

猪鼻湖における水質と栄養塩動態の季節変化に関する研究

Seasonal Variations of Water Quality and Nutrient Flux in Inohana Lake

陸 眞姫¹・青木伸一²

Jin-Hee YUK and Shin-ichi AOKI

The study was carried out to investigate the seasonal variations of water quality and nutrient flux in Inohana Lake by using the intensive field measurements and modeling approach. A significant amount of phosphorus is regenerated from the bottom sediment in conjunction with the lower bottom DO concentration and phosphorus is supplied from the lower layer into the upper layer during the stratified seasons. For the phosphorus exchange with Hamana Lake, the inflow from Hamana Lake is dominant during the stratified seasons, while the outflow to Hamana Lake is dominant during the transition and mixed seasons. The change of material transport accompanying with the seasonal change of water mass causes the change in water quality in Inohana Lake.

1. はじめに

浜名湖の奥に位置する猪鼻湖は慢性的に富栄養化した内湾であり、夏期には強い密度成層が形成され、底層に発達した貧酸素水塊が長期間存在する。一方、秋の終わりごろには一気に鉛直混合が進み、冬場は良好な水質を維持してカキ養殖等が行われている。このような水質の季節変動が極めて大きい内湾において水環境を適切に維持・管理するためには、陸域を含めた内湾システムでの物質動態をマクロに把握し、物質収支（フロー）の観点から水質管理を行うことが重要である。

本研究は、猪鼻湖において約1年間継続して実施した高頻度の水質データを用いて、猪鼻湖の水質の季節変動特性と、それをもたらす栄養塩動態を把握すること、さらには栄養塩の輸送フラックスを定量化することを目的に行ったものである。

2. 方法

(1) 現地観測及び水質分析方法

2009年4月末から2010年2月中旬まで、猪鼻湖と浜名湖の5地点で塩分、水温、密度、クロロフィル蛍光等の鉛直観測（0.1m間隔；アレック電子製、Compact-CTD）を毎週、DO（1m間隔）と透明度の観測を隔週定期的に実施した（図-1）。また、同じ5地点（各地点で水面下1mと水底面上1m）及び流入河川（4ヶ所）で隔週1回採水し、窒素およびリンの濃度分析を行った。リン酸態リン（以下PO₄-P）はモリブデン青法、全リン（以下TP）および全窒素（以下TN）はバルオキシソ二硫酸カリウム法、アンモニア（以下NH₄-N）はインドフェノール青法、

亜硝酸（以下NO₂-N）及び硝酸（以下NO₃-N）はジアゾ化法で吸光光度法により分析した。

(2) モデルによる物質収支の推定

水質データ（塩分、窒素、リン）をもとに、ボックスモデルを適用して1ヵ月間隔で水と栄養塩の収支を求めた（図-2）。なお、冬にも降雨により弱い躍層が見られるため、鉛直方向に上下2層に分割してモデルを適用した。まず塩分データをもとに平均的な流動の解析を行い、次に観測値を用いて栄養塩フラックスを求めた。各ボックスにおける窒素とリンの収支はDIN（=NH₄+NO₂+NO₃）、TN及びPO₄-P、TPについて解析した。

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（陸ら、2008；Gordon, 1996）。塩分は、約1週間ごとに得たCTDの観測値を1ヶ月ごとに平均し、ボックスモデルを1ヶ月インターバルで適用して解析を行った。河川流入量（Q_R）は計算対象期間中（1ヶ月間）の降雨量、流域面積、流出率（=0.6（11月-2月）、=0.8（4月-10月））、松田、1999；Yuk, 2008）から算出した。この河川流入量と塩分データの水・塩分の保存式（式（1）-（4））を入力し、未知数（平均流量；Q₁₃、Q₄₂、Q_A、Q_D）を求めた。

$$dV_1/dt = Q_R + Q_A - Q_{13} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$dV_2/dt = -Q_A + Q_{42} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$V_1(dS_1/dt) = Q_R S_R + Q_A S_2 + Q_D(S_2 - S_1) - Q_{13} S_1 = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$V_2(dS_2/dt) = -Q_A S_2 - Q_D(S_2 - S_1) + Q_{42} S_4 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、V_iとS_iは各ボックスの体積と塩分、Q_{ij}は浜名湖との交換流量、Q_AとQ_Dは鉛直移流と拡散量である（図-2）。dV_i/dtとV_i(dS_i/dt)は各ボックスの体積と塩分の月単位での

