

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

CHARACTERISTICS OF THE SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION
CHANGE IN THE INNER PART OF THE ARIAKE SOUND, JAPAN

山本浩一¹・速水祐一²・笠置尚史³・濱田孝治¹・吉野健児⁴・山田文彦⁵

Koichi YAMAMOTO, Yuichi HAYAMI, Takashi KASAGI,
Takaharu HAMADA, Kenji YOSHINO and Fumihiko YAMADA

¹正会員 博(工) 佐賀大学講師 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)

²博(農) 佐賀大学准教授 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工修 大分県豊肥振興局 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 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1)

⁵正会員 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)

Suspended sediment concentration and current velocity were measured continuously by Acoustic Doppler Current Profiler at the inner part of the Ariake Sound. Simultaneously, shear strength of the surface of the bottom mud was measured around the mooring point. Shear strength which measured by viscosity meter had finer relationships between vane shear strength. Multiple regression analysis was applied to the maximum SS concentration in every 15 hours. The main factor of the variation of the SS was the bottom shear stress. Sub-factor of the variation of SS concentration were wind velocity and the shear strength of the surface bottom mud.

Key Words : Shear stress, The Ariake Sound, bottom mud, ADCP and shear strength

1. はじめに

有明海は我が国の湾海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。

現在有明海においては底質の細粒化¹⁾・透明度上昇²⁾などが問題になっている。その解明のためには懸濁物質の動態の解明が必要であるが、有明海における懸濁物質の挙動について基本的な理解がまだ十分とはいえない。有明海における懸濁物質濃度の変動については田中ら³⁾が有明海湾奥で濁度の連続観測を行って、同じ潮位差において非海苔養殖期に比べて海苔養殖期の懸濁物質濃度が低下することを示している。

SS濃度の変動には再懸濁を引き起こす潮流による底面せん断応力、底質の状態、気象が関係していると考えられる。特に粘着性底質の再懸濁に関わる限界せん断応力が底質のせん断強度(降伏応力)に関係があることは知られており⁴⁾、せん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。

そこで本研究では粘度計を用いて底質の降伏応力を測定し、かつ濁度と音響強度の連続観測を通じて

懸濁物質濃度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) 研究対象水域

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。本研究では有明海湾奥部の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-1)。このうちA地点で通年の流向・流速および底面25cmにおける濁度を測定した。表示しているコンターは2005年8月に取得された表層泥のMd ϕ ⁵⁾を示す。ここに示したように、全域についてMd ϕ が7以上の粘土質の底泥である。

(2) 係留観測

懸濁物質の動態を調べるために塩田川沖定線のA地点に超音波流速計(Nortek Aquadopp)・濁度計を設置した。データは2006年6月26日~2007年6月18

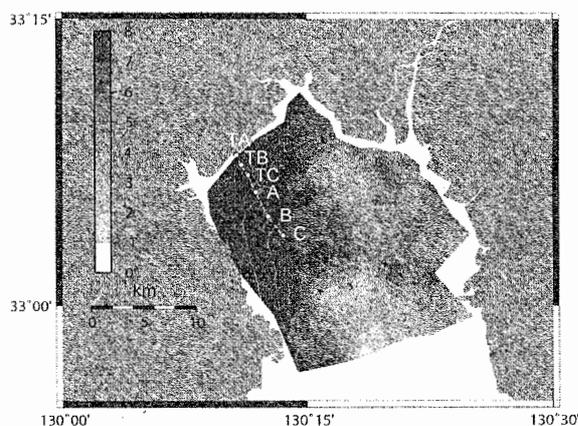


図-1 研究対象水域. コンターは2005年8月における表層底質のMd $\phi^{5)}$ を示す.

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にセンサを設置し, センサから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.

(3) 船舶観測

2006年7月から2007年7月まで毎月1回, 図-1に示す地点(TA~C)においてエクマンバージ採泥器を用いて採泥を行った. 採泥した底泥の降伏応力を計測するために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°転倒して粘度計により3~5層の降伏応力を測定して底泥の降伏応力の鉛直分布を求めた.

(4) 粘度計による非擾乱状態のせん断強度把握

本来粘度計は, 流体にずり速度を与えたときのずり応力から粘度を測定するものである.

