

有明海湾奥部における 底泥の物性の変動特性に関する研究

CHANGES OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE COHESIVE SEDIMENT
IN THE INNER PART OF THE ARIAKE SEA

笠置尚史¹・山本浩一²・吉野健児³・速水祐一⁴・濱田孝治⁵・大串浩一郎⁶
Takashi KASAGI, Koichi YAMAMOTO, Kenji YOSHINO, Yuichi HAYAMI,
Takaharu HAMADA and Koichiro OHGUSHI

¹学生会員 佐賀大学工学系研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²正会員 博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト(同上)

³非会員 博(水) 佐賀大学研究機関研究員 有明海総合研究プロジェクト(同上)

⁴非会員 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト(同上)

⁵正会員 博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト(同上)

⁶正会員 工博 佐賀大学准教授 理工学部都市工学科(同上)

Vertical shear strength distributions of the surface cohesive sediments were measured to clarify the sediment transportation in the north Ariake Sea. The extreme wave by the typhoon 200613 re-suspended the sediment of the north Ariake Sea, Japan. After the extreme wave by the typhoon, surface soft cohesive sediment on the mudflat was obviously eroded and showed low Eh. In contrast, soft cohesive sediment was accumulated over 10 cm on the surface of the offshore sediment and it showed high Eh. Simultaneously, large amount of suspended sediment transportation toward offshore was observed by ADCPs when the typhoon hit the north Ariake Sea. These facts show that a sudden great amount of the sediment (5-15 tons/m) was suspended from the mudflat surface by the typhoon hitting, transported toward offshore, and accumulated on the offshore sea bed. The possibility of these sudden accumulation of the sediment may influence the habitat of bivalves.

Key Words : Ariake Sea, sediment, typhoon, viscosity, bottom mud

1. はじめに

有明海は我が国の湾奥の中で最大の潮位差があり、大潮時の湾奥で 5m を越える。また、干潮時には広大な干潟が出現する。その面積は 270km² であり、国内の干潟の 4 割を占める。その干潟では従来からアサリ、サルボウ、タイラギを対象とした採貝や海苔養殖が行われているが、近年、底質が細粒化した海域でタイラギが激減したとの報告がされている¹⁾。底質の細粒化の本質は表層への細粒懸濁粒子の堆積であると考えられ、湾奥西部では底泥中の 16 μ m 以下の粒子の含有率が 9 割を超える²⁾。よって懸濁物質の動態の把握が有明海の細粒な底質の動態解明にとって重要であり、その第一歩として底質の再懸濁環境を把握することは重要である。

粘着性底質の再懸濁に関わる限界剪断応力が底質の剪断強度に等しいことは知られており³⁾、剪断強

度を把握することが再懸濁のしやすさにとって重要となる。ベーン剪断試験が可能な程度に固い底泥であれば剪断強度の測定が容易であるが、有明海の底泥表面は圧密した固い(剪断強度の高い)底質のごく表層に、再懸濁に寄与する可能性がある数 cm の高含水率・低比重の軟泥が存在することが多く、このような薄い底泥の剪断強度はベーン剪断では測定が困難である。一方で高い含水率を持つ霞ヶ浦の底泥の測定結果から、低ずり速度領域での粘度は底泥限界掃流力に対応するとされている⁴⁾。そこで本研究では底泥の粘度の詳細な鉛直分布を測定し、その広域分布や季節変動を明らかにし、かつ懸濁物質の流動と関連づけて底質の物性の変動特性を明らかにすることを目的とした。

2. 研究方法

(1) 粘度計測方法

底質の粘度は船上で回転粘度計（東機産業、TVC-5、定格20rpm）を用いて測定を行った。試験的に有明海底泥の粘度を測定したところ、計測初期に粘度が高く、計測を継続すると粘度が減少する傾向にあった。これは底泥が粘度計のスピンドルの摩擦で降伏したことによるとみられた。スピンドル回転開始時は、スピンドルに付着した底質を剪断して回転開始することから最大の剪断応力がかかり、粘度計の表示としても最大値を示す。この応力はスピンドルのずり速度がまだ低いときに計測されていることから、底質の剪断強度あるいは大坪の「低ずり速度領域の粘度」⁴⁾に対応すると考えられたので、粘度の初期最大値を記録して、データとした。以降この方法で測定された粘度を通常の方法で測定された粘度と区別するため、「初期粘度」として表示することにする。厳密には初期粘度とベーン剪断強度の比較をする必要があるものの、初期粘度が高い底泥（100Pa・s以上）ではかなり締め固まっており、初期粘度の低い底泥（10Pa・s以下）は流動性を帯びているので、みかけの底質の剪断強度にほぼ対応していると考えられた。

