

# 鉄鋼スラグ水和固化体の基本特性と 海洋環境下における生物付着性

松永 久宏\*・高木 正人\*・小菊 史男\*

Fundamental Properties of Blocks which Set Steel Slag by Hydration Reaction and  
Biofouling Build-up Properties on Exposure to Marine Environment

Hisahiro MATSUNAGA, Masato TAKAGI and Fumio KOGIKU

**Synopsis** : Block without cement and natural aggregates has been developed from steel slag, and its applicability to marine structure has been investigated. The slag block has the following feature: (1) Similar-manufacturing process to conventional concrete can be used. (2) It has sufficient strength to adapt the standard of marine concrete. (3) It has excellent abrasion resistance characteristics. (4) The lower rate of dissolution of alkaline elements in soaking seawater. (5) The biofouling growth on slag block was significantly more than that on the concrete block in the intertidal area at Mizushima Port in the Inland Sea. This was true both with respect to the total biomass of biofouling organisms as well as the number of species.

**Key words**: slag block; steel slag; steelmaking slag; ground granulated blast furnace slag; biofouling organism; marine structure; marine environment; carbon dioxide.

## 1. 緒言

高炉スラグおよび製鋼スラグから構成される鉄鋼スラグは、日本国内で年間およそ3,600万トン発生している<sup>1,2)</sup>。このうち製鋼スラグは2001年度において1,372万トン発生しており、有効利用率は97%<sup>2)</sup>と高いものの、粉状になりやすいことと遊離石灰による水和膨脹性を示す<sup>3,4)</sup>ことから、その用途は道路用路盤材、土木工用仮設材などの比較的付加価値の低い用途としての利用にとどまっている。そこで、より有効に活用するために、路盤材等のように単に天然材料の代替として使用するのではなく、新しい材料を創製する試みが行われるようになった。製鋼スラグ、高炉スラグ、および発電所から発生するフライアッシュをセメントにより固化したFSコンクリート<sup>5)</sup>、製鋼スラグ中の成分を炭酸化させることにより固化した炭酸固化体<sup>6)</sup>がそれである。

製鋼スラグは、 $\beta$ -2CaO $\cdot$ SiO<sub>2</sub>相などから構成され、free-CaOだけでなく、存在する鉱物相の中には、水和反応を生じ、長時間かかって硬化する活性を有している<sup>7)</sup>。この反応性を利用し、高炉スラグ微粉末等と水を加えて混練すると、天然骨材およびセメントを使用せずにリサイクル材のみからコンクリート代替が可能な固化体（鉄鋼スラグ水和固化体）を製造できることを見出し、消波ブロックおよび根固め用人工石等の海洋構造物としての適用について検討している<sup>8-13)</sup>。また、製鋼スラグは、生物の育成に必要と

される成分である鉄、珪素等を含むため、鉄鋼スラグ水和固化体の海洋構造物としての使用が、生物の育成に有効に働くことも期待できる。

本研究では、鉄鋼スラグ水和固化体の強度等の基本特性について検討するとともに、本固化体を実海域の港湾内へ暴露し、2年間にわたりコンクリートと比較した生物付着性を調査し、その特性を明らかにした。また、リサイクル材料からなる本固化体をコンクリート代替として利用した際の環境負荷低減効果についての試算を行った。

## 2. 鉄鋼スラグ水和固化体の基本特性

### 2.1 実験方法

#### 2.1.1 固化体の製作方法

鉄鋼スラグ水和固化体の製作方法をFig. 1に示す。本固化体は、通常のコンクリートと同様に、練混ぜ、打込み、養生して製作する。本固化体の配合をTable 1に、使用原料の化学成分の例をTable 2に示す。使用材料は製鋼スラグ（表乾密度2.9~3.2g/cm<sup>3</sup>、吸水率2~6%）、高炉スラグ

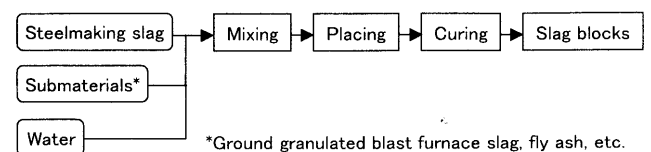


Fig. 1. The manufacturing process of slag block.

Table 1. Specified mix formula of slag blocks.

Proportion No.	Maximum diameter of steemaking slag (mm)	Slump (cm)	Air (%)	Amount of composition (kg/m <sup>3</sup> )					
				Water	BFS*	Fly ash	Steelmaking slag	Calcium hydroxide	Water reducing agent
A	40	21.0	-	268	574	0	1339	57	0.0
B	40	21.0	2.8	196	374	267	1497	39	3.9
C	20	15.0	1.7	242	276	138	1743	41	0.0
D	20	10.5	-	277	620	0	1446	62	0.0
E	20	10.5	-	270	403	202	1410	61	0.0
F	20	8.0	2.5	222	364	260	1458	36	2.3

\*Ground granulated blast furnace slag

Table 2. Example of chemical compositions of raw materials.

