

〈論文〉

火葬炉からの酸性ガス、水銀および微小粒子の排出挙動

大下和徹¹⁾、高岡昌輝²⁾、江口正司³⁾、塩田憲司⁴⁾¹⁾ 京都大学大学院工学研究科
(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1 E-mail: oshita@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)²⁾ 京都大学大学院工学研究科
(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1 E-mail: takaoka@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)³⁾ 太陽築炉(株) (〒 812-0045 福岡市博多区東公園 6-21 E-mail: s-eguchi@taiyochikuro.jp)⁴⁾ 京都大学大学院工学研究科
(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1 E-mail: shiota@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

概要

本研究は、火葬炉排ガス中の微小粒子、水銀、酸性ガスの調査を行い、各排出濃度や挙動、排出原単位を明らかにした。ばいじんの粒径頻度分布は、0.2~0.3 μm の微細粒子の割合が高かった。PM2.5 濃度は、44.5~72.2 mg/m³_N で比較的高濃度で排出されており、バグフィルター導入が望ましい。HCl、SO₂ は、各算術平均 (N=103) で 61.3 mg/m³_N、12.3 ppmv であったが、都市ごみ焼却炉の実質的な排出基準を超過するケースもあり、集じんと同時に消石灰噴霧などの対策が必要と考えられた。

キーワード：火葬炉、塩化水素、微小粒子、二酸化硫黄、水銀

原稿受付 2012. 4. 23 原稿受理 2012. 6. 20

EICA: 17(2・3) 116-125

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

わが国の火葬率は 2010 年度現在で 99.9% 以上であり¹⁾、かつ死亡人口が年々増加していることから²⁾、火葬数は増大傾向にある。現在の日本における火葬場数は、2009 年に厚生労働省が実施したアンケート調査によれば、1,447 施設で、このうち、排ガス処理にバグフィルターや電気集じん機など、比較的高い集じん効率が期待できる集じん機が設置されている施設は、222 施設であり、全体の 15% 程度である。さらに消石灰噴霧や湿式洗煙などの酸性ガス処理がなされているところは皆無である³⁾。我が国で、火葬炉から排出される排ガスは、現在のところ大気汚染防止法の対象外であるが、ばいじんはもとより、塩化水素、硫酸化合物などの酸性ガスやダイオキシン類、水銀を含んでいることがこれまでの研究から明らかとなっている⁴⁾。しかし、現在の火葬炉の状況では排ガス処理におけるこれらの除去は期待できず、その多くが大気中に放出されているものと考えられる。また、火葬炉では煙突高さが低い箇所が多く³⁾、拡散によるこれらの希釈効果は見込めず、火葬炉近傍でのローカルな汚染が懸念される。したがって、今後、火葬場の改装時や新設時には、近隣住民との合意事項として、火葬炉の排ガス処理システムの増強が求められよう。

以上のような背景から、安全・安心な火葬を行っていくためには、火葬炉から排出される有害物質の実態調査やその抑制対策が必要である。これまでに、火葬炉排ガス中の有害物質に関する研究は、世界的にも、ダイオキシン類、水銀を中心として、排出濃度や排出原単位に関する調査がなされてきてはいるが^{4,5)}、ばいじんや酸性ガスについては、詳細な調査を行っている例は少ない。特に、ばいじんについては、大気中浮遊粒子状物質 (SPM: 空気動力学径 10 μm 以下の粒子)、および微小粒子状物質 (PM2.5: 空気動力学径 2.5 μm 以上の粒子が 50% カットされている粒子) への寄与が懸念されるものの、火葬炉から排出されるばいじん中の SPM や PM2.5 を実際に測定した報告は皆無であり、排出原単位を明らかにすることも含めた調査が求められる。さらに、既存の火葬炉にバグフィルターを導入する場合、その効果をあらかじめ予測するためには、排ガス中のばいじん粒径の頻度分布を明らかにしておくことが重要となる。また、酸性ガスについては、HCl、SO₂ とともに、JIS 法^{6,7)} により火葬時間を通じての平均濃度が、これまでの研究や⁸⁾、各自治体で自主的に行われている排ガス測定にて報告されているもの³⁾、排出原単位については言及されていない。また、既存の火葬炉はバッチ燃焼炉であり、HCl、SO₂ 除去対策として、例えばバグフィルターに消石灰噴霧を組み合わせた乾式除去を導入し、これを効率的

に行うためには、これら酸性ガスの連続的な排出挙動が重要であり、火葬時間を通じた連続モニタリングによる調査が求められる。また酸性ガスの連続的な排出挙動を明らかにすることは、酸性ガスの由来を推定し、発生源への対策にもつながる。すでに水銀については、形態別水銀連続分析計による調査が国内の火葬炉排ガスを対象に実施されており⁹⁾、遺体が有する歯の修復材料である歯科アマルガムを発生源としたピークが火葬初期 10~20 min に出現し、この時間帯で遺体頭部の燃焼が進行していることが予想されている。

以上の背景から、本研究は、まず、火葬炉排ガスに含まれるばいじん、SPM, PM2.5, 酸性ガス (HCl, SO₂)、および水銀について、それらの濃度、排出挙動、排出原単位を把握し、排出抑制対策を検討することを目的とした。具体的には、1か所の火葬炉にて、まず、2件の火葬について、排ガス中ばいじんの粒径別捕集を行って、SPM, およびPM2.5濃度、およびそれらの排出原単位、ならびにばいじん粒径の頻度分布を明らかにし、既存の調査結果とも総合して、バグフィルター導入の効果を予測した。次に、同じ火葬炉にて、103件の火葬について、水銀、HCl, SO₂を中心とした排ガス中成分の連続モニタリングを行って、それらの濃度、排出挙動、排出原単位を明らかにした。特に、HCl, SO₂の排出挙動については、水銀の歯科アマルガムによる高濃度ピークの出現時間と比較し、その発生源について言及した。

1.2 火葬炉について

本研究で対象とする火葬炉の概要を、Fig. 1に示す。火葬炉は、遺体を燃焼させるための主燃焼炉と、燃焼排ガスに含まれるばい煙や臭気物質などを二次燃焼させる再燃焼炉が中心となる密閉された炉設備であり、バッチ燃焼炉である。排ガス処理設備は、排ガス冷却

装置 (空気混合設備や熱交換器)、集じん装置 (電気集じん機やバグフィルター等)、高度排ガス処理装置 (活性炭吸着塔、触媒装置)、排風機、および煙突から構成される。前述したように、現在、多くの火葬炉は、電気集じん機やバグフィルターなどの比較的高度な集じん装置や、高度排ガス処理装置を有しておらず、排ガスは、空気混合により冷却されたのち、簡易フィルター等で集じんされ、あるいは集じんされないまま排出される。

2. 調査方法

2.1 対象とした火葬炉と火葬

調査は、1か所の火葬炉で行った。火葬炉と調査対象とした火葬の概要を Table 1 に示した。本施設の炉部分は主燃焼室1室に対し、再燃焼室1室を有しており、排気系列は1炉1系列である。排気方式は排風機による強制排気方式であり、排ガス冷却方式は、空気混合方式である。集じん機は排風機前に、パンチングメタル (孔径 5 mm × ピッチ 6 mm × 1 層) による簡易フィルターが設置されているのみであり、触媒装置、

Table 1: Configurations of the Crematorium and the Sampling Conditions.

