

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

VOL.42    NO.4    December 2003

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 卷 第 4 号 (Vol. 42, No. 4), 2003年12月 (December 2003)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 難視界時の把持作業における触覚を用いた遠隔操作支援手法  
..... 内海 真・酒井 浩・秋園 純一 ..... 3  
(Manipulation Aid for Tele-operation Grasp in Unclear Environment  
..... Makoto UTSUMI, Hiroshi SAKAI, Junichi AKIZONO)
  
2. 有明海における底泥輸送現象のモデル化  
..... 中川 康之 ..... 25  
(Numerical Modeling of Fine Sediment Transport Processes in the Ariake Bay  
..... Yasuyuki NAKAGAWA)

## 有明海における底泥輸送現象のモデル化

中川康之\*

### 要 旨

陸域からの負荷が大きく閉鎖性の強い内湾域においては、シルトや粘土等の泥質物の輸送・堆積現象が海域環境の変動に深く関与する。本研究では、このような泥の輸送が海域環境の形成にきわめて重要と考えられている有明海を対象として、現地データの解析による底泥輸送特性の把握と、数値モデルによる底泥輸送シミュレーションを試みた。用いた数値モデルは、多層レベルモデルによる海水流動モデルと、海底面での底泥の巻き上げおよび沈降・堆積を考慮した泥粒子の移流・拡散モデルにより構成される。湾内4地点で約1ヶ月間同時に測定された観測データによると、潮汐流が卓越する大潮期になると底泥の巻き上げが生じ、湾奥部ではこれらの浮遊泥が西岸側に偏向することがわかった。一方、大潮・小潮の振幅変動を考慮した潮汐を主な外力として、底泥の移動・堆積に関する数値シミュレーションを行ったところ、観測結果に見られる上記のような大潮期の底泥輸送傾向が再現された。

キーワード：底泥輸送，有明海，数値モデル，潮汐流

---

\* 海洋・水工部主任研究官

〒239-0826横須賀市長瀬3-1-1

電話 (046) 844-5051, FAX (046) 844-1274, E-mail: nakagawa@pari.go.jp

## Numerical Modeling of Fine Sediment Transport Processes in the Ariake Bay

Yasuyuki NAKAGAWA\*

### Synopsis

The transport of fine sediment particles, such as silt and clay, has a key role in estuarine and coastal environments. In the study, the fine sediment transport processes in the Ariake bay are elucidated through the analysis of field data and a numerical simulation with a model applied to the bay also. The numerical model uses a multi-level hydrodynamic model to reproduce the tidal current field and an advection-diffusion model with bottom boundary conditions for erosion and deposition to estimate transport rate of fine sediment. The field measurement indicates that the suspended sediment concentration and their transport rate are prominent in the spring tide period especially in the upper bay and their averaged direction tends to the west ward. The numerical simulation, considering the tidal current as dominant force, shows that the sediment transport characteristic is well reproduced.

**Key Words:** Fine sediment transport, Ariake bay, Numerical model, tidal current

---

\* Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka 239-0826

Tel : +81-46-8445051, Fax : +81-46-8441274, E-mail : nakagawa@pari.go.jp

## 目 次

1. はじめに .....	29
2. 有明海の海域特性 .....	29
2.1 地形および潮汐 .....	29
2.2 湾内の底質分布 .....	30
3. 現地観測による底泥輸送特性の把握 .....	31
3.1 調査概要 .....	31
3.2 浮遊懸濁物濃度の変化と潮汐の関係 .....	31
3.3 底泥の輸送と潮汐の関係 .....	34
4. 底泥輸送現象のモデル化と数値シミュレーション .....	34
4.1 数値モデルの概要 .....	34
4.2 計算条件 .....	36
4.3 計算結果 .....	37
5. おわりに .....	41
謝辞 .....	41
参考文献 .....	41

## 1. はじめに

航路や泊地の埋没の原因となる沿岸域の底質輸送現象の中でも、河川からの土砂流出の影響を受け、閉鎖的な地形条件にある河口部や内湾域においては、特に粒径の細かなシルトや粘土等の泥分の堆積が問題となる。このような、粒径の細かな泥粒子の輸送現象の把握は、港湾施設の維持・管理上のみならず、沿岸域環境の維持・管理においてもきわめて重要な課題となる。たとえば、海水中の微細粒子は有機物や化学物質を吸着して沈降・堆積するため、底質中の泥分の含有率が高いほど底質の汚濁化が進行しやすい。また、底生生物の生息条件において底質粒径は重要な因子とされており（例えば池松・1980）、泥の堆積に伴う底質の粒度組成の変化は底生生物の生息環境に大きな影響を及ぼす。さらに、一度堆積した泥でも流れなどの外力により容易に巻き上がりやすく、浮遊した泥粒子による濁りの発生は、水中での太陽光の透過度を減少させ、植物プランクトンや海草などの生育環境に影響を及ぼす。このように底泥の輸送現象は、生態系を含めた沿岸域環境の形成に密接に関わっている。このため、沿岸域開発における環境影響評価や環境修復事業の効果の評価など、環境変動予測のための数値シミュレーション技術の必要性はますます高まっていることを考慮すると、沿岸域での底泥輸送現象の理解を深め、より適切なモデル化に基づく数値シミュレーション技術を確立する必要がある。

一方、環境影響評価などの行政課題においては、緊急的課題に対応すべく数値シミュレーションの活用が求められる場合も多い。これに対し、ここで対象とする底泥の輸送現象においては、泥粒子間の物理化学的な結合作用による凝集体の形成過程や、潮流や波浪等の外力作用の履歴に応じて変化する底泥の強度特性など、供給される泥粒子の物理・化学的特性のほか、対象とする海域での海象条件など、局地性の強い多くの要素を考慮する必要がある。このため、実験や現地観測を通じて粘着性土の挙動特性の把握を目的とした数多くの研究（例えば、口田ら・1986）がなされ、海水中での沈降過程や海水流動による侵食過程をはじめとするモデル化も試みられている（例えば、Mehta・1988）ものの、普遍的なモデルの完成には至っていない。また、海水中に浮遊した泥の移流・拡散現象のほか、海底面極近傍に形成される高濃度浮泥の密度流的な流動も、底泥輸送における重要な輸送形態とされているが、測定方法の困難さによりその実態については不明な点が多く、より高い精度を有する数値シミュレーション技術の確立にとって残された課題

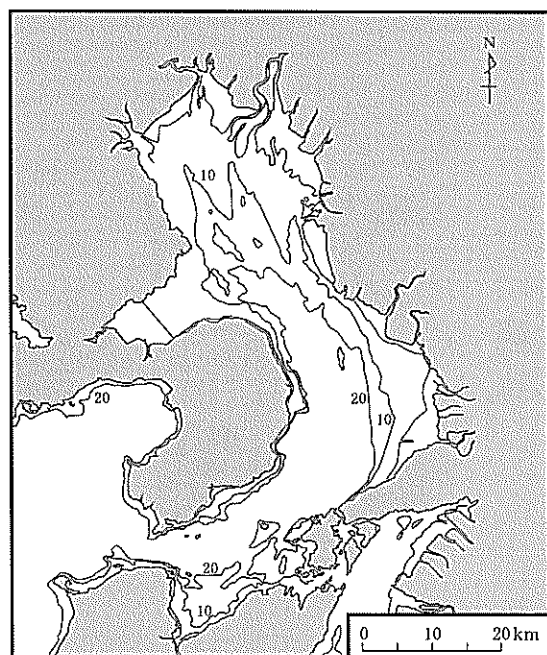
は少なくない。したがって、解決すべき課題が数多く残された状況において、数値シミュレーションを有効に活用するには、対象となる海域の環境特性を現地観測データ等を通じて十分に把握し、それらを可能な限り反映させた数値シミュレーションを行い、その再現性の程度を認識しつつ、予測計算の結果を評価することが重要と考えられる。

本研究で対象とする有明海では、ノリをはじめとする水産資源の減少のほか、流れや水・底質等の海域環境の変化も顕在化し、海域環境の改善が急務となっている。そこで本研究では、これらの環境改善策の検討に必要な数値モデルの構築を目的として、特に当海域での環境特性の変動に大きな影響を及ぼすと考えられる底泥輸送現象に注目し、現地観測を通じた底泥輸送特性の検討をふまえて数値シミュレーションを行い、その再現性について検討した。

## 2. 有明海の海域特性

### 2.1 地形および潮汐

有明海は、島原半島南端と天草下島北端の間の早崎瀬戸を通じて東シナ海に通じる面積約 1700km<sup>2</sup> の内湾域であり、伊勢湾とほぼ同等の規模である。湾口の海峡部から島原半島東岸にかけては、海釜と呼ばれるすり鉢状の地形が点在し、最も深い地点では水深 150m 以上に達



図一 有明海の水深分布 (D.L. 0m (破線) および同 10m, 20m のみ表示)

する。しかし、平均水深は約 20m と浅く、特に湾奥部と湾中央部の東岸域では遠浅の海岸地形となっており、これらの沿岸部に流入する河川の河口域では干潟地形が発達し（図-1）、干潟面積の総計は国内の内湾域と比較しても傑出したものとなっている。また、湾奥部においては、流入河川の滞りに連なる形で海底水道が、海底砂州と平行に南北に並んでいるのも有明海における海底地形の特徴の一つである。（例えば日本海洋学会・1985）。一方、国内でも有数の潮位差を有し、半日周潮（ $M_2$  および  $S_2$ ）を主要な成分として、湾奥部での大潮差（大潮時の平均潮差）は約 5m にも達する。このような卓越した潮位変化に伴う広大な干潟域の出現や、潮汐流の底泥攪拌作用による高濁度水塊の発生が、有明海独特の生態系の形成に関与しているものと考えられている（例えば、佐藤・2000）。

