

百間川の洪水流解析による 二ノ荒手の保存の検討

STUDY ON PRESERVING THE NINOARATE BANK BY FLOOD FLOW ANALYSIS OF THE HYAKKEN RIVER

前野 詩朗
Shiro MAENO

正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

The Ninoarate bank of the Hyakken river is a historic civil engineering structure which was built more than three hundred years ago. Under the original river restoration plan, the entire Ninoarate bank structure was scheduled to be removed. However, due to the historic significance of this precious hydraulic structure, the possibility of its preservation has been re-examined in recent years. In this paper, the possibility of preserving the Ninoarate bank is studied by the flow analysis based on MacCormack Scheme. Numerical results show that it is feasible to preserve a part of the Ninoarate bank at the actual location, though it may be difficult to preserve the whole structure.

Key Words : flood flow analysis, MacCormack method, the Hyakken river, the Ninoarate bank

1. はじめに

旭川の放水路である百間川は、度重なる洪水の被害から岡山城下を守るために岡山藩の政治顧問熊沢蕃山が「川除けの法」を考案し、郡代津田永忠が設計・施工したものである。これは、旭川の上流部に荒手を設け、旭川の洪水が岡山城下に侵入しそうなときには、この荒手から洪水を越流させ、城下を洪水の被害から守ろうとするものである。貞享3年(1686年)の築造当時は3段方式の荒手であった¹⁾。すなわち、旭川から百間川への流入口には二つの荒手(一方の荒手は現在はつきりせず、現存するのはそのうち現在の一ノ荒手)、次に百間川の分流口にあたる部分に二ノ荒手(現在の二ノ荒手)、さらに下流部に三ノ荒手(明治25年の洪水により流失)が築造されていた(図1参照)。この三段方式の荒手は、旭川の水量が増すと、まず一ノ荒手が切れ、一ノ荒手と二ノ荒手の間に流入し、土砂を沈殿させる。さらに水量が増すと、二ノ荒手、つぎに三ノ荒手の順に越流させる構造で、百間川下流域への流送土砂の軽減と洪水被害の低減を図ったものである。この百間川放水路により岡山城下は洪水の危険から守られてきたわけであるが、三つの荒手のうち、二ノ荒手には築造当時の石積み・石張り(災害復旧時に補修はなされている)が現存している。写真1

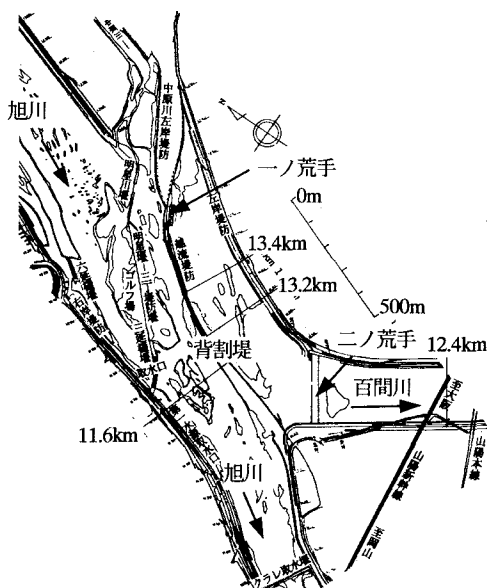


図1 分流部現況

は二ノ荒手の越流部を示しているが、良好な状態で現存しており、築造当時の石工の技術の高さが伺える。

以上のように、二ノ荒手が貯留堤かつ越流堤としての機能を有し、しかも河川を横断して設置されているという点、また、築造当時の石積みが現存しているという点



写真1 ニノ荒手越流部

を考慮すると、ニノ荒手の歴史的河川構造物としての価値は非常に高いものと判断される。しかし、平成4年に改訂された旭川の工事実施基本計画を基に、百間川に2000m³/s（旭川本川に4000m³/s）流下させるための改修工事が現在進められており、当初の計画によるとニノ荒手は全面撤去することになっている。近年、歴史的土木構造物を保存し後世に伝えていくことの重要性が認識されつつあり、今後、ニノ荒手の保存の可能性を検討していくためには、ニノ荒手の存在がどの程度洪水時の流れに影響するのかをあらかじめ検討しておく必要がある。一般に、ニノ荒手のような河川構造物が流れに及ぼす影響を検討する場合には、水理模型実験あるいは数値解析により構造物周辺の流況を得ることが考えられる。本研究では、河床条件の変化などに対して柔軟に対応可能であるということを考慮して、後者の方法、すなわち、数値解析により得られるニノ荒手周辺（図1に示す百間川12.4km～13.4km区間）の流況を基に、ニノ荒手の現地保存の可能性を検討するものである。

