干潟浅海域周辺での底質輸送に及ぼす 外力因子の評価

高嶋 紀子¹・中川 康之²・松尾 武³・壹岐 幸史⁴・松本 英雄⁵

¹非会員 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域沿岸土砂管理研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3丁目1-1)

E-mail:takashima-n889ko@pari.go.jp

²正会員 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域沿岸土砂管理研究チーム (同上)

E-mail:nakagawa@pari.go.jp

³非会員 国土交通省九州地方整備局志布志港湾事務所 (〒899-7191 志布志市志布志町帖6617-182)
(前 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 係長)

⁴正会員 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 課長 (〒750-0025 下関市竹崎町4丁目6-1)

⁵非会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3丁目1-1)
(前 九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所 所長)

内湾河口部干潟浅海域周辺での底質輸送特性の解明を目的として、熊本港周辺の4地点で濁度・流況等に関する連続観測を約2週間実施し、潮汐流や波浪(風波)、航跡波による底質の巻き上げと輸送への影響について検討した。現地観測から得られた底面近傍での平均流速や波浪軌道流速振幅などの外力と、底層浮遊懸濁物(SS)濃度との対応関係を調べることににより、各外力因子による底質輸送への寄与を定量的に把握することを試みた。その結果、熊本港南側の観測点では、主に上げ潮流によるSS濃度の上昇に伴う底質の輸送が、観測全期間を通じて生じた正味の輸送量において支配的となる一方で、北側の観測点では潮汐流による輸送と同程度に、波浪(風波)や航跡波によるSS濃度の上昇が輸送量に影響することを示した。

Key Words : tidal flat, sediment transport, tidal currents, wind waves, waves generated by a ferry boat

1. はじめに

内湾河口部の干潟浅海域周辺では、河川からの土砂供給のほか、潮汐流や波浪(風波)などの外力によって底質の移動が生じている。このような干潟域周辺での底質の輸送現象の理解は、干潟・浅場における生物の生息環境保全の観点から、一方で浅海域の浚渫により整備される航路泊地の水深維持という利用の観点からも重要である。しかし、上記のような自然外力の多様性、現象の非定常性のほか、舟運利用(航跡波)による干潟や河岸部の地形変化など、自然外力以外の要素も河口域周辺の地形変化現象を複雑なものとしている¹⁾²⁾。

本研究で対象とする有明海東岸の熊本港周辺海域では、白川河口域の潮間帯干潟における1潮汐間の底質輸送フラックスが河口向きに卓越することが潮汐の位相平均による解析から明らかとされ³⁾、干潟沖合では潮汐外力や高波浪により輸送フラックスが沿岸方向に卓越することが過去の研究により示されている⁴⁾⁵⁾。また、出水によ

る地形変化について、白川河口の深浅測量データを用いて地形変化量を算定し、さらに河川流量データから推定した河川からの流出土砂量との比較を行うことで定量的に評価した研究もある⁶⁾⁷⁾。

本研究では、対象海域内での地形変化に関与すると考えられる、干潟域とその沖合浅海域との相互間での底質輸送の特性を明らかにするため、干潟縁辺部の潮下帯において実施した連続観測データの解析に基づき、潮汐流や波浪(風波)のほか定期高速フェリーによる航跡波等の外力が底層での底質の巻き上げと底質輸送に与える影響について検討した。

2. 観測概要

(1) 観測海域

本研究で解析対象とした観測データは、図-1に示す熊本港周辺の干潟縁辺部潮下帯のStn.1とStn.2、および干潟沖合のStn.3とStn.4の合計4地点において、2013年8月10日

図-1 観測対象海域（カッコ内の数字は地盤高，赤の一点鎖線は熊本一島原間を連日就航する定期高速フェリー船の航行ルートを示す）

図-2 採泥分析結果

から同25日（以下，西暦年は略記）までの約2週間にわたり測定されたものである。次節で示す観測項目のほか，沖合の波浪情報として，観測点Stn.1から西方約1 kmの地点に設置されている波浪観測塔（国土交通省熊本港湾・空港整備事務所）で計測された2時間おきの波浪データを，また，風況については気象庁熊本気象台のデータを参照した。なお，各観測地点の地盤高はレッド測深と波浪観測塔で得られた測深時の実測潮位から算出した。

