりも高くても低くても障害の原因となる。ただし、人体は酸素の輸送などにおいて複雑なメカニズムを有するため、吸気中の濃度とその影響の程度が比例するわけではない。

酸素欠乏の一般的な症状を表2-2に示す^{3, 28, 29)}。吸気中の酸素濃度が低下した場合に認められる影響の一つは呼吸量の増加であるが、吸気中の二酸化炭素濃度が低く、安静にしている状況では、酸素濃度が12%程度に減少するまでは顕著な変化は認められない。しかし、それ以下の濃度で

表2-2 酸素欠乏に対する症状

酸素濃度	症 状
16～12%	脈拍や呼吸数の増加、精神作業能力の低下、筋労作の不活性化 悪心など
14～9%	精神不安定、動作不的確、体温上昇、チアノーゼなど
10～6%	行動の自由を失う、意識喪失、幻覚、昏睡、中枢神経障害など
6%以下	失神・昏睡、呼吸停止、けいれん、死

は急激に増加する³⁰⁾ (図2-6)。また、中枢神経系などへの作用も同様な傾向を持ち、12%程度以下になると顕著に影響が現れ始める。そして4%未満では一息で失神し、敏速な救助がなされない場合には短時間で死亡する。なお、酸素自己救命器において、初期酸素発生により呼吸袋が純酸素で満たされた後に呼吸を開始する場合、その後の酸素供給が体内の酸素消費に対して十分である限り、酸素欠乏となる危険性は考えられない。

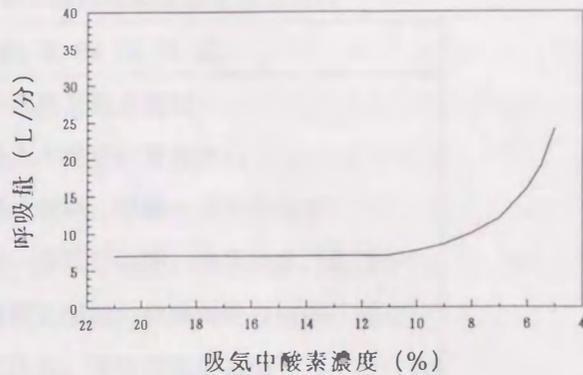


図2-6 吸気中の酸素濃度と呼吸量の変化

高濃度の酸素も人体に様々な悪影響を及ぼす³¹⁻³³⁾。高い酸素濃度には運動能力の向上などの効果も期待できるが、一方において酸素中毒の危険性も考慮する必要がある。酸素中毒には、急性的な側面と慢性的な側面がある。前者は中枢機能への影響であり、酸素分圧が1.6気圧以上となった場合に認められる意識障害やけいれんである。後者は肺の組織変化に関連した影響であり、0.5気圧以上の酸素分圧に長期間さらされた場合に認められる肺活量の低下や胸部痛などである。酸素自己救命器は大気圧下で使用するため、仮に吸気中の酸素濃度が100%であっても、急性的な影響は特に問題にならない。しかし、慢性的な影響については検討しておく必要がある。この影響は、経験的に次式により評価される³³⁾。

$$UPTD = t \times \{0.5 / (P - 0.5)\}^{-0.833}$$

ここで、UPTD (Unit pulmonary toxicity doses) は中毒量を数値的に示したもので、tは高濃度酸素に暴露している時間(分)、Pは酸素分圧(絶対気圧)である。単発的な曝露に対する許容値は615UPTDとされており、吸気中の酸素濃度が100%となった場合でも、10時間の吸気で600UPTDであり、許容値には達しない。酸素自己救命器の場合、公称使用時間は30分から1時間程度であるため、酸素中毒を特に問題とする必要はない。ただし、酸素自己救命器の性能を検討する上で、高濃度酸素が運動下での呼吸量や代謝量に与える影響については把握しておく必要がある。

2.4.3 吸気中の二酸化炭素濃度

二酸化炭素はエネルギー代謝の産物として体内で産出されるもので、単なる老廃物ではなく、酸塩基平衡の維持などで重要な役割を担っている³⁴⁾。しかし、何らかの原因で過度に体内に蓄積した場合には様々な影響を及ぼす。表2-3に吸気中の二酸化炭素濃度と一般的に認められている生理反応との関係を示す^{29, 35)}。短時間の吸気では3%以下の濃度は生理的な悪影響を及ぼさない。しかし、4%以上の濃度では頭痛やめまいなどを生じ、6%では悪心、嘔吐、8%では精神活動の乱れや呼吸困難を生じる。10%を越えるような非常に高い濃度になると、中枢神経系の機能が低下して無意識となり、呼吸中枢や循環中枢の麻痺を生じ、20%では死に至る。また、9%程度の二酸化

表 2-3 吸気中の二酸化炭素濃度と生理反応

CO ₂ 濃度 %	生理的な反応
1.0	呼吸数と一回換気量の増加
2.5	数時間の吸入で症状に変化無し
3.0	危険な影響はない、呼吸の深さが増す
4.0	粘膜に刺激、頭部圧迫感、血圧上昇、耳鳴り
6.0	呼吸数が著明に増加、皮膚血管の拡張、悪心
8.0	精神活動の乱れ、呼吸困難が著明
10.0	意識喪失、呼吸困難
20.0	中枢の麻痺、死亡

炭素でも、神経毒として作用して、瞬間的に死亡する可能性もあるとの指摘もある³⁶⁾。

二酸化炭素濃度3%は短時間の使用では生理的な悪影響がないとされるため、この値が許容値として採用されたと考えられる。しかし、この程度の二酸化炭素濃度でも、呼吸量の増加が認められる³⁴⁾。呼吸量の増加は人体にとって負担であり、特に酸素自己救命器には呼吸抵抗が存在するためその影響は著しい。また、二酸化炭素による呼吸量の増加の特徴として、非常に大きな個人差が知られているが^{37, 38)}、大部分の研究は安静時の影響として調べられたものであり、酸素自己救命器の場合に問題となる運動時の影響については明らかではない。さらに、高濃度酸素と複合した条件で、呼吸量や代謝量に与える影響も不明である。これらは基準の妥当性を検討する上での重要な課題であるため、その詳細を明らかにする必要がある。

2.4.4 呼吸抵抗

Yasukouchi³⁹⁾は呼吸抵抗による不快感などについて調べているが、防じんマスクなど比較的に小さな呼吸抵抗を対象としているため、酸素自己救命器の基準を考える上での参考にはならない。酸素自己救命器の呼吸抵抗について考える上で重要な研究は、ある程度強い抵抗を対象として、運動時の影響を考察したものである。Dressendorferなどの研究⁴⁰⁻⁴³⁾によると、呼吸抵抗により呼吸量が有意に減少することなどが認められている。このような呼吸量の減少は、Poonの理論⁴⁴⁾に基づけば、人体の恒常性を多少犠牲にして呼吸に費やすエネルギーを減少させるためと考えられる。また、呼吸量の減少は、二酸化炭素排出量の減少につながるとの報告や、酸素摂取量の変化は認められないなどの報告もあるがデータの信頼性の点で疑問なものも多い。ところで、同一の抵抗体であっても、呼吸量が大きい場合には圧力変動が大きくなり、人体に加わる負担もより著しい。酸素自己救命器では吸気中に二酸化炭素が混入して呼吸量を増加させる傾向があるが、二酸化炭素と呼吸抵抗が複合して人体に与える影響は明らかでなく、安全な基準を確立する上での重要な課題である。

