

# 連続床止め工を有する複断面河道 における流れと河床変動の計算

## CALCULATION OF FLOW AND BED DEFORMATION IN COMPOUND CHANNEL WITH A SERIES OF VERTICAL DROP SPILWAYS

清水康行<sup>1</sup>・藤田陸博<sup>2</sup>・平野道夫<sup>3</sup>

Yasuyuki SHIMIZU, Mutsuhiro FUJITA and Michio HIRANO

<sup>1</sup> 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科助教授 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>2</sup> 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科助教授 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>3</sup> 正会員 北海道開発局石狩川開発建設部長 (〒064 札幌市中央区北2西19)

Compound channel with a series of vertical drop spillways in low water channel is popular countermeasure for flood and sediment control works in Japan, especially in steep slope rivers. The main river flowing through the city of Sapporo, Toyohira River, has 8 low head dams in low water channel with a few hundred meters of interval. It is desired from engineering viewpoint to evaluate hydraulic functions, effect and existing problems in such compound channel rivers. In this paper, a numerical model to simulate flow and bed deformation in compound channel with a series of vertical drop spillways is developed. Calculated results are compared with the results obtained in moveable bed experiment.

*Key words: compound channel, vertical drop spillways, numerical model.*

### 1. はじめに

床止め工(落差工)は急流河川の河床安定化対策として用いられる代表的な工法のひとつである。特に、河川改修による河道の直線化や支川合流点の付け替え工事などにより河床勾配が急になったり、河床高に不連続が生じた場合などには連続的に床止め工が設置され当該区間の河床洗掘防止に効果を発揮している例が多く見られる。図-1は石狩川の支川である豊平川の札幌市中心部付近の航空写真である。豊平川では昭和25年から48年にかけて8基の床止め工の設置と盛土による高水敷の造成が行われ<sup>1)</sup>、その後の豊平川の安定化に大きく貢献している。しかしながら、この連続的に床止め工が設置された区間は勾配が1/100以上の急流区間であるため、出水時には流速10m/sにも達する高速流と大量の土砂輸送が生じ<sup>2)</sup>、出水時には非常に危険な状態となるため、改築を含めた何らかの対策を求める声も多い。近年は魚類の遡上や水辺や水面の公共利用などの観点からも注目されており、この意味からもその水理学的な機能を明らかにすることが急務となっている。

図-1でも明らかなように豊平川においては低水路内には交互砂州が発生しており一部の砂州は床止め工を乗り越えるような形で存在している。このように豊平川

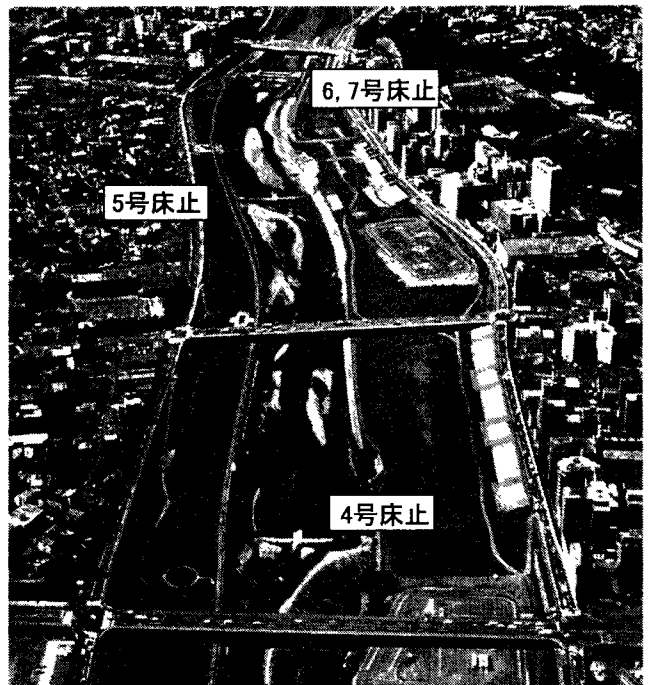


図-1 豊平川(下流から上流方向を望む, 石狩川開発建設部提供)

