小本川における洪水中の流水抵抗変化が ハイドログラフに及ぼす影響

INFLUENCE OF FLOW RESISTANCE ON HYDROGRAPHS DURING A FLOOD IN THE OMOTO RIVER

工藤俊¹・萬矢敦啓²・原田大輔³・笛田俊治⁴ Shun KUDO, Atsuhiro YOROZUYA, Daisuke HARADA and Toshiharu FUETA

 1正会員
 工修
 土木研究所
 水工研究グループ水文チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

 (現:国土交通省
 国土技術政策総合研究所
 河川研究部
 水循環研究室)

 2正会員
 Ph.D
 土木研究所
 水工研究グループ水文チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

 3正会員
 博(工)
 土木研究所
 ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

 4正会員
 工修
 土木研究所
 水工研究グループ水文チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

This study aims to investigate flow resistance and its influence on hydrographs during a flood in the Omoto River. Flow resistance at the Akashika station where water level was observed during the target flood was studied, focusing on form resistance due to sand waves, vegetation over floodplain and eddies due to interaction between floodplain and main-channel. The result show that integrated roughness coefficient increases possibly up to 0.061 m^{-1/3}s at maximum water level with developed sand waves, on the other hand, integrated roughness coefficient takes value of 0.052 m^{-1/3}s in the transition regime. Computed results on rainfall runoff process considering roughness change discussed above show that especially water level has a high sensitivity to flow resistance, and that simulated water level reproduced observed one accurately in the case that increase of roughness is incorporated into a model.

Key Words: Omoto River, flow resistance, rainfall runoff simulation, hydrograph

1. はじめに

洪水時は水位と流量の両方を的確に予測した上で種々の対応を講じることが必要である。河川の縦横断形状や河床材料の粒径等の河道情報が既知であれば、抵抗則を通じて流量は水位に変換され、また、水位を流量に変換することができる。このような変換は、観測データが極度に乏しい中山間地河川の災害情報の中核をなす。

本研究は洪水中の流水抵抗に着目し、最初に既往研究の成果を用いて流水抵抗変化を分析した上で、これが水位及び流量のハイドログラフにどのように影響を及ぼすか調べるものである。ここで、今回着目する抵抗要素は、河床波の発達、消失に起因する形状抵抗変化¹⁾、植生による抵抗増加²⁾、低水路流れと高水敷流れの流体混合に起因する抵抗増加³⁾である。また、上流域では礫列、礫段による流水抵抗⁴⁾を考慮する。

対象流域は我が国の典型的な中山間地河川であり,

2016年8月に発生した台風10号で甚大な被害を受けた小本川を対象とする. 最初に流域内の水位観測地点における断面に着目し, 上述の抵抗要素を踏まえた流水抵抗変化を推算する. その上で, それをモデル化して降雨流出モデルに反映させ, 洪水中の流水抵抗変化が計算結果にどれほど影響するか調べた.

2. 赤鹿地点の流水抵抗分析

図-1は赤鹿地点の洪水前の断面及び現地写真を示す. 断面形状については、国土地理院の基盤地図情報5から空間解像度5 mの数値標高モデルを入手し、水中部分の河床高については横断測量結果を用いて補間した.写真はGoogleストリートビューによるもので、2015年9月の状況である.赤鹿地点は水位観測地点であり、横断図に対象洪水のピーク水位を示す.当該洪水では、赤鹿地点の周囲でも道路が冠水し、現地調査では堤内地の建物壁

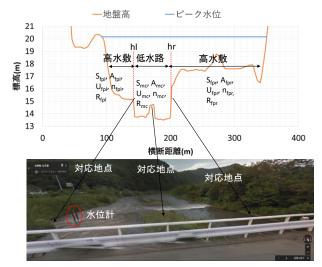


図-1 赤鹿地点の断面及び現地写真

(断面図において、Sは潤辺、Aは流積、Uは断面内平均流速、nは粗度係数、Rは径深を表し、添え字のfplは左岸高水敷、mcは低水路、fprは右岸高水敷を意味する. 現地写真はGoogleストリートビューによるもの.)

面に痕跡水位が確認された6.

