

都市ごみ焼却残渣の金属含有量*

酒 井 護**

キーワード ①都市ごみ ②飛灰 ③焼却主灰 ④金属含有量

要 旨

都市ごみ焼却残渣には、都市ごみに含まれる重金属等の有害物質が濃縮されやすい。今後、ごみの収集に関する行政施策の変更によりごみの物理組成が変化し、重金属等の溶出挙動が変化する可能性がある。そのため、焼却物の物理組成の異なる施設から焼却残渣を採取し金属含有量を分析し変化の可能性を検討した。その結果金属含有量について、①飛灰では物理組成によらずほぼ10倍程度の範囲内で収まる、②焼却主灰では物理組成に大きく影響されるが溶出液のpHに大きな影響を与える可能性のある元素は全体で10倍以内の範囲内であることから溶出挙動に与える影響は小さい、と考えられた。

1. はじめに

環境省のまとめによると2010年度に都市ごみは約4,200万t発生した¹⁾。これらのうち資源化できないものを衛生的かつ効率的に減容化するため焼却による中間処理を行った後、生じた飛灰や焼却灰などの焼却残渣が最終処分されている。この焼却残渣にはごみに含まれる重金属等の有害物質が濃縮されやすい。最終処分場の周辺環境を保全する必要があり、焼却残渣中の重金属含有量の定量分析や処理に関し多くの研究がなされてきた。

貴田ら²⁾は都市ごみ焼却炉内の元素の挙動に関する知見を得るため、焼却灰および飛灰の重金属含有量の測定結果からそのばらつきや相関について検討した。

高岡ら³⁾は都市ごみ焼却飛灰中の重金属含有量を蛍光X線法およびICP発光分析法、中性子放射化分析法による結果を評価した結果、この3種の定量方法を含有量に応じて使い分けることで迅速な分析が可能となつた。

野馬ら⁴⁻⁶⁾は最終処分場において焼却残渣に由来するカルシウムスケールの問題を解決するための手法として、炭酸化により難溶性の炭酸カルシウムの形成による処理法を提案した。福永ら⁷⁾は都市ごみ焼却施設の焼却残渣からの重金属の溶出はpHの及ぼす影響が大きいことから、水洗浄法による処理が妥当であるとした。

大迫ら⁸⁾は韓国で鉛の溶出量が大きく最終処分の基準を満たさない都市ごみ焼却灰が多く深刻な問題となっていることから、韓国および日本での焼却灰を調査した。その結果、焼却灰中のアルカリ金属・アルカリ土類金属の酸化物が溶出液のpHを大きくしており鉛の溶出量が大きくなるとした。

大阪市の焼却ごみ質において、紙の比率は乾燥ベースで40%程度でありそのうち資源化可能なものは75%を占めている⁹⁾。大阪市の都市ごみ焼却施設では、2013年10月より資源化可能な紙類の持ち込みが禁止される。その他の行政施策の変化も

* A Metal Content Investigation in Residues of Municipal Solid Waste Incinerators

** Mamoru SAKAI (大阪市立環境科学研究所) Osaka City Institute of Public Health and Environmental Sciences

含め、ごみの物理組成が変化により、焼却残渣の溶出挙動に与える可能性がある。既報の調査¹⁰⁾より、大阪市の都市ごみ焼却施設に搬入されているごみの物理組成は大きく異なっている。

このようにごみの物理組成が異なる8施設より焼却残渣(飛灰および焼却主灰)を採取し金属含有量を測定した。また、その結果の統計的考察も踏まえ、ごみの物理組成の変化による焼却残渣中の金属の溶出挙動の変化の可能性を考察した。

2. 方 法

2.1 焼却残渣の採取と金属含有量の定量分析

大阪市の都市ごみ焼却施設(8施設)において、飛灰(以下「FA」)を集じん灰輸送コンベアより、焼却主灰(以下「BA」)をフライト水槽より直接採取したものを試料とした。これらの採取では、4カ月の期間をあけて2回にわたり採取した。採取した施設での集じん方法およびインターバルの前後で採取した試料数は、表1に示した。

大阪市の都市ごみ焼却施設には複数の焼却炉があり、試料採取日に稼働していたすべての焼却炉から焼却残渣を採取した。集じん器について、“EP”は電気集じん器、“BF”はバグフィルタを表す。大阪市のゴミの分別に関する行政施策の変遷は表2に示したとおりであり、容器包装材以外のプラスチックは全量を焼却している。すべての焼却施設は、24時間連続運転式のストーカー炉である。

