統合型降雨流出・洪水氾濫モデルによる佐用町 洪水災害分析と経済被害推定

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED MODEL FOR RAINFALL-RUNOFF/FLOOD INUNDATION SIMULATION AND ECONOMIC LOSS ESTIMATION FOCUSING ON SAYO TOWN, HYOGO, JAPAN

小林健一郎¹・寶 馨²・奥勇一郎³
Kenichiro KOBAYASHI, Kaoru TAKARA and Yuichiro OKU

¹正会員 Dr.-Ing., 博（工）京都大学特定准教授 学際融合教育研究推進センター
極端気象適応社会教育ユニット（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

²フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

³非会員 博（理）京都大学特任助教 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

This paper deals with the development of an integrated model for rainfall-runoff/flood inundation simulation and economic loss estimation, especially focusing on Sayo Town, Hyogo Prefecture, Japan where there was a severe flood disaster due to a heavy rainfall event on 9-10 August 2009. Firstly, the rainfall over the Sayogawa river catchment at the time is analyzed by using the composite radar and Radar-AMeDAS reanalysis data by the Japan Meteorological Agency in addition to the ground observation data. Second, the rainfall-runoff and flood inundation processes are simulated using the integrated model with the Radar-AMeDAS reanalysis data. The simulated inundation area shows the good agreement with the inundation record. Then, the economic loss estimation based on the simulated inundation area and depth is carried out and compared with the prospected value reported by the municipal government. The house/building economic loss estimated is 20.4 billion Japanese Yen, which agrees well with the reported value 18.5 billion Japanese Yen.

Key Words: integrated model, economic loss estimation, composite radar, Radar-AMeDAS, Sayo town

1. はじめに

2009年8月9日から10日にかけて台風9号による大雨により兵庫県佐用町に甚大な洪水被害がもたらされた。台風第9号災害検証報告書¹⁾によると2010年3月末日の集計では、佐用町で死者18名、行方不明者2名、負傷者1名の人的被害が、また全壊家屋139、大規模半壊269、半壊483、床上浸水157、床下浸水742など合計1789戸の家屋被害が生じたと報告されている。また同報告書によると農作物被害は被害面積が549.4ha、被害額総計が2億456万円とある。他方、2009年12月1日時点で、見込みの住宅総被害額は185億円と試算されている²⁾。

佐用町豪雨災害についての研究はこれまで例えば宇野ら³⁾により実施されている。これらの研究は久崎地区の氾濫現象及び同地の水害時のソフト対策に焦点を絞ったものである。他方、本稿では佐用川流域全体を対象とした研究を実施した。具体的には本稿ではまず

流域全体を対象に佐用町豪雨災害における支派川の河道流量と外水・内水氾濫浸水深をシミュレーションするモデルを構築する。次に、氾濫浸水深に基づいて住宅・作物被害額を推定し、佐用町、兵庫県により推定された実態経済被害と比較することにより経済被害推定モデルの精度の検証を試みる。これにより、洪水ハザードのシミュレーション精度を高める事に加え、流域の洪水による経済リスクを事前に推定する手法の高度化を図る。ここでは洪水浸水深の再現のために特に佐用川流域全体を対象とした統合型の降雨流出・洪水氾濫同時追跡シミュレーションモデルを構築した。なお、以下に記述する統合型の降雨流出・洪水氾濫シミュレーションモデルを構築する理由として、今回の佐用町豪雨災害では、洪水流が河道から溢水しつつ流下したという点がある。一般的な物理法則に基づく分布型の降雨流出モデルは斜面から河道への一方向の水の移動を考えて、河道から堤内地への溢水については考慮していないことが多いことから、今回この手法を採

図-1 佐用川流域概要及び統合型降雨流出・洪水氾濫モデル概念図

用した．この点については実績のある氾濫原を考慮した一次元解析法を採用することも考えられるが，本稿のように流域規模で一括的にデータプロセスを実施すると，事前に氾濫原の範囲を特定する必要がないという利点がある．他方，流域全体に対する各種データ蓄積量は洪水対策上の主要地点のそれよりも少ないことが難点となるが，昨今，流域治水や支流水位の観測の重要性などが指摘されていることなども考えて，本稿のモデルは観測網の更なる整備など将来的な展開を視野に入れて，この方式を採用した．

