

揚子江汽水河道の脈動的土砂移動と その季節特性について

THE PULSATILE SEDIMENT TRANSPORT AND ITS SEASONAL CHANGE IN THE ESTUARINE CHANNEL OF YANGTZE RIVER

王 張嶠¹・石川 忠晴²・赤穂 良輔³
Zhangjiao WANG, Tadaharu ISHIKAWA and Ryosuke AKOH

¹学生会員 工修 東京工業大学大学院博士課程 総合理工学研究科 (〒226-8503横浜市緑区長津田町4259番)

²フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科 (〒226-8503横浜市緑区長津田町4259番)

³正会員 工博 東京工業大学大学院助教 総合理工学研究科 (〒226-8503横浜市緑区長津田町4259番)

The flow field in the Yangtze estuarine channel is highly pulsatile throughout the year, because of its mild channel slope and large tidal amplitude. This paper compares the different tendency of topography change in flood season and dry season by using numerical simulation. The shallow water equations on the base of unstructured triangular mesh system are applied to calculate the flow field. The Laursen's formula on bed sediment load is used to evaluate the topography change. The calculations result shows highly pulsatile sediment transport in thalweg and remarkable cross-sectional flow above the underwater shoals in both seasons. In dry season, due to the stronger landward transport, sandspits develops at the edge of underwater shoals. This small scale topography feature further develops in the next flood season and changes the flow field entirely. Considering the large sediment transport rate, the topography outline is formed in flood season. However, the small scale sandspit might be a key point to the topography change in the Yangtze Estuarine channel.

Key Words : Yangtze estuarine channel, pulsatile flow field, topography change, numerical simulation, sediment transport

1. はじめに

河川汽水域は、沿岸と内陸を結ぶ輸送・交通の結節点として重要な役割を果たしてきた。特に大陸大河の汽水河道は、陸上交通の発達した現在でも、主要な輸送幹線の1つとして用いられている。一方、流域から排出される細粒土砂が滞留するため汽水河道の地形は複雑に変化し、大型船舶航行のための漕の維持に問題を生じているところもある。

本研究で対象とする揚子江汽水河道は、上海、無錫、常州、南京といった中国華東の産業中心地域を結ぶ輸送路として「黄金水道」¹⁾とも呼ばれている。しかし長江の広大な流域からは 5×10^8 ton/年¹⁾という大量の土砂が排出されるため、揚子江汽水河道の形状は昔から変遷が著しい。現在は航行容量増大のために「深水航道工程」の工事が始められているが、河床変動に関する現地観測データが少ないために、漕の長期安定性については十分確認されていない。

揚子江河口では大潮における潮位差が3.5mにも達するが、汽水河道の勾配は1/100,000以下であるため、洪水時においても周期的・律動的流れ（以下では脈動という）が顕著であり、流砂運動も脈動的性質を帯びている。乾季には流量が減少するが、潮汐流動だけでも河床材料を移動させるに十分な掃流力を発生する。そこで本研究では、洪水期と乾季の水理条件において流砂の数値シミュレーションを行い、潮汐に伴う脈動的流れのもとでの土砂移動特性を検討した。

2. 対象水域

長江流域と揚子江汽水河道の拡大図を図-1に示す。流域図に記入されている大通(624KP)は長江で最下流の流量観測点である。長江では潮汐変動が数百kmも遡上するため、下流部では水位・流量関係が変動し、精度よい流量推定が困難である。なお大通より下流の流域面積は長江全流域面積の5%であるので、揚子江流量は大通でほ