Raw material	(mass%)						
	Total Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
Steelmaking slag (Hot metal pretreatment slag)	18	34	15	2	4	5	4
Ground granulated blast furnace slag	0	42	33	7	13	0	0
Fly ash	5	1	63	0	27	0	0

微粉末 (JIS A 6206 高炉スラグ微粉末4000), 必要に応じてフライアッシュ (JIS A 6201 フライアッシュII種) および反応刺激材として消石灰 (JIS R 9001 工業用消石灰) を用いており, セメントおよび天然骨材は全く使用していない。製鋼スラグはエージング処理し, JIS A 5015 附属書2による水浸膨張比が1.1%以下になったものを使用した。本固化体の硬化は, これらの材料からCa, Si, Alが水に溶解し, CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>OおよびCaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>Oが生成することにより生じる。

### 2.1.2 固化体の評価項目と評価方法

鉄鋼スラグ水和固化体の物理的特性として, 強度, 耐摩耗性, 細孔径分布を調べた。強度試験は, 圧縮強度 (JIS A 1108), 曲げ強度 (JIS A 1106), 引張り強度 (JIS A 1113), 静弾性係数 (JSCE-G 502) を行った。耐摩耗性の試験は, サンドブラスト装置を用いて固化体に砂を吹付け, 磨耗の程度を調べる ASTM C418-98 に準拠した方法により行った。平均細孔径は, Table 1 の配合Aの標準養生56日後の固化体について, 水銀圧入式ポロシメーターを用いて測定した。

化学的特性として, アルカリ成分の溶出試験を行った。アルカリ成分の溶出試験は, φ100×200 mm の供試体を材齢28日まで20°C・湿度60%で気中養生後, 容積15倍の人工海水に浸漬して海水のpHを測定することにより行った。

## 2.2 結果および考察

### 2.2.1 物理的特性

圧縮強度の経時変化を Fig. 2 に示す。鉄鋼スラグ水和固化体の圧縮強度は, 普通用途のコンクリート<sup>14)</sup>と同等であり, 材齢とともに増加する。本固化体は, 材齢91日強度が28日強度の1.3倍程度になっており, 91日以降も強度が増加し, コンクリートよりも長期強度の伸びが大きい。この理由として, 硬化反応が長期間にわたり継続することが

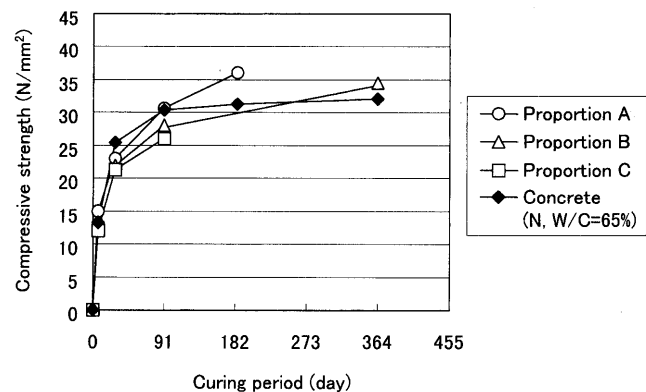


Fig. 2. Relationship between compressive strength and curing period.

Table 3. Properties of slag block and concrete.

Item	Slag block	Concrete (N, W/C=65%)
Elastic modulus* (N/mm <sup>2</sup> )	21500	26100
Tensile strength* (N/mm <sup>2</sup> )	2.14	2.22
Flexural strength* (N/mm <sup>2</sup> )	3.89	4.05
Abrasive coefficient* (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	0.043	0.095
Density (t/m <sup>3</sup> )	2.4~2.5	2.3
Median pore size (μm)	0.02	0.09

\*Compressive strength: 30N/mm<sup>2</sup>

考えられる。

鉄鋼スラグ水和固化体のその他の特性を Table 3 に示す。曲げ強度および引張り強度は同一圧縮強度のコンクリートと同レベルである。静弾性係数はやや小さいことからコンクリートよりも柔らかい材料である。潮位の影響を受ける海洋環境下および降雨の影響を受ける野外等で使用する際には, 乾燥収縮と湿潤膨脹が繰り返されるため, 材料に柔軟性がないとひび割れが発生しやすくなる。したがって, コ

ンクリートよりも柔らかい材料である鉄鋼スラグ水和固化体は、これらに対する抵抗性が大きいと考えられる。また、すりへり係数がコンクリートの約1/2と小さく、海洋環境下での漂砂による磨耗に対する耐久性に優れることが期待できる。さらに、密度が2.4~2.5t/m<sup>3</sup>と大きいため水中での波浪安定性が高いこと、細孔径が小さく緻密であるため塩分浸透しにくい特徴を有する<sup>11)</sup>。

