

圧縮酸素形循環式呼吸器に関する検証

佐藤 良行*, 徳永 敦司*, 町井 雄一郎*, 鈴木 健司*

概要

地下空間、トンネル等における災害時には、呼吸器を着装した状態で、長時間の活動を行うことが想定される。本検証では、当該災害で活用する圧縮酸素形循環式呼吸器（以下「酸素呼吸器」という。）の有効性等について確認することを目的とした。

実験は、酸素呼吸器の使用時間として示されている240分間、酸素呼吸器を着装した被験者に、消防活動に相当する強度の動作等を実施させることにより行った。その結果、主に以下のことについて知見を得た。

- (1) 被験者に生理的な異常は認められないが、180分以上の活動では、吸気の温度上昇による息苦しさ、面体の曇りによる視界不良等が発生する。
- (2) 高濃度酸素がすぐ止弁付近で検知されたことから、火災や可燃性物質が付近に存在する場合、激しい燃焼をひき起こすこと等により、活動隊に危険が及ぶ可能性がある。
- (3) 適正な取扱い及び安全管理事項を順守することによって、既存の呼吸器よりも長時間活動することが可能である。

1 はじめに

地下空間、トンネル等における災害時には、呼吸器を着装した状態で、長時間の活動を行うことが想定される。そのため、当庁において、呼吸環境を長時間維持する方策として、当庁に配置されている既存の呼吸器よりも長時間使用可能な呼吸器の必要性が検討された。

本検証では、当該災害で活用する酸素呼吸器の有効性等について確認することを目的とした。

2 酸素呼吸器の概要

酸素呼吸器の標準的な規格は、JIS（日本工業規格）M 7601¹⁾によって規定されている。呼吸で増加した二酸化炭素を二酸化炭素吸収剤で除去するとともに、呼吸で減少した酸素を酸素容器から補給することで、呼吸を吸気として循環再利用する構造の呼吸器である。

3 検証方法

(1) 検証対象

表1に示すように、概ね240分間使用可能とされる2種類の酸素呼吸器を検証対象とした。

(2) 実験条件等

酸素呼吸器を240分間連続して使用した場合における、被験者の生理的変化及び酸素呼吸器の特性に関する知見を得るため、以下のアからオに基づき、実験条件等を設定した（表2）。

表1 検証対象

検証対象	主要諸元	
製品A (ドイツ製)	型式 使用時間 質量 寸法 二酸化炭素吸収剤 面体 酸素容器内容積 呼吸袋内容積 通常使用環境温度	陽圧形圧縮酸素形循環式呼吸器 公称240分（充てん圧力19.6MPa） 14.7kg（冷却用氷約1.2kgを含む） 縦595mm×横450mm×厚さ185mm 主要成分：水酸化カルシウム等 曇り除去ワイパー付 
製品B (日本製)	型式 使用時間 質量 寸法 二酸化炭素吸収剤 面体 酸素容器内容積 呼吸袋内容積 通常使用環境温度	陽圧形圧縮酸素形循環式呼吸器 公称230分（充てん圧力19.6MPa） 14.5kg（冷却用氷約1.4kgを含む） 縦550mm×横380mm×厚さ160mm 主要成分：水酸化カルシウム 曇り除去機構無し 

* 装備安全課

表2 実験条件等

実験環境	温度 25±5℃、湿度 35±20%
被験者	A群：消防技術安全所員 5名 B群：消防技術安全所員 5名
服装	執務服
測定項目等	・深部体温（耳内温） ・心拍数 ・血中酸素飽和度（SpO ₂ ） ・酸素容器の残圧 ・酸素呼吸器内部の熱画像 ・酸素呼吸器周囲の酸素濃度 ・面体の曇りの状況

ア 実験環境

表1から、製品A、製品Bともに、通常使用環境温度は40℃以下である。また、一般的に同程度の活動を低温環境下よりも高温環境下で行う方が、隊員の身体負荷が高い。以上のことから、夏季の6～9月（表3）を参考として、実験環境を温度 25±5℃、湿度 35±20%とした。

表3 日平均気温の月平均値（2013年、東京）²⁾

月	1	2	3	4	5	6
温度(℃)	5.5	6.2	12.1	15.2	19.8	22.9
月	7	8	9	10	11	12
温度(℃)	27.3	29.2	25.2	19.8	13.5	9.9

イ 被験者

被験者が実験に順応することを避けるため、検証対象ごとに異なる被験者とし、製品Aを着装し実験を行う被験者群をA群、製品Bを着装し実験を行う被験者群をB群とした。なお、表4に示すように、被験者群ごとで身体的特徴等の平均値が概ね同等となるように選定した。

ウ 服装

酸素容器下での救助活動現場を想定し、執務服とした。

エ 測定項目等

(ア) 被験者の生理的変化

酸素呼吸器を長時間連続して使用したときの被験者に及ぼす生理的な影響を確認するため、表5に示す耳式体温計及びパルスオキシメータを用いて、深部体温（耳内温）、心拍数及び血中酸素飽和度（SpO₂）を測定した。

(イ) 酸素容器の残圧

酸素容器内の酸素残量が使用時間に関係することから、酸素容器の残圧を記録した。

(ロ) 酸素呼吸器の温度等

酸素呼吸器は、呼吸を循環させる過程で二酸化炭素吸収剤と二酸化炭素を反応させる化学反応を伴うことから、反応熱が生じる。そのため氷を用いた吸気冷却装置（以下「冷却装置」という。）が装備されている。長時間使用する場合、冷却装置内の氷の融解状況によっては、吸気

