

燃焼生成ガスによる空気呼吸器面体に与える影響について

富 永 勝 彦*
小 林 英 明**

1. はじめに

近年建物構造の高層化や深層化等に伴い空気呼吸器は、消防活動上不可欠な装備となってきた。このことは、昭和40年代以降の当庁装備工場における年度別空気ボンベ充填本数の増加から見ても明らかである。また需要の増加に伴い、当該呼吸器の修復件数も増加している。昭和53年度の当庁装備工場の統計によれば、空気呼吸器の整備件数は4200余件で、中でも面体部の修繕整備がその約24%を占めている。

現用の空気呼吸器は、元来鉱山用の保安用具として開発されたもので、熱や煙等を伴う各種燃焼生成ガスの中での使用を必ずしも前提としたものではないため、消防活動環境への適用については、安全性の面で十分に検討を加える必要があると思われる。このようなことから、今回以下の燃焼素材（杉材、ポリ塩化ビニール、ポリエチレン、ナイロン-6）を燃焼させ、発生した各種燃焼生成ガス（以下煙ともいう）が、空気呼吸器面体等の各部に与える影響を把握して空気呼吸器の安全管理上の資料を得ることを目的として、各種実験研究を実施したのでその結果を報告する。

2. 研究の概要

研究の推進に当り、煙を発生させ供試体をばく露させるための装置（耐熱耐煙試験装置）を試作し、当該装置を用いて生成ガス発生試験を行ない、生成ガス組成の分析、温度条件等を確認し、同じ試験条件において面体及び吸気管等のばく露試験を実施した。

3. 実験装置及び実験内容

(1) 耐熱耐煙試験装置

ア 装置本体

三層の構造とし外層12mm合板(図-1, 1)中層を25mmグラスウール(図-1, 2)内層を5mm石綿スレート板(図-1, 3)で構成することによって稼動時の熱損失を約10%以下に抑えた。外形寸法は900mm×900mm×900mmとし、0.73m³の内容積とした。また温度設定のためメインヒーター(図-1, 8)及びサブヒーター(図-1, 7)を設けた。

煙濃度については、自由燃焼のため炉から発生する煙は初期の段階では少なく、中期に最大となり、後期は徐々に減少することから一定濃度を保つためにセレン光電池を使用した煙濃度センサー(図-1, 9, 10)により煙濃度を監視し、所定の濃度(透過率10±5%)を越えるとレコーダー内に組み込んだ制ぎょ回路が働き、シロッコファン(図-1, 5)が作動することによって外部からの空気を導入して煙を希釈し濃度を一定に保つようにした。

装置本体内に導入される煙は、ファン(図-1, 6)により吸引され、攪拌羽根(図-1, 2)により均一な濃度とした。

イ 燃焼部

燃焼炉は、プラスチック類燃焼用(図-2)と木材燃焼用(図-3)に区別し、2基を設置した。燃焼炉は、厚さ3mmの鉄板製で半径400mm高さ700mmの円筒型である。また空気取り入れ口は、200mm×100mmとした。

