

遠賀川流域の分布型流出解析と 平面2次元洪水追跡

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

重枝未玲¹・秋山壽一郎²・小園裕司³・上川謙⁴
Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Yuji KOZONO and Ken KAMIKAWA

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)

⁴学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (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 river were simulated simultaneously by the 2D unsteady free-surface flow model based on flux-difference splitting scheme and unstructured finite-volume method. The flooding event in the Onga river basin in July 2003, was simulated by the model. The simulated results compared with the observed water level. Dangerous zone to occur the overflow induced by different rainfall patterns was also examined. 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, Onga river flood*

1. はじめに

近年、我が国では記録的豪雨による水害が頻発している。2004年には円山川や出石川、信濃川の支川である五十嵐川、刈谷田川などで破堤氾濫が発生し、大きな被害が生じた。

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おり、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、豪雨の発生頻度は確実に増加している。今後の河道管理には、こうした豪雨によって生じる流域からの雨水の流出、それに伴う洪水流の挙動を適切に予測し、河道で起こりうる現象をあらかじめ把握することが不可欠である。

このような観点から、分布型流出解析モデルを用い、流域全体を対象として中小河川までも含めたリアルタイムの河川流量と水位の予測²⁾³⁾、都市流域を対象に地表面を忠実に再現し都市での洪水流出の過程の予測を目的とした流出解析法⁴⁾の開発、また、分布型流出解析のモデルパラメータの推定方法⁵⁾も進められている。一方で、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

の洪水追跡法も開発され、平面2次元モデルと水面形の観測結果から流量ハイドログラフの算定⁷⁾やこれを応用し河川上流端での本川・支川の流量ハイドログラフの推定⁸⁾、定常流解析では出水ごとに変化させてきた粗度係数値や樹木群透過係数の算定法⁹⁾などが明らかとなっている。

このように、流域流出や洪水追跡法は高精度化されつつあり、また、モデルパラメータの設定法について明らかになりつつある。このような高度なモデルを組み合わせることで、流域特性を踏まえた上で、降雨外力から河道で生じる洪水現象をより詳細に把握でき、今後の河道管理に有用な情報を提供できると考えられる。

降雨から流域での流出を予測し、平面2次元解析などの高度な洪水追跡法を用いて、洪水流の挙動の予測を試みた研究は数少なく、川内川を対象とした川池らの研究¹⁰⁾がある程度である。川池らの研究では、降雨を外力として求めた支川からの流入流量と水位が境界条件であり、流量の境界条件が必要ないモデル構成となっている。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、流域特性を踏まえた上で、降雨外力から河道の水位および流量ハイドログラフなどの洪水流の予測が可能な「分布型流出解

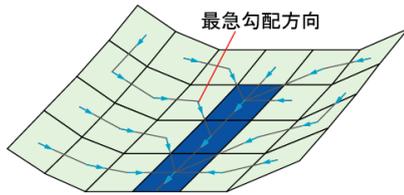


図-1 セル分布型流出モデルの概念図

析・平面2次元解析モデル」の開発を目的としたものである。ここでは、セル分布型流出解析モデルを新たに構築し、同モデルと高精度・高解像な洪水流モデルであるSA-FUF-2DFモデル^{11),12),13)}と組み合わせることで、モデルを構築した。さらに、同モデルを遠賀川流域に適用し、2003年7月豪雨災害の河道内水位の予測の再現性を確認するとともに、任意の降雨外力に対して、遠賀川の支川で2003年7月豪雨災害時に危険な状況にあった穂波川について越水危険箇所の検討を行った。

2. 分布型流出と平面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)¹²⁾で構成される。

(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河道流の追跡をkinematic wave法により行う。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¹⁴⁾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次元浅水流方程式の連

続の式と運動方程式は以下に示す通りである。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\mathbf{U} = (h, \quad uh, \quad vh)^T; \quad \mathbf{E} = (uh, \quad u^2h + 1/2gh^2, \quad uvh)^T;$$

$$\mathbf{F} = (vh, \quad uvh, \quad v^2h + 1/2gh^2)^T;$$

$$\mathbf{S} = (q_r, -gh(S_{ox} - S_{fx}) + F_x, -gh(S_{oy} - S_{fy}) + F_y)^T$$

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¹³⁾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。

