

# 木崎湖の *Peridinium bipes* を原因種とする 淡水赤潮発生における Ca の影響

渡辺 義人<sup>1)</sup>・朴 虎 東<sup>2)</sup>・林 秀 剛<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 信州大学繊維学部

<sup>2)</sup> 信州大学理学部

## Effects of Calcium on Occurrence of Freshwater Red Tide Caused by *Peridinium bipes* in Lake Kizaki

Yoshito WATANABE<sup>1)</sup>, Hodong PARK<sup>2)</sup> and Hidetake HAYASHI<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Faculty of Textile Science & Technology, Shinshu University

<sup>2)</sup> Faculty of Science, Shinshu University

**Abstract :** The effects of Ca on the occurrence of freshwater red tide caused by *Peridinium bipes* in Lake Kizaki were investigated.

The Ca concentration in the water of Lake Kizaki was low ranging from 4 to 5 mg/l with the annual mean of 0.43 mg/l in 1988 and 1989, and this level did not change for last ten years.

The Ca concentration in surface lake water decrease from early spring to summer and decreased from surface to 4m layer in summer, while Ca did not decreased from 6m to 8m layer, where Si decreased evidently.

The Ca content in cells of *Peridinium bipes* was 0.20% or so. This level is considerably low comparing with that of *Microcystis* cells collected from Lake Suwa. The concentration factor of Ca by *Peridinium bipes* was order of  $10^2$ , which was remarkably smaller than that of other metals.

From these results, the following may be concluded :

1. Ca is not a primary factor for stimulating occurrence of freshwater red tide caused by *Peridinium bipes* in Lake Kizaki.
2. *Peridinium bipes* absorbs Ca more positively than a dominant diatom *Fragilaria* sp.
3. Among the species of genus *Peridinium*, *Peridinium bipes* is not a species which requires Ca in excess.

**Key words :** *Peridinium bipes*, freshwater red tide, calcium, Lake Kizaki

ペリディニウム, 淡水赤潮, カルシウム, 木崎湖

### はじめに

近年、ダム湖を中心に淡水赤潮の発生が各地で見られるようになったが、その赤潮の原因種の多くは *Peridinium* 属の渦鞭毛藻<sup>1)</sup> である。この *Peridinium* による赤潮の発生機構についての研究は未だ極めて不十分な段階であるが、これまでに赤潮の発生を促す有力な環境因子の一つとして、Ca が挙げられている。渡

辺<sup>2)</sup>は淡水赤潮が発生したダム湖の底泥から溶出物を含む水を培養基として、*Peridinium bipes* f. *occulatum* の増殖を検討した結果、Ca 濃度の高いことが著しい増殖を誘発する主要な要因の一つであると報告している。また、畑<sup>1)3)</sup> は *Peridinium cunningtonii* および *Peridinium penardii* の増殖における Ca 要求量の実験から、両種ともに Ca の濃度が10mg/l で最大増殖量に達したこと、さらに広島県下での赤潮は Ca 濃度が

10mg/l以上の比較的高い湖にのみ出現し、7mg/l以下の低濃度の湖では見られなかったなどから、*Peridinium*による淡水赤潮の発生にはCa濃度の高いことが基本的条件である可能性が大きいとしている。一方、浦牛ら<sup>4)</sup>は*Peridinium bipes* f. *occultatum*を供試生物としてAGP試験を行った結果、Ca濃度と*P. bipes*の増殖量との間には関係がみられず、Ca濃度の低い試水でより高い増殖量が見られたことから、Caは*P. bipes*の増殖制限因子にはなり得ないと報告している。

