

洪水による被害推定手法の高度化に関する研究

小林健一郎*・寶 馨

*京都大学 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

要 旨

本研究では洪水による直接被害（家屋被害，作物被害）の推定手法について述べる。基本的な考え方としては洪水氾濫シミュレーションを構造格子型で実施し，グリッドセルで出力された浸水深情報を詳細なベクトル型データに属性化することにより，家屋一棟一棟，農地一区画一区画毎の経済被害リスクの推定を可能とする。本稿では，まず，滋賀県竜王町により整備されたベクトル型データを用いた家屋・農作物被害推定手続きを紹介する。その後，佐用川流域全体を対象に構造格子で統合型の降雨流出・洪水氾濫同時解析を実施し，これによる浸水深に基づいた経済被害推定を行い，実態の経済被害と推定経済被害を比較する。本稿の経済被害推定手法の汎用性は高く，かつ構造格子型で広域の降雨流出・洪水氾濫解析の有効性を示すものである。

キーワード：降雨流出・洪水氾濫解析，家屋被害，作物被害，佐用川，日野川，竜王町

1. 詳細な洪水直接被害推定手法の提案

1.1 ベクトル型データの有用性

図1は滋賀県竜王町により整備されたGISフォーマットのベクトル型デジタル地図である。この電子地図では家屋・構造物，田畑，道路などがポリゴンデータとして整備されている。一見してわかるように，この詳細なベクトル型のデジタルデータによって，構造物や田畑の正確な形状が認識できる。例えば，図1中の赤色の長方形ポリゴンは家屋・構造物を示し，緑色の長方形のポリゴンは田畑を示している。

シミュレーションによる浸水深をグリッドセルで出力し，この浸水深情報を各ポリゴンに属性情報として割り当て，浸水深から被害率を推定し，経済被害額を推定する手続きを以下に述べる。

1.2 ラスター型浸水深情報のベクトル型構造物・田畑データへの属性化

図2は図1のベクトル型デジタルデータに正方形型構造格子で行った洪水浸水深シミュレーション結果を重ねて表示したものである。図3はこの浸水深メッシュデータ情報をベクトル型データの各ポリゴンに属性情報として与えたものである。

この属性付与過程において，複数の浸水深グリッドセル情報が一つのポリゴンにまたがる場合がある。

この場合，最大浸水深を代表値として採用する。例えば最小値あるいは平均値なども属性候補となりえるが，最大値を取る場合が洪水防御計画としては安全側で最も妥当だと考える。

この方式であれば図2で浸水深が低い地域でも図3では大きめの浸水が生じる事がある。各区画（ポリゴン）内に障害がないのであれば各区画で浸水深が同一の方が現実により近いと考えられる。また，図3のようにベクトル型で浸水深を表現することにより，各家屋や田畑の所有者は各々の資産が浸水しているかどうか，浸水深はどの程度かを判断しやすくなる。

こうした情報は避難の判断や資産保護にも有用である。

1.3 被害率推定

家屋・構造物及び作物の被害率を推定するための統計値が国土交通省の治水経済調査マニュアル（2005）に示されている。なお，こうした統計値は日本ではほとんど公表されていない。この統計値を用いた構造物・家屋に関する被害率推定手続きは以下のようなものである。

(1) 被害率とは，洪水により家屋・構造物や作物が評価額に対してどの程度のパーセンテージで被害を



Fig 1 Detailed vector-type data of house and paddy fields (Ryuou Town)

