

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

PARAMETER OPTIMIZATION METHOD BASED ON OBSERVED WATER SURFACE OF FLOOD FLOWS FOR DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF AND 2D FLOOD FLOWS SIMULATION MODEL

重枝未玲¹・秋山壽一郎²・野村心平³

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA and Shinpei NOMURA

¹正会員 博士(工) 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 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 工学研究院建設社会工学研究系 (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前期課程 (同上)

The parameter optimization method based on observed water surface of flood flows for distributed rainfall-runoff and 2D flood flows simulation model was examined. The design of experiments and response surface method were used for the optimization method. The rain-fall 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 2D unsteady free-surface flow model with treatment of parallel computation and sink term semi-implicitly. The flooding event in the Onga river basin in July 2003, 2009 and 2010 were simulated by the model. The simulated results were compared with the observed water level. It shows that the optimization method is a useful tool for parameter estimation..

Key Words : distributed rainfall-runoff model, 2D unsteady free-surface flows simulation model, parameter optimization, design of experiments, Response surface method, Onga river

1. はじめに

近年、観測史上最大やそれに近いような豪雨による水害が頻発し、甚大な被害が生じている。地球温暖化に伴う気候変動により年最大日雨量が増大する予測¹⁾²⁾もなされており、今後、観測史上最大の豪雨が発生する可能性はますます高くなると考えられる。

このような自然環境の変化とともに、社会的背景から「できるだけダムにたよらない治水対策」への転換³⁾も打ち出されており、治水対策は、流域全体で流出の抑制対策を行い河道への雨水流出を遅らせ洪水ピーク流量を低減させることで治水安全度を確保する「流域と一体となった治水対策」へと移行している。超過洪水対策を検討する上で、流域の治水施設が超過洪水に及ぼす影響を知ることは重要であり、そのためには、降雨外力から治水施設によって変化する流出プロセスやその結果によって生じる洪水プロセスを予測できるモデルが不可欠である。

流出プロセスの予測については、土地利用に応じてモ

デルパラメータを設定する地物指向の分布型流出モデル⁴⁾⁵⁾が、洪水プロセスの予測については、河道の縦横断面形状、平面形状、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する平面2次元モデル等が開発⁶⁾⁷⁾されており、流量ハイドログラフや水位ハイドログラフを適切に予測できることを示している。著者らは、このようなモデルを用いれば、任意の降雨から水位ハイドログラフの予測が可能となり、モデルの検証やモデルパラメータの設定が流量に比べ観測精度の高い水位に基づき行うことが可能になると考え、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、同モデルが遠賀川流域を対象に本川と複数の支川を対象に、流域と河道特性を踏まえた上で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示した⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。しかし、モデルパラメータの最適化には課題が残った。

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、降雨外力から本川および支川の水位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「分布型流出解析・平面2次元洪水追跡モデル」の開発を最終的な目的としたものである。ここでは、同モデルの特徴を踏まえ、従来の流出モデルのように流量ハイドログラフではなく、観測所が多かつ精度が高い水位ハイドログラフに基づき、分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルのモデルパラメータの最適化について検討した。

2. モデルと最適化手法の概要

(1) 分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルの概要¹⁰⁾

分布型流出・平面2次元洪水追跡モデル¹⁰⁾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と②平面2次元自由表面流モデルで構成され、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。

セル分布型流出解析モデルは、斜面流と河道流の洪水追跡をkinematic wave法で行うモデルである。なお、河道流の追跡は、平面2次元洪水追跡の対象としない河道についてのみ実施する。セル分布型の基礎方程式を式(1)に示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (1)$$

ここに、 t =時間、 x =斜面の距離、 h =水深、 r =降雨強度、 q =単位幅流量である。単位幅流量 q には飽和流、不飽和流、表面流を区別できる斜面表層の流量流積関係式¹¹⁾を用いた。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。式(1)の離散化は、高解像度風上解法の一つであるMUSCL法¹²⁾に基づき行われている。

