

2008年7月都賀川増水における局地的大雨の頻度解析・流出解析 と事故防止に向けた技術的課題について

立川康人*・江崎俊介**・椎葉充晴*・市川 温***

* 京都大学大学院工学研究科

** 京都大学工学部地球工学科

*** 山梨大学大学院医学工学総合研究部

要 旨

2008年7月28日、神戸市灘区を流れる都賀川において、極めて短時間に集中した大雨によって水位が急上昇し、5名の人命が失われた。都賀川は、行政と住民が一体となって市街地の中に潤いのある親水空間を構築することに成功したモデル的な河川であるが、その親水空間において増水事故が発生した。本論では今回の大雨の頻度解析および流出解析を実施し、大雨の頻度とそれが河道に流出する経路を明らかにする。次に、流出解析の結果をもとに水難事故を防止するための技術的課題と対策を考察する。

キーワード： 都賀川，出水，頻度解析，流出解析，分布型流出モデル

1. はじめに

阪神地区では昭和13年の阪神大水害や昭和42年の大水害などを初めとして、しばしば集中豪雨による被害を受けており、河川改修が進められてきた。その中で、平成7年に発生した阪神・淡路大震災では、都賀川の河川水が消火用水や生活用水の水源となり、都市河川の機能が再認識された。そのため治水機能、親水機能に加えて、地震などの災害時の水利用や河川空間の避難経路としての機能が考慮され、より都賀川に近づきやすい空間構築が意図されて河川改修が進められてきた。こうして構築されてきた河川空間において、水遊びや移動などで河道内にいた住民が、集中豪雨とそれに伴う急激な水位上昇によって流され、5名の人命が失われた。

本論では今回の集中豪雨の頻度解析と流出解析を実施し、その結果をもとに、こうした水難事故を防止するための技術的課題と対策を考察する。

2. 都賀川流域と増水事故の概要

Fig. 1 に都賀川流域の位置、Fig. 2 に都賀川流域の流域図を示す。流域面積は8.57km² であり、Fig. 3 に示すように、河床勾配は河口から国道2号線付近ま

で1/60から1/200、そこから甲橋までが1/35、甲橋より上流は1/20であり、表六甲河川特有の急勾配河川となっている。川幅は15m から20mである。Photo 1 は甲橋下流から都賀川を上流に向かって写した写真である。Fig. 2 の赤くハッチを付けた部分は市街地であり、流域の約25%を占める。市街地は雨水排水幹線網が整備されており、市街地の雨水の大半は下水道を通して都賀川に流入する。

Fig. 4 に都賀川流域およびその周辺域でもっとも降雨量の大きかった鶴甲地点での10分雨量の時間変化と甲橋での水位の時間変化を示す。14時40分から50分の間の10分間に、降雨の発生に遅れることなく約1.3m の水位上昇が生じている。甲橋水位観測点のすぐ下流では、神戸市によるモニタリングカメラが河川の状況を捉えており、14時42分には水位が上昇し始め、44分にはほぼ最高水位に近い水位に達している様子が捉えられている。つまり、1m近い水位上昇が2分で発生していたことがわかる。

この突然の水位上昇により、篠原橋付近で児童2名、都賀野橋付近で園児と女性、JR高架橋付近にいたと思われる男性が流されて亡くなった。他にも河道内にいた多くの人が流され、灘警察署によれば11名が救助され、自力で避難した人は41名であった(藤田, 2009)。



Fig. 1 The Toga River basin and the Omote-Rokko river basins. Source: Hyogo Prefecture handout at the presentation on August 22, 2008.

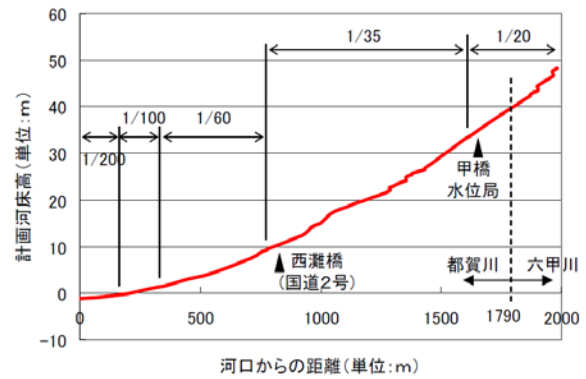


Fig. 3 Longitudinal sectional view of the Toga River. Source: Hyogo Prefecture handout at the presentation on August 22, 2008.



