

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

DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF AND 2D FLOOD FLOWS ANALYSIS WITH PLURAL TRIBUTARIES IN THE ONGA RIVER BASIN

重枝未玲¹・秋山壽一郎²・小園裕司³
Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA and Yuji KOZONO

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 (同上)

The numerical simulations of rainfall-runoff and flood flows in the Onga river basin were performed. The rain-fall runoffs were simulated by a distributed hydrological model. The flood flows in the main river and plural tributaries were simulated simultaneously by the 2D unsteady free-surface flow model. The flooding event in the Onga river basin in July 2003, June 2004 and September 2004 were simulated by the model. The simulated results compared with the observed water level and discharge rating curve. It shows that the model is a useful tool for examining the process of runoff and flooding in the Onga river basin.

Key Words : *rainfall-runoff, flood flow, distributed rainfall-runoff model, 2D unsteady free-surface numerical model, plural tributaries, Onga river flood*

1. はじめに

近年, 毎年のように観測史上最大あるいはそれに近いような豪雨が生じている。豪雨の発生頻度は, 2007年の「地球温暖化に伴う気象変動について」¹⁾で指摘されるように確実に増加しており, 今後, 超過洪水が生じる可能性はますます高くなると考えられる。

超過洪水対策を検討する上で, 豪雨が流域からの雨水の流出, 本川・支川で生じる洪水流の挙動に及ぼすインパクトを適切に予測することは重要である。そうすることで, 流域・河道で起こりうる現象をあらかじめ把握でき, 水害の発生する可能性が高い豪雨パターン, 越流・溢水発生区間, 本川と支川の計画規模の違いが洪水流の挙動に及ぼす影響などの有用な情報を提供できると考えられる。

このような観点から, 任意の降雨外力から流出・洪水プロセスを予測する流出解析・洪水追跡モデルの開発が行われている^{2),3),4),5)}。都市流域を対象に地表面を忠実に再現しモデルパラメータの依存性を極力排除した分布型

流出解析モデル^{2),3)}, モデルパラメータの推定方法を組み込んだ分布型流出解析モデル⁴⁾, 観測値の流量から推定値を補正しリアルタイムで河川流量を予測する分布型流出解析モデル⁵⁾の開発が行われており, これまで降雨ごとに必要であったパラメータを土地利用や実測値に基づき適切に設定あるいは補正することで, 任意の降雨外力から流出・洪水プロセスを予測することが試みられている。洪水追跡モデルについても, 非定常準2次元解析モデル⁶⁾や平面2次元解析モデル⁷⁾などの洪水追跡法が開発され, 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モデルであれば, 樹木繁茂状況に応じて樹木群透過係数を設定すれば粗度係数値をほぼ一定として, 水位ハイドログラフを予測できること⁸⁾が明らかとなっている。つまり, 上記のような流出解析および洪水追跡モデルを用いれば, 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となる。

著者らは, 上記のようなモデルの構築を目的に, 遠賀川流域を対象に分布型流出解析モデルにより降雨から流

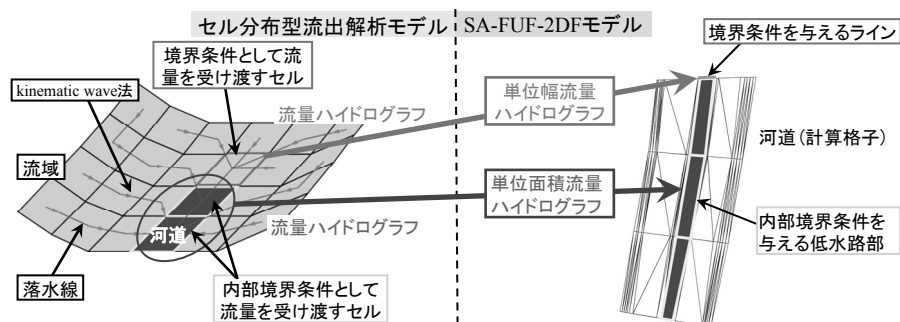


図-1 分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルの概要

域での流出を予測し、高度な平面2次元解析モデルを用いた洪水追跡法により、遠賀川流域の洪水流の挙動の予測を試み、同モデルが十分な性能を有していることを示した⁹⁾。しかし、同研究では、一つの降雨パターンで解析を行ったものであり、モデルの検証としては十分ではなかった。また、治水計画に、計画規模が異なる本川と支川で生じる洪水流の挙動は重要となるが、流域全体で本川と複数の支川を対象に洪水流の挙動の把握を試みた研究は、著者らの知る限り存在しない。

