

河川におけるDAD特性を考慮したPMP (可能最大降雨量)の算定に関する研究

A Study on calculation of Probable Maximum Precipitation (PMP)
by taking into account of Depth-Area-Duration (DAD) characteristics of
rainfalls

湧川勝己¹・荒川英誠²・柳澤修³・岡部真人³・竹島雄介⁴

Katsumi WAKIGAWA, Hidenobu ARAKAWA, Osamu YANAGISAWA, Masato OKABE,
Yusuke TAKESHIMA

¹正会員 工博 (一財) 国土技術研究センター情報・企画部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

²正会員 工修 (株) ニュージェック中部支店 (〒450-0002 愛知県名古屋市中村区名駅5-27-13)

³正会員 工修 (一財) 国土技術研究センター河川政策グループ (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

⁴工学 (一財) 国土技術研究センター河川政策グループ (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

In this study based on the scientific knowledge of today and observation data, Probable Maximum Precipitation (PMP) was investigated by taking into account of Depth-Area-Duration (i.e., the amount of rainfall – area – rainfall duration) characteristics of rainfall eventually flown into rivers. The Japanese Islands were divided into 15 regions on the basis of similarity of rainfall characteristics with reference to existing division of region and by implementing cluster analyses after the indexes showing characteristics of intensive rainfalls were reorganized and coordinated. Subsequently, trial calculations to obtain the maximum possible level of rainfall by region, by fixed area and by rainfall duration were made.

Key Words : *rainfall characteristics, division of region, rainfall analysis, cluster analysis, DAD (Depth-Area-Duration) analysis*

1. はじめに

近年、全国各地で既往最大を更新する豪雨が頻発する等、現況の安全度を上回る外力がますます頻繁に発生し、激甚な外力の発生が危惧されている。このような背景の下、激甚な豪雨への備えとして、地震、津波と同様に、河川分野においても現在の科学的知見と観測データに基づき、想定しうる最大の外力（以下、「可能最大降雨量」と呼ぶ。）の設定が求められており、本研究は全国を対象にこれを試みたものである。

我が国は、東西南北に広い上、脊梁山脈など地形特性もあることから、地域ごとに降雨特性が異なる。桑原¹⁾による先行研究においても、日本全域と地域区分した場合のDD (Depth Duration: 降雨量, 降雨継続時間) 特性の違いが示されている。このため、まず全国を降雨特性の類似する地域に区分することとした。

検討にあたっては、世界気象機関 (WMO : World

Meteorological Organization) による可能最大降雨量の推定方法²⁾としても紹介されているDAD(Depth-Area-Duration)解析により、地域ごとに継続時間別の面積降雨量の最大値を分析した。

任意の面積別、降雨継続時間別の可能最大外力を設定する方法として、DAD解析で得られた面積降雨量の最大値を包絡する、地域別のDAD式を作成した。

2. 地域区分の設定

(1) 既往の地域区分

気象現象に関する地域区分については、関口による地域区分³⁾、前島による地域区分⁴⁾など、様々な地域区分が提案されているが、必ずしも定まった方法論があるわけではない。これらの区分は降水量の他、気温や月別の降水量などを指標としており、洪水流量に関与する短時間（数時間～数日）の豪雨量に着目したものではない。ま

た、現在の治水計画で運用されている地域区分として、クリーガー式の地域区分⁵⁾が知られている。これは1976年までの実績洪水比流量を基に地域を区分したものであるが、洪水流出特性と降雨特性は異なること、策定から時間が経っていることなど、唯一の方法ではない。このため、河川の流域界を踏まえ、気象現象に関する既往の地域区分の事例を参考にするとともに、豪雨特性を表す指標を整理した上で、客観的に分析できるように数値的な分析を行い設定することとした。

(2) クラスタ分析

豪雨の地域特性は、主に継続時間別の雨量の大きさや、その発生頻度という形で表され则认为、これらの特性を全国的に一定の様式、精度で整理されている気象庁アメダスデータを用い、分析するものとした。

