

(51) ラフィド藻 *Gonyostomum semen* の鉛直上昇移動に対する光と pH の影響

**Influence of Light and pH on Controlling Upward Vertical Migration of
Gonyostomum semen (Raphidophyceae)**

竹本陽一*, 古本勝弘**, 多田彰秀**

Youichi TAKEMOTO*, Katsuhiko FURUMOTO**, Akihito TADA**

ABSTRACT ; This paper deals with the influences of lightness and pH on the diel vertical migration of the phytoplankton (*Gonyostomum semen*). By the field observation on the water quality in Kawahara Lake, it was found that the phytoplankton biomass, of which dominant species was *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. The light density of the aggregated layer in the daytime was fairly lower than the optimum photon flux density for *G.semen*. Accordingly the laboratory experiment by using the microcosm was conducted to make clear the controlling factor other than lightness. As the results of the microcosm experiment, it was found the diel vertical migration of *G.semen* was influenced by higher pH than about 7.8.

Keywords ; *Gonyostomum semen*, pH, photon flux density, diel vertical migration

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) があることが報告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。日本においても、蛇沼、中沼、河口湖等で生息が確認⁷⁾ されているが、比較的に稀な種であるため *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、渦鞭毛藻 *Peridinium 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る、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、2001年に実施した詳細な水質鉛直分布調査によって、*G. semen* のブルームが中層付近に確認された。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。その結果、日中、*G. semen* のブルームが中層付近に形成される要因として、光の影響以外にも pH が大きく影響している可能性がでてきた。そこで、マイクロコスム (小型実験生態系) を用いた室内実験を行い、それらを明らかにした。

*長崎大学大学院生産科学研究科システム科学専攻 (Graduate School of Science and Technology, Nagasaki University)

**長崎大学工学部社会開発工学科 (Department of Civil Engineering, Nagasaki University)

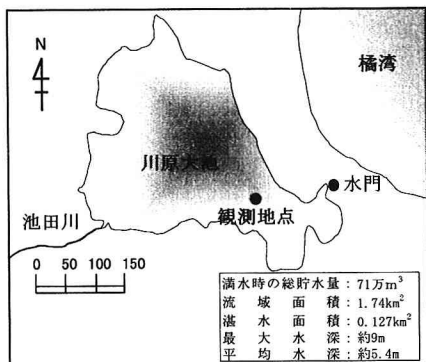


図-1 川原大池の概要

2. 川原大池の概要

長崎県の長崎半島に位置する川原大池(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年ポンプ排水によって強制脱塩され淡水湖化されている。湖には池田川のみが注ぎ、湖水は末端の水門(敷高TP1.47m)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

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。

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 $171\mu\text{g}\ell^{-1}$ 、 $147\mu\text{g}\ell^{-1}$ 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

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
光子密度	PFD	光子計 (ML-20P: 英弘精機株式会社製)
水素イオン濃度	pH	
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 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	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 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

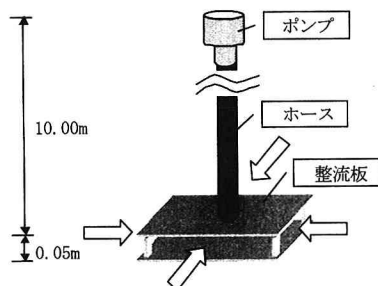


図-2 採水器

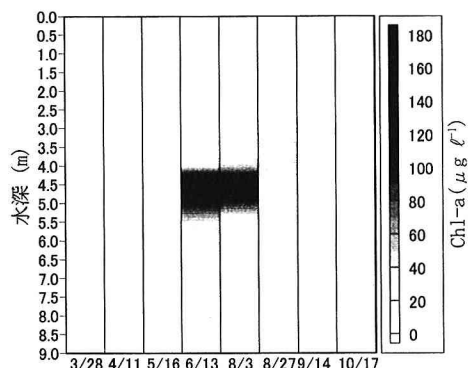


図-3 Chl-aの鉛直分布月変化 (2001年)

