

揚子江汽水域の流れの数値シミュレーション

東京工業大学 学生会員 ○王 張嶠
 東京工業大学 フェロー会員 石川 忠晴
 千葉工業大学 正会員 吉田 圭介

1. はじめに

揚子江汽水域の平面地形を図-1 に示す。同水域には毎年約 5×10^8 トンの細粒土砂が流下し、そのうち約 70% は 6 月～9 月の洪水期に集中している¹⁾。この大量の土砂供給のために揚子江デルタは年間に約 20m/年の速度で東に伸び²⁾、また下流部の主流は最近 500 年に北派川から南派川に移行した。南派川の河道は非常に広いが浅く、たくさんの砂州があり、滯筋は分岐し蛇行している。水深幅比 (H/B) は 0.0005-0.001 である。

揚子江沿岸は経済発展が著しく、汽水域の水上交通は活発である。このため“深水航道工程”と呼ばれる新航路建設のプロジェクトが計画されている。また、この地域の水需要の増加に対応するため、汽水域内に“青草砂貯水池”という淡水貯留域の建設が計画されている。このようなプロジェクトの実行可能性の検討と合理的設計を行うために、汽水域における土砂堆積と地形変動を定量的に把握することが望まれている^{3), 4)}。

中国東海岸では半日周潮汐が支配的であり、大潮の潮位差は 2.7m に及ぶ。一方、揚子江の縦断勾配は非常に小さいため、洪水期においても河口から 160km 上流の江陰観測所まで潮汐波が伝播する。その結果、流れの非定常性が強く、土砂移動とそれに伴う地形変化は非常に複雑で^{2), 5)}、その実態は必ずしも明らかでない。そこで本研究では、揚子江汽水域の地形変化特性を調べる基礎的段階として、数値シミュレーションにより潮汐作用のもとでの流況を求め考察した。

2. 計算方法

2.1 計算対象区間および計算期間

計算期間は 2003 年 7 月 15 日～16 日の 1 日半と

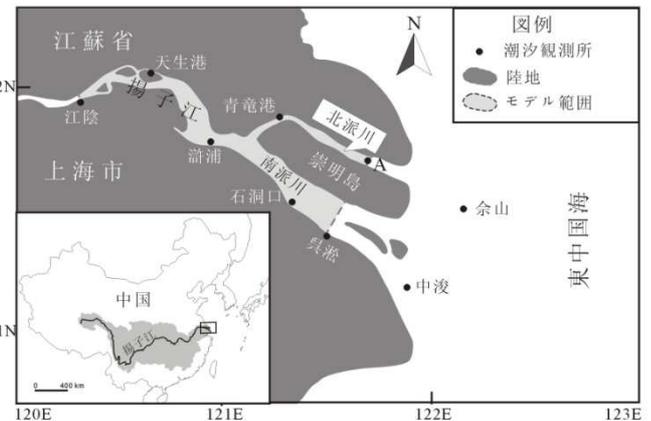


図-1 計算領域と潮位観測所の位置

した。この期間の流量は図-2 に示すように洪水期の平均的流量であった。計算区間は江陰観測所から河口近くの呉淞観測所までの約 145km である。河道地形は一連の揚子江航路図をデジタル化して作成した。

境界条件は上流端の流速と下流端の水位だが、揚子江汽水域は幅が非常に広いので、これらの横断変化が計算結果に影響を与える可能性がある。しかしそれらについての詳細な情報はない。そこで、異なる境界条件を仮定して計算を行い、その感度分析を行った上で、影響を受けない区間における流れ場の特性と土砂移動を議論した。

2.2 計算モデル

揚子江汽水域では干満差が大きいため淡塩水の混合は強混合型に属する。このため密度成層の影響は小さいものと考えられる。そこで本研究では、吉田ら⁶⁾の、二次流を考慮した浅水方程式に基づく準三次元流動シミュレーションモデルを用いた。デカルト座標系における三次元の運動方程式に Galerekin 法を適用して鉛直積分すると、以下の準三次元モデル方程式が得られる。

