

## 都市ごみ焼却炉における凝縮性ダストの調査

The Emission of Dust Including Condensable Dust  
from Municipal Incinerator

広瀬 健二 Kenji HIROSE  
安藤 仁 Hitoshi ANDO  
井上 俊明 Toshiaki INOUE  
佐藤 静雄 Shizuo SATOH

キーワード：凝縮性ダスト，都市ごみ焼却炉，排出源単位，成分分析

Key words : dust including condensable dust, municipal incinerator, emission, elemental composition

## 1 はじめに

大手工場からのばいじん排出量は1975年に約2500 t / 年であったものが、1992年には 480 t / 年にまで減少した。しかしながら浮遊粒子状物質（以下SPM）濃度の環境基準の適合状況は、川崎市の全ての地点で不適合である<sup>1)</sup>。

SPMの発生源としては、固定発生源の他に移動発生源や二次生成粒子の影響が考えられ、現在その対策について検討が進められている。

一方、ばいじん採取方法を定めているJIS-Z8808<sup>1) 1995</sup>「排ガス中のダスト濃度の測定方法」<sup>2)</sup>の改定において、ダストの定義がより拡大されミスト（液体粒子中の可溶性物質）についても評価の対象になった。

固定発生源のSPM対策では、ばい煙発生施設の煙突から排出された後、比較的短時間に大気との混合冷却により生成される凝縮性ダストの影響が目立って始めている<sup>3)</sup>。

凝縮性ダストについてはサンプリング方法については様々な報告がすでに行われている<sup>4)・5)・6)</sup>。今回、環境庁で検討が進められている凝縮性ダストの採取方法である「水-間接冷却法」と「空気-直接冷却法」に基づいて<sup>7)</sup>、都市ごみ焼却炉における凝縮性ダストの調査を実施したので報告する。

## 2 調査方法

## 2.1 調査期間・調査対象工場

調査は、1995年2月に川崎市内の都市ごみ焼却施設でサンプリングを実施した。サンプリングは水-間接冷却法を2サンプル、空気-直接冷却法を2サンプルの計4サンプルを採取した。

調査対象の焼却炉の概要を表1に示した。当該施設は150t/日の焼却炉を3基、合計450t/日のごみ焼却能力を持つ事業場である。焼却炉の排ガス処理フローは図1に示したが、NO<sub>x</sub>、HC<sub>0</sub>除去施設と電気集塵機が設置してある。

表1 焼却炉の概要

焼却炉形式	ストーカ式焼却炉
焼却能力	450t/24h (150t/24h * 3基)
排ガス処理装置	電気集塵機 HC <sub>0</sub> 除去施設 (消石灰噴射処理) NO <sub>x</sub> 除去施設 (アンモニア噴霧処理)

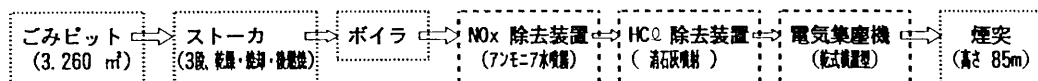


図1 焼却炉の排ガス処理フローシート

2.2 試料採取

2.2.1 試料採取方法

サンプリング時の煙道条件は表2に示したが、排ガス温度は239℃と高く、また塩化水素濃度は385ppmであった。水分量は33%と多くの水分を含んだ排ガスであった。

今回の凝縮性ダストのサンプリング方法である「水-間接冷却法」の概念図を図2に、「空気-直接冷却法」の概念図を図3に示した。

水-間接冷却法は、1形ろ紙を通過した吸引ガスを水を冷媒とした冷却器で間接的に冷却することによって発生する凝縮液（以下ドレン）と凝縮性ダストを同時に捕集し、さらに残りを後段に設置した2形ろ紙で捕集する方法である。ドレン採取用の冷却器に流れる水は氷冷水を使用した。この方法における凝縮性ダスト量は「ドレン乾燥重量+2形ろ紙採取重量」である。

