

肱川感潮域における懸濁物質の動態 —観測結果と凝集体の分裂を考慮した解析—

Dynamics of Suspended Solid in Hiji River Estuary
—Field Measurement and Numerical Analysis considering the Breakage of Aggregate—

伊福 誠¹・塩見政博²

Makoto IFUKU and Masahiro SHIOMI

The present paper is composed of the field measurement in Hiji river estuary and the numerical simulation for suspended solid. In the field measurement, the turbidity maximum was not able to confirm. It was the reason that the rate of discharge due to rainfall is much during the measured period. The breakage of aggregate is modeled, that is, when the diameter of the aggregate is larger than the micro-scale by Kolmogorov and the drag force acted to the aggregate exceeds the critical value, the aggregate splits into two equal fragments. In the numerical analysis, the temporal variation of suspended solid concentration agrees well with the measured results.

1. はじめに

感潮河川における懸濁物質の分布に関する特徴的なものの一つは、turbidity maximum と呼ばれる高濁度水塊が塩水遡上の上限近くに出現することである。波浪や潮汐流により河床の底泥細粒分が巻き上げられ高濁度水塊を形成し、遡上流により上流に移送され堆積する。さらに、上流から流下して来た物質が海水と接して凝集沈殿を生じ、淡塩水境界面で高濁度となる。

感潮河川における濁度の分布の空間的、時間的変化や底質の沈降・堆積、再移動過程については、とくにヨーロッパを中心として現地観測の研究が行われてきた。その一つが、ドイツ西北部の北海に注ぐウェーザー川の下流域で MASEX (Mud And Suspended sediment Experiment) と名づけられた定点観測と航走観測からなる大規模な観測であり、1983 年と 1985 年に河口から約 60 km の範囲に渡って行われた。その結果、緩混合型の水域では高濁度の領域は潮汐の干満に応じて移動し、河口から 8 ～ 12 km の付近に出現し、塩分が 6 psu の等塩分線が河床に接する付近を上端にしている場合が多いことなどが成果として得られている (Riethmüller ら, 1988)。

わが国においては、小田ら (1999) は、塩水とベントナイトを用いた系統的な室内実験を行い、塩水中における微細土粒子のフロック形成過程、終局粒径および有効密度と攪拌強度、濁質濃度および塩分との関係を定量的

に調べ、それらを予測する経験式を提案している。さらに、横山・宇野 (2001) は、環境を考慮した河川管理を行うには河川感潮域における地形や底質の形成機構を明らかにすることが重要であると主張し、現地河川における観測から turbidity maximum の挙動を明らかにしている。

河川感潮域での現地観測は、採水分析による多点観測の時空間精度の問題や移動速度が速いこと、漁業や船の航行の障害になるといった社会的理由等により極めて困難であるという状況にもかかわらず、上述したように種々の研究が行われてきた。しかしながら、懸濁物質の動態に関する詳細な資料は依然として不足しているのが現状である。

楠田ら (1978)、足立 (1982) は実験で凝集体の終局径と塩分および攪拌強度との関係について貴重な資料を得ているが、成長過程や分裂機構についての議論はなされていない。伊福ら (2002) は、2001 年の CCD カメラによる観測で凝集体は最大で 2 ～ 3 mm 程度であることを得ている。これ以上の大きさの凝集体が観測されなかったのは、凝集体が何らかの要因で分裂しているのではないかと考えられる。

こうしたことから、本研究では愛媛県南西部に位置する一級河川である肱川の感潮域において、レーザー回折式粒度分布計、超音波ドップラー式多層流速計、塩分計および濁度計等を用いて 2 点同時観測を行い、懸濁物質の動態について調べるとともに、伊福・原楨 (2005) が解析で用いた数値モデルに分裂機構を組み入れ、凝集体の成長・分裂が懸濁粒子の動態に及ぼす影響についての基礎的資料を得ようとしたものである。

1 正 会 員 工博 愛媛大学大学院教授 理工学研究科生産環境工学専攻

2 学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻

2. 観測点および観測機器

(1) 観測点

愛媛県の肱川を観測対象とした。2001～2005年まで観測を継続してきた地点（河口から6 km）が観測を続行するには不適な環境になったため、約800 m上流に観測点を移して、水位、流向・流速、水温、塩分、pH、濁度、DOおよび懸濁物質濃度を観測した（図-1）。

