

〈地域汚染〉

永瀬ダム湖における淡水赤潮の研究 (I)*

—赤潮の発生と環境要因との関係—

門田 治 幸**・邑岡 和 昭**・渡辺 賢 介**
河 淵 雅 恵**・松 村 浩 明***・鎮 西 正 道****
浜 田 康 行*****

1. はじめに

人造湖における淡水赤潮現象は、近年各地のダム湖¹⁻³⁾で報告されており、永瀬ダム湖でも⁴⁾1975年頃より連続して淡水赤潮の発生が観察されている。これらの報告では、bloom を形成するプランクトンが渦鞭毛藻の *Peridinium* であること、そのほとんどがダム湖の河川流入端付近で観察されること、さらに発生の時期が冬～春あるいは夏に限られることが共通している。

淡水赤潮の発生の諸要因を大別すると、気象条件あるいは水文学的条件などの非生物学的要因、さらにプランクトンの栄養要求性、運動性および生物間競合などの生理生態的特性である生物学的要因の相乗作用によると考えられる。

ここでは、人造湖での淡水赤潮発生機構の解明のため

に、高知県下の物部川水系の永瀬ダムで、1980年4月から1982年4月に行った調査から、1981年の調査結果を中心に、*Peridinium* 赤潮の発生状況と環境要因の関係について述べる。

2. 調査の方法

2.1 調査地点と日程

永瀬ダムに Fig. 1 に示すように、貯水池に8地点 (st. 2～st. 9) と流入河川1地点 (st. 1) を設定した。調査回数は、4月から12月にかけて、bloom の発生状況に応じて月1回～8回程度とした。

2.2 調査項目および分析方法

バンドーン型採水器を用いて0 m, 1 m, 2 m, 5 m および底泥上1 mの5層について水を採取した。

計測は、水温は現地で測定し、溶存態栄養塩類は採取後実験室に持ち帰り、平均口径0.45 μmのメンブランフィルターで吸引濾過して分析に供し、残渣はクロロフィル a の分析を行った。同一試料を濾過処理をしないで分析し、この値から溶存態栄養塩の値を差し引いて懸濁態物質とした。NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, T-P, クロロフィル a は海洋観測指針⁵⁾, PO₄-P は JIS K 0102 の27.1の方法, TOC はメンデルファンドバル法で測定した。

植物プランクトンは安達の固定液で固定の後、自然沈降法で濃縮し、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

各地点における植物プランクトンの分布調査は5月, 6月, 8月, 10月に行った。季節によって各地点の植物プランクトンの分布および相の構成に多少の差異はある

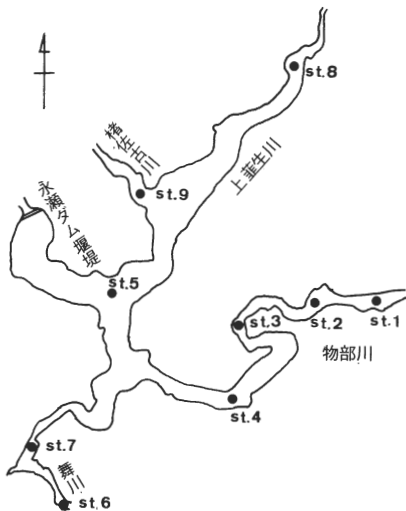


Fig. 1 Map of Sampling stations of Nagase Dam.

