

資源循環を目指した藻礁開発と藻場再生に関する研究

山本健太郎¹、根上武仁²、鶴成悦久³、石橋敬⁴

¹西日本工業大学、²佐賀大学、³大分大学、⁴(株)白海

本研究では、藻礁の保全や再生を目的に、木質バイオマス発電から排出される流動砂、産業廃棄物である使い捨てカイロ等の廃鉄粉や廃陶磁器をリサイクルして再資源化し、同じく陶磁器の廃型枠等から再資源化した再生石膏をこれらと混合して、藻礁基盤材を作製する。そして、実際の海域に設置し、海藻の海中生育及び基盤材の性状変化モニタリングを実施した。

1. はじめに

日本全国の藻場は過去 30 年で 30-40% 消失しており、深刻な問題となってきた。写真-1(a)では海の砂漠化と言われる、磯焼けの様子を示す。海藻類がほとんど生存していないことが観察される。藻場の重要性はあまり知られていないが、魚貝類の隠れ家や生息場、餌場、産卵場としての機能がある。つまり、魚礁としての多方面への効果が大きく、生態系や沿岸漁業においても欠かせない存在である¹⁾。

藻場の減少は、埋め立てや浚渫による生息域そのものの減少や、温暖化による水温上昇などによることが知られている。また、海藻の生育に必要な栄養素である鉄分が森林伐採やダム造成などにより、海中において不足していることが指摘されている²⁾。一方で、消波ブロックや漁礁などのコンクリート構造物等について、近年は漁業関係者からもセメントが海洋環境に与える悪影響も懸念されており、海中でのセメント使用に反対する声も聞かれるところでもある。

そこで、藻場の保全や再生を目的に、産業廃棄物リサイクルマテリアルを有効活用した環境に優しい藻礁基盤材を開発し、海中モニタリングを行ってきた³⁾。近年は、新たに二種類の産業廃棄物を有効活用した環境に優しい藻礁基盤材の開発を実施してきている^{4), 5)}。一つ目は、写真-2 に示す陶磁器破砕片（粒径 2~4mm と 0.9mm を使用）と廃石膏（写真-3 参照）を主としたものである。二つ目は、木質バイオマス発電から排出される流動砂、陶磁器破砕片（粒径 2~4mm）と廃石膏を主としたものである。両方ともに鉄分としては使い捨てカイロを使用することにより、低環境負荷型となる藻礁基盤材の開発とその実証試験を行ってきた。なお、これまでセメントを約 4%前後混入した藻場基盤材

を作製してきたが、藻類が完全に活着する前に、基盤材表面が波浪の影響などで削られる現象が写真-1(b)のようにモニタリング結果から観察された。よって、本研究では基盤材表面の強度がこれまでよりも上がるように作製を行い、実際の海域での実証試験を試みる。



(a) 磯焼け



(b) 2カ月経過後に壊れた藻礁基盤材

写真-1 長崎県佐世保市針尾漁港の海底の様子

2. テストピースによる試験結果

表-1 には開発した陶磁器破砕片を有効活用した藻礁基盤材の配合（質量比率）と一軸圧縮試験結果を示す。一軸圧縮強さは、28日養生後の基盤材供試体からの一軸圧縮試験結果を示す。これを見ると、配合は廃陶磁器（fine と coarse）だけで約 50%あり、廃石膏も約 24%含まれている。当然であるが、セメントの配合が 10.0%の



写真-2 様々な大きさの陶磁器破碎片
(粒径; 左下: 0.9mm, 右下: 2.0-4.0mm)



写真-3 窯業関連企業からの廃石膏



写真-4 流動砂

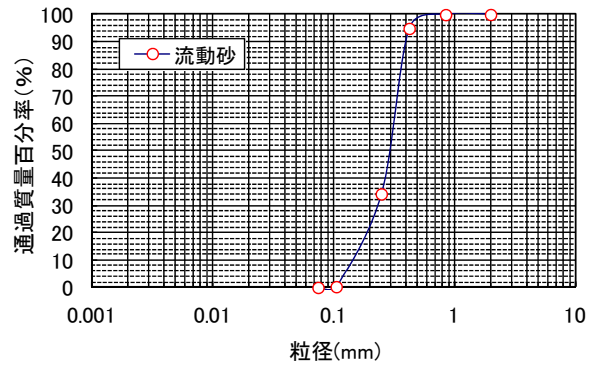


図-2 粒径加積曲線 (流動砂)

