

(2) 下水汚泥焼却灰、溶融スラグ及びそれらの再生資材からの重金属類の溶出特性

Characteristics of Heavy Metal Release from Incinerated Ashes, Melted Slags
and their Re-Products of Sewage Sludge

渡部春樹*、尾崎正明*、野崎眞司**

Haruki WATANABE, Masa-aki OZAKI, Shinji NOZAKI

ABSTRACT; Several Leaching Tests were applied to incinerated ashes, melted slags and their re-products of sewage sludge for investigating their release characteristics.

It was found that final pH after leaching tests was affected by major components of samples, such as CaO , K_2O , MgO and Na_2O , and also affected by CO_2 condition during leaching test periods. The lower the final pH of leachates after leaching tests for incinerated ashes became, the higher the As and Se concentrations were observed. The concentration of other heavy metals in leachates was also measured and found to be very low. The 10 kinds of re-products made from incinerated ashes and melted slags by sintering, cement consolidation, crystallization and so on were examined by several leaching tests. The release of heavy metals from re-products was found to be much lower than those of raw materials.

KEYWORDS; Leaching Test, Release, Heavy Metal, Incinerated Ash, Melted Slag, Re-Product, Sewage Sludge, pH, CO_2

1. はじめに

下水道の着実な普及にともなって、発生する汚泥量は年々増加の一途をたどっており、その汚泥を最終的にどのように処分・利用するかというのが大きな課題になっている。このため、近年は下水汚泥の建設資材利用が大・中都市を中心に注目されており、既に地方公共団体や民間等で実用化が進められている。しかし、それらの再生資材の品質についてはそれぞれの製造者が一定の基準を定めて管理しているのが実態である。特に、再生資材からの重金属等の溶出については、統一的な試験方法等が定められていないため、ガイドライン等の作成が望まれている。

廃棄物を最終処分する場合には土壌や地下水を保全するため様々な規制があり、その中の1つとして溶出試験については、既に各国で公的な方法が定められている。例えば、わが国の環境庁告示第13号（環告法）¹⁾、米国の方法^{2)・3)・4)}、ドイツ標準溶出試験⁵⁾、スイス溶出試験⁶⁾などが知られている。金子⁷⁾は各種溶出試験方法の特徴等についてとりまとめ紹介している。Shively等⁸⁾やConner等⁹⁾は安定化処理を施した後の廃棄物を対象にして、その溶出特性を調べている。

焼却灰からの重金属類の溶出特性についてはThomas等¹⁰⁾やFrancis等¹¹⁾の報告がある。溶融スラグからの溶出特性については、金子等¹²⁾の報告がある。しかし、下水汚泥焼却灰や溶融スラグを原料とした再生資材について、それらの溶出特性を調べた報告はほとんどみあたらない。

本研究は、下水汚泥焼却灰、溶融スラグ及びそれらを原料にして製造された再生資材を対象にして、種々

* 建設省土木研究所、Public Works Research Institute, Ministry of Construction

** 岐阜県、Gifu Prefectural Government

の溶出試験方法を適用し、重金属類の溶出量と、pHやイオンバランス等との関係を明らかにしたので報告するものである。

表－1 溶出試験試料

2. 実験方法

2.1 試料

下水污泥焼却灰や熔融スラグを原料として焼成レンガやインターロッキングブロックなどが再生資材として製造されている。本実験で溶出試験のために用いた試料は、表－1に示したようにAからJまで延べ10

試料	原料		製品	
	種類	炉形式	種類	加工方法
A	石灰系焼却灰	階段ストーカー式	埋戻材	焼却灰、生石灰添加 成分調整、結晶化
B	石灰系焼却灰	流動床式	改良土	
C	高分子系焼却灰	流動床式	結晶化スラグ	成型、焼成
D	高分子系焼却灰	流動床式	焼成レンガ	成型、焼成
E	高分子系焼却灰	流動床式	インターロッキングブロック	セメント固化
F	高分子系焼却灰	流動床式	透水性ブロック	成型、焼成
G	空冷スラグ	コークスベッド式	路盤材	粒度調整
H	空冷スラグ	旋回流式	インターロッキングブロック	セメント固化
I	水砕スラグ	旋回流式	透水性ブロック	成型、焼成
J	水砕スラグ	表面熔融式	インターロッキングブロック	セメント固化

