

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

重枝 未玲¹・秋山 壽一郎²・Adelaida Castillo DURAN³・
中木 翔也⁴・大久保 剛貴⁴・荒木 佑仁⁵

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)

E-mail: mirei@civil.kyutech.ac.jp

²フェロー会員 九州工業大学教授 (同上)

E-mail: akiyama@civil.kyutech.ac.jp

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)

E-mail: o595301d@mail.kyutech.jp

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)

E-mail: q345305k@mail.kyutech.jp, q345315s@mail.kyutech.jp

⁵学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (同上)

E-mail: n105004y@mail.kyutech.jp

本研究は、流域と河道特性を踏まえた上で、降雨外力から河道の水位・流量ハイドログラフなどの洪水流の予測を行なうことが可能な「分布型流出・準平面 2 次元洪水追跡モデル」と遺伝的アルゴリズムと粒子群最適化法を用いたモデルパラメータの最適化法を構築し、仮想流域での解析結果や彦山川流域での実測値に基づき、その妥当性について検討したものである。本研究から、本最適化手法を用いた分布型流出・準平面 2 次元解析は、同解析のモデルパラメータを推定できること、堰周辺の流れの再現性については改善の余地が残るものの、複数の支川が合流する河川での水位ハイドログラフをある程度の精度で予測すること、などが確認された。

Key Words: distributed rainfall-runoff model, quasi-2D unsteady free-surface flows simulation model, parameter optimization, genetic algorithms, particle swarm optimization, Hikosan river

1. はじめに

近年、わが国では、毎年のように過去に経験のないような豪雨による水害が発生し、甚大な被害が生じている。このような豪雨は、将来の世界規模の気候変動により、増加することが予測されている¹⁾。そのため、現在、将来激甚化する水災害の備えとして、洪水を河道内で安全に流すためのハードによる従来の防災対策に加え、治水施設の能力を上回る洪水が発生し氾濫が生じた場合に、ハード・ソフトの両面から被害軽減を図る減災対策が重要となってきた²⁾。

このような防災・減災対策を講じる上で、複数の豪雨シナリオを想定し、そのシナリオに対して、流域から流出した雨水が、河道特性や治水施設の影響を受けながら、洪水として河道を伝播するプロセスを的確に予測し、河道の水位や氾濫の発生する可能性の高い区間などの水害

リスクに関する情報を把握することが不可欠である。

洪水時の河道内水位を高精度に予測するためには、河道の流量、河道の縦横断面形状、平面形状および非定常性に起因する貯留現象や樹木や粗度による抵抗を適切に取り扱うことが不可欠である。このような観点から、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設定し、洪水の再現を行う数値モデル³⁾、降雨を外力として、流量や抵抗特性を補正しながら洪水の予測を行う数値モデル⁴⁾が構築されている。著者らは、分布型流出解析モデルと高度な平面2次元解析モデルを用いた洪水追跡法による「分布型流出・平面2次元洪水追跡モデル」を開発し、遠賀川流域を対象に、その予測精度⁵⁾やパラメータ最適化法⁶⁾などを示した。さらに、著者ら⁷⁾は、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構築し、同モデルが、1次元解析よりも高い精度で、平面2次元モデルより高い計算効率で、複数の支川が合流する河川での水位・流量ハイドログラフを予測可能であることを示した。このようなモデルにより、河道特性を考慮しつつ、1次元解析より高精度で、平面2次元解析より高計算効率なモデルパラメータの最適化が可能になると考えられる。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、流域と河道特性を踏まえた上で、降雨外力から河道の水位・流量ハイドログラフなどの洪水流の予測を行なうことが可能な数値モデルの開発を最終的な目的としたものである。ここでは、著者らの分布型流出解析モデルと上記の準平面2次元洪水流モデルを用いた「分布型流出・準平面2次元洪水追跡モデル」を構築するとともに、遺伝的アルゴリズムと粒子群最適化法を用いた新たなモデルパラメータの最適化法を提案し、その妥当性について検討した。

2. 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水位ハイドログラフ等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⁹⁾と②準平面2次元洪水流モデル⁹⁾で構成され、①で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、②では河道平面形状などの河道特性を考慮した上で洪水追跡を行う。両モデルは、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。以下では、両モデルの概要について述べる。

