

# 交互砂州上の流れにおける摩擦損失の定量化

新潟大学大学院自然科学研究科 ○学生会員 齋藤 選  
新潟大学災害・復興科学研究所 正会員 安田 浩保  
新潟大学理学部理学科 非会員 早坂 圭司

## 1 はじめに

実河川の底面には流水と流砂の相互作用で、堆積や洗掘を周期的に繰り返す河床波が形成される。河床波は主に砂漣、砂堆を代表とする小規模河床波と砂州を代表する中規模河床波に大別される。このうち中規模河床波は川幅の数倍程度の流下方向の波長を持つことから河川の底面起伏の骨格となっており、治水と密接に関わっている。

治水において基本的かつ重要な問題は河川の流下能力の把握である。流量の支配変数は断面の形状と通過する水の流速であり、摩擦損失は流速を決める上で重要なパラメータである。この流速と摩擦損失の関係で代表的なのは固定床かつ等流状態の実験式である Manning の平均流速公式である。しかし、中規模河床波上では水位と流速が共に漸変することから不等流となる。小規模河床波上では流れの抵抗に関する多数の研究が実施されているが、不等流における摩擦損失の空間的な評価は前例がない。

著者らの研究グループでは摩擦損失の理論的な算出に必要な移動床での水深の高分解能な測定法の開発に最近成功している。本研究では、模型水路上の交互砂州での水深と底面位の面的な情報を計測し、得られた情報を元に水理解析を行い、交互砂州上の摩擦損失を定量的に評価した。

## 2 水底位とそれに対応した水深の同時計測

本章では模型実験を実施し、交互砂州が形成された時の水面と底面の同時計測から、底面位とそれに対応した水深を計測した。

### 2.1 模型実験の概要と計測手法の概要

模型実験水路は全長 12 m、水路幅 0.45 m、水路床勾配 1/200 の直線水路である。水理条件は交互砂州が発生する条件を狙い、黒木・岸の領域区分図<sup>2)</sup>を参考に流量 1.7 L/sec、無次元掃流力 0.08、川幅水深比 11.1 に設定した。底面には平均粒径が 0.76 mm の 4 号珪砂を 5cm の厚さで平坦に敷き詰めた。給砂条件は上流端の底面位を維持するために 20 分毎に 600 g の給砂を行なった。

通水中の水面と底面の計測は星野ら<sup>1)</sup>の開発した Stream Tomography (以下 ST と呼称) を用いて行なった。計測は 4 cm 四方の解像度で行い、計測区間は水路上下流端から

2m を除いた 8m を計測した。

### 2.2 底面の計測結果

図-1 の a) から c) の左図に ST 計測で得られた底面の変位量の時間発展を示す。a) 左図の通水開始から 2 分後では水路全体がゼロに近い一様な値となり、平坦床が維持されている。通水を続けると b) 左図の通水開始から 120 分後では交互砂州が水路全体に形成された。その後も交互砂州の波高や波長や発達し、c) 左図の通水開始 720 分後では通水開始から 120 分後と比べると堆積と洗掘がより明瞭となった。

## 3 水深の計測値を収束条件とした水理解析による粗度係数及び流速の推定

摩擦損失の算出に必要な流速は ST 計測による水深や底面位と同等の解像度での計測が困難である。そこで、時間的に高解像度な情報の取得が可能な数値解析で流速を推定した。

### 3.1 水深の計測値を収束条件とした水理解析手法

平面 2 次元流れの水理解析では、運動方程式は水深とせん断応力を独立変数、流速の 2 成分を従属変数とする。また、独立変数であるせん断応力は粗度係数と水深、運動エネルギーとに關係するため、運動方程式の従属変数は水深と粗度係数と流速の 2 成分となる。一方で連続式は流速を独立変数にもち、水深を従属変数とする。問題はこの連立方程式での未知数が 4 つに対して方程式は 3 本となり、劣決定問題となる点である。粗度係数は固定床の等流状態の抵抗とみなし一定値で与えることが多いが、この方法は数学的に解が得られるだけで水理現象での解とは限らない。

そこで、本研究では連立方程式での未知数の内、底面位だけでなく水深を既知量とし、以下の水理解析の手順により未知数である流速と粗度係数の推定を行なった。1) 計測した底面を入力し水理解析を行う。この時、上流端の境界条件には模型実験時の流量、下流端には横断方向で一様な等流水深、粗度係数には Manning-Strickler の式で算出した 0.014 を全計算点に設定した。2) 水理解析で得られた水深と計測で得られた水深が一致するように、計算点毎に入力する粗度係数を変更する。3) 計測点毎に粗度係数を設定