2.5 結言

酸素自己救命器は有害な外気環境に対して呼吸器系を保護するが、人体に対するいくつかの負荷因子も持っている。JISなどにおける性能に関する評価基準は、これらの負荷因子に対して一定の制限を加えているが、必ずしも十分ではない。そのため安全性のより高い基準の確立が不可欠であるが、その検討に必要な基礎データは既往研究のみでは不十分であり、解明すべき課題が残されている。すなわち、体感温度に及ぼす吸気の温度や湿度、呼吸量の影響、高濃度酸素や二酸化炭素が呼吸量や代謝量に与える影響、二酸化炭素が存在する状況下での呼吸抵抗の影響などである。

参考文献

- 1) 日本規格協会：“呼吸用保護具用語”，JIS T 8001, (1992)
- 2) 日本規格協会：“呼吸用保護具の選択、使用および保守管理方法”，JIS T 8150, (1992)
- 3) 三浦豊彦ほか：“現代労働衛生ハンドブック”，労働科学研究所出版部, (1988)
- 4) 日本規格協会：“一酸化炭素自己救命器”，JIS M 7611, (1985)
- 5) 日本規格協会：“閉鎖循環式酸素自己救命器”，JIS M 7651, (1996)
- 6) 仰木清久ほか：“酸素呼吸器の清浄カンの能力判定に関する研究”，採鉱と保安, 17(4), (1971)
- 7) Kyriazi, N. and Shubilla, J.P.：“Performance Comparison of Oxygen Self-Rescuers”，Bureau of Mines Report of Investigations, RI-8876, (1984)
- 8) Stengel, J.W. et al.：“Laboratory Testing of Chemical Oxygen Self-Rescues for Ruggedness and Reliability”，Bureau of Mines Report of Investigations, RI-8657, (1982)
- 9) Gallagher, S. et al.：“Hot Air Breathing: Effects of Elevated Wet Bulb Temperatures on Tissue Temperatures on the Mouth”，Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 46(6), (1985)
- 10) Kyriazi, N.：“Fast-Response, Wet-Bulb Thermocouple”，J. ISRP, 6(3), pp.12~14, (1988)
- 11) Sparks, A.W., Stein, R.L. and Stengel, J.W.：“A Breathing Metabolic Simulator for Testing Respiratory Protective Equipment”，Bureau of Mines Report of Investigations, RI-8496, (1980)
- 12) Bureau of Mines：“Physiological Costs and Consequences of Mine Escape and Rescue”，A Mining Research Contract Report, Contract J0345327, (1993)
- 13) Deno, N.S., Kamon, E. and Kiser, D.M.：“Physiological Responses to Resistance Breathing during Short and Prolonged Exercise”，Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 42(8), pp.616~623, (1981)
- 14) Wilson, J.R. and Raven, P.B.：“Clinical Pulmonary Function Tests as Predictors of

- Work Performance during Respirator Wear” , Am.Ind.Hyg.Assoc.J., 50(1), pp.51~57, (1989)
- 15) 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)
- 16) 公害資源研究所編 : ” 鉱山坑内用品検定試験法” , (1986)
- 17) 日本消防設備安全センター : ” 火災避難用呼吸用保護具の試験方法および判断基準” , (1995)
- 18) Kyriazi,N. : ” Development of an Automated Breathing and Metabolic Simulator” , Bureau of Mines Report of Investigations, IC-9110, (1986),
- 19) Wangner,K.H. : ” The Testing of Closed-Circuit Breathing Apparatus - Human Testing and Simulator Testing” , J.ISRP, 5(2), pp.9~14, (1987)
- 20) US National Archives and Records Administration : ” Self-Contained Breathing Apparatus” , Code of Federal Regulation 30 Subpart H, (1991)
- 21) British Standards Institution : ” Specification for closed-circuit escape breathing apparatus” , BS 4667 Part-5, (1990)
- 22) D.Bernhad Prinz : ” Gerate und system fur die selbstrettung nach brand-oder explosionsungluecken in steinkohlenbergwerken” , Gluckauf, 127(7/8), pp.278~285, (1991)
- 23) Killick,E.M. : ” Physiological response to breathing hot air” , J.of Hyg., 32(3), pp.332~339, (1932)
- 24) Lind,A.R. : ” The influence of inspired air temperature on tolerance to work in the heat” , Brit.J.Ind.Med., 12, pp.126~130, (1955)
- 25) McCutchan,J.W. and Taylor,C.L. : ” Respiratory heat exchange with varying temperature and humidity of inspired air” , J.Appl.Physiol., 4, pp.121~135, (1951)
- 26) Gallagher,S., Vercruyssen,M. and Deno,N.S. : ” Hot air breathing: Effects of elevated wet bulb temperature on tissue temperature of the mouth” , Am.Ind.Hyg.Assoc.J., 46(6), pp.332~335, (1985)
- 27) Gallagher,S. and Vercruyssen,M. : ” Interaction of temperature and humidity of inspired air on tissue temperature of the tongue and hard palate” , J.ISRP, 4(2), pp.20~42, (1986)
- 28) 山口裕 : ” 酸素欠乏症と酸素濃度測定” , セーフティダイジェスト, 21(3), pp.122~128, (1975)
- 29) 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)
- 30) Comroe,J.H. : ” Physiology of respiration” , Year book medical publishers, (1965)
- 31) 眞野喜洋 : ” 高圧環境と健康” , 労働科学研究所出版部, (1994)
- 32) 眞野喜洋ほか : ” 潜水医学” , 朝倉書店, (1992)

- 33) 池田知純：“潜水医学入門”，大修館書店，(1995)
- 34) Hlastala, M.P. and Berger, A.J.：“Physiology of respiration”，Oxford university press, (1996)
- 35) 関邦博ほか：“人間の許容限界ハンドブック”，朝倉書店，(1990)
- 36) ユージン・メーヤー：“危険物の化学”，海文堂，(1979)
- 37) Read, D.J.C.：“A clinical method for assessing the ventilatory response to carbon dioxide”，Australas Ann.Med., 16, pp.20~32, (1967)
- 38) 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)
- 39) Yasukouchi, A.：“Relationships between forced vital capacity and subjective responses to added resistive load to inspiration”，J.theerm.Biol., 18(5/6), pp.623~628, (1993)
- 40) Cerretelli, P., Sikand, R.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)
- 41) Demedts, M. and Anthonisen, N.R.：“Effects of increased external airway resistance during steady-state exercise”，J.Appl.Physiol., 35(3), pp.361~366, (1973)
- 42) Flook, V. and Kelman, G.R.：“Submaximal exercise with increased inspiratory resistance to breathing”，J.Appl.Physiol., 35(3), pp.379~384, (1973)
- 43) Dressendorfer, R.H., et al.：“Combined effects of breathing resistance and hyperoxia on aerobic work tolerance”，J.Appl.Physiol., 42(3), pp.444~448, (1977)
- 44) Poon, C.：“Ventilatory control in hypercapnia and exercise: optimization hypothesis”，J.Appl.Physiol., 62(6), pp.2447~2459, (1987)

第3章 吸気の熱的な条件が人体に与える影響

3.1 緒言

酸素自己救命器は呼吸回路内で二酸化炭素除去などの化学反応を行っており、その際の発熱作用により吸気温度が上昇する。高温の吸気は使用者にとって大きな負担であり、不快感のみでなく、著しい場合には呼吸が困難となる。そこで、使用に当たっての安全性を確保するため、評価基準において吸気温度に対する許容値が設定されている。