Fig. 2 The Toga River basin and hydrologic monitoring and observation stations. Source: Fujita (2009).



Photo 1 The Toga River taken at the downstream of the Kabuto-bashi Bridge.

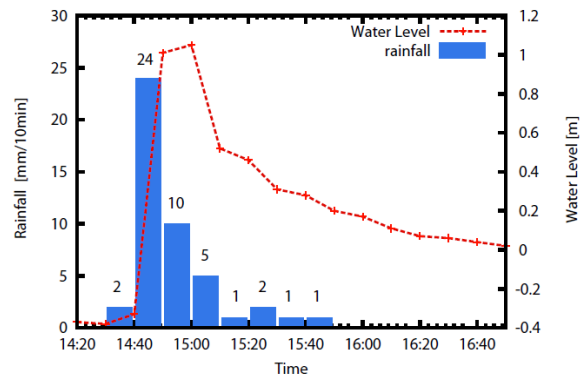


Fig. 4 Observed water level at the Kabuto-Bashi station and observed ground rainfall at the Tsurukabuto station.

3. 降雨の頻度解析

鶴甲地点での10分雨量を用いて発生規模とその頻度を分析する。最大10分雨量は14時40分から50分の間の24 mm, 最大60分雨量は44 mmであった。同地点の降雨観測は開始から数年しか経過していないため、長期間の10分雨量データが蓄積している神戸気象台, 姫路気象台の観測データに照らし合わせて今回の豪雨の頻度を評価する。Table 1 は神戸, 姫路の各気象台の観測開始以降の上位10位の10分雨量と今回の豪

雨を比較したものである。10分雨量は神戸気象台のデータで第3位, 姫路気象台のデータでは第1位に相当し, 極めて大きな降雨であったことが分かる。これを1時間雨量でみると, 姫路気象台のデータでは第8位に位置するものの, 神戸気象台の1時間雨量では10位に入らない。

Table 1 Comparisons of the heavy rainfall at the Tsurukabuto station on July 28, 2008 and the top ten historical observed rainfall records at the meteorological observatories of Kobe and Himeji.

神戸	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	データ期間
R ₁₀ (mm)	28.0	24.5	23.5	23.4	23.0	22.0	22.0	22.0	21.0	20.0	1937/1～2009/2
R ₆₀ (mm)	87.7	75.8	61.5	60.8	56.5	55.0	52.5	50.3	50.2	50.2	1897/1～2009/2
姫路	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	データ期間
R ₁₀ (mm)	23.5	23.0	22.5	20.6	20.0	20.0	20.0	19.5	19.5	19.0	1949/2～2009/2
R ₆₀ (mm)	70.5	53.0	50.5	50.0	48.1	45.5	45.5	43.0	42.5	42	1949/2～2009/2

R₁₀：日最大 10 分間降水量(mm)，R₆₀：日最大 1 時間降水量(mm)

Table 2 Estimated return periods of ten minutes rainfall and 1 hour rainfall of the heavy rainfall at the Tsurukabuto station on July 28, 2008.

神戸 10 分雨量		3 母数対数正規分布, SLSC=0.032								
再現期間(年)		400	200	150	100	80	50	30	20	
確率水文量(mm)		30.8	28.9	28.2	27.1	26.4	25.1	23.8	22.4	
姫路 10 分雨量		3 母数対数正規分布, SLSC=0.025								
再現期間(年)		400	200	150	100	80	50	30	20	
確率水文量(mm)		27.3	25.7	25.1	24.1	23.6	22.5	21.2	20.2	
神戸 1 時間雨量		3 母数対数正規分布, SLSC=0.029								
再現期間(年)		80	50	30	20	10	5	3	2	
確率水文量(mm)		69.9	65.2	60.1	56.1	49.1	41.9	36.3	31.2	
姫路 1 時間雨量		3 母数対数正規分布, SLSC=0.021								
再現期間(年)		80	50	30	20	10	5	3	2	
確率水文量(mm)		65.5	61.0	56.2	52.4	46.1	39.8	35.0	30.9	