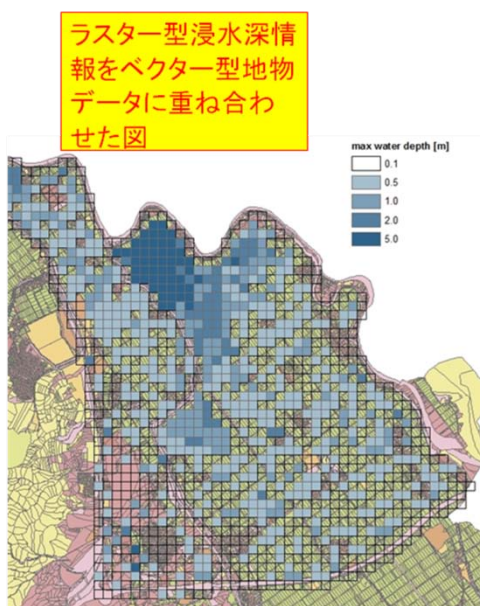


Fig 2 Grid cell inundation depth overlaid on the vector data

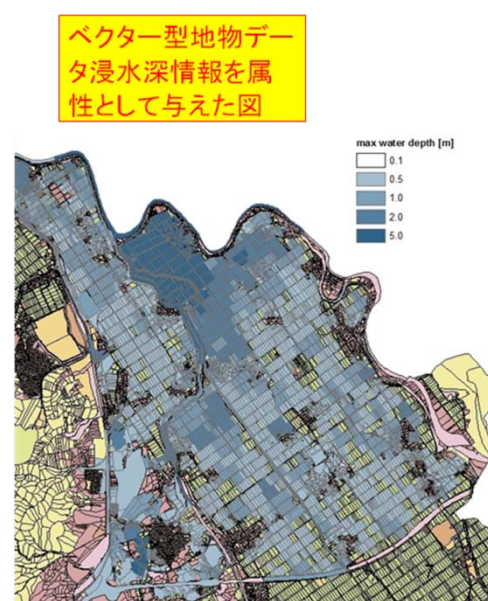


Fig 3 Transfer of the grid cell information to the vector data

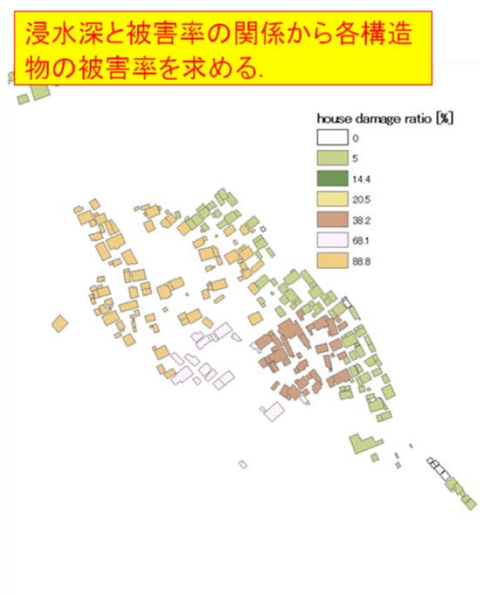


Fig 4 The damage ratio of the houses in the region

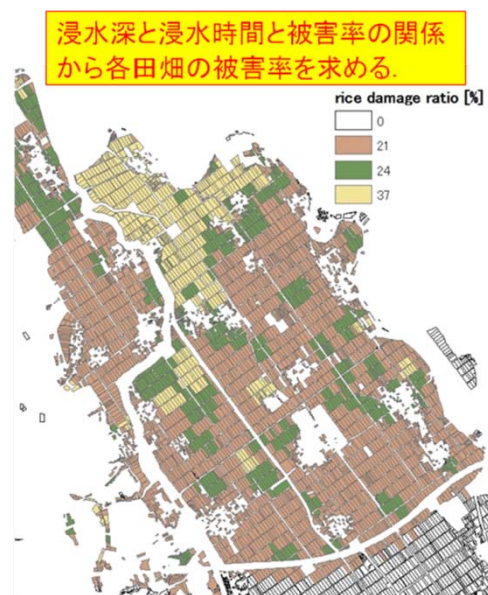


Fig 5 The damage ratio of the crops in the region



Fig 6 The procedure to estimate the economic loss of the houses

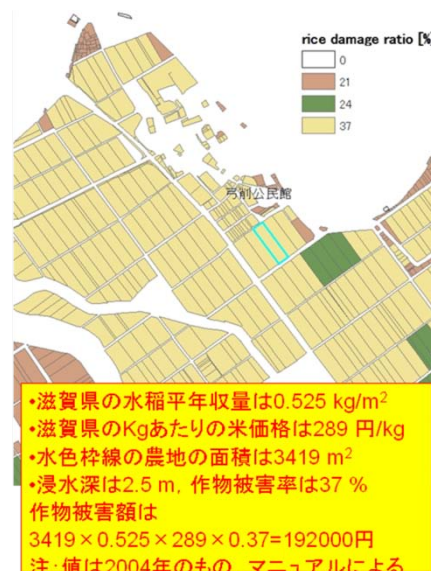


Fig 7 The procedure to estimate the economic loss of the crop fields

Table 1 The relationship between the inundation water depth and the house damage ratio