鶴谷らはカオリン・ベントナイト・現地泥のずり応力とずり速度の関係を検討し, 現地泥についてはビンガム流体とみなせることを示した⁶⁾. ビンガム流体については τ をせん断応力(Pa), τ_y を降伏応力(Pa), μ を粘度(Pa·s), D をずり速度(1/s)として

$$\tau = \tau_y + \mu D \quad (1)$$

で表せる. さらに鶴谷らは D が低い領域においては, τ が τ_y に漸近することを示し, D に対する τ の変化が小さいことを示している.

鶴谷ら⁶⁾は流動時の底泥の特性を求めるため擾乱された底泥の流動曲線について研究しているが, 本研究では非擾乱底泥の降伏値を現場で簡便に求めることを目的としている.

本研究では, 単一円筒型回転粘度計を用いた. 測定に際してはロータを非擾乱底泥中に静かに挿入し, 2秒間なじませたあとスイッチを入れてロータの回転を開始した. 粘度計内部にトルクを検知するためのトーションバネがあり, バネの偏角を内部の光センサで読み取る機構になっている. 測定を開始するとモーターが回転を始め, トーションバネのひずみが蓄積して遅れてロータが回転する. このときの粘度(10秒間の最大値)を読み取った. ロータ

(3.2mm ϕ)を取り付けたときのずり速度は $2.1s^{-1}$ であり, これが最大のずり速度である. ロータが回転する前から最大のずり速度に達する過程での平均的なせん断応力を測定しているため, 近似的に降伏応力 τ_y に対応するものとした.

なお本装置は現場で簡便に測定することを目的とした装置のため, データロガーやずり速度変化装置は付属していない. このため精密な流動曲線を描くことはできない.

粘度計が測定するトルク M (N m)は, k をねじれ定数(N m division⁻¹), θ を指示値(division)とすると, (2)式で算出できる. なお, 計測可能な範囲は100 divisionである.

$$M = k\theta \quad (N \text{ m}) \quad (2)$$

今回, 東機産業TVC-5型粘度計と同社製5番ロータ(3.2mm ϕ × 51mm)では, 表示される粘度を η (Pa·s)とすると, $\eta = 2.03 \theta$ の関係にある. 本研究で用いた粘度計のねじれ定数 k は, $7.187 \mu\text{N m division}^{-1}$ である⁷⁾から, 粘度をトルクに換算する式は結局,

$$M = \frac{7.187}{2.03} = 3.54 \times 10^{-6} \eta \quad (3)$$

となる. 次に, 回転するロータにはたらく面応力を計算する. 直径 d (m), 高さ h (m)のロータにはたらく面応力を τ (Pa)とすると, ロータの下面と側面にはたらく面応力とトルク M とのつりあいから,

$$M = \tau \left(\frac{\pi d^2 h}{2} + \frac{\pi d^3}{12} \right) \quad (4)$$

となる. (4)に $d=0.0032\text{m}$, 高さ $h=0.051\text{m}$ を代入すると,

$$\tau = 1.206 \times 10^6 M \quad (5)$$

となる. よって(3)と(5)から

$$\tau = 4.27 \eta \quad (\text{Pa}) \quad (6)$$

となる.

粘度計によって算出した降伏応力とベーンせん断強度を同一試料について計測した. ベーンせん断強度は誠研舎製FTD2CN-S(ベーン長2cm, ベーン幅1cm)試料は筑後川感潮河道で2007年8月5日に採取された底泥を用いた. それぞれ3回測定し, 平均

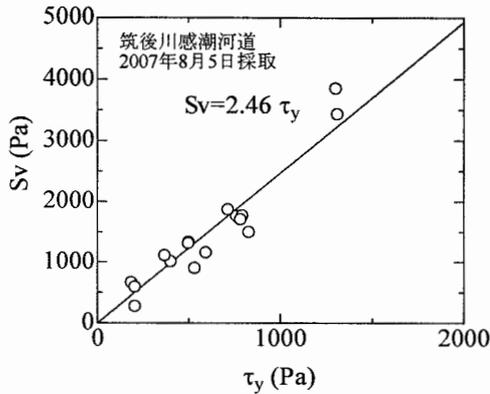


図-2 ベーンせん断強度 S_v と粘度計による降伏応力 τ_y の関係

値を用いている。

中央粒径は $9\mu\text{m}$ から $12\mu\text{m}$ のシルト・粘土であり、貝殻や木片などの挟雑物はほとんどない。図-2 のように粘度計で測定した降伏応力 τ_y とベーンせん断強度 S_v の間に

