

分布型流出モデルをネスティングする 流出・氾濫一体型モデルの構築

DEVELOPMENT OF A FLOOD-INUNDATION MODEL NESTING
A DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF MODEL

田中 智大¹・立川 康人²・萬 和明³

Tomohiro TANAKA, Yasuto TACHIKAWA and Kazuaki YOROZU

¹ 学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

² 正会員 博 (工) 京都大学 准教授 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

³ 正会員 博 (工) 京都大学 助教 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

An impact assessment of a risk of water-related disaster under a changing climate has been highly concerned recently. For the assessment, it is important to examine a change of the magnitude of inundation disasters as well as that of flow regime under various climate conditions. To make an ensemble assessment of the magnitude of inundation disaster, systematic and computational cost-effective simulation is required. In this research, a flood-inundation model which nests a distributed rainfall-runoff model and is applicable to any part of a basin was developed. The developed model was successfully applied to the Shirakawa River catchment in Kyushu, Japan.

Key Words: *inundation simulation, distributed rainfall-runoff model, nesting, climate change*

1. はじめに

近年, 気候変動が河川流況・水資源に与える影響が懸念されている。これまで気候変化による将来気候の変化を分析・予測する研究が数多く行われ, また, 気候変化が洪水流量や濁水流量などの流況に与える影響を分析する研究が進められている^{1) 2) 3) 4)}。こうした流況変化の分析を水災害リスクの影響分析につなげることは重要であり, そのためには河川流況とともに氾濫規模の変化を分析することが必要となる。特に, 不確かさを考慮した様々な外力設定やモデル設定のもとで多数の流出・氾濫シミュレーションを実施するために, 流量計算から氾濫計算までを効率的に高速に演算できるシミュレーションモデルが必要となる。

そこで本研究では, 流量から氾濫規模までを一体的に高速に計算するネスティング型の分布型流出・氾濫一体型モデルを構築した。氾濫計算では, 降雨流出計算も含めた解析手法として川池ら⁵⁾や秋山ら⁶⁾などによって提案されたモデルが従来用いられてきた。最近では, 佐山ら⁷⁾が開発した RRI モデルのように流域全体で降雨流出から氾濫計算までを連続的に行うモデルも開発・適用されている。ただし, わが国のように大規模氾濫が発生する領域がある程度限定できる場合は, 流域すべてを一体型モデルで解くのではなく, 流域の一部のみを選択して氾濫計算を実施できると効率が良い。一般に, 氾濫計算は流出計算よりも高い空間分解能が求められる。氾濫計算では, 異なる破堤条件や境界条件を設定した複数のシナリオを用意し, それらの条件

での計算を多数実施して, 氾濫域の広がり进行评估することが重要である。境界を限定した高分解能の氾濫流モデルを分布型流出モデルにネスティングすることにより, これを実現することが可能である。佐藤ら⁸⁾は, 極値降水量を入力として日本全域の河川流域で 2 次元の氾濫計算を実施し浸水被害を定量的に評価しているが, 空間分解能は 1km であり, わが国の都市域の氾濫を予測するためにはより高い空間分解能が望まれる。本研究では, まず 30 秒 (約 1km) 空間分解能で流域全体の降雨流出計算を行う分布型流出モデル 1K-DHM⁹⁾を構築し, 流域の任意の一部の領域を選んで流出計算をネスティングして 3 秒 (約 90m) 空間分解能で河道流・氾濫流計算を行うモデルを開発した。開発したモデルを熊本県白川流域 (480km²) に適用し, 2012 年の九州北部豪雨を対象に流量および氾濫規模の再現計算を行い, モデルの妥当性を検証した。

2. 分布型流出モデルの構成

まず, 河道流・氾濫流モデルがネスティングする降雨流出モデルについて述べる。降雨流出モデルは分布型流出モデル 1K-FRM¹⁾と, 1K-FRM をもとに開発した 1K-DHM を用いる。1K-FRM は, HydroSHEDS¹⁰⁾により提供される標高および流下方向データを用いて河道流を 1 次元のキネマティックウェーブモデルによって計算するモデルであり, モデルパラメータは等価粗度と河道幅の 2 つである。このモデルは表面流に

