

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

DIEL VERTICAL MIGRATION OF *Gonyostomum semen* (Raphidophyceae)
IN KAWAHARA LAKE

竹本陽一¹・古本勝弘²・多田彰秀³

Youichi TAKEMOTO, Katsuhiko FURUMOTO and Akihide TADA

¹学生会員 長崎大学大学院生産科学研究科システム科学専攻 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

²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)

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)

Seasonal changes and the vertical distributions of the water quality in Kawahara Lake were observed during Mar.-Sep.2001. With progressing of thermal stratification in the lake, DO decreased gradually in the lower layer and the nutrients ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$) released from bottom sediment.

On the other hand, in the middle layer of 3-5m depth, phytoplankton biomass grew and aggregated densely in the state of thin layer about 1m thick. The dominant species of the phytoplankton in that layer is *Gonyostomum semen*. *G.semen* has the character of diel vertical migration. Then, its diel vertical migration was investigated by using the mesocosm.

As the results, it was able to be confirmed that its diel vertical migration received not only the photon flux density but also the influence of pH.

Key Words : *Gonyostomum semen*, diel vertical migration, photon flux density, pH
Mesocosm, algal bloom

1. はじめに

湖沼において水質の予測や改善を考える上で、植物プランクトンの異常増殖(ブルーム)の発生のメカニズムやその特性を明らかにすることは重要である。ブルームを形成する植物プランクトンの中には、渦鞭毛藻 *Peridinium bipes* に代表されるような、遊泳能力を持つ走光性の種が存在する。それらの種は、日周期鉛直移動を行うことで、他の種に比べ栄養塩摂取や光合成の面で、優位に立てるといえる。

本研究対象である川原大池では、2000年に実施した詳細な水質鉛直分布調査によって、ラフィド藻 *Gonyostomum semen* のブルームが中層付近に確認された。この種の特徴は、*P. bipes* 同様、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い、弱酸性から中性の腐植栄養の傾向をもつ水を好むとされている¹⁾。また、室内実験で pH3.5 以下及び 8.0 以上では死滅することが確認されている²⁾。しかし、ヨーロッパや北アメリカ等ではブルームが問題になって

おり、観測^{3), 4), 5)} や室内実験等^{6), 7), 8)} が行われているが、わが国においては、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。

そこで、本研究では、鉛直分布調査やメソコスム(隔離水界)を用いた日周期鉛直移動観測を行い、*G. semen* の日周期鉛直移動の特性を調査した。また、日中、中層付近にとどまる要因として、光の影響以外にも pH が大きく影響している可能性があると思われるので、ここにそれらの結果を報告する。

2. 川原大池の概要

川原大池(図-1)は、砂嘴の成長で入り江が締め切られて出来た、海に隣接する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、地元の町の緊急用の水源になっている。湖には池田川のみが注ぎ、湖水は末端の水門と堰から越流し、水位はほぼ一定に管理されている。また、池田川では水道水として取水されているため、川原大池への流入は降水時

