

瀬戸内海水島港周辺海域における懸濁粒子(SS) の巻き上げ・沈降特性の解析

EROSIONAL AND DEPOSITIONAL CHARACTERISTICS OF SUSPENDED SOLIDS AROUND MIZUSHIMA PORT IN THE SETO INLAND SEA

高尾敏幸¹・白木喜章²・柴木秀之³・山下義昭⁴・田中文裕⁵

Toshiyuki TAKAO, Yoshiaki SHIRAKI, Hidenori SHIBAKI

Yoshiaki YAMASHITA and Takehiro TANAKA

¹正会員 工修 株式会社 エコー 環境・計画部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

²理博 株式会社 エコー 環境・計画部

³正会員 工博 株式会社 エコー 防災・水工部

⁴岡山県 土木部港湾課 (〒700-8570 岡山市内山下2-4-6)

⁵農修 岡山県 農林水産部水産課

Re-suspension and settling parameters for suspended sediments (SS) were estimated using current data and acoustic backscatter obtained with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) over three seasons (cold season, rainy season, and hot season) in 2006. SS concentrations were also obtained by filtering seawater in each season. Results indicated settling velocities of around 20 m/d, and critical bottom shear stress of erosion of between 0.1 N/m² and 0.5 N/m². The critical bottom shear stress varied with season, being lower in the hot than in the cold season.

Key Words : *Suspended solids, re-suspension, settling velocity, tidal current, the Seto Inland Sea*

1. はじめに

海域における懸濁粒子(SS)は、一般的にその濃度が高いほど透明度が低下し、水中の光強度を介して生物環境に多大な影響を与える。このため、SSの海域における挙動特性を把握することは、各種の環境施策を行う上で非常に重要である。

2007年の報告¹⁾において、瀬戸内海水島港周辺海域におけるSSの分布特性について示した。高梁川河口部よりも西側の海域を中心に、底層のSSが上げ潮・下げ潮の1日4回のピークで変動していることを確認し、潮流に起因すると考えられる底泥の再懸濁の特徴を有していることを示した。また、水島港のほぼ中央部に流入する高梁川から、出水時に多量のSSが表層を流出する様子を確認した。

このため、水島港周辺海域のSS挙動特性を理解する上で、底泥の再懸濁とその沈降特性を把握することは、非常に重要である。また、このようなメカニズムを抜きにしては、海域のSSを表現することは不可能である。

SSの潮流に起因した再懸濁に関するモデル化については、中川ら²⁾により、有明海熊本港沖で音響式流速計

(ADCP)による流況観測と光学式濁度計による濁度観測および現地底泥による濁度とSSの関係をもとに、解析が行われている。ADCPにより計測される反射強度を用いて海水中のSS濃度を推定し、得られるSS濃度の時系列をもとに底泥の移動限界条件や侵食速度に関するパラメータの推定が行われている。

また、山本ら³⁾は、有明海大掬干潟で同様に音響式流速計(ADCP)による流況観測と電気伝導度計による塩分観測、採水によるSS観測結果をもとに、解析を行っている。ADCPにより計測される流速から対数則により底面せん断力を求め、これとSS・塩分の鉛直分布をもとに、SSの移流拡散方程式を用いて沈降と巻き上げに関するパラメータの推定を行っている。

