

(72) 有明海・諫早湾における 底泥の再懸濁速度の分布特性に関する研究

山本 浩一^{1,2}・速水 祐一²・笠置 尚史³・濱田 孝治²・吉野 健児²
大串 浩一郎^{4,2}・平川 隆一⁴・横山 勝英^{5,2}

¹山口大学大学院理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²佐賀大学有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1)

³大分県豊後振興局 豊後大野事務所 (〒879-7131 大分県豊後大野市三重町市場1123)

⁴佐賀大学理工学部都市工学科(〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1)

⁵首都大学東京都市基盤環境コース (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

* E-mail: k_yama@yamaguchi-u.ac.jp

懸濁物質輸送数値モデルで使用可能な底質の再懸濁条件の空間分布を有明海湾奥部および諫早湾について求めるため、有明海湾奥部および諫早湾において、合計121点の底泥を採取し、現地でせん断強度を取得したほか、粒度分布、含水比、湿潤密度を分析した。さらに有明海に5地点の係留地点を設定し、底面に設置した超音波流速計の連続データから、底面での底泥再懸濁速度 E を計測した。 E を再懸濁速度係数 M_E 、底面せん断応力 τ_b を用いて $E = M_E \tau_b$ としてモデル化した。 M_E は底泥の特性(粘土含有率、乾燥密度とペーンせん断強度)を用いて推定することが可能であった。上記の結果を用いて諫早湾、有明海湾奥部について底質の再懸濁速度係数の推定値をマッピングした。

Key Words: fine sediment, Isahaya Bay, Ariake Bay, acoustic doppler velocimeter, erosion flux

1. はじめに

有明海異変に関する問題のうち、底質の細粒化は懸濁物質の動態と密接に関連していると考えられる。この原因を解明するためには、懸濁物質輸送数値モデル¹⁾²⁾を用いて懸濁物質の輸送を再現する必要がある。

数値モデルにおいて粘性底質の輸送を再現するためには、底質の再懸濁現象や懸濁物質の凝集による沈降速度の変化³⁾を組み込む必要があり、これは対象海域の実態に即したものにすることが望ましい。

底質の再懸濁は、海底面に作用するせん断応力により起こるが、再懸濁速度すなわち底面から供給される懸濁物質のフラックスは底質の特性、例えば粒径⁴⁾や生物による安定化⁵⁾などの影響を受ける。そのため、対象海域全域で正確な再懸濁速度を求めようとする場合、底質の特性が大きく変動するような海域では、実際の海域の底質分布に即した再懸濁速度の分布を表現することが必要となる。

海域における再懸濁パラメータの推定を浸食実験をもとにして行った例は数多くある⁶⁾⁷⁾が、実際の海域の複数地点において再懸濁速度の実測に基づく再懸濁パラメータの推定例はほとんどない。

なお、これまで有明海において再懸濁パラメータの分布(再懸濁限界せん断応力)を推定した例としては、中央粒径を用いた例²⁾がある。

2. 研究方法

(1) 底質調査

有明海湾奥部の表層底質の分布を把握するために、2006年8月9日～15日(大潮～中潮)において採泥を行った。また、2008年7月8日には諫早湾で採泥を行った。図-1に調査地点を示す。また、底質特性の季節変動を把握するためにSx1とS3を通るラインで2006年7月～2007年7月の間、大潮の日に定線採泥調査を行った。上記の底泥採取にはエクマンバージ採泥器を用い、採取後直ちに表層1cmの泥のせん断強度を、回転粘度計(東機産業TVC-5, ロータ No.5)を用いて測定した。また、表層1cmの底泥については実験室に持ち帰り湿潤密度・含水比・強熱減量・粒度分布を測定した。乾燥密度は湿潤密度と含水比から計算した。なお諫早湾における採泥においては、ペーンせん断試験も実施した。測定された粘度は山本ら⁷⁾の方法により、ペーンせん断強度に変換した。

(2) 係留観測

SS 濃度と濁度の関係を得るために各地点にて底面直上 20 cm の海水と表層水を採水し濁度と SS 濃度を測定した。図-1 に示した 5 点の再懸濁速度調査地点において ADV (Nortek Vector 6 MHz) と濁度計 (ATU5-8M) を設置して計測を行った。観測の諸元を表-1 に示す。ここで Hamakawa は佐賀県浜川タワー、Chikugo-14K は筑後川感潮河道 14 km 地点、Kx2 は佐賀大学有明海総合研究プロジェクト有明海観測タワー、S3 は神沖瀬地点、Sx1 は白石沖地点である。

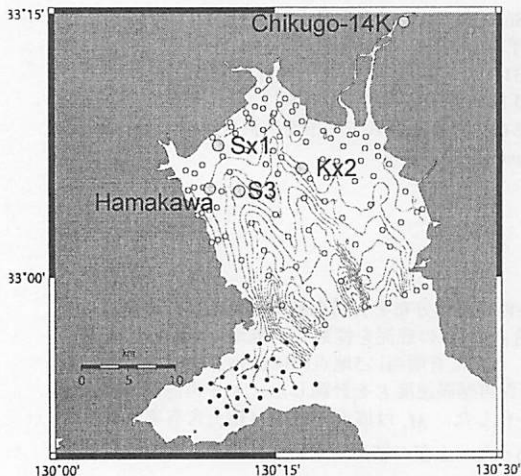


図-1 底質測定地点(○2006年8月, ●2008年7月)および
○ 再懸濁速度調査地点, コンターは水深(5m 間隔)

