

レーダー雨量の逐次補正とその洪水予測への適用

高棹 琢馬・宝 馨
三谷裕次郎・笛田 俊治

REAL-TIME CALIBRATION OF RAINFALL MEASURED BY A RADAR FOR FLOOD RUNOFF FORECASTING

By *Takuma* TAKASAO, *Kaoru* TAKARA,
Yujiro MITANI and *Toshiharu* FUETA

SYNOPSIS

Radar raingauges can instantaneously measure precipitation over the broad area. To make good use of this characteristic for flood forecasting, the authors consider five methods of calibrating the parameters B and β in the radar equations which transform the received power into the rainfall intensity. The rainfall measured by a radar is corrected in real time through the calibration using the hourly rainfalls measured by many raingauges on the ground in the drainage basin.

The aim of this research is to improve the accuracy of flood runoff forecasting by improving the estimation accuracy of areal rainfalls through the real-time calibration. Using the existing rainfall and discharge data in the Yura River basin (1880 km²) and rainfall data obtained by the Miyama Radar Raingauge System, the accuracies of flood forecasting based on the five calibrations are compared with those based on the situations using only raingauge data (not using radar) and using only the radar data (no-calibration situation).

1. 序 論

レーダー雨量計が降雨観測に利用されるようになってから、既に20年余の時間が経過した。現在レーダー雨量計は、河川管理・道路管理等の有用な情報源としての役割をも担うようになってきている。豪雨出水に基づく災害を防止・軽減するためには、降雨・流出を実時間でかつ精度よく予測することが必要である。レーダー雨量計は、従来用いられてきた地上雨量計と比べ降雨を広範囲で観測でき、しかも、その情報が瞬時に得られるという優れた特性を持っており、この目的のために有用であると考えられる。

本研究は、レーダー雨量計のこうした特性をいかして、流出計算のインプットとして必要な雨量の推定精度を高め、ひいては、出水予測精度の向上を図ろうとするものである。ここでは、レーダー雨量計データを雨量に変換する際に用いられるレーダー定数 B 、 β を、流域内の多数の地上雨量計データを利用して実時間において逐次補正することによってより正確な面積雨量を求め、出水予測精度の向上を図る。建設省近畿地方建設局深山レーダー雨量計およびその北方に位置する由良川流域（面積1880 km²）を対象として、いくつかの実時間補正の方法を試み、それらの適用可能性を検討するものである。

2. 対象流域および解析対象資料の概要

2.1 対象流域および流出モデル

由良川水系は近畿地方の北部に位置し、幹川由良川は若狭湾に注ぐ流域面積 1880 km²、流路延長 146 km の河川である (Fig. 1)。由良川には福知山を基準地点とする洪水予報用のモデルが設定されている。な

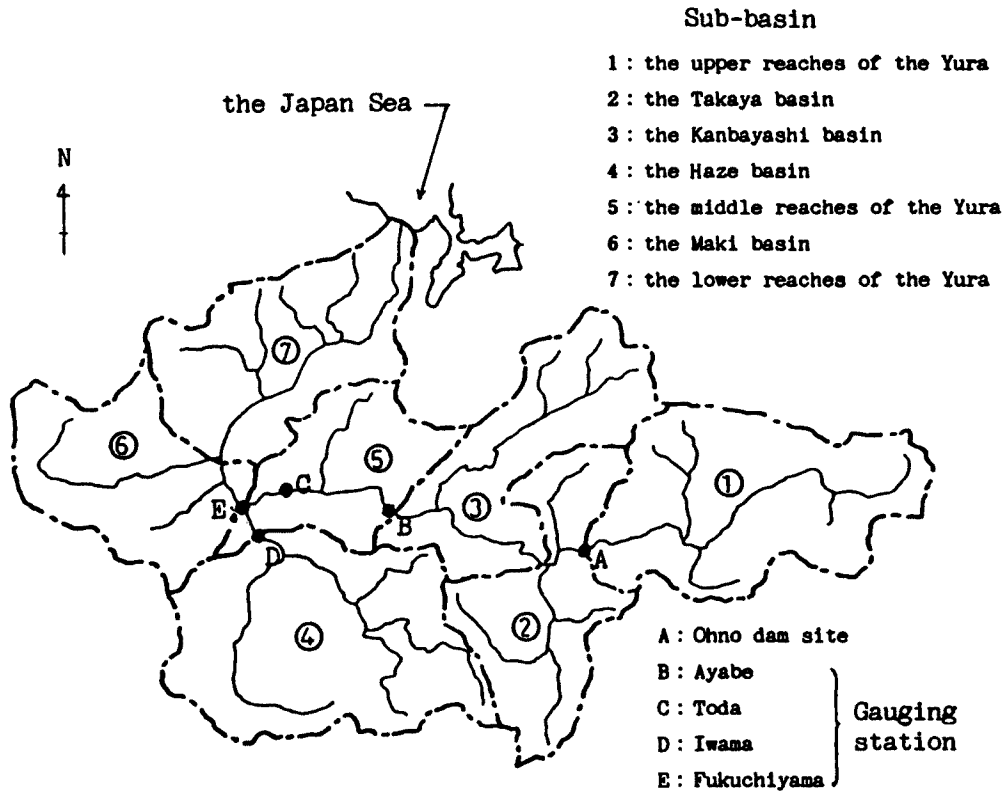


Fig. 1. The Yura River basin (1880 km²).

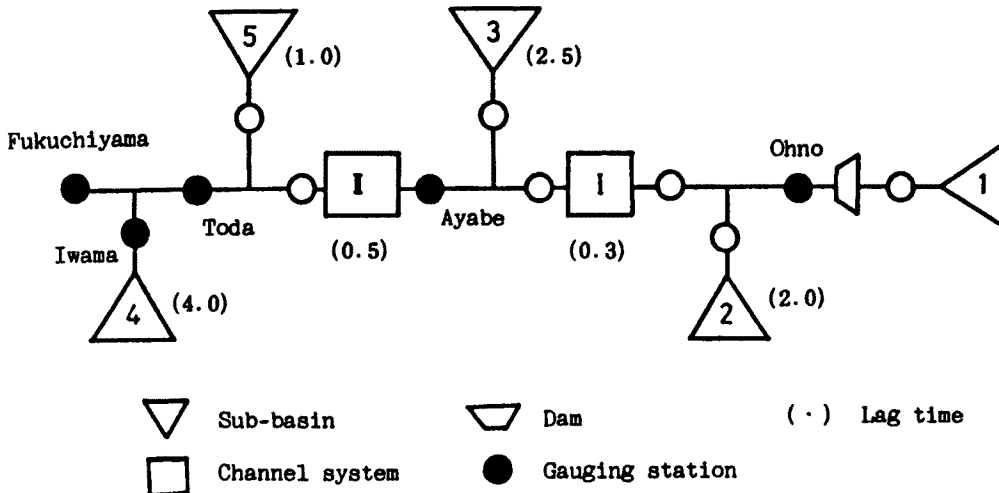


Fig. 2. Schematic diagram of the existing flood prediction model of the Yura River.

