

急流扇状地河川の河床変動および河岸侵食のシミュレーション

A 2-D METHOD FOR PREDICTING BANK EROSION TOGETHER WITH BED-DEFORMATION IN FAST-FLOWING ALLUVIAL STREAMS

金 海生*、佐々木成人**、山田裕康**
Haisheng JIN, Shigeto SASAKI and Hiroyasu YAMADA

It is important to study the mechanisms and develop methods of predicting river bank erosion for the planning and implementation of measures to prevent disasters, especially for fast-flowing alluvial streams. This paper presents a new method for predicting bank erosion. The depth-averaged 2-D bed-deformation model, NKhydro2D, was applied to a fast-flowing alluvial stream. Erosion of the natural riverbank and local scouring in the toe area of a protected bank during flood flow were predicted well by the model. These results show that the method is applicable to the prediction of bank erosion in fast-flowing alluvial streams. The model can also be employed to evaluate the efficacy of erosion-control structures.

Key Words : *bank erosion, bed deformation, alluvial river, fast-flowing stream, NKhydro2D, numerical simulation, boundary-fitted coordinates*

1. はじめに

河岸侵食による破堤などの災害が発生する事例は過去に多数観察されている。洪水時に、河岸の侵食や越水に起因して堤防が決壊すると、河道内の水および土砂は堤内地に氾濫し、人的、経済的などさまざまな甚大な被害が生じる。急流河川では、氾濫流れの流速は家屋などの構造物に衝撃をもたらすほど速く、氾濫流れが一気に広がるため、特に危険である。また、急流河川の堤防が決壊して氾濫が発生した場合には、大量の土砂が流出し、構造物への土石の衝撃、氾濫域への土砂堆積などによる、予期せぬ二次的氾濫による被害を増大させる危険がある。したがって、急流河川の堤防は破堤が絶対に生じないように強固にする必要があるが、一方では経済面からみると重点的に堤防を補強すべき箇所を予測、特定した上で堤防強化の改修を行うべきである。

また、河川管理・計画においては、河川の被災原因を把握するとともに、被災可能性予測、低水河岸侵食防止のような河道内対策、堤防の質的強化対策、破堤時において被害を最小化するような氾濫原対策を検討するために、災害リスク管理技術の高度化が求められている。

石狩川水系の忠別川は、広い河道を有する急流な礫床河川で、中小洪水においても河床洗掘や河岸侵食が進行する典型的な複列砂州を有する河川であり、河岸侵食による災害が度々発生している。その一部区間の河川平面形は緩やかに蛇行しており、湾曲による多くの水衝部が存在する。

この区間では、河床・河岸の洗掘災害も多発している。

本研究では、自然河川の河岸侵食を予測することを目的に、境界適合直交曲線格子の平面2次元移動床解析モデル—NKhydro2Dに加えて河岸侵食をモデル化し、これを河床勾配約1/100の急流河川忠別川の一部区間の解析に適用した。

2. 水深平均の2次元移動床解析モデル

洪水時の河岸侵食は移動床現象の一つで、砂州や局所洗掘に起因して発生する低水河岸の侵食、決壊であり、低水路の横断面・平面形状の変化を伴うことに特徴がある。したがって、移動床解析手法により河岸侵食の予測が可能であると考えられる。本研究では、流速、水位および河床変動などの平面分布を検討することにより、自然河川の災害発生要因の分析を行うことを目的としているため、平面2次元移動床解析モデル—NKhydro2D^{1)~3)}を用いることとした。対象とする急流扇状地河川の忠別川は砂州および植生が発達するため、流れの偏りが起こり易く、局所的な河床洗掘が生じている。したがって、水理解析においてはできるだけ実河川に近い河道条件(平面形状、抵抗など)を与える必要がある。そこで、境界適合型の直交曲線メッシュをベースにした移動床解析モデル—NKhydro2Dを適用し、砂州・低水路形状、構造物、植生などの影響を受ける急流扇状地河川の流れおよび河床変動特徴をシミュレーションにより解明することとした。

* 中央研究所 総合技術開発部

** 札幌支店 技術第一部

(1) 直交曲線座標系における流れの基礎式

水深平均のReynolds方程式を河道の流下方向に ξ 軸、横断方向に η 軸を持つ直交曲線座標系に変換すると(1)～(3)式になる。流れの支配方程式には植生などの影響を考慮する。高木などによる抗力の影響については運動量保存式(2)～(3)の C_{Dm} 項を参照されたい。その他の植生の影響は植生の種類、密生度などの特性に応じてマニング粗度係数に考慮する。

<水の質量連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(u^*hg_{22})}{\partial \xi} + \frac{\partial(v^*hg_{11})}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (1)$$