表4 被験者の身体的特徴等

実験群	被験者	年齢(歳)	70% HRmax※ (回/分)	身長(cm)	体重(kg)	BMI
A群	a	38	127	172	63	21.3
	b	37	128	171	74	25.3
	c	38	127	173	63	21.0
	d	28	134	175	80	26.1
	e	29	134	170	66	22.8
A群平均		34	130.2	172.2	69.2	23.3
B群	f	42	125	177	85	27.1
	g	43	124	169	65	22.8
	h	39	127	167	67	24.0
	i	36	129	176	70	22.6
	j	33	131	163	58	21.8
B群平均		38.6	127.0	170.4	69.0	23.7
全体平均		36.3	128.6	171.3	69.1	23.5

※本検証における活動時心拍数の目安(220-年齢)×0.7

表5 使用測定機器

測定機器	仕様等		
 耳式体温計	製造会社	オムロン株式会社	
	型式	MC-510	
	測定範囲	34.0～42.2℃ (±0.2℃)	
	使用環境温度	10～40℃	
 パルスオキシメータ	製造会社	日本精密測器株式会社	
	型式	B0-800	
	測定範囲	血中酸素飽和度 0～100%(±2%) 脈拍数 30～240拍/分(±3%)	
	測定方法	2波長吸光度測定法	
使用環境温度	10～40℃		
 熱画像装置	製造会社	NEC Avio 赤外線テクノロジー株式会社	
	型式	Thermo Shot F30W	
	測定範囲	-20～350℃ (±2℃)	
 複合型ガス検知器	製造会社	理研計器株式会社	
	型式	GX-2009	
	検知対象及び検知範囲	酸素	0～40.0vol%
		可燃性ガス	0～100%LEL
		硫化水素	0～30.0ppm
検知方法	拡散式	一酸化炭素 0～500ppm	
使用環境温度	-20～49℃		

温度が上昇することが考えられる。このことから、表5に示す熱画像装置を用いて、冷却装置、二酸化炭素吸収缶（以下「吸収缶」という。）、呼吸袋等の表面温度を熱画像で記録した。

(エ) 排出酸素濃度

酸素呼吸器は、呼吸袋内の過剰となったガスが自動排気弁から排出されるため、高濃度の酸素が排出される可能性がある。このことから、表5に示す複合型ガス検知器を用いて、使用中の酸素呼吸器周囲の酸素濃度を測定した。

(オ) 面体の曇り

大気中で呼吸しているときの人の呼吸は相対湿度が100%³⁾であるといわれており、面体のアイピースが曇る可能性があることから、面体の曇りの状況を静止画で記録した。なお、製品Aの面体に装備されている曇り除去ワイパー（以下「ワイパー」という。）は、圧力指示計を目視することができない場合に使用することとした。

オ 実験動作

酸素呼吸器の公称使用時間は、酸素容器内の酸素の全容量と定量補給量から計算したものであり、実際の使用時間は、使用者の呼吸量が影響するものと考えられる。このことから、実験動作は、呼吸量に差が生じるよう、運動強度が低い動作及び消防活動を想定した動作の2種類の動作とした。

運動強度が低い動作は、座位での安静状態とした。一方、消防活動を想定した動作については、呼吸器を着装した状態での長時間活動を想定した活動モデルが無いことから、運動強度の検討を行った。過去に消防技術安全所（消防科学研究所）で行った実験から、個人装備を完全装着し、建物火災の現場で40分間消防活動を行った場合の平均活動強度は、高さ20cmの踏み台を用いた昇降運動に換算すると1分あたり100ステップの運動に相当し、その時の心拍数は最大心拍数（220-年齢）の60%から70%程度であるという結果が得られている⁴⁾。240分間連続して活動することを考慮すると、この活動強度は高いと考えられることから、10分間踏み台昇降運動の後20分間待機（立位）を繰り返す動作を、本検証における消防活動を想定した動作とした。

(3) 実験方法

表6に示す実験方法により実験を行った。

4 検証結果及び考察

(1) 被験者の生理的变化

ア 被験者の耳内温

耳内温の測定結果を図1に示す。

いずれの条件下においても、熱中症の危険性⁵⁾がある38.5℃以上の値を示した被験者はいなかった。

また、被験者cは、安静時、活動時ともに34.5~35℃と低い値を示したが、被験者本人による主訴は無く異常はみられなかった。

表6 実験方法

順序	概要等	
1 着装	酸素呼吸器を着装し、面体を着装	
2 動作前の測定	表2の測定項目等を記録及び測定	
3 動作及び測定	① 安静	② 活動
	座位で待機 ↓ 10分後 測定 ※ 繰り返し継続	踏み台昇降運動 〔踏み台高さ 20cm〕 昇降速度 100 ステップ/分 ↓ 10分後、測定 立位で待機 ↓ 10分後、測定 立位で待機 ↓ 10分後 測定 ※繰り返し継続
4 動作終了	次のいずれかとなった場合、動作終了 ・連続使用時間が240分間経過 ・残圧警報が鳴動（残圧が製品Aは1MPa、製品Bは1.5MPaで鳴動） ・深部体温（耳内温）が38.5℃に達し、熱中症の疑いがある場合 ・血中酸素飽和度（SpO ₂ ）が90%以下となり、呼吸不全の疑いがある場合 ・被験者の自己申告で、呼吸困難等により継続不能となった場合	
5 動作後の測定	表2の測定項目等を記録及び測定	
6 離脱	酸素呼吸器を離脱	
7 記録	冷却装置内の氷の残存状況を記録	
8 実験終了	実験終了	

