

過栄養湖茨戸湖（北海道）の浮遊性藻類の 遷移に対する温度の影響

高野敬志¹・日野修次²

¹北海道立衛生研究所（060 札幌市北区北 19 条西 12 丁目）

²山形大学理学部物質生命化学科（990 山形市小白川町 1 丁目 4-12）

Takano, K. and Hino, S. 1997. Effect of temperature on the succession of planktonic algae in hypertrophic Lake Barato, Hokkaido. Jpn. J. Phycol.(Sôri) 45:89-93.

The effect of temperature on the succession of planktonic algae was examined from 1988 to 1994 in hypertrophic Lake Barato, central Hokkaido, Japan. A blue-green algal bloom appeared in the summer of 1988 and 1989 but did not appear from 1990 to 1993. Annual difference was found in monthly average temperature from May to August ($p < 0.01$). The average temperatures in May 1990 and 1991 (11.75 and 11.95 °C) were higher than those in May 1988 and 1989 (10.32 and 10.07 °C). Such high temperature might promote diatom growth and cause a lack of orthophosphate ($\text{PO}_4\text{-P}$) in May and June 1990 and 1991. The phosphorus shortage might be the reason of the absence of blue-green algal bloom in summer of 1990 and 1991. The temperatures in July and August 1993 (17.46 and 18.62 °C) were significantly lower than in other years, while the temperatures in 1994 (20.52 and 23.05 °C) were significantly higher than in other years. The summer blue-green algal bloom was observed in 1994. In these years, the occurrence or absence of blooms may have been determined by summer temperatures.

Key index words: Blue-green algal bloom-diatoms-phosphorus shortage-temperature.

¹Hokkaido Institute of Public Health, Kita-ku Kita-19 Nishi-12, Sapporo 060, Japan

²Faculty of Science, Department of Material and Biological Chemistry, Yamagata University, Kozirakawa 1-4-12, Yamagata 990, Japan

緒言

温帯地域の浅い富栄養湖における浮遊性藻類の季節的遷移は、貧栄養湖や中栄養湖と共通の春と秋のケイ藻のブルームに加えて、夏のラン藻のブルームの形成に特徴づけられる（坂本, 1976）。人間活動の影響を受けやすい湖においては、過剰な窒素、リンが湖内に流入し、ラン藻が大量発生して水の華と呼ばれる現象が起きるようになった。一方で近年、琵琶湖と霞ヶ浦において水の華を形成するラン藻種の変化、あるいは水の華の消失が観察されている（Takamura *et al.* 1992; Nakanishi *et al.* 1992）。この原因として栄養塩、特にリンと窒素の存在比の変化が推定されているが（Takamura *et al.* 1992）、日照時間などの物理的な要因の影響が大きいことも同時に示唆されている（Nakanishi *et al.* 1992）。

茨戸湖は石狩川の河口付近に位置する三日月湖であり、全国各地に存在する三日月湖と同様、非常に富栄養化が進んだ湖である。この湖においても、ラン藻による水の華の消失という現象が観察された。茨戸湖では1980年代の夏に *Microcystis aeruginosa* などのラン藻が優占種となり、湖水面に濃密な水の華が形成されていた（Hino and Tada 1985; Hino 1991, 1992）。その後、1990年以降、突然夏のラン藻の現存量が減少して水の華の形成が起こらなくなり、直接的な原因としてリン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）濃度の低下が推定された（Takano and Hino 1994）。更に、ラン藻の成長の抑制には間接的にケイ藻の現存量の増加が関連していることが示唆されたが、このような浮遊性藻類相の変化の根底には栄養塩類の問題に加えて、物理的な環境要因の影響が関わっていることも十分に考えられる。本報告では1988

年から1994年までの7年間の茨戸湖の調査に基づいて、藻類の変遷に対する決定要因を明らかにすることを目的とし、特に気温変動に注目して統計的解析を行った結果について考察した。すなわち、気温変動と、藻類の現存量または優占藻類の変化との関連、同時に栄養塩 (PO₄-P) 濃度の変動との関連について考察を行った。

材料と方法

調査地点を図1に示す。この地点は水深が3mと浅く、流入河川、海水の侵入の影響をほとんど受けない。茨戸湖の中では特にクロロフィルa (Chl-a) 濃度が高く (中村ら1975; 日野・青井1983; 橘ら1996)、藻類の個体数密度が高いことが示唆されている。試料採取は月一度の間隔で行った (1月と3月を除く)。カラム式採水器 (直径4.4cm, 長さ2m) により、表面から水深2mまでの区間を採水した。なお、ここで示すChl-a濃度、栄養塩の濃度および優占浮游藻類種の季節変化は、Takano and Hino (1994, 1996) によった。また、年ごとの月平均気温は、日本気象協会北海道支部 (1988~1994) によった。1988年から1994年までの各月の平均気温の変動は、次元分散分析により評価し、更に有意差のあった月に関してはフィッシャーの最小有意差法を用いて各年の平均気温の多群比較を試みた。