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次元洪水流解析モデル」の開発を最終的な目的としたものである。ここでは、複数の降雨を用いて、遠賀川流域を対象に、分布型流出解析、本川の遠賀川と8つの支川を含む平面2次元洪水追跡を行い、同モデルの再現性について検討した。

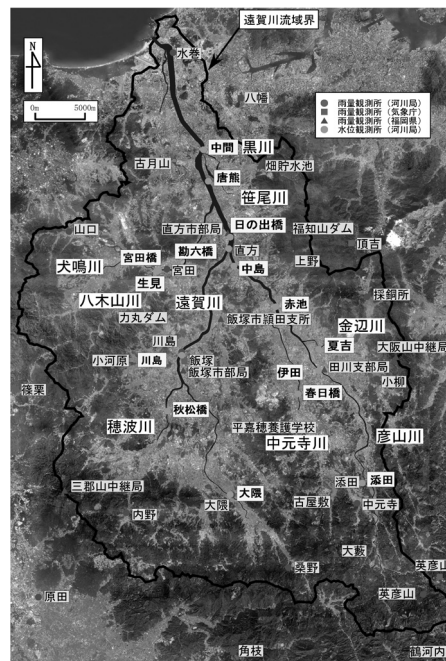


図-2 遠賀川流域の概要

2. 分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルの概要

「分布型流出・平面2次元洪水追跡モデル」は、①流域の雨水の挙動を予測するセル分布型流出解析モデルと②洪水追跡を行うSA-FUF-2DFモデル(A Spatial Averaged Finite volume method on Unstructured grid using FDS technique for 2D Flood flows)¹⁰⁾で構成される。

両モデルの接続は、図-1に示すように、流出解析より得られた流量とその位置を河道と対応付け、河道の境界条件あるいは河道低水路の内部境界条件として与えることで行われる。つまり、降雨を入力条件として、河道内貯留による洪水変形を考慮した洪水追跡を行うことが可能なモデルフレームワークとなっている。このようなフレームワークであれば、降雨の応答として水位ハイドログラフを得ることができ、流量に比べ観測精度が高い水位あるいは水面形に基づき、モデルのキャリブレーションを行うことが可能となる。また、適切にモデルパラメータを設定することが可能となれば、様々な降雨パターンに対する当該流域の洪水特性も検討可能となり、河道計画上有用なツールになると考えられる。

以下では、セル分布型流出解析モデルとSA-FUF-2DF

モデルの概要を示す。

(1) セル分布型流出モデルの概要

セル分布型流出モデルでは、図-1に示すように隣接する8つの標高から最急勾配方向を求め、その方向に沿って、斜面流と平面2次元洪水追跡の対象とする河道を除く河道流の追跡をkinematic wave法により行う。セル分布型の連続の式を式(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。時間積分にはEulerの陽解法を、空間積分には風上差分を用いた。