のような河川の流れや流砂・河床変動などの問題を扱う場合には、床止め工、複断面、高速流、交互砂州（の発生発達と移動）といった様々な現象が混在しているためこれらの各要素の相互作用を含む総合的な検討が必要である。従来よりこれらの個別要素に関する研究は数多く行われており、特に最近の数値計算法の発達により、上記の各要素に対しては様々な条件下の流れや河床変化の解析が可能となっている<sup>3,4)</sup>。しかしながら実際に豊平川のような複雑な条件下でも数値計算が可能かどうかは不明であり、この検証は実務上重要課題である。本研究においては、豊平川のように連続的に床止め工が設置された複断面河川の流れと河床変動の数値計算モデルの開発を目指すこととする。数値計算モデルに用いる基礎式は従来より砂州の発達・移動の計算 2 次元モデルとするが、流れの計算においては床止め工周辺や高水敷への部分的な冠水などの急変部の計算が可能な CIP(cubic-polynomial interpolation) 法<sup>5)</sup> を用いることとする。なお、モデルの検証は豊平川の 2 通りの水理条件（低水路満杯、既往最大出水）を模倣した移動床の複断面水路による模型実験との比較において行われる。

## 2. 基礎式と計算方法

2 次元の流れの場合は以下に示す 2 次元流れの連続式および運動方程式より計算する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + h\nu_t \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + h\nu_t \nabla^2 v \quad (3)$$

ただし、 $u$  および  $v$  はそれぞれ  $x, y$  方向の水深平均流速、 $h$  は水深、 $H$  は水位 ( $=h + \eta$ ,  $\eta$  は河床高)、 $t$  は時間、 $\tau_x$  および  $\tau_y$  それぞれ  $x$  および  $y$  方向の河床せん断力、 $\nu_t$  は水深平均の渦動粘性係数、 $\rho$  は水の密度、 $g$  は重力加速度である。 $\tau_x$  および  $\tau_y$  はマニング則を用いて以下のように表す。

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \frac{\tau_y}{\rho} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

ただし、 $n$  はマニングの粗度係数である。水深平均の渦動粘性係数  $\nu_t$  は次式で与える。

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (5)$$

ただし、 $\kappa$  はカルマン定数、 $u_*$  は摩擦速度であり次式で与える。

$$u_* = \frac{gn^2(u^2 + v^2)}{h^{1/3}} \quad (6)$$

河床の時間的な変化は流砂の連続式で計算する。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left[ \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right] = 0 \quad (7)$$

ただし、 $q_{bx}$  および  $q_{by}$  は  $x$  および  $y$  方向の単位幅掃流砂量であり、それぞれ以下の M.P.M. 式および長谷川<sup>6)</sup> の式で求める。

$$\frac{q_{bx}}{\sqrt{sgd^3}} = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \quad (8)$$

$$q_{by} = q_{bx} \left( \frac{v}{u} - N_* \frac{h}{r_*} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\nu_s \nu_k \tau_*}} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \quad (9)$$

ただし、 $s$  は河床砂の水中比重、 $d$  は河床砂の粒径、 $\tau_*$  は無次元掃流力 [ $=u_*^2/(sgd)$ ]、 $\tau_{*c}$  無次元限界掃流力であり岩垣の式で求める。また、 $\nu_s$  および  $\nu_k$  は河床砂の静止摩擦係数および動摩擦係数である。(9) 式の右辺第 2 項は 2 次流が存在する場合の 2 次流に伴う横断方向の流砂量の付加量を表すものである。本文においては流れは 2 次元場を仮定しているが、砂州の形成などの河床変化に伴う流れの局所的な湾曲・蛇行により生ずる 2 次流を付加的に考慮することとし、 $N_*$  は Engelund<sup>7)</sup> による定数 ( $=7.0$ ) を、 $r_*$  は水深平均流の曲がりの曲率半径を用いることとし、Shimizu and Itakura<sup>8)</sup> による次式を用いて計算する。

$$\frac{1}{r_*} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left( u \frac{\partial u}{\partial x} - u \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left( u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (10)$$

(1)～(3) 式の流れの計算は中山ら<sup>9)</sup> と同様に運動方程式に関して移流項とそれ以外の項の分離解法を採用し、移流項に関しては CIP 法を、運動方程式の移流項以外の項は連続式と連立して SOR 法により陰的に水深を求める方法を採用する。河床変動の計算は、(7) 式を中央差分を用いて計算を行う。

## 3. 移動床模型実験

複断面で連続的に床止め工を有する河道の河床変動特性を検討する目的で以下の条件で模型実験を行った。実験水路は図-2 および図-3 に示すように全長 20m、幅 1m の可傾斜水路び中央部 48cm は粒径 0.2mm の均一砂による移動床の低水路、左右岸それぞれ 26cm にモル

