

利根川感潮域における 乱流と底泥の巻き上げに関する現地観測

FIELD STUDY ON NEAR-BOTTOM TURBULENCE AND RESUSPENSION OF COHESIVE SEDIMENT IN THE TONE RIVER ESTUARY

清水健司¹・入江光輝²・石川忠晴³

Kenji SHIMIZU, Mitsuteru IRIE, and Tadaharu ISHIKAWA

¹学生会員 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 環境理工学創造専攻
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

²正会員 博(工) CREST研究員 科学技術振興機構(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

³フェロー 工博 東京工業大学教授 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

Near-bottom turbulence and flux of suspended sediment were measured in the Tone River Estuary to study a relationship of resuspension and settling of cohesive sediment with turbulence. An acoustic Doppler velocimeter was deployed because of its advantage of measuring suspended sediment concentration besides turbulence by utilizing acoustic intensity data. Vertical profile of velocity and spatial distribution of suspended sediment were measured with an ADCP and water quality meters.

Three phases for sediment suspension were observed: First phase was characterized by quasi-equilibrium under low Reynolds stress, second phase by resuspension of comparatively fine sediment accompanied by a growing turbidity front moving upstream, and the third phase by strong resuspension of comparatively rough sediment under strong Reynolds stress. Budget analysis of suspended sediment suggested that the settling velocity at the third phase was 10^{-3} [m/s] while the value at the first phase was 10^{-5} [m/s].

Key Words: Estuary, turbulence, resuspension, settling velocity, SS, ADV

1. はじめに

懸濁物質(以下SSと呼ぶ)は河川感潮域の環境を理解する上で欠かすことのできない重要な要素である。例えば, SSの挙動は河口域における地形変動, 栄養塩および有害物質の輸送, そして生物の生息環境と密接な関わりがある。利根川感潮域においては, 底泥の浮上が貧酸素水塊の形成に結びつく可能性も指摘されている³⁾。そのため, 河川感潮域におけるSSの挙動を詳細に把握することが必要である。

河川感潮域におけるSSの挙動を把握するためには, 感潮域特有の流動やSSの空間分布とともに, 河床における底泥の巻き上げ, 沈降速度の変化等を把握する必要がある。特に底質の巻き上げについては, 底泥の圧密状態や構造, 作用している外力に依存するため, 現地における評価が必要である。また, 沈降速度もフロックの形成と破壊などに依存するから, 現地における評価が望ましい。しかし, 現地においてこれらの評価を行うのは容易ではないため, 従来はあまり行われていなかった。

ところで近年, 超音波流速計を流速測定だけでなく, SSの濃度を推定するために用いた事例が出てきている^{2,4,5)}。特にADV(Acoustic Doppler Velocimeter)は高周波数で流速と音響強度を計測するため, SSの乱流フラックスを計測することができ^{5,7,8)}, 河床近傍の乱流と底泥の巻き上げを詳細に計測できる可能性がある。また, 沈降速度の推定にもADVを用いることも提案されている⁹⁾。

そこで本研究では, 利根川感潮域において流速やSSの空間分布の計測に加え, ADVによる河床近傍の乱流計測とSSフラックスの推定を行い, 河川感潮域における乱流と巻き上げの関係, およびSSの沈降速度について考察する。

