

## 特集

## 各種副産物のリサイクル技術

## 鉄鋼スラグとその資源化 — 製鉄工場副産物のリサイクル —

## Iron and Steel Slag and Its Recycling

竹田 重三\*

Shigemi Takeda

## 1. まえがき

鉄鋼業においては、年間3,630万tものスラグが発生する。昭和50年代より業界として本格的な資源化にとり組み、現在では、付加価値が低い用途も含め97%が利用されている。しかし、新たなリサイクルの時代を迎え、一部ではリサイクル材同士が競合する局面も生じており、鉄鋼スラグとしても、新たな用途の開発や一層の付加価値の向上を図っていく必要がある。ここでは、鉄鋼スラグの資源化の現状および今後の利用技術開発の方向について紹介する。

## 2. 鉄鋼スラグの概要

鉄鋼スラグの分類を図-1に、生成プロセスの概要を図-2に示す。高炉スラグは、高炉で鉄鉱石から銑鉄を製造するさいに発生するもので、高炉から出た直後で

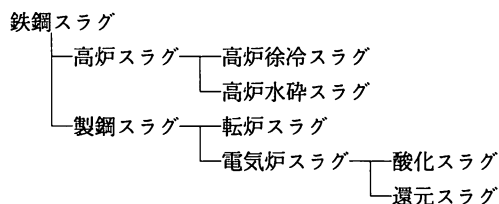


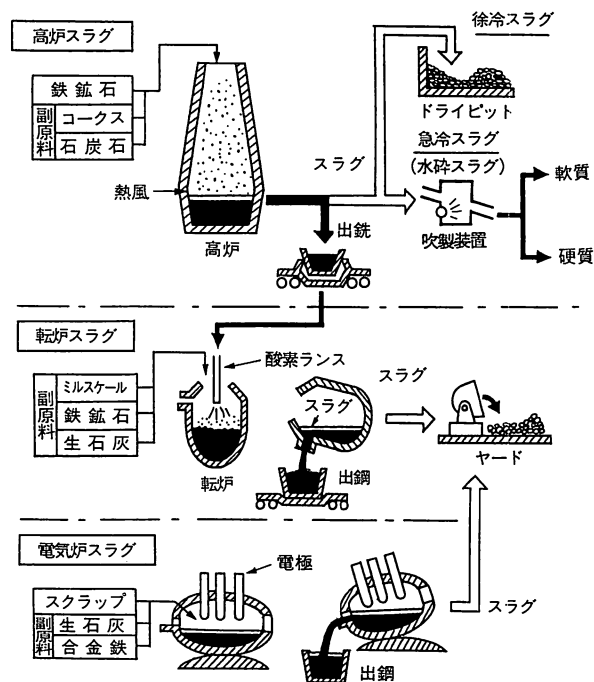
図-1 鉄鋼スラグの分類

表1 鉄鋼スラグの生成量(平成8年度)<sup>2)</sup>

スラグ分類	生成量	生成原単位
高炉スラグ	22,916千t	303kg/銑鉄t
転炉スラグ	9,739千t	145kg/粗鉄t
電気炉スラグ	3,649千t	120kg/粗鉄t
合計	36,304千t	—

は1500°C程度の高温熔融状態にあり、冷却処理方法により、徐冷スラグと水砕(急冷)スラグに区分される。製鋼スラグには、高炉で製造された銑鉄を転炉で精錬するさいに発生する転炉スラグと、スクラップを電気炉で精錬するさいに発生する電気炉スラグがある。さらに、電気炉スラグは、精錬過程における炉内ふん囲気により、酸化スラグと還元スラグに区分される。

平成8年度の全国の鉄鋼スラグの生成量を表1に示す。年間約3,630万tもの鉄鋼スラグが発生しており、そのうち高炉スラグは約2,290万t(全体の63%)、製鋼スラグは約1,340万t(全体の37%)である。

図-2 鉄鋼スラグの生成<sup>1)</sup>

\* 鉄鋼スラグ協会 技術委員会副委員長  
新日本製鐵(株)技術総括部資源化推進グループマネージャー  
〒100-71 東京都千代田区大手町2-6-3

表2 鉄鋼スラグの化学成比例<sup>1)</sup>

(単位: %)

