有明海泥質干潟における懸濁物質輸送の 季節変動特性

Seasonal variation characteristics of the suspended sediment transportation in the
mudflat of the Ariake Bay

古谷貴洋¹・山本浩一²・速水祐一³・濱田孝治⁴・
吉野健児⁵・関根雅彦⁶

Takahiro FURUTANI, Koichi YAMAMOTO, Yuichi HAYAMI, Takaharu HAMADA,
Kenji YOSHINO and Masahiko SEKINE

¹山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1)

²正会員 准教授 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1)

³准教授 佐賀大学低平地沿岸海域研究センター (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地)

⁴正会員 准教授 佐賀大学低平地沿岸海域研究センター (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地)

⁵特別研究員 佐賀大学低平地沿岸海域研究センター (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地)

⁶正会員 教授 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1)

Long term observation was carried out for the measurement of the suspended sediment transport in the inner part of the Ariake Bay, Japan. Acoustic Doppler Current Profilers were used to estimate the vertical distributions of the suspended particle matter. As a consequence, estimated vertical suspended sediment fluxes for the two sections were calculated. The results showed that the suspended sediment came from the offshore regularly and it accumulated on the tidal flat. In the season of the laver cultivation, suspended sediment from offshore seemed to be inhabited by the field of the laver cultivation. After the season of the laver cultivation, suspended sediment moved again to the tidal flat. On the other hand, strong rainfall on the direct rainfall made surface sediment run off to the offshore. Bottom mud density and shear strength change seemed to be matched with the vertical suspended sediment budget in the observed points.

Key Words : SS, Ariake Bay, ADCP, erosion, sedimentation, effective rainfall

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。冬季になると一面にノリひびが立ち、ノリ養殖の舞台となる。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を明らかにする必要があるが、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(SS)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ノリ養殖期に比べてノリ養殖期の懸濁物質濃度が低下することを示している。また、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、気象が関係しており、山本ら⁴⁾は底面せん断応力、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有明海における日最大SS濃度を表現している。一方で

SSの水平フラックスについては短期の観測例は多く、八木ら⁵⁾は2004年12月に超音波流速計と濁度計による流速・SSのモニタリングを実施し、両者の積から底上0.5 mにおける5日間平均SSフラックスを計算している。また、2005年8月に六角川沖の同じ地点で流速・濁度観測を行っている⁶⁾。中川ら⁷⁾は2001年11月に筑後川、早津江川の干潟沖と塩田川沖で超音波流速計・濁度計によるSSモニタリングを実施しており、底上0.2 mの濁度をSS時系列に換算し、底上0.7 mの流速データを掛け合わせて底面付近のSSフラックスを求めている。速水ら⁸⁾は塩田川沖海底水道で1潮汐の観測を行って、水平のSSフラックスを算出している。しかしながら有明海において数ヶ月以上にわたる係留観測によるSSフラックスの解析例は笠置らによるもの⁹⁾を除いてほとんど例がないといってよく、少なくとも有明海においては1年間にわたって干潟・浅海域のSSの収支を実測した例は聞かない。

そこで、本研究では有明海の干潟・浅海域におい

図-1 研究対象水域および観測地点

て一年間にわたる観測を行い、通年のSSの輸送特性について考察した。

2. 研究方法

(1) 観測方法

図-1 に研究対象水域を示す。有明海北西部、佐賀県白石町沖合の泥質干潟・浅海域を対象とした。当該地点の底泥は細粒であり、中央粒径は ϕ スケールで 7 前後である⁹⁾。海岸における干潟面の標