お、福知山地点基本高水ピーク流量は $6500 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、上流の大野ダムで洪水調整を行った上で計画洪水流量 $5600 \text{ m}^3/\text{s}$ とされている。このモデルは流出計算に貯留関数法を用いて、遅滞時間の性質を利用して3時間先までの流出予測を行うものである。Fig. 2に示すように福知山上流域（ 1350 km^2 ）を5流域・2河道に分割し、それぞれ貯留関数法を適用して各流域・河道の定数決定がなされている（Table 1）。現行の洪水予報モデルでは大野ダム上流の流出計算は行わず、大野ダムの放流量を予測計算に用いている。本研究では、この現行モデルをプログラム化したものと、大野ダムの操作規則およびダム上流域のモデル（昭和48年の予報モデル検討業務の際に求められた貯留関数のモデル定数を用いた）を組み込んだモデルをプログラム化したもの（全流域モデルと呼ぶことにする）の2通りを流出計算に用いる。

Table 1. Parameters of the existing flood prediction model of the Yura River

Sub-system No.		Area (km^2)	K	P	Tl (hr)	Rsa (mm)
Sub-basin	1	350	25	0.50	1.5	80
	2	220	13	0.65	2.0	80
	3	240	30	0.65	2.5	80
	4	370	22	0.65	4.0	80
	5	170	20	0.65	1.0	80
Channel	I	—	9	0.6	0.3	—
	II	—	23	0.6	0.5	—

2.2 解析対象資料

本研究で用いる出水データは、深山レーダーが昭和57年に運用を開始して以来の比較的大きな出水を毎年1つずつ抽出した全6ケースである（Table 2）。このうち、ケース4とケース6についてはレーダー雨量計の欠測期間が長いので、今回は除外した。そのため、実際に解析を行ったのは4ケースである。流量データの観測点は、綾部・岩間・福知山の3地点であり、それぞれについて観測ハイドログラフと計算ハイドログラフの比較を行った。キャリブレーションに用いた地上雨量計は、由良川流域内にある計34台である。Fig. 3に由良川流域とその上方にかかるレーダーメッシュを、地上雨量計および福知山の位置とともに示す。

Table 2. Data used for the analysis

Case	Year	Period		Cause
		Raingauges	Radar	
Case 1	1982	7/26~8/5	7/26(13:00)~8/5(24:00)	Typhoon 8210
Case 2	1983	9/19~9/29	9/25(14:00)~9/29(03:00)	Depression (Typhoon 8310)
Case 3	1984	6/22~7/1	6/25(11:00)~6/28(24:00)	Frontal rainfall
Case 4	1985	6/21~7/15	—	Frontal rainfall
Case 5	1986	7/19~7/24	7/20(15:00)~7/22(12:00)	Baiu front with Thunderstorm
Case 6	1987	7/13~7/19	—	Baiu front (Typhoon 8705)

3. レーダー雨量計の概説

3.1 レーダー雨量計の原理・特性^{1)~4)}

レーダー雨量計の特徴としては広範囲にわたる気象状況を空間的・時間的に連続して観測でき、しかも即時性が高いことが挙げられる。これはいわば、定性的な長所と言える。

また、レーダーの受信電力を適切に降雨量に変換することが出来れば、上記の定性的長所を残したまま

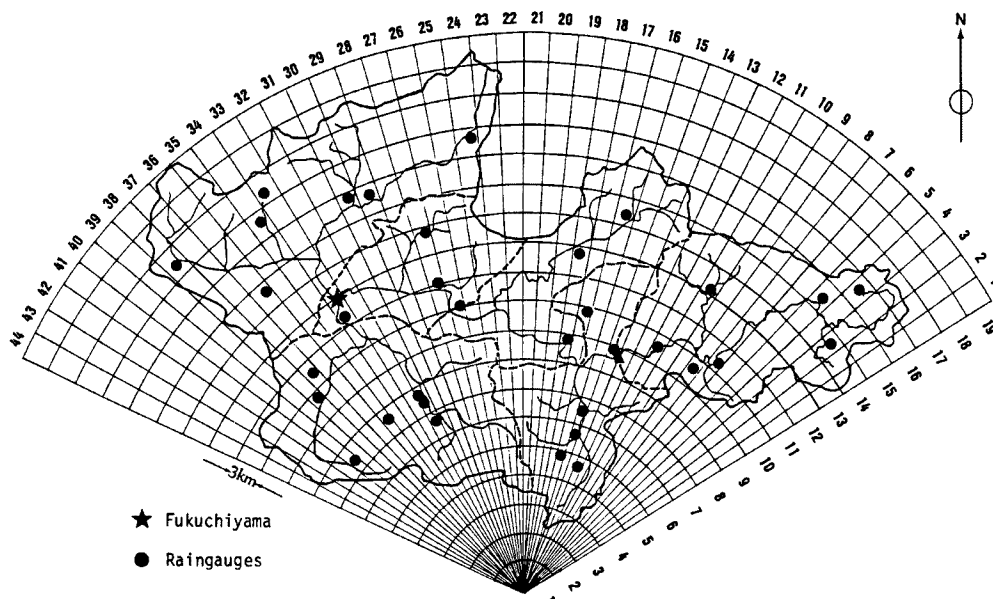


Fig. 3. Radar mesh and the location of raingauges.