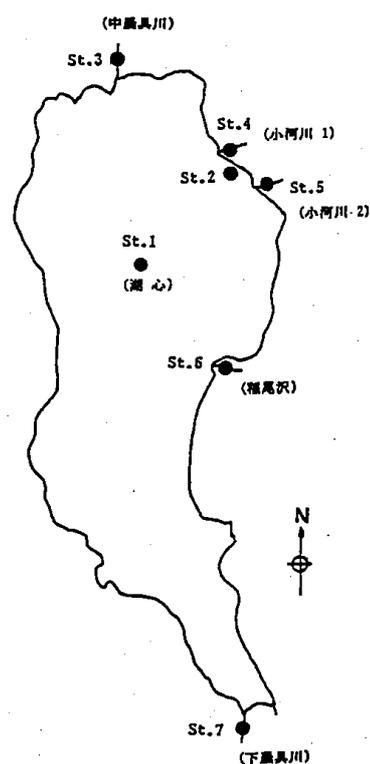
本論文では1987年以来*Peridinium bipes*を主要原因種とする淡水赤潮の発生が見られるようになった木崎湖を対象に、湖水中のCa濃度のレベルや変動傾向および木崎湖産*Peridinium bipes*の化学組成などから、淡水赤潮の発生を促すCaの増殖制限因子としての可能性などについて検討したものである。

#### 試料および方法

水質調査は1988年7月から1989年の8月まで月1回行った。水質測定項目はCaの他に植物プランクトンの消長との関係を見るためにMgとSiについても分析した。採水地点は湖心のほか(図1)に沿岸部1点、中農具川を含む流入河川4点、それに流出口(下農具川)の計7地点である。なお、湖心では水質の垂直的な分布傾向を見るために2mないし4m間隔で深度別に採水した。分析にはGFフィルター(Whatman社製、GF/C)で口過した口液を用いた。Ca, Mg, Siの分析はICP発光分光法による。なお、この3成分のほかに基本的水質を知るためにNa, K, Cl, SO<sub>4</sub>などを分析した。Na, Kは原子吸光法、Cl, SO<sub>4</sub>はイオンクロマトグラフィーで定量した。Fe, Al, Mn, Zn, Cuなどの溶存態微量成分は0.45μmメンブランフィルター(ミリポア社製、HAタイプ、孔径0.45μm)で口過した口液を50倍に濃縮し、ICP発光分光法で測定した。

*Peridinium*は20μmメッシュサイズのプランクトンネットで採取した後、走光性を利用して集積するか、64μmと20μmメッシュのネットを用いて口別した。なお、同時に*Fragilaria*や*Staurastrum*を分別するときには、98μmメッシュのネットを併用した。*Peridinium*の化学分析は、藻体を凍結乾燥後、テフロン密閉分解容器にて酸性下、加圧・熱分解し、Kは原子吸光法、その他の成分はいずれもICP発光分光法によって行った<sup>5)</sup>。

図1. 採水地点



#### 結果と考察

##### 1. 木崎湖における淡水赤潮の発生状況

朴ら<sup>6)7)</sup>によると、木崎湖の*Peridinium*は1984年以前は時々検出される程度であったのが、1985年より増加を始め、1987年秋から赤潮状態を呈するまでになった。1986年11月以前は*Peridinium williei* 1種であったが、1986年以後徐々に*Peridinium bipes*が共存するようになり、1988年5月のパッチ内では90%以上が*P. bipes*で占められるようになった。1988年の*Peridinium*によるパッチの形成状況をみると5月中旬、水温が15℃を越えた後、東部沿岸から始まり、北部および西部沿岸での発生がそれに続き、湖心から南部での発生が最も遅れて観察された。8月中旬の湖心部におけるパッチ内の細胞数は $2 \times 10^5$  cells/mlをこえる最高値を示した。9月中旬にいったん減少したが10月中旬にはまた増加し、その後ゆっくり減少した。1989年は水温の上昇が遅かったためか、*Peridinium*のパッチの形成は前年よりも一ヶ月ほど遅れて観察された。

##### 2. 木崎湖および流入河川的基本的水質とCaの濃度レベル

表1は木崎湖および中農具川などの流入河川の基本

的水質を示したものである。下欄には比較のために、日本の河川の平均水質<sup>8)</sup>を示した。これによると木崎湖と木崎湖の主要流入河川である中農具川の水質は、非常によく似ており、木崎湖の水質が基本的には中農具川の水質に支配されていることがわかる。また、中農具川の水質と稲尾沢川などの小河川の水質は、流域

