

残火処理活動現場等に存在する 粉塵等の検証と防護方策（第2報）

中西 智宏^{*}，黒田 裕司^{**}，鳥谷 淳^{**}

概要

災害現場で活動する消防隊員や消防団員の安全を確保するため、平成20年度の検証では居住用途部分が延焼した火災現場において、粉塵及び有毒ガスの分析測定をするとともに、防塵マスクの捕集効率効果を検証した。本検証は居住用途以外の部分が延焼した火災現場において行った。

その結果、残火処理現場から採取した粉塵の平均粒子径は $0.3975\mu\text{m}$ で、これは肺胞への到達率が50%になる $4\mu\text{m}$ よりもはるかに小さく、確実な粉塵に対する防護措置を行う必要があることがわかった。防護措置としてはN95及びDS2マスクを着用することで、粉塵濃度が管理濃度以下となり、これらのマスクの着用は粉塵に対する有効な防護措置となることがわかった。

1 はじめに

工場、事務所及び作業所等での作業環境については、労働安全衛生面での規制に基づく措置が行われている。一方、残火処理活動現場（以下「残火現場」という）及び火災原因調査現場（以下「調査現場」という）といった消防に特有の環境は規制の対象外となっており、そのため、健康を害する粉塵や有毒ガスの存在については十分に明らかとはなっていない。しかしながら、消火活動現場における屋内進入や救助検索活動については、空気呼吸器の着装により一定の安全性を確保している。さらにアスベスト粉塵が飛散する環境下での、残火現場及び調査現場については防塵マスク等の着用により対応している。

平成20年度の検証では、主として居住用途の火災の残火現場及び調査現場における粉塵及び有毒ガスの濃度を測定し、災害現場で活動する職員の健康被害に対する安全性をより一層向上させるための方策について検証を行った¹⁾。そこで本検証では主として工場、事務所、作業所及び学校等の居住用途以外の建物火災について検証を行った。

2 検証状況

本検証は残火現場5件について行った。（写真1参照）検証を実施した建物火災の焼損程度別の状況及び構造別の状況を、それぞれ表1及び表2に示す。



写真1 残火現場での検証

表1 焼損程度別の状況

焼損程度	残火現場
全焼	2件
部分焼	1件
ぼや	2件
合計	5件

表2 火災建物用途別の状況

用途	残火現場
遊技場	1件
作業所	1件
倉庫	2件
店舗	1件
合計	5件

3 測定方法

(1) 粉塵の質量濃度

ア 測定装置

粉塵の質量濃度の測定は、分粒装置付きろ過捕集装置（柴田科学株式会社 HV-500 型、以下「捕集装置」という。写真 2 及び写真 3 参照）を使用した。平成 20 年度の検証では、試料採取は流量 9.6L/min の捕集装置を用いていたが、粉塵採取量が少なかったことから、本検証では流量 500L/min の捕集装置を使用した。フィルターは遊離ケイ酸の含有の確認を行うために、ケイ素を含んでいない PTFE フィルターを使用した。

捕集装置は、分粒装置を通過した粉塵を、フィルター上に採取するものである。24 時間乾燥させたフィルターを用いて粉塵を採取し、その後採取したフィルターをデシケーター内で 24 時間乾燥した後、電子天秤（METTLER TOLEDO 社 AX205 型）により質量測定を行った。天秤により秤量した粉塵の質量を、吸引した試料空気量で除して質量濃度を求めた。粉塵採取前及び採取後のフィルターを写真 4 に示す。

本検証で使用した分粒装置は、労働安全衛生法に基づく作業環境測定基準（以下「測定基準」という）第 2 条第 2 項に規定するもの²⁾で、流量 500L/min のとき 4 μm の粒子に対して 50% の分粒特性を有する。また、使用したフィルターは、測定基準第 1 条に規定するもの³⁾で、仕様を表 3 に示す。



