

洪水予測精度向上のためのレーダー雨量の逐次補正について

Real-Time Calibration of Radar Rainfall for Improvement of Flood Forecasting Accuracy

京都大学工学部 高棹 琢馬 Takuma TAKASAO

京都大学工学部 宝 馨 Kaoru TAKARA

京都大学大学院 三谷裕次郎 Yujiro MITANI

This paper describes real-time calibration of B, β in the radar equation used to transform the radar reflectivity into the rainfall intensity. The calibration is intended to obtain a higher degree of accuracy in estimating areal rainfall and forecasting flood runoff. Various methods of calibration are compared in terms of the accuracy of hydrograph in the Yura River basin ($1,880\text{km}^2$) located in the north of the Miyama Radar Rainage system, Ministry of Construction.

Keywords : radar rainage, real-time calibration, areal rainfall, flood forecasting, concordance analysis

1. はじめに

本研究の目的は、レーダー雨量計の即時的・広域的観測特性を有効に利用し、流出計算の入力として必要な雨量の推定精度を高めて出水予測精度の向上を図り、豪雨・洪水災害の防止・軽減に資することである。筆者らは既に、レーダー雨量計データを雨量に換算する際に用いる、レーダー反射因子 Z と降雨強度 R との関係を与える経験式 $Z = B \cdot R^\beta$ の中の定数 B, β (標準値として $B=200, \beta=1.6$ がよく用いられる)を流域内の多数の地上雨量計データを利用して実時間で逐次(オンライン)補正していくことによって、面積雨量の推定精度、出水予測精度がどの程度向上するかという点について基本的な検討を行ってきた^{1,2)}。ここでは、その検討に基づき、さらに詳細に検討を進めた結果をとりまとめた。

2. これまでの検討の概略^{1,2)}

レーダー雨量計によって評価される降雨量を「レーダー雨量」と呼ぶことにする。レーダー雨量は、極座標系のメッシュで囲まれる区画ごとの平均値の形で評価される。建設省近畿地方建設局深山レーダー雨量計および由良川流域(面積 $1,880\text{km}^2$)を対象として、昭和57年以後の比較的大きな4出水(Case 1, 2, 3, 5と記す)について検討した。地上雨量計データは流域内の34地点の1時間単位のものを用いた。

深山レーダー雨量計では、次式により受信電力 E (MTIデータ)を降雨強度に変換する。 E_0 は定数で、 $E_0=1.7$ である。

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

これに対し、以下のような補正方法(5個の部分流域それぞれの面積雨量推定の方法)を試みた。ただし、⑧と⑨は、いわゆる折れ線回帰法³⁾で、本研究で追加検討したものである。

- ①地上雨量計のみを利用(算術平均法)。すなわち、レーダー雨量を使わない。
- ②逐次補正しないで定数固定($B=200, \beta=1.6$)。すなわち、地上雨量を使わない。
- ③全流域同一の B, β を逐次補正(すなわち、地上雨量とその直上方のメッシュ区画のレーダー雨量との誤差二乗和が最小になるように B, β を最適化)する。
- ④全流域で $\beta=1.6$ と固定して B のみを逐次補正する。

- ⑤全流域で $B=200$ として(2)式の右辺に新たに係数 a を乗じ、 a 、 β を逐次補正する。
- ⑥部分流域ごとに異なる B 、 β を逐次補正する。
(ただし、 $B>0$ 、 $\beta\geq 0.1$)
- ⑦レーダーサイトからの距離レベルごとに異なる定数を逐次補正する。
- ⑧レーダー反射因子 Z の大きさを3段階に分け、 $Z-R$ 関係の折れ線回帰モデルを予め求めておき、このモデルにより補正する。地上雨量は使わない。
- ⑨雨量強度を3段階に分け、 $Z-R$ 関係の3つの回帰モデルを予め求めておき、毎正時の34地点の地上雨量強度の平均値に基づいてその3つのモデルのうちどれを用いるか決定したのち、そのモデルと受信電力 E (すなわち Z)から、面積雨量を求める。