表2 サンプリング時の煙道条件

流速	11.5 m/s
排ガス温度	239 °C
酸素濃度	11.5 %
水分量	32.7 %
SO <sub>2</sub> 濃度	55 ppm
HCl 濃度	385 ppm
NO <sub>x</sub> 濃度	71 ppm

空気-直接冷却法は、1形ろ紙を通過した吸引ガスに除湿した清浄空気を混合することによって吸引ガスを希釈・冷却し、それによって生成する凝縮性ダストを2形ろ紙で捕集する方法である。この方法における凝縮性ダスト量は「2形1採取重量+2形2採取重量」である。

現場で設置した測定装置は、写真に示したようにパイプで組んだ枠内にガラス器具をクランプで固定した。

2.2.2 試料採取条件

測定条件は、吸引ノズル径6mm、等速吸引量9ℓ/minで約400ℓの排ガスを吸引した。

空気-直接冷却法の循環空気量は、理論的には次式<sup>7)</sup>を用いると吸引ガス量の14倍の希釈が必要である。しかし、循環用ポンプ能力から循環空気量は18ℓ/min、希釈率で2倍の空気量しか確保出来なかった。それが原因で2形2のろ紙に水分が溜まってしまった。

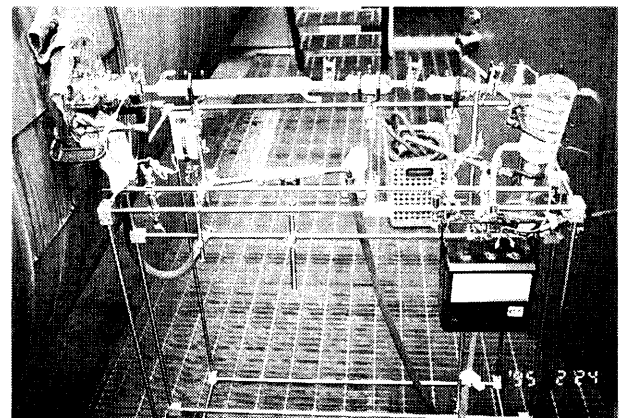


写真 測定現場（空気-直接冷却法の測定）

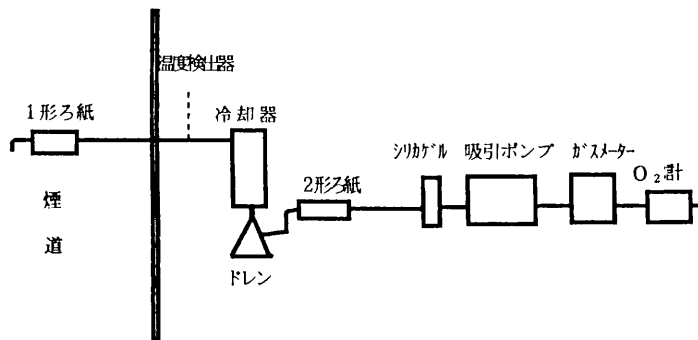


図2 水-間接冷却法の概略図

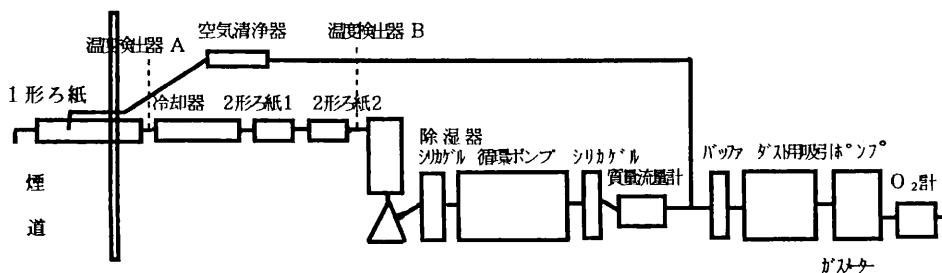


図3 空気-直接冷却法の概略図

$$\text{理論希釈空気倍率} = \frac{(\text{排気ガスの水分量} - 2\text{形捕集部の温度における飽和水分量})}{2\text{形捕集部の温度における飽和水分量}} + 1$$

