

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

FACTORS OF INFLUENCE ON DIEL VERTICAL MIGRATION OF BLOOM OF *GONYOSTOMUM SEMEN* (RAPHIDOPHYCEAE)

古本勝弘¹・竹本陽一²・多田彰秀³・石田洋一郎⁴

Katsuhiko FURUMOTO, Youichi TAKEMOTO, Akihide TADA and Youichiro ISHIDA

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)

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)

By the field observation on the water quality in Kawahara Lake, it was found that the phytoplankton biomass, of which dominant species was *Gonyostomum semen* (*G.semen*), grew and aggregated densely in the middle layer in summer season. The diel migration of aggregated layer of *G.semen* was observed in the field. In the daytime *G.semen* aggregated at the depth of about 5m and in the nighttime about 6.5m. Then, the laboratory experiment by using the microcosm was conducted to make clear characteristics on diel vertical migration of *G.semen*. As the results of the microcosm experiment, it was found that *G.semen* moved downward for the nutrient salts at nighttime, and *G.semen* stopped the downward migration when reached the anaerobic layer in strong reduction. Also, the upward migration of *G.semen* was influenced by pH and the photon flux density. In addition, there is a correlation in pH and the photon flux density in the top of *G.semen*'s bloom layer. It was found that the optimum photon flux density for *G.semen* decreased with the rise of pH.

Key Words: *Gonyostomum semen*, algal bloom, diel vertical migration, pH, Microcosm

1. はじめに

近年, ヨーロッパ, アメリカ及びアフリカ等, 世界各国の比較的小さな湖や池で, ラフィド藻 *Gonyostomum semen*^{1), 2)} の異常増殖(ブルーム)が発生しており, 観測^{3), 4), 5), 6)} や室内実験等^{7), 8), 9), 10)} が行われ, 注目されている。*G. semen* のブルームは, 水利用に障害(濾過池閉塞や海藻臭着臭)があるだけでなく, 人体にも影響(かゆみ, アレルギー反応)あることが報告³⁾ されており, ブルームによって遊泳禁止となった湖もある。わが国においても, 蛇沼, 中沼, 河口湖等で生息が確認⁷⁾ されているが, 比較的稀な種であるため *G. semen* に関する研究報告が少なく, 未だ不明な点が多い。

G. semen は, 遊泳能力を持つ走光性の種であり, 2本の鞭毛によって遊泳し, 日周期鉛直移動を行う。このような日周期鉛直移動を行う植物プランクトンは, 栄養塩摂取や光合成の面で, 他の種に比べ優位に立てるため優占種となりやすい。貯水池や湖沼においてブ

ルームを起こす植物プランクトンの特性を解明することは, 水利用の障害を回避したり, 水質の予測や改善を考える上で重要なことである。

長崎市の隣町・三和町にある川原大池では, 毎年, 6~9月にかけて, *G. semen* のブルームが発生する。当該湖からはポンプ取水により上水道に利用しており, 水質浄化および利水傷害の回避を課題としている。現在, 浄化対策として栄養塩濃度の高い底層水と中層に発生するブルーム水を排出する装置が試験的に設置されている。

本論では, 現地調査により得られた *G. semen* の日周期鉛直移動の特性を述べ, また, マイクロコスム(小型実験生態系)を用いた室内実験により, *G. semen* のブルームが中層の限られた範囲内を日周期で鉛直移動する原因は, 日中は上層の光量と高い pH に, 夜間は下層の豊富な栄養塩と低い DO に関係することを明らかにした。

2. 川原大池の概要

長崎半島の東側に位置する川原大池(図-1)は、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。汽水湖であった川原大池は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(敷高 TP 1.47m)から越流し、水位はほぼ一定に保たれているものの、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。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いし、川水で不足するときは湖からポンプ取水されている。

