

◆特集：建設材料研究の新たな展開◆

## 下水汚泥溶融スラグの建設資材としての利用

宮本豊尚\* 尾崎正明\*\*

### 1. はじめに

近年下水道普及率の増加に伴い下水汚泥の発生量も増加している<sup>1)</sup>が、他方では処分地の逼迫が大きな問題となっており、一部では溶融炉が導入された。溶融により得られるスラグは、物理・化学的性質から建設資材として利用することが可能であるが、下水道工事など利用は限られてきた。

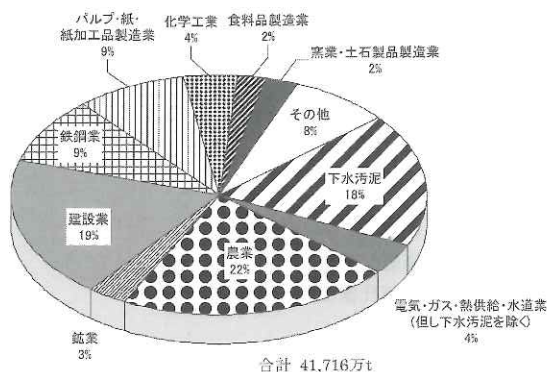
平成18年7月に、一般廃棄物および下水汚泥を対象とする道路用、コンクリート用溶融スラグ骨材に関するJIS規格が制定された。これにより下水溶融スラグの建設資材利用の促進が期待されている。本稿では、下水汚泥溶融スラグ利用にいたる経緯と下水溶融スラグの化学・物理的特性を述べ、建設資材としての利用例を示すととも今後の下水溶融スラグの展望を述べる。

### 2. 下水汚泥溶融スラグ利用の経緯

2004年度現在、下水汚泥は日本国内において排出している産業廃棄物のうち20%近くの割合を占めており(図-1)、25年間で約3倍に増加している(図-2)。

減量化を計るため、溶融処理を行っている処理場もある。下水汚泥(あるいはその焼却灰)を約1,300~1,500℃に熱すると、汚泥中の有機物は熱分解・燃焼し、残りの無機物は溶融する。この融液を冷却・凝固させたものが下水汚泥溶融スラグである。

下水汚泥の溶融処理は1981年に川崎市の加瀬処理場にて始まったといわれ、2004年度末には全国で18箇所、計33基が稼働している(図-3)。地域性をみると、関西地区は多くの溶融炉が導入されており、溶融スラグの生産シェアも80%近くと高くなっている(図-4)。現在、最大の生産量を誇る処理場は兵庫県の揖保川浄化センターで、



(下水汚泥は含水率97%;発生時現物量ベース)

図-1 産業廃棄物排出量に占める下水汚泥の割合<sup>1)</sup>

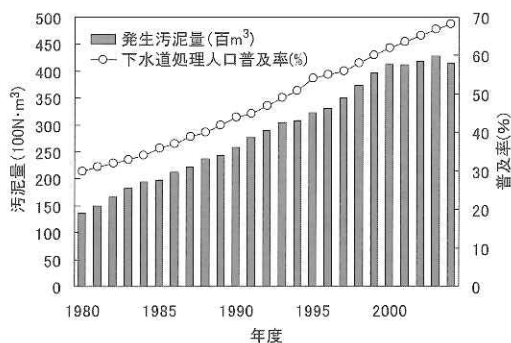
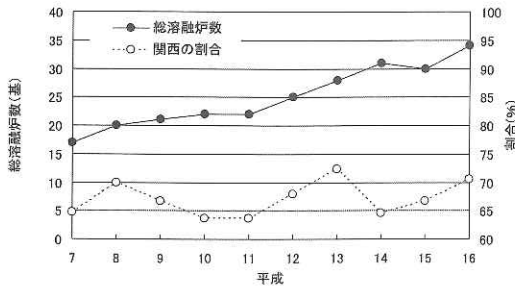


図-2 下水道処理人口普及率と汚泥発生量<sup>1)</sup>

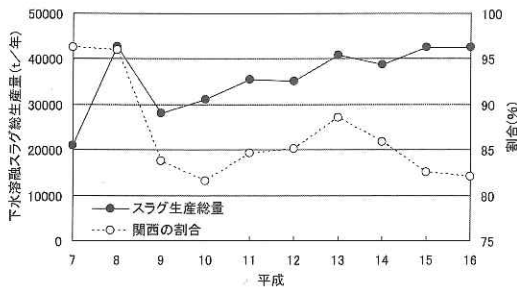
2006年度には年間7601tを生産している。一般廃棄物では、下水汚泥以上に溶融処理が急速に進んでおり、一般廃棄物溶融スラグの生産量は1997年からの7年間で約5倍に増加している<sup>2)</sup>。

