土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. B2-65，No.1，2009，471-475

干潟浅海域沖合における底質輸送の現地観測

Field Observation of Sediment Transport Process off Shallow Coast with Tidal Flat

中川康之[1]・石貫國郎[2]・添田　宏[3]・中村嘉邦[3]

Yasuyuki NAKAGAWA, Kuniro ISHINUKI, Hiroshi SOEDA and Yoshikuni NAKAMURA

A field observation, comprising bottom mounted instruments for near-bottom currents and suspended sediment concentrations, was carried out for 1-month at the Kumamoto port in the Ariake Bay. The measurements have captured high suspended sediment concentration event under extreme wave conditions during a passage of typhoon near the Kyushu island in the early September of 2003. The peak of suspended sediment concentration was observed during low tide period after high wind wave attacks and net suspended sediment transport through the high wave event was towards the north-east ward. The values of net transport near the bottom measured at 20 cm above the bottom were 2 - 4 times higher than those measured at 100 cm above the bottom.

1. はじめに

内湾域河口沿岸部では，河川からの流下土砂の堆積により干潟や浅瀬を含む浅海域が形成される一方で，潮汐流や波浪等の外力による底質の移動が生じる．このような底質の輸送現象は，たとえば海岸侵食や航路埋没などの沿岸域の防災や利用上の問題に関わるのみならず，水質や生物の生息環境などの環境保全を考える上でも重要な要素である．近年，水産資源の減少や水質環境の劣化への対応が迫られている有明海においても，同海域の特徴の一つである広大な干潟部と，それらを含めた沿岸部での底質の移動過程の把握は，沿岸海域の適切な利用，環境の保全や回復を検討する上で極めて重要な課題と考えられている（たとえば，環境省，2006）．

これに対し，著者らは有明海内の海域での底質移動特性の解明を目的とした流況や濁度等の連続観測を実施し，これまでは主に潮汐流による底質の巻き上げ現象を対象とした現地観測データの解析を行ってきた（中川ら，2002，2007）．本研究では，これらに加えて波浪擾乱時における干潟周辺海域での底質輸送特性の解明を目的として，有明海東岸に位置する熊本港沖合にて実施した連続観測にて捉えた高波浪時のデータ解析を行った．

2. 現地観測およびデータ解析の方法

（1）現地観測データ

現地観測は，有明海東岸に位置する熊本港沖の平均水深約7m（D.L.基準で約5.5m）の地点（図-1）において，

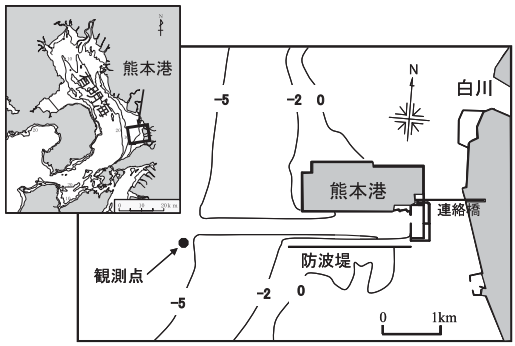

図-1　観測地点

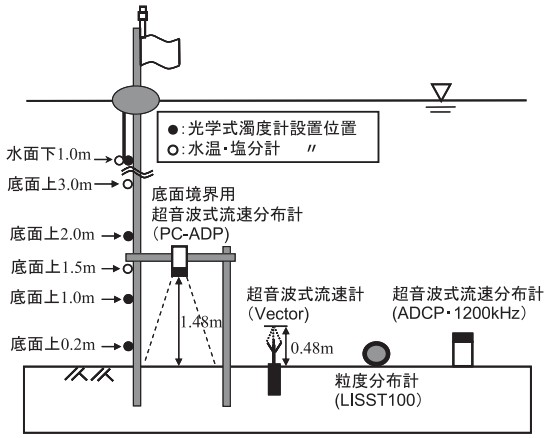

図-2　計測器設置概要図

2003年8月21日から9月18日（以下，西暦年は略記）までの約1ヶ月間にわたり，流速および濁度等の連続観測のための各種計測器を図-2に示すように設置して行った．使用機器の内容と測定方法（設置高さ，測定スケジュールなど）の詳細については，中川ら（2007）を参照されたい．波浪情報に関しては，観測点の南東約1kmの地点に設置されている波浪観測塔（国土交通省熊本港

