

短時間降雨情報に基づく中小河川の洪水氾濫危険度 予測法の提案と新潟県中小河川への適用

ESTIMATION METHOD OF FLOOD HAZARD IN A SMALL RIVER BASIN
USING SHORT-TIME RAINFALL DATA AND APPLICATION TO THE RIVER IN
NIIGATA PREFECTURE

大塚健太¹・戸田圭一²・米山望³

Kenta OOTSUKA, Keiichi TODA and Nozomu YONEYAMA

¹学生員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8510 京都市西京区桂)

²正会員 Ph. D. 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

In small rivers, it is difficult for the river manager to issue a proper evacuation order as the water level data are not available in some rivers and runoff is faster compared with large rivers. In this study, the integrated river basin model which consists of a run-off model based on the kinematic wave model and a two-dimensional inundation model based on the pond model is applied to one of small rivers in Niigata, Japan. The past inundation in July 2004 is well simulated by this model. Next, imposing various patterns of rainfall distribution with two and three hour's durations, inundations have been simulated and their extents have been examined by the above model. As a result, we obtain the diagram which can express the inundation level by the rainfall characteristics. This diagram may be useful for considering flood disaster reduction in a small river basin.

Key Words : short-time rainfall, small river basin, estimation of flood hazard, integrated river basin model

1. はじめに

近年, 局地的集中豪雨の増加による中小河川の洪水氾濫災害が顕在化している。2007年には, 7月6日から7日にかけて熊本県中央部で梅雨前線の停滞による豪雨災害が発生した。八代市で1時間72mm, 3時間156mmの降雨を観測し, 一級水系緑川および二級水系氷川の支川で洪水氾濫が発生した。また同年8月30日から31日にかけて島根県隠岐地方で前線の停滞による豪雨災害が発生した。この災害では1時間に131mmもの降雨を観測し, 二級河川八尾川で中流部の5.9kmにわたり洪水氾濫が発生した¹⁾。

中小河川は洪水流出および水位上昇が速く, 水位計測が行われていない河川もあることから, 河川管理者が流域住民に適切な避難情報を出すことが難しい。一方, 雨量については, 降水量観測データが気象庁および国土交通省により公開されていること, また必要に応じて気象情報会社からの情報入手も可能であることなどから, 降雨情報の獲得はさほど難しくないと考えられる。以上の背景から, 流出解析ならびに氾濫解析を用いて, 降雨量

や降雨分布と流域の被害状況の関係を事前に取りまとめることにより, 効果的な避難情報の提供に役立てることができるのではないかと考えられる。そこで本研究では, 流出解析および氾濫解析を組み合わせた統合型流域モデルを新潟県中小河川に適用する。そして洪水氾濫の再現計算を行い, モデルの妥当性を検証した上で, 継続時間2時間および3時間の短時間集中豪雨時の中小河川の洪水氾濫危険度を降雨情報から予測する手法の提案を試みる。

2. 解析手法の概要

中小河川の氾濫形態には様々なものが考えられるが, 本研究で扱う氾濫とは, 河道の流下能力以上の流出量に起因する中小河川流域の洪水による氾濫である。したがって上流部の山地の降雨にตอบสนองする流出流量を評価し, そしてその流量に基づき河川の洪水ならびに河川からの洪水氾濫を表現する必要がある。そこで武藤ら²⁾, 徳永ら³⁾にならい, 対象領域を上流部の山地・丘陵地と下流部の氾濫域に分割する統合型流域モデルを用いた(図-1