全国のアメダス観測地点の中で、豪雨特性が類似するものを分類する方法として、多変量解析の1つであるクラスタ分析を行うものとした。クラスタ分析は、類似するものを集めて集落（クラスター）をつくり、分類しようとするもので、分析手法は大きく階層的方法と非階層的方法に別れ、それぞれ種々の分析方法が提案されているが、本研究では、クラスターの形成状態を樹形図の形で確認できる階層的方法を用い、階層的方法の中でも安定した解が得られ、比較的良好に用いられているウォード法による。ウォード法はクラスター内の平方和が最小となるようにまとめる方法である。

分析の指標は、降雨量の大きさとその頻度を表す指標として、アメダス各地点における1976～2010年（35年）の継続時間別年最大雨量の平均とその分散及び、地域ごとに異なるDD特性に着目し、表-1に示すものを設定し、このうち表-2に示す決定係数 R^2 について、強い相関があるといわれる0.5以上のものを除き、“DD係数比”，“年最大24時間雨量の平均”，“年最大3時間雨量の平均／標準偏差”，“年最大48時間雨量の平均／標準偏差”の4つの指標を用いることとした。

DD係数比とは、関係を表すDD図において、1～24時間最大雨量の傾きと24～72時間最大雨量の傾きの比を表した指標で、図-1のように長時間雨量が頭打ちとなる傾向など継続時間ごとの特性を表すものである。

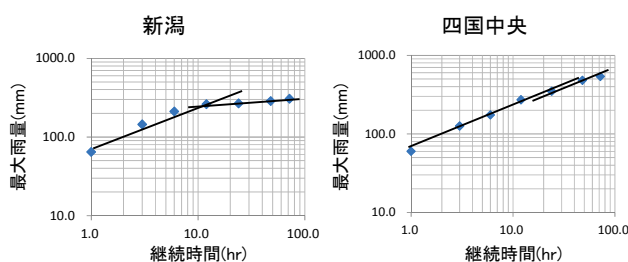


図-1 DD係数の継続時間による相違

クラスタ分析により豪雨特性として全国のアメダス地点を10のクラスターに分類した。クラスターの分布及

び樹形図を図-2に示す。

表-1 指標一覧

指標	内容
DD係数比	1～24時間の最大降雨量近似曲線の傾き／24～72時間の最大降雨量近似曲線の傾き
年最大3時間降雨量の平均 (3av)	降雨継続時間別の降雨量の大きさ
年最大24時間降雨量の平均 (24av)	
年最大48時間降雨量の平均 (48av)	
年最大3時間降雨量の平均／標準偏差 (3av/sig)	年最大降雨量の平均／標準偏差（年最大降雨量の分布を表す指標として、観測地点ごとの年最大降雨量の標準偏差を用い、年最大降雨量の平均と標準偏差を合成したもの）
年最大24時間降雨量の平均／標準偏差 (24av/sig)	
年最大48時間降雨量の平均／標準偏差 (48av/sig)	

表-2 指標間の決定係数 R^2

	DD係数比	3av	24av	48av	3av/sig	24av/sig	48av/sig
DD係数比	—	0	0	0	0.001	0.005	0
3av	0	—	0.905	0.897	0.281	0.179	0.13
24av	0	0.905	—	0.989	0.253	0.147	0.107
48av	0	0.897	0.989	—	0.262	0.154	0.117
3av/sig	0.001	0.281	0.253	0.262	—	0.429	0.302
24av/sig	0.005	0.179	0.147	0.154	0.429	—	0.771
48av/sig	0	0.13	0.107	0.117	0.302	0.771	—

