

レーダー雨量を用いた DAD 解析と那珂川における 可能最大洪水の推定

宝 馨・端野典平*

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

本研究では、DAD (Depth-Area-Duration) 解析を用いた可能最大降雨(PMP) の推定方法と、PMPと分布型流出モデルを用いた可能最大洪水(PMF)の推定方法を提案する。那珂川流域を覆う2つのレーダー雨量計で得られた雨量データを、45個の地上雨量計を用いて補正する。レーダー雨量計は、地上雨量計が捕らえられなかった局所的豪雨を検知し得ることが示された。レーダー雨量を用いてDA関係を求める新しい方法として、面積固定法と雨量固定法を考え、両者によって得られるDAD式の違いを検討している。その際、DAD式(最適な包絡線)を求める非線形最適化アルゴリズムを開発した。求めたDAD式に基づき、最大の洪水を引き起こすと思われる豪雨の時空間分布を設定して、それを分布型流出モデルに入力することにより、那珂川流域における物理過程に基づくPMFの推定を行った。

キーワード: DAD 解析, レーダー雨量計, PMP, 分布型流出モデル, PMF, 那珂川

1. はじめに

近年世界の至る所で甚大な水災害(洪水・渇水)が頻繁に起こっている。これらの災害を防止・軽減するためには、過去のデータのみに依存しない、物理過程に基づく水文流出解析の手法と水資源計画・管理を開発する必要がある。また、甚大な水災害を引き起こすと考えられる地球規模での気候変動、異常気象の効果を考慮する必要がある。一方で環境保全への関心や情報公開に対する要求が増加しているため、計画の際には合理的で科学的な解析が必要不可欠になっている。対象とする地域において起こり得る降雨量と洪水流量を正確に推定することは、洪水防御計画を策定するにあたり重要な解析のひとつであると考えられる。

物理的に発生し得る極限の量はestimated limiting values (ELV's)と呼ばれ、従来から構造物の設計に用いられてきた。例えば、決壊した場合の被害が大きいと予想される巨大ダムや貯水池の洪水吐き(spillway)

は、PMFを用いて設計が行われる。しかし多くの場合、現実的なアプローチとしてはコスト面からそのままPMFの値は用いられず、何%かスケールダウンさせた値が用いられる。

本研究の目的は、レーダー雨量に基づくDAD解析によって可能最大降水(PMP)を推定し、そのPMPと分布型水文モデルを用いて可能最大洪水流量(PMF)を精度良く推定することである(Fig. 1)。

対象とする流域は1998年8月末に未曾有の豪雨に見舞われた那珂川流域(Fig. 2)である。那珂川流域は、茨城県、栃木県および福島県にまたがる流域面積約3,270km²、幹川150kmの一級水系である。

2. 2つのレーダー雨量計

レーダー雨量データは、対象流域を覆う2つのレーダー雨量計、赤城山レーダーと高鈴山レーダーから得られる。これらのレーダー雨量計から仰角固定観測情報としてPPI (Plan Position Indicator)が得られ

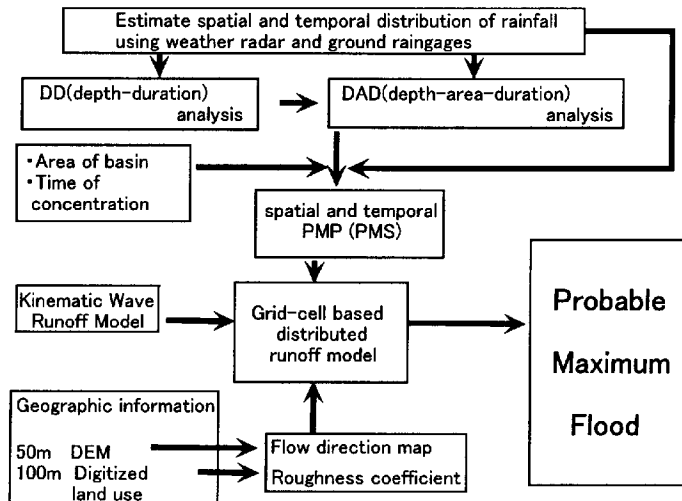


Fig. 1 Flow chart of estimating PMP and PMF.

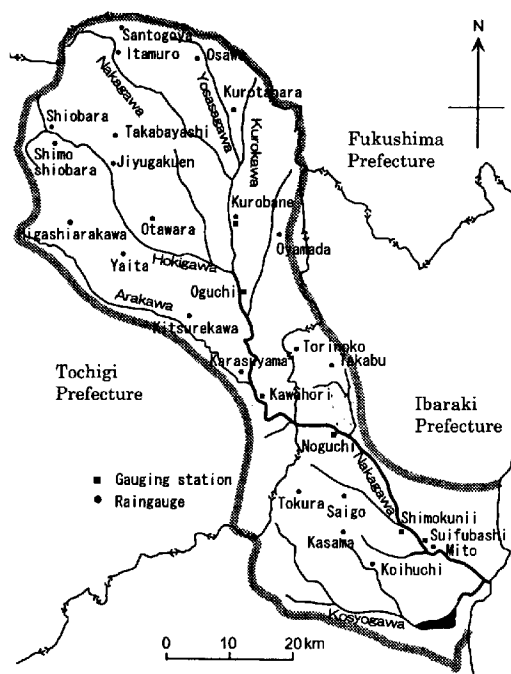


Fig. 2 The Naka river basin.

