

京都大学工学部地球工学科

学生員

○嶋田大士

京都大学大学院地球環境学堂

フェロー

嘉門雅史

京都大学大学院地球環境学堂

正会員

勝見 武

京都大学大学院地球環境学堂

正会員

乾 徹

1. はじめに

近年は発生する一般廃棄物の約 90 %が焼却処理され、その焼却灰の大半は埋立処分されている¹⁾。埋め立てた焼却灰から溶出する重金属等の有害物質の対処や、最終処分場の残余容量が減少していることを背景として、焼却灰を熔融固化し、スラグにすることで地盤材料として利用する取り組みがなされている。しかし、熔融スラグから溶出する重金属類の溶出挙動の調査に基づいた土壌や地下水への環境影響評価手法が確立されていないのが現状である。本研究では都市ごみ焼却飛灰をプラズマ熔融し水砕処理した熔融スラグを用いて、重金属の溶出挙動を実験的に評価し、その結果に基づいて再利用時の環境影響について議論を行った。

2. 実験方法

実験に使用した熔融スラグの物理特性を表 1、粒径加積曲線を図 1 にそれぞれ示す。熔融スラグからの重金属の溶出挙動を把握するため、環境庁告示第 46 号試験 (JLT46 試験)、シリアルバッチ試験、カラム試験の 3 種類の溶出試験を実施した。各試験方法を表 2 に示す。JLT46 試験は土壌環境基準値との適合性を判定するために用いたが、ここでは、さらに溶媒の初期 pH を 0.75 として、酸性条件下での溶出量も併せて調査した。シリアルバッチ試験では試料に多量の溶媒を連続的に接触させ、長期間の溶出挙動を把握するために実施した。カラム試験は円筒カラムに熔融スラグを充填し、そのスラグ層に溶媒を浸透させる試験で、熔融スラグを地盤材料として利用するときの状況を再現したものである。本研究では、スラグ層を浸透する溶媒の流速、スラグ層厚を変化させ溶出挙動への影響を調査した。それぞれの溶出試験で得られた溶液は、pH、Pb 濃度、Zn 濃度について分析を行った。

表 1 使用した熔融スラグの物理特性

項目	試験方法	物性値
粒子密度 (有姿)	JIS A 1202	2.73 g/cm ³
(2mm 以下)		2.89 g/cm ³
自然含水比	JIS A 1203	7.28 %
最適含水比	JIS A 1210	11.3 %
最大乾燥密度	JIS A 1210	1.88 g/cm ³
修正 CBR	JIS A 1211	43.6 %

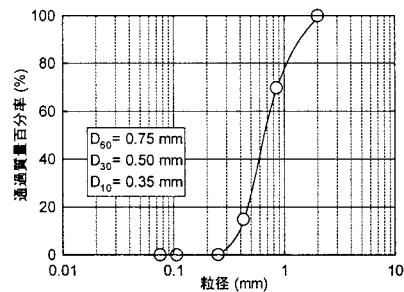


図 1 熔融スラグの粒径加積曲線

3. 実験結果

3.1 JLT46 等の試験 試験結果を表 3 に示す。Pb の溶出量は土壌環境基準値 (0.01 mg/L) の 6 倍であった。Zn は土壌環境基準に規定がないため水道水の環境基準値 (1.0 mg/L) と比較したところ、約 1/100 の溶出量であった。溶媒の初期 pH を 0.75 として同様に試験を行ったところ、Pb が基準値の 230 倍、Zn が 1.3 倍となり、酸性条件下では当然のことながら溶出量が著しく増大した。

表 2 溶出試験方法比較

試験方法	JLT46 試験	シリアルバッチ試験	カラム試験
試料の状態	風乾		
試料粒径	2mm 以下	2mm 以下	有姿
溶媒 pH	5.85	4.0	4.0
液固比	10	10 × 5 段階	10
溶媒との接触方法	6 時間振とう	24 時間振とう × 5 段階	上昇流による通水

3.2 シリアルバッチ試験 液固比で表記した溶媒接触量と Pb、Zn の累積溶出量の関係を図 2 に示す。Pb は試験初期の溶出が大きく、徐々に溶出速度が低下する傾向にある。一方 Zn は微量であるが一定量の溶出が長期間に渡って継続する傾向を示した。このことから、Pb についてはスラグ表面に易溶出性の形態で存在する Pb が溶出し、その後内部から徐々に溶解する挙動、Zn については内部から徐々に溶解する挙動のみがそれぞれ生じていると考えられる。

表 3 JLT46 等の試験結果

試験方法	JLT46 試験	初期 pH 0.75
溶媒 pH	5.85	0.75
溶出液 pH	9.44	3.40
Pb 溶出量	0.06 mg/L	2.27 mg/L
Zn 溶出量	0.009 mg/L	0.13 mg/L

