

## FAST-BOXを用いた産業廃棄物の脱塩処理

繁泉 恒河 久保田 洋  
山田 裕己<sup>※1</sup> 野口 俊太郎<sup>※1</sup>

### 概 要

建設混合廃棄物由来の篩下残渣や産業廃棄物由来の焼却飛灰の再資源化にあたり課題となる塩素(Cl)などの塩類の溶出特性を検討した。また、筆者らが開発を行っている「FAST-BOX システム」の脱塩性能と室内試験との整合性を評価した。

試験の結果、篩下残渣および焼却飛灰中の Cl は水溶性の形態の割合が高いと推定された。一方で、カルシウム(Ca)は難水溶性の形態が多いと推定され、カラム試験の結果より洗浄処理後も継続的な溶出の可能性が考えられた。FAST-BOX を用いた 2t の実規模試験では、処理による Cl の液固比あたりの溶出率がカラム試験と同等となり、カラム試験と実規模試験の整合性が確かめられた。

### Desalination treatment of industrial waste using FAST-BOX

#### Abstract

We examined elution behavior of salts from different types of waste. We also examined desalination performance of the “FAST-BOX system” developed by the authors and evaluated the consistency with an indoor test. As a result of the test, it was estimated that the percentage of the water-soluble form of Cl in the under-sieve residue and incinerated fly ash is high. However, Ca was presumed to have a large number of poor water solubility forms, and from the results of the column test, it was considered that there is a possibility of continuous elution after washing treatment. In the 2 t actual-scale test using FAST-BOX, the dissolution rate of Cl by treatment was equal to that of the column test in the under-sieve residue and incinerated fly ash, and the consistency of the column test and the actual-scale test was confirmed.

キーワード： 篩下残渣、焼却飛灰、脱塩処理、  
塩類、溶出挙動

※1建設本部土木エンジニアリングセンター土壌環境部

## §1. はじめに

建設混合廃棄物の選別処理後に生じる篩下残渣は、安定型産業廃棄物として取り扱うことができないため、建設混合廃棄物の処理業者にとって処分先の確保が困難な廃棄物<sup>1)</sup>である。リサイクル方法としてセメント原料、再生砕石・再生砂、溶融によるスラグ化があるが、特にセメント原料とする場合 Cl、S などの含有が問題となっている。

また、焼却飛灰は排ガス処理として噴霧された消石灰の中和物が含まれることから塩濃度が高い。リサイクル先としてはセメント原料があるものの、セメント工場側で塩素バイパスを設置し製造工程において塩類を除去する必要がある。さらに、セメント製品中の Cl 濃度を管理するために他の原料との調合による濃度調整が必要になる。Cl 含有量の高い飛灰をセメント原料化する際の費用が高額化しており、原料化が困難なものについては埋立処分されているなど、焼却飛灰中の塩濃度の低減が求められている。<sup>2)</sup>

これらの廃棄物の再資源化において、Cl などの塩類の含有がハードルとなっているが、その対策のひとつとして洗浄処理による脱塩が挙げられている。<sup>1)</sup>篩下残渣および焼却飛灰中の塩類を効果的に洗浄処理するには、その溶出特性を把握することが重要である。

フジタではこれまで焼却主灰を対象に、焼却施設の焼却灰搬出に使用される脱着式コンテナを活用して、焼却灰の発生現場(オンサイト)でも少ない散水量で効率的に塩類を洗い出し、通気処理による重金属類の難溶化などの安定化促進を行うことができる技術、「FAST-BOX システム」の開発を行ってきた<sup>3)</sup>。

本報では、篩下残渣および焼却飛灰中の塩類の洗浄による低減を目的として、シリアルバッチ試験およびカラム試験を用いて塩類の水に対する溶出特性を検討した。また、2t の実規模試験を行うことで、FAST-BOX システムの脱塩機能およびカラム試験との結果の整合性を検討した。

