

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）

（総合）研究報告書

受動喫煙を防止するための効果的な呼吸用保護具のフィルターの検討

研究代表者 保利 一 （産業医科大学産業保健学部 教授）

研究要旨：清掃作業のため喫煙室等に入って働く作業員や喫煙可能な飲食店等で働く作業員の受動喫煙を防止する方法としては、作業環境管理上の対策が困難であることから、呼吸保護具の活用が有効と考えられる。しかしながら、現在使用されている呼吸用保護具がたばこ煙に有効であるか否かは検討されていない。そこで、防じんマスク、防毒マスク、簡易マスクおよび新たに開発した吸着材のたばこ煙に対する捕集特性を調べた。その結果、粉じんについては、現在の区分 **RL2**、**RS2** 以上の防じんマスク用フィルタであれば、**98%**以上捕集できることが認められた。ただし、臭気については、防じんマスク用フィルタはほとんど効果がないこと、また、防毒マスク吸収缶でも **50%**程度以下しか除去することができないことがわかった。ガス状物質については、防じんマスクではほとんど捕集できないが、活性炭入り防じんマスクは若干ではあるが捕集することが認められた。一方、有機ガス用防毒マスク吸収缶は有機物質をかなり捕集できること、また活性炭とセピオライトを **7:3** で配合した両親媒性吸着材およびホルムアルデヒド用吸収缶では、アルデヒド類やアセトンをほぼ捕集できることが示された。また、活性炭入り防じんマスクは低沸点の **VOC** はほとんど除去できなかったが、ベンゾ(a)ピレンやニコチンは **98%**以上捕集できることが示された。労働衛生用ではない簡易マスクについては、捕集効果はさまざまであったが、活性炭入りのもののなかには、**VOC** をある程度捕集できるものがあることがわかった。

研究分担者 石田尾 徹
（産業医科大学産業保健学部 講師）

研究協力者 野口 真
（株式会社 重松製作所）

研究分担者 樋上 光雄
（産業医科大学産業保健学部 助教）

研究協力者 関口 裕亮
（株式会社 重松製作所）

研究分担者 山本 忍
（産業医科大学産業保健学部 助教）

A. 研究目的

研究協力者 山田 比路史
（株式会社 重松製作所）

平成 27 年の労働安全衛生法の改正で受動喫煙防止措置が努力義務化されたことに

より、事業場では建物内を全面禁煙にするか、または喫煙室等の設置を徹底することが求められるようになった。また、平成30年には健康増進法が改正され、多数の者が利用する施設等の利用者に対しては、原則として喫煙を禁止することとなった。ただし、経営規模が小さい既存の飲食店等については経過措置として当面は猶予が認められている。

喫煙対策としては、建物内で喫煙を完全に禁止する全面禁煙が究極の対策であり、最も受動喫煙防止の効果は高いが、日本たばこ産業が平成28年度まで実施していた「全国たばこ喫煙者率調査」[1]によると、男性の喫煙率は近年下がっているものの、2018年度でもまだ約28%あり、全面禁煙は必ずしも容易ではない事業場が多いことが考えられる。次善の策は、喫煙室等を設置し、空間分煙を実施することである。この場合、非喫煙者のたばこ煙へのばく露は避けられるものの、清掃のため喫煙室に入る作業員はたばこ煙へのばく露が避けられない。また、小規模の飲食店等では、上にも述べたように当面喫煙を可とすることになっているため、このような職場で働く従業員も受動喫煙は避けられない。このように喫煙場所が存在する職場では、非喫煙者も受動喫煙のリスクが常に存在することになる。

このような作業員のたばこ煙へのばく露を低減する方法としては、さまざま考えられるが、喫煙室は部屋全体が発生源と考えられるため、換気等で濃度を低減することはできるものの、作業環境管理上の対策のみで作業員の受動喫煙を防止することは困難である。したがって、作業環境管理対策に加え、作業管理対策として作業員に呼吸用

保護具を着用させることが現実的と考えられる。現在、作業現場で使用されているろ過式の呼吸用保護具には、大きくわけて粉じん用の防じんマスクとガス・蒸気用の防毒マスクがある。防毒マスクには、さらに有機ガス用、アンモニアガス用、酸性ガス用など対象とするガス・蒸気に対応した吸収缶があり、対象物質に合ったものを使用しなければ期待される防護効果は得られない。指定作業場等、有害物を取り扱う労働現場では、あらかじめ使用する物質が決まっているため、マスクの選択は比較的容易であるが、たばこの煙にはガス状、粒子状合わせて数千種類もの化学物質が含まれており[2]、物理・化学的性質もさまざまであるため、防じんフィルター（以下ではフィルターをフィルタと表記する）や吸収缶がこれらを十分に捕集できるか否かの検討はなされておらず、その効果も不明である。

そこで本研究は、既存の呼吸用保護具に用いられている防じんマスク用のフィルタ（以下、防じんフィルタと表記する）あるいは防毒マスク吸収缶の吸収・吸着材、さらに、飲食店等で働く作業員の保護の観点から、その他の簡易マスクや捕集材等についても、たばこ煙に対してどのような特性を有しているのかを把握し、たばこ煙ばく露の恐れがある作業場において作業員を守るのに適したフィルタを提案することを目的とした。

B. 研究方法

1. 文献調査

呼吸用保護具の防護性能を検討するにあたり、まず、特に重点的に低減する必要のある物質を選定することが重要である。たば

こ煙の成分については、これまでも数多くの報告がある。そこで、たばこ煙中の化学物質の種類と濃度、また、化学物質と生体影響に関して文献調査を実施し、その結果に基づき、本研究の対象とする化学物質を決定することとした。

2. 実験

たばこ煙は、粒子状物質とガス状物質の混合物である。粒子状物質については防じんフィルタ、ガス状物質については防毒マスク用吸収缶および本研究室で開発した活性炭とセピオライトを7:3で混合し成形した両親媒性吸着材を用いて試験を行った。また、飲食店等において接客する労働者を想定し、労働衛生用ではない市販の簡易マスクについても捕集特性の検討を行った。また、たばこ煙は粉じんやガスに加えて独特の臭気があるため、臭気の除去についても検討を行うこととした。

2.1 粒子状物質の捕集試験

1) たばこ

たばこは、わが国で売り上げランキングの上位3銘柄（セブンスター（日本たばこ産業）、メビウス（日本たばこ産業）、マールボロ（フィリップ・モリス））を使用して試験を行った。ただし、いずれの粒径分布もほぼ同じであったため、その後の実験はメビウスのみで実施した。

2) 試験用フィルタ

平成30年度の試験に使用した防じんマスク（重松製作所）を表1に示す。表中のNo.1~4の防じんフィルタは、取り替え式防じんマスク用でメカニカルフィルタであり、

No.5の防じんフィルタは使い捨て式防じんマスクに用いられている静電ろ過材である。

令和元年度は、表2に示すフィルタ及び吸収缶を用いて、粒子除去能力および2.2で述べる臭気除去能力について検討した。

3) 装置および方法

試験装置の概略を図1に示す。約68Lの引き出しタイプの衣装ケースを利用したチャンバーの側面にたばこをセットし、吸引ポンプ（MP-Σ30またはPMP-001、柴田科学）を用いて外部から空気を吸引および吐出することにより呼吸を模擬し、主流煙と副流煙を発生させた。吸入した主流煙はポンプを介してチャンバー内に戻し、チャンバー内に主流煙+副流煙の環境を作った。なお、この装置は、発生部の構造を変更することにより、主流煙、副流煙のみをチャンバーに導入することもできる。試験時間は実際の作業を想定して20分とし、たばこは5分毎に新しいものに交換した。

チャンバー内の空気をデジタル粉じん計（AP-632FM、AP-632FH、柴田科学）に通じ、各試料前後の粉じん計の指示値から、1分毎の捕集効率を算出した。試験流量は40L/minとした。また、これと並行して走査型電気移動度粒径測定装置（Scanning Mobility Particle Sizer, (SMPS), SMPS3936, TSI）を用いてたばこ煙の粒径分布を測定した。

2.2 臭気測定試験

表1に示すフィルタについて、図1の試験装置を用い、実験開始後1, 5, 10, 20分後に、チャンバー内およびフィルタ通過後の臭気をニオイセンサ（XP-329RIII、新コスモス電機）で測定した。また、表2に示すフィルタ

および吸収缶についても、フィルタ^{a)}を用いて 30 秒間隔で経時的に測定した。または吸収缶通過後の空気をニオイセンサ

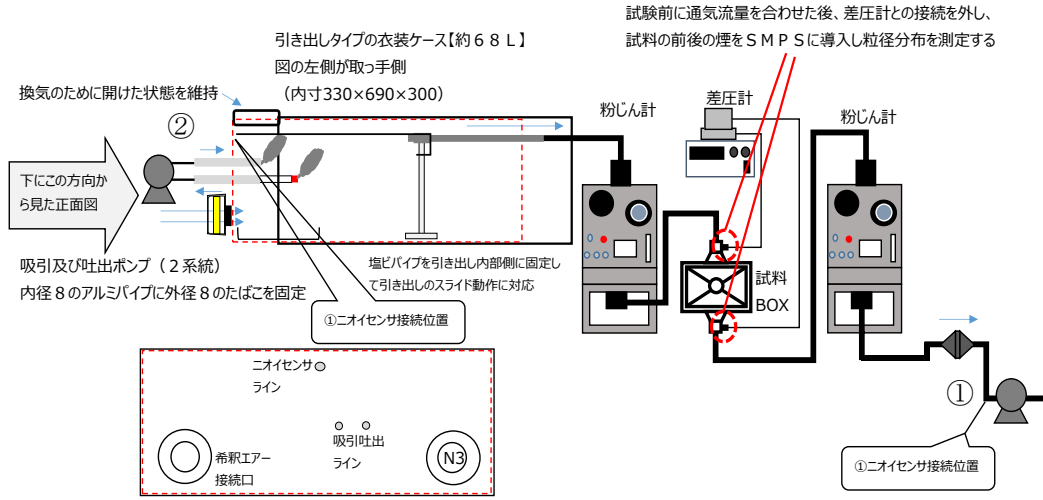


図1 粒子状物質および臭気測定用実験装置の概略

表1 粒子状物質の捕集試験に使用した防じんフィルタの種類

No.	試料	国検区分	ろ過材取り付け数	備考
1	TW08SFX3	RL3 (≥99.9%)	2	
2	TW01SX2	RL2 (≥95.0%)	1	ACF ^{a)} 入り
3	TW01ST2	RL2 (≥95.0%)	1	ACF ^{a)} 入り
4	TW01SX1	RL1 (≥80.0%)	1	
5	DD02-S2-2K	DS2 (≥95.0%)	—	使い捨て

注^{a)} 活性炭素繊維

表2 粉じんおよび臭気試験に使用したフィルタおよび吸収缶の種類

名称	種類	粒子除去能力の有無	臭気除去能力 ^{a)} の有無
DD12-S1-1	使い捨て式	有り	×
ACF入りDD12A-S1-1	防じんマスク	有り	△
ACF無しフィルタ(PL1)	ろ過材	有り	×
T2		有り	△
T/OV		有機ガス用	無し ○
T/FA	吸収缶	ホルムアルデヒド用	無し ○
CA-ABEK1		複合ガス用	無し ○
CA-V3/OV	フィルタ付き吸収缶	有機ガス用	有り ○

注^{a)} ○は臭気除去能力を持つことを示す。
△は○に劣るが臭気除去能力を持つことを示す。
×は臭気除去能力を持たないことを示す。

2.2 ガス状物質の捕集試験

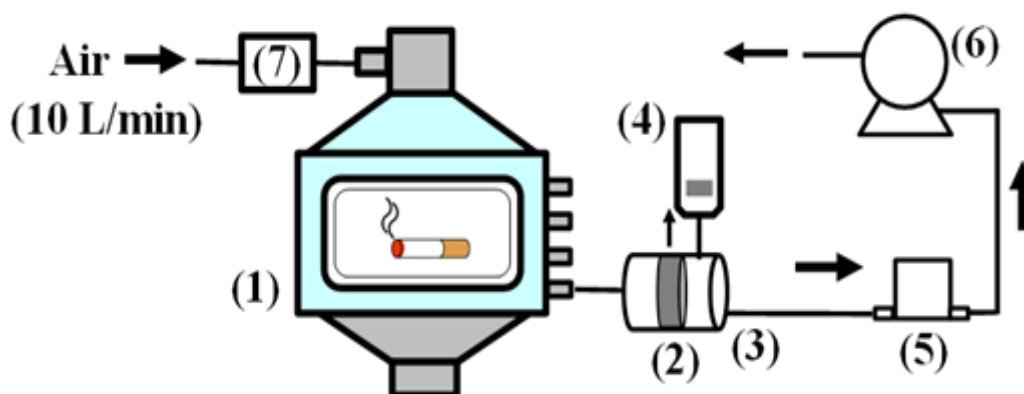
試験装置の概略を図2に示す。装置は、たばこ煙を発生させるステンレス製のチャンバー(1)、煙を捕集する試験フィルタ部(2)、およびガス検出部(リアルタイムモニタ)(4)から構成されている。

