

# 鉄鋼スラグによる沿岸環境改善技術

## Coastal Environment Improvement by Iron and Steelmaking Slag

沼田 哲始 基盤技術研究所 無機工学チーム 主任研究員  
宮田 康人 基盤技術研究所 無機工学チーム 主任研究員  
藪田 和哉 基盤技術研究所 無機工学チーム 主査  
高橋 達人 鉄鋼技術センター 主幹  
豊田 恵聖 東海大学 海洋学部 学部長  
佐藤 義夫 東海大学 海洋学部 海洋科学科 主任教授

Noriji Numata  
Yasuhito Miyata  
Kazuya Yabuta  
Tatsuhito Takahashi  
Yoshimasa Toyota  
Yoshio Sato

鉄鋼スラグの環境改善効果について、底泥からの海水への化学成分の溶出抑制と生物着生に関して、実海域実験による検討を行った。その結果、高炉水砕スラグは、底泥から海水への硫化水素の発生抑制、周辺海水へのケイ酸塩供給、および底棲生物の増殖機能を有することが明らかになった。また、製鋼スラグは、付着性海藻や付着性動物の着生基盤としての特性が見い出された。これらの特性を組み合わせることによって、底質改善、浅場・藻場造成など鉄鋼スラグによる沿岸環境の改善が可能である。

*Experiments were conducted to assess the applicability of iron and steelmaking slag to improve the waters and bottom sediment as well as base of algae and sessile organisms. From experimental results, it was clear that granulated blast furnace slag restrains the occurrence of hydrogen sulfide, supplies silicate to seawater and increases a benthonic organisms which inhabited within the slag. We also observed that steelmaking slag has a characteristic as a base of algae and sessile organisms. It is suggested that iron and steelmaking slag improve coastal environment by combination of these characteristics.*

### 1. はじめに

日本の沿岸域は、臨海部の埋め立てや海砂の採取、直立護岸化などにより、それらの水域の海水流動が変化し、水質・底質に大きな影響を及ぼしていることが指摘されている<sup>1),2)</sup>。このような沿岸域の開発は、干潟、藻場、砂浜を消失させ、水質汚染や底質汚染を引き起こしてきた。その結果、富栄養化に伴う底質のヘドロ化が進行し、底質改善が必要な水域が多く存在している。これらの海域では、赤潮・青潮の発生、水産資源の減少などの問題が顕在化している。最近では、浚渫によるヘドロの除去、覆砂による底質の酸素消費量低減、藻場造成などの対策も実施されつつあるが充分とは言えない。覆砂や藻場造成といった環境修復事業には、天然の砂や石が用いられてきたが、環境修復のための天然資源採取が、新たな自然破壊になるケースもあり、環境修復事業のあり方が問われている。

鉄鋼生産の副産物である鉄鋼スラグは、CaOを多く含み、ヘドロの堆積した海底の環境浄化に効果を有することが知られている。成松ら<sup>3)</sup>は、スラグで形成された魚礁にクロダイなどの魚類が寄り付き、付着生物の着生が観察されたことを報告している。また、伊藤ら<sup>4),5)</sup>は、製鋼スラグ中のケイ酸二カルシウム(β型)が海水中のリンおよびイオウを吸着し、海水浄化機能を有することを結論付けてい

る。さらに、NAKAMURAら<sup>6)</sup>は、製鋼スラグ中の鉄およびリンの溶出が、プランクトンの増殖に効果のあることを指摘している。

筆者らは、鉄鋼スラグを組み合わせることによって沿岸海域の環境を改善修復する技術を開発することを目的に、鉄鋼スラグの環境改善効果を、実海域実験におけるヘドロから溶出する化学成分(H<sub>2</sub>S, Pなど)の制御機能と生物着生の点から検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 高炉水砕スラグの実海域開放系実験

既報(NKK技報 No.172(2000.12)pp.21-27)で報告した高炉水砕スラグの実海域実験を2ヵ年にわたって継続した。実験の概要をFig.1に示す。高炉水砕スラグ約600kgと比較材の海砂約160kgを、それぞれ2mmφの穴を多数あけた容器に入れ海底に設置した。高炉水砕スラグ、海砂の周囲と間隙の海水を採取し水質を調査した。また、高炉水砕スラグ、海砂、および周辺の底泥に生息する底棲生物も調査した。

