

伊豆沼における湖面風と底質の巻上げについて

東北大学工学部 別当 雄亮
東北大学大学院工学研究科 梅田 信

1. はじめに

多くの閉鎖性水域において富栄養化が進行したことに対し水質改善の対策がなされてきているが、十分に効果が発現していないことも多く、課題となっている。特に、浅い湖沼の水質悪化の傾向が顕著であり、健全な生態系を保全するためにも水質の改善・管理が必要となる。しかし、浅い湖沼においては気象などの条件により底泥が巻き上げが発生し、巻き上げられた濁質から栄養塩が水中へと回帰する。底泥からの内部負荷による水質への影響を抑制し、効果的な水質対策を行うためには、風による底質の巻上げを含めた底質の挙動を考慮に入れることが重要であると考えられる。

そこで本研究では、伊豆沼周辺における風の傾向について既存のアメダスによるデータを分析するとともに、伊豆沼における底質と水の濁りに関する現地観測を行った。また、水理学的な解析に基づく底質巻上げモデルを用いた数値計算を行い、その結果について現地観測結果と比較検討した。

2. 研究対象地域の概要

対象領域である伊豆沼は、宮城県北部に位置する湖沼面積 2.89km^2 、最大水深 1.6m の浅い水域である。伊豆沼の平面図を図-1に示す。図-1に示すよう、流入河川は本川である荒川、内沼からの流出河川である浄土川などがある。これに対して、流出は湖東端の1ヶ所である。また、伊豆沼の水位は下流端に設置されているゲートで管理されている。

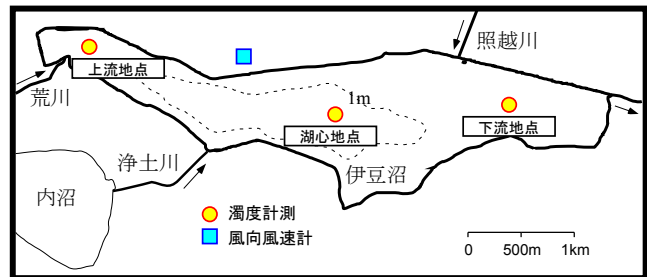


図-1 伊豆沼の平面図と観測地点

伊豆沼周辺の湿地環境は多様な動植物の生息地となっており、国内有数の渡り鳥の飛来地として

ラムサール条約にも登録されている。しかし、家庭内排水の流入、水鳥の糞や餌などの影響により水質が悪化し、2009年には化学的酸素要求量(COD)による評価で全国の公共用水域中ワースト1位となるなど富栄養化が深刻な問題となっている。

3. 風の傾向分析

底質の巻上げに対して、重要な外力となる風の傾向をまず調べた。用いたデータは、伊豆沼の西側6 km地点にある築館アメダスのデータである、対象期間を2000年から2004年として季節ごとの風向の偏り、風速について検討した。

*Study on resuspension of sediment in Lake Izunuma caused by wind induced current

図-2 に 2000 年から 2004 年 5 年間の平均した月ごとの平均風速を示す。12 月から 4 月にかけて平均風速が大きく、特に 3 月から 4 月にかけて強い風が吹いていることがわかる。図-3 に 2000 年から 2004 年の 12 月から 4 月の風向の頻度分布を示す。また、図-4 に 2004 年 2 月、5 月、8 月、11 月の風速変動を、図-5 に 2004 年 1 月から 3 月、4 月から 6 月、7 月から 9 月、10 月から 12 月の風向頻度分布を示した。図-4 から年間を通して 1 日周期の風が吹きやすいことがわかる。図-3 及び図-5 では、冬季に西風の頻度が高いのが特徴的である。これは伊豆沼の上流から下流側への長手方向に対応している。このため、冬季には風下側にあたる伊豆沼の東側ほど風の影響を受けやすく、巻上げが発生しやすいのではないかと考えられる。

