

有明海大授揚干潟における 底泥の再懸濁および沈降に関する現地観測

RESUSPENSION AND DEPOSITION OF MUD
IN THE DAIJYUGARAMI TIDELAND, THE ARIAKE SEA, JAPAN

山本浩一¹・槻木(加)玲美²・速水祐一³
吉野健児⁴・濱田孝治¹・山田文彦⁶

Koichi YAMAMOTO, Narumi TSUGEKI-KUWAE, Yuichi HAYAMI,
Kenji YOSHINO, Takaharu HAMADA and Fumihiko YAMADA

¹博(工)佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト(〒840-8502 佐賀市本庄町1)

²博(理)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)

³農博 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト(同上)

⁵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)

⁶博(工)熊本大学准教授 大学院自然科学研究科(〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)

To clarify the sediment transport on the tidal flat of the Ariake Sea, we studied SS concentration and nutrient concentration by the simultaneous observation by mooring and shuttle ship over 10 hours. The contribution of the erosion, deposition, storage by water depth change and advection were calculated by using empirical formulae of the erosion and deposition. It was clarified that high concentration of SS was observed around the mud shore line and its advection affected the SS concentration on the tidal flat as well as re-suspension caused by bottom shear stress. The water mass of high nutrient, which came from the river was transported by tide.

Key Words : *sediment, floc, density, tidal flat, seabed*

1. はじめに

有明海湾奥部には国内最大級の泥質干潟がある。シルト・粘土質の底質環境のもと、ムツゴロウやシチメンソウなど貴重な生物が生息する。シギ・チドリ類の有数の渡来地としても重要で、きわめて貴重な干潟といえる。冬期は干潟全域に海苔養殖用の支柱が建ち並び海苔養殖に利用される。このような自然生態系や養殖環境の基盤となる干潟の底泥は水中のシルト・粘土などの細粒懸濁物質が堆積することにより形成される。このため泥質干潟の地形形成速度や地形形成機構については再懸濁フラックスや沈降フラックスの値が重要となる。比較的潮流が弱い有明海西部の泥質干潟において山西らが自動昇降型多項目水質計を用いて懸濁物質の鉛直積分値の変化を解析し、SS濃度が189 mg l⁻¹の条件で沈降速度2.8×10⁻⁴ m s⁻¹, 見かけの鉛直SSフラックスとして5.29×10⁻⁵ kg m⁻² s⁻¹(= 1.33 kg m⁻² day⁻¹)を得ている¹⁾。さらに山西らはセジメントラップを用いた現地試験によって底面のSS濃度範囲 70 - 600 mg L⁻¹の条件で2.54 kg m⁻² day⁻¹を得ている²⁾。また、再懸濁フラックスについては中川らによって熊本港沖で限界剪断応力

0.0235Paが得られている³⁾。有明海湾奥部の底質は多様であり、竹崎島ー三池港より北の海域において底質の中央粒径($M_{d\phi}$)は1~8の範囲にある⁴⁾。しかもシルト・粘土から構成される細粒底質について多様な剪断強度の底質が存在していることが明らかになってきた⁵⁾。そこで従来の知見の少ない、潮流が強かつシルト質の $M_{d\phi}=6\sim7$ の底質における再懸濁・沈降特性について明らかにするため現地調査を行い、再懸濁項・沈降項に一定の仮定を導入することで移流成分を分離し、泥質干潟におけるSS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) 調査対象水域

調査対象水域は有明海(図-1)であり、有明海最奥部に位置する大授揚干潟(図-2)は単一の泥質干潟としては有明干拓干潟、七浦干潟とともに国内最大級であり、1289haの面積を有する⁶⁾。底質はシルト質であり、

$6 < M_{d0} < 7$ である⁴⁾。有明海西部の泥質干潟に比較して2倍程度中央粒径が大きい。現地踏査の結果、海岸での標高は高く、2.2m (T.P.換算)に達し、筑後川や六角川などの感潮域の干潟を除けば有明海奥部の干潟では最も標高が高い。