排ガス水分量 : 33%  
 2形捕集部の温度 : 20℃  
 2形捕集部の温度における飽和水分量 : 2.3%

ダスト捕集用のろ紙は、円筒ろ紙 (ADVANTEC 88RII 25 × 50mm) を使用した。

2.3 調査項目・分析方法

2.3.1 測定項目

測定項目は、ダスト量、各種イオン (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>)、金属類 (Ca, Mg, Cd, Pb, Zn, Ni, Cu, Fe, Mn, Al, Cr, V) および炭素成分を分析した。

2.3.2 分析方法

試料採取した円筒ろ紙は、105℃で乾燥し秤量した。そのろ紙についてイオン分析 (100mlの超純水で抽出後イオンクロマトグラフ分析) と金属分析 (フッ酸-過塩素酸処理後、原子吸光分析) を行った。

ドレンについては、水浴上で乾固してものを105℃で乾燥し秤量した。その後、超純水で再溶解したものをイオン分析、酸処理したものを金属分析の試料とした。

炭素分析のろ紙については、メノウ乳鉢で粉末処理したものを試料とした。ドレンについては、水浴上で乾固させたものを少量の水で再溶解し、CHN計用の石英サンプルボードに移し、それを105℃で乾燥させて試料とし、CHN計で有機炭素 (He, 550℃) と元素状炭素 (He-O<sub>2</sub>, 900℃) を分析した。

3 結果及び考察

3.1 凝縮性ダスト濃度について

水-間接冷却法の凝縮性ダスト濃度の結果については表3に示した。空気-直接冷却法については表4に示した。また、これらの結果を図4に示した。

両方法で採取された1形のダスト量は、11~15mg/m<sup>3</sup>N とほぼ同程度の濃度であった。

水-間接冷却法では、全ダスト採取量にしめる割合は1形ろ紙とドレンが半分ずつであり、2形ろ紙にはほとんどダストは採取されていなかった。凝縮性ダスト (ドレン+2形ろ紙) のダスト全体に占める割合は49%であった。

空気-直接冷却法では、全ダスト採取量にしめる割合は1形で39%、2形1で4%、2形2で57%であった。凝縮性ダスト (2形1+2形2) としては61%であった。2形2については水分が凝縮したことによるガス状物質の影響を大きく受けたためダスト濃度が高くなったと考えられる。

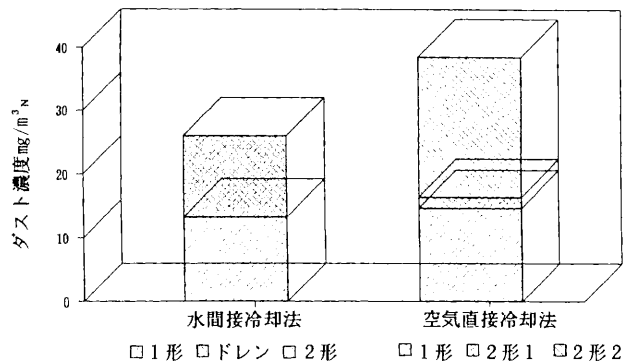


図4 ダスト濃度結果

表3 水-間接冷却法のダスト濃度

試料 No	1 形		ドレン		2 形		全ダスト濃度 mg/ m <sup>3</sup> N
	ダスト濃度 (mg/ m <sup>3</sup> N)	全ダスト濃度に対する割合 (%)	ダスト濃度 (mg/ m <sup>3</sup> N)	全ダスト濃度に対する割合 (%)	ダスト濃度 (mg/ m <sup>3</sup> N)	全ダスト濃度に対する割合 (%)	
1	15.4	52.7	13.8	47.0	0.08	0.0	29.3
2	11.0	48.5	11.7	51.2	0.07	0.0	22.8
鞘	13.2	50.6	12.8	49.1	0.08	0.0	26.0