実際の採泥・初期粘度計測についてはエクマンバージ採泥器によって採泥された底泥にシャッターを付けた方形のステンレス角形容器を埋め込み、底泥表面と角形容器上面が同じ高さになるまで底泥に埋め込んだところで角形容器のシャッターを開き、非擾乱状態で方形のステンレス製小型バットに採取した。これを90°転倒して最も細い2mm太さのスピンドルを用いてもとの底泥において3層から5層の初期粘度を測定して鉛直分布を求めた（図-1）。なお、通常の粘度測定のためには円筒内でスピンドルを回転させる必要があるが、初期粘度計測方法においては高粘度の物体の剪断強度の測定に相当し、かつ壁面の影響は無視できることを確認している。

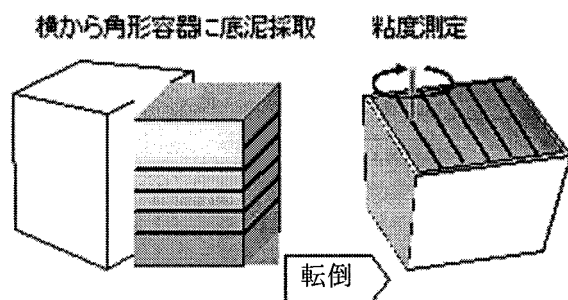


図-1 底泥の初期粘度の鉛直分布計測方法

(2) 調査方法

a) 調査対象水域

調査対象の有明海は佐賀県、福岡県、長崎県、熊本県の4県に囲まれた長さ90km、幅20km、平均水深18m、面積1700km²の閉鎖性水域である。本研究では竹崎島と熊本県の三池港を結ぶ線より北側の有明海湾奥部を対象とした（図-2）。また、干潟から沖合にかけての底泥の物性の季節変動を調べるため10点の採泥ポイントからなる測線（塩田川沖測線）を設定した（図-3）。

b) 広域調査

有明海湾奥部の底質の広域分布特性を調べるため、2005年8月18日～23日と2006年8月9日～15日に調査を行った。底泥の採取にはエクマンバージ採泥器を用い、採取した泥のうち表層1cm、2～5cmを直径5cmの亚克力パイプを用いて分取した。現地では表層から5cmまでの泥温、酸化還元電位（ORP）、初期粘度を測定した。

なお、使用したORP計の比較電極は3.33mol/L KCl-Ag/AgClを使用しており、一般には基準電極として標準水素電極が用いられることが多く今回使用した比較電極との関係は下記のようなものである。

$$E_h = E + 206 - 0.7(t - 25) \quad (t = 0 \sim 60^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

E_h ：標準比較電極を比較電極としたORP測定値(mV)、 E ：3.33 mol/L KCl-Ag/AgClを比較電極としたORP測定値(mV)、 t ：泥温(°C)

c) 塩田川沖定線底泥調査

干潟から沖合にかけての底泥の季節変動を調べるため図-3の測点において2006年7/29、9/23、10/25、11/26、12/22、2007年1/28に採泥調査を行った。底泥の採取には広域採泥調査と同様にエクマンバージ採泥器を用い、採取した泥のうち表層1cmをアク