吸気温度に関して各国の基準を比較すると、必ずしも統一した評価法が採用されているわけではない。我が国の検定試験は乾球温度による評価であり、合格のための許容範囲は 50°C （呼気温度 $+13^{\circ}\text{C}$ ）以下である¹⁾。一方、英国では乾球温度は 90°C まで認めているが、同時に湿球温度が 50°C 以下であることを規定している²⁾。また、米国は乾球温度のみによる評価であるが、吸気の湿度によって許容値を区別しており、湿度が50%未満の呼吸器については 52°C 、湿度が50%以上については 48°C 以下と定めている³⁾。このような相違の原因として、信頼できる研究データの不足があげられる。

Gallagherら^{4, 5)}の研究は、吸気の湿球温度と口内の皮膚の表面温度に関連性があることを明らかにしており、吸気の熱的な条件の評価において、湿球温度が非常に重要な指標となることを示唆している。しかし、非常に乾燥した吸気ガスを呼吸した場合における乾球温度の指標としての役割や、呼吸量の増加により体内に取り込まれる熱量の変化の影響など、未解明な課題も多く残されている。

本章では、吸気の熱的な条件の適切な評価基準を確立するため、吸気温度や湿度、呼吸量の違いが体感温度に与える影響を検討した。また、酸素自己救命器の湿球温度の計測法について検討し、圧縮酸素型と K O_2 型における吸気の熱的な特徴について調べた。

3.2 吸気の乾球温度および湿球温度と体感温度との関係⁶⁾

3.2.1 目的

我が国の現行の基準は、吸気の熱的な条件を乾球温度により評価しているが、Gallagherらは湿球温度による評価がより妥当であると報告している^{4, 5)}。しかし、彼らの報告では、実際に体感する熱さとの関係が示されていない。また、乾球温度の影響が不明である。そこで、吸気の熱的な条件の評価指標について検討するため、乾球温度や湿球温度と、体感する熱さとの関係について実験的な検討をおこなった。

3.2.2 試験方法

被験者試験により、呼吸可能な乾球温度と湿球温度の範囲を求めた。

被験者は日頃運動に親しんでいる3名の男性（表3-1）である。火傷防止のため、極端な無理

は避けるように被験者に伝えた上で実験を行った。被験者はトレッドミル（ICR社製、MODEL-4450）の上を時速5kmの速さで歩きながら加温加湿された空気を呼吸した。なお、全自動代謝測定装置（AIC社製、SYSTEM-5）を利用して、あらかじめこの運動強度での呼吸量を求めた。また、高温空気の吸気時においても同じ呼吸量を維持していると仮定した。

表3-1 被験者の身長と呼吸量

被験者	年齢 才	身長 cm	体重 kg	呼吸量* L/min
a	31	175	65	20.8
b	57	162	57	20.8
c	33	169	69	28.3

* 呼吸量は予備試験での値

吸気の加熱には吸気加熱装置（図3-1）を使用した。これは、加熱・加湿した空気を、被験者が吸気できる方法で供給する装置である。内部には加湿槽と加温槽があり、ブロワーから供給された空気の温度と湿度を調整する。加湿槽や加温槽の温度は±0.1℃の精度で制御可能であり、これを適当に調整してマウスピース部の吸気の乾球および湿球温度を設定した。途中の吸気管（ゴム管：内径30mm、長さ70cm）にはリボンヒータを巻いて加温槽と同じ温度に設定した。マウスピース付近には逆止弁を配置して、呼吸がスムーズに行えるように配慮した。また、被験者の口内（硬口蓋）の皮膚温度を測定するため、マウスピース内から口内に熱電対を伸ばして、感熱部が被験者の硬口蓋の中央部（マウスピースから約3cm）に軽く触れるようにセットした。なお、熱さを最も感じやすいと考えられる咽頭部での温度計測は、嘔吐感につながるなどの問題があり、実現できなかった。

被験者試験における吸気の設定条件は、まず乾球温度を一定値に固定した上で、湿球温度を50℃から0.5℃間隔で上げた。それぞれの設定条件に対して被験者は5分間の呼吸を行い、この試験時間

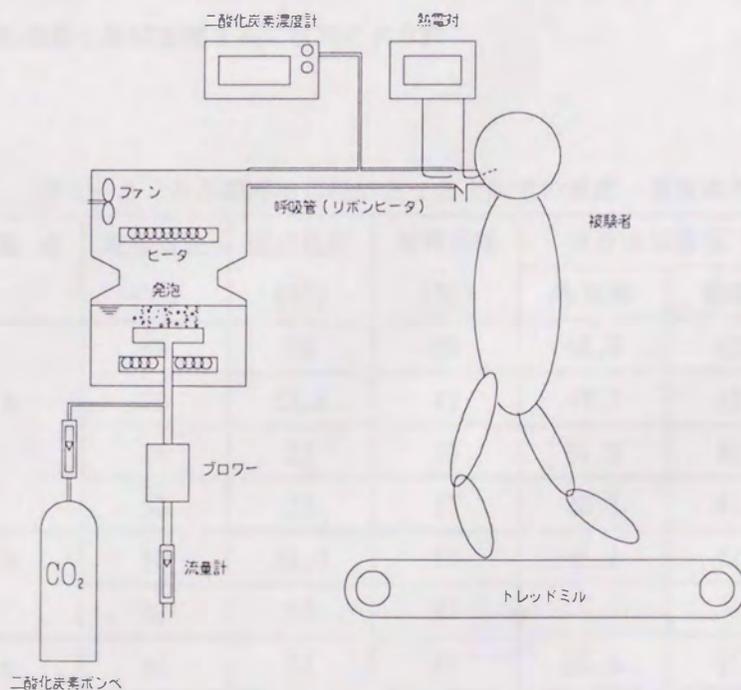


図3-1 吸気加熱装置の模式図

の最後まで継続できない場合に限界を超えていると判断した。なお、乾球温度は、被験者 a は 60°C から 90°C まで 10°C 間隔で、被験者 b と c は 60°C と 80°C にて行った。また、試験時の気温は 24 ± 2°C であった。

3.2.3 試験結果

図 3-2 に、吸気の乾球温度 60°C、湿球温度 53°C (被験者 a) における硬口蓋の皮膚表面の温度変化を示す。表面温度は呼吸に合わせて上昇と下降を繰り返しており、各波形の極大値が吸気時の皮膚温度、極小値が呼気時の皮膚温度に相当している。呼吸の大きさ等の影響で多少の相違はあるが、試験開始から 1.5 分程度が経過した後は、吸気時は約 45°C、呼気時は約 42°C で安定している。

表 3-2 に呼吸可能な限界時での吸気の熱的な条件を示す。各乾球温度に対して、5 分間呼吸可能であった上限での湿球温度、相対湿度、および吸気時と呼気時の皮膚表面温度を各被験者について示している。ここで示された値よりも湿球温度が 0.5°C 高い場合には、試験開始から 1~2 分で、口蓋奥部および咽頭部付近の熱さのため、全ての被験者は実験を中止した。なお、相対湿度は、乾球温度と湿球温度を基に次式により計算した^{7, 8)}。

