

海浜公園池における水の華発生機構と環境要因

EFFECT OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON WATER BLOOM IN SEASIDE PARK POND

村上和仁¹・石井俊夫²・瀧 和夫³・松島 眸⁴

Kazuhito MURAKAMI, Toshio ISHII, Kazuo TAKI and Hitomi MATSUSHIMA

¹正会員 理博 千葉工業大学准教授 工学部生命環境科学科 (〒275-8588 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

²非会員 工修 千葉工業大学教授 教育センター (〒275-0023 千葉県習志野市芝園2-1-1)

³フェロー 工博 千葉工業大学教授 工学部生命環境科学科 (〒275-8588 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

⁴正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

Eight years observation was conducted to obtain some information for water bloom occurrence mechanism in brackish water such as seaside park pond, Hasunuma Water Garden in Kujyukurihama coastal line, Chiba prefecture. The results obtained are as follows; (1) massive water bloom of *Anabaena spiroides* and *Microcystis aeruginosa* were linked deeply in P-surplus water condition, with N_2 gas fixing from the air of *A. spiroides*, which leads N-surplus condition, (2) pine trees around the seaside park pond are one of the heavy nutrient loading sources with their much pollen, and (3) migratory birds, one of very important factors for recreation function water environment, supply much nutrient load as their excrement. These outcomes are obtained from on-site observation in field survey, and laboratory scale experiment should be conducted to certain these outcomes in the future.

Key Words : Seaside park pond, Water bloom, Brackish water, Environmental factors, Nutrient salts, *Anabaena spiroides*, *Microcystis aeruginosa*

1. 緒 言

海岸地帯, 特に人工海浜の有効利用のひとつとして海浜公園が挙げられる。親水を目的とした海浜公園は, 都市域では都会のオアシスとして, リゾート地では集客施設としてきわめて有益であると考えられる。海水と地下水が集水して汽水となる公園池は, 含有する塩分濃度のイメージから淡水湖(陸水)と海洋(海水)の中間的な性質を有していると考えられがちであるが, 実際にはいずれとも異なる独自の性質を有し, 特徴的な水圏生態系を構築している¹⁾。また, 閉鎖性が強いと富栄養化が進行し, 実際, わが国における代表的な汽水湖であり, 湖沼水質保全特別措置法における指定湖沼である児島湖(岡山県), 中海・宍道湖(島根県・鳥取県)は, いずれも富栄養化湖沼に分類されている^{2), 3)}。

一般的な湖沼では, 栄養塩の量と生物相とのバランスが保たれている。しかし, 湖沼への過剰な栄養塩の流入等により, 水中の溶存酸素が消費され嫌気化し, 底層に沈殿した生物の枯死体や底泥中から栄養塩が溶出し, 徐々に富栄養化する。このような湖沼での生物相は多種適量から少種多量へと移行し, 最終的には水の華の異常発生を招き湖沼生態系をかく乱させる⁴⁾。このことは, 湖沼のみならず, 海浜公園に造成された公園池でも同様であり, 本来の目的である親水機能や景観を悪化させる一因ともなっ

ている。水の華の異常発生は湖沼生態系を攪乱するだけでなく, 悪臭・利水障害など, 人間が生活する上でもさまざまな問題を引き起こす。そのため, 過剰な栄養塩を適正化し, 水の華の発生を防止する必要がある。

本研究では, 海浜公園池をはじめとする汽水湖における富栄養化対策の一助として, 千葉県九十九里浜に隣接する蓮沼海浜公園ボート池における水の華の発生機構と, それに影響を与える環境要因について, 現地調査からの検討を行った。

2. 蓮沼海浜公園池の概要と現状

蓮沼海浜公園(蓮沼ウォーターガーデン)は, 千葉県九十九里浜より350mほど内陸に位置した海浜/砂質地帯に位置しており(図-1), 九十九里浜沿いに南北4km, 広さ40万 m^2 に亘る非常に大規模な県立都市公園である。ボート池は蓮沼ウォーターガーデンの一部として造成された, 塩分混じりの地下水を水源とする親水施設であり, 池表面積約10,380 m^2 , 池水容積約7,000 m^3 , 平均水深0.65mのリン過多(T-P濃度:1.0-1.5mg/L)の汽水湖(Cl^- 濃度:400mg/L程度)で, 生物相が少種多量のいわゆる富栄養状態にある⁵⁾。この蓮沼ウォーターガーデン内にはテニスコートなどのスポーツ施設や小規

