

中規模河床形態における水量の時空間分布

新潟大学大学院自然科学研究科
新潟大学災害・復興科学研究所

正員 五十嵐拓実
安田 浩保

1. はじめに

中規模河床形態の形成領域は古くから川幅水深比やフルード数等の無次元量を指標にした領域区分が行われてきた。なかでも川幅水深比は中規模河床形態の形状と密接な関係があるといわれ、これを指標とすることにより、中規模河床形態を明瞭に領域区分できることが理論的に示されている¹⁾。また、既往の実験的研究の多くは初期の水利条件を川幅水深比に基づいて設定し、形成される河床形態について調べられてきた。このように中規模河床形態の形成領域に関する議論は様々にされてきているものの、それぞれの形成領域に対応する水量について十分な議論がされてきていないようである。本研究では上記の実状を踏まえ、中規模河床形態の形成過程における水利状態の時空間的な把握を目的とする。具体的には、川幅水深比を変化させたパターンの数値実験を行い、砂州形成過程における水量の空間的偏在性を調べ、各砂州形態ごとの水利状態の時空間分布について議論する。

2. 数値実験

数値実験のスケールは、室内実験スケールを対象とし、川幅水深比を様々に変化させた数値実験を実施した。本研究における川幅水深比は砂州の形成領域を議論する際にひとつの指標とされてきた黒木らの砂州の領域区分図における $BI_0^{0.2}/H_0$ を用いた。川幅水深比の違いによる水利状態を把握するため、砂州形態の形成に影響を与えることが推測される無次元量である無次元掃流力とフルード数を統一した実験条件を設定した。

(1) 計算条件

数値実験で使用した実験水路の諸元を表-1、川幅水深比を変えたパターンごとの粒径及び流量の条件を表-2に示す。川幅水深比は20, 40, 60, 80の計4パターンを実施した。Lは流路長、Bは川幅、 I_0 は河床勾配を意味する。 τ_* 、 F_r は初期の水利条件から算出した無次元掃流力とフルード数である。本研究では初期の無次元掃流力とフルード数を統一した値で行うため、川幅水深比のパターンごとに粒径 d_s 及び流量 Q がそれぞれ異なる。この水利条件を中規模河床形態の領域区分図に照らし合わせると、図1のように単列砂州領域 ($BI_0^{0.2}/H_0=20$)、複列砂州領域 ($BI_0^{0.2}/H_0=40,60,80$) に属することがわかる。計算格子は格子サイズ $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ を用いて、初期河床には既往の研究と同様に河床全体に乱数により河床材料粒径程度の擾乱を与えた。計算時間は試行錯誤の結果、砂州形態が平衡状態に遷移したと推測される30,000

表-1 実験水路の諸元

L(m)	B(m)	I_0	τ_*	F_r
50	0.9	1/38	0.1	1.5

表-2 川幅水深比を変化させた場合の粒径及び流量

$BI_0^{0.2}/H_0$	$d_s(\text{mm})$	$Q(\text{m}^3/\text{sec})$
20	3.48	0.0135
40	1.74	0.0047
60	1.16	0.0026
80	0.87	0.0016

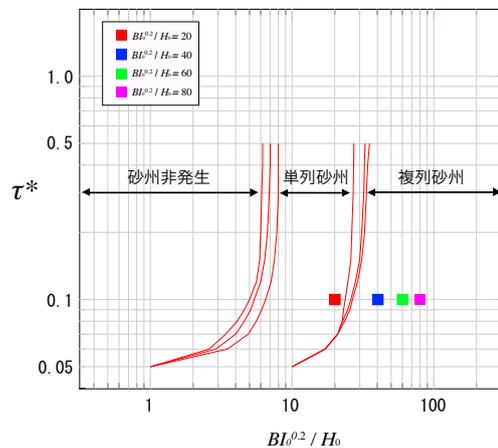


図-1 中規模河床形態の領域区分図 (黒木・岸)

秒までとし、計算の上流端と下流端の境界条件は周期境界条件とした。

(2) 数値解析モデル²⁾

以下で実施した河床変動計算は iRIC2.0 に同梱される平面 2 次元河床変動計算のソルバーである Nays-2D(V4.0) を用いた。このソルバーの基礎式を以下に示す。

a) 流れの支配方程式

流れの支配方程式には、水深方向に積分された流速を用いる以下に示す浅水流方程式である。

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

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

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial (uH)}{\partial x} + \frac{\partial (vH)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

