

貝殻構造物の物質循環促進機能

穴口 裕司¹・藤澤 真也²・田中 丈裕³・田上 英明⁴・伊藤 靖⁵

¹海洋建設株式会社 水産環境研究所 (〒711-0921 岡山県倉敷市児島駅前1丁目75番地)

E-mail: yanaguch@kaiyoh.co.jp

²正会員 海洋建設株式会社 水産環境研究所 (〒711-0921 岡山県倉敷市児島駅前1丁目75番地)

E-mail: sfujisaw@kaiyoh.co.jp

³NPO法人里海づくり研究会議 (〒700-0921 岡山県岡山市北区東島田町2丁目7番20-501号)

E-mail: satoumiken@gmail.com

⁴水産大学校 海洋生産管理学科 (〒759-6595 山口県下関市永田本町2-7-1)

E-mail: h-tanoue@fish-u.ac.jp

⁵一般財団法人漁港漁場漁村総合研究所 (〒101-0032 東京都千代田区 岩本町3-4-6)

E-mail: y_ito@jific.or.jp

貝殻を円筒形のメッシュパイプに詰めた貝殻構造物は、海中において多様な底生生物・付着生物の好適な棲息場として機能することがこれまでの研究で明らかとなっている。本研究では、全国31海域における貝殻構造物に生息する小型動物を海区ごとに区分し、魚類に摂餌される餌料動物と懸濁物食性動物に分類した。前者については魚類を通じた食物連鎖による炭素循環量、後者についてはろ過摂餌による海中の有機懸濁物 (TOC) の除去量を定量化し、貝殻構造物をベースとした物質循環についての評価を行った。その結果、貝殻構造物1m³当たり年間約10~13kgの有機炭素が除去され、これをCODに換算すると人工干潟65~79m²に相当し、下水処理場における費用では人口1.2~1.7人、年間56~76千円相当の経済効果を見込まれ、沿岸域における物質循環促進技術としての有効性を示すことができた。

Key Words: shell substrate, material cycle, harbor facilities, COD, TOC, food chain, attaching animals, mudflat, sewage treatment

1. 貝殻構造物の特徴と研究目的

かつてより、一部の漁業者の間ではカキ殻が堆積した場所はエムシ (ゴカイ類) の漁場となり、漁業生産に役立つことが経験的に知られてきた¹⁾。また、貝殻はカキやホタテ、真珠などの養殖漁業によって安定供給される材料であることから、この貝殻を活用した人工魚礁が開発され、漁場造成等に活用されている²⁾。中でも、直径15cmのメッシュパイプ内に貝殻をランダムに詰めた構造体 (以下“貝殻構造物” 図-1) については、著者を含めてこれまでに多くの研究者によって生物生産や海藻類の着定基盤などとしてのメカニズムの解明が進んでいる。この貝殻構造物の特徴としては、①貝殻の重なりによって形成される空間 (空隙率 80%程度) が多様な底生生物・付着生物の好適な生息場として機能することで生物生産性と多様性を向上させる³⁾、②透水性が保たれるとともに下流側の流れに与える影響範囲が広く、底生生物や付着生物幼生や胞子の着底を促進する⁵⁾ということが明らかとなっている。

また、三重県英虞湾^{6), 7)}や広島県江田島湾⁸⁾、兵庫県芦屋浜⁹⁾において、貝殻構造物を使用した人工中層海底を設置した研究が行われており、海域の有機懸濁物を捕捉、集積、分解し、食物連鎖を通して高次の生物へと物質循環を移行させることや、閉鎖性水域における生物生息空間の創出効果が示されている。さらに、福井県敦賀港内では貝殻構造物を使用した水質改善礁が使用されており、この水質改善礁に取り付けた貝殻構造物を使用した水槽実験では、貝殻構造物に付着する懸濁物食者のろ過摂餌による有機物除去量が定量化されている^{10), 11)}。我々は、このような特徴を備えた貝殻構造物が、埋立や護岸整備などの沿岸開発により

