



特集記事・7

SDGsの目標実現に貢献する鉄鋼業

# JFE スチールの鉄鋼スラグ製品を用いた 海域環境改善の取り組み

JFE Steel's Activities to Improve Marine Environments  
Using Steel Slag Products

宮田 康人  
Yasuhito Miyata

JFE スチール (株)  
スラグ事業推進センター  
スラグ企画部市場開拓室 主任部員

## 1 はじめに

JFE スチールでは、「常に世界最高の技術をもって社会に貢献する」を企業理念に、持続的な社会と経済の発展を支えるべく事業活動を進めている。「資源循環」「地球温暖化の防止」「生物多様性の保全」「地域連携」が持続可能な社会の実現への重要な課題と捉えており、SDGsが掲げているグローバル目標のうち、12、13および14番目の目標である「つくる責任、つかう責任」、「気候変動に具体的な対策を」および「海の豊かさを守ろう」にも貢献できうるものと考えている。その一つの取り組みとして、鉄鋼スラグを活用した沿岸海域の生物多様性を保全・創出するための製品開発を積極的に進めている。

日本の沿岸域において、1950年代から1970年代の高度経済成長期における経済発展に伴って埋め立てや港湾や護岸の整備が進み、また陸域からの工場排水や農業排水などの陸域からの栄養塩流入負荷が増大した。これらの経済活動により、図1に示すような藻場・干潟の減少<sup>1)</sup>、富栄養化や赤潮の発生<sup>2)</sup>、底質の悪化や貧酸素化などさまざまな環境問題が顕在化してきた<sup>3)</sup>。

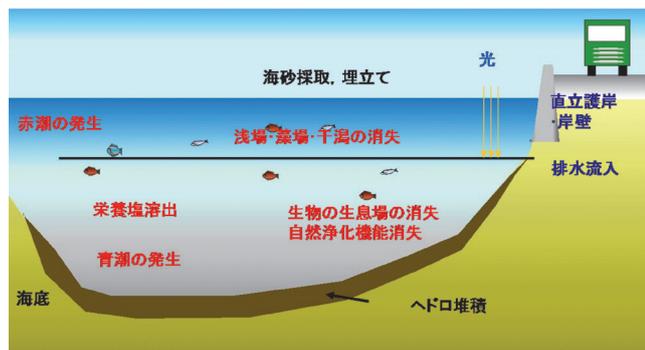


図1 沿岸域の環境問題

加えて、近年では沿岸各地において「磯焼け」と呼ばれる比較的浅い海域の全部または一部で海藻・海草藻場が消失する現象が生じている。これらの環境問題や磯焼けによって、海藻類や藻場で生活する魚介類などの水産資源の減少が進行し、沿岸海域の環境への影響が顕著になってきている<sup>4)</sup>。

当社では海域の環境改善に寄与する鉄鋼スラグ製品を開発して各地の海域での実証を行い、現在では官公庁・自治体の公共事業や漁業協同組合の事業に使用されている。本報では、海域環境改善向け鉄鋼スラグ製品の概要、および取り組み事例を紹介する。

## 2 海域環境改善向け鉄鋼スラグ製品

### 2.1 鉄鋼スラグ水和固化体 (フロンティアロック<sup>®</sup>、フロンティアストーン<sup>®</sup>)

製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を主原料としたフロンティアロック<sup>®</sup>およびフロンティアストーン<sup>®</sup> (以下、鉄鋼スラグ水和固化体) (図2) を開発し、製造している<sup>5-7)</sup>。鉄鋼スラグ



