

ラフィド藻 *Gonyostomum semen* のブルームの特性と その鉛直移動に関するメソコスム実験

FIELD EXPERIMENTS WITH MESOCOSM ON DIEL VERTICAL MIGRATION OF
BLOOM OF *GONYOSTOMUM SEMEN*(RAPHIDOPHYCEAE)

古本勝弘¹・石田洋一郎²・多田彰秀³・竹本陽一⁴

Katsuhiko FURUMOTO, Youichiro ISHIDA, Akihide TADA and Youichi TAKEMOTO

¹正会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

²学生員 長崎大学大学院生産科学研究科博士前期課程 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

³正会員 博(工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

⁴正会員 博(工) (社)長崎県食品衛生協会環境科学試験所 (〒851-2129 西彼杵郡長与町斎藤郷 1006-10)

By the field observation on water quality in Kawahara Lake, it was found that phytoplankton biomass, of which dominant species was *Gonyostomum semen*(*G.semen*), grew and aggregated densely in the middle layer in summer season. To clarify the influence factors on the diel migration of aggregated layer of *G.semen*, the field experiments with 3 mesocosms was conducted. A part of the lower water body in a mesocosm was transferred into the other mesocosm to change the condition of stratification for the water quality. In daytime *G.semen* aggregated at the depth of about 5.5m and in nighttime about 7.5m. As the results of the mesocosm experiment, it was found that *G.semen* moved downward for the nutrient salts at nighttime and stopped the downward migration when reached the anaerobic layer in strong reduction. Also, in daytime, the upward migration of *G.semen* was influenced by pH and the photon flux density.

In addition, it was found that the bloom of *G.semen* was generated after the heavy rainfall from the frequent field researches, so that the trigger of a rapid proliferation of *G.semen* was the supply of NO₃ with inflowing of river discharge.

Key Words: *Gonyostomum semen*, phytoplankton, mesocosm, algal bloom, diel vertical migration

1. はじめに

湖沼や貯水池における植物プランクトンの異常増殖(ブルーム)は、水利用において障害となるばかりでなく、視覚的に不快感を与え景観を損なうことにもなる。植物プランクトンのブルームはわが国のみならず世界各地で問題となっている。本研究の対象とするラフィド藻 *Gonyostomum semen* (*G. semen*)¹⁾のブルームは、欧州や北米等の小さな湖や池で発生し、観測^{2)~4)}や実験⁵⁾によりその特性の解明が進められている。そのブルームは水利用における濾過池閉塞や着臭等の障害の他に、人体への影響(痒み、アレルギー反応)があるとされ、遊泳禁止となった湖もあると報告²⁾されている。わが国においては藍藻類や渦鞭毛藻類によるアオコや淡水赤潮の研究は多いが、*G. semen*のブルームが問題視されたことはなく、わずかな研究報告⁵⁾を見出すに過ぎない。

*G. semen*は、弱酸性~弱アルカリ性(pH3.5~8.0)の

水域に生息し⁵⁾、遊泳能力をもつ走光性の種であり、日周期鉛直移動を行う。このような鉛直移動できる種は光合成や栄養塩摂取の点で他の種に比べ優位に立てるため優占種となりやすいと考えられる。

長崎県の川原大池では、水利用を目的に水量・水質の調査を1998年以来続けてきている。毎年、夏季を中心に *G. semen*のブルームが中層に高濃度で発生することが明らかとなり、本研究グループがいくつかの研究報告^{7)~10)}を発表してきたが、未だ不明の点が多い。

本研究の初期段階に川原大池では、栄養塩を多く含む底層水と *G. semen*のブルームが発生する中層水を選択的に排出する装置が試験的に設置されており、その効果的運用を図る上でも、また利水においてブルーム水を回避した取水のためにも、*G. semen*のブルーム特性を明らかにすることが求められている。本論では、*G. semen*のブルームが降雨後の河川水流入に関係して発生すること、および、メソコスムを用いた現地実験によりブルーム層の鉛直移動の範囲が水質と関係していることを示した。

2. 川原大池の概要

川原大池(図-1)は、長崎半島の東側に位置し、砂嘴の成長で入江が閉塞してできた海跡湖で、比較的小さな湖である。汽水湖であった湖は1974年ポンプ除塩により淡水湖化されている。湖には池田川のみが注ぎ、余剰水は末端の水門から越流し橘湾へ放流されている。朔望満潮位では海面の方が高くなるため常時は水門は閉塞され、降雨時に管理水位を超える場合のみ水門が開けられている。流域は僅かの果樹栽培の他は森林であり、人工的な汚濁負荷は少ないものの、植物プランクトンの発生は多い。池田川では水道水の取水があるため、湖への流入は降雨時以外では非常に少なく、川水で不足するときは湖からポンプ取水されている。また、地元の今後の水需要の増大に対処する定常的な水源として期待されており、水質浄化の課題がある。