1 博(工) 韓国成均館大学校研究員
2 学生会員 工博 豊橋技術科学大学教授
建築・都市システム学系

時間変化であるが、本研究では1月毎に定常状態を仮定しているため、これらの値はゼロとおいている。なお添字の数字はボックス番号を表している。

各ボックスにおけるDIN,PO₄-PあるいはTN,TPの収支は、式(5)および(6)で表される。

$$V_1(dY_1/dt) = Q_R Y_R + Q_A Y_2 + Q_D(Y_2 - Y_1) - Q_{13} Y_1 + \Delta Y_1 \quad \dots (5)$$

$$V_2(dY_2/dt) = -Q_A Y_2 - Q_D(Y_2 - Y_1) + Q_{42} Y_4 + \Delta Y_2 \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここに、YはDIN,PO₄-PあるいはTN,TPを表し、V_i(dY_i/dt)はそれらの月間の時間変化である。ただし、前述の通り左辺はゼロとしている。DINとPO₄-Pについては、植物プランクトンによる取込が盛んな場合はΔYが負の値を、栄養塩の再生と底泥からの溶出が盛んな場合は正の値を示す。TNとTPについては、上記のプロセスに加えて沈降、堆積、脱窒を含み、上層ボックスから下層ボックスへの沈降、下層ボックスから海底への堆積は負の値(ただし、下層ボックスについては、上層ボックスからの沈降による負荷は正)、海底での再生による水柱への回帰、溶出、堆積物の巻き上げは正の値を示す(松村ら, 2002)。