る。Fig. 3の破線と実線はそれぞれ、レーダーサイトから120km, 198kmのレンジを示している。破線の内側は定量領域、破線と実線の間は定性領域と呼ばれている。定量領域内の場合、5分間平均受信電力は、方位方向に256等分し、ビーム方向に80等分した放射状メッシュ上で得られる。この放射状メッシュで定義されるセルの面積は約 $1.5 \times 1.5 \text{ km}^2$ であるから、受信電力値をメッシュ間隔1.5 kmの正方形メッ

シュ上に変換する。1.5km角のグリッドセルにおける受信電力値として、その中心点を含む放射状メッシュにおける受信電力を用いる。

ここで二つのレーダー雨量計のレーダー反射因子を比較する。Fig. 4は、赤城山レーダー(上側)と高鈴山レーダー(下側)のレーダービームの走査線を示している。1998年8月26日0時から8月31日7時までの期間で、それぞれのグリッドセルにおける赤城山レーダーと高鈴山レーダーのレーダー反射因子について相関係数CCを計算した(Fig. 5)。Fig. 5によると、特に左下の隅近くでCCが大きい値を示しており、全体として左に凸の等高線を描いている。これは、西の部分では二つの走査線が東の部分よりも近づいているためである(Fig. 4)。Fig. 6とFig. 7はそれぞれのグリッドセルにおいて観測期間(127 h)通して平均されたレーダー反射因子を示している。

3. レーダー雨量の補正と評価

3.1 方法

1998年の豪雨を対象とし、2つのレーダー雨量計と45個の地上雨量計を用いて地上雨量の空間分布を推定する。本研究では地上雨量計の雨量データとして1時間雨量データを用いる。ゆえに5分間平均レーダー反射因子から1時間平均レーダー反射因子を計算し B - β 法((1)式)を用いて1時間の分解能を持つレーダー雨量に変換する。

$$Z = BR_g^\beta \quad (1)$$

ここに Z はレーダー反射因子、 R_g は地上での雨量強度である。

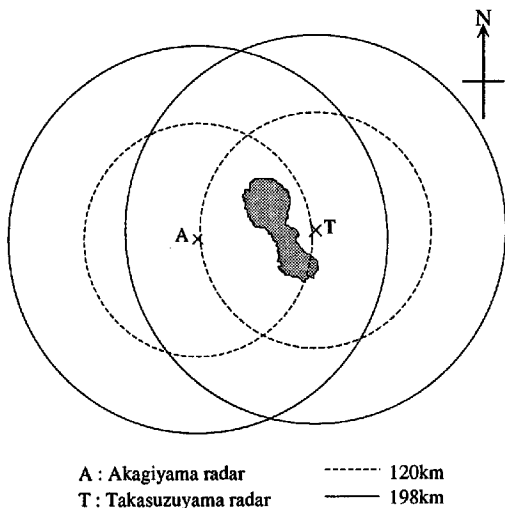


Fig. 3 Location of two radars.

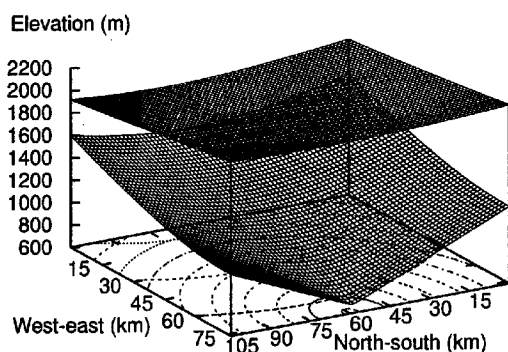


Fig. 4 Elevation of scanning lines (upper: Akagi-yama radar, lower: Takasuzuyama radar).

それぞれのレーダー雨量計について B , β の標準値を用いて雨量強度を計算したところ、地上雨量計のそれと比較すると過大評価する結果となった。そこで、以下の4つの補正方法を用いて雨量を推定する。

Cal-A: 赤城山のレーダー反射因子を用いて、流域全体で同一の B , β を毎正時補正する。

Cal-T: 高鈴山のレーダー反射因子を用いて、流域全体で同一の B , β を毎正時補正する。

このとき B , β は、対応する地上雨量計とレーダー雨量計の雨量値の誤差二乗和が最小になるように最適化する。

$$f(B^{(t)}, \beta^{(t)}) = \sum_{i=1}^m \left\{ \left(\frac{Z_i^{(t)}}{B^{(t)}} \right)^{\frac{1}{\beta^{(t)}}} - R_{g_i}^{(t)} \right\}^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

ここで、時刻 t における地点番号 i の観測所の地上雨量を $R_{g_i}^{(t)}$ 、その観測所に対応するグリッドセル上のレーダー反射因子を $Z_i^{(t)}$ 、 m を観測所の総数 ($m = 45$) とする。最適解を求める方法について述べると、まず適当な $B^{(t)}$, $\beta^{(t)}$ の範囲で格子探索を行ない、関

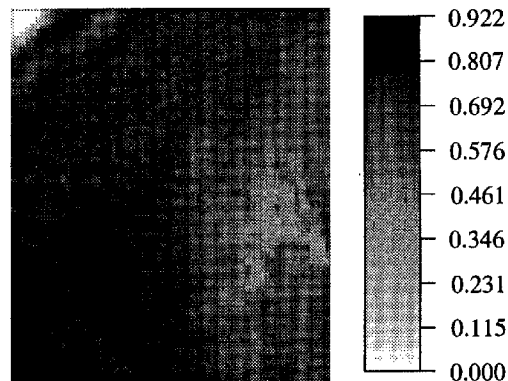


Fig. 5 Correlation coefficient of reflective factors in dBZ between Akagi-yama and Takasuzuyama averaged every 5 minutes.

