

底質改良資材を用いた干潟環境の修復技術に関する基礎実験

井 芹 寧* ・ 石川泰助** ・ 平島英恵***
矢野真一郎**** ・ 小松利光*****

干潟の環境修復を目的として、農地に施用されているクリンカ多孔質粒の干潟域への適用基礎実験を行った。干潟の砂、クリンカ多孔質粒、砂とクリンカ多孔質粒混合の3系列の貝類飼育システムを製作し、アサリとハマグリとの飼育実験を実施した。17日間の実験期間においていずれの系も貝類の生存が観察された。飼育実験期間における直上水及び底質間隙水の水質分析並びに底質分析の結果、クリンカ多孔質粒はDOの改善効果、汚濁物質濃度低減効果が期待できる等、干潟修復資材としての有効性が確認された。これらの結果に基づき、クリンカ多孔質粒を用いた干潟修復施工方法に関して提案を行った。

1. はじめに

近年、全国的に干潟域の貝類の生産量の減少が問題となっている。その原因として、河川流域からの土砂供給量の減少、海域の海水流動構造変化及び有機汚濁物質負荷の増加等による泥質化、貧酸素水塊、Mn・農薬などの化学物質、温暖化による生態構造の変化及びウイルスなどの疾病等、種々の影響要因があげられている(柿野, 1992; Tsutsumi ら, 2003)。

干潟域における直接的な対応策として、人工干潟造成(Suzuki, 2004)、耕耘(滝川ら, 2003)及び覆砂(堤ら, 2000)などが実施されている。特に覆砂はアサリの生産量の回復に効果が認められており、実用的な対応策の一手法として実績が上がっている。しかしながら、今後は水域環境保全の立場から河川や海域での砂の採取が制限される状況となることから覆砂対策における砂の代替品の開発が重要な課題と考えられる。

干潟造成、覆砂代替材としては、造粒浚渫泥(沼野ら, 2004)、浚渫ヘドロ(国分ら, 2004)、高炉スラグ(内藤ら, 2001)、貝殻(泉ら, 2004)などが検討されている。

本報告は建築骨材、農業用土壌改良材及び河川水質浄化資材として利用されているクリンカ多孔質粒に関して貝類室内飼育実験を行い、その干潟覆砂材としての適用性について評価を行ったものである。

2. 実験方法

(1) 飼育試験条件

a) 砂及び資材

実験に用いる砂は本研究の対象地点である大分県佐伯市の番匠川河口干潟の砂を採取した。クリンカ多孔質粒は石炭火力発電所で燃焼時に高温で熔融した石炭が急速

冷却されて生成するガラス状粒体で、多孔質で溶出物がほとんどないなど化学的に安定性が高い特長を有している。今回の実験には、熊本県苓北石炭火力発電所の資材を入手し実験に供した。

b) 実験ケース

検討ケースは①砂、②クリンカ多孔質資材、③砂＋クリンカ混合(容量比1:1)の3ケースについて貝類の飼育試験を実施した。貝類生育実験装置として、ケース毎に15L水槽を準備し、各水槽内に人工海水を入れ、容量500 cm³の資材を敷いた1 L硬質ガラスビーカーを3連設置した(図-1)。各ビーカーに貝類を投入し実験期間中は20°C±1°Cで温度制御を行った。初期塩分濃度は約28.8‰であった。

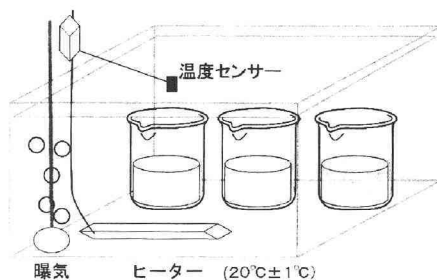


図-1 実験水槽概略図

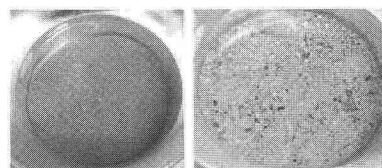


写真-1 砂(左)、クリンカ(右)の外観

c) 貝類

佐伯湾産のアサリ2個体、ハマグリ1個体合計3個体を用い飼育実験を行った。貝類は事前に人工海水に5日間以上無給餌で馴致させ実験に供した。飼育実験中は数日間隔で配合飼料と藻類粉末を混合した餌を給餌した。

