

諏訪湖における風波の影響を考慮した 底泥の輸送解析

SIMULATION OF BOTTOM SEDIMENTS TRANSPORTATION
CONSIDERING THE EFFECT OF WIND WAVE IN LAKE SUWA

豊田政史¹・北村聡²・富所五郎³

Masashi TOYOTA, Satoshi KITAMURA and Goro TOMIDOKORO

¹正会員 工修 信州大学助手 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野市若里4-17-1)

²学生会員 信州大学大学院工学系研究科博士前期課程社会開発工学専攻 (同上)

³正会員 工博 信州大学教授 工学部社会開発工学科 (同上)

We have developed the model to describe the bottom sediments transportation such as the resuspension and movement in Lake Suwa. In this model, the effect of wind wave is taken into account, because wind wave plays an important role in the resuspension of bottom sediments in shallow area especially. As a result, it could be simulated that the wind wave has a greater influence than the current on the resuspension of bottom sediments in shallow and long-fetch area. Moreover, the resuspended sediments are transferred offshore by the vertical water circulation in this simulation.

Key Words : wind wave, bottom sediment, resuspension, shear stress

1. はじめに

諏訪湖は、全国に先駆けて富栄養化が進行し、一時は過栄養湖の状態にまで至った¹⁾。そのため、1960年代には浄化対策が検討されはじめ、1969年から湖底に堆積した底泥の浚渫事業が始まった。現在、湖面積の約50%の浚渫が終了している状態である。諏訪湖においては、浚渫に加えて、流域下水道の整備等が行われており、最近はリンが環境基準を下回るなど、水質改善の傾向が見られはじめている。

水質浄化対策を行うには、湖内水中に含まれる栄養塩や環境化学物質などの物質循環過程を把握することが重要である。その中でも特に、流入河川から湖への流入量および湖から流出河川への流出量の把握は不可欠である。これらに加えて、湖内の物質循環に対して、大きな役割を果たすのが、底泥中に蓄積されている栄養塩や環境化学物質の水中への還元である。水中への還元は、底泥からの溶出に加えて、短期的には強風作用時における底泥の巻き上げが要因として考えられる。

本研究では、浚渫効果の定量的な評価および環境化

学物質循環過程解明のために重要であると思われる底泥の輸送メカニズムを数値モデル化し、底泥輸送解析を行う。土砂の輸送を解析する数値モデルは、河床変動や海浜変形などの分野で数多く作成されてきている。一方、湖や内湾などの閉鎖性水域では、浅場において底泥の巻き上げが水中の物質循環に大きく関わっている観点から、近年になって底泥輸送解析が多くなされるようになってきた。中川²⁾は、内湾の沿岸域における底質の泥化現象について着目し、潮流による底質の輸送を現地観測と数値解析で検証している。梅田ら³⁾は、現地観測結果から、霞ヶ浦湖心部における底泥の浮上には、流れによるせん断乱れよりも、水面における風波による擾乱が支配的と推察し、三次元k-εモデルの乱流パラメータと底泥巻き上げ率の現地観測結果との関係を検討し、濁度の時系列を再現している。稲垣ら⁴⁾は、南サンフランシスコ湾において、潮流・吹送流・風波を考慮できるモデルを作成し、湾内の土砂輸送機構を説明している。本研究では、稲垣らと同様に、風波の影響が底泥の巻き上げに大きく作用する⁵⁾と考え、底泥の巻き上げにおいて、流れに加えて簡易的に風波の影響を考慮した数値モデルによる解析を行った。

2. 諏訪湖の概要

(1) 地形特性

諏訪湖（北緯 $36^{\circ} 03'$ ，東経 $138^{\circ} 05'$ ）は、長野県中央部の霧ヶ峰山麓と赤石山脈に挟まれた諏訪盆地の北西端に位置している。図-1に示すように、平面形状は台形状になっていて、面積は 13.3km^2 、最大水深は 7.2m 、平均水深は 4.7m である。なお、図中には、等深線も示してある。湖底の形は底の浅い皿状になっている。また、流域面積は 531km^2 であり、湖面積の約40倍である。湖の流入河川は31河川であるが、流出河川は天竜川のみとなっており、釜口水門より流出している。

