

貯水池末端における持続的な淡水赤潮に関する研究

STUDY ON THE MECHANISM SUSTAINING THE LONG TERM FRESHWATER RED TIDE FORMED AT THE RESERVOIR TAIL

天野 邦彦¹・田中 康泰²・鈴木 宏幸³・安田 佳哉⁴
Kunihiko AMANO, Yasuhiro TANAKA, Hiroyuki SUZUKI and Yoshiya YASUDA

¹正会員 工博 建設省土木研究所 環境部環境計画研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

²正会員 北海道開発局 石狩川開発建設部 (〒060-0002 北海道札幌市中央区北2条西19丁目)

³建設省土木研究所 環境部環境計画研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

⁴正会員 建設省土木研究所 環境部環境計画研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

Freshwater red tide blooms are formed at the reservoir tail in many cases. Dinoflagellates such as *Peridinium* and *Ceratium* are usually causative species. These species are unique in being able to swim toward light (phototaxis). This ability makes it possible for them to swim upward during a day. Density currents formed around a plunging point of river water at the reservoir tail seem to help them accumulate around the plunging point. We have surveyed flow structure, water quality changes and diel distribution variation of red tide causing *Peridinium bipes* at a reservoir tail to investigate the mechanism which leads to a long term continuation of red tide bloom. A continuous surface flow directing upstream was measured at the reservoir tail and *P. bipes*'s accumulation at the water surface and upward migration during a day were observed. Most individuals remain at the surface even during night; however, some settled down and were transported downstream by plunged river water which contains available nutrients. This partial settling seems to allow them to take up nutrient from river water without being flushed out throughly.

Key Words : Red Tide, Dinoflagellate, Density current, and phototaxis

1. はじめに

貯水池末端における植物性プランクトンの集積現象は、淡水赤潮と呼ばれ貯水池によっては毎年のように発生し、景観障害を引き起こすこともある¹⁾。淡水赤潮の原因となる植物性プランクトンは、遊泳能力を持つ渦鞭毛藻類であることが多いことから、この遊泳能力を持つという特性と貯水池末端での流れとの関係が貯水池末端での淡水赤潮集積の原因となっていることが今までの研究で示されている^{2) 3)}。

本研究では、淡水赤潮がほぼ毎年発生する貯水池末端において淡水赤潮原因藻類の分布について日周変化を観測すると共に、流速分布、水温、水質の現地調査を行い、長期にわたる淡水赤潮の維持が可能な原因について検討した。

2. 研究目的

先に述べたように、淡水赤潮発生に関しては赤潮原因藻類の遊泳と貯水池末端での流動との関連の重要性が指摘されてきている³⁾。しかし、集積に関して遊泳と流動との関連から説明がついたとしても、比較的栄養塩濃度の低い貯水池で数ヶ月にわたり安定して淡水赤潮が維持されるためには、栄養塩の供給に関して疑問が残っていた。すなわち、貯水池末端表層の非常に限られた範囲において、大量の赤潮原因の植物性プランクトンが、流入河川から貯水池表層に供給される摂取可能な栄養塩だけで数ヶ月にわたり維持されるのか、あるいは赤潮原因の植物性プランクトンの分布が日周変化することで貯水池末端において河床付近を流下していると考えられる流入河川水から栄養塩を摂取することで維持されているのか不明であった。

このため、本研究では、流入端において淡水赤潮が発生している貯水池で淡水赤潮原因藻類分布の日周変化を観測し、その挙動をとらえると共に、水温、水質との関連について検討することを目的としている。

3. 観測方法

観測を行った貯水池では、例年10月後半頃から流入端における赤潮の集積が顕著になることから、平成10年10月20日から11月20日までの1ヶ月間、水温計、流速計、気象観測等の自動計測機器を設置することで、流動に関する観測を行うと共に、現地採水と機器による24時間水質測定を上記期間中4回行い、赤潮原因藻類分布の日周変化の観測を行った。以下に、それぞれの測定場所、測定方法について述べる。

(1) 自動計測機器による測定場所及び方法

観測対象とした貯水池は、2つの支川が上流端で合流し流入する形状を持っている(図-1)。測定は、2支川のうち左支川の流入端より約2.5kmの範囲で河床の最深部を流下方向に縦断的な調査が可能となるように測定点を設定した(図-1)。本貯水池は、測点No. 1と2の間に夏期水位低下時の取水堰(天端標高317m)が設けられているが、観測期間中は水没していた。