観測地点の底質特性を把握するため，Stn.1およびStn.2の2地点でコアサンプルを採取し，粒度組成，含水比，強熱減量を測定した。図-2(a)に含泥率（粒径75 μ m以下のシルト粘土分の含有率）を，図-2(b)に含水比の鉛直分布をそれぞれ示す。まず，Stn.1の含泥率をみると，表層では3 %程度と低いものの，泥深5 cm付近で100 %近くまで高くなり鉛直方向に変化がみられる。一方，Stn.2ではStn.1に対し深さ方向の変化は比較的小さく，含泥率は全層において70 %以上となっている。また，含水比に関しては，Stn.1では表層から50 %程度で推移し鉛直方向の変化は小さく，Stn.2では表層での150 %から深さ方向に低下し泥深20 cm付近で再び含水比の上昇がみられる。すなわち，熊本港を挟む南側（Stn.1）では砂分主体の底質が堆積し，北側（Stn.2）では比較的含水比が高い泥分主体の底質が堆積している特徴が示された。

図-3 Stn.1における計測機器の設置概要図

表-1 各観測地点における計測機器の測定条件

測定項目	使用機器	観測地点	測定高さ	記録間隔
流速	超音波式3次元流速計(Nortek社製Vector)	Stn.1 Stn.2	B+0.1 m	30分おきに16 Hzで約4分間
	超音波式多層流速計(RDI社製ADCP1200kHz)	Stn.1	B+1.5 m-0 m (5 cm間隔)	1分おきに1データ
波高	メモリー式波高計(JFEアドバンテック社製Compact-WH)	Stn.2	B+0.15 m	60分おきに4 Hzで5分間
濁度	光学式濁度計(JFEアドバンテック社製 Compact-CLW, 又は ATU75W)	Stn.1	水面下0.5 m	10分おきに1秒間隔で20秒
		Stn.2	B+0.1 m	
		Stn.3		
		Stn.4		
粒度	懸濁物粒度分布計(SEQUOIA社製LISST-100X)	Stn.1 Stn.2	B+0.1 m	30分おきに1秒間隔で30秒

(2) 観測内容

観測点Stn.1, Stn.2では，流速計および濁度計等の各種計測機器を海底設置しており，図-3にStn.1での設置概要図を示す。流速測定は，底面境界近傍における流速分布を超音波式3次元流速計ADV(Nortek社製Vector)により行った。観測で得られた流速値は約4分間のバースト測定ごとに各方向成分の平均値($\bar{u}, \bar{v}$)を算出し，SS輸送量の算定に用いたほか，波浪成分を含む流速値の標準偏差により代表軌道流速振幅を求めた。

濁度計の計測結果については，それぞれの観測地点で採取した堆積物を用いた濁水試料による検定結果を基に，出力をSS濃度（単位：mg/l）に換算した。なお，各観測地点における測定項目，使用機器，測定高さと記録間隔等の測定条件を表-1に示す。

3. 観測結果と考察

(1) 概況

観測期間中の気象・海象データと，連続観測に基づく

図-4 観測期間中の風速，有義波高，潮位，絶対流速およびSS濃度の時系列変化（潮位は沖合の波浪観測塔における観測基準面TP-2.30mからの水面変動とし，●は小潮，○は大潮，赤枠は高波浪イベントを示す）

Stn.1およびStn.2での底面付近の流速（測定高さ：底面上10cm），底層のSS濃度（測定高さ：底面上10cm）の時系列変化を図-4に示す。観測期間の特徴として，一日のうち午後の時間帯に風速が速くなり，沖合の有義波高も高くなる傾向がみられる。さらに，観測期間後半の8月24日午後には，停滞前線の影響で最大風速7m/s以上，有義波高30cm以上の観測期間中では最も高波浪となる擾乱があり，底層のSS濃度も最大値を記録した。

また，底面付近の流速については，基本的には潮汐変動に対応した変化がみられ，大潮期（8月20日から23日，潮位差422cm-460cm）ではいずれの地点においても最大で30cm/sを超え，上げ潮時には下げ潮時と比較して相対的に速い流れが発生している。小潮期（8月14日から16日，潮位差134cm-179cm）では，流速は小さくなりStn.2においては最大でも10cm/s以下となっている。

底面付近のSS濃度については，上述の高波浪イベント時の上昇以外にも，大潮期に100mg/l程度まで上昇し，また潮流速が減少する小潮期においても，SS濃度が50mg/lを超える程度にまで上昇する特徴がある。

このようなSS濃度変動の特徴について，大潮期および小潮期における波浪や流速の時系列変化と比較してみたところ（図-5(a),(b)），風速・有義波高や流速の変動周期よりも短い間隔の一時的なSS濃度の上昇が生じている。同図には熊本港と島原外港の間を毎日就航する定期カーフェリーのうち，特に高速型のフェリー（船