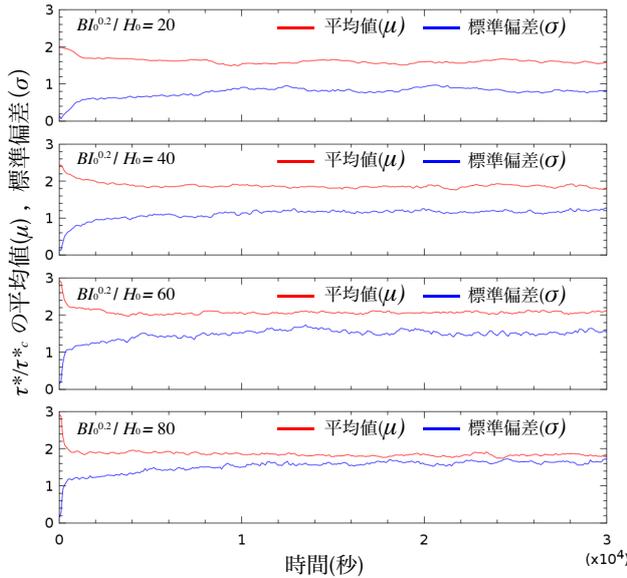


図-2 無次元限界掃流力比の標準偏差, 平均値の時間変化

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial (uh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial (uh)}{\partial y} \right] \quad (4)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial (vh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial (vh)}{\partial y} \right] \quad (5)$$

式(2)(3)はデカルト座標系 (x, y) における2次元浅水方程式を表しており, また式(4)はデカルト座標系における流れの連続の式を表している。ここで, u は x 方向流速, v は y 方向流速, h は水深, H は水位, g は重力加速度, ρ は流体密度, τ_x は x 方向底面剪断力, τ_y は y 方向底面剪断力, D^x は x 方向の粘性項, D^y は y 方向の粘性項, ν_t は動粘性係数を表す。ただし, 以下に実施した数値計算では上式を一般座標系に変換したものをを用いている。

b) 河床変動の支配方程式

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial q^x}{\partial x} + \frac{\partial q^y}{\partial y} \right] = 0 \quad (6)$$

$$q_b = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left[1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right] \sqrt{sgd^3} \quad (7)$$

式(7)(8)はそれぞれ, デカルト座標系においての流砂の連続の式, 芦田・道上の式³⁾である。ここで, λ は河床材料の空隙比, q^x は x 方向流砂量, q^y は y 方向流砂量, τ_* は無次元掃流力, τ_{*c} は無次元限界掃流力, s は砂粒の水中比重, d は河床材料粒径を表している。ただし, 上式を流れの支配方程式と同様に一般座標系に変換した。

(3) 計算結果

a) 無次元限界掃流力比の標準偏差の時間変化

河床変動計算結果から流速の計算点ごとに無次元掃流力を無次元限界掃流力で除した無次元量を求めた。無次

表-3 無次元限界掃流力比の標準偏差, 平均値 (計算最終時刻)

$BI_0^{0.2}/H_0$	平均値 (μ)	標準偏差 (σ)
20	1.5	0.8
40	1.7	1.2
60	2.1	1.5
80	1.8	1.7

元掃流力比から場所ごとに土砂を輸送する流れの駆動力の規模を判断できる。以後, 本文では, この無次元量を無次元限界掃流力比と定義する。無次元限界掃流力は粒径の大小から決定する岩垣らの式を用いた。図-2に求めた水路全区間における無次元限界掃流力比の平均値と標準偏差の時間変化を示す。また, 表-3に計算最終時刻における無次元限界掃流力比の平均値と標準偏差を表す。

計算条件ごとに無次元限界掃流力比の空間的偏在性とその発達速度の違いがわかる。川幅水深比が単列砂州領域に属する $BI_0^{0.2}/H_0 = 20$ の条件では標準偏差は小さく, 緩やかに発達してやがて値の増減が少ない, ほぼ一定値となる。これに対して, 川幅水深比が大きくなるにつれて計算初期に標準偏差は大きく, 急速に発達し, 一定値に達するまでの時間が短くなる。どの計算条件においても計算最終時刻までには標準偏差がそれぞれの一定値に達している。川幅水深比が大きいほど無次元限界掃流力比の空間的な偏在が大きくなり, 両者は比例関係にあることがわかる。

b) 河床形状, 水理状態の時空間的偏在

図-3に砂州発生時刻, 図-4に計算最終時刻における河床形態と無次元限界掃流力比のコンター図, さらに水路内の無次元限界掃流力比の出現率を表した度数分布を示す。度数分布におけるグラフの着色は無次元掃流力比が1を下回る箇所をオレンジ色, 1を上回る箇所を水色で表しており, 図の右上に各時刻における面積を示している。