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 ⁻¹)
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>Cosmocladium</i> sp.	2
	<i>Sphaerocystis Schroeteri</i>	8
	<i>Gloeocystis gigas</i>	7
細胞合計数(cells ml ⁻¹)		855

数で見た場合, 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の最適光量子密度は 75~90 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であることが分かっている⁸⁾。

3.4 *G. semen* が中層にブルームを形成する要因

図-4 に 8/3 11:30 における pH, 光量子密度及び Chl-a の鉛直分布を示す。*G. semen* のブルーム水深は 4.5 m で, その層における光量は 56 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり, 光合成の最適光量 (75~90 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) よりも低い層にブルーム形成していることが分かる。ここで, 光合成の最適光量である水深 4.0m に注目すると, pH が水深 4.5m では 7.2 と低いのに対し, 水深 4.0m では 8.4 と高い値を示している。*G. semen* は pH8.0 以上では死滅するため, 水深 4.0m では *G. semen* は生存できない環境であることが分かる。よって, この調査結果より, *G. semen* は高い pH のために光合成の最適光量下に上昇移動できない, つまり, pH が *G. semen* の鉛直上昇移動を抑制していると考えられる。

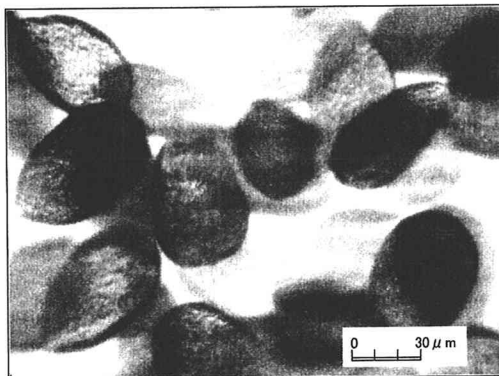


写真-1 *G. semen* の顕微鏡写真

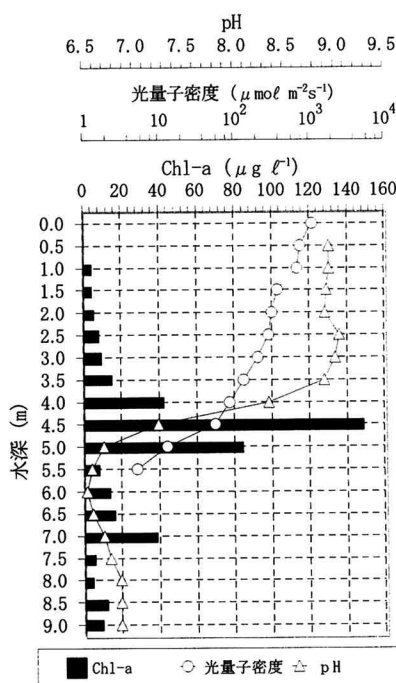


図-4 pH, 光量子密度, 及び Chl-a の鉛直分布
(2001/8/3 11:30)

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 にメソコスムを現地最深地点に設置し、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-5 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* の固体数を計数した。但し、8/13 1:00・13:00 は水深 0.5~8.5 m 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

