# 再懸濁特性マッピングに基づく有明海の懸濁物シミュレーション

Numerical Simulation of Sediment Transport in the Ariake Sea with Erosion Property Mapping

濱田孝治<sup>1</sup>·山本浩一<sup>2</sup>·速水祐一<sup>3</sup>·吉野健児<sup>4</sup> 大串浩一郎<sup>1</sup>·山口創一<sup>5</sup>·片野俊也<sup>5</sup>·吉田 誠<sup>6</sup>

## Takaharu HAMADA, Koichi YAMAMOTO, Yuichi HAYAMI, Kenji YOSHINO Koichiro OHGUSHI, Soichi YAMAGUCHI, Toshiya KATANO and Makoto YOSHIDA

Numerical simulation of suspended sediment concentration in the Ariake Sea was conducted applying erosion property mapping. The result was compared with a 1-tidal-cycle field observation and the model reasonably reproduces temporal variation of Secchi depth and suspended sediment concentration profile in the head of the Ariake Sea. However, significant Secchi depth decreases during ebb tide off Chikugo & Hayatsue river mouth were not reproduced in the model. It suggests that it is necessary to resolve the tidal channel of these rivers for further improvement of the model.

## 1. はじめに

有明海奥部(図-1)の海洋環境の大きな特徴の一つは, 非常に濁った透明度の低い海であることである.有明海 の場合,こうした濁りの主体は藻類ではなく,水中に懸 濁した粘土鉱物によるものである.近年,有明海の特徴 である濁りが減少し,透明度が上昇したことが指摘され ており,有明海異変の一つに挙げられている(川村, 2002;清本ら,2008など).

また,近年の有明海奥部では,底質の細粒化も問題と なっている.有明海湾奥部西部海域では,底泥域の経年 的な拡大に伴ってタイラギ漁場が消失しており,本海域 におけるタイラギ資源の減少の大きな原因となっている と考えられている(伊藤,2006など).底質粒径分布の 変化には,海域内の懸濁物輸送の変化が直接的に関って いる.

佐賀大学有明海総合研究プロジェクトでは,有明海異 変の原因解明のため,懸濁物輸送機構の解明を重点的な 課題として研究を進めてきた.研究にあたっては,まず 文献調査やデータ解析によって仮説を構築し,それを数 値モデルによって検証するという戦略をとっている.仮 説検証のためには高精度の懸濁物輸送モデルを構築する ことが必要であり,そのためには現場に即したパラメー タの取得が不可欠である.本研究では,特に再懸濁特性 について,実測値に基づいたマッピングを行い,懸濁物 輸送モデルに適用した.計算結果を1潮汐間の懸濁物調

1	正会員	博(工)	佐賀大学准教授
2	正会員	博(工)	山口大学准教授
3	非会員	博(農)	佐賀大学准教授
	ホムロ		什加上,此外在北京

- 4 非会員 博(水) 佐賀大学准教授 5 非会員 博(理) 佐賀大学御究機関
- 5 非会員 博(理) 佐賀大学研究機関研究員 6 非会員 博(農) 佐賀大学特別研究員

嘉瀬川 六角川 33.2 Latitude (°) 33.1 池港 33 32.9 130.1 130.2 130.3 130.4 130.5 Longitude (°) 図-1 有明海奥部

査結果と比較し,透明度や懸濁物濃度プロファイルの時 間変動の再現性が向上することが示されたのでここに報 告する.

### 2. モデル構築と底質のマッピング

本研究で使用した数値モデルは, FVCOM (Chen *et al.* 2006) およびその懸濁物モジュールをベースとしたもの である.ここでは懸濁物モデルについて述べる.

本研究では,懸濁物の粒子区分は単一とした.また,凝 集性を考慮するため沈降速度 $w_s$  (m s<sup>-1</sup>)を懸濁物濃度C (g L<sup>-1</sup>)の関数とし,Mehta (1986)に準拠した以下の式を用 いた.