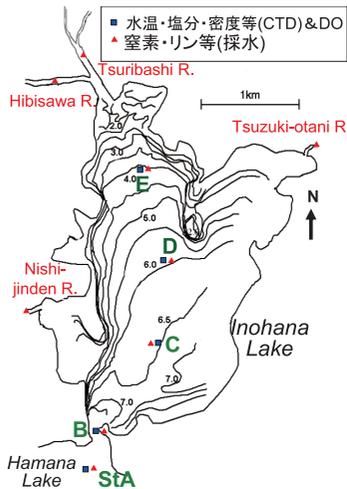


図-1 猪鼻湖の観測地点の概要

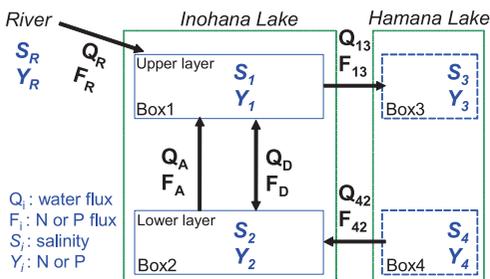


図-2 ボックスモデルの概要

3. 結果及び考察

(1) 水質観測結果

観測期間中の気象と水質変化を図-3, 4に示す。図-3は5地点の表層(水面下1m)での水質の時空間分布を、図-4は底層(底面上1m)の分布を示す。まず、図-3の表層については、クロロフィルa濃度は冬季を除き年間を通してほぼ10μg/Lを越えていて、この海域の高い生産性と赤潮の発生可能性を表している(US EPA, 1974)。クロロフィルa濃度は4月-5月が最も高く(spring bloom)、冬に最も低かったが、12月に表層で高い値が観測される場合もあった。夏のクロロフィルa濃度は比較的的低く、秋の方が高い濃度を示した。溶存酸素濃度はクロロフィルa濃度の高い春に高い傾向を示した。この期間の高いDOは植物プランクトンの生産のためと考えられる。実際に全観測期間のクロロフィルaとDOの相関はr=0.52(p<0.05, n=119)で植物プランクトンとDOに相関が見られた。DINは春・夏・秋には比較的高く、冬に低かった。PO₄-Pは夏から秋(8月-11月)に10-20μg/L前後の値が観測され、冬にはほとんどゼロであった。DIN/PO₄のモル比の値の図から、一般的には猪鼻湖はリンが制限因子(モル比>16)になっていることがわかる。ただし、比較的先行降雨が少なかった時期のDIN/PO₄のモル比は16以下になっており、この時期には窒素が制限因子になっていたことがわかる。また、主河川(釣橋川)付近(St.E)とインレット付近(St.A)を比べると、インレットでの比が低かった。この観測結果から、湖の窒素負荷は河川流量(降水量)に伴って変化することが推察される。

一方、底層の水質は、5月中旬から10月初旬まで貧酸素(DO<2mg/L)水塊が見られる(図-4)。DOが低下する時期に底層のDINとPO₄-Pが高くなっており、海底からの栄養塩の溶出が推察される。DIN/PO₄のモル比はこのとき16以下になっていることから、海底から多量のリンの溶出があったものと思われる。PO₄-PとTPを比べると、夏の底層(St.Eを除く)ではTPに占めるPO₄-Pの割合は70%以上であった。図-5はSt.Aの水質変化を示した図であるが、257日(2009/9/14)の観測ではSt.Aの表層で貧酸素水塊が観測され、同時に表層のPO₄-P, NH₄-Nが非常に高かった。この現象は図-3の表層のDOとPO₄-P分布でも確認できる(257日, St.Aで低いDO, 高いPO₄-P)。この観測結果から、この時期に底層貧酸素水塊が表層付近まで上昇していることが推察され、密度成層が弱まる時期に鉛直混合により表層への栄養塩輸送が大規模に行われていることがわかった。

(2) 栄養塩フラックスの変化

以下では、図-2のボックスモデルを用いて水・窒素・リンの収支から栄養塩フラックスの月別変化を調べる。

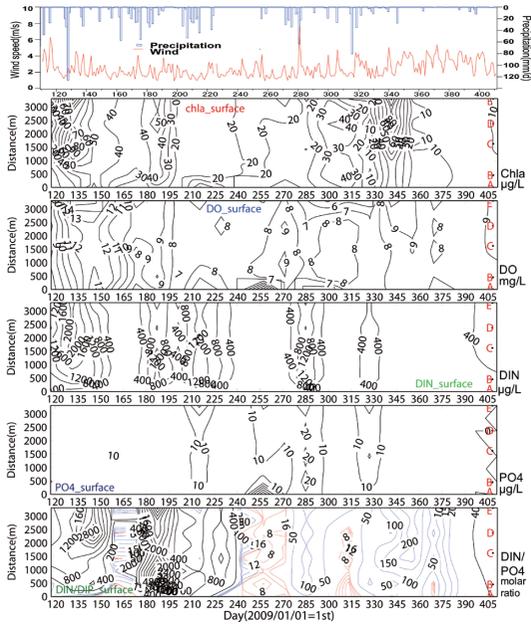


図-3 海域の気象と観測地点A-Eに沿った表層(水表面下1m)の水質変化(縦軸:A点からの水平距離, 横軸:時間)

本研究では淡水流入量を単純に降水量と流域面積を用いて算定したため, まず河川流入量の予測値と湖の塩分の関係をチェックしておく必要がある。図-6は観測期間中の月ごとの河川流入量と猪鼻湖の表層塩分の関係を示したものであるが, 両者は高い負の相関を示しており, 2009年8月の値を除くと, $R^2=0.92$ となった。これより, 本研究で用いた手法の妥当性を確認した。また, このモデルを用いて算定した浜名湖との交換流量は, 著者らの研究(陸ら, 2008; Yuk・Aoki, 2008)の実測流量の範囲内にあり, 得られた平均流量は妥当なものであった。以下では, これをもとに栄養塩の収支を推算する。