飼育実験は平成17年12月2日から17日まで実施した、

* 正会員 博(工) 西日本技術開発(株)環境部
** 学生会員 九州大学大学院工学府
*** 修(工) 日本工営(株)河川水工部
**** 正会員 工博 九州大学大学院工学研究院
***** フェロー 工博 九州大学大学院工学研究院

その間12月3日(飼育開始1日後), 6日(4日後), 9日(7日後), 17日(15日後)に直上水の水質測定を実施した。3日と17日には直上水(水槽水)をポリビンで直接採取し, 底質間隙水を $0.45\mu\text{m}$ メンブランフィルターを取り付けた注射筒を用いて過採取し分析に供した。採水で除かれた海水は人工海水を補充し, 蒸発により失われた水量は蒸留水を補充した。

底質直上水の水温, pH, DO, 塩分濃度について多項目水質計(YSI ナノテック社製, YSI6600)を用いて計測した。また, 総リン(TP), 溶存態総リン(DTP), 総窒素(TN), 溶存態総窒素(DTN), 硝酸+亜硝酸態窒素($\text{NO}_2+\text{NO}_3-\text{N}$)についてオートアラナライザ(Bran-luebbe 社製 AAC3)を用いて分析を行った。

底質間隙水の pH 及び ORP の測定は TOA 社製 HM-10P を, DO の測定は YSI 社製 MODEL58 を用い, スペーサー内浸出間隙水に直接センサーを投入し測定を行った。

なお, 間隙水については直上水を完全に採水除去した上, 底質部に間隙水浸出スペーサーをビーカー底部まで差し込み, 震動を与えスペーサー内に間隙水を浸出させることにより効率的な測定及び分析試料採取が可能となった。また, 実験開始時及び終了時の底質の有機炭素, 窒素含有量を多項目分析装置(Fisons 社製 NA1500)を用いて分析を行った。

3. 実験結果及び考察

(1) 貝類の観察

飼育実験期間中は全てのハマグリ, アサリの生存が確認された。実験に供した貝類の殻長, 湿重量を表-1に示す。生存した貝類は概ね湿重量が維持されるか, もしくはわずかながら増加を示した。アサリについては, 各系とも実験終了後1個体が死亡したが, 残りの個体は最大56日間の生存が確認できた(56日以降は凍結保存)。

(2) 底質直上水の水質

底質直上水の pH, DO の測定結果を図-2に, 栄養塩

分析結果を図-3に示す。

a) 水素イオン濃度 (pH)

pH は 8 前後の弱アルカリ性で推移する。クリンカ(K)及び砂・クリンカ混合(SK)は7.9~8.3の範囲でほぼ同様に推移した。砂(S)は7.7~8.2の範囲でやや中性側の値となった。pH は水産用水基準では7.8~8.4の範囲で定められており, クリンカが含まれている系では基準を満たしているのに対し, 砂はわずかに基準を超過した。

b) 溶存酸素量 (DO)

DO はクリンカが5.1~8.0 mg/l の範囲で, 砂・クリンカ混合が5.0~7.9 mg/l の範囲で, 砂は4.9~7.9 mg/l の範囲を推移した。実験期間中はいずれの系でも減少傾向を示すものの, 水産用水基準の内湾の底層の基準(夏季)の4.3 mg/l を満足している。