の地質学的条件の違いを反映してか、明らかに異なり、前者に比べて小河川の方が Ca で低く、K, Cl, Si の 3 成分が高濃度である。しかし、稲尾沢川や他の小河川の流量は少なく、それらを合わせても中農具川の流量の1/5程度<sup>9)</sup>であり、湖水の基本的水質への影響は小さいと考えられる。

表 1. 各採水地点における主要無機成分組成

採 水 地 点	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	Si mg/l	アルカリ度 me/l
St.1 (湖心表層)	2.53	0.88	4.47	0.59	0.93	2.6	4.72	0.307
St.2 (沿岸湖水)	2.51	0.93	4.50	0.58	0.94	2.4	4.79	—
St.3 (中農具川)	2.32	0.83	4.53	0.57	0.79	2.5	5.36	—
St.4 (小河川 1)	2.91	1.83	2.22	0.38	1.5	2.7	9.51	—
St.5 (小河川 2)	3.88	1.79	2.64	0.53	1.5	2.2	10.6	—
St.6 (稲尾沢)	—	—	2.72	0.51	1.6	2.4	7.10	—
* 日本河川の平均値	3.7	1.9	8.8	1.9	5.8	10.6	8.87	—

採水日：1988.5.23 \* Kobayashi (1960)

木崎湖の各成分の濃度を、日本河川の平均濃度と比べるといずれの成分も木崎湖の方がかなり低く、Ca で 1/2、Cl の濃度は特に低く、1/6 のレベルであり、上流域にある天然水の特徴をよく表している。

表 2 は基本的成分のうち、Ca, Mg, Si の 3 成分について、月 1 回、計 13 回の調査データにもとずき、年平均値と変動係数をまとめたものである。これによると、木崎湖と農具川 ( St. 1, 2, 3, 7 ) では、Ca と Mg の変動係数が 5 ~ 10%、Si で 10 ~ 15% の範囲にあり、成分により若干異なるものの、そのばらつきの程度はかなり小さい。木崎湖の Ca の平均値は湖心 (

St. 1 ) で 4.35 mg/l であり、変動の範囲は沿岸帯を含めると、およそ 4 ~ 5 mg/l になる。稲尾沢川や他の流入河川 ( St. 4, 5, 6 ) では、Ca, と Mg の変動係数はおよそ 15 ~ 30% と木崎湖などに比べるとばらつきが大きく、これら小河川に対する人為の影響の大きさを伺わせている。このように、木崎湖の Ca 濃度は、畑<sup>1)</sup>が報告した *Peridinium* の増殖に必要な最低濃度 3 mg/l の条件は満たしているものの、すでに報告<sup>1)2)3)</sup>されているような *Peridinium* の赤潮を誘発するに要する Ca 10mg/l 以上という濃度に比べてかなり低いレベルである。

表 2. 各採水地点における Ca, Mg および Si 濃度の年平均値と変動係数

		St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7
Ca	平均値(mg/l)	4.35 (3.99~4.73)	4.30 (3.75~5.05)	4.56 (3.90~5.27)	1.34 (1.01~2.35)	2.50 (1.47~3.98)	2.68 (2.18~3.86)	4.31 (3.84~4.78)
	変動係数(%)	5.37	7.75	8.12	28.3	26.8	15.6	9.29
Mg	平均値(mg/l)	0.56 (0.49~0.60)	0.55 (0.49~0.61)	0.50 (0.40~0.58)	0.25 (0.21~0.36)	0.36 (0.24~0.69)	0.48 (0.41~0.56)	0.53 (0.42~0.59)
	変動係数(%)	5.78	6.13	9.32	16.1	27.3	12.6	8.00
Si	平均値(mg/l)	4.36 (3.24~5.23)	4.43 (3.30~5.54)	5.03 (4.25~5.85)	11.5 (8.17~13.3)	11.6 (8.72~14.1)	8.78 (7.10~11.6)	4.29 (2.89~5.36)
	変動係数(%)	13.2	14.9	10.2	10.7	10.4	14.6	16.0

