

非静水圧準三次元解析 (Q3D-FEBS) を用いた巨石の点在する

山地河川の洪水水面形

ANALYSIS OF FLOOD FLOWS IN MOUNTAIN STREAMS WITH BOULDERS BY USING NON-HYDROSTATIC QUASI-THREE DIMENSIONAL MODEL (Q3D-FEBS)

- 大野 純暉, 中央大学, 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, E-mail: a12.fd7b@g.chuo-u.ac.jp
- 福岡 捷二, 中央大学研究開発機構, 同上, E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp
- 竹村 吉晴, 中央大学研究開発機構, 同上, E-mail: takemura@tamacc.chuo-u.ac.jp
- 児子 真也, 国土交通省 中国地方整備局 太田川河川事務所, E-mail: nigo-s87bb@milit.go.jp
- Jyunki Ohno, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan
- Shoji Fukuoka, RDI, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan
- Yoshiharu Takemura, RDI, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan
- Shinya Nigo, Otagawa River Office, CRDB, MLIT, Japan

Flood water surfaces and flow structures in mountain streams are quite complicated due to sudden topographical changes and the presence of large boulders on the river bed. This paper proposes a new analytical technique for estimating flood water surfaces in mountain streams with large boulders by combining the drone geomorphic survey and non-hydrostatic quasi three-dimensional model (Q3D-FEBS). Q3D-FEBS can calculate the three-dimensional velocity and pressure distributions with considering the complicated bottom shape on the framework of the depth-integral model. We apply Q3D-FEBS to the 2017 flood of the Takiyama River and investigate appropriate computational grid size to calculate the flood water surfaces of the mountain streams with large boulders by using the geomorphic survey data of drone.

1. 序論

Fig. 1 に示すように、滝山川は太田川の主要支川の一つであり、流域内で唯一洪水調節容量を持つダム（温井ダム）が設置されている。Fig. 2 は、滝山川の温井ダム下流河道の写真である。Fig. 2 に示すように、山地河川では短い縦断間隔で地形が大きく変化し、河床には数 m の巨石が点在する。このような山地河川の洪水水面形を含む洪水時の流れ構造の解明は、下流河川への洪水流の伝わり方、ダム下流山地河川の流下能力の定量的評価、ダム貯水池の調節容量の有効活用のためのダム操作方法・山地河川の河道計画を考える上で不可欠である。また、山地河川における生物の良好な生息・生育環境を考える上でも重要な研究課題である。特に、洪水時の水面形は、河道で起こっているほぼ全ての水理現象を時間的・空間的に反映しており、洪水時の水面形の正しい把握と解析は、今後の治水計画の新しい展開を促すものである^{(1),(2),(3)}。

近年では、安価な水位計の開発が進み、河床や水面形の縦横断変化が緩やかな河川中下流域では、多点の洪水観測水位時系列データを与条件として洪水流解析を行うことで、洪水時の水理現象を適切に解析できるようになってきている^{(2),(3)}。本論文では、このような解析法を多点観測水位洪水流解析 (flood flow analysis with Multiple Observed Water Level(MOWL)) と呼ぶ。著者らは、多点観測水位洪水流解析を滝山川の温井ダム下流山地河川に適用してきたが、水面形をあわせても粗度係数の値を $0.04 \sim 0.085 \text{ (m}^{-1/3} \cdot \text{s)}$ の範囲で時間的に変化させる必要があり、実際の水理現象を適切に表せない課題があった⁽⁴⁾。これは、Fig. 2 に示したような数百 m の定期横断測量では捉えられない短い縦断間隔での地形変化や河床に点在する巨石による流れ場の変化や抵抗が粗度係数の値にしわ寄せされたためである。物理性のある粗度係数の値を用いて、巨石の点在する山地河川の洪水水面形を含む流れ構造を適切に解析するためには、山地河川の詳細な地形や巨石の観測を行い、これらを適切に考慮した洪水流解析を行う必要がある。

近年では、ドローンを用いた測量技術等が進展し、これまで困

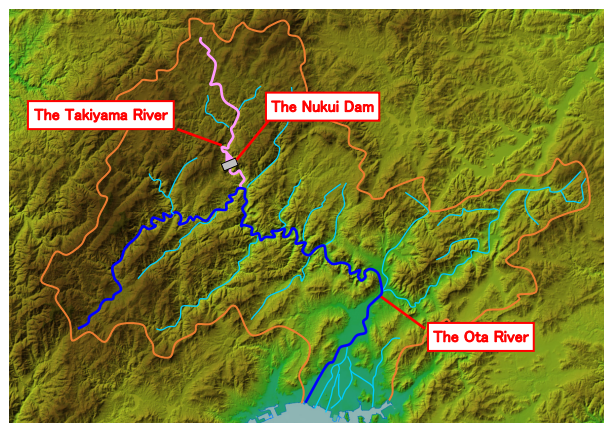


Fig. 1 The Ota River system and the Takiyama River.



