

鑄造工場から排出される廃砂の有効利用に関する調査

村川悟*, 柴田周治*, 西尾憲行*

Survey Report on Beneficial Use of the Foundry Sand Waste

by Satoru MURAKAWA, Syuji SHIBATA and Noriyuki NISHIO

Many waste discharged from the foundry have been disposed in landfill. In the foundry waste, there are most much discharge of waste sand. For the purpose of reducing weight of the landfill disposal of the waste sand, present situation and problem of beneficial use were investigated. As the result, it became clear that the possibility of the utilization extension as portland cement raw material, crushed stone for road construction, aggregate in cement concrete was high.

Key Words: foundry sand, beneficial use, portland cement, crushed stone, aggregate

1. はじめに

鑄造工場からは、廃砂、スラグなどの様々な廃棄物が排出されている。この廃棄物の処理方法としては、他の産業での有効利用、工場内での再生、埋め立て処分がある。

現在、各工場は環境問題に対応を迫られており、大企業の工場を中心に埋め立て処分量を減らし、有効利用あるいは再生の量を増加させる努力が続けられている。しかし、中小企業の工場においてはなかなか埋め立て処分量の削減は進んでいない。これは、有効利用あるいは再生を行うためには、廃棄物の分別を行う必要があること、廃棄物の保管場所を確保する必要があること、経済の低迷・外国からの輸入品の増加により経営環境がきびしく設備投資が十分に行えないなどの理由による。

しかし、ものづくりの基幹産業のひとつとして鑄造工場が生き残るためには、環境に調和した循環型製造工場への転換が不可欠である。そこで、鑄造廃棄物の中でも最も排出量の多い廃砂について、有効利用の方法の現状と課題について述べる。

2. 調査方法

調査は、文献（特許を含む）調査と県内の鑄造工場に対する聞き取り調査により行った。

文献については、国内およびアメリカの文献を調査対象とし、廃棄物排出の現状および廃砂の有効利用について調査した。

聞き取りについては、県内の工場の廃棄物排出の状況を調べた。調査対象とした工場は、県内に立地する約 80 の鉄系鑄物工場のうち鑄物生産量が月産 1000 トン未満の中小規模の鑄造工場 21 工場である。（参考：県内で 1000 トン以上の工場は 3 工場）

3. 調査結果

3.1 鑄造工場から排出される廃棄物の概要と廃砂の概要^{1),2)}

鑄造工場から排出される廃棄物を分類すると、①廃砂、②スラグ、③集塵ダスト、④耐火物くず、⑤その他である。平成 9 年度に実施された全国の鑄物工場を対象とした調査によると、鑄物製品を 1 トン製造する際には 0.47 トンの廃棄物が発生している。このうち、64 %が廃砂、スラグが 16 %、ダストが 17 %であり、残りが耐火物くずとその他の廃棄物である。これらのうち、有効利用ある