(1) 手法

小本川流域では当該洪水中に流量観測が実施されておらず、すなわち流速の計測データがない. そのため、今回は既往研究の成果を用いて流水抵抗を推算することとした. ここで、本研究では赤鹿地点の抵抗分析にあたり、以下の抵抗要素を考える.

(a) 小規模河床波の発達,消失による形状抵抗変化無次元掃流力(τ *)と無次元有効掃流力(τ *)の関係を用いて低水路における流水抵抗変化を推算する.ここで、 τ *と τ **は以下の通りである.

$$\tau_* = \tau_*' + \tau_*'' \tag{1}$$

ここで、 r^* "は無次元掃流力のうち形状抵抗分である. また、 r^* と r^* "は以下のようである.

$$\tau_* = \frac{RI}{sd} \tag{2}$$

$$\tau_* = \frac{R'I}{sd} \tag{3}$$

ここで、Rは径深である。Iは勾配であり、今回は等流仮定で河床勾配を用い、基盤地図情報からの河道縦断地形から1/285を用いる。dは粒径で、現地調査 0 から得た赤鹿地点の d_{50} (=41 mm)を用いる。sは河床材料の水中比重で1.65を用いる。R'は平坦河床見合いの径深で、以下に示す通り流速に関係する水理量である。

$$\frac{U}{\sqrt{gR'I}} = 8.5 - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{R'}{k_s} \tag{4}$$

ここで、Uは平均流速、 κ はカルマン係数で本研究では 0.4を用いる。 k_s は相当粗度高さであり本研究では $2d_{84}$ (=160 mm)を用いる。

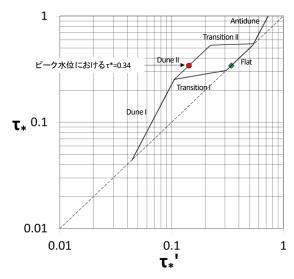


図-2 赤鹿地点のτ∗-τ∗'関係

図-2は赤鹿地点の $\tau *-\tau *$ 関係を表すものであり、実線は ピーク水位における、断面内最深部の相対水深(R/d=161) を用いた岸・黒木によるスメーマ。'関係1)である。岸・黒木に よるマォーマ゙関係は主に水路実験の資料を用いて構築された ものである. 筆者らは複数の実河川において、acoustic Doppler current profilerによる洪水中の計測結果を用いて τ *- τ *'関係を検証した結果, R/dが103オーダー以下であれ ば洪水中の流水抵抗変化はスォーズ関係で良好に説明できる ことを示した7. 図中には各実線に対応する河床形態を 示し, 破線はできて、を表す. 破線はで、"=0, すなわち形状 抵抗が無く平坦河床であることを意味する. よって, 破 線から左へ離れるほど形状抵抗が大きいことを表現する ものである. ここで、ピーク水位におけるτ*は0.34であ り、で・で、関係が二価性を有する領域にある。そこで、今 回はDune IIを経由する場合とTransition Iを経由する場合 の2通りを仮定して流水抵抗を推算する. なお、具体的 な流水抵抗の算出手順としては、断面に任意の水位を与 えた時のマォから、 マォーマ゙関係を介してマ゙を求め、式(3)と式 (4)からUを得た上で、マニング式を用いて逆算粗度とし て粗度係数を算出する. また, 各河床形態のおけるで-で、 関係式は岸・黒木の文献りに記載されている.

(b) 植生による抵抗増加

水位が高水敷の高さを超えた場合に、植生による抵抗増加を考える。今回は福岡・藤田が提案した以下の式²⁾を用いて高水敷における流水抵抗を推算する。

$$n_{t} = \left(n_{b}^{2} + \frac{C_{D}}{2g}\lambda h^{\frac{4}{3}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

ここで、 n_t は植生による粗度係数、 n_b は底面の粗度係数で今回は $0.04~{\rm m}^{-1/3}$ sを用いる、 λ は植生の密生度で今回は赤鹿地点周辺の現地調査 $^{\rm o}$ から $0.00833~{\rm m}^{-1}$ を用いる。 C_D は抗力係数で今回は1.2を用いる。hは水深である。

