

都市ごみ焼却施設排ガス中の粒子状物質

酒井 護

Properties of Particulate Material from Municipal Solid Waste Incinerators

Mamoru SAKAI

Abstract

Particulate material with a diameter less than 10 μ m has been known as major ambient air pollutants for a long time. More fine matter has come to be concerned about the impact on health. Air quality standards of both coarse and fine particulate matter have come to be regulated lot of countries including Japan. In this study, the concentration of particulate matter generated from municipal solid waste incinerator, which are known as stationary emission sources of particulate matter, were measured and evaluated the effect of exhaust gas treatments. As a result, 1) Regardless of its diameter, particulate material was able to be removed more than 99% by the exhaust gas treatment. 2) The median diameter was variable by sampling point. 3) The frequency distribution of particulate matter was differed by the combustion conditions and the properties of solid waste.

Key words: municipal solid waste incinerator, particulate matter, frequency distribution

I はじめに

浮遊粉じんとは大気中に長期間存在する粒子状物質 (PM:Particulate Matter)のことであり原燃料等の物の燃焼、加熱あるいは物の破碎、選別、たい積等の過程によって発生する。このうち粒径が 10 μ m 以下である浮遊粒子状物質 (SPM:Suspended Particulate Matter)は、

- 1) 粒径 10 μ m 以下の粒子は沈降速度が小さいため大気中に比較的長期間滞留する
- 2) 粒径 10 μ m 以下の粒子は、そのほとんどが気道又は肺胞に沈着する

ことから人の健康上有害な影響を与える[1]。SPM は、硫酸化物と同様に大気汚染物質の一つであり、人の健康および快適な生活環境を阻害するものとしてその対策の徹底が課題となっていた。そのため、1972 年 1 月に浮遊粒子状物質に係る環境基準が「連続する 24 時間における 1 時間値の平均値として 0.10 mg/m³、1 時間値として 0.20 mg/m³」と設定された。環境基準の設定と前後して、ばいじんの排出基準も設定された。排出基準は発生源の規模等により異なり、例えば、毎時 4 トン以上の能力を持つ廃棄物焼却施設では 0.04 g/m³N とされている。

その後、大気汚染に関する科学的知見に基づき、米国や EU 諸国などで微小粒子状物質(PM_{2.5})に関する規制がなされるようになった。こうした背景より、環境

省は 2007 年より PM_{2.5} に関する検討会を重ね、2009 年に環境基準として、1 年平均値(15 μ g/m³)と 1 日平均値(35 μ g/m³)の 2 種類が設定された。一般に長期間での平均値が高い地域では、短期間での測定値に高い数値が表れる頻度が高いとされている。また、大気汚染物質の濃度と人口集団の健康影響指標との関連において、長期曝露では低濃度でも慢性影響が起り、短期曝露ではより高濃度で急性影響が起ると考えられている。環境基準の設定においては、長期曝露と短期曝露のそれぞれの健康影響に対応して定めることが妥当とされる[2]。そのため、PM_{2.5} の環境基準では、長期的な指標(年平均値)と短期的な指標(日平均値の高濃度出現頻度)が必要がある。

大気環境中に浮遊する PM の生成機構には、一次生成(発生源から直接排出された PM)と二次生成(化学反応や吸着により生成した PM)がある。また、発生源には、人為起源(焼却や種々の化学反応生成物など)と自然起源(花粉、黄砂、火山活動や海塩粒子など)がある。さらに人為起源の発生源には、固定発生源(工場など)と移動発生源(自動車など)がある[3]。固定発生源として、都市ごみ焼却施設での発生に関する粒径別分布の詳細な調査事例として、塩田らは、ダイオキシン類対策のために導入された排ガス処理設備により、SPM 成分および PM_{2.5} 成分ともに除じん効果が 99.9% 以上であり従来よりも強化されていたことを確認

した[4]ものなどがある[5-8]が報告例は少ない。その他、石炭火力発電所[9-11]、鉄鋼炉[12]、病院廃棄物[13]などの固定発生源や内燃機関[14]などの移動発生源から排出されるPMの粒径分布および金属組成など多数の調査事例が報告されている。