2. 数値解析法の概要

2.1 基礎式

解析には保存形の2次元浅水方程式²⁾を用いるが、解析対象である百間川のニノ荒手付近が大きく湾曲していることを考慮して、本研究では直交直線座標系における基礎式を一般曲線座標系に座標変換した基礎式³⁾を採用した。

$$\mathbf{A}_t + \mathbf{B}_\xi + \mathbf{C}_\eta = \mathbf{D}^\xi + \mathbf{D}^\eta + \mathbf{R}_\xi + \mathbf{T}_\eta \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{h}{J} \\ \frac{uh}{J} \\ \frac{vh}{J} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{u'h}{J} \\ \frac{1}{J} \left[(u'uh) + \frac{\xi_x}{2} gh^2 \right] \\ \frac{1}{J} \left[(u'vh) + \frac{\xi_y}{2} gh^2 \right] \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{v'h}{J} \\ \frac{1}{J} \left[(v'uh) + \frac{\eta_x}{2} gh^2 \right] \\ \frac{1}{J} \left[(v'vh) + \frac{\eta_y}{2} gh^2 \right] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}^\xi = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} gh(-\xi_x \frac{\partial z}{\partial \xi} - \frac{\eta_y}{J} u' n^2 \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}) \\ \frac{1}{J} gh(-\xi_y \frac{\partial z}{\partial \xi} - \frac{\eta_x}{J} u' n^2 \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}^\eta = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} gh(-\eta_x \frac{\partial z}{\partial \eta} - \frac{\xi_y}{J} v' n^2 \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}) \\ \frac{1}{J} gh(-\eta_y \frac{\partial z}{\partial \eta} - \frac{\xi_x}{J} v' n^2 \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ \varepsilon \left\{ (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial(uh)}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial(uh)}{\partial \eta} \right\} \\ \varepsilon \left\{ (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial(vh)}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial(vh)}{\partial \eta} \right\} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 \\ \varepsilon \left\{ (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial(uh)}{\partial \eta} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial(uh)}{\partial \xi} \right\} \\ \varepsilon \left\{ (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial(vh)}{\partial \eta} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial(vh)}{\partial \xi} \right\} \end{bmatrix}$$

ここに、 x, y : 物理平面の座標、 ξ, η : 写像平面の座標、 J : 座標変換のヤコビアン($J = \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x$)、 h : 水深、 z : 河床高、 u, v : x, y 方向の流速成分、 u', v' : 一般曲線座標(ξ, η)の流速の反変成分、 g : 重力加速度、 ε : 渦動粘性係数、 n : マニングの粗度係数である。

2.2 MacCormack差分スキーム

数値解析モデルとしては、ニノ荒手付近で射流が生じるため、本研究では常流と射流が混在した流れが解析可能とされているMacCormack法⁴⁾を適用した。基礎式の具体的な差分化に際しては、プログラミングの容易さ等から時間分割法⁴⁾を採用した。この方法は基礎式(1)を ξ 方向と η 方向に分割し、式(2)に示すように、予測子段階の値を計算した後に、さらに修正子段階で値を補正するものである。また、 ξ 方向と η 方向の演算を表1のように4段階に組み合わせることにより2次元問題においても2次精度を保つことができる。

ξ 方向

予測子段階（後退差分： $m=0$ ，前進差分： $m=1$ ）

$$\mathbf{A}_{i,j}^p = \mathbf{A}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta \xi} (\mathbf{B}_{i+m,j}^n - \mathbf{B}_{i,j}^n) + \Delta t \cdot \mathbf{D}_{i,j}^{\xi n} + \Delta t \cdot \mathbf{R}_{i,j}^n$$

修正子段階（後退差分： $m=0$ ，前進差分： $m=1$ ）

$$\mathbf{A}_{i,j}^c = \mathbf{A}_{i,j}^p - \frac{\Delta t}{\Delta \xi} (\mathbf{B}_{i+m,j}^p - \mathbf{B}_{i,j}^p) + \Delta t \cdot \mathbf{D}_{i,j}^{\xi p} + \Delta t \cdot \mathbf{R}_{i,j}^p$$

$$\mathbf{A}_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2} (\mathbf{A}_{i,j}^n + \mathbf{A}_{i,j}^c) \quad (2.1)$$