タルによる固定床の高水敷を設置し、低水路部分には5.3m 間隔で落差1.3cm の床止め工を3基設置した。床止め工の規模や複断面の形状および河床材料の粒径は図-1 に示した実際の豊平川の約1/150 のスケールで設定されたものである。実験流量は豊平川の融雪出水規模（低水路満杯程度）の500m<sup>3</sup>/s および既往最大出水（昭和56年8月）規模の1,417m<sup>3</sup>/s の水理条件に対応する2通りの設定としてそれぞれ2ℓ/sec(Run-1) および7ℓ/sec(Run-2) とした。予備実験により2通りの流量規模に対して水深が現地と相似になるように水路勾配を調節した結果、低水路の初期河床縦断勾配は1/60、高水敷の縦断勾配は1/52 と設定された。RUN-1,2 ともに通水は流れおよび河床変動がほぼ定常状態に達するまで行われ、両実験ともに1時間の通水を行った。通水中は上流端から約2m の区間は低水路河床がほぼ一定の高さに保たれるように連続的な給砂を行った。RUN-1 の実験においては、実験終了直前に水位の測定と発砲スチロールをトレーサーとした表面流況の写真撮影が行われ、後に写真をもとに表面流速分布の算定を行った。実験終了後に河床高の測定が行われた。両実験ともに上流側2基の床止め間と下流側2基の床止めの間の河床変動量（初期河床からの変化量）のコンター図を図-4 に、縦断図を図-5 に示す。また、RUN-2 の実験終了直前に測定された表面流速ベクトルを図-6 に示す。

低水路が床止め直下流で最も深く、下流に向かって徐々に浅くなるために、RUN-1 においては床止めの上流部約2m 付近から高水敷へ氾濫する流れが見られ、この高水敷の流れは床止め位置を通過後に低水路に流れ落ちる状況となった。これは、実際の豊平川の融雪出水や中規模出水で良く見られる流況に一致している。RUN-1 においては、実験中に交互砂州が確認され、床止め地点においても深掘れ位置が左右に振れるのが確認され、実験終了後には、図-7 に示すような規則正しい交互砂州が確認された。RUN-2 の実験は、高水敷を全面的に水流が流れる条件で行われたが、この場合はRUN-1 のような交互砂州は確認できず、床止め上流での洗掘と下流部での堆積が確認された。各実験中の床止め間の中央部付近の平均的な水理条件を黒木・岸<sup>10)</sup>の砂州領域区分図にプロットすると、図-8 のように RUN-1 は単列砂州、RUN-2 は非砂州となり、実験結果に一致している。