写真 2 分粒装置付きろ過捕集装置



写真 3 分粒装置付きろ過捕集装置の設置状況

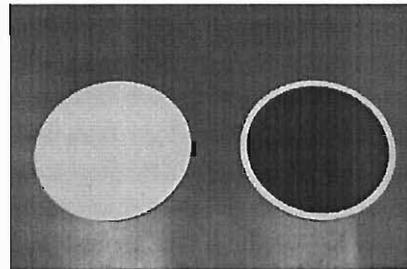


写真 4 フィルター（左：採取前、右：採取後）

表 3 フィルターの仕様

ろ過材	PTFE フィルター
圧力損失*1	0.21kPa
捕集効率*2	95.0%
保留粒子径*3	4 μm

*1 通気速度 5 cm/s のときの値

*2 0.3 μm のフタル酸ジオクチル粒子を分散した大気を 5 cm/s の通気速度で濾過したときの捕集効率

*3 メチルアルコール中の標準粒子を、1.0kL/h・m² の濾過速度で濾過したときの保留粒子径により求めたもの

イ 粉塵採取条件

本検証における捕集装置の設定条件を表 4 に示す。測定点は主として火点室内に設定した。

残火現場において粉塵採取を開始した時期は、3 現場については鎮圧報後に採取し（以下「残火現場①」、「残火現場②」及び「残火現場③」という）、他の 2 現場については、家屋倒壊等の恐れがあったことから鎮圧報前に粉塵を採取した。（以下「残火現場④」及び「残火現場⑤」という）

なお、本検証では粉塵採取時期は鎮圧報後で統一しており、鎮圧報前に採取した粉塵は比較対象から外れるため、残火現場④及び残火現場⑤で採取した粉塵はエネルギー分散型 X 線分析装置（日本電子株式会社 JED-2300、以下「EDS」という）付き走査型電子顕微鏡（日本電子株式会社 JSM-6390LA、以下「SEM」という）及び蛍光 X 線分析装置（日本電子株式会社 JSX-3100R II）を用いた捕集粉塵の定性及び粒度分布測定にのみ使用した。

表 4 設定条件

吸引流量	500L/min
設定点	1 点
捕集時間	10 分
高さ	床上約 1 m

(2) ガス成分の濃度測定

測定は全ての現場において粉塵採取と同時に行った。測定ガスは、一酸化炭素 (CO)、アンモニア (NH₃)、二酸化窒素 (NO₂)、二酸化硫黄 (SO₂)、塩素 (Cl₂)、シアン化

水素 (HCN) 及びホルムアルデヒド (HCHO) の7種類とした。

測定には、ガス検知警報器 (Drager 社 Multiwarn II 及び Xam-7000) にて現場で約 30 分間濃度を測定した。測定場所は捕集装置と同位置とした。

(3) 防塵マスクの粉塵捕集率の計測

残火現場①、残火現場②及び残火現場③の3現場において、防塵マスク使用時と未使用時の粉塵濃度を比較した。使用したマスクは表5に示す5種類とした。N95規格マスクは米国 NIOSH (国立労働安全衛生研究所) による検定合格品、DS1、DS2 及び DS3 規格マスクは日本の国家検定合格品であり、それぞれの性能試験方法を表6に示す。

ア 測定装置

測定には捕集装置及び粉塵計 (写真5参照) を使用して行った。捕集装置を使用しての粉塵採取に関しては、測定装置及び粉塵採取条件で示したとおりである。

粉塵計は、質量濃度ではなく相対濃度を測定するものであり、仕様を表7に示す。相対濃度とは粉塵の絶対濃度 (質量濃度あるいは個数濃度) と1対1の関係にある物理量をいう。

表5 検証に使用したマスクの粒子捕集効率の規格値

N95	95%以上
DS3	99.9%以上
DS2	95%以上
DS1	80%以上
規格外	規格外につきデータなし

表6 捕集効率の性能試験方法

	NIOSH 規格	国家規格 (日本)
試験粒子 (固体)	塩化ナトリウム (NaCl)	塩化ナトリウム (NaCl)
粒径 [μm]	0.075±0.02	0.06~0.1
試験流量	85L/min	85L/min
捕集効率の判定	200±5mg 供給する間の最低値	100mg 供給する間の最低値



写真5 粉塵計の外観

表7 粉塵計の仕様

測定原理	光散乱方式
光源	レーザーダイオード
測定範囲	0.001~10.000 mg/m ³
吸引流量	1.7 L/min

イ 測定条件

粉塵計の測定条件を表8に示す。粉塵計の測定点は主として火点室内とし、捕集装置も同様の部屋内に設定した。

表8 粉塵計の測定条件

吸引流量	1.7L/min
測定点	1点
測定時間	1分間
測定高さ	床上約1m

ウ マスクの漏れの確認

測定を行う粉塵計にマスクを装着した場合と装着しない場合で一定時間の吸入を行い、マスクの漏れの確認を実施した。測定にはA、Bの2種類の粉塵計を使用した。確認方法は粉塵計の排気部にチューブを装着し、水上置換法で一定時間に溜まる空気量を測定することによって、流れの確認を行った。以下に実験方法を写真6に示す。

