

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

RESUSPENSION OF FLUID MUD AT THE CENTRAL AREA OF LAKE KASUMIGAURA

梅田 信¹・長峯知徳²・長広 遙²・石川忠晴³・宇多高明⁴

Makoto UMEMA, Tomonori NAGAMINE, You NAGAHIRO, Tadaharu ISHIKAWA and Takaaki UDA

¹学生会員 修(工) 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境理工学創造専攻 日本学術振興会特別研究員

(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259番地)

²学生会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境理工学創造専攻

³フェロー会員 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科環境理工学創造専攻

⁴正会員 工博 建設省土木研究所河川部長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

Resuspension processes of bottom sediment in a lake have great influences on the water environment of the lake, since nutrients and heavy metals contained in the interstitial water are released with sediment particle. In this study, extensive field measurements have been conducted at the center of Lake Kasumigaura. From the results of the measurements, it is deduced that the major force on sediment erosion is the disturbance induced by wind waves. The relation between entrainment rates of sediment and turbulent intensity by waves has a good correlation.

Parameterization of the entrainment rate is considered using variables of k - ϵ turbulence model. In this paper, the dissipation rate ϵ is proposed to be a suitable parameter. By using this model, time series of turbidity for 6 cases of resuspensions are reproduced relatively well.

Key Words : Entrainment of bottom sediment, wind wave turbulence, k - ϵ turbulence model

1. はじめに

わが国の平野部には多くの浅い湖沼が存在するが、そのほとんどは1970年代以降に急速に富栄養化が進行し水質が悪化した。一方、近年の水需要の増大に伴い、富栄養化した湖沼に対しても水源としての機能が期待されるようになり、その水質改善・管理が求められている。

富栄養湖では、過去に流入した栄養塩が底泥に付着した形で或いは間隙水中に溶解した形で湖底に蓄積されている。これらは気象などの外力条件によって湖水中に回帰し、植物プランクトンの増殖に利用されることになる。浅い湖沼においては、底泥の巻き上げという物理現象がこのプロセスに大きく関わっている。

底泥の浮上に関して従来より研究がなされている。大坪、村岡は多数の底泥サンプルにより限界掃流力を調べた上で¹⁾、掃流限界の理論的な考察をしている²⁾。海田らは、スランプ試験により底泥の分類をした上で、柔らかい底泥について実験を行い、巻き上げモデルを検討している³⁾。また内湾や感潮

域においては、波の作用による底泥の浮上が顕著であるため、波と底泥の相互作用を検討した研究^{4), 5)}や底泥の非ニュートン流体的性質を考慮した底泥運動のモデル化の検討⁶⁾などが行われている。

これらの研究の多くは室内実験を基礎としており、底泥の物性が既知で外力が明確な場合には、定量的にも比較的良好な結果が得られる。しかし現地湖沼では、底泥の物性が空間的に変化しており⁷⁾、また外力条件も複合的であるため、適用は難しいことも考えられる。

そこで本研究では、霞ヶ浦において底泥の巻き上げに関する現地観測を行い、次のような考えのもとに、3次元 k - ϵ モデルの乱流パラメータと観測された巻き上げ率との関係を検討した。すなわち、実際のフィールドで巻き上げ率を推定しようとする場合、何らかの流動シミュレーションモデルの出力結果を巻き上げ率算定式に代入することになる。したがって、その算定式がいくら精緻に構成されていたとしても、流動モデルの出力パラメータと算定式のパラメータが同一でなければ、その変換過程において曖昧な部分が入りこむ恐れがある。それであれ

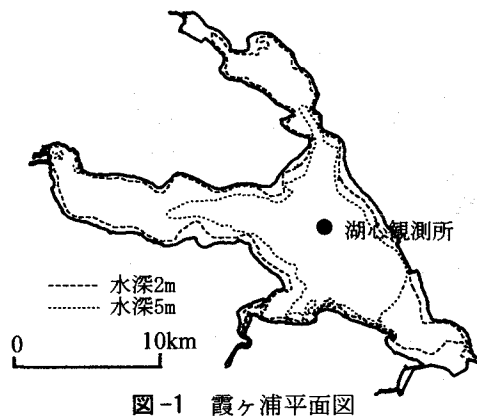


図-1 霞ヶ浦平面図

ば、始めから、流動モデルシミュレーションモデルの持つパラメータがそのまま算定式に代入される仕組みで定式化しておく方が良いと思われる。このような考えのもとに、本研究では、筆者らが以前から湖沼流動の計算に用いている3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た。

