

溶融スラグの多角的有効活用について*

菅原 龍江**

発生量が増えている溶融スラグを多角的に有効活用することを目的に、他県先進地における活用事例等を調査し有効活用の可能性について検討を行った。その結果、藻場造成礁への応用あるいは重量を生かした用途が有望であることが分かった。

キーワード：溶融スラグ、有効活用、活用事例

Many-Sided Effective Use of Molten Slag

SUGAWARA Ryukou

For the purpose of many-sided effective use of molten slag whose amount of generating was increasing, the practical use example in another prefecture as an advanced ground was investigated, and possibility of effective use was examined. As a result, it turned out that the application to a rock for alga place or the use which employed weight efficiently was promising.

key words : molten slag, effective use, practical use example

1 結 言

岩手県内では、廃棄物処理施設として溶融炉の導入が進んでおり、自治体による一般廃棄物処理施設や民間企業による産業廃棄物処理施設が多数稼働している。それに伴って発生する溶融スラグが増加してきており、これらの新規用途の開発・製品化等、その有効活用が求められている。

岩手県工業技術センターでは、産業廃棄物再資源化技術開発事業（H15～H16、H17～H18）を進めており、岩手・青森県境不法投棄物の試験溶融スラグを建設材料へ利用する実証試験を行い、溶融スラグの特性や問題点を明らかにしてきている。^{1,2)}

そこで、今回これらの知見を基にし、溶融スラグを多角的に有効活用するため、各種溶融炉等から発生する溶融スラグ等について他県先進地における活用事例等を広く調査し、それがどのようにして製品化されているか、また活用に当たっての問題点をどのように克服しているか等の調査を行った。

そして、出口を見据えた有効活用の可能性を検討し、克服すべき課題を明らかにして、溶融スラグの新しい用途や研究開発の展開方向等について検討を行ったので、その内容について報告する。

2 調査研究方法

2-1 調査対象施設等の選定

溶融スラグ関係の文献調査やインターネット検索調査を行って情報収集を行い、今回の調査研究の趣旨に合致する施設等を調査候補とし、各施設等に対して調査受入の諾否について確認した結果、受入可能と回答があった

施設等を調査対象として選定した。

2-2 調査の実施

各調査対象施設等については、ホームページ等により事前調査を行った上、予め調査事項を連絡して資料等を用意しておいて頂いた。そして、現地調査時（一部施設は聞き取りや資料等による調査のみ）は各調査事項について施設の担当者から説明を受け、質疑応答を行った後、必要に応じて施設見学を行った。

2-3 調査結果の取りまとめ

各調査施設等におけるスラグ活用の仕組みや用途について調査結果の取りまとめを行い、溶融スラグ活用のための用途別考察を加えて、各々の用途の活用可能性について検討を加えた。

2-4 外部有識者への技術相談

調査結果に基づく用途別考察・可能性検討資料を持参して立場の異なる外部有識者2名（仙台市内のA氏及び東京都内のB氏）へ別々に技術相談に伺い、溶融スラグ活用の可能性について助言を頂いた。

2-5 今後の研究開発の展開方向

調査結果や外部有識者との技術相談結果を踏まえて、今後の研究開発の展開方向を検討することとした。

3 結果および考察

3-1 調査対象施設等

調査対象として岩手県外9カ所、岩手県内4カ所を選定し調査を行った（表1）。なお、調査施設名等の一部を除いて伏せることとした。

* 試験研究機能強化推進事業

** 環境技術部

表1 調査対象施設等

名 称	種類	調 査 内 容 等
香 川 県	環境森林部 廃棄物対策課	行政 豊島スラグを利用するための仕 組み・各種制度
	環境セン ター	直島 施設 施設運転状況、スラグ検査方法、 スラグ用途
		豊島 現場 不法投棄現場の状況
岩 手 県 外	A製鉄所 研究部門	研究 スラグ研究の概要、A製鉄所ス ラグの用途
	B溶融炉	施設 産廃溶融炉。稼働状況、スラグ の流れ・用途
	C溶融炉	施設 一廃溶融炉。稼働状況、スラグ の流れ・用途
	Dセメント 工場	施設 廃棄物のセメント化の状況
	E大学	研究 産廃溶融スラグ活用研究の状況
	F溶融炉	施設 産廃溶融炉。稼働状況、スラグ の流れ・用途
岩 手 県 内	G溶融炉	施設 稼働状況、スラグの流れ・用途
	H溶融炉	施設 稼働状況、スラグの流れ・用途
	I溶融炉	施設 稼働状況、スラグの流れ・用途
	J溶融炉	施設 稼働状況、スラグの流れ・用途