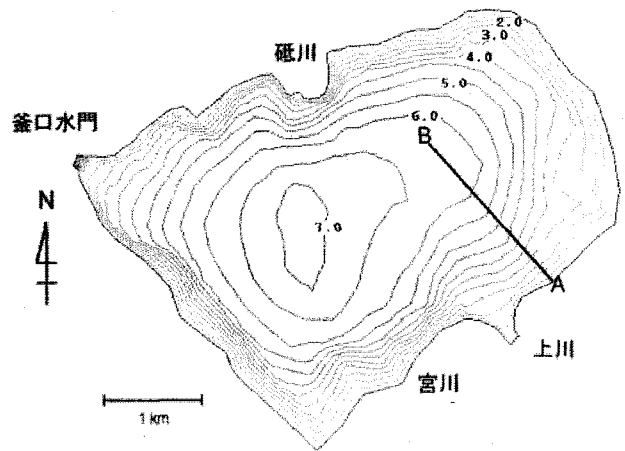
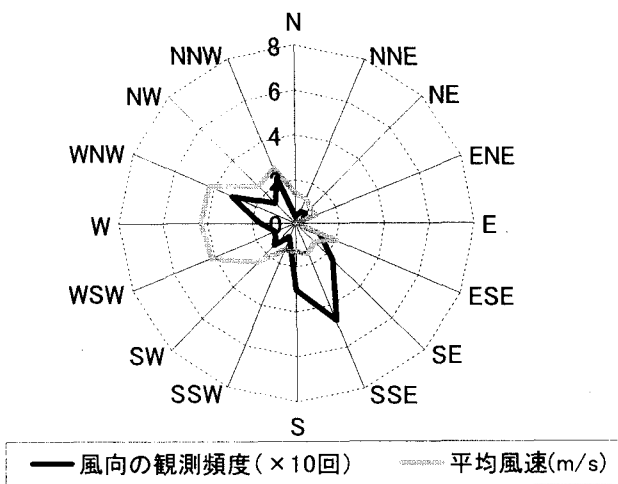
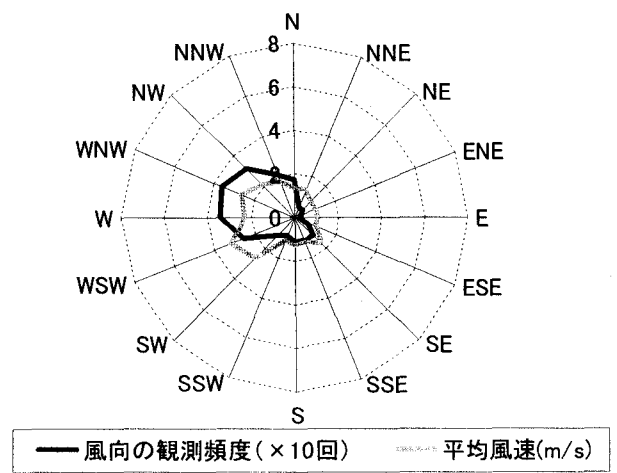