種類の原料と製品である。原料としては、石灰等の無機凝集剤を用いて脱水し焼却して生成した灰（石灰系焼却灰）、高分子凝集剤を用いて脱水し焼却して生成した灰（高分子系焼却灰）、融液を空气中で徐冷すると生成するスラグ（空冷スラグ）及び融液を水中で急冷すると生成するスラグ（水砕スラグ）の4種類である。焼却炉としては階段ストーカー式が1ヶ所、流動床式が5ヶ所で採用されている。熔融炉では、コークスベッド式と表面熔融式が各1ヶ所、旋回流式が2ヶ所で採用されている。再生資材としては各種原料からそれぞれ特徴のある建設資材が製造されており、パイロットスケールで製造されているものを含めてできるだけ重複をさけ選択した結果、埋戻材、改良土、結晶化スラグ、焼成レンガ、路盤材が各1種類、インターロッキングブロックが3種類である。なお、試料FとIは、原料としてこの2種類を用いて透水性ブロックを製造しており、製品としては1種類となる。

2.2 溶出試験方法

溶出試験方法として5種類を設定した。その条件の概要を表－2に示す。環告法①－aは、環境庁告示13号に準拠した方法である。ただし、製品の溶出試験では0.45μmと1μmのGF/Bろ紙を用いて行い両者の結果を比較した。環告法変法①－bとは、環告法にほぼ準拠しながら試料の性状、溶出時間及び攪拌方法について異なる条件設定で行った方法である。すなわち、試料は粉碎せず有姿のまま用い、溶出時間は24時間、攪拌はテフロン攪拌棒で約200回/分とした。US－EPA変法②とは、米国EPAが定めた溶出試験²⁾にほぼ準拠しながら、攪拌方法を転倒式からテフロン攪拌棒での攪拌へ変更したものである。

CO₂飽和法③とは、脱イオン水1ℓに対して0.2ℓ/minの割合で二酸化炭素ガス（CO₂）を20分間吹き込んだ溶液（CO₂飽和液）を溶出液として用い、その他の条件は環告法変法に準拠した溶出試験方法である。CO₂飽和液のpHはほぼ4.0になる。CO₂連続法④とは、CO₂飽和法と同じ条件で溶出試験を開始するが、溶出時間中もCO₂を溶出液1ℓに対して0.2/minの割合で連続して吹き込む点異なる。

表－2 溶出試験方法の概要

	環告法 ①－a	環告法変法 ①－b	US－EPA変法 ②	CO ₂ 飽和法 ③	CO ₂ 連続法 ④
試料性状	5mm以下に粉碎	有姿のまま	比表面積3.1cm ² /g以上 または粒径9.5mm未満	有姿のまま	有姿のまま
溶媒	脱イオン水 (初期pH=5.8～6.3)	脱イオン水 (初期pH=5.8～6.3)	脱イオン水 (初期pH=5.8～6.3)	CO ₂ 飽和水 (初期pH=4.0)	CO ₂ 飽和水 (初期pH=4.0)
pH値	溶出試験中は未調整	溶出試験中は未調整	0.5N酢酸を添加 pH=5 (最大添加量=4ml/g)	溶出試験中は未調整	CO ₂ ガスを連続吹込み
溶媒/試料比 (体積重量比)	10:1	10:1	20:1	10:1	10:1
溶出時間	6時間連続振とう 常温、常圧	24時間連続攪拌 常温、常圧	24時間連続攪拌 常温、常圧	24時間連続攪拌 常温、常圧	24時間連続攪拌 常温、常圧
ろ過	GF/Bろ紙 1.0μm 製品: 1.0, 0.45μm	GF/Bろ紙 0.45μm	GF/Bろ紙 0.45μm	GF/Bろ紙 0.45μm	GF/Bろ紙 0.45μm
攪拌方法	水平振とう 約200回/分	攪拌棒(テフロン) 約200回/分	攪拌棒(テフロン) 約200回/分	攪拌棒(テフロン) 約200回/分	攪拌棒(テフロン) 約200回/分

