

肱川感潮域における懸濁物質の観測

伊福 誠¹・塩見政博²

2001 年の観測結果に基づいた数値解析結果は、潮位の変動に伴う塩分の変動を十分には再現できなかった。これは、マウンドと渚での流動や物質輸送のメカニズムに差があるのではないかと考え、2001 年の観測時とほぼ同一の場所で河川の横断方向に複数の観測点を設けて観測を行った。懸濁物質濃度が極小値をとる位相は縦断方向流速が下流向きから上流向きに逆転する位相とほぼ同位相であった。渚における水温の変動幅が小さく、水温が緩やかな上昇を示す場合には、懸濁物質濃度は徐々に高くなる。このことは、懸濁物質濃度の凝集には季節的な差違があることを示唆するものではないかと考える。

1. はじめに

塩水遡上の影響を受ける河川感潮域においては、懸濁物質の凝集が生じやすいことが経験的によく知られている。河川感潮域に存在している様々な懸濁物質の動態を知ることは感潮域における物質輸送、循環、水質および生態系等を考えるうえで重要である。しかしながら、河川感潮域を対象とした研究は、上流と比較して極めて少なく、その理解は遅れているように思える。これは、河川工学の研究の主たる対象は、潮汐の影響が現れない上流側であるのに対して、海岸工学における研究は河口で止まっていることが多く、感潮域は両分野の境界領域にあたるためである。それだけ感潮域における水理現象は極めて複雑であるといえる。このことから、上・下流域における問題への対処法をそのまま感潮域に適用するのは必ずしも合理的でないので、現象の解明には継続的に研究を遂行する必要がある（西條・奥田, 2000）。

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輸送され堆積する。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、時間的变化や底質の沈降・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 (Riethmuller 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、横山ら (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。

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 3 点同時観測を行い、懸濁物質の動態についての基礎的資料を得ようとしたものである。

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。図-1 示すように、河口から 6 km 上流付近に観測点を設け、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-2 は、観測点付近の河道形態と河口から 5.8, 6 および 6.2 km の断面形状を示す。河川水は右方向から左方向へと流れ、観測点の下流側約 300 m と上流側約 200 m 付近で河道は大きく蛇行している。河口より 5.8 km

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

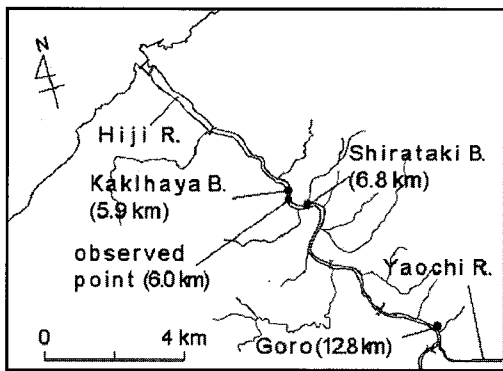


図-1 観測点と国土交通省の水位観測所

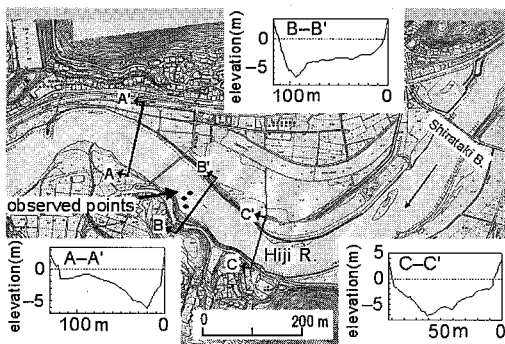


図-2 観測点付近の河道形態

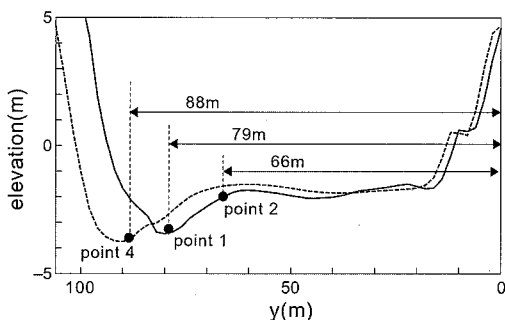


図-3 観測点付近の横断形状

(A-A') では右岸側に滞が存在し左岸側は水深が浅くなっている。また、6 km (B-B') では左岸側に滞が存在し、右岸側に比較的幅が広く水深の浅いマウンドが形成されている。また、6.2 km (C-C') では滞は河道のほぼ中央に存在する。このように、観測点付近の河川形態および断面形状は極めて複雑であることが確認できる。なお、図-3 は観測点付近の断面形状を示したものである。実線は河口から 6 km 上流地点、破線は 6 km 地点から約 20 m 上流の断面を示している。両観測断面では左岸側に滞が存在し、右岸側には比較的幅が広く水深が