浸水深 地盤勾配	床下	床上					土砂堆積 (床上)	
		50cm 未満	50～ 99	100～ 199	200～ 299	300cm 以上	50cm 未満	50cm 以上
Aグループ	0.032	0.092	0.119	0.266	0.580	0.834	0.43	0.785
Bグループ	0.044	0.126	0.176	0.343	0.647	0.870		
Cグループ	0.050	0.144	0.205	0.382	0.681	0.888		

A : 1/1000 未満、B : 1/1000～1/500、C : 1/500 以上

注：1. 平成5年～平成8年の「水害被害実態調査」により求められた被害率。(ただし、土砂堆積は従来の被害率)

2. 家屋の全半壊についても考慮した数値である。

Table 1 The relationship between the inundation water depth and the crop damage ratio

事項 冠浸 水深 浸水 日数 作物種類	冠 浸 水												土砂埋没			
	0.5m 未満				0.5～0.99m				1.0m 以上				地表からの 土砂堆積深			
	1 日 以 上	3 日 以 上	5 日 以 上	7 日 以 上	1 日 以 上	3 日 以 上	5 日 以 上	7 日 以 上	1 日 以 上	3 日 以 上	5 日 以 上	7 日 以 上	0.5 m 未 満	0.5 ～ 0.99 m	1.0 m 以 上	
田	水稻	21	30	36	50	24	44	50	71	37	54	64	74	70	100	100
畑	陸稲	20	34	47	60	31	40	50	60	44	60	72	82			
	甘しよ	11	30	50	50	27	40	75	88	38	63	95	100			
	白菜	42	50	70	83	58	70	83	97	47	75	100	100			
	蔬菜	19	33	46	59	20	44	48	75	44	38	71	84			
	根類	32	46	59	62	43	57	100	100	73	87	100	100			
	瓜類	22	30	42	56	31	38	51	100	40	50	63	100			
	豆類	23	41	54	67	30	44	60	73	40	50	68	81			
	畑平均	27	42	54	67	35	48	67	74	51	67	81	91	68	81	100

注) 1. 「蔬菜」は、ねぎ、ほうれん草、その他、「根菜」は、大根、里芋、ごぼう、人参、「瓜類」はきゅうり、瓜、西瓜、「豆類」は小豆、大豆、落花生、たまねぎ等である。
 2. 土砂埋没の被害率は、河川の氾濫土砂によるものであるので、「土石流」の場合は実情に応じて修正すること。

受けるかを意味している。

(2) 家屋・構造物被害率は図3の浸水深と表1の浸水深と被害率の関係により推定できる。表1の地面勾配は各地域（あるいは各ポリゴン）の地面の勾配を示しており、この地面勾配により流体力（すなわち洪水流速）を陰的に考慮するために分類されている。

(3) 作物の被害率は図3の浸水深と表2の浸水深、浸水継続時間と作物被害率の関係により推定できる。作物の場合、浸水継続時間も考慮するのがポイントであり、表2に示されるように作物は浸水が生じた後でも浸水時間が短ければより多く生存できる。例えば、浸水深が0.5m以下で浸水継続時間が1～2日の場合、米被害率は21%となるが、浸水継続時間が7日以上の場合、米被害率は50%となる。

(4) この被害率統計値は1993年～1996年に実施された水害被害実態調査から算出されている。

家屋被害率推定例を図4に示す。この地域では平均地面勾配が1/500以上であるから、表1の一番下の行の値を被害率推定に用いる。図4では一部の家屋被害率が最大で88.8%に達しており、68.1%, 38.2%, 5%などの被害率も見られる。各家屋の被害率が明確に示されているので、家屋所有者は各々の資産が洪水によりどのような被害を受けるかの可能性をはっきりと考えることができる。これは洪水浸水シミュレーションのみよりはずっと有用であると考えられる。

他方、作物被害率（現地の作物種を同定するための情報は一般にはないので、米として考える）の推定例を図5に示す。この場合シミュレーションにより浸水継続時間が1～2日と推定されたので（これは排水を考慮できる洪水氾濫モデルによってのみ可能である）、表2の対応する値を被害率推定に用いる。図5に示したように作物被害率としては21%, 24%, 37%が得られた。標高が一番低い地域で最大の作物被害率（37%）が推定された。