図-2は、観測点付近の河道形態を示す。河川水は右方向から左方向へと流れ、観測点の下流側約350 mと上流側約250 m付近で河道は大きく蛇行している。

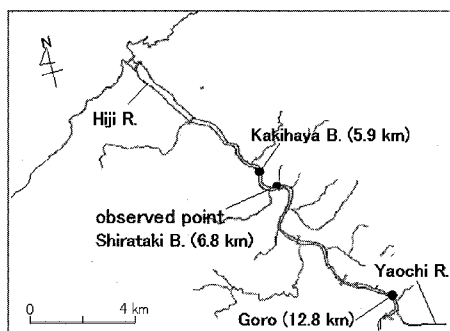


図-1 観測点と国土交通省の水位観測所

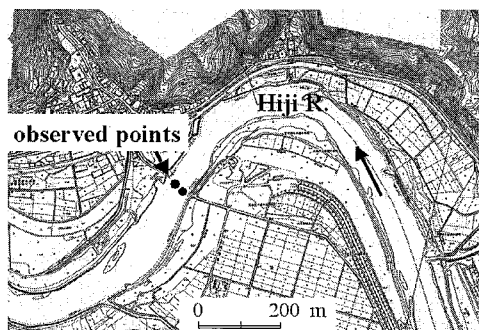


図-2 観測点付近の河道形態

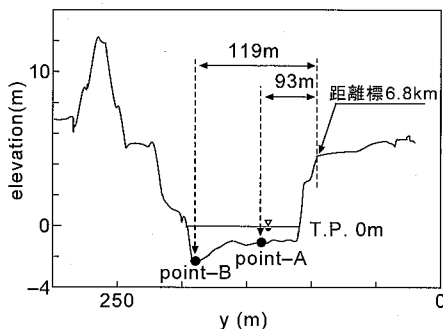


図-3 観測地点の横断形状

図-3は、観測点の断面形状を示したものである。観測点は、河口から6.8 kmの地点で既往の調査では塩水の遡上が確認されている。観測点付近は、肱川河口から6.6 km～7.0 km付近の直線区間にあり、左岸側に滞りが形成されている。観測点は、右岸の河川距離標6.8 kmから直角方向に93 mの位置に point-A、119 mの位置に point-B を設けた。なお、point-A は右岸と滞筋への勾配変化点の中央部付近、point-B は左岸側の滞筋にあたる。

(2) 観測機器

図-3中の point-A では、流速3成分、水位および水温は SonTek 社製のドップラー式流速計 (ADV)、塩分および濁度は、それぞれ Seabird 社製の電導度センサ (SBE-37) および D&A Instrument 社製の濁度計 (OBS-3) で測定した。さらに、レーザー回折式粒度分布計 (LISST-100) を設置して懸濁物質の粒径・濃度を測定した。なお、各計測機器は、架台に取り付け、各種センサを河床上30 cmの位置に設置した。

point-B では、SonTek 社製のドップラー式多層流速計 (PC-ADP) と YSI ナノテック社製の多項目水質計 (6600S) を設置した。機器は架台に設置し、ドップラー式多層流速計および多項目水質計のセンサは、それぞれ河床面から約15 cmおよび約10 cmの高さに設定した。

データのサンプリング間隔は各観測点の各物理量において10分である。ただし、point-Aの各物理量においてはレーザー回折式粒度分布計を除いて5分間隔である。また、各観測点における縦断方向、横断方向および鉛直方向流速は、それぞれ上流方向、右岸方向および鉛直上方向を正とした。また、潮位は、アプリケーションソフト“潮時表”（酒巻，1996）による肱川河口に位置する大洲市長浜港における推算値を用いた。なお、図中の y 軸は、河口より6.8 km上流の右岸側にある距離標の位置をゼロとしている。

3. 解析結果

観測は2006年2月21日から約14日間実施したが、解析対象は、潮位が高く肱川で塩水の遡上距離が比較的に長い中潮（2月25日）から大潮（2月26日～3月1日）の期間とした。