表-1 再懸濁速度調査の諸元

地点	時期	方法	周波数	底面からの高さ (cm)
Hamakawa	2006.9.5	ADV	64Hz	25
Chikugo-14K	2007.8.31			38
Kx2	2007.11.8			
S3	2007.1.28		16Hz	20
	2007.2.21			
Sx1	2006.12.22			

調査地点の海底面上 20 - 38 cm にサンプリング・ボリュームが来るように ADV (Nortek 社 Vector) を設置した。サンプリング周波数は 16 Hz ないし 64 Hz で計測し, 出力は各計測で一定とした。

ADV によって測定された流速から x , y , z 方向のそれぞれの流速 u , v , w の乱流成分 u' , v' , w' を算出した。これを用いて x , y 方向のレイノルズ応力 τ_{bx} (Pa), τ_{by} (Pa) をそれぞれ (1) 式, (2) 式で算出した。ここで ρ (kg m^{-3}) は海水の密度である。底面せん断応力 τ_b (Pa) はそれらのベクトルの和の大

きとし, 底面での値とするため, 水面で 0 として外挿し (3) 式で求めた。ここで h は水深 (m), h_s はセンサー高 (m) である。

$$\tau_{bx} = -\rho u' w' \quad (1)$$

$$\tau_{by} = -\rho v' w' \quad (2)$$

$$\tau_b = \frac{h}{h-h_s} \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad (3)$$

(4) 式で ADV によって得られた反射音響強度は濁度計で測定された SS 濃度に変換した。変換に用いた係数を表-2 に示す。ここで a および b は地点ごとの懸濁物質 (フロック) の粒径に依存すると考えられ, 地点ごとに異なる。

$$SNR = a \log C + b \quad (4)$$

ここで, C は SS 濃度 (mg/L), SNR は ADV の反射音響強度 (dB) を示す。

表-2 各地点における (4) 式中の定数 a , b

地点	a	b
Hamakawa	13.387	-0.097
Chikugo-14K	12.494	10.000
Kx2	15.197	11.758
S3	10.851	11.337
Sx1	13.631	-0.067

以上より, SNR の時系列から SS 濃度 C (g m^{-3}) およびその変動成分 C' (g m^{-3}) を計算できる。 J_z を乱流鉛直 SS フラックス ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) とすると, 渦相関法により (5) 式のように J_z を計算できる。

$$J_z = \overline{C' w'} \quad (5)$$

J_z と再懸濁フラックス E ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 沈降フラックス D ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) の関係は下記で示される。

$$J_z = E - D \quad (6)$$

よって,

$$E = J_z + D \quad (7)$$

となる。さらに D は SS の沈降速度を w_s (m s^{-1}) とすると

$$D = w_s C \quad (8)$$

である。有明海, 諫早湾, 筑後川の懸濁物質について w_s (m s^{-1}) と C (g m^{-3}) の関係が下記のように得られ

ている⁸⁾ので、これを利用して D を求めた。

$$w_s = 4.27 \times 10^{-6} SS^{0.768} \quad (R^2 = 0.628) \quad (9)$$

表-3に再懸濁速度を計測した地点における表層底質の特性を示す。Kx2地点以外は、泥分がほぼ100%近い。ここで粘土とシルトの境界は $5\mu\text{m}$ 、シルトと砂の境界を $75\mu\text{m}$ としている。

表-3 再懸濁速度観測地点の底質特性

地点	時期	ベーンせん断強度 (Pa)	粘土含有率 (%)	シルト含有率 (%)	乾燥密度 (kg/m^3)
Hamakawa	2006.9.5	131	52.1	47.9	305
Chikugo-14K	2007.8.31	29	23.9	76.1	191
Kx2	2007.11.8	650	1.4	2.6	1250
S3	2007.1.28	200	39.4	60.2	320
	2007.2.21	150	41.9	58.1	330
Sx1	2006.12.22	160	45.8	54.2	300

3. 研究結果

(1) 有明海湾・諫早湾における底質分布

図-2に有明海および諫早湾の底質分布($M_d\phi$)を示す。

$M_d\phi$ は中央粒径 d_{50} (mm)を対数表示したものであり、(10)式で表される。

$$M_d\phi = -\log_2 d_{50} \quad (10)$$

湾奥西部や諫早湾奥では $M_d\phi$ が7より大きく粘土質であり、湾東部には粗粒質の底質が分布する。

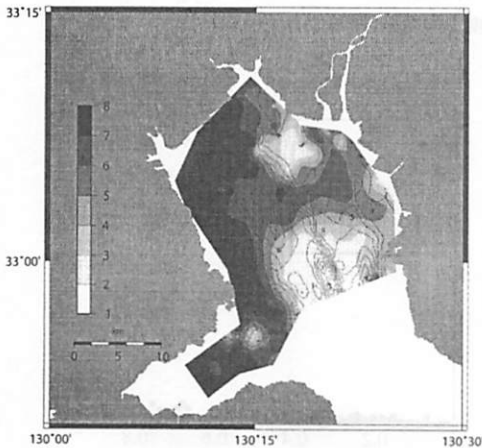


図-2 有明海(2006年8月)・諫早湾(2008年7月)における表層底質の $M_d\phi$ の分布、コンターラインは水深(5m間隔)

