

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

石井 裕一* ・村上 和仁** ・矢内 栄二**
石井 俊夫*** ・瀧 和夫**

1. 緒 言

干潟は陸域と水域との境界に位置しており、河川から淡水が、海洋から海水が供給され、さらに潮汐による干満があるため周期的かつ極めて急激に環境要因が変化している(清木・岡田, 1999)。しかし、その反面で、陸域と海域から多量の栄養塩が供給されるため、堆積物表面の底生珪藻や鞭毛藻などの藻類の生産速度は極めて高い。この豊富な生物生産量と、潮の干満による物理的要因により、干潮時にはシギ、チドリなどの鳥類が、また冠水時には魚類が甲殻類やゴカイを捕食するために集まり、特殊で貴重な生態系を構成している。干潟は生物生態系にとって重要であるだけでなく、人間にとっても身近な自然環境であり、水産資源の場でもあり同時に、レクリエーションや潮干狩りを楽しむ親水の場でもある(栗原, 1988)。

近年、干潟を含む湿地の重要性が指摘され、1971年には渡り鳥の保護を目的として、ラムサール(イラン)における会議で「特に水鳥の生息地として国際的に重要な湿地に関する条約」(ラムサール条約)が採択され、わが国でも11ヶ所が登録されている。東京湾奥部に位置する

谷津干潟(千葉県習志野市)は、1996年6月に登録湿地に指定された。しかしながら、鳥類保護条約であるラムサール条約の登録湿地となった谷津干潟では、数年来、写真-1に示した富栄養化海域の指標生物である大型緑藻類のアオサ(*Ulva* sp.)が異常繁茂しており、生態系への影響が危惧されている。

本研究では、富栄養化した干潟環境における生態系保全に寄与する基礎的知見を得ることを目的とし、閉鎖性が極めて高い谷津干潟におけるアオサの栄養塩類吸収特性ならびに干潟生態系における物質収支に及ぼす影響について実験的検討を加えた。

2. 干潟の概要

谷津干潟は、千葉県習志野市の西部に位置し、干潟面積約40.1ha、平均水深0.8mの比較的小さな干潟である。谷津干潟は1970年代初頭から開始された京葉湾岸地区第2次埋立事業から取り残され、その周囲を埋立てられたため、写真-2に示したように、あたかも潟湖干潟のような形状の干潟へと変化していった。

都市域に残された干潟として極めて貴重な存在となっている谷津干潟であるが、周辺が埋立てられ、東京湾と遮断されてから20年以上が経過している。現在では、谷津川(習志野市側)と高瀬川(船橋市側)の2本の水路により東京湾と連絡しており、干潟内の水の交換は、こ

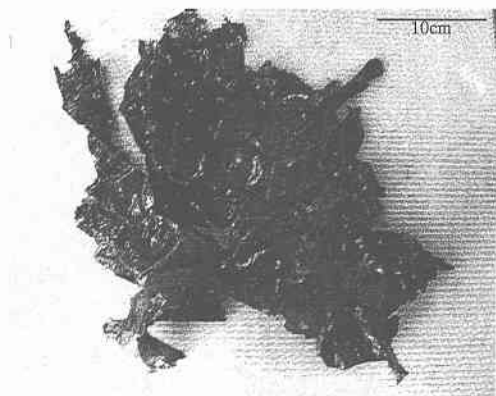


写真-1 アオサ (*Ulva* sp.)



写真-2 1998年の谷津干潟

* 学生会員 千葉工業大学大学院 土木工学専攻
** 正 会 員 千葉工業大学 工学部 土木工学科
*** 千葉工業大学自然系

の2河川を通じて行われている。また、干潟東側最奥部の谷津船溜からは習志野市の、西側からは船橋市の生活雑排水が流入している。

谷津干潟における主要環境構成因子の変遷について検討を行った結果、近年の公共下水道整備による谷津干潟への生活雑排水（淡水）の流入量の減少に伴う干潟内水の水質の海水化、干潟東部の底質の砂質化が進行していること、潮流に伴う滞筋周辺の底質が流出している可能性があることが報告されている（石井ら、2000）。