平面2次元洪水追跡モデルは、複数の河川での洪水追跡をDynamic wave法で行うモデルである。同モデルは、有限体積法、流束差分法(FDS法)、領域分割法による並列計算などのCFD技術によるPSA-FUF-2DFモデル(A Parallelized Spatial Averaged Finite volume method on Unstructured grid using FDS technique for 2D Free-surface flows)¹⁰⁾である。なお、同モデルの摩擦勾配の取り扱いについては半陰解法を用いている。PSA-FUF-2DFモデルの基礎方程式は、以下に示す通りである。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2 + \mathbf{S}_3 = \mathbf{0} \quad (1)$$

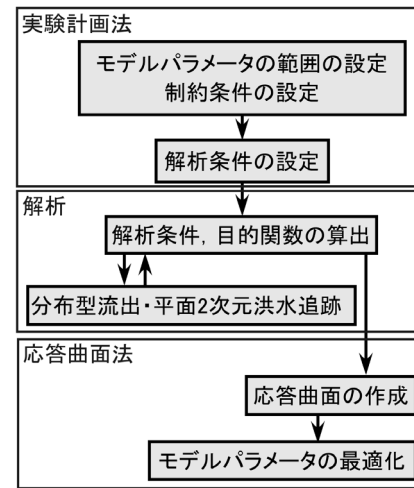


図-1 最適化の手順

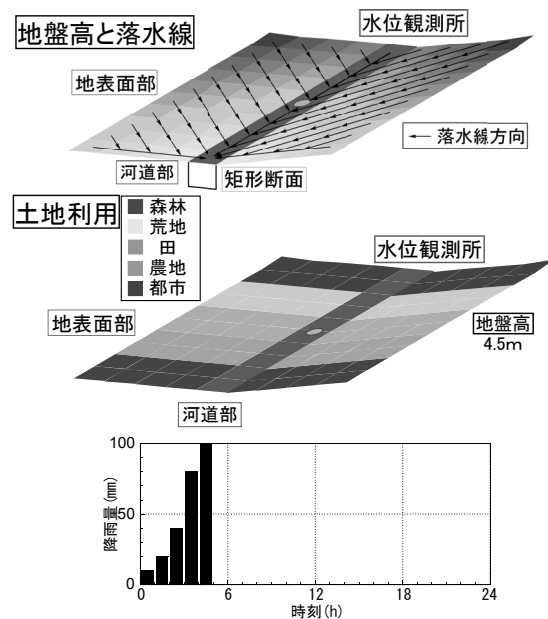


図-2 仮想流域と降雨ハイトグラフ

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= (h, uh, vh)^T; \quad \mathbf{E} = (uh, u^2h + 1/2gh^2, uvh)^T; \\ \mathbf{F} &= (vh, uvh, v^2h + 1/2gh^2)^T; \\ \mathbf{S}_1 &= (0, -ghS_{ox}, -ghS_{oy})^T; \quad \mathbf{S}_2 = (0, ghS_{fx}, ghS_{fy})^T; \\ \mathbf{S}_3 &= (q_r, F_x, F_y)^T \end{aligned}$$

ここに、 $\mathbf{U}$ =保存量ベクトル、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{F}$ = x 、 y 方向の流束ベクトル、 $\mathbf{S}_1$ =河床勾配ベクトル、 $\mathbf{S}_2$ =摩擦勾配ベクトル、 $\mathbf{S}_3$ =発生項・消滅項ベクトル、 h =水深、 u 、 v = x 、 y 方向の流速、 g =重力加速度、 q_r =単位面積当りの流入流量（-：流入、+：流出）、 S_{ox} 、 S_{oy} = x 、 y 方向の河床勾配、 S_{fx} 、 S_{fy} = x 、 y 方向の摩擦勾配、 F_x 、 F_y =計算メッシュ内に樹木などの物体群が含まれる場合に付加される x 、 y 方向の流体力項である。摩擦勾配は、Manningの公式を用いて、流体力項は抵抗係数 C_d を用いた式¹³⁾で計算される。式(1)の離散化は、時間積分についてはEulerの陽解法に基づき、空間積分については有限体積法と流束差分法¹²⁾に基づき行われている。