模遊園地、レストラン、プールなどさまざまなレジャー施設があり、特に夏季には非常に大きな集客力を誇る千葉県の観光名所のひとつとなっている。しかし、この公園内にあるボート池では毎年夏季になると池全体を覆うほどの水の華（アオコ）が発生し、レクリエーション機能の損失や景観の悪化、悪臭などの問題が深刻化している。かつては公園施設の一部として貸しボートの営業を行っていたが、ここ数年は水の華の発生が原因で利用客が激減し、貸しボートは休業せざるを得ない状況となっている。従来の研究より、蓮沼ウォーターガーデンのボート池はリン過多の汽水湖であることがわかっている⁵⁾が、N/P 比や塩分濃度をはじめとして一般的な水の華（アオコ）発生条件⁷⁾とは異なる面も多い。

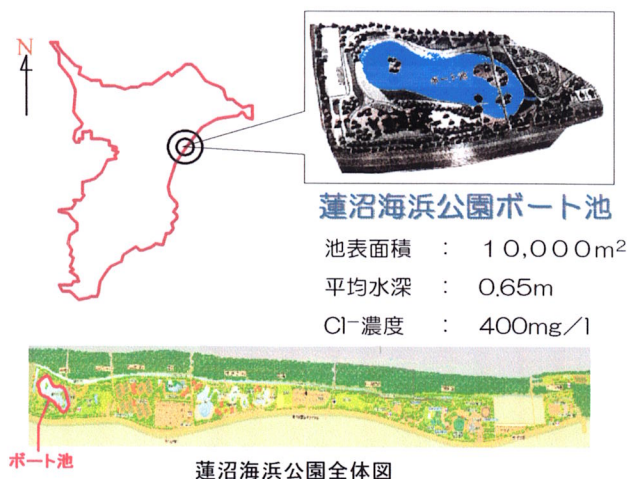


図-1 調査対象地点

3. 方法

(1) 調査期間

採水・分析は1999年9月から2007年3月の8年間に亘って行った。採水は月1～2回の頻度で行い、湖心部の水面下約5cmの表層水を採水し、必要に応じて底泥直上水も採水した。

(2) 分析項目および方法

水質測定項目は、T-N、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、T-P、PO₄-P、COD、Chl.a、pH、DO、Cl⁻、水温、植物プランクトン相とした。採水後、DO、pH、水温については現地で、その他の項目は直ちに研究室に持ち帰り、可及的速やかに分析した。なお、栄養塩類は吸光光度法（HACH DR4000）にて、CODおよびCl⁻は工場排水試験法 JIS-K0102⁸⁾にて、Chl.aは海洋観測指針⁹⁾にて、pHおよびDOは電極法にて分析・測定した。植物プランクトンは、生物顕微鏡（NIKON Eclipse E800）にて分類・同定・計数を行った。

(3) 解析方法

各月ごとの分析データの比較解析から、水の華の発生と栄養塩類濃度の関係および植物プランクトン種の変遷について検討した。また、採水時にはデジタルカメラによる定点観測を行い、池および周辺環境の変遷も捉えることとした。

4. 結果および考察

(1) 蓮沼海浜公園池の水収支

池水のCl⁻濃度および降水量データから算出したボート池における水収支を図-2に示す。蓮沼ウォーターガーデンのボート池には流入河川は存在せず、富栄養化の原因物質である栄養塩類の流入経路は、地下水：雨水：浸透水＝6.9：2.9：0.2と見積もられた。これより、地下水の占める割合が大きく、地下水中に含有される高濃度な栄養塩類がボ-

