

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560618

研究課題名(和文) 準三次元計算と航空写真解析の併用による河道計画手法の高度化に関する研究

研究課題名(英文) Development of a practical method for river channel design using a quasi-3D flow simulation and stereo image analysis of aerial photographs

研究代表者

石川 忠晴 (Ishikawa, Tadaharu)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：50159696

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)： 沖積低地の複断面河道改修では合流点の設計が一つのポイントとなる。本研究では、洪水航空写真のステレオ解析と、樹林抵抗を考慮した三角形非構造格子準三次元浅水流モデルを用いて実用的合流点設計手法を提案した。

本手法を利根川・渡良瀬川合流部の1981年洪水流に適用したところ、ステレオ解析から詳細な水面流況が示され、準三次元数値計算はそれらをうまく再現するとともに、合流河道設計に必要な三次元流況に関する情報を提供することができた。

研究成果の概要(英文)： The design of the confluence is one of the most difficult aspects of the implementation of a compound channel which is widely adopted in rivers on alluvial plains. In this project, we proposed a practical method of flow analysis for the designing of confluence channels by combining the technique of stereo image analysis of the aerial photographs of flood flow and the quasi-3D shallow water simulation model with unstructured triangular mesh system. The drag force of the tree communities was also taken into consideration based on the results of a field survey.

The method was applied to the flood flow occurred in the confluence of the Tone River and Watarase River. The stereo image analysis showed the detailed surface flow characteristics. The quasi-3D flow simulation reproduced the surface flow successfully, and revealed the three dimensional flow characteristics under the water surface which are useful for the design of river confluence.

研究分野：水工学

キーワード：河道計画 準三次元計算 洪水航空写真解析 分合流 高水敷粗度

1. 研究開始当初の背景

河道改修において、その結節点である合流部の設計の重要性は以前から認識されており、主に水理模型実験により検討がなされていた。しかし費用がかかるとともに、河道植生の粗度相似則の問題などが残されていた。一方、開水路流の数値計算技術の発達に伴い合流部の流れのシミュレーションも行われるようになってきたが、その対象は単純な直線水路における基礎実験結果の再現に限られていた。また我が国の主要河川形状は複断面となっているが、多くの基礎実験は単断面水路において行われていた。複断面河道では、堤防法線と低水路河岸線という2種類の線形が流れを規定するために、流入条件によって洪水時の流線が低水路河岸を乗り越える等、複雑な流況を呈する。そこで実際の河道条件に対応した数値シミュレーションモデルを開発し実務に適した河道設計手法の確立が望まれていた。

2. 研究の目的

合流部の流れは流軸が湾曲しながら合体するために二次流が顕著となる可能性がある。また高水敷の樹林帯付近では水深方向の流速偏差が大きくなる。このため流れの三次元性を評価できる数値モデルが必要となるが、計算速度やメモリの制約のために、単純な三次元計算を行うことは困難である。そこで本研究では準三次元浅水流方程式により実河道合流部の流れの再現性を検討することにした。しかし洪水時には流れの直接計測が困難なため流速データが得られていないので、従来調査では水位データによる間接的検証のみが行われていた。そこで本研究では洪水航空写真のステレオ解析によって表面流況を詳細に求め、これを検証データとして用いることにした。また河川合流部では流れの滞留によって樹林帯が発達しやすいことから、現地調査により樹林抵抗を推測し、数値モデルに反映することとした。

3. 研究の方法

(1) 利根川治水の要である渡良瀬川合流部を検討対象とした。河道平面計を写真1に示す。KP(キロポスト)は、利根川については河口からの距離、渡良瀬川については合流点からの距離を示している。赤線で示す3測線の横断面計を図1に示す。図中のHWLは計画高水位、FWLは検討対象洪水の最高水位を示している。