η 方向

予測子段階（後退差分： $m=0$ ，前進差分： $m=1$ ）

$$\mathbf{A}_{i,j}^p = \mathbf{A}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta \eta} (\mathbf{C}_{i,j+m}^n - \mathbf{C}_{i,j}^n) + \Delta t \cdot \mathbf{D}_{i,j}^{\eta n} + \Delta t \cdot \mathbf{T}_{i,j}^n$$

修正子段階（後退差分： $m=0$ ，前進差分： $m=1$ ）

$$\mathbf{A}_{i,j}^c = \mathbf{A}_{i,j}^p - \frac{\Delta t}{\Delta \eta} (\mathbf{C}_{i,j+m}^p - \mathbf{C}_{i,j}^p) + \Delta t \cdot \mathbf{D}_{i,j}^{\eta p} + \Delta t \cdot \mathbf{T}_{i,j}^p$$

$$\mathbf{A}_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2} (\mathbf{A}_{i,j}^n + \mathbf{A}_{i,j}^c) \quad (2.2)$$

表1 各差分段階における差分方法

計算段階(差分の方向)	予測子段階	修正子段階
第1段階 (ξ 方向)	後退差分	前進差分
第2段階 (η 方向)	後退差分	前進差分
第3段階 (η 方向)	前進差分	後退差分
第4段階 (ξ 方向)	前進差分	後退差分

表2 計算条件

初期水位	領域全体水位 8.4 m
初期流速	領域全体 0 m/s
上流端流入流量	$Q = 2000 \times n / 1000 \text{ (m}^3/\text{s)} : n < 1000\text{step}$ $Q = 2000 \text{ (m}^3/\text{s)} : n \geq 1000\text{step}$
下流端水位	8.4 m(実験により得られた同地点の左右岸水位の平均値)
クーラン数	$C_r = 0.9$
マンニングの粗度係数	$n = 0.025$
渦動粘性係数	$\varepsilon = \alpha u_* h \text{ (}\alpha = \kappa / 6.0, \kappa = 0.4\text{)}$
人工粘性係数	$k = 0.20$

以上のステップを微小な時間増分 Δt ごとに繰り返すことにより解を求めることができる。計算に用いた Δt はCourant-Friedrichs-Lewy(CFL)の安定条件を満足するように設定した。

$$\Delta t = \min \left(\frac{C_r \Delta \xi}{\max(|u'| + |\xi_x + \xi_y| \sqrt{gh})}, \frac{C_r \Delta \eta}{\max(|v'| + |\eta_x + \eta_y| \sqrt{gh})} \right)$$

ここに、 C_r はクーラン数である。

また、MacCormackスキームを常流と射流が混在した流れに適用する場合には数値振動が発生するため、人工粘性項を付加する必要がある。本研究では、Fennema⁵⁾や秋山⁶⁾が常・射流が混在する流れの解析に導入した方法を採用した。その際、次式で示すように一般座標系に適合するように人工粘性係数の算出方法を若干変更して用いた。

ξ 方向：

$$A_{i,j}^{n+1} = A_{i,j}^{n+1} + [\gamma_{\xi i+1/2,j} (A_{i+1,j}^{n+1} - A_{i,j}^{n+1}) - \gamma_{\xi i-1/2,j} (A_{i,j}^{n+1} - A_{i-1,j}^{n+1})]$$

η 方向：

$$A_{i,j}^{n+1} = A_{i,j}^{n+1} + [\gamma_{\eta i,j+1/2} (A_{i,j+1}^{n+1} - A_{i,j}^{n+1}) - \gamma_{\eta i,j-1/2} (A_{i,j}^{n+1} - A_{i,j-1}^{n+1})]$$

ここに、

$$\gamma_{\xi i-1/2,j} = k \max(v_{\xi i-1}^2, v_{\xi i}^2), \gamma_{\eta i,j-1/2} = k \max(v_{\eta i-1}^2, v_{\eta i}^2)$$

