内湖における窒素・リン浄化に及ぼす Chl. a の影響

Influence of Chl.a Concentration on the Purification of Nitrogen and Phosphorus in a Lagoon

入江達之¹⁾ 金木亮一¹⁾ 古川政行¹⁾

Tatsuyuki IRIE Ryoichi KANEKI Masayuki FURUKAWA

¹⁾ 滋賀県立大学環境科学部

School of Environmental Science, University of Shiga Prefecture

琵琶湖周辺の内湖では水質浄化能を利用して、農地など面源からの汚濁負荷を削減することが期待されている。しかしながら、長年に亘って維持管理が行われていない内湖では、浄化能の低下が観測されている。その原因としては植物プランクトンの内部生産や底泥からの栄養塩の溶出が考えられる。そこで、内湖での Chl.a の濃度変動を測定し、それが SS、COD、窒素、リンなどの水質に及ぼす影響について検討した。

Chl.a 濃度の上昇は、SS と COD の汚濁を進行させるが、窒素とリンについては浄化を促す傾向が見られた。底泥からの溶出実験を行った結果、底泥からの窒素・リン溶出量は内湖への流入負荷量の 3% 程度に留まった。このことから、Chl. a 濃度の増加には底泥からの溶出よりも流入負荷の影響の方が大きいことが確認された。

キーワード: クロロフィル a, 内湖, 浄化, 底泥

Generally in lagoons around Lake Biwa, a reduction of loads from non-point source was expected. The purification ratio of the Noda lagoon, however, recently failed for the following reasons: plankton production and efflux of nitrogen and phosphorus from the sediment.

In this study, Chl.a concentration in the Noda lagoon is measured to investigate the relationship and influence of SS, COD, nitrogen and phosphorus.

It is shown that SS and COD increase as Chl.a concentration rises, while nitrogen and phosphorus tend to decrease. According to the experiment of efflux from the sediment, the efflux loads of nitrogen and phosphorus are less than the inflow loads, then the inflow loads greatly influence Chl. a concentration.

Key words: Chlorophyll-a, Lagoon, Purification, Sediment

はじめに

内湖とは琵琶湖と水路で結ばれている沼状の水域の呼称である。近年、水質浄化機能の面から内湖に対する関心が高まっており、内湖での汚濁負荷削減効果について数多く報告されている（里内・菊地，1983；大久保，1998；大久保ほか，2000；金木ほか，2003；金木・山本，2004）。滋賀県では、琵琶湖周辺にある内湖の水質浄化機能を利用して、農地から流出した汚濁負荷を削減することが試みられている。例えば彦根市の野田沼においては、1989～92の4年間に亘る内湖等周辺環境保全事業によって、底泥の浚渫やヨシ・マコモなど水生植物の生息環境整備、エアレーションのための浮遊式噴水施設の建設などが行われている。

しかしながら、最近では内湖の浄化機能が低下し、富栄養化、高濃度の COD の流出などが観測されるようになった。一般に、富栄養化した内湾や湖沼で観測される高濃度の COD は、陸起源の汚濁物質による他生性のものと植物プランクトンの増殖による自生性のものとがあり、後者が浄化機能に大きな影響を与えていることが、よく知られるようになってきた（大道・金木2005）。

そこで、植物プランクトンの指標となる Chl. a 濃度の変動が、内湖での SS・COD・窒素・リンの濃度にどのような影響を与えているかについて調査・検討することにした。調査期間については、植物プランクトンが夏期に異常増殖していることから7月下旬～8月下旬に設定した。調査地とした野田沼内湖は浚渫から10年以上経過している。富栄養化した

1) 〒522-8533 彦根市八坂町 Hikone, Shiga, 522-8533, Japan

湖沼における浮遊物質の沈殿速度は $5 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 程度(細見, 1993)にのぼるといわれており, 内湖の底には多くの泥が堆積している。堆積した底泥は酸素の消費や有機物質の溶出など水質にさまざまな影響を及ぼす(前田ほか, 1996)ことから, 底泥からの栄養塩(窒素, リン)の溶出量についても測定したので, その結果を報告する。