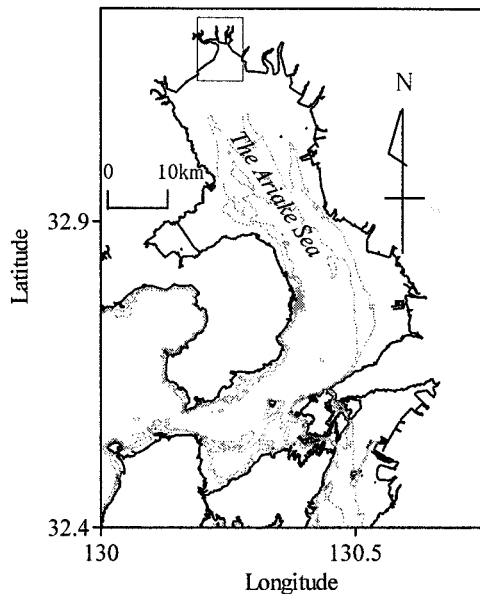


図-1 調査対象水域(有明海)。

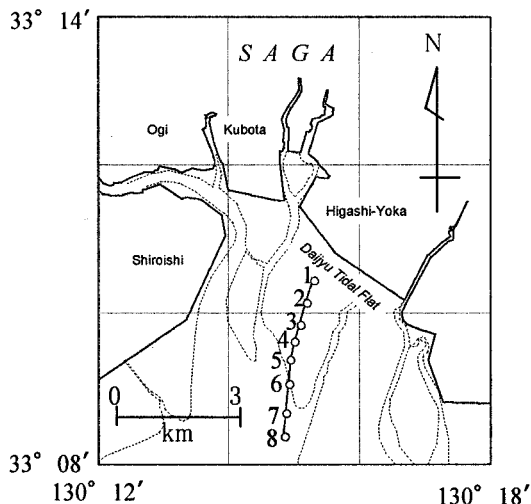


図-2 調査対象水域(詳細観測地点)。

(2) 現地観測・分析方法

現地観測は2005年12月2日8:00から18:00までの10時間、有明海東与賀町沖の大授干潟にてSta.4にADCP (RDI Workhorse Sentinel 1200kHz)を機装した観測船一隻を係留し、多項目水質計やレーザー粒度分析計(LISST-100)による鉛直水質観測および採水を行い、もう一隻の観測船によって岸沖方向(Sta1~Sta8)の水質の往復観測を行った。採水層は係留船については底面から20cm, 125cm, 255cmを基本として40分間隔の採水を

行い、満潮時の10:00に限り鉛直10層(底面上20 cm, 35 cm, 65 cm, 95 cm, 125 cm, 155 cm, 205 cm, 255 cm, 305 cm)で採水を行った。移動船については表層・中層(1/2深度)・底面上20cmで採水した。

採水したサンプルについては1 μ mの濾紙でサンプル水を濾過し、SS濃度を測定したほか、0.45 μ mのMFで濾過し、オートアナライザーによって各態溶存栄養塩(NO_3^- -N, NO_2^- -N, NH_4^+ -N, PO_4^{3-} -P, SiO_2 -Si)を分析した。

(3) SS濃度の解析方法

移流拡散方程式から、拡散を無視し、水位変動分を考慮することで、水柱に存在するSSの保存について下記のように考えた。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = E - D - uh \frac{\partial C}{\partial x} + C \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

ここで x : 縦断方向距離(m), M : SSの水柱あたり現存量(g m^{-2}), E : 再懸濁フラックス($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), D : 沈降フラックス($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), u : 水平流速 (m s^{-1}), C : SS濃度 (g m^{-3}), h : 水深(m)。

沈降フラックス D ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)はSSの沈降速度を w_s (m s^{-1})としたとき

$$D = w_s C \quad (2)$$

で与えられると仮定する。

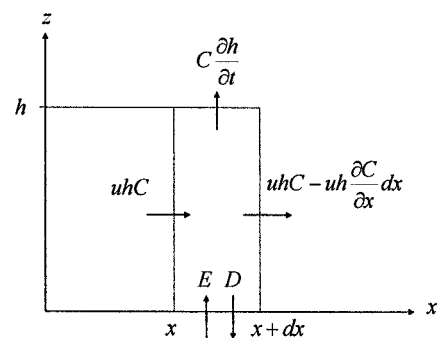


図-3 SS收支解析のためのモデル、

x : 沖合方向, z : 鉛直上向き方向, h : 水深。

(4) 底面剪断応力推定方法

ADCPで得られた鉛直流速分布から対数則に近似して底面剪断応力を計算した。海底面は大授干潟の中央粒径 $d_{50} < 0.020 \text{ m}$, $u^* < 0.1 \text{ m s}^{-1}$, $\nu = 1.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ より,

