

溶融スラグの品質及び品質管理手法

堤 克裕 根本久志¹⁾ 伊藤康子²⁾ 原 雄³⁾

(1 : 千葉県産業支援技術研究所 2 : 千葉県葛南県民センター 3 : エコシステム千葉(株))

1 はじめに

当センターは、溶融スラグを土木資材として利用するための、技術的問題を解決することを目的とした研究を行ってきた。

最初の段階では、溶融スラグの環境影響を知るための溶出基準及び試験方法の検討を行い、その結果を基に1996年3月に「千葉県溶融スラグ利用促進指針」が策定された。続いて、溶融スラグの骨材としての利用可能性の検討を行い、溶融スラグの土木資材としての有用性を示した¹⁾。

これらの結果を受け、千葉県では道路用アスファルト合材への溶融スラグ利用が進められた。これにより、製品として利用されるアスファルト合材の品質を確保することが必要となり、溶融スラグの品質が一定の範囲内であることを求められた。

そのため、次の段階として、溶融スラグを土木資材として利用するために、その性状を明らかにして資材としての品質を確保し、それを保証することが必要となった。

そこで、2002年度から2004年度にかけて、溶融スラグの品質把握に関する研究を行った。その結果を元に2003年度に品質管理手法を提案し、溶融スラグ生産市町村等会議において「千葉県版溶融スラグ品質管理手法」を定めた。

続いて2004年度から2007年度にかけて溶融スラグの品質変動に関する研究を行い、品質管理手法の妥当性を検討した。

また、2004年度には溶融施設の環境負荷を、2008年度から2009年度には製造される溶融スラグの品質向上に関する研究を実施した。

以上の溶融スラグの品質及び品質管理についての研究結果をとりまとめ、報告する。

2 溶融スラグの品質把握

溶融スラグの品質を保証するためには、標準の品質やばらつきをプラント毎に把握しておく必要がある。そのため、千葉県内の施設で製造される溶融スラグの品質を把握する研究を行った^{2) 3)}。

2・1 粒度分布と主成分

資材としての品質の一つである粒度分布に着目し、粒度分布調整方法を検討するための基礎資料を得ることを目的に、4施設で生産されるスラグ7試料について、JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」により粒度分析を実施した。

また、一部の試料について、蛍光X線分析装置により粒度毎の主成分分析も行った。

粒度分析の結果、生コンクリート用砕砂のJIS標準粒度と比較すると、標準粒度範囲内の分布を示すものもあったが、粗粒分が多く、標準粒度とは隔たりがあるものもあった(図1)。

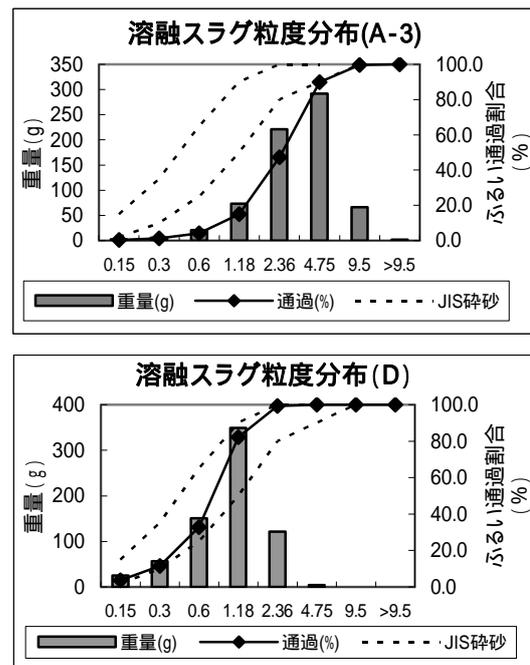


図1 溶融スラグ粒度分布

一部のスラグには針状のスラグが目立つものがあり、2.36mm～0.15mm の範囲に多く含まれ、特に1.18mm 以下の粒度範囲で顕著であった。

粒度毎の主成分分析を実施した結果、粒度による主成分組成の違いはほとんど見られないが、SiO₂、Al₂O₃ など、粒度の違いにより若干の差が生じる傾向が見られる成分もあった。

2・2 粒度分布と品質

4 施設で生産されるスラグについて、粒度分布、粒形割合、メタル・アルミ割合について調査を行った結果は次のとおり。

(1)磁選のみの後処理では、JIS のコンクリート用砕砂標準粒度内の粒度分布に適合しなかったが、磁選及び磨砕の後処理を行うことにより、JIS のコンクリート用砕砂標準粒度内の粒度分布となっていた。

