

高密度都市域における潟湖化干潟の生態工学的特性

石井 裕一*・村上 和仁**・瀧 和夫***・立本 英機****

谷津干潟内環境の変化を、現地観測および干潟モデル実験を通して水質及び生態工学的な検討を試みた。その結果、干潟の水質および底質変化は干潟内藻類の繁茂に大きな影響を与えることが明らかとなった。砂質化と流入海水の持つ $\text{NH}_4\text{-N}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比の藻類吸収最適 N/P 比との一致に起因しているものと考えられる。また、谷津干潟内では、従来からの食物連鎖網に加えて、アナアオサを生産者とする新たな生態系ピラミッド、すなわち「複数型生態系ピラミッド」が進行していると考えられる。さらにアナアオサの繁茂が溶存態栄養塩類循環に強く関わっていることを明らかにした。

1. 緒 言

東京湾岸域のような高密度都市域では、干潟が生物の多様性の保持や潮感帯・沿岸域の環境保全の面から重要であると考えられる(石井ら 2001a)。

谷津干潟(千葉県習志野市)は、東京湾奥部に位置する潟湖化干潟であるが、近年、周辺域の公共下水道の整備によって下水道水を起源とする淡水の流入量が減少し、干潟内の水質の海水化が進行している(環境庁など、1996; 村上ら、2000; 石井ら、2000)。一方、谷津干潟内では海産性大型緑藻類であるアナアオサ (*Ulve pertusa*) の異常繁茂が観察されるようになっており、その発生面積は、写真-1 に示したように、1995 年の 6.8 ha (谷津干潟面積の 15.2%)、1999 年には 13 ha (32.4%)、さらに 2000 年には干潟面積のほぼ半分を占める範囲にまでなっている(石井ら、2000; 石井ら、2001a; 石井ら、2001b)。

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バントス類の斃死、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。

谷津干潟は水鳥の保護のために締結されたラムサール

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る。しかし、このままアナアオサが異常繁茂すると、餌であるバントス類が死滅し、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。さらに、アナ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。

本研究では、このような干潟内環境の変化を解明するため、現地観測および干潟モデル実験を通して水質及び生態工学的な検討を試みた。

2. 干潟内藻類への水質および底質変化の影響

2.1 水質および底質の変遷

流域から干潟内への流入負荷量は図-1 に示すように、1983 年から 1995 年までの 12 年間に 16.8% 減少した。これは、流域の公共用下水道の整備に伴い、生活排水の流入量が減少したためであるが、この下水道整備は、単に流入負荷量の減少というだけでなく、淡水の供給量の減少という結果ももたらした。これを裏付けるように、干潟最奥部に位置する谷津船溜での塩素イオン濃度は、図-2 に示すとおり上昇しつづけ、塩分濃度の増大を示す結果を得た。これはすなわち、干潟内水の海水化を意味している。

次に底質に関しては、谷津干潟(面積 40.1 ha)における砂・泥質の割合は、表-1 に示す通り、泥質面積が 20 ha から 15 ha に減少する一方で、砂泥質面積が 10 ha から 18 ha に増加しており、底泥中の強熱減量 (Ignition Loss: 有機物量の指標) の減少から、干潟内底泥の砂質化が進行していることがわかる。また、干潟内底泥の泥の厚さは、1984 年には 25~200 cm であったが、1995 年には 0~50 cm と激減しており、砂質化に伴う、潮汐作用による干潟内底泥の流失を示唆している。

さらに、底泥中の生物相のゴカイ (*Neanthes japonica*)



写真-1 アオサ発生面積の推移

* 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
** 正 会 員 理博 千葉工業大学講師 工学部土木工学科
*** 正 会 員 工博 千葉工業大学教授 工学部土木工学科
**** 工博 千葉大学教授 工学部物質工学科

