

連携記事

鉄鋼スラグの道路への利用

Iron and Steel Making Slag & It's Applications for Road Constructions

新日本製鐵(株) 環境・プロセス研究開発センター
土木建築技術部

JFE スチール(株) スチール研究所
スラグ耐火物研究部

篠崎晴彦

Haruhiko Shinozaki

高橋克則

Katsunori Takahashi

1 鉄鋼スラグの生成および概要

鉄鋼スラグは、鉄鋼製造工程において鉄とともに熔融状態で生成される副産物であり、図1に示す通り高炉スラグと製鋼スラグに大別される。

高炉スラグは、鉄鉱石とコークス、石灰石等を熔融して銑鉄を分離した熔融スラグを冷却することにより製造されるスラグであり、冷却方法によって高炉水砕スラグと高炉徐冷スラグに大別される。

一方、製鋼スラグは、銑鉄やスクラップから成分調整を行って「鋼」を製造する製鋼工程で製造されるスラグで、溶銑を主原料として鋼を製造する転炉にて生成される転炉系製鋼スラグおよびスクラップを主原料として鋼を製造する電気炉にて生成される電気炉系スラグに大別される。

2008年度の鉄鋼スラグの生成量は約3,800万tにおよび¹⁾、

我が国最大量の産業副産物である。

高炉水砕スラグは、微粉碎しコンクリート用高炉スラグ微粉末 (JIS R 6206) にした後、コンクリート混和材または、普通ポルトランドセメントと混合して高炉セメント (JIS R 5211) として利用される他、コンクリート用高炉スラグ細骨材 (JIS A 5011-1)、裏込め材、盛土材、路床材、覆土材、サンドマット材などの土木材料、肥料、ロックウール、セメントクリンカー原料などに利用されている。高炉徐冷スラグは、主に道路用鉄鋼スラグ (JIS A 5015) の他、コンクリート用高炉スラグ粗骨材 (JIS A 5011-1)、土木材料、肥料、ロックウール、セメントクリンカー原料などに利用されている。

製鋼スラグは、土木用と、道路用鉄鋼スラグ (JIS A 5015) の他、土木材料、肥料、セメントクリンカー原料などに利用されている。表1に鉄鋼スラグの化学成分を示す。鉄鋼スラグの化学成分はセメントと天然砂とのほぼ中間的な化学成分

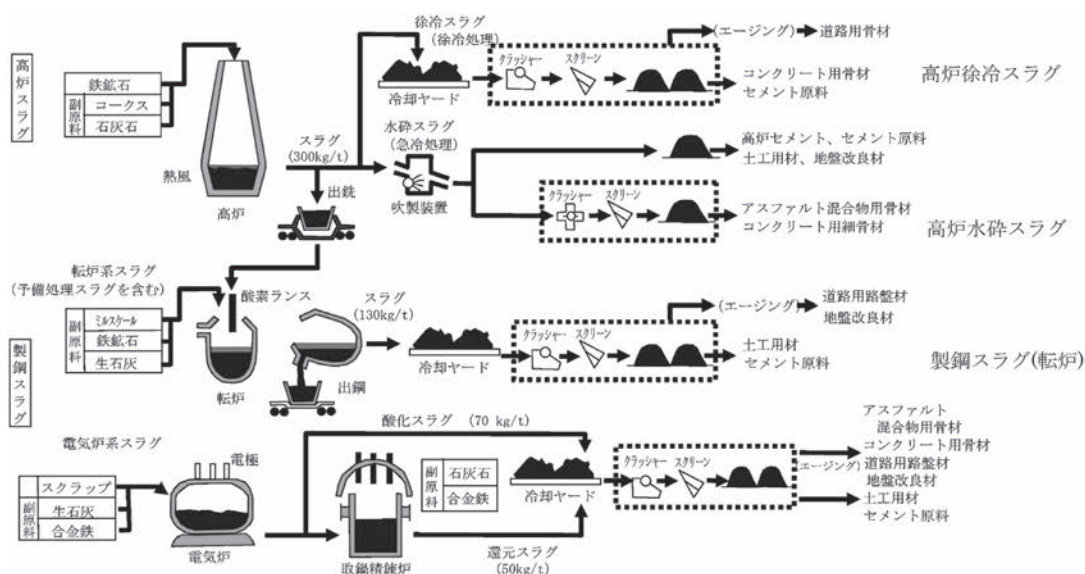
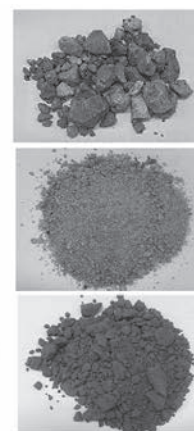