$$S_v = 2.46\tau_y \quad (7)$$

の関係があり、ベーンせん断強度との関係に良好な相関が認められた ($R=0.944$)。よって粘度計を用いて降伏応力を推定することが可能であると考えられる。

ただし式(7)の係数は一般的なものではなく、粒度分布の影響を受けることが考えられ、砂分が混入すると粘度計のロータが滑ることで係数が大きくなると予想される。

(5) 反射音響強度から SS 濃度への変換

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(8)式により推定することができる。

$$EL = -20 \log r - 2\alpha + 10k \log C + 10 \log(\psi c T / 2) + A \quad (8)$$

ここで、 EL : 反射音響強度 (dB), r : 超音波流速計から測定層中心までの距離 (m), C : SS 濃度 (g/m^3), α : 減衰係数 (dB/m), ψ : 音波のビーム幅 (sr), c : 音速 (m/s), T : パルス長 (s), k , A は定数である。(8)式において、

$$E^* = EL + 20 \log r + 2\alpha - 10 \log(\psi c T / 2) \quad (9)$$

とおくと、(8)式は

$$E^* = 10k \log C + A \quad (10)$$

とかける。 E^* は補正反射音響強度 (dB) と呼ぶことにする。図-3 に E^* と $\log C$ の関係を示した。地点 A においては $k=1.47$, $A=62.9\text{dB}$ が得られ、これを用いて底面上 0.85m の SS 濃度を推定した。多変量解析の際は一潮汐での最大せん断応力および最大 SS 濃度を抽出するため、せん断応力、SS 濃度はそれぞれ連続 15 時間での最大値を用いた。

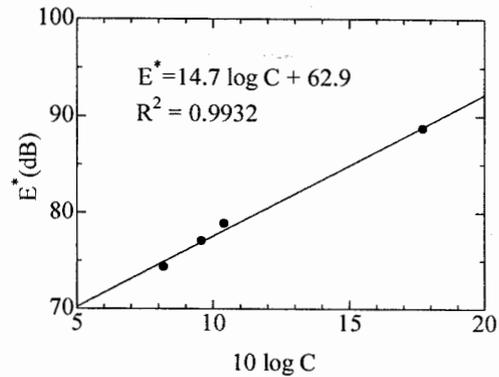


図-3 補正反射音響強度 E^* と SS 濃度 C の関係 (A 地点)

(6) 底面せん断応力の推定

底面せん断応力は超音波流速計の流速分布から推定した。超音波流速計で得られた鉛直流速分布から対数則に近似して底面せん断応力を計算した。

水平流速は滑面の場合、対数分布則の範囲で

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \log_e \left(\frac{u^* z}{\nu} \right) + 5.5u^* \quad (11)$$

に近似できる。ただし u : 水平流速 (m/s), u^* : 摩擦速度 (m/s), z : 底面からの高さ (m), ν : 動粘性係数 (m^2/s), κ : カルマン定数である。

海底面は底質の中央粒径 $< 0.02\text{mm}$, $u^* < 0.03\text{m/s}$, $\nu = 1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ より、底質の中央粒径を相当粗度高 k_s (m) として摩擦レイノルズ数を計算すると

$$\frac{u^* k_s}{\nu} < 0.6 \quad (12)$$

となり、海底面自体の凹凸を考えなければ摩擦レイノルズ数が 3.5 以下であるから滑面とみなせる⁸⁾。

u^* を求める際には(12)式と実際の鉛直流速分布から、繰り返し計算を行い最小 2 乗法によって u^* を求めた。

底面せん断応力は下記で求めた。

$$\tau^* = \rho u^{*2} \quad (13)$$

ここで、 τ^* : 底面せん断応力 (Pa), ρ : 水の密度 (kg/m^3)