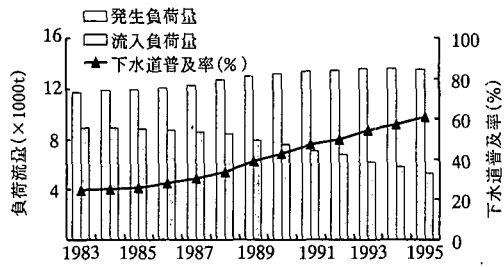


図-1 下水道普及率と負荷流量の経年変化
(環境庁など、習志野市のデータより作成)

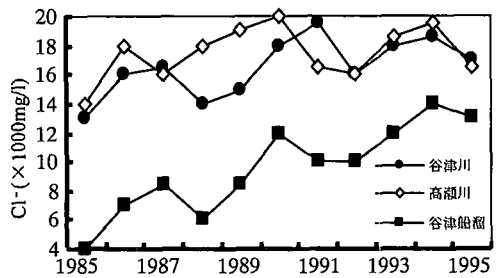


図-2 塩素イオン濃度の経年変化
(環境庁などのデータより作成)

表-1 底質の性状変化
(環境庁などのデータより作成)

	1984 年	1995 年
泥の厚さ (cm)	25~200	0~50
強熱減量 (%)	3.6~11	2.1~6.9
窒素 (mg/g)	0.35~2.2	0.35~1.34
リン (mg/g)	0.28~0.79	0.20~0.81
ORP (mV)	-55~-198	-99~-340
砂質 (ha)	4	4
砂泥質 (ha)	10	18
泥質 (ha)	20	15
滞筋 (ha)	6	2

からアサリ (*Ruditapes philippinarum*) への変化も報告されている (風呂田, 1999)。

2.2 アナアオサの吸収最適 NH₄-N/PO₄-P 比

アナアオサの異常増殖により生態系バランスが崩壊しつつある谷津干潟において、干潟の環境構成因子の1つである水質と、アナアオサ繁茂との関係を解明するため、以下の実験を行った。

本実験では、19 L 容の透明プラスチック容器 (幅 38 cm×奥行 20 cm×高 25 cm) を培養器として用い、培養器内に、NaCl, MgCl₂, Na₂SO₄等を主成分とする Hale の人工海水 10 L を充填し、自然光の下で、水温 20℃, 2 L/min の曝気条件で培養した。

谷津干潟にて採取したアナアオサをプラスチック容器

表-2 流入 2 河川における NH₄-N, PO₄-P 濃度

		1995 年	1996 年	1997 年
谷津川	NH ₄ -N	0.54	0.54	0.34
	PO ₄ -P	0.18	0.13	0.14
高瀬川	NH ₄ -N	0.19	1.3	0.67
	PO ₄ -P	0.69	0.21	0.19

単位: mg/l

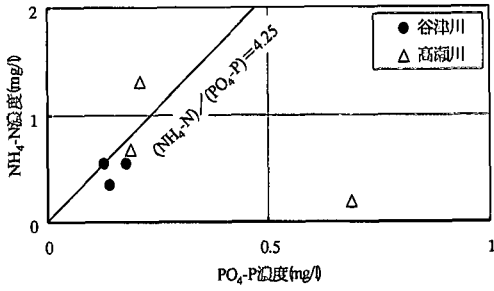


図-3 流入 2 河川における (NH₄-N)/(PO₄-P) 比

に 1,520 cm² (7.5 g-wt.) となるように投入した。また、栄養塩として、無機態窒素 (NH₄Cl) および無機態リン (K₂HPO₄) を、東京湾奥部の平均値 (T-N=1.2 mg/l, T-P=0.097 mg/l) を基準として、表 2 に示したように、0, 1, 5, 10, 20, 50 倍の濃度となるようにそれぞれ投入し、培養開始後 0, 1, 3, 5, 7 日目に栄養塩類 (NH₄-N, PO₄-P) 濃度の測定を行い、アナアオサによる栄養塩類吸収特性の検討を行った。