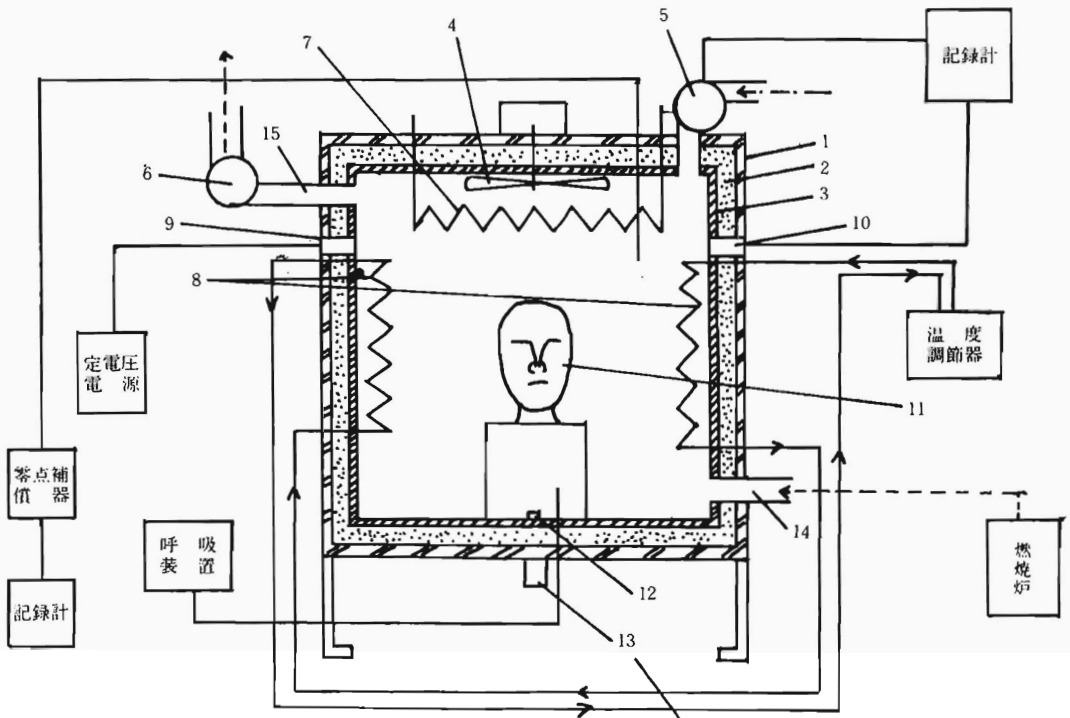
ウ 呼吸装置部

モーターの回転を変速器(図-4, 2)に伝え

* 第一研究室 ** 志村消防署

所定の回転数に調整してストロークシャフト(図-4, 3)をスライドさせ、フートポンプ(図-4, 4)を圧縮する方法を採用したもので、回転盤上のa点を回転軸の中心から調整することにより、ストロークシャフトのスライド幅を自由

に変えることができるようにし、フートポンプを最大に圧縮することによって最大2000mlの空気を人頭ダミー(図-1, 11)に送気する能力を持たせたものとした。



- 1 合板 (15mm)
- 2 グラスウール (25mm)
- 3 スレート板 (5mm)
- 4 攪拌羽根
- 5 煙濃度制ぎょファン
- 6 煙排出ファン
- 7 ストレートフィンヒーター (1KW)
- 8 熱交換器
- 9 煙濃度計投光部
- 10 " 受光部 (セレン光電池)
- 11 人頭ダミー
- 12 呼気管接続口
- 13 吸気弁
- 14 煙導入口
- 15 煙排出口

