

砂州の形成過程に関する数値計算手法

Simulation methodologies to describe bar initiation and development

寺本敦子*, 辻本哲郎**

Atsuko Teramoto and Tetsuro Tsujimoto

*修(工), 名古屋大学大学院助手, 工学研究科地圏環境工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

** 工博 名古屋大学大学院教授, 工学研究科地圏環境工学専攻 (同上)

We often observe transformation of bars due to various human impacts. From the viewpoint of river landscape management, it is important to clarify bar transformation and prepare the methodology to predict. Numerical simulation is useful to know the behaviors of bars and it suggests how the human impact degenerates the bar formation process. We have two methods of numerical simulation on bar formation. However, the present methods that many researchers employ have some problems to describe real phenomena appearing in real rivers. In this paper, the results by several methodologies are compared with each other. Particularly, some methodologies presume the results in wavelength and mode. And, a new methodology is proposed which never presume the appearing length characteristics.

Key Words: numerical simulation, bar formulation, NHSED2D model

キーワード: 数値解析, 砂州, NHSED2D モデル

1. はじめに

近年, ダムが建設されるなど様々な人為的インパクトが河川に加わり, 様々な河川で河道の変遷が顕著に見られるようになった. 例えば, 手取川では次のような変化が報告されている. 手取川の河道では, 1960 年代まで網状流路が形成されていたが, 砂利採取や 1980 年のダム建設などによって流況や土砂供給条件が変化することで, 砂州に植生が侵入し, 砂州モードの減少が起こったとされる. 現在の河道には固定化した複列や単列の砂州が多く存在している. このような砂州の変遷が様々な河川で見られ, その原因や経過を解明するためには, 砂州の動態について充分知見を集積しておくことが重要である.

砂州に関する研究は, 従来, 線形・非線形解析や実験によるものが多く見られたが, 近年は計算機の発達により数値解析が多く行われるようになってきた. 線形安定理論に基づく研究は, 数学的な手法を駆使して解かれているが, 様々な仮定をおいていることから実現象における様々な変遷過程, とくに, 様々なインパクトによる河道の応答的变化を追うことは困難である. 河道の動態を追うためには, インパクトを考慮しやすい実験や数値解析が有用であるが, とくにその簡便さと再現性から数値解析が有用である. しかし, 現在用いられている砂州の再現計算方法にはいくつかの問題点が存在し, その問題点を認識した上で適用する必要があると考える. 本研究では, 交互砂州, 複列砂州の再現計算結果を通じて, 現在多くの研究者に用いられて

いる砂州の再現計算方法の問題点を明らかにする. そして, 河道の変遷を解析するのににより有用な砂州の再現計算方法を提案する.

2. 数値計算方法(NHSED2D)

本研究で用いた数値計算法の概要を説明する. 流れの計算, 河床変動計算は, これまでに開発してきた複雑な流れを比較的安定的に解くことができ, 河床変動計算と連動できる NHSE2D モデル¹⁾を用いて行った.

NHSE2D モデルでは, collocated grid を用い, 各セル内のすべての物理量はセル中心の値に代表させる. 支配方程式の離散化にあたり, 有限体積法 (FVM) を用いている.

2.1 流れの計算手法

(1) 基礎式

表面流に関して水深平均された平面 2 次元流れの支配方程式は次のようにかける.

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \operatorname{div} \left(q_x \frac{\mathbf{q}}{h} - \frac{\mathbf{T}_x}{\rho} \right) = -gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{C_f}{h^2} q_x |\mathbf{q}| \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \operatorname{div} \left(q_y \frac{\mathbf{q}}{h} - \frac{\mathbf{T}_y}{\rho} \right) = -gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{C_f}{h^2} q_y |\mathbf{q}| \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \text{div} \mathbf{q} = 0 \quad (3)$$

ここで、 t : 時間、 q_x, q_y : それぞれ x, y 方向の単位幅流量、 $\mathbf{q}$: 単位幅流量のベクトル、 ζ : 水面高さ、 h : 水深、 $\mathbf{T}_x, \mathbf{T}_y$: 乱流拡散による運動量フラックスのベクトル、 g : 重力加速度、 ρ : 水の密度、 C_f : 河床抵抗係数である。

乱流拡散による運動量フラックスは渦動粘性係数 ν_t を用いて表現され、渦動粘性係数は摩擦速度 u_* と水深 h によって次のようにモデル化される。

$$\nu_t = \alpha u_* h \quad (4)$$

ここで、 α : 経験定数である (≈ 0.1)。

(2) Fractional step method と内挿補間法

(1)項で示した運動量の輸送方程式と連続式を連立させて解くために、水面高さに関するポアソン方程式の解を反映させる fractional step method (Ferziger and Peirc²⁾) による時間発展型解法を採用する。すなわち、①運動量の輸送方程式中の水面勾配項を除く項を時間積分して仮の単位幅流量を得て、②これを連続式に代入して得られる水面高さに関するポアソン方程式を解くことにより水面高さを求め、③これをもとに単位幅流量を補正する。これにより各時間ステップでの単位幅流量と水面高さが得られることになる。こうした操作を時間発展させながら所定の回数だけ繰り返し、各量の時間変化が無くなった時点で定常解が得られたものと見なす。

この際、セル境界での値はセル中心の値から内挿することになるが、本モデルでは Rhie and Chow³⁾の方法を用い、セル境界での質量フラックスに対して互いに打ち消しあう表現の異なる2つの水面勾配項を付加する。これにより、collocated grid に特有の振動解の発生を抑制する。一方、移流によって輸送される運動量成分は、QUICK scheme を用いて与える。