その結果、アナアオサの NH₄-N 吸収特性は、Michaelis-Menten の酵素反応に準じることが明らかとなった。また、アナアオサの NH₄-N 最大吸収除去量 (A_{max}) は 0.0089 mg/l/day/g, 半飽和定数 (K_s) は 6.43 倍 (=7.73 mg/l) と算出された。また、PO₄-P の吸収特性も、NH₄-N と同様に、Michaelis-Menten 式に準じたものであることが明らかとなった。これより、アナアオサの PO₄-P 最大吸収除去量 (A_{max}) は 0.00089 mg/l/day/g, 半飽和定数 (K_s) は 18.2 倍 (=1.82 mg/l) と算出された。

ここで、表-2 は谷津干潟へ流入する 2 河川における NH₄-N 濃度および PO₄-P 濃度の 1995 年から 1997 年までの実測データ (習志野市, 1996, 1997, 1998) を示したものであり、また、図-3 は、NH₄-N および PO₄-P の濃度をそれぞれ軸にとり、各年の濃度をそれぞれのプロットしたものである。これらより、流入 2 河川の NH₄-N/PO₄-P 比は、アナアオサの吸収最適 NH₄-N/PO₄-P 比とほぼ一致していることが明らかとなった。(石井ら, 2001a) 一般に、藻類の栄養塩吸収は、環境水中の栄養塩の N/P 比とその体組成の N/P 比が等しいか、または非

常に近いときに最も効率良く行われるとされている(桜井)。したがって、谷津干潟におけるアナアオサの大量発生は、干潟に流入する河川水中の栄養塩の $\text{NH}_4\text{-N}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比が、アナアオサの最適増殖条件に一致していることが原因のひとつであると考えられた。これより、アナアオサの繁茂を抑制し生態系バランスを維持するためには、例えば底質改善剤散布による底質からの栄養塩類溶出抑制などの手法(天野ら, 2000; Murakami ら, 2000)を導入して流入河川水の $\text{NH}_4\text{-N}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比をアナアオサの増殖における最適 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比と一致しないように制御することで、アオサの異常増殖を抑制・防止することが可能になるものと考えられる。

3. 干潟内生態系の推移

谷津干潟内でアオサが繁茂した範囲の底質 (ORP: $-200 \sim -250$ mV) は、アナアオサが繁茂しなかった範囲 (ORP: $-50 \sim -100$ 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(環境庁など 1996)。したがって、鳥類の重要な餌資源であるマクロベントス群の死滅に伴い、従来の鳥類を最上位とする生態系の崩壊が懸念されている。さらに、このアオサを採餌する鳥類はほとんど存在せず、今後より一層のアオサ繁茂が危惧されている。

しかしながら、アナアオサが繁茂する一方で、以前は観察されなかったホソウミニナ (*Batillaria cumingii*) が干潟全域に亘って大量に発生していた。ホソウミニナは、サハリン以南から、日本、朝鮮半島、中国などの外海の干潟、岩礁の間の底泥に生息している巻貝である。谷津干潟内では、冬季には稚貝がアナアオサ表面に付着しているのが観察され、また夏季においても、アナアオサ付近の底泥に分布していた。ホソウミニナは海域で孵化し、

潮汐により干潟域に輸送されるため、谷津干潟に流入したホソウミニナがアナアオサに着底し、成長しているものと考えられる。また、谷津干潟においてはホソウミニナを捕食する魚類および鳥類は確認されておらず、谷津干潟生態系において最上位に位置しているものと考えられる。従って、図-4 に示したように、谷津干潟における生態系が、鳥類を最上位者とする従来の生態系に加え、ホソウミニナを最上位者とするもう一つの新たな生態系が確立されつつある可能性が示唆された。

4. 干潟内の食物連鎖と溶存態栄養塩類循環

次に、干潟内の食物連鎖における代表種を考え、それらが作り出す栄養塩の受け渡しについて干潟実験モデルによる検討を行った。これまで、単一種生物の水質浄化機能に関する研究(例えば磯野, 1998; 西村ら, 1996)はなされているが、本実験では、アナアオサを核とする食物連鎖を考え、底質(底泥)、ゴカイ、アサリ及びアナアオサの3種の生物で作られる系で有機物の摂取・分解、栄養塩の溶出・吸収の流れに関して検討した。