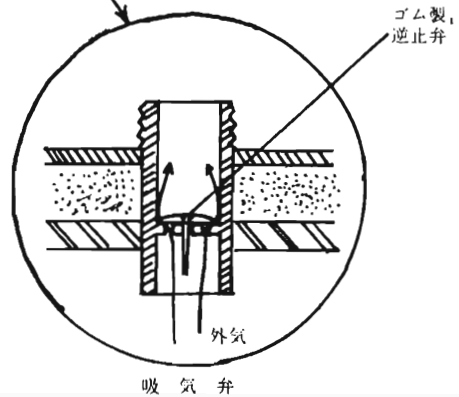


図-1 耐熱耐煙試験装置

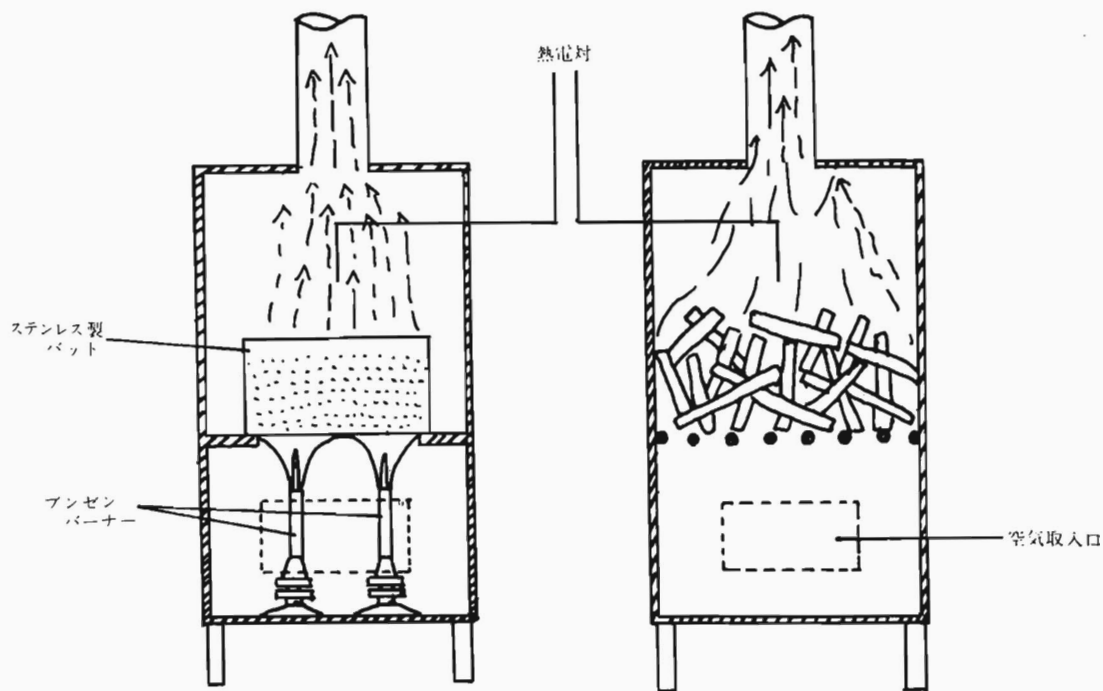


図-2 プラスチック燃焼用炉

図-3 木材燃焼用炉

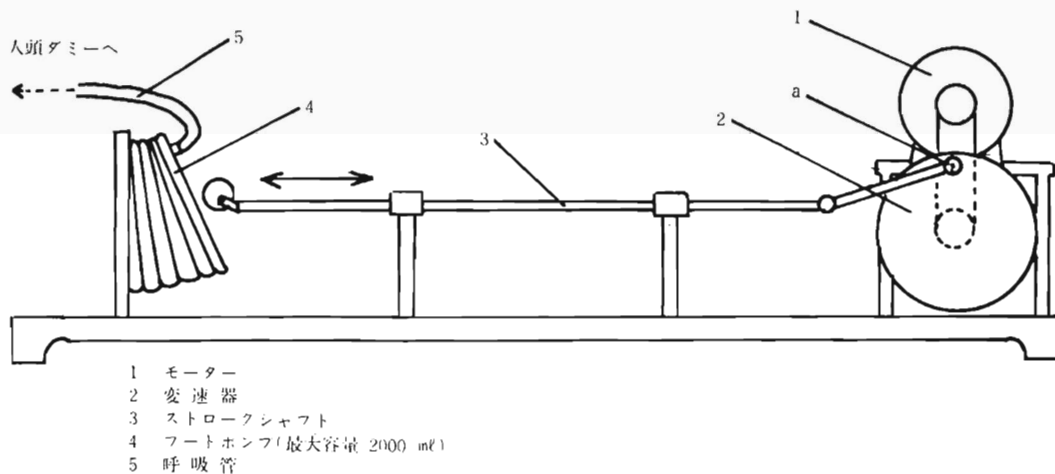


図-4 呼吸装置部

(2) 燃焼生成ガスの組成分析及び温度測定

組成の分析に当たり、CO、CO₂についてはコンパクト赤外線ガス分析計により測定し、他の成分についてはドレーゲルガス検知管により、10分毎又は20分間隔で測定した。

燃焼温度は、熱電対により測定しレコーダーにより記録した。

(3) 面体及び吸気管のばく露試験

資料は、燃焼素材(杉材、ポリ塩化ビニール、

ポリエチレン、ナイロン-6) 毎にK-III型面体1、吸気管及び締めヒモと同質のタンベル3号形テストピース各20個をサンプル1群として計4群を用意した。

試験は、1群ごとに耐熱耐煙試験装置内に入れ、60℃±5℃で1時間ばく露させた後2~3日室内に放置し、さらに1時間ばく露させるというパターンを繰り返して行ない、5時間、10時間、15時間20時間にわたる各試験を行なった。

(4) ばく露後の供試資料の性能及び物性試験

ア 通気抵抗試験

JIST8155-6-3-5(1)により実施した。
 空気量を30ℓ/minとし、呼気弁内外の圧力差を
 マーメーターにより測定した。

イ 呼気弁の作動気密試験

JIST8155-5-3により実施した。

ウ 吸気管及び締めヒモの引張強度試験

JISK6301(加硫ゴム物理試験)の3により実
 施した。

エ 膨潤性試験

JISK6301-12により実施した。

浸せき温度は、23℃±2℃、浸せき時間は168
 時間とした。

4. 実験及び実験結果

(1) 燃焼生成ガス組成の分析

各燃焼素材の燃焼量は、次のとおりとした。杉

材については、図-3の燃焼炉の中へ3kg入れ、
 30秒間アンゼンバーナーで予備燃焼させたのち自
 由燃焼させた。またポリ塩化ビニール、ポリエチ
 レン、ナイロン-6については、SUS-27(100mm
 ×200mm×200mm)製バットに1.5kg入れ、図-2の
 燃焼炉の下部からアンゼンバーナー2基で燃焼が
 終了するまで加熱した。この燃焼生成ガスを図-
 1の装置内に導入したのち、燃焼生成ガスの成分
 を10分毎に測定した。