2. 現地観測およびデータ処理

(1) 対象水域の概要

図-1に利根川感潮域の平面図を示す。鈴木ら³⁾は, 塩水楔先端付近の14KPから17KPの区間において,

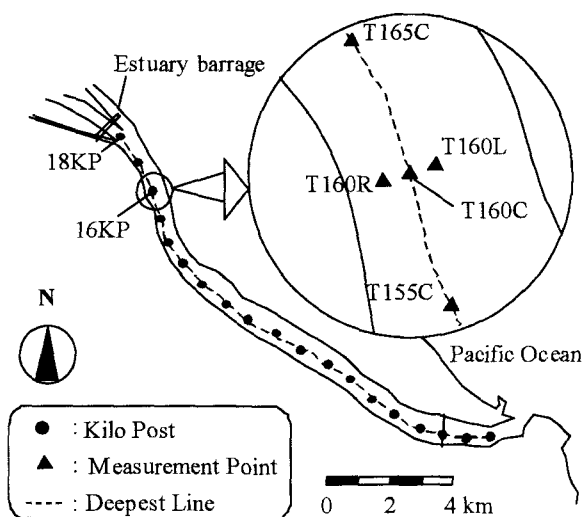


図-1 利根川感潮域平面図と観測地点名

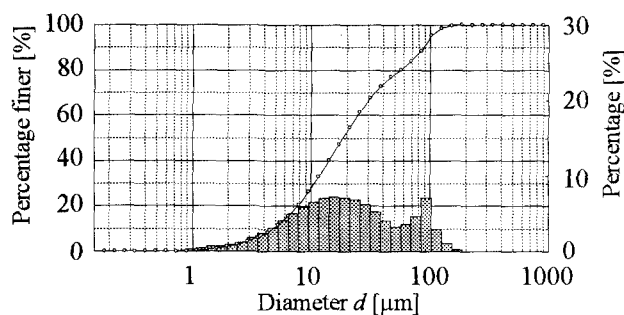


図-2 表層底質の粒度分布

Turbidity Maximumの形成など活発なSSの運動が起こると指摘している。そこで、本研究では16KPを中心とした長さ1kmの区間で集中的に観測を行うこととした。

(2) 観測方法

観測は2003年4月20日(大潮)に行った。鈴木ら³⁾はこの区間において濁度のピークが逆流のピークと概ね一致していたと述べている。そこで、濁度の上昇を捉えるために、彼らの観測を参考にして8:00～15:30に観測を行った。

河床付近の乱流計測を行うためにADV(Nortek社製:Vector)を用いた。ADVは後で述べるADCPとともにステンレスと木でできた台に固定し、16.0KP滞の河床に設置した。測定点の高さは河床上15cm、サンプリング周波数は16Hzとした。

また、河道内におけるSSの空間分布を調べるため、16.0KP滞とそこから100m左岸側と右岸側、15.5KP滞、16.5KP滞の5点(以下、それぞれT160C、T160L、T160R、T155C、T165Cと省略する。図-1参照)において、2台の多項目水質計(アレック電子製:ACL1182-PDK、ACL1183-PDK)による塩分・濁度の鉛直分布測定を行った。1台の水質計を用いて、T160Cにおいて10分ごとに計測を行った。もう1台の水質計を用い

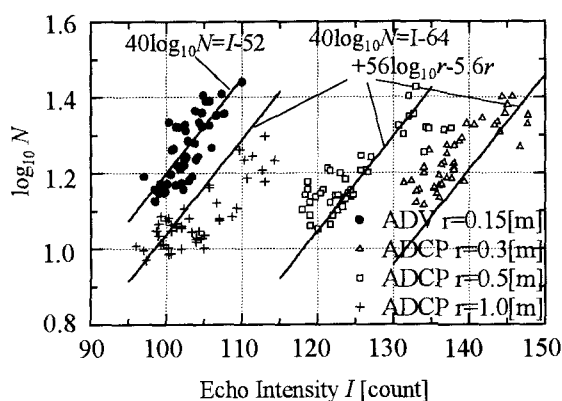


図-3 濁度値Nと音響強度値Iの関係

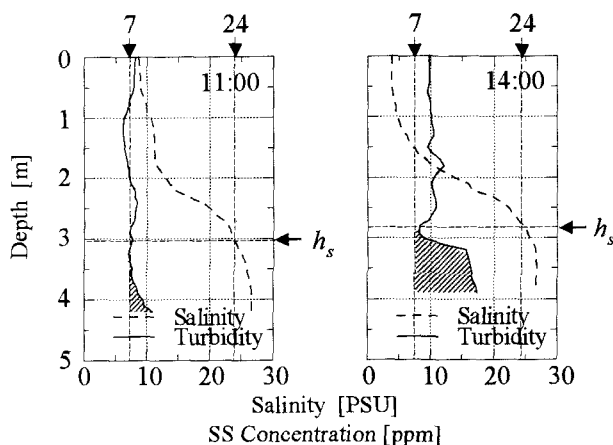


図-4 塩分・SSの鉛直分布の例 斜線部の面積がTESSに相当する

て、それ以外の4点で30分ごとに計測を行った。また、T160Cの河床にADCP(Nortek社製:Aquadopp)を設置し、流速の鉛直分布の計測およびSSの鉛直分布の推定に用いた。