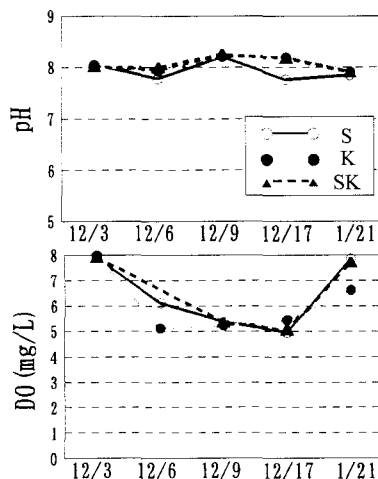


図-2 底質直上水の pH, DO の経日変化

c) 窒素成分 (DTN, $\text{NO}_3+\text{NO}_2-\text{N}$)

溶存態総窒素(DTN)は人工海水が0.331 mg/l であるのに対し, 12/6における砂が0.598 mg/l, クリンカが0.509 mg/l, 砂・クリンカ混合が0.511 mg/l と高濃度になった。砂と比較するとクリンカ系がわずかに低濃度である。その後, 12/17にかけて濃度の増加が認められ, 砂は2.84 mg/l に達した。これに対し, クリンカは2.08 mg/l, 砂・クリンカは1.54 mg/l で砂・クリンカ混合は砂の半分程度の濃度となり, クリンカを含んだ系のほうが低濃度になる結果となった。

硝酸+亜硝酸態窒素($\text{NO}_3+\text{NO}_2-\text{N}$)は人工海水が0.005 mg/l であるのに対し, 12/6におけるクリンカが0.003 mg/l, 砂・クリンカ混合が0.047 mg/l となった。DTN と同様, クリンカが含まれる系が低濃度になる傾向を示した。

総窒素(TN)は人工海水が0.315 mg/l であるのに対し, 12/6における砂が0.872 mg/l, クリンカが0.539

表-1 貝類計測結果

系	貝	殻長(mm)	湿重量(g)		
			12月2日	12月17日	1月21日
砂 (S)	アサリ1	32	6.87	—	6.87
	アサリ2	31	5.99	—	—
	アサリ3	27	4.87	—	4.89
	ハマグリ1	26	5.81	6.68	—
	ハマグリ2	24	4.03	5.85	—
クリンカ (K)	ハマグリ3	20	2.63	2.65	—
	アサリ1	30	5.19	—	5.23
	アサリ2	29	6.68	—	6.09
	アサリ3	28	5.8	—	—
	ハマグリ1	25	5.31	5.36	—
砂・クリンカ 混合 (SK)	ハマグリ2	20	1.99	2.01	—
	ハマグリ3	22	2.66	2.66	—
	アサリ1	25	5.59	—	5.58
	アサリ2	28	5.49	—	—
	アサリ3	25	4.52	—	4.56
	ハマグリ1	16	1.39	1.4	—
	ハマグリ2	24	3.93	3.93	—
	ハマグリ3	23	3.43	3.45	—

mg/l, 砂・クリンカ混合が0.532 mg/l となった。12/17には大幅な濃度の増加が認められ, 砂が2.82 mg/l, クリンカが2.05 mg/l, 砂・クリンカが1.48 mg/lで砂・クリンカ混合は砂の半分程度の濃度となり, クリンカが含まれる系の濃度低減の傾向を示した。

12/17にはすべての項目において, 砂・クリンカ混合が最も低濃度の値を示し, 砂と比較して半分程度の濃度減少効果が認められた。

DTNにおいてクリンカより砂・クリンカ系で最も値が低くなったことは, 単純に有機物希釈作用のみではなく, 有機物分解, 硝化・脱窒などの微生物浄化活動によって砂・クリンカ系が適した条件になった可能性が考えられる。今後, 本機構の詳細を解明することが重要と考えられる。

d) リン成分 (DTP, $\text{PO}_4\text{-P}$)

