事例論文(Case Study Research Article)

最終処分場延命と地球温暖化のトレードオフを考慮した
下水汚泥溶融スラグの有効性の評価山崎 竜治¹・田畑 智博^{2,*}Environmental Evaluation of Slag Produced by the Sewage Sludge Melting Process
Considering the Trade-off between Life Extension of Landfill Sites and Global WarmingRyuji YAMASAKI¹ and Tomohiro TABATA^{2,*}

Synopsis:

Objective. Although slag produced by the sewage sludge melting process offers the advantage of reducing the final volume that must be landfilled, such recycling also presents an important disadvantage due to emission of abundant greenhouse gases. A trade-off exists in the waste management sector between the life extension of landfill sites and global warming, and appropriate solutions are required to find an appropriate balance between these factors. This study aims to evaluate the environmental impact of slag produced by the sewage sludge melting process and to investigate conditions to promote slag production under trade-off condition.

Results and Discussion. This study evaluates two cases: (1) slag is produced from sewage sludge and recycled for use in construction materials, and (2) sewage sludge is incinerated and the incineration ash is landfilled. Case studies at a particular treatment plant were conducted for comparative evaluation, and environmental loads of CO₂ and final disposal were targeted. CO₂ emissions of 1,400 and 500 kg-CO₂/tonne were determined for cases (1) and (2), respectively. Then, a comprehensive evaluation of the trade-off between the life extension of the landfill site and global warming was conducted using the distance-to-target method. The indicator value was 89% lower for case (1) than for case (2) when the reduction target of final disposal from FY2011 to FY2030 was 67%. However, this result supposes that all of the slag produced was recycled. Assuming effective utilisation of slag (68%), the difference in the final volume between the two cases would drop to 45%. A sensitivity analysis using distance-to-target method was conducted to investigate the percentage of the final disposal reduction or greenhouse gas target that would be required to revive the results of cases (1) and (2). The results indicated effective utilisation of slag has advantageous comparing with case (2).

Conclusions. The present study indicates that slag produced by the sewage sludge melting process is important to address the trade-off between life extension of landfill sites and global warming. Moreover, effective utilization of slag is a key factor in determining the effectiveness of slag recycling. Therefore, finding ways to increase the effective utilization should be made a priority.

Keywords: Distance-to-target; global warming; life-extension of landfill site; sewage sludge; slag

1. はじめに

下水汚泥は、全国で年間約77,300 [千t] (2008年度) 排出されている¹⁾。排出された下水汚泥の大部分 (96.6%) は減量化され、残りの2.9%がリサイクル、0.5%が最終処分されている。リサイクルの方法としては、焼却灰の骨材利用が約66%と最も多く、続いて堆肥が約16%、下水汚泥

溶融スラグ (以下、スラグ) の骨材利用が約12%である²⁾。全国規模でみるとスラグの生産量は少ないが、近畿地方だけでみると全国で生産されるスラグの約79%が本地方で生産されており、リサイクルの方法に対する地域性が大きいことがわかる³⁾。

このうちスラグに焦点を当てると、スラグの利点は、重

1 放送大学教養学部 / 〒 261-8586 千葉県千葉市美浜区若葉 2-11

2 神戸大学大学院人間発達環境学研究科 / 〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区鶴甲 3-11

1 The Faculty of Liberal Arts, The Open University of Japan / 2-11, Wakaba, Mihama-ku, Chiba, Chiba 261-8586

2 Graduate School of Human Development and Environment, Kobe University / 3-11, Tsurukabuto, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657-8501

* 連絡先 (Corresponding author), tabata@people.kobe-u.ac.jp

金属を溶融固化してリサイクルしやすい形状にすることである。廃棄物処理事業では、最終処分場の延命が課題となっている。例えば、近畿圏の産業廃棄物最終処分場の残余年数が8.9年（2009年実績）⁴⁾であり、スラグ化による最終処分量の削減への期待は大きい。その一方で、1,200～1,500℃の高温で溶融処理するため、多くのエネルギーが必要となり、温室効果ガスの排出量が多くなることが欠点である。