観測終了時にエクマンバージ採泥器を用いて底泥の採取を行った。表層約3cmを実験室に持ち帰り、分析を行った結果、含水比は220[%]、土粒子密度は2500[kg/m³]であった。また、粒度分析の結果を図-2に示す。

(3) SSの推定方法

SSは濁度、または音響強度から相関式を用いて推定した。過去の経験から、SSと濁度には概ね比例関係があることが分かっているので、濁度に0.73をかけてSSに換算した¹⁾。SSと音響強度の関係は、濁度と音響強度との相関関係を用いて間接的に求めた。濁度と音響強度の関係は、横山ら⁴⁾の式を参考にして以下の式を用いた。

$$40 \log_{10} N = I - A + B \log_{10} r + 5.6r \quad (1)$$

ここで、N:濁度値[NTU]、I:音響強度[count]、r:センサーから測定点までの距離[m]、A、B:フィッティングパラメータ、である。音響強度は[count]という単

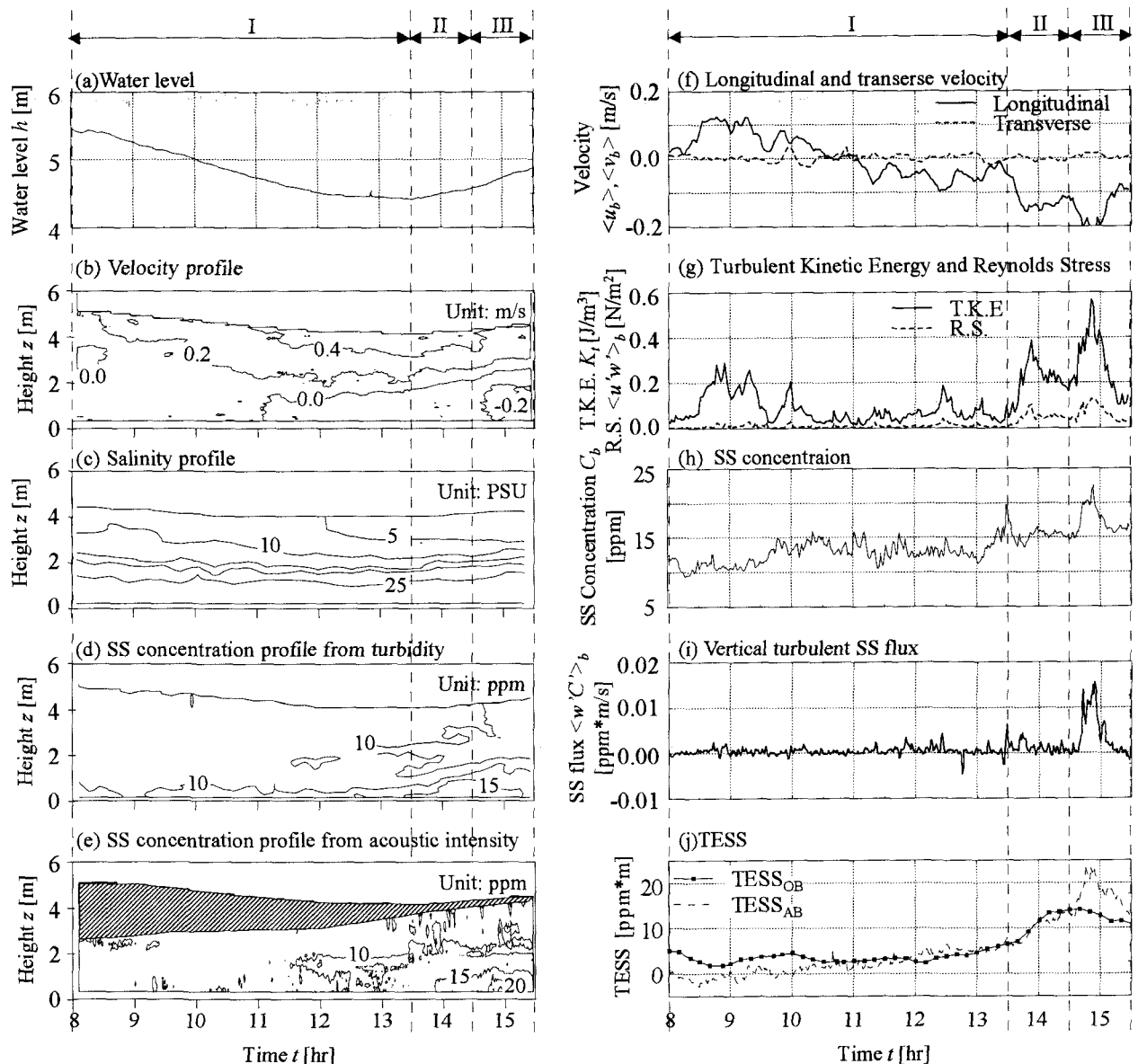


図-5 T160Cにおける観測結果 (a)水位, (b)主流方向流速(下流向き正), (c)塩分, (d)濁度から求めたSS濃度, (e)ADCP音響強度から求めたSS濃度で網掛け部分は濁度-音響強度相関が悪い部分, (f)主流・横断方向流速(下流向き, 左岸向き正), (g)乱流エネルギーと河床に働くレイノルズ応力の絶対値, (h)ADV音響強度より求めたSS濃度, (i)鉛直方向SSフラックス(上向き正), (j)TESS, (e)(f)(g)(h)は河床上15cmにおける値である。点線は解析に用いた時間区分(Period)を示している。

位で表され, $1[\text{count}]$ が約 $0.43[\text{dB}]$ に相当する。濁度と音響強度の関係を図-3に示す。黒丸は濁度とADVの音響強度の関係, 三角・四角・十字はそれぞれ $r=0.3, 0.5, 1.0$ [m]における濁度とADCPの音響強度の関係, 直線は式(1)による相関線である。