分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルのモデルパラ

表-1 モデルパラメータの設定範囲

	$N(\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s})$	$d_s(\text{m})$	$d_c(\text{m})$	$k_a(\text{m/s})$	β
森林	0.4~0.6	0~0.3	0~0.3	$3.5 \times 10^{-5} \sim 0.03$	4~6
荒地	0.2~0.4	0.00	0.00		
田	1~3				
農地	0.2~0.4				
都市	0.01~0.1				
水域	0.035				

表-2 観測結果として用い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	0.60	0.20	0.15	0.015	5.00
荒地	0.30	0.00	0.00		
田	2.0				
農地	0.30				
都市	0.055				
水域	0.035				

表-3 仮想流域での解析条件の一例

	$N(\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s})$					$d_s(\text{m})$	$d_c(\text{m})$	$k_a(\text{m/s})$	β
	森林	荒地	田	農地	都市				
Run1	0.4	0.31	3	0.2	0.1	0	0	0.028502	5.8
Run2	0.8	0.24	1	0.27	0.0145	0	0	0.000035	5.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Run37	0.8	0.33	1.8	0.2	0.01	0.15	0.15	0.024007	4.7
Run38	0.4	0.2	3	0.26	0.1	0.15	0.3	0.009025	4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Run71	0.4	0.2	3	0.4	0.01	0	0.3	0.03	4
Run72	0.8	0.4	1	0.2	0.1	0	0.3	0.000035	6

メータは、流域の土地利用(森林, 荒地, 田, 農地, 都市)に応じた等価粗度 N と、飽和透水係数の比 β 、土層中の大空隙部の飽和透水係数 k_a 、マトリックス部の層厚 d_c 、全空隙に相当する層厚 d_s と河道の粗度係数 n である。なお、 β 、 k_a 、 d_c 、 d_s は土地利用が森林の場合についてのみ考慮した。

(2) 最適化手法の概要

分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルは、前述したように、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。ここでは、この特徴を踏まえ、従来の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に基づくモデルパラメータの最適化手法について述べる。

最適化手法には、LM(Levenberg-Marquardt)法¹⁴⁾や群知能最適化手法¹⁵⁾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、車両の設計分野の寸法最適化¹⁶⁾で用いられている実験計画法と応答曲面法を適用した。なお、著者らの知る限り、同様な手法の流出モデルへの適用例は存在しない。

実験計画法は、モデルパラメータが目的関数に及ぼす影響を把握するための効率的な解析条件を設定する方法である。応答曲面法は、モデルパラメータと目的関数との関係を応答曲面と呼ばれる2次の多項式で求め、その関係から最適化パラメータを推定する方法である。ここでは、目的関数を観測水位と解析水位を用いたカイ2乗基準とし、最適化を行うモデルパラメータは、5つの土地利用別の N 、 β 、 k_a 、 d_c 、 d_s の9つとした。なお、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、河道の縦横断面形状、平面形状および非定常性に起因して起こる貯留現象を取り扱うことができる平面2次元モデルであれば、樹木繁茂状況や河床材料や状態に応じた適切なパラメータ値を設定することで、水位ハ

イドログラフを予測できるためである。

最適化の概要は図-1に示す通りであり、その手順は(1) 実験計画法による解析条件の設定、(2) 解析条件による分布型流出・平面2次元洪水追跡の実行と誤差のカイ2乗基準の算定、(3) 解析結果に基づく応答曲面の作成と目的関数を最小とするパラメータの推定である。

3. 最適化手法の妥当性の検討

はじめに、図-2に示す仮想的な流域と河道を対象に、仮定したパラメータ値より得られる解析結果を観測水位として、本手法の最適パラメータ値の妥当について検討した。

解析対象流域の流域面積は5.2km²で流域の地形と土地利用は図-2に示す通りである。河道は矩形断面で延長2300m、川幅25m、勾配を9/4600、粗度係数 $n=0.035$ とした。降雨外力には図-2に示す後方集中型の降雨を与えた。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観測値として用いた。なお、観測地点は図-2中の○で示す河道中央とした。