図1 鉄鋼スラグの製造概要¹⁾



であり、カルシウム、ケイ素を多く含有することから、水と反応して硬化する性質（水硬性）を有している。

2 鉄鋼スラグの道路用材への適用

図2はアスファルト舗装の構造断面の一例を示したものである³⁾。原地盤である路床（舗装構造としては路床上面から1mの厚さ）上に、碎石などを締固めて築造した路盤、さらにその上に車両走行時の摩耗、すり減り抵抗性のあるアスファルトからなる表層が施工され、下層から上層に向かって強度、耐久性の高い舗装構成にして、交通荷重を円滑に分散しながら路床に伝達することが一般的である。

鉄鋼スラグの路盤材、アスファルト骨材への利用は昭和40年代から始まり、昭和54年に道路用鉄鋼スラグ（JIS A 5015）⁴⁾として基準化された。

基準化当初は、製鋼スラグの適用が認められていなかったが、昭和54年より、建設省土木研究所、(財)土木研究センター、鉄鋼スラグ協会の3者により体系的な調査研究が実施された⁵⁾。その結果、エージング期間3ヶ月以上、80℃水浸膨張比2%以下であれば、利用できることが確認されるとともに、蒸気エージングなどによる膨張品質安定化の技術開発が進み⁶⁾、平成4年10月のJIS改正により、製鋼スラグも基準化された。2008年度には全国で約7百万トンの鉄鋼スラグが道路用材へ利用されている。表2は道路用鉄鋼スラグ（JIS A 5015）の路盤材品質基準を、表3はアス

ファルトコンクリート骨材の品質基準をそれぞれ示したものである。水硬性粒度調整鉄鋼スラグ HMS25 (Hydraulic Mechanically Stabilized Slag) は、鉄鋼スラグの特性である水硬性を保証した材料であり、これにより高い材料強度（等値換算係数）が設定され、断面の薄肉化により経済的な道路構造が実現できる。ちなみに欧州では年間約1,560万t（全体の約37%）の鉄鋼スラグが道路用材として利用されており、EN13242-2002 (Aggregates for bound and unbound mixtures) をはじめとする欧州規格が整備されている⁷⁾。また、路床の支持力比 CBR (California Bearing Ratio) が3%未満の場合には、良質な砂や碎石に置き換えるかセメント、石灰などを混合して改良するのが一般的であり、これらにも鉄鋼スラグが利用されている^{8,9)}。

2.1 路盤材への適用事例

(1) 道路路盤材での品質評価事例：

国道16号線での長期耐久性評価試験¹⁰⁾

図3は、千葉県木更津市から君津市間の国道16号線で平成7年から実施された試験舗装の断面を示したものである。図に示す通り、路盤材として鉄鋼スラグ路盤材（HMS25、MS25、CS40）および再生路盤材（RM：粒度調整再生材、

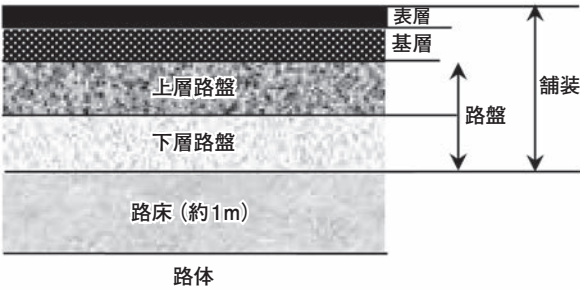


図2 アスファルト舗装の構成と各層の名称

表1 鉄鋼スラグの化学成分析 (重量%)