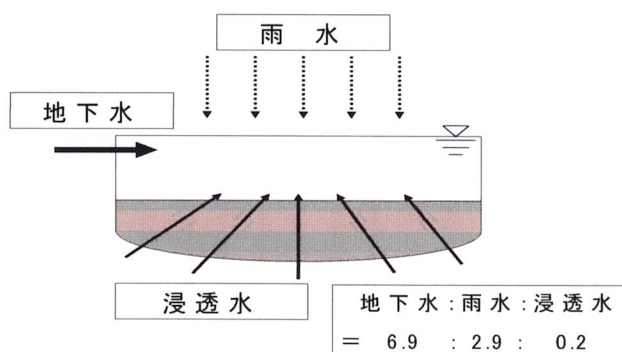


図-2 ボート池における流入経路

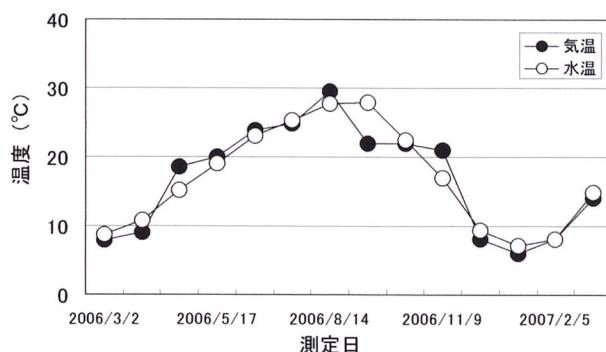


図-3 ボート池表層の水温変化

ト池の富栄養化の原因となっているものと考えられた。この地下水はポンプにより揚水されてボート池に供給されており、その由来は周辺の農耕地の地下浸透水と太平洋の海水である。

(2) 水温の変動

水の華が最も大規模に発生した平成18年度（2006年4月～2007年3月）における気温および水温の変動を図-3に示した。平均水温は17.2℃、最高水温は28.3℃（8、9月）、最低水温は7.1℃（1月）、平均気温は17.6℃、最高気温は30.4℃（8月）、最低気温は6.4℃（1月）であった。

(3) 窒素濃度の変動特性

窒素濃度の変動をみると、毎年夏季に T-N が急激に増加するという現象がみられた（図-4a）。この T-N の急増の際、溶存態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ ）はほとんど増加していない。また、Chl.a 濃度と T-N 濃度との相関係数は $R=0.48$ と弱い正の相関がみられ、関連性があることがわかった（図-5a）。これらのことから夏季における T-N の急増は植物プランクトンの増加に伴ったものであり、またボート池の T-N 濃度は植物プランクトン量の増減に伴って変化すると考えられる。

ボート池の T-N 濃度の値をみると、その平均値は 8.0mg/L であった。また、図-6a は $\text{NO}_3\text{-N}$ の各濃度における *Microcystis aeruginosa* と *M.flos-aquae* の増殖速度を表しており¹⁰⁾、また同図中にボート池と、富栄養化した汽水湖である児島湖²⁾の平均 T-N 濃度を示した。これよりボート池にはアオコ形成藻類である *Microcystis* 属が最大増殖速度で増殖するのに過剰な量の窒素があることがわかる。また、児島湖の平均 T-N 濃度と比較すると、ボート池の平均 T-N 濃度は児島湖の 6.2 倍もの濃度になる。これらのことからボート池の T-N 濃度は非常に高く窒素による汚染が進行しているといえる。しかし、T-N 濃度に対する溶存態窒素濃度の割合は低く、窒素の大部分は有機体として存在し、植物プランクトンが増殖に利用できる溶存態無機窒素の割合は少ないといえる。

(4) リン濃度の変動特性

T-P 濃度と $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の間には強い連動性がみられ、また T-P の大部分を溶存態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）が占めていた。このことからボート池のリン濃度は溶存態リンの変動に支配されているといえる。リン濃度の変動についてみると、窒素濃度の場合と異なり年間の変動に特徴や規則性はみられなかった。これはボート池におけるリンの主な供給源が地下水であり、その地下水の供給量や水質変化に規則性がなかったことによると考えられる。

またリン濃度の経年変化についてみると、年々増加傾向にあることがわかる（図-4b）。ボート池は流出河川が無いとため、一度池内に取り込まれたリンは池内に留まり続ける。そのため年々徐々にリンが蓄積し、このように増加したものと考えられる。また、Chl.a 濃度と T-P 濃度との相関係数は $R=0.037$ となり、相関は認められなかった（図-5b）。