(2) SA-FUF-2DFモデルの概要

SA-FUF-2DFモデルは、河道内樹木群や分流部などを

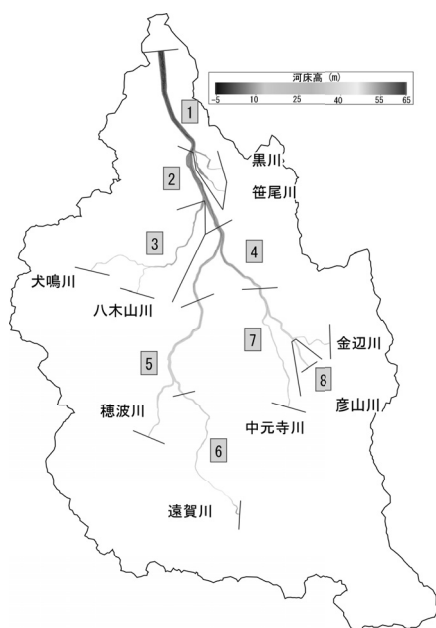
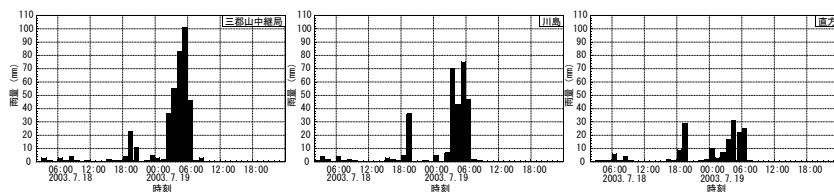
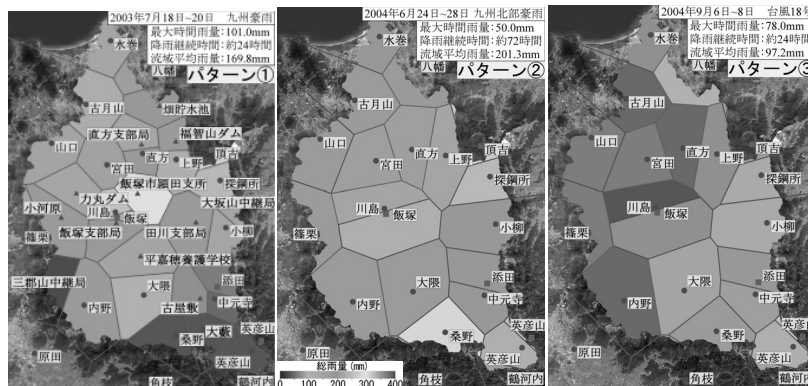


図-3 河床コンターと河道の分割



(a) 2003年九州豪雨災害時の降雨ハイトグラフ



(b) 総雨量分布

図-4 降雨ハイトグラフの一例と総雨量分布

含む複雑な河川での洪水流を予測可能であることが明らかとなっている¹²⁾。

同モデルの基礎方程式である2次元浅水方程式の連続の式と運動方程式は以下に示す通りである。

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

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、 $\mathbf{S}$ =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、 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¹²⁾で計算される。時間積分にはEulerの陽解法、空間積分には流束差分法を用いている。また、プログラミングを行うに当たっては、計算効率の向上の観点から複数のCPUで並列計算が可能なように改良を加えた。なお、並列計算では解析対象領域の分割位置を指定する必要がある。

3. 解析データの作成

解析対象領域は遠賀川流域である。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、流域の土地利用については、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。2003年7月19日の九州豪雨災害では支川の穂波

川が計画高水位を超えるなど危険な状況となった。図-2に遠賀川流域の航空写真と雨量・水位観測所を示す。

(1) 分布型流出解析

分布型流出解析では図-2に示す遠賀川流域を対象とした。分布型流出解析には、標高、土地利用、雨量、河道の平面形状・河床高のデータが必要となる。標高データには国土地理院発行の数値地図250mメッシュ(標高)を、土地利用データには100mメッシュで土地利用が数値データ化されている国土数値情報L03-09M(H9年)を、降雨量には雨量観測所の実測データ、河床高にはH14年の測量結果を用いた。

解析データは、数値地図250mメッシュ(標高)のメッシュをセルとして、次のように作成した。(1) 航空写真から河道の位置とセルとを対応付け、その標高を平均河床高に修正した。(2) 標高データに窪地がある場合、隣接するセルの最も低い標高に置き換える処理を行った。この標高データに基づき、流水解析を行い隣接8セルの中で勾配が最大となる落水線方向と、落水線が集中する擬似河道を決定した。(3) 各セルの土地利用形態は、100mメッシュ土地利用データを森林、荒地、田、農地、都市、水域に再分類し、セル内の最大面積の土地利用に決定した。なお、擬似河道が通るセルに関しては水域に分類した。また、セルと平面2次元洪水追跡を行う河道との対応付けは、航空写真を用いて行い解析対象セルから除外した。(4) 各セルの雨量はティーセン分割領域内の雨量観測所の実績データを与えた。