Table 2 は神戸、姫路の各気象台の年最大10分雨量、年最大1時間雨量を用いて頻度解析を行い、今回の都賀川の集中豪雨がそれぞれに対してどの程度の再現期間となるかを調べたものである。神戸気象台、姫路気象台とも1961年から2007年のデータを用い、年最大資料を3母数対数正規分布に当てはめた。SLSCはいずれも0.03程度あるいはそれ以下となった。この3母数対数正規分布を用いると、10分雨量の再現期間は神戸気象台のデータで30年から50年、姫路気象台のデータで80年から100年、1時間雨量の再現期間はどちらも5年から10年程度となった。この結果から、今回の豪雨は1時間雨量で評価すればそれほど大きな雨量ではなかったが、10分雨量は稀な事象であったことがわかる。

一般に前線や台風では、1時間雨量が大きければ10分雨量も大きな値を示す。こうした場合は、事前に相当の降雨があり予測情報も合わせて、河道内に住民が入る可能性は低く、今回のような水難事故が発生する可能性は小さいと考えられる。今回の豪雨では、事前に大雨・洪水警報が発令されていたとはい

え、直前まで降雨がなく急激に大雨が発生した。この状況が水難事故の大きな要因と考えられる。

4. 詳細分布型流出モデルによる流出解析

4.1 流域と分布型流出モデルの概要

Fig. 2 に示すように都賀川流域 (8.57km²) の上流域は六甲山地、下流域は雨水排水幹線網が整備された市街地であり、山地域が流域の約75%、市街地が約25%を占める。この流域を対象として50m分解能の分布型流出モデル(椎葉ら(1999)、市川ら(2001)) を構築し、降雨流出の発生過程を分析した。

流域地形は国土地理院が発行する数値地図50mメッシュ(標高)を用い、50mの空間分解能で斜面の流れ方向を一次的に決定する。Fig. 5 に50mメッシュ標高データを用いた流域モデルを示す。河道の接続状況と土地利用状況に応じてサブ流域を9つ設定した。下流部のサブ流域1, 2, 3, 4は市街地、それ以外のサブ流域は山地である。流域は50m分解能で設定された矩形の斜面要素の集合体と、それが流出する河