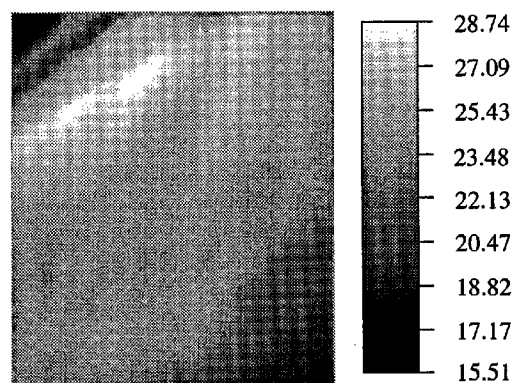


Fig. 6 Mean reflective factors in dBZ averaged every 5 minutes by Akagi-yama Radar.

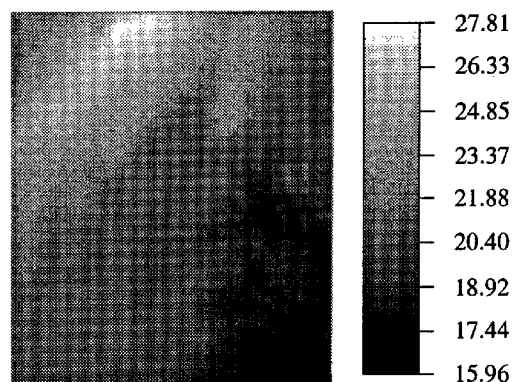


Fig. 7 Mean reflective factors in dBZ averaged every 5 minutes by Takasuzuyama Radar.

数の最小値を与える $B^{(t)}$, $\beta^{(t)}$ を求める。それらの値を初期値として、ガウス-ニュートン法に修正を加えたマルカート法を用いる。ただし $B^{(t)}$, $\beta^{(t)}$ の値により雨量に異常値が発生する場合には、 $B^{(t)}$, $\beta^{(t)}$ の標準値を用いる。

Weighted Mean(WM): 上の Cal-A, Cal-T で得られたレーダー雨量値を用いて、重み付け平均 ((4)

式)する。

$$W_A + W_T = 1.0 \quad (3)$$

$$R_r = W_A R_A + W_T R_T \quad (4)$$

ここで R_A , R_T をそれぞれ Cal-A による補正值, Cal-T による補正值, R_r を地上雨量の推定値, W_A , W_T をそれぞれ Cal-A, Cal-T の補正值に対する時空間一定の重みとする。(5)式で表される相関係数が最大になるように W_A , W_T を決める。 n は観測時間数, $R_{ri}^{(t)}$ は地点番号 i , 時間 t における R_r の値である。

$$\overline{R_r} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m R_{ri}^{(t)}}{n \cdot m}, \quad \overline{R_g} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m R_{gi}^{(t)}}{n \cdot m}$$

$$r_{all} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m (R_{gi}^{(t)} - \overline{R_g})(R_{ri}^{(t)} - \overline{R_r})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m (R_{gi}^{(t)} - \overline{R_g})^2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m (R_{ri}^{(t)} - \overline{R_r})^2}} \quad (5)$$

(5)式を W_A , W_T で微分して得られる関数から, (6)式の直線上で r_{all} が最大値をとることがわかる。

$$W_T = k \cdot W_A \quad (6)$$

ここに,

$$k = \frac{S_{R_r R_g} \cdot S_{R_r R_T} - S_{R_T R_g} \cdot S_{R_r R_A}^2}{S_{R_T R_g} \cdot S_{R_r R_T} - S_{R_r R_g} \cdot S_{R_T R_A}^2}$$

ここで S_X^2 を X の標本分散, S_{XY} を X , Y の標本共分散とする。(3)式, (6)式を解いて以下のように得られる。

$$W_A = \frac{1}{k+1}, \quad W_T = \frac{k}{k+1}$$

Multiple Regression Analysis(MRA): 上の Cal-A, Cal-T で得られたレーダー雨量値を用い, 毎正時, 重回帰分析を行うことによって補正值を求める。つまり以下の式のように求める。

$$R_r = a_0 + a_1 R_A + a_2 R_T \quad (7)$$

3.2 結果と考察

以下のような平方根平均二乗誤差(RMSE)と相関係数を計算する。RMSE_t, r_t はそれぞれ, ある時刻 t においてすべての地上雨量計の雨量と, 対応するグリッドセル上の推定されたレーダー雨量との間で, RMSEと相関係数を計算したものである。RMSE_i, r_i はそれぞれ, ある観測所 i において全観測期間を通じて地上雨量計の雨量と, 対応するグリッドセル上の推定されたレーダー雨量との間で, RMSEと相関係数を計算したものである。RMSE_{all}, r_{all} ((5)式) はそれぞれ, すべての観測所, 全観測期間において地上雨量計の雨量と, 対応するグリッドセル上の推定されたレーダー雨量との間で, RMSEと相関係数を計算したものである。Table 1に RMSE_t, r_t を全観測時間で平均したもの, RMSE_i, r_i を全観測所で平均したもの, そして RMSE_{all}, r_{all} を示す。

Table 1は, Cal-TがCal-Aよりも精度良く空間分布を表現していることを示している。3.1の4つの方法によって推定された累加雨量と地上雨量計で観測されたものを比較すると(Table 2), Cal-TはCal-Aよりも地上雨量計に近い値を与える。事実, 赤城山レーダーにおいてレーダー反射因子が大きい値を示す領域は, 高鈴山レーダのその南西に位置している(Fig. 6, Fig. 7)。これと同じような位置関係で, Cal-AとCal-Tによる雨量は空間的に分布している。

