# 有明海湾奥西部海域における懸濁物輸送に関する現地観測 Field Observation on Suspended Sediment Transport Process off Tidal Flat in Upper Ariake Bay

中川康之<sup>1</sup>·桑江朝比吕<sup>2</sup>

## Yasuyuki NAKAGAWA and Tomohiro KUWAE

A field measurement was carried out to elucidate fine sediment transport processes off the north-western shore of the Ariake Bay, Japan. Time series data analysis of hydrodynamic forcing and suspended sediment properties shows that the increments of suspended sediment concentration during a tidal cycle under spring tide condition are due to multi processes including both local resuspension by strong tidal current and advection effect of turbid water from near shore region. The field data also shows the variability in the suspended sediment properties such as settling velocity and particle size over a tidal cycle indicating relatively higher settling velocity during ebbing tide and finer median grain size during low tide.

## 1. はじめに

有明海湾奥部では,近年になり底質の細粒化や貧酸素 水塊の形成などの環境劣化が懸念されつつあり、そこで の環境変動機構の理解とそれに基づく環境改善や保全等 のための適切な対応が求められている.広大な泥干潟と 国内最大規模の潮位差と潮汐流の発生に特徴づけられる 有明海では,水・底質環境の変動機構を解明するには, 潮汐流等の作用により生じる高濃度な濁りの発生とその 輸送現象の理解が重要とされている(たとえば環境省 (2007)). これまでにも、有明海湾奥における残差流や それに基づく懸濁物の輸送特性に関して、現地観測を通 じた検討がいくつかみられ(たとえば、中川ら、2002; 八木ら, 2005;大串ら, 2007), それらと底質分布の関 係(横山ら, 2008)や貧酸素水塊などの水質分布の空間 構造との関係を調べた研究(速水ら,2006)もみられる. また、徳永ら(2009)は佐賀県大浦沖で採取した底泥サ ンプルを用いた室内実験を通じて、海水中の酸素消費速 度を増大させる底泥の巻き上げ現象の重要性を指摘して いる.

一方,コア試験や現地でのチャンバー装置等を用いた 隔離環境下での測定ではなく,潮流等の外力作用による 巻き上げ現象が実際に生じる中での水質変化の直接的な 評価を可能とするため,著者らは渦相関法による酸素輸 送フラックスの測定手法を現場海域に導入し,海底面近 傍での酸素消費速度の測定に活用できることを示した (柔江ら,2008).ただし,そこでは測定データ数の制約

1	正会員	修(工)	(独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水
			工部沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研
			究チームリーダー
2	正会員	博(農)	(独法)港湾空港技術研究所 海洋・水

(気気) (気気) に得呈得気柄切光所 海洋 不 工部沿岸環境研究領域 沿岸環境研究チ ームリーダー



もあり,酸素消費速度の変動機構の解明にはいくつか課 題も残されている.たとえばSS濃度と酸素消費速度の間 には単純な相関関係が見られるわけではなく,再懸濁粒 子の起源などに起因する質的な変動要因の把握も水質変 動を評価する上で重要と考えられる.

そこで本研究では、上記の酸素消費現場測定を実施し た有明海佐賀県沖での定点連続観測における、流況と濁 度を中心とする測定データの解析を通じて、当該海域で のSS濃度の上昇要因の把握を目的とする浮遊懸濁物 (SS)の輸送機構の解明を試みた.

### 2. 現地観測の概要

定点連続観測は2007年2月13日~同28日までの約2週 間,図-1に示す有明海湾奥西部の平均水深約6mの地点 において,流速および乱れ計測のための超音波式流速計 (ADV),超音波式流速プロファイラー(ADCP, PC-ADP), 懸濁物の濃度や粒径を測定するための光学式濁度計 (OBS),現地式粒径分布径(LISST100X)などの各計測 器を設置・係留して行った(図-2).各測定器による測定 方法(設置高さ,測定スケジュールなど)の詳細を表-1 に示す.OBSの測定結果については,観測地点で採取し



図-2 計測器設置の概要

た堆積物を用いた濁水試料による測器毎の検定を行い, 出力値をSS濃度(単位:mg/l)に換算した.観測点周辺 の底質については,コアサンプルの分析結果によると, 採取した泥深21cmまでの全層において,シルト分が約 66%,粘土分が約33%を占め,含水比は表層(0-0.5cm) において約370%となっていた.