材料	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	T-Fe	MnO	S
高炉スラグ ¹⁾	33.8	41.7	13.4	7.4	0.4	0.3	0.8
転炉系製鋼スラグ ¹⁾	11.0	45.8	1.9	6.5	17.4	6.5	0.06
参考：セメント ²⁾	22.2	65.0	5.2	1.2	3.0	-	2.1
参考：安山岩 ¹⁾	59.6	5.8	17.3	2.8	3.1	0.2	-

表2 道路用鉄鋼スラグ（JIS A 5015）路盤材の品質基準⁶⁾

品質項目	上層路盤用鉄鋼スラグ		下層路盤用鉄鋼スラグ
	水硬性粒度調整鉄鋼スラグ HMS-25 等値換算係数*a=0.55	粒度調整鉄鋼スラグ MS-25 等値換算係数*a=0.35	クラッシュラン鉄鋼スラグ CS-40, CS-30, CS-20 等値換算係数*a=0.25
呈色判定	呈色なし	呈色なし	呈色なし
高炉徐冷スラグを含む場合 水浸膨張比(80℃10日)	1.5%以下	1.5%以下	1.5%以下
製鋼スラグを含む場合			
単位容積質量	1.5kg/L 以上	1.5kg/L 以上	-
一軸圧縮強さ(14日)	1.2N/mm ² 以上	-	-
修正 CBR	80%以上	80%以上	30%以上

注) 粒度範囲の規定は省略

*舗装構成の設定は、一般的には路床の CBR (設計 CBR) および設計期間 (n 年：一般には 10 年) における累積 5 トン (49kN) 換算輪数 (輪/1 方向) N を用いて計算した目標 T_A (舗装各層を表層および基層用加熱アスファルト混合物で設計したときの必要厚さ) に対して、断面各層の厚さと等値換算係数 a_i から計算される等値換算厚 T_A' が下回らないように決定される。

RC：クラッシュラン再生材）とこれらを組み合わせた5断面を設定し、いずれも目標設計舗装厚さ（表層および基層用加熱アスファルト混合物に換算した舗装厚さ） $T_A = 34\text{cm}$ である。図4は舗装後5年間にわたり1年毎に実施されたFWD（Falling Weight Deflect meter）試験結果を逆解析して求めた各舗装断面の弾性係数を換算して得た残存 T_A の経時変化を示したものである。図より、いずれの舗装断面も当初設計舗装厚さを満足しているが、特に鉄鋼スラグを上層路盤に適用した断面A、B、Dは施工初期よりも残存 T_A が増加（耐久性が向上）していること、断面CとDの比較から、同一下層路盤RC40の条件のもと、上層路盤をRM40からHMS25に変更することによって耐久性が向上し、再生路盤材を鉄鋼スラグ路盤材と組み合わせて利用することにより、高耐久性舗装が実現できることも確認できた。

(2) 空港舗装路盤材での評価事例：

東京国際空港（羽田）沖合展開事業新A滑走路建設での試験舗装および適用¹¹⁾

昭和63年7月に供用開始された新A滑走路の直下は東京湾内の浚渫ヘドロの埋め立て地であり、建設に伴う不同沈下対策を目的として、圧密促進による地盤改良が行われたが、供用開始後の沈下に対してアスファルトコンクリートによる嵩上げを前提とした構造を採用することにした。

ただし、航空機の繰り返し荷重による軟弱地盤への影響が

懸念され、これらを現地で直接確認するため、試験舗装を実施した。

試験舗装による走行試験は、新A滑走路設計条件（B747-200B、反復走行回数20000回）に対して「空港アスファルト舗装要綱」（1976年運輸省制定）に基づき、標準的な舗装断面に加えて、路床上の下層路盤に水硬性粒度調整鉄鋼スラグ路盤材（HMS）またはセメント安定処理土、上層路盤を粒度調整碎石としたサンドイッチ舗装を含む計9つの断面を設定して試験舗装を行い、その上にB747-200Bと同じ脚荷重82.5tfをもつ鋼塊（インゴット）20個を積載した原型走行荷重車（現港湾空港技術研究所所有）を走行させ実施した。