有明海湾奥部においては空間的な底質の違いが大きいことがわかる。なお、 $M_d\phi=7$ とは、有明海においてはシルト・粘土の含有率がおおよそ100%とな

る中央粒径である(図-3)。

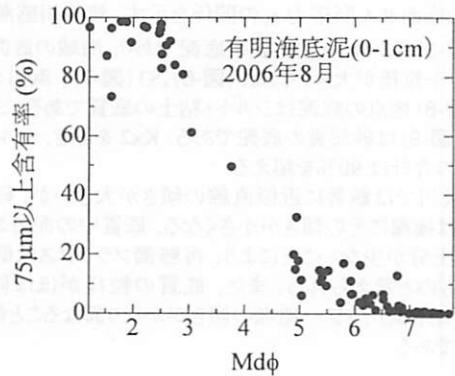


図-3 有明海湾奥部表層底質の $M_d\phi$ と $75\mu\text{m}$ 以上(砂)含有率(2006年8月)の関係

有明海湾奥南部や筑後川沖合い西部(川副沖合)には主に砂質からなる底泥が分布する。このような底質では粘度計でせん断強度を測定できず、ベーンせん断強度の測定も行っていない。このため、諫早湾で得られたベーンせん断強度と砂含有率の関係式を適用することを検討した。ベーンせん断強度 S_v (Pa)は砂含有率 α_s (%)と関係があり、砂含有率が18.8%で場合分けできて、

$\alpha_s < 18.8\%$ の場合

$$S_v = -138.99\alpha_s + 389.08 \quad (11)$$

$\alpha_s \geq 18.8\%$ の場合

$$S_v = -3.1354\alpha_s + 87.781 \quad (12)$$

となった(図-4)。有明海では粘度計によりベーンせん断強度を推定したため、砂領域ではせん断強度を得ることができなかった。このため、上記の推定式により砂質域のベーンせん断強度を推定した。

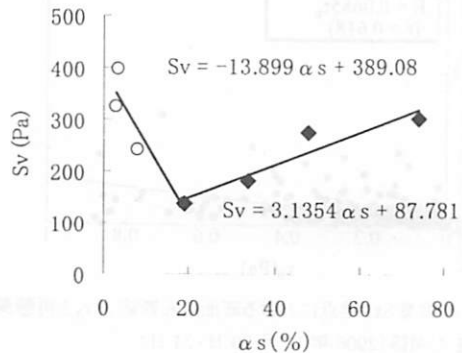


図-4 諫早湾における砂含有率 α_s (%)とベーンせん断強度 S_v (Pa)の関係(2008年7月)

(2)再懸濁速度と底面せん断応力の関係

図-5から図-9に、ADVで測定された再懸濁フラックス E と底面せん断応力 τ_b の関係を示す。筑後川感潮河道(図-5)はシルト・粘土質の底泥であり、海域の底泥よりも若干粒径が大きい。Sx1(図-6),S3(図-7),浜川タワー(図-8)地点の底泥はシルト・粘土の底質である。また、Kx2(図-9)は砂泥質の底泥である。Kx2を除き、シルト・粘土の合計は90%を超える。

筑後川では顕著に近似直線の傾きが大きい。砂泥域では極端にその傾きが小さくなる。底質中の泥分および粘土分が少ないことにより、再懸濁フラックスは低下するものと考えられる。また、底質の粒径がほぼ同じSx1, S3, 浜川タワー地点の傾きがかなり異なることも特徴的である。

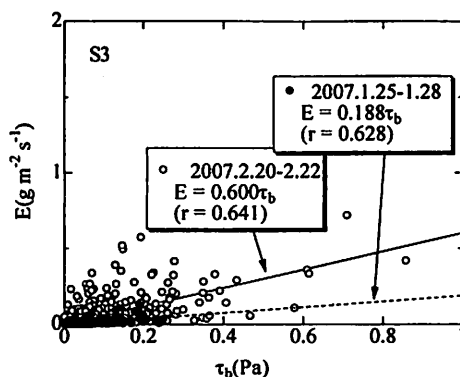


図-7 有明海 S3 地点における底面せん断応力 τ_b と再懸濁速度 E の関係(2007年1月25日-28日, 2月20日-22日)

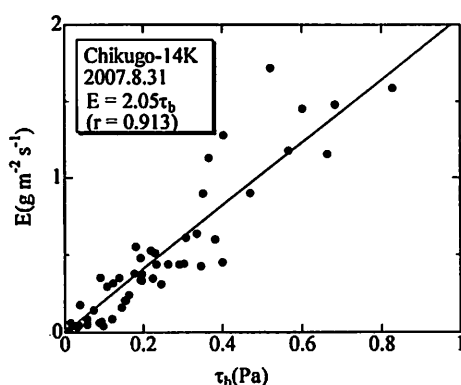


図-5 筑後川 14km 地点における底面せん断応力 τ_b と再懸濁速度 E の関係(2007年8月31日)