Fig. 2 Photograph of the Takiyama River (4.5km).

難であった山地河川における巨石を含めた詳細な地形測量が可能となっている。一方、河川の洪水流解析によく用いられる平面二次元解析や従来の準三次元解析法では、山地河川の急激な地形変化や河床に点在する巨石等から生じる流れの三次元性や非静水圧

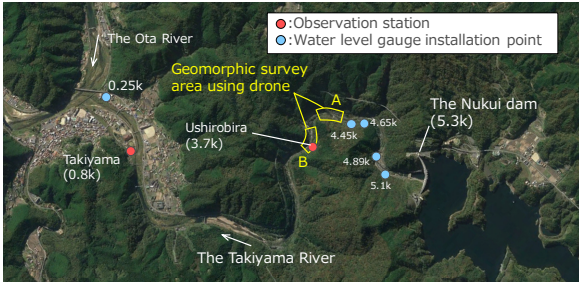


Fig. 3 Water-level observation points and geomorphic survey area using drone.

分布を適切に考慮できず、本質的な解析法となり得ない。最近、竹村らはバップルピアの配置された跳水及びその減勢区間の流れを水深積分モデルの枠組みで計算するために、新しい非静水圧準三次元解析法 (Q3D-FEBS) を開発している⁽⁶⁾。Q3D-FEBS は、水面と底面上の運動方程式を導入し、水深平均流とともに水面・底面流速、圧力場を計算することで、跳水の水面形や流速・圧力分布、バップルピアから受ける流体力の解析が可能である。Q3D-FEBS は、境界面形状の変化が大きい三次元流れ場の解析に適しており、巨石の点在する山地河川の洪水流解析に応用可能と考えられる。

Fig. 3 に示す滝山川の温井ダム下流山地河川では、平成 29 年 7 月洪水時に Fig. 3 の赤丸で示す後平観測所(3.7km)、滝山観測所(0.8km)に加え、青丸の地点で圧力式水位計による水位観測が行われた。さらに、平成 30 年 7 月には、Fig. 3 の黄色の実線で囲まれた範囲でドローンによる詳細地形測量が実施された。詳細地形測量区間では密な水位観測が行われていないため、本研究では、滝山川の 5.1km~0.8km 区間を対象に、平成 29 年 7 月洪水時の多点観測水位時系列データを用いた洪水流解析を行い、その結果を参考値として、Fig. 3 の詳細地形測量区間 A を対象に、どの程度の計算格子幅を用いればドローンによる詳細地形測量と Q3D-FEBS を組み合わせた洪水流解析によって山地河川の洪水水面形を実用上十分な精度で解析可能か検討する。

2. Q3D-FEBS の概要

Q3D-FEBS は、水深積分の連続式・運動方程式に加え、水面・底面上の運動方程式を解くことで、水深積分モデルの枠組みにおいて複雑な境界面形状を適切に考慮し、三次元流速分布と圧力分布を計算できる特徴がある。具体的には、Fig. 4 に示すように水平方向流速を式(1)の三次多項式で仮定する。

$$u_i = \Delta u_i (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + \delta u_i (-4\eta^3 + 3\eta^2) + U_i \quad (1)$$

ここで、 $i, j=1, 2$ ($x_1=x, x_2=y$)、 $\eta = (z_s - z)/h$ 、 $\Delta u_i = u_{si} - U_i$ 、 $\delta u_i = u_{bi} - u_{bi}$ 、 u_i : x_i 方向の流速、 U_i : x_i 方向の水深平均流速、 u_{si} : x_i 方向の水面流速、 u_{bi} : x_i 方向の底面流速である。式(1)の未知量である水深 h 、水平方向の水深平均流速 U_i 、水面流速 u_{si} 、底面流速 u_{bi} を式(2)~式(6)の方程式群より求める。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_i h}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_j U_i h}{\partial x_j} = & -gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \bar{p}'}{\partial x_i} - \frac{p'_b}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \\ & - \frac{\partial h u'_i u'_j}{\partial x_j} + \frac{\partial h \tau_{ij}}{\partial x_j} - \hat{S} \frac{\hat{\tau}_{bi}}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

