

外部擾乱に対する小川原湖の水質応答特性

RESPONSE ANALYSIS OF WATER QUALITIES TO EXTERNAL DISTURBANCES IN LAKE OGAWARA

西田修三¹・鈴木誠二²・中辻啓二³

Shuzo NISHIDA, Seiji SUZUKI and Keiji NAKATSUJI

¹正会員 工博 大阪大学大学院助教授 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²学生会員 修(工) 大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

³フェロー 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Lake Ogawara is a blackish lake in the Takase River basin, and has a surface-area of 63 km² and maximum depth of 25 m. We made clear the characteristics of the variability of water qualities of the lake based on the observational data, and using a water quality model considering the purification effect of dominant bivalves, we made a response analysis of the water qualities to external disturbances such as changes of the weather and the pollution load.

The calculation results show that (1) the change of the phosphorus load from the river has a great impact on the water quality of the lake, (2) however, there is little effect of reduction in nitrogen load on the water quality improvement of the lake, (3) though the blooming in next spring increases more by the strong wind in winter, the following blooming is not so large, and (4) the salinity in the upper layer rises by 0.1 psu caused by salt water intrusions in one period, and two years or more are required to return to the original state.

Key Words : Water quality, ecosystem, simulation, blackish lake, Lake Ogawara

1. はじめに

本研究で対象とする小川原湖は、青森県の東岸、高瀬川水系の河口上流6kmに位置する汽水湖である。湖面積63km²、平均水深11m、最大水深25mを有し、約20m以深の底層部に一年を通して約12psuの塩水が存在する。

ヤマトシジミやワカサギ等の内水面漁業が盛んで、宍道湖に次ぐ国内第2位の漁獲量を誇っている。シジミの漁獲量は年間約2500トンに上り、重要な水産資源であるとともに、植物プランクトンを含む水中懸濁物の捕食による高い水質浄化機能は小川原湖の水質保全に重要な役割を果たしている。例えば、現存のシジミによる小川原湖の水質改善効果はCODで約20%との報告もある¹⁾。

近年、小川原湖では窒素やリンの濃度が上昇傾向にあり、富栄養化が徐々に進行していることが指摘されている²⁾。湖の回転率が約1と低く水交換が悪いため、湖の水質は河川からの流入負荷の他、内部生産や底泥からの溶出に大きく依存し、水温や日射等の影響を受けて大きく変動する。この水質変動は、湖の生態系に影響を及ぼすばかりでなく、上述のようにその生態系自体が物質循

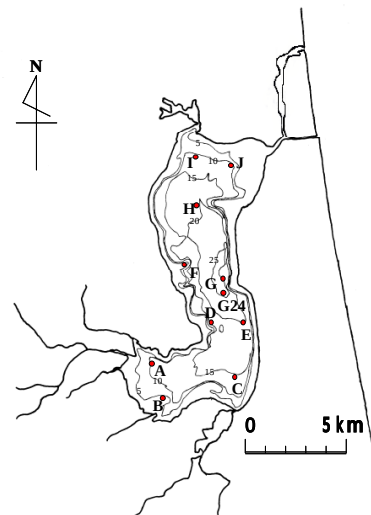


図-1 小川原湖の深浅図

環に大きく関わっているために、その予測は極めて難しい。そのため、流入負荷や気象等の外的インパクトに対する湖の物理的、生物化学的な応答については、ほとんど研究がなされていない。例えば、風に起因する湖水の流動や貧酸素層の湧昇現象についての解析等^{3), 4)}はあるが、水質への影響についての解析はほとんどなされていない。それは、生態系を含む湖の生物化学的過程が極めて複雑であることに起因している。