よる河道流追跡計算を念頭に置いている．1K-FRM は各グリッドでの河道流追跡計算を並列化しているため、高速に流れを計算できるという特徴がある．

一方、1K-DHM は1K-FRM と同じ枠組みで流れの流量流積関係式を拡張したモデルである．1K-DHM は流域を斜面グリッドと河道グリッドに分け、斜面グリッドでは不飽和・飽和中間流・地表面流を考慮したキネマティックウェーブモデル¹¹⁾、河道グリッドでは地表面流型のキネマティックウェーブモデルによって流れを計算している．本研究で開発した河川流・氾濫流モデルは1K-DHM および1K-FRM のどちらもネスティングすることができる．

3. 河道流・氾濫流モデルの構成

分布型降雨流出モデルの空間分解能は30秒(約1km)であるが、氾濫流計算では氾濫規模を表現するためにより細かい空間分解能が必要となるため、全球の地形データを提供する HydroSHEDS の中で最も空間分解能の高い3秒(約90m)メッシュで氾濫流計算を行うモデルを構築した．このモデルは、降雨流出モデルで計算された流量を受け取って、河道流計算と氾濫流計算を降雨流出計算の10分の1の空間分解能で行う．氾濫域の中で河道がある部分を河道グリッド、それ以外の部分を氾濫域グリッドとし、河道グリッドでは1次元で河道流計算を行い、氾濫域グリッドでは2次元で氾濫流計算を行う．

氾濫水深および下流の河川流量を正確かつ高速に計算するために、Bates et al.¹²⁾ によって提案された局所慣性方程式を流れの計算に用いた．局所慣性方程式は移流項のみを無視した運動式であり、これを連続式と組み合わせて流れを追跡する．河道では以下の1次元の運動式および連続式を用いる．

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial(h+z)}{\partial x} + \frac{gn^2|Q|Q}{R^{4/3}A} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 Q は流量、 A は通水断面積、 h は水深、 z は河床高、 g は重力加速度、 n はマンニングの粗度係数、 R は径深である．流量 Q と水深 h (通水断面積 A) はスタガード格子状に定義する．また、これらを解くためには A と h の関係が必要となるが、ここでは矩形断面を仮定し、 $A = Bh$ とした． B は河道幅である．

局所慣性方程式は流量の時間変化の項を考慮することによって、拡散波方程式での水面勾配の振動から生じる流量計算の不安定性を軽減する¹²⁾．そのため拡散波方程式に比べて計算が安定し、時間ステップを大きくとることができる¹²⁾．さらに Bates et al. は、この局所慣性方程式を差分化する際、まず運動式を差分化して時刻 t での通水断面積 A_t 、水深 h_t および流量 Q_t のみから時刻 $t + \Delta t$ での流量 $Q_{t+\Delta t}$ を求め、次に連続式を差分化して時刻 t での通水断面積 A_t および時刻

$t + \Delta t$ での流量 $Q_{t+\Delta t}$ から時刻 $t + \Delta t$ での通水断面積 $A_{t+\Delta t}$ および水深 $h_{t+\Delta t}$ を求めている¹³⁾．このように支配方程式を陽解法で解くため、繰り返し計算を必要としない．以上のように、局所慣性方程式は拡散波方程式よりも高速かつ安定に流れの計算を行える．

氾濫域では、以下の(3)式、(4)式のように移流項を除いた運動式を x, y 方向に立てて、(5)式に示す連続式と組み合わせて2次元で洪水流の拡散を追跡する．

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + g \frac{\partial(h+z)}{\partial x} + \frac{gn^2|q_x|q_x}{h^{7/3}} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + g \frac{\partial(h+z)}{\partial y} + \frac{gn^2|q_y|q_y}{h^{7/3}} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

q_x, q_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の単位幅流量である．氾濫流計算の移流項は、安田ら¹⁴⁾ や Hunter et al.¹⁵⁾ によってその影響が運動式の他の項に比べて小さいことが理論的に示されており、(3)式、(4)式を用いても十分な解析が可能と考えられる．河道と氾濫域の水の流出入については、佐山ら⁷⁾ を参考に、河道と氾濫域の水位によって段落ち式または越流公式を適用した．