廃棄物処理事業では、最終処分場延命だけではなく、地球温暖化への対応が急務となっている。しかし、これらはしばしば二律背反（トレードオフ）の関係がみられる⁵⁾。即ち、最終処分量削減と温室効果ガス削減を両立させるのは困難であり、トレードオフ関係においてもこれらをバランスよく削減できるかが課題である。そのため、スラグ化によるリサイクルは環境面からみて優位性があるかどうか、また、どのような条件でスラグ化を推進できるのか検討するうえで重要である。

これに対し、下水処理を対象としてLCAを実施した事例は多い。例えば、榊原ら⁶⁾、澤田ら⁷⁾、宮原ら⁸⁾の研究事例があるが、これらの研究は下水処理場や浄化槽における下水処理を対象としているものが多い。スラグの生産までを含めた評価はほとんど実施されていない。また、下水汚泥から生産したスラグについて、利用用途に関する検討は多いものの（例えば、間瀬⁹⁾）、LCAの観点から評価した事例は少ない。一方で、廃棄物についてはスラグ生産の影響をLCAにより実施した事例は多く、例えば、田畑ら¹⁰⁾、胡ら¹¹⁾、長田ら¹²⁾の研究事例があるが、複数の環境影響からスラグの生産方法を検討した研究事例は少ない。

そこで本研究では、スラグのリサイクルに伴う環境影響をLCA手法により評価する。また、最終処分場延命と地球温暖化のトレードオフをふまえた、スラグの生産を推進するための条件を明らかにする。なお、前述のように下水汚泥のリサイクル方法としてはスラグ生産の他に堆肥化や焼却灰の骨材利用等があるが、本稿では、近畿地方で多く実施されているスラグ生産に焦点を当てた評価を実施する。

2. 研究の方法

2.1 ケーススタディ

本研究では、X県A下水汚泥処理場（以下、A処理場）をモデルケースとしたケーススタディを実施する。A処理場では、年間約20,500t-DS（乾燥重量）の下水汚泥を溶融処理し、年間約4,980tのスラグを生産している（2011年度実績）。図1に、2011年度の下水汚泥の処理及びスラグリサイクルのフローを示す。スラグの70%はアスファルト骨材にリサイクルされ、残り30%はコンクリート骨材やエコレンガ骨材にリサイクルされている。A処理場は、全国のスラグ生産量の約16%（2010年度実績）を占めており、規模が大きい処理場であるといえる。ちなみに、2011年度のスラグの有効利用率は68%であり、2011年度における全国平均の有効利用率82%³⁾に比べて低い。但し、本処理場では、2010年度以前の見かけ上の有効利用率は在庫処分も影響して100%を超えていたため、一時的なスラグ供給の悪化によるものと考えられる。

溶融処理において、A処理場は旋回溶融炉を2基（いずれも30t-DS/日規模）、コークスベッド式溶融炉（40t-DS/日規模）を1基有している。下水汚泥の8割は旋回溶融炉で処理され、残り2割はコークスベッド式溶融炉で処理されている。

2.2 目的と調査範囲

本研究では、スラグのリサイクルによる環境負荷削減効果（以下、リサイクル効果）の度合いを評価することをLCAの実施目的とする。そのため、(1) 下水汚泥をスラグ化してリサイクルする場合（以下、スラグ化あり）と(2) 焼却して焼却灰を最終処分する場合（以下、スラグ化なし）の2ケースについてインベントリ分析及び影響評価を実施し、結果を比較する。なお、スラグ化ありのケースは、A処理場において実際に行われている処理方法である。スラグ化なしのケースでは、A処理場でスラグ生産は行わずに、焼却を実施した場合を想定した。評価の単純化のため、下水汚泥のスラグ化及び最終処分以外のフローは除外する。

図1 下水汚泥の処理とスラグリサイクルのフロー（2011年度）

機能単位は下水汚泥 1t-DS の処理とし、これに伴う CO₂ 排出量、最終処分量を評価する。また、影響評価では、上述のトレードオフを加味した評価を行うため、地球温暖化 (CO₂) と最終処分場の消費 (最終処分量) を評価対象とする。