#### 2.2 高炉水砕スラグの実海域閉鎖系実験

高炉水砕スラグ閉鎖系実験の概要をFig.2に示す。ヘドロの堆積した海底に、高炉水砕スラグを厚み150mmで設置し、その上を黒色アクリル容器で覆い閉鎖系の環境を調

整した。また、ヘドロを直接アクリル容器で覆った比較区を設けた。黒色アクリル容器で覆った閉鎖実験において、海底（スラグ層）から 250mm の位置の海水を採取し水質を測定した。

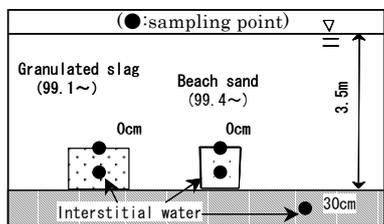


Fig.1 Scheme of granulated slag on the bottom setting

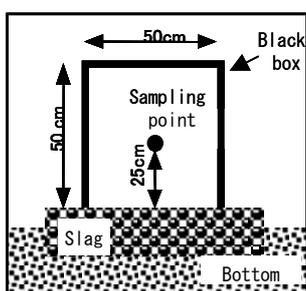


Fig.2 Setting scheme of granulated slag and black box

### 2.3 製鋼スラグの実海域開放系実験

既報（NKK 技報 No.169(2000.3)pp.24-28）で報告した製鋼スラグの実海域実験の中で 70~150mm スラグの試験区を 4 ヶ年にわたって生物の生息状況を観測した。また、20~30mm に粒度調整した製鋼スラグ、コンクリート、天然石を、150mm 角のステンレス籠（Photo 1）に入れ、3 週間までのケイ藻の着生を調査した。



Photo 1 Steelmaking slag, concrete and granite on the bottom setting

### 2.4 実海域実験海域

実海域実験は、Fig.3 に示す静岡県清水市折戸の東海大学臨海実験場地先にて実施した。実験海域は、折戸湾の最奥部に位置した閉鎖性の強い海域で、実験場前面の貯木場、巴川などの河川からの流入物によって、海底はその全面がヘドロで覆われ大型海藻がほとんど生息せず、夏期には底層に無酸素の海水層が生成する富栄養化した海域である。

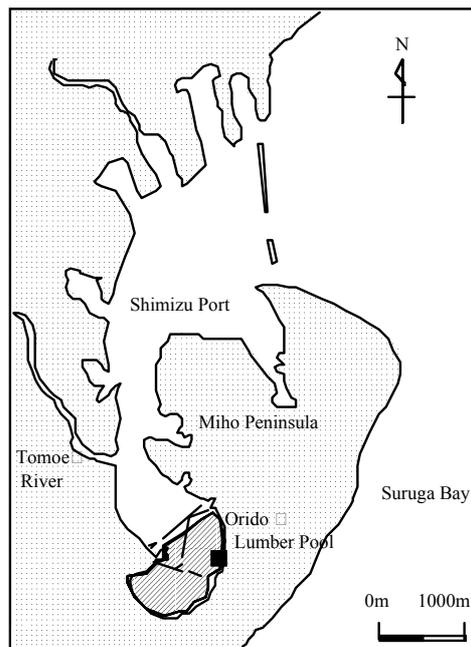


Fig.3 Location of experiment area at Shimizu Port in Suruga Bay (■ : experiment point)

## 3. 実験結果

### 3.1 高炉水砕スラグ開放系実験結果

Fig.4 および Fig.5 に開放系実験における 2 ヶ年間の pH と H<sub>2</sub>S 濃度変化を示す。ヘドロ間隙水は周辺海水に比べて pH が低く H<sub>2</sub>S 濃度が高い。特に、夏期には H<sub>2</sub>S 濃度が 10ppm を超えた。高炉水砕スラグ間隙水は、海砂間隙水、ヘドロ間隙水よりも pH が高い状態が継続した。H<sub>2</sub>S は設置初期に 9ppm 程度検出され、それ以降は夏期に 0.05ppm 程度の極微量が検出された。海砂間隙水の H<sub>2</sub>S は、夏期 0.5ppm と高炉水砕スラグ間隙水の 10 倍の値が観察された。これらの水質の変化は、実験 2 年目も 1 年目と同様の傾向であった。