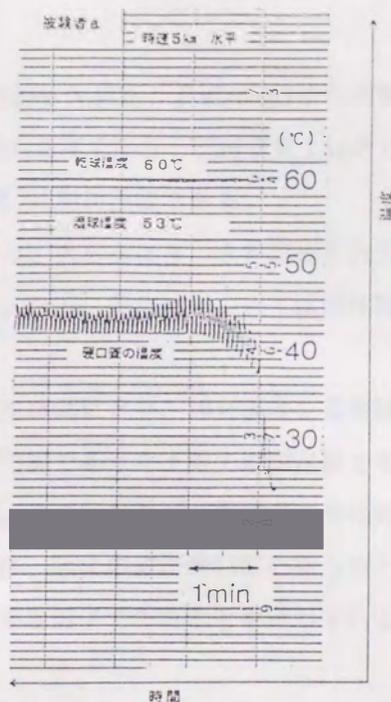


図 3-2 硬口蓋の皮膚温度の変化

表 3-2 5 分間呼吸可能であった上限での温度・湿度条件

被験者	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	相対湿度 (%)	皮膚表面温度 (°C)	
				吸気時	呼気時
a	60	53	69	45.5	42.3
	70	52.5	41	47.7	43.0
	80	53	26	51.5	42.5
	90	53	17	48.5	42.8
b	60	53.5	71	45.5	42.7
	80	53	27	-	-
c	60	53	69	51.0	41.5
	80	53	26	-	-

$$P_w = P_s - \frac{0.5 \times (T_d - T_w) \times P}{755}$$

$$x = 0.622 \times \frac{P_w}{P - P_w}$$

$$x' = \frac{P_w}{P_s} \times 100$$

ここで、 T_d (°C)は乾球温度、 T_w (°C)は湿球温度、 P (mmHg)は大気圧、 P_w (mmHg)は水蒸気圧、 P_s (mmHg)は T_w での飽和水蒸気圧、である。 x (kg/kg)は絶対湿度であり、乾燥空気1kgあたりの湿り空気中に含まれる水蒸気重量 (kg)を意味する。 x' (%)は相対湿度である。

皮膚表面温度については、吸気時の値が45.5~51.5°Cであり、大きなばらつきが認められた。これには、呼吸パターンの違いなどが影響していると思われる。一方、呼気時についてはほぼ同様な温度 (41.5~43°C程度)を示している。

図3-3に結果の一部を図示する。これは乾球と湿球温度を両軸にとり、相対湿度を等量線で結んだものである。プロットとそれを結ぶ直線は、5分間呼吸可能であった上限での測定値とその回帰直線である。この直線よりも下側が呼吸可能な領域である。この結果より、乾球温度や相対湿度は呼吸可能な領域を規定していない。これに対して湿球温度は、吸気の値が約53°Cになったときに呼吸の継続が不可能になっており、吸気の熱さを規定する重要な因子であることを示している。

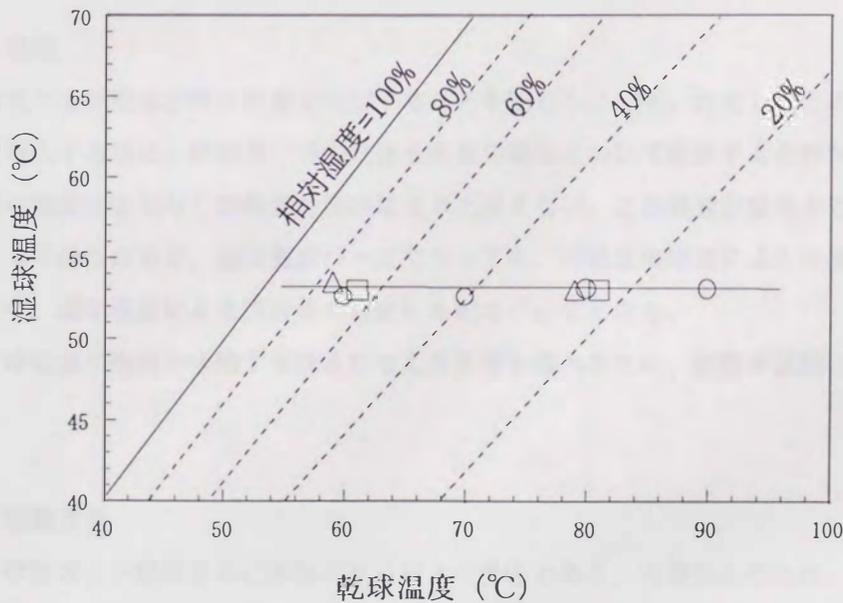


図3-3 吸気可能な上限の温度と湿度

○ : 被験者 a △ : 被験者 b
□ : 被験者 c

3.2.4 考察

熱さ（熱感覚）の規定因子として、皮膚の表面温度が考えられる。皮膚のような固体の表面温度は、それが乾燥しているときには外気の乾球温度が関係し、水分で湿っているときは湿球温度が大きな影響を与える。すなわち、熱量で考えた場合、乾燥した表面では乾球温度に等しくなるまで熱の移動が続き、湿った表面では蒸発潜熱が奪われるため乾球温度よりも低い温度で熱的な平衡に達する。この時の温度が、湿球温度に相当する。このことから、口内が湿潤であることを考えた場合に、Gallagherら^{4, 5)}の研究結果を参考にするまでもなく、吸気の湿球温度が熱さに関係することは予想できる。しかし、非常に乾燥した高温吸気の場合に、吸気の過程で口内が乾燥して乾球温度の影響を受ける可能性も想定された。今回の研究では乾球温度が90℃にて相対湿度が20%以下の非常に乾燥した条件での実験も行ったが、湿度が高い場合と同様に、体感温度を規定する因子として湿球温度が作用していることが明らかになった。これは唾液や呼気による水分の供給が、口内を湿潤に保つのに十分であることを示している。運動量の増加などの影響で呼吸量が大きくなった状況では途中で乾燥する事態も想定されるが、K O₂型においても相対湿度は40%程度（後述）であることを考えると、湿球温度の値のみで吸気温度を評価しても問題がないものと判断される。なお、熱量についての議論は次節で行う。

3.3 呼吸量の変化と体感温度との関係⁶⁾

3.3.1 目的

前節で、吸気の湿球温度が熱さ感覚を規定することを明らかにした。ただし、この湿球温度を評価指標として導入する前に、呼吸量の増加に伴う熱量の増加について検討する必要がある。すなわち、皮膚表面の温度は吸気からの熱量の供給により上昇するが、この熱量が変化すると皮膚温度にも影響を与える可能性がある。湿球温度が一定であっても、呼吸量の増加により体感する熱さが変化した場合には、湿球温度による許容値の設定にも配慮が必要となる。

本節では、呼吸量の増加が体感する熱さに与える影響を調べるため、被験者試験による検討を行った。

3.3.2 実験方法

被験者は呼吸器および循環器系に障害のない11人の男性であり、火傷防止のため、極端な無理は避けるように被験者に伝えた上で実験を行った。被験者の身体的な特徴を表3-3に示す。なお、被験者a~cは前節の被験者と同一である。試験においては被験者の呼吸量を変化させた上で、加熱した空気を吸気させ、呼吸可能な上限の温度を求めた。乾球温度は前節の試験結果を参考にして60℃のみで行なった。また、湿球温度は50℃から毎分0.6℃の割合で連続的に上昇させた。連続的な

温度上昇とした理由は、被験者への負担を軽減させるためである。また、上昇速度の0.6°Cは装置の性能から決まった値であるが、後述のように硬口蓋の温度も対応して変化しているため、大きすぎる値とは考えられない。

被験者の呼吸量を次の3つの方法により変化させた上で、被験者が自発的に中止するまで実験を継続した。

A：空気を呼吸しつつ、時速5kmで水平に歩く

B：空気を呼吸しつつ、時速5kmで5°の傾斜を上方に歩く

C：3%の二酸化炭素を添加した空気を呼吸しつつ、時速5kmで水平に歩く

条件Cでは、呼吸を刺激する目的で二酸化炭素を添加した。濃度は、JISや検定試験における基準値（3%）を採用した。各被験者は条件Aのほか、BまたはCの試験を行った。試験時の気温は24±2°Cであり、運動に伴う体内への蓄熱や発汗を防止する目的で扇風機を適時使用した。また、各々の条件下での被験者の呼吸量を、全自動代謝測定装置により予め計測した（表3-3参照）。なお、高温気体の吸気時の呼吸量はこの予備試験での呼吸量と同一であると仮定した。