図2にシステム境界を示す。ここでは、製品バスケット法の概念を利用して2ケースの比較評価を行う。ここでは、下水処理のフローと建設資材製造のフローの2つを用意し、下水汚泥をスラグ化して建設資材にリサイクルする場合とリサイクルしない場合のインベントリ分析を行い、その差分をリサイクル効果として評価する。スラグ化ありでは、生産したスラグは、図1に示す用途に全量リサイクルされるものと仮定する。また、スラグ化なしでは、下水汚泥を流動床炉で焼却処理し、焼却灰を最終処分すると仮定する。なお、処理施設の建設についても評価対象とするが、2ケースで共通である汚泥処理と返流水処理は対象外とする。また、施設解体における環境負荷は小さいと考え、評価の対象外とする。これはごみに関する事例ではあるが、田崎ら¹³⁾の研究事例では、焼却施設、破碎施設の解体費は建設費の約2～13%程度と小さかったためであり、故に環境負荷も小さいと勘案したためである。

2.3 インベントリ分析と影響評価

インベントリ分析に必要なデータは、A処理場に対してデータ提供を依頼し、頂いたデータ (2011年度稼働実績分) を使用する。提供頂いたデータは、施設建設費、下水処理量、スラグ生産量、ユーティリティ使用量、薬剤使用量である。表1に、主要なデータを示す。(1) スラグ化ありの場合は、下水処理・溶融に係るプロセスを汚泥処理、施設建設、返流水処理、溶融処理、その他設備に分割する。なお、汚泥処理には遠心濃縮及び遠心脱水が含まれる。また、返流水処理は、酸素循環変法により行われる。その他設備には、管理棟等が含まれる。(2) スラグ化なしの場合は、溶融処理が焼却処理に変更されるが、他のプロセスは (1) と同じである。

表2に、環境負荷算出に用いた主要な排出係数及び排出原単位を示す。下水処理・溶融、焼却、最終処分に係る各プロセスでの環境負荷は、各プロセスにおけるユーティリティ、薬剤使用量に、環境負荷排出係数及び排出原単位を乗じることで算出する。電力の場合は、関西電力¹⁴⁾の2011年度のCO₂排出係数を用いる。それ以外は、MiLCA¹⁵⁾に掲載されている数値を用いる。下水汚泥の焼却及び最終処分に伴う環境負荷原単位は、田畑ら^{10, 16)}において算出されたインベントリデータを用いる。アスファ

図2 システム境界

表1 A処理場のデータ

	下水汚泥 処理量	スラグ 生産量	ユーティリティ使用量			
			電力	コークス	都市ガス	工業用水
単位	[t-DS]	[t]	[10 ³ kWh]	[t]	[Nm ³]	[10 ³ m ³]
合計	20,500	4,980	31,200	1,100	3,200	460
汚泥処理	—	—	5,400	—	—	—
返流水処理	—	—	4,700	—	—	—
溶融 コークスベッド式 溶融炉	—	—	2,600	1,100	—	—
旋回溶融炉	—	—	12,000	—	3,200	460
その他設備	—	—	6,500	—	—	—

※2011年度実績

表2 インベントリ分析に用いた排出係数及び原単位

	単位		備考	出典
電力	[kg-CO ₂ /kWh]	0.45	使用（販売）電力量あたり	関西電力 ¹⁴⁾
コークス	[kg-CO ₂ /kg]	4.67	製造から燃焼を対象	MiLCA ¹⁵⁾
都市ガス	[kg-CO ₂ /Nm ³]	2.77	製造から燃焼を対象	MiLCA ¹⁵⁾
工業用水	[kg-CO ₂ /m ³]	0.13	製造を対象	MiLCA ¹⁵⁾
焼却	[kg-CO ₂ /kg]	0.16	流動床炉の建設、運用（燃料、電力等使用）の各プロセスにおける直接・間接環境負荷より算出	田畑ら ¹⁶⁾
最終処分	[kg-CO ₂ /kg]	0.067	最終処分場の建設、運用（燃料、薬剤等使用）の各プロセスにおける直接・間接環境負荷より算出	田畑ら ¹⁰⁾
アスファルト骨材	[kg-CO ₂ /kg]	61.1	製造までを対象	MiLCA ¹⁵⁾
コンクリート骨材	[kg-CO ₂ /kg]	18.3	製造までを対象	MiLCA ¹⁵⁾
エコレンガ骨材	[kg-CO ₂ /kg]	0.73	製造までを対象	MiLCA ¹⁵⁾

