豪雨の時間・空間スケールが 洪水リスク評価に及ぼす影響

FLOOD RISK ASSESSMENT AND APPLICATION CONSIDERING RAINFALL TEMPORAL-SPATIAL DISTRIBUTION

井上直哉¹・杉本悠¹・堀智晴²・野原大督³

Naoya INOUE, Haruka SUGIMOTO, Tomoharu HORI and Daisuke NOHARA

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

²正会員 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正会員 工博 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The design rainfall for flood control planning is assumed to have 24 or 48 hours duration and spatially uniform distribution. However, the heavy rainfall which has short duration and small area seems to put small rivers at risk. The purpose of this study is to reveal the effects of Depth-Area-Duration (DAD) of heavy rainfall on the flood risk assessment.

DAD relationship is calculated using Radar-AMeDAS rainfall data and the methods of making rainfall models holding DAD relationship are proposed. Finally, the flood risk is assessed by runoff analysis. The result says that peak flow at points on river channel tends to be maximum value when the spatial scale of heavy rain equals to the catchment area of each point. It suggests that the flood risk along the tributaries located at the upper stream of the river may be underestimated when the target rainfall is assumed to have the basin scale.

Key Words : DAD analysis, Radar-AMeDAS, local heavy rain, flood risk

1. はじめに

治水計画を策定する場合、対象となる外力豪雨を確率規模別に設定する。このとき対象となる流域の規模に応じて、24時間や48時間といった継続時間が採用されることが多い。また空間スケールについては、一級水系では部分流域毎に外力豪雨を設定する場合もあるが、二級水系などでは全流域に一律な空間分布が仮定されることも多い。一方、実際に発生する豪雨の時間・空間スケールは様々である。例えば1時間のスケールで見た場合には、極めて大きな降雨を伴っているような降雨イベントがあり得る。また空間スケールについて考えると、流域全体を対象とする計画では、数十km²の範囲で生じるような局地的な豪雨のリスクを見逃してしまう可能性がある。施設の設計などにおいては、ある一つの計画外力を設定して計画を進めることが必要となる場合もあるが、ハザードマップの作成や避難などの災害対応行動について考える場合は、起こり得るさまざまな特性をもつ降雨と、それに起因するリスクを評価しなければならない。そこで本研究では、大阪府南部を流れる大和川水系の石川を

対象とし、時空間スケールを考慮に入れたモデル豪雨を作成することで、豪雨の時空間分布が河道の各地点の洪水リスクに及ぼす影響について分析する。

2. 解析雨量を用いた流域雨量データの作成

(1) 解析雨量

本研究では雨量データとして、高時空間解像度を有する解析雨量¹⁾を使用した。財団法人気象業務支援センターが提供する全国の時間雨量分布で、レーダで観測された雨量分布を地上観測雨量によって矯正することで得られる。1983年の運用当初の空間解像度は5kmだったが、高解像度化が進み、2006年以降は空間解像度1kmでの提供を行っている。

(2) 本研究の対象流域

本研究では大阪府南部を貫流する大和川水系の石川を対象流域とした。石川は南河内を貫流して大和川に注ぐ一級河川である。流路延長約36km、流域面積約222km²で南大阪最大の河川であり、複数の支川が存在する。

石川流域では、これまで幾多の水害が発生しており、昭和57年8月の台風では、石川流域内の河内長野観測所で日雨量193mm、道明寺地点の流量は約1,200m³/sを記録し、床上浸水156戸、床下浸水55戸の被害が発生した。また、平成7年7月の梅雨前線による豪雨では、河内長野観測所で日雨量172mmとなり、床上浸水5戸、床下浸水39戸の被害となった。

(3) 流域雨量データの作成

解析雨量を研究に適用する為には、圧縮されたデータセットを解凍し、対象流域内の雨量データを切り出す必要がある。そこで国土交通省が提供する「国土数値情報流域メッシュデータ」を利用し、対象流域の1kmメッシュに時間雨量データを内挿した、流域雨量データを作成した。

3. 降雨の時空間分布解析

(1) DAD解析

降雨の時空間分布特性を定量的に調べる手段として、降雨強度(Depth)-面積(Area)-継続時間(Duration)の3者の関係を調べるDAD解析がある。本研究では、空間解像度が1kmとなった2006年から2011年までの6年分の解析雨量を用いて降雨のDAD解析を実施し、対象流域における降雨面積及び降雨継続時間に応じた年最大降雨強度(mm/h)を抽出した。