4.2.1 鉛直移動速度の算定

図-6 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

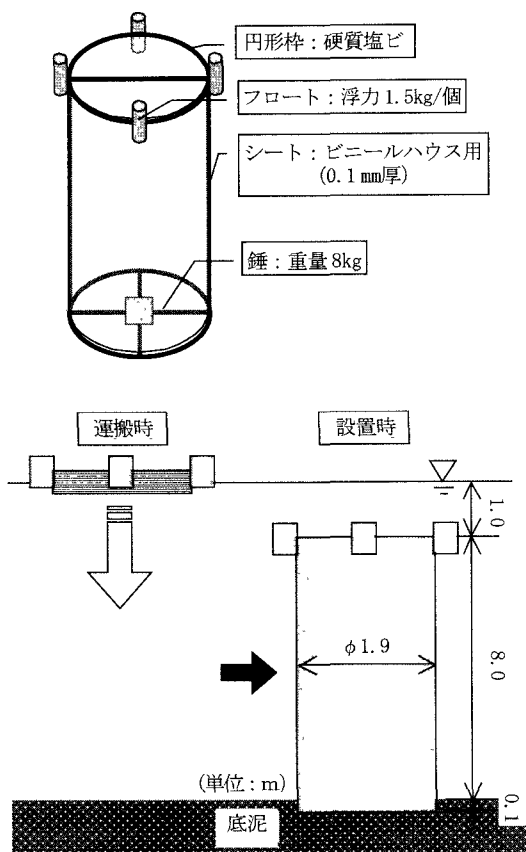


図-5 メソコスム詳細図

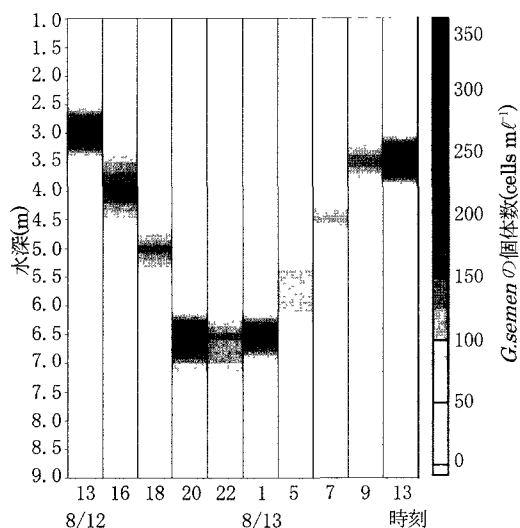


図-6 *G. semen* の鉛直分布(2001/8/12 13:00~8/13 13:00)

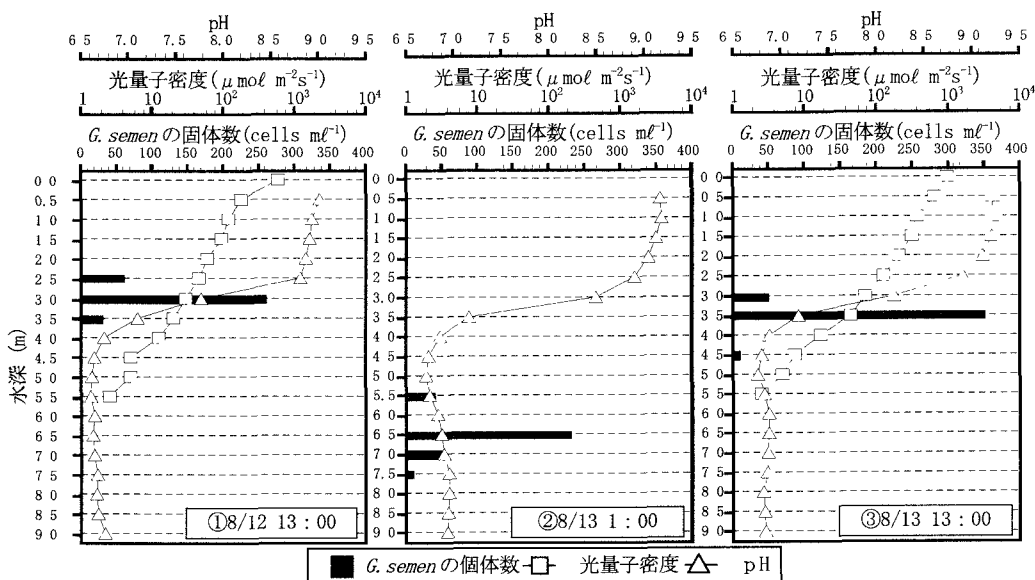


図-7 *G. semen* の個体数、光量子密度及びpHの鉛直分布 (①8/12 13:00、②8/13 1:00、③8/13 13:00)

まではその層にブルームを形成した。この結果より、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、下方への鉛直移動速度は、18:00～20:00にかけての下降移動から求めると、 0.75m hr^{-1} であった。また、日の出後の上昇移動は7:00～9:00にかけて求めると、 0.50m hr^{-1} であった。

4.2.2 pHが与える鉛直移動への影響

図-7に、①8/12 13:00、②8/13 1:00、③8/13 13:00の*G. semen*の個体数、光量子密度、pHの鉛直分布を示す。ここで、棒グラフが*G. semen*の個体数、折れ線グラフが光量子密度、pHである。