2. 現地観測の方法

霞ヶ浦の平面図を図-1に示す。観測内容は底泥の巻き上がり状況を把握するための連続モニタ観測と底泥物性の調査との二通りである。

巻き上がり観測は、1998年10月から二年間継続して、次のように実施している。図-1に示した建設省湖心観測所（水深6.0m）において、水深5.0m及び5.5mの高さにワイパー付き濁度計（（株）アレック電子製ATU-8M、ATU-3D）を設置し、10分間隔で連続計測を行った。また、超音波ドップラー式流速計（Sontek社製ADP）を湖底に設置し、水深4.8mから水面までの水平流速を0.5m毎に5秒間で計測した。また、2000年3月からは、湖底付近における乱流計測を行うために、水深5.7m（湖底から0.3m）の位置に電磁流速計（（株）アレック電子製ACM-300）を設置するとともに、水面では容量式波高計（（株）ケネック製CH-501）により波浪計測を行った。両者は30分ごとにサンプリング周波数20Hzで2048データを収録し、パソコンにA/D変換をして取り込むようになっている。なお、同地点における風向風速及び水深0.5mの濁度は建設省により計測されている。

底泥の物性調査は、改良型簡易式コアサンプラー（（株）離合社製）を用いて底泥コアを採取し、その場で冷凍して持ち帰り、層状にスライスしてから融解した後、含水率及び粘度の計測を行った。なお、粘度計はBrookfield社製DV-Itを用いた。

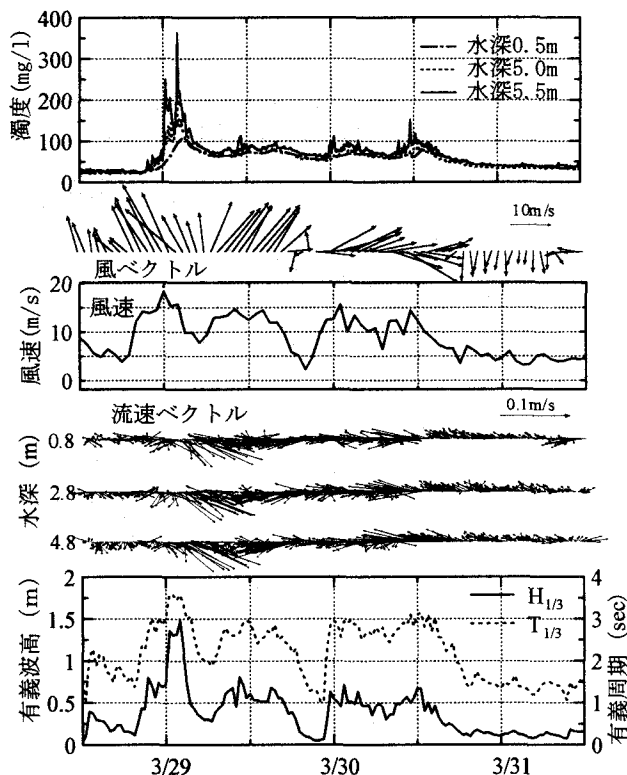


図-2 観測結果

3. 観測結果と考察

(1) 観測結果の概要

観測開始以来、比較的大きな巻き上がりは、6例ほど生じている。ここでは一例として、2000年3月の観測結果を図-2に示す。図は上から、濁度、風ベクトル、風速変動、流速ベクトル、有義波高・周期の時系列である。これらの図から、風速が10m以上になり、有義波高が1mを越えたところから、急激に濁度が上昇していることがわかる。このことから、大坪、村岡⁸⁾が霞ヶ浦高浜入りについて行った考察と同様に、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ではないかと推察される。また、濁度の鉛直分布を見ると、上層（水深0.5m）と下層（水深5.0m）の差は大きくて数割程度であり、比較的一様に底泥が巻きあがっていると言える。それに対して、底面近傍（水深5.5m）では、変動が非常に大きく、ちょっとした外力の変化にも敏感に反応している様子が現れている。また、ピークを過ぎた後も濁度が低下せず長時間残っている様子が現れる。これは、底泥間隙水などに含まれる非常に微細な物質（コロイド成分など）が水中に回帰しているためだと考えられる。