溶解態総リン (DTP) は人工海水が0.103 mg/lであるのに対し, 12/6における砂が0.080 mg/lとやや低く, クリンカが0.137 mg/l, 砂・クリンカ混合が0.142 mg/lと高い値を示した。その後12/17にかけて窒素同様増加が認められ, 砂は0.279 mg/l, クリンカは0.320 mg/lと同様な割合で増加したが, 砂・クリンカ混合は0.210 mg/lとなり, 砂と比較して2.5割程度低い値となった。

リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) は人工海水が0.0330 mg/lであるのに対し, 12/6における砂が0.088 mg/l, クリンカが0.122 mg/l, 砂・クリンカ混合が0.124 mg/lといずれの系も増加を示した。その後, 12/17にかけて, 砂は0.246 mg/l, クリンカは0.275 mg/l, 砂・クリンカ混合は0.166 mg/lとなった。砂と比較して砂・クリンカ混合は3割程度低い値となった。

総リン (TP) は人工海水が0.117 mg/lであるのに対し, 12/6における砂が0.150 mg/l, クリンカが0.155 mg/l, 砂・クリンカ混合が0.164 mg/lといずれの系も増加し, それぞれの系が近い値を示した。その後, 12/17にかけ

て, 砂は0.302 mg/l, クリンカは0.361 mg/lとなったが, 砂・クリンカ混合は0.225 mg/lと砂と比較して3割程度低い値となった。

(3) 底質間隙水の水質

間隙水の pH, DO, ORP 測定結果 (平均値) を図-4に, 栄養塩分析結果を図-5に示す。

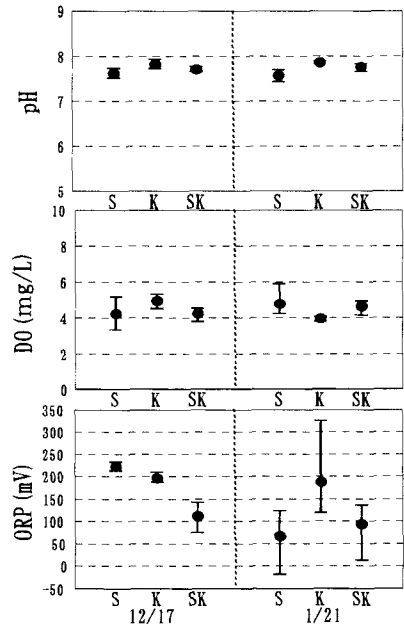


図-4 底質間隙水の水質

a) pH

pH は各系の平均値が7.6~7.9の範囲で弱アルカリ性を示した。

約1ヶ月間の経時変化を3連の平均値でみると, 砂がおよそ7.6で変化がないのに対し, クリンカは7.8から7.9に, 砂・クリンカ混合は7.7から7.8とわずかにアルカリ側に傾いた。

