

廃棄物焼却灰循環資源化の考え方と研究の取り組み

九州大学大学院工学研究院 教授 島 岡 隆 行*

1. 利用了した資源は自然界に返したい

廃棄物の多くは、天然資源を原料に製造された製品の廃物である。私は、出来ることなら廃棄物を大地へ戻したい。有機性廃棄物の生ごみは、分解過程における環境影響が懸念される。同じ有機物

でも、木材などの分解速度は極めて小さい。さらに、プラスティックに至っては、生物分解を受け難い。公衆衛生上、またこれらの廃棄物埋立処分に伴う環境汚染のリスクなどを考えると、化学・生物学的な反応だけによる安定化（無機化）に依存することは、廃棄物の排出量から判断しても間尺に合わない。その意味で、焼却処理による酸化分解（燃焼）は効率的である。焼却技術は百年に及ぶ長い歴史を有し、技術的にも

成熟している。しかし、焼却は燃焼制御を一步間違うと、ガス化されない物質の濃縮工程であり、燃焼工程において有害な物質を意図せずに生成してしまうことになる。しかし、今日の燃焼技術と、さらなる技術の改善で解決できる問題だと思っている。

図1は、九州日報（明治36年10月27日付）の広告記事である。「肥料用福岡市厨芥焼灰販売、各種の作物草木に最も有効かつ廉価なり、ご入用の方は下記にお申し込みください。福岡市薬院土手焼却場」とある。大変興味深い新聞記事である。100年前にあたる明治36年（1903年）には、既に、川の土手で厨芥を焼却処理していたことがわかる。焼却灰の施肥は、肥料3要素を供給すると同時に、日本の土壤は酸性を示す傾向にあることから、土壤改良材（中和剤）の役割も果たしていたと想像される。先人の知恵である。厨芥、草木類を主とした焼却灰と思われるが、廃棄物（利用した資源）を自然界に返すことを実践していたのである。

2. 焼却灰は風化する

大量の焼却残渣（焼却灰と飛灰の総称）を用いた長期間にわたる埋立実験を通して、焼却残渣は土壤化することを体感している。屋外に数年も放置された焼却残渣には、いつか



図1 厨芥焼却灰販売の新聞広告
(九州日報、明治36年10月27日付)