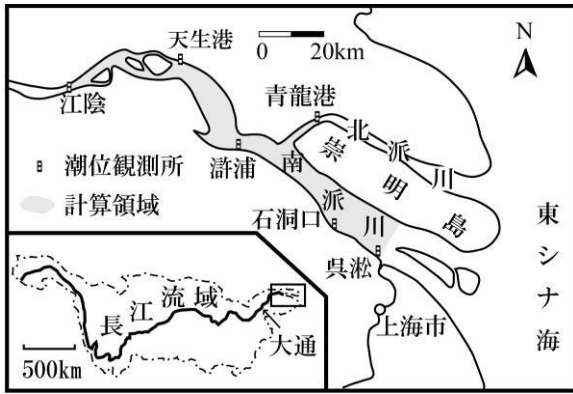


図-1 揚子江汽水域の平面図

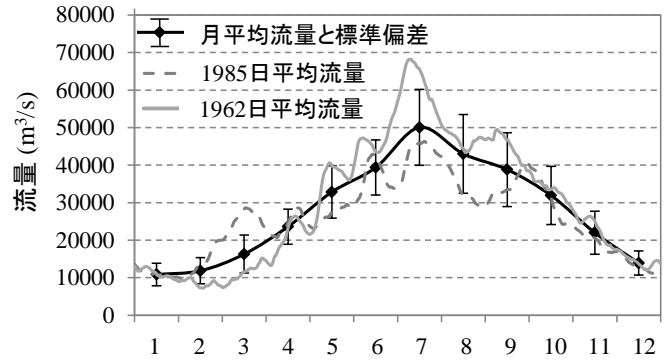


図-2 大通 (624KP) での月平均流量と標準偏差

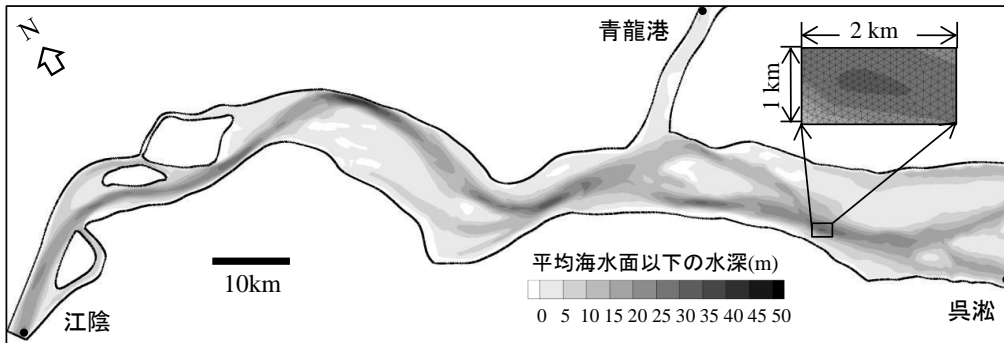


図-3 計算区間の河床形状

ば捕捉されているといえる。

大通における1950~2007年の月平均流量のアンサンブル平均と、1962年および1985年の日流量を図-2に示す。長江は流域面積が非常に大きいので流量が平滑化され、洪水時間スケールは1カ月のオーダーである。なお長江流量は1988年までは日流量が公表されていたが、それ以降は月平均流量しか公表されていない。

揚子江汽水河道は75KPの地点で北派川と南派川に分かれる。1800年頃までは北派川が主流であったが、土砂堆積のために疎通能力が減少し、現在では長江の流水のほとんどが南派川を経由して東シナ海に流出する。図中には水位観測所の位置と名称を記入している。本研究で対象とする区間の上流端は江陰、南派川の downstream 端は吳淞、北派川の downstream 端は青龍港である。江陰から吳淞までの距離は約145kmである。

対象区間の河床形状を図-3に示す。この図は2001年に長江航道局が公表した1/100,000航路図をもとに、後述の非構造三角形格子を用いた数値計算のために作成したものである。なお揚子江の詳細地形は公表されていない。航路図は船の航行のためのものであり地形図とは異なる。同図には、水深0, 2, 5, 10mの等深線と、1.2km間隔の横断線上に500m間隔で河床標高の数値が記載されている。これから内挿して格子データとしているので、河床形状の詳細は必ずしも表現できていない恐れはある。しかし砂州形状や漣の配置など河床形状の基本構造は河道スケールに対して十分詳細に表現されているので、流砂運

送の大局的性質の議論には十分使用できるものと考えた。図からわかるように、揚子江汽水域の河道幅は10~15kmである。しかし漣幅は2km程度で、広大な砂州の間を屈曲し、ところどころで分岐している。