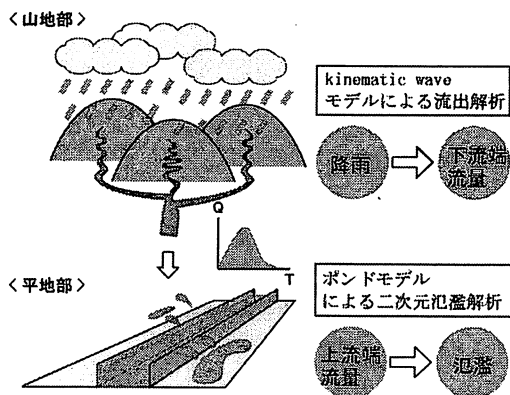


図-1 モデル概念図

参照). 上流部ではkinematic waveモデルによる流出解析を行い山地・丘陵地からの流出流量を求め、得られた流量ハイドログラフを上流端境界条件とした下流部の二次元氾濫解析を行う. その際、河道を地盤高が一段低い格子とみなして氾濫解析に組み込み、河川からの溢水を表現する. また本研究では計算ケースが非常に多くなることから、平面二次元氾濫解析においては計算負荷の小さいポンドモデルを適用した.

(1) 流出解析手法

流域を斜面と河道に分割し、kinematic waveモデルを用いて下流端での流出流量を求める. 斜面、河道に用いた基礎式はそれぞれ以下のとおりである⁴⁾.

$$\langle \text{斜面流} \rangle \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (1)$$

$$q = \alpha h^m \quad (2)$$

ここに、 h は水深、 q は斜面の単位幅流量、 r_e は有効降雨($r_e = f \cdot r$, f は流出率、 r は降雨)、 α , m は定数であり、斜面勾配 θ_s とManning則の式形を用いると、 $m = 5/3$, $\alpha = \sqrt{\sin \theta_s} / N$, N は等価粗度である.

$$\langle \text{河道流} \rangle \quad \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3)$$

$$Q = GW^M \quad (4)$$

ここに、 W は流水断面積、 Q は河道流量、 q は斜面からの単位幅流入量、 G , M は定数である.

(2) 氾濫解析手法

本研究で用いたポンドモデルでは、対象領域を多数の領域に分割し、それらを固有の容積を持った貯留槽とみなし、貯留槽間の流量の算定には、以下の基礎式⁵⁾⁶⁾を用いる. また河道は一段低い貯留槽とみなし、モデルに組み込んだ.

〈連続式〉

$$A \frac{\partial h}{\partial t} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{in} \quad (5)$$

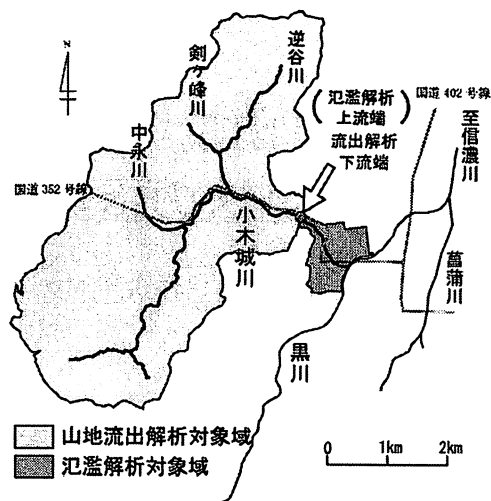


図-2 対象領域

ここで、 A は貯留槽の有効底面積、 h は水深、 t は時間、 Q_i は貯留槽が有する i 番目の界面から流入する流量、 m は流量の出入りが行われる界面数、 Q_{in} は外部からの流入流量である.

$$\langle \text{運動量式} \rangle \quad \frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha L Q |Q| \quad (6)$$

ここで、 ΔH は水位差、 Q は流量、 g は重力加速度、 t は時間、 L は隣接した貯留槽の図心間の距離、 A_b は界面の断面積、 α は損失係数である. 損失係数は以下のように表される.

$$\alpha = \frac{n^2 s^{4/3}}{A_b^{10/3}} \quad (7)$$

ここで、 n はManningの粗度係数、 s は界面の潤辺である. 河道水位が堤防高を越えたときの溢水は越流公式を用いて表現した.

また構造物の密集具合に応じて各貯留槽ごとに有効率を設定し、有効底面積を算出した. 有効率は貯留槽の底面積のうち実際に水が溜まる底面積の割合である.

ポンドモデルにおいては河道断面を長方形として認識させるが、実際の河道断面は様々な形をしており、対応させる必要がある. ここでは最大水深時の流水断面積を求め、Manning則を用いた等流計算によって流量を算出した. そして同一水深、同一流量で長方形断面を仮定したときの河道断面幅を同様の計算によって求め、その断面幅を河道ポンドの幅として用いることとした.