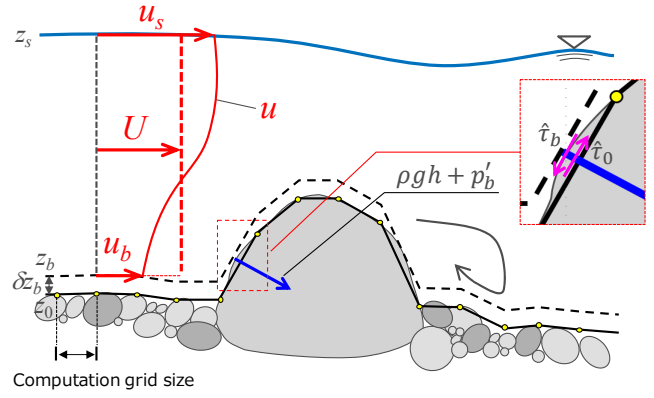


Fig. 4 Method estimating the flow resistance of large boulders in Q3D-FEBS.

$$\bar{\tau}_{ij} = \rho \bar{v}_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} \Big|_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + \frac{\hat{S}}{\rho} \nu_{ts} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \Big|_s \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{bi}}{\partial t} + u_{bj} \frac{\partial u_{bi}}{\partial x_j} = & -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'_b}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} \Big|_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \\ & + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \Big|_b + \frac{1}{\rho} \frac{\hat{S}}{\delta z_b} (\hat{\tau}_{bi} - \hat{\tau}_{0i}) \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 $z_s (= h + z_b)$: 水位、 z_b : 底面高、 g : 重力加速度、 ρ : 水の密度、 p' : 非静水圧、 $\hat{\tau}_b$: 底面せん断応力、 $\hat{\tau}_0$: 河床面のせん断応力、 τ : レイノルズ応力、 ν : 渦動粘性係数、 $\delta z_b (= z_b - z_0)$: 底面 z_b と河床面 z_0 の距離、 $c_{zb} = 0.03$ 、 $\hat{S} = (1 + (\partial z_b / \partial x_i)^2)^{0.5}$ 、 $\hat{S} = (1 + (\partial z_b / \partial x_i)^2)^{0.5}$ である。また、“ $\bar{\cdot}$ ”、“ $\Big|_b$ ” は水面及び底面での値、オーバーバー “ $\hat{\cdot}$ ” は水深平均の値をそれぞれ表す。底面せん断応力 $\hat{\tau}_b$ 及び河床面のせん断応力 $\hat{\tau}_0$ は次のように評価する。

$$\hat{\tau}_{bi} = \rho \nu_{tb} \frac{\partial u_i}{\partial z} \Big|_b \quad (7)$$

$$\hat{\tau}_{0i} = \rho c_b^2 u_{bi} |u_b| \quad (8)$$

$$c_b = \frac{C_0}{1 - 2C_0/\kappa} \sqrt{1 + c_{zb}}, \quad C_0 = \sqrt{gn^2/h^{1/3}} \quad (9)$$

ここで、 c_b : 摩擦係数、 n : 粗度係数である。式(3)の水深積分の運動方程式では、右辺第二項、第三項で非静水圧が考慮され、右辺第五項で流速鉛直分布による運動量輸送が考慮される点に特徴がある。水深平均の非静水圧及び底面の非静水圧は式(10)、式(11)でそれぞれ評価する。

$$\frac{p'_b}{\rho} = U_i h \frac{\partial W}{\partial x_i} + \frac{\hat{S}}{\rho} c_b^2 w_b |u_b| \quad (10)$$

$$\frac{\bar{p}'}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{p'_b}{\rho} + \frac{U_i h}{12} \frac{\partial \delta w}{\partial x_i} \quad (11)$$

ここで、 W : 水深平均の鉛直方向流速、 $\delta w = w_s - w_b$ 、 w_s : 鉛直方向の水面流速、 w_b : 鉛直方向の底面流速である。水深平均の鉛直方向流速は、