測定器具は、CO、CO₂ガスについてはコンパクト
 赤外線ガス分析計ZAP(富士電機社製)を使用
 し、その他のガスは、ドレーゲルガス検知管を使
 用した。なおガス採取には、サンプリングバッグ
 を用い、採取ガスの透過、分解、吸着等を考慮し、
 短時間(サンプリング後2~3分間)での分析測
 定を行なった。

発煙20分後及び40分後のガス組成の分析結果を
 表-1及び表-2に示した。

表-1 各種燃焼素材の煙組成

燃焼素材	煙の組成	CO	CO ₂	O ₂	HCl	NH ₃	C ₂ H ₄	NO ₂	HCHO	HCN	温度	備考
杉材		0.21%	1.4%	18.0%	—	—	100ppm	—	1.0ppm	—	580	発煙後 20分
PVC		0.02	0.14	8.0	475ppm	—	10	—	—	—	330	
PE		0.02	0.75	14.5	—	—	0	—	1.5	—	380	
NY-6		0	0.3	6.5	—	0	—	4ppm	—	6ppm	360	

表-2 各種燃焼素材の煙組成

燃焼素材	煙の組成	CO	CO ₂	O ₂	HCl	NH ₃	C ₂ H ₄	NO ₂	HCHO	HCN	温度	備考
杉材		0.19%	0.45%	18.0%	—	—	75ppm	—	1.0ppm	—	470	発煙後 40分
PVC		0.02	0.12	7.5	120ppm	—	7.5	—	—	—	330	
PE		0.01	0.25	15.5	—	—	25	—	*	—	410	
NY-6		0	0.3	7.0	—	0	—	0.7ppm	—	30ppm	410	

以上の結果をみると、杉材の燃焼の場合CO₂の
 濃度は、高温時に高くなっており、ホルムアルデ
 ヒドは、600~700℃で発生が認めれ、540~590℃
 付近ではアセトアルデヒドが検出された。

ポリ塩化ビニールについては、330℃付近で塩化
 水素が多量に発生しており、この温度をピークと
 する上下の温度範囲において発生量が減少してい
 た。

ポリエチレンについては、400~500℃付近でエ
 チレン及びホルムアルデヒドの発生がみられた。

ナイロン-6については、400~500℃でシアン
 化水素が多量に発生した。また他の燃焼素材と比

較して酸素濃度が極めて低いことが認められた。

煙の発煙量については、杉材<ポリエチレン<
 ポリ塩化ビニール<ナイロン-6の順であった。

(2) 面体及び吸気管のばく露試験結果

ア 面体外観の所見

写真1~4でもわかるように、面体全体にカ
 ーボンが付着しており、各燃焼素材によるばく
 露時間の長短による差異については、視認によ
 る顕著な変化は認められなかった。

写真1~4は、各燃焼素材に20時間ばく露し
 たときのものである。

イ 面体金具類の状況

面体に使用されている金具は、図5に示す位置に全部で9ヶ所使われている。材質は、a,b,i.がステンレス製、たがアルミダイキャスト製、d,gがアルミ合金製、c,e,f.が鉄製である。