(2) 巻き上げ率の推算

前節で述べたように、底泥浮上の主要因は、風波

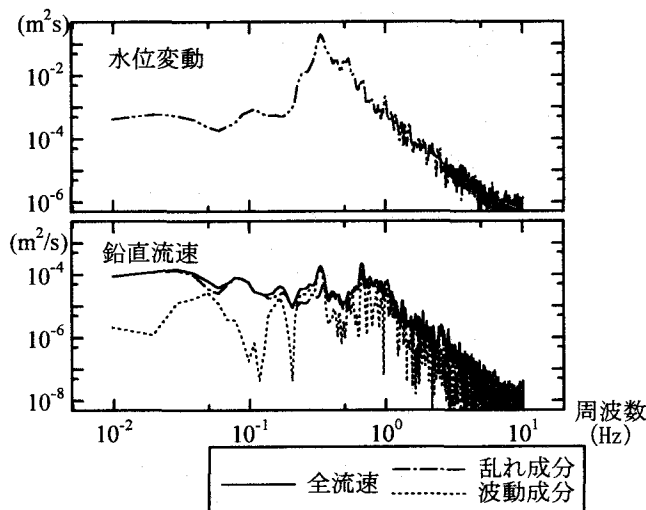


図-3 鉛直流速と水位のスペクトルの成分分離の一例

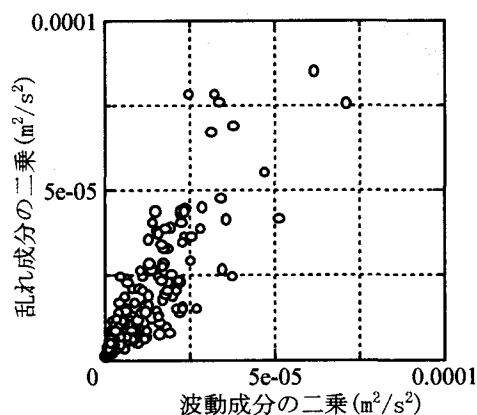


図-4 鉛直流速の乱れ成分と波動成分の相関

によって生じる乱れである可能性が高いと考えられる。そこで、本節では湖底近傍で計測された乱流強度と濁度の時系列と底泥粒子の巻き上げ率との関係を調べた。

吹送流によって生じる流速変動は、波動成分と乱れ成分の両方を含んでいる。そこでまず計測した流速変動から両者の分離を行った。本研究では、水位変動と流速変動のスペクトルを用いたLFT(Linear Filtration Technique)⁹⁾を採用した。図-3に、上段に水位変動のスペクトルを、下段に流速変動のスペクトル及び分離後の波動成分と乱れ成分のスペクトルを示した。水位変動のピークのある0.3Hz付近に対応して、波動成分のパワーが卓越しており、その他の領域では乱れ成分が大きくなっていることがわかる。なお、湖底に設置した電磁流速計の水平成分センサーが計測中に不調となったため、本論文では以後、鉛直流速成分を用いて解析を進める。

図-4は、鉛直流速の乱れ成分と波動成分の相関をプロットしたものである。両者を比較すると、乱れ成分の方が若干大きいものの、ほぼ同程度の大きさであることがわかる。

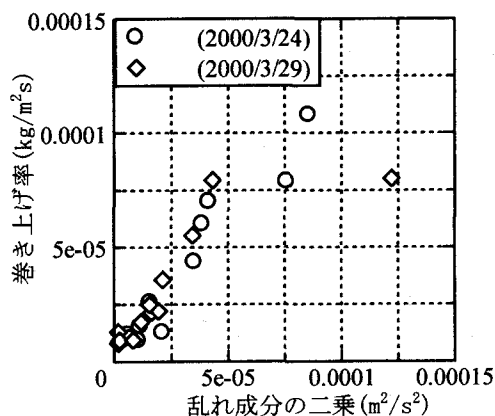


図-5 鉛直乱れ流速と巻き上げ率の関係

次に、濁度変化の時系列を用いて、以下のようにして巻き上げ率の推算を行った。

先に述べたように、底面の近傍を除けば、濁度は水深方向にほぼ一様な分布である。そこで、鉛直水柱内での平均的な濁質の収支を考え、巻き上げ率を近似的に算定する。濁質収支式は次式で表される。