2. 3 分析方法

原料及び製品中の主要成分の含有量測定は J I S R 5 2 0 2 に準拠して行った。分析項目は強熱減量 (I g-Loss)、アルミニウム (Al_2O_3)、カルシウム (CaO)、鉄 (Fe_2O_3)、カリウム (K_2O)、マグネシウム (MgO)、ナトリウム (Na_2O)、リン (P_2O_5)、ケイ素 (SiO_2)、イオウ (SO_3) の 1 0 成分である。微量成分については、マイクロウェーブを用いて原料及び製品中の金属等の可溶化処理を行った後、I C P 発光分光分析計を用いて定量した³⁾。

溶出試験後の溶出液中の成分分析は、表-3に示す方法で行った。原子吸光度計で分析した鉛 (P b)、カドミウム (C d)、水銀 (H g)、セレン (S e)、ヒ素 (A s) の定量限界値はそれぞれ 0.001mg/ℓ、0.001mg/ℓ、0.0005mg/ℓ、0.001mg/ℓ、0.001mg/ℓ である。ジフェニルカルバジド吸光度計で測定した六価クロム (C r (V I)) の定量限界値は 0.005mg/ℓ である。分析値がこれらの定量限界値以下の場合には N D として示す。

表-3 溶出液中の成分分析

分析装置	分析項目
ICP発光分光分析計 (パーキンエルマー製 OPTIMA3000)	Na, K, Ca, Mg他
原子吸光度分析計 (パーキンエルマー製 5100PC)	Pb, Cd, Hg, Se, As
ジフェニルカルバジド吸光度計 (SHIMADZU製 UV-160)	Cr(VI)
イオンクロマト分析計 (Dionex製, DX-100)	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻

3. 実験結果と考察

3. 1 溶出試験におけるろ紙の比較

表-2に示した環告法では 1 μ m の G F / B ろ紙を使用するが、その他の方法では 0. 45 μ m を使用している。ろ紙の差異が測定結果に影響を与えるかについて、再生資材の溶出試験を実施する際に検討した。その結果、再生資材の溶出試験に環告法を適用する場合に、ろ紙の違いはほとんどみられなかったことから、再生資材に環告法を適用する場合には 0. 45 μ m G F / B ろ紙を用いることにした。

3. 2 主要成分の分析結果

下水汚泥中の主要成分は、下水道の排除方式、水処理方式、汚泥処理方式等によって大きく影響され、処理場毎に異なると考えられる。表-4は9種類の原料について、その主要成分分析の結果を示している。 SiO_2 が 32. 2% ~ 48. 7%、C a

表-4 原料中の主要成分含有量

試料	(単位: wt %)									
	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	P_2O_5	SiO_2	SO_3	I g-loss
A	7.09	27.80	12.50	0.47	0.84	0.84	2.99	32.20	1.47	5.80
B	14.10	24.80	4.57	0.87	0.78	1.05	2.03	40.60	4.41	1.10
D	24.70	9.58	4.04	1.81	0.90	1.36	6.07	42.50	1.36	1.10
E	24.70	8.68	5.64	0.92	0.99	1.23	4.72	47.50	1.05	0.80
F	25.40	8.26	9.33	1.67	0.73	1.16	5.96	43.20	0.90	1.40
G	19.20	25.60	2.30	0.49	0.56	0.98	2.55	41.90	0.74	0.80
H	25.00	8.37	7.72	1.05	0.90	1.59	3.64	44.80	0.51	1.10
I	23.20	7.54	7.00	1.76	0.89	1.23	3.63	45.60	0.67	1.60
J	24.20	9.43	4.54	1.59	1.00	0.84	3.54	48.70	1.24	0.50

O が 7. 54% ~ 27. 8%、 Al_2O_3 が 7. 09% ~ 25. 4%、 Fe_2O_3 が 2. 30% ~ 12. 5%、 P_2O_5 が 2. 03% ~ 6. 07%、 K_2O が 0. 47% ~ 1. 81%、 MgO が 0. 56% ~ 1. 00%、 Na_2O が 0. 84% ~ 1. 59%、 SO_3 が 0. 51% ~ 4. 41% となっている。これらの主要成分に I g-L o s s を加えると 92. 0% ~ 98. 0% に達しており、下水汚泥焼却灰や溶融スラグの主要構成成分はこれらでほとんど説明できるといえる。