フロンティアロック<sup>®</sup>

フロンティアストーン<sup>®</sup>

図2 鉄鋼スラグ水和固化体 (フロンティアロック<sup>®</sup>・フロンティアストーン<sup>®</sup>) の外観

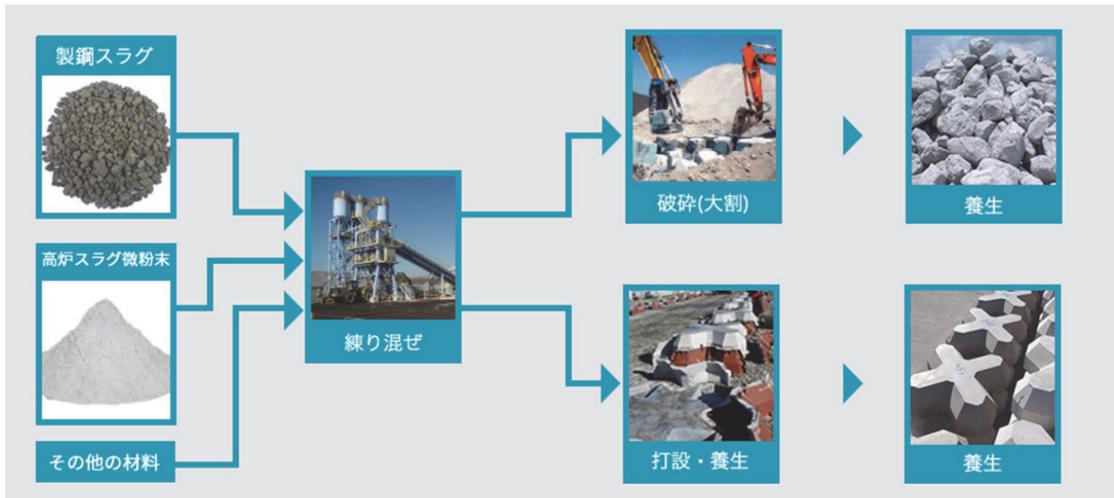


図3 鉄鋼スラグ水和固化体の製造プロセスイメージ



図4 鉄鋼スラグ炭酸固化体 (マリブロック®) の外観

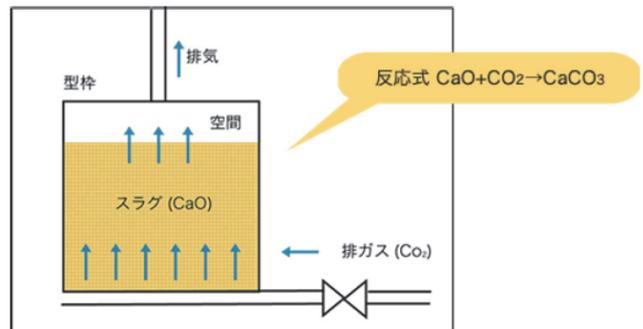


図5 鉄鋼スラグ炭酸固化体の製造イメージ

水和固化体の製造フローイメージに図3に示す。製鋼スラグを砂や砂利の代替に、高炉スラグ微粉末を結合材とし、通常のコンクリートと同様に、練り混ぜ、打設したのちに養生する。製鋼スラグから溶け出すCaイオンのアルカリ刺激が、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を引き出し、水和反応により固化する。練り混ぜ後は、生コンクリートと同様に扱うことができ、型枠でコンクリートブロック同様に成形したものや、固まった後に破碎して岩石状にすることにより製造している。水和固化体のアルカリ成分の溶出性は、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートよりも小さい。そのため、海域で使用した場合、コンクリートよりも生物付着性が優れるという特徴があり、港湾工事用の石材やブロックとして利用されている。

鉄鋼スラグ水和固化体は、港湾工事用人工石材として、東北震災復興工事に採用された。さらに、藻場や漁礁などの資材としての有用性も確認されている<sup>7)</sup>。

## 2.2 鉄鋼スラグ炭酸固化体 (マリブロック®)

マリブロック® (以下、鉄鋼スラグ炭酸固化体) の外観を図4に、製造フローイメージを図5に示す。鉄鋼スラグに排ガス中の炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) を吹き込んで、スラグ中の酸化カルシ