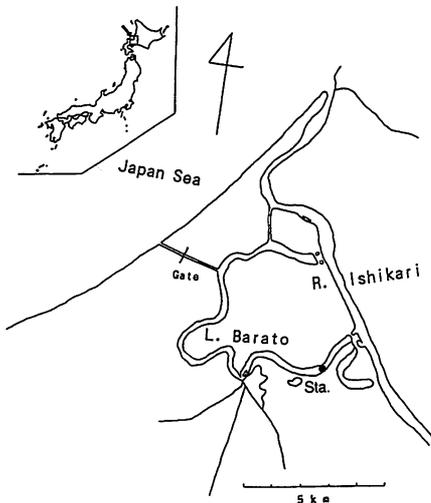


Fig. 1. Map of L. Barato and sampling station (●).

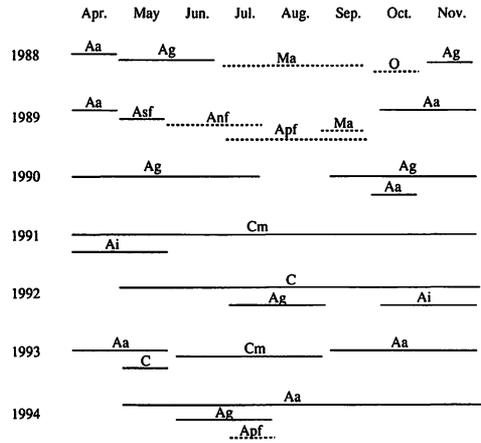


Fig. 2. Dominant planktonic algal species in L. Barato from 1988 to 1994. The dominating periods of the algae are indicated by lines. Solid lines, diatom species; broken lines, blue-green algal species. Abbreviations to species: Aa, *Auracoseira ambigua*; Ag, *Auracoseira granulata*; Ai, *Auracoseira italica*; Anf, *Anabaena flos-aquae*; Apf, *Aphanizomenon flos-aquae*; Asf, *Asterionella formosa*; Cm, *Cyclotella meneghiniana*; C, *Cyclotella* spp.; Ma, *Microcystis aeruginosa*; O, *Oscillatoria* sp..

結果および考察

1988年から1994年までの浮游性藻類の優占種の季節変化を図2に示す。1988年および1989年は、7月から9月までラン藻種の *Microcystis aeruginosa* や *Aphanizomenon flos-aquae* が優占して、湖水面に濃密な水の華の形成が認められた。1990年から1993年は、同時期のラン藻の現存量が著しく低下し、水の華の形成が認められなくなり、入れ替わってケイ藻種 (1990年は *Auracoseira granulata* (= *Melosira granulata*), 1991, 1993年は *Cyclotella meneghiniana*, 1992年は *A. granulata* と *Cyclotella* spp. が優占した。1994年の7, 8月は *Auracoseira ambigua* (= *Melosira ambigua*) と *A. granulata* が優占したと同時に、*Apha. flos-aquae* の現存量が増加して薄い水の華の形成が認められた。

4月から8月までの月平均気温の経年変動と、1988年から1994年までの各月の平均気温の差について分散分析検定を行った結果を図3に示す。図中のFの値は分散分析検定の検定統計量を表し、大きな値ほど変動が大きいことを示す。有意水準1% (p<0.01) および5