3. 新潟県中小河川流域への適用

(1) 対象領域

本研究では、2004年7月の豪雨によって溢水氾濫が起こり、かつ詳細な氾濫データが得られたことから、新潟

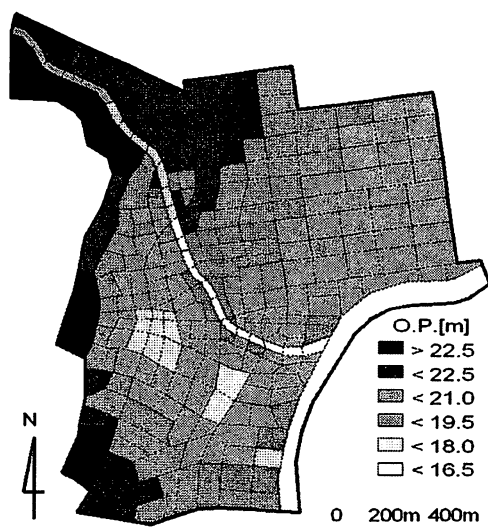


図-3 地盤高図

県長岡市三島地区を流れる中小河川である、小木城川流域を対象領域として設定した。解析対象領域を図-2に示す。対象領域を上流部の山地・丘陵地、下流部の低平地に分割する。流出解析を行うにあたって、上流部を斜面と河道に要素分割した。斜面総数は24個であり、対象領域の面積は約15.7km²である。氾濫解析における河道部の下流端は黒川との合流部とした。対象領域周囲の境界については基本的に河川沿いの地盤よりも十分高くなった道路を境界とし、左岸東側は低地盤の水田が広がっているため十分大きい面積をとって境界とした。面積は約0.79km²で、解析格子数は289である。また右岸側には地盤が周囲よりも1.5m程度低い調整池があり、氾濫水が溜まりやすくなっている。対象領域の地盤高、土地利用状況をそれぞれ図-3、図-4に示す。

(2) 計算条件

有効降雨を求めるための流出率は0.7一定として、流出解析対象領域全域に降雨を一樣に与えた。流出解析において河道の粗度係数は0.035を用い、等価粗度は従来から丘陵山地で使用される0.8を用いて計算した。氾濫解析時の河道の粗度係数は、河道格子については河床に多くの植物が繁茂していることや、断面が一樣でなく変化が大きいことを考慮して、0.035を与えた。水田、それ以外の格子の粗度係数については、それぞれ0.025、0.067を与えた⁷⁾。

小木城川は対象領域下流端で黒川と合流しており、境界条件はManning則を用いて等流条件で表現した。氾濫解析対象領域の境界条件は、山地の存在する右岸西側は境界の地盤が高いため、領域外に水が流出しないような十分な高さを持つ壁が存在すると仮定し、その他の境界では領域外への流出流量を段落ち式を用いて計算した。また堤内地格子と黒川を表す格子の間は十分な高さを持つ盛土があるため、黒川と堤内地の間の水のやりとりは一切無いとした。初期条件として、河道には初め流れが存在しないものとした。

