

イ 飛灰のサンプリング法

(ア) 飛灰はバグフィルタの点検口よりサンプリングした。サンプリング日は、10月〇+1日～12月〇+1日の毎日とし、当日の朝一、火葬前に行った。(1. ③による)

(イ) 100g程サンプリングし、ラベルは1. ②に準じるものとした。サンプリングは斎場側の炉裏担当者に行っていた。



バグフィルタの点検口

(2) 組成分析

組成分析は蛍光X線分析装置を用いて行った。蛍光X線分析は測定装置内の真空試料室で試料にロジウム管球からの蛍光X線を照射し、試料から発生する蛍光X線を複数の分光結晶を用いて分光し、試料中に含まれる元素組成を定量するものである。

本実験では波長分散式(WD)蛍光X線分析装置(島津製作所製、XRF-1800)を使用した。試料は高速振動試料粉碎機(島津製作所製、CMT TI-1100、容器はタングステンカーバイド製)により2分間乾式粉碎し、粉末状にしたものをアルミキャップ(39.7mmφ×11.3mmH)にとり、ブリケットプレス機(島津製作所製 MP-35)によりシリンダ内圧140kgf/cm²(表示35t)、加圧時間25秒で成型したものを測定した。本研究では、蛍光X線分析法の測定対象元素である元素番号6のC(炭素)から元素番号92の(ウラン)までを100%として規格化して構成比を算出するFundamental Parameter法(FP法)により濃度を換算した。

(3) 放射性物質の測定法

Ge半導体検出器を用いて、できるだけ多くの種類の放射性物質を測定し、自然起源以外の放射性物質の存在量を測定する。自然起源放射性物質の存在量に比べて無視できる量となる可能性も高い。本測定では、検出効率の導出にかなりの時間を要することが想定されるため、サンプル採取後、Ge半導体検出器によって、まずは試料の測定を行ってその検出結果を考慮しながら、検出効率の導出を行った。サンプルはU8容器などに移し替えて、測定に供した。

(4) 六価クロム含有量・溶出試験

含有試験は平成15年3月環境省告示第19号付表に掲げる方法に基づいて、行った。溶出試験はS48環境庁告示第13号第1.1「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」に基づいて行った。六価クロムの濃度の測定は、JIS K 0102 65.2.1 ジフェニルカルバジド[®]吸光光度法で行った。サンプルはA施設、B施設ともにそれぞれ残灰は10サンプル、飛灰10サンプルとした。サンプルの選定は濃度、性別、炉を考慮した。

2 結果及び考察

(1) 男女構成・年齢分布・測定数

施設AおよびBで採取したサンプルの女構成・年齢分布・測定数等の各種統計情報を表6-1に示す。施設Aの採取期間は2014年11月7日～12月30日、残灰総数は191、飛灰総数は98、男女構成は男性91人、女性100人、平均年齢は83才であった。この内、残灰お

よび飛灰の元素組成測定数は 124 および 40、放射性物質測定数は複数人分をひとまとめとし 30 および 27 であった。一方、施設 B の採取期間は 2014 年 10 月 30 日～11 月 20 日、残灰総数は 76、飛灰総数は 21、男女構成は男性 40 人、女性 36 人、平均年齢は 78 才であった。この内、残灰および飛灰の元素組成測定数は 70 および 21、放射性物質測定数は複数人分をひとまとめとし 12 および 7 であった。

表 6-1 男女構成・年齢分布・測定数

施設		A	B
期間(Y/M/D)		2014/11/7-12/30	2014/10/30-11/20
男女構成	男性(人)	91	40
	女性(人)	100	36
年齢分布	21-30(人)	0	1
	31-40(人)	0	0
	41-50(人)	0	3
	51-60(人)	5	3
	61-70(人)	16	13
	71-80(人)	55	18
	81-90(人)	71	23
	91-100(人)	40	14
	101-110(人)	3	1
	不詳(人)	1	0
平均年齢(才)		83	78
残灰数		191	76
残灰測定数	元素組成	124	70
	放射性物質	30(2-12人分混合)	12(4-8人分混合)
飛灰数		98	21
飛灰測定数	元素組成	40	21
	放射性物質	27(1-10試料混合)	7(1-8試料混合)

(2) 組成分析結果

残灰の元素組成を表 6-2 に示す。以下、表中の小文字アルファベット a, b, c は多重比較によって有意差有り ($p < 0.05$) の場合、異なるアルファベットで示し、有意差がない場合、同じアルファベットを用いて示した。加えて、 $a > b > c$ の順番で比較した群の代表値が有意に大きいことを示す。なお、ab は a, b どちらも有意差がないことを意味する (他のアルファベットについても同様)。

A 施設においては 2 炉からサンプリングを行った A-1 炉のサンプルは 61 サンプル、A-2 炉は 63 サンプルを分析した。元素濃度が A-1 炉より A-2 炉で統計的に有意に 2 倍以上高かった元素は Cr, Ni であり、逆の傾向が Sr でみられた。A-1 炉ではステンレス鋼の代わりにセラミック材料が使用されていることからその違いが大きく現れたと考えられた。Pb は元々検出頻度が低く、A-1 および A-2 間での有意検定は不可能であり、材質の影響とは考えにくかった。一方、B 施設においては 70 サンプルを分析した。元素濃度が A-1 炉より B 炉で統計的に有意に 2 倍以上高かった元素は Cr, Ni であり、A-1 炉と同様の結果を示した。B 炉においても A-2 炉同様にステンレス鋼が使用されていると考えられ、それにより違いが大きく現れたと考えられた。

飛灰の組成を表 6-3 に示す。A-1 炉、A-2 炉のサンプルはそれぞれ 20 サンプルを分析に供した。傾向としては、残灰と同様に Cr, Ni において、A-1 炉と A-2 炉において大きな差が現れた ($p < 0.05$)。

一方、B 炉のサンプルは 21 サンプルを分析に供した。傾向としては、残灰と同様に Cr, Ni において、A-1 炉と B 炉において大きな差が現れた ($p < 0.05$)。以上の理由は残灰と同様と考えられた。

表 6-2 残灰の元素組成

残灰									
施設	A-1			A-2			B		
元素	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差
C	61/61	5.23	2.14 a	63/63	7.41	6.36 a	70/70	6.46	1.43 b
O	61/61	42.09	0.97 a	63/63	40.60	3.64 b	70/70	40.21	1.06 c
Na	61/61	4.60	1.69 a	63/63	3.48	1.47 b	70/70	3.33	1.18 b
Mg	61/61	2.02	0.86 c	63/63	1.54	0.75 b	70/70	4.99	4.59 a
Al	61/61	8.90	5.40 a	63/63	5.35	3.39 a	70/70	0.36	0.30 b
Si	61/61	1.33	0.71 a	63/63	1.01	0.92 b	70/70	0.88	0.69 b
P	61/61	9.05	3.03 b	63/63	11.43	3.50 a	70/70	10.30	3.48 ab
S	61/61	0.23	0.15 b	63/63	0.24	0.52 a	70/70	0.22	0.11 b
Cl	61/61	0.22	0.24 b	62/63	0.68	2.76 a	70/70	0.25	0.27 b
K	60/61	1.61	0.62 a	63/63	1.29	1.58 b	70/70	1.96	0.96 a
Ca	61/61	22.93	3.23 c	63/63	25.31	5.74 b	70/70	29.64	6.30 a
Ti	60/61	0.74	0.66 a	62/63	0.49	0.39 b	69/70	0.44	0.40 b
Cr	61/61	0.08	0.21 b	63/63	0.16	0.12 a	70/70	0.14	0.11 a
Mn	57/61	0.02	0.01 a	54/63	0.02	0.01 a	64/70	0.02	0.01 a
Fe	61/61	0.70	0.61 b	63/63	0.77	0.41 a	70/70	0.59	0.43 b
Ni	27/61	0.01	0.02 b	63/63	0.04	0.03 a	70/70	0.06	0.05 a
Cu	59/61	0.03	0.05 b	62/63	0.05	0.06 a	56/70	0.03	0.05 b
Zn	61/61	0.07	0.11	63/63	0.08	0.15	70/70	0.07	0.11
Sr	61/61	0.02	0.01 a	62/63	0.01	0.00 b	70/70	0.02	0.00 ab
Pb	4/61	0.06	0.09	6/63	0.02	0.01	1/70	0.19	nc

