びわ湖の“淡水赤潮”に関する研究—I. 植物プランクトンおよび栄養塩類の分布変化

吉田 陽一・三田村緒佐武・田中 信彦・門田 元

Studies on a Freshwater Red Tide in Lake Biwa—I. Changes in the Distribution of Phytoplankton and Nutrients

Yoichi YOSHIDA, Osamu MITAMURA, Nobuhiko TANAKA and Hajime KADOTA.

Abstract

In order to clarify the mechanism triggering the occurrence of a freshwater red tide of *Uroglena americana* that took place in Lake Biwa from May to June since 1977, a series of studies were undertaken in the northern basin of the lake.

In 1978, *Dinobryon barvaricum*, *Uroglena americana*, *Closterium aciculare*, *Aphanothece clathrata*, and *Planktosphaeria gelatinosa* occurred successively as dominant phytoplankton species from early May to late June. Mean concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN), urea-N, phosphate-P, and silicate-Si at a representative station (St. 4) were 9.8, 1.2, 0.18, and 1.5 $\mu\text{g at.} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, and changes of these concentrations were not so large except for the increasing silicate-Si concentration on June 29. Concentrations of chlorophyll *a* were ca 2-40 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 50-340 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$, and these concentrations usually were high and variable near the surface, especially at the time of the occurrence of freshwater red tide. The results suggested that the effects of growth and accumulation of *U. americana* were large in the occurrence of freshwater red tide in the lake.

1. 緒 言

1977年5、6月にびわ湖において従来みられなかったような大規模な淡水赤潮が発生し、湖水を取水している池中養魚場の一部に被害が生じ、また湖水を水源とする浄水場に目づまりや着臭などの被害を生じた。びわ湖は近畿の“水がめ”ともいわれ、近畿圏の飲料水や産業用水として非常に重要な役割を果たしている。このようなびわ湖において大規模な淡水赤潮が発生するようになった原因、特に南湖だけでなく比較的きれいで一般に貧栄養と考えられてきた北湖において、富栄養と考えられる南湖よりもむしろ大きい規模で発生した原因の究明や、このような淡水赤潮の被害防止策の確立などが強く要望された。

したがって、これらの諸問題の解明や被害防止対策の確立等に密接な関連があり、また最も基礎的な問題である、びわ湖の淡水赤潮の発生機構（特に原因生物の集積機構）を明らかにするために、1978年から1980年までの3年間にわたり、一連の研究を行なった。得られた結果のうち、本報では、1978年5、6月の2カ月間、北湖南部域において、淡水赤潮原因種

Uroglena americana を中心とした植物プランクトンの分布変化や、これらと栄養塩の分布変化との関連についてしらべた結果についてのべる。

2. 方 法

2-1. 調査日程と定点

びわ湖北湖に Fig. 1 に示すように計6の定点を設定し、5月4日以後、6月29日まで毎週1回の定期調査を行ない、また淡水赤潮発生時には臨時に数回の調査をおこなった。

2-2. 調査項目および分析法

バンドーン型採水器（5 l×2）を用いて、定点1、2、4、および6について、数層（0、2～5、10、20、30 m、または底層）の水を採取し、植物プランクトンおよび栄養塩などを測定した。水質分析については、アンモニア態窒素は SAGI (1966) による法、亜硝酸態窒素は BENDSHNEIDER and ROBINSON (1952) による法、硝酸態窒素は WOOD ら (1967) による法、磷酸態磷は MURPHY and RILEY (1962) による法、硅酸態珪素は MULLIN and RILEY (1955) による法、および尿素態窒素は NEWELL ら (1967) による法で

Fig. 1. Stations set up in Lake Biwa.

測定し、クロロフィル *a* は LORENZEN (1967) の方法で測定した。また、植物プランクトンは、試水を醋酸ルゴール液 (ヨードカリ 20 g, ヨード 10 g, 氷醋酸 100 ml, 蒸溜水 200 ml) で固定 (試水に 0.5% 添加) した後、検鏡により細胞数を計測した。

