

# ラフィド藻 *Gonyostomum semen* の 日周期鉛直移動に及ぼす影響因子

竹本 陽一\*・古本 勝弘\*\*・多田 彰秀\*\*・山本 晋哉\*\*

## Factors of influence on diel vertical migration of *Gonyostomum semen* (Raphidophyceae)

by

Youichi TAKEMOTO\*, Katsuhiro FURUMOTO\*\*, Akihide TADA\*\* and  
Shinya YAMAMOTO\*\*

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 by using the mesocosm in the field. In the daytime *G.semen* aggregated at the depth of about 3m 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.

### 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*<sup>1),2)</sup>の異常増殖（ブルーム）が発生しており、観測<sup>3),4),5),6)</sup>や室内実験等<sup>7),8),9),10)</sup>が行われ、注目されている。*G.semen*のブルームは、水質に影響があるだけでなく、人体にも影響（かゆみ、アレルギー反応）あることが報告<sup>3)</sup>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。日本においても、蛇沼、中沼、河口湖等で生息が確認<sup>7)</sup>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、その特性を解明することは、水質の予測や改善を考える上で重要なことである。

本研究対象である川原大池では、2000年～2002年に実施した詳細な水質鉛直分布調査によって、*G.semen*のブルームが、日中、中層付近に確認された。そこで、本研究では、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。その結果、*G.semen*は、日中および夜

平成15年4月18日受理

\*大学院生産科学研究科システム科学専攻 (Graduate School of Science and Technology)

\*\*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

間において、ある水深にブルームを形成することが明らかになった。そこで、*G.semen*がある水深にブルームを形成する要因を明らかにするために、マイクロコスム(小型実験生態系)を用いて室内実験を行い、それらを明らかにした。

2. 川原大池の概要

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。湖には池田川のみが注ぎ、湖水は末端の水門(敷高 TP 1.47m)から越流し、水位は一定に保たれている。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。

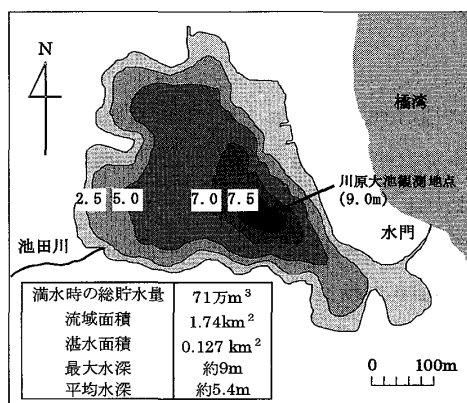


図-1 川原大池略図

3. 鉛直分布調査

3.1 水質調査方法

水質調査は、2001/3～10にかけて月に1回の頻度で、湖最深地点(水深約9.0m)で行った。ここでは、水深1.0～9.0mを0.5m間隔で採水し、測定を行った。0.5m間隔の密な採水を行うため、採水器(図-2)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。水質調査項目は表-1に示す。ただし、本論では植物プランクトンを中心とした問題を扱うためChl-a以外の水質について以下では触れない。

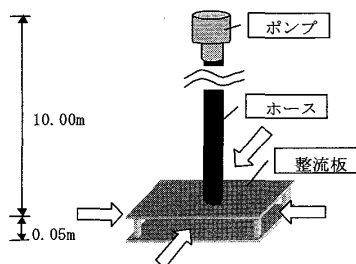


図-2 採水器

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 (堀場製作所)
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	ペルオキシ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 <sub>4</sub> -N	インドフェノール青吸光度法
亜硝酸性窒素	NO <sub>2</sub> -N	ナフチルエチレンジアミン吸光度法
硝酸性窒素	NO <sub>3</sub> -N	Mullin Riley法
全リン	T-P	ペルオキシ二硫酸カリウム分解-吸光度法
リン酸態リン	PO <sub>4</sub> -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

3.2 Chl-aの調査結果

図-3に12:00前後におけるChl-aの鉛直分布月変化を示す。6/13、8/3において、水深4.5m付近の1m程度の狭い層に、Chl-aが極めて高く集積していることが分かる。6/13水深4.0～5.0mには、全層のChl-aの約62%、8/3水深4.0～5.0mには、約66%が集積していた。また、6/13、8/3のChl-aのピーク濃度は、それぞれ171 μg l<sup>-1</sup>、147 μg l<sup>-1</sup>と高濃度であった。このChl-aの集積層における植物プランクトンの優占種を調べるため、7/26に水深4.5m層の植物プランクトン分析を行った。その結果を表-2に示す。この層の優占種はラフィド藻の*G.semen*であり、個体数での優占率は44.4%であった。また、*Trachelomonas* sp. や *Cyclotella* sp. も個体数で見えた場合、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ことから、Chl-aに占める割合は更に大きいと考えられる。