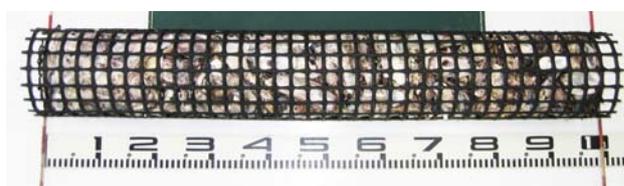


図-1 貝殻構造物

表-1 調査対象海域の一覧

海区	海域(設置水深, 設置期間)
外海 (太平洋, 日本海)	岩手県大槌町(21m, 29ヶ月), 宮城県南三陸町(7m, 35ヶ月), 静岡県熱海市(29m, 43ヶ月), 愛知県田原町(5m, 36ヶ月), 富山県入善町(5m, 23ヶ月), 石川県能登町(17m, 20ヶ月), 三重県南伊勢町(53m, 41ヶ月), 志摩市(20m, 103ヶ月), 紀北町(12m, 46ヶ月), 和歌山県田辺市(17m, 42ヶ月), 白浜町(19m, 21ヶ月), 印南町(17m, 40ヶ月)
内海	大阪府岬町(10m, 18ヶ月), 泉南市(6m, 47ヶ月), 田尻町(7m, 20ヶ月), 島根県中海(3m, 17ヶ月), 岡山県倉敷市釜島西(6.5m, 23ヶ月), 釜島東(17m, 23ヶ月), 鷺羽(7.5m, 19ヶ月), 香川県詫間町(瀬戸内海, 有明海, 中(5m, 11ヶ月), 愛媛県伊予市(6m, 16ヶ月), 大分県姫島村(10m, 56ヶ月), 佐賀県太良町(8m, 51ヶ月), 大村湾, 鹿児島湾)月), 長崎県佐世保市崎針尾(7m, 10ヶ月), 針尾(30m, 15ヶ月), 南島原市(16m, 56ヶ月), 鹿児島県垂水市(34m, 39ヶ月)
港湾	福井県敦賀港(3m, 15ヶ月), 広島県呉市(3m, 19ヶ月), 高知県宿毛港(5m, 6ヶ月), 宮崎県細島港(6.5m, 12ヶ月)

閉鎖性が強まって物質循環の停滞が問題となっている港湾や漁港水域において、多種多様な生物の棲息場として機能することで物質循環を健全なものに近づけ、生物多様性、生態系の保全に役立てることができると考えている。貝殻構造物は1994年度以降全国各地の海域に設置されており、そのうち70箇所以上の海域で付着生物調査が実施されている。本研究においては、これらのうち31海域を外洋域、瀬戸内海などの内海、漁港・港湾水域に分け、着生動物のデータから食物連鎖を通じた有機炭素循環並びに懸濁物食者による有機物除去量を示し、海区ごとの貝殻構造物設置による物質循環促進について検証したのでここに報告する。

2. 有機物除去量の推定

(1) 調査方法

a) 貝殻構造物設置と回収

調査海域は岩手県から鹿児島県までの水深3~53 mの31海域とした。調査海域および調査時期により透明度、水温、流況、水質等の海域特性は異なっているが、ここでは、概ねの設置場所から海水交換が大きい“外海”，内湾など外海と比べると閉鎖性の強い“内海”および防波堤などの人工構造物の直近に設置された“港湾”の3海区に区分けした(表-1)。調査は現地に設置されている海中構造物に、貝殻構造物(直径15 cm, 長さ30~100 cm)を設置して行った。貝殻構造物は、着生動物の数量変化が安定する任意期間(設置期間6~103ヶ月)経過したものを、小型動物が脱落しないようにダイバーにより海中で木綿袋等で包んで陸上に回収し、固着・潜入する小型動物をスクレーパー等により全て剥ぎ取り、1 mm目合のふるいで濾し、残った小型動物を試料として種ごとの湿重量の測定を行い記録した。これらのデータは、水産庁資料¹²⁾に従い二枚貝類、巻貝類、多毛類、甲殻類等を魚類の餌として利用され