溶融スラグは冷却方法により、水砕スラグ・空冷(除冷)スラグに大別される(図-5)。水砕スラグは水と直接接触させることで急冷する方法で作られ、ガラス質で細粒状又は砂状である。表面には光沢があり、撥水性がある。空冷スラグは、結晶化を目的として大気中で放冷したスラグで、塊状である。利用に際しては破碎・分級等の加工が必要となる。一部施設ではスラグの表面性状や強度の改善を図るため結晶化を進めたスラグを製

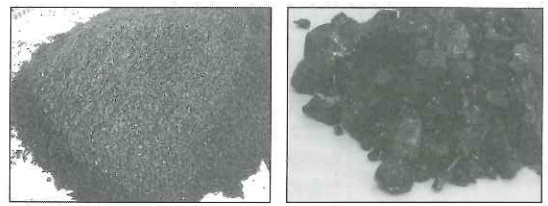
Utilization of Melt-Solidified Slag Derived from Sewage Sludge for Construction Materials



(関西は滋賀・京都・大阪・兵庫の各府県の合計値)  
図-3 下水汚泥溶融炉数の年次変化<sup>2)</sup>



(関西は滋賀・京都・大阪・兵庫の各府県の合計値)  
図-4 下水汚泥溶融スラグ生産量の年次変化<sup>2)</sup>



(a)水砕スラグ (b)空冷スラグ  
図-5 溶融スラグ

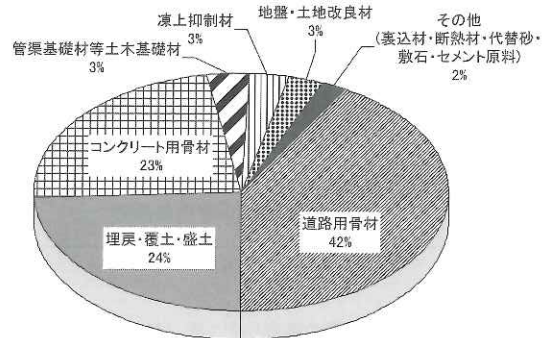


図-6 溶融スラグ利用内訳<sup>3)</sup>

造している。

その一方で、一般廃棄物を含む溶融スラグの有効利用はあまり進んではこなかった。2004年度には下水汚泥・一般廃棄物由来の溶融スラグはそれぞれ4.3万t・52.1万t発生しているが、有効利用されたのは全体の65%、37万tである<sup>3)</sup>。その利用内訳は図-6に示すように建設資材としての利用が大半である。下水汚泥溶融スラグは2004年度において、約82%が建設資材として有効利用されている<sup>4)</sup>。

有効利用が進まない理由の一つとして、製造箇所数が多くスラグの品質を一定に保つことが難しいのではないかと疑問が挙げられ、利用促進のためには標準化を行う必要があると言われてきた。このような状況下から、2002年7月には溶融スラグに関するTR(標準情報)0016および0017が公表され、2006年7月にはJIS A5031「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材」および5032「同 道路用溶融スラグ」が公示された。JISの利用用途では、表-1、2に示すように、コンクリート用溶融スラグ骨材として粗骨材と細骨材が、道路用溶融スラグとして加熱アスファルト混合物用と上層

・下層路盤材用が規定された。

実際の下水汚泥溶融スラグの利用状況として、富山県の例を示す<sup>5)</sup>。富山県では下水汚泥溶融スラグを下水道工事などに建設資材として100%有効利用してきたが、下水道の普及率が高くなるのにあわせて、下水汚泥の量が増え、下水汚泥溶融スラグの生成量も増加した。そこで企業等への売り払いを開始し、下水汚泥溶融スラグを原材料とした製品が開発された。それらは富山県認定リサイクル製品として認定を受け、優先的に公共事業で利用されている。