### 2.2 湾内の底質分布

湾内の堆積物の分布特性を図-2 に示す。その特徴として、湾奥部の西側と湾中央部の東岸沖合で、特に中央粒径値（ $Md\phi$ ）が 4 以上の泥質物が分布している。また、湾奥東部に流入する筑後川河口部では、砂質と泥質をそれぞれ主体とする底質が混在する複雑な分布となり（日本海洋学会・1985）、また湾中央部東岸に流入する白川および緑川の河口干潟は主に砂泥質を主体とする堆積物により構成されている。一方、島原半島東岸の湾中央部から湾口にかけては、砂質から礫にいたる粗粒の底質となっている。なお、東京湾や伊勢湾の場合、湾奥から

湾の中心部に至る広い範囲でシルト・粘土等の泥質物が堆積している（日本海洋学会・1985）のに対し、有明海の湾中央部の底質粒径は上述のように比較的粗く、泥の堆積域が湾奥西部や湾中央東岸域に偏在していることは、他海域に比して特徴的な堆積環境であることを示している。ところで、有明海ではノリをはじめとする水産資源の

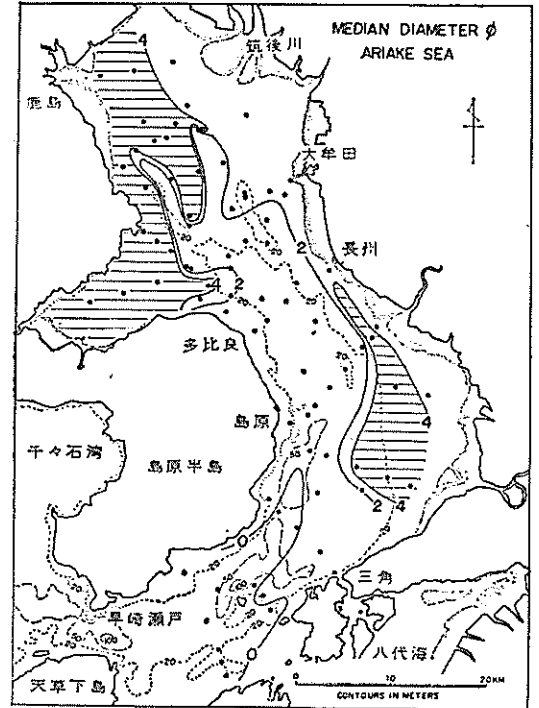


図-2 有明海の底泥分布（鎌田・1980より）

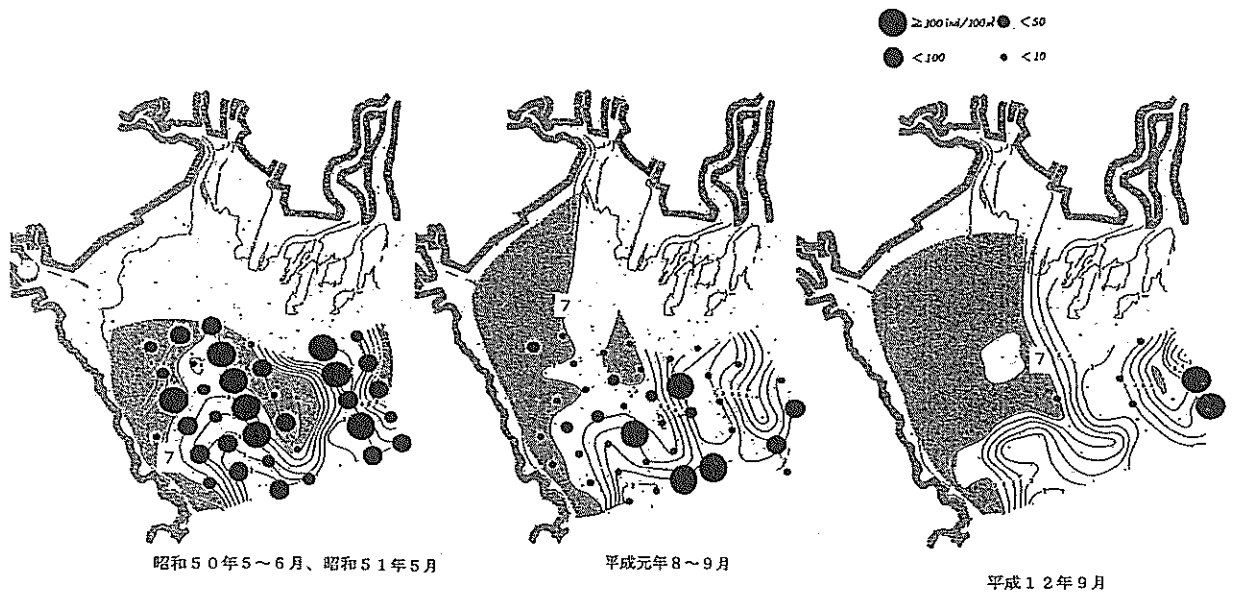


図-3 底泥の細粒化と二枚貝（タイラギ）生息量の変化（農林水産省・2002より）

減少のほか、潮汐振幅の現象や濁りの減少（透明度の増大）など、種々の海域環境の変化がデータに基づいて指摘されるようになった（例えば農林水産省・2002）。底泥の堆積環境についても、湾奥西部海域における底質粒径が細粒化し、それに伴い砂泥質を好む二枚貝の生息量が減少しつつあることを図-3は示している。しかし、このような堆積物の質的な変化の原因については、現時点では十分な理解は得られていない。したがって、これらの底質環境の変化が、干潟の発達に関連する泥質物の堆積傾向など当海域が元来有する自然的特性なのか、あるいは人為的活動の影響によるものなのか、今後も現地データを蓄積することにより環境変化の原因究明を進めることが重要である。本研究では、このうち自然的外力の作用に伴う底泥輸送への影響について検討し、同海域での底泥の侵食あるいは堆積傾向の特徴について調べるものとする。

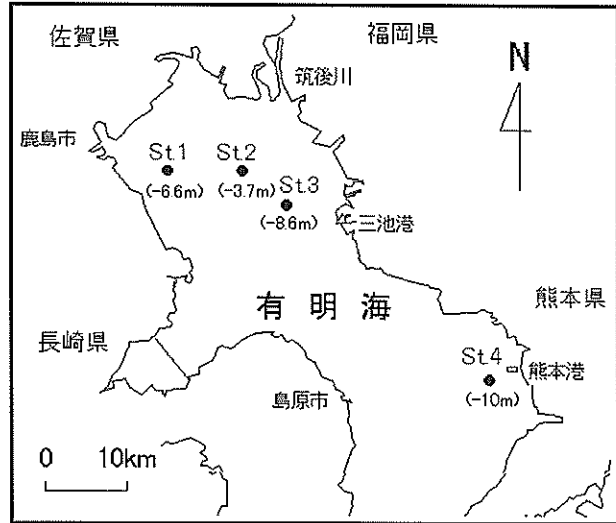


図-4 観測地点（カッコ内は平均水深）

### 3. 現地観測による底泥輸送特性の把握

#### 3.1 調査概要

有明海における底泥輸送特性を把握するため、流況および濁度等の連続観測を約1ヶ月間、図-4に示す合計4地点で同時に実施した。ここでは、潮汐流等の外力により浮遊状態で移動する泥の輸送量や輸送方向の把握を目的としており、主な測定項目は超音波式ドップラー流速計による流向・流速の鉛直分布、底面上20cm, 50cmおよび水表面下100cmの鉛直3点における濁度（後方散乱光学式濁度計）、Chl-a濃度（蛍光光度計）、および水温・塩分である。流速測定に関しては、30分毎に2分間の平均値を記録し、濁度等の水質項目の測定間隔は10分（St.4の濁度のみ5分）である。濁度計のデータについては、1Hzで10秒間計測された濁度値の平均をとり、さらに現地底泥を用いたキャリブレーションによりSS濃度に換算した結果を解析に用いている。また、浮遊懸濁物の粒径特性の把握を目的として、いずれの地点においても大潮期および小潮期それぞれを対象とした3日間に、海面下100cmと底面上50cmが採取面となるようセディメント・トラップを設置した。以下では、2001年10月10日から11月15日の約1ヶ月間に実施された観測データの解析結果を説明する。

