

干潟における物質循環に及ぼす 生物種間相互作用

BIOLOGICAL INTERACTION EXERTED ON MATERIAL CYCLE IN TIDAL FLAT

石井裕一¹・村上和仁²・瀧 和夫³・立本英機⁴

Yuichi ISHII, Kazuhito MURAKAMI, Kazuo TAKI, Hideki TATSUMOTO

¹学生会員 工修 千葉大学大学院自然科学研究科多様性科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

²正会員 理博 千葉工業大学講師 工学部土木工学科 (〒275-8588 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

³正会員 工博 千葉工業大学教授 工学部土木工学科 (〒275-8588 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

⁴非会員 工博 千葉大学教授 工学部物質工学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

Material cycle in tidal flat was investigated from the viewpoint of biological interaction with experimental microcosm system. The experiment, in this paper, was executed using macrophytes and macrobenthos living in tidal flat, which is located in Tokyo Inner Bay.

As the result, it was clarified that the living things with different life style exerted the influence on the concentration of dissolved nutrient salts in water under the individual biological treatment process in each kinds.

Moreover, for the reason of coexistence due to living things with different life style, the dissolved nutrient salts in water layer was suppressed into 1/4 times as much as the concentration produced by a single kind.

It was considered, in conclusion that the utilization of biological interaction depending on various living things is important for purification of water quality in tidal flat.

Key Words: biological interaction, microcosm system, macrophytes, macrobenthos,

1. 序 論

干潟や浅場は海洋環境の中で最も高い生物生産力を有する場である¹⁾。そこに生息している生物群集では、植物プランクトン、藻類を起点として、ベントス、魚類そして鳥類へ至る食物網が成立している。これらの生物群集が、流れ、水質、底質などの物理化学環境と相互に作用し合いながら独自の生態系を作り出している。

干潟は、レクリエーションや潮干狩りなどの親水機能や水産資源の場としての機能など、さまざまな機能を有しており、特に富栄養化の低減すなわち水質浄化機能が近年注目を集め、多くの研究がなされている^{2, 3)}。

干潟に生息する生物は多種多様である上に、生息

する生物同士が相互作用を及ぼし合いながら水質浄化に寄与していると考えられる。しかしながらこれまで、単一種生物の水質浄化機能に関する研究^{4, 5)}はなされているが、生物種間の相互作用に関する報告はほとんどないのが現状である。

本研究では、干潟実験モデルを用い、東京湾奥部の干潟における生態系を構成する主要生物であるアサオサ (*Ulva pertusa*)、アサリ (*Ruditapes philippinarum*)、ゴカイ (*Neanthes japonica*) の栄養段階および生活様式の異なる3種類の生物に着目し、それぞれの単一種系およびそれらを組み合わせた多種共存系における栄養塩類除去量を比較し、水質浄化におよぼす生物種間相互作用の影響について解析・検討を行った。

2.干潟モデル培養実験

本研究では、透明矩形アクリル容器を干潟実験モデルとして用い、干潟生態系を構成する主要生物3種を培養し、栄養塩濃度を経日的に測定することにより、それらの生物による生物種間相互作用の検討を行った。

従来より干潟実験モデルによる実験は数多く報告されている^{1, 6)}が、本干潟実験モデルは、生物の排泄および底泥からの溶出由来の栄養塩が水質に与える影響を検討するため、冠水時の干潟を想定して作成しており、潮の干満はつけておらず、人工海水および栄養塩類の流入出も与えていない。