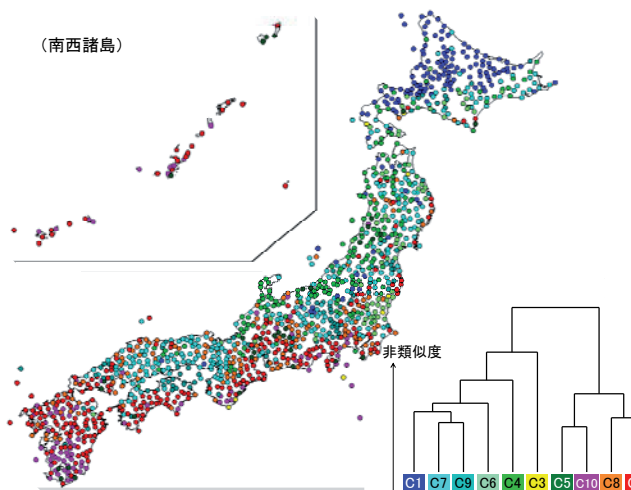


図-2 クラスタ分析の結果

クラスタ分析によって10に分類したそれぞれの降雨特性を理解するため、クラスターの分布を2つの指標間の関係図として整理し、図-3に示す。

C1群(青色)は、24av、3av/sigがともに比較的小さく、雨量が小さくかつ稀に降る大雨のためバラツキが大きい、小雨量の地域で、北海道北部に多い。C10群(桃色)は、24av、3av/sigがともに比較的大きいことから、雨量が多く、短時間雨量のバラツキが小さい地域で、前線など毎年のように短時間の大雨に見まわれる九州南西部に多く見られる。C2群(赤色)は、24avは大きい、3av/sig、48av/sigは比較的小さく、関東以西の太平洋沿岸から中国地方西部に多く、東北や北海道南部沿岸にも散見される。多雨地域であるが発生頻度にバラツキがある、台風

等の影響を受けやすい地点と推測される。C5群(緑色)は、48av/sigが大きく長時間雨量のバラツキが少ない地点といえるが、数は少なくC2群と類似した地域に分布している。C9群(藍色)は、C1群より24avが大きく、3av/sig、48av/sigは小さい地域で瀬戸内や本州内陸部などに見られる。C7群(水色)は、C9群よりややバラツキの小さい地点で関東以西の太平洋沿いを除く、中国地方から北海道に分布している。C4群(緑色)は、24av、3av/sigが比較的小さいが、48av/sigは比較的大きく北陸から東北日本海側に広く分布している。豪雨要因に台風の影響が少なく、梅雨前線など概ね24時間程度の継続時間となる地域と推測される。C3、C6はDD係数が大きい地点で、24時間以下の雨量増加割合が大きく、かつ24時間以上で雨量が頭打ちになるような地点である。数は少ないが関東以北の太平洋側に比較的多く分布している。台風や前線など豪雨要因の影響を受けず、台風通過時も速度が速いため長時間降雨にならないような地域ではないかと推察される。