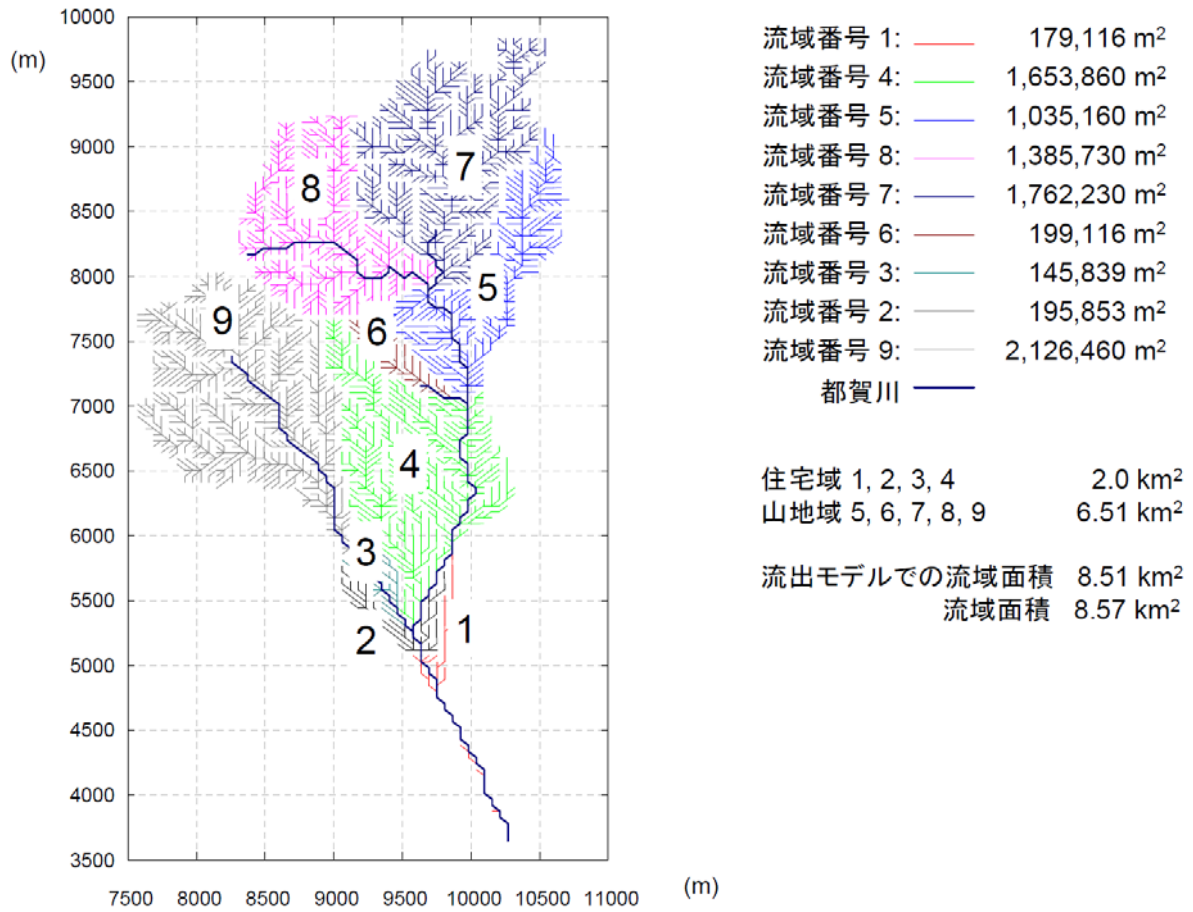


Fig. 5 Topographic representation of the watershed model for the Toga River basin. The sub-basins 1, 2, 3 and 4 are the residential area, and the other is mountainous area.

道網によって表現される。流域周辺には Fig. 2 に示す観測設備が設置されており、六甲川と杣谷川の合流地点下流のサブ流域2の河道下端が甲橋水位観測局の設置位置に対応する。

流れ方向に従って、すべての矩形斜面要素での流れを逐次追跡して河道への流出量を算定し、次に、河道での流れを追跡して河川流量を求める。Fig. 3 に示すように、甲橋上流では流域の大半が勾配1/20以上の急勾配斜面である。そこで、雨水流出の追跡計算には斜面流出、河道流出ともにキネマティックウェーブモデルを用いる。

斜面部の土層は、重力水が発生する大空隙部分と毛管移動水の流れの場合であるマトリックス部分から構成されると考える(立川ら, 2004)。マトリックス部の最大保水量を水深で表した値を d_c 、重力水を含めて表層土壤中に保水し得る最大水深を d_s と考え、流量流積関係式(1)を仮定する。この流量流積関係式と連続式(2)を用いて上流の斜面要素から順次、雨水を追跡する。河道においては矩形断面を仮定し土層厚をゼロとして表面流のみを考える。

$$q = \begin{cases} v_c d_c (h/d_c)^\beta, & 0 \leq h \leq d_c \\ v_c d_c + v_a (h - d_c), & d_c < h \leq d_s \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) + \alpha (h - d_s)^m, & d_s < h \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2)$$

ここで t は時間、 x は斜面上端からの距離、 q は単位幅当たりの流量、 h は水深、 r は降雨強度である。また、 i を斜面要素の勾配として

$$v_c = k_c i, v_a = k_a i, k_a = \beta k_c, \alpha = \sqrt{i} / n$$

であり、モデルパラメータは流量流積関係式を決定する n, k_a, d_c, d_s, β の5つとなる。 n は地表面流が発生する場合の等価粗度、 k_a は重力水が卓越するA層内の透水係数、 β は重力水部と不飽和水部との飽和透水係数の比である。

Table 3 Model parameter values of the distributed hydrologic model.