表-3は、表-1のパラメータ値の範囲から、実験計画法に基づき設定した解析条件の一例を示したものである。この条件で分布型流出解析・平面2次元洪水追跡を行い、応答曲面を算定した。

表-4は、応答曲面より得られる最適パラメータ値を示したものである。これより、(1) マトリックス部の層厚 d_c 、全空隙に相当する層厚 d_s で15~20%程度の誤差があるが、(2) 本最適化手法は比較的良い精度でモデルパラメータを再現できることがわかる。図-3は、最適パラメータにより求めた水位ハイドログラフの解析結果を示したものである。図中には他のパラメータを用いた結果も示している。これより、(1) 最適パラメータ値を使用

表-4 仮想流域でのモデルパラメータの最適値

$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$d_s(m)$	$d_c(m)$	$k_a(m/s)$	β
森林	0.62	0.23	0.12	0.015
荒地	0.30			
田	1.87	0.00	0.00	
農地	0.28			
都市	0.053			
水域	0.035			

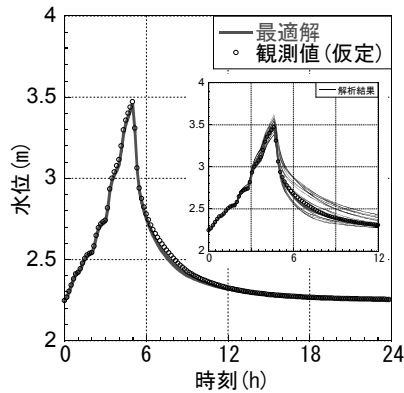


図-3 水位ハイドログラフの比較

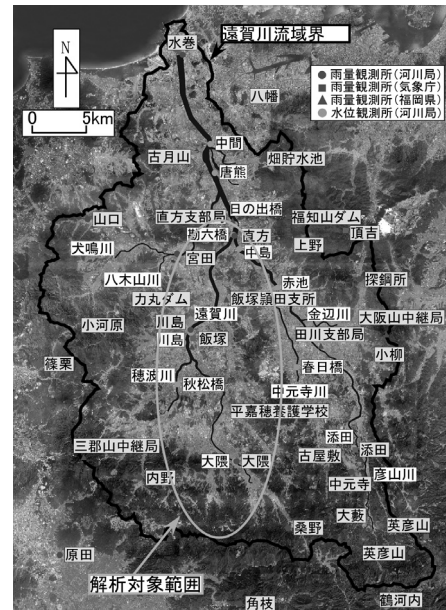


図-4 遠賀川流域の概要と解析対象区間

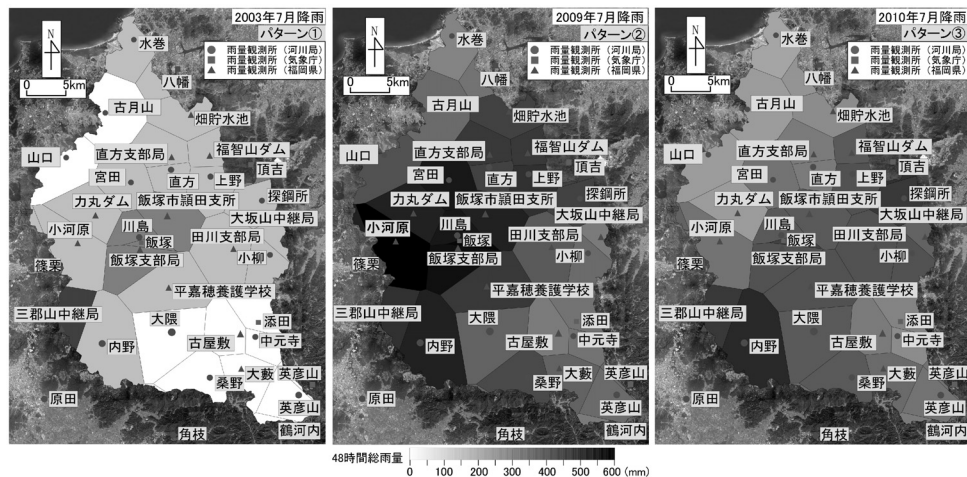


図-5 降雨量の空間分布

していない場合、水位上昇時やピーク値や減水時での誤差が生じ、特に減水時に大きいこと、(2) 最適パラメータ値を用いた場合、減水時で若干の誤差があるものの、増水時、ピーク時の水位ともに再現性高いことが確認できる。