#### 3.2 浮遊懸濁物濃度の変動と潮汐の関係

まず、図-5は観測期間を通じた、潮位とSS濃度の時間変動の関係を示したものである。同図から明らかのように、大潮期を中心にSS濃度が上昇しており、湾奥

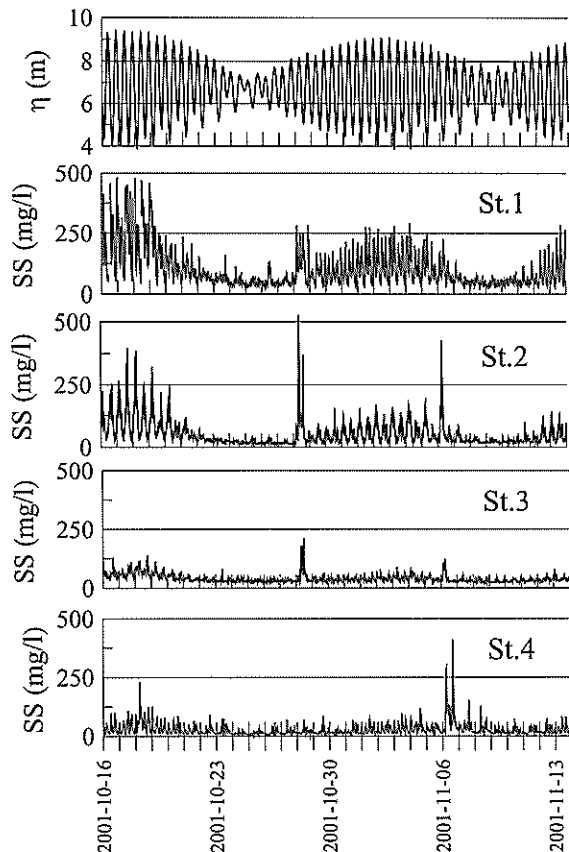
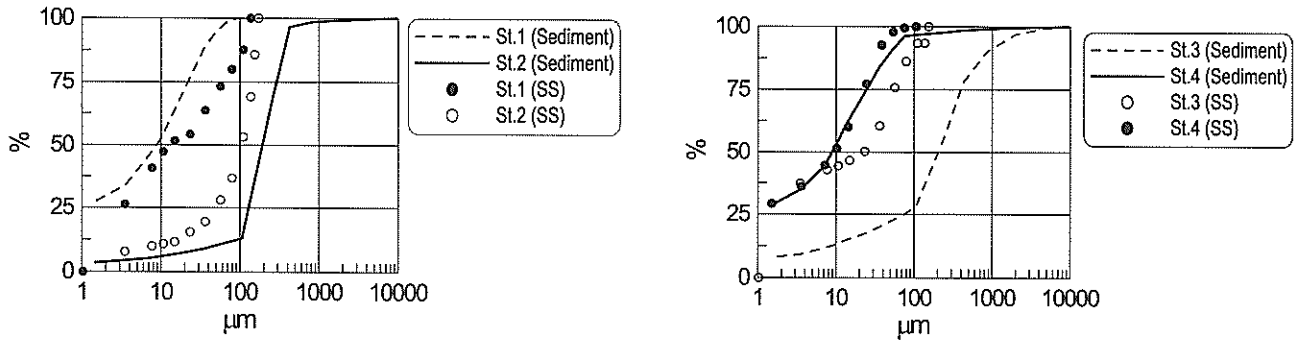


図-5 各観測点での底面付近のSS濃度と潮汐の関係

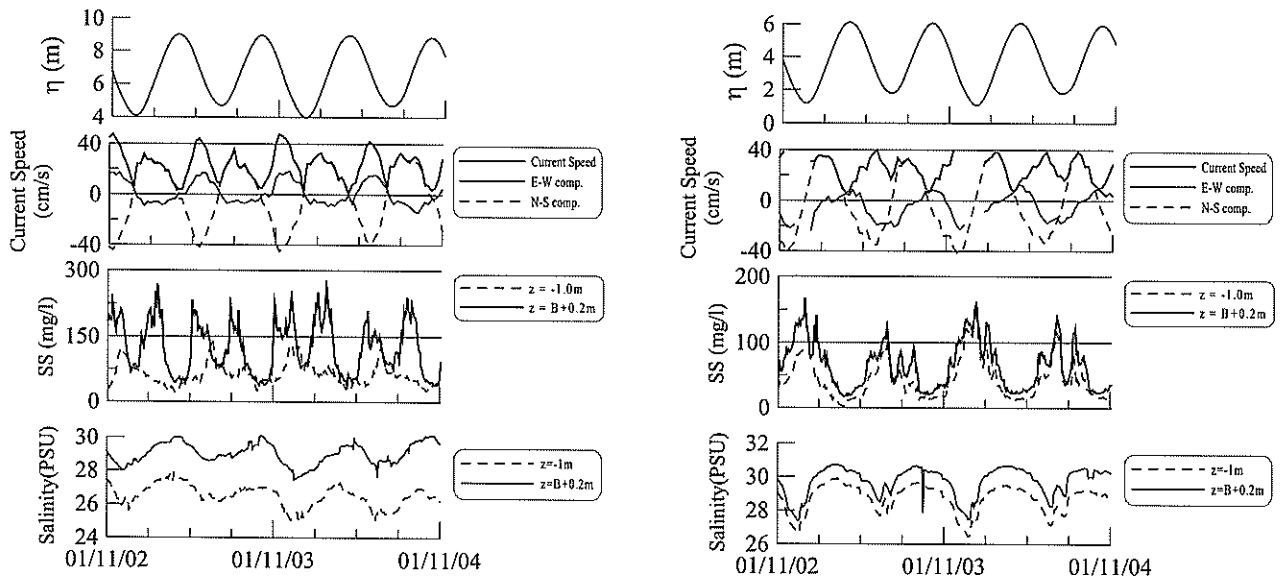




(a) St. 1 および St. 2

(b) St. 3 および St. 4

図-6 各地点の浮遊懸濁物 (SS) と堆積物 (Sediment) の粒径分布



(a) St. 1

(b) St. 2

図-7 St. 1 および St. 2 における大潮期の水位、流速、SS 濃度および塩分の変化

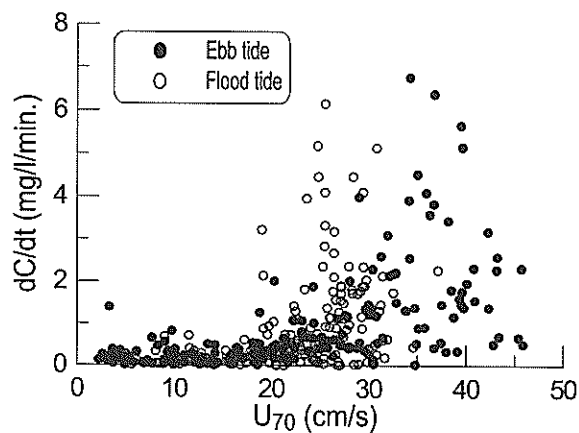


図-8 St. 1 における底面付近での SS 濃度上昇率と流速の関係

部に位置する St.1 および St.2 においてその傾向が顕著となっている。底泥の巻き上げに及ぼす潮汐流の影響はきわめて小さい東京湾奥部の観測例（中川・2002）と比較しても、上記の結果は有明海の底泥輸送における潮汐作用の重要性を示すものとなっている。また、10月28日の St.1~3 や、11月7日の St.3 や St.4 において、短期的な SS 濃度の上昇が見られ、これらは波浪観測結果との比較により、波浪の影響によるものであることが確認されている。これら SS 濃度の上昇要因となる浮遊懸濁物の粒径特性を調べるため、底面上50cmを採取面とするセディメント・トラップにより捕獲された浮遊懸濁物の粒径分布を示すと図-6 のようになる。同図には比較のため、各観測地点の堆積物の粒径分布も示してある。これらを見ると、St.2 を除く各点では、浮遊懸濁物の中央粒径は10 $\mu$ m 程度であり、シルト・粘土分がその主体となっていることがわかる。St.2 については、中央粒径が100 $\mu$ m 程度と他地点よりも粗くなるものの、St.2 の堆積物の粒度分布に比べれば細粒分の割合が大きくなっている。したがって、いずれの地点においても SS 濃度の測定結果は、シルト・粘土の泥分を主体とする浮遊懸濁物の濃度変化に対応したものであると考えられる。

つぎに、大潮期に顕著となる SS 濃度の変動要因の詳細について調べるため、大潮期間中の水位、流速、SS 濃度および塩分の各項目について、湾奥部の St.1 および St.2 における観測結果を示したものが図-7 である。まず、湾奥西部に位置する St.1 の結果（同図 (a)）について注目すると、底面上 20cm での SS 濃度の変動が、上げ潮および下げ潮の流速の強弱に対応し、また、このような濃度の変化は水面下 1m のデータ ( $z=-1.0$ m) には見られない。有明海湾奥西部に位置する諫早湾内で、同様な観測を行った近藤ら（1996）の結果では、上げ潮と下げ潮時では SS 濃度の変動が非対称となり、特に下げ潮時には巻き上げではなく浅海域からの移流の影響による SS 濃度の上昇を指摘している。本調査における St.1 でも、下げ潮時には湾奥からの高濁度水の影響もわずかに見られるものの、特に底層付近の SS 濃度は上げ潮・下げ潮時の流速の増大に対応した底泥の巻き上げが SS 濃度増大の主要な要因となっている。このような底面付近での SS 濃度の上昇率と流速との関係を調べると（図-8）、底面付近の流速が約 20cm/s を超えると顕著な SS 濃度の増大が生じており、この流速値が底泥の移動限界に対応しているものと考えられる。また、このような潮汐流に対応した SS 濃度の変動パターンは、熊本港沖の St.4 においても同様に見られる。（中川