* (財)九州環境管理協会 評議員

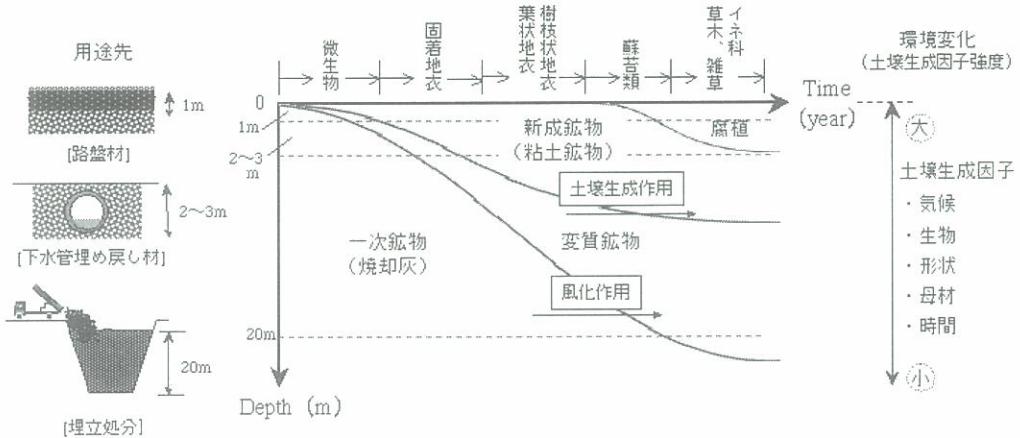


図2 焼却灰風化のプロセス

らとなく草木が繁茂する。色も土壤に似てくるし、手にとって臭いをかけば土の臭いがする。ときには、土壤動物が生息している。火山灰土に関する書物¹⁾に、「日本はいうまでもなく火山国で、重要な火山が167、噴火の記録や兆候のある活火山が77もある。噴煙物質は火口からの何10kmも遠方に達し、広い範囲の地表面をおおう。これが土壤化されて火山灰土となる。その面積は、日本の国土の約6分の1、全農耕地の27%、畑・樹園地の46%を占める。」とある。研究を通しての体験とこの一文をきっかけに、筆者はここ数年、焼却残渣（主に、焼却灰）の安定化（土壤化、風化、粘土化など）についての研究に力を入れている。わが国の廃棄物の清掃工場（1,715施設、2000年度）を火山に例えると、焼却残渣は噴煙物質に相当する。埋立処分された焼却残渣の安定化機構、土木資材の有効利用をめざした利用先での環境影響評価のための焼却残渣の安定化を明らかにしたい。「焼却残渣の科学」なるものが体系化できればと思っている。

図2には、廃棄物埋立地や有効利用先における風化のプロセスを模式的に示している。焼却灰を一度だけ土木材料として利用するので

は、地下資源の消費削減や採掘に伴う自然破壊の歯止めには寄与するものの、いずれや埋立処分され、埋立処分の先送りにしか過ぎない。繰り返し利用が大切であり、この過程において環境に安全なまでに焼却灰を土壤化、風化させることができれば素晴らしいと考えている。

3. 清掃工場は骨材工場

清掃工場における廃棄物の焼却処理を、焼却対象ごみを「原料」、焼却灰を「骨材（土木材料）」、そして飛灰を「有害物の抽出物」であるとの見方ができるのではないだろうか。焼却灰を骨材（土木材料）として積極的に有効利用すると決めれば、焼却灰骨材の品質を高める手だては多々あると考える。まずは、原料にあたる焼却対象ごみを制御することが考えられる。焼却する廃棄物が厨芥、草木類主体であれば、前述したように、焼却灰を肥料として有効利用できるであろう。収集形態の変更、焼却前の選別などによって、焼却廃棄物の厨芥、古紙、プラスティック類、金属、ガラス等の組成割合を変えれば、物理・化学的に異なる性状を有する焼却灰を生産する

表1 全国10都市の清掃工場から排出された焼却灰の化学的組成

工場名	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J _M	J _A	J _N	J _J
重金属含有量 溶出試験	Cd(mg/kg)	6	9.3	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	4.1	8.7	6.2	11.7	< 0.1
	Pb(mg/kg)	1060	663	1120	294	3330	1540	322	1330	555	1290	1610	1300
	Ce(mg/kg)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	T-Cr(mg/kg)	326	329	188	174	197	462	149	546	73.7	230	321	330
	As(mg/kg)	13.5	3.48	3.6	5.66	2.65	< 0.1	1.87	2.43	3.6	4.94	4.86	3.95
	Zn(mg/kg)	-	3080	2900	2330	4160	7330	1310	3230	-	-	3380	4760
	Hg(mg/kg)	0.476	0.419	< 0.005	< 0.005	0.24	3.91	0.239	0.37	0.4	< 0.005	< 0.005	< 0.005
pH(-)	12.3	12.6	11.2	11.4	8.8	10.8	11.5	11.9	12.5	12	11.4	11.9	12.5
Cd(mg/l)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Pb(mg/l)	0.8	1.4	0.82	< 0.01	< 0.01	0.54	0.03	0.12	1.49	0.04	0.18	2.86	3.03
Ce(mg/l)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Cr ⁶⁺ (mg/l)	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
As(mg/l)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Hg(mg/l)	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005