3. 研究結果

(1) 潮流と底面せん断応力の関係

Aquadopp で測定された 2006 年 6 月 26 日から 2007 年 6 月 19 日までの約 1 年間の流速データ (底上 0.85m) について、南北成分、東西成分に分け、最小二乗法を用いて主要 40 分潮について調和分解をおこなった。調和分解によって得られた潮流成分を v_{pred} とし、各日の 0 時を中心にした 25 時間について v_{pred} の 2 乗の最大値を求めた。これを日最大潮流 $v_{pred,max}$ と呼ぶ。

同様に、底面せん断応力についても日最大値 τ_{max}^* を求めた。図-4に、求められた $v_{pred,max}$ の2乗値を示す。なお、平均流の大きさ（南北成分）は1.5cm/sであり、潮流に比べると小さかった。潮流と底面せん断応力の間には非常によい正の相関が見られた（図-5）。これは、底面せん断応力が基本的に潮流によって決まっていることを示している。1点だけ大きく外れた日が見られるが、これは2006年9月17-18日であり、台風13号が有明海を直撃した日である。

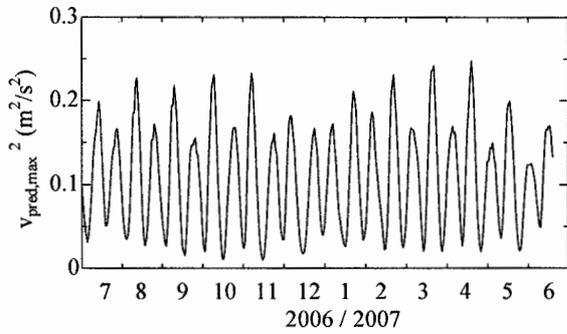


図-4 有明海A地点における底面上0.85mの日最大潮流 $v_{pred,max}$ の2乗値の変動

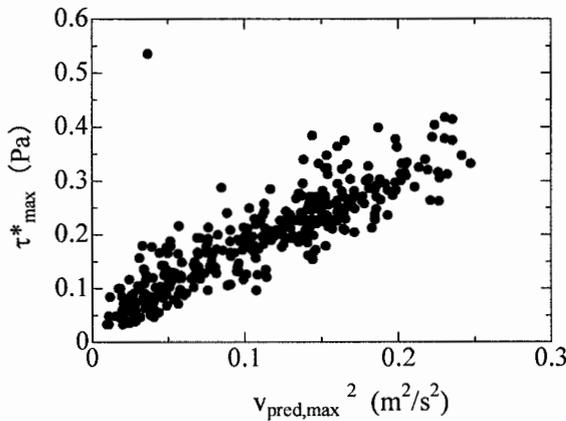


図-5 有明海A地点における底面上0.85mの日最大潮流 $v_{pred,max}$ の2乗値と日最大底面せん断応力 τ_{max}^* の関係

(2) 底泥の降伏応力の変動

干潟部（TA～TC）の降伏応力の変動を図-6に示す。2006年7月～8月にかけては降伏応力が大きかったが、2006年9月17日に九州北部を通過した台風0613号によって干潟部の表層の軟泥が侵食されて沖合に流出したことがわかっている⁵⁾。TAでの8月～9月にかけての降伏応力の変化が少ないのは侵食傾向にあったからであると考えられる。TB, TCについては一旦侵食された底泥が潮流によって干潟部に戻ったために降伏応力の低い軟泥が堆積していることがわかる。最も標高が高いTA地点も遅れて10月には降伏応力が低くなっている。TA地

点では2006年10月から翌年7月にかけて降伏応力は徐々に増大しているが、TB, TC地点での変化は明瞭ではない。

次に沖合部干潟部（A～C）での表層底泥の降伏応力の変動を図-7に示す。干潟部と同様に2006年7月～8月にかけては降伏応力が大きかったが、台風の通過と共に一気に降伏応力が低くなり、目視でも新しい底泥が堆積していることがわかった。水平方向のSSフラックスの解析からも台風時にSSが沖合に一気に流出したことがわかっている⁵⁾。干潟域と異なって、A, B, Cともに2006年10月から2007年2月にかけて徐々に降伏応力が増大してゆき、徐々に圧密が進行しているとみられる。3月・4月に低くなっていることがわかった。この原因は不明であるが、2月後半から潮流が再び大きくなり、SS濃度が上がっていることが関係していると考えられる。