Parameter	Mountainous area	Residential area
n ($m^{-1/3}s$)	0.3	0.06
k_a (m/s)	0.01	-
d_s (m)	0.4	0.0
d_c (m)	0.2	0.0
β (-)	6.0	-

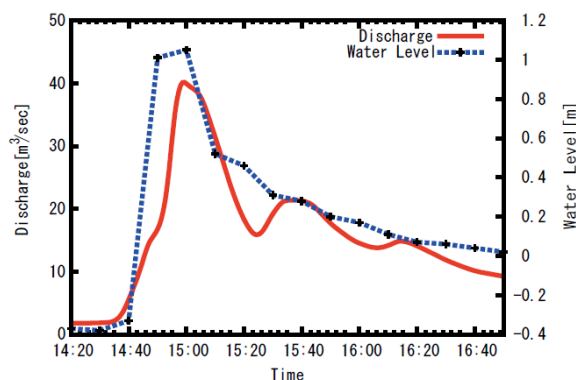


Fig. 6 Observed water level and simulated discharge at the Kabutobashi station.

市街地は雨水排水幹線網が整備されていて、市街地への降雨の大半は都賀川に流入する。そこで市街地は土層厚をゼロとして地表面流型のパラメータを設定し、等価粗度は河道と同等の値を設定した。また、山地域のパラメータはわが国の他の山地流域で適合するような代表的な値を設定した。Table 3 に設定したモデルパラメータの値を示す。当流域では流量観測データは存在しないので、これらのパラメータの値は、同じ分布型流出モデルを他の流域に適用してよく適合するパラメータ値を参考とした。

4.2 流出解析

Fig. 6 に甲橋水位観測地点 (サブ流域2の下端)での河川流量の計算値と甲橋水位局の水位観測データを合わせて示す。Fig. 7 は流出解析に用いた神戸市の降雨レーダーによる雨量の時間変化であり、流域全体の流域平均値と流出に支配的であったと考えられるサブ流域4 (市街地) の流域平均値を示している。降雨レーダーの空間分解能は250m、時間分解能は2分30秒であり、レーダーアメダス合成雨量によって補正されている。降雨レーダーによる流域平均値を14時20分から16時まで積算すると43.0 mmとなった。この値は Fig. 4 の鶴甲地上観測雨量による同時間帯の積算雨量が 46 mmであり、レーダー雨量は妥当な値と考えられる。

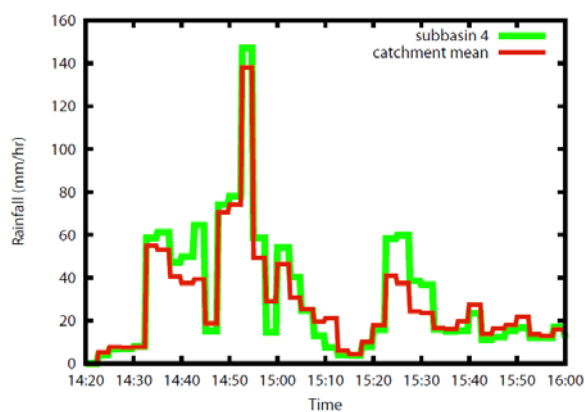


Fig. 7 Radar rainfall for distributed hydrologic simulation. The green line shows the catchment mean rainfall for sub-basin 4, which is believed to be a dominant source of the discharge. The red line shows the catchment mean rainfall derived from the radar data.

この流域では河川流量は測定されていないため、一般的に適合する代表的なパラメータ値を用いているが、Fig. 6 に示す計算流量ハイドログラフは、概ねピーク流量の発生時刻を再現している。このときのピーク時の推定河川流量は40.2 m^3/s となった。藤田(2009)はビデオ映像から表面流速を推定し、新都賀橋下流の横断表面流速分布を推定している。それによると河道中央部での表面流速は5m/sを越え、この表面流速分布から推定される河川流量は30 m^3/s から40 m^3/s 程度としている。また、洪水到達時間を10分とし、市街地からの雨水流出が支配的であると想定すると、合理式を用いてピーク時の河川流量は

$$Q = \frac{1}{3.6} fRA = 36 \text{ } m^3/s$$

と推定される。ここで、市街地は雨水排水幹線網が整備されているので $f=1.0$ 、レーダー雨量による10分間の平均雨量強度の最大値として $R=60 \text{ mm/hr}$ (Fig. 10 参照)、市街地の面積として $A=2.2 \text{ km}^2$ とした。これらの観測情報を合わせて考えると、ピーク流量が30 m^3/s から40 m^3/s 程度というのは妥当と考えられ、Fig. 6 の流出計算結果は妥当なものと考えられる。