再燃焼炉	有		
主燃焼炉:再燃焼炉	1:1		
排ガス冷却方式	空気混合		
集じん機	簡易フィルター(パンチングメタル)		
集じん機後段の排ガス処理	無		
排気方式(炉:系列)	強制(1:1)		
燃料	都市ガス 13A		
調査番号	A-1	A-2	B
調査日	2011/12/26	2011/12/26	2012/1/25~ 2012/3/28
火葬数	1	1	103
火葬時間(min)	80	63	52~93 平均:70
年齢(歳)	70	88	27~104 平均:78.1
性別	男性	女性	男性:62 女性:41

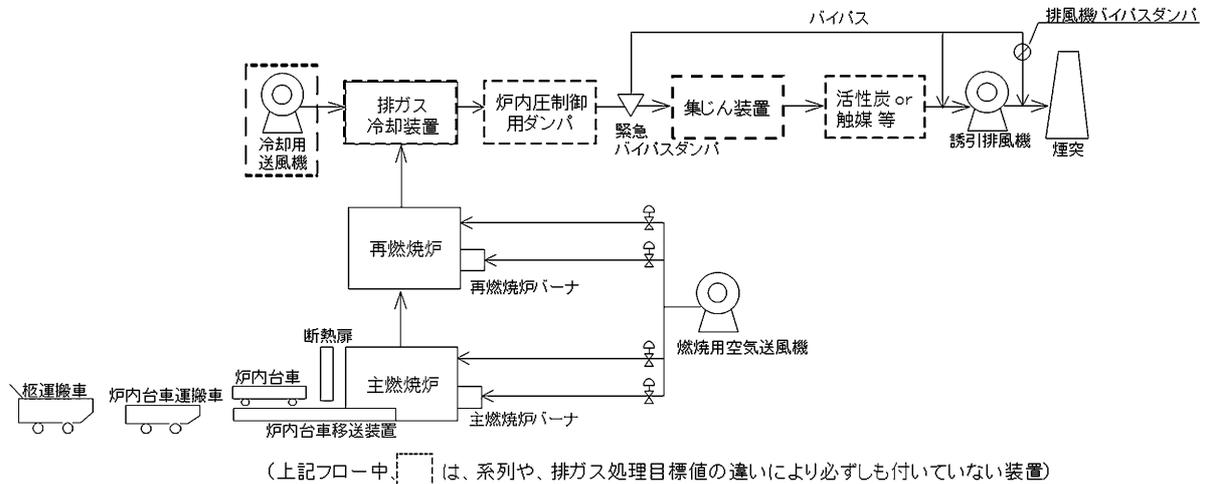


Fig. 1: Flow Diagram of the Crematorium.

湿式洗煙装置、活性炭吸着装置などの高度排ガス処理装置は設置されていない。このような形式の火葬炉は、1.1で述べたように、従来型の火葬炉であり、わが国の火葬炉の約85%を占めている（以下従来型火葬炉とする。）

ばいじん中のSPM, PM_{2.5}については2011年12月26日に実施された2件の火葬を対象とし（調査A-1, A-2）、HCl, SO₂, 水銀の連続モニタリングについては、2012年1月26日～3月28日までに実施された103件を対象とした（調査B）。

2.2 排ガス中各成分のサンプリングおよび分析方法

排ガス中各成分のサンプリング箇所や方法について、対象とした火葬炉のフロー図とともにFig. 2に示す。

(1) ばいじんの粒径別捕集と分析方法（調査A-1, A-2）

ばいじんの粒径別捕集については、塩田らが、都市ごみ焼却施設から排出されるSPM, PM_{2.5}を把握する目的でアンダーセン型カスケードインパクターを用いて実施しており¹⁰⁾、この調査と本調査の結果とを比較することも鑑み、同様のサンプリングを行った。

具体的には、Fig. 2に示す排風機後、かつ煙突前の煙道中において、JIS Z8808¹¹⁾、JIS K0302¹²⁾に準じて行った。ばいじんの粒径別捕集には、多段多孔型カスケードインパクター（東京ダイレック株式会社製：アンダーセンスタックサンプラーAS-500）を直接煙道内に挿入し、ノズルを排ガスの流れに向け等速吸引を行い8段のステージ上の石英捕集紙（東京ダイレック株式会社製：AS513A, AS513B）およびバックアップフィルター（東京ダイレック株式会社製：2500 QAT-UP）にばいじんを分級捕集した。カスケードインパクターの後段には水分捕集用のドレンおよびガス吸収用の5%過酸化水素水溶液を設置した。サンプリング時間は、本来カスケードインパクターの各ステージの捕集ばいじん重量が10mg以下になるように設定するが¹²⁾、火葬炉は都市ごみ焼却炉と異なりバッチ燃焼炉であるため、Table 1に示した各火葬の

Table 2: Flue Gas Characteristics and Sampling Conditions at the Crematorium.