3. 計算方法

(1) 流れ計算のモデル

大きな潮位変動のために揚子江汽水域では常に強混合状態である²⁾。また過去に行われた準三次元計算の例³⁾では、流路蛇行による二次流はほとんど見られない。そこで本研究では通常の浅水流方程式を基礎式として用いた。ただし底面せん断力は流速の二乗に比例するとした。

$$\tau = f \cdot \rho U |U| \quad (1)$$

ここに τ は底面せん断力ベクトル、 U は流速ベクトル、 ρ は水の密度、 f は摩擦係数である。

f の値を経験的に定めるために、2003年7月15日12時~16日24時の水理条件で計算を行った。計算下流端の境界条件は吳淞と青龍港の観測水位とした。一方、計算上流端である江陰の流量は計測されていない。そこで趙ら⁴⁾の長江一次元不定流モデルを用い、江陰の観測水位と大通の流量を境界条件として江陰の流量を推定し境界条件とした。それらをまとめて図-4に示す。計算区間にある4観測所の実測値と計算値を図-5に比較する。これか

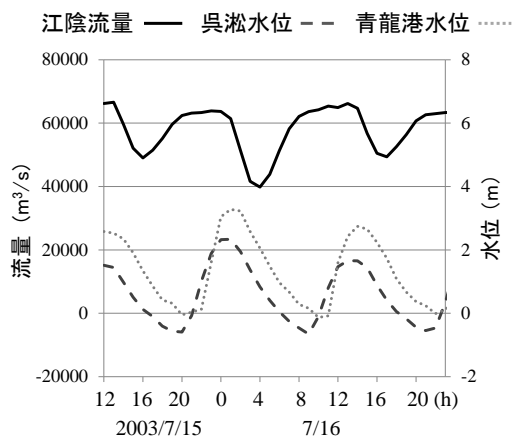


図-4 江陰の計算流量と吳淞、青龍港の観測水位

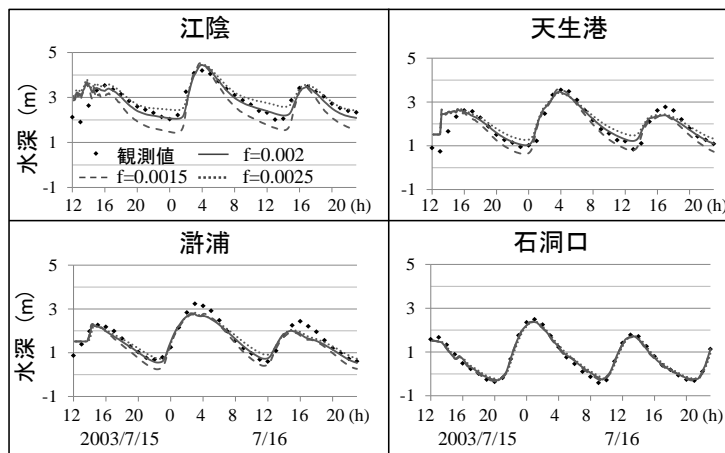


図-5 摩擦係数 f のキャリブレーション結果

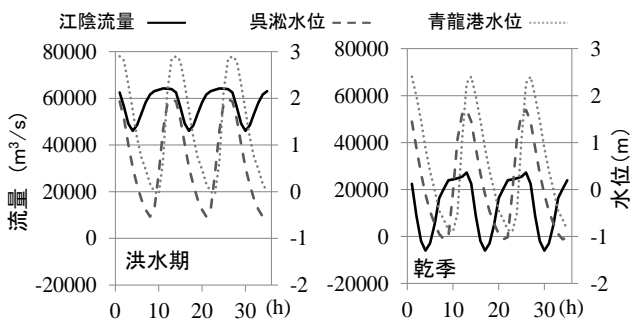


図-6 洪水期と乾季の計算条件

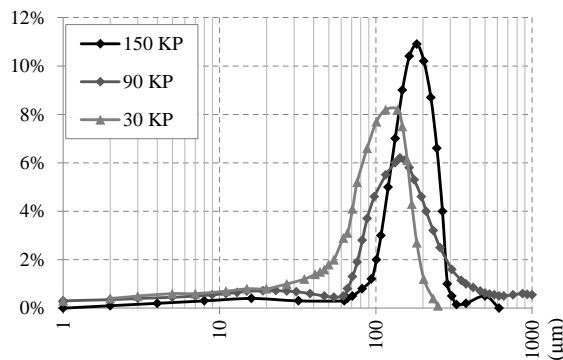


図-7 河床材料粒径

ら $f = 0.002$ のときに観測結果と計算結果がよく一致することがわかったので、以後はこの値を用いた。

図-3に示した複雑な地形上の流れを表現できるように、非構造三角形格子を用いた有限体積モデル⁵⁾を採用した。図-3の右上に格子の一部を示している。格子スケールは約100mで、総格子点数は約29万個である。そこで計算を加速するために計算領域を4483の小領域に分割しGPGPU⁶⁾を用いた。計算式およびGPGPUの詳細については引用文献^{5), 6)}を参照されたい。