ルト骨材、コンクリート骨材、エコレンガ骨材の環境負荷原単位は、MiLCA¹⁵⁾に掲載されている数値を用いる。スラグの利用用途の割合は、図1に示した2010年度実績値の値を用いる。施設建設費について、ケース1の溶融施設は、施設への聞き取り調査等をもとに250億円と設定した。また、ケース2の焼却施設は、110t-DS/日規模の全連続型流動床炉を建設すると想定し、統計資料¹⁷⁾を用いて全国自治体における全連続型流動床炉の処理規模と建設費の実績値より回帰分析を行った結果として、42億円と設定した。建設に伴う環境負荷を下水汚泥1t-DSあたりの排出量に変換するため、ここでは、定額法により各施設の施設建設費の減価償却費を算出し、これを年間のごみ処理量で除した。これに、南斉ら¹⁸⁾が公表している3EIDに掲載されている「土木工事」、「土木・建築工事」、「整備補修」のCO₂排出原単位の平均値を乗じて算出した。溶融施設と焼却施設の耐用年数は、田畑ら¹⁶⁾より21.5年とした。

影響評価は、Distance-to-Target (DtT) 法を用いる。DtT法とは、影響領域ごとに目標値と現状値との比から重み付け係数を算出し、これを用いて統合評価を行う手法であり、次式により算出する¹⁹⁾。

$$I = \sum_i \left(Inv_i \times \frac{1}{NV_i} \times \frac{NV_i}{T_i} \right) \quad (1)$$

但し、 I : 単一指標、 Inv_i : 影響領域 i の排出量、 NV_i : 影響領域 i の現状値、 T_i : 影響領域 i の目標値、 i : 影響領域。

表3に、地球温暖化と最終処分場の消費に関する特性化係数、特性化係数の算出に用いる現状値と目標値を示す。ここでは、現状値は、地球温暖化の場合は2011年度、最終処分量の場合は2010年度とし、目標値を2030年度とした。地球温暖化と最終処分量で現状値を用いた年度が違うのは、本稿執筆時点において産業廃棄物の最新公表年度が2010年度であったためである。

CO₂排出量については、IPCC²¹⁾のSRES B2シナリオ（排出削減のための費用をかけることで削減可能な温室効果ガス排出量の最大値を採用した。なお、SRES B2シナリオは「地域共生型社会シナリオ」であり、他シナリオに比べて経済成長は低いものの、地域的な問題解決や世界の公平性が重視されるシナリオである。但し、本シナリオは2005年度を基準として設定したものである。2005年度と2011年度で温室効果ガス排出量は3%程度しか違わなかったため、2011年度時点においても目標削減率は同じ数値

表3 目標値に対する現状値の割合

目標値に対する現状値の割合 [-]			備考
地球温暖化	2.70	(現状値：1,240,684 [千t-CO ₂]、 目標値：459,053 [千t-CO ₂]、 目標削減率：63%)	現状値は、2011年度における日本のCO ₂ 排出量 ²⁰⁾ 。目標値は、IPCC ²¹⁾ の2030年時の世界経済の緩和ポテンシャルに対して、SRES B2シナリオと比較した削減率。
最終処分量	3.03	(現状値：19,097[千t]、 目標値：6,311[千t]、 目標削減率：67%)	現状値は、2010年度における日本の一般廃棄物及び産業廃棄物の最終処分量 ^{22, 23)} 。目標値は、神奈川県 ²⁴⁾ 、徳島市 ²⁵⁾ 、名古屋市 ²⁶⁾ の廃棄物処理計画における最終処分量削減目標（2020年度前後において2005年度比で80%削減）を踏まえ、2010年度から2030年度までの目標削減率を計算した。但し、2030年度における最終処分量削減目標は、2020年度前後と同じとした。