都市ごみは、全国で年間に約 4,500 万トン発生している。衛生的な処理を進めるため、そのうち 3,400 万トンが焼却により中間処理されている[15]。環境省の調査では、2008 年度には産業廃棄物なども含めた廃棄物焼却施設より発生したばいじんは、ばい煙発生施設全体の約 7%を占める[16]。ばい煙発生施設は大気汚染物質であるPMの主要な発生源のひとつとされている。

本調査は、都市ごみ焼却施設におけるPMの発生量と排ガス処理による除去効果の把握を目的として実施した。調査項目は、1)煙突からのPM排出量の調査、2)排ガス処理による除去効率、3)煙突から排出されるPMの粒径別の性質のほか、4)集じん器入口、煙突入口での粒子状物質中の金属・イオン成分である。

II 測定の方法

1) 粒子状物質を採取した施設

粒子状物質は、2012年と2013年の2年間に、大阪市の都市ごみ焼却施設(A~Hの8施設)の最終出口ガスのサンプリング口がある煙突入口で採取した。大阪市の都市ごみ焼却施設では、電気式集じん器(EP)またはバグフィルタ(BF)により除じんしたのちに、湿式スクラバおよび脱硝処理を行っている。EPによる除じんを行っている施設では、ダイオキシン類対策のために後置BFを設置している。各施設の排ガス処理フローは表1に示した通りである。8施設のうちA~Dの4施設では、煙突入口で2度採取(1日1度を2日)し、集じん器の入口でも粒子状物質を2~4度採取(1日2度を2日)した。E~Hの4施設では煙突入口で1度採取した。煙道ガスの温度や水分率などは、日間変動が大きいと考えられることから測定日ごとに吸引速度を設定した。粒子状物質の濃度を考慮し、煙突入口では4時間、集じん器入口では10分程度ガスを採取した。

表1 各施設に設置されている排ガス処理装置とその順番

施設	焼却炉から煙突までの排ガス処理の順序				
A 集じん器 (EP)	誘引ファン	湿式スクラバ	後置BF	誘引ファン	
B 集じん器 (BF)	脱硝装置	誘引ファン	湿式スクラバ		--
C 集じん器 (BF)	湿式スクラバ	脱硝装置	誘引ファン		--
D 集じん器 (BF)	湿式スクラバ	脱硝装置	誘引ファン		--
E 集じん器 (EP)	湿式スクラバ	誘引ファン	後置BF	誘引ファン	
F 集じん器 (BF)	脱硝装置	誘引ファン	湿式スクラバ		--
G 集じん器 (EP)	誘引ファン	湿式スクラバ	後置BF	誘引ファン	
H 集じん器 (BF)	湿式スクラバ	脱硝装置	誘引ファン		--

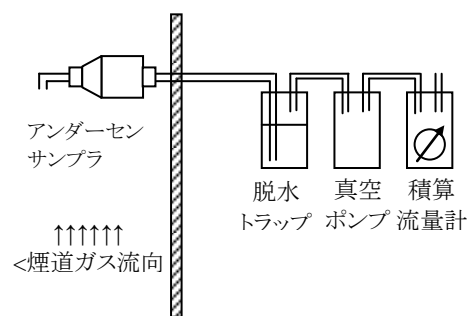


図1 サンプリング装置 (模式図)

2) 粒子状物質の採取と秤量

粒子状物質の採取は、日本工業規格(JIS) K-0302:1989「排ガス中のダスト粒径分布の測定方法」[17]に基づき行った。採取の装置は、東京ダイレック社製アンダーセン型スタックサンプラ(AS-500型)を使用した。採取装置の構成は図1に示した。採取後、蛍光エックス線による金属成分の測定を実施することから、石英ろ紙(型番AS-513Q)を用いた。煙道の温度は200°C程度であることから、揮発性の物質の影響を除くために石英ろ紙は、使用前に200°Cで4時間強熱したものをを用いた。秤量には、ザルトリウス社製 micro M5P-Fを用いた。秤量にあたり、文献[18]に従い、恒温室(湿度50%、温度20°C)で24時間静置したのちに行った。粒子状物質濃度に関しては、JIS Z-7152「バーチャルインパクタによる排ガス中のPM10/PM2.5質量濃度測定方法」が制定されている(平成25年8月)[19]。本調査では、他の排出源での調査結果と比較するため、JIS Z-7152による方法では採取しなかった。