3.3 *G.semen*の特徴

ラフィド藻の*G.semen*(写真-1)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45～70 μm、幅は20～30 μm、厚さは10～17 μmであり、植物プランクトンの中では大型の種である<sup>1)</sup>。室内実験でpH3.5以下及び8.0以上では死滅<sup>7)</sup>、別の実験では光合成に最適な光量(光量子密度)は75～90 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>と得られている<sup>8)</sup>。

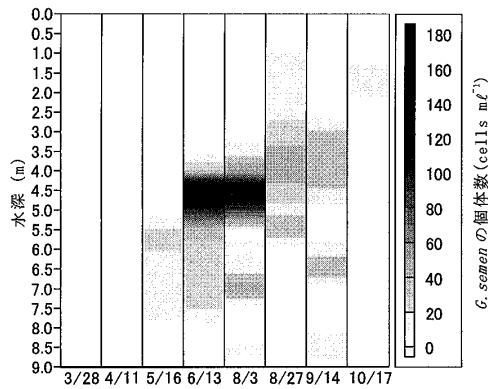


図-3 Chl-a の鉛直分布月変化 (2001 年)

表-2 植物プランクトン同定結果  
(7/26 採水, 水深 4.5m)

分類	種名	個体数 (cells mL <sup>-1</sup> )
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>Staurastrum</i> sp.	5
	<i>Cosmoecidium</i> sp.	2
	<i>Sphaerocystis schroeteri</i>	8
<i>Gloeocystis gigas</i>	7	
個体合計数 (cells mL <sup>-1</sup> )		855

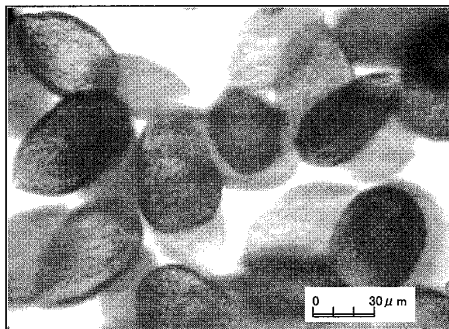


写真-1 *G.semen* の顕微鏡写真

#### 4. メソコスムを用いた *G.semen* の日周期鉛直移動観測

##### 4.1 観測方法

*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、鉛直分布観測を行った。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。2001/8/9 にメソコスムを川原大池最深地点に設置し、メソコスム内の水質が安定した後、8/12 13:00 から 8/13 13:00 にかけて観測を行った。図-4 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 の項目とともに *G.semen* の個体数を計数した。ただし、8/13 1:00 と 13:00 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、ピペットで 0.1mℓ を採取し、枠付スライドグラス (方眼 1.0mm 目盛) に載せ、生物顕微鏡 (CBMT-15 型 (株) カートン光学) 下で、60 倍で計数した。

##### 4.2 観測結果

図-5 に 24 時間の *G. semen* 鉛直分布を示す。これより、*G.semen* は 13:00 から 20:00 にかけて徐々に下降移動し、20:00 に水深 6.5m にブルーム層を形成した。その後、1:00 まではその層に止まっていた。5:00 には鉛直移動を開始し、9:00 に水深 3.5m に、その後 13:00 まではその層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、一般的に、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。しかしながら、光合成に最も適した水深は、光が最も強い水表面であるといえ、