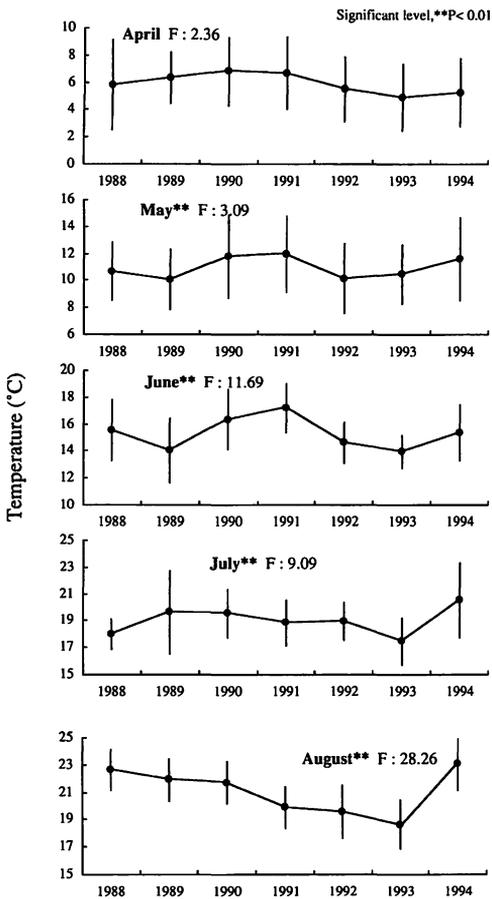


Fig. 3. Annual change in average monthly temperature from April to August. The variations in the average temperature from 1988 to 1994 were tested by one-way ANOVA for each month. The bars represent standard deviation.

% ($p < 0.05$) で検定した結果、4月を除く全ての月において年間の平均気温の値に $p < 0.01$ で有意差が認められたが、4月は $p < 0.05$ で有意差は認められなかった。F値から考えて、平均気温の年変動は特に8月が大きく、次いで6月、7月、5月の順に大きいことが明らかとなった。

フィッシャーの最小有意差法による5月から8月までの月平均気温の年別の多群比較 ($p < 0.05$) を図4に示す。1990、1991年の5、6月の平均気温は調査年の同時期のそれらと比較して、高い気温の年のグループに含まれた。1990年と1991年の5月の平均気温はそれぞ

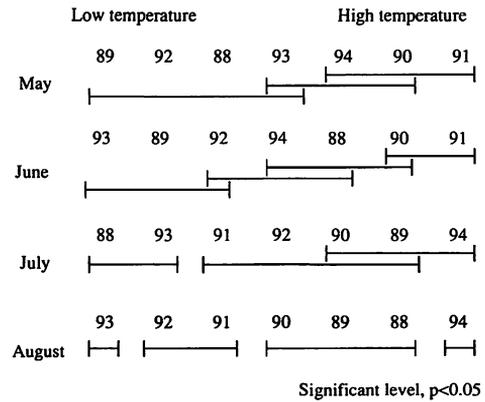


Fig. 4. Multiple comparison of the average monthly temperatures by Fisher's least significant difference. The significance among the years ($p < 0.05$) is indicated by the distinction using bars.

れ 11.75, 11.95°C であり、ラン藻による水の華が観察された 1988 年と 1989 年の 5 月の平均気温 (それぞれ 10.32, 10.07°C) よりも高く、有意差が認められた。また、1990 年の 6 月の平均気温は 17.21°C であり、1988 年 6 月の平均気温 15.50°C との比較では有意差がないが、1989 年 6 月の平均気温 14.02°C との比較では有意差が認められた。1991 年の 6 月の平均気温は 17.21°C であり、1988 年と 1989 年のそれらよりも高く、有意差が認められた。

1988 年から 1994 年までの Chl-a 濃度と PO_4 -P 濃度の季節的变化を図 5 に示す。1990 年以降の Chl-a 濃度の 4 月から 5 月への増加量は、1988, 1989 年のそれらよりも大きく (t 検定, $p < 0.001$)、同時に PO_4 -P 濃度の減少量も大きくなっている (t 検定, $p < 0.05$)。各年の 5 月の平均気温と 4 月から 5 月にかけての Chl-a 濃度の増加量の間に順位相関が認められた ($\rho = 0.87$, $n = 7$, $p < 0.05$)。一方、5 月の平均気温と 4 月から 5 月にかけての PO_4 -P 濃度の減少量の間には相関は認められなかったが、これは 5 月の PO_4 -P 濃度が 4 月の濃度に影響され、特に 1991 年と 1992 年の 4 月の PO_4 -P 濃度が低いために 4 月から 5 月にかけての減少量が過少に見積られたことに原因すると考えられる。Takano and Hino (1994) は 1990 年から 1992 年までの夏のラン藻の現存量の減少は、5、6月に著しく増加したケイ藻によって PO_4 -P が消費されたことが原因であると推定している。今回の結果から、5月に気温が高い場合には、この時期のケイ藻の成長が促進されることによって、