このように、最適パラメータ値を用いることで十分な精度で水位ハイドログラフを予測可能であることから、本最適化手法は妥当であることがわかる。ただし、減水時に誤差があることから土層水の流れに関するパラメータには検討の余地が残る。この点については、今後検討したいと考えている。

4. 遠賀川流域への適用

次に、遠賀川流域を対象に観測水位に基づき最適化パラメータを推定するとともに、複数の豪雨に対する同モデルの予測精度と最適化パラメータの妥当性について検討した。

(1) 遠賀川と流域の概要

遠賀川は幹川流路延長61km、流域面積1,026km²の一級河川であり、流域の土地利用は、森林が約52%、水田や果樹園等の農地が約19%、宅地等市街地が約18%、荒地が約6%を占める。図-4に遠賀川流域の航空写真と雨量・水位観測所を示す。

(2) 解析条件の概要

分布型流出解析では遠賀川流域全体を、平面2次元洪水追跡では図-4に示す勘六橋観測所より上流を、それぞれ解析対象とした。

降雨には2003年(パターン①)、2009年(パターン②)、2010年(パターン③)の3つの降雨パターンを用い、パターン②の降雨でパラメータの最適化を行った後、そのパラメータ値を用いてパターン①と③での解析を行った。図-5は解析に用いた総降雨量分布を示したものである。いずれも中流域を中心とした降雨分布であることが特徴である。

分布型流出解析の開始時刻は、それぞれパターン①で

表-5 遠賀川流域でのモデルパラメータの最適値

	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$d_s(m)$	$d_c(m)$	$k_a(m/s)$	β
森林	0.63	0.00	0.00	0.015	5.09
荒地	0.30				
田	2.53				
農地	0.29				
都市	0.055				
水域	0.035				

は2003年7月18日2時、パターン②では2009年7月24日1時、パターン③では2010年7月12日1時とした。平面2次元洪水追跡では、図-4に示す勘六橋観測所より上流の遠賀川本川と支川の穂波川を対象とし、河道を12区間に分割した。河道横断面図はパターン①では2003年のものを、パターン②と③では2009、2010年のものを用いた。総メッシュ数はパターン①で7743個、パターン②と③で5893個であった。平面2次元洪水追跡のパラメータについては、粗度係数には計画で用いられた値 $0.035(m^{-1/3}s)$ を、下流端には勘六橋観測所の実測水位を与えた。平面2次元洪水追跡の解析開始時刻は、それぞれパターン①では2003年7月18日15時、パターン②では2009年7月24日12時、パターン③では2010年7月13日1時とした。なお、流出解析および平面2次元洪水追跡の解析データの作成方法の詳細は、参考文献^{(8),(9),(10)}に示す通りである。実験計画法に基づき設定した解析条件は、表-3と同様である。

(3) 結果と考察

表-5は、分布型流出・平面2次元洪水追跡の解析結果に基づき求めた応答曲面より得られる最適パラメータ値を示したものである。これより、(1) 等価粗度係数については、市街地で若干大きな値を取るが、いずれも標準値程度であること、(2) マトリックス部の層厚 d_c と全空隙に相当する層厚 d_s には大きな差がないこと、などわかる。パターン②の降雨では、小河原雨量観測所等で時間降雨100mmを越えるなどの豪雨であったことを踏まえると、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と考えられる。

図-6は、遠賀川・穂波川について、パターン②の水面形の経時変化の解析結果と実測値との比較を行ったものである。これらより、本川の遠賀川では、(1) 24日17:00～23:00では、勘六橋から穂波川との合流部付近までの区間で水位上昇が顕著となること、(2) 一方で、24日23:00～25日20:00では、穂波川合流部よりも上流で水位が上昇した後、低下すること、(3) 解析結果は実測値を概ね再現していること、などが確認できる。また、支川の穂波川では(1) 本川の水位上昇により、合流部から秋松橋水位観測所の区間で水位が上昇すること、(2) 水面形は、増水時、減水時ともに概ね相似形を保ち変化すること、(3) 解析結果は実測値を概ね再現していること、などが確認できる。