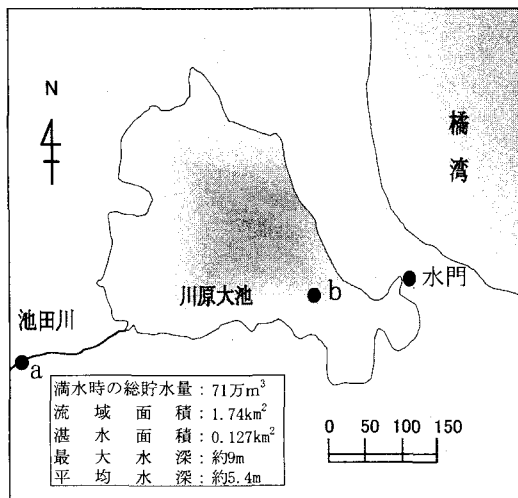


図-1 川原大池の概要

表-1 水質調査項目及び分析方法

調査項目	略号	分析方法
透明度	Transp.	透明度板
光量子密度	PPFD	光量子計 (ML-20P: 英弘精機株式会社製)
水素イオン濃度	pH	マルチ水質モニタリングシステム U-22 (株式会社製作所)
溶存酸素	DO	
導電率	COND	
塩分	SAL	
全溶存固形物量	TDS	
水温	Temp	
濁度	TURB	
酸化還元電位	ORP	
全窒素	T-N	ベルオキソ二硫酸カリウム分解-紫外線吸光度法
アンモニア性窒素	NH ₄ -N	インドフェノール青吸光度法
亜硝酸性窒素	NO ₂ -N	ナフチルエチレンジアミン吸光度法
硝酸性窒素	NO ₃ -N	Mullin Riley法
全リン	T-P	ベルオキソ二硫酸カリウム分解-吸光度法
リン酸態リン	PO ₄ -P	モリブデン青 (アスコルビン酸還元) 吸光度法
クロロフィルa	Chl-a	単波長吸光度法
フェオフィチンa	Phy-a	単波長吸光度法

に限られている。流域は僅かの果樹園の他は森林であり、人工的な汚濁の流入は少ない。

3. 鉛直分布調査

(1) 水質調査とその方法

水質調査は、2001年3月から同年9月にかけて月に1回の頻度で、池田川(a地点)と湖最深部(b地点、水深約9.0m)で行った。b地点では、水深1.0～9.0mを0.5m間隔で採水し、測定を行った。水質調査項目は表-1に示す。図-2に使用した採水器を示す。0.5m間隔の密な採水を行うため、採水器の呑み口部分には整流板を取り付け、他層の流入をできるだけ防ぐようにした。

(2) 水質調査結果

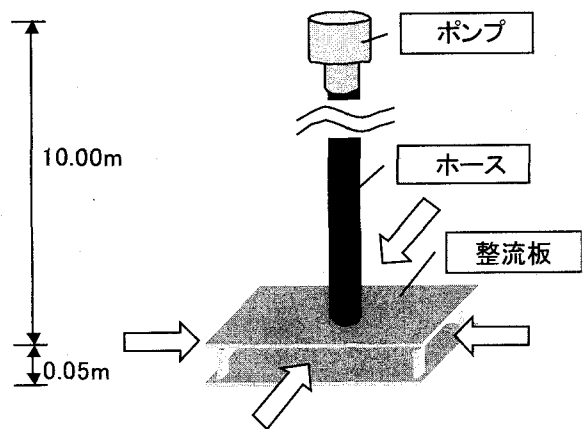


図-2 採水器

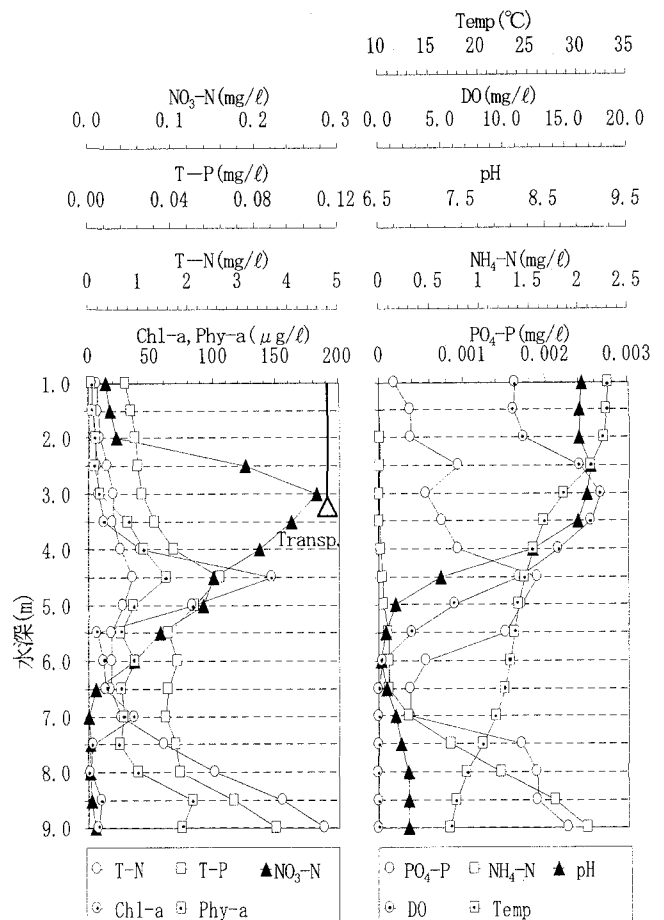


図-3 水質鉛直分布図 (8月3日11:30)