3-2 調査施設における溶融スラグ活用の仕組み

調査を行った溶融炉を保有する岩手県外4施設および岩手県内4施設について、溶融スラグを活用する仕組みを表2に示す。

調査施設における溶融スラグの利用の仕組みは、各施設ともできていた。

表2 調査施設における溶融スラグ活用の仕組み

	施設名	活 用 の 仕 組 み
岩 手 県 外	香川県 直島環境 センター	香川県独自に「溶融スラグ有効利用マニ ュアル」を策定。スラグの安全性と品質 の検査を実施し、合格品のみ出荷。県工 事の仕様書に豊島スラグ使用を明記。業 者はスラグ使用製品を申請し、合格後県 工事に使用可。
	B溶融炉	関連会社が全量を引き取り、そこから実 際に活用する各業者へ販売。
	C溶融炉	当該県内の3業者に販売。
	F溶融炉	当該県内のコンクリート製品製造会社 等に販売。
岩 手 県 内	G溶融炉	岩手県内のコンクリート二次製品会社 5社と契約を結んで販売。
	H溶融炉	同一市町村内にあるコンクリート製品 の組合と契約して全量を販売。
	I溶融炉	岩手県内企業数社と年契約を結んで販 売。
	J溶融炉	近在の2社に販売。

3-3 調査施設における溶融スラグの用途

調査を行った溶融炉を保有する岩手県外4施設および岩手県内4施設について、溶融スラグを活用する仕組みを表3に示す。

なお、各施設とも、現時点では発生する溶融スラグは基本的に全量再利用されている（原則として処分場に埋め立てられる溶融スラグはない）という説明であり、現在の用途では再利用する上での問題点等は特にないとのことであった。

しかし、全量再利用を証明する根拠データは、特に民間施設では提供されることはなかったため、全量再利用をデータとして確認することはできなかった。

また、香川県以外では溶融スラグの新規用途への具体的動きはなかった。

表3 調査施設における溶融スラグの用途

	施設名	用途 コンク リート 骨材	アスフ ルト 混合物 骨材	インタ ーロッ キング ブロッ ク	路盤材	埋戻し 材
岩 手 県 外	香川県 直島環境 センター	○	検討中	○		
	B溶融炉			○	○	
	C溶融炉	○			○	
	F溶融炉	○	○			
岩 手 県 内	G溶融炉	○	○			○
	H溶融炉			○		
	I溶融炉	○		○	○	
	J溶融炉		○			

3-4 スラグ活用事例と用途別考察

3-4-1 コンクリート骨材

溶融スラグは、コンクリート二次製品等の天然骨材代替品として各地で活用されている。しかし、利用されている溶融スラグの多くは一般廃棄物由来であり、産業廃棄物由来のスラグは公共工事にはあまり利用されず民間工事での利用が中心という状況になっている。

なお、香川県では、豊島産廃由来の溶融スラグの利用促進のため、県発注工事の仕様書の中でスラグ利用を義務付ける取り組みがされており、成果を上げている。溶融スラグ活用のためには、このような制度面での仕組み作りも重要であると考えられる。

3-4-2 アスファルト混合物骨材

これも天然骨材代替品として、各地で溶融スラグが活用されている。しかし、利用されている溶融スラグは一般廃棄物由来が多く、産業廃棄物由来は少ない。

なお、香川県では豊島産廃由来の溶融スラグの利用促進のため、コンクリート骨材の実績を踏まえ、溶融スラグの安全性確認を十分に行った上、アスファルト混合物骨材としての利用を検討している。

3-4-3 路盤材・埋戻し材

これも天然骨材代替品として、各地で溶融スラグが活

用されているが、香川県では豊島産廃の溶融スラグは路盤材への利用はされていない。これは、スラグが有姿の状態で使用されると、万一スラグから有害成分が出た場合の影響が大きいためと考えられる。これらへの利用が検討されるのはアスファルトで実績を上げた後になると思われる。

3-4-4 環境調和型ブロック

A製鉄所では、高炉スラグ微粉末を結合材とし、石炭火力発電所の副産物であるフライアッシュを混和材として用いた環境調和型ブロックを開発。消波ブロックやケーソンなどの港湾土木材料として使われている。

このブロックは、生物付着性に優れるとしているが、その理由は高炉スラグ中に生物育成に必要なFe、Siなどを含むこと、フライアッシュの主成分がSiO₂で低アルカリ性であることから、コンクリートより生物の生育環境として好適である、としている。³⁾

一方、溶融スラグにもFe、Siなどは含まれている。また、石炭火力発電所のフライアッシュは、岩手県内には少ないが、主成分のSiO₂を多く含むものであれば、他で代替可能と考えられ、岩手県でも有望と思われる。

3-4-5 海底への覆砂材

A製鉄所では、高炉水砕スラグを覆砂材として底泥の堆積した海底に設置しているが、硫化水素の発生を抑制し、天然砂以上に青潮抑制効果がある、としている。また、このスラグから海水中へケイ酸塩が供給されることから、赤潮の予防や抑制の可能性もある。³⁾

