

# 広島湾北部海域における土砂輸送解析

## NUMERICAL ANALYSIS OF SEDIMENT TRANSPORT IN THE NORTHERN PART OF HIROSHIMA BAY

川西 澄<sup>1</sup>・森 泰二<sup>2</sup>・牛嶋 健詞<sup>3</sup>

Kiyosi KAWANISI, Taiji MORI and Kenshi USHIJIMA

<sup>1</sup>正会員 工博 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

<sup>2</sup>学生会員 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

<sup>3</sup>学生会員 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

Sediment transport in semi-closed sea is very important, because this is closely linked to not only maintenance of port facilities but also coastal environmental issues. We analyzed sediment transport in the Hiroshima Bay using a 3-D baroclinic numerical model with a sediment transport model that realistically simulates cohesive and noncohesive sediments. There is a characteristic horizontal distribution of bottom layer turbidity in the Hiroshima Bay, i.e., the turbidity is higher in the southwestern part than in the northeastern part. The result of the model showed that sediments resuspended by strong tidal current in Seto parts make the north-south gradient of turbidity. In addition, discharge from the Ohta River brings about the east-west gradient of turbidity. The strong tidal current at Seto part tends to erosion. On the contrary, northern part of the Itsukushima tends to deposition.

**Key Words :** *sediment transport, suspended sediment, numerical simulation, Hiroshima Bay*

### 1. はじめに

広島湾は、湾奥部には太田川、湾西部には小瀬川、錦川の一级河川が流入しており、河川水の影響を強く受ける閉鎖性の湾である。河川からの土砂流出の影響を強く受ける広島湾のような沿岸域における土砂輸送現象は、航路や泊地の埋没など港湾施設の維持・管理上の問題に関わっている。また、閉鎖性の強い内湾や内海では、有害物質やシストを含んだ底泥が厚く堆積しているところが多い。底泥は含水比が高く軟弱で、流れや波の作用によって容易に再懸濁や流動が生じる。底泥の再懸濁や底泥内間隙水の流動は、底泥中の栄養塩の溶出現象と密接な関係があるため、底泥の挙動が河口周辺や沿岸部の環境に与える影響は大きい。このような海域では、粒径の細かいシルトや粘土などの泥粒子の挙動を知ることが重要である。さらに、土砂輸送現象は、底質の細粒化、粗粒化という底生生物の生息環境に多大な影響をもたらす問題にもつながるため、早急に現象を把握しなければならない。しかし、内湾における懸濁粒子の濃度は時空間的な変動が大きく、現地観測のみからその全体像を把握することは困難である。そこで、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ことは、上述し

た問題を解決するためのアプローチとして非常に有効な手段であると考えられる。

本研究では、土砂輸送を考える上で、砂（非粘着性粒子）と泥（粘着性粒子）の性質の異なる2種類の土砂に分けて計算することで、濁度の長期・短期変動を把握することや広島湾内の土砂の堆積傾向を推測することを目的とする。

### 2. 方法

#### (1) 計算結果の検討に用いた現地データ

計算結果と照合するデータには、広島湾北部域のSta.A (34°16'24"N, 132°16'9"E : 図-1参照)において、2000年10月14日～11月18日の間に行われた、ADCPによる流速と後方散乱強度から算出する濁度の鉛直分布の連続測定データ<sup>1)</sup>と、朱ら<sup>2)</sup>により1997年8月21日～9月19日の間、広島湾の太田川河口域を中心に、湾奥部全域にわたる22測点において行われた、底層の流速や濁度などの観測データを用いた。このように広島湾の湾奥部において観測データが比較的豊富であるため、今回は広島湾奥部に焦点を絞った計算・解析を行うものとする。

