

レーダ雨量を用いたDAD解析と 集中豪雨の発生頻度分析

PROBABILITY EVALUATION OF SAMPLING OF LOCALIZED HEAVY RAIN EXTRACTED FROM RADAR PRECIPITATION

坂井広正¹・田中耕司¹・中北英一²・野稻誠³・宮本哲明⁴

Hiromasa SAKAI, Kohji TANAKA, Eiichi NAKAKITA, Makoto NOINE, Tetsuaki MIYAMOTO

¹正会員 修(工) (株)建設技術研究所 大阪本社 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1丁目6-7)

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非会員 山口県 土木建築部 長門土木建築事務所 (〒759-4101 山口県長門市深川1875-1)

⁴非会員 山口県 土木建築部 周南土木建築事務所 (〒745-0025 山口県周南市毛利町2丁目38)

Recently flooding damages in floodplain occur frequency by heavy rain. The feature of heavy rain is to occur anywhere and anytime. There make possible to arise heavy rain above designated one, such as occurring heavy rain in other basin. In this study, larger precipitation, which can obtain space-time distribution of rain fall area, had been used in order to sample precipitation in defined area. We estimated frequency analysis of heavy rain fall with hydrological statistics. Precipitation as return period 100-200years is accordance with maximum precipitation that are picked up in area. Moreover we supposed measure of flood risk management for excess flood.

Key Words : Radar precipitation, heavy rain fall, DAD, excess flood, frequency analysis

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨、梅雨前線、秋雨前線にともなう豪雨の発生により、浸水被害が頻発している。例えば、山口県で、平成21年7月の「中国・九州北部豪雨」で県央部や県西部の河川氾濫による浸水被害が発生した¹⁾。さらに、平成22年7月の豪雨では、県西部で被害が発生した²⁾。このような集中豪雨は、局所的な大気的不安定性や前線の南下等によって引き起こされ、流域を限定せずどこでも発生すると考えられる。

本研究で対象にした山口県は、河川の多くが $10^0\text{km}^2 \sim 10^1\text{km}^2$ の規模の中小河川であり、河川の整備計画規模が $1/5 \sim 1/30$ となっており、現状において、この整備水準をまだ達成していない。これらの中小河川における河川計画は、流域内で発生した集中豪雨や台風による豪雨を対象として計画されており、流域外で発生した豪雨は評価されていない³⁾。また、計画の立案に必要な雨量資料を有している河川も少なく⁴⁾、地域ごとに定められて

いる降雨強度式を用いて、基本高水流量を決定して、治水対策が実施されている。

前述のとおり、県内の中小河川の計画規模は $1/5 \sim 1/30$ であることから、整備目標を達成したとしても超過洪水により甚大な浸水被害が発生することは否定できない。さらに、整備目標が達成できていない現状や、今後整備が完了した後の治水対策として、避難や災害軽減・復旧といった日常・非日常の危機管理対応を考える必要がある。しかしながら、どのような洪水規模を設定するのかは、明確な定義があるわけではない。

計画規模を超える洪水の外力の設定として、最大降雨量に関する研究が従来から多く行われてきた。桑原⁵⁾は、日本全体を対象にして、地域区分とDAD解析から降雨量を算出しているが、降雨の発生要因を区別しているわけではないので、台風性を含めたものとなっている。一方で、谷岡⁶⁾は、都市域における治水計画の降雨外力を設定する方法として、降雨要因を考慮したDAD解析を行い、実績降雨を計画の検討対象降雨とすることを提案している。また、DAD解析におけるレーダ雨量の利

用という観点から、矢島等⁷⁾が大阪平野を対象にしたDAD解析を実施し、降雨場の形状とサンプリングの仕方によって降雨要因の特徴を把握できることを指摘している。

本研究では、山口県を対象として、どこでも起こり得る集中豪雨の特徴を考慮して、レーダ雨量から集中豪雨の降雨データを抽出・整理し、最大降雨量を算出した。抽出する際には、降雨継続時間、モデル流域を設定した。その標本からDAD解析を実施することにより、流域面積、降雨継続時間別の最大降雨量を算出した。さらに、これらの降雨量が発生する可能性として、水文統計解析を実施し、発生確率を評価した。この集中豪雨の発生確率を日頃のソフト対策や危機管理上の対応策への活用方法について提案した。