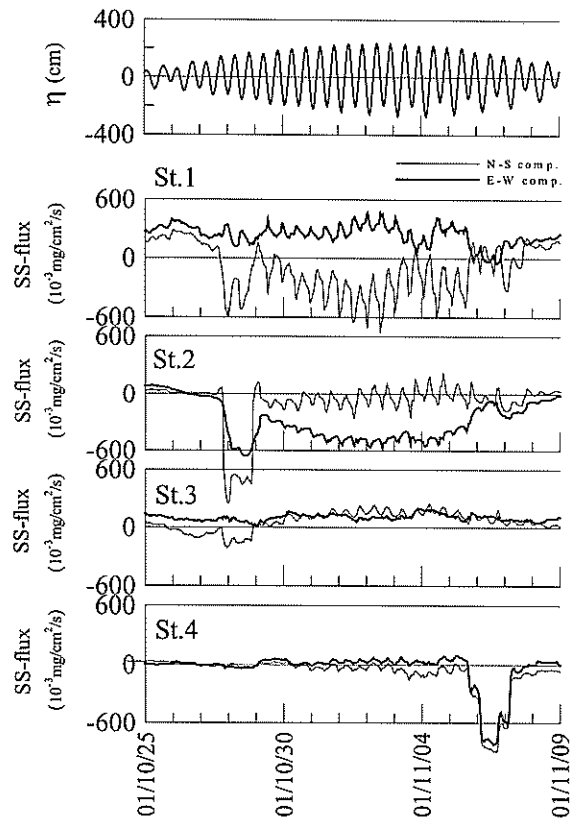


図-9 泥の輸送（25時間移動平均値）と潮汐の関係

ら・2002)

一方、筑後川河口沖に位置する St.2 の結果（図-7 (b)）では、SS 濃度は鉛直方向にほぼ一様化し、SS 濃度が最低となる満潮時から下げ潮時の濃度上昇を経て、干潮時付近で SS 濃度が最大となり、次の満潮時には再び濃度は低下する。流速に対応する二次的な SS 濃度のピークも見られるものの、大局的には潮位変化に対応した濃度変動がより支配的になっている。このように、干潮時に SS 濃度が最大となる原因としては、St.2 の北側海域の筑後川河口付近に存在する高濁度水塊の移流の影響が考えられる。つまり、満田（1968）の観測結果にも示されるように、湾奥部の主要河川河口部には高濁度水塊が存在し、干潮時におけるこれら高濁度水塊の沖合へ移流・拡散が、St.2 における SS 濃度の変動に影響しているものと考えられる。St.2 の SS 濃度の変動が、河口付近の水塊の移流の影響を受けていることは、同地点での干潮時（SS 濃度の増大時）には塩分の低下も同時に生じている（図-7 (b)）ことからわかる。このような移流の影響による SS 濃度の上昇は大潮期に顕著であり、これは潮汐流程のスケールが小さい小潮期には、河口部の濁水の移動範囲が小さく St.2 にまで到達して

いないためと考えられる。なお、St.1においても干潮時の塩分濃度の低下と濁度の上昇傾向がわずかではあるがみられ、湾奥部の河口域からの濁水の影響も少なからず受けていることがわかる。

### 3.3 底泥の輸送と潮汐の関係

さらに、濁度計により推定されたSS濃度と流速計の測定結果を用いて、浮遊状態により輸送される泥の輸送量および輸送方向について検討した。浮遊泥の輸送フラックスとして、ここでは底面上20cmのSS濃度と、それに最も近い底面上70cmでの流速データを用いて、両者を掛け合わせるにより算定した。このようにして算定された浮遊泥フラックスの結果に対して、半日周期の潮汐の影響を取り除くため、25時間の移動平均を施した結果が図-9である。濁度データに欠測やノイズがみられた観測期間中の前半は除き、同図では10月25日午前0時~11月9日午前0時の15日間分の結果を示している。これからわかるように、大潮期には単にSS濃度が上昇するのみならずその輸送量も増大し、特に湾奥部のSt.1とSt.2において顕著となっている。これら大潮期に増大する浮遊泥の輸送方向は、St.1では南東方向へ、St.2では西方向となっており、同湾の湾奥部では泥質物の堆積が西岸側でより顕著であることに対応している。一方、St.3やSt.4における輸送量は、St.1やSt.2に比べて小さく、St.4では11月4日に生じた高波浪時の底泥輸送量が顕著となっている。このように波浪の影響は、特に湾奥部浅海域での底泥輸送を検討する上でも重要な要素である(瀬口ら・1989)けれども、風向きや発生頻度などの確率的な要素を含む気象擾乱の影響に対し、約2週間の周期で確実に作用する大潮期の潮汐流の影響は、上記のデータを見る限り有明海の長期的な底泥輸送傾向を支配する基本要素であると考えられる。

## 4. 底泥輸送現象のモデル化と数値シミュレーション

内湾域での底泥輸送過程においては、まず、河川を通じて流入する陸域起源の土砂や、植物プランクトンの死骸等の海生起源の有機物などが海域に供給される。これらは、一度堆積した後も、流れや波浪などの外力の程度に応じて、再び巻き上げられ移動・沈降・堆積を繰り返すものと考えられる。有明海においても、第3章の観測結果で示されたように、堆積泥の再移動が大潮期を中心に繰り返して生じている。そこで、このような有明海の底泥輸送における基本特性に注目し、潮汐流を主な外力とする湾内底泥の移動現象を対象とした数値シミュレーション

を行うため、ここでは海水の流動場を再現する流動モデルと、流れにより輸送される物質の移流・拡散モデルにより構成される底泥輸送モデルを構築した。なお、ここで用いたモデルは、港湾域での航路・泊地への埋没予測を目的として開発されたシルテーション・モデル(鶴谷ら・1990)を基本としており、さらに河川水流入による密度流効果の導入など、内湾域での流動特性の再現に必要な改良を施したものである。

### 4.1 数値モデルの概要

#### (1) 基礎方程式

まず流動モデルは、鉛直方向に任意の層厚( $H_k, k=1, \dots, K$ )で分割され、各層内での平均量に関する連続式(式(1))および運動方程式(式(2), (3))で表される多層レベルモデルである。

$$w_{k-1/2} = w_{k+1/2} - \frac{\partial M_k}{\partial x} - \frac{\partial N_k}{\partial y} \quad (k=2, 3, \dots, K) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = w_{3/2} - \frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial N_1}{\partial y}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_k}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_k^2}{H_k} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_k M_k}{H_k} \right) \\ & - (wM|_{k-1/2} - wM|_{k+1/2}) / H_k + fN_k \\ & - gH_k \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_k} \sum_{i=1}^k (H_i \frac{\partial \rho_i}{\partial x}) - \frac{1}{2} \frac{H_k}{\rho_k} \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right) \\ & + (\tau_{xz})_{k-1/2} - (\tau_{xz})_{k+1/2} + A_x \frac{\partial^2 M_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 M_k}{\partial y^2} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_k}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_k N_k}{H_k} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_k^2}{H_k} \right) \\ & - (wN|_{k-1/2} - wN|_{k+1/2}) / H_k - fM_k \\ & - gH_k \left( \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_k} \sum_{i=1}^k (H_i \frac{\partial \rho_i}{\partial y}) - \frac{1}{2} \frac{H_k}{\rho_k} \frac{\partial \rho_k}{\partial y} \right) \\ & + (\tau_{yz})_{k-1/2} - (\tau_{yz})_{k+1/2} + A_x \frac{\partial^2 N_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 N_k}{\partial y^2} \quad (3) \end{aligned}$$

ここに、 $\zeta$ は水位、 $M_k$ および $N_k$ は第 $k$ 層の流量の $x$ 方向、 $y$ 方向の各成分であり、 $w_{k-1/2}$ は第 $k$ 層と第 $k-1$ 層の間の鉛直流速を意味する。また、運動方程式(式(2)および(3))においては、 $g$ は重力加速度、 $\rho$ は海水

密度である。\$A\_x, A\_y\$ は水平方向の渦動粘性係数、\$\tau\_{xz}, \tau\_{yz}\$ は各層の上下面に作用する水平方向成分のせん断応力である。

一方、浮遊懸濁物の移流・拡散に関する基礎式は、式(4)により表される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_k H_k}{\partial t} + \frac{\partial M_k C_k}{\partial x} + \frac{\partial N_k C_k}{\partial y} \\ & + \left( (w - w_f) C \right)_{k-1/2} - \left( (w - w_f) C \right)_{k+1/2} \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x H_k \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y H_k \frac{\partial C_k}{\partial y} \right) \\ & - \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{k-1/2} + \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{k+1/2} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、\$C\_k\$ は物質濃度、\$w\_f\$ は浮遊物質の沈降速度、\$K\_x, K\_y, K\_z\$ は \$x, y, z\$ 方向の渦動拡散係数である。浮遊物質の沈降速度については、砂粒子等の比較的粒径の粗い底質を対象とした場合には、底質粒径の関数として表現される。しかし、ここで対象とするシルトや粘土等の微細粒子の場合には、粘着性を有する粒子間の吸着作用(フロッキュレーション)の影響により、沈降速度は粒子濃度や塩分に依存することが実験的に示されている(例えば、Dyer・1986)。そこで、本モデルにおける浮遊泥の沈降速度は、熊本沖の現地泥を対象にした実験結果から得られている浮遊泥濃度と沈降速度の関係(鶴谷ら・1990)を用いた。