写真1 対象領域の平面形状

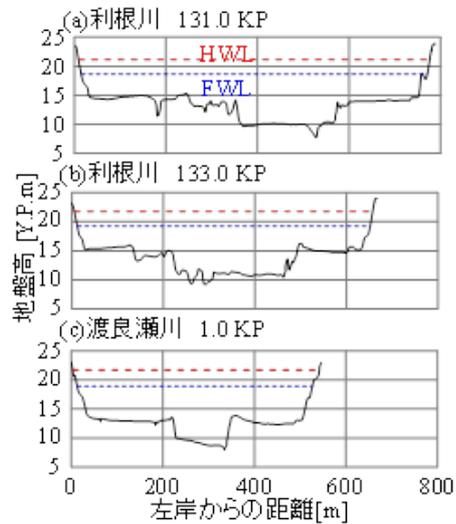


図1 河道断面形状

両河川は典型的な複断面河道であり、高水敷には部分的に樹林帯が発達している。また1981年8月洪水のピーク時にステレオ解析に適した連続航空写真が利根川上流工事事務所によって得られている。写真の撮影諸元を表1に、近傍の栗橋観測所における水位記録と航空写真撮影時間を図2に示す。

表1 航空写真の撮影諸元

撮影日	1981年8月23日
撮影時間帯	16:32:13-16:32:40
撮影高度	1,460 m
縮尺	1:10,000
撮影時間間隔	7秒
重複率	70%

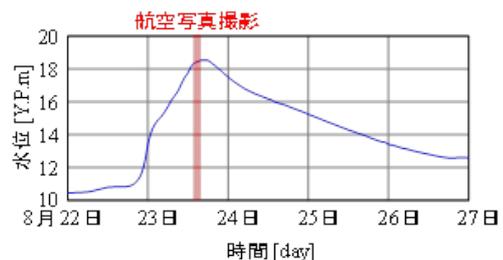


図2 栗橋水位と航空写真撮影時刻

(2) 合流部を含む約4km x 2kmの範囲について、連続する5枚の写真を解析した(写真2)。

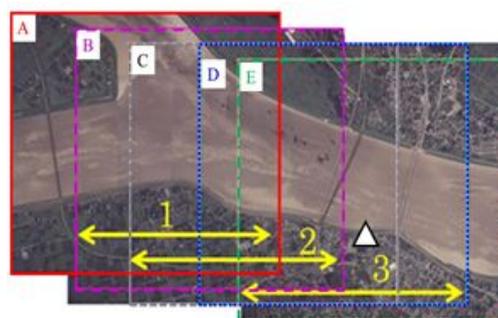


写真2 解析対象とした写真の撮影範囲

新井ら が開発した手法に従い、各写真をデジタル画像としてパソコンに取り込み、連続する写真の重複区間について画像相関法により水面流速の一次解析を行い、その結果を原画像とともにスクリーン上で合成して実体視し、カメロン効果を利用した補正により二次解析データを作成した。

(3) 数値シミュレーションのモデル方程式は、石川ら による準三次元浅水流方程式に準拠して求めた。非圧縮の連続式と静水圧の仮定による運動量式を、表 2 に示す関数と変数の組み合わせにより鉛直方向に Galerkin 積分を行い、5 変数に対応する方程式を導いた。ここに  $h$  は水深、 $(u_0, v_0)$  は  $(x, y)$  方向の鉛直平均流速、 $(u_1, v_1)$  は偏差流速成分で、合成流速  $(u, v)$  は式(1)で表現される。

表 2 Galerkin 積分の関数と変数

基礎方程式	重み関数	対象変数
連続式	1	$h$
x 方向運動量式	1	$u_0$
"	$f(z/h)$	$u_1$
y 方向運動量式	1	$v_0$
"	$f(z/h)$	$v_1$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix} \cdot f\left(\frac{z}{h}\right), f\left(\frac{z}{h}\right) = \left(\frac{z}{h} - \frac{1}{2}\right) \quad (1)$$