本研究の目的は、このようなSSの挙動において重要な巻き上げおよび沈降についてのモデル化を行い、水島港周辺海域のSSの巻き上げ・沈降特性を把握することである。

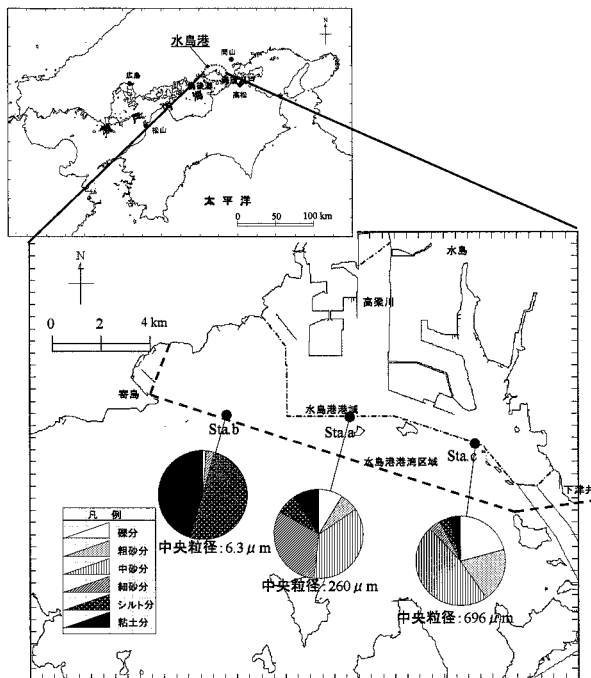


図-1 観測地点図

2. 観測データ

本研究で使用した観測データは、水島港周辺海域で2006年の3月1日～3月20日（低温季）、6月29日～7月18日（増水季）、8月21日～9月7日（高温季）の3期間に測得されたものである¹⁾。図-1に示す3地点で音響式流速計(ADCP: RDI 社製WH1200kHz)を用い、海底上1.25mから層厚0.25mで流速の多層連続観測を実施している。この連続データと3季の各観測期間内に上層（海面下2m）、中層（水深の1/2）、下層（海底上2m）で6回採水を行い、分析により定量化したSS量を解析に用いた。

3. 解析

(1) 底面せん断力

2007年の報告¹⁾で、ADCPにより観測された流速の鉛直分布が、式(1)に示す流速の対数則⁸⁾とよく一致することを示した。そこで、最下層（海底上1.25m）の流速データから式(1)により摩擦速度を算出し、式(2)により底面せん断力を算出した。

$$\frac{u(z)}{u_*} = \kappa^{-1} \left\{ \ln \frac{z}{k_s} + \alpha \frac{(z - k_s)}{L} \right\} + 8.5 \quad (1)$$

$$\tau_t = \rho |u_*|^2 \quad (2)$$

ここで、 $u(z)$: 海底上 $z(m)$ における流速、 u_* : 摩擦速度(m/s)、 κ : カルマン定数($=0.40$)、 k_s : 相当粗度(m)、 α : Monin-Obukhov係数、 L : Monin-Obukhov長さ(m)、 τ_t : 底面

せん断力 (N/m^2)、 ρ : 海水の密度(kg/m^3)、をそれぞれ示す。

使用した相当粗度の k_s は1mm、Monin-Obukhov係数の α は7.0、Monin-Obukhov長さの L は低温季が350m、増水季が175m、高温季が17.5mを用いた。流速は、1時間の移動平均した値を使用した。 ρ は1,024 kg/m^3 とした。

(2) SSの時系列

ADCPは、超音波を海中に発射し、それが海中に存在している散乱体により反射して返ってくる時のドップラーシフトを利用して流速分布を測定する計測器である。この超音波の反射強度から、式(3)、式(4)によって音の拡散損失と吸収損失の補正により後方散乱強度が求められる⁹⁾。

$$BS = 0.46(AGC - N_c) + R_c \quad (3)$$

$$R_c = 20 \log(r/r_0) + 2\alpha_d(r - r_0) \quad (4)$$

ここで、 BS : 後方散乱強度(dB)、 AGC : 反射強度(dB)、 N_c : 雑音レベル(dB)、 R_c : 音の拡散損失(dB)、 r : ADCPからの距離(m)、 α_d : 音の水中での吸収係数(dB/m)、 r_0 : r の基準値(m)、をそれぞれ示す。

音の水中での吸収係数は、本研究で使用したADCP(1200kHz)の場合、約0.5 dB/m となる。

式(3)、式(4)により、反射強度から後方散乱強度への換算を行った。

後方散乱強度からSSへの換算は、低温季・増水季・高温季の各期間中に6回上層・中層・下層で採取されたSS量を用いた。後方散乱強度と観測値のSS量の散布図を作成し、後方散乱強度からSS量を推定する回帰式を指数関数近似により設定した。