なお、泥の輸送過程においては、上記のように移流・拡散方程式で表現される浮遊状態での輸送現象のほかに、海底面付近に緩く堆積した高濃度浮泥の密度流的な輸送も重要とされている。これらの輸送形態を考慮したモデル化もいくつか見られる(鶴谷ら・1994、運輸省第四港湾建設局・1995)けれども、ここで対象とする広範囲な海域での高濃度浮泥の堆積状況に関する現地での情報が十分ではなく、計算結果を適切に評価することが困難であるため、ここでは浮遊状態の輸送のみを対象とした。

(2) 渦動粘性係数および渦動拡散係数の設定

式(2)、(3)および(4)における水平方向の渦動粘性係数、渦動拡散係数の設定には、ここでは、水平方向の計算メッシュサイズと速度勾配の関数として表されるスマゴリンスキー・モデル(式(5))を用いた。

$$\begin{aligned} A_{x,y} &= K_{x,y} \\ &= C_{dif} \Delta x \Delta y \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{0.5} \end{aligned} \quad (5)$$

式中の無次元係数 \$C\_{dif}\$ は、沿岸域の海水流動を対象とした場合には、通常0.1~0.2程度とされている(Ezer and Mellor, 2000)が、ここでは潮流計算の安定度を考慮して0.4とした。

また、鉛直方向の渦動粘性係数 \$A\_z\$ (式(3)においては、せん断応力(\$\tau\$)の算定に利用)および渦動拡散係数 \$K\_z\$ については、密度成層の形成による運動量や物質の鉛直混合への影響を考慮するため、成層の強度を示すパラメータであるリチャードソン数の関数として式(6)および(7)を用いた。

$$A_z = A_{z0} (1 + 10 R_i)^{0.5} \quad (6)$$

$$K_z = K_{z0} (1 + 3.33 R_i)^{-1.5} \quad (7)$$

ここに、\$A\_{z0}\$ および \$K\_{z0}\$ はそれぞれ中立時の鉛直渦動粘性係数、渦動拡散係数であり、ここではいずれも \$10\text{cm}^2/\text{s}\$ とした。

(3) 底泥の侵食および堆積量の定式化

潮汐流等の外力作用による海底からの泥の巻き上げ量の算定には、主に粘着性を有する泥質堆積物を対象に広く用いられている式(8)(例えば、Van Leussen・1988)を使用した。

$$E = M \left( \frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right) \quad (\tau_b \geq \tau_e) \quad (8)$$

$$E = 0 \quad (\tau_b < \tau_e)$$

ここに、\$\tau\_b\$ : 底面せん断応力、\$\tau\_e\$ : 堆積泥の侵食に関する限界せん断応力、および \$M\$ : 侵食速度係数である。底泥の侵食特性を示す \$\tau\_e\$ や \$M\$ の値は、底泥を構成する

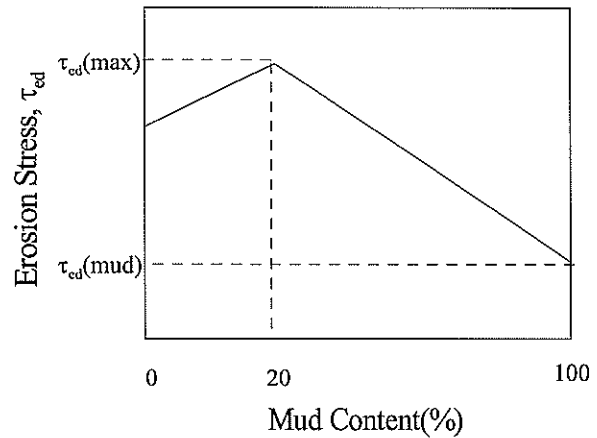


図-10 含泥率の変化と侵食限界せん断応力の関係

鉱物組成や粒子構造のほか、含泥率（底質中のシルトおよび粘土分の割合）あるいは含水比等の堆積状態にも依存するため、対象とする海域の泥の特性を反映させたパラメータを用いる必要がある。ここでは、有明海の底泥を対象とした過去の実験例（村上ら・1989、楠田ら・1990）や、3章で示した浮遊泥連続観測調査の結果を考慮して、限界せん断応力を0.1Pa（含泥率100%の場合）として設定した。

さらに、底質の粒度組成の違いによる侵食特性を考慮するため、ここでは図-10に示すように含泥率が低くなるほど、線形的に $\tau_e$ が大きくなるという関係（Whitehouseら・2000）を用いた。後述する計算対象海域の含泥率分布に応じ、含泥率の低下と共に限界せん断応力が、含泥率100%の場合の最大約2.5倍にまで大きくなるものと設定した。また、侵食速度係数についても、含泥率を100%とした場合の基準値（ここでは、 $0.0001\text{kg}/\text{m}^2/\text{min}$ ）を使用し、各地点ごとの含泥率を乗じることにより、含泥率の違いによる巻き上げ速度への影響を考慮している。なお、これらパラメータの設定に際しては、浮遊泥濃度の計算結果と観測結果の比較から試行錯誤的に妥当なパラメータを決定している。したがって、これらの含泥率を反映させたモデル化の妥当性や適切なパラメータの設定方法については、今後、実験等を通じて詳細な検討を加える必要がある。

一方、海水中に浮遊した泥の沈降過程については、やはり泥の輸送モデルで使用されることの多い、式（9）（Van Leussen・1988）を用いた。

$$D_f = w_f \left( 1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right) C_0 \quad (\tau_b \leq \tau_d) \quad (9)$$

$$D_f = 0 \quad (\tau_b > \tau_d)$$

ここに、 $\tau_d$ ：泥の沈降に関する限界せん断応力、および $C_0$ ：底面直上層での浮遊泥濃度である。右辺第二項の括弧内は、底面付近の乱れが粒子の沈降を妨げる程度を示す堆積確率（Mehta・1988）に相当し、 $\tau_d$ の値はここでは侵食に対する限界せん断応力と同じ値（0.1Pa）とした。

#### 4.2 計算条件

計算対象領域の水深分布を図-11に示す。これらの領域において水平格子間隔を900mとし、また鉛直方向には層厚3m（表層のみ4m）で最大10層の層分割とした。湾内の潮流流を再現するため、湾外側の開境界で主要6分調の振幅と位相差を考慮した水位変動を境界条件とし

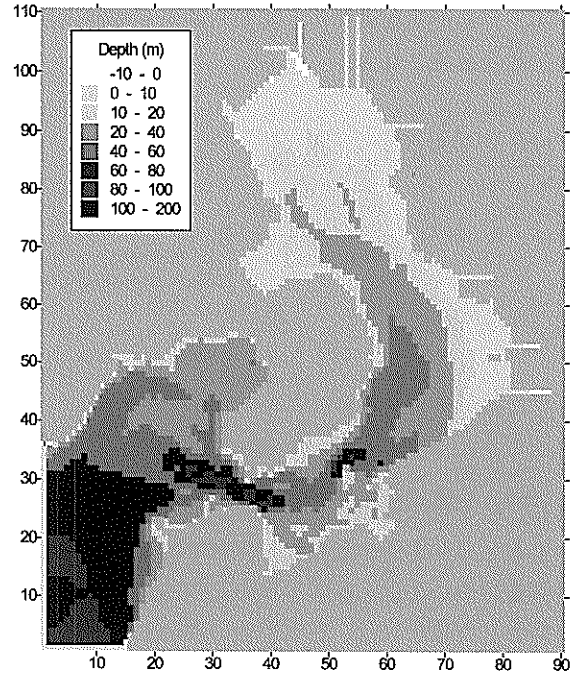


図-11 計算に用いた水深分布

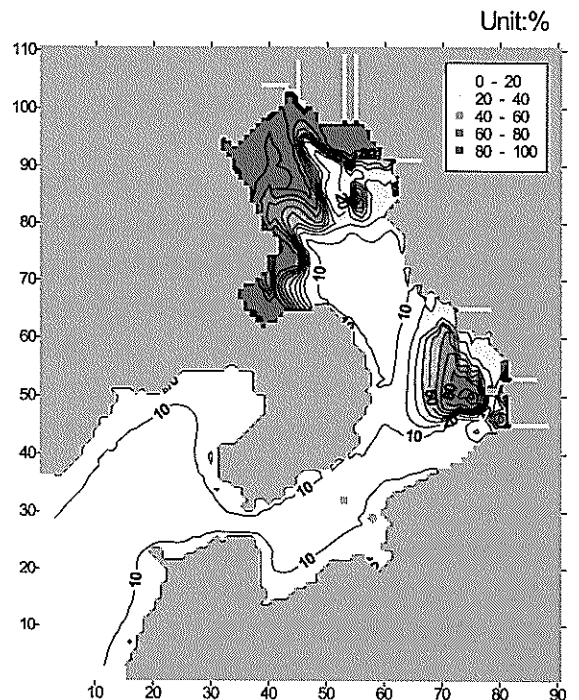


図-12 計算に用いた湾内の含泥率分布

て与えた。また、淡水流入の影響については、流入量が比較的小さい平水時を想定して、主要10河川における過去3カ年の冬期（1995年～1997年の12月,1月,2月）の平均流量を各河川境界より定常的に与えた。また、図-12は現地の底質データを参照して作成した湾内の含泥率分布であり、上述したように侵食量の算定の際にこれらの分布を用いている。ただし、計算期間中は含泥率の変化は考慮せず、一定の分布を与えている。すなわち、本シミュレーションでは、図-12で示される領域に堆積する底泥の、潮汐作用に伴う侵食とそれらの移動・堆積傾向を推定するものとなっている。