Galerkin 積分から得られた方程式を、赤穂ら による三角形非構造格子系を用いた有限堆積法で離散化した。計算格子は堤防法線と低水路河岸線をもとにソフトウェア ANSYS を用いて図 3 のように作成した。

変数  $(u_0, v_0)$ ,  $(u_1, v_1)$ ,  $h$  の各値が三角形セルごとに一つ定義され、セル境界上の値は対応するセルについての平均値と仮定される。時間発展についての方程式は Galerkin 方程式を各セル上で積分し Green-Gauss theorem を適用して求められる。この過程において、境界をまたぐフラックスは Roe 's Approximate Riemann Solver により算定される。

計算区間は利根川 138 ~ 123 KP および渡良瀬川 0 ~ 3.5 KP とした。典型的メッシュサイズは約 13m、格子総点数は 133,669 である。なお航空写真がほぼ洪水ピーク時に撮影されたことから、再現計算においては、この時の水理条件の下で定常流れを想定した。利根川流量および渡良瀬川流量は、それぞれ川俣観測所と古河観測所の計測値を、下流端水位は関宿観測所の記録に基づいて設定した。

(4) 高水敷上の地被状態は 1980 年撮影の平常時航空写真から同定し、石川ら を参考に粗度係数を定めた。樹林の抗力については、樹冠形状と葉密度の現地調査 に基づき算定式を導き、モデル方程式に組み込んだ。写真 2 に現地調査において葉の密度を計測した際の樹木部位の分割例を で示している。

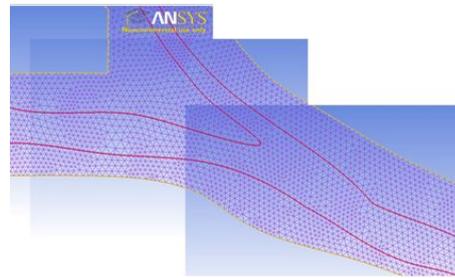


図 3 三角形非構造格子



写真 3 樹木部位の分割の例 ( )

#### 4. 研究成果

##### (1) 航空写真解析の結果

図 4 に 3 セットの画像 (図-2 の A-B, B-C, C-D) についてのステレオ解析の結果を示す。色は画像の組み合わせの違いを識別できるように 3 色にしている。重複部分の解析結果には若干の差異が見られるが、概ね一致していることがわかる。

図 5 は、図 4 に赤線で示す測線(a)と(b)における主流速の横断分布を示している。分布系の色は図 4 のものと対応している。測線(b)の左岸高水敷で解析結果がやや異なるが、この付近には樹林帯があるため流れの変動性が高い。一方、航空写真の撮影時間間隔は 7 秒であるから、この間に流速が変化している可能性がある。

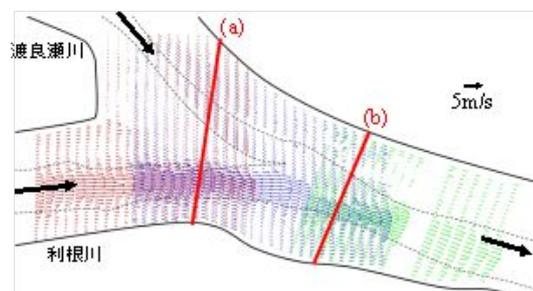


図 4 ステレオ解析により得られた水面流速ベクトル

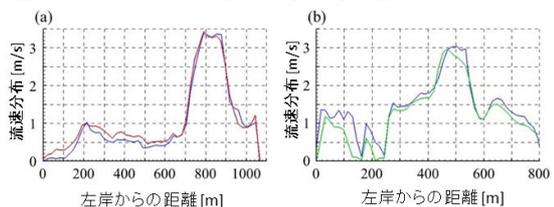


図 5 異なる画像から得られた横断流速分布の比較

## (2) 樹木の抗力係数

幹および枝の断面積とその先にある葉の枚数の間には、図6(a)に示すように高い相関がみられた。そこで枝径の計測結果に基づき、葉の相対密度の鉛直方向変化を推定した結果が図6(b)である。