なお、合理式において流域面積として都賀川全域の8.57 km^2 を用い、全流域から流出があったと想定すると、ピーク流量は160 m^3/s に近い値となる。甲橋地点での水位上昇が1.3m、断面幅が約18mであることを考えると、断面平均流速が7m 近い値となり、表面流速の推定値が 5m/sであることと比べると、明らかに過大である。レーダー雨量観測によれば、山地域も同様に降雨が観測されているが、山地からは流出が少なかったとしなければ、ピーク流量の値を説明することが難しい。

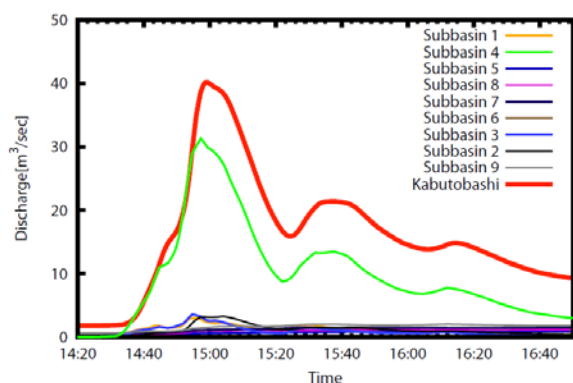


Fig. 8 Discharge from each sub-basin. The red line is the river discharge at the Kabutobashi station.

合理式によるピーク流量の推定では、市街地からの流出が支配的であったと想定しているが、これが妥当であるかを確認する必要がある。Fig. 2 に示す観測施設の一つとして、都賀川流域には河川流・土石流をモニターするために、国土交通省六甲砂防事務所による監視ビデオカメラ (ITVカメラ) が山地域の3箇所に設置されている。このビデオ画像によれば、柚谷川の妙楽ITVカメラでは水位の上昇を確認できるが、残りの2カ所のITVカメラでは豪雨の時間帯を通して河道内の流れは見られず、山地からの流出量は極めて小さかったことが確認されている(藤田(2009))。

Fig. 8 は Fig. 6 の推定流量とともに、そのときの各サブ流域から河道への流出量を示した結果である。この計算結果によれば、市街地であるサブ流域4からの流出が出水の立ち上がり時のほぼすべての流量を占めており、全流量の多くの部分を占めていることがわかる。サブ流域(5~9)は山地として設定した流域からの斜面流出の計算結果である。Fig. 7 に示すようにレーダー雨量観測によれば、山地域にも相当の降雨があったにも関わらず、山地からの流出量の計算値は極めて小さな値であった。これは監視ビデオカメラによる観測結果とも符合している。

このことをさらに確かめるために、流域すべての斜面に Table 3 の市街地のパラメータ値を設定した場合の甲橋地点における想定流出量をFig. 9 に示す。この場合は土層厚をゼロとしているために降雨が地表面流となってすぐに流出する。このため、サブ流域からの流出量の時間変化パターンはそれぞれのサブ流域への降雨の時間変化パターンとほぼ等しい。この場合の甲橋での想定河川流量は160 m³/sに近い値となる。これは上の合理式によるピーク流量の推定において、全流域から流出があると想定する場合のピーク流量とほぼ同様の結果となり、明らかに過大であることがわかる。