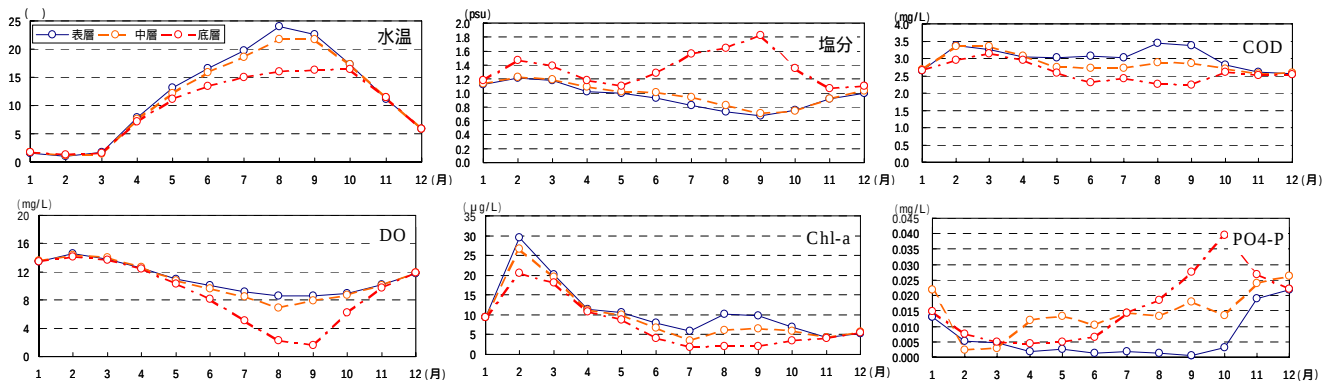


図-2 水質の季節変動 (1994年 - 2003年の10年平均)

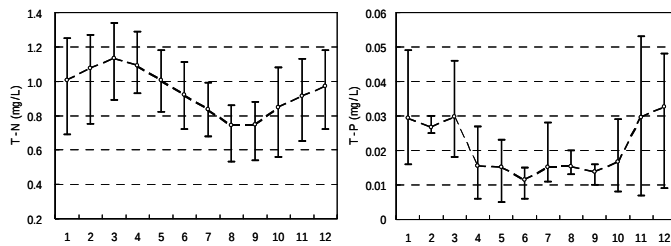


図-3 全リン・全窒素の季節変動と水質変動の年格差 (--- 平均値)

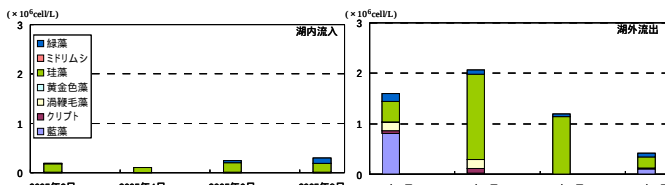


図-4 プランクトン構成細胞数

そこで、本研究では小川原湖の水質の実態を観測データを基に明らかにするとともに、これまで構築してきた二枚貝を考慮した水質モデル^{1), 5)}を用いて、気象等の外部擾乱に対する湖の水質応答について解析を行う。

2. 水質変動特性

小川原湖では、湖内5地点（最大3水深）と主要流入河川において月一回の水質観測が国土交通省により実施されている。1994年から2003年までの10年間の観測データを基に集計した湖の水質の季節変化を図-2に示す。湖内の観測データを、表層（水深0.5m）、中層（水深7.5～9.8m）、下層（14.0～18.5m）に分け、10年間の月別平均値を表示している。

深層部の観測データを含んでいないために、10psuを超える塩水層の水質変動は示されていないが、5月から9月にかけての成層期に水温とともに各水質項目も水深方向に変化している。特に、夏季に溶存酸素は急激に低下し、下層では生物の生息に適さない3mg/L以下を示している。また、成層期に下層のリン濃度が急激に上昇し、秋季には成層破壊にともない表層のリン濃度が上昇して

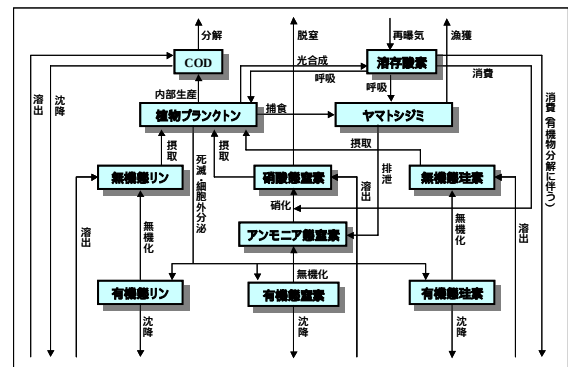


図-5 水質モデルの概念

おり、リンの主たる供給源が底層にあることがわかる。また、クロロフィルaが春季と秋季に極大を示しており、植物プランクトンの増殖の様子が顕著に見てとれる。

1985年から1994年までの解析結果⁴⁾と比較すると、ほとんどの水質項目に関して大きな違いは見られず、ここに示された水質変動は小川原湖の特性を表しているものと考えられる。ただし、2月のクロロフィルaが3月より高い値を示しているのは、2月は荒天や結氷により観測が実施できなかった年が多く、高濃度を記録した1997年の値が大きく反映されてしまったことによるもので、過去20年の平均値は3月と同程度の値を示した。