3. 谷津干潟の生態系に及ぼすアオサの影響

谷津干潟に生息する、生産者である植物プランクトン（*Cheatceros* sp., *Skeletonema costatum* など）および一次消費者である動物プランクトン（*Oithona davisae*, ネクトキータ幼生など）は、その種構成より大部分は東京湾由来であると考えられる（村上ら、2000）。二次消費者であるベントス類は、底質環境により干潟内でも棲息する種が異なり、砂質域ではアサリ（*Ruditapes philippinarum*）、砂泥質域アシナガゴカイ（*Neanthes succinea*）、泥質域ではゴカイ（*Neanthes japonica*）が優占していた（風呂田・鈴木、1999；環境庁ほか、1996）。三次消費者である魚類はマハゼ（*Acanthogobius flavimanus*）・ボラ（*Mugil* sp.）などが確認されている（環境庁ほか、1996）。生物生産性が高く、この豊富な生物生産資源を求めて、シギ類（*Limicolae*）・チドリ類（*Charadrii*）など多くの鳥類が飛来しており（石川、1993）、高次消費者すなわち谷津干潟における生態系ピラミッドの頂点を占めている。これらの生物が谷津干潟独自の生態系を形成しており、都市域に形成された自然生態系として価値の高いものであるが、しかしながら、ここ数年来、富栄養化海域の指標生物であるアオサ（*Ulva* sp.）が谷津干潟内で異常繁茂するようになってきており、貴重な生態系への影響が懸念されている。

アオサは、東京湾など、富栄養化が進行した湾や入り江で、ごく普通に繁殖する海産性大型緑藻類である。このアオサが、極端に閉鎖性の高い谷津干潟に流入し繁茂

した結果、東京湾に流出せずに干潟内に堆積し、底泥の嫌気化によるベントス類の斃死、鳥類の休息場の減少など、様々な問題を引き起こしている。

谷津干潟内のアオサは、写真-3に示したとおり、干潟東部を中心にして、1984年は観察されず、1995年に6.8haの範囲に発生していたものが、1999年には13ha、2000年夏季には干潟面積の半分を占める20ha程度の範囲で確認されており、その発生面積は、年々増加の一途をたどっている（環境庁ほか、1996；石井ら、2001）。

夏季にアオサが繁茂した範囲の底質（ORP：-200~-250 mV）は、アオサが観察されなかった範囲の底質（ORP：-50~-100 mV）に比べると、明らかに黒色の還元状態を呈しており、干潟生態系における物質循環・生物生産を支える高次捕食者であるマクロベントスは皆無に等しい状態であった。これは、アオサの腐敗に伴って底質が嫌気化したためと考えられる。1984年と1995年を比較すると、マクロベントスの総種類数は13種から39種へと増加し多様化しているが（環境庁ほか1996）、その総個体数は現地調査において無生物地点が観測されるなど、明らかに減少しており、少種多量から多種少量への変化という生物生産の脆弱化を示唆している（石井ら、2000；村上ら、2000）。また、アオサの異常繁茂の原因を培養実験より検討した結果、アオサの成長に対する最適 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比が4.25であり、谷津干潟へ流入する2つの河川における $\text{NH}_4\text{-N}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比と一致していることがアオサ繁茂の原因の1つであることが推察されている（石井ら、2001）。アオサは泥質底層よりも砂泥質あるいは砂質底層を好む海産性大型緑藻である（能登谷、1999）。そのため、海水化、砂質化が進行し、かつ閉鎖性が高い谷津干潟では、今後、更なるアオサの繁茂が予想される。

なお、谷津干潟はラムサール条約登録湿地であるため、シギ・チドリといった渡り鳥の休息地および採餌場として保全していく必要があり、このままアオサが異常繁茂すると、餌であるベントス類が死滅し、採餌場としての価値が失われ、また、アオサの繁茂により羽を休める土地を奪われることにもなり、谷津干潟そのものの存在意義が失われることとなる。アオサの繁茂は生態系バランスの崩壊を誘引し、都市域における貴重なオアシスとしての干潟の親水機能が損失する可能性があるため、アオサの栄養塩類吸収特性ならびに干潟生態系に及ぼす影響を解明することは極めて重要な課題である。