実験系は単一種系および多種共存系における水中の栄養塩類濃度を経日的に測定した。その結果、単一種系について、ゴカイ及びアサリでは排泄される $\text{NH}_4\text{-N}$ の海水中への蓄積が、また、藻類のアナアオサでは海水からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収と $\text{PO}_4\text{-P}$ の若干の細胞外分泌とが非可逆的に行われているのが認められた。一方、生態系ピラミッドでの栄養段階の異なる種の共存系では、溶存態栄養塩類循環が効率よく行われることを明らかにした。ここで、アナアオサは系内の $\text{NH}_4\text{-N}$ の挙動に強い影響力を持っていることが明らかとなった。

干潟における栄養塩類循環には、その場に棲息する各種の生物が相互に影響を及ぼし合いながら関与していることを前項までで述べた。その結果を、図-5 のようにま

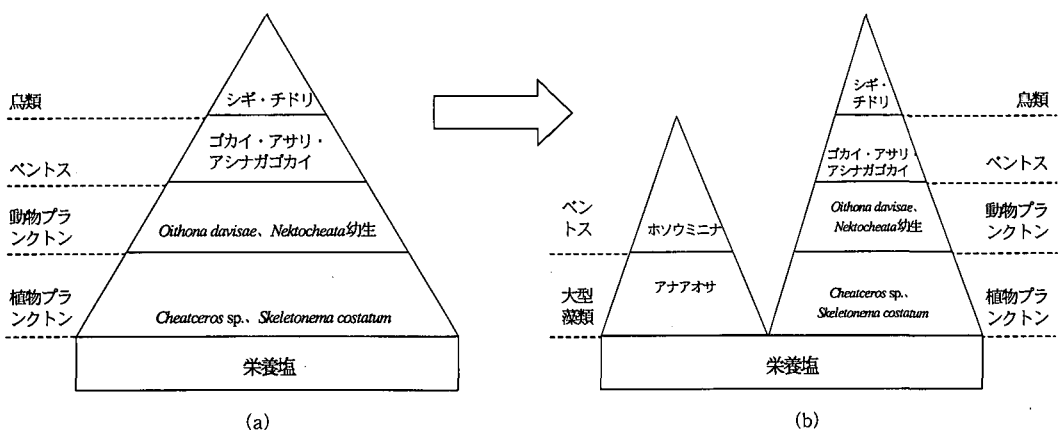


図-4 干潟内生態系ピラミッドの推移

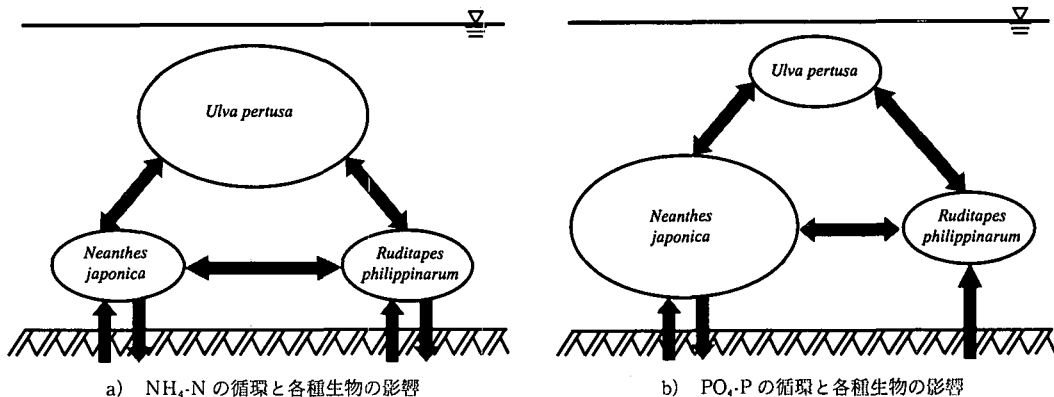


図-5 物質循環に及ぼす各種生物の影響の概念図

とめた。図中の楕円の大きさは、物質循環への影響量を表しており、矢印は物質の移動を表している。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 循環に関しては、*Ulva pertusa* がきわめて大きな影響を及ぼしており、その場の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度にかかわらず、水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ を吸収し除去効果を示していた。