浅いマウンドが形成されている。また、観測機器は右岸にある 6 km の距離標 (T.P. + 4.6 km) より左岸側に 79 m の滞のほぼ中央(以下、point 1 と記す)と斜面の法肩にあたる右岸から 66 m の地点 (以下、point 2 と記す) と、point 1 より約 20 m 上流側の滞 (以下、point 4 と記す) の合計 3 点に設置した。なお、2004 年に観測を実施した point 3 については、今回は測器を設置していない。

(2) 観測機器

図-3 中の point 1 では、レーザー回折式粒度分布計 (LISST-100) および YSI ナノテック社製の 6600 s, SonTek 社製のドップラー式多層流速計 (PC-ADP) を設置し、塩分、DO、pH、濁度、水位、水温、懸濁物質濃度および流速 3 成分を計測した。なお、LISST-100 の測定範囲は 2.5~500 μm である。point 2 では、流速 3 成分、水位および水温を計測するため SonTek 社製のドップラー式流速計 (ADV) を設置した。また、塩分および濁度は、それぞれ Seabird 社製の電解度センサ (SBE-37) および D&A Instrument 社製の濁度計 (OBS-3) で測定した。さらに、point 1 と同様に、レーザー回折式粒度分布計 (LISST-100) により懸濁物質濃度を計測した。point 4 では、ドップラー式多層流速計 (PC-ADP) を設置し、水位および流速 3 成分を計測した。

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 2 の各物理量においてはレーザー回折式粒度分布計 (LISST-100) 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 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 2005 年 7 月 28 日から約 14 日間実施したが、解析対象期間中は中潮から大潮にあたる 8 月 1 日~8 月 3 日とした。

(1) point 1 における水位、流速、懸濁物質濃度

図-4 は、point 1 (滞) において観測した水位 (h)、縦断方向流速 (u)、懸濁物質濃度 (C_s)、塩分 (S)、水温 (t)、長浜港における潮位 (h_t) の経時変化である。解析期間中における塩分は、大潮に近づくにつれ満潮時には僅かに低下するものの、20 psu 程度ではほぼ一定である。なお、潮位変動との相関はない。懸濁物質濃度は、8 月 1 日 0 時以降、僅かな変動をしながら徐々に高くな