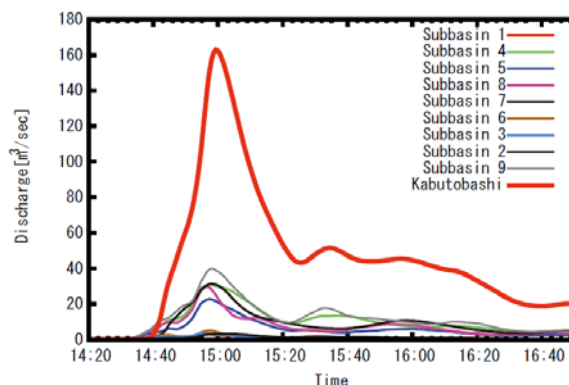


Fig. 9 Discharge from each sub-basin in the case that the parameter values of all sub-basins are set to the type of the residential area. The red line is the river discharge at the Kabutobashi station in the case.

これらの観測データによる分析と流出解析の結果から、山地域にも相当の降雨があったにも関わらず、流域の約7割以上を占める六甲山地からの流出はほとんどなく、急激な水位上昇をもたらした流出は市街地からの直接流出によって構成され则认为することが妥当である。

4.3 レーダー雨量の有効性

Fig. 10とFig. 11 は、分布型流出モデルにレーダー雨量を入力データとした場合と、最も大きな降雨が観測された鶴甲地点の地上雨量データを与えた場合の計算流量の違いを示したものである。上述したように、降雨レーダーによる流域平均雨量の14時20分から16時までの積算雨量は43 mm、同時時間帯の鶴甲地上観測雨量の積算雨量は46 mmであり、積算雨量で見た場合の両者の違いはほとんどない。時間雨量で見ても、14時から15時の降雨は26mmと同じ値となる。しかし、10分雨量で見るとレーダー雨量から推定した流域平均雨量と甲橋地点での地点雨量の時間変化は大きく異なる。また、その違いによって、推定したハイドログラフの時間変化やピーク流量も大きく違いが現れる。

流域が小さい場合は降雨から流出への時間遅れが極めて短い。また、市街地であるか山地であるかといった土地形態の違いが降雨流出に敏感に反応する。そのため、降雨強度の時間空間分布の少しの違いが流出開始時刻やピーク生起時刻、ピーク流量、ハイドログラフの形状に大きく影響する。一地点の雨量情報だけでは、こうした市街地の流出現象の再現が難しいことがわかる。特に流出が降雨に鋭敏に反応する都市の小流域では、レーダー雨量観測と分布型流出モデルを用いて詳細に雨水流れを追跡しないと、洪水予測の向上には結びつかない。

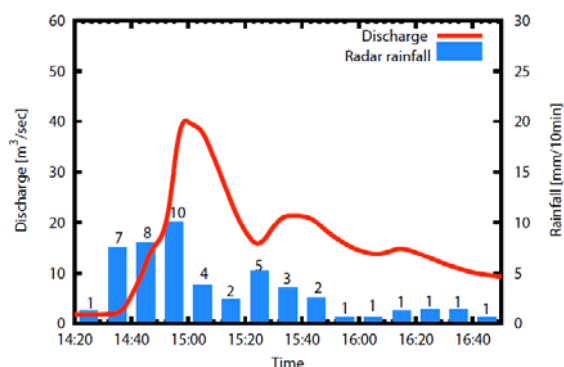


Fig. 10 Simulated discharge at the Kabutobashi station using a distributed hydrologic model with radar rainfall.

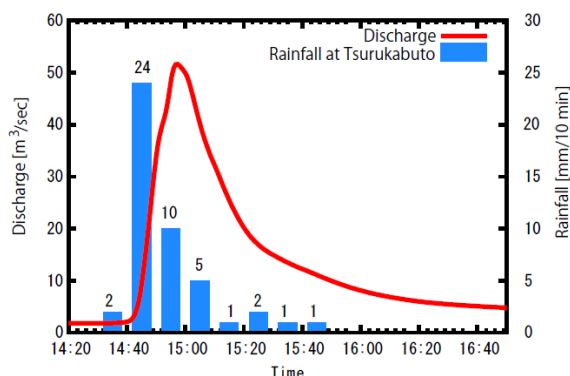


Fig. 11 Simulated discharge at the Kabutobashi station using a distributed hydrologic model with the Tsurukabuto ground observed rainfall.