高は 0m 程度である。底泥の季節変動特性を捉えるために 7 点の観測点を設置した。Sta. A～D の区間は干出することのある干潟部、Sta. D～G は干出することのない浅海域である。冬季には Sta. C～F の区間はノリ漁場となる。2007 年 8 月～2008 年 7 月まで毎月一回 Sta. A～G の各点でエクマンバージ採泥器による採泥と多項目水質計 (AAQ1183, アレック電子) による水温・塩分・濁時計の鉛直分布の測定を行った。このうち Sta. D および Sta. F の 2 点には濁度計、超音波流向流速計を設置した。これらの観測は 2007 年 8 月 1 日～2008 年 7 月 31 日まで行った。本研究では、Sta. D および Sta. F の超音波流速計には海底に超音波ドップラー流速プロファイラー (Nortek 社製 Aquadopp 1MHz) および濁度計 (アレック電子製 ATU3-8M, ATU5-8M, Compact CLW) を底上 0.2m に設置した。超音波ドップラー流速プロファイラーの設置高は底上 0.2m, 不感距離は 0.4m, 層厚は 0.5m, データ取得間隔は 10 分とした。濁度計についても計測間隔は 10 分とした。また、2008 年 4 月～2008 年 7 月まで電磁流速計 (アレック電子製 Compact-EM) を底上 0.2m に設置した。

底泥については、2cm ごとにベーンせん断試験と粘度計によるせん断試験を併用して山本らの方法によってせん断強度を求めた⁴⁾。エクマンバージ採泥器で採泥後容器に入れて横倒ししてせん断試験を行った。

(2) ADCP の反射音響強度による SS 濃度の推定方法

超音波流速計 (ADCP) の反射音響強度は (1) 式によって SS 濃度に変換した⁴⁾。

$$EL = -20 \log r - 2\alpha r + 10k \log C + 10 \log (\psi v T / 2) + A \quad (1)$$

ここで EL : 反射音響強度 (dB), r : ADCP からの測定層中心までの距離 (m), α : 減衰係数 (dB/m), C : 懸濁物質濃度 (g/m^3), ψ : 音波のビーム幅 (steradian), v : 音速 (m/s), T : パルス長 (s), k , A : 定数である。超音波流速計の反射音響強度から鉛直方向の SS 濃度が算出できるから、鉛直方向に積算した岸方向 (方位 334°) の SS フラックスを (2) 式で算出した。

$$Js = \sum_{k=1}^n C(k) U(k) \Delta h \quad (2)$$

ここで Js : 岸方向 SS フラックス ($\text{g}/\text{m}/\text{s}$), $C(k)$: 層 k における SS 濃度 (g/m^3), $U(k)$: 層 k における岸方向流速, Δh : 層厚 (m), n : 層数である。本研究で用いた定数を表-1 に示す。

(3) 濁度計による SS 濃度の推定方法

濁度計によるSS濃度の推定はカオリン検定の濁度計について

$$SS \text{ (mg/l)} = 1.2398 \times \text{Turb(NTU)} \quad (3)$$

ホルマジン検定の濁度計については、

$$SS \text{ (mg/l)} = 2.1798 \times \text{Turb(FTU)} \quad (4)$$

が現地でキャリブレーションした結果として得られ、これを用いて換算した(図-2)。

ADCPは不感知層があり、本研究の場合、底面から65cmのSSフラックス(g/m/s)は濁度計によるSS濃度も用いて推定した。0.2m地点における電磁流速計との比較結果から、流速はSta. DについてはADCPの第一層目の流速×0.72の流速を、Sta. Fにおいては第一層目流速×0.58を用いることで0.2m地点(濁度計設置地点)における流速を推定した。

表-1 反射音響強度によるSS濃度推定のためのパラメータ (Nortek Aquadopp 1MHz)

項目	数値
出力設定	Low+
音響強度のdBへの換算	0.45dB/count
α (減衰係数)	0.301dB/m (1MHz)
ψ (ビーム幅)	3.4 sr
$v T$ (パルス長)	0.5/cos 25°(m)
k	1.469
A	62.87 dB

図-2 濁度 (Turb) と SS 濃度 (SS) の関係 (△:ホルマジン濁度, ●: カオリン濁度), Sta. D での観測結果 (2008年5月6日)