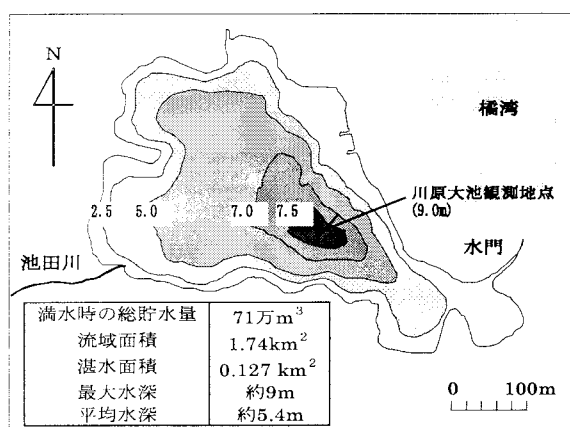


図-1 川原大池略図

3. *G. semen* のブルーム形成とその要因

2003年夏季に7回、現地最深地点において水質の鉛直分布を多項目水質計(アレック電子(株)製 Model-AAQ1183)により計測した。その水質項目のうちクロロフィル-a (Chl-a) の各日の鉛直分布を図-2に濃淡図で示した。計測は、すべて正午前後の日照時である。これより、7回調査した内の4日間で高濃度のブルームの発生が見られる。8/4にChl-aが高い値($1,920 \mu\text{g l}^{-1}$)を示す層を採水し植物プランクトン分析をした結果¹⁰⁾では、21種類、細胞数 $6,221 \text{ cells ml}^{-1}$ を数え、このうち、ラフィド藻 *G. semen* は $5,920 \text{ cells ml}^{-1}$ 、優占率は95.2%であった。したがって、図-2のChl-aの高い層は *G. semen* のブルーム層であると判断できる。各日のブルーム発生水深の範囲は2.5m~5.3mに存在し一定していない。これは、*G. semen* の生息できる水域にpHが関係する⁵⁾ためと考えられるので、各観測日のpHと光量子密度の鉛直分布を図-3に示した。同図にはブルーム層の上面に相当する

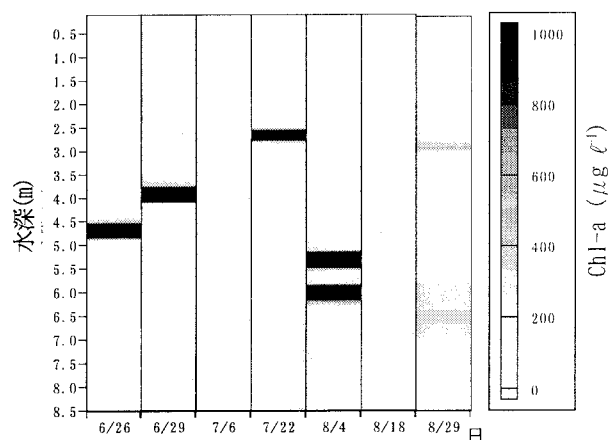


図-2 各日のChl-a鉛直分布(2003)