図3 インベントリ分析の結果

であると想定した。最終処分量については、最終処分場の逼迫が特に厳しいと思われる日本の幾つかの自治体が公表している2005年度を基準とした目標削減率を踏まえた。但し、最終処分量の場合は温室効果ガス排出量と異なり、2005年度と2010年度の間で最終処分量が約39%減少していたため、それを踏まえて2010年度から2030年度までの目標削減率を計算した。

しかしながら、これらの目標削減率は恣意的に選択している批判は避けられないため、感度解析を合わせて行い、CO₂排出量と最終処分量の目標削減率が変化した場合の結果の変化について分析した。

3. 結果と考察

3.1 インベントリ分析

図3にCO₂排出量の結果を示す。全体の結果として、CO₂排出量では、スラグ化ありは1t-DSあたり1,400kg-CO₂、スラグ化なしは500kg-CO₂で、スラグ化ありの方が排出量は多くなった。この原因は、スラグ化ありは、熔融処理での寄与率が72%と非常に大きいためである。熔融処理につ

いて特にみると、コークスベッド式熔融炉の排出量は1基あたり320kg-CO₂であり、旋回熔融炉は1基あたり320～370kg-CO₂である。下水汚泥の2割はコークスベッド式熔融炉で、残り8割は旋回熔融炉で処理されていることから勘案すると、コークスベッド式熔融炉からの排出量が如何に大きいかがわかる。その原因としては、コークスを燃料に使用していることが大きい。汚泥処理と返流水処理は合せて約16%の寄与度であるが、熔融処理に比べると圧倒的に小さい。スラグ化なしについては、焼却処理の寄与率は3%、汚泥処理と返流水処理は合せて約46%であった。

最終処分量の結果では、スラグ化ありは、1t-DSあたり243kgのスラグが生産される。スラグは全量リサイクルすると仮定しているため、最終処分量は1t-DSあたり0kgである。スラグ化なしの場合は、最終処分量は170kgとなった。

以上の結果として、下水汚泥のスラグ化は、最終処分量の削減には効果があるものの、CO₂の各排出量の削減には効果はみられなかった。

3.2 影響評価

前節の結果では、下水汚泥をスラグ化する方法は、最終処分量の削減については有利であるものの、CO₂排出量の観点から不利となった。これは、いわゆる最終処分場延命と地球温暖化のトレードオフが発生していることを意味する。そこで、トレードオフをふまえたスラグの生産を推進するための条件を明らかにするため、DtT法による影響評価を実施した。なお、ここでは、スラグを全量リサイクルした場合とスラグの有効利用率を加味した場合の2ケースに分け、機能単位あたりの影響評価結果を算出するとともに、年間処理量を乗じた場合の評価を行った。ここでいう有効利用率とは、リサイクルに回された割合を指し、ストックや最終処分された分を除外している。スラグの有効利用率は、2011年度のA処理場の実績値より68%とする。残り32%はすべて最終処分されるものとする。

図4に結果を示す。(a) 全量リサイクルした場合では、スラグ化ありの結果はスラグ化なしの結果に比べて約89%小さくなった。また、(b) 有効利用率を加味した場合も同様の結果であるが、両者の差は約45%となった。結果として、2ケースともに、スラグ化なしよりもスラグ化ありの方が、統合化結果が低くなった。これは、トレードオフの状況下においては地球温暖化よりも最終処分量の影響が大きくなることを意味しており、故にスラグ化ありの結果の優位性が高くなったといえる。このことは、統合化結果のうちの地球温暖化と最終処分場の消費の影響項目がそれぞれ占める割合を比べたときに、最終処分場の消費の寄与が圧倒的に大きいことからわかる。また、スラグ化ありの結果には2ケースで差があり、スラグの有効利用率が高いほど、その優位性はより高まるといえる。なお、詳細な結果は省略するが、全国平均の有効利用率（82%）で同様の計算をした場合、差は64%となった。