濁度とADCPの音響強度の関係は水面付近で式(1)から大きくずれていたため, この部分のデータは以下の解析に使用していない。図-3を見ると, $r=0.3$ のデータは相関線よりも上側に, $r=1.0$ のデータは下側に偏っている。これは, 様々な高さのデータが最もよく式(1)に合うようにA, Bを決めているためであり, ある高さにおける相関に偏りが生じてしまうのは止むを得なかった。

(4) 塩水層内過剰SS総量(TESS)の算出方法

図-4に塩分・SSの鉛直プロファイルの例を示す。それぞれは11:00, 14:00における結果で, 11:00は塩水層内でのSSが低い場合, 14:00はSSが高い場合の例として示した。塩分躍層下部では, 濁度が常にほぼ一定で, $7[\text{ppm}]$ 程度あった。これは, 躍層の存在により, 塩水層から上向きのSSの輸送が抑制されているためであると考えられる。

鈴木ら³⁾は, 塩水層内におけるSSの挙動を把握するためには, SSの値そのものよりもSSの塩水層内総量を用いた方が良く指摘している。しかし図-4に見られるように, 本河道内の塩水は常にあ

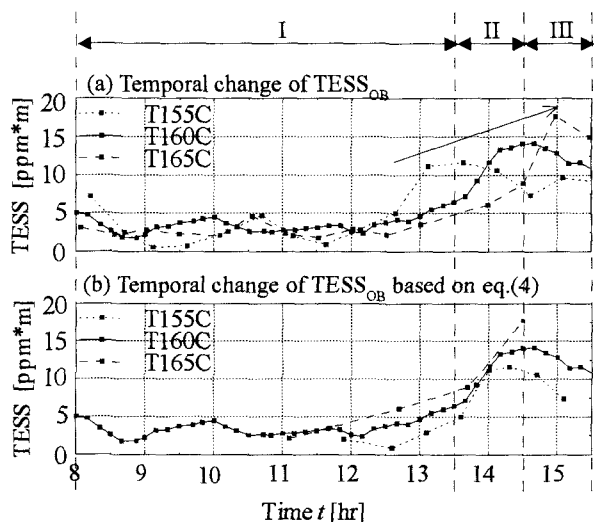


図-6 T155C, T160C, T165Cにおける $TESS_{OB}$ の変化および式(4)を用いた変換の結果

る程度のSSを含んでいる。そのため単純に塩水層内でSSを積分すると、塩水層が厚くなればSS総量は増えてしまう。そこで、本研究では鈴木らの方法を修正し、以下の式を用いて塩水層内過剰SS総量(以下TESS)を求めた。

$$TESS = \int_0^{hs} (C - C_0) dz \quad (2)$$

ここで、 C : SSの濃度、 C_0 : 常に存在するSSの濃度、 hs : 塩水層の高さ、である。図-4や他の測定結果から、 C_0 は7[ppm]とし、 h_s を塩分が24[PSU]となる高さとした。