一方、年変動に注目すると年較差は大きく、例えば図-3に示すように、冬季の表層部の全窒素（T-P）では0.01～0.05 mg/Lの年変動を示し、その較差は0.04mg/Lにも及んでいる。小川原湖の水質は、図-2に示したような深大な汽水湖の特徴的な季節変動を示す一方で、気象変動等の外部擾乱により水質は生物化学的過程を経て大きく変化し、その影響は長期に及ぶものと考えられる。

図-4は、2005年に実施したプランクトン調査の結果である。湖内に流入する河川水（七戸川河口表層水）と湖外に流出する湖水（湖口表層水）を採水し細胞数を計数した結果で、春のブルーミング期を含む植物プランクトンの構成細胞数を示している。春のブルーミング期には上流河川からの供給に比して湖水のプランクトン数は約10倍の個体数を示し、珪藻類の大きな増殖が見てとれる。しかし、定期的なクロロフィルの観測値からプラン

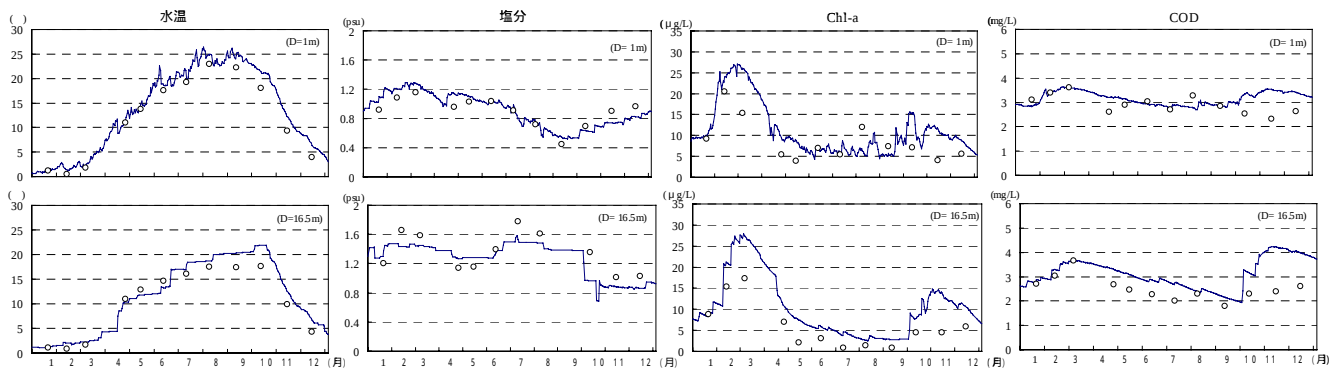


図-6 2002年の水質計算の再現性 (○ 観測値, — 計算値)

クトンの発生の時期と規模を推測すると、やはり年較差がきわめて大きいことがわかった。

以下では、水質の変動要因とその影響を明らかにするために、種々の外部インパクトに対する水質の応答特性について、水質モデルを用いた解析を行う。

3. 解析方法

(1) 水質モデル

水質モデルの概念図を図-5に示す。窒素とリンの循環をモデル化し、さらに、ヤマトシジミによる懸濁物質の浄化機能⁶⁾もモデルに取り込んでいる。この水質モデルを以下に示す鉛直1次元拡散モデルに組み込み、長期にわたる水質変動の解析を行った。シジミの個体数は、観測データを基に水深別に各層の個体数を与えた。また、渦動拡散係数には、風による混合効果と密度成層の安定効果が加味されている。モデルの詳細については文献¹⁾、⁵⁾を参照されたい。ただし、パラメタ値については最新の観測データを用いてさらなる調整を施している。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{A(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left(A(z) K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum S(C) \quad (1)$$

ここで、 C ：物質濃度、 $A(z)$ ：水深毎の湖盆面積、 z ：水深、 K_z ：渦動拡散係数、 $S(C)$ ：物質生成項である。

(2) 計算条件

水面での熱収支、風、気温、主要6河川からの淡水流入、塩水の遡上流入を考慮し、気象の経時データを取り込みながら計算を行った。平均的な水質状況を示した2002年と翌2003年を計算の対象として、まず、2002年1月1日の水質を初期条件として2年間の水質計算を行い、再現性の検証を行った。その後、以下の条件の下、湖の水質への影響を解析した。