## §2. 実験材料および方法

### 2.1 供試廃棄物

供試廃棄物として建設混合廃棄物の分級選別処理によって発生した篩下残渣(写真 1)および産業廃棄物由来の焼却飛灰(写真 2)を用いた。

### 2.2 試験方法

#### (1)シリアルバッチ試験

水による最大溶出量および機械攪拌洗浄などの従来行

われてきた液固比が大きい洗浄方法の溶出特性を評価すること目的とし、環境庁告示第 13 号試験(以下、JLT13 法)を 3 回繰り返して行った。本試験によって溶出した成分は水に溶解する性質を持つ成分(水溶性)と考えられる。

#### (2)カラム試験

試験装置は円筒型の透明塩ビ製カラム(φ 104 × 400mmH)を用い、高さ 30cm となるように廃棄物を充填した。充填後、チュービングポンプを用いてカラム上部から散水した。散水前に浸出水が得られるまで給水し、その時点を試験開始(累積浸出水量 0ml)とした。カラムおよび実規模試験の実験条件を表 1 に示す。本実験では、浸出水量の累積量(累積浸出水量)を廃棄物の重量(有姿)で除したものを液固比と定義し、所定の液固比となるよう散水強度を設定した。試験終了後、カラム内の洗浄済み廃棄物は 3 等分に分割し、それぞれ、上、中、下層として採取した。

#### (3)実規模試験

充填した廃棄物と浸出水を分離可能な構造とした 4t・8m<sup>3</sup> コンテナ(FAST-BOX、3,600L × 1,910W × 1,170Hmm)を用い、所定の廃棄物量を重機により投入した。充填後、廃棄物上部より散水用のノズルを用いて散水した。試験終了後、洗浄済みの廃棄物は、採取箇所を水平方向で写真 3 に示すように 3 点(P1~3)定め採取した。



写真 1 篩下残渣



写真 2 焼却飛灰

表 1 実験条件

試験種類	廃棄物種類	散水強度	試験時間	液固比 (排水)	充填密度	供試 廃棄物量
		mm/d	hr	L/kg	g/cm <sup>3</sup>	kg-dry
カラム試験	篩下残渣	390	15	0.5	1.2	2.5
	焼却飛灰	650	11	0.4	0.8	2.2
実規模試験	篩下残渣	300	21	0.5	0.9	1800
	焼却飛灰	630	14	0.6	0.8	2000

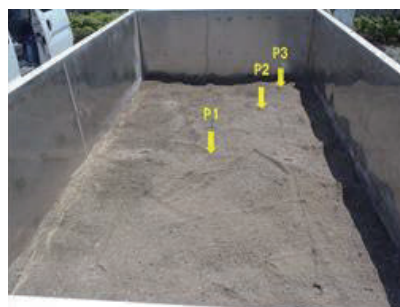


写真 3 採取箇所

### 2.3 分析項目および方法

#### (1) 廃棄物

Cl 含有量、溶出量(JLT13 法)、蛍光 X 線による組成分析

#### (2) 浸出水および溶出液

ナトリウム(Na)、カルシウム(Ca)、塩素(Cl)、硫酸(SO<sub>4</sub>)

#### (3) 分析方法

Cl 含有量は JIS R 5202 により測定した。溶出量は環境庁告示第 13 号に準拠した。また、各種イオン濃度はイオンクロマトグラフ法により測定した。組成分析は波長分散型蛍光 X 線により測定した。各物質の廃棄物あたりの累積溶出量は、サンプリングで得られた浸出水量に浸出水中の物質濃度を乗じたものを廃棄物量(乾燥重量)で除しその累積で算出した。

