

河川－湖沼結合モデルに基づく手賀沼における 土砂輸送シミュレーション

COMPUTATION OF SEDIMENT TRANSPORT IN LAKE TEGANUMA WITH A COUPLED RIVER-LAKE MODEL

山崎裕介¹・二瓶泰雄²・大関雅丈³

Yusuke YAMASAKI, Yasuo NIHEI and Masatake OOZEKI

¹学生員 修（工） 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士後期課程
（〒278-8510 千葉県野田市山崎2641）

²正会員 博（工） 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科（同上）

³学生員 学（工） 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程（同上）

To perform a computation of water environments in lake with accurately evaluating discharge and pollutant loads in influent rivers, we develop a coupled river-lake model in which a river-flow simulation is employed with a new simplified horizontal coordinate system, named horizontal sigma coordinates. In the numerical simulation for river flow and sediment transports with the coupled river-lake model, the computational results for SS fluctuations in the river and lake give acceptable agreements with those of the observed data, demonstrating the fundamental validity of the present model. It is also noteworthy that the treatment of the erosion rate of sediments has a key role on an accurate computation of sediment transports in an urban river estuary.

Key Words : *Coupled river-lake model, horizontal coordinate, Lake Teganuma, sediment transport*

1. 序論

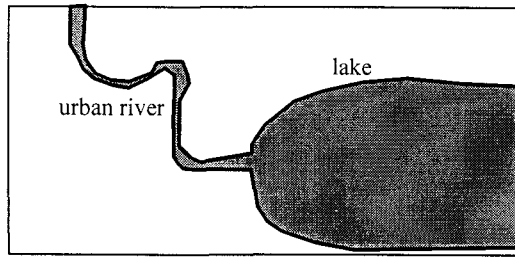
富栄養化した湖沼における水環境シミュレーションでは、水質環境に多大な影響を与える陸域影響を反映するために、流入河川からの流量や汚濁物質輸送量を適切に考慮することは必須となる。このような湖沼計算における河川の取り扱いとしては、単純には、湖沼と河川の接続点において境界条件として河川流量や汚濁物質負荷量を与え、湖沼内のみを計算するということが考えられる^{1)・2)}。しかしながら、この接続点では、境界条件として与えるべき観測データセットが一般には十分揃っていない。また、河川下流域では、底質巻上げ・沈降過程が汚濁物質動態に大きく影響している³⁾、このような河川内での巻上げ・沈降過程を考慮した形で汚濁負荷量をモデル化する必要がある。以上のことから、陸域影響を適切に考慮するためには、湖沼のみを計算対象とするのではなく、湖沼と河川を一体とした数値シミュレーションを実施する必要がある。

湖沼とそこへの流入河川の空間スケールは一般的に大きく異なるため、河川計算に対して湖沼計算と同一の座標系や格子解像度を適用すると、空間解像度が粗くなり、

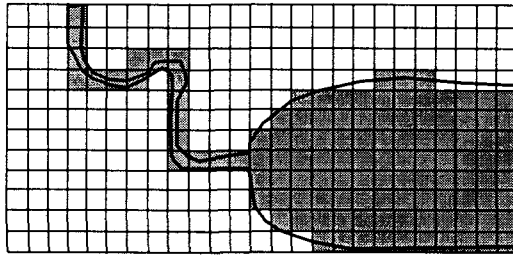
河川における局所的な流速の再現性は著しく低下するものと考えられる。このような問題点を解消するためには、河川モデルと湖沼モデルにおいて各々異なった座標系や格子解像度を採用し、その河川モデルと湖沼モデルを結合した数値モデルを開発することが望ましい。そのとき、河川モデルの水平座標系としては、河川平面形状を適切に取り扱うために一般座標系^{4)・5)}を採用することが考えられるが、複数の流入河川を抱える湖沼を想定すると、より簡便な境界適合座標系の導入が必要となる。