2.2.2 アルカリ成分の溶出性

供試体を人工海水へ浸漬した後の海水のpH変化をFig. 3に示す。鉄鋼スラグ水和固化体は、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べ海水のpH上昇が小さく、アルカリ成分の溶出が少ない。特にフライアッシュを配合した配合Eでは、pH上昇がほとんどない。この理由として、海水と直接接するペースト部分を構成する0.1mm以下の微粉（高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、消石灰のほぼ全量、および製鋼スラグの一部（約3mass%）のCaO/SiO<sub>2</sub>が低いことがあげられる。

コンクリートに使用している普通ポルトランドセメントのCaO濃度は64.2mass%、SiO<sub>2</sub>濃度は21.2%である<sup>14)</sup>ことから、CaO/SiO<sub>2</sub>は3.03（質量比）である。鉄鋼スラグ水和固化体のCaO/SiO<sub>2</sub>は、Table 1の配合およびTable 2の原料の化学成分から計算すると、フライアッシュ無配合（配合D）では1.53（質量比）、フライアッシュ配合（配合E）で

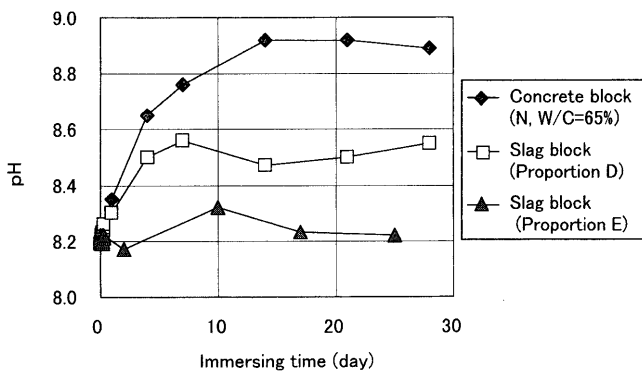


Fig. 3. Variation in seawater pH observed after the immersion of test blocks in the laboratory.

は0.87（質量比）であり、普通ポルトランドセメントよりも低いために、アルカリ成分の溶出が小さくなると考えられる。

3. 鉄鋼スラグ水和固化体の海洋環境下における生物付着性

3.1 実験方法

1999年12月に鉄鋼スラグ水和固化体およびコンクリートからなる高さ約2.0mの5トン型波消ブロックを製造した。製造に用いた鉄鋼スラグ水和固化体の配合をTable 4に、コンクリート（18-8-40BB）の配合をTable 5に示す。打込み・型枠取外し後の波消ブロックは現場養生し、2000年2月に瀬戸内海の岡山県水島港の干満帯（消波ブロック下端潮位：MP+1.50m、平均潮位：MP+1.90m、大潮平均満潮位：MP+3.27m、大潮平均干潮位：MP+0.53m）に暴露した。大潮の干潮時に撮影した海水暴露27ヶ月後の状況をFig. 4に示す。多くの生物が波消ブロックに付着していることが観察される。

消波ブロックへの生物付着性は、2000年11月（約10ヶ月後）、2001年3月（約14ヶ月後）、2001年11月（約22ヶ月後）、2002年4月（約27ヶ月後）に調査した。付着生物の採取は、消波ブロックの沖側上部（上端から約30cm）、沖側下部（下端から約30cm）、陸側上部、陸側下部の4カ所から、それぞれ面積20×20cmの正方形部分を刈り取るにより行った。サンプルは5%ホルマリンを添加した海水中に保存後、生物種ごとに大別し、60°Cで24時間乾燥後の質量測定および生物種の同定を行った。

3.2 結果および考察

波消ブロックの各部位から採取した付着生物の平均付着質量の経時変化をFig. 5に示す。鉄鋼スラグ水和固化体への生物付着質量は、暴露時間とともに増加し、27ヶ月後における生物付着質量は10ヶ月後の約3倍である。一方、コンクリートへの生物付着質量は、時間が経過しても大きな変化が見られなかった。鉄鋼スラグ水和固化体とコンク

Table 4. Specified mix formula of slag blocks used for the present study for the test of biofouling organisms.

Maximum diameter of steemaking slag (mm)	Slump (cm)	Air (%)	Amount of composition (kg/m <sup>3</sup> )				Compressive strength at 28 days (N/mm <sup>2</sup> )
			Water	BFS*	Steelmaking slag	Calcium hydroxide	
40	15.0	1.8	274	613	1433	61	22.4

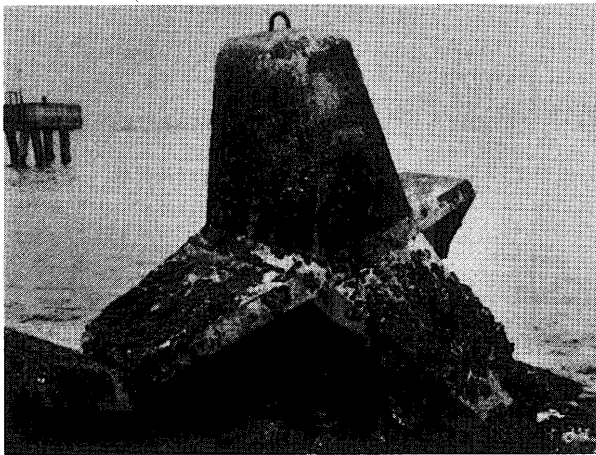
\*Ground granulated blast furnace slag

Table 5. Specified mix formula of concrete blocks used for the present study for the test of biofouling organism.