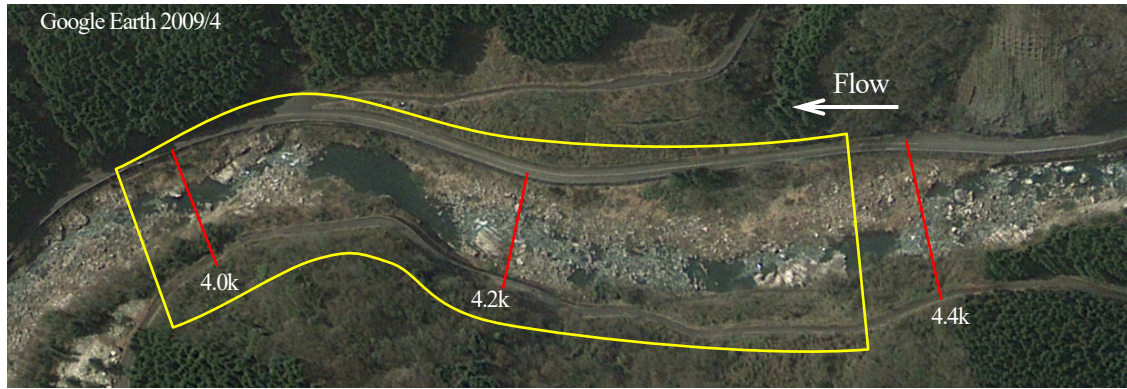


Fig. 5 Aerial photograph of geomorphic survey area A.

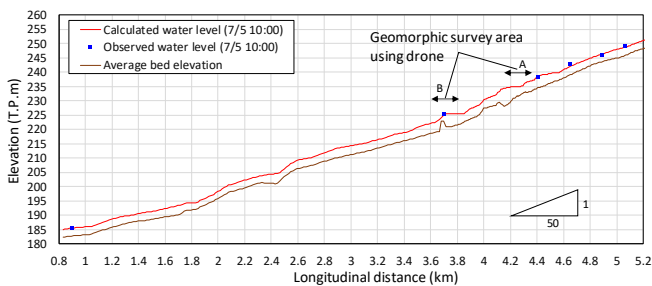


Fig. 6 Calculated peak water surface of 2017 flood of the Takiyama River by using time series data of multiple observed water level.

$$W = \frac{1}{2} \frac{\partial(z_s + z_b)}{\partial t} + \frac{1}{2} U_i \frac{\partial(z_s + z_b)}{\partial x_i} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x_i} h^2 \left(\frac{\delta u_i}{20} + \frac{\Delta u_i}{10} \right) \quad (12)$$

$$w_s = \frac{\partial z_s}{\partial t} + u_{si} \frac{\partial z_s}{\partial x_i}, w_b = \frac{\partial z_b}{\partial t} + u_{bi} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \quad (13)$$

式(5), 式(6)に含まれる水面と底面での非静水圧の鉛直勾配は, 式(14)でそれぞれ評価する.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} \Big|_s = -u_{si} \frac{\partial w_s}{\partial x_i}, \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} \Big|_b = -u_{bi} \frac{\partial w_b}{\partial x_i} \quad (14)$$

竹村ら⁽⁹⁾の Q3D-FEBS は, 跳水によるエネルギー減勢機構を高精度に評価するため, 水深平均の乱れエネルギー及び水面の乱れエネルギーに関する輸送方程式を解くことで, 渦動粘性係数を求めている. 本研究では, 実用性と解析法の簡潔さを優先し, 乱れエネルギーの輸送方程式は解かず, 渦動粘性係数を $1/6 \kappa u^* h$ ($\kappa=0.41$ カルマン定数, u^* : 摩擦速度) で与えた.

Q3D-FEBS では, Fig. 3 に示す巨石から受ける圧力抵抗のうち, 静水圧成分は式(3)の右辺第一項, 非静水圧成分は右辺第三項でそれぞれ考慮される. また, 巨石から受けるせん断力は式(3)の右辺第六項で考慮される. このように Q3D-FEBS は, 非静水圧成分を含め, 巨石から受ける抵抗を基礎方程式系の中で考慮できるが, その精度は計算格子幅に依存する. 次章では, 計算格子幅の異なる複数の計算格子に対し Q3D-FEBS を適用し, どの程度の計算格子幅を用いれば巨石の点在する山地河川の洪水水面形を実用上十分な精度で解析できるか検討する.