(2) 流れ計算のモデル

本研究では、潮汐に伴う脈動的流れのもとでの土砂移動の基本特性を調べることを目的としている。そこで洪水期と乾季について代表的な水理条件を定めて計算に用いた。流量としては、年間流量が平均的であった2003年の7月と1月の月平均流量を洪水期および乾季の代表流量とした。また潮汐条件については、同年7月と1月の大潮日の潮位波形をもとに周期波形を作成し、そのもとで周期的な流れ場を計算した。

計算下流端の境界条件は吳淞と青龍港の観測水位とした。また計算上流端である江陰の流量は、趙らの長江一次元不定流モデルを用い、江陰の観測水位と大通の流量を境界条件として求めた。以上から得られた周期的境界条件を図-6に示す。

(3) 流砂計算のモデル

対象河道の河床材料粒度分布を図-7に示す⁷⁾。粒径100~200 μm の比較的均質な細砂が主体である。粒径ピークは下流に向けて若干小さくなるが、本研究では150 μm の均一粒径砂として取り扱う。この粒径での沈降速度は0.016m/sであり、王ら³⁾によれば、7月の流量・潮汐条件における摩擦速度と沈降速度の比は、 $u_* / w_0 = 0 \sim 5$ の範囲で大きく変動する。したがって流砂形態は[静止]~[掃流]~[浮流]の間で変化すると考えられる。

掃流と浮遊の形態の流砂を一括して表現するために、本研究ではLaursonの流砂量式⁸⁾を用いた。

$$\frac{q_T}{u_* d} = \frac{7.66}{265 \tau_{*c}} (\tau_* - \tau_{*c}) \times f \left(\frac{u_*}{w_0} \right) \quad (2)$$

$$\tau_* = \frac{u_*}{(\sigma/\rho - 1)gd}$$

ここに q_T は単位幅あたりの全流砂量、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力、 d は河床材料粒径、 σ と ρ は土粒子および水の密度である。なお無次元限界掃流力は岩垣公式⁸⁾から求めた。

水理計算で用いている非構造三角形格子では、全ての変数が三角形の重心で定義されている。そこで各点で計算される掃流力から流砂量ベクトルを求め、図-8に示すように、辺上の流砂量を両側の三角形重心位置での流砂