2. モデル流域での降雨のサンプリング

(1) 対象要因とモデル流域の形状

本研究では、雨域を面的に捉えられる表-1に示す期間の気象庁のレーダ解析雨量を用いて、集中豪雨に起因する降雨量を抽出した。本資料は、最小1km四方の雨量であり、最小単位の大きさでの30分雨量を抽出ができるものである。さらに、それぞれの降雨要因によって、雨域の形状が異なることから、降雨継続時間内の雨量を抽出するモデル流域として、正方形を採用した。

山口県内では、100km²以下の河川が全河川の90%を占めており、流域面積が1km²以下の河川が多い。なお、山口県内最大の河川である錦川の流域面積は885km²である。このような、山口県の管理河川の特性を考慮し、表-2に示す1～400km²の8ケースのモデル流域を設定した。

レーダ雨量データは、2003年以降は30分間隔、それ以前のデータは1時間間隔となっており、計算には、1時間雨量を使用した。集中豪雨の継続時間は短時間であるが、平成22年7月の洪水では、1日以上降雨が継続していた。このような状況を考慮して、降雨継続時間は表-2に示すように1～24時間までの8ケース設定した。

矢島等⁷⁾の指摘しているように、水蒸気の流れ込みや地形などを考慮した形状を設定する必要があると考えられるため、正方形以外に南北と東西に長い長方形についてもモデル流域として設定した。表-3には、長方形モデル流域の諸元を示している。長方形のモデル流域は、長辺と短辺の比が2:1を基本として、正方形の流域面積と近似できるケースを設定した。このケースの降雨継続時間は正方形の場合と同様である。

(2) サンプリング方法

降雨量の抽出範囲は、図-1に示すように山口県全域を対象とした。サンプリング方法は以下のとおりである。

- 図-1に示すように対象時刻ごとにモデル流域を1km単位に縦横方向に移動し、流域平均雨量が最大となる

雨量を抽出した。

- 上記の抽出を流域面積、降雨継続時間のケース毎に実施した。なお、出水期間中の5月～11月に発生した集中豪雨を対象にした。
- 台風経路図と降雨状況から台風に起因する豪雨は除外した。

表-1 レーダ雨量の観測期間とメッシュサイズ

観測期間	メッシュサイズ
1988年4月～2001年3月	5.0km四方
2001年4月～2005年12月	2.5km四方
2006年1月～2010年9月	1.0km四方

表-2 検討ケース（正方形）

流域面積	降雨継続時間
①1km×1km=1km ²	①1時間
②2km×2km=4km ²	②2時間
③3km×3km=9km ²	③3時間
④5km×5km=25km ²	④4時間
⑤7km×7km=49km ²	⑤5時間
⑥10km×10km=100km ²	⑥6時間
⑦15km×15km=225km ²	⑦12時間
⑧20km×20km=400km ²	⑧24時間

表-3 検討ケース（長方形）

縦長のケース	横長のケース
①2km×1km=2km ²	①1km×2km=2km ²
②4km×2km=8km ²	②2km×4km=8km ²
③7km×4km=28km ²	③3km×5km=15km ²
④10km×5km=50km ²	④4km×7km=28km ²
⑤15km×8km=120km ²	⑤5km×10km=50km ²
⑥20km×10km=200km ²	⑥10km×20km=200km ²

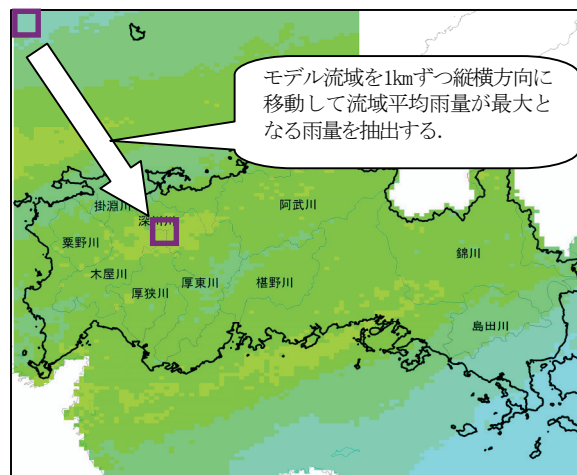


図-1 検討対象範囲とサンプリング方法イメージ

3. 集中豪雨の頻度分析

(1) 最大降雨量の算出

2001年以降の抽出した雨量を対象として、流域面積、降雨継続時間別の最大降雨量を算出した。なお、対象期間を2001年以降としたのは、表-1に示すようにメッシュ雨量の解像度が高いためである。