セル分布型流出解析モデルは、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洪水追跡を kinematic wave 法で行うモデルである。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、①計算セルを河道線形に沿って配列することで、平面2次元モデルのように河道特性を考慮し、②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ることで、1次元モデルのように高い計算効率で解析を行うことが可能なモデルである。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

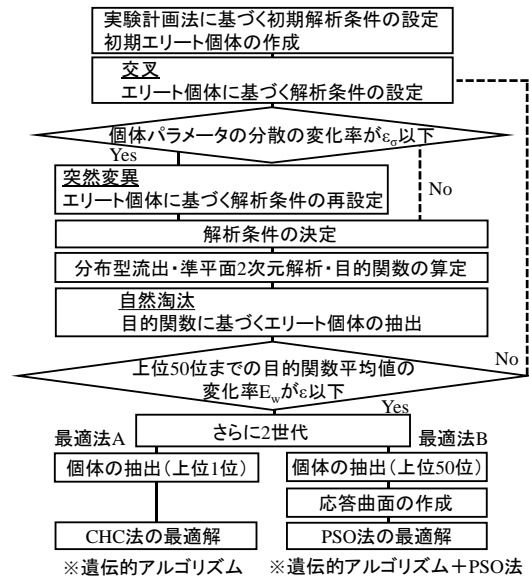


図-1 最適化法の概要

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⁹⁾を参照されたい。

3. 最適化法の概要

本分布型流出・準平面2次元洪水追跡モデルは、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が特徴である。この特徴を踏まえ、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。

最適化手法には、LM(Levenberg-Marquardt)法⁹⁾や群知能最適化手法¹⁰⁾等があり、分布型流出解析モデルの最適なパラメータ値の推定に成功している。本研究では、最適化手法として、遺伝的アルゴリズム¹¹⁾を用いた。同アルゴリズムでは、自然淘汰、交叉、突然変異のシミュレーションを行い大局的な最適解を求める最適化手法¹¹⁾である。本研究では、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)¹¹⁾を用いた。

モデルパラメータは、土地利用別の N , β , k_a , d_c , d_s とした。なお、今回の検討には、河道の粗度係数は最適化を行うパラメータには含めていない。これは、河床材料や河床の状況に応じた適切な粗度係数を与えれば、水位を予測できると考えたためである。また、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の和を用いた。

本研究の遺伝的アルゴリズムに基づく最適化法の概要は、図-1 に示す通りであり、その概要は以下の通りである。①初期の解析条件として、実験計画法¹²⁾に基づき、

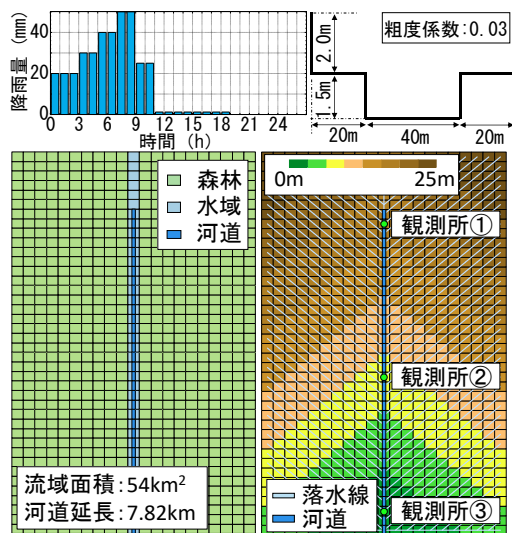


図-2 仮想的な流域と河道

表-1 仮想流域でのモデルパラメータの範囲

	$N(\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s})$	$d_s(\text{m})$	$d_c(\text{m})$	$k_a(\text{m/s})$	β
森林	0.40~0.80	0.0~0.20	0.0~0.20	$10^{-8}\sim 0.10$	2.0~6.0
水域	0.01~0.055	0.0	0.0		

表-2 観測値としたモデルパラメータ

	$N(\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s})$	$d_s(\text{m})$	$d_c(\text{m})$	$k_a(\text{m/s})$	β
森林	0.46	0.12	0.052	0.040	4.10
水域	0.033	0.0	0.0		