#### 4. 数値計算

計算は前記の連続床止め工を配置した移動床模型実験の条件で行われるため、流れおよび流砂、河床変動の

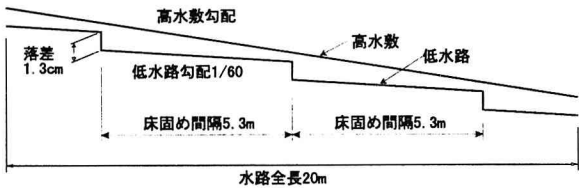


図-2 実験水路縦断図

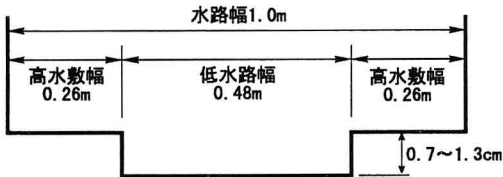


図-3 実験水路横断図

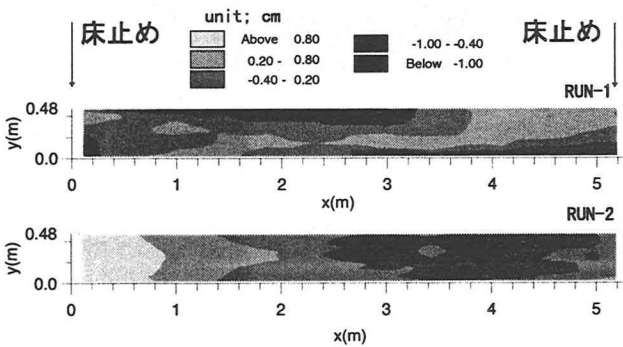


図-4 実験結果河床変化量コンター図

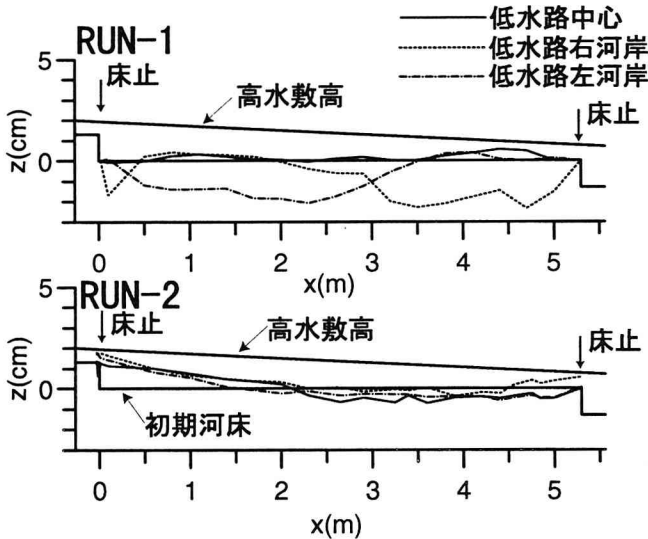


図-5 実験結果河床変化量縦断図

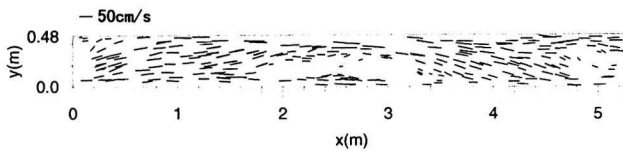


図-6 実験結果表面流速ベクトル図



図-7 実験結果写真 (RUN-1, 通水後)

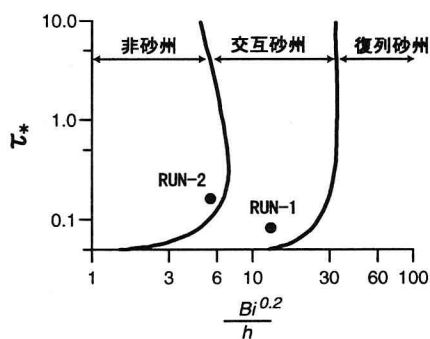


図-8 中規模河床形態の領域区分図

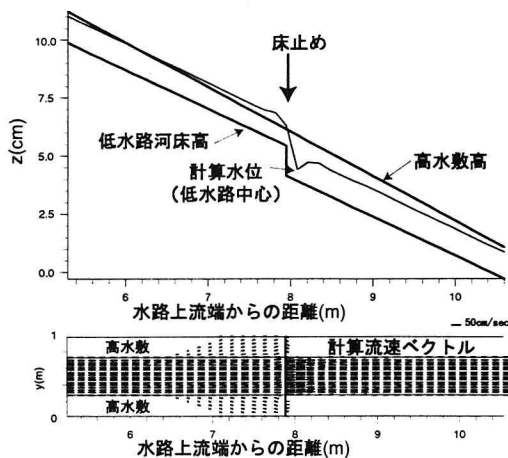


図-9 水位・流速の計算結果 (RUN-1 の流量, 河床は初期状態)