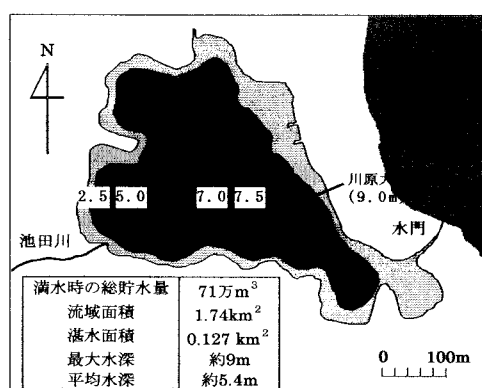


図-1 川原大池略図

3. *G. semen* の日周期鉛直移動調査

3.1 調査方法

調査は、2003/8/3～8/4にかけて湖最深地点(水深約9.0m)で行った。*G. semen*は高濃度に集積する性質があるため、クロロフィルa濃度(Chl-a)の鉛直分布を計測することでブルーム層の位置を容易に捕捉することができる。調査日前後には*G. semen*のブルームが広い範囲に発生しており、隔離水界で囲うことなくChl-aの鉛直分布を測定した。このため、水平流によるブルーム層の移動があり、時刻によりChl-aに若干の濃淡があった。

測定は、多項目水質計(アレック電子(株)製 Model-AAQ1183)のセンサー部をボートから降ろして、水深、水温、DO、ORP、pHおよびクロロフィルaを直接計った。日中は2時間、夜中は3時間の間隔で測定した。

最後の測定時(8/4 12:00)にブルーム層から採水し、植物プランクトン種を同定した。

同時に、そのときの栄養塩($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, T-N, $\text{PO}_4\text{-P}$, T-P)の鉛直分布を知るために、水深1.0～9.0mを1m間隔で採水し、持ち帰って水質分析を行った。

採水には水中ポンプを用い、呑み口に整流板を取り付け他の層からの混入をできるだけ防いでいる。

3.2 ブルーム層の植物プランクトン

8/4 12:00におけるクロロフィルaの最高値を示す層(水深5.3m, Chl-a $1,920 \mu\text{g l}^{-1}$)から採水し、植物プランクトンの同定および個体数計数を行った。その結果は表-1に示す通りである。確認された植物プランクトンは21種、細胞数は $6,221 \text{ cells ml}^{-1}$ であり、この中、ラフィド藻*G. semen*は $5,920 \text{ cells ml}^{-1}$ で、優占率は実に95.2%の高い値を示した。このため、今回計測されたクロロフィル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。

ラフィド藻の*G. semen*は、2本の鞭毛によって遊泳する走光性の種であり、日周期鉛直移動を行う。細胞の長さは $45\sim70 \mu\text{m}$ 、幅は $20\sim30 \mu\text{m}$ 、厚さは $10\sim17 \mu\text{m}$ であり、植物プランクトンの中では大型の種である¹⁾。室内実験でpH3.5以下及び8.0以上では死滅し⁷⁾、別の実験では光合成に最適な光量(光量子密度)は $75\sim90 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ とされている⁸⁾。

表-1 植物プランクトン同定結果
(2003/8/4 12:00 採水、水深5.3m)

分類	種名	個体数 (cells ml^{-1})
藍藻綱	<i>Chroococcus</i> sp.	18
渦鞭毛藻綱	<i>Ceratium hirundinella</i>	1
黄色鞭毛藻綱	<i>Mallomonas</i> sp.	8
ラフィド藻綱	<i>Gonyostomum semen</i>	5920
緑虫藻綱	<i>Euglena</i> sp.	1
	<i>Trachelomonas</i> sp.	8
	<i>Phacus longicauda</i>	8
	<i>Phacus</i> sp.	2
珪藻綱	<i>Fragilaria crotonensis</i>	12
	<i>Cyclotella</i> sp.	12
	<i>Cymbella</i> sp.	1
緑藻綱	<i>Asterococcus superbus</i>	3
	<i>Tetradron minimum</i>	10
	<i>Coelastrum cambricum</i>	88
	<i>Coelastrum sphaericum</i>	16
	<i>Scenedesmus bijuga</i>	8
	<i>Scenedesmus</i> sp.	72
	<i>Golenkinia radiata</i>	1
	<i>Pediastrum simplex</i>	16
	<i>Elakatothrix</i> sp.	8
	<i>Staurostrum</i> sp.	8
個体合計数(cells ml^{-1})		6221