これらの主要成分が各種溶出試験によってどの程度溶出してくるかを I C P 発光分光分析計で測定した。その結果、原料及び製品とも S i、F e、A l についてはその含有量に比べると微量しか溶出せず、それぞれ N D ~ 84. 7mg/ℓ、N D ~ 1. 21mg/ℓ、N D ~ 11. 6mg/ℓ であった。その他の成分については、溶出条件によって、溶出量が大きく影響されることがわかった。

3. 3 重金属類の溶出量と含有量

環告法による溶出試験を原料と製品に適用して、A s、S e、P b、C d、C r (V I) の溶出量と含有量の関係を示したのが図-1と図-2である。原料の A s と S e を除けば、溶出液中からはほとんど検出されなかった。また、H g の分析結果については図示していないが、すべての分析値が N D であったためである。

図-1のAsとSeについてみると、溶出量と含有量には明確な相関関係があるようには認められなかった。ここでは結果を示していないが、その他の溶出試験においても、As、Seの溶出量と、含有量に良い相関はなかった。

3. 4 重金属類の溶出量と最終pH

原料と製品について表-2に示した5種類の溶出試験方法を適用し、重金属類の溶出量と最終pHとの関係を示したのが、図-3と図-4である。ここで最終pHは、溶出時間経過後の溶出液のpHである。原料のAsとSeについてみると、pHが低くなるほど溶出量が大きくなる傾向が認められるものの、最終pHが4付近になってもほとんど溶出しないケースもある。最終pHが4付近でもほとんど溶出しないのはスラグ試料であった。原料のCr(VI)ではCO₂連続法を適用した場合、最大0.668mg/ℓ検出されたものがあった。

また、製品ではAsがUS-EP A変法で最大0.095mg/ℓ、CO₂飽和法で最大0.067mg/ℓ、CO₂連続法で最大0.178mg/ℓ検出されたものがあった。

図-3と図-4の比較から明らかに、比較的溶出し易いAsとSeにおいても、製品として加工することによって溶出量が大幅に減少することが認められる。Pb、Cd、Cr(VI)の溶出量は、それぞれND～0.007mg/ℓ、ND～0.005mg/ℓ、ND～0.099mg/ℓであった。Pb、Cd、Cr(VI)の含有量がそれぞれ600mg/kg・DS以下、10mg/kg・DS以下、1.5mg/kg・DS以下であれば、今回の溶出条件下では「金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令」に定められている下水汚泥に係る基準値に比べると大幅に低い値であった。水銀についてはいずれの試料についても溶出液中の濃度がNDであった。

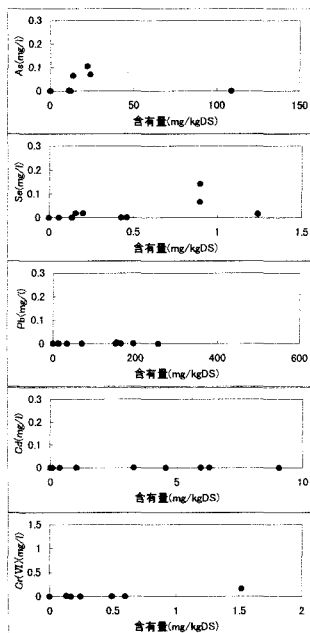


図-1 環告法による溶出液中の溶出量と含有量の関係(原料)

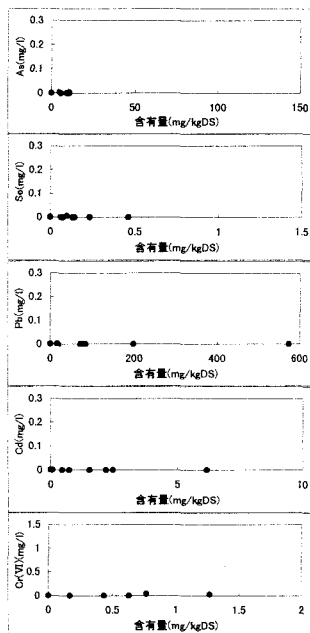


図-2 環告法による溶出液中の溶出量と含有量の関係(製品)

