

植生を考慮した千曲川の洪水流と河床変動の解析

FLOOD FLOWS AND RIVER-BED VARIATION ANALYSIS FOR THE CHIKUMA RIVER WITH VEGETATION

富所 五郎¹・後藤 和也²・石原 祐樹³・松本 明人⁴

Goro TOMIDOKORO, Kazuya GOTOH, Yuuki ISHIHARA and Akihito MATUMOTO

¹正会員 工博 信州大学教授 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野市若里 4-17-1)

²工修 群馬県沼田土木事務所 (〒378-0053 沼田市東原新町 1906)

³工修 愛知県津島土木事務所 (〒496-8533 愛知県津島市西柳原町 1-14)

⁴正会員 工博 信州大学助教授 地域共同研究センター (〒380-8553 長野市若里 4-17-1)

The flood flows and river-bed variation of the Chikuma river with vegetation zone on major bed were analyzed. In this study, flood flows were assumed to be two-dimensional in horizontal direction, and the Galerkin finite element method was applied to the basic equations for spatial directions and the two-step Lax-Wendroff method was employed for time direction. The hydraulic resistances of plants on major bed were idealized to dispersive resistance on river bed in one case or were culculated according to the water depths and the plant shapes in the other case. The analytical zone was from confluence of the Sai and Chikuma river to Tategahana, 13.5km length, about 1.0km width. The flood water levels measured('83.9) and these numerical results showed good agreement.

Key Words : flood flows, river-bed variation, Chikuma river, vegetation

1. はじめに

河川環境を知る手がかりの一つに河川敷地内の樹木、草花の存在が挙げられる。これらは河川の生態系の保持の他、川を安らぎの場所にする大切な要素である。その一方で、洪水の流れを妨げて治水の安全性を損なう恐れもある。そこで、河道内に樹木等の植生が存在した場合の水の流れを把握し、洪水の危険性を知ることが必要となる。研究対象となる千曲川は写真-1に示すように高水敷にリンゴ、桃等の果樹園が存在する特徴的な河川である。そこで本研究では植生分布を考慮した千曲川における洪水流の数値解析を行い、広範囲な植生と狭窄部の存在する実際の河川に対する数値解析の可能性と、植生の洪水流や河床変動に及ぼす影響について検討している。

流れの数値解析手法としては、流れを二次元と仮定して、空間変数に対してはGalerkin有限要素法を、時間変数に対してはtwo-step Lax-Wendroff法によって離散化し解析を行う。解析メッシュの作成には、解析精度を確保するために狭窄部や複雑な植生分布を考

慮して解適合格子法を用いている。樹木の抵抗は、底面の抵抗に分散させるものとして、各々の樹木のある地目毎に合成粗度係数を一定値とする方法と樹形を考慮した水深の関数とする二方法を用いる。そして、昭和58年9月('83.9)の既往最大洪水の洪水痕跡と最大流量が流れる定常流とした数値解析の水位との比較を行う。

また、洪水時の河床変動は流れ解析に大きな影響を与えるので、河床材料の粗粒化も予測可能な簡便な河床変動解析を試みる。



写真-1 千曲川の高水敷のりんご畑

2. 解析方法

(1) 流れの解析

開水路の流れの基礎方程式¹⁾はReynoldsの運動方程式と連続式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = gI_x - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (A_h \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h \frac{\partial u}{\partial y}) - \tau_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = gI_y - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (A_h \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h \frac{\partial v}{\partial y}) - \tau_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u \cdot d) + \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot d) = 0 \quad (3)$$

$$\tau_x = gn^2 u \sqrt{(u^2 + v^2)} / d^{4/3} \quad (4)$$

$$\tau_y = gn^2 v \sqrt{(u^2 + v^2)} / d^{4/3} \quad (5)$$

ここに、 x 軸は x 方向の平均勾配 I_x に平行に、 y 軸は y 方向の平均勾配 I_y に平行に水面付近にとり、 z 軸は x - y 平面に直角に鉛直上方を正としている。また、 u, v はそれぞれ鉛直平均流速の x, y 成分、 t は時間、 g は重力加速度、 d は水深、 n はマンニングの粗度係数、 ζ は水面上昇量、 A_h は水平渦動粘性係数、 τ_x, τ_y は x, y 方向の底面せん断応力を ρd で除したものであり、 ρ は水の密度である。