負荷量の影響：流入負荷量が現況に比して増加または減少した場合、および、短期間の出水により急激な負荷流入があった場合。

風の影響：成層期および循環期に強風が連吹した場合。

塩水流入の影響：夏季と冬季の大潮期に潮位が上昇し、塩水流入量が増加した場合。

(3) 再現性の検証

図-6に、水質再現計算のうち2002年の結果を示す。代表水深として0.5mと16.5mの2水深の結果を用いて、主要項目について観測点Gにおける実測値との比較を行った。物理的条件で決定される水温や塩分の再現性はもとより、複雑な生物化学的過程によって決定されるCODやクロロフィルaの季節変化も良好に再現されている。

小川原湖は南北に長く、河川水は南西部より流入し北東部へと流出し、その流下距離は約15kmに及んでいる。そのため、縦断方向に水質が幾分異なり、その時空間特性を明らかにするためには、3次元解析が必要である¹⁾。しかし、水質の鉛直構造に着目した解析や、日スケールより大きな時間スケールの水質変動については、1次元モデルで十分解析が可能であり、計算精度は次元数よりむしろ水質モデルの適否に強く依存している。

4. 解析結果

(1) 流入負荷量の影響

図-7、図-8は、河川から供給される栄養塩（有機態、無機態）の濃度を現状の0.5倍および2倍にした場合の水質変化を示したものである。図-7は窒素を、図-8はリンを変化させた場合の結果である。

窒素の流入量の増減（0.5倍、2倍）に呼応して、湖水の窒素濃度もほぼ同様の増減傾向を示している。しかし、他の水質項目には影響が及ばず、ほとんど変化は見られない。このことは、富栄養化が徐々に進行している小川原湖において、流入河川水の窒素量のみを削減しても、水質はほとんど改善されないことを意味している。

一方、リンの負荷量を変化させた場合には、その影響がほとんどの水質項目に及び、大きな水質変化を生じている。これは、小川原湖が強いリン制限の湖であることに起因している。リンの負荷量の増加に呼応し内部生産が増大し、クロロフィルaやCODが増加している。その生産過程で窒素が取り込まれるため、リンの増加に反し

