

レーダ雨量を外力とした本・支川複数流域の分布型流出・洪水追跡と各流域パラメータの推定

DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF AND FLOOD FLOWS ANALYSIS WITH PLURAL TRIBUTARIES BASED ON RADAR-RAINFALL IN THE HIKOSAN RIVER BASIN AND ITS PARAMETER ESTIMATION

重枝未玲¹・秋山壽一郎²・Adelaida Castillo DURAN³・中木翔也⁴・藤田 輝⁵
Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Adelaida Castillo DURAN
Shoya NAKAKI and Akira FUJITA

¹正会員 九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 九州工業大学教授 (同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻博士後期課程 (同上)

⁴学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻博士前期課程 (同上)

⁵正会員 建設技術研究所 (〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町1-6-7)

The numerical simulations of rainfall-runoff and flood flows in the Hikosan River basin were performed and the parameter for the rainfall-runoff simulation was estimated. The rainfall runoffs were simulated by a distributed hydrological model with radar-rainfall. The flood flows in the main river and plural tributaries were simulated simultaneously by the quasi-2D unsteady free-surface flow model. The Genetic Algorithms(GA) and Particle Swarm Optimization(PSO) were used for the optimization method. The parameter optimization was performed against the flooding event in the Hikosan river basin in July 2012 based on the observed water level. It shows that the model and optimization method are a useful tool for examining the process of runoff and flooding and the parameter characteristics in the Hikosan River basin.

Key Words : distributed rainfall-runoff model, quasi-2D unsteady free-surface flows model, radar rainfall, parameter optimization, plural tributaries, Hikosan River

1. はじめに

近年、わが国では過去に経験のない豪雨による水害が頻発している。今後、従来のハード対策による防災に加え、ソフト対策による減災対策がますます重要となる。一般に、支川の治水安全度は本川に比べ低く、上記の対策を講じる上で、複数の豪雨シナリオに対して、本・支川の洪水が相互に及ぼす影響を考慮しつつ河道の洪水伝播を予測することが不可欠となる。

このような検討を行う上で、入力条件となる降雨量、流域から河道への流出流量を予測する流出解析、流量から水位を予測する洪水追跡の精度が重要となる。入力条件となる降雨量については、近年のX-band MPレーダやC-band MPレーダに代表される気象レーダの性能向上に伴い¹⁾、その観測精度は時空間ともに高く、より信頼性の高いものとなっている。河道への流出流量を予測する流出解析については、分布型流出解析モデルが開発され

ており、土地利用に応じてパラメータを適切に設定する地物指向のモデル^{2,3)}やLM(Levenberg-Marquardt)法⁴⁾や群知能最適化手法⁵⁾等のパラメータ最適化法が開発されている。河道の洪水追跡については、水面形の経時変化に基づき、河道の樹木繁茂状況や河床材料・状態に応じた樹木群透過係数や粗度係数を適切に設定し、洪水の再現を行う数値モデル⁶⁾や降雨を入力条件として流量や抵抗特性を補正し洪水の予測を行う数値モデル^{7,8)}が構築されている。著者らは、分布型流出解析モデルと平面2次元モデルのように河道の線形、その合流を一つのモデルとして取扱え、河道を1次元モデルのように取り扱うことが可能な準平面2次元洪水流モデルを用いた洪水追跡法による「分布型流出・準平面2次元洪水追跡モデル」を開発し、同モデルの予測精度やパラメータ最適化法などを示した⁹⁾。このような最適パラメータと流域の特性とを関連付けることができれば、降雨に対する流出流量や水位の応答の信頼性が高くなり、未経験の洪水に対しても同精度の解析結果を得られると考えられる。