定量的な把握が可能になる。これによって、例えば極めて局地的な地形性しゅう雨も確実に捉えることが出来る。レーダー雨量計と通常の気象レーダーとの違いは、気象レーダーが降雨を4～5ステップの強度別にアナログ表示するのに対し、レーダー雨量計は256ステップ（8ビット）のデジタル量に変換して表現する点にある。したがって、雨量を定量的により詳細に評価することが可能である。

以下にレーダー雨量計の理論について簡単に説明する。

レーダーのアンテナから送信された電波は雨雲・雨・大気により吸収減衰または散乱されるが、特に後方に散乱される電波の強さはその位置の雨量強度と密接な関係がある。この強さのある時間内平均と降雨強度との関係を与えるものがレーダー方程式である。

レーダー方程式は次式で与えられる。

$$P_r = \frac{P_t \cdot A_e \cdot h}{8\pi r^2} \cdot \Sigma\sigma \dots\dots\dots (1)$$

P_t は送信電力、 r はレーダーからの距離、 A_e は距離 r での有効面積、 h はパルス長、 $\Sigma\sigma$ は単位体積中にある雨滴の後方散乱断面積の総和、 π は円周率である。そして、 P_r はレーダーからの送信パルスに対し、距離 r の点を中心とした目標体積中の雨滴群から反射（後方散乱）して来る電波の平均電力である。

ここで、 $D \ll \lambda$ (D : 雨滴の直径、 λ : 波長) のとき、Rayleigh 近似が成立し、

$$\Sigma\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \cdot |K|^2 \cdot \sum_D N(D) \cdot D^6 \dots\dots\dots (2)$$

$N(D)$ は単位体積（1 m³）中の直径 D (mm) の雨滴数で、

$$|K|^2 = \left| \frac{e-1}{e+2} \right|^2 \dots\dots\dots (3)$$

e は水の複素誘電率で、温度と波長によって変化し、 $|K|^2$ の標準的な値として0.93が与えられている。

(1) 式と (2) 式より

$$P_r = \frac{P_t \cdot A_e \cdot h \cdot \pi^4}{8r^2 \cdot \lambda^4} \cdot |K|^2 \cdot \sum_D N(D) \cdot D^6 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

$$Z = \sum_D N(D) \cdot D^6 \dots\dots\dots (5)$$

$$C = \frac{P_t \cdot A_e \cdot h \cdot \pi^4}{8\lambda^4} \cdot |K|^2 \dots\dots\dots (6)$$

とすると

$$P_r = \frac{C \cdot Z}{r^2} \dots\dots\dots (7)$$

Z はレーダー反射因子と呼ばれている。

レーダー方程式を用いて受信電力を降雨強度に変換するためには、 Z と R の関係を知る必要がある。

(5) 式に対応する降雨強度 R は、直径 D の雨滴の落下速度を $v(D)$ (m/s) とすると、

$$R = 3.6 \cdot 10^{-3} \cdot \sum_D N(D) \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D^3 \cdot v(D) \dots\dots\dots (8)$$

(5) 式と (8) 式を比較すると、 Z と R には一義的な関係はないことが分かる。しかしながら従来からの観測の結果、経験的に次式が与えられている。

$$Z = B \cdot R^\beta \dots\dots\dots (9)$$

B , β は降雨の種類等に関するパラメータで、Marshall & Palmer によると、総合的な標準値は $B=200$, $\beta=1.6$ である。

(7) 式と (9) 式から Z を消去すると P_r を R に変換できるわけだが、 P_r にはグランド・クラッタとよばれる大地や建物といった雨滴以外のものからのエコーも含まれている。グランド・クラッタを除去する主な方法としては、次の2つがある。1つは、LOG方式と呼ばれる方法で、晴天時において得られる各基本メッシュ単位のクラッタマップを用意し、降雨時において晴天時のクラッタを差し引く方法である。この方法には、季節ごとにマップを変えなければならないなどの欠点がある。

もう1つは、MTI方式と呼ばれる方法で、反射電波の揺らぎが運動している雨滴群と不動の大地等では異なることを利用し、特殊なフィルターを通すことによって除去する方法である。この方法には過不足が生じる恐れがあるという欠点がある。深山レーダーにおいては両者を併用しているが、過去の研究成果によって山岳部におけるMTI方式の優位性が示されたので、本研究ではMTI方式を採用した。

グランド・クラッタを除去された P_r には、まだ降雨による減衰、雲による減衰、大気による減衰の効果などが含まれている。これらに対する補正を加えたデータがMTIデータ (E) で、 E と Z の関係は次式で与えられる。

$$Z = 200 \cdot (E/E_0)^2 \dots\dots\dots (10)$$

E_0 は基準電圧値で、192 km遠方で $R=1$ mm/hr となるように設定されたものであり、深山レーダーでは1.7に設定されている。

(9) 式と (10) 式より

$$R = (200/B)^{1/\beta} \cdot (E/E_0)^{2/\beta} \dots\dots\dots (11)$$

これが、ここで用いたレーダーデータの変換式である。以下、レーダーによって評価される雨量を『レーダー雨量』と呼ぶことにする。また、地上雨量計によって評価される雨量を『地上雨量』と呼ぶことにする。

3.2 地上雨量計による B, β の逐次キャリブレーション

レーダー雨量と地上雨量との一致性は B, β に依存していると言っても過言ではなく、 B, β を適切に定めることがレーダー雨量の精度を向上させるために重要である。 B, β は雨滴の粒径分布および落下速度によって異なる値をとるため、降雨の種類によって大きく変化する。したがって、本来ならば雨滴の粒径分布の観測と分析に基づいて B, β のキャリブレーション（定数決定）を行わなければならない。しかしながら、ここでは実際の立場から地上雨量データを用いてキャリブレーションを行うことにする。すなわち、レーダー雨量と地上雨量が1時間単位でよく一致するように B, β の値を逐次変更していく。

地上雨量は1時間単位で整理されていることが多いのに対して、レーダー雨量は5分単位で得られる。そのためレーダー雨量を1時間単位に変換する必要がある。ここでは、5分毎のレーダー雨量を単純平均することにした。 R が前後2.5分ずつの幅を持った時間帯の代表値であるとして、毎正時における値は前後の時間帯に等分した。こうして得たレーダー雨量による時間雨量を R_R とする。また、地上雨量は R_G で表し、各地点に対して添え字 i を付して R_{Gi} とする。そして、地上雨量とその直上方のメッシュ区画のレーダー雨量（これを R_{Ri} とする）との誤差二乗和が最小になるように B, β を最適化する。

$$\sum_i (R_{Ri} - R_{Gi})^2 \rightarrow \min \dots\dots\dots (12)$$

最適化に際しては FACOM の SSL II に格納されている改訂準ニュートン法による多変数関数の極小化プログラム MINF1⁷⁾ を用いた。ただし、地上雨量が3地点以上で観測されたときに限り最適化を行った。これは、部分流域内の最小の地上雨量計の数が3つであることと、過去の研究¹⁾によりキャリブレーション用の地上雨量計は3~4あれば十分であることが示されていることによっている。キャリブレーションを行わない場合は、標準値 $B=200, \beta=1.6$ を与えた。