また，降雨による内水氾濫を考慮する際に，河道だけでなく山腹斜面から平地に流れ出す水量を推定する必要がある．本稿の手法によれば山地と平地が統合されているので，この水量を推定することも可能である．本稿の手法は分布型降雨流出モデルにより河道流量を推定し，それを境界条件として洪水氾濫解析を実施する手法と比べると，流域内の流出・氾濫プロセスを一体的に取り扱えるという利点がある．他方，この統合型手法では計算負荷は増加するが，特に一出水を対象とする場合は統合型手法の利点は多いと考える．

2. 佐用町の概要

佐用町は兵庫県西部の千種川流域内部に位置し，居住人口は平成22年3月末日で20166人，世帯数は7203戸である．本稿では被害の多かった円光寺地点（図-1）より上流の佐用川流域を対象とする（流域面積191km²）．

図-1左に国土数値情報⁵⁾より取得した森林・田畑・都市域の分布図を掲載する．これによると森林面積は151km²，田畑面積は37km²となった．図-1中央の赤線は

河道網で，この図には雨量観測所の位置も示している．

3. 統合型降雨流出・洪水氾濫追跡モデル

本稿では図-1中央の河道網の流れは一次元不定流解析により追跡し，流域の斜面や市街地の流れ（以後堤内地流と呼ぶ）は二次元浅水流モデルにより追跡する．

一次元不定流、二次元洪水解析の基礎方程式、数値計算手法はすでに実績がある井上⁶⁾、川池⁷⁾の手法を採用した．本稿のモデルはこれらの基礎方程式を流域全体に拡張した点に特徴がある．流域への拡張はKinematic wave法に基づく分布型降雨流出モデルに関する研究も参考にした（例えば市川⁸⁾）．図-1右に正方形セルで表現した60m解像度の標高データ，国土数値情報⁵⁾から取得したベクトル型河道網データ，及びこれをGISにより一次元ラスタライズした60m解像度の河道網を示す．

堤内地計算の2次元座標系は図-1中央のように左下の1地点を節点原点 $(i, j) = (0, 0)$ とし，右及び上に60m移動するごとに節点番号が1ずつ増えることとした．節点 (i, j) ($i=0, \dots, 254, j=0, \dots, 450$) は常に図-1右のセルの中心に位置し，各節点に標高，粗度係数などを割り当てる．

1次元不定流計算はベクトル型の河道網データ（図-1右赤線）をGISの機能を利用してラスタライズした河道網データを用いて実施する（図-1右黒色セル）．この設定では河道流は上下左右方向にジグザグに流れるとし，斜め方向には流れない．つまり河道流計算は常に1次元で実施され解像度は常に60mである．二次元浅水流方程式により計算された堤内地流が節点 (i, j) に到達すると，その位置で結節された一次元不定流計算の河道

図-2 合成レーダ出力点及び佐用川流域のティーセン分割図

図-3 合成レーダ各出力点における2009年8月9日0時～10日23時の累積雨量

図-4 レーダ・アメダス解析雨量各出力点における2009年8月9日0時～10日23時までの累積雨量

位置($k, k=0, \dots, 2614$)で越流公式に基づく単位幅流量 $\times$ 節点間距離(60m)に相当する流量 q が側方流入として河道に流入する。この側方流入は一次元河道の60m間隔の各節点の左右岸で存在する。また、逆に河道流の水位が堤防高さを越えた場合にも、河道位置(k)から堤内地(i, j)へ越流公式により推定される流量が溢水する。側方流入出とともに完全越流ともぐり越流を区別する。

下流端境界条件は観測値を与え、上流端については一定水深を与える。ここで採用した基礎方程式、数値計算手法については例えば小林・寶⁹⁾も参考にされたい。

この手法は氾濫解析手法を流域全体に拡張したとも言えるし、分布型降雨流出モデルで一般に適用されているkinematic wave法を1次元・2次元不定流モデルで代替したものともいえる。森林については、恩田ら¹⁰⁾などを参考に25mm/hrの浸透能があり、それ以降表面流が発生するとした。本稿では表面流の支配方程式が物理法則に基づいているため、地中流を概念モデルや半物理式で追跡することを避けた。森林土壌の流れのより具体的な取り扱いについては今後の課題である。

一次元不定流計算については以下の連続式と、抵抗則にManning公式を用いたSt.Venant式を適用する。連続式：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

運動量方程式：

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = s_0 - \frac{n^2 u |u|}{R^{4/3}}$$