項目	調査番号	A-1	A-2
排ガス特性	排ガス平均温度(°C)	177	192
	排ガス流速(m/s)*	3.5	6.2
	排ガス中平均O ₂ 濃度(Vol.%)	15.3	16.6
	排ガス中水分量(wt.%)*	22.4	8.0
	排ガス流量(湿り)(m ³ _w /h)*	2580	3920
サンプリング条件	排ガス流量(乾き)(m ³ _d /h)*	2000	3610
	ノズル径(mm)	10	10
	等速吸引流量(吸引ポンプ)(L/min)	9.0	14.0
	等速吸引流量(カスケードインパクター中)(L/min)	16.5	29.2
	サンプリング時間(min)	80	63
サンプリング量(L)	720	881	

* 採取開始後8分間の測定結果に基づく値

火葬時間を通してサンプリングを行うこととした。なおカスケードインパクターでの捕集の際には、排ガス温度をK熱電対で、排ガス中O₂濃度をポータブル酸素計（島津製作所製：POT-101）にて連続モニタリングした。ばいじんの粒径別捕集条件をTable 2に示す。

カスケードインパクターの各段に捕集されたばいじんについては、捕集前後の捕集紙およびバックアップフィルターの質量差を捕集ダスト質量とした。捕集紙およびバックアップフィルターは、捕集前は250°C、1時間で加熱乾燥後にデシケーター中で室温まで放冷し秤量した。捕集後は、恒温恒湿室（気温21.5±1.5°C、湿度35±5%）にて、約3日間乾燥させ秤量した。秤量にはJIS Z8808¹¹⁾に準じ高感度で測定可能な天秤（sartorius社製：M5P-F、感度1μg）を使用した。カスケードインパクターに分級捕集されたばいじんの粒径範囲はJISK0302¹²⁾、および既報¹⁰⁾と同様にして求めた

(2) 排ガス成分の連続モニタリング方法（調査B）

排ガス中各成分は、酸性ガスとしてHClとSO₂、水銀として金属状水銀：Hg⁰と2価の水銀：Hg²⁺、加えて、O₂、CO、CO₂およびNO_xを連続測定した。サンプリングは、調査Aと同様の箇所にフィルターを有するサンプリングプローブ（150°Cに保温）を設置し、連続モニタリング用の排ガスをサンプリングした。採取した排ガスは、120°Cに保温された加熱導管、および排ガス分岐装置を経て、各分析装置に導入した。排ガス成分のうちO₂、CO、CO₂、NO_x、およびSO₂濃度は、除湿のため電子クーラ（堀場製作所製：PS-300）を通過させた後、ポータブルガス分析計（堀場製作所製：PG-350）にて分析を行った。本分析計については、1週間に1回、2種類の標準ガス（住友精化製：O₂ 15%/N₂、およびSO₂ 100 ppm+NO 125 ppm+CO 1,000 ppm+CO₂ 10%/N₂）にて、ゼロ・スパン校正を行った。またHCl濃度については、イオン電極連続分析法による塩化水素濃度計（京都電子製：HL-36N）にて分析を行った。水銀に関しては、湿式の形態別水銀連続測定装置（日本インスツルメン

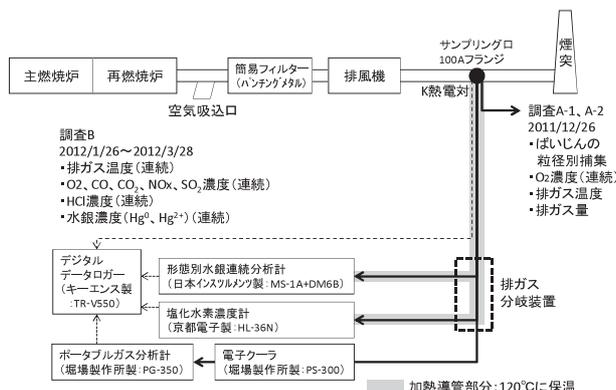


Fig. 2: The Flow Diagram of the Crematorium and Gas Sampling and Analysis.

ツ社製：MS-1A+DM-6B)を用いた¹³⁾。これら3種の装置で得られたデータは、デジタルデータロガー(キーエンス製：TR-V550)にて収集した。なお排ガスサンプリング部分の排ガス温度は、K熱電対にてモニタリングし、同データロガーに記録した。

3. 調査結果および考察

火葬排ガスの位置づけを明らかにするため、本調査結果の多くは、これまでの火葬炉排ガス調査結果はもとより、都市ごみ焼却炉における排ガス組成やその基準とも比較することとした。その理由としては、大きく以下の2点が挙げられる。

- ・火葬炉は大気汚染防止法の対象外であるが、一定規模以上の都市ごみ焼却炉は大気汚染防止法の対象であり、基準が設定されている。また調査データについても豊富であり比較が容易である。
- ・燃焼対象物の組成が火葬と都市ごみの場合で、元素レベルでも類似していることから^{14,15)}、排ガス組成も似通っていると推測される。

3.1 ばいじんおよびSPM, PM2.5(調査A-1, A-2)

(1) 排出濃度

2件の火葬でサンプリングを行ったカスケードインパクターの各ステージについて、捕集されたばいじん粒径の計算を行った結果と、各粒径のばいじん濃度、SPMおよびPM2.5の濃度を算出した結果を**Table 3**

Table 3: The Particle Sizes and Concentrations of the Collected Dusts on the Each Stages of Cascade Impactor.

A-1	粒径範囲	排ガス濃度
	μm	mg/m ³ _N (O ₂ 12%換算)
ステージ1	13<	5.29
ステージ2	8.42-13	1.69
ステージ3	5.62-8.42	0.478
ステージ4	3.85-5.62	0.627
ステージ5	2.46-3.85	1.09
ステージ6	1.23-2.46	1.54
ステージ7	0.703-1.23	2.35
ステージ8	0.518-0.703	3.65
バックアップフィルター	<0.518	36.9
合計		53.7
SPM		46.4
PM2.5		44.5
A-2	粒径範囲	排ガス濃度
	μm	mg/m ³ _N (O ₂ 12%換算)
ステージ1	10.3<	8.59
ステージ2	6.65-10.31	3.99
ステージ3	4.42-6.65	3.25
ステージ4	3.02-4.42	2.17
ステージ5	1.91-3.02	2.25
ステージ6	0.937-1.91	2.99
ステージ7	0.519-0.937	5.22
ステージ8	0.374-0.519	11.0
バックアップフィルター	<0.374	51.8
合計		91.2
SPM		79.2
PM2.5		72.2

に示す。SPM, PM2.5については分級捕集されたばいじんのふるい下積算率を求め、それと粒径からふるい下積算分布を作成し、粒径が7μm¹⁶⁾および2.5μmに相当する積算率をそれぞれ算出し、全体のばいじん濃度に乗じることによって求めた。すなわちSPMは、これまでの知見から¹⁶⁾、PM7(空気動力学径7μm以上の粒子が50%カットされている粒子)に相当するとした。