<流れの運動量方程式>

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu^*)}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22}hu^{*2})}{\partial \xi} + \frac{\partial(g_{11}hu^*v^*)}{\partial \eta} \right. \\ \left. + h(u^*v^* \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} - v^{*2} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi}) \right] = -\frac{hg}{g_{11}} \frac{\partial \xi}{\partial \xi} \\ + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(hg_{22}\sigma_1^*)}{\partial \xi} + \frac{\partial(hg_{11}\tau_{21}^*)}{\partial \eta} \right] + h(\tau_{12}^* \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} \\ - \sigma_2^* \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi}) - \frac{\tau_{b\xi}}{\rho} - \frac{1}{2} C_{Dm} a_v hu^* \sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hv^*)}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22}hu^*v^*)}{\partial \xi} + \frac{\partial(g_{11}hv^{*2})}{\partial \eta} \right. \\ \left. + h(u^*v^* \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} - u^{*2} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta}) \right] = -\frac{hg}{g_{22}} \frac{\partial \xi}{\partial \eta} \\ + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(hg_{22}\tau_{12}^*)}{\partial \xi} + \frac{\partial(hg_{11}\sigma_2^*)}{\partial \eta} \right] + h(\tau_{21}^* \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} \\ - \sigma_1^* \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta}) - \frac{\tau_{b\eta}}{\rho} - \frac{1}{2} C_{Dm} a_v hv^* \sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 u^* : ξ 方向の流速 ($= \frac{ux_\xi + vy_\xi}{g_{11}}$)

v^* : η 方向の流速 ($= \frac{ux_\eta + vy_\eta}{g_{22}}$)

u : デカルト座標系における x 方向の流速

v : デカルト座標系における y 方向の流速

h : 水深 ($= \xi - Z_b$)

ξ, Z_b : 水位および河床高。解析格子点における河床高は、対象区間の横断測量成果を内挿して与える

$\sigma_1^*, \sigma_2^*, \tau_{12}^*, \tau_{21}^*$: 水深平均Reynolds応力⁴⁾

$$\sigma_1^* = 2\nu_t \left[\frac{1}{g_{11}} \frac{\partial u^*}{\partial \xi} + \frac{v^*}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} \right]$$

$$\sigma_2^* = 2\nu_t \left[\frac{1}{g_{22}} \frac{\partial v^*}{\partial \eta} + \frac{u^*}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} \right]$$

$$\begin{aligned} \tau_{12}^* = \tau_{21}^* = \nu_t \left[\frac{1}{g_{11}} \frac{\partial v^*}{\partial \xi} + \frac{1}{g_{22}} \frac{\partial u^*}{\partial \eta} \right. \\ \left. - \frac{u^*}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} - \frac{v^*}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} \right] \end{aligned}$$

$\nu_t = cu_*h$: 渦(有効)粘性係数⁴⁾

$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$: 摩擦速度

τ_b : 底面せん断力

$\tau_{b\xi}$: ξ 方向の底面せん断力

$$\left(= \frac{n^2 \rho g}{h^{1/3}} u^* \sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \right)$$

$\tau_{b\eta}$: η 方向の底面せん断力

$$\left(= \frac{n^2 \rho g}{h^{1/3}} v^* \sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \right)$$

ρ : 水の密度

g : 重力加速度

n : マニング粗度係数。河道計画によって河床材料から決まる低水路粗度係数、植生などから決まる高水敷の粗度係数を基準に設定するか実測流速・水位データなどを用いてキャリブレーションする

C_{Dm} : 植生(高木などによる)の抗力係数

a_v : 植生による単位体積あたりの遮蔽面積

ξ, η : 直交曲線座標

x, y : デカルト座標

g_{11}, g_{22} : 座標変換における係数⁵⁾

$$(g_{11} = \sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2}, g_{22} = \sqrt{x_\eta^2 + y_\eta^2})$$

$$(x_\xi = \frac{\partial x}{\partial \xi}, x_\eta = \frac{\partial x}{\partial \eta}, y_\xi = \frac{\partial y}{\partial \xi}, y_\eta = \frac{\partial y}{\partial \eta})$$

(2) 河床変動に関する支配方程式

河床変動は流砂輸送によるものである。本研究においては、対象河川の河床材料が粗い、解析にかかる時間などのことから、現時点では掃流砂のみを考慮する。

流砂の連続式(4)により、混合砂礫の掃流砂のみを対象に河床高変動および河床材料の粒度変化の計算を行う。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (g_{22}q_{s\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (g_{11}q_{s\eta}) \right] = 0 \quad (4)$$

ここに、 λ は河床材料の間隙率(砂の粒径、形状などに依存する)、 q_s は単位幅、単位時間あたりの体積流砂量である。単位幅、単位時間あたりの体積掃流砂量およびその輸送方向は、局所的な河床勾配および流線湾曲による二次流の影響を考慮し、芦田・道上式に準じて求める⁶⁾。この流砂量式は有効掃流力を考慮して掃流砂量を推算することとしている。