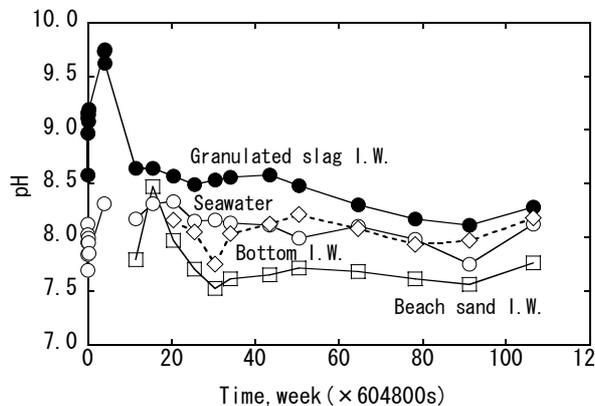


Fig.4 Time changes of pH in interstitial water and seawater close on granulated slag (I.W. : Interstitial Water)

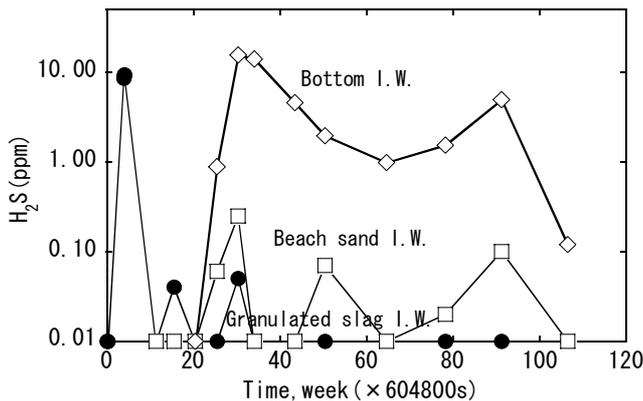


Fig.5 Time changes of H<sub>2</sub>S in interstitial water (I. W. : Interstitial Water)

Fig.6 に、各試験区において観察された底棲生物の出現種数、湿重量、個体数を示す。2 ヶ年にわたって高炉水砕スラグ区の底棲生物の出現種数、湿重量、個体数は、ヘドロよりも多く、海砂と同等以上であった。

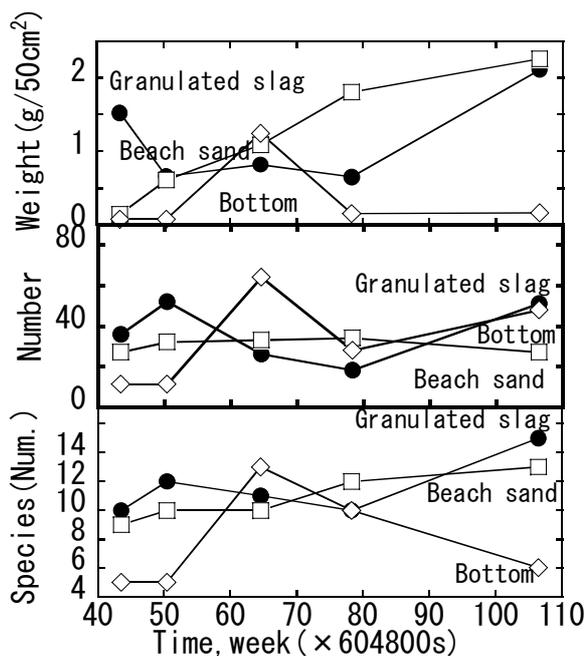


Fig.6 Observational results of benthonic organisms, which inhabited the inside of slag, number and weight (sampling area ; 50cm<sup>2</sup>)

### 3.2 高炉水砕スラグ閉鎖系実験結果

Fig.7 に閉鎖系実験におけるケイ酸塩濃度を示す。高炉水砕スラグ区は、ヘドロよりも高いケイ酸塩の値を示した。これは、高炉水砕スラグ中の SiO<sub>2</sub> 成分が海水へ溶解した結果であり、SiO<sub>2</sub> の海水への溶解量が高炉水砕スラグの方がヘドロよりも多いものと考えられる。