### §3. 廃棄物中各種イオンの溶出特性

#### 3.1 供試廃棄物の諸元

表 2 に本試験で用いた篩下残渣および焼却飛灰の含水率、熱しやく減量および組成分析の結果を示す。

#### 3.2 シリアルバッチ試験

本試験では各物質の廃棄物からの溶出特性を検討した。

篩下残渣および焼却飛灰のシリアルバッチ試験による各物質の溶出濃度および Cl 含有量を表 3 に示す。

Cl 含有量について、篩下残渣は 0.04mg/kg、焼却飛灰で 2.3mg/kg だった。Cl の溶出濃度は Cl 含有量と同様に、JLT13 法 2 回目で 1 回目に対して篩下残渣で 1/4、焼却飛灰で 1/10 まで低減した。Na の溶出濃度は、Cl と同様に JLT13 法 2 回目で 1 回目の 1/5 まで低減した。

Ca および SO<sub>4</sub> は篩下残渣では JLT13 法 1 回目と 2 回目ではほとんど差がなかった。焼却飛灰では約 1/3~1/2 まで溶出濃度が低減したものの、JLT13 法 3 回目の 1 回目に対する低減は、Na および Cl で 1/30 であるのに対し Ca および SO<sub>4</sub> では約 1/9~1/8 にとどまり、洗浄により低減しにくいことが確認された。

Na、Cl の 1 価のイオンと Ca、SO<sub>4</sub> の 2 価のイオンの JLT13 法での溶出濃度の低減の傾向は、篩下残渣および焼却飛灰の双方で共通していた。低減しづらい Ca および SO<sub>4</sub> の JLT13 法 1 回目における溶出濃度は篩下残渣では Na および Cl よりも高いが焼却飛灰では Cl よりも低いことから、低減の傾向はイオン組成に関わらず生じたものと推察された。

表 2 含水率、熱しやく減量および含有成分

項目	単位	篩下残渣	焼却飛灰
含水率	%	13.7	0.0
熱しやく減量	%	9.4	1.5
Na <sub>2</sub> O	wt%-dry	1.5	3.5
MgO		1.5	3.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		9.7	22
SiO <sub>2</sub>		35	30
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.2	1.4
SO <sub>3</sub>		15	4.0
Cl		-	2.2
K <sub>2</sub> O		1.1	2.0
CaO		31	23
TiO <sub>2</sub>		0.5	2.6
MnO		0.1	0.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3.6	3.6
CuO		-	0.2
ZnO		-	0.5
Br		-	0.2
BaO		-	0.3
PbO	-	-	

また、図 1 に Na、Cl および Ca における初期含有量に対する各 JLT13 法での溶出量の占める割合を示す。初期含有量は蛍光 X 線による組成分析および Cl 含有量を 100% とした。初期含有量から 3 回目までの溶出量の合計を初期含有量から減じた値を難水溶性画分とした。

Cl では廃棄物の種類に関わらず 1 回目で溶出する割合が大部分を占め、このことは溶出濃度での傾向と一致した。

Na は、溶出濃度からは Cl と同様に水に溶出しやすいと考えられたが、3 回目までの溶出量は焼却飛灰で 40% 程度、篩下残渣では 8% 程度と初期含有量に対して Cl よりも低い割合と推定された。JLT13 法 2 回目または 3 回目での Na の溶出濃度は 2 つの廃棄物で 10mg/L 程度と低いことから、水溶性の Na について洗い出しによる溶出濃度の低減が可能である一方で、洗い出しが可能な Na は初期含有量の一部にとどまることが示唆された。

また、Ca では廃棄物の種類によらず難水溶性と推定される割合が高かった。JLT13 法での溶出濃度の低減率が Na および Cl よりも低いこと、JLT13 法 1 回目と 2 回目での溶出濃度にはほとんど差がなかったことから、Ca の難水溶性と推定された形態について、JLT13 法の試行回数を増やした際に継続的な溶出が見られる可能性が考えられた。

表 3 各物質の溶出濃度および Cl 含有量

サンプル名	Na mg/L	Ca mg/L	Cl mg/L	SO <sub>4</sub> mg/L	Cl含有量 mg/kg
篩下残渣	有姿	-	-	-	0.04
	1回目	34	730	30	1,500
	2回目	7.0	690	6.5	1,500
焼却飛灰	有姿	-	-	-	2.3
	1回目	400	1,000	2,000	820
	2回目	69	300	350	320
	3回目	13	130	59	89