* 金属研究室研究グループ

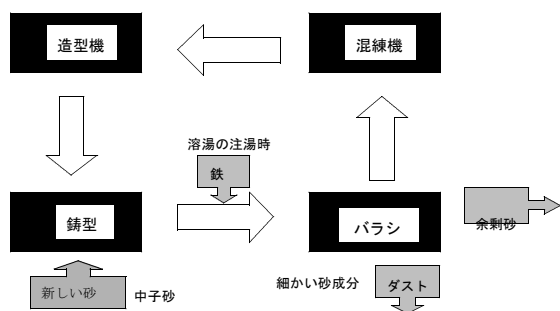


図1 鑄造工程における砂の循環

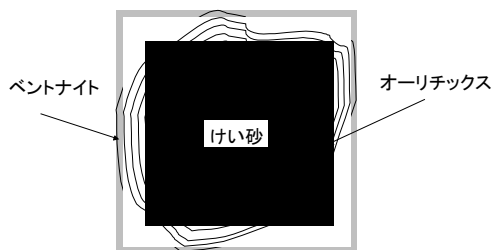


図2 生型砂の概念

いは再生の比率は 57 %で、43 %が埋め立て処分されている。最も排出量が多い廃砂の中で、鑄型の種類別では、生型の廃砂が 79 %を占める。

生型砂は、85 ~ 95 %のけい砂、5 ~ 15 %の粘結剤および添加剤で構成されるように調整される。粘結剤には、無機質のベントナイトが用いられ、添加剤は、でんぷん、石炭粉が用いられる。生型砂は図1に示すように循環しており、その過程で溶湯と接して熱により変質し、さらには、中子砂・溶解鉄が混入する。図2、図3は工程での実際の生型砂の概念図および構成図である。図のオーリチックスは熱によるベントナイトの変質物で、けい砂の表面に付着する。

中子砂は、生型砂と同じ構成物で構成される場合も希にあるが、通常は粘結剤として有機質のもの（一般的にはフェノール樹脂系）を利用する。そのため、上述の砂の循環の中で、有機質の一部は燃焼し灰となって生型砂に残留し、未燃焼の部分はそのまま残留する。

実際の工程での生型砂の構成比は、およそ以下の通りである。

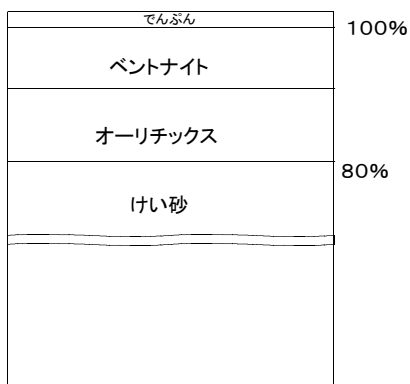


図3 生型砂の構成物

けい砂	72 ~ 85 %
ベントナイト	10 ~ 12 %
オーリチック	14 ~ 16 %
でんぷん	0.3 ~ 0.4 %
その他	0.1 %以下

3. 2 廃砂の発生状況³⁾

廃砂の発生の主な原因は、新しい砂を造型ラインに投入することにより余剰の砂が生じることである。通常、余剰の砂はラインの中の砂処理設備の部分でオーバーフローさせている。

このオーバーフローさせた廃砂以外にも少量ではあるが廃砂が発生する。

ひとつは、ショットブラスト装置による鑄物の清掃時（砂落とし）に発生する廃砂である。この廃砂はショットブラスト装置で利用する鉄玉が粉碎されて発生する鉄粉を数割含んでいる。ただし、この鉄分は磁選などの方法により除去することは可能であり、鉄分を除去した廃砂は通常の廃砂と同一の性状である。

もうひとつは、装置からこぼれるなどして工場の床面などに存する廃砂で、工場内の清掃時に集められる廃砂である。この廃砂は異物混入があり、粒度分布なども一定しない。

さらに、造型ラインなどの集塵機で捕捉されるダストが廃砂と区別されずに扱われる場合もある。以下の記述においては、ダストは基本的に本調査の対象外とするようにした。

3. 3 三重県内中小工場の鑄造廃棄物の状況

表1は1工場当たりの鑄物生産量および廃棄物発生量である。廃棄物発生量は月当たり 104 トン

表1 1工場あたりの鋳物生産量および廃棄物発生量

1工場あたりの鋳物生産量(トン/月)	264.6
1工場あたりの廃棄物発生量(トン/月)	104.1
鋳物生産1トンあたりの廃棄物発生量(トン)	0.39

であり、1トンの鋳物を生産するのに0.39トンの廃棄物が発生している。

表2は廃棄物処理方法別の工場数、処理量、処理費である。調査した21工場の中でなんらかの分別を実施しているのは12工場である。有効利用、再生、埋め立て処分の比率は、それぞれ約1/3の割合となっている。処理費は再生、有効利用、埋め立ての順序で高くなっている。この処理費は業者へ引き渡す料金である。処理費のみから考えると、再生、有効利用の方が有利であるが、分別等の手間などの他の要因で埋め立てが選択されているわけである。