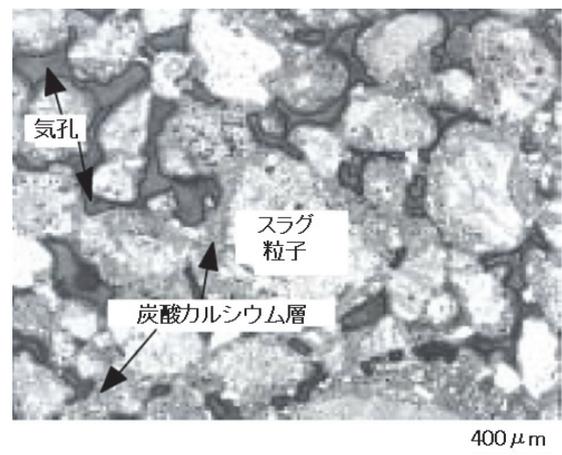


図6 鉄鋼スラグ炭酸固化体の微構造

ウム (CaO) と反応させて炭酸カルシウム (CaCO<sub>3</sub>) を生成させることで製造する。鉄鋼スラグ炭酸固化体の断面の微構造を図6に示す<sup>8)</sup>。スラグの粒子間隙に炭酸カルシウムが生成し、その炭酸カルシウムが粒子同士を結合することにより固化している。

鉄鋼スラグ炭酸固化体は他に類を見ない2つの特徴を有

する。まず、製造時にCO<sub>2</sub>を吹込んで吸収・固化させるため、CO<sub>2</sub>の排出を削減する効果がある。気候変動の緩和や炭素の循環利用を実現する技術の一つとして期待されるCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) の一類型といえる。

もう一つの特長は、主成分がサンゴや甲殻類の骨格や貝殻などと同じ炭酸カルシウムであり、さらに内部に無数の連続した細孔を持つ多孔質体であることから海の生物との親和性が高いことであり、藻類や海藻類に加え、サンゴの幼体の着生などにも優れた資材である<sup>9-11)</sup>。

### 2.3 粒度調整鉄鋼スラグ資材 (マリンストーン®)

マリンストーン® (以下、粒度調整鉄鋼スラグ資材)<sup>12)</sup>の外観および製造フローを図7および図8に示す。砕石状の製鋼スラグを粒度調整して製造される。下記にその特徴を記す<sup>12-14)</sup>。

- ①ヘドロが堆積した底質上に施工することにより、底質中の硫化水素やリン酸イオンを化学的に吸着する。これにより、海底からの硫化水素などに起因する悪臭の発生やリンの溶出を抑制し、悪化した底層水や底質を化学的に「改質」する(図9)。また、硫化水素による酸素消費を抑えることにより、海底の貧酸素化や青潮の防止が期待できる。
- ②粒子の表面や粒子間の間隙が海底に生息する生物(底生生物)の付着基盤となり、生物生息環境を構築する。
- ③天然砂と比較して大きな粒径および粒子密度を有している



図7 粒度調整鉄鋼スラグ資材 (マリンストーン®) の外観

ことから、波浪などで流失し難く、安定性に優れる。このため、日光が届く浅海域では藻類・海藻類の着生基盤としても機能する。さらには、天然石からの振替により、天然石の製造に伴う発生CO<sub>2</sub>の削減効果も期待できる。

## 3 海域環境改善の取り組み事例の紹介

当社では、海域の環境改善に寄与する鉄鋼スラグ製品を開発して各地の海域での実証実験を積み重ねている。その結果、現在では数多くの官公庁・自治体の公共事業や漁業協同組合の事業で使用されている。その中の9か所で継続的なモニタリングを実施している。そのうちのいくつかについて、以下に紹介する。

### 3.1 横浜市と連携した「豊かな海づくり」

横浜市に製鉄所を立地している当社は、横浜市が進める「豊かな海づくり」事業に賛同し、2013年から2017年にかけて「山下公園前海域における水質浄化能力の回復に向けた生物生息環境の改善手法に関する共同研究」を連携して実施し