(3) 初期条件および境界条件

各計算点における水位(水深)および流速を仮定し、下流端において計算開始時の水位、上流端において計算開始時の流量を与えて流れ解析を実施し、各計算点の水位および流速が一定値に収束した状態を初期条件とする。また、各計算点において、初期河床高および粒度分布を与える。

境界条件としては、上流端において流量時系列、下流端において水位時系列を与える。境界での混合粒径ごとの流砂量は掃流力の計算値より求めた平衡流砂量を粒度分布にあわせて与える。

(4) 解析スキーム

流速と水位、河床高変数をスタッガード格子上に配列し、有限体積法に基づき、解析を行う。空間微分の離散では、移流項、レイノルズ応力項にPower Lawスキーム⁷⁾を、その他の項に中心差分を適用する。時間積分には、陰形式のスキームを用いる。

(5) 河岸侵食のモデル化

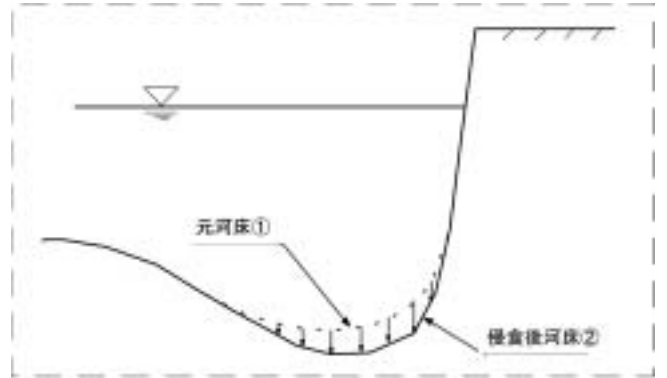
河岸の後退量を決定するものは、河岸近傍河床の低下量であると考えられる。従来、侵食過程にある河岸形状が相似性を保つことは、Ikeda⁸⁾が流路変動実験により指摘している。自然河川でも、このような特徴を有する。そこで、長田ら⁹⁾はこの形状を関数で近似することによって表現し、河岸侵食による供給土砂量とそれによる洗掘域の埋め戻し量が等しくなるように河岸後退量を算出することで側岸侵食過程をモデル化している。河岸形状を表現する指数関数形は次式で表す。

$$h = h_{max} [1 - \exp(-\frac{l}{\Delta})] \tag{5}$$

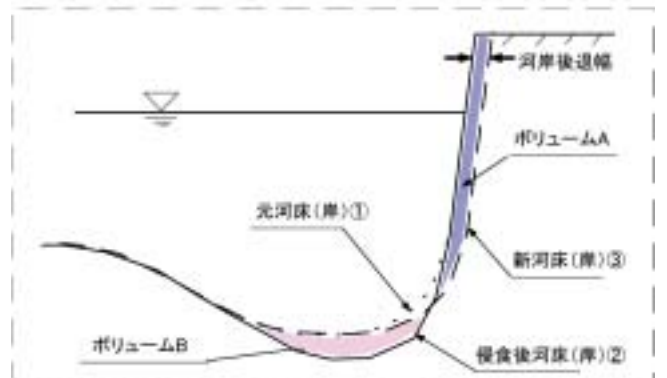
ここに、 h ：水際より距離 l 離れた地点の水深、 h_{max} ：最大水深で、 h_{max}/Δ を河岸側面勾配に関するパラメータとみなし、 $h_{max}/\Delta = 4.0$ とした。洪水時の河床低下量を予測することで、河岸の侵食幅を予測する。よって、河岸崩落1回ごとの侵食量を正確に見積もれなくても、河岸近傍河床の低下量が精度良く計算できれば、河岸後退量を計算することができる。しかし、(5)式による計算では、 h_{max}/Δ を一定値としたため、すべての河川において同様の河岸側面勾

配をもつ結果となる恐れがある。実際、自然河川の河岸勾配はさまざまである。

そこで、本研究では、河岸勾配を当該地点の計算開始時刻の初期勾配に保ったまま河岸を後退させることとした。側岸侵食モデル化のイメージを図-1に示す。



(a) 移動床解析モデルによる河床変動計算



(b) 側岸侵食モデルによる河岸後退量計算

図-1 側岸侵食モデル化のイメージ

計算の手順は以下に示すとおりである。

- ① 平面2次元移動床モデル—NKhydro2Dモデルで、流れおよび河床変動解析を行う。
- ② 河岸沿いの河床変動量を算出する。
- ③ 河床高が初期河床よりも低下した場合には(河床洗掘、図-1a)、この洗掘域の埋め戻し量(図-1b、ボリュームB)を計算する。
- ④ 河岸侵食による供給土砂量(図-1b、ボリュームA)が洗掘域の埋め戻し量(ボリュームB)に等しくように河岸勾配を初期の一定勾配に保ったまま河岸の後退幅を算出し、河岸侵食とする。
- ⑤ 以上の手順を繰り返して解析を進める。

