

Ⅱ. 降雨の頻度解析と流出解析

京都大学大学院工学研究科

立川康人・江崎俊介

1. 目的

2008年7月28日の集中豪雨により神戸市灘区を流れる都賀川の水位が急上昇し、河道内にいた人が流されて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住宅域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水難事故が発生した。本研究では今回の集中豪雨の頻度解析と流出解析を実施し、それをもとに事故を防止するための技術的課題と対策を考察する。

2. 降雨の頻度解析

図-1に都賀川流域およびその周辺でもっとも降雨量の大きかった鶴甲地点での10分雨量を示す。最大10分雨量は14時40分から50分間の24mm、最大60分雨量は44mmであった。これらの値を、長期間の10分雨量データが取得されている神戸气象台、姫路气象台の観測データと比較した結果を表-1に示す。観測開始以降の上位10位の10分雨量で今回の豪雨を評価すると、10分雨量は神戸气象台のデータで第3位、姫路气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、姫路气象台のデータでは第8位に位置するものの、神戸气象台の1時間雨量では10位に入らない。

表-2は神戸、姫路の各气象台の年最大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。神戸气象台、姫路气象台とも1961年から2007年のデータを用いた。10分雨量の再現期間は神戸气象台のデータで30年から50年、姫路气象台のデータで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。この結果からも、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。

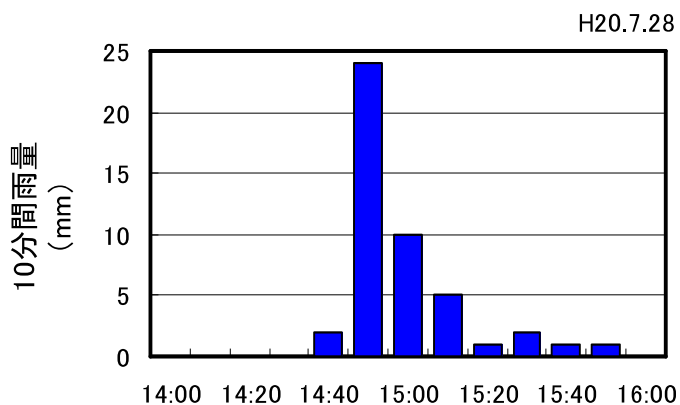


図-1 鶴甲地上雨量観測点での10分雨量の時間変化

表-1 観測開始以降の上位 10 位の値と 2008 年 7 月 28 日の都賀川集中豪雨との比較

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)

表-2 都賀川集中豪雨の 10 分雨量と 1 時間雨量の再現期間

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	

3. 詳細分布型流出モデルによる流出解析

都賀川流域(8.57km²)を対象として 50m 分解能の分布型流出モデル¹⁾²⁾を構築し、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)を用いて 50m の空間分解能で斜面の流れ方向を一次元的に決定する。図-2 に都賀川の流域モデルを示す。河道の接続状況に応じてサブ流域を 9 つ設定した。このうち、サブ流域 1, 2, 3, 4 は住宅域であり、流域の 3 割弱を占める。流域は矩形の斜面要素の集合体と、それが流出する河道網によって表現される。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する。次に、河道での流れを追跡して河川流量を求める。流域の大半が勾配 1/20 以上の急勾配斜面であり、雨水流出の追跡計算には斜面部、河道部ともにキネマティックウェーブモデルを用いる。

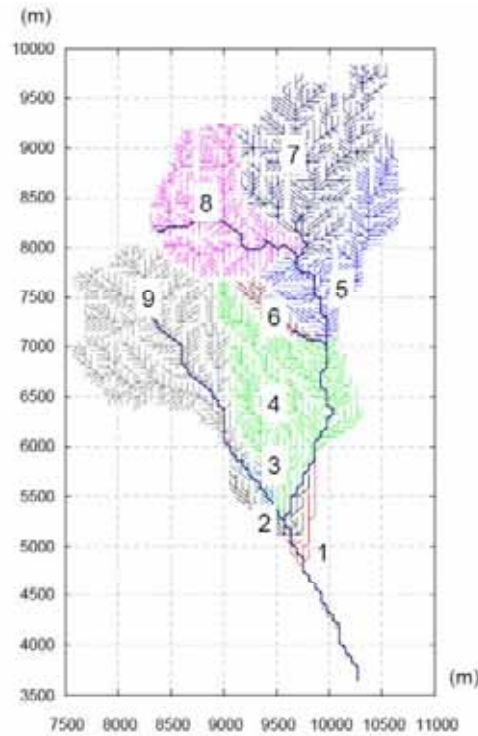


図-2 都賀川流域の流域モデル。サブ流域 1, 2, 3, 4 が住宅域でそれ以外は山地域である。

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であるマトリックス部分から構成されると考える³⁾。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壌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。