また、文献¹⁰⁾より、2003年から2007年までの5年間での大阪市の各焼却施設に搬入されたごみの

物理組成の全体での平均値と工場別平均値の最小値および最大値を表3に示す。

採取した焼却残渣中の金属含有量を以下の方法で定量した。定量した元素は、溶出液のpHに与える影響が大きいと考えられるアルカリ金属(ナトリウム、カリウム)およびアルカリ土類金属(マグネシウム、カルシウム)、ベースメタル(鉄、銅、亜鉛)、pHにより溶出量が影響されると考えられるもの⁷⁾(カドミウム、鉛)の9種類とした。

FAは有姿のまま、BAは水分を含むため105℃で一昼夜加熱乾燥し目開き5mmのふるいを通してのもの、それぞれ1グラム程度を王水で分解したものを検液とした。

定量分析方法は、表4のとおりである。表4の分析法において、ICは東ソー社製イオンクロマトグラフ IC-2001(カラムはIC-CR)を使用した。AASは、島津製作所社製原子吸光光度計

表2 大阪市での分別収集施策の変遷

1970年～	粗大ごみ収集開始
1994年～	資源ごみ収集開始(空き缶、空きビン)
1997年～	資源ごみにペットボトル追加
2005年～	容器包装プラスチック収集開始

(資源ごみ収集 および 容器包装プラスチック収集は全市域での収集開始時期)

大阪環境局事業概要 より作成

表3 大阪市のごみの物理組成比率の分布

	物理組成							
	可燃物(絶乾基準)						不燃物	水分
	厨芥	紙	繊維	木草	プラ	雑物		
	%							
全体の平均	3.01	29.50	6.05	6.41	10.16	3.13	10.42	31.32
最小値	1.94	23.29	3.45	2.26	7.59	0.55	4.48	24.84
最大値	4.27	33.63	8.93	9.55	13.19	5.76	17.39	39.81

文献¹⁰⁾より作成

表1 検体を採取した施設の概要と検体数

施設	焼却能力	集じん器	消石灰 噴霧	検体数		
				(前)	(後)	
A	300 t/日	3 炉	EP	なし ^{*1}	3	2
B	300 t/日	2 炉	EP	なし	2	2
C	300 t/日	2 炉	EP	なし	2	2
D	300 t/日	2 炉	EP	なし	1	1
E	300 t/日	2 炉	BF	あり	2	1
F	450 t/日	2 炉	BF	なし	2	1
G	450 t/日	2 炉	BF	なし	1	1
H	200 t/日	2 炉	BF	なし	1	2

休止中の炉を除き、当日稼働している焼却炉より採取した

*1 施設 A では、集じん器の前で活性炭を噴霧している

表4 金属の定量分析方法

金属	前処理方法	分析法
Na	王水分解	IC
K	王水分解	IC
Mg	王水分解	AAS
Ca	王水分解	AAS
Fe	王水分解	AAS
Cu	王水分解	AAS
Zn	王水分解	AAS
Cd	王水分解	AAS
Pb	王水分解	AAS

AS-6300を使用した。また、FA に存在する結晶構造をもつ金属塩を表 5 に示した条件で PAnalytical 社製 X'pert PRO により粉末 X 線回折 (XRD) を測定した。

3. 結果と考察

3.1 焼却残渣中の金属含有量の分析結果

採取した焼却残渣中の金属含有量の平均値および標準偏差、最小値、中央値、最大値は表 6 のとおりまとめられる。ただし、BA では26試料中8試料でカドミウムの含有量が定量下限値 (0.1 mg/kg) 未満であった。各施設に搬入されているごみ質が異なっているため、BA の金属含有量の分布は、マグネシウムおよびカルシウムでは5倍程度の範囲内であったが、銅や鉛など100倍以上の範囲になっている場合もあった。

一方、FA の金属含有量に関して、鉛が12倍であったがその他はすべて10倍以内の小さな範囲に分布していた。

文献による FA および BA 中の金属濃度の平均値を表 7 にまとめた。本測定における26件の分布は、表 7 と比較して同程度の数値であると考えられた。

表 5 XRD の測定条件

X 線対陰極	銅	走査速度	1° /min
管電圧	40 kV	発散スリット	1°
管電流	40 mA	散乱スリット	1°
フルスケール	1000 cps	受光スリット	0.3mm
時定数	1 s	走査範囲	2 θ =5~80°