nc: 計算不可, a > b > c の順に有意差有り($p < 0.05$), 空欄: 検定不可

表 6-3 飛灰の元素組成

飛灰									
施設	A-1			A-2			B		
元素	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差
C	20/20	18.83	8.85 b	20/20	34.30	3.99 a	21/21	18.16	7.46 b
O	20/20	26.10	4.25 a	20/20	22.27	1.00 b	21/21	24.03	1.45 a
Na	20/20	10.00	1.61 b	20/20	8.81	0.71 c	21/21	11.29	1.12 a
Mg	20/20	0.99	0.59 a	20/20	0.35	0.10 b	21/21	0.28	0.10 b
Al	20/20	1.84	1.87 a	20/20	0.98	0.26 a	21/21	0.11	0.08 b
Si	20/20	0.74	0.18	20/20	0.85	0.43	21/21	0.65	0.22
P	20/20	1.29	2.08 a	20/20	0.67	0.11 b	21/21	0.72	0.13 b
S	20/20	2.99	0.78 c	20/20	3.53	0.36 b	21/21	3.88	0.38 a
Cl	20/20	16.46	4.55 b	20/20	13.81	1.61 c	21/21	22.32	2.60 a
K	20/20	9.74	2.47 b	20/20	8.80	0.90 b	21/21	15.67	2.03 a
Ca	20/20	8.19	5.49 a	20/20	2.85	0.73 b	21/21	1.18	0.77 c
Ti	20/20	0.36	0.13 a	20/20	0.22	0.06 b	21/21	0.11	0.09 c
Cr	20/20	0.04	0.03 b	20/20	0.15	0.02 a	21/21	0.13	0.02 a
Mn	20/20	0.03	0.01 a	20/20	0.02	0.01 a	21/21	0.01	0.01 b
Fe	20/20	1.69	0.92 a	20/20	1.61	0.92 a	21/21	0.60	0.79 b
Ni	19/20	0.01	0.02 c	20/20	0.04	0.01 a	21/21	0.01	0.01 b
Cu	20/20	0.03	0.01 a	20/20	0.02	0.00 b	21/21	0.02	0.00 c
Zn	20/20	0.52	0.15 b	20/20	0.61	0.15 b	21/21	0.71	0.10 a
Sr	20/20	0.01	0.00 a	20/20	0.01	0.00 b	6/21	0.01	0.00 ab
Pb	19/20	0.03	0.01 a	20/20	0.03	0.00 a	21/21	0.02	0.01 b

nc: 計算不可, a > b > c の順に有意差有り($p < 0.05$), 空欄: 検定不可

(3) 放射性物質の種類及び濃度

表 6-4 残灰および飛灰の放射性核種濃度

残灰							
施設	A			B			
放射性核種	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差	
Cs-134(Bq/kg)	0/30	nd	nc	0/12	nd	nc	
Cs-137(Bq/kg)	0/30	nd	nc	0/12	nd	nc	
K-40(Bq/kg)	10/30	590	183	9/12	892	237	

nd: 不検出, nc: 計算不可

飛灰							
施設	A			B			
放射性核種	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差	
Cs-134(Bq/kg)	3/27	3.54	0.717	2/7	25.1	7.10	
Cs-137(Bq/kg)	5/27	65.5	22.4	7/7	265	72.0	
K-40(Bq/kg)	25/27	4348	1591	7/7	9676	1839	

施設							
A-1				A-2			
放射性核種	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差	
Cs-134(Bq/kg)	2/9	3.89	nc	1/9	2.83	nc	
Cs-137(Bq/kg)	4/9	70.6	22.2	1/9	45.1	nc	
K-40(Bq/kg)	9/9	3838	1934	7/9	4005	953	

nc: 計算不可

残灰および飛灰の放射性核種濃度を表 6-4 に示す。残灰の A、B 両施設から検出されず、カリウム 40 のみ検出された。このことから、混合による 100 検体ほどの分析においても Sr や I といった医療用の放射性物質の検出はなかった。

A 施設の飛灰試料の内、1 サンプルを用いて A-1 炉および A-2 炉が区別できるものがそれぞれ 9 サンプルあったため、それらについても表 6-4 中に示した。これら以外は A-1 炉および A-2 炉の複数サンプルが混合した状態で分析した。飛灰については、ごくわずかに Cs-134、Cs-137 が検出された。しかしながら、合わせて 300Bq/kg 以下であった。都市ごみ焼却灰等では現在、Cs-134 は Cs-137 に対して 1/4 程度あるが、本調査ではやや Cs-134 が低い結果であった。検出下限に近いレベルであることも影響していると考えられる。残灰と同様、医療用の放射性物質の検出はなかった。K-40 のレベルは A 施設で 4400Bq/kg 程度、B 施設で 9700Bq/kg 程度であった。K-40 は天然に存在する代表的な放射能で、太陽系がつくられた時から存在している。同位体存在比は 0.0117% で、カリウム 1g に放射能強度が 30.4 ベクレルの K-40 が入っている。つまり、この計算では残灰には 300~470Bq/kg 程度、飛灰には 2670Bq/kg~2950Bq/kg 程度含まれることになる。測定値はやや大きいと同じオーダーであった。なお、A 施設の K-40 の検出数は 25 であり、A-1 炉および A-2 炉合計の検出数 16 よりも 9 サンプル多い。これは上記理由で A-1 炉と A-2 炉の区別がつかない試料によるものである。K-40 の平均値、標準偏差の違いも同様の理由による。

本研究では、医療用の放射性物質が検出されなかったが、事故が起こりうることを想定すると、サーベイメータなどによりスキャンすることはありうる。放射性物質のモニタリングポストが反応することもあることから、サーベイメータで十分検出されうるものであると考えられる。

(4) 六価クロム含有濃度および溶出濃度

六価クロムの含有濃度（含有）、六価クロム溶出濃度（溶出）の結果を表 6-5 に示す。各サンプルを 3 回測定し、平均値および標準偏差を同表に示す。溶出濃度は、残灰の 1 サンプルのみ $< 0.05\text{mg/L}$ となり、環境基準 (0.05mg/L) を満たしたが、残りのサンプル 19 サンプルはすべて環境基準を超えるデータが検出された。飛灰と残灰を比べると、残灰でばらつきが大きい傾向が見られた。

全量 VS 含有、全量 VS 溶出、含有 VS 溶出の関係を図 6-1 に示す。全量 VS 含有、含有 VS 溶出の相関係数は $R^2=0.30$ で正の比例関係があった。相関係数は高くないが、六価クロム量は大きくはクロム全量に比例することを示している。つまり、その変換割合が濃度によらず、ほぼ同じであることを示している。また、含有 VS 溶出についても同様で、六価クロムとして含有されるとある比例関係で溶出することを意味している。しかしながら、全量 VS 溶出では相関係数は小さく、関係性は薄かった。

また、よく見ると、飛灰については六価クロムが含有されるとほぼ溶出すると言えるが、残灰については必ずしもそうではなく、六価クロムとして飛灰同様にほぼ全量が溶出するものがあるが、逆に数%以下の溶出というサンプルもあった。この差については今後より詳細に見ていく必要がある。

表 6-5 六価クロム含有量及び溶出濃度

炉	性別	年齢(才)	溶出試験(mg/L)			含有試験(mg/kg)			
			平均	標準偏差	変動係数(%)	平均	標準偏差	変動係数(%)	
残灰	A-1	男	71	14	1.7	12	130	10	7.7
		男	82	36	1.2	3.2	257	64	25
		女	95	0.18	0.11	63	570	36	6.3
		女	74	61	3.6	5.9	440	96	22
	A-2	男	66	0.22	nc	nc	5.3	0.91	17
		女	80	36	3.5	9.6	427	38	8.9
		男	79	<0.05	nc	nc	147	15	10
		女	60	0.05	nc	nc	107	32	30
飛灰	A-1	男	81	2.3	0.12	5.1	200	10	5.0
		女	86	0.14	0.08	53	44	13	29
				2.1	0.64	30	29	12	40
				5.6	0.42	7.4	48	10	21
	A-2			1.1	0.0	0.0	12	1.2	9.9
				2.6	0.15	5.8	34	12	34
				3.6	0.80	22	9.1	2.5	28
				36	3.1	8.6	187	47	25
		33	1.2	3.5	227	31	13		
		13	1.0	7.7	210	36	17		
		21	2.1	10	170	10	5.9		
		17	1.7	10	101	25	25		