図-6b に示した $\text{PO}_4\text{-P}$ の各濃度における *M.aeruginosa* と *M.flos-aquae* の増殖速度¹⁰⁾をみると、窒素と同様に、ボート池には *Microcystis* 属が最大増殖速度で増殖するのに過剰な量のリンがあることがわかる。また、児島湖の平均 T-P 濃度と比較すると、ボート池の平均 T-P 濃度は 1.5mg/L であり、児島湖の 7.5 倍もの濃度になる。これらのことからボート池は窒素に加えて、それ以上にリンによる汚染が進行していることがわかる。このようにリン濃度が異常に高くなったのは、水源である地下水やそ

他の環境要因から絶えずリンが供給され年々蓄積したためと考えられ、今後も増加していくと予想される。

(5) N/P 比の変動

ボート池では、窒素濃度の変動に比べてリン濃度の変動が小さく安定していた。そのため T-N 濃度と N/P 比との相関係数は $R=0.88$ と、非常に強い相関があり、T-N/T-P 比は T-N の変動に支配されていた（図-7a）。さらに T-N の変動は植物プランクトン量（Chl.a）の変動に支配されていることから、ボート池の T-N/T-P 比は植物プランクトン量に支配されているといえる。一方、T-P 濃度と N/P 比の相関係数は $R=0.23$ となり、相関は認められなかった（図-7b）。すなわち、リン濃度は一定で、植物プランクトンの増減によって窒素濃度が変動し、N/P 比が変動しているといえる。ボート池の T-N/T-P 比の平均値は約 6 となったが、一般的な調和型湖沼の T-N/T-P 比¹¹⁾とされる 10 よりも低い値になった（図-8）。そのためボート池はリン過多であり窒素制限的であるといえる。また、水の華発生の最適 N/P 比は、水の華形成プランクトンの体細胞の N/P 比や Redfield 比から 12 程度とされる¹²⁾が、ボート池の N/P 比はその 1/2 程度なので水の華は発生しにくい状況と評価される。しかし、毎年夏季～秋季には非常に高濃度の Chl.a が検出され、水の華の発生が観察されている。

また、毎年夏季から秋季の間に T-N/T-P 比が急激に上昇し、10 以上となる現象がみられた。この N/P 比の急激な上昇は植物プランクトンの増殖による T-N の急増に伴ったものであり、毎年夏季～秋季にかけての植物プランクトンの急増に伴い、N/P 比が急増していることがわかった。

(6) プランクトン種構成の変遷と水の華発生機構

春季は珪藻類、夏季～秋季は藍藻類、冬季は珪藻が優占した。初夏には藻類の *Anabaena spiroides* による水の華が形成されたが、夏季から秋季にかけて水の華の優占種は *A.spiroides* から *Microcystis aeruginosa* へと変遷した。冬季～春季は珪藻の *Aulacoseira italica* および *A.japonica* が優占した。

ボート池の夏季（7～8 月）の優占種は藍藻の *A.spiroides* であった。その占有率は 90%を超えており、水の華を形成するほど増殖した。*A.spiroides* は水中に溶存態無機窒素が枯渇しているときに大気中の N_2 を直接光合成に利用して増殖することを可能とする空中窒素固定能を有している¹³⁾。ボート池は、リン濃度が異常に高く溶存態窒素が少なかったため、窒素さえ供給されれば植物プランクトンが大増殖できる状況となっていた。そのため、ボート池のような状況で大気中の窒素を利用することができる *A.spiroides* が他の植物プランクトン種よりも有利に、そして爆発的に増殖し、水の華を形成したと考えられる。また、*A.spiroides* は他の植物プランクトンが死滅するほどの強光下でも増殖を維