計算条件ごとに砂州の発達速度が異なるため, 図-2に示した標準偏差の時間発展図から発達時期とみなせる時刻を求めた。具体的には初期の砂州形成時に標準偏差が一定値に達した時刻を計り, その中間の時刻を同一の砂州発達時刻とみなした。

● 砂州形成時刻

既往の多くの実験的研究でも確認されたように, 砂州形成時刻においては全ての計算条件で横断方向に2以上の波数をもつ高周波数の河床形態が形成されている。川幅水深比が大きく複列砂州領域になるにつれて高周波数の河床形態を形成する。無次元限界掃流力比のコンター図より単列砂州領域に属する $BI_0^{0.2}/H_0 = 20$ の条件では, コンターの着色が一樣なことから各横断面内におおむね均一な駆動力が作用していることがわかる。川幅水深比が大きくなるほどコンターの着色の幅が広がり, 各横断面内で駆動力が均一に作用していない。度数分布のグラフの波形からも計算条件ごとの傾

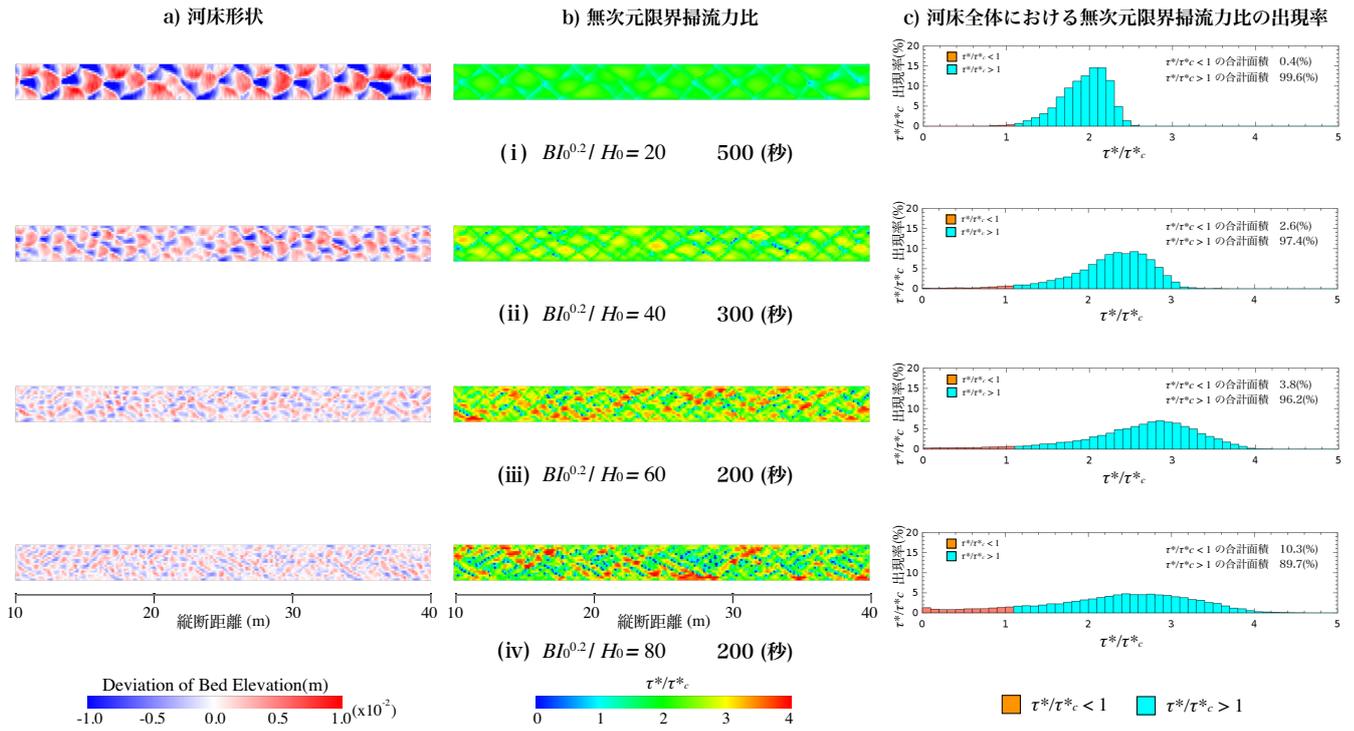