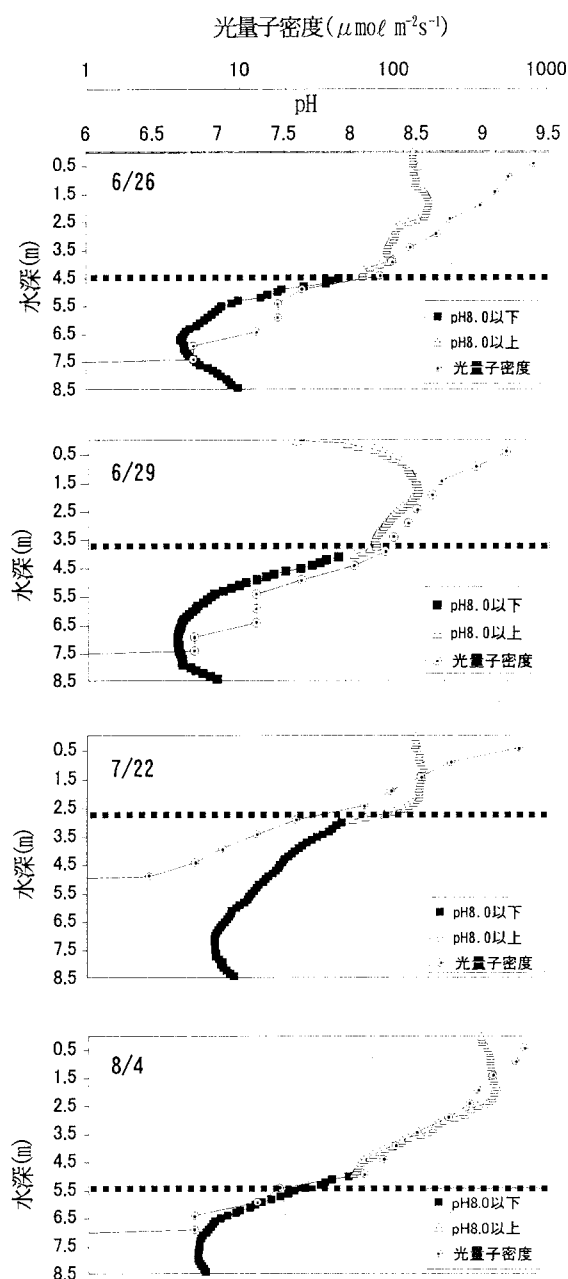


図-3 ブルーム水深とpH, 光量子密度の鉛直分布

水深を破線で示している。これによるとブルーム層上面の位置における pH はほぼ 8.0 であり、これより高い pH の表層にブルームは形成されないことが分かる。また、*G. semen* は走光性であり、光合成に最適な光量(光量子密度)は $75 \sim 90 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ とされている⁹⁾が、図-3によるとブルームは必ずしも最適光量の層に形成されるわけではなく、これよりも光量の低い層に留まる傾向がある。これらのことから、*G. semen* は、日中、光を求めて上昇移動するものの、高い pH を回避して 8.0 以下の水深に留まるものと考えられる。図-2には表れていないが、表層には緑藻や珪藻が $400 \sim 600 \text{ cells mL}^{-1}$ 程度生息し、これらの炭酸同化作用により表層の高い pH はもたらされるが、降雨や風による擾乱、河川水の流入などによりその分布は変化し、pH 8.0 の深さも変動する。

次に、*G. semen* のブルーム発生の要因について考察する。図-2 でも分かる通り *G. semen* のブルームは消長を繰り返す。夏季に成層が発達する時期には、低層は貧酸素状態となり、底泥から $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出がある(後掲図-10 参照)。常時供給のあるこれらの栄養塩を摂取して増殖するのであれば、長い期間ブルームは維持されることが考えられるが、そのような状況ではない。2000 年の調査⁹⁾ではブルーム形成のない日の、湖内における N/P 比は 10 を切っており N 制限の状況があった。そこで、ブルーム形成には $\text{NO}_3\text{-N}$ との関連が考えられ、降雨量とブルーム発生時期との関係を調べた。前述の通り、池田川の水は湖への流入直前に取水されており、まとまった降雨時のみに河川水の流入がある。

池田川の水質について、1998 年⁷⁾及び 2000 年に調査した 28 回の平均 (mg L^{-1}) では、 $\text{NH}_4\text{-N}$: 0.01, $\text{NO}_2\text{-N}$: 定量限界以下 (<0.01)、 $\text{NO}_3\text{-N}$: 0.85, $\text{PO}_4\text{-P}$: 0.008 であり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ のみが湖内よりかなり高い値を示しており、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が河川から供給される主たる栄養塩と言える。また、河川水の pH は同じく 7.4 であり、湖内表層(図-3)よりかなり低い。

図-4 は、6, 7, 8 月における日降水量の経日変化図であり、点線でブルーム発生日(観測日)を示した。いずれもブルーム観測の前日、前々日にまとまった降水が見られ、河

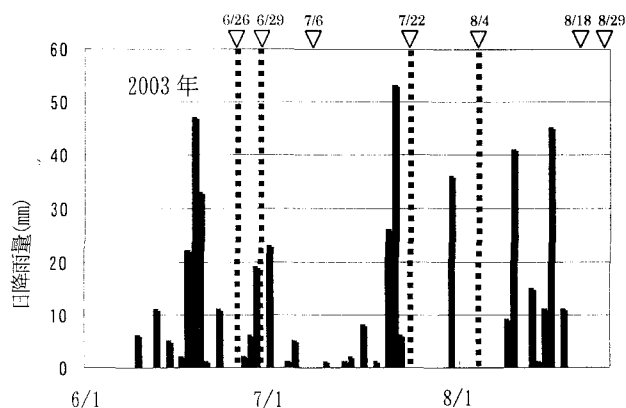


図-4 日降水量時系列 (2003/6~8)