3. 研究結果

(1) ADCPによる懸濁物質濃度のプロファイル再現結果

Sta. F における懸濁物質濃度プロファイルの測定例を図-3 に示す。ADCP の反射音響強度による鉛直プロファイルは濁度から換算した SS 濃度の鉛直プロファイルを良好に再現しており、減衰等の補正が良好であることを示している。

図-3濁度鉛直分布から換算したSS濃度(実線)とADCPで推定されたSS濃度プロファイル(o)の関係 (Sta. F, 2007年9月13日, 8:40)

(2) 年間を通じたSSフラックス

Sta. D, Sta. F とともに年間を通じて岸側に輸送される傾向にあった(図-4)。Sta. F においては年間を通じて沖合から岸向き(北向き)に SS が供給されていることがわかる。11月~12月にかけてはフラックスがやや減少していた。

図-4 Sta. D (実線), Sta. F (点線) における SS の岸方向の水平フラックスの累積値

Sta. D においては 2007 年 10 月までは 0.4t/m/day 程度の SS フラックスがあったが、11 月以降は岸側に輸送される SS フラックスが急に減少し、0.2t/m/day 程度となった。なおこの傾向は 2008 年 3 月末まで継続した。2008 年 4 月に急激に岸方向に SS が輸送されている傾向がみられたが、それ以降は若干減少している。また、時折沖合方向へ

のフラックスが見られる。

表-2 および図-5 に、日平均岸向き SS フラックスの変動を示した。図-5 から、Sta. F の岸向きフラックスが Sta. D の岸向きフラックスを 12 月～2 月まで上回っているが、これは Sta. D と Sta. F の間に SS が堆積していることを示している。一方で 2007 年 8 月～11 月、2008 年 4 月には Sta. D における SS フラックスが Sta. F におけるフラックスを上回っており、Sta. D～Sta. F における SS がさらに岸側に輸送されたことを示している。年間の岸方向への SS 輸送の平均値は Sta. D で 0.25t/m/day、Sta. F で 0.21t/m/day となった。八木ら⁵⁾は六角川沖で岸側への輸送量を 0.139t/m²/day と算出している。八木らの観測点の水深は 5m であるから、これに乗ずると 0.7t/m/day となる。これは本研究で得られた SS フラックスの最大値程度となっている。

表-2 Sta.A, Sta.E における推定される日平均堆積フラックスと Sta. D, F における各期間における単位幅当たりの日平均岸向き SS フラックスの変動 (Start: 計測開始, End: 計測終了)

		Sta.A	Sta.D	Sta.E	Sta.F
Start	End	kg/m ² /day	t/m/day	kg/m ² /day	t/m/day
2007/8/1	2007/8/31	0.288	0.512	-0.122	0.390
2007/9/1	2007/9/30	0.199	0.353	-0.041	0.312
2007/10/13	2007/10/31	0.238	0.422	0.046	0.468
2007/11/1	2007/11/30	0.098	0.175	-0.048	0.127
2007/12/1	2007/12/23	0.061	0.108	-0.022	0.086
2008/1/10	2008/1/31	-0.065	-0.116	0.600	0.484
2008/2/1	2008/2/29	0.052	0.093	0.341	0.434
2008/3/1	2008/3/31	0.112	0.199	-0.010	0.190
2008/4/1	2008/4/30	0.339	0.602	-0.284	0.318
2008/5/1	2008/5/31	0.164	0.291	-0.056	0.235
2008/6/1	2008/6/30	0.038	0.067	0.095	0.162
2008/7/1	2008/7/30	0.157	0.279	-0.282	-0.003

図-5 Sta. D, F における単位幅あたりの日平均岸向き SS フラックスの変動

(3) 年間を通じた底泥のせん断強度の変動

一般に底泥の乾燥密度すなわち見掛け密度が低い、またはペーンせん断強度が比較的低く軟弱な場合は圧密が進んでおらず堆積して間もない軟泥であることを示していると考えられる。

図-6上にも最も岸側のSta. Aにおける乾燥密度を示した。9月～10月に堆積が進んだ状況を示しているほか、特に3月～4月にかけて徐々にせん断強度の低い底泥が厚くなっているのがわかる。ところが、2008年5月には急激にせん断強度の低い底泥は厚み