1998年8月末の豪雨では大沢において, 29時間目(1998年8月27日4時から5時までの1時間)に103mmという最大時間雨量を記録した。Table 3によると, どの方法でも流域のある地点でその103mmより大きい局所的極値を与える。特に, Cal-Tは193.7mmという, 1982年長崎県長与で観測された187mmよりも大きい値を与える。これは, 26時間目に B , β の最適化がうまくいかず標準値を用いて雨量を計算したためである。しかしながら, WMとMRAにより与えられる26時間目における最大時間雨量は114.9mmと81.5mmである。WMとMRAは異常な雨量値を緩和するように雨量を最適化することができる。WMの流域平均累加面積雨量は, Cal-AとCal-Tの間の値となっている。これは W_A と W_T がそれぞれ0.47と0.53となったからである。

結局 Table 1はMRAが地上雨量を最も正確に推定していることを示す。以下に続くDAD解析, 流出解析そしてPMSの推定にはMRAによって推定された降雨を用いる。

4. DAD解析

4.1 DAD式について

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。本研究では, 既往最大の面積雨量を包絡するように決定されたDAD式が, 面積と降雨継続時間を指定したときの可能最大面積雨量, つまりPMPを示すと仮定する。Shermanによって提案されたDD式と, もともとHortonにより提案され角屋・永井(1979)と桑原(1986)により修正されたDAD式を用いる(それぞれ(8)式, (9)式)。

$$P_0 = I \cdot t = a \cdot t^{1-c} \quad (8)$$

$$\widehat{P}_a(A, t) = at^{1-c} \exp\{-ut^{-v}(A - A_0)^n\} \quad (9)$$

ここで $\widehat{P}_a(A, t)$ は降雨の面積 $A(\text{km}^2)$ と継続時間 $t(\text{hour})$ を指定したときの可能最大面積雨量の推定値(mm), A_0 は $\widehat{P}_a(A, t)$ が可能最大地点雨量 P_0 と等しくなる面積(km^2), そして 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

Table 1 Correlation coefficient and Root Mean Square Error.

Calibration method	RMSE (mm/hr)			Correlation coefficient		
	Mean RMSE _t	Mean RMSE _i	RMSE _{all}	Mean r_t	Mean r_i	r_{all}
Cal-A	3.27	3.61	4.30	0.694	0.862	0.853
Cal-T	2.92	3.45	4.11	0.788	0.851	0.869
WM	2.73	3.08	3.62	0.807	0.889	0.899
MRA	2.49	2.80	3.32	0.819	0.908	0.915

Table 2 Comparison of the accumulated rainfall estimated by four methods at some raingages where more than 1,000mm was observed. "Max" means the maximum accumulated rainfall at a location in the basin.

Calibration method	Nasu	Yumoto purification plant	Yumoto fire station	Osawa	Max
Ground raingage	1253.0	1016.9	1087.0	1091.0	1253.0
Cal-A	551.8	724.9	822.6	611.0	1227.8
Cal-T	1019.5	1151.1	1006.3	1122.2	1214.5
WM	799.7	950.8	920.0	881.9	1074.9
MRA	851.9	1021.9	955.3	958.8	1104.7

Table 3 Comparison of the maximum hourly rainfall intensity and average accumulated areal rainfall estimated by four methods.

Calibration method	Maximum (mm/hr)	Time (hr)	Accumulated (mm)
Ground raingage	103.0	29	426.7
Cal-A	119.0	29	419.4
Cal-T	193.7	26	431.0
WM	114.9	26	425.6
MRA	131.7	29	414.0

(宝, 1997)より0.532とし, A_0 はグリッドセルの面積 $1.5 \times 1.5 \text{ km}^2$ とした。

4.2 包絡線を引く方法について

DD式((8)式)の定数 a の値は, 両辺対数をとると直線の傾きを示すので既往最大地点雨量を包絡するように容易に決めることができる。しかしDAD式((9)式)の定数 u, v, n に対してはこの方法は使えない。そこで, 以下の方法を提案する。DAD解析の結果得られた全継続時間の最大面積雨量値に対して包絡線を引くことを目的として, 以下の非線型計画問題を考える。

Suppose

$$\vec{x} = (u, v, n)^t = (x_1, x_2, x_3)^t \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \widehat{P}_a(A_i, t, \vec{x}) = \\ a \cdot t^{1-c} \exp\{-x_1 \cdot t^{-x_2} \cdot (A_i - A_0)^{x_3}\} \end{aligned} \quad (11)$$

Minimize

$$f(\vec{x}) = \sum_i^N \sum_t^{\ell} \{P_a(A_i, t) - \widehat{P}_a(A_i, t, \vec{x})\}^2 \quad (12)$$

subject to

$$\begin{aligned} g(A_i, t, \vec{x}) &= P_a(A_i, t) - \widehat{P}_a(A_i, t, \vec{x}) \\ &\leq 0 \quad (i = 1, \dots, N) \end{aligned} \quad (13)$$

ここで N はそれぞれの降雨継続時間に対してDA関係を計算した降雨面積の総数, ℓ は最大の継続時間, $\widehat{P}_a(A_i, t, \vec{x})$ は面積 A_i と継続時間 t に対する可能最大面積雨量, $P_a(A_i, t)$ は既往最大面積雨量である。

本研究ではこの制約付き最適化問題を解く方法として, 外点ペナルティ関数法を用いた。これは, 制約付き最適化問題を制約なし最適化問題の列に変換して, 後者を解くことによって前者の解を得ようとする変換法の一つである。ペナルティ関数法はアルゴリズム自身が簡単で広い範囲の問題に適用可能であり, また種々の有効な制約なし最適化の方法を利用

できるという利点があるので広く用いられている。
以下のような拡張目的関数を用いた。

Minimize

$$F(\vec{x}, r) = f(\vec{x}) + r \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^m \{\max(0, g(A_i, t, \vec{x}))\}^2 \quad (14)$$