### 4.3 計算結果

#### (1) 流れの再現性

主要分潮であるM<sub>2</sub>成分の湾内での調和定数（振幅および遅角）について、現地データ（海上保安庁・1992）と比較したものが図-13である。これらを見ると、湾内での潮汐の振幅増幅率および伝達速度が良好に再現されていることがわかる。また、浮遊泥の連続観測を行った調査地点（図-1）を対象とした潮流楕円の比較（観測値は水面下約1.5m、計算値は第1層の結果）

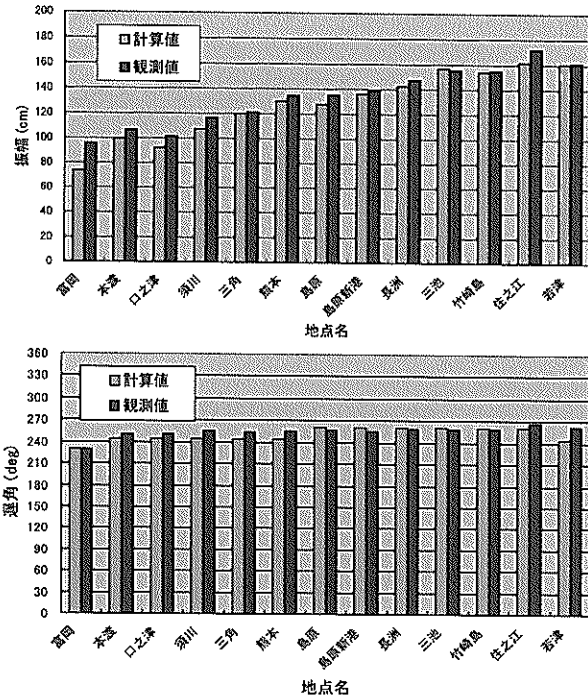


図-13 M<sub>2</sub>分潮の振幅（上段）と遅角（下段）の計算結果と観測値の比較

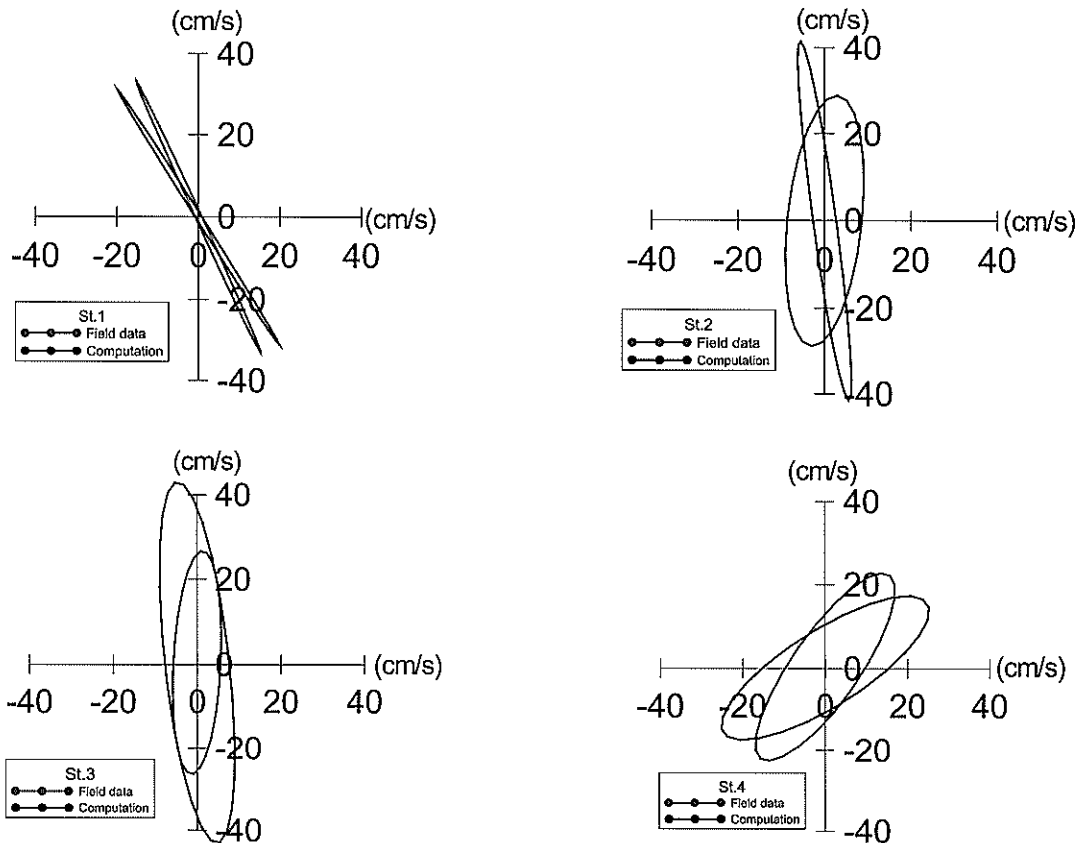
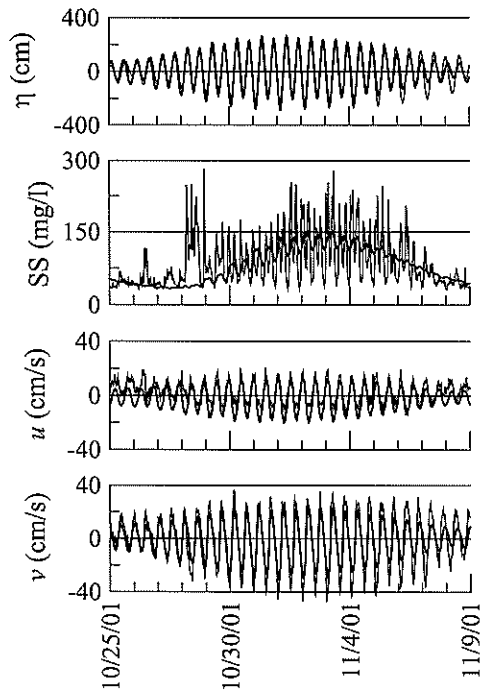
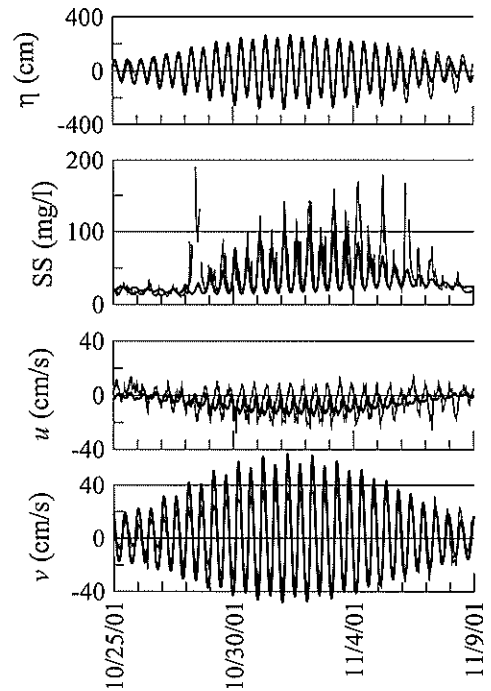


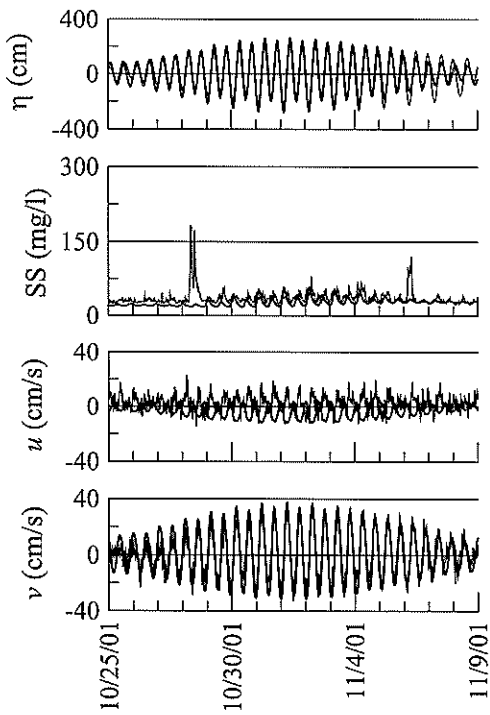
図-14 各観測地点での潮流楕円の比較（観測値は水面下約1.5m、計算値は第1層の結果）