1　正会員　　工修　（独法）港湾空港技術研究所海洋・水工部
2　国土交通省港湾局海岸防災課（前・九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所所長）
3　国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所技術開発課

湾・空港整備事務所）において計測された波浪データを用いた．

（2）流速および乱れの評価方法

流速測定においては，ADCP（RD-Instruments社製1200kHz）による流速分布測定（層厚30cmピッチ）に加え，底面境界近傍における流速分布および乱れ測定をPC-ADP（Sontek社製）およびADV（Nortek社製Vector）により行った．流速値は基本的にはバースト測定毎の平均値とするが，ADVの測定結果については式（1）に示すように，流速値の各方向成分の平均成分（$\overline{u},\overline{v},\overline{w}$）以外に，FFTを用いたバンドパスフィルターにより周期2秒以上の波動成分（$\tilde{u},\tilde{v},\tilde{w}$）とそれ以下の乱れ成分（$u',v',w'$）に分離し，後述する波動軌道流速や乱れ強度および懸濁物のReynolds fluxの算定に用いた．

$$(u,v,w)=(\overline{u},\overline{v},\overline{w})+(\tilde{u},\tilde{v},\tilde{w})+(u',v',w') \cdots\cdots (1)$$

底面付近における波浪運動の影響による流速変動の程度をここでは代表波動流速，u_{br}（Traykovskiら・2007）として次式により評価した．

$$u_{br}=u_{bsig}\Big/\sqrt{2} \cdots\cdots (2)$$

$$u_{bsig}=2\sqrt{(\tilde{u}_{rms}{}^2+\tilde{v}_{rms}{}^2)} \cdots\cdots (3)$$

ここに，rmsは波動成分の自乗平均を意味する．さらに，乱れ強度は次式により評価した．

$$TKE=\frac{1}{2}\left(\overline{u}'^2+\overline{v}'^2+\overline{w}'^2\right) \cdots\cdots (4)$$

（3）懸濁物濃度（SSC）およびフラックスの評価方法

光学式濁度計による測定結果は，観測地点で採取された堆積物を用いた濁水試料による測器毎の検定結果を基に濁度計出力をSS濃度（単位：mg l^{-1}）に換算した．鉛直方向に4点設置された光学式濁度計による測定は2分間のバースト測定（サンプリング速度0.5Hz）を10分間隔で行っており，データ解析にはこれらのバースト毎の平均値を用いた．これらのSS濃度測定と同じ測定高さで，同時刻に測定されたPC-ADPによる流速測定結果を用いて，水平方向のSSフラックス（$F_{x,y}(z)$）を算定した．一方，ADV計測により得られる反射強度のデータを用いたSS濃度の推定が実用化されつつある（たとえば，Fugate・Friedrichs, 2002；川西・稲田，2006）．本観測で使用したADVを有明海内における他の現地観測（中川・桑江，2008）で使用した際に，ADV計測と同時に測定されたSS濃度の測定値と反射強度との関係（図-3）を得ており，これにより求めた両者の相関関係式からここではSS濃度を推定した．さらに，流速値と同様にSS濃度の乱れ成分（c'）を求めることにより，鉛直方向のSSフラックス（F_z）を次式で表されるReynolds fluxとして求めた．