NKhydro2Dモデルの特徴としては下記があげられる。

- ・大規模な河床形態を考慮した直交曲線メッシュに基づくより厳密な解析を行う
- ・横断方向のメッシュサイズを細かくすることで、局所的な地形などを評価できる
- ・側岸侵食を考慮した移動床解析を実施する
- ・河床材料は混合粒径として扱う
- ・植生の影響を考慮する

3. 解析モデルの検証

忠別川では、低水路平均水深は1m～1.5m程度、河床勾配は約1/100、河床におおむね粒径0.075mm～150mmの砂・礫が混在し(図-2)、河床材料の平均粒径は約40mmである。河川平面はおおむね直線的であり、活発な中州の移動による流れの偏りを呈し、多くの水衝部が形成されて河床・河岸の洗掘災害が多発している。このような河岸侵食を考慮した平面2次元移動床モデル—NKhydro2Dを忠別川の解析に適用した。

まず、河川の平面図を用い、境界適合型の直交曲線解析

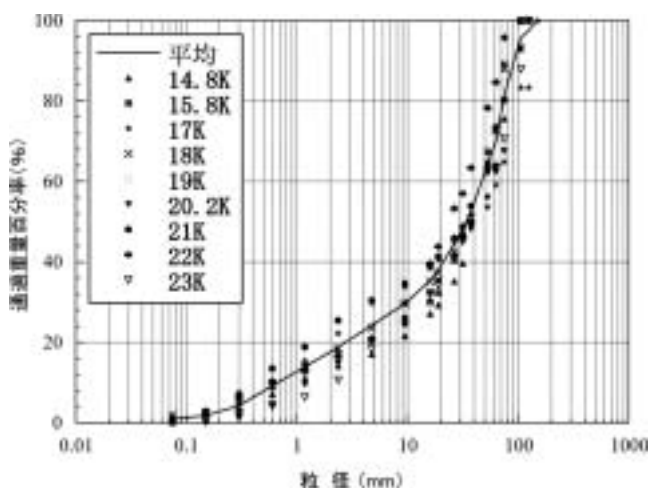


図-2 別川15K～22K区間の河床材料



図-3 境界適合直交曲線メッシュの一部

格子を作成した。直交曲線格子のサイズは横断方向約1～5m、縦断(流下)方向約25mである。横断方向のメッシュサイズを細かくすることで、砂州、河岸近傍の解析精度を高めた。境界適合型の直交曲線メッシュを図-3に示す。

洪水前の河床を初期河床とし、洪水期間中の掃流砂輸送による河床変動を計算する。近年発生した実績洪水条件で河床変動解析を実施し、洪水時の流向写真ならびに流向図や洗掘箇所などの実績データを解析の流速ベクトルおよび河床変動結果と比較することで解析モデルを検証した。洪水前後の河床高変動量の解析結果に応じた色分け図を図-4に示す。寒(青)色は河床の侵食(河床高変動量はマイナス)を、暖(赤)色は河床の堆積(変動量はプラス)を表す。図中赤線に囲まれる箇所は護岸工事である。

対象とした平成6年8月洪水においては、16.40K～16.73Kと16.88K～16.98Kの左岸および20.75K～21.10Kの右岸に河岸侵食が生じた(表-1)。近年の調査では、19.2K～19.6Kと20.1K～20.4Kの右岸、20.2K～20.3Kと20.5K～20.8Kの左岸に洗掘跡が見つかり、河岸侵食が発生したことが推定される(表-2)。また、河道特性などのことから16.8K付近の右岸と17.5K付近の左岸に河岸侵食の可能性を予想している(表-3)。河床変動の解析結果(図-4)ではこれらの同地点での侵食を予測している(表-1～3)。また、護岸工事により河岸侵食が抑制され、護岸の効果が確認される。一

表-1 平成6年洪水における河岸侵食

場所 (距離標)	洪水災害調査結果 または洗掘予想箇所	解析結果 (図-4)	最大流速、 水深
16.40K～16.73K および 16.88K～16.98K	左岸に河岸侵食	16.4K～17.2Kの 左岸に河床洗掘	4.4m/s、 1.5～2.2m
20.75K～21.10K	右岸に河岸侵食	20.5K～21.4Kの 右岸に河床洗掘 (護岸工事あり)	4.8m/s、 1.0～2.5m