なお一般に豪雨の分布は地形特性の影響を受けることが知られており、流域内の場所毎に年最大値を分析するのが望ましいといえる。しかし一方で、解析に用いるデータ数が大きくない場合には、たまたまその場所では観測期間内に強い降雨が発生していないことに解析結果が大きく影響を受ける恐れがある。解析雨量はまだ蓄積がそう多くはないため、本稿では流域におけるDAD関係は、流域内の至るところで同じであると仮定して進めることにした。

(2) 検討ケース

解析は表-1に示す降雨継続時間9通り、空間スケール9通りの組み合わせについて、最大降雨強度を流域内で網羅的に検索することで行った。

(3) 解析結果

石川流域における各年の継続時間、面積別の年最大降雨強度（最大DAD関係）をみる。2007年の結果の一部を図-1に示す。同一継続時間であれば考える空間スケールが小さいほど降雨強度が大きく、また同じ空間スケールであれば降雨継続時間が小さいほど降雨強度が大きいことが確認できる。

表-1 降雨の時空間分布解析の検討ケース

空間スケール	降雨継続時間
①1km×1km = 1km ²	(i)1時間
②2km×2km = 4km ²	(ii)2時間
③3km×3km = 9km ²	(iii)3時間
④4km×4km = 16km ²	(iv)4時間
⑤5km×5km = 25km ²	(v)5時間
⑥6km×6km = 36km ²	(vi)6時間
⑦7km×7km = 49km ²	(vii)12時間
⑧8km×8km = 64km ²	(viii)24時間
⑨214km ² (流域全体)	(ix)48時間

図-1 2007年の最大DAD関係

4. 地上雨量データを用いた確率降雨強度の推定

水文頻度解析において、一群の観測データである標本を確率分布に当てはめる場合、30～40程度の標本数から再現確率統計量の安定性が増してくると言われている²⁾。しかし今回扱う解析雨量の蓄積は少なく、頻度解析に使用することは難しい。そこで、過去30年分以上のデータが入手可能な、流域内4箇所の地上雨量観測所の地点雨量を対象とし、確率規模評価を行うことにした。具体的には表-1に示す降雨継続時間9通りに対する年最大雨量を求めた。

この結果をもとに、財団法人国土技術研究センターが開発した水文統計ユーティリティ³⁾を用いて、各観測所における9通りの降雨継続時間および再現期間10, 30, 100, 200年のそれぞれについて確率降雨量を算出した。水文統計ユーティリティは、標本となるデータを入力することで、データにガンマ分布や指数分布などの16種類(毎年値分布13種類、非毎年値分布3種類)の確率分布モデルをあてはめ、それらのモデルによって算出された確率水文量とともに、その適合度を求めることができる。

5. 石川流域における洪水リスク評価

(1) モデル降雨の作成

a) 地上雨量データの空間スケールに関する検討

地上雨量で観測された降雨強度はどのくらいの空間スケールの降雨を捉えているのかは明らかでない。地点雨量であるので、本研究でDAD関係を考える際の最小面積スケールに対する降雨強度であると考えられることもできない。しかし固定された観測地点で、毎年1km²スケールの流域内最大強度が発生していると考えられることには無理がある。

そこで地上雨量データはどの程度の空間スケールの年最大降雨ならば捉えられるのか調べるため、地上雨量データから得られるD-D曲線を解析雨量から得られた面積別のD-D曲線と比較した。すると地上雨量データによるD-D曲線は、概ね4km²のD-D曲線から36km²のD-D曲線の間に位置していた。ただし6年間の比較しかできておらず、ばらつきも見られるため、地上雨量データがどの程度の空間スケールの降雨を代表すると言えるか結論付けることは難しい。本稿で扱う4箇所の観測地点について、流域をティーセン分割することで得られた面積をその観測所の支配面積と考えると、先の比較から得られた空間スケールの最大値(36km²)よりも少し大きい値となった。そこで本稿では各観測所の支配面積を、各観測点のデータから求められた確率雨量の空間スケールであると仮定することにした。ただし、他の流域で検討する場合など、この方法を採用して良いのか再度検討する必要がある。

b) 確率規模をもつDAD曲線の作成

前項に設けた仮定により、地点雨量の統計分析から得られる確率雨量は、時間スケールはすべてのケースについて考慮できるものの、空間スケールについてはその観測所の支配面積ただ1ケースしか考慮できない。そこで、解析雨量から求められる面積-降雨強度(D-A)関係が各継続時間について流域内では一様であると仮定し、前章で得られた再現期間別の各雨量観測所において面積、降雨強度を満たすように、D-A関係を調整することで、再現期間別のD-A曲線を求めることにした。