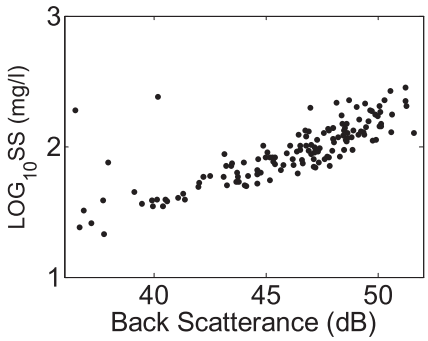

図-3　ADV反射強度とSS濃度測定値との関係

$$F_z=\overline{c'w'} \cdots\cdots (5)$$

3. 観測結果と考察

（1）海象条件

本論文で解析対象とする高波浪時（48時間）における有義波高，同周期，潮位およびADVにより測定された平均流速と波動軌道流速，それぞれの時系列変動を図-4に示す．当該期間においては，台風0314号が九州西側の東シナ海を北上し，熊本地方では9/12に瞬間最大風速が20 m/sを越える南西からの強風を観測している（気象庁）．これに伴い熊本港周辺海域では，図-4に示すように有義波高が70cm，同周期が4sを越えている．同海域では有義波高75cm以上の波浪の出現確率は3％未満（日本気象協会・1986）であり，当海域としては比較的希な高波浪時の観測データを取得したことになる．

一方，大潮期のため潮位差は4m以上となっており，本観測地点で通常の大潮期にみられる20cm/s程度の底層付近での流れ（中川ら，2007）に加え，本観測期間においては，波高がピークを迎えるのとほぼ同時期（9/13 6:00）に，40cm/sを越える速い流れが発生している．また，底面付近への波浪の影響の程度を示す波動軌道流速については，潮位変動による水深変化の効果により，波浪発達後の干潮時（9/13 4:00頃）付近で最大となっている．なお同海域に流入する白川，緑川の流量は，台風通過前から図-4の期間において20～50m^3/s程度と小さく，河川出水に伴う海域への土砂供給の影響は小さかったものと考えられる．