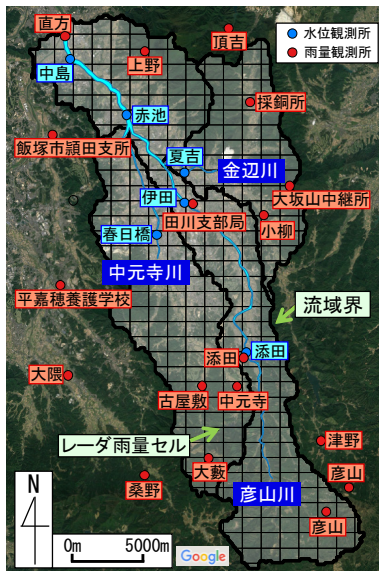


図-1 彦山川, 中元寺川, 金辺川流域の概要

本研究では、以上のような背景を踏まえ、前報⁹⁾をさらに発展させ、最適手法に計算条件の多様性を維持できるような改良と降雨外力を地上観測雨量からレーダ雨量に変更を加え、彦山川流域とその支川流域を対象とした分布型流出・準平面2次元洪水追跡を実施した。さらに、水位ハイドログラフに基づき遺伝的アルゴリズムと粒子群最適化法を用いた本・支川の流域特性を考慮したモデルパラメータの最適化を実施し、その妥当性を検討した。なお、本最適化法の特徴は、既往⁴⁾の最適化法と異なり、水位ハイドログラフに基づき最適化を行っている点、遺伝的アルゴリズムと粒子群最適化法を用いた大局的な最適解を効率的に探索する手法を用いた点にある。

2. 解析対象流域と対象降雨の概要

本研究では、平成24年7月の九州北部豪雨災害で被災した彦山川とその支川である中元寺川と金辺川を解析対象領域とした。

(1) 彦山川流域の概要

彦山川、中元寺川、金辺川流域の概要と雨量、水位観測所を図-1に示す。彦山川は、英彦山を源流とし直方市で一級河川遠賀川に合流する一次支川であり、その流域面積は327.6km²、その幹線流路延長は43.8kmである。中元寺川および金辺川は、彦山川の支川であり、その流域面積はそれぞれ彦山川流域の30%および19%程度、その大臣管理区間はそれぞれ9.0km、4.0kmである。

彦山川流域の標高、土地利用、表層地層を図-2に示す。標高の図には、標高解析より得られた落水線の主流路、彦山川では伊田、添田観測所までの小流域、中元寺川では春日橋観測所までの小流域、金辺川では夏吉水位観測所までの小流域をあわせて示している。

標高図から、(1)彦山川では添田、伊田観測所までに、それぞれその流域面積の38%、60%程度の雨水が、(2)中元寺川では春日橋観測所までに、その流域面積の73%程度の雨水が、(3)金辺川では夏吉水位観測所までに、その流域面積の95%程度の雨水が流入すること、土地利用図から、(1)彦山川流域では山地が約59%、田が11%、農地が約2%、市街地が約15%、荒地が5%、水域が8%を、(2)中元寺川流域では山地が56%、田が11%、農地が2%、市街地が16%、荒地が7%、水域が8%程度を、(3)金辺川流域では山地が68%、田が10%、農地が2%、市街地が9%、荒地が4%、水域が7%程度を占めていること、表層地層図から(1)彦山川流域では岩が66%程度、砂・粘土・淤泥・礫が27%程度、砂および礫が7%程度を、(2)中元寺川流域では岩が68%程度、砂・粘土・淤泥・礫が30%程度、砂および礫が2%程度を、(3)金辺川流域では岩が68%程度、砂・粘土・淤泥・礫が30%程度、砂および礫が2%程度を占めていること、などが確認できる。

(2) 平成24年7月豪雨の概要

平成24年7月豪雨では、彦山川上流域で強い雨が降り、英彦山雨量観測所では1時間雨量81mmを観測した。この豪雨により、7月13~14日には彦山川の伊田水位観測所、中元寺川の春日橋水位観測所で氾濫危険水位を超え、彦山川の中島、赤池、添田水位観測所と中元寺川の春日橋水位観測所で観測史上最大の水位を記録した。

図-3は、7月13~14日豪雨時の地上雨量及びレーダ雨量の流域平均降雨ハイトグラフを示したものである。同流域での平成24年7月時点のXバンドMPレーダ雨量には欠測値が多数あったため、レーダ雨量にはダイナミックウィンドウ法¹⁰⁾に基づく気象庁全国合成レーダGPV¹¹⁾の雨量と図-1に示す雨量観測所の実績降雨とを合成した合成雨量を用いた。図-3より、(1)地上雨量、レーダ雨量のいずれも48時間雨量で270mm程度の三山の豪雨であること、(2)地上雨量もレーダ雨量も同様な波形となっているが、ピーク雨量はレーダ雨量が地上雨量の1.25倍程度となること、(3)レーダ雨量と地上雨量の流域平均雨量は同程度であること、などが確認できる。