nc: 計算不可

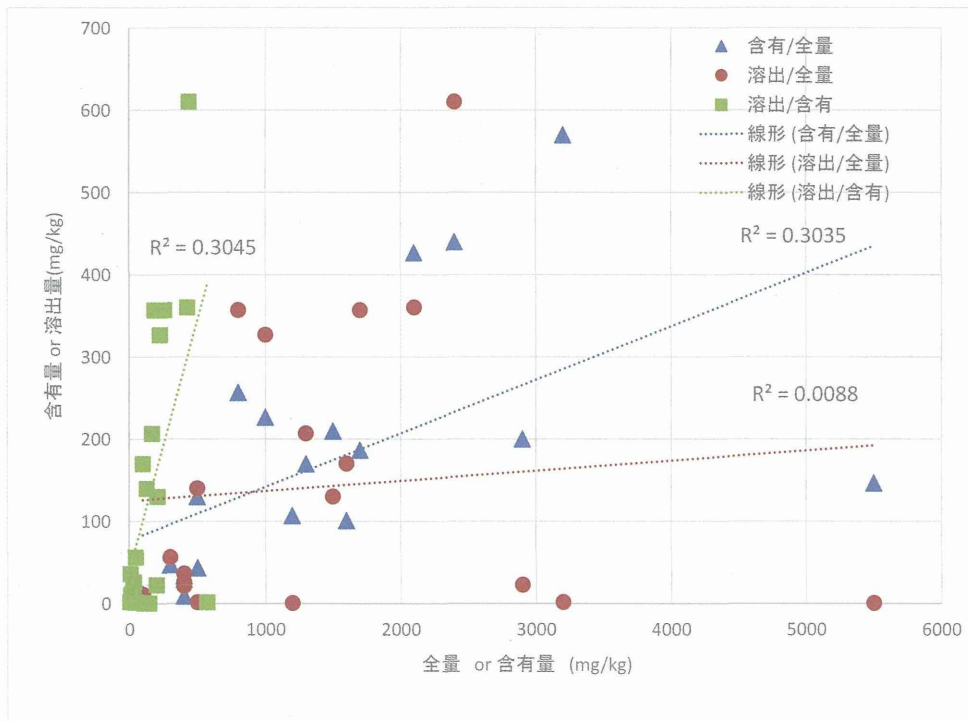


図 6-1 クロム全量、含有量、溶出量の関係

第3節 火葬場における作業環境測定

1 調査方法

(1) サンプルング

単位作業場所* での計測を実施した。

ア 炉の裏側でご遺族が不在時のみに連続運転

(ア) ハイボリュームサンプラーによる** 全粒径の粒子状物質の捕集を、就労時間に実施した。

(イ) ロープレッシャーインパクターによる粒径毎の粒子状物質の捕集を、就労時間に実施した。

イ 炉の表側でご遺族が不在時のみに連続運転

(ア) デジタル粉じん計により、作業環境測定法による A 測定を実施した。同一測定箇所にて、温湿度計を設置した。

(イ) 単位作業場における作業中に、粒度分布計測器 (SMPS+OPS) または (FMPS+OPS) にて個数濃度をモニタリングした。

ウ 炉の表側でご遺族が不在時に随時測定

(ア) 作業場での気流を調査するために、発煙装置、熱線風速計を用いて風向や風速を測定した。

(イ) 作業者の行動範囲、従事時間、作業内容を調査、ヒアリングした。

* 単位作業場所は、粒子状物質が高いと予測される炉の周辺を想定している。

**「作業環境測定ガイドブック 2 電離放射線関係」(社団法人日本作業環境測定協会)、「廃棄物等の放射能調査・測定法暫定マニュアル」(独立行政法人国立環境研究所)に従い測定を行った。

エ 持込み装置

主な大型装置は下の 5 項目で、これに加え温湿度計などの小型機器を持参した。10～300 nm の粒径に対する個数濃度測定を行う粒度分布計測器において C 調査地では SMPS を用い、A 調査地では時間分解能の高い FMPS を用いて測定を行った。

(ア) ロープレッシャーインパクター (LP-20、東京ダイレック)、1 点

全粒径粒子をインパクターで分級し、各ステージで一定の粒径幅の粒子をフィルターに捕集する。分級範囲は、粒子径が 0.06～12 μ m。



【サイズ・容量】

W350×D177×H450mm、質量：12.5 kg

(イ) LP-20 用真空ポンプ (MSV-380、東京ダイレック)、1 点

上のインパクトに接続されるオイルフリーポンプ。計測時にポンプ稼働の騒音が発生する。



【サイズ・容量】

W600×D235×H300mm、質量：34 kg

(ウ) ハイボリュームサンプラー (HVC-500N、柴田科学)、1 点

全粒径の粒子状物質を石英フィルターに捕集する。捕集時間と積算流量が記録できるため、これらの値から体積当たりの重量濃度を求める。



【サイズ・容量】

W530×D160×H230mm、質量：9.5 kg

(エ) SMPS3910 (TSI)、1 点

粒子径が 10～300nm の個数濃度を、一定の粒径毎に測定する。約 1 分間で個数濃度を計測可能。バッテリー駆動により電源は不要。



【サイズ・容量】

W450×D230×H390mm、質量：8 kg

(オ) FMPS3091 (TSI)、1 点

粒子径が 5.6nm～560nm の個数濃度を、一定の粒径毎に測定する。約 1 秒間で個数濃度を計測可能。



【サイズ・容量】

W704×D343×H439mm、質量：32 kg

(カ) OPS3330 (TSI)、1点

粒子径が $0.3\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ の個数濃度を、一定の粒径毎に測定する。約 30 秒間で個数濃度を計測可能。バッテリー駆動により電源は不要。



【サイズ・容量】

W210×D220×H130mm、質量：2 kg

(キ) デジタル粉じん計 (LD-3、柴田科学)、3点

サブミクロンからミクロンサイズの粒子数をカウント値として計測する装置。カウント値は換算計数 (K 値) を用いて、質量濃度に変換できる。



【サイズ・容量】

W70×D105×H185mm、質量：1.2 kg

(2) 調査地点

ア C調査地

(ア) 見取図と調査エリアの状況

- C調査地の炉は40年近く稼働しており、前室の無い炉のみの構造。
- 灯油によるバーナーで、燃焼条件などは作業員の経験から判断。
- 遺族不在時でも、マスクなどの保護具の着用は無い。
- 炉の前の部屋は、換気などの装置は無く、開口面の大きさから成行き。
- A測定は炉の前の部屋での清掃時を対象とした。
- B測定は炉裏の燃焼時と、炉の前の部屋の清掃時を対象とした。

(イ) 調査スケジュールと状況

調査内容と炉の運転スケジュールを図6-3に示す。この他の運転に関する情報を下に記す。

- 炉の運転は昼を挟んで2回であった。
- 燃焼中の炉裏は、目視で確認ができる程度の煙濃度であった。
- 燃焼直後の冷却開始時と、清掃時の灰をスコップで集める作業時にも、煙濃度が高い。
- 台座の上に敷く石灰と、掃除機で集めた埃を試料として持ち帰った。

