

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

RELATIONSHIP BETWEEN ECOLOGICAL BALANCE AND ENVIRONMENTAL FACTORS IN NATURAL TIDAL FLAT LEFT FROM RECLAMATION

石井裕一¹・村上和仁²・石井俊夫³・立本英機⁴・瀧 和夫⁵

Yuichi ISHII, Kazuhito MURAKAMI, Toshio ISHII, Hideki TATSUMOTO, Kazuo TAKI

¹ 学生会員 千葉工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒275-8588 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

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 非会員 千葉工業大学助教授 工学部自然系 (〒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)

⁵ 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)

Recently, the collapse of ecosystem balance caused by the dominant multiplication of single species is focused in various artificial tidal flats. In this study, it was investigated that the causes of extraordinary distribution of the chlorophyceae, especially *Ulva* sp. in Yatsu tidal flat, and the environmental factors composed with water quality.

As the result, the ratio (C_N/C_P) on the concentration between $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ was estimated at the average value as 4.2 by the onsite investigation in two canals connected Yatsu tidal flat and Tokyo Bay. Otherwise, the optimum ratio for growth of *Ulva* sp. was detected as 4.25 by the culture experiment operated in our laboratory. It is considered for the reason to be extraordinarily distribution of *Ulva* sp. in Yatsu tidal flat, that the ratio in the field is similar value as the optimum value for growth of *Ulva* sp..

The ratio control in two canals and the shift from the optimum value for growth of *Ulva* sp. are considered to be efficiency method for the restraint of the irregular growth/distribution of *Ulva* sp..

Key Words: ecosystem balance, *Ulva* sp., Yatsu tidal flat, environmental factors, ($\text{NH}_4\text{-N}$)/($\text{PO}_4\text{-P}$) mass ratio

1. 序論

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¹⁾。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、特殊で貴重な生態系を構成している²⁾³⁾。

干潟は浅海域であるが故に埋立てが用意であり、開発が進行し、自然干潟の面積は年々減少の一途をたどっている。しかし近年、親水性、水質浄化能等の干潟が有する機能が注目を集め、埋立てのために失われた自然干潟の代替とし

て、葛西人工海浜、横浜海の公園など東京湾岸には多くの人工干潟が造成されている⁵⁾⁶⁾。

この埋立て造成から取り残された自然干潟は、この地域での人工干潟を創出するための、干潟生態系と環境構成因子との関係を検討する上で、極めて重要な干潟と考えられる。

本研究では、人工干潟で生じ得る問題の1つである、単一種の異常増殖による生態系バランスの崩壊を解決するための一助として、東京湾奥部に位置し、周囲の埋立てから取り残された自然の干潟、すなわちラムサール条約登録湿地である谷津干潟を対象とし、谷津干潟内で異常増殖しているアオサ (*Ulva* sp.) と環境構成因子の関係について検討を行った。

2. 人工的干潟の生態系バランスと環境構成因子

(1) 谷津干潟の概要

干潟はその形状により前浜干潟・河口干潟・潟湖干潟・沿岸砂州の4つに分類される^{2) 4) 7)}。東京湾奥部に位置する谷津干潟（千葉県習志野市）は、写真1に示すように、かつては東京湾の海岸線前面に発達した広大な前浜干潟の一部であった。しかし、1971年に開始された京葉湾岸地区第2次埋立事業により周囲を埋め立てられ、孤立化し、写真2に示すように、地形学的に潟湖の形状となっている。

現在の谷津干潟は面積40.1ha、平均水深約80cmの干潟である。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結ばれており、干潟内の水の交換はこの2河川を通じて行われている。また、干潟東側奥部の谷津船溜から習志野市の、西側から船橋市の生活雑排水が流入している。