Jの添字M, A, N, Jは、それぞれ5月, 8月, 11月, 1月に採取したことを表す。

ことができよう。骨材に要求される品質が一般廃棄物の焼却だけで得られなければ、必要な成分を含有する産業廃棄物を混焼されることも考えられる。次に、燃焼工程の制御が考えられる。炉内への廃棄物供給速度、燃焼温度、一次・二次空気送量、炉内滞留時間などを制御することによって、特有の性状を有する焼却灰が発生し、焼却灰の有効利用の用途に応じた性状のものが得られるであろう。セメント工場は、セメントの燃料や原料の代替材として大量の産業廃棄物を受け入れている。廃棄物から土木材料(waste to material)の考えが、既に、ここでは実現されている。

4. 全国焼却灰の性状調査 —有効利用の視点から—

焼却灰の物理・化学的性状は、焼却対象廃棄物の質・量のみならず、燃焼方式・温度等にも大きく依存する。発生焼却灰の性状を十分に把握することが、焼却灰の有効利用のための第一歩である。そこで、全国の政令指定都市を中心とした10清掃工場より発生した焼却灰(d < 13mm)の性状を調査することにし

た。物理・力学的性状として、密度、粒度分布、最大乾燥密度、最適含水比、修正CBRを求めた。焼却灰間の物理・力学的性状の相異はあまり見られず、平均値は密度 2.331g/cm³、均等係数13.3、最大乾燥密度 1.541g/cm³、最適含水比 19.8%，修正CBR 66.6%であった。締め固めやすい骨材であり、修正CBRも比較的高く、下層路盤材に求められる修正CBR 20%を大きく上回り、十分な地盤支持力を発揮することが分かった。このように、焼却灰の物理・力学的性状からは、土木材料として有効利用する際の問題点は認められず、十分に有効利用できると判断された。

焼却灰の化学的性状として、土壤環境基準に示されている項目の重金属について、成分分析(含有量測定)と溶出試験(環境庁告示46号法、JLT46)を行い、その結果を表1に示す²⁾。鉛の溶出濃度が土壤環境基準値(< 0.01 mg/l)を超過する傾向を示し、10施設中8施設で基準値を越えた。焼却灰の有効利用においては、この鉛の溶出に十分注意する必要がある。しかし、薬剤処理によって溶出濃度は土壤環境基準値を満足するとともに、一週

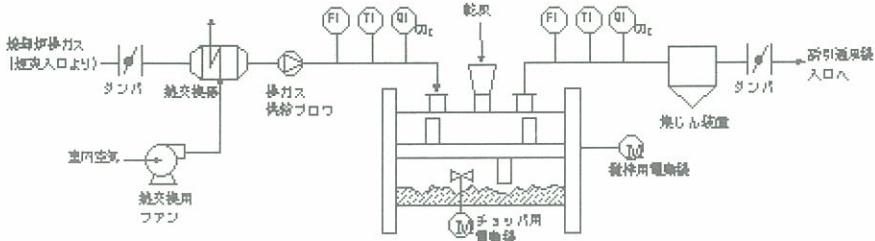


図3 焼却灰の炭酸化処理実証装置フロー

間程度のエージング（焼却灰を湿潤状態で大気中に放置）で鉛は不溶化し、土壤環境基準値を満足することを確認した。

5. 骨材としての焼却灰有効利用の取り組み

現在、我が国的一般廃棄物の最終処分量は年間約1,051万トン（2000年度実績³⁾）にのぼり、最終処分場の残余容量不足は深刻さを増している。埋立廃棄物の約半分を占める一般廃棄物焼却残渣を循環資源として有効利用することは、循環型社会の実現にとって不可欠であり、早急な対策が社会から要請されている。一方、我が国の総骨材需要量は、ここ数年、景気の影響で減少傾向にあるが、それでも約8億トン前後で推移している⁴⁾。発生焼却灰の全量を骨材として再利用しても、総需要量の1%にも達せず、市場へ与える影響は小さいと考えられる。問題となるのは、やはり、焼却灰骨材の品質、特に重金属の溶出についてである。加えて、2003年2月に施行された土壤汚染対策法では、新たに土壤含有量基準（例えば、Pb < 150mg / kg）が設定されたことから、これまで以上に有効な循環資源化技術の確立が急務となっている。

