

## 鹿野川湖のアオコ発生に関する研究

大塚有加 高松公子 村上 裕 中村洋祐\*

### Study on the Water Bloom Appearance in Lake Kanogawa

Yuka OOTSUKA, Kimiko TAKAMATSU, Hiroshi MURAKAMI, Yousuke NAKAMURA

In Lake Kanogawa, which is located in the south western part of Ehime prefecture, the water bloom has been observed frequently. The water bloom causes various problems such as bad-looking, offensive odor and cyanotoxin.

To investigate the present status of eutrophication of this lake, measurements of phytoplankton number, water quality and algal growth potential (AGP) were conducted from April 2005 to March 2006. In this lake, diatom dominated from autumn to spring, and cyanobacteria in summer. The aquatic environmental factors were suitable for the growth of *Microcystis* sp. in summer, suggesting the dependency primarily on nitrogen as limiting factor.

**Keywords** : Lake Kanogawa, eutrophication, phytoplankton, *Microcystis* sp., AGP test

#### はじめに

鹿野川湖は、愛媛県一の水量を誇る一級河川肱川本流に、洪水調節及び発電目的で1958年に竣工した県内で最も富栄養化が進んだダム湖である。近年鹿野川ダム湖では植物プランクトンの異常増殖により、アオコや淡水赤潮が引き起こされ、水質汚濁の進行が懸念されている<sup>1)</sup>。

アオコの原因となる植物プランクトンは、主に *Anabaena* 属 (以下, *Anabaena*) と *Microcystis* 属 (以下, *Microcystis*) で、これらは藍藻とよばれる原始的な細胞の植物プランクトンである。アオコが発生すると、景観の悪化、腐敗したアオコによる悪臭、さらにはアオコが生産する毒素による被害等さまざまな問題が生じる。このため富栄養化した湖沼において、発生メカニズムの解明、アオコ抑制対策等これまで多くの研究がなされてきた。しかし、各湖沼、特にダム湖はその形状、水質等に地域の地理的、地形的特性、周辺の人間活動の影響を受けており、個々の水域の特性にあった調査、対策が必要である<sup>2)</sup>。

当所においても、これまで鹿野川ダム湖の水質調査結果から検討を行ってきたが、近年、窒素安定同位体比を用いてダム湖への流入河川の影響について解析を行うな

ど、多方面から鹿野川ダム湖の富栄養化問題に取り組んでいる<sup>1)</sup>。

今回、ダム湖及びダム湖の流入河川のうち最も汚濁負荷量が多い宇和川において、プランクトン相、水質の調査を実施し、月別変動を把握した。また、富栄養化と藻類増殖の関係を調査するため、藻類生産の潜在能力 (AGP) を用いた藻類培養試験を行い、藻類増殖量、増殖の制限因子、阻害因子を検討した。

#### 方 法

##### 1 調査地点

鹿野川ダム湖の中央及び堰堤 (堰堤はプランクトン調査のみ)、流入河川の宇和川で採水し調査した。

##### 2 調査期間

2005年4月から2006年3月まで毎月1回採水し調査した。

##### 3 植物プランクトン調査

検水1Lをグルタルアルデヒド固定液 (グルタルアルデヒド (25%) 500mLにホルマリン (37%) 5mL, 塩化カルシウム12.5gを加え溶解したもの) 0.5v/v%またはルゴール固定液 (ヨウ素10g, ヨウ化カリウム20gを水に溶解し、氷酢酸20mLを加えたもの) 1v/v%で固定し、自然沈殿により20~40mLに濃縮した。この濃縮液をプランクトン計数板 (松浪硝子工業 (株) 製 MPC-200) に取り、生物顕微鏡 (オリンパス (株) 製 BX51) で計数し

愛媛県立衛生環境研究所 松山市三番町8丁目234番地

\* 現 県民環境部環境局環境政策課



図1 調査地点

た。なお、藍藻類については非常に微細な細胞が集合し群体を形成するものが多いことから、一瀬の方法<sup>3)</sup>に準じ、予め1群体とカウントする平均細胞数を決めておき、計数時にはその群体数を計数した。