3.3.3 実験結果

一回の試験の継続時間は7分程度であった。図3-4に、試験を中止した時点における吸気の湿球温度を示す。以下において、この温度を「呼吸可能な上限の湿球温度」と定義する。呼吸量の増加に伴って呼吸可能な上限の湿球温度は減少しているが、その程度はわずかである。最小二乗法に

表3-3 被験者の特徴と予備試験での呼吸量

被験者	年齢 (才)	身長 (cm)	体重 (kg)	各試験条件での呼吸量(L/min)		
				A	B	C
a	31	175	65	20.8	35.9	43.9
b	57	162	57	20.8	-	26.0
c	33	169	69	28.3	-	36.3
d	31	174	67	28.4	-	51.0
e	31	172	75	27.6	-	40.3
f	34	181	72	27.6	-	31.7
g	26	180	70	26.4	-	45.8
h	42	171	64	25.5	-	28.5
i	25	175	57	25.0	35.7	-
j	37	172	70	23.0	31.8	-
k	30	182	65	30.6	36.2	-

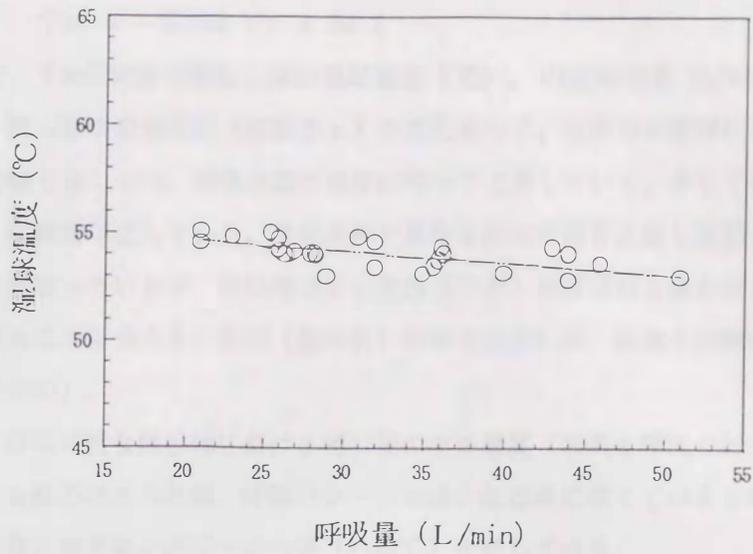


図3-4 呼吸量と呼吸可能な上限の湿球温度

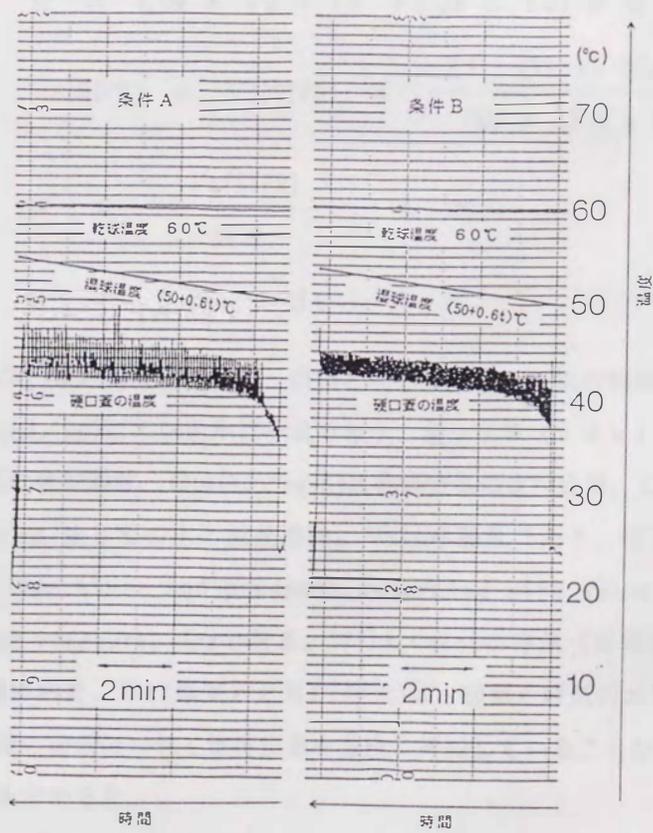


図3-5 硬口蓋の皮膚温度の変化
(条件AとBの比較)

より回帰直線を求めると、

$$T_{WB} = -0.054 V_E + 55.7$$

となる。ここで、 T_{WB} は呼吸可能な上限の湿球温度(°C)、 V_E は呼吸量(L/min)である。

図3-5に、硬口蓋の皮膚温度(被験者a)の変化を示す。被験者の呼吸に合わせて正弦波に近い形で上下動を繰り返しつつ、吸気の湿球温度に伴って上昇している。そして最終的には呼吸可能な限界に至り、試験を中止している。運動条件が異なる左右の図を比較した場合に、吸気時のピーク値(上方)は異なっているが、呼気時のピーク値(下方)はほぼ同じ値を示している。また、全体的な上昇速度は呼吸量の大きい右図(条件B)がやや大きい。試験中止時の呼気のピーク値はほぼ等しい(約42°C)。

図3-6に、呼吸可能な限界時における硬口蓋の皮膚温度(吸気と呼気のピーク値)を示す。吸気時に認められる値のばらつきは、呼吸パターンの違いなどを反映していると考えられる。呼気時については呼吸量に関係なくほぼ一定の値(約42°C)を示している。

図3-7に、高温の空気を呼吸することにより、1分間あたりに人体にもたらされた熱量(以下、獲得熱量)を示す。獲得熱量は、吸気と呼気のエンタルピー差で求めた。なお、呼気は温度37°C、湿度100%と仮定するとともに、吸気(空気)に対して組成変化がないと仮定した^{7, 8)}。

$$H = C_{pa} \times T_d + (r + C_{pw} \times T_d) \times x$$

$$V_E(\text{STPD}) = V_E(\text{BTPS}) \times \frac{(P-47) \times 273}{760 \times (273 + 37)}$$

$$W = \frac{V_E(\text{STPD})}{22.4} \times 29$$

$$Q = (H_I - H_E) \times W$$

ここで、 x (kg/kg)は絶対湿度であり、前節と同じ方法で、吸気の乾球温度および湿球温度の値から計算した。 H (kJ/kg)はエンタルピー量であり、湿り空気(1+x)kg中に含まれる値である。 T_d (°C)は吸気の乾球温度、 C_{pa} (kJ/kg·K)は乾燥空気の定圧比熱、 C_{pw} (kJ/kg·K)は水蒸気の定圧比熱、 r (kJ/kg)は0°Cの水の蒸発潜熱。 V_E は呼吸量であり、括弧内は状態の違いを示し、BTPSはBody temperature and pressure, saturated with water vapor、STPDはStandard temperature and pressure, dryである。 W (kg/min)は呼気(吸気)の空気重量(乾燥量)。 Q (kJ/min)は獲得熱量。 H_I (吸気)と H_E (呼気)は、吸気と呼気のエンタルピー量を示す。

