びわ湖の“淡水赤潮”に関する研究—III. *Uroglena americana* の水平分布パターン

吉田 陽一・河口 克己・門田 元

Studies on a Freshwater Red Tide in Lake Biwa—III. Patterns of Horizontal Distribution of *Uroglena americana*

Yoichi YOSHIDA, Katsumi KAWAGUCHI and Hajime KADOTA

Abstract

In order to clarify the patterns of horizontal distribution of *Uroglena americana*, investigations were conducted in the water area where the plankton accumulated in the northern basin of Lake Biwa in 1979. Small wings and a tail plane were set on an *in situ* fluorometer (Varioscence II) with a thermistor and the instrument was towed by a ship with the speed of 4 knots at the depth 1 or 1.5 m.

The following remarkable variations of patterns were found in the horizontal distribution of chlorophyll *a* and water temperature:

1) Chlorophyll *a* concentration changes in reverse proportion to water temperature. 2) Chlorophyll *a* concentration changes parallel with water temperature. 3) Chlorophyll *a* concentration changes independently with water temperature.

As the cause why these various patterns were found, it was suggested that the types of vertical distributions of both *U. americana* and water temperature, the buoyancy of the plankton, the convergence and sinking of surface water, the convergence and upwelling of subsurface water, and so on, affected greatly the accumulation of the plankton and the formation of horizontal distribution patterns.

1. 緒 言

著者らは前報(吉田ら, 1983a, b)において, *Uroglena americana* 群体の集積域(または淡水赤潮発生域)が帯状や盤状の形で, びわ湖北湖の西部沿岸や南部域に偏在する傾向のあることをみだが, このような *U. americana* 群体の水平分布の偏在性は数点程度の定点調査では充分把握し得ないこと, したがって例えば局部的に淡水赤潮が発生していても, 定点がそれに当らなければ赤潮が発生していないという結果しか得られないこと, などがわかった. また, このような *U. americana* 群体の水平分布パターンは, *U. americana* 群体の浮上性, 走光性などの差異によってかなり変化することが示唆され, このような水平分布を詳細に測定する必要性が痛感された. したがって, 本報では, 水中で直接的に蛍光度を測定しうる現場型蛍光光度計を調査船で曳行測定出来るように改良し, これを用いて, *U. americana* の群体の集積域における同群体の微細な水平分布の諸様式を明らかにし, またこのような分布様式に差異のみられる原因を明らかにしようと試みた.

2. 方 法

調査は1979年5月3日から6月4日までの間, 週1~2回の割合で行ない, 調査時間は *U. americana* 群体が最も表層に近づくと考えられる午後1~3時頃を中心として行なった. また調査水域は Fig. 1 に示すように北小松沖に設定された1~7のブイの周辺水域を中心としたが, 淡水赤潮の発生状況により適宜他の水域についても調査を行なった. 調査時の風向, 風速は滋賀県衛生環境センターの調査船“みずすまし”に設置された風向, 風速計によった. *U. americana* 群体の集積域は現場型蛍光光度計(バリオセンスⅡ型, Impuls Physik 製)により測定したクロロフィル *a* 量や水域の着色の有無, などから判定した. 水温はサーミスターを用い, 水温とクロロフィル *a* 量を同時に測定するために, バリオセンスⅡ型に取付けた. またバリオセンスⅡ型は小型の主翼および尾翼を取付け, 下方には約10kgの錘を下げ, 1または1.5mの水深で, 約4ノットで曳行し, コードにより船上で連続的に自記記録出来るように改良した. バリオセンスⅡ型の読み(mV)とクロロフィル *a* 量との関係は培養

Fig. 1. Location of buoys which were set up off Kitakomatsu.