ここに A は河道での流水断面積、 Q は河道内流量、 q は x 方向の単位長さあたり横流入出量(流入が正)、 g は重

力加速度、 $u=Q/A$ は断面平均流速、 s_0 は水路床勾配、 n はマンニングの粗度係数、 R は径深である。数値計算には特性曲線法を用いる。

堤内地の氾濫解析には2次元浅水流方程式を用いる。連続式：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = Q_{in/out}$$

運動量方程式：

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - gn^2 u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - gn^2 v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$$

ここに h は水深、 $M=uh$ 、 $N=vh$ で M 、 N は流量フラックス、 u 、 v はそれぞれ x 方向、 y 方向流速、 H は水位、 $Q_{in/out}$ は単位面積当たりの2次元格子への流入出量である。 h 、 M 、 N を千鳥格子状に配置し(staggered grid)、時間方向差分には陽的解法のLeap frog法を用いる。

4. 合成レーダ・レーダアメダスによる降雨解析

2009年8月9日～10日にかけての佐用川流域における降雨の分析のために、気象庁より提供されている合成レーダ雨量、及びレーダ・アメダス解析雨量を用いた¹¹⁾。概要は次の通りである。

1kmメッシュ全国合成レーダ：気象庁が保有する全国20台の気象レーダーで観測されたエコー強度(レー

図-5 2009年8月9日～10日の佐用川流域での流域平均雨量推定図

ダーで観測される換算降水強度)で10分間隔で提供されている。

1kmメッシュレーダ・アメダス解析雨量：気象庁の保有する気象レーダと地域気象観測（アメダス）データを用いてメッシュで解析した1時間降水量であり、30分間隔で提供されている。

図-2に合成レーダの出力点位置を佐用川流域に重ね合わせた図を示す。同図には流域平均雨量を計算する際のティーセン分割図も示している。まず合成レーダを用いて、2009年8月9日0時～10日23時までの2日間累積雨量を各出力点で計算した結果を図-3に示す。佐用川流域で2日間雨量450-500mmの降雨を示す図中上部右側地域から150mm/2day以下の図中上部左側地域まで降雨分布に幅があることがわかる。

他方、レーダ・アメダス解析雨量による2日間の累積降雨量分布を図-4に示す。図-4のレーダ・アメダス解析雨量による累積雨量を見ると、図-3の合成レーダによる累積雨量に比較して、全体に降雨強度差が縮まり、最高2日間累積雨量の値も減少しているのがわかる。

図-5は合成レーダ及びレーダ・アメダス解析雨量により算定した流域平均雨量、兵庫県が算定した地上観測雨量による流域平均雨量である。図-5を見ると算定された流域平均雨量値には幅があるのがわかる。例えば、降雨が最高値を記録した9日21時においては、合成レーダによる流域平均雨量が最大で、その後、地上雨量観測計による流域平均雨量、最も小さいものがレーダ・アメダスによる流域平均雨量となる。他方20時においては、最大値が地上観測雨量による流域平均雨量で、次がレーダ・アメダスによる流域平均雨量、最後が合成レーダによる流域平均雨量となる。

レーダ・アメダス解析雨量は合成レーダの値をアメダス（地上観測値）により補正したものである。したがって、地上観測値が真値であるという立場に立て、一般にはレーダ・アメダス解析雨量の方が合成レーダ

よりも信頼性のあるデータであると考えられている。他方、合成レーダは出力間隔が短いため防災用に有効であると考えられている。実際今回の流域平均雨量の20～21時の値を見ると、合成レーダの値がアメダスにより補正されて、レーダ・アメダス解析雨量の値になっている様子は見て取れる。レーダ・アメダス解析雨量の質の評価については、例えば参考文献¹²⁾を参考にされたい。本稿では、以降、レーダ・アメダス解析雨量が降雨の空間分布を考慮することができ、かつ信頼性が高いと考えて、洪水計算を実施した。

5. 浸水深計算結果

図-6は浸水実績図、図-7はレーダ・アメダス解析雨量を用いて空間分布を考慮し計算した最大浸水深の流域全体図、浸水実績図近辺を拡大したのが図-8である。まず、図-7を見ると、本稿のモデルでは標高データにより生じる山地部の窪地の処理を行っていないため、流域全域において各窪地に水がたまっている様子が見て取れる。