図-7は, 猪鼻湖を基準として栄養塩フラックスの変化を示したものである。すなわち, 河川からの負荷量($River_load=F_R$), 浜名湖との交換量($Net_horizontal=F_{42}-F_{13}$; 猪鼻湖への流入が正), 猪鼻湖内の鉛直輸送量($Net_vertical=F_A+F_D$; 上向きが正)の月別の変化を示している。河川負荷量については, DINは5月-11月に流入量が多く, 冬(12月-2月)には少なくなった。PO₄-Pについても, 11月までは流入量が多かったが, 12月から減少した。浜名湖との栄養塩の交換は, DINについては, 夏期に猪鼻湖への流入が大きいとき(6月, 9月)があるものの, 全般的には1年間を通して浜名湖へ流出する傾向にある。PO₄-Pについては, 5月-9月は猪鼻湖へ流入, その後は浜名湖への流出になった。特に6月-9月は浜名湖からの流入量が多く, 河川負荷量を上回っていた。猪鼻湖内鉛直輸送量の月別分布を見ると, DIN, PO₄-Pともほぼ下層から上層へ輸送され

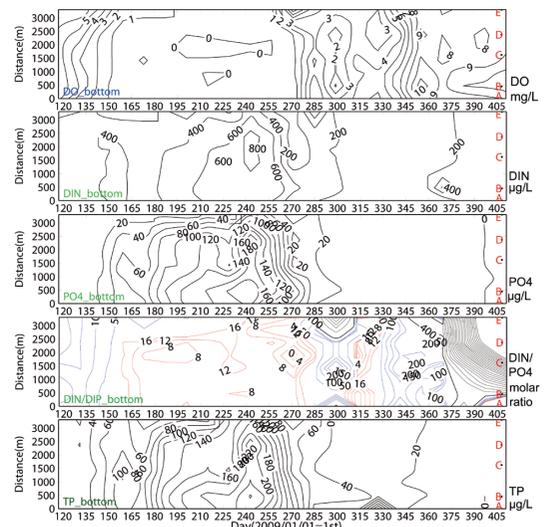


図-4 観測地点A-Eに沿った底層(海底面上1m)の水質変化(縦軸:A点からの水平距離, 横軸:時間)

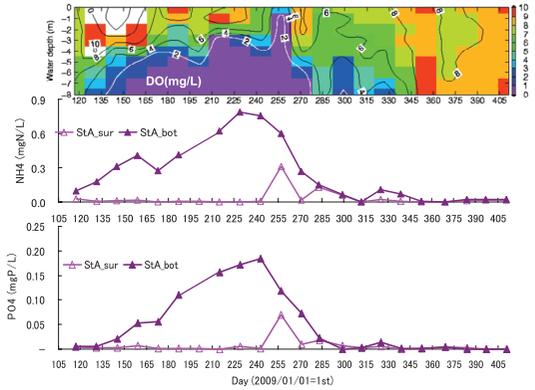


図-5 St.AにおけるDOの鉛直方向時空間分布(上段図)及び表層(水面下1m; St.A_sur)と底層(底面上1m; St.A_bot)のNH₄とPO₄の季節変化

ており, これは夏(6月-9月)に多く10月から減少した。特にPO₄-Pについては, 夏に下層から上層への輸送量が河川負荷量や浜名湖との交換量より多くなっており, 下層から上層へのPO₄-Pの多量の供給が夏場の生産を支えていることがわかった。

(3) 栄養塩動態の季節変化

次に, モデルより見積もった各月の水と栄養塩の収支をもとに, 5月-9月を成層期, 10月-11月を遷移期, 12月-2月を混合期として, 物質動態を論じる(図-8)。淡水については, 成層期に流入量が多く(11.7x10⁶m³/mon), 混合期に最も少なかった(1.4x10⁶m³/mon)。水の鉛直輸送量は, 強い密度成層のため, 夏(成層期)に少なかった。水の鉛直拡散量(Q_b)は成層期から遷移期にかけて次第に多くなり, 混合期に10倍程度に増加した。浜名湖との交換流量については, 成層強度も成層期より弱く淡水流

