

# 論文 溶融方法が都市ごみ溶融スラグの化学的・物理的性質に及ぼす影響

川端 雄一郎<sup>\*1</sup>・松下 博通<sup>\*2</sup>・佐川 康貴<sup>\*3</sup>・三宅 淳一<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、都市ごみ溶融スラグのアスファルト舗装用細骨材及びコンクリート用細骨材としての積極的な有効利用を目的とし、異なる過程により生成された都市ごみ溶融スラグ及びそれらを磨砕加工したものをを用いて化学的・物理的性質について検討を行った。その結果、生成過程の違いによらず都市ごみ溶融スラグの化学組成はほぼ同様の成分比となるが、物理的性質には差が生じることを明らかにした。また、磨砕加工によりコンクリート用細骨材としての物理的性質を十分に満足できることが分かった。

**キーワード:** 都市ごみ溶融スラグ, 磨砕加工, 化学的性質, 物理的性質

## 1. はじめに

都市ごみ溶融スラグ（以下スラグ）の品質は、生成の過程で決定されるため人工的な改善ができない性質のものと、人工的改善が可能な性質のものに分けて考えることができる。前者には密度、破碎値、均質さ、化学成分、溶出特性等があり、後者としては粒度、内部亀裂に起因した脆弱さ、粒子形状等が挙げられ、溶融方法や加工方法等によって様々な化学的・物理的性質のスラグが生成される。

そこで、本研究では4種類の炉型式により生成されたスラグを用いて各種の試験を行って基本性状を把握するとともに、粒子形状を改善する磨砕加工の有無や採取季節の影響を考慮しつつ、コンクリート用細骨材やアスファルト舗装

用骨材としての適用性に関する評価を行った。あわせて、各種試験の簡便なスラグ品質管理法としての適用性や、粒子形状改善のための加工の効果や必要性についても考察を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 対象としたスラグ

本研究で使用したスラグの溶融炉型式と生成過程について表-1に示す。スラグは代表的な溶融炉型式4種類（コークスベッド式炉、アーク式炉、プラズマ式炉、表面溶融式炉）を選択し、それらの該当炉を持つ自治体より夏季に入手した。表に示す磨砕加工とは、スラグをインペラブレーカにより壁に叩きつけて軽度の破碎

表-1 対象としたスラグ

スラグ 項目	A	Bg	C, Cw	Cg	D	Dg
溶融炉型式	コークスベッド式炉	アーク式炉	プラズマ式炉		表面溶融式炉	
溶融温度	1700~1800°C	1300~1600°C	1400~1500°C		1300~1400°C	
溶融雰囲気	還元	酸化	還元		酸化	
冷却方法	水冷					
メタル分離	スラグ化後に磁選機で分離	スラグ化後に磁選機で分離	スラグ化後に磁選機で分離		無	
ふるい分け	5mm以下	—	—		—	
加工方法	未加工	磨砕加工	未加工	磨砕加工	未加工	磨砕加工

\*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

\*3 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助手 修士(工学) (正会員)

\*4 電源開発(株) 技術開発センター茅ヶ崎研究所所長 工修 (正会員)

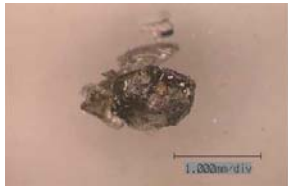


写真-1 スラグ A

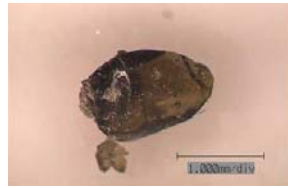


写真-2 スラグ Bg



写真-3 スラグ C

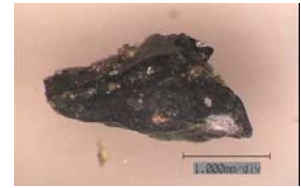


写真-4 スラグ D

を行い、角ばりの少ない粒子形状とする加工方法のことを表す。また、Cwはスラグの季節の変動による品質の変化の傾向を確認するためにCの生成箇所より冬季に採取したものである。なお、各スラグのみによる評価が難しい試験項目については、高炉スラグ細骨材や天然砂（大井川産陸砂）との比較を行うことで相対的な評価を行った。A、Bg、C、Dの粒子の写真を写真-1～4に示す。写真を見ると、磨砕加工を施したBgが最も粒形がよく、C、Dは角張った形状を示していることが分かる。