3) エネルギー分散型蛍光エックス線法(XRF)による金属成分の測定

XRF法による金属成分の測定には、日本電子社製エレメントアナライザーJSX-3000を用いた。分析の条件は、表2に示した通りである。

表2 XRF 分析の条件

X 線管球のターゲット	Rh(ロジウム)
コリメータ	1mm
試料室	大気雰囲気
測定時間	700 秒

III 結果と考察

1) 粒子状物質の濃度と粒径別に見られた傾向

(1) 重量濃度

等速吸引により試料を採取したため、平均吸引速度は採取回ごとに異なっている。吸引速度の実測値および各ステージでの 50%分離径(D_{p50})、捕集した粒子状物質の重量の合計を、集じん器入口および煙突入口の別に表3に示す。粒子状物質の合計重量は、集じん器入口では 726~2,520 $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 、煙突入口では 169~1,680 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。表3のうち、微小粒子状物質とされる D_{p50} が 2.5 μm 未満である部分は斜体で表記している。表3 中斜体で D_{p50} を示したステージでの粒子状物質の重量濃度は、集じん器入口では 254~573 $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 、煙突入口では 95~1,080 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。通常の集じん器や湿式スクラバなどの排ガス処理装置により、燃焼により発生した粒子状物質は、 D_{p50} に関わらず 99%以上が除去可能であった。既報の調査結果[4,5]では、集じん器入口では 1,400~2,000 $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 、煙突入口では 10~1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ の範囲であり、本調査結果は、これらの数値と比較して通常の範囲であると考えられた。

(2) ふるい下積算分布

JIS K0302 に従い、集じん器入口(左)および煙突入口(右)でのふるい下積算分布をそれぞれの別に図2に示す。縦軸は標準正規分布の累積分布関数の逆関数(NORMSINV 関数)に変換して表記している。図2において、各測定点の間は、直線で結んだ。 $y = 0$ (ふる

い下積算分布が 0.50)および $y = \pm 1$ (ふるい下積算分布が 0.16 および 0.84)を破線で示した。

一般にアンダーセン型サンプラにより粒子状物質を捕集しふるい下積算分布を対数確率紙にプロットした場合、きれいな直線にならないことがある[21 など]。本調査による煙突入口での結果も同様に直線とならなかった。ふるい下積算分布が 0.50 ($y = 0$)となる中位径は、施設 D 及び施設 E の 1 回を除き 1~3 μm の範囲に収まっていた(施設 E では、バックアップフィルタに全粒子重量の約 80%が捕集されていたため $y = 0.84$ から始まる分布となった)。また、施設 B および施設 D での 1 回ずつの採取を除き、ふるい下積算分布はマイナス方向には 1 までの範囲であったが、プラス方向には 2 付近で分布している傾向があった。

集じん器入口では、中位径は 3~30 μm 以上の広い範囲に分布していた。施設 B 及び施設 D では、第 1 ステージで全粒子重量の約 55%以上が捕集されていたため、ふるい下積算分布が 0.5 ($y = 0$)を超えていない。

(3) 頻度分布

JIS K0302 に従い、カスケードインパクトのステージごとの捕集分率と粒径幅の比を縦軸方向、各ステージの D_{p50} と前段の D_{p50} の幾何平均を横軸方向にプロットしたもののうち代表的なものとして施設 B で集じん器入口(①、②)および煙突入口(③)で採取したものを図3に示す。粒径の下限値は、0.1 μm とし、上限は第 1 ステージの 1.5 倍の数値とした。図3において、各測定点の間は、スプラインにより補間[20]した。集じん器入口においては、二峰性を示すが、煙突入口においては、明瞭な二峰を示さない場合があった。塩田らの指摘[4]にもある通り、本調査では煙突入口ではガスの採取量が少なく十分な量の粒子を捕集できていないために明瞭なピークが現れなかったものと考えられる。