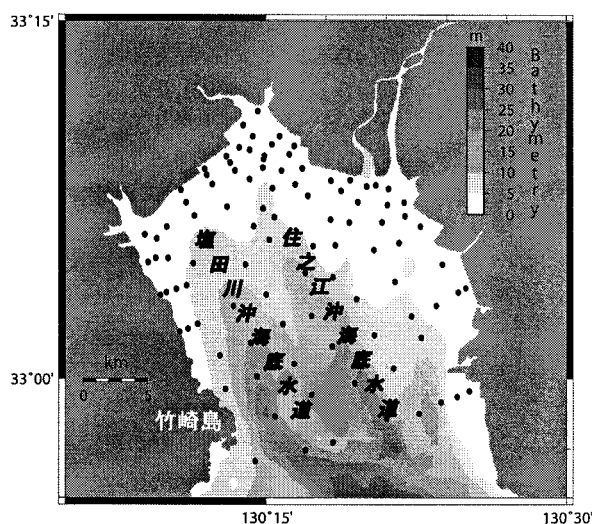


図-2 調査対象地域（●：底質調査地点）

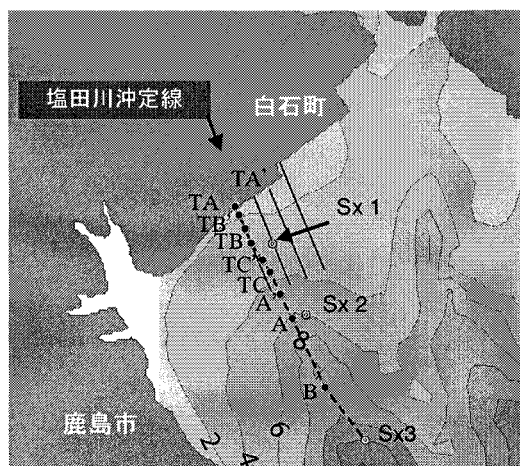


図-3 調査対象地域 (●: 底質調査地点, ◎: 係留点)

リルパイプ(径 5cm)を用いて分取した。現地では泥温、酸化還元電位(ORP)の 1cm 毎の鉛直分布、図-1 に示す方法によって表面下 1cm から 2cm 毎の初期粘度の鉛直分布を測定した。

d) 係留観測

懸濁物質の動態を調べるために塩田川沖定線に沿って Sx1 と Sx2 に ADCP (Nortek Aquadopp) ・濁度計を設置した。データは 2006 年 6 月 26 日～2006 年 11 月 14 日までのデータを用いた。計測間隔は 10 分である。

超音波流速計は底面から 25cm にセンサーを設置し、センサーから 65cm を第 1 層の中心とした。また、層厚は 50cm とした。なお、底面上 0cm～40cm は不感距離であり測定が不能である。濁度計は底面上 25cm に設置した。

超音波流速計 (Nortek Aquadopp) の反射音響強度の鉛直分布を用いて懸濁物質強度の鉛直分布を (2) 式により推定することができる⁵⁾。

$$EL = -20 \log r - 2\alpha + 10k \log C + 10 \log(\psi v T / 2) + A \quad (2)$$

ここで、 EL : 反射音響強度(dB), r : ADCP から測定層中心までの距離(m), C : 懸濁物質濃度(g/m³), α : 減衰係数(dB/m), ψ : 音波のビーム幅(sr), v : 音速(m/s), T : パルス長(s), k , A は定数である。

SS フラックスの算出は Sx1, Sx2 に設置した濁度計データ、超音波流速計の反射音響強度データから、以下のように求めた。

$$SSF_N = 0.65 \cdot SS_0 \cdot v_{N,0} + 0.5 \cdot \sum_{k=1}^n SS_k \cdot v_{N,k} \quad (3)$$

$$SSF_E = 0.65 \cdot SS_0 \cdot v_{E,0} + 0.5 \cdot \sum_{k=1}^n SS_k \cdot v_{E,k} \quad (4)$$

ここで、 SSF_N : 北方成分 SS フラックス(gm⁻¹s⁻¹),

SSF_E : 東方成分 SS フラックス, $v_{N,0}$: 底面上 25cm における北方流速, $v_{E,0}$: 底面上 25cm における東方流速, SS_k : ADCP の第 k 層における SS 濃度, $v_{N,k}$: ADCP の第 k 層における北方流速, $v_{E,k}$: ADCP の第 k 層における東方流速 である。