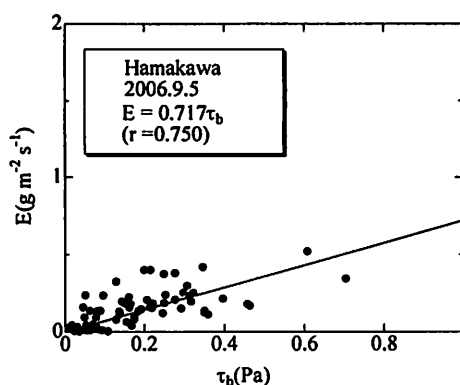


図-8 有明海浜川タワーにおける底面せん断応力 τ_b と再懸濁速度 E の関係(2006年9月5日)

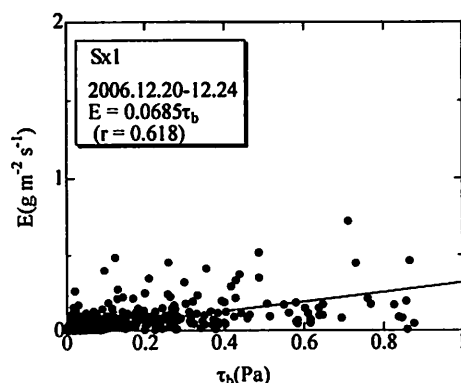


図-6 有明海 Sx1 地点における底面せん断応力 τ_b と再懸濁速度 E の関係(2006年12月20日-24日)

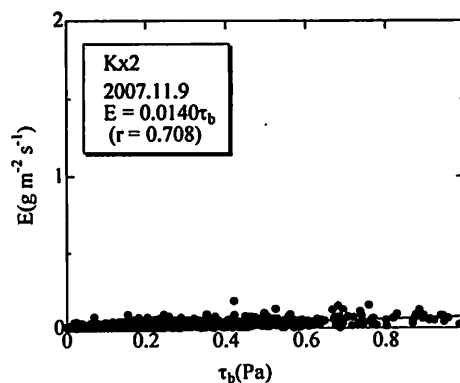


図-9 有明海 Kx2 地点における底面せん断応力 τ_b と再懸濁速度 E の関係(2007年11月9日)

(3)再懸濁フラックスのモデル化

再懸濁フラックスは限界せん断応力を含んだモデルで記述されることが多い。限界せん断応力を超えた底面せん断応力では再懸濁が発生するというモデルであり、限界せん断応力を τ_c とすれば、 $\tau > \tau_c$ では

$$E = M \left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right) \quad (13)$$

で表される⁴⁾。Eを(13)式で表す利点は、EとMが同じ次元になり、外力の関係する項が無次元になることである。従来、 τ_c を設定している研究は回転水槽などでの再懸濁実験⁴⁾⁵⁾⁶⁾によるものがほとんどである。中川は有明海において再懸濁フラックスを推定している⁹⁾が、これはADVによる直接測定ではなく、懸濁物質収支を解析した結果によるものである。図-5から図-9に示した底面せん断応力 τ_b と再懸濁速度Eの関係からは、一定の限界せん断応力を読み取ることは困難であり、存在したとしても微小であるとしてもよいであろう。

従来、室内実験においても低いせん断応力領域における微小な再懸濁が測定されることがわかっている⁴⁾。ただし、顕著な再懸濁がおこり始めるせん断応力という意味で便宜的に τ_c を設定して定式化している場合が多い。

しかしながら、このモデルでは計測されたデータをもとに底面せん断応力と再懸濁速度の関係を定式化する際、Mが τ_c に大きな影響を受けることが問題で、それがMの定式化を困難にする原因にもなっている。また、モデルの運用にあたってパラメータは少ないほうが良い。そこで今回の広域的なパラメータ推定においては、 τ_c を用いないモデルを採用することとした。

本研究では再懸濁速度をE ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 τ_b を底面せん断応力 (Pa) として、ADVで計測した τ_b とEの関係を(14)式に回帰させた。

$$E = M_E \tau_b \quad (14)$$

ここで設定した再懸濁速度係数 M_E ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$)が底質のどのような特性に依存性するか検討することにする。既往の研究では、再懸濁速度係数が底質の乾燥密度に比例し、せん断強度に反比例するとの研究例がある¹⁰⁾。

有明海において粘土粒子(粒径 $5 \mu\text{m}$ 以下)の含有率とシルト粒子の含有率の相関係数の絶対値は高い。有明海・諫早湾底泥121検体については、砂割合が20%以下において粘土含有率とシルト含有率の相関係数は $r = -0.834$ 、砂割合が20%以上においては $r = 0.908$ となるから、粘土とシルトの両方を考慮する必要はなく、粘土かシルトの一方を考えればよい。本モデルの目的は海水中へ回帰して透明度に影響を与える粘土