イ 心拍数

心拍数の測定結果を図2に示す。

いずれの条件下においても、被験者の心拍数に異常は認められなかった。A群では、活動時における被験者dの心拍数が最大で176回/分の値を示し、最大心拍数192回/分の92%となった。一方、B群では、活動時における被験者gの心拍数は最大で151回/分の値を示し、最大心拍数177回/分の85%となった。しかし、被験者d及びgのいずれも安静時において、比較的心拍数が高い値を示していたことや、被験者本人の自己申告から、異常な値ではなかったと考えられる。

また、安静時、活動時ともに、群間でばらつきの傾向に違いはみられるが、被験者選定の際、心拍数ではなく

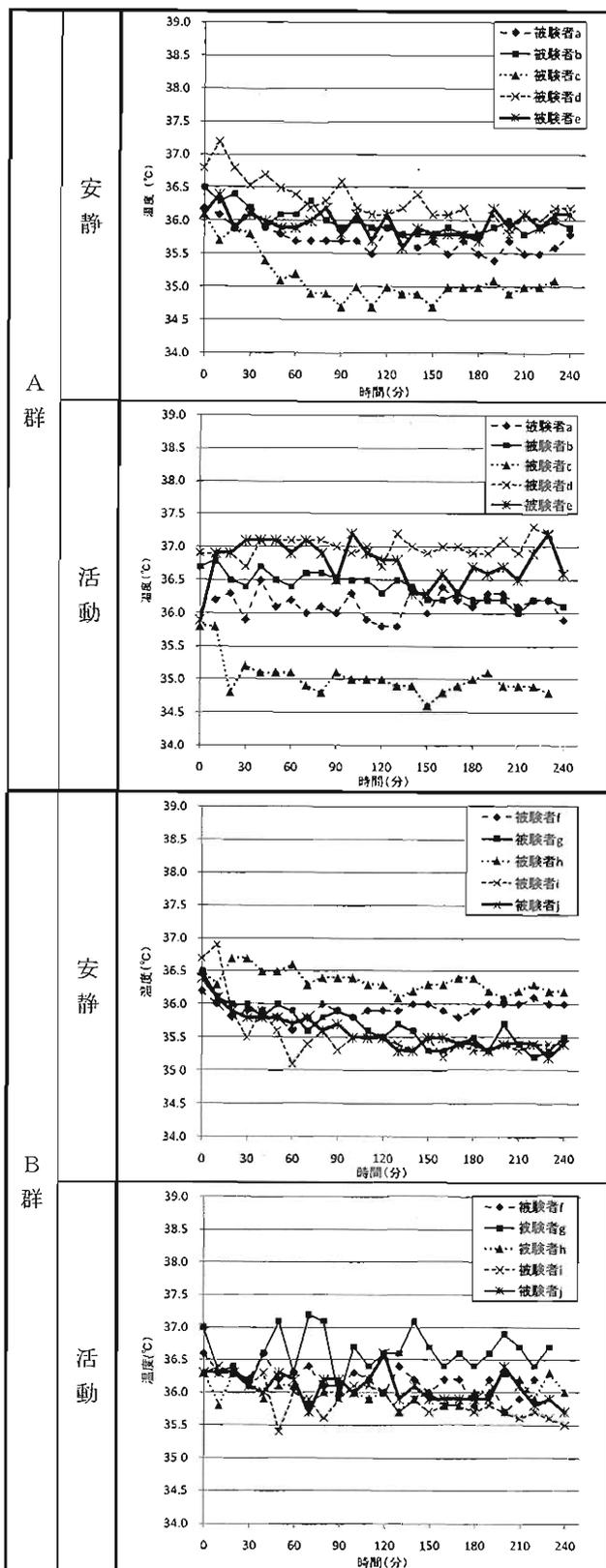


図1 耳内温の測定結果

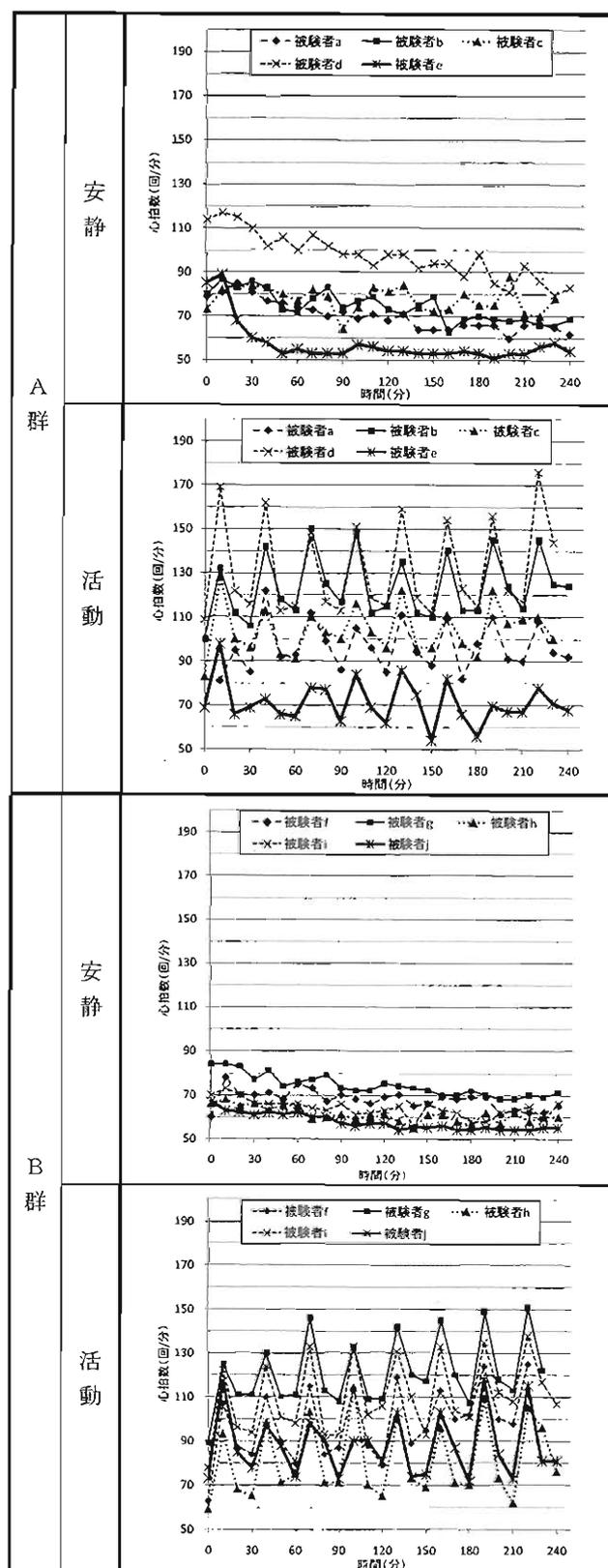


図2 心拍数の測定結果

BMI 値等を考慮したため個人差が生じたことによるもので、製品間の性能の違いによるものではないと考えられる。

ウ 血中酸素飽和度

血中酸素飽和度の測定結果を図3に示す。

いずれの条件下においても、すべての被験者の血中酸