Maximum diameter of aggregate (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	Amount of composition (kg/m <sup>3</sup> )					Compressive strength at 28 days (N/mm <sup>2</sup> )
				Water	Cement (BB)	Fine aggregate	Coarse aggregate	Air entraining and water reducing agent	
40	8.0	4.8	64	157	245	800	1137	2.45	27.9

リートへの生物付着質量を比較すると、鉄鋼スラグ水和固化体への付着質量比が10ヶ月後で1.7倍、22ヶ月後で4.4倍と大きく、海水暴露時間とともに付着質量の差異が拡大している。

付着生物の種類数の経時変化をFig. 6に示す。また、10ヶ月後における付着生物の種類名をTable 6に示す。鉄鋼スラグ水和固化体への付着生物の種類数は、暴露後10ヶ月から27ヶ月の間では、約32種類であり、ほとんど変化がない。一方、コンクリートへの付着生物の種類数は、



50cm

Fig. 4. Biofouling growth on slag block exposed to seawater for a period of 27 months.

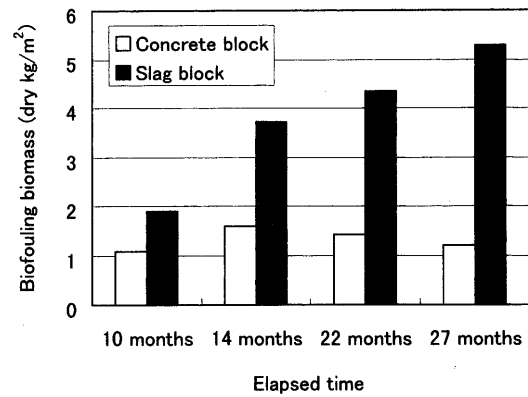


Fig. 5. Change in Biomass of biofouling organisms on slag and concrete blocks exposed to sea.

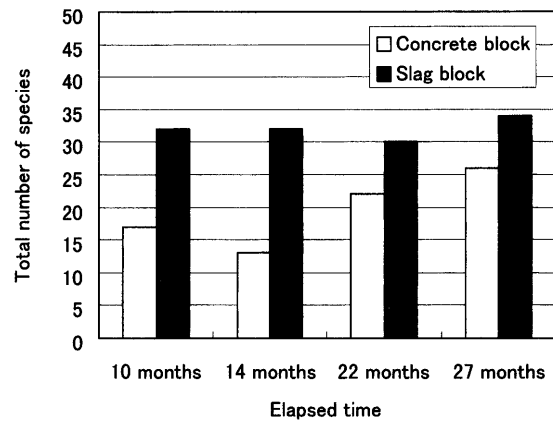


Fig. 6. Change in total number of species on slag and concrete blocks exposed to sea.

Table 6. Species encountered on slag and concrete blocks exposed to sea for a period of 10 months.

Slag block		Concrete block	
Group	Species names	Group	Species names
Algae	<i>Ulva pertusa</i> <i>Enteromorpha linza</i> <i>Cladophora</i> sp.	Polychaetes	<i>Nephtys</i> sp. <i>Neanthus</i> sp. <i>Lepidonotus</i> sp. <i>Dexiospira</i> sp.
Polychaetes	<i>Eunice</i> sp. <i>Branchiosyllis</i> <i>Ophiodromus</i> sp. <i>Nephtys</i> sp. <i>Hololepidella</i> sp.1 <i>Hololepidella</i> sp.2 <i>Harmothoe</i> sp. <i>Lepidonotus</i> sp. <i>Dexiospira</i> sp.	Molluscs	<i>Nodilittorina granularis</i> <i>Septa</i> sp. <i>Stomatia</i> sp. <i>Puncturella nobilis</i> <i>Pollia</i> sp. <i>Mytilus edulis</i> <i>Modiolus difficilis</i> <i>Modiolus philippinarum</i> <i>Crassostrea</i> sp. <i>Crassostrea gigas</i>
Molluscs	<i>Nodilittorina granularis</i> <i>Septa</i> sp. <i>Stomatia</i> sp. <i>Puncturella nobilis</i> <i>Pollia</i> sp. <i>Mytilus edulis</i> <i>Modiolus difficilis</i> <i>Modiolus philippinarum</i> <i>Crassostrea</i> sp. <i>Crassostrea gigas</i>	Arthropods	<i>Chthamalus challengerii</i> <i>Balanus albicostatus</i> <i>Balanus amphitrite</i> <i>Balanus trigonus</i> <i>Platochestia platensis</i> <i>Paracerceis japonica</i> <i>Gnorimosphaeroma</i> sp. <i>Paranthura</i> sp. <i>Dinoides</i> sp. <i>Nanosesarma gordon</i>
Arthropods	<i>Chthamalus challengerii</i> <i>Balanus albicostatus</i> <i>Balanus amphitrite</i> <i>Balanus trigonus</i> <i>Platochestia platensis</i> <i>Paracerceis japonica</i> <i>Gnorimosphaeroma</i> sp. <i>Paranthura</i> sp. <i>Dinoides</i> sp. <i>Nanosesarma gordon</i>		