$$\frac{u^* k_s}{\nu} = 0.14 \leq 5 \quad (3)$$

となり、滑面とみなしてよい⁷⁾。

ただし u^* : 摩擦速度 (m s^{-1})、 k_s : 相当粗度高 (m)。

水平流速は対数分布則の範囲で (4) 式に近似できる⁸⁾。

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \log_e \left(\frac{u^* z}{\nu} \right) + 5.5 u^* \quad (4)$$

ただし u : 水平流速 (m s^{-1})、 z : 底面からの高さ (m)、 ν : 動粘性係数 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)、 κ : カルマン定数

u^* を求める際には (4) 式と実際の鉛直流速分布から、繰返し計算を行い最小2乗法によって u^* を求めた。底面剪断応力 τ^* は下記で表される⁹⁾。

$$\tau^* = \rho u^{*2} \quad (5)$$

ここで τ^* : 底面剪断応力 (Pa)、 ρ : 水の密度 (kg m^{-3})

3. 研究結果と考察

(1) 縦断測線における水質・懸濁物質の空間変動

a) 塩分の縦断分布特性

図-4に一潮汐における測線縦断方向の塩分の分布を示す。上げ潮時のRun 1ではSta. 4～Sta. 8の分布を示したが、この時点では塩分の鉛直成層は無く、沖合から高塩分(塩分29.6程度)の水塊が強混合で流入していることがわかる。Run 2では測線の観測を終了するのに3時間を要したため、Run 2のうち2 kmよりも沖合では下げ潮初期の状態を表している。満潮時～下げ潮初期にかけてはごくわずかだが塩分の鉛直成層が認められる。また、満潮時には低塩分水塊がSta. 1よりも岸側に存在していることがわかる。最干潮時のRun 3では塩分28以下の低塩分の水塊が認められる。これはSta. 5～Sta. 6の間に嘉瀬川滞筋が、Sta. 8に六角川の滞筋内があり、Sta. 7を境に両側に低塩分の水塊が存在しているのを考えると、Sta. 5～Sta. 6については嘉瀬川の、Sta. 8については六角川の河川流出水の影響を受けている可能性が高い。上げ潮時にもSta. 5～Sta. 6は低塩分の傾向を保ったままであった。この低塩分の水塊について、ケイ酸濃度と無機態窒素濃度の関係をプロットした(図-5)。河川水のDIN濃度・河川流量については国土交通省が測定したデータを用いた。六角川については牛津川妙見橋の栄養塩濃度を用い、筑後川については瀬の下地点の栄養塩濃度を用いた。嘉瀬川については官人橋地点の栄養塩濃度と河口で流入する下水処理場の全窒素負荷量から計算した。ここで下水処理場から排出される全窒素負荷量のうちDINの割合は90%を超える¹⁰⁾ので、DIN濃度として扱って問題ない。また、下水処理場ではケイ酸濃度は変化しないと考えられ、嘉瀬川流域の下水を処理していることから、ケイ酸濃度は嘉瀬川と等しいとした。これらをエンドメンバーとすると、今回の調査におけるケイ酸とDIN濃度の関係を直線近似すると嘉瀬川河口の水質がエンドメンバーとな