$$q = \begin{cases} v_c d_c (h/d_c)^\beta, & 0 \leq h \leq d_c \\ v_c d_c + v_a (h - d_c), & d_c < h \leq d_s \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) + \alpha (h - d_s)^m, & d_s < h \end{cases} \quad (1) \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (2)$$

ここで

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

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 ($m^{-1/3}s$), k_a (m/s), d_c (m), d_s (m), β (-) 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。住宅域は大部分が勾配 1/20 以上の急勾配流域であり、雨水排水幹線網が整備されていて、住宅域への降雨の大半は都賀川に流入する。そこで住宅域は土層厚を 0 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する。表-3 に設定したモデルパラメータの値を示す。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。

表-3 分布型流出モデルに用いたモデルパラメータの値

土地利用	n ($m^{-1/3}s$)	k_a (m/s)	d_s (m)	d_c (m)	β (-)
山地	0.3	0.01	0.4	0.2	6.0
住宅域	0.03	-	0.0	0.0	-

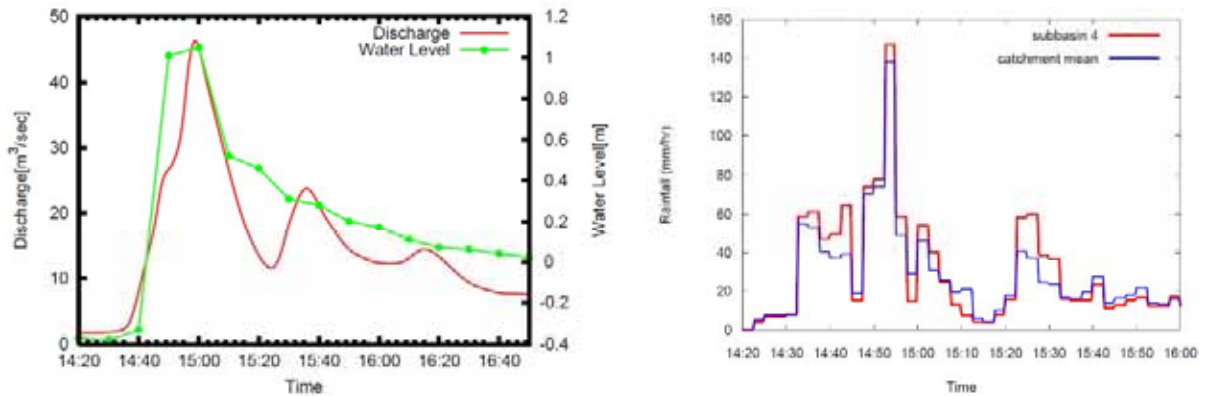


図-3 甲橋地点での流量の再現結果と観測水位(左)と流出計算に用いたレーダー雨量(右)

図-3(左)に甲橋直上流の水位観測地点(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。図-3(右)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たデータを用いた。計算した流量ハイドログラフは、ピーク流量の発生時刻を適切に再現している。このときの河川流量は、藤田による表面流の流速推定と平面2次元モデルの分析によって30から50 m³/s程度と推定されており、この結果とも適合する値となっている。

都賀川流域では河川流・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、山地からの流出量は極めて小さかったことがわかっている。図-4は各サブ流域から河道への流出量を推定した結果である。図-4(左)は適合すると考えられる表-3のパラメータ値を設定した場合の計算流出量であり、実線が住宅域のサブ流域(1~4)からの流出、点線が山地サブ流域(5~9)からの流出である。雨水排水幹線が整備されているサブ流域4からの流出が支配的で、山地からの流出はほとんどなかった。これは監視ビデオカメラによる観測結果と適合している。一方、図-4(右)は流域すべての斜面に表-3の住宅域のパラメータ値を設定した場合の想定流出量である。この場合は降雨が地表面流となってすぐに流出するため、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200m³/s近い値となり、実際よりもかなり大きな値となった。これらの観測データ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住宅域からの直接流出であることがわかった。

