

鑄物スラグのコンクリート骨材への利用*

藤原 智徳**、佐々木 秀幸***、平野 高広****、小山田 哲也****、佐藤 直也*****

鑄物工場で発生するスラグの建材等への再生利用を目的として、粗粉碎した鑄物スラグを電気炉で熔融後徐冷した。その結果、鑄物スラグが結晶化することをX線回折（以下、XRDと略記）のプロファイルにより確認した。結晶化によりスラグの強度が向上することから、コンクリート骨材としての適用性を調べたところ、碎石のJIS規格を満たしており利用可能であることがわかった。

キーワード：鑄物スラグ，熔融，結晶成長，骨材

Utilization of Casting Slag for Concrete Aggregate

FUJIWARA Tomonori, SASAKI Hideyuki, HIRANO Takahiro,
OYAMADA Tetsuya and SATO Naoya

For the purpose of recycle, Casting slag was crushed coarsely, then heat-treated and annealed.

As a result, crystal growth was confirmed by XRD. Strength of Casting slag improved with crystallization. Hence, utilization of that product for concrete aggregate was examined. Heat-treated and annealed Casting slag met JIS as crushed stone, so that utilization for concrete aggregate was possible.

key words : Casting slag, melt, crystal-growth, aggregate

1 緒 言

近年、環境への配慮と処分費用の高騰から事業活動に伴って排出される産業廃棄物の再生利用が数多く検討されている。

鑄造工場等では、製鉄副産物の約85%がスラグといわれており、その種類は銑鉄製造過程で副生する高炉スラグと鋼製造過程で副生する製鋼スラグとがある¹⁾。さらに高炉スラグは冷却方法により、徐冷スラグと水砕スラグに分けられる。水砕スラグは熔融物を水と接触させ、急冷したものでSiO₂ならびにCaOを主成分としており、また急冷によりガラス化している²⁾。県内のある鑄造工場ではこのような水砕鑄物スラグ（図1）が年間2,500t～3,000t発生し、処分料を負担してセメント会社に処理を委託しているのが現状である。

一方、非晶質のガラスを熔融・徐冷して結晶成長させることによりセラミックスの特長を付与したものを結晶化ガラスと呼んでいる。これは大理石の5倍程度の曲げ強度を有し、耐酸性に優れ一部建築材料として使用されている³⁾。結晶化ガラスは、これまで下水道汚泥や一般廃棄物の焼却灰を応用した例が報告されているが、鑄物スラグを使用した事例についての報告はない。本研究では鑄物スラグを結晶化ガラスに変換し、高強度骨材として再生利用することを目的に、熱処理条件を調べた。またコンクリート骨材としての適用性を調べたので結果を報告する。



図1 鑄物スラグ

2 実験内容

2-1 供試材料

鑄物スラグは県内の鑄物工場I社から排出されるものを用いた。鑄物スラグは大塚鉄工製HB-189型ハンマークラッシュャーで粗粉碎し、熱処理試験に供した。また、粗粉碎試料をHEIKO社製TI-300型ボールミルで微粉碎し、分析に供した。分析方法はJIS M8852ならびにM8856、Z2615、Z2616を参照し、Perkin-Elmer社製OPTIMA3300DV型誘導結合プラズマ発光分光分析装置（以下、ICP-AESと略記）とLeco社製CS-200型炭素硫黄分析装置を用いて行った。結果を表1に示す。

* 産業廃棄物再資源化技術開発事業

** 材料技術部（現 岩手県盛岡地方振興局保健福祉環境部）

*** 材料技術部（現 岩手県環境保健研究センター企画情報部）

**** 材料技術部（現 環境技術部）

***** 岩手大学工学部建設環境工学科

***** 岩手大学工学部建設環境工学科（現 大東建託株式会社）

表1 供試鑄物スラグの化学成分

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	Na ₂ O
50.07%	36.88%	7.62%	5.82%	3.04%	0.51%	0.43%	0.16%
S	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	水分	Cd	Pb	C	
0.30%	0.17%	0.14%	trace.	ND	ND	0.35%	