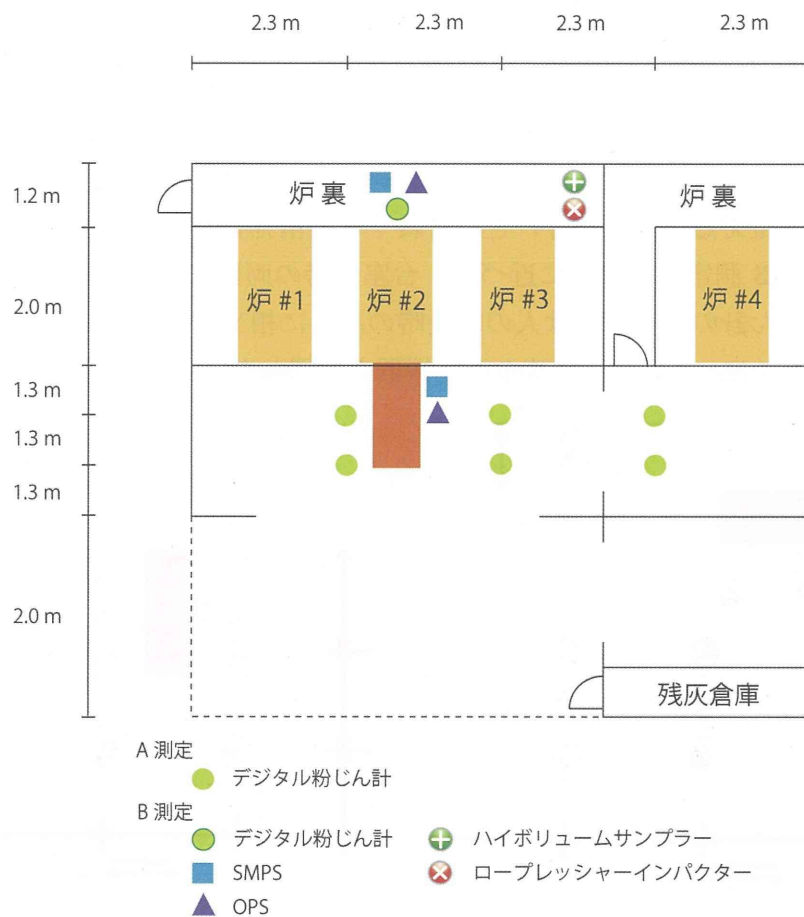


図 6-2 C 調査地の見取図と測定項目とその場所

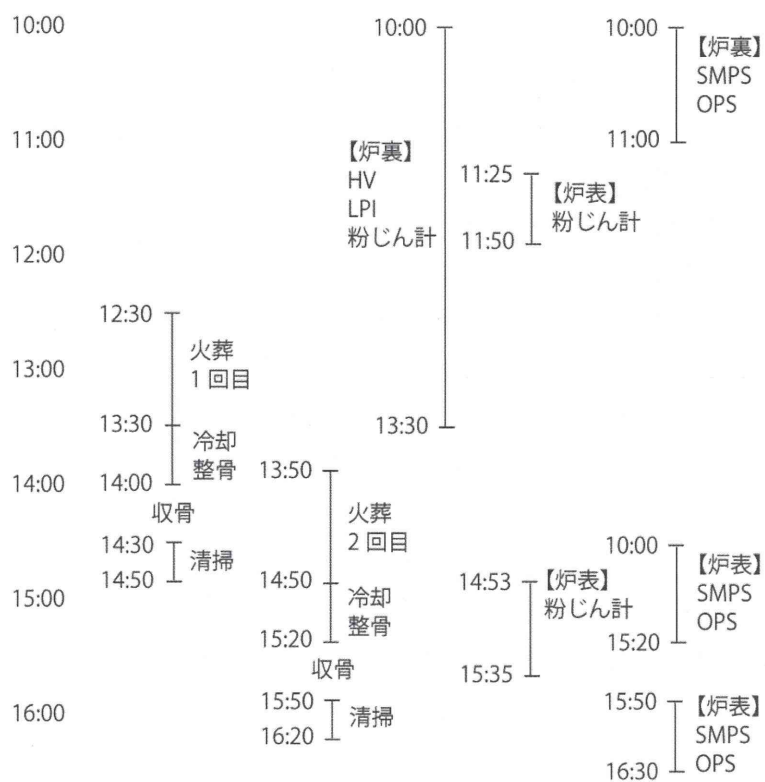


図 6-3 調査と炉の運転スケジュール

(ウ) 測定機器の設置場所

図 6-4 に示す通りに、粉じん計 3 台を炉の奥から手前に移動させることで、6 点（等間隔抽出）の観測を行った。また、SMPS と OPS による計測（発生源近傍の B 測定）は火葬中に炉の表と裏で行った。なお、火葬終了後の作業としては、遺族による納骨前に御骨を整える作業（整骨）と納骨終了後の清掃作業が行なわれた。それぞれの作業に対して B 測定は作業中に近づき、台座近傍の両側に装置を移動させて測定を実施した。粉じん計の設置高さは人の呼吸時の高さに相当する 120～150 cm に設定した。以下の図 6-4 に、2 号炉作業時の測定機器を設置したレイアウトを示す。

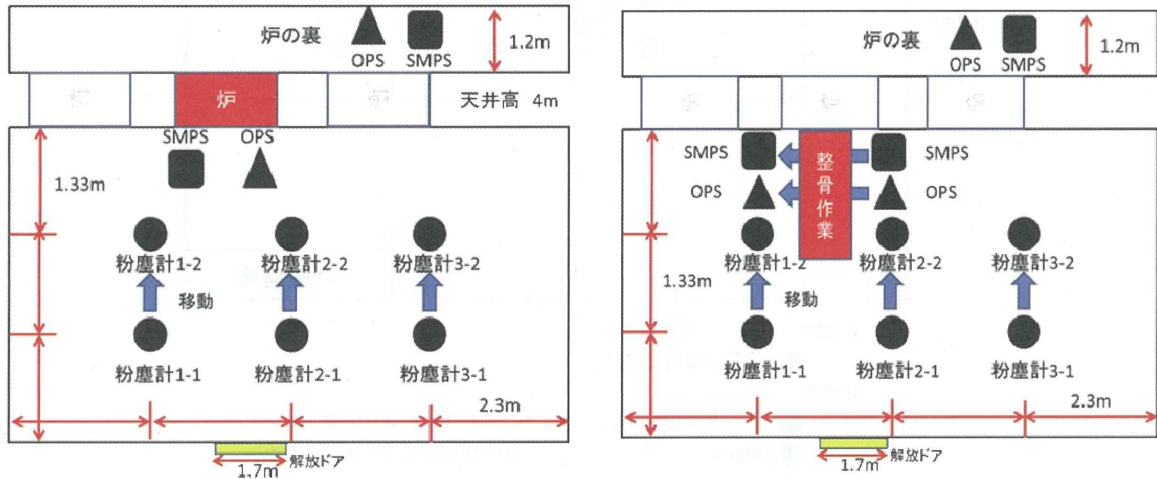


図 6-4 2 号炉作業時の測定機器設置レイアウト

左図：燃焼中、右図：冷却、整骨、清掃作業時

イ A 調査地

(ア) 見取図と調査エリアの状況

A 調査地の見取図と測定項目とその場所を図 6-5 に示す。また、調査地の状況や作業環境に関する情報を下に記す。

- a タイプの異なる 2 系統が 10 炉稼働。
- b 冷却および整骨を行うための前室がある。
- c 炉と前室を格納している対象作業場は換気システムが整備された室内。
- d 燃焼に従事していた作業者は 2 名。
- e 保護メガネ、保護面の着用がなされていた。
- f 飛灰を回収するフィルターが設置されており、これらのメンテナンス業務も行っている。

(イ) 調査スケジュールと状況

調査内容と炉の運転スケジュールを図 6-6 に示す。HV サンプラー、LPI は観測の始めから終わりまで上図の位置に固定し、サンプリングを実施した。粉じん計は時間と作業工程を踏まえた上で 15 分間の観測を粉じん計毎に 7 回ずつ、炉の奥と手前とで前後に移動させて行なった。粉じん計の設置高さは人の呼吸時の高さに相当する 120～150cm に設定した。

また、FMPS と OPS は発生源近くで測定（B 測定）を行うため、単位作業中に近傍へ

移動させ、台座の冷却および整骨、清掃作業時における飛散粒子を測定した。炉の燃焼が終わると台座は局所排気装置であるコンパートで仕切られた前室に移動し、冷却後の整骨作業時には、前室の扉を開けて作業を開始する。作業が終わると前室の扉を閉じ、収骨へと移行する。その後、前室の扉を再び開けて清掃作業を行った後、台座は再び炉へと戻る。清掃作業時には、マグネットによる金属の回収、ステージの回収、骨などの回収が行なわれ、掃除機をかけた後に台座の保護材としてアルミナを撒く。

整骨作業と清掃作業はそれぞれ数分間で行うため、平均粒度分布としては炉ごとに一括して求めた。また作業別の濃度の経時変化も示す。炉の作業は同時並行で行われるため、計測は整骨のみを観測した炉と整骨と清掃を通して観測した炉とに分かれた。