上式の空間変数に対してはGalerkin有限要素法を、時間変数に対してはtwo-step Lax-Wendroff法を用いて離散化する。

水平渦動粘性係数は、 $k-\varepsilon$ 乱流モデル等を用いる方法もあるが、ここでは簡単のため、Reynoldsの相似仮定を用いてElderの定義²⁾に従い、次式で算定する。

$$A_h = Kn \sqrt{g(u^2 + v^2)} / d^{5/6} \quad (6)$$

ここに、 K は定数で、ここでは6.0とする。

(2) 河床変動解析

本河床変動解析は、河床面近くに砂礫の移動により時間的に粒度分布が変化するが、鉛直方向に粒度分布の一定な交換層を考える。また、空隙率(λ)の時間的な変化は小さいとして無視し、各粒径範囲別に区分された砂礫に対して次の二次元の連続式を適用する。

$$\frac{\partial z_i}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial i_b \cdot q_{Bxi}}{\partial x} + \frac{\partial i_b \cdot q_{Byi}}{\partial y} \right] = 0 \quad (7)$$

ここに、 i_b は交換層内のある粒径範囲の砂礫(d_i)が占める割合、 $z_i = a \cdot i_b$ はその砂礫の交換層内で占める高さ、 q_{Bxi}, q_{Byi} はそれぞれ x, y 方向の d_i の流砂量、 a は交換層厚である。

本研究で提案する簡易な河床変動解析の目的は、流れとの連動解析を最終目的にして、洪水時の流れ

特性に大きな影響を与える低水路等の河床低下を予測することにある。また、解析は洪水ピーク時における流量変化の小さい、短時間を想定しており、洪水減水時のような砂礫の堆積も少ない。そこで以下では、浮遊砂を無視して、簡便な次の Meyer-Peter-Müller の式³⁾を混合砂礫に拡張した次式で流砂量を評価する。

$$q_{Bsi} = 8(\tau_{*ei} - \tau_{*ci})^{3/2} \cdot \sqrt{sgd_i^3} \quad (8)$$

$$d_i/d_m > 0.4 : \tau_{*ci} = \left(\frac{\log 19}{\log \{19(d_i/d_m)\}} \right)^2 \left(\frac{d_i}{d_m} \right) \tau_{*cm}$$

$$d_i/d_m \leq 0.4 : \tau_{*ci} = 0.85 \tau_{*cm}$$

$$\tau_{*ei} = \frac{u_{*e}^2}{sgd_i}, \quad u_{*e} = \left(\frac{n_b}{n} \right)^{3/4} \cdot u_*, \quad n_b = 0.0192 d_m^{1/6}$$

$$u_* = \sqrt{(u^2 + v^2)} / \{6.0 + 5.75 \log(h/2.5d_m)\}$$

ここに、下添え字 i は d のそれらを表し、また q_{Bsi} は流砂量、 τ_{*ei} 、 τ_{*ci} はそれぞれ無次元有効掃流力、無次元限界掃流力、 s は砂礫の水中比重、 d_m は混合砂礫の平均粒径、 u_* は摩擦速度、 τ_{*cm} は d_m の無次元限界掃流力で岩垣の式³⁾より評価する。

これらの連続式の離散化は、流れの解析と同様である。実際の計算においては、時間刻み dt 毎に得られた z_i を全ての d_i について合計すると交換層厚となり、これより河床面が求められる。更に、得られた a で z_i を割ることにより i_b が求められる。また、空隙率は、時間刻み dt 間では一定としているが、次の時間刻み dt 間では、新たに求めた中央粒径の関数として計算した値を用いる。