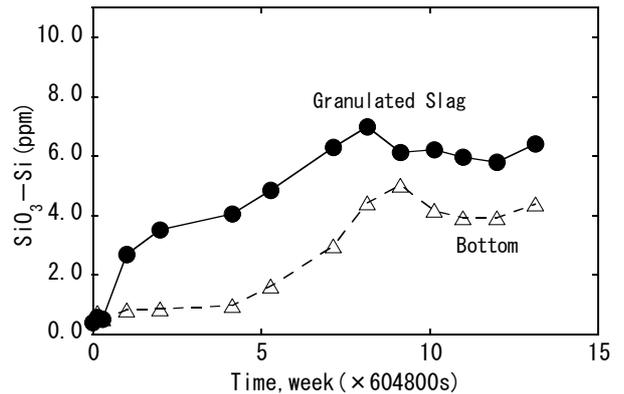


Fig.7 Time changes of SiO<sub>3</sub>-Si in seawater in black box

### 3.3 製鋼スラグ開放系実験結果

Photo 2 に製鋼スラグの開放系実験の海底での外観変化を示す。4 ヶ年の長期にわたり、製鋼スラグ表面は季節に応じた海藻類の着生が認められた。また、実験海域がヘドロの堆積負荷が大きく、製鋼スラグ周辺がヘドロで覆われているにもかかわらず、製鋼スラグ表面は、スラグ粒子間の隙間が確保されていた。製鋼スラグ表面に着生した藻類は、主にケイ藻とアオサであるが、製鋼スラグ設置海域の周辺の海底には、大型の藻類の着生は認められなかった。

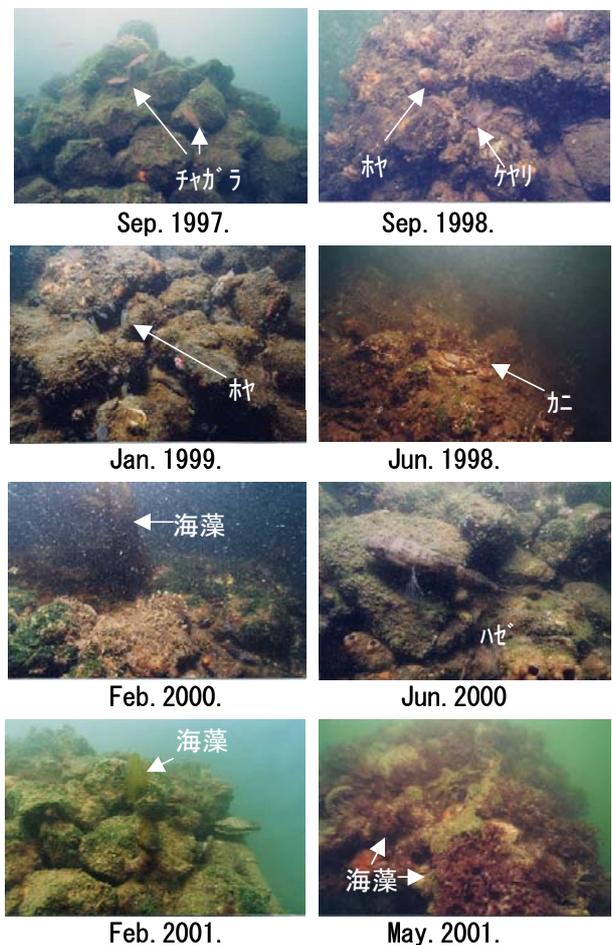


Photo 2 Steelmaking slag surface

製鋼スラグ、コンクリートおよび天然石表面のクロロフィル a 量の変化を Fig.8 に示す。また、Table 1 に設置 3 週間後における各試料表面のケイ藻分類結果を示す。製鋼スラグは、クロロフィル a 量がコンクリートの 4 倍以上あり、天然石よりも多い。製鋼スラグ表面で観察されたケイ藻種も 27 種とコンクリートの 18 種、天然石の 13 種よりも多い。製鋼スラグ、コンクリートおよび天然石の細胞数は、それぞれ 243,600cell/cm<sup>2</sup>、13,500cell/cm<sup>2</sup>、12,150cell/cm<sup>2</sup> と、製鋼スラグが最も多いことが観察された。