2.2 河床変動解析手法

流砂の形態として掃流砂のみを対象とし、次の流砂の連続式をもとに河床変動解析を行なう。

$$(1 - \rho_0) \frac{\partial z}{\partial t} = -\text{div} \mathbf{q}_b \quad (5)$$

ここで、 z_0 : 河床高さ、 ρ_0 : 河床砂礫層の空隙率、 $\mathbf{q}_b$: (q_{bx}, q_{by}) 成分をもつ掃流砂量ベクトルである。また、(q_{bx}, q_{by}) は、次式で与えられる。

$$q_{bx} = q_b \cos \varphi \quad (6), \quad q_{by} = q_b \sin \varphi \quad (7)$$

ここで、 q_b : 単位幅あたりの掃流砂量、 φ : 流砂の方向角となっている。

セル境界における流砂量ベクトルは、次の考え方に基つき算出される。

- 1) セル境界面それぞれにおける流量フラックスを求め、これらの大きさの比較から、縦断方向、または横断方向のどの面に対して、流れが卓越するかを定める。流

れが卓越する方向のセル境界面については、流れの上流側のセル中心での流れの諸量(流速、水深、河床勾配など)をもとに、セル境界での流砂量を求める。流れが卓越しない方向のセル境界面については、セル境界での流れの緒量を内挿により得た後に、これを用いて、セル境界での流砂量を求める。

- 2) 流砂量の算定には、芦田・道上⁴⁾の式を用いる。ここで、限界掃流力の算定については岩垣の式⁵⁾を用い、河床が傾いていることによる限界掃流力の減少効果を Lane⁶⁾の式によって与える。
- 3) 流砂量を流砂の運動方向に成分分けすることで流砂量ベクトルが得られる。ここで、流砂の運動方向角は、流線の法線方向を基本とし、河床が傾くことならびに流線の曲がりによる底面流速の流線の法線方向からの偏倚の効果について、それぞれ Englund⁷⁾, Nakagawa *et al.*⁸⁾による方法で算定して補正する。

なお、計算領域の内部に中州として陸化領域が出てきた際には、陸化領域と水域との境目で流砂量が急に変化するために、そこをきっかけとして河床の振動が起きやすい。そこで以下の工夫を施した。①陸化領域と水域の境目のセルをさらに横断方向に等分②水位を一定として細分セルにおける水深を算出、その他の水理量を線形補間により算出③細分セルにおいて流砂量を計算④細分セルにおける河床変動量を算出⑤細分セルにおける河床変動量の平均値から元のセルにおける河床変動量を計算した。

各時間ステップで、流れ場が解かれた後、式(5)により河床高さを更新する。ここで、河床勾配が砂礫の水中安息角を超えた場合には、その斜面が安定には存在できないものとし、河床勾配がほぼ水中安息角となるように、質量保存に注意して河床高さを補正する(後藤⁹⁾の論文で用いたものと同様の手法)。なお、水面下でない河床については、表面張力に支えられる砂の最大傾斜角に保たれるとしている。

2.3 上下流端境界条件

周期境界条件以外の計算における境界条件として、上流端で流量、流砂量を、下流端で水深を与える。

下流での水深は、初期条件として等流水深を与え、河床変動と共に変動を可能とし、式(8)を用いて水位を補正する形で与えている。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sqrt{gh} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right) = 0 \quad (8)$$

土砂の流入条件は、上流端の水理条件に合わせた平衡土砂量を横断方向に一定に与えているため、上流端の河床はほとんど変化しない条件となる。

3. 砂州を再現する計算の方法

2章で説明した NHSE2D モデルを用いて上下流の境界条件を変化させることにより、砂州の発生・発達過程の再現を試みる。本研究では、この砂州を再現するための境界

条件に焦点をあて、将来的に河道変遷や砂州の変化を伴う河床変動を再現するのに有効な方法について議論を進める。

3.1 従来の砂州の再現計算方法

現在用いられている砂州を再現する簡便な方法として、砂州発生のかきかけをつくるために人為的に微小な擾乱を河床及び水量に与えるものがある。現在、初期河床にマウントや微小擾乱を与え周期境界条件を用いて計算することにより交互砂州や複列砂州を再現する計算が数多く発表されている（例えば、Adichai ら¹⁾ や清水ら¹⁰⁾）。一方、上流端の微小擾乱として、次式で示すような単位幅流量 q の横断方向分布を与える方法が長田ら¹¹⁾によって用いられている。

$$\frac{q}{\bar{q}} = 1 + a \cos \frac{m\pi y}{B} \sin \frac{2\pi x}{T} \tag{9}$$

ここに、 $\bar{q}$ ：平均単位幅流量、 B ：水路幅、 a ：定数であり、長田らは、 $a=0.05$ としている。なお、上式において横断方向分割数 m 、周期 T は黒木、岸の線形安定解析¹²⁾に従って、擾乱の増幅率が最大となる波数、すなわち与えられた水理条件のもとで卓越する河床波に対応するように決定している。流れの数値解析において、上流における流入流量の条件としては、横断方向に一定流速になるように流量を与えたり、単位幅流量を水深の3/2 乗に比例させて配分したりする例が多い。これに対し上流からの流入流量に横断方向分布を与え、水量に常に擾乱を与えることによって砂州が形成される過程を再現しようとするものが上述した長田らの方法である。この他に竹林ら¹²⁾に用いられている初期河床にのみ擾乱を与える方法もあるが、この方法は浮き州ができない進行性砂州の条件では、初期擾乱が時間と共に計算領域を流下、消失し、定常的に砂州が形成されない。そのため、本研究において検討対象としない。すなわち、砂州の再現計算方法は大きく次の2つに分けることができる。