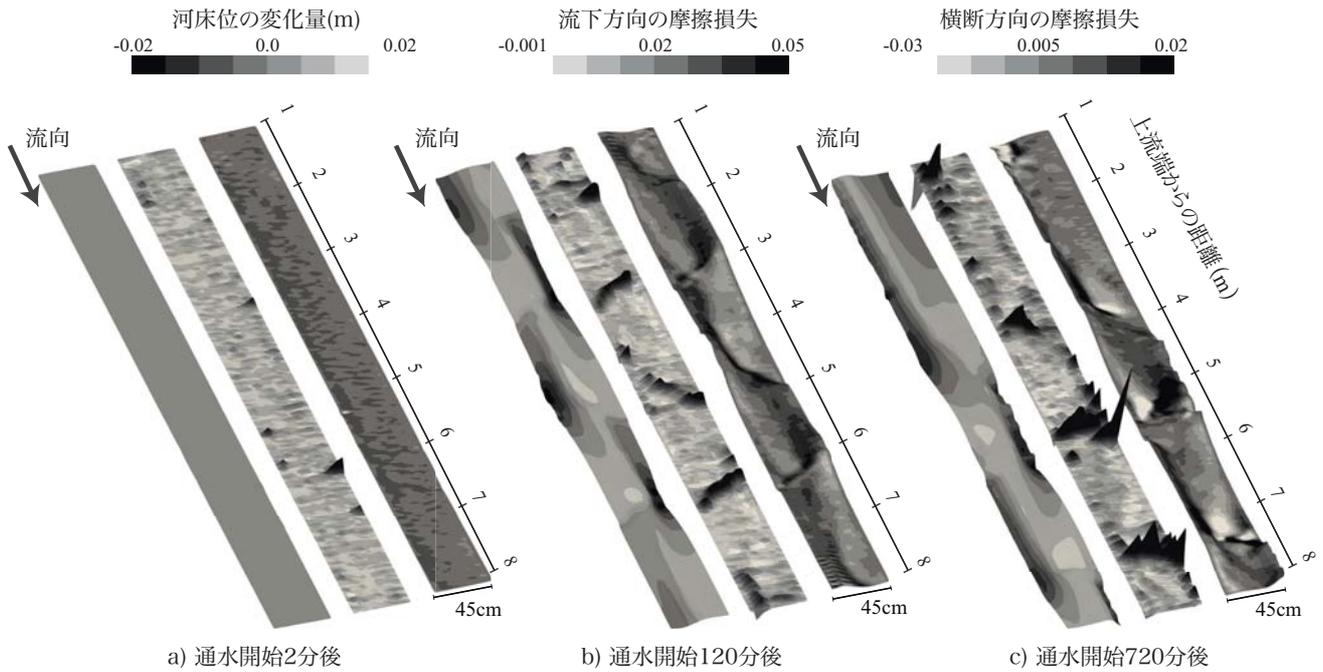


図-1 各時刻の河床位の変化量と摩擦損失の縦横断方向の鳥瞰図 (左図：底面の変動量，中図：摩擦損失の流下方向成分，右図：摩擦損失の横断方向成分)

後，再び水理解析を行う。4)2 と 3 の操作を繰り返す，水深の誤差率を小さくする。

### 3.2 粗度係数の推定手法の検証

#### 3.2.1 検証方法の概要と設定条件

底面位と水深が既知量のとときに粗度係数の推定が可能かを確認するため，交互砂州上の流れを単純化した1次元の不等流計算により検証した。検証方法はまず，一定勾配の平坦床に特定の区間で粗度係数が大きくなるような粗度係数の分布を設定して，水深の真値を1次元の不等流計算から算出する。このときの水利条件と計算点間隔は前章の模型実験と同じ条件とした。次に，設定した底面位で粗度係数を流下方向で一律に0.01で設定し水位の真値に適合するように粗度係数の再設定と不等流計算を繰り返した。

#### 3.2.2 1次元不等流による粗度係数の推定手法の検証結果

図-2(a) に設定した河床位と水位の真値，水位の推定値の縦断分布を示す。灰色の実線は底面位で，灰色の点線は水位の真値である。また，黒色の実線は粗度係数を調整した後の水位の推定値である。下流端から3から5mの区間で上下流より水位が高いのは粗度係数をその区間だけ大きく設定しているからである。水位の真値と推定値を比較すると全区間で概ね一致している。