3. 解析結果

(1) 対象区間と検討方法

本研究では, Fig. 3 に示した詳細地形測量区間 A を対象とする.

Fig. 5 は, 詳細地形測量区間 A の航空写真とドローンによる測量

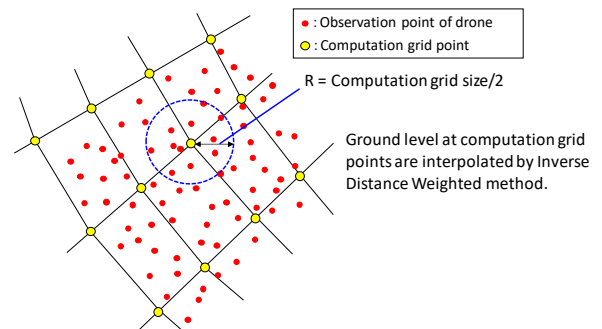


Fig. 7 Ground level interpolation method of computation grids.

区間を重ねたものである. この区間では, 高さ 1~2m 程度, 長さ 2~3m 程度の巨石が点在するため, 計算格子幅を約 0.5m, 約 1m とした 2 つの計算格子を用い検討する. Fig. 6 は, Fig. 3 の滝山川 5.1km~0.8km 区間の観測水位時系列データを用いた洪水解析 (多点観測水位洪水解析) による洪水ピーク時の解析水面形である. この解析結果を参考値として, 上述した計算格子幅の異なる 2 つ計算格子に Q3D-FEBS を適用し, 詳細地形測量区間 A の洪水解析を行い解析結果を比較検討する. 各計算格子の地盤高は, Fig. 7 に示すように計算格子近傍のドローンの地形測量結果を測量点と計算格子点との距離の逆数で重み付け平均し与えた. Fig. 8(a), (b) は, ドローンによる地形測量結果から作成した詳細地形測量区間 A における各計算格子の地盤高コンター図である. Fig. 8(a) の計算格子幅を約 0.5m とした場合に比べ, Fig. 8(a) の計算格子幅を約 1.0m とした場合は河床に点在する巨石の形状が滑らかになっているのが分かる.

(2) 解析結果と考察

Fig. 9 は, 詳細地形測量区間 A における多点観測水位洪水解析の洪水ピーク時の解析水面形, 計算格子幅を約 0.5m, 約 1.0m とした場合の Q3D-FEBS による洪水ピーク時の解析水面形の比較である. Q3D-FEBS の洪水解析では, 上流端に流量 $400 \text{ m}^3/\text{s}$, 下流端 (約 3.9km) で水位 230.2 T.P.m を与え, 粗度係数は $0.026 (\text{s m}^{-1/3})$ としている. また, 流量の低い時間帯での検討を目的に上流端で流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ を与えた場合の Q3D-FEBS の解析水面形も示している. Q3D-FEBS の解析水面形及び平均河床高は, 主流部 (流速が 1.5 m/s 以上) の計算格子点の解析水位及び地盤高を横断面で平均し求めている. また, 詳細地形測量区間 A の流れは, 水深の浅い断面ではフルード数 (断面平均値) が $0.6 \sim 0.8$ に達する高フルード数の流れとなっている.