* Studies on a Freshwater Red Tide and Nagase Dam (I)—Relation between Occurrence of Red Tide and Environmental Factors—

** Haruyuki Kadota, Kazuaki Muraoka, Kensuke Watanabe, Masae Khobuchi (高知県公害防止センター)

*** Hiroaki Matsumura (高知県中央保健所)

**** Masamichi Chinzei (高知県須崎保健所)

***** Yasuyuki Hamada (高知県公害対策課)

が、最も bloom の安定した8月の調査結果を Fig. 2 に示した。

物部川流入水の st. 1 では、植物プランクトンの数および種共に少なく、細胞数は 10^1 cells/ml 程度で珪藻が主体である。河川流入端付近の st. 2, st. 3, st. 8 では植物プランクトン数は著しく増え、細胞数はそれぞれ 5.6×10^4 cells/ml, 1.8×10^4 cells/ml, 3×10^4 cells/ml であり、構成種は少なく80%以上が渦鞭毛藻の *Peridinium* で占られる。流入端から湖心に近い st. 4, st. 7 での細胞数は 1.8×10^4 cells/ml, 3×10^3 cells/ml で、種も多くなり、緑藻の *Carteria* sp., *Pandorina morum* 等の比が多くなる。湖心付近の st. 5, st. 9 での細胞数は 1.7×10^4 cells/ml, 5×10^4 cells/ml 程度であり、構成種はさらに増え緑藻の他に藍藻の *Oscillatoria*

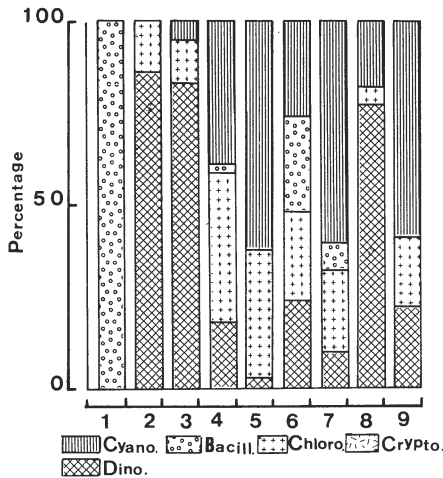


Fig. 2 Changes in distribution of phytoplankton at each stations.

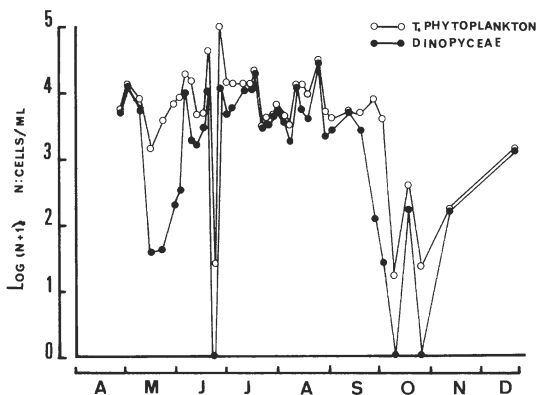


Fig. 3 Seasonal changes of total phytoplankton number (cells/ml) and Dinophyceal number (cells/ml) in surface layer at st. 3.

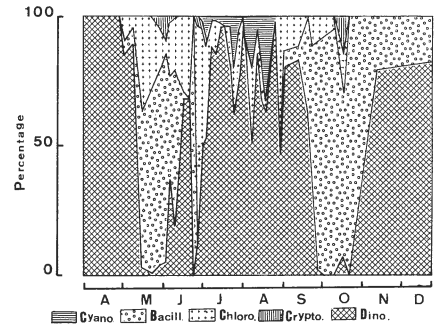


Fig. 4 Seasonal succession of major phytoplankton in surface layer at st. 3.

sp.の優占がみられる。なお、*Oscillatoria* sp. は st. 1, st. 2, を除く定点で出現が観測された。

3・2 植物プランクトンの季節的遷移

各定点における植物プランクトンの構成比は多少の差異はあるものの、季節的な遷移パターンは良く似た推移を示した。安定した大規模な *Peridinium* の bloom を形成し、さらに他の生物相も含む st. 3 における植物プランクトン数を Fig. 3 に、植物プランクトン相の季節遷移を Fig. 4 に示す。