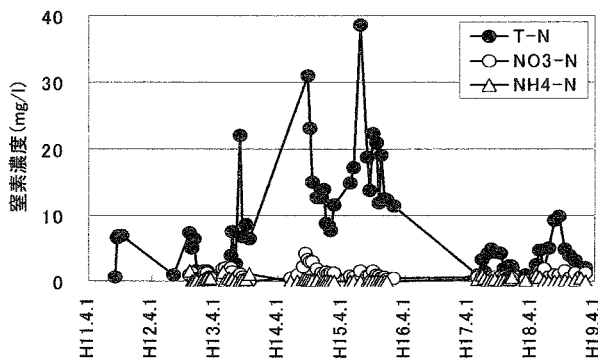


図-4a 窒素濃度の推移

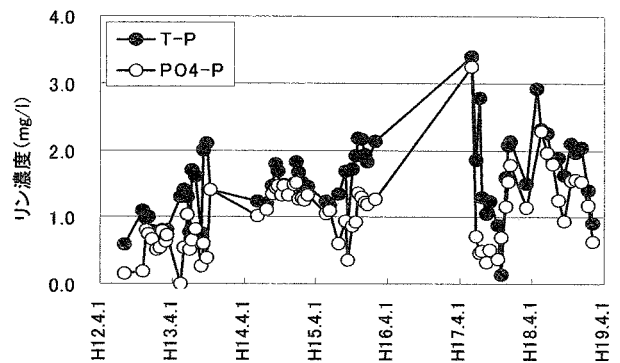


図-4b リン濃度の推移

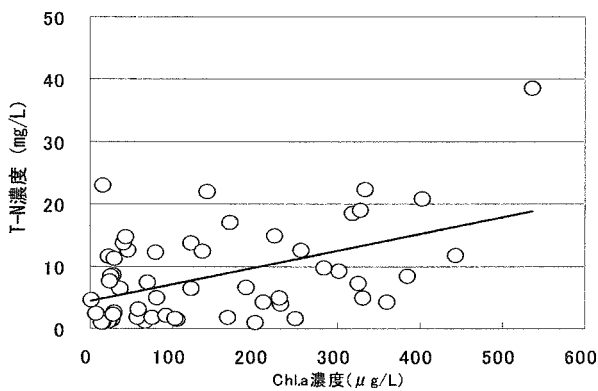


図-5a T-NとChl.aの関係

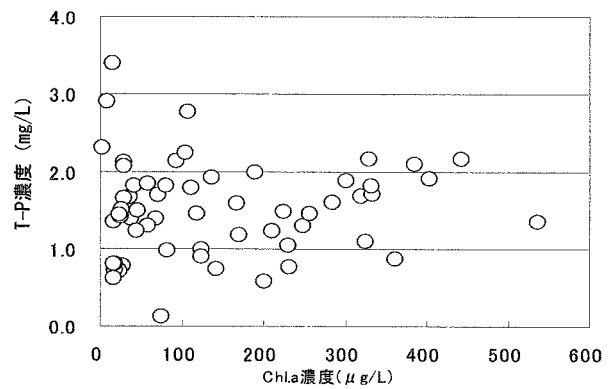


図-5b T-PとChl.aの関係

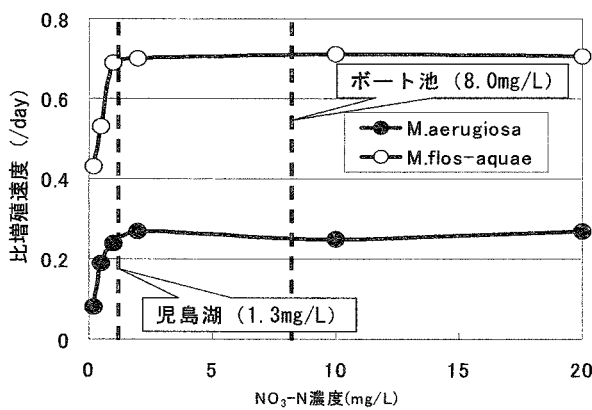


図-6a *Microcystis*の増殖能と窒素濃度の関係

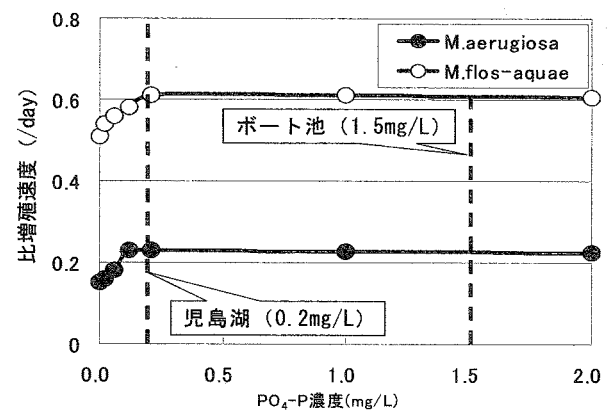


図-6b *Microcystis*の増殖能とリン濃度の関係

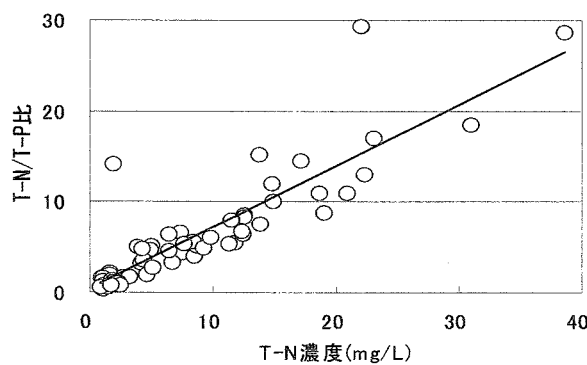


図-7a T-NとN/P比の関係

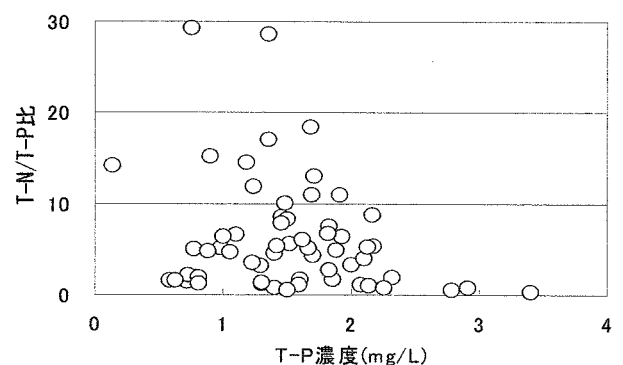


図-7b T-PとN/P比の関係

持することができる⁷⁾。これは強光による光酸化作用による死滅に抵抗するために、体細胞中の色素のカロテノイドの割合を増加させる能力をもっているためである¹⁴⁾。このことも夏季に *A.spiroides* が優占した一因と考えられる。

また、夏から秋にかけて（9～10月）、ボート池に形成された水の華の優占種は *A.spiroides* から *M.aeruginosa* に変遷した。本来、*M.aeruginosa* は *A.spiroides* と異なり空中窒素固定能を有していない¹³⁾ため、ボート池のような窒素制限的な湖沼では増殖できないと考えられる。