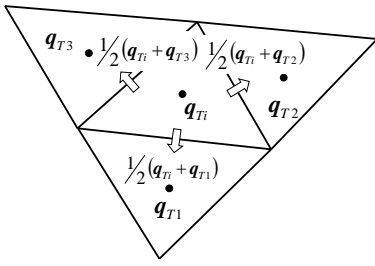


図-8 三角格子における流砂量

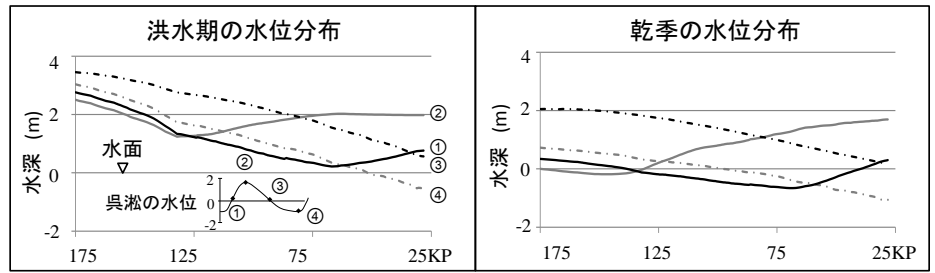


図-9 水位縦断面図

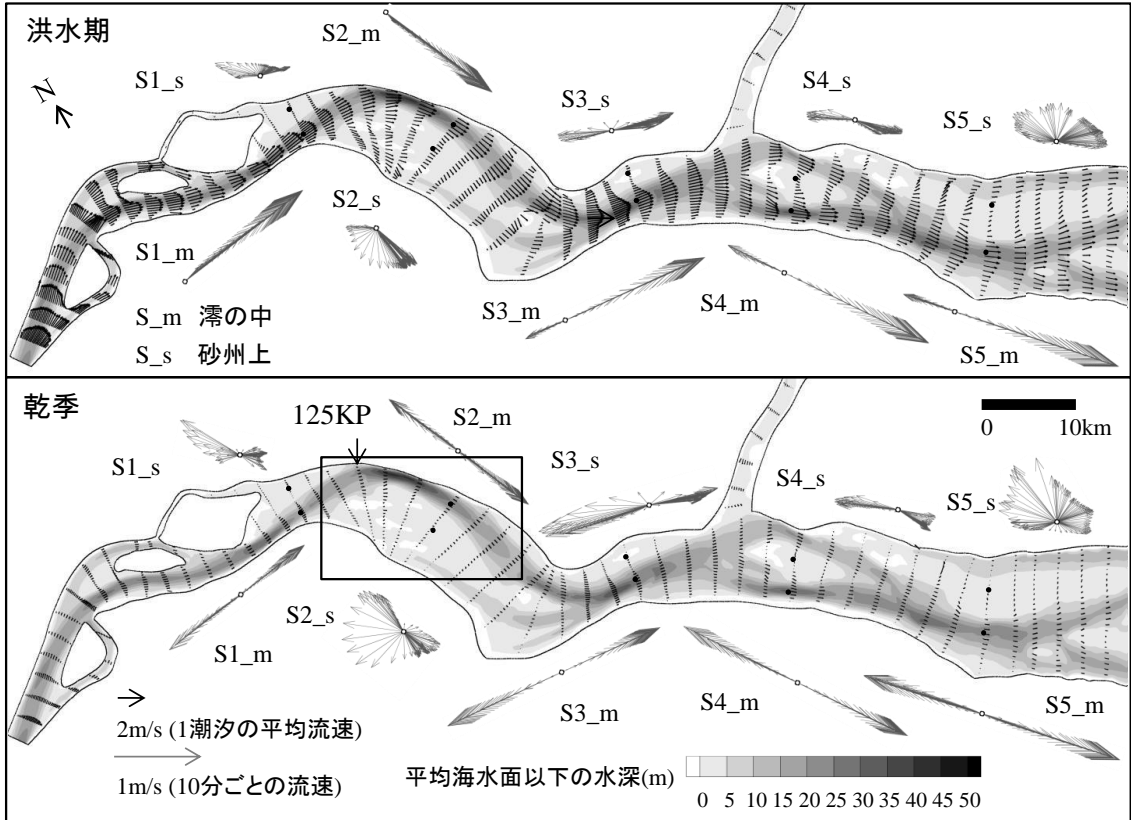


図-10 流速分布の特徴

量の平均値とした。これに辺の方向余弦を乗じてフラックスを算定し、流砂連続条件から河床変動量を求めた。地形変動計算の期間は、洪水期の条件で1カ月、乾季の条件で4カ月とした。

4. 計算結果と考察

(1) 流れと流砂の特徴

図-9に潮汐の4位相(図中に示す①, ②, ③, ④)における水位縦断面図を示す。潮汐波が下流から上流に伝播する様子がわかる。洪水期には上流に行くほど波高が減じるが、乾季には上流部でも水位変動が大きく、潮汐フロントにおける水位の逆勾配が大きい。乾季には水深が相対的に小さいので、潮汐による流速変動が砂州地形の影響を受けやすいと考えられる。

図-10に一潮汐平均流速ベクトルを示す。また図中に

[・]で示した位置での10分ごとの流速流向変化を示す。背景の濃淡は平均海面からの深さである。滞では単純な脈動流が生じているが、砂州上では流向の変動が大きい。また乾季には砂州上および砂州縁辺部で上流向きの流れが強くなっている。潮汐波によるこのような流れの不均一性は、流砂運動の空間変化にも影響を及ぼしていると考えられる。