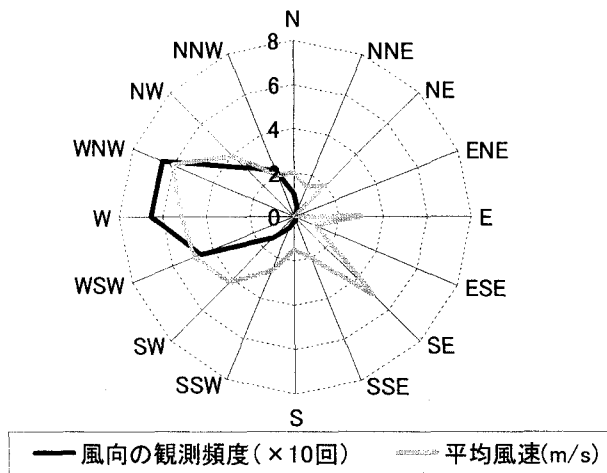
図-1 諏訪湖の概要（図中の数字は等深線、単位はメートル）



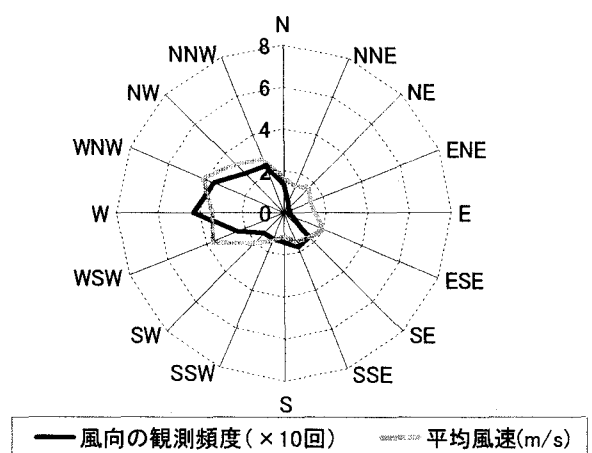
(a) 3時



(b) 9時



(c) 15時



(d) 21時

図-2 諏訪湖測候所における毎正時の風向の観測頻度と平均風速（1月）

(2) 風の特徴

図-2に、1991年から1999年までの諏訪湖測候所における1月の風向の観測頻度とその平均風速（3, 9, 15, 21時）を示す。これらの図より、風向は夜中（3時）には南東と北西が卓越しているが、日中（9時, 15時）は西～北西が他の風向に比べて著しく卓越し、夜間（21時）においても、日中ほどではないが、西～北西が卓

越していることがわかる。また、平均風速は昼間においては $5\sim 6\text{m/s}$ となっており、このことは冬期に強風が西～北西の方向から吹き続ける日が多いことを示している。なお、ここには示さないが、夏期には北西と南東の風が卓越しており、この原因としては海風が考えられている。

3. 底泥輸送解析モデルの概要

底泥輸送解析を行うにあたっては、湖流とSS濃度を連立させて求めることが望ましいが、本解析では、計算容量の都合上、以下の2段階に分けて行った。

- ① まず、外力（風および河川からの流入出量）を与えて、運動方程式および連続式から定常状態の湖流を求める。これらの基礎式においては、静水圧分布を仮定し、空間変数にGalerkin有限要素法、時間変数にRunge-kutta法を用い離散化を行った⁶⁾。
- ② 次に、求まった定常状態の湖流を用いて、底泥の巻き上げおよび沈降を考慮したSSの移流拡散方程式を解き、SS濃度の分布を求める。このときの離散化方法は運動方程式と同様に行った。また、ここで、底泥の巻き上げ量および沈降量から湖底の底泥堆積量（浸食量）を求める。なお、巻き上げ量の評価には、風波による底面せん断応力を考慮している。

以上の解析で用いた基礎式は、以下の通りである。

[Reynoldsの運動方程式]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L \cdot u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + D \cdot u + f \cdot v \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + L \cdot v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + D \cdot v - f \cdot u \quad (2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g \quad (3)$$

[連続式]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

[SSの移流拡散方程式]

$$\frac{\partial c}{\partial t} + L \cdot c = D' \cdot c - \frac{\partial c}{\partial z} w_0 \quad (5)$$

ただし、

$$L = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

$$D = \frac{\partial}{\partial x} (A_h \frac{\partial}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h \frac{\partial}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_v \frac{\partial}{\partial z})$$

$$D' = \frac{\partial}{\partial x} (D_h \frac{\partial}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_h \frac{\partial}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_v \frac{\partial}{\partial z})$$

ここに、 u, v, w (m/s) : x, y, z 方向の流速成分、 t (s) : 時間、 ρ (kg/m³) : 水の密度、 P : 圧力 (N/m²)、 g (m/s²) : 重力加速度、 A_h, A_v (m²/s) : 水平および鉛直渦動粘性係数、 f (1/s) : コリオリ係数、 c (kg/m³) : SS濃度、 D_h, D_v (m²/s) : 水平、鉛直渦拡散係数、 w_0 (m/s) : 沈降速度である。

ここで、巻き上げ量 E (kg/m²/s) および沈降量 D (kg/m²/s) の評価は式 (1) で行った⁷⁾。なお、土粒子の沈降速度 w_0 (m/s) はストークスの式より求めた。

$$E = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right), D = w_0 C_{bed} \quad (6)$$