チャンバー(1)内で発生させたたばこ煙を、フィルタ(7)を通した空気と混合、希釈したのち試験用吸着フィルタ(2)に通じ、下流側の空気をリアルタイムモニタ(4)で計測した。一部の試験においては、リアルタイムモニタによる測定に加えて捕集材の入口および出口の空気をサンプリングし、高速液体クロマトグラフ(HPLC)およびガスクロマトグラフ質量分析計(GC/MS)による機器分析を行った。HPLCによる分析対象物質は、アルデヒドおよびケトン類、GC/MSの分析対象物質は、先行研究[3]においてたばこ煙に多く含まれていることが示されている5種類

のVOC(1,3-ブタジエン、イソプレン、アクリロニトリル、ベンゼンおよびトルエン)と、ベンゾ[a]ピレンおよびニコチンとした。

リアルタイムモニタには、光イオン化検出器を有するPID式VOC濃度計(TIGER, 理研計器)および個人用PIDモニタ(CUB, 理研計器)を用いた。それぞれの写真を図3に示す。TIGERは、吸引ポンプが内蔵されているため、図2に示す装置の(4)の位置に置いて測定したが、CUBは内蔵ポンプを有していないので空気を吸引できず、(4)の位置では測定することができない。このため、図2の固定ホルダー(3)とマスフローコントローラー(5)の間の流路にCUBを入れた測定用セルを挿入し、そこを通過する空気中のVOCを測定するようにした。

ガス状物質の捕集試験に用いた吸収缶(捕集材)と実験条件を表3に、また、写真を図4に示す。



- (1)ステンレス製チャンバー (2)捕集材 (3)固定ホルダー
(4)リアルタイムモニタ (5)マスフローコントローラ
(6)ポンプ (7)活性炭およびシリカゲル

図2 ガス状物質測定用実験装置の概略



図3 測定に用いたリアルタイムモニタ

表3 ガス状物質の捕集試験で用いた捕集材と実験条件

捕集材	リアルタイムモニタ		機器分析	
	CUB (10.6 eV)	TIGER (11.7 eV)	HPLC	GC/ MS
防臭用マスク(マスキーMD、興研)		10 L/min		
防じんマスク(DF620、SANKO)	3 L/min			
活性炭入り防じんマスク(DF640、SANKO)	3 L/min			
ACF入り防じんマスク(DD12A-S1-1、重松製作所)		10 L/min		○
活性炭/セピオライト吸着剤(試作品)	10 L/min	10 L/min	○	
有機ガス用吸収缶(3001 J-55、3M)	3, 10 L/min			
有機ガス用吸収缶(CA-104N II/OV、重松製作所)		10 L/min		
ホルムアルデヒド用吸収缶(CA-104N II/FA2、重松製作所)		10 L/min	○	
ホルムアルデヒド用吸収缶(CA-104N II/FA2、重松製作所) +防じんフィルター(L2B、重松製作所)		10 L/min		○

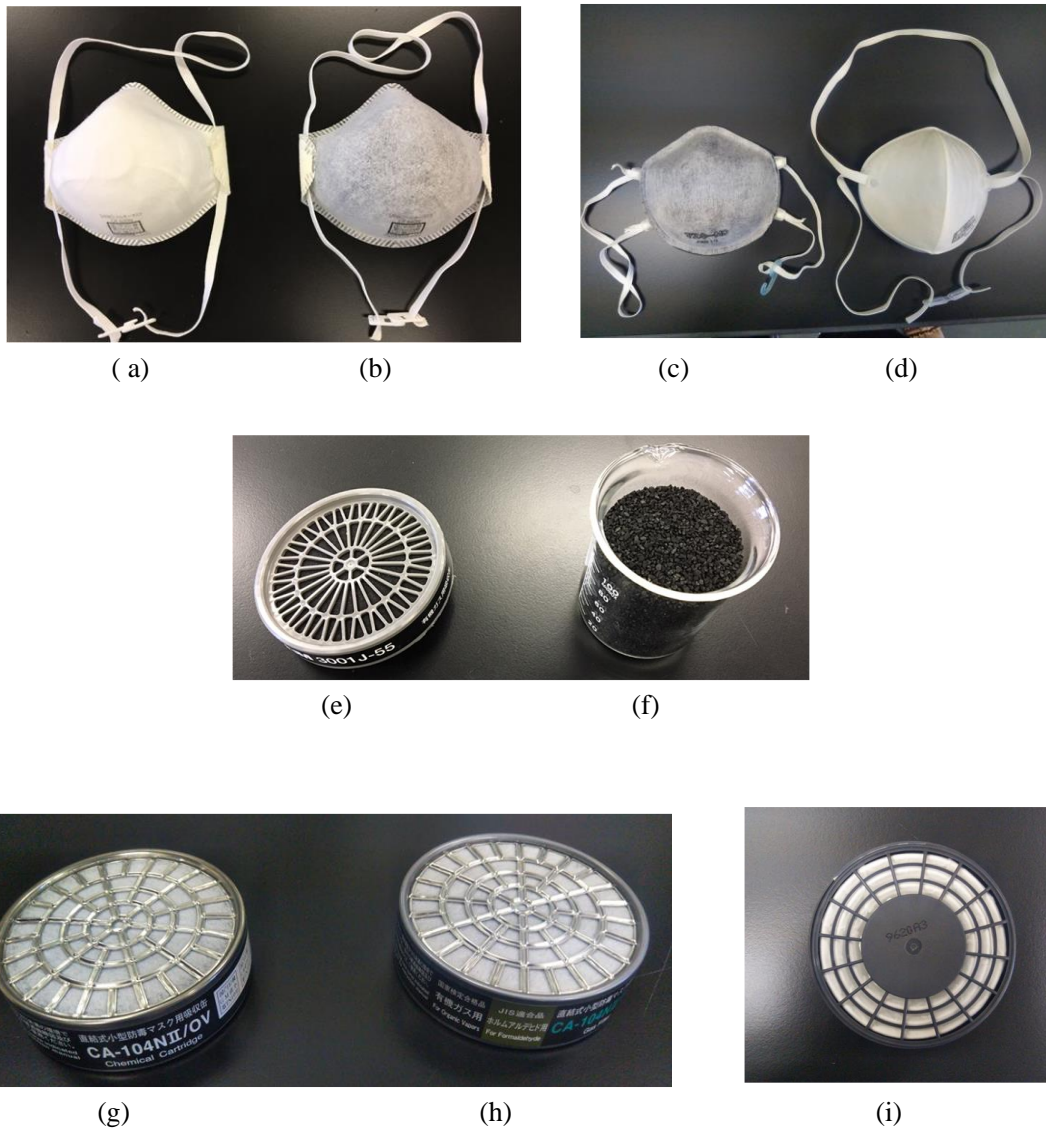


図4 ガス状物質捕集試験に用いた吸収缶および捕集材。

(a) DF620 (三光化学), (b) DF640 (SANKO), (c) マスキーMD(興研), (d) DD12A-S-1 (重松製作所), (e) 3001J-55(3M), (f) 活性炭/セピオライト吸着材 (試作品), (g) CA-104NII/OV (重松製作所), (h) CA-104NII/FA2 (重松製作所), (i) L2B(重松製作所)

2.3 活性炭入り簡易マスクの性能試験

飲食店等の接客業等で使用できるマスクを想定し、作業環境用ではないマスクを含む簡易マスクについて、ガス状物質をどの程度捕集できるか検討するための実験を計

画した。実験装置の写真を図5に、使用したマスクの種類を表4に、また、活性炭マスク、アドール、ハイパーマスク2の写真を図6に示す。

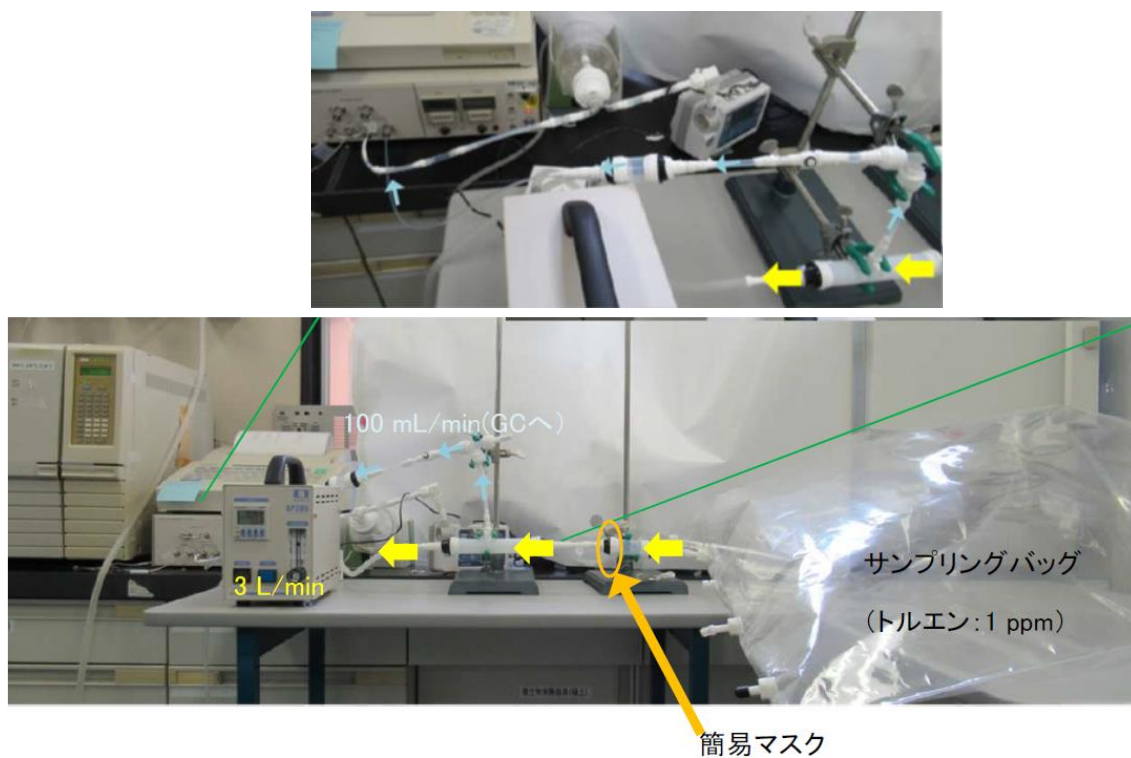


図5 活性炭入りマスクを用いた実験装置

表4 使用した活性炭または ACF 入りマスク

No	名称	メーカー・型式	備考
1	活性炭マスク	アズワン	ACF55%含有
2	使い捨て式防じんマスク	重松製作所・DD12A-S1-1	ACF 入り
3	使い捨て式防じんマスク	3M・9913-DS1	活性炭入り
4	繊維状活性炭アドール	大阪ガスケミカル	たばこ臭気用
5	ハイパーマスク 2	松田商会	ACF 入り



活性炭マスク(アズワン)



アドール(大阪ガスケミカル)



ハイパーマスク 2
(松田商会)

図6 実験に用いた簡易マスクの写真

これらのマスクに使用されているフィルタを直径 2cm の円形にくり抜き、テフロン製のホルダーに固定した。試験ガスはトルエンとし、濃度 1 ppm になるようにテドラーバッグに調整し、面風速が検定試験と同じになるように流量 3 L/min でフィルタに通じた。下流側の蒸気をオートガスサンプラー (GS-5000A, ジーエルサイエンス) で採取し、FID 付ガスクロマトグラフ (GC-17A, 島津製作所) で経時的に濃度を測定し、透過曲線を得た。

(倫理面での配慮)

本研究は人を対象としないため、倫理面の配慮は必要ない。

C. 研究結果

1. 文献調査結果

たばこ煙の成分に関しては、数多くの報告がある[3-6]。厚生労働省[3]は、平成 11-12 年度に国内で販売されているたばこのうち、消費量の多い銘柄の中から 7 銘柄を選び、標準的および平均的の 2 種類の燃焼条