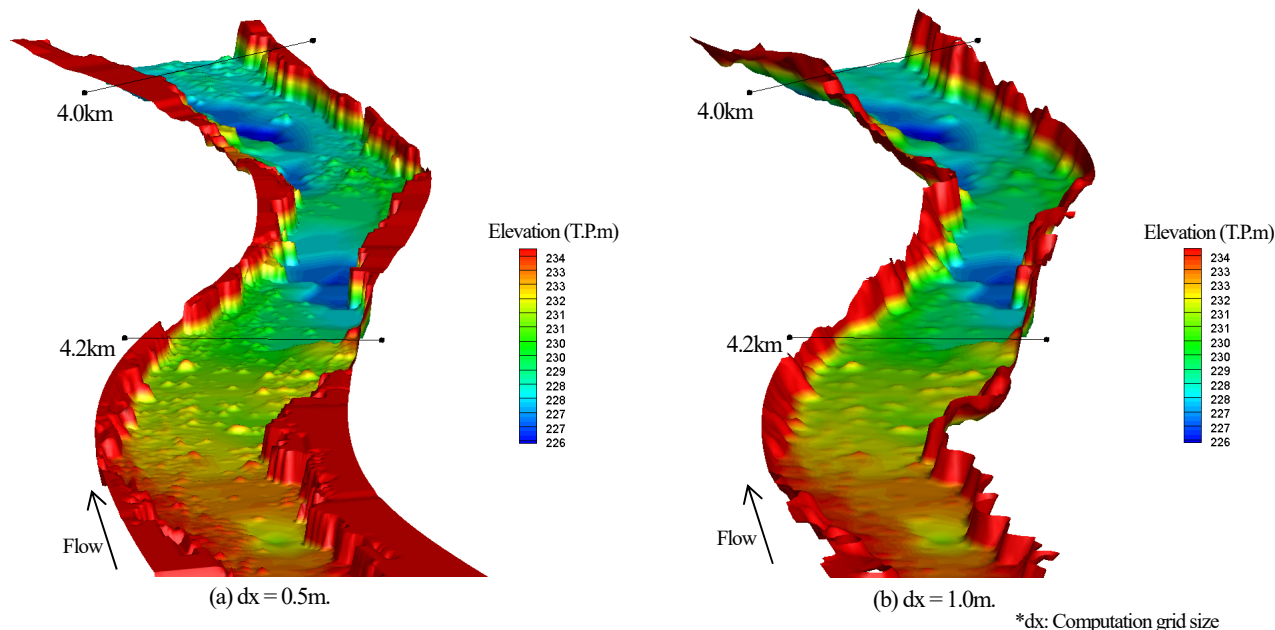


Fig. 8 3D topographical contour map of geomorphic survey area A.

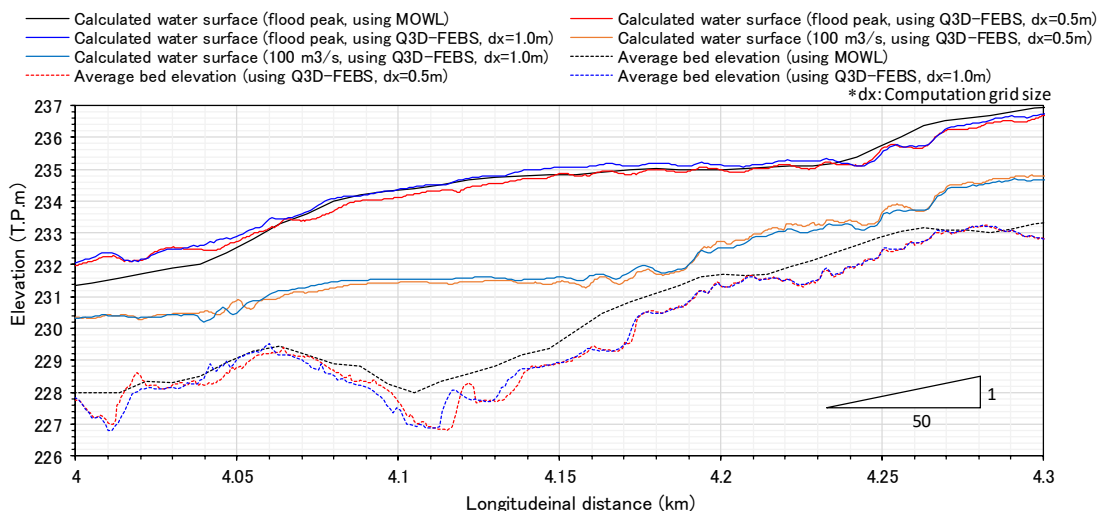


Fig. 9 Calculated water surfaces of geomorphic survey area A by using multiple observed water level data (MOWL) and Q3D-FEBS.

Fig. 9 に示すように、Q3D-FEBS の解析水面形は、赤の実線で示す計算格子幅を約 0.5m とした場合、青の実線で示す計算格子幅を約 1.0m とした場合とともに、黒の実線で示す多点観測水位洪水解析 (MOWL) による洪水ピーク時 ($Q=400\text{m}^3/\text{s}$) の解析水面形を概ね説明できている。計算格子幅を約 0.5m とした場合と計算格子幅を約 1.0m とした場合の洪水ピーク時の解析水面形を比較すると、計算格子幅を約 1.0m とした場合の方が全体的に水位が高く計算されている。両者の差は最大でも 20cm 程度であり、山地河川における洪水時の水位や地盤高等の観測精度からすれば十分に小さい値である。次に流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 時の解析水面形を比較すると、4.05km~4.2km の区間では、洪水ピーク時と同様に計算格子幅を約 1.0m とした場合の方が解析水位が高いのに対し、4.2km~4.25km 区間では計算格子幅を約 0.5m とした場合の方が解析水位が高くなる。この原因について以下で考察する。