図-3に8月3日の水質鉛直分布(左図: T-N, T-P, NO₃-N, Chl-a, Phy-a, 透明度, 右図: PO₄-P, NH₄-N, pH, DO, Temp)を示す。右図より、水深1.0mと9.0mで水温差は16℃以上あり、水温成層が形成されていることがわかる。また、水深6.5m以下は無酸素状態であり、底泥からPO₄-P, NH₄-Nの溶出が起きている。PO₄-Pについては、底層だけでなく中層にもピークがみられる。これは、Chl-aのピーク部分と重なることから、植物プランクトンの一部のフィルター透過・溶出に由来するものと考えられ

表-2 植物プランクトン同定結果
(7月26日採水、水深4.5m)

分類	種名	細胞数 (cells/ml)
藍藻綱	<i>Chroococcus</i> sp.	19
渦鞭毛藻綱	<i>Peridinium</i> sp.	1
ラフィド藻綱	<i>Gonyostomum semen</i>	380
緑虫藻綱	<i>Trachelomonas</i> sp.	115
	<i>Phacus longicauda</i>	61
	<i>Euglena</i> sp.	3
珪藻綱	<i>Fragilaria crotonensis</i>	18
	<i>Asterionella gracillima</i>	5
	<i>Cyclotella</i> sp.	72
緑藻綱	<i>Elakatothrix genevensis</i>	1
	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	8
	<i>Chodatella citrifomis</i>	6
	<i>Tetraedron minimum</i>	47
	<i>Coelastrum cambricum</i>	4
	<i>Coelastrum microporum</i>	8
	<i>Coelastrum</i> sp.	12
	<i>Scenedesmus maximus</i>	9
	<i>Scenedesmus</i> sp.	42
	<i>Cosmarium</i> sp.	22
	<i>Staurostrum</i> sp.	5
	<i>Cosmocladium</i> sp.	2
	<i>Sphaerocystis schroeteri</i>	8
	<i>Gloeocystis gigas</i>	7
	細胞合計数 (cells/ml)	855

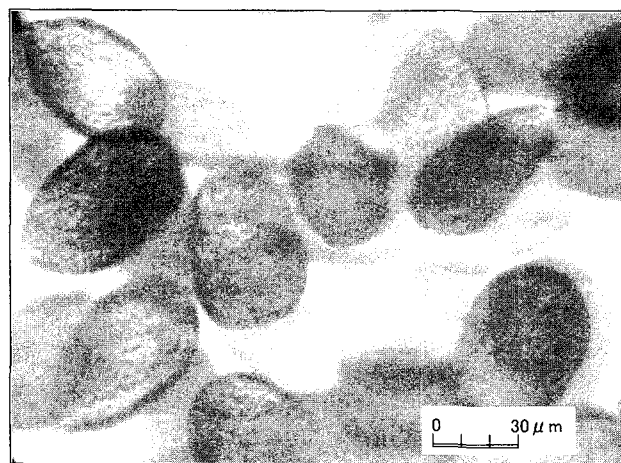


写真-1 *G. semen*の顕微鏡写真

る。NO₃-Nについては、中層部分にピークがみられるが、これは降水によって、池田川からNO₃-Nが供給されたためである。⁹⁾左図より、水深4.5mにChl-aのピークがあり、植物プランクトンのブルーム層が形成されていることが分かる。また、この層で、T-N、T-Pの濃度も高い値を示している。また、表-2は、7月26日の水深4.5mにおける植物プランクトンの分析結果である。これより細胞数で見た場合、*G. semen*(写真-1)は植物プランクトン全体の44%を占めていることが分かる。また、*Trachelomonas* sp.や*Cyclotella* sp.も細胞数で見た場