(2) 谷津干潟における環境構成因子

干潟の環境を構成している因子には、地形、水質、底質、外的作用（波浪・潮汐など）などが考えられる⁷⁾。



写真1 1967年の谷津干潟（前浜干潟的）



写真2 1998年の谷津干潟（潟湖干潟的）

以下に谷津干潟における主要環境構成因子について述べていく。

a) 周辺環境

埋立てにより周囲を遮断され、地形学的には潟湖干潟のような形状へと変貌した。また、干潟東側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。また、高度経済成長期の埋立て・開発に伴い流域からの有機物を多量に含む生活雑排水の流入負荷が増大し、以前は砂質であった底泥は泥質へと変わっていったが、近年の公共下水道の整備により干潟内への淡水（生活排水）の流入が減少したため、底泥の砂質化および干潟内水の海水化が進行し、その潟湖の形状を留めつつ性質的には再び以前のような前浜干潟に戻りつつあるといわれている^{7) 8) 9)}。

b) 水質

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はなく、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。

c) 底質

谷津干潟（面積40.1ha）における砂・泥質の割合は、図3に示す通り、泥質面積が20haから15haに減少す

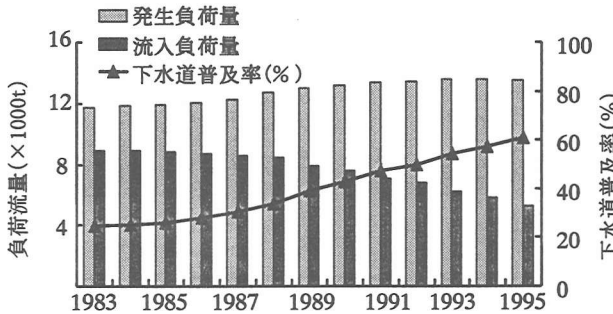


図1 下水道普及率と負荷流量の経年変化^{9) 10)}

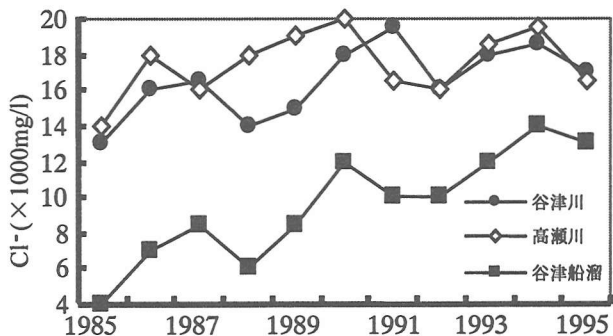


図2 塩素イオン濃度の経年変化⁹⁾

る一方で、砂泥質面積が10haから18haに増加しており、また表1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25~200cmであったが、1995年には0~50cm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。

(3) 谷津干潟における生態系バランス

極めて特殊な環境の谷津干潟であるが、このような場においても食物連鎖を中心とする生態系は成立している。

一次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。また、同じく生産者である大型藻類では、やはり東京湾由来のアオサ(*Ulva* sp.)の存在が確認されている。

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。また、三次消費者である魚類はマハゼ(*Acanthogobius flavimanus*)・ボラ(*Mugil* sp.)などが確認された。また、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¹²⁾、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おり、これらの生物が谷津干潟独自の生態系を形成している。しかしながら、ここ数年来、写真3に示した大型緑藻類のアオサの存在が、干潟生態系に壊滅的な影響を与えている。大量発生したアオサは、干潟内で枯死・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、様々な問題が発生している。夏季にアオサが繁茂した範囲の底質(ORP: -200~-250mV)は、アオサが観察されなかった範囲(ORP: -50~-100mV)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。これは海水由来のアニオンの蓄積に加えて、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⁹⁾、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、小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。

(4) 単一種生物の異常増殖による生態系バランスの崩壊

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大型緑藻類であるが、このアオサが、極端に閉鎖性の高い谷津干潟に流入し、繁殖した結果、東京湾に流出せず、干潟内に堆積してしまっている。