(1) point-A における水位、塩分、流速、懸濁物質濃度

図-4は、point-Aにおいて観測した水位 (h)、縦断方向流速 (u)、懸濁物質濃度 (Cs)、塩分 (S)、水温 (t)、長浜港における潮位 (h_t) および河口から12.8 kmにある五郎観測所における流量 (Q) の経時変化である。解析期間中、渇水期にも関わらず、降雨の影響で

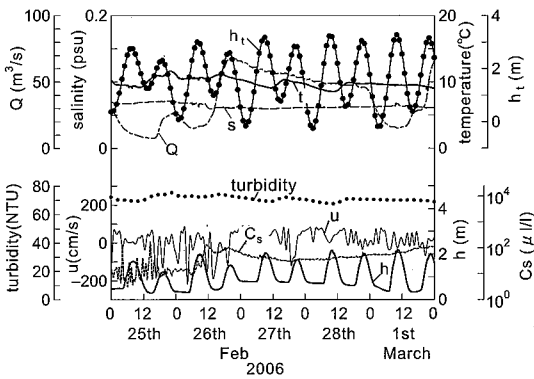


図-4 観測した物理量の経時変化 (point-A)

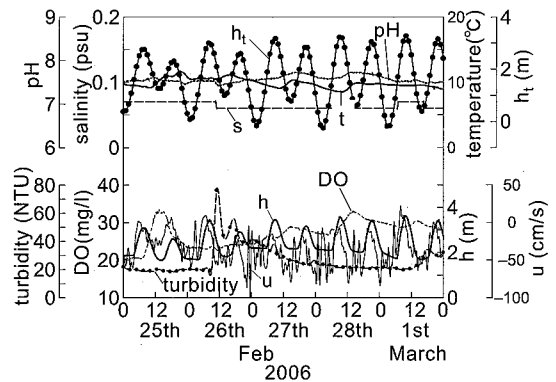


図-7 観測した物理量の経時変化 (point-B)

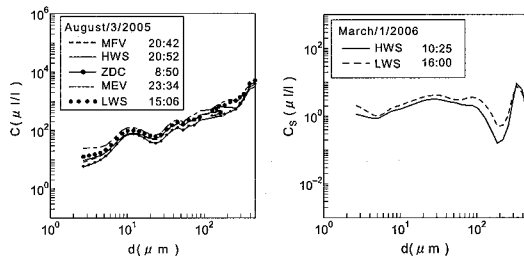


図-5 濃度スペクトル(2005) 図-6 濃度スペクトル(2006)

6月4日16時頃から $50\text{ m}^3/\text{s}$ を超える流量が50時間程度継続している。塩分は 0.1 psu 以下であり、ほとんど変動していない。濁度は、 70 NTU を境に僅かに上昇・下降するものの塩分同様、ほとんど変化していない。また、懸濁物質濃度は、2月26日12時以降、 $50\sim 100\text{ }\mu\text{l/l}$ 程度で大きな変化はない。さらに、2005年の観測時には、河口から 6 km の地点で $10^4\text{ }\mu\text{l/l}$ 程度を記録しているが、それと比較すると極めて低い(伊福・塩見, 2006)。なお、塩分、濁度および懸濁物質濃度の変動が潮位の変動に関わらず小さいのは、2月21～22日および2月26日の降雨(気象庁, 2006)が原因であると考えられる。

図-5は、2005年のpoint 1(滞筋)における懸濁物質の濃度スペクトルである。2～ $10\text{ }\mu\text{m}$ の粒径では、粒径の増大に伴って濃度も増大し、 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ の粒径では粒径が増大するにつれて濃度は低下するが、粒径が $20\text{ }\mu\text{m}$ 以上になると再び粒径の増大に伴って濃度は増大する。また、懸濁物質濃度は2001年には $10^{-2}\sim 10^2\text{ }\mu\text{l/l}$ であるのに対して2005年は $10\sim 10^3\text{ }\mu\text{l/l}$ であり、 $10\sim 1,000$ 倍程度高い。

図-6は、2006年のpoint-A(滞筋)における懸濁物質の濃度スペクトルである。流量は $15\text{ m}^3/\text{s}$ 程度である。2～ $100\text{ }\mu\text{m}$ の粒径では、粒径の増大に伴って濃度は $1\sim 30\text{ }\mu\text{l/l}$ 程度まで増大するが、その増大の割合は、