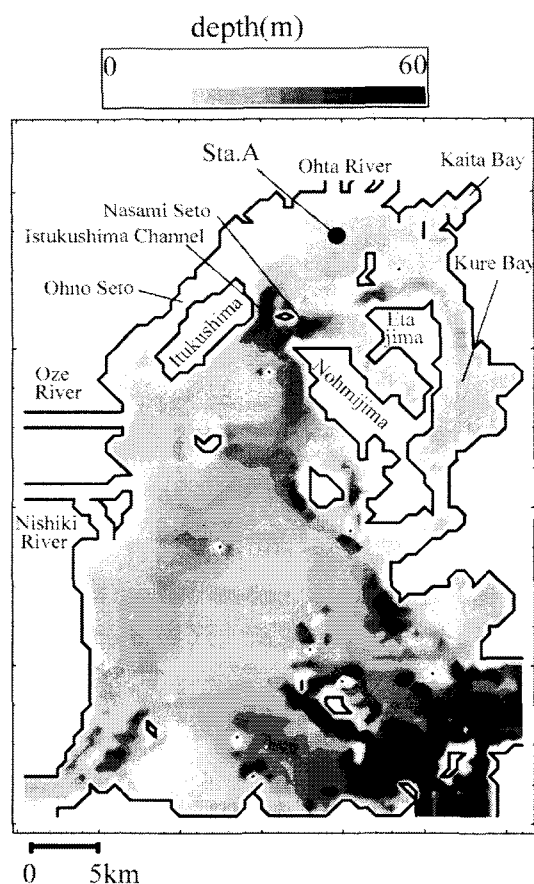


図-1 計算領域と観測地点

## (2) 数値モデルの概要

数値モデルには、フリーソースであるECOMSEDを使用した。ECOMSEDの流況モデルには、POM<sup>3)</sup> が用いられている。土砂輸送モデルについては、HydroQual社の3D土砂輸送モデルが組み込まれている。このモデルの特徴は、様々な水環境下（湖や河川、沿岸域など）で対応できるように、輸送される土砂を粘着性粒子と非粘着性粒子の2種類に分けていることである。粘着性粒子は粒径が75 $\mu\text{m}$ より小さい細粒土、非粘着性粒子は粒径75～500 $\mu\text{m}$ の粗粒土としている。粒径が500 $\mu\text{m}$ を越える粗砂や礫に関しては、このモデルでは考慮していない。外力作用による粘着性粒子の底泥の再懸濁量 $\varepsilon$ の算定には、次式を用いている。

$$\varepsilon = \frac{a_0}{T_d^m} \left( \frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right)^n \quad (1)$$

ここに、 $a_0$ ：侵食速度係数、 $T_d$ ：堆積時間（day）、 $\tau_b$ ：底面せん断応力（dynes/cm<sup>2</sup>）、 $\tau_c$ ：限界底面せん断応力（dynes/cm<sup>2</sup>）、 $m$ 、 $n$ は侵食環境に依存する定数で、それぞれ0.5、2.0としてある。粘着性の土で形成される底面は堆積後の時間とともに圧密が進み、強固になる性質を持つ。そこで、底面を堆積時間で分けられた鉛直のセグメントで構成することによって、この底面

表-1 基本的な計算条件

|                                   |               |     |                                                                   |
|-----------------------------------|---------------|-----|-------------------------------------------------------------------|
| モデル                               | 水平格子数         |     | 64×89                                                             |
| グリッド                              | 鉛直分割          |     | 12層                                                               |
| タイム                               | 外部モード[s]      |     | 1.0                                                               |
| ステップ                              | 内部モード[s]      |     | 10.0                                                              |
| 混合係数                              | 水平混合          |     | スマゴリンスキー                                                          |
|                                   | 鉛直混合          |     | M-Y2.5クロージャ                                                       |
| 湾内初期<br>条件                        | 水温[℃]         |     | 22.0                                                              |
|                                   | 塩分[psu]       |     | 32.5                                                              |
| 河川境界                              | 流入量<br>[m³/s] | 太田川 | 55.0                                                              |
|                                   |               | 小瀬川 | 9.0                                                               |
|                                   |               | 錦川  | 36.0                                                              |
|                                   | 水温[℃]         |     | 25.0                                                              |
|                                   | 塩分[psu]       |     | 10.0                                                              |
| 外海との<br>境界                        | 潮汐変動          |     | M <sub>2</sub> , S <sub>2</sub> , K <sub>1</sub> , O <sub>1</sub> |
|                                   | 水温[℃]         |     | 22.0                                                              |
|                                   | 塩分[psu]       |     | 32.5                                                              |
| 沈降速度<br>[μm/s]                    | cohesive      |     | Burbanの式                                                          |
|                                   | non-cohesive  |     | 200                                                               |
| 限界底面せん断応力[dynes/cm <sup>2</sup> ] |               |     | 0.5                                                               |