種 類	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	T-Fe	MgO	S	MnO	TiO <sub>2</sub>
高炉スラグ	33.8	42.0	14.4	0.3*	6.7	0.84	0.3	1.0
転炉スラグ	13.8	44.3	1.5	17.5	6.4	0.07	5.3	1.5
電気炉スラグ	酸化スラグ	17.7	26.2	12.2	21.2	5.3	0.09	7.9
	還元スラグ	27.0	51.0	9.0	1.5	7.0	0.50	1.0

注\* FeOとしての含有量を示す。

鉄鋼スラグの化学成比例を表2に示す。高炉スラグの化学成分は、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgOの4成分で95%強を占め、これらは鉄鉱石から鉄分をとりのぞいた後の脈石、コークス燃焼後の灰分およびフラックスとして用いられた石灰石などに由来するものである。製鋼スラグの化学成分は、転炉と電気炉では異なり、また製造する鋼種や操業方法などによっても異なる。おもな成分は、転炉スラグではSiO<sub>2</sub>、CaO、MgO、MnOであり、電気炉スラグではSiO<sub>2</sub>、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgOである。そのほかに、転炉スラグと電気炉酸化スラグには、10~30%の鉄分が残留している。なお、高炉スラグ・製鋼スラグとも、有害な成分の溶出については問題がなく、各種の基準値を下回っている。

### 3. 鉄鋼スラグの特性と用途

鉄鋼スラグの特性と用途の概要を表3に示す。

#### 3.1 高炉スラグの特性と用途

高炉スラグは、高温熔融状態からの冷却・固化の仕方によってえられる性質が異なる。徐冷スラグは、大

気中で常温まで冷却されるため、結晶質となっている。破碎後に粒度調整したものは、一般の碎石と同様にとりあつかうことができ、さらには水硬性をもっているため、これを活かして碎石以上の強度をもたせることもできる。水砕スラグは、高圧水の噴射により粒状に破碎され、そのまま水槽で急冷されるため、ガラス質(非晶質)となっている。粒状のままでも水硬性をもつが、微粉碎したものは、アルカリ刺激によりセメント並の水硬性を発揮する。用途別のおもな特性を以下に示す。

(1) 道路用路盤材(徐冷スラグ): 徐冷スラグは、水硬性をもっているため、セメント安定処理路盤と同等にとりあつかうこともできる。施工後も長期にわたって強度が増進する。そのほか、微粉分が少なく塑性が低いいため、施工にあたる含水比の影響が小さいという特長をもっている。

(2) セメント用材料およびコンクリート混和材(水砕スラグ): セメント用材料としては、普通ポルトランドセメントの増量材(混合割合は0~5%)および高

表3 鉄鋼スラグの特性と用途の概要<sup>1)</sup>

区 分	特 性	用 途
高 炉	○内部摩擦角大・水硬性	→ 道路用(路盤材)
	○有害物を含まない碎石・非反応性	→ コンクリート粗骨材
ス 水 ラ 砕 グ ス ラ グ	○SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、CaO含有・低アルカリ性	→ セメントクリンカー原料
	○繊維化により断熱・保温・吸音性	→ ロックウール原料
	○肥料成分(CaO、SiO <sub>2</sub> )	→ 珪酸石灰肥料(ケイカル)
	○微粉碎によりセメント並の水硬性	→ 高炉セメント混合材
		→ 普通ポルトランドセメント増量材
		→ コンクリート混和材
ス 製 ラ グ 鋼	○SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、CaO含有・低アルカリ性	→ セメントクリンカー原料
	○有害物を含まない人工砂・非反応性	→ コンクリート細骨材
	○水硬性・軽量・内部摩擦角大	→ 土工用材、地盤改良材(裏込材、覆土材、サンドドレン材など)
	○透水性良好	
	○肥料成分(CaO、SiO <sub>2</sub> )	→ 珪酸石灰肥料、土壌改良材
ス 製 ラ グ 鋼	○硬質・耐摩耗性	→ 道路用(アスファルトコンクリート骨材)
	○微弱水硬性	→ 道路用(路盤材)
	○FeO、CaO、SiO <sub>2</sub> 含有	→ セメントクリンカー原料
	○肥料成分(CaO、SiO <sub>2</sub> )	→ 肥料、土壌改良材