図-3 砂州形成時刻における河床変動計算の結果

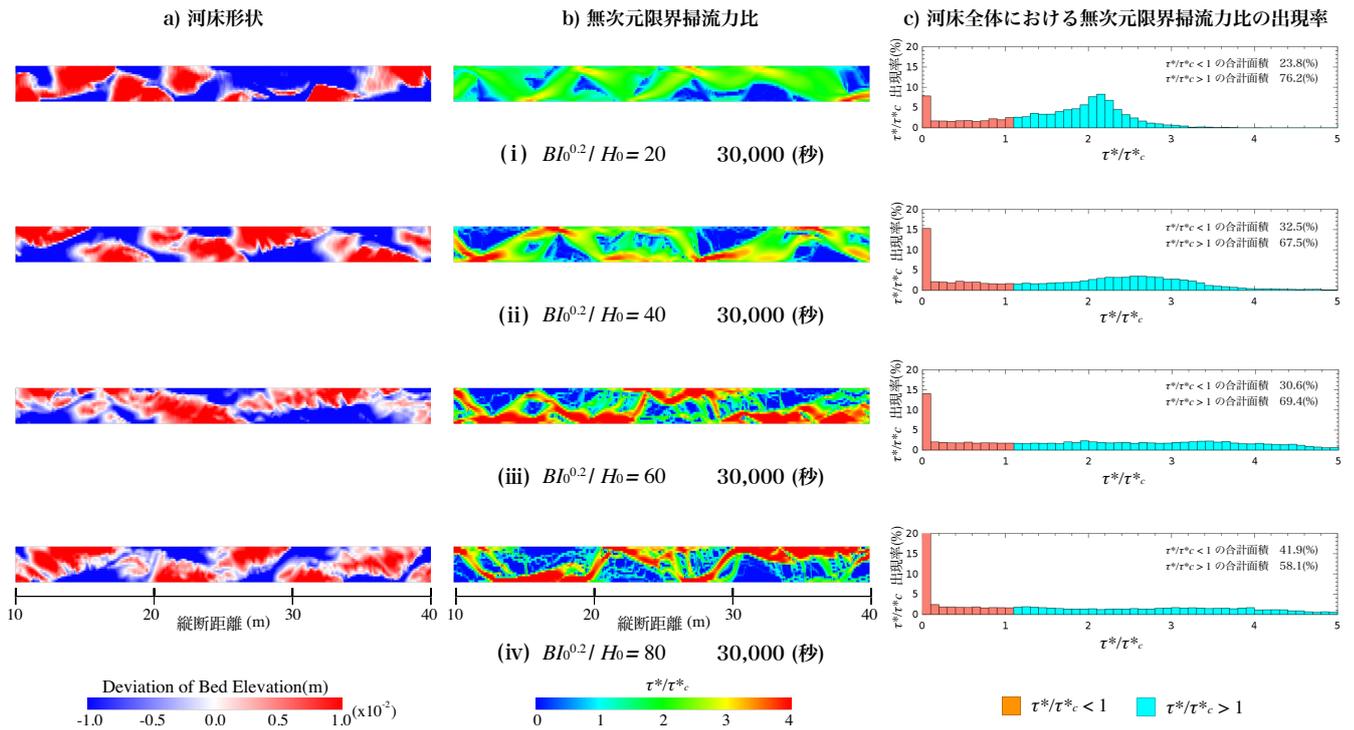


図-4 砂州形成時における河床変動計算の結果

向がわかる。 $BI_0^{0.2}/H_0 = 20$ の条件では無次元限界掃流力比の値が2付近をピークとした山型の分布となっており、水路全区間に土砂を輸送できる駆動力が作用している。川幅水深比が大きくなるにつれて分布の幅が広がり、 $BI_0^{0.2}/H_0 = 80$ の条件ではグラフのオレンジ色で着色したように、水路全区間における1割の面積においてす

に駆動力が作用していない水理状態であることがわかる。

● 計算最終時刻

計算最終時刻においても同様の解析を行った。河床のコンター図を見ると、砂州発生時刻には複数に分かれていた流路の滯筋が時間の経過につれて1本に集中し、単列砂州形態へと遷移している。川幅水深比が複列砂州領