件で発生させたたばこ煙を発生させ、主流煙および副流煙中に含まれる主な化学物質 (粉じん, ガス) を調査した。その結果、濃度は銘柄によっても異なるが、粉じん中の成分としては、ニコチン, タール, ニトロソアミン類, ガス状物質としては、無機ガス (一酸化炭素, NO, NO₂, シアン化水素など) および、カルボニル類 (アセトアルデヒド, ホルムアルデヒド, アセトンなど) その他の有機化合物 (イソプレン, トルエン, 1,3-ブタジエン, ベンゼンなど) が多く含まれていることを報告している。

伏脇[4]は、2012 年に、喫煙による室内環境汚染と喫煙による室内環境汚染と喫煙および受動喫煙に伴う健康影響に関する知見について整理するとともに、喫煙に関する国際および国内における法規制についてレビューしているが、前述の物質のほか、多環芳香族炭化水素類 (ピレン, ベンズ[a]アントラセン, ベンゾ[a]ピレン, ベンズ[a]アントラセン, ベンゾ[b]フルオランテン, ベンゾ[j]フルオランテン, ベンゾ[k]フルオラン

テン, ジベンズ[a,h] アントラセン, ジベンズ[a,i]ピレン, インデノ[1,2,3-cd]ピレンなど), さらにジクロロメタン等が検出されている。これらの物質のほとんどは IARC あるいは日本産業衛生学会の発がん分類で Group 2B 以上に分類されている物質である。また, Pazo ら[5]は, 米国の 50 銘柄のたばこについて, 主流煙から芳香族炭化水素, カルボニル化合物など 21 種の VOC を同定し, 比較している。このほか, アンモニア, シアン化水素などのガスや, カドミウムや鉛などの重金属類も検出されている[6]。

主流煙と副流煙では, 副流煙のほうが有害物質が多く含まれており, その比率は, ニコチン 2.8 倍, ベンゾ [a] ピレン 3.4 倍, ジメチルニトロソアミン 19~129 倍, ジエチルニトロソアミン 2~56 倍, 一酸化炭素 4.7 倍, アンモニア 46 倍などと報告されている[7]。

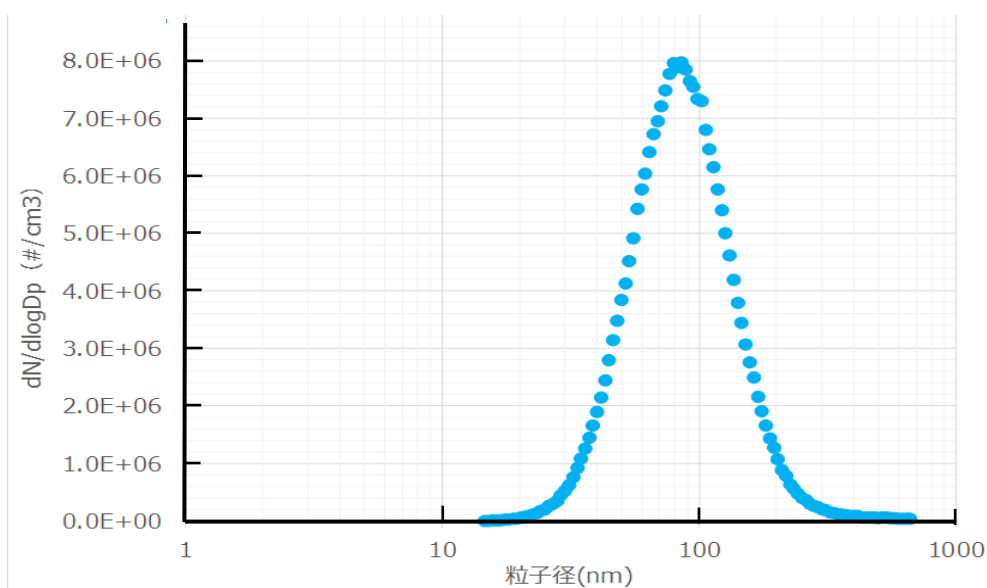
2. 粉じんの捕集特性

試験に用いたたばこ煙の粒径分布を

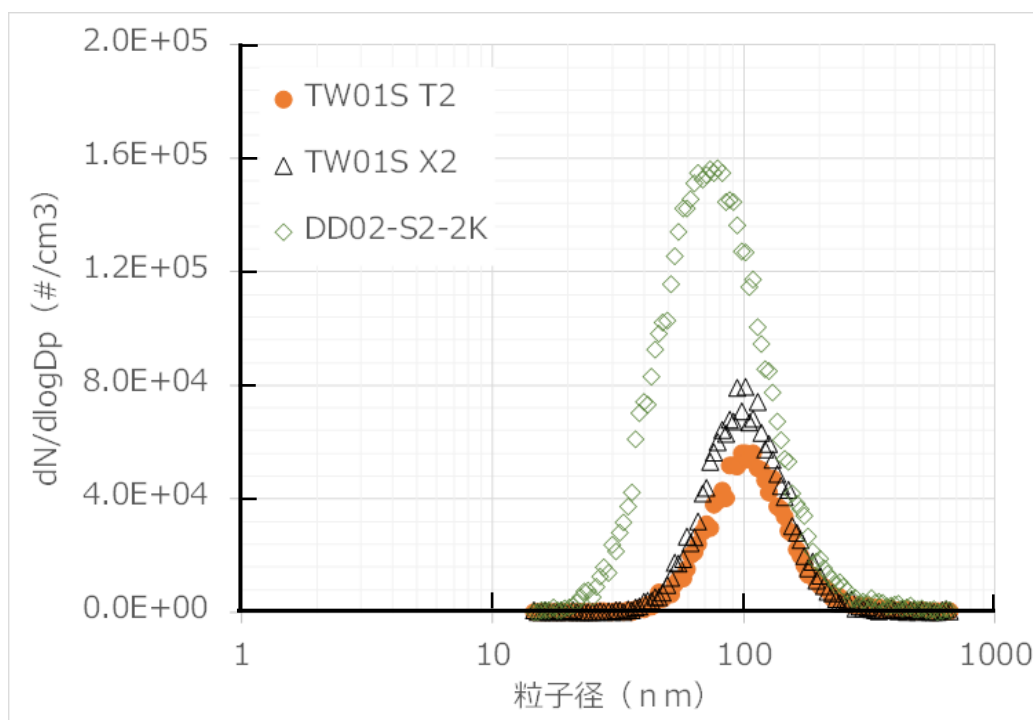
SMPS で測定した結果を図 7 (a)に示す。図から, たばこ煙の粉じんの粒径は対数正規分布することが示され, その幾何平均径は約 85 nm であった。

捕集材通過後の粒径分布を図 7 (b)に示す。濃度 (個数) は下がっているが, 粒径分布は大きく変わっていない。ただし, 幾何平均径はやや大きくなる傾向があった。

各試料のフィルタ透過前後の粒径分布から, 捕集率を測定した結果を表 5 に示す。No.4 を除き, 捕集効率は 98% を上回っていた。特に No.1 は区分 RL3 のフィルタであり, 「防じんマスクの規格」で 99.9% 以上を要求されるが, いずれも 99.97% 以上となり, たばこの粉じんはほぼ完全に捕集できることがわかった。No.4 は区分 RL1 のフィルタであり, 「防じんマスクの規格」で要求されている捕集効率 80% は十分に上回っていたが, 95% には満たなかった。このことから, 粉じんについては, DS2 あるいは RL2 以上のフィルタであれば, 98% 以上の捕集効率があることが確認された。



(a) フィルタ通過前



(b) フィルタ通過後

図7 防じんマスク前後のたばこ煙粉じんの粒径分布

表5 防じんマスクのたばこ煙粉じんの捕集率

No	試料	捕集効率(%)					
		SMPS			デジタル粉じん計(0.3μm で校正)		
		1-10min	11-20min	全体	1-10min	11-20min	全体
1	TW09SFX3	99.97	99.98	99.97	99.97	99.97	99.97
2	TW01SX2	99.50	99.03	99.26	98.36	98.78	98.57
3	TW01ST2	99.53	99.22	99.37	98.41	98.68	98.55
4	TW01SX1	94.00	95.01	94.51	90.95	95.70	93.32
5	DD02-S2-2K	97.64	98.69	98.16	98.91	99.18	99.04

表2に示した捕集材のうちの防じんフィルタについて、フィルタ通過前後のたばこ煙の濃度を SMPS で測定し、粒子の粒径ごとの捕集効率を調べた結果を図8に示す。なお、捕集効率は次の式から計算した。

捕集効率＝

$$\frac{\text{環境濃度} - \text{試料通過後の粒子濃度}}{\text{環境濃度}} \times 100$$

図から、防じんフィルタのたばこ煙粒子の捕集効率は、フィルタの種類および粒径によって異なっており、静電フィルタである DD12-S1-1 と DD12A-S1-1 は、粒子径約 150 nm 以上の粒子の捕集効率はほぼ 100% であり、それ以下だと捕集効率は低くなったが、メカニカルフィルタである ACF 無しフィルタ(PL1)及び T2 は 40 nm 付近の捕集

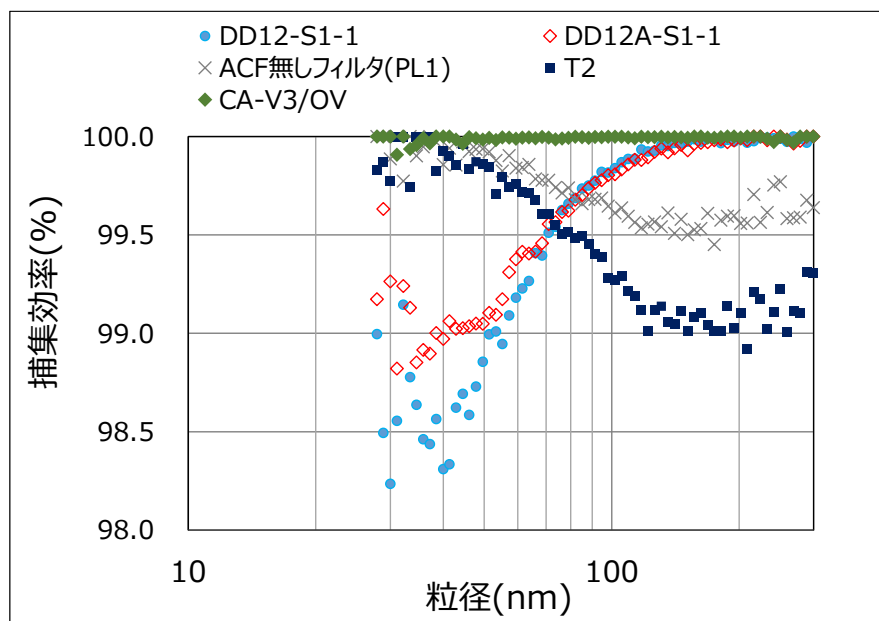


図8 各種フィルタのたばこ煙に対する捕集効率

効率が最も高く、粒径が大きくなると捕集効率が低下する傾向が観察された。図8から、最も捕集効率が低い粒径=MPPS (Most Penetrating Particle Size)は以下の通りであることがわかった。

DD12-1 及び DD12A-S1-1 : 約 40 nm

ACF 無しフィルタ(PL1)及び T2 : 約 150 nm

CA-V3/OV は、電動ファン付呼吸用保護具(PAPR)用のフィルタであり、フィルタの区分が PL3 (DOP 粒子の捕集効率 99.97%以上) と非常に高い捕集効率を有するフィルタである。たばこ煙に対しても本試験で行った全ての粒径範囲でほぼ 100%の捕集効率が認められた。

3. 臭気測定

表1のフィルタについて、ニオイセンサによる臭気を測定した結果を表6に示す。このニオイセンサはにおいの検知に半導体センサを用いている。センサの数値と感度は必ずしもヒトの感覚に対応したものではありませんが、

臭気の強さの相対的な変化を把握することできる。表6は発生場所付近の入口(図1の①)と、ろ過材の後(出口)(図1の②)で交互に測定したものであるが、いずれの試験でもチャンバー内に比較してフィルタ通過後の数値はほぼ半減していた。ただし、これは、図1の①から②に至る経路内に吸着されたものも含んでいる。

そこで、表2に示すフィルタ(防毒マスク吸収缶を含む)について、フィルタ通過後の臭気を発生開始から30秒間隔で経時的に測定し、臭気強度を調べた。結果を図9に示す。実験開始直後のたばこ煙濃度が一定になる前からニオイセンサを作動させたため、実験初期は臭気レベルは低く、経時的に上昇している。この中で、DD12A-S1-1は、実験開始時から測定値が高くなっているが、これは、マスク自体に臭気成分が含まれており、たばこ煙を発生させない状態でも、ニオイセンサが反応したためである。