ここに、 τ_b (N/m²) : 底面せん断応力、 τ_e (N/m²) : 限界底面せん断応力、 M (kg/m²/s) : 浸食速度定数、 C_{bed} (kg/m³) : 底層SS濃度である。ここで、 τ_b の評価にあたり、水深の浅い諏訪湖では底泥の巻き上げに風波の影響が大きく作用すると考え、湖流によるものと風波によるものとを足し合わせることにした。すなわち、

$$\tau_b = \tau_{b,c} + \tau_{b,w} \quad (7)$$

である。ここに、 $\tau_{b,c}$ (N/m²) : 湖流による底面せん断応力、 $\tau_{b,w}$ (N/m²) : 風波による底面せん断応力で、 $\tau_{b,w}$ は式 (8) で求めた⁸⁾。

$$\tau_{b,w} = \rho \frac{f_{cw}}{2} \hat{U}_w^2 \quad (8)$$

f_{cw} は摩擦係数で、田中、THUの方法により求めた⁸⁾。また、 $\hat{U}_w$ (m/s) は波速振幅で、微小振幅波理論より、

$$\hat{U}_w = \frac{\pi H_{1/3}}{T_{1/3}} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \quad (9)$$

で求めた。ここに、 k (m⁻¹) : 波数、 h (m) : 水深、 $H_{1/3}$ (m) : 有義波高、 $T_{1/3}$ (s) : 有義周期で、 $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ は以下のように井島らの浅水域に対する波浪推算の式で求めた⁹⁾。

$$gH_{1/3}/U_{10}^2 = 0.30A \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(gF/U_{10}^2 \right)^{1/2} / A \right\}^{-2} \right] \quad (10)$$

$$gT_{1/3}/(2\pi U_{10}) = 1.37B \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(gF/U_{10}^2 \right)^{1/3} / B \right\}^{-5} \right] \quad (11)$$

ただし、

$$A = \tanh \left\{ 0.578 \left(gh/U_{10}^2 \right)^{3/4} \right\}$$

$$B = \tanh \left\{ 0.52 \left(gh/U_{10}^2 \right)^{3/8} \right\}$$

ここに、 U_{10} (m/s) : 湖面上10mでの風速、 F (m) : 吹送距離である。

4. 解析条件および結果

(1) 解析条件

本解析では、2. (2) で述べた冬季の卓越風である北西の風が10m/sの強さで吹き続けた場合を想定する。

まず、湖流解析に用いた解析メッシュを図-3に示す。流量の変化が大きいと予測される流出、流入河川の河口付近は細かいメッシュを配置しており、節点数は6000、要素数は11689である。

ここで、北西の風による各節点の吹送距離を事前に計算する。この吹送距離を式 (10) , (11) に用いると、波高と周期が計算できる。図-4に波高分布を示す。吹送距離の大きい南東岸で波高が大きくなっており、最大で約25cmとなった。なお、周期についても、ほぼ同様の分布が得られ、最大で約1.4sとなった。

また、解析に考慮する流入河川は流域面積の大きい上川・宮川・砥川の3河川とし、流出河川は天竜川（釜口水門）のみとした。まず、湖流解析において、流出入河川の境界条件として流速観測値の標本メディアンを、解析対象領域全体の初期条件として0m/sを与えて定常解を求めた。次に、底泥(SS)の移流拡散解析において、流出入河川の境界条件としてSS観測値の標本メディアンを、解析対象領域全体の初期条件として諏訪湖（3カ所）における観測平均値を与えた。なお、これらの初期条件・境界条件の設定に用いた観測値は、公共用水質測定結果（1994年4月～2000年3月）¹⁰⁾に基づいている。これらの詳しい値は、表-1に示す。