図-2(b) に水位の真値と推定値の誤差率の縦断分布を示す。下流端から0から3mの区間と5から8mの区間では，

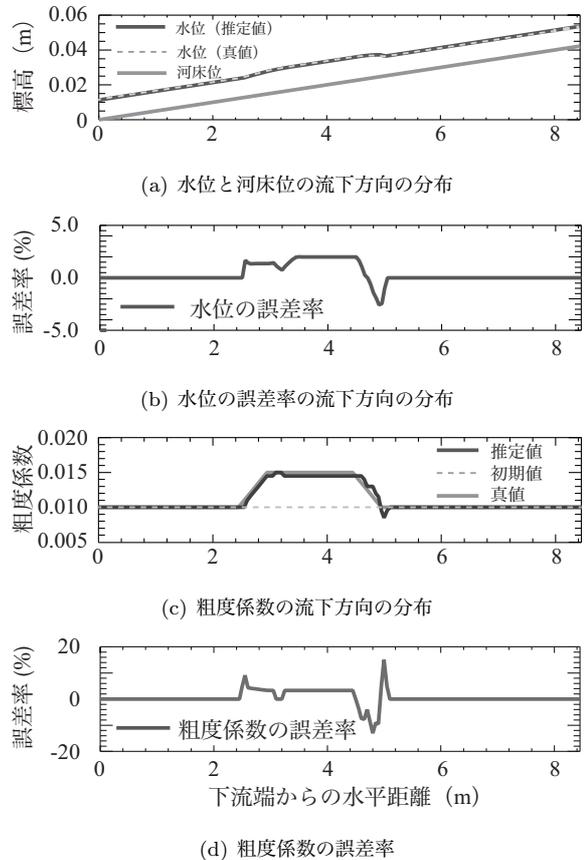


図-2 1次元不等流計算による各種水理量の推定結果

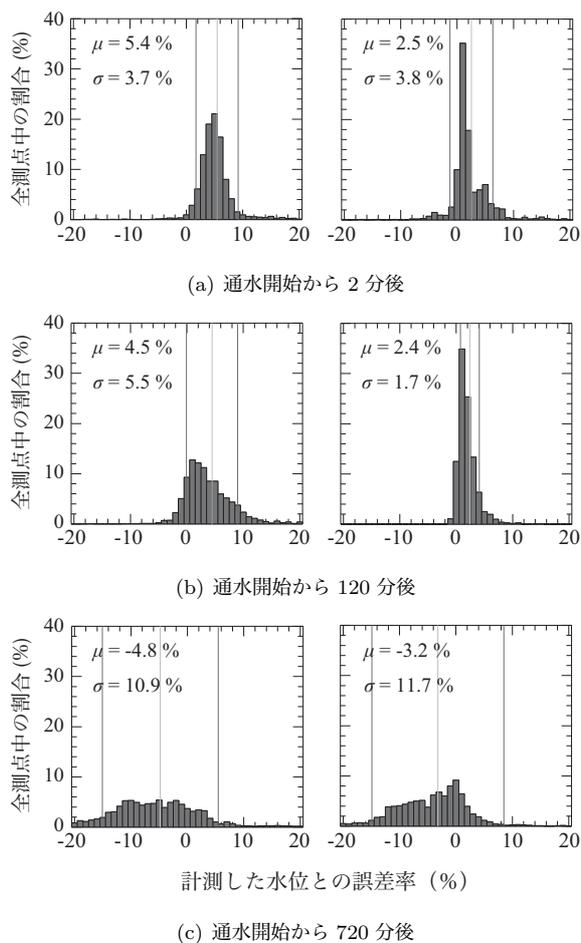


図-3 粗度係数の調整前後での水深の誤差率の変化 (左図: 調整前, 右図: 調整後)

誤差率はほぼ0%である。また、粗度係数が他の区間よりも大きい下流端から3から5mの区間では3%程度の誤差率が生じている。誤差率が最も大きくなっていたのは下流端から5mの地点でその誤差率は4%程度である。

図-2(c)に粗度係数の縦断分布を示す。灰色の実線は粗度係数の真値で、灰色の点線は不等流計算の初期に与えた粗度係数である。また、黒色の実線は粗度係数の推定値である。推定結果は粗度係数の真値を0.01に設定した区間や粗度係数が増加する下流端から3m付近では推定が良好であったのに対し、0.015に設定した区間や粗度係数が増加する下流端から5m付近では真値と推定値に差が見られた。図-2(d)に粗度係数の真値と推定値の誤差率を示す。誤差率の分布をみると粗度係数の真値を0.01に設定した区間は誤差率が概ね0%になり、0.015に設定した区間は5%程度の誤差率となった。また、粗度係数が増加する下流端から3m付近では10%、下流端から5m付近では15から16%程度の誤差率となった。