表-2 既往洪水における河岸侵食

場所 (距離標)	洪水災害調査結果 または洗掘予想箇所	解析結果 (図-4)	最大流速、 水深
19.20K～19.60K	左岸に洗掘跡	19.5K～19.9Kの 左岸に河床洗掘	3.7m/s、 1.0～1.8m
20.10K～20.40K	右岸に洗掘跡	19.9K～20.2Kの 右岸に河床洗掘 (護岸工事あり)	3.5m/s、 1.3～1.8m
20.20K～20.30K	左岸に洗掘跡	20.1K～20.3Kの 左岸に河床洗掘	4.0m/s、 1.8～2.5m
20.50K～20.80K	左岸に洗掘跡	20.4K～20.6Kの 左岸に河床洗掘	3.5m/s、 1.2～1.8m

一般的に、侵食箇所においては流れが速く、河床(河岸)侵食が流れの偏りと密接な関係があることが推定される。

したがって、当モデル—NKhydro2Dに側岸侵食を考慮したモデルは少なくとも定性的に忠別川の河床変動および河岸侵食を再現できることが判明した。

表-3 河道特性などのことから河岸侵食箇所の推測

場所 (距離標)	洪水災害調査結果 または洗掘予想箇所	解析結果 (図-4)	最大流速、 水深
16.80K付近	右岸に洗掘可能予想	16.8K~17.0Kの 右岸に河床洗掘	2.3m/s、 0.5~1.0m
17.50K付近	左岸に洗掘可能予想	17.5K~17.7Kの 左岸に河床洗掘	2.2m/s、 0.7~1.2m