(k ：人工粘性係数)

$$v_{\xi i,j} = \frac{\left| \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{L_{\xi i+1/2,j}} - \frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{L_{\xi i-1/2,j}} \right| \cdot L_{\xi i,j}}{h_{i+1,j} + 2h_{i,j} + h_{i-1,j}}$$

$$v_{\eta i,j} = \frac{\left| \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{L_{\eta i,j+1/2}} - \frac{h_{i,j} - h_{i,j-1}}{L_{\eta i,j-1/2}} \right| \cdot L_{\eta i,j}}{h_{i,j+1} + 2h_{i,j} + h_{i,j-1}}$$

$$L_{\xi i,j} = \sqrt{x_{\xi i,j}^2 + y_{\xi i,j}^2}, L_{\eta i,j} = \sqrt{x_{\eta i,j}^2 + y_{\eta i,j}^2}$$

2.3 解析条件

(a) 計算条件

解析に用いた各種計算条件は表2に示す通りである。領域全体に初期水位・初期流速を与え、上流端からの流入量を計算開始後、徐々に計画流量2000m³/sになるまで増加させ、その後2000m³/sを与え続け、下流端からの流出量が定常状態になるまで計算を継続した。

(b) 河床条件

図2は解析対象区間(百間川12.4km～13.4km区間)の計画河道平面図および解析に用いたメッシュ図を示し

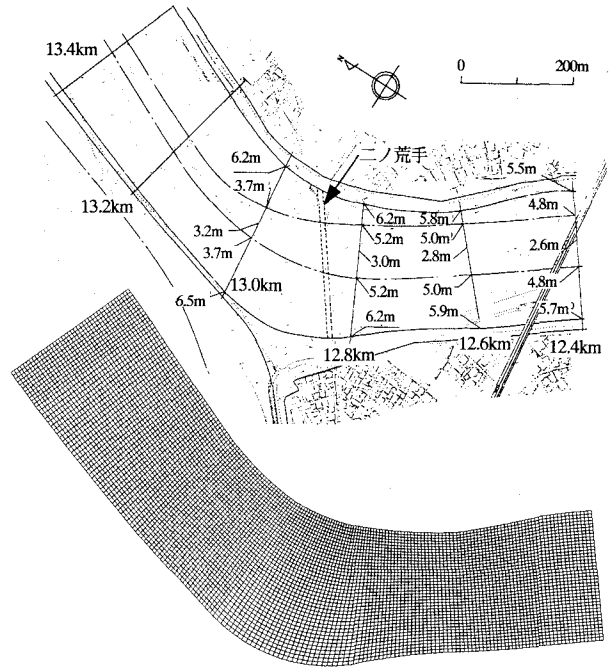


図2 計画河道平面図およびメッシュ図

ている。計画では湾曲部にある二ノ荒手は全面撤去し計画河床まで掘削することになっているが、二ノ荒手の位置を明確にするために図中に点線で荒手の位置を示している。なお、二ノ荒手の位置は河川縦断距離12.8km+45mにあり、左岸距離はそれよりも20m程度長く、右岸距離は20m程度短い。メッシュ図に示すように解析対象区間を40×168=6720個の格子に分割した。メッシュの一辺の長さは数メートル程度である。解析は以下の4つのケースについて行った。Case1は図2に示す計画河道、すなわち、荒手を全面撤去することを想定した場合である。Case2は左岸側導流堤部のみを保存し、その他の部分は計画河道まで掘削する場合である。Case3は左岸側導流堤部および右岸側荒手部を保存し、低水路部分は計画河道まで掘削する場合である。Case4は現存する二ノ荒手を全面保存する場合である。

3. 結果および考察

3.1 解析モデルの妥当性の検討

本研究では、採用した解析モデルの妥当性について、Case1の解析結果と土木研究所において縮尺1/50の模型を用いて計画河道を対象にして行われた実験結果⁷⁾を比較することにより検討する。

図3は、二ノ荒手を全面撤去したCase1の場合の水面形を示している。図中には、実験結果も合わせて示している。なお、解析結果については12.9km地点の結果もプロットしているが、実験結果については12.9km地点のデータが不明であったので掲載していない。解析結果より、12.8～13.0km付近の湾曲部では、右岸(外湾)側の水位が、左岸(内湾)側の水位よりも高くなっている

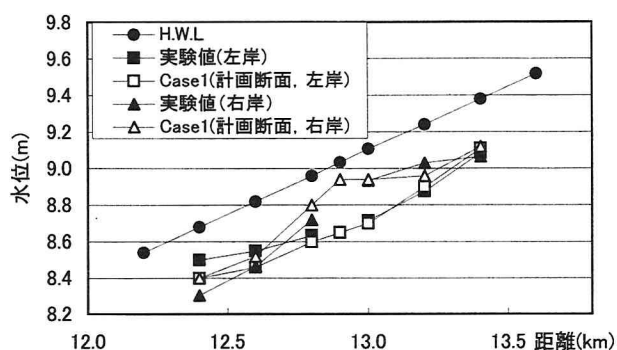


図3 計画河道の水面形 (Case1)

