Ⅱ－１７　平成17年度　土木学会北海道支部　論文報告集　第62号

非定常流の下での砂州の挙動に関する数値解析

MORPHODYNAMIC MODELING OF SAND BAR EVOLUTION UNDER UNSTEADY FLOW

北海道大学工学部　○　学生員　小林　健介(Kensuke KOBAYASHI))
北海道大学工学部　　正会員　清水　康行(Yasuyuki SHIMIZU)
北海道開発土木研究所　正会員　渡邊　康玄(Yasuharu WATANABE)

key Word：alternate bars, unsteady flow, bar formation

1.　はじめに

実河川における砂州の挙動を明らかにすることは，砂州が河岸浸食や河床洗掘を引き起こすことから河道を維持する上できわめて重要な事である．従来から防災上の立場から砂州の挙動に関する研究が多く行われてきたが，そのほとんどは流れを定常流として扱ってきた．しかしながら，近年増加している集中豪雨による洪水は，時間的水位の変化が大きく洪水時の砂州の挙動を明らかにしようとする場合，流れを非定常流として扱うことが重要となる．

このような理由により最近は，非定常流である洪水時の砂州の挙動や砂州の発生過程に関する研究が行われてきている．渡邊ら[1)]は室内水路において洪水を模した非定常流を発生させ，交互砂州を形成させる水理実験を行い，流れが定常の場合と非定常の場合では，砂州が異なる挙動を示すことを指摘している．

本研究では，渡邊らの非定常流の下での砂州形成実験条件を用いて、非定常流の下での砂州の挙動を数値解析によって再現することを試み、その問題点や限界についての検討を行う．

2.　解析モデルと計算条件

(1) 流れの計算

流れの計算では，非定常項を含んだ平面二次元流れの一般座標系(ξ,　η)における連続式と運動方程式を解いた．

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{h}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \xi}\left(u^{\xi}\frac{h}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(u^{\eta}\frac{h}{J}\right)=0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial u^{\xi}}{\partial t}+u^{\xi}\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \xi}+u^{\eta}\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \eta}+\alpha_1 u^{\xi}u^{\xi}+\alpha_2 u^{\xi}u^{\eta}+\alpha_3 u^{\eta}u^{\eta}\\&=-g\left[\left(\xi_x^2+\xi_y^2\right)\frac{\partial H}{\partial \xi}+\left(\xi_x\eta_x+\xi_y\eta_y\right)\frac{\partial H}{\partial \eta}\right]\\&-\frac{C_f u^{\xi}}{hJ}\sqrt{\left(\eta_y u^{\xi}-\xi_y u^{\eta}\right)^2+\left(-\eta_x u^{\xi}-\xi_x u^{\eta}\right)^2}+D^{\xi}\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial u^{\eta}}{\partial t}+u^{\xi}\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \xi}+u^{\eta}\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \eta}+\alpha_4 u^{\xi}u^{\xi}+\alpha_5 u^{\xi}u^{\eta}+\alpha_6 u^{\eta}u^{\eta}\\&=-g\left[\left(\eta_x^2+\eta_y^2\right)\frac{\partial H}{\partial \eta}+\left(\xi_x\eta_x+\xi_y\eta_y\right)\frac{\partial H}{\partial \xi}\right]\\&-\frac{C_f u^{\eta}}{hJ}\sqrt{\left(\eta_y u^{\xi}-\xi_y u^{\eta}\right)^2+\left(-\eta_x u^{\xi}-\xi_x u^{\eta}\right)^2}+D^{\eta}\end{aligned} \tag{3}$$

ただし,

$$\begin{aligned}&\alpha_1=\xi_x\frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2}+\xi_y\frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2},\quad \alpha_2=2\left(\xi_x\frac{\partial^2 x}{\partial \xi\partial \eta}+\xi_y\frac{\partial^2 y}{\partial \xi\partial \eta}\right)\\&\alpha_3=\xi_x\frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2}+\xi_y\frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2},\quad \alpha_4=\eta_x\frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2}+\eta_y\frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}\\&\alpha_5=2\left(\eta_x\frac{\partial^2 x}{\partial \xi\partial \eta}+\eta_y\frac{\partial^2 y}{\partial \xi\partial \eta}\right),\quad \alpha_6=\eta_x\frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2}+\eta_y\frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2}\end{aligned} \tag{4}$$