まず、正方形のモデル流域の最大降雨量の算出にあたっては、表-2に示すモデル流域に対する雨域を探索した。なお、流域の形状による影響を把握するために、長

方形流域と比較するために最大降雨量を算出した。図-2にその結果を示す。これによれば、本研究で対象としている流域面積が100km²程度の中小河川では、正方形のモデル流域と長方形のモデル流域で流域平均雨量に大きな違いがない。これにより、モデル流域として正方形を仮定しても問題がないと考えられる。

次に、モデル流域で算出された流域平均雨量データについて、DAD解析を実施した。DAD解析は一般に、最大面積雨量がその降雨継続時間、降雨面積とどのような関係を持つか調査すること、と理解されている。

ここでは、Shermanによって提案されたDD式と、もともとHortonにより提案された角屋・永井⁸⁾と桑原⁵⁾により修正されたDAD式を用いる。

$$P_0 = I \cdot t = a \cdot t^{1-c} \quad (1)$$

$$\hat{P}_a(A, t) = at^{1-c} \exp(-ut^{-v}(A - A_0)^n) \quad (2)$$

ここに、 $\hat{P}_a(A, t)$ は降雨の面積 A (km²)と継続時間 t (hour)を指定したときの最大面積雨量の推定値(mm)、 A_0 は $\hat{P}_a(A, t)$ が最大地点雨量 P_0 と等しくなる面積(km²)、 a, c, u, v, n は定数である。

定数 c は日本の最大地点雨量観測値の包絡線より0.532⁹⁾とし、 A_0 はグリッドセルのメッシュの面積1km×1km=1km²とした。 a は面積1km×1km=1km²の1時間雨量の最大値である100mmとした。なお、気象庁のアメダス観測所の下関、萩、山口の既往最大の1時間雨量は93mm/hrであり、今回のDAD解析で使用した最大降雨量は実現値として発生しうる降雨量であると考えられる。

上記の定数を固定したうえで重回帰分析により算出した結果は(3)式のとおりである。これによるDAD曲線を図-3に示す。

$$\hat{P}_a(A, t) = 100t^{0.468} \times \exp[-0.02735t^{0.009}(A - A_0)^{0.289}] \quad (3)$$

これによれば、24時間雨量のDAD曲線が実績値を大きく上回り、3時間、4時間、5時間、6時間、12時間雨量でDAD曲線が実績値を下回っている結果となっている。(3)式のDD式は地点雨量から算出されているが、本研究では、最大降雨量の抽出にレーダ雨量を使用し、集中豪雨のみを対象としている。前述の違いは、集中豪雨の雨域面積、降雨継続時間が影響していると推察される。

(2) 従来の水文統計解析に対する考察

最大雨域の探索より、集中豪雨による最大降雨量を算出した。これは流域に限定しない実績値である一方で、これを上回る降雨量が発生しないとは言えない。そこで、抽出した降雨データから水文統計的な解釈を加えることとした。