炉セメントの混合材（混合割合は高炉セメントA種が5～30%、同B種が30～60%、同C種が60～70%）に用いられる。高炉セメントは、製造工程におけるCO<sub>2</sub>の発生量が少なく、省資源・省エネに貢献するセメントとして知られており、性能的には低発熱、アルカリシリカ反応抑制、耐海水性の向上などの特長をもっている。コンクリート混和材は、水砕スラグを微粉碎したものであり、コンクリートの品質改善などを目的にコンクリートの練混ぜ時に混合される。3種類の粉末度のものがあり、使用目的に応じて、粉末度、混合割合および各種セメントとの組み合わせを選定することができる。

(3) セメントクリンカー原料（徐冷スラグ、水砕スラグ）：高炉スラグに含まれるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>分が、セメントクリンカー原料のうち粘土の代替として使用される。高炉スラグは、成分変動が小さくアルカリ分が少ないことから、良質なクリンカー原料となっている。

(4) コンクリート骨材（高炉スラグ粗骨材：徐冷スラグ、高炉スラグ細骨材：水砕スラグ）：高炉スラグ粗骨材は、内部空隙を含むためやや軽量ではあるが、それ以外は一般の碎石と同様にとりあつかうことができる。特長としては、塩分などの有害なものを含まず、骨材表面の凹凸が大きいためコンクリートとの付着が良好なことなどがあげられる。高炉スラグ細骨材は、有害なものを含まない良質な人工骨材であるため、粒度などが所定の基準を満たさない天然細骨材の品質改善を目的に、混合して使用することができる。単味で使用する場合、保水性が小さいため、ブリージングが多少大きくなる。夏期の高温時には、固結しないように注意する必要がある。なお、両骨材とも、アルカリシリカ反応を生じるおそれはない。

(5) 土工用材（主に水砕スラグ）：水砕スラグは、水硬性をもっており、粒状で空隙を保有したまま固化する。このため、軟弱地盤の改良材や地震時の液状化対策として使用することができる。また、軽量のため、構造物背面の裏込材として用いると、構造物に作用する土圧を軽減することができる。

### 3.2 製鋼スラグの特性と用途

製鋼スラグの大半は徐冷処理されるが、急冷や半急冷処理されるものもある。一般には、①硬質かつち密で耐摩耗性にすぐれる、②微弱な水硬性がある、③セメントや肥料に有効な成分を含むなどの特長をもっている。電気炉酸化スラグをのぞく製鋼スラグは、遊離

石灰（f-CaO）を数パーセント含むため、そのままでは膨張・崩壊する性質をもっているが、自然エージングや促進エージングによりあらかじめ水和反応を生じさせて、所定の膨張率以下に処理されている。用途別のおもな特性を以下に示す。

(1) 道路用アスファルトコンクリート骨材：ち密で硬質なことから耐摩耗性にすぐれているため、路面の擦り減りに対する抵抗性が大きい。また、アスファルトとの親和性もよく、タイヤに対する滑り抵抗性も大きい。

(2) 道路用路盤材：路盤材としての強度は十分であり、かつ微弱な水硬性をもっているため、単味でも使用することができる。膨張性については、各種のエージング法により、JIS A 5015「道路用鉄鋼スラグ」で規定された水浸膨張比1.5%以下に処理されている。

(3) セメントクリンカー原料：製鋼スラグに含まれるFeO分が、セメントクリンカー原料のうち鉄源として使用される。

(4) 肥料用：製鋼スラグに含まれる鉄分は秋落ち水田に対して効果があり、また石灰分・けい酸分・苦土分は酸性土壌の改良に対して効果がある。加えて、りん酸分や各種ミネラルは、作物の生育および収量増加に寄与する。

## 4. 鉄鋼スラグの利用の推移

### 4.1 高炉スラグの利用の推移

昭和50年代以降の高炉スラグの利用の推移を図-3に示す。昭和40年代より以前については、おもに製鉄所建設工事の資材、埋立・土地造成材料および道路の路盤材として使用された。昭和40年代から道路用路盤材として、昭和50年代からはコンクリート骨材としての本格的な利用技術の開発および利用促進活動が開始され、またセメント分野での利用拡大も図られた。その成果として、埋立などに使用された割合が昭和51年度では1/4近くを占めていたが、昭和54年度以降はゼロとなり、全量有効利用されている。セメント分野での利用量は、昭和50年代後半からの高炉セメントの増加により増大したが、最近では、クリンカー原料での石灰灰の使用拡大などにより減少する傾向にある。

### 4.2 製鋼スラグの利用の推移

昭和50年代以降の利用の推移を図-4に示す。昭和20年代から40年代にかけては、もっぱら埋立・土地造成用として使用されており、昭和40年代から道路の路盤材として一部使用され始めた。昭和50年代から道路用