(c) 低水路流れと高水敷流れの流体混合による抵抗増加 福岡・藤田が提案した以下の手法³⁾で、低水路流れと

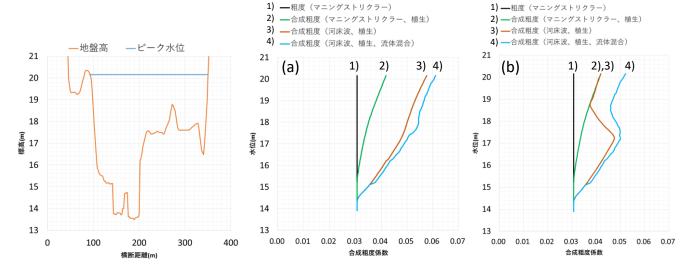


図-3 水位と合成粗度係数の関係(左:横断図とピーク水位,

中央: (a) $\tau * - \tau * '$ 関係がDune IIを経由すると仮定する場合,左: (b) $\tau * - \tau * '$ 関係がTransition Iを経由すると仮定する場合)

高水敷流れの流体混合による抵抗増加を加味した合成粗度を算出する。図-1に示すように左岸高水敷,低水路,右岸高水敷それぞれの潤辺,流積,平均流速,粗度係数,径深を定義する。また,左岸高水敷,低水路,右岸高水敷それぞれの潤辺における平均せん断力を τ_{fir} 、 τ_{mc} 、 τ_{fpr} 、低水路と左岸(右岸)高水敷の境界に作用する見かけのせん断力を τ_{cst} (τ_{csr})とすると,それぞれの断面で以下のつり合い式が導かれる。

$$\tau_{fpl}S_{fpl} - \tau_{asl}h_l = \rho g A_{fpl}I_b \tag{6}$$

$$\tau_{mc}S_{mc} + \tau_{asl}h_l + \tau_{asr}h_r = \rho g A_{mc}I_h \tag{7}$$

$$\tau_{fpr}S_{fpr} - \tau_{asr}h_r = \rho g A_{fpr}I_b \tag{8}$$

また、 τ_{fpl} 、 τ_{mc} 、 τ_{fpr} , τ_{asl} 、 τ_{asr} はそれぞれ以下で表される.

$$\tau_{fpl} = \frac{\rho g n_{fpl}^{2} U_{fpl}^{2}}{R_{fpl}^{1/3}}$$
 (9)

$$\tau_{mc} = \frac{\rho g n_{mc}^2 U_{mc}^2}{R_{mc}^{1/3}} \tag{10}$$

$$\tau_{fpr} = \frac{\rho g n_{fpr}^{2} V_{fpr}^{2}}{R_{fpr}^{1/3}}$$
 (11)

$$\tau_{asl} = \rho f \left(U_{mc} - U_{fpl} \right)^2 \tag{12}$$

$$\tau_{asr} = \rho f \left(U_{mc} - U_{fpr} \right)^2 \tag{13}$$

ここで、 ρ は水の密度(1,000 kg/m³)、fは境界混合係数で 今回は福岡・藤田の検討³シを参考に0.17とした。

式(9)~式(13)を式(6)~式(8)にそれぞれ代入し、Uについて解くと、左岸高水敷、低水路、右岸高水敷における流速が求まり流量が得られる。これを用いて、以下の式

から合成粗度を算出する.

$$N_{C} = \frac{A_{fpl} + A_{mc} + A_{fpr}}{O} R_{C}^{2/3} I_{b}^{1/2}$$
 (14)

ここで、 N_c は合成粗度、Qは流量、 I_b は河床勾配、 R_c は 断面全体の径深で、今回は以下に示す井田法 8 により算 出した。

$$R_{C} = \left\{ \frac{A_{fpl} \left(\frac{A_{fpl}}{S_{fpl}} \right)^{\frac{2}{3}} + A_{mc} \left(\frac{A_{mc}}{S_{mc}} \right)^{\frac{2}{3}} + A_{fpr} \left(\frac{A_{fpr}}{S_{fpr}} \right)^{\frac{2}{3}} \right\}^{\frac{3}{2}}}{A_{fpl} + A_{mc} + A_{fpr}}$$
(15)

なお、流速差による抵抗増加を考慮せずに合成粗度係数を算出する場合は、 τ_{asl} , τ_{asr} を0として、断面分割法により計算する。

(2) 流水抵抗の推算結果

図-3に赤鹿地点の水位と合成粗度係数の関係を示す. 図-3(a)は $\tau_{*-\tau_*}$ 関係がDune IIを経由すると仮定する場合, 図-3(b)はTransition Iを経由すると仮定する場合である. それぞれ以下の4種類の計算方法で算出したものである.