従来の治水計画に基づけば、流域内で発生した降雨のみを対象として水文統計解析が実施されている。さらに、観測データからリターンピリオド内に発生する降雨の確

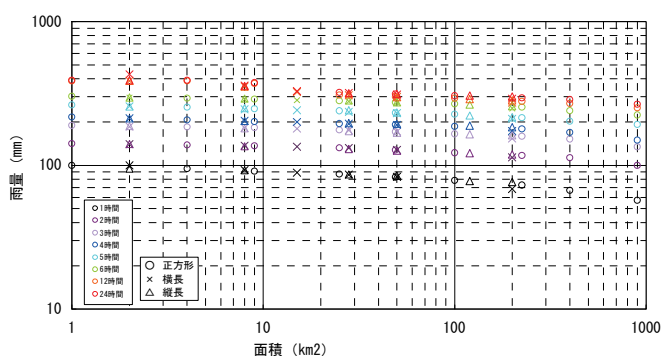


図-2 流域形状の違いにおける最大降雨量の比

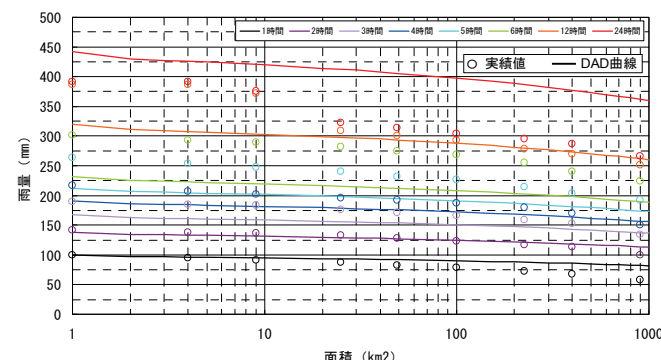


図-3 DAD解析結果

率を算出する。これにより、年超過確率に対する降雨規模が設定されている。

一方、中小河川では流域内に雨量観測がなく、水文データがない水系も多い。山口県内においてもダム等の治水施設がない水系については、県内を4地域に分割した降雨強度式からの基本高水流量が設定されている。

ここでは、DAD解析で最大降雨量が観測された流域を対象に、水文統計解析を実施した。図-4には、モデル流域において雨域を移動させずに抽出したデータに基づき解析した確率分布毎の適合度を示している。雨域を移動させない場合には、毎年値、非毎年値のいずれの解析でも適合度の評価基準¹⁰⁾ (SLSC>0.04)を満足していない結果となった。これは、図-5に示すように、第1位が第2位以下に比べて非常に大きな降雨量の場合、分布形の適合性が悪くなることを示している。一方、大きな降雨量が発生していない流域では、分布形の適合性が良いケースもあった。

次に、全降雨量データの毎年最大値を用いて、水文統計解析を実施した。図-5に示すように、雨域を移動しない場合と比較して、第2位以下の雨量が大きくなっており、確率分布の安定性が向上する結果となった。表-4には、本研究で対象としたケースにおける最も適合度の良い分布形とSLSCを示している。他のケースにおいても雨域を移動しない場合と比較して、確率分布の安定性が向上する結果となっている。その時の確率評価手法として、一般化極値分布とGumbel分布の安定性が高いことが分かった。

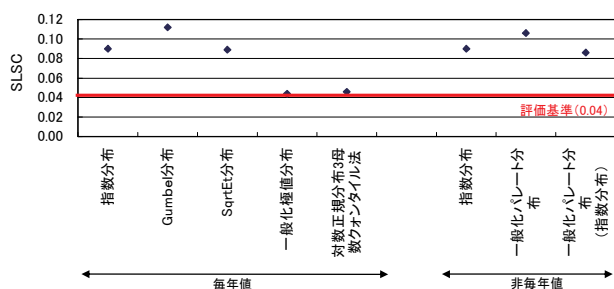


図-4 確率分布のSLSC (雨域移動なし：降雨継続時間3時間，5km×5km)

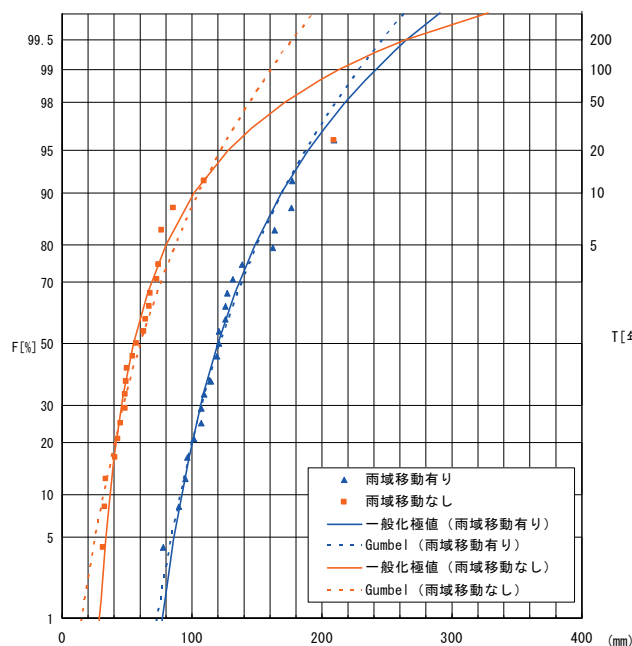


図-5 確率分布 (5km×5km, 降雨継続時間3時間)