同モデルは、これまで1個のCPU上で計算されるモデルであったが、最近のCPUは複数個のコアを持つ傾向にあることから、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いように改良を加えた。並列化を行うにあたっては以下のような考え方でいった。同モデルは計算格子に非構造格子を用いており、構造格子のように規則正しく格子が並んでいるわけではないので単純に並列化することはできない。また、平面2次元解析の河道データの作成には多大な労力を要し、特に支川との合流までも考慮にいたした解析を行うには、そのデータは複雑で膨大なものとなる。そこで、ここでは河道を幾つかの領域に分割し、各領域間の接続条件を与えることで解析データを領域内で閉じさせ並列化を行った。こうすることで、計算速度を向上させるとともに、河道データが、距離標やあるいは本川・支川単位で整理でき、河川改修などが行われた場合には、他の河川を含めたメッシュを再生成する必要はなく、その領域だけの計算格子の生成のみで済ませることが可能となる。また、氾濫解析など行う場合には、氾濫原のデータと河道のデータの間に接続条件を設定することで行うことも可能となる。

(3) セル分布型流出モデルとSA-FUF-2DFモデルとの接続

セル分布型流出モデルと平面2次元洪水追跡モデルとの接続については、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った。

3. 解析データの整理と作成

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

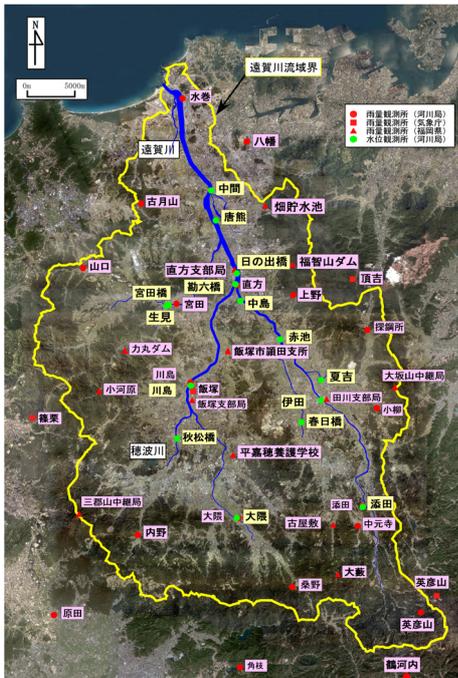


図-2 遠賀川流域の概要



図-3 降雨ハイトグラフと総雨量分布

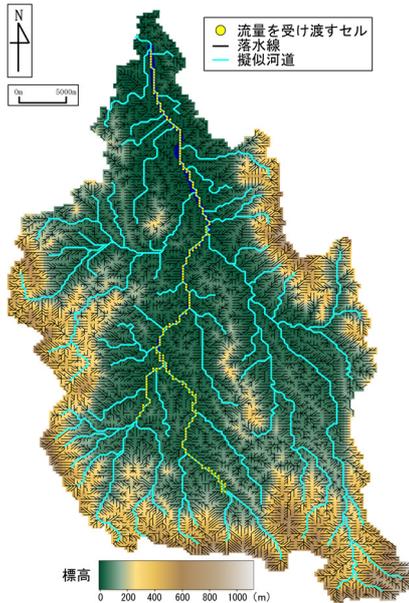


図-4 落水線・擬似河道・洪水追跡へ流量を受け渡すセル

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

分布型流出解析データの作成には標高、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。これらのデータをGIS上で整理した。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用い次のように作成した。まず、航空写真から河道の位置をセルと対応付け、その標高を平均河床高に修正した。次に、標高データに窪地がある場合、そこに雨水が集中し河道へ流出されないため、隣接するセルの最も低い標高に置き換える処理を行い、標高データを修正した。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。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った。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。図-3に降雨ハイトグラフの一例とティーセン分割により求めた総雨量分布を、図-4に落水線と擬似河道および洪水追跡を行う河道への流量を与えるセルを示す。

(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を対象とした。図-5に示すように両河川を5つの領域に分割した。データの作成には、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、横断面図の全ての座標を用いるとデータ数が莫大な数となるので、図-6に示すように変曲点となる