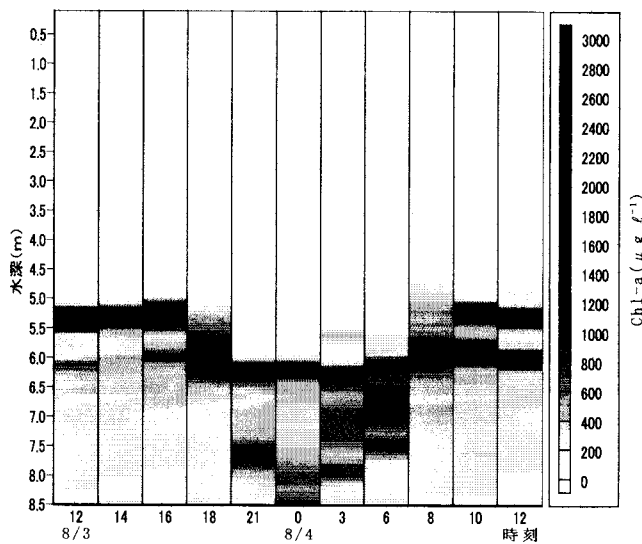


図-2 Chl-a 鉛直分布の経時変化
(2003/8/3 12:00~8/4 12:00)

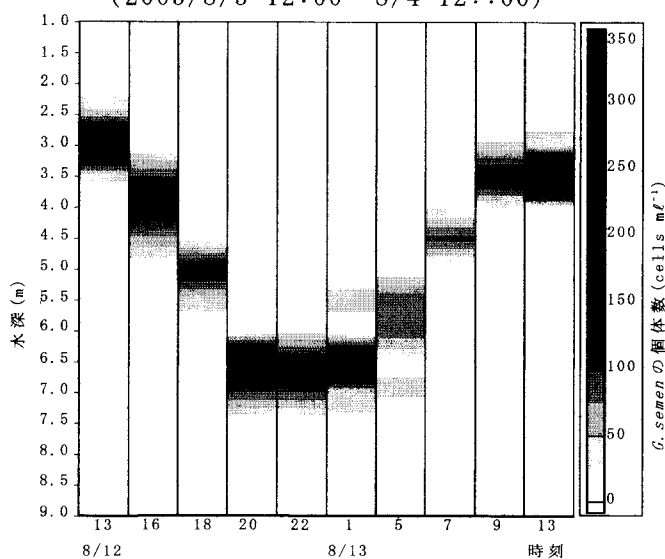


図-4 *G. semen* の個体数鉛直分布の経時変化
(2001/8/12 13:00~8/13 13:00)

3. 3 *G. semen* ブルーム層の鉛直移動経時変化

図-2 に 2003/8/3~4 に調査された Chl-a の鉛直分布の一昼夜の変化を示す. 上述のとおり高濃度の Chl-a は *G. semen* のブルームと置き換えて見る事ができる. 8/3 12~14:00 にかけて水深 5.5m 附近に形成されたブルームは, 時刻の経過とともに徐々に下降移動し, 翌日 3:00 には水深 6.5m 付近にブルーム層を形成した. その後, 日出 6:00 まではその層に止まるが, 太陽の高まりとともに上昇移動し, 12:00 には再び 5.3m 付近にブルームを形成した. このように植物プランクトンが日周期鉛直移動を行うのは, 一般に,

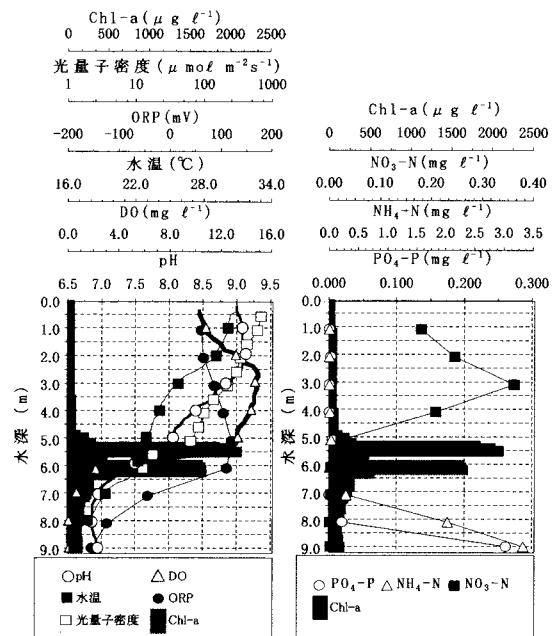


図-3 水質鉛直分布 (2003/8/4 12:00)