#### 4 水質調査

ダム湖中央の表層(0.5m)及び底層(底より5m上)、宇和川の試水について、水温、pH、溶解性総窒素(DT-N)、溶解性総リン(DT-P)を測定した。水温は現場で、pHは持ち帰り後直ちに測定した。DT-N及びDT-PはWhatman GF/Bフィルターでろ過後、それぞれ日本工業規格 K0102の45.2及び46.3に定める方法により測定した。

#### 5 藻類培養試験

##### 1) 供試藻類

鹿野川ダム湖のアオコ発生の原因である*Microcystis*の一種の、*Microcystis aeruginosa*(以下、*M. aeruginosa*)の単藻分離株NIES-1099株を用いた。

##### 2) 培養条件

試水をWhatman GF/Fフィルターでろ過したろ液を用いた。このろ液150mLを300mL三角フラスコにとり、前培養したNIES-1099株を加えて、藻類培養試験器(高崎科学器械(株)製)により南條の方法<sup>4)</sup>に従い、温度30℃、照度2000Lx(暗環境12時間、明環境12時間)、50rpmで振とう培養した。

##### 3) 増殖量の測定

培養開始後、数日毎に分光蛍光光度計(日本分光(株)製FP-6200)で蛍光強度を測定し、最大値を藻類増殖の終点とした。

##### 4) AGP調査

ダム湖中央表層及び宇和川で採水した試水において*M. aeruginosa*がどの程度増殖可能なのかを検討するため、毎月AGPを測定した。前培養したNIES-1099株を加えて培養し、各試水の藻類増殖量を調査した。

##### 5) 制限因子の検討

ダム湖のアオコ増殖における制限因子を検討するた

め、アオコが多く見られる夏季(7月)のダム湖中央表層の試水に栄養塩類等を添加して培養した。栄養塩類等の添加量は、須藤らの方法<sup>5)</sup>に準じ、窒素(N)は $\text{NaNO}_3$  1.0mg-N/L、リン(P)は $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0.1mg-P/L、エチレンジアミン四酢酸(EDTA)は $\text{Na}_2 \cdot \text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  1mg/L、鉄(Fe)は $\text{FeCl}_3$  0.34mg-Fe/Lとした。またNとPの同時添加も行った。

##### 6) 阻害因子の検討

ダム湖のアオコ増殖を阻害する因子を、アオコが多く見られる夏季(8月)のダム湖中央表層の試水を用いて検討した。生体必須元素でありながら下等生物に対して毒性の高い亜鉛(Zn)と*Microcystis*に対して毒性が強いといわれている銅(Cu)<sup>6)</sup>を用いた。Znは塩化亜鉛( $\text{ZnCl}_2$ )を0~30 $\mu\text{g-Zn/L}$ の範囲で、Cuは硫酸銅( $\text{CuSO}_4$ )を0~20 $\mu\text{g-Cu/L}$ の範囲で段階的に添加し、増殖量を検討した。また、予め試水中の重金属濃度を誘導結合プラズマ発光分析装置(ICP-ES)(Leeman Labs, INC製Profile plus)で測定した。

## 結果及び考察

### 1 植物プランクトン調査結果

宇和川、ダム湖中央及び堰堤での植物プランクトンの細胞数の月別変動を図2に、優占種を表1に示した。

宇和川、ダム湖共に秋から春にかけて珪藻、夏季は藍藻が優占し、過去の調査<sup>2)</sup>と同様の傾向であった。ダム湖において、植物プランクトンが少ない時期ではあるが、中央で1~2月に堰堤で3月に鞭毛藻の優占もみられた。