ここでは、焼却灰有効利用の重金属不溶化を目的とした、比較的簡易、かつ安価な方法として、（1）炭酸化処理、（2）高温・高圧

処理を紹介する。

（1）炭酸化処理⁵⁾

炭酸化とは、溶液中のカチオンが溶解した炭酸ガスと反応することによって炭酸塩化することである。生成した炭酸塩、例えば炭酸鉛等は難水溶性である。炭酸化処理で必要とする炭酸ガスは清掃工場から十分に供給されることから、煙道の排ガス（CO₂濃度 約10%）を有効利用した炭酸化処理が可能となれば、低コストかつ低エネルギーで重金属を不溶化できる。

ここでは、実際の清掃工場において、図3に示す処理フローで炭酸化処理実証試験の結果を紹介する。実験に用いた焼却炉排ガスは、

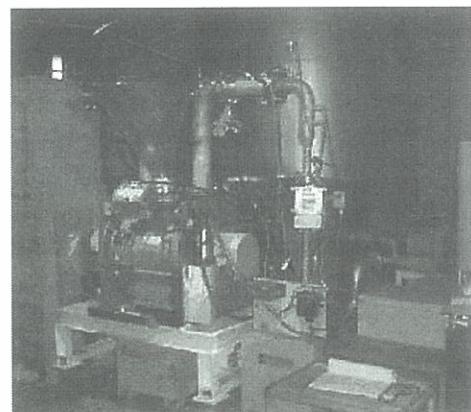


写真1 焼却灰炭酸化実証装置本体
(W450cm × L250cm × H200cm, 内容積約50L)

煙突入口より導入し、装置内での反応後、誘引通風機入口へ戻した（写真1参照）。

実験では、乾燥させた焼却灰6kgを装置本体に投入し、所定の水分を添加後、装置入口焼却炉排ガス流量を400L/min、排ガス温度を約30°Cに調整して焼却炉排ガスを通気し、炭酸化処理を行った。鉛の溶出濃度（JLT46）と炭酸化処理時間の関係を図4に示す。時間とともに処理灰の鉛溶出濃度は低下し、添加水分率10%の場合は処理時間30分までに、添加水分率5%，15%の場合は処理時間60分までに、それぞれ鉛の土壤環境基準値(<0.01mg/L)を満足した。また、炭酸化処理装置入出口气体について分析した結果、炭酸化処理過程におけるガスの顕著な汚染は認められなかった。このように、実排ガスを有効利用した炭酸化処理は、低成本かつ低エネルギーで重金属を不溶化できる。

(2) 焼却灰の湿潤・乾燥処理、高温・高圧処理⁶⁾

焼却灰もまた、土壤生成因子が作用することによって土壤化していくことが十分に予想される。湿潤・乾燥処理、高温・高圧処理は、焼却灰に水分、温度、圧力を変化させ、重金属の溶出を抑制させることを目的としている。

具体的に、実験結果の一例を紹介しよう。図5は、含水率30%に調整した焼却灰試料を60°C、または110°Cで乾燥させ、再び含水率30%にする操作を1工程とし、この工程を繰り返したときの溶出試験（JLT46）結果を表す。湿潤・乾燥工程を繰り返すことによって、鉛の溶出濃度が減少し、特に、乾燥温度110°Cでは、6時間の乾燥を3回繰り返した後、土壤環境基準を満たした。