図-5 領域分割と河床高コンター

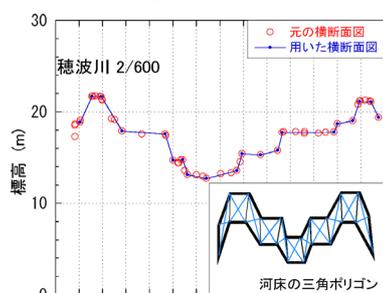


図-6 河床高コンター作成の概要図

表-1 分布型流出解析に用いたモデルパラメータ

	$N(m^{-1/3}s)$	$d_s(m)$	$d_c(m)$	$k_a(m/s)$	β
森林	0.6	0.00	0.00	0.015	4.0
荒地	0.3				
田	2.0				
農地	0.3				
市街地	0.05				
水域	0.035				

点を抽出した。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、計画で用いられた平均値0.035を与えた。なお、本解析では樹木群については考慮していない。計算格子には三角形の非構造格子を用いた。なお、総メッシュ数は12,514個であった。図-5に作成した河床高コンター図を示す。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

解析開始時刻は、7月18日PM0時とした。流出解析のパラメータは土地利用で同じものとし、表-1の値を用いた。等価粗度係数については標準値の平均値を用いた。

土層の飽和・不飽和状態は流出に及ぼす影響が大きいと考えられる森林の場合にのみ考慮し、 k_a については従来の研究¹⁵⁾を参考とした値を、 β については2~6程度の値を取る¹⁴⁾ことを踏まえ、その平均値を、 d_c 、 d_s については、遠賀川上流の観測所で森林が流域の土地利用の75%を占める大隈水位観測所の流量を再現できる値とした。河道上流端には分布型流出解析から得られた流量を、下流端には河口堰でほぼ一定にコントロールされる水位を与えた。流量及び水位を境界条件として与えた位置を図-5に示す。なお、境界条件以外の河道への流入流量は、河道低水路内の内部境界条件として単位面積当たりの流量として与えている。

図-7, 8は、それぞれ水面形の経時変化と図-2の日の出橋、勘六橋、川島、秋松橋の観測所の水位ハイドログラフについて観測結果と解析結果との比較を行ったものである。これらより、(1) 水面形状の経時変化は、増水時には下流端から日の出橋付近まで、減水時には下流端から中間までは水面勾配に違いがあるが、その他の区間や穂波川については概ね相似形を保ち水位が増減すること、(2) 増水時に穂波川の秋松橋と川島水位観測所で水位が急激に上昇すること、(3) 若干のずれはあるものの、ピーク値や水位ハイドログラフの実測結果を十分な精度で再現していること、などがわかる。

図-9は、遠賀川と彦山川の合流点下流の日の出橋水位観測所および遠賀川と穂波川の合流点下流の秋松橋水位観測所の流量ハイドログラフの実測値と解析結果および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を比較したものである。これらより、(1) 流量ハイドログラフについては、日の出橋で若干のずれはあるものの概ね再現できること、(2) 日の出橋、川島水位観測所の解析結果は、水位流量曲線を中心にループを描いていること、(3) 上流側の川島では、日の出橋に比べ、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。日の出橋、川島水位観測所は合流部直後の観測所であることから、合流部で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。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と考えられる。このように、本モデルはそのような現象を的確に捉えていることが確認できる。

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。

また、今回の計算では、図-5に示す5つの領域で並列化を行い、Quad-Core Intel Xeon 3.0GhzのDual CPUで5つ

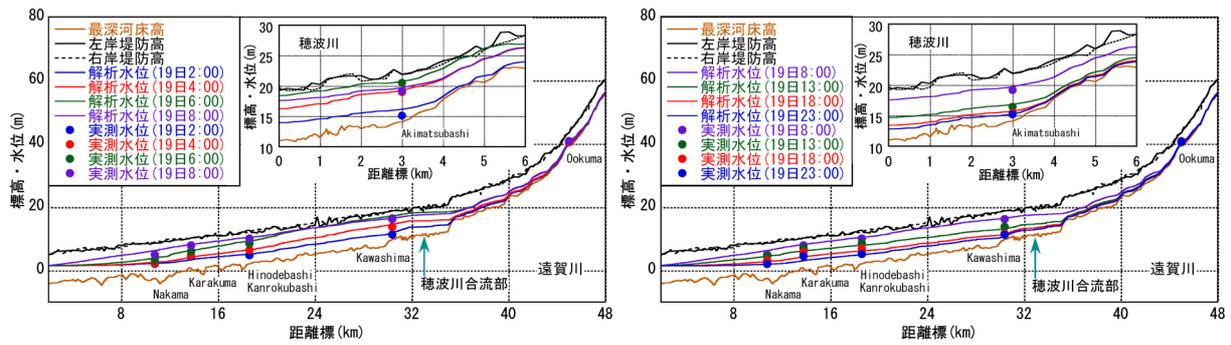


図-7 水面形の経時変化の比較(左:増水時 右:減水時)

