

鑄造工場から排出される廃棄物の性状

村川悟*, 西尾憲行*, 加藤進**, 吉村英基**

Property of Waste discharged by Foundries

by Satoru MURAKAWA, Noriyuki NISHIO, Susumu KATO
and Hideki YOSHIMURA

This paper explored property of the waste (slag and sand) discharged from foundries. Slag which was investigated was safe in environment. However, there was a porosity thing in the slag and these slag don't satisfy the standard of base and subbase material. Some of waste sand which was investigated don't satisfy enviromental quality standard. Therefore, the slag needs to mix other base and subbase material for beneficial use.

Key words: waste sand,slag,foundry,base and subbase

1. はじめに

鑄造工場において鑄物（鉄系）1000kgを生産する際には470kgの廃棄物が排出される。このため、廃棄物の減量を図ることは、鑄造業にとって大きな課題となっている。

鑄造業から排出される廃棄物は、廃砂、スラグ、ダストなどである。この中で、廃砂とスラグについては、路盤材などの道路用骨材へ有効利用が進められている。

スラグには、鑄造業から排出されるスラグ以外に、鉄鋼スラグ、一般廃棄物熔融スラグなどがある。これらのスラグについても道路用骨材への活用が進められており、鉄鋼スラグはJIS化され、一般廃棄物熔融スラグについてもJIS化の作業が進行している。JIS化に際しては、安全性のデータ、性状に関するデータ、施工時の性能データの積み重ねが必要であり、その積み重ねにはかなりの労力と時間を要するが、JIS化されることにより該当品の利用促進が図られる。道路用骨材としては、種々の廃棄物が新たに利用されようとしており、今後、他の材料と競合することが予測さ

れている。しかし、鑄物スラグについては、鉄鋼スラグ類似品としては扱われている反面、安全性、性状などのデータ^{1) 2)}がほとんどなく、JIS化の動きもない。今後、鑄物スラグが引き続き道路用骨材として使用されるためには、安全性、性状などのデータの蓄積が求められる。

また、廃砂については再生が可能であり、すべての廃砂を再生してふたたび鑄物砂として利用することが最も望ましい姿であるが、中小企業を中心に道路用骨材としてかなりの量が有効利用されている³⁾。しかし、スラグと同様に安全性、性状などに関するデータ^{2) 4)}の蓄積が不十分であり、データの蓄積が必要となっている。

本研究では、スラグ、廃砂を道路用骨材として利用することを前提に、実際の鑄物工場から排出されているスラグ、廃砂について、安全性の問題を検証すると共に、化学成分、物理的な性状を明らかにすることを目的に種々の試験を実施した。

2. 実験方法

2. 1 試料のサンプリング

試験対象となるスラグおよび廃砂は、三重県内の中小規模の銑鉄鑄物工場から採取した。表1に

* 金属研究室研究グループ

** 保健環境部資源循環グループ

表 1 採取したスラグ

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
発生溶解炉	電気炉	電気炉	キュポラ	電気炉	キュポラ	電気炉	キュポラ	電気炉
採取場所	廃棄物置場	廃棄物置場	廃棄物置場	発生場所	廃棄物置場	廃棄物置場	廃棄物置場	廃棄物置場
採取場所における他の廃棄物との分別	なし	なし	あり	あり	なし	なし	なし	なし
スラグの水冷	なし	なし	一部あり	なし	なし	なし	一部あり	なし
除さい剤の添加	あり	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり

表 2 採取した廃砂

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
生型の添加物	石炭粉 でんぷん	石炭粉 でんぷん	石炭粉 でんぷん	石炭粉	石炭粉 でんぷん	石炭粉 でんぷん	石炭粉	石炭粉
中子の有無	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり
中子の量	少	多	多	多	多	多	多	少
中子の種類	シェル	シェル	シェル	シェル	シェル	シェル	シェル	シェル
該当工場の主な製品	マンホール	機械部品	機械部品	下水道製品	機械部品	下水道製品	機械部品	マンホール