( ) 内の数値：最小値～最大値

表3は、1979年の夏に行われた第2回自然環境保全調査の際に分析した、仁科三湖における表層水の Ca と Mg の濃度である。木崎湖についてみると、Ca 4.41および Mg 0.51 mg/l であり、両元素とも今回調査した夏期の濃度に極めて近い値である。このことは木崎湖における Ca の濃度レベルが少なくともこの10年間、基本的に変化しなかったことを示すものである。すなわち、木崎湖において *Peridinium* の存在が検出され、赤潮を呈するに至る過程で、Ca の濃度に大きな変化はなかったことを示している。

このように、木崎湖の Ca の濃度レベルが基本的に低いことと、赤潮発生前後において Ca の濃度に変化がなかったことから、Ca が *Peridinium bipes* による淡水赤潮の発生を促す増殖制限因子となっている可能性は極めて少ないといえる。

表3. 1979年における仁科三湖表層水の Ca および Mg 濃度

	木崎湖	中綱湖	青木湖
Mg mg/l	4.41	4.34	4.11
Ca mg/l	0.52	0.37	0.31

1979年8月25日採水。

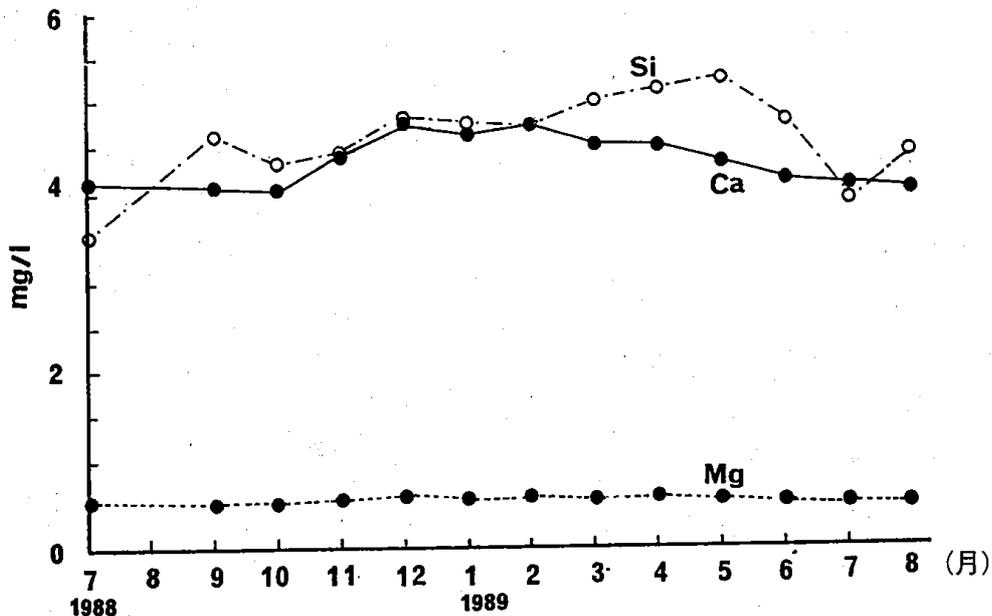
3. 木崎湖における Ca, Mg および Si の各濃度の季節変化と垂直分布

図2は木崎湖の表層水における Ca, Mg, および Si

の各濃度の季節変化をみたものである。Mg は年間を通して0.5~0.6 mg/l の範囲で推移し、はっきりとした変化傾向はみられなかった。Si は冬から5月頃にかけて徐々に増加するが、その後夏に向かって急激に減少し、再び秋にかけて増加するという顕著な傾向がみられた。この5月頃からの Si の減少は、この時期が *Asterionella Fragilaria* などの珪藻の増殖期にあたる<sup>10)</sup> ので、主にこれら珪藻類により取り込まれたものと思われる。Ca は、変動幅は小さいもののやはり冬期に高く、Si に先がけて3月頃から夏にかけて徐々に減少し、秋から冬にかけて上昇するというパターンが見られる。この Ca の春先から夏への減少は Si の場合と同様、植物プランクトンの増殖過程と何らかの関係があることをうかがわせるが、あとで述べる夏期の Ca 濃度の垂直分布を形成する原因と同様に、この期間における Ca の減少も *Peridinium* により吸収されたことが主な原因であると推測される。

