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

竹 本 陽 一* 古 本 勝 弘** 多 田 彰 秀**

Bloom and Limiting Factor of *Gonyostomum Semen* (Ehr.) Diesing (Raphidophyceae) in Kawahara Lake

Youichi TAKEMOTO*, Katsuhiko FURUMOTO** and Akihiko TADA**

* Graduate School of Science and Technology, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-cho, Nagasaki 852-8521, Japan

** Department of Civil Engineering, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-cho, Nagasaki 852-8521, Japan

Abstract

Seasonal changes and the vertical distributions of the water quality in Kawahara Lake were observed during Feb.-Oct.2000. With progressing of thermal stratification in the lake, DO decreased gradually in lower layer and the nutritive salts ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$) released from bottom sediment.

On the other hand, in the middle layer of 4-5m 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*. It was concluded that the limiting factor for the biomass growth was $\text{NO}_3\text{-N}$, because the bloom occurred after inflowing of $\text{NO}_3\text{-N}$ with heavy rainfall.

Key words : *Gonyostomum semen*, limiting factor, nutrient release, dissolved oxygen consumption, eutrophication

1. はじめに

アオコや淡水赤潮は、植物プランクトンの異常増殖（ブルーム）に伴って発生する。日本だけでなく、世界中の湖沼において植物プランクトンのブルームは問題となっている。日本においては、特にアオコや淡水赤潮の原因となる藍藻類や渦鞭毛藻類による報告例¹⁾が多い。しかし、近年、ヨーロッパや北アメリカ等で、淡水産のラフィド藻 *Gonyostomum semen* のブルームが問題となっている^{2~7)}。*G.semen* の特徴は、2本の鞭毛によって遊泳することができ、鉛直方向に日周期運動を行い、弱酸性か中性の腐食栄養的傾向をもつ水を好むとされている⁸⁾。また、*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²⁾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。しかし、日本において、ラフィド藻は海域で赤潮の原因となるために注目されているものの、淡水域では特に問題視されていない。また、*G.semen* に限っては、日本での発見例は少なく、蛇沼、中沼、河口湖等で生息が確認されているが、ブルームや優占種としては確認されていない⁹⁾。

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、*G.semen* のブルームが確

認された。本論では、水質鉛直分布調査結果より、*G.semen* のブルームの形成特性、*G.semen* の鉛直移動に与える要因、ブルームの制限因子を説明することができたので、ここにその結果を報告する。

2. 川原大池の概要

川原大池(Fig.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。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. 水質調査方法

水質調査は、2000年2月から同年10月にかけて月に2~4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0.5~8.5mを0.5m間隔で測定を行った。水質測定にはマルチ水質計(U-22、堀場製作所製)を用いて現地では8項目(DO, pH, 導電率、塩分濃度、全溶存固形物質、水温、濁度、酸化還元電位)を測定

* 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

** 長崎大学工学部社会開発工学科 〒852-8521 長崎市文教町1-14

Fig.1 The map and scale of Kawahara Lake

Fig.2 Water sampler

し、又、採水した水を実験室に持ち帰り11項目を測定した。測定方法は、上水試験方法(1993年)により、クロロフィルa(Chl-a)・フェオフィチンa(Phy-a)：単波長吸光光度法、工場排水試験方法(1993年)により、SS：GFPろ過・重量法、T-N：ペルオキシ二硫酸カリウム分解-紫外線吸光光度法、 $\text{NH}_4\text{-N}$ ：インドフェノール青吸光光度法、 $\text{NO}_2\text{-N}$ ：ナフチルエチレンジアミン吸光光度法、T-P：ペルオキシ二硫酸カリウム分解-吸光光度法、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ：モリブデン青(アスコルビン酸還元)吸光光度法、S-Fe・S-Mn：フレイム原子吸光法、Mullin Riley法¹⁰⁾により $\text{NO}_3\text{-N}$ を測定した。Fig.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。また、水温については、b地点の水深1.0~8.5mに1.5m間隔でサーミスター式温度計を設置し、30分毎にデータロガー(㈱IBC製)に自記記録させた。同様に、池田川の水温(a地点)、気温(c地点)についても自記させた。