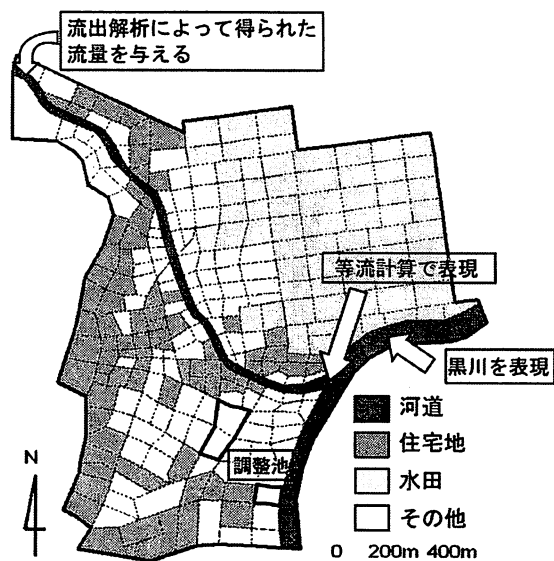


図-4 土地利用図

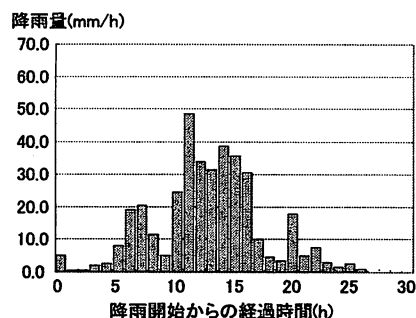


図-5 2004年水害時のハイエトグラフ

(3) 2004年水害の再現計算結果と考察

モデルの妥当性を検証するため、2004年7月12日21:00～14日0:00にかけて対象領域内で観測された降雨⁸⁾を与えて解析を行った。降雨開始時刻である12日21:00を計算開始時刻としている。降雨継続時間は27時間、総降雨量は374mm、最大時間雨量は48.5mmである。ハイエトグラフを図-5に示す。この降雨によって両岸ともに3箇所ずつから溢水が起こったが、住宅地と堤防沿いの地盤高の差が大きいため、氾濫水が窪地に滞留し、最大浸水深は1.7mを記録した。人的被害はなかったものの、住宅の床上浸水48棟、床下浸水142棟と住民の生活を大きく混乱させる災害となった。実績と計算の浸水範囲の比較、最大浸水深の比較をそれぞれ図-6、図-7に示す。なお実績図は三島町の災害被害資料⁹⁾と現地住民へのヒアリングに基づいて作成した。

浸水範囲は堤防沿いの格子、河道左岸側を除いてはかなり実績に近い結果が得られた。ただし左岸側の浸水実績は浸水深が小さいことに加え、住宅が少なく水田が中心であり、実際に浸水範囲まで浸水が起こったのか判断が難しいといえる。また溢水箇所が実績よりも少なく、最大浸水深が地点9、10においては実績と比べかなり小さいが、前者は計算では格子ごとに堤防高を一律に設定しているため、実績において溢水が起こった箇所の最上流部に溢水が集中したことが一因と考えられる。また後

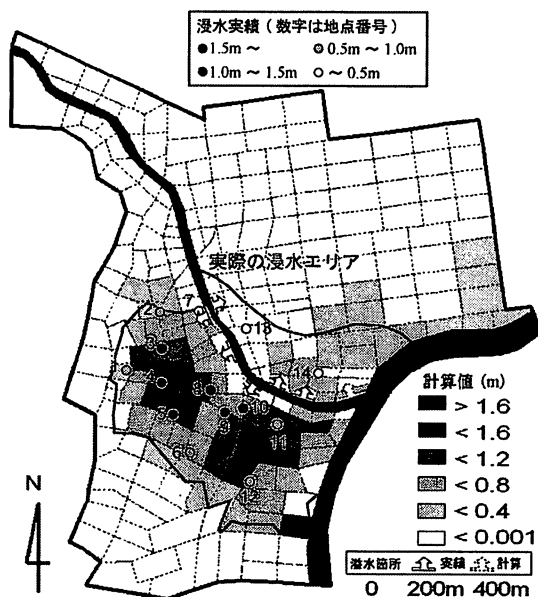


図-6 浸水範囲比較

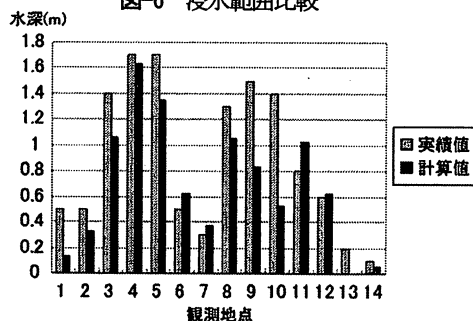


図-7 最大浸水深比較

者は観測地点の南側には用水路が通っているものの、用水路からの氾濫の影響を考慮していないことが原因と考えられる。全般に、計算結果は実績と概ね一致した。特に右岸側の浸水範囲はよく再現できている。