表4 空気-直接冷却法のダスト濃度

試料 No	1 形		2 形 1		2 形 2		全ダスト濃度 mg/ m <sup>3</sup> N
	ダスト濃度 (mg/ m <sup>3</sup> N)	全ダスト濃度に対する割合 (%)	ダスト濃度 (mg/ m <sup>3</sup> N)	全ダスト濃度に対する割合 (%)	ダスト濃度 (mg/ m <sup>3</sup> N)	全ダスト濃度に対する割合 (%)	
1	14.2	31.9	2.4	5.5	27.8	62.6	44.4
2	15.2	46.5	1.0	3.1	16.5	50.4	32.7
鞘	14.7	39.2	1.7	4.3	22.2	56.5	38.6

3.2 都市ごみ焼却炉からのダスト成分の特徴

3.2.1 全ダスト濃度に対する成分比

イオン8成分と金属10成分の全ダスト採取量（1形+ドレン+2形，1形+2形1+2形2）に対する成分比（wt%）の結果については，表5と図5に示した。

水-間接冷却法では，1形のCl<sup>-</sup>が33.9%と最も多い成分であり，次に1形のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，Na<sup>+</sup>，K<sup>+</sup>の順に存在していた。ドレンではSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，Cl<sup>-</sup>，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>が1形の成分について多いイオンであった。

空気-直接冷却法では，2形2のCl<sup>-</sup>が27.1%と最も多い成分であり，次に1形のCl<sup>-</sup>，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>そして2形2のFeなどが主要なイオンであった。また，1形であまり捕捉されていないが2形2に多く捕捉されたものとしては，Cl<sup>-</sup>，Ca，Ni，Fe，Crなどがある。

3.2.2 各ろ紙・ダストごとの成分比

各ろ紙・ドレンのそれぞれについて，イオンと金属の成分比（wt%）を表6と図6に示した。

水-間接冷却法の1形の主成分はCl<sup>-</sup>，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，Na<sup>+</sup>，K<sup>+</sup>，ドレンの主成分はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，Cl<sup>-</sup>，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>，2形ろ紙の主成分はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，Cl<sup>-</sup>，K<sup>+</sup>であった。

空気-直接冷却法の1形の主成分はCl<sup>-</sup>，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，Na<sup>+</sup>，K<sup>+</sup>，2形1の主成分はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，Cl<sup>-</sup>，K<sup>+</sup>，2形2の主成分はCl<sup>-</sup>，Fe，Crであった。2形2の成分は他のろ紙・ドレンとは成分が異なっており，Ni，Crなども捕集された。

水-間接冷却法の1形と空気-直接冷却法の1形の主な成分は一致していた。

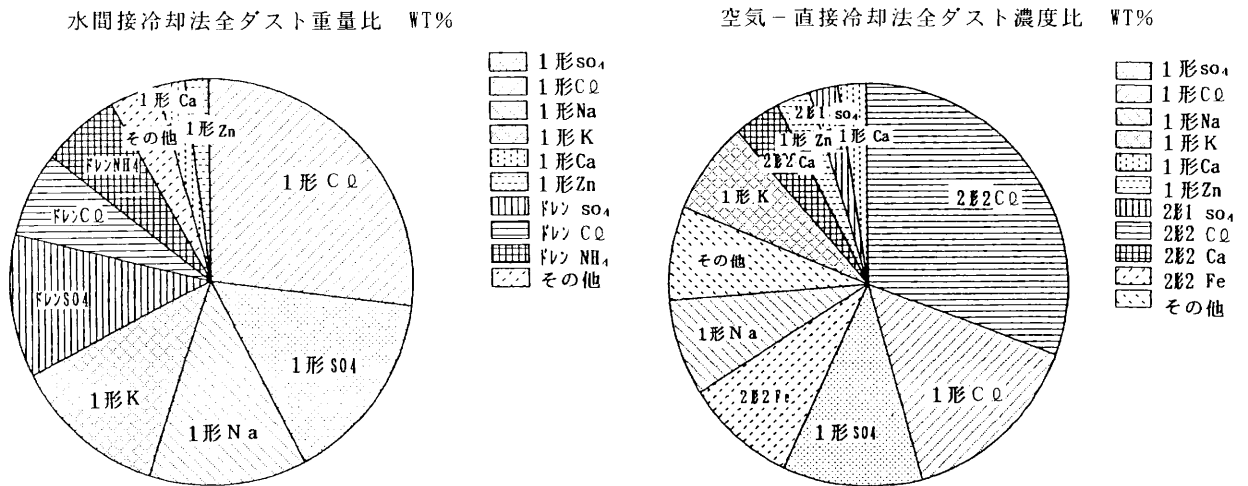


図5 全ダスト濃度に占める各成分比(WT%)