表-2に密度試験、吸水率試験、粒形判定実積率試験の結果を示す。表における粒形判定実積率やF.M.の値から、前述した通りA、BgがC、Dと比較して粒形や粒度が良いことが分かる。また、図-1に各スラグの粒度分布を示す。なお、図中で白抜きのプロットで表したスラグは磨砕加工を施したものを示している。A、Bgはコンクリート用砕砂の粒度規格を満たしたが、C、Dは粗目側に外れる結果となった。しかし、磨砕加工を行ったCg、Dgは粒度規格を満足し、粒度の粗いスラグは磨砕加工を適切に行うことにより、粒度規格を満足できると言える。

## 2.2 化学的性質の評価

### (1) 化学分析

A、Bg、C、Dを対象に、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、FeO、MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、SO<sub>3</sub>の8成分についての化学成分分析を実施した。

### (2) EPMAによる組成分析

スラグの元素組成と平面分布を把握するため、A、Bg、C、Dに対し、EPMAにより各主要元素の組成分析と面分析を実施した。

各元素の平面分布によりスラグ組織の均質性を評価できるとともに、金属元素と酸素の分布

表-2 基本物性試験結果

スラグ	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粒形判定実積率 (%)	F.M.
A	2.71	1.2	64.2	2.72
Bg	2.65	0.6	67.9	2.71
C	2.78	0.8	59.2	3.69
Cw	2.79	1.9	—	3.50
D	2.75	1.3	62.0	4.65
高炉スラグ	2.73	0.6	55.8	2.69
天然砂	2.61	1.5	58.6	2.79

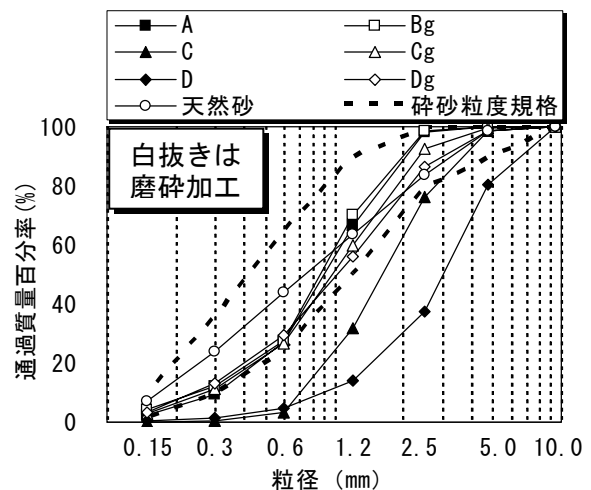


図-1 粒度分布曲線

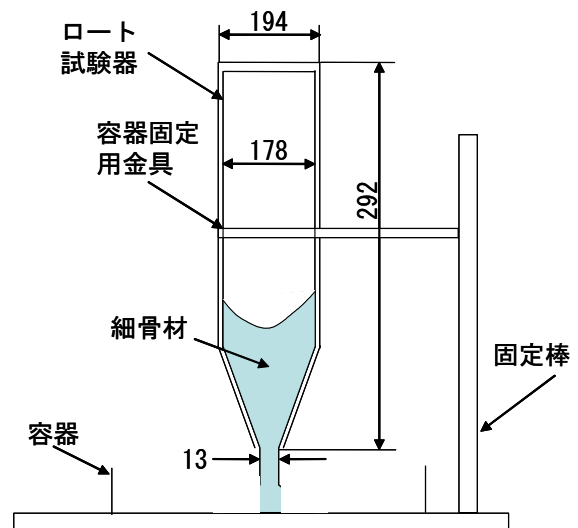


図-2 ドライブスコシティ試験装置

を対比することによって金属の存在形態についても判別できるものと考えた。分析箇所については、各元素の平面分布に偏りがなく、均質と評価できる部分を選んで組成分析を行った。また、A、Dに一部観察された不均質と見られる部分についても組成分析を行った。