まず、①、③における*G. semen*の個体数のピーク水深は3.0m、3.5mであり、また、その水深における光量子密度は、 $31\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ と $46\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。最適な光量子密度は $75\sim 90\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり、今回得られた結果とは倍以上の差であった。また、①、③の*G. semen*の個体数のピーク水深のpHは、それぞれ、7.77と7.20であり問題はないもの、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. マイクロコスム実験

5.1 実験方法

現地調査とメソコスム実験より、日中、中層に*G. semen*がブルームを形成する要因は、光量とpHが関係していると予想された。そこで、マイクロコスムを用いて*G. semen*の日周期鉛直移動を再現し、光量とpHが*G. semen*のブルーム形成に与える影響を調べた。

マイクロコスム(図-8)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約 $27\pm 1^\circ\text{C}$ であり、成層はほとんどしていない。実験には、2001/9/15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*

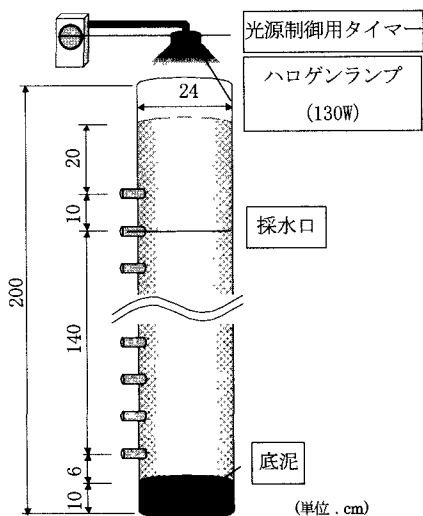


図-8 マイクロコスムの概要

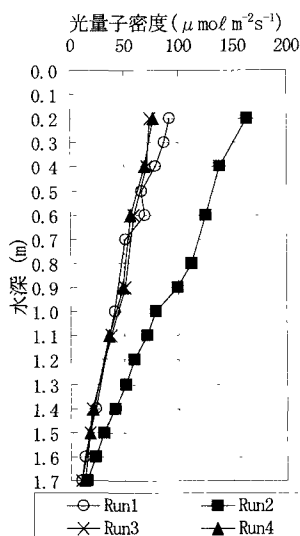


図-9 光量子密度の鉛直分布
Run1~4 (0:00)

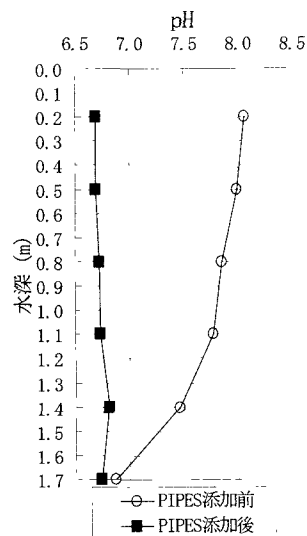


図-10 PIPES 添加前後の pH 変化

のブルーム水)と底泥を使用した。

実験は9/18 0:00から連続して4日間、光量およびpHを変化させてRun1~4まで行った。光量は、Run1~4の*G. semen*の光合成の最適光量子密度が、Run1, 3, 4:0.2~0.5m, Run2:0.9~1.1mになるようにランプ高さを設定した。光量の設定及び測定は、*G. semen*が底泥表面に移動して水中にはなくなる夜間に一時的に光源を点灯させて、光量子計(ML-20P:英弘精機株式会社)で行った。Run1~4(0:00)の光量の鉛直分布を図-9に示す。pHの調整はRun3終了後、*G. semen*が底泥表面に移動した夜間に、PIPES(ピペラジジン-N, N-ビス{2-エタンスルホン酸})³⁾を混和して行った。また、*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-10にPIPESによるpH調整前後のpHの鉛直分布を示す。

