

< 報 文 >

公民連携による「豊かな海づくり」*

ー鉄鋼スラグ製品による海域環境改善の実証と環境教育に向けた取組みー

浦垣直子**・小川義人**・川村颯子**・中里亜利咲**・宮田康人***・森 玄***・岩井健太郎***

キーワード ①閉鎖性海域 ②生物生息環境 ③水質浄化 ④鉄鋼スラグ製品 ⑤透明度

要 旨

横浜市山下公園前海域において海中に生物付着基盤（生物のすみか・逃げ場など）としての効果が期待される鉄鋼スラグ製品を配置し、生物の生息環境改善と生物による水質浄化能力の回復についての検証を行った。2017年11月までに行ったモニタリング調査の結果、濾過食性のホヤや二枚貝などの水質浄化能力を有する動物が増え、生物生息環境が改善されることを確認し、鉄鋼スラグ製品などを用いた浅場造成が生物豊かな海域環境形成に有効であることが示唆された。現在は横浜市の「豊かな海づくり事業」として引継ぎ、継続的に生物付着基盤の機能を確認しているとともに、本研究の成果については様々な場面で情報発信したほか、環境教育にも活用している。

1. はじめに

横浜は日本有数の港町であり、臨海部は横浜市の顔として知られている。しかし、横浜の海は海底のヘドロ化や大規模な赤潮の発生によって、夏場には海底に光が届かず酸素濃度が低下し、生物にとっては過酷な環境である。その原因の一つは、沿岸域の生物生息環境が失われ、生物の数が減少し、生物による水質浄化能力が減少したことにある。

そこで横浜市とJFEスチール株式会社は、生物付着基盤を用いた生物生息環境の改善と生物の水質浄化能力の回復について検証するため、山下公園前海域において2013年10月から2018年3月まで共同研究を実施した。

2. 共同研究概要

2.1 試験海域

山下公園は横浜市中区山下町に位置しており、横浜を代表する観光地であることなどから、イベント開催を通じてプロモーションを行い、新たな都心部の魅力づくりにつなげる効果も期待できる。試験海域は、各種イベントや船舶の航行等に影響なく実施できるほか、海域浄化資材の設置作業等の施工性、事後調査等の作業性を考慮し氷川丸左舷側とした。

2.2 研究内容

鉄鋼スラグを原料とする再生資材製品及びその対照物（自然石・山砂）を生物付着基盤として用い、浅場造成を行った。使用した生物付着基盤の概要を表1に示す。その後、生物生息状況の経時的な変動を見るため、年4回の定期的なモニタリング調査を行い、生物の生息環境改善効果を検証した。

表1 使用した生物付着基盤

製品名					
形状	ブロック状	破砕物（岩石状）	岩石状	砂利状	自然石
寸法	1m×1m×0.5m	φ100mm～	φ100mm～	φ30mm～80mm	φ100mm～
比重	2.0～2.4	2.0～2.4	2.4～2.6	2.0～	中央粒径0.3mm以上

2.3 各エリアのゾーニング

試験区St.1～St.3に図1、図2のように生物付着基盤を配置した。それぞれ同等の水深となっている場所に対照区St.4～St.6を設け、比較対象とした。

*Creating a rich ocean” through public-private collaboration

**Naoko URAGAKI, Yoshito OGAWA, Akiko KAWAMURA, Arisa NAKAZATO（横浜市環境科学研究所）Yokohama Environmental Science Research Institute