川水に伴い供給される $\text{NO}_3\text{-N}$ が *G. semen* のブルームを惹起する因子として大きく働いたものと考えられる。

次に、2000 年の調査⁹⁾に基づいて水温について考察する。*G. semen* は冬季における活動は見られず、底泥中で休眠していると考えられるが、5 月中旬から低濃度ではあるが発生し、高濃度でブルームといえる集積状態を呈するのは 6 月中旬以降である。これらのことから、底層の温度が 15°C を超えると活動を始め、 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ で活発に活動するようである。水温はブルーム発生の環境を与える意味での要因として重要である。

4. ブルーム層の日周期鉛直移動に関するメソコスム実験

2003/8/3, 4 に当該湖において *G. semen* のブルーム層の日周期鉛直移動に関する調査を実施し、この結果は既に公表¹⁰⁾している。この調査では、メソコスムを用いることなく、水面から多項目水質計を垂下してクロロフィル-a の鉛直分布を計測することでブルーム層の鉛直移動を捕捉する方法をとった。このため、プランクトン濃度の水平方向分布と流れの影響を多分に含むものと考えられる。そこで、メソコスムを用いることにより水平流を抑え、かつメソコスム内の成層状態をポンプによる注・排水により変化させることで、ブルーム層の鉛直移動に水質がどのように影響するかを調査した。

(1) メソコスムと実験方法

2004/7/27、川原大池最深地点において *G. semen* のブルームが発生していることを確認して、図-5 に示す 3 基 (A, B, C) のメソコスム (隔離水界) を水面から静かに落とし込む方法で、設置した。メソコスムは、ビニールハウス用透明シートを上下端の硬質塩化ビニールの円形枠 (直径 1.0m) に貼付したもので、下端枠の錘と上端枠のフロートにより水中に自立する。下端枠は錘により底泥中に沈み込むため、メソコスム内の円筒状水体はブルーム層を含んで周囲水と隔離される。ただし、上端の 30cm は周囲水から隔離されていない。