（2）SS濃度の変動と作用外力との関係

波高や流れの時系列変化を示した図-4と同一期間における，底面付近でのSS濃度の変動とADV計測による乱

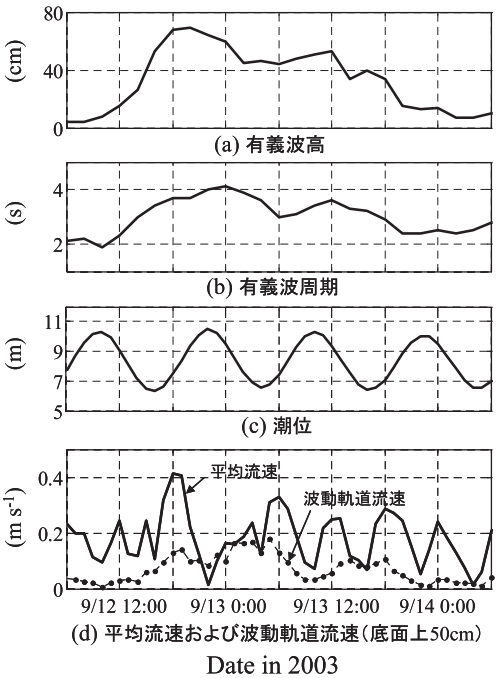

図-4　波高，周期，潮位および流速の時系列変化

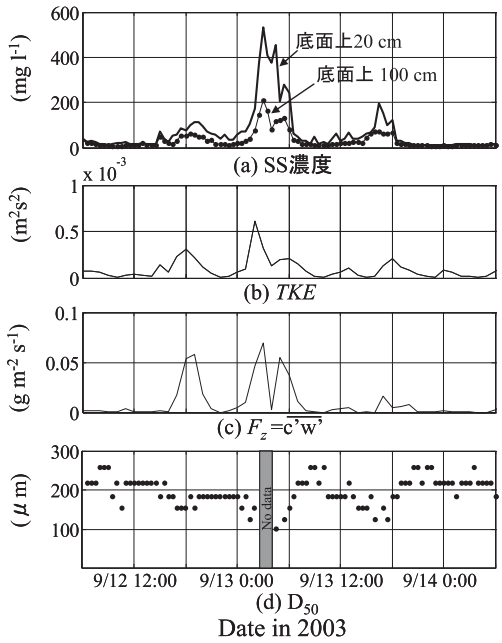

図-5　底面付近のSS濃度，乱れ強度，SS鉛直フラックスおよび懸濁物中央粒径の時系列変化

れ強度およびSS鉛直フラックスの変動を図-5に示す．底面付近のSS濃度は乱れ強度がピークとなる9/13 4:00頃の干潮時に最大となり，特に底面上20cmにおいては，500mg/lを超える高濃度な状況となっている．波浪が静穏な場合には，大潮期の潮汐流の影響による底質の巻き上げが生じるものの，底層付近のSS濃度のピーク値は高々100mg/l程度である（中川ら，2007）．ここで示すSS濃度のピークの発生時期は，波高増大時にみられた流速40cm/s以上の流れの発生に対応するものではなく，海底での波浪の影響が増大する干潮時に発生している．ただし，観測地点その場での底質の巻き上がりの程度を示す鉛直フラックス（図-5（c））をみると，必ずしもSS濃度増大時により大きなピークを持つものではないことから，SS濃度の増大は周辺浅海域からの浮遊懸濁物の移流の影響も受けたものであることが推察される．すなわち，SS濃度がピークとなる時間帯は下げ潮から干潮にいたる時間帯に相当していることから，観測点よりも岸側に位置する干潟浅海域において波浪の影響により巻き上げられた底質が，下げ潮時に沖合海域に移流され本観測点でのSS濃度の増大に関与したものと考えられる．

（3）SS濃度鉛直分布と粒径分布の変化

SS濃度のピーク時とその前後の時間帯における，底面上2m以内でのSS濃度の鉛直分布の変化を図-6に示す．同図における縦軸は，それぞれの観測時刻における水深により無次元化した相対水深で表されている．また，同図には水平方向に濃度が一様で，かつ平衡状態を仮定した場合のSS濃度の鉛直分布を式（5）（Whitehouseら，2000）により表現して，鉛直分布関数を参考までに図示している．

$$C(z)/C_b = \left(1 + B(z/h)\right)^{-1} \quad \cdots\cdots (6)$$

ここに，C_b：底面直上のSS濃度，h：水深，である．また，式中の係数Bは鉛直拡散係数および懸濁物の沈降速度の関数であるが，ここでは各観測値の結果をうまく再現できるB値を用いて図示しており，（a）9/13 1:00および（c）同5:00に対してはB=6，一方SS濃度が最大となる（b）同3:00のデータに対しては，B=12により近似されている．より大きなBの値で近似可能になるという

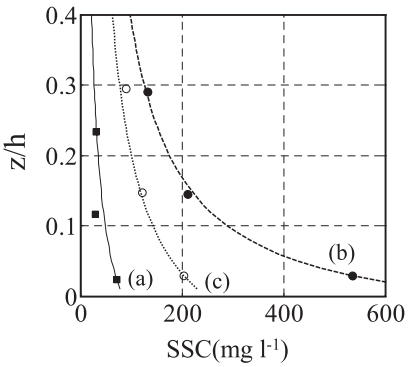

図-6　底面付近におけるSS濃度の鉛直分布の時間変化（（a）9/13 1:00，（b）同3:00，（c）同5:00の結果．実線および破線は式(6)による近似曲線を示す）