さらに、測線方向、測線直交方向の SS フラックスを式(5), (6)を用いて算出した。

$$SSF_{lon} = SSF_N \cos \theta + SSF_E \sin \theta \quad (5)$$

$$SSF_{orth} = -SSF_N \sin \theta + SSF_E \cos \theta \quad (6)$$

ここで、 SSF_{lon} : 測線北方方向の SS フラックス, SSF_{orth} : 測線直交方向の SS フラックス, θ : 測線方位角である。

(3) 分析方法

a) 湿潤密度

試料を一定体積のビンに入れその重量を測定し、湿潤密度を算出した。

b) 粒度分布

砂泥質の試料については 75 μ m ふるいを通過する細粒分と、残留する粗粒分に分け、粗粒分は重量を測定後、JIS A 1204 に規定された試験用網ふるい群を用いてふるい分けした。鈣物質のみの粒度分布を得るために貝殻 (CaCO₃) を 1N HCl で除去して重量を測定した。細粒分は蒸留水を加えメスシリンダーで 1L の懸濁水にし、その濃度を測定後少量の懸濁水を用いてレーザ回折式粒度分布測定装置 (島津 SALD-3100) によって粒度分布を求めた。懸濁水の SS 濃度を測定して、ふるい分析によって得た粗粒分の粒度分布と合成した。さらに土粒子の密度が 2.65 で一定であると仮定して質量に体積百分率を掛け合わせ、各粒径に対する通過質量百分率を求め粒径加積曲線を描いた。最大粒径 100 μ m 以下の泥分より構成される試料はレーザ回折式粒度分布測定装置のみで粒径加積曲線を求めた。

3. 研究結果

(1) 底質の広域分布特性

a) 粒度分布

図-4 に中央粒径値 $M_{d\phi}$ の平面分布を示す。 $M_{d\phi}$ は 1.02～7.87 の範囲にあった。図-4 において、有明海湾奥部の南側と筑後川河口に比較的粒径の大きな粒子が分布している。住之江川沖海底水道ではコンターが密になり、砂泥質と泥質の分布の境界になっている。 $M_{d\phi}$ が 7 以上である海域は白石町沖合のデルタ地形の西側であり、湾奥西部の底質は細粒分で占められていることが分かる。

b) 初期粘度広域分布

図-5に2006年8月の有明海湾奥部底泥1cm～2.25cmの初期粘度の広域分布図、図-6に有明海湾奥部底泥6.75cm～9cmの初期粘度の広域分布図を示す。大抵の地点は深いほど初期粘度が上昇する傾向が見られた。しかし、白石町沿岸から鹿島市沿岸の干潟部に初期粘度の低い地点が存在した。

c) 湿潤密度

図-7に2006年8月の有明海湾奥部底泥表層1cmの湿潤密度の広域分布図を示す。砂泥および粗粒シルトの場所では湿潤密度は高く、粘土が分布している西側では 1300kg/m^3 以下の湿潤密度を示した。特に白石町沿岸に湿潤密度の低い地点が存在した。これは潮汐や波浪により底泥の表層が懸濁・堆積を頻繁に繰り返すことで底泥が締め固まらず他の地点よりも間隙が大きい可能性を示唆している。

(2) 懸濁物質の動態

Sx1 地点および Sx2 地点での SS フラックスの沿岸方向・岸沖方向の季節変化を図-8 に示す。8 月中旬までは明瞭ではないが、8 月下旬以降 Sx2 地点は岸沖方向の懸濁物質輸送が沿岸方向の懸濁物質輸送よりも卓越する。Sx1 地点は懸濁物質の輸送がほとんどない 8 月頭から 9 月半ば以外は塩田川沖定線に直交して東に輸送されている。また、岸沖方向にはコンスタントに岸方向に輸送が行われていることが分かった。

佐賀県に台風が通過した 9 月 17・18 日に Sx1 地点では西向きに、Sx2 地点では沖向きに一気に大量の懸濁物質が輸送されている。これは台風により底泥が激しく巻き上げられたことが原因と思われる。