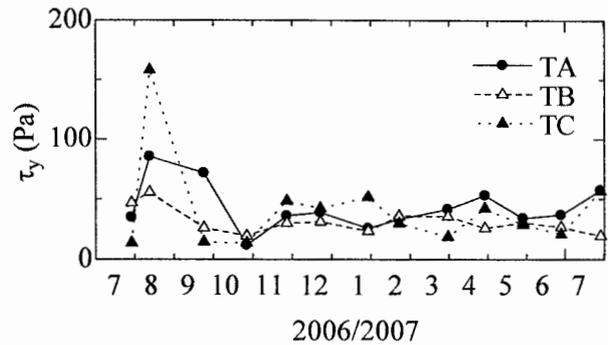


図-6 有明海TA～TC地点における表層泥(1cm)の降伏応力 τ_y の変動

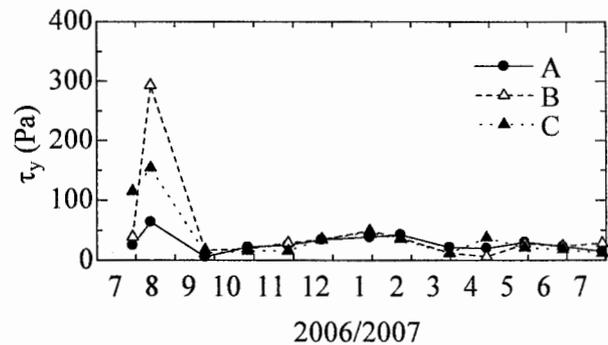


図-7 有明海A～C地点における表層泥(1cm)の降伏応力 τ_y の変動

(3) SS濃度の季節変動

図-8に風速、底面せん断応力と音響強度から推定されたSS濃度を示した。風速は8月16日付近の台風10号接近時と9月17日の台風通過時に極大値をとっている。底面せん断応力も台風通過時に極大値をとっている。