表-4 毎年値によるSLSC (全ケース)

		メッシュサイズ (km)							
継続時間		1×1	2×2	3×3	5×5	7×7	10×10	15×15	20×20
	1h	0.032	0.042	0.027	0.037	0.020	0.029	0.036	0.028
	2h	0.040	0.044	0.026	0.022	0.034	0.027	0.033	0.032
	3h	0.022	0.023	0.035	0.030	0.019	0.022	0.023	0.033
	4h	0.042	0.035	0.038	0.028	0.032	0.028	0.025	0.029
	5h	0.026	0.027	0.036	0.035	0.038	0.031	0.037	0.039
	6h	0.030	0.032	0.034	0.026	0.028	0.023	0.030	0.031
	12h	0.026	0.030	0.022	0.038	0.032	0.027	0.022	0.023
	24h	0.021	0.024	0.014	0.033	0.029	0.029	0.025	0.024

斜体字：SLSC>0.04， ：Gumbel分布， ：一般化極値分布

(3) 集中豪雨の発生頻度

従来の水文統計解析では，リターンピリオドに対して発生する降雨量が算出される．レーダ雨量のデータの存在期間が23年と短く，単純な最大降雨量の発生確率は1/23となる．集中豪雨は年に複数回発生して，大きな降雨量が年に数回生じている場合もある．上記の点を考慮すると，年極値による従来の水文統計での評価は難しいと考えられる．そこで，データの存在期間内において降雨量の発生した頻度を水文統計的に取り扱った．

ここでは，大雨洪水警報発令基準¹⁾や山口県の河川計画を参考にして，1時間雨量50mm，2時間雨量70mmを上回る降雨の発生頻度を抽出した．山口県内の流域面積と洪水到達時間の関係から1km×1kmと3km×3km，

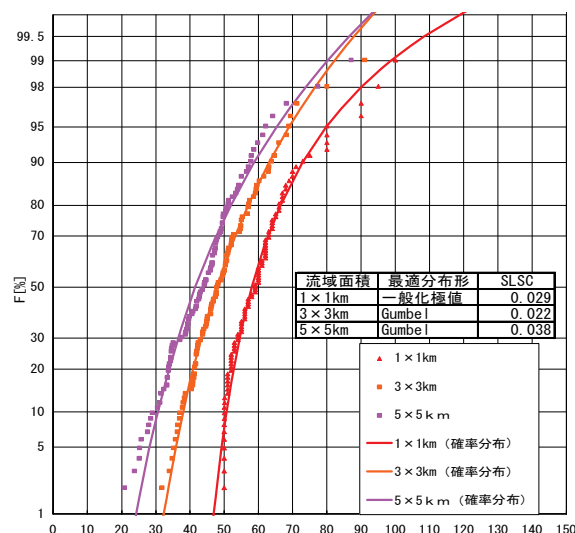


図-6 集中豪雨の発生頻度分布

5km×5kmは1時間雨量，7km×7km，10km×10kmのケースは2時間雨量で評価した．

抽出期間は，レーダ雨量のメッシュサイズが1×1kmとなった2006年以降の5年間とした．この期間で1km×1kmで101回，10km×10kmでは19回基準を上回るケースが発生している．他のケースでも年に複数回の計画規模を上回る降雨量が発生していることが確認され，年極値での評価が難しいことが分かった．

発生した降雨量に対する非超過確率をプロットングポジションにより算出した．図-6に示すように，確率統計解析を実施した結果，適合度は良好であった．

以上のことから，集中豪雨の発生頻度を評価する方法としては，従来の水文統計解析で実施されている年極値で発生する確率を評価する方法より，リターンピリオドを考慮しない非毎年による発生頻度で評価する方法が適していると考えられる．