実験の結果、表9に示すように、マスクの有無にかかわらず、空気量に大きな変化はなく、マスクの装着に伴う漏れはほとんど認められなかった。



写真6 粉塵計の漏れの確認状況

表9 測定結果 (単位: mL/min)

マスク	粉塵計A	粉塵計B
N95	938	1058
DS3	938	1050
DS2	953	998
DS1	930	1028
規格外	945	1185
未装着	940	1088

濃度測定には、防塵マスクを適当な大きさに切り取り、加工したシリンジでマスクを挟むようにして取り付けしたもの（以下「マスク装置」という）を使用した。なお、粉塵計とマスク装置は、市販されている指サックを使用することで、気密性を確保した。（写真7及び写真8参照）

マスク装置を採気口に装着した粉塵計（写真9参照）と装着しない粉塵計を2台使用し、同時に同じ地点で粉塵濃度を測定した。マスク装置の有無の場合での粉塵濃度を比較し、以下に示す式(1)により、マスクの粉塵捕集率を計算した。

捕集率(%)

$$= \left[1 - \frac{\text{マスク使用時の粉塵濃度 [CPM]}}{\text{マスク未使用時の粉塵濃度 [CPM]}} \right] \times 100 \dots (1)$$

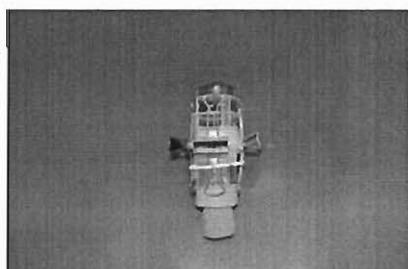


写真7 マスク装置の外観

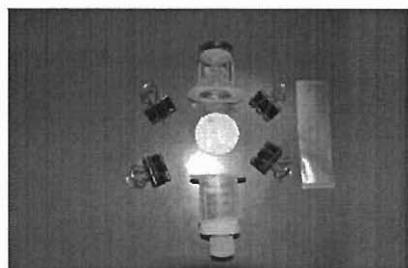


写真8 分解したマスク装置



写真9 粉塵を採取する状態

(4) 採取した粉塵の粒度分布測定

残火現場④において採取した粉塵について、粒度分布測定を行った。測定には SEM で撮影した写真について、

画像解析式粒度分布測定ソフトウェア（マウンテック株式会社 Mac-View Ver.4）を用いて解析を行った。

(5) 採取した粉塵中のケイ素含有測定

残火現場①、残火現場②、残火現場③、残火現場④及び残火現場⑤の5現場で採取した粉塵について、ケイ素含有の有無の確認を行った。測定には蛍光X線分析及びEDS付きSEMを用いた。

4 検証結果

(1) 粉塵の質量濃度

残火現場における粉塵の質量濃度の測定結果を表10に示す。なお表中の網掛けの数値は、粉塵質量濃度が管理濃度以上になった値を示している。

管理濃度とは、作業環境管理を進める過程で、有害物質に関する作業環境の状態を評価するために、測定基準に従って単位作業場所について実施した測定結果から当該単位作業場所の作業環境管理の良否を判断する際の管理区分を決定する際の指標である。管理濃度は式(2)により算定され、遊離ケイ酸の含有率により、0.025～3.00mg/m³と変化する。遊離ケイ酸とはケイ素が酸素と3次元的に結合し、他の元素とは化学的に結合していない状態の鉱物で、石英、トリジマイト、クリストバライト等の化学式がSiO₂またはSiO₂・nH₂Oで表されるものをいう。

本検証では最も厳しい値（0.025mg/m³）を管理濃度としたところ、残火現場全てにおいて管理濃度を上回った。このことから、粉塵に対して、残火現場、調査現場の両現場において、防塵マスクの装着等、何らかの防護措置が必要であると考察する。以下、管理濃度は0.025mg/m³として検討する。

表10 粉塵の質量濃度の測定結果
(網掛けは管理濃度以上を示す。)