3. 観測結果とその考察

(1) 観測結果の概要

図-5にT160Cにおける観測結果を示す。(a)は水位、(b)は主流方向の流速分布(下流向き正)、(c)は塩分の鉛直分布、(d)は水質計の濁度値より求めたSSの鉛直分布、(e)はADCPの音響強度より求めたSSの鉛直分布で、網掛け部分は2.(3)で述べた、式(1)が成り立たない部分である。(f)はADVで計測したデータを2分間平均して求めた主流方向及び横断方向の平均流速 $\langle u_b \rangle$, $\langle v_b \rangle$ (それぞれ下流向き、左岸向き正)、(g)は乱れエネルギー $Kt_b = (\langle u_b' u_b' \rangle + \langle v_b' v_b' \rangle + \langle w_b' w_b' \rangle)/2$ と河床上15cmにおいて水平面に働くレイノルズ応力 $\langle u'w' \rangle_b$ の絶対値である。ここで、 $\langle \rangle$ は2分平均を表す。(h)はADVの音響強度より求めた河床上15cmにおけるSSの濃度 C_b 、(i)は鉛直方向乱流SSフラックス $\langle w'C' \rangle_b$ (上向き正)、(j)はTESSで、濁度値から求めたものとADCPの音響強度から求めたものを示した。以下、濁度値から求めた

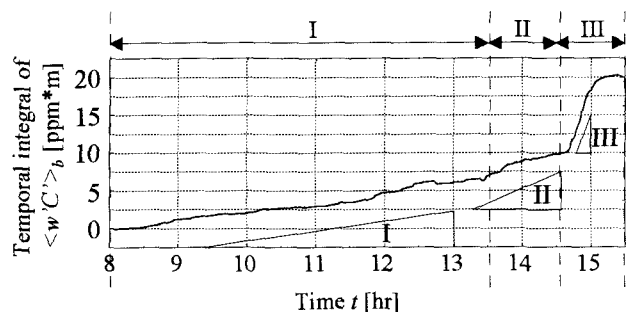


図-7 乱流SSフラックス $\langle u'w' \rangle_b$ の時間積分値の変化
傾きが $\langle u'w' \rangle_b$ を表している

TESSには添字OB、音響強度から求めたTESSには添字ABをつけて区別する。

今回の観測では、13:00以降にSSの上昇が観測された(図-5(d)(e)(h))。SSは河床付近で高く、2.(4)で述べたように、塩分躍層において小さくなっている(図-5(c)(d)(e))。

乱れエネルギーとレイノルズ応力を見ると、13:00以降にピークが2つあり、これに対応してTESSが増加していることが見て取れる(図-5(g)(j))。1つめのピークは13:50頃で、 $TESS_{OB}$, $TESS_{AB}$ とも増加しているが、 $\langle w'C' \rangle_b$ の大きな増加は見られない。ところが2つめのピークである14:50頃では、 $TESS_{AB}$ と $\langle w'C' \rangle_b$ は大きく増加するが、 $TESS_{OB}$ は変化せず、SSの挙動が異なっていることが予想される。そこで、以下では1つめのピーク以前の8:00-13:00をPeriod I、1つめのピークが観測された13:00-14:30をPeriod II、2つめのピークが観測された14:30-15:20をPeriod IIIとして、それぞれ巻上げ率と沈降速度について考察を行うこととする。図-5～図-7の点線はそれぞれのPeriodの区切りを示している。