図-7は、パターン①～③について、最適パラメータ値を用いた水位ハイドログラフの解析結果を示したもので

ある。これより、(1) いずれの観測所についても、若干のずれがあるものの、水位ハイドログラフの波形やピーク値などを再現できること、(2) 特に、パターン②と③では2山の波形を持つ複雑な水位ハイドログラフとなるが、これらも再現していること、などがわかる。このように、本最適化手法は、モデルパラメータを十分な精度で推定できることがわかる。しかしながら、(3) パターン①では減水が早いこと、(4) パターン②、③では2波目のピークが早く減水も早いことなどがわかる。これは、先述の仮想領域での検討結果を踏まえると、本最適化手法では土壌水のパラメータの推定が十分ではなく土層厚などのパラメータが現実とは異なる可能性があり、表面流が支配的となる増水時に比べ、相対的に土壌水の影響が大きくなる減水時に差が生じたためと考えられる。

以上から、本最適化手法は、土壌水の流れに関するパラメータの推定には課題が残るが、最適パラメータ値を推定する上で有用であることが確認された。

5. おわりに

本研究では、水位ハイドログラフに基づき分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルのモデルパラメータの最適化について検討した。その結果、以下のことが確認された。

- (1) 実験計画法と応答曲面法を用いた実測水位に基づく最適化手法は、モデルパラメータを十分な精度で推定できること。
 - (2) 分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルは、最適化パラメータを用いることで、複数の豪雨に対して本川および支川の水位ハイドログラフを十分な精度で再現できること。
 - (3) ただし、土壌水の流れに関するパラメータの推定には課題が残るため、実験計画法による解析条件の追加など、その改善方法について検討が必要なこと。
- 今後は、上記のパラメータ推定の改善を行うとともに、地物や土壌の湿潤状況と最適パラメータとを関連付けることで、土地利用や地質等からパラメータを設定できる手法を検討したいと考えている。

謝辞： 本研究を実施するに当たり、国土交通省遠賀川河川事務所からデータ提供などで、当時本学学部4年生の網中達郎君、大谷昌成君にはデータ整理等で協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：地球温暖化に伴う気候変動について、大規模水害対策に関する専門調査会，2007。
- 2) 小林健一郎，實 馨，中北英一：全球気候モデル出力を用いた日本域の100年確率日降水量の将来予測，水工学論文