採取したスラグの発生溶解炉の種類などを、表 2 に採取した廃砂の添加物などを示す。

銑鉄鋳物工場で現在利用されている溶解炉は電気炉とキュポラの 2 種類である。今回は電気炉を利用している 5 工場、キュポラを利用している 3 工場の試料を採取した。溶解炉から発生したスラグは、通常、一時的に溶解炉の傍（発生場所）に保管された後に、工場内の廃棄物置場に移動される。廃棄物置場は工場により鋳造工場から排出される他の廃棄物と分別されている場合とされていない場合がある。スラグの採取にあたっては分別されていない廃棄物置場からも採取を行ったが、その場合スラグ以外の廃棄物が混入しないようにして採取した。キュポラスラグは、溶解炉から排出された直後に水で急冷させて細粒化する場合がある（水砕スラグ）。このとき、冷却の仕方によってはスラグが多孔質となる。今回の工場では水で急冷させている工場はなかった。しかし、炉から発生したスラグを受ける容器に少量の水を入れている工場があり、その工場のスラグは一部が水に接触し急冷され多孔質な状態となっていた。電気炉スラグはスラグの除去を容易にするために除さい剤を添加する場合があるが、今回の工場ではすべての工場を除さい剤を使用していた。

鋳物砂は生型砂と呼ばれるけい砂と粘土を混合したものが主として利用されており、今回採取した廃砂はすべて生型砂の廃砂である。鋳物砂は鋳型を作製する際に利用されるが、鋳型には中子と呼ばれる部分がある。この中子は通常、合成樹脂

を粘結剤として砂を固めたものが利用されており、フェノール樹脂を粘結剤とするシェルと呼ばれる中子が最も利用されている。この中子も廃砂に混入してくるが、今回の廃砂に含まれる中子はすべてシェルであった。

2. 2 安全性試験

スラグ、廃砂を道路用骨材として利用することを考えた場合、土壤環境基準を適用することが望ましいと考えられる。土壤環境基準では 27 項目の溶出試験の基準を設定している。

2. 2. 1 スラグ

スラグについては、1273K を超える高温に曝されること、さらにはスラグ生成の履歴から、農薬、有機塩素化合物などの有機物質などは分解するか、あるいはもともと存在しないと考えられ、試験の対象外とした。フッ素、ホウ素についてもスラグの履歴から対象外とした。また銅も農用地の土壤のみに適用される基準であるため除外した。アルキル水銀については総水銀が検出された場合に試験を行うこととした。結果として、表 3 の項目の中で、総水銀、カドミウム、鉛、六価クロム、砒素、セレンの 6 項目が試験対象となった。これらの項目は、スラグと性状が似ていると考えられる一般廃棄物の熔融固化物の目標基準と同じ項目である（表 3）。

2. 2. 2 廃砂

廃砂では、鋳物砂の原材料および鋳型作製工程などから考えて農薬、有機塩素化合物など有機物

表6 スラグのマイクロトックス毒性試験結果

No.1		ブランク	試料溶液
	開始時の発光量	96	98
	5分後の発光量	104	102
No.3		ブランク	試料溶液
	開始時の発光量	102	97
	5分後の発光量	61	67
No.6		ブランク	試料溶液
	開始時の発光量	93	90
	5分後の発光量	79	82

3. 1. 1 スラグ

表4にスラグの溶出試験結果を示す。採取したスラグは、すべての項目について溶出は認められず、表3に示した土壤環境基準以下であった。過去に実施された鑄造工場から排出されたスラグの溶出試験²⁾においても今回と同じく有害物質は検出されていない。表5にマイクロトックス毒性試験の結果を示す。試験は、電気炉スラグ2試料、キュポラスラグ1試料を対象に行った。試料溶液とブランクの間に差異は認められず、いずれの試料についても毒性はないと判断される。一般的に、鑄造工場から排出されるスラグを含めてスラグは高温に曝されて、有機物は燃焼し、無機物は酸化物などになることにより、安定な状態であるとされている。今回試験を実施した鑄造スラグについても安全性に問題はないと考えられる。

3. 1. 2 廃砂

表6に廃砂の溶出試験結果を示す。No.1,4,5,6,8の5個のサンプルが土壤環境基準を超えている。ただし、いずれの試料も表3に示した産業廃棄物に係る判定基準は満たしており、