こうして毎正時に得られる部分流域ごとの時間雨量を、福知山を基準地点(流域面積 $1,350\text{km}^2$ ；計画高水流量 $5,600\text{m}^3/\text{s}$)とする洪水予報用のモデル

(5流域・2河道の貯留関数モデルで、モデル定数はここでの解析期間以前に既に決定されているもの⁴⁾を用いた)に入力し、洪水予測精度を検討した。図1は、これら9つの方法で得た福知山地点のハイドログラフの平均二乗誤差(RMSE)を比較したものである。また、表1は、流域内の3地点(福知山、綾部、岩間)のハイドログラフのRMSEを評価標準として、それに観測ピーク流量の大きさ、集水面積により重み付けしてコンコーダンス・アナリシス⁵⁾を行った結果をケースごとに示している。ただし、4つのケースのうち、Case2とCase5は地上雨量とレーダー雨量の相関が悪いので解析結果を割り引いて考えねばならない。そのため、Case1とCase3のみを対象とした結果を併記した。①～⑨の9つの代替案の中で表中の数値の大きいものほど選好度が良いことを示す。これらの結果から次のようなことがわかった。

【1】レーダー雨量を用いなくて、地上雨量計のみを用いた①の場合でも流出予測精度はかなりよい。由良川流域では、約 50km^2 に一つの割合で地上雨量計があり、地上雨量計のみによる面積雨量推定の精度はかなり高いものと思われる。また、由良川の現行洪水予報モデルの tune up は良好であるといえる。

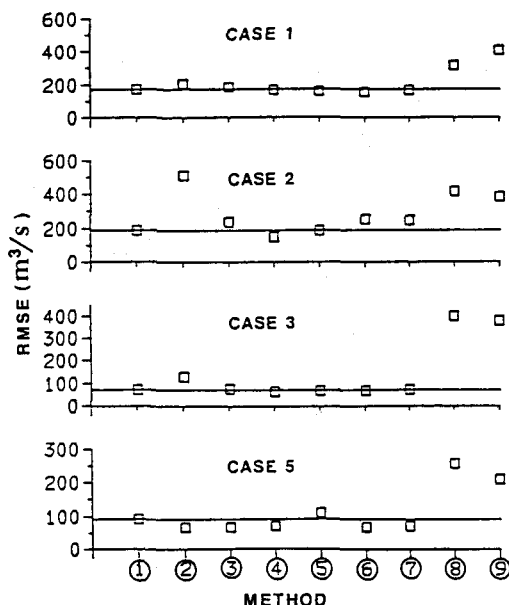


図1 ハイドログラフの誤差の比較

表1 コンコーダンス・アナリシスの結果(福知山流域)

... 1位, ** 2位, * 3位

Method	All Case	Case 1&3	Case 1	Case 2	Case 3	Case 5
①	4.43**	3.46*	2.52	7.11*	7.48**	1.90*
②	-5.20	-5.65	-9.55	-14.22	3.04	9.75***
③	-2.13	-4.96	-6.88	2.67	3.69	-1.64
④	4.14*	3.41	3.49	12.15***	4.09*	-3.14
⑤	5.85***	7.63***	7.52***	9.56**	7.79***	-1.23
⑥	2.79	4.48**	5.37**	0.34	2.19	4.75**
⑦	0.73	3.37	4.90*	-0.10	-1.12	-2.95
⑧	-5.80	-4.94	-0.57	-10.21	-15.33	-6.78
⑨	-4.81	-6.80	-6.80	-7.24	-11.83	-0.67

【2】定数固定の②の場合、計算ハイドログラフに大きな誤差が生じる。したがって、何らかの補正（逐次補正）を行う必要がある。

【3】7つの補正方法（③～⑨）の中では④、⑤が相対的に良い結果を与える。特に（1）式をそのまま用いて B 、 β を同定する③よりも、⑤のようにした方が結果が良い。