高強度の結晶化ガラスの製造には、0.1～20 μ mの柱状結晶をガラス中に均一に生成させる必要がある。柱状結晶にはウォラストナイト（珪灰石）： $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ やアノーサイト（灰長石）： $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、フォーステライト（苦土カンラン石）： $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、ディオブサイド（透輝石）： $\text{CaO} \cdot 2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、ネフェリン（カスミ石）： $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ がある⁴⁾。化学分析の結果より、供試材料は主成分が $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ の3成分系であることから、ウォラストナイトやアノーサイト結晶の析出が予想され、結晶化ガラスの原料として適していることがわかった。

2-2 熱処理試験

ADVANTEC 社製 KM-1302P 型電気炉を用いて、粗粉碎試料の加熱処理をした。熱処理条件は 30min. で目的温度まで昇温させた後、所定時間保持し、3h. で室温まで放冷した。放冷後の試料を微粉碎した後、RIGAKU 社製 RINT2200V 型 X 回折装置で測定し、プロファイルと比較した。

またエリオニクス社製 ERA-8800 走査型電子顕微鏡（以下、SEM と略記）を用い、試料の熱処理前後の形状を観察した。

2-3 コンクリート用骨材試験

未処理の鑄物スラグ（以下、未処理スラグと略記）と 900℃で 3h. 熱処理後徐冷した鑄物スラグ（以下、処理スラグと略記）について、JIS A5005 に基づきコンクリート用骨材として必要な物性を調べた。スラグ表面が鋭利であったため、環境保全サービス㈱が開発・保有する乾式ガラスリサイクル破碎装置で試料を磨砕した後、粒度調整し供試した。比較試料はコンクリート試験基準供試体作成に使用した砕石を用いた。

またスラグの有害性について評価した。一般的にスラグは 1,000℃以上の高温で処理される過程で製造されるため、ダイオキシン類は熱分解により含まれないが、微量の重金属を含んでいる。この重金属はスラグを構成するガラスの網目構造内に固定され、溶出しにくくなっている。本研究では平成 3 年環境庁告示第 46 号に掲げる方法による溶出試験（以下、環告 46 号法と略記）を実施し、Cd、Pb、Cr(VI)、As、T-Hg、Se について土壤環境基準と比較した。コンクリート試験は、砕石を用いた基準供試

体と同一の配合比で、砕石をスラグに置換したコンクリート供試体を作成し、そのフレッシュコンクリートについてスランプと空気量、ブリーディングを調べた。また硬化コンクリートについて、圧縮強度と引張強度を調べた⁵⁾。表 2 に基準供試体の作成に使用した材料とその密度を示す。また表 3 に基準供試体の配合比を示す。

表2 基準供試体作成材料

	使用材料	密度 (g/cm ³)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材	川砂	2.64
粗骨材	砕石	2.95
混和剤	AE 剤 (変性ロジン酸化合物系)	1.04
	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸)	1.06

3 実験結果

3-1 熱処理条件の検討

熱処理の保持時間を 30min. とし、温度を 800℃～1000℃まで変化させたときの鑄物スラグの XRD プロファイルの変化を図 2 に示す。

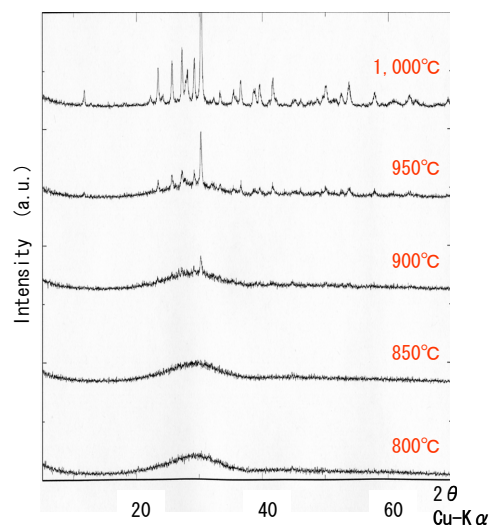


図2 熱処理温度による鑄物スラグの XRD プロファイル

表2 基準供試体配合比

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)
		水	セメント	細骨材	粗骨材	SP	AE 剤			
35	40.5	171	489	673	1,103	1.47	2.93	20	8.0±1.5	4.5±1.0
45	42.5		380	744	1,124	0.57	1.52			
55	44.5		311	805	1,121	0.00	1.87			