4. 河道流・氾濫流モデルによる1K-DHMのネスティング

前節までのモデル化によって、降雨流出モデルおよび河道流・氾濫流モデルを開発した．次に、3秒空間分解能の河道流・氾濫流モデルを用いて30秒空間分解能の降雨流出モデルをネスティングする．本研究のネスティングでは、まず降雨流出モデルを流域全体に適用して任意の地点の河川流量を計算し、計算結果を保存する．次に、計算した河川流量を選択した任意の境界で河道流・氾濫流モデルに受け渡し、河道流・氾濫流計算を開始する．

一般に、河道の下流域に氾濫原が広がっていることが多いため、例えば図-1のように、流出計算の格子と適合する形で流出計算域の下流域の一部を河道流・氾濫流計算域として設定する．図-1(上)の青い四角に降雨流出モデルの河道グリッド、黄色い四角に河道流・氾濫流モデルの河道グリッドを示す．両モデルの境界(赤線)右側の青いグリッドでの河川流量の計算値 Q_u を境界に接する左側の黄色いグリッドに与える．また、流出モデルで計算された斜面グリッドから河道グリッドへの流出量は、河道流・氾濫流モデルの河道グリッドで側方流入量として与える．具体的には図-1(下)に示すように、流出モデル内で斜面グリッドから河道グリッドへと流下するところで、斜面グリッドからの流出量計算値 Q_r を流出モデルの河道グリッド内部の河道流・氾濫流モデルの河道グリッドの数(図-1(下)では左側の青いグリッドに含まれる黄色いグリッドの数10)で等分し、各河道グリッドに受け渡す．河道グリッドで

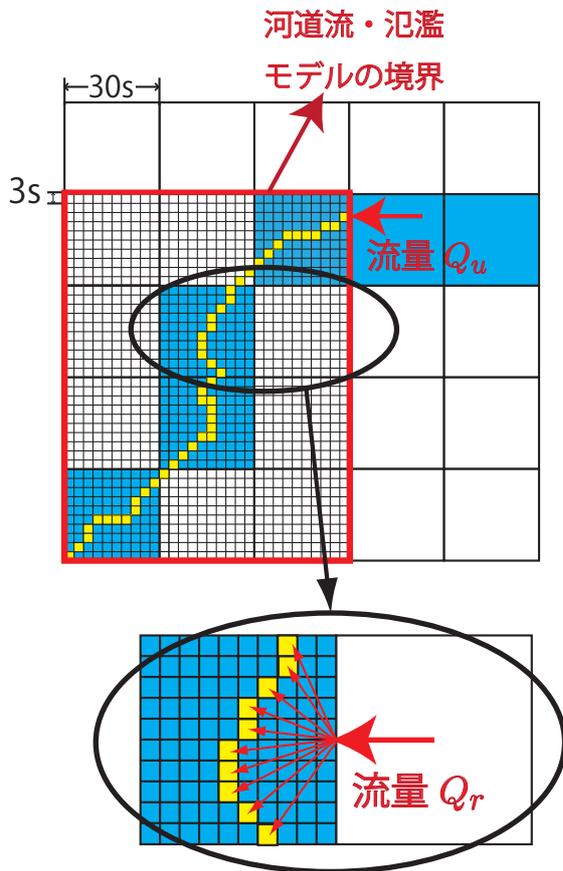


図-1 降雨流出モデル1K-DHMと河道流・氾濫モデルの関係 (青: 1K-DHMの河道の格子サイズ, 黄色: 河道流・氾濫モデルの河道の格子サイズ, 赤線: 境界, 拡大図: 1K-DHMの斜面グリッドからの流出量の河道流・氾濫モデルへの受け渡し)

