猪鼻湖における夏期密度成層形成期のリンの輸送過程に関する研究

A Study on Phosphorus Transport Process in Inohana Lake under the Density Stratification during Summer

陸 眞姫¹•青木伸一²•奥村和皓³•中尾知史⁴

Jin-Hee YUK, Shin-ichi AOKI, Kazuaki OKUMURA and Satoshi NAKAO

An intensive field measurement was carried out in Inohana and Hamana Lakes including a narrow channel to investigate the phosphorus transport process in Inohana Lake during summer. Inohana Lake has a two-layer structure of the phosphorus distribution: the particulate phosphors (PP) in the surface layer, while the phosphate phosphorus (PO_4 -P) in the bottom layer. The phosphorus inflow from Hamana Lake through the bottom layer is dominant over the riverine loading and Inohana Lake becomes a sink of phosphorus from Hamana Lake. The settling and release fluxes of phosphorus are larger than the input and output of the phosphorus in Inohana Lake. The phosphorus budget suggests that the phosphorus accumulates in the sediment during summer.

1. はじめに

猪鼻湖は浜名湖の奥に位置し、本湖と長さ200m、最 小幅約75mの狭い水路で連結されている枝湖の1つであ る (図-1). 夏の密度成層形成期には,底層に大規模な 貧酸素水塊が発生して湖の水質悪化を招いている(青木 ら、2001,2002)、湖水の水質改善対策としては、主に流 入負荷量の削減が行われているが、計画的に改善してい くためには物質収支分析に基づく定量的な検討と改善シ ナリオの構築が求められる. 著者らは, このような視点 からこれまで種々の検討を行ってきた.(青木ら,2004; 陸ら, 2006, 2007; Yuk and Aoki, 2008; Yuk, 2008). こ れらの研究により、以下のような点が明らかになってい る.(1)夏期に形成される貧酸素水塊の規模は、淡水流 入量や気象擾乱によって決まる密度成層の強さとの関係 が大きい. (2)猪鼻湖の1次生産は水域のリン濃度との相 関が高い. (3)猪鼻湖と浜名湖とを結ぶ狭水路を通して の湖水交換は主として風によって誘起されており、平均 流として、表層で浜名湖側へ流出、中底層で猪鼻湖側へ 流入する流れが卓越する.(4)水路での夏期の平均的な 交換流量は猪鼻湖への淡水流入量の数倍程度である。(5) 水路での平均流の2層構造に対応して、リンの形態およ び濃度も表層と中底層で異なる2層構造を有している. その結果、水路底層を通して浜名湖から猪鼻湖に溶存態 リンが流入するメカニズムが存在する.(6)湖内の鉛直

1	博(工)	豊橋技術科学大学未来技術流動研究セ ンター研究員
2 正 会 員	工博	豊橋技術科学大学教授建設工学系
3		豊橋技術科学大学大学院建設工学専攻
4		豊橋技術科学大学元学生建設工学課程

混合ついても風の影響が大きく,平均的には底層から表 層へのリンの供給が卓越している.(7)塩分をトレーサー とした簡易なボックスモデルにより夏期の平均流量の推 定が可能である.

本研究は、これまでの研究を発展させ、水路内での流 れの連続観測データと水路・湖内多点での高頻度な水質 観測データをもとに、夏期の平均的な水およびリンの収 支を定量的に明らかにし、夏期のリンの輸送過程につい て論じたものである.



図-1 猪鼻湖と観測地点:■:CTDと採水,●:ADCP,▲: 採水(右側は釣橋川,左側は宇利山川)

2. 現地観測

猪鼻湖と浜名湖の湖水交換流量を調べるために,水路 北端(猪鼻湖の入口,水深約15.5m; 図-1の St.1)の湖 底に ADCP(Nortek 社製 Aquadopp-1MHz)を設置し, 流速の鉛直プロファイルの連続観測行った. 観測期間は 2007年6月29日~9月4日,観測間隔は20分,鉛直方向分 割幅は1m である.また,鉛直混合特性を明らかにする ために,浜名湖と水路を含む計13地点で CTD 観測(ア