未処理スラグは非晶質であるためシャープなピークはみられない。しかし熱処理温度が高くなるに従いシャープなピークが現れ、結晶化することがわかった。しかし950℃以上では試料が溶融して固着し、取り扱いが困難になることから、熱処理温度は900℃とした。熱処理温度を900℃、保持時間を30min.～12h.まで変化させたときのXRDプロファイルの変化を図3に示す。

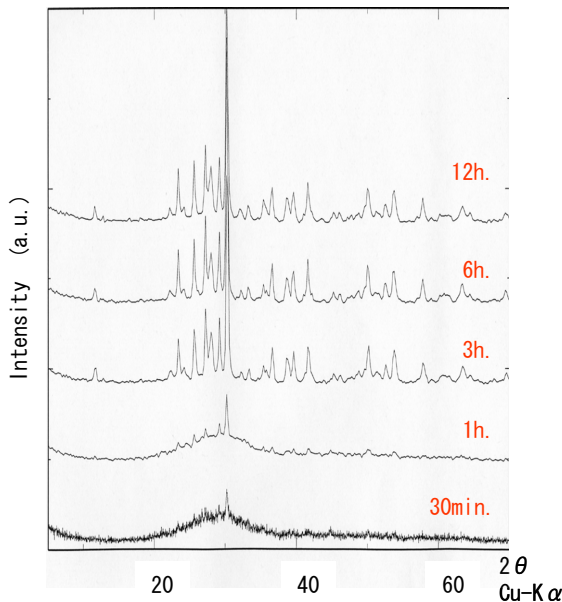


図3 熱処理時間による鋳物スラグのXRDプロファイル

処理時間を長くすることによりシャープなピークが現れ、結晶化が進むことがわかった。しかし保持時間を3時間以上延長しても、顕著な変化は見られなかった。

以上の結果より、熱処理条件は900℃、3hとした。骨材試験とコンクリート試験ではこの条件で処理したスラグを用いることとした。

また処理スラグのプロファイルから構成成分を同定したところ、図4に示すとおりウォラストナイトが確認された。

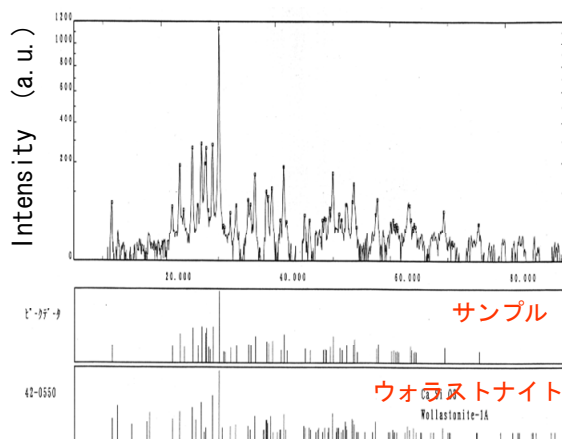


図4 XRDプロファイルによる構成成分の同定

図5には未処理スラグのSEM写真を、図6には処理スラグのSEM写真を示す。熱処理・徐冷による表面形状の変化が認められる。この変化はウォラストナイトの柱状結晶が成長したことによるものと思われる。