次に図-7の実績図近辺を拡大した図-8と図-6の浸水実績図を比較すると良く一致しているのがわかる。ただし、細部には差異が見て取れる。こうした差異は基本的には標高データの解像度・精度、及び河道の表現形式にもう少し工夫が必要なことなどを示唆していると考えている。本稿では標高データに国土地理院の数値地図50mメッシュデータ（標高）を用いたが、このデータの精度は7.2mとある。これにより微地形が十分に再現されていないことが推測される。また、河道幅が二次元モデル解像度より高い場合などは河道の表現形式に修正が必要になると思われる。

しかしながら、レーダ・アメダス解析雨量を用いたシミュレーションによる佐用町総合庁舎の最大浸水深

図-6 浸水実績図¹⁾

図-7 レーダ・アメダス解析雨量による
浸水深計算結果

図-8 図-7拡大図 (浸水実績図範囲)

は1.16mとなり、兵庫県台風9号追加資料¹³⁾による総合庁舎の実績浸水深は1m程度であったとあるので、シミュレーションの全体的な再現性は良い。

6. 家屋・農作物経済被害推定

経済被害推定はGISを用いて実施した。兵庫県佐用町については家屋一棟一棟を詳細に再現したベクトル型のポリゴンデータが存在するのでこれを経済被害推定の基礎データとして用いる。他方、農地一区画一区画を詳細に再現したベクトル型データは佐用川流域については存在しないので、国土数値情報による100m解像度の土地利用データから農地を選択抽出して基礎データとして用いた。以下の推定法の詳細については小林ら (2010) ¹⁴⁾¹⁵⁾を参考にされたい。

概略の手順は以下のようである。最初に内水・外水

氾濫解析を実施し、これにより計算された浸水深をグリッドセルで出力する。次にグリッドセル浸水深を各家屋や農地のポリゴンデータに属性情報として割り当てる。複数のグリッドセルが一つのポリゴンと重ね合う場合、複数の水深の最大浸水深を取る。その後、各家屋や農地の浸水深に応じたいわゆる被害率（家屋・農地の評価額が受ける被害の割合）を治水経済調査マニュアルの統計値¹⁶⁾を用いて計算する。この手続きにより各家屋あるいは農地毎に被害率が割り当てられる。その後、家屋については「面積当たり家屋評価額×面積×被害率」により被害額を推定する。農地については「面積当たりの作物収量×単位重さあたり作物価格×面積×被害率」により農地作物被害額を推定する。ここでは¹⁶⁾、兵庫県の面積当たり評価額を150600円、面積当たり作物収量を0.514kg/m²、単位重さあたり作物価格を289円/kgとした。

この手続きにより推定された佐用町付近の建造物被害額分布を図-9に示す。500万円以下の被害が多く、の建造物について推定されているのがわかる。この手法により推定された佐用川流域の総被害額は最低最大浸水深（1cm）を含めると242億円、これを除くと204億円となった。兵庫県による住宅の見込み被害額が185億円であるから、ある程度の精度で被害推定ができていると考えられる。なお、ここでの経済被害推定では、流域に降った雨による各地点の最大浸水深を被害推定の基礎データとして用いるため、雨が降ればかならず多少の浸水は発生し、ここから最大浸水深を取れば流域のどの地点においても被害が発生することになってしまう。この最低の最大浸水深が、本稿のモデル設定では1cmであるため、この最低の最大浸水深は被害額計算から取り除くという計算結果を併記することとする。一方農地作物の推定被害額分布を図-10に示す。各農地で

図-9 被害推定モデルによる
建造物被害額分布図

図-10 被害推定モデルによる
農地被害額分布図

40～60万円程度の被害が推定されている。この推定モデルによると農地の総被害額は7億6800万円となった。他方、佐用町による農作物被害報告額は2億450万円である。農地については100m解像度の土地利用データを用いたので、農地面積が常に100m×100mになり実際より過大で被害額も過大に評価していると考えられる。なお、田畑についても最低最大浸水深1cm以下を除くと被害額は7億4000万円となった。これにより推定モデルは被害額を概算する能力は十分に有していると考ええる。

7. 結論

本稿では最初に2009年8月9日～10日に発生した佐用町における豪雨災害の流出・浸水現象をシミュレーションにより再現することを試みた。また計算浸水深に基づいて家屋・農地の経済被害を推定し、その総額を実際に佐用町や兵庫県により報告されている見込み被害と比較することで、経済被害推定モデルの精度を確認した。