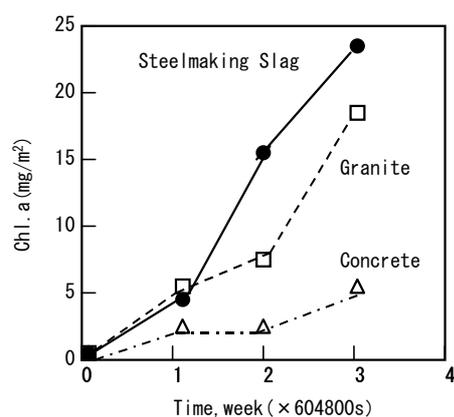


Fig.8 Time changes of chlorophyll a on slag, concrete and granite

## 4. 考察

### 4.1 高炉水砕スラグの硫化水素発生抑制効果

海底での H<sub>2</sub>S の発生を抑制することは、東京湾などの閉鎖性海域で発生する青潮被害の抑制に有効である。H<sub>2</sub>S の発生は、おもに海底に溜まった有機物の分解に伴い、無酸素状態の海水やヘドロ中で硫酸還元菌による硫酸イオンの還元によって生ずる。高炉水砕スラグは、(1) 海底に覆砂することによる底泥（ヘドロ）と海水との遮断によって H<sub>2</sub>S の海水中への溶出を遮断する効果や、(2) Fig.5 の結果のように海砂よりも間隙水中の H<sub>2</sub>S を低下させる効果がある。これは、Fig.4 に示すように間隙水中の pH が高炉水砕スラグ中の Ca 分の微量溶解によって 8.5 程度に維持されることによる。硫酸還元菌は、pH が高くなると、活性が弱まることが知られており<sup>7)</sup>、pH ≥ 8.5 ではほとんど硫化水素を発生しない。高炉水砕スラグの硫化水素発生抑制効果は、硫酸還元菌の活性を弱める特性により海砂よりも優れているものと考えられる。さらに、硫化水素の発生が 2 ヶ年以上抑制されることも確認されており、長期にわたって効果を発揮する。

### 4.2 高炉水砕スラグのケイ酸塩供給効果

ケイ酸塩イオンは、海藻類の増殖に必要な栄養素の一つであり、特に海の基礎生産者であるケイ藻にとっては、SiO<sub>3</sub>-Si ≥ 0.28ppm が増殖の目安となる<sup>8)</sup>。海水中でのケイ

Table 1 Observational results of diatom species and cell number after 3 weeks (cell/cm<sup>2</sup>)

Species	Steelmaking Slag	Concrete	Granite
<i>Achnanthes brevipes</i> v. <i>intermedia</i>		450	
<i>Achnanthes delicatula</i>			
<i>Achnanthes lanceolata</i>		225	
<i>Amphipleura</i> sp.	1,200	1,350	
<i>Amphora coffeaeformis</i>			
<i>Amphora ventricosa</i>	1,200	225	360
<i>Amphora</i> sp. (cf. <i>aequalis</i> )			
<i>Amphora</i> sp. (cf. <i>coffeaeformis</i> )	2,400	225	360
<i>Amphora</i> spp.	2,400	225	360
<i>Bacillaria paradoxa</i>	127,200	2,700	3,600
<i>Campylodiscus</i> sp.	2,400		
<i>Cocconeis scutellum</i>	1,200		
<i>Cocconeis</i> sp.	1,200		
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	1,200		
<i>Cyclotella</i> sp.			
<i>Cylindrotheca closterium</i>	2,400	450	450
<i>Diploneis smithii</i>			
<i>Gomphonema pseudaugur</i>	2,400		
<i>Gomphonema</i> sp.			
<i>Grammatophora oceanica</i>			
<i>Gyrosigma</i> sp.			
<i>Melosira</i> sp.	6,400		
<i>Navicula gregaria</i>	1,200		360
<i>Navicula howeana</i>	3,600	225	
<i>Navicula</i> sp. (cf. <i>directa</i> )	2,400	450	360
<i>Navicula</i> sp. (cf. <i>ramosissima</i> )	12,000	450	1,080
<i>Navicula</i> spp.	7,200	450	2,520
<i>Nitzschia acuminata</i>	1,200	225	360
<i>Nitzschia hungarica</i>	1,200		
<i>Nitzschia longissima</i>	800		
<i>Nitzschia panduriformis</i> v. <i>continua</i>	2,400		
<i>Nitzschia sigma</i>			
<i>Nitzschia</i> sp. (cf. <i>amphibia</i> )		225	360
<i>Nitzschia</i> sp. (cf. <i>constricta</i> )	1,200	450	
<i>Nitzschia</i> sp. (cf. <i>fonticola</i> )	2,400		
<i>Nitzschia</i> sp. (cf. <i>laevis</i> )	13,200		
<i>Nitzschia</i> spp.	2,400	450	720
<i>Skeletonema costatum</i>	31,200	3,150	900
<i>Stauroneis</i> sp.	1,200	450	360
<i>Synedra fasciculata</i>		1,125	
<i>Synedra investiens</i>			
<i>Synedra</i> sp.	8,400		
Total of species	28	19	14
Total of cells(cell/cm <sup>2</sup> )	243,600	13,500	12,150