レック電子製, Compact-CTD) により塩分・水温の定 期的な観測(約1週間ごと)を実施した。さらに、リン の輸送特性を明らかにするために,水路(St.1),浜名湖 内(St.3),猪鼻湖内(St.7)および釣橋川下流(▲)で 採水(湖内では表層から水底まで50cmごと)を行い. リン濃度を求めた. さらに, 猪鼻湖内にセディメントト ラップ(筒長:25cm, 口径:5cmのアクリルパイプ) を湖心付近(St.8)の水底から2m および3m の位置にそ れぞれ2本設置して、約1週間間隔でサンプルを採取した。 設置期間中セディメントトラップに捕捉された堆積物の TP 濃度を求め、それに堆積物の体積を乗じてリンの総 量を求めた. リンの総量をセディメントトラップの面積 と設置期間で割ることで平均的なリンの沈降フラックス を求めた.リンの分析は、DP(溶存態リン)とTP(全 リン)はペルオキソ二硫酸カリウム分解法で、PO₄-P (リン酸態リン) はモリブデン青法で吸光光度法より分 析した.

3. 観測結果

(1) 河川水のリン濃度

図-2は、釣橋川の支流2地点(tributary1:釣橋川, tributary2:字利山川)で採水した水のリン濃度を時系列 で示したものである.図中には降雨量も一緒に示してい る.これより、いずれの支流においても、リンは高濃度 に存在することがわかった.また、PO₄-Pは両支流とも 同程度の濃度となっており、その時間変動も似ているが、 TPは2地点で濃度が大きく異なる場合が見られた.これ は、懸濁態リンの流出特性が異なるためと思われる.流 入河川で採水した水のリン濃度は、TPで0.05~0.3mg/L, PO₄-Pで0.05~0.2mg/L 程度であった.ただし、降雨と リン濃度の関係は明確ではなかった.



(2) リン濃度の鉛直分布

図-3は、2007年6月末から8月初旬までの期間の全デー タを平均して求めた、浜名湖(St.3)、水路(St.1)およ び猪鼻湖湖心(St.7)でのTP, PO₄-P及びDO 濃度の鉛 直分布を示したものである.ただし、St.7での値につい ては、データの不良から2回の平均値を示す.水路およ び猪鼻湖内でのリン濃度の鉛直分布は、密度成層に対応 して明確な2層構造となっており、底層でPO₄-Pの濃度 が非常に高く、表層では懸濁態リン(TPとPO4-Pの差) の濃度が高いことがわかった。またこのリンの形態が大 きく変化する水深は、溶存酸素濃度が急激に低下する水 深とほぼ一致していることがわかった。これより、夏期 の貧酸素水塊形成時には底泥からのリンの溶出が顕著で あることが示唆された。また、浜名湖(St.3)でのリン濃 度については、TP、PO4-Pとも表層は低く、底層で高 い濃度を示しているが、PO4-PのTPに占める割合が高 いことがわかった。観測期間を通して、浜名湖、水路お よび猪鼻湖湖心でのTPの表層(0~-2m)と底層(-2m 以深)での平均濃度は、浜名湖ではそれぞれ0.06(表層) 及び0.14(底層)mg/l、水路では0.08及び0.16mg/l、猪鼻 湖湖心では0.09及び0.13mg/l であった。

(3) リンの沈降フラックス

図-4はセディメントトラップ(サンプル期間約1週間, 計4回)によって求めたリンの沈降フラックスを示した ものである.図では、トラップの設置水深(湖底から2m および3m)別に結果を示している.これより、リンの 沈降フラックスは設置水深に関係なく26~52mg/m²/day の範囲で変動しており、密度躍層(水底から4m 付近) の下ではリンの沈降フラックスはほぼ一様であることが 類推された.図-5は、沈降フラックスとクロロフィル濃 度の関係を示したものであるが、両者には正の相関が認 められる.ここに、クロロフィル濃度は、St.8で観測さ れた湖水面からセディメントトラップの位置までのクロ ロフィル濃度の平均値である.以上より、セディメント トラップ調査によって懸濁態リンの沈降フラックスを定 量化することができた.



図-3 浜名湖 (St.3),水路 (St.1),湖心 (St.7)での TP (左) PO₄-P (中)及び DO (右)濃度の鉛直分布





図─5 リンの沈降フラックスと表層クロロフィル濃度の関係

4. ボックスモデルによる収支の検討

ボックスモデルは、物質移動に関わる物理・化学及び 生物学的全過程を1つのボックス内で起こる反応として ボックス間の物質輸送を解析するものである.(Robson et al., 2008; Shen et al., 2008)本研究で対象とするリン の挙動を把握するためには物質を運ぶ媒体(水)の収支 分析をまず行わなければならない.そこで,淡水流入と 塩分収支から平均流量(水フラックス)を算出し,その 妥当性を観測結果と比較して確認した.さらに,この流 量に現地で観測したリン濃度を乗じることでリンのフラッ クスを算定し,その収支を推定した.