### (3) 溶出試験

溶出試験は環境庁告示第46号に基づき、Cd、Pb、Cr(VI)、As、T-Hg、Seについて行った。試験はA、Bg、C、Cw、Dの5種類のスラグを対象とした。

### (4) アルカリ骨材反応性試験

A、Bg、C、Dを対象として化学法、モルタルバー法をそれぞれJIS A 1145、JIS A 1146に準じて行った。

## 2.3 物理的性質の評価

### (1) ドライブスコシティ試験

この試験方法は、日本道路公団によりアスファルト舗装関係試験方法として規定されており、**図-2**に示すロートの流下時間で粒子形状の良否を判定するものである<sup>1)</sup>。対象スラグはA、Bg、C、Cg、D、Dgであり、比較対象として高炉スラグ細骨材、天然砂を使用した。

流下時間の測定及び骨材粒度の算出に使用する試料は、粒径が2.5~0.075mmのスラグを100~110℃で質量が一定となるまで乾燥させたものである。流下時間は、ロート試験器の下端を指で押さえて試料を入れた後、流出口を開いてから試料が全て流下するまでの時間をストップウォッチにより測定した。

粒子形状の良否のみを表すために、測定流下時間に対する粒度の影響を排除する必要がある。

そのため、日本道路公団<sup>1)</sup>により規定された式

(1)を用いて、測定流下時間とF.M.より補正流下時間を求めて評価出来ることとなっている。

補正流下時間

$$= \text{測定流下時間} + 2.94 \times (3.2 - \text{F.M.}) \quad (1)$$

本研究では各スラグと天然砂細骨材について

表-3 化学成分分析結果

測定項目	A	Bg	C	D
SiO <sub>2</sub>	39.50	45.00	36.50	40.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.18	20.25	16.34	15.57
FeO	2.65	2.19	1.47	9.22
CaO	32.10	20.00	36.70	23.00
MgO	1.55	2.86	2.63	2.56
Na <sub>2</sub> O	3.33	4.07	1.97	2.72
K <sub>2</sub> O	0.78	1.37	0.41	1.42
SO <sub>3</sub>	0.03	0.03	0.04	0.05
Total	97.12	95.77	96.06	94.74

表-4 EPMAによる組成分析結果(均質部)

測定項目	A	Bg	C	D
Si	24.27	27.45	22.19	23.27
Ca	26.00	16.79	29.32	19.71
Al	12.04	14.49	11.51	9.61
Fe	2.36	4.49	2.83	12.04
Na	3.60	3.03	1.78	2.29
Mg	1.78	2.70	2.84	2.30
K	1.01	1.39	0.49	1.56
Cu	0.99	0.41	0.95	0.46
Cl	0.20	0.17	1.53	0.71
O	24.13	25.31	23.82	22.91
Total	96.38	96.23	97.26	94.86

表-5 EPMAによる組成分析結果(不均質部)

測定項目	A	D
Si	3.29	54.53
Ca	0.00	1.34
Al	0.17	3.46
Fe	88.48	2.68
Na	0.00	0.74
Mg	0.00	1.10
K	0.15	0.89
Cu	3.69	0.95
Cl	0.11	0.49
O	1.88	31.35
Total	97.77	97.53

補正流下時間を求め、各スラグの値を天然砂細骨材の値で除して無次元化し、各試料の差異を検討した。

### (2) 突固め試験

この試験はスラグの粒子強度を把握するため、本研究における全てのスラグ及び高炉スラグ細骨材と天然砂を対象に、JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験方法」に準じて行った。