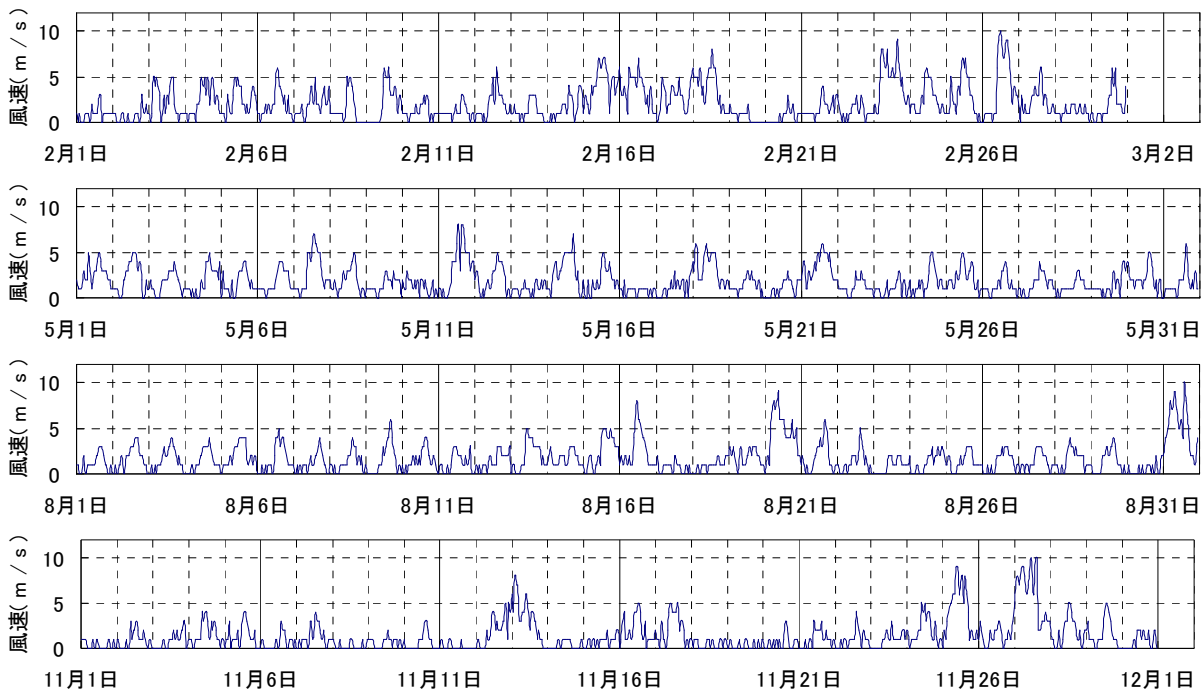
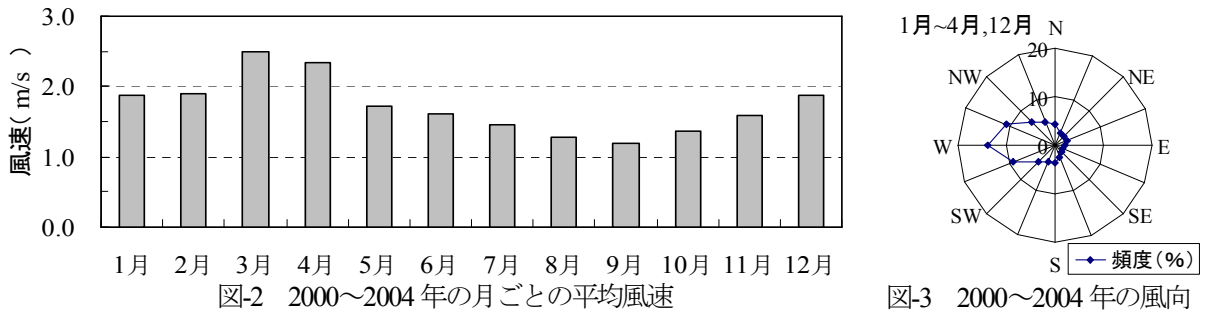


図-4 2004 年 2 月、5 月、8 月、11 月の風速

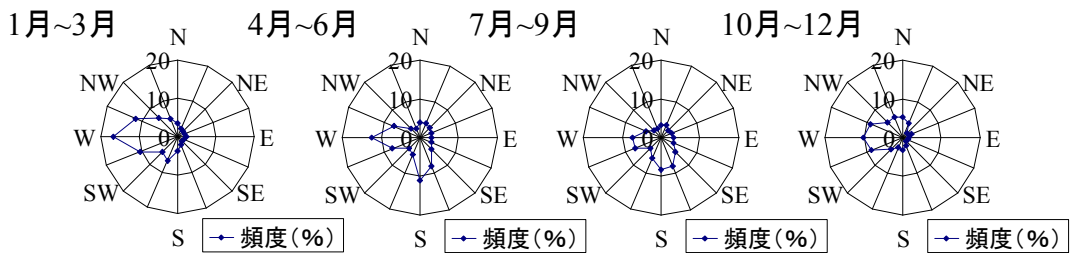


図-5 2004 年季節ごとの風向頻度分布

4. 現地観測

(1) 現地観測の方法

2010年12月に底質の巻上げに関する現地観測を実施した。観測内容は風向・風速および湖内濁度の連続観測と底泥物性の調査である。

風向・風速は図-1に示した地点に風向・風速計を設置し、10分間隔で連続計測を行った。この地点は、湖岸近くで高台になっている場所である。風速計は、地上から約3mの高さに設置したが、湖面からは約20mの高さにあたる。