3.2 物理組成の変化が焼却残渣の溶出挙動に与える影響

FA の金属含有量に見られる傾向を統計的に解析する。FA の金属含有量の絶対値でカルシウムと銅では200倍以上の違いがあるため、相関係数行列を作成しその固有値および固有ベクトルにより主成分分析を行った。このうち、平均値がゼロ、標準偏差が1となるように規格化した数値により計算した第1主成分と第2主成分に対応する固有ベクトルの成分を表 8 に示す。

各定量分析結果について、第1主成分スコアを横軸、第2主成分スコアを縦軸にプロットしたものを図 1 に示す。図 1 では、施設によりプロットの記号を変えている。このプロットは、クラスタ分析の結果¹¹⁾により4つのグループに分けることができる。これらのグループには、主成分および金属含有量について表 9 に示したような傾向が見られた。これらについて、ごみ物理組成が同一で

表 7 他の研究による焼却残渣の金属含有量

金属	FA の金属含有量			BA の金属含有量		
	出典			出典		
	本調査	文献 ²⁾	文献 ³⁾	本調査	文献 ²⁾	文献 ⁸⁾
	mg/kg			mg/kg		
Cd	170	110	470	8.4	2	15
Cu	790	930	1,302	6,100	800	—
Pb	2,800	2,700	10,870	880	410	1,280
Fe	6,600	10,000	21,300	37,000	26,000	45,300
Zn	11,000	10,000	25,770	6,100	2,500	4,430
Mg	11,000	16,000	20,000	8,900	24,000	—
Na	37,000	77,000	31,000	9,300	19,000	24,600
K	37,000	100,000	41,000	6,800	13,000	12,700
Ca	164,000	59,000	81,000	130,000	200,000	129,000

表 6 焼却残渣の金属含有量 (n = 26)

金属	FA の金属含有量					BA の金属含有量				
	平均値	標準偏差	最小値	中央値	最大値	平均値	標準偏差	最小値	中央値	最大値
	mg/kg					mg/kg				
Cd	170	80	36	165	360	8.4	13	0.1	2.95	51
Cu	790	220	310	795	1,200	6,100	12,000	260	1,100	47,000
Pb	2,770	1,330	440	2,550	5,300	880	1,400	12	365	5,100
Fe	6,600	2,910	1,700	7,100	12,000	37,000	29,000	2,400	27,000	110,000
Zn	11,000	4,840	4,000	10,000	21,000	6,100	10,000	1,200	2,250	38,000
Mg	10,800	2,300	4,800	11,000	14,000	8,900	2,300	4,100	9,250	14,000
Na	36,960	10,840	11,000	38,000	61,000	9,300	10,000	980	5,900	43,000
K	36,540	12,570	10,000	37,500	63,000	6,800	8,900	670	3,650	35,000
Ca	163,540	48,350	93,000	160,000	290,000	130,000	40,000	40,000	140,000	190,000

あると考えられる同施設の FA が異なるグループに属している場合や、物理組成が異なる別施設の FA が同じグループに属することが見られた。

また、FA の金属含有量の相関係数は、表 10

表 8 固有値と固有ベクトル

	第 1 主成分	第 2 主成分
固有値	5.173	1.646
Cd	-0.393	0.130
Cu	-0.379	-0.128
Pb	-0.354	-0.012
Fe	-0.071	-0.662
Zn	-0.374	0.092
Mg	0.002	-0.691
Na	-0.379	0.093
K	-0.402	0.085
Ca	0.354	0.162

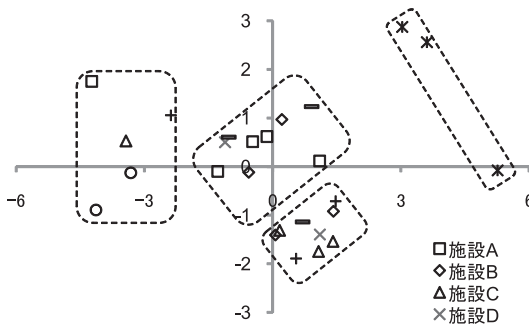


図 1 各施設別の主成分スコア

のとおりである。銅、鉛、ナトリウム、カリウムの4元素の相互の相関係数は0.6以上と大きいことやナトリウムとカリウムに対してカルシウムの相関係数の絶対値が0.7以上と大きな負の値であることなど、表 9 に示した各グループの金属含有量の特徴と類似した傾向を示している。以上の結果より、ごみの物理組成は、FA の金属含有量の組成および溶出挙動に影響しないと考えられた。