しかしながら、ボート池においては、まず夏季に *A.spiroides* が優占し、大気中の窒素を体細胞内に取り込み異常増殖し、その後、*A.spiroides* は夏季～秋季の季節変遷に伴う日射量・水温の低下や水の華自体による遮光などにより死滅する。そしてその死滅した *A.spiroides* から溶存態無機窒素が溶出し、水中に窒素が供給されて一時的に N/P 比が上昇し、*M.aeruginosa* が大増殖して水の華を形成する。以上のような、まず *A.spiroides* が増殖し、その後 *M.aeruginosa* が増殖するという二段階の水の華発生機構を経ることによって、ボート池のような低 N/P 比・窒素制限的な湖沼環境であっても *M.aeruginosa* による水の華が形成されたものと考えられる。このような二段階の水の華発生機構は、ドイツの Melangsee 湖と Langer See 湖でも確認されている¹⁵⁾。

(7) アオコ発生に関わる環境要因

蓮沼ウォーターガーデンは九十九里浜沿いに位置し、防風林としてのクロマツ (*Pinus thunbergii*) の林に隣接している。また、ボート池の周囲にも多くのクロマツが植樹されている（写真-1）。そのため、春季（4～5月）にはボート池の表面を黄色く覆い、潮目を生じるほどの花粉がクロマツから飛散している。クロマツの花粉は他の植物細胞と比べ固形分が非常に多く、重量の 82.52% を固形分が占めており、さらにその固形分の 0.31% をリンが占めている¹⁶⁾。この春季における松花粉の飛散は、ボート池にとっては窒素・リンの供給源になっていると考えられる。したがって、海浜地帯に位置する親水湖沼の水環境保全のためには、流入河川からの負荷のみならず、周囲に林立する松林からの花粉など、防砂林に由来する汚濁負荷を考慮する必要があると考えられる。