1.4 経済被害推定

各家屋や農地の経済被害は被害率とそれぞれの評価額により計算する。詳細なベクトル型データにより各家や農地の面積が正確に算定できる。平成17年における各県の m^2 あたりの家屋評価額が国土交通省治水経済調査マニュアルに記載されている。例えば、滋賀県の m^2 あたりの家屋評価額は151900円である。面積と面積当たり評価額と被害率がわかるのでこれにより面積×面積当たり評価額×被害率として経済被害を推定する。図6の例では、太枠で囲まれた家屋

は当地の郵便局であり、この占有面積は 376m^2 、面積当たりの評価額が151900円であり、浸水深が0.71m、被害率が20.5%であるので、結果として経済被害は $376 \times 151900 \times 0.205 = 1170$ 万円となる。

田畑被害については、経済被害=田畑面積×面積あたり収量×kgあたり評価額×被害率で求められる。家屋と同様に、田畑面積はベクトル型データから正確に算出できる。日本では作物の各県での平均収穫高が通常算出されており、平成17年において滋賀県では米の平均収穫高は $0.525\text{kg}/\text{m}^2$ である。kgあたりの米価格は平成17年で289円/kgである。図7の太線で囲った田を例にとると、田面積は 3419m^2 で、浸水深が2.5m、被害率が37%であるから、結果として経済被害は $3419 \times 0.525 \times 289 \times 0.37 = 19$ 万2000円となる。

一般的に、この手法を採用すると面積当たりでは家屋の被害額の方が田畑の被害額より大きくなる。

1.5 結語

本章では最初に図2のようなメッシュデータ浸水深情報を図3のようなGIS形式のベクトル型データのポリゴンに移行（属性付与）する手続きを示した。ポリゴンに属性情報として与えられた浸水深は地域密着型の洪水災害管理を行うに当たって、住民が洪水をより身近にかつ自分自身の物として感じる事ができるので、非常に有用である。こうしたベクトル型データは洪水災害だけでなく地震や火事災害の被害推定にも利用できる。

家屋・建造物及び作物の洪水被害は図4や図5に示したように、水害実態調査の統計値を使って推定できる。

こうした被害率の研究は大変有用であるが、洪水氾濫モデルなどの物理数値モデルを構築する努力に比べるとあまり進んでいない。広義の脆弱性評価の研究が現在求められていると言ってよい。

なおここで導入した手法は、詳細なベクトルデータがなくても適用可能である。すなわち、対象地域の航空写真などがあれば、ArcGISなどの基本的な機能により被害を受ける地域の輪郭が描けるので、これにより途上国などを対象としてもこの手法を適用できる。ただしそれでは各家屋の被害までを考えることは難しい。また、被害率は国や地域によっても違うので、被害率算定の作業が必要となる。

ここで示した洪水経済被害推定手法は非常に精緻なものの一つであると考えており、今後更にこの研究を進めていく。次節に2009年8月9日～11日の佐川豪雨災害にこれを適用した例を示す。

2. 佐用川流域を対象とした広域降雨流出・洪水氾濫解析と経済被害推定

2.1 はじめに

2009年8月8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号の動きに伴い南から暖かく湿った空気が西日本に流れ込み、大気の状態が不安定となり、兵庫県佐用町佐用で89.0ミリなど時間降水量の年間1位の記録が更新された（大阪气象台，2009）。佐用町被害状況（速報）（佐用町，2009a）によると佐用町においては平成21年12月24日時点で、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138、大規模半壊269、半壊482、床上浸水156、床下浸水742の人家被害が発生したとある。また同速報³⁾では農作物被害は被害面積が549.4ha、被害額総計が2億456万円とされている。

本節では、この佐用町豪雨災害を再現し、かつ実態経済被害とシミュレーションによる予測経済被害を比較することを試みる。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、流域の洪水によるリスクを事前に推定する手法の高度化を図る。最初に洪水浸水深を再現するために、佐用川流域全体を対象に広域の降雨流出・洪水氾濫同時解析を実施した。その後、浸水深に応じた家屋・農地の経済被害を推定し、実態の被害と比較を試みた。なお、広域（流域全体）での降雨流出・洪水氾濫同時解析を実施した理由として、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。通常、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おり、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から、今回この手法を採用した。