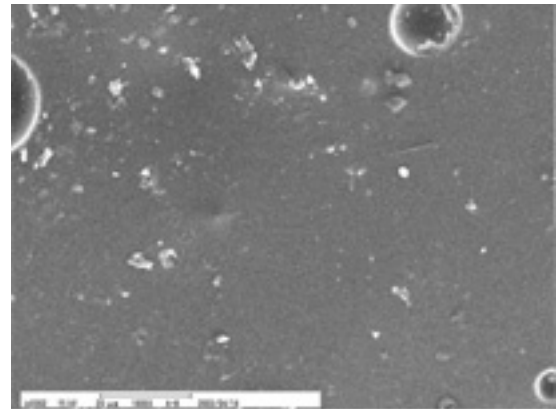


図5 未処理スラグのSEM写真

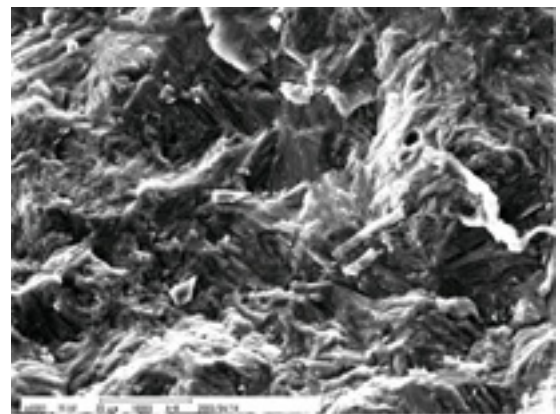


図6 処理スラグのSEM写真

3-2 骨材試験

JIS A5005に基づき、未処理スラグと処理スラグ、またコンクリート試験の基準供試体作成に用いた碎石について、物性を調べた結果を表4に示す。

未処理スラグはすりへり減量値が大きく出たが、これは非晶質で粉砕され易いためと考えられる。しかし粗骨材のJISの規格を満足しており骨材として使用上の問題はない。また、環告46号法による溶出試験の結果を表5に示す。どちらのスラグも定量下限値を下回っていた。

3-3 コンクリート試験

表6に水セメント比を変えて、スランプ試験と空気量、ブリーディング量を調べた結果を示す。スランプ試験では基準供試体より大きくなる傾向が見られた。これは吸水率がやや小さいことと、疎水性であるためコンクリートの流動性が高まったことが原因と考えられる。空気量は処理スラグでやや多かったが、未処理スラグでは基準と同等もしくはやや少なかった。ブリーディング量は、強度や耐凍害性に影響を及ぼすほどの差異は見られなかった。

表 4 物性試験結果

試験項目	JIS A5005 砕石規格	砕石	処理 スラグ	未処理 スラグ
表乾密度(g/cm ³)	—	2.95	2.83	2.83
絶乾密度(g/cm ³)	2.5 以上	2.91	2.82	2.82
ふるい分け(粗粒率)	—	6.71	6.75	6.67
吸水率(%)	3.0 以下	0.5	0.4	0.1
安定性(%)	12 以下	—	1.1	1.5
微粒分量(%)	1.0 以下	0.24	0.12	0.18
単位容積質量 (kg/m ³)	—	1,691	1,796	1,754
実積率(%)	55 以上	58	64	63
粒形判定実積率(%)	—	58	64	62
すりへり減量(%)	40 以下	7.7	5.2	25.6
ASR Rc (mmol/l) Sc (mmol/l)	Rc>Sc	—	25	32
		—	21	4
水中浸漬	亀裂、分解、 泥状化、粉 化などなし	○	○	○

表 5 環告 46 号法の試験結果

	(μg/l)					
	Cd	Pb	Cr(VI)	As	T-Hg	Se
熱処理スラグ	<0.5	<5	<20	<5	<0.5	<2
未処理スラグ	<0.5	<5	<20	<5	<0.5	<2
土壤環境基準	10	10	50	10	0.5	10
定量下限値	0.5	5	20	5	0.5	2