プランクトン型による区分<sup>7)</sup>で見ると、富栄養型藍藻類群集の*Microcystis*、*Anabaena*はもちろんのこと、富栄養型緑藻類群集の*Scenedesmus*属、*Pediastrum*属や、中・富栄養型珪藻類群集の*Aulacoseira*属、*Fragilaria*属が多くみられ、鹿野川ダム湖で富栄養化が進んでいることが改めて示唆された。

鹿野川ダム湖のアオコ発生の原因プランクトンである*Microcystis*の写真を図3に示した。7月には直径が20~50 $\mu\text{m}$ くらいまでの比較的小さな群体が大部分を占めていたが、8月には50~300 $\mu\text{m}$ ほどの大きさの不定形の群体が主になっており、鹿野川ダム湖において7月頃からアオコが徐々に発生していたと考えられる。

また図2に示すように、7月には鹿野川ダム湖より宇和川により多くの*Microcystis*が観察されており、これまでの調査結果<sup>2)</sup>と同様に、ダム湖上流に位置する野村ダムからの種株の流入が鹿野川ダム湖でのアオコ発生要因のひとつであることが推察された。

### 2 水質調査結果

各地点における水温、pH、DT-N、DT-Pの月別変動を図4に示した。

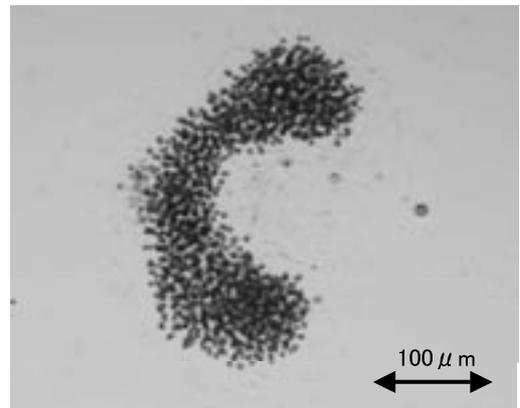
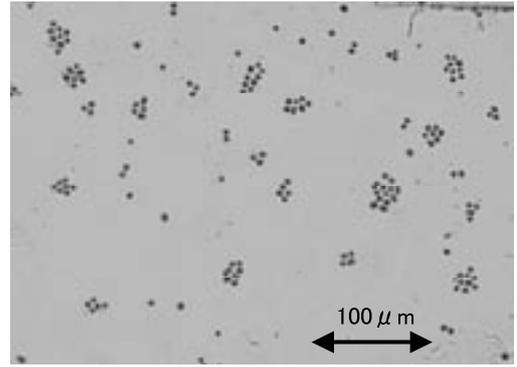
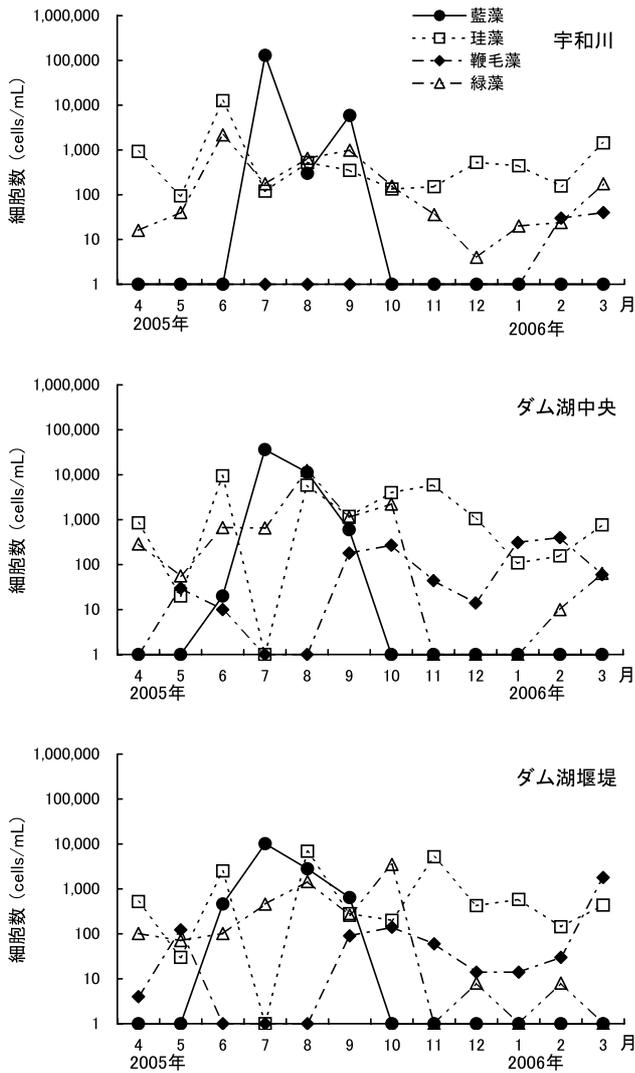