本研究では、著者らが最近提案している簡易境界適合座標系⁶⁾に基づく河川モデルと、一般的な湖沼モデルをカップリングした数値モデル（以下、**河川－湖沼結合モデル**と呼ぶ）を構築する。この河川－湖沼結合モデルを用いて、富栄養化湖沼として有名な手賀沼⁷⁾とその主要流入河川の一つである大堀川を対象とした土砂輸送シミュレーションを実施する。この計算結果と、別途行われた観測結果³⁾との比較を通して、本論文で提案する河川－湖沼結合モデルの有効性を検証するとともに、都市河川（大堀川）河口域における土砂動態について検討する。

2. 河川－湖沼結合モデルの概要



(a) 実地形



(b) 格子配置

図-1 矩形格子座標系でかつ同一の格子幅を用いた場合における河川・湖沼での計算格子設定例

(1) 河川－湖沼結合モデルの必要性と基本構成

河川－湖沼結合モデルが具備すべき必要条件を、図-1 (a) に示されているような湖沼とそこへ流入する一つの河川を例に説明する。湖沼計算で一般に用いられるデカルト座標系を、湖沼と同一の格子解像度で河川計算に適用すると、河川での計算格子は図-1 (b) のように配置される。これより明らかなように、河川形状は滑らかではなく階段状に表現され、また、河川の幅も格子サイズに規定されて実際とは大きく異なる。この場合には、河川内における流速分布や底質の巻上げフラックスの評価精度が大幅に低下し、結果として、精度の良い流動・土砂動態シミュレーションを行うことは難しいものと考えられる。

この問題を回避するには、河川モデルと湖沼モデルにおいて、それぞれ異なった座標系や格子解像度を採用する必要がある。特に、河川モデルとしては、河道平面形状を忠実に再現しつつ、より計算負荷の少ない水平座標系を導入することが望ましい。そのため、本研究では、河川流計算のための簡易的な境界適合座標系として提案されている水平 σ 座標系⁶⁾を採用することとする。また、湖沼モデルとしては、一般的なデカルト座標系をベースとする流動モデルを用いており、河川計算と湖沼計算における計算結果を河川と湖沼の接続点において双方向に交換する。

(2) 河川モデルについて

河川モデルにおけるキーポイントとなる水平座標系と

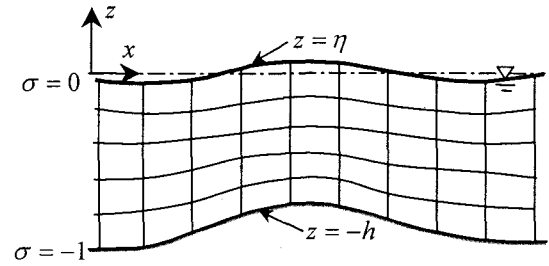


図-2 σ 座標系の設定

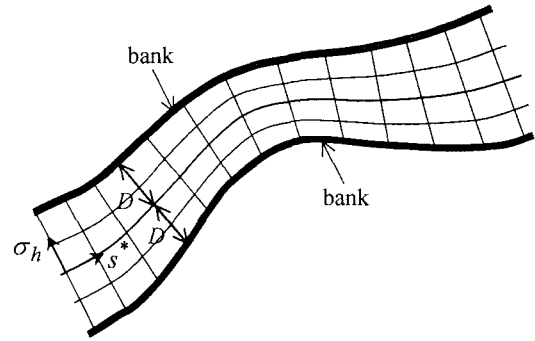


図-3 水平 σ 座標系の定義

しては、鉛直座標系として使われている σ 座標系を水平座標系に応用した水平 σ 座標系⁶⁾を採用する。鉛直座標として用いられている σ 座標系とは、図-2に示すように、底面地形や水面に沿って計算格子を設定し、簡便かつ忠実に境界を再現することが可能な座標系であり⁸⁾、様々な気象場や海水流動場へ適用されている。それに対して、本研究で用いる水平 σ 座標系は、図-3に示すように、河道側岸に沿うように座標系が定義されており、河道形状を忠実に再現していることが分かる。この水平 σ 座標系では、平面二次元場の直交曲線座標系における s, n 座標が、次式に示されている s^*, σ_h 座標へと変換される。

$$s^* = s, \quad \sigma_h = \frac{-D+n}{2D} \quad (1)$$

ここで、上式中の D は、図-3に示しているように、 s^* 軸から河岸までの距離である。このような水平 σ 座標系における基礎方程式系は、直交曲線座標系における連続式と運動方程式を式(1)に基づいて座標変換すると、次のような式系が得られる。