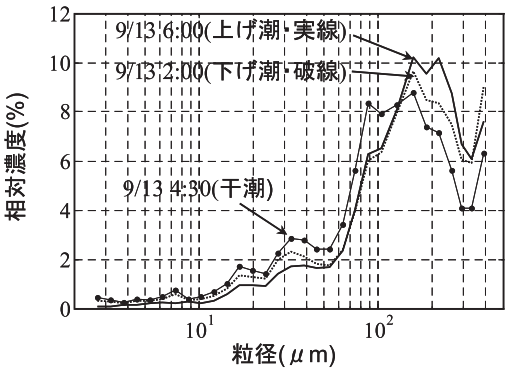

図-7　懸濁粒子粒径分布の変化

ことは，浮遊懸濁粒子の沈降速度の増大が要因の一つとして考えられるものの，沈降速度と密接な関係のある懸濁物の粒径分布には大きな変化はみられず（図-7），SS上昇時にはむしろ懸濁物粒径はわずかではあるが細粒化（沈降速度の減少に対応）する傾向にある（図-5（d））．したがって，水平方向の一様性を仮定して得られる平衡濃度の関係式では，SS濃度の鉛直分布特性を十分に説明できるわけではなく，上述したような水平方向の高濁度水塊の移流の影響や，あるいは高濁度水塊形成時の鉛直混合特性の変化（Winterwerp,2006）なども考慮して，SS濃度の鉛直分布の時間的な変動を評価することが必要と考えられ，この点については今後の検討課題としたい．

（4）SSフラックスおよび積算値

高波浪期における浮遊懸濁物の輸送特性について，SSフラックスベクトルおよび輸送量の積算値を示したものが図-8である．同図では底面上100cmおよび20cmにおける結果をそれぞれ示してあり，高度差がわずか1 m以内の範囲においても，より海底面に近い方が輸送量として2～4倍大きな結果となっており，底質輸送量の定量的な評価における底面近傍での鉛直構造の把握の重要性を示す結果となっている．

SS濃度の顕著な上昇がみられた9/13 2:00～5:00の間の底面上20cmでの輸送傾向に注目すると，下げ潮時には北西方向に懸濁物は輸送され，上げ潮時には北東方向への輸送に転じている．すなわち，岸沖方向には上げ潮・下げ潮流による輸送方向の反転がみられるものの，沿岸方向には継続的に北向きの輸送が生じており，高波浪時期を通じた正味のSS輸送が北向きに生じていたことがわかる．本観測点における，潮汐流の一般的な傾向としては，下げ潮時に南西方向，上げ潮時に北東方向の流れが