表6 ニオイセンサによる臭気の計測結果

No	試料	ニオイセンサ指示値			
		1 min 出口②	6 min 入口①	11 min 出口②	16 min 入口①
1	TW09SF+X3	410	890	470	920
2	TW01S+X2	360	970	470	930
3	TW01S+T2	460	950	515	960
4	TW01S+X1	480	940	530	950
5	DD02-S2-2K	490	910	525	950

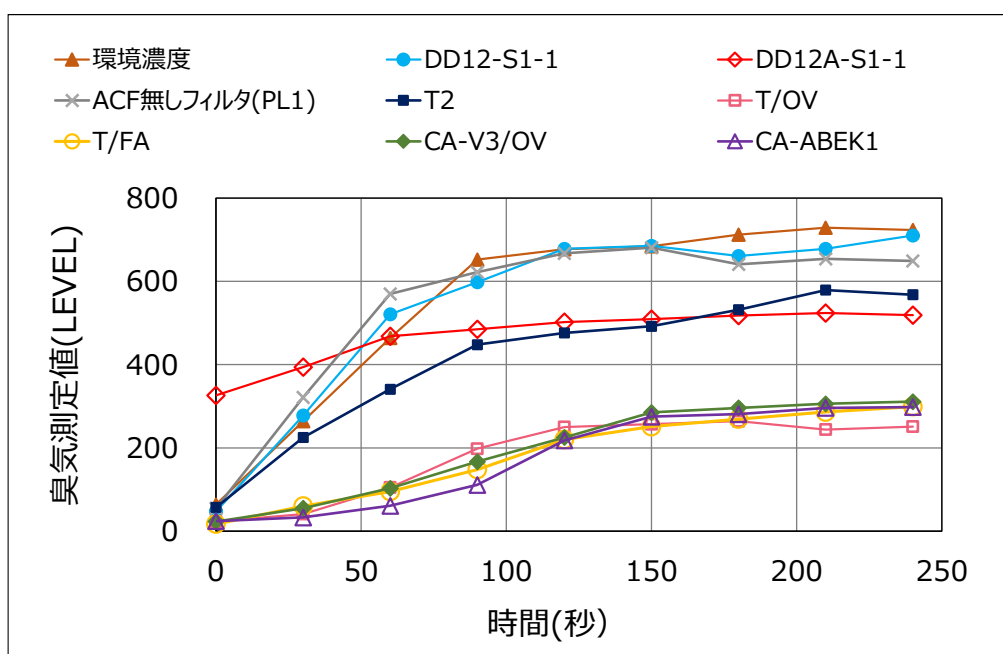


図9 ニオイセンサによる臭気経時変化

実際、ニオイセンサをこのフィルタに近づけただけで 300~500 LEVEL 程度の臭気が測定された。

図の環境濃度(▲)は、チャンバー内の濃度変化を表しているが、チャンバー内の濃度が定常になるまで約 100~150 秒程度要することを示している。

DD12-S1-1 及び TS 型 ACF 入り(PL2)は、環境濃度とほぼ同じ値と傾向を示しており、

臭気についてはほとんど除去できないことがわかる。DD12A-S1-1 と T2 は、100 秒以降では、臭気は環境濃度よりもやや低くなっており、たばこの臭気を若干捕集していることを示している。T/OV、T/FA、CA-V3/OV および CA-ABEK1 は、いずれも防毒マスク用吸収缶であり、臭気的大幅な低減が期待されたが、いずれも臭気 LEVEL が環境濃度の 1/2 程度以下にまで低減したもの

の、依然として検出されており、マスクの種類による違いもほとんど見られなかった。

4. ガス状物質に対する吸収缶および捕集材の特性

4.1 リアルタイムモニタによる測定

国産のたばこ(メビウスオリジナル, JT)から発生した煙中のガス状物質を、使い捨て式防じんマスク(DF620), 使い捨て式活性炭入り防じんマスク(DF640), 有機ガス用防毒マスク吸収缶(3001 J-55)の3種類のフィルタに通じた場合の捕集材前後のたばこ煙の濃度変化の結果を図10に示す。この図はイオン化電位 10.6eV の CUB で濃度をモニタした場合の結果である。

入口濃度は実験開始後約3分間ほぼ0 ppmであったが、その後直線的に上昇し、12分後頃にピークに達している。最初に濃度が上昇しなかったのは、発生した煙が測定部に達するまでに時間を要したためと考えられる。また、その後は入口のたばこ煙濃度は下がっているが、これは約10分程度で

たばこが燃え尽きたためである。

DF620は、入口濃度よりもゆるやかに上昇し、入口よりも遅れて35分後付近にピークとなる曲線が得られている。DF640も約30分後まで緩やかな上昇を示し、その後はやや減少傾向が見られたが、60分後まで大きな変化はない。また出口濃度も、活性炭を含まないDF620が約13 ppmまで上昇したのに対し、活性炭入りのDF640では、約2.5 ppmと低くなっている。これは、防じんフィルタに加えられている活性炭が、ガス・蒸気を吸着したことを示している。最後に防毒マスク吸収缶(3001 J-55)であるが、これについては、指示値は試験を行った60分間では大きく上昇せず、ほぼ1 ppm以内に収まっている。防毒マスクの有機ガス用吸収缶に使用されている吸着剤は活性炭である。活性炭は多くの揮発性有機化合物(VOC)を吸着することが知られている。たばこ煙にはきわめて多数のVOCを含む有機物が含まれており、この結果は、これらを活性炭が吸着したことを示している。しかしながら、

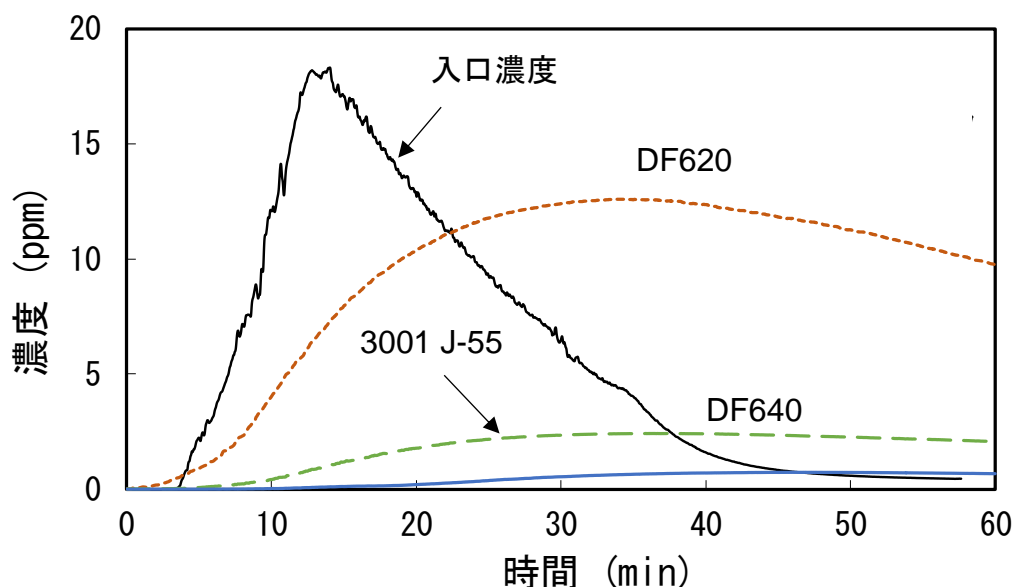


図10 各捕集材に対するたばこ煙の捕集実験結果 (3 L/min, CUB)

わすかではあるが指示値は経時的に上昇しており、一部の物質については、破過している可能性がある。

以上の結果から、これらの3つのフィルタの中では、防毒マスク吸収缶が最も捕集性能が高く、ついで活性炭又は ACF 入り使い捨て式防じんマスク、もっとも捕集性能が低いのは活性炭を含まない使い捨て式の防じんマスクであった。なお、入口と出口のピーク濃度が現れる時間に差が生じているが、これについては、D（考察）で述べる。

次に、モニタには同じ CUB を用いて、新たに開発した両親媒性吸着剤（活性炭：セピオライト＝7:3）と、有機ガス用吸収缶用に用いられている活性炭を比較した結果を図 11 に示す。両者の透過曲線の形状はほぼ一致しており、活性炭等とセピオライトの混合物と防毒マスクに使用されている活性炭では顕著な違いはみられなかった。

図 12 は、モニタに TIGER（イオン化電位 11.7eV）を用いて、活性炭＋セピオライトの

両親媒性吸着材と、ホルムアルデヒド用吸収缶の透過曲線を比較したものである。両親媒性吸着材は実験開始数分後に出口濃度は上昇を始めたが、約 10 分後に一度濃度上昇が緩やかになり、その後約 20 分後から再び上昇して約 35 分後に約 4 ppm でピークに達した。その後は図 9 と同様、経時的に低下した。一方、ホルムアルデヒド用吸収缶は出口濃度のピークの時間が 11 分後付近と両親媒性吸着材よりも早くなっている。また、ホルムアルデヒド用吸着材は、両親媒性吸着材のように途中で濃度上昇が緩やかになるような現象は現れず、約 11 分までほぼ直線的に濃度は上昇し、ピーク濃度が約 3 ppm となったあと、減少を開始し、約 50 分でほぼ 0 ppm にまで減少している。このホルムアルデヒド用吸収缶において最大濃度となった時間は、たばこが燃え尽きた時間とほぼ一致している。

図 13 は、ホルムアルデヒド用吸収缶の吸着材、両親媒性吸着材および有機ガス用吸

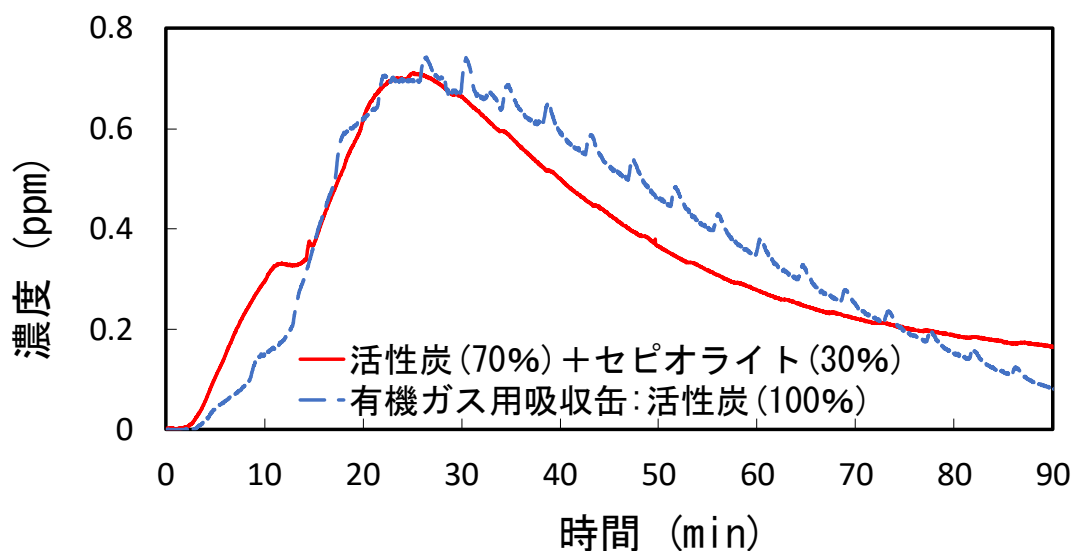


図 11 両親媒性吸着材(活性炭 70%, セピオライト 30%)と有機ガス用吸収缶の TVOC 捕集特性の比較。

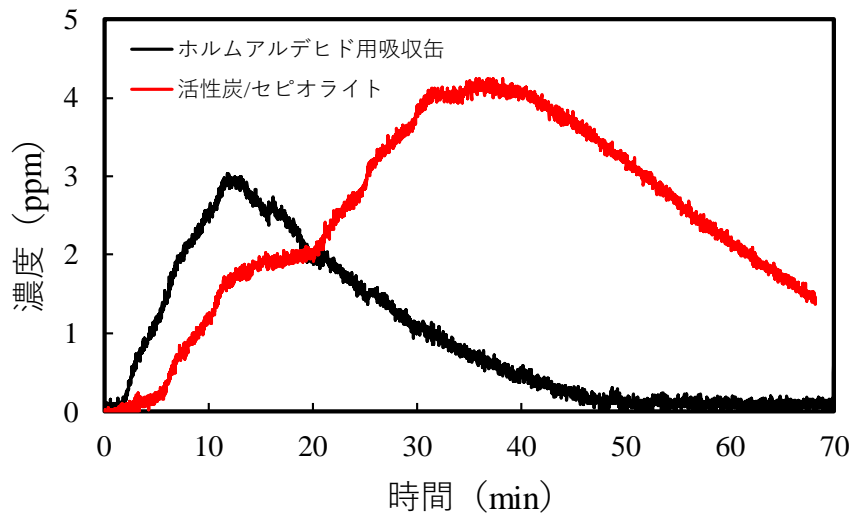


図 12 TIGER を用いた場合のホルムアルデヒド用吸収缶と両親媒性吸着材の透過曲線の比較.