4. アオサの栄養塩類吸収特性

本研究では、谷津干潟で異常繁茂しているアオサの栄養塩類吸収特性を解明することを目的として、干潟実験モデルを用いて培養実験を行った。



写真-3 アオサ発生面積の推移

表一 Hale の人工海水組成表

単位: g/l	
NaCl	23.990
KCL	0.720
CaCl ₂	1.135
MgCl	5.102
SrCl	0.011
Na ₂ SO ₄	4.012
H ₃ BO ₃	0.027
NaHCO ₃	0.197
NaBr	0.085

表二 実験条件

Run No.	アオサ投入 (1,520 cm ²)	栄養塩濃度 (倍)	NH ₄ -N 濃度 (mg/L)	PO ₄ -P 濃度 (mg/L)
1	○	0	0.0	0.0
2	○	1	1.2	0.1
3	○	5	6.0	0.5
4	○	10	12.0	1.0
5	○	50	60.0	5.0
6	—	0	0.0	0.0
7	—	1	1.2	0.1
8	—	5	6.0	0.5
9	—	10	12.0	1.0
10	—	50	60.0	5.0

4.1 干潟モデル実験の概要

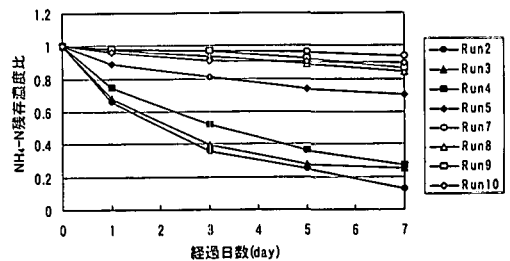
干潟実験モデル装置として、19 L 容の透明プラスチック容器（幅 38 cm×奥行 20 cm×高さ 25 cm）を用いた。本装置内に表一の組成に基づく Hale の人工海水を 10 L 注水し、自然光下、水温 20°C、一定量（2 L/min）の曝気を行う条件で培養した。また、供試するアオサは、東京湾に生息する種であり、かつ谷津干潟で繁茂しているアナアオサ（*Ulva pertusa*）とし、超純水で藻体表面を洗浄して夾雑物を除去した後、1,520 cm²（7.5 g-ww）となるように投入した。

栄養塩類濃度は、無機態窒素（NH₄Cl）、無機態リン（K₂HPO₄）を、東京湾奥部における水質の平均値（T-N：1.2 mg/L、T-P：0.1 mg/L）を基準として、表二に示したように、それぞれ、0、1、5、10、50 倍の濃度となるように調整した系を作成した。培養期間は 7 日間、分析項目は NH₄-N および PO₄-P とし、培養開始後 0、1、3、5、7 日目に測定を行った。なお、NH₄-N および PO₄-P の分析においては、水質分析装置（セントラル科学 DR 2010）を用いた。

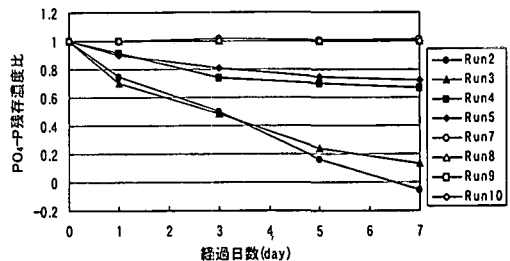
4.2 アオサの NH₄-N および PO₄-P の吸収特性

各系における NH₄-N 濃度について、それぞれの初期値で経日変化における値を除し、無次元化したものを図一に示した。これより、Run 2、Run 3、Run 4 では、それぞれ 58.2%、51.8%、44.7%と高い除去率を示しているが、Run 5 における除去率は 12.6%と低い値となった。これは *Ulva pertusa* は、NH₄-N 濃度が東京湾奥部における T-N 濃度の年平均値の 10 倍から 50 倍の範囲、すなわち 12~60 mg/L の範囲で吸収阻害が生じることを意味している。