- 1. 河床に初期擾乱を与え、流量、水深、流砂量の境界条件に周期境界条件を用いて砂州を再現する方法
- 2. 上流の流量の流入条件として横断方向に時間的、空間的周期性をもつ微小擾乱を与える方法

3.2 砂州の再現計算方法の問題点

この2つの方法は、その計算条件の特徴から次の問題点が考えられる。

方法1の周期境界条件を用いると、最初に与えた計算領域の長さによって現象の周期が決まってしまう。もっとも境界を長く取ることではじめて選定した計算領域の長さの影響を小さくできる。しかし、計算領域の影響を完全になくすことはできないし、こうした周期境界条件を用いる場合には周期性のある現象や平衡状態が想定される場合の議論のみに有効である。川幅が拡大し、交互砂州の条件が変化することにより砂州波長が変化する場合には、この

計算を用いるのは適当でないと考えられる。また、仮想的な平衡状態の議論には対応できるが、上流から何らかのインパクトが与えられ非平衡となる場合、例えば、給砂条件の変化や流量が変化する場合の解析には対応できないのが現状である。

方法2は、与えられた水理条件のもとで卓越する河床波に対応させた横断方向分割数 m と周期 T を与える必要がある。このことは、砂州波長が変化したり、条件が変化したりするときに卓越するはずの擾乱に対応する m 、 T が初期条件と適合しないことで、現象の移行を表現できない可能性がある。

本研究では、方法2の応用として上流端流入条件として与える単位幅流量の擾乱を、式(9)の右辺第二項のような正弦波や余弦波を用いずに、ランダムに与えることとする。すなわち、正規分布に従う Box-Muler 法で平均値が0 となる乱数を発生させ時間的、空間的にもランダムに与え砂州を再現することを試みる。まず、直線流路における定常流量下での砂州発達過程について、この方法による解析結果を他の計算方法の結果と比較し、この方法の有用性を明らかにする。

4. 砂州の再現

4.1 再現する実験ケース

本研究では上述のいくつかの砂州の再現計算方法を用いて再現計算を行うが、その対象を藤田らの研究^{14), 15)}における実験ケース C-2、B-2 とする。これらの計算結果をその水路実験結果を用いて比較することで計算法の問題点を考察する。

藤田らの実験条件は、次の表-1 に示す通りである。両ケースの水理条件に対して線形安定解析¹³⁾を行うと無次元増幅率 kC_i と波長 L の関係は図-1、2 のようになり、ケース B-2 はモード2 が卓越し、ケース C-2 は交互砂州の発生条件に入っていることがわかる。なお、波長 L は隣り合う砂州の前縁線下流端間の距離とする。

表-1 実験条件

実験ケース	B-2	C-2
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0.03075	0.00195
I	0.005	0.01
$d(\text{mm})$	0.88	0.99
$B(\text{m})$	3.0	0.4
$q(\text{m}^2/\text{s})$	0.01025	0.004875
$h(\text{m})$	0.023083	0.012146

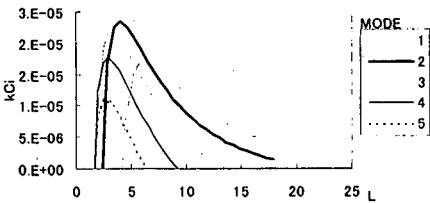


図-1 線形安定解析結果
砂州波長と増幅率の関係（ケース B-2）

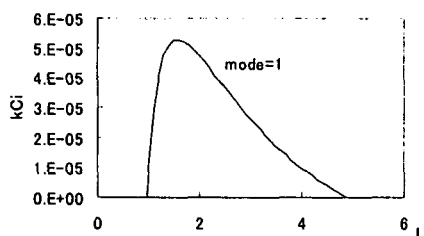


図-2 線形安定解析結果
砂州波長と増幅率の関係 (ケース C-2)

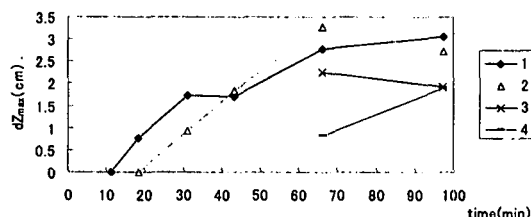


図-3 実験ケース C-2 における波高時間変化¹⁴⁾

図-4 実験ケース C-2 における波長時間変化¹⁴⁾

4.2 交互砂州の再現計算(実験ケース C-1)

(1) 実験結果の概要

実験ケース C-1 の個々の砂州に着目した波高、波長の時間変化を図-3、4 に、河床コンターを図-5 に示す。藤田らによると、実験結果から交互砂州の発達段階は、次の三段階に分けることができる。

第一段階：通水開始後、波長、波高ともに増大し、波長がほぼ平衡状態に達するまでの段階

第二段階：波長は一定値の周辺を緩やかに波状変化するが波高は増大を続け、波高が平衡状態に達するまでの段階

第三段階：砂州形状が平衡状態に達して、波長・波高がともに一定値の周辺を波状変化する段階

(2) 計算方法 1：周期境界条件を用いた交互砂州の再現

上述したように、周期境界条件を用いた計算では、計算領域が現象の周期を決めてしまう問題がある。計算領域に整数個(波長の整数倍)の砂州しか存在できず、現象の途中で砂州波長が伸びるような場合を取り扱うときには、計算領域内で砂州が消滅するなどの変化がおき、実際の現象とは違って来る危険性がある。このような現象は実は平衡状態に至るまでの砂州の発達段階でも見られるはずである。