4. 水質調査結果

4.1 水温成層と水質変化特性

Fig.3(次項)はb地点における水温、DO、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、ORP(酸化還元電位)の鉛直分布である。これより、水温成層は4月から始まり、7月~8月にかけて表・底層との水温差は 10°C 以上となる。その後、10月中旬で水温成層は終わる。この成層と密接に関係して、成層期にDOが減少し、7月~8月には湖底から水深6.5mまで無酸素状態となる。また、それに伴い底泥から $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出

する。同時期において $\text{PO}_4\text{-P}$ が $0.01\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ (表層濃度の約3倍)を超えるのは、湖底から水深8.0mまでであり、拡散範囲は底層に限られていることが分かる。他の溶出物質においても、S-Fe、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は水深7.5m、S-Mnは水深7.0mまでが拡散範囲であった。これらの物質の溶出が無酸素層に比べ狭い範囲で生じ、物質によって溶出範囲が異なる要因は、植物プランクトンによる摂取や湖沼形状の影響の他に、ORPも影響している可能性がある¹⁰⁾。7月~8月において、ORPがマイナスとなるのは水深7.0m以下であり、湖底付近では約-200mVになる。DOが $0\text{mg}\cdot\ell^{-1}$ であるとき、ORPは+200~-200mVの範囲で変化しており、湖底付近で最も還元状態となっていることが分かる。 $\text{PO}_4\text{-P}$ ・ $\text{NH}_4\text{-N}$ の鉛直分布は、時期的に若干変化するものの、底泥付近で濃度がほぼ指数関数的な変化を示しているのに対し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は時期的な変動が大きく、中層で高くなることもある。注目すべき点は、8月初旬から中旬にかけて全層にわたって濃度が検出限界値($0.01\text{mg}\cdot\ell^{-1}$)を下まわったことである。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少は、無酸素層である底層部では、脱窒作用、中層から表層にかけては、植物プランクトン等の増殖が原因であると考えられる。

4.2 Gonyostomum semenのブルームの形成

Fig.4はChl-aの鉛直分布(横軸スケールの不統一に注意)と透明度の時期的変化である。Chl-aは4月下旬から水深5~6m付近に高い濃度がみられ、6月下旬から8月上旬と9月初旬には、全量の50~90%のChl-aが4~5mに集中しており、植物プランクトンのブルームが形成されていることが分かる。ブルーム発生時、水深0.5mの違いでChl-aの濃度差が最大で60倍以上となる。また、鉛直方向に0.5m間隔の調査で、Chl-aの高濃度を示す水深が連続2地点あることから、ブルーム層厚は約1.0m程度であると考えられる。ブルーム層と透明度を見ると、ほぼ一致しており、

Fig. 4 Seasonal change of vertical distribution of Chl-a, and transparency

Fig.3 Seasonal change of vertical distribution of water quality (Temp, DO, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, and ORP)

Table.1 The result of Phytoplankton analysis
(2000/7/13, Depth 4.5m)

Class	Species name	Number of cells (cells·mL ⁻¹)
Cyanophyceae	<i>Merismopedia glauca</i>	16
	<i>Microcystis aeruginosa</i>	17
Bacillariophyceae	<i>Cymbella</i> sp.	2
	<i>Fragilaria crotonensis</i>	70
	<i>Navicula</i> sp.	1
	<i>Nitzschia</i> sp.	1
	<i>Synedra ulna</i>	1
Chlorophyceae	<i>Arthrodesmus</i> sp.	34
	<i>Chlorella vulgaris</i>	56
	<i>Coelastrum cambriem</i>	48
	<i>Cosmarium</i> sp.	12
	<i>Pediastrum biwae</i>	16
	<i>Scenedesmus bijuga</i>	24
	<i>Scenedesmus obliquus</i>	20
	<i>Staurostrum gracile</i>	3
	<i>Tetraedron elegans</i>	4
	<i>Tetraedron minimum</i>	16
Xanthophyceae	<i>Botryococcus braunii</i>	40
Raphidophyceae	<i>Gonyostomum semen</i>	225
Euglenophyceae	<i>Trachelomonas</i> sp.	56
Dinophyceae	<i>Peridinium</i> sp.	1