(2)粒形はほとんどが角礫状であり、針状の存在率はわずかである。

(3)磁選後のスラグ中のメタルは全体で 1%以下であり、アルミはほとんど存在しない。

(4)粗粒分が多く粒度調整が必要なスラグと、4.75mm 以上の粒子を除く処理を行うことで、アスファルト骨材（スクリーニングス）としての利用に当たってほぼ問題のないスラグがあった。

2・3 溶融スラグの品質まとめ

施設による違いはあるが、適切な後処理を行うことにより、コンクリート用砕砂やアスファルト骨材として利用可能なスラグが製造されていることがわかった。

3 溶融スラグの品質変動

溶融原料や溶融炉の運転条件などの工程が変わらない限り、溶融スラグの品質はある程度の幅を持ちながら一定の性状を示すと考えられる。品質保証に重要な、この変動を把握するための検討を行った⁴⁾⁵⁾。

3・1 12時間連続サンプリング

溶融施設から生産される溶融スラグの品質変動を把握するために必要なサンプルサイズを決定するため、JIS の規格項目のうち粒度分布を対象として連続サンプリングを行った。

稼働中の溶融施設(A 施設)から生産される溶融スラグについて、30 分ごと 12 時間連続サンプリングを同一運転期間中に 2 回行い、試料の各粒度階の重量%についてデータ処理を行った結果、サンプルサイズ n=12.4233 を得た。

この結果により、溶融スラグの品質変動を把握するために必要なサンプルサイズは、1 ロット内で 13 試料以上であることがわかった。

3・2 一運転期間連続サンプリング

3・1 の結果に基づき、稼働中の溶融施設(A 施設及び B 施設)から生産される溶融スラグについて、一運転期間内での品質変動を把握するための調査を行った。

両溶融施設とも、一運転期間内では溶融原料や溶融炉の運転条件は大きく変わらないため、これを 1 ロットと考えることができる。一運転期間はおよそ 2～3 ヶ月と予定されているので、品質変動を把握するための 13 試料以上を採取するために、一運転期間中に 2 回/週の間隔でサンプリングを行い、最終的にそれぞれ 21 試料を採取した。

3・2・1 粒度分布

試料の各粒度階の重量%について平均と偏差を算出し、サンプルごとの偏差の平均(各粒度階の偏差の単純平均)により品質変動を確認した。

それぞれの炉で生産されるスラグは、後処理を行っていない状態で JIS A 5032 の溶融スラグ細骨材(FM-2.5)の粒度範囲にほぼ収まっており、磨砕などの後処理により JIS 品質を満足できるものであった。また、B 施設のスラグは A 施設のスラグと比較して細粒分が多い傾向が見られた。

一運転期間中の粒度分布の品質変動は、12 時間の変動より若干ばらつきが大きかったが、平均から大きく外れた点や、周期的変動などは見られず、十分管理された品質であった(図 2)。

3・2・2 化学成分

3・2・1 で分級した 0.60mm～1.18mm サイズのスラグをメノウ乳鉢で粉碎して蛍光 X 線分析により化学成分分析を行い、主要 4 元素(Ca, Si, Al, Fe)の重量%について変動を確認した。

主要元素の重量%の成分比は一運転期間を通じて

ほぼ一定していたが、B施設ではA施設より若干変動が大きくなっていった(図3,4)。A施設では焼却灰を投入するので、原料がある程度均質化されているため変動が小さくなっているが、B施設はごみを直接炉に投入するので、原料の変動が影響し、化学成分の変動が大きめになると考えられた。原因の一つとして、事業系廃棄物(紙類主体)の投入量が多い場合にCaの割合が高くなることが考えられた。