## 3. 観測結果と考察

#### (1) 概況

観測全期間における風況(佐賀気象台),潮汐および SS濃度等の変化を図-3に示す.風場の特徴としては,北 西からの季節風が日中になると強くなる傾向がみられ, 2月23日には風速10m/s以上となっている.ただし,当 地点に対しては陸風となるため,底面近傍で測定された 流速波形の結果をみても波浪運動に伴う振動流成分の影 響は小さく,観測点の海底面に直接影響を及ぼすほどの 風波の発達には至っていない.底泥の巻き上げに関与す る主要な外力となる潮汐流については,大潮期には底層 で40cm/sに達している.一方,SS濃度の変動(同図(e)) については,底層および表層のいずれにおいても小潮期 には低濃度であるのに対し,潮位あるいは潮汐流速の振 幅増大と共に高濃度化し,中潮から大潮期においてSS濃 度の増大が顕著である.

さらに同図(f)および(g)には、これらSSの水平方 向の輸送フラックスについて、潮汐変動の影響を除去し た25時間移動平均値の時系列を示してある.濃度が増大 する大潮期にSSの輸送量も増大する傾向が見られるもの の、潮汐流の主軸方向である南北成分については北向き (湾奥方向)あるいは南向き(湾外方向)のいずれかに 大きく偏った輸送は生じていない.速水ら(2006)は、 同海域におけるSS輸送の特徴として、成層状態における エスチュアリー循環流に起因する湾奥方向へのSSの輸送 について、夏季に行われた観測結果により示しているの に対し、ここでは成層がほとんどみられない冬季の観測 結果を示したものであり、成層構造の差異による輸送機 構の違いが生じているものと考えられる.

表-1 使用計測機器と測定内容

	測定 項目	使用機器	測定高さ (層間隔)	測定時間 (バースト間隔)
-		超音波式3 次元 流速計 (Nortek 社製Vector)	底面上0.2m	16 Hz,4096 個 (60 分おき)
	流速	超音波式流速 プロファイラー (底面境界用, Sontek 社製 PC-ADP)	底面上0.03~1m (約10 cm 間隔)	1 Hz,600 個 (60 分おき)
		超音波式流速 プロファイラー (RD-Instrument 社 製ADCP1200 kHz)	底面上0.9 m~水 面下0.4 m 程度 (50 cm間隔)	1 Hz,5 分間平 均値を記録 (10 分おき)
	濁度	メモリー式後方散 乱型濁度計 (アレック社製 COMPACT-CLW)	0.2 m 0.5 m 1.0 m 水面下1.0 m	1Hz ,600 個 (60 分おき)
	水温 塩分	メモリー式小型 水温・塩分計 (アレック社製 COMPACT-CT)	0.2 m 0.5 m 1.0 m 水面下1.0 m	連続測定 (1分おき)
	粒度	現地式粒度分布計 (Sequoia 社製 LISST100X)	0.2 m	1 Hz,600 個 (60 分おき)

#### (2) 潮汐周期内のSS 濃度の変動要因

大潮期の2日間におけるSS濃度の時系列変動を潮位, 流速および巻き上げフラックスと併せて図-4に示す.巻 き上げフラックスは,乱流成分により鉛直方向に輸送さ れるSSフラックスとして次式により算定した.

ここにc'は、ADV反射強度とOBSの測定結果との間で 得られる相関式(決定係数(R<sup>2</sup>):0.65)を用いて,ADV の測定結果から求めたSS濃度の乱れ成分である.w'は 同じくADV計測で得られた鉛直流速の乱れ成分である。 これらの乱れ成分は、FFTを用いた数値フィルターによ り表面波の影響を除去した周期2秒未満の高周波成分を 抽出したものであり、また平均操作 '- 'についてはバ ースト測定毎(約4分間)の時間平均とした.巻き上げ フラックスの変動(図-4(d))をみると、潮流速の上昇 に併せて、特に下げ潮に顕著な巻き上げが生じている. それに対応して底層でのSS濃度も上昇しており、流速 増大に伴う底面せん断応力の増大が、観測点周辺の底泥 の巻き上げを発生させているものと考えられる. このよ うな潮汐流による作用外力の巻き上げへの影響を評価す るため、ADVで底面上20cmを対象に測定された水平流 速(*u*)の結果から,次式により底面せん断応力(*τ*)を 算定し、巻き上げフラックスとの関係をみたものが図-5 である.