図3は5月、6月、7月および8月における3成分の垂直的な濃度分布を示したものである。5月はまだ3成分ともほとんど変化はみられないが、6月に入ると6m層付近に僅かながら Si の負のピークがみられるようになる。7月、8月になると Ca, Si ともに明らかな変化がみられ、Si は6~8m層にかけて大きく減少しそれより下層に向かって僅かながら増加する傾向を示す。一方、Ca は Si ほど顕著ではないが、表層から4mにかけて、下層より明らかに濃度の低い部分が現れ、8m層より下層では濃度はほぼ一定となる。

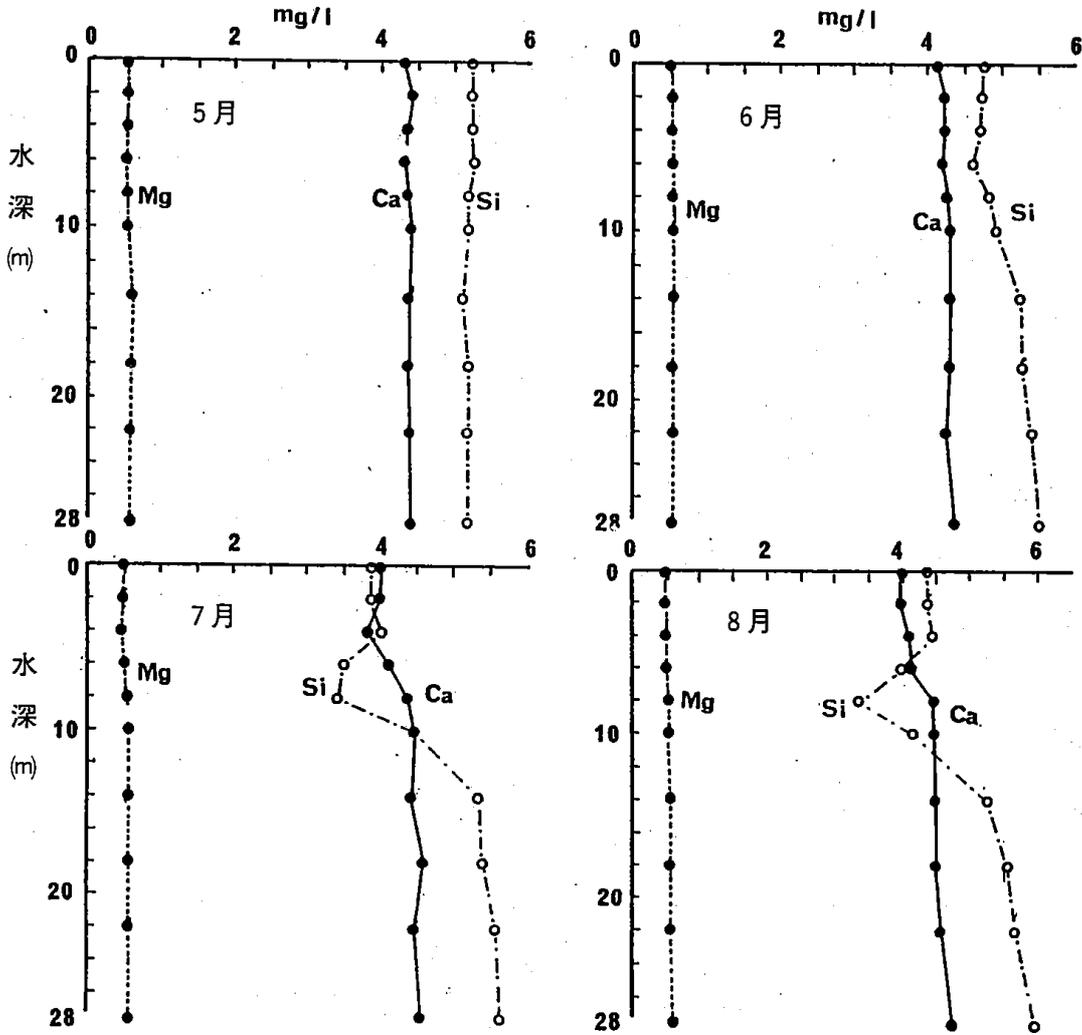
図2. 木崎湖表層における Ca, Mg および Si の季節変化



夏期における 8 m 層付近は珪藻類の現存量の分布が極大値を示す深度にあたるので、この深度付近の Si の濃度の減少は、珪藻類による消費に起因することは明らかである。一方、この時期の表層付近には *Peridinium* の現存量のピークがみられ、しばしばパッチ状に赤潮

を呈する。このことから表層付近における Ca 濃度の減少は主に *Peridinium* によるものと思われる。Mg の濃度については、いずれの時期においても明確な変動傾向は認められなかった。

図 3. 木崎湖における Ca, Mg および Si の垂直分布 (1989)



4. *Peridinium bipes* の無機成分組成

渡辺ら<sup>5)</sup>は1988年7月1日に採取した木崎湖産 *Peridinium bipes* の無機成分組成から、その Ca 含量が、*Synedra* や *Microcystis* に比べて特に高くないことや、Ca の濃縮率が Mg や他の金属よりも小さく、Ca を特に積極的に吸収していないことなどを報告した。本研究ではさらに木崎湖において、異なった時期に採取した *P. bipes* 3 試料と、同時に採取分別した緑藻の *Staurastrum* sp. と珪藻の *Fragilaria* sp. の無機成分組成を明らかにし、*P. bipes* の Ca 要求性について検討を行った。

表 4 に分析結果をまとめて示した。1988年7月1日に採取した *P. bipes* の成分組成についてはすでに報告したものであるが<sup>5)</sup>、比較のためここに再録した。また参考として諏訪湖産 *Microcystis* spp. の成分組成を示した。