図-4は、同豪雨の地上雨量とレーダ雨量の6時間雨量の空間分布を示したものである。図中には各河川の流域もあわせて示している。なお、地上とレーダ雨量の6時間流域平均雨量は、それぞれ269mmと270mmであり、同程度の雨量であった。図-4から、(1)地上雨量では彦山川流域の上流で降雨が集中していること、(2)レーダ雨量では彦山川上流と中元寺川上流域で降雨が集中していること、(3)レーダ雨量は、地上観測雨量のティーセン分割領域内での降雨量分布まで捉えており、より局地的な降雨についても捉えていること、特に中元寺川流域の強雨域などを捉えていること、などが確認できる。このように、レーダ雨量は、地上観測雨量では難しい局地的な降雨を捕捉可能であることが確認できる。

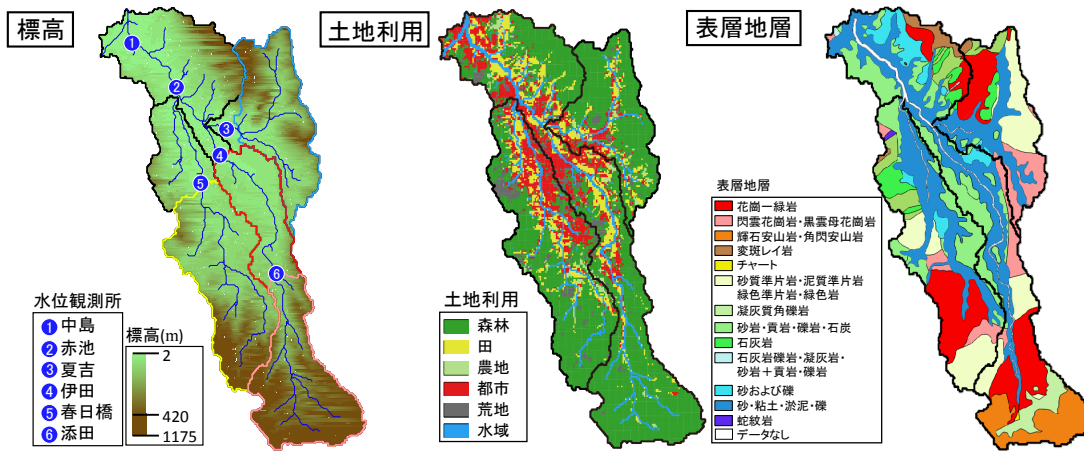


図-2 彦山川, 中元寺川, 金辺川流域の標高, 土地利用, 表層地層

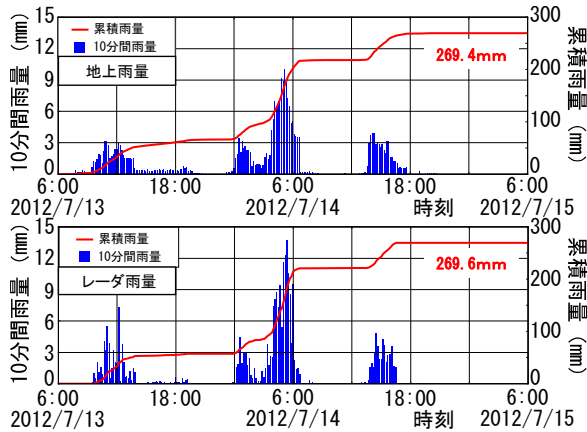


図-3 流域平均ハイドログラフ

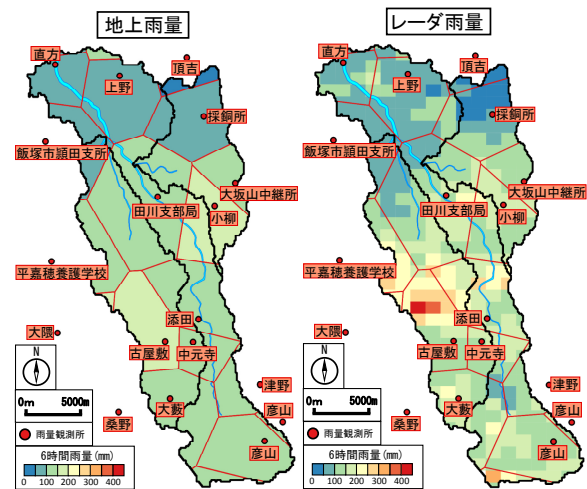


図-4 地上雨量とレーダ雨量の6時間雨量の空間分布

3. 分布型流出・洪水追跡の概要

本研究では著者らの開発した分布型流出・準平面2次元洪水追跡モデル⁹⁾を用いて、分布型流出・洪水追跡を行った。

(1) 分布型流出・準平面2次元洪水追跡モデルの概要

分布型流出・準平面2次元洪水追跡モデルは、降雨を入力条件として河道での流量と水位ハイドログラフを予

測できるモデルである。同モデルは、①セル分布型流出解析モデル¹²⁾と②準平面2次元洪水流モデル¹³⁾で構成され、①より求まる河道への流出流量を②の境界あるいは内部境界条件として与えることで接続される。

セル分布型流出解析モデルは、標高や土地利用などの流域特性を考慮した上で流域の雨水の挙動の予測を行うモデルである。同モデルでは、kinematic wave法により斜面流と準平面2次元洪水追跡で対象外とする河道流の挙動を予測する。同モデルのモデルパラメータは、 N =等価粗度係数、 k_a =重力水が卓越するA層内の透水係数、 d_c =マトリックス部の最大保水量を水深で表した値、 d_s =重力水を含めて表層土中に保水しうる最大水深、 β =重力水部と不飽和水部との飽和透水係数の比である。