ことがわかる。この水位の示す傾向は実験値とよく一致する。また、13.2km地点の右岸水位が実験値よりやや低いが、二ノ荒手の直上流の13.0km地点では実験結果とほぼ一致する。下流端付近では、右岸側の水位は実験値よりも高くなり、左岸側の水位は実験値よりも小さくなっている。これは、下流端の水位の境界条件を実験結果から得られた左右岸の水位の平均値を与えた影響である。二ノ荒手を全面撤去したこのケースでは計画高水位(H.W.L.)を越えることはなく、洪水流を安全に流下させることができることがわかる。

図4は、二ノ荒手を全面撤去したCase1の解析結果について、解析領域全体の水位・流速の平面分布を示している。また、図5は二ノ荒手周辺の水位・河床高を湾曲部の右岸上流側を視点として3次元的に示したものである。これらの図より、二ノ荒手付近の湾曲部では右岸側の水位がやや上昇するが、非常に滑らかな水面形状を呈していることがわかる。流速分布より、湾曲部の流れは

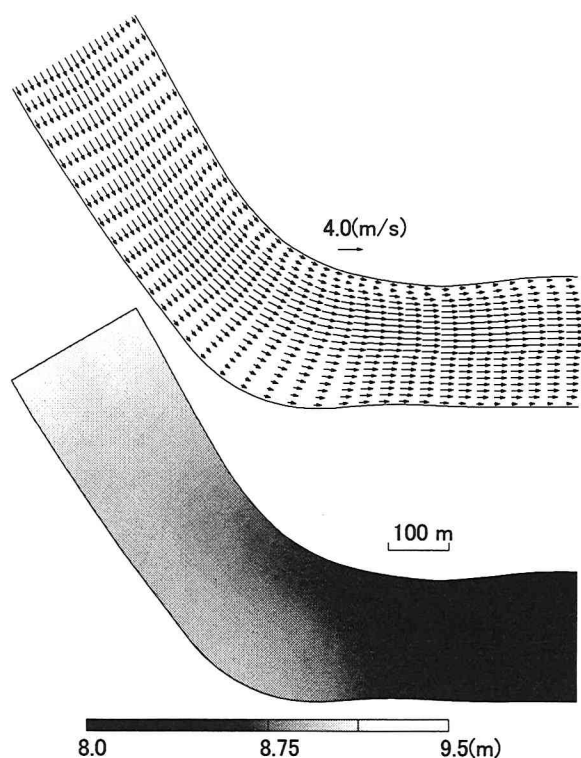


図4 水位・流速分布 (Case1)

堤防法線に沿うスムーズな流速分布になっていることがわかる。また、低水路部分の流速が大きくなり、左右岸の高水敷部分では流速が小さくなる。流速分布においても上流端付近では流入境界の影響が現れるが、ある程度流下すると上流端境界の影響は殆どなくなる。紙面の都合上掲載していないが、実験により得られた湾曲部の平面流速分布と本解析結果を比較した結果、両者はよく一致することが示された。以上の結果より、二ノ荒手を撤去した湾曲部の流況は実験値をよく再現しており、本研究で採用した解析手法が妥当であることが明らかにされた。

3.2 二ノ荒手の保存に関する検討

(a) 平面流速および水位分布による検討

図6および図7は、Case4の場合の解析結果について図4および図5と同様に図示したものである。これらの図より以下のことがわかる。

二ノ荒手を全断面保存するCase4の場合には、流速、水位ともに二ノ荒手付近でかなり乱れた状況になることがわかる。流速分布を見ると二ノ荒手を越える付近でかなりの高速流が現れ、左右岸の高水敷部分に現れる高速流の影響は下流端境界にまで及んでいる。また、水位については、二ノ荒手で堰上げられた流れが荒手を越える部分で強度の水位低下を起こしている様子がわかる。とくに左岸側の導流堤の下流部では水面形がかなり乱れた状況になっている。