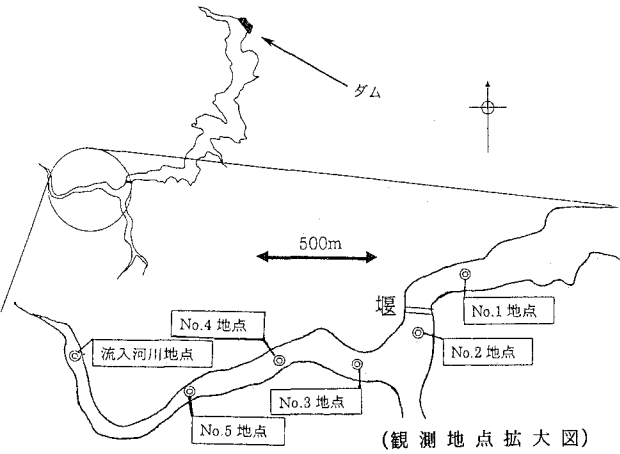


図-1 観測対象貯水池平面図及び観測地点拡大図。

自動計測機器の配置については、以下の通りに行った。

a) 流速計の配置及び測定方法

No. 1～4の4地点の河床上にADCPを設置すると共にNo. 1～5の5地点の河床から0.5m上に電磁流速計を設置し、バースティングモードでそれぞれ30分間隔で流速測定を行った。

b) 水温計の配置及び測定方法

流入河川地点の河床1点、またNo. 1～5地点では水深方向に水温計をチェーン状に配置した。観測期間中の水位変化が予測されたこと、また先に述べた水没した堰に低水温塊が貯留されていることから、これが流動に与える影響について調査するためにNo. 1地点(堰下流)では、湖底上1mから12mまで1mおきに12点立ち上げると共に水面から0.5, 1, 2, 6, 10m水深の5点の合計17点、No. 2及び3地点では、湖底上1m及び水面から0.5,

2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16m水深の9点の合計10点、No. 4地点では、湖底上1m及び水面から0.5, 2, 4, 6, 8, 10, 12m水深の7点の合計8点、No. 5地点では湖底上1m及び水面から1m水深の合計2点に水温計を設置した(図-2)。測定間隔は10分とした。

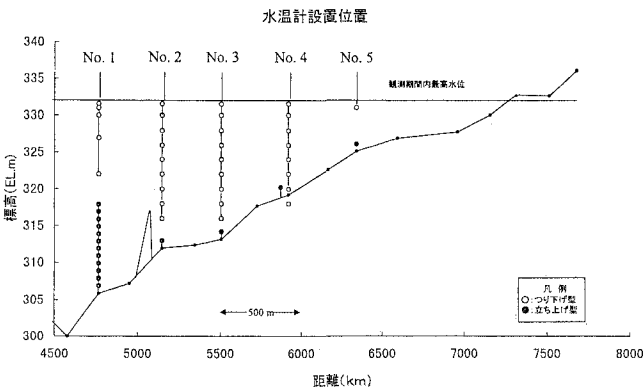


図-2 水温計設置位置図。

c) 気象計の配置及び測定方法

気象観測については、日射量、気温、風向風速、湿度についてNo. 2地点の左岸で観測を行った。日射量については30分毎に積算値を、気温、風向風速、湿度については10分間隔で測定を行った。

(2) 24時間水質測定場所及び方法

24時間水質測定については、調査船を用いてNo. 1～5地点および可能な限りNo. 5地点より上流側に移動し機器測定により水温、pH、クロロフィル a、水中照度の4項目について水深0.1, 0.5, 1.0mから1m毎に水底まで縦断的にほぼ4時間おきに観測した。

また、栄養塩に関する測定として、リン(T-P, PO₄-P, 0-P)、窒素(T-N, NO₃-N, NH₄-N, 0-N)を流入地点及び原則としてNo. 1～5地点の表層、中層、底層でバンドン型採水器を使用して採水後、速やかに実験室に持ち運び分析を行った。測定は4回行った24時間調査のうち3回については1日1回、残りの1回については1日2回(昼間及び夜間)の合計5回行った。

さらに、プランクトンに関する測定として、植物性プランクトンの定量分析及びクロロフィル aを栄養塩と同様の場所で採水、分析することで測定した。ただし、植物性プランクトンの定量分析とクロロフィル aについては、機器測定によるクロロフィル aとの相関をとる目的から、測定は4回行った24時間調査のうち3回については1日1回、残りの1回については1日7回(ほぼ4時間毎)の合計10回行った。