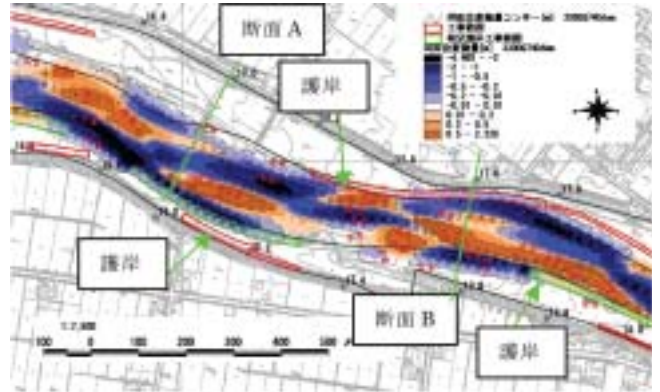


図-5 初期河床に対する河床(岸)高変動量

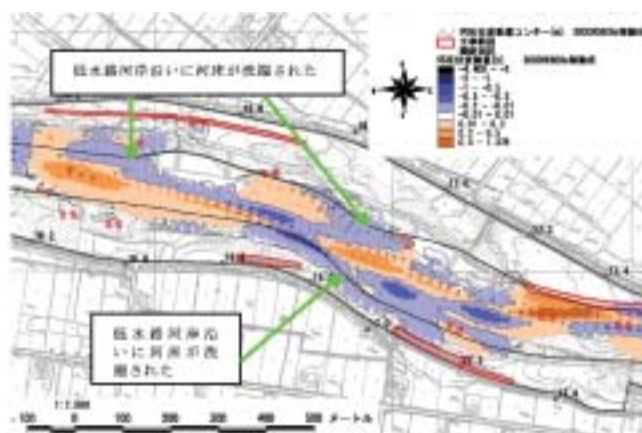


図-4 解析結果の一部—洪水前後河床高変動量

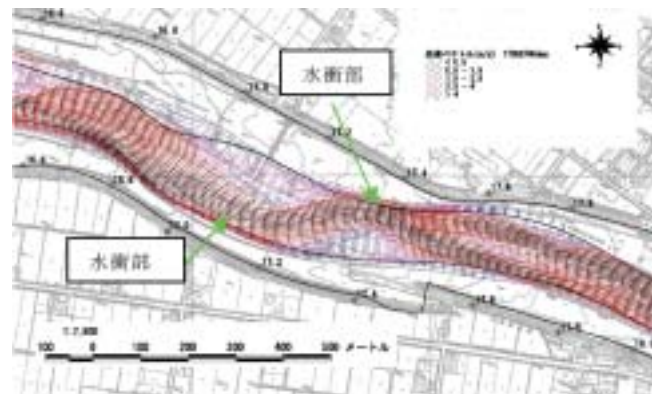


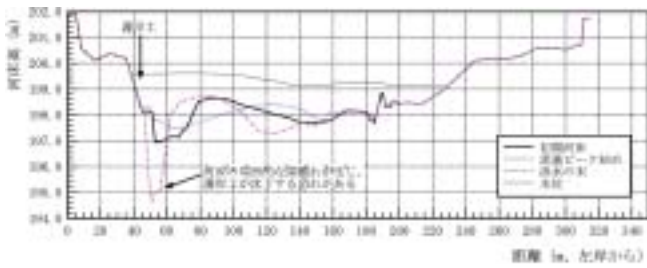
図-6 洪水ピークの流速ベクトル

4. 河岸侵食予測への適用

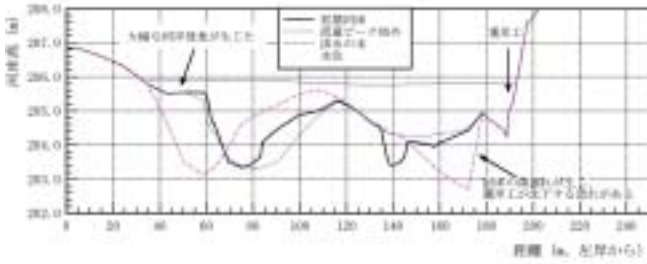
本モデル—NKhydro2Dを用い、特定洪水条件での河床変動および河岸侵食の予測を行った。16.6K~18.0K区間において、初期河床からの河床高変動量に応じた色分け図を図-5に示す。図中赤と緑線に囲まれる箇所は護岸工事である。検討対象の洪水ピーク流量は忠別川の計画高水流量で、河床および河岸の激しい侵食または堆積を呈している。河岸が護岸工事により防護されていることも判る。洪水ピーク時の流速ベクトルを図-6に示す。全体的に流れが速く、主流流れの蛇行・偏り・乱れなどが見られ、護岸位置に水衝部が形成されている。そして、それに対応した河床変動が生じている(図-5)。しかし、17.4K付近の右岸側水衝部においては、上流砂州の影響により河床変動、異なった傾向を呈している。これはその地点より上流側からの流砂供給と関連のあることが考えられる。

代表断面の河床高の変化を図-7に示す。断面A(17.0K)の左岸沿い、断面B(17.6K)の右岸沿いにおいて、河床の深掘れが生じ、護岸工が沈下する恐れがあることを示唆している。断面Bの左岸においては、大幅な低水河岸侵食が生じることを示している。

側岸侵食を考慮しない場合の解析も実施した。そのための解析条件は前記と同じである。代表断面において河床変動の解析結果を図-8に示す。図-7と比べ、特に断面Bにおいては、右岸側の洗掘が若干深くなり、左岸側の低水河岸の侵食幅(低水河岸の後退幅)が減少したことが判る。よって、少なくとも定性的に忠別川のような急流扇状地河川の河岸侵食の予測にこの側岸侵食モデルを適用できると考えられる。