の性質の効果を組み込んでいる。

粘着泥の堆積については、ブロックの形成による粒径と沈降速度の変化を考慮する必要がある。Kroneの定式化によると粘着泥の堆積フラックス $D_1$ は次のように表される。

$$D_1 = -W_{s,1} C_1 P_1 \quad (2)$$

ここに、 $W_{s,1}$ ：粘着泥ブロックの沈降速度（m/d）、

$C_1$ ：粘着泥の濃度（g/m<sup>3</sup>）、 $P_1$ ：堆積確率である。

粘着泥ブロックの沈降速度は、その場の浮遊泥濃度と、せん断応力に依存すると仮定し、室内実験によって堆積フラックスを次のように表している。

$$W_{s,1} = \alpha (C_1 G)^\beta \quad (3)$$

ここに、 $G$ ：せん断応力（dynes/cm<sup>2</sup>）である。 $\alpha$ 、 $\beta$ の値はBurban<sup>4)</sup>の室内実験により、それぞれ2.42、0.22としている。堆積確率 $P_1$ は、ブロックの大きさの不均一性と底面近くでの乱れの効果を数値化したものである。非粘着性粒子の堆積については、堆積確率は考慮せず、沈降速度も一定としている。

## (3) 計算条件

主な計算条件を表-1に示す。計算領域は図-1に示している東西方向約38km、南北方向約60kmの範囲であり、水平格子数は64×89（600mメッシュ）とし、鉛直方向には $\sigma$ 座標を用いて12層に分割した。時間刻みは外部モードを1s、内部モードを10sとした。粘性・拡散係数は、水平方向にスマゴリンスキーモデル、鉛直方向にMellor and Yamada<sup>5)</sup>のレベル2.5乱流モデルを用いて計算している。

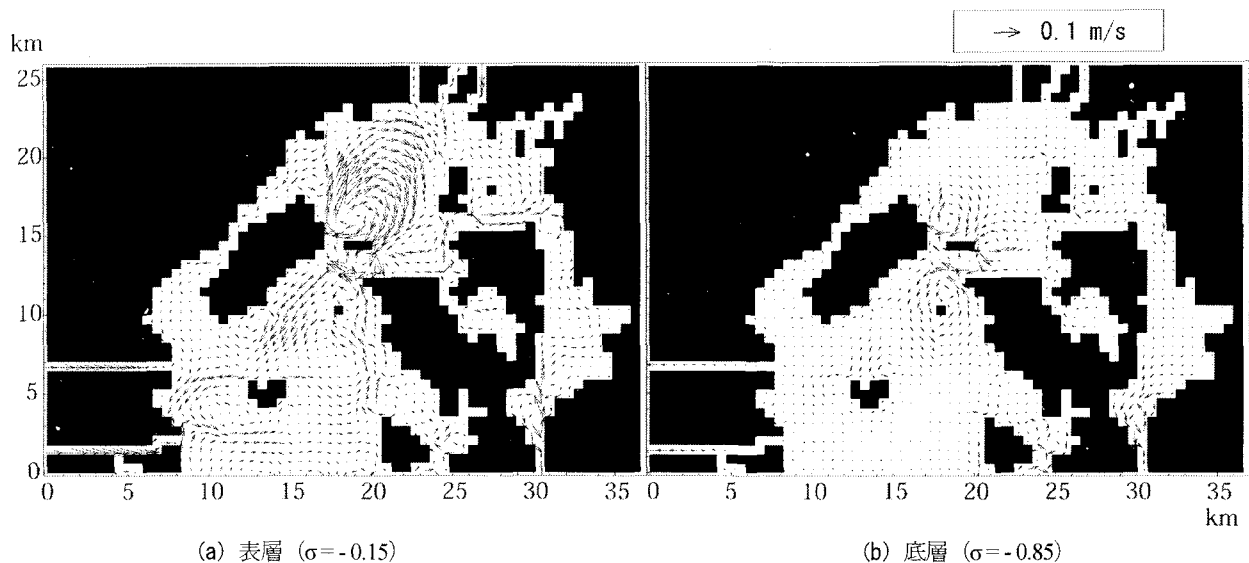


図-2 残差流の流速ベクトル

河川流入は、太田川、小瀬川、錦川の一級河川のみを考慮する。平水時は太田川からは $55\text{m}^3/\text{s}$ 、小瀬川からは $9\text{m}^3/\text{s}$ 、錦川からは $36\text{m}^3/\text{s}$ の一定流入を常に与えている。これらの河川は夏季になると流量が増加するが、今回平水時として与えた流量は夏季以外の、流量が少ないときの代表値である。境界条件としての潮汐は、海上保安庁水路部によって測定された調和定数をもとに設定した。今回の計算では大潮・小潮変動による再懸濁の影響を考慮するため、 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ の主要4分潮を与えた。海面を吹く風による影響や海面の熱収支については考慮していない。なお、土砂輸送モデル中の限界底面せん断応力などの底質に関するパラメータは、濁度の計算結果と観測結果の比較から試行錯誤的に妥当と考えられる値を与えた。これらのパラメータの設定に関しては、今後、実験や観測のデータを通じて詳細に検討する必要がある。