次に、オートクレーブを用い、焼却灰を高

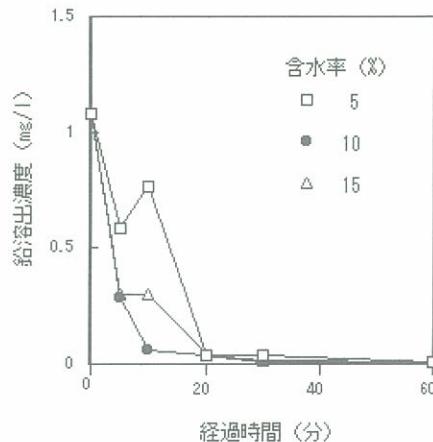


図4 炭酸化処理における鉛の溶出濃度の経時変化

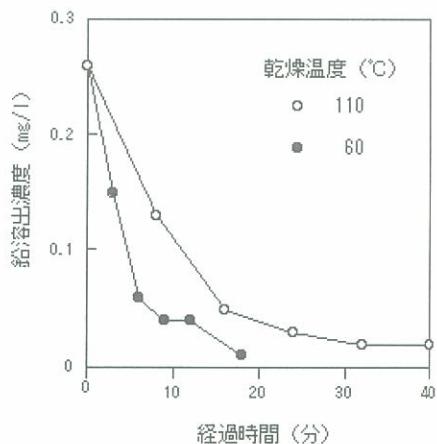


図5 湿潤・乾燥実験における鉛の溶出濃度の経時変化

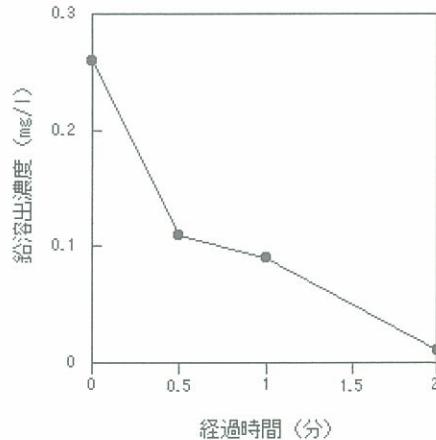


図6 高温・高圧実験における鉛の溶出濃度の経時変化

温・高圧下に曝露した際の鉛溶出量 (JLT46) の経時変化を図6に示す。加熱・加圧時間の経過とともに鉛の溶出濃度が減少し、焼却灰では2時間後に土壤環境準値以下となった。

清掃工場における高温・高圧蒸気を利用することによって、焼却灰を高温・高圧下に配置することが可能であることから、本法もまた、低コストかつ低エネルギーで重金属を不溶化できるといえる。

6. 既埋立廃棄物のセメント原料化 —埋立地の再生と蘇生—

我が国のセメント生産量は減少傾向にあるが年間8,000万トン程度であり⁷⁾、一方、一般廃棄物の焼却残渣発生量は年間約600万トンである。発生する焼却残渣の全量がセメント原料として有効利用されれば、焼却灰のセメント原料化は、極めて有効な焼却灰の利用方法となる。

ここでは、最終処分場を資源の循環基地と

もいえる「Sustainable Landfill (持続型最終処分場)」と捉える。すなわち、清掃工場から排出される焼却残渣を直ちに洗浄してセメント化するのではなく、持続型最終処分場に焼却残渣を持ち込み、洗浄水としての雨水を適切な方法で積極的に受け入れることによって、効率よく焼却灰中の塩素を溶脱させようとするのである(図7参照)。

図8は、埋立模型槽に焼却灰主体の廃棄物を充填し、約3年間、屋外暴露させたときの浸出水中の塩素濃度経時変化を表す⁸⁾。時間の経過とともに浸出水中の塩素濃度は減少した。また、埋立模型槽解体後の塩素含有量は平均で0.05%程度であり、実験開始の塩素含有量の98%が除去されていた。

次に、ストーカー炉焼却残渣、および20年が経過した実際の埋立処分場から採取した既埋立焼却残渣中の塩素含有量をそれぞれ表2、3に示す⁹⁾。福岡県下の清掃工場から排出された直後の焼却残渣中の塩素含有量は、焼却灰