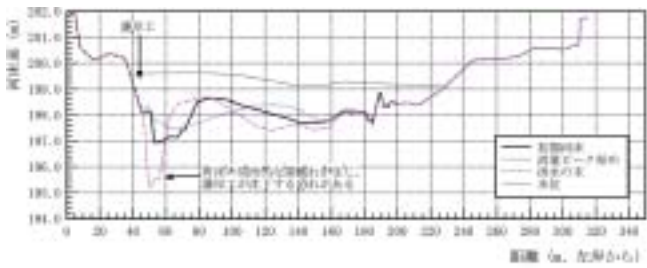


(a) 断面A

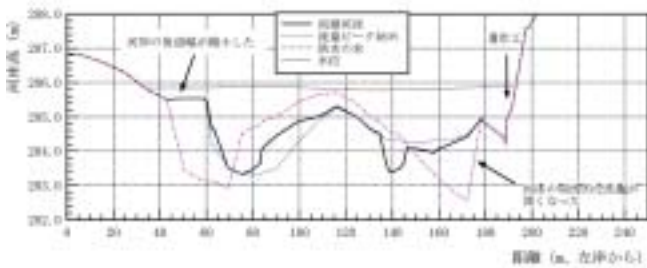


(b) 断面B

図-7 代表断面において洪水期間中の河床(岸)変動



(a) 断面A

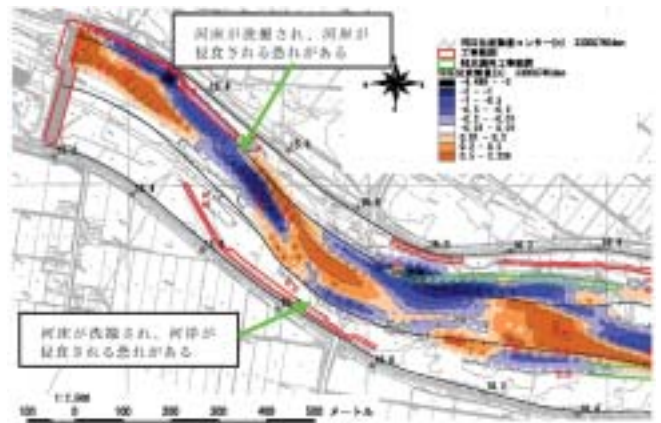


(b) 断面B

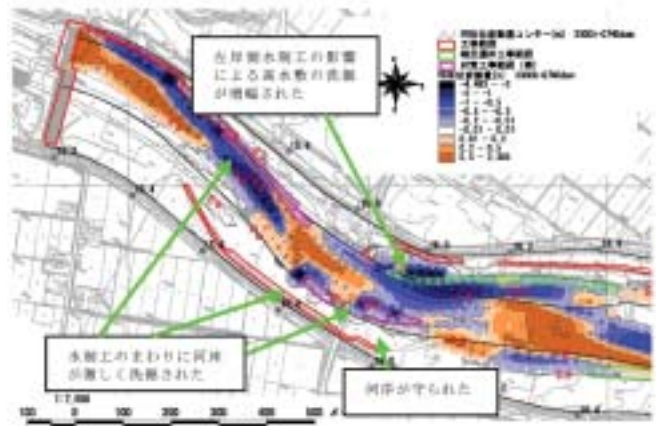
図-8 側岸侵食を考慮しない場合、代表断面の河床変動

5. 低水路河岸侵食の対策工検討

低水路河岸侵食防止対策を検討するため、図-9(b)に示す箇所の低水路内(ピンク線で囲む範囲)に水制工を施したとし、河床変動シミュレーションを実施した。対策工範囲内の河床を侵食することなしに、河床高を高水敷高より約0.2m低くなるように設定した。対策工が存在する場合と存在しない場合の河床変動の比較を図-9に示す。ピーク流量



(a) 対策なし



(b) 対策あり

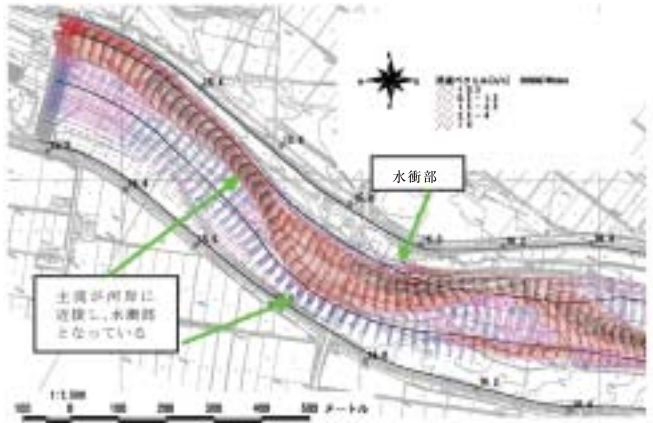
図-9 河床(河岸)高変動量の比較

時の流速ベクトルの比較を図-10に示す。図-11には、洪水期間中16.0K断面の河床高の変化を示す。

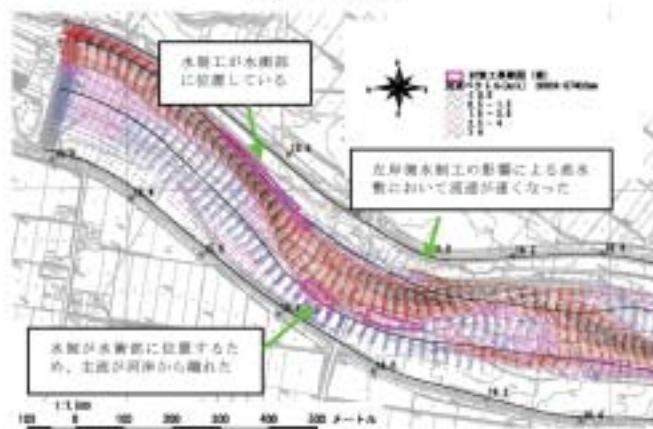
低水路河岸の侵食防止対策の水制工を施さない場合、15.8K付近の左岸および15.4K~15.7Kの右岸は水衝部となっていた(図-10a)。しかし、15.8Kと16.0K地点に水制工を施すことで、流れの主流が河岸から少々離れた(図-10b)。また、15.80K~16.05K区間の低水路左岸沿の洗掘はより河岸から離れた(図-9b)。だが、水制先端部の河床洗掘範囲が拡大し、上記のいずれの河床洗掘深が増える結果となっている。また、16.0K左岸側水制の対岸側—16.0K右岸沿においては、低水路および高水敷の河床侵食がより激しくなり、洗掘範囲も拡大している(図-9b、図-11)。これらの河床侵食における変化は流れの変化と密接している。図-10に示すように、低水路水制工の影響で16.0K右岸高水敷において、流れの流速が速くなって、15.6K右岸側の低水路水制護岸工では逆効果が生じ、15.6Kより下流において河岸侵食が発生した。さらに水制は先端部の河床洗掘範囲を拡大させ、河床洗掘深が増えた。これは水制の存在で流れが高あげられ、河岸沿いにおける流れが速くなり、流砂輸送を活発させたのが原因と考えられる。15.8K左岸側の水制工に