2.2 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月末で20166人、世帯数は7203戸である。本稿では特に被害の多かった円光寺地点（図8）より上流の佐用川流域を対象とする（流域面積191km²）。図8には国土数値情報（国土交通省，2009）より取得した森林・田畑の分布図も掲載している。これによると森林面積は151km²、田畑面積は37km²であった。

2.3 モデル概念

本稿では図9に示すように河川網の流れについては一次元不定流解析を実施し、流域内部の斜面や市街の流れは二次元不定流解析モデルで追跡する。堤内

地の流れが河道位置に到達すると越流公式により算定された単位幅流量×節点間距離（60m）に相当する流量が側方流入として河道に流入する（図9のqnode; 実際は全河道網の各節点でqnodeが存在する）。また、逆に河道流の水位が堤防高さを超えた場合にも、河道から堤内地へ同様に越流公式により推定される流量が溢水する。これは氾濫解析手法を流域全体に拡張したとも言えるし、あるいは分布型降雨流出モデルで用いられているkinematic wave法を1次元、2次元不定流モデルに拡張したものとも言える。森林土壌については恩田ら（2005）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。森林土壌の扱いについては今後の課題である。河川網の一次元不定流解析には以下の連続式(1)と、抵抗則にManning 公式を用いたSt.Venant式(2)を適用する。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

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

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）、u = Q/Aは断面平均流速、s₀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。これらの式を特性曲線法で解く。堤内地の流れの解析には以下の連続(3)と2次元浅水流方程式(4)-(5)を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = Q_{in} \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - gn^2 u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - gn^2 v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

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方向への流速、Hは水位、qは単位面積当たりの流入出流量である。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。家屋・農地の経済被害推定については、浸水深に応じた家屋・農地の評価額に対する被害率を治水経済調査マニュアルの統計値により設定し、被害を推定する。例えば小林ら（2010）を参照されたい。