5. まとめ

降雨の頻度解析の結果、今回の集中豪雨は10分雨量において30年から50年程度の事象であることがわかった。また、観測データの分析と流出解析の結果、山地域にも相当の降雨があったにもかかわらず、流域の約7割以上を占める六甲山地からの流出はほとんどなく、急激な水位上昇をもたらした流出は、市街地からの直接流出であると推定された。以上から得られた結果をもとに事故防止のための技術的課題と対策を考えると、以下のことが挙げられる。

- 1) 今回の降雨は最大1時間雨量が44 mm、1日雨量にして46 mmであり、山地流域では洪水とはならない程度の降雨で、急激な出水が発生した。出水は市街地への降雨が急激に流出したものと考えられる。豪雨による急激な水位上昇をできるだけ抑えるためには、降った場所で雨水を一時的に貯留するなど、流域での対応を考えなければ、対策が難しい。
- 2) 一般に台風や前線性の降雨では、10分雨量が大きければそれを含む1時間雨量も大きな値を示す。こうした場合は、事前に相当の降雨があり予測情報とも合わせて、河道内に住民が入る可能性は低く、今回のような水難事故が発生する可能性は低いと考えられる。今回は事前に大雨・洪水警報が発令されていたとはいえ、直前まで降雨がなく、急激な豪雨が発生した。この状況が水難事故の大きな要因であったと考えられる。空振りとなっても、注意報あるいは警報が発令されたら河川には近づかないなどを地域住民の共通認識とする必要がある。
- 3) 都市小流域の急激な流出を再現するためには地点雨量では不十分である。また、流域条件を一樣とすると流出現象を再現できない。レーダー

雨量と詳細な地形、土地利用を反映することができ分布型流出モデルの利用が有効である。

- 4) 水難事故防止のためには、現況を把握するだけでは限界がある。降雨と流出の時間差はほとんどない。また、今回の豪雨では上流域からの流出はほとんどなく、上流で河道の状況をモニターするだけでは、下流の水難事故防止には役立たない。ピンポイント的な集中豪雨を予測する技術を向上させる必要がある。

謝 辞

本研究は(社)土木学会都賀川水難事故調査団による調査研究の一環として実施されたものである。本研究を進めるにあたり、国土交通省六甲砂防事務所、兵庫県、神戸市から水文データや地理情報の提供をいただいた。また、データ取得においては神戸大学大学院工学研究科の藤田一郎教授、宮本仁志准教授に多大な協力を頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 市川 温, 村上将道, 立川康人, 椎葉充晴: 流域地形の新たな数理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.
- 椎葉充晴, 市川 温, 榊原哲由, 立川康人: 河川流域地形の新しい数理表現形式, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 1-9, 1999.
- 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, vol. 48, pp. 7-12, 2004.
- 藤田一郎: 都賀川水難事故調査について, 平成20年度河川災害に関するシンポジウム, pp. 1-7, 2009.

Frequency Analysis and Rainfall-Runoff Analysis of the Toga River Flush Flood in July 2008 to Prevent the Water Accident

Yasuto TACHIKAWA*, Shunsuke ESAKI**, Michiharu SHIIBA* and Yutaka ICHIKAWA***

* Department of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University

** Undergraduate School of Global Engineering, Kyoto University

*** Department of Civil and Environmental Engineering, University of Yamanashi

Synopsis

The sudden water level rising caused by the severe rainstorm at the Toga River in July 2008 claimed five people. To prevent the water accident, a distributed rainfall-runoff analysis is conducted to understand the sudden runoff phenomena. The rainfall-runoff analysis and observed camera images revealed that discharge which caused the sudden water level rising came from the residential area and contribution from the mountainous area was quite small. It is proposed that only to monitor the discharge at the upper reaches is insufficient to prevent the accident; detailed distributed rainfall-runoff analysis with radar rainfall is essential to predict the runoff phenomena at the urbanized small catchment; and to foster the common view to keep off from the river at the alert of heavy rainfall warning is indispensable to avoid the accident.

Keywords: Toga River, flush flood, rainfall frequency analysis, runoff analysis, distributed rainfall-runoff model