また、冬季には多数のマガモ (*Anas platyrhynchos*) が飛来する（写真-2）。このカモは雑食性であり、池外で植物や穀物、貝などを摂食し、池内で糞をしている。事実、ボート池の棧橋や遊歩道はカモの排泄物が多くみられる。鳥類の糞は他の動物の糞と比べ、窒素・リンなどの無機成分を多く含有しており、固形分の割合も 80% と高い¹⁷⁾。そのためこのカモの糞は、量は少なくとも与える影響は大きく、池外からの外部負荷として多くの窒素・リンを海浜公園池に供給している

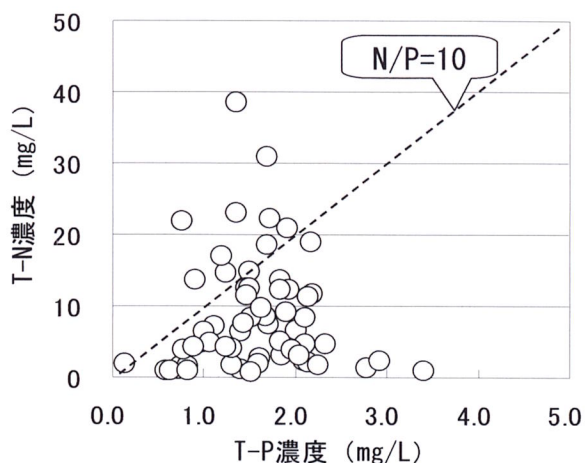


図-8 ボート池におけるN/P比



写真-1 ボート池周辺の松林と飛散した松花粉



写真-2 冬季に飛来するマガモ

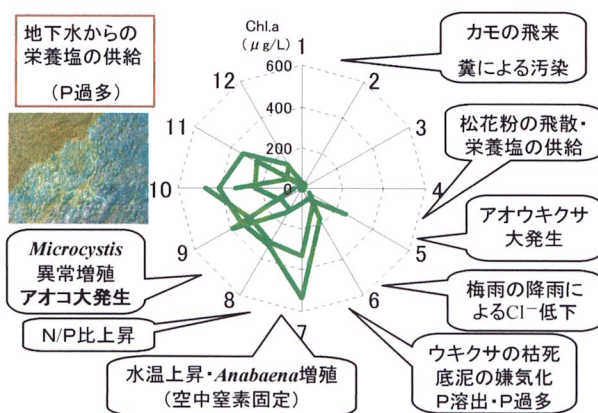


図-9 水の華の発生と環境要因

と考えられる。

さらに、初夏（6～7月）にはアオウキクサ（*Lemna paucicostata*）がボート池表面を覆うほど大量発生する。このアオウキクサは非常に密に発生・繁茂するため、遮光効果がきわめて強く、水中に太陽光が届かなくなり、植物プランクトンの増殖を抑制する。この時期に、水温の上昇にもかかわらず、Chl.a 濃度が低下するのはこのためである。植物プランクトン量が減少すると光合成による水中への DO の供給が減少するため、池水が嫌気化して底泥からのリン溶出を促進している可能性がある。なお、このアオウキクサは、7月中旬から枯死しはじめ、8月にはほとんど観察されなくなった。

以上より、蓮沼海浜公園ボート池における水の華（アオコ）の発生機構は次のようであると考えられた。

- ① 蓮沼海浜公園ボート池における栄養塩類の供給は、太平洋からの地下水によるところが大きい。
- ② 冬季にマガモ（*A.platyrhynchos*）が飛来し、排泄物により水中に窒素・リンを供給する。
- ③ 4～5月に、周囲の松林から潮目が生じるほどの松花粉が飛散し、窒素・リンが供給される。
- ④ 6～7月にアオウキクサ（*L.paucicostata*）が大量発生して湖面を覆い、これにより湖水が嫌気化して底泥からのリン溶出を促進している可能性がある。
- ⑤ 梅雨の降雨により、表層水の Cl⁻濃度が一時的に低下する。
- ⑥ 7～8月には、水温が上昇すると同時に、過剰供給されたリン（N/P 比＝6 程度）を利用して *A.spiroides* が水の華を形成するが、これは *A.spiroides* が有する空中窒素固定能によるところが大きい。
- ⑦ 8～9月には、水の華の優占種は *A.spiroides* から *M.aeruginosa* に変遷する。
- ⑧ *A.spiroides* から *M.aeruginosa* への変遷は、空中窒素固定により *A.spiroides* の細胞内に取り込まれた窒素が *A.spiroides* の死滅に伴って溶出し、水中の N/P 比が一時的に窒素過多になり、*M.aeruginosa* が増殖するという二段階の仕組みである。