4. 短時間集中豪雨に対する危険度評価

(1) 降雨を用いた危険度指標の作成

次に、短時間集中豪雨に対する小木城川流域の洪水氾濫危険度を評価するために、作成した流域モデルに継続時間2時間および3時間の短時間降雨を外力として与えて計算を行った。まず流域の危険度指標として、溢水氾濫なしを危険度B、溢水氾濫の発生を危険度A、住宅地の10%における床上浸水の発生(最大浸水深50cm以上)を危険度AAと設定した(図-8参照)。溢水氾濫の発生限界および住宅地に床上浸水を生じさせる氾濫の発生限界と降雨量の関係を取りまとめるため、降雨パターンの作成と計算を以下のように行った。

1. まず降雨終了1時間前までの累積降雨量を定めた。降雨継続時間3時間の場合は、1時間目降雨量と2時間目降雨量の比を1:3, 1:2, 2:3, 1:1, 3:2, 2:1, 3:1

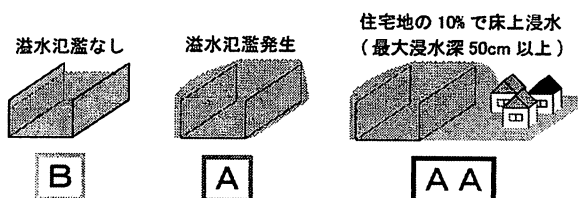


図-8 設定した危険度

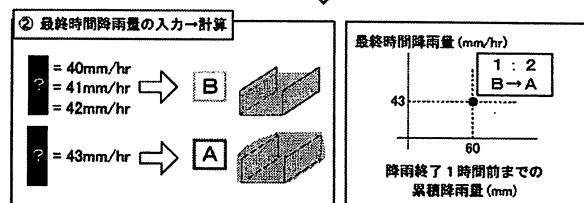
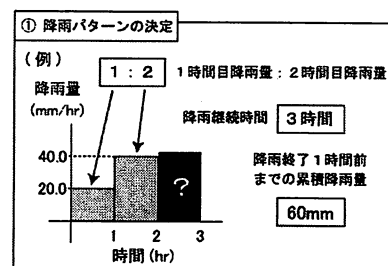


図-9 危険度指標の作成方法

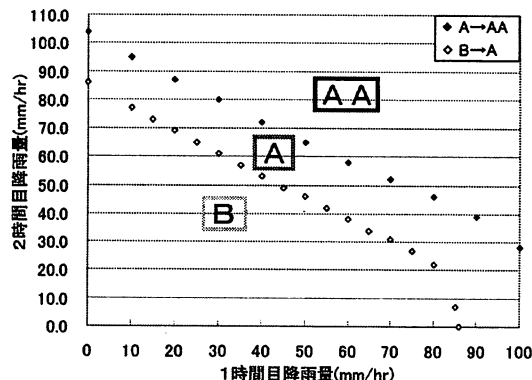


図-10 降雨を用いた危険度指標(降雨継続時間2時間)

の7種類に変化させた。

2. 1で決定したそれぞれの降雨について最終時間の降雨量を1mm/hr単位で変化させて与えた。
3. 作成した降雨パターンを対象領域に一樣に与えて計算を行った。計算開始時刻は降雨開始時刻とした。
4. 以上の作業を繰り返し行い、出力された最大浸水深および浸水範囲の結果より、危険度のランクが1つ上がる最終時間の降雨量の限界値を読み取った。

以上の過程の具体例を図-9に示す。この場合、降雨継続時間は3時間、2時間目までの累積降雨量は60mmであり、1時間目降雨量と2時間目降雨量の比を1:2に定めている。よって1時間目降雨量、2時間目降雨量はそれぞれ20mm/hr、40mm/hrである。さらに3時間目の降雨量を40mm/hrから1mm/hrずつ変化させた結果、43mm/hrで初めて溢水氾濫が発生した。よって危険度がBからAに変