4. 流出シミュレーション

4.1 面積平均雨量の算定

流出計算を行う際のインプットである面積雨量をどのように求めるかは重要な問題である。そこで、 B, β のキャリブレーションの方法をいくつか考え、それぞれの方法で毎時求められる B, β を用いて面積雨量を推定し、流出予測の精度を比較することにした。

流出モデルに含まれる遅滞時間により、3時間先までの流出予測には降雨予測を必要としない。したがって、こうして得た面積雨量による流出予測が、そのまま実時間での洪水予測とみなせるのである。また、ここでは前の時間にキャリブレーションされた B, β は、次の時間ステップでは使用せず、また新たに B, β のキャリブレーションを行うことにし、各時点での B, β の値の変化を調べる。

面積雨量の算定法として以下の7通りの方法を考えた。

① 地上雨量のみを利用

流域内の地上雨量計に記録された降雨を算術平均して面積雨量としたものである。これは、キャリブレーションを行ったものと比較・検討するために用意した。

② 逐次キャリブレーションしないで定数固定

$B=200, \beta=1.6$ に固定してレーダー雨量を求め面積雨量に換算した。これも、キャリブレーションを行ったものと比較・検討するために用意した。

③ 流域全体で同一の B, β を逐次キャリブレーションする。

由良川流域内の地上雨量計34地点すべてを用いてキャリブレーションを行って得た B, β によってレーダー雨量を求め②と同様に面積雨量に換算した。

④ 流域全体で $\beta = 1.6$ に固定して B のみを逐次キャリブレーションする。

過去の様々な研究で、 β の変動は B の変動よりも小さいということが報告されている。そこで、 β を標準値(1.6)に固定して B のみを地上雨量計34地点すべてを用いてキャリブレーションを行った。この B 、 β を用いて面積雨量を計算した。

⑤ 流域全体で $B = 200$ として(11)式の右辺に新たに補正係数 a を乗じ、 a 、 β を逐次キャリブレーションする。

(11)式の $(200/B)^{1/\beta}$ の項の200は、 $B = 200$ に基づいて設定されたものであり、(11)式に基づけば後述するように(Fig. 6)、指数部にある β が大きく変動することになる。そこで(11)式を、次のように変形する。

$$R = a \cdot (E/E_0)^{2/\beta} \dots \dots \dots (13)$$

地上雨量計34地点すべてを用いて a 、 β のキャリブレーションを行い、その a 、 β により面積雨量を計算するのが⑤の方法である。

⑥ 部分流域ごとに異なる B 、 β を逐次キャリブレーションする。

各部分流域内の地上雨量計によってキャリブレーションを行い、部分流域ごとにそれぞれ異なった B 、 β によってMTIデータを雨量強度に変換し、面積雨量を計算した。このとき、 β の値が極めて小さくなり一時的に異常な面積雨量が現れることがあった。これを防ぐために $\beta \geq 0.1$ 、 $B > 0$ という制約を与え、この条件に適合しないときは③の方法を行うことにした。

⑦ レーダーサイトから距離レベルごとに異なる B 、 β を逐次キャリブレーションする。

レーダーからの距離が異なると減衰などの効果が変化するものがある。そこで、地上雨量計の数などを考慮しつつレーダーからの距離を4つのレベルに分け(レーダーからの距離が0~24 km, 24 km~33 km, 33 km~42 km, 42 km~57 kmの4つに分けた)、レベルごとに異なる B 、 β をキャリブレーションして面積雨量を計算した。

以下、丸囲みの数字は上記の7つの面積雨量推定方法を表すものとする。

4.2 キャリブレーションの効果

キャリブレーションの効果を検討するために、まず、地上雨量とその直上方のレーダー雨量の相関を調べた。Fig. 4は、②、③、⑥の場合を示しているが、キャリブレーションを行うことによって、相関係数が0.72, 0.84, 0.88と②-③-⑥の順にだんだん良くなっている。ただ、地点ごとの地上雨量とレーダー雨量の相関が良くなったからといって、必ずしも面積雨量の精度が向上するとはいえない。なぜならば、後述するように地上雨量計が強雨域をとらえていない場合に過大な面積雨量が算定されることがあるからである。

各部分流域ごとにそれぞれの方法により求めたハイトグラフを調べてみた。Fig. 5にその1例を示す。①と②を比べると、時間的変動は似ているが、雨量値が大きく異なる。すなわち、キャリブレーションを行わないレーダー雨量の場合(②)、面積雨量が過小評価となっている。キャリブレーションを行うことによって(③および⑥)この過小評価を補正しているのがわかる。

次に、③の方法でキャリブレーションした場合の B 、 β の挙動についてその1例をFig. 6に示す。図中の F は、地点におけるレーダー雨量と地上雨量の平均二乗誤差の平方根を表す。全般的な傾向として、 B は200周辺であり変化せず、 β の値が大きく変化している点が注目できる。 β は、地上雨量に比べてレーダーのエコーが小さいときに小さな値をとり、逆のときに大きな値をとる。 B よりも β の方が大きく変動する原因としては、 β が累乗の形になっているため、 β の小さな変化で大きな R_R の変化をもたらす(言い換えると(11)式の形では B よりも β の方が感度がよいと言える)ためだと考えられる。

B 、 β の値に制約を加えないでキャリブレーションした場合、既に述べたとおり、一時的に異常な面積雨量値を示すことがあった。このときは、地上雨量ではかなりの雨量を観測しているにもかかわらずその