土砂輸送に関しては、2パターンの計算を行った。ケース1として、河川からの土砂流入を考えずに、湾内に初期濃度のみを与え、湾内の濁度の輸送・沈降と底泥の再懸濁を考慮して計算を行った。このケースは湾内に存在する懸濁土砂がどこに移動し、堆積するのか、という傾向を把握することが目的である。

次にケース2として、河川からの流入がかなり大きい、出水時を想定した土砂輸送計算を行った。このケースは河川から流入してきた土砂が湾内にどのように広がり、堆積するのかを調べるのが目的である。

土砂輸送の計算には、ケース1、ケース2の両ケースとも粘着性の土（cohesive sediment, 以下coh）と非粘着性の土（non-cohesive sediment, 以下non-coh）の性質の異なる2種類の土砂で計算を行った。それぞれの沈降速度については、cohは前述のBurbanの室内実験式から計算し、non-cohには一定値の $200\text{ }\mu\text{m/s}$ を与えた。エスチャリーにおける限界底面せん断応力は、およそ $0.2\sim$

$20\text{ (dynes/cm}^2\text{)}$ と言われており<sup>6)</sup>、今回は限界底面せん断応力を $0.5\text{ (dynes/cm}^2\text{)}$ とし、その値を境に沈降モードと再懸濁モードで切り替わるように設定した。

### 3. 流況について

#### (1) 潮流場の再現性について

計算結果の潮流場の再現性については、以前、同様の条件下での計算において、表層の $M_2$ 潮流楕円を実測値と比較することで調べてある<sup>7)</sup>。実測値と計算結果を比べると、振幅も軸もおおよそその一致を見せていて、潮流場はうまく再現できているものと考えられる。

#### (2) 流況の確認

図-2に中潮時の表層、底層の残差流を示す。残差流は大潮・小潮で流速・流向が多少変動するが、基本的なパターンは同じである。図-2(a)に示すように湾奥部の表層では、太田川の河口から南向きに流れていて、厳島、能美島間の厳島海峡、奈佐美瀬戸の方に向かっている。その流れは、大奈佐美島の北側で西に曲がり、厳島の北東部を迂回するように北上して、一部は大野町と厳島に挟まれた大野瀬戸に流入している。奈佐美瀬戸を通過した南下流は厳島の南東沿いを南下していく。広島湾奥部には時計回りの循環流が形成されているが、これは大阪湾や伊勢湾でも確認されている重力循環に伴う高気圧性循環流であると考えられる。上嶋ら<sup>8)</sup>による現地観測の結果にも、計算結果と同様に時計回りの循環の存在が示されており、うまく流況の再現計算ができていると思われる。