交換層厚はアーマーマーコートの厚さ程度として、最大粒径(d_{max})とする。計算の進行により、 a は d_{max} を越えたり、下回ったりする。この過不足は、交換層の下層で調整を行うが、この際にはこの層の粒径分布が必要になる。本研究では交換層下に層厚一定な層を設け、この調整に伴う層間の各粒径範囲の砂礫の調整量から、これらの層の層内平均 i_b を計算する。これらの層では砂礫の移動がないことより鉛直変化を考慮し、 i_b に直線分布を仮定する。この傾きは、河床上昇時には層下部の値を、降下時には上部の値を前の計算ステップ値から内挿して決める。これは、層間の各粒径範囲の砂礫の調整量誤差を小さくするためである。これらの計算は、氾濫計算の移動境界部のボリューム調整と同様に行える。

本研究の初期条件では、粒度分布を鉛直方向に一定とするが、時間経過過程で同一点の河床が一方向的に上がるか、または下がる場合には、交換層の下層で新たに計算される i_b は全く使われなく、計算精度に影響を及ぼさない。そこで、本解析では、この層数を1層として、層厚を交換層厚の2倍としている。

尚、本研究では文献 4)に従って、流線方向の粒砂量を求めている。

粒径は、文献 5)を参考に 0.1cm ～ 1.0cm を 0.1cm 毎の9区分、1.0cm ～ 4.0cm を 0.5cm 毎の6区分、4.0cm ～ 6.0cm を 1.0cm 毎の2区分、6.0cm ～ 12.0cm を 2.0cm 毎の3区分の合計20の粒径範囲に細分する。各粒径範囲の代表粒径は、その最大値と最小値の積の平方根とする。尚、この最大粒径を一樣粒径とした解析を行ったところ、狭窄部の最大流速部以外では河床変動は見られなかった。

3. 粗度係数決定の概念

本研究では、合成粗度係数を植生のある地目毎に一定とする方法(case-1)と樹形を考慮した水深の関数とする方法(case-2)を採用している。後者は樹木の場合、水位により抵抗が著しく変化するため、樹木を枝下部と樹幹部に分け、水深に対応した粗度係数を与える必要がある。そこで果樹と広葉樹に対し粗度係数を水深の関数として次式で算出した。⁶⁾

幹部分のみ浸水する場合($h \leq h_0$)

$$n = \left[n_b^2 + \frac{a}{2g} C_D h^{4/3} \right]^{1/2} \quad (9)$$

樹幹部まで浸水する場合($h_0 < h \leq H$)

$$n = \left[n_b^2 + \frac{a}{2g} h^{1/3} (C_D D h_0 + C_u a_u) \right]^{1/2} \quad (10)$$

ここに、 h は水深、 h_0 は枝下高、 H は樹木高、 n_b は底面のマニング粗度係数、 n は合成粗度係数、 C_D は樹木の抗力係数、 C_u は樹幹部の抗力係数、 D は幹径、 a は樹木の育成密度、 a_u は樹幹部の投影面積である。

また、本研究で用いた果樹と広葉樹の解析モデルを図-1、図-2にそれぞれ示す。図は千曲川河川敷に植樹されている果樹と広葉樹の平成10年の実測値を模式化したもので、桑は桑畑の面積が小さいので模式化していない。また、果樹と広葉樹の地目の樹木密度 a は、それぞれ1/36.0、1/30.0(本/㎡)である。

4. 解析対象河道と計算条件

(1) 解析対象河道の概要

本研究における計算対象河道は、長野市東部の千

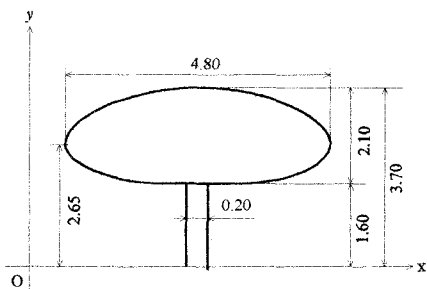


図-1 果樹の模式図 [単位: m]