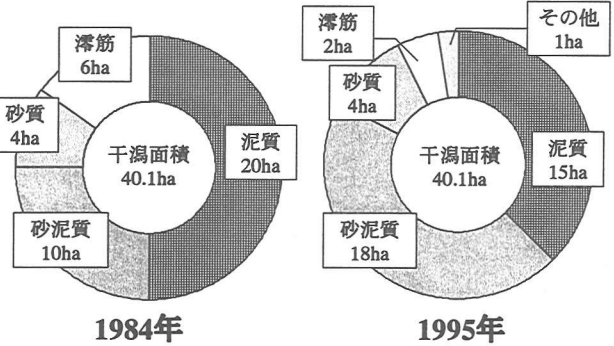


図3 底質の性状変化⁹⁾

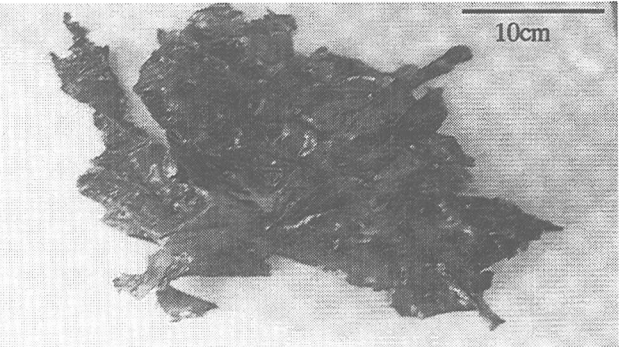


写真3 アオサ (*Ulva* sp.)

表1 底質の性状変化⁹⁾

	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

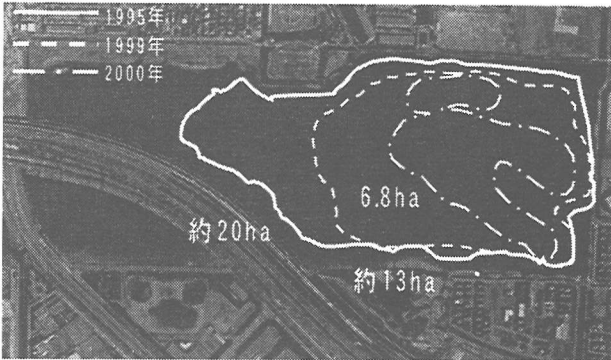


写真4 アオサ発生面積の推移

谷津干潟内のアオサは、写真 4 に示したとおり、干潟東部を中心にして、1995 年夏季には 6.8ha の範囲に発生していたものが、1999 年夏季には 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。

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¹³⁾。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。したがって、ベントスの個体数も更に減少し、上位捕食者である魚類および鳥類も減少し、これまでの生態系を維持することができない、すなわち現在の生態系バランスが崩壊する可能性が危惧される。

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。

3. アオサの栄養塩吸収特性

上述のように、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、アオサ繁茂との関係を解明するため、以下の実験を行った。

(1) 実験概要

本実験では、19L 容の透明プラスチック容器(幅 38cm×奥行 20cm×高 25cm)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 10L を充填し、自然光の下で、水温 20℃、2L/min の曝気条件で培養した。

谷津干潟にて採取したアオサをプラスチック容器に

1,520cm² (7.5g-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=1.2mg/l, T-P=0.097mg/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,