そこで、3 基のメソコスム内の水質の成層状態に差異を与えるために、メソコスム A の水深 7m 付近の貧酸素底層

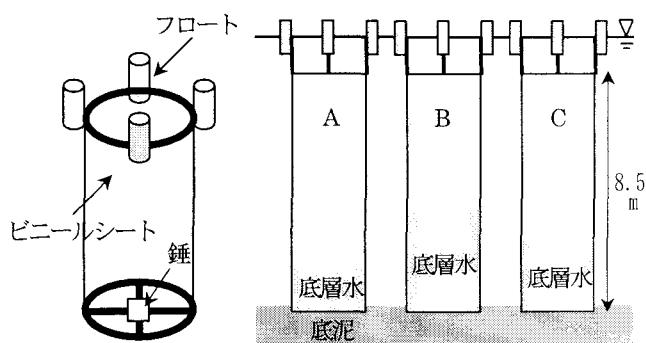


図-5 メソコスムの概略図

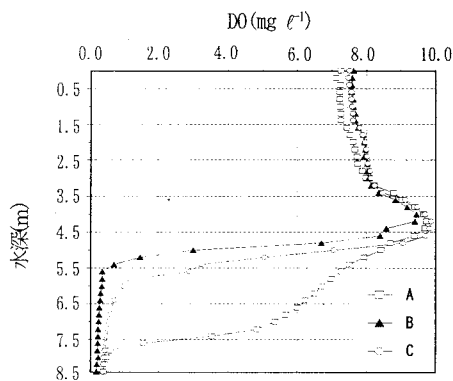


図-6 各槽の実験開始時の DO 分布

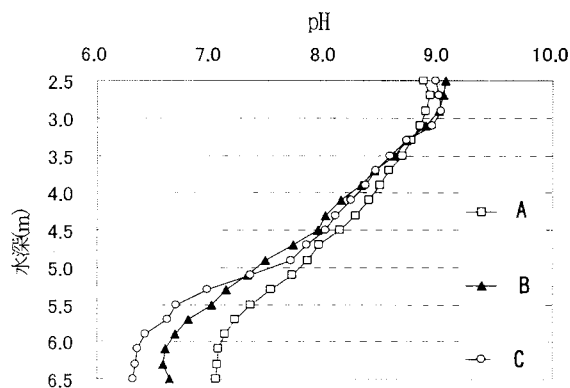


図-7 各槽の実験開始時の pH 分布

水をポンプを用いてメソコスムBの水深7m付近に移した。メソコスムCは何も手を加えていない。底層水のAからBへの移し替え後18時間経過後のDOの鉛直分布(図-6)からほぼ2.0m厚さの水塊を移し替えたと判断できた。ただし、メソコスムA,BにおけるpHの鉛直分布(図-7)からは、pH=8付近では0.5m程度の水深の差異しか生じていない。この原因は注・排水に伴うメソコスム内の混合のためと考えられる。水温については、底層水の移し替えか

表-1 ブルーム層の植物プランクトン

分 類	科 名	種 名	細胞数 (細胞/ml)
藍藻綱	オスキラトリア	<i>Phormidium</i> sp.	40
	ウズオビムシ	<i>Ceratium hirundinella</i>	246
	渦鞭毛藻綱	クリプトモナス	<i>Cryptomonas</i> sp.
ラフィド藻綱	緑色鞭毛藻	<i>Gonyostomum semen</i>	1630
緑虫藻綱	ユウグレナ	<i>Euglena oxyuris</i>	2
		<i>Trachelomonas</i> sp.	168
		<i>Phacus longicauda</i>	12
		<i>Phacus</i> sp.	10
珪藻綱	メロシラ	<i>Aulacoseria granulata</i>	70
		<i>Aulacoseria islandica</i>	52
	オビケイソウ	<i>Fragilaria crotonensis</i>	26
	コマキケイソウ	<i>Cyclotella</i> sp.	78
	クサビケイソウ	<i>Gomphonema</i> sp.	2
		<i>Cyclotella</i> sp.	4
		<i>Cymbella</i> sp.	2
緑藻綱	ボルボックス	<i>Eudorina elegans</i>	64
	クロロコクム	<i>Tetradon</i> sp.	90
		<i>Coelastrum cambricum</i>	16
	セネデスムス	<i>Scenedesmus ecornis</i>	16
		<i>Scenedesmus</i> sp.	52
	ヒドロジグマ	<i>Pediastrum simplex</i>	32
		<i>Ankistrodesmus</i> sp.	10
	オエキステイス	<i>Oocystis</i> sp.	6
		<i>Cosmarium</i> sp.	10
	デスミジウム	<i>Closterium parvulum</i>	2
		<i>Staurastrum</i> sp.	4
種類数			26
総細胞数(細胞/ml)			2652

(2004/7/29 12:00採水)

ら18時間の経過により周囲との熱移動で各メソコスム内の鉛直分布にほぼ差異はなくなっていた。

メソコスム設置からほぼ18時間経過した翌日から1昼夜(7/28~29),メソコスム内の水質を計測した。測定は、多項目水質計のセンサー部をボートから降ろして、水深、水温、DO、pHおよびChl-aを各メソコスム内で直接計った。

次にメソコスム内のブルーム層における植物プランクトン種の同定と細胞数の分析を行った。その結果を表-1に示す。ただし、表-1は、メソコスム内を乱さないためと細胞数を減らさないために、メソコスム外の周囲水におけるChl-aの最高値を示す層(水深5.1m)から29日12時に採水したものである。

表-1より、ブルーム層に存在する植物プランクトンは26種、総細胞数は2652cells ml⁻¹であり、この中の、ラフィド藻 *G. semen* は1630cells ml⁻¹で、細胞数による優占率は61.6%の高い値を示している。また *G. semen* (写真-1)の細胞は、長径45~70μm、短径20~30μm、厚さ10~17μmの扁平な卵形で、2本の鞭毛によって遊泳することができる。また植物プランクトンの中では大型の種であり、Chl-aに占める優占率はさらに高い値であると考えられる。このため今回計測されたChl-aのピーク位置は *G. semen* のブルーム層を反映していると判断できる。