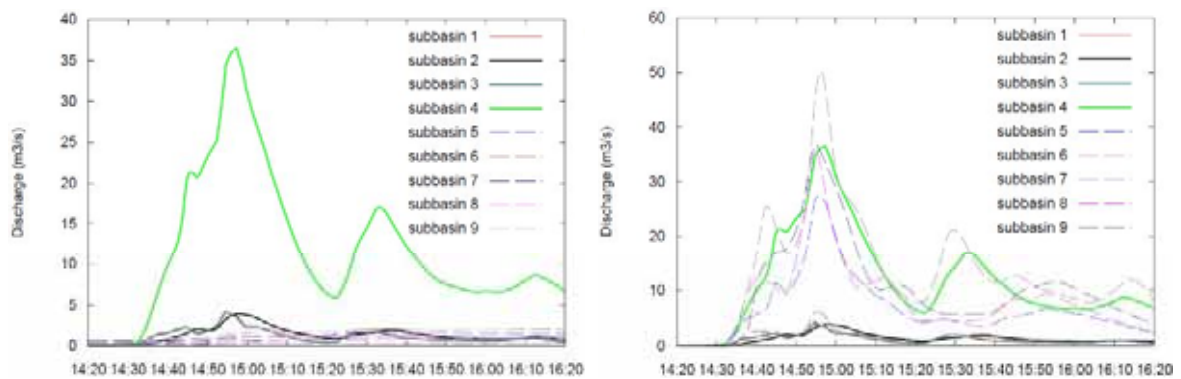


図-4 各サブ流域から河道への流出量(実線は住宅域からの流出、破線は山地域からの流出)。左：表-3 に示すパラメータを設定した場合。右：流域すべてに住宅地のパラメータ値を設定した場合。

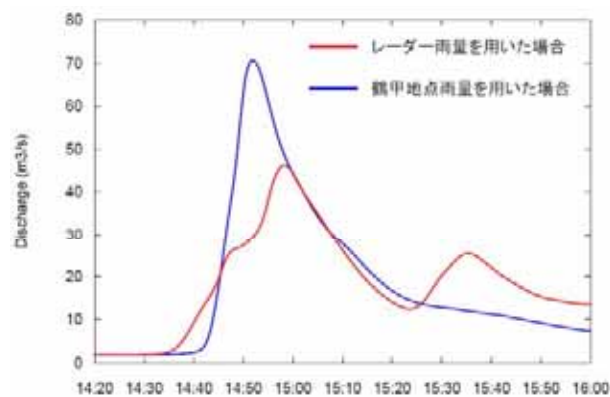


図-5 レーダー雨量と地点雨量を用いた場合の甲橋地点の計算流量の比較

図-5 は、同定した分布型流出モデルの降雨データとして最も大きな降雨が観測された鶴甲地点の雨量を用いた場合と、レーダー雨量を用いた場合の計算流量(図-3(左))を比較した結果である。流域が小さくかつ住宅域の流出が降雨に敏感に反応するため、少しの降雨の違いが流出開始時刻やピーク生起時刻、ピーク流量に大きく影響する。一地点の地点雨量情報だけでは、こうした流域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、レーダー雨量と分布型流出モデルを用いて詳細に雨水を追跡しないと、予測の向上には結びつかない。

4. まとめ

降雨の頻度解析の結果、今回の集中豪雨は10分雨量が極めて大きな降雨であることがわかった。また、観測と流出解析の結果、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

した流出は住宅域からの直接流出であることがわかった。事故防止のための技術的課題と対策を考察する。

- 1) 都市小流域の急激な流出を再現するためには地点観測雨量では不十分である。また、流域条件を一様とすると、流出現象を再現できない。レーダー雨量と詳細な土地利用、地形を反映することができる分布型流出モデルの利用が有効である。
- 2) 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。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。豪雨があった場所の雨水流出によって水位が急上昇している。急激な水位上昇を防ぐためには、降った場所で雨水を貯留するしか方法がない。
- 3) 前線あるいは台風に伴う大雨は、それを観測・予測する技術が進展している。しかし、その中で発生するピンポイント的な集中豪雨を事前に予測することは容易ではない。現状では、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。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.