

中規模河床形態の2次元河床変動計算による 再現性に関する検討

Study on reproducibility of 2-D model for bar formation

北見工業大学工学部土木開発工学科
北見工業大学工学部社会環境工学科
北見工業大学大学院工学研究科土木開発工学専攻

○学生員 玉澤卓也 (Takuya Tamazawa)
正員 渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)
学生員 山本昌慧 (Masato Yamamoto)

1. はじめに

中規模河床形態の形状特性を把握することは、治水対策や河川環境を考える上で極めて重要な要素であり、その特性を把握するために様々な研究が進められている。

特に数値シミュレーションは、様々な条件を設定し、その形状特性を把握することが他の方法に比べて容易なため、近年多数実施されている。竹林¹⁾は数値シミュレーションにおいて種々の初期条件や境界条件の与え方により同じ水理条件でも異なる結果が得られるとしている。

本研究は、数値シミュレーションモデルを用いて様々な条件で数値実験を行い、水理実験と比較してどのように結果が異なるか、また、水理実験を再現するために適用できる条件はどのようにすべきかについて検討を行った。

2. 数値シミュレーション概要

(1) 水理実験概要

数値シミュレーションに用いる水理実験は、渡邊ら²⁾が行った砂州形成実験のうち、Run S-40の水理量を用いた。Run S-40は、長さ50m、幅90cmの直線水路に、粒径0.76mmの均一の珪砂を勾配1/80になるように敷き詰めたものを初期河床とし、流量7600cm³/sを通水したものである。測定区間は、水路下流端から10m上流から26m上流までの縦断距離で16mの区間であり、縦横断方向それぞれ40cmおよび7.5mm間隔で測定されている。

(2) 基礎式

数値シミュレーションモデルは小林・清水ら⁴⁾の2次元一般座標系河床変動モデルを用いた。数値シミュレーションに用いる基礎式は、式(1)～(4)の定常2次元浅水流式と連続の式および掃流砂を対象とした流砂連続式である。

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -hg \frac{\partial(H)}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D^x \quad (1)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -hg \frac{\partial(H)}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D^y \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right] = 0 \quad (4)$$

表-1 数値シミュレーション条件表

ケース	周期・非周期	2次流強度	上流端擾乱
Case-1	周期境界	Engelund	なし
Case-2	非周期境界	Engelund	なし
Case-3	非周期境界	Engelund	流速
Case-4	非周期境界	Engelund	河床高
Case-5	非周期境界	Engelund	流速と河床高
Case-6	非周期境界	Rozovskii	流速と河床高
Case-7	非周期境界	Zimmermann	流速と河床高
Case-8	非周期境界	Ikeda	流速と河床高

ここで、 x, y :縦横断方向座標軸、 u, v :縦横断方向流速、 t :時間、 h :水深、 H :水位、 η :河床高、 g :重力加速度、 ρ :水の密度、 λ :河床空隙率、 q_{bx}, q_{by} :縦横断方向流砂量であり、

$$\frac{\tau_x}{\rho} = C_d u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \frac{\tau_y}{\rho} = C_d v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right] \quad (6)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right] \quad (7)$$

である。また、 C_d :河床摩擦係数、 v_t :拡散係数である。流砂量式は、式(8)で表される芦田・道上の式³⁾の式を用いた。

$$q_b = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \sqrt{sgd^3} \quad (8)$$

ここで、 q_b :単位幅あたりの流砂量、 τ_* :無次元掃粒力、 τ_{*c} :限界無次元掃粒力、 s :砂粒子の水中比重、 d_s :砂粒子の粒径である。

(3) 数値シミュレーション条件

計算は、上流端境界条件、2次流強度を変えて表-1に示す8ケース行った。表-1の上流端擾乱の項目のうち、「なし」、「流速」、「河床高」、「流速と河床高」はそれぞれ上流端擾乱を与えていないもの、流速に微小な変動をランダムに与えているもの、河床高に微小な変動をランダムに与えているもの、流速と河床高の両方に微小な変動をランダムに与えているものであり、流