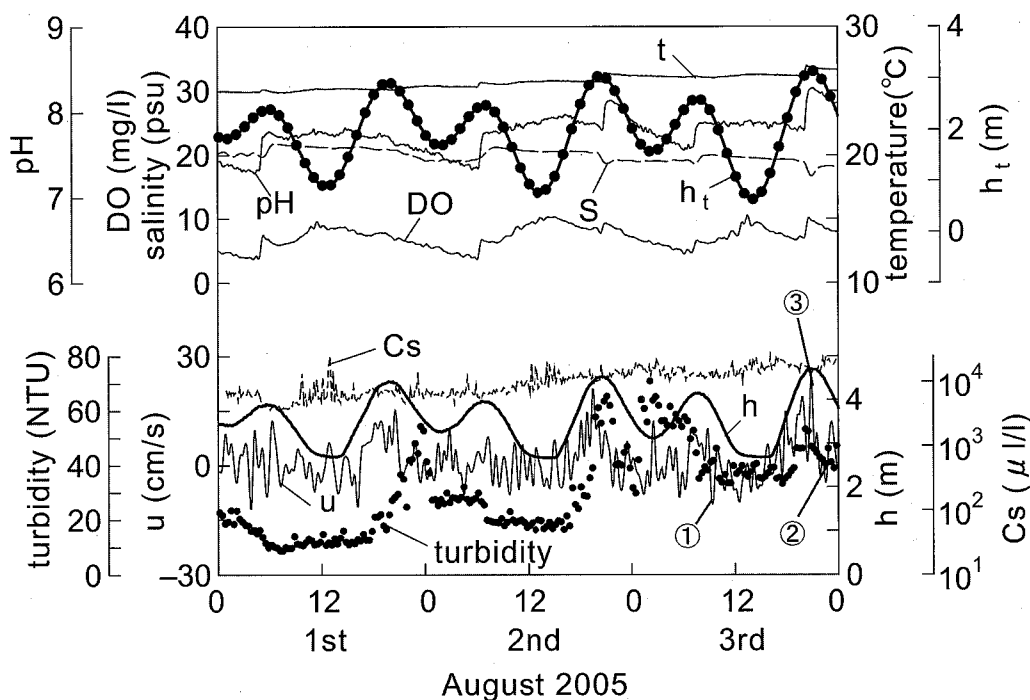


図-4 観測した物理量の経時変化 (point 1)

り、 $10^4 \mu\text{l/l}$ 程度の値を示す。詳細にみると、低低潮時付近では、僅かではあるが濃度が上昇する。これは、上流からの懸濁物質の輸送に起因するものと考えられる。懸濁物質濃度と縦断方向流速との関係を見ると、2001年の観測（伊福ら；2002）にみられた結果、すなわち、縦断方向流速が上流向きから下流向きに逆転する位相付近から懸濁物質濃度は急激に増大することとは異なる挙動を呈する。これは、塩水の遡上・流下および水温の変化がほとんどない滞特有の現象である。DOは、半日周潮のうち低低潮時付近で最大となり、低高潮時付近で最小となる。解析期間中の低低潮時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によるものとも推測できるが、特定するまでには至っていない。また、pHは7.2~8程度の値を示し大きな変動はないものの、低高潮時付近では最小となる。とくに、大潮である2日と3日には、高高潮時付近で最大となる。こうしたDOやpHの変動は感潮域特有の現象ではないかと考える。

図-5は、point1の8月3日における縦断方向流速分布である。河床に最も近いセルでの縦断方向流速の上流向き振幅が最大となるMFVの位相（図-4中の③）では、水深の1/2付近を境にして流れの向きが逆である。また、縦断方向流速が上流向きから下流向きに逆転するZDCの位相（図-4中の②）では、河床からの高さが3.5m付近ではMEVの位相よりも流速振幅が大きい。さらに、縦断方向流速の下流向き振幅が最大となる

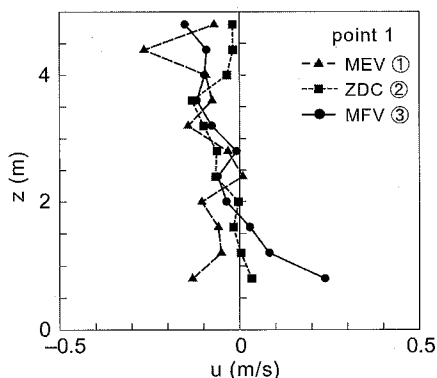


図-5 point 1 における縦断方向流速分布

MEVの位相（図-4中の①）では、ほぼ流れは下流向きではあるが水深の1/2程度では流速振幅はほぼ0である。図-4における塩分や懸濁物質の変動は観測点付近の局所地形の影響に起因するものではないかと考える。

(2) point 2 における水位、流速、懸濁物質濃度

図-6は、point 2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) の経時変化である。塩分は0~20 psu程度であり、潮位・水位が最高となる位相から40~90分遅れて最大となるものの潮位・水位変動と良く対応している。しかしながら、低高潮時には高高潮