キーワード 準三次元モデル 二次流 境界条件 土砂移動 揚子江汽水域

連絡先 〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 東京工業大学 TEL 045-924-5515 E-mail : wang.z.ac@m.titech.ac.jp

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(MU)}{\partial x} + \frac{\partial(MV)}{\partial y} + \gamma \frac{\partial(mu')}{\partial x} + \gamma \frac{\partial(mv')}{\partial y} \\ = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial h\tau_{uu}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{uv}}{\partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(NU)}{\partial x} + \frac{\partial(NV)}{\partial y} + \gamma \frac{\partial(nu')}{\partial x} + \gamma \frac{\partial(nv')}{\partial y} \\ = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial h\tau_{uv}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{vv}}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nU)}{\partial x} + \frac{\partial(nV)}{\partial y} + \gamma \frac{\partial(Nu')}{\partial x} + \gamma \frac{\partial(Nv')}{\partial y} \\ = \frac{1}{\gamma} \left(\tau_{fv} + g_v + \frac{\partial h\tau_{f,uv}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{f,vv}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 h は水深、 H は水位、 $(M,N)=(Uh,Vh)$ 、 $(m,n)=(u\hat{h},v\hat{h})$ で、 (U,V) は鉛直平均流速、 (u',v') は二次流強度である。吉田らは二次流鉛直分布を線形関数で近似しており、その場合には $\gamma=1/12$ である。また、 ρ は流体の密度、 τ_{bx} は底面せん断応力であり、 τ_{uv} および $\tau_{f,uv}$ は平均流とその偏差成分に対して水深平均を施したレイノルズ応力を表す。吉田らは、境界適合座標系にサポートされた局所的な円筒座標系に CIP-Soroban 法を適用し、任意の曲線的な河川の流に適用できるスキームを開発している⁷⁾。詳細は参考文献を参照されたい。

上流端（江陰）では水位は観測されているが流量は観測されていない。一方、潮汐波は江陰まで遡上するので、そこでの流量は変動する。そこで趙らの揚子江一次元不定流モデル⁸⁾を用いて、江陰から流量観測が行われている大通（江陰から 480km 上流）までの潮汐波の伝播を計算し、江陰のハイドログラフを求めた。

計算下流端は、図-1に示す呉淞と北水路の A 点である。呉淞では水位が観測されているが、A 点の水位は不明である。そこで潮汐波の伝播を考えて青竜港と佘山の潮位観測所の観測水位を内挿して A 点の水位を推定した。

予備計算で Manning の粗度係数 n を検討した。計算区間には呉淞と江陰の他に 3 か所の水位観測所がある（天生港、滸浦、石洞口）。そこで前述の一次元不定流計算で求めた流量をもとに暫定的に上流端流速分布を均一とし、また下流端水位を横断方向に