4. 治水計画を上回る洪水対策

(1) 集中豪雨の発生頻度と治水計画の比較

前項で抽出した降雨データに対して，一般化極値分布あるいはGumbel分布を適用することにより，発生頻度を評価できることが分かった．この抽出したデータをリサンプリングすることにより，発生確率の推定値と推定誤差の評価が可能と考えられる．本研究では，モデル流域における様々な降雨継続時間内の降雨量を算出した．ここでは，これらのデータから，モデル流域の降雨継続時間内の計算結果を使用し，発生頻度を評価した．ここでの検討における降雨継続時間は洪水到達時間と見なし，1km×1km，3km×3km，および5km×5kmは1時間，7km×7km，10km×10kmのケースは2時間とした．

まず，一般化極値分布もしくはGumbel分布による確

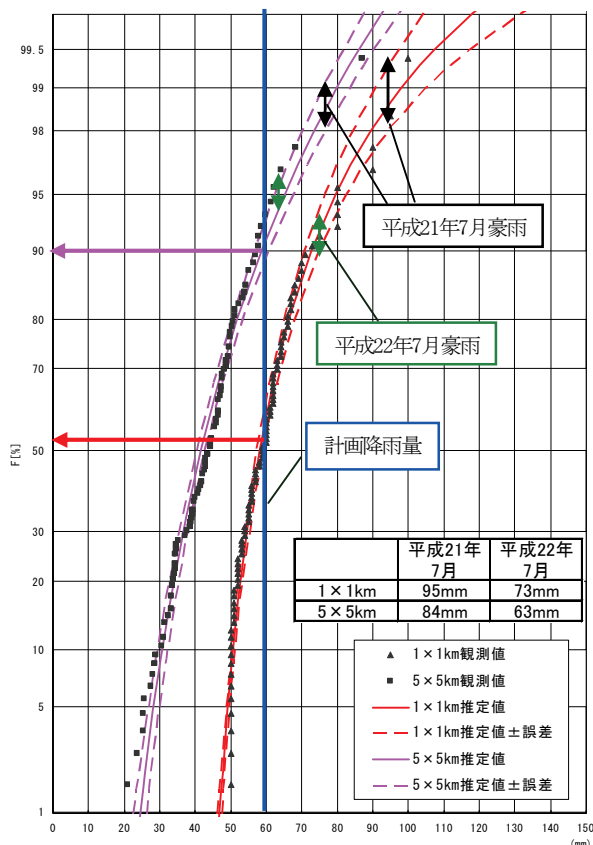


図-7 集中豪雨の発生頻度と計画降雨量・既往出水との比較

率評価による最適分布形を選定したうえで、bootstrap法¹²⁾によるリサンプリングを行い、各モデル流域と洪水到達時間における推定誤差を算出した。図-7には1×1kmと5×5kmの結果を示す。これによれば、1×1kmでは1時間雨量60mm程度、5×5kmでは40mm程度が50%の確率値となっている。

次に、近年発生した平成21年7月洪水と平成22年7月洪水をもたらした降雨量の発生頻度を評価するために、上記モデル流域と降雨継続時間における最大降雨量と図-7で算出された頻度分布を比較した。

その結果、平成21年7月降雨は、1×1kmでは0.5%～2%、5×5kmでは0.5%～1%の確率で発生する降雨である。同様に、平成22年7月降雨の発生確率は、1×1kmでは8%～12%、5×5kmでは5%～8%に位置付けられる。最近の大きい降雨の発生頻度は低いことが分かった。

さて、中小河川の基本高水流量は合理式で算出されているが、合理式に適用される計画降雨量は、洪水到達時間内の降雨強度式より算出することができる。

計画規模を上回る洪水の発生頻度を評価するために、計画降雨量と頻度分布を比較した。山口県の1/10の確率雨量は、1時間雨量で約60mmとなっている。この降雨の発生頻度は、1×1kmでは45%、5×5kmの流域では、10%の確率で発生することが分かる。流域が小さい場合には、高頻度で発生する可能性がある。