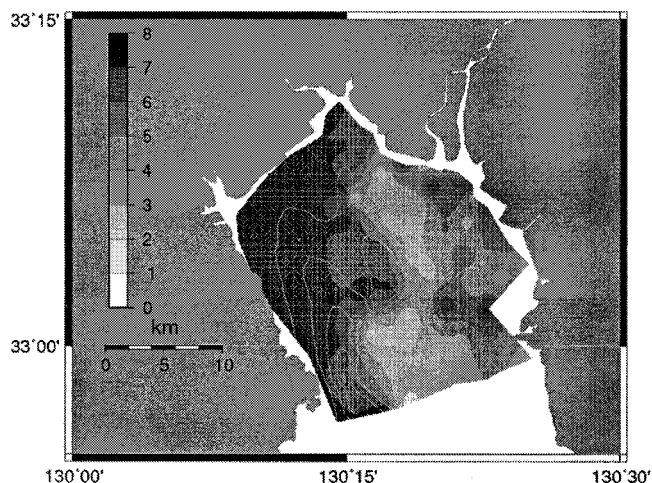


図-4 底質の $Md\phi$ (2005/08, 3cm～5cm)

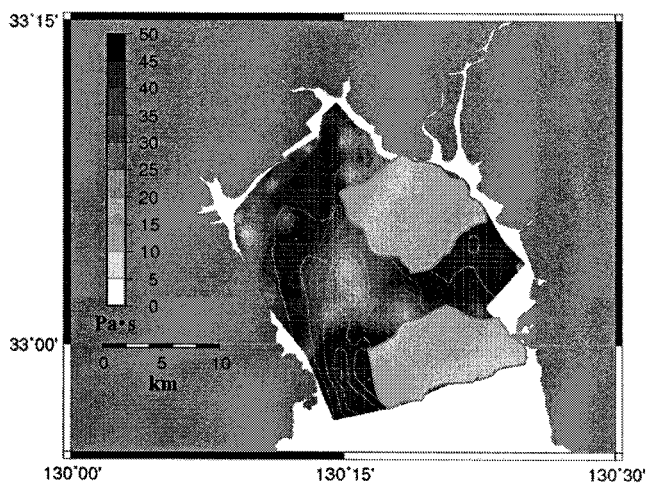


図-6 底質下層の初期粘度
(2006/08, 深さ6.75cm～9cm □: 欠測)

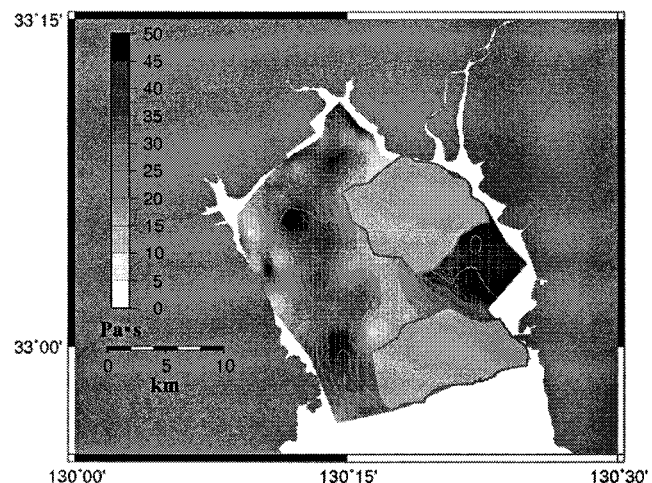


図-5 底質表層の初期粘度
(2006/08, 深さ1cm～2.25cm □: 欠測)