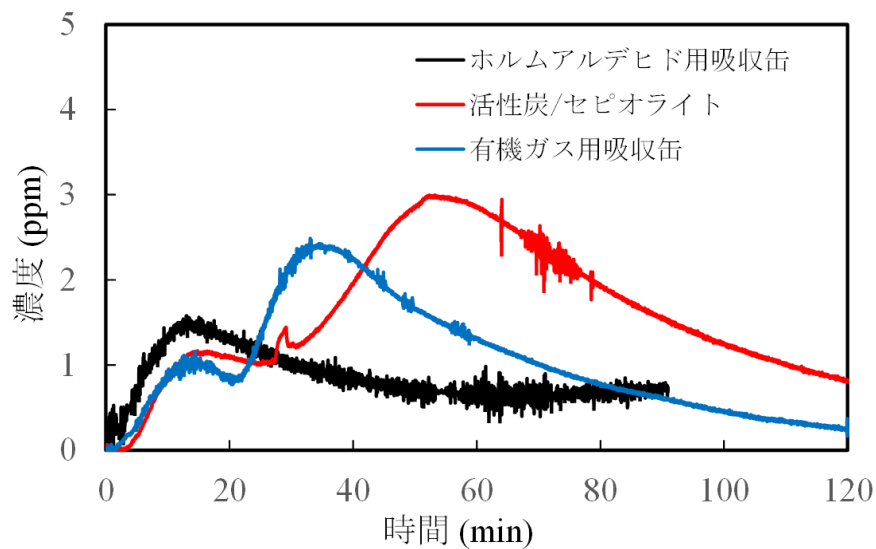


図 13 ホルムアルデヒド用吸着材，両親媒性吸着材および有機ガス用吸着材に対するたばこ煙の透過曲線（TIGER による測定結果）

吸収缶の吸着材について、TIGER を用いて測定を行った結果である。ホルムアルデヒド用吸収缶を通過したたばこ煙のガスは、約 15 分後にピークに達した後、減少しているが、活性炭/セピオライト両親媒性吸着材および有機ガス用吸収缶については、濃度が上昇しピーク達した後、いったん減少し、さらに大きなピークが現れるという二峰性の

透過曲線が得られた。また、濃度の最大値は、活性炭/セピオライト両親媒性吸着材が最も高く、次いで有機ガス用吸収缶、ホルムアルデヒド用吸収缶の順であった。

以上、図 9 - 図 13 の結果から、防じんマスクはほとんどガス状物質を捕集できないが、活性炭又は ACF 入り防じんマスクはある程度ガス状物質も捕集できることが示さ

れた。また、活性炭又は ACF 入り防じんマスクは臭気成分を若干捕集していることが示されたので、ACF 入り使い捨て式防じんマスク(DD12A-S1-1)および労働衛生用ではない防臭用マスク(マスキーMD)について、たばこ煙中の全 VOC の捕集特性をリアルタイムモニタ (TIGER) を用いて調べた。その結果の例を図 14 に示す。これは、図 2 に示した装置を使用して流量 10 L/min でチャンバー内の空気を吸引し、得られた結果を比較したものである。両捕集材ともに実験開始後約 15 分に最大値を示し、その後減少した。この最大濃度は、たばこに火をつけてから燃えつきるまでの時間にほぼ対応している。この表示濃度の経時変化曲線の下部の面積が検出された煙中の VOC の量に相当するため、この面積が小さいほどフィルタがたばこ煙中の VOC を捕集していることを示している。図では、DD12A-S1-1 の方が防臭用マスクよりもやや小さく、粉じん

だけでなく、ガスも若干捕集していることが示された。

図 13 から、ホルムアルデヒド用吸収缶、両親媒性吸着材および有機ガス用防毒マスク吸収缶に対するガス状物質の捕集特性を検討した結果、ホルムアルデヒド用吸収缶が最も捕集性能が高いことがわかった。そこで、このホルムアルデヒド用吸収缶(CA104NII/FA2)に防じんフィルタ(L2B)を付けたものについてさらに捕集実験を行い、TIGER を用いて、防じんフィルタをつけない場合との比較を行った。その結果を図 15 に示す。防じんフィルタを併用したホルムアルデヒド用吸収缶は約 10 分で最大値を示し、その後減少したが、0 にはならず、40 分後付近以降ではやや上昇する傾向がみられた。このような、最後に濃度低下がみられなくなる現象は防じん機能なしの吸収缶でも同様にみられている。これは有機ガス用吸収缶の場合とは異なる傾向である。いず

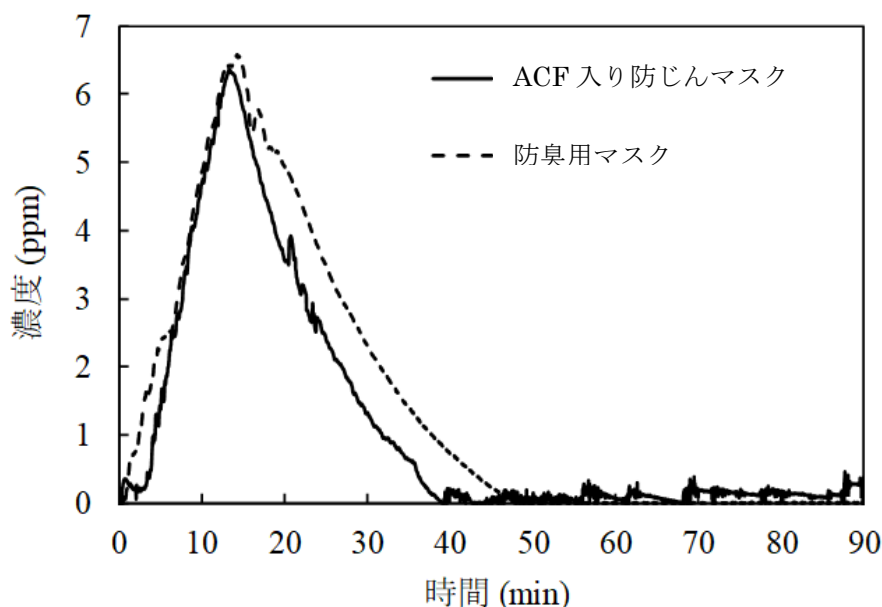


図 14 ACF 入り防じんマスク (DD12A-S1-1) と防臭用マスク (マスキーMD) のたばこ煙に対する捕集実験結果 (10 L/min、TIGER)

れにしても防じんフィルタの有無で比較すると、表示濃度の面積は防じんフィルタ併用の方が吸収缶単体よりも小さくなってお

り、防じんフィルタでもある程度ガス状成分を捕集していることがわかった。

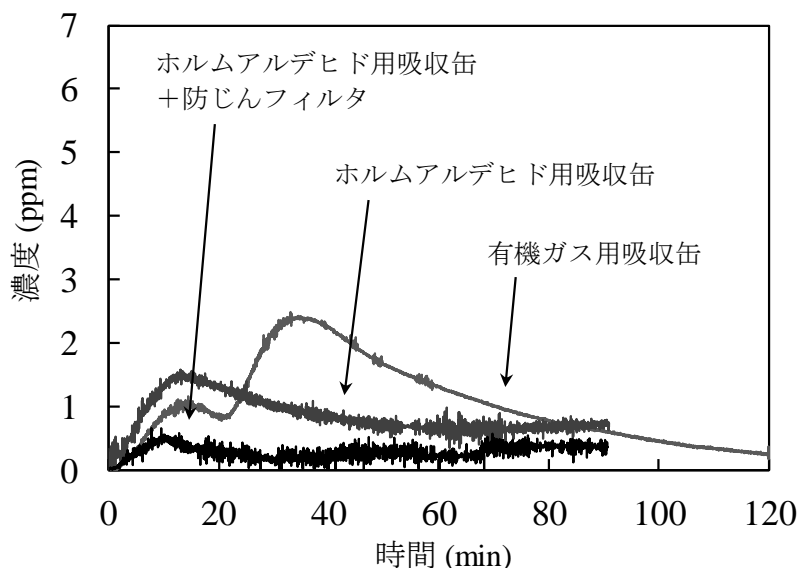


図 15 有機ガス用吸収缶 (CA104NII/OV)、ホルムアルデヒド用吸収缶 (CA104NII/FA2) およびホルムアルデヒド用吸収缶+防じんフィルタ (CA104NII/FA2+LB2) (10 L/min、TIGER)の VOC 捕集特性の比較

4.2 化学分析結果

1) アルデヒド類の分析

表 7 に、HPLC を用いて活性炭/セピオライトを 7:3 で混合した両親媒性吸着剤とホルムアルデヒド用吸収缶に対するアルデヒド類の捕集前後の濃度を分析した結果を示す。また、それぞれの物質の定量下限値を付記した。

表から、ホルムアルデヒド用吸収缶、両親媒性吸着材とも、捕集材通過後の空気から

ホルムアルデヒドが 2~3 ppb 程度検出されているが、それ以外の物質は定量下限未満であり、ホルムアルデヒド用吸収缶はもちろん、活性炭/セピオライトの両親媒性吸着剤でもアルデヒド類はほぼ完全に捕集できていることがわかった。活性炭は疎水性の吸着材であり、アルデヒド類に対する捕集能力は高くないが、親水性のセピオライトとの混合物にすることで、アルデヒド類もかなり捕集できることがわかった。

表7 捕集材前後におけるアルデヒドおよびケトン類の HPLC による分析結果

物質名	活性炭/セピオライト		ホルムアルデヒド用吸収缶	
	入口濃度 [ppb]	出口濃度 [ppb]	入口濃度 [ppb]	出口濃度 [ppb]
ホルムアルデヒド	671.08	2.91	886.32	2.05
アセトアルデヒド	3124.70	—	3215.30	—
アセトン	714.18	—	566.02	—
プロパノールアルデヒド	142.82	—	138.53	—
クロトンアルデヒド	42.05	—	38.50	—
N-ブチルアルデヒド	32.35	—	36.58	—

—：定量下限値（ホルムアルデヒド：1.2 ppb、アセトアルデヒド：7.6 ppb、アセトン：2.2 ppb、プロピオンアルデヒド：1.2 ppb、クロトンアルデヒド：1.5 ppb、N-ブチルアルデヒド：1.6 ppb）未満

2) VOC その他の物質

活性炭入り防じんマスクおよび防じんフィルターを併用したホルムアルデヒド用吸収缶を用いて得られた、GC/MS による 5 種類の揮発性有機化合物（VOC）（1,3-ブタジエン、イソプレン、アクリロニトリル、ベンゼンおよびトルエン）、ベンゾ[a]ピレンおよび

ニコチンの分析結果を表 8 に示す。表中(*)で示した入口濃度の値（推定値）は、先行研究[3]から得られた 1 本のたばこから発生する副流煙中の化学物質量を、活性炭入り防じんマスクの実験時の捕集空気量で除した気中濃度の推定値(平均値)であるが、実測値とは大きく異なっているため、以下で

表8 たばこ煙の捕集実験における VOC その他の GC/MS による分析結果

物質名	発生源		活性炭入り 防じんマスク	ホルムアルデヒド用吸収缶 +防じんフィルター
	入口濃度* (ppb)	入口濃度 (ppb)	出口濃度 (ppb)	出口濃度 (ppb)
1,3-ブタジエン	823	115	270	-
イソプレン	4884	500	550	0.35
アクリロニトリル	224	20	65	-
ベンゼン	465	60	55	0.10
トルエン	791	65	49	1.70
ベンゾ[a]ピレン	183 ng/m ³	120 ng/m ³	1.8 ng/m ³	-
ニコチン	1182	207	-	-

*：文献値[3]と捕集空気量から推定した値、-：定量下限値（1,3-ブタジエン：0.1 ppb、アクリロニトリル：0.1 ppb、ベンゾ[a]ピレン：0.5 ng/m³、ニコチン：0.125 ppb）未満