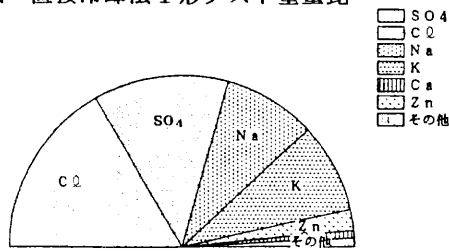
表5 全ダスト濃度に占めるイオン及び金属の成分比(WT%)

		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca	Mg	Cd	Pb	Zn	Ni	Cu	Fe	Mn	Al	Cr	V	合計
水間接冷却法	1形	19.1	0.0	33.9	0.0	15.8	15.4	2.7	0.0	0.0	0.4	2.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	ドレン	14.3	0.7	8.6	7.9	1.7	0.5	0.4	0.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	2形	0.7	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	125.0
空気直接冷却法	1形	9.9	0.2	13.2	0.0	6.9	6.6	2.0	0.0	0.0	0.5	2.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	2形1	2.1	0.0	0.9	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	2形2	0.0	0.0	27.1	0.0	0.0	0.5	3.4	0.0	0.0	0.0	0.2	1.3	0.1	7.9	0.2	0.0	1.4	0.0	88.1

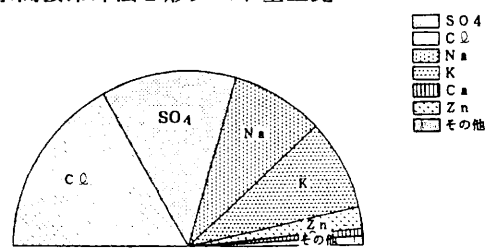
表6 水-間接冷却法・空気-直接冷却法の各ろ紙、ドレン濃度に占める各成分比(WT%)

		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca	Mg	Cd	Pb	Zn	Ni	Cu	Fe	Mn	Al	Cr	V	合計
水間接冷却法	1形	32.1	0.0	56.8	0.0	26.6	25.9	1.5	0.0	0.0	1.1	5.7	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	150.0
	ドレン	29.4	1.4	17.5	16.2	3.4	0.9	0.8	0.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	69.6
	2形	216.4	0.0	81.2	0.0	0.0	45.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	347.1
空気直接冷却法	1形	31.1	0.7	41.4	0.0	21.5	20.8	1.7	0.0	0.0	1.1	5.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	129.9
	2形1	37.6	0.0	16.9	0.0	7.3	14.6	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.6
	2形2	0.0	0.0	43.2	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	2.6	0.1	15.7	0.4	0.0	2.7	0.0	67.0