した *U. americana* のクロロフィル *a* 量を LORENZEN (1967) の方法と現場型蛍光光度計を用いて測定することによって求めた。なお、現場型蛍光光度計は、クロロフィル類の他フェオ色素類も同時に測定されるため、得られた値はクロロフィル *a* の絶対量というよりはむしろ、光合成色素量の相対的な量を示すと考えられる。

3. 結 果

U. americana 群体および水温の水平分布パターンについてしらべた結果、両者には次のような正の相関または負の相関を示す場合の外、それ程顕著な相関を示さない場合など、種々のパターンがみられた。

3-1. *U. americana* 群体の分布と水温分布とが負の相関を示す場合

クロロフィル *a* 量と水温との間に逆相関がみられた測定例は最も多かったが、そのうちの代表的な測定例（いずれも北小松沖）を Fig. 2~5 に示す。Fig. 2 は 5 月 28 日の測定例であり、高水温域でクロロフィル *a* 量の急減がみられる。Fig. 3 は 5 月 31 日の測定例であり、水温が急に低くなった水域でクロロフィル *a* 量の急増がみられる。Fig. 4 も 5 月 31 日の測定例であるが、水温が上昇した水域ではクロロフィル *a* 量は減少し、水温が低下した水域ではクロロフィル *a* 量が増加するというパターンがくり返された。なお、5 月 28 日および 31 日には *U. americana* の群体数は全般的に比較的少なく、(数 col. ml⁻¹ ~ 数 10 col. ml⁻¹ 程度)、したがってクロロフィル *a* 量のピークを示した水域でもそれ程顕著な着色はみられなかった。

つぎに、高水温域内ではあるが、相対的に少し水温の低くなった水域にクロロフィル *a* のピークがみられた、5 月 23 日の北小松沖の測定例を Fig. 5 に示す。

Fig. 2. The horizontal distribution pattern of chlorophyll *a* (thin line) and water temperature (thick line) at the depth of 1 m off Kitakomatsu (May 28).

Fig. 3. The horizontal distribution pattern of chlorophyll *a* (thin line) and water temperature (thick line) at the depth of 1 m off Kitakomatsu (May 31).

Fig. 4. The horizontal distribution pattern of chlorophyll *a* (thin line) and water temperature (thick line) at the depth of 1 m off Kitakomatsu (May 31).

Fig. 5. The horizontal distribution pattern of chlorophyll *a* (thin line) and water temperature (thick line) at the depth of 1 m off Kitakomatsu (May 23).

この日は比較的大規模な（着色水域が広く、着色水域内の *U. americana* の群体密度も高い）赤潮が出現した日であり、特に北小松周辺は顕著な赤潮（最高群体数約 1,200 col. mL^{-1} , 滋賀県資料参照）がみられた。また北湖の北小松を含む南部域の表層水温は 16~21°C 程度であり、沿岸に近い程水温が高くなる傾向がみられたが、北小松周辺水域は 20°C 前後かそれ以上で高水温域内にあった。Fig. 5 に示されるように、クロロフィル *a* 量のピークがみられた水域は、沿岸寄りの最高水温を示す水域よりは、少し水温が低くなった水域にみられる。なお、クロロフィル *a* 量のピークがみられた水域と着色域はほぼ一致しており、また着色域では数 100 col. mL^{-1} 程度の *U. americana* の群体がみられた。

3-2. *U. americana* 群体の分布と水温分布とが正の相関を示す場合

クロロフィル *a* 量の分布と水温分布とが正の相関を示した 6 月 4 日、北小松沖の測定例を Fig. 6 に示す。この調査水域では、着色域が比較的広い水域に広がっており、むしろ着色していない水域が部分的に（帯状に）みられた。Fig. 6 に示されるように、クロロフィル *a* 量の多い水域では水温が高く、クロロフィル *a* 量の少ない水域では水温が低くなっている。またクロロフィル *a* 量の多い水域と着色域とはほぼ一致しており、クロロフィル *a* 量の少ない水域では着色がみられなかった。

Fig. 6. The horizontal distribution pattern of chlorophyll *a* (thin line) and water temperature (thick line) at the depth of 1 m off Kitakomatsu (June 4).

3-3. *U. americana* 群体の分布と水温分布との間に関連のみられない場合

クロロフィル *a* の分布と水温の分布とにそれ程密接な関連のみられなかった測定例を Fig. 7 に示す。この例は 5 月 10 日北小松の、水深 1~2m 層に平行にの

Fig. 7. The horizontal distribution pattern of chlorophyll *a* (thin line) and water temperature (thick line) at the depth of 1.5 m off Kitakomatsu (May 10).