図3 Microcystis の群体  
ダム湖中央にて採水 (上:7/21, 下:8/22)

図2 植物プランクトン総細胞数の月別変動

表1 植物プランクトン優占種

	宇和川	ダム湖中央	ダム湖堰堤
2005年 4月18日	<i>Aulacoseira</i> sp. 珪藻	<i>Aulacoseira</i> sp. 珪藻	<i>Aulacoseira</i> sp. 珪藻
5月11日	<i>Aulacoseira</i> sp. 珪藻 <i>Cyclotella</i> sp. 珪藻 <i>Scenedesmus</i> sp. 緑藻	<i>Cryptomonas</i> sp. 鞭毛藻	<i>Cryptomonas</i> sp. 鞭毛藻
6月14日	<i>Fragilaria</i> sp. 珪藻 <i>Scenedesmus</i> sp. 緑藻	<i>Fragilaria</i> sp. 珪藻	<i>Fragilaria</i> sp. 珪藻
7月21日	<i>Microcystis</i> sp. 藍藻	<i>Microcystis</i> sp. 藍藻	<i>Microcystis</i> sp. 藍藻
8月22日	<i>Fragilaria</i> sp. 珪藻 <i>Pediastrum</i> sp. 緑藻 <i>Microcystis</i> sp. 藍藻	<i>Microcystis</i> sp. 藍藻 <i>Volvox</i> sp. 緑藻 <i>Fragilaria</i> sp. 珪藻	<i>Fragilaria</i> sp. 珪藻 <i>Microcystis</i> sp. 藍藻
9月16日	<i>Microcystis</i> sp. 藍藻 <i>Anabaena</i> sp. 藍藻	<i>Aulacoseira</i> spp. 珪藻 <i>Anabaena</i> sp. 藍藻 <i>Chlamydomonas</i> sp. 緑藻	<i>Anabaena</i> sp. 藍藻
10月3日	<i>Cymbella</i> sp. 珪藻	<i>Aulacoseira</i> spp. 珪藻 <i>Eudorina</i> sp. 緑藻	<i>Eudorina</i> sp. 緑藻
11月14日	<i>Aulacoseira</i> spp. 珪藻	<i>Aulacoseira</i> spp. 珪藻	<i>Aulacoseira</i> spp. 珪藻
12月13日	<i>Aulacoseira</i> spp. 珪藻	<i>Aulacoseira</i> spp. 珪藻	<i>Aulacoseira</i> spp. 珪藻
2006年 1月16日	<i>Aulacoseira</i> spp. 珪藻	<i>Peridinium</i> sp. 鞭毛藻	<i>Aulacoseira</i> sp. 珪藻
2月6日	<i>Aulacoseira</i> sp. 珪藻	<i>Peridinium</i> sp. 鞭毛藻	<i>Aulacoseira</i> sp. 珪藻
3月6日	<i>Cyclotella</i> sp. 珪藻	<i>Cyclotella</i> sp. 珪藻	<i>Peridinium</i> sp. 鞭毛藻