各部とも煙の種別を問わず7時間ばく露後に腐食が始まっている。



写真 1

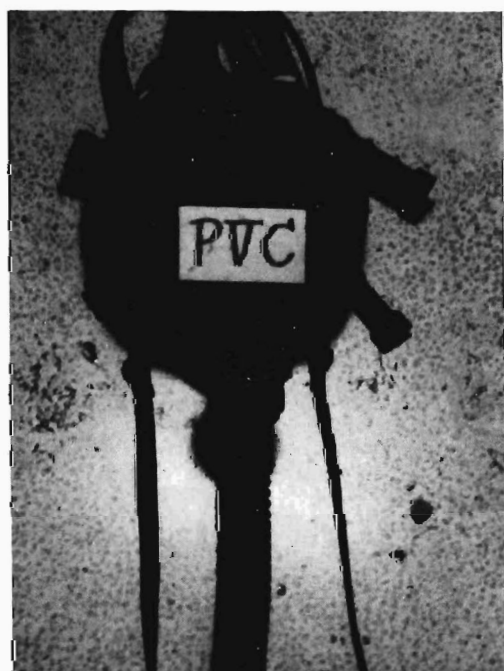


写真 2

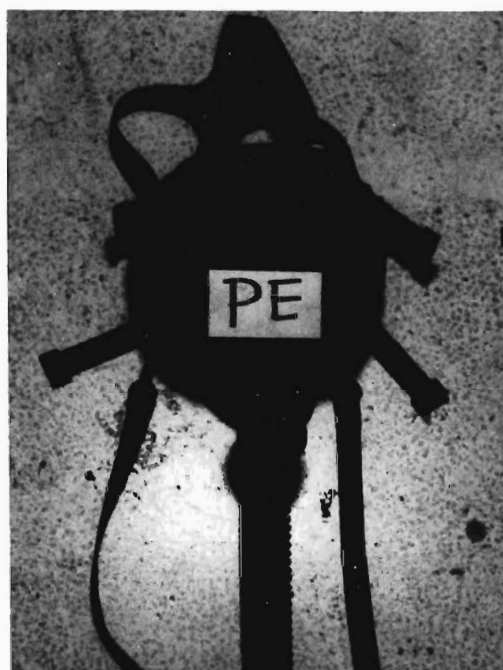


写真 3



写真 4

20時間ばく露後の所見では、相対的にみてポリ塩化ビニールの煙にばく露させた面体の金属部分の腐食程度が特に著るしく、以下杉材、ポリエチレン、ナイロン-6の順であった。また最も腐食の激しい部分は、図-5のCの部分で次にb、f、h、iの部分であった。写真5-8は、

各燃焼素材に20時間ばく露させた時の腐食度の大きい部分である。

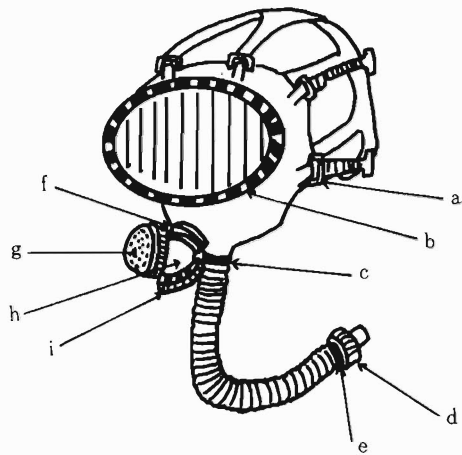


図-5 面体の金属使用部



写真-5 杉材に20時間ばく露

(3) ばく露後の面体及び吸気管の各種試験結果

ア 呼気弁の通気抵抗及び作動気密試験

表-3-1及び表-3-2に試験結果を示した。本結果では、呼気弁に対する熱及び煙等の影響は認められなかった。

イ 吸気管及び締めヒモの引張強伸度試験

吸気管及び締めヒモのダンベルによる引張強伸度試験の結果は、表-4-2及び表-4-2及び図-6、図-7に示すとおりである。



写真-6 PVCに20時間ばく露



写真-7 PEに20時間ばく露



写真-8 NY-6に20時間ばく霧

表-3-1 通気抵抗値 (mmH₂O)

ばく霧時間 燃焼素材	0	5	10	15	20
Blank	3.6	3.9	4.0	3.7	4.2
杉	4.2	4.0	3.7	3.7	3.7
PVC	2.7	2.6	2.6	2.4	2.2
REP	3.3	3.1	2.2	3.4	3.3
NY	3.0	2.7	2.9	2.9	2.8

表-3-2 作動気密性

燃焼素材	作動気密時間	備 考
Blank	180秒以上	Blankを除き20時間、煙にはく霧した 呼吸弁をサンプルとした
杉	180 "	
PVC	180 "	
PE	180 "	
NY	180 "	

吸気管の引張強度は、相対的に見て10時間まで低下し、15時間では増加の傾向を示し、その後約1/2程度まで低下した。ただナイロンの煙では、5時間から15時間まで差はあまり見られなかった。引張伸度も引張強度と類似した傾向が見られた。ナイロンの煙では、5時間から15時間まで差はあまり見られなかった。締めヒモの引張

強度は、15時間まではほぼ横ばいの傾向を示し、その後約1/2程度まで低下した。ただ杉材の煙では、5時間で770kgf/cm²に増加し、10時間で460kgf/cm²に低下した。引張伸度は、10時間まで若干増加の傾向にあり、その後若干低下した。しかし始めと終りの値を見ると若干増加している。

表-4-1 ばく霧時間と引張強伸度(吸気管)