3.3 感度解析

3.3.1 有効利用率及び各目標削減率を変化させた場合

前節では、目標削減率を固定して評価を行った。しかし、最終処分場は、それを保有する自治体によって残余年数が異なり、それに対する余裕の度合いも異なる。そのため、下水汚泥のスラグ化が有利になるかどうかは、自治体の判断基準の違いにより変化することが予想される。CO₂排出量についても、同様のことが言える。また、目標削減率の数値は、いくら合理的なものを使用したとしても恣意的に設定したとの批判を免れることは難しい。そこで本節では、スラグの有効利用率及び最終処分量とCO₂排出量のそれぞれの目標削減率が変化した場合の感度解析を行う。

まず、有効利用率を0～100%まで20%刻みで変化させるとともに、最終処分量目標削減率を0～90%まで変化させた。図4と同様に、年間処理量でみた場合の結果を図5に示す。参考として、スラグ化なしの場合の結果も掲載した。結果として、有効利用率の大小に限らず、目標削減率が上昇するほどそれぞれの統合化結果も上昇し、目標削減率が50%を超えたあたりから急上昇することがわかる。有効利用率が60%までは、スラグ化ありの方がスラグ化なしよりも統合化結果が低く、優位性が高い結果となった。有効利用率が40%の場合はスラグ化なしと結果がほぼ拮抗しており、有効利用率が20%より小さい場合はスラグ化なしよりも統合化結果が高くなり、不利となることがわかった。これは、有効利用率が減少することで最終処分量が多くなることに加え、スラグ化なしよりもCO₂排出量の影響が大きくなるためであると考えられる。

次に、前項と同様の方法で、地球温暖化目標削減率を0～90%まで変化させた場合の感度解析を行った結果を、図6に示す。結果として、有効利用率が60%以上の場合は、目標削減率が上昇しても、スラグ化なしに比べてスラグ化

図4 影響評価の結果

図5 最終処分量目標削減率を変化させた場合の結果

図6 地球温暖化目標削減率を変化させた場合の結果

ありの方が統合化結果は低く、優位性が高いことには変わりはなかった。但し、有効利用率が40%の場合は、地球温暖化目標削減率が90%を超えた時点でスラグ化なしよりも不利になった。有効利用率が20%よりも小さい場合は、スラグ化なしよりも不利な結果となった。また、地球温暖化の影響項目は最終処分場の消費に比べて結果への寄与が低かったため、目標削減率が上昇しても図5のような結果の急上昇はみられなかった。

本ケースでは、有効利用されないスラグは全量最終処分するとしたが、実際は、それらの一部は在庫となるため、全量が最終処分されるわけではない。そのため、今回の結果は過大評価になっている可能性がある。しかし、在庫になったスラグは無駄に空間を専有するため、有効利用した方がいいことには変わりはない。スラグの有効利用率を上げることが、スラグ化の優位性をより高めるうえでも非常に重要であるといえる。

3.3.2 最終処分量と地球温暖化目標削減率を変化させた場合

続いて、最終処分量と地球温暖化目標削減率を変化させた場合についても感度解析を行った。ここではスラグの有効利用率68%を固定として、それぞれの目標削減率の幅を10～90%で相反させるように変化させた。具体的には、最終処分量目標削減率が90%のときに地球温暖化目標削減率は10%とした。以後、10%刻みでそれぞれを変化させ、最終的に最終処分量目標削減率が10%のときに地球温暖化目標削減率は90%になるようにした。このように設定した理由は、最終処分量とCO₂排出量のどちらの影響が大きいかをみるためである。また、それぞれの目標削減率が同調するように0～90%で増加する場合についても解析を行った。