2007年の報告¹⁾で、再懸濁によるSSの挙動が確認されたSta.bを対象として解析を実施した。

得られる回帰式をもとに、SS量の観測値と推定値の比較を行った結果を図-2に示す。 R^2 は0.7以上であり、推定値は観測値とほぼ一致する結果が得られた。

後方散乱強度とSS量の回帰式をもとに、後方散乱強度から推定したSS量のイソプレットと底面せん断力の時系列を図-3に示す。底面せん断力の強い大潮前後の上げ潮時と下げ潮時は、底面せん断力に対応してSS量も激しく増減する傾向を示している。また、SS量は、低温季 < 増水季 < 高温季となる傾向にあった。

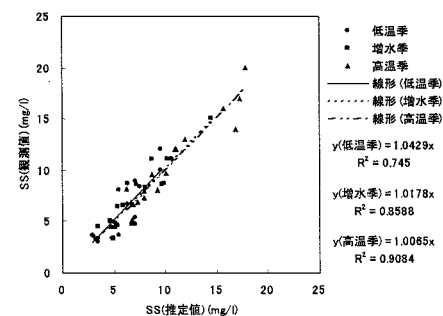
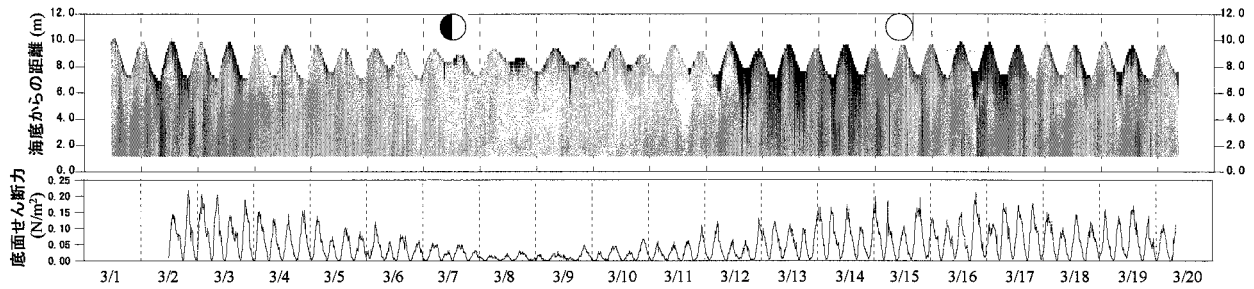
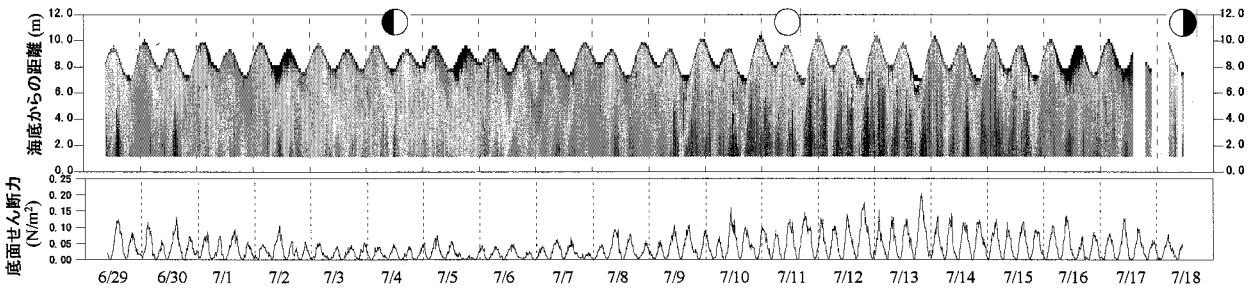


図-2 Sta. bにおけるSSの観測値と推定値の比較

(a) 低温季(Sta.b)



(b) 増水季(Sta.b)



(c) 高温季(Sta.b)