底層は河口付近で、表層とは逆に北向きの流れが発生し、太田川に流れ込む形となる。厳島海峡の北側では時計回りの渦が存在する。これは地形性の潮汐残差流だと

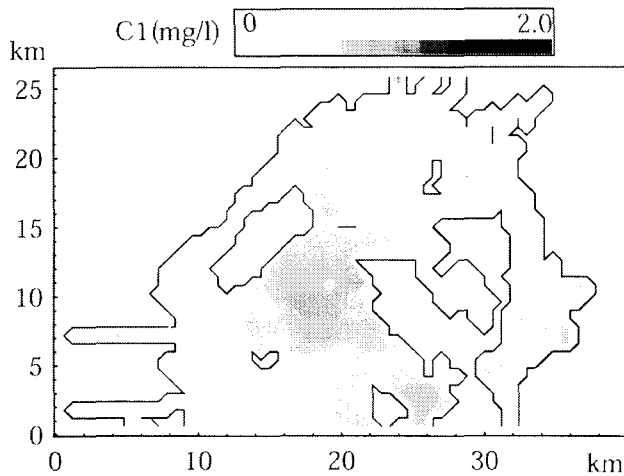


図-3 底層のcoh濃度

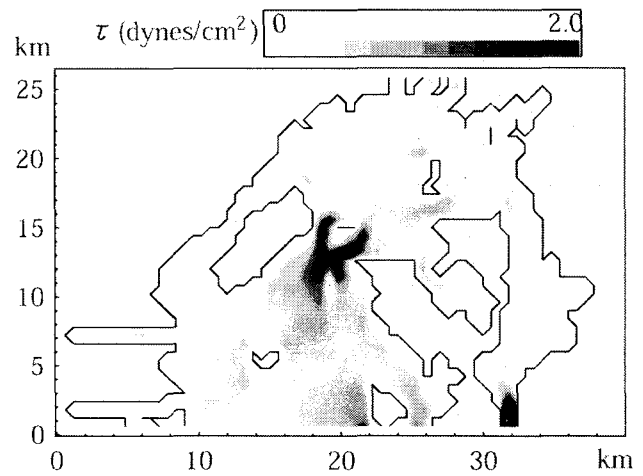


図-4 底面せん断応力（上げ潮最強時）

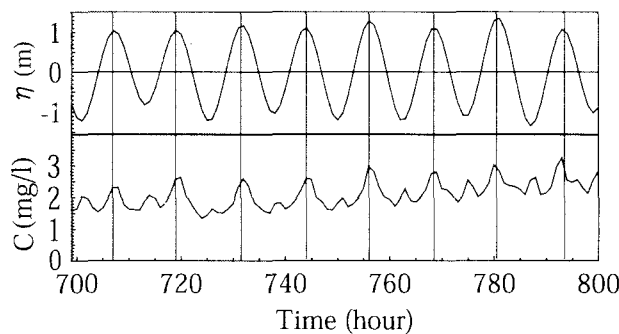


図-5 大潮期の潮位と底層濃度の経時変動

考えられる<sup>7)</sup>。奈佐美瀬戸の北東部にはもうひとつ、反時計回りの渦が存在する。その流れを受けて湾東部に向かう流れが発生している。強い潮流が発生するのは厳島海峡、奈佐美瀬戸などの瀬戸部で、大潮期には表層の流速は最大で50cm/sをこえる値となる。

#### 4. 土砂輸送特性

##### (1) ケース 1：平水時の湾内の濁度変動

出水時以外は河川から広島湾への土砂流入はあまりなく、平常時の湾内の濁度の変動は潮流による湾内懸濁粒子の移流や沈降・再懸濁によるものだと考えられる。まず、一様な初期濃度10mg/l (coh : 5mg/l, non-coh : 5mg/l) を湾内に配置し土砂輸送計算を行うことで、どこで高濁度が発生しやすいか、どこに土砂が堆積しやすいかという湾内の傾向を把握することにした。

図-3には、大潮時における一日平均した、底層におけるcoh濃度分布を示している。これを見ると、厳島海峡、奈佐美瀬戸の周辺で土砂濃度が高くなっており、湾奥部では南側が高く北側が低いという底層濃度分布になっていることが分かる。実際、朱ら<sup>2)</sup>が行った移動観測によると、湾奥部では南北方向では南高北低、東西方向では西高東低の濃度分布の傾向が認められている。

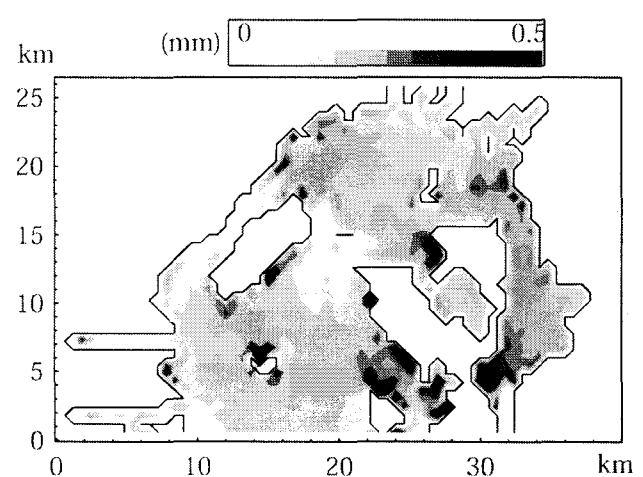
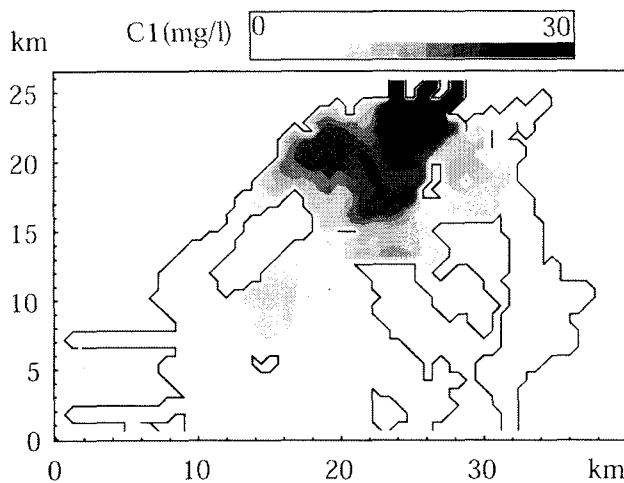