ケース C-2 における再現計算例から極端な性状を示す。流下方向の計算領域長を $XL=3, 4, 5, 12m$ 、としたものの比較を行う。砂州の発達を伴い、計算領域内の砂州波数

図-5 藤田らの実験ケース C-2 における河床時間変化¹⁴⁾

図-6 周期境界条件における
計算領域毎の砂州波高の発達

は $XL=3m$ では変化しないが、 $XL=4, 5, 12m$ それぞれ砂州の発達段階で波数の減少が起こっている。藤田らの実験の第一段階で先に砂州波長と高低差がともに発達する。周期境界条件では現象の起こりうる周期が限られてしまうため、このような砂州波長の発達を説明することができない。つまり、砂州の発達に伴い砂州の波長が伸びることは、現象が起こる長さの周期が変化していることであり、固定された計算領域では対応できない可能性がある。図-6 に砂州波高の時間変化を示す。この図と図-7 に示す河床時間変化から、 $XL=4m$ では砂州の高低差の発達段階で、 $XL=5m$ ではある程度発達した後の段階で波数の変化が起こり高低差の変化が他の計算領域長さのケースと大きく異なっている。

藤田らの実験結果¹⁴⁾にもあるように砂州の発達段階で砂州の消滅は起こりうるが、この消滅が起こりうる周期は必ずしも一定でないし、周期も分からないため、周期境界条件を用いる際にどの程度計算領域を長くすれば波数の変化が実際の現象に近い形で起こるのかは明確でない。

波数の変化が計算中に起こることは、砂州の発達に伴う変化を再現するときに計算結果に何らかの影響を与える可能性がある。例えば、著者ら¹⁰⁾による砂州の発達を伴う低水路河岸侵食を数値解析で検討した場合、周期境界条件を用いると波数が変化するとき大きく現象の変化が見られた。この現象が、計算領域長さに支配されるような計算特有の現象なのか実際の現象なのかの判断が難しい。周期性を持たない現象や、波長が変化するような現象に周期境界条件を用いて砂州の再現を行うことは、判断を誤る可能性があることを認識する必要がある。