の下端の境界条件は、潮位または適切な水位を与える。降雨流出計算と河道流・氾濫計算で河道の格子サイズは異なるが、河道流の計算はどちらも1次元で行っており、河道幅はどちらもパラメータとして与えるため、図-1中の赤い境界線に隣接する青いグリッドと黄色いグリッドはどちらも同じ河道幅をもつ。また、30秒格子の地形データは3秒格子の地形データから作成されているため、河道の位置がずれることはない。そのため、流域の上流から下流までの任意の地域を切り取ってネスティング計算を行うことができる。図-1では流域下流部を例に取ったが、図-2に示すような流域の中流域で氾濫が考えられる場合、降雨流出モデルで計算した流量 Q_u を河道流・氾濫モデルに受け渡し、河道流・氾濫計算を行ったのち、下流境界の流量 Q_l を逆に降雨流出計算に受け渡して降雨流出計算を引き続き行うことも可能である。

5. 流出・氾濫一体型モデルの実河川への適用

(1) 対象流域および対象イベント

開発したネスティングモデルを熊本県白川流域(480km²)で構築し、モデルの有効性を検討した。流

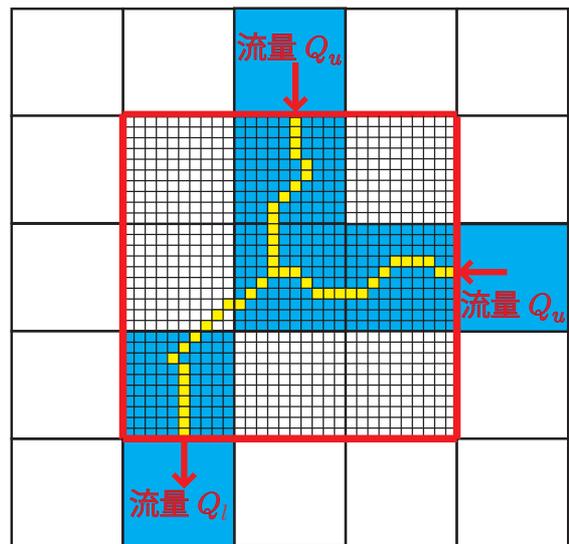


図-2 流域中流部をネスティングする場合の概念図 (青: 1K-DHMの河道の格子サイズ, 黄色: 河道流・氾濫モデルの河道の格子サイズ, 赤: 河道流・氾濫計算領域の境界線) 右上から左下に流下する。

量に加えて氾濫規模を評価するために、九州各地で甚大な被害をもたらした2012年7月の九州北部豪雨を対象とし、特に大きな被害を受けた一級河川白川を対象流域とした。梅雨前線性の豪雨であった九州北部豪雨は、白川水系の流域面積の8割を占める阿蘇カルデラ内において100mm前後の時間雨量を4時間観測するなど、記録的な大雨となった¹⁶⁾。白川流域の全体図を図-3(上)に示し、流域内で浸水が発生した地域を図-3(上)に青い四角で示す。今回は河道流・氾濫モデルの有用性を検証するため、白川流域の中でも浸水が広範囲(2059.8ha)に発生した白川流域上流部の黒川流域¹⁷⁾(北東部の四角の地域)を再現計算の対象とした。また、再現する流量の観測値は国土交通省の立野地点、妙見橋地点および九州電力(株)の黒川第一発電所への流入量を用いた。図-3(下)に白川上流域の模式図と観測所の位置を示す。白川の上流域を図中の水色の領域に示し、モデル上で集水面積が閾値を越える河道グリッドで形成される河道網を赤い線に示す。流量の観測地点はそれぞれ黒い四角に示す。

(2) 白川流域へのモデルの適用

4.で述べたように、本研究で開発した流出・氾濫一体型モデルは流域の上流から下流まで任意の領域で降雨流出計算をネスティングすることができる。ここでは流域の上流域で氾濫計算を行ったが、対象流域が小さいため今回の適用では流出計算も3秒メッシュで実施した。そのため、側方流入量は図-1(下)で10等分した降雨流出モデルによる斜面グリッドからの流入量を1等分、すなわちそのまま与えた。具体的には図-4で、3秒メッシュの1K-DHMで計算された青い斜面グリッドからの流出量を、河道流・氾濫計算の黄色い河