つぎに、左岸側導流堤部のみを保存したCase2および左岸側導流堤部および右岸側荒手部を保存したCase3については、紙面の都合上掲載していないが、いずれの場合

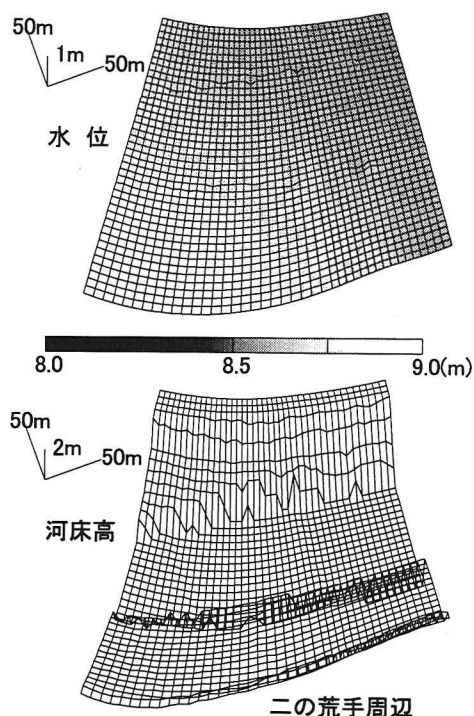


図5 二ノ荒手付近の水位・河床形状 (Case1)

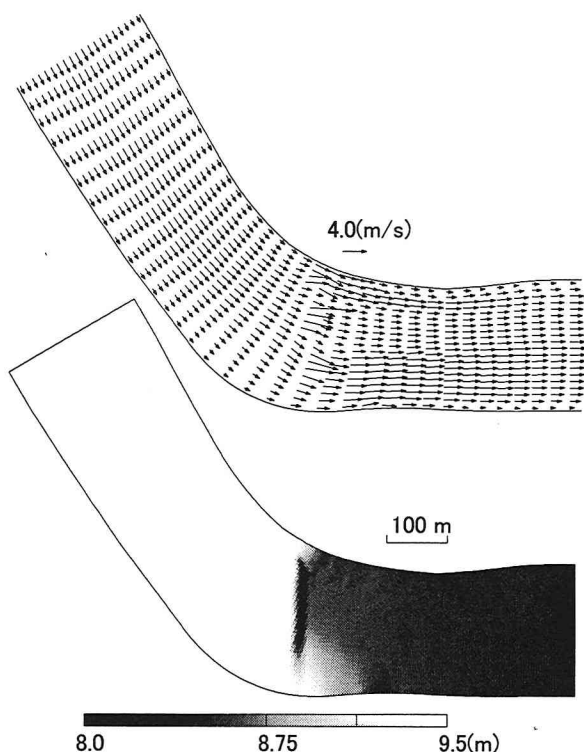


図6 水位・流速分布 (Case4)

合も荒手を越える部分でやや水位が低下していることが示された。これらのケースでは、Case4の場合に見られた強度の水位低下は発生しなかった。また、荒手を越える部分の水面の乱れも小さく、Case4の場合のように下流端にまで及ばなくなる。荒手を保存した部分ではやや大きな流速が現れるが、Case4の場合ほど大きくならない。低水路部分の流況はCase1の場合とほぼ同様であり、左右岸の荒手を残した影響が低水路部の流れに及ぼす影響は殆どないものと判断される。Case2およびCase3の全体的な流況は、保存した荒手の部分を除いて荒手を全面撤去したCase1の場合とほぼ同様であった。

(b) 水面形および荒手部の水理量（水位，流速，フルード数）による検討

図8は各ケースにおける左右岸の水面形を示している。図9は二ノ荒手近傍の水面形を示している。それぞれ、左岸高水敷中央部，低水路中央部，右岸高水敷中央部の位置の水面形を示している。また、表3は図9に示した箇所の水理量（水位，流速，フルード数）の最小値と最大値を示している。これらの図および表より，以下のことがわかる。

Case4の荒手を全断面保存する場合には，二ノ荒手より上流側で計画高水位を大きく越えることがわかる。二ノ荒手近傍の最大流速は水路中央部で7(m/s)以上にまで達し，フルード数も2を越えて射流となっている。低水路中央荒手部では跳水が発生し，左岸導流堤を越流する部分では波状跳水が起きている。