(1) 水収支

水収支については、水と塩分の質量保存に基づき定常 状態を仮定して解析した.流域の流出率を考慮した降雨 量及び用水供給量の和として与えられる水域への淡水流 入量の推定は重要な要素であるが、本研究では単に淡水 流入量は全降雨量に等しいと仮定した.猪鼻湖流域の降 雨量データは釣橋川河口から北西方向に約1 km の距離 に位置する静岡県果樹研究センターでの観測データを用 い、流域面積は猪鼻湖に流入する主要4河川(図-6参照) の流域面積の和とした(静岡県, 2005).ここに、西神 田川の流域面積は6.0 km², 宇志川は1.84 km²,都筑大谷 川は10.17 km², 釣橋川は52 km² である.なお、本研究 では湖面からの蒸発および地下水としての淡水流入は無 視した.

今回用いたボックスモデルは陸ら(2007)のものを改 善したものである.2007年もこれまでの観測結果(青木 ら,2001,2002,2004;陸ら,2006,2007)と同じく,猪 鼻湖は夏期に強い密度成層が形成されており,猪鼻湖で は,水深0~2 m,浜名湖(St.3)では水深3 m付近まで に塩分,密度の強い躍層が存在していた.そこで,湖内 と水路は水深2 m,浜名湖側は水深3 mを境界として上 下2層に分け,平面的にも湖北側(St.13)から浜名湖側 (St.3)までをCTDの観測地点を考慮して7個のボック スに分けて,上下2層の全14個のボックスに分割した (図~6).これは陸ら(2007)と同じボックス分割方法で ある.ただし,河川流入量(流域流出量)については, 陸ら(2007)は河川流量の最も多い釣橋川のみを考えて 全流量がボックス1(B1)へ流入するとして計算したが, 今回は4箇所の河川からの流入を別々に考慮した.



図-6 ボックスモデルの概念図:平面図(上)と断面図(下)

ボックス間の水の収支(フロー,Q_uはボックスiから ボックスjへの流量)の算定については,実測塩分を用 いて,水と塩分の保存式をもとに,鉛直方向には移流と 拡散を,水平方向には移流のみを考慮した(Yuk and Aoki, 2008).計算方法は陸ら(2007)と同様であるが, ボックス5~6の計算まで河川流入項を追加している.ボッ クスモデルの計算は,約1週間ごとに得た CTD の観測結 果を用いて,各観測インターバルごとに行った.このと き,ボックス内の塩分は,連続する2回の観測を平均し たものとし,河川流入量は計算対象期間中の降雨量と流 域面積から求めた.これより,ほぼ1週間の観測インター バルごとにボックス間の平均流量を算定した.

図-7は、ボックスモデルの解析結果を示したものであ る. 図中には、平均風速および全淡水流入量(QR)の 実測結果も示してある.また、ボックスモデルで求めた 水路の表層流量(Hor-Calc.;図-6のQ_{11,3})とその表層 流量の実測値(Hor-Obs.)とを比較して示している.こ れより、モデルによる計算値と実測値は平均的に近い値 を示しており、ボックスモデルの妥当性が確認できる. ただし、実測値は風の影響で一時的に大きな流量値を示 す場合があるが、これはボックスモデルでは再現できな い.また、図中には鉛直方向流量の移流量(Advection)





図-7 ボックスモデルによる平均流量と観測値の比較. Hor-obs.: ADCP による水路表層での観測流量; Hor-calc.: ボックスモデルによる水路表層の平均流量; Advection: 猪鼻湖全体の鉛直移流量(モデル値); Diffusion: 猪鼻湖全体の鉛直交換流量(モデル値); QR: 淡水流入量. ここに, Hor-Obs., Hor-Calc., QR は, 北向き(猪鼻湖に流入する向き)が正である.

と交換流量 (Diffusion) を示しているが,両者とも河川 からの淡水流入量 (QR) よりも大きな値を示している ことがわかる.