透明度はブルーム層の深さに支配されているといえる。このブルームの優占種は *G.semen* (ラフィド藻綱) である。**Table.1** は7月13日の水深4.5m (Chl-a 極大値) における植物プランクトン分析結果である。これより、細胞数で見た場合、*G.semen* は植物プランクトン全体の34%を占めていることが分かる。*G.semen* は、川原大池の過去の植物プランクトン調査^{12), 13)} では、まったく出現していない。ただ、上述したブルームの特徴を考えると、鉛直方向へ少なくとも1.0m間隔の調査を行う必要があるといえる。よって、過去の調査では、そのような詳細な調査は実施されていないため、過去にも川原大池でブルームを形成していたと思われるが、発見には至らなかったと考えられる。

4.3 *G.semen* の遊泳層調査 (24時間観測)

G.semen は遊泳能力を持ち鉛直移動することが知られている。そこで、7月21日6:00から7月22日3:00にかけて、マルチ水質計で3時間間隔でDO等を測定し、7月21日12:00と7月22日3:00にChl-aとPhy-aの濃度を測定した。**Fig.5** にChl-a, Phy-a, DOの鉛直分布を示す。7月21日12:00のChl-aの鉛直分布にブルームが現れていない。これは、*G.semen* の平面的な分布が不均一であったために、ブルームを観測することができなかったと思われる。ただ、濃度は低い水深5.5mでピークを示しており、優占種として*G.semen* も確認できているので、5.5m付近にブルームが発生していたと思われる。また、7月21日7:00における水深6.0mのChl-aは339 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ であり、*G.semen* も確認できている、このことからブルームは発生していたといえる。

Fig.5 の7月22日3:00の鉛直分布より、7.0m~7.5mにブルームが形成されていることが分かる。よって、7月21日~22日の*G.semen* の遊泳層はおおよそ水深5.5m~7.5mであると考えられる。また、水深7.0m以下は無酸素層であることから、夜間は無酸素層においても生活できるといえる。**Fig.3** より、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は水深7.5m以下にしかほとんど存在していない。よって、*G.semen* は日中光合成のために中層付近で生活し、夜間は $\text{PO}_4\text{-P}$ 等の栄養塩を取り込むために、無酸素層にまで移動することが分かる。

Fig. 5 The vertical distributions of Chl-a, Phy-a, pH and DO

Fig. 6 The vertical distributions of Chl-a and pH

4.4 日中における*G.semen*のブルームが中層にとどまる要因

日中、*G.semen* は光合成を行うため、底層から中層に鉛直移動し、ある条件を満たす水深で鉛直移動を止め、光合成を行うと考えられる。その条件として、まず光量が考えられる。4.2で述べたように、透明度とブルーム層がほぼ一致しており、他の観測²⁾からも同様な結果が得られており、透明度付近の光量が*G.semen*にとって最適であるため、透明度付近にブルームを形成すると考えられる。しかし、9月7日のデータでは、ブルーム層は水深4.5~5.0mであるのに対して、透明度は3.7mであり、相関関係はみられなかった。よって、光量以外にも鉛直移動に影響を与える要因があると考えられる。そこで、ラフィド藻の弱酸性から中性の水を好む性質に注目する。*G.semen* はpH4.0~7.5までの範囲で生存でき、3.5以下及び8.0以上では死滅することが実験で明らかになっている⁹⁾。**Fig.6** に、*G.semen* のブルーム発生時のChl-aとpHの鉛直分布を示す。ここで、ブルームはChl-aが100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上とした。**Fig.6** より、9/7を除いて、ブルーム層が存在する透明度付近のpHは7.5以下であり*G.semen* が生活できる環境といえる。9/7では、透明度は3.7mであり、その付近のpHは8を超えており生活することのできない環境と考えられる。この時、ブルーム層は4.5~5.0mに存在し、pHも8以下である

Fig.7 Seasonal change of amount of Chl-a, nutrient salts in each layer and daily precipitation

ことから、鉛直移動時にpHが8を超えるようなアルカリ性の環境を避けていると思われる。よって、日中における*G.semen*のブルームが中層にとどまる要因は、透明度付近の光量の影響が第一であるが、pHが8を超えるような場合には、pHの影響も受ける可能性があると考えられる。

5. *G.semen*ブルームの制限因子

Fig.7は、Chl-a, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ の鉛直分布結果を用いて、単位面積(1m^2)の水柱(高さ9m)を3分割した各層毎(水深0~3m:表層, 3~6m:中層, 6~9m:底層)の物質量を算定し、経時的に示したものである。