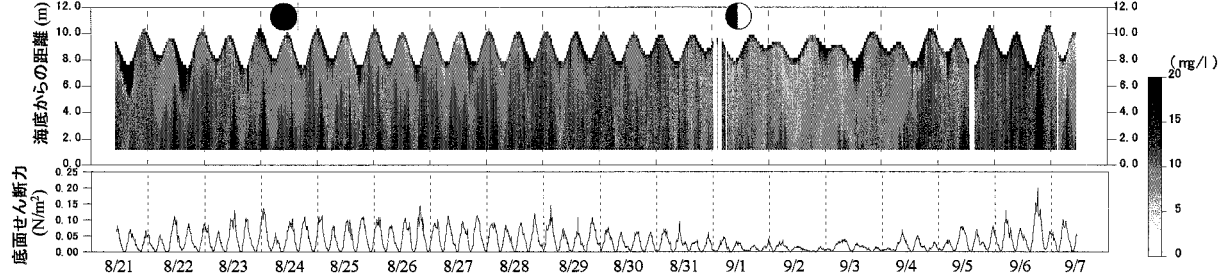


図-3 SSのイソプレットと底面せん断力の時系列

(3) 巻き上げ・沈降特性の解析

ここでは、SSの移流・拡散方程式および巻き上げ・沈降過程をモデル化し、巻き上げ・沈降に関するパラメータの推定を試みた。

まず、SSの移流・拡散方程式は、式(5)で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (5)$$

ここで、 C : SS濃度(kg/m³)、 (u, v, w) : (x, y, z) 方向の流速(m/s)、 w_s : SSの沈降速度(m/s)、 (K_x, K_y) : (x, y) 方向の水平渦拡散係数(m²/s)、 K_z : 鉛直渦拡散係数(m²/s)、をそれぞれ示す。

境界条件は、海底における巻き上げ量と沈降量があげられ、それぞれ次の式(6)および式(7)で表すこととした。

$$\begin{cases} Q_m = M \left(\frac{\tau_t}{\tau_e} - 1 \right) \cdot \frac{M_R}{100} & (\tau_t > \tau_e) \\ Q_m = 0 & (\tau_t \leq \tau_e) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 Q_m : 巻き上げ量(kg/m²/s)、 M : 巻き上げ定数(kg/m²/s)、 τ_e : 巻き上げに関する限界せん断力(N/m²)、

M_R : 含泥率(%),をそれぞれ示す。

$$D_m = w_s \cdot C_b \quad (7)$$

ここで、 D_m : 沈降量 (kg/m²/s)、 C_b : 底面付近の濃度(kg/m³)、を示す。

式(6)および式(7)において、沈降速度(w_s)、巻き上げに関する限界せん断力(τ_e)、巻き上げ定数(M)は、係数として扱うことが可能な変数である。そこで、これらの値を解析により推定した。

a) 沈降速度

再懸濁したSSを対象として沈降速度について調べた。転流時においては、式(5)の移流・拡散方程式の移流項が無視できる。それに合わせて拡散項をゼロと仮定すると、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = w_s \frac{\partial C}{\partial z} \quad (8)$$

と表される。転流時の条件を、水平流速0.03 m/s未満として式(8)により沈降速度を算出した。結果を表-1に示す。

標準偏差が大きく、値にばらつきが大きいものの、概ね20 m/dの前後を示した。算出した沈降速度に対して標準偏差が大きいのは、鉛直流速を考慮していないためであると考えられる。計測器は、鉛直流速を測定している

ものの、流速の分解能が0.1cm/s(=86.4m/d)単位であり、鉛直流速を用いて沈降速度を算出すると鉛直流速自体により非常に大きな誤差を生じてしまうことにつながる。このため、鉛直流速を使用しなかった。

驚見ら⁴⁾は、瀬戸内海福山沖で測定された濁度・流速の時系列から対数則に基づいたSS量の鉛直分布式であるラウスの式¹⁰⁾を用い、再懸濁粒子の沈降速度を算出している。その結果によると、沈降速度は、約17m/d (2.0×10^{-4} m/s)に該当していた。また、レーザー散乱と沈降筒を使った計測器LISST-STにより測定した紀伊浦神沖での懸濁粒子の沈降速度は、粒径9.8 μ mで37.2 m/s (4.3×10^{-4} m/s)、粒径17.3 μ mで44.1 m/d (5.1×10^{-4} m/s)であったことを示している。

本研究で対象としたSta.bの中央粒径は、6.3 μ mであった。この点を踏まえると、本研究で得られた沈降速度は、既往の研究結果とも概ね一致した値であるといえる。