ここで，a_bは$\partial a/\partial b$を示し，t；時間，h；水深，x，y；直交座標軸，ξ，η　；一般座標軸，u^{ξ}，u^{η}；ξ, η方向流速の反変成分，　J；座標変換のヤコビアン，H；水位，D^{ξ}, D^{η}；粘性項である. 反変成分, ヤコビアンの定義は以下の式に従う．

$$\begin{aligned}u^{\xi}&=(\xi_x u+\xi_y v)/J,\\u^{\eta}&=(\eta_x u+\eta_y v)/J\end{aligned} \tag{5}$$

$$J=\xi_x\eta_y-\xi_y\eta_x=\frac{1}{x_{\xi}y_{\eta}-x_{\eta}y_{\xi}} \tag{6}$$

(2) 河床変動計算

河床変動計算では，流れの解析の結果を用いて芦田・道上の平衡流砂量式から流砂量を算出，流砂の連続式を離散化して解いた．平面二次元一般座標系における河床変動の連続式を次式に示す．

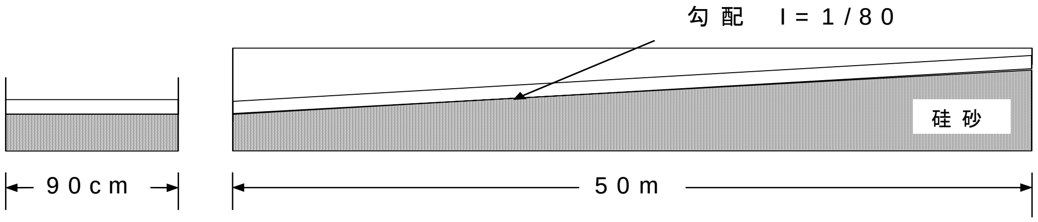

図-１ 水路模式図

表-１　実験諸元

Case	T (min)	D (mm)	Q (l/s)	L_b (m)	Z_b (cm)
U-20-1	15	9	3.439	2.94	5.8
U-20-2	30	12	5.569	5.7	6.0
U-20-3	45	15	7.595	7.58	7.1
U-20-4	90	18	10.320	8.63	7.0
U-20-5	155	15	7.731	6.75	6.1
U-20-6	205	12	5.267	9.9	5.3
U-20-7	265	9	3.277	6.3	5.1
U-20-8	360	6	1.654	8.1	6.9
U-50-1	4	9	3.439	2.28	2.0
U-50-2	10	12	5.569	2.05	2.5
U-50-3	16	15	7.595	6.53	2.6
U-50-4	30	18	10.320	5.33	4.1
U-50-5	52	15	7.731	4.99	5.6
U-50-6	68	12	5.267	4.8	5.7
U-50-7	88	9	3.277	5.33	5.9
U-50-8	120	6	1.654	7.35	5.1

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{Z}{J}\right)+\frac{1}{1-\lambda}\left[\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{q^{\xi}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{q^{\eta}}{J}\right)\right]=0 \tag{7}$$

ここで，Zは河床高，λは空隙率，q^{ξ}，q^{η}はξ，η方向の単位幅掃流砂量である．ξ，η方向の単位幅掃流砂量q^{ξ}，q^{η}は次式で与えられる．

$$q^{\xi}=q_b\left[\frac{u_b^{\xi}}{V_b}-\gamma\left(\frac{\partial Z}{\partial \xi}+\cos\theta\frac{\partial Z}{\partial \eta}\right)\right] \tag{8}$$

$$q^{\eta}=q_b\left[\frac{u_b^{\eta}}{V_b}-\gamma\left(\frac{\partial Z}{\partial \eta}+\cos\theta\frac{\partial Z}{\partial \xi}\right)\right] \tag{9}$$

$$\gamma=\sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s\mu_k\tau_*}} \tag{10}$$

ただし，u_b^{ξ}，u_b^{η}はξ，η方向の河床近傍の流速，V_bは河床近傍の合成流速，q_bは全掃流砂量，θはξ軸とη軸のなす角度である．また，γは斜面勾配による流砂の補正係数であり，μ_s，μ_kは河床材料の静止摩擦係数および動摩擦係数である．

全掃流砂量q_bは芦田・道上の式で求める．

$$\frac{q_b}{\sqrt{s_g g d^3}}=17\tau_*^{3/2}\left(1-\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)\left(1-\frac{u_{*c}}{u_*}\right) \tag{11}$$

ここで，s_gは砂粒子の水中比重，gは重力加速度，dは河床材料の粒径，τ_*は無次元掃流力，τ_{*c}は無次元限界掃流力，u_*は摩擦速度，u_{*c}は限界摩擦速度である．このとき，無次元限界掃流力は岩垣式を用いて算出した．数値解析法としては，ＣＩＰ法を用いた．