表－6 スラグ溶出試験結果

試験項目	単位	A	Bg	C	Cw	D	溶出基準	定量下限値
pH	—	9.4	7.7	8.6	9.1	10.3		—
電気伝導率 (EC)	mS/m	2.6	3.4	53	49	7.6		—
pH, EC測定水温	℃	19	19	19	10	19		—
カドミウム	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	0.01	0.003
鉛	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	0.01	0.01
六価クロム	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	0.05	0.01
砒素	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	0.01	0.002
総水銀	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	0.0005	0.0005
セレン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	0.01	0.005

ND：定量下限値未満を示す

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 化学的性質

EPMA により、スラグについて断面の各主要な元素を面分析した結果、ほとんどのスラグは分布に偏りがなく、均質であった。このことから、スラグは溶融が十分になされていることが確認された。

##### (1) スラグ均質部の評価

化学分析結果を表－3に示す。また、EPMAにより均質と評価できた部分に対する組成分析結果の一例を表－4に示す。表－3より、いずれのスラグも化学成分の合計がほぼ100%に近いことから、スラグ中の各成分は酸化物として組織を形成しているものと考えられる。また、全体の80～90%をSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaOが占め、SiO<sub>2</sub>とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はほぼ同様の成分比となっており、溶融雰囲気は異なっても大きな相違は認められない。CaOの含有率にやや差異が見られるが、Caはごみ中のCa成分の他に、燃焼ガスからの脱塩素対策やスラグ溶融温度の調整のために添加されるCa成分の影響を受け、各炉によって値が異なっていると考えられる。

また、DのみFeOの含有量が多くなっていることが分かる。また、同様に表－4においてもDのFe含有量が多い。これはDのスラグ生成の際にはメタル分離（溶融時の密度差により金属を分離回収したり、スラグ化後に磁選機で鉄を回収する工程）が行われていないことによるものと考えられる。また、Cは塩素が他のスラグに比べ多い結果となっているが、これはCの水砕

工程では水砕用の水が循環使用されているため、水中の塩素濃度が高くなっていることが原因と考えられる。

以上から、スラグは溶融方法に関わらず化学組成はほぼ同様であり、安定していると言える。

##### (2) スラグ不均質部の評価

EPMAによる面分析により一部不均質部と思われる部分はAとDに観察された。A、Dスラグの不均質部における組成分析結果の一例を表－5に示す。

Aでは大半を鉄が占めており、酸素が少量しか含まれていない。また、面分析により鉄と酸素の平面的な分布位置が一致しないことが確認されたことから、鉄は酸化鉄ではなく金属状態の鉄で多く存在していると考えられる。これはAの溶融炉が還元性の雰囲気であるためと考えられる。金属鉄は発錆のおそれがあるため有効利用上は好ましくない場合があり得る。一方、Dの不均質部はSiが大半を占めていた。これは、表－1に示すようにDの設定溶融温度が最も低いことから陶器くず等が未溶融のままスラグ内に残存したものと推定される。

これらのことから、スラグの不均質部の発生は溶融時の条件に依存し、それがスラグの品質に直接影響を与え得ると言える。そのため、溶融温度を低く設定した場合はスラグの不均質部が生成される恐れがあるため、一定のスラグの品質を確保するためには溶融温度に変動を与えないような運転状態を実現させることが必要であると考えられる。

### (3) スラグの溶出特性

表-6に溶出試験結果を示す。表より、本研究で使用したスラグはいずれの項目とも定量下限値未満となった。これは、既往の研究<sup>2)</sup>から明らかにされているようにスラグ中のSiO<sub>2</sub>の網目構造により有害物質の溶出が抑制されるためと考えられ、本研究で用いたスラグは有害物質の溶出に対する安全性が確保されていると言える。

### (4) スラグのアルカリシリカ反応性

化学法による試験結果を図-3(a)に示す。図より、いずれのスラグも、Rc, Scともに小さく、アルカリシリカ反応性は小さいものであることが分かる。A, Cはともに溶解シリカ量Scが10mmol/l以下なので、「無害」と判定され、BgについてもRc $\geq$ Scとなり「無害」と判定された。また、DについてはRc $\leq$ Scとなり、「無害でない」という判定となった。