算出された沈降速度は、どの程度の粒子に該当するのかを概略把握するため、式(9)に示すStokes式に得られた沈降速度を入れ、懸濁粒子の粒径を逆算した。

$$w_s = \frac{1}{18} \cdot \frac{g(\rho_s - \rho)}{\mu} \cdot d^2 \quad (9)$$

ここで、 g ：重力加速度(9.8 m/s^2)、 ρ_s ：土粒子の密度(kg/m^3)、 ρ ：海水の密度(kg/m^3)、 μ ：粘性係数($\text{Pa} \cdot \text{s}$)($1 \text{ poise} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)、 d ：粒径(m)、をそれぞれ示す。

ρ_s を2650 kg/m^3 、 ρ は、海水の状態方程式⁵⁾をもとに水温・塩分から設定し、 μ は、水温・塩分から設定した⁶⁾。その結果、低温季・増水季・夏季の粒径は、それぞれ19.6 μ m、15.1 μ m、16.2 μ mとなり、概ね15 μ m～20 μ mに該当していた。この粒径は、シルト(5 μ m～75 μ m)の範囲内であり、概ね現地の再懸濁粒子の沈降速度を捉えているものと推察される。

表-1 沈降速度の算出結果

	沈降速度	検体数	標準偏差
	m/d (10^{-4} m/s)		m/d (10^{-4} m/s)
低温季	21.4 (2.48)	87	56.6 (6.55)
増水季	17.2 (1.99)	121	58.1 (6.72)
高温季	22.3 (2.58)	84	45.9 (5.31)

b) 巻き上げに関する限界せん断力

図-3に示すSSの時系列をもとに、転流後における最下層のSS量の時間変化がゼロの時(SS量が増加し始める時刻)に着目する。このときに、海底からの再懸濁を生じ始めたと仮定すると、この時の底面せん断力が巻き上げに関する限界せん断力(τ_c)に該当する。

そこで、SSの増減が顕著な大潮前後の3日間を対象に、低温季を3/14～3/16、増水季を7/12～7/14、高温季を8/24～8/26について底面せん断力とSSの時系列を図-4に示す。SSは底上0.75mの推定値を1時間移動平均した値を示す。底面せん断力の増加から少し遅れてSS量が増加している。また、底面せん断力の減少から少し遅れ

てSS量が減少をしている。これは、巻き上げがある限界の底面せん断力を超えてから生じること、ある限界の底面せん断力より小さくなるまでは巻き上げ続けることを意味している。そこで、図-4に示した3日間を対象に、転流後におけるSS濃度の増加開始時の底面せん断力を巻き上げに関する限界せん断力として整理した結果を表-2にまとめる。

巻き上げに関する限界せん断力は、0.01～0.05N/m²の範囲であり、高温季 < 増水季 < 低温季という季節変化の傾向を示した。

転流後における底面せん断力の増加時間帯でかつSSの増加時間帯を対象にSSと底面せん断力の散布図を作成したものが図-5である。同じ底面せん断力でも、SSは、低温季 < 増水季 < 高温季となる傾向にあった。また、底面せん断力の増加量に対するSSの増加量についても、式(10)に示すように高温季ほど高くなる傾向にあった。このことは、高温季ほど底質が巻き上がり易いことを意味している。

$$\left. \frac{\partial C}{\partial \tau_t} \right|_{\text{低温季}} < \left. \frac{\partial C}{\partial \tau_t} \right|_{\text{増水季}} < \left. \frac{\partial C}{\partial \tau_t} \right|_{\text{高温季}} \quad (10)$$