つまり, $\{r^k\}$, $k = 0, 1, 2, \dots$ を狭義単調増加して無限大に発散する正数列として, 拡張目的関数に対する制約なし最適化問題の列: 最小化 $F(\vec{x}, r^k)$ の最適解の列 $\{\vec{x}^k\}$ を求めてゆく。 $\{\vec{x}^k\}$ の収束解を求めることによって(12)式の最適解を求めた。

4.3 DA関係の求め方について

従来は地上雨量計のみを用いて, まず豪雨毎にDA関係が最大を示す時間帯を求めてから, 等雨量線図を作成したり Thiessen法により面積雨量を推定した。いずれの方法でも, 全流域をいくつかのブロックに分けてそれぞれの平均雨量を求めた後, これらのブロックを何らかの規則に従って順次連結して流域面積を広げ, それに対する平均面積雨量を推定する方法をとる。そして流域平均雨量と面積の関係を一雨ごとの継続時間ごとに求め, 特定の選定面積に対する平均雨量を内挿的に求めていた(建設省土木研究所河川部水文研究室, 1977; 角屋・永井, 1979)。

過去にもレーダー雨量を用いてDA関係を求める研究が行われている(建設省土木研究所河川部水文研究室, 1988)。その研究では雨域という概念が導入されており, ある雨量値を閾値として設定し, 閾値以上の独立した降雨範囲を1つの雨域としてその雨域の面積に対する平均雨量を求めている。この方法では中間的な面積に対する平均雨量が計算されないという問題点が指摘されている。

本研究ではDA関係を求める方法として以下の2つを提案する。両方法とも, 流域全体を覆うグリッドにより定義されるグリッドセル上で, 雨量の空間分布を評価するものである。

面積固定法(CAM)は, 指定された継続時間に対する最大面積雨量を半径一定の円に含まれる面積に対して求める方法である(Fig. 8)。つまり円と重なるグリッドセルにおける雨量値を用いて, 円に含まれる領域の面積雨量を求める。そしてこの円を対象流域全体に移動させ, その面積に対する最大面積雨量を計算する。半径を変化させて同様にし, DAD関係を得る。ただし円が対象流域に含まれる範囲で半径を変化させる。

雨量固定法(FRM)は, 指定された継続時間に対する最大面積雨量を降雨面積を柔軟に変化させて計算する方法である(Fig. 9)。今, x-y平面に流域を覆

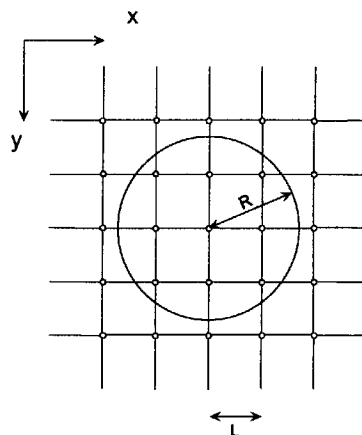


Fig. 8 Concept of CAM (Constant Area Method). The DA relationship for each duration is calculated for the area of circle with a radius R and the rainfall within the circle.

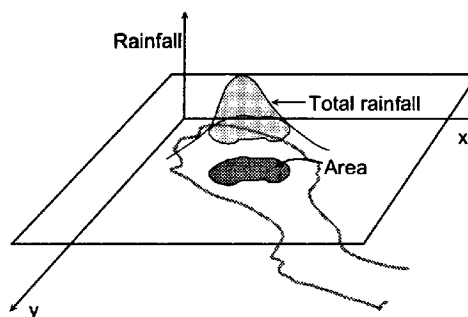


Fig. 9 Concept of FRM (Fixed Rainfall Method). The DA relationship is calculated for the Area and Total rainfall determined by a magnitude of rainfall.

うグリッド, z軸に雨量をとる3次元グラフで, ある時刻, 継続時間における雨量の空間分布を考える。ある雨量値を通る平面で, 観測雨量を示す曲面を切り, その断面積と断面より上部の体積(断面積に対する総雨量)を求める。このようにして, 最大面積雨量と面積との関係を求める。本研究では, 1つの雨域には降雨中心(最大雨量点)が1つあると仮定する。降雨域は以下のように設定した。降雨域に含まれるグリッドセルについて周囲を探索し, そのグリッドセル自身の雨量値より大きい値を持つグリッドセルは他の降雨域に含まれるとした。この作業を降雨中心のグリッドセルから行うことで降雨域が決定される。

4.4 DAD解析の結果と考察

まず最初にDD解析の結果について述べる。Fig. 10に、地上雨量計で観測された各継続時間に対する最大地点雨量に基づくDD関係を示す。1978年から1996年のDD関係と1998年のそれを比較すると、1998年の豪雨はすべての継続時間についてそれまでの最大記録を更新しているのがわかる。Fig. 11は地上雨量計によるデータとMRAにより補正されたレーダー雨量に対するDD関係を示している。DD式((8)式)の定数 a は、流域のある地点における可能最大時間雨量を示している。すなわち、レーダー雨量によると $a = 183.0\text{mm}$ 、地上雨量計によると $a = 174.4\text{mm}$ だけ降り得ることを示している。レーダー雨量は継続時間の短い場合(10時間以下)には地上雨量よりも大きい値を与え、長い場合(26時間以上)には地上雨量よりも小さい値を与えている。このことは、Table 2からもわかるように、MRAが累加雨量を過小評価しているということを示している。しかしながら、継続時間が短い場合には地上雨量計が探知できなかった局所的豪雨を、レーダー雨量は捕らえているといえるであろう。

次に、DAD解析の結果をFig. 12, Fig. 13, Fig. 14に示す。これらの図に描かれているDAD曲線は、4.2で与えた最適化のアルゴリズムにより、自動的(主観的判断なし)に決められたものである。