さらに、平成21年7月洪水と平成22年7月洪水以外にも計画降雨量を上回る降雨量は複数回発生しており、超

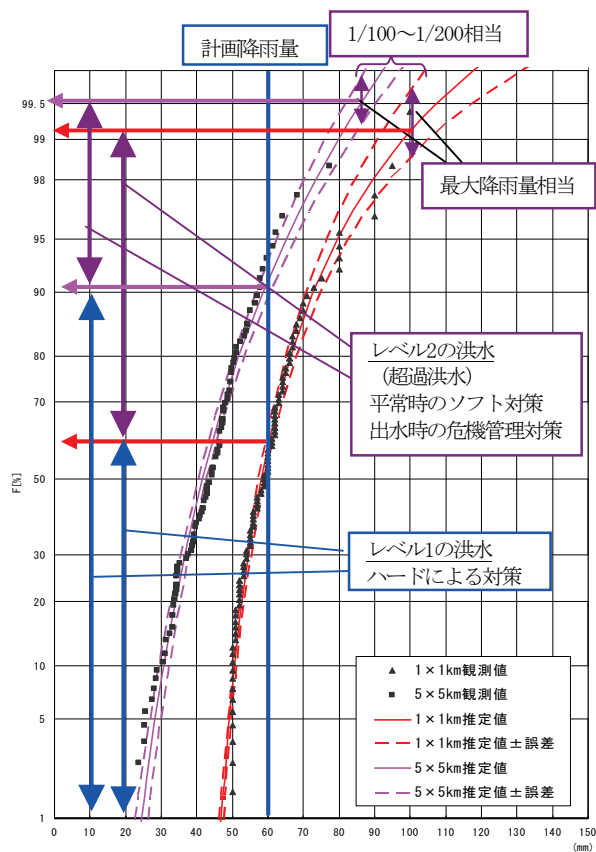


図-8 発生頻度に着目した洪水発生危険度評価

過洪水対策が必要であると考えられる。

(2) 超過洪水対策

上記のとおり、頻度分布と計画降雨量、既往洪水と比較することにより、計画降雨量を上回る降雨量が実際に複数回発生することが明らかとなった。

ここでは、治水計画を下回る洪水をレベル1、上回る洪水をレベル2と分類して超過洪水対策の方法を提案する。図-8には、頻度分布に対してレベル1とレベル2による洪水対策の考え方を示している。

県内の中小河川では、合理式により治水計画が進められ、河川改修規模が決められる。河川改修が完了した場合には、計画降雨量を下回る雨量では、浸水被害が発生しない。このことから、施設対策の限界は計画降雨量となる。

治水計画を上回る超過洪水（レベル2の洪水）が発生した場合には、浸水被害が発生し、人的被害も生じる可能性がある。しかし、現状の中小河川の計画では、どの程度の降雨量を外力として浸水被害を想定すれば良いかわからない現状にある。

そこで、DAD解析で算出された実績最大降雨量を想定外力として設定した場合を考える。1×1kmのケースの最大降雨量100mm/hrの発生頻度は、0.5%～1.5%、5×5kmのケースの最大降雨量87mm/hrの発生頻度は0.5%～1%となっている。山口県の降雨強度式では、地域により差はあるものの、1時間雨量の1/100確率の降雨量が

80mm～90mm、1/200確率の降雨量が85mm～100mmとなっている。この結果から、実績最大降雨量は降雨強度式における1/100～1/200に相当している。

なお、山口県の降雨強度式は、広瀬、防府、山口の3観測所における平成13年までの雨量データから作成されたものである。一方、今回、最大雨域の探索で抽出した最大降雨量は、平成13年から平成22年までのデータを扱っている。このことから、最大規模が非常に近い値を示したことは、1/100～1/200程度の降雨量は、実際に起こる可能性があることを示唆しているものと考えられる。

したがって、最大雨域の探索で抽出した最大降雨量をレベル2における想定外力の上限値として設定可能であると考えられる。

この想定されるレベル2の洪水に対して、中小河川では洪水到達時間が短く、急激に水位が上昇することが想定され、いかに避難に要する時間を確保するかが重要である。そのために、本研究の頻度分布の検討結果を活用した平常時からの備えとリアルタイムでの情報提供の方法を以下のように提案する。