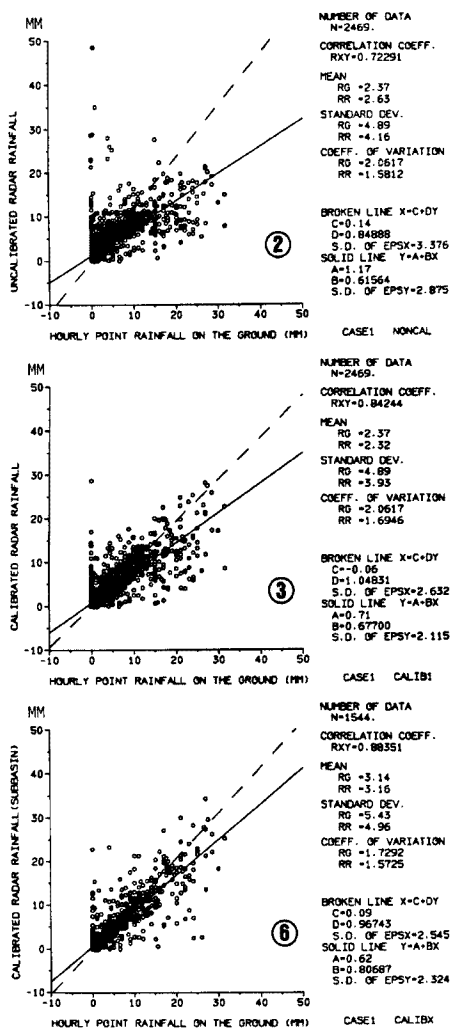
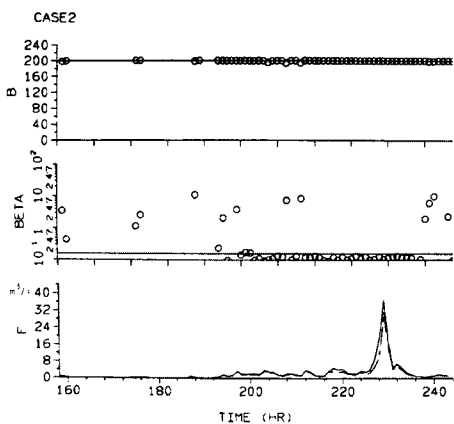


Fig. 4. Correlation between rainfalls estimated by the radar and by raingauges (Case 1).



上空のメッシュでのレーダーのエコーが小さく、しかも、その部分流域内に、かなり強いレーダーエコーが存在していた。即ち、地上雨量計が強雨域をうまくとらえていない状況でのキャリブレーションはその精度が著しく低下することがあり得ることを示唆している。

Fig. 7にケース1の①, ②, ⑤, ⑥の場合のハイドログラフの例を示す。実線がシミュレーションによるもので、1点鎖線は観測流量を示す。また、レー

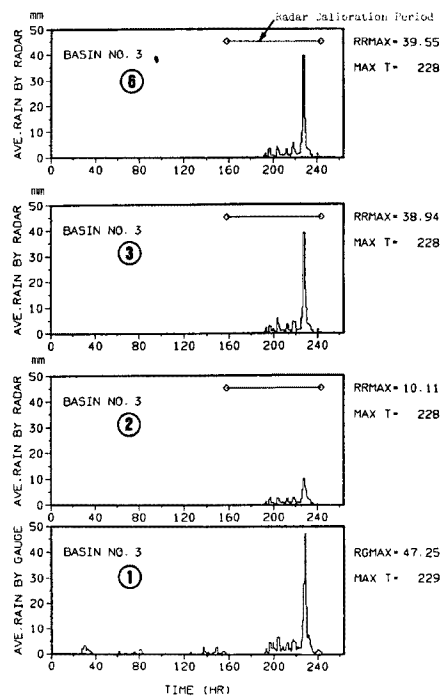


Fig. 5. Comparison of hyetographs of the areal rainfall in the subbasin-3 (Case 2).

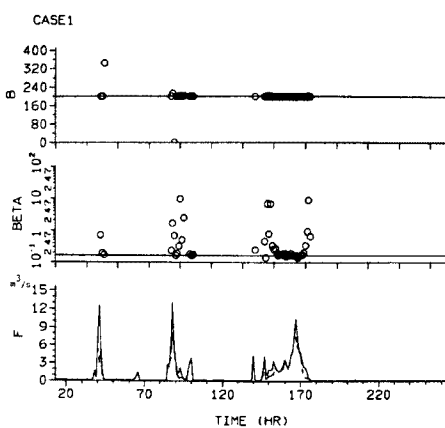


Fig. 6. Behavior of the calibrated parameters B and β (Case 1 and Case 2).

ダー雨量計データがない期間については地上雨量計のデータによる面積雨量を用いた。各流量観測地点における観測流量とシミュレーションによる流量との rmse (平均二乗誤差の平方根) を計算し、図中に記入した。①と⑤の岩間(土師川流域)のハイドログラフを見ると、キャリブレーションがマイナスの効果を与えている(ハイドログラフが合わなくなっている)が、綾部ではプラスの効果が見れており、福知山では全体として精度 (rmse) が地上雨量のみを用いたものよりも向上していることが分かる。⑥をみると、岩間では⑤のときよりも良いが、綾部でその精度が著しく悪くなっている(②よりも悪くなっている)。そのため、福知山では⑤よりも悪い結果になった。これより、キャリブレーションが有効である流域もあれば、キャリブレーションによって逆に精度が悪くなる流域もあることが分かる。また、Table 3 に rmse の一覧表を示す。

Fig. 8 に、7つの面積雨量算定方法すべてについてケース3の福知山地点でのハイドログラフを示した。これを見ると、③と⑤についてはキャリブレーションの効果がみられるが、それ以外では地上雨量計のみを用いた方が良くなっている。このように、逐次キャリブレーションを行なっても、常に面積雨量推定精度がよくなるわけではないことに注意する必要がある。