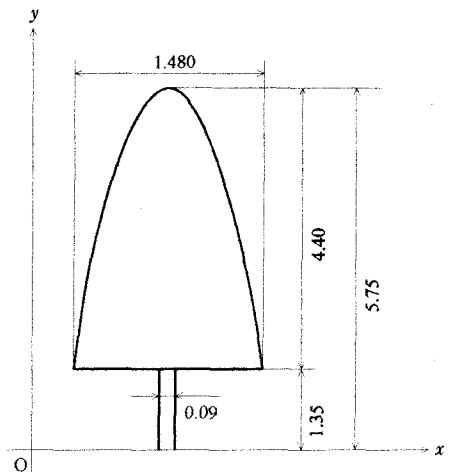


図-2 広葉樹の模式図 [単位: m]

曲川と犀川合流地点より下流500m地点から立ヶ花橋地点までの総延長13.5kmの区間である。川幅は1km弱、河川勾配は1/1000程であるが、下流の狭窄部ではそれぞれ200m、1/700程に急変している。川の横断面は、狭窄部以外では複断面形で、高水敷は果樹園等として利用され、ほぼ全体が植生に覆われている。図-3に、昭和58年当時の解析領域の果樹、低水路、砂地、荒地、畑、広葉樹、狭窄部、桑畑の8種類の地目分布を示す。

解析メッシュは、以下の手順に従って作成している。
1)500mピッチの横断測量結果より、節点数275点の初期メッシュを作成する。
2)ブロック別修正デローニー三角分割法により、急縮部を細かくした節点数2012の解析メッシュを作成する。
3)この解析メッシュによる流速の計算結果を用いて、解適合格子法⁷⁾により、流速の変化の激しい箇所を細かくした節点数4000点の二次解析メッシュを作成する。

最終的な解析メッシュは、2)、3)を試行錯誤して作成した解析メッシュで、解の安定性に高いメッシュを用いている(図-3)。なお、3)で解適合格子法の代わりに、通常の修正デローニー三角分割法を用いた場合には、流速変化の激しい箇所の分割が不十分で、この解析メッシュを用いた計算では、途中で解が発散したり、得られても精度が悪いものであった。

(2) 流れの解析条件

本研究では、千曲川の昭和58年9月の最大流量740 0m³/sの既往最大洪水の洪水痕跡を数値解析による再現を試みるものであるが、上流端での非定常計算のためのデータがないことと、洪水のピーク流量付近の比較的フラットな状態が、解析領域を流れが通過するのに要する時間以上に継続していて、流れは解析領域で定常流に近いと考えて、解析は最大流量が流れる定常流としている。流れの初期条件として、流速はすべて零とし、水位は上下流端でその洪水痕跡に、中

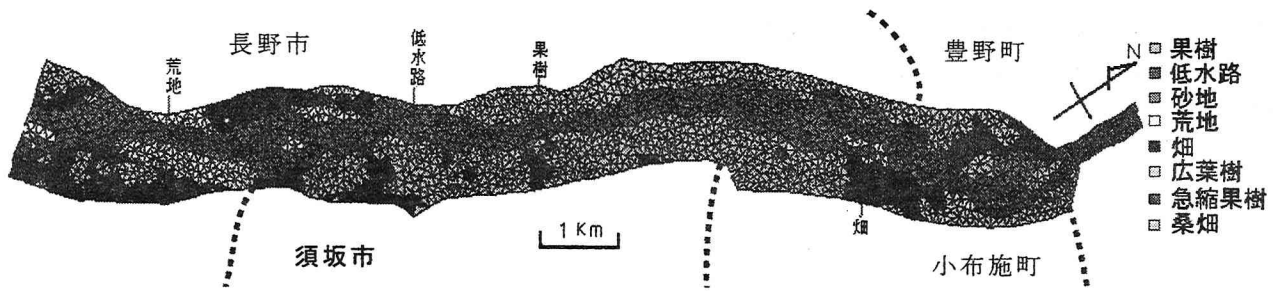


図-3 昭和58年当時の千曲川の地目分布図と解析メッシュ(右が下流方向)

間で直線補間した値としている。

上下流端の境界条件として、水位は実際の洪水痕跡線に拘束し、流速は零から洪水時の最大流量と水位をもとに境界付近の植生を考慮した流速にsin曲線により短時間で立ち上げ、その後一定値に固定している。また、兩岸の流速はすべて零に拘束する。