酸素飽和度は正常値の95%から99%までの範囲内であり、かつ、被験者本人からの自己申告もなかったことから、被験者に異常は認められなかった。

(2) 酸素呼吸器の特性

ア 酸素容器の残圧

酸素容器の圧力変化を図4に示す。平均値で見ると、

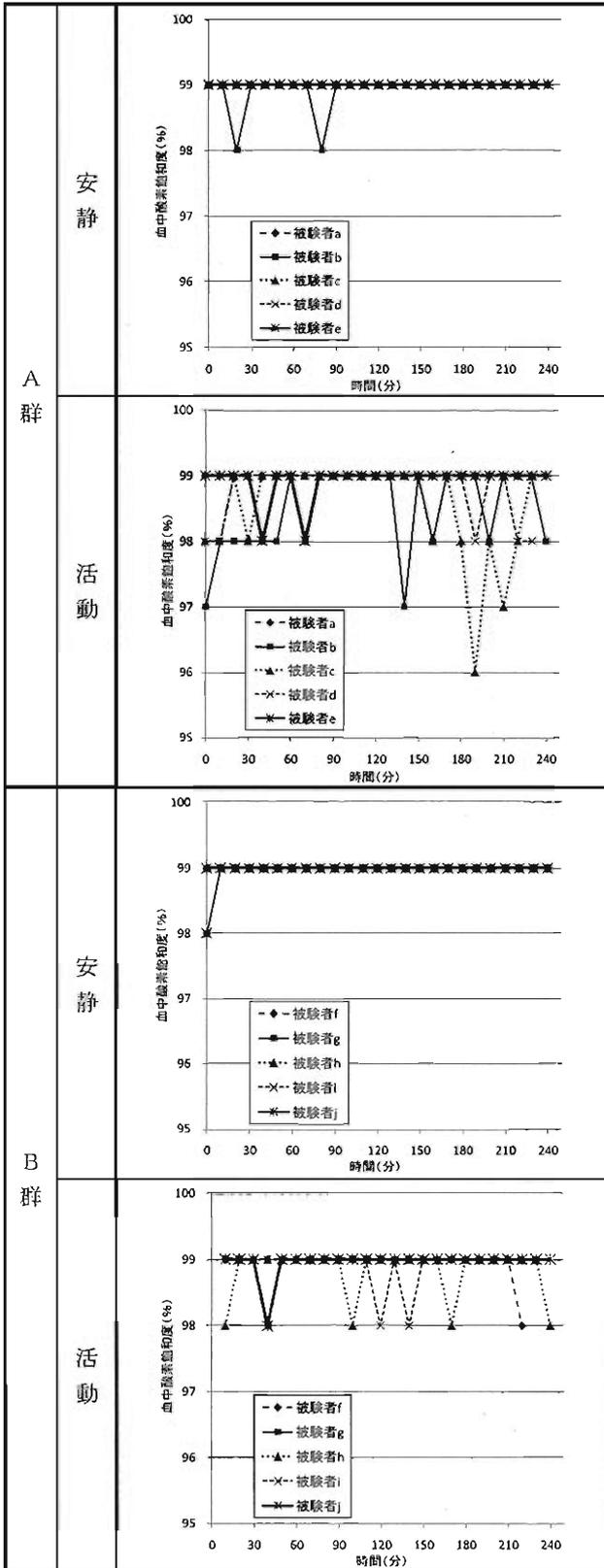


図3 血中酸素飽和度の測定結果

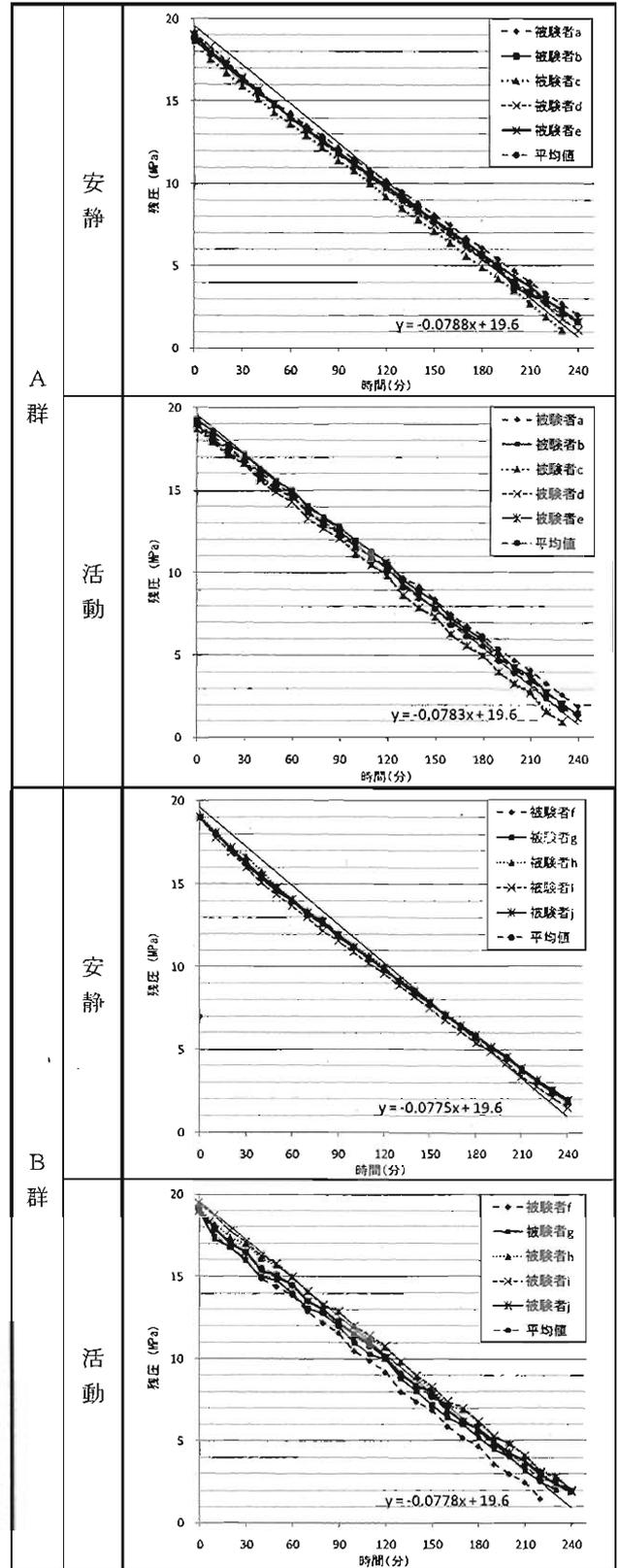


図4 酸素容器の圧力変化

いずれの条件下においても、圧力減少と時間はほぼ比例関係にあり、直線で近似した場合、その割合は1分あたり0.077MPaから0.079MPaの範囲であった。

A群の平均値を直線で近似した式では、安静時と比較して、活動時の圧力減少の差は1分あたり0.0005MPa少ない。一方、B群の平均値を直線で近似した式では、安静時と比較して、活動時の圧力減少の差は1分あたり0.0003MPa多い。この差は240分間では、A群で0.12MPa、B群で0.072MPaとなるが、充てん圧力19.6MPaに対して、A群で0.6%、B群で0.4%であることから、無視することができる範囲であり、製品間の差も無いといえる。

また、使用者に酸素残量が少なくなったことを知らせる警報（以下「残圧警報」という。）について、製品Aは1MPa、製品Bは1.5MPaで残圧警報が鳴動する。

A群では、呼吸器の使用時間である240分以前に残圧警報が鳴動した被験者は2名（c及びd）であり、最も早く残圧警報が鳴動したのは被験者dの活動時における227分であった。一方、B群では、240分以前に残圧警報が鳴動した被験者は3名（f、g及びi）であり、いずれも活動時であった。最も早く残圧警報が鳴動したのは被験者f及びgの220分であった。

酸素容器から酸素が補給される方法として、一定量ずつ連続して補給される定量補給、呼吸回路内の圧力変化、内容積変化等で作動し補給される自動補給、使用者自身が操作することで補給される手動補給がある。本実験では手動補給は使用されなかったことから、被験者間で酸素残量に違いが生じたのは、自動補給の作動状況によるものと考えられる。

身長、体重及びBMIのそれぞれの値と残圧警報が鳴動した時間については関係性が認められなかったことから、圧力の減少速度については主に心肺機能の個人差によるところが大いと考えられる。

なお、安静時において、被験者cの残圧警報が240分以前に鳴動したが、その理由として、被験者cを除き、残圧警報の鳴動はいずれも活動時であったことから、面体の隙間等から呼気または吸気の漏れがあったことが考えられる。