そこで、河道軸と流砂方向の間の角度 θ の時系列を作成し、その絶対値の平均を計算した。なお紙面の制約により以降では125KP付近(図10下段の中に表示している)の現象を取り上げて説明する。図-11に θ の平均値を濃淡で示す。この値が大きいほど流砂方向の変動が大きい。なお図中の破線は-5mの等深線である。この図から、乾季において-5mより浅い部分で流砂の方向が大きく変化することがわかる。

次に、河道軸方向の流砂成分を下流向きと上流向きに区分し、式(3)で定義される R_q を図-12に示す。

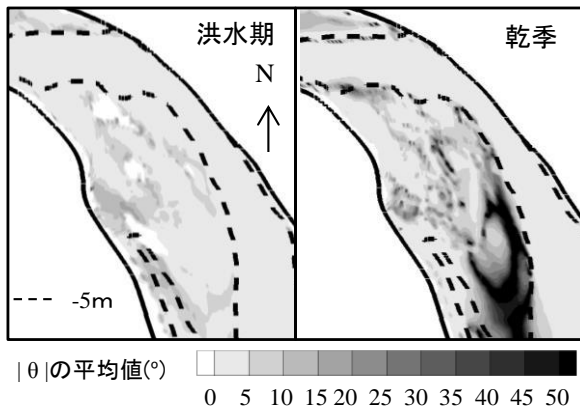


図-11 一潮汐における流砂方向の変化の程度

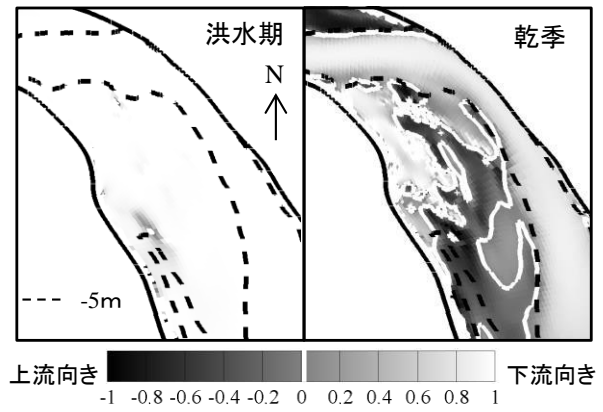


図-12 上流向き流砂強度

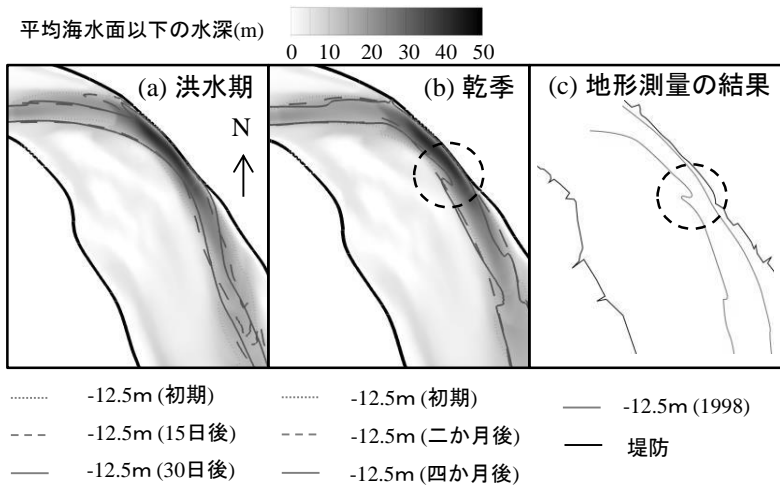


図-13 洪水期と乾季の地形変化の特徴

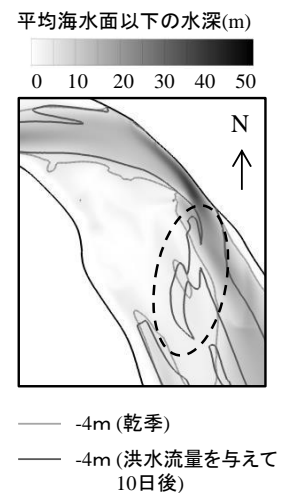


図-14 流量増加による砂嘴の成長

$$R_q = \frac{q_T^+ - q_T^-}{q_T^+ + q_T^-} \quad (3)$$

ここに q_T^+ は下流向き流砂量の一潮汐積分値、 q_T^- は上流向き流砂量の積分値である。乾季において-5mより浅い部分で上流向き流砂量 ($R_q < 0$) の卓越することがわかる。以上のような乾季における流砂の特性は、図-9と図-10に示した潮汐波の作用によっている。