は実測値で比較する。活性炭入り防じんマスクについては、出口濃度と入口濃度(実測値)を比較すると、VOCについては同程度となった。しかし、ベンゾ[a]ピレンの出口濃度は入口濃度に対して約50分の1となっており、ニコチンの出口濃度は定量下限値未満であった。防じんフィルタを併用したホルムアルデヒド用吸収缶では、イソプレン、ベンゼンおよびトルエンの3種類の物質がわずかな濃度であるが検出されたが、それ以外のものは定量下限値未満であった。

5. 活性炭又はACF入りマスクによるトルエンの捕集特性

小規模飲食店等での利用も考え、活性炭又はACF入り使い捨て防じんマスクおよび労働衛生用ではないものを含む活性炭を用いた簡易マスクのフィルタがどの程度VOCの捕集能力があるか、たばこ煙中の含有率が比較的高いトルエンを用いて透過率を検

討した結果を図16に示す。いずれも、試験時間は30分間とした。図に示すように、マスクのトルエン透過率はさまざまである。アズワン(表4のNo.1のマスク)は活性炭入りであるが、ほとんど吸着されず、最初から80~90%の透過率であった。アドール(表4のNo.4のマスク)の透過率は40~60%程度であった。3Mの活性炭入り使い捨て防じんマスク(9913-DS1,表4のNo.3のマスク)は80%以上の防護能力があった。重松製作所のACF入り使い捨て式防じんマスク(DD12A-S1-1,表4のNo.2のマスク)とハイパーマスク(表4のNo.5)は透過率がほぼ0%であり、ほぼ100%の除毒能力を示した。ただし、DD12A-S1-1は、約30分で透過が始まった。

以上の結果から、労働衛生用のマスクであれば、30分程度ならば区分1の防じんマスクでもある程度VOCは捕集できることがわかった。

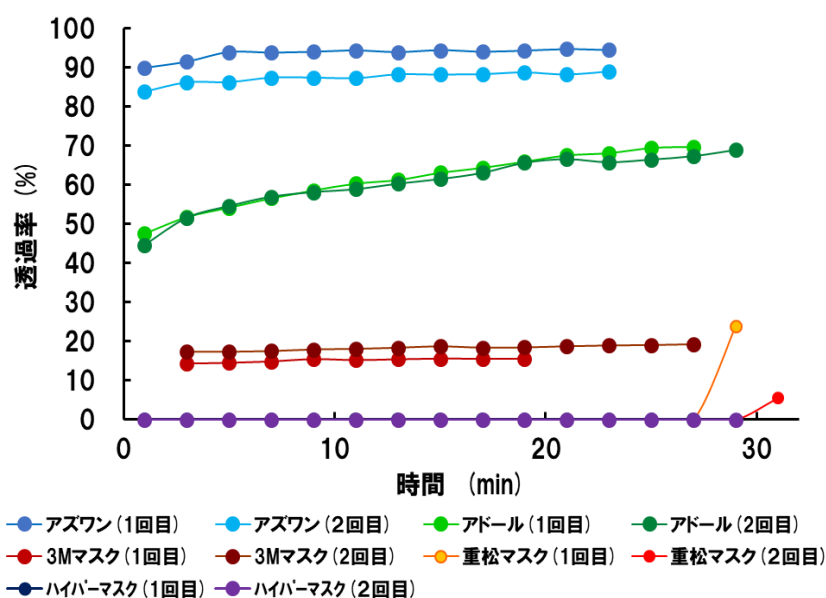


図16 活性炭又はACF入りマスクによるトルエンに対する透過率の経時変化

D. 考察

たばこの煙には、数千種類ともいわれる化学物質が含まれていると言われており、発がん物質もベンゼン、多環芳香族炭化水素類、さらにニトロソアミン類など数多く検出されており[3-6]、日本産業衛生学会[8]は、2010年に「タバコ煙」として、発がん性分類の第1群に分類している。このため、喫煙対策は重要な課題であり、特に受動喫煙防止は喫緊の課題となっている。わが国では、平成4年の労働安全衛生法の改正により「快適職場づくり」が事業者の努力義務となり、この規定の適切かつ有効な実施を図るため公表された、いわゆる「快適職場指針」の中の第2の「快適な職場環境の形成のために事業者が講ずべき措置の内容に関する事項」の空気環境の項に「必要に応じ作業場内に喫煙場所を指定する等の喫煙対策を講ずること」ということが規定された。その後、平成8年に「職場における喫煙対策のためのガイドライン」が公表され、喫煙対策の方法としては、全面禁煙、空間分煙、時間分煙があるが、当時の社会的状況を鑑みると、空間分煙が現実的で受け入れやすいことから、喫煙室等の設置を推奨することとされた。その後、このガイドラインは、WHO たばこ枠組み条約の採択や、健康増進法の施行に伴い、平成15年5月に全面的に見直されたが、空間分煙で対策を行う場合、受動喫煙を確実に防止する観点から、非喫煙場所にたばこの煙が漏れない喫煙室の設置を推奨することとされた。平成27年6月に労働安全衛生法の一部を改正する法律が施行され、受動喫煙防止が法的に努力義務化された。さらに、平成30年には、健康増進法の一部を改正する法律が公布され、

望まない受動喫煙の防止を図るため、多数の者が利用する施設等の区分に応じ、当該施設等の一定の場所を除き喫煙を禁止することとなった。

厚生労働省は、毎年、労働安全衛生調査を実施しているが、平成30年度の調査[9]では、喫煙対策に取り組んでいる事業場は全体の88.5%であった。大企業ほど取り組みの割合は高くなっており、1000人以上の事業場では99.6%あったが、10~29人の事業場では86.5%と低くなっている。屋外を含めた敷地内全体を禁煙としている事業所は13.7%、建物内を禁煙としている事業所は38.8%と、ほぼ半分の事業所で建物内は禁煙としているが、300人以上の規模の事業部所では、約50%が、喫煙室等を設けて空間分煙を実施している。

空間分煙は、喫煙者、非喫煙者とも受け入れやすく、現実的な対策と考えられるが、喫煙室を設置すると、喫煙室の清掃作業を行う必要があり、その作業のために喫煙室に入る作業者は常に受動喫煙のリスクが存在する。喫煙室は部屋全体がたばこ煙の発生源であり、作業環境対策には限界がある。したがって、清掃作業に従事する作業者に対する喫煙対策は重要である。また、健康増進法では、中小の既存特定飲食提供施設については禁煙が猶予され、標識を掲示することにより喫煙可能となっている。このため、このような飲食店等で働く従業員は、客が吸うたばこによる受動喫煙のリスクが存在する。

このような喫煙室や小規模飲食店における作業者の受動喫煙のリスクを低減するには、作業環境管理政策では限界があり、個人用保護具、すなわち、呼吸用保護具の使用が

現実的と考え、本研究では、これらの作業における作業者の受動喫煙を防止するために効果的な呼吸用保護具について検討することとした。

たばこの煙にはきわめて多くの化学物質が含まれているが、大きく分けて粒子状物質（粉じん）とガス状物質（ガス・蒸気）がある。このため、呼吸用保護具も防じんと防毒の機能が必要になる。そこで、本研究では、防じんマスク用のフィルタと防毒マスクに使用される吸着材について試験をすることとした。また、有機溶剤作業等で使用される防毒マスクは飲食店等で従業員が使用するには外観上ふさわしくないとと思われるので、使い捨て式の簡易マスクで対応できれば普及する可能性がある。そこで、簡易マスクでどの程度たばこの煙が除去できるのかについても検討を行った。

まず、粉じんであるが、「防じんマスクの規格」で期待されている DS2 あるいは RL2 以上のフィルタであれば、たばこ煙について 98%以上の捕集効率があることが確認されたため、このクラスの防じんフィルタを有する呼吸用保護具が有効であることが考えられた。また、いくつかの静電フィルタとメカニカルフィルタについて、粒子径と捕集効率の関係についてさらに調査した結果、図 8 に示すように、捕集効率はすべて 98%以上を確保しているが、DD12-S1-1 および DD12A-S1-1 と T2 および PL1 は、粒径別の捕集効率に違いがみられた。DD12-S1-1 と DD12A-S1-1 はいずれも区分 DS1 の静電フィルタであり、ACF 無しフィルタ(PL1)と T2 は PL1 あるいは RL2 のメカニカルフィルタである。区分上は ACF 無しフィルタ(PL1)と T2 の方が捕集効率は高いが、これらのフ

ィルタは粒子径 70~80 nm 付近以下の捕集効率は 99.5%以上と高いものの、それより大きな粒径では捕集効率は低下し、DD12-S1-1 や DD12A-S1-1 よりも低くなっていた。これは、メカニカルフィルタと静電フィルタの捕集原理の違いによるものと考えられる。図 7 (a)に示すように、たばこ煙粉じんの粒径分布は 85 nm 付近をピークとした対数正規分布であることがわかっており、各フィルタの捕集効率は粒径分布によって異なるものの、図 8 の結果からは、CA-V3/OV 以外の 4 つのフィルタについては、たばこ煙に対する捕集性能はトータルで考えると大きく変わらないと考えられる。一方、CA-V3/OV は、電動ファン付き呼吸用保護具に用いられる防じんフィルタ付きの有機ガス用吸収缶であり、防じん機能も優れている。通常の防じんマスクは、顔面と面体の隙間からの漏れこみは避けられないので、防護係数を考慮すると、CA-V3/OV を装着した電動ファン付き呼吸用保護具の使用がたばこ煙の粒子のばく露防止には特に有効であると考えられる。

防じんマスクは粒子状物質を捕集するものであり、ガス状物質は基本的には透過するが、粒子状物質の中に臭気の原因となる物質が存在すれば、臭気もある程度低減される可能性がある。そこで、ニオイセンサを用いてフィルタ前後の臭気を計測した。その結果、図 9 に示すように、試験した 8 種類のフィルタの性能は大きく 3 つに区分されることがわかった。すなわち、

- ① DD12-S1-1 と ACF 無しフィルタ(PL1)
- ② DD12A-S1-1, T2
- ③ T/OV, T/FA, CA-V3/OV, CA-ABEK1 の 3 グループである。

DD12-S1-1 と ACF 無しフィルタ(PL1)は、いずれも活性炭素などの吸着材が入っていない防じんフィルタであり、ガスの吸着能力は期待できない。実際、図9では、この2つを通した臭気は、フィルタを通さないで測定した環境濃度とほとんど一致しており、臭気には効果がないことがわかる。

これに対し、DD12A-S1-1 と T2 も防じんフィルタであるが、これらは ACF が入っているため、ある程度臭気も除去できることが期待される。図5では、確かに DD12A-S1-1 や T2 に比較すると臭気強度は 1~2 割程度低くなっていたが、この程度の低下では、作業者が低下を実感できるほどのにおいの除去はできていないと考えられる。

残りの4つのフィルタ(T/OV, T/FA, CA-V3/O および CA-ABK1)はいずれも防毒マスク用吸収缶である。T/OV は有機ガス用、T/FA はホルムアルデヒドガス用、CA-ABEK1 は複合ガス用の吸収缶であり、CA-V3/OV は有機ガス用吸収缶に防じんフィルタをつけたものである。いずれも有機溶剤やホルムアルデヒドなどのガス、蒸気に有効な吸収缶であり、たばこ煙中の揮発性成分もある程度捕集し、除去できると考えられるが、図9に示すように臭気測定値のレベルは他のフィルタよりも低くなっているものの、定常状態でも、環境濃度の 1/2 程度にとどまっている。また、有機ガス用、ホルムアルデヒドガス用、複合ガス用ともほぼ同じ値を示しており、吸収缶の種類による差は認められなかった。これらの防毒マスク用吸収缶は、国家検定を満たす除去能力を有しており、吸収缶に対応したガスであれば、このような短時間に破過することは考えられない。したがって、たばこ煙には、

防毒マスクの吸収缶で除去される成分もあるが、全く除去されず透過してしまう成分もあることが考えられる。

なお、DD12A-S1-1 は、図9に示すように実験開始時から臭気レベルが高かったが、これは、前にも述べた通り、マスク自体に臭気成分が含まれているためである。ニオイセンサの検知原理は半導体式ガスセンサであり、たばこ煙の成分だけではなく、多くの揮発性成分に非選択的に反応すると考えられる。また、ニオイセンサの指示値とヒトの鼻の感覚とは必ずしも一致しない。したがって、ニオイセンサの指示値は臭気強度のひとつの指標と考えるべきであり、たばこの煙の除去の指針として使用するにはなお問題が残ると考えられる。