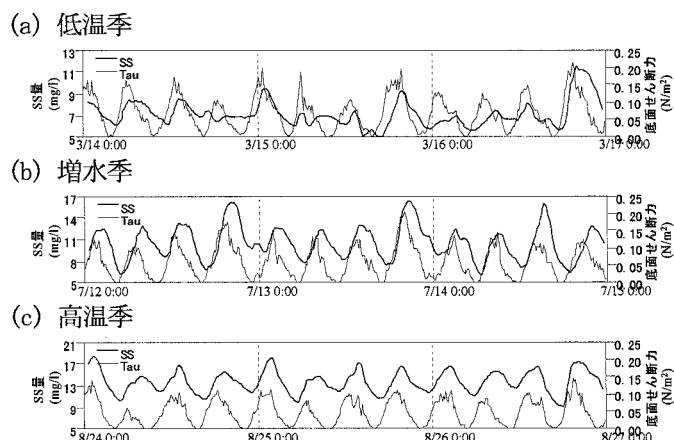


図-4 SS量と底面せん断力の時系列

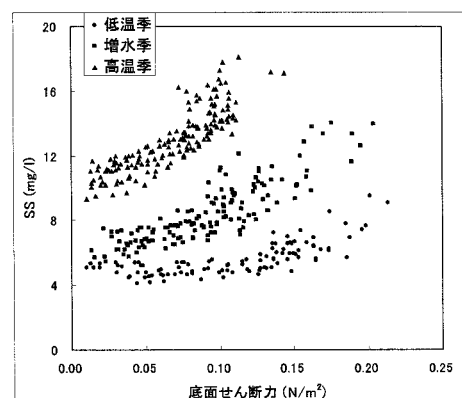


図-5 SSと底面せん断力の散布図

表-2 巻き上げに関する限界せん断力の算出結果

	巻き上げに関する 限界せん断力	検体数	標準偏差
	N/m ²		
低温季	0.0414	8	0.0251
増水季	0.0304	11	0.0135
高温季	0.0175	11	0.0058

c) 巻き上げ定数

SS濃度を海底から海面まで鉛直積分すると、単位面積あたりの水柱内のSS量を求めることができる。この単位面積あたりに含まれる水柱内のSS量は、式(11)のように表される。

$$Q_{SS} = \int_{-h}^{\eta} C(z) dz \quad (11)$$

ここで、 Q_{SS} ：単位面積あたりの水柱内のSS量(kg/m²)、 $C(z)$ ：水深 z でのSS濃度(kg/m³)、 h ：水深(m)、 η ：水位(m)、をそれぞれ示す。

SS量の鉛直方向の積分範囲について、水深 h を測得範囲の限界であった海底上0.75mとし、水位 η は、海面付近では反射強度に多くの誤差を含むため、海底上6.0 mとした。ここで、海面付近のSSは多くの誤差を含むため、ある層のSS量が一層分下の層のSS量よりも高い場合、その層のSS量は、一層分下の層のSS量を適用した。

対象としたSta.b周辺は比較的なだらかな海底地形であり、周辺に障壁も存在しないことから、流速およびSS量の水平勾配が小さいとして、式(5)において移流項と拡散項を無視できると仮定すると、式(12)で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(Q_{SS}) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{b+0.75m}^{b+6.0m} C(z) dz \right) = Q_m - D_m \quad (12)$$

式(12)より Q_m を算出し、底面せん断力とあわせて時系列図として表した結果が、図-6である。底面せん断力の増減とほぼ対応して、巻き上げ量 Q_m も増減をしている。

そこで、転流後の底面せん断力の増加時間帯に着目し、 $Q_m > 0.0$ の時間帯を対象に底面せん断力と巻き上げ量 Q_m の散布図を作成したものが図-7である。底面せん断力が巻き上げ限界せん断力よりも小さい時は巻き上がらないものと考え、底面せん断力が巻き上げ限界せん断力よりも高い場合を対象に整理した。

図に示す回帰直線は、 $Q_m = 0.0$ のとき、 τ_t が巻き上げ限界せん断力となるように最小自乗法で1次式の回帰直線を描いたものである。回帰直線は、 R^2 が0.3~0.55であった。

そこで、この関係を用い、式(6)を展開し、

$$M = \frac{Q_m}{M_R/100} \left/ \left(\frac{\tau_t}{\tau_e} - 1 \right) \right. \quad (13)$$