***Yasuhito MIYATA, Gen MORI, Kentarou IWAI（JFEスチール株式会社）JFE Steel Corporation

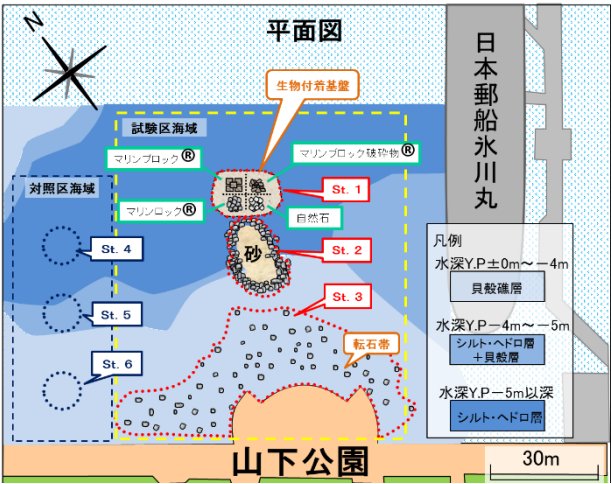


図1 平面図



図2 試験区海域断面図

2.4 調査実施日及び方法

生物付着基盤設置前の事前調査及び生物付着基盤設置後に四季での調査（生物及び水質調査，年4回）を実施した。調査実施日を表2に示す。生物調査は試験区St. 1のマリンブロック・マリンブロック破砕物・鉄鋼スラグ水和固化体製人工石（以下，マリンロック）・自然石の基質毎，St. 2のマリンロックで囲った自然砂，St. 3のマリンロックにある転石帯及び対照区（St. 4～St. 6）を対象に，潜水土による付着生物及びネクトンの目視観察・記録を行った。被度の観察範囲は1m×1mコドラート内を4つのサブコドラートに分けて，付着動物，移動性生物，藻類の種類数・被度及び個体数を目視により記録した（図3）。

表2 調査実施日

調 査 回	生物調査	水質調査
事前調査	2013年10月10日	10月15日
第1回	2013年11月28日	11月29日
第2回	2014年2月13日	2月12日
第3回	2014年5月28日	5月29日
第4回	2014年8月27日	8月26日
第5回	2014年11月28日	11月27日
第6回	2015年2月12日	2月13日
第7回	2015年5月28日	5月29日
第8回	2015年8月24日	8月25日
第9回	2015年11月27日	11月30日
第10回	2016年1月15日	1月14日
第11回	2016年5月30日	5月31日
第12回	2016年9月5日	9月23日
第13回	2016年11月30日	12月8日
第14回	2017年2月10日	2月6日
第15回	2017年6月5日	6月2日
第16回	2017年8月31日	9月13日
第17回	2017年11月27日	11月27日

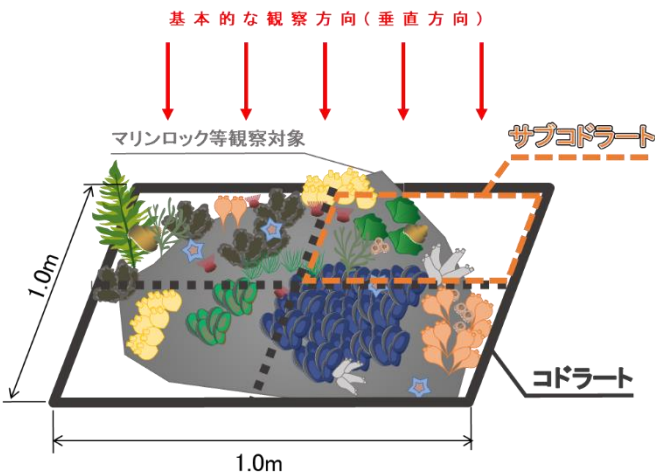


図3 付着生物観察・記録の調査イメージ

3. 結果

3.1 生物調査結果

試験区St. 1～St. 3の生物種類数及び被度の変化を図4～図6に示す。

試験区St. 1～St. 3全てにおいて生物付着基盤設置後すぐ生物種類数，被度の増加が見られた。St. ごとの生物種類数が最大となったのは第12回調査（夏季）のSt. 1で，38種類であった。被度について最大となったのは第9回調査（秋季）のSt. 3の92％であった。St. 1，St. 2では第8回調査（夏季）に生物の減少が見られ，その後回復と減少を繰り返した。第16回調査（夏季）ではSt. 1～3全てにおいて付着していた二枚貝網やホヤ網などの多くが死に，その上に刺胞動物門がつく様子などが確認されたが，第17回調査の水中映像では二枚貝網やホヤ網の付着が見られるなど回復の様子が見て取れた（図7）。また，アカニシやウミウシの卵塊や，ハゼ科の稚魚が多数確認されるなど，生き物が定着し，産卵・生育の場として活用されていることが示唆された。