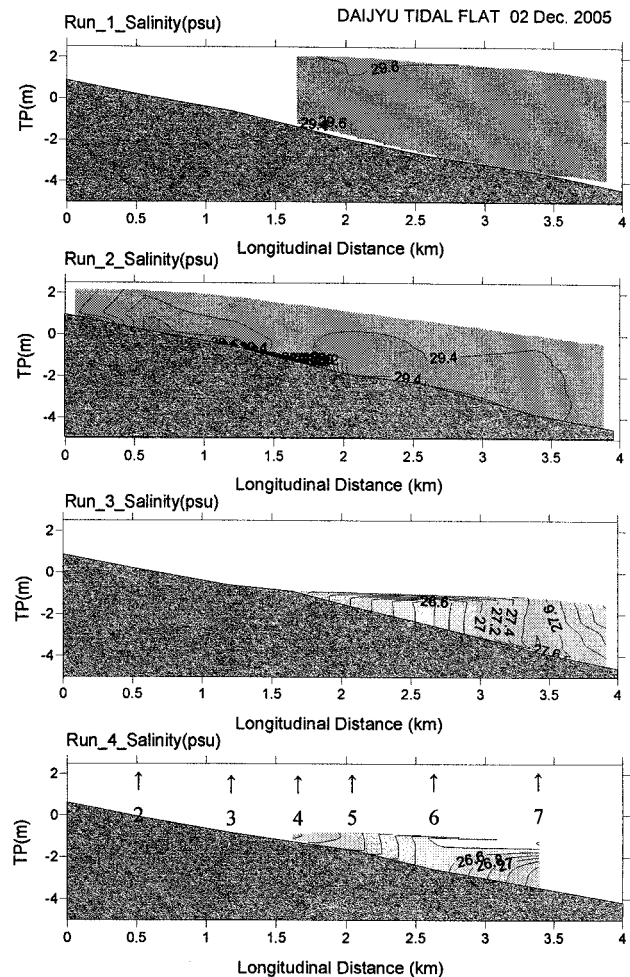


図-4 岸沖方向の塩分分布の変動, 2005年12月2日, 有明海大授干潟, Run1(沖→岸):7:40-9:10, Run2(岸→沖):9:57-13:10, Run3(岸→沖):15:06-15:39, Run4(沖→岸):16:45-17:20, 水平軸はSta. 1からの距離, 数字はSta番号。

る結果を得た。よって、嘉瀬川河口の低塩分水が潮汐に伴って干潟上を流動しているといえる。嘉瀬川河口のDIN濃度は高く、 3.7mg/L に達する。局所的にみると、河川からの高濃度な栄養塩によって河口に近い干潟部の水質環境が影響を受けることがわかる。特にアンモニア態窒素の割合が高いのが特徴であり、DINのうち全サンプル平均して39%はアンモニア態であった。本調査における海域全サンプルの平均濃度は 0.127mg/L であり、上流域の嘉瀬川官人橋では 0.01mg/L 以下であったことを考えると、都市排水の影響によりアンモニア態窒素濃度が高かったと考えられる。干潟においては一潮汐のうちに栄養塩濃度が変化することが知られている¹¹⁾が本調査においては河川水の影響が強く、干潟における水質変動は明らかではなかった。生物活性の低い冬期の調査であることも影響しているであろう。Run 2のSta. 1～Sta. 4についてはほぼ満潮時の濃度分布を示しており、Sta. 4～Sta. 8については下げ潮初期の状態を示している。満潮時には底層にSSが沈殿して高濃度になっている。

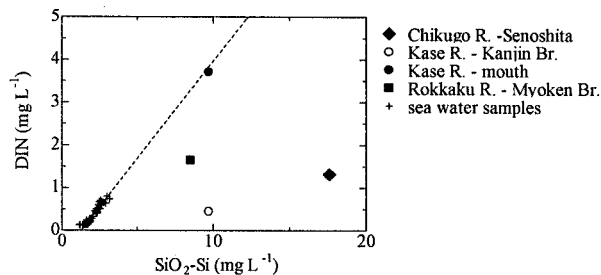


図-5 河川水、海水のDIN-SiO₂プロット、2005年12月2日、有明海大授干潟(+), 筑後川瀬の下地点(◆), 嘉瀬川官人橋(○), 嘉瀬川河口(●), 六角川水系妙見橋(■), 河川水の採取は2005年12月9日。

また、下げ潮初期においては中層でもSS濃度が高くなるが、縦断方向にはほぼ一様で、濃度変化は顕著でなく、主に底面からの再懸濁によってSS濃度が決まっているとみられた。

干潮時のRun 3においては、水位の低下に伴って、汀線付近で顕著に高濃度なSS濃度が認められた。縦断方向のSS濃度の変化も著しい。干潟部においては600 mg/Lを超えるSS濃度が観測された。