(2) Period IにおけるSSの挙動

この期間では特に目立ったSSの挙動は見られなかったが、変化があった時間との比較のために、巻上げ率、沈降速度のオーダーを見積もっておく。

そのために、まずSSの移流の効果を見積もる。Period Iにおいて $TESS_{OB}$ は概ね一定であった(図-5(j))。図-6(a)にT155C, T160C, T165Cにおける $TESS_{OB}$ の変化を示す。この時間帯にはT155C, T165CにおいてもT160Cと同様に $TESS_{OB}$ が概ね一定であることから、SSは河道方向に概ね一様であり、 $TESS_{OB}$ の変化に対する移流の寄与は小さいと考えられる。8:00～10:00において、 $TESS_{OB}$ と $TESS_{AB}$ の間に違いが見られるが(図-5(j))、これは音響強度から推定したSSが、濁度から推定したものより全体的に2 [ppm]程度低かったためである。

図-7に乱流SSフラックス $\langle w'C' \rangle_b$ の時間積分値の変化を示した。実線の傾きが $\langle w'C' \rangle_b$ に相当する。Period Iでは全体として $\langle w'C' \rangle_b$ は正であることが分

かる。 $\langle w'C' \rangle_b$ の平均値は 4.7×10^{-4} [ppm*m/s]であった。

次に、Period Iにおける平均沈降速度を求めることを考える。平均沈降速度は移流の効果が無視できる場合、TESSの変化と巻き上がり、沈降の収支を考えて

$$\overline{w_s} = \frac{1}{C - C_0} \left(\overline{\langle w'C' \rangle_b} - \frac{\Delta TESS}{\Delta t} \right) \quad (3)$$

と表せる。ここで w_s :沈降速度、 C :SSの濃度、 C_0 :TESSの計算で用いた C_0 であり、バーは時間平均を表している。平均SSは12.6 [ppm]であったので、沈降速度は 8.7×10^{-5} [m/s]となり、沈降速度は 10^{-5} [m/s]のオーダーであると見積もられる。

(3) Period II における SS の挙動

Period II では、TESS の増加が見られるにも関わらず、 $\langle w'C' \rangle_b$ はあまり増加していない。そのため、TESS の増加は主に移流によって引き起こされたと考えられる。

実際、図-6(a)を見ると、TESS_{OB}の増加は下流側から順に起きていることが分かる。TESS_{OB}の急激な増加はそれぞれT150Cでは12:30から13:00の間に、T160Cでは13:30から14:00の間に、T165Cでは14:30から15:00の間に起こっている。さらにそれぞれの地点でTESS_{OB}は急激な増加を示した後、わずかな減少傾向を示し、その変化は概ね相似に見える。このことは濁水が下流から上流へ移動していることを示唆している。

濁水が移動していると考えれば、時間を基準と考えて

$$TESS = TESS(t - x/U) \quad (4)$$

と書ける。ここで、 t :時間、 x :河道に沿う座標、 U :濁水の進行速度、である。濁水の進行速度として塩水層内平均流速を用い、簡便のためT160Cを $x=0$ として、式(4)の変換をした結果を図-6(b)に示す。3本の線の立ち上がり時刻は概ね一致している。このことから、Period II におけるTESS_{OB}の増加は主に移流によって引き起こされることが分かる。しかし、そのピーク値を見ると、図-6(a)の矢印で示したように、上流に移動するに従って徐々に増加していることがわかる。TESS_{OB}のピーク値の時間変化(増加率)を計算すると、 7.6×10^{-4} [ppm*m/s]程度である。Period II の平均乱流フラックスは 1.2×10^{-3} [ppm*m/s]であり、Period I での値 4.7×10^{-4} [ppm*m/s]から増加している(図-7)。その増加分は 7.0×10^{-3} [ppm*m/s]程度となり、TESS_{OB}の増加率に概ね一致する。そこで、濁水は巻き上げられたSSによって濃度を増しつつ上流に移動しているのではないかと推測される。