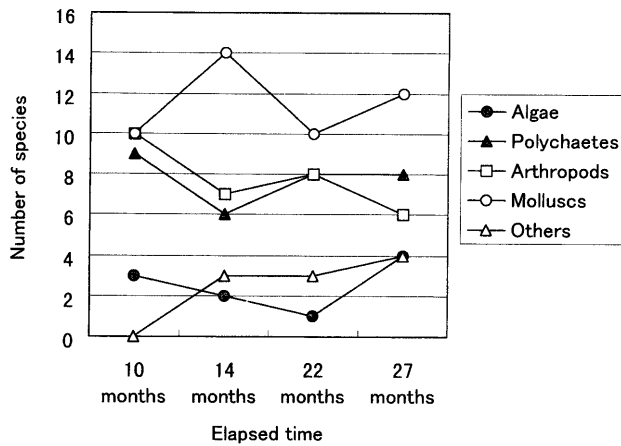


Fig. 7. Change in the total number of species of individual groups on slag block exposed to sea.

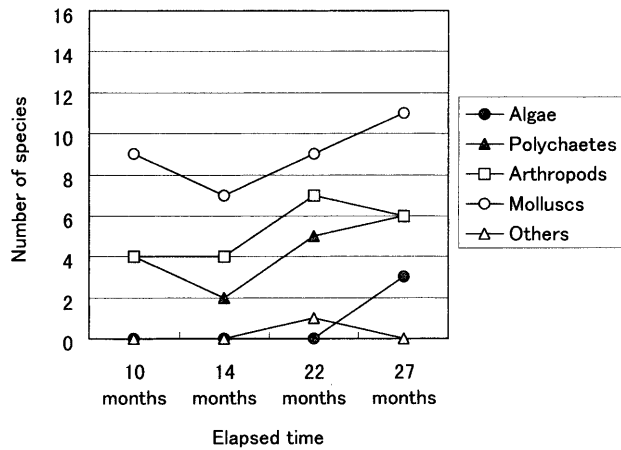


Fig. 8. Change in the total number of species of individual groups on concrete block exposed to sea.

増加傾向が見られ、10ヶ月後では鉄鋼スラグ水和固化体の約1/2の種類数であったものが、27ヶ月後には約3/4の種類数まで増加している。

これらの付着生物についての結果をさらに海藻類 (Algae)、ゴカイ等の多毛類 (Polychaetes)、フジツボ等の節足動物 (Arthropods)、二枚貝および巻貝等の軟体動物 (Molluscs)、その他の5種に大別して解析した。鉄鋼スラグ水和固化体への付着生物の種類数の経時変化を Fig. 7 に示す。観察時期によりやや異なるが、最も種類数が多いのは軟体動物であり、次に節足動物、多毛類、海藻類の順である。節足動物の種類数は、時間とともにやや減少傾向であるが、その他の種は大きな変化が見られない。

コンクリートへの付着生物の種類数の経時変化を Fig. 8 に示す。コンクリートも鉄鋼スラグ水和固化体と同様に最も種類数が多いのは軟体動物であり、次に節足動物、多毛類、海藻類の順となる。各生物種は、海水暴露時間とともに種類数が増加する傾向が見られる。

鉄鋼スラグ水和固化体への各種類ごとの生物付着質量の経時変化を Fig. 9 に示す。質量で比較すると最大付着生物

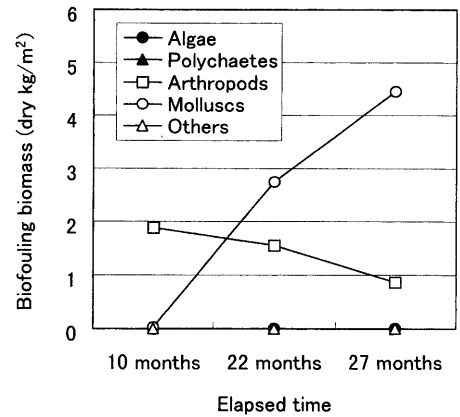


Fig. 9. Change in the biomass of individual groups of organisms on slag block exposed to sea.

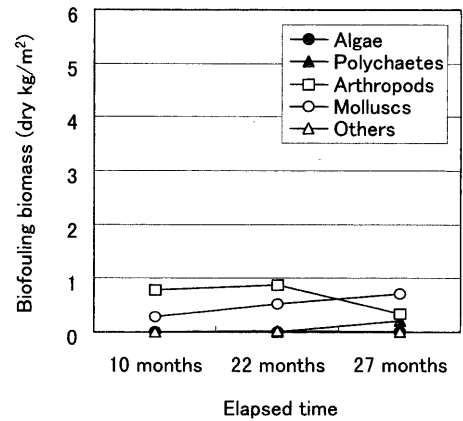


Fig. 10. Change in the biomass of individual groups of organisms on concrete block exposed to sea.