粒径と各ステージの対応を見ると、SPMはPM7相当として、ステージ2あるいはステージ3より後段の粒子に該当し、PM2.5はステージ5よりも後段に該当することがわかった。各条件での合計値としてのばいじん濃度は、O₂12%換算値で53.7~91.2 mg/m³_Nであった。手法は異なるが、円筒ろ紙法¹¹⁾により2007~2009年に火葬炉煙突手前で排ガス中のばいじん濃度を測定した例と比較すると、本研究で対象とした施設と同様に、集じん機がない、あるいは簡易フィルターを有する従来型火葬炉で、41~190 mg/m³_N(O₂12%換算)であったと報告されており^{4,17)}、本研究と概ね同様の結果であった。

本結果を都市ごみ焼却炉のばいじんの一般排出基準(既設炉の基準は80~250 mg/m³_N以下、新設炉の基準は40~150 mg/m³_N)と比較すると、本結果は新設炉の最も厳しい基準はクリアできないレベルであった。本研究と同様の手法で都市ごみ焼却炉のばいじん濃度を評価している調査では、中塚は1998年に、電気集じん機を有する旧式の都市ごみ焼却施設の煙突手前のばいじん濃度が、実濃度で1.2~64 mg/m³_Nであったと報告しており¹⁸⁾、塩田らは、2010~2011年にバグフィルター、湿式洗煙等を有する比較的新しい都市ごみ焼却施設の煙突手前のばいじん濃度が実濃度で0.007~0.31 mg/m³_Nであったと報告している¹⁰⁾。2回の測定であり、はっきりとは言えないが、本結果と比較すると、従来型火葬炉から排出されるばいじん濃度は、新しい都市ごみ焼却施設よりは2オーダー以上高く、旧式の都市ごみ焼却施設と同等あるいはやや高いレベルであると考えられた。

SPM, PM2.5については、**Table 3**より、O₂12%換算値でそれぞれ46.4~79.2 mg/m³_N、44.5~72.2 mg/m³_Nであった。ばいじん濃度に対し、SPM, PM2.5は、それぞれ約86%, 79~83%であり、そのほとんどをSPM, PM2.5が占め、ばいじんが粒径の比較的小さい粒子から形成されていることが窺えた。ばいじんの場合と同様に、都市ごみ焼却炉の煙突手前でのSPM, PM2.5の結果は、旧式の都市ごみ焼却施設がそれぞれ1.02~27.9 mg/m³_N、0.84~18.3 mg/m³_N¹⁸⁾、比較的新しい都市ごみ焼却施設がそれぞれ0.007~0.31 mg/m³_N、0.005~0.29 mg/m³_Nと報告されており¹⁰⁾、本結果と比較すると、従来型火葬炉では、ばいじんの

場合と同様に旧式の都市ごみ焼却炉よりもかなり高いレベルでSPM, PM2.5が排出されていると予想された。

(2) ばいじんの頻度分布

次に捕集分率（各ステージでのばいじん捕集量の重量%）を計算し、各捕集ステージに対応する粒径に対するばいじんの頻度分布を作成したものを Fig. 3 に示す。頻度分布は、各ステージの分級幅 ($\Delta \log D$) の中央値を横軸に、各分級幅に対応する捕集分率 ($\Delta W/W$) を分級幅 ($\Delta \log D$) で除したものを縦軸にプロットして求めた¹²⁾。ここでは占部の研究¹⁹⁾を参考に粒径の上限値を 45 μm 、下限値を 0.1 μm として頻度分布を作成した。Fig. 3 には、比較のために、ばいじんの排出濃度が本研究と最も近かった旧式の都市ごみ焼却炉の煙突前の 2 ケース¹⁸⁾を示した。

Fig. 3 より、旧式の都市ごみ焼却炉の煙突前では、粒径 0.5~0.6 μm および 6~8 μm をピークとするはっきりとした 2 山型の頻度分布であったのに対し、火葬炉のケースでは 2 回の測定ともに、粒径 0.2~0.3 μm の部分が最大となる頻度分布を示した。したがって火葬炉から排出されるばいじんは、旧式の都市ごみ焼却炉に比較して、粒径が小さい粒子の割合が多いと言え、このことは、前述したばいじん中の PM2.5 の割合が

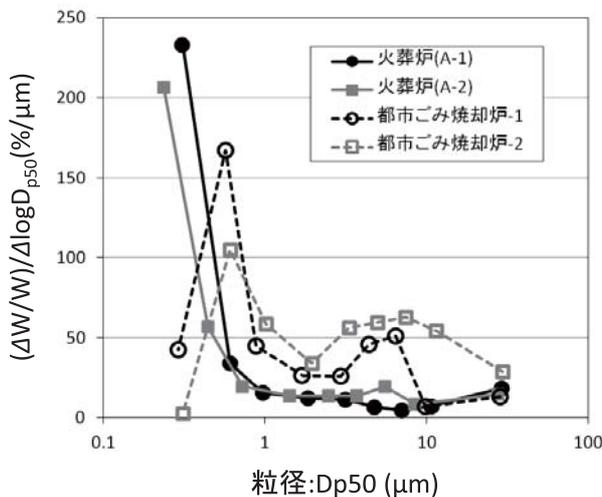


Fig. 3: The Frequent Distributions of Dusts at the Inlet of Stack in the Crematorium and the Old MSWI.

高かったことから裏付けられよう。この原因としては、粗大な粒子が排ガス処理で除去され、粒径の小さい粒子の割合が増加した可能性と、元々火葬で発生する粒子が細かい可能性が考えられるが、本火葬場での集じん機は $\phi 5$ のパンチングメタルによる簡易フィルターであり、数 μm オーダーの粒子の除去は期待できないことから、後者の可能性が高いと考えられた。