まず、それぞれの目標削減率を相反させた場合の結果を図7(a)に示す。スラグ化ありの結果が最も小さくなるポイントは、最終処分量目標削減率が30%のときに地球温暖

図7 最終処分量と地球温暖化目標削減率を変化させた場合の結果

化目標削減率が70%の場合であった。すなわち、このポイントよりも左側は、最終処分場の消費の影響項目の寄与が大きく、右側は地球温暖化の影響項目の寄与が大きいことを意味している。スラグ化なしの結果が最も小さくなるポイントは、最終処分量目標削減率が20%のときに地球温暖化目標削減率が80%の場合であった。また、スラグ化ありの結果がスラグ化なしの結果を逆転するポイントは、最終処分量目標削減率が10%のときに地球温暖化目標削減率が90%の場合であり、最終処分場の逼迫が問題となっている自治体では、よほどのことがない限りスラグ化ありの優位性は高いといえる。

次に、それぞれの目標削減率を同調させた場合の結果を図7(b)に示す。この場合、いずれの目標削減率においても、スラグ化ありの方がスラグ化なしよりも有利となった。最終処分量とCO₂排出量が同じ目標削減率の場合、CO₂排出量の方が最終処分量よりも影響が小さいため、このような結果になったと考えられる。

なお、目標削減率の設定が恣意的であるとの批判を免れる方法として今回は感度解析によりさまざまな検討を行ったが、その課題を完全に解決したとは言い切れない。また、将来の目標は静的に設定されるため、早い段階に目標が達成された場合に動的に目標を変更することが可能かどうかの課題も存在する。動的な目標設定を踏まえたDfT法の拡張方法については、今後の検討が必要である。

4. おわりに

本研究では、下水汚泥より生産したスラグをリサイクルすることの環境的な効果を、スラグ化せずに最終処分した場合と比較することで明らかにした。また、最終処分場延命と地球温暖化のトレードオフをふまえたスラグの生産を推進するための条件を明らかにした。以下に、本研究で得られた知見を記す。

(1) CO₂排出量は、スラグ化ありの場合は1t-DSあたり

1,400kg-CO₂、スラグ化なしは500kg-CO₂で、スラグ化ありの方が排出量は多くなった。スラグ化ありのCO₂排出量が多くなった原因は、熔融処理での寄与率が約72%と非常に大きいためである。最終処分量は、スラグ化ありは1t-DSあたり0kg、スラグ化なしの場合は170kgであった。

- (2) DfT法による影響評価の結果、スラグを全量リサイクルする場合では、スラグ化ありが、スラグ化なしよりも約89%統合化結果が小さくなった。スラグの有効利用率(68%)を加味した場合は、その差が約45%であった。
- (3) スラグの有効利用率及び最終処分量目標削減率を変化させた場合の感度解析を行った結果、有効利用率が40%より大きい場合は、スラグ化ありはスラグ化なしよりも優位性が高かった。その一方で、有効利用率が20%以下の場合はスラグ化ありのほうに不利になった。地球温暖化目標削減率を変化させた場合も同様の結果であった。
- (4) 最終処分量と地球温暖化目標削減率をそれぞれ相反するように変化させた場合、スラグ化ありの結果がスラグ化なしの結果を逆転するポイントは、最終処分量目標削減率が10%のときに地球温暖化目標削減率が90%の場合であり、余程のことがない限りはスラグ化ありの優位性は高いといえる。また、それぞれの目標削減率を同調させるように増加させた場合、いずれの目標削減率においても、スラグ化ありの方がスラグ化なしよりも不利となった。

以上の結果として、最終処分場延命と地球温暖化のトレードオフの状況下において、スラグ化は非常に重要であることが示された。同時に、優位性をより高めるためには、スラグの有効利用率の向上が必要不可欠であることも示された。当然ながら、スラグには供給限界があり、2008年度以降、スラグの生産量は頭打ちになっている³⁾。そのた

め、全量をリサイクルすることは困難であることが予想されることから、如何にスラッグの販路を拡大できるかが鍵になると言える。

謝辞

本研究を実施するに当たり、X県A下水道処理場よりデータを提供頂いた。ここに記して、謝意を表します。

(平成25年3月13日受付、平成25年12月7日採択)