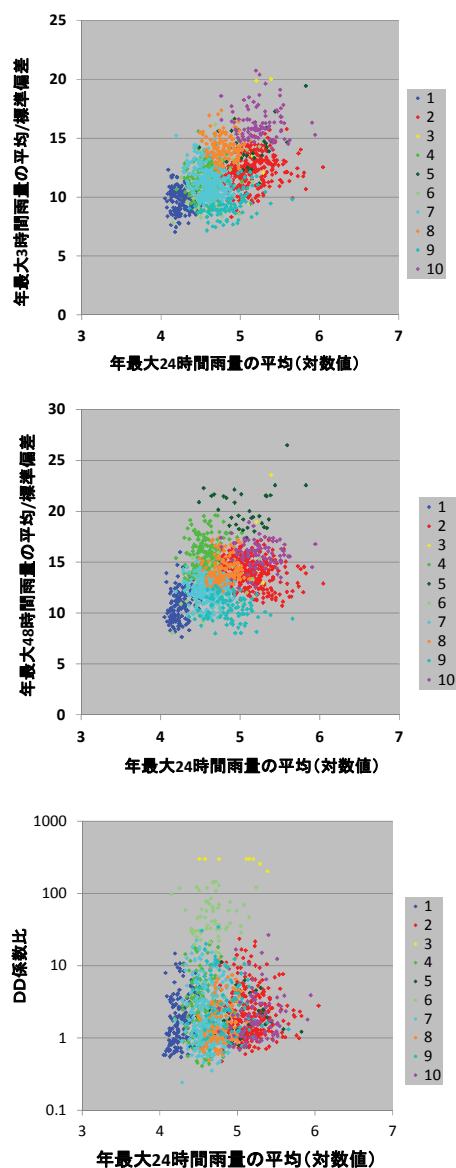


図-3 クラスターの分布

(3) 地域区分の設定及び妥当性検証

クラスター分析では、アメダス各地点を分類したが、一義的には地域を区分できない。本研究では、既往の地域区分のうち治水計画で採用されているクリーガー曲線の地域区分(以下、「クリーガー区分」と呼ぶ。)をベースに、クラスター分析と他の気候区分を照らして、一部を変更するという手順で設定した。具体的には図-4に示すように、クラスター分析結果に既往の地域区分を重ね合わせ、クリーガー区分がクラスター分析結果や他の地域区分と異なると思われる地域を抽出し、検証するものとした。抽出した箇所は、河川の流域界も考慮しつつ、6地域14箇所である。

抽出した地域を、隣接するどちらの地域に含めることが妥当かについて、「Mann-WhitneyのU検定」により検証した。この検定は、2つの集団の比較において、「それらが同じ母集団である」とする帰無仮説に基づき検定するノンパラメトリックな検定手法であり、一方が他方より大きいあるいは小さい傾向を示す場合、帰無仮説は棄却され、同じ母集団とはいえないと判断される。

ここでは検証地域内のアメダス各地点の継続時間別最大雨量を標本とし、有意水準5%で検定した。例えば北海道の北部と南部の分類を検定する場合、北部地域と南部地域の各アメダス地点の継続時間別雨量を標本として、表-3に示すp値が5%(0.05)未満であるとき、2つの地域は異なると見なし、その時間帯が多い地域は区分するものとした。なお、表-3において北海道南部の東部と西部は3つの時間帯で0.05未満であるが、甚大な被害の生じるような12時間以上の降雨では0.05以上であることから区分しないこととした。

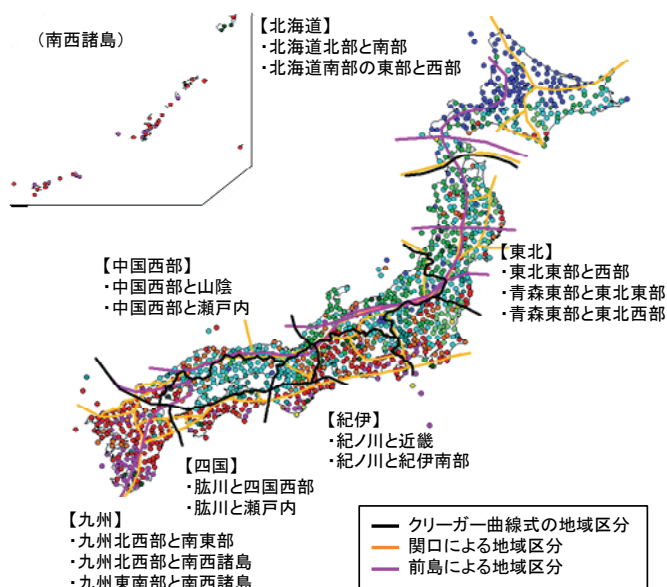


図-4 クラスター分析結果と既往の地域区分の重ね合わせ

以上の結果を踏まえ、流域界と豪雨特性を考慮した地域区分として、全国を図-5に示す15の地域(北海道北部、

北海道南部、東北西部、東北東部、関東、北陸、中部、近畿、紀伊南部、山陰、瀬戸内、中国西部、四国南部、九州北西部、九州南東部) に区分した。

表-3 Mann-WhitneyのU検定の結果 (p値)