低水路,高水敷共に以下で示すマニングストリクラーの式で計算する。

$$n = 0.0417k_s^{1/6} \tag{16}$$

ここで、nは粗度係数、ksは上述の通り160 mmを用いる.

- 2) 低水路はマニングストリクラー, 高水敷は植生による抵抗として式(5)で計算し合成粗度係数を算出する.
- 3) 低水路は河床波に起因する流水抵抗としてτ**τ**関係 を用いて計算し、高水敷は式(5)で計算し、断面分割 法で合成粗度係数を算出する.
- 4) 低水路はτ--τ-*関係,高水敷は式(5)を用いて計算した 上で,式(6)~式(15)を用いて,低水路流れと高水敷 流れの流体混合による抵抗増加を加味して合成粗度

係数を算出する.

1)~4)で計算した合成粗度係数の差を調べることで、 それぞれの抵抗要素が全体に対してどれほど寄与しているか分かる. すなわち、1)と2)の差は植生による抵抗増加分、2)と3)の差は河床波による抵抗増加分、3)と4)の差は流体混合による抵抗増加分を意味する.

図-3(a)に着目する. マニングストリクラーの式は説明変数に水深が入らないため一定値であり、今回は0.031 m^{-1/3}sである. 植生による抵抗増加分を考慮する場合は、左岸高水敷に水位が到達した時点で合成粗度係数が増加し始め、ピーク水位では0.042 m^{-1/3}sまで上昇する. 低水路の流水抵抗として河床波を考慮し、τ*-τ*^{*}関係による粗度係数から合成粗度係数を求める場合、水位約14.6 mから合成粗度係数が増加し始める. これは、無次元掃流力が限界無次元掃流力を超えて河床波による形状抵抗が出現し始めることを意味する. 水位の増加とともに合成粗度係数が増加していき、ピーク水位では合成粗度係数が0.058 m^{-1/3}sに達する. さらに流体混合による抵抗増加を考慮する場合、水位が左右岸高水敷にそれぞれ到達した時(水位約15.0 mと約17.5 m)に合成粗度係数が急変し、ピーク水位では0.061 m^{-1/3}sまで増加する.

図-3(b) に着目する. 3)でτ∗-τ∗'関係がTransition Iを経由 すると仮定した場合,水位約17.2 mから合成粗度係数が 減少していく. これは、河床波が遷移し始め、図-2にお いてτ*-τ*'関係がTrasition Iに従っていることを意味する. 水位約18.7 mでは平坦河床に達して低水路の抵抗はマニ ングストリクラーの式で計算する場合と同様となり、2) と3)の合成粗度係数は同一の値を示す。3)ではピーク水 位における合成粗度係数は0.042 m^{-1/3}sとなる. 一方, 流 体混合による抵抗増加を考慮する4)では、ピーク水位で 0.052 m^{-1/3}sまで上昇する. その差は0.010 m^{-1/3}sであり、 図-3(a) のピーク水位における3)と4)の差(0.061-0.058=0.003 m^{-1/3}s)よりも明確に大きい. 流体混合による 抵抗増加は式(12)、式(13)に示すように、高水敷と低水 路の流速差に支配される. で*-で* 関係がTransition Iを経由 する場合, 低水路の流水抵抗が減少して流速が増加する ため、高水敷の流れとの流速差が大きくなり、流体混合 による抵抗増加量が格段に大きくなる.