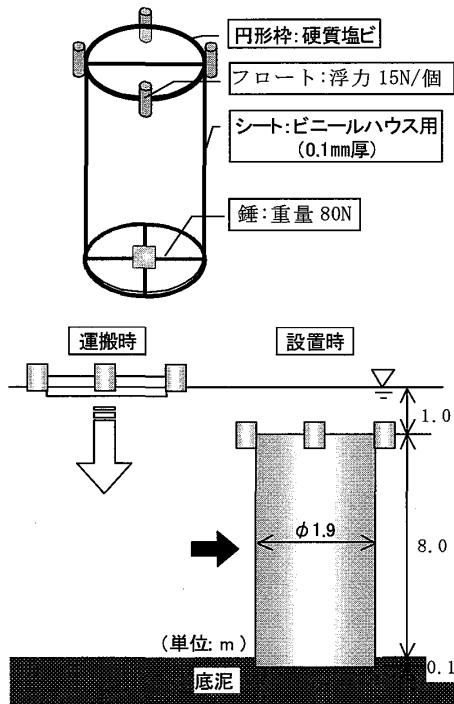


図-4 メソコスム詳細図

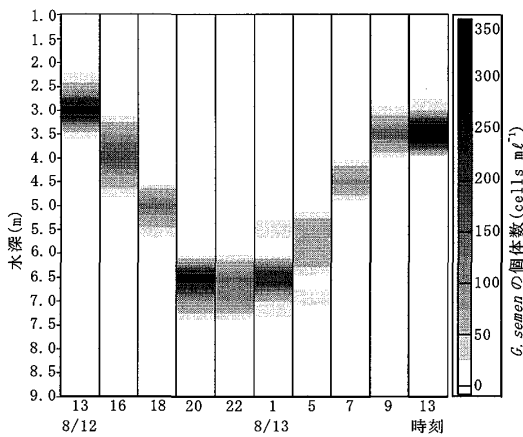
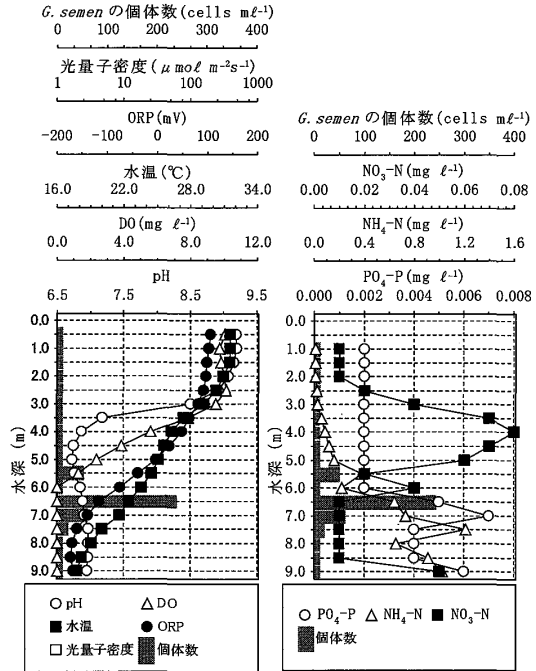
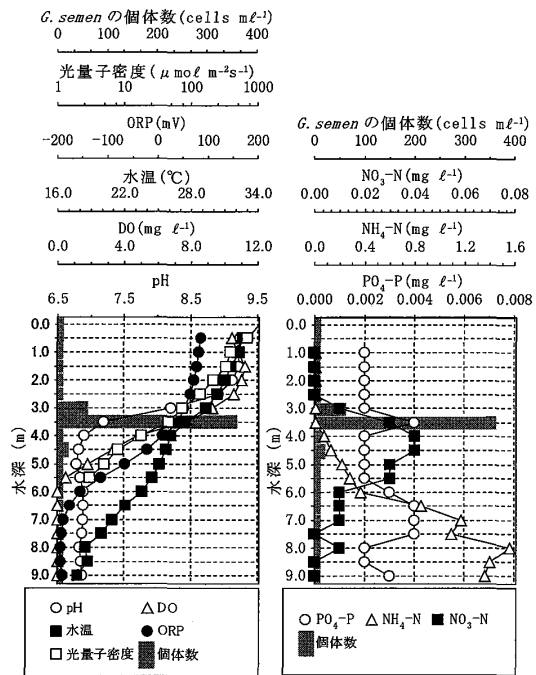


図-5 *G.semen* の鉛直分布  
(2001/8/12 13:00 ~ 8/13 13:00)

も適した水深は、光が最も強い水表面であるといえ、また、栄養塩の摂取には、栄養塩濃度が最も高い底泥直上であるといえる。*G.semen*は、日中、水深3.5m付近、夜間、6.5m付近にブルームを形成しており、このように、ある水深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。



①8/13 1:00



②8/13 13:00

図-6 左図: PO<sub>4</sub>-P, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-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  
(① 8/13 1:00, ② 8/13 13:00)