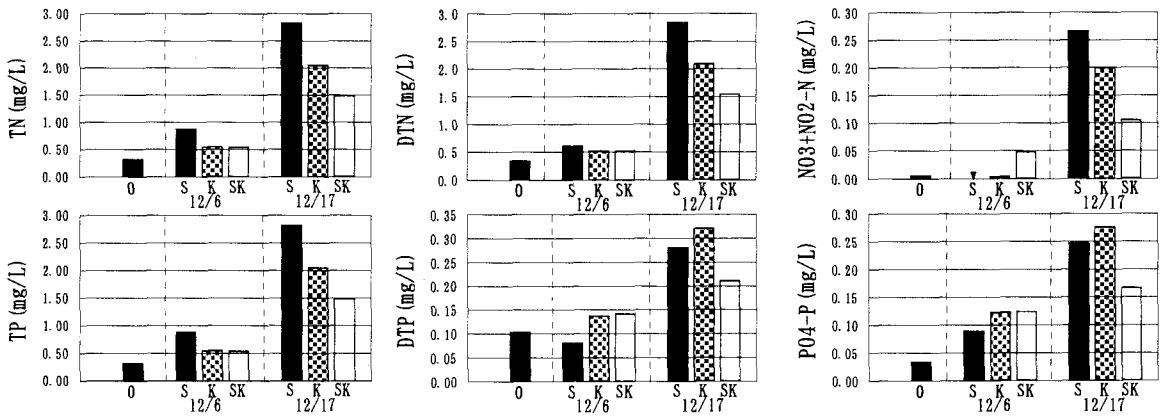


図-5 直上水の栄養塩濃度の変化

b) DO

DO は各系の平均値が4.0~5.0 mg/l となっており、おおむね 4 mg/l 以上の値を示した。各系の差異は大きくないが、12/6ではクリンカが12/17では砂と砂・クリンカ混合がより良好な値となった。

c) ORP

ORP を各系毎にみると、砂の還元化が進行している傾向がみられ、最小値で -19 mV となったものもあったのに対し、砂・クリンカ混合、クリンカは還元化の進行は比較的小さかった。特にクリンカは325 mV で酸化的环境下が保持されたものもあった。クリンカの適用により有機物含有量が低減されたこと、透水性が改善されたことなどで還元化が抑制されたものと考えられる。

d) 窒素成分 (DTN, $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$)

溶存態総窒素(DTN)は、人工海水が0.331 mg/l であるのに対し、12/6において砂が0.295 mg/l、クリンカが0.171 mg/l、砂・クリンカ混合が0.121 mg/l とクリンカを含む系が低濃度となった。その後12/17にかけて濃度の増加が認められ、砂は0.516 mg/l、クリンカは0.446 mg/l、

砂・クリンカ混合は0.572 mg/l で砂に対し、クリンカがやや低濃度、砂・クリンカ混合がやや高濃度となった。

硝酸+亜硝酸態窒素($\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$)は、人工海水が0.005 mg/l であるのに対し、12/6において砂が0.061 mg/l、クリンカが0.008 mg/l、砂・クリンカ混合が0.033 mg/l とDTN 同様にクリンカを含む系で低濃度であった。その後12/17は砂とクリンカに対して砂・クリンカ混合では低い値となった。

e) リン成分 (DTP, $\text{PO}_4 - \text{P}$)

溶存態総リン(DTP)は人工海水が0.103 mg/l であるのに対し、12/6において砂が0.011 mg/l、クリンカが0.033 mg/l、砂・クリンカ混合が0.006 mg/l と、砂と比較してクリンカが増加、砂・クリンカ混合で減少した。その後12/17にかけて窒素と同様に増加が認められ、砂は0.026 mg/l、クリンカは0.055 mg/l、砂・クリンカ混合は0.024 mg/l となり砂と比較してクリンカでは増加、砂・クリンカ混合ではわずかに減少した。

リン酸態リン($\text{PO}_4 - \text{P}$)は人工海水が0.033 mg/l で、各系の値はDTP のおよそ10%程度の濃度で、同様な変動を示した。

(4) 底質分析結果

実験開始時と実験終了時の底質の全窒素含有量(TN)と全有機炭素含有量(TOC)分析結果を図-6 に示す。

TN に関しては実験開始時は砂が0.24 mg/g でありクリンカはその1/4程度の0.05 mg/g であった。いずれの系も実験終了時には餌投与の影響により増加を示しており、砂が0.26 mg/g、クリンカが0.07 mg/g、砂・クリンカ混合が0.17 mg/g となった。

TOC に関しては実験開始時において両資材ともおよそ1.4 mg/g であった。実験終了時ではクリンカ系が大きく減少したが、現地砂の含有有機物は難分解性の有機物が主体であるのに対し、クリンカは易分解性の炭素系有機物を含み浄化微生物等の栄養源として分解利用されたことが原因と考えられる。クリンカを混合することにより底質中で不足する炭素分を供給し、脱窒等の生物浄