(3)河床変動の解析条件

河床変動解析における流速と水深の初期値は、流れ解析によって得られた流量ピーク時のデータを使用している。その後は、河床変動による水深の変化に応じて、各節点での流量が維持されるように流速を変化させている。これは、本来なら時間ステップごとに河床変動を取り入れた流れの計算を繰り返すべきであるが、計算時間の都合と、河床変動量が水深に比べて小さいことから、上のような簡便法を用いている。

上流端の流砂量は、それを評価する上流のデータがないため、上下流端とも拘束せず、それぞれの境界において流れに基づく掃流力を用いて境界内部で計算された平衡流砂量としている。

解析においては、平水時に形成され、洪水増水期

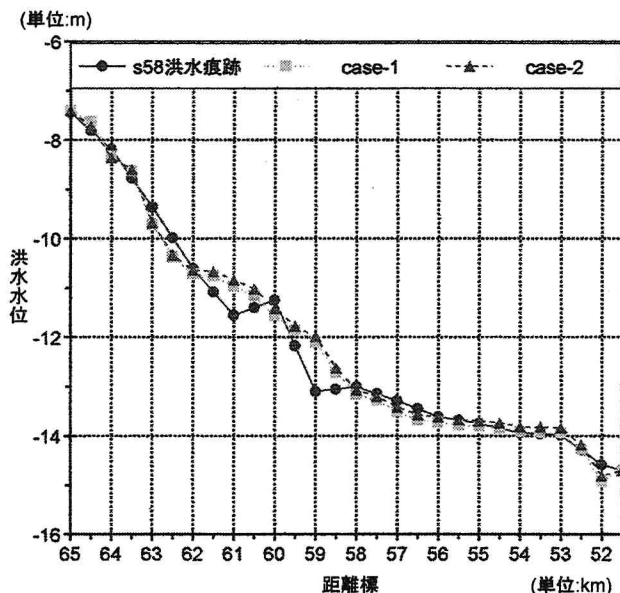
にさらに発達すると考えられる粗粒化されたピーク前の河床材料粒径分布が必要となってくるが、利用できる実測値がない。そこで本研究では、最初に 20 区分全ての粒径の割合を 5%(平均粒径 2.831cm)として、そこに7400m³/sのピーク流量を 24 時間流すことによって仮想的な粒径分布を作り出し、その状態から洪水ピーク時の解析をスタートさせるという手法を取った。

5. 解析結果と考察

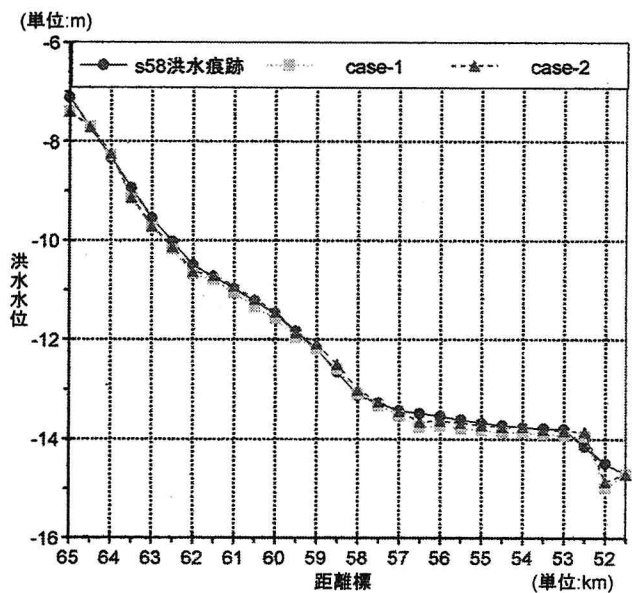
(1)流れの解析結果と考察

昭和58年9月に発生した千曲川既往最大洪水(最大流量7400m³/s. 距離標(県境から)51.5km地点の最高水位-14.7m(海拔350mを基準))の解析結果を図-4, 5に示す。この解析では、表-1に示す地目別粗度係数を用いているが、case-1は参考文献8)の標準値を参考にして、解析水位が最も良く洪水痕跡線に一致するように試行錯誤して決めている。case-2の地目別粗度係数も、case-1と参考文献9)の標準値を参考にして、case-1と同様に決めている。