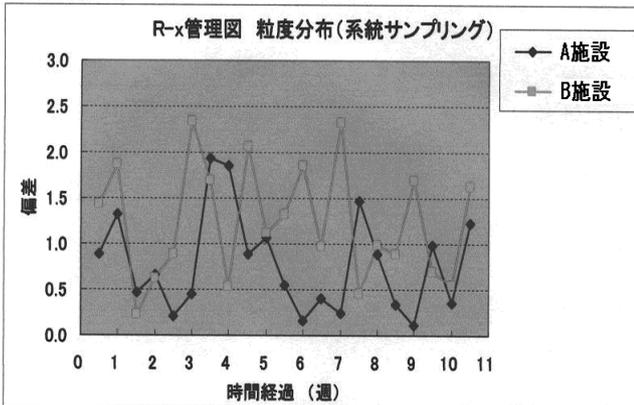


図2 粒度分布の変動

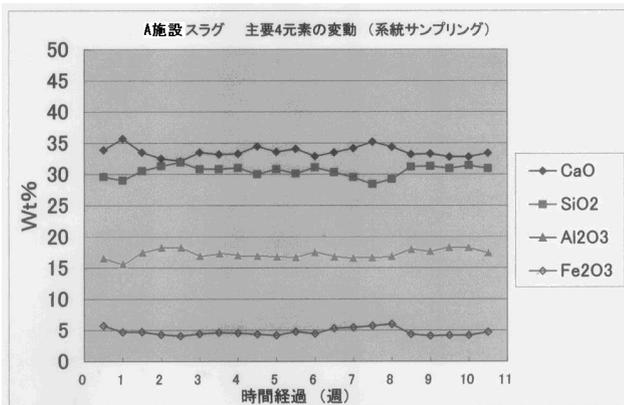


図3 化学組成の変動(A施設)

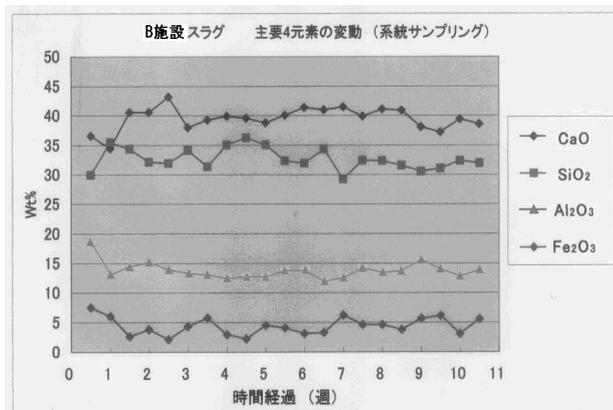


図4 化学組成の変動(B施設)

3.3 溶融スラグの品質変動まとめ

以上の結果から、溶融原料や溶融炉の運転条件な

どの工程が変わらない限り、溶融スラグの品質はある程度の幅を持ちながら一定の性状を示すことが確認された。

4 溶融スラグの品質管理方法

品質把握及び品質変動に関する研究結果を基に、製造施設における品質管理手法を検討し、「千葉県版溶融スラグ品質管理方法」を定めた⁶⁾。2004年度から、県内の溶融スラグ製造者に対してこの品質管理方法によるスラグの品質管理を求め、スラグの品質確保に努めた。

品質管理方法は、品質検査の前提となるスラグの利用方法、検査項目及び方法、検査対象及び検査頻度、サンプリング方法及び結果の報告について作成した。その内容及び考え方を以下に示す。

4.1 品質検査の前提

千葉県内の施設はすべて水砕スラグを製造していることから、水砕スラグの主要な用途である、アスファルト及びコンクリート用細骨材として利用する場合を想定した。

4.2 検査項目及び方法

品質管理の前提となるJIS(検討時TR)において、細骨材(MS-5及びFM-2.5)に求められている物理・化学性状の試験、及び溶融スラグの安全性の指針として示されている項目の溶出試験を定めた。

4.3 検査対象及び検査頻度

実際に製品として利用する場合を想定しているため、検査対象は出荷状態の溶融スラグとした。

検査頻度は、現在の施設の運転状況とスラグの性状調査の結果などから3ヶ月に一度とした。

4.4 サンプリング方法

試料の性状にばらつきがある可能性を考慮し、JIS K 0060に基づく系統サンプリングを実施することとした。

なお、各施設の構造に違いがあるため、スラグストックからのストックパイルサンプリングまたはスラグコンベヤからのコンベヤサンプリングを例示し、実施可能な方法を選択できるようにした。

4.5 結果の報告

各施設の状況を把握し、利用量拡大のための方策

を検討する際の基礎資料にするため、資源循環推進課への結果の報告を定めた。

5 溶融原料中の重金属類

溶融スラグの安全性に関して、スラグ中に含有する重金属類は微量であり、適正に生産された場合にはほとんど溶出しないとの結論を得た。しかし、ごくわずかではあるが、含有量及び溶出量が JIS の基準を超過する事例が見られた。これは、溶融原料中の重金属が溶融過程で十分に揮散していない可能性も考えられ、解決方法として原料からの重金属除去又は溶融炉運転条件の最適化などが考えられた。

このような基準超過事例をなくすために、製造された溶融スラグについてのデータ収集の外に、溶融スラグの原料となる一般廃棄物に着目し、可燃物として焼却される廃棄物中の重金属類含有の実態を調査した⁷⁾⁸⁾。