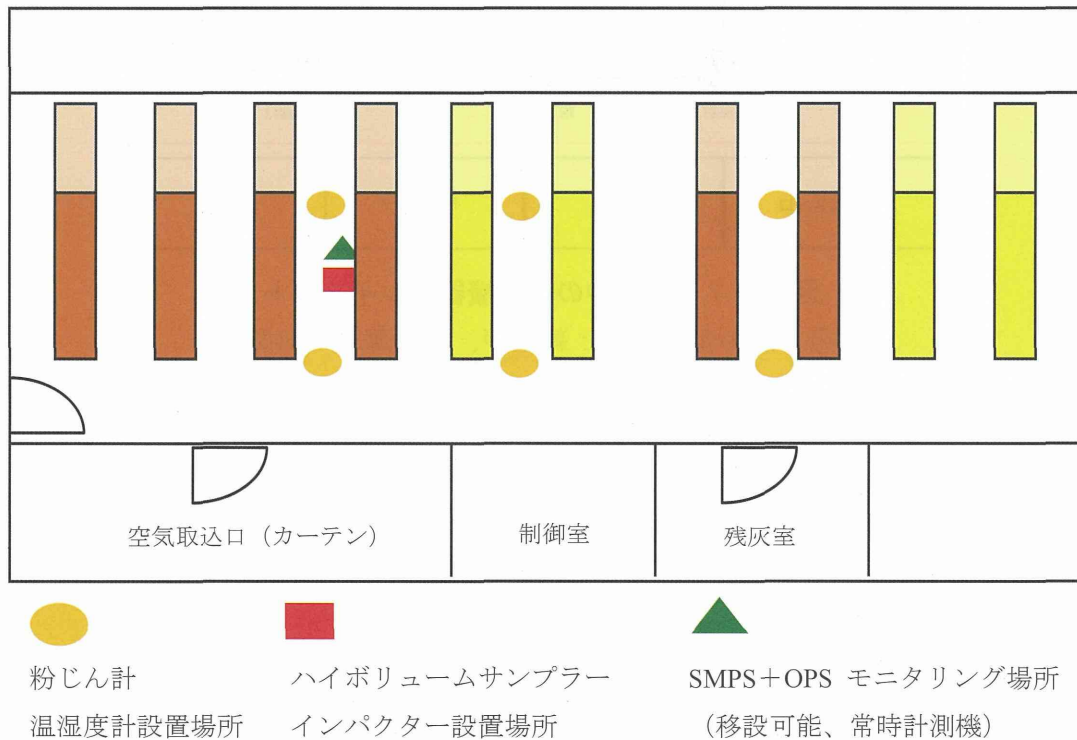


図6-5 A調査地の見取図と測定項目とその場所

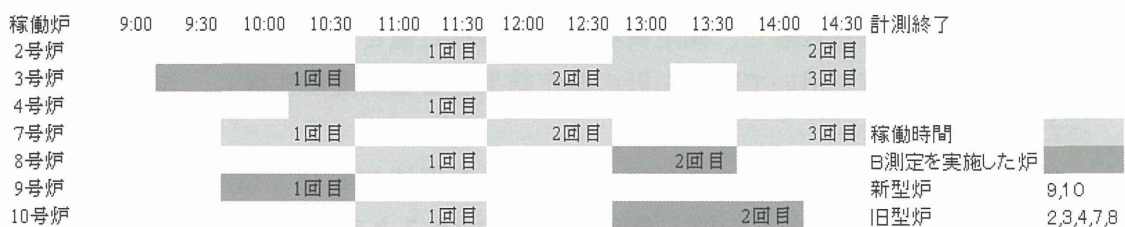


図6-6 炉の運転スケジュール

グレーは運転時間帯を示し、濃いグレーはB測定を実施した炉を示す。

2、3、4、7、8号炉は旧型、9、10号炉は新型炉であった。

(ウ) 測定機器の設置場所

B測定の実施に伴って観測器（FMPSとOPS）を作業中に計測炉付近へ移動させた。粉

じん計による測定では、作業場の面積をおおよそ均等に割り振り、3機を火葬炉の手前と奥に移動させることによって6点観測を行った。

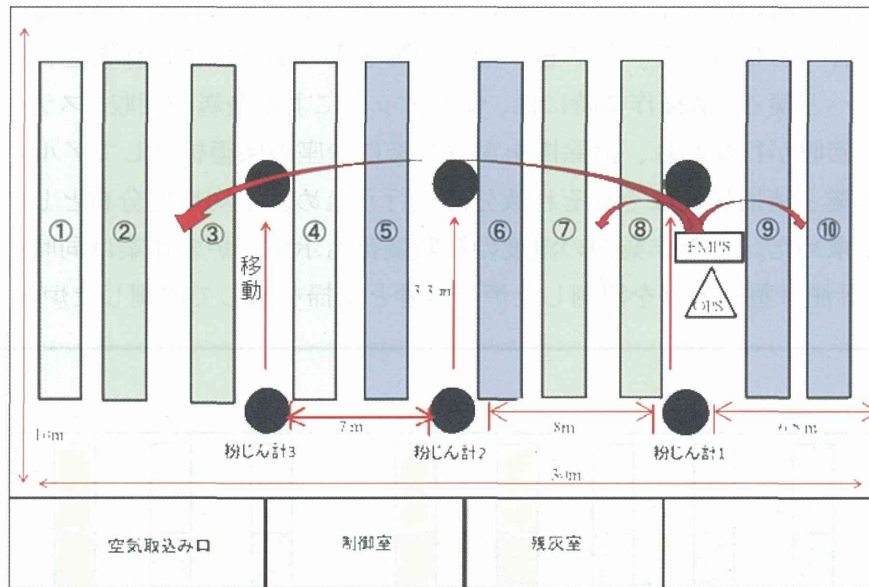


図6-7 作業中の測定機器のレイアウト

番号：炉の番号、青：新型炉、灰・薄緑：旧型炉

(3) 粉じん計による作業環境測定

ア A 測定評価方法

粉じん作業場において、相対濃度計を用いて測定して得られた相対濃度（粉じん計では1分間の当たりのカウント数（cpm））から質量濃度を求めるには相対濃度値に質量濃度変換係数 K 値を乗じて質量濃度を算出する。

$$K = C / (R_D - D) \quad (6.1)$$

C : 質量濃度 [mg/m^3]

R_D : 粉じん計によるカウント数 [cpm]

D : バックグラウンド値

文献値との比較も考慮し、測定現場から得られた値と文献値の両値を使用して計算した。これらの K 値を用いて粉じん計の測定結果を質量濃度に変換し、作業環境評価を行った。

作業環境評価は以下の図6-8の通りに、第一評価値 EA1（5%相当の推定濃度）と第二評価値 EA2（平均濃度からの推定濃度）を算出することで、これらを境界とした1~3の管理区分として評価をする。なお、各区分の解釈は、第1管理区分（作業環境管理が適切であると判断される状態）、第2管理区分（作業環境管理になお改善の余地があると判断される状態）、第3管理区分（作業環境管理が適切でないとは判断される状態、再測定と改善措置が必要）となっている。尚、作業環境測定における管理区分表は表6-6の通りとなっている。

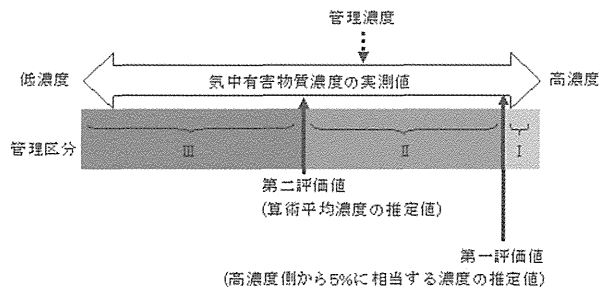


図 6-8 管理区分に対する管理濃度の概略図

表 6-6 作業環境測定における管理区分表

		A測定		
		第1評価値 < 管理濃度	第2評価値 ≤ 管理濃度 ≤ 第1評価値	第2評価値 > 管理濃度
B測定	B測定値 < 管理濃度	第1管理区分	第2管理区分	第3管理区分
	管理濃度 ≤ B測定値 ≤ 管理濃度 × 1.5	第2管理区分	第2管理区分	第3管理区分
	B測定値 > 管理濃度 × 1.5	第3管理区分	第3管理区分	第3管理区分

各サンプル点の測定値に対する幾何平均を求める。

$$\log M = (\sum \log C_i) / n \quad (6.2)$$

また幾何標準偏差 σ は、

$$\log \sigma = \{ \sum (\log C_i)^2 - n (\log M)^2 \} / (n-1) \quad (6.3)$$

求める EA_1 は、次の式で求めた。

$$\log M_{A1} = \log M + 1.645 \log \sigma \quad (6.4)$$

粉じんの管理濃度の式は、

$$E = 3.0 / (1.19 Q + 1) \quad (6.5)$$

E : 管理濃度 [mg/m³]

Q : 遊離けい酸含有率 [%]

粉じんの管理濃度値は、粉じんの遊離珪酸が 100% 含まれたとすると 0.025mg/m³、0% とすると 3mg/m³ となる。

イ 発生源に対する作業環境測定 (B 測定) 評価方法

SMPS と OPS を用いて、発生源近傍にて個数濃度の測定を行った。得られた濃度 (個/cm³) に対し、各粒径ごとに質量の変換式を用いた。最も高い個数濃度を記録した整骨時に対し、最大時の個数濃度を重量濃度に換算し、B 測定値とした。変換モデルは、今回測定に使用した計測器 SMPS を用いたディーゼルエンジンの評価研究に関する文献を参照した⁵⁾。下記の式 (6.6) を用い、各粒径ごとに質量へ換算し、個数に応じて乗算した後、計測した全粒径の合計質量を体積 (m³) あたりに換算して求めた。

変換式

$$\text{Mass (kg)} = 6.05 \times 10^{-24} dp^{2.34} \quad (6.6)$$

(4) 電子顕微鏡による観察と元素分析

作業環境中に発生した粉じんに対し、ハイボリュームサンプラー (HV) による全粒径に対する捕集と、ロープレッシャーインパクト (LPI) による粒径別捕集を行った。また粉じん捕集に用いた石英繊維フィルターに対して、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope; SEM, JEOL JSM-5600T) を用いて、捕集した粉じんの形態を観測した。同時に、未使用のフィルターをブランクフィルターとして比較することで、フィルター表面に堆積した粉じんに対し、元素の定性分析と簡易的な定量分析を行った。元素の同定には蛍光 X 線を使用した。

(5) ICP-MS による定量分析

HV サンプラーで用いた石英繊維フィルターと、LPI で用いたメンブレンフィルターに対して ICP-MS (Thermo Scientific X series 2) による定量分析を行った。なお LPI のフィルターは、B 測定でピーク粒径が 60 nm 付近であったことから、その粒径を分級捕集したものに対して分析を行なった。測定の前処理としては、フィルターに濃硝酸 10 ml を加え、マイクロウェーブ分解装置 (Mars OneTouch Technology, CEM) を用いた分解を行なった。分解条件は 180~200 °C において三段階に温度を上昇させ、約 1 時間半かけて加熱分解した。その後、超純水を加えて硝酸の濃度を 1 N に調整した。また内標準液はイットリウム (Y) を使用した。希釈標準系列を測定することで検量線を作成し、検出限界はブランクフィルターの標準偏差を σ と、定量限界を $+10\sigma$ とした⁶⁾。