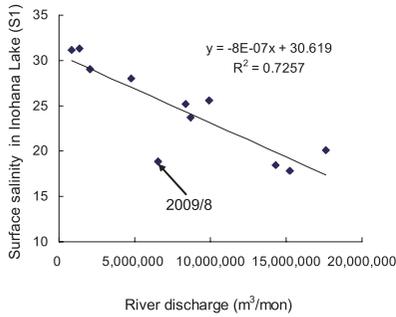


図-6 猪鼻湖への淡水流入量と表層塩分の関係

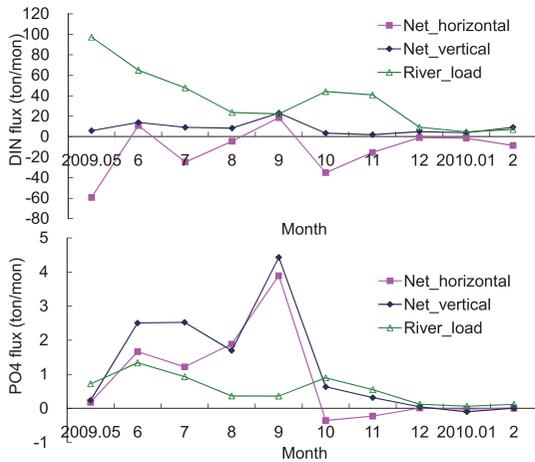


図-7 DINとPO₄のフラックスの月別の変化

入量も多い遷移期に多く、浜名湖との間で多くの水が交換されていることがわかった。

DINについては、成層期に51.0ton/month、混合期に6.8ton/month程度で1年間に7～51ton/monthの負荷が発生した。浜名湖との交換量は、成層期から混合期にかけて、それぞれ12.0, 25.5, 3.8ton/month程度で浜名湖に流出する結果を得た。遷移期の多い流出量は、上述したように遷移期に湖水交換が多く、高濃度の栄養塩が流出しやすくなったためと思われる。猪鼻湖内の鉛直輸送量はnetで11.9, 2.5, 5.9ton/month程度であった。遷移期から混合期に向けては、水の鉛直拡散量が大きくなりDINの鉛直拡散輸送量は多くなったが、netのフラックスとしては小さくなった。ΔDINの季節変化量は、上層で各期間に対して-39.8, -13.4, -1.5ton/month, 下層で0.8, -3.4, -1.5ton/monthであった。

PO₄-Pは1年間を通して、0.1～0.7ton/monthが河川から流入していた。浜名湖との交換量は、成層期には浜名湖から1.8ton/monthが流入したが、遷移期には0.3ton/monthの流出になり、混合期にも少量(0.01ton/month)ではあるが、流出になっていた。PO₄-Pの鉛直フラックスは成層期から混合期にかけて、2.27, 0.47, -0.03ton/month(+が上向き)となり、成層期