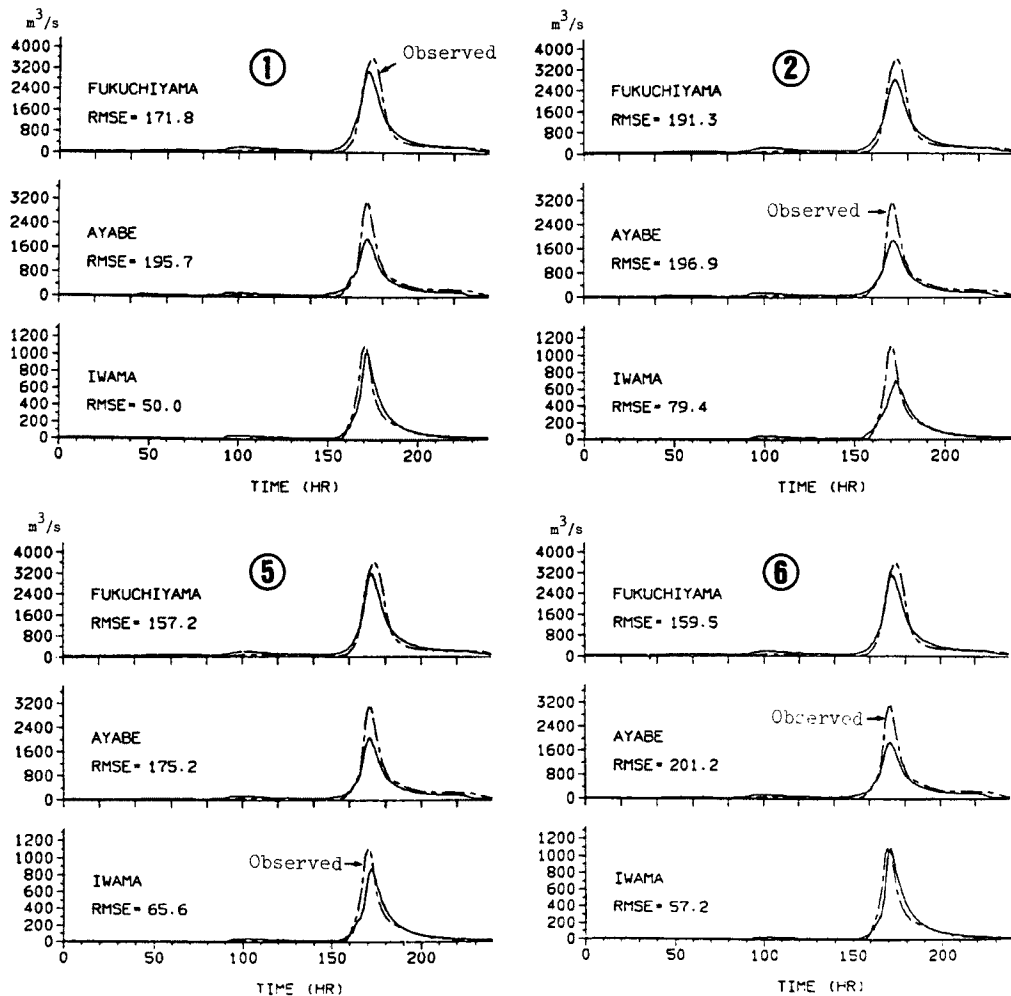


Fig. 7. Comparison of hydrographs computed by the existing model (Case 1 : at Fukuchiyama, Ayabe and Iwama).

Table 3. Comparison of the calibration performances (rmse, m³/s)

Case	Method of areal rainfall estimation	Whole basin model			Existing model		
		Fuku.	Ayabe	Iwama	Fuku.	Ayabe	Iwama
Case 1	① Only ground rainfall	170.7	193.9	50.0	171.8	195.7	50.0
	② Not calibrated	205.6	208.6	79.4	191.3	196.9	79.4
	③ Calibrated over all basin	182.9	195.1	80.9	190.8	195.6	80.2
	④ B calibrated and β fixed	152.6	166.7	76.0	169.4	178.0	76.0
	⑤ a and β calibrated	157.0	174.3	65.6	157.2	175.2	65.6
	⑥ Calibrated every subbasin	153.4	191.3	57.2	159.5	201.2	57.2
	⑦ Calibrated every range	156.3	165.5	73.9	171.2	177.4	73.9
Case 2	① Only ground rainfall	185.6	72.9	119.3	139.0	88.0	119.3
	② Not calibrated	513.0	338.2	178.9	442.2	280.5	178.9
	③ Calibrated over all basin	237.9	182.5	88.8	239.4	180.4	88.8
	④ B calibrated and β fixed	148.2	75.2	69.6	107.7	70.1	69.6
	⑤ a and β calibrated	189.5	86.7	77.5	122.1	62.8	77.5
	⑥ Calibrated every subbasin	253.1	205.3	75.4	244.7	195.8	75.4
	⑦ Calibrated every range	249.6	193.9	90.8	249.1	189.8	90.8
Case 3	① Only ground rainfall	71.6	64.5	27.5	55.8	67.4	27.5
	② Not calibrated	126.5	86.7	28.1	59.7	55.7	28.1
	③ Calibrated over all basin	72.5	68.9	33.2	54.8	63.9	33.2
	④ B calibrated and β fixed	60.1	66.7	35.8	59.9	70.4	35.8
	⑤ a and β calibrated	67.1	65.3	32.1	54.0	65.2	32.1
	⑥ Calibrated every subbasin	65.3	68.1	33.3	64.6	73.6	33.3
	⑦ Calibrated every range	68.0	69.4	37.3	64.1	70.5	37.3
Case 4	① Only ground rainfall	91.4	158.9	31.5	115.2	154.7	31.5
	② Not calibrated	65.2	163.7	22.5	88.4	161.5	22.5
	③ Calibrated over all basin	66.1	194.3	38.3	96.6	174.2	38.3
	④ B calibrated and β fixed	68.7	192.7	39.4	99.9	174.7	39.4
	⑤ a and β calibrated	109.2	157.9	38.6	128.2	151.9	38.6
	⑥ Calibrated every subbasin	65.9	168.9	36.6	104.6	153.8	36.6
	⑦ Calibrated every range	69.9	173.8	48.6	105.8	161.9	48.6

4.3 コンコーダンス・アナリシスによる検討^{8),9)}

コンコーダンス・アナリシスは、多基準分析法の一つである。これは、複数の代替案の相対的な優位性を各項目に関する代替案間の相違に着目して求めようとするものである。以下に、簡単にコンコーダンス・アナリシスの手順を述べる。

[1] インパクトマトリックス Z を構成する。これは各代替案の実施によって生ずる各評価項目ごとのインパクト（結果）を表すマトリックスである。Z の成分を z_{ji} で表す。