Run1~4では、13:00にブルーム調査を行い、Run1, 4では24時間の*G. semen*の鉛直移動観測も行った。13:00のブルーム調査では、マイクロコスムの全ての採水口から少量(約30ml)ずつ採水し、*G. semen*の個体数を計数した。計数方法はメソコスム実験と同様である。また、*G. semen*のブルーム層付近のpH, DO, 水温をU-22(榊堀場製作所製)で測定した。24時間の*G. semen*の鉛直移動観測では、0:00から1時間間隔で24時間、*G. semen*の個体数の計数を行った。

5.2 実験結果及び考察

5.2.1 鉛直移動速度の算定

図-11は、Run1, 4の*G. semen*の鉛直移動の経時変化である。ここでは、*G. semen*の水中移動がみられる7:00~21:00の時間帯のみを示した。図-11より、Run1, 4共に、光源点灯直後から鉛直移動が始まり、13:00~14:00に*G. semen*が最も集積してブルームを形成していることが分かる。その後、*G. semen*は分散しながら下層に移動して行き、光源消灯後の夜間には底泥表面上に移動するため、20:00以降ではマイクロコスム内で計数できなくなる。

*G. semen*の移動距離の長いRun4において、鉛直移動速度を算定した。算定方法は、*G. semen*の個体数のピークにおける単位時間あたりの移動距離から求めた。これより、上方向への鉛直移動速度は、0.70m hr⁻¹、下方向への鉛直移動速度は、0.90m hr⁻¹であった。これらの結果は、現地のメソコスム実験の値と近似して

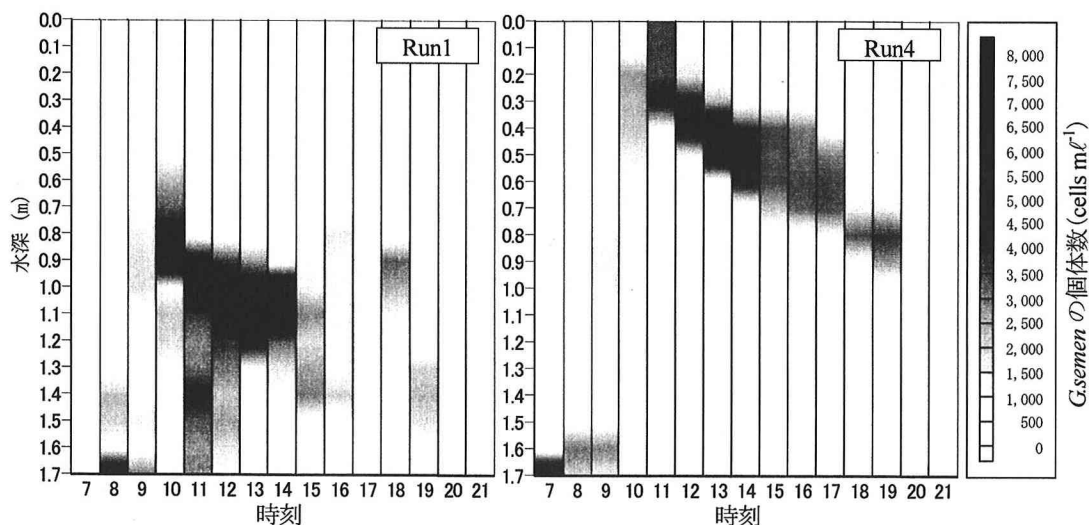


図-11 *G. semen* の日周期鉛直移動の経時変化(左図: Run1、右図: Run4)