上げ潮時のRun 4においては、汀線際に高濁度水塊が形成され、遡上しているのがわかる。高濁度水塊の長さは約800 mであった。厳密には底面摩擦があるので正しくないが、底面摩擦を無視して考えると、潮汐にともない水位が上昇して海水が干潟に流入すると質量保存により浅い水域の方が、流速が早くなるので、再懸濁が活発に起こり始める限界流速を超える地点がどこかに存在することになる。これが図-6上のRun 4における2.5 km地点であると考えられる。

(2) 定点におけるSS濃度の変動特性

係留観測点(Sta. 4)におけるSS濃度分布および密度を図-7に示す。下げ潮に伴い底面剪断応力が増加するとともにSS濃度が増加した。13時ころ低温・低塩分水塊のフロントが通過するが、強い躍層は形成されておらず、鉛直的に良く混合されている。

この低塩分の水塊は高濃度のSSを含有している。このSSを高濃度に含んだ水塊は往復船による縦断観測結果によればRun 2のSta. 1(水深1.5 m)で浅に存在していたことから、この水塊が移動していることが予想された。SS濃度はフロント通過以降も上昇を続け、干潮直前の14:40に濃度685 mg/Lを記録した(図-8)。干潟は以降2時間完全に干出した。ただし表面の水は排水されることなく、微地形によっては2 cm程度の水深で残存していた。また、干出中は干潟表面は湿潤状態にあった。間隙からの排水がされにくい泥質であることと、T.P.換算で-1mという低い地盤の干潟の特徴であると考えられる。

16:40ころ干潟の冠水が始まり、248 g m⁻³の高濃度な懸濁物質を含んだ海水が遡上し始めた。塩分は27.5であり、干出直前の塩分とほぼ同じである。その後流速が

上昇し始めたが、SS濃度は低下する傾向にあった。

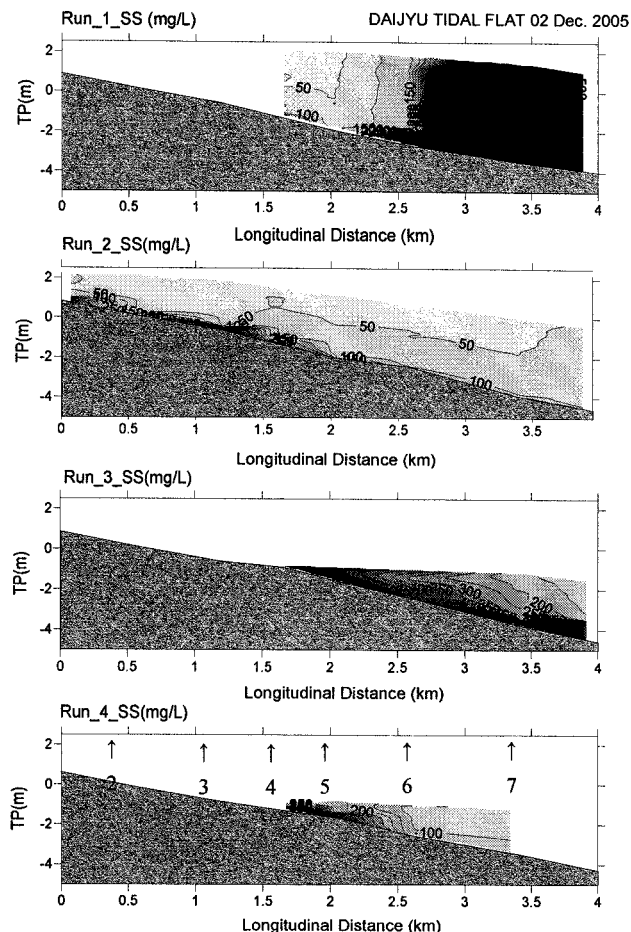


図-6 岸沖方向のSS濃度分布の変動、2005年12月2日、有明海大授干潟、Run1(沖→岸):7:40-9:10, Run2(岸→沖):9:57-13:10, Run3(岸→沖):15:06-15:39, Run4(沖→岸):16:45-17:20, 水平軸はSta. 1からの距離、数字はSta番号。