(1) 実験装置

本研究では、透明矩形アクリル容器（長さ36.9cm、幅21.6cm、高さ24.9cm、容量12）を干潟実験モデルとして用いた。

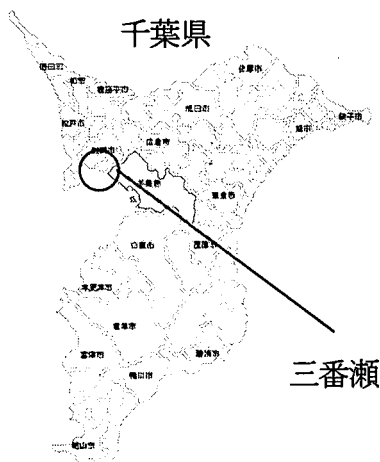


図1 三番瀬位置図

干潟実験モデルに供試する底泥は、自然泥として、図1に示した東京湾奥部に位置している三番瀬（千葉県船橋市）で採取し、肉眼で確認できる生物のみを取り除いた底泥を用いた。採掘時には表層から5cm程度までの深度の砂泥を採取するよう留意した。また、人工泥として、粒径0.71~1.00μmのガラスビーズを用いた。海水はHaleの人工海水（無機塩海水）を用いた。各系への投入量は泥5,000cm³（表面積760cm²）、人工海水4.0とした。また、各実験系において、供試生物を死滅させないように溶存酸素を供給するため、一定量（2/min）の曝気を行うこととした。

(2) 実験条件

各実験系に投入する生物は、東京湾奥部における干潟生態系を構成する主要生物^{7, 8)}とし、近年、異常増殖が確認されている^{9, 10)}生産者である海産性大型緑藻類の*Ulva pertusa*、ろ過摂食者である軟体動物の*Ruditapes philippinarum*、堆積物摂食者である環形動物の*Neanthes japonica*の3種とした。各生物の投入量は、底泥を採取した干潟である三番瀬における各生物の現存量⁷⁾を参考とし、*Ulva pertusa* 60cm²、*Ruditapes philippinarum* 8個体、*Neanthes japonica* 3個体となるよう、それぞれ投入し、表1に示した16系の干潟実験モデルによる培養実験を行った。

実験期間は7日間とし、各実験系においてNH₄-NおよびPO₄-Pの経日的な測定、ならびに栄養塩類の濃度および総存在量に基づく各種生物による栄養塩類除去量の比較から、生物種間の栄養塩類除去相互作用の検討を行った。ここで、NH₄-NおよびPO₄-Pの測定は、ADVANTECH 5Cのろ紙にて吸引ろ過したろ液を用い、所定の前処理を施した後、分光光度計（HACH DR4000型、

表1 実験条件

Run No.	底質条件	投入生物
1	自然泥	-
2	自然泥	<i>Ulva pertusa</i>
3	自然泥	<i>Ruditapes philippinarum</i>
4	自然泥	<i>Neanthes japonica</i>
5	自然泥	<i>Ulva pertusa</i> + <i>Ruditapes philippinarum</i>
6	自然泥	<i>Ruditapes philippinarum</i> + <i>Neanthes japonica</i>
7	自然泥	<i>Neanthes japonica</i> + <i>Ulva pertusa</i>
8	自然泥	<i>Ulva pertusa</i> + <i>Ruditapes philippinarum</i> + <i>Neanthes japonica</i>
9	人工泥	-
10	人工泥	<i>Ulva pertusa</i>
11	人工泥	<i>Ruditapes philippinarum</i>
12	人工泥	<i>Neanthes japonica</i>
13	人工泥	<i>Ulva pertusa</i> + <i>Ruditapes philippinarum</i>
14	人工泥	<i>Ruditapes philippinarum</i> + <i>Neanthes japonica</i>
15	人工泥	<i>Neanthes japonica</i> + <i>Ulva pertusa</i>
16	人工泥	<i>Ulva pertusa</i> + <i>Ruditapes philippinarum</i> + <i>Neanthes japonica</i>

保証精度：95%) にて行った。

ここで、本実験における栄養塩類除去とは、7日間の実験期間内において、人工海中からの除去されることを意味している。

(3) 実験結果

NH₄-N および PO₄-P 濃度の経日測定結果を表2に示した。また、図 2a), b) および図 3a), b) は、表2より作図した NH₄-N および PO₄-P 濃度の経日濃度変化を示している。