C_u の値の標準値は0.4~0.8であるが、この解析では



(1) 左岸



(2) 右岸

図-4 洪水痕跡線と解析水位(海拔350mを基準)

表-1 地目別粗度係数

地目	面積割合	case-1	case-2
果樹	0.331	0.045	*
低水路	0.220	0.030	0.030
砂地	0.141	0.020	0.020
荒地	0.061	0.040	0.040
畑	0.192	0.025	0.025
広葉樹	0.046	0.060	*
急縮果樹	0.002	0.070	*
桑畑	0.007	0.050	0.050

ここに、*で示す果樹(急縮部果樹を含む)や広葉樹の地目の粗度係数は、果樹、広葉樹ともに $C_b:1.2$, $C_u:0.2$, 果樹の地目で $n_b=0.010$, 広葉樹の地目で $n_b=0.015$ として、図-2,3の数値を用いて水位に応じて式(7),(8)で計算する。

0.2と小さく設定している。これは、解析領域の殆どを占める果樹は、日光が満遍なく葉に当たるように毎年伸びる枝と同量の枝が剪定され樹形が保持され、自然状態の樹木に比べ樹冠部が透けていることと、樹冠部の投影面積も流れにより縮小しているためである。

図-4の洪水痕跡線と解析水位図では、右岸では洪水痕跡線にほとんど等しい値が得られたが、左岸の距離標61.5～59.0km間で差が現れている。これは、この位置の支川の影響やこの直下流に昭和初期に架設された橋脚間隔の狭い橋があり、橋脚に付いたごみの影響(橋脚の抵抗も粗度に換算して考慮している)等が考えられる。また、case-1とcase-2を比較するとcase-2の方が再現性が高いことがわかる。これは細かな粗度係数の設定が可能になったためである。

図-5に解析結果の流速分布図を示す。流れは、上流部でcase-2の方が、下流部では若干case-1の方が速い。これらの相違は粗度係数の違いによるものであるが、大洪水であったため多くの樹木は樹冠部まで冠水状態にあったためか、全体の流速分布としてはどちらもほとんど等しい結果となっている。

(2)河床変動解析結果と考察

河床変動結果を図-6～9に示す。解析は、case-2の流速を用いて、樹木のある地目の掃流力には底面せん断応力のみが寄与するものとして行った。図-6は4.(3)で述べた方法で求めた河床材料の交換層の粒径