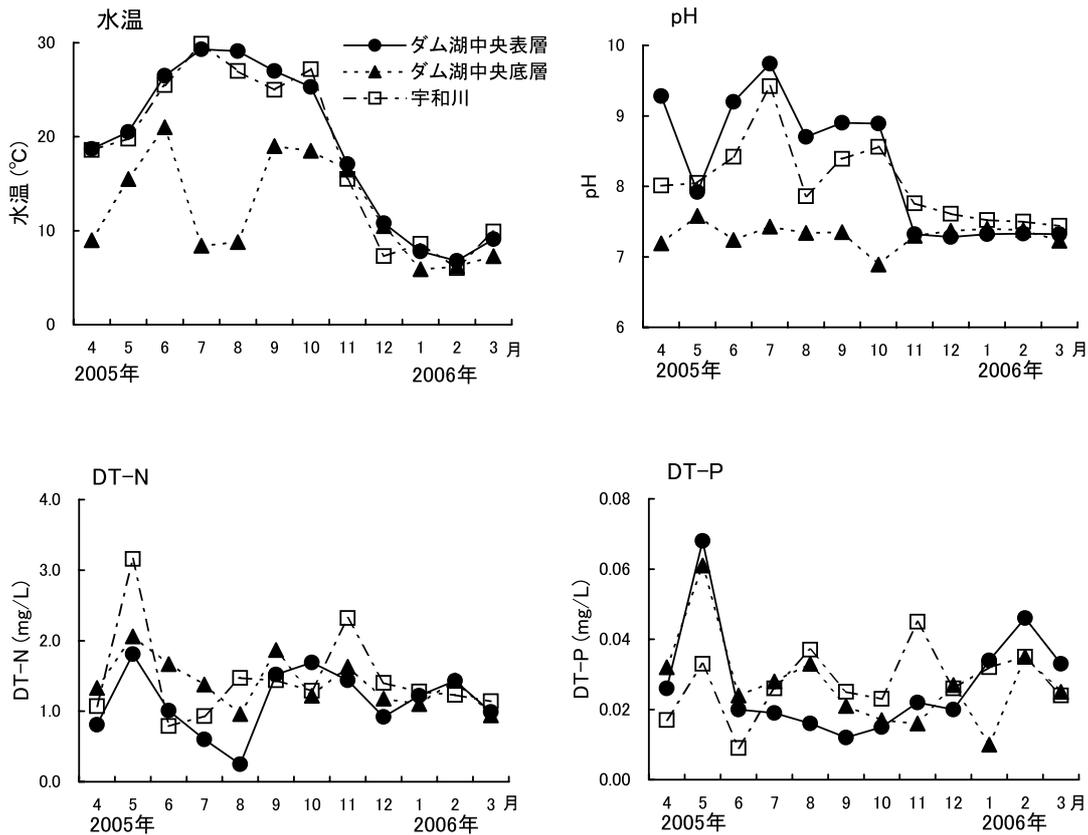


図4 水温, pH, DT-N, DT-P の月別変動

### 1) 水温

ダム湖中央の表層は6.8~29.3℃, 底層は5.9~21.0℃, 宇和川では6.0~29.9℃で推移し, ダム湖の表層と宇和川の水温は同月ではほぼ同じ値を示した。

夏季の7, 8月には, ダム湖表層及び宇和川では水温が30℃近くにまで上昇していた。これは, 成長の最適水温が30℃付近である *Microcystis* の増殖に適した条件であり<sup>8, 9)</sup>, 細胞数の調査結果と一致する。またこの時期, ダム湖底層では10℃未満となり, 成層が形成されていた。

### 2) pH

ダム湖中央の表層は7.3~9.7, 底層は6.9~7.6, 宇和川では7.4~9.4で推移し, ダム湖の表層と宇和川ではほぼ同様の変動を示した。

藻類による光合成が起こるとpHが上昇する<sup>10)</sup>が, 7月は, ダム湖中央表層及び宇和川で共に9.5付近を示した。*Microcystis* の最大成長が得られるpHは10付近である<sup>9)</sup>ので, この時期に *Microcystis* が優占した結果の一因を示すと考えられる。また, ダム湖底層は年間を通じて7付近であった。