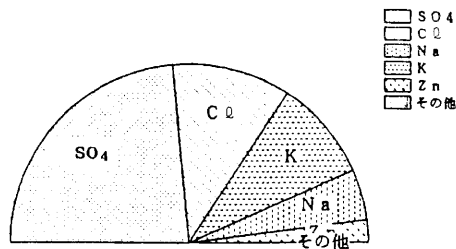
空気-直接冷却法1形ダスト重量比



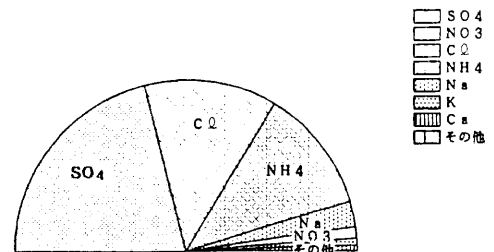
水間接冷却法1形ダスト重量比



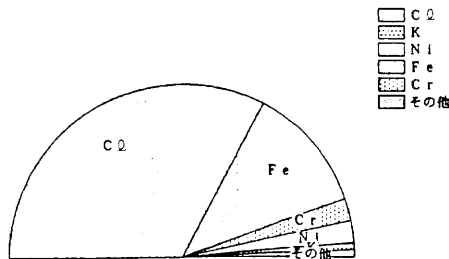
空気-直接冷却法2形1ダスト重量比



水間接冷却法ドレン・ダスト重量比



空気-直接冷却法2形2ダスト重量比



水間接冷却法2形ダスト重量比

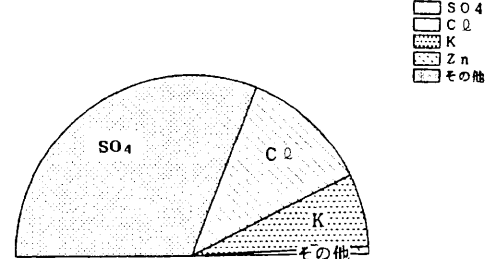


図6 各ろ紙、ドレン濃度に占める各成分の重量比(WT%)

### 3.2.3 炭素組成について

炭素分の測定についてはろ紙とドレンについて行ったが、ろ紙については円筒ろ紙を使用したのではろ紙ブランクが高すぎて測定が出来なかった。

その結果を表7に示した。ドレン中の有機炭素は3~4wt%であり、元素炭素は0.2~0.4wt%とその存在割合は低かった。

表7 ドレン中の炭素成分結果(wt%)

試料番号	有機炭素	元素炭素
1	3.3	0.2
2	4.1	0.4

### 3.2.4 排ガス中のSO<sub>2</sub>・HC<sub>2</sub>・NO<sub>x</sub>濃度とダスト中のイオン成分の関係

ダスト中のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>・Cl<sup>-</sup>・NO<sub>3</sub><sup>-</sup>イオンをガス濃度に換算すると表8に示した濃度になる。この時の排ガス中の各ガス濃度と換算ダスト・ガス濃度との存在割合を比較すると、NO<sub>x</sub>ではガス濃度の0.06%と比率が低く、SO<sub>2</sub>では2~3.5%、HC<sub>2</sub>では2~2.6%であった。

ダスト中のイオン成分の由来は、塩やミスト状のものもあるので、ガス状物質の影響の程度については今後さらに検討する必要がある。

表8 排ガス中の濃度と凝縮性ダストのイオン濃度の比較

	SO <sub>2</sub>	HC <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
全ダスト(水間接) ppm	1.9	7.6	0.05
全ダスト(空気直接) ppm	1.1	10.0	0.04
排ガス濃度 ppm	55	385	71
水間接/排ガス濃度 %	3.5	2.0	0.07
空気直接/排ガス濃度 %	2.0	2.6	0.06

(注) 全ダスト：全ダスト中のイオン成分のガス換算濃度

表9 都市ごみ焼却炉と簡易焼却炉のダスト濃度の比較

	水-間接冷却法			空気-直接冷却法		
	全ダスト濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	凝縮性ダスト濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	凝縮性ダストの割合 (%)	全ダスト濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	凝縮性ダスト濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	凝縮性ダストの割合 (%)
都市ごみ焼却炉	26	13	49	38	24	62
簡易焼却炉：合板	136	11	9.2	92	1.0	1.2
枝葉	336	64	20	346	23	6.6
トレー	384	31	9.4	550	7.4	1.4

### 3.3 都市ごみ焼却炉と簡易焼却炉の比較

上記方法を用いて法対象外の簡易焼却炉で合板・枝葉・トレーを焼却した時の凝縮性ダストの実態を調査した<sup>8)</sup>。

凝縮性ダストの結果を表9に示したが、簡易焼却炉は排ガス処理装置が設置されていないので、全ダスト濃度は都市ごみ焼却炉の2.5～15倍と高い濃度であった。また全ダストに占める凝縮性ダストの割合は都市ごみ焼却炉では50～60%の割合であり、簡易焼却炉は10%以下がほとんどであった。