濁度の観測は次の2通り実施した。まず、12月5日に図-1に示した伊豆沼の上流地点、湖心地点、下流地点において多項目水質計（旧アレック電子（株）製AAQ-1183）を用いて濁度の鉛直分布を測定した。また、12月5日から12月26日に図-1の3地点において、湖底から0.5mの位置にワイパー付き濁度計（JFEアドバンテック（株）製Infinity CLW）を設置し、10分間隔で連続計測を行った。

底泥の物性調査は、エクマン・バージ採泥機を用いて底泥サンプルを採取し、含水率及び粒径分布を測定した。粒径分布は、粗流分については $500\mu\text{m}$ 、 $250\mu\text{m}$ 、 $125\mu\text{m}$ でふるい分けをした後、細粒分については、MICROTRACHRA 9320- \times 100（日機装（株）製）を用いて分析した。

(2) 観測結果と考察

2010年12月5日の湖内3地点における濁度分布の観測結果を図-6に示す。観測時、伊豆沼周辺は晴れていたが、風速4m/s程度の西風が吹いていた。伊豆沼は非常に浅く、湖底が平坦であるため湖心部、下流部の濁度分布は鉛直方向に一様となり、よく混合されていることがわかった。上流部では比較的濁度が高くなっていた。この原因としては、流入河川の影響や他の地点と比較して浅いため巻き上げが生じやすいことなどが考えられる。

上流地点、湖心地点、下流地点の底泥分析の結果を図-7に示す。上流地点、湖心地点、下流地点の粒径の中央値はそれぞれ、 $47\mu\text{m}$ 、約 $200\mu\text{m}$ 、 $54\mu\text{m}$ であった。上流地点、下流地点では似たような粒径分布となっているが、湖心地点は比較的砂質分が多いことがわかった。

12月6日から12月26日までの風向・風速の現地観測値を図-8に、上流地点、湖心地点、下流地点における濁度変動を図-9に示す。12月21日から25日にかけて比較的強い風が吹いており、各地点の濁度についても22日から23日にかけて急激な増加が見られた。これは強風による底質巻上げの影響が出たものと考えられる。上流地点における濁度のピークは風速のピークと一致しており、強風時における風速変動と濁度変動には同様のパターンが見られた。これは、上流地点が非常に浅いため風の影響を受けやすいことによるものと考えられる。湖心地点、下流地点における濁度のピークは風速のピークよりも前に生じており、伊豆沼の底質巻き上げによる濁度上昇には、風速だけでなく風向も大きく作用している可能性がある。また、湖心地点、下流地点では強風発生後は強風発生前に比べて濁度の高い状態が数日間持続することが明らかになった。

5. 濁度の数値解析

(1) 巻き上げモデル

本研究で用いた解析モデルは、伊豆沼と同じく浅い湖沼である霞ヶ浦において開発された銭ら¹⁾の3次元の流動解析モデルに、同じく霞ヶ浦の底質の巻上げの解析に用いられた梅田ら²⁾による巻き上げモデルを組み合わせたものである。以下に本論分で用いた際の条件等をあわせて、解析の詳細を示す。