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 100 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 100 個体作成する。②交叉により、エリート個体から次世代の 100 ケースの解析条件を新たに設定する。なお、交叉はランダムに 2 個体を抽出して、パラメータ値を平均することでを行い、1 個体につき 2 回交叉に参加させた。③交叉により得られた 100 個体のパラメータ値の分散の変化率が閾値 ε_0 (本研究では $\varepsilon_0=0.2$) を下回った場合には、突然変異を生じさせ解析条件を再設定させる。突然変異の解析条件は、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 100 個体と前世代のエリート 100 個体の計 200 個体から、優良な 100 個体をエリート個体として抽出し、自然淘汰を行う。⑤上位 50 位までの目的関数の平均値の変化率 $E_w \leq \varepsilon$ を満たした後、2 世代後の上位 1 位のパラメータを最適値とする。満たさない場合は、上記の②~④を繰り返す。

遺伝的アルゴリズムでは、上記のような計算を何世代か繰り返す必要がある。そのため、適用する問題と閾値 ε の値によっては計算条件数が増大する。これを避けるために、本研究では遺伝的アルゴリズムから得られたエリート個体を使用して、著者らが参考文献 7 で用いた応答曲面法による最適パラメータの探索を導入した。すなわち、上記の⑤の後、さらに 2 世代後の計算結果の上位 50 位までのエリート個体に基づき応答曲面を作成し、

その関係から最適化パラメータを探索する手法である。これにより、目的関数の平均値の変化率の閾値 ε の値を大きくでき、繰り返し世代数を少なくできると考えられる。本研究では最適パラメータの探索には、粒子群最適化法(PSO 法)¹⁹を用いた。粒子群最適化法(PSO 法)は、位置情報を持った多数の粒子を応答曲面上に設定し、その挙動によって局所的な最小値ではなく、大域的に最小値を求める手法である。なお、PSO 法では 100 個の粒子を用いて最適化を探索させた。

ここでは、遺伝的アルゴリズムのみを用いた最適化法を最適化法 A、遺伝的アルゴリズムと粒子群最適化法を用いたものを最適化法 B とする。

4. 最適化法の妥当性の検討

(1) 仮想的な流域と河道を対象にした妥当性の検討

はじめに、図-2 に示す仮想的な流域と河道を対象に、解析結果を実測水位として与え、本手法の最適パラメータ値の妥当性について検討した。

解析対象流域の流域面積は約 54km²で流域の地形と土地利用は図-2 に示す通りである。本最適化手法の基本性能を調べる目的で、土地利用は森林と水域のみと単純化した。河道は延長 7.82km とし、河道横断面は図-2 に示す複断面とした。降雨外力には図-2 に示す降雨を流域一様に与えた。モデルパラメータの範囲を表-1 に示すように設定し、表-2 に示すモデルパラメータによる解析結果を実測水位として用いた。なお、観測所は図-2 中の○で示す位置とした。

図-3 は、観測所②の水位ハイドログラフの解析結果を示したものである。なお、後述するように、最適化法による最適パラメータ値は若干の違いはあったが、最適パラメータ値を用いた解析結果は一致していたので、図中には手法 A の結果を示している。図中のハッチは、各世代のパラメータの解析結果の範囲を示している。これより、世代が進むにつれて、解析結果の幅は小さくなり、最終的には実測水位と一致すること、などが確認できる。他の観測所でも同様であった。

図-4 は、最適化法 A と最適化法 B より得られた最適パラメータ値を世代別で示したものである。なお、 $\varepsilon=0.15\%$ とし、12 世代目を最適パラメータとした。図中のハッチは最適化法 A の世代別のパラメータの範囲を示している。これより、(1)最適化法 A では、森林の N 、 d_s は世代が進むごとに、パラメータの範囲を縮小しながら、最適パラメータ値が設定値へと漸近すること、(2)一方、水域の N と β 、 k_a 、 d_c はさほど収束していないこと、(3)最適パラメータ値については、遺伝的アルゴリズムのみを用いた手法も、本最適化手法も比較的良好な精