は、10ヶ月後では節足動物であるが、海水暴露時間とともにその量は減少し、逆に軟体動物が増加し、27ヶ月後には軟体動物が優位となる。生物付着性は、波消ブロックの上部と下部で異なり、節足動物は上部および下部の両方に付着していたが、軟体動物は下部に多く付着していた。10ヶ月後における優占種は、消波ブロックの上部および下部ともに節足動物でフジツボの一種である *Balanus amphitrite* であった。22ヶ月後および27ヶ月後の優占種は、波消ブロックの上部では10ヶ月後と同じ *Balanus amphitrite* であったが、下部では軟体動物でカキの一種である *Crassostrea gigas* に変わった。

コンクリートへの各種類ごとの生物付着質量の経時変化を Fig. 10 に示す。海水暴露期間にかかわらず付着質量の大部分は、節足動物および軟体動物が占める。節足動物の付着重量は、10ヶ月後と22ヶ月後で変化がないが、27ヶ月後になると減少している。一方、軟体動物の付着質量は、10ヶ月後では鉄鋼スラグ水和固化体よりも多いが、鉄鋼スラグ水和固化体のように時間とともに急激に増加せず、22ヶ月および27ヶ月後の付着質量は、鉄鋼スラグ水和固化体の方が圧倒的に大きい。10ヶ月後における優占種は、

波消ブロックの上部では節足動物でフジツボの一種である *Chthamalus challengerii* であり、下部は鉄鋼スラグ水和固化体と同様にフジツボの一種である *Balanus amphitrite* であった。22ヶ月後および27ヶ月後の優占種は、波消ブロックの上部では10ヶ月後と同じ *Chthamalus challengerii* であったが、下部では鉄鋼スラグ水和固化体と同様に軟体動物でカキの一種である *Crassostrea gigas* に変わった。

これらの結果から、鉄鋼スラグ水和固化体の生物付着性をコンクリートと比較すると以下のようにまとめられる。コンクリートは、初期の付着生物の種類数が少なく、暴露期間が長くなるにしたがい徐々に増加し、鉄鋼スラグ水和固化体の付着生物の種類数に近くなる。しかし、付着質量にはほとんど変化がない。一方、鉄鋼スラグ水和固化体は、海水暴露初期の10ヶ月後には27ヶ月後と同種類の生物がすでに付着している。また、付着質量も徐々に増加する。したがって、鉄鋼スラグ水和固化体は、コンクリートよりも海水暴露時間が短い段階で多くの種類の生物が付着しやすく、生物親和性が高いと言える。

鉄鋼スラグ水和固化体への付着生物相の変化は次のように考察される。

(1) 海水暴露後の初期段階において多くのフジツボの幼生が付着。

(2) フジツボは、比較的個体の大きさが大きく、複雑な形状であることから、フジツボが成長することにより、小さな生物の生息基盤を形成。

(3) フジツボの周辺に、比較的個体の大きさが小さいゴカイ等の多毛類が生息することにより種類数が増加。

(4) カキの付着量が徐々に増加。その結果、フジツボの幼生がブロック表面に付着しにくくなり、フジツボの付着量が徐々に減少。

一方、コンクリートでは、初期段階においてフジツボの付着量が少ないために、フジツボを生息基盤とする生物が少なく、その結果、鉄鋼スラグ水和固化体よりも付着生物の種類数が少なかったと考えられる。また、鉄鋼スラグ水和固化体よりもカキ等の軟体動物の付着量増加が遅いため、付着生物の種類数の増加も遅いと考えられる。したがって、鉄鋼スラグ水和固化体への生物付着質量と付着生物の種類数が多い理由は、海水暴露後の初期段階においてフジツボの付着性に優れること、およびその後のカキの付着性に優れることがあげられる。

これらの大きな理由の一つとして、Fig. 3に示したように鉄鋼スラグ水和固化体のアルカリ溶出性が低いことがあげられる。また、海洋植物プランクトン群集が光合成の生産を営むためには、炭素、窒素、珪素、りん、鉄などの元素が必要とされるが、これらの栄養塩は、表層水中では不足することが多く<sup>15)</sup>、鉄イオンを用いる薬剤処理をブロックに施すと設置後1ヶ月から6ヶ月の間は、生物付着促進の効果が見られることが確認されている<sup>16)</sup>。また、製鋼ス

ラグを海水に浸漬すると鉄、珪素等が徐々に溶出することが報告されている<sup>17,18)</sup>。鉄鋼スラグ水和固化体は、製鋼スラグを主原料とし、鉄、珪素を含むことから、これらの元素の溶出に優れ、生物付着性が向上している可能性がある。