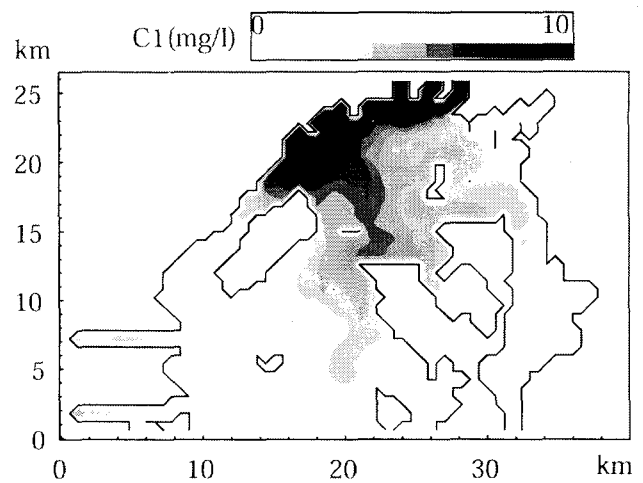
図-6 計算開始から50日後の堆積厚

図-4に示す底面せん断応力の空間分布を見てみると、厳島海峡、奈佐美瀬戸の瀬戸部が最も大きく、その周辺に大きい箇所が広がっている。その場所は、底層濃度の高い場所と概ね一致している。したがって図-3南高北低の濃度分布は、底泥の再懸濁が関係しているものと考えられる。瀬戸部で発生した高濁度水塊は、残差流の方向に対応して、厳島海峡からは北に、奈佐美瀬戸からは北東に広がっている。

Sta.Aで観測された定点の時系列濁度データには、半日周期の濁度変動が存在している。この変動は潮流変動との相関が高く、満潮時に濁度のピークが来ることが分かっている<sup>1)</sup>。今回の計算結果からも、観測地点付近のグリッドにおいて、図-5に示すように同様の変動が見られる。計算結果や朱ら<sup>2)</sup>の観測結果から考えて、湾奥部底層では南側が高く、北側が低いという濁度の空間分布が存在し、潮流によって濁度が水平移動することで起こる変動であると予想される。今回の結果では大潮期でその現象が顕著に現れていたことから、厳島海峡や奈佐美瀬戸近辺で発生している高濁度が潮流に運ばれ河口近辺まで影響を及ぼすものと考えられる。



(a) 表層



(b) 底層

図-7 土砂流出後のcoh濃度

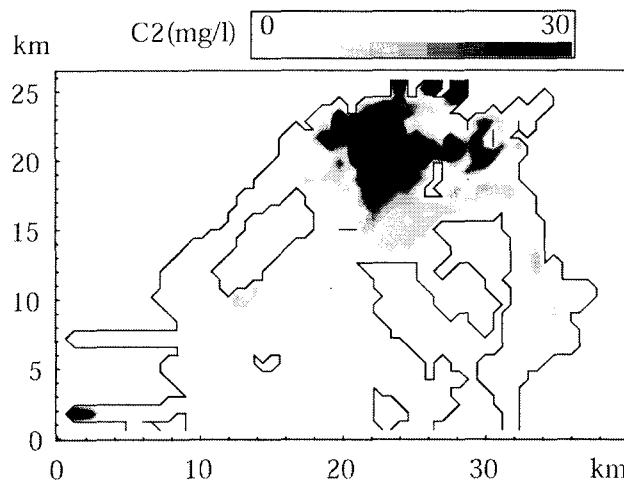


図-8 土砂流出後のnon-coh濃度 (底層)