(2) 平面2次元洪水追跡

平面2次元洪水追跡では、図-2に示す本川の遠賀川と支川の穂波川・中元寺川・彦山川・金辺川・八木山川・犬鳴川・笹尾川・黒川の9河川を対象とした。

表-1 分布型流出解析に用いたモデルパラメータ

	$N(m^{-1/3})$	d_s	d_c	k_a	β
森林	0.6~0.8	0.08~0.2	0.04~0.1	0.01~0.015	4.0~6.0
荒地	0.2~0.3	0.0	0.0		
田	1.0~2.0				
農地	0.2~0.3				
市街地	0.01~0.05				
水域	0.035				

平面2次元洪水追跡には、河道の堤防や低水路線形、河床高、粗度係数のデータが必要となる。堤防と低水路線形については、各距離標の横断面図から、堤防、高水敷、低水路の座標を世界測地系で整理し、それぞれに対応する点を距離標間で接続することで作成した。ただし、横断面図では変曲点のみを抽出した。河床高については、河道横断面図から平面座標に対応する値とし、平面座標と河床高とで三角ポリゴンを作成して任意の位置での河床高とした。粗度係数については一定値を用いた。なお、本解析では樹木群については考慮していない。

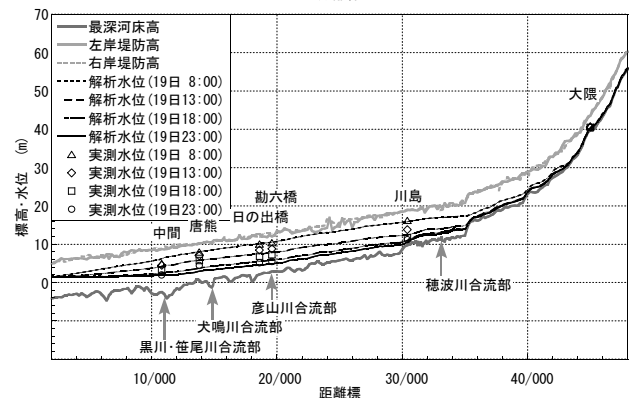
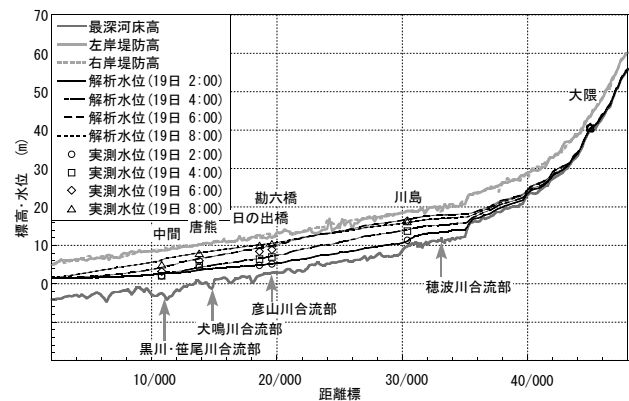
解析データは次のように作成した。(1) 図-3に示すような区間を対象に、河道を8つに分割した。(2) 堤防と低水路線形を境界として、三角形の非構造格子を用い計算格子を作成した。(3) この計算格子の重心位置に対応する河床高、粗度係数、内部境界条件を与えた。図-3に作成した河床高コンター図を示す。なお、総メッシュ数は21,720個であった。これより、堤防線形や低水路線形が高い解像度で作成されていることが確認でき、本作成方法の妥当性が伺える。