### 3. 下水汚泥溶融スラグの性質

#### 3.1 物理的性質<sup>6)</sup>

下水汚泥溶融スラグは先述したように、水砕スラグと空冷スラグに大別される。

水砕スラグは内部にクラックがあるなどして山砂等と比較し脆いことが多い。鋭利な角を有することが多く、融液の粘性が高い場合や溶融炉内温度が低い場合にはスラグの一部が針状になることがある。空冷スラグの強度は水砕スラグと比較すると大きい。空冷スラグの中でも特に冷却速度を遅くし結晶化が進んだスラグ(結晶化スラグ)は、

表-1 コンクリート用溶融スラグ骨材の種類<sup>7)</sup>

種類	記号	摘要
粗骨材	MG	一般廃棄物及び下水汚泥の溶融固化施設から有効利用を目的に産出される溶融物を冷却固化し、粒度調整したもの。
細骨材	MS	

表-2 道路用溶融スラグの種類<sup>8)</sup>

種類	記号	用途(参考)
単粒度溶融スラグ (徐冷スラグ)	SM	加熱アスファルト混合物用
溶融スラグ細骨材 (水砕スラグ、徐冷スラグ)	FM	加熱アスファルト混合物用
粒度調整溶融スラグ (徐冷スラグ)	MM	上層路盤材用
クラッシュラン溶融スラグ (徐冷スラグ)	CM	下層路盤材用

表-3 主なスラグ類の密度<sup>6),9)~12)</sup> (単位 g/cm<sup>3</sup>)

下水溶融	高炉	フェロニッケル	銅	電気炉酸化
2.5~3.0	2.1~2.7	2.7~3.1	3.3~3.7	3.1~4.5

天然骨材とほぼ同様の物性を持つが、製造コストは高くなる。

すりへり減量は骨材そのものの硬さや摩耗に対する耐性と密接な関係があり、特に水砕スラグではすりへり減量が大きくなる場合があるので注意が必要である。摩砕処理によりスラグの形状を整えるとすりへり減量を抑えることが出来る。

一般的に下水汚泥溶融スラグの密度は、2.5~3.0g/cm<sup>3</sup>の範囲であり、結晶化スラグは他のスラグと比較して、密度が高い傾向にある。ちなみに高炉スラグやフェロニッケルスラグとはほぼ同等、銅スラグや電気炉酸化スラグより低くなっている(表-3)。吸水率は概ね2.0%以下である。

### 3.2 化学的性質<sup>13)</sup>

下水汚泥溶融スラグの主成分はSiO<sub>2</sub>、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>であるが、一般廃棄物溶融スラグと比較して、鉄・リン・硫黄等の含有量が多いという特徴がある(表-4)<sup>14)</sup>。高熱溶融する過程で重金属類はガラス質結晶体の中に取り込まれる。

下水汚泥溶融スラグのJIS化に先立ち、スラグ

表-4 スラグの化学組成例<sup>14)</sup> (単位 重量%)

	下水汚泥溶融スラグ	一般廃棄物溶融スラグ
SiO <sub>2</sub>	29.3	34.6
CaO	17.7	25.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.1	16.4
MgO	1.9	2.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.4	5.8
Na <sub>2</sub> O	1.4	3.0
K <sub>2</sub> O	1.8	1.0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15.5	4.9
TiO <sub>2</sub>	0.2	1.5
SO <sub>3</sub>	0.2	0.3

表-5 含有量試験結果例<sup>17)</sup> (単位 mg/kg)

	測定限界(N.D.)	測定値 (n = 17)			含有量基準
		最小	最大	平均	
カドミウム	0.17	N.D.	1.4	0.5	150
鉛	0.17	0.4	39.2	13.9	150
砒素	0.17	N.D.	109.7	7.2	150
セレン	0.17	N.D.	0.2	0.0	150
ふっ素	13.3	N.D.	366.7	80.2	4000
ほう素	0.17	0.7	70.0	27.8	4000