図-5 大潮・高波浪イベント期と小潮期の風速，有義波高，絶対流速およびSS濃度の時系列変化（下向きの矢印は定期高速フェリー入港時刻，▼は航跡波をとらえた流速波形の計測時刻，赤丸は大潮期上げ潮の流速増大時に一致したSS濃度の上昇を示す）

図-6 航跡波をとらえた流速時系列データ（東西方向成分）

型：超細長双胴船，全長：72.09m，全幅：12.90m，所要時間：30分）の入港時刻を下向きの青矢印で示しており，上述のSS濃度の上昇時期との一致がみられる．定期高速フェリーは入港時間によって入港速度が異なるためSS濃度の上昇値に差異はみられるものの，航跡波によるSS濃度上昇への影響を唆するものとなっている．なお，もう一つのタイプのカーフェリー（所要時間：60分）の入港時間での航跡波の影響は小さいことが確認されている．また，定期高速フェリーの就航時間帯以外には，図-5(a)に赤丸で示すように，大潮期の上げ潮時にSS濃度の上昇が明瞭となる場合もみられる．

ここで，航跡波による海底面への影響をみるため，定期高速フェリーの入港時刻付近において計測された（図-5(b)中，▼），超音波式3次元流速計の測定結果を図-6に示す．同図において周期7秒程度の流速波形がみられ，当該海域で発生する風波の周期3-4秒よりも長く，軌道流速振幅も60 cm/s程度にまで達していることがわかる．

そこで，潮流流および波浪（風波）に加えて，航跡波も含めたそれぞれの要因によるSS濃度の上昇および水平輸送量への影響について評価することとした．

(2) SS濃度の変動と作用外力との関係

潮流流の影響を半潮汐間における潮位差 $\Delta\eta$ により指標化し，対応する半潮汐間のSS濃度の平均値と比較した（図-7）．同図では航跡波の影響をみるため，潮位差を求めた半潮汐の時間帯が，定期高速フェリーの就航時間（午前9時から19時または21時）にかかる場合を○（黒）または○（赤）で表し，それ以外を●で示した．さらに，前章で示したように日中において波高が増大する場合が多いことから，定期高速フェリーの就航時間帯にかかるデータについては，各半潮汐間に観測された有義波高の最大値が20 cmより小さい場合を○（黒），20 cm以上の場合を○（赤）として示した．その結果，図-7に矢印で示す高波浪イベント時にSS濃度が極だつて高い値となる以外にも，潮流流の影響度（ $\Delta\eta$ ）および風波の大小に関わらず，定期高速フェリーの就航時間帯には，就航時間帯外と比較して相対的にSS濃度が高くなっていることがわかる．以下では，潮流流，波浪（風波），航跡波の因子ごとによる影響について評価を試みる．

a) 潮流流によるSS濃度の変動

まず，潮流流のみによるSS濃度上昇への影響をみるため，波浪（風波）と航跡波の影響が小さい期間を対象として流速とSS濃度との関係を調べた．航跡波の影響の有無は，定期高速フェリーの就航時間帯および時間帯外により評価できるが，これらの時間帯における波浪観測結果（図-8(a),(b)）をみると，有義波高20 cm以上の出現頻度は就航時間帯に多い一方，就航時間帯外では1回しかなく，就航時間帯外は航跡波および波浪（風波）の

図-7 Stn.1における半潮汐間の潮位差（ $\Delta\eta$ ）とSS濃度の平均値との関係（矢印は高波浪イベント，○はHsig<20cmかつフェリー就航有り，○はHsig≥20cmかつフェリー就航有り，●はHsig<20cmかつフェリー就航無しを示す）

図-8 沖波有義波高の出現頻度

図-9 定期高速フェリー就航時間帯と就航時間帯外での絶対流速とSS濃度の関係（+は就航時間帯，●は就航時間帯外を示し，近似式は就航時間帯外を対象としている）

いずれの影響も小さいことがわかる．（なお，波浪観測は毎正時前後20分のみによるもので，必ずしも航跡波の影響が反映されているわけではなく，主に沖合からの風波による波浪を評価しているものと考えられる．）

潮流流のみの影響が卓越する時間帯（定期高速フェリー就航時間帯外）での潮流流速とSS濃度の関係を図-9に●で示す．Stn.1, Stn.2ともに，流速増大に伴うSS濃度の上昇が顕著にみられ，流速0~15 cm/sまではSS濃度が小さく，流速が15 cm/sを超えると流速の増大に応じたSS濃度の上昇がみられる．底面付近の流速とSS濃度の関係については，有明海湾奥部（水深-6.6 m）でも流速が20 cm/sを超える場合に，大きなSS濃度の上昇が生じること