を減少させた。

一方で浅海域のSta. E (図-6下) においては、8月においては厚く軟泥が堆積していたものの、9月～12月まで非常に剪断強度が高くなり、12月～1月にかけて一気にせん断強度が下がったためここで堆積が進んだと判断される。その後5月まで継続的に圧密等によると思われるせん断強度の増加が観測されたが、6月～7月にかけては軟泥の堆積が進んだことがわかる。

図-6 Sta. A における底泥の乾燥密度の鉛直分布 (上) と Sta. E におけるせん断強度の鉛直分布 (下)

4. 考察

(1) SSの輸送から計算された堆積フラックスと底泥のせん断強度の関係

Sta. D における SS フラックスを、A～D の区間長 1775m で除し、Sta. F と Sta. D の SS フラックスの差分を D～F の各区間長 2695m で除して各区間の単位面積あたり堆積量を推定した (図-7)。

区間 A～D (干潟部) については、推定堆積量の傾向は当然ながら Sta. D における SS フラックスの傾向と同じであり、2007 年 8 月～2007 年 12 月は、増減はあるものの堆積傾向にある。2008 年 3 月・4 月に堆積フラックスが大きくなるが、図-6 の底泥の乾燥密度をみると 2008 年 3 月に突然軟泥の厚さが増大している。このことから 2008 年 3 月の軟泥の厚さが増大したのは沖合から輸送されてきた SS の堆積によるものであるといえる。

一方、2008 年 1 月には Sta. D から沖向きに SS が輸送されており、これに対応して Sta. A では 9cm 層に乾燥密度が高い底質が現れてきている。

区間 D～F (浅海域) については 2007 年 8 月～12 月は、Sta. F から岸側に輸送された SS よりも Sta. D から岸側に輸送された SS のほうが多く、SS の収支からみて侵食傾向にあったが、2008 年 1 月は Sta.

F から岸側に輸送された SS が Sta. D から岸側に輸送された SS を上まわり、SS はこの区間で堆積傾向にあった。この時期がちょうどノリ養殖が活発に行われる時期であることから、Sta. E 付近（ノリ網内）では沖合から輸送された懸濁物質がノリ網内で堆積していると考えられる。Sta. E の底泥についてはこのとき軟泥が堆積していたことがわかる（図-6 下）。

また、2008 年 6 月～7 月にかけても Sta. E で軟泥の堆積が起こっている（図-6）。一方で、Sta. A ではそのような軟泥堆積は生じておらず、逆に堆積速度が減少している。よって、これは、干潟（Sta. A～D）表面の底泥が侵食されて流出した懸濁物質が干潟縁辺部（Sta. E 付近）に堆積したと考えられた。この原因として干潟上への降雨が考えられた。

図-7 区間Sta. A- Sta. D（干潟域，一部ノリ漁場，△）および区間Sta. D-Sta. F（干潟縁辺部，ノリ漁場内，●）におけるSSの日平均堆積フラックスの変動

(2) SSの輸送におよぼす降雨の影響

干潟上への降雨による干潟底泥の侵食への影響を明らかにするため、干潟面への直接の降雨である干潟有効雨量を考えた。Sta. Aにおける標高は0mであり、Sta. Dにおける標高が-3mである。この地点での年間最低潮位が-3mであることから、均一な勾配と仮定するとA-D間の干出率 b を計算することができる。干出率 b はSta. Fの超音波流速計で取得した潮位 H (m)から算出し、(4)式のように干潟有効降雨 R_E (mm)を計算した。

$$b = 0 \quad (H > 0\text{m}) \quad (5)$$

$$b = -H/3 \quad (H \leq 0\text{m}) \quad (6)$$

$$R_E = bR \quad (7)$$

干潟有効降雨量 R_E は、梅雨時期である5～7月に特に多いことが分かる（図-8）。しかしながら潮位変化が存在する関係で最大でも降水量の17%程度が干潟有効雨量となった。縦軸に日最大潮位差、横軸に干潟有効雨量をとると（図-9）、降雨のない状態では日最大潮位差が大きければ大きいほど岸向きに