(3) 排出原単位と我が国における大気への排出量

上記のばいじん、SPM, PM2.5 の各排出濃度 C_{ij} ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$) や、これまで報告されている結果^{4,17)}から、乾き排ガス流量 $Q_{\text{dry},j}$ ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$)、火葬時間 t_j ($\text{min}/\text{体}$) を用いて、以下の式 (1) によって、火葬 1 体あたりのばいじん、SPM, PM2.5 の大気への排出原単位 M_{ij} ($\text{g}/\text{体}$) を計算した。排出原単位の算出については集じん機の有無や種類により大きく影響を受けるため、それぞれのケース (j) に応じて算出した。なお火葬炉において SPM, PM2.5 のばいじんに対する割合は、本研究で得られた値を用いた。

$$M_{ij} = C_{ij} \times Q_{\text{dry},j} \times t_j / 60 / 1000 \quad (1)$$

i は、ばいじん, SPM, PM2.5 の種別

j は火葬炉の集じん機種類

結果をまとめたものを Table 4 に示す。排出原単位は、集じん機の種類を考慮しない場合、算術平均値として、ばいじんは 24~249 $\text{g}/\text{体}$ 、SPM は 21~216 $\text{g}/\text{体}$ 、PM2.5 は 20~202 $\text{g}/\text{体}$ と見積もられた。ばいじんの排出原単位については、EU では、排ガス処理に BF が存在するケースで 9.63~19.3 $\text{g}/\text{体}$ とされており^{20,21)}、排ガス処理がない従来型火葬炉の場合は、224 $\text{g}/\text{体}$ とされている²²⁾。これらの値は、Table 4 での結果と概ね整合しており、本研究で求めた排出原単位は妥当であるものと考えられる。ばいじん、SPM, PM2.5 ともに、それぞれ従来型火葬炉の排出原単位に比較して、バグフィルターを導入した場合の排出原単位は約 90% 以上低減されると予想され、現状ではこれらが比較的高濃度で排出されていることや、ダイオキシン類対策の面からも、バグフィルターの設置が望ましいと考えられた。

Table 4: Concentrations and Emission Factors of the Dusts, SPM and PM2.5 Emitted from Crematoriums.

集じん機の種類	対象数	火葬時間(min)	排ガス量 ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$)	濃度 ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$)			排出原単位 ($\text{g}/\text{体}$)		
				ばいじん	SPM	PM2.5	ばいじん	SPM	PM2.5
BF	14	59 (42-85)	2,230 (1,020-3,170)	9.1 (2.0-32)	7.9 (1.7-27)	7.4 (1.6-26)	24 (2.0-139)	21 (1.8-121)	20 (1.7-113)
EP	2	55 (45-64)	2,180 (1,870-2,490)	32	28	26	65 (45-85)	56 (39-74)	53 (36-69)
なし	12	74 (59-90)	1,790 (1,240-2,390)	122 (41-190)	105 (36-164)	99 (33-154)	249 (117-635)	216 (101-550)	202 (95-514)

※ BF: バグフィルター、EP: 電気集じん機、※※ 排ガス量および各濃度は O_2 12%換算値、※※※ () 内の値は最小値-最大値

Table 5: Continuous Analytical Results of Flue Gas from the Crematory

項目	排ガス温度	O ₂	CO	CO ₂	NO _x	Hg ⁰	Hg ²⁺	T-Hg	HCl	SO ₂
単位	℃	Vol.%	ppmv	Vol.%	ppmv	μg/m ³ _N	μg/m ³ _N	μg/m ³ _N	mg/m ³ _N	ppmv
算術平均値	179	17.0	172	6.04	91.1	8.19	2.08	10.3	61.3	12.3
中央値	178	16.9	127	6.04	90.7	0.0570	1.27	1.63	53.0	9.89
最大値	200	18.6	1090	6.55	125	81.8	24.4	92.2	388	63.6
最小値	164	15.8	27.1	4.46	57.6	0	0	0	11.8	0.06

※ O₂以外の成分は、すべてO₂12%換算値

3.2 排ガス成分の連続モニタリング (調査 B)

排ガス中成分の連続モニタリングを行い、各火葬にて各成分の平均濃度を算出し、103件の火葬についてまとめたものを **Table 5** に示す。排ガス温度はサンプリング箇所の温度であり、164~200℃の範囲で、103件の算術平均で179℃であった。O₂濃度は、15.8~18.6%の範囲であり、103件の算術平均で17.0%であった。NO_xについては、57.6~125 ppmvの範囲で、算術平均で91.1 ppmvであり、特に脱硝施設を有さない都市ごみ焼却炉の排ガスのレベル (100~150 ppm)²³⁾ と大きな差はなかった。COについては、27.1~1,090 ppmvの範囲で、算術平均は172 ppmvであった。COに関しては、103件の火葬中、26件が平均濃度で200 ppmvを超えていた。この原因としては副葬品の影響も考えられるが、本施設には再燃焼炉が設置されているにもかかわらず、高濃度で排出されているケースが多いことから、燃焼管理が重要であると考えられた。水銀、酸性ガス (HCl, SO₂) については、以下に詳細な結果を述べ、考察する。

(1) 水銀

Table 5 より、T-Hg に関しては、0~92.2 μg/m³_N であり、103件の算術平均で10.3 μg/m³_N であった。2008年に別の6か所の種々の形式の火葬炉において同様の調査を行ったケースでは、算術平均で11.5 μg/m³_N としており⁴⁾、大きな差はなかった。これらの値は都市ごみ焼却炉での煙突排ガス中の水銀濃度²⁴⁾ と比較すると同程度かやや高い値であるといえる。

Hg⁰ に関しては、0~81.8 μg/m³_N であり、103件の算術平均で8.19 μg/m³_N であったが、中央値が0.057 μg/m³_N であり、両者には差が見られた。これは、103件の火葬のうちHg⁰排出濃度が低い場合が多く占めるものの、比較的大きなHg⁰排出濃度 (平均濃度として5.0 μg/m³_N以上) が24件あり、この影響を受けていることによる。特に大きなHg⁰排出濃度では、平均で80 μg/m³_N まで達しているものもあり、国内の都市ごみ焼却炉にて、各自治体が独自に設定している自主目標値、あるいは現実的な要求値としての30~50 μg/m³_N²⁵⁾ を超過しているものが9件あった。この比

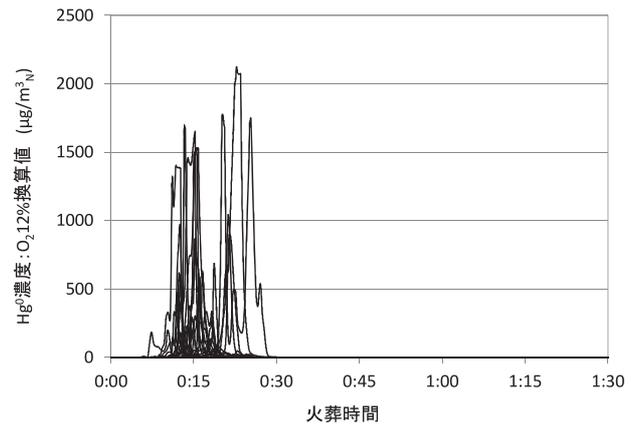


Fig. 4: The Time Trend of Hg⁰ Concentration in Flue Gas from the Crematorium

較的大きなHg⁰排出が見られた24件の火葬について、Hg⁰排出濃度の時間トレンドを **Fig. 4** に示す。Hg⁰は火葬開始後10~30 minに、1~3の鋭いピークを有する排出が見られ、最大で1,500 μg/m³_Nを超える排出濃度が見られた。これらは、歯科アマルガム中水銀に由来すると推測されており⁴⁾、この時間帯にて、遺体頭部が燃焼していることが推測された。歯科アマルガムは、歯科修復材料として用いられ、作成初期には水銀が約50%含まれており、主にAg, Snとの合金として銀スズアマルガムが用いられてきた⁴⁾。現在はあまり用いられていないが、歯科アマルガムを有する火葬対象者は、将来的な死亡者増加とともに、2020年ごろにピークを迎える予測があり²⁶⁾、今後、このようなケースが増加することが予想されるため、留意する必要がある。