具体的には、第3章で解析雨量を調べることで得られた6年第1位から第6位までのDA曲線を用いて一定の再現期間を有するDA曲線を、以下の手順に則り作成する。なお参考として図-2にイメージ図を示す。

まず考える再現期間を t 年と固定する。統計処理の結果求めることができた観測所（支配面積 A ）の継続時間 d に対する再現期間 t 年の雨量強度を $r(A, d)$ （図-2における赤点）とし、解析雨量のDAD解析の結果得られた継続時間 d に対するD-A曲線のうち順位 i のものを $f_i(a, d)$ ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$) とする。ただし a は雨の面積スケールを表す。次に面積 A における雨量強度 $f_i(A, d)$ が赤点 $r(A, d)$ に最も近くなるようなグラフ $f_{i^*}(a, d)$ （図-2では $i^*=1$ ）について、面積スケール A における雨量強度 $f_{i^*}(A, d)$ が赤点 $r(A, d)$ と一致す

図-2 再現期間別のDAD曲線の作成イメージ

るよう引き伸ばしを行う。すなわち

$$c = \frac{r(A, d)}{f_{i^*}(A, d)} \quad (1a)$$

で引き伸ばし倍率 c を求め、それを引き伸ばして対象のグラフ $f_{i^*}(a, d)$ に乗じることで、空間スケールを考慮した再現期間を t 年の降雨強度 $f(a, d)$ を

$$f(a, d) = cf_{i^*}(a, d) \quad (1b)$$

で定める。以上を1/10, 1/30, 1/100, 1/200の全ての確率規模および継続時間について行うことで、確率規模ごとに各地上雨量観測地点の代表する領域内における継続時間別の降雨強度-面積曲線を作成する。

c) 時間分布をもつモデル降雨の作成

我が国では、一級水系において計画降雨を定めるにあたり、48時間の継続時間を持つ降雨分布を考えることが多い。そこで、前節で確率規模評価をした結果を用い、流域内の広さを考慮して、再現期間が10, 30, 100, 200年の確率規模別48時間の中央集中型のモデル豪雨を作成する。確率規模評価した面積 a km²、継続時間 t の雨量強度を $f(a, t)$ 、モデル降雨の各時間の雨量強度を r_s ($s=1, 2, \dots$, とし、まず1時間雨量を48時間の中央に位置する24時から25時の雨量 r_{25} とする。

$$r_{25} = f(a, 1) \quad (2a)$$

図-3 天見観測所における25km², 10年確率のモデル降雨

次に、2時間雨量が23時から25時の積算となるように r_{24} を決める。

$$r_{24} = f(a, 2) \times 2 - r_{25} \quad (2b)$$

続いて3時間雨量が23時から26時の積算となるように r_{26} を決める。

$$r_{26} = f(a, 3) \times 3 - \sum_{s=24}^{25} r_s \quad (2c)$$

以下同様にして21時から27時の雨量を求める。18時から21時と27時から30時は12時間雨量を用いて求める。代表として27時から28時の雨量を求める式を式(2d)に示す。

$$r_{28} = \frac{f(a, 12) \times 12}{6} - \sum_{s=22}^{27} r_s \quad (2d)$$

この方法の特徴は、空間スケールを決定するとDAD関係により時間スケールも決まってくるため、自動的に面積 - 継続時間関係が組み込まれることである。例えば、小さな空間スケールを持つモデル降雨では、長い継続時間に対する降雨強度は小さくなる傾向があるため、上記手順で作成したモデル降雨は時間中央に強い降雨強度を持ち、中央から離れた時間帯は0もしくは極めて弱い降雨強度になるなど、面積スケールに応じた継続時間を持つことが期待できる。

上記の手順で、観測地点の代表する領域（支配面積）内における、面積スケール、確率規模別の48時間のモデル降雨を作成する。例として天見観測所の代表する領域における面積スケール25km²、再現期間10年のモデル降雨を図-3に示す。

(2) 様々な豪雨に対する流域河道内各点のピーク流量の算定

流出解析には、京都大学防災研究所水資源センターで開発されたセル分布型流出モデルであるHydro-BEAM⁴⁾を使用する。本研究では、Hydro-BEAMの表層土壌厚、B、C層の水平流出係数、B層の鉛直流出係数、A層の間隙率、飽和透水係数、樹冠遮断貯留容量の7つのパラメータについて同定を行うこととした。