 $w_{s} = \max(k_{1}C^{n}, w_{s0}(1-k_{2}C)^{\beta})$  .....(1)

係数*k*<sub>1</sub>,*n*には有明海における複数点での観測結果を用い(山本,2008), *k*<sub>1</sub>=4.27×10<sup>-6</sup>, *n*=0.768とした.また,



 $w_{s0}, k_2, \beta$ にはMehta (1986) による $w_{s0}$ =2.6×10<sup>-3</sup>,  $k_2$ =8.0×10<sup>-6</sup>,  $\beta$ =4.65を用いた.底泥の再懸濁量E (kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>) は,



表-1 有明海の複数地点における再懸濁試験結果

地点	観測時期	Μdφ	含水比(%)	$\tau c\left( Pa\right)$	$M(g m^{-2}s^{-1})$
B1	2007/11/ 8	2.47	49.2	0.229	0.0149
A2	2007/11/ 9	1.39	41.4	0.260	0.0306
A4	2007/ 1/26	7.08	279	0.080	0.0275
A4	2007/ 2/21	7.22	264	0.040	0.0368
A10	2006/10/14	7.3	357	0.040	0.0316
A10	2006/12/15	7.44	308	0.096	0.0280
浜川	2006/ 9/ 5	7.73	289	0.065	0.0489



で表すこととした.限界せん断応力 $\tau ce$  (Pa),浸食速度 係数M(kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>)は、有明海の複数の調査点にADV (Nortek社製Vector流速計)を設置して行った再懸濁試験 の結果(表-1)より、 $Md\phi$ の関数として

$$\tau_{ce} = -0.0327 M d\phi + 0.3042 \quad (3)$$
$$M = \begin{cases} 3.1199 \times 10^{-5} & (M d\phi > 4) \\ 0 & (M d\phi < 4) \end{cases} \quad (4)$$

で表されるものとした.ただし*Md φ*は中央粒径をD (mm)とするとき*Md φ*=log<sub>2</sub>Dで表される量である.(3), (4)と有明海全域における底質の*Md φ*分布をもとに,有 明海全域の再懸濁特性のマッピングを行った.底質の *Md φ*は,有明海奥部については2006年8月の底質調査 (山本ら,2006),諫早湾内については2008年5月の底質 調査結果(山本ら,2009),その他の海域については近



図-6 満潮・干潮時の透明度水平分布の比較

藤ら(2003)の結果を用いることとし、それらを結合し た後スプライン補間(大西,1975)によって格子点上の 値とした.図-2に各調査点の位置と得られた*Md*¢分布を 示す.季節変動が予想されるためデータ取得時期は可能 な限り揃えることが望ましいが、今回は現時点で入手可 能なもっとも詳細なデータを使用することを優先した. 今後は季節ごとの再懸濁特性の違いによる懸濁物動態の 変化について考察し、また、将来的には堆積状況によっ て再懸濁特性が動的に更新されるようなモデルを構築し て行きたい.

FVCOMでは, 流れの計算に使用する底面せん断応力 τは,

で計算される.ここで  $\kappa$ はvon Karman 定数,  $v_b$ は底層流 速,  $z_b$ は底層流速評価点の高さ,  $z_0$ は粗度高さで,本研 究では $z_0$ =1mmとしている.オリジナルのFVCOMでは, 再懸濁にも同じ式,同じ値が使用されている.しかし は,懸濁粒子に直接作用する skin friction ( $\tau_s$ ),海底の形 状に起因する形状抵抗( $\tau_t$ ),懸濁物が輸送されることに よる運動量輸送( $\tau_t$ )からなるので, $\tau \geq \tau_s$ は一致すると は限らない.そこで本研究では, $\tau_s$ の計算時にのみ  $z_0$ =0.02mmとした.この値は $Md\phi$ 5~6の一次粒子がfloc erosionによって再懸濁することを想定した値となって いる. 河川からの懸濁物の流入は筑後川・早津江川河口についてのみ考慮することとし、実測(平川ら、2007)による観測結果から潮位と懸濁物濃度の関数を求め、それを 用いて河口の懸濁物濃度を強制的に与えた.