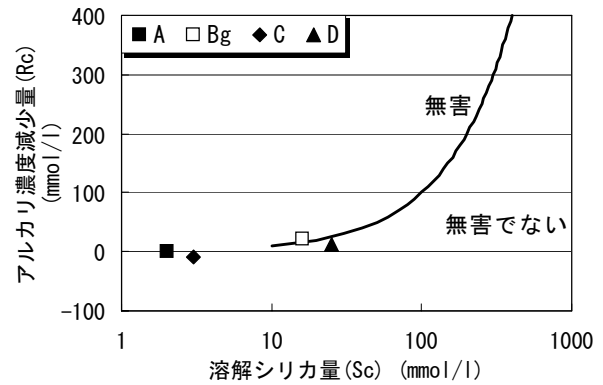
次に、モルタルバー法による試験結果を図-3(b)に示す。図より、モルタルバー法では測定材齢6ヶ月における長さ変化率の判定基準値0.1%に対して全ての試料が0.02%以下となり、アルカリシリカ反応性の問題がない「無害」な骨材であると判定された。JIS A 1146によれば、モルタルバー法による判定を優先してよいことから、本研究で使用したスラグはいずれも「無害」の評価となる。

ガラス質で構成される骨材は不安定であり、一般的にはアルカリシリカ反応性が高いとされるが、本研究で使用したスラグがアルカリシリカ反応性を示さなかったのはスラグ中に含まれるシリカ分に対してカルシウム分、アルミナ分が多く、ガラス相が安定しているためであると考えられる<sup>3)</sup>。しかし、本研究の範囲ではアルカリシリカ反応性を完全に否定できるとは言えない。スラグの組織構造と化学反応特性については今後のさらなる研究が待たれる。

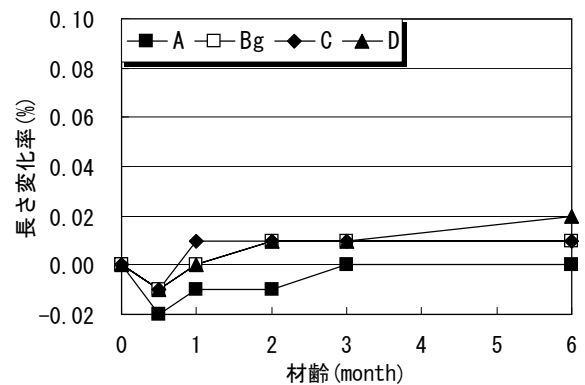
## 3.2 物理的性質

### (1) スラグ粒子の形状

ドライビスコシティ試験による粒形評価試験結果を図-4に示す。図に示す値の小さい方が



(a) 化学法試験結果



(b) モルタルバー法試験結果

図-3 アルカリシリカ反応性試験結果

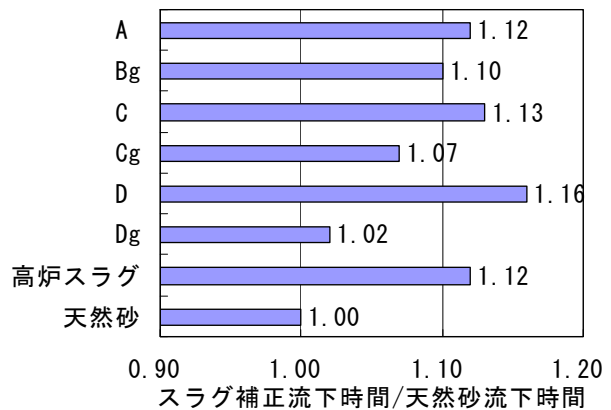


図-4 粒形評価試験結果

粒形の良い試料と評価される。CとCg, DとDgを比較すると、磨砕加工を施したCg, Dgの方が粒形が良くなっており、特にDに対する磨砕加工の効果が大きいことが示されている。しかし、表-2に示す粒形判定実積率と比較すると、粒形判定実積率試験においてはスラグが天然砂よりも良いのに対し、本試験ではスラグの方が粒形の悪い骨材と悪いと判断された。これはスラグの表面の平滑度に起因するものと考えられ