およそ4年半にわたる調査で山下公園前の海域では夏季に生物が減少し，その後回復するサイクルを繰り返している様子がうかがえた。

事前調査から2017年夏季までの調査で確認された生物の出現記録一覧を表3に示す。試験区St. 1～St. 3で合計16門26綱46目78科98種の生物が確認された。

一方，対照区St. 4，St. 5ではほとんど生物が確認されず，生物種類数は0～5種，被度は0～10％と，ともに横ばいであった。また，対照区St. 6は水深-3m以浅の浅場にあることから，生物種類数は8～23種，被度は2～31％と季節によって変動はあるものの，生物が生存する上で必要な溶存酸素などの環境が保たれていたことが分かった。

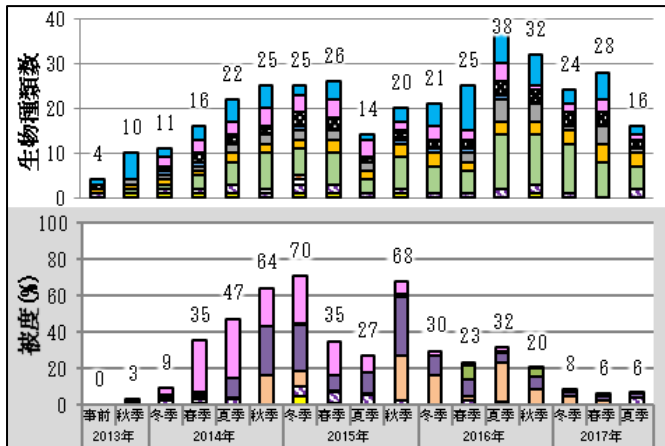
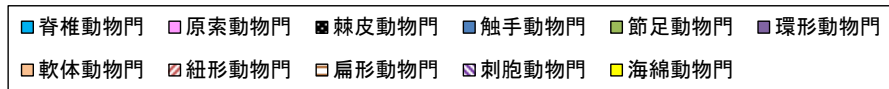