準平面2次元洪水流モデルは、計算セルを河道線形に沿って配列し、平面2次元モデルのように河道特性を考慮しつつ、セル境界の数値流束には横断面で面積分された数値流束を用いて、1次元モデルのように高い計算効率で解析を行うモデルである。同モデルでは、(1)河道線形に沿って計算セルを配置し、(2)計算セルをコントロールボリュームとして、計算セル境界の法線方向に対して、セル境界の横断面で面積分された数値流束を算定し、(3)全てのセル境界線に対して数値流束を線積分することで、計算セル内の体積、流速と体積との積を算定し、水深と流速の予測を行う。本モデルの詳細は参考文献¹³⁾を参照されたい。

(2) 最適化の概要

本モデルが降雨外力から水位ハイドログラフ等の洪水流の挙動を予測できることを踏まえ、モデルパラメータの最適化には、流出モデルのような流量ハイドログラフではなく、観測所が多くかつ精度が高い水位ハイドログラフを用いた。モデルパラメータは、各流域の土地利用別の N 、 β 、 k_a 、 d_c 、 d_s とした。目的関数には、ピーク水深の40%までと全時刻の水位の差の2乗平均の各観測所での平均値を用い、算出した誤差の重みをそれぞれ0.6、0.4と設定し、それらの和とした。

最適化手法には前報⁹⁾と同様に、実験計画法¹⁴⁾、遺伝

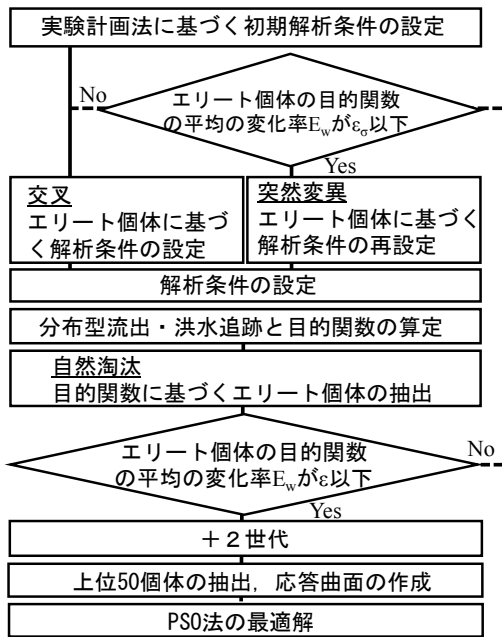


図-5 最適化法の概要

的アルゴリズム¹⁵⁾、応答曲面法¹⁶⁾、粒子群最適化法(PSO法)¹⁷⁾を用いた。その手順は、図-5に示す通りである。なお、本手法は、前報⁹⁾の最適化法から、個体の多様性の確保を目的として、交叉をさせる個体の抽出方法と突然変異の実施条件に改良を加えた。また、前報⁹⁾では彦山川流域のみで最適化を実施したが、本研究では、彦山川とその支川の中元寺川と金辺川流域で最適化を行った。以下では、最適化法の概要を述べる。