Fig. 10(a)~(f)は、4.2km~4.25km 区間において、計算格子幅を約 0.5m とした場合と計算格子幅を約 1.0m とした場合の地盤高、洪水ピーク時と流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 時の平面流況を比較したものである。Fig. 10(c), (d)に示す流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 時の平面流況を Fig. 10(a), (b)の地盤高を見つづ比較すると、黒の点線で囲んだ 4.25km の河道中

中央や 4.2km の左右岸等で顕著に見られるように、巨石背後の水深平均流速が計算格子幅を約 1.0m とした場合に比べ計算格子幅を約 0.5m とした場合の方が減速している。Fig. 10(e), (f)に示す洪水ピーク時の平面流況を比較すると、計算格子幅を約 0.5m とした場合の方が巨石背後の水深平均流速が減速する傾向は変わらないが、その差は流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 時に比べ小さい。Fig. 9 に示したように、4.2km~4.25km 区間の水深は他の区間に比べ浅い。流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 時には巨石と同程度の水深となり、巨石による流れの抵抗が強く現れ、巨石の形状をより正確に考慮した計算格子幅を約 0.5m とした場合の方が解析水位が高くなったと考えられる。洪水ピーク時には、巨石の 2~3 倍程度の水深となり、巨石による流れの抵抗が相対的に小さくなり、Fig. 9 に示したように他の区間と同様に計算格子幅を約 0.5m とした場合の方が計算格子幅を約 1.0m とした場合よりも解析水位が低くなったと考察できる。

以上の結果から、滝山川の温井ダム下流山地河川では、水深が巨石程度の時間帯では、Q3D-FEBS から解析される洪水水面形は計算格子幅の影響を強く受けるものの水深の上昇とともにその影響は小さくなり、山地河川の流下能力を評価する上では、1.0m 程度の計算格子でも十分な精度で洪水水面形を計算可能と考えられ