る餌料動物、濾過摂餌を行う海綿動物、触手動物(コケムシ類)、原索動物(ホヤ類)を懸濁物食者として分類し、いずれも貝殻構造物1 m³当たりの湿重量に換算した。二枚貝類、フジツボ類等は濾過摂餌を行うが、ここでは餌料動物として分類したため、懸濁物食者からは除外した。

b) 餌料動物を魚類が摂餌することによる有機物の系外除去量の推定

餌料動物については、湿重量を乾重量に換算してから魚類による摂餌量を求め、これを炭素量に換算し、全ての魚類が漁獲または成長や季節変化等に伴って移動するものと仮定して有機物の系外除去量を試算した。湿重量から乾重量への変換は分類群ごとに中田、畑及び原口らが示している換算係数、腹足類0.045(乾重量/殻付湿重量)¹³⁾、二枚貝類0.032(乾重量/殻付湿重量)¹³⁾、フジツボ類0.390(乾重量/湿重量)⁷⁾、その他のマクロベントス0.2945(乾重量/湿重量)¹³⁾を用いた。餌料動物の年間生産量/現存量比(P/B)及び魚類の餌料動物摂餌率、魚体重への転換効率は水産庁他に従い、P/B³⁾、摂餌率2³⁾、餌料転換効率0.13¹⁴⁾とし、乾重量/炭素量は0.335¹³⁾を用いた。

c) 懸濁物食者のろ過摂餌による有機物除去量の推定

懸濁物食者による有機物除去については、大原らが福井県敦賀港内に設置した貝殻構造物を使用した水槽実験を行っている¹¹⁾。この実験は、一定期間海中に設置して生物を着生させた貝殻構造物(試験区)に対し、海中に設置せず生物の付いていない貝殻構造物を対照区とし、それぞれを海水を満たした小型水槽内に静置した後に珪藻(*Chaetoceros gracilis*)を添加して、細胞数、濁度、TOCなどについて一定時間経過ごとに採水して測定したものである。試験区と対照区におけるTOC濃度の差から長さ30 cm貝殻構造物に棲息する懸濁物食者による有機物除去量を活性が高かった11月と低かった2月における実験結果から算出したところ、124.3 g/yearの有機炭素が除去されるという結果が得られている¹¹⁾。

表-2 餌料動物および懸濁物食者の現存量

海域	場所	餌料動物		懸濁物食者		
		湿重量 (gWW/m ³)	乾重量 (gDW/m ³)	湿重量 (gWW/m ³)	乾重量 (gDW/m ³)	
外海	岩手県 大槌町	357,694	81,671	227,706	20,881	
	宮城県 南三陸町	19,675	2,437	10,821	1,703	
	静岡県 熱海市	44,025	6,325	3,096	675	
	愛知県 田原町	174,759	18,049	12,240	2,108	
	富山県 入善町	20,740	6,144	17,822	1,417	
	石川県 能登町	92,521	4,413	18,561	1,308	
	三重県	南伊勢町	96,570	35,323	6,836	1,720
		志摩市	97,113	11,099	82,538	9,696
		紀北町	49,981	8,983	72,655	4,193
		田辺市	55,519	6,788	6,168	1,396
	和歌山県	白浜町	67,374	8,375	9,511	1,368
		印南町	30,025	4,499	25,543	4,601
		平均	92,166	16,175	41,125	4,255
内海	大阪府	岬町	63,178	20,600	27,143	2,074
		泉南市	161,506	33,268	10,607	541
		田尻町	101,515	36,117	14,060	2,562
	島根県	中海	621,768	24,453	0	0
	岡山県	倉敷市釜島西	219,860	74,083	10,836	1,320
		倉敷市釜島東	223,617	64,338	102,049	6,939
		倉敷市鷺羽	105,270	33,465	6,619	1,658
	香川県	詫間町	107,898	5,083	12,693	1,438
	愛媛県	伊予市	64,731	12,888	49,278	7,136
	大分県	姫島村	245,842	87,350	28,018	6,781
	佐賀県	太良町	134,551	43,239	158,245	9,139
	長崎県	崎針尾	96,306	33,903	46,103	5,659
		針尾	256,953	81,984	65,579	3,360
		布津	346,461	117,178	19,474	5,312
	鹿児島県	垂水市	41,508	5,865	3,284	420
		平均	186,064	44,921	36,933	3,623
	港湾	福井県 敦賀港	84,704	29,606	57,338	3,707
広島県 呉市		106,600	37,875	3,390	1,423	
高知県 宿毛市		188,566	70,908	16,760	1,140	
宮崎県 細島		121,094	41,098	15,689	901	
		平均	125,241	44,871	23,294	1,793

この時の二枚貝類なども含めた懸濁物食者の平均湿重量は391 gWWであり、懸濁物食者1 gWWあたりの有機炭素除去量は0.318 g/gWW/yearとなる。二枚貝類など餌料動物に含まれる動物群を除いた懸濁物食者の湿重量は約320 gWWであり約80%を占めることから、本論における懸濁物食者による有機物処理量を0.254 g/gWW/year (0.8倍)とし、各海区ごとの貝殻構造物に固着する懸濁物食者による有機物除去量を推定した。