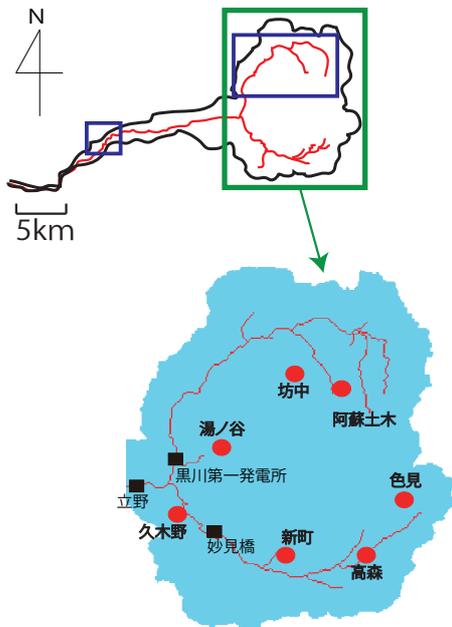


図-3 上：白川流域全体図(青い四角：浸水域)，下：白川上流域の観測地点(水色の領域：立野地点上流の白川流域，黒い四角：流量観測所，赤丸：地点雨量観測所)

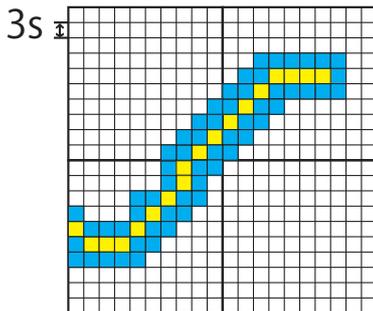


図-4 白川流域での降雨流出計算から河道流・氾濫流計算への受け渡し

道グリッドに受け渡した。差分計算の時間間隔は、降雨流出モデルで 600 秒，河道流・氾濫流モデルでは 5 秒である。また，河道流・氾濫流計算の下端の境界条件は立野地点の水位観測値を与えた。

地形データは降雨流出モデルでは HydroSHEDS の提供する標高および流下方向データを与えた。また，河道流・氾濫流モデルではより詳細に氾濫状況表現するために，高さ 1m 分解能の HydroSHEDS ではなく，高さ 10cm 分解能をもつ 10m メッシュの基盤数値情報のデータを 3 秒メッシュ間隔に補正して用いた。

(3) 流量の再現計算

流量の計算結果を示す。流出モデルのパラメータは過去 10 年間で 2012 年に次いでピーク流量が大きく，かつ氾濫が発生していない 2007 年 7 月の梅雨前線による降雨イベントを対象として，立野地点での観測流量を与えて SCE-UA 法¹⁸⁾ によって同定した。同定した立

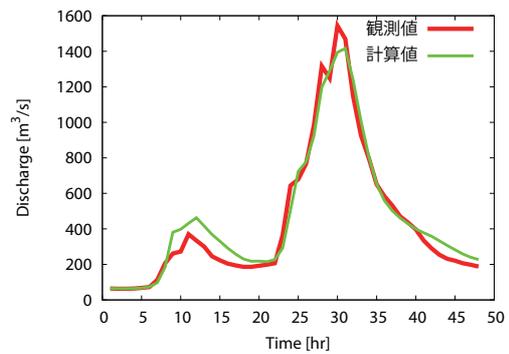


図-5 パラメータ同定期間(2007年7月6日～2007年7月7日)の立野地点の観測流量と計算流量の比較(赤：観測流量，緑：計算流量)

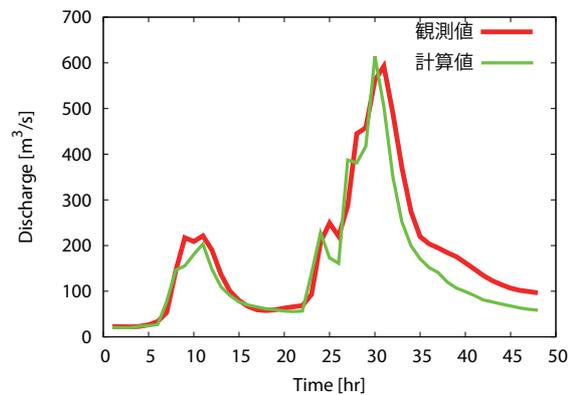


図-6 2007年7月6日～2007年7月7日の妙見橋地点の観測流量と再現計算による計算流量の比較(赤：観測流量，緑：計算流量)