以上の県内鋳物工場の廃棄物の状況は前述の全国の鋳物工場の状況とほぼ同じであり、特に三重県内における特殊な状況はみうけられなかった。

表3は有効利用方法別の工場数である。12工場が道路用骨材、2工場がセメント原料での有効利用であり、ほとんどが道路用骨材として利用されている。また、他の有効利用方法は実施されていない。

なお、分別において廃砂を他の鋳造廃棄物と明確に区別して有効利用あるいは再生を実施している工場は10工場であった。分別は廃棄物の有効利用、または再生を図るための最低限の条件である。したがって、今後、分別の促進が求められる。

3. 4 国内における廃砂の有効利用の現状

国内で廃砂の有効利用方法として実績のあるのは以下のとおりである。

- ・セメント原料
- ・道路用骨材（路盤材、アスファルト混合材用など）
- ・土壌改良材
- ・れんが原料などの窯業原料

この中でセメント原料および道路用骨材としての方法が一般的であり、他の鋳造廃棄物と分別してあれば受け入れ先（メーカーあるいは処理業者）

表2 廃棄物の処理方法別の工場数、処理量、処理費

	工場数	処理量 (トン/月)	処理費 (円/トン)
廃棄物の分別を実施している工場	12	—	—
有効利用	12	724.8	6173
廃砂の再生(鋳物砂への再生)	7	773.6	5250
埋立処分	14	688.4	7403

表3 有効利用方法別の工場数

	工場数
路盤材に利用	12
セメント原料に利用	2

を探するのは比較的容易である。他の方法は実際に利用されている方法ではあるが、種々の課題を抱えている。そのため、セメント材料および道路用骨材以外の方法は、受け入れ先を探したとしても、受け入れ先を見つけ出すのは困難である。

一方、人工骨材などの上記以外の方法については方法の提案、試作等の報告例などはあるが、実績についての報告例がない。

以下の各方法の詳細について述べる。

3. 4. 1 セメント原料^{1), 4), 5), 6)}

廃砂をセメント原料として利用する場合は珪石の代替材料として利用される。セメント工場では受け入れの要件を定めている。廃砂に対する要件としては、重金属分（マンガン、クロム、鉛、亜鉛、チタンなど）が少ないこと、アルカリ分（ $\text{Na}_2\text{O}_3, \text{K}_2\text{O}$ ）が過大でないこと（例えば、あるセメント工場の受け入れ基準は3%未満であること）、異物混入がないことが求められる。廃砂の場合、他の廃棄物との分別が不十分な場合、重金属の混入の可能性が生じ、異物混入防止と併せて分別の徹底が重要である。さらに、鋳物砂の一部としてクロマイトサンドを利用している場合は要件を満たさない可能性が高くなる。また、ベントナイトはアルカリ分であるため、アルカリ分の管理も要する。廃砂に含まれる有機物分などの可燃物については、セメントの製造過程で高温（1500℃）の焼成過程があるため問題にはならない。一方、セメント産業が廃砂を受け入れる場合、安定した量と安定した品質が要求される。大規模工場が発生する大量の廃砂ではその要求を満たすのは

容易である。しかし、中小規模の工場では各工場から直接セメント産業に搬入したのでは要求を満たしにくい。これを克服するためには、共同保管場所の設置などの要求を満たすための仕組みの構築が有効であると考えられる。

3. 4. 2 道路用骨材^{1), 5)}

道路用骨材として廃砂を利用する場合、砂（細かい骨材）の代替品として利用する。ただし、骨材の利用の実態についての詳細な報告^{7), 8), 9)}が少なく、その実態は不明確である。求められる要件としては所定の粒度を有していること、土壤汚染がないことなどである。一般的には「舗装設計施工指針」（平成13年12月日本道路協会）および「土壤汚染に係わる環境基準について」（平成3年8月23日環境庁告示第46号）に基づいて該当する廃砂が利用可能かどうか判断する。