まず、①初期の解析条件として、実験計画法¹⁴⁾に基づき、モデルパラメータが目的関数に及ぼす影響を把握しやすい効率的な条件を300ケース設定する。この条件に基づき分布型流出・準平面2次元解析結果から目的関数を求め、エリート個体を300個体作成する。②遺伝的アルゴリズムには、その中でも優良なパラメータを確実に残すCHC法(Cross generational elitist selection, Heterogeneous recombination, Cataclysmic mutation法)¹⁵⁾を用い、交叉により、エリート個体から次世代の300ケースの解析条件を新たに設定する。交叉は類似度が低い2個体を抽出し、 k_a は相乗平均、それ以外のパラメータは相加平均することで行った。なお、類似度の判定について、二個体のパラメータ値の差をエリート保存された300個体のパラメータの大小の差で無次元化した値が閾値 α (本研究では0.1)を下回る数が最適化されるパラメータの数の半分以下となった時に類似度は低いと判定した。③エリート保存された300個体の目的関数の平均値の変化率 E_w が ϵ_0 (本研究では $\epsilon_0=0.2$)を下回った場合に、突然変異を生じさせ解析条件を再設定させる。突然変異は1回のみとし、その解析条件は、各パラメータの設定範囲内で求めた。④作成された解析条件による分布型流出・準平面2次元解析を実施し、解析結果から求めた目的関数に基づき得られた300個体と前世代のエリート300個体の計600個体から、優良な300個体をエリート個体として抽

表-1 パラメータ値の範囲

	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$d_s(m)$	$d_c(m)$	$k_a(m/s)$	β
森林	0.40~0.80	0.0~1.0	0.0~1.0	$10^{-7} \sim 0.10$	2.0~6.0
田	1.0~3.0	/	/	/	/
農地	0.2~0.4				
都市	0.01~0.1				
荒地	0.2~0.4				
水域	0.01~0.055				

表-2 最適パラメータ値

	森林					田	都市	水域
	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$d_s(m)$	$d_c(m)$	$k_a(m/s)$	β	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$N(m^{-1/3} \cdot s)$
彦山川	0.65	0.65	0.32	0.021	3.4	1.79	0.071	0.043
中元寺川	0.64	0.79	0.38	0.015	4.6	1.69	0.053	0.027
金辺川	0.56	0.68	0.58	0.013	4.7	2.10	/	0.035

出し、自然淘汰を行う。⑤遺伝的アルゴリズムはエリート保存された300個体の目的関数の平均値の変化率 $E_w \leq \epsilon$ (本研究では $\epsilon=0.06$)を満たした後、2世代後に終了とした。満たさない場合は、上記の②~④を繰り返す。⑥2世代後の上位50位までのエリート個体に基づき応答曲面を作成し、大域的に最小値を求める粒子群最適化法(PSO法)¹⁷⁾により、最適化パラメータを探索する。なお、PSO法では100個の粒子を用いて最適化を探索させた。

(3) 解析条件の概要

解析対象河川は、彦山川、金辺川、中元寺川であり、解析は2012年7月13日9時から15日0時の出水を対象とした。降雨外力には上述のレーダ雨量を与えた。

最適化を行うパラメータは流域の土地利用別の N 、 β 、 k_a 、 d_c 、 d_s とし、 N については水域以外で土地利用の割合が1割以上を対象とした。 N の範囲は土地利用に応じた標準的な範囲¹⁸⁾を、 k_a の範囲は、先述した表層地層から、各流域の表層地層の割合と各地層の透水係数¹⁹⁾求めた流域平均の k_a の範囲($1.0 \times 10^{-7} \sim 0.1m/s$)を与えた。 d_s 、 d_c については森林のみを考慮した。表-1に、本最適のパラメータ値の範囲を示す。河道の粗度係数は、最適化の対象とはせず、彦山川では逆算粗度係数を、金辺川と中元寺川では計画粗度係数を用いた。

まず、赤池水位観測所の実測水位を河道下流端境界条件として、彦山川沿いの伊田、添田、中元寺川沿いの春日橋、金辺川沿いの夏吉水位観測所での実測水位に基づき最適化を行った。なお、最適化は、2012年7月13日24時から14日14時までの洪水波形で行った。次に、これらの最適化パラメータを用いて、彦山川最下流の中島水位観測所の実測水位を河道下流端境界条件として与えた解析を実施した。