平常時には流域で計画規模を上回る洪水の発生する確率がどれくらいあるのか、レベル2の洪水が発生した場合の想定される浸水範囲、それにより人的被害の発生する箇所等を予め把握しておくことが危機管理上重要な意味を持つと考えられる。

実際の出水時には、中小河川では、前述のとおり急激に水位が上昇することが想定されることから、迅速な避難が重要である。メッシュ雨量から算出される流域平均雨量と頻度分布を組み合わせることにより、洪水発生の確率を評価することが可能であると考えられる。ここでは、想定される降雨量と超過洪水の発生確率から、計画規模の発生確率の差分を取ることで、計画規模を上回る洪水の発生確率による情報伝達方法を提案する。例えば、計画降雨量60mmに対して実績最大雨量と同等の雨量が予測される場合には、計画降雨量の発生頻度と最大降雨量の発生頻度の差分から、1×1kmの流域では、氾濫発生確率45%、5×5kmの流域では同19%という降水確率と似たような情報伝達内容となる。

現状では、気象庁からメッシュ雨量データとして、10分間隔に1時間先までの予測雨量、30分間隔に6時間先までの予測雨量が配信されている。また、都市部では、XRAINというメッシュ解像度の高い降雨量を用いることができる。実績のメッシュ雨量と上記の予測雨量から流域で想定される降雨量は把握可能であり、リアルタイムの注意喚起に活用できると考えられる。

5. まとめ

(2013. 4. 4受付)

本研究で得られた成果を以下のように要約する。

- ・レーダ雨量を用いて、流域面積、降雨継続時間に対す

る最大降雨量を抽出し、DAD解析を実施した。モデル流域として正方形を使ったが、形状の違いによる最大降雨量への影響はなかった。

- ・集中豪雨の特徴を考慮して、雨量の抽出範囲を拡大して、従来の水文統計解析を適用する場合、Gumbel分布と一般化極値分布の安定性が良いことが分かった。
- ・局地的な集中豪雨は、年に複数回発生していることから、発生頻度により評価する方法を提案した。
- ・最大降雨量は、現行の河川整備水準や計画規模を上回り、超過洪水の外力の一つとして適用できるものと考えられる。
- ・山口県内で発生した集中豪雨の最大降雨量は、現行の降雨強度式における確率規模の1/100～1/200と非常に近い値を示した。
- ・発生頻度による確率評価により、河川整備規模を上回る洪水に対する対策として、平常時における実績最大降雨量を用いたリスク把握と出水時における情報提供方法について提案した。

参考文献

- 1) 災害記録～平成21年7月21日豪雨災害～、山口県、2009. 10.
- 2) 災害記録～平成22年7月15日豪雨災害～、山口県、2010. 10.
- 3) 中小河川計画検討会編：中小河川計画の手引き（案）、（財）国土開発技術研究センター、pp. 21-75、1999. 9.
- 4) 涌川勝己、末次忠司：中小河川における計画論及び実効的な減災対策、河川技術論文集、第11巻、pp. A-4-1～A-4-11、2005. 6.
- 5) 桑原英夫：日本における最大級豪雨の時空間的集中特性に関する実証的研究、東京大学学位論文、1988. 2.
- 6) 谷岡康・福岡捷二：都市域の治水計画における降雨外力について、河川技術論文集、第10巻、2004. 6.
- 7) 矢島啓・池淵周一：降雨成因を考慮した降雨の時空間分布特性の統計的解析、京都大学防災年報、第37号、B-2、pp. 267～280、1994
- 8) 角屋睦・永井明博：洪水比流量曲線へのアプローチ、京都大学防災年報、第22号、B-2、pp. 195～208
- 9) 寶肇：異常降雨記録、水文・水資源ハンドブック、水文・水資源学会（編集）、第7章、水文リスク解析、p. 230
- 10) 宝馨、高埴琢磨：水文頻度解析における確率分布モデルの評価基準、土木学会論文集、第393号／Ⅱ-9、pp. 151-160、1988
- 11) 警報・注意報発表基準一覧表（山口県）、気象庁
- 12) 宝馨：大標本時代の水文統計解析手法ーリターンピリオドを超えるようなサイズの標本に対する極値データ解析ー、京都大学防災年報、第49号B、pp. 7～22、2006