・連続式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1+N} \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial s^*} [H U_s^* D] + \frac{1}{2D} \frac{\partial}{\partial \sigma_h} [H U_n^*] \\ + \frac{H}{(1+N)R} \left(U_n^* - 2D \frac{U_s^*}{1+N} \frac{\partial \sigma_h}{\partial s^*} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

・運動方程式 (s^* 方向)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U_s^*}{\partial t} + \frac{U_s^*}{1+N} \frac{\partial U_s^*}{\partial s^*} + \frac{U_n^*}{2D} \frac{\partial U_s^*}{\partial \sigma_h} + \frac{U_s^* U_n^*}{(1+N)R} \\ &= -\frac{g}{1+N} \left[\frac{\partial(H+z)}{\partial s^*} + \frac{\partial \sigma_h}{\partial s} \frac{\partial(H+z)}{\partial \sigma_h} \right] \\ &+ \frac{1}{1+N} \frac{\partial}{\partial s^*} \left(\frac{A_H}{1+N} \frac{\partial U_s^*}{\partial s^*} \right) + \frac{1}{2D} \frac{\partial}{\partial \sigma_h} \left(\frac{A_H}{2D} \frac{\partial U_s^*}{\partial \sigma_h} \right) \\ &- \left(\frac{C_f}{H} + \frac{aC_b}{2} \right) U_s^* \sqrt{U_s^{*2} + U_n^2} \end{aligned} \quad (3a)$$

・運動方程式 (σ_h 方向)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U_n^*}{\partial t} + \frac{U_s^*}{1+N} \frac{\partial U_n^*}{\partial s^*} + \frac{U_n^*}{2D} \frac{\partial U_n^*}{\partial \sigma_h} - \frac{U_s^{*2}}{(1+N)R} \\ &= -\frac{g}{2D} \frac{\partial(H+z)}{\partial \sigma_h} \\ &+ \frac{1}{1+N} \frac{\partial}{\partial s^*} \left(\frac{A_H}{1+N} \frac{\partial U_n^*}{\partial s^*} \right) + \frac{1}{2D} \frac{\partial}{\partial \sigma_h} \left(\frac{A_H}{2D} \frac{\partial U_n^*}{\partial \sigma_h} \right) \\ &- \left(\frac{C_f}{H} + \frac{aC_b}{2} \right) U_n^* \sqrt{U_s^{*2} + U_n^2} \end{aligned} \quad (3b)$$

ただし,

$$U_n = U_n^* - 2D \frac{U_s}{1+N} \frac{\partial \sigma_h}{\partial s} \quad (4)$$

ここで, U_s, U_n : s, n 方向の鉛直平均流速, U_s^*, U_n^* : s^*, σ_h 方向の鉛直平均流速, H : 全水深 ($= h + \eta$), h : 水深, η : 水位, g : 重力加速度 ($= 9.8 \text{ m/s}^2$), A_H : 水平渦動粘性係数, z : 地盤高さ, R : s 方向座標の曲率, $N = n/R$, C_f : 底面摩擦係数 ($= gn^2/h^{1/3}$), a : 植物密度パラメータ, C_b : 植生の形状抵抗係数をそれぞれ表す.