以上の結果から、防じんフィルタを通すと若干臭気の指示値が低くなっており、多少は防じんフィルタでも臭気成分を除去できる可能性は示されたが、実用的には無視される範囲にとどまっている。したがって、防じんフィルタのみでは、たばこ煙の臭気を除去することは不十分であることが確認された。また、防毒マスクでも臭気の除去に関しては十分とは言えず、これについては、さらに検討が必要と考えられる。

ガス状物質に対しては、通常、防毒マスクが使用される。防毒マスクの使用に当たっては、対象ガスに合った吸収缶を選択することが重要である。本研究では、臭いを伴う多くの化学物質が有機物質あることを考慮し、有機ガス用吸収缶についてまず検討することとした。有機ガス用吸収缶には、捕集材として活性炭が充填されている。活性炭は、多くの有機溶剤の蒸気等の除去に効果があるが、極性の高い物質については、吸着

容量が小さいことがわかっている。Nelsonら[9]は、活性炭が充填された防毒マスク用の吸収缶に対する 121 種類の有機溶剤蒸気の吸着特性について調べた結果、極性が高く、低沸点の溶剤については吸着容量が小さく破過時間が短いこと、特にメタノールや塩化メチルについては極端に短いことが示された。アルデヒド類についても活性炭のみでは吸着量は小さいことが考えられる。そこで、本研究では、有機ガス用吸収缶に使用されている活性炭のほか、文献調査の結果からアルデヒド類が検出されていることを考慮し、ホルムアルデヒド用吸収缶、さらに極性の高い物質にも対応するため、活性炭とセピオライトを 7:3 で混合した吸着材についても検討することとした。

前にも述べたように、たばこ煙には多種多様の化学物質が含まれているが、まず、吸着材のたばこ煙に対する大まかな捕集性能を把握するため、吸着材前後のガス、蒸気の変化をリアルタイムモニタによりモニタリングすることとした。リアルタイムモニタは、センサの種類によって物質に対する感度が大きく異なる[11,12]ため、現在のところ化学物質を同定し、定量することは困難であるが、多くのモニタにはデータロガーが付いているため、相対的な濃度変化を経時的に調べるには適していると考えられる。特にたばこ煙の場合、フィルタを通して新たに物質が生成することは考えにくいいため、簡便にフィルタの効果を調べるには有用であると考えられる。

本研究では、PID（光イオン化検出器）を内蔵した 2 種類のモニタおよび、半導体式のモニタについて検討したが、PID センサの方が汎用性があったため、PID センサを

有するモニタを用いて調べることにした。

PID センサは、UV ランプから照射された紫外光で対象ガス分子が電離して生じるイオン電流を測定することにより、対象物質の濃度を計測する装置である。ただし、分子がイオン化されるエネルギー（イオン化電位）よりも照射した光のエネルギーのほうが小さければ、分子はイオン化しないので計測できない。市販の標準的な PID モニタのセンサには、10.6eV のイオン化電位を持つランプが内蔵されているが、これでは、たばこ煙に比較的多く含まれているホルムアルデヒド（イオン化電位 10.87eV）は検出できないことになる。そこで、本研究では、10.6 eV のイオン化電位を持つモニタ（CUB）のほかに、11.7 eV のイオン化電位を有するモニタ（TIGER）を用いて検討を行った。

まず、CUB（イオン化電位 10.6 eV）を用いて 3 種類のフィルタに対する捕集特性を調べた結果、図 10 に示すように粉じんを除去するだけの防じんマスクはほとんど効果がなかったが、活性炭フィルタはかなり濃度を低減化できることがわかった。吸着材が活性炭である有機ガス用吸収缶はこれら 3 つのフィルタで最も効果的であることは確認できたが、わずかに濃度の上昇が見られており、吸着性能についてはなお検討の余地がある。

なお、入口濃度は約 13 分をピークに減少しているのに対し、使い捨て式防じんマスクは、入口濃度よりもゆるやかに上昇し、入口よりも遅れて 35 分後付近にピークとなる曲線が得られている。ピークの時間に遅れがあるのは、入口と出口の測定点の間に吸着材が入ったセルを置いているため、これを通過する時間だけ時間遅れが生じること、

また、セル内で煙が混合されるため、濃度変化が緩やかになることが原因と考えられる。出口濃度の最大値は、入口濃度よりも低くなっているが、これは、防じんフィルタがガス成分を吸着したというよりも、入口と出口の間で空気が混合され、平均化したことが大きいと考えられる。このことは、入口濃度が下がっても出口濃度は大きく下がっておらず、約 20 分後で濃度が逆転していることから推測できる。さらに、一定流量で流しているため、図の透過曲線の下側の面積に流量を乗じたものが全発生量に相当する。この値は、吸着がなければ入口と出口で等しいはずであるが、使い捨て式防じんマスクでは、出口濃度から得られた値の方が、入口濃度から得られた値よりも大きくなっていて収支がとれていない。これは、吸着セルおよび配管内にいったん煙が吸着したあと、徐々に脱着したことや、防じんマスクのフィルタに付着したガスが、時間とともに脱着したこと等が原因として考えられる。したがって、より精度良く測定するためには、時間遅れを小さくする必要があり、その方法として、捕集部の容積を小さくする、吸着し難い材料を使用するなど、吸着の影響を小さくする工夫が必要になると考えられる。このような問題点はあるものの、基本的な特性は本装置で検討できると考え、以下の検討についても本装置を用いて行った。

図 11 は、同じ装置を用いて、活性炭とセピオライトを混合した両親媒性吸着材と有機ガス用吸収缶の捕集特性（透過濃度で評価）を比較したものである。入口濃度は、図 10 と同様であるが、濃度のスケールが大きく異なるため、図では省略している。図から、両者の透過曲線はほぼ一致しており、両親

媒性吸着材と有機ガス用防毒マスク吸収缶に使用されている活性炭はほぼ同程度の捕集率を示すことが考えられる。

図 12 は、TIGER(イオン化電位 11.7 eV)を用いて、ホルムアルデヒド用吸収缶と両親媒性吸着材の透過曲線を比較したものである。活性炭/セピオライトの両親媒性吸着材の透過曲線は、図 11 と異なり二峰性となっている。また、縦軸の濃度の値も図 11 に比較して図 12 が高くなっている。この理由は、図 11 がイオン化電位 10.6 eV の PID センサを有するモニタを用いたのに対し、図 12 が 11.7 eV のセンサを有するモニタを用いたことによると考えられる。すなわち、図 11 では、イオン化電位が 10.6 eV 未満の物質しか検出されないのに対し、図 12 では検出される物質の範囲が広がったため、濃度の指示値も高くなったものと考えられる。透過曲線が二峰性になる傾向は図 13 でもみられる。図 13 には、有機ガス用吸収缶の結果も併せて示しているが、ホルムアルデヒド用吸収缶以外は同様に二峰性の曲線が得られている。この原因としては、混合有機溶剤の吸着でも見られる置換脱着の影響と考えられる[13]。すなわち、いったん吸着された比較的親和性の弱い物質が相対的に親和性の強い物質により置換されて脱着するため、最初は親和性の低い成分が破過し、その後しばらくすると、あとから破過した親和性の強い成分が加わることにより、見かけの濃度が高くなったと考えられる。一方、ホルムアルデヒド用吸収缶は、二峰性になっていないが、これは、ホルムアルデヒドの捕集には化学吸着を利用しているため、置換脱着が起こりにくかったことが考えられる。

図 13 において、ホルムアルデヒド用吸収缶および防じんフィルタを併用したホルムアルデヒド用吸収缶については、いずれも濃度が最大値を示した後減少したが、ゼロレベルにはならず、ある程度時間が経過するとやや濃度が増加する傾向がみられた。チャンバー内のたばこ煙は経時的に確実に減少していることから、たばこ煙以外のガスを TIGER が検出している可能性がある。

そこで、ホルムアルデヒド吸収缶について、副流煙を含まない清浄空気を通じ、ブランクを確認する実験を行った。防じんフィルタをつけた場合とつけない場合について、流量 10 L/min で清浄空気を送り、出口濃度を TIGER を用いて測定した。その結果を図 17 および図 18 に示す。図より、ブランク実験ではたばこ煙を用いていないにもかかわらず、指示値は経時的に上昇しており、

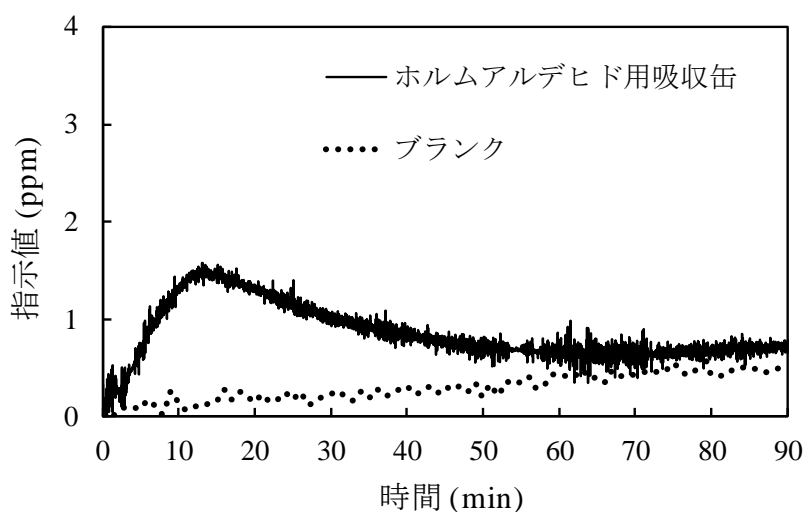


図 17 ホルムアルデヒド用吸収缶におけるブランク値の測定

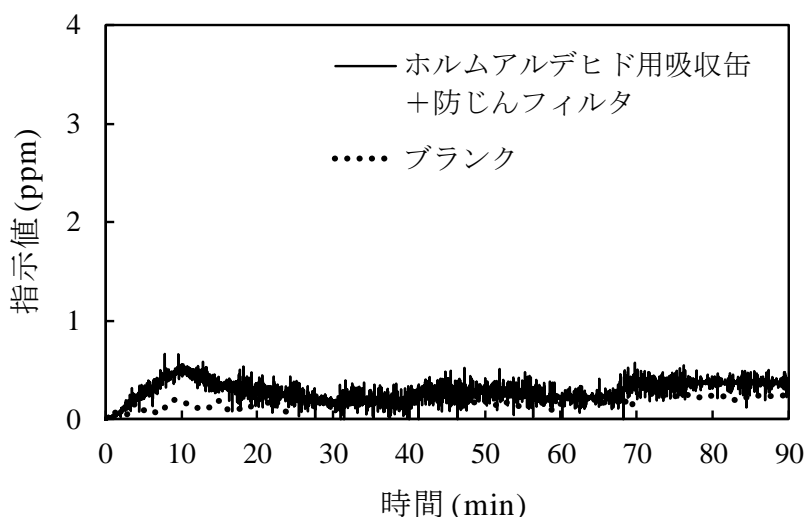


図 18 防じんフィルタ付きホルムアルデヒド用吸収缶におけるブランク値の測定

TIGER が何らかのガスを検出していることがわかる。ホルムアルデヒド用吸収缶は化学吸着を利用しており、ホルムアルデヒドと反応し、固定させるための添加物が活性炭に含まれている。この添加物、または添加物との化学反応に起因して発生する物質をリアルタイムモニタが検出した可能性が考えられる。実測値からブランクの値を差し引くことにより、たばこ煙中のガス状物質が求まるが、図 18 を見ると、この差の値は 0 ppm に近づいていくことが推測され、実質的にはほぼ完全にたばこ煙を捕集していると考えられる。ただし、このブランクの中身については定性・定量できておらず、今後の検討課題である。

ACF 入り防じんマスク(DD12A-S1-1)と防臭用マスク(マスキーMD)のガス状物質の捕集性能を比較した結果、表示濃度の面積は、DD12A-S1-1の方がマスキーMDよりも若干小さかった(図 14)。この理由としては、マスキーMDは防じん用フィルタではないが、DD12A-S1-1はDS1の防じんフィルタを用いているため、粒子の捕集効率がマスキーMDよりも高く、捕集された粒子にガス状化学物質の一部が吸着していたため、ガスの捕集量がやや大きくなっていた可能性が考えられる。

以上の測定値はあくまでPIDを内蔵したモニタの指示値であり、物質ごとの感度補正は行なっていないので、ガス状物質の各々の成分が同程度に捕集されているとは限らない。また、リアルタイムモニタは反応したすべての物質の総和として表示されるため、個々の物質の濃度を計測することはできない。さらに、詳しく検討するためには、HPLCやGC/MSなどを用いた機器分析を行