3. 結 果

3-1. 植物プランクトンの分布変化

調査期間中約 45 種の植物プランクトンがみいだされたが、これらのうち定点 1 (水深約 5 m) および定点 4 における、数種の優占種を中心としてしらべた、植物プランクトン分布の調査結果を、Fig. 2 および 3 に示す。*U. americana* は 5 月上旬から 6 月中旬頃まで出現し、特に 5 月 11 日、25 日の観測では褐色の着色域 (赤潮) が観察された。なお、6 月 8 日の *U. americana* の分布は非常に不均一であり、定点 1 および 4 では少なかったが、他の定点や定点間の水域では南北に走る帯状の淡水赤潮が観察された。他種のプランクトンでは、5 月初旬に *Dinobryon bavaricum* が特に表層に多く出現し、6 月中旬には *Closterium aciculare* が、6 月下旬には *Planktosphaeria gelatinosa*、および *Aphanothece clathrata* が多くみいだされた。また、*Fragilaria crotonensis* や *Cryptomonas* sp. は若干の変動はあるが、調査期間中ほと

Fig. 2 Weekly change in vertical distribution of phytoplankton (cells·ml⁻¹) at station 1.

Fig. 3. Weekly change in vertical distribution of phytoplankton (cells·mL⁻¹) at station 4.

んど常にみいだされた。この外、数は少ないが他種に比し比較的大型の *Ceratium hirundinella* が5月下旬以降に比較的多くみいだされた。

3-2. 栄養塩およびクロロフィル *a* の分布変化

得られた結果のうち、定点1および4における栄養塩などの分布変化を Table 1 および2に、定点1, 2, 4, および6におけるクロロフィル *a* の分布変化を Table 3 に示す。溶存無機態窒素、尿素態窒素、磷酸態磷、および硅酸態硅素の定点別の平均値は、それぞれ、定点1で、12.9, 1.8, 0.23, および 13.2 $\mu\text{g at.} \cdot \text{l}^{-1}$, 定点4で、9.8, 1.2, 0.18, および 5.3

$\mu\text{g at.} \cdot \text{l}^{-1}$ であり、定点4よりも定点1の方が一般的にやや高い値が得られている。溶存無機態窒素と磷酸態磷の原子比は定点1で約 56 : 1, 定点4で約 54 : 1 であり、磷は窒素に比しかなり低い値となっている。また溶存無機態窒素のうちでは硝酸態窒素が最も多く、ついでアンモニア態窒素であり、亜硝酸態窒素は最も少ない。これらの栄養塩類や尿素態窒素は、6月29日における硅酸態硅素の急増を除いては、調査期間中、あまり大きな変動はみられなかった。

クロロフィル *a* は、一般に表層附近では数 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ~ 40 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 程度で量も多く、変動も大きい、淡水赤

Table 1. Changes in vertical distribution of nutrients ($\mu\text{g at.} \cdot \text{I}^{-1}$) at Station 1.

Date	Depth	Ammonia-N	Nitrite-N	Nitrate-N	DIN	Urea-N	Phosphate-P	Silicate-Si
May 4	0.5	6.4	0.61	11.7	18.7	2.9	0.26	9.1
	2	6.5	0.53	11.8	18.8	1.7	0.24	10.6
	7	2.7	0.47	11.1	14.3	0.9	0.15	5.6
May 11	0.5	6.9	0.95	14.1	22.0	1.0	0.30	19.3
	2	4.6	0.72	12.6	17.9	0.9	0.26	15.8
	5	2.1	0.53	11.5	14.1	0.7	0.20	8.5
May 25	0.5	2.4	0.60	8.1	11.1	2.1	0.28	10.0
	2	2.4	0.65	8.8	11.9	1.2	0.33	11.8
	4.5	2.1	0.48	6.8	9.4	0.9	0.26	9.4
Jun. 1	0.5	1.2	0.40	8.5	10.1	2.2	0.21	4.7
	2	1.6	0.38	6.6	8.6	2.6	0.18	4.9
	5	1.6	0.38	6.4	8.4	1.3	0.21	4.4
Jun. 8	0.5	5.2	0.84	12.7	18.7	1.7	0.30	16.2
	5	3.9	0.64	9.1	13.6	1.1	0.25	15.2
	4.5	2.4	0.38	7.8	10.6	1.2	0.17	6.4
Jun. 15	0.5	3.4	0.67	10.2	14.3	1.4	0.21	17.0
	2	3.6	0.62	8.6	12.8	1.6	0.26	15.7
	4	2.5	0.33	6.3	9.1	1.2	0.17	5.5
Jun. 22	0.5	2.4	0.51	7.4	10.3	1.7	0.16	12.3
	2	1.7	0.23	2.9	4.8	0.9	0.16	9.4
	4	3.2	0.31	7.6	11.1	1.2	0.14	10.6
Jun. 29	0.5	1.8	0.66	6.5	9.0	7.0	0.31	35.1
	2	1.6	0.57	13.1	15.3	3.0	0.27	32.7
	4.5	2.6	0.51	12.4	15.5	2.1	0.32	26.6