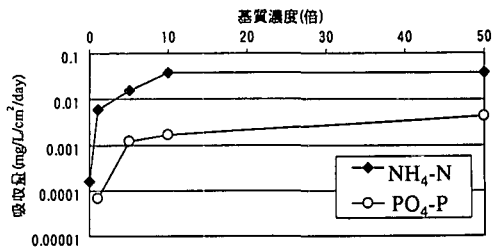
また、図二は、各系における PO₄-P 濃度について、NH₄-N と同様に、それぞれの初期値で経日変化における値を除し、無次元化したものである。Run 2、Run 3 では、それぞれ 59.0%、55.5%と高い除去率を、Run 4、Run 5 では、それぞれ 22.9%、18.9%と低い除去率を示した。これは、*Ulva pertusa* は、PO₄-P 濃度が東京湾奥



図一 NH₄-N 残存濃度比の経日変化



図二 PO₄-P 残存濃度比の経日変化



図三 アオサの栄養塩吸収特性

部における T-P 濃度の年平均値の 5 倍から 10 倍の範囲、すなわち 0.5~1.0 mg/L の範囲で吸収阻害が生じ、PO₄-P 吸収率が低下するためと考えられる。

Ulva pertusa の栄養塩類吸収量と栄養塩類初期濃度の

関係について検討した結果、図-3 に示したような Michaelis-Menten 型の酵素反応に準じた関係式を得た。一般に、生物の基質吸収は Michaelis-Menten 型酵素反応と同型の Monod 式に従うことから (稲森ら, 1993), 本研究における *Ulva pertusa* の $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ に対する栄養塩類吸収特性は妥当なものであると考えられる。これより, *Ulva pertusa* の $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸収は東京湾奥部における T-N 濃度の年平均値の 10 倍, すなわち 12.0 mg/L で飽和状態になること, $\text{PO}_4\text{-P}$ 吸収は東京湾奥部における T-P 濃度の年平均値の 50 倍, すなわち 5.0 mg/L で飽和状態になることが明らかとなった。また, *Ulva pertusa* の $\text{NH}_4\text{-N}$ 最大吸収除去量 ($A_{\max}$) は 0.038 mg/L/day/cm², $\text{PO}_4\text{-P}$ 最大吸収除去量 ($A_{\max}$) は 0.0042 mg/L/day/cm² と見積もられた。

ここで、図-3 に示した Michaelis-Menten 型の反応式を Lineweaver-Burk のプロットにより変換し、谷津干潟における $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を代入すると、谷津干潟内に棲息するアオサの栄養塩類吸収量として、0.89 g $\text{NH}_4\text{-N}/\text{m}^2/\text{day}$, 0.117 g $\text{PO}_4\text{-P}/\text{m}^2/\text{day}$ を得る。これより、谷津干潟におけるアオサの発生面積である 6.8 ha (1995 年) を乗じることで、谷津干潟でのアオサによる栄養塩類吸収量は、 $\text{NH}_4\text{-N}$: 60.5 kg/day および $\text{PO}_4\text{-P}$: 7.89 kg/day と算出された。

5. 谷津干潟における栄養塩収支

谷津干潟における物質収支の概念図を図-4 に示した。この物質収支概念図を基にして、谷津干潟における栄養塩類収支に及ぼすアオサの影響について検討した。

干潟内への栄養塩類の流入量 L_{IN} 、動・植物プランクトンの流入量 N_{IN} およびそれぞれの流出量 L_{OUT} , N_{OUT} の算定は、桑江ら (1997), 児玉ら (2000) と同様の手法を用い、谷津干潟における水の出入りが、高瀬川・谷津川の 2 本の水路および干潟最奥部の谷津船溜の 3 ヶ所のみで行われているものと仮定し、式 (1) および式 (2) に示したように、各時刻、各地点での流量 $Q(t)$ および各物

質濃度 (個体数密度) $C(t)$ を流入および流出時間に亘り積分することにより求めることとした。

$$L_{\text{IN}}, N_{\text{IN}} = \int C(t) Q(t) dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$L_{\text{OUT}}, N_{\text{OUT}} = \int C(t) Q(t) dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

谷津干潟への溶存態栄養塩類の流入負荷量は、谷津干潟環境調査報告書 (環境庁ほか, 1996) および習志野市環境白書 (習志野市, 1999; 習志野市, 2000) 記載の流量・物質濃度データより、282 kg $\text{NH}_4\text{-N}/\text{day}$, 77.4 kg $\text{PO}_4\text{-P}/\text{day}$ とそれぞれ算出された。