残火現場	構造	用途 (詳細)	焼損 床面積 [m ²]	粉塵質量 濃度 [mg/m ³]
①	耐火造	複合用途 (遊技場)	412	0.21
②	木造	作業所兼住宅	0	0.25
③	木造	倉庫	110	0.08
④	木造	店舗兼住宅	70	※
⑤	耐火造	倉庫	0	※

※ 残火現場④及び残火現場⑤は測定基準外の（鎮圧報前に粉塵採取を行った）ため、粉塵質量濃度は計算していない。

$$E = \frac{3.0}{1.19Q+1} \dots (2)$$

E:管理濃度 [mg/m³]

Q:当該粉じんの遊離ケイ酸含有率

(2) ガス成分の濃度測定

ガス成分の許容濃度として、CO、NH₃、Cl₂、HCN 及び HCHO は日本産業衛生学会が示す許容濃度⁴⁾、NO₂及びSO₂ はACGIHが示す許容濃度⁵⁾を使用した。

各現場において測定した7種類のガス成分の濃度を表11に示す。COは3件中2件の現場で発生し、許容濃度の約50%の数値を示した。NH₃は3件中1件のみで発生し、許容濃度の約50%の数値を示した。HCHOは3件中1件で発生し、許容濃度の17.5倍と高い数値を示した。Cl₂、HCN及びSO₂はいくつかの現場で検出されたものの、許容濃度と比べて低い値であった。今回の測定において、NO₂はいずれの現場でも検出されなかった。

表11 ガス成分の濃度測定結果
(単位:ppm、網掛は許容濃度以上を示す。)

ガス種類	CO	NH ₃	NO ₂	SO ₂	Cl ₂	HCN	HCHO
許容濃度	50	50	3	5	1	10	1
残火現場	①	26	0	0	0.6	0.9	17.5
	②	0	0	0	0	1	0
	③	20	24	0	0	0.3	0

(3) 防塵マスクの粉塵捕集率の計測

表10に示す粉塵の質量濃度と、各マスクの粒子捕集効率の規格値から、各現場でマスクを装着したと仮定したときに装着者が曝露する粉塵の質量濃度(以下「曝露濃度」という)を計算し、計算結果を表12に示す。粒子捕集効率99.9%のDS3規格マスクについては、全く曝露せず、粒子捕集効率95%のN95規格マスク及びDS2規格マスクについて、曝露濃度は最大で0.01mg/m³となった。粒子捕集効率80%のDS1規格マスクについては、曝露濃度は最大で0.05mg/m³となり、残火現場3件中2件で管理濃度0.025mg/m³以上となることがわかった。以上の規格値を用いた計算結果から、DS1規格マスクの使用時には管理濃度以上の濃度の粉塵を曝露する現場が存在したが、粒子捕集効率99.9%以上のDS3、粒子捕集効率95%以上のN95及びDS2規格マスク使用時には、全ての現場で管理濃度以下となることがわかった。

また、残火現場①、残火現場②及び残火現場③の3現場において、マスクの粉塵捕集率の実測を行った。採気口にマスク装置を装着した粉塵計及び装着しない粉塵計

それぞれの相対濃度の測定結果を表13に示す。この測定値から、各マスクの粉塵捕集率の平均値を計測した。(表14参照)

粉塵捕集率は、DS3以外は各検定試験による規格値に比べて高い数値となった。これは、残火現場における粉塵の粒径は、規格検定の試験粒子(粒径0.06~0.1μm)に比べて大きかったことに関係すると考えられる。残火現場において採取した粉塵をSEMにより観察したところ、全ての粒径は2μm以下であった(写真10及び写真11参照)。一方、DS3の粉塵捕集率は規格値に比べて低い値を示した。これは写真7に示すマスク装置のオレンジ色の指サックに漏気があったことが原因と考えられる。指サック交換後の粉塵捕集率は、N95、DS2、DS1規格マスクの粉塵捕集率と同様に、規格値以上となった。

表12 マスクの粒子捕集効率の規格値から計算した粉塵濃度(単位:mg/m³、網掛は管理濃度以上を示す。)

マスク	N95	DS3	DS2	DS1	
粒子捕集効率(規格値)	95%	99.9%	95%	80%	
残火現場	①	0.01	0	0.01	0.04
	②	0.01	0	0.01	0.05
	③	0	0	0	0.01

※ 小数点第3位以下は四捨五入

表13 粉塵計による相対濃度測定結果(単位:CPM)