3. 降雨流出計算

前章の分析結果を踏まえ、洪水中の流水抵抗変化が降雨流出計算の結果にどれほどの影響を及ぼすか調べる。 図-4に計算領域を示す、小本川流域全体を対象とする。

(1) 計算条件

降雨流出計算には佐山らが開発した降雨流出氾濫 (RRI)モデル⁹⁾を用いる. RRIモデルは斜面と河道の間の水のやり取りを計算し、河道追跡と氾濫計算を一体的に



図-4 計算対象範囲(小本川流域,流域面積:約730km²) (青線で示す河道は上流域の単断面,黒太線で示す河道は複断面)

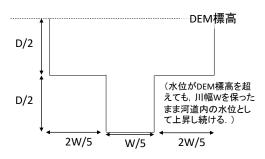


図-5 モデル上の複断面形状

表-1 斜面計算に関するパラメータ

斜面の等価粗度	$0.6 \mathrm{m}^{-1/3}\mathrm{s}$		
土層厚	0.5 m		
土層の有効空隙率	0.5		
飽和層の側方透水係数	0.05 m/s		
不飽和層の有効空隙率	0.3		
不飽和層の側方透水係数	0.0125 m/s		

実施することに特徴があるが、今回は氾濫を考慮せず、 疑似的に堤防高を高くし、河道から斜面への越水が生じ ない条件で計算を実施する、RRIモデルの詳細な基礎式 などについては既往文献%を参照されたい. 標高は国土 地理院の基盤地図情報から空間解像度10 mの数値標高モ デルを入手し、約100 mグリッドにスケールアップ10)し て使用した. 降水量については、気象庁によるCバンド レーダーのデータを用いた.ここで,流域内の2地点 (岩泉地点及び種倉地点、位置は図-4に示す)で地上雨 量計によるデータと比較すると、Cバンドレーダーによ る降水量が過少傾向であった. そのため、単純なバイア ス補正を施した. すなわち、Cバンドレーダーによる降 水量と地上雨量計による降水量の関係を線形近似して傾 きを求めると、岩泉地点では、地上雨量計による降水量 はCバンドレーダーによる降水量の1.65倍, 種倉地点で は1.92倍であった. そのため、これらの平均値である 1.79を流域全体のCバンドレーダーによる降水量に乗じ て入力値とした. なお, Cバンドレーダーのデータの時 間解像度は10分である. 蒸発散量については、Hamon法 で可能蒸発散量を算出した上で、小葉竹川による検討を

表-2 計算ケース

	低水路	高水敷	流体混合に よる抵抗増加	上流域
Case0	マニング ストリクラー	マニング ストリクラー	×	マニング ストリクラー
Case1	マニング ストリクラー	植生	×	マニングストリクラー
Case2	河床波 (Dune II)	植生	×	マニング ストリクラー
Case3	河床波 (Dune II)	植生	0	マニング ストリクラー
Case4	河床波 (Dune II)	植生	×	Heyの式
Case5	河床波 (Dune II)	植生	0	Heyの式
Case6	河床波 (Transition I)	植生	×	Heyの式
Case7	河床波 (Transition I)	植生	0	Heyの式

参考として実蒸発散量を与えた.これは、国内の地区毎に、水収支法による蒸発散量と可能蒸発散量を比較してその割合を簡易的に調べたものである。東北地方における推算結果の0.565倍を、Hamon法で算出した可能蒸発散量に乗じて実蒸発散量として与えた。物理的に精緻に算出したものではないが、今回は大規模出水が対象であることから、蒸発散量の精度は計算結果に大きな影響を与えるものではないと考える。また、斜面計算に関するパラメータは表-1に示す通り与えた。

(2) 河道形状と流水抵抗のモデル化

河道位置は、当該セルの集水セル数に応じて与えた. 集水セル数100(集水面積約1.2km²に相当)以上1,000 (集水面積約12km²に相当)未満を単断面、集水セル数 1,000以上を複断面として与えた. 図-4に単断面河道と 複断面河道の分布を示す. また、川幅と河道深さは、集 水面積に比例すると仮定して、以下の式で与えた.

$$W = C_W A^{S_W} \tag{17}$$

$$D = C_D A^{S_D} \tag{18}$$

ここで、Wは川幅(m)、Dは河道深さ(m)、Aは当該セルの集水面積(km²)、 C_W (5.0)、 S_W (0.5)、 C_D (1.1)、 S_D (0.25)はパラメータで、今回は括弧内の数値を用いた.