また、生物付着性は表面粗度と関係することが報告されている<sup>17)</sup>。22ヶ月後における付着生物採取後のブロック表面の状態は、鉄鋼スラグ水和固化体およびコンクリートともに、表面がやや磨耗して、一部に原料の粗粒子（鉄鋼スラグ水和固化体では製鋼スラグ、コンクリートでは骨材）が観察される状況であったが、表面粗度と生物付着性との関係を定量化することはできなかった。

#### 4. 環境負荷低減効果

リサイクル材料からなる鉄鋼スラグ水和固化体をコンクリート代替として使用した際の環境負荷低減効果について試算を行った。全国での年間発生量の1/14にあたる100万トンの製鋼スラグを原料にTable 1の配合Fにしたがい鉄鋼スラグ水和固化体を製造し、Table 7の配合で製造されるコンクリートに代替するものと仮定して計算した。なお、各原料の製造にともなうCO<sub>2</sub>排出量は、ポルトランドセメント757.9 kg/t<sup>19)</sup>、高炉スラグ微粉末24.1 kg/t<sup>19)</sup>、フライアッシュ17.9 kg/t<sup>19)</sup>、細骨材3.5 kg/t<sup>19)</sup>、粗骨材2.8 kg/t<sup>19)</sup>、および石灰433 kg/t<sup>20)</sup>とした。また、製鋼スラグの製造（粉碎、篩い等）にともなうCO<sub>2</sub>排出量は、再生骨材と同じ2.8 kg/t<sup>19)</sup>と仮定した。

鉄鋼スラグ水和固化体の製造量：

$$(1,000,000 \text{ t/年}) / (1.458 \text{ t/m}^3) = 686,000 \text{ m}^3/\text{年} \dots\dots\dots (1)$$

天然骨材使用量削減：

$$(0.932 \text{ t/m}^3 + 1.000 \text{ t/m}^3) \times 686,000 \text{ m}^3/\text{年} = 1,325,000 \text{ t/年} \dots\dots\dots (2)$$

天然骨材不使用にともなうCO<sub>2</sub>排出量削減：

$$(3.5 \text{ kg/t} \times 0.932 \text{ t/m}^3 + 2.8 \text{ kg/t} \times 1.000 \text{ t/m}^3) \times 686,000 \text{ m}^3/\text{年} = 4,160 \text{ t/年} \dots\dots\dots (3)$$

セメント不使用にともなうCO<sub>2</sub>排出量削減：

$$757.9 \text{ kg/t} \times 0.254 \text{ t/m}^3 \times 686,000 \text{ m}^3/\text{年} = 132,000 \text{ t/年} \dots\dots (4)$$

製鋼スラグ使用にともなうCO<sub>2</sub>排出量増加：

Table 7. Specified mix formula of concrete for the trial calculation of environmental load.

W/C (%)	Amount of composition (kg/m <sup>3</sup> )				
	Water	Cement (N)	Fine aggregate	Coarse aggregate	Air entraining and water reducing agent
65	163	254	932	1000	2.54

$$2.8 \text{ kg/t} \times 1.458 \text{ t/m}^3 \times 686,000 \text{ m}^3/\text{年} = 2,800 \text{ t/年} \dots\dots\dots (5)$$

高炉スラグ微粉末使用にともなうCO<sub>2</sub>排出量増加:

$$24.1 \text{ kg/t} \times 0.364 \text{ t/m}^3 \times 686,000 \text{ m}^3/\text{年} = 6,020 \text{ t/年} \dots\dots\dots (6)$$

フライアッシュ使用にともなうCO<sub>2</sub>排出量増加:

$$17.9 \text{ kg/t} \times 0.246 \text{ t/m}^3 \times 686,000 \text{ m}^3/\text{年} = 3,020 \text{ t/年} \dots\dots\dots (7)$$

消石灰使用にともなうCO<sub>2</sub>排出量増加:

$$433 \text{ kg/t} \times 56/74 \times 0.036 \text{ t/m}^3 \times 686,000 \text{ m}^3/\text{年} = 8,090 \text{ t/年} \dots\dots\dots (8)$$

\* CaOの分子量/Ca(OH)<sub>2</sub>の分子量

全CO<sub>2</sub>排出量削減:

$$(\text{式}(3) + \text{式}(4)) - (\text{式}(5) + \text{式}(6) + \text{式}(7) + \text{式}(8)) \\ = 116,000 \text{ t/年} \dots\dots\dots (9)$$

式(2)に示したように年間132万トンの天然骨材の使用量削減, 式(9)に示すように年間11万6千トンのCO<sub>2</sub>排出量削減に寄与することが可能となる結果となった。日本の2000年度における温室効果ガスの総排出量は, 13億3200万トン-CO<sub>2</sub>である<sup>21)</sup>が, 京都議定書(地球温暖化防止京都会議)において, 基準年(1990年)の温室効果ガス排出量12億2900万t-CO<sub>2</sub>に対して6%削減の11億5500万t-CO<sub>2</sub>とすることになっている。鉄鋼スラグ水和固化体の使用により, このうちの約0.1%の削減に寄与することが可能となる。さらに, 生物親和性に優れることから, 海洋植物プランクトンの光合成および炭酸カルシウムの殻を持つ貝類によるCO<sub>2</sub>吸収効果, また海水浄化効果が期待できる。