イ 酸素呼吸器の温度等

(7) 吸収缶の表面温度

熱画像装置により記録した吸収缶の表面温度を図5に、吸収缶の表面温度における被験者ごとの平均値及び最大値を表7にそれぞれ示す。

A群、B群いずれにおいても、安静時よりも活動時の方が平均値、最高値ともに高い値を示した。

安静時と活動時の平均温度の差について比較すると、A群は4.3℃、B群は7.0℃であった。B群は温度差が大きい傾向がみられ、活動時において平均的にA群よりも高い値を示した。

A群では、安静時、活動時のいずれにおいても、被験者dの平均値及び最大値が最も高い値を示した。一方、

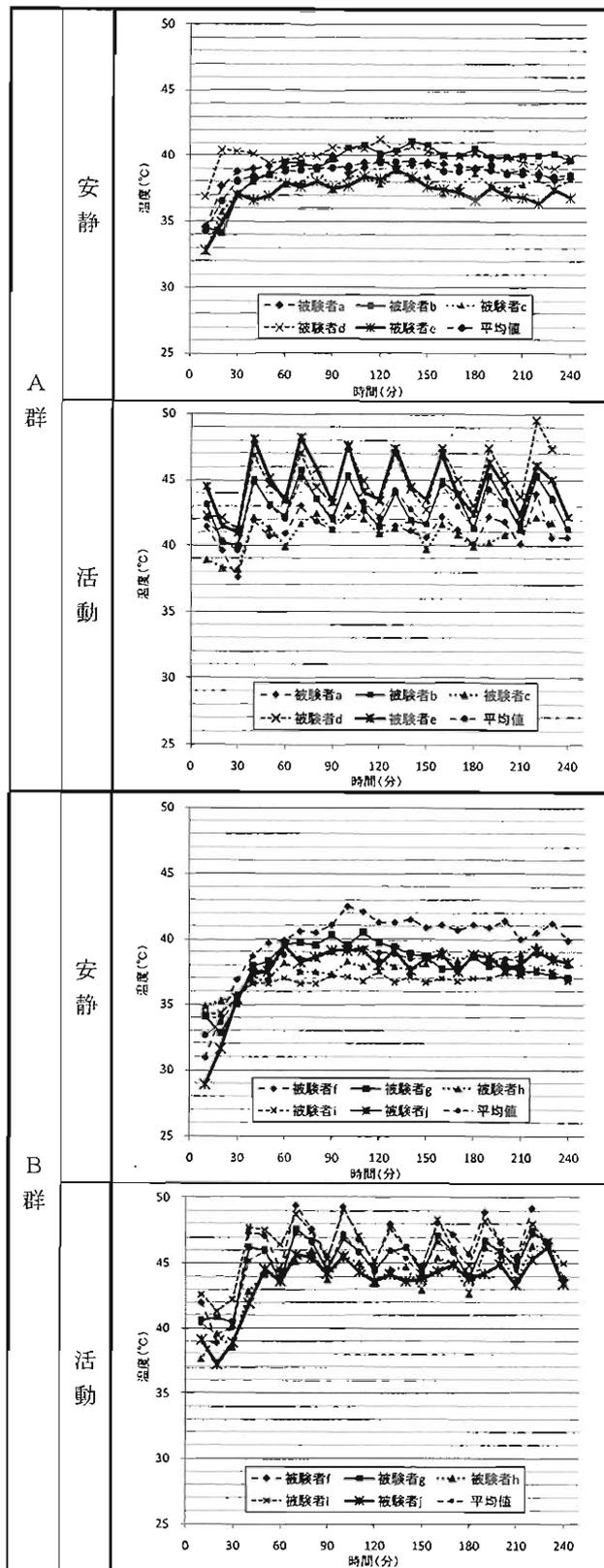


図5 吸収缶の表面温度の記録結果

B群では、活動時の平均値において被験者iの値が最も高くなり、安静時の平均値及び最大値、活動時の最大値では被験者fが最も高い値を示した。

表7 吸収缶の表面温度の被験者ごとの値 (°C)

被験者		a	b	c	d	e	
A群	安静	平均値	38.8	39.3	37.7	39.9	37.1
		最大値	40.0	41.1	38.9	41.2	38.9
	活動	平均値	41.3	43.0	40.9	44.9	44.6
		最大値	43.9	45.7	43.0	49.5	48.2
被験者		f	g	h	i	j	
B群	安静	平均値	40.0	38.0	37.8	36.7	37.6
		最大値	42.5	40.5	39.5	37.7	39.5
	活動	平均値	46.1	45.2	43.8	46.2	43.6
		最大値	49.4	47.6	46.3	49.1	46.2

A群、B群いずれにおいても、前アの圧力減少速度が速い被験者は吸収缶の温度が高くなる傾向がみられた。二酸化炭素の排出量が多い被験者は吸収缶での吸収剤と二酸化炭素の反応が増加し、発熱量が大きくなっていると考えられる。前アの結果と併せて考えると、温度差についても個人の心肺機能の差が影響しているものと推測される。

(イ) 冷却装置内の氷の融解状況

目視で確認したところ、安静時では、すべての条件下において、実験終了後も冷却装置内の氷は残存していた。一方、活動時では、すべての条件下において、実験終了時には氷が完全に融解していた。