$$h \frac{\partial C}{\partial t} = E - Cw_0 \quad (1)$$

ここに、 h は水深(6.0m)、 E は巻き上げ率、 w_0 は底泥粒子の沈降速度である。

ここで用いる濁度 C は、全水深に対する平均的な収支を得る目的から、水深5.0mと0.5mの観測結果の平均時系列を用いた。なお、水深5.0mの濁度はばらつきが大きいため、前後2データずつの移動平均をしている。また、沈降速度 w_0 は、採取した底泥を用いて、沈降法により平均的な沈降速度を求めたところ $w_0=4.2 \times 10^{-4} \text{m/s}$ となった。

観測データから巻き上げ率を推定する際の精度を確保するために、濁度の上昇期について計算を行った。その結果を図-5に示す。なお、乱れ計測を開始した2000年3月以降で顕著な巻き上げが観測されたのは3月24日と3月29日の2ケースである。この図よりどちらのケースについても、乱れの鉛直成分と巻き上げ率が概ね一価の関係にあることが判る。

4. 底泥の性状

巻き上げモデルを検討するにあたり、まず霞ヶ浦の底泥の性状、特性について調べ、考察の足掛かりとする事にした。

図-6に含水率の深度分布を示す。表層付近は特に含水率が高く、900%近い値となっている。また、図-7は粘性試験の結果である。プロットした点を結ぶ曲線の傾きが粘性係数を表し、縦軸切片が降伏応力を表している。図-7より、降伏応力はゼロに近く、

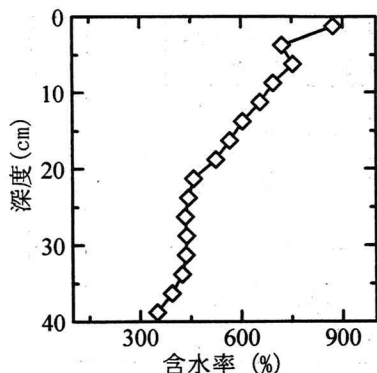


図-6 底泥含水率の鉛直分布

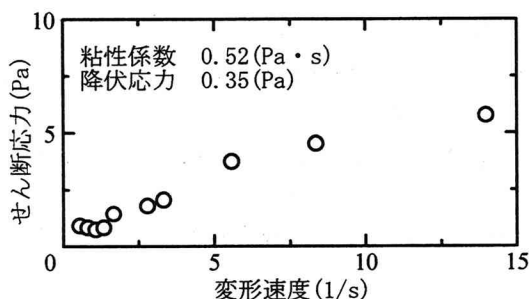


図-7 底泥粘性試験結果

粘性係数もほぼ一定であると言える。このように、霞ヶ浦の底泥表層は、含水率が大きく、降伏応力が非常に小さいため、写真-1に示すように非常に流動性が高く、流体（ニュートン流体）的な性質を示す。従って霞ヶ浦底泥の巻き上げは、流砂水理で言うところの pick up rate の概念よりも、密度流における連行概念に近い形で定式化できることが予想される。

次に、現地の湖底付近における流れに近い状態を室内実験により再現し、そのような流れ場における底泥の挙動について観察した。実験は、建設省土木研究所の造波水路を用いて行った。実験条件は、流速の変動幅及び周期を、霞ヶ浦における巻きあがり時の湖底湖底近傍の状態に近い条件になるように、それぞれ0.11m/sおよび2.0秒に設定した。その結果、写真-2に示すように底面付近に濁度の高い層が形成され、濁度を計測したところ、図-8のような鉛直分布が得られた。この高濁度層は、海域（内湾）で報告されている海底高濁度層¹⁰⁾（もやもや層）に対応する可能性があるが、現時点では何とも言いえない。

5. 巻き上げモデル

(1) 定式化の方針

既往の研究では、底泥の巻き上げ率を定式化する際に、底面におけるせん断応力や底泥の物性値（粘度など）をパラメータとして用いることが多い。しかし、湖水流動の数値シミュレーションに巻き上げモデルを組み込む場合、それらのパラメータを湖全