特徴的な遷移パターンは数種の植物プランクトンの消長および優占によって起きる。すなわち、それは、渦鞭毛藻の *Peridinium penardii*, *P. cunningtonii*, *P. africanum*, 緑藻の *Carteria* sp., *Chlorogonium elongatum*, *Eudrina elegans*, *Pandorina morum*, 珪藻の *Synedra acus*, *Cyclotella* sp., 藍藻の *Oscillatoria* sp. によって構成される。

季節を追って植物プランクトンの優占種をみると、4月、5月中旬に *P. penardii* が優占して赤潮が発生する。その後6月下旬まで順次、*C. acus*, *Cyclotella* sp., *P. morum*, *E. elegans*, *C. elongatum* の消長がみられる。7月中旬から9月中旬 *P. cunningtonii*, *P. africanum* が優占して赤潮が発生する。この時期は *Oscillatoria* も出現がみられる。その後、10月下旬までの間、*P. morum*, *Cyclotella* sp., *S. acus* が順次出現するが、11月初旬には再び *P. penardii* が優占する。これ等優占する種の他に *Cryptomonas* sp. が調査期間を通して出現する。

渦鞭毛藻の淡水赤潮に至る過程の植物プランクトンの遷移現象を要約すると、渦鞭毛藻→珪藻→緑藻→渦鞭毛藻および藍藻→緑藻→珪藻→渦鞭毛藻となる。

3・3 赤潮プランクトンと水温の関係

同湖に出現した *Peridinium* を分類し、そのスケッチを Fig. 5 に示した。この種の季節的遷移を Fig. 6 に遷移現象に関わる水温の垂直分布を st. 3 を例にとって Fig. 7 に示す。

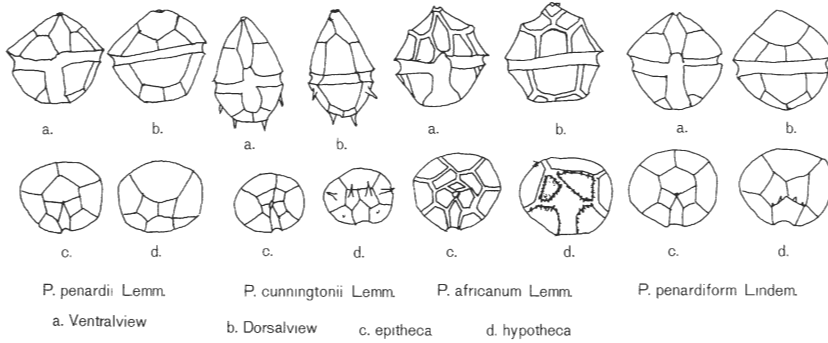


Fig. 5 Sketch of Peridinium for fresh water red tide in Nagase Dam.

Peridinium 属は, *P. penardii* Lemm., *P. cunningtonii* Lemm., *P. africanum* Lemm., *P. penardiform* Lindem., の 4 種あった。*P. penardiform* を除く他の 3 種は季節的に消長を繰返し, 単独あるいは複合して他の植物プランクトンに優占する。

季節の変化に伴う種の遷移は以下のごとくであった。*P. penardii* は 4 月から 5 月中旬および 11 月以降に優占をする。*P. cunningtonii* は 5 月下旬に出現するが優占するには至らず, 徐々に数を増し 7 月初旬より優占し, 8 月中旬まで継続する。その後徐々に消滅する。*P. africanum* は 6 月中旬より出現し, 8 月中旬には *P. cunningtonii* を凌いで優占し, 10 月中旬まで継続する。*P. penardiform* は優占種とはならず, 6 月および 9 月に出現が観察された。