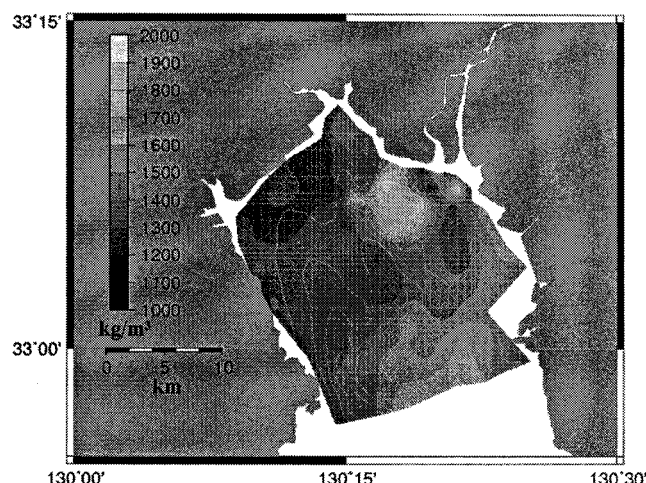
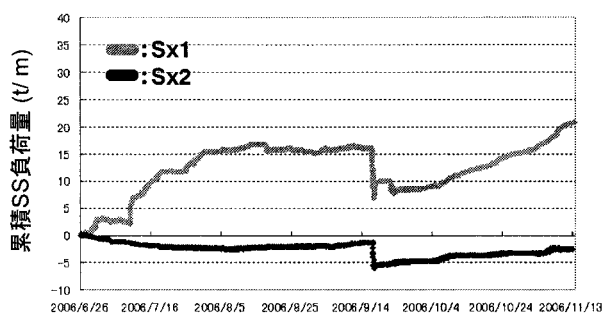
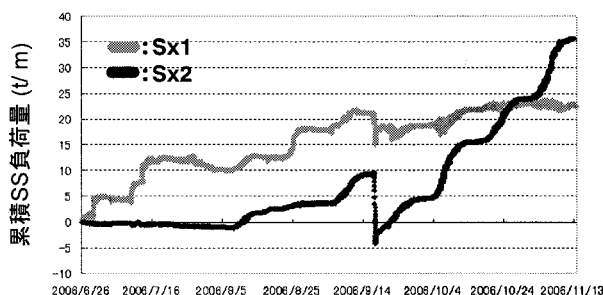


図-7 底質表層の湿潤密度 (2006/08, 表層1cm)



(a) 沿岸方向の累積SS負荷量(正が北東方向)



(b) 岸沖方向の累積SS負荷量(正が岸方向)

図-8 沿岸方向と岸沖方向の累積SS負荷量

(3) 塩田川沖定線観測

a) 初期粘度の鉛直分布の時間変化

図-9に塩田川沖定線での初期粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)の鉛直分布の時間変化の図を示す。地点TA', TA, TBは干潟域であり、地点TC, A, B, S3は浅海域である。また最も岸よりの地点TA'では7月, 8月および2007年1月に調査中に潮が引いてしまい採泥することができなかったために欠測となっている。初期粘度が高く、コンターの間隔がほぼ一定の部分の短期的に安定な圧密泥とするとその上に堆積している泥の初期粘度は約 $15 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 以下であり、本研究ではそれを軟泥と定義した。図-9をみると9月に突然浅海域の4地点で圧密泥上に堆積している軟泥の厚さが増加しており、干潟域の地点TA, TBでは逆に減少している。調査期間中佐賀県には台風200610号(8/17~8/19)と台風200613号(9/17~9/18)が通過した。その影響により干潟域の地点TA, TBでは底泥が侵食され、浅海域の地点では干潟域から削られ輸送された底泥が堆積したと考えられる。9月23日の地点TCにおいて採泥を行うと、サルボウ貝の死骸の上に泥が約8cm堆積していたのが確認できた。なお地点TCは7月30日時点で $154 \text{ 固体}/\text{m}^2$ のサルボウ貝の生息が確認されていた。10月になると地点TBでは軟泥厚が増加した。係留観測でも9月の台風移行は岸方向の輸送が見られたため、それにより軟泥厚が増加したものと思われる。浅海域の地点では10月以降の粘度の緩やかな上昇がみられたが、これが岸方向に表層泥が輸送されたからなのか、圧密によ

るものか今の時点では不明である。また、干潟域の地点TA, TBで11月以降の粘度の変化があまりみられないのは波浪の影響と係留計観測より9月の台風以降、沖から物質の輸送が行われているからであると考えられる。以上より2006年8月~9月の台風をきっかけに大量の底泥が干潟域から懸濁し輸送され沖合に堆積したが、潮汐の作用により徐々に干潟に底泥が輸送されていると考えられる。