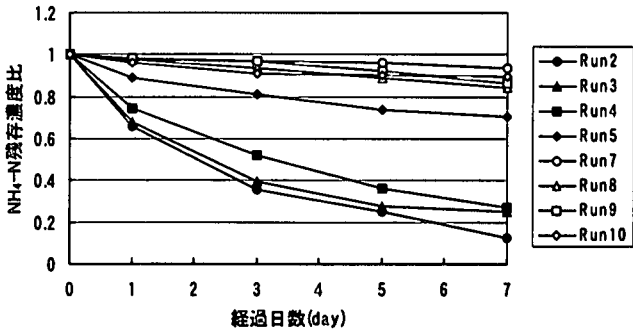


図 4 NH₄-N 残存濃度比の経日変化

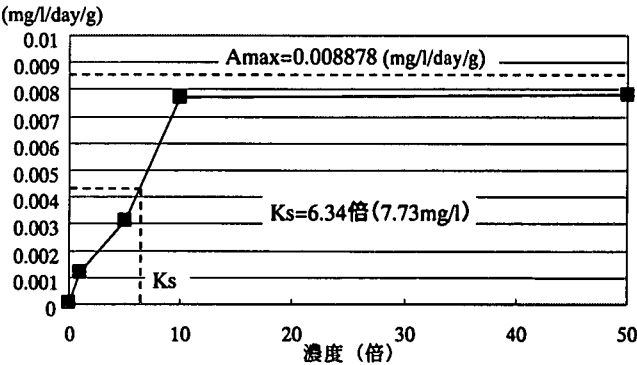


図 5 NH₄-N 吸収特性

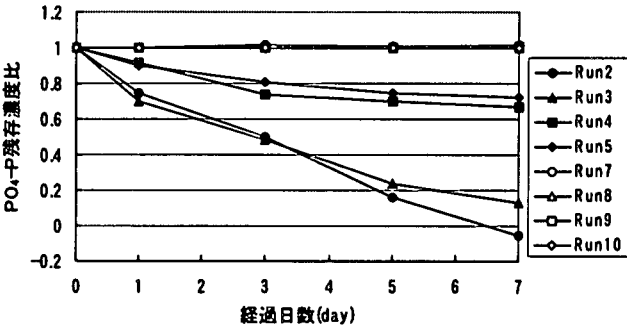


図 6 PO₄-P 残存濃度比の経日変化

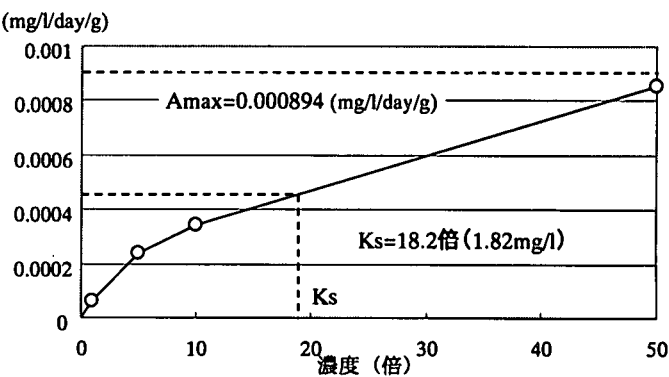


図 7 PO₄-P 吸収特性

表 2 実験系

	アオサ投入	栄養塩濃度
Run1	○	0倍
Run2	○	1倍
Run3	○	5倍
Run4	○	10倍
Run5	○	50倍
Run6	—	0倍
Run7	—	1倍
Run8	—	5倍
Run9	—	10倍
Run10	—	50倍

東京湾平均 T-N : 1.2mg/l、T-P : 0.1mg/l

表3 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

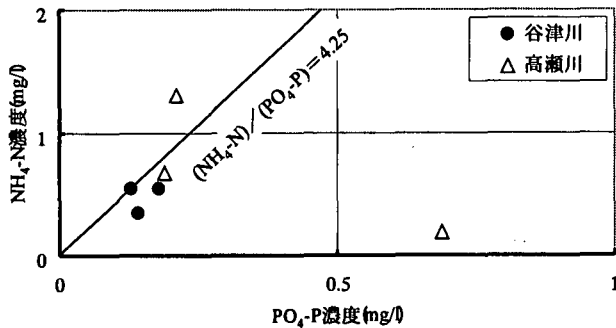


図8 流入2河川における(NH₄-N)/(PO₄-P)比

PO₄-P) 濃度の測定を行い、アオサによる栄養塩類吸収特性の検討を行った。

(2) 栄養塩吸収特性に関する検討

a) NH₄-N の吸収特性

図4は、各系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。Run2 (1 倍), Run3 (5 倍), Run4 (10 倍) では高い除去率を示しているが、Run5 (50 倍) では低下した。これはNH₄-N 濃度が東京湾における年平均値の10 倍で吸収除去が飽和状態になることを示唆している。

図5は、NH₄-N の吸収量とNH₄-N 濃度をそれぞれ軸にとり、各系の値をプロットしたものである。これより、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。これより、アオサのNH₄-N 最大吸収除去量(A_{max})は0.0089mg/l/day/g、半飽和定数(K_s)は6.43 倍(=7.73mg/l)と算出された。

b) PO₄-P の吸収特性

図6は、図5と同様に各系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。Run3 (5 倍) が最大のPO₄-P 除去率を示し、次いでRun4 (10 倍) とRun5 (50 倍) は同程度の除去率となり、Run2 (2 倍) が最低となった。