限界底面せん断応力 τ_e については、諏訪湖の底泥を用いた実験¹¹⁾によると0.1(N/m²)程度となっている。また、琵琶湖での解析¹²⁾でも0.1(N/m²)程度で底泥の再浮上が起こると報告されている。しかし、振動流である波は底泥の表層を弱くするため、一方向流が底泥に作用する場合に比べて、より小さなせん断応力で底泥の巻き上げが生じることがわかっている⁷⁾。これらのことをふまえて、本研究では、 $\tau_e = 0.05$ (N/m²)とした。浸食速度定数 M (g/m²/s) については、Tsuruya et al. ¹³⁾と同様に 1.5×10^{-3} (g/m²/s)とした。また、底泥の粒径は、現地観測¹⁴⁾から得られた中央粒径 $d_{50} = 9.32 \times 10^{-6}$ (m)で一様であると仮定した。本論文では、底泥の移流拡散解析開始10時間後の結果を示し、考察を行う。

(2) 解析結果

まず、図-5に水面下1.0mにおけるSS濃度を示す。図-4の吹送距離が大きい部分で、SS濃度が大きくなっていることがわかる。その値については、風上側では0～100 (g/m³) の範囲であるが、風下側にいくほど大きくなり、宮川と上川河口付近の湖岸においては、SS濃度が200～300 (g/m³)となっている。また、上川河口の水深の小さいところで、1000 (g/m³) 以上となっている。

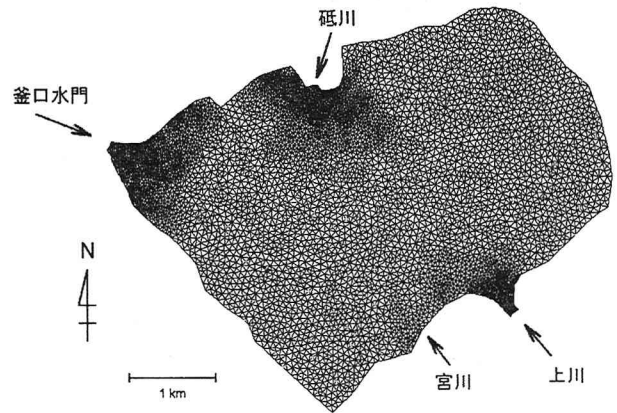


図-3 解析メッシュ

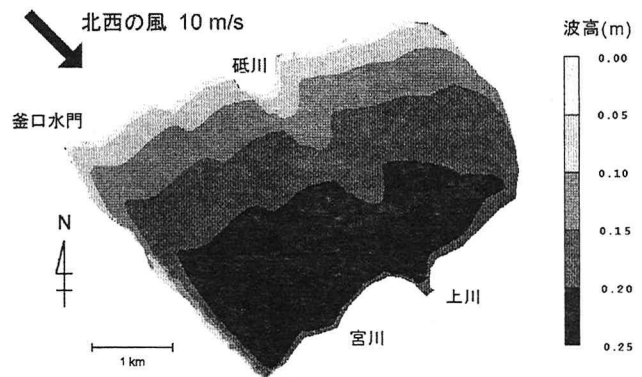


図-4 北西の風10(m/s)時の波高分布

表-1 湖流およびSS解析の境界条件

	上川	宮川	砥川	釜口水門
流量(m ³ /s)	3.1	1.6	1.7	6.4
SS (g/m ³)	3.0	4.0	4.0	—

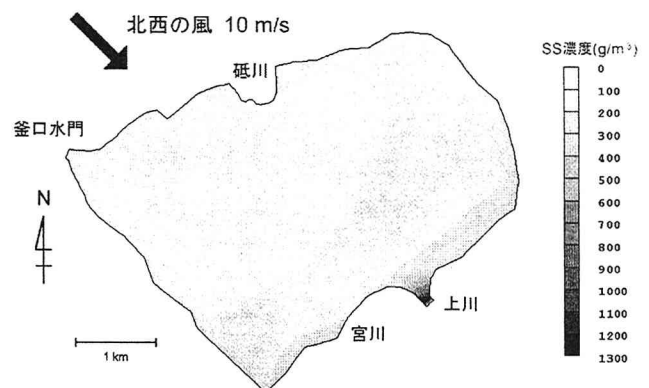


図-5 水面下1.0mにおけるSS濃度

次に、図-6に1日あたりの底泥浸食および堆積厚（プラスが浸食、マイナスが堆積）を示す。図-5でSS濃度が大きくなっている宮川と上川河口付近の湖岸においては浸食傾向を示しているが、そのほかのほとんどの部分では、堆積傾向を示していることがわかる。これらのことから、宮川と上川河口付近の湖岸においては吹送距離が大きく水深が小さいために風波が発達し、その風波によって底泥が巻き上げられSS濃度が上昇していることが予想される。