図4 St. 1の生物種類数，被度の推移

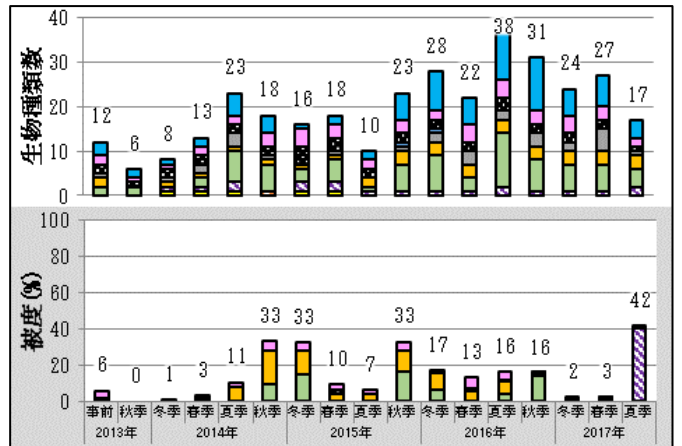


図5 St. 2の生物種類数，被度の推移

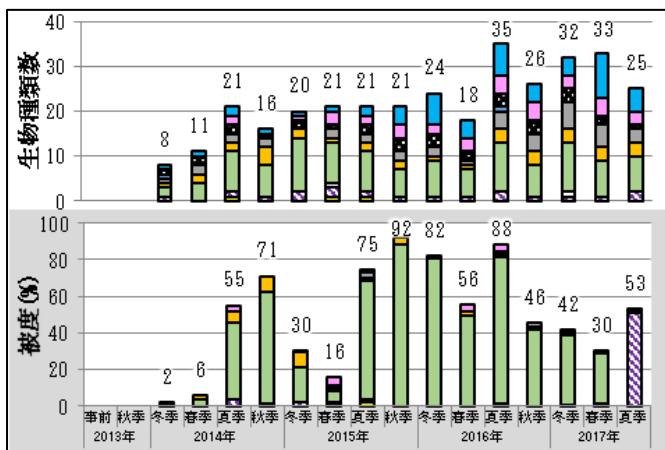


図6 St. 3の生物種類数，被度の推移



図7 第17回調査写真（St.1マリブロック）

表3 試験区St. 1～St. 3の生物の出現記録一覧（1/2）

No.	門	種名	事前	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回	第14回	第15回	第16回
			2013年	2014年				2015年				2016年				2017年			
			-	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季
1	緑色植物	アオノリ属			○	○	○		○									○	
2		アオサ属			○	○	○		○	○	○		○	○	●	○	●	○	
3		シオグサ属			○	○	○		○	○			○				○		
4		ミル			○	○	○	●	○	○	○	○			○	○	○	○	●
5		ハネモ属							○				●	●			○	●	
6	黄色植物	ワカメ			○	○		●	○	○			○	○			○	○	
7		珪藻綱		○	○	○	○	○	○	○	○		○				○		
8	紅色植物	アマノリ属			○					○	○								
9		テングサ科								○									
10		サンゴモ科(無節サンゴモ)										○				○			
11		カイノリ						○											●
12		ムカデノリ科			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○	
13		ベニスナゴ											○				●	○	
14		イワノカワ科											○		○	○	○	○	
15		イギス科											○		○	○	○	○	
16		イギス目(微小紅藻類)			○	○	●		○	○	○	○	●		●	●		●	
17		イトグサ属										○	○						
18	藍色植物	藍藻綱			○	○	○	○	○	○	○	○				○	○		
19	海綿動物	海綿動物門		○	○	○	○	○	○	○	○	○				○			
20	刺胞動物	ヒドロムシ綱			○	○	○	○	○	○	○	○				○			○
21		タテジマイソギンチャク		○	○					●	●		●	●	○	●	●	○	○
22		イソギンチャク目	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	○	●	○	○	○
22		ムラサキハナギンチャク	○																
23	扁形動物	ヒラムシ目						●	●	●							●		
24	紐形動物	クリゲヒモムシ目						●											

表3 試験区St. 1～St. 3の生物の出現記録一覧 (2/2)