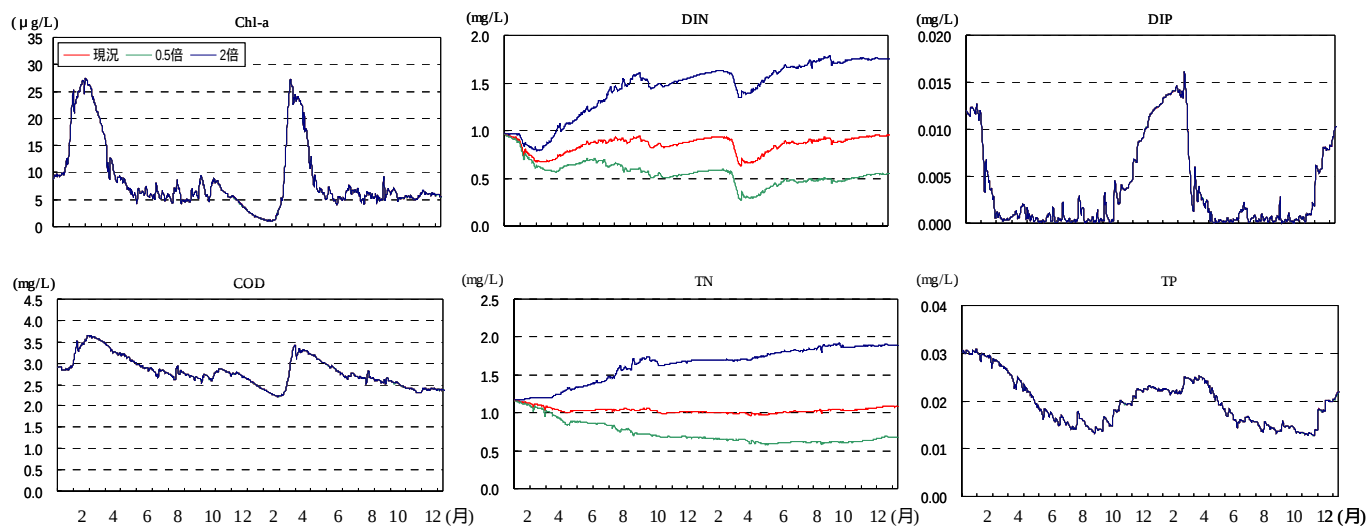


図-7 水質に及ぼす窒素流入負荷量の影響

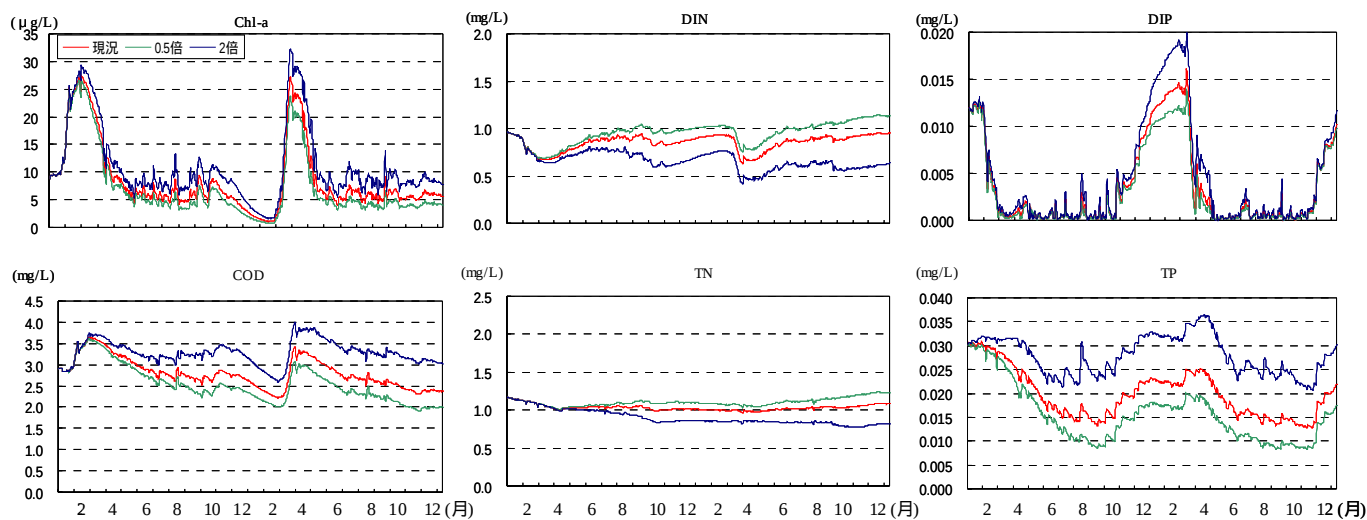


図-8 水質に及ぼすリン流入負荷量の影響

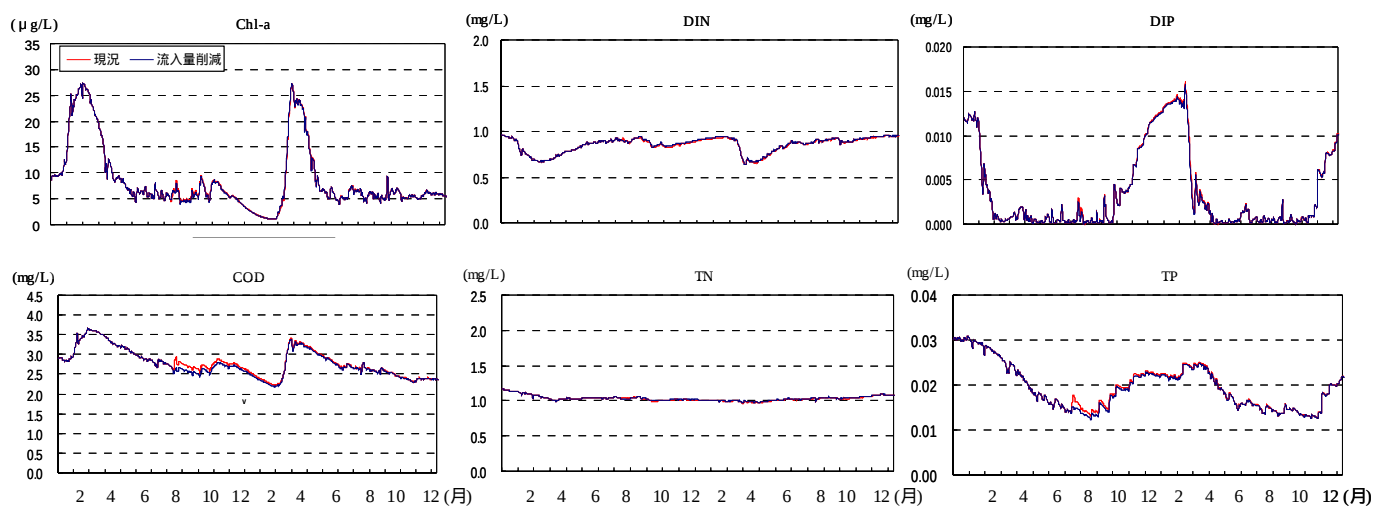


図-9 水質に及ぼす河川流入量の影響

て窒素濃度が減少しているのがわかる。

窒素とリンどちらの場合も流入負荷量の急変に対して、1年目の10月頃までは過渡的な水質変化を示すが、それ

以降は安定した水質変化を示している。この結果から、現在の小川原湖は安定した物質循環系を形成しており、負荷量の半減や倍増など急激な変動に対しても安定した

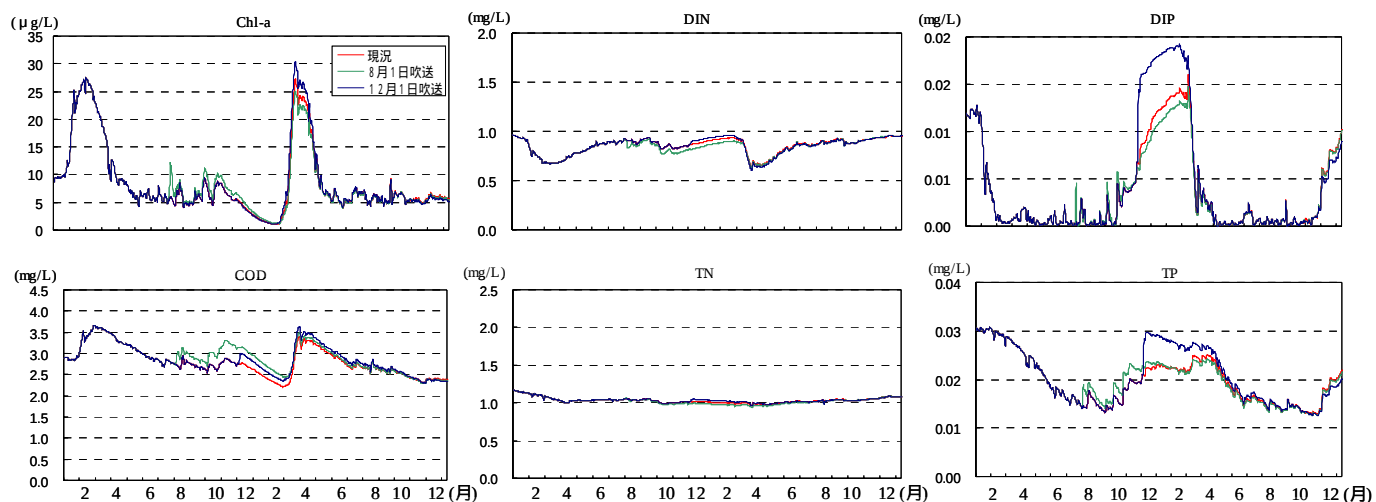


図-10 水質に及ぼす風の影響

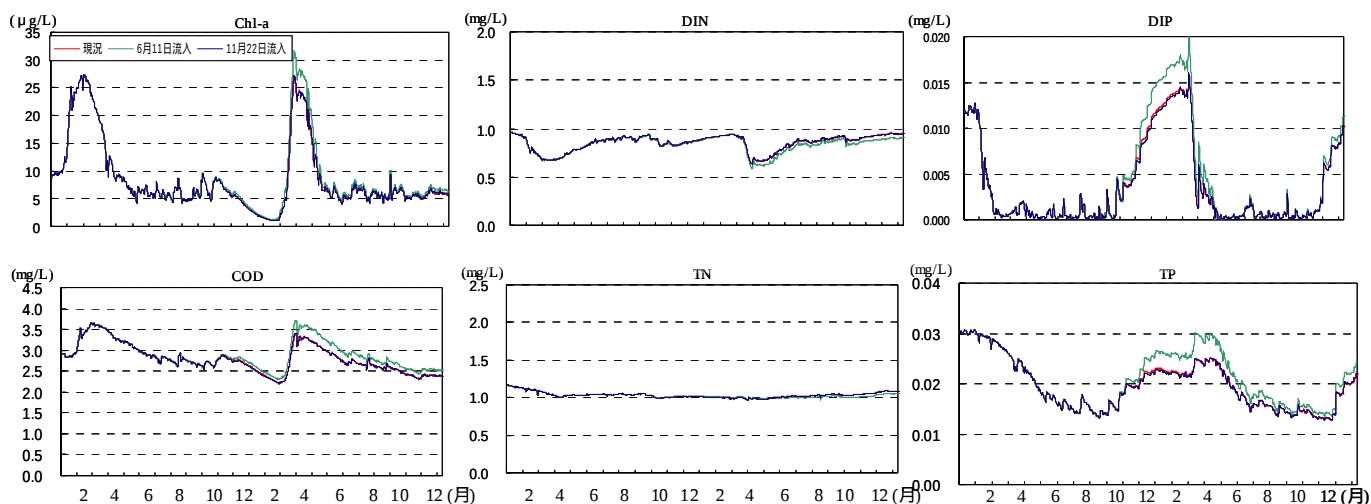


図-11 水質に及ぼす塩水流入の影響

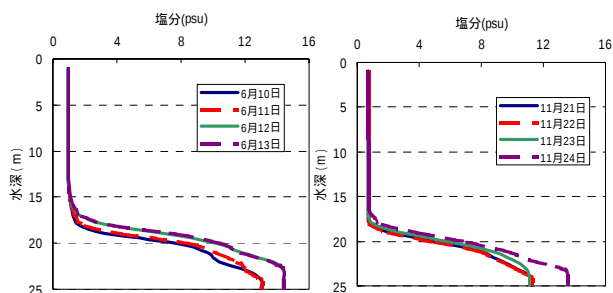


図-12 塩水流入による塩分分布の変化

応答特性を有していると言える。

次に、降雨出水による短期負荷流入の影響について計算を行った。ここでは日平均流量が $340\text{m}^3/\text{s}$ を記録した2002年8月の最大出水時の流出パターンを用いて、出水の影響解析を行った。ちなみに、2002年の年平均流量は約 $30\text{m}^3/\text{s}$ であった。