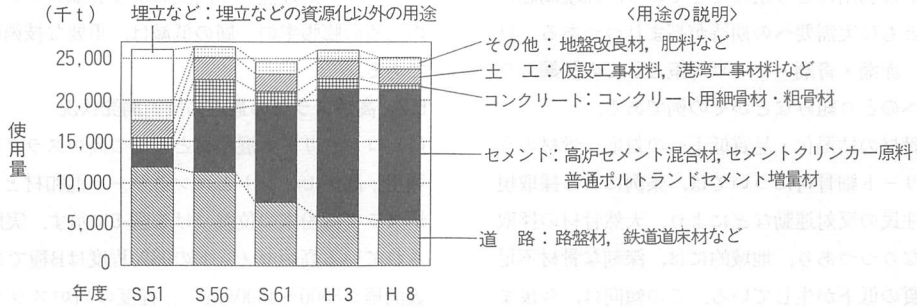


図-3 高炉スラグの利用の推移<sup>2), 3)</sup>

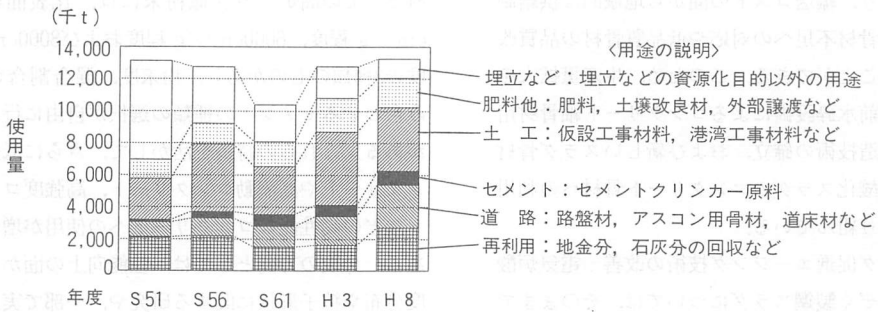


図-4 製鋼スラグの利用の推移<sup>2), 3)</sup>

材（アスファルトコンクリート骨材，路盤材）などへの本格的な利用技術の開発および利用促進活動が開始された。その成果として，埋立などに使用された割合が昭和51年度では5割近くを占めていたが，最近では1割以下に減少しており，有効利用の割合が大幅に増加している。最近のおもな用途は，再利用をのぞくと，土工用と道路用である。

## 5. 最近の利用技術開発の概要

### 5.1 利用技術開発の方向

わが国では年間3,630万tもの大量の鉄鋼スラグが発生し，しかもこれらのスラグは需要に応じて生産量を調整することができないため，大量かつ安定的な需要を確保できるか否かは，鉄鋼業の死活問題に関わるといっても過言ではない。近年，鉄鋼スラグをとり巻く環境は徐々に変化してきており，鉄鋼スラグの需要が減少しつつある。需要の大半を依存している土木・建築分野では，資源リサイクルの進展とともにコンクリート廃材を始めとする建設廃材の使用が拡大しており，また，セメント製造においても，原料・燃料として大量の副産物または廃棄物が使用されている。これらは一時的な現象ではなく，今後ますます拡大していくことは確実であり，資源化ではバイオニア的な存在

として高い有効利用率を誇ってきた鉄鋼スラグも，このような状況下で新たな対応を迫られている。鉄鋼スラグの需要維持・拡大のために，業界レベルあるいは国家レベルでの新たな仕組みづくりを模索するとともに，技術面では，より付加価値の高い利用技術を開発する必要がある。以下に，今後の鉄鋼スラグの利用技術開発の方向を示す。

(1) 鉄鋼スラグの特長を活かし鉄鋼スラグとして使用される用途の拡大：鉄鋼スラグは，発生量が膨大なことから，ある程度以上の需要量が見込まれる用途について技術開発を行ってきた結果，総体的には既存材料と同等かまたは準じるものとしてみとめられるに至っている。しかし，他のリサイクル材料と同一市場で競合する状況下では，鉄鋼スラグの独自性を前面に押し出すことが，ますます必要となってきた。このようなとり組みの例として，①高炉スラグ微粉末のコンクリート混和材としての利用，②製鋼スラグの港湾工事や地盤改良工事への利用，③高炉水砕スラグの透水性舗装への利用などがあげられる。