潮発生時の 5 月 11, 25 日および 6 月 8 日には一部の定点で $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 近くの値が得られているが, *U. americana* の淡水赤潮がみられなかった, 5 月 4 日の定点 4 および 6 月 29 日の定点 1 でもそれぞれ, 43.2 および $17.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ と, かなり高い値が得られている. 定点 4 における水面 1 m^2 当りの水柱に含まれる全クロロフィル *a* 量は, 第 1 週から第 9 週まで, それぞれ, 約 158, 340, 85, 86, 47, 60, 55, 92 および 170 mg であり, 淡水赤潮発生時が必ずしも多いとは限らない.

4. 考 察

北湖の植物プランクトン優占種の季節的消長に関して根来 (1956, 1974) は, 1950 年頃は, 1~3 月は *Stephanodiscus carconensis*, 4 月は *Melosira solida*, 5 月は *Asterionella formosa*, 6 月は *Attheya Zachariasi*, などと比較的安定した季節的遷移がみられたが, 1958 年以後は, らん藻類が急増するように

なった外に, *Closterium aciculare* var. *subprunum* (1958 年以降), *Staurastrum dorsidentiferum* var. *ornatum* (1961 以降), *Fragilaria crotonensis* (1972 年以降) などが急増するようになったことを明らかにし, 北湖も近年では貧栄養湖からすでに中栄養湖に遷移したと指摘している. 本研究の結果でも, 5, 6 月の植物プランクトンの優占種は *D. bavaricum*, *U. americana*, *C. aciculare*, *P. gelatinosa*, *A. clathrata* などであり, 1950 年頃 (根来, 1956) に比しかなり優占種が変化していることが示された.

また, NAKANISHI (1976) の塩津湾 (北湖北部) における, 1971 年 7 月から 1973 年 6 月までの 2 年間の研究結果では, 同湾のクロロフィル *a* 量は, 数 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ~ $25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, および数 $10 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 程度であり, 同氏は, 光合成活性および生産速度も考慮すれば, 塩津湾は貧栄養湖というよりはむしろ富栄養湖水域であると考えている. 本研究の結果では, クロロフィル *a* 量は数 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ~ $40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 数 $10 \sim 340$

Table 2. Changes in vertical distribution of nutrients ($\mu\text{g at.} \cdot \text{I}^{-1}$) at Station 4.

Date	Depth (m)	Ammonia-N	Nitrite-N	Nitrate-N	DIN	Urea-N	Phosphate-P	Silicate-Si
May 4	0.5	0.9	0.39	8.9	10.2	0.7	0.19	5.2
	5	1.1	0.40	9.8	11.3	0.7	0.21	5.1
	10	1.2	0.44	10.4	12.0	1.2	0.22	4.3
	30	1.6	0.47	11.0	13.1	0.6	0.20	4.3
May 11	0.5	1.2	0.47	7.7	9.4	0.6	0.31	4.6
	3	1.3	0.45	7.0	8.8	0.9	0.24	4.5
	10	1.4	0.57	9.3	11.3	0.6	0.21	4.7
	30	1.4	0.62	11.4	13.4	1.3	0.20	4.7
May 18	0.5	3.0	0.34	5.0	8.3	0.8	0.26	5.1
	5	0.8	0.22	2.9	3.9	0.4	0.20	4.9
	10	1.2	0.48	8.5	10.2	0.9	0.27	4.0
	30	0.7	0.10	9.2	10.0	0.6	0.19	4.1
May 25	0.5	1.3	0.38	6.0	7.7	1.3	0.23	4.7
	2	1.5	0.36	6.2	8.1	1.0	0.24	5.5
	10	1.5	0.44	7.3	9.2	1.5	0.17	4.3
	30	0.9	0.11	13.4	14.4	1.3	0.20	4.0
Jun. 1	0.5	1.9	0.37	5.8	8.1	1.9	0.15	5.0
	5	4.0	0.37	7.1	11.5	6.1	0.16	4.6
	10	2.9	0.37	6.3	9.6	1.7	0.17	4.6
	30	1.3	0.16	12.8	14.3	0.9	0.16	3.9
Jun. 8	0.5	1.6	0.31	7.4	9.3	1.3	0.18	3.5
	5	2.9	0.32	6.8	10.0	1.5	0.12	3.6
	10	1.8	0.31	6.1	8.2	1.2	0.11	4.6
	30	1.2	0.10	13.5	14.8	1.1	0.12	5.0
Jun. 15	0.5	1.7	0.29	5.6	7.6	1.0	0.10	3.1
	5	1.9	0.22	4.2	6.3	1.1	0.10	2.6
	10	2.3	0.31	7.1	9.7	1.3	0.08	3.7
	30	1.2	0.10	13.9	15.2	1.9	0.10	4.0
Jun. 22	0.5	1.6	0.34	5.1	7.0	0.8	0.09	7.2
	5	1.4	0.32	5.0	6.7	1.0	0.12	6.8
	10	2.4	0.32	6.3	9.0	0.7	0.17	5.5
	30	2.7	0.37	9.7	12.8	1.6	0.21	7.6
Jun. 29	0.5	1.2	0.31	5.4	6.9	1.2	0.22	13.4
	5	1.0	0.30	4.9	6.2	0.2	0.28	12.0
	10	1.8	0.30	6.2	8.3	1.6	0.24	11.7
	30	0.9	0.10	9.5	10.5	0.5	0.18	5.0