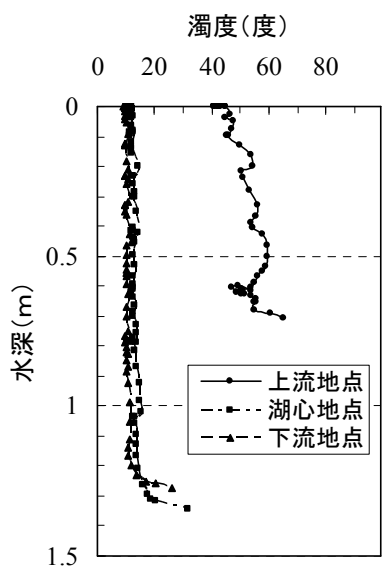


図-6 濁度の現地観測結果

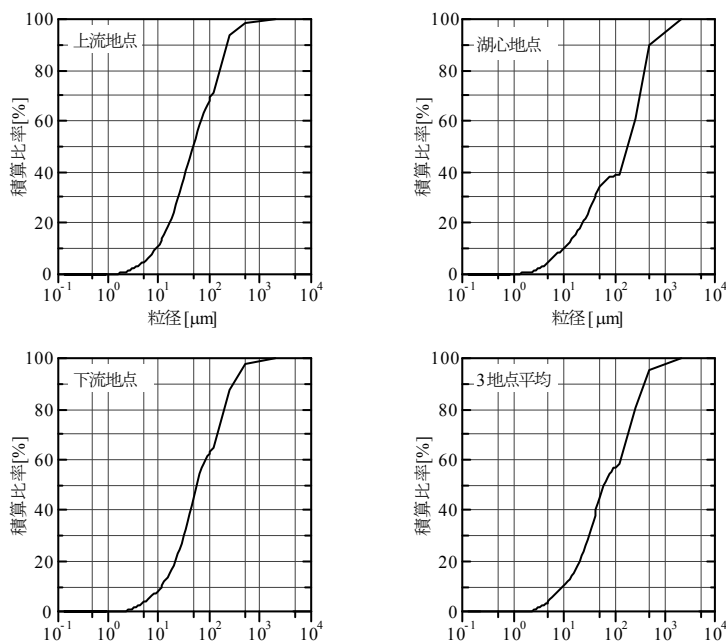


図-7 地点別粒径分布

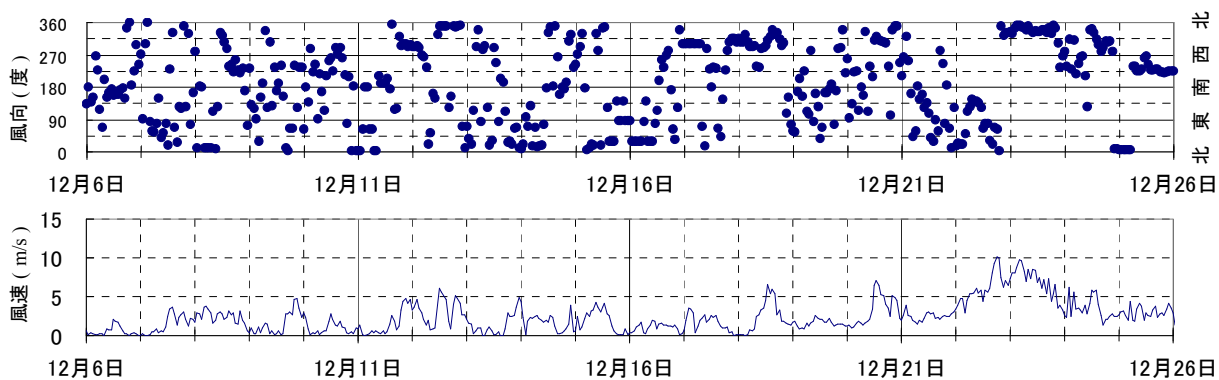


図-8 12月風向・風速 (現地観測値)