(3)砂州の再現計算法

砂州の再現計算手法としては，近年，周期境界条件による計算方法と，上流端の流入流量に横断方向に撹乱を与える方法が用いられている．各計算方法の特徴としては，周期境界条件による計算では砂州波長の変化に対応しにくいこと，上流端に撹乱を与える計算では砂州波長の変化には対応できるが，平衡状態に近づけるために長い計算領域を要することなどがあげられる．本研究では，実験条件により近づけるために，上流端の流入流量に横断方向に周期性を考慮しないランダムな撹乱を与える手法(寺本ら[3])を用いた．

(4) 計算条件

計算条件は，渡邊ら[2]が行った非定常流下での砂州形成実験の内，流れの非定常性を最も強く受けていると考えられるU-20 と最も継続時間の短いU-50 の値を用いた．その水理諸元と通水停止時の砂州の形状を表-1 に示した．ここで，T；通水時間，D；平均水深，Q；流量，Z_b；砂州波高，L_b；平均砂州波長である．また，図-1 は水路模式図で，実験水路は長さ 50m，幅 0.9mの直線水路で，粒径 0.76mmの硅砂を勾配が 1/80 になるように敷き詰めて初期河床としている．

3.　解析結果

図-2 および図-3 に実験結果および解析結果の河床コンター図を示した．図-2 はケース U-20，図-3 はケース U-50 の結果をそれぞれ示している．なお，計算領域は 80m で，このうち，実験の測定区間と一致するように，

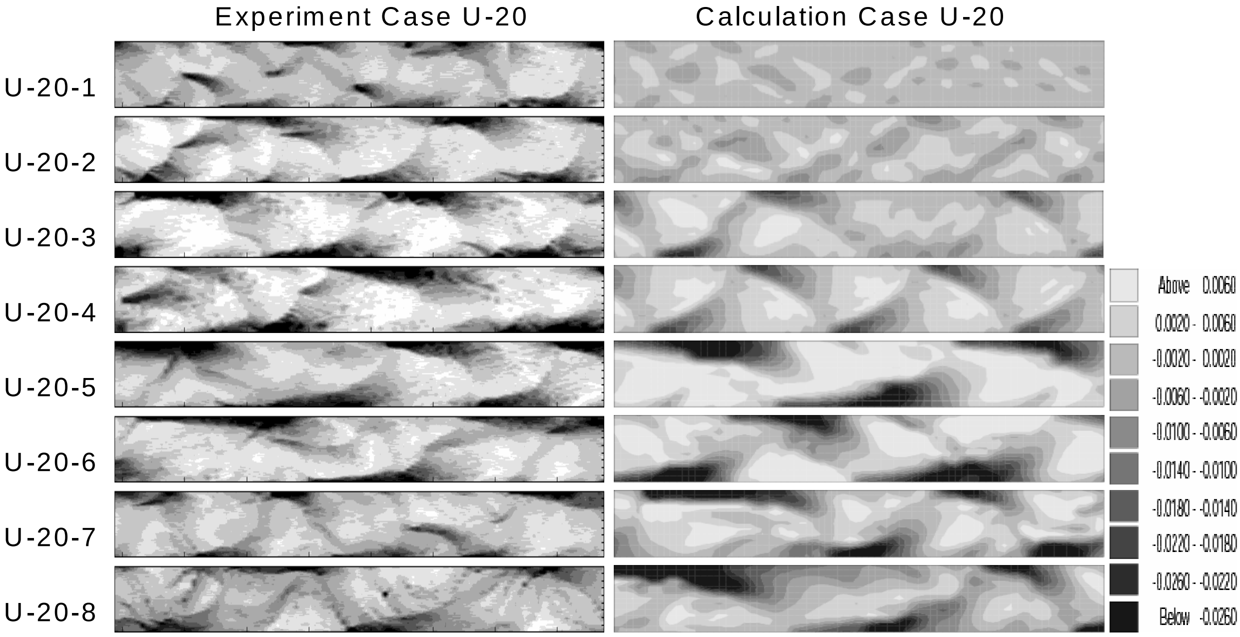

図- 2　実験および数値解析の河床コンター図 (Case U-20)