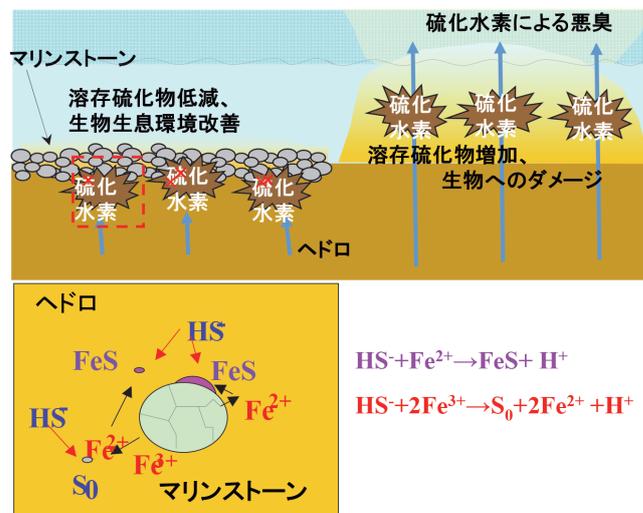


図9 粒度調整鉄鋼スラグ資材の硫化水素抑制効果

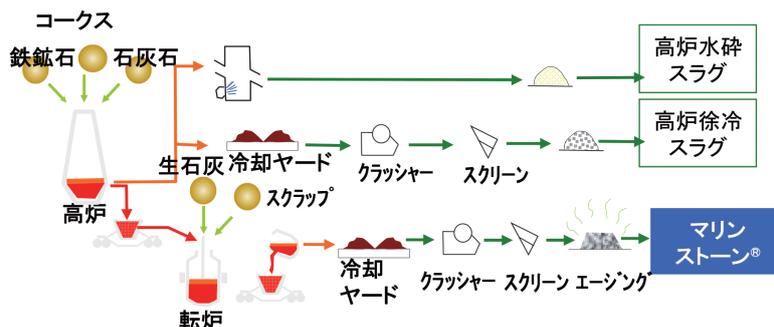


図8 粒度調整鉄鋼スラグ資材の製造プロセスイメージ

た<sup>15,16)</sup>。

横浜市の山下公園は、国内外から多くの来訪客で賑わう有名な観光地である。その一方で、公園が面している横浜港では春から夏にかけて、赤潮発生や降雨に伴う水質悪化がたびたび起こる。横浜港の水質を改善するためには、流入汚濁負荷を削減するとともに、底質の改善や海洋生物の水質浄化能力が活用できるような環境の修復・創出することが重要であることが示唆されていた<sup>17)</sup>。

共同研究にて、鉄鋼スラグ水和固化体、鉄鋼スラグ炭酸固化体および粒度調整鉄鋼スラグ資材を使用し、図10に示す山下公園前海域に図11に示すようにつき磯を造成した。造成前の海底はシルト・ヘドロが堆積しており、海藻、貝類などの生物相がほとんど生息していない状態であったが、鉄鋼スラグ製品で岩礫性のつき磯を造成することにより、貝類などの動物や海藻の着生を期待した。

モニタリング調査の結果、対象海域の生物の種類が増加することが実証された。例として、St.1にて観察された動物の例および種類数の推移を図12および図13に示す。造成前の2013年10月時点で4種程度だった動物は一時38種類にまで

増加。季節要因で一時的に減少することもあったが、その後再び増加に転じるなどその回復力も確認された。

生息が確認された生物種のうち、ホヤ類や二枚貝類等はろ過食性動物として知られる。これらの生物が濁った海水をろ過することにより、水質（透明度）の改善に寄与すると考えられる。スラグ製品に着生した二枚貝などのろ過食性動物の浄化能力が1日当たり8,400 kLと試算された。これは25 m プール17杯分にも相当する（図14）。

横浜市では、2009年の開港150周年記念事業で開催された「ITU世界トライアスロンシリーズ横浜大会」が継続されており<sup>18)</sup>、世界各国の選手たちが毎年山下公園前の海を泳いでいる。その大会のプレ環境イベント（グリーントライアスロン）が毎年開催されており、その中で横浜市と連携したイベントである「海中実況中継」を行っている。スラグ製品設置部にダイバーが潜り、海中の映像を陸上のモニターに映し出し、訪れた市民、とくに子供たちに生息している動物や植物をクイズ形式で紹介することで、市民の環境啓発・学習の場となっている。