参考文献

- 1) クリーンジャパンセンター (2011): リサイクルデータブック2011, 17
- 2) 日本環境衛生センター (2007): 汚泥処理の悩みに答える, 東京, 212pp.
- 3) 一般社団法人 日本産業機械工業会, エコスラッグ利用普及委員会 (2012): エコスラッグ有効利用の現状とデータ集2011年度版, 東京, 221pp.
- 4) 環境省, 産業廃棄物処理施設の設置、産業廃棄物処理業の許認可に関する状況について, 環境省ホームページ, 入手先 <<http://www.env.go.jp/recycle/waste/kyoninka.html>>, (参照 2013-2-19)
- 5) Tabata, T., Hishinuma, T., Ihara, T., Genchi, Y. (2011): Waste Manag. Res., 29(4), 423-432
- 6) 榊原隆, 西村峻介, 小越真佐司, 荒谷祐介 (2010): 下水道協会誌, 47 (573), 62-66
- 7) 澤田哲平, 小松敏宏, 宮原高志 (2008): 下水道協会誌, 45 (554), 122-130
- 8) 宮原高志, 柏木秀仁 (2006): 下水道協会誌, 43 (526), 141-150
- 9) 間瀬弘幸 (2009): 舗装, 44 (7), 28-33
- 10) 田畑智博, 井原智彦, 中澤廣, 玄地裕 (2009): 日本LCA学会誌, 5 (1), 54-67
- 11) 胡浩, 小野田弘士, 永田勝也 (2011): 都市清掃, 64 (299), 83-89
- 12) 長田守弘, 真名子一隆, 平井康宏, 酒井伸一 (2012): 廃棄物資源循環学会論文誌, 23 (6), 264-278
- 13) 田崎智宏, 橋本征二, 森口祐一, 小林健一, 入佐孝一 (2008): 第29回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, 広島, 19-21
- 14) 関西電力 (2012): CSR Report 2012, 39-40
- 15) 一般社団法人 産業環境管理協会, MiLCA, 東京, 一般社団法人 産業環境管理協会, 2010-12-7
- 16) 田畑智博, 李一石, 菱沼竜男, 楊翠芬 (2011): 都市清掃, 64 (303), 509-519
- 17) 財団法人 廃棄物研究財団 (2008): 平成18年度版ごみ焼却施設台帳 (全連続燃焼方式編), 東京, CD-ROM
- 18) 南斉規介, 森口祐一, 東野達 (2013): 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID), 独立行政法人 国立環境研究所地球環境センターホームページ, 入手先 <<http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/>>, (参照 2013-8-1)
- 19) 伊坪徳宏, 田原聖隆, 成田暢彦 (2007): LCA概論, 一般社団法人 産業環境管理協会, 東京, 305pp.
- 20) 温室効果ガスインベントリオフィス, GIO 温室効果ガスインベントリ 日本国温室効果ガスインベントリ報告書NIRデータ, 温室効果ガスインベントリオフィスホームページ, 入手先 <<http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>>, (参照 2013-7-26)
- 21) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): Climate Change 2007 Mitigation of climate change, Cambridge, U.K., 851pp.
- 22) 環境省, 環境省廃棄物処理技術情報, 一般廃棄物処理実態調査結果, 環境省ホームページ, 入手先 <http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/>, (参照 2013-7-26)
- 23) 環境省, 産業廃棄物の排出及び処理状況等について, 環境省ホームページ, 入手先 <<http://www.env.go.jp/recycle/waste/sangyo.html>>, (参照 2013-7-26)
- 24) 神奈川県, 神奈川県廃棄物処理計画 (平成20年3月改訂), 神奈川県ホームページ, 入手先 <<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f7178/p26348.html>>, (参照 2013-7-26)
- 25) 徳島市, 徳島市一般廃棄物処理基本計画, 徳島市ホームページ, 入手先 <http://www.city.tokushima.tokushima.jp/siminkankyo_seisaku/pdf/siminkankyo_seisaku28.pdf>, (参照 2013-7-26)
- 26) 名古屋市, 名古屋市第4次一般廃棄物処理基本計画 (概要版) (市政情報), 名古屋市ホームページ, 入手先 <<http://www.city.nagoya.jp/kankyo/page/0000015513.html>>, (参照 2013-7-26)