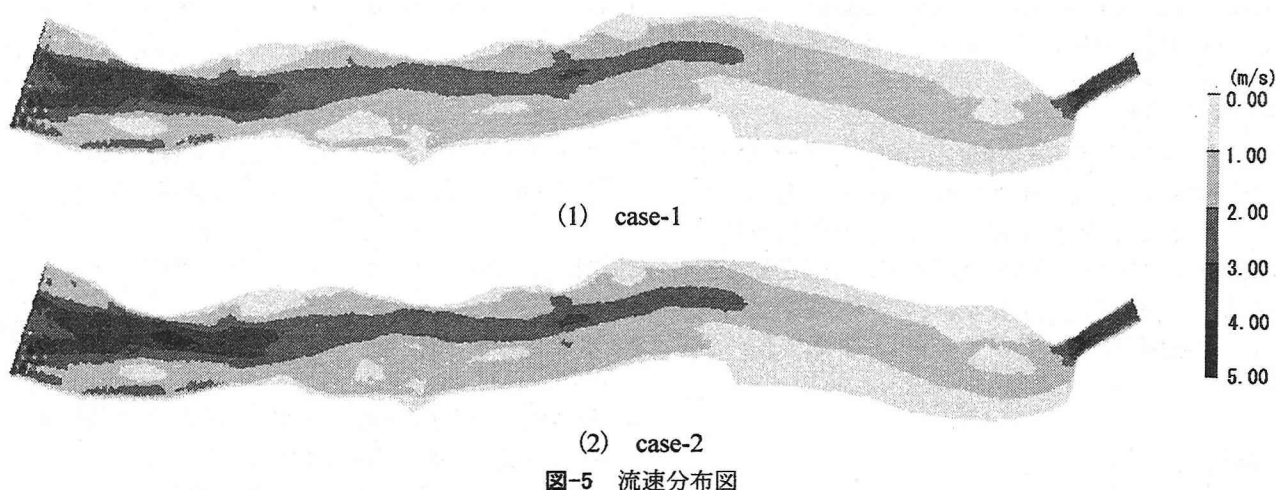


図-5 流速分布図

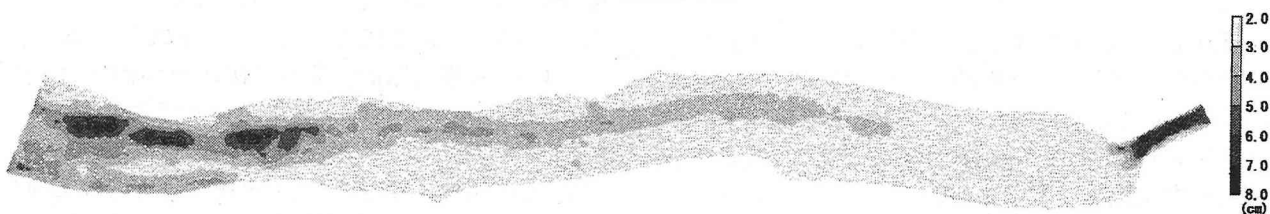


図-6 河床材料の平均粒径の分布の初期値

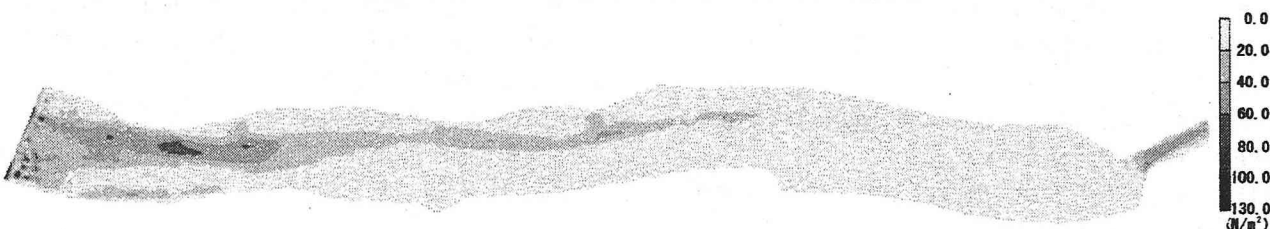


図-7 6時間経過後の掃流力の分布

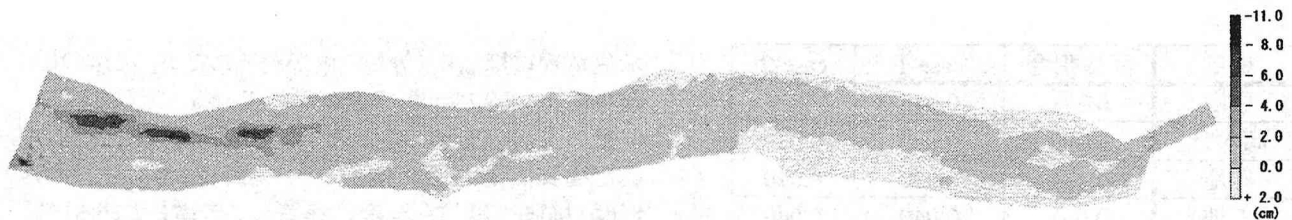


図-8 6時間経過後の初期河床からの河床変動量の分布

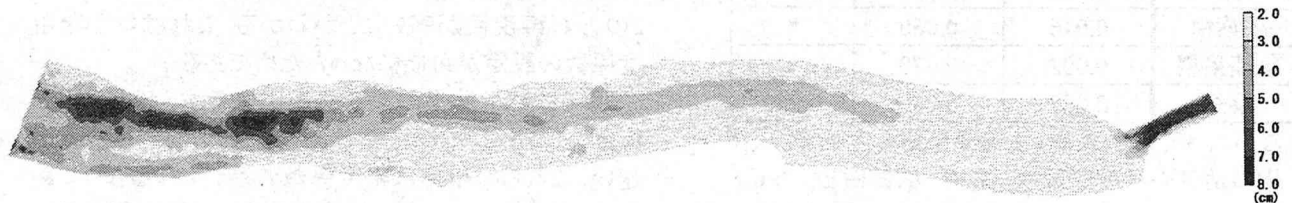


図-9 6時間経過後の河床材料平均粒径の分布

分布の初期値を平均粒径の形で表したものである。さらに、図-7, 8, 9は、河床材料は上の粒度分布で、河床高は元的地盤に戻し、洪水ピーク流量が6時間続くものとして、それぞれ6時間経過後の掃流力、河床変動量、河床材料平均粒径の分布を示したものである。

図-6では、掃流力の大きい上流部の低水路や下流狭窄部で河床材料の粗粒化のために、4.(3)で述べた平均粒径2.831cmより平均粒径が大きくなっているのに対して、大きく果樹園の広がっている下流の高水敷では掃流力が小さいために、細粒化により平均粒径が小さくなっている。

図-7の掃流力は、せん断応力が主として流速の二乗に比例するために、流速分布に似通った分布になっている。また、図-8, 9においては、河床材料の初期値に粗粒化層が形成された影響で、河床変動や粗粒化はそれほど進行していない。しかし、これは河床材料の初期値が、中小の洪水等により変化すると、大きく変化する可能性がある。

6. 結論

本研究では、植生を考慮した千曲川における洪水流と、この流れによる河床変動の数値解析を行い、実在の河川に対する数値解析の予測精度と植生の洪水流や河床変動に及ぼす影響について検討したもので、得られた結論を以下に述べる。

- ・解析の難しい広範囲に植生の存在する急縮部を含む実河川の洪水流を解析できた。
- ・千曲川の58年当時の地目別粗度係数を決定することができた。