びる帯状の着色域が多数みだされた水域であり、調査は帯状の着色域を横断するような形でなされた。Fig. 7 に示されるように、水温はそれ程大きな変動がみられなかったが、クロロフィル *a* 量は大巾に変動し、大きな変動と小さな変動が複雑にからみ合っているようであった。なお、クロロフィル *a* 量のピークがみられた水域と着色域はほぼ一致していた。

4. 考 察

植物プランクトンの分布を、現場で直接的に、しかも連続的に測定しうる方法として、現場型蛍光光度計（バリオセンス）が考案され、これを用いて多くの研究がなされた結果、植物プランクトンは鉛直的にも水平的にもかなり不均一に分布する場合がみられること、特に赤潮または淡水赤潮原因種の分布は不均一性が顕著なことが明らかにされた（NAKAMOTO, 1975; HERMAN and DENMAN, 1977; 小笹, 1979）。

しかし、このような赤潮または淡水赤潮の原因プランクトンの分布、特に水平的な不均一分布と水温の水平分布との関連や、プランクトンの不均一な水平分布をひきおこす原因については不明の点が多かった。

本報ではこれらの点を明らかにするために検討を行なったが、その結果、クロロフィル *a* 量や着色域などから推定した *U. americana* 群体の水平分布と、水温の水平分布の間に、負の相関がみられる場合（A型）、正の相関がみられる場合（B型）、あまり密接な関連がみられない場合（C型）、の他に、調査水域は隣接水域に比し高水温の水域ではあるが、調査水域内では *U. americana* 群体の分布と水温分布とが負の相関を示す場合（A-B型）のあることをみいだした。このような *U. americana* 群体と水温の水平分布に種々のパターンがみられる原因としては次のようなことが考えられる。

さきに吉田ら（1983 b）は、*U. americana* 群体の集積の型として、表層水の低水温域に集積がみられる型（Ⅱ型）と、表層水の高水温域に集積がみられる型（Ⅲ型）のあることを推察した。したがって、本研究でみいだしたA型は、集積型としてはⅡ型に、B型はⅢ型に、またA-B型はⅡ型とⅢ型の中間型に相当すると考えられる。すなわち、1) A型では、*U. americana* 群体の昼間における最浅浮上層（午後1～3時頃、鉛直的にピークを示す層）で、その層で浅では沈降性を、以深では浮上性を示す層が2～3m 層にあり、したがって風または湖流によって表層水が移動した場合、流れの反対側の中層の低水温水の収束、浮上域に、湧昇流に逆って沈降、集積し、2) B型では *U. americana* 群体の最浅浮上層がごく表層にあり、表層水が移動した場合、流れの向う側の表層の高水温の集束、沈降域に、沈降流に逆って浮上、集積し、また、3) A-B型では、*U. americana* 群体の最浅浮上層が約1m と比

較的表層に近いが、ごく表層よりは少し深く、したがって、表層水が移動した場合、表層水と共に高水温域に移動するが、ごく表層の高水温の集束域では集積せず、これに隣接した、局部的にみられる1m 前後の少し深い層の水の湧昇域に、沈降、集積した、ように思われる。また、4) C型では、この型が得られた5月10日は、表層水温がそれ程まだ上昇しておらず、したがって水温躍層も顕著でなかったため、表層水の収束、沈降、および下層水の収束、湧昇があっても水平的な水温変化として現われにくかった、また実際には表層水と下層水の比重差が小さいため鉛直安定度が低く、表層水の移動に伴ない、水の沈降、湧昇が起りやすく、したがって、*U. americana* 群体数の変動の大きい、複雑な分布を示した、ように思われる。

ある水域で、風の作用により、風向と直角の方向に鉛直的な循環流を生じ、表層水の沈降域と、下層水の湧昇域とを交互に生起させる結果、浮遊粒子が風向と平行のしかも多数の帯状の集積域を形成する（浮上性粒子は沈降域に、沈降性粒子は湧昇域に集積する）という現象は、最初 LANGMUIR (1938) によって明らかにされたが、その理論的解析については多くの研究者によって検討が続けられている（川合, 1976; GRAIK and LEIBOVICH, 1976; GARRETT, 1976; 坂本, 1980 など）。本研究でみられた、5月10日の測定例などは、このような現象とよく似た多数の平行の帯状の着色域がみられたが、その方向は多くの場合沿岸と平行か、またはびわ湖に形成される2または3個の環流の方向と平行的なことを示唆しており（吉田ほか, 1983 b, Fig. 6 参照）、必ずしも風の方角とは一致していない。したがって、このようなパターンの生ずる原因として、今後、湖流（または環流）と風（または吹送流）の両面から、さらに検討する必要があるように思われる。