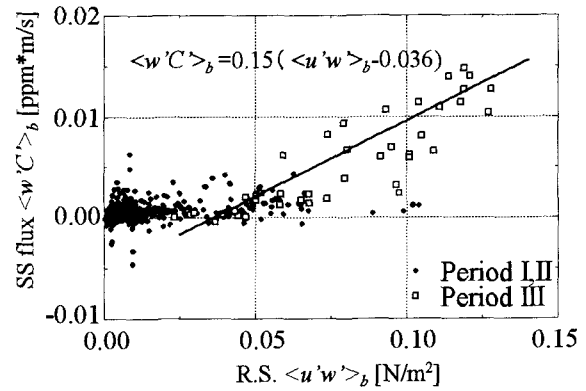


図-8 レイノルズ応力と乱流SSフラックスの関係

(4) Period III における SS の挙動

Period III では $\langle w'C' \rangle_b$ が大きく増加し、底泥の強い巻き上がりがあったと考えられる(図-5(i))。同時にレイノルズ応力にもピークが見られた(図-5(g))。そこで、レイノルズ応力と乱流SSフラックスの関係を図-8に示す。Period III では概ねレイノルズ応力の増加につれて乱流SSフラックスが増加している。回帰線を引くと、次式となった。

$$\langle w'C' \rangle_b = 0.15(\langle u'w' \rangle_b - 0.036) \quad (6)$$

図-9 から、限界せん断応力は0.03 ~ 0.05 [Pa]程度と見積もられる。Maa et. al.⁹は浮泥層の限界せん断応力を0.05 [Pa]と報告しているの、この結果はMaa et. al.⁹の結果とほぼ一致していると言える。Period III においては概ね式(6)の関係が成り立つが、Period II におけるレイノルズ応力のピーク時には $\langle w'C' \rangle_b$ のピークが見られない(図-6(a)(b))ので、必ずしも τ_b の増加が $\langle w'C' \rangle_b$ の増加に対応しているわけではないことに注意する必要がある。

次に移流の効果を見積もりたいが、図-5(j)から分かるように、濁度は音響強度が捉えたSSの増加を捉えておらず、TESS_{OB}はわずかに減少している。そのため、多地点におけるTESS_{OB}の変化を比較できず、TESS_{AB}の増加に対する移流の寄与は評価できなかった。

上記のような濁度と音響強度の不一致の主な原因は、SSの粒径に対する濁度と音響強度の応答性の違いにあると言われている²⁾⁵⁾。濁度計の応答は粒径に反比例する²⁾⁵⁾。一方、音響強度は粒径にあまり依存しないという見解⁵⁾と3乗に比例するという見解²⁾があるが、いずれにしても粒径が大きくなると、濁度より音響強度の方がSSの変化に敏感に反応すると考えてよい。

実際、ADVとADCPの音響強度から求めたSSやTESS_{AB}ではともに14:50にピークが見られる(図-5(h)(j))。また、2台の水質計による計測から求めたTESS_{OB}の変化を見ると、ともに14:50のピークが見ら

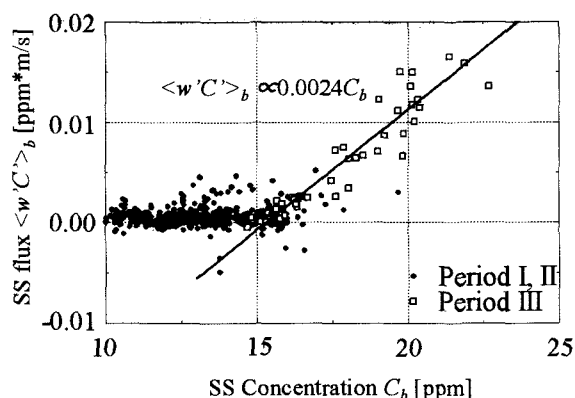


図-9 SS濃度と乱流SSフラックスの関係

れない(図-6(a)). つまり, 同種の方法で測定されたSS どうしを比較すれば, その傾向は一致している. 従って, 上記の不一致は計測誤差によるものではないと考えられる.

最後に沈降速度について考える. Fugate et. al.⁹⁾は, ADVを用いて沈降速度を求める方法を提案している. 彼らは, 上向き乱流フラックスと沈降フラックスが釣り合った状態を仮定すると

$$\langle w'C' \rangle_b = w_s C_b \quad (5)$$

が成り立つことから C_b と $\langle w'C' \rangle_b$ の関係をプロットして沈降速度を求めることができると提案した. このプロットをした結果が図-9である. Period IIIでは C_b と $\langle w'C' \rangle_b$ の間に概ね比例関係が成り立っており, 沈降速度は $2.4[\text{mm/s}]$ と推定された.