(2) 環境改善に貢献する新たな利用技術の開発：近年，地球規模での環境保全が叫ばれるなかで，自然環境の保護・改善はますます重要な課題となってきた。鉄鋼スラグ業界では，昭和53年より海洋環境改善への

鉄鋼スラグの利用にとり組んできており、環境問題の深刻化とともに実需要への期待が高まりつつある。具体的には、赤潮・青潮・ヘドロ対策としての製鋼スラグ覆砂材へのとり組みなどがその例である。

(3) 天然骨材の枯渇化・品質低下への対応：骨材のうちコンクリート細骨材については、条例による採取規制や地域住民の反対運動などにより、天然骨材の採取が困難になりつつあり、地域的には、深刻な骨材不足または品質の低下が生じている。この傾向は、今後ますます加速されていくものと思われる。鉄鋼スラグは、人工骨材であり、輸送コストの面から地域的な供給制約はあるが、骨材不足への対応や低品質骨材の品質改善に利用することができる。このため、生産量拡大を目的として炉前水砕設備によるコンクリート細骨材用硬質水砕の製造技術の確立、および新しいスラグ骨材として電気炉酸化スラグのコンクリート骨材への利用技術開発にとり組んでいる。

(4) 製鋼スラグ促進エージング技術の改善：電気炉酸化スラグをのぞく製鋼スラグについては、そのままでは膨張・崩壊する性質があるが、エージングにより所定の膨張率以下（JISの規定は水浸膨張比1.5%以下）に処理されている。エージング方法には、自然エージング法と促進エージング法がある。自然エージング法は、製鋼スラグをヤードに野積みし、雨水や大気中の湿分により自然に水和させる方法で、6か月間以上を必要とする。促進エージング法は、一般には蒸気を用いることが多く、ピットに製鋼スラグを入れ、上部をシートでおおい、下部から蒸気（大気圧）を吹き込んで水和を促進する方法で、2～4日間を必要とする。

エージング処理能力の向上および製鋼スラグ用途拡大のための膨張率の一層の低減は、重要な技術開発課題である。

5.2 高炉スラグの最近の技術開発状況

(1) コンクリート混和材としての高炉スラグ微粉末の利用：高炉セメントとコンクリート混和材としての高炉スラグ微粉末の位置づけを図-5に示す。実際に製造されている高炉セメントの98%程度はB種であり、比表面積が3500～4500cm<sup>2</sup>/g程度の高炉スラグ微粉末が40～45%混合されている。一方、コンクリート混和材としての高炉スラグ微粉末には、比表面積が4000cm<sup>2</sup>/g程度、6000cm<sup>2</sup>/g程度および8000cm<sup>2</sup>/g程度の3種類のものがあり、粉末度、混合割合および組み合わせるセメントの種類を選択が自由に行える特長がある。これらの特長を活かして、さらに低発熱なコンクリートや高流動コンクリート、高強度コンクリートなどの高性能なコンクリートへの使用が増加しつつある。今後の方向としては、性能向上の面からは、粒度分布や粒子形状に関する研究や、一部で実用化されている比表面積が10000cm<sup>2</sup>/gをこえる粉末度のものに関する特性と利用技術の研究などが、用途拡大の面からは、コンクリートの組織がち密で耐海水性などの化学抵抗性が大きい特長を活かした高耐久コンクリートとしての利用技術を確立することなどが考えられる。

(2) 透水性舗装への利用：透水性舗装は、舗装全体を透水性の構造にしたものであり、環境保全の面からは、地下水の涵養や街路樹などの植生の活性化などの効果が、都市防災の面からは、集中豪雨による洪水のピークカットなどの効果が期待される。舗装構造としては、