・調査方法

1. 調査地の概要

調査地は滋賀県彦根市中部に位置する野田沼で, 琵琶湖から約500 m 内陸にある内湖である。水面積約6.6 ha, 貯水量約10万 m^3 , 平均水位1.5 m, 最大貯水量17万 m^3 , 平均滞留時間は7日程度である。集水面積は1,380 haで, そのうち水田が58%, 畑地が20%, 市街地が22%を占めている。

野田沼への流入河川は安食川と雲川であり, 安食川は沼へ流入する直前に分岐して一部が直接琵琶湖へ流出している。野田沼には, その他2つの農業排水路からも流入しているが, 安食川と雲川に比べて流量がかなり少なかったため, ここでは無視した。一方, 野田沼からの流出は江面川と循環灌漑取水口(以下, 取水口という)からの2ヶ所である。取水口から流出した水は彦根中部揚水機場の吸水槽で琵琶湖の水と混合された後, ポンプアップされて灌漑用水として再利用されている。

2. 調査項目

1) 流量

野田沼への流入地点2カ所(安食川と雲川)および野田沼からの流出地点2カ所(江面川と取水口)において流速, 流水幅, 水深を実測して流量を求めた(図-1)。なお, 安食川, 雲川, 江面川は放物線断面であることから, $2/3$ を掛けて流積とした。一方, 取水口には角落しが設置されているため, 角落し上部で水深および流速を測定した。

2) 水質

流量測定時にDO, 水温, 透視度を測定するとともに, サンプルを採水ビン(500 mL)に採水して実験室へ持ち帰りSS, T-COD_{Mn}, D-COD_{Mn}, T-N, D-N, T-P, D-P, pH, ECをJISに準拠して, Chl. aをユネスコ法で測定した。なお, 懸濁態(P-)の濃度は全量(T-)から溶存態(D-)を差し引いて求めた。採水は2004年7月27日~8月28日までの1ヶ月間に亘って毎日行った。ただし, 8月17日と21日は

図-1 採水・採泥地点の概要。

Fig. 1 Sampling stations in the Noda lagoon.

採水できなかったため, 水量はH-Q式により, 負荷量はL-Q式を用いて算出した。

3) 底泥

自重式コアサンプラーを用いて, 野田沼内湖2ヶ所で不攪乱柱状泥10 cmを各々6本のアクリル円筒(内径52 mm, L300 mm)に採取し, 各々1~6日間の溶出量の測定に供した。採取後1日静置して上水を除去した後, 内湖の水を静かに注入して15 cmの湛水深とした。ゴム栓で密閉後, $25 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温器内に静置した。底泥上層水の中央部の水を20 mL採取し, 窒素・リン濃度を測定した。

一方, 底泥中のT-N・T-P含有量を測定するため, エクマンバージ型採泥器で採取した底泥を実験室に持ち帰って風乾し, 2 mmのふるいを通過したものをすり鉢で粉碎して試料とした。底泥中のT-N含有量についてはC/Nコーダーで, T-P含有量については過塩素酸分解法で測定した。

・結果と考察

1. 流量の変動

図-2に, 調査期間中の流量の変動を示した。各調査地点の平均流量は, 安食川0.23 m^3/s , 雲川0.22 m^3/s , 江面川0.39 m^3/s , 取水口0.015 m^3/s であった。流入量の平均は0.44 m^3/s , 流出量の平均は0.41 m^3/s で, 晴天日は流入量が流出量を上回り, 降雨日には流出量が流入量を上回っていた。

8月5日の値が突出しているが53.5 mmの降雨の影響である。その他にも8月15日に21 mm, 8月17日に23 mmの降雨があり, 流出河川である江面川の流量が他の3地点よりもやや多くなっている。野田沼は水がよどみやすい部分と短絡流の部分に分かれており, 揚水機場稼働時には前者に流入水の4

図 - 2 各採水地点の流量 (2004) .

Fig. 2 Discharge of sampling stations.

割程度、後者に6割程度が流れている。一方、降雨時や非灌漑期など揚水機場が稼動していない時には、後者がおよそ7～8割に増加する(古川・金木, 2004)。このため、降雨時の江面川では短絡流の影響が強くなり、流量の増加につながったものと推察される。

2. 水質の変動

図 - 3 に Chl. a, SS, T-COD, T-N, T-P の平均流入・流出濃度の変動状況を示した。COD については植物プランクトンが主に懸濁態であることから

図 - 3 流入・流出水の水質 (2004) .