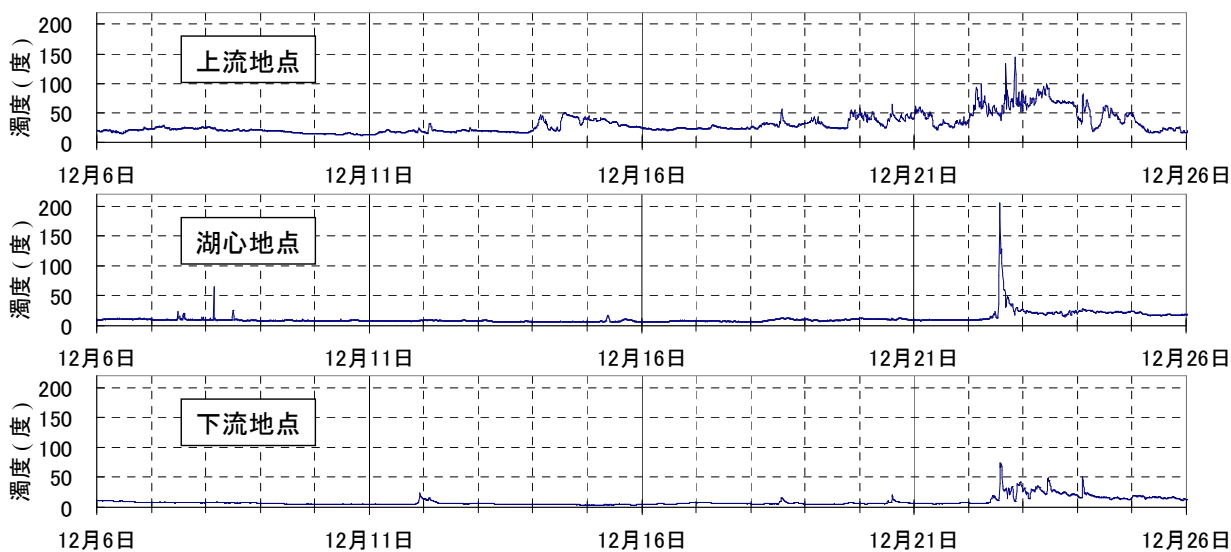


図-9 地点別濁度変動

流動計算の基礎方程式として、三次元の運動方程式、連続条件式、k-ε乱流モデル式を用いた。なお、相対密度差の保存式は考慮に入れない。と言うのも、底泥の巻上げの生じる強風時には、全層で混合しており、密度差（温度差）の影響は、ほとんどないからである。

水平方向のメッシュサイズは 94m×100m とし、鉛直方向には 0.1m とした。水面での風の摩擦速度は次式で与えた。

$$\rho_w u_*^2 = 0.5 \times 10^{-3} \rho_a U_{10}^{2.5}$$

ここに、 u_* : 水中の摩擦速度、 ρ_w : 水の密度、 ρ_a : 空気の密度、 U_{10} : 風速であり、ここでは図-1 の地点で観測された値を湖全域で一様に与えた。また、湖底摩擦は

$$\tau_i = f_b u_{1i} |u_i|$$

により与えた。ここに、 τ_i : i 方向のせん断応力、 f_b : 摩擦係数 (0.005)、 u_i : i 方向流速である。

k 及び ε の水面と湖底での境界条件は、壁関数を用いて与えた。

$$k = \frac{f_b u^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \varepsilon = \frac{(f_b u^2)^{3/2}}{\kappa \Delta z / 2},$$

ここに、 u : 水平流速の絶対値、 C_μ : k-ε モデル定数 (=0.09)、 κ : カルマン定数 (=0.4)、 Δz : 鉛直メッシュサイズである。

濁質粒子の沈降速度を考慮し拡散計算を行った。基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial C}{\partial z} \right) = 0$$

ここに、 x, y : 水平座標、 z : 鉛直上向き座標、 u, v, w : それぞれ x, y, z 方向の流速、 C : 濁度、 w_s : 濁質粒子の沈降速度、 ν_L : 水平方向の渦動粘性係数、 ν_T : 鉛直方向の実効動粘性係数である。なお、ここで実効動粘性係数とは、層流状態のときの分子運動による動粘性係数と乱流時の渦動粘性係数の和として表されるものである。また、水平方向の渦動粘性係数は、Richardson の 4/3 乗則により計算メッシュサイズの関数として与えている。拡散方程式の境界条件として

$$flux = \alpha \varepsilon - w_s C$$

を巻き上げ、堆積フラックスとして考慮する。係数 α は既往の研究²⁾ から経験的に $\alpha = 15$ を設定した。

(2) 計算条件

計算期間は、最大風速が 10m/s を超える風の生じた 2010 年 12 月 21 日午前 0 時から 25 日午前 0 時までの 96 時間を設定した。この期間の風速条件は図-10 に示した通りである。濁質の沈降速度は調査した 3 地点の底質の平均粒径分布を求め (図-7 参照)、この中央値である 62 μm に対して、ストークスの沈降則から沈降速度に換算し、 2.93×10^{-3} m/s と与えた。

(3) 計算結果及び現地観測との比較考察

計算結果は濁度の現地観測を行った地点と同様に上流部、湖心部、下流部における湖底から 50cm の位置の SS 濃度を出力した。計算結果と同期間における濁度の実測値を図-11 に示す。結果から風速 5m を超える風で底泥の巻上げが大きくなる可能性が示唆された。しかし、計算結果と濁度の現地観測結果と比較すると湖心地点のピークとなる時間は一致していたものの全体的にかなり過大評価となっていることがわかった。今後は巻き上げ式の定数を変えてみるなど、モデルを改良していく必要がある。