分解液から検出した捕集粉じん中の対象元素の重量濃度を求め、HV サンプラーと LPI のそれぞれの稼働時間により、吸入した大気流量中に対する濃度に換算した。ステンレスやペーサーメーカー等に使用されている Cr、Ni、Cu、Co、Cd、Pb を対象元素として選定し、それぞれの元素に対し定量分析を行った。

2 結果及び考察

(1) C 調査地における結果

ア SMPS、OPS による粒度分布

両粒子計数器は 1 分毎にデータを取得できるように設定し、10 分間の計測を実施した。その時の個数濃度の平均値と信頼区間 (3σ) のグラフを図 6-9 に示す。

炉運転中の炉表は粒径 50nm 付近の粒子数が、周辺外気の数値 (図 6-10) に対して約 2 倍の値を示しており、燃焼が要因と考えられる。図 6-9 上段の炉運転中と比較すると、台座冷却および整備作業 (図 6-9 左下) や、台座の清掃および床や炉内の清掃作業 (図 6-9 右下) において、50nm 付近の粒径粒子で高い値を示した。特に台座冷却時および整備作業時には、300~500nm の比較的大きな粒子の濃度の上昇が、作業中に継続して計測された。

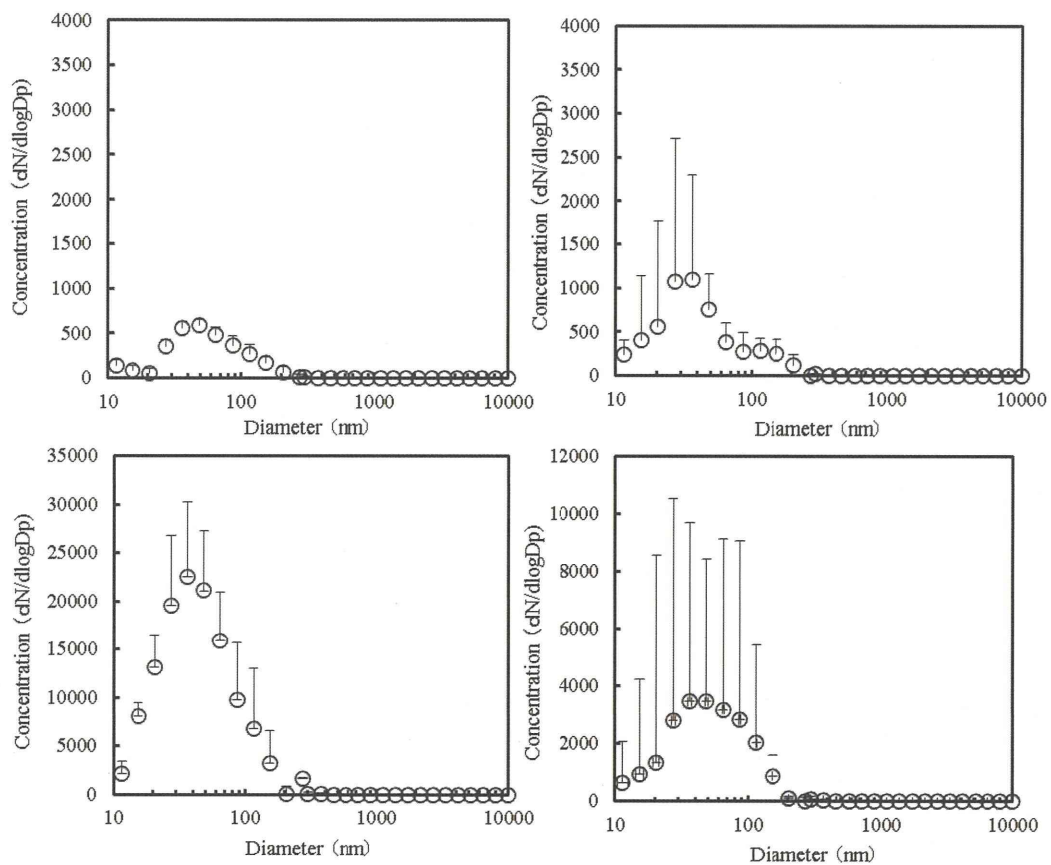


図6-9 各種作業における10nm~10 μ m粒子の平均個数濃度とその信頼区間
 左上：炉運転中、炉裏 (N=13)、右上：炉運転中、炉表 (N=9)
 左下：台座冷却および整骨作業中、炉表 (N=16)
 右下：台座および床の清掃作業中、炉表 (N=14)

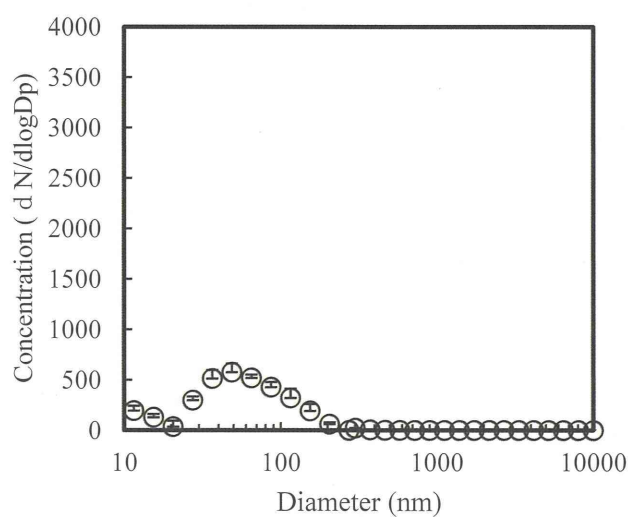


図6-10 火葬炉周辺屋外における10nm~10 μ m粒子の平均個数濃度とその信頼区間 (N=4)

イ 粉じん計による作業環境測定

(ア) A 測定

前述した計算に基づいて算出した。本施設において K 値は 0.004 を得た。第一評価値 EA1 と第二評価値 EA2 は下の通りとなった。

$$EA1 = 1.2022 \text{ [mg/m}^3\text{]}$$

$$EA2 = 0.3224 \text{ [mg/m}^3\text{]}$$

粉じんの管理濃度値は、粉じんの遊離珪酸が 100% 含まれたとすると 0.025 mg/m^3 、0% とすると 3 mg/m^3 となる。

K 値を文献値である 0.001 を用いた場合も以下に示す。

$$EA1 = 0.3005 \text{ [mg/m}^3\text{]}$$

$$EA2 = 0.0806 \text{ [mg/m}^3\text{]}$$

(イ) B 測定

B 測定値は、式(6.6)より $EB = 0.02 \text{ [mg/m}^3\text{]}$ を得た。

この値は気中の粉じん中に遊離珪酸が 100% 含まれていたと仮定した値と比較した場合において管理濃度より低い値であった。

A 測定、B 測定の結果から、B 測定結果は管理濃度以下であったことから、表 6-6 の 1 段目による基準に従い、A 測定による遊離珪酸の値に依存する。粉じん中の遊離珪酸が今回の第一評価値では 1.26% 以上含まれていた場合に管理基準を越え、また 7% を超えると第二評価値を超える試算となった。本調査地では、粉じん計や粒度分布計の結果から、浮遊する粒子濃度が高く、整骨や清掃時には十分に換気（プッシュプル方式^{*}を推奨）に注意する必要がある。また、作業内容に応じて、作業者に対するマスク（DS3 もしくは RS3^{**}以上を推奨）などの保護具着用を指導し、防護をする必要がある。

^{*}換気方式の分類：興研ホームページ (<http://www.koken-ltd.co.jp/pushpull.htm>)

^{**}マスクの分類：3M ホームページ (<http://www.mmm.co.jp/ohesd/support/sup05.html>)

(ウ) 作業種毎の濃度変動

台座冷却および整骨作業と、収骨後の清掃作業において、個数濃度に明らかな増加が認められた（図 6-9）。この結果から、これら作業毎の濃度変動を解析した。以下、図 6-11 に台座冷却および整骨作業中の、図 6-13 に清掃作業中の濃度変動を示す。SMPS（図 6-11 左上）と OPS（図 6-11 右上）による測定では、各測定器で検出できる各粒径幅における個数濃度の累計（総個数濃度）変動を示し、粉じん計（図 6-11 左下）による測定では、重量濃度（ mg/m^3 ）に換算した濃度変動を示す。また、図 6-11 左下の粉じん計の値は、図 6-11 右下の測定箇所での測定した時の変動を表している。