粒子の量をモデル化することにより、比較的粒径が大きく沈降速度が速いシルト粒子は対象にしていない。また、今回は濁度計で計測されたSS濃度を基準としてADVの反射音響強度からSS濃度に換算しているが、懸濁物質のうち、濁度計で測定されるのは主に粘土粒子である¹¹⁾。よって、本研究では再懸濁速度が底質の粘土分の乾燥密度に比例すると考えた。

底質の粘土含有率を ζ_c (-)、乾燥密度 ρ_{dry} (kg m^{-3})とすれば、粘土分の乾燥密度は $\rho_{dry} \zeta_c$ (kg m^{-3})で表される。底質の粘着力を評価する点から、底質のベーンせん断強度 S_v (Pa)で除した $\rho_{dry} \zeta_c / S_v$ と M_E の関係を考察する。なお ζ_c と S_v の相関はほとんどなく($r = -0.172$)、独立した変数として扱ってよいと判断した。

図-10に $\rho_{dry} \zeta_c / S_v$ と M_E の散布図を示す。プロットの回帰曲線を検討したところ、指数関数への回帰がもっとも相関係数が高かった($r = 0.9253$)。

$$M_E = 1.47 \times 10^{-2} \exp(3.17 \rho_{dry} \zeta_c / S_v) \quad (15)$$

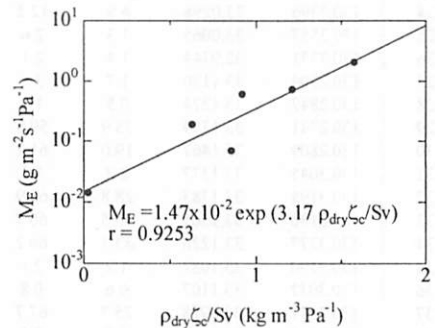


図-10 再懸濁速度係数 M_E ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$)の底質の特性に対する依存性 (S_v :ベーンせん断強度 (Pa), ζ_c :粘土含有率(-), ρ_{dry} :乾燥密度 (kg m^{-3}))

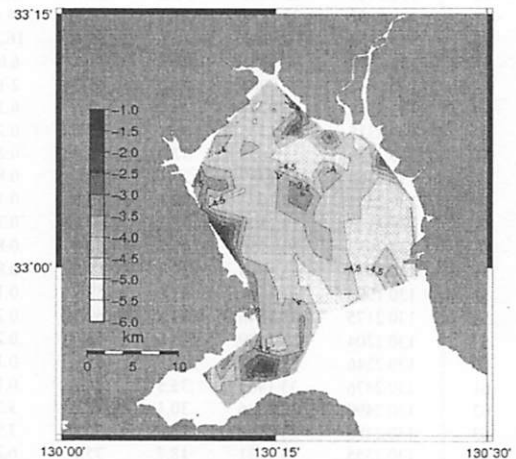


図-11 有明海における底質の特性を考慮した再懸濁速度係数 M_E ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)の対数値 $\log M_E$ の分布

表-4 有明海湾奥部における底質の特性と再懸濁速度係数 M_E の推定値 (2006 年 8 月)