図5は、同一設計舗装厚における標準断面A-7（下層路盤：切り込み碎石）に対してA-6（下層路盤：HMS）、A-8（下層路盤：セメント安定処理）を示したものである。試験走行における舗装各層の沈下および路床上面の土圧、下層路盤下面のひずみ計測結果から下層路盤にHMSを用いたA-6舗装断面は非常に優れた性能を示した。また上記計測結果と多層弾性理論を用いた解析による評価を総合的に判断して、HMS、セメント安定処理土の粒度調整碎石に対する等価値はそれぞれ1.5および1.3と決定した。図6は新A滑走路の舗装断面を示す。

尚、供用後の継続する軟弱地盤の沈下等により舗装面の沈下やクラックが多数発生し、供用開始後の平成元年から補修を余儀なくされた。その改修方法としてアスファルト舗装の

表3 道路用鉄鋼スラグ（JIS A 5015）アスファルトコンクリート骨材の品質基準⁶⁾

品質項目	加熱アスファルト混合物用	瀝青安定処理用
	単粒度製鋼スラグ SS-20, SS-13, SS-5	クラッシュラン製鋼スラグ CSS-30, CSS-20
水浸膨張比(80℃10日)	2.0%以下	2.0%以下
すり減り減量	30%以下	50%以下
表乾比重	2.45以上	—
吸水率	3.0%以下	—

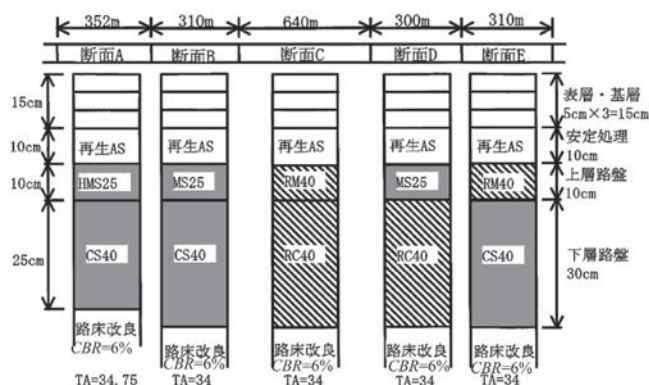


図3 試験舗装断面図

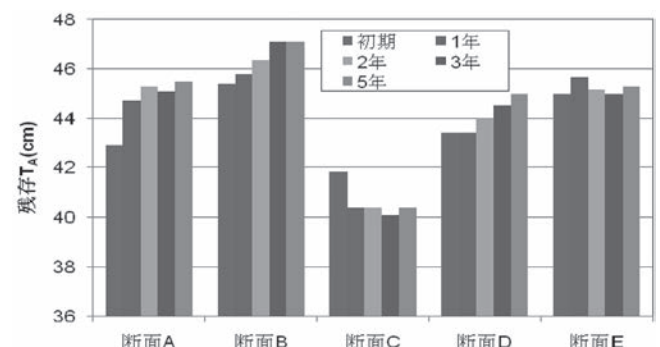


図4 舗装各断面の残存 T_A

打替とともに、上層、下層路盤ともにHMSを用いて改修し、その後切削摺付部を除き再度損傷は発生しなかった。

2.2 アスファルト混合物用骨材

鉄鋼スラグは、省資源の観点から、加熱アスファルト用の道路用骨材として高炉スラグ、製鋼スラグ、電気炉スラグのいずれの材料も用いられており、2002年度にグリーン購入法指定調達品目にも指定されている(図7)。平成20年度は、アスコン材として年間約19万tの鉄鋼スラグが出荷・利用されている。

高炉徐冷スラグは、容積安定性が高く、JIS規格も先行したことから、早い段階からアスファルト舗装要綱に取り入れられて使用されている。また、国内に限らず、イギリスやドイツなどでも天然骨材と同様に用いられている¹²⁾。最近では、高炉水砕スラグについても利用が検討され、供用2年後において良好な路面状況を維持していることが確認されている¹³⁾。