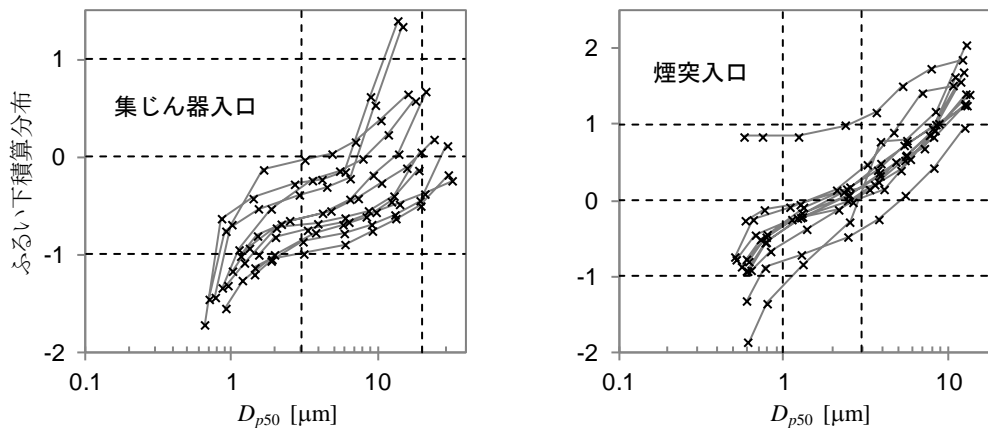


図2 ふるい下積算分布曲線
(縦軸は、標準正規分布の累積分布関数の逆関数に変換して表記している)

表3 各ステージの D_{p50} と捕集された PM の濃度

施設	ステージ別の D_{p50}								各ステージに捕集された PM の濃度								全体の				
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	B	合計	斜体部の	合計	
<集じん器入口での結果>																					
A	30.0	19.5	13.1	9.07	5.89	3.07	1.86	1.43	790	380	88	56	48	42	86	51	200	1,740	337		
A	32.3	21.0	14.1	9.74	6.33	3.30	1.99	1.53	1,500	130	97	71	84	65	53	120	400	2,520	573		
A	30.4	19.7	13.3	9.18	5.96	3.11	1.88	1.44	1,200	250	92	84	82	52	28	40	270	2,100	338		
B	16.1	10.5	7.03	4.86	3.16	1.65	1.00	0.77	230	83	75	43	22	35	180	150	67	885	432		
B	24.3	15.8	10.6	7.34	4.77	2.49	1.50	1.15	660	180	92	91	70	51	74	84	240	1,540	449		
B	21.3	13.9	9.31	6.44	4.18	2.18	1.32	1.01	350	330	120	130	70	51	99	75	170	1,400	395		
B	18.1	11.8	7.91	5.48	3.56	1.86	1.12	0.86	290	130	100	51	39	110	130	83	93	1,030	416		
C	19.8	12.9	8.63	5.97	3.88	2.02	1.22	0.94	660	240	74	34	26	19	130	62	130	1,380	341		
C	19.1	12.4	8.34	5.77	3.75	1.96	1.18	0.91	1,000	220	96	47	45	110	100	77	110	1,810	397		
D	13.7	8.91	5.98	4.14	2.69	1.40	0.85	0.65	70	160	250	26	16	47	61	190	37	857	335		
D	14.8	9.62	6.46	4.47	2.90	1.52	0.91	0.70	66	150	210	24	22	37	54	110	53	726	254		
<煙突入口での結果>																					
A	13.5	8.79	5.90	4.09	2.65	1.39	0.84	0.64	77	70	130	140	64	130	96	68	170	945	464		
A	12.9	8.38	5.62	3.89	2.53	1.32	0.80	0.61	13	64	60	2.8	250	120	72	36	20	638	248		
B	12.4	8.06	5.41	3.74	2.43	1.27	0.77	0.59	23	64	31	56	48	41	14	28	200	505	331		
B	12.7	8.26	5.54	3.84	2.49	1.30	0.79	0.60	170	130	170	130	200	150	200	160	370	1,680	1,080		
C	12.6	8.15	5.47	3.79	2.46	1.28	0.78	0.60	130	120	120	130	120	110	150	140	220	1,240	740		
C	12.8	8.33	5.59	3.87	2.51	1.31	0.79	0.61	91	110	110	110	110	130	140	130	200	1,130	600		
D	12.6	8.19	5.50	3.80	2.47	1.29	0.78	0.60	67	65	55	49	34	31	20	37	37	395	159		
D	11.0	7.18	4.82	3.34	2.17	1.13	0.68	0.52	8.8	33	10	23	18	8.5	13	18	37	169	95		
E	12.2	7.89	5.30	3.67	2.38	1.24	0.75	0.58	18	5.3	14	32	21	23	<0.1	<0.1	450	563	494		
F	10.7	6.98	4.68	3.24	2.11	1.10	0.66	0.51	19	4.0	31	39	37	26	19	50	67	292	199		
G	11.9	7.71	5.18	3.59	2.33	1.22	0.73	0.56	20	46	51	24	13	46	35	38	65	338	197		
H	13.0	8.42	5.65	3.91	2.54	1.33	0.80	0.62	100	50	64	82	110	100	130	110	200	946	540		