(3) 定点におけるSS濃度変動の解析

次に、定点のSS濃度変化からSS濃度の変動要因について考える。まず、(2)式における w_s を推定する。満潮憩流時(10:30~10:40)については底面からの再懸濁、水平方向の移流、水位変動成分を全て無視できると仮定して、(1)式において $E=0$, $\partial h/\partial t=0$, $uh\partial C/\partial x=0$ とくと $D=2.0\times 10^{-2} \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-2}$ であった。これと $C=27.7 \text{ g m}^{-3}$ より、 $w_s=7.3\times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ が得られた。同様にLISST-100による粒径毎の沈降速度も算出したが、全粒径一様であり、平均すると $7.63\times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ となった。これはおよそ800 μm 程度のマクロブロックの沈降速度に相当する。ただし本観測時にはLISST-100で計測できない粗大なマクロブロック(推定800 μm 程度)が生じ、一様に沈降していた可能性がある。以上より $w_s=7.63\times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ とした。

Sta. 4における底面剪断応力の変動を図-9に示す。底面剪断応力は流速に対応して増減しているが、位相が

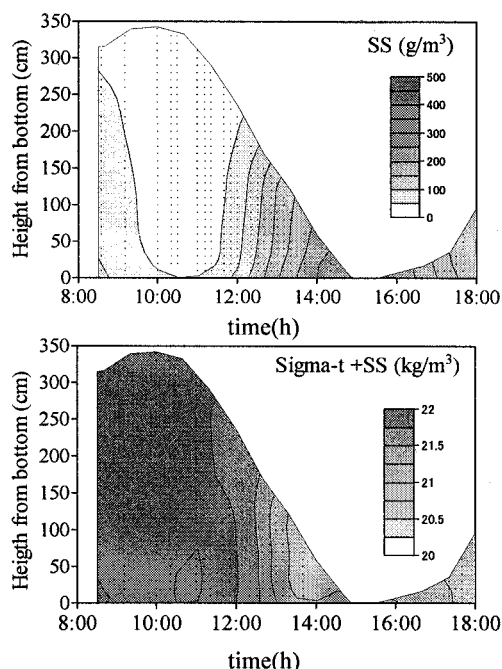


図-7 Sta. 4におけるSS濃度および比重の変動，2005年12月2日，有明海大授干潟，SS濃度が高濃度のため密度を評価するにあたってSS濃度を考慮した。

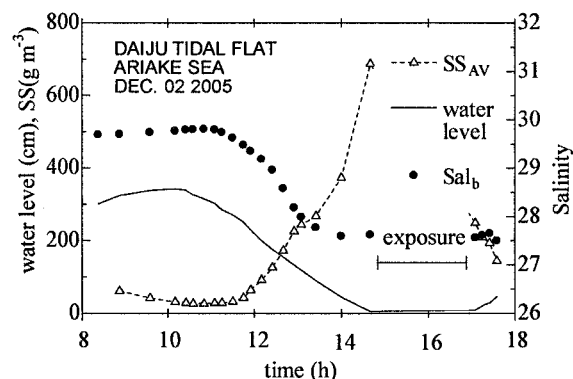


図-8 Sta. 4における鉛直平均SS濃度 SS_{AV} と水位、底面における塩分 Sal_b ，有明海大授干潟，2005年12月2日。

流速よりも若干遅れる傾向があった。

次に底面剪断応力 τ^* と再懸濁速度 E の関係を推定した。前節で述べたように，下げ潮初期(12:00まで)には沖側の測線で縦断方向のSS濃度分布の変化がほとんどみられなかったことから，下げ潮初期に(10:00～12:00)においてSta. 4付近では $\partial C / \partial x = 0$ とおけるとした。さらに w_s として上記の値を用いることとし，観測で得られたSS現存量と水位の変化から，(1)式によって E を求めることができる。 E と τ^* の関係を整理したところ，

$$E = \begin{cases} 0 & (0 \leq \tau^* < 0.129 \text{ Pa}) \\ 0.9965(\tau^* / 0.1290 - 1) & (\tau^* \geq 0.129 \text{ Pa}) \end{cases} \quad (6)$$