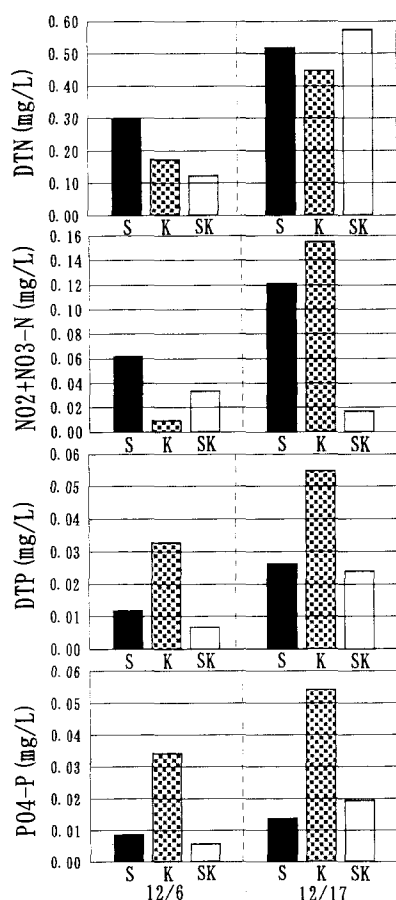


図-5 間隙水の栄養塩濃度の変化

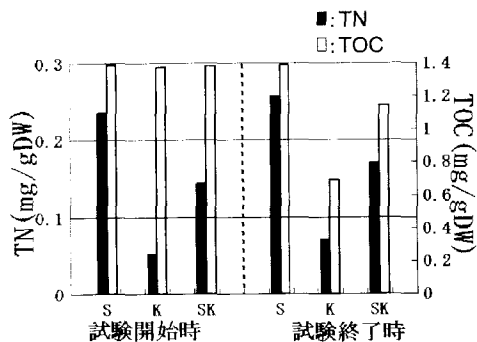


図-6 底質の窒素・有機炭素含有量

化作用の促進効果が期待できる。

4. 干潟間隙水改善工法の基礎検討

アサリの生息には、直接的に接触する底質間隙水の水质が重要な影響要因と指摘されている（井芹ら, 2003）。

間隙水の改善には底質中の汚濁物質の含有量を低減させるとともに間隙水と直上水との交換率を高めることが必要である。本研究により、透水性を向上させるクリンカは砂と同等もしくはより良好な貝類生息場の創生資材として利用できる可能性が確認された。不活性無機粒状、多孔質、高透水性などの特長を有するクリンカ底質改善材を利用することにより、泥質化、汚濁化が進行しアサリ等の貝類、底生生物の生息に不適となった環境を改善することが可能と考えられる。

今後は、現場生育試験など実用化に向けての適用試験を実施する計画である。覆砂が最も簡易な施工法であるが、それに加えより積極的に浄化能力を高めた施工方法を検討する予定である。生物の生息に不適となった現地の砂、泥とクリンカ底泥改善材を混合し、適当な有機物量に調整し、底質中の海水の浸透を促進するシステムである。適用試験案の数例を図-7に示す。いずれも潮汐を利用し無動力で底質間隙水の海水交換作用を促進する。対象干潟においてクリンカを汚濁砂に混合し、適当な有機物含量、透水性を持つ生育場に改善する。あわせて粒径の大きいクリンカ構造体を海水浸透性を高める目的で敷設する。構造体の一部は干潟部に回帰し脱窒作用の炭素栄養源ともなる生分解性プラスチックを利用する。また、貯水槽などコンクリート部も藻礁効果が確認できているクリンカを混合したプレートを設置し、生態的改善を促進する。