計算には2006から2011年における3事例の豪雨イベントを用いた。試行錯誤的にパラメータを変化させながら、石川流域最下流部の道明寺地点における観測流量データ

図-4 パラメータ調整に用いた降雨イベントのハイドログラフ

と、解析雨量を入力してHydro-BEAMで算出された計算流量を比較することで、パラメータの評価を行った。パラメータの評価関数としては、観測流量と計算流量について、二乗平均平方根誤差(RMSE)およびピーク流量の差(PE)を用いた。

最終的に得られたパラメータセットによる、キャリブレーション期間における道明寺地点の計算流量と観測流量のグラフを図-4に示す。3つの事例について、全体的な挙動は捉えられており、ピーク流量と時刻も概ね一致していることが確認できる。

(3) 洪水リスク評価

石川流域において、外力降雨について時間スケール・空間スケールの異なる組み合わせを考慮した場合に、リスク評価がどの程度影響を受けるのかについて検討を行う。なお、石川流域には上流部に滝畑ダムという多目的ダムが存在するが、本研究では降雨の時空間スケールが洪水リスク評価に与える影響を把握することを目指しているため、ダムをモデルに組み込むことはせず、ダムのない状態でのリスク評価を行っている。

表-2 解析対象5地点の集水面積

地点	集水面積(km ²)
a	20
b	121
c	44
d	25
e	26

図-5 解析対象5地点の位置

a) 集水面積の異なる地点での洪水リスク

流域内の河道に位置する地点において、確率規模毎に空間スケールを変化させたモデル降雨を用いて、同じ確率規模であってもどの程度ピーク流量の違いが発生するのかを調べる。対象地点としては、集水面積20~30km²から3地点、40~50km²、100km²以上から各1地点の合計5地点(a~e)を選定した。図-5にその地点を、表-2にそれぞれの集水面積を示す。

降雨の空間スケールは1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 110, 150, 220 (流域全体) km²の12パターンとし、再現期間10, 30, 100, 200年のそれぞれに対応する降雨モデルについて流出解析を行った。降雨の空間スケールが各地点の集水面積よりも小さい場合は、集水域内において降雨対象領域を移動させ、ピーク流量が最大となる時の値を採用する。なお、降雨の空間スケールが9km²以上の場合は、各メッシュに定められているIDを利用し、集水域内において下流側から上流側へメッシュを1つずつずらしていく。空間スケールが4km²のときは、集水域内で2km×2kmの正方形の領域を移動させることとする。集水域内の降雨対象領域に含まれないメッシュの雨量は全て0とした。

流出解析結果の例として、b, e地点における降雨の面積とピーク流量との関係を図-6に示す。黄色点線はその地点の集水面積の大きさを示す。この結果から、降雨の空間スケールが集水面積に対応するときにピーク流量が最大値を示す傾向は、ほぼ全てのケースについて見られ

図-6 地点b, eにおける降雨面積とピーク流量の関係

る。これは、モデル降雨に用いているDA関係により、降雨の空間スケールが小さくなるほど降雨強度は大きくなるが、集水面積よりも小さくなると、雨域含まれないメッシュの雨量が0となるために集水域内の総降雨量が減少し、その結果ピーク流量も減少するからだと考えられる。

b) モデル降雨の空間スケールによるピーク流量の違いに関する考察

前項より、石川流域内の河道の各地点において、降雨の空間スケールをその地点の集水域と考えたときに最も洪水のリスクが大きく評価される傾向があることがわかった。それを踏まえ、このような傾向がすべての集水域のスケールにおいて見られるのかどうか、あるいは集水面積によって異なるのかを分析することにする。具体的には、流域内の任意の地点において、その地点の集水域に対応する空間スケールのモデル降雨が降った場合と、石川流域全体(220km²)に対応する空間スケールのモデル降雨が降った場合でピーク流量にどのくらい違いが出るのかを、対象とする地点の集水域、また降雨の確率規模に着目して考察を行う。

流域内の河道(支川を含む)上に位置する12地点について、それぞれ2通りの雨を設定し、流出解析を行った。1通り目は流域全体の面積と等しい空間スケールを持つ降雨であり、2通り目は各地点における集水域の面積と等しい空間スケールを持つ雨である。本研究ではDA関係を保持したモデル降雨を設定しているので、雨の空間スケールが小さくなるほど、降雨強度は大きくなる。

各地点で得られた2通りの結果について、1通り目のピーク流量で2通り目のピーク流量を除いた値を「ピー

表-3 各地点における集水面積と、確率規模別ピーク流量比

case	集水面積 (km ²)	10年	30年	100年	200年
1	25	1.17	2.33	4.07	4.50
2	25	1.09	1.29	6.28	4.50
3	26	1.17	1.54	4.92	1.42
4	34	1.05	1.18	3.29	2.74
5	38	1.14	1.05	1.19	1.19
6	47	1.02	1.13	1.53	1.15
7	49	1.02	1.14	1.52	1.15
8	60	1.11	1.18	1.59	1.23
9	110	1.01	1.08	1.36	1.07
10	129	1.01	1.06	1.23	1.07
11	150	0.99	1.05	1.13	1.04
12	223	1.00	1.00	1.00	1.00