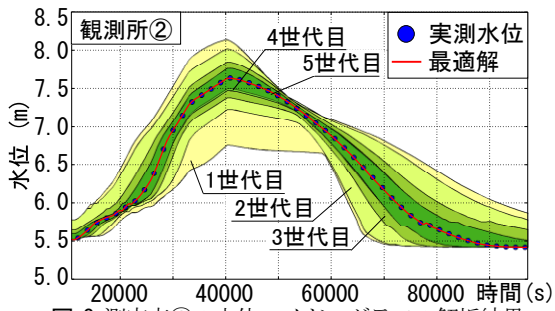


図-3 測定点②の水位ハイドログラフの解析結果

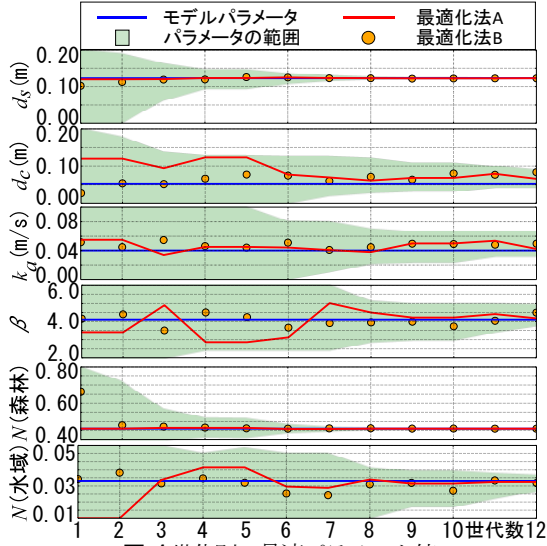


図-4 世代別の最適パラメータ値

度でモデルパラメータを再現できること、(4)最適化法 B では、最適化法 A の結果に基づき応答曲面を作成し、PSO 法により最適値を求めるため、最適化法 A に比べ、早い世代で最適パラメータが設定値と一致すること、などがわかる。透水係数 k_a 、マトリックス部の層厚 d_c 、重力水部と不飽和水部との飽和透水係数の比 β でさほど収束しないのは、今回の降雨では森林の保水能力を超えると早期に地表面流が生じ、流域からの流出は地表面流が支配的であったためと考えられる。

以上から、最適化法 A、B のいずれも最適パラメータ値を再現でき、最適化法 B は、最適化法 A に比べ、早い段階で最適パラメータ値が設定値と一致することが確認された。

(2) 彦山川流域を対象にした妥当性の検討

最後に、本最適化手法を九州北部豪雨災害で被災した彦山川へ適用し、その有用性を検討した。

彦山川は、一級河川遠賀川の一次支川であり、その幹線流路延長 43.8km、流域面積 327.6km² であり、土地利用は山地が約 59%、田が 11%、農地が約 2%、市街地が約 15%、荒地が 5%、水域が 8% を占めている。彦山川流域の概要および水位観測所を図-5 に示す。

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 20 時から 15 日 0 時の出水を対象とした。粗度係数には計画粗度係数を用いた。降雨外



図-5 彦山川流域の概要および水位観測所

表-3 彦山川流域の最適パラメータ値

	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$d_s(m)$	$d_c(m)$	$k_a(m/s)$	β
森林	0.58	0.17	0.059	0.074	3.44
田	2.06				
農地	0.30				
都市	0.059				
荒地	0.31				
水域	0.018				

力には、2012 年 7 月 13 の雨量観測所の実績降雨を、河道下流端には中島水位観測所の実測水位を与えた。

彦山川沿いの赤池、伊田、添田水位観測所での実測水位に基づき最適化法 B で最適化を行った。なお、最適化は、2012 年 7 月 13 日 24 時から 14 日 13 時までの一つの洪水波形で行い、得られた最適パラメータを用いて全時刻の解析を行った。

表-3 は、最適化法 B より得られた最適パラメータ値を示したものである。なお、 d_s 、 d_c については森林のみを考慮し、他の土地利用については 0 とした。また、 $\epsilon=0.15\%$ とした。最適値は 8 世代目で得られた。これより、(1)等価粗度係数については、森林、田、農地、荒地はいずれも標準値程度であること、(2)一方で、都市部は大きく、水域は比較的小さな値となっている。

図-6、7 は、彦山川沿いの赤池、伊田、添田水位観測所での水位・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。いずれも前報の準平面 2 次元洪水流解析結果⁸⁾をあわせて示している。なお、同解析は、遠賀川流域を対象に実験計画法と応答局面法⁷⁾により最適化したパラメータ値を用いた流出解析結果に基づき実施している。水位ハイドログラフについては、(1)ピークの時間にずれはあるものの、二山の波形を持つ複雑な水位ハイドログラフの波形を再現していること、(2)赤池水位観測所では減水期に水位を過大評価し最大で 1.63m 程度の誤差があること、(3)伊田水位観測所ではピーク水位に 0.88m 程度の差が生じていること、(4)添田水位観測所では、ピーク付近の水位を 6% 程度の誤差で