- 978 -

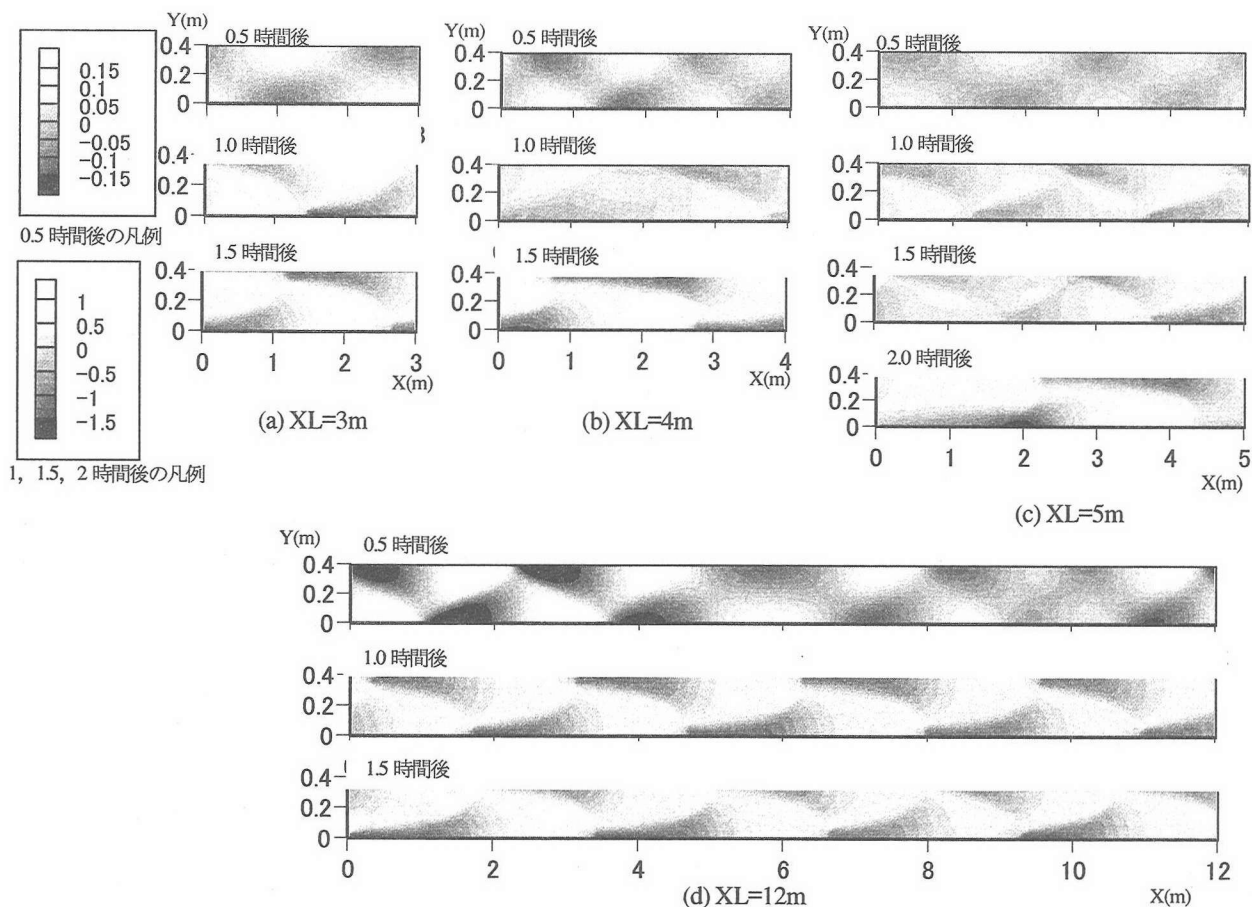


図-7 周期境界条件における0.5, 1.0, 1.5, 2.0時間後の各計算領域での河床時間変化

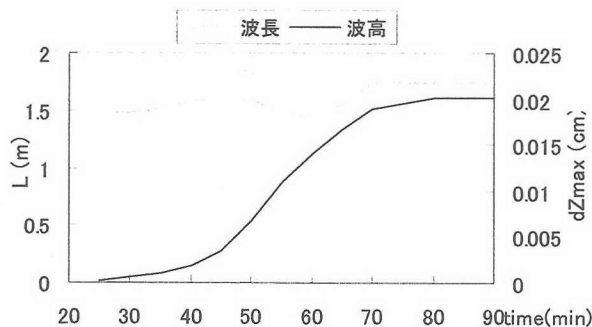


図-8 計算方法2-1による波長, 波高の時間変化

(3) 計算方法2: 流入流量条件に微小擾乱を与える方法を用いた交互砂州の再現

計算方法2-1: 周期性がある擾乱を与える方法

この方法で計算を行う場合には、黒木、岸の線形解析¹³⁾より周期及び発生モード数を決める必要がある。藤田らの実験ケースC-2では、式(9)における値はそれぞれ $m=1$ 、 $T=1600s$ となり、最初に発生が予想される砂州条件に対して擾乱を決めるため、発達する砂州がそれに縛られる可能性がある。

交互砂州の実験ケースC-2に対する計算結果を個々の砂州に着目した砂州波長と波高の時間変化によって図-8に示す。計算領域に現れる砂州はほとんど図-8の結果とほぼ同様な変化を示す。図-8によると、実験結果(図-3, 4)と同様に波長がある程度発達した後、波高が発達している。し

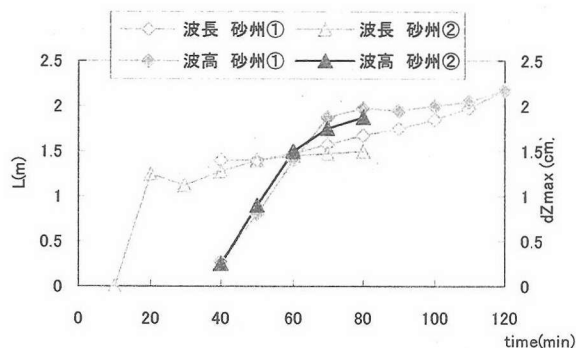


図-9 計算方法2-2による波長, 波高の時間変化

かし、図-3に示した実験結果とは異なり、砂州波長は、最初に与えた m 、 T の条件を算出するのに用いた初期卓越波長の1.6mに近い値からあまり変化していない。これらの結果から、初期条件で与えられる波長からあまり変化しないような状況での砂州の発達過程の再現には有用であるが、砂州波長が変化するような条件での計算には、擾乱の条件を変化させる必要があると言える。

計算方法2-2: ランダムな擾乱を与える方法

この計算方法では、計算流入口で流量に与える擾乱が水深、流速の条件などと絡み実際に自然に存在する擾乱に変化するまでの区間、つまり砂州が安定して発達するための助走区間が必要となり、結果として計算領域を長く取る必要がある。それに伴って平衡状態に至るまでには要する時