輸送される。すなわち小潮よりも大潮のほうが岸側に輸送されることを示しているが、干潟有効雨量が多ければ特に小潮のときに沖側に輸送される傾向が生じることがわかる。おおむねその閾値は図-9から判断すると干潟全域平均して6 mm/dayとみられる。このことから、5月～7月に岸側から沖側にSSが輸送されているのは降雨の影響であると考えられ、干潟上での降雨による侵食は浅海域での軟泥の堆積を生じることがわかる。

図-8 干潟有効雨量 R_E の計算結果
(2007 年 8 月～2008 年 7 月，有明海湾奥白石町沖干潟)

図-9 Sta. D での日平均岸向き SS フラックスにおよぼす干潟有効雨量 R_E と日最大潮位差の関係

5. まとめ

本研究では有明海の泥質干潟～浅海域について一年を通じた係留観測から得られた水平SSフラックスから、堆積フラックスを計算した。また、定期的に採泥を行った。

本研究の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 水平SSフラックスから計算したSSの堆積フラックスの傾向と軟泥の堆積状況は概ね整合していた。
- (2) 干潟域では、年間を通じてほとんど常に沖合から岸側にSSが輸送されており干潟部において堆積傾向となった。

(3)干潟上の底泥については季節的に堆積傾向の強い時期と弱い時期が存在し、特に12月～2月にかけてノリ網が張られる時期に沖合から輸送されてきたSSの堆積が干潟辺縁部に存在するノリ網内で進み、干潟部へのSSの輸送が減少することが明らかになった。

(4)ノリ漁期の終了した3月～4月に一気に干潟部での堆積が進むがその後5月～7月にかけては干潟上への降雨によって侵食されて発生したSSが再び干潟辺縁部へ堆積する傾向にあることが明らかになった。

(5)干潟上の直接降雨を表す「干潟有効雨量」を提案し、潮位差やSSフラックスとの関係を検討した結果、潮位差が大きいと干潟への岸向きフラックスが卓越し、潮位差が小さい時期において干潟全域平均して6 mm/day以上の干潟有効雨量があると、沖向きのSSフラックスが観測されるようになった。

(6)ノリ網の展開とSSの堆積傾向について時期は一致するものの、その因果関係は不明である。しかしながら冬季において一時的に泥質干潟辺縁部に懸濁物質がトラップされやすくなっていることは事実であるといえる。

謝辞：本観測は有明海再生機構の委託事業平成19年度および平成20年度「干潟・浅海域における底質の物質循環に関する研究」（代表：速水祐一）により実施されたものである。観測にあたっては国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室から濁度計を、国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所から超音波流速プロファイラーを貸与していただいた。ま

た、現地調査にあたっては、佐賀大学農学部郡山益実准教授、いであ株式会社九州支店、佐賀県有明海漁業協同組合連合会に多大な御協力をいただいた。ここに記して感謝申し上げる。

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) 川村嘉応：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. 5，19-2319-23，2004.
- 4) 山本浩一，速水祐一，笠置尚史，濱田孝治，吉野健児，山田文彦：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，海洋開発論文集，24，1081-1086，2008.
- 5) 八木宏，井瀬肇，石田大暁，灘岡和夫，中山巖，小谷正幸：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，52巻，pp. 941-945，2005.
- 6) 八木宏，井瀬肇，松村航裕，木元克則：有明海湾奥部干潟前縁域の流動構造と懸濁態物質輸送特性に関する現地観測，水工学論文集，50巻，pp. 1465-1470，2006.
- 7) 中川康之：有明海における底泥輸送現象のモデル化，港湾空港技術研究所報告，42-4，pp. 25-42，2003.
- 8) 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：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，53巻，pp. 956-960，2006.
- 9) 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