産業廃棄物として埋め立て処分することに問題はない。廃砂の溶出試験では、過去の報告^{2) 8)}においても、鉛、砒素、フッ素が検出されており、今回も同様の傾向を示している。

現在、廃砂が道路用骨材として利用される場合、他の材料と混合されて利用されており、道路用骨材全体に対する含有重量比率も低い（1割以下と推定される）。よって、今回の溶出試験結果程度の溶出量であれば、通常、廃砂が道路用骨材として利用されている状態（含有比率1割以下）で、その材料を溶出試験した場合、溶出量は環境基準を満たす。しかし、一方で単独での溶出試験では問題があることも事実であり、廃砂を道路用骨材として活用する場合は安全性の管理を十分に行う必要がある。

3. 2 化学成分

鑄造工場から排出されるスラグは、成分的には道路用骨材として利用されている鉄鋼スラグと同様の化学成分を有している。よって、成分的には道路用骨材への利用に問題はないと判断される。表7に今回採取したスラグの化学成分を示す。

鉄鋼スラグの中にはスラグ中の多硫化物が原因で屋外に放置するとスラグに付着した雨水が黄色くなる現象（黄色水）が生じるものがある。この黄色水を発生するスラグはSが1wt%程度含まれる高炉スラグ⁹⁾であるが、今回のスラグはSが0.01～0.4wt%と低い値であった。また、各スラグを屋外に1ヶ月放置して黄色水発生の有無を観察したが、発生は認められなかった。以上のことから、鑄物工場から発生するスラグについて、黄

表6 廃砂の溶出試験結果

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
カドミウム (mg/L)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
鉛 (mg/L)	0.1	0.01	0.01	0.04	0.04	0.03	0.01	0.04
六価クロム (mg/L)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
砒素 (mg/L)	0.01	0.01	<0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
総水銀 (mg/L)	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
セレン (mg/L)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
ベンゼン (mg/L)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
フッ素 (mg/L)	0.7	0.75	0.35	0.45	0.77	1.03	0.8	0.92
ほう素 (mg/L)	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

表7 スラグの化学成分

No	unit:wt%							
	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	88.67	85.07	86.65	74.81	86.58	89.72	86.9	85.25
Al ₂ O ₃	3.9	5.3	4.8	3.6	4.5	3	4.1	5.1
MgO	1.8	0.86	1	5.3	1.5	0.97	1.4	1.2
MnO	0.02	0.01	0.04	0.05	0.02	0.01	0.02	0.02
Fe ₂ O ₃	1	1.3	2.9	1.8	0.97	0.92	1.2	1.3
TiO ₂	0.06	0.07	0.08	0.06	0.07	0.08	0.1	0.09
CaO	0.43	0.49	0.53	1	0.53	0.39	0.59	0.71
NaO	1.2	1.6	2	0.89	1.2	0.44	0.61	0.86
金属鉄分	0.2	0.3	0.5	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4
Ig.loss	4.2	6.9	2.7	3.5	5.5	4.2	5.4	5
pH	8.9	7.2	8.7	8.5	9.8	9.3	9.1	8.9

* 化学成分はIg・loss除去後の試料に対する%

表8 廃砂の化学成分、Ig.loss、pH

No	unit:wt%							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Al ₂ O ₃	16.2	17.4	13.0	16.9	26.6	11.7	14.4	15.2
SiO ₂	56.5	67.8	52.7	64.1	47.1	58.6	53.5	69.0
MgO	0.9	2.7	1.1	4.6	0.5	6.6	1.5	2.5
CaO	1.4	2.1	32.7	3.1	9.1	7.3	27.1	2.8
MnO	4.6	3.9	0.8	1.9	1.9	0.5	1.5	0.1
TiO ₂	0.3	0.5	0.4	0.2	1.1	0.1	0.5	0.1
Fe ₂ O ₃	18.8	2.4	0.6	3.3	12.9	3.2	2.2	2.2
Na ₂ O	0.7	0.9	0.0	1.3	0.2	2.1	0.2	3.2
K ₂ O	1.3	1.3	0.5	1.8	0.5	2.6	0.5	4.2
S	0.01	0.01	0.05	0.01	0.02	0.41	0.09	0.25
金属鉄	7.45	5.55	0	21.1	0	10.35	0	29.25