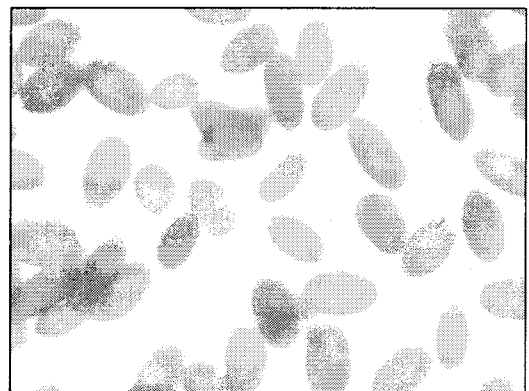


写真-1 *G. semen* の顕微鏡写真

(2) *G. semen* の日周期鉛直移動

メソコスム設置18時間後の2004/7/28 9:00から3~5時間間隔でChl-aを中心とした水質の鉛直分布を計測した。図-8は各メソコスム内のChl-aの鉛直分布を測定時間毎に濃淡図で表示したものである。また、図-9は、各槽の7/29 12:00における水温、pH、DO、光量子密度およびChl-aの鉛直分布である。ただし光量子密度はメソコスム外で計測したものを参考のために各槽に記入したものである。ブルーム上面は4.5m~5.3mに存在するが、夜間は6.5m以下の深い位置に移動することが分かる。また、翌日、太陽の上昇とともにブルームは上昇移動し前日の日中とほぼ同じ位置に留まることが分かる。