【4】⑥の場合、 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った。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捕らえていないときに起きる。強雨域が極端に大きく外押されてしまうのである。少ない地上雨量計で逐次補正を行うときには、この点に十分な注意を払う必要がある。

【5】⑥の場合、補正がうまくいく部分流域とそうでない流域とがあり、今後、地上雨量計の適正な配置の研究によってキャリブレーションの精度がさらに向上する可能性がある。

【6】⑧と⑨はあまり良い結果を与えなかった。 Z あるいは R の強度別に回帰モデルを求めたのであるが、強度別に分けても $Z-R$ の散布状態のばらつきはかなり大きく、この方法には無理があるようである。

3. 大野ダム流域における検討

上記の検討はかなり広い流域（千数百 km^2 ）での洪水予報を念頭に置いたもので、各部分流域の集水面積は170～370 km^2 であった。レーダー雨量計では約10 km^2 ごとに雨量が得られるわけであるから、雨量の空間分布を、部分流域の1つである大野ダム流域においてより詳細に検討することにした。この流域は由良川の最上流にある面積約350 km^2 の山地流域である。本研究では、これをさらに20の部分流域に分割し（図2；流量観測点はA：田歌、B：島、C：静原、D：大野の4地点；地上雨量観測は8地点）、斜面－河道モデルを構成した（図3）。斜面には山腹斜面集中化モデル⁶⁾、河道には kinematic wave モデルをそれぞれ適用した。モ