せん断応力が潮流によって変化することは前述の通りであるが、7月～8月にかけて時折大きなせん断応力の発生が認められる。これは潮流以外の要因で

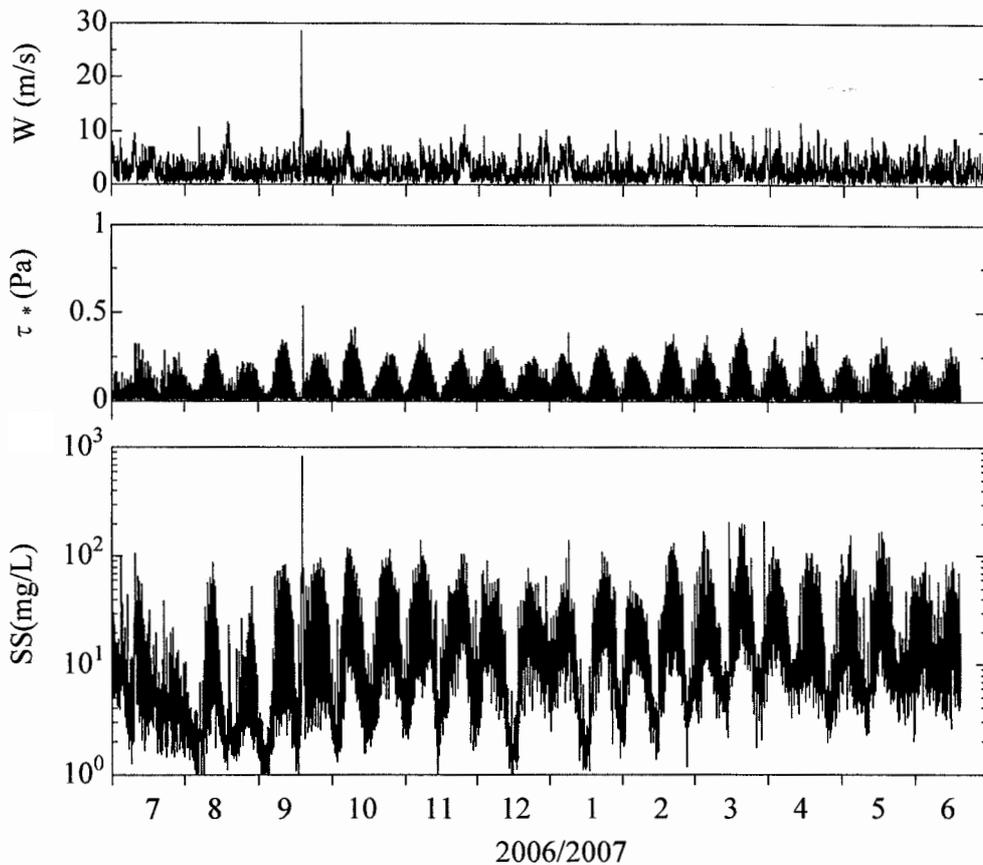


図-8 佐賀における風速 W (上), 有明海A地点における底面せん断応力 τ^* (中), 超音波流速計の音響強度から求められた有明海A地点の底面上0.85mにおけるSS濃度(下)

与えられるせん断応力であることを示している。

SS濃度はせん断応力に対応して濃度の増減を繰り返している。潮流の2乗値が $0.2\text{m}^2/\text{s}^2$ 以下となる11~2月にかけては大潮時の最大せん断応力が低下し、田中・児玉³⁾の観測結果と同様に他の時期に比べて最大SS濃度が低い。また、7月~8月にかけて、9月前半とほぼ同等のせん断応力がありながら、SS濃度が低い状態が続いていた。7~8月は底泥の降伏応力が高い時期と重なるが、SS濃度が上昇しない、すなわち再懸濁・沈降が活発に起こらないために底泥表層に新たな懸濁物質の供給がなく、圧密・内部構造の強化がすすんで底泥の降伏応力が増大し、さらに再懸濁を抑制したと考えられる。

(4) SS濃度に関する重回帰分析

1 潮汐間におけるSS濃度の最大値への①潮流によるせん断応力、②風速、③底質のせん断強度の寄与を調べるため、15時間最大底面せん断応力と15時間最大風速、線形補間した降伏応力(沖合の代表としてC地点の降伏応力)を説明変数とし、15時間最大SS濃度を目的変数として重回帰分析を行った。ここで、それぞれの要因の1次結合ではなく、それぞれの説明変数の積で表現することが妥当と考えられたので、説明変数と目的変数の対数を取り、これについて重回帰分析を行った。

表-1 SS濃度の15時間最大値の対数の重回帰分析結果 ($n = 573$)、 τ_y :底泥の降伏応力 (Pa)、 W :15時間最大風速(m/s)、 τ^* :15時間最大底面せん断応力 (Pa)

変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	偏相関係数	単相関係数
$\log \tau_y$	-0.510	-0.310	-0.447	-0.387
W	0.558	0.221	0.336	0.284
$\log \tau^*$	1.06	0.646	0.723	0.681
定数項	2.74			

変数は全変数を用いた。解析期間は2006年6月26日から2007年6月18日、サンプル数は573である。表-1に重回帰分析の結果を示す。

最大SS濃度は最大底面せん断応力で概ね説明される(偏相関係数=0.723)が、せん断強度の偏相関係数も0.447と比較的高く、底面の降伏応力の条件も最大SS濃度に影響を与えていると考えられる。決定係数は0.622であった。 τ_y を除いた場合は決定係数が0.528に落ちたため、底泥の降伏応力(固さ)とSS濃度は関係があるとみられる。