ごみの物理組成の変化が発熱量など燃焼挙動に与える影響は以下のとおり考えられる。既報⁹⁾で報告した物理組成比率、水分率、単位重量発熱量をもとに、厨芥および紙、プラスチックのそれぞれの組成のみが現状と比較して100%減量(ゼロ)、50%減量(半分)、50%増量(1.5倍)、100%増量(2倍)となった場合の単位重量発熱量の計算値の変化を図 2 に示す。

厨芥は、水分が70%程度と多く減量により発熱量は大きくなる。プラスチックの単位重量発熱量は 33.3 MJ/kg と紙 (16.8 MJ/kg)、木草 (19.5 MJ/kg)と比較しても大きく、減量により発熱量が小さくなる。しかし、紙の発熱量は他の有機物と比較しても同程度であり、発熱量に与える影響は小さい。そのため、焼却物中の紙類の重量比率が変化しても燃焼挙動には影響がないと考えられる。

表 9 各グループに見られた特徴

	第 1 主成分スコア	第 2 主成分スコア	元素の特徴
第 1 グループ	-2 以下		銅、鉛、カリウム、ナトリウムが多い
第 2 グループ	-1.5から1.5の間	-0.2以上	鉄少ない
第 3 グループ	0から1.5の間	-0.5以下	鉄、マグネシウムが多い ナトリウム少ない
第 4 グループ	3 以上		カルシウムが多い 銅、鉛、ナトリウム、カリウム少ない

表 10 FA 中の金属含有量の相関係数

	Cd	Cu	Pb	Fe	Zn	Mg	Na	K	Ca
Cd	1	0.741	0.625	0.038	0.885	-0.132	0.731	0.791	-0.596
Cu	0.741	1	0.594	0.271	0.701	0.088	0.663	0.717	-0.734
Pb	0.625	0.594	1	0.245	0.622	-0.098	0.611	0.769	-0.612
Fe	0.038	0.271	0.245	1	0.140	0.552	-0.098	0.067	-0.143
Zn	0.885	0.701	0.622	0.140	1	-0.116	0.757	0.670	-0.456
Mg	-0.132	0.088	-0.098	0.552	-0.116	1	0.050	-0.128	-0.227
Na	0.731	0.663	0.611	-0.098	0.757	0.050	1	0.773	-0.674
K	0.791	0.717	0.769	0.067	0.670	-0.128	0.773	1	-0.773
Ca	-0.596	-0.734	-0.612	-0.143	-0.456	-0.227	-0.674	-0.773	1

BA 中のアルカリ金属およびアルカリ土類金属の最小値および最大値のそれぞれの和は、6 倍程度の比率であり、ごみの物理組成の変化が溶出液の pH に与える影響は小さくなることが示唆される。これらの結果より、ごみの物理組成の変化が BA からの金属の溶出挙動に与える影響は小さいと考えられる。

3.3 FA の結晶構造

全施設から採取した FA の XRD チャートを図 3 に示す。最下段に示した消石灰噴霧を行っている施設 E を除き、集じん器の形式(EP, BF)によらずほぼ同様のチャートであった。また、これら

について、ナトリウム、カリウム、カルシウムの塩についてそれぞれに由来するピークを記号で示した。ただし、塩化カルシウムに由来するピークは帰属できなかった。これらの対になっている陰イオンは塩化物イオンが多く見られた。既報⁹⁾のとおり、焼却ごみ 1 t 中には 4.6 kg の塩素が含まれており、竹内らの報告¹²⁾に見られるように気相成分の凝縮により生成したものであると考えられる。

4. ま と め

都市ごみ焼却工場から焼却残渣を採取し金属の含有量を測定した結果以下の知見を得た。

- ・飛灰中の金属含有量は焼却物の物理組成にかかわらず一定の範囲内に収まる。一方、焼却主灰中の金属含有量は焼却物の物理組成に依存し大きく変動する。
- ・ごみの物理組成の変化が焼却残渣の溶出液の pH に与える影響は小さく溶出挙動は大きく変化しないと考えられる。
- ・消石灰などの薬剤噴霧の影響を考慮しなければ飛灰の X 線回折パターンは、焼却物の物理組成や集じん器の形式によらずほぼ同様であった。