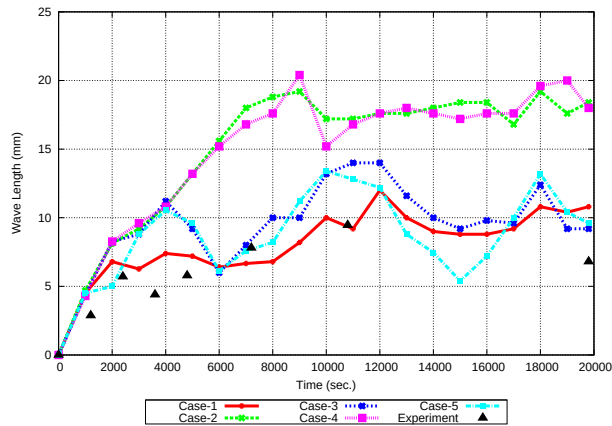


図-1 流入部擾乱の違いによる波長の比較

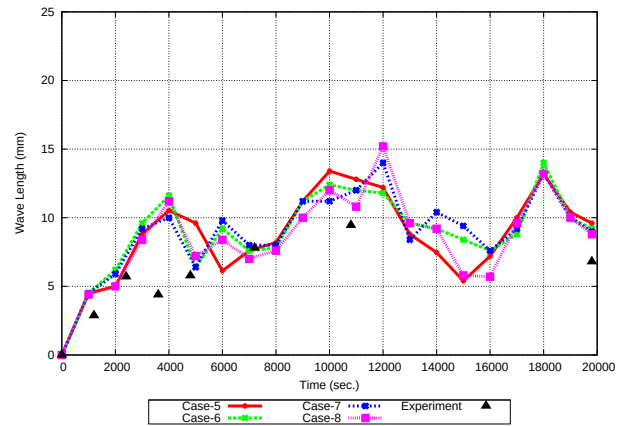


図-3 2次流強度の違いによる波長の比較

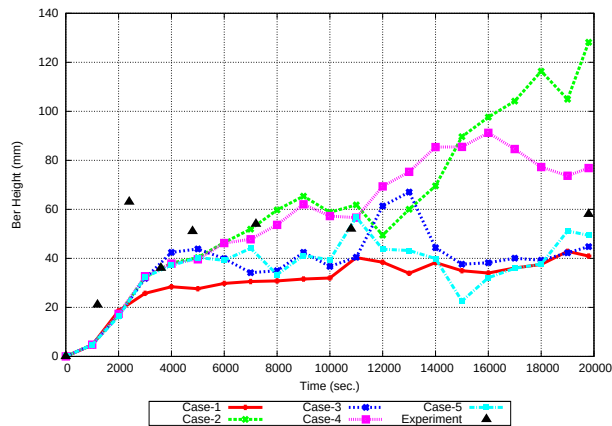


図-2 流入部擾乱の違いによる波高の比較

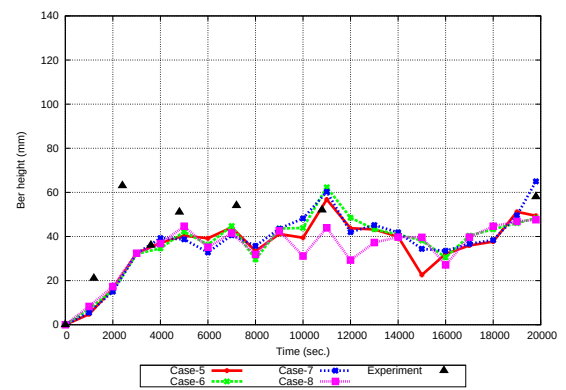


図-4 2次流強度の違いによる波高の比較

速の変動量は0.02m/s、河床高の変動量は0.001mである。また、2次流強度は式(9)で示される値を用いた。

$$N_* = \begin{cases} 7 & (\text{Engelund}) \\ 11 \sim 11.5 & (\text{Rozovskii}) \\ \frac{4.52 + 8\sqrt{2C_f}}{3.83\sqrt{2C_f} + 27.12C_f} & (\text{Zimmermann}) \\ 1.226 \left(\sqrt{\frac{1}{C_f}} - 1.584 \right) & (\text{Ikeda}) \end{cases} \quad (9)$$

なお、河床抵抗係数は式(10)で表される Engelund & Hansen の式を用いた。

$$C_f = \frac{1}{\left[6.25 + 2.5 \ln \frac{1}{2.5d_s} \right]^2} \quad (10)$$

ここで、 $d_s = \tilde{d}_s / \tilde{D}_0$ であり、 $\tilde{D}_0$:等流水深である。

3. 数値シミュレーション結果

(1) 波長と波高について

図-1、2にそれぞれ2次流強度を Engelund の定数で与え、上流端境界条件を変えた Case-1~5 と水理実

験について波長と波高の比較を示した。また、図-3、4にそれぞれ非周期境界条件で上流端擾乱に流速と河床高の両方に微小な変動をランダムに与え、2次流強度を変えた Case-5~8 と水理実験について波長と波高の比較を示す。計算結果の波長と波高は1000秒ごとにプロットしている。