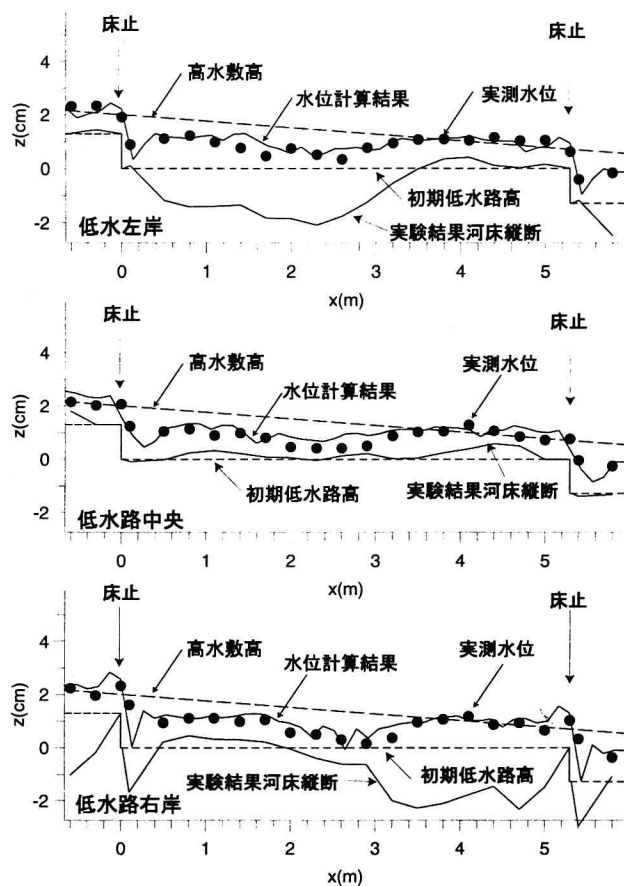


図-10 水位実測結果と計算結果の比較

上下流の境界条件は繰り返し条件を用いることとした。また河床の粗度係数は岸・黒木<sup>11)</sup>による平坦河床および砂州河床の抵抗則からマンニングの粗度係数を換算して用いる。高敷敷のマンニングの粗度係数はモルタルの粗度として 0.01 を与える。計算格子は水路全体を流下方向に 122 分割, 横断方向に 28 分割の直交格子とし, 計算時間刻みは 0.01 秒として初期河床から 2 時間後までの流れと河床変化の計算を行うこととした。また, 前記の実験 RUN-1 のように部分的に高水敷に流れが存在するような条件でも計算可能とするために, 非冠水部分も仮想的に微少な水深 (ここでは 0.1mm とした) が存在するものとして, 冠水部分と同様の計算を行うこととした。適当な水位・流速の初期条件を与えて流れの計算を開始し, 計算流量が対象実験の流量に一致するように上流端の流速・水深を徐々に調節しながら計算範囲全体の流速・水位が安定した段階で, 河床変動の計算を開始することとした。床止め工地点は河床が固定点となるため, 非常に単純ではあるが (7) 式による河床変化の計算は行わないものとした。図-9 は実験初期条件の河床高および RUN-1 の流量を用いて流れの計算を実施した結果の水位縦断図および流速ベクトル図である。RUN-1 の実験中に見られた床止め上流部における高水敷への

流れの乗り上げ状況が良好に表現されている。

4.1 流れと流速の計算

水深および流速の計算精度を検証するために、RUN-1の実験後に測定された河床高を与え、河床高は変化させずに流れの計算のみを実施した。この場合の水位および流速の計算結果を実験 RUN-1 の測定結果と比較したのが図-10 および図-11 である。図-10 は上から低水路左岸、低水路中央および低水路右岸の水位縦断分布（左右岸は低水路河岸から 0.5cm づつ低水路中央より）であり、図-11 の上の図は図-6 の測定結果を計算格子に合わせて内挿して作成したものである。床止めを含む複断面で段落ちを含む水面形や流速のパターンが非常に良く再現されている。

4.2 交互砂州の計算 (RUN-1)

計算上でも交互砂州が発生するかどうかを確かめるために、RUN-1 の水理条件で流れと河床変動の計算を行った。また、比較のために床止め（落差）の無い一定勾配（低水路勾配 1/60）の条件での砂州の発生状況調べるための計算も同時に行われた。計算は実験でほぼ定常と見なされた 1 時間の倍の 2 時間まで行われ定常性の確認が行われた。図-12 および図-13 は RUN-1 の流量条件で行われたもので、計算開始後 3600 秒から 5400 秒までの河床変動量である。ここで、図-12 では仮想的に床止め無しとした場合、図-13 は実験 RUN-1 と同じ条件で床止めを配置したものである。図-12 の床止め無しの条件で行われた計算結果によれば、左右岸の交互砂州が一定の速度で下流に向かって移動している様子が見られる。この時の交互砂州の波長は低水路幅の約 12 倍、最大砂州波高は約 1.3cm(平均水深の 1.5 倍)となっており、床止めを含む実験結果（図-4, RUN-1）よりは小さい値となっている。これに対して図-13 の床止め工を含む計算結果では、図-12 に見られるような一定速度で規則正しい交互砂州の移動は見られず、床止めに向かって前進する砂州が床止め地点でその動きが一端阻害され、床止めを越えた地点への砂州の伝播が不連続になっているようにも見える。砂州波高に関しては床止めの影響による洗掘・堆積と重なっているため明確ではないが、最大と最低の変動量の差は約 2cm で実験結果にほぼ一致している。ただし、全体的な砂州の形状が実験結果ほど明瞭でないこと、床止め下流での堆積量が実験結果より多いことなどの問題も見られる。これは、床止めを越える流砂量の見積もりに問題があると考えらる。