(単位: D_{p50} [μm] 集じん器入口での PM の濃度[mg/m^3] 煙突入口での PM の濃度[$\mu\text{g}/\text{m}^3$])

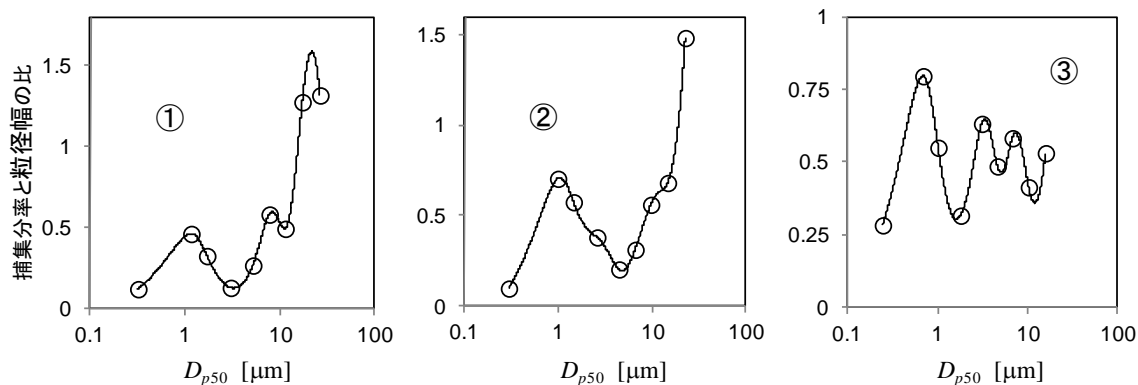


図3 施設Bの集じん器入口(①, ②)および煙突入口(③)でのPMの頻度分布

表4 施設Aの集じん器入口での各フィルタのXRFから計算された元素の質量%

ステージ	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Ag	As	Br	Pb
1	ND	65.9	--	1.2	4.5	ND	12.5	1.3	--	--	--	0.2	--	0.1	--	--	--	--
堆積物	--	--	--	1.9	--	--	71.1	1.1	--	--	ND	2.8	ND	0.3	22.6	--	--	--
2	13.6	76.5	--	0.9	3.4	0.2	1.5	0	--	ND	ND	0.1	--	0	3.7	--	--	--
3	15.4	74.5	ND	1.2	4.6	0.2	2.7	0.2	--	--	--	0.1	--	0	--	--	--	--
4	15.2	72.5	ND	1.1	6.1	0.3	3.5	0.2	--	--	--	0.1	--	0	--	--	--	--
5	13.7	73.7	--	2.0	6.0	0.3	4.0	0.2	--	--	--	0.1	ND	0	--	--	--	--
6	13.7	75.1	ND	1.3	5.4	0.3	2.8	0.1	ND	--	--	0	--	0	--	--	--	--
7	14.1	78.9	ND	1.0	3.7	0.3	0.9	0.1	--	--	--	0	--	0	--	--	--	--
8	12.6	64.2	--	2.5	15.9	3.1	1.3	0.1	--	--	--	0.1	0	0.3	--	ND	ND	ND
B.F.	ND	53.7	--	2.5	26.3	5.9	--	--	--	--	--	0.1	0	0.5	--	ND	ND	ND
ろ紙のみ	14.7	81.8													3.56			

また、図3において①および②は、同日に集じん器入口で採取したものである(①の2時間後に②を採取した。採取時間はいずれの場合も10分程度)。短時間では、粒子状物質の頻度分布が大きく異なっていた。焼却ごみ質や燃焼状態により頻度分布が大きく異なる可能性のあることが示唆された。

2) 集じん器入口、煙突入口での粒子状物質中の金属・イオン成分

(1) 金属成分

施設Aの集じん器入口(発生状態)、煙突入口(排出状態)において採取したろ紙を用いてXRF法によりPM中の元素重量比を測定した(煙突入口では、施設A以外では、ろ紙に由来するケイ素以外の元素は検出されなかった)。