番号	東経 度	北緯 度	粘土 %	シルト %	砂 %	Md ϕ	ρ_{dry} kg m ⁻³	Sv Pa	M_E g m ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	備考
1	130.3493	32.9716	6.8	6.1	87.1	1.53	1178	360	0.030	Sv は推定値
2	130.3228	32.9968	17.4	21.4	61.2	3.06	738	279	0.063	Sv は推定値
3	130.3048	33.0230	13.6	13.1	73.3	1.61	910	146	0.216	
4	130.2877	33.0444	39.2	60.1	0.7	7.14	283	165	0.124	
5	130.2827	33.0739	42.0	57.5	0.5	7.31	289	86	1.27	
6	130.2529	33.0969	44.8	55.1	0.1	7.43	283	212	0.098	
7	130.2329	33.0794	35.8	62.6	1.6	6.86	422	472	0.041	
8	130.2507	33.0583	34.2	64.3	1.5	6.79	359	203	0.100	
9	130.2645	33.0376	27.6	61.4	11.0	5.94	452	405	0.039	
10	130.2767	33.0069	19.3	31.1	49.6	3.77	665	589	0.029	
11	130.3065	32.9529	1.3	2.0	96.7	1.22	1166	391	0.017	Sv は推定値
12	130.2889	32.9869	3.2	5.2	91.6	1.97	880	375	0.019	Sv は推定値
13	130.4187	32.9905	20.1	70.4	9.5	5.49	512	397	0.033	
14	130.4091	32.9864	2.1	5.9	92.0	2.67	946	376	0.017	Sv は推定値
15	130.3950	32.9826	33.8	61.3	4.9	6.53	598	198	0.373	
16	130.3786	33.0282	3.9	8.4	87.7	2.52	780	276	0.021	
17	130.3707	33.0433	18.0	49.6	32.4	4.95	657	655	0.026	
18	130.3913	33.0507	29.4	65.4	5.2	6.20	801	1439	0.025	
19	130.4096	33.0603	18.3	63.8	17.9	4.98	652	488	0.032	
20	130.4160	33.0628	3.7	12.3	84.0	2.76	952	450	0.019	
21	130.3963	33.0798	3.5	13.6	82.9	2.51	938	1009	0.016	
22	130.3571	33.0678	30.8	68.1	1.1	6.73	344	479	0.030	
23	130.3248	33.0560	24.9	58.1	17.0	5.81	590	471	0.040	
24	130.3396	33.0298	6.9	12.2	80.9	2.90	484	320	0.020	
25	130.3557	33.0065	1.3	2.6	96.1	2.50	1020	389	0.016	Sv は推定値
26	130.3771	32.9744	1.4	2.1	96.5	1.61	1034	390	0.017	Sv は推定値
27	130.2500	33.1130	1.7	3.5	94.8	2.47	1122	384	0.017	Sv は推定値
28	130.2847	33.1274	0.5	1.0	98.5	1.89	1392	396	0.016	Sv は推定値
29	130.2741	33.1359	33.9	59.5	6.6	6.53	531	96	5.72	
30	130.2809	33.1467	19.0	61.2	19.8	4.90	755	104	1.16	
31	130.3045	33.1377	2.2	7.1	90.7	2.60	1112	87	0.036	
32	130.3198	33.1383	28.8	69.9	1.3	6.39	325	223	0.056	
33	130.3130	33.1305	36.5	60.7	2.8	6.81	706	173	1.64	
34	130.3277	33.1226	33.1	66.2	0.7	6.85	364	220	0.084	
35	130.3190	33.1087	1.2	2.1	96.7	2.24	1240	391	0.017	Sv は推定値
36	130.3032	33.1107	0.6	0.8	98.6	1.79	1148	397	0.016	Sv は推定値
37	130.3077	33.0928	25.7	67.7	6.6	5.97	1151	298	0.342	Sv は推定値
38	130.2891	33.0922	1.0	2.0	97.0	2.20	1179	392	0.016	Sv は推定値
39	130.3335	33.1338	0.8	1.4	97.8	2.51	1114	394	0.016	Sv は推定値
40	130.3406	33.1350	23.2	74.0	2.8	6.16	403	352	0.034	Sv は推定値
41	130.3516	33.1322	19.4	69.8	10.8	5.39	605	364	0.041	
42	130.3654	33.1226	31.4	66.1	2.5	6.60	399	356	0.045	Sv は推定値
43	130.3511	33.1205	1.0	2.9	96.1	2.49	1319	389	0.016	Sv は推定値
44	130.3469	33.1089	36.2	63.5	0.3	7.09	355	386	0.042	Sv は推定値
45	130.3652	33.1134	23.1	62.5	14.4	5.52	569	189	0.133	Sv は推定値
46	130.3782	33.1062	28.3	55.4	16.3	6.11	1034	163	4.30	Sv は推定値
47	130.3599	33.0951	22.3	71.1	6.6	5.95	461	298	0.044	Sv は推定値
48	130.3413	33.0904	32.2	65.7	2.1	6.87	373	360	0.042	Sv は推定値
49	130.3058	33.0704	28.1	65.6	6.3	6.34	563	303	0.077	Sv は推定値
50	130.2315	33.1765	36.2	63.6	0.2	7.11	239	167	0.076	
51	130.2280	33.1605	37.9	61.9	0.2	7.15	233	528	0.025	
52	130.2368	33.1387	27.1	72.1	0.8	6.64	327	288	0.039	
53	130.2396	33.1061	40.1	59.8	0.1	7.23	352	386	0.047	
54	130.2178	33.1199	38.7	60.6	0.7	7.14	319	176	0.135	
55	130.2053	33.1356	41.7	57.5	0.8	7.28	321	294	0.062	
56	130.2010	33.1418	39.4	59.8	0.8	7.16	309	605	0.028	
57	130.1992	33.1461	41.0	58.9	0.1	7.26	333	459	0.038	
58	130.2175	33.1546	39.3	60.5	0.2	7.16	272	339	0.040	
59	130.2204	33.1499	46.8	53.0	0.2	7.52	267	401	0.039	
60	130.2246	33.1446	44.3	55.6	0.1	7.39	244	501	0.029	
61	130.2476	33.1467	35.5	64.4	0.1	7.00	356	400	0.040	
62	130.2490	33.1536	30.1	66.6	3.3	6.29	432	244	0.080	
63	130.2488	33.1549	23.7	72.4	3.9	6.09	495	171	0.129	
64	130.2555	33.1631	18.7	75.1	6.2	5.04	705	383	0.044	

表-4(つづき) 有明海湾奥部における底質の特性と再懸濁速度係数 M_E の推定値 (2006 年 8 月)