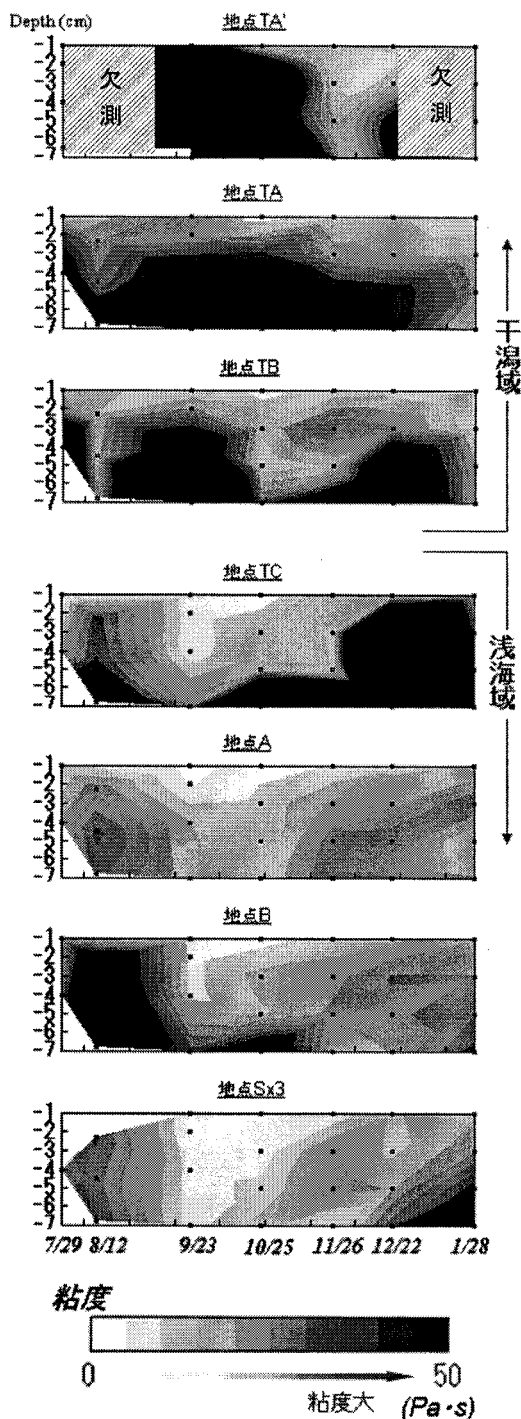


図-9 塩田川沖定線での初期粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)の時間変化

岸から沖方向へTA' (標高-0.5m), TA (標高-1m), TB (標高-2.8m), A (標高-6.5m), B (標高-10.5m), Sx3 (標高-13m)

b) Ehの鉛直分布の時間変化

図-10に塩田川沖定線でのEhの鉛直分布の時間変化の図を示す。7月から9月になると干潟のEhの値が-20(mV)以上の底泥の厚さが減少しているのに対し、浅海域の地点では増加している。10月になると干潟域の地点ではEhの値が高くなり、浅海域では