4. モデルの検証

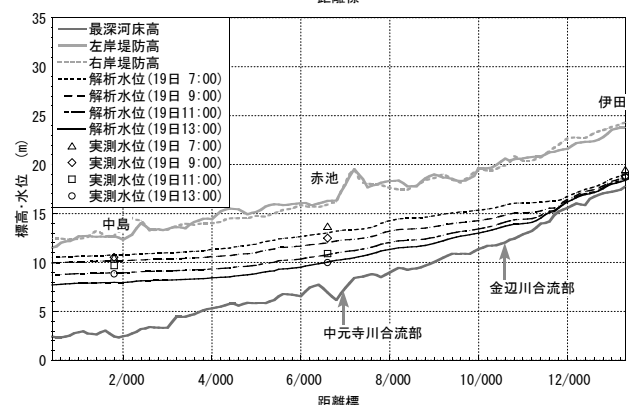
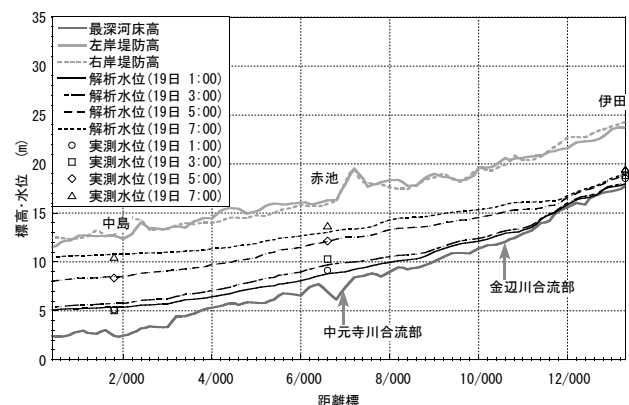
(1) 解析条件

図-4は、解析に用いた降雨ハイトグラフの一例と総降雨量分布を示したものである。3つの降雨パターンを用い、それぞれパターン①は中流域を、パターン②は流域全体を、パターン③は上流域を中心とした降雨分布であることが特徴である。なお、パターン②、③では県が管理する観測所の降雨データを得ることができなかったため、データの解像度が低くなっている。

流出解析のモデルパラメータについては、表-1に示すように土地利用に応じて値を決定した。等価粗度係数については標準値¹³⁾に基づき、土層の飽和・不飽和状態については、その影響が大きいと考えられる森林のみで考慮し、土層厚の浸透係数 k_a については従来の研究^{11),14)}を参考とした値を、浸透係数比 β については2~6程度¹¹⁾の値をとることを踏まえて、土層厚 d_c と d_s については、森林が流域の土地利用の75%を占める大隈観測所の実測結果を概ね再現できるような値を試算し、 d_c は0.04~0.1(m)、 d_s は0.08~0.2(m)の範囲で決定した。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 $0.035(m^{-1/3})$ を、下流端には河口堰でほぼ一定に保た



(a) 遠賀川(上:増水時,下:減水時)



(b) 彦山川(上:増水時,下:減水時)

図-5 水面形の経時変化

れている水位を与えた。

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12時、パターン②では2004年6月25日8時、パターン③では2004年9月7日6時とした。

(2) 結果と考察

図-5は、遠賀川・彦山川について、パターン①の水面形状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) 増水時には下流端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であり、特に勘六橋から川島水位観測所の区間で水位上昇が早期にかつ急激に生じていること、(2) 減水時には中間水位観測所より上流側では水面は概ね相似形を保ち減少すること、(3) 解析結果は実測値を概ね再現していること、彦山川では(1)上流では水位がさほど上昇していないこと、(2)本川の水位上昇に伴い合流部から金辺川との合流部付近で水位が上昇すること、(3) 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、(4) 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-6はパターン①~③について、図-2の日の出橋、勘六橋、川島観測所の水位ハイドログラフの解析結果と実測値との比較を、図-7は同観測所の水位流量曲線と解析結果から求めた水位と流量との関係の比較を行ったものである。これらより、(1) 本モデルが減水期には若干のずれがあるものの、いずれの観測所についても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) 川島、勘六橋、日の出橋のいずれの水位観測所においても水位と流量との関係はループを描くこと、(3) 上流側の川島では日の出橋や勘六橋に比べ、ループの程度は小さく概ね水位流量曲線に沿っていること、などが確認できる。川島、勘六橋、日の出橋水位観測所はいずれも合流部直後の観測所であり、河道の貯留効果が生じこのような結果になったと考えられる。さらに、その効果は下流側の勘六橋、日の出橋水位観測所で大きいと考えられる。また、水位流量曲線が観測結果から最小二乗法に基づき求められることを考えると、本解析結果は妥当な結果であると考えられる。