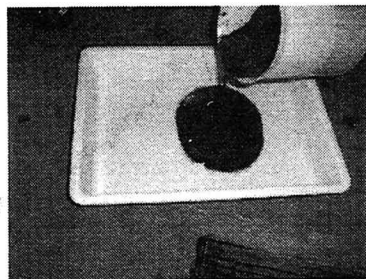


写真-1 底泥の性状

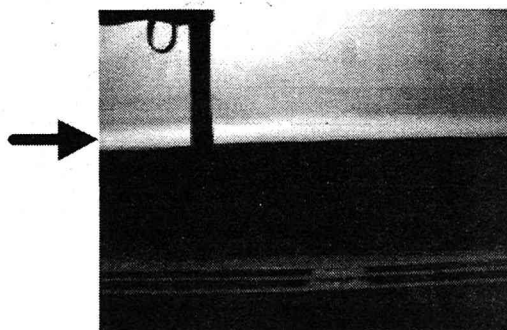


写真-2 底層高濁度層（もやもや層）

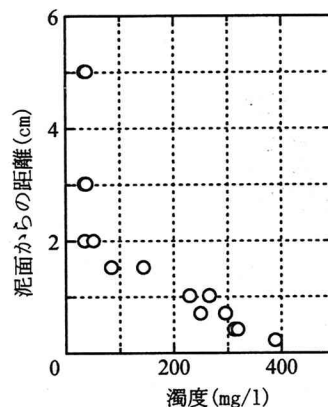


図-8 造波水路における底面付近の鉛直濁度分布

体にわたって評価すること自体、困難である。

そこで、本研究では、次の2点を前提として底泥の巻き上げ率の定式化を行う。

- ① 3次元k-ε乱流モデルを用いた流動計算モデル¹¹⁾、¹²⁾に組み込むことを想定し、流動モデルの変数（kやεなど）を用いた定式化を図る。
- ② 湖底には常に前節において見られたようなもやもや層が存在し、底泥の巻き上げはもやもや層の連行現象であると考える。

(2) 流動数値計算の結果と観測結果との対応

まず、k-εモデルを用いた流動計算による乱れエネルギーと現地での乱れ強度の観測値がどの程度対応しているかを調べた。計算には銭ら¹²⁾の計算モデルを用いた。巻上がりの生じた期間の前後一日を含めた期間を対象として、現地で計測された風データを条件として与え、湖心観測所地点の底層乱れ強度を抽出した。計算モデルについては文献12を参照い

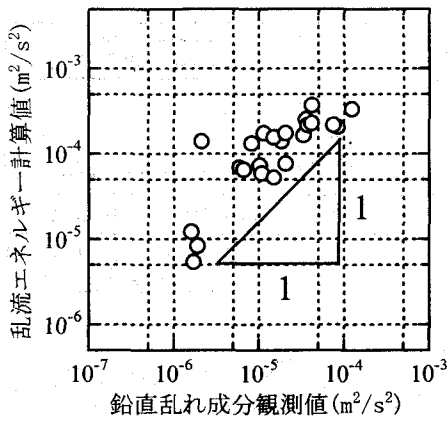


図-9 乱流エネルギーの計算値と観測値の比較

ただきたい。

3章において求めた鉛直乱れ成分と同時刻における計算結果の乱流エネルギーの関係をプロットしたところ、図-9のようになった。両者は概ね1乗の比例関係にあると言える。したがって、本数値計算における乱流エネルギーは、実際の乱れ強度に概ね対応して変化すると言える。

(3) 巻き上げ率の定式化

図-10は、本モデルの概念的に示したものである。湖底に相対密度差 δ のもやもや層が存在し、これが乱流により連行される状況を想定する。通常の連行の考え方に従い、ポテンシャルエネルギーの増加分が乱れエネルギーの供給速度に比例すると考えると次の関係が成り立つ。

$$w\delta gh \propto u'^3 \quad (2)$$

ここに、 w は連行速度、 δ は相対密度差、 g は重力加速度、 u' は乱れ特性速度、 h は連行された底泥が“連行されたという記憶を失い”上層の拡散過程に組み込まれる高さである。したがって、単位面積当たりの相対質量フラックスは次のように書ける。