4. 結果と考察

(1) 最適パラメータ値と流域特性との関係

表-2は、本最適化法より得られた最適パラメータ値を示したものである。7世代目で閾値を満たし、9世代目の

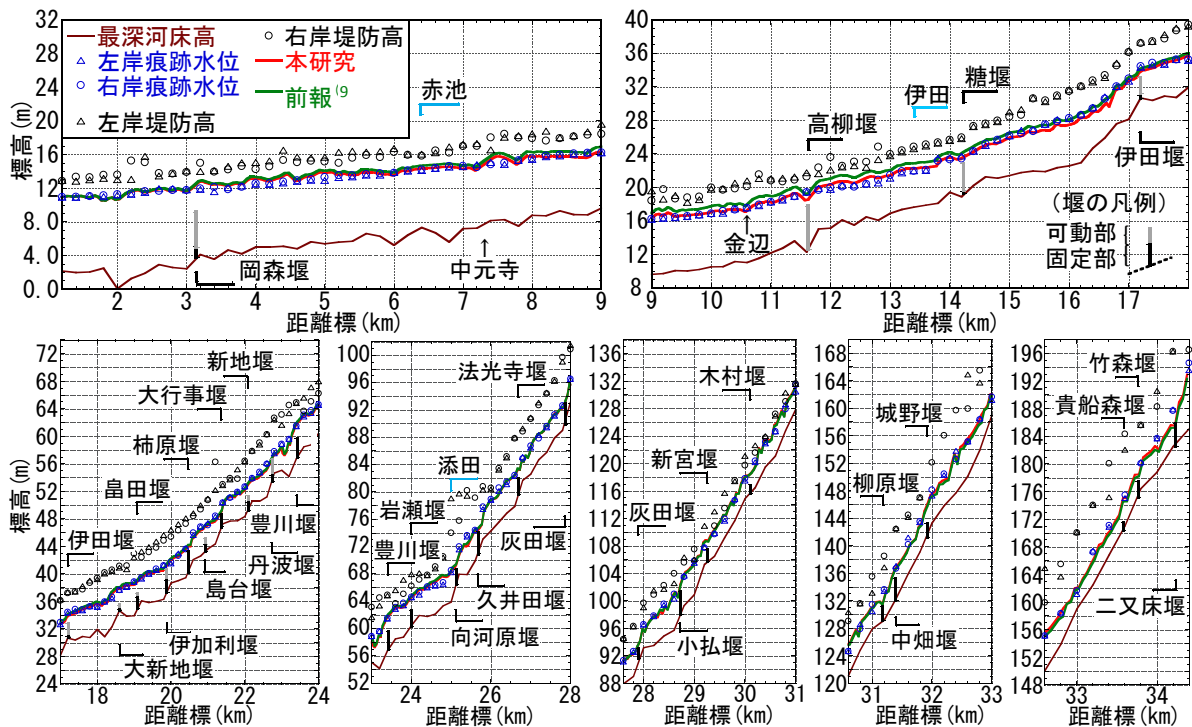


図-6 解析ピーク水位の縦断変化と痕跡水位との比較

解析結果に基づく応答曲面より最適値を得た。いずれの流域についても、等価粗度係数 N については、(1)森林、田、都市部のいずれも標準値の平均値程度で、(2)水域は、彦山川と金辺川では計画粗度係数値程度、中元寺川は計画粗度係数よりも若干小さい値であった。また、土層厚については、(1)中元寺川流域では、 d_s が他の流域に比べ若干大きく、(2)他の流域については同程度であること、透水係数 k_a については、概ね同程度であり、 $0.01\sim 0.021\text{m/s}$ となっている。これらの値はいずれも上述した面積比率より求めた透水係数の範囲の平均値程度であった。

(2) 痕跡水位、流量および水位ハイドログラフの再現性

図-6は、彦山川について、解析ピーク水位の縦断変化と痕跡水位との比較を行ったものである。なお、図中には参考文献⁹⁾の結果もあわせて示している。これより、(1)本研究の解析結果は、いずれの区間も8.8%程度の誤差で痕跡水位を再現していること、(2)前報⁹⁾に比べ、距離標14.3km付近の糖堰より下流側で、痕跡水位の予測精度が改善されていること、などが確認できる。これは、本解析では、支川の金辺川および中元寺川流域で最適化を行ったため、両支川の予測精度が向上したためである。