いま、谷津干潟内のアオサおよび干潟内に流入してきた植物プランクトンがこれらの栄養塩を吸収するとすると、アオサによる溶存態栄養塩類吸収量は、それぞれ 60.5 kg $\text{NH}_4\text{-N}/\text{day}$, 7.89 kg $\text{PO}_4\text{-P}/\text{day}$ であると算出される。

また、溶存態栄養塩類吸収のもう 1 つの経路である植物プランクトンに関しては、その種構成より、大半が海産性藻類であると考えられる。いま、植物プランクトンが吸収した溶存態栄養塩類が全てそれらの細胞形成に使用されると仮定すると、植物プランクトンが海産性であることから、Redfield 比 C : N : P = 41 : 7.2 : 1 (質量比) を適用し、その吸収栄養塩量は 133 kg $\text{NH}_4\text{-N}/\text{day}$, 18.5 kg $\text{PO}_4\text{-P}/\text{day}$ と算出される。したがって、流入する栄養塩類の利用の比率は、アオサ:植物プランクトン=1:2 程度であり、アオサは、その繁茂面積が増大傾向にあることから、干潟生態系に多大な影響を及ぼしている可能性が示唆された。

次に一次消費者以降の栄養段階を占める動物による捕食について検討すると、まず、谷津干潟内に繁茂したアオサは、動物プランクトン、マクロベントス等高次消費者により捕食されることなく、そのほとんどが干潟内で堆積・腐敗していると考えられる。そのため、谷津干潟における食物連鎖網における生産者は植物プランクトンの

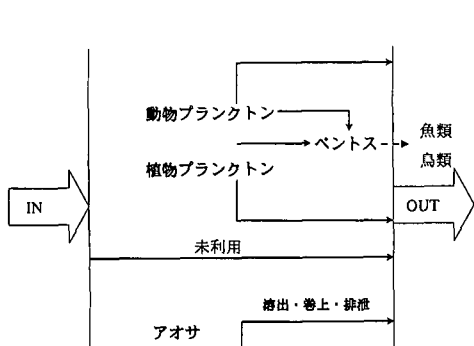


図-4 谷津干潟における物質収支概念図

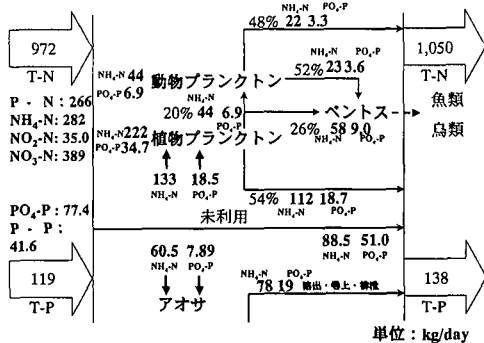


図-5 谷津干潟における窒素・リン収支

みと考えることができる。植物プランクトンの被食率は、中田ら (1994) が算出した盤洲干潟の窒素循環を参考にし、その 20%程度が動物プランクトンに、また 26%程度がマクロベントスにより捕食されるものと仮定した。さらに同様に、動物プランクトンの 52%程度がマクロベントスにより捕食されるものとした。以上の結果をまとめると、図-5 に示したようになる。図より、干潟内で藻類に吸収されずに残った残存溶存態栄養塩類量は、それぞれ $88.5 \text{ kgNH}_4\text{-N/day}$ 、 $51.03 \text{ kgPO}_4\text{-P/day}$ となり、これが潮汐作用により再び東京湾海域へ流出することが明らかとなった。これより、 $\text{NH}_4\text{-N}$ については流入負荷の 68.6%が干潟内生物により吸収・利用され、残りの 31.4%が再び東京湾に流出または底泥に吸着しているものと考えられた。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ については流入負荷の 34.1%が生物へ、残りの 65.9%が再び東京湾に流出または底泥に吸着しているものと考えられた。