を得た(図-10)。これより現場の水理条件とSS濃度から E ， D が推定可能となる。なお，巻き上げ限界剪断応

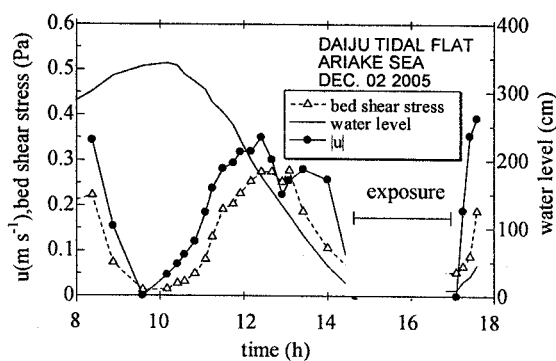


図-9 Sta. 4における推定底面剪断応力，鉛直平均水平流速の絶対値 $|u|$ の変動，有明海大授干潟，2005年12月2日。

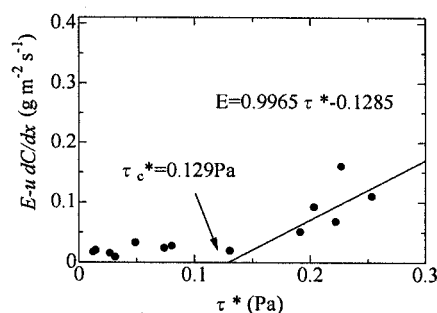


図-10 Sta. 4における底面剪断応力と再懸濁フラックスの関係，有明海大授干潟，2005年12月2日。

力 τ_c^* が存在するかどうかは解析の精度が悪いので確認できないが，今回の解析では存在するものとして解析をすすめた。なお，図-10から得られた0.129 Paは熊本港沖の^{3)0.0235 Pa}よりもかなり大きく，底質の特性が異なることが原因と考えている。

各時刻について推定された再懸濁フラックス E ，沈降フラックス D を単位水柱あたりSS現存量 M とともに示す(図-11)。満潮にあたる9時～11時5分までは $E = 0$ と推定され，流速の増大と共に再懸濁速度が増加する。 E は12:40ごろ最大になっているとみられる。 M は E に15分遅れて最大値をとった。 D はSS濃度に比例して増大すると推定されるから満潮から干出まで単調に増加する。 $E = D$ となった時刻は12時40分付近であり，塩分フロント到達直前であった。塩分フロントから岸側の低塩分水塊内では $E < D$ となっていることがわかる。すなわち，岸側の水塊において下げ潮時には再懸濁するSSより沈降するSSの量が多いことを示している。 E ， D が推定されたので，(1)式から水平移流成分 $-uhdC/dx$ を推定した。図-12に推定された $-uhdC/dx$ を水位変動による貯留成分((1)式右辺第4項 $C \partial h / \partial t$)とともに示す。塩分フロントが通過する13時以降に水平移流成分が非常に大きくなっている。図-6のRun 3に示したように，干潮時には岸側でSS濃度が高濃度になり，水平濃度勾配が大きくなったが，その影響が顕著にSta.4のSS濃度に影響していることがわかる。塩分の挙動ともほぼ一致していることから本解析から得られる移流成分はほぼ妥当な結果を示していると考えられる。図-12によると上げ潮最初

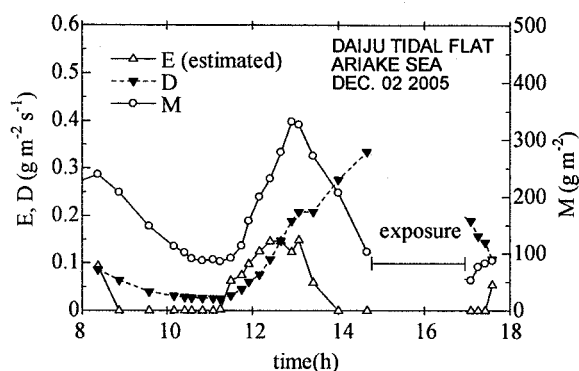


図-11 Sta. 4における推定再懸濁フラックス E 、沈降フラックス D および水柱あたりSS現存量 (M) の変動, 有明海大授干潟, 2005年12月2日.