Peridinium 属の遷移パターンを水温の変化からみる

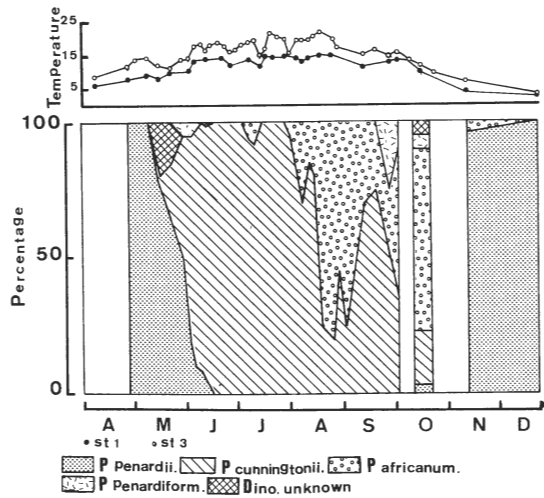


Fig. 6 Seasonal changes of water temperature (°C) in surface layer at st. 1, st. 3 and the seasonal succession of Peridinium species in surface layer at st. 3.

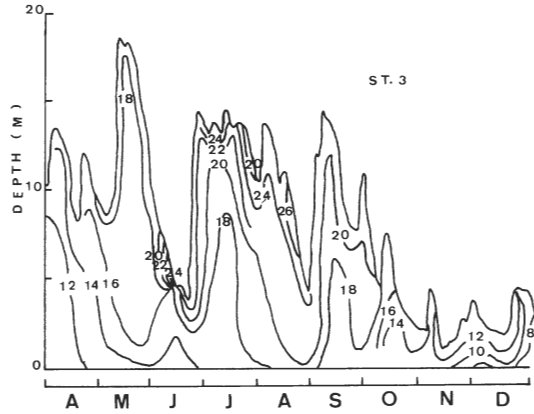


Fig. 7 Changes in vertical distribution of water temperature (°C) at st. 3.

と, *P. penardii* の発生期の水温は 8°C ~ 19°C, 平均 13.8°C である。*P. cunningtonii*, *P. africanum* では 18°C ~ 26°C, 平均 23°C の水温域にある。*P. penardiform* は 16°C ~ 23.2°C, 平均 20.5°C である。

3・4 溶存態栄養塩類の分布

1981 年 4 月から 12 月にかけて測定した st. 1 および st. 3 の表層水について, 溶存栄養塩類の季節的変動および垂直分布の平均を, Fig. 8, Fig. 9 に示した。

NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P および DTP (溶存態全磷) の平均値は, st. 1 ではそれぞれ 0.02 mg/l, 0.0008 mg/l, 0.179 mg/l, 0.006 mg/l, 0.008 mg/l であり, 変動は調査期間を通して少なくほぼ一定している。st. 3 の表層では, それぞれ 0.019 mg/l, 0.001 mg/l, 0.006 mg/l, 0.002 mg/l, 0.004 mg/l であり変動は大きい。

両定点を比較すると, st. 3 では NO₃-N が 1/30 程度まで減少し, NH₃-N, PO₄-P, DTP は一般に減少の傾向にあり, NO₂-N ではやや高い値が得られた。

DIN (溶存態無機窒素) と DTP の比は, st. 1 で 23 : 1,

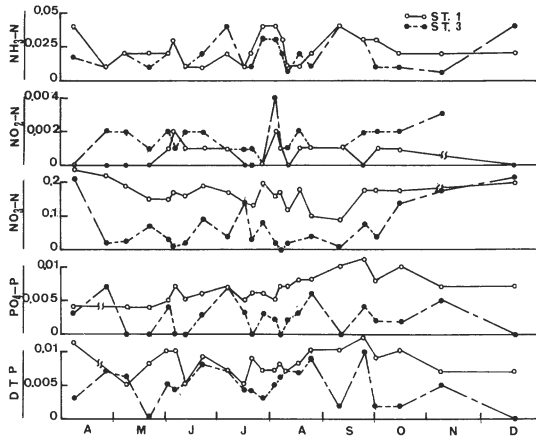


Fig. 8 Seasonal changes of nutrients concentration (mg/l) in surface layer at st. 1 and st. 3.