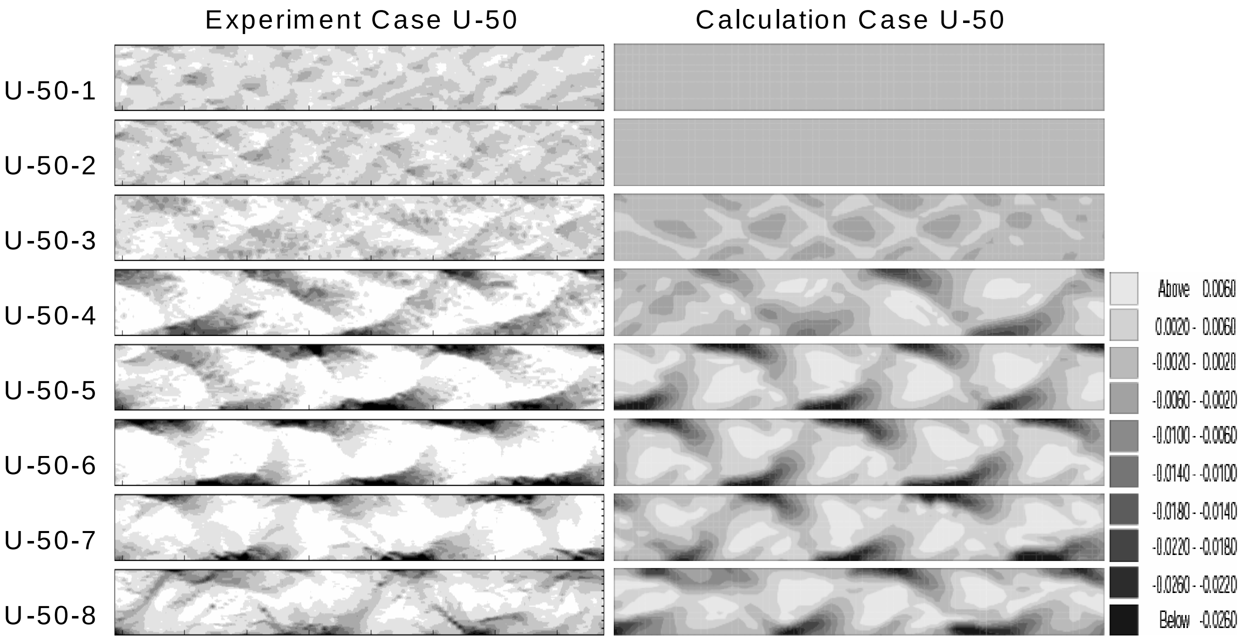

図- 3　実験および数値解析の河床コンター図 (Case U-50)

下流端から 10.5～26.25m の地点の範囲の結果を用いた．U-20-1，U-20-2，U-50-1 および U-50-2 の実験と数値解析の河床コンター図を比較すると，数値解析は実験と比較して砂州が発生するのに時間がかかる．このことにより，数値解析で非定常流の下での砂州を再現しようとする場合，計算の最初の段階で予備計算が必要であると言える．流量が比較的大きい U-20-3～U-20-6 および U-50-4～U-50-6 においては，数値解析により交互砂州の形状を概ね再現できている．しかしながら，流量が再び小さくなり浮洲が形成される U-20-7，U-20-8，U-50-7 および U-50-8 においては，実験と数値解析で異なった結果を示した．特に，ケース U-20 においては，浮洲が形成されてからの計算時間が長いため，大きく異なった結果を示している．これらのことにより，本研究では，浮洲の形成が数値解析における砂州形状に大きな影響を与えていることがわかる．

水深の時間変化と砂州形成過程の関係を見るため，図-4 および図-5 に砂州波長および砂州波高（ここでは，砂州波高は測定区間内の河床の最も高い部分と最も低い部分の差と定義）の時間変化を示した．