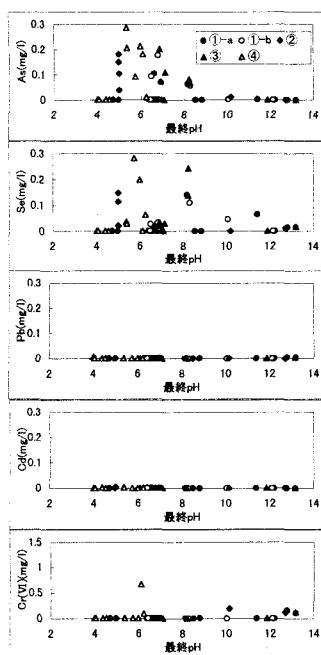


図-3 溶出量と最終pHの関係(原料)

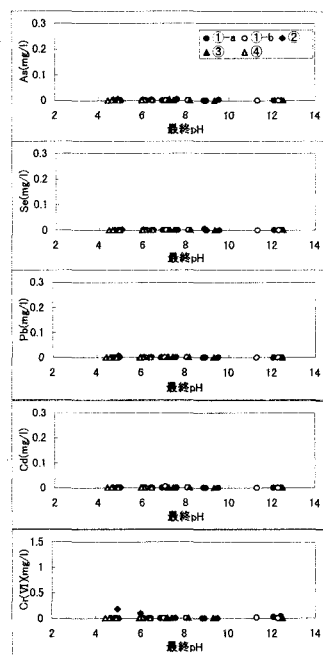


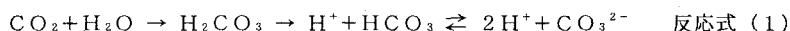
図-4 溶出量と最終pHの関係(製品)

3. 5 溶出液のイオンバランスと最終pH

図-3から明らかなように、焼却灰からのAsやSeの溶出はpHが低くなるほど溶出量が大きくなる傾向が認められることから、溶出液の最終pHがどのような因子によって影響されているかを検討した。ここで、US-EPA変法については0.5N酢酸を添加して強制的にpHを5にする操作がなされるため、ここでは検討対象からはずし、表-2の①-a、①-b、③、④の変法について検討することとした。

(1) 溶出液pHとCO₂の関係

溶出時間中におけるCO₂ガスの連続吹き込みや空気中のCO₂の取り込みによって、溶出液のpHは影響を受ける。



空気中のCO₂が脱イオン水に飽和状態で溶解すると、水溶液のpHは5.6になるが、通常の脱イオン・蒸留水の精製ではそのpHが6付近になる。このため、溶出試験方法①-aと①-bでは脱イオン水を溶出液として直接使用している。

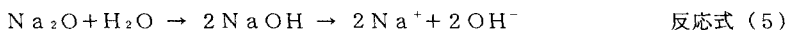
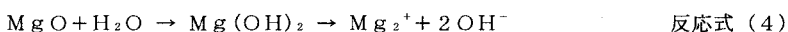
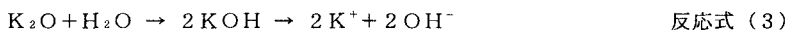
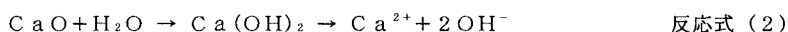
CO₂ガスを脱イオン水に連続的に吹き込むと、pHはさらに低下する。溶出試験方法④のように連続的にCO₂ガスを吹き込んで試験する場合には、反応式(1)でみると反応が右側へ進み、溶出条件は酸性側になることがわかる。

(2) 主要成分の溶解

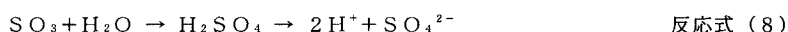
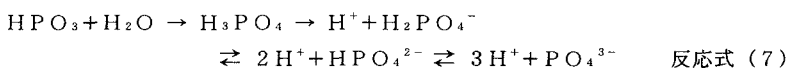
実験に用いた試料は下水汚泥を酸化条件下で焼却又は熔融しているため、主要成分はSiO₂、CaO、Al₂O₃、Fe₂O₃、P₂O₅、K₂O、MgO、Na₂O、SO₃の形態で存在していると仮定する。

この内、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃はICP発光分光分析計の測定結果からほとんど溶出しなことが明らかになったので、主要成分の溶解については次のように考えることができる。