家庭から廃棄物として排出される紙、布類 29 試料及びプラスチック類 136 試料について、蛍光 X 線分析装置により化学成分の分析を行った。

それぞれの検体ごとに、色などの目視で異なる部分ごとに分析を行った結果、JIS で基準が定められた重金属類（以下有害重金属類）では、紙・布類 1 試料及びプラスチック類 4 試料で Pb を、プラスチック類 1 試料で As を検出した。

紙、布類及びプラスチック類に含まれる有害重金属類は、主に着色や品質向上のために添加される物質に含まれるものであり、紙の繊維やプラスチックそのものに比較して微量であるため、蛍光 X 線分析装置で検出可能な濃度の含有がない可能性が考えられる。そのため、可燃ごみを焼却した場合に、紙の繊維やプラスチックそのものが燃焼、ガス化して揮散し、相対的に有害重金属類が濃縮され、蛍光 X 線分析装置で検出可能な濃度に達する可能性が考えられる。

金属の含有が多い試料には添加物の量が多いと考え、上記の分析で有害重金属類の含有が認められず、かつ金属の含有が多かった可燃ごみを電気炉内で 600℃、2 時間かけて灰化し、蛍光 X 線分析装置により成分分析を行った結果、有害重金属類の含有は

認められなかった。

これらのことから、焼却灰中に含有されるメタルの主成分である Fe 及び Cu のほか、Ti 及び Zn の多くは可燃ごみ由来であるが、有害重金属類の主な由来は可燃ごみ以外であると推定できる。

実プラントの運転管理担当者への聞き取り調査によると、経験的に破碎残渣焼却の有無と焼却灰中の重金属類含有の有無に関連性が指摘されており、可燃ごみと同時に焼却される破碎残渣中の重金属類の影響が大きいとされている。今回の結果は、これまで経験的に言われてきたことの一端が確認されたといえる。

6 溶融施設の運転管理調査

溶融処理の環境負荷を検討するため、溶融施設の運転管理及び溶融飛灰処理方法について調査を行った³⁾。

6・1 溶融施設のエネルギー使用量

表面溶融式灰溶融及びコークスベッド式直接溶融の各 1 施設について、スラグ 1t 生産当たりの使用エネルギー量を、CO₂ 排出量に換算して評価を行った結果は次のとおり（表 1、2）。

(1) 灰溶融施設では、消費エネルギーによる負荷は焼却と溶融でほぼ同等。

(2) コークスベッド式直接溶融施設では、消費エネルギーによる負荷が灰溶融に比べて 30% 程度大きい。

(3) ゴミ発電を利用することにより、電気消費による負荷を 9 割程度削減可能。

溶融処理に要するエネルギー消費による環境負荷は大きいといえるが、最終処分量削減効果や天然資源利用量削減効果など環境面にプラスの効果もあるため、施設ごとの立地条件や運転状況などにより環境負荷は異なると考えられる。

表 1 灰溶融施設のエネルギー使用量

| | 焼却 | 溶融 | 合計 |
|------------------------|-------|-------|--------|
| 電気(kwh/t) | 2,376 | 255 | 2,631 |
| 灯油(l/t) | 23 | 359 | 382 |
| CO ₂ (kg/t) | 955.1 | 991.5 | 1946.6 |

表2 直接溶融施設のエネルギー使用量

| | ごみ発電有無 | |
|--------------------------|--------|--------|
| | 有 | 無 |
| 電気(kwh/t) | 300 | 2,625 |
| コークス(kg/t) | 462 | 462 |
| 都市ガス(Nm ³ /t) | 33 | 33 |
| CO ₂ (kg/t) | 1685.1 | 2564.1 |

6・2 溶融飛灰処理方法

県内6溶融施設に対し、溶融スラグ生産量、溶融飛灰発生量、排ガス処理方法及び溶融飛灰処理方法について聞き取り調査を行った結果は以下のとおり。

- (1)直接溶融ではスラグに対し重量比3割程度の溶融飛灰が生成する。
- (2)灰溶融では被溶融物や噴霧薬剤の違いにより溶融飛灰生成量が大きく異なる。
- (3)処理は発生量の約5割がエコセメント、残りが安定化処理後埋立。

調査実施時点での溶融飛灰の処理方法は、資源化技術及びコストの観点から適当と考えられた。

7 まとめ

溶融スラグを土木資材として利用するための、品質保証方法について研究を行った。千葉県での利用実態から、道路用アスファルト合材への溶融スラグ利用を想定し、主に粒度分布とその変動に着目して研究を行った。