廃砂は、粒度としてはそのまま利用可能である。さらに、土壤汚染についても他の鑄造廃棄物との分別がなされておれば問題はないと判断される。実際、前述の三重県内中小企業の鑄造廃棄物の状況あるいは他の報告^{3), 10)}にみられるように、路盤材用として多くの廃砂が業者に引き取られている。

ただし、前述のように鑄物廃砂を利用した報告例はきわめて少ない。今後、環境の変化（例えば、道路用骨材材料の見直し）が生じた際に、鑄物廃砂が排除される可能性も否定できない。安定的な道路用骨材での利用を考えると、使用実績のデータの積み重ね、及びそのデータの道路建設機関（国土交通省など）での評価により、鑄物廃砂が道路用骨材として公に認知される必要がある。これらの作業は鑄造業界自らが行うことが認知の早道と考えられ、今後の課題である。

3. 4. 3 土壤改良材

土壤改良材として廃砂を利用する場合は、造粒、成形の後、加熱焼成した製品を利用する。廃砂中に含まれるベントナイトが焼成過程で熱膨張を起こし、焼成物が多孔質体になって、その一部がゼオライト化することに着目した技術^{11), 12), 13)}である。さらに、焼成過程は、土壤改良材の成分としては不要な成分である有機粘結剤などの可燃物質を除去できるという副次的な効果もある。廃砂で作製した土壤改良材は、保水性、通気性は他

の土壤改良材より優れており、土壤改良材として十分な性能を有している。しかし、価格が高いこと、土壤改良材の市場は成熟しており新規参入が困難であることなどがネックとなり、廃砂の有効利用方法として処理量を増加させることは困難な状況である。

3. 4. 4 窯業原料

窯業原料として、利用事例が報告されているのはれんがの原料の中の川砂の代替⁶⁾がある。さらには、試作事例としてれんが^{14), 15)}、透水性ブロック¹⁶⁾、タイル¹⁷⁾があり、特許についてもインターロッキングブロック¹⁸⁾、タイル¹⁹⁾、建材²⁰⁾が申請されている。試作事例の報告でも述べられているように、窯業原料としての利用は技術的には問題がない。しかし、一方で、競合材料に対しての優位性がないこと、使用実績がほとんどないことなどにより、利用拡大は困難と判断される。

3. 4. 5 人工骨材

廃砂を原料とした人工骨材は他の原料と混合し、成形、焼成、粉碎、分級を行い、製造する。試作事例²¹⁾が報告されており、特許^{22), 23), 24)}の申請もなされている。道路用の骨材として利用した場合、他の自然砕石あるいは人工骨材と同様の性能であることが試作事例で紹介されている。廃砂を原料とした人工骨材と同じ製造方法による鑄物ダストを原料とした人工骨材²⁵⁾は、市販されている。しかし、コスト面などの問題でこの骨材の利用拡大は困難な状況であり、廃砂を利用した人工骨材についても実用化は困難な状況と考えられる。

3. 4. 6 その他

上記以外の有効利用方法として提案されている方法は、コンクリート製品⁵⁾・ゼオライト原料²⁶⁾・造さい剤（鉄鋼用）²⁷⁾などいくつかの方法がある。廃砂がシリカ分を多く含んでいること、あるいはベントナイトを数パーセント含んでいることに着目して、既存の材料の代替品となることを狙った技術である。しかし、利用実績データがないこと、さらには既存の材料に対する優位性に欠けることにより、実用化の目処は立っていない。

3. 5 アメリカにおける有効利用の現状^{28), 29), 30), 31)}

アメリカにおいても廃砂の有効利用の拡大は進められており、様々な有効利用方法の事例が報告されている。この有効利用方法の事例の中で、今後、利用量の拡大が見込まれる方法は以下であるとされている。