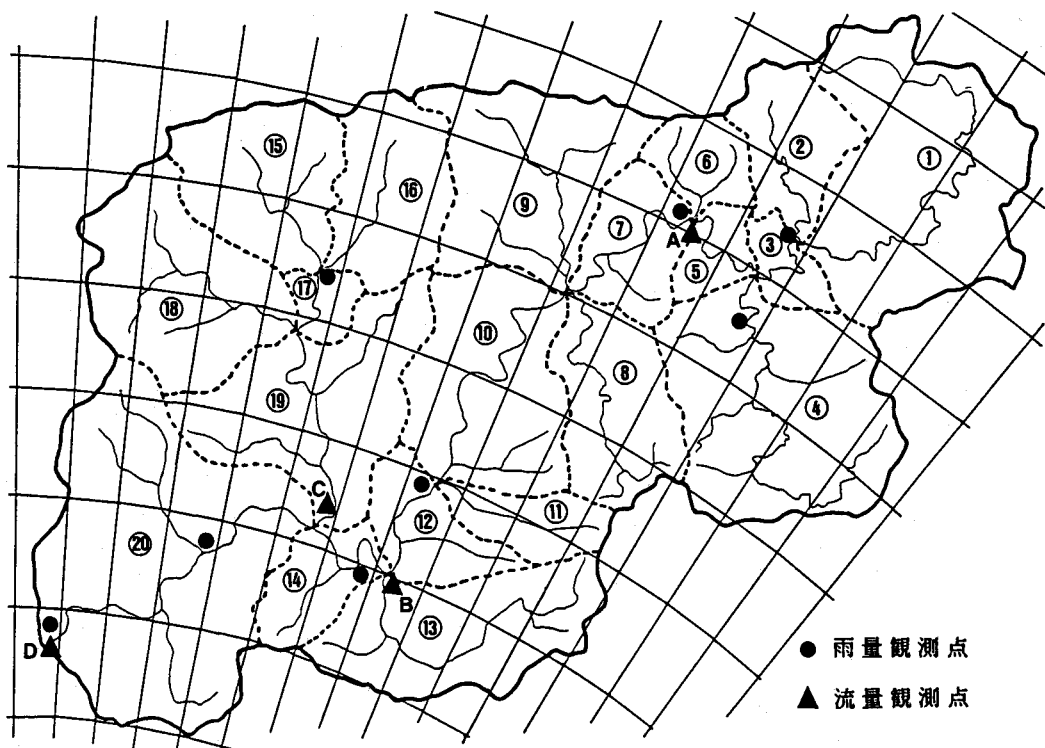


図2 大野ダム流域

デルのパラメタは、流量観測点ごとに、その上流の面積雨量を地上雨量で算出（算術平均）し、計算流量と観測流量との誤差が小さくなるように決定した。

まず、2. において用いた①～⑦の方法をそのまま適用することを試みた。すなわち、大野ダム流域内のみならず周辺の地上雨量データをも用いて逐次補正したB, β によって、大野ダム流域内の4流量観測点でのハイドログラフがどの程度適合するかを調べた。さらに、大野ダム流域内の8地点の地上雨量のみでB, β を逐次補正することも試みた。上記の③～⑦のうち、⑥をダム流域のみで実行することは③に相当する。残りの④⑤⑦の方法をダム流域のみで適用したものを、それぞれ④*, ⑤*, ⑦*と表すことにする。ただし、⑦*は2つの距離レベルに（雨量観測点が4個ずつになるように）分けた。

表2は、①～⑦および④*, ⑤*, ⑦*の方法を用いて得たハイドログラフのRMSEの値をCase1について

各々の流量観測点で比較したものである。表3は、2. と同様にしてコンコーダンス・アナリシスを行った結果を示している。これらの表によって、以下のようなことがいえる。

【1】10通りの方法の中では、①, ③, ④, ④*, ⑤の方法が良いといえる。①が良いのは、地上雨量計の密度が高いため面積雨量の推定精度がある程度良く、この雨量を用いて流出モデルのパラメタ同定を行ったことによるが、詳しくみると、田歌や静原のように逐

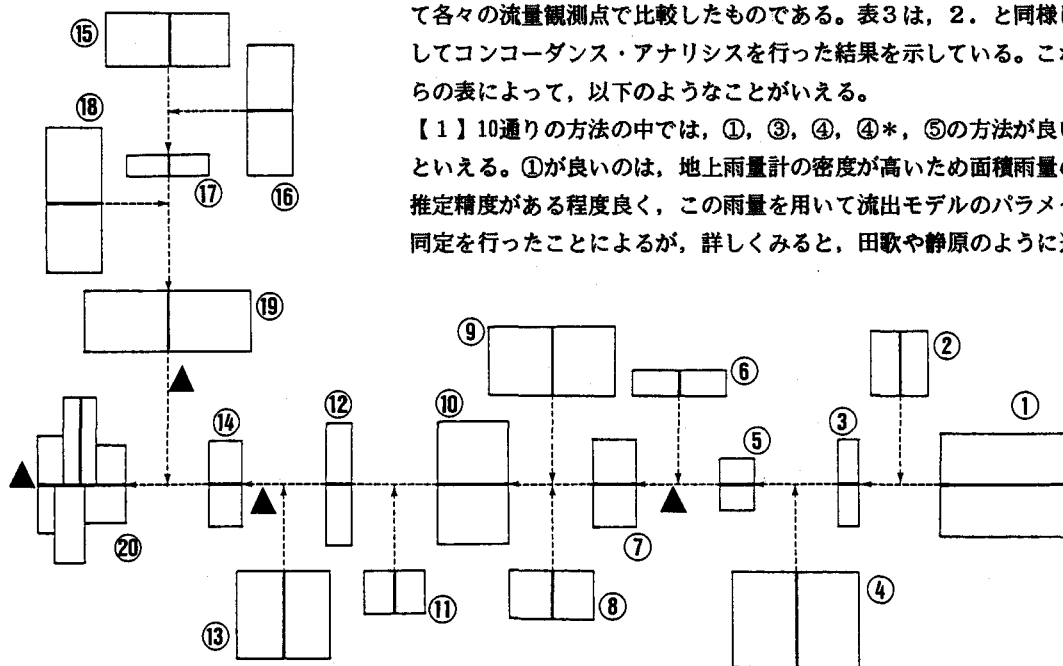


図3 大野ダム流域のモデル化

表2 大野ダム流域におけるRMSE (m^3/s)