域と考えられる $BI_0^{0.2}/H_0 = 40, 60, 80$ の条件においても砂州の単列化が生じた。無次元限界掃流力比のコンター図からも全ての計算条件において砂州の単列化が確認できる。また、川幅水深比が大きい条件ほど水路の壁際付近でコンターが赤色に着色しており、駆動力が集中しやすい結果となった。度数分布のグラフの面積から、駆動力が作用する面積は水路全区間における6割から7割程度に収束しているが、駆動力の分布は計算条件ごとに異なる。無次元限界掃流力比が1以下では分布に大きな差は見られないが、1以上の値となると計算条件ごとに違いが見られた。以上の結果から、川幅水深比が大きくなるにつれて駆動力の空間的な偏在性が大きくなることがわかる。

c) 無次元有効川幅長の時間発展

ここでは無次元限界掃流力比から水路の横断面内で駆動力が有効に作用する有効川幅長についての議論を行う。有効川幅長は各断面ごとに無次元限界掃流力比が1を上回る箇所を求め、水路縦断方向に平均化した。さらに初期水面幅で無次元化を行い時刻ごとに算出した。無次元有効川幅長を算出する際に、以下の次式を用いた。

$$B_e \tilde{t} = \frac{1}{B} \frac{1}{i_{\text{end}}} \sum_{i=1}^{i_{\text{end}}} B_e(i) \quad (8)$$

$B_e \tilde{t}$ は縦断方向に平均化された無次元有効川幅長、 $B_e(i)$ は各断面における有効川幅長、 i_{end} は縦断面数である。図-5に計算条件ごとに求めた無次元有効川幅長の時間発展を示す。 $BI_0^{0.2}/H_0 = 20$ の条件では、無次元有効川幅長の変化率は他の条件に比べて小さく、その減少幅は最も少ない。川幅水深比が $BI_0^{0.2}/H_0 = 80$ の条件では、計算初期の無次元有効川幅長の変化率が最も大きく、計算最終時刻には計算初期の6割程度の横断面に駆動力が作用していない。これは先の度数分布で求めた無次元限界掃流力比が1を下回る面積と同じ結果である。このことから無次元有効川幅長の計算初期の変化率と最終時刻における減少幅は川幅水深比と比例して変化することがわかる。

3. 考察

(1) 砂州形成時刻における水理状態の時空間分布

解析結果から初期条件として無次元掃流力を一様に与えた水理条件下において川幅水深比を様々に変化させた場合、計算条件ごとに水理状態の空間分布が異なることが確認された。川幅水深比が小さい条件ほど横断面におおむね均一に駆動力が作用することが確認された。逆に川幅水深比が大きくなるに従って横断面に駆動力の不均衡の度合いが大きくなる。

(2) 計算最終時刻における水理状態の時空間分布

計算最終時刻において複列砂州領域と考えられる計算条件においても単列砂州形態が形成された。計算最終時刻においても川幅水深比ごとに水理状態の空間分布が異

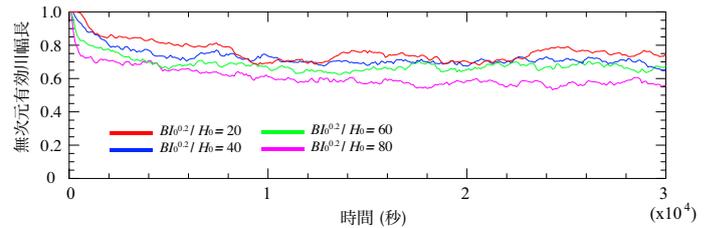


図-5 有効川幅長の時間変化

なることが確認できた。川幅水深比が小さい場合、横断面に駆動力がおおむね均一に作用していることがわかる。川幅水深比が大きくなるにつれ、横断面に駆動力が不均一に作用し、とくに壁際付近で駆動力が集中することが確認された。度数分布をみても無次元限界掃流力比の分布の幅は広く、川幅水深比が小さいときに比べて局所的に強い駆動力をもつ場所が存在していることがわかる。

(3) 無次元有効川幅長

計算初期に水路幅全体に駆動力が作用する水理条件を与えていても、時間の経過につれて駆動力が作用する有効川幅長は小さくなる。川幅水深比が大きい条件においては、流れが壁際付近に集中しやすく、土砂の輸送が壁際付近で活発になることがわかる。また、本研究において導入された無次元有効川幅長は、砂州の発達状態を評価する有用な指標であることが示された。

4. おわりに

本研究では、川幅水深比を様々に変化させた数値実験を行い、川幅水深比の違いによる水理状態の空間的分布について調べた。既往の研究では川幅水深比が大きくなるにつれて流れの不安定性が強いとわれてきたが、この不安定性は、本研究におけるその水理状態の定量的な把握により、無次元限界掃流力比と密接に関係していることが示唆された。

参考文献

- 1) 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, Vol.342, pp.87-96, 1984.
- 2) 河川シミュレーションソフト iRIC : <http://i-ric.org/>
- 3) 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, 土木学会論文集, 第206号, pp.59-69, 1972.