No.	門	種名	事前	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回	第14回	第15回	第16回
			2013年	2014年	2014年	2014年	2014年	2014年	2015年	2015年	2015年	2015年	2016年	2016年	2016年	2016年	2017年	2017年	2017年
			–	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季
25	軟体動物	ヒザラガイ																	
26		コンダカガンガラ		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○
27		シマメノウネガイ		○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
28		ヒメヨウラクガイ																	
29		レイシガイ					○	○	○	○	○		○		○	○	○	○	●
30		イボニシ							○				○		○	○	●		
31		アカニシ(卵塊含む)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
32		ムギガイ							○								○		
33		タモトガイ科														○	○		
34		アラムシロガイ		○	○	○	○		○	○	○				○		●		●
35		トゲアメフラシ		○		○		●								●			
36		コベルトフネガイ													○	○			
37		カリガネエガイ															○		
38		サルボウガイ	○	○	△	○	○		○	△	○		○		○	○			
39		ホトギスガイ		○		△	△	○	○	△	○	○	○		○	○			
40		ムラサキガイ		○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
41		ミドリイガイ		○	△	△	○	○	○		●	○	○	○	○	○	○	○	○
42		ナミマガシワガイ								○		○	○		○	○	○	○	○
43		マガキ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
44		アサリ		△	△	○	△	△	△	△	○	△			●		●	●	
45		ヒダミノウミウシ					●	●											
46		クロソソデウミウシ													○				
47		クロシタナシウミウシ					●	●	●	●			●	●	○		●	○	●
48	環形動物	カンザシゴカイ科	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
49		ミズヒキゴカイ	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
50		ケヤリムシ科						●		●		●	●	●	○	●	○	○	○
51		サンハチウロコムシ						●								●	●	●	○
52	節足動物	イシガニ	○			○		○	○	○	●	●	●	○	○	●	●	○	○
53		イソクズガニ								○	○		●	●		●	●	○	
54		タカノケフサイノガニ																○	
55		イワガニ科													○				
56	節足動物	オウギガニ科						●			●					○	●	○	
57		ユビナガスジエビ						●			●							○	
58		ヤドカリ科															○	○	
59		ホンヤドカリ科															○	○	
60		エビ目(ヤドカリ類)			○					○	○				●	●	●	●	●
61		アメリカフジツボ															○		
62		ヨーロッパフジツボ		○						○	○	●	○		●	●	●	●	●
63		サンカクフジツボ			○	●	●	○	●	●	●			○	○	○	○	○	○
64		コケムシ綱			○	○			○			○	○	○	○	○	○	○	○
65	棘皮動物	イトマキヒトデ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
66		キヒトデ						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
67		クモヒトデ綱							○	○	○				●				
68		キンコ科							○								●		
69	原索動物	マナマコ	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
70		サンショウウニ	○									●	●		●	●			
71		カタユウレイボヤ	○	●	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○
72		エボヤ				○	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○
73		シロボヤ	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
74		群体性ボヤ			○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
75		ホヤ亜綱														○	○		
76	脊椎動物	ツバクロエイ		○															
77		メジナ		○			○	○				○	●	●	○	○		○	○
78		ウミタナゴ		●		○	●			○	○	○	●		○	○		○	○
79		クロダイ												○	○		●	●	
80		イシダイ		●										●	●				
81		キュウセン					○									●			
82		ボラ										○	●	●				○	
83		マハゼ	○				●		●						●	●			
84		スジハゼ	○	○											●	●	●	●	●
85		キラハゼ属											○	●				○	
86		ドロメ											○			●			
87		ニクハゼ											○	●	○	●	●		●
88		ウキゴリ属																○	
89		サビハゼ														○	●		●
90		シモフリシマハゼ	○	○			●	○				○	○	○	○	○	●	○	
91		ヌマチチブ										○							
92		チチブ											○	○	○	○	●	○	○
93		アカオビシマハゼ										○	●	●	●	●	●	●	●
94		チチブ属																○	
95		ハゼ科			●	○				○	○								
96		ネズツボ科															●		
97		イダテンギンボ													○				
98		ニジギンボ		○											●				
99		ダイナンギンボ														○		○	
100		クサフグ						●	●	○	○	●		●	●	●		○	
101		カワハギ			○				●	○	○	●		●	●	●		●	●
102		アイナメ					○							●					
103		メバル属		○		○	●			○	○	○		○	●	○		○	

※ 生物相調査で確認されたものについては○、映像・目視のみで確認されたものについては●で示す。

また死骸のみ確認されたものについては△で示した。

3.2 溶存酸素量

第12回調査（夏季）において、St.1のマリンブロックに測定器を設置し、15昼夜連続（9月5日～20日）で水質測定を実施した。その結果、ほとんど無酸素状態となっている時間帯があることが分かった（図8）。また、第17回調査（秋季）の水質調査において鉛直方向0.5m毎に測定した結果、夏季の山下公園前海域の海底はおおむね4m以深では溶存酸素量が4.0mg/L以下と生物が生息できないほどに低下していることが分かった（図9）。