4. 結果

(1) 水温分布

No. 3地点における水温変化を示す等温線図(図-

3) から、観測期間を通して、天端標高317mの水没堰上流に貯留されている底部の低水温水塊の影響のため、標高320m付近に水温躍層が存在していたことが分かる。この水温鉛直分布は放流の影響を受けたダムサイト地点とは全く異なっており、この堰の影響と考えられる。

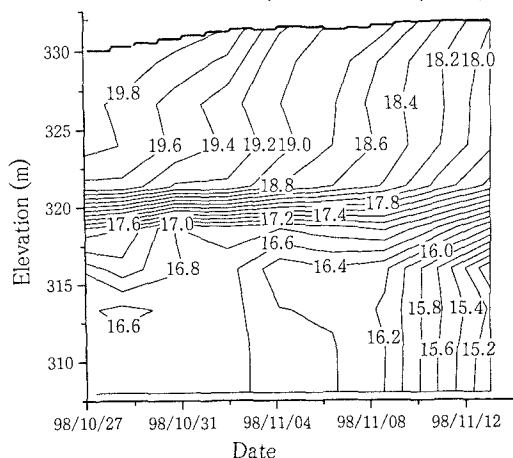


図-3 No. 3 地点における等水温線図。

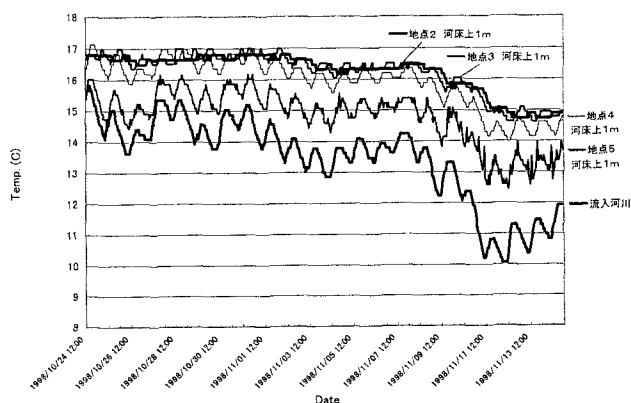


図-4 流入水温及びNo. 2～5 地点での河床上1m水温の変化。

流入河川水温は、期間中約16℃から気温の低下に伴い10℃程度にまで低下した(図-4)。また、流入河川水温は規則的に1℃程度の日周変動を示した。貯水池に流入した河川水は、貯水池表層水温より5℃以上低いため、底層を流下することが考えられる。図-4は、流入河川水温の変化と共に水没した堰上流の4測点での河床上1mでの水温変化を同時に示しているが、No. 4及び5地点では、河床標高が堰天端より高いため底層を流下する河川水の影響を直接受け、両地点河床上1mでの水温変化は、流入河川とほぼ同様の变化傾向を示すことが分かる。しかし、流入河川水は、標高320mより高い位置に存在する高温の表層水と混合するため、No. 5、No. 4地点へと流下するに従い、水温が1℃程度ずつ上昇していた。これに対してNo. 2及び3地点は、河床が堰より低いため、河床上1m水深での水温変化は流入河川水温変化の様な日周変化は示さず、水温変化は非常に緩慢であった。しかし、水温変化の傾向としては流入河川水温の変化傾向に従い、特に流入河川水温が急激に低

下した11月12日以降1℃以上の低下を示した(図-4)。

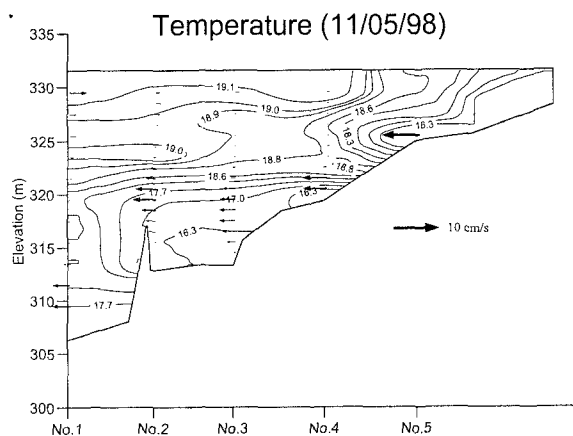


図-5 11月5日午後3時の縦断面等水温線及び平均流下方向流速分布図。

第2回目の24時間調査が行われた11月5日午後3時の水温の縦断面等温線を図-5に示す。コンピュータによる作図のため、No. 4と5地点の間での底層水温分布に若干難があるが、流入河川水が底層を流下すること、堰により低水温水塊がNo. 2地点からNo. 4地点直下流までに存在することが分かる。