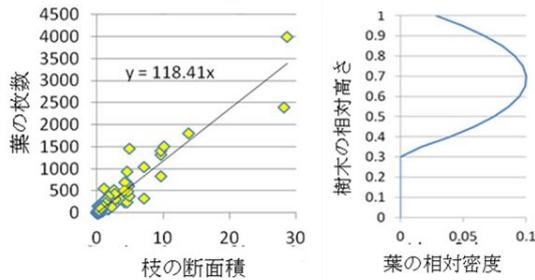


図6 樹木の現地調査の結果

左：枝の断面積と葉の枚数の相関

右：葉の密度の分布

続いて、平均的サイズの葉と同じ面積の平行平板上に発達する境界層による抗力をもとに1枚の葉の効力を求め、葉の空間密度を乗じて地盤上の高さごとの抗力係数を求めた。その結果は式(2)で近似される。ここには地盤上の高さを表している。

$$C_D = \begin{cases} 0.02 & \xi < 0.98 \text{ m} \\ a\xi^2 + b\xi + c & 0.98 \text{ m} \leq \xi \leq 4.0 \text{ m} \\ 0.0 & \xi > 4.0 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

$$(a = -0.011, b = 0.064, c = -0.058)$$

## (3) 計算結果と航空写真解析結果の比較

計算された水面流速を図6に示す。図4と比較すると、以下に述べるような共通の特長が見られる。(a) 利根川の低水路の流れは合流点の上流で左岸高水敷に乗り上げる。(b) その下流では低水路から高水敷に乗り上げた流れが右岸高水敷上に広がっていく。(c) 利根川と渡良瀬川の間の三角形上の高水敷から渡良瀬川低水路に斜めに流入する流れが見られる。(d) 渡良瀬川の主流は左岸高水敷側に偏っているが、(c)の流れにより低水路の流れは加速される。(d) 合流点下流では低水路左岸付近の樹林帯によって高水敷の流速が減速する。

以上の類似性はあるものの、流速絶対値の間には乖離も見られる。原因としては、公表されている流量値の誤差による全体的な流速のずれ、粗度係数の仮定による局所的誤差、準三次元モデルが有する問題などがある。例えば、準三次元モデルでは流速偏差関数を仮定するが、式(4)で仮定した線形の流速偏差関数を放物線のような曲線分布と比較すると、同じ分散応力を表すために水面流速を大きくとることになるので、図6に示す水面流速の計算値は計測値に近づく可能性がある。