まず、この出水の水質に及ぼす影響を見るために、2002年8月9日～8月15日の7日間の流量を、出水前の流量の $50\text{m}^3/\text{s}$ に置き換え、出水の有無による水質の差異を調べた。その結果を図-9に示す。この7日間に湖水量の約14%に相当する 10^8 トンの淡水流入と多量の栄養

塩の供給があったにもかかわらず、水質への影響はほとんどみられず、僅かに表層水の栄養塩濃度が上昇し、CODとクロロフィルaの増加が認められる程度であった。この影響は翌年には及ばず、短期的な影響にとどまっている。

(2) 風の影響

水質に及ぼす風の効果調べるために、2002年の成層期（8月1日）および循環期（12月1日）に風速15mの強風が2日間連吹した場合の計算結果を図-10に示す。

風の力学的作用により湖水の鉛直混合が起こり、2ケースとも吹風直後に下層から栄養塩が供給され、表層の栄養塩濃度が増加していることがわかる。その増加量は、成層化の安定効果により拡散が抑えられるため8月の方が若干小さくなっている。また、8月には下層から供給された栄養塩は植物プランクトンの増殖に費やされ、CODの上昇となって現れている。一方、循環期の12月の場合は、上層に取り込まれた栄養塩はそのまま上層内に蓄えられ、翌年春のブルーミングによって消費されている。しかし、プランクトンの増殖にともないリンの消費が増大すると、リンが枯渇してリン制限が働き、最終的

に増殖は止まり現況の水質に回帰している。