表 6 フレッシュコンクリート試験

	基 準 コンクリート			未処理スラグ コンクリート			熱処理スラグ コンクリート		
水セメント比	35	45	55	35	45	55	35	45	55
スランプ (cm)	6.5	8	8.3	8.2	12.8	11.8	9.1	11	11.5
空気量 (%)	4.3	4.7	5.5	4.5	3.9	3.9	5.1	4.8	6.0
ブリーディング (cm ³ /cm ²)	0.04	0.15	0.26	0.02	0.18	0.22	0.07	0.21	0.27

図 7 に材齢 28 日目の圧縮強度と引張強度を示す。圧縮強度はどちらのスラグを用いた場合も、水セメント比 55%では基準供試体より高かった。水セメント比の低下に伴って基準供試体よりも強度が低くなったが、一般的な強度の普通コンクリートならば問題なく使用できると思われる。また処理スラグの方がより高い強度を得られた。

引張強度については、未処理スラグ使用コンクリートの強度がやや低かった。これは比較的すりへり減量が大いことから骨材自体の強度が低く、スラグの破壊が起こるためと考えられる。処理スラグ使用コンクリートは基準供試体と同等の値を示した。また破断面を確認したところ、スラグの付着の悪い部分は認められず、スラグとセメントの結合性は良好であった。

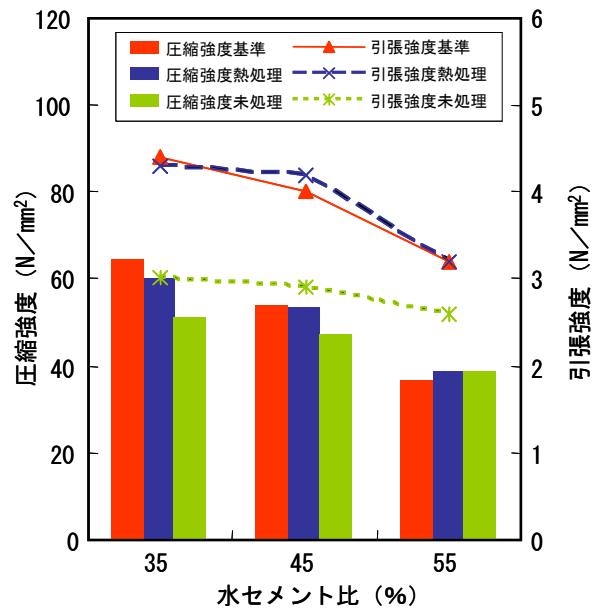


図 7 28 日強度と水セメント比の関係

4 結 言

鋳物スラグの骨材化を目的として溶融・徐冷後の挙動を調べた。その結果、非晶質の鋳物スラグが結晶化することが XRD プロファイルにより確認された。結晶化させるための熱処理条件は、900℃、3h. が最適であった。

処理スラグは物理的品質に優れていた。未処理スラグの骨材試験ではすり減り減量がやや大きく、強度が低かったがどちらも JIS のコンクリート用砕石の規格は満たしていた。また、有害物質の溶出はなく環境への負荷は極めて小さい。未処理スラグ使用コンクリートは、処理スラグ使用コンクリートと比較すると圧縮強度は小さいが骨材として適用可能である。処理スラグ使用コンクリートの品質はブリーディングがやや増えるが、強度は砕石使用コンクリートとほぼ同等であり、骨材としては十分適用可能である。

本研究の実施にあたり、ご指導いただいた岩手大学工学部建設環境工学科藤原忠司教授と、ご協力いただいた環境保全サービス (株) 代表取締役社長狩野公俊氏をはじめ関係各位に感謝いたします。

文 献

- 1) 眞目 薫：セラミックス，37(12)，936-940 (2002)
- 2) 高橋 達人：セラミックス，36(4)，246-247 (2001)
- 3) 横尾 俊信：セラミックス，37(7)，534-537 (2002)
- 4) 鈴木 蕃：the glass，39，15-20 (1996)
- 5) 佐藤 直也：平成 15 年度岩手大学工学部卒業論文 (2004)