(2) 流速分布

図-5には、ADCP及び電磁流速計によって得られた11月5日の日平均流下方向流速分布を同時に示している。水温の縦断面等温線と矛盾無く、流入端からNo. 4地点付近まで流入河川水が河床上の底層を流下し、その下流で、堰による底層低水温水塊の上、標高320m付近を中心に貫入している様子が良く示されている。堰を越えた流入水は、下流の貯水池水に比べて密度が高いため、再び河床付近を流下することが図から示されている。

No. 2地点でのADCP及び電磁流速計による流速の連続計測結果を図-6に示す。本地点では、ほぼ北方向が流下方向に当たっている。観測期間中は、大きな出水もなく、このため、流入河川水の流下と考えられる標高320m付近の水深を中心に最大値(7cm/s程度)を示す流下方向流速は、期間中大きな変化を示すことなくほぼ一定の値を示していた。

これに対して、表層3～4m付近では、上流側に向かう流れが観測されている。表層付近の流れは風の影響を受けることから変動が大きく、特に昼間に上流側へと流れる流速が大きくなる傾向が見られる。

(3) 栄養塩濃度

流入河川水質は、期間中5回行った測定結果の中では、大きな変動は見られなかった。窒素については、T-Nで0.23～0.35mg/lの範囲で変化したが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ で0.19～0.27mg/l、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は検出されず、O-Nで0.04～0.14mg/lの値を示した。全ての測定において、窒素の項目中で $\text{NO}_3\text{-}$