るが、本研究においては明らかとなっておらず、今後の検討課題である。

## (2) スラグ粒子の強度

表-7に1EC, 2EC (EC=標準エネルギー) による突固め試験前後の通過重量百分率 50%粒径 ( $D_{50}$ ) の変化を示す。また, F.M. (土質試験ふるい目による) を算出して細粒化の程度の表現を試みた。試験による F.M. の変化を表-8に示す。A, Bg 及び高炉スラグ細骨材と天然砂は突固め前後で  $D_{50}$  及び F.M. に大きな変化が見られないことからあまり細粒化しておらず, 試験に用いた試料の中では大きい粒子強度を有することを示す結果となった。

一方, C, Cw, D については  $D_{50}$ , F.M. ともに細粒化程度が大きいことから, A, Bg, 高炉スラグ細骨材, 天然砂と比較して強度的に劣ることを示している。これは, 磨砕を施していないことで粒子形状が悪いためと考えられる。

しかし, C, D に加工を施した Cg, Dg は細粒化程度が小さく, 粒子破壊に対する抵抗性が大きく改善されている。すなわち, スラグに磨砕加工等を行うことは, 粒子形状の改善とともに粒子強度を向上できることから, スラグの性能向上のために有効な手法と言える。なお, 夏季採取の C と冬季採取の Cw との差は小さいことから, 同様の性状を有するものと考えられる。

以上から, 突固め試験により  $D_{50}$ , F.M. を把握することは, スラグ粒子の破砕値を管理するための簡便な手法と位置付けてよいと考えられる。

## 4. 結論

本試験により得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究で使用した熔融温度 1300 度以上の異なる 4 種類の熔融炉より生成したスラグはいずれも全体の 80~90% を  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が占める。その構成比は生成過程に依らずほぼ同様であった。
- (2) 生成過程や採取した季節, 磨砕加工の有無に関わらず, 本研究で使用したスラグからの重金属の溶出量は環境庁告示第 46 号溶出試験

表-7 突き固めによる  $D_{50}$  の変化

試験対象	原粒度	1 EC	2 EC	$D_{50}$ 変化量
	$D_{50}$ 粒径	$D_{50}$ 粒径	$D_{50}$ 粒径	
A	0.720	0.685	0.690	0.030
Bg	0.800	0.715	0.735	0.065
C	1.250	1.100	1.050	0.200
Cw	1.200	1.000	0.965	0.235
Cg	0.700	0.665	0.625	0.075
D	3.010	2.100	2.050	0.960
Dg	0.700	0.600	0.600	0.100
高炉スラグ	1.100	1.050	1.015	0.085
天然砂	1.200	1.150	1.150	0.050

表-8 突き固めによる F.M. の変化

試験対象	試験前	1 EC	2 EC	F.M. 変化量
	F.M.	F.M.	F.M.	
A	3.1	3.0	3.0	0.1
Bg	3.1	3.0	3.0	0.1
C	4.0	3.7	3.7	0.4
Cw	3.7	3.5	3.5	0.2
Cg	3.7	3.6	3.6	0.1
D	4.9	4.5	4.4	0.5
Dg	3.7	3.6	3.6	0.1
高炉スラグ	3.7	3.6	3.5	0.2
天然砂	3.6	3.5	3.5	0.1

の定量下限値未満であり, アルカリシリカ反応性は「無害」であった。

- (3) 炉型式, 熔融温度, 水冷手順等の生成過程の違いにより, 生成時のスラグの粒度分布や粒子形状のような物理的性質には差が生じる。
- (4) 粒子形状が悪く, 低強度であるスラグは磨砕加工を行うことで物性の改善が可能であり, コンクリート用細骨材の規格も満足できる。

## 参考文献

- 1) 日本道路公団規格: 細骨材の粒形評価試験方法, JHS 238-2001, 2001
- 2) 財団法人 廃棄物研究財団: スラグの有効利用マニュアル, pp.51-58, 1999.11
- 3) 鳥居和之ほか: 熔融炉スラグの物理・化学的性質とアルカリシリカ反応性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.623-628, 2003.7