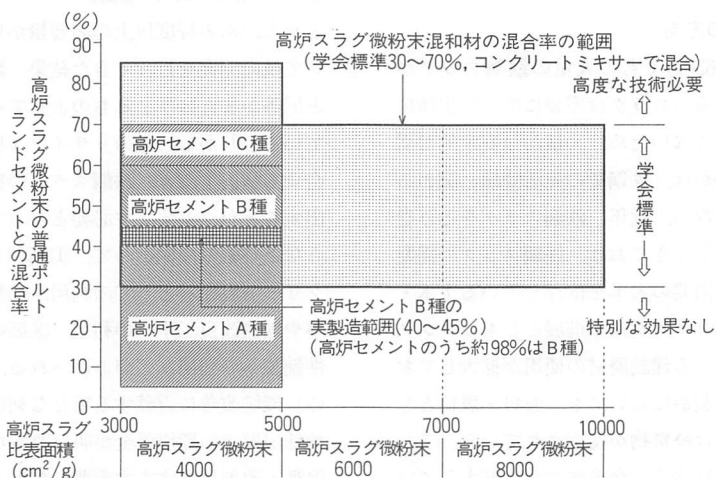


図-5 高炉セメントと高炉スラグ微粉末の位置づけ

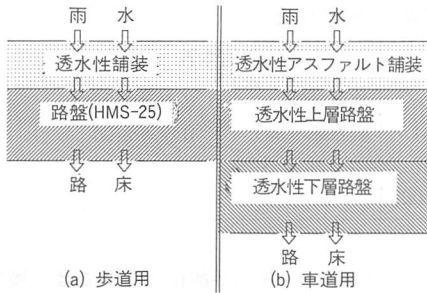


図-6 透水性舗装の構造例

①連続した空隙により透水性をもち、②水浸状態でも交通荷重などをささえるに十分な強度をもつことが要求される。通常の砂や砂利では、荷重をささえるのに必要なせん断強度が粒子間の摩擦接触によって発揮されるため、水浸状態では強度が低下する問題がある。これに対して、水砕スラグは、アルカリ刺激により水硬性が発揮され、粒状で空隙を保持したまま粒子間が強い粘着力で結合されるため、水浸状態でも強度が低下しない特長をもつ。透水性舗装の構造例を図-6に示す。歩道では表層部および路盤に、車道では上層および下層路盤に水砕スラグを使用している。前述の効果に加えて、歩道の場合は、水溜まりが発生しないだけでなく、夏期の高温時でも舗装表面温度の上昇が少なく、照返しが和らげられる効果がある。車道の場合は、路面に滞水しないことにより、滑り抵抗の増加やハイドロプレーニング現象の防止に効果があり、また表層部の空隙の吸音作用によりタイヤ騒音の軽減などにも効果がある。

(3) 炉前水砕設備によるコンクリート細骨材用硬質水砕スラグ製造技術の確立：良質な天然細骨材の不足に対応して高炉スラグ細骨材の供給量を拡大するためには、炉前水砕設備（セメント用の軟質な水砕スラグを製造する設備）で、硬質な水砕スラグが製造できる技術を確認することが、効果的な方策である。炉前水砕設備で製造した水砕スラグの品質実績例を表4に示す。JISで規定された単位容積質量 $1.45\text{kg}/\ell$ 以上とするためには、よりち密で硬質なものとする必要がある。水砕スラグのち密さ（=硬さ）と熔融スラグの冷却処

表4 炉前水砕設備による水砕スラグ品質実績例

区分	絶乾比重	吸水率 (%)	単位容積質量 ( $\text{kg}/\ell$ )
品質実績例	2.4~2.6	1.0~4.0	1.05~1.4
JIS A 5011	2.5以上	3.5以下	1.45以上

理方法との関係については、一般には、水冷処理前の熔融スラグの温度が低いほど、また水・熔融スラグ比（熔融スラグ $1\text{t}$ 当たりの冷却水使用割合）が大きく水温が低いほど硬質でち密なものが得られる。これまでに得られている知見をもとに、同じ設備で軟質と硬質のものが造り分けられる技術を確認する必要がある。

### 5.3 製鋼スラグの最近の技術開発状況

(1) 港湾工事・地盤改良工事への利用：製鋼スラグの用途の1/3強を占める土工用材は、土工工事の仮設材料や土地造成などに用いられるものであり、付加価値が低い使われ方である。製鋼スラグは、他の材料に比べてすぐれた材料特性もっており、これらの特性を活かした用途として、港湾工事・地盤改良工事への利用拡大が期待される。製鋼スラグの主な特性値を表5に、これらの特性がもっとも活かされる工法として5工法に絞り込んだ結果を表6に示す。これらの工法においては、通常使用される材料に比べて製鋼スラグが性能的にすぐれている面が多く、経済的な設計が可能となる。たとえば、サンドコンパクションパイル工法では、製鋼スラグの内部摩擦角が大きいことによりパイル強度が大きくなるため、パイル本数を減らすか、またはパイルの断面積を小さくすることができる。