得られたXRFのチャートにより分析されたフィルタ中の元素の重量割合を表4および表5に示す。今回測定したろ紙中の元素の重量比は表4下段に示した通り、ケイ素を多く含んでいる。表4および表5において「ND」と表記されている元素はXRFでは検出されているが重量比を定量できなかったものであり、「--」と表記されている元素は他のステージではXRFが検出されている

が当該ステージでは検出されなかったことを示す。また、集じん器入口の1段階目では、フィルタ上に堆積した粒子を別に測定した。

以上の結果より、廃棄物焼却施設の排ガス処理の前後では、粒径別の元素重量比は以下のように異なった傾向が見られた。

- ・ 煙突入口では、検出された元素のうち、カルシウム、硫黄などは D_{p50} が1 μm 程度のステージにのみに見られた。

表5 施設Aの煙突入口での各フィルタのXRFから計算された元素の質量%

ステージ	Al	Si	S	Ca	Fe
1	15.5	84.5	--	--	0.02
2	14.3	85.7	--	--	--
3	14.2	85.7	--	ND	0.03
4	15.1	84.9	--	--	0.02
5	14.8	84.4	0.69	0.09	0.03
6	16.2	83.1	0.67	ND	0.03
7	15.8	84.1	--	0.07	0.02
8	14.7	85.2	--	--	0.02
B.F.	16.3	83.7	--	--	--
ろ紙のみ	14.7	81.8	--	--	--

- ・ 集じん器入口では、煙突入口に比べ検出される元素の数が多くなるほか、カルシウムは粒径が大きくなれば比率が増加しているが、塩素やカリウムなどは粒径が小さくなれば比率が増加する傾向にあった。
- ・ ろ紙に由来するケイ素およびアルミニウム以外で検出された元素の数は、集じん器入口では6~9種類であるが、煙突入口では3種類となっている。排ガス処理により、粒子状物質の濃度が小さくなり検出されなくなっていた。排ガス処理の前後で粒径と元素質量比は異なった傾向を示していた。

(2) イオン成分

施設 A および施設 B、施設 C では、分級捕集器で捕集されないガス状の成分のうち、後段の凝縮水に捕集されたイオン成分を定量した。その結果を表 6 に示す。濃度は、捕集したガスの体積当たりの量に換算し

表 6 凝縮水中のイオン成分

施設	採取場所	塩化物イオン	硫酸イオン
		ppm(V/V)	
A	集じん器入口	26.25	15.15
	煙突入口	0.89	0.08
B	集じん器入口	30.2	45.85
	煙突入口	1.11	0.17
C	集じん器入口	29	2.35
	煙突入口	2.135	<0.004

た。表中、施設 B および施設 C の煙突入口では硫酸イオンを検出されないことがあった。また、硝酸イオンおよび亜硝酸イオンは、すべての検体で定量できなかった。これらガス状成分は、粒子状物質と同様、排ガス処理において 99% 以上が除去されていた。

IV まとめ

大阪市の都市ごみ焼却施設の煙突入口および集じん器入口(一部の施設のみ)において、粒子状物質を採取しその性状を分析した結果、以下の結果を得た。

- ・ 粒子状物質の合計重量は、集じん器入口では 726~2,520 mg/m³_N、煙突入口では 169~1,680 μg/m³_N の範囲であり、D_{p50} が 2.5 μm 未満であるステージでの粒子状物質の重量濃度は、集じん器入口では 254~573mg/m³_N、煙突入口では 95~1,080 μg/m³_N であった。通常の排ガス処理により、D_{p50} に関わらず都市ごみ焼却において発生した PM の 99% 以上が除去可能であると考えられた。
- ・ PM の中位径は、煙突入口で採取した場合は 1~3 μm の範囲に分布していたが、集じん器入口の場合は 3~30μm 以上の広い範囲に分布していた。
- ・ PM の頻度分布曲線は、集じん器入口では二峰性を示したが、煙突入口では明瞭な二峰性は見られなかった。また、焼却ごみ質や燃焼状態により頻度分布が大きく異なると考えられた。