そこで、図-7に(a)湖流による底面せん断応力分布、(b)風波による底面せん断応力分布、(c)全底面せん断応力分布を示す。図-7(a)によると、せん断応力の分布にばらつきはあるが、湖全体において底泥の巻き上げが始まるせん断応力である $0.05 \text{ (N/m}^2\text{)}$ 以下となっている。一方、図-7(b)によると、宮川および上川河口付近の湖岸では $0.05 \text{ (N/m}^2\text{)}$ をこえているが、そのほかのほとんどの部分では $0.025 \text{ (N/m}^2\text{)}$ 以下となっている。図-7(a)と図-7(b)を加えあわせた図-7(c)によると、宮川および上川河口付近の湖岸では(b)の分布、そのほかのほとんどの部分では(a)の分布とほぼ同様になっている。また、その大きさは宮川および上川河口付近の湖岸でのみ、底泥の巻き上げが始まるせん断応力である $0.05 \text{ (N/m}^2\text{)}$ を上回っている。これらのことから本解析においては、湖流よりも風波による巻き上げの影響を受けて底泥が輸送されているといえる。

このことを詳しくみるために、図-1に示す直線AB上における流速およびSS濃度の鉛直断面分布をそれぞれ図-8(a)、(b)に示す。図-8(a)をみると、北西の風によって、表層では沖から岸へ、底層ではその流れを補償するように岸から沖への流れが生じており、鉛直断面内で循環流が生じていることがわかる。図-8(b)をみると、湖岸の水深1m程度となっている浅い場所でのSS濃度がもっとも大きく、沖へいくにつれて、小さくなっていることがわかる。これは、水深の小さい湖岸付近で巻き上がった底泥が、図-8(a)に示した鉛直循環流によって沖へ輸送されている様子を表していると考えられる。

諏訪湖においては底泥の巻き上げに関する観測はなされていないが、霞ヶ浦¹⁵⁾や琵琶湖¹²⁾では観測が行われている。これらの観測は、水深2～2.5mの地点で行ったものであり、風速が 6.0 (m/s) 以上になると底泥が浮上し始め、 12.0 (m/s) 以上になるとSS濃度が $200 \sim 300 \text{ (g/m}^3\text{)}$ に上昇している。また、風速 10 (m/s) 程度のときに浸食される底泥は数mmから1cm程度と報告されている。本解析結果は、水深2～2.5m地点ではこれらの観測値と近い値を示した。しかし、風波が発達する湖岸付近の水深1m地点では、 $25 \sim 50 \text{ (cm/day)}$ 程度の浸食厚となっており、また、上川河口付近ではSS濃度が $1000 \text{ (g/m}^3\text{)}$ 以上となっている。これらの値の妥当性については不明であり、今後の検討が必要である。