[2] 各評価項目に対してウェイト W を与える。W の成分を w_j とし、 $\sum w_j = 1$ となるようにする。

[3] 代替案 i のコンコーダンスセット C_{ii} は、評価基準 j について、代替案 i' よりも i の方が好ましいときに作成される。ディスコーダンスセット D_{ii} はその逆の手順で作成される。 C_{ii} および D_{ii} は次のように定義される。

$$C_{ii} = \{j \mid z_{ji} > z_{ji'}\} \dots\dots\dots (14)$$

$$D_{ii} = \{j \mid z_{ji} < z_{ji'}\} \dots\dots\dots (15)$$

[4] コンコーダンスマトリックス C およびディスコーダンスマトリックス D を作成する。コンコーダンスインデックス c_{ii} は次のように定義される。

$$c_{ii} = \sum w_j, i \neq i', j \in C_{ii} \dots\dots\dots (16)$$

また、ディスコーダンスインデックス d_{ii} は次のように定義される。

$$d_{ii'} = \max \{ |Z_{ji} - Z_{ji'}| / d_j^{\max}, j \in D_{ii'} \dots\dots (17)$$

$$d_j^{\max} = \max |Z_{ji} - Z_{ji'}|$$

$c_{ii'}$ を成分としてコンコダンスマトリックス C をつくり、 $d_{ii'}$ を成分としてディスコダンスマトリックス D をつくる。

[5] 2つのマトリックス C および D の成分である $c_{ii'}$ および $d_{ii'}$ の値を用いて、I 個の代替案の相対的な優位性を求める。そのために、ここでは次の (18) 式と (19) 式を用いる。

$$c_i = \sum_{i'=1}^I c_{ii'} - \sum_{i'=1}^I c_{i'i} \dots\dots\dots (18)$$

$$d_i = \sum_{i'=1}^I d_{ii'} - \sum_{i'=1}^I d_{i'i} \dots\dots\dots (19)$$

指標 c_i は、コンコダンス卓越指標 (concordance dominance index) と呼ばれ、代替案 i が他のすべての案よりどの程度優れているかを表し、この値の大きい案ほど優位性は高い。一方、指標 d_i は、ディスコダンス卓越指標と呼ばれ、代替案 i が他のすべての案よりどの程度劣っているかを表し、この値が小さいものほど優位性は高い。これらの指標を用いて代替案の選好順位を決定する。 c_i と d_i により 2通りの順位が求められるが、最終的には、両者を比較してどの代替案を選ぶかを決めなければならない。

コンコダンス・アナリシスは基本的には複数個の計画代替案の中の最適手法を見つけるものである。これを、本研究ではどの面積雨量算定方法が優れているかを判断するために採用した。以下その適用方法を示す。

1) 評価値は各ケース、各地点における流量の誤差 2 乗和 (rmse) とした。(これによってインパクトマトリックス Z を構成する)

2) 地点に関するウェイトは、その地点の上流に当たる流域の面積の合計に比例して配分した。このとき、放流量データを用いて解析したときには、大野ダム上流域の面積を除いた。また、ケースに関する

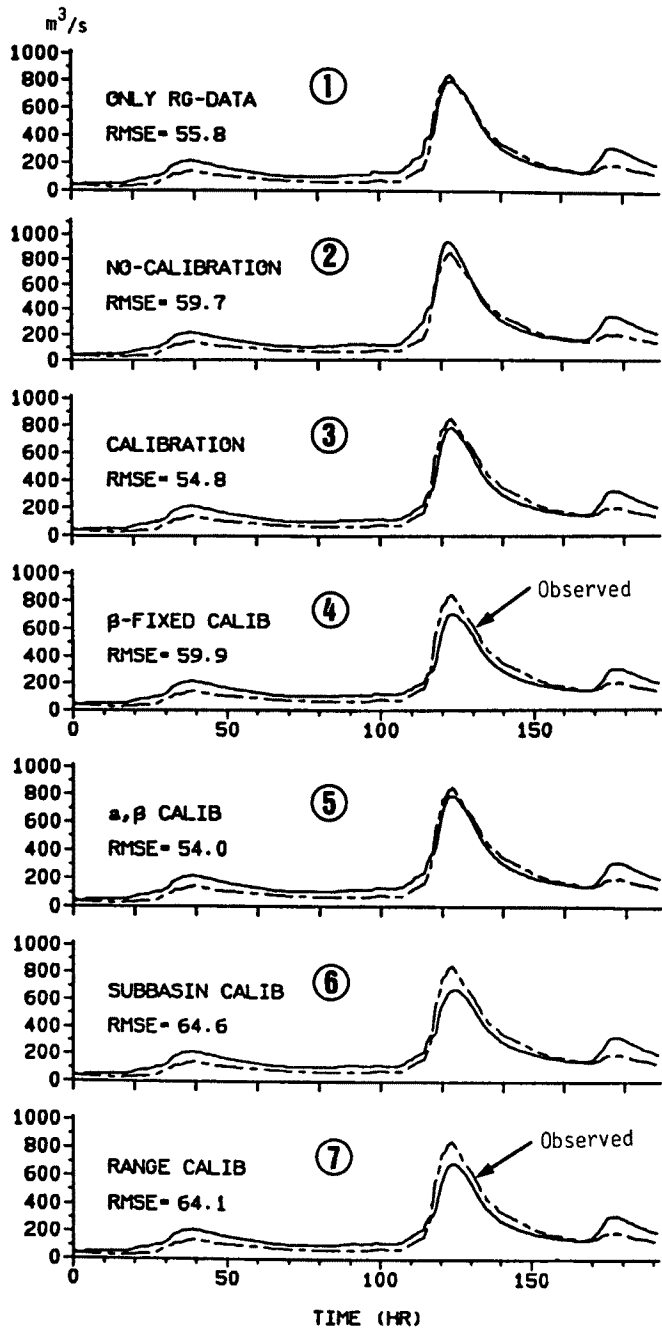


Fig. 8. Comparison of hydrographs computed by the existing model (Case 3 : at Fukuchiyama).