塩基成分の溶解



酸成分の溶解



塩の溶解



(3) 溶出液のイオンバランスと最終pH

溶出液中の主要成分測定結果からカチオン当量とアニオン当量を算出する。ただし、通常0.01mol/L以下の濃度の希薄溶液は活量係数を1で近似できることから、ここでは活量係数を1と仮定した。従って、カチオン当量とアニオン当量は反応式(2)から(12)までのように電解すると仮定すると次の式で計算される。

$$\text{カチオン当量} = 2 \times \text{Ca}^{2+} + \text{K}^+ + 2 \times \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+$$

$$\text{アニオン当量} = 3 \times \text{PO}_4^{3-} + 2 \times \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$$

ここで、

カチオン当量：ミリ当量 (m eq/ℓ)

アニオン当量：ミリ当量 (m eq/ℓ)

Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} ：ミリモル濃度 (m mol/ℓ)

PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^{-} ：ミリモル濃度 (m mol/ℓ)

図-5は、カチオン当量とアニオン当量の両方についてデータが得られた原料C、E、F、Hの結果を示している。試料によって溶出量にかなり差があり、試料Hのようなスラグでは溶出量が極端に小さくなる。溶出試験方法①-aでは、溶出時間中 CO_2 供給がそれほどなく、溶出液中のカチオン当量とアニオン当量のバランスがとれている場合には、試料C、E、Fのように溶出液の最終pHがほぼ中性付近に保持されることがわかる。

溶出液中のpHは一義的には主要構成成分の溶出特性によって決まるが、カチオン当量とアニオン当量のバランスがとれている場合には、①-bや③のように溶出試験中に空気中から CO_2 の供給があるような条件下でも、ほぼ中性付近になることがわかる。

④のように溶出試験中に強制的に CO_2 供給がある場合には、反応式(1)のように溶出液のpHは酸性側になる。この時、カチオンの溶出も進行し、試料E、Fの例にみられるように、カチオン当量とアニオン当量のバランスは崩れ、明らかにカチオンの溶出の方が多くなっている。

石灰系統却灰の試料AとBに溶出試験①-a、①-b、③を適用すると、 CO_2 の供給が限られているため、反応式(1)より

も反応式(2)が進行し、最終pHは12.0~12.5になった。溶出試験④を適用すると、反応式(1)の進行によってpHは低下し、最終pHは6.3~6.5になった。この時、反応式(2)も進行し、カチオンの溶出量は溶出試験①-a、①-b、③を適用した場合よりも大きくなった。

3-6 原料中のAs、Seの溶出特性

図-3にみられるように原料が焼却灰の場合には、As、Seの溶出量は最終pHが低くなる程大きくなる傾向が認められる。溶出試験①-a、①-b、③、④を適用してAs及びSe溶出量と、カチオン当量、アニオン当量、最終pHとの関係を調べた

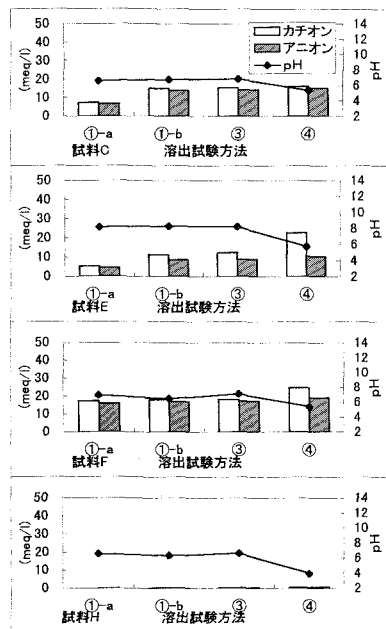


図-5 溶出液中のイオンバランス(原料)