図から、呼吸量の増加につれて獲得熱量も急激に増加していることが分かる。最小二乗法により熱量の回帰直線を求めると、

$$Q = 0.177 V_E - 0.354$$

となる。

3.3.4 考察

本研究により、呼吸量の増加は、呼吸可能な上限の湿球温度にほとんど影響を与えないことが明らかになった。一分間当たりの獲得熱量について考えると、呼吸量が20 L/min から50 L/min に増加した場合は、呼吸可能な湿球温度の低下は1.62°Cと小さい値にとどまっているため、獲得熱量

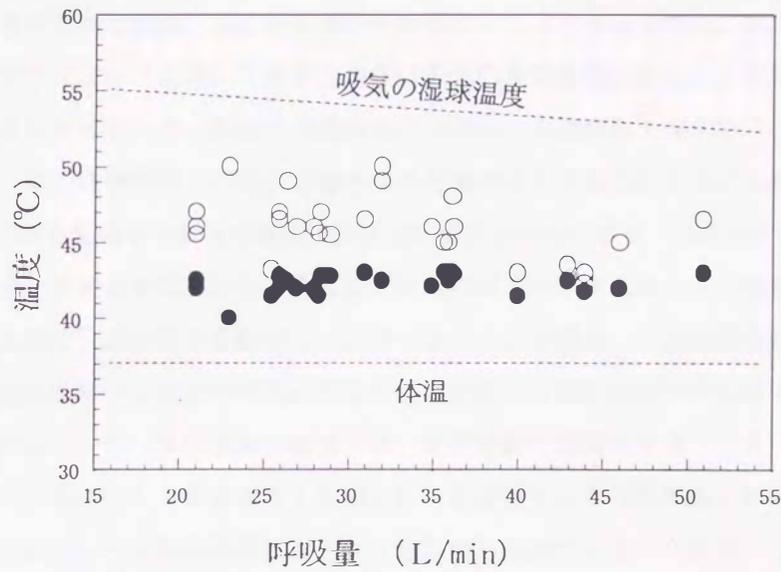


図3-6 呼吸量と硬口蓋の温度

○—吸気時 ●—呼気時

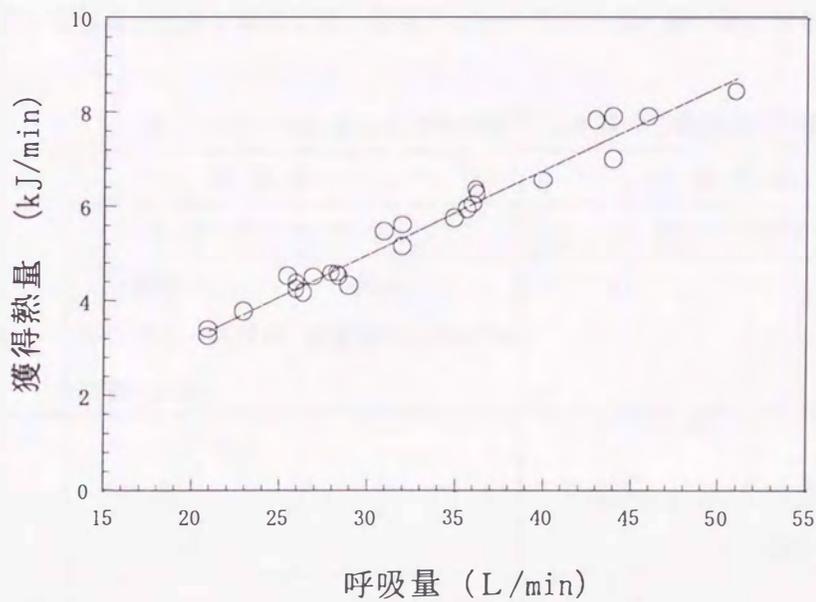


図3-7 呼吸量と獲得熱量の関係

は約3.5(kJ/min)から約8.5(kJ/min)へと2倍以上の値に増加している。しかし、硬口蓋における呼吸時の皮膚温度は約42°Cで一定であり、吸気時の値はむしろ減少傾向にある。このことから、獲得熱量の増加は皮膚温度の上昇に寄与しておらず、当初の予想と異なる結果となった。原因として、通過する気流が連続気流でなく、呼吸運動に伴う往復気流であることが考えられる。

呼吸気流として定常流（気道の奥部方向への連続気流）を仮定すれば、皮膚の表面温度は、気流からの伝熱と皮膚深部への伝熱、および皮膚の熱容量などにより決定される。定常状態に至れば、気流の導入部（マウスピース近傍）での表面温度は吸気の湿球温度に等しい。また、気流量が大きいほど気流の熱量が大きくなり、気道の奥部方向に向かった温度低下は少なく、高温域が奥部方向へ拡張する。一方、往復気流（呼吸）の場合には高温の吸気と低温の呼気が交互に繰り返されるため、吸気時における熱的な平衡（定常状態）に達する前に呼気に移り、表面温度は低下を始める。同様に、呼気においても定常状態に至る前に次の吸気に移り加熱される。この繰り返しにより、皮膚の表面温度は正弦波に近い形で変動する（図3-5）。この場合、呼吸の頻度が重要である。すなわち、呼吸頻度が小さいと吸気や呼気の時間が長いため、皮膚の加熱や冷却は十分に進み、温度変動の振幅は大きい。一方、頻度が高い場合には、温度変動の振幅が小さくなる。ところで、呼吸頻度の違いがピーク値に与える影響を考えた場合に、低温側ピーク（呼気時）は体温よりも下がることはあり得ないため、その変化は高温ピーク（吸気時）の変化に比べて少ないと考えられる。以上により、呼吸量と呼吸頻度の大小が皮膚の表面温度に与える傾向をまとめると表3-4のようになる。

呼吸の特徴として、呼吸量は、一回換気量と呼吸頻度が増えることによって増加する。特に、歩行時の呼吸量の増加に対しては、呼吸頻度の影響が大きい。このため、呼吸量が小さい場合には、マウスピース近傍の狭い領域での吸気時のピーク値が非常に高く、奥に行くに従って急速に温度が低下する。一方、呼吸量が大きい場合には、吸気のピーク値はさほど高い値とならないが、高温域

表3-4 呼吸量および呼吸頻度と皮膚の表面温度の関係

	呼吸量		呼吸頻度	
	小 ← → 大		小 ← → 大	
高温領域	狭い マウスピース近傍 に限られる	広い 気道奥部に広がる		
変動幅			拡大	縮小 吸気時と呼気時の 値が平均化
高温ピーク値			上昇	低下
低温ピーク値			少し低下	少し上昇

は全体的に喉の奥部に広がる。

今回の試験において、呼吸量の増加が体感温度に関係しなかった理由は、呼吸頻度の増加によって、高温側ピーク値が減少傾向を示したためと考えられる。逆に、呼吸量が小さい場合にはマウスピース近傍での高温側ピークが高くなる傾向にあるが、熱さに対して敏感な部位（咽頭部付近）までの温度低下が大きいいため、吸気の湿球温度としてはほぼ一定値で呼吸が不可能になったと考えられる。

以上の研究結果から、吸気の湿球温度が変わらない限り、呼吸量の増加は体感する熱さにさほど影響しないことが明らかになった。つまり、酸素自己救命器の性能を評価するにおいて、現行の呼吸量30 L/minでの湿球温度による評価を行えば、使用者がより激しい呼吸を行っても吸気の熱さが問題となることはない。ただし、運動による呼吸量の増加を考えた場合、これは二酸化炭素排出量の増加も伴うため、酸素自己救命器内の化学反応の促進につながり、吸気温度自体を上昇させることが考えられる。その場合、より大きな呼吸量（二酸化炭素排出量）での試験も必要となるが、許容値としては30 L/minの場合と同じ値を採用することが可能である。