図-5より小さい。 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ の粒径では、濃度は急激に減少する。さらに、 $300\text{ }\mu\text{m}$ の粒径では、濃度は最大となる。なお、図-5と比較すると濃度は、 $1/100\sim 1/1,000$ 程度でありかなり低い。

(2) point-Bにおける水位、塩分、流速、pH、DO

図-7は、point-Aにおいて観測した水位(h)、縦断方向流速(u)、塩分(S)、水温(t)、DO、pHおよび長浜港における潮位(h_t)の経時変化である。塩分は、point-Aとほぼ同一濃度であり、その傾向も似ている。濁度は、2月26日12時頃に 80 NTU 程度のピーク値を示し、その後20時間程度 40 NTU を持続するが、それ以降は 30 NTU のほぼ一定の値である。解析期間中の縦断方向流速は負であることから、滞筋を通して上流から輸送されて来た土砂に起因するものであり、滞筋特有の現象ではないかと考える。溶存酸素は、2月25日、27、28および3月1日は高低潮時の位相付近で小さなピークを示す。この時間は、日射量の多い時間帯であることから光合成による酸素供給であると推測されるが、特定するまでには至っていない。また、降雨の影響で流量が増大し、流速が速くなっているため界面に溶ける酸素量が増加したことも考えられる。また、pHは 7.5 程度の値を示し大きな変動はないものの、詳細にみると低高潮時付近では最大となるようである。

4. 数値解析

(1) 凝集体の分裂のモデル化

凝集体は流体中では微細粒子が衝突・合体して成長する訳であるが、楠田ら、足立および小田らの実験的研究では、凝集体の成長過程については詳細な検討がなされているが、分裂機構についての議論はなされていない。

流動する流体中における凝集体の成長は塩分と攪拌強度に関係する訳であるが、凝集体の大きさは無限にはならない。これは成長した凝集体が流体中で分裂するためである。その分裂の要因となるのが凝集体に作用する流

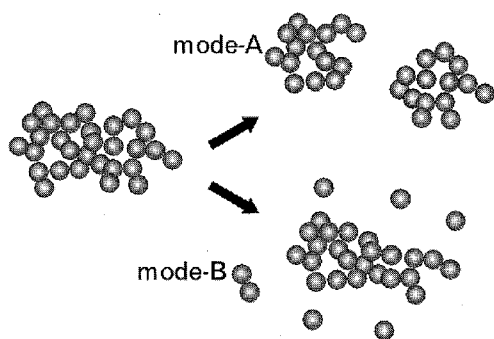


図-8 凝集体の分裂モード (Gregory, 2006)

体力であると考ええる。

成長した凝集体の分裂には、図-8のような2つのモードがあるといわれている (Gregory, 2006)。

- mode-A: ほぼ同じ大きさの二つの凝集体に分裂する。
- mode-B: 凝集体の表面から小粒径のものが剥がれる。本研究で対象した懸濁物質の凝集体は、小粒径の集合としては捉えず成長した1個の凝集体であるとした取り扱いをしていることから、取り扱いが容易な mode-A を分裂モードとして選択し、以下のことを考える。

- (1) 凝集体の粒径は、Kolmogorov の micro-scale, $l_k = (\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ (ν : 動粘性係数, ϵ : 単位質量当たりのエネルギー逸散) より大きくなると分裂する。
- (2) 凝集体に作用する抗力がしきい値より大きくなると分裂する。
- (3) 正規乱数法を用いて乱数を発生させ、乱数が平均値以上であると分裂する。

上述の(1)~(3)を全て満足した場合、凝集体は分裂するものと判定する。

この分裂機構を鉛直2次元数値モデル (伊福・原横, 2005) に組み入れ、2001年の観測結果に基づいた解析を行った。また、解析には σ 座標系を採用し、水平方向の間隔は25 m、鉛直方向は10分割、時間間隔は0.5 sとした。

(2) 凝集体が分裂する抗力のしきい値と乱数

凝集体の分裂を考慮する解析において、凝集体が分裂する単位面積当たりの抗力のしきい値は1, 10 および 10^2 N/m^2 として解析した。なお、乱数は平均値および標準偏差を、それぞれ2および0.5として発生させた。