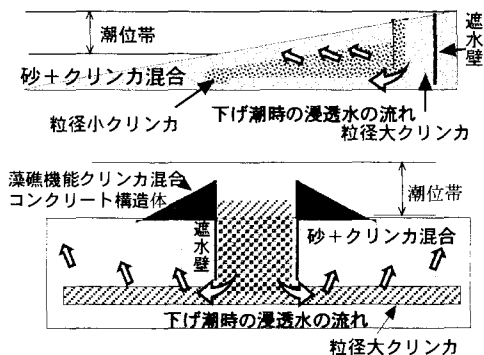


図-7 干潟環境修復施工案

5. おわりに

貝類飼育実験の結果、生息基材として砂と比較してクリンカを混合した系において間隙水、直上水ともに DO や ORP の改善が認められ、クリンカ混合による還元化

の抑制効果が確認された。また、間隙水及び直上水の栄養塩成分に関して窒素成分の低濃度化が示されており、干潟域の富栄養化防止効果も示唆された。本実験の給餌による窒素負荷量は2.33 g に達するが負荷後の水中の窒素総量は砂で0.040 g, クリンカで0.029 g, 砂クリンカ混合系で0.021 g 程度であり、そのほとんどが生物系、底質系（間隙水含む）の中に存在する。そのなかで砂・クリンカ混合が水中の存在量が砂の半分程度となっており、水中の窒素成分量の低減効果が大きい。底質に関しては、全般的に給餌による栄養塩増加が認められたが、クリンカについて炭素が1.37 mg/g から0.69 mg/g へと減少を示したのが特徴的であった。窒素成分の減少は底質の炭素含有量が減少したことをあわせて考えると、脱窒等の生物学的浄化作用が生じていることが推察される。以上より、クリンカ多孔質粒は貝類の生息環境としての干潟域の修復資材として有効であるものと考えられる。

謝辞：底質の分析についてご教授いただいた熊本県立大学の堤裕昭教授ならびに大学院生の佃政則氏、また、本論文作成にあたり、ご助力いただいた堀田剛広氏、金尾充浩氏に対し謝意を表します。

参考文献

- 泉田典彦・中泉昌光・三上信雄・米山正樹・若松純子・菊池有 (2004)：水産系副産物（貝殻）の覆砂代替材としての有効活用に関する実験的研究，海洋開発論文集，第20巻，pp. 1043-1048.
- 井芹寧・中茂義昌・井上徹教 (2003)：河口干潟におけるアサリ生息底泥域の水質環境について，海岸工学論文集，第50巻，pp. 1031-1035.
- 内藤了二 (2001)：港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドラインについて，底質浄化技術セミナーテキスト，27巻，pp. 28-52.
- 柿野純 (1992)：アサリ漁業をとりまく近年の動向，水産工学，29巻，pp. 31-39.
- 国分秀樹・奥村宏征・上野成三・高山百合子・湯浅城之 (2004)：英虞湾における浚渫ヘドロを用いた干潟造成実験から得られた干潟底質の最適条件，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1191-1195.
- 滝川清・田中健路・外村隆臣 (2003)：有明海干潟環境の改善・回復に向けた対策工とその効果，海岸工学論文集，第50巻，pp. 1226-1230.
- 堤裕昭・竹口知江・丸山渉・中原康智 (2000)：アサリの生産量が激減した後の緑川河口干潟に生息する底生生物群集の季節変化，日本ベントス学会誌，55，1-8.
- 沼野祐二・中泉昌光・瀬戸口喜祥・吉村直孝 (2004)：泥質干潟における干潟走行機による耕耘（こうん）の栄養塩類溶出効果に関する実験的研究，海洋開発論文集，第20巻，pp. 383-388.
- 沼野祐二・中泉昌光・瀬戸口喜祥 (2004)：有明海河川内漁港における浚渫土（軟弱土砂）の漁場造成等への有効利用に関する研究，海洋開発論文集，第20巻，pp. 1157-1162.
- Suzuki T (2004)：三河湾における貧酸素水塊発達を抑制するための大規模干潟および浅海の復旧，水産総合研究センター研究報告，別冊1，pp. 111-121.
- Tsutsumi H・Tsukuda M・Yoshioka M. (2003)：有明海熊本県沿岸の干潟堆積物における重金属汚染とアサリ *Ruditapes philippinarum* の出現に及ぼす影響，Benthos Res，58巻，2号，pp. 121-130.