4. 結果と考察

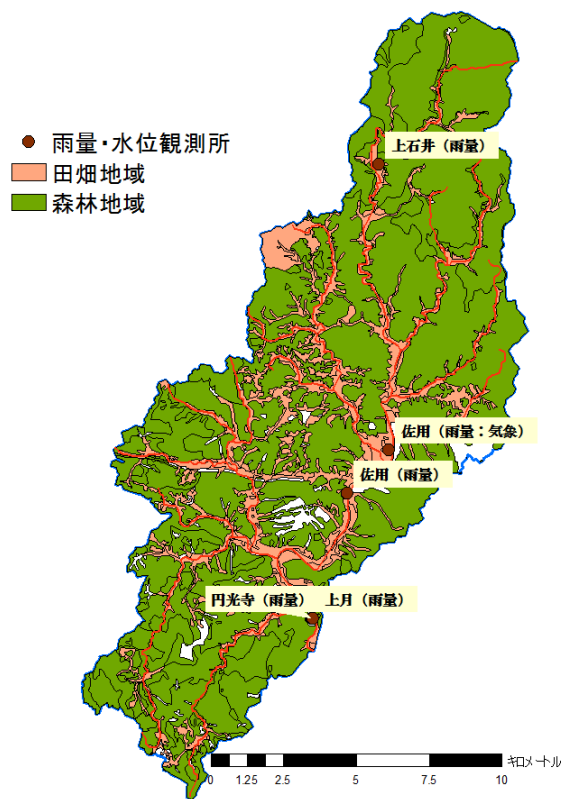


Fig 8 The Sayogawa river catchment

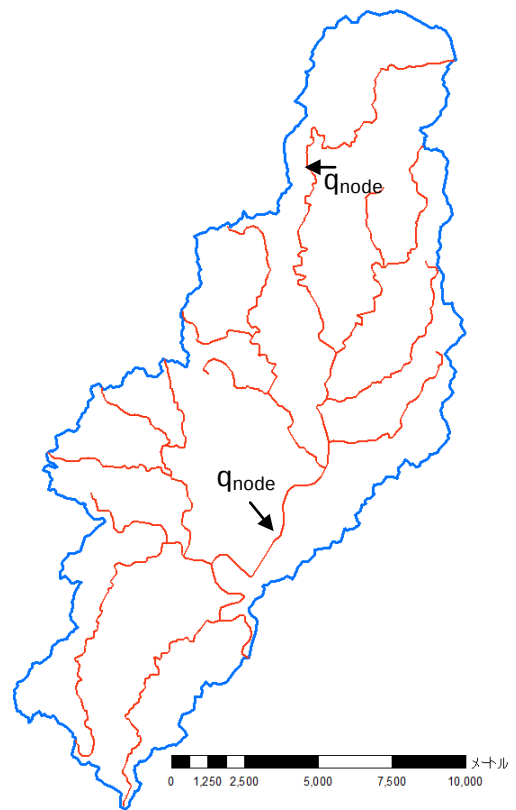


Fig 9 Schematic diagram for the rainfall-runoff/flood inundation simulation



Fig 10 Observed flood inundation area

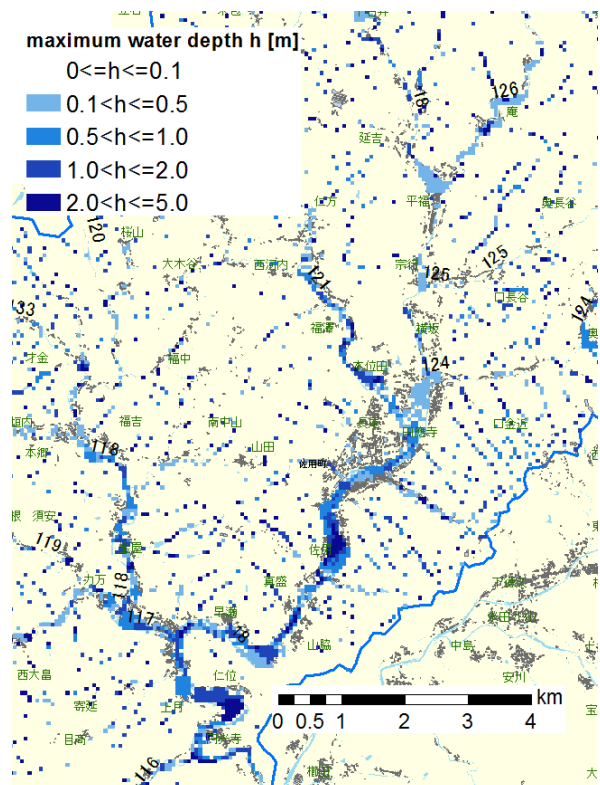


Fig 11 Simulated water depth

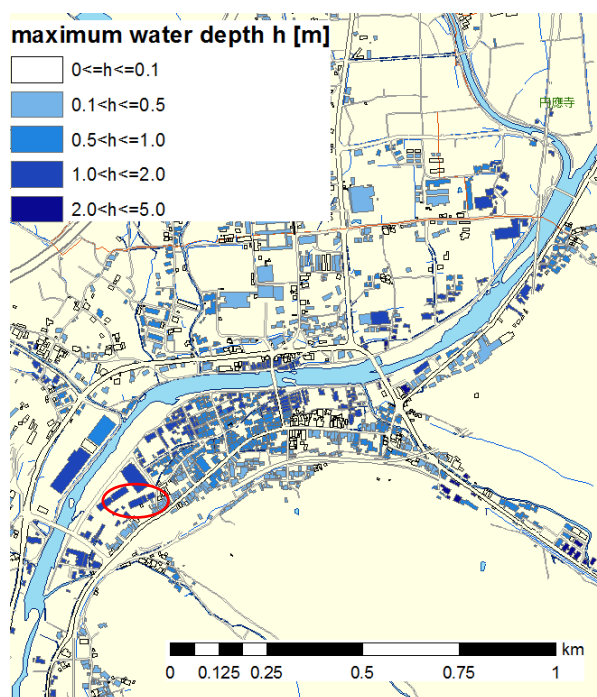


Fig 12 Simulated water depth of each building

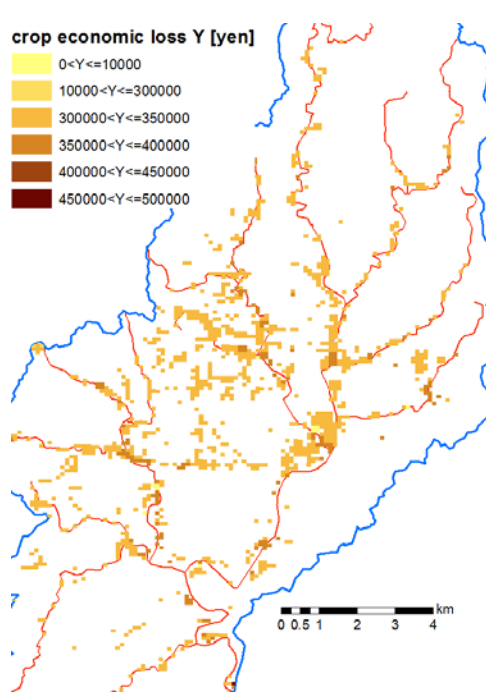


Fig 13 Simulated economic loss of the paddy field

図10に今回の氾濫実績図（佐用町，2009a）を図4にシミュレーションによる最大浸水深を示す。これらの図を比較すると浸水範囲が良く再現されているのがわかる。図12には家屋形状もわかるベクトルデータを用いた家屋毎の最大浸水深を示す。図中丸印にある佐用町総合庁舎のシミュレーションによる最大浸水深は1.16mであった。佐用町追加資料（佐用町，2009b）によると総合庁舎の浸水は1m程度であったとあるので、シミュレーションの再現性は良いといえる。家屋被害推定モデルによると浸水による佐用町総合庁舎の直接被害は3900万円と推定された。今後はこれを実態被害と比較する。農地については、100mメッシュ土地利用情報（国土交通省，2005）を用いて農作物被害を推定した所（図13），7億8000万円となった。佐用町速報（佐用町，2009a）による実態被害額2億456万円よりはるかに高い。使っている農地データが小林ら（2010）などに比べると粗い事なども原因と考えられる。今後は現地訪問等を通じて実態被害と計算結果を比較し、モデルの精度を高めたい。

謝 辞

滋賀県，竜王町にはデータや資料を提供して頂きました。また，財団法人河川情報センターの研究助成金の支援を受けました。被害推定手法については株式会社パスコの技術的支援を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 大阪気象台（2009）：平成21年8月8日から11日までの台風9号による大雨について，大阪管区気象台管内（近畿・中国（山口を除く）・四国地方の速報，http://www.jma-net.go.jp/osaka/saigai/pdf/h21/sokuji/ks20090812_kanku.pdf
- 恩田裕一・辻村真貴・野々田稔郎・竹中千里（2005）：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
- 国土交通省（2005）：治水経済調査マニュアル平成17年度版
- 国土交通省（2009）：国土数値情報ダウンロードサービス，<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 小林健一郎・寶 馨・中北英一（2010）：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，2010
- 佐用町（2009a）：平成21年台風第9号災害の被害状況等について（速報，平成21年12月24日），http://www.town.sayo.lg.jp/kakuka/saigaifukkotaisaku/saigaifukkou_keikakusakutei/kentouuininkai/2_kentouininkai/6_higaizyoukyou.pdf