流出・浸水現象の再現に当たっては、統合型の降雨流出・洪水氾濫追跡モデルを構築した。これは従来の、流出モデルにより河道流量を推定し、これを境界条件として洪水氾濫計算を実施する手法に比較しても幾つか利点がある。例えば、山腹斜面から平地への流入流量を考慮した氾濫追跡が可能であること、氾濫原を事前に設定する必要がないことなどがあげられる。流域全体を一体型でモデル化できることから取り扱いが容易であることなども言える。一方で、計算負荷が高いことから一出水に対しては単一PCでも取り扱いが可能であるが、長期の流出現象や水循環をモデリングしたい場合には、並列化などの作業が必要となる。本稿ではこの統合型モデリングにより佐用町の浸水現象を良く再現できたと考えている。

経済被害推定モデルについても、自治体による経済被害報告額も基本的には精度の高い推定値であることを考えると、概算値を提供するには良い精度を持っていると考えられる。

今後はこれらのハザード、経済リスクモデルの更なるキャリブレーションを実施して、推定精度を高める所存である。

謝辞：土木学会調査団への参加を通じて、兵庫県及び佐用町にはデータ・資料提供など多大なご助力をいただいた。また本研究は文部科学省グローバルCOEプログラム「極端気象と適応社会の生存科学（PI：寶馨）」の支援を受けた。経済被害推定モデルの開発に当たっては河川情報センターより助成金を受けた。ここに記して心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐用町：台風第9号災害検証報告書，
<http://www.town.sayo.lg.jp/kakuka/saigaifukkotaisaku/kensyouiinkai/kensyouhoukokusyo.pdf>, 2010
- 2) 兵庫県災害復興室：平成21年台風第9号災害の復旧・復興計画，<http://web.pref.hyogo.jp/contents/000143772.pdf>, 2009
- 3) 宇野 宏司・中野 晋・梅岡 秀博・渡辺 一也：平成21年台風9号による洪水氾濫特性―兵庫県佐用町久崎地区を例として―，土木学会水工学論文集第54巻，pp. 865-970, 2010
- 4) 宇野 宏司・中野 晋・久米賢治：2009年8月佐用町豪雨災害にみるソフト防災対策の有効性とその限界，河川技術論文集第16巻，pp. 489-494, 2010
- 5) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス，
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>, 2009
- 6) 井上和也・戸田圭一・前田修：河川網が発達した領域での氾濫解析法とそのメコンデルタでの適用，土木学会水工学論文集第44巻，pp. 485-490, 2000
- 7) 川池健司・井上和也・戸田圭一・野口正人：低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析，土木学会論文集，No.751/II-67, pp.57-68, 2005.
- 8) 市川温・村上将道・立川康人・椎葉充晴：流域地形の新たな数値表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発，土木学会論文集，No. 691/II-57, pp.43-52, 2001
- 9) 小林健一郎・寶 馨：雨域の移動が流域の降雨流出・洪水氾濫過程に及ぼす影響，土木学会水工学論文集第53巻，pp. 841-846, 2000
- 10) 恩田裕一・辻村真貴・野々田稔郎・竹中千里：荒廃したヒノキ人工林における浸透能測定法の検討，水文・水資源学会誌18(6), pp. 688-694, 2005
- 11) 鷲見哲也：レーダー・アメダス解析雨量の利用例，
<http://sumisumi.cocolog-nifty.com/sumisumi/files/Rader-AME.pdf>, 2009
- 12) Kamiguchi, K. et al.: Development of APHRO_JP, the first Japanese high-resolution daily precipitation product for more than 100 years, Hydrological Research Letters, 4, pp. 60-64, 2010
- 13) 佐用町：台風第9号災害にかかる追加資料について，
http://www.town.sayo.lg.jp/kakuka/saigaifukkotaisaku/kensyouiinkai/dai2kai/3_tsuikashiryoku.pdf, 2009
- 14) 小林健一郎・寶 馨・中北英一：全球気候モデル出力と洪水及び経済被害推定モデルを用いた中小河川の水害リスクの将来変動に関する研究，河川技術論文集第16巻，pp.495-500, 2010
- 15) Kobayashi, K., Takara, K., Funada, M. and Takeuchi, Y.: Development of a Framework for the Flood Economic Risk Assessment Using Vector GIS Data, Journal of Disaster Research, Vol. 5 No.6, pp. 657-665, 2010
- 16) 国土交通省：治水経済調査マニュアル（平成17年度版），
<http://www.gsi.go.jp/chizujoho/chizujoho40004.html#09>, 2010
(2010. 9. 30受付)