*各化学成分は金属鉄除去試料に対する%

色水の発生の問題はないと考えられる。

表8に廃砂の化学成分、Ig.loss、pHを示す。

廃砂の主原料であるけい砂は、道路用に利用されている細骨材（砂）と同じ岩石由来の物質であり、けい砂も細骨材のひとつとして利用されている。

その場合、化学成分はほぼ同一である。さらに、細骨材のひとつである山砂は粘土を含んだ砂であり、鋳物砂と同程度の粘土含有量である。ただし、廃砂には、有機性の粘結剤（合成樹脂）、でんぷん、石炭粉（表2参照）などが含まれておりこれらが

Ig.loss分である。Ig.lossは道路用骨材としては不要な成分である。しかし、その量は2.7～6.9wt%で、前述の実際の廃砂の道路用骨材としての利用状態（含有比率1割以下）からすると除去の必要はない水準と考えられる。pHは弱いアルカリ性を示すがこれは、廃砂に含まれる粘土の影響であり、問題となるような値ではない。

3.3 物理的性状試験

表9にスラグの比重、吸水率、すりへり減量を示す。なお、すりへり減量はキュポラスラグお

表9 スラグの比重、吸水率、すりへり減量

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
比重	1.6	1.2	2.5	2.1	2.6	1.8	2.3	1.9
吸水率(wt%)	2	12	0.3	3	0.2	10	0.5	25
すりへり減量(wt%)	46	—	38	—	—	—	—	—

表10 比重、吸水率、すりへり減量に関する規格

	道路用碎石 (JIS-A5001)		鉄鋼用スラグ (JIS-A5015)	アスファルト用碎石 (アスファルト舗装要綱)	
	1種	2種		表層・基層材	上層路盤
比重	2.45以上		2.45以上	2.45以上	
吸水率	3%以下		3%以下	3%以下	
すりへり減量	35%以下	40%以下	50%以下	30%以下	50%以下

表 1 1 溶出 Ca 量

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
カルシウム (mg/L)	3.9	1.1	17	1.5	4.7	0.01	<0.01	<0.01

よび電気炉スラグ各 1 試料のみ実施した。道路用骨材に関する比重，吸水率，すりへり減量については，JIS あるいはアスファルト舗装要綱（日本道路協会）で表 10 のとおり規格が定められている。比重は，2 種類のキュポラスラグ（No.3, 5）以外は各規格に適合しない。吸水率については，キュポラスラグは適合するが，電気炉スラグは 2 種類（No.1,4）のみが適合する。キュポラスラグ，電気炉スラグ共に規格に適合しないスラグがあるのは，多孔質な部分があることに起因する。電気炉スラグが多孔質な部分がほとんどであるが，これは電気炉スラグに添加する除さい剤の影響である。除さい剤は黒曜石が主成分であるが，黒曜石は高温になると発泡する性質があり，これが原因である。すりへり減量は，試験を実施した両スラグとも，一部の規格を満たさなかった。このすり減り減量の規格を満たさない原因も主として多孔質な部分が存在することによる。

電気炉スラグとキュポラスラグを比べると，電気炉スラグの方が各規格に対してより適合している。これは電気炉スラグがより多孔質なためと考えられる。各規格を満たさない場合については，規格を満たす材料と混合することにより道路用骨材としての利用は可能である。他の材料と混合して道路用骨材として利用する方法は一般的に実施されている方法ではある。また，鉄鋼スラグでは，多孔質なスラグを軽量性が求められる裏ごめ材，盛り土材などの土木材料に利用しており，同様の利用も考えられる。

キュポラスラグについて，多孔質でない部分のモース硬度を測定したところ 6 であった。これは，けい石と同程度の硬度である。電気炉スラグについては，全体が多孔質であるため測定不能であった。