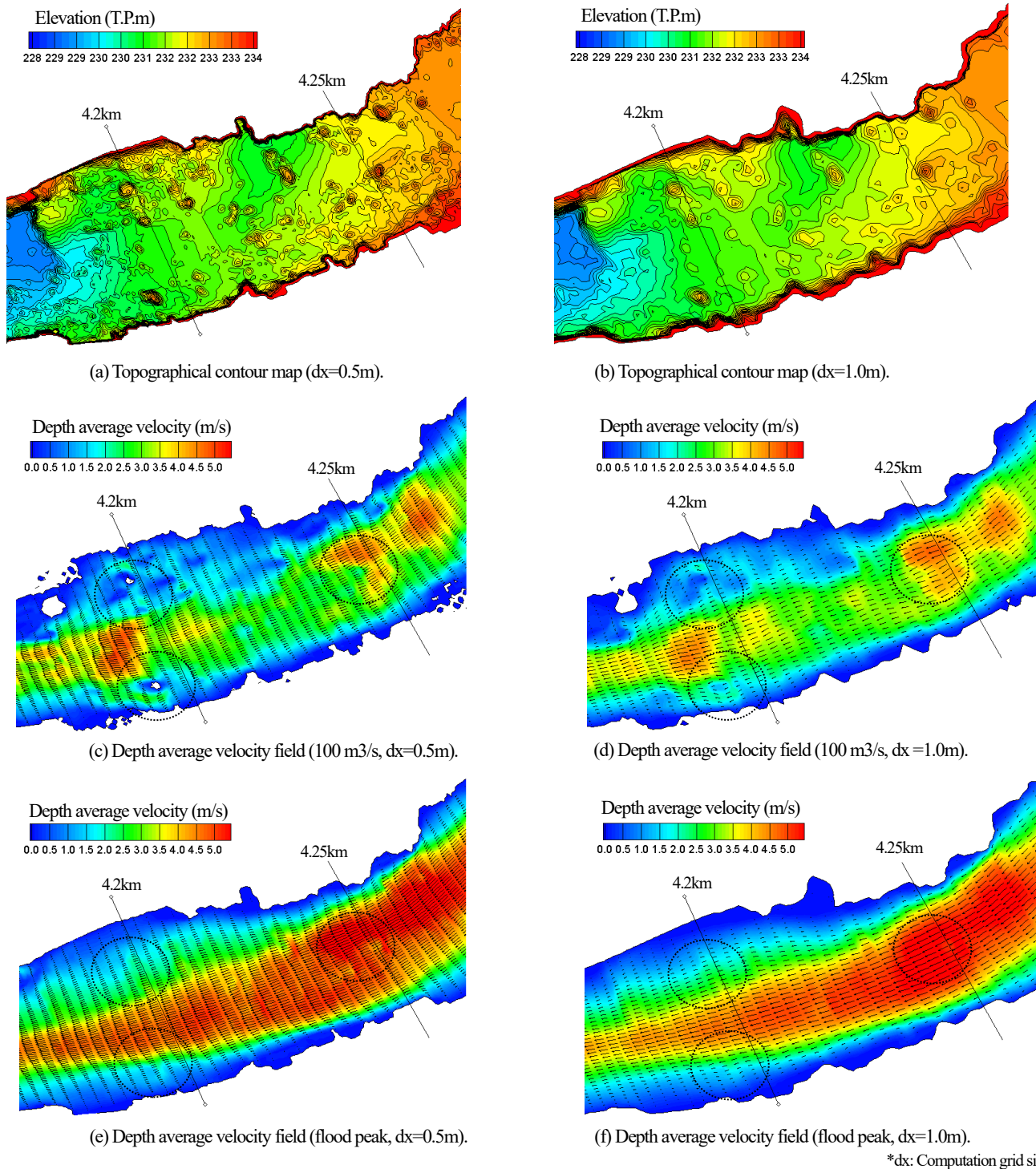


Fig. 10 Topographical contour map and depth average velocity field of 4.2-4.25km area.

る。今後、より粗い計算格子を用いた場合や流量規模の異なる場合について検討を重ねるとともに、計算格子の地盤高補間方法やQ3D-FEBSの基礎方程式の簡略化を検討し、巨石の点在する山地河川における実用的な洪水解析法及び解析に必要な観測データ・観測体制について研究を進める。

4. 結論

滝山川の温井ダム下流山地河川における平成29年7月洪水を対象として、ドローンによる詳細地形測量とQ3D-FEBSを組み合わせた巨石の点在する山地河川の洪水水面形解析について検討した。計算格子幅を約 0.5m, 約 1.0m とした 2 つの計算格子に対し

Q3D-FEBS を適用し、ドローンによる詳細地形測量区間の洪水解析を行った。両ケースともに洪水時に多点で観測された観測水位時系列データを用いた洪水解析による洪水ピーク時の水面形を説明できること、計算格子幅を約 0.5m とした場合と計算格子幅を約 1.0m とした場合での洪水ピーク時の解析水面形の差は最大でも 20cm 程度であることを示した。また、水深が河床に点在する巨石程度の時間帯では、巨石による流れの抵抗が大きく、計算格子幅がQ3D-FEBSによる洪水水面形の解析結果に与える影響は大きい、水深が巨石の2~3倍程度になるとその影響は相対的に小さくなることを示した。

Q3D-FEBS は、急激な地形変化や河床に点在する巨石から生じ

る三次元流れや圧力分布を基礎方程式系の中で考慮できるため、従来の解析法のように粗度係数の値を時間的に大きく変化させずとも、水深や流量の変化に伴う山地河川における洪水水面形を含む流れ構造、抵抗特性を適切に解析可能である。

参考文献

- (1) 福岡, "洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術," 河川技術論文集, Vol.12, pp. 1-6 2006.
- (2) 福岡, "洪水流の水位と流量の今日的考え方 —多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見える化する—," 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.637-642, 2017.
- (3) 福岡, "洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて," 河川技術論文集, Vol.23, pp.251-256, 2017.
- (4) 大野, 福岡, 時岡, 田辺, "多点水位観測に基づく山地河川の洪水流量算定法に関する研究," 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_799-I_804, 2018.
- (5) 竹村, 小野, 伊藤, 福岡, "大型床固めに接続する魚道周辺の三次元流況—大型水理実験と準三次元解析による比較検討," 第 73 回年次学術講演会, CD-ROM, II-127, 2018.