岩手県内では、底泥の堆積した海底に天然砂の覆砂材設置は、大船渡湾などで検討されている。

しかし、水砕スラグを海底に敷き詰める方式は、廃棄物由来の溶融スラグが長期間直接海水にさらされることになり、長期データがない現時点で将来とも影響が出ないと断定するのは難しい。万一、問題が発生した場合にスラグを全量回収するのはほぼ不可能であることから、今すぐ覆砂材に応用するのは不安があると思われる。

3-4-6 藻場造成礁

A製鉄所では、製鋼スラグの成型体にCO₂を吹き込んで製造される藻場造成礁を全国の海域で設置し、コンクリートブロックとの比較試験を行っているが、どの海域でもコンクリートブロックを上回る藻の着生効果が認められている。表面にある炭酸カルシウムや炭酸マグネシウム皮膜の生物親和性が高いため、としている。³⁾

魚礁を設置する場合、藻場が形成されるかどうかが非常に重要となる。溶融スラグの場合でも同様の作り方をすれば、表面に炭酸マグネシウム皮膜が形成されると思われる、通常のコンクリートブロックより早く藻場が形成される可能性は高く、岩手県沿岸部でも有望と言える。

3-4-7 ヒートアイランド抑止舗装用保水材

A製鉄所では、高炉スラグ微粉末に副原料を組み合わせて製造した硬化体を、排水性アスファルト舗装などの空隙に部分注入し、ヒートアイランド抑止舗装用保水材

とする試験施工を行ったところ、夏場に通常の舗装部に比べ路面温度が10度以上低いことが確認され、高い保水性能が立証されている。³⁾

高炉スラグの代わりに溶融スラグを使っても実用化は可能かと思われる。しかし、岩手県は寒冷地で人口集中地区も少ないので、ヒートアイランドが問題になることはあまりなく、地域ニーズは低いと思われる。

3-4-8 ロックファイバー

社団法人日本建材産業協会が、焼却灰溶融スラグを用いてロックファイバー（ロックウール）を試作した際の報告書⁴⁾によると、小規模電気炉で焼却灰溶融スラグのロックファイバーを試作できたが、一部原料で熱間収縮温度がJIS規格を外れ、耐熱性に問題があったほか、試作工程においていくつかの問題点が発生した。これらの問題点を改善できれば、ロックファイバーの通常原料へ溶融スラグを混合使用することは可能とし、混合率としては30%以下なら適当と思われる、としている。

したがって、実用化する場合は、ロックファイバーの製造工場において原料の一部に溶融スラグを使用する、というのが活用の形態になるが、岩手県ではロックファイバー製造工場がなく、通常原料となる高炉スラグ等も入手しにくい、岩手県ではロックファイバーへの活用は困難と思われる。

3-4-9 れんが

社団法人日本建材産業協会が、焼却灰溶融スラグを用いてれんがを試作した際の報告書⁴⁾によると、スラグ添加によるメリットとしては、①乾燥速度の向上が期待できる、②成型時寸法より大きな製品ができる、③焼成温度の低下により省エネルギーが期待できる、④低温焼成では炉の傷みが少なく耐用年数が延びる、等があった。

一方、デメリットとしては、①粘土とスラグを均一混合・混練させるための工程が増える、②成型機内部の摩擦が早くなる、③金型寸法の変更が必要、④素地が膨張するため製品寸法の管理が難しくなる、等であった。

れんが工場は岩手県内にもあり、活用の可能性はあるが、スラグの混合・混練のための工程が新たに必要になることや、素地膨張による寸法管理の難しさ等のため、岩手県内の小規模な事業所でこれらに対応してメリットを出すのはかなりの困難が予想される。

3-4-10 サンドマット及びサンドドレーン

東京都では、海面埋立処分場内に焼却灰溶融スラグを使ったサンドマットを設置して盛土荷重を与えると共に、サンドドレーン（砂状のくい）を設け、そのドレーンを通じて処分場内の間隙水を抜き取り、沈下を促進することによって埋立容量を増加（処分場延命化）させる地盤改良工事を行っている。⁵⁾

岩手県内の処分場でも市町村によっては埋立容量が逼迫しつつあるところもあるが、昨今の市町村の財政事情は埋立容量を増やすために多額の地盤改良工事費を支出できる状況にはない。また、溶融炉を設置している市町

村では、処分場に埋め立てられる廃棄物そのものが少ないことから、処分場が逼迫している状況にはない。今後とも岩手県内で熔融炉が普及していけば、ニーズは低いと考えられる。