溶融スラグの粒度分布調査の結果、粗粒分が多い場合は粒度調整を行って4.75mm以上のスラグを除くことや、磁選を行ってメタルを除くことで、アスファルト骨材(スクリーニングス)としての利用に当たってほぼ問題のないスラグが生産可能であることがわかった。

また、品質変動調査の結果、溶融原料や溶融炉の運転条件などの工程が変わらない限り、溶融スラグの品質はある程度の幅を持ちながら一定の性状を示すことが確認された。

これらの結果を基に、千葉県版溶融スラグ品質管理方法を定めることにより、県内溶融施設の生産するスラグの品質確保を図った。

溶融スラグの品質向上の観点から、重金属類の由来について検討した結果、溶融原料となる焼却灰中に含有されるメタルの主成分であるFe及びCuの多くは可燃ごみ由来であるが、有害重金属類の主な由来は可燃ごみ以外であることが推定された。経験的に言われてきた、破碎残渣焼却の有無と焼却灰中の重金属類含有の有無の関連性を考慮すると、可燃ごみと同時に焼却される破碎残渣の除去等の対策を行うことにより、スラグ中に含有される重金属類及びメタルの生成量を低減させられる可能性が示唆された。

溶融処理はエネルギー消費によるマイナス面はあるものの、最終処分量削減効果や天然資源利用量削減効果などのプラス面があり、施設ごとの立地条件や運転状況などにより環境負荷は異なると考えられた。

「千葉県溶融スラグ利用促進指針」を策定して以降、千葉県版品質管理方法による生産者の自主的品質管理を進めただけでなく、県の道路工事への利用義務づけや、単価設定などを実現したこと、また、道路用及び生コンクリート用のJISが制定されたことなどから、溶融スラグの利用はかなり進み、初期に見られたような大きな問題はなくなってきた。

また、近年の燃料費高騰などの影響で、スラグの製造を中止する製造者もいることから、溶融スラグに関する研究は一定の役割を終えたと考えられる。そのため、溶融スラグに関する研究は本調査研究において一旦終了し、今後新たに問題が発生した際に改めて研究課題を設定して対応する。

引用文献

- 1) 原雄, 根本久美子, 北橋伸一, 堤克裕, 依田彦太郎: 溶融スラグの資源化への道のり, 千葉県廃棄物情報技術センター年報, vol.7, 57~71(2000)
- 2) 堤克裕, 根本久志, 伊藤康子, 原雄: 溶融スラグ品質管理手法の検討(1. 粒度分析), 千葉県環境研究センター年報, vol.2, 133~135(2002)
- 3) 堤克裕, 伊藤康子, 原雄: 溶融スラグの品質管理方法及び溶融施設の運転管理方法, 千葉県環境研究センター年報, vol.4, 176~179(2004)

4) 堤克裕, 原雄: 溶融スラグの品質保証に関する研究(1), 千葉県環境研究センター年報, vol.5, 88~89(2005)

5) 堤克裕: 溶融スラグの品質保証に関する研究(2), 千葉県環境研究センター年報, vol.6, 98~99(2006)

6) 堤克裕, 根本久志, 伊藤康子, 原雄: 溶融スラグ品質管理手法の検討, 千葉県環境研究センター年報, vol.3, 86~87(2003)

7) 堤克裕: 一般廃棄物中に含有される重金属類に関する研究, 千葉県環境研究センター年報, vol.7, 90(2007)

8) 堤克裕: 一般廃棄物中に含有される重金属類に関する研究, 千葉県環境研究センター年報, vol.8, 89~90(2008)

9) 日本規格協会: 一般廃棄物, 下水汚泥またはそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材 JIS A 5031(2006)

10) 日本規格協会: 一般廃棄物, 下水汚泥またはそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ JIS A 5032(2006)

Quality and quality control method for slag

Katsuhiro TSUTSUMI, Hisashi NEMOTO, Yasuko ITO, Yu HARA

溶融スラグを土木資材として利用するための, 品質管理手法について研究を行った。粒度分布に着目して溶融スラグの品質把握及びその変動調査を行い, それらの結果を元に品質管理方法を提案した。また, スラグ中に含有される重金属類の由来を推定するため, 一般廃棄物中重金属類の実態を調査した。溶融スラグ利用に当たった問題点をクリアしていったことで土木資材としての利用が進み, 有効利用率の向上に寄与した。

キーワード: 溶融スラグ, 品質管理, 品質変動, 粒度分布, 重金属類