まず Ca 含量についてみると、*P. bipes* では 0.14~0.22% の範囲にあるのに対して、*Staurastrum* sp. (1988年12月採取) と *Fragilaria* sp. (1989年6月採取) の Ca 濃度は 0.12% 前後であり、明らかに *P. bipes* のほうが高い。このことは *P. bipes* が Ca を、より積極的に吸収・蓄積していることを示すと云えよ

表 4. 木崎湖産植物プランクトンの無機成分組成 (比較のために諏訪湖産 *Microcystis* についても示した)

試料	採取日	K %	Mg %	Ca %	Sr ppm	Ba ppm	Al ppm	Mn ppm	Zn ppm	Cu ppm	Fe ppm	P %
<i>Peridinium bipes</i>	880701	0.16	0.07	0.14	3	17	182	150	37	4.4	185	0.37
"	881202	0.16	0.11	0.18	6	36	2840	1440	73	12.2	9290	0.38
"	890630	—	0.10	0.22	5	24	221	222	47	9.2	247	0.61
"	890718	—	0.09	0.20	6	31	148	177	53	4.1	94	0.20
<i>Staurastrum</i> sp.	881202	0.40	0.08	0.13	5	23	1264	532	58	14.2	3450	0.12
<i>Fragilaria</i> sp.	890630	—	0.06	0.11	3	25	345	155	36	6.3	226	0.31
* <i>Microcystis</i> spp.	890714	—	0.17	0.56	17	19	348	64	186	8.2	350	0.59

(\* 諏訪湖産) ( )

う。前述したように夏季の成層期における湖水中の Ca 濃度の垂直分布において、*Fragilaria* などの珪藻類の現存量が多い 8 m 層付近よりも、*Peridinium* が多く分布している上層付近に低い傾向を示したのはこのことを裏付けている。このように *P. bipes* の Ca 含量は同じ木崎湖産の他の植物プランクトンよりも相対的に高い値を示しているが、諏訪湖の *Microcystis* の Ca 濃度よりはかなり低いレベルである。諏訪湖の水中の Ca 濃度は 12~13 mg/l と木崎湖に比べて 3 倍程高いが、*P. bipes* と *Microcystis* spp. における Ca の濃縮率を算出するといずれも  $4 \times 10^2$  程度でありほとんど差はない。