Fig. 3 Water quality of inflow and outflow water.

P-COD を、窒素とリンについては水生植物や植物プランクトンが溶存態の栄養塩を吸収することから D-N と D-P を併せて表示した。ここで平均流入濃度とは、安食川と雲川の負荷量の合計（流入負荷量）を合計流入水量で割ったものであり、平均流出濃度は江面川と取水口の負荷量の合計（流出負荷量）を合計流出水量で割ったものである。なお、いずれの水質項目も 8 月 5 日に高い値を示しているが、これは降雨の影響である。

Chl. a の流入濃度と流出濃度を比較すると、すべて流出濃度が流入濃度を上回っている。これは、内湖において植物プランクトンが増殖した結果である。8 月の上旬と中旬に濃度が減少しているのは、動物プランクトンによる捕食や降雨による流出などの影響と考えられる。その後 Chl. a 濃度が再び上昇しているのは、8 月 5 日に 53.5 mm、15 日に 21 mm、17 日に 23 mm の降雨があり、安食川や雲川から窒素やリンなどの栄養塩が供給されたためと推察される。

SS 濃度は、農業用水基準の 100 mg/L を大きく下回っているものの、流出濃度が流入濃度を上回っている日が多く見られる。流出水の色が緑色系であったことから、植物プランクトンの増殖による影響であると推測される。8 月 5 日の値が突出しているのは、上述した降雨の影響が大きく表れたためである。

T-COD 濃度はほとんどの日で農業用水基準の 6 mg/L を下回っているものの、平均流出濃度（4.5 mg/L）は平均流入濃度（3.2 mg/L）の 1.5 倍弱に増加しており、内部生産によって汚濁していることが伺われる。なお、流出水中の P-COD 濃度は概ね Chl. a 濃度に対応した変化を示している。

T-N・T-P 濃度は SS や COD とは異なり、ほとんどの日で流入濃度が流出濃度を上回っている。これは、水生植物や植物プランクトンが栄養分として D-N や D-P を吸収しているためであると考えられる。D-N・D-P 濃度は、Chl. a 濃度の上昇に伴って下降し、Chl. a 濃度の下降に伴って上昇する傾向があり、SS や COD とは逆の対応を見せている。

3. Chl. a 濃度と SS・COD・窒素・リン濃度の関係

Chl. a と SS・COD・窒素・リン濃度の関係を図 - 4 に示した。なお、図中には流出濃度から流入濃度を差し引いた値を Chl. a, SS, P-COD, D-N, D-P と表示している。

Chl. a と SS の関係は正の相関になっており、Chl. a が上昇すると SS も上昇している。これは、

図 - 4 Chl.a と SS・P-COD・D-N・D-P の関係。

Fig. 4 Relationship between Chl.a and SS, P-COD, D-N, D-P.

野田沼内で増殖した植物プランクトンによる影響であり、流出水中のSSの大半は懸濁態の植物プランクトンであると考えられる。湖沼に流入した浮遊物質は沈殿などによって浄化されるのが一般的であるが、植物プランクトンが増殖してSSを増加させているのは、富栄養化した野田沼内湖の特徴といえる。

Chl. a と P-COD との関係も SS と同様で、Chl. a が上昇すると P-COD も上昇している。

一方、Chl. a と D-N、D-P との関係は、SS や P-COD とは異なり、Chl. a が上昇すると D-N と D-P は下降している。その理由としては、植物プランクトンが窒素やリンを栄養分として吸収したためと考えられる。

以上のことから、Chl. a 値が増加、つまり植物プランクトンの内部生産がより一層進めば、SS や COD の汚濁量は増加するものの、窒素やリンに関してはより多くの浄化量が見込まれるようになるものと推察される。

4. 晴天時の内湖の浄化能

降雨の影響のある場合には流入負荷量が大幅に変動することから、ここでは降雨の影響を受けない場合(8/5, 15, 17以外)の浄化量・浄化率を検討することにした。降雨時の浄化量は総雨量、降雨強度、降雨継続時間、降雨前の無降雨継続日数などが関係すると考えられることから、今後もデータの収集を図り、検討を行ってゆく予定である。

Chl. a, SS, T-COD, D-COD, P-COD, T-N, D-N, P-N, T-P, D-P, P-P の各濃度に流量を掛けて負荷量を求め、内湖による物質浄化量と物質浄化率を次式より算出し、その結果を表-1に示した。

表-1 晴天時における水質の浄化能(2004.7.27~8.28)。

Table 1 Amounts and ratio of water purification except rainy days.