地域	比較するグループ	3h	6h	12h	24h	48h	検定結果
北海道	北海道北部と南部	0	0	0	0	0.052	差がある
	北海道南部の東部と西部	差有	差有	差有	差有	差有	差がある時間帯は限定的である
	東北東部と西部	0.005	0	0	0	0	差がある
東北	青森東部と東北東部	0.044	0.037	0.012	0.004	0.001	差がある
	青森東部と東北西部	0.991	0.633	0.229	0.07	0.562	差があるとは言えない
	紀ノ川と近畿	0.482	0.166	0.297	0.624	0.092	差があるとは言えない
紀伊	紀ノ川と紀伊南部	0.003	0.005	0.01	0.012	0.024	差がある
	山陰と中国西部	0	0	0	0	0	差がある
	瀬戸内と中国西部	差有	差有	差有	差有	差有	差がある
中国西部	徳川と四国西部	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	差がある
	徳川と瀬戸内	0.517	0.349	0.373	0.445	0.728	差があるとは言えない
	九州北西部と南東部	0.039	0	0	0	0	差がある
九州	九州北西部と南西諸島	0.02	0.412	0.7	0.229	0.784	差があるとは言えない
	九州南東部と南西諸島	0.281	0.237	0.004	0	0	差がある



図-5 降雨の特性を考慮した地域区分

3. 観測された降雨データの解析

(1) 対象とする降雨のデータ

想定最大外力の設定にあたり用いる降雨データについては、全国各地に時間雨量の計測が可能な観測所が一定程度整備された昭和30年代前半以降のものを対象とした。このうち、昭和63年以降については気象庁編集の「解析雨量」（レーダ観測雨量をアメダス等地点雨量により補正した雨量）を用いた。なお、レーダ観測雨量は、その作成時期により空間分解能が異なること（約1km四方～約5km四方）。また、細かな空間分解能のデータで日

本全国といった広域の解析を行う場合には膨大な時間を要する。このため、本研究においては約5km四方(緯度0.05度、経度0.0625度 28～33km²)のサイズに統一することとし、解析の対象とする降雨データは、アメダスデータで日雨量100mm以上を記録した降雨日のものとした。

また、昭和62年以前については、主な洪水日の降雨量を用いることとした。なお、主な洪水日とは、気象庁の気象観測所における日雨量の上位5位までの降雨日、及び1級水系（109水系）の河川整備基本方針等に記載されている主要な洪水のうち、降雨量または洪水流量が最大となっている降雨日を対象とした。降雨データについては、気象庁及び国土交通省水管理・国土保全局の観測所のものを用いた。なお、観測所の降雨データは地点雨量であるため、レーダ雨量と同じく約5km四方のサイズのものに曲率最小化法により変換して解析した。

(2) 面積別の降雨量の解析

面積別の降雨量については、面積ごとの平均降雨量（以下、「面積雨量」という。）として解析を行った。面積雨量の最大値については、これまで我が国で実施された手法⁶⁾やWMOが示すマニュアル⁷⁾より、表-4に示すFEM(変形面積法：Flexible Elements Method)、CAM(面積固定法：Constant Area Method)、FRM(雨量固定法：Fixed Rainfall Method)を比較した。

表-4 面積雨量算定手法の概要

解析手法	特徴
FEM	雨量の最大値を追跡して連続する任意形状に雨域を設定し、面積雨量を算定
CAM	対象区域内で同心円状に一定形状を隈なく移動させ、最大となる面積雨量を算定
FRM	雨量閾値以上の雨域を集約して面積雨量を算定