表-1 降雨流出モデルのパラメータ¹¹⁾

パラメータ	値
等価粗度 n [m ^{-1/3} /s]	0.1456
飽和透水係数 k_a [m/s]	0.0017
土層厚 d_a [m]	1.3143
土層厚 d_s [m]	0.9867
透水係数比 β [-]	7.8670

野地点でのハイドログラフを図-5 に示す。降雨初期の観測流量が少し過大に算定されているものの，おおむね結果が一致していることがわかる。Nash 指標は 0.96 となった。同定されたパラメータによる妙見橋地点の再現計算の結果を図-6 に示す。妙見橋地点でも高い再現性を示していることがわかる。Nash 指標は 0.95 となった。同定したパラメータを表-1 に示す(パラメータの意味は文献¹¹⁾ 参照)。

次に，同定したパラメータを用いた 2012 年 7 月 12 日の妙見橋地点での再現計算結果を図-7 に示す。2012 年の九州北部豪雨では，黒川流域で広範囲にわたり浸

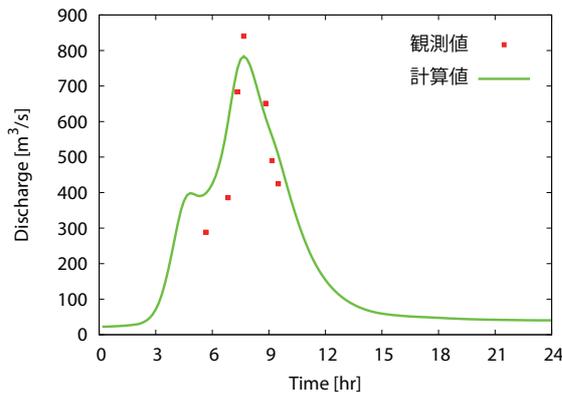


図-7 再現期間(2012年7月12日)の妙見橋地点の観測流量と計算流量の比較(赤: 観測流量, 青: 計算流量)

水被害が発生したため、流量の再現性は浸水被害の発生していない阿蘇カルデラ南部の妙見橋地点で確認した。観測流量は、流量観測による観測値を用いた。図-7から、計算流量は観測流量を再現していることがわかる。降雨データは、図-3中に赤い丸で示した熊本県の阿蘇土木地点、久木野地点、高森地点の地点雨量データおよび国交省の色見地点、新町地点、湯ノ谷地点、坊中地点の地点雨量データを用いてティーンセン法によって作成した。

(4) 氾濫規模の再現計算

次に氾濫計算の再現結果を示す。2012年7月12日の降雨流出計算で得られた斜面グリッドからの流出量を河道流・氾濫流モデルの河道グリッドに与えて河道流計算を行った。河道断面をもとに設定した堤防高よりも河道または氾濫域の水位が高くなった場合に、越流公式によって河道と氾濫域の流量のやり取りを行うものとした。図-8に示す白三角の地点では破堤があったことが報告されている¹⁷⁾。そこで、その地点での越流開始時刻に破堤箇所位置する河道グリッドの堤防高をグリッド幅にわたって0mとした。等価粗度は、河道では河道水位の計算値が観測値に合うように0.055とした。また、氾濫域では実測データに合うように同定するのは難しいため、0.06とした。

黒川流域の浸水域の実測値を図-8、氾濫計算による最大浸水深分布を図-9にそれぞれ示す。浸水域の傾向はおおむね一致し、浸水面積も実測値が20.59km²、計算結果が21.38km²となり、おおむね再現していることがわかる。図-8中の浸水域に黄色で示す地点の最大浸水深の計算値も、筆者らが現地を確認した高さで整合する。また、最大浸水深が比較的大きい地域はおおむね遊水地の設置されている地域に一致した。