Case2およびCase3は，Case4の場合の河床形状から低

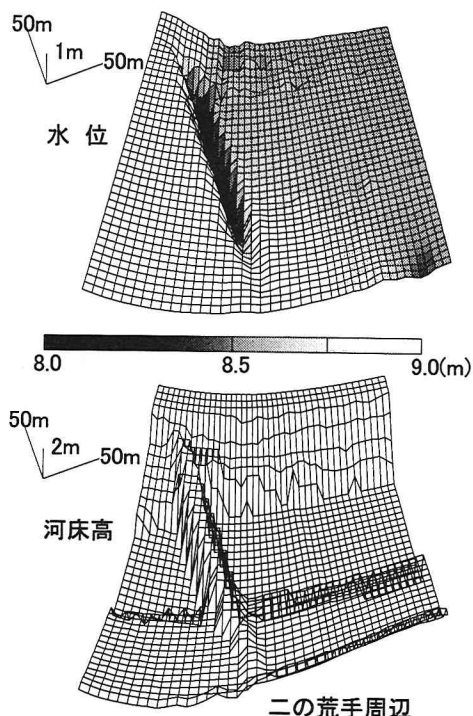


図7 二ノ荒手付近の水位・河床形状 (Case4)

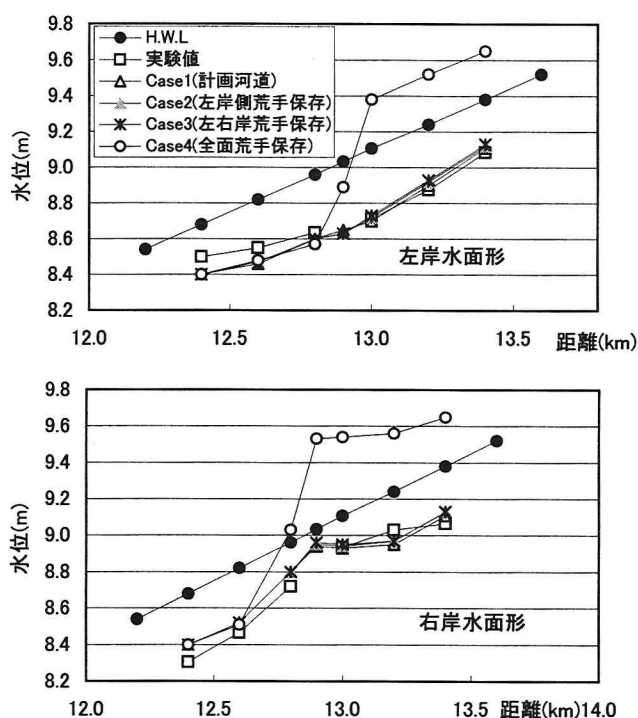


図8 左右岸の水面形

水路部分を掘削し，左岸側あるいは左右岸の荒手を部分的に保存することを想定した場合であるが，荒手よりも上流側の13.0～13.2km付近で荒手を全面撤去するCase1の場合よりもやや水位が上昇する。しかし，量的には数cm程度であり，低水路部分の掘削の効果はかなり大きいことがわかる。二ノ荒手付近ではCase3の場合に，右岸側の水位が計画高水位とほぼ同程度まで上昇するが，

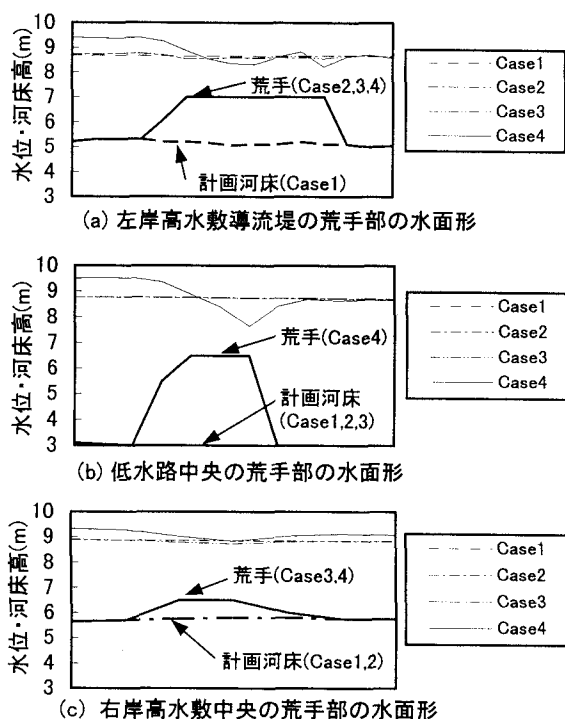


図9 二の荒手部の水面形

Case4の場合のように、大幅に計画高水位を越えることはない。Case2およびCase3の場合には、左岸側導流堤部の流速ならびにフルード数がCase1の場合よりも大きくなるが、Case4の場合のように強度の射流になることはない。左岸側導流堤上部の水面形は若干振動しているが、Case4ほど激しくはない。