番号	東経 度	北緯 度	粘土 %	シルト %	砂 %	Md ϕ	ρ_{av} kg m ⁻³	Sv Pa	M_E g m ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	備考
65	130.2365	33.1589	36.9	63.0	0.1	7.00	321	351	0.043	
66	130.2392	33.1686	24.4	63.2	12.4	5.42	607	467	0.040	
67	130.2433	33.1863	37.5	62.2	0.3	7.00	492	720	0.033	
68	130.2611	33.1686	23.6	72.6	3.8	5.75	497	389	0.038	
69	130.2735	33.1625	19.2	69.5	11.3	5.04	680	90	1.43	
70	130.2696	33.1566	18.8	66.2	15.0	4.93	685	275	0.065	
71	130.2630	33.1453	25.0	60.6	14.4	5.52	629	237	0.120	
72	130.2556	33.1325	24.5	60.8	14.7	5.37	604	174	0.217	
73	130.2479	33.1183	44.1	55.8	0.1	7.44	259	233	0.069	
74	130.2116	33.0165	47.5	52.4	0.1	7.56	358	401	0.056	
75	130.2164	32.9914	48.3	51.5	0.2	7.58	399	168	0.559	
77	130.2828	32.9495	51.2	48.5	0.3	7.53	848	420	0.389	
78	130.2573	32.9730	60.0	39.9	0.1	7.71	651	730	0.080	
79	130.2418	33.0015	44.5	54.9	0.6	8.08	348	273	0.089	
80	130.2374	33.0252	32.8	54.3	12.9	7.44	508	447	0.048	
81	130.2221	33.0518	41.5	58.3	0.2	6.78	316	379	0.044	
82	130.2112	33.0774	41.9	57.9	0.2	7.30	389	721	0.030	
83	130.1988	33.0989	48.2	51.7	0.1	7.32	244	247	0.066	
84	130.1908	33.1134	43.9	55.9	0.2	7.58	355	394	0.052	
85	130.1842	33.1226	40.3	59.1	0.6	7.42	382	158	0.326	
86	130.1796	33.1314	43.6	56.2	0.2	7.21	331	258	0.086	
87	130.1895	33.0803	42.3	57.5	0.2	7.40	325	113	0.685	
89	130.1934	33.0377	42.9	56.9	0.2	7.40	386	88	5.63	
90	130.1850	33.0346	43.3	56.5	0.2	7.34	531	93	35.6	
92	130.1754	33.0628	46.3	53.5	0.2	7.25	360	690	0.032	
94	130.1637	33.0580	40.4	59.5	0.1	7.29	586	172	1.15	
95	130.1524	33.0814	42.6	57.3	0.1	7.36	289	381	0.041	
96	130.1495	33.1006	44.8	55.0	0.2	7.41	314	171	0.199	
97	130.1677	33.1054	44.5	55.3	0.2	7.43	257	234	0.069	
98	130.1594	33.0972	47.1	52.8	0.1	7.52	337	114	1.18	
99	130.1589	33.0845	46.2	53.7	0.1	7.46	363	117	1.41	
100	130.1694	33.0836	52.0	47.9	0.1	7.73	303	133	0.625	

表-5 諫早湾における底質の特性と再懸濁速度係数 M_E の推定値 (2008 年 7 月)

番号	東経 度	北緯 度	粘土 %	シルト %	砂 %	Md ϕ	ρ_{av} kg m ⁻³	Sv Pa	M_E g m ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	備考
1108	130.1938	32.8602	40.7	59.2	0.1	7.29	210	103	0.205	
1035	130.2171	32.8728	43.6	56.3	0.1	7.39	248	195	0.085	
1103	130.1943	32.8767	42.4	57.5	0.1	7.34	240	131	0.172	
1104	130.2039	32.8676	46.2	53.6	0.2	7.47	260	172	0.134	
1028	130.2314	32.8849	40.7	59.1	0.2	7.28	278	148	0.165	
1105	130.1655	32.8936	46.6	53.2	0.2	7.49	318	98	1.81	
1032	130.1898	32.9050	51.7	48.2	0.1	7.69	289	121	0.744	
1037	130.2320	32.9358	45.9	53.9	0.2	7.47	321	151	0.322	
1106	130.1759	32.8816	50.2	49.7	0.1	7.63	183	270	0.043	
1101	130.1764	32.8988	41.6	58.3	0.1	7.30	318	370	0.046	
1026	130.2395	32.9017	48.4	51.4	0.2	7.55	491	106	17.8	
1031	130.2050	32.9133	46.2	53.4	0.4	7.48	278	152	0.213	
1107	130.1837	32.8712	39.9	59.6	0.5	7.25	282	121	0.282	
1025	130.2281	32.9153	38.6	60.8	0.6	7.18	292	91	0.735	
1020	130.2624	32.9377	31.5	67.8	0.7	6.84	336	138	0.168	
1034	130.2066	32.8848	33.7	65.6	0.7	6.91	320	150	0.143	
1029	130.2221	32.8969	44.9	54.4	0.7	7.41	373	98	3.34	
1027	130.2503	32.8920	38.9	59.4	1.7	7.18	453	131	1.03	
1102	130.1859	32.8873	43.7	53.5	2.8	7.34	417	325	0.087	
1033	130.1981	32.8952	32.3	64.3	3.4	6.81	366	397	0.038	
1021	130.2805	32.9169	32.8	59.2	8.0	6.82	732	243	0.339	
1024	130.2580	32.9097	34.1	47.0	18.9	6.62	459	138	0.540	
1023	130.2724	32.8946	20.0	46.3	33.7	5.30	769	182	0.215	
1036	130.2181	32.9249	15.3	36.7	48.0	4.02	952	275	0.079	
1038	130.2475	32.9220	7.1	19.0	73.9	1.95	881	303	0.028	