(2) リンの収支

ボックスモデルで求めた平均流量と測定したリン濃度 をもとに、降雨の多い時期と少ない時期の平均的なリン のフローを猪鼻湖全体で2層に分けて示した(図-8).水 およびリンのフローは、連続する2つの観測値の平均お よび変化をもとに算定したが、図-8にその観測期間を示 している. 図中Qは水の流量を, TPは TP濃度を, FP はリンのフラックス (g/s) を示す. 図より, 降雨の多 い期間は河川流入量の増加によって水路表層を通して浜 名湖へ流出する流量が多いが、水路底層を通して流入す る量は、降雨の少ない期間に比べて大きな差がないこと がわかる. さらに、この底層流入量は、上下ボックス間 の純輸送量に対応しており、その量は降雨の大小によら ずほとんど変化していないことがわかる. このことは, 夏期に強い密度成層が形成された状態では、湖内での淡 水の鉛直混合はあまり生じず、そのまま表層を通して浜 名湖に流出することを示している.

リンの収支(リンのフラックス)は、前述したとおり、 流量にリン濃度を乗じることで求めた.まず河川からの 負荷量は釣橋川の2支流で得た TP 濃度(図-2)の地点・ 期間平均を取り、4箇所の河川からの全淡水流入量に乗 じた.厳密には、それぞれの河川からの負荷量を算定し なければならないが、ボックスモデルの計算に河川流入 地点数を考慮してもほとんど影響がないこと(Yuk, 2008)より、今回は河川からの淡水流入・リンの負荷は 釣橋川のみで代表できるとした.湖内上下層間のリンの 交換フラックスの計算については、下向きの流れは湖心 (St.7)表層の平均 TP 濃度、上向きの流れは湖心底層の 平均 TP 濃度を用いた(湖内の鉛直方向の細い矢印). 浜名湖とのリンの交換フラックスの計算については、水 路(St.1)で測った TP 濃度の各層平均値を用いた(水



 図-8 2つ観測期間のボックスモデルによる平均的な水とリンの収支. 上図は降雨量の多い期間(2007.7/23-7/31, 204th-212th),下図は降雨量の少ない期間(2007.7/31-8/6, 212th~218th).Q:流量(m³/s),italic 体の数字: TP 濃度(mg/l),[]内の数字:リンのフラックス(g/s)

路での水平方向の細い矢印).また,リンの収支に各期 間の懸濁態リンの沈降フラックスを加えた(湖内の下向 きの太い矢印).これは水深と関係がないと仮定できる ので,上下層の沈降フラックスは同じとした.上下ボッ クスをひとつのボックスとしてボックス内のリンの収支 を求めると,図-8の2つの期間とも負の値となり,供給 源は湖内にあることがわかった.そこで,リンがバラン スするように湖内の底泥からの溶出フラックスを計算し たところ,図-8に示すような値を得た.(湖底からの上 向きの太い矢印).猪鼻湖の表面積が5.27 km² なので, 単位面積あたりの溶存態リンの溶出フラックスを計算し てみると,31.2~31.9mg/m²/day が得られる.既往の研 究によれば,6月下旬~9月初旬の霞ヶ浦の溶出フラック スは1~10 mg/m²/day(細見, 1984),秋季の大阪湾では 9.3~29.14 mg/m²/day(中島・西村, 1978),夏季の東京 湾では1.56~65mg/m²/day(国総研, 2002)が報告されて おり,1990年には浜名湖本湖で3.6~20 mg/m²/day(静岡 県,1981,1993),猪鼻湖で13.2mg/m²/day(静岡県, 2000) が報告されている。リンの収支から推定した値が浜名湖 と猪鼻湖の既往値を上回っているが,上記比較から推定 値は実際の溶出フラックスの範囲にあると推察される.

以上より,猪鼻湖内のリンのフロー(収支)を求めた 結果,浜名湖との湖水交換により,水路の底層を通して 浜名湖内からリン(PO₄-Pが大半)が流入するメカニズ ムが存在し,猪鼻湖は浜名湖のリンのシンクとなってい ることがわかった.この量は,降雨時に河川から猪鼻湖 に流入するリンの量に匹敵しており,期間を通して考え れば,浜名湖からのリンの負荷が大きいことがわかった. 表層と底層とのリンの交換量(懸濁態リンの沈降フラッ クスと溶存態リンの表層への輸送フラックス)は,猪鼻 湖に出入りするリンのフラックスよりも大きく,内部で のリンの循環量が大きいことがわかった.また,湖底に はリンが蓄積する傾向があることがわかった.

5. あとがき

本研究で得られた主な知見は以下の通りである.