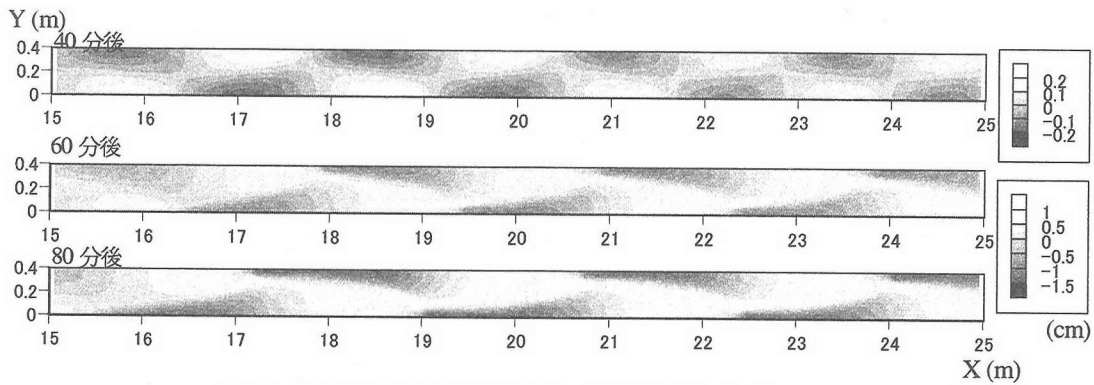


図-10 砂州の再現方法 2-2 を用いた計算結果, 河床コンター

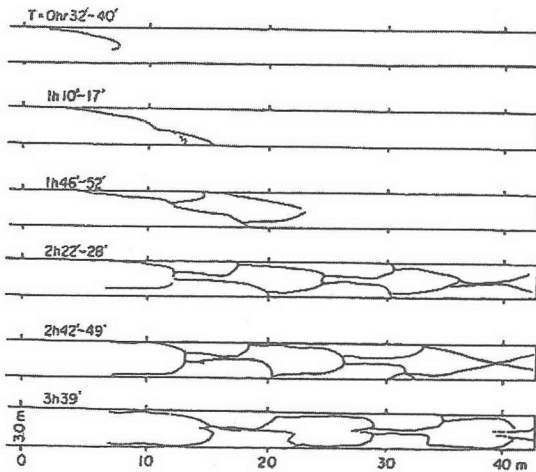


図-11 実験結果¹⁵⁾ (ケース B-2).

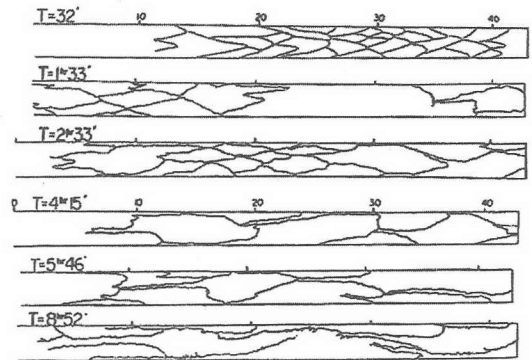


図-12 実験結果¹⁵⁾ (ケース B-4).

間は長くなる。この計算方法は、計算方法 1, 2-1 と異なり条件を先に決めて与える必要がなく、発達する砂州を波長、波高とも与えた条件で縛る危険がないこと、周期性を持たない現象でも再現できるという利点がある。この計算方法を用いた結果を図-9, 10 に示す。図-9 は、計算結果から個々の砂州について、砂州波高、波長の発達をみたものである。計算方法 2-1 と異なり、砂州によって波長、波高の値が違ふ値を示し時間的に変化していた。これは、図-9 から 4.1 で記述した実験結果での砂州の発達段階における第一、二段階を再現していると言える。平衡状態だけでなくこうした砂州の発達段階を再現できることは、上述した砂州の発達を伴う河岸侵食など砂州の変遷を議論するのに有用なツールとなる。

4.3 複列砂州の再現計算(ケース B-2)

ケース B-2 において計算方法 1 を用いた結果は、すでに報告したとおりで(Pomprommin *et al.*¹⁾), 計算領域によって異なる計算結果となっている。この時の計算領域の問題は、すでに 4.2 節の(2)において述べたものと同様であり、計算領域を十分に長くしない限り計算領域次第で現象が変化する可能性が高い。

ここでは、実験ケース B-2 においては、計算方法 2 を用いた議論に絞る。

(1) 実験結果の概要

図-11, 12 に Fujita *et al.*¹⁴⁾によって行われた実験ケース

B-2, B-4 の結果を示す。実験ケース B-4 は、B-2 と同じ水理条件を用いたものであり、実験途中で 6 回通水停止を行ったケースである。ケース B-2 においては、通水開始から 1 時間 15 分ごろには交互砂州的な砂州の前縁が現れ、2 から 3 時間後に図-11 から分かるように定常的なモード 2 の複列砂州が現れ、3 時間 39 分には波長が 6 から 8m 程度の前縁が向かい合った部分の深掘れが著しい複列砂州となることが確認されている。一方、ケース B-4 においては、高モードの砂州が現れ、その後流路の一部に複列砂州が現れるが、最終的に単列砂州へ移行し網状流路、自己形成流路が現れた。この 2 ケースの結果は、同じ水理条件においても、河床の条件によって現れる砂州のモードが変化することを示している。

(2) 計算方法 2: 流入流量条件に微小擾乱を与える方法を用いた複列砂州の再現

計算方法 2-1 において初期条件を決めるのは、現象を規定してしまう危険性がある。そこで、ここでは、実験ケース B-2 について、計算方法 2-1 と 2-2 の計算結果を比較することによって計算 2-2 の有用性を示す。

計算方法 2-1: 周期性を持った擾乱を与える方法

黒木、岸の線形安定解析¹³⁾により求められる式(9)中の m , T はそれぞれ $m=2$, $T=6627s$ で、その値を用いると、図-13, 14 に示す結果となる。図-13 に示す波高の時間変化を見ると、計算開始から 2 時間まで波高の発達は見られない。砂州が発達し始めた段階から砂州のモード数が 2 であることは明確であり、これが実験結果とは異なる点となる。この場合について、実験結果と同様な結果が得られてはい

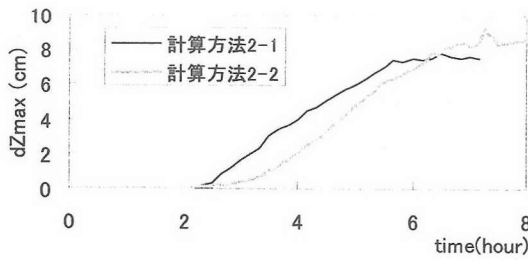


図-13 計算方法2における波高の時間変化(B-2)