図-7, 8は、彦山川沿いの伊田、添田観測所、中元寺川沿いの春日橋観測所、金辺川沿いの夏吉観測所における水位・流量ハイドログラフの解析結果と実測値との比較を行ったものである。なお、彦山川沿いの伊田、添田観測所には前報⁹⁾の解析結果をあわせて示している。これらより、彦山川の伊田・添田観測所では(1)二山や三山の波形を持つ複雑な水位・流量ハイドログラフの波形を再現していること、(2)ピーク水位を4.4%程度、ピーク流量を9.2%程度の誤差で再現していること、(3)水位・

流量のいずれも前報に比べ予測精度が向上していること、中元寺川の春日橋観測所では、(1)ピーク水位に15.9%程度、ピーク流量に25.8%程度の誤差があるものの、(2)水位・流量ハイドログラフを概ね再現していること、金辺川の夏吉観測所では、(1)ピーク水位に2.5%程度、ピーク流量に29.7%程度の誤差があり、他の観測所に比べその誤差が大きいこと、(2)水位ハイドログラフは概ね再現しているものの、流量ハイドログラフは誤差が大きいこと、などが確認できる。金辺川では、流量・水位ハイドログラフのピーク発生時刻が実測値に比べ遅いことを踏まえると、解析条件として与えた計画粗度係数が、実績よりも大きいためと考えられる。

以上から、本最適化手法を用いた分布型流出・準平面2次元解析は、複数の支川が合流する河川での水位ハイドログラフを前報⁹⁾よりもより高い精度で予測可能である。しかし、水位を過大に、流量を過少に評価する観測地点もある。この要因としては、先述したように、粗度係数に計画粗度を用いていること、本モデルでは複断面河道を単断面として取り扱っていることなど、河道内の抵抗評価が十分ではないことが考えられる。今後は、洪水追跡モデルの改善を含め、河道の粗度係数の最適化法について検討したいと考えている。

5. おわりに

本研究から、(1)レーダ雨量では、地上観測雨量では捉えていなかった中元寺川流域の豪雨を捉えていること、(2)レーダ雨量を外力とし彦山川とその支川とそれぞれの流域を考慮した解析は、複数の支川が合流する河川での痕跡水位や水位ハイドログラフを十分な精度で予測でき

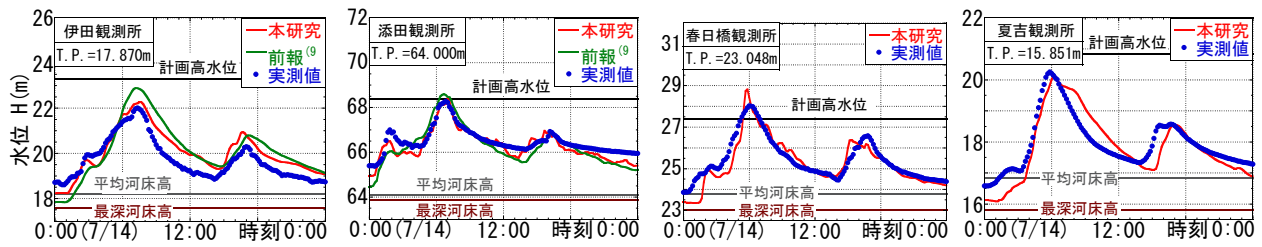


図-7 水位ハイドログラフの実測値と解析値との比較

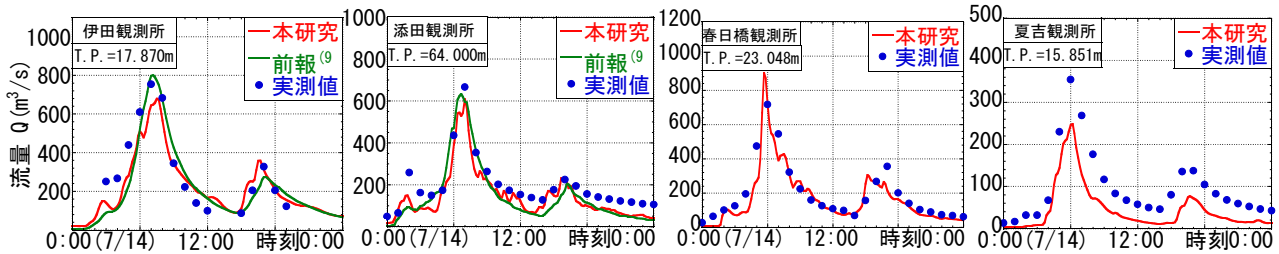


図-8 流量ハイドログラフの実測値と解析値との比較

ること、(3)水位の2乗誤差を目的関数とした遺伝的アルゴリズムと粒子群最適化法を用いた最適化法は、支川の流域特性を考慮できる有用な手法であること、などが確認された。