湖沼における植物プランクトンの制限因子は一般的にPかNである。Fig.7よりChl-aは、6月から増加がみられ、特に中層での増加が顕著である。7月中旬から8月初旬にかけてChl-aは減少している。同時期において、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は全層において減少しており、8月初旬にほぼ0gとなる。その後、降水によって $\text{NO}_3\text{-N}$ を多量に含む池田川の流入水が湖内に供給され、中層の $\text{NO}_3\text{-N}$ が増加すると、10日程遅れてChl-aの急激な増加がみられた。これより、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が*G.semen*ブルームの制限因子であると考えられる。 $\text{NH}_4\text{-N}$ ・ $\text{PO}_4\text{-P}$ については、同時期に減少がみられるが、Chl-aが減少した後であるため、制限因子とは考えられない。これらの減少は、降水があった時期と一致しているので、流入水によって底層部が酸化され、一時的に底泥からの溶出が止まったためと思われる。

Fig.8は、N/P比とChl-aの経時変化である。N/P比を考え

Fig.8 Time change of N/P ratio and Chl-a

Fig.9 Secular change of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$

る場合、T-NとT-Pを用いるのが一般的であるが、遊泳できる*G.semen*を中心に考える場合、栄養塩を摂取できる層が広いので、ここではOrg-NとOrg-PのN/P比も求め、植物プランクトン自体のN/P比も求めて検討を行った。折れ線がT-N, T-PによるN/P比(T-N/P比)とOrg-N, Org-PによるN/P比(Org-N/P比)の経時変化で、面積がChl-aの経時変化である。ここでは、Chl-aのピーク濃度層(優占種:*G.semen*)におけるデータを用いた。N/P比は一般的に10以下でN制限である¹⁴⁾。Fig.8より、7月から8月中旬にかけて両N/P比は共に下がりN制限となっている。Chl-aも同様に減少がみられる。その後、池田川から $\text{NO}_3\text{-N}$ が供給されるとT-N/P比は上がり、それから遅れてOrg-N/P比も上がり、N制限が解消され、Chl-aが増加する。このことから、制限因子が $\text{NO}_3\text{-N}$ であることが分かる。

Fig.9は、1996年1月~2001年1月までの水深1.0mと8.0mにおける $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の経年変化である。これより、全ての年の8月における $\text{NO}_3\text{-N}$ は両水深共にほぼ $0\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であるのに対し、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は水深8.0mは、水深1.0mよりも高濃度であることが分かる。これより、川原大池では毎年8月に $\text{NO}_3\text{-N}$ が不足し、植物プランクトンの制限因子となることが分かる。

6. 夏季の $\text{NO}_3\text{-N}$ 欠乏の要因

夏季の $\text{NO}_3\text{-N}$ の欠乏は、植物プランクトンの増殖による消費と、脱窒作用による減少が考えられる。池田川の $\text{NO}_3\text{-N}$ 年平均濃度は $0.9\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と高く、一年を通して川原大池表層濃度の2倍以上である。Fig.10は川原大池の各水深毎の水温、池田川の水温、気温と降水量の経時変化である。3月の池田川の水温は表層水よりも高いが、その後、湖内の水温度成層の発達に伴い川原大池の水温が高くなり、

Fig.10 The time series of water temperature in each layer at point b, water temperature in Ikeda river, and daily precipitation

Fig.11 Vertical distribution of DIN and DO at 18 and 28 Aug. 2000.

池田川の水温は、6月で水深8.5m, 8月で水深7.0mの層と水温となる。これより、池田川からの流入水は川原大池の底層に流れ込んでいると言える。成層期の底層は無酸素状態であるため、流入水に多量に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ は脱窒作用によって、 $\text{NO}_2\text{-N} \rightarrow \text{N}_2$ となり、湖外に放出される。