共同研究の成果をさらに広げていくため、当社と横浜市は

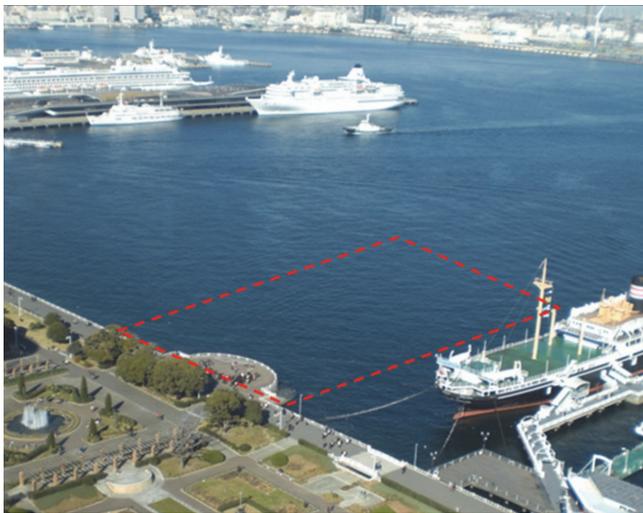


図10 山下公園前海域、点線枠内がつき磯造成部（横浜市提供）

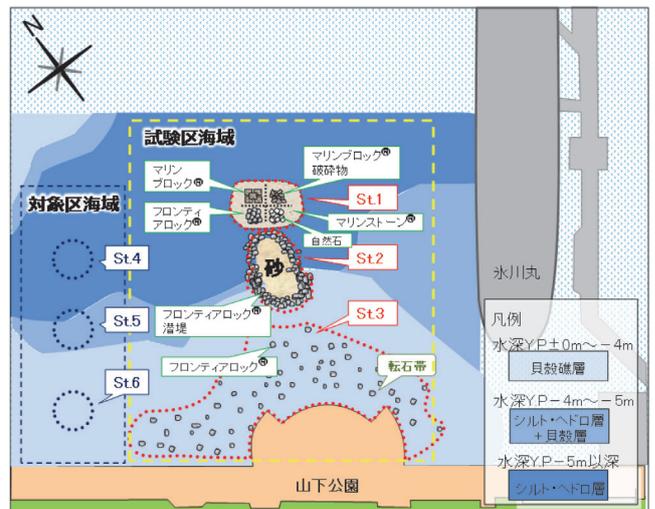


図11 山下公園前海域のつき磯造成部の平面図



紅藻類とイトマキヒトデ



ムラサキイガイとイトマキヒトデ



マナモコ

図12 スラグ製品に着生した生物の例

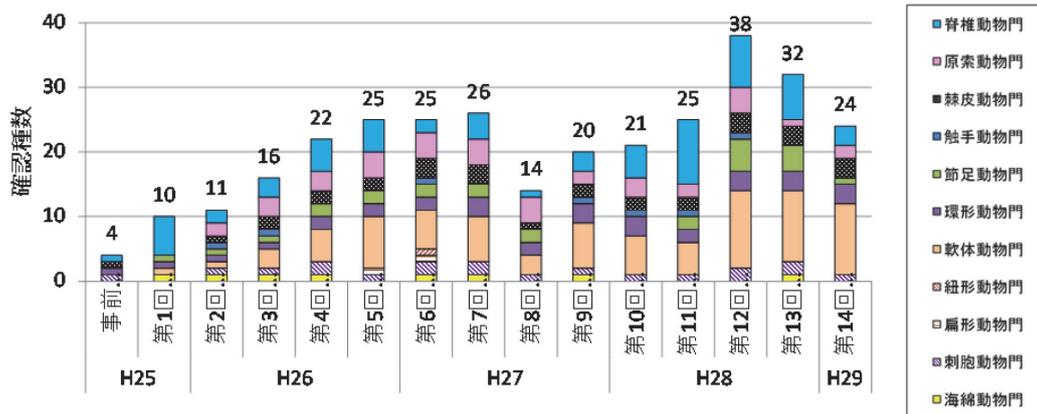


図13 St. 1にて観察された動物の種類数の推移 (St. 1の位置は図11参照方)

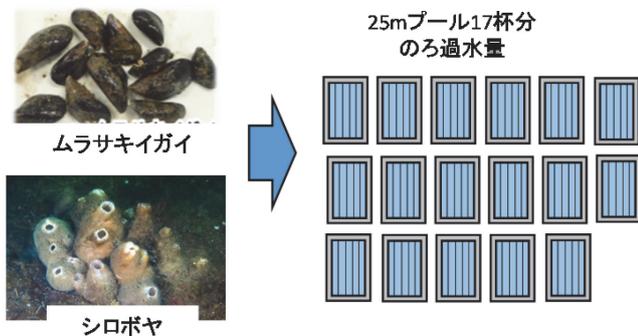


図14 二枚貝などのろ過食性動物によるろ過水量



図15 事業実施海域 (山口県岩国市)