単断面の場合は式(17)、式(18)で計算した川幅と河道深さをそのまま矩形断面として与え、複断面の場合は図-5に示すように与えた。複断面河道における粗度係数は赤鹿における検討と同様に、低水路の小規模河床波による形状抵抗変化、高水敷の植生による抵抗増加、低水路流れと高水敷流れの流体混合による抵抗増加を考慮して合成粗度係数を計算する。これを河道の計算タイムステップ毎、セル毎に行い、粗度係数を時空間的に逐次更新させながら降雨流出計算を実施する。なお、粒径や植生の密生度などの諸量は、実際には流域内で空間的に分布すると考えられるものの、今回は簡易的に赤鹿地点の

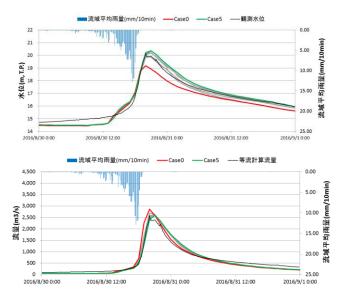


図-6 赤鹿地点の水位(上図)と流量(下図)の計算結果 (灰色の線はCase0とCase5以外の全ケースの計算結果)

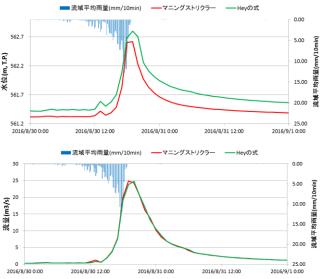


図-7 鼠入川上流地点の水位(上図)と流量(下図)の計算結果

調査で得られた値を流域内の全ての複断面河道に与えた. 流域上流における単断面河道については、礫列、礫段に おける流水抵抗を調べた例⁴に従い、以下のHeyの式¹²に よって得られた流速から、マニング式による逆算粗度を 計算して与える.

$$\frac{U}{\sqrt{gRI}} = 5.75 \log \left(\frac{aR}{3.5d_{84}}\right) \tag{19}$$

ここで,Uは平均流速,Rは径深,Iは勾配,aは矩形断面に一般的に用いられる11.16を与えた。 d_{84} は鼠入川上流部における現地調査 $^{\circ}$ を踏まえて,499 mmを与えた.

(3) 計算結果

表-2は今回の計算ケースを示す. CaseOは最も単純な 条件で,流域全体の河道の粗度係数にマニングストリク ラーの式で得られる $0.031 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ を与えた。今回検討した 全ての抵抗要素を加味したものはCase5とCase7で、Case5は低水路の流水抵抗としてDune IIを経由する $\tau * - \tau * '$ 関係、Case7はTransition Iを経由する $\tau * - \tau * '$ 関係を用いた。

図-6は赤鹿地点の水位及び流量の計算結果を示す。赤 鹿地点で最も合成粗度係数が小さくなるCaseOの計算結 果を赤色、最も合成粗度係数が大きくなるCase5の計算 結果を緑色で示す. なお, 他のケースの計算結果は全て 灰色で示した. また, 水位については観測水位を示し, 流量については、前章おける抵抗分析のうち、図-3(a) の4)で示される合成粗度係数を用いて、等流計算を実施 して流量を推算した結果を示す. 特に水位については流 水抵抗の条件による感度が大きく、ピーク水位を比較す るとCaseOで19.17 m, Case5で20.37 mであり、1.2 mの差 がある. また、CaseOでは計算水位が観測水位と比較し て過少傾向であるが、洪水中の抵抗増加を考慮すること で計算水位が観測水位に近づくことが分かる.流量につ いては水位ほどハイドログラフに大きな変化はないもの の、ピーク流量を比較するとCaseOでは2,860 m³/sである のに対し、Case5では2,590 m³/sで、270 m³/sの差が生じる.