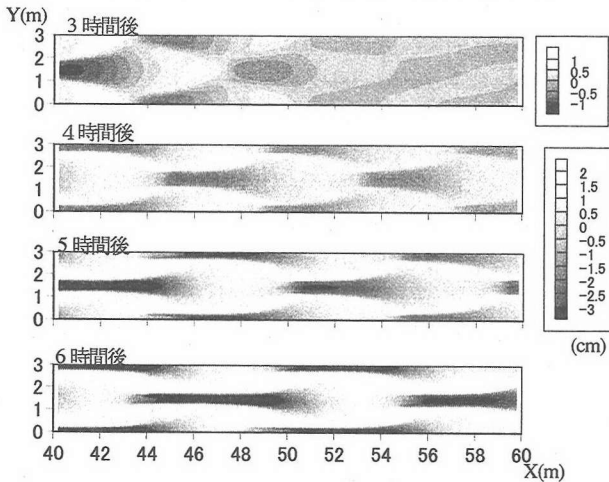


図-14 計算方法2-1における河床の時間変化(B-2)

るが、この計算方法では、 $m=2$ とした初期条件のために発達の初期段階から、最終段階までモード2の複列砂州のみが現れた。

計算方法2-2：ランダムな擾乱を与える方法

この計算法を用いた結果を図-13, 15に示す。図-13の波高の時間変化から、計算方法2-1と比較して波高の発達はやや遅れているが、計算方法2-1と同様に発達していくのが確認できる。図-15に示した河床コンターの時間変化より最初は様々なモードの砂州が現れているが、波高が発達したところから複列砂州が上流から形成され下流へ伝播している。また、それが下流へ伝播するため、3時間後には計算領域内は複列砂州のみとなる。これは、実験結果における時間変化と良く一致している。さらに計算を続けると、波高が発達した6, 7時間後ごろから複列砂州に乱れが生じ始め、12時間後には砂州の一部が浮き州化し自己形成流路が現れた。実験結果においてこのケースでは、ほぼ定常的な複列砂州が形成された時点で実験を停止しているため、最終形状の議論はできないが、この最終形状は、ケースB-4の実験結果の最終形状と良く似ている。

以上の結果から、計算方法2-2は、計算方法2-1と異なりモードが限定されず、砂州の発達に伴うモードの変化をも再現できる。

5. ランダムな擾乱の与え方に関する考察

計算方法2-2として砂州の発達の再現性を検討してきた計算方法について考察する。基本的な擾乱の与え方は計算方法2-1の考え方にに基づき、上流端の微小擾乱として次式

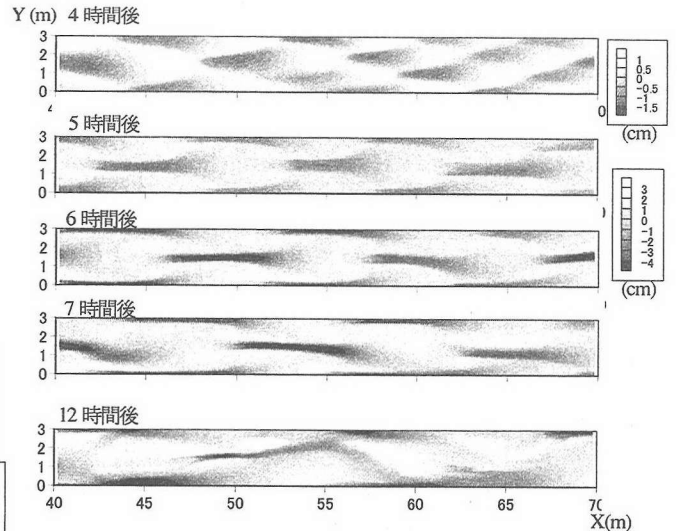


図-15 計算方法2-2における河床の時間変化(B-2)

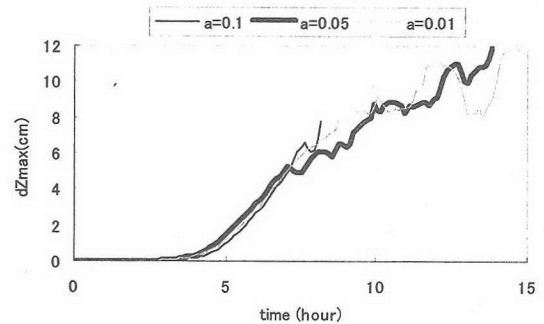


図-16 擾乱の強さによる波高の発達の違い

で示すような上流端から流入する単位幅流量 q の横断方向分布を与える。

$$\frac{\bar{q}}{q} = 1 + aR(y, t) \quad (10)$$

ここに、 $\bar{q}$ ：平均単位幅流量、 a ：定数、 $R(y, t)$ ：BoxMuler法により算出される平均値0、最大最小値を1とした乱数である。この計算方法において、これまでの再現計算における定数 a は長田ら¹¹⁾にならい0.05としてきたが、ここでは、この値が計算結果へ与える影響を検討する。

擾乱を与える強さを支配する a を0.01, 0.05, 0.1と変化させ、藤田らの実験ケースC-2について再現計算を行ったところ、図-16, 17に示すように、擾乱の強さにより波高の発達時間は変化せず、また、計算領域内に砂州が発生するまでに要する助走距離も変わらないことがわかった。しかし、あくまで a は微小擾乱を決める定数であるため極端に大きな値にすると流入条件により計算が不安定になり発散しやすくなることが分かっている。このため a の値は、0.05程度以下が妥当と考えられる。また、計算に必要な助走距離は、現れる砂州の条件によって異なり、たとえば実験ケースC-2, B-2でそれぞれ12m, 30m程度となっている。これは、砂州波長の3倍程度の値である。