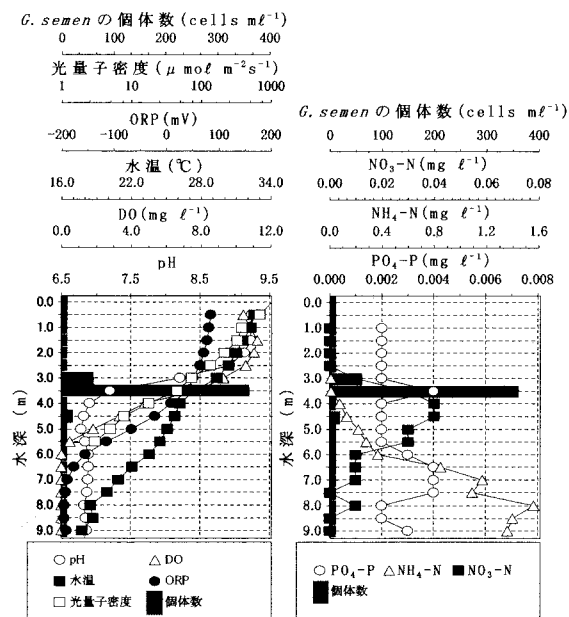


図-5 水質鉛直分布 (2001/8/13 13:00)

日中の上昇移動は光合成のためであり, 夜間の下降移動は栄養塩の摂取であると考えられている. このことのみがブルームの移動を支配しているとすれば, 日中は光合成に最も適した光の豊富な水表面に移動し, また, 夜間は栄養塩濃度が最も高い底泥直上に移動する筈である. *G. semen* は, 日中は水深 5.5m 付近, 夜間は 6.5m 付近にブルームを形成している. このように, ある水深の範囲にとどまりブルームを形成することは, なんらかの要因によって, 鉛直移動が制限されたためと考えられる.

このときの水質との関係を見るために, 図-3 に 8/4 12:00 における Chl-a, 水温, 光量,

DO, pH, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ の鉛直分布を示した. ここに示した項目のうち Chl-a と光量以外は一日の中での鉛直分布の変化は殆どないと見られる.

G. semen のブルームは, 最も上昇したときでも最適光量子密度とされる $75\sim90\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ よりかなり小さい光量の層に存在する. この上昇の位置を決める要因は pH と考えられる. *G. semen* は, pH3.5 以下, 8.0 以上で斃死する⁷⁾とされており, pH が 8.0 を越える 5m より上層には移動できなかったと考えられる.

夜間の下降移動については, 栄養塩摂取が目的であろうと考えられる. 底泥からの栄養塩の溶出は, 窒素については $\text{NH}_4\text{-N}$, リンについて $\text{PO}_4\text{-P}$ の形態で現れることが図-3 の分布からもよく分かる. $\text{NO}_3\text{-N}$ は河川からの流入に由来し, 表層に多くなっている. 下降移動がどの栄養塩を摂取するためかは定かではないが, 少なくともリンは底泥から溶出するもの以外には殆どないため, これを摂取することが下降移動の目的とも考えられる. しかし, ブルームは水深 7m より下層には移動しない. この下降移動を制限する要素は呼吸作用に必要な DO の低下にあると考えられる. DO は水深 7m 以下では 0.2mg l^{-1} より低下するため, ブルームは栄養塩の豊富な底泥直上までは下降し得ないものと考えられる.

比較のために, 2001/8/12~13 に実施した *G. semen* の日周期鉛直移動調査の結果¹¹⁾を図-4, 5 に示した. このときの調査法は, 水面から底泥に達する円筒状の透明ビニールシートのメソコスム ($\phi 1.9\text{m}$) で, 中層に発生したブルームを含む水柱を囲い, 時間ごとに各水深の *G. semen* の個体数を計数したものである.