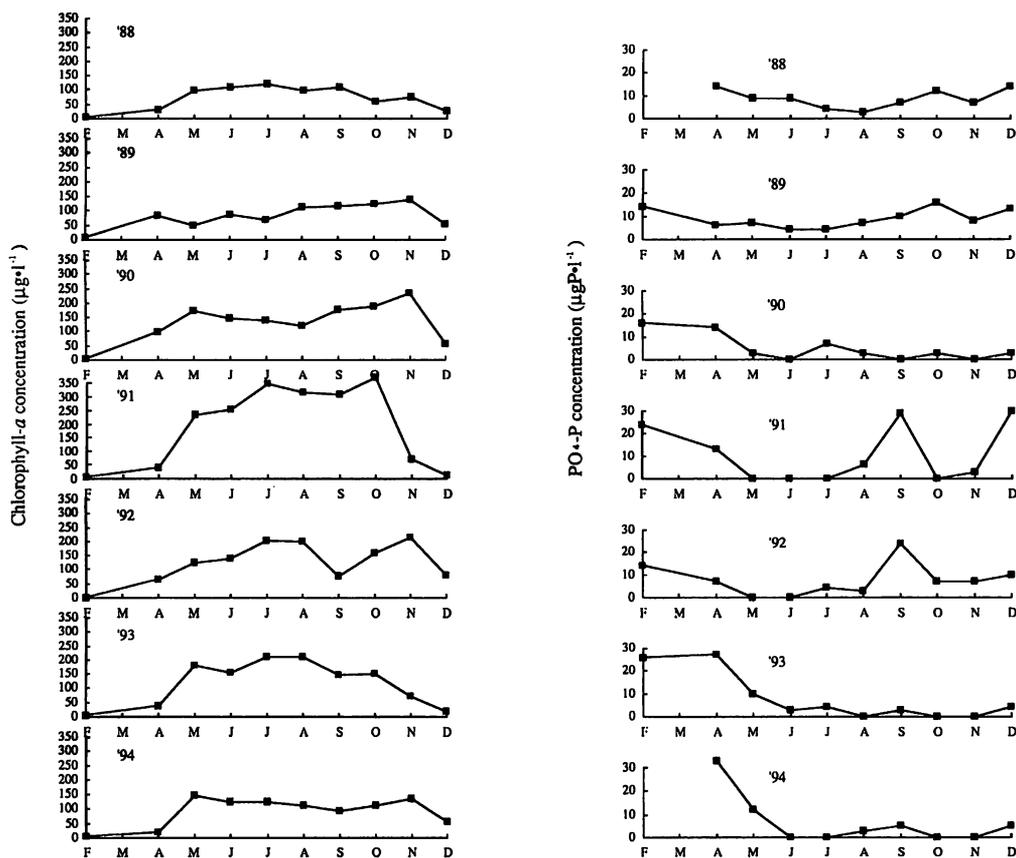


Fig. 5. Seasonal changes in chlorophyll-a and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations in L. Barato from 1988 to 1994.

$\text{PO}_4\text{-P}$ が欠乏することの主原因となり、結果的にラン藻の成長が抑制されたと推定できる。

1991年から1993年までの7、8月は、他の年と比較して気温が低くなる傾向にあった。特に1993年の平均気温はそれぞれ17.46°Cであり、1988年の7月を除いた他の年の同月の平均気温よりも低く、有意差が認められた ($p < 0.05$, 図3, 4)。一方で、1994年の7、8月の平均気温はそれぞれ20.52, 23.05°Cであり、1989, 1990年の7月を除いた他の年の同月の平均気温よりも高く、有意差が認められた ($p < 0.05$, 図3, 4)。1993年の夏のラン藻の現存量が少なかったことに対し、1994年の7月は、1980年代に出現した水の華よりも規模が小さいものであったが、*Aphanizomenon flos-aquae*による水の華が出現した。従って、このような著しい夏の気温の高低により、ラン藻の成長が大きく影響さ

れたと考えられる。

湖沼において、藻類にとって制限となる可能性のある元素は、リンの他に窒素、ケイ素が通常考えられる。茨戸湖では無機態の窒素、特に硝酸態窒素濃度が一年を通じて高く、制限要因になるとは考えられない (Hino and Tada 1985; Takano and Hino 1994)。また、ケイ素はラン藻にとって必要な栄養塩ではなく、一般の湖沼ではラン藻の成長の制限要因となるとは考えられない。また微量元素、特に鉄が藻類の成長に対して制限要因となる可能性が指摘されている。しかし、茨戸湖では、鉄濃度が高く (通常の場合、溶存鉄として数百 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 存在する。三上, 私信), またキレートとなるフミン質などの有機物が多く存在する。このような状態において藻類の成長が制限される可能性は低いと考えられる (Bayer et al. 1987)。

今回の調査において、5月の高い気温と藻類（ほとんどがケイ藻）の現存量に相関が認められた。一方、Neale *et al.* (1991) は春のケイ藻 (*Asterionella formosa*) のブルーム開始時において、ケイ藻の個体数およびChl-a濃度の増加は光の条件によって影響されることを報告している。春のケイ藻のブルーム開始時には栄養塩濃度が高く、ケイ藻の成長が栄養塩による制限をうけるとは考えられないため、光や温度の物理的な要因がケイ藻の現存量の決定に大きく影響するものと思われる。しかしながら、今回の茨戸湖の調査では、光の強さや日照時間を調べておらず、それらの藻類種への影響は評価できない。