次に、本調査結果から火葬1件あたりの水銀排出量 (排出原単位) を、火葬時間と、乾き排ガス量 (O₂ 12%換算値)、T-Hg濃度 (O₂ 12%換算値) を乗じることで求めた。乾き排ガス量は、調査Aの結果 (**Table 2**) の平均値 (2,805 m³_N/h) を用いた。その結果、103件の火葬について、水銀排出原単位は0~383 mg/体、算術平均で32.5 mg/体と見積もられた。別の複数の火葬炉での調査を総合した結果では、水銀排出原単位は、31.4~36.9 mg/体と推定されてお

り⁴⁾、本結果は、この値とほぼ同様の値を示しており、国内の火葬炉からの水銀排出原単位としては妥当であると考えられた。

(2) HCl

Table 5 より、HCl については、平均排出濃度は 11.8~388 mg/m³_N であり、103 件の算術平均で 61.3 mg/m³_N であった。大気汚染防止法による都市ごみ焼却炉における HCl の排出基準は 700 mg/m³_N であり²³⁾、この値を超過することはなかったが、現実には、都市ごみ焼却炉では、自治体が独自に設定する排出基準として、50~100 ppmv (81~162 mg/m³_N) 以下とする場合が多く、103 件中 13 件がこれらの基準を超過していた。現状では、HCl 除去を特に実施している火葬炉はわずかであり³⁾、かつ煙突高さも低いものが多いことから、HCl 除去対策が必要であると考えられる。また、HCl 排出濃度の時間トレンドを、排出濃度が高かったもの 24 件について **Fig. 5** に示した。

全体として、HCl 濃度は、火葬開始後 5 min で急激に濃度が上昇し、10~15 min をピークとして漸減していく傾向が見られた。ピークにおいては 800~1,700 mg/m³_N にまで達するものが見られた。**Fig. 4** の Hg⁰ のケースと比較すると、遺体の頭部が燃焼し Hg⁰ のピークが発生する 5 min 程度前からすでに HCl の濃度上昇が開始していることから、HCl は、遺体の周囲にある副葬品が主たる由来であり、具体的には、塩素を含む化学繊維製品やプラスチック類であると推測される。

またいくつかのケースでは、火葬が進行した 20 min 以降においても比較的大きな HCl のピークが見られ、この原因ははっきりしなかったが、火葬においては遺体を完全に燃焼させるために、遺体の位置を火葬中に調整するデレッキ作業を実施することがあり、この操作を行ったことによって、未燃であった部分の燃焼が進行したことによる可能性が考えられた。

次に、水銀のケースと同様に、火葬 1 件あたりの

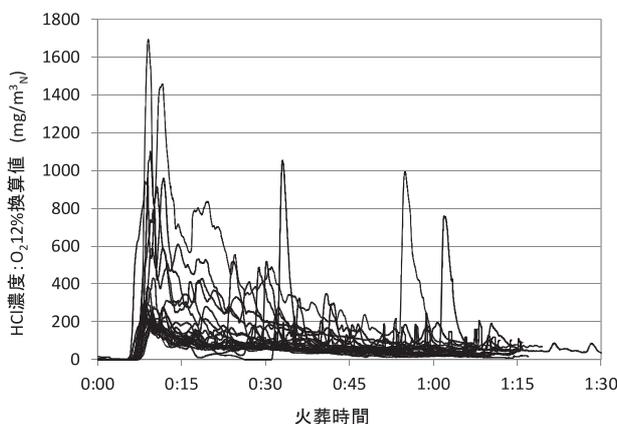


Fig. 5: The Time Trend of HCl Concentration in Flue Gas from the Crematorium.

HCl 排出量 (排出原単位) を、火葬時間と、乾き排ガス量 (O₂ 12% 換算値)、HCl 濃度 (O₂ 12% 換算値) を乗じることで求めた。その結果、103 件の火葬について、HCl 排出原単位は 39~1,450 g/体、算術平均で 205 g/体と見積もられた。国内では、HCl 排出原単位は報告されていないため、EU の報告値 (排ガス処理のない火葬炉にて 15.9, あるいは 46 g/体)²²⁾ と比較すると、本調査での排出原単位が高く、この原因としては、HCl 源となる副葬品の量や質が異なっていることによるものと推測される。

(3) SO₂

Table 5 より、SO₂ については、平均排出濃度は 0.06~63.6 ppmv であり、103 件の算術平均で 12.3 ppmv であった。SO₂ を含む硫黄酸化物は、都市ごみ焼却炉においては K 値による総量規制がなされている上、消石灰や湿式洗煙などによる硫黄酸化物除去設計値では、20~50 ppmv 以下とする場合が多いが、これを SO₂ として平均濃度で超過するケースは 103 件中 14 件であった。硫黄酸化物についても、何らかの対策が必要と考えられるが、バグフィルター + 消石灰吹き込み方式、あるいは湿式洗煙等の HCl 除去技術を導入することによって、同時に除去できるものと推測される。また、SO₂ 排出濃度の時間トレンドを、排出濃度が高かったもの 24 件について **Fig. 6** に示した。

全体として SO₂ 濃度は、HCl と同様に、火葬後 5 min 程度から急激な濃度上昇と、10~15 min 程度に大きなピークが見られ、副葬品等の燃焼に由来するものと推測された。しかし、HCl のケースとは異なって、15~40 min の時間帯にも比較的ブロードなピークが多く見られた。Hg⁰ のケースにおいて、遺体の頭部の燃焼が 10~30 min であったことを考慮すると、このピークは、遺体の燃焼に由来するものと推測された。人体には、タンパク質中に硫黄を含むアミノ酸が含まれており、硫黄は体重 70 kg の成人で平均