Table 3. Changes in distribution of chlorophyll *a* ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) at Stations 1, 2, 4 and 6.

Station	1	2	4				6
Depth (m)	2	3	0.5	2-5	10	30	5
Date							
May 4	2.6	2.5	43.2	1.9	2.8	0.5	2.2
May 11	6.9	2.4	21.5	25.0	13.2	0.5	8.3
May 18	—	—	2.3	1.9	2.9	3.3	0.5
May 25	10.0	11.5	16.7	6.2	2.4	0.5	2.6
Jun. 1	6.9	3.6	4.8	2.6	1.2	0.7	3.5
Jun. 8	10.5	20.9	2.5	1.7	2.6	1.3	7.3
Jun. 15	10.9	4.3	1.6	5.9	1.1	0.8	2.3
Jun. 22	6.6	8.1	5.1	5.7	3.1	1.2	3.7
Jun. 29	17.5	10.7	7.4	9.8	7.3	1.1	9.2

$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 程度の値が得られている。有賀 (1973) によれば、クロロフィル *a* 量は中栄養湖で $1\sim 15\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, $11\sim 123\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$, また富栄養湖で $17\sim 140\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, $100\sim 290\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 程度とされているので、クロロフィル *a* 量だけでみた場合、北湖の調査水域は中栄養湖と富栄養湖の中間型に相当することになる。

U. americana による淡水赤潮発生に関しては、クロロフィル *a* 量が淡水赤潮発生時に局部的には高い値を示すが、水域全体としては非発生時に比し必ずしも高いとは限らず、また溶存無機態窒素、燐酸態燐などの栄養塩類も発生時と非発生時とでそれ程大きな変動が認められなかった。したがって、同種による淡水赤潮発生は、淡水赤潮発生前に一時的に多量の栄養塩などの供給があり、これにより *U. americana* が異常に多量増殖したと考えるよりはむしろ、増殖量は他の優占種とそれ程変らないが、局部的に集積しやすい同種が異常に集積し淡水赤潮を形成するようになったのではないかと考えられる (続報で検討)。

なお、1977 年以前はほとんどみられなかった *U. americana* が、近年急にまた多量に出現するようになった原因としては、富栄養化など水質の変化が考えられるが、従来から富栄養湖とされて来た南湖においても、北湖とはほぼ同時期の 1977 年春以降出現するようになっており、富栄養化だけにその原因を求めるのは困難である。南湖と北湖では水深の相異その他により富栄養化の影響が異なることも考えられるが、今後はさらに別の要因の可能性も検討する必要があるように思われる。

摘 要

1977 年以降、びわ湖において発生するようになった、*Uroglena americana* による淡水赤潮の発生機構を明らかにするために、一連の研究を行なった。本報では、1978 年 5, 6 月の 2 カ月間、毎週 1 回、北湖南部域の数定点について、*U. americana* を中心とした植物プランクトンの分布変化をしらべ、またこれらと水質の分布変化などとの関連についても検討した。