(3) 上下流域における条件

縦断方向の解析範囲は10.5 km である。2001年6月2日22時~6月5日10時40分までを1サイクルとし、下流域においては長浜港における潮位の予測値をアプリケーションソフト“潮時表”から抽出し境界値として与えた。一方、上流域では河口より12.8 km 上流に

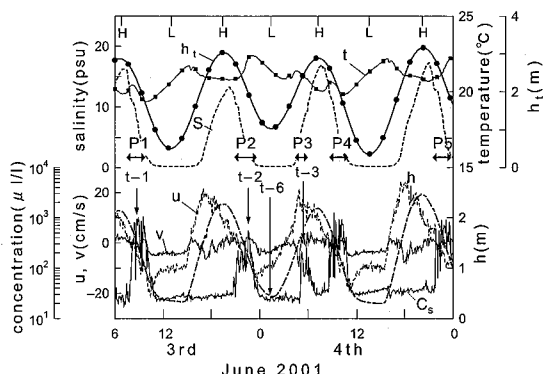


図-9 観測した物理量の経時変化 (2001)

ある五郎観測所における河川の固有流量 ($9.7 \sim 10.1 \text{ m}^3/\text{s}$) を与えた。また、上流境界における懸濁物質の粒径、密度および濃度は、それぞれ $5 \mu\text{m}$, 2.650 kg/m^3 および 10 mg/l とした。なお、計算は前述の1サイクルを10サイクル分計算した。

以下、9サイクル目から10サイクル目にかけての結果について述べる。

(4) 計算結果

図-9は、2001年6月の観測によって得た結果である (伊福ら, 2002)。懸濁粒子濃度は、縦断方向流速 u が上流向きから下流向きへ逆転する位相付近から急激に増大する。なお、その位相における塩分は8 psu 程度である。

図-10は、凝集体の分裂を無視した場合と考慮した場合の河口から6 kmの地点における河床から0.1 mの高さにおける懸濁物質濃度の解析結果である。分裂を無視した場合の懸濁粒子の挙動は、第一の著者が2001年6月の観測によって得た結果をほぼ再現できている。しかしながら、6月3日9時付近の懸濁粒子の急激な増大を再現できていないこと、6月4日6時付近では、懸濁粒子濃度は小さなコブ状の変化が見られるが観測結果と比較するとその変動が僅かであること、観測結果における6月4日8時付近の懸濁粒子濃度は 30 mg/l 前後であるが、計算結果は懸濁粒子濃度の低下の割合が観測結果よりも小さく、懸濁粒子濃度は 100 mg/l 程度であり、十分な精度では再現し得ていない。凝集体が分裂する抗力のしきい値を1, 10 および 10^2 N/m^2 として解析した場合、しきい値が 1 N/m^2 の場合には分裂を考慮しない場合より低めであるが、10 および 10^2 N/m^2 の場合には、ほぼ同一の濃度変化である。しかしながら、分裂を無視した解析では観測結果で得た6月3日9時付近の変動を十分な精度で再現できていないが、分裂を考慮した結果は、分裂を無視した場合の7倍程度の濃度変動を示し、観測で得た懸濁物質濃度の1/10程度になっている。

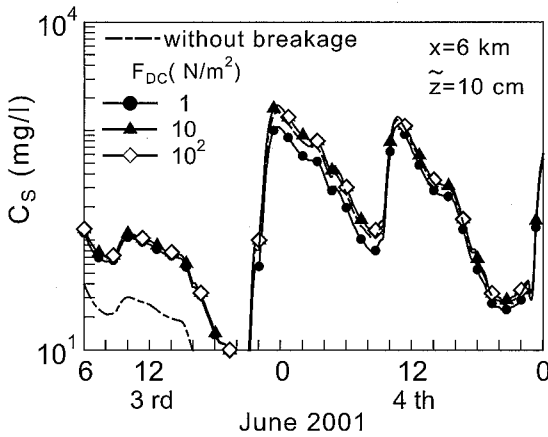


図-10 分裂の有無による懸濁物質の濃度変動
(F_{DC} : 抗力のしきい値, z : 河床からの高さ)