製鋼スラグは、フリーライムを含み膨張する可能性があるため、エージング条件と特性値の関係を中心として、昭和54年より、建設省土木研究所、(財)土木研究センター、鉄鋼スラグ協会の3者により体系的な調査研究が実施された⁷⁾。そ

の結果、昭和57年に「製鋼スラグを用いたアスファルト舗装設計指針」、昭和58年に「加熱アスファルト混合物用製鋼スラグ品質管理要綱」として纏められ、平成4年にJIS A 5015に基準化または規格化の用語統一された¹⁴⁾。これらの研究の中で、製鋼スラグは硬質で耐磨耗性が一般的な天然骨材に比べて優れていることがわかり、磨耗の激しい道路などでの利用に有効であると考えられている。

海外における製鋼スラグのアスコン骨材としての利用は、ドイツで積極的に進められている。塩基度調整して容積安定性を改善した製鋼スラグは、緻密で耐磨耗性が高いことが評価され、アスコン骨材のほか、舗装用ブロックの骨材などにも適用されている¹⁵⁾。

3 鉄鋼スラグを用いた新技術への対応

3.1 九州新幹線シラス地盤トンネルにおける高炉水砕スラグを用いた透水性強化路盤^{17,18)}

九州新幹線の鹿児島ルートの一部に特殊土として全国的に有名なシラス地帯を通過するトンネルが総計約7kmもある。シラスは、含水比の増加に対して引張強度が低下し、列車走行荷重の繰返しにより噴泥化し、コンクリート打継目から地下水とシラスが流れ込む問題が発生することが予想され、トンネル路盤部を良好な透水性および強度を有する高炉水砕スラグ(以下、水砕スラグ)で構築し、その中央に有孔管を配置することによりトンネル周辺の地下水を外へ排出する構造を採用した。水砕スラグを新幹線トンネルに用いたのは過去にほとんどなく、路盤としての信頼性を確立する上で種々の課題を解決する必要がある、「シラス地盤トンネル・路盤検討特別委員会」を設置し、仕様を決定した。

まず、水砕スラグの必要路盤強度(一軸圧縮強さ)は、室

A6		A7		A8	
アスコン	15	アスコン	15	アスコン	15
粒調碎石	30	粒調碎石	30	粒調碎石	30
HMS	39	切込碎石	50	セメント安定処理	39
岩ずり	15	路床		路床	
路床		山砂		山砂	
山砂					
	185		200		200

図5 試験舗装断面(抜粋)

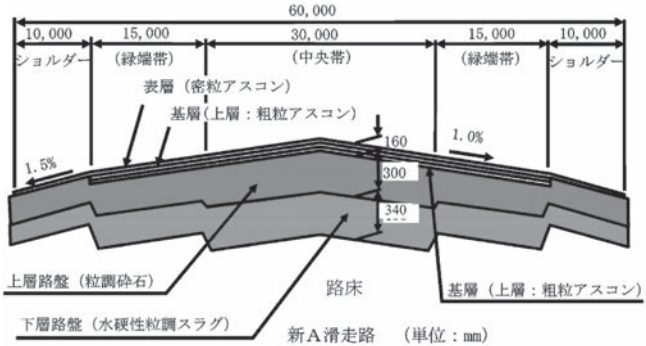


図6 東京国際空港新A滑走路(中間部)舗装断面



図7 鉄鋼スラグをアスファルト混合物用骨材として用いた施工例¹⁶⁾

内長期耐久性試験（繰返し三軸試験）ならびに実模型路盤による供用 10 年相当の 200 万回の繰返し載荷試験より、一軸圧縮強さ $q_u = 2000 \text{ kN/m}^2$ 以上であれば沈下がわずかで十分な耐久性があることを確認した。

さらに、このスラグを用いたトンネル孔内の試験施工により $q_{u14} = 2000 \text{ kN/m}^2$ の強度を有する路盤で、透水係数 $k \geq 2.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ を満足することを確認し、この結果をもとに水砕スラグ路盤を用いたトンネル断面をモデル化して実施した浸透流解析により、地下水位を路盤コンクリートより下面に保ち、かつシラス地盤を流動化させるような限界流速を超えないことを確認した。