2020年3月に「横浜の海の生物生息環境改善による豊かな海づくりに関する連携協定」を締結した。この協定に基づき、横浜市と連携して、さらなる海の環境改善に向けて取り組んでいく。

### 3.2 沿岸の生態系の復元

「浅場」は水深10m~15m以浅の砂地・岩礁など海藻類や魚介類などの生育場としての機能を持った海域である。近年、海砂採取や沿岸開発などにより天然の浅場が減少している。

山口県岩国市にある漁業協同組合では新たに藻場造成して稚魚の成育場とし、沖合の漁礁と連携させて水産資源を豊かにすることを目的に粒度調整鉄鋼スラグ資材 (30-85 mm材) が採用され、36,000 m<sup>2</sup>の浅場が造成された (図15、図16)<sup>19)</sup>。

造成前は当該海域に海藻の生育はない砂地であったが、藻場造成後には目論見通り、太陽光が海底まで届くようになり粒度調整鉄鋼スラグ資材に着生した海藻が生育した。季節変動しながらも海藻の着生量は増加して、魚類の群れなどが確認された (図17)。刺し網による漁獲調査の結果、造成後に漁獲した魚類の個体数は施工前に比べて2~3倍に増大し、藻場の効果が確認された。

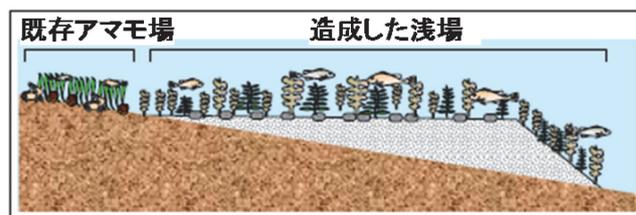


図16 粒度調整鉄鋼スラグ資材による浅場の断面イメージ

### 3.3 サンゴ再生

サンゴ礁は、熱帯から亜熱帯域の海洋に広く分布し、生物多様性の保全上、特に重要な生態系である。人間の生活にとっては漁業資源、観光資源の提供者であると同時に、台風や津波などの自然の脅威から陸地を保護する重要な機能も合わせ持つ。しかし、世界のサンゴ礁は、オニヒトデなどの捕食生物の爆発的な増大、海水温の上昇などにより、面積を減らしておりサンゴ礁の存亡は各地で深刻化している<sup>20)</sup>。

鉄鋼スラグ炭酸固化体は、先に述べたように主成分がサンゴと同様の炭酸カルシウムで構成されている。表面は適度な凹凸があり、内部は連続した細孔を持つ多孔質体である。これらの

特性から、サンゴ着生に好適であることを確認している<sup>21)</sup>。さらに世界有数のダイビングスポットを持つ宮古島の周辺海域にてサンゴ移植基盤として鉄鋼スラグ炭酸固化体を沈設し移植したサンゴが鉄鋼スラグ炭酸固化体へ活着しながら成長している状況も確認した(図18)。直径30 cmまで成長したハナガサミドリイシ (*Acropora nasuta*) では産卵も確認できており(図19)、サンゴ育成の基盤材への適用が期待できる<sup>11)</sup>。

### 3.4 閉鎖性海域の底質改善

ヘドロが堆積している閉鎖性海域等では、水塊の滞留や堆積した有機物分解による貧酸素化などによって、硫酸還元菌の増殖に適した環境が形成され、硫化水素が発生することがある。硫化水素は毒性が高く、生物の生息を困難とし、加えて異臭を発生させ地域の環境問題となりうる<sup>13,14)</sup>。

典型的な閉鎖性海域である福山内港(広島県福山市)ではヘドロ状底泥から硫化水素臭が発生する問題を抱えていた。当社は国立大学法人広島大学(以下、広島大学)と共同で粒度調整鉄鋼スラグ資材を用いたフィールド実証試験を行い(図20)、硫化水素発生抑制(図21)や底生生物の生息などの底質改善効果を確認した<sup>12,14)</sup>。