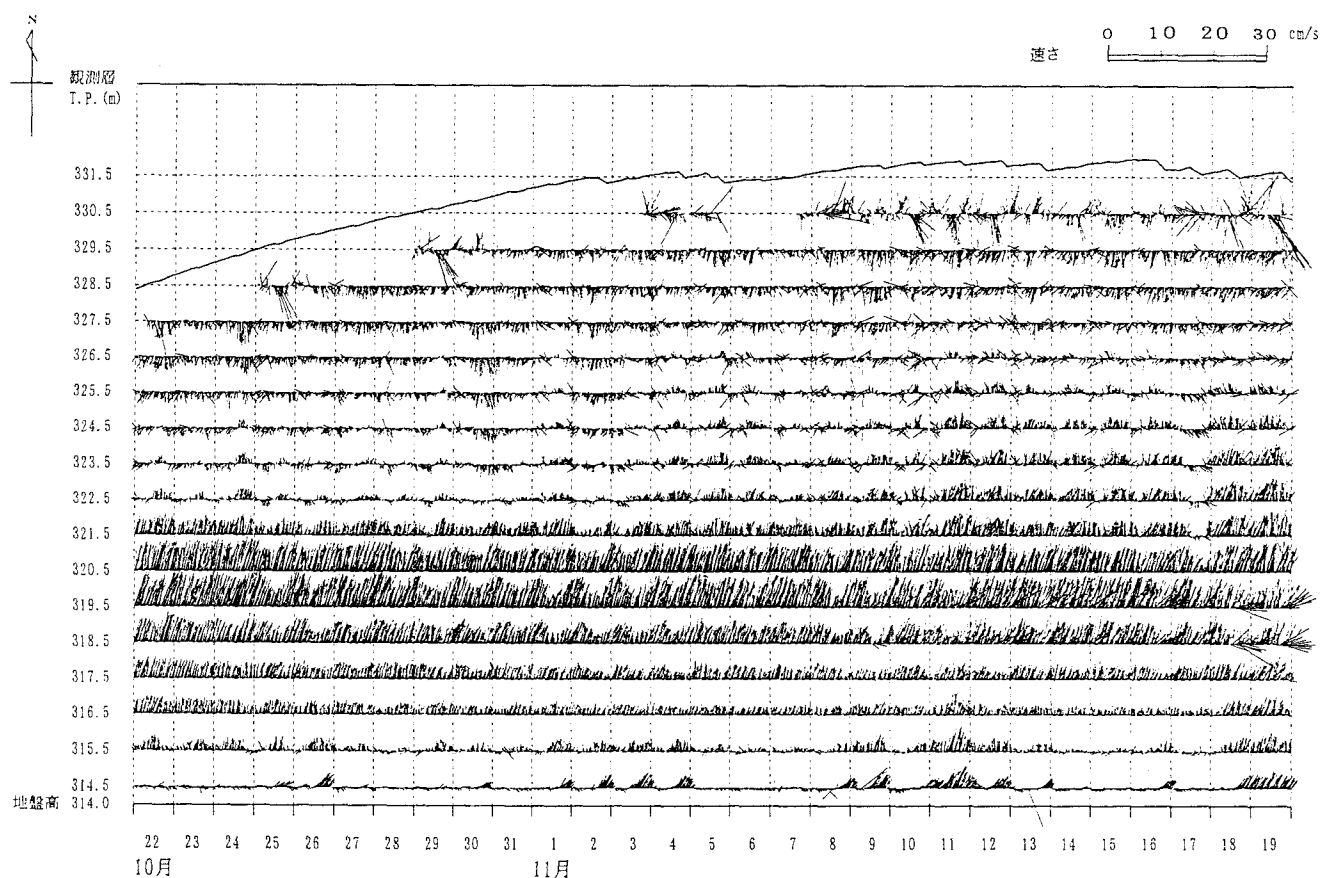


図-6 No. 2地点でのADCP及び電磁流速計による流速の連続計測結果。

Nが最も大きな割合を示していた。リンについては、T-Pで0.011～0.013mg/lとほとんど変化せず、 PO_4 -Pで0.006～0.009mg/l、O-Pは検出されないか0.006～0.01mg/lの範囲で分布した。1回の測定を除いてリンの項目中 PO_4 -Pが50%以上の割合を占めていた。流入河川水中のクロロフィル-a濃度は最大値で $5.3\mu\text{g/l}$ と貯水池水に比べて低い値を示した。

貯水池流入末端では、栄養塩濃度の変化は後述するように赤潮藻類の分布に大きく影響を受けていた。例えば、測定した検体中クロロフィル-a濃度の最大値は、赤潮が集積した箇所から採水したもので、 $438\mu\text{g/l}$ と非常に高い値を示したが、この検体のT-N、O-N濃度はそれぞれ3.79、3.60mg/l、T-P、O-P濃度はそれぞれ0.271、0.269mg/lと流入河川水濃度に比べてT-Nで10倍以上、T-Pでは20倍以上の高濃度を示していた。

リンに関しては、藻類による摂取と考えられるが、貯水池内での測定からは PO_4 -Pは全く検出されず、また上の例からも示されるように、T-P濃度のほとんどはO-Pで占められていた。貯水池内での窒素に関しては、リン同様、O-N濃度は赤潮藻類の分布に大きく影響を受けて変化する分布を示したが、窒素については観測期間中、藻類増殖の制限因子とはなっていなかったようで、藻類が利用可能な溶存性無機態窒素である NO_3 -Nが赤潮藻類が大量に集積していた2、3の検体を除いて0.1～0.2mg/l残存していた。

(4) 植物性プランクトン分布

観測方法の項で述べたように、植物性プランクトンについては、採水した検体について、検鏡による植物性プランクトンの定量分析及びクロロフィル-a濃度分析を行うと共に、現地で機器による詳細なクロロフィル-a測定を行っている。植物性プランクトンの定量分析結果からは、期間中測定された植物性プランクトンの優占種は赤潮原因藻類の*Peridinium bipes*であったことが示された。表-1は、*P. bipes*に続いて多く検出された珪藻類の*Asterionella formosa*、*P. bipes*の細胞濃度、窒素、リン、クロロフィル-a濃度との相関を一覧表にして表したものである。*P. bipes*が圧倒的な優占種であったため、O-N、O-P、クロロフィル-aとの相関が非常に高いことが分かる。

表-1 植物性プランクトン、栄養塩濃度等相関一覧。

単相関	<i>Asterionella formosa</i>	<i>Peridinium bipes</i>	T-N	Org-N	T-P	Org-P	濃度	Chl-a
<i>Asterionella formosa</i>	1.0000							
<i>Peridinium bipes</i>	0.1124	1.0000						
T-N	0.0700	0.7867	1.0000					
Org-N	0.0834	0.7930	0.9993	1.0000				
T-P	0.0012	0.8915	0.8859	0.8909	1.0000			
Org-P	0.0104	0.8910	0.8868	0.8924	0.9996	1.0000		
濃度	-0.0077	0.8288	0.7678	0.7706	0.9319	0.9312	1.0000	
Chl-a	0.1391	0.8672	0.8893	0.8962	0.9655	0.9663	0.8883	1.0000

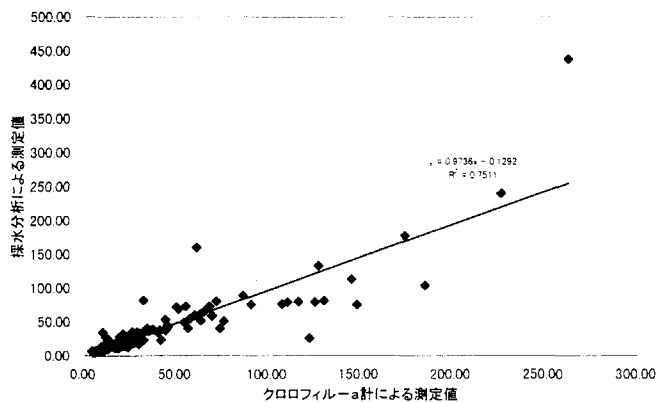


図-7 機器観測と水質分析によるクロロフィル-*a* 分析比較.