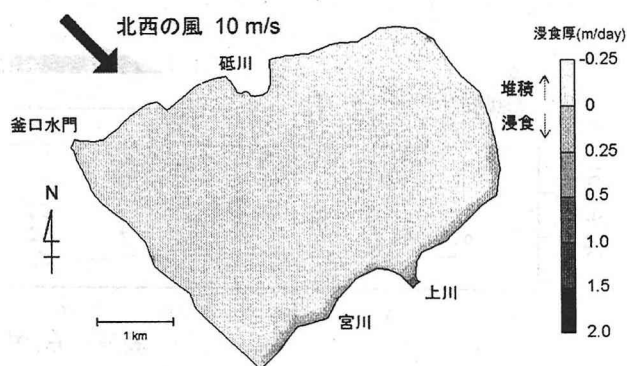


図-6 1日あたりの底泥浸食および堆積厚

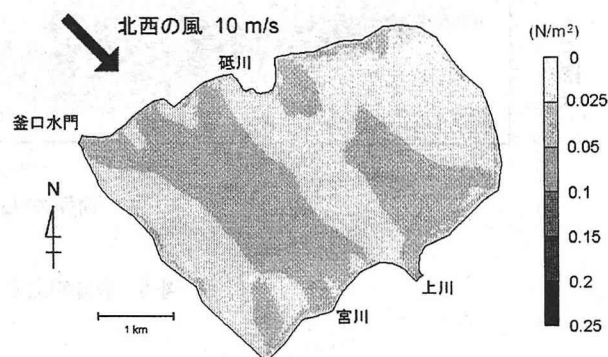


図-7(a) 湖流による底面せん断応力分布

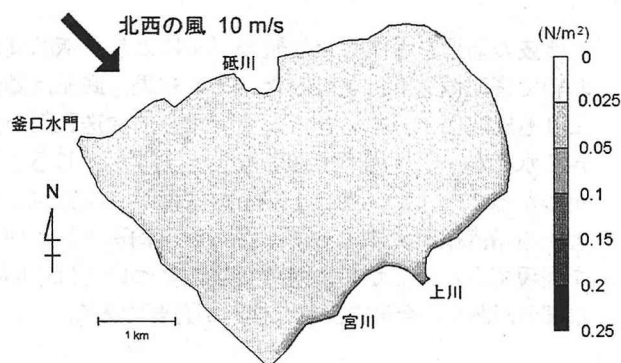


図-7(b) 風波による底面せん断応力分布

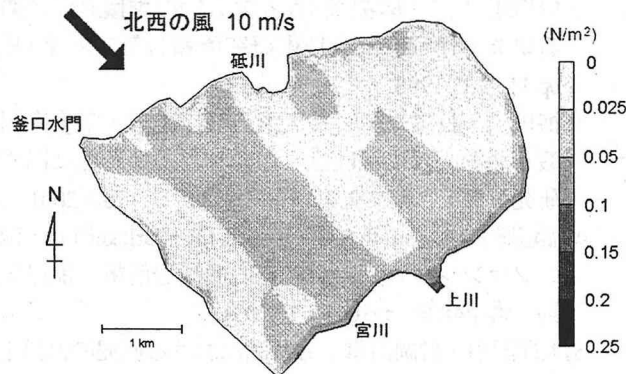


図-7(c) 全底面せん断応力分布

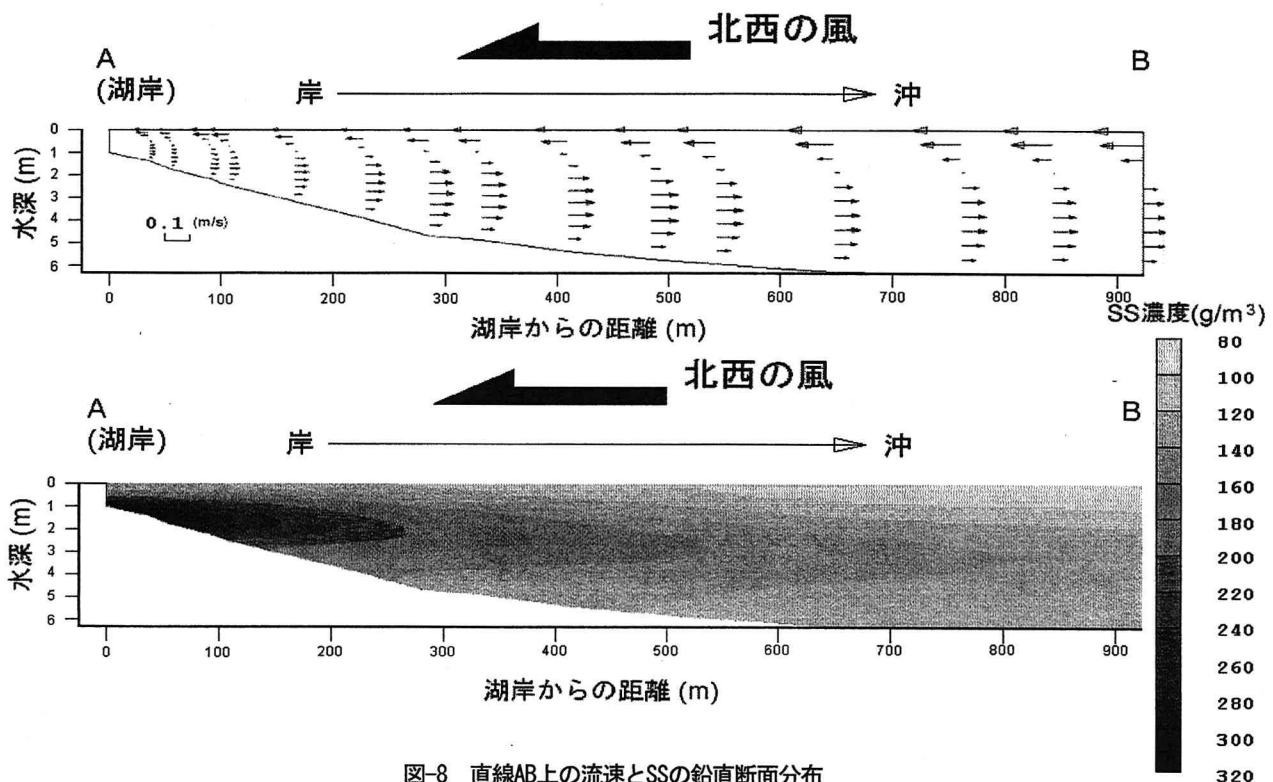


図-8 直線AB上の流速とSSの鉛直断面分布

5. おわりに

風波の効果を考慮した数値モデルにより、諏訪湖において底泥輸送解析を行った。その結果、底泥は湖流よりも風波によって巻き上がっており、吹送距離が大きく水深が小さい場所で顕著な巻き上げが生じることがわかった。また、巻き上がった底泥が、吹送流に起因する鉛直循環流によって岸から沖へ輸送される様子を表現できた。しかし、値の妥当性については不明確な部分があり、今後の詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 日本水環境学会編：日本の水環境 関東甲信越編，pp.2-7，技報堂出版，2000。
- 2) 中川康之：内湾域における泥質物の堆積過程に関する研究，運輸省港湾技術研究所報告第37巻第4号，pp.113-133,1998。
- 3) 梅田信・長峯知徳・長広遙・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，水工学論文集第45巻，pp.1171-1176，2001。
- 4) 稲垣聡・Monismith.S.G・Koseff.J.R・Bricker.J.D：南サンフランシスコ湾における底泥輸送解析，海岸工学論文集第48巻，pp.641-645,2001。
- 5) 大坪国順・村岡浩爾：霞ヶ浦における底泥の再浮上に関する現地観測およびシミュレーション，第29回水理講演会論文集，pp.353-358，1985。
- 6) 富所五郎：FEMによる浅水域における三次元流動解析，第27回海岸工学講演会論文集，pp.453-457,1980。