(2) 特徴的な地形変化

洪水期の河床変動計算による-12.5m等深線の変化を図-13(a)に、乾季における変化を図-13(b)に示す。洪水期の河床変動は比較的なだらかであるのに対し、乾季においては濤と砂州の境界付近に砂嘴が発生する。図-13(c)は1993年の測量結果を差⁹⁾が図化した-12.5mの等深線である。図-13(b)と同じ位置に砂嘴状の地形が見られる。

このような微地形の形成過程は、図-11および図-12に示したように、潮汐により砂州縁辺部で流砂方向が急激に変化するためであると考えられる。このような砂嘴地形の流量増に対する応答を調べるために、洪水期の水理条件を10日間作用させた。その時の-4m等深線の変化を図-14に示す。砂嘴が成長するとともに、その下流の砂

州上(左下)に浅い水路が形成されていることがわかる。このことから、乾季に生じた砂嘴地形が洪水期の流れに影響を及ぼす可能性があるといえる。

そこで、砂嘴がない初期地形と、砂嘴が形成された後の地形について洪水期流量での流線を比較した。図-15の左2つは砂嘴が形成されていない場合、右2つは砂嘴が発達した場合で、それぞれ「順流最盛期」と「順流から逆流へ転換した直後」を示している。後者では濤から砂州に乗り上げる流れが発生している。

図-13~図-15で述べた現象は、計算対象河道の他の部分でも生じていた。図-16には、乾季の河床変動計算結果から得られた-4m等深線の全体を示す。濤と砂州の境界に砂嘴が形成されている場所を円で示している。砂嘴は砂州縁辺部が凸に湾曲している部分で生じやすい。

河床変動計算は一般にかなりの誤差を含むので、乾季における微地形の発達とそれが濤の安定性に与える影響を定量的に議論するには、流砂量式の精度検定が必要であると思われる。しかし4(1)に述べた流れ特性と組み合わせると、少なくとも定性的には、砂嘴の発達とそれが濤の流れに与える影響が、揚子江汽水河道の地形変化の検討における一つのポイントになる可能性があると考えられる。

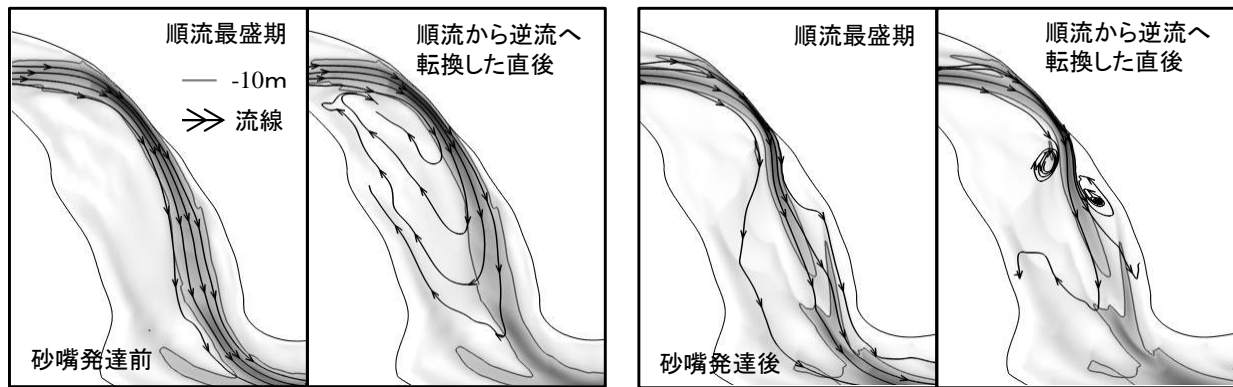


図-15 洪水流量を与えた場合の流线 (砂嘴発達前と発達後)