#### 3.1潮汐間懸濁物調査

モデルの再現性検証のため,2008年5月6日に竹崎島-三池港以北の有明海奥部を対象とした懸濁物調査を行っ た.この観測では、図-3に示す20点を2隻の漁船でまわ り、1潮汐間に各6回濁度の鉛直プロファイル(Alec 電子 製多項目水質計Compact-CTDによる)と透明度を観測し た(図-4).また、同時にバケツ採水を行い、黒色水槽中 で濁度の測定を行った.濁度測定後の水は持ち帰りSSを 測定した.これらの結果を元に、濁度*Turb*(FTU)とSS 濃度*C*(mg L<sup>-1</sup>)の関係、および透明度*Tr*(m)の逆数とC の関係について以下の式を得た.

$$C = 1.546 \times Turb^{1.086} \qquad \left(R^2 = 0.989\right) \cdots \cdots \cdots \cdots (6)$$

$$\frac{1}{Tr} = 0.0196C + 0.633 \qquad \left(R^2 = 0.898\right) \cdots \cdots \cdots (7)$$

5月6日前後の気象・海象条件を図-5に示す.当日は大 潮であり,風は弱かった.また,観測前1週間程度の河 川流量は安定していた.



#### 4. 結果

前節の調査の再現のための懸濁物シミュレーションを 行った.計算は2ケース行い, Caselでは再懸濁マッピン グを適用し, Case2では全領域で $\tau_{ce}=0.1$ (Pa),  $M=3.1199 \times 10^{-5}$ (kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>)とした.なお,両ケースとも, 調査実施日がスピンアップ終了後に来るよう2008年4月 1日から計算を行った.透明度は水面直下(第1層)の懸 濁物濃度*C*から(7)式を用いて求めた.

図-6に、観測, Casel, Case2それぞれの,満潮時,干 潮時の透明度水平分布を示す.再懸濁特性のマッピング を行ったCase1では,干潮時に湾口側の透明度が低下す るのが捉えられ,また,住之江川沖海底水道西側で干潮 時に透明度が低下している点も一致している,一方で, 満潮時に塩田川沖海底水道に沿って見られる2mを越え る透明度の領域はCase1では再現されなかった. Case2で は,満潮・干潮に係らず湾奥東部で透明度が低く,西部 で高かった.特に白石町沖の透明度は満潮から干潮にか けて高いままであった.

図-7に、A06(住之江川沖海底水道西部),B05(塩田 川沖海底水道内),A01(早津江川河口沖)の懸濁物濃度 鉛直プロファイルの時間変動を示す.Case2ではCase1に 比べ懸濁物濃度の変動幅が小さいため透明度の変動も小 さかった.B05も同様である.A01では観測では干潮時 に3000mg L<sup>-1</sup>を越える高濁度水塊が底層に出現している. Case 1,2ともこれは再現されていない.

#### 5.考察

下げ潮に伴う白石町沖の透明度低下は空間一様の再 懸濁特性を与えたCase2では再現されなかった.図-2に よれば住之江川沖海底水道西部から湾奥西部にかけて *Md* > 7の領域が広がっていることから,湾最奥部の透 明度低下はこの領域からの巻上げの影響が大きいと考 えられる.

観測では湾西部の塩田川沖海底水道沿いは常に透明度 が高い. Case2でも常に湾西部の透明度が高く, 観測を よく再現しているように見えるが, 鉛直プロファイルを 見ると, 干潮にともなう底層への高濃度の懸濁物の進入 が見られず, 変動パターンはむしろCase1のほうが近い.

観測では、筑後川・早津江川河口に沿って干潮時には 透明度が極端に下がり、0.5mを切る.A01の懸濁物濃度 プロファイルを見ると、干潮時には3000mg L<sup>-1</sup>を越える 高濃度水塊が現れている.この傾向は河口沖のほかの点 でも同様である.これはCase1、Case2のどちらにおいて も明瞭には再現されなかったため、再懸濁特性マッピン グとは別の理由で再現されていないと考えられる.横山 ら(2008)は、筑後川感潮域で形成された1000mg L<sup>-1</sup>を 越える高濁度水が、干潮時には河口沖の1.5kmまで広が ることを示している.今回、A01で干潮時に観測された 高濁度水塊も、同じメカニズムで生じた可能性が高い.