... 1位, .. 2位, * 3位

Case	面積雨量	田歌	島	静原	大野ダム
1	① 地上雨量	30.78	32.08***	29.81	70.76***
	② 定数固定	46.59	67.59	30.06	110.97
	③ 全流域一様B, β	31.64	49.07	27.30	86.18*
	④ β 固定	27.12**	58.57	27.12**	116.50
	④* β 固定(ohno)	33.03	45.56*	27.44	83.66**
	⑤ a, β	32.01	45.33**	28.61	116.50
	⑤* a, β (ohno)	58.69	46.31	30.63	95.82
	⑥ 部分流域B, β	27.53*	47.56	27.16*	135.87
	⑦ レンジ毎B, β	24.04***	59.84	26.69***	163.06
	⑦* レンジ毎B, β (ohno)	39.87	112.38	33.96	178.92

次補正によりさらに改善されるケースもある。

【2】図4は、Case3の静原地点の観測ハイドログラフと①②④⑤の計算ハイドログラフを示したものである。図4左のように、定数固定の②は良い結果を与えないので何らかの補正が必要であり、④⑤によりどの程度の改善が可能なのか、その一例がこの図に示されている。

【3】⑤＊、⑥、⑦、⑦＊は良くない。これらは、2つの定数を同定するのに毎回4～8個程度以下のデータしか使わないことにより同定がうまくいかないものと思われる。

【4】④＊は使うデータの数とはそれらと同程度ではあるが、同定する定数が1つだけなのでうまくいくようである。

4. おわりに

レーダー定数 B 、 β の同定・逐次補正に関する研究は多数あり、現在も鋭意研究が進められている⁷⁾。本研究は、レーダー雨量の精度を流域が捕捉した水量（河川流量）で評価したものである。こうしたアプローチの場合、従来の地上雨量とレーダー雨量の直接的な比較の場合とは異なり流出モデルの精粗が評価結果に反映される点に留意しなければならないが、洪水予測精度向上の観点から重要であり、今後さらに推進すべき課題であろう。

今後の検討項目として以下のようなものが挙げられる。

- 気象条件ごとに降水粒子の形態が異なり、したがって、 B 、 β の値も変化することが以前より指摘されている。現在、建設省では二重偏波・ドップラ（DND）レーダーの試験を行いつつある⁸⁾。これは降水粒子の形態や移動の情報をも取り込もうとするもので、雨だけでなく雪の観測にも有望視されている。このDNDレーダーによって得られる情報を B 、 β の逐次補正にオフラインであるいはオンラインでどのように活用していくかの検討。
- 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る。逐次補正用の地上雨量計の適切な配置を検討する。
- 逐次補正の時々刻々の結果を、リアルタイムの降雨予測にどう生かすかを検討する。
- ここでは、地上雨量とレーダー雨量との差が小さくなるように B 、 β を最適化した。地上雨量データを使わず、ハイドログラフの誤差が小さくなるようにする最適化も考えられる。

こうした検討を積み重ねてゆき、 B 、 β 方式でどの程度まで洪水予測精度が向上できるのかを定量的に明らかにすることが当面の課題といえよう。

表3 コンコーダンス・アナリシスの結果（大野ダム流域）

*** 1位, ** 2位, * 3位

Method	All Case	Case 1&3	Case 1	Case 2	Case 3	Case 5
①	10.30***	9.83***	9.81***	3.67	7.50**	14.80***
②	-7.14	-7.62	-5.10	-15.35	-12.09	3.89*
③	2.44	6.06*	6.02*	11.98***	3.70	-12.57
④	-5.23	3.29	2.20	-7.86	7.21*	-11.16
④＊	3.44**	7.70**	7.88**	-0.84	3.12	2.80
⑤	-0.65	3.79	1.94	-7.73	10.11***	1.01
⑤＊	1.13	-4.07	-3.99	-1.47	-2.12	12.81**
⑥	1.74	0.38	-0.02	5.26*	1.88	-3.25
⑦	2.73*	-3.01	-3.01	10.17**	-2.13	2.14
⑦＊	-8.76	-16.35	-15.73	2.17	-17.18	-10.48