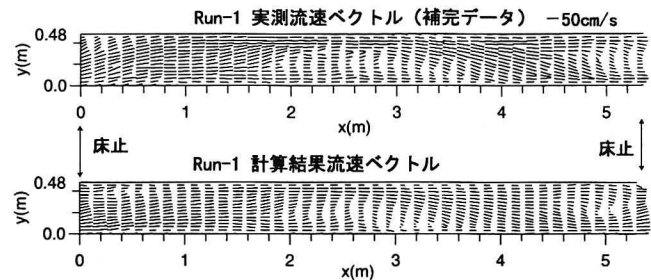


図- 11 流速ベクトル図の実験結果と計算結果の比較

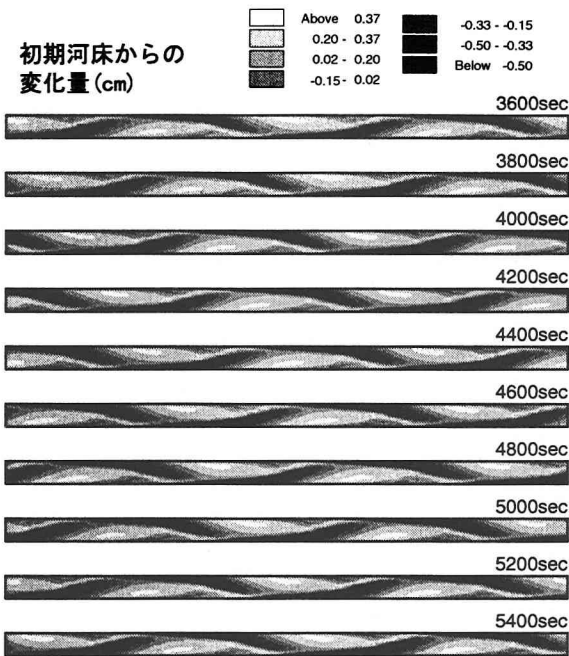


図- 12 河床変動量の計算結果 (床止無しの場合)

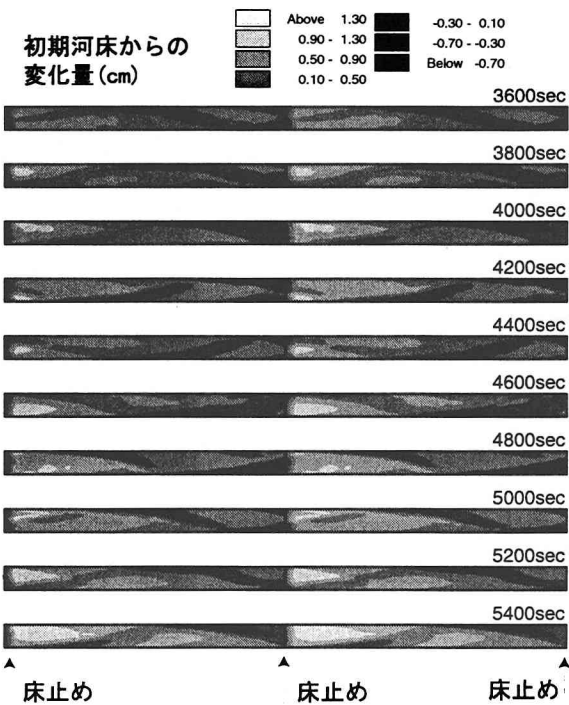


図- 13 河床変動量の計算結果 [Run1](床止あり)

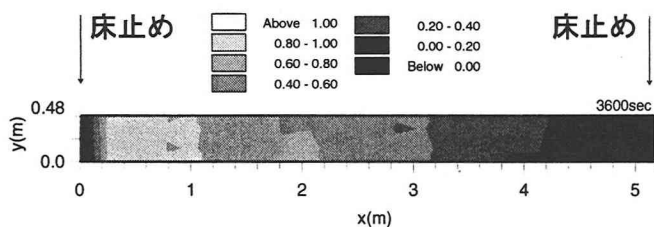


図-14 河床変動量の計算結果 [Run2](床止あり)