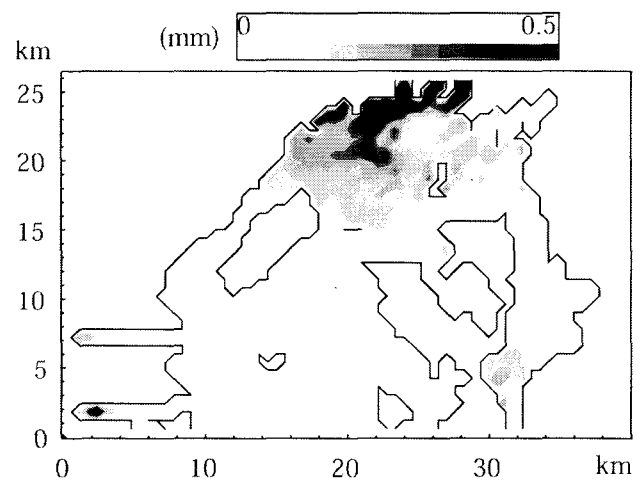


図-9 出水後の底泥堆積厚

図-6は計算開始から50日後の堆積厚の空間分布を示したものである。傾向としては河口の西側や、江田島と能美島に囲まれた江田内湾の湾口部に多く堆積しており、厳島海峡や奈佐美瀬戸などの瀬戸部では堆積せず、侵食傾向にある。これは図-4に示す底面せん断応力の分布によく似ていて、底面せん断応力の小さな場所で多く堆積する傾向にある。

## (2) ケース2：河川からの流入土砂の挙動

次に、河川から湾に流入してくる土砂がどのように広がり、堆積するのかということを推測するために、河川境界の条件を変えて計算を行った。

平水時の太田川の河川境界には、 $50\text{m}^3/\text{s}$ の流量と $10\text{mg/l}$  (粘着： $5\text{mg/l}$ ，非粘着： $5\text{mg/l}$ )の土砂濃度を与えている。この計算では出水時を想定し、平水時の条件で10日間計算した後、約1週間だけ平水時の約8倍の量である $450\text{m}^3/\text{s}$ の流量を与えてみた。表-2に示すように、出水時の河川境界部の土砂濃度は平水時の20倍である $200\text{mg/l}$  (coh： $100\text{mg/l}$ ，non-coh： $100\text{mg/l}$ )を与える。

表-2 ケース2の河川境界

| 状態  | 流量 $[\text{m}^3/\text{s}]$ | coh $[\text{mg/l}]$ | non-coh $[\text{mg/l}]$ |
|-----|----------------------------|---------------------|-------------------------|
| 平水時 | 55.0                       | 5.0                 | 5.0                     |
| 出水時 | 450.0                      | 100.0               | 100.0                   |

出水時の土砂濃度の値は太田川戸坂上水取水施設のデータを参考に設定した<sup>9)</sup>。以下にその計算結果を示す。

図-7にはそれぞれ表層、底層のcoh濃度分布、図-8には底層のnon-coh濃度分布を示している。表層のcoh濃度については、河川水とともに南方にとびだし、湾奥部全体に広がっていく。河口から東の呉湾には入っていくものは少なく、湾東部に及ぼす影響は小さい。河口から南に向かう高濃度の水塊は残差流に対応して、湾西部に広がる傾向にある。底層の分布を見ると、高濃度域がさらに西側に寄っており、西高東低の濃度分布が顕著に現れている。特に河口の西側から大野瀬戸の北部海域にかけて大きな濃度が集中している。この計算結果から、朱ら<sup>2)</sup>による観測で捉えられた湾奥部での西高東低の濁度分布を作る一因として、河川からの土砂の流入による影響

が考えられる。朱ら<sup>2)</sup>が夏季に行った観測は出水があった後に行われているものであることも、この推測に至る理由の1つである。

non-coh粒子は沈降が早いいため、河口周辺のみが高濃度となっている。図には示していないが、河口付近の高濁度をつくる土砂の多くは沈降・堆積し、一部が潮流によって湾西部の方へ輸送されていく。また、coh, non-cohに関わらず、太田川から流入した土砂は、北東部最奥の海田湾や、江田内湾にはなかなか流入せず、これらの湾に対する太田川からの土砂流入は少ないと考えられる。