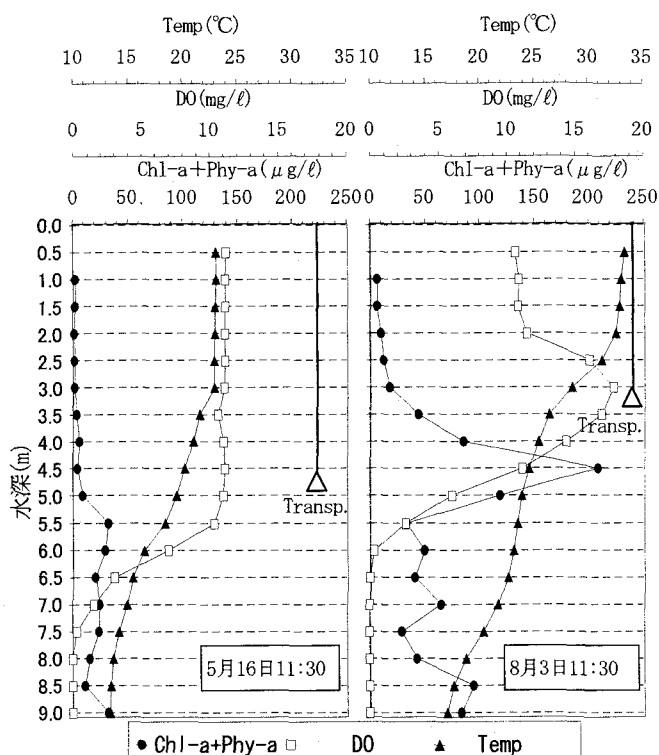


図-4 Chl-a+Phy-a, DO, 水温の鉛直分布

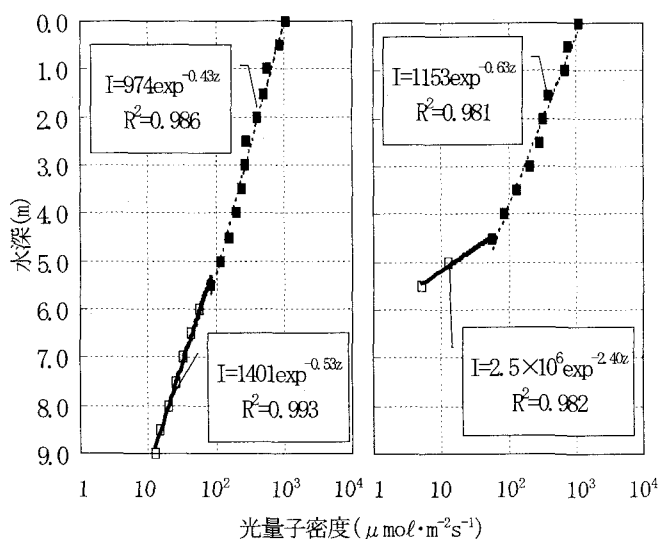


図-5 水深と光量子密度の関係

合、全体の13%、8%を占めているが、両者の大きさが約20 μmであるのに対して、*G. semen*は約60 μmと植物プランクトンの中では大型の種である¹⁾。よって、ブルーム層には、*G. semen*が極めて高く集積しているといえる。

(3) *G. semen*ブルーム層が与える光量消散係数への影響

図-4は5月16日と8月3日におけるChl-a+Phy-a, DO, Temp, 透明度の鉛直分布である。また、図-5は5月16日と8月3日における水深と光量子密度を片対数紙上にプロットしたものである。光量子密度は次式に示されるように水深方向にほぼ指数関数的に減衰することが知られ