ク流量比」と定義し、表-3に示す。

集水域が小さい地点ほど、ピーク流量比は大きくなる傾向がある。ところが、集水域の面積が110km²以上、すなわち流域面積の約半分を超えると、どの確率規模の降雨でもピーク流量比が1に近い値となる。このことから、集水域の面積が流域の半分を超えるような地点では、降雨の空間スケールを流域全体と考えても洪水リスクの評価にはあまり影響を及ぼさないと推測できる。

これらの傾向は100、200年確率規模について大きく見受けられ、特に100年確率の降雨が最も大きなピーク流量比を示した。これは100年確率程度では空間スケールの違いによる平均降雨強度の差がより大きくなるためと考えられる。ところで我が国の河川計画では、100年を確率規模として設定することが多い。今回の解析結果を考慮するならば、確率規模100年として計画降雨を考える場合には、降雨の空間スケール設定に特に配慮を要するといえる。

6. まとめ

本研究では、解析雨量データを用いて、DAD関係を保持した確率規模別のモデル降雨を作成する手法を提案した。そしてモデル降雨を用いて分布型流出モデルにより流出解析を行うことで、DAD関係を考慮した洪水リスクの評価を行った。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) 解析雨量を用いて流域雨量データセットを作成するソフトシステムを開発した。これにより、解析雨量の圧縮データの解凍ならびに切り出しを行って対象流域の雨量データセットを作成できるようになり、対象流域におけるメッシュ単位での降雨の解析を行うことが可能になった。
- 2) 石川流域における近年6年分の解析雨量を用いて、降雨の時空間スケールと降雨強度の関係を求めた。
- 3) 解析雨量から求めたDAD関係と、地上雨量データの統計解析によって算出された確率降雨を結合さ

せることで、各確率規模に対応するDAD曲線を作成する手法を提案した。

- 4) 確率評価されたDAD曲線から、任意の空間スケールにおける確率評価されたモデル降雨を作成する方法について提案した。なお、モデル降雨の時間分布については、中央集中型でかつ中央をはさむすべての継続時間で確率規模が同一となるように設定した。
- 5) 大阪府の石川を対象流域とし、作成したモデル降雨を用いてセル分布型流出モデルHydro-BEAMにより流出計算を行うことで、洪水リスク評価を行った。その結果、流域内の河道上に位置する地点において、それぞれの地点の集水面積に対応する空間スケールの雨が降ったときにピーク流量が最大となる傾向がみられた。また、これは集水面積が小さくなるほどその差が大きくなった。

以上より、特に支川流域の洪水リスクを評価する際には、その集水面積に応じた外力降雨を与える必要があると言える。加えて、近年増加の傾向を示す短時間豪雨も、積極的に考慮していく必要があるだろう。

一方課題として、作成したモデル降雨の、中央集中型でかつピークをはさむすべての継続時間で確率規模が同一とした妥当性について検討する必要がある。例えば時間分布の仮定を変えることでリスク評価に大きな影響が生じないかといった検討が必要だと考えられる。

今回地上雨量データを用いて確率規模評価を行ったが、空間解像度が5kmであった運用開始時からの解析雨量であれば、すでに25ヶ年分以上の蓄積がある。空間解像度を5kmにすることで、解析雨量のみでの確率規模評価を試みたい。

また今回は、流域内の河道の各地点でのピーク流量を指標として洪水リスク評価を行った。本研究の成果を浸水リスクの評価にまで発展させるには、氾濫解析と組み合わせる必要がある。氾濫解析を行い、市街地における浸水リスクを算定することで、より具体的なリスク評価につながると考えられる。

参考文献

- 1) 新保明彦：レーダー・アメダス解析雨量(Ⅰ)，天気，Vol.48, pp579-583, 2001.
- 2) 宝馨，小林健一郎：標本サイズと水文頻度解析，水工学論文集，第53巻，2009.
- 3) 財団法人国土技術センター：水文統計ユーティリティ Version 1.5 操作マニュアル
- 4) 佐藤嘉展：気候変動に対する先行適応のための流域スケールでの洪水および渇水リスク評価，京都大学防災研究所年報，Vol.52 B, pp573-586, 2009

(2014. 9. 30受付)