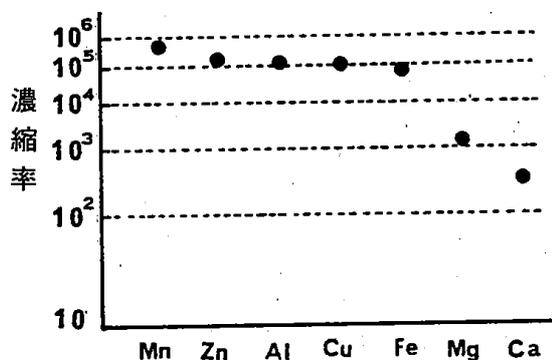
Mg 含量は *P. bipes* では 0.07~0.11% で、Ca 含量の約 1/2 である。*Staurastrum* や *Fragilaria* はこれよりやや低い。ちなみに湖水中と *P. bipes* の藻体中の Ca と Mg の濃度比 (Ca/Mg) を比較すると、湖水中 Ca/Mg 7.6 に対して藻体中では 2.0 となり、Ca よりむしろ Mg のほうがより積極的に *P. bipes* に取り込まれていることがわかる。*Staurastrum* や *Fragilaria* についても同様の傾向である。図 4 は、*P. bipes* によるいくつかの金属の濃縮率を比較したものである。濃縮率の算出に用いた湖水中の各金属の濃度は表 5 の通りである。この図からもわかるように金属の中でも Ca 濃縮率は  $10^2$  のオーダーであり非常に小さい。これらのことから *P. bipes* は Ca を特に過剰に要求する種ではないと推定される。従って、鞭毛藻類には Ca 分の豊富な皮殻で細胞を覆っている種が多い<sup>11)</sup> といわれているが、*Peridinium bipes* に関してはそのような Ca を多量に含んだ皮殻をもっている可能性は少ない。

表 5. 木崎湖水の溶存態金属元素濃度 (湖心、4 m 層)

Mg	Ca	Al	Fe	Mn	Zn	Cu
mg/l	mg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l
0.57	4.31	12.8	11.3	2.1	2.2	0.43

1988年7月1日採水。

図 4. *Peridinium bipes* による各金属の濃縮率



Kについては一部の試料のみ分析されているが、*P. bipes* は 0.16% で、Ca より若干低い程度である。*Staurastrum* は 0.4% と *P. bipes* より 2.5 倍ほど高い。P 含量については *P. bipes* は 0.20~0.61% とかなり変動が激しい。今回の試料中、最も高い含量である。0.61% (6月30日) は諏訪湖産 *Microcystis* spp. の 0.59% に匹敵する。また、*Peridinium* と同時に採取した *Staurastrum* や *Fragilaria* の P 含量と比較すると明らかに *Peridinium* のほうが 2~3 倍ほど高い。Whne ら<sup>12)</sup> によると Kinnered 湖における *Peridinium cinctum* の P 含量は  $0.3 \pm 0.11\%$  である。0.61% を除くと、木崎湖産 *P. bipes* の P 含量はこの範囲

に入る。

重金属などの微量成分についてみると、1988年12月の試料を除き、各成分の含量は採取時期によって、また *Peridinium* と *Staurastrum* や *Fragilaria* との間で、それほど大きな違いはなく、ほぼ同じレベルである。これに対して、12月の試料は土壌の主成分である Al, Mn, Fe などの含量が極めて高く、特に *Peridinium* はその他の試料の各含量より10~50倍も高い。この原因についてはさらに検討を要するが、この時期が循環期にあたるので、これら土壌成分の微粒子が湖底表層付近から上層へと移動し、藻類の表面に吸着蓄積したものと推定される。