また、T-N および T-P については、干潟からの流出量の方が若干多くなっていることが明らかとなった。これは、潮流やバイオターベーション等によって巻き上げられた底泥および溶存態栄養塩類を摂取して増殖した生物が潮汐作用により干潟から掃き出されることによるものと考えられた。

6. 結 言

谷津干潟で異常繁茂しているアオサの栄養塩類吸収特性を解明するため、干潟実験モデルを用いた実験を行い、閉鎖性の高い潟湖化干潟における物質収支への影響について検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 東京湾奥部の潟湖化干潟である谷津干潟に特徴的にみられるアオサ (*Ulva pertusa*) は、Michaelis-Menten 型酵素反応に準じた栄養塩吸収特性を有していることが明らかとなった。
- 2) 谷津干潟におけるアオサによる溶存態栄養塩類吸収量は、 $60.5 \text{ kgNH}_4\text{-N/day}$ および $7.89 \text{ kgPO}_4\text{-P/day}$ と算出された。
- 3) 干潟における東京湾等の海域由来および陸域由来の溶存態栄養塩のうち、 $88.5 \text{ kgNH}_4\text{-N/day}$ および $51.03 \text{ kgPO}_4\text{-P/day}$ が潮汐作用により谷津干潟から東京湾海域へ流出することが明らかとなった。
- 4) 干潟内に流入する栄養塩類の挙動は $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ で異なり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ については 68.6%が干潟内生物

により吸収・利用され、31.4%が再流出または底泥に吸着しているのに対し、 $\text{PO}_4\text{-P}$ については 34.1%が生物へ、65.9%が再流出または底泥に吸着しているものと考えられた。

- 5) 流入する栄養塩類の利用の比率は、アオサ：植物プランクトン=1：2 程度であり、干潟における生態系ピラミッドを考慮すると、アオサは干潟生態系に多大な影響を及ぼしている可能性が示唆された。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、谷津干潟自然観察センター長谷川昭仁所長に多大なる御協力を賜った。ここに記して、深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 石井裕一・村上和仁・瀧 和夫 (2000)：主要環境構成因子による干潟の分類と谷津干潟の変遷，第 14 回環境情報科学論文集，pp. 213-218
- 石井裕一・村上和仁・石井俊夫・瀧 和夫・立本英機 (2001)：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，第 26 回海洋開発シンポジウム，pp. 129-134.
- 石川 勉 (1993)：東京湾の渡り鳥，晶文社。
- 稲森悠平・村上和仁・角田美奈子・佐藤瑠佳・栗原 康 (1993)：遺伝子組換え細菌と親株細菌の相互作用に関する研究，日本水処理生物学会誌，第 29 巻，第 1 号，pp. 39-49.
- 環境庁・千葉県・習志野市 (1996)：谷津干潟環境調査報告書，p. 153.
- 栗原 康編 (1988)：河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー，大学出版会。
- 桑江朝比呂・細川恭史・江口菜穂子 (1997)：夏季の盤洲干潟における直上水の潮汐に伴う変化，日本海洋学会春季研究発表会講演概要集，p. 205.
- 児玉真史・松永信博・水田健太郎 (2000)：干潟底泥—海水間の栄養塩フラックスに関する現地観測，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 1126-1130.
- 清水 徹・岡田光正 (1999)：前浜干潟の水質浄化能，水環境学会誌，第 22 巻，第 7 号，pp. 7-12.
- 杉山恵一 (2000)：海辺ビोटープ入門，基礎編，信山社サイテック p. 146.
- 中田喜三郎・畑 恭子 (1994)：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.
- 習志野市 (1999)：平成 10 年版，習志野市環境白書。
- 習志野市 (2000)：平成 11 年版，習志野市環境白書。
- 能登谷正浩編 (1999)：アオサの利用と環境修復，成山堂書店。
- 風呂田利夫・鈴木嘉平 (1999)：東京湾奥部谷津干潟の 1986-87 年冬期における底質環境ならびにマクロベントスの生息状況と垂直分布，日本ベントス学会誌，第 54 巻，pp. 36-43.
- 村上和仁・石井裕一・瀧 和夫・長谷川昭仁 (2000)：東京湾奥部に位置する潟湖化干潟の遷移特性，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 1121-1125.