3.4 酸素自己救命器における吸気の湿球温度の測定⁹⁾

3.4.1 目的

前節での検討の結果、酸素自己救命器における吸気の熱的な条件は湿球温度により評価可能であることが明らかになった。しかし、呼吸管内での湿球温度の測定は、吸気と呼気が非常に頻繁に入れ替わっているため、精度の点で困難がある。Kyriazi¹⁰⁾は応答速度の速い湿球温度計を開発して、米国における人工肺試験に利用した。これは熱電対の感熱部を多孔質なセラミックでコーティングし、綿糸を介して蒸留水を供給することによって、湿球温度を測定する器具である。この応答速度は95%応答が約0.6秒であり、湿球温度計としては非常に応答が速い。米国の人工肺は呼吸管が一体であるため、この様に応答速度の早い湿球温度計は非常に有効である。しかし、呼吸頻度が大きい場合には精度に疑問が生じる。一方、日本の人工肺は吸気管と呼気管が完全に分離しているため、吸気管内で測定が可能であれば、応答速度を問題にすることなく吸気の湿球温度を測定できる。そこで、実際の酸素自己救命器の熱的な条件を評価することを目的に、人工肺用の湿球温度計を制作し測定を行った。

3.4.2 人工肺用の湿球温度計

人工肺の吸気管内での測定が可能な湿球温度計を製作した。温度測定器には、工作が比較的容易な熱電対（k型、線径0.2mm）を利用した。構造を、図3-8と図3-9に示す。熱電対の先端（感熱部）から1cm程度の間に脱脂綿を薄く（厚さ0.5mm程度）巻き付け、根本をビニールテープによって固定した後、蒸留水で適度に湿らせた。これを人工肺の吸気管とほぼ同径の透明アクリル管（長

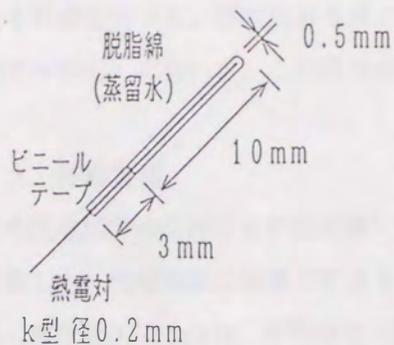


図 3-8 湿球温度計の感熱部の構造

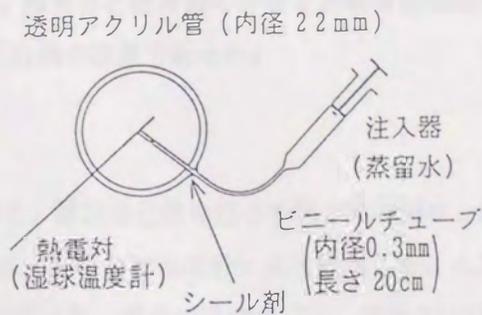


図 3-9 湿球温度計の構造

さ 50mm、内径22mm) に側面から挿入した。挿入口は直径約 5 mm であり、感熱部が管のほぼ中心に位置するようにセットした。また、脱脂綿に水を供給するため、内径 3mm のビニール管を、湿球温度計の挿入口から同周縁上に約 20mm の位置から挿入し、一端を感熱部から約 5mm の位置に触れさせた。また、他端を蒸留水を満たした注入器に接続した。アクリル管における挿入口は、漏洩防止のためバルカニーテープとゴム粘土でシールした。計測に当たっては、綿の状態を確認しながら注入器により水の供給を行ったが、通常はビニール管の水面が綿に触れないように注意した。

湿球温度計の測定精度を確認するため、吸気加熱装置を利用して、アスマン通風乾湿度計との比較を行った。内径 30mm のゴム管を 2 本用意した上で、排気口から同じ距離 (約 20cm) で測定ができるように、一方にはアスマン通風乾湿度計を、他方には湿球温度計を挿入した。前者は、ゴム管の上方に直径 20mm の穴を開けて、アスマン通風乾湿度計の入気用の筒部を挿入した。また、断熱シートを下方部に巻いて、放熱の影響を防止した。後者は、アクリル管の挿入部にバルカニーテープを巻いて、隙間が空かないように調整した。なお、試験時の通気流量は 100 L/min とした。これは、酸素自己救命器の人工肺試験での呼吸量 (30 L/min) のピーク流量にほぼ等しい値である。測定では、

表 3-5 湿球温度計の測定精度

吸気加熱装置の設定温度 (°C)		湿球温度の測定値 (°C)		
加温槽	加湿槽	アスマン 通風乾湿度計	湿球温度計	誤差
(外気)	(外気)	23.4	23.5	+0.1
60.1	40.8	43.4	43.6	+0.2
70.1	41.1	45.2	45.1	-0.1
80.0	42.3	47.0	47.0	0.0
99.4	44.6	51.0*	51.2	+0.2

*印は温度計の目盛りを延長して読んだ値である

まずいくつかの設定条件に対してアスマン通風乾湿度計での計測を行い、次に同様の条件で湿球温度計による計測を行った。測定結果を表3-5に示す。酸素自己救命器の評価で重要な湿球温度の領域(40°C~50°C)において、この湿球温度計は0.2°C以内の誤差であった。

3.4.3 試験方法

JISや検定試験法における評価試験^{1) 11)}に基づいて、酸素自己救命器の吸気の乾球温度と湿球温度を計測した。乾球温度は熱電対により、湿球温度は上記の湿球温度計により計測した。人工肺の設定は、呼吸量が30 L/min、呼気中の二酸化炭素濃度が4%、呼気の温度が37°C、湿度は100%である。熱電対はマウスピースとの接続部から吸気の下流側に約2 cmの場所に、湿球温度計は約10 cmの場所に感熱部が位置するように設置した。また、外気による冷却を防止するため、湿球温度計までの経路を綿で厚く覆った。乾球および湿球温度は、ペンレコーダ(理化電機社製、R-50)に連続記録したデータを読みとった。

測定の対象とした酸素自己救命器は、圧縮酸素型と KO_2 型のそれぞれ1機種であり、暖機運転の終わった人工肺に装着して公称使用時間中(ともに30分)試験を行った。

3.4.4 試験結果

図3-10に圧縮酸素型の結果を示す。乾球温度は試験開始から10分程度まで急激に上昇しており、その後はほぼ一定値(約45°C)を保っている。乾球温度と湿球温度の対比において、最初の5分程度は湿球温度がやや低いが、その後は両者が同じ値を示している。このことから、圧縮酸素型では、吸気温度がある程度まで上昇すると吸気の湿度は飽和状態となる。これは2.2.2で述べたようにソーダライムの化学反応の特徴を反映している。