により巻き上げ定数(M)の算出を試みた。

式(13)は、変形すると、

$$M = \frac{\tau_e}{M_R/100} \cdot \frac{Q_m}{\tau_t - \tau_e} \quad (14)$$

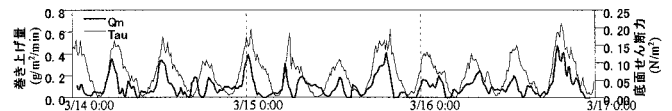
と表せる。右辺の $Q_m/(\tau_t - \tau_e)$ は、図-7に示した回帰式の

勾配に該当する。 M_R は、Sta.bの含泥率（シルト分50.6%、粘土分45.2%）を用い95.8%とした。 τ_e は、表-2に示した巻き上げの限界せん断力を用いた。

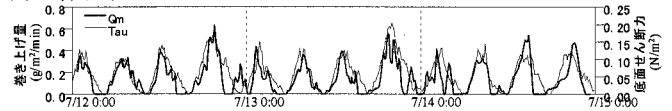
解析により得られる巻き上げ定数(M)を表-3に示す。算出した巻き上げ定数(M)については、海底上0.75m~海底上6.0mのSS量の推定値をもとに算出を行ったものである。このため、海底直上から海底上0.75mまでのSSについては加味されておらず、いくらか過小な数値であることが想定される。

算出結果は、低温季・増水季・高温季のいずれの期間も0.1 g/m²/min (1.67×10⁻⁶ kg/m²/s)前後であった。

(a) 低温季



(b) 増水季



(c) 高温季

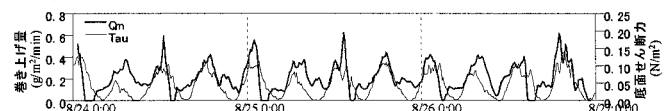


図-6 巻き上げ量と底面せん断力の時系列

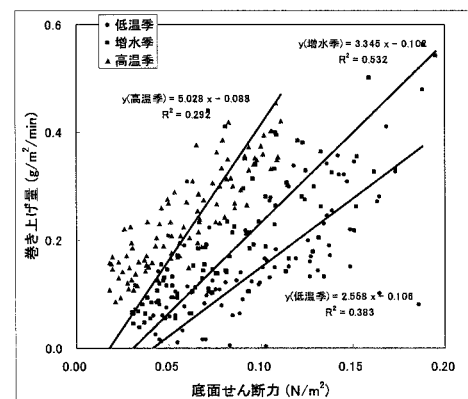


図-7 巻き上げ量と底面せん断力の散布図

表-3 巻き上げ定数の算出結果

	巻き上げ定数
	g/m ² /min (×10 ⁻⁶ kg/m ² /s)
低温季	0.111 (1.85)
増水季	0.106 (1.77)
高温季	0.092 (1.53)

4. 考察

本研究により、水島港周辺海域の底泥は、高温季ほど巻き上がり易いことが確認された。このように、高温季

ほど底泥が巻き上がり易い要因には、例えば次のような点が想定される。

①粘性の季節変化による効果、②生物攪乱による底質の季節変化による効果、③底泥の構成物質の季節変化による効果。

①については、高温ほど海水の粘性は小さい。粘性が小さいほど、海底面付近の境界層の厚さは薄くなると考えられる。海底面ごく近傍では、粘性底層とよばれ、流速は式(15)に示すように直線分布となる⁷⁾。

$$u = \frac{u_*^2}{\nu} z \quad (15)$$

ここで、 u ：流速(m/s)、 u_* ：摩擦速度(m/s)、 ν ：動粘性率(m^2/s)、 z ：底面からの距離(m)、をそれぞれ示す。

例えば、低温季の水温と塩分をそれぞれ 10°C 、33psuとすると ν は約 $1.33 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ となる。また、高温季の水温と塩分をそれぞれ 28°C 、31psuとすると ν は約 $0.88 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ となる。このように、粘性が小さいほど、海底面付近の流速は強くなることが考えられる。このことにより、海底ごく近傍の流速は、高温ほど強くなることが想定される。このことが、高温季ほど底泥を巻き上がり易くさせている可能性がある。

②については、高温ほどバクテリアや底生生物の活動が活発となること、底泥の間隙率を増加させることにつながり、結果として高温季ほど巻き上がり易くさせている可能性がある。