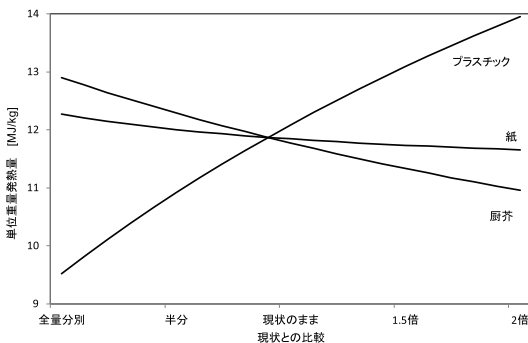


図2 厨芥、紙、プラスチックが現状よりも増加または減量した場合の単位重量発熱量の変化
(中央にある各グラフの交点は現状の発熱量である)

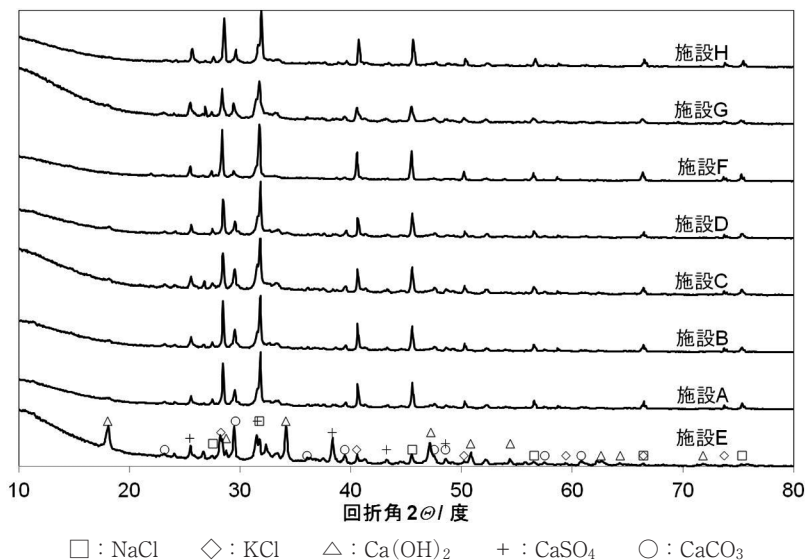


図3 FA の XRD チャート

謝辞

本調査を行うにあたり、大阪市環境局施設部のみなさまにご協力いただきましたことを記し、感謝いたします。

—参考文献—

- 1) 環境省：廃棄物処理技術情報 廃棄物処理の現状と科学研究 http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippa/h22/index.html (2013/01/15 閲覧)
- 2) 貴田晶子，野馬幸生，高延堅三：焼却炉における元素の挙動とその類似性。廃棄物学会論文誌，**2**，11-20，1991
- 3) 高岡昌輝，中塚大輔，武田信生，藤原健史：ごみ焼却飛灰中元素の定量に関する蛍光 X 線分析法の適用性。廃棄物学会論文誌，**11**，333-342，2000
- 4) 野馬幸生，貴田晶子：高アルカリ飛灰の炭酸化と処理飛灰の溶出特性。廃棄物学会論文誌，**8**，129-137，1997
- 5) 野馬幸生，貴田晶子：最終処分場におけるカルシウムスケール生成の予測。廃棄物学会論文誌，**9**，215-223，1998
- 6) 野馬幸生，貴田晶子：カルシウムスケールの生成におよぼす埋立焼却残渣の影響。廃棄物学会論文誌，**9**，287-295，1998
- 7) 福永勲，伊藤尚夫，澤地實：ごみ焼却飛灰の無害化処理のための重金属類の溶出要因の検討。廃棄物学会論文誌，**7**，28-35，1996。
- 8) 大迫政浩，山田正人，井上雄三，金容珍，朴政九，李東勲，吉田恵男，野村稔郎：日韓の都市ごみ焼却主灰からの重金属類溶出特性に関する比較考察。廃棄物学会論文誌，**12**，256-265，2001
- 9) 酒井護，北野雅昭，西谷隆司：大阪市の都市ごみ焼却施設搬入ごみ質調査。大阪市立環境科学研究所報告 調査・研究年報，**73**，59-64，2011
- 10) 酒井護，山本攻：ごみ分析において発生する“ばらつき”の要因解析。大阪市立環境科学研究所報告 調査・研究年報，**70**，53-58，2008
- 11) 酒井護，西尾孝之，西谷隆司，北野雅昭：都市ごみ処理施設 焼却灰中の金属含有量調査。廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，**23**，31-32，2012
- 12) 竹内庸夫，水上和子，須藤勉：ごみ焼却炉から排出されるばいじんの挙動について。埼玉県公害センター年報，**11**，72-80，1984