この成果を受け、広島県が実施する港湾海域環境創造事業において底質改善材として採用され、福山港内港(広島県福山市)の約67,500 m<sup>2</sup>にわたり、約39千tの粒度調整鉄鋼スラグ資材が敷設された<sup>12)</sup>。施工後、すぐにボウアオノリなどの海藻が着生するなどの生物生息環境の改善効果が確認(図22)され、現在もその効果は継続している。

これらの成果が評価され、第12回エコプロダクツ大賞の農林水産大臣賞および第26回日経地球環境賞優秀賞を受賞した。



図17 粒度調整鉄鋼スラグ資材による浅場に着生、蟄集した動植物

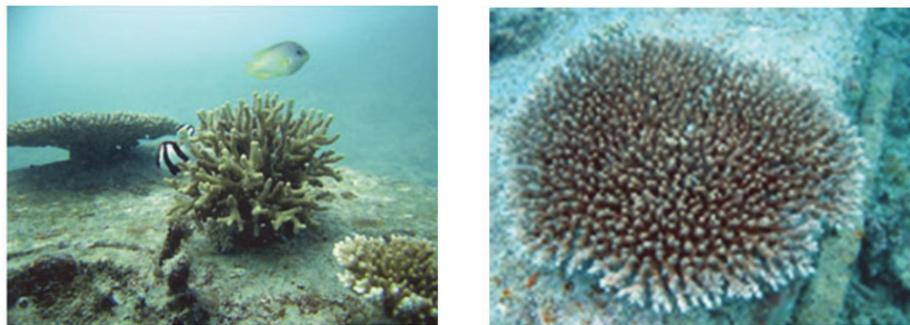


図18 鉄鋼スラグ炭酸固化体上で成長したサンゴ

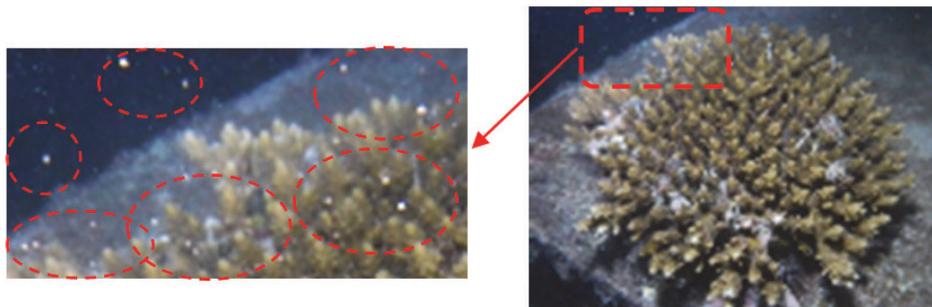


図19 成長したサンゴの産卵の様子

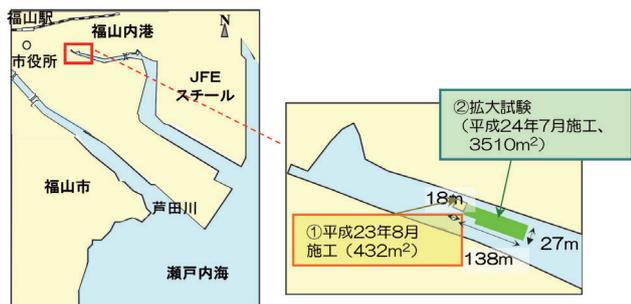


図20 実証試験区の施工位置

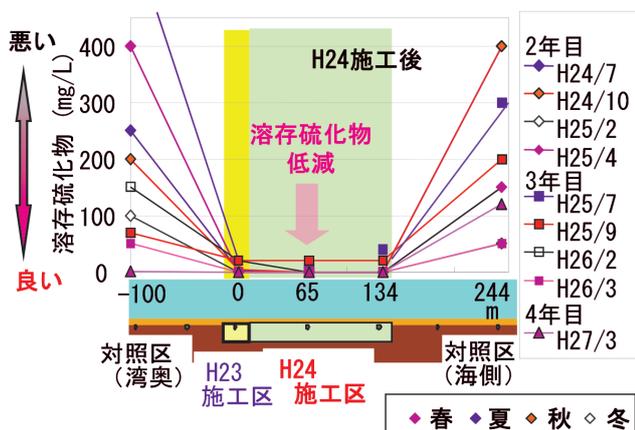


図21 硫化水素の発生抑制効果

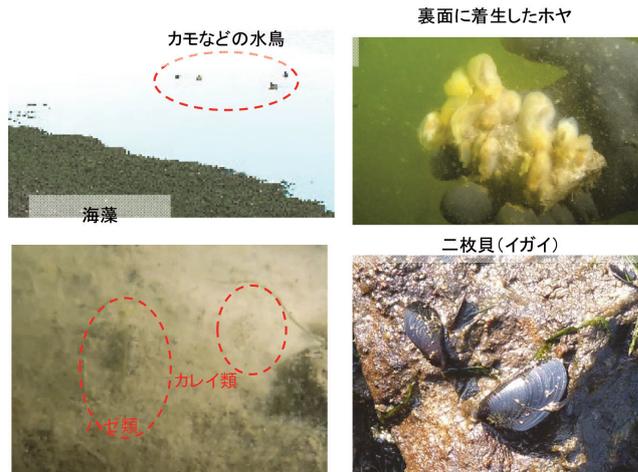


図22 広島県事業の粒度調整鉄鋼スラグ資材施工部位で観察された動植物

## 4 さいごに

これらの鉄鋼スラグ製品は、これまでは日本の沿岸域にて実証事業および公共事業に使用されて効果を確認して成果を上げてきた。今後も水産・港湾関係者並びに地域社会と意見を交わしながら海域環境の改善に貢献していく所存である。

### 参考文献

- 1) 環境庁自然保護局：第4回自然環境保全基礎調査海域生物環境調査報告，第2巻藻場，(1994)，400.
- 2) 岡市友利：化学と生物，9 (1971)，566.
- 3) 山本民次：環境技術，44 (2015)，141.
- 4) 藤田大介：水産工学，48 (2011)，25.
- 5) 松永久宏，小菊史男，高木正人，谷敷多穂：コンクリート工学，41 (2003)，47.