また, 水平 σ 座標系における SS の輸送方程式は, 底質巻上げ項 P_k 及び土砂沈降項 D_p を含めると, 以下のようになる.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{1}{1+N} \frac{\partial(HU_s^*C)}{\partial s^*} + \frac{1}{2D} \frac{\partial(HU_n^*C)}{\partial \sigma_h} \\ &= \frac{1}{1+N} \frac{\partial}{\partial s^*} \left(\frac{A_H H}{1+N} \frac{\partial C}{\partial s^*} \right) + \frac{1}{2D} \frac{\partial}{\partial \sigma_h} \left(\frac{A_H H}{2D} \frac{\partial C}{\partial \sigma_h} \right) \\ &+ P_k - D_p \end{aligned} \quad (5)$$

ここで, C は SS を表しており, また, 沈降項 D_p は, 土粒子の沈降速度を w_0 とすると, 次のように表記される.

$$D_p = w_0 \alpha_s C \quad (6)$$

ここで, 上式中の α_s は, SS の鉛直分布を考慮した場合の補正係数であり, ここでは, SS 鉛直分布として指数関数を仮定して, α_s を次のように与えている.

$$\alpha_s = \frac{6w_0}{\kappa U_*} \left/ \left[1 - \exp \left(-\frac{6w_0}{\kappa U_*} \right) \right] \right. \quad (7)$$

また, 式 (5) 中の底質の巻上げフラックス項 P_k に関しては, 流速 (底面せん断力) のべき関数としてモデル化されているものの^{9), 10)}, 様々な河川への適用性に疑問が残るため, 著者らが別途行っている, 現地で直接計測可能な巻上げ装置¹¹⁾ に基づいて得られた観測結果により与える. その詳細については後述する.

(3) 湖沼モデルについて

湖沼における流動・土砂輸送シミュレーションでは, 水平座標系として矩形座標系を採用している平面二次元モデルとする. 基礎方程式としては, 連続式と運動方程式, SS の輸送方程式である. ここで, SS の輸送方程式中の底質巻上げフラックス項や土砂沈降項は, 前節で記述した河川モデルと同じ取り扱いを施している.

3. 手賀沼における流動・土砂輸送シミュレーション

(1) 計算条件

水平 σ 座標系に基づく河川流モデルと矩形座標系を用いた湖沼モデルをカップリングさせた河川-湖沼結合モデルに基づいて, 手賀沼における流動・土砂輸送シミュレーションを実施する. 計算対象領域や水深分布は, 図-4 に示すとおりであり, 河川計算を行っているのは, 3つの流入河川 (大堀川, 大津川, 染井入落) のうち大堀川のみとする. このような計算領域の中で, 河川モデルは Stn1 から大堀川と手賀沼の接続点 (Stn3 より下流 29m) までの領域を対象とし, それ以外の部分に関しては湖沼モデルを適用する. また, 計算期間としては, 土砂輸送量が大きく増減する洪水イベント時に着目して, 別途行った降雨時の現地観測結果³⁾ と比較するために, 2003年7月4日 0:00~6:00 における洪水イベント時を対象とする. なお, この現地観測³⁾ では, 大堀川内の Stn1 では流量と SS を, また, 大堀川内 Stns2 と 3 及び手賀沼内の Stn4 では SS をそれぞれ計測している.

計算格子数は, 湖沼では東西方向 54, 南北方向 34, 河川では主流方向 44, 横断方向 17 である. 計算格子幅は, 湖沼では東西方向 126m, 南北方向 77m, 河川では主流方向 20m, 横断方向 1.2~6.0m とする. 境界条件としては, 河川計算では, 上流端 (Stn1) において水位と SS の観測