注) N.D.は濃度からの計算値、平均値算出の際は0とした。

類の溶出量および含有量の試験方法が別途JISに制定された<sup>15),16)</sup>。これまで環境省通知では、再利用物に対する環境安全性については現状有姿や利用形態を考慮して評価がなされるべきとされていた。すなわち最終製品の状態で土壤汚染対策法の指定基準を満足すれば、安全上問題ないと考えられていた。しかし、今回のJISでは溶融スラグが対象とされ、溶融スラグ単体の安全品質レベルが規定されている。新たなスラグ類の溶出量の試験方法では、分析に用いる溶融スラグの大きさは粉砕して粒の大きさを小さくすることなく利用形態の有姿とされた。また、土壤汚染対策法において直接摂取による人への影響を考慮した有害物質の含有量基準が設定されたことを踏まえて、溶融スラグ単体で同含有量基準を満足することが要件とされた。ただし、暫定的な措置として、溶融スラグ単体で同含有量基準を満足しない場合の取扱いも規定されている<sup>13)</sup>。有害物質の監視項目は8項目(カドミウム・鉛・六価クロム・ヒ素・総水銀・セレン・ふっ素・ほう素)である。含有量試

験の結果例を、表-5に示す<sup>17)</sup>。また、溶出試験の知見も数多く得られており、多くが測定限界以下となっている<sup>18)~20)</sup>。

現在、肴倉ら<sup>21)</sup>により、建設資材系の再生製品を対象とした環境安全性評価試験の規格化研究がなされている。安全性評価については、再生製品全体の動きを注視する必要がある。

## 4. 下水汚泥溶融スラグの利用

### 4.1 埋め戻し材・土壌改良土

埋め戻し材・土壌改良土は下水汚泥溶融スラグの一般的な使用用途の一つである。特に、下水道事業では下水あるいは汚泥の処理のために管渠や処理場の整備も必要であるため、これらのような下水道事業由来の土工において、下水汚泥溶融スラグは利用されている。特に下水道管の埋め戻し材として粒形の小さい砂状の水砕スラグがよく用いられている。

例えば栃木県では年間約2,200tのスラグを下水道資源化工場にて製造している。県内の市町により埋め戻し材として下水道管渠工事の管基礎材・防護材として有効利用している<sup>22)</sup>。発生したスラグはすべて、排出量に応じて各市町村に返却し、公共事業に利用されている。

また大阪市では、「校庭の芝生化」事業の一環として、土壌固結防止のための土壌改良材として利用されたユニークな例がある<sup>23)</sup>。下水汚泥溶融スラグを校庭の土と混ぜた後、芝の種まきを行い、今ではグラウンドは緑の芝生となっている。

他方で長年の利用により、埋め戻し需要の減少や、埋め戻し現場の遠方化に伴う運搬コスト上昇等の問題が生じている。

### 4.2 道路用骨材<sup>8)</sup>

一般の道路用材料としての加熱アスファルト混合物用骨材及び路盤材として用いる溶融スラグとして品質等を規定するJIS A 5032が2006年に制定された。

溶融スラグをアスファルト骨材として使う研究は古くからなされている<sup>24)</sup>。主としてアスファルト混合物の細骨材代替として水砕スラグが利用されているが、一部では除冷スラグも粗骨材の代替として利用されている。兵庫県西播磨・中播磨地域では、特徴的な利用が行われている。平成16年度より全国に先駆けて、県が発注する舗装工事に

は下水汚泥溶融スラグを用いたアスファルト混合物を原則使用することになった<sup>25)</sup>。現在アスファルト利用をしていない地域でも、検討しているところは多い。

路盤材としての利用は平成9年頃より福岡県<sup>26)</sup>などで研究された事例があり、長野県においては溶融結晶化骨材を路盤工・敷砂利工に利用している<sup>27)</sup>。

スラグではなく汚泥焼却灰をフィラー（石粉）の代替としてアスファルトに混入させている事例が神戸市や東京都・宮城県等である<sup>28)</sup>。

### 4.3 コンクリート細骨材・粗骨材<sup>7), 29)</sup>

道路用骨材と同様に、コンクリート用溶融スラグとしての品質等を規定するJIS A 5031が2006年に制定された。溶融スラグをコンクリートの細骨材・粗骨材に使う研究も古くからなされている<sup>30)</sup>。

溶融スラグ骨材の標準化では金属鉄含有量の規定が問題となった。スラグ中の金属鉄は、全鉄から他の物質と化合している鉄を除いたものである。金属鉄が規定されたのは、スラグ骨材に含まれる金属鉄が発錆することによりコンクリート表面が着色され美観を損ねるおそれがあるためである。

2002年に制定されたTR（標準報告書）では含有量を1%以下とする基準ができた。1%という基準はフェロニッケルスラグ骨材の規定と同じく定められた。JIS化される際に、道路用骨材の金属鉄含有量の規定は変更され、密度管理のみが行われることとなったが、コンクリート用骨材では金属鉄含有量1%以下との基準がそのまま適用された。