Fig.11は、8月18日と28日におけるDIN($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$)とDOの鉛直分布である。面積がDINの積算濃度、折れ線がDO濃度を示す。8月16日～22日にかけて265.5mmの降水があったため、池田川から湖内へ $\text{NO}_3\text{-N}$ が供給されたといえる。8月18日の図より、水深3.5m以下でDOの減少がみられるが、水深6.0～6.5mに増加がみられた。これに加えて、同水深に $\text{NO}_3\text{-N}$ のピーク濃度がみられることから、池田川からの流入水がこの層に流れ込んだことが分かる。8月28日の図より、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度分布は表層にまで広がっている。水深7mの無酸素層に $\text{NO}_2\text{-N}$ のピーク濃度がみられ、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が脱窒によって、 $\text{NO}_2\text{-N}$ に変化していることが分かる。これらのことから、夏季の流入水に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ は、底層の無酸素層に流れ込むため、脱窒によって N_2 ガスとなって湖外に放出され、湖内に供給されるN量が減少する。その結果、N欠乏となった湖沼は植物プランクトンの制限因子が $\text{PO}_4\text{-P}$ から $\text{NO}_3\text{-N}$ へと変化すると考えられる。

7. まとめ

水質鉛直分布の詳細調査から、以下のことが明らかとなった。

1) 6月末から9月初旬にかけて*G.semen*ブルームが発生、ブルームの層厚は約1.0mと薄く、日中は中層に、夜間は底層に存在する。

2) *G.semen*の鉛直移動は、光量の影響だけでなく、pHが8を超える場合には、その影響も受けると考えられる。

3) *G.semen*ブルームの制限因子は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ であり、川原大池では、毎年8月に $\text{NO}_3\text{-N}$ が欠乏している。

4) $\text{NO}_3\text{-N}$ が制限因子となる理由は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の供給源である池田川からの流入が降水時に限られているため、川原大池への供給量が少ないことの他に、脱窒による減少もある。

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分析(Table. 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孟琳、織田由樹子、西貴志、松本孝志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。

(原稿受付 2001年6月11日)

(原稿受理 2001年8月14日)

参 考 文 献

- 1) Tezuka, Y (1985) Rainfall as factor regulating the appearance of *Anabaena* bloom in the south basin of Lake Biwa, *Jpn. J. Limnol.*, **46**, 8-14.
- 2) Cronberg, G., Lindmark, G., and Björk, S. (1988) Mass development of flagellate *Gonyostomum semen* (Raphidophyta) in Swedish forest lakes - an effect of acidification?, *Hydrobiologia*, **161**, 217-236.
- 3) Slonen, K., Arvola, L., and Rosenberg M., (1993) Diel vertical migrations of phyto- and zooplankton in a small steeply stratified humic lake with low nutrient concentration, *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **25**, 539-543.
- 4) Hansson, L.-A. (2000) Synergistic effects of food chain dynamics and induced behavioral responses in aquatic ecosystems, *Ecology*, **81**(3), 842-851.
- 5) Eloranta, P. and Järvinen, M. (1991) Growth of *Gonyostomum semen* (Ehr.) Diesing (Raphidophyceae): Results from culture experiments, *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **24**, 2657-2659.
- 6) Heywood, P. (1973) Nutritional studies on the Chloromonadophyceae: *Vacuolaria virescens* and *Gonyostomum semen*, *J. Phycol.*, **9**, 156-159.
- 7) Heywood, P. (1974) Mitosis and cytokinesis in the Chloromonadophycean alga *Gonyostomum semen*, *J. Phycol.*, **10**, 355-358.
- 8) 堀輝三編:藻類の生活史集成第3巻 (1993), pp.459-461., 内田老鶴園, 東京.
- 9) 加藤季夫 (1975) 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, **39**, 179-183.
- 10) 三宅泰雄, 北野康 (1976) 新水質化学分析法, pp. 146-147, 地人書館, 東京.
- 11) 細見正明, 須藤隆一 (1984) 9.霞ヶ浦底泥からの窒素及びリンの溶出について一高浜入を中心として一, 国立公害研究所報告, **51**, 191-217.
- 12) 竹本陽一 (1999) 貯水池の水質変化と底泥からの溶出物質に関する研究, 205pp., 長崎大学大学院工学研究科修士論文.
- 13) 川原大池生態系調査団 (1985) 川原大池の自然 (川原大池生態系調査中間報告), 43pp., 昭和印刷堂, 長崎.
- 14) 岩佐義郎 (1990) 湖沼工学, pp. 368-369, 山海堂, 東京.