このときのブルームは, 日中は水深 3m, 夜間は水深 6.5m に見られ, 2003 年の図-2 に比較して移動範囲は格段に広い. これを可能にしたのは, 図-5 に示す pH と DO の分布であると考えられる. このとき, 水深 3m より上層が pH8.0 を越えており, DO は 6m より下層はほぼ 0mg l^{-1} となっているからである.

4. マイクロコスムを用いた *G. semen* の日周期鉛直移動実験

4.1 実験方法

マイクロコスム (図-6) は, 内径 24cm, 高さ 200cm の透明なアクリル製の円筒水槽

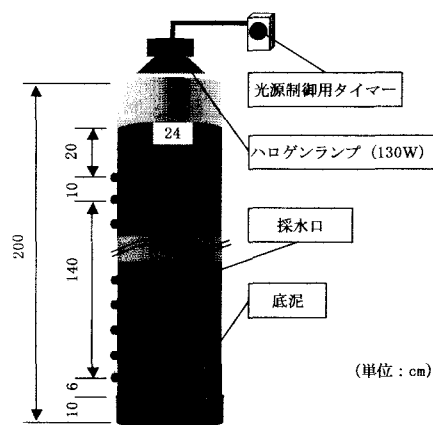


図-6 マイクロコスムの概要

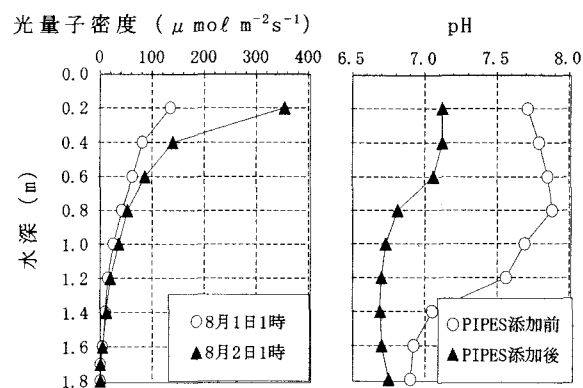


図-7 左図：光量子密度の鉛直分布
右図：PIPES 添加前後の pH の鉛直分布

である. 水槽側面には採水口が 10cm 間隔に設けてあり, 水槽上部にはハロゲンランプ (130W) を設置し, 明暗サイクルは 12/12hr (明: 7:00~19:00, 暗: 19:00~7:00) とした. 実験期間中の水温は全層で約 28°C ~ 31°C であり, 成層はほとんどしていない. 実験には, 2002/7/31 に川原大池最深地点において採取した実験水 (水深 4m 付近の *G. semen* のブルーム水) と底泥を使用した. 実験期間は 2002/8/2~8/4 の 3 日間で, 光量および pH を変化させて実験を行った. 光量は, *G. semen* の光合成の最適光量子密度 ($75\sim90\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) が, 8/2: 0.5m~0.6m, 8/3~8/4: 0.7m~0.8m になるように光源の高さを設定した. 光量の設定および測定は, *G. semen* が底泥表面に移動して水中にいない夜間に一時的に光源を点灯させて, 光量子計で行った. また, pH の調整は *G. semen* が底泥表面に移動した 8/4 1:00 に, PIPES (ピペラジン-N, N-ビス {2-エタンスルホン酸}) を混和して行った. ここで, *G. semen* 等の光合成によって pH が高まることを考慮