図-3 観測期間中の風況,潮汐,SS濃度およびSSの水平方向輸送フラックス(25時間移動平均値)

 $\tau = \rho C_f u^2 \quad \dots \qquad (2)$ 

ここに、ρは海水の密度であり、抵抗係数(Cf)につい ては、測定高さおよび底質性状を考慮し、ここでは 0.0034とした.図-5においては、上げ潮時と下げ潮時に おけるそれぞれの潮時に分けて、底面せん断応力と巻き 上げフラックスの関係を示している.せん断応力の増大 と共に巻き上げフラックスが増大する傾向はいずれの潮 時にも共通してみられるものの、下げ潮時においては両 者の関係にばらつきが大きくなる傾向がみられる.特に 図中の破線で囲われた部分のデータはいずれも満潮から 下げ潮に転じた直後の下げ潮加速期におけるものであ り、他の期間と比べてせん断応力に対する巻き上げフラ ックスが大きくなる傾向が示されている.満潮時に一旦 静穏化した際に、底泥表層に沈降した粒子が下げ潮の発 生と共に容易に巻き上げられることを意味しているもの と考えられる.

一方,水表面付近のSS濃度の変動においては,流速ないし巻き上げフラックスと対応した変動よりも,潮位変

動に対応した濃度変化の特徴がみられる.すなわち,水 表面付近のSS濃度は潮位の低下と共に増大し,干潮時に 濃度のピークがみられている.干潮時には潮汐流速も 15cm/s未満にまで低下し,巻き上げフラックスも小さい ことから,干潮時におけるこのようなSS濃度の上昇は, その場での底泥の巻き上げの影響によるものではなく, 観測点よりも岸側の干潟部および浅海域で巻き上げなど により生じた高濁度水の移流が主な原因と考えられる. また,このような干潮時におけるSS濃度の上昇は,水表 面のみならず海底面近傍でも同様に見られ,鉛直方向に 混合した濁度水塊の移流が生じていることがわかる.な お,小潮期の干潮時にはSS濃度が増大しないのは,次式 でタイダルエクスカーション (L)を見積もると(ここ に,U:潮流振幅,T:潮汐周期),

 $L = UT / \pi$  (3)

大潮期には8km以上に達するのに対し,小潮期には4km 未満にとどまり,観測点の位置する沖合までは高濁水が 干潟浅海部から到達しなくなるためと考えられる.この



図-4 大潮期間中の潮位,流速(底面上20cm),SS濃度およ び浮遊懸濁物の巻き上げフラックス



図-5 底面せん断応力と巻き上げフラックスの関係

ような移流に伴う濃度の上昇と朔望周期との関係をみる ため、25時間以内の潮位の標準偏差で表した潮汐振幅の 朔望周期間での変動と、水面下1mでのSS濃度の25時間 平均値との関係を示したものが図-6である.小潮期から 大潮期に向かって(図中,破線矢印),潮位振幅の増大 に対応したSS濃度25時間平均値の上昇が明瞭である中 で,同じ潮位変動量にもかかわらずSS濃度の上昇(図中, 太線矢印)が生じる場合がみられる.この上昇期間は2 月23日の比較的強い風が吹いた時期(図-3)に相当して おり、陸風であっても波浪擾乱の影響を受けやすい干潟 や極浅海域での底泥巻き上げによるSS濃度上昇が生じ, それらの移流により本観測点でのSS濃度が上昇したもの と考えられる.



(3) 潮汐周期内におけるSS粒子特性の変化

SS濃度の変動と潮位や潮流外力との関係から,SS濃 度を増大させる要因が複数考えられることを前節では示 した.その場合,懸濁粒子の発生要因に依存して,粒子 の特性も異なることが予想される.そこで潮汐周期間で の懸濁粒子組成の変化の可能性を探るため,懸濁粒子の 沈降速度や粒径の変動特性について調べた.

まず,ここでは以下の仮定に基づいて,懸濁粒子の沈 降特性の潮汐周期間における変動について検討した.す なわち,ADV計測におけるバースト計測時間内(約4分 間)において水平移流による濃度変化の影響は小さく, SS濃度が平衡状態にある場合を仮定して,次式で示され るSS鉛直フラックスのバランス式(たとえばFugate and Friedrichs, 2002)の各項の比較を行った.

ここに、Wsは粒子の沈降速度、CはSSのバースト平均 濃度である.上式中、左辺のSS平均濃度を横軸に、右辺 の巻き上げフラックスを縦軸として、ADV計測により測 定された両者の関係を上げ潮時と下げ潮時に分けてプロ ットしたものが図-7である.同図において両軸の各項の 比が沈降速度を意味し、相対的に下げ潮時のデータ群の 方が沈降速度は大きくなる傾向がみられ、下げ潮時には





最大で約0.6mm/sであるのに対し,上げ潮時には最大で 約0.2mm/sとなった.