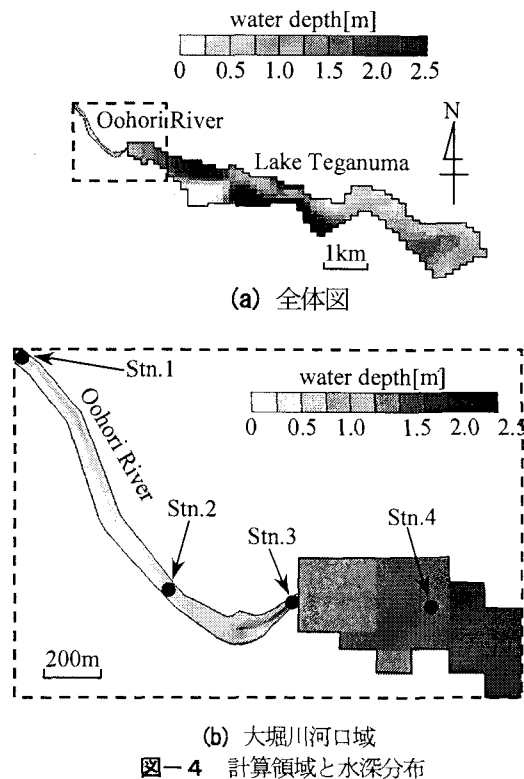


図-4 計算領域と水深分布

値を与え、側岸部では no-slip 条件を課している。一方、湖沼計算においては、河川との接続部や北千葉導水路注水口のうち大堀川では河川計算結果を、他の河川や北千葉導水路では現地観測等に基づいて流量を与えている。また、陸域と接する部分では no-slip 条件を課している。

また、土砂輸送シミュレーションで用いる底質の巻上げ特性に関しては、上述したように、現地直接計測が可能な巻上げ装置¹¹⁾により得られた観測結果に基づいて与える。図-5は、この巻上げ試験装置により得られた、大堀川の上流側 (Stn.1) と下流側 (Stn.3) における底質巻上げフラックス P_k の流速依存性を示している。ここでの流速は、巻上げ試験装置内における攪拌速度に相当している。これを見ると、同一の攪拌速度では、Stn.3 の巻上げフラックスの方が Stn.1 の値よりも明らかに大きくなっており、その差は攪拌速度とともに大きくなっている。また、両地点における巻上げフラックスと流速の相関式は、以下のようにになっている。

$$[\text{Stn.1}] \quad P_k = 1.23U^{2.03} \quad (8)$$

$$[\text{Stn.3}] \quad P_k = 9.93U^{1.87} \quad (9)$$

これより、大堀川河口付近の底質巻上げ特性には明確な空間変化が存在していることが分かる。そこで本計算では、河川内における巻上げ特性の空間分布が土砂動態に及ぼす影響を検討する。具体的には、河川計算における底質巻上げ項 P_k について、Stn.1 での巻上げ観測結果 (式 (8)) を全域に与えた場合 (Case1) と、Stn.1 から Stn.2

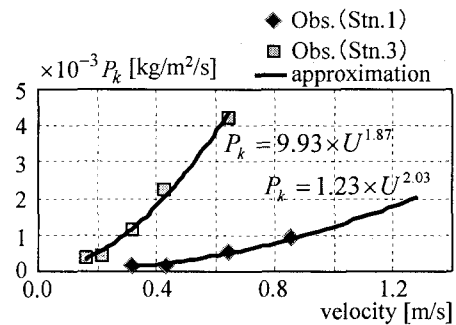


図-5 大堀川における底質巻上げ量の流速依存性 (U: 攪拌速度)

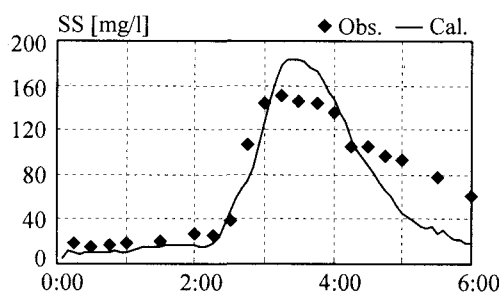
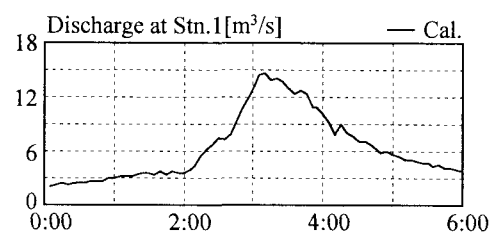
までは上流での巻上げ結果 (式 (8)) を、Stn.2 から Stn.3 までは下流での巻上げ試験結果 (式 (9)) をそれぞれ用いた場合 (Case2) , という2ケースの計算を行う。