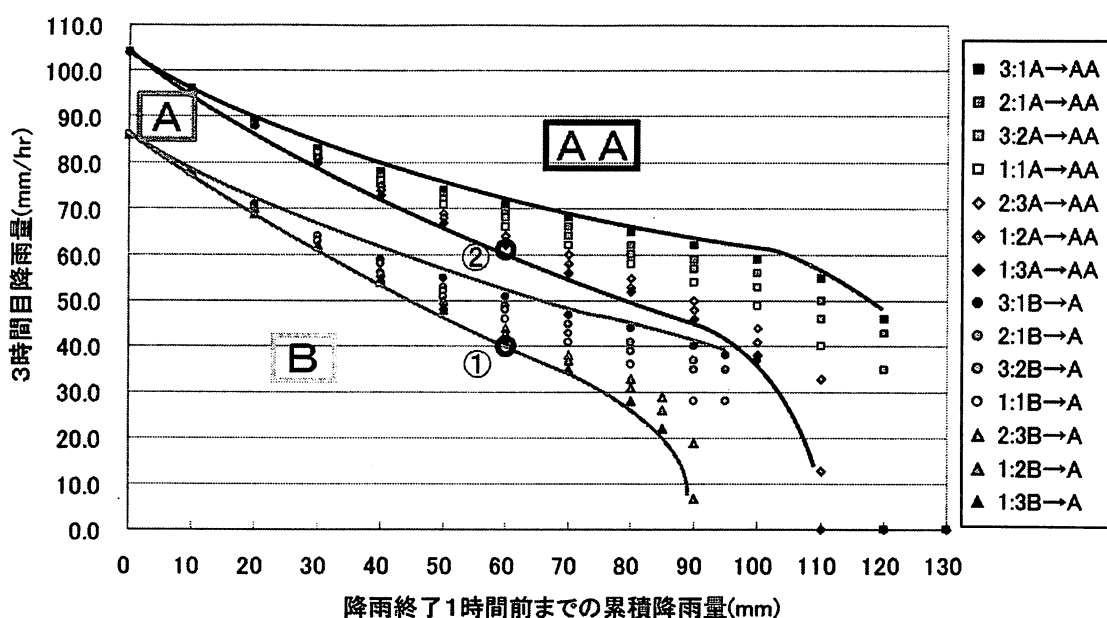


図-11 降雨を用いた危険度指標(降雨継続時間3時間)

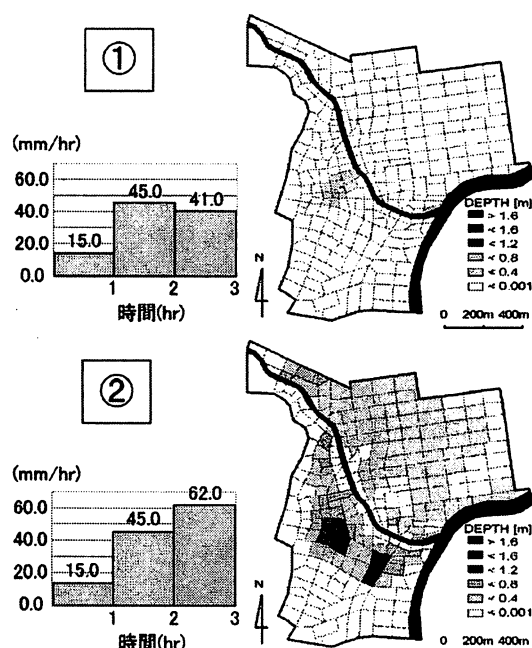


図-12 ハイエットグラフおよび最大浸水深図

化する3時間目降雨量の限界値は43mm/hrである。

得られた限界値をプロットしたグラフを図-10, 11に示す。さらに参考として、1時間目と2時間目の降雨量の比が1:3の降雨について、図-11上の限界値①, ②におけるハイエットグラフおよび最大浸水深図を図-12に示す。グラフの横軸には降雨終了1時間前までの累積降雨量、縦軸には最終時間の降雨量をとっている。図-10, 11より、降雨継続時間3時間の場合は1時間目降雨量と2時間目降雨量の分布が等しい雨について、危険度がAになる限界値とAAになる限界値の差は概ね20mm/hr前後である。さらに図-11より降雨継続時間3時間の場合、1時間目の降雨量が2時間目の降雨量に比べ大きいほど限界値が大きくなることから、ピークが2つではなく1つの形で雨が降る場合に、危険度が大きくなるという結果が得られた。