	流入負荷量(kg)	流出負荷量(kg)	浄化量(kg)	浄化率(%)
Chl. a	3.9	18	-14	-360
SS	11,000	10,000	400	3.7
T-COD	3,100	3,600	-510	-17
D-COD	2,200	2,300	-49	-2.2
P-COD	860	1,300	-470	-54
T-N	1,600	1,200	370	24
D-N	1,400	950	420	31
P-N	180	230	-53	-30
T-P	140	100	34	25
D-P	74	39	36	48
P-P	63	64	-1.3	-2.0

物質浄化量(kg)=

$$\text{流入負荷量} - \text{流出負荷量} \quad (1)$$

物質浄化率(%)=

$$\text{物質浄化量} \div \text{流入負荷量} \times 100 \quad (2)$$

ここに、流入負荷量は安食川と雲川の負荷量の合計、流出負荷量は江面川と取水口の負荷量の合計である。

表-1よりT-N, D-N, T-P, D-Pについては浄化されていることがわかる。T-NとT-Pが浄化を示しているのはD-NとD-Pの浄化によるものである。植物プランクトンはD-NやD-Pを吸収・浄化しているが、吸収された窒素やリンは植物プランクトンに取り込まれてP-NとP-Pになるため、P-NとP-Pは増加している。

植物プランクトン中のChl. aは藻類種やその活性等によって大きく変化するが、文献値(宗宮・津野2003, 農業土木学会2002)を参考に、Chl. a 1 µg/L当たりSSでは100, T-CODでは50, T-N10, T-P 1 µg/Lに相当すると仮定して、全流出負荷量のうちChl. aが占める割合を算出し、表-2に示した。流出負荷中にはChl. aの形でSS, T-COD, T-N, T-Pが2割前後含まれていることが分かる。

5. 底泥からの栄養塩の溶出

細見(1993)によれば、底泥中の窒素含有量は0.2~20 mg/g・soilの範囲内にあつて5 mg/g・soilが代表的な値であり、リン濃度は0.7~10 mg/g・soilの範囲内にあつて1.2 mg/g・soilが代表的な値とされている。野田沼内湖の底泥中の窒素含有量は5.7 mg/g・soilで代表的な値に近かったが、リン含有量は3.0 mg/g・soilであり代表的な値よりも2.5倍高かった。したがって、野田沼内湖の底泥は、窒素に比べてリンを比較的多く含んでいることが伺える。

底泥からの栄養塩の溶出実験結果を図-5に示した。なお、採水時に上層水のDOを測定したところ、いずれも2 mg/L以下であった。図中の回帰直線の勾配が1日あたりの濃度増加を示している。溶出量

表-2 流出負荷量中にChl. aが占める割合。

Table 2 Percentage of the Chl. a load to the outflow load.

	換算値(kg)	流出負荷量(kg)	割合(%)
SS	1,800	10,000	17
T-COD	900	3,600	25
T-N	180	1,200	15
T-P	18	100	17

図 - 5 溶出に伴う窒素・リン濃度の変動。
Fig.5 Changes of nitrogen and phosphorus concentration with efflux from sediment.

は上層水の濃度増加量と、上層水の容量、底泥の表面積より求めた。内湖 2 ケ所の平均溶出量は、窒素で $22 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 、リンでは $2.5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ となった。細見ら (1984) によると湖の底泥からは、 $\text{NH}_4\text{-N}$ $28 \sim 50$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ $3 \sim 6.4 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ が溶出していた。高木ら (1998) は博多湾の底泥からの溶出量として、 $\text{NH}_4\text{-N}$ $37 \sim 94$ 、 T-P $9 \sim 14 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ の値を得ている。浮田ら (1975) は底泥の $\text{NH}_4\text{-N}$ が T-N の $76 \sim 100\%$ を占め、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は T-P の $68 \sim 96\%$ を占めていることを示している。これらのことを勘案すると、今回の測定値は従来の値よりやや小さ目ではあるが、オーダーとしては差はないものといえる。