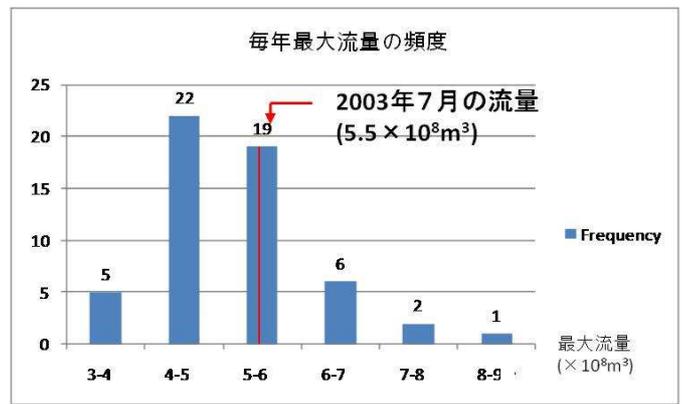


図-2 年最大流量の頻度分布

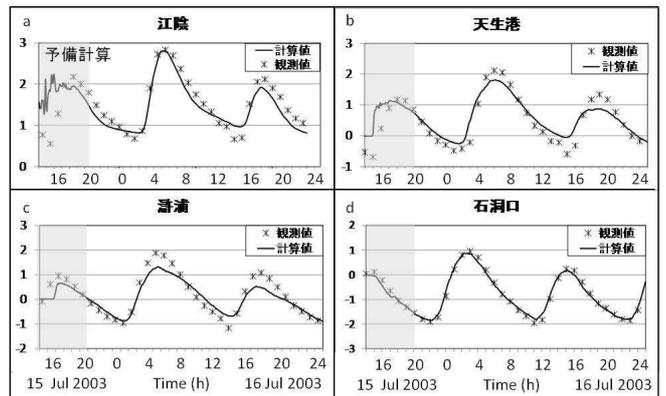


図-3 粗度係数のキャリブレーション結果

一定として、粗度係数を種々仮定して計算を行ったところ、 $n=0.024$ で図-3に示すように各観測所の値と良い一致をみた。

3. 境界条件の影響の検討

前述したように、本計算では上流端（江陰）の流速分布と下流端（呉淞）の水位分布を境界条件として与える必要がある。しかしそれらについての詳細な情報はない。そこで、境界条件の与え方を以下のように複数設定し、この不確定要素の影響範囲を調べた。

前述したように、江陰における流入量の波形は一次元解析から求められている。そこでこの流量波形のもとで2つの方法で流速横断分布を設定し、両者の計算結果の比較から上流境界条件の影響範囲を推定した。一つの方法は Manning 式 $U=(1/n)h^{2/3}I^{1/2}$ を用いて単位幅あたり流量 q を $h^{5/3}$ に比例させる方法、もう一つは q が横断方向に一定とするものである。2つの計算結果の差は式(5)で定義される指標 IE で評価した。

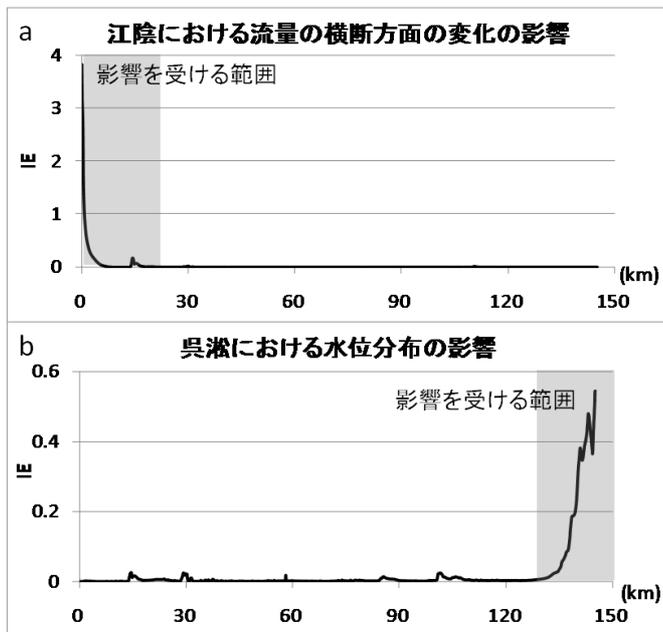


図-4 誤差指標 IE の分布

$$IE = \frac{\sum_{i=1}^N (\sum_{t=1}^T \frac{(u_{1i}^t - u_{2i}^t)^2 + (v_{1i}^t - v_{2i}^t)^2}{T})}{\sum_{i=1}^N (\frac{\sum_{t=1}^T u_{1i}^t}{T})^2 + (\frac{\sum_{t=1}^T v_{1i}^t}{T})^2} \quad (5)$$

ここに、 (u_{1i}^t, v_{1i}^t) と (u_{2i}^t, v_{2i}^t) は、2つの計算結果における時刻 t での断面内の第 i 格子点の流速ベクトルで、 T は潮汐の周期である。

江陰から呉淞までの IE の縦断分布を図-4-a に示す。この図より、上流境界における流量の横断偏差の影響は、江陰から 20km の区間内に限られていることがわかる。

次に下流端断面（呉淞）における水位横断分布の影響について調べた。河口のすぐ外にある余山と中浚（図 1）の潮位観測データから外海での水位勾配を求め、その代表値を与えて計算を行った結果と、水位が横断方向に水平であると仮定して計算を行った結果から、式(5)による IE の縦断分布を求めた（図-4-b）。その結果、水位の仮定の影響は呉淞から 20km 上流までしか及ばないことがわかった。