本研究は、昭和63年度 文部省科学研究費補助金・重点領域研究(1)「豪雨出水の実時間予測と制御に関する研究」(63601021, 代表・高棹)および 同・重点領域研究(2)「MIMO流出系の洪水予測手法に関する研究」(63601518, 代表・宝)の補助を受けた。また、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・資料を多数提供して頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。

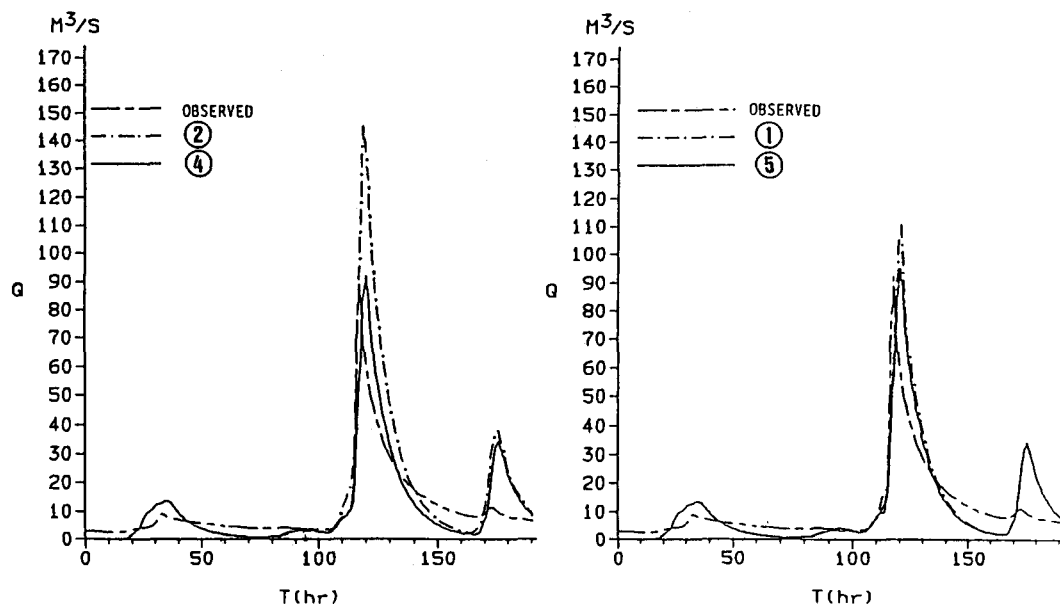


図4 ハイドログラフの比較 (Case3, 静原地点)

参 考 文 献

- 1)高棹琢馬(代表): 豪雨出水の実時間予測と制御に関する研究, 昭和62年度文部省科学研究費補助金(重点領域研究(1))研究成果報告書, 1988, pp.18-23.
- 2)高棹琢馬・宝 馨・三谷裕次郎・笛田俊治: レーダー雨量の逐次補正とその洪水予測への適用, 京都大学防災研究所年報, 第31号B-2, 1988, pp.241-254.
- 3)建設省淀川ダム統合管理事務所: 深山レーダー雨量計定数等解析業務報告書, 1982.
- 4)由良川洪水予報連絡会: 由良川洪水史, 1981, pp.248-252.
- 5)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」.
- 6)Takasao, T. and K. Takara: Evaluation of Rainfall-Runoff Models from the Stochastic Viewpoint, Journal of Hydrology, Vol.102, 1988, pp.381-406.
- 7)上林好之・山口高志・山本晃一: レーダー定数(B, β)の同定手法の提案, 土木学会論文集, 第399号/II-10, 1988, pp.121-130.
- 8)吉野文雄・水野雅光・水野秀幸・井川貴史: 二重偏波・ドップラレーダによる降水現象の観測, 土木技術資料, Vol.30, No.6, 1988, pp.293-298.