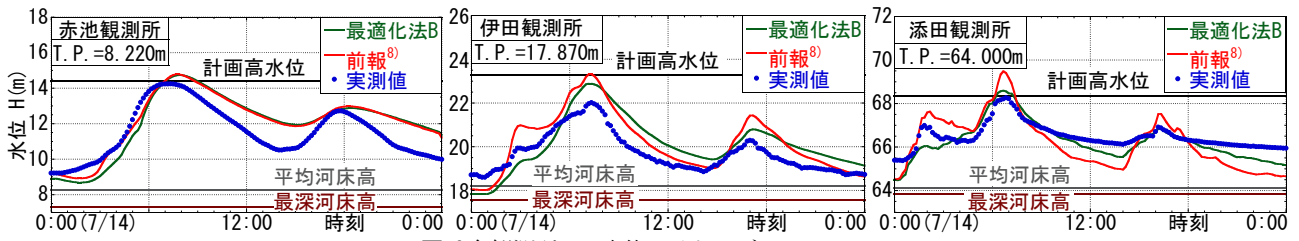


図-6 各観測所での水位ハイドログラフ

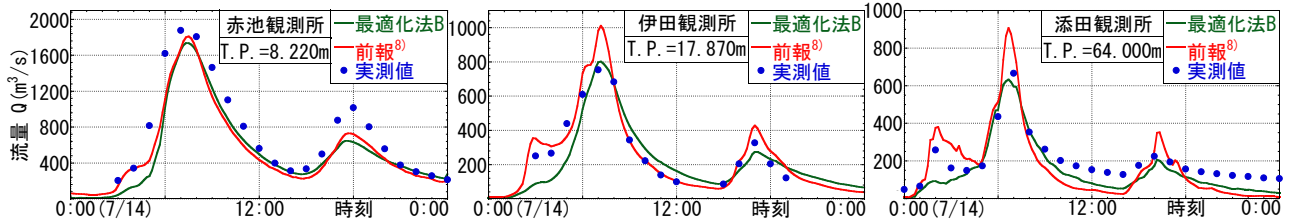


図-7 各観測所での流量ハイドログラフ

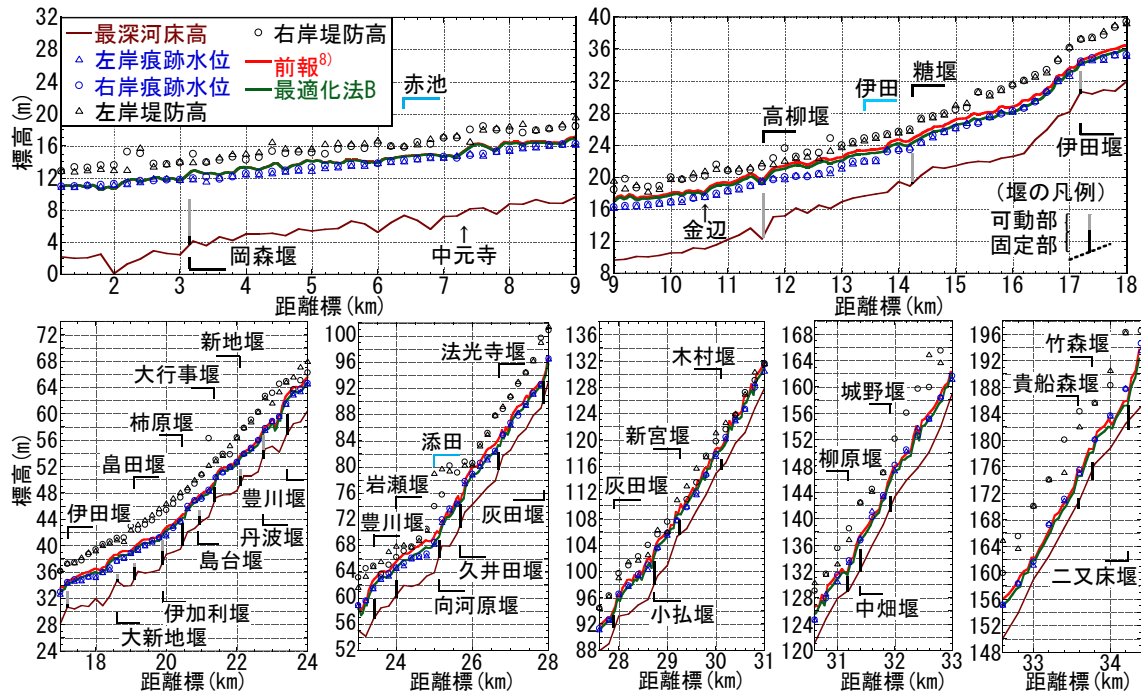


図-8 痕跡水位の比較

再現していること、(5)水位観測所周辺は、堰があるため、特に低水時にいずれのモデルも実測水位との誤差が大きくなること、(6)最適化された準平面2次元解析は、前報⁸⁾に比べ予測精度は高いこと、などが確認できる。流量ハイドログラフについては、(1)赤池・伊田観測所の二山波形や添田観測所の三山波形を持つ複雑な流量ハイドログラフを再現していること、(2)最適化した準平面2次元解析は、前報の結果に比べ予測精度が向上していること、などが確認できる。

図-8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。これより、(1)いずれのモデルも堰周辺で誤差が生じているものの、(2)それ以外の区間では、痕跡水位との間には、距離標14.3km付近の糖堰よりも上流側では5%程度の誤差、それよりも下流側では30%程度の誤差があること、などがわかる。距離標14.3km付近の糖堰より下流側で、痕跡

水位との差が大きい理由は、支川の金辺川および中元寺川の流量を過大に評価したためと考えられる。

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⁸⁾よりもより高い精度で予測可能である。しかし、水位を過大に評価する観測地点もある。この要因として、流出パラメータを流域で一様として与えていること、雨量をレーダ雨量ではなく、地上観測雨量を与えたこと、粗度係数に計画粗度を用いていること、などが考えられる。今後は、これらの改善について検討したいと考えている。

5. おわりに

本研究では、流域と河道特性を踏まえた上で、降雨外

力から河道の水位・流量ハイドログラフなどの洪水流の予測を行なうことが可能な「分布型流出・準平面2次元洪水追跡モデル」を構築するとともに、遺伝的アルゴリズムと粒子群最適化法を用いたモデルパラメータの最適化法を提案し、その妥当性について、仮想流域と彦山川流域を対象に検討した。その結果、本最適化手法を用いた分布型流出・準平面2次元解析は、堰周辺の流れの再現性については改善の余地が残るものの、複数の支川が合流する河川での水位ハイドログラフをある程度の精度で予測することが確認された。

謝辞：本研究は、科学研究費基盤研究(C)(課題番号：16K06515、研究代表者：重枝未玲)の助成を受けたものである。本研究の遂行にあたり、本学学部生の藤田輝君に多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会 河川分科会 気候変動に対応した治水対策検討小委員会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～中間とりまとめ、http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000870.html, 2015.