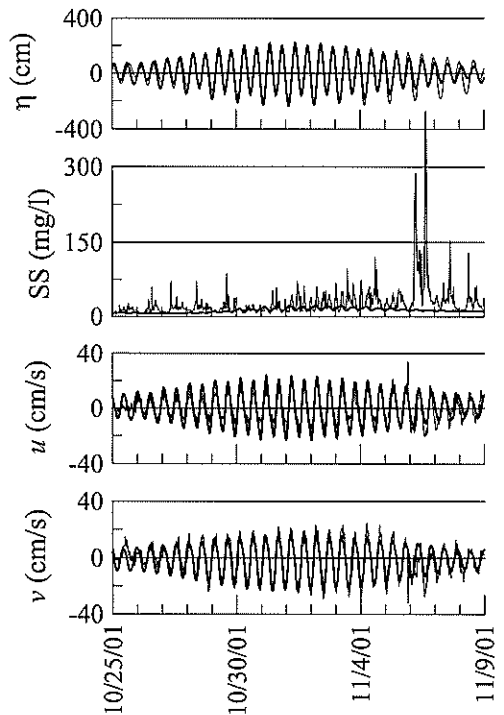
(a) St. 1



(b) St. 2



(c) St. 3



(d) St. 4

図-15 水位および最下層のSS濃度，流速の計算結果（太線）と観測値（細線）の比較

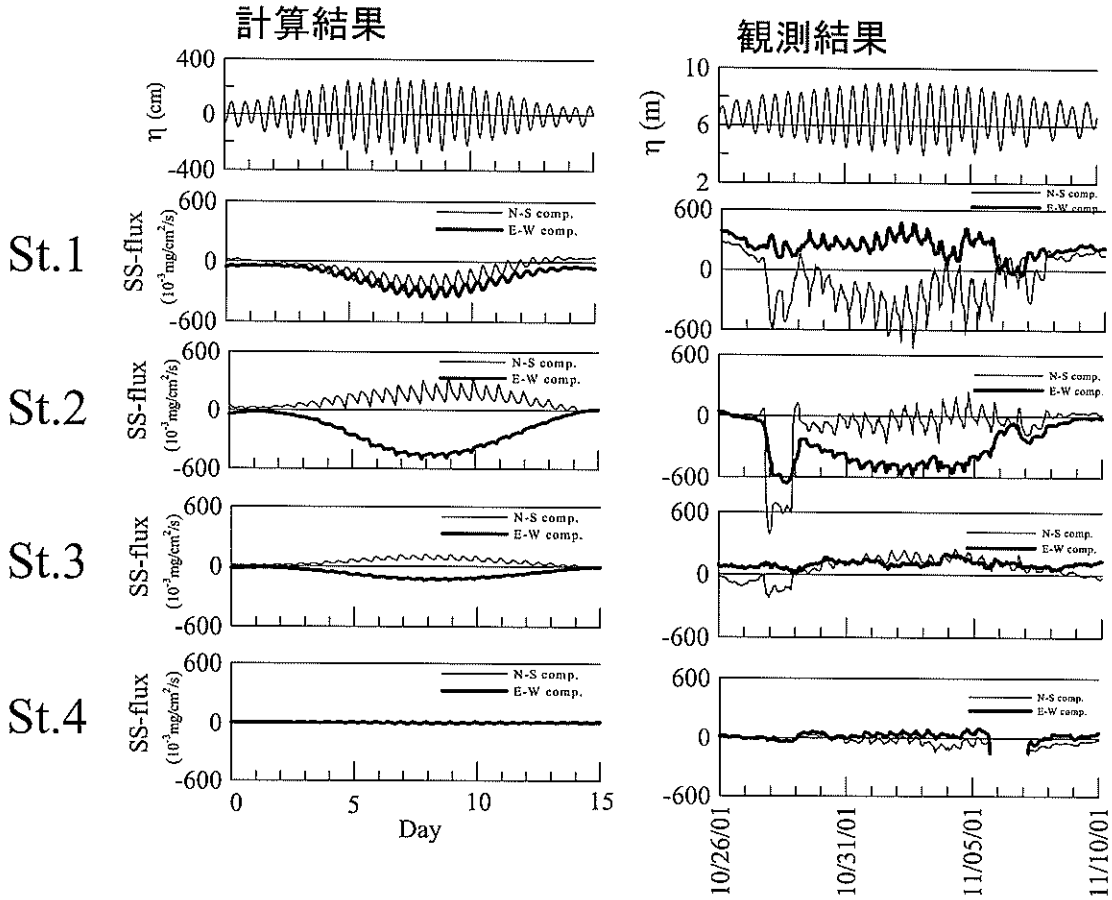


図-16 浮遊泥フラックス（25時間平均値）の計算結果（左）と観測値（右）の比較

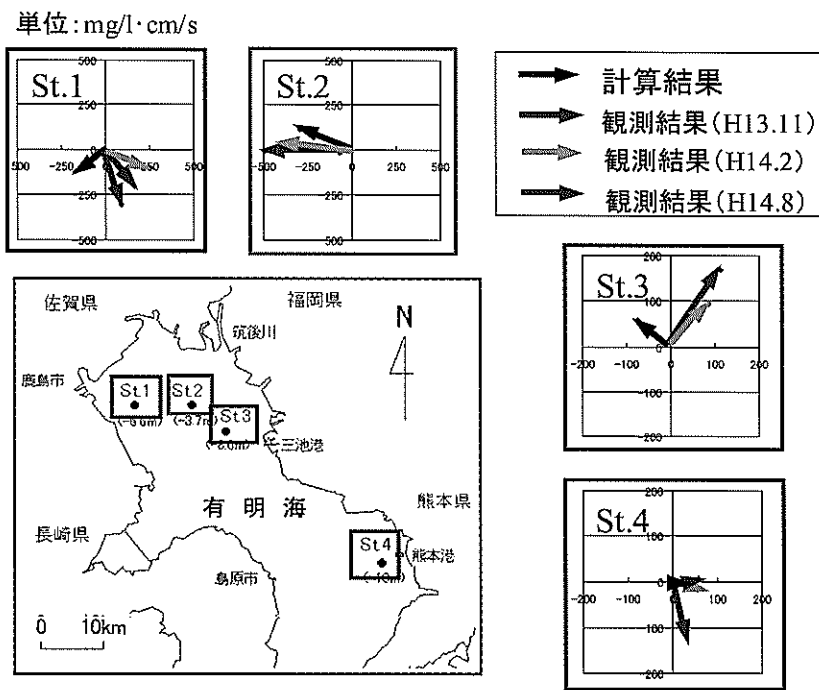


図-17 大潮期の浮遊泥フラックス・ベクトル



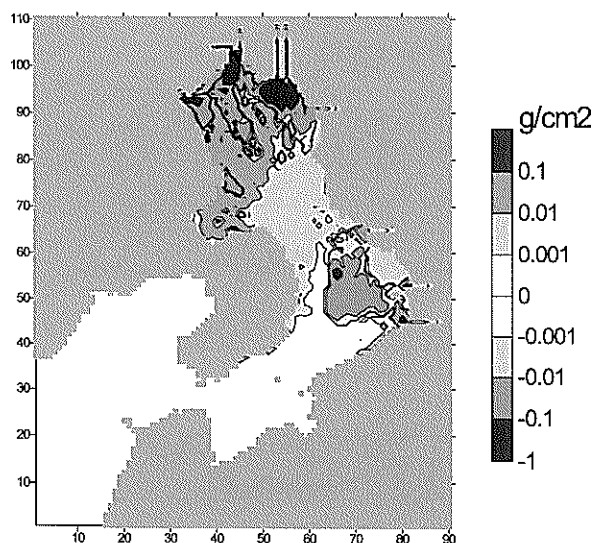


図-18 侵食・堆積傾向の分布

算結果と観測結果の比較の一例を図-14に示す。流れの向きや大きさについても、おおむね再現できていることがわかる。ただし、一部の計算結果においては、観測結果との差異がみられる部分もある。これらの理由については、観測期間中の淡水流入量を計算で用いていないことや、風による吹送流の影響もここでは考慮されていないなど、流れに関与する機構のモデル化が必ずしも十分ではないことが考えられる。したがって、河口部の滞りや海底水道等の複雑な海底地形の再現性の向上など、空間解像度の高度化も含め、流れの計算精度の改善が今後の検討課題の1つとなる。

#### (2) SS濃度の変動特性

大潮、小潮を含む15日間での潮位と底面付近での流速、さらにSS濃度の計算結果について、現地での観測値(2001年10月~11月)と比較して示したものが図-15である。いずれの地点においても、潮汐流が卓越する大潮期のSS濃度変動の傾向が、数値計算により良好に示されていることがわかる。ただし、St.1~St.3の10月28日、あるいはSt.4の11月6日の観測値にみられるような、高波浪の影響によるSS濃度の短期的な高まりについては、計算では潮汐流のみを外力としているため、当然このような変動は再現できていない。しかし、大潮・小潮の変化に追従したSS濃度の時間的変動が計算結果に示されており、潮汐作用により生じる有明海のSS濃度変動がおおむね再現できていることがわかる。

#### (3) 浮遊泥フラックス

さらに、潮汐流により輸送されるSSフラックスについて、計算結果と観測値を比較したものが図-16である。各観測地点での底面付近でのSSフラックスの25時間

移動平均値について、計算結果(左列)と観測結果(右列)をそれぞれ示したものである。例えば、図-16におけるSt.1およびSt.2の結果をみると、計算では考慮されていない高波浪の影響(10月28日)を除いては、観測結果同様に、潮汐振幅の増大とともにSSフラックスも増大する傾向がみられる。また、St.3やSt.4においては、St.1やSt.2比べてSSフラックスは小さく、このような空間的なSSフラックスの変動特性も計算結果は観測値と一致した傾向を示している。これらは、現地データを基にした含泥率分布を考慮したことにより、各海域で生じる底泥の巻き上げ量の空間的な差異が適切に再現されているためと考えられる。また、SSフラックスの増大が顕著となる大潮期を対象として、SSフラックスをベクトル表示して計算値と観測結果とを比較したものが図-17である。同図には、同様な観測が行われた別の期間の結果も含めて示している。観測結果からは、筑後川河口に位置するSt.2では西向き、また湾奥西部のSt.1では南東方向すなわち沖方向に大潮期になると泥の輸送が顕著となり、計算結果においてもこれらの傾向が再現されていることがわかる。また、湾奥部に比べて泥の輸送量の絶対値がSt.3やSt.4では小さくなる傾向も、計算結果において再現されている。ただし、輸送方向の観測値との一致が必ずしも完全ではなく、これらについては流れの再現性と同様に、吹送流などの潮汐流以外の影響などが、観測値との相違の原因として考えられる。