を

- ・ 廃棄物焼却施設の排ガス処理の前後では、粒径別の元素重量比の傾向が異なっていた。

謝辞 本調査の実施にあたり、大阪市環境局施設部のみなさまのご協力を受けたことを記し、深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省. 浮遊粒子状物質に係る環境基準の設定について. 環大企 27 号, 昭和 47 年 02 月 14 日. <http://www.env.go.jp/hourei/syousai.php?id=01000065>
- 2) 環境省, 微小粒子状物質に係る環境基準の設定について(答申) 別添 1「微小粒子状物質環境基準専門委員会報告」5.環境基準の設定に当たっての指針値に関する検討, <http://www.env.go.jp/council/toshin/t07-h2102.html>
- 3) 環境省, 微小粒子状物質(PM2.5)に関する情報, <http://www.env.go.jp/air/osen/pm/info.html>
- 4) 塩田憲司, 今井玄哉, 高岡昌輝, 木本 成, 松井康人, 大下和徹, 他. 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 2011 ; 46(4) : 224-232.
- 5) 真室哲雄, 溝畑 朗, 久保田寅英. 都市廃棄物焼却炉より放出される浮遊粒子の元素組成. 大気汚染学会誌 1979 ; 13(5) : 190-196.
- 6) 東京都微小粒子状物質検討会. 東京都微小粒子状物質検討会報告書 ; 平成 23 年 7 月.
- 7) G Buonanno, G Ficco, and L Stabile. Size distribution and number concentration of particles at the stack of a municipal waste incinerator. Waste Management 2009 ; 29(2) : 749-755.
- 8) Chiung-Wen Hua, Mu-Rong Chaoa, Kuen-Yuh Wua, Gou-Ping Chang-Chienb, Wen-Jhy Leec, and Louis W Changa, et al. Characterization of multiple airborne particulate metals in the surroundings of a municipal waste incinerator in Taiwan. Atmospheric Environment 2003 ; 37(20) : 2845-2852.
- 9) Honghong Yia, Xingming Guoa, Jiming Haoa, Lei Duana, and Xinghua Li. Characteristics of Inhalable Particulate Matter Concentration and Size Distribution from Power Plants in China. Journal of the Air & Waste Management Association 2006 ; 56(9) : 1243-1251.
- 10) Ernest S Gladney, John A Small, Glen E Gordon, and William H Zoller. Composition and size

- distribution of in-stack particulate material at a coal-fired power plant. *Atmospheric Environment* 1976 ; 10(12) : 1071-1077.
- 11) J.M. Ondov, C.E. Choquette, W.H. Zoller, G.E. Gordon, A.H. Biermann, and R.E. Heft. Atmospheric behavior of trace elements on particles emitted from a coal-fired power plant. *Atmospheric Environment* 1989 ; 23(10) : 2193-2204.
 - 12) Robert E. Lee, Howard L. Crist, Allan E. Riley, and Kathryn E. Macloed. Concentration and size of trace metal emissions from a power plant, a steel plant, and cotton gin. *Environmental Science and Technology* 1975 ; 9(7) : 643-647.
 - 13) Esko I. Kauppinen, and Tuomo A. Pakkanen. Mass and trace element size distributions of aerosols emitted by a hospital refuse incinerator. *Atmospheric Environment* 1990 ; 24A(2) : 423-429.
 - 14) Michael J. Kleeman, James J. Schauer, and Glen R. Cass. Size and Composition Distribution of Fine Particulate Matter Emitted from Motor Vehicles. *Environmental Science and Technology* 2000 ; 34(7) : 1132-1142.
 - 15) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課, 日本の廃棄物処理(平成 24 年度版), http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h24/data/disposal.pdf
 - 16) 環境省, 環境統計集 6.08 ばいじん排出量(施設種別内訳), <http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/index.html>
 - 17) 日本工業規格. JISK0302. 排ガス中のダスト粒径分布の測定方法, 1989/2/1.
 - 18) 環境省, 大気中微小粒子状物質(PM_{2.5})測定方法暫定マニュアル. 改訂版, <http://www.env.go.jp/air/report/h19-03/>
 - 19) 日本工業規格, JISZ7152. バーチャルインパクタによる排ガス中のPM10/PM2.5質量濃度測定方法, 2013/8/20.
 - 20) スプラインによる補間の方法は、例えば以下のサイトなどの情報を参考にした。
<http://www.akita-nct.ac.jp/yamamoto/lecture/2004/5E/interpolation/text/html/node3.html>
 - 21) 門脇 恰. アンダーセンサンプラーによる都市大気中の粒子状物質の粒度分布. *分析化学* 1974 ; 23(5) : 490-495.

参照したサイトの URL は、2014 年 8 月末にアクセスしたものである。