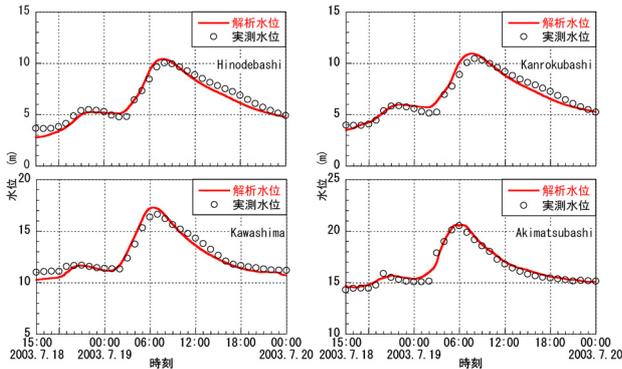


図-8 水位ハイドログラフの比較

のコアを用いて計算を行った。しかし、1つのコアで計算した場合に比べ、約2.5倍程度の向上しか得られなかった。そのため、解析の実行には実時間の約2倍の時間を要した。この点については、領域の最適分割方法やアルゴリズムの修正など、今後検討し、計算効率の向上に努めたいと考えている。

5. 穂波川の越水危険箇所の検討

最後に、同モデルを用いて、2003年7月19日の九州豪雨災害では計画高水位を超えるなど危険な状況となった穂波川の越水危険箇所を検討した。図-5に示す遠賀川・穂波川の上流端から川島水位観測所までの領域4と5を用いて行った。

検討では近年の集中豪雨を想定し、堤防からの越水が生じる箇所と豪雨継続時間との関係を求めることを目的として、降雨強度を50mm/h、75mm/h、100mm/hの一定とした降雨ハイドログラフを用いた。降雨は対象領域に一律に与えた。なお、遠賀川では2日間最大雨量405mmで計画降雨が設定されており、その計画規模は1/150である。降雨強度50mm/hでは8時間強で、75mm/hでは6時間弱で、100mm/hでは4時間強で計画降雨を超えることとなる。また、領域4の下流端の境界条件には水位流量曲線を与えた。

図-10は越水箇所と越水開始時間、越水が開始した時の秋松橋観測所での水位および水位上昇速度 dh/dt を示したものである。これらより、(1) 降雨強度を変化させて

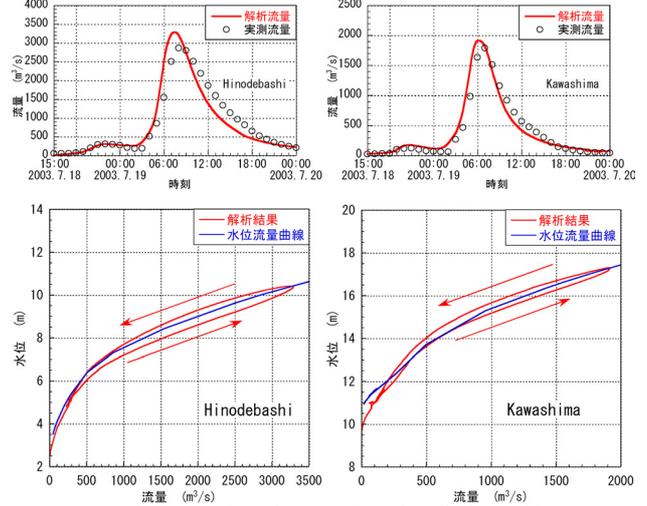


図-9 流量ハイドログラフと水位流量曲線の比較

も越水が発生する箇所には大きな変化がないこと、(2) 越流が開始する時刻は、降雨強度100mm/h、75mm/h、50mm/hの順で早くなり、どの降雨についても図-10中の右岸Aで越水が開始すること、(3) 越水開始時間は、降雨強度50mm/h、75mm/h、100mm/hでそれぞれ、降雨開始から約4時間後、2時間30分後、2時間後であること、(4) その時の秋松橋水位観測所の水位は約20.8~21.0mで計画高水位を0.6~0.8m程度上回った水位であること、(5) その時の水位上昇速度は、降雨強度50mm/h、75mm/h、100mm/hでそれぞれ0.93m/h、3.06m/h、3.55m/hであり、短時間で急激な水位の上昇が生じること、などがわかる。九州豪雨災害時にも秋松橋の水位は、計画高水位を0.4m程度超えており、この時、越水による外水氾濫が生じている。この値に比べて、解析結果値は若干高い程度で、妥当な値であると考えられる。