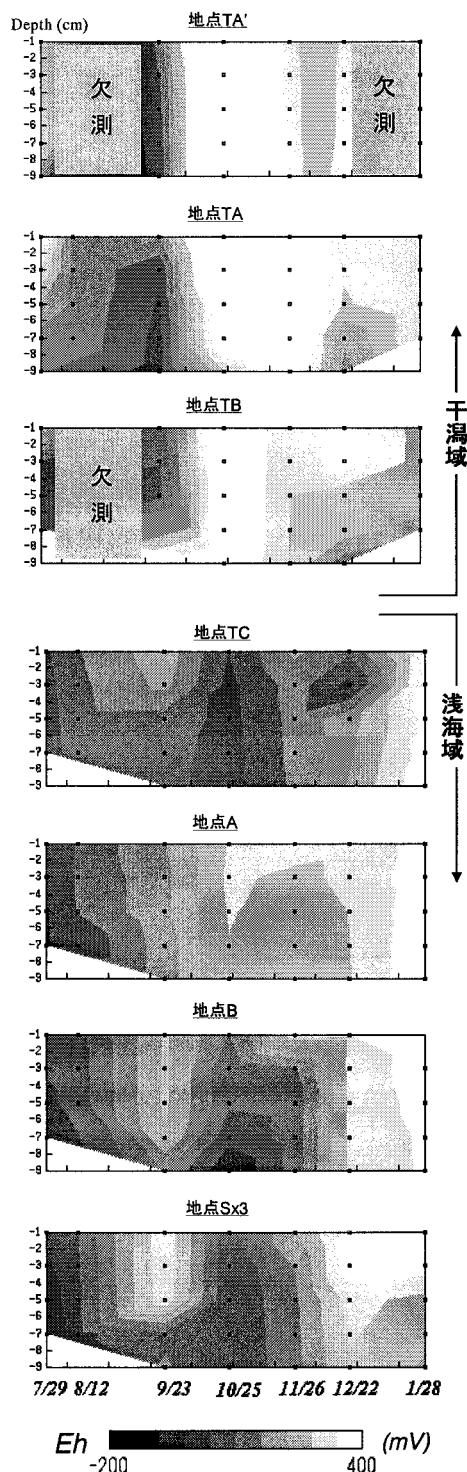


図-10 塩田川沖定線でのEh (mV)の時間変化

岸から沖方向へTA' (標高-0.5m),
TA (標高-1m), TB (標高-2.8m),
A (標高-6.5m), B (標高-10.5m), Sx3 (標高-13m)

低くなっている。9月にこのようなEhの変化を示したのは同時期の初期粘度の変化と同じように2006年8月～9月の台風によって干潟域では表層泥が削られ下層のEh値の低い層が現れ、浅海域では干潟域で削られた泥が再堆積する間に好氣的となりEh値が上昇したと考えられる。

4. まとめ

有明海湾奥部では西側に粘土が分布しており、砂泥および粗粒シルトは東側を主として住之江海底水道と塩田川沖海底水道に挟まれた標高の高い地帯を避けるように分布していた。

底泥の初期粘度の広域分布から同じような粒度であっても初期粘度は異なる地点が多く存在した。また、西岸沖に1地点2005年、2006年ともに周辺地点より初期粘度の高い地点が存在した。

塩田川沖定線付近での係留観測では懸濁物質の輸送はSx2地点で沿岸方向より岸沖方向の方が頻繁であり、6月後半から11月半ばまでは岸方向に輸送が行われることが分かった。また、台風により干潟域から底泥が巻き上げられ大量に沖合に輸送されたことも確認できた。それにより塩田川沖定線では干潟域の地点TA, TBでは軟泥厚が減少し、逆に浅海域の地点では増加したと思われる。

広域的・季節的に初期粘度およびORPを測定し、係留観測を行った結果、台風により干潟域から大量の底泥が懸濁し沖合に堆積したことが分かった。9月23日の地点TCにおいて採泥を行うと、サルボウ貝の死骸の上に泥が約8cm堆積していたのが確認できたことも踏まえると、台風などにより干潟域から沖合へ底泥の突発的な輸送・堆積は底泥の直上水の貧酸素水塊とともに2006年において二枚貝類の生息環境を悪化させた可能性がある。

参考文献

- 1) 大隈齊, 江口泰蔵, 川原逸朗, 伊藤史郎: 有明海湾奥部の底質及びマクロベントス, 佐賀県有明水産振興センター研究報告, 20号, pp.55-62, 2001
- 2) 山本浩一・速水祐一・笠置尚史・宮坂仁・大串浩一郎・吉野健児・平川隆一: 有明海奥部における表層底質の分布特性と底質環境の形成要因, 海岸工学論文集, Vol.53, pp.961-965, 2006
- 3) Trimbak M. Parchure and Ashish J. Mehta: Erosion of Soft Cohesive Sediment Deposits, *Journal of Hydraulic Engineering*, VOL.111, No.7-12, pp.1308-1326
- 4) 大坪国順: 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究. 国立環境研究所報告, 42号, p133, 1983.
- 5) 末次忠司, 日下部隆昭, 横山勝英, 山本浩一: 陸域・河口域における土砂・栄養塩動態に関する研究, 国総研資料第236号, 2005