表5 製鋼スラグの物性値例

単位容積質量 ( $\text{kg}/\ell$ )	内部摩擦角 (度)	透水係数 ( $\text{cm}/\text{sec}$ )
1.9~2.2	35~40	$10^{-2} \sim 10^{-3}$

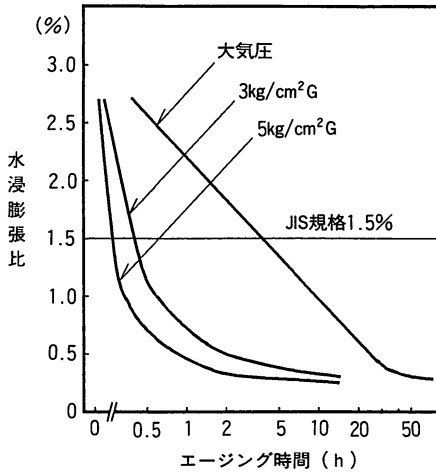
表6 製鋼スラグの特性を活かした工法

製鋼スラグの特性	適用工法名
○内部摩擦角大・微弱水硬性	→サンドコンパクションパイル工法
○単位容積質量大	→プレローディング工法
・内部摩擦角大	→置換工法
	→セル護岸・ケーソン護岸中詰材
○透水性良好	→ドレイン工法

(2) 覆砂材（水質・底質浄化材）への利用：富栄養化による赤潮の発生および貧酸素化による青潮の発生は、漁業関係者にとっては深刻な問題となっている。そのほか、海底に堆積したヘドロにより水質が低下している海域も多い。製鋼スラグは、これまでの研究から、赤潮のおもな発生原因であるりん酸 ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) の濃度低下、青潮の発生原因である硫化水素 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) の固定などに効果があることが確認されている。製鋼スラグを覆砂材として海底に散布することにより、海底ヘド

表7 電気炉酸化スラグの化学組成と物理的性質

化学組成 (%)				物理的性質	
SiO <sub>2</sub>	10.7~25.9	S	0.02 ~ 0.26	絶乾比重	3.16~4.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9~27.6	MgO	1.40 ~14.84	吸水率 (%)	0.66~3.00
CaO	8.3~42.4	f-CaO	0.02 ~ 0.37		
FeO	8.2~43.6	f-MgO	0.0009~ 0.0067		

図-7 蒸気圧とエージング期間の関係例<sup>4)</sup> (室内試験)

口の拡散を防止し、かつ赤潮・青潮の発生の防止または軽減化が図れる可能性がある。赤潮は、瀬戸内海、和歌山県、長崎県などで、青潮は、東京湾、三河湾などで、また水質の低下は、英真湾、気仙沼などで発生しており、かなりの需要が期待できる。

(3) 電気炉酸化スラグのコンクリート骨材への利用：製鋼スラグは膨張・崩壊性をもっていることから、コンクリート骨材には利用されていないのが現状である。膨張・崩壊の原因は、製鋼スラグに含まれる遊離石灰

(f-CaO) であるが、電気炉酸化スラグでは、操業方法の改善などにより、表7に示すように遊離石灰の量が大幅に減少しており、コンクリート骨材として利用できる可能性が大きい。

(4) 促進エージング技術の改善：エージング処理能力の向上を目的として新しく開発されたのが、オートクレーブ装置を用いた加圧式蒸気エージング法である。蒸気圧とエージング期間の関係例を図-7に示す。蒸気圧が5 kg/cm<sup>2</sup>Gの場合のエージング期間は、大気圧の場合の1/15~1/20に短縮される。すでに一部の製鉄所で実用化されており、エージング期間は、従来の蒸気エージング法(大気圧)の場合の2日間から2時間に短縮された。この加圧式蒸気エージング法は、エージング期間の短縮だけでなく、残留膨張率を相当小さくできる可能性もあり、将来的には、骨材の膨張性が問題となるコンクリートケーソンの中詰め材やコンクリート骨材などへの用途拡大が期待される。

#### 引用文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会；鉄鋼スラグの特性と有用性，鉄鋼スラグ協会パンフレット(1996)。
- 2) 鉄鋼スラグ協会；鉄鋼スラグ統計年報(1979~1996)。
- 3) (社)日本鉄鋼連盟；鉄鋼スラグ資源化への道(1984)。
- 4) 小出浩；加圧式蒸気エージング法による道路用転炉スラグの製造とその利用，舗装(1997年4月号)，19~23。