$$w\delta g \propto \frac{u'^3}{h} \quad (3)$$

さて、 h の物理的意味はやや曖昧だが、ここでは $k-\epsilon$ 乱流モデルにおける乱れの特性長さスケール l' に比例するものと仮定する。

$$h \sim l' \sim \frac{u'^3}{\epsilon} \quad (4)$$

すなわち、乱れの特性長さ以上に持ち上げられた底泥は上方に拡散される（つまり巻き上げられた）と考える。

以上より相対質量フラックス（＝巻き上げ率）は、

$$w\delta g \sim \epsilon \quad (5)$$

となり、散逸率 ϵ に比例する。

そこで、3章で計測値から求めた巻き上げ率と、流

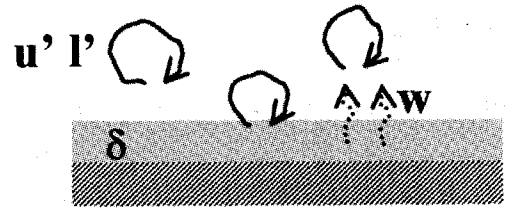


図-10 底泥巻き上げモデル概念図

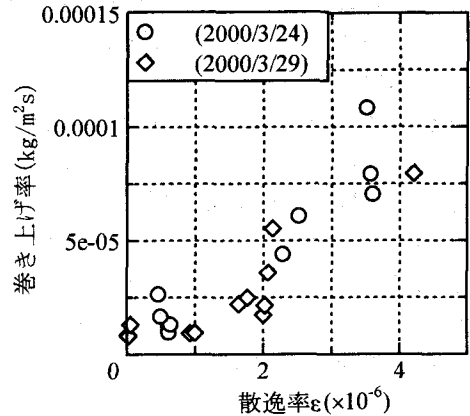


図-11 散逸率 ϵ と巻き上げ率の関係

動数値計算から得られた ϵ との関係をプロットすると、図-11のようになり、多少ばらつきがあるものの、両者は概ね比例していることが判る。

(4) 巻き上げ時系列の再現計算

霞ヶ浦は湖面積が大きく、湖底地形が平坦であるため、湖心部における濁度変化は概ね鉛直一次元の現象であると考えられる。そこで、鉛直一次元の拡散計算を行い、前節で検討した巻き上げ式の妥当性を検討する。

基礎方程式は、以下の通りである。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = w_0 C + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (6)$$

底面の境界条件として

$$flux = A\epsilon - w_0 C \quad (7)$$

を巻き上げ、堆積フラックスとして考慮する。ここに A は定数である。なお、拡散係数 K は、 ϵ と同様に3次元流動計算で出力される実効渦動粘性係数 ν を用いている。

図-12に計算結果を示す。なお巻き上げ式の係数は、乱流計測を行った2000年の2ケースから経験的に求め、 $A=15$ を設定した。その他の4ケースについても同じ値を用いたが、比較的良好に濁度の変化が再現されていることがわかる。なお、これらの中には、小規模ながら出水を含む期間もあるものの(98/10/18)、霞ヶ浦における既往の研究¹³⁾によれば、洪水時の浮遊SSの大部分は、底泥の巻き上げによるという結果が得られており、流入水の濁度の影響は小さいと考えられる。

6. おわりに

本研究では、霞ヶ浦の湖心部において底泥の巻き上がり現象について現地観測を行った。その結果をもとに、巻き上げ率の定式化を検討したところ、 k - ε 乱流モデルにおける散逸率 ε が巻き上げ率に比例する可能性のあることが推測され、その比例関係を仮定することで濁度の時系列がある程度再現可能であることが示した。

底泥の巻き上げ現象は非常に複雑な力学現象であり、その定式化は容易でない。したがって筆者らは、上述の簡単な取り扱いで事が済んだとは決して考えていない。しかし、複雑な現象であるがゆえに、いろいろの仮定に基づいた検討の積み重ねが大切であると思われる。その意味で、本研究の結果は“一つの結果”であると考えている。