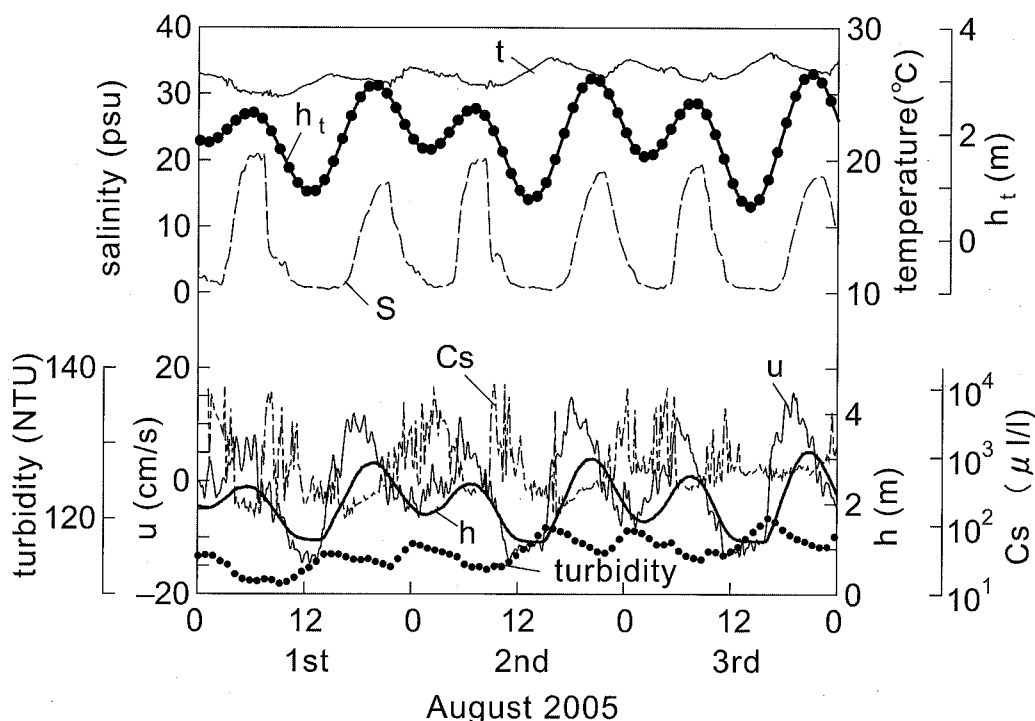


図-6 観測した物理量の経時変化 (point 2)

時よりも塩分は僅かに高いようであり、中潮の8月1日と2日は大潮の3日よりその傾向が顕著である。また、懸濁物質濃度は、水位が最大となる位相より1~2時間遅れて縦断方向流速が上流向きから下流向きに向きに逆転する位相付近で急激に増大する。これは、伊福ら(2002)が得た結果とほぼ一致するが、高濃度を維持する時間は3~5時間程度であり、2001年の観測結果より僅かに長い。なお、8月1日の12時頃を除けば、下流向き流速が最大となる位相付近で懸濁物質濃度は高い。これは、上流からの輸送に起因するものと考えられる。さらに、水温と濁度は、縦断方向流速が下流向きから上流向きに変わる位相付近で最大値を示し、濁度は塩分が最大となる位相で最小となる。

図-7は、河床から約10cmの高さで得た8月1日から3日における流速3成分の経時変化を示したものである。横断方向流速の振幅は極めて小さい。縦断方向流速は、中潮から大潮に推移するにつれて上流向き流速の振幅が増大する傾向にある。また、鉛直方向流速の振幅は、縦断方向流速のその1/2程度でかなり大きく、縦断方向流速が上流向きの位相においては鉛直上向きである。これは、point 2が斜面の法肩に位置することから、塩水の遡上に伴う斜昇流の存在を示唆するものではないかと考える。

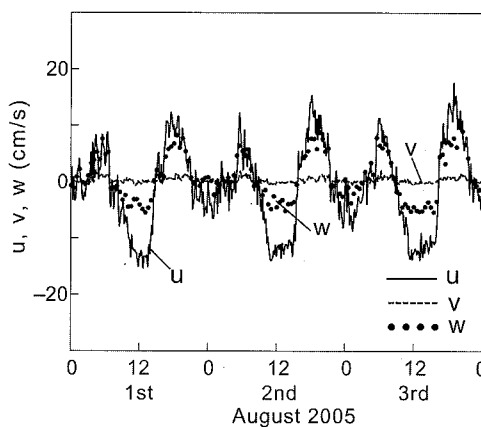


図-7 流速3成分の経時変化 (point 2)

(3) 濃度スペクトル

図-8は、2001年6月の観測で得た懸濁物質の濃度スペクトルである。なお、図中のMFV, HWS, ZDC, MEVおよびLWSは、それぞれ上流向き流速が最大となる位相、最高水位の位相、縦断方向流速が上流向きから下流向きへと逆転する位相、下流向き流速が最大となる位相および最低水位の位相である。ZDCの位相を除けば、懸濁物質濃度は粒径が増大するにつれて増大する。ZDCの位相における40~100 μ mの粒径の濃度低下