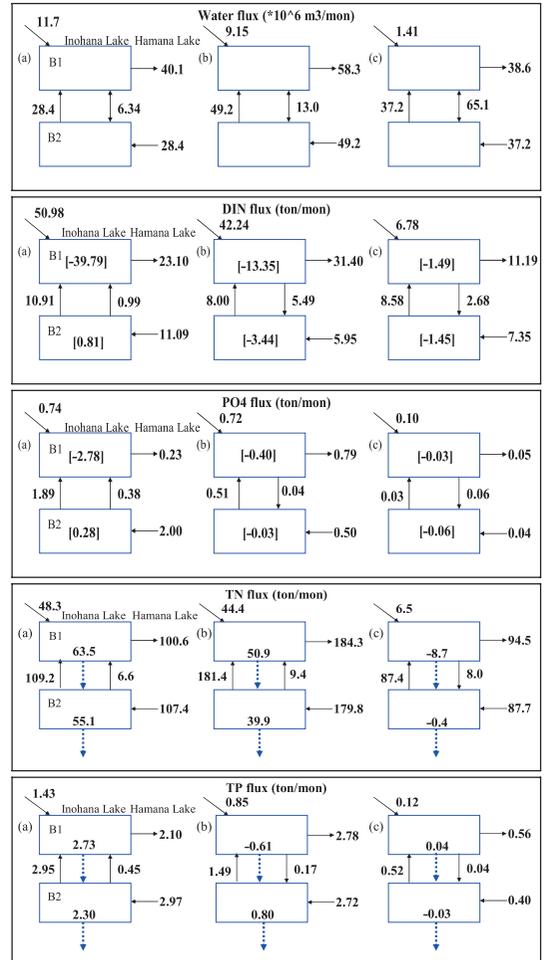


図-8 水・窒素・リンの収支(フラックス)の季節変化。図で(a)成層期, (b)遷移期, (c)混合期。実線の矢印の成分は図-2と同一。DINとPO₄-Pで[数字]はAYを示し、TNとTPで点線の矢印はAY、即ち、沈降・堆積・再生等を意味する。

には底層からのリンの供給が顕著であることがわかった。ΔPO₄-Pの季節変化量は、上層で-2.78-0.40, -0.03ton/month, 下層で0.28, -0.03, -0.06ton/monthであった。

TNの収支の推算結果をみると、成層期と混合期の河川負荷量については、TNよりDINのほうが若干多くなっている。これは水質分析の精度によるもので、DINの濃度がTNの濃度よりわずかに高くなったためであるが、TNとDINの河川負荷量の差が小さいことから、TNの収支の計算結果は妥当であると考えた。TNは、成層、遷移、混合期において、それぞれ48.3, 44.4, 6.5ton/monthが河川から流入した。DINとTNの収支の比較と河川水の水質分析データより、窒素はDIN、具体的にNO₃の形態で猪鼻湖に流出していることがわかり、これは既往の研究(Uchiyamaら, 2006)と一致する。Uchiyamaら(2006)によれば、猪鼻湖への窒素の流入メカニズムに関して、その発生源

は柑橘園地, 畑地等の施肥に由来する部分が大きいと報告されている. 浜名湖との交換量は成層, 遷移, 混合期にかけて6.8, -4.5, -6.8ton/month (+が猪鼻湖への流入)であった. 鉛直直流・拡散量は115.8, 190.8, 79.4ton/monthであった. TNの沈降水量及び堆積量は63.5/55.1 (沈降水量/堆積量), 50.9/39.9, -8.7/-0.4ton/month (ここで, +が下向き, 即ち, 沈降, 堆積は+)であった.

TPについては, 河川からの流入量が1.43, 0.85, 0.12ton/monthとなった. 浜名湖との交換量は, 0.87, -0.06, -0.16ton/monthであり, 鉛直直流・拡散量は3.40, 1.32, 0.48ton/monthであった. TPの沈降水量及び堆積量は2.73/2.30, -0.61/0.80, 0.04/-0.03ton/monthであった.

以上より, 全般的には, 窒素とリンの河川負荷量は11月(遷移期)まで高く冬に低くなった. DINは, 猪鼻湖から浜名湖への流出が周年支配的であったが, TN, TP, $PO_4\text{-P}$ は成層期に浜名湖から猪鼻湖への流入が大きくなり, 遷移期～混合期に流出になっていた. さらに, 成層期に底層の高濃度の窒素とリンが湧昇によって表層に輸送されることを確認し, さらにその規模(輸送量)を把握した.