## 5. 結言

リサイクル材料を原料にした鉄鋼スラグ水和固化体の基本特性, 海洋環境下における生物付着性および環境負荷低減効果について検討を行い, 以下のことが明らかになった。

- (1) コンクリートと同様な装置, 同様な手順で製造することができる。
- (2) コンクリート相当の強度特性を有し, 耐摩耗性に優れる。
- (3) コンクリートよりもアルカリ成分の溶出が少ない。
- (4) 鉄鋼スラグ水和固化体は, 海水暴露10ヶ月後の初期段階から多くの種類の生物が付着し, 付着質量も増加し続けた。一方, コンクリートは, 初期段階における付着生物の種類数が少なく, 27ヶ月後では鉄鋼スラグ水和固化

体の約3/4の種類数まで徐々に増加したが, 付着質量の増加が見られなかった。鉄鋼スラグ水和固化体は, コンクリートよりも生物親和性が高い。

(5) 鉄鋼スラグ水和固化体に製鋼スラグを100万トン/年使用した場合, 天然骨材の使用量削減には132万トン/年, CO<sub>2</sub>排出量削減には11万6千トン/年の寄与ができる試算結果となった。

以上より, 鉄鋼スラグ水和固化体の消波ブロック等の海洋構造物への使用による環境保全への寄与は大きい。

本研究を遂行するにあたり, 付着生物の同定に御尽力をいただきました産業技術総合研究所 四国センターのDr. Kanavillil Nandakumarに謝意を表します。

## 文 献

- 1) 高炉スラグ需給調査表(平成13年度), 鉄鋼スラグ協会, 東京, (2002), 1.
- 2) 製鋼スラグ需給調査表(平成13年度), 鉄鋼スラグ協会, 東京, (2002), 3.
- 3) K.Narita, T.Onoye and Z.Takada: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1978), 1558.
- 4) H.Suito, T.Yokomaku, Y.Hayashida and Y.Takahashi: *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), 2316.
- 5) FSコンクリート利用手引き書, 沿岸環境開発資源利用センター, 東京, (1998), 1.
- 6) T.Takahashi: *Concrete J.*, **38** (2000), 3.
- 7) K.Torii and M.Kawamura: *J. Soc. Mater. Sci. Jpn.*, **40** (1991), 1518.
- 8) 高木正人, 奥村樹郎, 松永久宏, 谷敷多穂, 櫻谷敏和: 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, 土木学会, 東京, (2000), 175.
- 9) F.Kogiku, H.Hamada, T.Yamazi and H.Matsunaga: *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Jpn.*, (2001) No. 990, 1.
- 10) H.Matsunaga, M.Takagi, F.Kogiku, K.Tanishiki and Y.Yoshioka: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 144.
- 11) 松永久宏, 高木正人, 小菊史男, 谷敷多穂, 櫻谷敏和: 鉄鋼スラグ利用拡大に関するシンポジウム, 日本鉄鋼協会, 東京, (2001), 16.
- 12) F.Kogiku, H.Matsunaga, M.Takagi, T.Sakuraya and H.Hamada: *Proc. 56th Jpn. Soc. Civ. Eng. Annual Meeting*, (2001), VI-408.
- 13) K.Tanishiki, H.Okuda, M.Takagi, H.Matsunaga and M.Nishigaki: *Proc. 56th Jpn. Soc. Civ. Eng. Annual Meeting*, (2001), VI-998.
- 14) コンクリート技術の要点'01, 日本コンクリート工学協会, 東京, (2001), 5.
- 15) A.Taniguchi, Y.Nakamura, K.Haraguchi, K.Arita and Y.Umiguuchi: *Proc. 45th Science Council of Japan Material Study Association Meeting*, (2001), 25.
- 16) T.Asai, H.Ozasa and K. Murakami: *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Jpn.*, (1997) No. 881, 1.
- 17) 二塚貴之, 桑田清輝, 長坂哲也, 日野光元: 製鋼スラグを栄養源として利用した海洋植物プランクトン増殖によるCO<sub>2</sub>固定化研究会中間報告会, 日本鉄鋼協会, 東京, (2001), 12.
- 18) 有田康一, 原田浩一, 谷口 旭: 製鋼スラグを栄養源として利用した海洋植物プランクトン増殖によるCO<sub>2</sub>固定化研究会中間報告会, 日本鉄鋼協会, 東京, (2001), 24.
- 19) コンクリートの環境負荷評価, 土木学会, 東京, (2002), I-87.
- 20) 環境庁温室効果ガス排出量算定方法検討会, 温室効果ガス排出量算定方法に関する検討結果 燃料の漏出および工業プロセス報告書, 環境庁, 東京, (2000), 4.
- 21) 2000年度(平成12年度)の温室効果ガス排出量について, 環境省, 東京, (2002), 1.