ばく霧時間 燃焼素材	0	5	10	15	20
杉 材		144	133	167	93
		770	650	670	550
PVC	202	163	150	167	100
		730	700	690	570
P E	810	168	131	170	107
		750	600	680	600
N V		168	170	169	105
		780	550	705	600

表-4-2 ばく霧時間と引張強伸度(締めヒモ)

ばく霧時間 燃焼素材	0	5	10	15	20
杉 材		197	205	201	194
		770	460	480	110
PVC	188	203	204	186	192
		510	450	440	120
P E	480	212	208	187	197
		460	480	440	120
N Y		202	201	196	190
		490	530	420	120

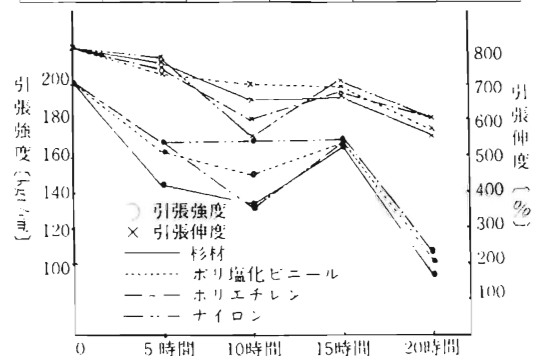


図-6 ばく霧時間と引張強伸度(吸気管)

ウ 吸気管及び締めヒモの膨潤性試験

高分子化合物の特徴は、適当な溶剤につけた場合溶剤を吸収して膨潤することである。

この膨潤度からゴムの加熱による架橋、一般劣化による架橋変化を確認することができる。一般に劣化が進むにつれて膨潤度は増加し、架橋数が減少し、架橋数が減少することによって引張強伸度が低下すると言われている。膨潤度の値からP.T Flouryの式に当てはめることによってゴムの単位重さ中の鎖の数が求められる。

本実験では、溶剤としてトルエンを使用した。膨潤度の測定結果は、表-5及び図-8に示したとおりである。

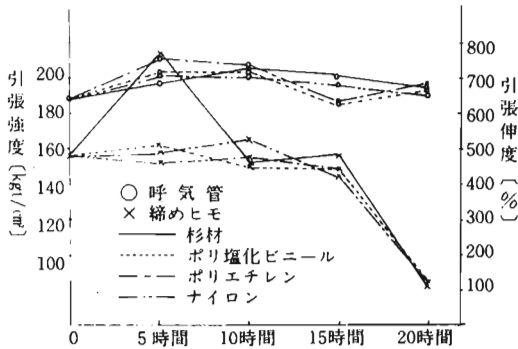


図-7 ばく露時間と引張強伸度(締めヒモ)

表-5 膨 油 度

(吸気管)		%		
ばく露時間	燃焼素材	0	5	20
杉材	杉材	421.8	418.1	401.6
ポリ塩化ビニール	杉材	421.8	417.8	413.6
ポリエチレン	杉材	421.8	413.7	410.9
ナイロン	杉材	421.8	420.4	408.7

(締めヒモ)		%		
ばく露時間	燃焼素材	0	5	20
杉材	杉材	144.7	192.78	233.3
ポリ塩化ビニール	杉材	144.7	238.5	207.7
ポリエチレン	杉材	144.7	195.9	192.0
ナイロン	杉材	144.7	196.6	193.1

図-8で、吸気管の膨潤度はばく露時間の長いほど低下しており、締めヒモは燃焼素材の種別にかかわらず、5時間まで増加しナイロンとポリエチレンの煙では、ほぼ横ばいであった。また杉材の煙では、増加を続け、ポリ塩化ビニールの煙では、逆に低下した。

Flouryの式によるポリマー単位重さ中の鎖数

膨潤度の結果から、P.T.Flouryの式を用いてポリマー(ゴム)の単位重さ中の鎖数を求めた。

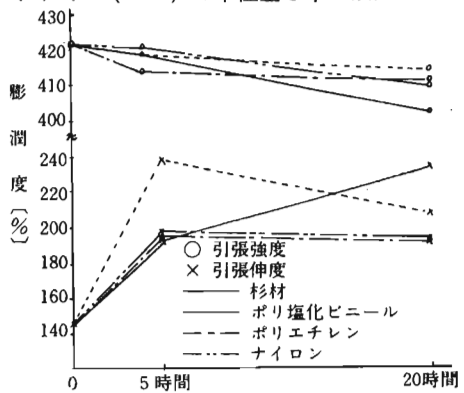


図-8 時間経過に伴う膨潤度

Flouryの式

$$v = -\frac{\ln(1-v) + v + \mu v^2}{V\rho(v^{1/3} - v^{1/2})} + \frac{2}{M}$$

v : ポリマーの単位重さ中の鎖数 (mal/g)