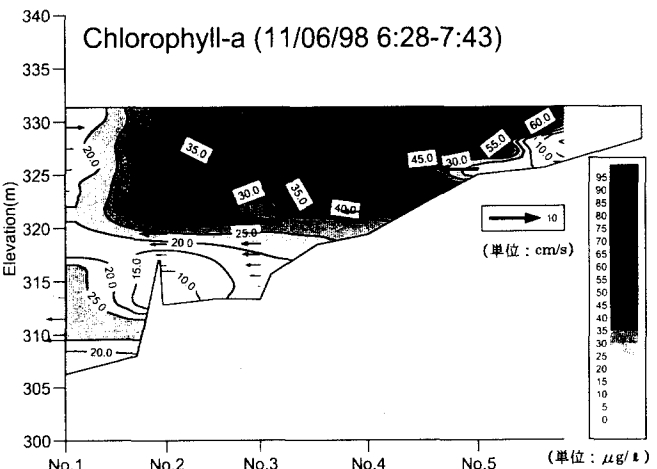
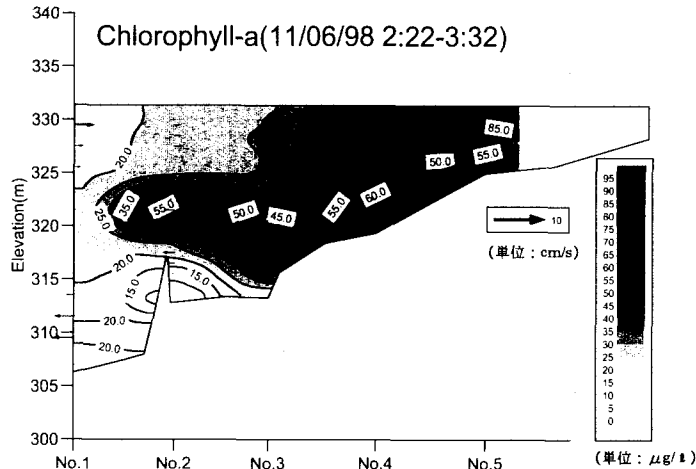
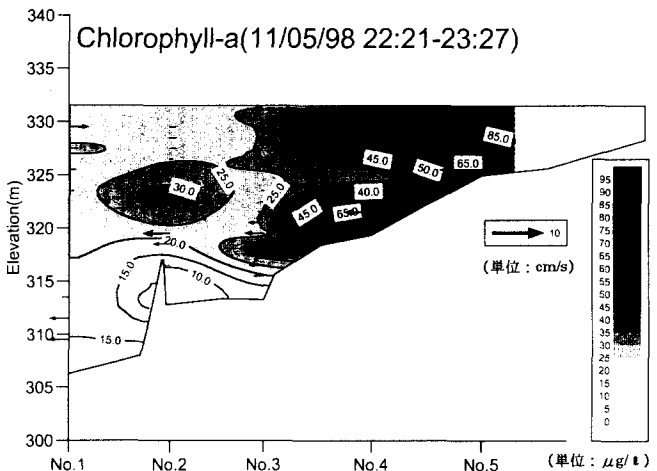
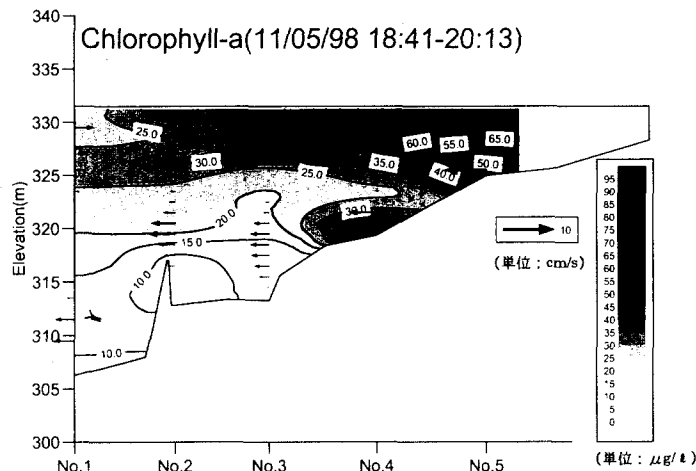
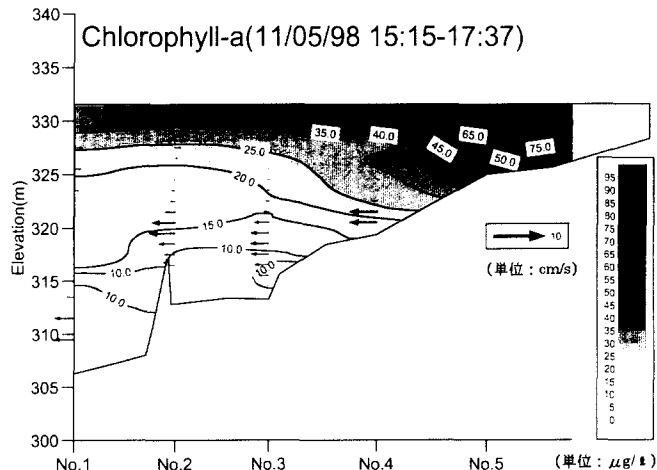
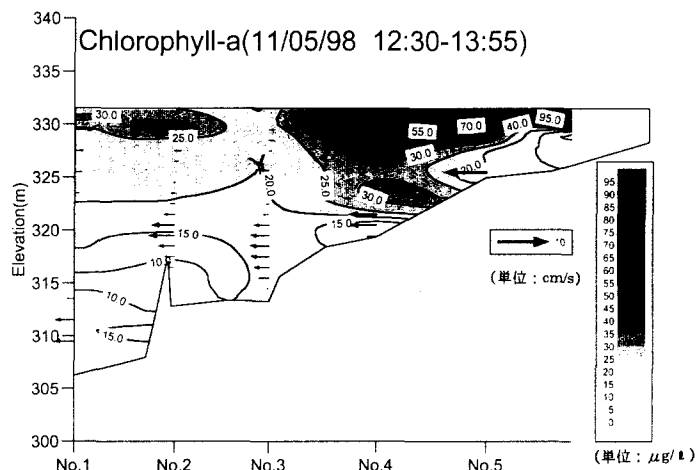