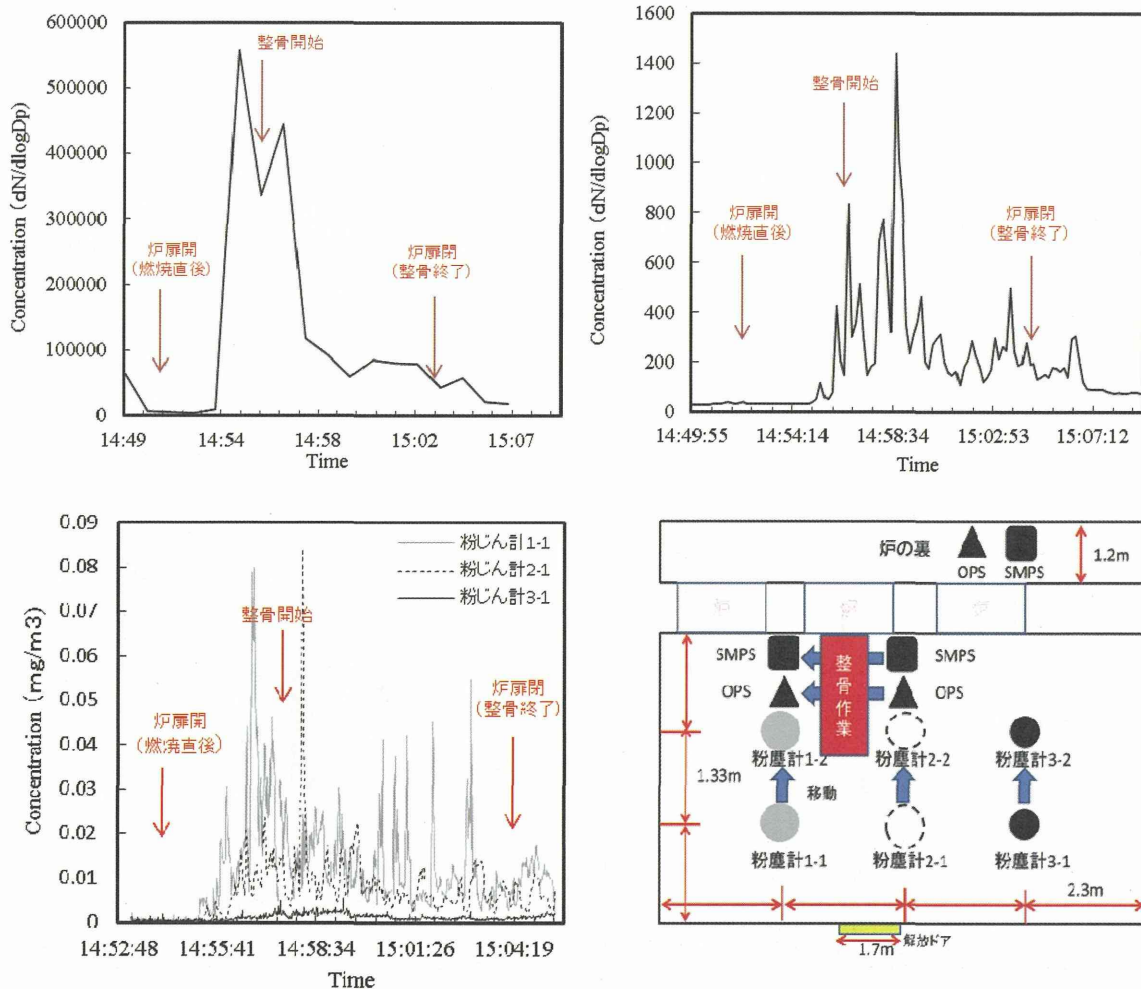


図 6-11 台座冷却および整骨作業中の濃度変化

左上：SMPS による個数濃度変化、右上：OPS による個数濃度変化
 左下：粉じん計による質量濃度変化、右下：粉じん計の配置図

図 6-11 中の炉扉開は、燃焼を終えた後に台座を炉外に引出し、扇風機で風冷して温度を下げている状態である。台座に作業者が近づく程度まで温度が下がった段階で、整骨作業を開始した（図 6-11 中の整骨開始）。この作業に入ると、300nm までの粒子の個数を計測する SMPS による経時変化では、個数濃度が 6×10^6 (個/cm³) 近くまで上昇を示し(図 6-11 左上)、300nm から 10 μm までをモニタリングできる OPS では 800 (個/cm³) まで上昇した(図 6-12 右上)。粉じん計による計測では、台座に最も近い粉じん計 1-1 で、ベースラインに対して質量濃度換算で 10 倍程度の値まで急激な上昇が見られた(図 6-11 左下)。すべての計測器において、整骨作業が終了し、炉の扉を閉めた頃(図 6-11 中の「炉扉閉」)から徐々に、濃度が減少する傾向にあった。

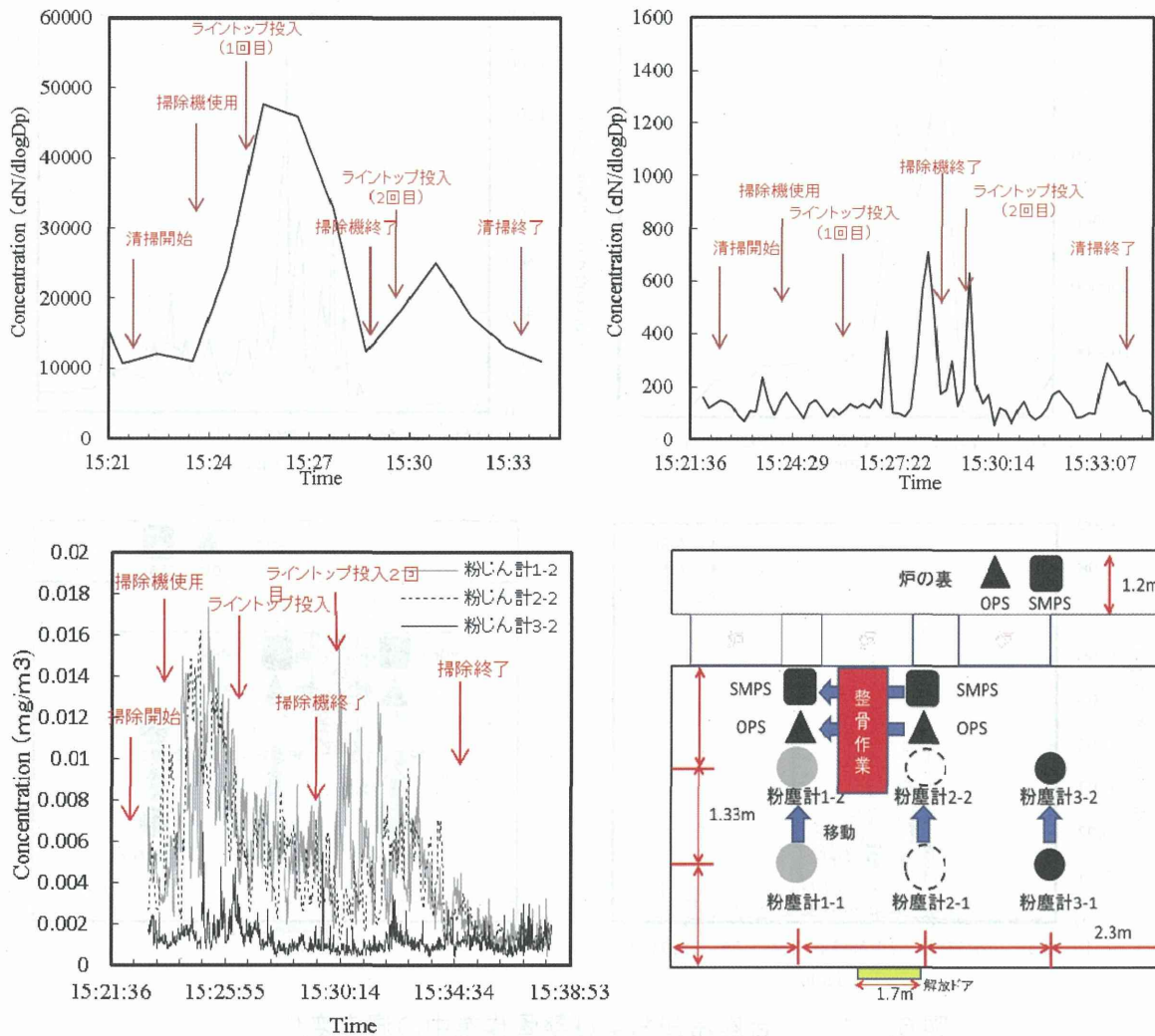


図 6-12 台座の清掃作業中の濃度変化

左上：SMPS による個数濃度変化、右上：OPS による個数濃度変化
 左下：粉じん計による質量濃度変化、右下：粉じん計の配置図

次に清掃作業に関する結果を示す。

台座の清掃開始時の濃度変化について図 6-12 に示す。清掃内容には、マグネットによる金属の回収、金属ステージの回収と、比較的大きな残骨の回収、スコップ状器具による残灰の回収があり、最終的には残った粉状の灰などを掃除機で回収した(図 6-12 中の「掃除機使用」)。掃除機を使用していた作業者は、炉内の残灰や台座の上、台座の床を掃除機で吸引していた。もう 1 名の作業者が並行して、台座の保護材(消石灰)(図 6-12 中の「ライントップ投入」)を 2 回の作業に分けて(図 6-12 中の「ライントップ投入 2 回」)、台座の上に散布しこれを整形した。