(2) 調査結果と考察

各調査海域に設置した貝殻構造物の着生動物について、

餌料動物ならびに懸濁物食者の湿重量、乾重量の測定結果を表-2に示す。

a) 餌料動物を魚類が摂餌することによる有機物の除去量

各海域における餌料動物の湿重量は19,675～621,768 gWW/m³ (平均141,868 gWW/m³)と差が大きく、イガイ類やフジツボ類が大量に固着した岩手県大槌町、島根県中海、長崎県南島原市などで顕著に多く、波浪の影響の大きい外洋に面した浅場である宮城県南三陸町や富山県入善町、和歌山県印南町などで少ない結果となった。海区別で比較すると、外海では平均92,166

gWW/m³, 内海では平均186,064 gWW/m³, 港湾では平均125,241 gWW/m³となり外海で少なかった。一方, 乾重量では外海で16,175 gDW/m³と少なく, 内海と漁港・港湾ではそれぞれで44,921 gDW/m³, 44,871 gDW/m³と同程度の値となった。これは, 内海で特に大きな値を示した島根県中海等において乾重量/湿重量比の小さい二枚貝類が多かったためである。餌料動物現存量(乾重量)から各種係数を掛けて魚類の摂餌による有機炭素の除去量を算出した結果, 外海で1,416 gC/m³/year, 内海で3,932 gC/m³/year, 港湾で3,928 gC/m³/yearとなった(表-3)。

b) 懸濁物食者による有機物の除去量

各海域における懸濁物食者の湿重量は餌料動物ほど大きな差は見られなかったが, マボヤなど大型のホヤ類が大量に着生した岩手県大槌町で227,706 gDW/m³, 佐賀県太良町で158,245 gDW/m³と多かった。その一方で, 島根県中海では懸濁物食者が全く確認されなかった。海区別で比較すると, 外海は平均41,125 gWW/m³, 内海は平均36,933 gWW/m³, 港湾は平均23,294 gWW/m³と外海で多い傾向が見られた。前述の手法により懸濁物食者による有機炭素の除去量を算出した結果, 外海で10,446 gC/m³/year, 内海で9,381 gC/m³/year, 港湾で5,917 gC/m³/yearとなった(表-4)。ただし, 内海で多く着生した二枚貝類やフジツボ類も懸濁物食者であり, これ

表-3 餌料動物を魚類が摂餌することによる有機物除去量

項目	外海	内海	港湾	計算式
餌料動物現存量 (gDW/m ³)	16,175	44,921	44,871	A
P/B比		3		B
利用率		2/3		C
餌料転換効率		0.13		D
魚体重増加量 (gDW/m ³ /year)	4,227	11,738	11,725	E= A*B*C*D
炭素量/乾重量		0.335		F
有機物除去量 (gC/m ³ /year)	1,416	3,932	3,928	G=E*F

表-4 懸濁物食者による有機物除去量の算定

項目	外海	内海	港湾	計算式
懸濁物食者現存量 (gWW/m ³)	41,125	36,933	23,294	A
懸濁物食者1gWWあたりの有機物除去量 (gC/gWW/year)		0.254		B
有機物除去量 (gC/m ³ /year)	10,446	9,381	5,917	C=A*B

らを含めると内海における有機物除去量が最も多くなるものと考えられた。

3. 他の指標との比較

上記の推算により, 餌料動物を起点とした食物連鎖による間接的な有機物除去量および懸濁物食者の濾過摂餌による有機物除去量が推定された。これらの値が他と比較してどの程度のレベルであるかを検証するために, 干潟における有機物除去量に関する既往知見と比較した。また, 下水処理場におけるCOD除去費用に相当する金額を試算した。TOCのCODへの換算は, 浮田の係数TOC/COD=0.86¹⁵⁾を使用した。