## a) 鉛直下降移動を制限する因子

図-6に、①8/13 1:00および②8/13 13:00における水質鉛直分布を示す。ここで、左図は、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  および *G.semen* の個体数の鉛直分布を、右図は、pH、DO、水温、ORP（酸化還元電位）および *G.semen* の個体数の鉛直分布を示している。

図-6の①8/13 1:00より、水深6.5mに *G.semen* のブルームが形成されていることがわかる。その付近の栄養塩濃度の分布に注目すると、特異な変化はしておらず、ブルーム形成水深に栄養塩濃度は影響を与えていないと思われる。また、pHは6.89～6.95で *G.semen* は生育可能であるといえ、水温変化も一定であることから、pHおよび水温は *G.semen* の下降移動の制限因子であるとはいえない。そこで、DOに注目すると、水深6.0m～9.0mでほぼ  $0\text{mg}\ell^{-1}$  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は、水深が深くなるにつれて減少していることから、同じ無酸素層でも底泥表面に近いところがより還元状態が強いことがわかる。よって、このような還元状態では、*G.semen* が呼吸に必要とする酸素が欠乏しており、生育するには困難であるといえる。以上より、*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。

## b) 鉛直上昇移動を制限する要因

図-6の②8/13 13:00より、*G.semen* の個体数のピーク水深は3.5mであり、また、その水深における光量子密度は、 $46\mu\text{mol}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。最適な光量子密度は  $75\sim 90\mu\text{mol}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり、今回得られた結果とは倍以上の差であった。また、②の *G.semen* の個体数のピーク水深のpHは、それぞれ、7.20であり問題はないもの、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、現地調査と同様に、pHが *G.semen* の鉛直上昇移動を抑制していると考えられる。

5. マイクロコスムを用いた *G.semen* の日周期鉛直移動実験

## 5.1 実験方法

マイクロコスム（図-7）は、内径24cm、高さ200cmの透明なアクリル製の円筒水槽である。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  $28^\circ\text{C}\sim 31^\circ\text{C}$  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

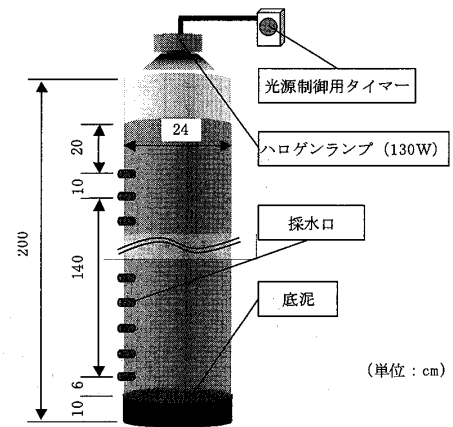
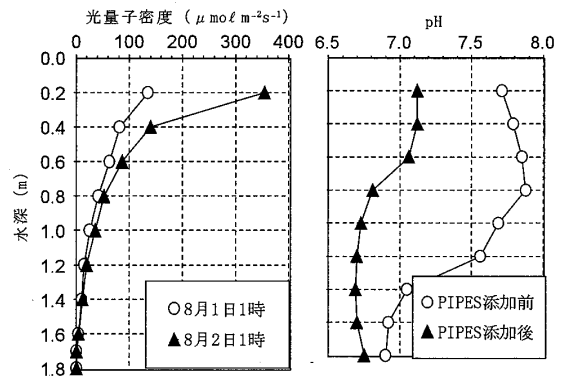


図-7 マイクロコスムの概要

図-8 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

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 ( $75\sim 90\mu\text{mol}\ell\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) 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くなる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し、マイクロコスム内のpHが7以下となるようにした。図-9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