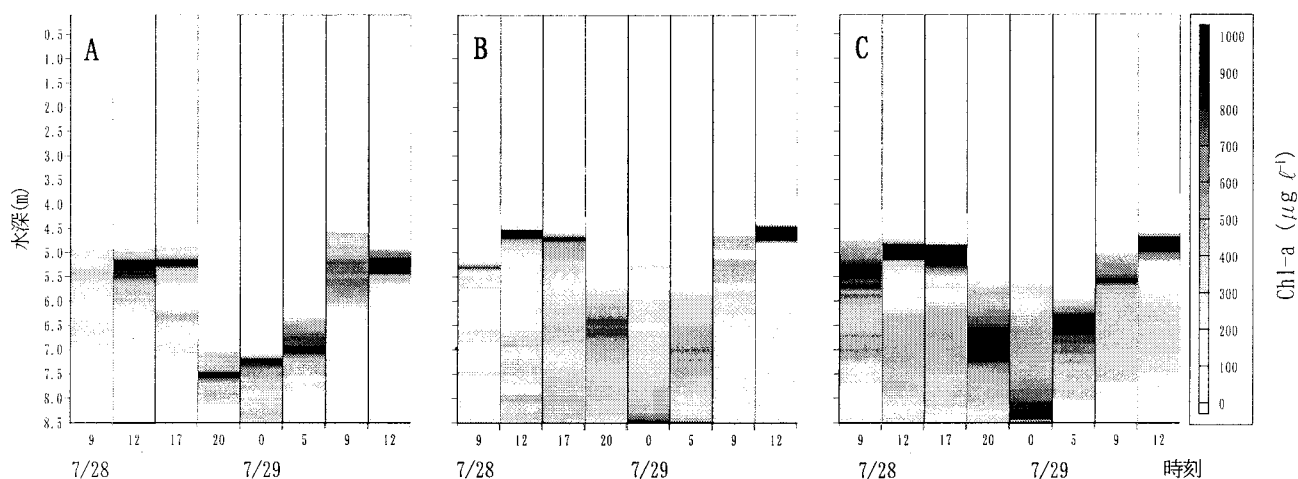


図-8 各メソコスム内でのChl-a鉛直分布の経時変化

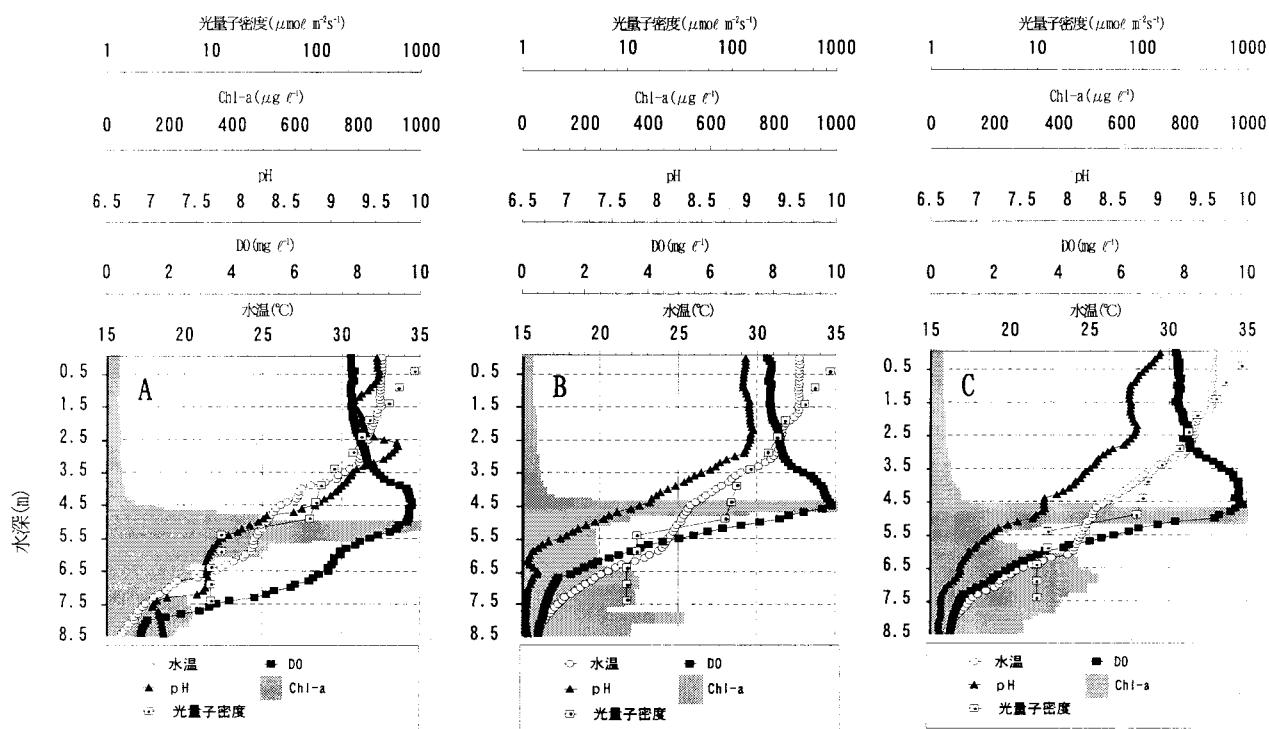


図-9 各メソコスム内における水温、pH、DO、光量子密度およびChl-aの鉛直分布(7/29 12:00)

3節で述べたように、*G. semen*は走光性ではあるが、光量よりpHに制限されて上昇移動を停止すると考えている。このことを証明するためにメソコスムの底層水を移し替え、pHの鉛直分布に差異をつけて、*G. semen*の上昇位置に影響が生ずることを期待した。しかし、図-7に示す通り、pHの鉛直分布に対する深さ方向の差は0.5m程度しか生じていない。しかし、図-8から、日中(28日12:00)における*G. semen*のブルーム上面の位置は、A槽(底層水を抜いてpH曲線が最も下がった)が最も低く水深5.1mに、B槽(底層水を注入してpH曲線が最も高い)が最も浅く4.5mに、C槽は中間の4.8mにあり、その深さのpHの値はいずれもほぼ8.0である。このことは、*G. semen*の上昇移動が、光を求める行動ではあるもののpHが8.0

を超える水域にまでは上昇し得ず、上昇限界の位置に高濃度に集積すると解釈できる。

光の無い夜間には下降移動するが、これは栄養塩を求める行動と考えられている。図-10に、7/29 12:00にC槽から採水し求めた栄養塩の鉛直分布を示した。*G. semen*のブルーム形成には $\text{NO}_3\text{-N}$ が必要で、これは河川水から供給されると3節で述べたが、図-10では $\text{NO}_3\text{-N}$ はほとんど無く使い尽くしている。同図から分かるように還元状態の底泥から溶出する栄養塩は $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ であるので、下降移動は栄養塩として $\text{PO}_4\text{-P}$ を求める行動と考えられる。また、同図で $\text{PO}_4\text{-P}$ が中層付近に高く出ているが、定量限界値が0.003であることを考えると分析誤差とも考えられる。

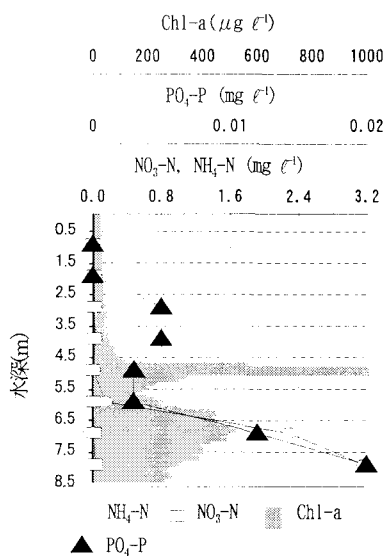


図-10 C槽における栄養塩の鉛直分布(7/29 12:00)