これらをレーダーグラフにて表すと、図-9 のようになる。なお、図中の Chl.a 濃度は調査期間中（8年間）の値を示している。

4. まとめ

本研究は蓮沼海浜公園ボート池をモデルとして、汽水湖における水の華（アオコ）発生機構と、それに影響を与える環境因子を明らかにすることを目的として検討を行ったものである。得られた成果は以下のようにまとめられる。

- (1) リン過多の汽水湖である蓮沼海浜公園ボート池における *Microcystis aeruginosa* による水の華の発生機構は、*Anabaena spiroides* による水の華と連動した二段階の仕組みであることが示された。今後、培

養実験などにより検証していく必要がある。

- (2) 海浜地帯に位置する親水湖沼の水環境保全のためには、流入河川からの負荷のみならず、周囲に林立する松林からの花粉など、防砂林に由来する汚濁負荷を考慮する必要があることが示された。
- (3) 親水機能のひとつとして渡り鳥の飛来は重要であるが、海浜公園池などの閉鎖性が高い水域では、渡り鳥の排泄物により水質汚濁が進行し、水の華の発生原因となっている可能性が示された。

謝辞：本研究の遂行に際し、千葉県山武地域整備センター関係各位に多大なるご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Horne, A.J. and Goldman, C.R. : *Limnology* (2nd ed.), McGraw-Hill, Inc., 1994.
- 2) 田中正明：日本湖沼誌，名古屋大学出版会，1992.
- 3) 村上和仁，鷹野 洋，吉岡敏行，荻野泰夫，森 忠繁：児島湖における植物プランクトンの種構成と季節的消長，水環境学会誌，Vol.22, No.9, pp.770-775, 1999.
- 4) Odum, E.P. : *Fundamentals of Ecology* (3rd ed.), CBS College Publishing, 1971.
- 5) Murakami, K., Ishii, T., Taki, K. and Matsushima, H. : Seasonal Change of Phytoplankton in Seaside Park pond on Kujyukurihama Coastal Line, Japan, Proceedings of 7th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST'05, Vol.1, pp.581-590, 2005.
- 6) 瀧 和夫，田中崇大：我が国における湖沼の水環境面からみた成因別特性，環境情報科学論文集，Vol.18, pp.483-488, 2004.
- 7) 渡辺真利代，原田健一，藤木博太：アオコ その出現と毒素，東京大学出版会，1994.
- 8) 日本工業標準調査会：工場排水試験法 JIS-K0102, 1993.
- 9) 日本気象協会：海洋観測指針（気象庁編），1990.
- 10) 矢木修身，岡田光正，須藤隆一，萩原富司，高村義親：Microcystis の増殖特性，国立環境研究所研究報告 Vol.25, pp.47-58, 1981.
- 11) 宝月欣二：湖沼生物の生態学，共立出版株式会社，1998.
- 12) 藤本尚志，福島武彦，稲森悠平，須藤隆一：全国湖沼データの解析による藍藻類の優占化と環境因子との関係，水環境学会誌，Vol.18, pp.901-908, 1995.
- 13) 彼谷邦光：飲料水に忍びよる有毒シアノバクテリア，裳華房，2001.
- 14) Kellar, P.E. and Paerl, H.W. : Physiological Adaptations in Response to Environmental Stress during an N₂-fixing *Anabaena* Bloom, Applied and Environmental Microbiology, Vol.40, No.3, pp.587-595, 1980.
- 15) Ute Mischke : Cyanobacteria Associations in Shallow Polyrophic Lakes: Influence of Environmental Factors, Acta Oecologica, Vol.24, pp.511-523, 2003.
- 16) 日本花粉学会：花粉学事典，朝倉書店，1994.
- 17) (社)石川県畜産協会：ふん尿処理の実際，<http://ishikawa.lin.go.jp/kankyo/02.htm>, 1999.