- 佐用町（2009b）：台風台9号災害にかかる追加資料について，http://www.town.sayo.lg.jp/kakuka/saigaifukkotaisaku/kensyouninkai/dai2kai/3_tsuikashiryou.pdf

Development of an Integrated Rainfall-Runoff/Flood Inundation Simulation Model and the Economic Damage Estimation Framework due to the Flooding

Kenichiro KOBAYASHI* and Kaoru TAKARA

*Educational Unit for Adaptation to Extreme Weather Conditions
and a Resilient Society, Kyoto University

Synopsis

This paper describes a framework to estimate the direct economic damages (e.g. house and crop damages) due to floodings. The basic idea is that: (1) the flood inundation simulations are carried out with a structured grid, (2) the inundation depths output in grid cells from the structured grid are transferred to the house and crop filed vector data as attributes and (3) the economic risk of each house and crop field is estimated using the attributes. In this paper first the example of the economic damage estimation using the vector data prepared by the Ryuou Town is introduced. Then, an integrated rainfall-runoff/flood inundation simulation model with a structured grid is developed and applied to the Sayogawa river catchment which recently experienced severe flood damages due to extreme rainfall. Based on the inundation depths observed and simulated with this model as well as the actual economic loss and estimated, the accuracy of the flood and economic estimation models are investigated. This paper shows the usefulness of the economic risk framework and large-scale integrated rainfall-runoff/flood inundation model.

Keywords: rainfall-runoff/flood inundation, economic risk, house damage, crop damage, the Hinogawa river, Ryuou Town, the Sayogawa river