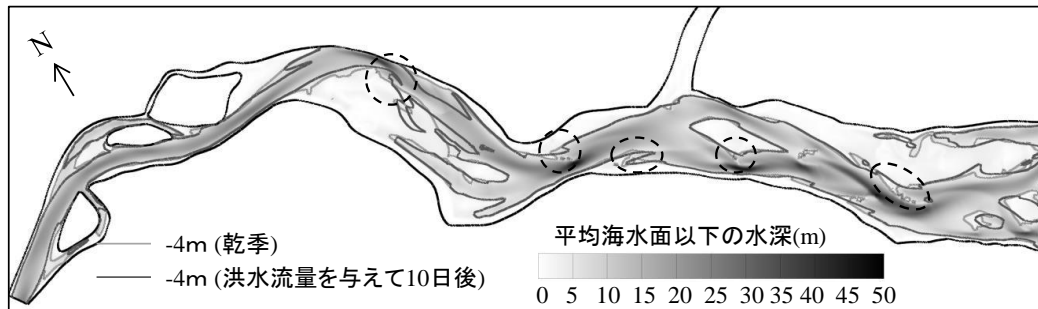


図-16 砂嘴の発生状況 (-4m等深線)

5. おわりに

揚子江汽水域では年間を通して潮汐が流れに強い影響を及ぼしていることから、河床変動も潮汐の影響を強く受けている可能性がある。この点に注目し、本研究では洪水期と乾季の代表流量と潮汐条件のもとで、流れとそれに伴う脈動的流砂量場を計算し、河床変動特性を考察した。得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 両期間とも濤ではほぼ一方での脈動的流砂輸送が生じたが、砂州上では輸送方向が大きく変動し、1潮汐平均でも比較的大きな横断方向輸送が生じた。
- 2) 特に流量の少ない乾季には、砂州上で上流向きの正味流砂量が発生した。この原因は、乾季には水位が相対的に低いために砂州上での水深変化率が大きく、上げ潮時の逆流強度が下げ潮時の順流強度を上回るためと考えられた。
- 3) 乾季の水理条件では、濤と砂州の境界で砂嘴状の微地形が形成された。砂嘴形成後に洪水期流量を与えたところ、砂嘴が発達するとともに、順流最盛時には濤から砂州に乗り上げる流れを誘起した。
- 4) 砂嘴上の微地形は、濤と砂州の境界が凸に湾曲する部分で多数見られた。このことは、乾季に形成される微地形が、揚子江汽水河道の地形変化を考察する上での一つのポイントになる可能性を示唆していると思われた。

参考文献

- 1) 陳吉余, 沈煥庭, 惲才興: 長江河口動力過程と地貌演変, 上海科学技術出版社, pp. 1-18, 1988
- 2) 沈煥庭, 茅志昌, 朱建榮: 長江河口塩水侵入, 海洋出版社, pp. 1-14, 2003
- 3) 王 張嶠, 石川忠晴, 吉田 圭介: 揚子江洪水期における感潮域の流れに対する潮汐の非定常効果, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol. 68, No. 1, pp. 67-76, 2012
- 4) 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
- 5) 赤穂良輔, 石川忠晴: 平成23年東北地方太平洋沖地震津波における利根川下流の津波遡上再現計算, 水工論文集, No. 56, pp. I_1543-I_1548, 2012
- 6) 曾新翔, 赤穂良輔, 石川忠晴, 中村恭志: 非構造三角形格子に基づく津波数値解析のGPGPUによる高速化, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol. 69, No. 4, I_619-I_624, 2013
- 7) Wang, Z.J., Chen, Z.Y., Li, M.T., Chen J., and Zhao, Y.W.: Variations in downstream grain-sizes to interpret sediment transport in the middle-lower Yangtze River, China: A pre-study of Three-Gorges Dam, *Geomorphology*. Vol 113, pp. 217-229, 2009
- 8) 土木学会編: 水理公式集 平成11年版, pp. 156-192, 1999
- 9) 姜寧林, 陳永平, 費錫安, 張長寬: 長江口通州砂, 狼山砂水道河床演變分析, 第十五回中国海洋 (岸) 工程學術討論會論文集, pp. 1160-1163, 2011

(2013. 4. 4受付)