得られた重回帰式から、A地点の15時間最大SS

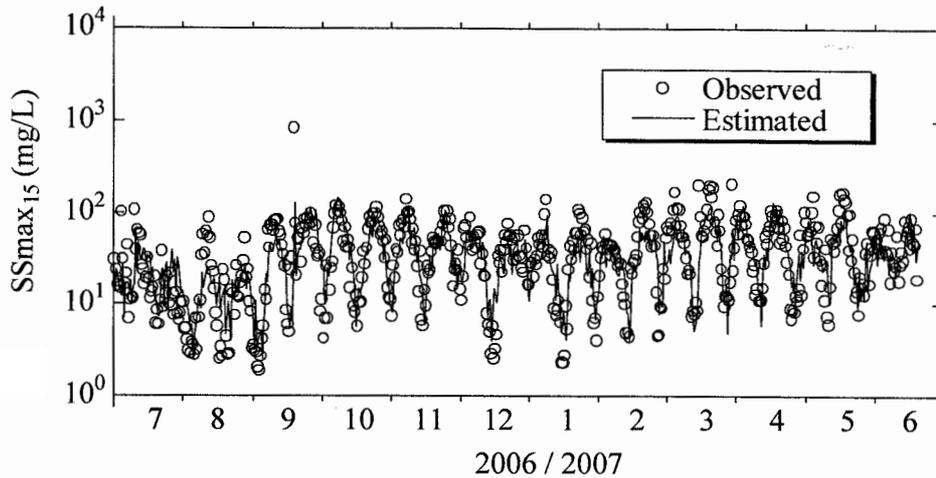


図-9 有明海A地点における底面上0.85mにおける，重回帰式で推定された15時間最大SS濃度 $SS_{max,15}$ (実線) と実測値 (○) .

濃度 $SS_{max,15}$ (mg/L) が (14) 式で表現された.

(14)式は，せん断応力の増大，降伏応力の減少，風速の増大が SS 濃度の上昇をもたらすことを示している.

$$SS_{max,15} = 10^{2.74} \tau_s^{1.06} \tau_y^{-0.509} W^{0.558} \quad (14)$$

(14) 式を用いて最大 SS 濃度の時系列変動を推定した. 図-9 に推定結果を示す. 重回帰式によって推定された SS 濃度は実際の最大 SS 濃度の季節変動をほぼ再現しているといえる. 従って，最大 SS 濃度の変動には潮汐の条件とともに風速，底質の降伏応力が影響しているといえる. ただし底質の降伏応力の減少は台風などの波浪時，潮流によるせん断応力が高まった時に起こっているとみられ，降伏応力の減少と SS 濃度の増大は相互に影響し合っていると考えられる. 2006 年 8 月上旬および 2007 年 3 月中旬に，推定値がかなり過小評価になった. すなわち重回帰式で考慮した以外の要因で SS 濃度が上昇したが，干潟や河川からの SS の移流の影響が考えられる. 2006 年 9 月 17 日については，台風時の再懸濁の影響があったが，十分に再現されていない. これについては A 地点方面へ干潟から SS が移流したことがわかっており⁵⁾，干潟で再懸濁した SS の移流の影響が大きいとみられる.

4. まとめ

有明海湾奥部で 12 ヶ月間の係留観測を行うと共に毎月一回の底質採取を行い，粘度計を用いた降伏応力を観測した. 得られた結論は下記の通りである.

- ・粘度計を用いて簡易にせん断強度 (降伏応力) を求めることができる.
- ・有明海湾奥部の泥質海域における SS 濃度の変動の主要因は底面せん断応力であり，底面せん断応力

は台風などの例外を除き潮流によって決まっている.

- ・SS 濃度の増大の副次的要因として風速の増大および底質の降伏応力の低下がある.
- ・底面せん断応力，風速，底質の降伏応力を説明変数とした重回帰式によって観測地点の最大 SS 濃度をほぼ表現できた.

謝辞：筑後川感潮河道の底質採取にあたり，首都大学東京横山勝英准教授にご協力いただいた. 国土交通省筑後川河川事務所と国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室には観測機材を貸与していただいた. ここに記して感謝の意を示す.

参考文献

- 1) 大隈斉，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) 川村嘉広：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.4-9，2002.
- 3) 田中勝久，児玉真史：有明海湾奥部の環境変動に及ぼす浮泥の影響，水環境学会誌，Vol.27，No.5，19-2319-23.
- 4) 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.
- 5) 笠置尚史，山本浩一，吉野健児，速水祐一，濱田孝治，大串浩一郎：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，海洋開発論文集，23巻，pp.531-536，2007
- 6) 鶴谷広一，中野晋，鷹濱潤：回転粘度計による底泥の流動特性の検討，港湾技研資料，No.566，1989.
- 7) 川崎種一，回転粘度計による粘性測定の実際 (改訂版)，東機産業株式会社，2006.
- 8) 小池勲夫編，海底境界層における窒素循環の解析方法とその実際，丸善，pp12-34，2000