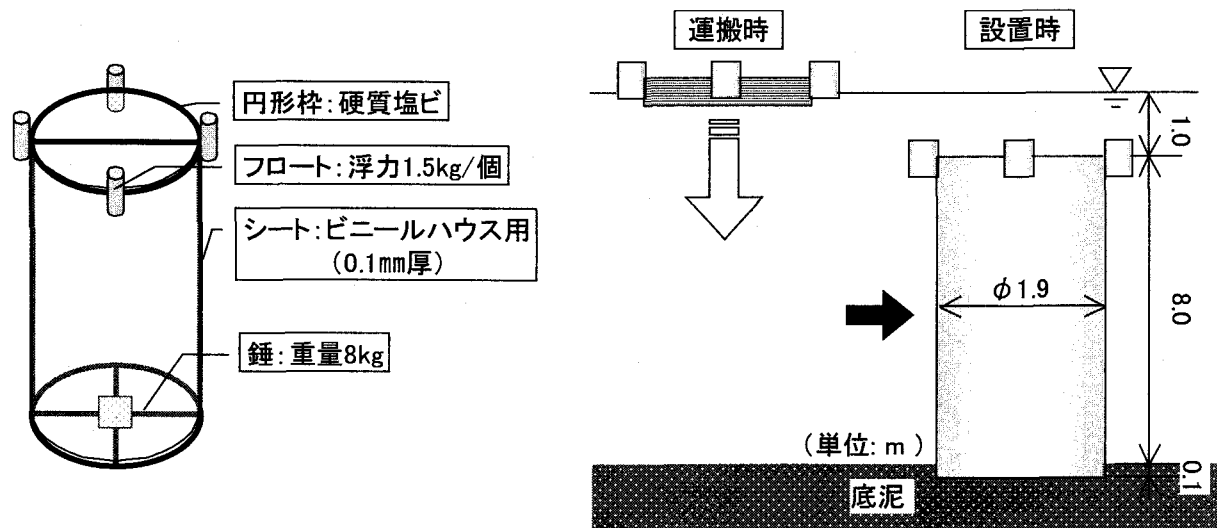


図-6 メソコスム詳細図

ている。¹⁰⁾

$$I = I_0 \exp(-k_s \cdot Z) \quad (1)$$

ここで、 I_0 、 I ：水面、水深 Z における光量子密度、 k_s ：消散係数である。図-5は、5月16日では水深5.5m、8月3日では水深4.5mで、すなわち、図-4に示す両日のChl-a+Phy-aのピーク水深で光量子密度の急変を示している。特に8月3日のデータでは*G. semen*のブルームが確認されており、この種が光の透過に大きく影響していることが知れる。図-5に記入の式はブルーム層の上下層に(1)式を適用した結果である。図-4、5より、Chl-a+Phy-aのピーク水深上下層(水表面からピーク水深までを上層、ピーク水深から湖底までを下層とする)で、消散係数が変化しており、Chl-a+Phy-aの濃度が高い8月3日では、下層の消散係数は上層の約3.8倍になっている。また、水表面光量の1%が届く水深が一般に補償深度(植物プランクトンによる酸素の生産量と消費量が等しくなる深さ)、その深度までの層が有光層とされている。5月16日では水表面から湖底まで有光層であるが、8月3日では、水表面から水深約5mまでが有光層であることが分かる。また、8月3日で、上層の消散係数を用いて、有光層を求めると水表面から水深約7.3mまでとなった。つまり、*G. semen*のブルームが存在しない場合には有光層が2m以上広がる事が分かる。よって、*G. semen*のブルームは光の透過を抑制し、有光層を狭くする。その結果、植物プランクトンの住めない無光層が広がり、無酸素層を広げ、栄養塩類の溶出を促進する効果をもつといえる。ただし、*G. semen*のブルームが与える影響を定量的に評価することは現地で得られたデータだけでは困難である。