金属鉄の計測方法としてフェロニッケルスラグではEDTA滴定法が提案されているが<sup>10)</sup>、同方法ではりん鉄を多く含む下水汚泥溶融スラグにおいては過大評価されることが多くなる。そうした場合、JIS A 5031ではメスbauer分光分析法（以下メスbauer法）による計測を認めている。メスbauer法は原子核が放射する $\gamma$ 線を利用した方法である。化学結合の違いによって得られるスペクトルが異なるため、Fe、Sn、Au等の化合物においては、金属か化合物かを判別することが出来る。メスbauer法では105 $\mu$ m以下に粉碎した溶融スラグを約0.1g使用するが、サンプル量が少量であるためサンプリングには注意を要する。

同一ロット内の代表した資料を採取するために、

例えば週ごとにサンプリングを実施したものを一ヶ月単位で混合するなどの方法が指示されている<sup>7)</sup>。ただし十分なストックヤードを確保し、出荷全量を代表する試料を採取して事前に検査を行って出荷前に試験値を確認できる場合には上記の検査頻度は適用されない。

現在のところ、溶融スラグのコンクリート用骨材としての主な利用は、コンクリート二次製品（インターロッキングブロック・擁壁・人孔・縁石・排水柵・ヒューム管等）が中心となっている。先述の富山県の例もそうであるが、これらの製品は各府県においてグリーン製品として認定されているものも多くなっている。

#### 4.4 その他の利用事例

利用例は少数であるが、耐酸性コンクリートの製作も行われている。セメントの代わりに水ガラスを利用したもの<sup>31)</sup> や、硫黄固化体との混合セメント<sup>32)</sup> が開発されている。耐酸性コンクリートが注目されている理由のひとつに、下水道事業での大量の自己消費が可能であることが挙げられる。下水管渠内は、硫酸環境下に置かれており、コンクリートの腐食が問題となっている。今後の下水道整備は修繕に力を入れていく必要があり、LCC（ライフサイクルコスト）の観点からも耐酸性コンクリートの需要が高まることが予想されているからである。

その他の事例として、京都市の結晶化スラグ（京石）は、生産量の約半数が透水性セラミックブロックの原料として利用されている<sup>33)</sup>。兵庫県では、レンガの原料としても利用されている。

### 5. 今後の展開

今回のJISで定められた加熱アスファルト混合物用道路用溶融スラグやプレキャストコンクリート製品などへの下水汚泥溶融スラグの用途についてはまだ使用実績が少なく、長期耐久性に関するデータも少ない。今後は、これらのデータの蓄積に加え、安定した利用先を確保できる下水溶融スラグの利用メニューを増やしていくことが肝要である。

土木研究所は下水汚泥溶融処理検討プロジェクトの活動を通じ、JIS原案作成の段階で情報提供を行い、JIS規格へのコンクリート粗骨材や金属鉄測定法の追加を実現してきた。今後は長期耐久