以上を踏まえると、穂波川では水災に対して脆弱な箇所は、図-10中の赤あるいは緑のラインで示す箇所であり、秋松橋の水位が20.8mを超えた場合に図-10の右岸Aから、越水が開始する可能性が高いことがわかった。

6. おわりに

本研究では、流域特性を踏まえた上で、降雨外力から河道の水位および流量ハイドログラフなどの洪水流の予

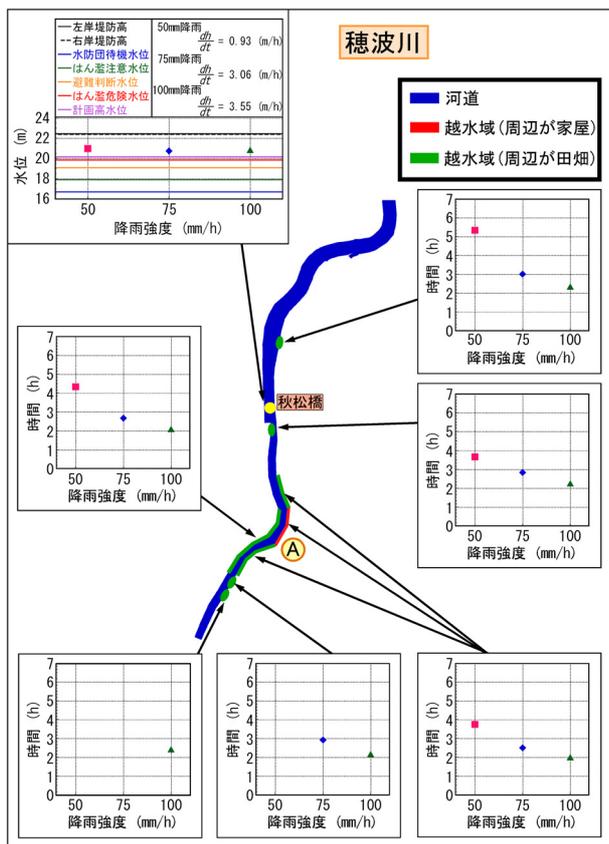


図-10 越水危険箇所の検討

測が可能な「分布型流出解析・平面2次元解析モデル」を構築し、2003年7月豪雨災害時の遠賀川流域に適用し同モデルの検証を行うとともに、任意の降雨外力に対して穂波川について越水危険箇所の検討を行った。その結果、同モデルが高い精度で河道流を再現可能であるとともに、任意の降雨外力から洪水プロセスを予知できることが確認された

なお、今回の結果は、2003年7月豪雨災害時の流域の状況(地盤の湿潤状況など)を前提とした結果で、異なった状況での本モデルの適用性は不明である。今後、複数の出水に適用し検証を行う予定である。また、流出解析の最適なパラメータ設定方法等についても検討したいと考えている。

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り、本学学部4年生の池田知央さん、草野浩之君には、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) 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) 安賢旭, 立川康人, 道広有里, 椎葉充晴, 市川温：流域全体を対象とする河川水位の実時間予測情報提供システムの開発, 河川技術論文集, 第15巻, pp.389-392, 2009.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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) 内田龍彦, 福岡捷二, 工藤美紀男：河川上流端における本川・支川の流量ハイドログラフの合理的推定法, 河川技術論文集, 第15巻, pp.309-314, 2009.
- 9) 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.
- 10) 川池健司, 中川一, 馬場康之：平成18年7月豪雨災害時の川内川洪水解析と推込分水路の影響の検討, 水工学論文集, 第52巻, pp.811-816, 2008.
- 11) 秋山壽一郎, 重枝未玲：河道・氾濫原包括解析による氾濫流量の評価と市街地破堤氾濫解析, 土木学会論文集B, Vol.63, No.3, pp.224-237, 2007.
- 12) 重枝未玲, 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.
- 13) 重枝未玲, 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) 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.
- 15) 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.

(2009. 9. 30受付)