計算に必要な助走距離、砂州波高が発達を開始するまでに要する時間は、上流端で与える人為的擾乱が水理条件によって卓越すべき擾乱に変化するために必要な距離、時

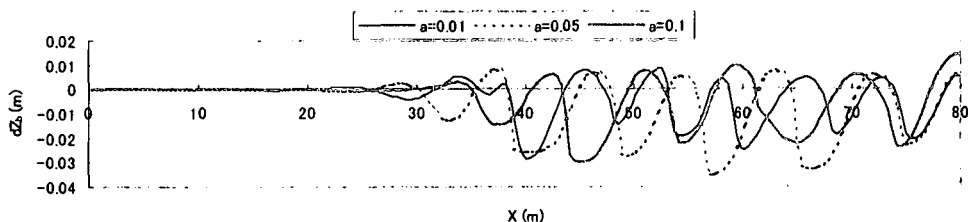


図-17 擾乱の強さによる右岸際の河床縦断形状の違い

間と考えられるが、これらがどう決まっているのか検討の必要がある。

6. 結論

従来、砂州の再現方法として使われてきた計算手法について、藤田ら^{14),15)}の実験ケースに適用し、その長所と難点を明らかにし、改善するための手法を提案した。

計算手法の特徴は以下のようになる。

手法1：周期境界条件を用いる

〔長所〕

- ・ 計算領域が比較的短くてすみ、これにより計算に要する時間が短くてすみ。
- ・ 仮想的な平衡状態が計算できる。

〔難点〕

- ・ 計算領域により現象が支配される。
- ・ 現象に内在する周期を見極めるのが一般的に難しい。
- ・ 周期が変わる現象には対応しにくい。
- ・ 上下流へ伝播するような現象には適用できない。

手法2：上流から擾乱を与える

〔長所〕

- ・ 上下流へ伝播するような現象に適用できる。
- ・ 周期性などを考慮しなくてよく、波長の変化にも対応できる。

〔難点〕

- ・ 計算領域を長く取る必要があるため計算に要する時間がかかる。

長田ら¹¹⁾によって用いられた周期性をもつ擾乱を与える場合には、最初にモード、擾乱を与える周期を知る必要がある。この場合は、モードの変化や波長の変化が著しい現象を再現することはできない。こうした場合には、ランダムな擾乱を与えることが好ましい。

現在の河道で多く見られる砂州の変質などの河道変遷における基本的特徴を知るためには、土砂供給条件、流入流量を変化させる必要がある。こうした影響による砂州の変遷や、川幅が変化するなど波長や砂州の発生モードが変化するような現象を再現するための計算手法として、上流端から横断方向にランダムな微小擾乱を含んだ流量を流入させる方法が有用だとわかった。

参考文献

1) Pomprommin, A., Teramoto, A., Izumi, N., Kitamura, T.,

Tsujimoto, T. : Numerical simulation of bar formation in straight channels by the NHSED2D model, *J. Applied Mech.*, JSCE, pp.629-938, 2002

2) Ferziger, J. H. and Peirc, M., *Computational method for fluid dynamics*, Springer, 1997.

3) Rhie, C. M. and Chow, W. L. : A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation, *AIAA J.*, 21, pp.1525-1532, 1983

4) 芦田和男, 道上直規 : 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.95-69, 1972.

5) 岩垣雄一 : 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集第 41 号, 1956.

6) Lane, E. W. : Design of stable channels, *Trans. ASCE*, Vol.120, pp.1234-1260, 1955.

7) Engelund, F. : Flow and bed topography in channel bends, *J. Hydr. Div.*, ASCE, 100(11), pp.1631-1648, 1974

8) Nakagawa, H., Tsujimoto, T., Murakami, S. : Non-equilibrium bed load along side bank, *Proc. 3rd Int. Sym. River Sedimentation*, Jackson, Mississippi, USA, pp.1029-1065, 1986.

9) 後藤孝臣, 北村忠紀, 辻本哲郎 : 上下流境界条件の変化による直線砂礫流路の側岸侵食を伴う河床低下に関する研究, 土木学会論文集 No.684, pp.35-46, 2001.

10) 清水康行, 倉林弘志, 藤田睦博 : 複列・網状砂州河道における河床変動計算, 水工論文集第 45 巻, pp.739-745, 2001.

11) 長田信寿, 村本嘉雄, 内倉嘉彦, 細田尚, 矢部昌之, 高田保彦, 岩田通明 : 各種河道条件下における交互砂州の挙動について, 水工学論文集第 43 巻, pp.743-748, 1999.

12) 竹林洋史, 江頭進治, 岡部健士 : 網状流路の時空間的な変動特性, 水工学論文集第 46 巻, pp.739-745, 2002.

13) 黒木幹男, 岸力 : 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第 342 号, pp.87-96, 1984.

14) 藤田裕一郎, 村本嘉雄, 堀池周二 : 交互砂州の発達過程に関する研究, 京大防災研究所年報第 24 号 B-2, pp.1-21, 1981.

15) Fujita, Y. : Bar and channel formation in braided streams, *River meandering*, Water Resources Monograph 12, edited by Ikeda, S. and Parker, G., AGU, pp.417-462, 1989.

16) 寺本敦子, 辻本哲郎 : 数値解析を用いた低水路河岸侵食に関する研究, 水工学論文集第 47 巻, pp.649-654, 2003.

(2003 年 4 月 18 日受付)