図-8 第2回24時間連続観測時のクロロフィル-*a* 濃度縦断分布の変化.

機器観測と水質分析から得られたクロロフィル-*a* 濃度の間にも良好な相関が得られた (図-7)。

ここで得られた回帰式を用いて現地での機器測定による詳細なクロロフィル-*a* 計測結果を変換してクロロフィル-*a* 濃度の日周変化を示したのが図-8である。ここでは、第2回目の24時間調査の結果を示す。表-1に見られるようにクロロフィル-*a* と *P. bipes* 細胞濃度との相関が約0.87と非常に高いことから、この結果は赤潮原因藻類である *P. bipes* 細胞濃度の分布と見ることができる。

午後12時30分から13時55分にかけて計測された分布図からは、流入端付近表層への*P. bipes*の集積によるピークが見てとれる。このとき、底層付近でのクロロフィル-*a*は低い値を示していた。次の15時15分からの観測では、流入端付近での底層クロロフィル-*a*濃度の上昇が見られ、流入端表層に集積していた*P. bipes*の一部が沈降したと考えられる。18時41分からの観測ではNo. 4付近の底層に沈降した*P. bipes*が流入河川水により運ばれたと考えられるピークが見られた。ここで、図中の矢印はA D C P及び電磁流速計により得られた流下方向流速の日平均値の分布を示している。流入河川水により下流へと運ばれたと見られる*P. bipes*の底層での最大値はNo. 4地点底層で22時21分からの観測に見ることが出来る。さらに、次の日の午前2時22分からの観測では、堰上流底層に滞留している冷水塊の上を流下する流入河川水の流れにより*P. bipes*が運搬されていることによると考えられるNo. 4地点からNo. 2地点下流までに至る中層でのクロロフィル-*a*濃度のピークが示された。この後に行われた午前6時28分からの観測では、この時点で*P. bipes*の上昇運動がすでに始まっていたと考えられ、流入端付近の底層でのクロロフィル-*a*濃度は再び低下し(5 µg/l以下)、午前2時22分からの観測で認められた中層でのクロロフィル-*a*濃度のピークは認められなかった。代わりに、No. 4地点からNo. 2地点下流での標高320m以浅でのクロロフィル-*a*濃度が全般的に上昇しており、午前2時22分からの観測で認められた流入河川水により下流へと運搬された*P. bipes*が上昇運動をすることでこのような分布になったと考えられる。