図-1、2から Case-1、3、5では波長、波高ともに実験結果と概ね合致した。一方 Case-2、4では、波長は通水後4000秒以内では実験結果と概ね合致したが、4000秒以降も長くなっていき、7000秒以降からは横ばいになった。また、この両ケースの波高についても確認を行った。波高は12000秒以内では実験結果と概ね合致しているものの、12000秒から徐々に高くなっている。この2ケースは計算では7000秒前後から各所で浮州が発生した。図-5に Case-2 の通水後7000秒の測定区間の河床コンター図を示す。黒線で囲んだところは浮州が発生した地点を示しており、Case-4でも概ね同様となった。浮州の位置が固定され、浮州の下流側が大きく洗掘を受けることとなり、結果として波長と波高は大きくなっている。すなわち、砂州の波長と波高は本来の意味ではなくなっている。

また、図-3、4から Case-5~8では波長、波高ともに実験結果と概ね合致しており、2次流強度の違いによる波長、波高の変化は見られなかった。

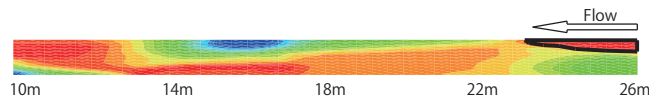


図-5 Case-2、通水後 7000 秒の河床コンター図

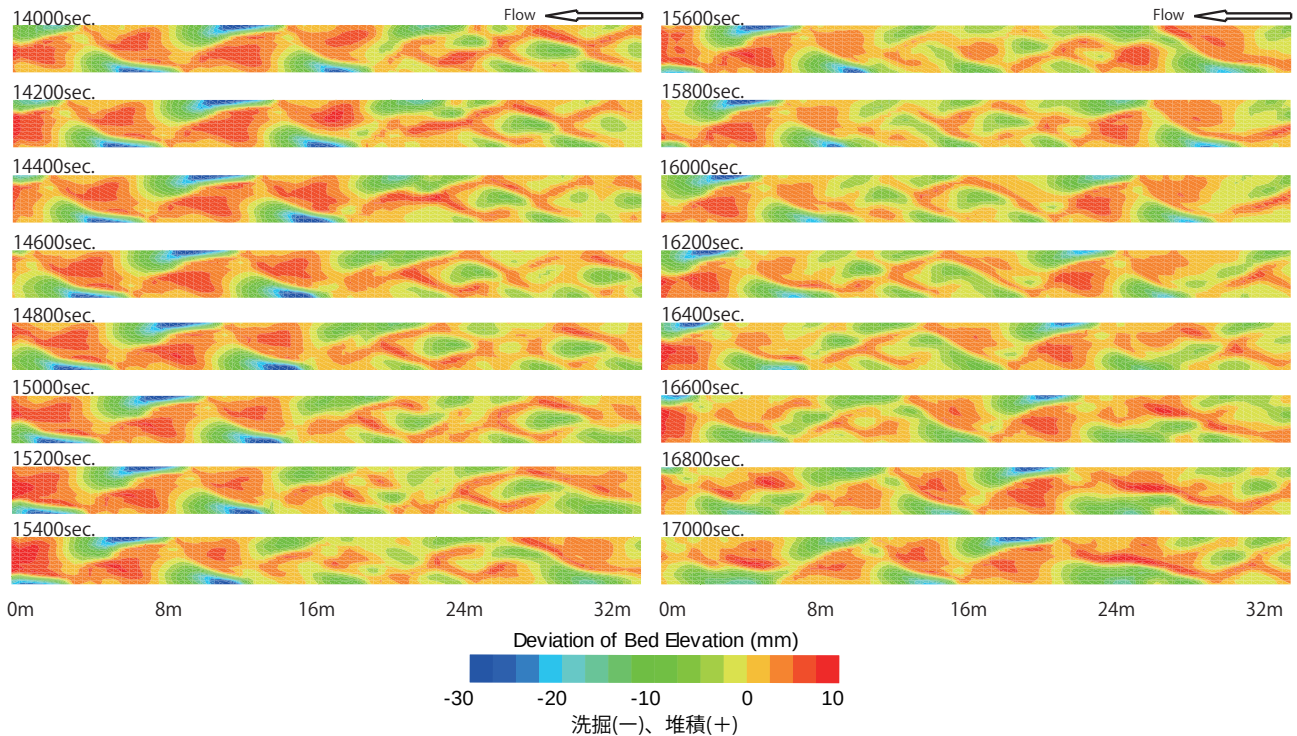


図-6 Case-8、通水後 14000 秒～17000 秒の河床コンター図

(2) 複列砂州の形成について

図-6 に Case-8 の下流端から 32m 上流までの通水後 14000 秒～17000 秒の河床コンター図を 200 秒ごとに示す。各河床コンター図から 14000 秒～15000 秒にかけては、図における上流側で、15000 秒以降では中流部で複列砂州が形成されていることがわかる。初期に多モードの砂州が形成される条件では、時間の経過に伴ってモードが減少することが水理実験や数値シミュレーションによって指摘されている⁵⁾⁶⁾⁷⁾が、非周期境界条件で上流端擾乱に流速に微小な変動をランダムに与えた Case-3、5～8 では初期に複列砂州から単列砂州に変遷し、その後単列砂州と複列砂州の変遷を繰り返した。これは渡邊⁸⁾がモード間の干渉を表現できる弱非線形解析を実施した際に指摘している振幅の初期値の違いにより現象の違いを引き起こすということと関係しているとも考えられる。