冷却装置表面の熱画像（本報では掲載省略）を確認したところ、A群では被験者 b、c 及び d は実験開始から 180 分後には氷が完全に融解したものと推測される。また、B群では被験者 f 及び i は実験開始から 180 分後には氷が完全に融解していたものと推測される。吸収缶の最高温度ではB群が高い傾向がみられたが、氷が融解する時間については両群ともに最短で 180 分程度であり、群間に明確な差はみられなかった。

ウ 排出酸素濃度

酸素呼吸器の構成品である酸素容器のそく止弁（以下「そく止弁」という。）付近の酸素濃度の測定結果を図6に示す。

A群、B群いずれにおいても、活動時よりも安静時の方が、排出酸素濃度が高かった。

また、群間で比較すると、安静時、活動時ともに、B群の方が、高い酸素濃度を示す傾向がみられた。その要因として考えられることを、以下に示す。

(ア) 表1に示すように、酸素容器の内容積は、製品Aが2.0 Lで、製品Bが2.4 Lである。そのため、製品A、製品Bともに19.6MPaで充てんされた場合、酸素容器内の総酸素量は製品Aが400 Lで、製品Bが480 Lとなる。また、酸素容器の圧力減少速度については、前アのとおり、製品間の差はほぼみられなかった。以上のことから、製品Bの方が、酸素の定量補給量が多い。

(イ) 表1に示すように、二酸化炭素吸着後の呼気を溜め

ておく呼吸袋の内容積は、製品Aが5.5 Lで、製品Bが5.0 Lである。また、呼吸袋にその内容積まで呼気が溜まると自動排気弁が作動する。以上のことから、製品B

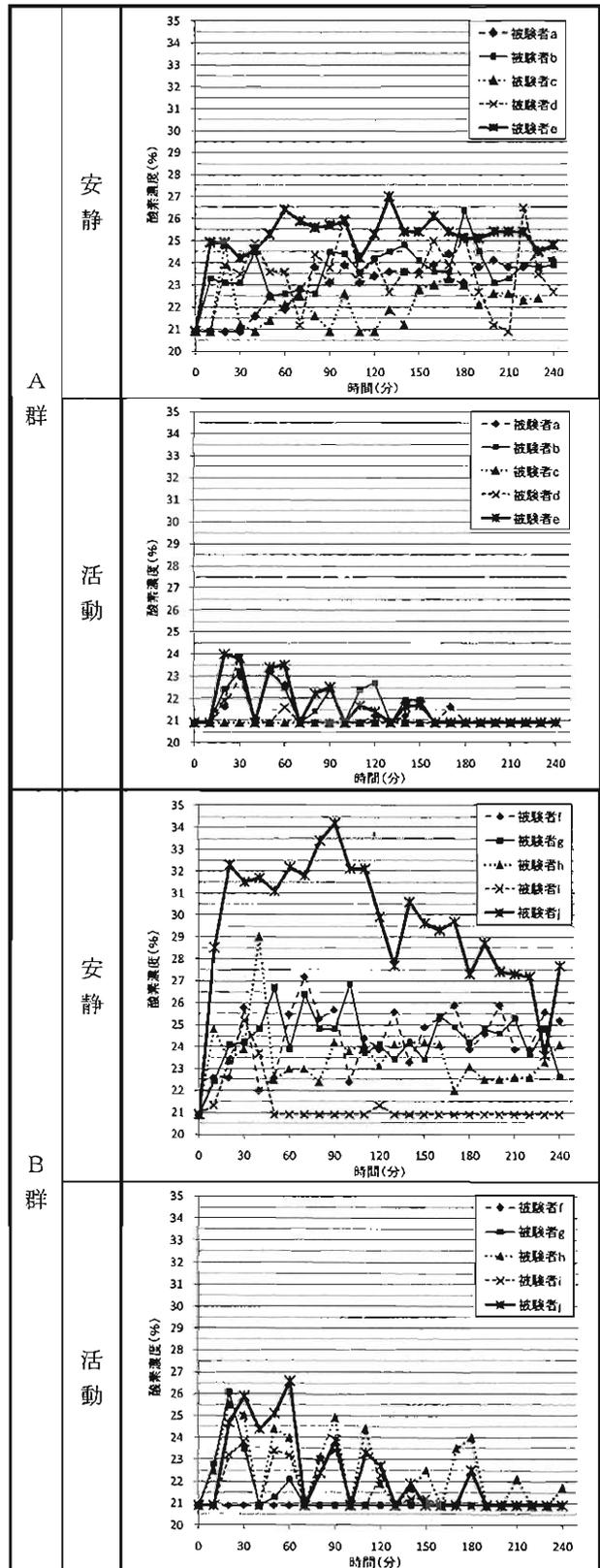


図6 そく止弁付近の酸素濃度の測定結果

の方が、呼気が排出されやすい。

(ウ) 製品Aは、二酸化炭素吸着前の呼気が自動排出弁により排出される機構であるのに対し、製品Bは、二酸化炭素吸着後の呼気が自動排出弁から排出される機構である。このことから、製品Bの方が、排出される呼気中の二酸化炭素濃度が低い。

なお、被験者ごとの排出酸素濃度については、心拍数、血中酸素飽和度等と関係があるとはいえず、測定状況によって差異が生じた可能性もあり、原因の特定には至らなかった。

大気中の酸素濃度は20.9%であるが、酸素濃度が増加すると、酸素の支燃性が高まり、可燃物の燃焼速度が増加することが知られている。酸素濃度が30%の場合、有機物の燃焼速度が大気中の時の2倍となる例が示されている⁹⁾。そく止弁付近で最大34%の酸素濃度が検知されたことから、火源が付近に存在すると激しい燃焼をひき起こす可能性があると考えられる。