以上の品質を満足するために、セメント添加量、1 層あたりの仕上げ厚さ、転圧後の締固め度密度管理、ウェルポイントによる地下水位低下工法の採用による施工時の地下水によるセメント成分の流出防止対策、水砕スラグとセメント混合後施工までの時間管理を行って施工した。さらに供用後は、トンネル内の水位観測孔による供用後の水砕スラグ路盤の透水性長期的な管理を行っている。

以上の検討結果、^{むぎょうだ} 麦生田トンネルをはじめとしてシラス地帯を走行する 11 トンネルに約 6.7 万 m^2 の水砕スラグが採用され、新幹線の安全走行に寄与している。図 8 および 9 は、ンネル標準断面および水砕スラグ路盤施工状況の一例を示す。

3.2 ヒートアイランド抑制用保水材料

都市型の環境問題であるヒートアイランド現象の対策技術として、道路舗装分野においては、保水性舗装、遮熱性舗装などが提案され、東京都を中心に供用されている。保水性舗装は、開粒度のアスファルト舗装の空隙部に保水性をもつ材料を注入することで、舗装内に水を保つことを可能にした舗装であり、人工的な舗装の利点を生かしつつ、水の蒸

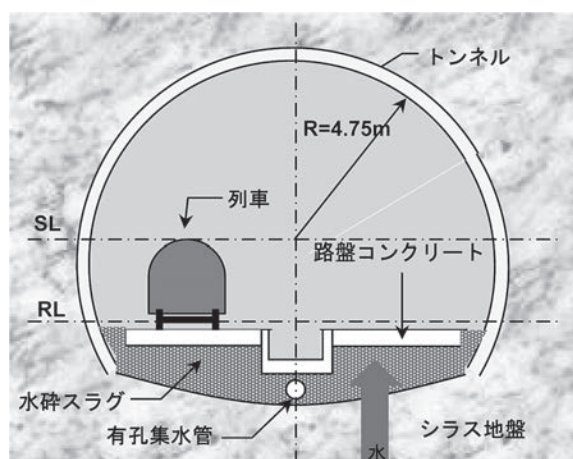


図 8 トンネル断面標準断面 ^{17,18)}

発散による潜熱冷却を実現するものである。この保水材として、高炉スラグを原料として利用した材料が実用化されている ^{19,20)}。

高炉スラグ系保水材は、固化した際に体積比率で 65% 以上の空隙を持つ材料であり、吸水と蒸発が起り易いよう、 $1 \mu\text{m}$ 前後の気孔径になるように設計されている。高炉スラグ系保水材を使用した保水性舗装の表面温度のサーモグラフィおよび表面下 10mm における 1 日の温度変化の例を図 10 に示す。水の蒸発効果などによって、通常の密粒度アスファルト舗装に比べて大幅に舗装温度が低下しており、真夏では 15°C 以上の温度低下効果がみられる場合もあった。蒸発による温度低下効果は、飽水状態となる 1 回の降雨の後、10cm 舗装で 1 週間程度観測された。

また、実施工体の 3 夏経過後の温度上昇抑制効果は施工



図 9 水砕スラグ路盤施工状況

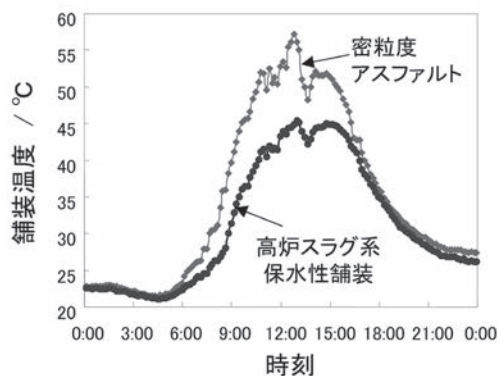


図 10 高炉スラグを用いた保水性舗装と密粒度アスファルト舗装の表面温度のサーモグラフィおよび舗装温度の例

直後に近いことが確認され、保水材としての効果も長期的に発現すると考えられる²¹⁾。

現在、鉄鋼スラグによる環境改善効果に関する研究・実用化は、海域利用を中心に進められているが²²⁻²⁶⁾、陸上用途についても土工材料的な利用に加えるかたちで拡大されることが望まれる。