ところで, 乱れによって上向きに輸送されたSSの一部は沈降しなかった可能性もある. そのため式(5)を用いるための仮定を満たしていない恐れがある. そこで上記の沈降速度と比較するために, TESS_{AB}のピークから観測終了までの間の平均沈降速度を式(3)から求めてみると, $8.1[\text{mm/s}]$ 程度となった. よってPeriod IIIにおける沈降速度は $10^{-3}[\text{m/s}]$ のオーダーであると考えられる.

この結果をPeriod Iと比較すると沈降速度が100倍程度になったことになる. この結果から, 巻き上げられたSSは粒径や密度が大きいと考えられる. TESS_{AB}とTESS_{OB}の不一致も粒径が増加した可能性を示唆していた. しかし, 実際に粒径の変化によって起こっているかどうかは, 粒度分析を行っていないので確かめることはできなかった.

以上をまとめると, Period IIIではレイノルズ応力の増加によって比較的強い巻き上がりが起こったと考えられる. また, 沈降速度が $10^{-3}[\text{m/s}]$ のオーダーに増加しており, 巻き上げられた粒子はそれ以前に水中に浮遊していた粒子よりも粒径が大きかった可能性がある. 濁度計はこの変化を捉えていなかったため, TESS増加に対する移流と巻き上がりの寄与

を分離することはできなかった.

5. おわりに

本研究では, 利根川感潮域において河床近傍における乱流計測を行い, 現地において巻き上げ率や沈降速度を推定することを試みた. その結果, 以下の結論が得られた.

(1) 巻き上げイベント時において, 巻き上げ率とレイノルズ応力の間に概ね $\langle w'C' \rangle_b = 0.15 * (\langle u'w' \rangle_b - 0.036)$ の関係が見られた. しかし, レイノルズ応力が増加しても乱流SSフラックスが増加しない時間帯もあった. 両者の関係には更なる検討が必要である.

(2) 沈降速度のオーダーを評価し, 沈降速度が巻き上げイベント以外の時間帯では $10^{-5}[\text{m/s}]$ のオーダーであったが, 巻き上げイベント時には $10^{-3}[\text{m/s}]$ のオーダーに変化していた.

ADVや超音波流速計の音響強度を用いることにより, 上記のような, 従来計測が困難であったSSの挙動を捉えることが可能となった. この種の計測は, Turbidity Maximumの形成など, 十分に理解されていない現象の理解や, 実験によって得られた既往のモデルの検証, 数値シミュレーションの高精度化などに有益であろう.

参考文献

- 1) 大作和弘: 利根川河口堰下流部における潮汐流動を伴う濁質運動について, 東京工業大学修士論文, 2001
- 2) 川西 澄・山本洋久・余越正一郎: 超音波流速計と散乱光学式濁度計を用いた懸濁粒子の濃度, 粒径, フラックスの測定, 水工学論文集, 第42巻, pp.559-564, 1998
- 3) 鈴木伴征・大作和弘・横山勝栄・石川忠晴: 利根川河口堰下流部における濁質の浮上とそれに伴う酸素消費, 水工学論文集, 第46巻, pp.917-922, 2002
- 4) 横山勝英・宇野誠高・森下和志・河野史郎: 超音波流速計による浮遊土砂移動量の推定方法, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1486-1490, 2002
- 5) David C. Fugate, Carl T. Friedrich: *Determining concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS, and LISST*, Continental Shelf Research, vol.22, pp.1867-1886, 2002
- 6) Jerome P.-Y. Maa, Larry Sanford, Jeffery P. Halka: *Sediment resuspension characteristics in Baltimore Harbor, Maryland*, Marine Geology, vol.144, pp.137-145, 1998
- 7) Kyoshi Kawanishi and Shoitiro Yokosi: *Characteristics of suspended sediment and turbulence in a tidal boundary layer*, Continental Shelf Research, vol.17, No.8, pp. 859-875, 1997
- 8) V. Nikora, D. Goring and A. Ross: *The Structure and Dynamics of the Thin Near-bed Layer in a Complex Marine Environment*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol.54, pp.915-924, 2002