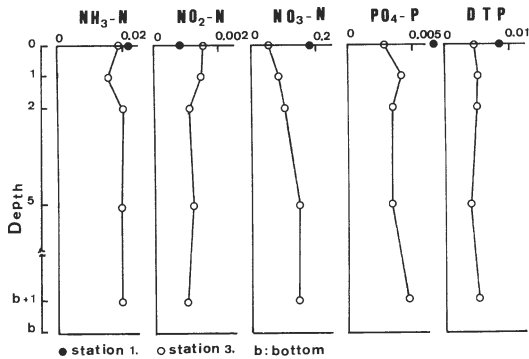


Fig. 9 Changes in vertical distribution of nutrients concentration (mg/l) at st. 3.

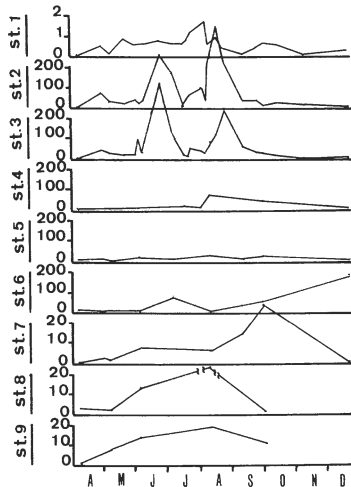


Fig.10 Seasonal changes of chlorophyll a concentration ($\mu\text{g/l}$) in surface layer at each stations.

Table 1

Correlation coefficients between POC, PON, PTP and chlorophyll a in surface layer at st. 2 and st. 3.

	POC	PON	PTP	ChloroPhyl a
POC				
PON	0.91			
PTP	0.96	0.93		
ChloroPhyl a	0.76	0.73	0.76	

st. 3 で 5 : 1 程度であり、淡水赤潮発生点の表層水では流入水の1/5程度の N : P 比になる。

存在量は、DIN のうちでは $\text{NO}_3\text{-N}$ が最も高く、次いで $\text{NH}_3\text{-N}$ であり、 $\text{NO}_2\text{-N}$ が最も低い値である。

これ等の溶存態栄養塩類の垂直分布を st. 3 でみると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ では表層水が低層水よりも激減し、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DTP は表層水でやや低い傾向にあり、 $\text{NH}_3\text{-N}$ ではほぼ一定の垂直分布をするが、 $\text{NO}_2\text{-N}$ は表層水でやや高い値が得られた。

3・5 懸濁態物質の分布

クロロフィル a の各定点における表層での季節的変化を Fig. 10 に示した。そして懸濁態有機炭素 (POC)、懸濁態有機窒素 (PON)、懸濁態全リン (PTP) およびクロロフィル a の相関を Table 1 に示した。なお Table 1 は 4 月～11 月の st. 2, st. 3 の表層水の 38 データを使用した。

クロロフィル a は、st. 1 では調査期間を通して $0.5 \mu\text{g/l}$ 程度で変動も少なくほぼ一定の値であるのに対して、河川流入端の backwater 付近の st. 2 では、6 月～9 月の夏期成層期には $20 \mu\text{g/l}$ 以上であり最高 $392 \mu\text{g/l}$ を示し、st. 3 でも $368 \mu\text{g/l}$ 、st. 8 で $211 \mu\text{g/l}$ という高い値を示した。backwater 付近では淡水赤潮の発生に伴って、クロロフィル a は増加し変動も大きい。

湖心付近の st. 4, st. 5 では季節的変動も少なくほぼ一定で $10 \mu\text{g/l}$ ～ $30 \mu\text{g/l}$ の範囲にある。