## 4 まとめ

今回は環境庁が進めている凝縮性ダストのサンプリング方法を用いて都市ごみ焼却炉の凝縮性ダストについて検討した。

### (1) 凝縮性ダスト濃度について

水-間接冷却法では、全ダスト濃度に対する割合は1形ろ紙とドレンが半分ずつであり、2形ろ紙にはほとんどダストは採取されなかった。凝縮性ダスト(ドレン+2形ろ紙)の割合は49%であった。

空気-直接冷却法では、全ダスト濃度に対する割合は1形で39%、2形1で4%、2形2で57%であった。凝縮性ダスト(2形1+2形2)の割合は61%であった。2形2については水分が凝縮したことによるガス状物質等の影響を大きく受けたためダスト濃度が高くなったと考えられる。

### (2) 全ダスト濃度に対する成分比

水-間接冷却法では、1形の $\text{CQ}^-$ が33.9%と最も多い成分であり、次に1形の $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{K}^+$ の順に存在していた。

空気-直接冷却法では、2形2の $\text{CQ}^-$ が27.1%と最も多い成分であり、次に1形の $\text{CQ}^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ そして2形2のFeなどが主要なイオンであった。

### (3) 各ろ紙・ダストごとの成分比

水-間接冷却法の1形の主成分は $\text{CQ}^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{K}^+$ 、ドレンの主成分は $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CQ}^- \cdot \text{NH}_4^+$ 、2形ろ紙の主成分は $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CQ}^- \cdot \text{K}^+$ であった。

空気-直接冷却法の1形の主成分は $\text{CQ}^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{K}^+$ 、2形1の主成分は $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CQ}^- \cdot \text{K}^+$ 、2形2の主成分は $\text{Cl}^- \cdot \text{Fe} \cdot \text{Cr}$ であった。

(4) 排ガス中の $\text{SO}_2 \cdot \text{HCQ} \cdot \text{NO}_x$ とダスト中のイオン成分の関係を調べた結果、排ガス中の $\text{SO}_2$ 濃度の2.0～3.5%が凝縮性ダストに含まれていた。また排ガス中のHCQ濃度の2.0～2.6%が凝縮性ダストに含まれていた。

(5) 都市ごみ焼却炉と簡易焼却炉について比較をした。全ダスト濃度は、簡易焼却炉が都市ごみ焼却炉の2.5～15倍高い濃度であった。また、全ダストに対する凝縮性ダストの割合は、都市ごみ焼却炉の方が高い割合であった。

(6) 空気-直接冷却法では希釈空気量を十分確保することが出来なかったため、2形ろ紙に水が溜まり、測定結果に影響を与えた。理論量の希釈空気量を確保するには大型ガスポンプを用意する必要があり、実用面で問題があると考えられる。

## 文献

- 川崎市：「よりよい環境をめざして」1994年度川崎市環境白書，川崎市，63-64(1994)
- 日本工業規格：Z8808<sup>1)9)9)</sup>排ガス中のダスト濃度の測定方法，1，日本規格協会，1，(1995)
- 飯豊修司：固定発生源から排出される粒子の評価，千葉県公害研究所研究報告，21(1)，1-17(1989)
- 飯豊修司：排ガス中ダスト濃度測定における捕集器の検討，千葉県公害研究所研究報告，22(1)，1-8(1990)
- 小暮信之，白波瀬雅明：排ガス中の凝縮性ダストの測定法および排出特性，大気汚染学会誌，27(3)，153-164(1992)
- 佐佐満夫，太田正雄，数野賢治：石炭燃焼に伴う煙道内凝縮性粒子の排出特性，横浜市環境科学研究所年報，18，11-13(1994)
- 財日本品質保証機構：凝縮性ダストを含むばいじん測定検討調査報告書，(財)日本品質保証機構，60(1994)
- 井上俊明，安藤仁，佐藤静雄：簡易焼却炉における凝縮性ダストの排出状況について，第36回大気環境学会年会講演要旨集，340(1995)