- ・水深によって粗度係数を変化させて、昭和58年洪水を高精度で再現することができた。
- ・粗粒化現象を含む河床変動の大まかな予測が可能な解析方法を作成できた。

今後は、本研究の解析方法により、植生分布の変

化している現在の千曲川の洪水に対する安全性を評価することと、河床変動解析では、河床変動の実測値のある河道を解析対象としたり、水理模型実験結果との比較などを通して、解析精度を確かめる必要がある。また、洪水の発生から収束までという一連の流れや河床変動の再現を目指すことも必要である。

最後に、貴重なデータを提供して下さいました、建設省千曲川工事事務所の関係者に感謝を表する次第です。

参考文献

- 1) 富所五郎:有限要素法による水理解析, 1991年度(第27回)水工学に関する夏期研修会講義集, pp.A-1-1~A-1-17, 1991.
- 2) 例えば 椿東一郎:水理学Ⅱ, 森北出版, pp.188, 1979.
- 3) 水理公式集:河川編, 土木学会編, pp.201 ~ 203, 1971.
- 4) 西本直史, 清水康行, 青木敬三:流線の曲率を考慮した蛇行水路の河床変動計算, 土木学会論文集, No.456, II-21, pp.11 ~ 20, 1992.
- 5) リバーフロント整備センター:千曲川平成11年度洪水の河岸被災原因と復旧手法評価検討委員会第1回検討委員会資料, 平成11年度千曲川多自然型川づくり検討業務報告書, pp.3 ~ 22, 2000.
- 6) 建設省河川局治水課:河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン, 山海堂, pp.70~72, 1994.
- 7) 松本良一, 富所五郎:FEM流れ解析におけるAMR (Adaptive Mesh Refinement)の適用について, 水工論文集, pp.1071~1076, 1996.
- 8) Ven Te Chow:開水路の水理学Ⅰ, 石原藤治郎訳, 丸善出版, pp.92~111, 1954.
- 4) 6)に同じ, pp.29~33, 1994.

(2000. 10. 2受付)