Table 4. Weights used in the concordance analysis

Point	Case No.				Area(km ²)
	1	2	3	4	
Fukuchiyama	0.128	0.127	0.030	0.054	1350
Ayabe	0.077	0.076	0.018	0.032	810
Iwama	0.035	0.035	0.008	0.015	370
Fukuchiyama (Existing model)	0.095	0.094	0.022	0.040	1000
Ayabe (Existing model)	0.043	0.043	0.010	0.018	460

Table 5. Concordance matrix

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
①	0.00	0.88	0.80	0.23	0.37	0.52	0.50
②	0.12	0.00	0.21	0.20	0.13	0.22	0.20
③	0.20	0.79	0.00	0.17	0.12	0.46	0.54
④	0.77	0.80	0.83	0.00	0.53	0.62	0.67
⑤	0.63	0.87	0.88	0.47	0.00	0.66	0.83
⑥	0.48	0.78	0.54	0.38	0.34	0.00	0.60
⑦	0.50	0.80	0.46	0.33	0.17	0.40	0.00

ウェイトは、福知山地点での実測のピーク流量（Case 1,2,3,5 に対して、ピーク流量は、それぞれ 3635.62, 3607.69, 847.81, 1538.78 m³/sec である）に比例して配分した。すなわち、出水規模に応じて重みづけを行なった。（これによってウェイト W を構成する）

重みづけに用いた数値を Table 4 に、得られたマトリックスを Table 5, 6 に示した。

これらを用いると、 c_i によればもっとも評価が高かったのは⑤で、以下④-①-⑥-⑦-③-②の順であり、 d_i によれば①-⑤-④-⑦-②-③-⑥の順となった。

4.4 総括

実時間キャリブレーションによる流出予測精度向上の可能性について検討してきた。これらを総合的に判断すると以下のことがわかる。

【1】レーダー定数 B , β を標準値に固定して変換したレーダー雨量を用いると、計算ハイドログラフに大きな誤差が生ずる可能性がある。そのため、何らかの補正（逐次キャリブレーション）を行う必要がある。

【2】5つのキャリブレーション（③～⑦）の中では④と⑤の面積雨量の推定精度が良いといえる。

【3】由良川流域には約 50 km² に 1つの割合で地上雨量計があり、流出計算結果を見ても分かるように地上雨量計による面積雨量推定の精度はかなり高いと思われる。

【4】部分流域ごとにキャリブレーションを行う場合（⑥）、 B , β の値に制約をつけないで面積雨量に換算すると極めて異常な値がでることがある。これは、地上雨量計の数が少なく、かつ地上雨量計が強雨域を捉えていないときに起きる。強雨域の雨量値が極端に大きく外挿されてしまうのである。少ない地上雨量計でキャリブレーションを行うときにはこの点に十分な注意を払う必要がある。

【5】部分流域ごとにキャリブレーションを行う場合（⑥）、キャリブレーションがうまくいく部分流域とそうでない流域とがあった（土師川流域と大野ダム上流域において概して良い結果を得た）。このことは、今後地上雨量計の適正な配置を研究することにより、キャリブレーションの精度が向上する可能性を示している。

Table 6. Discordance matrix

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
①	0.00	0.67	0.57	0.68	0.79	0.58	0.70
②	1.00	0.00	0.82	1.00	1.00	1.00	1.00
③	1.00	0.84	0.00	0.68	1.00	0.92	0.70
④	0.93	0.82	0.48	0.00	1.00	0.92	0.56
⑤	0.50	1.00	0.98	0.92	0.00	0.98	0.89
⑥	0.83	1.00	0.92	0.89	1.00	0.00	0.92
⑦	1.00	1.00	0.88	0.55	0.95	0.54	0.00

今回対象としたのはわずか4ケースであり、今後多数の降雨・流出記録を用いてさらに検討を加える必要がある。その項目として次のようなものが挙げられる。

a) 本研究の場合、貯留関数法に遅滞時間があるために降雨予測が必要でなかったが、降雨予測が必要となるときこうしたキャリブレーションの結果をどう生かすかを検討する。

b) レーダー定数 B 、 β は降雨の種類によって異なることは既に述べた通りである。気象条件（降雨の種類）ごとに適したキャリブレーションの有無を検討する。

c) 地上雨量計の位置によってレーダー雨量との相関がよいものと悪いものがあった。そこで、キャリブレーション用地上雨量計の適切な配置について検討する。

5. 結 語

この種の研究は建設省でも各地のレーダーで既に行われており、現在も進行中の課題である（例えば、西谷ら¹⁰⁾、阿部ら¹¹⁾）。本研究では特に、広域での洪水予測を念頭に置き、かなり広い流域（千数百km²）でのレーダー雨量の実時間補正の有用性について検討した。こうした実時間補正の有用性を検証する次のステップとして、数百km²程度の流域で、かつ流域内に多数の地上雨量計と流量観測所があるような流域（例えば大野ダム上流域）において、詳細に検討してみたいと考えている。

なお、建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所、同福知山工事事務所、京都府大野ダム管理事務所、(財)日本気象協会関西本部には貴重なデータ・資料を提供して頂いた。また、京都大学防災研究所中北英一助手にはレーダーデータの処理について有益な助言を頂いた。本研究では、昭和62年度文部省科学研究費補助金（試験研究（1）および重点領域研究（1））の援助を受けた。ここに記して、深甚なる謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所：レーダ雨量計の特性に関する調査，土木研究所資料，第1634号，1981.
- 2) 建設省土木研究所：レーダ雨量計の観測特性と精度向上に関する調査報告書—レーダ雨量計を利用した流出予測シミュレータの開発—，土木研究所資料，第2078号，1984.
- 3) 深山レーダ雨量計システム研究委員会：深山レーダ雨量計システム開発報告書，1984.
- 4) 建設省土木研究所：降水現象のレーダ観測に関する調査報告書，土木研究所資料，第2353号，1986.
- 5) 木下武雄：レーダ雨量計の実用化への開発，土木学会論文集，第351号/II-2，1984，pp. 1-15.
- 6) 友杉邦雄：レーダ雨量と地上雨量の一致性向上に関する一考察，京都大学防災研究所年報，第28号B-2，1985，pp. 179-193.
- 7) 富士通(株)：FACOM FORTRAN SSL II 使用手引書，1980，pp. 403-406.

- 8) 戸田常一: 総合的な代替案評価手法の分類と考察, 土木学会関西支部講習会テキスト「都市施設計画の総合評価と住民参加」.
- 9) Nijkamp, P.: Theory and Application of Environmental Economics, Studies in Regional Science and Urban Economics, Vol. 1, North-Holland, 1977, pp. 250 - 274.
- 10) 西谷隆巨・勝木隆昌・潮田雄一: レーダ雨量計と地上雨量の対比による定数 B , β の検討, 土木学会第 42 回年講, II-36, 1987.
- 11) 阿部英志・吉野文雄・水野雅光: レーダ雨量計におけるオンライン補正, 土木学会第 42 回年講, II-37, 1987.