- ・セメント
- ・道路用骨材
- ・土壌改良材
- ・流動化処理土
- ・埋め立て地の覆土・表土
- ・コンクリート製品

以下に、有効利用の中で国内では利用実績がない方法についてその概要を紹介する。なお、土壌改良材については国内とは異なる方法で利用されているので触れることとした。

利用方法の種類で国内と比較すると種類が多いのがわかる。これは国内においてもさらなる努力により、有効利用の拡大が可能であることを示している。国内では鑄物砂が埋め立て処分される場合、管理型の廃棄物処分場に捨てる必要があることにより、廃砂が有害物としての扱いを受けている場合があり、有効利用に対して消極的である面が否定できない。勿論、分別が徹底されている前提はあるが、国内においても分別を行った鑄造廃棄物の見方・扱いを再検討する必要があることを示唆している。

3. 5. 1 土壌改良材

土壌改良材としての利用は国内と異なり、廃砂を加熱焼成することなく、そのままの状態での砂と混合して利用する。廃砂の中にベントナイトが存することにより、保水性、吸肥性などの土壌改良材に必要な性能を持つことに注目した利用法である。国内で生産されているものに比べると性能は劣ると判断されるが、コスト的には有利である。アメリカでは鑄造工場の近隣地区での利用を推奨しており、中小規模の工場に向けた有効利用方法とされている。

3. 5. 2 埋め立て地用覆土・表土

通常、埋め立て地の覆土・表土は埋め立て地内でベントナイトを土に混ぜて調整されている。その土の代替として鑄物砂の利用であり、鑄物砂にベントナイトが含まれることから、場合によっては調整なしでの利用もあり得る。この利用におい

ては埋め立て業者は鑄物砂を有価で引き取るわけではなく、埋め立て料金を通常より引き下げているのみである。

3. 5. 3 流動化処理土

流動化処理土の主たる構成物は砂とフライアッシュ、セメントの混合物であるが、砂を廃砂に置き換える。鑄物砂はベントナイトを含んでおり、自然の砂と性質が異なるが、フライアッシュ、セメントとの混合比を変えることにより、流動化処理土に求められる流動性、充填性、強度を調節する。また、ベントナイトを含むことにより、透水性を調節するのが容易となるという利点も見出されている。

3. 5. 4 コンクリート製品

コンクリート製品で廃砂を有効利用する場合、細かい骨材の代替として利用する。ただし、代替できるのは10～15%程度である。これは鑄物砂の中に微粉が存在することが理由である。よって、あらかじめ微粉除去処理を行えば、使用量を増加させることは可能である。

国内では有効利用としての実績はない方法ではあるが、国内における試用さらには利用データの積み重ねを行えば、今後の利用の可能性が示唆される。

3. 5. 5 その他

有効利用量は少ないようであるが、モルタルもしくはグラウトについては砂の一部の代替として利用されている。また、ロックウールのシリカ源としての利用方法も報告されている。しかし、両者とも今後の利用増は困難なようである。

4 おわりに

鑄造工場から排出される廃棄物のひとつである廃砂について調査した結果、セメント原料あるいは道路用骨材としての有効利用が、当面の利用拡大が可能な分野と考えられる。この利用拡大のためには、セメント原料についてはセメント産業が受け入れやすい仕組みの構築が必要であり、道路用骨材については利用実績の積み重ねが求められる。また、コンクリート製品についても有効利用の可能性があり、有効利用の試みが期待される。