表2 干潟モデル実験における栄養塩濃度測定結果

経過日数	NH ₄ -N					day	PO ₄ -P				
	0	1	3	5	7		0	1	3	5	7
Run1	0.198	0.221	0.241	0.360	0.320	mg/l	0.007	0.007	0.048	0.243	0.345
Run2	0.178	0.236	0.234	0.200	0.141		0.016	0.014	0.096	0.171	0.498
Run3	0.197	0.253	0.248	1.535	1.600		0.015	0.013	0.185	0.330	0.597
Run4	0.233	0.301	1.192	1.340	1.010		0.044	0.140	0.330	0.297	0.231
Run5	0.856	0.891	2.410	2.540	2.830		0.074	0.730	0.511	0.403	0.218
Run6	0.617	1.782	2.150	3.336	3.216		0.103	0.161	0.491	0.863	0.563
Run7	0.631	0.376	0.344	0.417	0.136		0.265	0.085	0.431	0.433	0.299
Run8	0.186	0.252	0.386	0.576	0.760		0.069	0.105	0.297	0.480	0.315
Run9	0.035	0.037	0.041	0.047	0.046		0.001	0.005	0.012	0.012	0.014
Run10	0.004	0.015	0.032	0.040	0.018		0.015	0.049	0.068	0.095	0.062
Run11	0.049	0.483	0.923	1.701	2.794		0.136	0.200	0.247	0.304	0.419
Run12	0.062	0.112	0.039	0.115	0.036		0.011	0.026	0.040	0.043	0.041
Run13	0.090	0.033	0.037	0.048	0.052		0.108	0.032	0.030	0.025	0.041
Run14	0.102	1.196	1.874	2.991	3.748		0.013	0.131	0.194	0.456	0.542
Run15	0.092	0.013	0.011	0.010	0.025		0.017	0.014	0.046	0.070	0.045
Run16	0.051	0.106	0.027	0.058	0.140		0.027	0.023	0.041	0.113	0.085