立野地点および黒川第一発電所の観測流量、計算流量(降雨流出モデルのみを用いた場合と河道流・氾濫流モデルを用いた場合)をそれぞれ図-10および図-11に示す。観測流量は妙見橋地点と同様に、両地点とも流量観測値を用いた。降雨流出モデルで計算した計算流



図-8 2012年7月12日の黒川流域の浸水域(文献¹⁷⁾より)。赤い領域: 浸水域。黄色い丸の地点の水深は筆者ら確認。

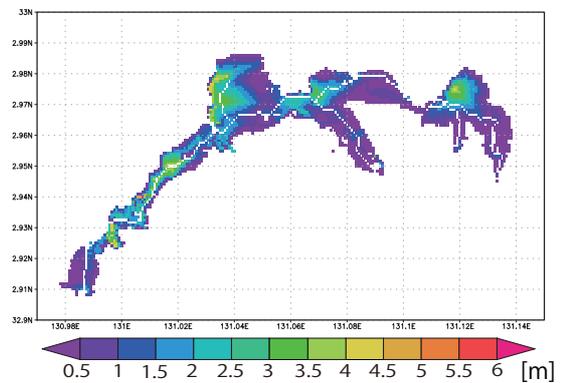


図-9 モデルによる最大浸水深分布の計算結果

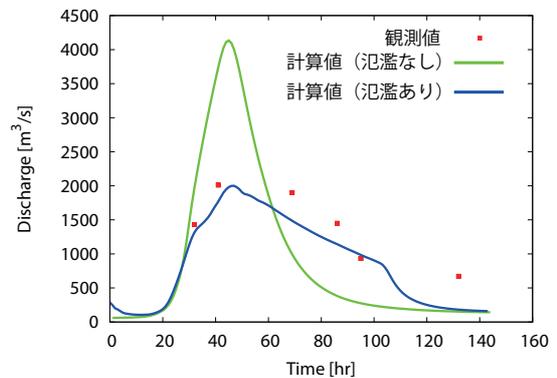


図-10 再現期間(2012年7月12日)の立野地点の観測流量と計算流量の比較(赤: 観測流量, 緑: 計算流量(氾濫なし), 青: 計算流量(氾濫あり))

量は氾濫を考慮していないので、観測流量を過大算定しているが、河道流・氾濫流モデルで計算した流量は氾濫によるピーク時刻付近の流量の低減および、氾濫水の戻りによる流量の回復が再現することができた。

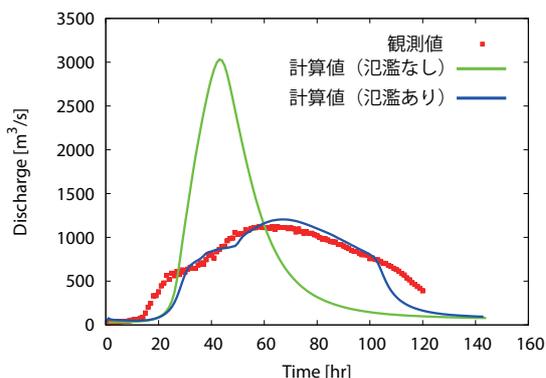


図-11 再現期間(2012年7月12日)の黒川第一発電所地点の観測流量と計算流量の比較(赤: 観測流量, 緑: 計算流量(氾濫なし), 青: 計算流量(氾濫あり))

6. おわりに

本研究では、様々な条件での多数の氾濫計算を、高空間分解能でかつ効率的に実施するために、分布型流出モデルの計算結果を流域の一部の任意の領域でネスティングして河道流・氾濫流計算を行うモデルを構築した。構築したモデルは、安定して高速に計算を行う局所慣性方程式を流れの計算に導入し、また降雨流出モデルをネスティングすることで、流域の上流域から下流域までの任意の領域での氾濫計算を可能にした。開発したモデルを白川流域に適用した結果、流量および氾濫規模を再現した。