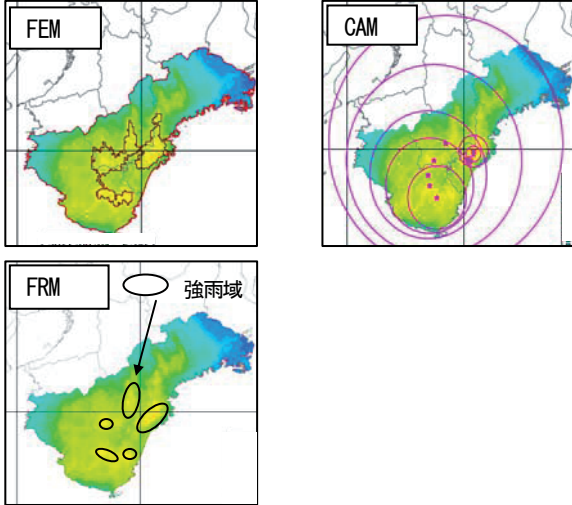


図-6 DA解析手法の参考図

FEM, CAM, FRMにより算出される面積雨量を比較

すると、FRMによるものが最も大きく、CAMによるものが最も小さくなる。FRMは集計面積を広範に取る場合に全く別の雨域を評価に加えてしまう可能性があることから用いないこととした。

また、FEMは、降雨量の最大値を追跡して雨域を設定し面積雨量を算定する手法であり、WMOが示すマニュアルにも記載されていることや、他の手法と比べてより厳密に一つの雨域の降雨量の最大値を評価できる手法と考えられるため、これを用いることとした。

FEMにおける具体的な最大雨域の探索方法は図-7のようである。メッシュ毎の継続時間別雨量をあらかじめ時系列で集計した上で、対象となる水文区域内で最大となる雨域を逐次探索していき、指定の面積となる最大雨域の面積及び平均雨量を求める。

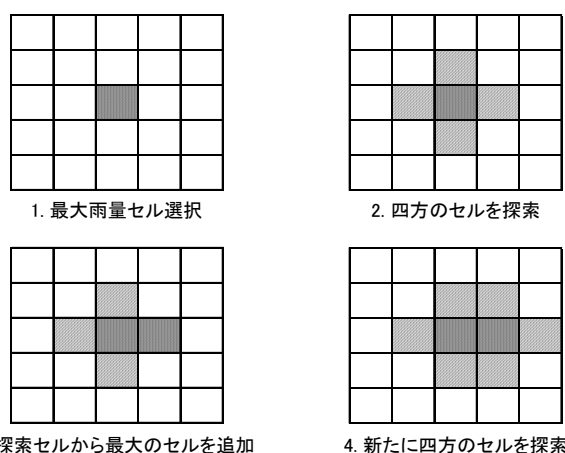


図-7 FEMによる最大雨域の探索概念図

(3) 面積雨量～降雨継続時間～面積の整理

FEMにより、上記(1)で対象とした15地域区分ごとの降雨日について、それぞれ降雨継続時間別（1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 72時間）に、区分した地域面積を上限とした面積別（1, 2, 4, 8, 16, ..., 256, 512, 1024メッシュ）に解析した。

4. 地域別最大降雨量のDAD式による表現

(1) 地域別DAD式の作成

世界気象機関（WMO）による可能最大降雨量の推定方法としても紹介^{3), 7)}されているDAD解析により、地域ごとに継続時間別の面積降雨量の最大値を分析した。

降雨継続時間及び流域面積に対する想定最大外力の設定にあたっては、先行研究である桑原¹⁾によるDAD式を参考に、実績最大雨量を包絡するDAD式の係数を設定するものとした。

桑原は、DA関係が降雨時間や降雨の規模によって変化することから、Horton型の式中の係数を時間の関数で表し、豪雨中心雨量を表すDD式（Sherman型： $kt^{0.5}$ ）と組み合わせ、以下の式形を「Horton型DAD

式」として提案している。また、このDAD式を用いて自身の調査した最大面積雨量を定式化している。

$$Pa = k \cdot t^{0.5} \cdot \exp(-u \cdot t^v \cdot A^n) \quad (1)$$

t : 降雨継続時間 k, n, u, v : 定数

豪雨中心の雨量を表すDD式について、桑原の示した2変数のShaman型DD式では、図-8のように傾きが一樣となるため、実績最大雨量を大きく上回ることがある。これは、現時点でまだその大雨が発生していないという可能性もあるが、本研究では、実績最大雨量に準ずることを重視し、式(2)のようにDD式として降雨強度式に一般的に用いられている3定数型を用いることで、豪雨中心の継続時間別最大雨量を実態に則した形とした。