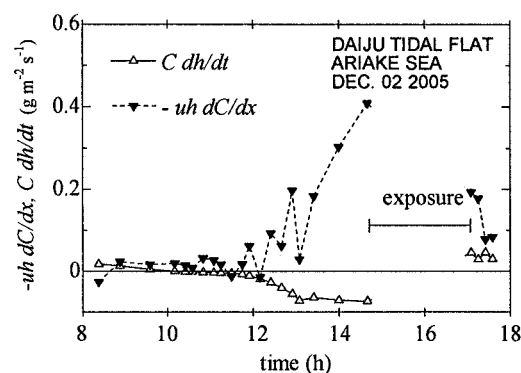


図-12 Sta. 4におけるSSの水平移流成分 ($-uh dC/dx$) と水位変動による貯留成分 ($C dh/dt$) の変動, 有明海大授干潟, 2005年12月2日.

期についても再懸濁よりも移流が卓越することが示された。水位変動による貯留成分 $C dh/dt$ は水位の変化が著しい時間帯には無視できない大きさになる。特に下げ潮時は沈降フラックスの1/4~1/5程度まで増加するため、見かけ上沈降を促進する方向にはたらく、逆に上げ潮時は見かけ上沈降を減速する方向にはたらく、この観測地点において時間帯によっては再懸濁フラックスと同程度の大きさを持っていた。この作用も再懸濁・沈降のバランスと同様に上げ潮と下げ潮で非対称になることから、干潟への懸濁物質の堆積を促していると見られる。

4. まとめ

泥質干潟における懸濁物質の挙動を明らかにするため、有明海の泥質干潟で移動船と係留船によりほぼ一潮汐の同時観測を行った。移動船による観測によって干潮時の汀線際には高濃度の懸濁物質を含んだ水塊が存在することが明らかになった。

干潟定点の係留観測において、再懸濁フラックスと沈降フラックスを推定し、水位変動による貯留成分を考慮することによって移流成分を抽出した。その結果、岸側に存在する低塩・高栄養塩濃度・高濁度の水塊が懸濁物質を伴って潮汐に伴って移流していた。この高濁度

水塊内では下げ潮時に再懸濁フラックスよりも沈降フラックスが大きく、水位変動による貯留項とともに懸濁物質の干潟への堆積を発生させる要因になっている。干潟の形成についてはこのような懸濁物質の一潮汐における非対称な挙動とともに堆積した後の底質の圧密・組織化も関係しているとみられる。今後はこの点も考慮してゆく予定である。

謝辞

河川水質データは国土交通省筑後川河川事務所、武雄河川事務所が測定したデータを使用させていただいた。ここに記して感謝申し上げます。海岸線の描画には MIRC 編日本全域海岸線データを使用した。

参考文献

- 1) 山西博幸, 荒木宏之, 古賀康之, 日村健一, 大石京子, 2005. 自動昇降型水質測定装置を用いた有明海湾奥部の干潟における懸濁物質輸送と水質変動に関する現地調査, 環境工学研究論文集, Vol. 42, pp. 297-304.
- 2) 山西博幸, 日村健一, 古賀康之, 前田葵, 大石京子, 徳永貴久, 荒木宏之, 2006. 泥質干潟域における懸濁物質の沈降特性に関する研究. 環境工学研究論文集, Vol.43, pp. 527-534.
- 3) 中川康之, 吉田秀樹, 谷川晴一, 黒田祐一, 2003. 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, Vol. 52, 441-445.
- 4) 笠置尚史, 山本浩一, 速水祐一, 大串浩一郎, 平川隆一, 有明海湾奥部における底質分布特性に関する基礎的研究, 平成17年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.1009-1010, 2006
- 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, 古賀勝喜, 有明海湾奥部における干潟-浅海域における底泥の輸送・再堆積に関する研究, 平成18年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.995-996, 2007
- 6) 環境省, 第4回自然環境保全基礎調査海域生物環境調査報告書(干潟・藻場・サンゴ礁調査), 第1巻 干潟, 1994
- 7) 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
- 8) 関根正夫, 移動床流れの水理学, 共立出版, pp57, 2005
- 9) 土木学会編, 水理公式集平成11年版, 丸善, pp156, 1999
- 10) 山本浩一・横山勝英・森下和志・高島創太郎・河野史郎・末次忠司, 白川河口域における土砂・栄養塩収支, 河川技術論文集, Vol. 11, pp.53-58, 2005
- 11) 児玉真史・松永信博・水田健太郎, 夏季の和白干潟における栄養塩収支に関する現地観測, 水工学論文集, Vol. 44, pp.1095-1100, 2000.