図7 既埋立廃棄物のセメント原料化の概念

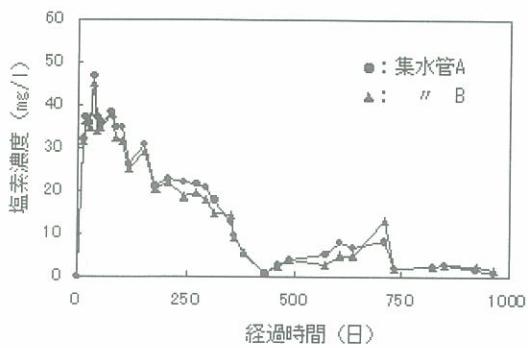


図 8 浸出水中塩素濃度の経日変化

で0.9～5.2%，飛灰で11.0～23.0%と非常に高かった¹⁰⁾が、既埋立焼却残渣中の塩素含有量は、埋立深度によるが0.03～0.41%であり、かなり脱塩が進行していったことがわかる。

これらのことから、最終処分場を Sustainable Landfill と位置づけ、セメント工場で受け入れ可能な塩素含有濃度に達した時点で埋立地内の焼却残渣を掘削し、セメント原料として有効利用する。このことによって、埋立てのスペース（空間）を再確保することが可能となり、繰り返して埋立空間を利用することができる。用地確保に困難を極めている最終処分場の延命化や規模縮小につながることが期待される。

表 2 ストーカー炉焼却残渣中の塩素含有量

試 料	塩素含有量 (%)	
	A町	B町
焼却灰 1	1.040	4.429
〃 2	1.071	1.288
〃 3	1.005	0.762
〃 4	0.999	0.870
〃 平均	1.029	1.837
飛 灰 1	12.56	15.89
〃 2	11.47	14.85
〃 平均	12.02	15.37

7. 焼却灰のセメント原料化のための難溶性塩素の脱塩処理

近年、循環型社会形成推進基本法が制定されるなど、循環型社会の構築に向けた様々な取り組みがなされている。焼却灰のセメント原料化もその一つであり、焼却灰を原料として利用したセメントである「エコセメント」がJIS制定されるなど、焼却灰のセメント原料化へ向けた動きは活発である。焼却灰は、セメントに類似した化学組成を有することから、セメント原料として利用することが可能であるが、原料化にあたり焼却灰中の高濃度の塩素が問題となる。セメントは、鉄筋の防錆を目的として塩素含有量が規制されている。例えば、一般的なセメントである普通ポルトランドセメントでは0.035%以下、焼却灰を原料としたセメントである普通エコセメントでは0.1%以下に規制されている。しかし、焼却灰中には、一般に数%の塩素が含有されていることから、セメント原料として利用するには塩素の除去が必要である。

焼却灰主体の埋立地において、雨水による効果的な塩素の除去を行うことを目的として、焼却灰中の塩素の溶出特性を検討したので紹介する。

埋立廃棄物の溶出特性の検討として、水和反応により生成する不溶性塩化物であるフリーデル氏塩（ $3\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ）に着目

表 3 既埋立焼却残渣中の塩素含有量

試料名	塩素含有量 (%)
焼却残渣 1	0.028
〃 2	0.046
〃 3	0.049
〃 4	0.048
〃 5	0.413
〃 6	0.177
平 均	0.127