5. 考察

安定した水温成層が貯水池表層付近に形成されることで、本貯水池末端では、観測期間中を通して流入河川水の中底層流下、これを補償していると考えられる表層での上流へ向かう流れが維持され、この流れが走光性を持ち昼間上昇運動をしていると考えられる⁴⁾。赤潮原因藻類の*P. bipes*にとって、長期間にわたる貯水池末端表層での集積及び栄養塩摂取に有利な条件を提供していると考えられる。

すなわち、昼間貯水池流入端表層に集積した*P. bipes*は、表層において昼間平均1~3cm/s程度の緩やかな上流へ向かう流れにより河川水の潜り込み点付近まで運搬されると考えられる⁵⁾。昼間は潜り込む河川水に連行されても、上昇運動を行うため、再び表層付近に戻ると考えられる。このことは、貯水池末端表層での集積は一部の*P. bipes*の沈降が認められる夕刻前に最大となることから示唆される。

夜間は、*P. bipes*の一部が沈降していることが観測結果から示されている。夜間の運動能の低下に伴う沈降が表層での集積の消失を説明しうるとされている³⁾。こと、今回の観測結果からも夜間に表層に残留するものの方が多いこと、また海洋で赤潮を引

き起こすラフィド藻の*Chattonella antiqua*の様に夜間下降運動をする種であれば、夜間の分布のピークは底層に形成される⁶⁾。ことから、本種は夜間の自発的下降運動は行わない可能性があると考えられる。

観測された流入河川の流下速度は標高320mで5cm/s程度であり、この速度で*P. bipes*も流下したとすれば、沈降がNo. 5地点上流で認められた午後6時からNo. 2地点中層にピークが到達した午前3時までの9時間で約1.6km流下することが可能で、これはクロロフィル-*a*分布の観測値から認められる流下距離と一致している。

しかし、先述したように、表層での上流に向かう流速はこの半分以下であり、このため、もし大多数の*P. bipes*が沈降していたとすると、大半が昼間に流入端まで戻りきることなく下流に流されてしまうと考えられる。また逆に、*P. bipes*が全く沈降しなければ、貯水池表層の利用可能なリンは枯渇しているため、赤潮はやがて消滅すると考えられる。

*P. bipes*の一部が何らかの理由で夜間に沈降すれば、貯水池表層とは異なり、利用可能なリンが存在する流入河川水に到達することで、これらの個体はリンの摂取が可能であると考えられる。この一部の個体のみが夜間沈降、流下しているということが、貯水池末端での*P. bipes*赤潮の長期間にわたる維持を可能にしていると考えられる。

6. 結論

貯水池末端に形成される淡水赤潮原因藻類*P. bipes*は、貯水池末端での流れにより集積が可能となると共に、その一部のみが夜間に沈降することで長期間にわたり栄養塩摂取と個体数の維持が可能になっていると考えられる。

参考文献

- 1) 山中芳夫：わが国各地における淡水赤潮の発生状況、淡水赤潮、恒星社厚生閣、PP.165-170, 1987.
- 2) 畑幸彦：永瀬ダム湖における*Peridinium*による赤潮現象、国立公害研究所研究資料、第24号、B-24-'83, pp. 15-28, 1983.
- 3) 渡辺仁治、清水晃、石井玉恵、坪田智子：*Peridinium bipes f. occulatum*(Lemm.)Lef.による淡水赤潮の発生機構に対する考察、国立公害研究所研究資料、第24号、B-24-'83, pp. 29-48, 1983.
- 4) 山田正人、宗宮功、安永望、小野芳朗：渦鞭毛藻*Peridinium*の走光性による遊泳速度に関する研究、*Jpn. J. Limnol.*, Vol.56, pp.125-135, 1995.
- 5) 天野邦彦、田中康泰、寺川陽：貯水池末端における流れと淡水赤潮の関連に関する研究、日本流体力学会年回'99講演論文集、pp. 437-438, 1999.
- 6) Watanabe, M., Kohata, K., Kimura, T., Takamatsu, T., Yamaguchi, S. and Ioriya, T.: Generation of a *Chattonella antiqua* bloom by imposing a shallow nutricline in a mesocosm, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.40, pp.1447-1460, 1995.

(1999. 9. 30受付)