### 4.3 非砂州の計算 (RUN-2)

実験 RUN-2 の条件で床止めを含む計算を行った結果、RUN-1 の結果に見られたような交互砂州の発生は見られず河床変動は 1 次元的なものとなり計算開始後 30 分程度で河床はほぼ定常に達した。計算結果の河床変動量を図-14 に示す。計算結果によれば床止め下流に最大約 1cm、床止め上流に若干の洗掘が見られ、定性的には図-4(RUN-2) の実験結果と一致している。しかしながら、定量的には特に洗掘量に不一致が見られる。今回の計算法では床止め地点 (固定点) で (7) 式の計算を行わないという極めて単純な方法を用いているため、床止め通過土砂量を過大に評価している可能性があり、結果的に水路全体の流砂の連続性が満たされていない。これは、前記の RUN-1 の計算結果にも見られる問題点である。

## 5. おわりに

本研究においては、複断面急流河川の低水路部分に連続的な床止工 (落差工) が存在する場合の流れと河床変動の予測を目的に、移動床模型実験および数値計算モデルの開発を行った。模型実験の結果、連続床止めが配置されている場合でも水理条件によっては交互砂州の発生・非発生が確認され、従来の砂州領域区分に一致することが確かめられた。

数値計算モデルは流れと河床変動の計算を組み合わせる従来からの方法と基本的には同じであるが、特に流れの計算に CIP 法を用いることにより落差部分の流れの急変部や高水敷への部分的な冠水など今まで困難であった条件の計算が高精度で実行可能であることが確かめられた。特に本研究で対象とした豊平川を模倣した模型実験においては段落ち部のフルード数が 2 を越えるような高速流であることを考えると、CIP 法は極めて有力な手法であると言える。

河床変動の計算に関しては、従来、常・射流の混在流れでは差分の方向性 (風上化) が重要とされていたが、本研究においては敢えて精度を重視して中央差分を採用

した。この結果、常・射流混在流れにおいて中央差分でも安定した計算が可能であることが確かめられ、さらに交互砂州の発生や移動、床止め前後の洗掘・堆積といった基本的な河床変動特性を表現可能であることが示された。従来の計算法は流れの計算の不完全さを河床変動計算に風上差分を採用することにより人工粘性を付加して河床形状の安定化を図ることにより補ってきたという側面もあり、今回用いた CIP 法の場合はこの必要性がほとんど無いということなのかも知れない。

本モデルの完成のためには固定点を通る流砂量の適切な算定法の確立という極めて大きな問題が残されており、今後の課題である。

**謝辞:** 本研究は (財) 北海道河川防災研究センターの助成を受けて行われたものである。関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 石狩川開発建設部: 札幌河川事務所 20 年史, pp.1-271, 1993.
- 2) 山下彰司, 清水康行, 渡辺康玄: 急流河川の床止め近傍の河床変動, 水工学論文集 第 36 巻, pp. 000-000, 1992.
- 3) 川島幹男, 福岡捷二: 床止め工周辺の河床変動計算法に関する研究, 水工学論文集 第 39 巻, pp. 689-694, 1995.
- 4) 福岡捷二, 渡邊明英, 岡田将治: 静水圧近似 3 次元解析モデルによる複断面蛇行水路河床変動解析, 水工学論文集 第 42 巻, pp.1015-1020, 1998.
- 5) Yabe, T., Ishikawa, T.: A Numerical Cubic-Interpolated Pseudoparticle(CIP) Method without Time Splitting Technique for Hyperbolic Equations, Journal of the Physical Society of Japan, Col.59, No.7, pp.2301-2304, 1990. 6) 長谷川和義: 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学学位論文, 1983.
- 7) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Cannel Bends, Jour. of Hydraulic Div., ASCE, Vol.100, HY11, pp.1631-1648, 1974.
- 8) Shimizu, Y. and Itakura, T.: Calculation of flow and bed deformation with a general nonorthogonal coordinate system, Proc. of XXIV IAHR Congress, Madrid, Spain, C-2, pp.41-248, 1991.
- 9) 中山恵介, 佐藤圭洋, 堀川康志: CIP 法を用いた浅水流方程式の数値計算手法の開発, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.1159-1164, 1998.
- 10) 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, 土木学会論文集第 342 号, pp.87-96, 1984.
- 11) 岸力, 黒木幹男: 移動床における河床形状と流体抵抗 (I), 北海道大学工学部研究報告, 第 67 号, pp.1-23, 1973.

(1998. 9. 30 受付)