表-1 一軸圧縮試験結果
(陶磁器破碎片, 28日養生)

Mixing ratio (%)	Scrapped ceramics (fine: 0.9 mm)	34.2	33.4
	Recycled gypsum	24.1	23.6
	Water	16.6	16.3
	Scrapped ceramics (coarse: 2.0-4.0 mm)	17.1	16.7
	Cement	8.0	10.0
Unconfined compressive strength (MPa)		4.22	5.26
Water content (%)		3.5	5.8
Wet density (g/cm ³)		1.57	1.62

ケースが一番高い強度 5.26 MPa を示した。図-1 には、表-1 に対応する応力—ひずみ曲線を示す。

次に、上記に示した陶磁器破碎片(細(0.9 mm))の代わりに、流動砂を利用した。流動砂とは木質バイオマス発電において、完全燃焼させるための流動媒体である珪砂のことを指す(写真-4参照)。特性としては、木質バイオマス発電からのカリウム付着のため、強いアルカリ性を示すことが挙げられる(土粒子密度 $\rho_s=2.607\text{g/cm}^3$, pH 9.33)。粒径加積曲線を図-2 に示す。これを見ると、粒径 0.425mm 以下がほぼ 95%で、非常に細かいことがわかる。

表-2 には流動砂を有効活用した藻礁基盤材の配合(質量比率)と一軸圧縮試験結果を示す。これを見ると、セメントを 7.0%, 8.0%, 9.9%混入した場合の一軸圧縮強さはそれぞれ、2.37MPa, 3.20MPa, 3.30MPa となり、陶磁器破碎片を有効活用した藻礁基盤材の一軸圧縮強さよりも小さくなることがわかった。図-3 には、表-2 に対応する応力—ひずみ曲線を示す。流動砂を用いた場合、セメント量が 8.0%と 9.9%で、一軸圧縮強さには大きな差は見られなかった。さらに、溶出試験は環境庁告示 13 号法により行った。これらより、個々の試料の元素含有量試験と人工海水中に侵した元素分析においても有害元素の溶出がなかった。

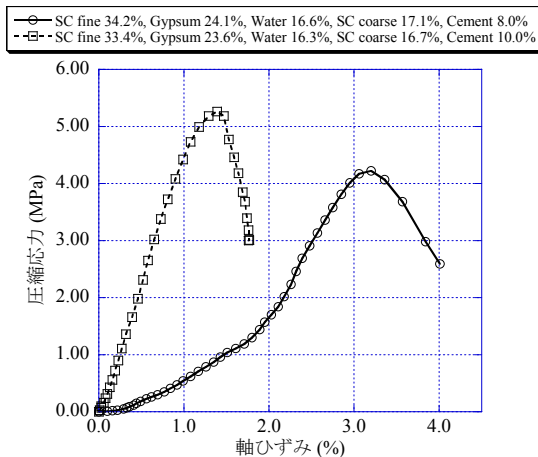


図-1 応力—ひずみ曲線 (廃陶磁器, 28日養生)

表-2 一軸圧縮試験結果 (流動砂, 28 日養生)

Mixing ratio (%)	Flow medium sand	34.4	34.1	33.4
	Recycled gypsum	24.4	24.0	23.4
	Water	16.6	16.4	16.1
	Scrapped ceramics	17.6	17.5	17.2
	Cement	7.0	8.0	9.9
Unconfined compressive strength (MPa)		2.37	3.20	3.30
Water content (%)		5.4	5.2	3.9
Wet density (g/cm ³)		1.61	1.63	1.61

○ Flow medium sand 34.4%, Gypsum 24.4%, Water 16.6%, SC coarse 17.6%, Cement 7.0%
 □ Flow medium sand 34.1%, Gypsum 24.0%, Water 16.4%, SC coarse 17.5%, Cement 8.0%
 ● Flow medium sand 33.4%, Gypsum 23.4%, Water 16.1%, SC coarse 17.2%, Cement 9.9%

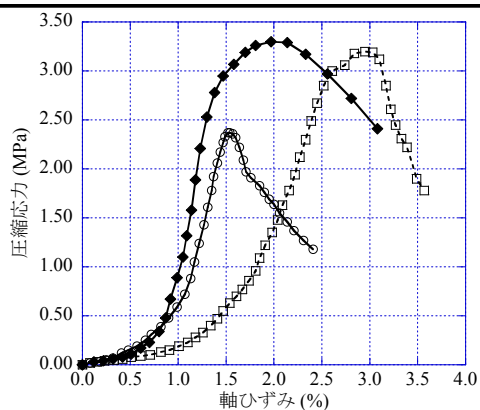


図-3 応力-ひずみ曲線 (流動砂, 28 日養生)