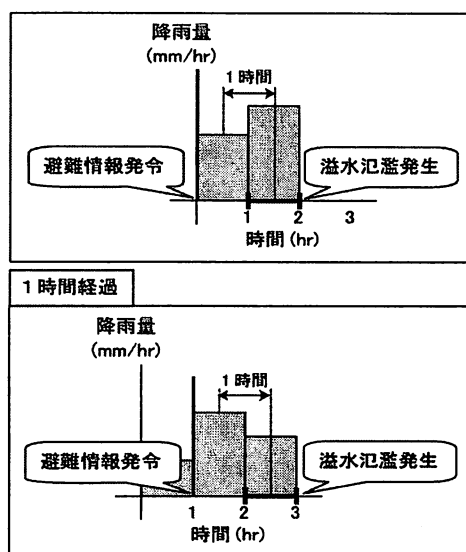


図-13 避難情報発令のタイミング

しかしながら、降雨終了1時間前までの累積降雨量が大きい場合を除き、限界値のばらつきは大きいときでも20mm/hr程度の範囲に収まっている。したがって小木城川流域では、危険度が1ランク上がる限界の総降雨量は一定の範囲内に収まり、降雨分布にはさほど依存しないことが明らかとなった。

図-10, 11のようなグラフと予想される降雨情報とを比較することにより、洪水氾濫危険度を事前に把握することが可能となると考えられる。

(2) 避難情報発令のタイミングについての考察

氾濫解析対象領域内に小学校や公民館といった3つの避難所施設が存在し、かつ対象領域の周辺にも避難所施設が点在するため⁹⁾、流域住民の自宅から避難所施設までの距離は長く見積もっても600m程度である。よって高橋ら¹⁰⁾にならい、避難時の住民の歩行速度を1.4m/secとすると、自宅から避難所施設への移動に要する時間は

表-1 危険度評価表(降雨継続時間3時間, 総降雨量120mm)

total (mm)	1hour (mm/h)	2hour (mm/h)	3hour (mm/h)	hazard level	1hour (mm/h)	2hour (mm/h)	3hour (mm/h)	hazard level
120	10	0	110	AA	40	0	80	A
	10	10	100	AA	40	10	70	A
	10	20	90	AA	40	20	60	A
	10	30	80	AA	40	30	50	A
	10	40	70	AA	40	40	40	A
	10	50	60	AA	40	50	30	A
	10	60	50	A	40	60	20	A
	10	70	40	A	40	70	10	A
	10	80	30	A	50	0	70	A
	10	90	20	A	50	10	60	A
	10	100	10	AA	50	20	50	A
	20	0	100	AA	50	30	40	A
	20	10	90	AA	50	40	30	B
	20	20	80	AA	50	50	20	A
	20	30	70	AA	50	60	10	A
	20	40	60	A	60	0	60	A
	20	50	50	A	60	10	50	A
	20	60	40	A	60	20	40	B
	20	70	30	A	60	30	30	B
	20	80	20	A	60	40	20	A
	20	90	10	AA	60	50	10	A
	30	0	90	AA	70	0	50	B
	30	10	80	AA	70	10	40	B
	30	20	70	A	70	20	30	B
	30	30	60	A	70	30	20	B
	30	40	50	A	70	40	10	A
	30	50	40	A	80	0	40	B
	30	60	30	A	80	10	30	B
	30	70	20	A	80	20	20	B
	30	80	10	AA	80	30	10	A
					90	0	30	A
					90	10	20	A
					90	20	10	A
					100	0	20	A
					100	10	10	A
					110	0	10	AA