PO₄-P の吸収量とPO₄-P 濃度の関係を図7に示す。その結果、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、アオサのPO₄-P 最大吸収除去量(A_{max})は0.00089mg/l/day/g、半飽和定数(K_s)は18.2 倍(=1.82mg/l)と算出された。

c) アオサの増殖における最適 N/P 比

アオサの培養実験より、K_s (NH₄-N) =7.73mg/l, K_s

(PO₄-P) =1.82mg/l が求められ、アオサの吸収最適 NH₄-N/PO₄-P 比は4.25 と算出された。ここで、表3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を示したものであり、また、図8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。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¹⁴⁾。したがって、谷津干潟における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NH₄-N/PO₄-P 比が、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^{15) 16)}を導入して流入河川水のNH₄-N/PO₄-P 比をアオサの増殖における最適 NH₄-N/PO₄-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。

4. 結論

人工干潟で生じ得る問題、すなわち生態系バランスの崩壊を解決するための一助として、現在、谷津干潟で異常繁茂しているアオサと、干潟の環境構成因子との関係について検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) アオサは海水かつ砂質域に棲息する海産性大型緑藻類であるため、海水化および砂質化が進行している谷津干潟では、今後更なる発生面積の拡大が予想される。
- 2) 大量発生したアオサは、東京湾に流出することなく、閉鎖性が極めて高い谷津干潟内で枯死・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、干潟生態系へ壊滅的な影響を与えているものと考えられる。
- 3) 培養実験にてアオサの栄養塩類吸収除去特性を検討した結果、NH₄-N 最大吸去量 (A_{max}) =0.0089mg/l/day/g、半飽和定数 (K_s) は6.43 倍 (=7.73mg/l) PO₄-P 最大吸収量 (A_{max}) =0.00089mg/l/day/g、半飽和定数 (K_s) は18.2 倍 (=1.82mg/l) となった。
- 4) アオサの吸収最適 N/PNH₄-N/PO₄-P 比が4.25 と算出されたことより、谷津干潟におけるアオサの大量発生は、干潟の水質がアオサの最適増殖条件に一致していることが原因の1つであると考えられた。
- 5) 生態系バランスを維持するためには、流入河川水の

NH₄-N/PO₄-P 比をアオサの増殖における最適 N/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、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 清水 徹, 岡田光正: 前浜干潟の水質環境浄化能, 水環境学会誌, 22 (7), 7~12, 1999
- 2) 栗原 康編: 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー, 大学出版会, 1988
- 3) 栗原 康: 干潟は生きている, 岩波新書, 1980
- 4) 杉山恵一: 海辺ピオトープ入門, 基礎編, 信山社サイテック, 2000
- 5) 木村賢史, 鈴木伸治, 西村 修, 稲森悠平, 須藤隆一: 葛西人工海浜における生物生息環境の不安定化に係わる環境因子の検討, 土木学会論文集, No.664/VII-17, 55-63, 2000
- 6) 田中昌宏, 稲垣 聡: 外海水の侵入が内湾の水質環境に及ぼす影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.1061-1065, 2000
- 7) 石井裕一, 村上和仁, 瀧 和夫: 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, 2000
- 8) 村上和仁, 石井裕一, 瀧 和夫, 長谷川昭仁: 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, 2000
- 9) 環境庁, 千葉県, 習志野市: 谷津干潟環境調査報告書, 1996
- 10) 習志野市: 平成10年版, 習志野市環境白書, 1999
- 11) 習志野市: 平成11年版, 習志野市環境白書, 2000
- 12) 石川 勉: 東京湾の渡り鳥, 晶文社, 1993
- 13) 能登谷正浩編: アオサの利用と環境修復, 成山堂書店, 1999
- 14) 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
- 15) 天野佳正, 村上和仁, 石井俊夫, 瀧 和夫, 松島 眸, 胡 翔: 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, 2000
- 16) Murakami, K., Matsushima, H., Tanaka, K., Ishii, T. and Taki, K. : Inspection of Magnesium Treatment effect on Nutrient elution from Eutrophicated Lake Sediment,, Proc.of 1st World Water Congress of the International Water Association, 2000