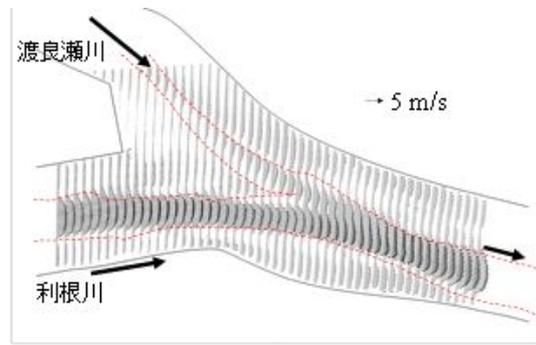


図6 数値計算から得られた水面ベクトル

## (3) 水面と底面の流線の相違

数値計算により得られた表面流速ベクトルと底面流速ベクトルから式(3)を数値積分して流線図を描いた。その結果を図7に示す。

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v}{u} \quad (3)$$

ここに $(x, y)$ は水平面内の座標、 $(u, v)$ は流速ベクトルの $(x, y)$ 成分である。

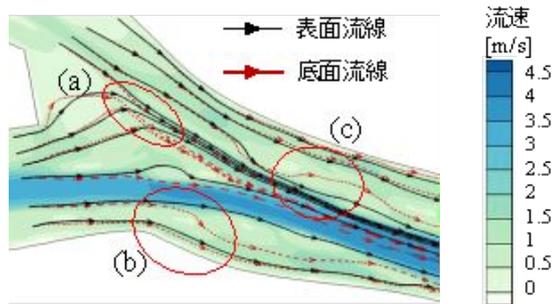


図7 水面と底面の流線の比較

水面と底面の流線は概ね一致しているが、赤線で囲った領域ではかなり異なっている。(a) 高水敷からの表層の流れは渡良瀬川低水路の左岸沿いを流れるが、底面上の流れは右岸に沿っており、螺旋的な二次流が生じていると考えられる。(b) 低水路の底層流が急角度で右岸高水敷に乗り上げ、図4および図6に見られる右岸堤防沿いの高速流の原因となっている。(c) 左岸高水敷の肩において表層流が直進するのに対し、底層流は高水敷に広がっている。

このような偏差流の発達、堤防付近および低水路河岸付近で上昇流・下降流を生じさせるので、河床洗掘や土砂堆積を引き起こす可能性がある。また低水路河岸に近い高水敷への堆積は樹林帯の発達を促す恐れがある。

そこで図7の(c)の領域の流線をやや詳細に図8に示す。同図には樹林帯の分布をクリーム色で示している。表層流線(黒実線)と底層流線(赤点線)は同じ位置から出発している。低水路寄りの2本の流線が表層と底層で大きく異なっていることがわかる。すなわち表層流は樹冠の抵抗によって低水路沿いに集中するが、底層流に対しての抵抗は小さいために樹林帯に侵入する。

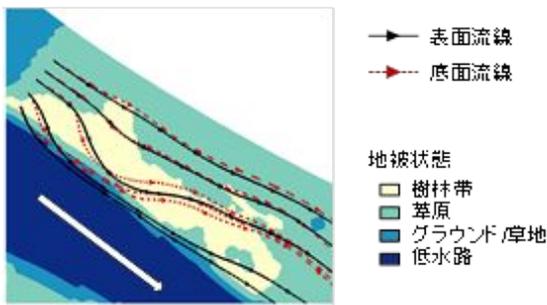


図8 樹林帯付近の流線の様子

(4) 流量比率が異なる場合の流線の変化

複断面合流部の設計において難しいのは、流線が常に低水路河岸線に沿うようにはできないという点であり、両河川の流量比によって流線がどのように変化するかを把握することが重要である。そこで合流後の流量を一定(1981 洪水ピーク流量 = 7,896m<sup>3</sup>/sec)として、合流量比率を変化させた場合について計算した。その結果得られた水面流線(黒)および底面流線(赤)と水路河岸線との関係を図9に比較する。 $r$ は[渡良瀬川流量 / 利根川流量]であり、 $r=0.28$ は1981年洪水における値である。なお計算区間の上流の渡良瀬川には渡良瀬遊水地があるので、渡良瀬川からの流出がゼロの場合には、実際には利根川から渡良瀬川に逆流が生じるので、利根川上流からの流線が渡良瀬川に侵入するはずだが、ここでは計算上流端流量がゼロの場合を  $r=0$  としているので死水域になっている。