(2) 河川-湖沼結合モデルの妥当性の検証

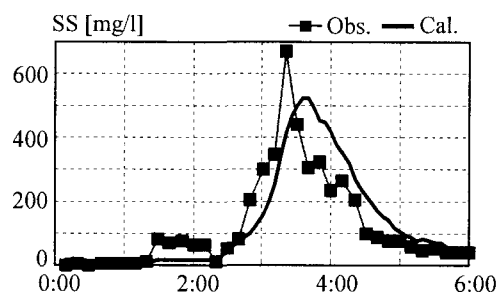
本論文で構築している河川-湖沼結合モデルの妥当性を検証するために、SSに関する計算結果と観測結果を比較する。図-6は、河川内 (Stn.2) , 河川と湖沼の接続点近傍 (Stn.3) 及び湖沼内 (Stn.4) におけるSSの時間変化に関する観測値と計算値を示している。また、比較のために、河川上流端 (Stn.1) における流量の計算結果を合わせて示している。なお、ここでの計算結果は、巻上げフラックスの空間分布特性を考慮している Case2 におけるものである。まず、観測値に関しては、河川内の Stn.2 と比べて、接続点近傍の Stn.3 のSSは極めて大きく、また、湖沼内での Stn.4 ではSS値が著しく低下しており、大堀川河口域において、ダイナミックにSS環境が変化している³⁾。このような観測値と計算結果を比べると、各地点におけるSSのピークレベルや増水期におけるSSの上昇過程などに関しては、計算結果と観測結果は概ね一致している。これより、本河川-湖沼結合モデルの基本的な有効性が示唆された。

なお、減水期においては、SSに関する計算結果と観測結果には差が生じている。現地観測では、降雨イベント時の増水期と減水期とでは、浮遊土砂の粒径分布特性が変化していることが確認されており、そのことが土砂沈降フラックスの算定精度に影響したものと考えられる。また、底質巻上げフラックスの流速依存性は、降雨イベント中に変化することが指摘されているものの^{11), 12)}、今回は巻上げフラックスの時間変化を考慮せずに行っている。このように、今後、土砂輸送シミュレーションの計算精度向上のためには、SS中の粒径分布を反映するとともに、時間変化を考慮し得る底質巻上げモデルを構築する必要があり、今後、本モデルに組み込む予定である。

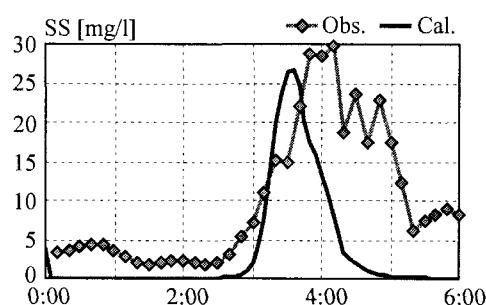
(3) 底質巻上げ量の空間分布が土砂動態に及ぼす影響



(a) 河川内 (Stn.2)



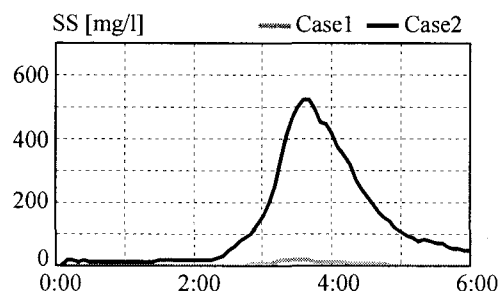
(b) 河川と湖沼の接続点近傍 (Stn.3)



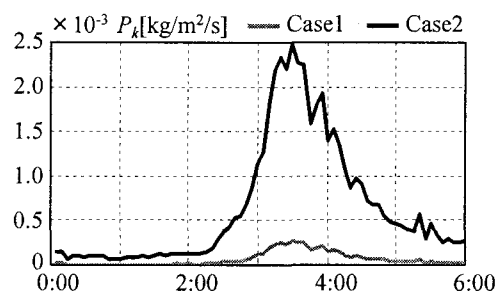
(c) 湖沼内 (Stn.4)