これらより、本モデルは水位ハイドログラフの波形やピーク値などの実測値を十分な精度で再現しており、本川の水位上昇による支川の応答を的確に捉えることや河道内の貯留効果などを的確に捉えることが可能であること、また、降雨分布が異なる場合にも、パラメータを適切に設定すれば十分な精度で洪水流の挙動を予測できることがわかった。本解析では流出解析のパラメータとして標準的な値、また、粗度係数値を一定として与えており、河道内の樹木等などの影響を考慮していない。また、他の支川についてはkinematic wave法により河道内の洪水追跡を行っている。にもかかわらず、解析結果は観測結果を概ね再現している。これは分布型流出解析モデルで流域の特性を、平面2次元解析で河道の特性を捉えることができた結果であると考えている。ただし、2003年九州豪雨災害で飯塚市街地の浸水の主要因となった建花寺川・明星寺川などの中小河川は分布型流出解析で取り扱われており、溢水による流出流量の減少は、本川への影響は小さいと考えられるがパラメータ値に陰的に含ま

れた形で考慮された可能性があること、流出解析のパラメータの設定には試行錯誤が必要であることから、その一般的な設定方法については今後さらなる検討が必要と考えている。

また、今回の計算では、図-3に示す8つの領域で並列化を行い、Quad-Core Intel Xeon 3.0GhzのDual CPUの8つのコアを用いて計算を行った。解析の実行には実時間の約4倍の時間を要した。計算効率の向上については、領域の最適分割方法やアルゴリズムの修正などを検討し、向上させたいと考えている。

5. おわりに

本研究では、流域特性を考慮できるセル分布型流出解析モデルと、高精度・高解像で河道特性を考慮できる平面2次元洪水流モデルを用いた「分布型流出解析・平面2次元洪水流解析モデル」を遠賀川流域に適用し、2003年7月の九州豪雨災害時の降雨を含む複数の降雨に対して各観測所の水位ハイドログラフの実測結果および水位流量曲線と比較することで同モデルの再現性を検討した。その結果、本モデルが以下の性能を有していることが確認され、流域特性と河道特性をうまく捉え、降雨から水位ハイドログラフなどの洪水流の挙動を十分な精度で再現できることが明らかとなった。

- (1) 本川および支川の流量ハイドログラフ、水位ハイドログラフの実測結果と水位流量曲線を十分な精度で再現できる。
- (2) 本川と支川との合流部付近の観測所における水位流量曲線はループを描いており、合流部での貯留効果を再現できる。
- (3) 本川の水位上昇による支川の応答を再現できる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究B(課題名：豪雨災害時の浸水減災シミュレータの開発と樹林帯の減災効果に関する研究、課題番号：21360237、研究代表者：秋山壽一郎)、の助成を受け実施したものである。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現地調査の実施やデータの提供など多大な協力を得た。また、本研究を遂行するに当たり、本学大学院生の草野浩之君、当時本学学部4年生の上川謙さんには、データ整理等で多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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) 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。