野田沼全体からの溶出量を推定すると、調査期間 30 日間では窒素で 43 kg 、リン 4.9 kg になる。この量は内湖への流入負荷量に対して、窒素・リンともに 3% 程度にすぎない値であった (表 - 3)。したがって、内湖の浄化能を向上させるためには、流入負荷量のコントロールが必要不可欠となろう。

次に、内湖を浚渫して植物プランクトンの内部生産を抑制する場合の影響を検討してみた。浚渫によって底泥からの栄養塩の溶出がゼロになったと仮

表 - 3 流入負荷量および底泥からの溶出量。

Table 3 The inflow load and the efflux load from sediment.

	流入負荷量(kg)	溶出量(kg)
T-N	1,600	43
T-P	140	4.9

定し、藻類の増殖がどの程度抑制できるか、古川・金木 (2004) が野田沼に適用した生態系モデルを用いて、数値実験を行った。その結果、野田沼における藻類の増殖には、底泥からの溶出はほとんど影響を及ぼしていないことが確認された。

・おわりに

内湖における Chl. a と水質浄化能の関係を調査し、次のことを明らかにした。

Chl. a の増加は、SS と T-COD の汚濁負荷を増加させるが、T-N と T-P の浄化能向上に寄与していた。

Chl. a の増加には、底泥からの窒素・リンの溶出の影響は少なく、流入負荷量の方が大きな影響を及ぼしていた。

Chl. a の増加は T-N と T-P に対して浄化効果があった。したがって、例えば内湖を 2 つのエリアに分け、はじめのエリアでは植物プランクトンを増殖させて T-N と T-P を浄化し、次のエリアでは高濃度の SS と T-COD のもととなる植物プランクトンを動物プランクトンに捕食させたり、沈殿除去する。今後、このような二段階浄化システムなどの可能性について、検討してゆくことが必要となろう。

引用文献

- 古川政行・金木亮一 (2004): 内湖を対象とした水質モデルの開発とその適用, 農土論集, **232**, pp. 67-73.
- 細見正明・岡田光正・八木修身・山根敦子・須藤隆一 (1984): 底泥からの窒素及びリンの溶出調査, 国立公害研報, **56**, pp. 75-101.
- 細見正明 (1993): 内部負荷としての底泥の役割とその削減対策, 水, **35**(2), pp. 92-95.
- 金木亮一・中村正久・泉峰一・姫野靖彦 (2003): 内湖と循環灌漑による水質浄化, 農土誌, **71**(9), pp. 31-36.
- 金木亮一・山本愛子 (2004): 降雨流出時の内湖の水

- 質浄化能, 農土論集, 231, pp. 19-24.
- 前田 高広・鈴木 正彦・大井 節男・佐々木 洋二 (1996): 底泥が水質に与える影響, 農土誌, 64 (4), pp. 33-38.
- 農業土木学会 (2002): 児島湖沿岸農地防災事業児島湾周辺地域基幹土地改良施設整備調査検討委託業務報告書, p. 8(32).
- 大久保 卓也 (1998): ため池, 内湖を利用した水質浄化, 用水と廃水, 40(10), pp. 35-45.
- 大久保 卓也・辻村 茂男・須戸 幹 (2000): 内湖の水質浄化機能 - 安雲川町エカイ沼での調査結果 -, 琵琶湖研究所所報, 18, pp. 36-48.
- 大道 暢之・金木 亮一 (2005): 早崎内湖ピオトープの水質および物質収支, 水文・水資源学会誌, 18(2), pp. 97-105.
- 里内 勝・菊地 憲次 (1983): 湖沼の自浄作用 - 曾根沼を例として -, 用水と廃水, 25(2), pp. 28-33.
- 宗宮 功・津野 洋 (2003): 水環境基礎科学, コロナ社, p. 149-153.
- 高木 雅子・村瀬 茂世・寺田 和光・松原 英隆 (1998): 博多湾底質からの窒素, リン溶出速度の簡易測定方法の開発, 用水と廃水, 40(6), pp. 19-25.
- 浮田 正夫・中西 弘・天谷 満徳 (1975): 底泥よりのN, P溶出量推定における種々の問題点について(), 用水と廃水, 17(10), pp. 21-34.
- (受付: 2005年4月11日, 受理: 2005年8月19日)