ラン藻の水の華の形成にはケイ藻が成長しはじめる時期である4月の $PO_4\text{-P}$ 濃度も関係していると思われる。1992年の5月のChl-a濃度は1988、1989年を除いた他の年のそれらよりも低く、ケイ藻の現存量が1990、1991年ほど高くなかったことを示唆している。しかしながら、1992年の4月の $PO_4\text{-P}$ 濃度が $7\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ と低く外部からの大きな供給源がないことから、ケイ藻の利用に伴って5、6月にリンが欠乏しラン藻の成長が抑制されたと考えられる(図5)。一方、1993、1994年は4月の $PO_4\text{-P}$ 濃度がそれぞれ27、 $33\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ と他の年よりも $10\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上高く、また、5月にも $PO_4\text{-P}$ が残存していることから、ラン藻が比較的成長しやすい条件であったと思われる。このような4月の $PO_4\text{-P}$ 濃度の高低は冬期間の枯死生物の分解、および春の雪解けに伴う外界からの流入負荷に影響されると考えられるが、実際にどのような条件によって影響を受けるのかは今後の調査課題である。

引用文献

- Bayer, G. L., Gillam, A. H. and Trick, C. 1987. Iron chelation and uptake. p. 415-436. In: Fay, P. and Van Baalen, C. (eds.) *The Cyanobacteria*. Elsevier, Amsterdam.
- Hino, S. 1991. Characterization of several types of lake in Hokkaido, Japan: situations of eutrophication and phytoplankton biomass in Lake Barato, Lake Akan, and Lake Shikaribetu. In: M. Aizaki and H. Tachibana (eds.), *Limnological comparison of characteristics of water quality in Chinese and Japanese lakes*, p. 123-140. Proc. Symp. Hokkaido Univ. "Limnological Comparison of Chinese and Japanese Eutrophic Lakes".
- Hino, S. 1992. The physiological state of the phytoplankton community of three types of lakes as estimated by its adenylate energy charge. *Hydrobiologia*. 230: 179-192.
- 日野修次・青井孝夫 1983. 茨戸川の水質変化について—特に1978年～1982年の水質変化—。北海道公害防止研究所報. 10: 142-146.
- Hino, S. and Tada, S. 1985. Seasonal changes of nutrients, chlorophyll-a, and organic matter concentrations in highly eutrophic Lake Barato, Japan. *Jpn. J. Limnol.* 46: 268-278.
- 中村俊男・安藤和夫・青井孝夫 1975. 富栄養化に関する研究2. 茨戸川の富栄養化と藻類について。北海道公害防止研究所報. 1: 157-170.
- Nakanishi N., Miyajima, T., Nakano, S. and Tezuka, Y. 1992. Studies on occurrence of *Anabaena* and *Microcystis* blooms in Akanoi Bay of the south basin of Lake Biwa, with special attention to nutrient levels. *Ann. Rept. Interdiscipl. Res. Inst. Environ. Sci.* 11: 67-75.
- Neale, P. J., Talling, J. F., Heaney, S. I., Reynolds, C. S. and Lund, J. W. G. 1991. Log time series from the English Lake District: Irradiance-dependent phytoplankton dynamics during the spring maximum. *Limnol. Oceanogr.* 36: 751-760.
- 日本気象協会北海道支部. 1988～1994. 北海道の気象. No. 4～No. 8.
- 坂本充. 1976. 生態遷移II. 共立出版, 東京.
- 橋治国・吉田邦伸・井上隆信. 1996. 都市近郊湖沼(茨戸湖)における栄養塩の形態と藻類増殖. 水環境学会誌 19: 132-139.
- Takamura, N., Otsuki, A., Aizaki, M. and Nojiri, Y. 1992. Phytoplankton species shift accompanied by transition from nitrogen dependence to phosphorus dependence of primary production in Lake Kasumigaura, Japan. *Arch. Hydrobiol.* 124: 129-148.
- Takano, K. and Hino, S. 1994. What caused the summer replacement of dominant planktonic algae in Lake Barato? *Jpn. J. Limnol.* 55: 279-286.
- Takano, K. and Hino, S. 1996. The effect of silicon concentration on replacement of dominant diatom species in a silicate-rich lake. *Jpn. J. Limnol.* 57: 153-162.

(Received Jun. 12 1996, Accepted Mar. 31 1997)