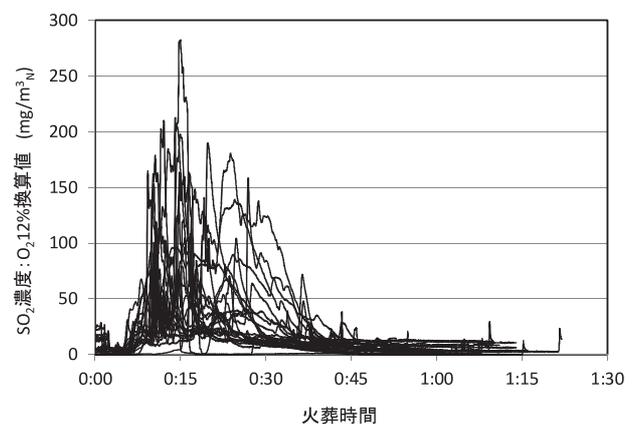


Fig. 6: The Time Trend of SO₂ Concentration in Flue Gas from the Crematorium.

140 g 体内に存在しているとされており²⁷⁾、これが燃焼して、一部はSO₂として排出されたものと考えられる。

次に、SO₂についても、水銀、HClと同様に火葬1件あたりのSO₂排出量(排出原単位)を、火葬時間と、乾き排ガス量(O₂ 12%換算値)、SO₂濃度(O₂ 12%換算値)を乗じることで求めた。その結果、103件の火葬について、SO₂排出原単位は0.5~577 g/体、算術平均で114 g/体と見積もられた。EUの報告値(排ガス処理のない火葬炉にて54.4あるいは63.6 g/体)²²⁾と比較すると、双方ともに、本研究の範囲に入っていたが、算術平均値と比較すると、HClの場合と同様に、本研究の排出原単位の方が高い値を示した。この原因としては、前段にてSO₂源として副葬品と遺体を考察したが、遺体に関しては、EUと大きな差はないと考えられ、HClと同様に副葬品の量や質が異なっているものと推測された。

4. おわりに

本研究では、火葬炉排ガスに含まれる微小粒子、水銀、酸性ガスの調査を、国内の火葬炉の多くを占めるとされるバグフィルターや酸性ガス処理設備などを有さない従来型火葬炉で行い、それぞれの排出特性や挙動、排出原単位を明らかにした。以下に得られた知見、および今後の課題を示す。

- 1) 火葬炉排ガスにおけるばいじんの粒径別捕集を行った結果、ばいじん、SPM、PM_{2.5}濃度は、O₂ 12%換算値でそれぞれ53.7~91.2 mg/m³_N、46.4~79.2 mg/m³_Nおよび44.5~72.2 mg/m³_Nであった。ばいじん濃度に対し、そのほとんどをPM_{2.5}が占め、比較的高濃度で排出されていることから、バグフィルター等の導入が望ましいと考えられた。
- 2) 火葬炉排ガス中ばいじんの粒径頻度分布は、粒径0.2~0.3 μmの部分が最大となり、旧式の都市ごみ焼却炉の煙突前に比較して、粒径が小さい粒子の割合が多いと言えた。この原因としては、元々火葬で発生する粒子が細かい可能性が考えられたが、今後より詳細な調査が必要である。
- 3) 調査結果を元に国内の種々の火葬炉における排出原単位を算出したところ、集じん機の種類を考慮しなければ、ばいじん、SPM、PM_{2.5}の排出原単位は、それぞれ24~249 g/体、21~216 g/体および20~202 g/体と見積もられ、EUにおける報告値とも概ね整合した。また従来型火葬炉にバグフィルターを導入することで、排出量は90%以上低減できることが予想された。
- 4) 現在のところ、ばいじん、SPM、PM_{2.5}の調査に

ついては、2火葬のみの測定であるため、他の形式の火葬炉での調査を含め、より多くの火葬調査を行っていく必要がある。

- 5) 火葬炉排ガス中の水銀に関しては、0~92.2 μg/m³_Nであり、103件の算術平均で10.3 μg/m³_Nであった。特にHg⁰は24件の火葬で、火葬開始後10~30 minに、歯科アマルガム中水銀由来と推測される鋭いピークを有する排出が見られ、この時間帯にて、遺体の頭部の部分が燃焼していることが推測された。水銀排出原単位は0~383 mg/体、算術平均で32.5 mg/体と見積もられ、既報の結果とも整合し、国内の火葬炉からの水銀排出原単位としては妥当であると考えられた。
- 6) 火葬炉排ガス中のHClに関しては、11.8~388 mg/m³_Nであり、103件の算術平均で61.3 mg/m³_Nであった。13件の火葬については、国内の都市ごみ焼却炉における実質的な排出規制を超過しており、対策が必要であると考えられた。HClの由来に関してはHCl濃度の時間トレンドから、副葬品に由来するものと推測された。HCl排出原単位は39~1,450 g/体、算術平均で205 g/体と見積もられ、EU報告値よりも高く、副葬品の量や質が異なっていることが原因と推測された。
- 7) 火葬炉排ガス中のSO₂に関しては、平均排出濃度は0.06~63.6 ppmvであり、103件の算術平均で12.3 ppmvであった。14件の火葬については、国内の都市ごみ焼却炉における実質的な排出規制を超過しており、HCl同様、対策が必要であると考えられた。SO₂の由来に関してはSO₂濃度の時間トレンドから、副葬品に加え、一部は遺体にも由来すると推測された。SO₂排出原単位は0.5~577 g/体、算術平均で114g/体と見積もられ、HClと同様にEU報告値よりも高く、副葬品の量や質が異なっていることが原因と推測された。
- 8) 特にHCl、SO₂等の酸性ガスについては、都市ごみ焼却炉排ガスと同等のレベルまで除去することを検討する必要がある。湿式洗煙方式では高い除去率が期待できるものの、排水処理が必要であり、極端にスペースが制約される火葬場には導入が困難であろう。バグフィルターを導入し、ばいじんを除去すると同時に、消石灰等を吹き込んで酸性ガスを除去する乾式法が望ましいと考えられる。ただし火葬はバッチ燃焼であることや、集じん灰の量を低く抑える必要もあることから、今後、煙突前のHCl、SO₂をモニタリングしつつ、消石灰の吹き込みを制御し、効率的な酸性ガス除去を検討していく必要がある。