う必要がある。そこで、6種類のカルボニル類(アルデヒド類およびアセトン)について、DNPHカートリッジに捕集し、HPLCにより濃度を測定した結果、表6に示すように、入口ではすべての物質が検出されたが、出口では、活性炭/セピオライトの両親媒性吸着材、ホルムアルデヒド用吸収缶ともホルムアルデヒドのみが微量検出されただけで、他のカルボニル類は検出されなかった。図12、図13では、TIGERの指示値として数ppmの物質が検出されているが、これらのなかにアルデヒド類はほとんど含まれていないことになる。そこで、GC/MS等を用いてさらにフィルタ透過成分を調べることとした。

図13から、本研究で用いた試料の中で最も捕集特性が優れていると考えられた防じんフィルタ付ホルムアルデヒド用吸収缶(CA-104NII/FA2+L2B)と、図14から、ガス状成分をある程度捕集することが考えられたACF入り防じんマスク(DD12A-S1-1)の2種類のフィルタについて、たばこ煙を捕集したあとの出口の空気をサンプリングし、たばこ煙に多く含まれるVOCである1,3-ブタジエン、イソプレン、アクリロニトリル、トルエンと、発がん物質のベンゼン、ベンゾ(a)ピレン、さらにたばこ煙の主要物質であるニコチンの分析を行った。結果は表8に示した通りである。なお、表中の「入口濃度*」は、たばこから発生する副流煙中の化学物質量の報告値を、本実験における活性炭入り防じんマスクの実験で吸引した捕集空気量と同じ値で除して求めた気中濃度の計算値(平均値)であり、本実験と条件はほぼ同じであり、同程度の値を期待したが、GC/MSで得られた実測値は、いずれも計算

値よりも低くなっていた。この原因としては、本実験では、チャンバー内に発生させ、拡散した煙を含む空気をポンプで吸引捕集しているため、サンプラーに捕集される前に、チャンバー等の壁面に VOC が吸着あるいは付着したこと、捕集材による捕集量や捕集条件の違いが考えられること、さらに、計算に用いたたばこ煙の成分のデータが、平成 11-12 年度に行われた調査に基づくものであるが、その後 20 年経過しており、たばこ煙中の化学物質量が低減した可能性があることなどが考えられるため、あくまで参考値とした。実際の入口濃度と出口濃度は同じ条件で測定しているため、直接比較することができる。CA-104NII/FA2+L2B については、通過後の出口濃度はいずれも極めて低く、測定対象とした物質はほぼ吸引缶に捕集されていることがわかった。これに対し DD12A-S1-1 は、測定対象とした VOC のうち、比較的低温の VOC である 1,3-ブタジエン、イソプレン、アクリロニトリル、ベンゼン、トルエンについては、入口濃度と出口濃度が同程度であったことから、これらの VOC は捕集材にはほとんど捕集されずに通過したと考えられる。一方、沸点が高く揮発性の低いベンゾ[a]ピレンおよびニコチンは、98%以上除去できていると考えられる。

これらの結果から、本研究で用いた試料のうち、防じんフィルタ付きホルムアルデヒド用吸引缶が最もたばこ煙の捕集性能が高く、実用可能と考えられる。また、何も対策せずに作業を行うより、活性炭入りのものであれば、使い捨てマスクでもニコチンや高沸点物質はある程度除去できるので、着用して作業を行う方が受動喫煙のリスク

を下げることができると考えられる。

本研究では、たばこ特異的ニトロソアミン類(tobacco-specific *N'*-nitrosamines; TSNAs)の測定を行うことができなかった。TSNAs には、*N*-ニトロソノルニコチン(NNN)、*N*-ニトロソアナタピン(NAT)、*N*-ニトロソアナバシン(NAB)、4-(メチルニトロソアミノ)-1-(3-ピリジル)-1-ブタノン(NNK)がある。特に、NNN は IARC の発がん性分類グループ 1、NNK はグループ 2B に勧告されている物質である。これらの物質は、高速液体クロマトグラフィー/タンデム質量分析計(LC-MS/MS)を用いて測定する方法が報告されている[14]が、本研究では測定に至らなかった。捕集性能が最もよかった防じん機能付きホルムアルデヒド吸引缶でも、リアルタイムモニタでは指示値が上昇しており、何らかの物質がフィルタを透過していることが考えられる。無害な物質であれば問題ないが、TSNAs は、ヒトの肺腺癌に関係があることが報告されているため、今後、捕集材前後の TSNAs 濃度を測定する必要があると考える。

飲食店等での使用を考えて、活性炭を使用した使い捨て式防じんマスクあるいは ACF を用いた簡易マスクについて、トルエン蒸気に対する捕集特性を調べたが、ほとんど捕集しないものから、ほぼ 100%捕集できるものまでさまざまであった。DD12A-S-1(表 3 の No.2)とハイパーマスク 2 (同 No.5) は 30 分間はほぼ 100%の捕集ができていたが、同じ活性炭を含有するマスクでも 80%以上透過するマスクもあり、実用的に問題があるものが多いことがわかった。アドール(同 No.4)は圧力損失が小さく、軽い ACF であり、1 層では、捕集は不十分であったが、

多層化することにより、捕集率は向上する可能性がある。いずれにしても、活性炭あるいは ACF を含有する DS1 以上の使い捨て式防じんマスクであれば、臭いの除去は難しいが、粉じんと VOC はある程度除去することができると考えられる。

E. 結論

本研究では、たばこ煙中の粉じんおよびガス状物質を捕集できる保護具の捕集材について検討を行った。たばこ煙の粉じんは防じんマスク用フィルタでほとんど除去でき、VOC も若干捕集できることがわかった。しかし、臭気については、防じんマスクではほとんど期待できないこと、防毒マスクでも 50% 程度の除去効果しかないことがわかった。ガス状物質については、防じんフィルタをつけたホルムアルデヒド用防毒マスク吸収缶が発がん物質を含め、最も捕集性能がよいが、使い捨て式防じんマスクでも、ニコチンや発がん物質であるベンゾ[a]ピレンはほとんど捕集できることがわかった。

以上のことから、たばこ煙の臭気についてはなお課題が残るが、健康影響の面からは、喫煙室等では防じんフィルタをつけたホルムアルデヒド用防毒マスクが、また、飲食店等では、DS1 以上の活性炭入り使い捨て式防じんマスクが利用可能であると考えられる。

参考文献

1. 日本たばこ産業(株)(2018)：2018 年「全国たばこ喫煙者率調査」。日本たばこ産業。
<https://www.jti.co.jp/investors/library/pres>
2. 中央労働災害防止協会（編）：やさしい空気環境へ。中央労働災害防止協会
3. 厚生労働省(2010)：平成 11 - 12 年度たばこ煙の成分分析について（概要）。
<https://www.mhlw.go.jp/topics/tobacco/hokoku/seibun.html>。（2019 年 5 月 20 日アクセス）
4. 伏脇裕一（2012）：喫煙による室内環境汚染と健康影響。安全工学 51(5), 297-304
5. Pazo DY, Moliere F, Sampson MM, Reese CM, Agnew-Heard KA, Walters MJ, Holman MR, Blount BC, Watson, CH, Chambers DH(2016): Mainstream smoke levels of volatile organic compounds in 50 U.S. domestic cigarette brands smoked with the ISO and Canadian intense protocols. *Nicotine & Tobacco Research* 18(9): 1886-1894
6. Eldridge A, Betson TR, Vinicius Gama M, McAdam K (2015): Variation in tobacco and mainstream smoke toxicant yields from selected commercial cigarette products. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 71: 409-427
7. (公財)健康・体力づくり事業財団：最新たばこ情報 主流煙と副流煙。
<http://www.health-net.or.jp/tobacco/risk/rs120000.html>
(2019 年 5 月 25 日アクセス)
8. 日本産業衛生学会(2010)：発がん物質暫定物質の提案理由、タバコ煙、許容濃度等の勧告（2010 年度）。産業衛生学雑誌 52: 258

9. 厚生労働省(2019): 受動喫煙防止対策に関する事項. 平成 29 年「労働安全衛生調査(実態調査)」の概況. 厚生労働省.
10. Nelson GO, Harder CA(1974): Respirator cartridge efficiency studies: V. Effect of solvent vapor. *Am Ind Hyg Assoc J* 35:391-410.
11. Hori H, Ishimatsu S, Fueta Y, Hinoue M, Ishidao T(2013): Characteristics of a real time monitor using the interference enhanced reflection method for organic vapors. *J UOEH* 35: 267-272.
12. Hori H, Ishimatsu S, Fueta Y, Hinoue M, Ishidao T (2015): Comparison of sensor characteristics of realtime monitors for organic vapors. *J Occup Health* 57: 13-19.
13. 保利 一, 田中勇武, 秋山 高(1985): 活性炭固定層における混合有機溶剤蒸気の破過時間の簡易推算法. *日本化学会誌* 1985: 2087-2093.
14. 杉山晃一, 稲葉洋平, 大久保忠利, 内山茂久, 高木敬彦, 櫻田尚樹(2012): 国産たばこ主流煙中たばこ特異的ニトロソアミン類の異なる捕集法を用いた測定. *日本衛生学雑誌* 67 : 423-430

F. 研究発表

1. 論文発表

- 1) 真如 一彬, 石田尾 徹, 山本 忍, 樋上光雄, 石松 維世, 笛田 由紀子, 保利一(2019): 受動喫煙を防止するための効果的な吸着フィルターおよび吸着剤の検討. *産業衛生学雑誌*, 61 (臨時増刊号) : 442.
- 2) 中村 麻里夢, 石田尾 徹, 山本 忍, 樋上光雄, 石松 維世, 笛田 由紀子, 保利一(2019): 受動喫煙を防止するための効果的な呼吸用保護具の吸着剤の検討. *産業医科大学雑誌* 41(1):121
- 3) 塚本 梨奈, 石田尾 徹, 山本 忍, 樋上光雄, 石松 維世, 笛田 由紀子, 保利一(2019) : 有機溶剤蒸気に対する両親媒性吸着材(セピオライト/活性炭)の捕集特性の検討. *産業医科大学雑誌* 41(1):121
- 4) 真如 一彬, 石田尾 徹, 山本 忍, 樋上光雄, 石松 維世, 笛田 由紀子, 保利一(2020) : 受動喫煙を防止するための捕集材の検討. *産業医科大学雑誌* 42(1) : 129.

2. 学会発表

- 1) 中村 麻里夢, 石田尾 徹, 山本 忍, 樋上光雄, 石松 維世, 笛田 由紀子, 保利一(2018) : 受動喫煙を防止するための効果的な呼吸用保護具の吸着剤の検討. 第36回産業医科大学学会, 北九州. 2018年10月
- 2) 中村 麻里夢, 石田尾 徹, 山本 忍, 樋上光雄, 石松 維世, 笛田 由紀子, 保利一(2019) : 受動喫煙を防止するための効果的な呼吸用保護具の吸着剤の検討. 第36回産業医科大学学会, 北九州. 2018年10月
- 3) 保利一(2018) : 労働環境における工学的対策の変遷と今後の展望 — 2. 専門家の立場から. 第58回日本労働衛生工学会, 第39回日本作業環境測定研究発表会, 富山, 2018年11月
- 4) 真如 一彬, 石田尾 徹, 山本 忍, 樋上光雄, 石松 維世, 笛田 由紀子, 保利一

- (2019) : 受動喫煙を防止するための効果的な吸着フィルターおよび吸着剤の検討. 第 92 回日本産業衛生学会, 名古屋, 2019 年 5 月
- 5) 真如 一彬, 石田尾 徹, 山本 忍, 樋上光雄, 石松 維世, 笛田 由紀子, 保利一(2019) : 受動喫煙を防止するための捕集材の検討. 第 37 回産業医科大学学会, 北九州. 2019 年 10 月
- 6) 真如 一彬, 石田尾 徹, 山本 忍, 樋上光雄, 保利 一(2019) : 受動喫煙を防止するための捕集材の検討. 第 59 回日本労働衛生工学会・第 40 回日本作業環境測定研究発表会, 郡山, 2019 年 11 月.
- 7) 保利 一, 真如一彬, 石田尾徹, 山本忍, 樋上光雄 (2019) : 受動喫煙防止のための効果的な呼吸用保護具のフィルターの検討. 2019 年度呼吸保護に関する研究発表会, 東京. 2019 年 11 月
- 8) 保利 一、真如一彬、山本 忍、樋上光雄, 石田尾 徹 (2020) : 受動喫煙を防止するための呼吸用保護具のフィルターの検討. 第 93 回日本産業衛生学会, 旭川, 2020 年 5 月
- G. 知的財産権の出願・登録状況
なし