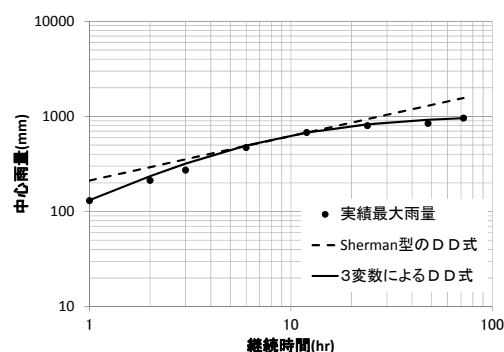


図-8 DD関係（中部地域の例）

$$Pa = \frac{a \cdot t}{t^c + b} \cdot \exp(-u \cdot t^v \cdot (A - a_0)^n) \quad (2)$$

DD式 DA式

Pa : 雨量 t : 降雨継続時間 A : 流域面積
 a, b, c, n, u, v : 定数 a_0 : 豪雨中心面積(=50km²)

DAD式の係数の算定は、まずDD係数を定め、次にDA係数を定めた。求められる雨量を可能最大と必要があるため、係数は最小2乗法などによる実績の近似解ではなく、包絡する係数とする必要があると考えたが、DD式、DA式それぞれ3種類の定数を解析的に求めることが困難であったため、定数を表-4の範囲で変化させ、式(3)で求められる推算雨量と実績雨量の誤差合計が最小となる係数を選定した。

$$err = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^9 \left(\frac{\text{推算面積雨量}}{\text{実績面積雨量}} - 1.0 \right) \quad (3)$$

また、最小面積 a_0 については、DAD解析に使用した雨量データが約5kmメッシュ(28~33km²)のため、それ以上とする必要があり、一級河川の貯留関数法などの流出モデルにおける分割流域の平均が概ね50km²程度であること、地上雨量計の配置目安が観測精度確保のためには50km²に1箇所とされていることから、豪雨

スケールの最小単位として 50km² とした。

表-4 DAD 式の係数試算範囲

式	定数	試算範囲	試算刻み
DD	a	0.01~2.00	0.01
	b	0.00~20.0	0.1
	c	1~3000	1
DA	u	0.001~0.500	0.001
	v	-1.000~-0.002	0.002
	n	0.30~1.00	0.1