### 3) DT-N及びDT-P

DT-Nは, ダム湖表層, 底層共に夏季に低下がみられ, 特に表層では0.25~0.60mg/Lの低い値を示した。DT-Pも, ダム湖表層では夏季に低下がみられた。これ

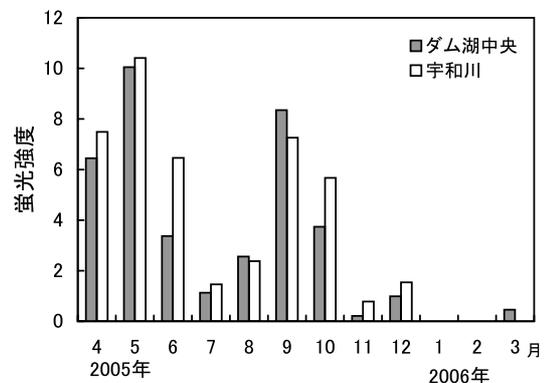


図5 AGPの月別変動

は, 夏季に藻類生産が活発になり, 栄養塩類を消費したためと推察される。

5月にはDT-N, DT-P共に増加がみられた。ダム湖のみでなく宇和川においても上昇していることから, ダム湖上流の野村ダムからの放流などにより, 多量の栄養塩類の流入があったものと考えられる。

## 3 藻類培養試験

### 1) AGP調査

ダム湖中央と宇和川におけるAGPの月別変動を図5に示した。試験開始時の蛍光強度を0とした。

*M. aeruginosa* の増殖量は、ダム湖中央、宇和川ともに、春、秋には高くなり、5月に最大値を示した。しかし、夏季は増殖量が低くなり、さらに冬季にはほとんど増殖が認められなかった。これらの試水の藻類増殖試験において *M. aeruginosa* の増殖が認められなかったケースが生じたのは2003年の調査時<sup>6)</sup>と同様であった。

夏季に増殖量が低下したのは、図4にも示すように、T-N等の栄養塩類濃度が減少した状態で新たな栄養塩類の供給がない今回の実験系においては、*M. aeruginosa* の増殖が困難であったためと考えられる。また、冬季の試水において増殖量が低かった原因のひとつとして、pHが中性付近であり、*M. aeruginosa* の増殖に最適な環境ではなかったのではないかと推察されるが、この時期の試水でほとんど増殖がみられなかった原因は今後さらに検討を要する。

## 2) 制限因子の検討

栄養塩類等を添加した培養試験結果を図6に示した。試験開始時の蛍光強度を0とした。

その結果、Nを添加すると増殖量が増大し、Nが制限因子となっていることが示唆された。P、EDTA、Feの添加では増殖量は増大せず、無添加の場合とほぼ同じであった。N及びP同時添加の場合は、N単独添加の場合よりは若干増加したが、顕著なものではなかった。

これらのことから、夏季は活発な藻類増殖により湖水中の栄養塩類が消費され減少した状態であったため、増殖量が低下していた(図5)が、Nが供給されるとさらに増殖量が増加することがわかる。湖沼がアオコ状態のときは、水中の無機態窒素が吸収され濃度が低下し、この時期の湖の生産力はNによって制限されている<sup>8)</sup>という、アオコ発生水域の特徴を示す結果となった。自然状態ではダム湖周辺からの連続的な栄養の補給があるので、アオコが発生しやすい状況におかれることとなる。また、N制限は、2004年に実施した、宇和川試水における制限因子の検討結果(図7)と同様であり、ダム湖への宇和川流入水の影響が大きいことが示唆された。