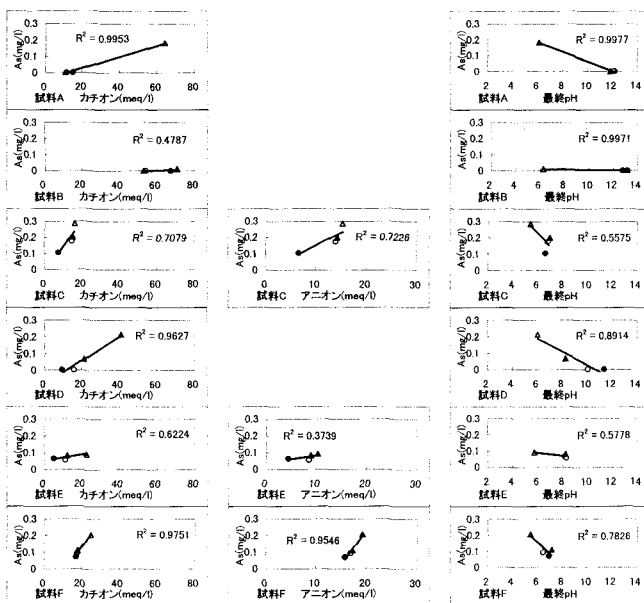
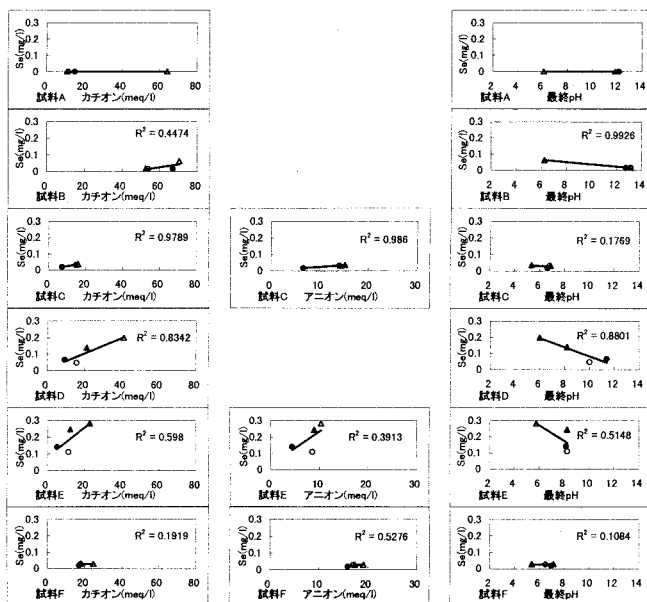


図-6 原料中のAsの溶出特性 (●: ①-a, ○: ①-b, ▲: ③, △: ④)

のが図－6、図－7である。全体的にみて最も相関の高いのがカチオン当量である。カチオン当量には、水に対する成分の溶出特性と、図－5にみられるような溶出液の最終pHの影響が、同時に反映されていると考えられることから、アニオン当量や最終pHに比べて良い相関が得られたものと考えられる。

しかし、同図から明らかなように、試料毎に相関式の傾きは大きく異なっている。このことは、試料毎に溶出特性が違うことを意味しており、カチオン当量から一般的なAsやSeの溶出量を予測することは難しいことを示している。



図－7 原料中のSeの溶出特性 (●①-a、○①-b、▲③、△④)

3-7 US-EPA変法によるAs、Seの溶出特性

原料が焼却灰の場合について、US-EPA変法を適用しAs、Seの溶出量を調べた結果を示したのが表－5である。石灰系焼却灰である試料AとBは、最終pHがアルカリ側になっているがその他の試料はすべて最終pHが5になっている。試料AとBのカチオン当量は図－6、図－7に比べて大きな値を示しているが、これは0.5N酢酸の添加によって

Ca^{2+} が大量に溶出したことによるものである。AsやSe溶出量は小さな値を示している。このことは、US-EPA変法が他の溶出試験と異なる特性を有していることを示している。

また、高分子系焼却灰であるC、D、E、Fについて、カチオン当量と、As及びSe溶出量との関係を図－6及び図－7の関係と比べると、相関式からずれているものもあり、US-EPA変法は①-a、①-b、③、④とやや異なる溶出特性を示す試験法であるといえる。

なお、熔融スラグが原料であるG、H、I、Jについては、AsとSeの溶出量はNDであった。

表－5 US-EPA変法によるAs、Seの溶出量

原料	最終pH	カチオン当量 (meq/l)	As溶出量 (mg/l)	Se溶出量 (mg/l)
A	10.2	139	0.011	ND
B	12.7	161	ND	0.010
C	4.99	12.2	0.181	0.019
D	4.99	32.4	0.039	0.114
E	5.00	16.7	0.104	0.148
F	4.98	14.2	0.150	0.021