よる流れの流向および主流流速の変化も上記侵食の発生原因の一つであろう(図-10)。

よって、水制工の配置については低水路水制工近傍河岸が守られる一方で、工事の上下流および対岸側河床(河岸)に対する影響を十分に検討しなければならない。



(a) 対策工なし



(b) 対策工あり

図-10 流速ベクトルの比較

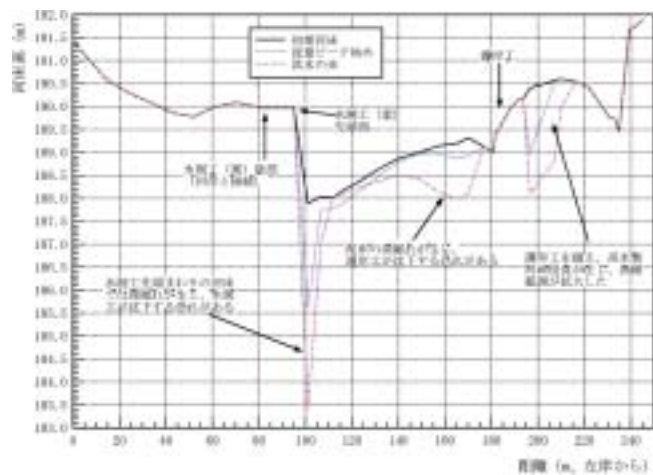


図-11 16.0K断面河床(河岸)高の変化(水制あり)

6. おわりに

河岸勾配を初期勾配に保ったまま河岸沿いの局所洗掘ボリュームに見合った分で河岸を後退させることで、側岸侵食をモデル化した。このモデルを境界適合直交曲線格子の平面2次元移動床解析モデル—NKhydro2Dに加え、河床勾配約1/100の急流扇状地河川—忠別川において河床・河岸変動のシミュレーションを実施した。実績洪水データで検証した結果、当モデル—NKhydro2Dは忠別川の河床変動および河岸侵食を再現できることが判明した。また、このモデルを用い、特定洪水条件での河床および河岸侵食の予測を行った。その結果、護岸位置で河床の深掘れ、自然河岸において側岸侵食などが予測可能になり、本モデルを忠別川のような急流扇状地河川の河岸侵食予測に適用できることが示された。

NKhydro2Dモデルを用い、低水路水制護岸工を施した場合の河床および河岸侵食予測を実施した。その結果、このような対策工は河岸侵食の防止に効果があるものの、水制先端部の河床洗掘をより進展させたことが判明した。従って、水制工の配置については対策工近傍河岸が守られる一方で、工事の上下流および対岸側河床(河岸)に対する影響を十分に検討しなければならない。そのような場合に、例えば、①水制による侵食位置が支障とならないこと、②水制の機械的に配置するのではなく、長さ・配置などを調整すれば、側岸侵食防止と新たな侵食の防止の両立ができること、などの検討業務に本モデルを活用することが期待できる。

今後、より有効に活用されるため、多くの実現象でのキャリブレーションなどを通じて、本モデルの再現性範囲をより明確にすることが重要である。

謝辞：本研究は、北海道開発局から技術提案要請を受け、特定された『平成12年度 石狩川上流 災害に強い川づくり検討業務』を契機に、その継続業務遂行過程で実施したものである。

ここに、本成果とりまとめにあたり貴重な御助言と御指導を戴いた旭川開発建設部治水課の関係方々に深謝する次第である。

参考文献

- 1) 金 海生：感潮河川流れの平面2次元数値シミュレーション、日本工営技術情報、No.21、2001。
- 2) Egashira,S., Jin,H.S., and Nakagawa,H.： Numerical Model for River Mouth Sand-bar Flushing, Proc. Theme B, the 27th Congress of IAHR, San Francisco, Aug.10-15, 1997.
- 3) 金 海生、江頭進治、芦田和男：植生が繁茂した木津川中流部の河床変動解析と河状、土木学会第53回年次講演会、Vol.53 (II)、1998。

- 4) Rodi, W. : Turbulence models and their application in hydraulics, IAHR Publication, DELFT, The Netherlands, 1980.
- 5) Thompson, Joe F., et al : Numerical Grid Generation — foundations and applications, Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York, 1985.
- 6) 芦田和男、道上正規：混合砂礫床の河床変動に関する研究、京大防災研究所年報、No.14 (B)、1971.
- 7) Patankar, S. V. : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, *Hemisphere Publishing Corporation*, 1980.
- 8) Ikeda, S. : Self-formed Straight Channels in Sandy Beds, Proc. ASCE, Vol.107, HY4, 1981.
- 9) 長田信寿、細田 尚、村本嘉雄：バングラデシュ国・メグナ川における河道変動問題への数値解析手法の適用、水工学論文集、Vol.42、1998.