4. メソコスムを用いた*G. semen*の日周期鉛直移動観測

*G. semen*の日周期鉛直移動を明らかにするために、24時間にわたって、鉛直観測を行った。ここでは、流れに

よる*G. semen*の水平移動を軽減するため、メソコスム(隔離水界)を用いて観測を行った。

(1) 観測方法

8月9日にメソコスムを設置し、メソコスム内の水質が安定した後、8月12日13時から13日13時にかけて観測を行った。図-6に使用したメソコスムの詳細を示す。メソコスムは、ビニールハウス用透明シートを硬質塩ビの円形枠(直径1.9m)に貼付したもので、鉛直方向に自由に畳むことができ、運搬時0.3m、設置時は8.0mとなる。また、メソコスム底部に取り付けた錘と上端枠のフロートのみで水中に自立し、メソコスム下端の円形枠は底泥にささり、安定した設置が可能である。円筒状水界は周囲水と隔離されるが、上端は水表面に没しており、上部1mは周囲水と隔離されていない。これにより、風や流れの影響を受けにくい、完全に隔離されていないため、表層付近においてメソコスム内外で栄養塩や植物プランクトン等のやりとりはあると思われる。ただ、*G. semen*の遊泳層は十分に隔離できるため、本調査での影響は少ないと思われる。

観測項目は、表-1の項目と*G. semen*の細胞数を計数した。但し、13日1時と同日13時は水深0.5~8.5mを0.5m間隔で測定したが、それ以外は、ブルーム層を中心に、*G. semen*の存在する層を測定した。計数方法は、*G. semen*は固定液で死滅しやすいため、ここでは採取後、固定せずに生体のままで、以下のような方法で計数を行った。まず、採取した容器をよく振り、プランクトンを均一に分布させる。その後、ピペットで0.1mlを採取し、枠付スライドガラス(方眼1.0mm目盛)に載せ、生物顕微鏡(CBMT-15型(樹カーテン光学)下で、60倍で計数した。

(2) 観測結果

a) 鉛直移動速度の算定

図-7に24時間の*G. semen*鉛直分布図を示す。これより、

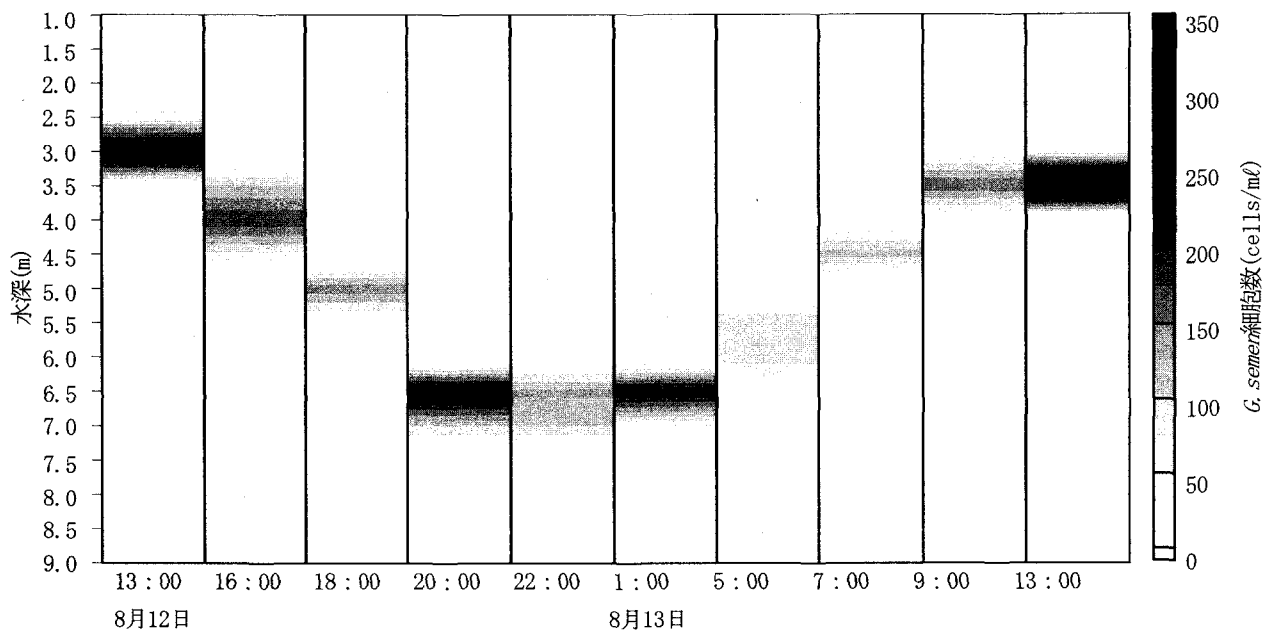


図-7 *G. semen*の鉛直分布(2001年8月12日13:00~8月13日13:00)