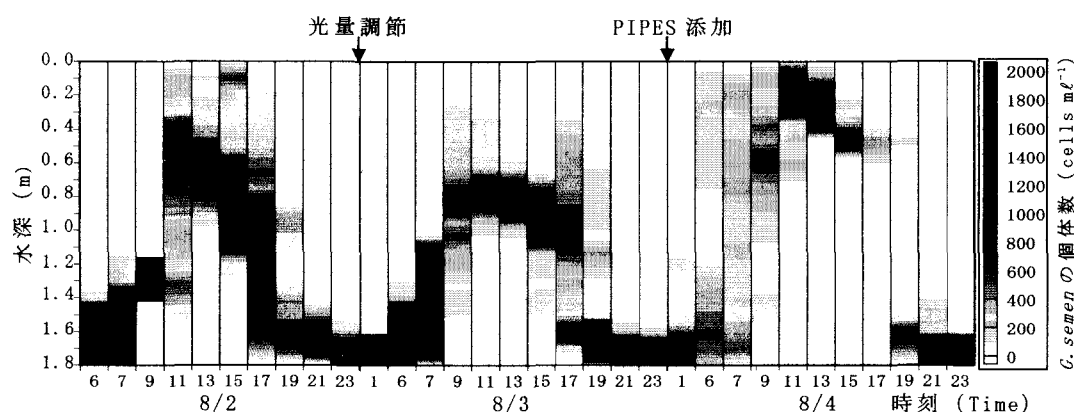


図-8 *G. semen* の鉛直移動の経時変化

し、マイクロコスム内の pH が 7 以下となるようにした．図-7 の左図に光量子密度の鉛直分布を、PIPES 添加前後の pH の鉛直分布を右図に示す．

G. semen の鉛直移動の観測方法は、6:00, 7:00, および 7:00 以降は 2 時間ごとに翌日 1:00 まで、全ての採水口から少量 (約 30ml) ずつ採水し、生体のまま顕微鏡下で *G. semen* の個体数を計数した．また、13:00 と 1:00 に *G. semen* のブルーム層を中心に採水し、水質分析した．また、pH、DO、水温等も U-22 (株式会社堀場製作所製) を用いて測定を行った．

4. 2 実験結果および考察

(1) 下降移動の制限因子の検討

図-8 に *G. semen* の鉛直移動の経時変化を示す．これより、各日ともに、夜間には底泥表面付近に *G. semen* のブルームが形成されていることが分かる．そこで、8/4 1:00 に注目して、図-9 (左図) に pH など他項目と *G. semen* の個体数の鉛直分布、図-9 (右図) に各種栄養塩と *G. semen* の個体数の鉛直分布を示した．図-9 より、*G. semen* は夜間、水深 1.6m～1.8m にブルームを形成している．ここで、ブルーム層の pH は 6.90～7.05 であり、水温変動も少ないことから、これらが *G. semen* の下降移動の制限因子とは考えられない．そこで DO に注目してみると、1.8m で 0mg l^{-1} となっており、無酸素層が形成されていることが分かる．また、ORP に関しても 1.8m で急激に低下しており、還元状態にあるといえ、*G. semen* の呼吸に必要な酸素が欠乏していると考えられる．よって、*G. semen* は夜間栄養塩を求めて下降移動するが、還元状態の強い無酸素層に到達すると下降移動を止めると考えられる．

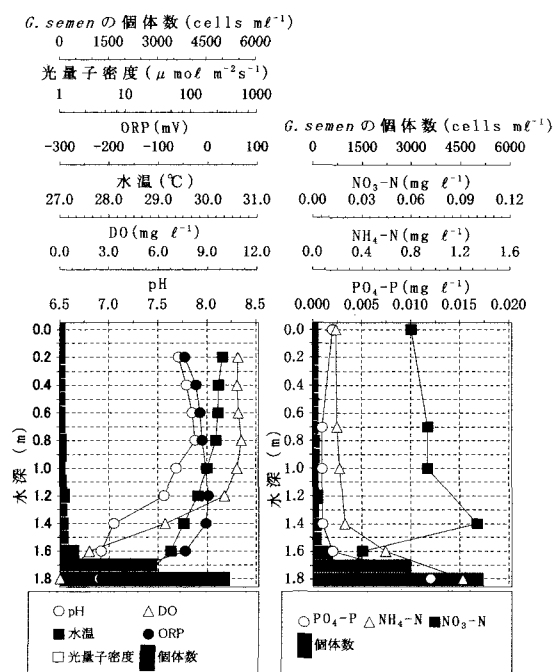


図-9 左図： $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、*G. semen* の個体数の鉛直分布