図-7 に単列砂州と複列砂州の変遷が最も多かった Case-8 の河床全長の形状変化を 200 秒ごとに測定した図を示す。図中の平坦、崩れ、複列、単列とはそれぞれ、河床が平坦なもの、図-6 の 15400 秒の下流端から 16m 上流から 24m 上流の地点の河床コンター図のような複列砂州から単列砂州に変遷する際に河床形状が崩れたもの、複列砂州、単列砂州を示す。図-7 から複列砂州は下流端から 40m 上流付近で形成し、1500 秒～

3000 秒かけ 15～30m 下流に移動し 図-7 のような形状を経て単列砂州に変遷することがわかった。

(3) 複列砂州から単列砂州への変遷の把握

図-6 を用いて複列砂州から単列砂州への変遷をさらに詳しく把握することとする。

14000 秒の下流端から 26m 上流から 30m 上流の地点に発生した複列砂州に着目した。15000 秒に下流端から 21m 上流の地点で河床形状が崩れたが、16600 秒に下流端から 6m 上流から 9m 上流で複列砂州が再び形成した。16800 秒には再び河床形状が崩れ、17000 秒には単列砂州に変遷した。

しかし、全ての複列砂州が同じような変遷をするわけではなく、単列砂州から複列砂州あるいは複列砂州から単列砂州への遷移メカニズムについてはさらに検討する必要がある。

(4) 計算の再現性

波長と波高については Case1、3、5～8 の再現精度がよいといえる。

しかし、数値シミュレーション条件と河床形状に着目すると、Case-1 の周期境界条件は無限に長い水路を理論上計算する条件で実験水路に適用する方法としてよいといえない。また、渡邊らの水理実験では通水後約 3600 秒に複列砂州から単列砂州への変遷がありその後