今後は都市域などの水害に脆弱な地域に本モデルを適用して気候変動による水害リスクの影響評価を行おうと考えている。これを都市域に対して行う場合には、土地利用に大きく影響を受ける粗度係数などのパラメータを土地利用情報をもとに面的に取り込む必要がある。また、建物による建ぺい率も高いため、佐藤ら⁸⁾で用いられていた抗力係数などの家屋の影響を考慮するパラメータも導入する必要がある。今後は、様々な条件下での多数の氾濫計算をもとに気候変動による氾濫規模の影響を確率的に評価する予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、熊本県から水文データや氾濫に関する資料を提供いただくとともに、現地調査の便宜を図っていただいた。また、データ取得について熊本大学の大本照憲教授の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 立川康人, 滝野晶平, 藤岡優子, 萬 和明, キムスンミン, 椎葉充晴: 気候変化が日本の河川流量に及ぼす影響の予測, 土木学会論文集, 67(1), pp. 1-15, 2011.
- 2) 新田友子, 鼎信次郎, 沖大幹: 流量確率指数を用いた地球温暖化に伴う日本域洪水リスク変化の推定, 土木学会論文集, B1(水工学), pp. 451-456, 2010.
- 3) Yadu Pokhrel, Naota Hanasaki, Sujana Koirala, Shin-

jiro Kanae and Taikan Oki: Climate change impact on river flow of the Tone River Basin, Japan, Journal of Japan Society of Civil Engineering, Ser. B1(Hydraulic Engineering), Vol.54, No.1, pp. I.97-I.102, 2010.

- 4) Yukiko Hirabayashi, Roobavannan Mahendran, Sujana Koirala, Lisako Konoshima, Dai Yamazaki, Satoshi Watanabe, Hyungjun Kim and Shinjiro Kanae: Global flood risk under climate change, Nature Climate Change, doi:10.1038/nclimate1911, pp. 816-821, 2013.
- 5) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 坂井広正, 相良亮輔: 低平地河川流域における内水氾濫解析法とその寝屋川流域への適用, 水工学論文集, 第46巻, pp.367-372, 2002.
- 6) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小園裕司: 流域特性を考慮した都市域氾濫解析モデルと都市域での浸水プロセスの予知, 水工学論文集, 第54巻, pp. 919-924, 2010.
- 7) 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡奨, 牛山朋来, 萬矢敦啓, 田中茂信: 2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集, No.400/II-22, pp. 1-15, 2012.
- 8) 佐藤歩, 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 降雨極値データを利用した気候変動に伴う全国浸水被害額評価, 土木学会論文集, B1(水工学), Vol. 52, pp. 433-438, 2008.
- 9) 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻水文・水資源学分野: 1K-FRM/DHM, <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/products/1K-DHM/1K-DHM.html> (2013/9/30 確認.)
- 10) USGS: HydroSHEDS, [http://hydrosheds.cr.usgs.gov/datasets.php\(2013/9/30 確認.\)](http://hydrosheds.cr.usgs.gov/datasets.php(2013/9/30 確認.))
- 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, 48, pp.7-12, 2004.
- 12) Paul D. Bates, Matthew S. Horritt, Timothy J. Fewtrell: A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modeling, Journal of Hydrology, Vol.387, pp. 33-45, 2010.
- 13) Gustavo A. M. deAlmeida, Paul D. Bates, Jim E. Freer, and Maxime Souvignet: Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling, Water Resources Research, Vol.48, W05528, 2012.
- 14) 安田浩保, 白土正美, 後藤智明, 山田正: 水防活動の支援を目的とした高速演算が可能な浸水域予測モデルの開発, 土木学会論文集, No.740/II-64, pp. 1-17, 2003.
- 15) Neil M. Hunter, Matthew S. Horritt, Paul D. Bates, Matthew D. Wilson, Micha G.F. Werner: An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation, Advances in Water Resources, Vol.28, pp. 975-991, 2005.
- 16) 熊本県土木部河川港湾局河川課: 平成24年7月九州北部豪雨治水対策事業 [概要], pp. 1-2, 2013.
- 17) 土木学会九州北部豪雨災害調査団: 平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書 3.4, pp. 16-18, 2013.
- 18) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K.: Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, Journal of Hydrology, Vol. 158, pp. 265-284, 1994.

(2013.9.30 受付)