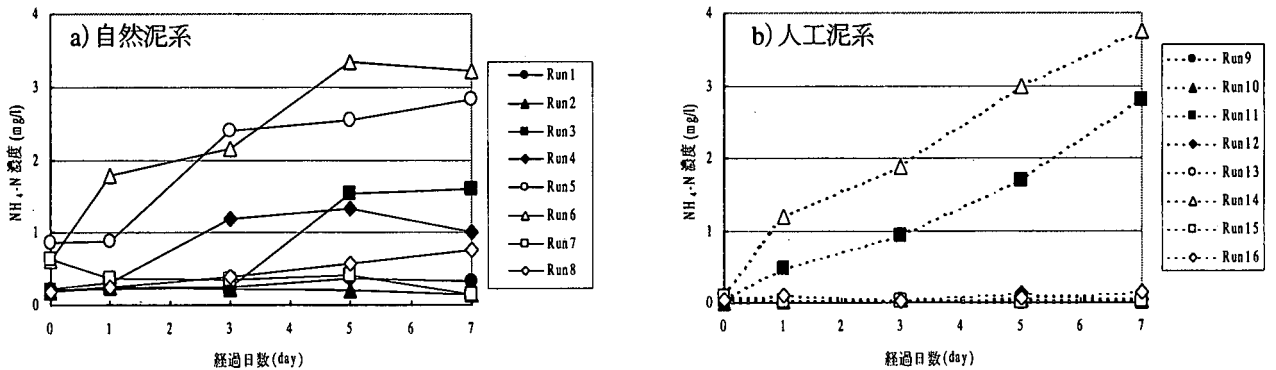


図2 干潟モデル実験におけるNH₄-N濃度経日変化

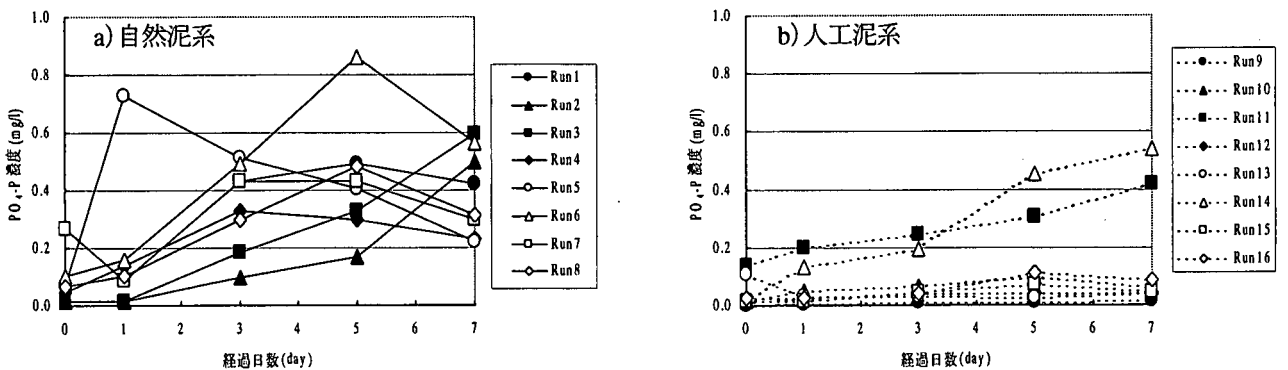


図3 干潟モデル実験におけるPO₄-P濃度経日変化

NH₄-N に関しては、自然泥系において、生物未投入の Run1 において 7 日間で 0.12mg/l 程度の増加がみられたものの、ほぼ横ばい状態を呈していた。また、単一種系では、*Ulva pertusa* を投入した Run2 においては 0.04mg/l の減少と、ほぼ横ばい状態を示した。しかしながら、*Ruditapes philippinarum* を投入した Run3 および *Neanthes japonica* を投入した Run4 においては、それぞれ 1.4mg/l、0.78mg/l の NH₄-N 濃度の増加が確認された。さらに、多種共存系では、*Ruditapes philippinarum* と他の生物との 2 種共存系 (Run5, Run6) において、それぞれ 1.97mg/l、2.60mg/l の増加が確認された、また、3 種共存系 (Run8) においては、その濃度増加は 0.57mg/l と 2 種共存系に対して比較的小さいものであった。

人工泥系においては、単一種系では *Ruditapes philippinarum* を投入した Run11 で 2.75mg/l の増加が確認されて、また、多種共存系では、*Ruditapes philippinarum* と *Neanthes japonica* を投入した 2 種共存系 (Run14) において、3.65mg/l の増加が確認されたが、それ以外の系では一様に、小さな変動であった。

一方、PO₄-P に関しては、自然泥系において、底泥からの経時的な溶出が認められた。その濃度増加は NH₄-N に対して比較的大きく、0.34mg/l であった。更に、いずれの系においても、7 日目の測定値は初期濃度よりも増加しており、単一種系では *Ulva pertusa* を投入した Run2 および *Ruditapes philippinarum* を投入した Run3 が、それぞれ 0.48mg/l、0.58mg/l の増加が確認された。

また、多種共存系では、その時期は異なるものの、全ての系において、一旦増加し、その後減少する傾向が確認された。

また、人工泥系においては、NH₄-N 濃度変化と同様、単一種系では *Ruditapes philippinarum* を投入した Run11 で、多種共存系では、*Ruditapes philippinarum* と *Neanthes japonica* を投入した Run14 で増加する傾向が確認された。

3. 生物種間相互作用

表 3 は、自然泥系における海水中の 7 日間の栄養塩類総存在量を表したものである。ここで、栄養塩類総存在量とは、図 2a), b) および図 3a), b) のグラフ上の面積を算出した値を、さらに Run1 の値で除し、Run1 を 100 とした場合の各系における 7 日間の栄養塩類の存在量を示したものである。また、Run1 との差を吸収除去量とし、海水中より除去していれば+ (プラス)、逆に海水中に排出していれば- (マイナス) である。これより、*Ulva pertusa*

表 3 各系における 7 日間栄養塩類海水中総存在量の比較

Run No.	NH ₄ -N 総存在量 (%)	PO ₄ -P 総存在量 (%)
1	100	100
2	74	113
3	289	176
4	340	183
5	742	338
6	879	379
7	130	243
8	162	219
9	15	7
10	10	50
11	450	201
12	28	27
13	16	27
14	785	217
15	7	33
16	25	47

を投入した Run2 においては、NH₄-N については単一種の生物を用いた系の中で、最も高い吸収能を示し、その NH₄-N 吸収除去量は 26% であった。しかし、PO₄-P については、除去は認められずに逆に増加しており、その PO₄-P 吸収除去量は -13% であった。また、*Ruditapes philippinarum* を投入した Run3 の 7 日間 NH₄-N 総存在量は 289% であり、吸収除去量は -189% となった。これは *Ruditapes philippinarum* が底泥中から巻き上がった懸濁物質をろ過摂食し、屎尿を放出していることによるものと考えられる。PO₄-P については、除去は認められずに逆に増加しており、その PO₄-P 吸収除去量は -76% 程度であった。さらに、*Neanthes japonica* を投入した Run4 では、NH₄-N、PO₄-P 共に、*Ruditapes philippinarum* を投入した Run3 よりも大きな値を示しており、NH₄-N 吸収除去量および PO₄-P 吸収除去量はそれぞれ -240%、-82% であった。