SMPS と OPS は作業の直近で計測を行っていたため、1 回目のライントップ投入に反応した。粉じん計では 1 回目のライントップ投入時は掃除機との並行作業のためか、急激な粉じん濃度上昇は確認できなかったが、掃除機終了後の 2 回目投入時には、SMPS、OPS、粉じん濃度とすべての計測器に上昇が認められた。

ウ 電子顕微鏡による観察と元素分析

フィルター表面に堆積した粉じんに対し、定性分析と簡易的な定量分析を行った。その結果を表 6-7 に示し、フィルターの SEM 観察像を図 6-13 に示す。

表 6-7 全量捕集フィルター簡易質量測定結果

Element	Collection (%)	Blank (%)
C	6.85	2.81
O	42.98	42.74
Na	8.72	7.82
Mg	1.15	1.05
Al	1.45	1.51
Si	30.51	33.65
Cl	1.22	0.06
K	1.45	1.93
Ca	5.68	8.42

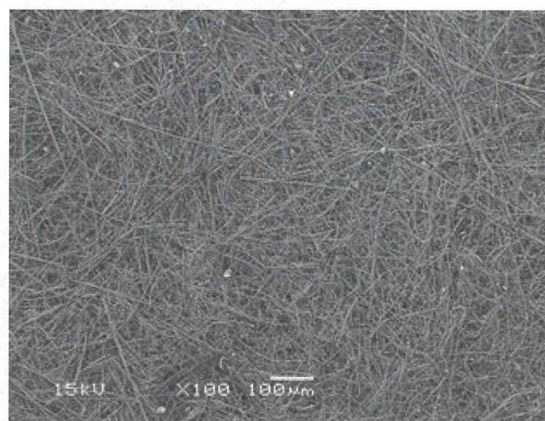


図 6-13 HV サンプラーによる捕集フィルターに対する電子顕微鏡画像

表 6-7 は、ハイボリュームサンプラーにて捕集したフィルターに対する、選定した元素種の重量パーセント濃度を示す (Collected 列)。ブランクフィルター (Blank 列) に対し、炭素の割合がやや増加し、これ以外の元素では特に高い値を示すものは無かった。燃焼由来の粒子が多く浮遊している可能性が考えられる。

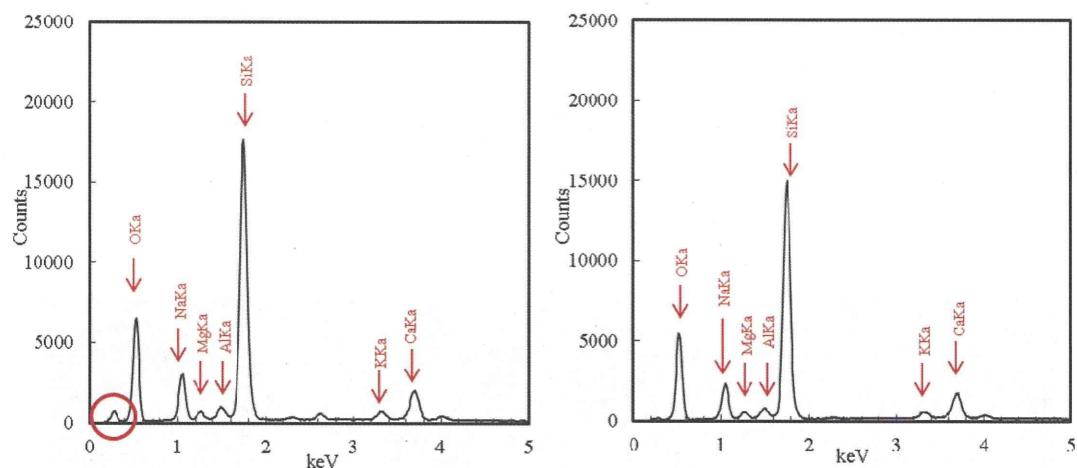


図 6-14 蛍光 X 線分析によるスペクトルの比較

左図：捕集したフィルター、右図：ブランクフィルター、赤丸：C (炭素) の $K\alpha$

図 6-14 の結果より、捕集したフィルターは、ブランクフィルターとほぼ同じピークを示した。炭素 (図 6-14 左図の赤丸) $K\alpha$ のピークがカウント値の増加を認め、表 6-7 の通りに捕集による増加を認めた。次に、捕集した粉じんをフォーカスし、倍率を上げて形態観測とマッピングを行った (図 6-15)。

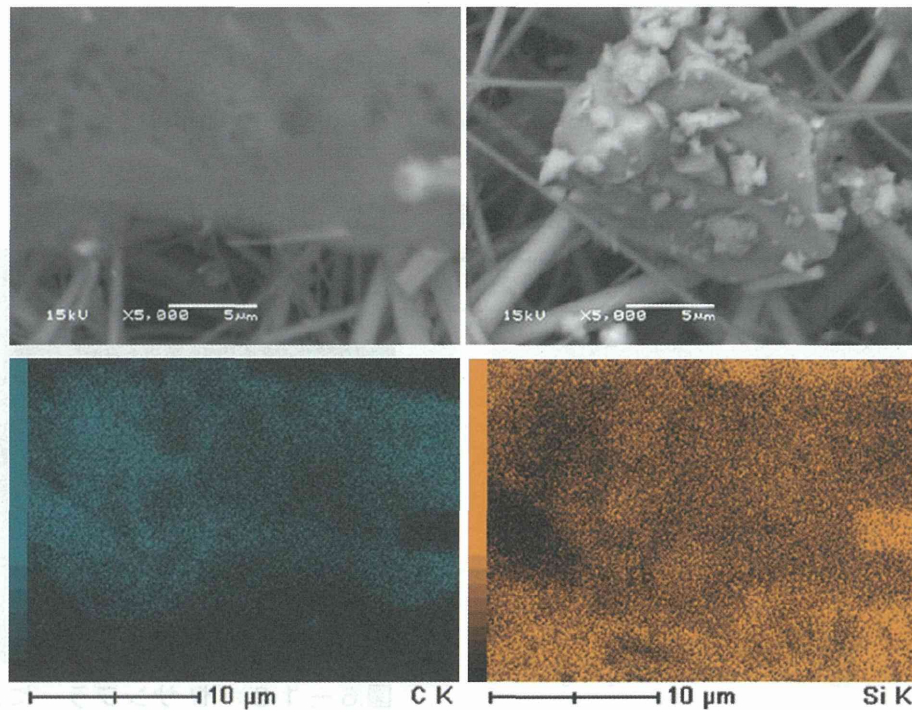


図6-15 電子顕微鏡によるHVフィルターの形態観測（倍率5000倍）

左上：フィルターに捕集した粉じん-1、右上：フィルターに捕集した粉じん-2

左下：粉じん-1の炭素元素マッピング像、右下：粉じん-1のシリカ元素マッピング像

図6-15左上で観察した粉じんは、図6-15左下からも主成分がカーボンであることが推測できた。また、図6-15右下からもシリカを多く含んでいることも分かった。図6-15右上の粉じん-2においても、同様の分析を行ったところ、アルミニウムと塩素を検出した。ハイボリュームサンプラーにて捕集したフィルターには、このような10 μ m以上の粗大粒子やダストが多く観察できた。

また、分級捕集したフィルターについても、同様に電子顕微鏡にて観察を実施した。観察対象としたフィルターは、個数濃度が高く目視による付着が確認できたstage11（捕集粒径は130~220 nm）を選定した。

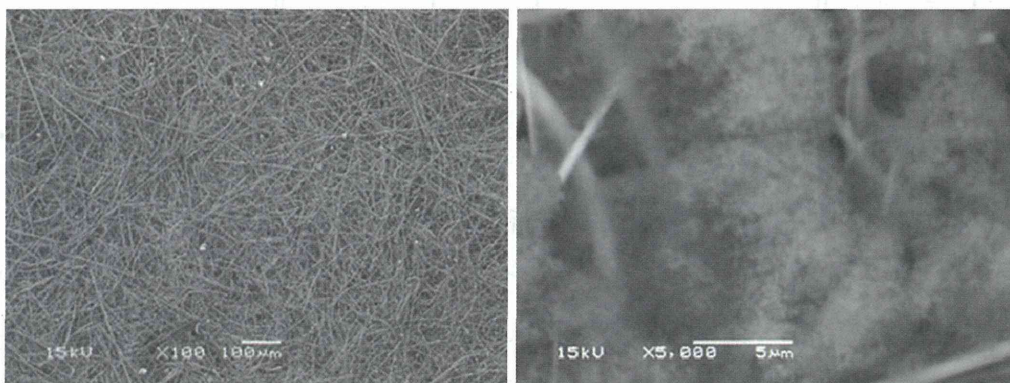


図6-16 stage11フィルターの観察像

左図：100倍像、右図：左図と同じエリアにおける5,000倍像

図6-16左図を拡大したの右図から、stage11のフィルターでは極微小粒子が凝集、堆