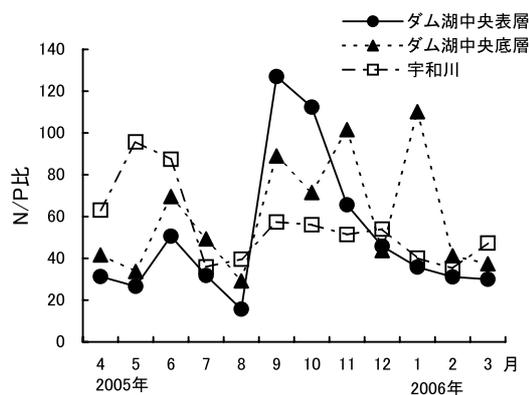


図8 N/P比の月別変動

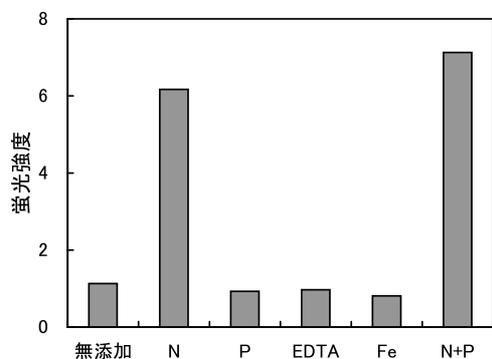


図6 栄養塩類添加培養試験結果

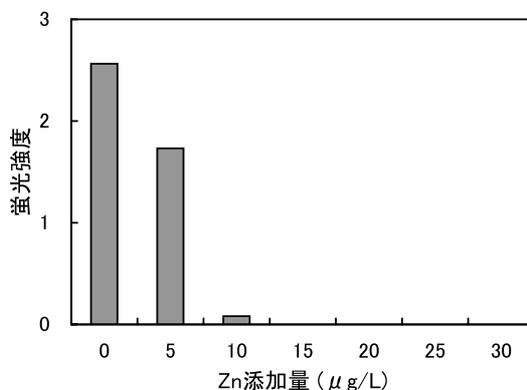


図9 Zn添加培養試験結果

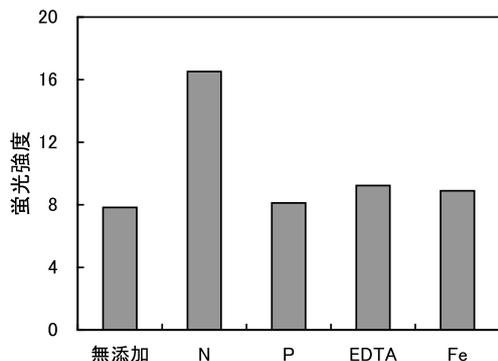


図7 宇和川試水における栄養塩類添加培養試験結果

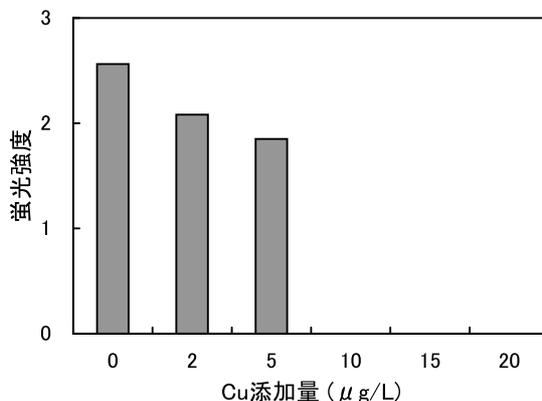


図10 Cu添加培養試験結果

さらに、植物プランクトンの増殖にとって重要な因子であるN/P比（重量比）の月別変動を図8に示した。植物プランクトンのN/P比は約7（Redfield比）、アオコは13.5であり、これよりN/P比が高いとP制限、低いとN制限になるとされている<sup>9, 11)</sup>。