参考文献

- 1) 素形材センター：“鑄造廃棄物の有効利用促進に向けて”. 鑄物廃砂再生利用調査研究報告書, (2000)
- 2) 日本鑄物工業会：平成3年度鑄造工場の産業廃棄物に関する調査研究報告書, (1991)
- 3) 菅谷信幸：“工場発生廃砂の有効利用化”. 可鍛鑄鉄事情, 297, P9- (2001)
- 4) 日本鑄造技術協会：“副産物（スラグ, 汚泥等）の製品 J I S 化に関する調査研究”. 鑄物廃砂再利用標準化調査委員会成果報告書, (2002)
- 5) 日本鑄物工業会, 素形材センター：平成6年度銑鉄鑄物業の産業廃棄物有効利用調査報告書, (1995)
- 6) 市川弘康：平成9年10月日本鑄造工学会技術講習会テキスト, P25- (1997)
- 7) 島根県建設技術センター：“鑄物廃砂利用アスファルトの施工”. 島根県建設技術センター技術情報, (1996)
- 8) 大森保幸ほか：“産業廃棄物の処理技術及び再資源化に関する研究”. 島根県工業技術センター研究報告, 33, P39- (1996)
- 9) 長野県廃鑄物砂資源化促進協議会：鑄物廃砂を骨材としたアスファルト舗装の研究調査報告書, (1984)
- 10) 日本鑄物工業会, 素形材センター：平成5年度鑄造工場の産業廃棄物に関する調査研究報告書, (1993)
- 11) アイシン高丘：“無機質多孔質体の製造方法”. 特許公開 2000-44362 (2000)
- 12) アイシン高丘：“無機質多孔質体及びその製造方法”. 特許公開 2000-290011 (2000)
- 13) アイシン高丘：“土壌改良材ポーセライト技術資料”, (1999)
- 14) 阪本尚孝ほか：“無機系産業廃棄物を用いたレンガの作製”. 平成8年度福岡県工業技術センター報告, 7, P111- (1997)
- 15) 堀川弘善ほか：“鑄物廃砂の利用に関する調査報告”. 北海道立工業試験場報告, 294, P33- (1995)
- 16) 渡辺倭文子ほか：“鑄物廃砂の有効利用に関する研究”. 富山県工業技術センター研究報告, 5, P2-21 ~ (1991)
- 17) 佐々木秀幸ほか：“鑄物廃砂の窯業原料への利用”. 岩手県工業技術センター研究報告, 4, P77- (1997)
- 18) 桐生機械：“鑄造工程で発生する廃棄物の固化方法”. 特許公開平 09-164377 (1997)
- 19) 天野孝三：“舗装用焼成タイル”. 特許公開 2000-054304 (1998)
- 20) 三井鉱山：“構造体用建材, 及びその製造方法”. 特許公開 2000-302535 (1999)
- 21) 谷藤真一：“産業廃棄物汚泥の舗装材料への利用”. 廃棄物学会研究発表会講演論文集, 9, P201- (1998)
- 22) 中村静夫ほか：“人工軽量骨材及びその製造方法”. 特許公開平 10-152356 (1998)
- 23) 岡本：“人工骨材の製造方法”. 特許公開平 07-315898 (1995)
- 24) 内外セラミックスほか：“廃珪砂を利用した人工砂の製造方法”. 特許公開平 05-237588
- 25) 宮本正規ほか：“産業廃棄物を原料とした人工軽量骨材の製造技術”. 石川県工業試験場研究報告, 47, P89- (1998)
- 26) 前川以知郎ほか：“鑄物廃砂の人工ゼオライト化”. 第136回鑄造工学会全国講演大会概要集, P41- (2000)
- 27) 情報総合研究所ほか：“製鋼スラグの改質方法”. 特開平 H08-002949 (1996)
- 28) R.W.Regan et al：“Beneficial Use of Fine Foundry Aggregate: Three Promising Option”. AFS Trans, 106, P167- (1998)
- 29) D.L.Twarog et al.：“Alternate Utilization of Foundry Sand Waste”. World Foundry Congress, 59 (2), P2.2- (1992)
- 30) R.W.Regan et al.：“Weighing Sand Reuse Options From the Customer's Perspective”. Modern Casting, 87 (8), P45- (1997)
- 31) T.Abichou et al.：“Database on Beneficial Reuse of Foundry By-Products”. Environmental Geotechnics Report 97-7, (1997)