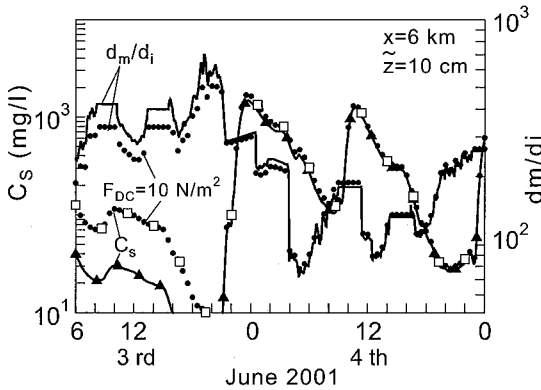


図-11 分裂の有無による懸濁物質の濃度と粒径
(d_m : 終局粒径, d_i : 初期粒径, —●—: 分裂無視,□.....: 分裂考慮)

ピークが生ずる位相や濃度の絶対値は、若干異なるものの凝集体の分裂を考慮することによって、感潮域における懸濁物質の挙動を再現し得たのではないかと考える。なお、分裂のモデル化に用いたパラメータについては、より詳細な検討が必要であると考ええる。

図-11は、凝集体の分裂の有無による懸濁物質濃度と粒径の時系列である。なお、図中の実線および点線は、それぞれ分裂を無視および考慮した場合である。粒径が極大値を示す1.5～4時間程度後に濃度は極大値を示す。解析期間前半部では観測結果の再現度は低いが、分裂を考慮した解析では、30%程度の粒径の減少に伴って沈降速度が減少し、濃度の増大に繋がったようである。

5. おわりに

本研究では肱川の感潮域を対象として現地観測を行い懸濁物質の動態について調べるとともに、鉛直2次元数

値モデルを用いて、凝集体の成長・分裂が懸濁粒子の動態に及ぼす影響についての基礎的資料を得ようとしたものである。得た結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 解析期間とした2006年2月25日～3月2日において塩分は0.06～0.07 psu程度と非常に低く、塩水遡上は確認されなかった。これは、観測期間中の日雨量20 mmを越える降雨に起因する流量の増大が原因である。
- (2) 塩水の遡上に伴う高濁度水塊は発生せず、懸濁物質濃度は、解析期間全体を通して極めて低く、上流からの輸送に起因する。
- (3) 日潮不等を考慮し凝集体の分裂を無視した解析では、現地観測で得た解析期間前半部の懸濁物質濃度の変動を十分な精度で再現できなかった。しかし、凝集体の分裂を考慮した解析では、解析期間前半部において懸濁物質濃度は観測結果の1/10程度ではあるものの濃度が増大する結果を得、現地観測結果を再現できた。なお、分裂機構については再考の余地があると考ええる。

謝辞：本研究は、科学研究費（基盤研究（B）No. 17360230、代表者：真野 明）の補助を受けて行ったこと、観測にあたっては、国土交通省大洲河川国道事務所へ便宜を図って戴いたことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 足立重昭(1982): 塩水中におけるベントナイトのフロック形成について、技研資料, No.421, pp. 1-16.
- 伊福 誠・合田宏隆・中田正人(2002): 肱川感潮域における懸濁粒子の観測, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 351-355.
- 伊福 誠・原横利幸(2005): 肱川感潮域における懸濁粒子の動態, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 921-925.
- 小田一紀・宋 元平・芝村 圭・農本 充(1999): 塩水中における微細土粒子の凝集・沈降過程に関する研究—ベントナイトをモデルとして—, 海岸工学論文集, 46巻, pp. 981-985.
- 気象庁ホームページ(2006): <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>.
- 楠田哲也・古賀憲一・栗谷陽一(1978): 塩水中における粘土粒子の凝集, 用水と廃水, Vol.20, No.3, pp. 295-300.
- 酒巻輝幸(1996): 潮時表, <http://www.twin.ne.jp/~sakamaki/>.
- 横山勝英・宇野誠高(2001): 河川感潮域における高濁度水塊の挙動—強混合河川の場合—, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 631-635.
- Gregory, J. (2006): Particles in Water-Properties and Processes-, IWA Publishing, p. 117.
- Riethmüller, R. et al. (1998): Hydrographic Measurement in the turbidity zone of the Weser estuary. In J. Dronkers and van Leussen eds, Physical Process in Estuaries, Springer-Verlag, pp. 332-344.