3. 藻場基盤材

配合の一例は表-1, 2 に示す。なお、鉄分としての使い捨てカイロは基盤材表面に 300g を一様に添加した。写真-5 には、使い捨てカイロからの廃鉄粉を示す。この使い捨てカイロの場合は、1 袋約 60g であった。基盤材の形状は、直径 40cm、高さ 14cm、重量約 26.0kg 程度の円盤型である (写真-6 参照)。写真-6(b)では、左下に位置する基盤材の表面が少し壊れていることもわかる。これは脱型時に生じたものである。

また、写真-1(b)で示されるように、セメント量 約 4%前後の時にはモニタリングに波浪の影響などで基盤材表面が容易に削られる傾向が



写真-5 使い捨てカイロからの廃鉄粉

あることがわかったため、今年度は、セメント量 8~10%をターゲットとした。

写真-7, 8 にはカキ殻やカキ殻を有効活用した基盤材を示す。写真-8 からわかるように、カキ殻がそのままのものと、粉碎したものを表面に混入したものを製作した。



(a) 陶磁器破砕片を主としたもの



(b) 流動砂を主としたもの
写真-6 作製された藻礁基盤材

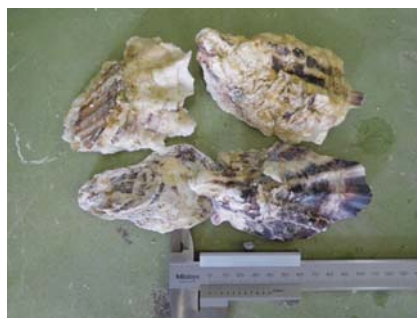


写真-7 カキ殻 (長さ 100mm 程度)



写真-8 カキ殻を活用した、陶磁器破砕片を主とした藻礁基盤材

4. 実証試験

開発した藻礁基盤材を2018年6月以降に北九州市若松区脇之浦、鹿児島市上花倉、長崎県佐世保市針尾漁港と大分県佐伯市米水津に海中投入・設置した。一例として、写真-9(a), (b), (c)には北九州市若松区脇之浦に海中投入した藻礁基盤材の性状変化を示す。写真-9(a)では円盤状の基盤材が5基投入されているのがわかる。次に、写真-9(b), (c)では海中投入から3カ月経過したものを示す。これを見ると、基盤材の色も少し変わり、基盤材表面に藻や海藻の活着が見られた。写真-10(a), (b), (c)には鹿児島市上花倉に海中投入した直後の藻礁基盤材の様子を示す。この時は、干潮時に4基投入を行い、白い円盤型の基盤材があることがわかる。

次に、写真-11, 12には大分県佐伯市米水津に海中投入した藻礁基盤材の性状変化を示す。写真-11の間越漁港では7月下旬に海中投入を実施した。写真-11(a)では基盤材表面に緑の藻が着いている様子がわかり、写真-11(b)では海中が濁っているが、少し藻が活着している様子が観察された。4カ月経過後の写真-11(c)では基盤材表面上に藻と海藻が着いており、基盤材自体にも砂が覆っている様子が観察できる。モニタリング結果からも設置場所としては少し好ましくないことがわかった。写真-12(a)の浦代浦では12月初めに海中投入を実施した。ここはヒジキ岩場も隣にあるが、波浪はやや強い箇所である。8月にここに投入した基盤材は砂に埋もれ、今後、探索と掘り起こしを実施する予定である。写真-12(b)は少し離れた陸上からの遠景で、写真-12(c)は2カ月経過後の接写写真を示す。基盤材表面の色も白から少し変わり、貝類の活着が確認できた。

現在のところ、陶磁器破砕片と流動砂を有効活用した藻礁基盤材への海藻の活着において顕著な差は見られなかった。特に、北九州市若松区脇之浦、鹿児島市上花倉、大分県佐伯市米水津浦代浦では自然に海藻（ホンダワラ、ヒジキなど）が繁茂しており、今後、基盤材への海藻活着や生育を定期的にモニタリングしていく予定である。また、若松区脇之浦では地産地消も考慮し、基盤材表面にカキ殻をそのままの状態が付着させたものと、粉碎し混入したもの（写真-8参照）を2018年8月に海中投入した。今後は、それらの効果も確認していきたい。