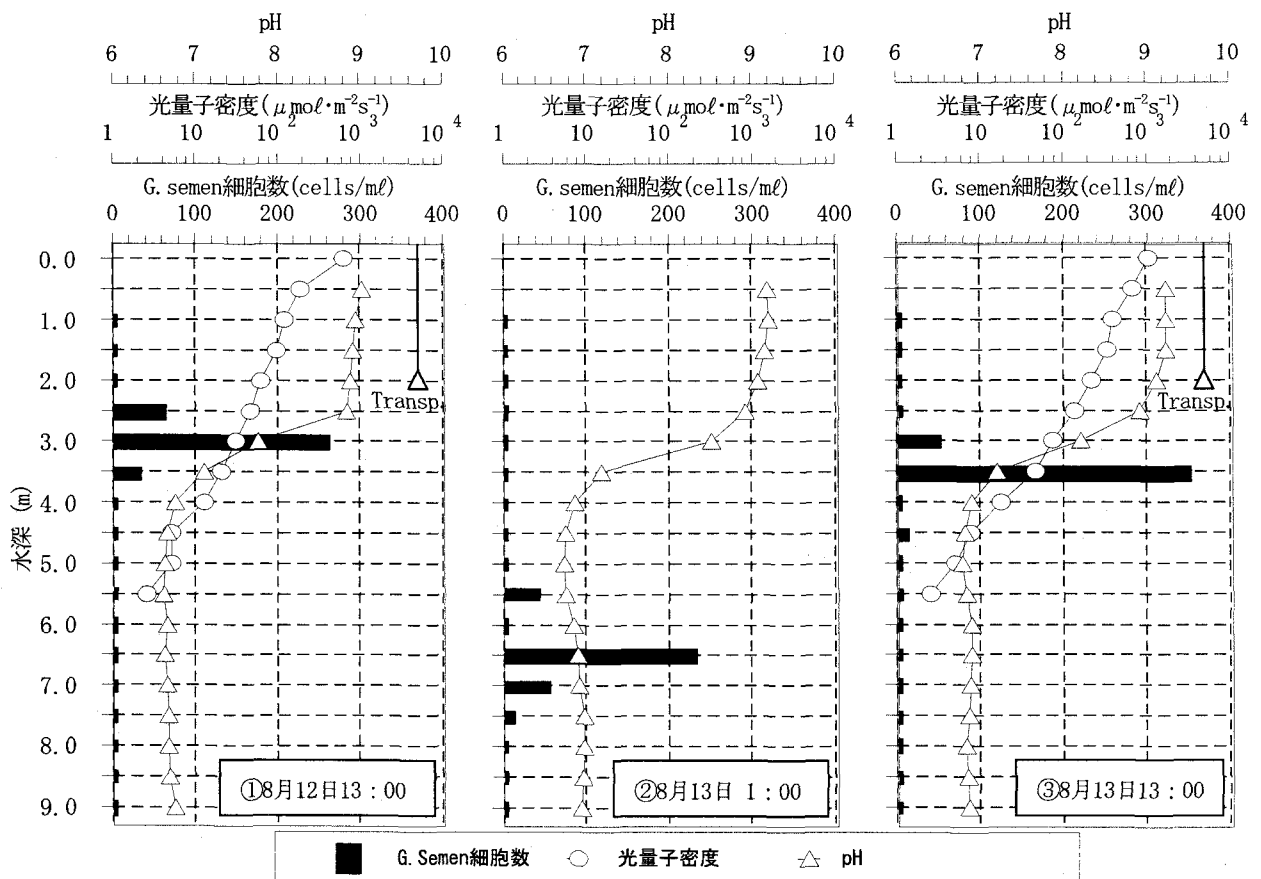


図-8 ①8月12日13:00, ②8月13日1:00, ③8月13日13:00の*G. semen*の細胞数, 光量子密度, pHの鉛直分布及び透明度

ブルーム層は13時から20時にかけて徐々に下降し, 20時には水深6.5mに形成された. その後, 1時まではその層に止まっていた. 5時には鉛直移動を開始し, 9時に水深3.5mに, その後13時まではその層にブルームを形成し

た. ブルーム層の測定間隔が2~4時間であるため, 正確な鉛直移動の開始・終了時刻や鉛直移動速度は分からないが, およその速度を見積もった.