N/P比の変動をみると全て13.5を超えており、これまでの鹿野川湖についての報告<sup>12-14)</sup>と同様に、P制限の状態となるが、藍藻類において無機態窒素で0.1mg/L、無機態リンで0.01mg/Lより高い場合は、N、Pは制限栄養塩とならないとの報告もあり<sup>9)</sup>、N/P比、AGPの季節変動を含めた制限因子の解析は今後さらに検討を要する。また8月から9月にかけて、特にダム湖表層でN/P比が劇的に増加しているが、これはDT-Nの増加に起因している。

### 3) 阻害因子の検討

Zn及びCuを添加した培養試験結果を図9及び10に示した。試験開始時の蛍光強度を0とした。なお、試水中のZn及びCu濃度は1 $\mu$ g/L未満であった。

その結果、Znは10 $\mu$ g/L以上で、Cuも10 $\mu$ g/L以上で顕著な増殖阻害がみられた。無添加培養液の増殖量を100%とすると、Znは5 $\mu$ g/L添加で68%、10 $\mu$ g/L添加で3%、Cuは2 $\mu$ g/L添加で81%、5 $\mu$ g/L添加で72%となり、これ以上の添加では増殖は認められなかった。

Cuは、実際に硫酸銅が殺藻剤として使用されることがあるが、鹿野川ダム湖でもこれらの因子が増殖抑制効果を示す可能性が示唆された。しかし、Cuによる増殖阻害がさらに低濃度でみられる報告<sup>6)</sup>もあり、他の季節での試水を調査するなど阻害因子についてさらなる調査検討が必要である。

## まとめ

鹿野川ダム湖において植物プランクトン調査、水質調査、藻類培養試験を行い、アオコ発生について調査検討したところ、次のような知見を得た。

- 1 秋から春にかけて珪藻、夏季は藍藻が優占し、さらに富栄養型群集のプランクトンが多く観察されたことから鹿野川ダム湖が富栄養化状態にあることが示唆された。
- 2 夏季においては水温、pH等の環境条件がアオコ発

生に適した状況になっていた。

- 3 夏季のダム湖水において、*M. aeruginosa*の増殖についてはNが制限因子となり、Zn及びCuが10 $\mu$ g/L以上で増殖阻害を示した。

今回の調査結果により、鹿野川ダム湖のアオコ対策において、ダム湖へのN負荷量の削減が重要課題であることが改めて示唆された。アオコが発生しやすい夏季においては特に、N負荷量を管理することがアオコの大量発生の抑制につながるものと考えられる。

今後は、季節ごとの制限因子、阻害因子等をさらに調査検討し、鹿野川ダム湖のアオコ対策に資する必要があると考えられる。

## 謝 辞

今回の調査検討にあたり、採水にご協力いただきました愛媛県八幡浜保健所の皆様に感謝します。

## 文 献

- 1) 進藤三幸ほか：全国環境研会誌，31，92-100（2006）
- 2) 中野伸一：鹿野川ダム湖流入汚濁負荷量調査研究事業報告書（2004）
- 3) 一瀬諭：滋賀県衛生環境センター所報，36，29-35（2001）
- 4) 南條吉之：鳥取県衛生環境研究所報，44，46-50（2004）
- 5) 須藤隆一ほか：国立公害研究所研究報告，26（1981）
- 6) 南條吉之ほか：鳥取県衛生環境研究所報，41，43-50（2001）
- 7) 田中正明：日本湖沼誌，名古屋大学出版会（1992）
- 8) 朴虎東ほか：陸水学雑誌，62，229-248（2001）
- 9) 手塚公裕ほか：用水と廃水，48，411-423（2006）
- 10) 須藤隆一ほか：水環境保全のための生物学，248-250，産業用水調査会（2004）
- 11) 藤本尚志ほか：水環境学会誌，18，901-908（1995）
- 12) 西原伸江ほか：愛媛県環境保全センター所報，18，1-10（1998）
- 13) 岡裕三ほか：愛媛県公害技術センター所報，12，69-73（1992）
- 14) 中村洋祐ほか：愛媛県公害技術センター所報，6，12-18（1985）