4. まとめ

下水汚泥焼却灰、熔融スラグ及びそれらを原料にして製造された再生資材を対象にして、環告法、環告法変法、US-EPA変法、CO₂飽和法、CO₂連続法を適用して、重金属の溶出特性を調べた。その結果をまとめると以下になる。

- (1) 下水汚泥の主要構成成分はSiO₂、CaO、Al₂O₃、Fe₂O₃、P₂O₅、K₂O、MgO、Na₂O、SO₃、I g-L o s sで、全体の92%~98%になる。
- (2) 重金属の含有量と溶出量には明確な相関関係が認められなかった。
- (3) 焼却灰中のAsとSeについては、溶出試験後の最終pHが低いほど溶出量が多くなる傾向がみられ

た。溶融スラグからのAsとSeの溶出はほとんどなかった。また、焼却灰と溶融スラグからのPb、Cd、Cr(VI)、Hgの溶出量は、総理府令の判定基準値に比べると非常に小さい値であった。

- (4) 焼却灰や溶融スラグが焼成、セメント固化、結晶化等を施されて製品化されると、重金属の溶出量は原料に比べてさらに少なくなった。
- (5) 溶出試験における最終pHは、一義的には試料中の主要構成成分の溶出特性によって決まる。溶出液のカチオン当量とアニオン当量がほぼバランスしている場合には、pHがほぼ中性付近に保持されることがわかった。CO₂を強制的に吹き込む連続法は、溶出液のpHが酸性側に傾き、同時にカチオンの溶出量が多くなることがわかった。
- (6) 焼却灰中のAsやSe溶出量は、溶出液のカチオン当量と高い相関があった。しかし、相関式の傾きは個々の試料毎に異なることがわかった。
- (7) US-EPA変法は、環告法、環告法変法、CO₂飽和法、CO₂連続法と異なる溶出特性を示すことがわかった。

参考文献

- 1) 環境庁環境法令研究会編、産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法(環境庁告示13号)、環境六法、中央法規出版(平成8年)
- 2) U.S.Environmental Protection Agency,Test Methods for Evaluating Solid Waste/Physical Chemical Methods/SW-846/2nd Edition,(1982)
- 3) ASTM,Standard Test Method for Shake Extraction of Solid Waste with Water,Annual Book of ASTM Standards, Vol.11.04 (1995)
- 4) ASTM,Standard Test Method for Sequential Batch Extraction of Waste with Water,Annual Book of ASTM Standards, Vol.11.04 (1995)
- 5) Institut fuer Normung Berlin, DIN 38414 S4: German Standard Procedure for Water,Waste water and Sediment Testing-Group S (Sludge and Sediment):Determination of Leachability (S4) (1984)
- 6) Schweizerische Bundesrat,Technische Verordnung ueber Abfaelle/814.015,(1993)
- 7) 金子栄広、溶出試験方法の現状と展望、廃棄物学会誌、Vol.3、No.3、pp182-191 (1992)
- 8) William Shively, Paul Bishop, David Gress, Todd Brown, Leaching tests of metals stabilized with Portland cement, Jour. WPCF, Vol.58, No.3, pp234-240 (1986)
- 9) J.R.Conner,J.M.Huffman, Comparison of U.S. and Foreign Test Protocols on Stabilized Hazardous Wastes, 87th Annual Meeting and Exhibition of Air and Waste Management (1994)
- 10) Thomas L. Theis, Lawrence E. Padgett, Factors affecting the release of trace metals from municipal sludge ashes, Jour. WPCF, Vol.55, No.10, pp1271-1279 (1983)
- 11) C.W.Francis, G.H.White, Leaching of toxic metals from incinerated ashes, Jour. WPCF, Vol.59, No.11, pp979-986 (1987)
- 12) 金子栄一、桃井清至、原田春樹、根岸達夫、都市ゴミ焼却灰溶融スラグの重金属溶出特性、土木学会第50回年次学術講演会第2部(B)、pp1206-1207、(平成7年)
- 13) 渡部春樹、尾崎正明、平山孝弘、北村友一、下水汚泥及びその溶出水中の重金属の分析、土木技術資料、Vol.37、No.8、pp38-43 (1995)