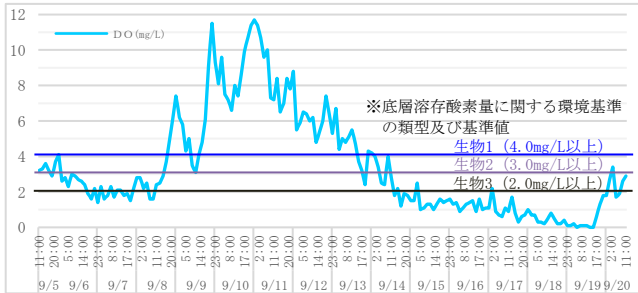


図8 溶存酸素量 15昼夜連続測定（第12回調査）

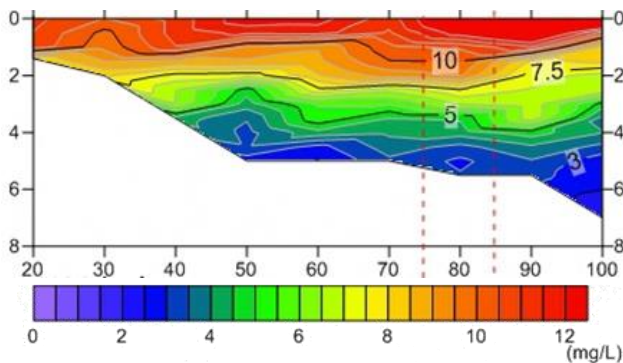


図9 St.1の溶存酸素量（第17回調査）

3.3 濾水量の推計

生物調査結果から、試験区における生物生息環境の改善は確認されたが、海水の入れ替わりがあるため、水質に大きな変化は見られなかった。

そこで、生物生息環境の改善による水質浄化能力の回復を定量的に評価するために、生物調査で確認された二枚貝綱やホヤ綱といった濾過食性動物に注目し、それらの生物が持つ、濾水量を試算した。濾水量の原単位は複数の文献の平均値を用いた（表4）。

生物の被度と、生物の体サイズから推定した1個体あたりの付着面積をもとに、基盤に付着した生物の個体数を生物の種類ごとに推計した。また、生物調査の際に生物を一定量採取し、1個体あたりの平均湿重量を求めた。これらの数値を用い、以下の計算式から生物の種類ごとに濾水量を求めたところ、St.1～3の合計で8400 kL/日と推計された。

表4 対象とした濾過食性動物と濾水量原単位

	種名	濾水量原単位 (L/湿g/日)	文献
二枚貝	ムラサキガイ	26.9	1)
貝	ミドリイガイ	26.9*	—
網	ホトトギスガイ	26.9*	—
網	マガキ	32.2	2)
ホヤ	シロボヤ	15.5	3), 4)
ヤ	エボヤ	13.2	5)
網	カタユウレイボヤ	6.7	6), 7), 8)

※ムラサキガイの数値を用いた

（計算式）

濾水量原単位（L/湿g/日）×平均重量（湿g）×個体数

4. 考察

St.1～St.3の全てで、設置したスラグ製品、自然石等が生物付着基盤として有効であった。設置したスラグ製品は大きさや形など様々であったが、生物種類数や被度は製品の違いによる差がほとんど見られなかった。また、同様にスラグ製品と自然石を比較したところ、明確な差は認められなかった。

生物生息環境の改善という点では、スラグ製品は自然石と同等の効果があり、自然石の代替品となりうることが示唆された。

生物付着基盤の種類によって差が生じなかった理由としては、設置したスラグ製品の大きさや形などの要素よりも、後述するように溶存酸素量などの環境要因の影響が大きいのと考えられる。一方、夏季に生物の減少が見られたこと、4m以深で海底の溶存酸素量が低下していたことから、試験海域の海底は夏季に生物にとって生息しにくい環境になっていることが改めてわかった。水質汚濁に係る環境基準のうち生活環境の保全に関する環境基準の底層溶存酸素量の基準値では、水生生物が再生産できる場を保全・再生するために必要な底層溶存酸素量が対象生物によって2～4mg/L以上であるとしている⁹⁾。そのため、今回設置したような生物付着基盤を設置して水深4mより浅い場所をつくることで、生物生息環境の改善に効果的であると考えられる。また、二枚貝綱やホヤ綱などの濾過食性動物の持つ濾過能力を定量化したところ、試験区エリアでは1日あたり8400 kLの海水が濾過されていることがわかった。また、実際の海域では水の入替わりがあるため、水質に変化は見られていないが、生物付着基盤の設置範囲が広がれば、水質改善が進むことが期待できる。