図-9は出水後の底泥の堆積厚を示したもので、やはり底層濁度の高かった河口の西側から大野瀬戸の北部海域にかけて多く堆積する傾向にある。厳島海峡、奈佐美瀬戸付近の流れが強い海域ではあまり堆積していない。河川から流出したcoh土砂は、表層では河口から勢いよく飛び出し、湾奥部全体に広がるが、沈降するまでに大野瀬戸の北部海域に集積し堆積する。その近辺は平均的に底面せん断応力が小さいということも堆積量が多い理由であろう。また、沈降速度の違いにより、coh粒子は湾西部に広く堆積し、non-coh粒子は河口付近で主に堆積していた。

## 5. おわりに

本研究では、粘着性の違いによる再懸濁・堆積特性を考慮した土砂輸送モデルを用いて広島湾における土砂輸送解析を行ない、広島湾奥部での濁度分布や堆積・侵食傾向について調べた。

厳島海峡や奈佐美瀬戸などの瀬戸部において、強い流れに伴う底面せん断応力の増加が引き起こす高濁度域が存在する。平水時は太田川などの河川からの土砂の流入が少なく、湾奥部の南高北低の分布となる。洪水時などの土砂流入が大きい場合は、流入土砂は河口から主に湾西部に広がっていくため、西高東低の濁度分布が形成される。これは観測によって認められた濁度の水平分布と一致している。

堆積しやすい場所は、流れが弱く底面せん断応力が平均的に小さいという傾向がある。瀬戸部は再懸濁が起こりやすく主に侵食傾向にある。河川流入が大きいときは、河口西部から大野瀬戸の北部海域にかけて多く堆積する結果となったが、平水時でも同じ場所に堆積しやすい。

2000年10月に行なった広島湾河口部における定点観測によると、底層の濁度には半日周期の変動があり、満潮のときに濁度はピークを迎えていた。計算結果でも、観

測地点に近い場所において同様の変動が認められた。これは底層濃度の水平分布と、潮流による移流によって生まれた現象であると考えられ、潮流の大きい大潮期でその変動が顕著であった。

今回の計算・解析は広島湾奥部に焦点を絞って行い、ある程度のパターンは掴んだと思われる。今後の課題について述べると、今回は風を考慮した計算を行っていないが、広島湾には季節的に南北方向に卓越した風が吹いており、吹送流による流況の変化にともなう底面せん断応力や土砂輸送機構の変化は無視できない可能性がある。また、底質の粒度変化の予測や定量的な解析を行うために、底質の物理特性に関するデータを取得する必要がある。今後はさらに様々な条件下で計算を行い、観測データと比較検討をしてモデルの精度を高め、またその結果を観測に反映するという形で土砂輸送機構を明らかにしていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 川西 澄, 水野 博史, 内田 卓志 : 1.5MHz 超音波ドップラー流速分布計を用いた感潮域における懸濁粒子の動態観測, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1096-1100, 2001.
- 2) 朱 小華, 高杉 由夫, 橋本 英資, 安田 秀一 : 広島湾における底層懸濁物質の濃度変動, 沿岸海洋研究, 第37巻, 第1号, pp. 59-67, 1999.
- 3) Blumberg, A. F. and Mellor, G. L. : A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in: N. S. Heaps, ed, *Three Dimensional Coastal Ocean Models*, American Geophysical Union, Washington, D. C., pp.1-16, 1987
- 4) Burban. P. Y., Xu, Y., McNeil, J. and Lick, W.: Settling Speeds of Flocks in Fresh and Sea Waters, *J. Geophys. Res.*, Vol.95 (C10), pp.18213-18220, 1990.
- 5) Mellor, G. L. and Yamada, T. : Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol.20 (4), pp.851-875, 1982.
- 6) Black, K. S., Tolhurst, T. J., Paterson, D. M. and Hagerthey, S. E.: Working with Natural Cohesive Sediment, *J. Hydraulic. Eng.*, pp.1-9, January 2002.
- 7) 川西 澄 : 広島湾北部海域の流動構造と海水交換性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1041-1145, 1999.
- 8) 上嶋 英機, 早川 典生 : 瀬戸内海の物質拡散, 分散特性, 沿岸海洋研究ノート, 第20巻, 第1号, pp. 1-11, 1982.
- 9) 田中 勝久 : 沿岸・河口域のリン循環におよぼす土壌物質の影響, 南西水研研報, No. 28, pp. 73-119, 1994.

(2004.9.30 受付)