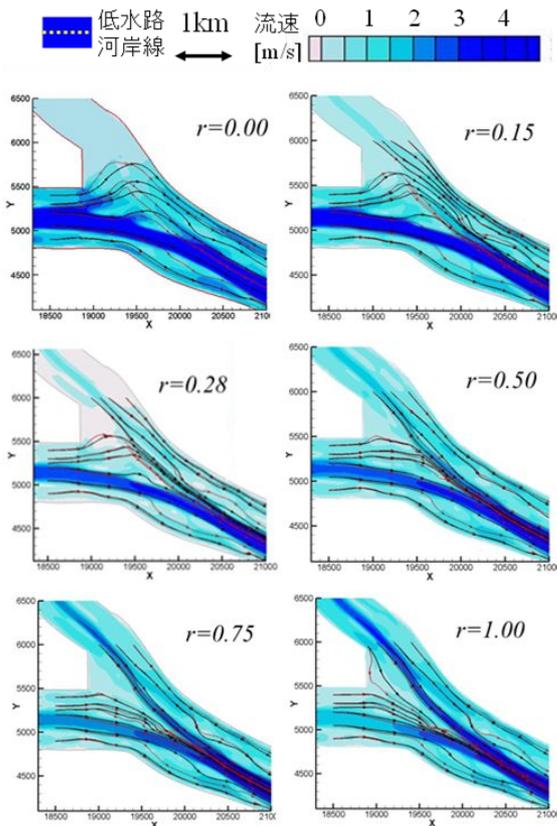


図9 流量比率が異なる場合の流線の変化

$r$  が小さい場合、利根川からの流水が左岸低水路河岸を横切って両河川間の高水敷に広がることから、この領域の土砂堆積や河岸の安定に問題を生じる可能性がある。一方、 $r$  が大きい場合には利根川低水路の底面流線が合流部付近の右岸高水敷に張りだし、右岸の低水路河岸や堤防に問題が生じる可能性がある。総観的には  $r=0.28$  と  $0.50$  の場合の流線は合流部の底層を除けば低水路河岸線に概ね沿っていると見える。

(5) まとめ

本研究では、実際の河道形状に適合させることが容易な三角形非構造格子を用いた5方程式準三次元モデルを作成し、これを河道設計の実務に適用することを検討した。ただしモデルの提案にあたっては精度の検証が不可欠である。そこで1981年洪水時に撮影された利根川・渡瀬川合流部の航空写真のステレオ解析から検証データを得た。また流れに対する河道内樹林の影響を現地調査に基づき評価した。その結果、洪水航空写真解析と準三次元数値シミュレーションの組み合わせが、河道の設計と管理の実務に有用であることが示された。

<引用文献>

新井奈々絵, 箕浦靖久, 石川忠晴: 航空写真を用いた河川合流部の流れの解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 69, No. 4, pp. 1\_757-1\_762, 2013.  
 石川忠晴, 吉田圭介, 箕浦靖久: 準3次元モデルによる利根川下流部1998年9月洪水流の再現, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 67, No. 3, pp.155-167, 2011.  
 赤穂良輔, 石川忠晴: 平成23年東北地方太平洋沖地震津波における利根川下流の津波遡上再現計算, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 68, No. 4, 1\_1543-1\_1548, 2012.  
 Roe, P.L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes, *J. Comput. Phys.*, **43**, pp.357-372, 1981.  
 新井奈々絵: 河川合流部洪水における準三次元モデルの構築, 修士論文, 東京工業大学, 2014.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

石川 忠晴, 赤穂 良輔, 新井 奈々絵, 田潤, 複断面河道合流部における洪水流の現地研究 - 利根川・渡良瀬川合流部を例として -, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol. 72, 2016, 1\_331-1\_336

〔学会発表〕(計2件)

Tadaharu Ishikawa, Flood flow at the confluence of compound river channels,

8<sup>th</sup> Int. Conf. on River Basin Management、  
2015年6月18日、A Coruna (Spain)  
新井奈々絵、断面河道合流部の流れの現  
地研究、土木学会年次学術講演会、2015  
年9月16日、岡山大学(岡山県、岡山市)

〔図書〕(計1件)

T. Ishikawa 他 (C.A. Brebbia 編)、WIT  
Press、River Basin Management 、2015、  
283 (37-48)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石川 忠晴 (ISHIKAWA Tadaharu)  
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・  
教授  
研究者番号：50159696

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

赤穂良輔 (AKOH Ryosuke)  
岡山大学大学院環境生命科学研究科・助教  
研究者番号：90599333

中村恭志 (NAKAMURA Takashi)  
東京工業大学大学院総合理工学研究科・  
准教授  
研究者番号：40323315