酸塩イオンの供給源は、河川水や土粒子である。本実験海域の海底は、河川流入土粒子と藻類の死骸で形成されている。これらは、海水にケイ酸塩を多く供給する。高炉水砕スラグは、本実験海域のようなヘドロと比べても、多くのケイ酸塩を海水に供給する効果を有しており、海域へケイ酸塩を供給するに適した材料である。

また、ケイ藻は、赤潮の原因の一つである渦鞭毛藻の競合種であり、ケイ藻が増殖した状態の海域では、渦鞭毛藻の増殖は阻害される。渦鞭毛藻による赤潮被害が毎年のように繰り返されている瀬戸内海では、ケイ酸塩濃度に着目した赤潮の研究もなされている。今井は、ケイ藻類による赤潮予防の可能性を指摘している<sup>9)</sup>。赤潮防止にケイ藻の増殖を利用するには、エンジニアリング、生態学など多くの課題が残されているが、高炉水砕スラグの沿岸海域修復機能の一つとして、今後注目すべき課題と考えられる。

#### 4.3 高炉水砕スラグの底棲生物着生基盤としての機能

高炉水砕スラグの試験区には、多くの底棲生物が観察された。底棲生物の生息量は、底質の間隙の大きさと相関がある<sup>10)</sup>。高炉水砕スラグは中間粒径が1.0~1.5mmで、かつ角張った形状をしており、粒子間の間隙が大きい。比較材の海砂の中間粒径が0.5mm程度なので、高炉水砕スラグの間隙が大きいことが底棲生物が多く観察されたことの主因であると考えられる。また、底棲生物の棲息には、底層水に酸素が十分に含まれていることも重要であり、高炉水砕スラグが硫化水素の発生抑制効果を有することも、底棲生物が多く観察されたことの要因と考えられる。高炉水砕スラグは、粒子の大きさ・形状、水質改善など底棲生物の生息にとって適した条件を有している。

底棲生物が多く生息することは、底棲生物による海水中のリン酸塩や窒素の除去、ヘドロ（有機物）の分解といった自然の活力を生かした水質底質改善効果も期待できる。

#### 4.4 製鋼スラグの生物着生基盤としての機能

製鋼スラグは、実海域の海底設置実験において、ヘドロの堆積負荷が大きく、周囲に海藻類の群落が認められない海域において、4ヵ年にわたり海藻類・付着動物類の着生が継続した。ハゼ類やカニ類などの生息場としても、製鋼スラグ試験区が継続的に利用されていた。また、NKK 技報 No.169(2000.3)pp.24-28 で報告したように、製鋼スラグが含有するFe分によって、海水中のH<sub>2</sub>Sおよびリン酸塩を吸着し水質も改善する効果や、Fe分による海藻類の増殖効果も期待できる。実海域実験においても、ケイ藻の増殖速度が、天然石およびコンクリートよりも大きかった。これは、製鋼スラグが付着性海藻類や付着性動物の着生基盤として、コンクリートや天然石以上の機能を有することを示すものと考えられる。