③については、高梁川から海域に流出するSSが、6月から7月の梅雨の季節に多く、底泥の堆積物の多くはこの時期にかけて堆積すると考えられる。このため、高温季にはまだそれら河川から流出して底面に堆積しているSSが締め占め固まっていなかったため、巻き上がり易い可能性がある。

5. おわりに

本研究による主要な結論をまとめる。

- ・再懸濁粒子の沈降速度は、概ね $20\text{m}/\text{d}$ の前後を示した。この値は、既往の研究結果とも概ね一致した値であった。
- ・底面せん断力の強い大潮前後の上げ潮時と下げ潮時は、底面せん断力に対応してSS量も激しく増減する傾向を示していた。また、SS量は、低温季 < 増水季 < 高温季となる傾向にあった。
- ・巻き上げに関する限界せん断力は、 $0.01 \sim 0.05 \text{N}/\text{m}^2$ の範囲であり、高温季 < 増水季 < 低温季という季節変化の傾向を示した。
- ・同じ底面せん断力でも、SSは、低温季 < 増水季 < 高温季となる傾向にあり、底面せん断力の増加量に対するSSの増加量についても、高温季ほど高くなる傾向にあった。これらの点から、高温季ほど底質が巻き

上がり易いという特徴をもつことが確認された。

- ・巻き上げ定数は、低温季・増水季・高温季のいずれの期間も $0.1 \text{g}/\text{m}^2/\text{min}$ ($1.67 \times 10^{-6} \text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$)前後であった。巻き上げ限界に関するせん断力と比べると、季節変化は明瞭には確認されなかった。算出した値は、海底上 0.75m よりも上層のデータより算出したため、海底直上のSS量が含まれておらず、いくらか過小な数値であると考えられる。

本研究により、水島港周辺海域のSSの巻き上げ・沈降特性を解析的に示すことができた。また、SS拡散モデル構築の再現の基礎となる再懸濁に関する巻き上げ・沈降のモデル化に必要なパラメータの推定を行うことができた。巻き上げに関する限界せん断力に確認されたような、高温季ほど底泥が巻き上がり易い点が何の理由によるものなのか、今後の検討課題である。

謝辞：本研究は、水島港の濁り拡散予測モデル開発の一環として行ったものであり、研究の機会を与えて頂き、かつ貴重なご助言を賜りました京都大学名誉教授 奥田節夫博士、九州大学応用力学研究所教授 柳哲雄博士並びに岡山大学環境理工学部教授 大久保賢治博士に深くお礼申し上げます。また、現地データの収集にご協力頂きました岡山県備中県民局水島港湾事務所、岡山県水産試験場の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 高尾敏幸・杉松宏一・柴木秀之・常森通浩・田中文裕：瀬戸内海水島港周辺域の懸濁粒子(SS)の輸送特性，海洋開発論文集，Vol.23，pp.1153-1158，2007。
- 2) 中川康之・吉田秀樹・谷川晴一・黒田祐一：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，pp.441-445，2005。
- 3) 山本浩一・槻木(加)玲美・速水祐一・吉野健児・濱田孝治・山田文彦：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，海洋開発論文集，Vol.23，pp.1159-1164，2007。
- 4) 鷺見栄一・田中祐志：沿岸域の底層における懸濁態粒子の物理的挙動，海岸工学論文集，Vol.46，pp.991-995，1999。
- 5) 気象庁編：海洋観測指針（第1部），200pp.，2004。
- 6) 淵秀隆：海水の物理的・化学的性質，海洋科学基礎講座1 海洋物理 I，東海大学出版社，pp.3-26，1973。
- 7) 伊賀啓太：第5章 乱流，地球環境を学ぶための流体力学，九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻編，成山堂書店，323pp.，2001。
- 8) Itakura, T. and Kishi, T. : Open channel flow with suspended sediments, *J. Hyd. Div.*, ASCE, Vol.106, HY8, pp.1325-1343, 1980。
- 9) RD Instruments : Acoustic Doppler current profilers, *Principles of operation - A practical primer*, RD Instruments, San Diego, California, 36pp, 1989。
- 10) Rouse, H. : Modern conceptions of the mechanics of turbulence, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 102, pp.436-505, 1937。