- 6) 松永久宏，谷敷多穂，辻本和仁：JFE技報，19 (2008)，13.
- 7) 宇田川悦郎，松永久宏：JFE技報，19 (2008)，18.
- 8) 高橋達人：コンクリート工学，38 (2000)，3.

- 9) 磯尾典男，高橋達人，岡田光正：日本水産学会誌，66 (2000)，647.
- 10) 宮田康人，高橋達人，藪田和哉，戸澤宏一，佐藤義夫：日本海水学会誌，60 (2006)，152.
- 11) 小山田久美，岡本峰雄，岩田至：JFE技報，32 (2013)，31.
- 12) JFE技報，40 (2017)，93.
- 13) 宮田康人，林明夫，桑山道弘，山本民次，谷敷多穂，卜部憲登：鉄と鋼，100 (2014)，1426.
- 14) 宮田康人，谷敷多穂，渡辺圭児，山本民次，卜部憲登：JFE技報，40 (2017)，7.
- 15) 宮田康人，松本剛，浦垣直子，市川竜也，堀美智子：JFE技報，40 (2017)，25.
- 16) 浦垣直子，市川竜也，堀美智子，山下理絵，松本剛，宮田康人：横浜市環境科学研究所報，40 (2016)，30.
- 17) 上原直子，石井彰：横浜市環境科学研究所報，26 (2012)，17.
- 18) YOKOHAMA TRIATHLON，世界トライアスロンシリーズ横浜大会組織委員会，<https://yokohamatriathlon.jp/wts/index.html>，(accessed 2020-08-25)
- 19) 藪田和哉，杉本憲司，林悦雄，高濱繁盛，玄番克弘：JFE技報，40 (2017)，13.
- 20) サンゴ礁の働きと現状，水産庁，[https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/sango\\_genjou/](https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/sango_genjou/)，(accessed 2020-08-25)
- 21) 小山田久美，渡辺圭児，岡本峰雄，岩田至：JFE技報，19 (2008)，6.

(2020年9月12日受付)