以上の結果から水深を既知量として粗度係数の推定を行

う場合、水位の変曲点では粗度係数による水位の調整が上手くいかず、水位の誤差率が4%程度のときには粗度係数の誤差率はその4倍程度の誤差になることが示唆された。

### 3.3 交互砂州の発達に応じた水深の誤差率と粗度係数の変化

#### 3.3.1 水理解析モデルの概要と計算条件

水理解析上で粗度係数の調整を行い、流速を推定した。解析は前章の1次元不等流計算を使った手法と同様だが、水理解析にはiRIC<sup>3)</sup>に同梱されている非定常平面2次元流れと河床変動のソルバーであるNays2Dを用いた。入力する底面と収束条件の水深は通水開始から2分、120分、720分においてSTで取得した計測値を使用した。通水中の底面位の変化は流れの変化に比べて十分に遅いため、擬似固定床と仮定して定常流かつ固定床の条件で解析を行なった。各時刻の最初の水理解析で空間全体に一樣に入力する粗度係数はManning-Stricklerの式より算出した0.014とした。その後、水深の計測値と推定値の誤差率が小さくなるように水理解析と粗度係数の設定を繰り返した。

#### 3.3.2 粗度係数の調整前後の水深の誤差率の比較

図-3に通水開始から2分、120分、720分での水深の計測値と推定値との誤差率のヒストグラムを示す。右図は粗度係数の調整前の水深の計測値と推定値の誤差率を示し、左図は粗度係数の調整後の水深の誤差率を示す。

まず、図-3(a)の通水開始から2分後では、粗度係数の調整前の誤差率の分布は平均値が5%、標準偏差が3.7%であったのに対し、調整後は平均値が3%、標準偏差が3.8%となった。粗度係数の調整で水深の誤差率の平均値が2%ほどゼロに近づいたが、標準偏差は変化しなかった。これは通水初期での水深が水路全体でほぼ一樣であり、粗度係数の調整前から水深の推定値にあまり誤差がなかったためと推察される。

次に、図-3(b)の通水開始から120分後では、粗度係数の調整前の水深の誤差率の分布は平均値が4%、標準偏差が5%であったのに対し、調整後は平均値が2%、標準偏差が2%となり、水深の誤差率の分散が緩和したことが分かる。この結果から交互砂州上においても粗度係数の調整によって水深の誤差率を緩和可能であることが示された。

最後に、図-3(c)の通水開始から720分後では、粗度係数の調整前の水深の誤差率の分布は平均値が4%、標準偏差が10%であったのに対し、右図の誤差率の分布は平均値が-3%、標準偏差が11%となり、平均値が若干ゼロに近づいたが、120分の時に比べて分散が大きくなった。

通水開始から120分と720分で、同じ解析方法だが、交

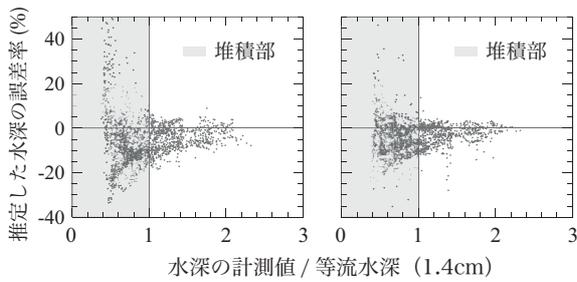


図-4 通水開始から 720 分後の水深の誤差率の空間分布 (左図: 粗度係数の調整前, 右図: 粗度係数の調整後)

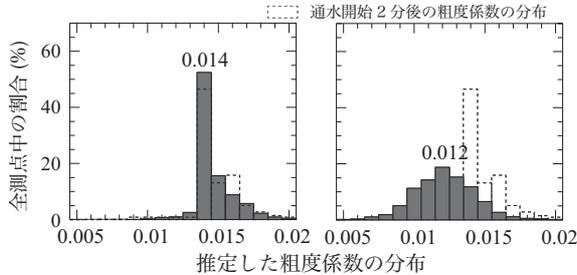


図-5 調整後の粗度係数の分布 (左図: 通水開始 120 分後, 右図: 通水開始 720 分後)