降雨による移動速度の低下を考慮すると、10分程度である。また避難準備に30分程度要すると仮定すると、洪水氾濫発生時の1時間以上前に避難情報を発令することで、洪水氾濫発生時には住民が避難所施設への移動を完了することが可能となると考えられる。

したがって、小木城川流域においては、短時間集中豪雨の継続時間が2時間と予想されるとき、2時間先までの降雨情報を得て、図-10と比較することにより、洪水氾濫の発生の有無を判断し、情報を得た時点で避難情報を発令すればよいと考えられる。また降雨継続時間が3時間と予想されるとき、降雨開始から1時間経過後に、その1時間で実際に観測された降雨量および新たに得られる2時間先までの降雨情報を、図-11と比較する。そこで洪水氾濫の発生が予想される場合、避難情報を発令すればよいと考えられる(図-13参照)。

5. 結論

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- 流出解析と氾濫解析を結合した流域モデルを用いて、2004年7月豪雨による小木城川の洪水氾濫の再現計算を行った。計算結果は浸水実績と概ね合致しており、モデルの妥当性が検証された。
- 継続時間2時間および3時間の短時間降雨を流域モデルに与えて解析を行った。小木城川流域では、洪水氾濫および住宅地に床上浸水被害を及ぼすような氾濫が発生する限界の総降雨量は、それぞれ一定の範囲内に収まり、降雨分布にはさほど依存しないことが明らかとなった。
- 得られた限界値を図示し、予想される降雨情報との比較を行うことにより、事前に短時間集中豪雨に対

する洪水氾濫危険度の予測を行う手法を提案した。本手法は、中小河川流域における効果的な避難情報の提供に役立つと考えられる。図-11を数値で表したものの一例が表-1である。実際にはこのような表を準備しておけば好都合である。

今後の課題として以下のようなことが挙げられる。

- 今回は山間部の中小河川を対象として扱ったが、都市域の中小河川についても同様の解析を行い、短時間集中豪雨に対する流域間の危険度の比較を行う。
- 避難経路および避難所施設の安全性や、高齢者が避難に要する時間などについて詳しく検討し、避難情報発令のタイミングについてさらに考察を行う。

謝辞：被害状況などの資料を提供してくださった長岡市役所三島支所の皆様、ヒアリングに協力してくださった長岡市三島地区の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 社団法人 日本河川協会：河川，No.739，pp.29-35，pp.50-54，2008。
- 2) 武藤裕則・中川一・戸田圭一・市川温：中小河川の洪水氾濫対策に関する研究 - 1998年8月新潟下越地方における豪雨災害を例として -，自然災害科学，Vol.19，No.2，pp.257-271，2001。
- 3) 徳永智宏・戸田圭一・川池健司・間島真嗣：短時間豪雨による都市域河川の危険度解析，河川技術論文集，第11巻，pp.25-30，2005。
- 4) 近森秀高：水理公式集例題プログラム集平成13年度版，kinematic wave法による流出計算(1)特性曲線法，土木学会，2002。
- 5) 鶴巻有一郎・奥田朗・神月隆一：平面流れとして取り扱った氾濫シミュレーションについて，第25回水理講演会論文集，pp.249-256，1981。
- 6) 間島真嗣・戸田圭一・大八木 亮・井上和也：都市域の地上・地下空間を統合した浸水解析，水工学論文集，第49巻，pp.601-606，2005。
- 7) 川池健司・丸山寛起・吉本静麿・野口正人：諫早低平地における氾濫解析とその浸水被害軽減策への応用に関する研究，水工学論文集，第49巻，pp.565-570，2005。
- 8) 新潟県三島町(現長岡市三島地区)：7.13梅雨前線豪雨災害被害状況，新潟県議会建設公安委員会行政視察資料，2004。
- 9) 長岡市役所三島支所：長岡市三島地域コミュニティサイト 緊急時の対応 三島地域の避難所施設，<http://www.town.mishima.niigata.jp/life/index.cfm>
- 10) 高橋保・中川一・東山基：洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究，京都大学防災研究所年報，第32号B-2，pp.757-780，1989。

(2008. 4. 3受付)