図-9は, ΔDIN と $\Delta\text{PO}_4\text{-P}$ の月別の変化を示したものである. 三つの期間に分けてその変動をみると, 上層では成層期に大きな負値を示しており, 植物プランクトンによる栄養塩の取り込みが盛んであることがわかる. これは混合期に向けて次第に減っている. 下層については, 成層期にはバクテリアによる分解, 水底からの栄養塩の溶出による栄養塩の生産が卓越している. 遷移期から混合期には, わずかではあるが, 消費の方が上回っていた. 遷移期から混合期にかけては透明度が高くなるため, 植物プランクトンの生産(栄養塩の消費)も寄与しているものと思われる. なお, 観測期間中の透明度は遷移期から混合期は平均3m, 成層期は1.5m程度であった. TNとTPの沈降水量及び堆積量は成層期が多く, 成層期に堆積し, 混合期にはその量が成層期の沈降・堆積量に比べかなり少なかったものの, 水柱へ回帰している傾向を示していた.

4. おわりに

本研究では, 約1年間にわたる猪鼻湖での継続的な水質観測結果とボックスモデルを用いて, 河川からの負荷量, 浜名湖との交換量, 湖内の鉛直循環量などの観点から栄養塩のフラックスを推定し, その季節的な変動特性を定性的・定量的に明らかにした. さらに, それらから湖内での栄養塩の消費や生産について考察を加えた. 得られた知見をまとめると以下の通りである.

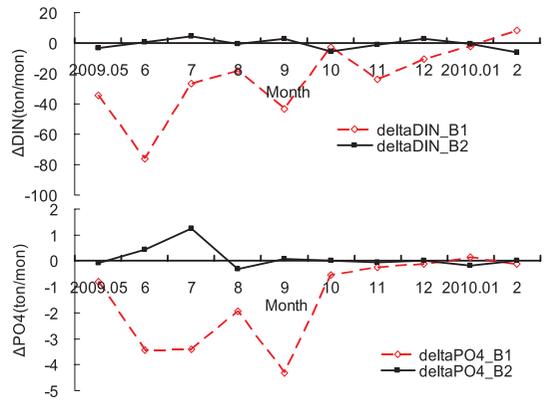


図-9 ΔDIN と $\Delta\text{PO}_4\text{-P}$ の月別の変化

- (1) 猪鼻湖は年間を通してリン制限となっているが, 底層のDOが低下する成層期に底層から表層に多量のリンが供給され生産を支えている.
- (2) 浜名湖とのリンの交換量は, 成層期に浜名湖からの流入が大きくなり, 遷移期から混合期には流出する傾向にある. このリンの流入量は河川負荷量を上回る.
- (3) 猪鼻湖では季節によって水質が大きく変動するが, これは季節変化に伴う水塊構造の変化によって, 栄養塩輸送特性が大きく変化するためである.

参考文献

- 松田義弘 (1999) : 浜名湖水の不思議, 静岡新聞社, 155p.
 松村 剛・石丸 隆・柳 哲雄 (2002) : 東京湾における窒素とリンの収支, 海の研究, 11 (6), pp. 613-630.
 陸 真姫・青木伸一・奥村和皓・中尾知史 (2008) : 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, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 1046-1050.
 Gordon, Jr. D. C. et al. (1996) : LOICZ biogeochemical modelling guidelines, LOICZ Reports and Studies No. 5, LOICZ, Texel, The Netherlands, p. 96.
 Uchiyama, M., W. Kawai, A. Ueta, T. Ishiwata, K. Kohara and A. Koike (2006) : A study for quality of contaminant inflow loads in Lake Inohana - the actual situation of a quality of contaminant inflow loads -, Bulletin of Shizuoka Institute of Environ. and Hyg. No.49, pp. 125-130.
 US EPA (1974) : Marine Algal Assay Procedure Bottle Test, US EPA, Corvallis, OR.
 Yuk, J.-H. (2008) : Water Exchange and Material Transport in a Semi-enclosed Estuary - The Characteristics and Long-term Changes in Hamana Lake -, Dr.Eng. Thesis, Environment and Life Engineering, Toyohashi University of Technology, 212p.
 Yuk, J.-H. and S. Aoki (2008) : A study on process of water exchange in Inohana Lake, Coastal Engineering Journal, 50(1), pp. 1-18.