このような沈降速度の差異が生じる要因の一つとして、 懸濁粒子の粒径特性の変化が考えられる. そこで、潮汐 周期間での懸濁物粒径の変化をみるため、底面上20cmを 対象とした現地式粒度分布計(LISST100X)の測定結果 について、ある1潮汐間における粒度分布の変化を図-8 に示す. 同図によると、上げ潮時と下げ潮時の間では粒 度分布に大きな差異はみられず、ここで得られた観測結 果においては、両潮時の間でみられた巻き上げや沈降特 性の差異を懸濁粒子の粒径の違いから説明することは難 しく、この点については別途検討が必要である。ただし、 満潮時と干潮時の間では粒度分布に差異がみられ、満潮 時に粗粒化する傾向がみられる.このような粒径分布の 時系列変化について、現地式粒度分布計の測定結果から 求めた中央粒径値を時系列で示したものが図-9である. 干潮時付近におけるSS 高濃度時に透過レーザ光の減衰に よるデータの欠測 (図中,中央粒径がゼロの結果)を生 じているものの、満潮時に粗粒化、干潮に向けて細粒化、 という周期的な変化がみられる. 干潮時の細粒化につい ては岸側からの移流する高濁度水塊との関係が示唆され, また満潮時の粗粒化に関しては憩流時付近にも関わらず 100µm程度の粒径粒子の割合が増大しており、有機物等 のフロックが沖合から移流した可能性が考えられる.

4. おわりに

有明海湾奥西部海域での定点連続観測結果をもとに, 潮汐の影響によるSS濃度の変動要因について検討し,1 潮汐の周期内においてもSS濃度の変動要因が複合的であ ることを示した.その要因として,観測点近傍で生じる 潮流による底泥の巻き上げの影響,さらに観測点よりも 湾奥側の干潟・浅海部からの高濁度水塊の移流の影響に ついて示した.また,底面付近での巻き上げフラックス や懸濁物の沈降特性が,上げ潮時と下げ潮時の間で異な ることや,懸濁物の粒径分布は,干潮時に近い時間帯で より細粒分の割合が多くなる傾向にあることを示した.



ただし、上げ潮時と下げ潮時の間で巻き上げや沈降特性

の差異が生じる機構には未解明な点も残された.このような潮汐周期間における懸濁物の粒径や輸送特性の変化 は,周辺域での底質粒径の変化や水質変動にも関与する 可能性があることから,粒径別の輸送量の評価などにつ いて,今後もさらに検討を加える必要がある.

謝辞:現地観測における機材の設置,保守および撤去に おいて,(株)いであの協力を得た.なお本研究は,環 境省地球環境研究総合推進費(RF-074,研究代表者:中 川康之)の一部として実施されたことを付記する.

#### 参考文献

- 大串浩一郎・速水祐一・濱田孝治・山本浩一.平川隆一 (2007):有明海湾奥部における残差流の分布について, 水工学論文集,第51巻, pp. 1469-1474.
- 環境省(2006);有明海・八代海総合調査評価委員会報告書, 80p.
- 桑江朝比呂・中川康之・三好英一(2008):海底境界面における酸素消費速度 渦相関法による現地連続観測 −,海岸工学論文集,第55巻,pp.1001-1005.
- 徳永貴久・磯野正典・松永信博(2009): 有明海泥質堆積物の 再懸濁時における酸素消費 - 室内実験による検討-,土 木学会論文集B, Vol.65, No.4, pp. 269-276.
- 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.
- 速水祐一・山本浩一・大串浩一郎、濱田孝治・平川隆一・宮 坂 仁・大森浩二(2006):夏季の有明海奥部における懸 濁物輸送とその水質への影響,海岸工学論文集,第53巻, pp.956-960.
- 八木 宏・井瀬 肇・石田大暁・灘岡和夫・中山哲厳・小谷 正幸(2005):冬季有明海湾奥部浅海域における底層懸濁 態物質の空間構造と輸送特性,海岸工学論文集,第52巻, pp.941-945.
- 横山勝英・山本浩一・河野史郎(2008):有明海北東部及び筑 後川感潮河道における地形・底質・形態別リンの季節変 動と土砂移動経路に関する考察,土木学会論文集B, Vol.64, No.2, pp.83-98.
- 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.