5. おわりに

本研究では、資源循環を目指し、産業廃棄物リサイクル材を用いた低環境負荷型となる環境にも優しい藻礁基盤材を開発することができた。特筆すべき点としては、固化材としてセメントの代りに廃石膏（再生石膏）を主として用い、セメントは補助的に用いた。リサイクル材の積極的な利用により、陸域においては産業廃棄物による最終処分場の延命・周辺地盤への環境負荷の軽減が見込まれる。一方、水域においても藻場の再生による沿岸海域環境の改善が挙げられる。次に、海中での鉄分不足を解消するために、使い捨てカイロを有効活用した。また、藻礁基盤材の場合は消波ブロック等と異なり、強度が要求されず、海中投入前に形状が壊れない程度の強度が確保され、海中投入後、自然に壊れた後も藻礁基盤材としての機能を有するならば問題はないと考えている。

今後は、木質バイオマス発電から排出される流動砂、陶磁器破砕片（粒径2~4mm）と廃石膏を主とした藻礁基盤材の開発を進める。これは流動砂の入手が立地面からより容易で、地産地消を考慮したいからである。さらに、木質バイオマス発電所は大型化し、今後も押し進められており、流動砂の有効利用は重要な課題となるだろう。

藻礁基盤材の実証試験としては、現在までに海中投入したものに加え、北九州市若松区脇之浦、長崎県佐世保市針尾漁港、大分県大分県佐伯市米水津、鹿児島市上花倉の4箇所に6月以降随時、ある程度の個数の藻礁基盤材を海中投入、設置していく予定である。また、今後は水中ドローンの購入等も予定しており、より詳細なモニタリングを実施していくことを検討している。

参考文献

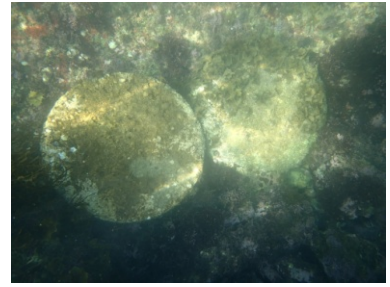
- 1) 寺脇利信、中山哲蔵、新井章吾、敷田麻美: 藻場の回復に向けて、海洋と生物 145 (第25巻第2号), pp.100-106, 2003.4.
- 2) 松永勝彦: 森が消えれば海も死ぬ 陸と海を結ぶ生態学, 講談社, 1993.
- 3) 根上武仁、山本健太郎、溝口直敏: 海中緑化の試みー低環境負荷型藻礁の作製と設置ー, 地盤工学誌, Vol.67, No.1, Ser. No.732, pp.24-27, 2019.1.
- 4) 山本健太郎、根上武仁、溝口直敏、平瑞樹、田中龍児: 産業廃棄物を有効活用した新たな環境に優しい藻場基盤材の開発, 第12回環境地盤



(a) 海中投入直後



(b) 海中投入から3カ月経過後



(c) 海中投入から3カ月経過後

写真-9 北九州市若松区脇之浦へ海中投入された藻礁基盤材の性状変化



(a) 海中投入直後 (接写)



(b) 海中投入直後 (近景)



(c) 海中投入直後 (遠景)

写真-10 鹿児島市上花倉へ海中投入された藻礁基盤材 (2018年9月)



(a) 海中投入から10日後



(b) 海中投入から2カ月経過後



(c) 海中投入から4カ月経過後

写真-11 大分県佐伯市米水津間越漁港へ海中投入された藻礁基盤材の性状変化



(a) 海中投入直後



(b) 海中投入から2カ月経過後 (遠景)



(c) 海中投入から2カ月経過後

写真-12 大分県佐伯市米水津浦代浦へ海中投入された藻礁基盤材の性状変化

工学シンポジウム論文集, pp.387-394, 2017.9.

5) 山本健太郎、根上武仁、溝口直敏、平瑞樹: 産業廃棄物を有効活用した環境に優しい藻場基盤材の開発とその海中モニタリング, 第27回海洋工学シンポジウム論文集, CD-R, 2018.8.

謝辞

本研究は、一般社団法人九州建設技術管理協会による平成30年度「建設技術研究助成」による助成金交付により遂行したものである。また、北九州市若松区脇之浦への基盤材設置に関しては株式会社白海の社員様、大分県佐伯市米水津への基盤材設置とモニタリングに関してはNPO法人 おおいた環境保全フォーラムにご協力をいただいた。ここに、謝意を表します。