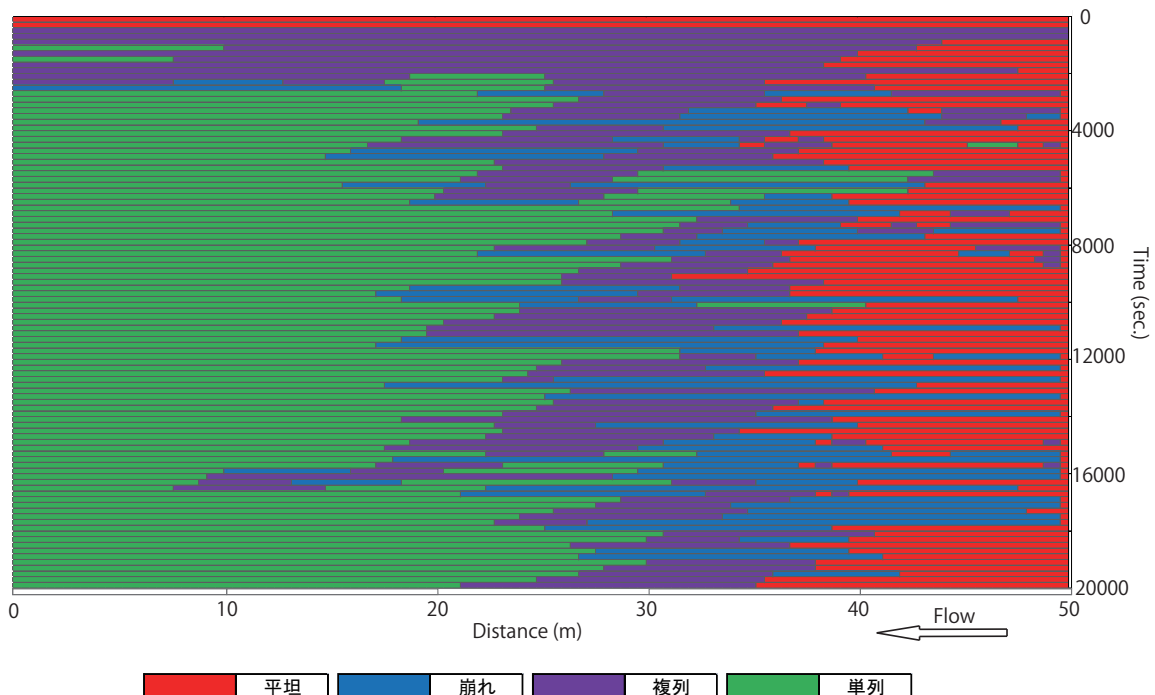


図-7 Case-8 の河床の形状変化図

の砂州の変遷はなかったが、他の5ケースは単列砂州と複列砂州の変遷を繰り返したため水理実験を再現する方法として適用するにはさらに検討する必要がある。

4. おわりに

中規模河床形態の形成に関し、数値実験を実施した。本研究の結論は以下のとおりである。

- (1) 上流端境界条件の影響を比較した Case-1～5 では、Case-1、3、5 では波長、波高ともに実験結果と概ね合致したが、Case-2、4 では実験結果と合致せず、通水後7000 秒前後から各所で浮州が発生した。一方、2 次流強度の影響を比較した Case-5～8 では波長、波高ともに実験結果と概ね合致しており、2 次流強度の違いによる波長、波高の変化は見られなかった。
- (2) 非周期境界条件で上流端擾乱に流速に微小な変動をランダムに与えた Case-3、5～8 では初期に複列砂州から単列砂州に変遷し、その後単列砂州と複列砂州の変遷を繰り返した。複列砂州は下流端から40m 上流付近で形成し、1500 秒～3000 秒かけ15～30m 下流に移動し図-6 の15400 秒の下流端から16m 上流から24m 上流の地点のような形状を経て単列砂州に変遷することがわかった。
- (3) 複列砂州から単列砂州への変遷をさらに詳しく把握するために、Case-8 の通水後14000 秒に発生した複列砂州に着目した。複列砂州は15000 秒に河床形状が崩れ、16600 秒には複列砂州が再び形成した。16800 秒には再び河床形状が崩れ、17000 秒には単列砂州に変遷した。しかし、全ての複列砂州が同じような変遷をするわけではなく、単列砂州から複列砂州あるいは複列砂州から単列砂州への遷移メカニズムについてはさらに

検討する必要がある。

- (4) 波長と波高については Case1、3、5～8 の再現精度がよいといえるが、Case-1 は周期境界条件であり、他の5 ケースは単列砂州と複列砂州の変遷を繰り返したため水理実験を再現する方法として適用するにはさらに検討する必要がある。

謝辞：本研究は平成19年度科学研究費補助金基本研究(A)(代表：清水康行、課題番号:19206052)の助成を受けて行われ、計算モデル、図化にRIC-Naysを使用させていただいた。また、北海道大学の清水康行教授には有益な助言をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 竹林洋史：直線河道の砂州に関する土砂水理学的研究、立命館大学学位論文、2000。
- 2) 渡邊康玄、桑村貴志：複列砂州のモード減少過程に関する水理実験、土木学会水工学論文集第48巻、pp.997-1002、2004。
- 3) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集第206号、pp.59-69、1972。
- 4) 小林健介、清水康行、Giri Sanjay、渡邊康玄：初期河床に与える微小擾乱が砂州の発達及び砂州形状に及ぼす影響について、土木学会水工学論文集第51巻、pp.1045-1050、2007。
- 5) 藤田裕一郎、永田順宏、村本嘉雄：多列砂州の形成・変化過程と細砂河床の影響、土木学会水工学論文集第36巻、pp.23-28、1992。
- 6) 藤田裕一郎、赤松英樹、村本嘉雄：網状流路の形成過程、土木学会第31回水理講演会論文集、pp.695-700、1987。
- 7) 竹林洋史、江頭進治：自己形成流路の形成過程と形成水理条件、土木学会論文集、第48巻、pp.997-1002、2004。
- 8) 渡邊康玄：モード干渉を考慮した砂州のモード減少過程、土木学会水工学論文集、第50巻、pp.967-972、2006。