#### (4) 侵食・堆積分布の推定

上記の計算により求められた侵食・堆積量の分布を図-18に示す。同図は、15日間で各地点で生じた侵食あるいは堆積量を、単位面積当重量で示したものである。計算結果によると、湾奥干潟域および湾奥西部海域にて堆積傾向を示し、特に湾奥西部で泥の堆積傾向が見られる。これは、図-3で示した近年の底質の細粒化傾向に一致した結果となっている。一方、潮汐流の作用外力が大きい筑後川河口部や熊本沖の泥質堆積域では、侵食傾向となっている。ただし、本計算では湾内に堆積した泥分のみを対象としており、河川から供給される量や砂分の移動は一切考慮していない。このため、湾奥東部などにみられる泥の侵食域は必ずしも水深が増大しているわけではない点に注意する必要がある。

このような、広域的な泥の侵食・堆積傾向に関する計算結果の検証は、観測データの不足などにより現時点では必ずしも十分ではない。しかし、SSフラックスの観測結果との比較で示されたように、特に湾奥部での潮汐作用による底泥の輸送特性は、おおむね再現できている。したがって、このような海域の潮汐流による底泥輸

送現象に限れば、例えば河川から新たに供給された泥の輸送傾向や、湾奥部での底質改善後の底泥堆積傾向への影響把握などの予測計算が可能である（水産庁ほか・2003）。

## 5. おわりに

有明海の環境変動に深く関与していると考えられる底泥の輸送現象について、観測データの解析に基づく現象の把握、さらに数値モデルによる底泥輸送シミュレーションを行った。湾内の4地点で同時に約1ヶ月間実施された流況・濁度の連続観測データの解析によると、有明海の特徴である大きな潮位差により生じる潮汐流が、底泥の巻き上げや河口付近の高濁度水の輸送を引き起こし、湾内の底泥輸送過程に重要な役割を果たしていることがわかった。また、これらの輸送量が顕著となる大潮期の湾奥部においては、筑後川沖からは西向きに、湾奥西部海域では南向きに、浮遊状態の泥の輸送が生じていることが明らかとなった。このことは同湾奥部における泥質物の堆積が、西岸側でより顕著であることと対応し、潮汐作用が泥の堆積分布の形成における重要な要素の一つであることを示している。

このような潮汐作用の重要性を考慮し、潮汐流を主な外力とする湾内の堆積泥の移動現象を対象として、底泥輸送モデルによる数値シミュレーションを試みた。連続観測データとの比較を通じて計算結果の検証を行い、現地データにみられた湾奥部での泥の輸送傾向が、数値計算によりおおむね再現できていることが確認された。さらに、これらの輸送に伴う底泥の侵食・堆積分布の推定結果においては、湾奥部の西部海域や海底水道部で泥の堆積傾向を示す結果となり、特に湾奥西部では底質粒径の細粒化が生じているという現地での堆積傾向に一致したものとなった。このような、広域的な泥の侵食・堆積傾向に関する計算結果の検証は、観測データの不足などにより現時点では必ずしも十分ではない。しかし、湾内での底泥の輸送傾向をおおむね再現できていることから、主に潮汐流の影響による底泥輸送現象に限定すれば、例えば河川供給土砂の湾内での広がり傾向の推定や、底質改善事業における改善域への泥の堆積傾向の推定などが本モデルの活用により可能となる（水産庁ほか・2003）。

今後の課題として、広域的な侵食・堆積傾向に関する計算結果の検証を充実させることや、ここでは考慮しなかった外力条件や泥の供給過程などの影響を取り込み、より汎用的な条件で使用できるモデルに発展させていく

ことが重要である。また、泥の侵食や堆積傾向の予測結果の検証においては、干潟部を含めた泥質域の地形測量や底質粒径に関する定期的なデータの取得に加え、含水比等の時間的な変化を経て生じる泥の堆積状況（密度の鉛直分布等）の変化を把握するための測定技術の確立も重要である。さらに、地形変化量の予測を主目的とする計算においては、本モデルでは考慮されていない砂質分の輸送も含めた計算に拡張する必要がある。一方、浮遊泥濃度の時空間変動の計算結果の水質モデルへの取込みは、植物プランクトン等による光合成量の推定精度の向上につながる。また泥粒子への栄養塩や化学物質の吸着過程の本モデルへの導入により、堆積物の汚染予測への活用が期待できる。冒頭に述べたように泥の移動が内湾域の環境要素として重要であることをふまえ、このような水質や底質等の環境変化予測に本モデルを発展させていく予定である。

## 謝辞

本調査は国土総合開発事業調整費による調査の一部として、国土交通省港湾局ならびに同省九州地方整備局の協力のもとに実施されたものである。特に浮遊泥連続観測調査等の現地調査は、九州地方整備局港湾空港部海洋環境・海岸課をはじめ、下関港湾空港技術調査事務所等の関係事務所の甚大なる協力のもとに実施された。数値モデルの構築に際しては、有明海海域環境検討委員会（委員長・酒井哲郎京都大学大学院工学研究科教授）ならびにモデル検討部会（座長・滝川清熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター教授）の委員各位より有益な助言を頂戴し、委員会事務局より数値計算用水深データの提供を受けた。また、口田登前部長をはじめとする当研究所海洋・水工部諸氏からは、部内討議等を通じて研究遂行上、貴重な意見を頂いた。ここに記して関係者各位に謝意を表する次第である。

## 参考文献

- Dyer, K. R. (1986): Coastal and Estuarine Sediment Dynamics, John Wiley & Sons, 342p.
- Ezer, T. and G.L. Mellor (2000): Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model, Dynamics of Atmospheres and Oceans, 32, pp.185-208.
- Mehta, A.J. (1988), Laboratory studies on cohesive sediment deposition and erosion, in Dronkers, J. and W. van Leussen(ed.), Physical processes in estuaries, Springer-Verlag, pp. 427-445.

- van Leussen, W. and J. Dronkers (1988) : Physical processes in estuaries : An introduction, in Dronkers, J. and W. van Leussen (ed.), Physical processes in estuaries, Springer-Verlag, 560p.
- Whitehouse, R. Soulsby, R., Roberts, W. and Mitchener, H (2000) : Dynamics of estuarine muds, Thomas Telford Publishing, 210p.
- 池松弥 (1980) : 有明海のエビ・カニ・貝類, 海洋科学, Vol.12, No.2, pp.97-104.
- 宇野木早苗 (2003) : 有明海の潮汐現象の原因に関する観測データの再解析結果, 海の研究, 第12巻, 第3号, pp.307-313.
- 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所 (1995) : 選定による航路・泊地埋没防止対策マニュアル
- 海上保安庁 (1992) : 日本沿岸潮汐調和定数表, 日本水路協会, p.267.
- 鎌田泰彦 (1980) : 有明海の沿岸地形・海底地形と底質, 海洋科学, Vol.12, No.2, pp.88-96.
- 楠田哲也・山西博幸・吉見博之・二渡了 (1989) : 攪乱・不攪乱底泥の巻き上げ特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.314-318.
- 口田登・足立一美・楠田哲也・金山進 (1986) : 底泥の静水中の沈降特性に関する実験, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.352-356.
- 近藤雅秋・戸原義男・平松和明・四カ所四男美・森健 (1996) : 潮流による底泥の巻き上げ特性に関する研究, 農業土木学会論文集, 第182号 (第64巻, 第2号), pp.109-115.
- 佐藤正典編 (2000) : 有明海の生きものたち, 海游社, 396p.
- 瀬口昌洋・渡辺潔・加藤治 (1989) : 有明海奥部浅海域における底層の流れと濁りについて, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.819-823
- 鶴谷広一・村上和男・入江功 (1990) : Mathematical modeling of mud transport in ports with a multi-layered model -Application to Kumamoto Port -, 港研報告, 第29巻, 第1号 pp.3-51.
- 鶴谷広一・村上和男・入江功・笹島博・糸井正夫 (1994) : Fluid Mud を考慮した三次元シルテーション予測モデルについて, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.308-312.
- 中川康之 (2002) : 東京湾奥部での底泥の巻き上げとその粒度分布特性について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1046-1050.
- 中川康之・今林章二・末次広児 (2002) : 有明海の底泥輸送現象に関する現地データの解析, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.566-570.
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編 (1985) : 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, 1106p.
- 農林水産省 (2002) : 第9回有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会資料
- 農林水産省水産庁ほか (2003) : 有明海海域環境調査報告書 (印刷中)
- 満田雅男 (1968) : 海中浮泥の分布と湯面への影響について, 第15回海岸工学講演集, pp.175-179.
- 村上和男・菅沼史典・佐々木均 (1989), 円形回転水路による底泥の巻き上がり沈降に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第28巻, 第1号, pp.43-76.