した。図 9 は、清掃工場からの焼却灰のX線回折結果である。フリーデル氏

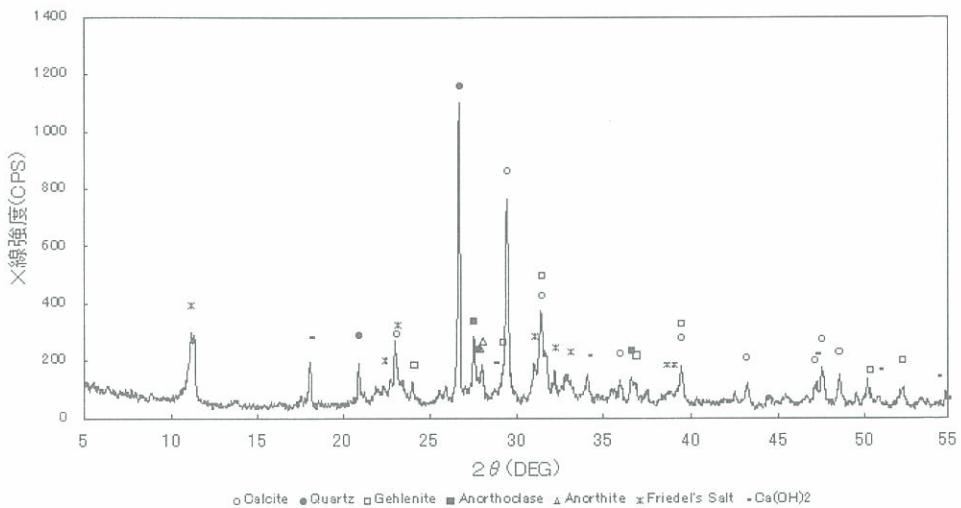


図9 焼却灰のX線回折図

塩は、 $2\theta \text{ CuK}\alpha = 11.192\text{deg}$ に最大ピークを持つことが知られており、その他のピークと合わせて検討した結果、フリーデル氏塩が焼却灰中に存在することが確認された。

図10に、埋立地から採取した複数の試料についての不溶性塩分量とフリーデル氏塩の最大ピークのX線強度との関係を示す。両者の間には相関関係を認めることができることから、焼却灰中の塩化物のうち、フリーデル氏塩の含有量が焼却灰からの塩素の溶出特性に大きく作用すると考えられる。

埋立地において、降雨などの自然現象によって焼却灰の性状がどのように変化するかを

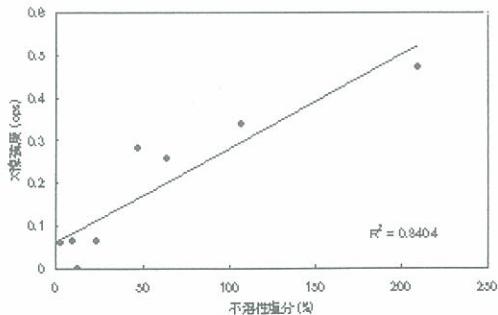


図10 不溶性塩分量とフリーデル氏塩の最大ピーク強度の関係

把握するために、埋立地表面から30cmの表層部分を5cm間隔でサンプリングし、それぞれX線回折分析を行った。図11に、フリーデル氏塩の最大ピーク付近のX線回折結果を示す。サンプリングした試料は全て5年前の同時期に埋立てられたものであることから、埋立てられた当初の初期性状に大きな差はないと考えられるが、5年が経過すると、地表面からの深さによってフリーデル氏塩のピーク高さが異

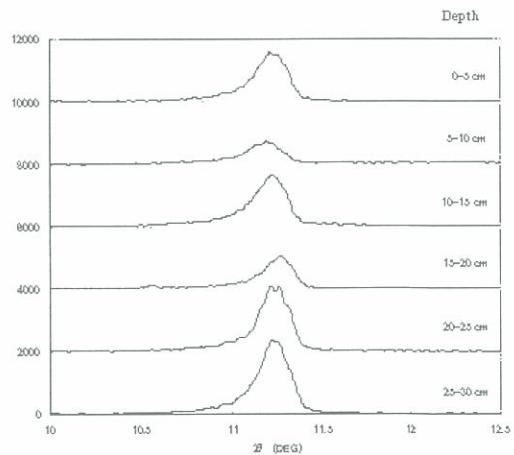


図11 フリーデル氏塩の最大ピーク付近のX線回折図

なっていた。特に、深さ20cmから30cmの試料で高いピークを示したことから、フリーデル氏塩の生成・分解には、地表面からの深さが関与していることが示唆される。また、このピークは複数のピークが重なっていると推定され、フリーデル氏塩の結晶構造に類似した化合物が含有されていると推測される。

以上の結果から、X線回折により焼却灰中に不溶性の塩化物であるフリーデル氏塩を確認できた。このような不溶性塩化物は、埋立地内において雨水による溶出が期待できないことから、生成を抑制、あるいは分解を促進する手法の開発が求められる。今後とも、不溶性塩化物の生成、分解メカニズムが解明されることが望まれる。