まず, 下方向への鉛直移動速度については, 18時から

20時にかけての下降移動から求めると、0.75m/hrであった。また、日の出後の上昇移動は7時～9時にかけて求めると、0.50m/hrであった。

b) pHが与える鉛直移動への影響

図-8に、①8月12日13:00、②8月13日1:00、③8月13日13:00の*G. semen*の細胞数、光量子密度、pHの鉛直分布及び透明度を示す。ここで、棒グラフが*G. semen*の細胞数、折れ線グラフが光量子密度、pHを示す。

まず、①、③における*G. semen*の細胞数のピーク水深は3.0m、3.5mであり、また、その水深における光量子密度は、 $31 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ と $46 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。しかし、Eloranta, P. and Räike, A.が行った室内実験⁶⁾の結果では、最適な光量子密度は $75\sim90 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ であり、今回得られた結果とは倍以上の差であった。この結果の要因として、*G. semen*のpHに対する性質が関係していると考えられる。*G. semen*は実験によってpH3.5以下及び8.0以上では生活できないことが分かっている²⁾。図-8より、①、③の*G. semen*の細胞数のピーク水深のpHは、それぞれ、7.77と7.20であり問題はないものの、それ以浅のpHは共に8.0以上となっており、*G. semen*の生活できない環境であることが分かる。よって、光合成に最適な光量子密度の層におけるpHが8.0以上のアルカリ性を示しているため、その水深までは鉛直移動せず、pHが8.0未満の水深にブルームを形成していると考えられる。

pHは光合成によって、アルカリ性に傾くため、*G. semen*ブルームの光合成によって、pHはアルカリ性に傾くといえる。図-8の水深3.0mのpHの変化に注目すると、①では8.0未満であるが、②③では8.0以上となっており、①で光合成によってpHがアルカリ性に傾き、それによって、*G. semen*には生活できない環境となり、③ではブルーム層が水深3.0mから3.5mに下がったと思われる。

5. まとめ

現地調査とメソコスムを用いた*G. semen*の日周期鉛直移動観測から得られた主要な結果と課題を以下に列挙する。

- (1) *G. semen*のブルームは光の透過を抑制し、有光層を狭くする。
- (2) 鉛直移動速度は、日の出後の上昇移動速度：0.50m/hr、日の入り後の下降移動速度：0.75m/hr
- (3) *G. semen*の日周期鉛直移動はpHの影響を強く受けており、pH8.0以上の高いアルカリ性の水域は避けて鉛直移動を行う。

今後は、現地観測によって明らかになった*G. semen*の

鉛直移動速度、光合成に最適な光量子密度、pHによる鉛直移動に与える影響を、室内実験等で明らかにしていく予定である。

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。植物プランクトンの同定結果(表-1)は、共同調査を行っている長崎県食品環境検査センターによるものである。調査や水質分析には卒研生の諸氏の熱心な協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 堀輝三編:藻類の生活史集成第3巻, pp.459-461, 内田老鶴圃, 1993.
- 2) 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, Vol.39, pp.179-183, 1975.
- 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) Eloranta, P. and Räike, 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.
- 7) Heywood, P.: Nutritional studies on the Chloromonadophyceae: *Vacuolaria virescens* and *Gonyostomum semen*, *J. Phycol.*, Vol.9, pp.156-159, 1973.
- 8) Heywood, P.: Mitosis and cytokinesis in the Chloromonadophycean alga *Gonyostomum semen*, *J. Phycol.*, Vol.10, pp.355-358, 1974.
- 9) 竹本陽一, 古本勝弘, 多田彰秀: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, pp.709-714, 2001.
- 10) 有田正光編著:水圏の環境, pp.20-22, 東京電気大学出版局, 1999.

(2001. 10. 1受付)