以上より、上下流の各 20km を除く 110km の区間の数値シミュレーション結果は、境界条件の影響をほとんど受けていないことが明らかとなった。そこで次節では、この 110km 区間での流れ特性について考察する。

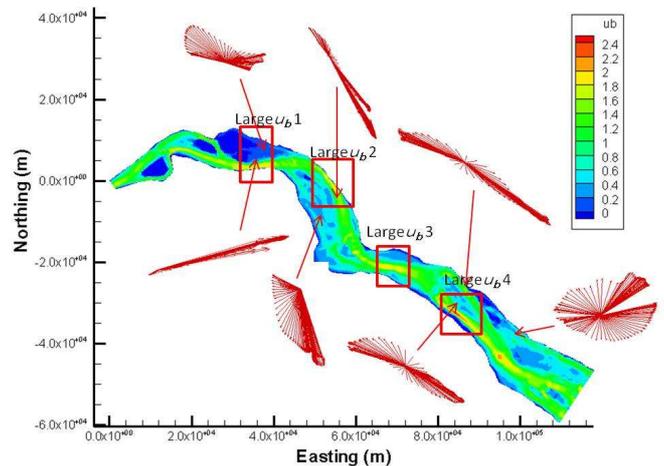


図-6 流速の回転性と最大底面流速 (u_b) 分布

4. 計算結果

4.1 非定常流況

解析結果から 1 潮汐間の流速ベクトルの変動を求め非定常特性を検討した結果を 7 地点について図-6 に示す。図中のカラーコンターは下げ潮の時間帯における最大底面速度 (u_b) を示している。 u_b の大きい部分は滞筋に相当する。図中に付した矩形については後述する。滞筋では上げ潮と下げ潮でちょうど逆向きの流向となり、その間も概ね単振動的挙動を示している。一方、砂州に対応する最大流速の小さな領域（概ね青色）では、1 潮汐の間に流向が大きく変動し、ベクトル先端が楕円上になっている。これらの地点では滞筋から離れる流向の時間帯が長いので、滞筋を中心に流下する細粒土砂が砂州方向に輸送される可能性のあることを示唆している。

次に u_b の空間分布に着目すると、矩形で囲った 4 地点で大きな値をとり、それらは 20-22km の等間隔に位置していることがわかる。また 4 か所の全てにおいて横に大きな砂州が存在する。したがって、このような流れの周期性は砂州地形の周期的発達と密接に連動しているものと考えられる。

4.2 非定常流況下での土砂移動

河床を構成する土砂の移動は、引き潮時の浮上と満潮の滞留時の沈降の繰り返しから成る。一方、掃流力は底面流速 u_b の単調増加関数と考えられるから、図-6 のカラーコンターで示される u_b の大きな領域から浮上する割合が大きいと考えられる。そこで、計算された非定常流速場において、引き潮時に当該区