3-5 外部有識者への技術相談

上記のスラグ活用事例及び用途別考察を踏まえ、スラグ実用化について多くの実証試験等の経験豊富な大手企業の技師長、及び環境システムの設計施工に通じ現場に明るい大学研究員に、今後の活用展開について技術相談を行い、下記の助言を得た。

3-5-1 A氏の助言

- ・産廃熔融スラグは未解明の部分が多いので、閉じこめられる状態で使う用途を検討してみてもどうか。
- ・スラグは天然骨材より密度が高いので、重量を生かした用途(カウインターウエイトや防潮堤のかさ上げ材)などがないのではないかな。

3-5-2 B氏の助言

- ・スラグ利用における重要なポイントは、そのスラグのクリーン度である。岩手県としてスラグ利用を進めるのであれば、岩手県の地域としての特性を踏まえた基準を設けることが大事になる。
- ・使う立場で地域に密着した用途開発をすべきである。岩手県内でどのようなニーズがあるのか、具体的な地域ニーズを把握するための調査を行う必要がある。

3-6 今後の研究開発の展開方向

今回の調査及び考察等の結果を踏まえ、熔融スラグの多角的有効活用のための今後の研究開発の展開方向としては、「藻場造成礁への応用」及び「重量を生かした用途」を中心に進めることとする。

3-6-1 藻場造成礁への応用

A製鉄所では製鋼スラグ成型体にCO₂を吹き込んで藻場造成礁を製造し、藻の着生効果が高いことが判明している。そこで、熔融スラグで、スラグ成型体にCO₂を吹き込むか、炭酸カルシウムや炭酸マグネシウムを添加して熔融し、藻の着生効果の高い藻場造成礁の開発を目指すこととする。

なお、岩手県工業技術センターではNP0法人いわて銀河系環境ネットワークと共に炭化ボードを使った藻場造成礁の実証化試験を陸前高田市の広田湾で実施しており、これを連動させることにより、効果的な研究開発を進めることを検討する。

3-6-2 重量を生かした用途

熔融スラグは天然の石や砂に比べて一般的に密度が大きいという特徴を生かし、重量ブロックや波消しブロックの骨材、あるいはケーソンや鋼板セル堰堤の中詰材としての利用に向けて研究開発を進める。ブロックの骨材

利用には「県境不法投棄熔融スラグの骨材利用」の研究成果が生かせる。

中詰材への利用については、外界と熔融スラグとが直接には触れないため、スラグの影響が外に出る恐れは少ないというメリットがある。この場合、密度の高い中詰材の製造法確立が研究開発の課題になると思われる。

4 結 言

今回の調査研究の結果、以下の結果が得られた。

- (1) 香川県では豊島不法投棄物熔融スラグを県工事に利用するために、県独自の制度を設け、熔融スラグを円滑に利用の仕組みを確立している。
- (2) 香川県以外の調査施設における熔融スラグの利用の仕組みもほぼできているが、用途については香川県の場合も含め、コンクリート骨材、アスファルト混合物骨材、インターロッキングブロック、路盤材、埋戻し材に限られている。
- (3) 熔融スラグの他分野への活用は、実験段階では様々な取り組みがされているが、実用化されている事例はなかった。
- (4) 製鉄所から排出されるスラグについては、覆砂材や藻場造成礁など様々な用途に活用されている。

以上の結果および外部有識者の助言を踏まえ、熔融スラグの多角的有効活用のための今後の研究開発の展開方向としては、「藻場造成礁への応用」及び「重量を生かした用途」を中心に進めることとし、具体的な内容については県内ニーズ調査を行った上で検討することとした。

なお、本研究の実施にあたり、調査にご協力頂いた香川県環境森林部廃棄物対策課の中村俊之副主幹をはじめ、各調査施設等の関係各位、またご助言を頂いた外部有識者の方々に感謝いたします。

文 献

- 1) 佐々木秀幸、平野高広、藤原智徳、藤原忠司、小山田哲也、安部隆司、中南真理子：岩手・青森県境不法投棄物の焼却及び熔融特性、廃棄物学会論文誌 Vol. 16 No. 6, 492-500 (2005)
- 2) 菅原龍江、平野高広、佐々木秀幸、藤原忠司、小山田哲也：岩手・青森県境不法投棄物の分析と熔融処理、第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 639-641 (2005)
- 3) 薮田和哉、戸澤宏一、高橋達人：循環型社会に貢献する鉄鋼スラグの利用技術、JFE 技報 No. 6, 24-29 (2004)
- 4) 社団法人日本建材産業協会：焼却灰熔融スラグの有効活用、循環型製品・システム市場化開発調査事業報告書, G1-G44 (1997)
- 5) 佐藤直樹：新海面処分場地盤改良工事における焼却灰熔融スラグの利用、エコスラグ 2005 コンファレンス, 43-54 (2005)