が確認されている⁹⁾。流速とSS濃度との対応関係について、ここでは次のように定式化を行った。まず流速0~15 cm/sの範囲では、流速の増大に伴うSS濃度の上昇は小さいため一定値により表し、流速が15 cm/sを超える範囲では指数関数により近似した(図-9中、赤線)。なお同図には、比較のため定期高速フェリー就航時間帯(図-9中、+)も示してあるが、流速0~15 cm/s程度の潮汐流による影響が小さい場合においても、波浪(風波)や航跡波によるSS濃度の上昇がみられる。

b) 波浪(風波)によるSS濃度の変動

つぎに、波浪(風波)によるSS濃度上昇への影響を抽出するため、以下の整理を行った。まず、潮汐流へのSS濃度変動の依存性がみられなかった流速15 cm/s以下のデータのみを対象とし、有義波高の増大する就航時間帯のデータのうち、航跡波の影響によると判断されるSS濃度の上昇ピーク時とその1時間後までのデータを取り除いた。これにより解析対象となった時刻のデータについて、Stn.1およびStn.2における底面軌道流速振幅とSS濃度との関係を示したものが図-10である。

図に●で示す高波浪イベントにおいて、Stn.1では流速振幅が10 cm/s程度、Stn.2ではそれ以上の値となり、SS濃度が大きく上昇した。同図中には、これらの関係を指数関数で近似した結果を示しているが、特にStn.2においては潮汐流との対応関係(図-9(b))と同様に、Stn.1と比べて決定係数が小さく、データのばらつきがみられた。

c) 外力因子別の底質輸送への寄与の推定

前節までの検討結果を基に、潮汐流とそれ以外(波浪(風波)、航跡波)の各因子によるSS濃度の変動と水平輸送量への影響度について検討した。図-9において求めた関係式を用いて、潮汐流速の実測値を基にSS濃度の時系列変化を推定し、観測結果と比較したものが図-11(a)、図-12(a)である。これらによると、Stn.1、Stn.2ともに潮汐外力のみによる推定値は、図-5(a)に赤丸で示したような流速増大によるSS濃度の上昇がみられ、流速とSS濃度の対応関係から求めた関係式が、観測値のSS濃度の変化傾向を概ね推定できていることがわかる。

さらに、上記のSS濃度推定結果に南北・東西各方向成分の平均流速($\bar{u}, \bar{v}$)を乗じて、潮汐流のみの影響によるSS輸送量を算出し、その積算値を推定した(図-11(b)、図-12(b))。なお、波浪(風波)成分のみのSS変動および輸送量の同様な推定は、図-10の結果のとおりの誤差が大きくなるため、潮汐流のみの推定とした。このため、波浪(風波)および航跡波によるSS輸送量は、観測値のSS輸送量から潮汐外力のみのSS輸送量(推定値)を差し引いた残差成分として評価した。

SS輸送量の観測結果に対する要因別の寄与をみると、Stn.1では期間全体を通じたSS輸送の卓越方向である東向きの輸送(図-11(b)中、青線)に対して、潮汐流による

図-10 波浪(風波)による底面軌道流速振幅とSS濃度の関係(●は高波浪イベントを示す)

図-11 Stn.1におけるSS濃度およびSS輸送量(方向別積算値)の時系列変化の推定

図-12 Stn.2におけるSS濃度およびSS輸送量(方向別積算値)の時系列変化の推定

ものが91%，波浪(風波)および航跡波によるものが9%であった。波浪(風波)や航跡波によるSS濃度の上昇はみられるものの水平輸送への寄与は小さく、大潮期の上げ潮時に巻き上げられるSSの上昇とその水平輸送が主に底質輸送量を支配していることが明らかとなった。