本計算では, 筑後川・早津江川河口の感潮河道を考慮 していないため, 感潮河道から沖合いにかけての移流の 再現が不十分である.また,河道を出入りする流れがないため,再懸濁も起りにくくなっていると考えられる. こうしたことから,感潮河道をモデル内で表現することによってより再現性を高めることが出来ると考えられる.

我々は、有明海奥部について、懸濁物輸送モデルと同 時に低次生態系モデルの開発も進めている.透明度の低 い有明海奥部では、基礎生産に対して光環境の変化が大 きく影響すると考えられる.本研究の結果は、実測され た底質再懸濁特性に基づいたマッピングデータを用いる ことで、有明海湾奥部の透明度の分布・時間変動の再現 精度が大きく向上することを示している.したがって、 こうしたマッピングデータの使用は、この海域において 懸濁物輸送や底質変動の予測精度を向上させるだけでは なく、生態系モデルによる植物プランクトン量変動の予 測精度向上にもつながるものと考えられる.

#### 6. おわりに

本研究では、実測に基づき再懸濁特性のマッピングを 行い、FVCOMをベースとした懸濁物モデルに適用した. 再現性検証のため、有明海奥部を対象とした1潮汐間懸濁 物調査の再現シミュレーションを行い、再懸濁特性マッ ピングによって透明度や懸濁物濃度鉛直プロファイルの 再現性が向上することを示した.特に透明度の再現性向 上は今後並行して開発中の生態系モデルの精度向上にも つながるものと期待される.ただし、本研究の段階では、 筑後川、早津江川沖の干潮時の透明度の極端な低下は再 現出来ていない.これは感潮河道をモデル内で表現する ことにより改善されると考えられ、今後の課題である.

#### 参考文献

- 川村嘉応 (2004): 佐賀県有明海域におけるノリの生産状況と 環境変化,海苔と海藻, 64, pp.4-9.
- 清本容子・山田一来・中田英昭・石坂丞二・田中勝久・岡村 和磨・熊谷 香・梅田智樹・木野世紀(2008):有明海に おける透明度の長期的上昇傾向及び赤潮発生との関連, 海の研究, 17 (5), 337-356.
- 伊東史郎(2006):「有明海異変」特にタイラギ資源の減少と 今後,海洋と生物,28,625-635.
- C. Chen, C. Beardsley and G. Cowles(2006): An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model FVCOM User Manual, Second Ed., 315 pages.
- A. Mehta(1986): Characterization of Cohesive Sediment Properties and Transport Process in Estuaries, Lecture notes on coastal and estuarine studies, 290-325.
- 山本浩一・横山勝英・山田文彦・安江洋介・速水祐一 (2008):有明海・筑後川感潮域での懸濁物質の沈降特性, 2008年度日本海洋学会春季大会公演要旨集, p.101.
- 山本浩一・速水祐一・笠置尚史・宮坂 仁・吉野健児・大串 浩一郎・平川隆一・西本 潤・大森浩二 (2006):有明海 湾奥における底質環境の形成要因に関する研究,佐賀大 学有明海総合研究プロジェクト成果報告集, 5,1-6.
- 山本浩一・速水祐一・濱田孝治・吉野健児・片野俊也・吉田 誠・横山勝英(2009):有明海・諫早湾における底泥の再 懸濁・沈降に関するマッピング,佐賀大学有明海総合研 究プロジェクト成果報告集,5.1-6.
- 近藤寛,東幹夫,西之首英之(2003):有明海における海底堆 積物の粒度分布とCN組成(川尻伸也教授退官記念),長 崎大学教育学部紀要,自然科学,68,1-14.
- 大西行雄(1975):スプライン法を用いた2次元補間について, Journal of the Oceanographical Society of Japan, 31, 259-264.
- 平川隆一,速水祐一,山本浩一,横山勝英,大串浩一郎,濱 田孝治(2007):筑後川感潮域における水理特性と物質輸送,佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集,3, 111-114.