一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 循環に関しては、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 循環とは異なり、アナオサがきわめて大きな影響を及ぼしており、生物体自身、分泌体液あるいは堆積物粒子への吸着、さらには代謝産物が細菌類の活性化を促進することにより、水中から $\text{PO}_4\text{-P}$ を除去しているものと考えられる。さらに、生物種の多種組み合わせ系においては、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ のいずれについても、単一種系におけるそれぞれの測定結果の単純な積算とは異なる挙動を示したことから、生物種間の相互作用が栄養塩類の挙動に大きく影響を及ぼしていることが明らかとなった。すなわち、アナオサは $\text{NH}_4\text{-N}$ 除去・ $\text{PO}_4\text{-P}$ 除去型、アサリは $\text{NH}_4\text{-N}$ 排出・ $\text{PO}_4\text{-P}$ 排出型、ゴカイは $\text{NH}_4\text{-N}$ 排出・ $\text{PO}_4\text{-P}$ 除去型であることが明らかとなったが、生活様式の異なる生物を組み合わせることにより、外部負荷に対する耐性と回復力を兼ね備えた、より高い栄養塩類除去機能をもつ場の形成が期待される。したがって、干潟においては異なる生物が異なる機能を発揮して物質循環に関与して共存しており、エコテクノロジー（栗原、1988）に代表されるように、干潟を水質浄化の場として捉えるならば、干潟に生息する生物種の多様性を高く維持することはきわめて重要であると考えられる。

5. 結 言

近年の谷津干潟における環境の変化を解明するため、現地観測および干潟モデル実験を通して水質及び生態工学的な検討を試み、以下の結論を得た。

① 干潟の水質および底質変化は干潟内藻類の繁茂に大きな影響を与えることが明らかとなった。砂質化と

流入海水の持つ $\text{NH}_4\text{-N}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比の藻類吸収最適 N/P 比との一致に起因しているものと考えられる。

- ② 谷津干潟内では、従来からの食物連鎖網に加えて、アナオサを生産者とする新たな生態系ピラミッド、すなわち「複数型生態系ピラミッド」が進行していると考えられる。
- ③ 各栄養段階の生物で作り出す種の共存系では溶存態栄養塩類の循環が効率よく行われることを明らかにした。また、谷津干潟内では、アナオサの繁茂が溶存態栄養塩類循環に強く関わっていることを明らかにした。

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

参 考 文 献

- 天野佳正・村上和仁・石井俊夫・瀧 和夫・松島 暁・胡 翔 (2000)：富栄養化湖沼における物理化学的ハイブリッド処理による底質・水質直接浄化の検討，環境工学研究フォーラム講演集，pp. 67-69。
- 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。
- 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 (2001a)：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，第 17 巻，pp. 129-134。
- 石井裕一・村上和仁・矢内栄二・石井俊夫・瀧 和夫 (2001b)：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，第 48 巻，pp. 1136-1140。
- 石井裕一・村上和仁・石井俊夫・瀧 和夫・立本英機 (2001c)：生物種間相互作用に着目した東京湾奥干潟のマイクロゾム物質循環実験，第 15 回環境情報科学論文集，pp. 273-278。
- 磯野良介 (1998)：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.
- 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.
- 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.
- 習志野市 (1996): 平成 7 年版, 習志野市環境白書.
- 習志野市 (1997): 平成 8 年版, 習志野市環境白書.
- 習志野市 (1998): 平成 9 年版, 習志野市環境白書.
- 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.
- 西村 修・佐々木久雄・徐 開欽・阿部早智子・須藤隆一 (1996): 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.
- 桜井善雄: 水辺の緑化による水質浄化, 緑の読本, 公害と対策臨時増刊, pp. 899-909.
- Murakami K., Matsushima H., Tanaka K., Ishii T. and Taki K. (2000): Inspection of Magnesium Treatment effect on Nutrient elution from Eutrophicated Lake Sediment, Proc. of 1st World Water Congress of the International Water Association.
-