$v^{1/2}$: ポリマーの単位重さ中の架橋数

ρ : ポリマーの密度

V : 溶剤のモル容積 (co/mol)

M : ポリマーの平均分子量

μ : ポリマーと溶剤の相互作用係数

v : 膨油試料中のポリマー分の容積分率

$$v = \frac{1}{1 + \left(\frac{w}{w_0} - 1\right) \frac{\rho t}{\rho_s \gamma}}$$

w_0 : 膨油前の試料重量

w : 膨油後の試料重量

ρ_s : 溶剤の密度

ρt : 試料の密度

γ : 試料中のポリマー分の重量分率

計算結果を表-6及び図-9、図-10に示した。

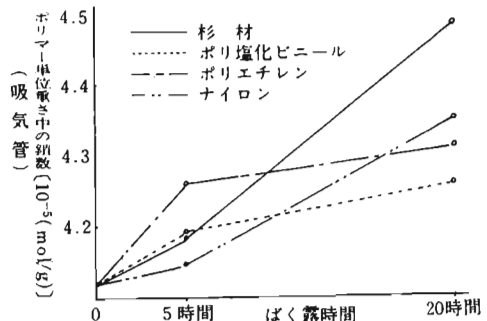


図-9 ポリマー単位重さ中の鎖数

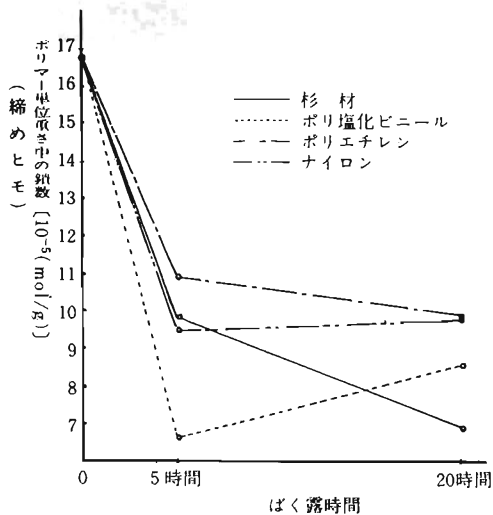


図-10 ポリマー単位重さ中の鎖数

表-6 ポリマー単位重さ中の鎖数

(吸気管) $\times 10^{-5}$ (mol/g)

ばく露時間	0	5	20
杉材	4.1228	4.1859	4.4853
ポリ塩化ビニール	"	4.1929	4.2626
ポリエチレン	"	4.2626	4.3143
ナイロン	"	4.1479	4.3533

(締めヒモ) $\times 10^{-5}$ (mol/g)

ばく露時間	0	5	20
杉材	16.711	9.792	6.884
ポリ塩化ビニール	"	6.609	8.528
ポリエチレン	"	10.878	9.860
ナイロン	"	9.437	9.758

吸気管は、ばく露時間とともにポリマー単位重さ中の鎖数は増加している。一方締めヒモは、5時間でポリ塩化ビニールの煙で約 $\frac{1}{2}$ 程度、その他の煙でも約 $\frac{1}{3}$ 程度まで減少した。杉材の煙はさらに減少し20時間で約 $\frac{1}{3}$ 程度まで減少した。またナイロン、ポリ塩化ビニールの煙では、増加の傾向を示し、ポリエチレンの煙では、若干減少した。

5. 考 察

- (1) 実験3-(3)において写真-5, 6, 7, 8の結果を得たが、最も激しい腐食を示したのがポリ塩化ビニールの煙にばく露させた面体(写真-6)であった。これは、ポリ塩化ビニールの脱

塩化水素反応により塩化水素ガスが多量に発生したため酸化作用が著しく促進されたものと思われる。また予備実験において各種燃焼素材の煙にそれぞれ8時間ずつ計32時間ばく露した時図-10,eの締めバンドが腐食のため、折損した例が見られた。