風に起因した強い鉛直混合が生じると、上述のように次期プランクトン発生期に大きな増殖が見られる。しかし、連行による塩淡水境界面の低下により、栄養塩の上層への拡散が弱まり、翌年のプランクトンの増殖が抑えられている。つまり、循環期に生じた強風によって、翌春のブルーミングは増大するが、その後のブルーミング規模は縮小するという興味深い結果が得られた。

(3) 塩水流入の影響

汽水湖の水環境を支配する重要な因子である塩分の影響を調べるために、潮位が上昇し塩水流入量が増加した場合の水質計算を行った。図 - 11にその結果を示す。

小川原湖では、河口水位が湖水位を上回った時に河口から塩水が遡上する。しかし、塩水が湖に侵入し実質的に湖内に貯留されるためには、長時間にわたって水位の逆転が生じるか、または、干潮時にも塩水フロントが河道内に残存している必要がある。通常このような状況は、6月、7月および11月、12月の大潮期に発現しやすい。そこで、2002年の6月11日～13日および11月22日～24日の大潮期3日間、河口水位を10cm上昇させ、塩水流入を促進させた計算を実施した。湖内への塩水流入量の算定には、実測データを基に構築された湖水位と河口水位の水位差と遡上流量の関係式、および、遡上流量と塩分濃度の関係式を用いた。この塩水流入による最深部の塩分分布の変化を図 - 12に示す。ちなみに、この3日間の湖内への塩分供給量は6月が約 1.74×10^5 トン、11月が 1.06×10^5 トンであり、それぞれ湖内に貯留されている全塩分量の約10～15%に相当する。