6. おわりに

本研究では、伊豆沼周辺における風の傾向を分析するとともに、伊豆沼において底質と水の濁りに関する現地観測を行った。その結果から、風向風速と濁度変動には関係があり、底質の巻上げが伊豆沼の濁度に影響を与えていることが確認された。また、水深の浅い地点ほど風の影響を受けやすいことがわかった。

さらに、既往の研究をもとに底質巻上げモデルを用いた濁度の経時変化を計算し、その結果と現地観測結果とを比較検討した。これにより、風速 5 m/s を超える風で巻上げが生じる可能性が示唆されたが、濁度の計算結果は全体的に過大評価となっており、さらなるモデルの改良が必要であることが明らかになった。

以上のことから伊豆沼における強風時の濁度変動を $k-\epsilon$ モデルを用いた三次元流動計算を行うことにより再現することが可能であることがわかった。これにより、風による濁度変動を把握することは、浅い湖沼における水質管理において有効な手段になると考えられる。

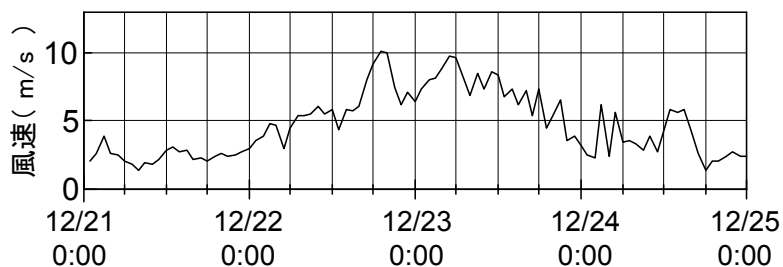


図-10 計算期間の風速

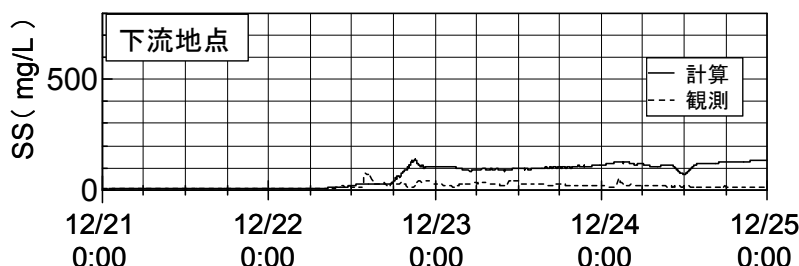
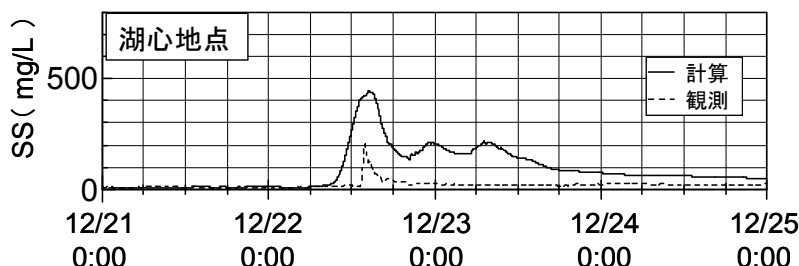
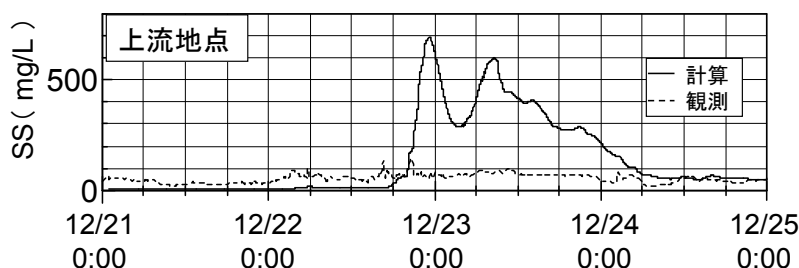


図-11 底泥巻き上がり時の計算結果

謝辞

現地調査実施に際して、宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団にご協力頂いた。また本研究は、環境省の環境研究総合推進費 (B-1004) の支援により実施された。

参考文献

- 1) 銭新, 石川忠晴, 西部隆宏: 霞ヶ浦高浜入りにおける日成層形成時の湾水交換の数値シミュレーション, 土木学会論文集, vol.43, pp.1216-1220, 1996
- 2) 梅田信・長嶺知徳・長広遥・石川忠晴・宇多高明: 霞ヶ浦湖心部における底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論文集, vol.45, pp.1171-1176, 2001