Ruditapes philippinarum と *Neanthes japonica* のそれぞれ単体の系 (Run3 と Run4) では、NH₄-N が 289% と 340% に増加している。両者を併せた系 (Run6) では 879% となり、単体の系を単純に和した値 (289+340=639) よりも高くなるが、そこに *Ulva pertusa* を加えると (Run8)、*Ulva pertusa* による NH₄-N 除去量が明瞭に高くなるのがわかった (879-162=727 の減少)

また、PO₄-P については、Run3 と Run4 では、それぞれ 176% と 183% に増加している。Run6 では 379% となり、単体の系を単純に和した値 (176+183=359) よりも高くなるが、*Ulva pertusa* を加えた Run8 では、(379-219=160) となり、PO₄-P を除去

していることが明らかとなった。

4. 干潟実験モデルにおける栄養塩類循環

本実験における栄養塩類フラックスを図4に示す。ここで、図中の矢印はフラックスの方向、数値はフラックスの値を表している。これらの数値は、7日間栄養塩類総存在量より、単位時間、単位個体(面積)当たりの値をもとめ、人工泥を用いた系をコントロール系とし算出した。

Ruditapes philippinarum については $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ のいずれも水中および泥中に排出されており、その生活様式から水中の懸濁物質はろ過摂食され、排泄物として溶存態の栄養塩類を排出しているものと考えられる。

一方、*Neanthes japonica* は $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ のいずれについても泥中から粒子として摂取し、溶存態として水中に排出している。これは *Neanthes japonica* が堆積物摂食者であり、底泥粒子に吸着している栄養塩類を摂取して水中に排泄しているものと考えられる。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ のいずれについても *Ruditapes philippinarum* よりも *Neanthes japonica* の方が約3~4倍の溶存態栄養塩類を多量に排出していることが判る。また、*Ulva pertusa* については水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収と $\text{PO}_4\text{-P}$ の見掛けの排出という結果を得た。この $\text{PO}_4\text{-P}$ の見掛けの排出は、藻体表面に付着し、水中に溶け出した栄養塩類量が、 $\text{PO}_4\text{-P}$ に関しては *Ulva pertusa* の吸収能力を上回ったためと考えられる。

また、底泥からの栄養塩類の溶出は、濃度平衡による溶出に加え、底生生物によるバイオターベーションに伴う底泥攪乱の影響を強く受けているものと考えられる。

生活様式の異なる生物種(生産者、懸濁物食者、堆積物食者)が共存することにより、生物間相互

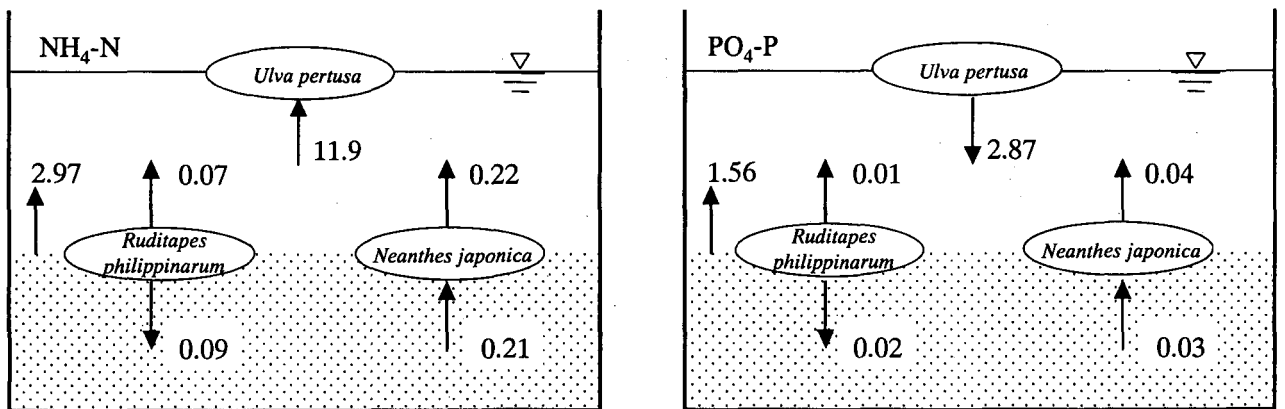
作用が認められるようになり、その効果は単一種における溶存態栄養塩類濃度の約4倍低く抑えられることが示された。