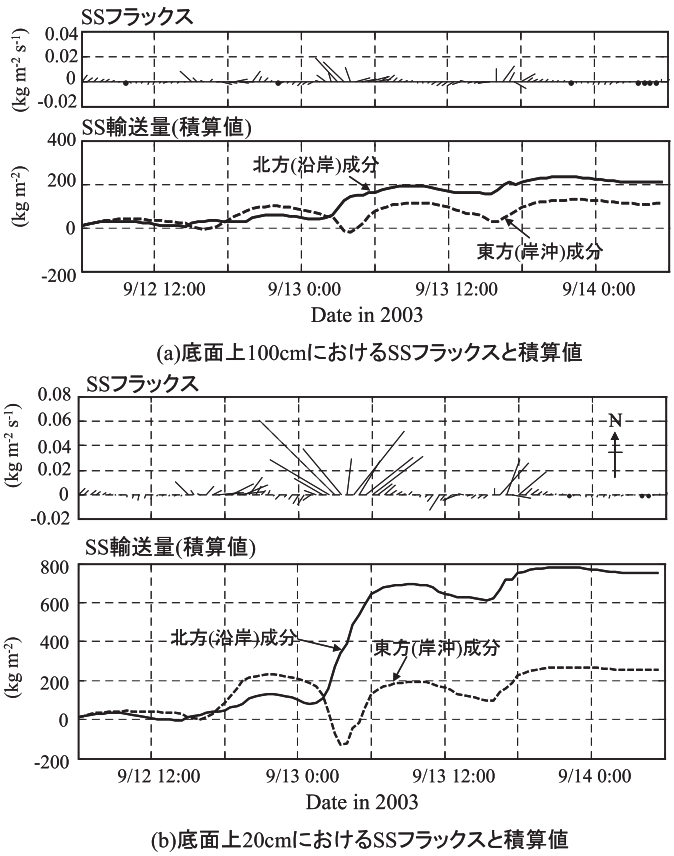

図-8　高波浪時におけるSS フラックスと輸送量の方向別積算値

卓越することを考慮すると，上記のSS濃度増大時においては，下げ潮時における流れが南方でなく北方に偏向していたことが特徴的である．

このような流れの駆動力として，ADCPのデータも含めた流速の鉛直プロファイルからは，上述した流れの向きは全層にわたりほぼ一様であることから，底層近傍での高濁度水塊の海底斜面に沿った密度流（重力流）的な振る舞いとは考え難い．一方，台風通過に伴う風の影響は9/13 2:00の時点では平均風速2m/s（気象庁アメダスデータ・三角）とすでに収まりつつあり，吹送流の影響はほとんどないものと考えられるものの，うねり性の波浪の来襲が生じていることから，海浜流の影響により通常の潮汐流とは異なる流れが励起された可能性が高い．なお，本観測点のすぐ北側には,浚渫により増深された熊本港航路が位置することから，このような底質の輸送特性は，今後の航路水深維持の観点からも注意すべき点である．

4. おわりに

有明海熊本港沖で生じた高波浪時の底質輸送特性の把握を目的として，定点連続観測で得られた流況・濁度等の現地観測データの解析を行った．干潟沖合に設けた観測点（平均水深約7m）では，底層近傍のSS濃度は必ずしも波高最大時に生じるわけではなく，有明海の特徴である潮位変動の影響を受けて，高波浪発生後の干潮前後に顕著なSS濃度の増大がみられた．観測点周辺での底質の巻き上げに加え，干潟部を含む岸側浅海域で巻き上げられた底質の移流によるSS濃度の上昇が生じたものと考えられ，特に海底面に近づくほどより大きな輸送が生じていることが確認された．また，時化期間を通じた正味のSS輸送量は，岸向きに生じた岸沖方向の輸送よりも沿岸方向（北向き）に卓越していたことが確認された．

一方，底質の主体が泥分である場合には，巻き上げられた泥粒子が沈降する際に，底面直上に形成される流動泥の挙動が，底質移動量の予測に際して重要になる（たとえばTraykovskiら，2007）．そのような，流動泥の状況はここでの観測では捉え切れていないことから，今後は流動泥挙動の解明に向けた検討も行っていく予定である．

謝辞：現地観測の実施ならびに波浪観測データの提供など，調査の遂行にあたり国土交通省九州地方整備局熊本港湾・空港整備事務所の協力を得たことを付記し，関係者各位に謝意を表する次第である．

参　考　文　献

川西　澄・稲田　景（2006）：超音波流速計による浮遊粒子の粒径を考慮した浮遊砂濃度の測定法，海岸工学論文集，第53巻，pp. 1401-1405.

環境省（2006）；有明海・八代海総合調査評価委員会報告書，80p.

中川康之・今林章二・末次広児（2002）：有明海の底泥輸送現象に関する現地データの解析，海岸工学論文集，第49巻，pp. 566-570.

中川康之・桑江朝比呂（2008）：底泥の巻き上げフラックスと乱れ強度との関係～有明海湾奥部での観測例～，2008年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp.121.

中川康之・吉田秀樹・田中克己・大波多昌志（2007）：底泥の巻き上げと底面境界層内の乱れの現地観測，海岸工学論文集，第54巻，pp.446-450.

日本気象協会（1986）：気象海象要覧・九州西岸海域，港湾気象海象シリーズ，251p.

Fugate, D. C. and C. T. Friedrichs (2002) : Determining concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST, Continental Shelf Research, Vol.22, pp.1867-1886.

Traykovski, P., P. L. Wiberg, and W. R.Geyer (2007): Observations and modeling of wave-supported sediment gravity flows on the Po prodelta and comparison to prior observations from the Eel shelf, Continental Shelf Research, Vol.27, pp.375-399.

Whitehouse, R., R. Soulsby,. W. Roberts and H. Mitchener (2000): Dynamics of Estuarine Mud, Thomas Telford Publications, 210 p.

Winterwerp, J. C. (2006): Stratification effects by fine suspended sediment at low, medium, and very high concentrations, Journal of Geophysical Research, Vol.111, C05012, doi:10.1029/2005 JC00319.