		残火現場		
		①	②	③
N95規格	マスクあり	4	0	0
	マスクなし	1044	170	26
DS3規格	マスクあり	307	0	0
	マスクなし	2340	164	55
DS2規格	マスクあり	4	1	0
	マスクなし	945	196	132
DS1規格	マスクあり	26	1	2
	マスクなし	1347	140	187
規格外	マスクあり	884	80	9
	マスクなし	1277	263	22

表14 マスクの規格上の粒子捕集効率と粉塵捕集率の測定結果(単位:%)

マスク	N95規格	DS3規格	DS2規格	DS1規格	規格外
粒子捕集効率の規格値	95	99.9	95	80	—
粉塵捕集率の実測値	99.9	95.6	99.7	98.8	53.1

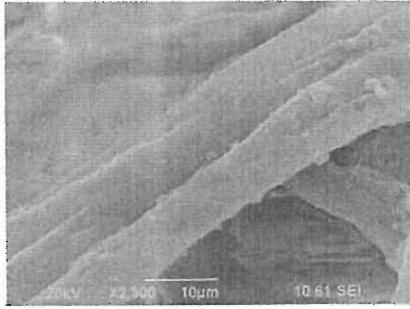


写真 10 粉塵粒子の拡大写真 (2,300 倍)

(4) 採取した粉塵の粒度分布測定結果

残火現場④で採取した粉塵の粒度分布測定結果を図 1 及び表 15 に示す。写真 11 は採取した粉塵を SEM で観察し撮影したもので、写真中の丸印は SEM 写真から判別した粉塵を粒度分布ソフトで解析しマークしたものである。粉塵は、残火現場④で採取した粉塵粒子のみ観察することができた。残火現場①、残火現場②及び残火現場③で採取した粉塵は、フィルターへの粉塵量の付着が少なく、粉塵粒子の観察ができなかった。また、残火現場⑤で採取したフィルターには大量の粉塵が一様に付着しており、粉塵粒子の区別が困難であった。

図 1 の粒度分布グラフを解析すると表 15 のようになり、残火現場④で採取した粉塵粒子の平均粒子径は 0.3975 μm であった。

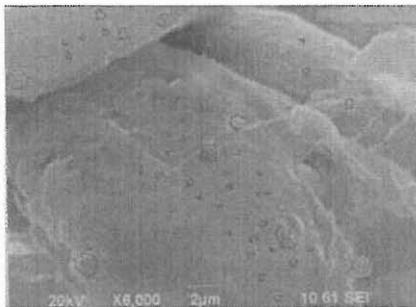


写真 11 粉塵粒子の拡大写真 (6,000 倍)

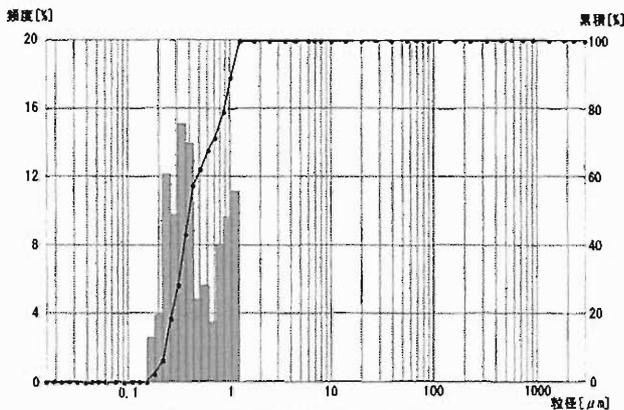


図 1 粉塵の粒度分布測定

表 15 粉塵の粒度分布測定結果

累積 [%]	粒子径 [μm]
10	0.2290
20	0.2265
30	0.3138
40	0.3521
50	0.3975
60	0.4797
70	0.6889
80	0.8827
90	1.0540
100	1.2320

平均粒子径

(5) 採取した粉塵中のケイ素含有測定

残火現場⑤で採取した粉塵の蛍光 X 線解析結果を図 2 に示す。また比較対照として未使用フィルターの蛍光 X 線解析結果を図 3 に示す。

図 2 を見分すると、1.8keV 付近の □ に示されるように、ケイ素のピークが確認できる。簡易定量結果によると、15.1%の Si (ケイ素) が含まれていることがわかる。一方、図 3 で示すように、未使用フィルターにはケイ素は確認できない。