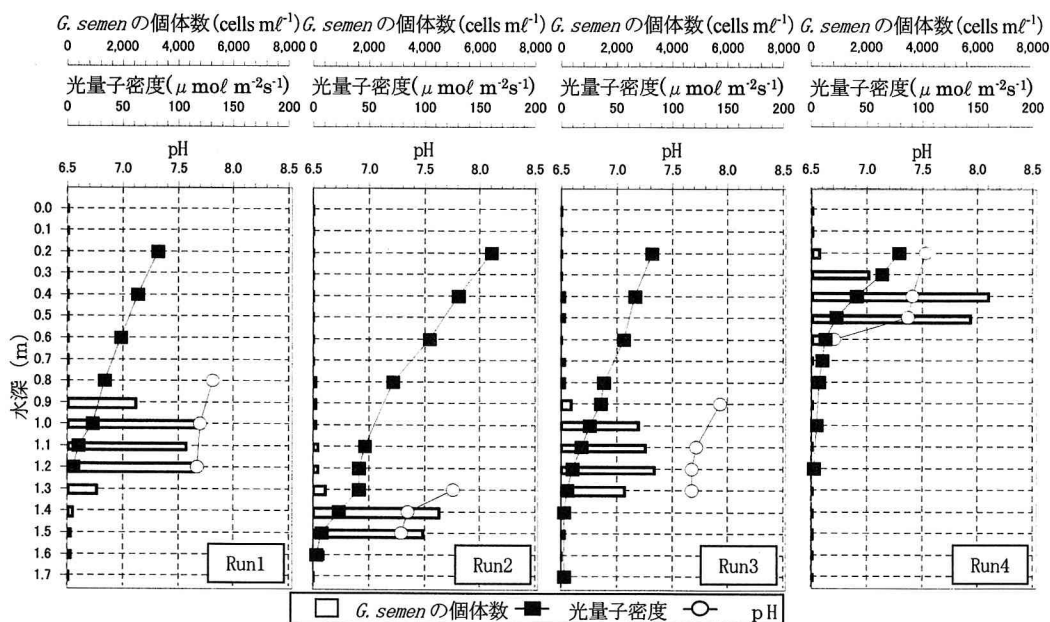


図-12 Run1~4 の 13 : 00 における, 光量, pH 及び *G. semen* 個体数の鉛直分布

いるので, 妥当な結果といえる。ただ, 鉛直移動速度は, 水温等の条件によって変化することが知られているので, 条件変化によって速度は変化すると思われる。

5.2.2 鉛直移動に与える pH の影響

図-12 は, Run1~4 の 13 : 00 における, 光量, pH 及び *G. semen* 個体数の鉛直分布である。pH の調整のない Run1~3 までの結果をみると, *G. semen* のブルーム水深は, 光量の変化に伴って変化しているように見える。しかし, Run1~3 において全て光合成の最適光量以下の水深にブルームが形成されており, またブルーム境界層の pH が Run1 : 7.81, Run2 : 7.76, Run3 : 7.93 といずれも高い値を示していることから, pH が鉛

直上昇移動を抑制しているとも考えられる。そこで、Run3 終了後、光条件は変えずに pH を全層で 7 以下になるように調整した。Run3 と Run4 を比較すると、*G. semen* のブルーム境界水深は 0.9m から 0.2m へと 0.7 m も上昇しており、Run4 のブルーム境界層における光量は $79 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり、光合成の最適光量下にブルームが形成された。また、ブルーム境界層における pH は、調整時よりも光合成の影響で高くなっているが、Run1~3 に比べ 7.53 と低い値であった。これより、*G. semen* の鉛直上昇移動は、高い pH によって抑制されていたといえる。また、Run1~3 までのブルーム境界層の pH 値より、*G. semen* は pH が約 7.8 を超えるような水環境下では、鉛直上昇移動は抑制されるといえる。

6. 結論

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、鉛直分布調査及びメソコスム実験で、川原大池における *G. semen* のブルームは、光合成の最適光量下に形成されないことが分かった。その要因を明らかにするために行ったマイクロコスム実験より、*G. semen* の鉛直上昇移動は pH が約 7.8 を超えるような水環境下では、pH によって抑制され、その結果、最適光量以下の水深にブルームを形成することが明らかになった。また、鉛直移動速度をメソコスム実験及びマイクロコスム実験より求めた。メソコスム実験より、上昇移動速度： 0.50m hr^{-1} 、下降移動速度： 0.75m hr^{-1} 、マイクロコスム実験より、上昇移動速度： 0.70m hr^{-1} 、下降移動速度： 0.90m hr^{-1} であった。

今後は、*G. semen* のブルームが水質に与える影響や、詳細な鉛直移動速度等を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-2)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 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, Vol.39, 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.