摘 要

Uroglena americana 群体の集積域はびわ湖北湖の西部沿岸や南部域に局部的に偏在し、その形状は帯状や盤状など種々で、数点の調査点ではその現状を把握することは困難であった。したがって本報では、現場型蛍光光度計（バリオセンスⅡ型）を調査船で曳航出来るように改良し、これを用いて集積域における *U. americana* 群体の微細な水平分布パターンの諸様式を明らかにしようと試みた。

現場型蛍光光度計にはサーミスタを取付け、水温とクロロフィル *a* を同時に船上で連続的に自記記録測定出来るようにし、また小型の主翼および尾翼を取付け、1または1.5m の水深で、約4ノットの速度で曳航するようにした。

U. americana 群体の水平分布には顕著な変動がみられ、また同種の水平分布と水温の水平分布の間には正の相関がみられる場合（前報のⅢ型に相当）、およ

び負の相関がみられる場合（前報のⅡ型に相当）の外に、少数例ではあるが両者にあまり密接な関連がみられない場合もみられた。また負の相関がみられた場合のうちで、調査水域は高水温域でありながら、調査水域内では負の相関を示す場合（ⅡとⅢの中間型）もみいだされた。

このような *U. americana* 群体と水温の水平分布パターンに差異が生ずる原因について考察を加え、同群体の浮上・沈降性、昼間の最浅浮上層の水深、水温の鉛直分布、表層水の収束、沈降、下層水の収束、湧昇などが、同群体の集積を介して、相互に密接に関連し、水平分布パターンに差異を生ぜしめることを推察した。

文 献

- CRAIK, A. D. D. and S. LEIBOVICH (1976) : A rational model for Langmuir circulations. *Fluid Mech.*, **73**, 401-426.
- GARRETT, C. (1976) : Generation of Langmuir circulation by surface waves a feedback mechanism, *J. Mar. Res.*, **34**, 117-130.
- HERMAN, A. W. and K. K. DENMAN (1977) : Rapid underway profiling of chlorophyll with an in situ fluorometer method on a 'Batfish' vehicle, *Deep-Sea Res.*, **24**, 385-397.
- 川合英夫 (1976) : 収束・発散と海の粒々物理学, 海洋物理学Ⅱ. (寺本俊彦編), 103-155, 東大出版会.
- 小笹悦二 (1979) : 東シナ海におけるクロロフィルの分布-I. Variosens で測定した 1978 年 7 月の鉛直分布特性. 日本プランクトン学会報, **26**: 87-95.
- LANGMUIR, I. (1938) : Surface motion of water induced by wind. *Science*, **87**, 2250, 119-123.
- LORENZEN, C. T. (1967) : Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, **12**, 343-346.
- NAKAMOTO, N. (1975) : A freshwater red tide on a water reservoir, *Jap. J. Limnol.*, **36**: 55-64.
- 坂本 亘 (1980) : 赤潮生物の物理学的集積, 赤潮-発生源機構と対策 (日本水産学会編), 63-85, 恒星社厚生閣.
- 吉田陽一・三田村緒佐武・田中信彦・門田 元 (1983 a) : 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, 陸水学雑誌, **44**: 21-27.
- 吉田陽一・松本 孝・門田 元 (1983 b) : 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; 河口克己, 興羽化学工業(株) 食品研究所, 104 東京都中央区勝どき; 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; KAZUMI KAWAGUCHI, Laboratory of Food Science & Technology, Kureha Chemical IND. CO. LTD., Kachidoki, Chuwo-ku, Tokyo 104; HAJIME KADOTA, Department of Fisheries, Faculty of Agriculture, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606)

1983 年 5 月 13 日 受理