さらに、残火現場⑤で採取した粉塵を EDS を用いて分析した結果を図 4 及び図 5 に示す。図 4 の □ に示されるように、残火現場⑤で採取した粉塵からはケイ素が検出された。これをマッピングしたものが図 5 である。なお図中では表示色が白いほど元素の含有率が高いことを示す。図 5 からはケイ素が一面に存在していることがわかる。比較対照としておこなった未使用フィルターの元素分析結果を図 6 に、元素マッピング結果を図 7 に示す。図 6 及び図 7 からはケイ素含有は確認できなかった。なお、残火現場①、残火現場②、残火現場③及び残火現場④で採取した粉塵には、ケイ素の存在は確認できなかった。

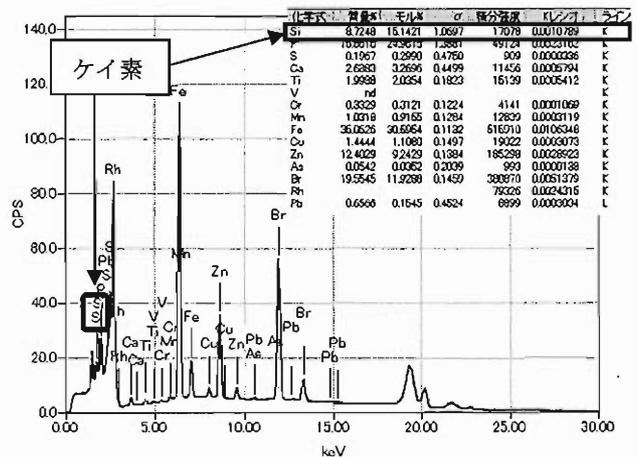


図 2 粉塵の元素分析結果

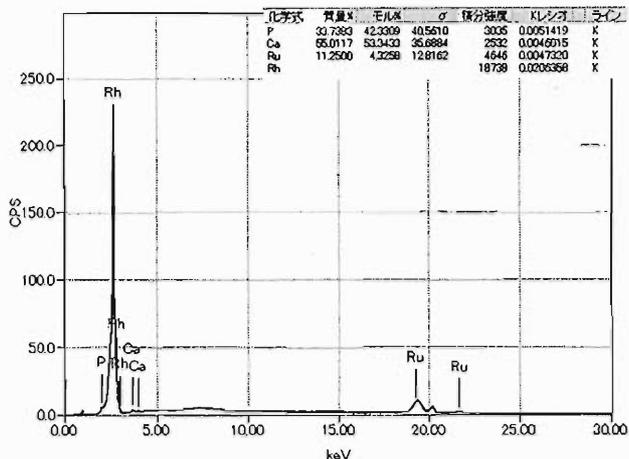


図3 未使用フィルターの元素分析結果

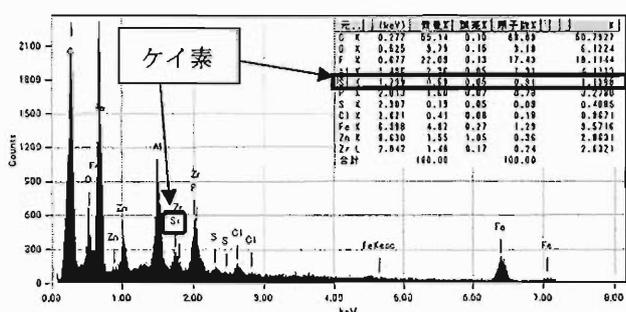


図4 EDSによる粉塵の元素分析結果

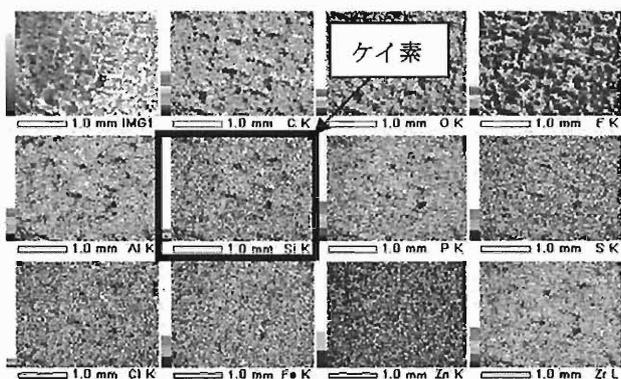


図5 EDSによる粉塵のマッピング結果

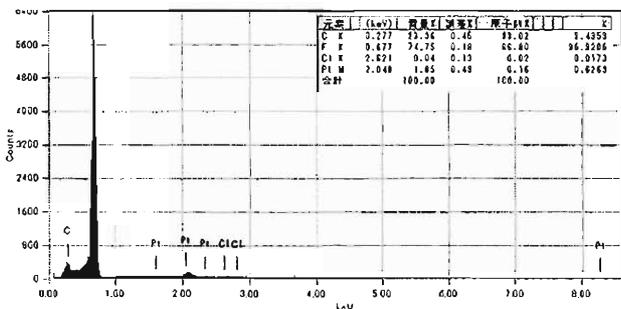


図6 EDSによる未使用フィルターの元素分析結果

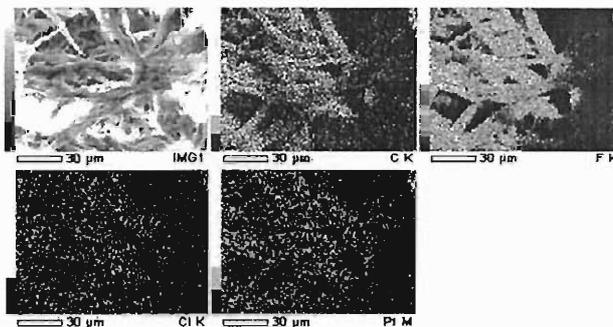


図7 EDSによる未使用フィルターのマッピング結果

5 おわりに

- 粉塵の質量濃度について、平成20年度の検証では、残火現場17件中13件(77%)が評価基準に示す管理濃度を上回っていたが、今年度の検証では、全ての残火現場において評価基準に示す管理濃度を上回っていた。このことから居住用途以外の火災においても粉塵に対する防護措置を行うことが必要である。
- 今回の検証で測定した7種類のガス成分の濃度について、HCHOについては1現場で許容濃度を上回った。この結果からHCHOについてはガス検知警報器等による警戒を行い、必要性に応じて空気呼吸器の着装等の対策を講じる必要がある。
- 粉塵の防護措置に関して、粒子捕集効率95%以上の規格マスクを使用すると、残火処理活動現場で、粉塵の質量濃度は管理濃度を最も厳しい $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ とした場合でもこの数値以下となり、有効であることがわかった。
- 粒度分布測定の結果、採取された粉塵の平均粒子径は $0.3975\mu\text{m}$ で、粉塵を吸入した場合、肺胞への到達率が50%になる $4\mu\text{m}$ よりもはるかに小さいことから、確実な粉塵に対する防護措置を行う必要がある。
- ケイ素を含まないフィルターを用いて粉塵を採取した。蛍光X線装置及び走査型電子顕微鏡を用いて元素分析を行った結果、残火現場5現場のうち、1現場でケイ素の含有を確認することができた。