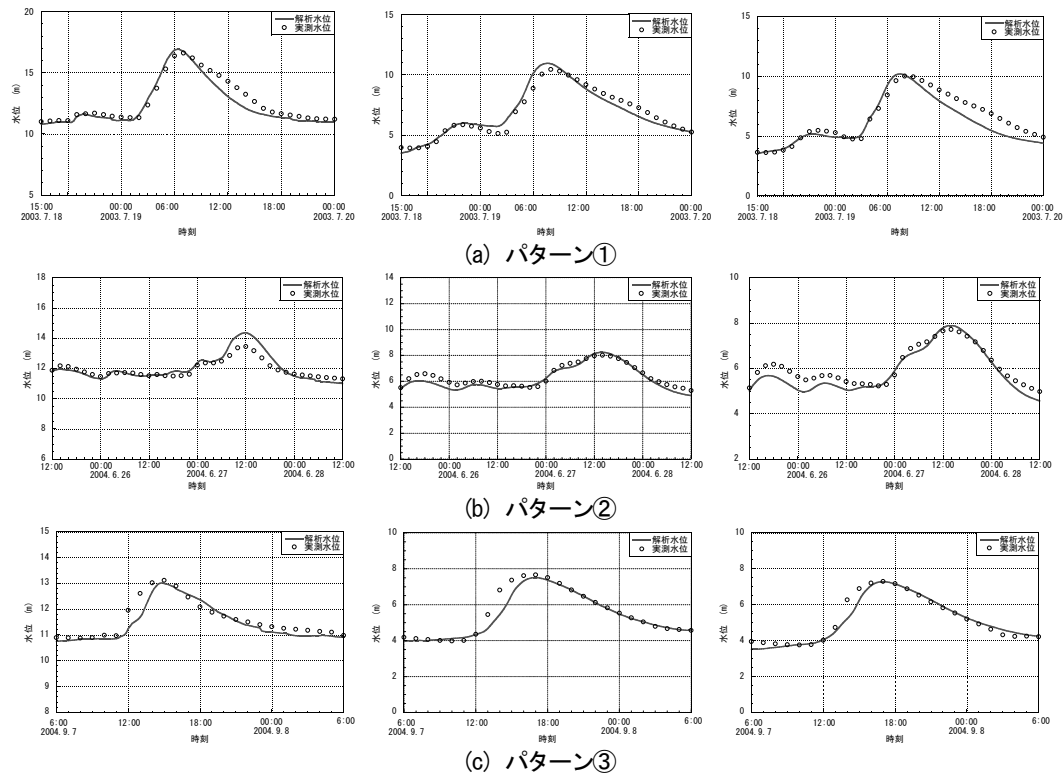


図-6 各観測所での水位ハイドログラフの比較 (左：川島水位観測所，中：勘六橋水位観測所，右：日の出橋水位観測所)

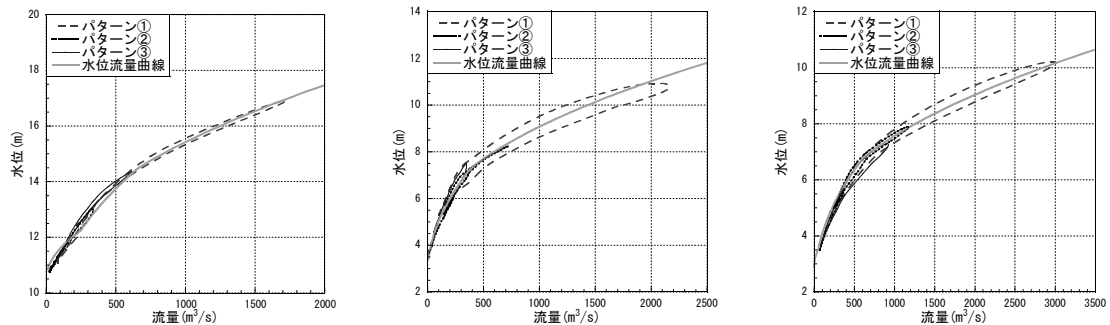


図-7 各観測所での水位と流量との関係と水位流量曲線との比較 (左：川島，中：勘六橋，右：日の出橋水位観測所)

- 3) 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。
- 4) 小林健一郎，寶 馨，立川康人：最適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) バイアス補正カルマンフィルタを用いた実時間分布型流出予測システムの改良，河川技術論文集，第15巻，pp.383-388，2009。
- 6) 福岡捷二，佐藤宏明，出口桂輔：洪水流の非定常準二次元解析法の研究，土木学会論文集B，Vol.65，No.2，pp.95-105，2009。
- 7) 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定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。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 重枝末玲，秋山壽一郎，重岡広美：ドライ・ウェット状態となる地形起伏がある場での氾濫流の数値シミュレーション，水工学論文集，第51巻，pp.781-786，2007。
- 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) 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。
- 13) 水理委員会編：水理公式集，昭和60年度版，pp.163，1985。
- 14) 佐山敬洋，立川康人，寶馨，市川温：広域分布型流出予測システムの開発とダム群治水効果の評価，土木学会論文集，No.803/II-73，pp.13-27，2005。

(2010. 4. 8受付)