調査期間中、約 45 種の植物プランクトンが出現し、また優占種として、*Dinobryon bavaricum*, *Uroglena americana*, *Closterium aciculare*, *Aphanothece clathrata* および *Planktosphaeria gelatinosa* が順次出現した。定点 4 (南部中央域) における溶存無機態窒素、尿素態窒素、燐酸態燐および珪酸態珪素の平均値は、それぞれ、9.8, 1.2, 0.18 および $1.5\text{ }\mu\text{g at.}\cdot\text{l}^{-1}$ であり、6 月 29 日における珪酸態珪素の急増を除いては、一般的にはあまり大きな変動はみられなかった。クロロフィル *a* 量は数 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\sim 40\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, および数 $10\sim 340\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 程度であり、淡水赤潮発生時には表層近くで局部的に多い水域がみいだされた。

謝 辞

本稿をまとめるに当たり、本研究に終始御協力を頂いた滋賀県生活環境部に深謝すると共に、調査船を借らせて頂いた、滋賀県立衛生環境センター、同水産試験場および建設省近畿地方建設局びわ湖事務所に深謝する。また植物プランクトンの種名の同定に関して、近畿大学農学部根来健一郎教授、および京都大学農学

部梅崎勇教授に種々貴重な御教示をいただいた。ここに深く謝意を表する。

文 献

- 有賀祐勝 (1973) : 水界植物群落の物質生産Ⅱ. 植物プランクトン, 生態学講座 8, 共立出版, pp.91.
- BENDSHNEIDER, K. and R. J. ROBINSON (1952) : A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *J. Mar. Res.*, 11: 87-96.
- LORENZEN, C. J. (1967) : Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, 12: 343-346.
- MULLIN, J. and J. RILEY (1955) : The colorimetric determination of silicate with special reference to sea and natural waters. *Anal. Chim. Acta.*, 12: 162-176.
- MURPHY, J. and G. A. RILEY (1962) : A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.*, 27: 31-36.
- NAKANISHI, M. (1976) : Seasonal variations of chlorophyll *a* amounts, photosynthesis and production rates of macro- and microphytoplankton in Shiozu Bay, Lake Biwa. *Physiol. Ecol. Japan*, 17: 535-549.
- NEWELL, B. S., B. MORGAN and J. CUNDY (1967) : The determination of urea in seawater. *J. Mar. Res.*, 25: 201-202.
- 根来健一郎 (1956) : 琵琶湖主湖盆の植物性プランクトン, 陸水学雑誌, 18: 37-46.
- 根来健一郎 (1974) : 富栄養化とプランクトン, 琵琶湖の動態 (藤永太一郎編), 時事通信社, 181-199.
- SAGI, I. (1966) : Determination of ammonia in sea water by the indophenol method and its application to the coastal and off-shore waters. *Oceanogr. Mag.*, 18: 43-51.
- WOOD, E. D., F. A. ARMSTRONG and F. A. RICHARDS (1967) : Determination of nitrate in sea water by cadmium-copper reduction to nitrite. *J. mar. biol. Ass. U.K.*, 47: 23-31.
- 吉田陽一・松本 孝・門田 元 (1983) : びわ湖の“淡水赤潮”に関する研究——Ⅱ. 赤潮の発生と環境諸要因との関係. 陸水学雑誌, 44: 28-35.
- (著者: 吉田陽一, 京都大学大学院農学研究科熱帯農学専攻, 606 京都市左京区北白川; 三田村緒佐武, 大阪教育大学教育学部理 学科, 543 大阪市天王寺区南河堀町; 田中信彦, 水産庁養殖研究所環境管理部, 519 三重県度会郡玉城町昼田; 門田 元, 京都大学農学部水産学科, 606 京都市左京区北白川; Yoichi YOSHIDA, Division of Tropical Agriculture, Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606; Osamu MITAMURA, Department of Science Education, Osaka Kyoiku University, Tennoji-ku, Osaka 543; Nobuhiko TANAKA, Division of Environmental Management, Hiruta, Tamaki-cho, Watarai-gun, Mie-ken 519-04; Hajime KADOTA, Department of Fisheries, Faculty of Agriculture, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606).

1982 年 10 月 15 日 受理