3.3 カラム試験 溶媒の浸透流速による Pb 溶出量の変化を図 3 に示す。シリアルバッチ試験結果と同様に初期の溶出が非常に大きく、時間経過に伴い溶出量が減少する傾向を示し、浸透流速が大きいほど溶出量は小さくなった。このことから、溶出量は時間依存性を示すと考えられる。しかし、流速と溶出量の間に定量的な関係を得ることができなかったことから、今後は溶出の支配要因を明らかにし、定量的な評価を進める必要がある。スラグ層厚が異なる条件 (10cm ~ 50cm) における Pb 溶出量を図 4 に示す。スラグ層厚を問わず単位質量スラグ当たりの浸透流量 L/S (L/kg) と Pb 溶出量 (mg/kg) にはほぼ一定の関係が確認できる。このことから、試験スケールが溶出量に及ぼす影響は比較的小さく、50 cm 程度の層厚で再利用する際の溶出量は小型のカラム試験で推定できると考えられる。

4. 実験に基づく環境影響評価

廃棄物を地盤材料として利用する際の環境影響評価手法として提案されている Hjelm et al.²⁾の方法に基づき、国立環境研究所では溶融スラグを路盤材、盛土材として利用した際の地下水環境への評価を検討している³⁾。Hjelm et al.の手法の概要は以下の通りである。

地盤への雨水等の浸透量に基づいて、地下水に流入する化学物質濃度が環境基準以下になるような最大許容重金属溶出量 M_{SA} (mg/kg) を以下の式 (1) で与える。

$$M_{SA} = G_E \times D \times P \times T_C \times I / (d \times H) \quad (1)$$

式 (1) 中の各パラメータの定義、値は表 4 に示す^{2), 3)}。一方、スラグ層を浸透する水量を液固比で表記すると以下の式 (2) となる。

$$(L/S)_C = T_C \times I / (d \times H \times IR) \quad (2)$$

この $(L/S)_C$ に対するスラグ層からの溶出量 ALM_C (mg/kg) を推定し、 $ALM_C / M_{SA} \leq 1$ であれば環境影響は許容の範囲であるとしている^{2), 3)}。この方法に従って、本研究で用いた溶融スラグからの Pb の溶出に伴う環境影響について議論を行った。3.3 で示したように、スラグ層厚に関わらず液固比と単位質量のスラグからの Pb 溶出量の関係は一定であるから、

原位置での浸透水量 $(L/S)_C$ に対する ALM_C はカラム試験結果から推定できるといえる。そこで、0.5 m 厚の路盤層としてスラグを再利用した場合の ALM_C / M_{SA} をカラム試験結果から算出すると、1.6 となり、有意な環境影響が生じる結果となった。ここでは $IR = 20$ としたが、表面舗装時には降雨の 5% が路盤層に浸透すると考えるのが一般的であることに基づいている。一方、スラグ層厚を 0.25 m まで低減させると $ALM_C / M_{SA} < 1$ を示すことから、0.5 m 厚の路盤層の 50% はスラグで置換できるといえ、本スラグの路盤材として利用は適正な施工条件によっては可能である。但し、上記の評価法は溶出総量を規制する考え方である。よって、本実験で確認された浸透開始直後に高い濃度で溶出が起こる場合など、時間的な溶出量の変化による影響を評価できないという問題があり、またスラグ層の利用規模 (面積) も考慮していない。したがって、環境影響を評価するにあたっては時間あたりの溶出量 $[M/T]$ を考慮するなど、より妥当な方法を確立することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 環境省 (2003): 平成 15 年版循環型社会白書, 2) Hjelm, O. et al. (2000): Testing of soil and inorganic residues prior to utilization: Development of rational limit values and adaptation of test methods, Waste Materials in Construction, G.R. Woolley et al., eds. Pergamon, pp.857-871, 3) 国立環境研究所 (2003): スラグ等再生利用促進調査 平成 14 年度環境省受託業務調査結果報告書。

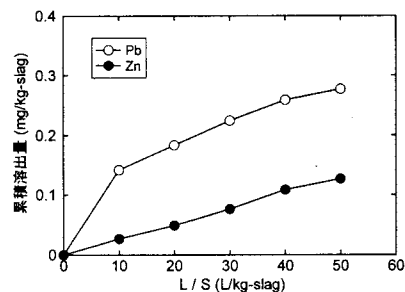


図 2 シリアルバッチ試験の結果

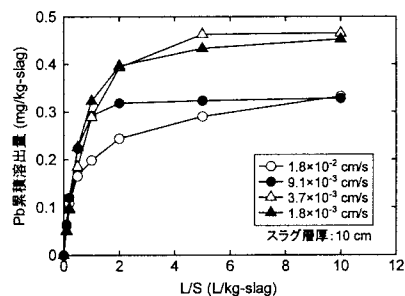


図 3 浸透流速が溶出量に及ぼす影響

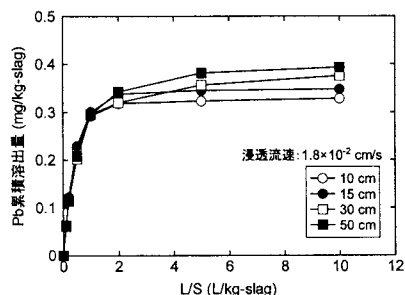


図 4 スラグ層厚が溶出量に及ぼす影響

表 4 評価に用いたパラメータ^{2), 3)}

地下水環境基準値	G_E (mg/L)	0.01
希釈率	D (-)	1
優先度	P (-)	1
経過時間	T_C (year)	10
浸透水量	I ($mm/year$)	1500
浸透減衰率	IR	20
スラグ層の乾燥密度	d (g/cm^3)	1.5
スラグ層の厚さ	H (m)	0.5