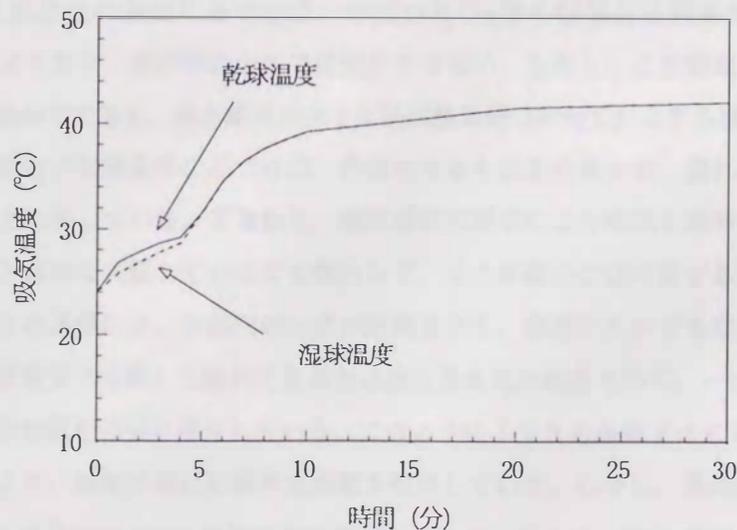


図3-10 圧縮酸素型酸素マスクの吸気温度の変化

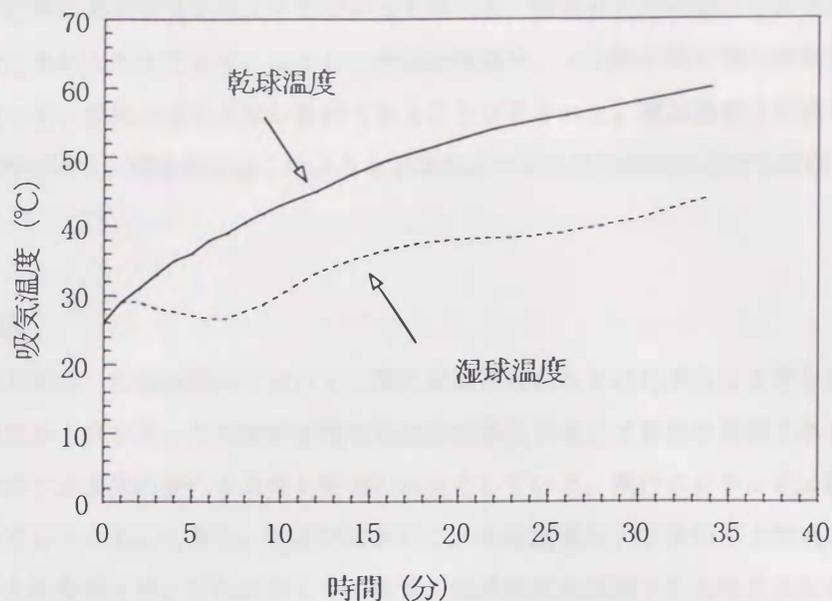


図3-11 KO₂型酸素マスクの吸気温度の変化

図3-11にKO₂型の試験結果を示す。乾球温度は、試験開始から終了まで連続的な上昇を示しており、30分時点での値は60°Cに近い値に達している。これは、検定試験法に定められた許容値の50°Cを大きく越えている。一方、湿球温度は、試験開始直後を除いて乾球温度よりもかなり低い。公称使用時間である30分時点での乾球温度は約60°C、湿球温度は約40°Cであり、相対湿度は約40%である。

3.4.5 考察

現行の検定試験法の評価に基づけば、今回のKO₂型の酸素自己救命器は乾球温度が許容値(50°C)を越えており、我が国の炭鉱では使用できない。しかし、この酸素自己救命器の湿球温度は30分時点で約40°Cであり、熱さ感覚の点では圧縮酸素型(約45°C)よりも楽に呼吸が可能である。このことは、現行の試験基準に基づけば、内容の劣るものを合格させ、優れたものを不合格にする事態があることを示している。すなわち、吸気温度の基準により吸気の熱的な条件を評価し、安全な器具であるか否かを判断しているにも関わらず、その評価法には不備がある。

現行のJISの基準には、本研究の一部が反映されて、湿度にたいする配慮がなされている。すなわち、圧縮酸素型は湿潤した吸気であるため許容値を乾球温度で50°C、一方KO₂型は吸気が乾燥しているため許容値を65°Cと規定している。このようにJISの基準ではKO₂型の許容値を高く設定することにより、湿度の違いに関する問題を解決している。しかし、湿球温度による評価ではないため、湿度の変化によっては問題を生じる場合もある。例えば、KO₂型において、酸素発生量の調整などの目的で添加される薬剤の種類によっては吸気の湿度に影響を与える可能性があり、乾球温度による評価の限界を示している。

J I S の改訂時に湿球温度が導入されなかった理由は、酸素自己救命器における湿球温度の計測が不可能と考えられたためである。しかし、今回の実験で、人工肺の吸気管と呼気管が別系統であることを利用して、吸気の湿球温度が計測できることが示された。湿球温度は体感する熱さを適切に表現する指標であり、将来的にはこのような方法によって吸気の熱的な条件を評価すべきである。

3.5 結言

酸素自己救命器は、呼吸回路内において二酸化炭素の吸収などの化学反応を伴うため、発熱作用により吸気温度が上昇する。これは呼吸器の安全性を検討する上で重要な課題であるため、検定試験法などの基準では吸気の熱的な条件を評価の対象としている。現行の基準は乾球温度の大小によって合否を判定している。しかし、本研究において、乾球温度と人が体感する吸気の熱さとの間には相関は認められなかった。これに対して、吸気の湿球温度は体感される熱さを左右する重要な要因であり、呼吸可能な上限値は呼吸量の大小にさほど影響を受けないことも明らかになった。また、実際の呼吸器を対象として吸気の湿球温度を測定する場合に、小型の湿球温度計を、人工肺の吸気回路に配置することにより正確な評価が可能であることを示した。さらに、これを利用してK O₂型と圧縮酸素型の吸気の熱的な条件を比較した。その結果、K O₂型は乾球温度が非常に高く、現行の検定試験法の基準では合格できないが、その湿球温度は圧縮酸素型の値よりも低く、吸気に対する熱さ感覚の点ではより好ましい器具であることが分かった。

以上の結果をもとにして、吸気の熱的な条件を湿球温度により評価することを提案する。その場合の許容値としては、現行の乾球温度における基準値(50°C)を利用しても問題はないが、この値は呼吸可能な限界温度(約53°C)とあまり差がないため、安全性の面から、より低い温度が好ましい。乾球温度による評価ではあるが、米国の基準では、吸気の湿度が50%以上の酸素自己救命器(圧縮酸素型を対象としていると考えられる)について、許容値として48°Cを規定している。これを参考にして、吸気の湿球温度の許容値として48°Cを提案する。なお、呼吸量の増加は体感温度にさほど影響しないため、現行の呼吸量(30 L/min)よりも大きな値で試験する場合でも同一の許容値を利用可能である。

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) British Standards Institution: " Specification for closed-circuit escape breathing apparatus" , BS 4667 Part-5, (1990)
- 3) US National Archives and Records Administration: " Self-Contained Breathing Apparatus" , Code of Federal Regulation 30 Subpart H, (1991)

- 4) Gallagher,S., Vercruyssen,M. and Deno,N.S. : " Hot air breathing: Effects of elevated wet bulb temperature on tissue temperature of the mouth" , Am.Ind.Hyg.Assoc.J., 46(6), pp.332~335, (1985)
- 5) Gallagher,S. and Vercruyssen,M. : " Interaction of temperature and humidity of inspired air on tissue temperature of the tongue and hard palate" , J.ISRP, 4(2), pp.20~42, (1986)
- 6) 高橋正好, 滝口郁英 : " 酸素マスクの吸気温度の評価" , 安全工学, 30(3), pp.169~174, (1991)
- 7) 日本機会学会 : " 伝熱工学資料" , 日本機会学会, (1966)
- 8) 東京天文台 : " 理科年表" , 丸善, (1981)
- 9) 高橋正好 : " 呼吸用保護具のための吸気温度計測システムの開発" , セーフティダイジェスト, 45(7), pp.15~22, (1986)
- 10) Kyriazi,N. : " Fast-Response, Wet-Bulb Thermocouple" , J.ISRP, 6(3), pp.12~14, (1988)
- 11) 日本規格協会 : " 閉鎖循環式酸素自己救命器" , JIS M 7651, (1996)