謝辞：本研究を実施するに当たり、遠賀川河川事務所の関係各位にはデータの提供など多大な協力を得た。また、本研究では、科学研究費基盤研究(C)(課題番号：16K06515, 研究代表者：重枝未玲)の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：川の防災情報，
<http://www.river.go.jp/kawabou/reference/index09.html>, 2017.
- 2) 立川康人, 佐山敬洋, 宝 馨, 松浦秀起, 山崎友也, 山路昭彦, 道広有里：広域分布型物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用, 自然災害科学, Vol.26, No.2, pp.189-201, 2007.
- 3) 深見親雄, 吉村栄司, 黒田尚吾, 井上靖生：FRICSにおける分布型洪水予測モデル検討の方向性と課題, 平成22年度河川情報シンポジウム講演集, pp.7-1-7-7, 2010.
- 4) 小林健一郎, 寶 馨, 立川康人：最適化手法による分布型降雨流出モデルのパラメータ推定, 水工学論文集, 第51巻, pp. 409-414, 2007.
- 5) 小槻峻司, 田中賢治, 小尻利治, 浜口俊雄：群知能最適化手法を用いた分布型流出モデルのパラメータ同定, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 68, No. 4, I_523-I_528, 2012.
- 6) 福岡捷二, 佐藤宏明, 藤澤寛, 大沼史佳：洪水流と河道の樹木繁茂形態に基づく樹木群透過係数と粗度係数の算定法, 水工学論文集, 第51巻, pp.607-612, 2007.
- 7) 立川康人, 須藤純一, 椎葉充晴, 萬和明, キムスンミン：粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発, 水工学論文集, 第55巻, pp.S511-S516, 2011.
- 8) キムヨンス, 立川康人, 萬和明, キムスンミン：粒子フィ

ルタと洪水追跡モデルを用いた水位流量曲線の作成および補正手法の開発, 河川技術論文集, 第20巻, pp.361-366, 2014.

- 9) 重枝未玲, 秋山壽一郎, Adelaida Castillo DURAN, 中木翔也, 大久保剛貴, 荒木佑仁：遺伝的アルゴリズムと粒子群最適化法を用いた実測水位に基づく分布型流出・洪水追跡のパラメータ最適化法, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.I_337-I_342, 2017.
- 10) 山口高志, 北川明, 小野寺直, 高水克哉, 幸弘美：レーダ雨量計の精度向上について, 河川情報研究, No.1, pp.91-104, 1993.
- 11) 気象庁：配信資料に関する技術情報(気象編)第162号, 気象庁観測部, 2004.
- 12) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 草野浩之, 野村心平：高解像度風上解法を用いた遠賀川流域の分布型流出・平面2次元洪水追跡と改修効果の評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, I_1429-I_1434, 2012.
- 13) 重枝未玲, 秋山壽一郎, Adelaida Castillo DURAN, 中木翔也, 大久保剛貴：河道特性を考慮した高計算効率な洪水流数值モデルの構築と彦山川への適用, 河川技術論文集, 第22巻, pp.127-132, 2016.
- 14) 栗原伸一：入門統計学, オーム社, p.319, 2011.
- 15) 佐藤浩, 小野功, 小林重信：遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価, 人工知能学会誌, Vol.12, No.5, 1997.
- 16) 尼子龍幸：ファーストオーダーアナリシス FOAにおける応答曲面法による寸法最適化, 豊田中央研究所R&Dレビュー, 第37巻, 1号, pp.31-36, 2002.
- 17) 多田毅：PSOアルゴリズムによる流出モデルパラメータの最適化, 水文・水資源学会誌, Vol.20-5, pp.450-461, 2007.
- 18) 国土技術研究センター：中小河川計画の手引き(案), p.180, 1994.
- 19) 地下水ハンドブック編集委員会：地下水ハンドブック, 建設産業委員会, pp.75-76, 1979.

(2017. 4. 3受付)