[参考文献]

- 岡崎、五味、海和、木田：残火処理現場等に存在する粉塵等の検証と防護方策、平成21年度東京消防庁消防技術安全所報46号 pp. 87-95
- (社)日本作業環境測定協会、作業環境測定ガイドブック 1 pp. 3-8, 23-32
- (社)日本作業環境測定協会、作業環境測定ガイドブック 0 pp. 13-34
- 日本産業衛生学会 HP (<http://www.sanei.or.jp>)
- ACGIH HP (<http://www.acgih.org/home.htm>)

Study on the dust and other materials that exist at embers extinguishing scenes, and protective measures (Report No. 2)

Tomohiro NAKANISHI*, Yuji KURODA**, Sunao TORIYA**

Abstract

To ensure the safety of on-scene career/volunteer firefighters, the study in FY2008 measured and analyzed the dust and toxic gas generated at fires spreading from property sections for residential purposes, and examined the collection efficiency and effectiveness of dust masks. The study this time focused on fires that spread from non-residential property sections.

The result showed that the average particle size of dust collected from embers extinguishing scenes was $0.3975\ \mu\text{m}$, much smaller than $4\ \mu\text{m}$ that has a 50% chance of reaching the lungs, which indicated the need to ensure protective measures against dust. Wearing N95 and DS2 masks as protection lowered the dust concentration to below the standard control concentration, and wearing masks proved to be an effective protection against dust.