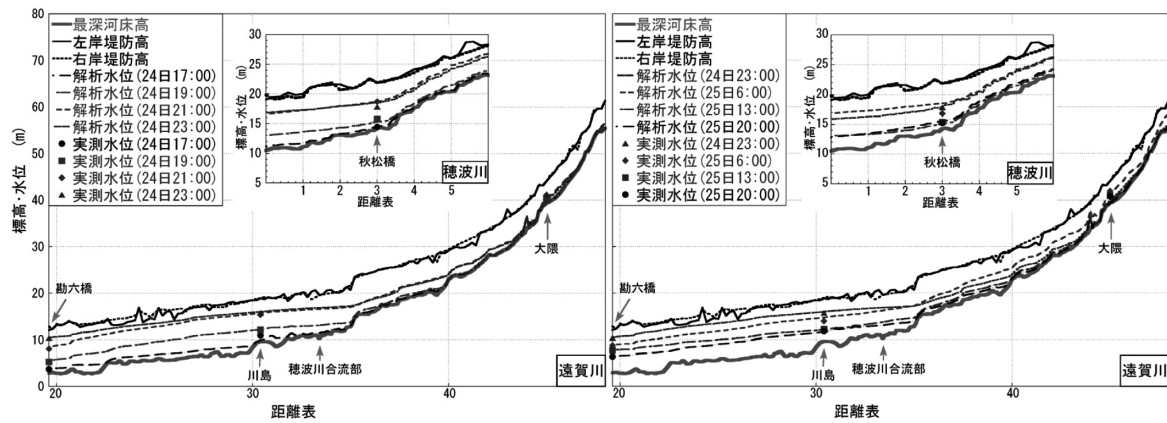


図-6 水面形の経時変化(パターン②) 左: 24日17:00~23:00, 右: 24日23:00~25日20:00

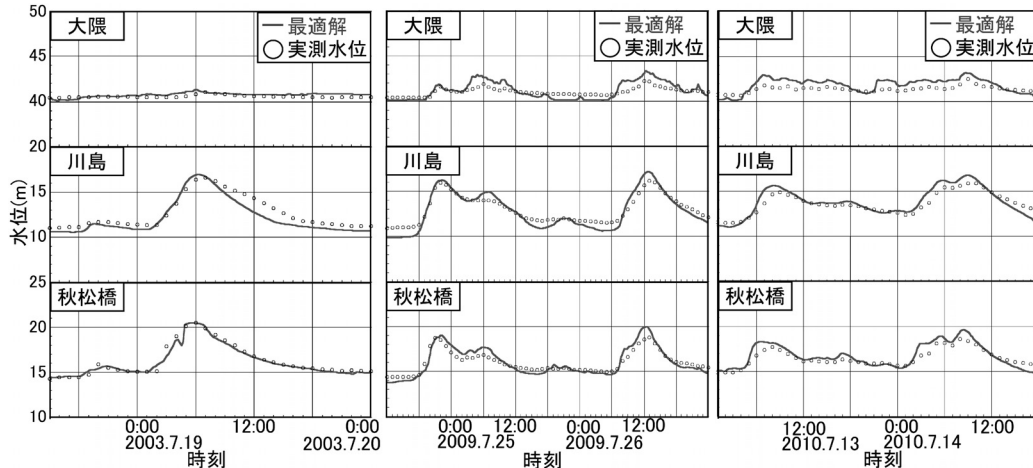


図-7 各観測所での水位ハイドログラフの比較(左: パターン①, 中: パターン②, 右: パターン③)

集, 第54巻, pp.223-228, 2010.

- 3) 今後の治水対策のあり方に関する有識者会議: 今後の治水対策のあり方について(中間とりまとめ), 国土交通省河川局, 2010.
- 4) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝: 地物データGISを用いた新たな地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案, 土木学会論文集, Vol.63, No.3, pp.206-223, 2007.
- 5) 天口英雄, 河村明, 荒木千博, 高崎忠勝: 神田川上流域の地物データを用いた洪水流出モデルの構築とその適用, 河川技術論文集, 第15巻, pp.377-382, 2009.
- 6) 福岡捷二, 渡邊明英, 原俊彦, 秋山正人: 水面形の時間変化と非常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算, 土木学会論文集, No.761/II-67, pp.45-56, 2004.
- 7) 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.
- 8) 重枝末玲, 秋山壽一郎, 小園裕司, 上川謙: 遠賀川流域の分布型流出解析と平面2次元洪水追跡, 水工学論文集, 第54巻, pp.517-522, 2010.
- 9) 重枝末玲, 秋山壽一郎, 小園裕司: 遠賀川流域の分布型流出解析と複数の支川を考慮した平面2次元洪水追跡, 河川技術論文集, 第16巻, pp.443-448, 2010.
- 10) 重枝末玲, 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.

- 11) 立川康人, 永谷 言, 寶 馨: 飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, 第48巻, pp.7-12, 2004.
- 12) 藤井孝考蔵: 流体力学の数値計算法, 東京大学出版会, 1994.
- 13) 重枝末玲, 朝位孝二, 坂本 洋, 長太茂樹, 秋山壽一郎, 樋口直樹, 重岡広美, 徳永智宏: 大野川とその派川の乙津川を包括した平面2次元洪水流解析と河道内樹木が乙津川への分流量に及ぼす影響, 河川技術論文集, 第12巻, pp.85-90, 2006.
- 14) 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.
- 15) 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ー同定, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, I_523-I_528, 2012.
- 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.

(2012. 4. 5受付)