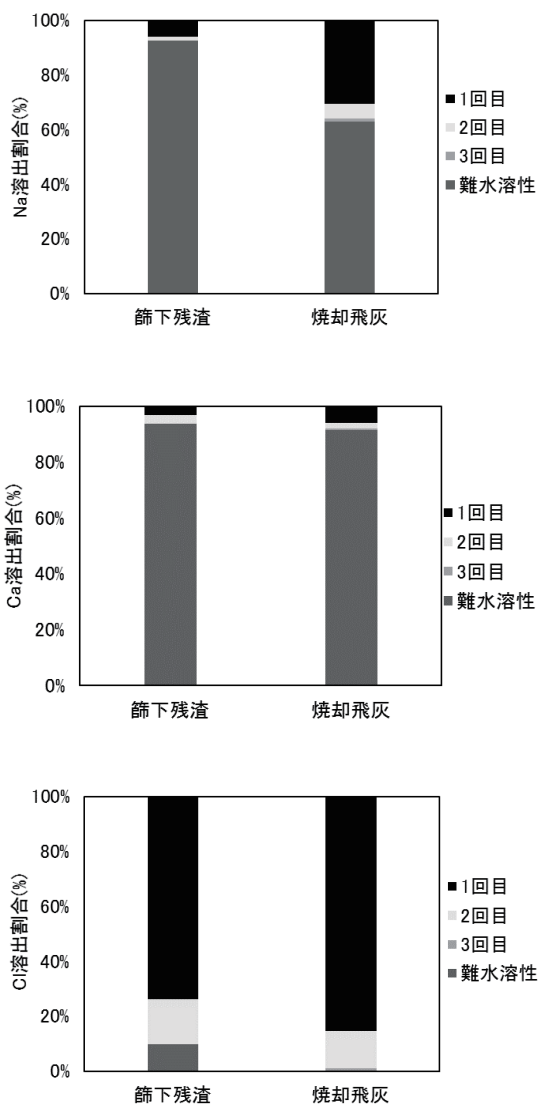


図 1 シリアルバッチ試験における各回数 of Na、Ca および Cl の溶出割合

### 3.3 カラム試験

本試験では散水処理における各物質の溶出特性および低減効果を検討した。表 4 に処理後のカラム各層における JLT13 法での溶出液中の濃度を、表 5 に JLT13 法 1 回目およびカラム試験での各物質の廃棄物あたりの溶出量を示す。

#### (1) 篩下残渣

図 2 に篩下残渣における各物質の累積溶出量の推移を示す。Na および Cl の推移は右肩上がりではあるものの浸出水量が 0~400ml 程度までと 400~1500ml 程度まででは傾きが異なり、400~1500ml 程度でより傾きが小さくなったことから、試験初期(累積浸出水量 0~400ml)において、水溶性の形態のうち特に溶出性が高い形態が溶出し

たと考えられた。Ca および SO<sub>4</sub> は JLT13 法での溶出濃度が高く(表 4)、篩下残渣に混入している石こうボードの影響によるものと考えられた。

表 5 において、カラム試験と JLT13 法 1 回目での溶出量を比較すると、Na および Cl ではほぼ同様の値を示していることから、これらの物質は液固比 0.5 の洗い出しでも液固比 10 の JLT13 法と同様の低減効果を得られる可能性が考えられた。カラム試験における Ca および SO<sub>4</sub> の溶出量は JLT13 法 1 回目の 1/10 以下であったこと、累積溶出量の推移が右肩上がりであったことから、シリアルバッチ試験の結果と同様に、継続的な溶出の可能性が考えられた。Cl 含有量について、カラム試験での水の流れが押し出し流れとなるため洗い出しが進みにくいと考えられる下層を分析したが、0.02%(表 4)と JLT13 法 1 回目 0.01%(表 3)よりは高いものの 5 割の低減が確認された。