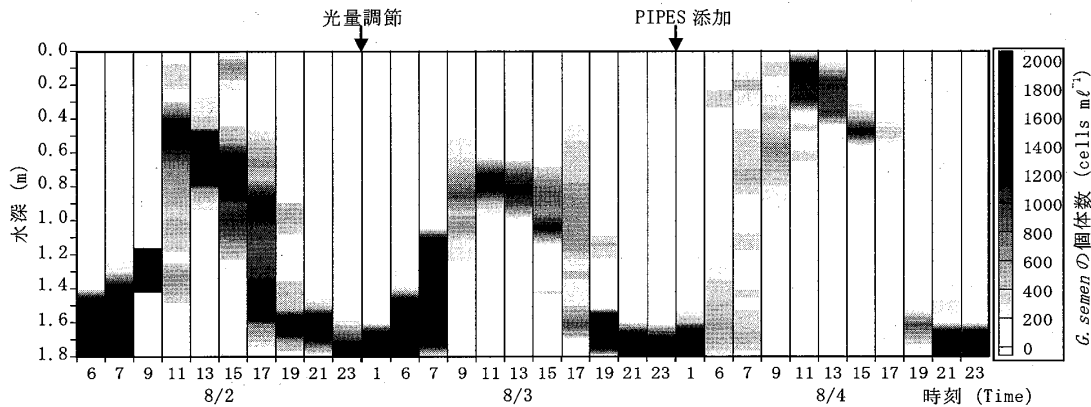


図-9 G.semen の鉛直移動の経時変化

口から少量 (約30mℓ) ずつ採水し、生体のまま *G.semen* の個体数を計数して行った。計数方法はメソコスム実験と同様である。また、13:00 と 1:00 に *G.semen* のブルーム層を中心に採水を行い、メソコスム実験と同様の水質項目の分析を行った。また、pH、DO、水温等も U-22 (㈱堀場製作所製) を用いて測定を行った。

5. 2 実験結果および考察

(1) 下降移動の制限因子の検討

図-9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わかる。そこで、8/4 1:00 に注目して、図-10 (左図) に pH など他項目と *G.semen* の個体数の鉛直分布、図-10 (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-10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とがわかる。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<sup>-1</sup> 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、メソコスム観測と同様に、*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。

(2) 上昇移動の制限因子の検討

図-9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ことが分かる。また、

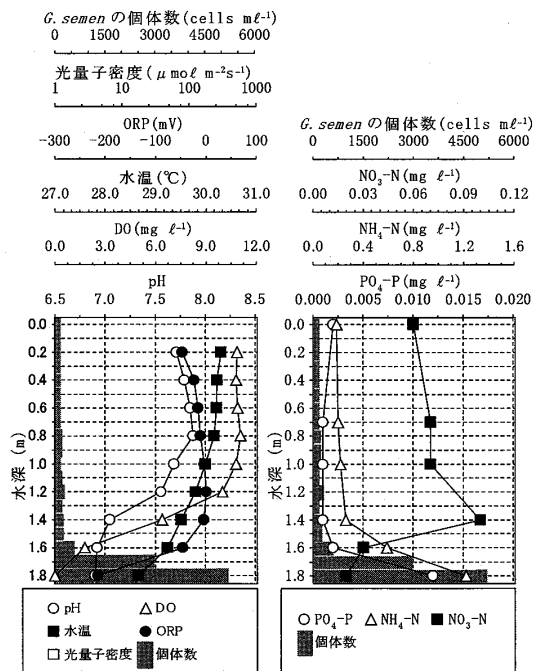


図-10 左図：PO<sub>4</sub>-P、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、*G.semen* の個体数の鉛直分布  
右図：pH、DO、水温、ORP、光量子密度、*G.semen* の個体数の鉛直分布

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 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> であり、境界水深の pH は 7.04 であった。最適光量が

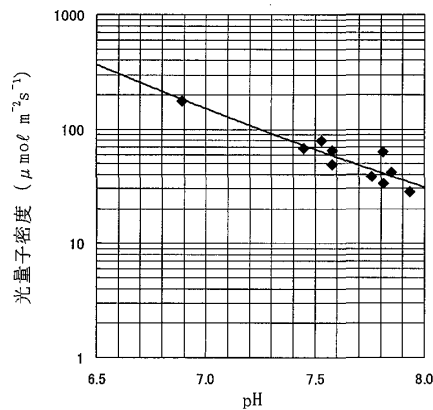


図-11 13:00におけるブルーム境界のpHと光量子密度の関係(2001年, 2002年)

75 ~ 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-11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, 相関関係が認められる. 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*のブルーム水深が決まることが明らかになった.

## 6. まとめ

川原大池で実施した水質鉛直分布調査によって, 夏季に *G.semen*のブルームが中層に形成されることが分かった. また, メソコスム実験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ことが明らかになり, また, 上昇移動にはpHおよび光量子密度が関係することが明らかになった. 更に, 後者に関しては, ブルーム層上端のpHと光量子密度に相関関係があることから, pHの上昇に伴い, *G.semen*の最適光量は低下す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. 植物プランクトンの同定結果(表-2)は, 共同調査を行っている(社)長崎県食品衛生協会によるものである. 調査や水質分析には卒研生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) 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 Bjork, 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 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.
- 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.