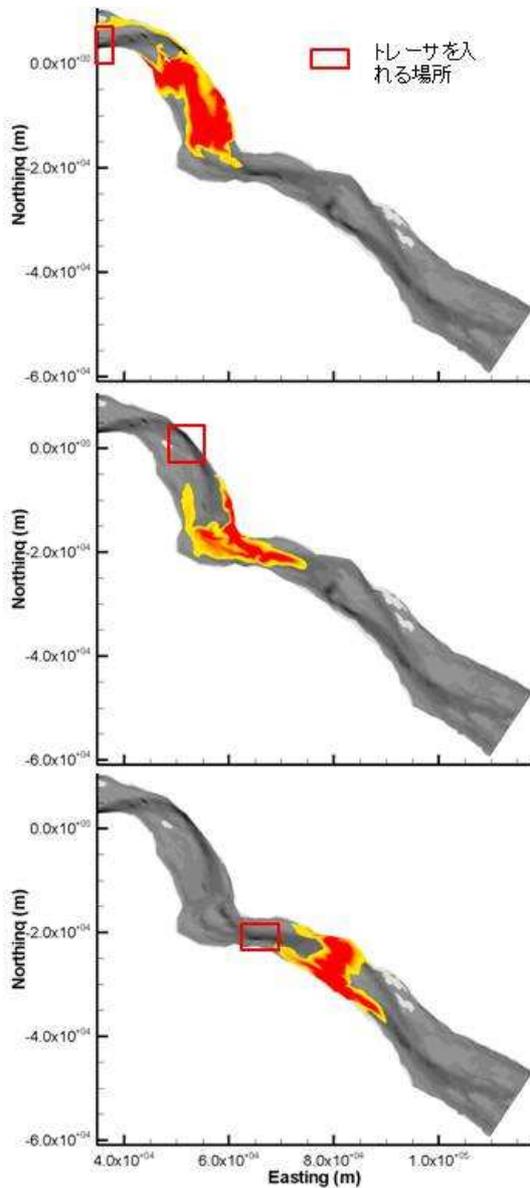


図-7 下げ潮から満潮時にかけての土砂移動状況

域の滞筋に中立トレーサを入れ、満潮時までの移流拡散状況を計算した。その結果を図-7-a~cに示す。

この図から、 u_b の大きな滞筋から浮上した細粒土砂は、下流側の矩形領域にちょうど達したところで沈澱する傾向のあることが推測される。その場合、拡散効果により砂州上にも沈澱する。このことから、図-6に示した空間的な周期性は、本研究で検討している平均的な洪水時の最大流量のもとで形成されているのではないかと考えられる。

5. おわりに

本研究では、平均的な洪水期の最大流量時における揚子江汽水域の流況を、準三次元流動モデルを用いて検討した。その結果、以下の知見を得た。

- 数値シミュレーションの境界条件として必要な上流側の流速横断分布および下流側の水位横断分布は不確定だが、それらが計算結果に及ぼす影響は、それぞれ 20km の範囲に収まっていると推定できる。したがって、残りの 110km の区間についての計算結果は信頼できる。
- 潮汐作用のもとで発生する非定常流は、滞筋では単純な往復流に近いが、砂州の部分では流向が横断方向にも変化し楕円の性状を示す。この運動のために、滞筋から砂州に向けて土砂が移動し堆積し、地形の深浅が増大している可能性がある。
- 掃流力の大きな区間は 20~22km のほぼ等間隔に位置しており、そこで洗掘された土砂は、下流側の掃流力が大きい滞筋の横の砂州上に堆積している可能性がある。

参考文献

- 1) Milliman, J.D., Shen, H.T., Yang, Z.S., Meade, R.H.: Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf, *Continental Shelf Research*. Vol 4, pp. 37-45, 1985
- 2) 陳吉余, 沈煥庭, 惲才興: 長江河口動力過程と地貌演變, 上海科学技術出版社, pp. 31-37, 1988
- 3) Wu, H.L., Shen, H.T., Wu, J.X.: Relationships among depth datum levels in the Yangtze Estuary, *The Ocean Engineering*. Vol 20(1), pp. 69-74, 2002
- 4) Mao, Z.C., Shen, H.T. and Xiao, C.Y.: Saltwater Intrusion patterns in the Qingcaosha area, Changjiang River Estuary (in Chinese), *Oceanologia Et Limnologia Sinica*. Vol 32(1), pp. 58-66, 2001
- 5) 惲才興, 長江河口近期演變規律, 海洋出版社, pp. 126-141, 2004
- 6) 吉田圭介, 石川忠晴: 2次流の時空間発展を考慮した水深積分モデルに関する基礎的検討, 水工論文集, No.50, pp.781-786, 2006
- 7) 吉田圭介, 石川忠晴: 円筒座標 CIP-Soroban 法と境界適合座標系を組み合わせた蛇行河川の準3次元計算法, 水工論文集, No.52, pp.997-1002, 2008
- 8) 趙聯芳, 吉田圭介, 石川忠晴, 二木敬右: 鎮江市内江の流動計算のための長江水理条件の導出, 水工論文集, No.52, pp.1051-1056, 2008