POC, PON, PTP, クロロフィル a の相関係数からみて、それぞれ良い相関を示し、C : N : P 比は 28 : 8 : 1 であった。

4. 考 察

永瀬ダム湖における植物プランクトンの優占種は季節により、渦鞭毛藻→珪藻→緑藻→渦鞭毛藻および藍藻→緑藻→珪藻→渦鞭毛藻の遷移パターンを示した。

これらの植物プランクトンの中で、渦鞭毛藻の Peridinium が淡水赤潮の原因種となっており、その分類の結果は P. penardii Lemm., P. cunningtonii Lemm., P. africanum Lemm. であり、他に P. penardi-

form Lindem の出現もみられる。Peridinium 属も他の優占植物プランクトンと同様に季節的に種の遷移パターンが認められる。

一般に植物プランクトンの季節的遷移は環境因子の水温、日照等に深い関係があるといわれているが Peridinium 属でもこのことは支持される。

Peridinium 属の種の交代は水温の支配を強く受け、P. penardii の培養実験による水温の増殖効果について、渡辺⁷⁾によると10℃および15℃で 4×10^4 cells/ml の最大増殖量が得られ、20℃では増殖速度は最も良いが、最大増殖量は 1.2×10^4 cells/ml にとどまると述べ、門田等⁷⁾の報告によると15℃で 4×10^4 cells/ml、20℃で 2.9×10^4 cells/ml の最大増殖量を得ている。一方、P. penardii の出現期の永瀬ダム湖表層水温は8℃~19℃、平均13.8℃である。また、P. cunningtonii の培養実験⁹⁾では、水温が15℃~20℃で最大増殖量が得られており、また、同湖における出現期の表層水温は18℃~26℃、平均23℃である。また、P. africanum、P. cunningtonii について詳細な培養実験のデータはないが出現期の湖水温から P. africanum は P. cunningtonii と同等かそれよりもやや高い値の P. penardiform は P. penardii と P. cunningtonii との中間程度と考えられる。これ等のことから Peridinium 属の増殖適性水温は、P. penardii が10℃~15℃、P. cunningtonii および P. africanum は20℃~25℃、P. penardiform が15℃~20℃と推定され、同湖の淡水赤潮は冬型 (P. penardii) と夏型 (P. cunningtonii、P. africanum) に分けられる。

さらに生物相の遷移は、季節的スケールよりもさらに長い単位のスケールで起きる。このことは相模湖⁹⁾では1964年~1968年に P. polonicum、1964年~1969年に P. inconsciam、1973年~1979年に P. elupatiuskyi、1977年~1980年に P. penardii form と種の消長が観察されており、同様に永瀬ダム湖^{7,10)}でも1980年4月に P. penardiform、8月は P. cunningtonii¹⁰⁾、1981年8月に P. cunningtonii > P. africanum、1982年8月に P. africanum > P. cunningtonii と優占種に変化がみられることから種の交代が予想される。

溶存態栄養塩類の中で $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DTP は淡水赤潮の発生に伴って減少するが、とくに $\text{NO}_3\text{-N}$ は表層水が底層の1/30にまで減少する。P. penardii の培養実験^{6,7)}によると N 源として $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、Urea-N に増殖効果があり、 $\text{NH}_3\text{-N}$ は $\text{NO}_3\text{-N}$ 以上に効果という報告もあるが、同湖では $\text{NH}_3\text{-N}$ の減少は少なかった。このことは栄養塩類補給の流入水や底層水の $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_3\text{-N}$ の比が90:1程度で $\text{NH}_3\text{-N}$ は微量であり、濃度に著しい差があることから Peridinium

の栄養吸収の濃度選択性によるものと推察される。

永瀬ダム湖の富栄養化度をクロロフィル a 量と有賀¹¹⁾の指数からみると、河川流入端 backwater 付近では最高 $392 \mu\text{g/l}$ に達することから富栄養に相当し、一方、湖心部は $< 1 \sim 20 \mu\text{g/l}$ 程度であり中栄養湖に相当することから局部的に富栄養化した中栄養湖といえる。このことは、河川流入端では backwater によって表層水は上向流となり^{4,7)}、植物プランクトンは昼間走光性により表層に集積しており^{8,12)}、この流れに乗って plunging point に集積される。一方、湖心部では、ダム操作、発電用水の表面取水により、flashing によって植物プランクトンは排除される結果に基づくと推察される。