(15)式は、底質の粘着性が高ければ再懸濁しにくく、単位体積あたりの粘土含有量が高ければ再懸濁速度係数が増加することを示し、その効果が指数関数的に発現するというモデルである。(15)式と実際の底質分布から、有明海・諫早湾における再懸濁速度係数 M_E の分布が推定された(図-11)。推定された再懸濁速度係数を底質の特性を含めて表-4 および表-5 に示す。 M_E は諫早湾と有明海西部で高い値を示しており、一定の底面せん断応力に対して粘土が再懸濁しやすいことを示している。特に諫早湾口の再懸濁速度係数は高い。ただしこれだけではその場で再懸濁が活発に起こるかどうかは判別できない。今後数値モデルに活用することで傾向を読み取ることが可能になるであろうし、今後、再懸濁速度係数の底質への依存性を表すモデルも再検討する必要がある可能性もある。

4. まとめ

有明海における懸濁物質輸送数値モデルに適用可能な再懸濁速度の広域的推定を目的として、実際に採取された底質の特性と複数地点での再懸濁速度の実測から再懸濁速度係数のモデリングを行い、広域的な再懸濁速度係数の推定(マッピング)を行った。再懸濁速度係数は粘土含有率、乾燥密度とベーン剪断強度を用いて推定でき、現地底質データとあわせて諫早湾、有明海湾奥部についてマッピングを行うことができた。今後は、これを現在開発中の懸濁物質輸送数値モデルに適用して、有明海における懸濁物質濃度の再現性を検討する予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、佐賀県水産課、佐賀県有明海漁業共同組合、福岡県有明海漁業協同組合連合会には底質調査の協力を得ました。濁度計や超音波流速計については国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室にご協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 濱田孝治・山本浩一・速水祐一・山口創一・吉野健児・片野俊也・吉田誠、有明海を対象とした懸濁物モデルの構築とその成果、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集、第5巻、2009。

- 2) 中川康之：有明海における底泥輸送現象のモデル化、港湾空港技術研究所報告、第42巻、第4号、pp.25-42、2003。
- 3) Mehta, A.J. and E. Patheniades, 1975, An investigation of the deposition properties of flocculated sediment, IAHR, Journal of Hydraulic Research 12 (4) 361-381.
- 4) Patheniades, E., 1986, A fundamental framework for cohesive sediment dynamics, in A.J. Mehta, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, 14: Estuarine Sediment Dynamics, Chapter XII, 219-250.
- 5) J. Widdows, M. D. Brinsley, N. Bowley, C. Barrett, 1998, A Benthic Annular Flume for In Situ Measurement of Suspension Feeding/Biodeposition Rates and Erosion Potential of Intertidal Cohesive Sediments, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 46(1), 27-38.
- 6) O. El Ganaoui, E. Schaaff, P. Boyer, M. Amielh, F. Anselmet, C. Grenz, 2004, The deposition and erosion of cohesive sediments determined by a multi-class model, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 60,(3), 457-475.
- 7) 山本浩一・速水祐一・笠置尚史・濱田孝治・吉野健児・山田文彦、有明海湾奥部における懸濁物質濃度変動特性に関する研究、海洋開発論文集、24、1081-1086、2008。
- 8) 山本浩一・速水祐一・笠置尚史・濱田孝治・吉野健児・山口創一・片野俊也・吉田誠・大串浩一郎・山田文彦・横山勝英、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、第5巻、2009。
- 9) 中川康之・吉田秀樹・谷川晴一・黒田祐一(2005): 潮汐流による底泥の巻き上げ現象のモデル化と浮遊泥量変動の再現、海岸工学論文集、第52巻、pp.441-445。
- 10) J.C. Winterwerp and Walter G.M. van Kesteren, 2004, Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment, Developments in sedimentology 56, Elsevier, pp.374.
- 11) 横山勝英：濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察、土木学会論文集、No.698/II-58、2002。

(2009.5.22 受付)

**Estimation of the Parameters for Erosion of the Cohesive Sediment in the Inner Part of
the Ariake Bay and Isahaya Bay**

**Koichi YAMAMOTO^{1,2}, Yuichi HAYAMI², Takashi KASAGI³, Takaharu HAMADA²,
Kenji YOSHINO², Koichiro OHGUSHI⁴, Ryuichi HIRAKAWA⁴ and Katsuhide
YOKOYAMA⁵**

¹Graduate School of Engineering, Yamaguchi University

²Ariake Sea Research Project, Saga University

³Oita Prefecture

⁴Faculty of Engineering, Saga University

⁵ Faculty of Urban Environment Engineering, Tokyo Metropolitan University

For the numerical modeling of the suspended sediment transport, the mapping of the erosion coefficient was performed. The authors took total of 121 samples from the bottom mud of the Ariake Sea and Isahaya Bay. The vane shear strengths of the surface mud were measured in situ by the viscosity meter and vane shear strength meter. Acoustic Doppler Velocimeters were moored on the bottom mud on the Ariake Sea and the Chikugo River to measure erosion flux. The erosion coefficient in the Ariake Sea and Isahaya Bay could be estimated by the clay content, dry density and vane shear strength of the bottom sediment which was measured by the viscosity meter.