鉄鋼スラグの中には freeCaO が原因で風化崩壊を起こすもの（転炉スラグ）がある。この種の

スラグの場合，屋外に長期間放置して風化崩壊を経た後に道路用骨材として利用する。freeCaO は転炉に添加する石灰の未反応部分であるが，電気炉スラグについては石灰を投入しないため，崩壊性が起こる可能性は低い。キュポラは石灰石を投入するが，高炉スラグと同様に炉内で反応して複合酸化物になると考えられ，崩壊の可能性は低い。スラグの崩壊性を確認する方法として，溶出 Ca 量を測定する方法が提案されており¹⁰⁾，念のため，この試験を今回採取したスラグに適用した。溶出方法は安全性試験で実施した溶出と同じ方法である。表 11 にその結果を示す。崩壊を起こす鉄鋼スラグの溶出 Ca 量は 100 ~ 1000mg/L 程度の値が検出されており，これに比べて低い値を示しており，崩壊性はないと判断される。さらに，崩壊性を判断する方法として JIS-A5015 に水浸膨張試験があり，No.3 のスラグについて試験を実施した。表 12 はその結果であるが，膨張はほとんど確認されず，この試験結果からも崩壊性はないと判断される。

表 13 に廃砂の比重，吸水率を示す。鑄物砂には，添加剤として黒色の石炭粉が添加されている。また，鑄物砂は高温の溶湯と接することにより有機物分が燃焼しすすが発生する。このため，廃砂は黒っぽい色である。廃砂の比重，吸水率は，吸水率で No.5 が表 10 の規格を満たしていないのみで，他は規格を満たしている。廃砂の粒度は，道路用骨材の粒度としては細骨材と呼ばれる細かい骨材に属し，単独での利用はなく，より粗い粗骨材と混ぜて利用するため，廃砂についても粗骨材と混ぜて利用することとなる。

表 1 2 スラグの水浸膨張比

No.	3 規格 *
水浸膨張比	0.32 1.5% 以下

* JIS-A5015 道路用鉄鋼スラグ

表 1 3 廃砂の比重、吸水率

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
比重	2.6	2.5	2.6	2.6	2.5	2.6	2.6	2.5
吸水率(wt%)	1.8	2.7	1.8	1.9	4.0	2.0	1.7	2.3

4. まとめ

鑄造工場から排出されるスラグ，廃砂について，安全性の問題を検証すると共に，化学成分，物理的な性状に関する試験を実施した結果，以下のことが明らかになった．

1) スラグは，溶出試験，マイクロトックスの試験結果から安全性に問題はないと判断される．

2) 廃砂は，溶出試験において一部の試料が鉛，砒素，フッ素の土壤環境基準を超えており，その利用には安全面の管理が必要である．

3) スラグには多孔質なものがあり，そのようなスラグは単独では道路用骨材の規格を満たさない．

4) 鑄造工場から排出されるスラグは，鉄鋼スラグに発生する黄色水，freeCaOによる崩壊の問題はない．

参考文献

1) 倉井秀樹他:” 鑄鉄溶解時に発生するスラグのリサイクル” .鑄造工学 69(12),P1045-(1997)

2) 素形材センター:” 鑄造廃棄物の有効利用促進に向けて” .素形材センター研究調査報告(2000)

3) 村川悟他:” 鑄造工場から排出される廃砂の有効利用に関する調査” .三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告,26,P47-(2002)

4) 島根県建設技術センター:” 鑄物廃砂利用アスファルト舗装の施工” .島根県建設技術センター技術情報 (1996)

5) 大迫政浩他:” 廃棄物試験・検査法の現状と将来展望” .廃棄物学会誌 11(6),p396-(2000)

6) 地質調査所” 地球科学的試料の化学分析法” .地質調査所 (1978)

7) 日本鑄造工学会東海支部砂型研究部会” 生型砂の管理の状況Ⅱ” .日本鑄造工学会東海支部砂型研究部会報告書(1998)

8) 日本鑄造技術普及協会:” 副産物の製品 J I S 化に関する調査研究” .(2002)

9) 越田孝久他:” 高炉スラグからの黄水生成機構” .63(11),P12-(1977)

10) スラグの有効利用に関する基礎研究部会:” 鉄鋼スラグの性質と再利用” .鉄と鋼 65(12),P1787-(1979)