これら製鋼スラグの特性は、富栄養化が進み、海底がヘドロで覆い尽くされ、透明度の小さい閉鎖性海域において、製鋼スラグが有効な環境改善材となりうることを示すものである。たとえば、閉鎖性海域の海岸にうつろを作製し、うつろ内の海域浄化を図る場合に、製鋼スラグをうつろ材料とすることによって、天然石を用いた場合以上に、うつろへの海藻類、動物類の着生が早く、うつろ内の水質浄化が進み、さらに、うつろ内に、高炉水砕スラグを覆砂すれば、うつろ内の底棲生物生息量も増加し、生物による水質浄化機能を高める可能性もある。製鋼スラグと高炉水砕スラグの組み合わせとしては、製鋼スラグを潜提材に用いて、高炉水砕スラグによる浅場造りも可能である。この場合も、スラグそれぞれの機能を活かし、水質浄化、藻類増殖、底棲生物増殖に適した浅場となるものと考えられる。

## 5. おわりに

鉄鋼スラグを組み合わせるによって沿岸海域の環境を改善修復する技術を開発することを目的に、鉄鋼スラグ

の環境改善効果を、実海域実験による海水成分の制御機能と生物着生の点から検討した。

- (1) 高炉水砕スラグは、硫化水素の発生抑制効果を有し、青潮抑制のための覆砂材として有効な材料であることが示された。
- (2) 高炉水砕スラグは、底泥以上に海水へのケイ酸塩供給機能を有し、海藻の増殖、ケイ藻の増殖効果を有する材料であることがわかった。将来的に、渦鞭毛藻赤潮防止のためのケイ藻増殖にとっても、有効な材料であることが示された。
- (3) 高炉水砕スラグ間隙には、海砂と同等以上に底棲生物が生息し、底棲生物の生息場としての高炉水砕スラグの機能が証明された。また、底棲生物による水質浄化機能・底泥分解機能も期待され、ヘドロの堆積した海底における覆砂材、浅場材、底棲生物生息場造成材として生物機能を利用した環境改善材となり得ることがわかった。
- (4) 製鋼スラグは、付着性海藻・付着性動物の着生基盤としての性能を有する。特に、ヘドロが堆積し透明度の小さい閉鎖性海域における環境改善材として、うつろ造成材や藻場造成材、浅場造成用潜提材として自然石やコンクリート以上の機能を有することがわかった。

最後に本研究を進めるにあたり、東海大学船舶管理課殿、海洋学部煙山政夫殿、(株)鉄組潜水工業所のダイバーの方々、芙蓉海洋開発(株)三輪竜一殿および鋼管計測(株)小田静殿に多大なご協力をいただきました。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 竹内智行. “水環境保全のための水質改善工法の可能性”. 沿岸海洋研究. 36.2. pp.131-135(1999).
- 2) 杉本隆成. “海洋生物資源と沿岸域のモニタリングの国際動向”. 沿岸海洋研究. 38.2. pp.73-77(2001).
- 3) 成松陽明ほか. “転炉スラグの漁業への利用”. 製鉄研究. 13534-13538(1980).
- 4) 伊藤一明ほか. “鉄鋼スラグ散布による沿岸海域でのリン除去の基礎的研究”. 水環境学会誌. 19, 501-507(1996).
- 5) 伊藤一明ほか. “鉄鋼スラグ散布による沿岸海域底泥からの硫化物抑制とアンモニア性窒素の溶出の検討”. 水環境学会. 20, pp.670-673(1997).
- 6) Y. NAKAMURA et al. *IISJ International*. 38, 390-398(1998).
- 7) 関政夫ほか. “昭和 57 年年英虞湾真珠養殖漁場改良事業効果調査”. 三重県浜島水産試験年報 1982, pp.28-44(1984).
- 8) 角皆静男ほか. “海洋化学・化学で海を解く”. 産業図書. p.286(1983).
- 9) 今井一郎. “赤潮生物の防除”. 赤潮セミナー, pp.49-68, 1997.
- 10) 北森良之介. 内湾の環境科学下(西條八東編)培風館, pp.93-115(1984).

<問い合わせ先>

基盤技術研究所 無機工学チーム

Tel. 044 (322) 6219 沼田 哲始

E-mail address : tnumta@lab.keihin.nkk.co.jp