- 移流・拡散を考察した簡易なボックスモデルを用いて、湖水交換流量、湖内での上下層の交換流量の夏期平均収支を推定した。その結果、水路表層での平均的な流量として実測値に近い妥当な結果が得られた。
- 2)河川から高濃度のリンが流入していることがわかったが、降雨とリン濃度の関係は明確ではなかった。 浜名湖と猪鼻湖を結ぶ狭水路および猪鼻湖内でのリン濃度の鉛直分布は、表層では懸濁態リン濃度が高く、底層は PO₄-P 濃度が高い明確な2層構造を有しているが、浜名湖では PO₄-P の TP に占める割合が高いことがわかった。
- リンの沈降フラックスは水深に関係なく26~52mg/ m²/dayの範囲で変動しており、クロロフィル濃度と 正の相関が認められた。
- 4)猪鼻湖内のリンのフロー(収支)を求めた結果,浜 名湖からのリンの流入が大きく,水路の底層を通し て浜名湖内からリンが流入するメカニズムによって 猪鼻湖は浜名湖のリンのシンクとなっていることが わかった.
- 5) 表層と底層とのリンの交換量は、猪鼻湖に出入りす るリンのフラックスよりも大きく、内部でのリンの

循環量が大きいことがわかった.また,湖底にはリ ンが蓄積する傾向があることがわかった.

本研究により,夏期のリンの輸送のメカニズムは概ね 把握できたが,さらに底泥からのリンの溶出を詳細に検 討して,リンの収支をより明確にする必要がある.

謝辞:本研究を行うにあたり静岡県果樹研究センターの 皆様には多大なご協力をいただいた.また,本研究は, 科学研究費,基盤研究(B),No.17360234「流域・内湾・ 外洋系の長期的環境変化からみた内湾環境問題の構造-浜名湖を対象として」(研究代表者:青木伸一)の補助 を受けて行ったものである.ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 青木伸一・福本直樹・岡本光雄(2001):猪鼻湖における底層貧 酸素水のエアレーション効果の検討,海岸工学論文集,第 48巻, pp. 1066-1070.
- 青木伸一・水野 亮・岡本光雄(2002):猪鼻湖における貧酸素 水塊の消長に及ぼす気象擾乱の影響,海岸工学論文集,第 49 巻, pp. 1036-1040.
- 青木伸一・水野 亮・有田 守(2004):潮汐の影響を受ける汽 水湖での夏期の貧酸素水塊の形成と栄養塩収支に関する研 究,海岸工学論文集,第51巻, pp.921-925.
- 国総研(2002):平成14年東京湾広域環境調査結果.
- 静岡県(1981):浜名湖水質環境管理計画, 静岡県, 152p.
- 静岡県(1993):浜名湖水質環境管理計画(第2次),静岡県・ 文化部環境保存課,104p.
- 静岡県(2000):浜名湖富栄養化防止対策調査報告書.
- 静岡県(2005):猪鼻湖における汚濁物質流入量削減に向けた 研究.
- 細見正明(1984):霞ヶ浦底泥からの窒素およびリンの溶出に ついて,国立公害研究所研究報告,51,pp.191-217.
- 中島光敏 西村 棨(1978):内湾,湖沼における底泥の影響に ついて-I.昭和53年度日本海洋学会春季大会公演要旨集, pp. 134-137.
- 陸 眞姫・青木伸一・大谷 聡(2006):閉鎖性内湾における夏 期密度成層形成時の海水交換と鉛直混合に関する研究,海 岸工学論文集,第53巻, pp. 981-985.
- 陸 眞姫・青木伸一・大谷 聡・奥村和皓(2007):狭水路で連 結された湖における密度成層下の湖水流動と物質交換特性 について,海岸工学論文集,第54巻, pp.981-985.
- Robon, B. J. Bukaveckas, P. A. and Hamilton, D. P. (2008): Modelling and mass balance assessments of nutrient retention in a seasonally-flowing estuary (Swan River Estuary, Western Australia). Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.76, pp. 282-292.
- Shen, Z., Zhou, S. and Pei, S. (2008) : Transfer and transport of phosphorus and silica in the turbidity maximum zone of the Changjiang estuary, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.76. pp. 1-12.
- Yuk, J.-H. and Aoki, S. (2008) : A study on process of water exchange in Inohana Lake, Coastal Engineering Journal, Vol.50(1), pp. 1-18.
- Yuk, J.-H. (2008) : Water Exchange and Material Transport in a Semi-enclosed Estuary - The Characteristics and Long-term Changes in Hamana Lake -, PhD. Thesis, Environment and Life Engineering, Toyohashi University of Technology, Japan.