一方、Stn.2では、高波浪イベント時のSS濃度の上昇が期間全体の底質輸送量に大きく影響するため、イベント

前を“期間Ⅰ“, イベント期間を“期間Ⅱ“, 観測期間全体を“期間Ⅲ“として、各期間での要因別の寄与をみた。期間全体を通じたSS輸送の卓越方向である北向きの輸送(図-12(b)中、赤線)に対して、潮汐流によるものが45%, 6%, 34%(期間Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ), 波浪(風波)および航跡波によるものが55%, 94%, 66%となり、潮汐流による水平輸送と同程度に波浪(風波)や航跡波によるSS濃度の上昇が底質輸送量に影響を及ぼすことが示唆された。しかしながら、Stn.2では流速とSS濃度の対応関係から求めた潮汐外力のみによるSS濃度の推定式(図-9(b))の決定係数は小さく、推定誤差が生じていると考えられる。両地点間では底質特性(底質粒径の違いによる粒子沈降速度の違い)の差異があるほか、Stn.2では上げ潮・下げ潮に対応した潮汐流(絶対流速)の変動がStn.1ほど明瞭な周期性を示しておらず、流れの場が複雑となっている(図-5)。また、Stn.2はStn.1よりも水深が浅く、同じ沖波の条件であっても波浪による底面軌道流速振幅が大きくなるなど(図-10)、外力条件の違いが両地点の間でみられる。これらが観測地点間での外力とSS濃度の対応関係の違いに関与していると考えられるが、その詳細な検討については今後の課題としたい。

4. おわりに

干潟縁辺部潮下帯における底面境界近傍での流速および濁度に関する現地観測データの解析を通じて、潮汐流や波浪(風波)、航跡波による底層での底質の巻き上げと輸送への影響について検討した。観測データの時系列変化では、高波浪イベント時にSS濃度が最大値を記録し、上げ潮による流速増大時や定期高速フェリーの入港時刻に対応するSS濃度の上昇がみられた。また、外力因子別にSS濃度およびSS輸送量の時系列変化を推定し、水平輸送への寄与を定量的に把握したところ、南側観測点では主に大潮期での上げ潮時のSS濃度の上昇が底質

輸送量に影響し、北側観測点では潮汐流による水平輸送と同程度に、波浪(風波)や航跡波によるSS濃度の上昇が底質輸送量に影響を及ぼすことが示唆された。

謝辞: 現地調査の実施に関して、国土交通省九州地方整備局熊本港湾・空港整備事務所の関係者諸氏に甚大なるご協力を頂いた。また、データ解析の一部においてはインターンシップ研修生の村田充彦君(研修当時・豊橋技科大学)に協力を得たことを付記する。

参考文献

- 1) Verney, R., Deloffre, J., Brun-Cottan, J.-C., and Lafite, R.: The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats: Impact of boat traffic and wind., *Continental Shelf Research*, Vol.27, No.5, pp.594-612, 2007.
- 2) 山西博幸, 東 修, 楠田哲也, 渡辺亮一: 波による傾斜底泥面の洗掘に関する研究, 土木学会論文集, No. 607, II-45, pp.55-67, 1998.
- 3) 山田文彦, 坂西由弘, 山口龍太, 蒲原さやか, 穴井広和, 小林信久, 玉置昭夫, 多田彰秀: 潮汐位相平均を用いた潮間帯上の底質輸送フラックスの時空間変動特性, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.626-630, 2007.
- 4) 中川康之, 吉田秀樹, 田中克己, 大波多昌志: 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, 2007.
- 5) 中川康之, 石貫國郎, 添田 宏, 中村嘉邦: 干潟浅海域沖合における底質輸送の現地観測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 65, No.1, pp.471-475, 2009.
- 6) 栗山善昭, 橋本考治: 熊本県白川河口干潟における土砂収支, 港湾空港技術研究所資料, No.1074, No.2, pp.1-16, 2004.
- 7) Yamada, F., Kobayashi, N., Shirakawa, Y., Watabe, Y., Sassa, S., and Tamaki, A.: Effects of Tide and River Discharge on Mud Transport on Intertidal Flat., *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.138, No.2, pp.172-180, 2012.
- 8) 中川康之, 今林章二, 末次広児: 有明海の底質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, 2002.

(2015.3.18 受付)

EFFECT OF CURRENT AND WAVE FORCES ON SEDIMENT TRANSPORT PROCESSES AT SALLOW COAST WATER AROUND TIDAL FLAT

Noriko TAKASHIMA, Yasuyuki NAKAGAWA, Takeshi MATSUO, Yukifumi IKKI and Hideo MATSUMOTO

Field observation was carried out for about 2 weeks in the summer of 2013 for the measurement of near-bottom currents and suspended sediment concentrations at sallow coast water around tidal flat around the Kumamoto Port in the Ariake Bay. The measurements have captured high suspended sediment concentration by the tidal currents, wind waves and waves generated by a ferry boat. This study examined the effect of these forces on sediment resuspension and transport processes. The analysis shows contributions of the forcing factors on the total suspended sediment load during the monitoring period, indicating the net transport towards the east ward at Stn.1(Southern side of the port) is mainly due to flooding tide, and the transport towards the north-east ward at Stn.2(Northern side of the port) is almost evenly by the flooding tide and waves due to wind and ferry boat.