(3) メソコスム内の *G. semen* 量の経日変化

メソコスム内におけるブルーム層の日周期鉛直移動の一昼夜観測の後、各槽のブルーム量がどのように変化するかを調べた。活性のある *G. semen* は、日中、中層に集積する性質があるので、各日正午に計測された Chl-a の鉛直分布において最高値を示す深さから上下 0.5m 間の Chl-a 量を積分し、この量の経日変化を図-11に示した。同図縦軸は、ブルーム層を含む 1m³ 中の Chl-a 量 (mg) である。7 日間における各槽の Chl-a 量の減少率は、A 槽：0.86、B 槽：0.67、C 槽：0.72 であり、すべての槽で *G. semen* は大幅に減少している。細かく見ると、底層水を汲み出した A 槽の減少率が最も大きく、底層水を汲み入れた B 槽が最も小さく、底層水の栄養塩が *G. semen* の維持に関係していることを示唆しているが、隔離して $\text{NO}_3\text{-N}$ の供給が無い状態では増殖しないことも明らかになった。

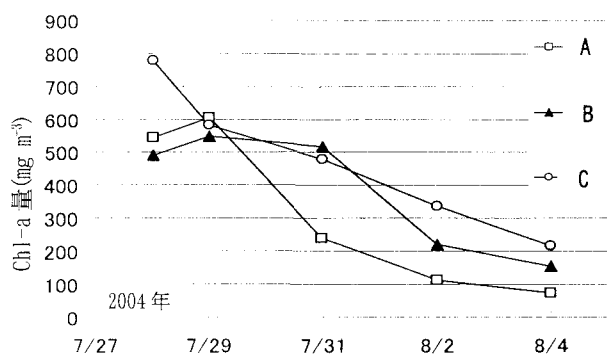


図-11 Chl-a 量の経日変化

5. まとめ

川原大池において夏季にブルームを起こすラフィド藻 *G. semen* の特性を調べた。ブルームは降雨後に発生することが多いことから、河川水がもたらす $\text{NO}_3\text{-N}$ と底泥から溶出する $\text{PO}_4\text{-P}$ を摂取して増殖すること、メソコスムで隔離し $\text{NO}_3\text{-N}$ を供給しない状態に置くと 7 日間で 30% 以下に

減少すること、*G. semen* は光を求めて上昇移動するが、pH が 8.0 を超える水域にまでは上昇しえずその直下に集積すること、などが今回明らかになった。

謝辞：本研究は、調査や水質分析に篠崎崇史、後藤雄一、松本武士の諸氏の熱心な協力を頂いた。また、本研究には科学研究費基盤研究 (C) (課題番号：15560471) の補助を受けた。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 堀輝三編：藻類の生活史集成第 3 巻，pp. 459-461，内田老鶴圃，1993.
- Cronberg, G., Lindmark, G., and Bjork, S. : Mass development of flagellate *Gonyostomum semen* (Raphidophyta) in Swedish forest lakes - an effect of acidification?, *Hydrobiologia*, Vol. 161, pp. 217-236, 1988.
- Hansson, L. -A. : Synergistic effects of food chain dynamics and induced behavioral responses in aquatic ecosystems, *Ecology*, Vol. 81(3), pp. 842-851, 2000.
- Slonen, K. and Rosenberg, M. : Advantages from diel vertical migration can explain the dominance of *Gonyostomum semen* (Raphidophyceae) in a small, steeply-stratified humic lake, *J. Plankton Res.*, Vol. 22, pp. 1841-1853, 2000.
- 加藤季夫：淡水産ラフィド藻の日本における分布とその生育に及ぼす pH の影響，藻類，Vol39, pp. 179-183, 1991.
- Eloranta, P. and Raike, A. : Light as a factor affecting the vertical distribution of *Gonyostomum semen* (Ehr.) Diesing (Raphidophyceae) in lakes, *Aqua Fennica*, Vol. 25, pp. 15-22, 1995.
- 竹本陽一他：川原大池における水質変動特性と底泥からの栄養塩溶出について，水工学論文集，43 巻 pp.1001-1006, 1999.
- 竹本陽一他：川原大池におけるラフィド藻 *Gonyostomum semen* のブルームと制限因子，水環境学会誌，第 24 巻，第 11 号，pp. 709 - 714, 2001
- 竹本陽一他：川原大池におけるラフィド藻 *Gonyostomum semen* の日周期鉛直移動特性，水工学論文集，46 巻，pp.1061-1066, 2002.
- 古本勝男他：ラフィド藻 *Gonyostomum semen* のブルームとその日周期鉛直移動への影響因子，水工学論文集，48 巻，pp.1200-1206, 2004

(2004.9.30 受付)