6月の塩水侵入の影響をみると、水温躍層下に密度貫入した塩水は秋季の成層破壊と冬季の鉛直循環により表層塩分を約0.1psu上昇させ、時間の経過とともに徐々に現況値に回復するものの、その影響は2年以上に及ぶことがわかった。これは小川原湖の水交換の悪さに依るので、この計算とは逆に塩水侵入量が低下した場合にも、その影響は長期に及ぶものと推測される。

小川原湖の塩分環境が、現在長期的に安定した状況にあることは、間欠的に生じる塩水流入の生起確率に大きな変化がないことを意味している。しかし、今回の解析結果が示すように、一回の塩水流入の影響が長期に及ぶことを考えると、今後、平均海面位の上昇等により塩水流入の確率が増加すれば、小川原湖の塩分環境は確実に変化することが予想される。

また、塩水の流入により塩分躍層が上昇し、底泥から溶出した高栄養塩が上層に供給されやすくなるために、循環期にリン濃度が上昇し、その結果、翌春のブルーミングの規模が増大している。窒素も同様に上層に取り込まれるが、現濃度が高いためにその影響は顕著には現れていない。しかし、翌春のブルーミングによる窒素消費が増大するために、ブルーミング後は現況より窒素濃度の低下がみられる。これも、前述のように小川原湖がリ

ン制限の湖であることに起因している。

この循環期のリン濃度の上昇は、塩分上昇の影響と同じく、翌年の循環期においても生じ、塩水流入の影響が塩分環境ばかりでなく、水質にも長期にわたって影響を及ぼすことがわかる。

5. おわりに

水質モデルを用いて流入負荷量の変化や気象擾乱が湖の水質に及ぼす影響について、2002年を対象に解析を行った。本研究により得られた主たる結果は以下の通りである。

- (1) 小川原湖は強いリン制限を受け、リンの流入負荷量の変化は、湖の水質に大きな影響を及ぼすが、窒素に関しては削減しても湖の水質改善はほとんど見られない。
- (2) 流入負荷量の半減や倍増に対して、1年以内に過渡的な水質変化から安定した水質変化に移行する。
- (3) 循環期に生じた強風によって、翌春のブルーミング規模は増大するが、その後発生するブルーミングの規模は縮小する。
- (4) 湖内貯留塩分量の約10～15%程度の塩水流入により表層塩分は0.1psu程度上昇し、現況値に回復するには2年以上の長期間を要する。
- (5) 塩水の流入により循環期のリン濃度が上昇し、翌春のブルーミングの規模が増大する。

参考文献

- 1) 西田修三・鈴木誠二・山中亮一・金城周平・中辻啓二：優占二枚貝を考慮した汽水湖の水質変動解析，海岸工学論文集，第50巻，pp.1016-1020，2003。
- 2) 国土交通省東北地方整備局：高瀬川河川事務所事業概要，2005。
- 3) 鶴田泰士・石川忠晴・西田修三・成田舞・藤原広和：小川原湖におけるヤマトシジミの繁殖環境について，土木学会論文集，No.705 / -59，pp.175-187，2002。
- 4) 西田修三・佐野俊幸・中辻啓二：汽水湖における流動構造と物質循環過程，海岸工学論文集，第48巻，pp.1116-1120，2001
- 5) 鈴木誠二・西田修三・金城周平・中辻啓二：小川原湖の水質変動とヤマトシジミの生息環境，水工学論文集，第49巻，pp.1243-1248，2005。
- 6) 中村義治：宍道湖ヤマトシジミ個体群の水質浄化機能の評価解析，海岸工学論文集，第48巻，1236-1240，2001。
- 7) Seiji Suzuki, Shuzo Nishida and Keiji Nakatsuji: Analysis of water Quality in Lake Ogawara Using a Coupled Hydrodynamic and Primitive Ecosystem Model, Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management, pp.629-635, 2004.

(2005.9.30受付)