表 4 カラム各層における溶出濃度

サンプル名	Na mg/L	Ca mg/L	Cl mg/L	SO <sub>4</sub> mg/L	Cl含有量 wt%	
篩下残渣	上層	21	730	16	1,500	-
	中層	23	730	19	1,500	-
	下層	17	740	14	1,500	0.02
焼却飛灰	上層	24	140	94	91	-
	中層	59	140	230	120	-
	下層	320	400	1,450	48	0.18

表 5 JLT13 法 1 回目、カラム試験での各物質の溶出量

サンプル名	Na mg/g	Ca mg/g	Cl mg/g	SO <sub>4</sub> mg/g	
篩下残渣	JLT13法1回目	0.4	8.3	0.3	17
	カラム試験	0.3	0.5	0.2	1.0
焼却飛灰	JLT13法1回目	3.7	9.2	19	7.6
	カラム試験	1.9	3.4	10	0.3

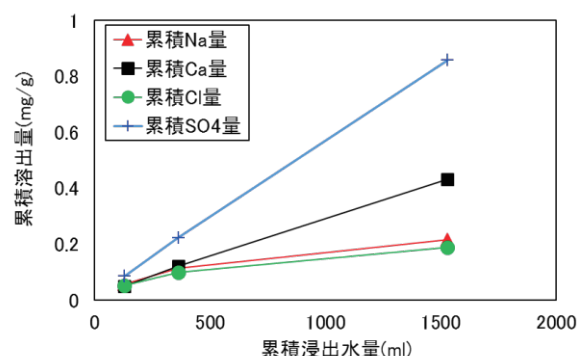


図 2 篩下残渣における各物質の累積溶出量の推移 (2) 焼却飛灰

図 3 に焼却飛灰における累積溶出量の推移を示す。焼却飛灰においては Na、Cl および Ca の推移は試験期間中、継続して右肩上がりであった。これらの物質のカラム試験における溶出量は JLT13 法 1 回目の 1/3~1/2 程度で

あったこと、JLT13 法では液固比 10 であることから、カラム試験における液固比 0.4 では洗い出しが不十分であった可能性が考えられた。一方で、特にカラム上・中層における Na、Cl および Ca の溶出濃度は、上層で JLT13 法 3 回目と同様の、中層は 2 回目よりも低い値を示していた。これは、本試験での液固比はカラム全体で 0.4 であったが、散水方法がカラム上部からの散水であり、カラム内で押し出し流れが形成されていると考えられることから、カラム各層を通過した水の液固比は、上層で 1.5、中層で 1.0、下層で 0.5 に相当し、上・中層では洗い出しが進んだためと考えられた。中層、下層とカラム下部となるに従い溶出濃度が増加しているが、これは廃棄物への物質の再吸着や上・中層の洗浄水の滞留による下層での溶出濃度の上昇が生じたと考えられた。これらより、カラム全体の液固比を 1.5 まで高くすることで下層でも洗い出しの効果が高くなり、カラム全体で累積液固比 30 の JLT13 法 3 回目と同様の低減の効果が得られると推測された。

SO<sub>4</sub>は浸出水量が 560ml までは右肩上がりであったが、試験終了まではほぼ一定の値を示し、カラム試験での溶出量は JLT13 法 1 回目の 1/25 であったことから、液固比の小さいカラム試験では溶出量が抑えられていた。SO<sub>4</sub>は中層で最も低くなり、累積溶出量の結果から、本試験に用いた焼却飛灰は SO<sub>4</sub>が溶出しにくいと推測されるが、そのメカニズムについては今後の課題となった。Cl 含有量については、下層で 0.18%と JLT13 法 1 回目と同様の値であり、92%の低減が確認された(表 4)。