互砂州の発達形態によって水深の誤差率に違いがみられた。

### 3.3.3 水理解析で推定される水深の誤差率が增大する場所

本節では水深の誤差率が交互砂州のどの場所で変化するかを調べた。図-4に通水開始から 720 分後の水深の誤差率が交互砂州のどの場所で変動しているかを示す。図中の縦軸は水深の計測値と推定値の誤差率であり、横軸は水深の計測値を等流水深で除した相対水深比である。相対水深比は 1 以下は交互砂州上の堆積部を、1 以上は洗掘部を意味する。右図では粗度係数の調整前の水深の推定値を使用し、左図では粗度係数の調整後の水深の推定値を使用した。

左図において堆積部では誤差率が  $\pm 40\%$  付近まで分散しているのに対し、洗掘部での誤差率は  $\pm 10\%$  程度の分散となっている。一方で、右図では堆積部の誤差率の分散が大きい傾向は左図と同じであるが、分散は  $\pm 20\%$  程度まで小さくなっている。また、洗掘部でも左図より分散が小さくなっている。

この結果から、通水開始から 720 分後の水深の誤差率が比較的大きい場所は交互砂州の堆積部であり、この傾向は粗度係数の調整の前後で変化しなかった。

### 3.3.4 交互砂州の発達に応じた粗度係数の変化

図-5の左図に通水開始から 120 分後の、右図に通水開始から 720 分後の粗度係数の分布を示す。また、両図に点線で通水開始から 2 分後の粗度係数の分布も示す。

左図の通水開始から 120 分後では粗度係数の最頻値が 0.014、分布の幅は 0.01 から 0.02 であり、通水開始から 2 分後の粗度係数の分布とほぼ一致していた。一方で、右図の通水開始から 720 分では最頻値が 0.012 になり、分散は

0.005 から 0.02 まで拡大した。

以上の結果から、交互砂州の発達に応じて粗度係数の分布の変化が見られ、また、交互砂州の堆積と洗掘がより明瞭になると粗度係数は減少傾向になると推察される。

## 4 交互砂州上の摩擦損失の定量化とその傾向

### 4.1 摩擦損失の算定方法

計測した水底位および水深と水理解析で推定した流速を使用して摩擦損失の定量化を行うため、平面 2 次元の運動方程式中の底面に働く剪断応力を含む摩擦項の大きさを各測点で算出し、空間的に定量を評価を行なった。

### 4.2 交互砂州上の摩擦損失の空間変化

図-1 の a) から c) の中図に摩擦損失の流下方向成分を、同図 a) から c) の右図に摩擦損失の横断方向成分を示す。

a) 中図の通水開始から 2 分後の流下方向成分は水路床勾配である 0.005 とほぼ同じである。a) 右図の横断方向成分は河床が平坦床のため、ほぼゼロである。

b) 中図の通水開始から 120 分後の流下方向成分は砂州の堆積部で増大し、それ以外の場所では初期から変化しない、または減少傾向であった。同図 b) 右図の横断方向成分は洗掘部で増大し、砂州頭頂部では減少していた。

c) 中図の通水開始から 720 分後の流下方向成分は砂州の前縁部でより増大し、それ以外の場所は概ね通水開始から 120 分後と同様の傾向である。同図 c) 右図の横断方向成分は洗掘部でより増大し、砂州の頭頂部ではより減少した。

この結果から、洗掘部の流水は横断方向は流れにくく流下方向は流れやすくなり、結果、直線的な流れになる。また、砂州の堆積部の流水は横断方向に流れやすく、流下方向には流れにくいため、堆積部を避ける流れになる。

## 5 おわりに

本研究では ST による水深と河床位の計測値と水理解析による粗度係数及び流速の推定を行い、交互砂州上での摩擦損失の定量化した。その結果、以下のことが明らかになった。1) 交互砂州上での水深の推定値を計測値に近づけると、数値解析に入力する粗度係数は全体的に減少することがわかった。2) 摩擦損失の流下方向と横断方向の分布を定量化したところ、交互砂州発達時には濡筋部では直線的な流れとなり、堆積部では前縁部を避けるような流れとなる。

### 参考文献

- 1) 星野剛, 安田 浩保, 倉橋 将幸, 交互砂州の形成機構の解明に向けた水面と底面の同時計測手法の開発, 土木学会論文集 A2, 74 巻, 1 号 pp.63 - 74, 2018.
- 2) 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.
- 3) 河川シミュレーションソフト iRIC: <http://i-ric.org/>