以上のことより、干潟の浄化を促進・維持する上で、多種多様な生物種間相互作用を活用することが重要であることが明らかとなった。

5. 結論

干潟における主要生物の3種類の生物に着目し、単一種系およびそれらを組み合わせた共存系における水質浄化能を干潟マイクロコズムによって比較し、水質浄化能における生物種相互作用について検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 単一生物での栄養塩類循環に及ぼす影響は、*Ulva pertusa* は $\text{NH}_4\text{-N}$ 除去・ $\text{PO}_4\text{-P}$ 除去型、*Ruditapes philippinarum* は $\text{NH}_4\text{-N}$ 排出・ $\text{PO}_4\text{-P}$ 排出型、*Neanthes japonica* は $\text{NH}_4\text{-N}$ 排出・ $\text{PO}_4\text{-P}$ 除去型であることがわかった。
- 2) 底泥からの栄養塩類の溶出は、濃度平衡による溶出に加え、底生生物によるバイオターベーションに伴う底泥攪乱の影響を強く受けているものと考えられる。
- 3) 本マイクロコズム実験において、生活様式の異なる生物種がそれぞれの形態の下で水中の溶存態栄養塩類濃度に影響を及ぼしていることが明らかとなった。
- 4) 生活様式の異なる生物の共存によって、水中の溶存態栄養塩類濃度は単一種のみの場合の1/4に抑えられることが示された。
- 5) 多種多様な生物間相互作用を活用することが干潟の浄化を促進・維持する上で、重要であることが明らかとなった。



単位: *Ruditapes philippinarum*, *Neanthes japonica* (mg/l/day/個) *Ulva pertusa*, 底泥からの溶出 (mg/l/day/m²)

図4 干潟モデル実験における栄養塩類フラックス模式図

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、千葉工業大学 矢内栄二助教授、石井俊夫助教授に貴重な御助言を賜った。ここに記し、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 桑江朝比呂, 細川恭史, 木部英治, 中村由行: メソコスム実験による人工干潟の水質浄化機能の評価, 海岸工学論文集, 47 巻, pp.1095-1100, 2000
- 2) 栗原 康編: 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー, 東海大学出版会, 337pp., 1988
- 3) 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, 第 17 巻, 第 3 号, pp.158-166, 1994
- 4) 磯野良介: 東京湾盤洲干潟のアサリによる窒素摂取量の推定とその季節変動に係わる要因, 水環境学会誌, 第 21 巻, 第 11 号, pp.751-756, 1998
- 5) 西村 修, 佐々木久雄, 徐 開欽, 阿部早智子, 須藤隆一: 沿岸域底泥上に形成された藻類生物膜の水質浄化機能, 日本水処理生物学会誌, 第 32 巻, 第 2 号, pp.79-92, 1996
- 6) 鄭 正朝, 西嶋 涉, 馬場栄一, 岡田光正: 砂浜における溶存態及び懸濁態物質の土壌浸透に及ぼす漂着油の影響, 土木学会論文集, 第 678 巻, 第 7 部門, 第 19 号, pp.105-110, 2001
- 7) 風呂田利夫, 山西良平, 福田 宏, 森野 浩: 東京湾奥部三番瀬北西域におけるマクロベントス相と分布特性, 千葉県生物誌, 第 46 巻, pp.1-7, 1996
- 8) 石井裕一, 村上和仁, 石井俊夫, 瀧 和夫, 立本英機: 埋め立てから取り残された自然干潟の生態系バランスと環境構成因子, 海洋開発論文集, 第 17 巻, pp.129-134, 2000
- 9) 石井裕一, 村上和仁, 矢内栄二, 石井俊夫, 瀧 和夫: 東京湾奥部に位置する潟湖化干潟におけるアオサの栄養塩類吸収特性, 海岸工学論文集, 48 巻, pp.1136-1140
- 10) 石井裕一, 村上和仁, 石井俊夫, 瀧 和夫, 立本英機: 埋立てから取り残された自然干潟の生態系バランスと環境構成因子, 海洋開発論文集 Vol.17, pp.129-134