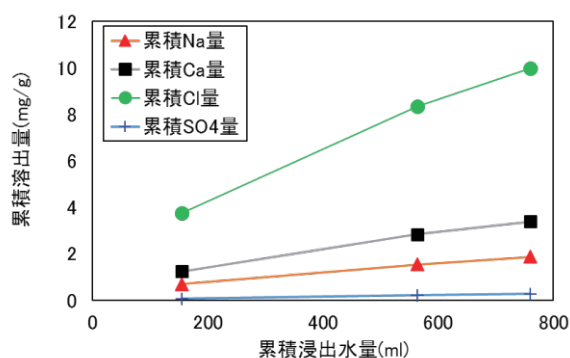


図 3 焼却飛灰における各物質の累積溶出量の推移

## §4. FAST-BOX を用いた脱塩処理

### 4.1 篩下残渣

表 6 に実規模試験後に採取した P1~P3 における JLT13 法での溶出濃度を、表 7 に JLT13 法 1 回目および実規模試験での各物質の溶出量を示す。

JLT13 法 1 回目での Na、Ca、SO<sub>4</sub>の溶出濃度はシリアルバッチ試験と同様の値を示したが Cl の溶出濃度は 120mg/L、有姿での Cl 含有量は 0.15%とそれぞれ 4 倍程度高かった。洗浄処理後の P1~P3 の Cl 含有量は 0.01~0.02 と低減率は 90%以上であり、これはカラム試験と同様の値であった(表 4)。また、Cl の液固比あたりの溶出率((試験における溶出量/JLT13 法による溶出量)/液固比)は実規模試験で 1.3 であり、これはカラム試験における液固比あたりの溶出率 1.2 とほぼ同じであることから、2t での実規模試験での洗い出しの効果はカラム試験と同等と評価された。

また、水平分布の差については、P3 の中層および下層で Cl 含有量が高くなったが、Na、Ca、Cl および SO<sub>4</sub>の溶出濃度については採取箇所間の差がほとんどなかったことから、全体としてほぼ均一な洗い出しが確認された。鉛直分布の差については、採取箇所によらず、中層、下層と下部になるにしたがって Na および Cl の溶出濃度が若干であるものの増加する傾向にあり、液固比が不足した可能性が考えられた。

表 6 P1~P3 における JLT13 法での溶出濃度

サンプル名	Na mg/L	Ca mg/L	Cl mg/L	SO <sub>4</sub> mg/L	Cl含有量 wt%	
有姿	-	-	-	-	0.15	
JLT13法1回目	53	750	120	1450	0.01	
P1	上層	6.1	720	2.5	1480	0.01
	中層	7.0	700	2.5	1500	0.01
	下層	12	730	6.2	1540	0.01
P2	上層	5.4	730	1.4	1540	0.01
	中層	11	700	3.6	1500	0.01
	下層	20	730	6.3	1530	0.01
P3	上層	6.6	720	2.4	1510	0.01
	中層	11	720	3.2	1540	0.02
	下層	18	690	8.1	1500	0.02

表 7 JLT13 法 1 回目、実規模試験での各物質の溶出量

サンプル名	Na mg/g	Ca mg/g	Cl mg/g	SO <sub>4</sub> mg/g
篩下残渣				
JLT13法1回目	0.6	9.2	1.5	18
実規模試験	0.5	0.9	1.0	1.0

### 4.2 焼却飛灰

表 8 に P1~P3 における JLT13 法での溶出濃度を、表 9 に JLT13 法 1 回目および実規模試験での各物質の溶出量を示す。

本試験で用いた焼却飛灰の有姿における Na、Ca、Cl の溶出濃度および Cl 含有量はシリアルバッチ試験と同様の値を示したが、SO<sub>4</sub>の溶出濃度は 3mg/L とシリアルバッチ試験よりも約 1/300 と低くほとんど溶出しなかった。JLT13 法 1 回目における Cl 含有量について、シリアルバッチ試験で用いた焼却飛灰では 0.18%であ

ったが (表 3)、本試験で用いた焼却飛灰では 0.56%と 3 倍程度高くなった (表 8)。P1~P3 における Cl 含有量は JLT13 法 1 回目と同様の値を示したが、カラム試験での処理後の Cl 含有量よりも高かった。また、実規模試験における Cl の液固比あたりの溶出率は 1.3 であり、カラム試験における液固比あたりの溶出率の 1.5 とほぼ近い値であることから、2t での実規模試験での洗い出しの効果はカラム試験と同等と評価された。