- 2) 社会資本整備審議会 河川分科会大規模氾濫に対する減災のための治水対策検討小委員会：大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について ～社会意識の改革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～、http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/daikibohanran/index.html, 2015.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 野村心平：実測水位に基づく分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルのパラメータ最適化法, 河川技術論文集, 第18巻, pp.459-464, 2012.
- 8) 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値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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 栗原伸一：入門統計学, オーム社, p.319, 2011.
- 13) 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.

(2016.9.30 受付)

OPTIMIZATION METHOD USING GENETIC ALGORITHMS AND PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR PARAMETER ESTIMATION OF DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF AND QUASI-2D FLOOD FLOWS MODEL

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Adelaida Castillo DURAN,
Syouya NAKAKI, Kouta OKUBO and Yuto ARAKI

The parameter optimization method based on observed water level for distributed rainfall-runoff and quasi-2D flood flows simulation models were examined. The Genetic Algorithms(GA) and Particle Swarm Optimization(PSO) were used for the optimization method. The rainfall runoffs were simulated by a distributed hydrological model using a high-resolution scheme. The flood flows in the main river and a tributary were simulated simultaneously by the quasi-2D unsteady free-surface flow model. The flooding event in the Hikosan river basin in July 2012 were simulated by the model. The simulated results were compared with the observed water level. It shows that the proposed optimization method was a useful tool for parameter estimation.