図-6 SSの時間変化に関する観測結果と計算結果 (Case2) の比較

河川内における底質巻上げ量の空間分布が、河口部での土砂動態に及ぼす影響を見るために、Case1とCase2における計算結果を比較する。図-7は、Stn.3におけるSSと巻上げフラックス P_k の時間変化を示している。まず、SSの時間変化を見ると、相対的に巻上げ量の小さいStn.1の結果のみを河川全域に採用しているCase1では、SSの計算値は、巻上げ特性の空間変化を考慮したCase2の結果よりも著しく小さいことが分かる。このときの巻上げフラックスを比較すると、最大値に関してはCase1の値はCase2の1/10となっており、Case1とCase2では1オー



(a) SS



(b) 巻上げフラックス P_k

図-7 Case1と2における計算結果の比較 (Stn.3)

ダー程度の巻上げフラックスの差が生じていることが分かる。このような巻上げフラックスの違いにより、両者における上述したSSレベルの差が発生したものと考えられる。以上のことから、大堀川のような都市河川河口部における土砂輸送シミュレーションを実施する際には、キーポイントとなる底質巻上げ量の空間分布を考慮することが不可欠であることが示唆された。

(4) 河口域における土砂動態特性

さらに、大堀川河口域における土砂動態を把握するために、河口域における累積巻上げ・沈降フラックスの空間分布を図-8に示す。ここでは全計算期間における巻上げ・沈降フラックスの総和を表示している。また、巻上げ特性の空間分布を考慮しているCase2の計算結果が図示されている。まず、累積土砂巻上げ量に関しては、沼内における結果は河川よりも著しく小さい。また、河川内では、下流側(Stn.2～Stn.3)全域にわたり巻上げフラックスが大きくなっているわけではなく、巻上げフラックスが大きい領域はStn.2近傍に限定されている。これは、河川内下流側における水深や河川幅の関係で、Stn.2の下流側における流速レベルが他の領域よりも大きくなっているためである。

一方、累積土砂沈降量に関しては、河川内では、上述した累積巻上げ量の最大値となっている領域の下流側において、土砂沈降量のピーク値が生じている。これは、下流側では、土砂巻上げ・沈降過程を通して、土砂動態において流下過程が顕著になっていることを示唆してい

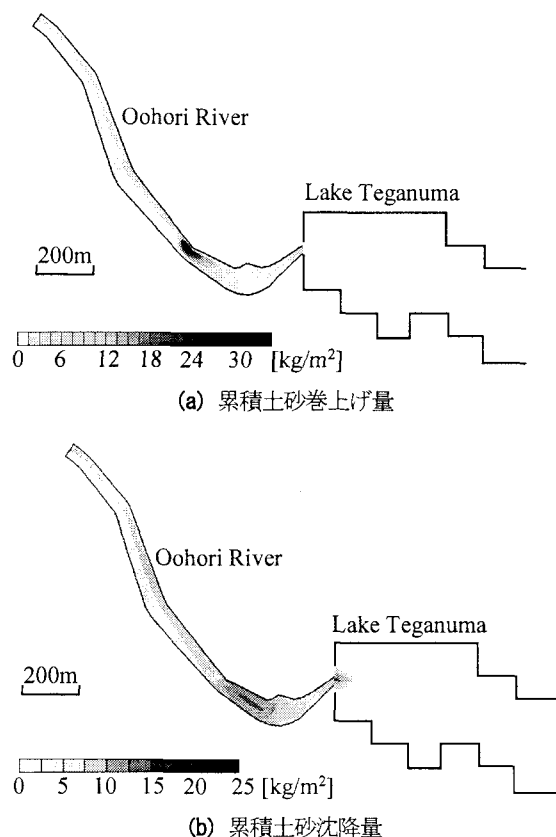


図-8 大堀川河口域における累積巻上げ・沈降フラックスの空間分布 (Case2)

る。また、沼内に関しては、河川と湖沼の接続点近傍においてのみ土砂沈降量が大きくなっている。これより、大堀川から手賀沼へ流入した直後に、流速レベルが急激に低下し、底質巻上げ過程よりも沈降過程が顕著となった結果、多くの土砂が接続点近傍に堆積することが明らかとなった。