### ま と め

*Peridinium* 属を原因種とする淡水赤潮の発生を誘発する主要な因子の一つとして挙げられている Ca が、*Peridinium bipes* による淡水赤潮発生を促す増殖制限因子となり得るかどうか、木崎湖を対象に湖水中の Ca の濃度レベルや変動傾向ならびに *Peridinium* の無機成分組成からその可能性などについて検討を行った。主な結果を要約すると以下のようである。

1. 木崎湖における Ca の濃度は、1988年7月から

1989年8月の間に4.0~5.0 mg/l の範囲で変動し、その年平均値4.35 mg/l は日本河川の平均濃度8.8 mg/l よりかなり低いレベルである。また、この木崎湖の濃度レベルは最近10年変わっていない。これらの結果は Ca が *Peridinium bipes* の淡水赤潮発生を促す増殖制限因子ではないことを示唆している。

2. Ca 濃度の表層における季節変化をみると春先から夏にかけて減少する傾向にあり、また夏期の垂直分布では表層から4 m層にかけて明らかに下層より低くなる分布を示す。これに対して、Si の濃度が大きく減少する6 mから8 m層付近では Ca の減少傾向は見られない。このことから *Peridinium bipes* は珪藻に比べて、Ca をより積極的に吸収していることが推定され、藻体中の Ca 濃度が珪藻より高いこともそのことを示している。

3. *Peridinium bipes* の Ca 濃度は0.2%前後で、緑藻の *Staurastrum* や珪藻の *Fragilaria* より高いものの、諏訪湖産 *Microcystis* の Ca 濃度よりかなり低く、またその濃縮率も $10^2$  のオーダーで、他の金属に比較して非常に小さい。これらの結果から、木崎湖で淡水赤潮を起こす *Peridinium bipes* は *Peridinium* 属の中で Ca を特に過剰に要求する種ではないと推定される。

### 文 献

- 1) 畑幸彦：ダム湖における淡水赤潮，日本陸水学雑誌，50(1)，71-72，1989
- 2) 渡辺仁治・清水晃・石井玉恵・坪田智子：*Peridinium bipes* f. *occulatum* (Lemm.) Lef. による淡水赤潮の発生機構に対する考察，国立公害研究所資料，第24号，29-48，1983
- 3) 畑幸彦・西島敏隆・藤岡敏彦：ペリディニウムの増殖生理及びシストの形成と発芽，永瀬ダム湖における淡水赤潮の発生に関する研究（高知県），130-153，1984
- 4) 浦牛原由紀・小野田義輝：淡水赤潮の発生に関する二、三の考察，II. AGP 試験における淡水赤潮増殖制限因子の探究，用水と廃水，31(9)，794-797，1989
- 5) 渡辺義人・朴虎東・林秀剛：木崎湖産 *Peridinium bipes* の化学組成，日本陸水学会甲信越支部会報，13・14号，51-53，1988
- 6) 朴虎東・木田浩司・林秀剛：木崎湖における *Peridinium* spp. の発生について，日本陸水学会第53回大会講演旨，AO8，1988
- 7) 朴虎東・楠見知彦・林秀剛：木崎湖における *Peridinium* spp. の動態解析，日本陸水学会第54回大会講演旨，D204，1989
- 8) Kobayashi, Jyun: A Chemical Study of the Average Quality and Characteristics of River Water of Japan. Ber. Ohara Inst. Landwirtschaft. Biol., V. 11, 313-358, 1960
- 9) 西条八束：湖沼における物質代謝の化学的研究，第1報，日本化学雑誌，77(6)，917-923，1956
- 10) 林秀剛・市川忠史・楠見知彦・朴虎東・関道代・上西実・清沢弘志・松岡明彦・平林公男：木崎湖におけるクロロフィル量の変遷，日本陸水学会甲信越支部会報，13・14号，84，1988
- 11) 中本信忠：神流湖の淡水赤潮について，用水と廃水，17(2)，213-219，1975

*Peridinium bipes* による淡水赤潮発生と Ca

- 12) Whnne, D., N. J. Patni, S. Aaronson and T. Berman : The relationship between nutrient status and chemical composition of *Peridinium cinctum* during the bloom in Lake Kinneret. J. of Plankton Research, 4(1), 125-136, 1982