- (2) 実験3-(4)アイにおいて熱的に弱いと思われた呼気弁の通気抵抗試験及び作動気密試験で、熱及び煙に対する影響が認められなかったことは、きびしいばく露条件下にもかかわらず、呼気弁が絶えず呼気(本実験では、呼気装置から送气される空気)によって冷やされ、呼気弁周辺の煙も呼気によって希釈されると考えられる複合した効果によって劣化の進行を軟わらせているものと思われる。しかし、ポリ塩化ビニールの煙に20時間ばく露した呼気弁の周辺に若干の亀裂を生じたことは、注意すべき点であろう。
- (3) 実験3-(4)ウにおける引張強伸度試験は、引張試験機が繊維用の試験機を用いたため、JIS規格で定める引張速度 500 ± 25 mm/minが得られず、5~50mm/minと極めて遅い速度で実施したため、この速度差が測定結果に少なからず影響を及ぼしていることと思われる。吸気管及び締めヒモのゴムの成分は別表-1のとおりである。

別表-1 ゴムの組成

ゴム種別	吸気管用ゴム	締めヒモ用ゴム
組成		
主体ゴム	※天然ゴム(48%) SMR-5L	"(49%) SMR-5L
ブレンドゴム	※エチレンプロピレンゴム EPT (15%)	なし
添加剤及び充填剤	カーボンブラック 白 堊 華 亜 鉛 華 ステアリン酸 加 硫 促 進 剤 老 化 防 止 剤 耐 オ ゾ ン 剤	37% 左同51%

※平均分子量 500,000 ※※平均分子量 350,000

別表-1から吸気管用ゴムと締めヒモ用ゴムとでは、ゴムの含有成分が異なっている。この結果吸気管の引張強度、引張伸度とも初期の値より20時間ばく露後の値が低下しているのに対して、締めヒモの引張強度が若干増加しているという差異になったものと思われる。しか

し締めヒモも引張伸度の点で伸びにくくなっていることが言えると思われる。さらに膨潤度とP.T.Flouryの式により、吸気管の膨潤度の低いことは、Flouryの式のポリマー単位重さ中の鎖数の増加として表われている。また締めヒモの膨潤度の高いことは、Flouryの式の鎖数の低下に表われている。しかし、引張強伸度の結果と膨油度の結果は、逆になっている。膨油度の結果の信頼性から言っても、締めヒモの方が吸気管より熱及び煙に対す影響を受けやすいということが言えるであろう。

- (4) 今回各燃焼素材個々の熱及び燃焼生成ガスが面体等各部位に与える影響について研究したが実際の災害現場や耐熱、耐煙訓練等においては、これらの熱及び燃焼生成ガスが複合的に作用し、また本実験以外の燃焼生成ガスが共存することによる悪影響も予想されることから、災害現場等で使用した面体は、帰署後は速やかに面体及びレンズ等を布でふしだけでなく、場合により水洗（よごれ等が取れない場合は、中性洗剤を若干使用）する必要があると思われる。特に金属部分は腐食度が大きいため、念入りに整備する必要がある。乾燥させる場合でも直射日光はさけて行なう。さらに日常の保管についても温度の上昇するような場所及び、日光が直接当たるような場所を避けて保管するように留意すべきであろう。

6. おわりに

本研究は、実験的に消防活動環境を設定し、面体及び吸気管を熱及び煙の共存する中にばく露しその影響を調べたわけであるが、この条件設定は、

かなりきびしいものと思われる。したがって結果を即現場に配置されている呼吸器具にストレートに当てはめることは、困難でもあり、また妥当性についても十分に検討すべきと思われるが、極めて悪い環境状態を想定すれば、今回の結果のようなこともあり得ることと推定される。

今後は、呼気弁の劣化と機能性との関連についての検討をはじめ、調整器の中に組み込んでいるダイヤフラムに熱及び煙が与える影響等も含めて研究を進めていく考えである。

7. 参考文献

1. 高分子材料（試料と物性）：戸原春彦
2. 化学工学便覧：化学工学協会編
3. 物理学ハンドブック：戸田
4. 建築学大系22（室内環境計画）
5. プラスチックの燃焼性：喜多信之
6. 消防科学研究所報第13号、14号
7. Combustion Products from the incineration of Plastics 1973: E.A.Boellner
8. 木材化学（上・下）：石田
9. 有機工業化学：八浜
10. 高分子の劣化：稲葉
11. 高分子の概論：M.Gordon
12. 有機化学ハンドブック：有機合成化学協会編
13. 応用ゴム物性論16講：金子
14. ゴムの疲労劣化文献集：日本ゴム協会編
15. 化学大辞典：化学大辞典編集委員会編
16. JISハンドブック1978ブム：日本規格協会編
17. JISハンドブック1979安全管理：日本規格協会編
18. 化学便覧（応用編）：日本化学会編