4 おわりに

路盤材、アスコン骨材に代表される道路用鉄鋼スラグは、1960年代の研究開始から設計施工指針作成、JIS化およびその改訂を経て、安定して利用いただいていた。また、天然資源の使用代替による地球環境保全、資源循環の観点から有効な資材として評価され、グリーン購入法における特定調達品目にも指定されている。一方、環境に対する負荷や安全性の重要性は、道路分野においても今後ますます高まると考えられる。鉄鋼スラグは今までも環境負荷に関して様々な研究と対応が進められてきているが、より高いレベルでの環境安全性を確実に確保し、重要な品質の1つとして管理強化をすすめることによって、社会全体からの信頼を得ていくことが重要である。

道路分野における鉄鋼スラグが、付加価値の高い工業製品として、良好な締固め性や耐磨耗性などを活用すると同時に環境品質によって、今後も一層利用されることを期待する。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会ホームページ：http://www.slg.jp/
- 2) 深谷泰文，露木尚光：セメント・コンクリートの材料科学，技術書院，(2003)，16.
- 3) (社)日本道路協会：アスファルト舗装要綱，(1995)，33.
- 4) 道路用鉄鋼スラグ，(JIS A 5015-1992)
- 5) 飯島尚，小島逸平，原富男，石神公一：土木学会論文集，366/V-4 (1986)，83-91.
- 6) 例えば，山中量一，遠山俊一，吉川勇一：鉄鋼スラグ有効利用の変遷，神戸製鋼技報，47 (1997) 3, 26-30.
- 7) 例えば，The Euroslag Association：Legal Status of Slags Potition Papar，(2006)
- 8) 鉄鋼スラグ協会：土工用水砕スラグ (2008)

- 9) 例えば，岡山県土木工事共通仕様書施工管理編土工用水砕スラグの施工管理要領，(2008)
- 10) 鉄鋼スラグ協会：スラグニュース平成15年1月号，(2003)
- 11) (財)沿岸技術研究センター：東京国際空港沖合展開事業技術総覧 (2000)
- 12) A.F.Stock et al., Transportation Research Record, 145 (1996)，35-40.
- 13) 藤井基高，浜崎拓司，江籠洋和，人見信男：舗装，43 (2008) 10, 18-22.
- 14) 製鋼スラグを用いたアスファルト舗装設計施工指針，鉄鋼スラグ協会 製鋼スラグ共同研究委員会 (1972)
- 15) ThyssenKrupp magazine, (2004)，48-53.
- 16) 松田康治：シラス地盤トンネルの設計・施工，土木技術，55 (2000)，64-67.
- 17) 例えば，武田幸博，西山智夫，藤本孝晴，小川逸作，松田康治：シラス地盤トンネルの設計・施工について，土木学会トンネル工学研究論文集，9 (1999)，119-124.
- 18) 環境資材 鉄鋼スラグ，鉄鋼スラグ協会，(2009)
- 19) 長谷川和弘，高橋克則：環境浄化技術，5 (2006) 4, 19.
- 20) 土田えりか，堀絃子，藤田壮，中山忠暢，角田智彦，高橋克則，坂本義仁：環境情報科学論文集，21 (2007)，381-386.
- 21) 高橋克則，藪田和哉：日本ヒートアイランド学会第2回全国大会予稿集，(2007)，147.
- 22) 宮田康人，佐藤義夫，清水悟，小山田久美：JFE 技報，19 (2008)，1-5.
- 23) 鉄鋼スラグ炭酸固化体利用マニュアル，港湾空間高度化環境研究センター／藻場着生基盤技術研究会，(2004)
- 24) 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル改訂版，沿岸技術研究センター，(2007)
- 25) 転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き，日本鉄鋼連盟，(2008)
- 26) 例えば，木曾英滋，堤直人，渋谷正信，中川雅夫：海域施肥時のコンブ等の生育に関する実海域実験—転炉系製鋼スラグ等を用いた藻場造成技術開発 (1) —，土木学会第20回海洋工学シンポジウム，(2008)

(2010年1月19日受付)