また、水平分布の差については、P3 の中層および下層で Cl 含有量が高くなったが、Na、Ca、Cl および SO<sub>4</sub> の溶出濃度については採取箇所間の差がほとんどなかったことから、全体としてほぼ均一な洗い出しが確認された。鉛直分布の差については、Cl の溶出濃度および Cl 含有量が下層で高くなる傾向にあったことから、液固比を増やすことで各層間の差を低減できると考えられた。実際の処理を想定した場合、洗浄処理では排水処理が必要であるため、施設運用およびコストの面から排水量を抑えたほうが望ましい。液固比の増加は、排水処理にかかる負荷、コストと洗い出しの効果の双方を考慮して設定することが求められる。

## §5. まとめ

本報告の結論を以下に示す。

- 本報告で用いた篩下残渣および焼却飛灰中の Cl は、シリアルバッチ試験の結果より水溶性の形態の割合が高いと推定された。一方で、Ca は難水溶性の形態が多く、洗浄処理後も継続的な溶出の可能性が考えられた。
- 篩下残渣においてシリアルバッチ試験の結果より Ca および SO<sub>4</sub> の溶出濃度が高く、石こうボードの混入による影響が推測された。
- FAST-BOX を用いた 2t の実規模試験では、篩下残渣および焼却飛灰では処理による Cl の液固比あたりの溶出率がカラム試験とほぼ同等となり、2t での実規模試験での洗い出しの効果はカラム試験と同等と評価された。
- 実規模試験では FAST-BOX 内の水平方向でのばらつきは少ないが、垂直 (深さ) 方向では液固比の影響で下層が高くなる傾向が示された。散水洗浄法としては均一な洗い出しが行われていることが確認された。

表 8 各採取地点における深さ別での JLT13 法での溶出濃度

サンプル名		Na mg/L	Ca mg/L	Cl mg/L	SO <sub>4</sub> mg/L	Cl含有量 wt%	
焼却飛灰	有姿	-	-	-	-	2.28	
	JLT13法1回目	160	900	1700	3.1	0.56	
	P1	上層	1.0	280	220	2.3	0.41
		中層	2.4	330	300	5.1	0.48
		下層	1.3	430	500	1.6	0.60
	P2	上層	1.1	260	200	1.5	0.41
		中層	3.9	300	260	8.6	0.49
		下層	1.7	320	290	3.2	0.62
	P3	上層	2.8	270	200	5.7	0.40
		中層	3.0	310	280	6.4	0.59
		下層	3.0	340	330	5.5	0.69

表 9 JLT13 法 1 回目、実規模試験での各物質の溶出量

サンプル名		Na mg/g	Ca mg/g	Cl mg/g	SO <sub>4</sub> mg/g
焼却飛灰	JLT13法1回目	1.9	1.1	2.0	0.0
	実規模試験	1.6	6.8	1.6	0.0

## 謝辞

本試験の実施にあたり株式会社富士クリーン、成友興業株式会社および高俊興業株式会社に多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 建設廃棄物協同組合：ふるい下残さ適正処理ガイドライン、2014。
- 2) CJC:ごみ焼却灰リサイクルの温室効果ガス排出削減・ライフサイクル管理に関する調査研究—民間施設を活用したごみ焼却灰のリサイクルに関する調査研究(その2)一、2010。
- 3) 久保田ら:FAST-BOX システムの開発、フジタ技術研究報告、Vol.53、pp.85-90、2017。
- 4) 繁泉ら:木質廃棄物由来焼却灰の塩類等の溶出挙動、フジタ技術研究報告、Vol.51、pp.79-84、2015。

## ひとこと



廃棄物リサイクルの促進のため、  
今後も様々な廃棄物の特性の検討  
を進めてまいります。