(1) 干潟における有機物除去量との比較

各海区における貝殻構造物1m³当たりの有機物除去量を, 干潟1m²当たりの有機物除去量0.481 gCOD/day¹⁶⁾と比較した。貝殻構造物における餌料動物を起点とした食物連鎖と懸濁物食者による除去量の合計値は, 外海で11,862 gC/m³/year, 内海で13,313 gC/m³/year, 港湾で9,845 gC/m³/yearとなり, これを干潟と比較すると外海で79 m², 内海で88 m², 港湾で65 m²に相当する結果となった(表-5)。港湾内に貝殻構造物を65個(1 m³)装着した人工魚礁(図-2)を100基設置した場合, 6,500 m²(0.65ha)の干潟の有機物除去量に相当する物質循環促



図-2 貝殻構造物を装着した人工魚礁の例

表-5 貝殻構造物の干潟相当面積の算定

項目	外海	内海	港湾	計算式
貝殻構造物の有機物除去量 (gC/m ³ /year)	11,862	13,313	9,845	A
TOC/COD		0.86		B
COD除去量 (gCOD/m ³ /year)	13,793	15,480	11,447	C=A/B
干潟のCOD除去量 (gCOD/m ² /day)		0.481		D
干潟相当面積 (m ²)	79	88	65	E= C/D/365

表-6 貝殻構造物の下水処理費用相当額の算定

項目	外海	内海	港湾	計算式
貝殻構造物1個当たり COD除去量 (gCOD/year)	13,793	15,480	11,447	A
CODの発生原単位 (g/人/day)		31		B
除去率(%)		79		C
下水処理相当人口 (人/m ³)	1.54	1.73	1.28	D= A/B/C/365
処理人口当たり 年間経費 (円/人/year)		44,381		E
下水処理費用相当額 (円/m ³ /year)	68,480	76,859	56,835	F=D*E

進効果が期待できる。

(2) 下水処理場におけるCOD除去費用との比較

水産庁資料¹⁷⁾によるとCODの発生原単位は31 g/人/dayで、下水処理における除去率は79 %、処理人口当たりの年間経費は44,381 円/人/yearとされている。これに従い貝殻構造物1 m³当たりのCOD除去量を下水処理人口および処理費用換算すると、外海で人口1.54 人、年間68,480 円、内海で人口1.73 人、年間76,859 円、港湾で人口1.28 人、年間56,835 円に相当する経済効果が期待できるものと試算された(表-6)。

貝殻構造物は、有機物除去以外にも餌料動物による魚体重増加(漁獲量増加)や着生する海藻による浄化効果、CO₂削減効果、生物多様性の向上など多面的な機能が付加されるため、その経済効果についてはさらに高いものと考えられる。

4. 本研究における課題と今後の展望

以上より、貝殻構造物を海域に設置することによる有機物除去効果を外洋、内海、港湾の3海区ごとに定量化することができた。餌料動物を起点とした食物連鎖による除去では内海や港湾区域といった一般的に陸域からの栄養塩類が多い海域で高い値となった。その一方で、懸濁物食者による除去では外海で高い値となったが、二枚貝やフジツボ類を含めると内海で最も高い効果が発揮されるものと考えられた。また、同じ海区内においても、比較的水深が深く潮流のある岩手県大槌町と浅くて波当たりの強い宮城県南三陸町では動物の付着量の差が著しいなど、一概に同様の効果が発現するとは言い難く、技術の活用を検討する場合には、対象とする場所の詳細な環境条件等を考慮する必要がある。

ある。

有機物除去量は、懸濁物食者による除去量が顕著に高い値を示している。しかし、今回使用した実験値は限られた水槽内における短期間の結果であり、長期的には懸濁物食者による排泄や斃死により有機物が系内に留まることも考えられる。また、閉鎖的な港湾や内湾などにおいては、海水交換が少ないため特に高水温期には底層に堆積した懸濁物や排泄物、死骸などがバクテリアに好氣的に分解されることにより酸素が急激に消費され貧酸素水塊が発生する可能性がある。こうした問題は、物質循環の停滞が懸念される水域で特に顕著である。貝殻構造物の優れた生物棲息空間としての機能をより効率高く発揮するためには、それぞれの環境における潮汐等の水塊移動による有機物の拡散や、生物群ごとの窒素、リンのフラックスなどを総合的に評価し、物質循環モデルに組み込むことで適切な規模や設置位置、配置密度などを考慮した研究が必要であろう。

今後は、これまでに取得してきた付着動物のデータをより詳細な海域ごとの環境特性とリンクさせた研究を進め漁港・港湾区域等閉鎖性水域における物質循環の健全化を図るための技術として発展させていくことが望まれる。