- 7) W.van.Leussen.and.J.Dronkers：Physical Processes in Estuaries，pp.13-14,1988。
- 8) 田中仁・THU.A：全てのflow regimeに適用可能な波・流れ共存場抵抗則，土木学会論文集No.467/ II - 23,pp.93-102,1993。
- 9) 井島武士：波浪の数値予測，土木学会1968年度水工夏期研修会講義集A，pp.2-1～2-30,1968。
- 10) 長野県：水質測定結果（平成6年度～平成11年度）
- 11) 大坪国順：底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究，国立公害研究所研究報告第42号，p.127,1983。
- 12) Kumagai.M：Predictive Model for Resuspension and Deposition of Bottom Sediment in a lake，Jpn.J.Limnol.Vol.49,No.3,pp.185-200,1988。
- 13) Tsuruya.H, Murakami.K, and Irie.I：Mathematical Modeling of Mud Transport in Ports with a Multi-Layered Model -Application to Kumamoto Port-, REPORT OF THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE Vol.29,No.1,pp.3-51,1990。
- 14) 長野県諏訪建設事務所，河川環境管理財団：諏訪湖浚渫に関するモニタリング調査委員会第3回委員会資料,1999。
- 15) Otsubo.K and Muraoka.K：Field Studies on Physical Properties of Sediment and Sediment Resuspension in lake Kasumigaura，Jpn.J.Limnol.,Vol.48,S131-S138,1987。

(2002. 9. 30受付)