性の確認法の確立や、新たな下水溶融スラグの利用方法の提案を行っていきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 下水道協会HP  
[http://www.jswa.jp/05\\_arekore/06\\_use/riyou/data.html](http://www.jswa.jp/05_arekore/06_use/riyou/data.html)
- 2) 下水道統計 (H7～16)
- 3) 坪井晴人：エコスラグ再資源化への自治体の動向、産業機械, No.674, pp.53-56, 2006
- 4) 松原 誠、伊藤貴輝：下水汚泥有効利用の現状と課題について、再生と利用, Vol.29, No.111, pp.19-27, 2006
- 5) 富山県HP  
[http://www.pref.toyama.jp/cms\\_cat/305020/kj00002979.html](http://www.pref.toyama.jp/cms_cat/305020/kj00002979.html)
- 6) 日本下水道協会：2001年度版下水汚泥の建設資材マニュアル, pp.149-248
- 7) 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材 JIS A 5031:2006、日本工業標準調査会審議、平成18年7月20日制定
- 8) 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ JIS A 5032:2006、日本工業標準調査会審議、平成18年7月20日制定
- 9) コンクリート用スラグ骨材-第一部：高炉スラグ骨材 JIS A5011-1、日本工業標準調査会審議、平成15年6月15日改正, pp.20
- 10) コンクリート用スラグ骨材-第二部：フェロニッケルスラグ骨材 JIS A5011-2、日本工業標準調査会審議、平成15年6月15日改正, pp.25
- 11) コンクリート用スラグ骨材-第三部：銅スラグ骨材 JIS A5011-3、日本工業標準調査会審議、平成15年6月15日改正, pp.22
- 12) コンクリート用スラグ骨材-第四部：電気炉酸化スラグ骨材 JIS A5011-4、日本工業標準調査会審議、平成15年6月15日制定, pp.21
- 13) 尾崎正明：一般廃棄物、下水汚泥等の溶融スラグのJIS化、土木技術資料, Vol49, No7, pp.15-16
- 14) (財)建材試験センター：溶融スラグ骨材コンクリート利用マニュアル, pp.44
- 15) スラグ類の化学物質試験方法-第一部：溶出量試験方法 JIS K0058-1、日本工業標準調査会審議、平成17年3月20日制定
- 16) スラグ類の化学物質試験方法-第二部：含有量試験方法 JIS K0058-2、日本工業標準調査会審議、平成17年3月20日制定
- 17) 尾崎正明、宮本綾子、山下洋正：溶融スラグ骨材の標準化、第42回下水道研究発表会講演集, pp.489-191, 2005
- 18) 櫻井信隆、杉村裕康、山田善照：高品質徐冷スラグ取出装置の開発、第35回下水道研究発表会講演集, pp.954-956, 1998
- 19) 小宮山善史、遠山 久：焼却灰溶融結晶化設備の実用化、第36回下水道研究発表会講演集, pp.926-928, 1999

- 20) 田中松生、三羽宏明、菊田 武：水砕スラグ・小生砂利の粒度調整による修正CBR値の向上、第37回下水道研究発表会講演集, pp.906-908, 2000
- 21) 肴倉宏史、大迫政浩、宮脇健太郎、崎田省吾、東條安匡、坂本広美、遠藤和人、田野崎隆雄、貴田品子、酒井伸一：再生製品を対象とした環境安全性評価試験の規格化研究（第一報）、第17回廃棄物学会発表会講演論文集, pp.1110-1112
- 22) 亀山栄一：栃木県における下水汚泥の有効利用について、再生と利用, No.115, pp.21-29, 2007
- 23) 大阪府HP  
<http://www.pref.osaka.jp/gesui/recycle/sibahu2.html>
- 24) 藤井 岳、塩田耕三、香川保徳、常深武志：下水汚泥溶融スラグのアスファルト粗骨材への利用、第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.602-604
- 25) 植谷寿夫：下水汚泥溶融スラグのアスファルト混合物への利用について、平成17年度近畿地方整備局管内技術研究発表会、新技術・新工法部門Ⅱ, No.4
- 26) (財)福岡県建設技術情報センターHP  
<http://www.fctic.or.jp/PDF/kenkyu-15.pdf>
- 27) 日本下水道協会、下水汚泥資源利用協議会：平成17年度下水汚泥リサイクル資材一覧, pp.4-93
- 28) 宮城県HP  
[http://www.pref.miyagi.jp/gesui/60\\_recycle/61\\_recycle\\_syokyakubai-new.html](http://www.pref.miyagi.jp/gesui/60_recycle/61_recycle_syokyakubai-new.html)
- 29) 尾崎正明：下水汚泥溶融スラグ中の金属鉄の分析、土木技術資料, vol.49, No.8, pp.7-8
- 30) 北辻政文、藤居宏一：ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの性状、農業土木学会論文集, No.200, pp.59-67, 1999
- 31) 新田智博、宮越 執、石田泰之、多田幸夫：下水溶融スラグを用いた耐酸性コンクリートの製品への適用、コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.97-102, 2001
- 32) 島田正夫、山崎友道、中野裕一：下水汚泥溶融スラグを骨材とした硫黄固化体の開発基礎調査、第43回下水道研究発表会講演集, pp.383-385, 2006
- 33) 京都市下水道局HP  
[http://www.city.kyoto.jp/suido/odeiriyou\\_hituyou.htm](http://www.city.kyoto.jp/suido/odeiriyou_hituyou.htm)

宮本豊尚\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所材料地盤研究グループリサイクルチーム 研究員  
Toyohisa MIYAMOTO

尾崎正明\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所材料地盤研究グループリサイクルチーム 上席研究員  
Masaaki OZAKI