右図：pH、DO、水温、ORP、光量子密度、*G. semen* の個体数の鉛直分布

(2) 上昇移動の制限因子の検討

図-8 より、各日 13:00 における *G. semen* の個体数に注目すると、8/2 では、*G. semen* のブルーム層の境界水深は 0.6m、8/3 では 0.8m であり、いずれも最適光量以深にブルームを形成している．また、いずれも境界水深での pH が 7.8 以上の値を示していることから、高い pH に鉛直上昇移動が抑制されて、最適光量以深にブルーム層を形成したと考えられる．そこで、8/4 1:00 に PIPES を添加してマイクロコスム内の pH を下げたところ、同日 13:00 には 0.2m 付近にブルーム層を形成した．この水深の光量は $177\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

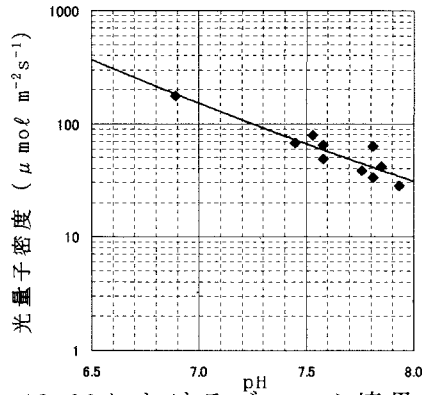


図-10 13:00におけるブルーム境界の pH と光量子密度の関係 (2001 年, 2002 年)

であり,ブルーム境界水深の pH は 7.04 であった. 最適光量が $75 \sim 90 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であることから,このように最適光量を上回る水深にブルーム層が形成されたことには, pH が関係していると考えられる. そこで, 2001 年, 2002 年に実施したマイクロコスム実験の結果より, 13:00 におけるブルーム境界の pH と光量子密度をプロットしたものを図-10 に示す. これより, pH の上昇に伴い光量子密度は低下しており, 相関関係を認めることができる. したがって, *G. semen* の光合成における最適光量は, pH によって変化し, pH と光量子密度の両値から *G. semen* の日中のブルーム水深が決まることが明らかになった.

5. まとめ

川原大池では夏季に *G. semen* のブルームが中層に形成され日周期で鉛直移動を繰り返すことが分かった. また, 現地調査およびマイクロコスム実験によって, *G. semen* は夜間栄養塩を求めて下降移動するが, 還元状態の強い無酸素層に到達すると下降移動を止める, また, 日中には光を求めて上昇移動するが, 表層の高い pH により上昇は制限される. 上昇を制限する pH 値は光量子密度に関係していることが明らかになった. ブルーム層上端の pH と光量子密度の相関関係から, pH の上昇に伴い, *G. semen* のブルーム形成水深はより深くなることが明らかになった.

謝辞: 本研究の調査は, 川原大池を管理する三和町の協力の下に実施された. 調査や水質分析には卒研生・山本晋哉, 篠崎崇史, 伊藤英孝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

- 1) 庵谷 晃: 北海道産緑色鞭毛藻類, 藻類, 第 18 巻, pp137-141, 1970.
- 2) 堀輝三編: 藻類の生活史集成第 3 巻, pp. 459-461, 内田老鶴圃, 1993.
- 3) Cronberg, G., Lindmark, G., and Björk, S. : Mass development of flagellate *Gonyostomum semen* (Raphidophyta) in Swedish forest lakes - an effect of acidification?, *Hydrobiologia*, Vol. 161, pp. 217-236, 1988.
- 4) Slonen, K., Arvola, L., and Rosenberg M. : Diel vertical migrations of pHyto- and zooplankton in a small steeply stratified humic lake with low nutrient concentration, *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, Vol. 25, pp. 539-543, 1993.
- 5) Hansson, L. -A. : Synergistic effects of food chain dynamics and induced behavioral responses in aquatic ecosystems, *Ecology*, Vol. 81(3), pp. 842-851, 2000.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Eloranta, P. and Räsänen, 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.
- 9) Heywood, P. : Nutritional studies on the Chloromonadophyceae: *Vacuolaria virescens* and *Gonyostomum semen*, *J. Phycol.*, Vol. 9, pp. 156-159, 1973.
- 10) Heywood, P. : Mitosis and cytokinesis in the Chloromonadophycean alga *Gonyostomum semen*, *J. PHycol.*, Vol. 10, pp. 355-358, 1974.
- 11) 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.