DAD解析の際には、地上雨量計のみを用いてThiessen法により空間分布を決定した雨量(T)を用いる場合と、MRAによって補正されたレーダー雨量(R)を用いる場合の2通りを考えた。

まずCAM(4.3参照)を用いて、上の2通りの方法によって推定された1998年豪雨の面積雨量を比較する(Fig. 12, Fig. 13)。Fig. 12において、継続時間12時間と24時間に対する曲線はプロットされた点とあまり一致していない。3時間と6時間に対するものは比較的小さい面積(100 km²以内)でよく一致している。また1時間と3時間に対するものは比較的大きい面積(700 km²以上)でよく一致している。一方、継続時間12時間と24時間に対する曲線は、Fig. 12よりFig. 13の方がよい一致を示している。他の三つの曲線も同様にプロットされた点とよい一致を示している。Fig. 12のDAD曲線は、Fig. 13のそれよりも緩やかに減少している。これはFig. 12のプロットされた点が、小さい面積(200 km²以内)のところでは上に凸の曲線を描く一方、Fig. 13のそれは下に凸の曲線を描いているからである。結果として、Fig. 12のDAD曲線はFig. 13で与えられるものよりも大きいPMPを与える。

次に補正されたレーダー雨量(MRA)を用いて、面

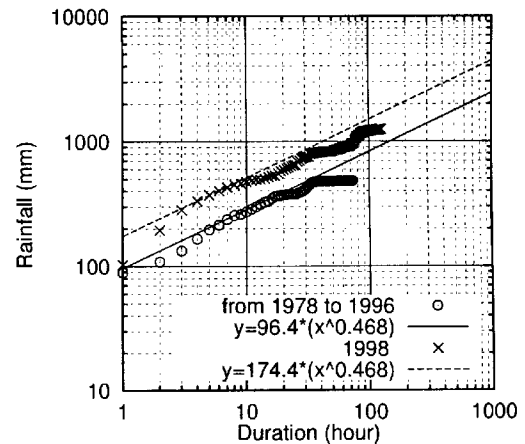


Fig. 10 Comparison of DD relationships obtained with raingages in 1978 to 1996 and in 1998.

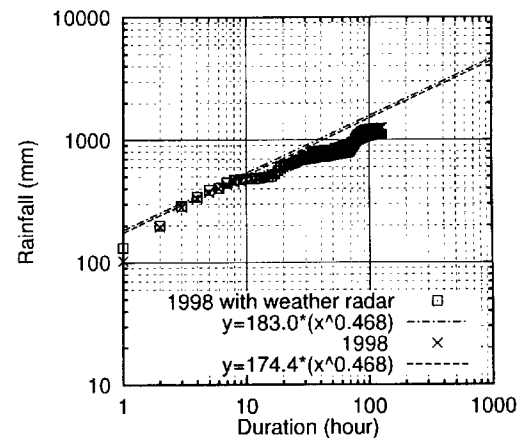


Fig. 11 Comparison of DD relationships with rain-gages and weather radar in 1998.

積固定法(CAM)と雨量固定法(FRM)の比較を行なう(Fig. 13, Fig. 14)。FRMによる面積雨量は、300km²より小さい面積に対してCAMより大きくなるので、結果としてFig. 14のDAD曲線は、400 km²以内の面積に対してFig. 13のものよりも大きいPMPの推定値を与える。FRMは降雨中心と降雨域を考慮しながらDAD関係を計算する方法である。ゆえに、PMPの推定にはレーダー雨量(MRA)にFRMを用いて決定したDAD式((17)式)を用いる。

これらのDAD曲線式は以下のものである。

Thiessen法にCAMを用いた場合:

$$\widehat{P}_a(A, t) = 174.4 t^{0.468} \times \exp(-0.00133t^{-0.195}(A - 2.25)^{1.05}) \quad (15)$$

レーダー雨量(MRA)にCAMを用いた場合:

$$\widehat{P}_a(A, t) = 183.0 t^{0.468} \times \exp(-0.0578t^{-0.0677}(A - 2.25)^{0.433}) \quad (16)$$

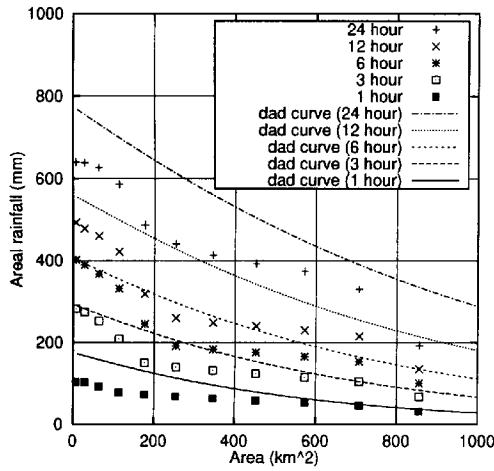


Fig. 12 DAD analysis using CAM with ground rain-gages.

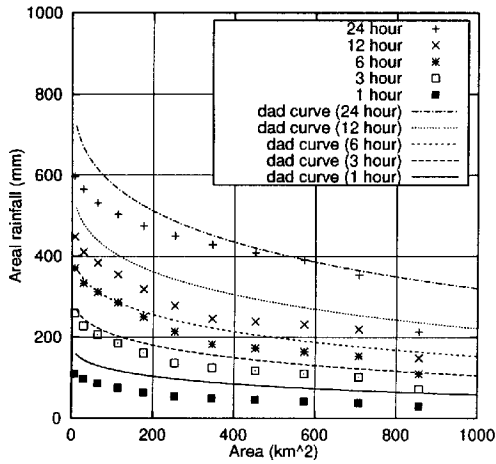


Fig. 13 DAD analysis using CAM with weather radar.