謝辞

本研究にて、火葬炉調査にご協力いただいた自治体、火葬場の関係各位、各分析機器メーカーの関係各位に感謝する。また、サンプリングや分析の一部は、島津テクノリサーチ株式会社、および京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻修士2回生の今井玄哉君、修士1回生の西本芳洋君、山口修史君、学部4回生の辻本悠真君に協力頂いた。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 厚生労働省：統計一覧，平成22年度衛生行政報告例第23表埋葬及び火葬の死体・死胎数並びに改葬数，都道府県一指定都市一核市（再掲）別
<http://www.e-stat.go.jp/SGL/estat/List.do?lid=000001083541/har0230.csv> (2012.4.12 情報取得)
- 2) 厚生労働省大臣官房統計情報部：平成23年（2011）人口動態統計の年間推計，第一表人口動態総覧の年次推移
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/suikei11/index.html> (2012.4.12 情報取得)
- 3) 厚生労働省健康局生活衛生課：火葬場から排出される有害化学物質に関するアンケート調査結果（2010）
- 4) 武田信生（研究代表者）：火葬場における有害化学物質の排出実態調査および抑制対策に関する研究，厚生労働科学研究費補助金，健康安全・危機管理対策総合研究事業，平成20年度～21年度総合研究報告書（2010）
- 5) M. Mari and J.L. Domingo: Toxic Emissions from Crematories: A Review, *Environment International*, Vol. 36, No. 1, pp. 131-137 (2010)
- 6) 日本工業規格：JIS K0107 排ガス中の塩化水素分析方法（2012）
- 7) 日本工業規格：JIS K0103 排ガス中の硫黄酸化物分析方法（2011）
- 8) N. Takeda M. Takaoka, T. Fujiwara, H. Takeyama and S. Eguchi: Measures to Prevent Emissions of PCDDs/DFs and Co-planar PCBs from Crematories in Japan, *Chemosphere*, Vol. 43, No. 4-7, pp. 763-771 (2001)
- 9) M. Takaoka, K. Oshita, N. Takeda and S. Morisawa: Mercury Emission from Crematories in Japan, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 10, pp. 3665-3671 (2010)
- 10) 塩田憲司，今井玄哉，高岡昌輝，木本 成，松井康人，大下和徹，水野忠雄，森澤眞輔：都市ごみ焼却施設から排出される微小粒子へのダイオキシン類除去対策強化による効果，*大気環境学会誌*，Vol. 46, No. 4, pp. 224-232 (2012)
- 11) 日本工業規格：JIS Z8808 排ガス中のダスト濃度測定方法（1995）
- 12) 日本工業規格：JIS K0302 排ガス中のダスト粒径分布の測定方法（1989）
- 13) K. Tanida, A. Chua, M. Takaoka and N. Noda: The Development and Current Status of the Mercury CEM, *Air Quality IV*, pp. 1-12 (2003)
- 14) (社)日本環境斎苑協会：新・改訂版 火葬場の施設基準に関する研究，p. 89 (1995)
- 15) (財)日本環境衛生センター：Fact Book，廃棄物基本データ集2000，p. 33 (2001)
- 16) 笠原三紀夫，東野 達 編：エアロゾルの大気環境影響，京都大学学術出版会（2007）
- 17) 武田信生（主任研究者）：火葬炉から排出される有害物質の実態調査とその抑制対策，厚生労働科学研究費補助金，厚生労働科学特別研究事業，平成19年度総括・分担研究報告書（2008）
- 18) 中塚大輔：ごみ焼却飛灰の粒径別特性，京都大学大学院工学研究科修士論文（1999）
- 19) 占部武生：ごみ焼却炉内での元素，特に重金属類の挙動，*衛生工学研究論文集*，Vol. 22, pp. 49-60 (1986)
- 20) A. Santarsiero, G. Trevisan, G. Cappiello, G. Formenton and E. Dell'Andrea: Urban Crematoria Emissions as They Stand with Current Practice, *Microchemical Journal*, Vol. 79, pp. 299-306 (2005)
- 21) European Environment Agency: EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, 6.C.d Cremation (2009)
- 22) European Environment Agency: EMEP/EEA emission inventory guidebook 2006, Activity 090901, CREMATION, Incineration of Corpses (2006)
- 23) 廃棄物学会 編：廃棄物ハンドブック，オーム社，p. 324 (1997)
- 24) M. Takaoka, N. Takeda, T. Fujiwara, M. Kurata and T. Kimura: Control of Mercury Emission from a Municipal Solid Waste Incinerator in Japan, *Journal of Air & Waste Management Association*, Vol. 52, pp. 931-940 (2002)
- 25) 高岡昌輝：飛灰堆積層による都市ごみ焼却排ガス中の水銀除去機構の解明，京都大学博士論文，p. 19 (2001)
- 26) 堂本真吾，江口正司，高岡昌輝，松本忠生，大下和徹，武田信生：火葬炉における水銀の排出挙動調査，*大気環境学会誌*，Vol. 41, No. 6, pp. 309-319 (2006)
- 27) 桜井 弘 編：元素111の新知識，講談社ブルーバックス，p. 102 (1997)

Behaviour of Acidic Gas, Mercury and Fine Particles Emitted from a Crematorium

Kazuyuki Oshita^{1)†}, Masaki Takaoka¹⁾, Shoji Eguchi²⁾ and Kenji Shiota¹⁾

¹⁾ Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

²⁾ Taiyo Chikuro Co. Ltd.

† Correspondence should be addressed to Kazuyuki Oshita :

(Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

E-mail : oshita@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

Abstract

This study measured the concentrations, time trends and emission factors of fine particles, mercury and acidic gas materials in the flue gases from a crematorium. For dust, 0.2-0.3- μm particles constituted the greatest proportion. The PM_{2.5} concentration ranged from 44.5 to 72.2 mg/m³_N (normalized by 12% O₂) and was relatively high. Therefore, bag filters should be used in existing crematoriums. Although the mean HCl and SO₂ concentrations were 61.3 mg/m³_N and 12.3 ppmv, respectively (n=103), the levels often exceeded the substantive emission standards for municipal solid waste incinerators. To remove these compounds, the flue gases should be sprayed with lime before passing through the bag filter. Comparing the temporal changes in Hg⁰ concentrations with those of HCl and SO₂, they are thought to have been derived mainly from burial accessories.

Key words : crematorium, hydrogen chloride, fine particles, sulfur dioxide, mercury