5. 環境教育

共同研究で得られた成果は2018年にIWA（国際水協会）世界水会議で情報発信したほか、生物付着基盤造成

が新たな付加価値を創出することを示した他に事例のない画期的なプロジェクトとして、第5回エコプロアワード国土交通大臣賞および令和3年度土木学会環境賞（Ⅱグループ）を受賞した。

また、横浜市は港町でありながらも、市民が海と気軽に接することができる場所が少ないことから、横浜の海により一層関心を持ってもらうための取組を行っている。主に小学生を対象とした環境教育出前講座を実施しているほか、生き物が回復して海が豊かになるまでの写真を使用した間違い探し映像など、子どもでも飽きずに視聴できるようなオンラインコンテンツを充実させている。また、横浜市内で開催される“海洋都市横浜うみ博”や“東京湾大感謝祭”などの海関連のイベントにも出展しており、特にワールドトライアスロン・パラトライアスロンシリーズ横浜大会関連イベントの“Green Triathlon”では試験海域に潜り、リポーターと中継してリアルタイムで海の中を紹介する海中実況中継を行い多くの人に横浜の海の魅力を紹介している（図10）。

さらに、共同研究の取組や成果を広く発信するために、横浜の街並みと海が一望できる、横浜スカイウォークにおいてパネルの常設展示やリーフレットの配布を行っているほか、研究概要を解説したサインを山下公園に設置した（図11）。



図10 海中実況中継のようす



図11 山下公園のサイン

6. おわりに

およそ4年半の長期にわたり、生物付着基盤のモニタリング調査を実施してきた。共同研究は2018年3月末までで終了したが、その後も年1回のモニタリング調査を継続し、アイナメの卵が確認されるなど生物の生息環境と、生物による水質浄化能力が維持されていることを確認している。また、本研究で得られた成果を今後の横浜港の環境改善の取組みに活用していきたい。

7. 引用文献

- 1) 山元憲一，荒木晶，半田岳志：ムラサキイガイの餌投与に伴う鰓換水の変化．水産大学校研究報告，**62**，（1），1-4，2013
- 2) 楠木豊：マガキの濾過水量の測定法について．日本水産學會誌，**43**，（9），1069-1076，1977
- 3) A.Fiala-Medioni：Filter-feeding ethology of benthic invertebrates (Ascidians). III. Recording of water current in situ - Rate and rhythm of pumping, *Marine Biology*, **45**, 185-190, 1978
- 4) A.Fiala-Medioni：Filter-feeding ethology of benthic invertebrates (ascidians). IV. Pumping rate, filtration rate, filtration efficiency, *Marine Biology*, **48**, 243-249, 1978
- 5) Holmes, N.：Water transport in the ascidians *Styela clava* Herdman and *Ascidrella aspersa*, *Journal of experimental marine biology and ecology*, **11**, 1-13, 1973
- 6) Kustin, K. , K. V. Ladd, G. C. McLEOD, and D. L. Toppen: WATER TRANSPORT RATES OF THE TUNICATE *CI ONA INTESTINALIS* *Biol. Bull.*, **147**, 608-617, 1974
- 7) A.Fiala-Medioni：Filter-feeding ethology of benthic invertebrates (ascidians). IV. Pumping rate, filtration rate, filtration efficiency. *Marine Biology*, **48**, 243-249, 1978
- 8) Fiala-Medioni, A.：Ethologie alimentaire d'invertébrés benthiques filtreurs (ascidies). II. Variations des taux de filtration et de digestion en fonction de l'espece, *Marine Biology*, **28**, 199-206, 1974
- 9) 環境省：水質汚濁に係る環境基準 別表2 生活環境の保全に関する環境基準，
<https://www.env.go.jp/kijun/mizu.html>
(2023.12.25アクセス)