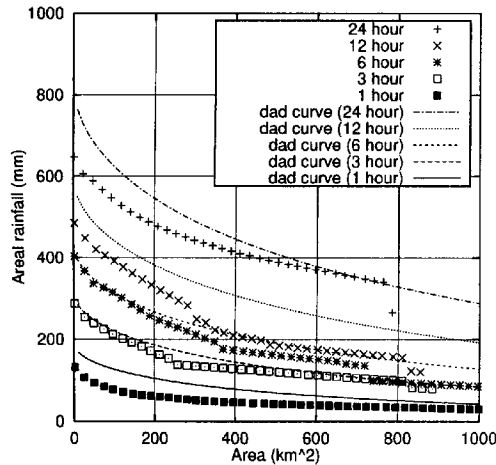


Fig. 14 DAD analysis using FRM with weather radar.

レーダー雨量(MRA)にFRMを用いた場合:

$$\widehat{P}_a(A, t) = 183.0 t^{0.468} \times \exp\{-0.0239t^{-0.108}(A - 2.25)^{0.595}\} \quad (17)$$

5. PMFの推定

5.1 方法

PMPは指定された降雨継続時間、面積に対応する降雨量を与えるもので、その時空間分布を設定する必要がある。この時空間分布を持つ豪雨のことを可能最大豪雨(PMS)という(Chow et al., 1988)。Hansen et al. (1982)により開発された方法は、以下の5つの大きな要素により構成されている。それは、特定の降雨面積と継続期間に対するPMPを示すDAD曲線、降雨形状が楕円になるように降雨量を分布させる標準等雨量パターン、対象流域における大気中の水分の流れ特性を考慮に入れるための方位調整因子、流域内で最大のPMPを発生させる最大豪雨発生エリア(critical storm area)、そして標準等雨量パターンのそれぞれの等値線に適用されるPMPの割合を決める等雨量調整因子である。

本研究では、レーダー雨量計によって得られる実績降雨の時空間分布パターンと、DAD解析によって得られるPMPを用いて、以下の方法によりPMSを設定する。

Step 1 洪水到達時間(CTF)を決定する。ここで $CTF = K$ 時間と想定する。

Step 2 過去に記録された豪雨イベントをいくつか選ぶ。

Step 3 $r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_K$ を面積平均時間雨量の時系列と仮定する。 K 時間の豪雨イベントに対して、時間雨量の順序統計量 $R_1 \geq R_2 \geq \dots \geq R_t \geq \dots \geq R_K$ を得る。

Step 4 時間帯を k とする。 r_k は t 番目に大きいので(19)式、(20)式に t を用いる。

Step 5 以下のことをすべての降雨域に対して行う。ここで降雨域 j の降雨中心が面積 A_1 、降雨強度 I_{*j}^1 を持つとする。(19)式で降雨中心に対する可能最大降雨強度 $\hat{I}(A_1, t)$ を計算する。 I_{*j}^i は降雨域 j における、実績降雨での i 番目に大きい降雨強度を示す。 A_i は、同じ降雨域 j における面積 A_{i-1} と I_{*j}^i を持つグリッドセルの面積との和である。(20)式により I_{*j}^i を持つグリッドセルに対する可能最大降雨強度 $\hat{I}(A_i, t)$ が求まる。

$$\widehat{P}_a(A_i, 0) = 0.0 \quad (18)$$

$$\hat{I}(A_1, t) = \widehat{P}_a(A_1, t) - \widehat{P}_a(A_1, t-1) \quad (19)$$

$$\hat{I}(A_i, t) = \frac{\{\hat{P}_a(A_i, t) - \hat{P}_a(A_i, t-1)\} \cdot A_i}{A_i - A_{i-1}} - \frac{\{\hat{P}_a(A_{i-1}, t) - \hat{P}_a(A_{i-1}, t-1)\} \cdot A_{i-1}}{A_i - A_{i-1}} \quad (20)$$

($i = 2, \dots$)

Step 6 実績降雨で降雨中心の強度を比較し、最大降雨強度 I_{*max}^1 を求める。次に、すべての降雨域 j について、 I_{*j}^1 の I_{*max}^1 に対する比 r_j を計算する。結局、可能最大降雨強度はこの比と Step 5 で求めた降雨強度との積で計算される。比 r_j は降雨域 j に対する縮小率を意味する。

Step 7 もし $k < K$ ならば $k = k+1$ とし Step 4 へ。そうでなければ終わる。

この方法は、Step 2 で選択された降雨イベントの時空間分布を保ちながら、Fig. 14 に示す DAD 曲線にできる限り接近するように PMS を決定するものである。

本論文では、水位観測所川堀の上流域(面積 1,930 km²)で那珂川流域の PMF を計算する。角屋・福島(1976)により提案された洪水到達時間実用式を参考にして、川堀での CTF を 12 時間とした。そして 1998 年の豪雨で最大流域平均雨量強度を含む 12 時間の降雨を選択した。

分布型流出モデルとして、セル分布型流出モデル(児島ら, 1998)を用いる。モデルのパラメータは、1998 年 8 月末の洪水の川堀におけるピーク流量を再現するように設定される。PMF の過小評価を避けるために、流出率を 1.0 としてすべての雨量が直接流出すると仮定する。

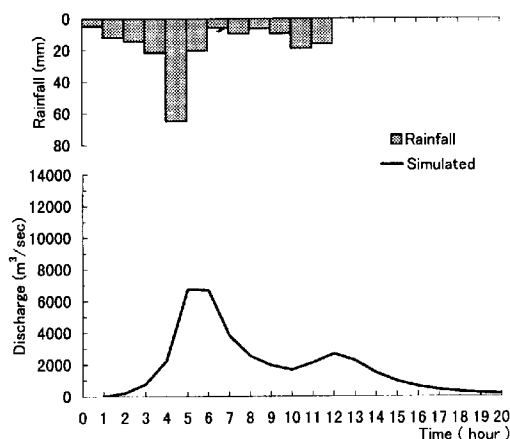


Fig. 15 Hydrograph of the Naka river at Kurobane, calculated by inputting PMS.