8. 焼却灰有効利用に際しての課題

焼却灰有効利用に向けて解決すべき課題は多いが、日頃考えている課題を列挙すると以下のようになる。

(1) 利用先の環境モニタリング手法の確立(安全性確保)

地下資源が枯渇する中において、廃棄物を有効利用することを躊躇していくはならない。長期的な安全性を予見することは難しい。しかし、現時点の技術レベルで安全であることが確認されれば、果敢に循環資源として利用すべきである。安全性が確保されるまでは、利用先でのモニタリングを継続し、またデータの蓄積に力を注ぐべきである。

(2) 焼却対象ごみの性状制御と燃焼方式の改善による焼却灰性状の制御(品質保証)

焼却灰を土木資材として有効利用するには、安定した性状を有する品質の高い焼却灰

を排出することが求められる。そのためには、焼却する廃棄物、燃焼工程の精度高い制御が不可欠である。

(3) 用途規制と用途開発

総骨材需要量に対して、一般廃棄物焼却灰の発生量は1%未満と僅かな量である。焼却灰の性状を活かせる用途、市民の合意が得られる用途への有効利用に限るべきである。新たな用途開発のための努力も求められる。

(4) 情報管理と公開

いつ、どこに、どのような用途で、どれだけの量の焼却灰を有効利用したのかを記録に留め、情報を管理しておくことが大切である。有効利用された焼却灰を散逸させないために、またリサイクル(繰り返し利用)のためにも不可欠である。それらの情報も公開されるべきである。

(5) 焼却灰再利用に関連する法的整備

何と言っても、法的な整備がなされなければ、焼却灰の有効利用の全国展開は困難である。そのためにも、焼却灰の有効利用が環境面において問題がないことが科学的に明らかにされなければならない。(1)の環境モニタリングにも通じるが、欧州、特にオランダでは焼却灰の全量を有効利用しており、焼却灰有効利用の先進国からの情報を積極的に入手し、活用すべきである。日々、地下資源の埋蔵量が減少し、環境が劣化している中で、躊躇していくはならない。

最後に、米国では焼却のことを'waste to energy'と呼んでいる。発電による廃棄物からのエネルギー回収(thermal recycle)を意味している。資源消費大国の日本において

は、さらに進めて、焼却による'waste to material'を実現したいものである。

(しまおか・たかゆき)

参考文献

- 1) 日本土壤肥料学会編：火山灰土，－生成・性質・分類－，博友社，1983
- 2) 福岡大学工学部土木工学科：全国一般廃棄物焼却灰の性状調査－土木資材への有効利用に向けて－，1999. 3
- 3) 環境省：一般廃棄物の排出及び処理状況について，2003. 3
- 4) 経済産業省製造産業局窯業室編：碎石統計年報，2000
- 5) 島岡隆行，瀬戸俊之：埋立処分量削減を目的とした廃棄物処理残さの土木資材化と環境負荷低減化技術，平成14年度環境省廃棄物処理等科学研究費補助金研究報告書，2003. 3
- 6) 中野彰子，崎田省吾，島岡隆行：人工的土壤生成因子の作用に伴う焼却残渣の鉛不溶化現象，第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.841－843，2002
- 7) 通商産業大臣官房調査統計部編：生コンクリート統計年報，1997
- 8) 堀直子，崎田省吾，宮脇健太郎，島岡隆行：覆土膜構造を有する埋立地の安定化に関する研究，第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.966－968，2002
- 9) 松田賢士，簗原伸二，島岡隆行：既埋立焼却残渣中の塩分の性状について，第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.960－962，2002
- 10) 焼却残渣の循環資源化研究会（九州大学）：セメント工場を活用した焼却残渣の資源化技術成果報告書，2003
- 11) 太平洋セメント株式会社ゼロエミッション事業部：灰水洗システムを利用した都市ごみ焼却残渣のセメント資源化技術，都市と廃棄物，Vol.32，No.5，2002