4. 結論

本研究では、陸域影響を適切に考慮した形で富栄養化湖沼における水環境シミュレーションを実施するために、河川-湖沼結合モデルを構築し、それに基づいて富栄養化湖沼として有名な手賀沼と主要流入河川（大堀川）において流動・土砂輸送シミュレーションを実施した。ここで得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 河川流計算のための簡易境界適合座標系として提案されている水平 σ 座標系に基づく河川流モデルとデカルト座標系に基づく湖沼モデルをカップリングした河川-湖沼結合モデルを構築した。

(2) 河川-湖沼結合モデルに基づいて、手賀沼における流動・土砂輸送シミュレーションを実施し、別途行われた現地観測結果³⁾と比較したところ、河川内及び湖沼内におけるSSの時間変化に関して、両者は概ね一致しており、河川-湖沼結合モデルの有効性が示された。

(3) 大堀川のような都市河川河口域において土砂輸送計算を行う上では、河川内における底質巻上げフラックスのモデル化、特に、現地計測された底質巻上げ量の空間分布を考慮することの重要性が示された。

(4) 大堀川河口域における土砂巻上げ・沈降量の空間分布を見たところ、河川内下流側では、両者の空間分布の非一様性が顕著であり、土砂動態に対して巻上げ・沈降過程が大きな影響を及ぼしていることが示された。

なお、本研究では、三つの主要流入河川のうち大堀川のみを考慮して計算を行ったものの、今後は他の主要流入河川である大津川や染井入落を含めた河川-湖沼結合モデルに基づく数値計算を実施する予定である。

謝辞：本研究の一部は、下水道振興基金研究助成金（研究代表者：二瓶泰雄）と科学研究費補助金基盤研究（C）

(2)（研究代表者：二瓶泰雄）によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 松梨史郎, 井野場誠治, 下垣久, 宮永洋一: 手賀沼における流動・水質・底質の時空間変動シミュレーションと底泥からの栄養塩溶出の水質への影響, 土木学会論文集, No.712/II-60, pp.161-173, 2002.
- 2) 梅田信, 横山勝英, 石川忠晴, 銭新, 高橋迪夫: セキ宿貯水池における濁質の流入・流動・堆積過程に関する観測と数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.255-268, 2000.
- 3) 山崎裕介, 二瓶泰雄, 大関雅丈, 今野篤, 西村司: 都市河川河口域における土砂・栄養塩・有機物輸送特性に関する現地観測, 水工学論文集, Vol.48, pp.1489-1494, 2004.
- 4) 細田尚, 長田信寿, 村本嘉雄: 移動一般座標による開水路非定常流の数値解析, 土木学会論文集, No.533/II-34, pp.267-272, 1996.
- 5) 福岡捷二・渡辺明英: 複断面蛇行水路における流れ場の3次元解析, 土木学会論文集, No.586/II-42, pp.39-50, 1998.
- 6) 山崎裕介, 二瓶泰雄, 西村司: 簡易境界適合座標系を導入した河川-湖沼結合モデルの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, Vol.59, pp.541-542, 2004.
- 7) 山田安彦, 白鳥孝治, 立本英機 (編): 印旛沼・手賀沼-水環境への提言一, 古今書院, pp.1-167, 1993.
- 8) Phillips, N.A.: A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting, *J. Meteor.*, Vol.14, pp.184-185, 1957.
- 9) 泉典洋, 池田駿介, 伊藤力生: 流水抵抗及び浮遊砂濃度に及ぼす植生の効果, 水理講演会論文集, Vol.33, pp.313-318, 1989.
- 10) 池田駿介, 泉典洋: 浮遊砂の横断方向の拡散係数について, 土木学会論文集, No.434/II-16, pp.47-55, 1991.
- 11) 二瓶泰雄, 山崎裕介, 西村司, 丸山透: 都市河川における易浮遊性堆積物環境の検討, 水工学論文集, Vol.48, pp.1447-1452, 2004.
- 12) 二瓶泰雄, 飯田裕介, 佐藤慶太: 都市河川における流速・SSの鉛直構造に関する高解像度 ADCP 調査, 水工学論文集, Vol.49, 2005 (印刷予定)。

(2004. 9. 30 受付)