以上のことより、Case4の場合には、二ノ荒手近傍の流れがかなり乱れた状況となるため、荒手を全断面現地に保存することは非常に困難であると判断される。しかし、荒手を部分的に保存することを想定したCase2あるいはCase3の場合には、低水路部分を掘削する効果が大きく現れ、洪水疎通能力（計画高水位）の面からは、荒手を現地保存することが可能ではないかと考えられる。しかし、荒手を越える部分で乱れた流れとなるため、左右岸の荒手を現状のまま保存しようとすると、荒手周辺の局所洗掘や荒手そのものの破壊が発生する恐れがある。とくに、左岸側の導流堤部分の保存を検討する際には、導流堤に直接流れが衝突しないような工夫や、洗掘防止策を施す必要があるものと考えられる。

4. 結 論

本研究は、今から300年以上前の江戸時代に旭川放水路（百間川）に築造された二ノ荒手の現地保存の可能性について、計画規模の洪水を想定した流況解析により検討した。その結果、以下のようなことが明らかにされた。

- (1) 本研究で採用した一般曲線座標系における数値解析モデルは、常流・射流が混在する百間川の湾曲部の流れを良好に再現することが明らかにされた。
- (2) 二ノ荒手を全断面現地保存することは、荒手近傍の

表3 荒手周辺の水理量の比較

Case	水理量	水位(m)	流速(m/s)	フルード数
	位置	最大値	最大値	最大値
1	左岸高水敷中央部	8.69	2.17	0.38
	低水路中央部	8.78	2.61	0.35
	右岸高水敷中央部	8.89	1.91	0.35
2	左岸導流堤部	8.74	2.63	0.64
	低水路中央部	8.77	2.75	0.37
	右岸高水敷中央部	8.89	1.85	0.34
3	左岸導流堤部	8.74	2.65	0.68
	低水路中央部	8.77	2.80	0.33
	右岸高水敷中央部荒手	8.90	2.33	0.50
4	左岸導流堤部	9.40	5.54	1.60
	低水路中央部荒手	9.53	7.61	2.27
	右岸高水敷中央部荒手	9.39	3.83	0.80

流速分布や水面形の面からみて困難であると判断された。

(3) 洪水疎通能力（計画高水位）のみを考慮する場合には、左岸導流堤部あるいは左岸導流堤部と右岸荒手部を現地保存することが可能であることが示された。しかし、この場合においても保存する荒手の近傍における流れの乱れを抑える工夫や荒手周辺の洗掘防止策を施す必要がある。

以上のように、流況解析により二ノ荒手を一部現地保存することが可能であることが示された。また、全面保存する場合には計画高水位をかなり上回るため、堤防の嵩上げ等による堤防保護のための対策が必要となろう。今後どのような形で荒手を保存していくのかを検討する際には、数値解析による検討のみならず実験による検討もあわせて行う必要があるものと考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、岡山大学環境理工学部名合宏之教授から数多くの貴重な助言を頂いた。また、建設省岡山河川工事事務所より実験データや対象区間の平面図等を提供して頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 百間川小史：建設省岡山河川工事事務所，1992。
- 2) R. Garcis and R. A. Kahawita：Numerical solution of the St. Venant equations with the MacCormack finite difference scheme, Internatioanl Jour. For Numerical Methods in Fluids, Vol.6, pp.259-274, 1986。
- 3) 清水康行・山下恭正・山下彰司・崇田徳彦：一般曲線座標系を用いた常・射流混在流れの計算，開発土木研究所月報，No.455, pp.18-33, 1991。
- 4) 大宮司久明他：流れの数値シミュレーション，日本機械学会編，コロナ社，1998。
- 5) R. J. Fennema and M.H. Chaudhry：Expricit methods for 2-D transient free-surface flows, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.116, No.8, pp.1013-1034, 1990。
- 6) 秋山壽一郎・浦 勝・山口 学・重枝未鈴：MacCormack法を用いた平面2次元数値モデルの浅水流への適用性について，水工学論文集，第42巻，pp.679-684, 1998
- 7) 旭川水理模型実験業務報告書：（財）土木研究センター，pp.152, 1992。

(1999.9.30受付)