謝辞：本研究を実施するにあたり、建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所および土木研究所に助力を頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 大坪国順, 村岡浩爾: 底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.363/II-4, pp.225-234, 1985.
- 2) 大坪国順, 村岡浩爾: 流れによる底泥の飛び出し率, 土木学会論文集, No.375/II-6, pp.43-52, 1986.
- 3) 海田輝之, 楠田哲也, 二渡 了, 栗谷陽一: 柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論文集, No.393/II-9, pp.33-42, 1988.
- 4) 鶴谷広一, 江口秀二, 鷹濱 潤: 流れと波による底泥の巻き上げに関する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, vol.35, pp.357-361, 1988.
- 5) 柴山知也, 中西雅明, 石原肇, 佐藤慎司: 波による底泥の浮遊機構に関する研究, 海岸工学講演会論文集, vol.34, pp.271-275, 1987.
- 6) 中野 晋, 鶴谷広一: 底泥床上の底面せん断応力と底泥運動, 海岸工学講演会論文集, vol.35, pp.342-346, 1981.
- 7) Otsubo, K. and Muraoka, K.: Field studies on physical properties of sediment and sediment resuspension in Lake Kasumigaura, Jpn. J. Limnol., vol. 48, pp.131-138, 1987.
- 8) 大坪国順, 村上浩爾: 霞ヶ浦における底泥の再浮上に関する現地観測及びシミュレーション, 水理講演会論文集, vol.29, pp.353-358, 1985.
- 9) Benilov, A. Y. and Filyushkin, B. N.: Application of methods of linear filtration to an analysis of fluctuations in the surface layer of the sea, Izv., Atmospheric and Oceanic Physics, vol.6, pp.810-819, 1970.
- 10) 星加 章, 谷本照巳: 海底凹地に捕集される粒状物

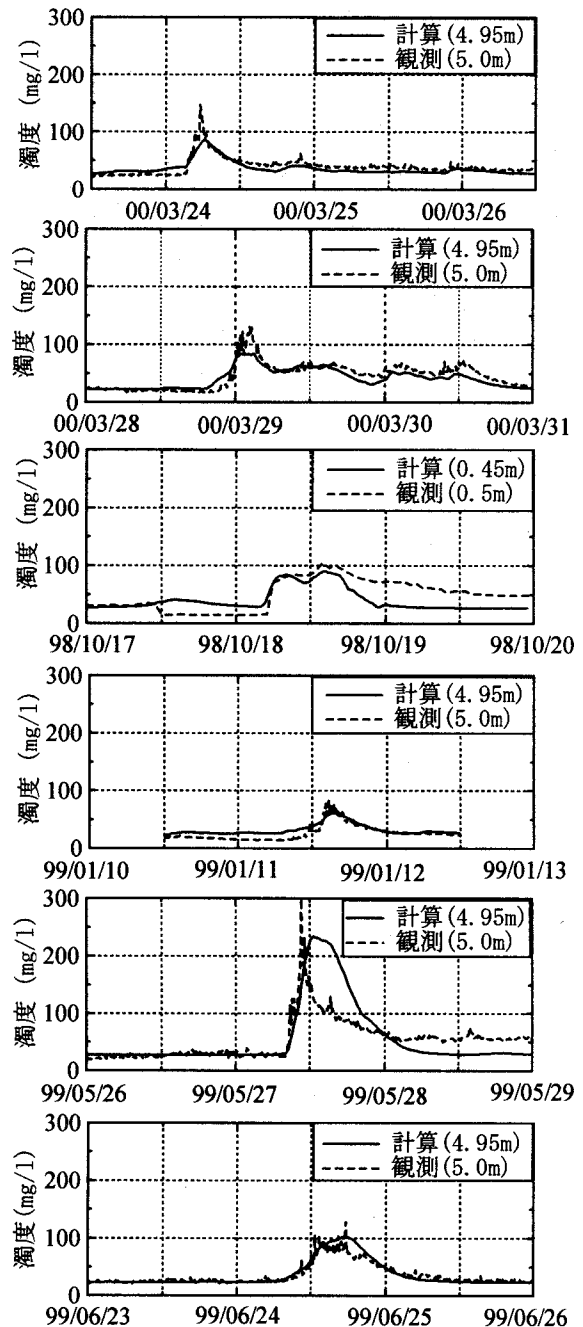


図-12 底泥巻き上がり時の濁度時系列計算結果

に関する実験的考察, 水環境学会誌, vol.19, pp.585-590, 1996.

- 11) 梅田 信, 横山勝英, 石川忠晴, 銭 新, 高橋 迪夫: セッケ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.
- 12) 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, 海岸工学論文集, vol.43, pp.1216-1220, 1996.
- 13) 森田弘昭: 洪水時汚濁負荷の湖水質に及ぼす影響—湖内粒子態栄養塩の挙動について, 水質汚濁研究, vol.12, pp.37-45, 1989.

(2000. 10. 2 受付)