通水初期の砂州波高はケース U-20，U-50 とも計算結果は実験値と比較して小さな値を示している．これは，前

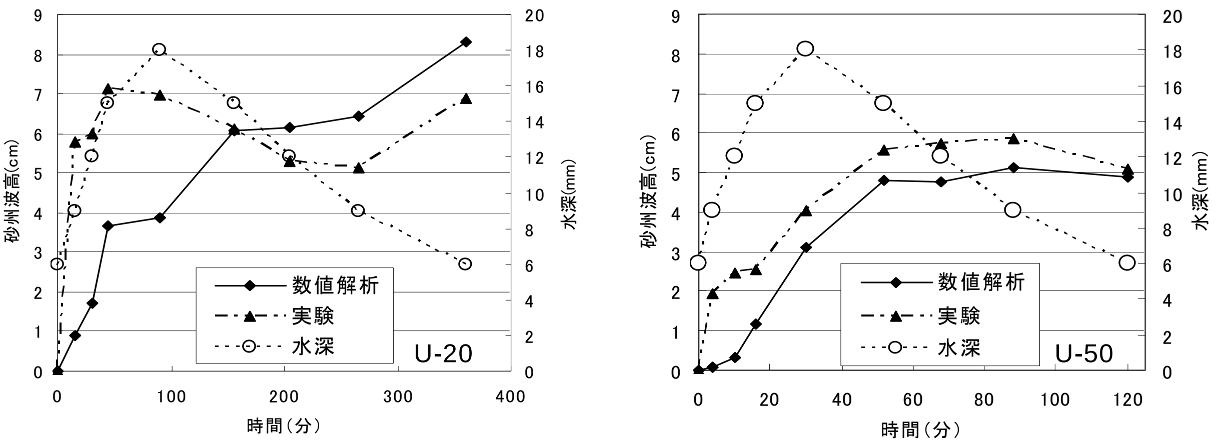

図-4 水深および砂州波高の時間変化

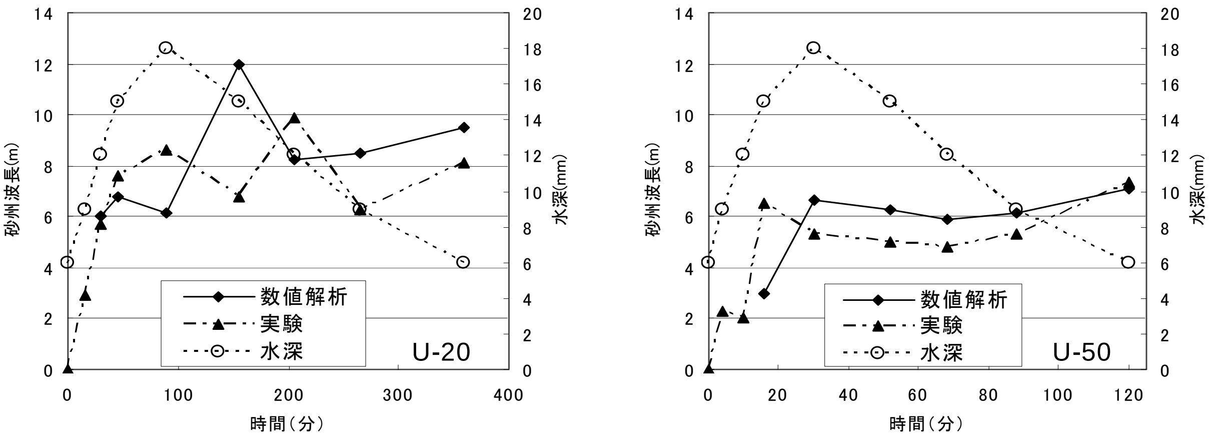

図-5 水深および砂州波長の時間変化

述のように数値解析では実験と比較して砂州が形成されるまでに時間を要するためであると考えられる．一方で，流量がピークを過ぎてからの砂州波高の時間変化は，ケースU-20，U-50とも実験と数値解析で概ね同じような傾向を示した．

ケースU-50の砂州波長に着目すると，通水初期では実験値と異なる傾向を示したが，流量がピークを過ぎてからは実験値と同じような傾向を示した．一方，ケースU-20においては，通水後155分で砂州波長が実験値と大きく異なった値を示した．これは，流量が大きくなると上流端の流入流量に与えた撹乱の影響を受ける距離が長くなってしまうことによると考えられる．つまり，この場合は，U-20のほうがU-50よりも大きい流量を通水する時間が長かったため，上流端の流入流量に与えた撹乱の影響を強く受けたと考えられる．

4.　おわりに

本研究では，洪水を模した非定常流の下での砂州形成実験の結果と数値解析結果との比較を行った．これにより，数値解析で砂州の挙動を明らかにしようとする場合，数値解析によって砂州発生までに時間を要するため，通水初期に予備計算が必要になることが判明した．また，流量によって上流端の撹乱の影響を受ける距離が大きく変わることから，計算領域をさらに長く設定する必要があると考えられる．また，流砂量式(11)の係数と砂州の発達速度の関係，グリッドサイズと砂州形成速度の関係を明らかにすることは今後の課題である．

参考文献

1) 渡邊康玄，佐藤耕治，大山史晃 ：非定常流の下での砂州形成実験，水工学論文集第 46 巻，pp725-730, 2002.

2) Y.Watanabe, T.Kuwamura : Experimental study on characteristic of double-row bars under unsteady flow, Proceedings 3rd IAHR Symposium on River Coastal and Estiarine Morphodynamics, pp113-123, 2003

3) 寺本敦子，辻本哲郎 ：砂州を伴う河道の低水路河岸浸食に関する数値解析による研究，水工学論文集第 47 巻，pp649-654, 2003