参考文献

- 1) 鳥井正也：水産系副産物(貝殻)の漁場造成事業への活用, 水産工学, 44(3), pp.205-209, 2008.
- 2) 人工魚礁：財団法人漁港漁漁村技術研究所, 東京, 2004.
- 3) 野田幹雄・田原実・片山貴之・片山敬一・柿元皓：内部空隙をもつ管状基質が無脊椎動物, 特に魚類餌料動物の加入に与える効果, 水産増殖, 50(1), pp.37-46, 2002.
- 4) 穴口裕司, 永松公明, 田原実, 足立吉宏：人工魚礁における生物多様性に関する研究事例, 水産工学, 50(3), pp.219-224, 2014.
- 5) 穴口裕司・片山真基・田中丈裕・永松公明・大久保賢治：貝殻基質周辺の流れに関する研究報告, 土木学会論文集B3(海洋開発), 69(2), pp.569-573, 2013.
- 6) 片山貴之・加村聡・原口浩一・山本民次・山形陽一：人工中層海底による環境改善システムの開発, 三重県地域結集型共同研究事業閉鎖性海域における環境創生プロジェクト環境再生技術集, pp.103-113, 2007.
- 7) 原口浩一, 山本民次, 片山貴之, 松田治：人工魚礁に形成される食物連鎖を通じた炭素フロー, 日本水産学会誌, 75(5), pp.810-818, 2009.
- 8) 山本民次・笹田尚平・原口浩一：人工中層海底によるカキ養殖場沈降物量の軽減能評価—設置後半年間の調査から—, 日本水産学会誌, 75(5), pp.834-843, 2009.
- 9) 平成20年度環境技術実証事業 閉鎖性海域における水環境改善技術分野 閉鎖性海域における水環境技

- 術 実証試験結果報告書, 兵庫県, 2009.
- 10) 加村聡・藤澤真也・片山貴之・齋藤達昭・岸本英明・田原実: 港湾内に設置した生物生息基質の水質浄化機能の定量化, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 67(2), pp.304-309, 2011.
 - 11) 大原啓史・加村聡・藤澤真也・井上弘之・齋藤達昭・田中丈裕・田原実: 港湾内に設置した貝殻を使用した水質改善礁の機能の定量化, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 69(2), pp.563-568, 2013.
 - 12) 水産庁漁港漁場整備部, 財団法人漁港漁場漁村技術研究所: 平成 15 年度水産基盤整備生物環境調査「原単位把握のための調査」(魚礁事業における増殖効果指標検討調査) 報告書, 2004.
 - 13) 中田喜三郎, 畑恭子: 沿岸干潟における浄化機能の評価, 水環境学会誌, 70, pp.722-727, 1994.
 - 14) 水産庁漁港漁場整備部, 財団法人漁港漁場漁村技術研究所: 魚礁における増殖機能の便益計測マニュアル, 2007.
 - 15) 浮田正夫: わが国における窒素・リンの発生源構造と富栄養化の機構に関する基礎的研究, 博士論文, 京都大学, 1982.
 - 16) 今尾和正・鈴木輝明: 貧酸素化海域の浅場の造成法—三河湾を例として—, 水産工学, 40(3), pp.185-190, 2004.
 - 17) 水産庁資源生産推進部整備課: 沿岸漁場整備開発事業 費用対効果分析の手引き, 2000.

PROMOTING FUNCTION OF MATERIAL CYCLE BY THE SHELL STRUCTURE

Yuji ANAGUCHI, Shinya FUJISAWA, Takehiro TANAKA, Hideaki TANOUE and Yasushi ITO

Cylindrical mesh substrata filled with waste shells have been demonstrated to promote suitable habitat of diverse small marine animals in recent studies. In this work, we divided these animals into two groups, prey and purifier (suspended feeder), throughout 31 water area data across this country, and estimated shell substrata value with different techniques, respectively. Those are, the former, to calculate amount of circulated carbon through food chain, and the latter, to quantify TOC remove from marine water with filter-feeding. As a result, organic carbon was estimated to remove 10 to 30 kg·m⁻³·yr⁻¹, and if to convert in COD, equivalent to 65 to 79 m² tideland, and sewage treatment for 1.2 to 1.7 human unit. For expected economical worth 56,000 to 76,000 yen, could develop the technology to help coastal material cycle.