図-7は鼠入川上流地点の計算結果を示す. 当該地点では水位観測を実施していないため、計算結果のみ示す. また、当該地点はモデル上では単断面となっているため、マニングストリクラーの式で粗度係数を与えた場合と Heyの式で粗度係数を与えた場合の比較を行う. 同様に水位について結果が大きく異なり、流水抵抗の違いによってピーク水位が0.18 m変化する. ピーク水深に基づいて比較すると、マニングストリクラーの式で粗度係数を与えた場合は1.34 mで、Heyの式で粗度係数を与えた場合は1.53 mとなる. 言い換えると、Heyの式で粗度係数を与えることで計算ピーク水深が14%上昇する結果となった. なお、流量についてはほとんど変化がない. 当該地点は支川の最上流域であり流下時間がごく短いために、このような結果が得られるものと考える.

4. まとめ

種々の抵抗要因を分析し、それが降雨流出計算に与える影響を分析した結果、以下の成果が得られた.

I) 赤鹿地点を対象として、小規模河床波の発達及び 消失による形状抵抗変化、植生による抵抗増加、 低水路流れと高水敷流れの流体混合による抵抗増加、の3つの抵抗要素を考慮して流水抵抗を分析した結果、ピーク水位時において、河床波が発達し続けると仮定した場合に合成粗度係数が0.061 m^{-1/3} sまで上昇し、河床波が遷移すると仮定した場合は0.052 m^{-1/3} sまで上昇する結果となった。また、流体混合による抵抗増加量について、河床波が発達し続ける場合はさほど大きくないが、河床波が遷移

- する場合は低水路の流速が増大するため、抵抗増 加量は特に大きくなることが特徴的である.
- 2) 赤鹿地点の分析結果を踏まえて、洪水中の流水抵抗変化をモデル化して降雨流出計算に反映させ、粗度係数を時空間的に変化させて計算した結果、マニングストリクラーの式で計算した一定値の粗度係数を与える場合と比較して、特に水位の計算結果が大きく変化し、赤鹿地点では抵抗増加を考慮することで計算水位が観測水位により近づく結果となった.

謝辞:本研究を実施するにあたり、岩手県県土整備部河川課から貴重なデータを提供して頂いた。また、土木研究所ICHARMの江頭進治研究・研修指導監から種々のご助言を頂いた。土木研究所ICHARMの山崎祐介専門研究員から主にCバンドレーダーのデータ処理でご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 岸力, 黒木幹男:移動床流れにおける河床形状と流体抵抗 (I), 北海道大学工学部研究報告, pp.1-23, 1973.
- 福岡捷二,藤田光一:洪水流に及ぼす河道内樹林群の影響, 土木研究所報告 180,pp.129-192,1990.
- 3) 福岡捷二,藤田光一: 複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用, 土木学会論文集,第411号/II-12,pp.63-72,1989.
- 4) 長谷川和義:河川上流域の河道地形,ながれ24,pp15-26,2004.
- 5) 国土地理院: 基盤地図情報, http://www.gsi.go.jp/kiban/
- 6) 江頭進治,小関博司,山崎祐介,南雲直子,原田大輔,萬矢 敦啓,工藤俊:平成28年8月台風10号豪雨による岩手県小本 川洪水災害調査報告,土木技術資料,第4348号,2016.
- 7) 工藤俊, 萬矢敦啓, 小関博司, 笛田俊治, 中津川誠: 実河川における流水抵抗の分析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.73, No.4, L_769-L_774, 2017.
- 8) 井田至春: 広巾員水路の定常流一断面形の影響について一, 土木学会論文集,第69号別冊(3-2),1960.
- 9) 佐山敬洋,建部祐哉,藤岡奨,牛山朋來,萬矢敦啓,田中茂 信:2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予 測,土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.1, pp.14-29, 2013.
- 10) 舛谷敬一, 赤井計之, 馬籠純: 格子状疑似河道網のスケール変換に関する新しい方法, 水文・水資源学会誌, 19(2), pp.139-150, 2006.
- 11) 小葉竹重機: 簡易式による蒸発散量の推定,京都大学防災研究所年報,第32号 B-2,pp.309-317,1989.
- 12) Hey, R. D.: Flow resistance in gravel-bed rivers, Jour. of Hy. Div., Proc. of ASCE, Vol. 105 No. HY 4, pp.365-379, 1979.

(2017. 4. 3受付)