よび $300\mu\text{m}$ 以上の粒径の濃度増大は、吸着によるものではないかと考えた。さらに、2004年2月の観測結果から、粒径が $10\sim 300\mu\text{m}$ の粒子が $0.8\sim 100\mu\text{l/l}$ の濃度を示し、粒径が $300\mu\text{m}$ 以上の粒子の濃度は低下しており、 $8\mu\text{m}$ 以下の微細粒子の濃度は極めて低いことを得ている。

図-9は、2005年の point 1 における懸濁物質の濃度スペクトルである。 $2\sim 10\mu\text{m}$ の粒径では、粒径の増大に伴って濃度も増大し、 $10\sim 20\mu\text{m}$ 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 $20\mu\text{m}$ 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 $10^{-2}\sim 10^2\mu\text{l/l}$ であるのに対して2005年は $10\sim 10^3\mu\text{l/l}$ であり、 $10\sim 1,000$ 倍程度高い。なお、2004年2月の観測結果にみられたような $300\mu\text{m}$ 以上の粒子の濃度低下、 $8\mu\text{m}$ 以下の粒径の濃度が著しく低いといった傾向、あるいは2001年6月のZDCの位相における $40\sim 100\mu\text{m}$ の粒子の濃度低下も生じていない。2005年と2001年の濃度分布の差異は、2005年の観測点である point 1 は図-3に示すように滞

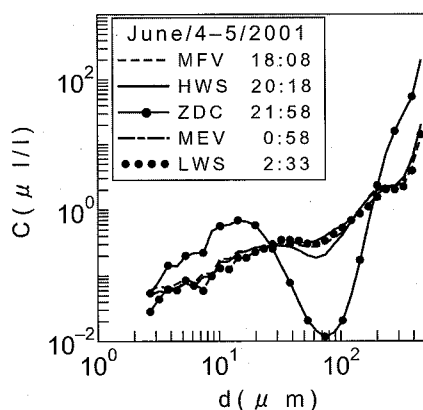


図-8 濃度スペクトル (2001年)

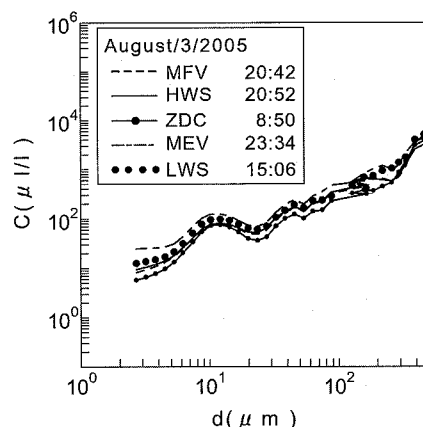


図-9 濃度スペクトル (2005年)

に位置しているのに対して、2001年の観測点は河道内に形成されているマウンド上に位置しており、観測位置の違いによる地理的条件が異なることや観測時期の違いなどが考えられる。また、2005年と2004年の濃度分布の差異は、2004年の観測での滞における水温に比べて、2005年の観測での滞における水温の変動幅が小さく、水温が緩やかに上昇していることから、それに伴って懸濁物質濃度が常に緩やかな上昇を示しているためだと考える。

4. おわりに

愛媛県南西部に位置する肱川感潮域における観測から得た結果を要約すると以下の通りである。

- (1) マウンドと滞における、塩分や懸濁物質濃度の変動は、局所的地形に大いに影響される。
- (2) マウンドにおける懸濁物質濃度は、縦断方向流速が上流向きから下流向きに逆転する位相付近から急激に増大するという傾向は、2001年の観測結果とも一致するが濃度は $10\sim 1,000$ 倍程度高い。観測時期等の違いによるこのような傾向の差異の解明については、定期的な数点同時観測が必要であると考ええる。
- (3) マウンドにおける懸濁物質濃度の2001年との差違は、観測時期が異なるため光合成による有機物の生成量に差が生じたのも一因ではないかと考える。

謝 辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費（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に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

- 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。
- 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，第46巻，pp.981-985。
- 西條八東・奥田節夫編(2000)：河川感潮域－その自然と変貌－，名古屋大学出版会，p.12。
- 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。
- Riethmüller, R., H-U.Fanger, I.Grabemann, H.L.Krasemann, K.Ohm, H.Boening, L.J.R.Neumann, G.Lang, M.Markofsky, R.Schubert(1988)：Hydrographic measurements in the turbidity zone of the Weser estuary, In J.Dronkers and van Leussen eds, Physical Process in Estuaries, Springer-Verlag, pp.332-344。