このようにして求められた地域別の可能最大降雨量を表すDAD式の係数を表-5に示し、既往の実績最大降雨量と重ね合わせた例を図-9に示す。

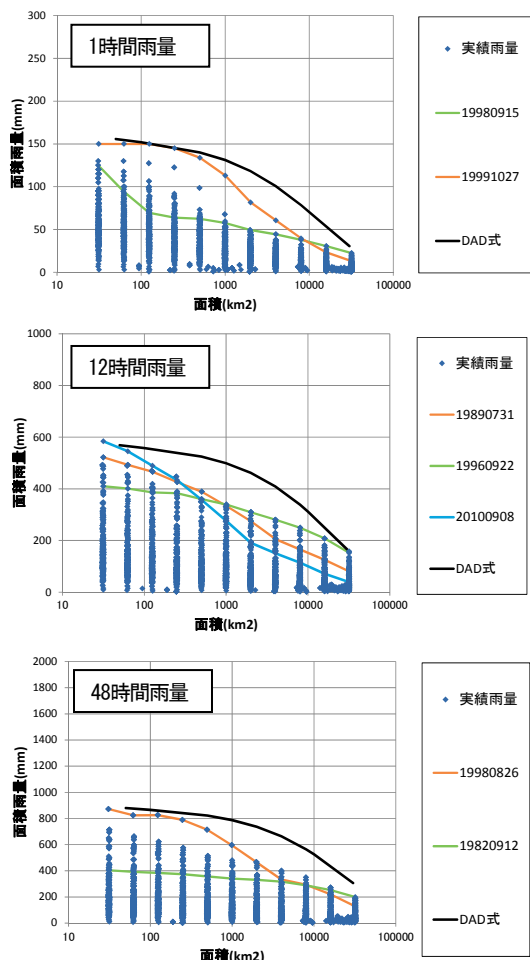


図-9 DAD式による実績雨量の包絡線（関東の例）

表-5 DAD式の地域別係数の算定結果

	a	b	nc	u	v	n
北海道北部	817	7.2	1.06	0.035	-0.208	0.40
北海道南部	380	2.6	0.88	0.029	-0.120	0.40
東北西部	218	0.5	0.72	0.007	-0.028	0.53
東北東部	771	5.7	0.91	0.034	-0.084	0.40
関東	405	1.6	0.78	0.002	-0.112	0.65
北陸	194	0.5	0.53	0.011	-0.036	0.49
中部	1131	7.7	1.01	0.005	-0.108	0.56
近畿	1357	10.7	0.95	0.024	-0.032	0.43
紀伊南部	512	3.0	0.69	0.019	-0.332	0.46
山陰	143	0.1	0.54	0.002	-0.140	0.70
瀬戸内	234	0.8	0.62	0.010	-0.136	0.49
中国西部	662	4.4	1.00	0.001	-0.104	0.78
四国南部	774	4.1	0.74	0.011	-0.056	0.50
九州北西部	2530	16.1	1.15	0.003	-0.100	0.64
九州東南部	854	6.2	0.87	0.004	-0.176	0.61

(2) DAD式作成上の課題

本研究で用いたDAD式において、3定数型のDD式と拡張Horton型DA式の組合せでは、比較的小さい面積（1,000km²を下回る）に対しては実績降雨との差は比較的小さい。これはDD式を3定数としたことで実態に即した設定ができていたものと考えられる。一方、対象面積が概ね数百～10,000km²では実績降雨と大きな差が生じている。このような実績とDAD式との乖離の傾向は、程度の差はあるものの他地域でも見られた。

実績降雨との差が見られる原因として、まだこれらの起こりうる降雨が発生していないという見方もできるが、1つのDAD式にて全時間帯の最大雨量を包絡する曲線とした場合、式形から、時間帯によって異なる降雨の減衰特性の表現に限界があり、いずれかの時間帯、面積帯において実績を大きく上回ることが原因の1つと考えられる。今後、DAD式として包絡曲線式を作成するにあたっては、地域別、継続時間別のDA特性について分析し、適切な表現方法を見いだす必要があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、豪雨特性に基づき全国を地域区分するとともに、従来からある可能最大降雨量の算定方法であるDAD解析を用い、レーダ雨量など最新の観測データに基づき、地域別の可能最大降雨量を算定した。設定した手法は、過去に観測された降雨データを基に設定したものであり、今後の降雨の発生状況等を踏まえ、適宜見直していく必要がある。

また、気候変動予測の結果を見込んだものとはなっていないので、気候変動予測や最大降雨等に研究の知見を踏まえ、設定手法の高度化を図っていく必要がある。

参考文献

- 1) 桑原英夫：日本における最大級豪雨の時間的空間的集中特性に関する実証的研究，東大学位論文，pp.1-173
- 2) WMO：Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP). 2009
- 3) 関口武：日本の気候区分，東京教育大学地理学研究報告3，pp.65-78
- 4) 前島郁雄：気候区分に関する諸問題，現代気候学論説（関口武編），東京堂，pp.51-71
- 5) 財団法人国土技術研究センター：改定 解説・河川管理施設等構造令，pp.14-17，山海堂，2000
- 6) 宝馨，端野典平，中尾忠彦：DAD解析におけるレーダ雨量と非線形最適化手法の適用，土木学会論文集No.691/II-57，1-11，2001.11
- 7) WMO：MANUAL FOR DEPTH-AREA-DURATION ANALYSIS OF STORM PRECIPITATION，pp.49，1969

(2015. 4. 3受付)