エ 面体の曇り

安静時には、A群、B群ともに、面体が曇り始める時間は、被験者によって異なった。

活動時には、A群は被験者b、c及びdが30分後、被験者a及びeが60分後の時点で曇り始める様子が観察された。製品Aは面体にワイパーが装備されているが、ワイパーにより曇りを除去した後も、10分以上経過した場合や、運動直後においては再度曇りがみられた。一方、B群では被験者iが60分後、被験者gが90分後、被験者f、h及びjが120分後に、それぞれ面体が曇る様子が観察された。製品Bには曇りを除去する機構が無く、事前に曇り止めの液体を塗布することが推奨されているが、最短で60分、最長でも120分しかその効果を得られなかった。

5 まとめ

本検証により、以下のことを確認した。

(1) 被験者の生理的変化

酸素呼吸器使用中の被験者について、耳内温、心拍数及び血中酸素飽和度からは、生理的な異常はみられなかった。

(2) 酸素呼吸器の特性

ア 酸素の圧力減少

(ア) 製品間の差異は認められなかった。

(イ) 活動時には、最短220分で使用時間の限界を迎える被験者がみられた。

イ 酸素呼吸器の温度等

(イ) 活動時において、製品Aと比較して、製品Bは吸収缶の温度が高くなる傾向がみられた。

(ロ) 使用時間が短い被験者は、吸収缶の温度が高くなる傾向がみられた。

(ハ) 冷却装置内の氷の融解状況について、製品間の差異は認められなかった。

ウ 排出酸素濃度

(ウ) 製品A、製品Bともに、活動時よりも安静時の方が、排出酸素濃度が高い傾向がみられた。

(ロ) 製品Aと比較して、製品Bは排出酸素濃度が高い傾向がみられた。

エ 面体の曇り

(ウ) ワイパーが装備された面体では、ワイパーの使用直後は面体の曇りを解消することができるが、その後10分以上経過した場合や、運動直後においては再度曇りがみられた。

(ロ) 曇りを除去する機構の無い面体では、曇り止めの液体を塗布したとしても、最長でも120分で面体に曇りがみられた。

6 おわりに

240分間使用可能とされる酸素呼吸器を検証したところ、当庁に配置されている既存の呼吸器よりも長時間活動することができることが明らかとなった。ただし、以下のことについて十分に留意する必要がある。

(1) 使用時間

ア 使用者の心肺機能等により、20分程度使用時間が短くなる場合がある。

イ 180分以上の活動では、冷却装置内の氷が融解し、吸気の温度上昇が考えられる。

ウ 曇りを除去する機構の無い面体では、曇り止めの液体を塗布したとしても、最長でも120分で面体が曇り、視界不良となる。

(2) 排出酸素濃度

ア 使用者及び製品によっては、そく止弁付近で最大34%の酸素濃度が検知される場合がある。

イ 火災や可燃性物質が付近に存在する場合、酸素呼吸器から排出された酸素が火災や可燃性物質と接触すること等により、激しい燃焼をひき起こし、活動隊に危険が及ぶ可能性がある。

[参考文献]

- 1) 田中正躬：JISハンドブック 37-2 労働安全・衛生、一般財団法人日本規格協会、pp. 381-389、2012年
- 2) 気象庁ホームページ <http://www.jma.go.jp>
- 3) 磨田裕：気道の給湿療法 呼吸療法テキスト、克誠堂出版、pp. 139-146、1992年
- 4) 山本陽太、三野正浩、高井啓安、山口至孝、下畑行盛、千葉博：消防活動における効果的な暑熱順化の方策に関する検証、消防技術安全所報 47号、pp. 45-52、2010年10月
- 5) 町田広重、伊藤昌夫、正木豊、山田羊一、小原朗敏：消防活動における熱中症予防対策の研究、消防技術安全所報 37号、pp. 110-120、2000年10月
- 6) 駒宮功顕：酸素の危険性と災害防止対策、産業安全研究所報 1961年、pp. 15-23、1961年

Study on the Compressed Oxygen Closed Circuit Self-Contained Breathing Apparatus

Yoshiyuki SATOU*, Atsushi TOKUNAGA*, Yuuichirou MACHII*,
Kenji SUZUKI*

Abstract

When disasters occur in such places as underground locations or tunnels, firefighters, while wearing respiratory protective devices, may need to prolong their operations. This study's objective was to determine the efficacy of compressed oxygen closed circuit self-contained breathing apparatus (oxygen SCBA).

The test subjects wearing oxygen SCBAs, for the stated oxygen SCBA usage duration of 240 minutes, carried out physical actions equivalent to firefighting efforts. The main results we were able to obtain are as follows:

- 1) We observed no physiological irregularities in the test subjects, but they experienced difficulty breathing due to both the rising temperature of the air inhaled and the impaired vision with visor fogging after more than 180 minutes of their activities.
- 2) Highly concentrated oxygen was detected around the cylinder valve. So, there is a risk, to firefighting members, of violent combustion with flames or flammable materials existing nearby.
- 3) Adhering to appropriate usage and safety management rules, firefighters can achieve prolonged activities with the oxygen SCBAs—not with the apparatuses currently in use.