5. まとめ

永瀬ダム湖における植物プランクトンの優占種は季節によって遷移現象がみられ、それは渦鞭毛藻→珪藻→緑藻→渦鞭毛藻および藍藻→緑藻→珪藻の様式のパターンである。

同湖の渦鞭毛藻のほとんどが Peridinium 属で、それは P. penardii、P. cunningtonii、P. africanum、P. penardiform と同定された。それぞれの増殖適性水温により赤潮における種の優占が決定されることが明らかになった。また、Peridinium 属は年単位のスケールで種の遷移が起きる可能性が示唆された。

栄養塩類は赤潮の発生に伴って $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少が顕著である。このことからは DIN に占る $\text{NO}_3\text{-N}$ 以外の N 源が微量であることから Peridinium による栄養吸収の濃度選択性が示唆された。

クロロフィル a の分布から同湖は、流入端富栄養性的中栄養湖と推定された。

ダム湖における淡水赤潮の発生機構の解明のために、さらに、ダム湖特有の物理化学特性および生物相の生理態特性の解明の重要性が示唆された。

謝 辞

本研究にあたって御指導いただいた三重大学水産学部安達六郎助教授、高知大学農学部畑幸彦教授、西島敏隆講師、理学部今井嘉彦教授ならびに観測にご援助いただいた永瀬ダム管理事務所職員の皆様に厚く御礼申します。

—引用文献—

- 1) Hashimoto Y., T. Okaichi, L. D. Dang and T. Noguchi : Glenodin, an ichthyotoxic substance produced by a Dinoflagellate, Peridinium polonicum. Bull. Jpn. Soc. S'cient. Fish., 34 (6), pp. 528-534, 1968.
- 2) Nakamoto N. : Afresh water red tide on a water reservoir. : Jpn. Limnol., 36, No. 2, pp. 55-64, 1975.

- 3) C. Serruya, U. Pollinger : An attempt at forecasting the Peridinium bloom in Lake Kinneret (Lake Tiberias) : Mitt. Internat. Verein. Limno. 19, pp. 277-291, 1971
- 4) 畑幸彦：永瀬ダムにおける淡水赤潮発生機構ならびに毒性に関する研究，昭和52年度淡水赤潮調査研究報告書，高知県，pp. 1-14, 1978.
- 5) 海洋観測指針，日本海洋学会編，pp. 145-209, 1970.
- 6) 渡辺信：ダム湖の富栄養化と赤潮の発生に関して，国立公害研究所淡水赤潮シンポジウム，口頭発表，1982.
- 7) 淡水赤潮調査報告書，高知県，pp. 12-14, 1983.
- 8) 畑幸彦，西島敏隆：永瀬ダム湖における淡水赤潮の発生状況，環境条件ならびに原因種ペリディニウムの培養について，昭和56年度淡水赤潮調査研究報告書，高知県，pp. 3-20, 1962.
- 9) 齊藤昭二：相模湖における21年間のペリディニウム (Peridinium) 属の季節的消長，用水と廃水，Vol. 25, No. 3, pp. 246-249, 1983.
- 10) 安達六郎：V. 永瀬ダム湖における淡水赤潮 Peridinium の生物学的研究，昭和55年度淡水赤潮調査研究報告書，高知県，pp. 59-61, 1980.
- 11) 有賀祐勝：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, 1973.
- 12) T. H. Sibly, P. L. Herrgesella, A. W. Knight : Density-dependent vertical migration in the freshwater dinoflagellate Peridinium penardii (Lemm.) Lemm. fo. Carifornigum javorn. J. Pycol., 10, pp. 475-476 (1974).