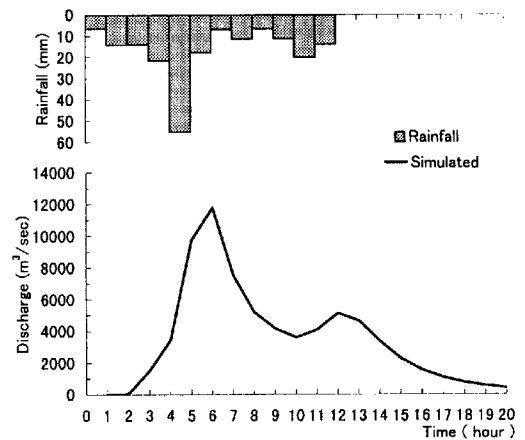


Fig. 16 Hydrograph of the Naka river at Oguchi, calculated by inputting PMS.

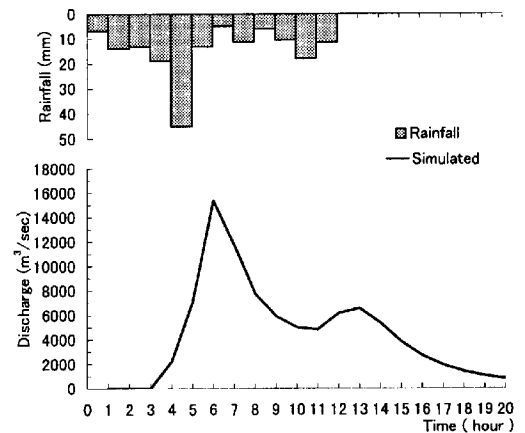


Fig. 17 Hydrograph of the Naka river at Kawahori, calculated by inputting PMS.

5.2 結果

黒羽、小口、川堀における PMF の推定値は、それぞれ 6,730, 11,790, 15,370 m³/s となった (Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17)。小口地点における年最大流量データセット (1955 年から 1998 年までの 44 年分) に対数正規分布をあてはめて、100 年確率流量 (5,412.1 m³/s) を得た。小口における PMF (11,790 m³/s) は、小口での 100 年確率洪水流量の約 2 倍となり、1839 年確率に相当することがわかった。

6. 結語

本研究ではまず、二つのレーダー雨量計と 45 個の地上雨量計を用い、地上での正確な雨量を推定した。空間分布した雨量データを用いて、降雨面積と面積雨量の関係 (DA 関係) を推定する方法と、DAD 式の

定数を客観的に求める方法を提案した。これらの方法により、以前よりDAD解析を合理的に行うことが可能となった。次にDAD解析の結果を用いて、PMFを推定する方法を試みた。PMSとPMFを求める方法論については議論の余地があるものの、物理的根拠を持つ分布型流出モデル、雨量の時空間分布、DAD解析を用いる本研究のアプローチが、洪水防御計画を合理的に策定するための有力な方法となり得ると考える。

謝 辞

地上雨量計と赤城山、高鈴山レーダー雨量計のデータを提供して頂いた建設省関東地方建設局及び財団法人河川情報センター中尾忠彦氏に謝意を表する。

参考文献

角屋 陸・永井明博(1979):洪水比流量曲線へのアプローチ, 京都大学防災研究所年報第22号 B-2, pp. 195-208.
角屋 陸・福島 晟(1976):中小河川の洪水到達時間, 京都大学防災研究所年報第19号 B-2, pp. 143-152.

桑原英夫(1986):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, 東京大学学位論文, 173 pp..

建設省土木研究所河川部水文研究室(1977):関東南部DAD調査報告, 土木研究所資料第1187号.

建設省土木研究所河川部水文研究室(1988):レーダー雨量計から見た降雨の時空間特性に関する調査報告, 土木研究所資料第2604号.

児島利治・宝 馨・岡 太郎・千歳知礼(1998):ラスタ型空間情報の分解能が洪水流出解析結果に及ぼす影響, 水工学論文集, 土木学会水理委員会, 第42巻, pp. 157-162.

宝 馨(1997):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.

Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays(1988): *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, pp. 473-488.

Hansen, E. M., L. C. Schreiner, and J. F. Miller(1982): Application of probable maximum precipitation estimates-United States east of the 105th meridian, NOAA hydrometeorological report no. 52, National Weather Service, Washington, D. C..

DAD analysis using radar raingages and PMF estimation in the Naka river

Kaoru TAKARA and Tempei HASHINO*

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

This paper describes a procedure of estimating the PMP (Probable Maximum Precipitation) using DAD (Depth-Area-Duration) analysis and the PMF (Probable Maximum Flood) using the PMP and a distributed hydrological model. Radar data obtained from two radars, which cover the Naka river basin in Japan, are calibrated with 45 ground raingages. The radar data detected the local extreme rainfall which ground raingages could not catch. In calculating DA relationship with the radar data, two new methods, constant area and fixed rainfall methods, are proposed. The difference of DAD equations given by the two methods is studied. A nonlinear optimization technique has been developed to determine parameters of DAD equations, optimal envelopes. The spatiotemporal distribution of storm, which is expected to cause the maximum flood, is set up based on the DAD equation. Inputting it into the grid-cell based distributed runoff model produces the physically-based PMF estimate for the Naka river basin.

Keywords: DAD analysis; radar raingage; PMP; distributed runoff model; PMF; Naka River