

レーダ雨量の時間外挿キャリブレーション手法の検討
Calibration of radar raingauge data by time-extrapolation

建設省利根川ダム統合管理事務所	小林 明	Akira Kobayashi
建設省利根川ダム統合管理事務所	小笠原 智 宏	Tomohiro Ogasawara
建設省利根川ダム統合管理事務所	松 崎 実	Minoru Matsuzaki
働河川情報センター	山 口 高 志	Takayuki Yamaguchi
働河川情報センター	大 塚 俊 匡	Toshimasa Otsuka

Even identical rainfall intensity with different distribution of rain drops diameters can result in different received power by radar, so it is difficult to determine precise rainfall intensity for all types of rainfall from received power by radar. In addition, because a radar beam passes 500~3,000M Above ground level, rainfall intensity observed by radar does not necessarily coincide with the ground rainfall intensity. In this paper the authors discussed the method of improving coherency between the current scene of a radar raingauge and ground rainfall by using past observed data of a radar raingauge and ground raingauges, and could find techniques yielding a certain degree of success.

Keywords : Radar Raingauge, Calibration Method, Time - Extrapolation

はじめに

建設省では、昭和51年度関東の赤城山に最初のレーダ雨量計を設置して以来、現在全国に16基を配置し、河川や道路の管理に利用している。また、これらによって得られるデータは建設省ばかりでなく地方自治体や民間へもオンラインで提供され、全国の水防災関係機関にとって欠くことのできない情報となっている。

しかし、レーダから発射されたレーダビームは山岳や障害物を避けて通常 500~ 3,000mの上空を通ることから、ここで観測された降雨強度はかならずしも地上の降雨強度とは一致しない。また降雨強度は同じでも、雨滴等の粒度分布がちがえばそれらから発射されて帰ってくるレーダの受信電力は異なるため、標準型のレーダ雨量計では、すべての雨についてレーダ受信電力から正確に降雨強度を求めることは難しい。

レーダ雨量のキャリブレーションとは、優れた能力を持ったレーダ雨量計の用途をさらに拡大するため、このような特性を持ったレーダ雨量を地上雨量計データを用いて補正し、レーダ雨量の地上雨量に対する整合性を改善することをいう。

レーダ雨量のキャリブレーションのうち、過去のレーダ雨量を同時刻の地上雨量計データを使って補正する場合はある程度の補正効果を期待できることが、これまでも報告されている。しかし、5分間隔で更新されるレーダ雨量計の現況画面などを補正しようとする場合には、地上雨量計データをそのような時間間隔で収集することは不可能であり、1時間間隔等で定期的に収集したデータのうちの最新のものなどを使った時間外挿キャリブレーションが必要になる。

1. 補正係数を時間外挿するキャリブレーション

レーダ雨量のキャリブレーションは、一般に観測されたレーダ雨量に次の補正係数 f を乗じることによ

$$f = \frac{\text{地上雨量}}{\text{レーダ雨量}} \quad (1)$$

て行なわれる。各メッシュの f は、補正に使用する地上雨量計のある補正基準地点の f を内挿して求められる。 f は直径20cmの円筒型の雨量計によって観測した地上雨量と上空のレーダ雨量 (1メッシュ = 3 km

の中の平均雨量)の比で与えられるが、この値は降雨現象のほか、両雨量計の観測特性や観測誤差の影響を受け、時間的・空間的に相当激しく変動する。したがってレーダ雨量のキャリブレーション手法の検討では、 f から観測誤差等にもとづく変動分を除去し、降雨現象にもとづく真の f を求めることが重要な課題となる。

レーダ雨量のキャリブレーションのうち図-1に示すように時刻 t に得られる時刻 $t-1$ から t までの間の地上雨量 $R_g(t)$ で、同時間帯のレーダ雨量 $R_r(t)$ を補正することを一般に同時刻補正と呼んでいる。現在のテレメーター地上雨量計システムでは、工事事務所等の親局から通常0.5~1.0時間ごとに各雨量計(子局)に対して信号を送り、この信号により子局は $R_g(t)$ のデータを親局に向けて送信する。したがって同時刻補正のできるレーダ雨量はすでに

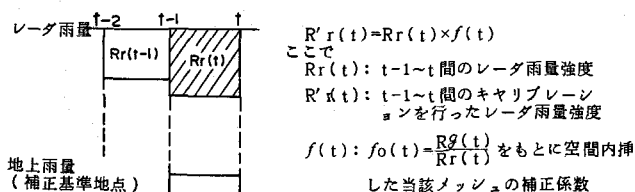


図-1 同時刻補正

過去の状況であり現在の雨量ではない。既往の検討結果によれば、この方式によりキャリブレーションを行う場合には地上雨量と比較的整合のとれたレーダ雨量を得ることができるとされており、これによりキャリブレーションを行ったレーダ雨量は、地上雨量計のない地域の災害査定用の雨量実績資料や洪水流出予測計算における実績雨量データ、レーダ雨量計を利用した降雨予測における当初雨量分布などとして利用され、効果を上げている。

しかし、この方式のキャリブレーションでは地上雨量情報が得られなければ補正を行えないため、レーダ雨量の長所のひとつである短時間間隔の降雨実況監視機能(レーダ雨量分布実況画面)のキャリブレーションにこれを採用することはできない。この

ため、前時間帯までの地上雨量計データを使って、次に地上雨量計データが入手されるまでの間のレーダ雨量を補正する時間外挿補正キャリブレーションが考えられ、これまでその手法の検討が行なわれている。

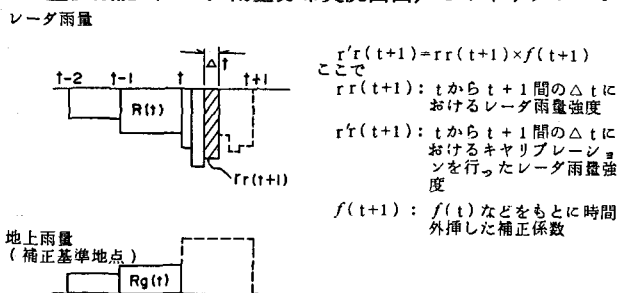


図-2 時間外挿補正

しかし、既往の時間外挿キャリブレーションに関する検討結果をみると、同時刻補正ではほとんど手法において、地上雨量に

対する相関係数や二乗平均誤差などの精度評価指標(4-2の(5)を参照)が一様に向上するのにくらべ、時間外挿補正を行うと補正を行わない場合より精度が悪くなるケースも見られるなど、安定した補正効果を期待できないことが述べられている。この主な原因は、先に述べた f の変動特性にあるものと思われる。したがって時間外挿キャリブレーションを行うにあたっては、 f の変動からレーダ雨量計や地上雨量計の観測特性又は観測誤差に起因する変動を極力除去し、降雨現象にもとづく有意な補正係数を外挿することが重要になる。

2. 補正係数の空間内挿手法

この検討では、補正係数の空間内挿手法として次の4手法を設定し、シミュレーションを行い各手法の補正効果を検討した。

(1) 二宮・秋山の方法

この方法は変分原理を用い、次の条件下の関係式を解くことにより内挿値を求める方法である。

① 補正基準地点での補正係数は、実測によって求められた f に最も近い。

② 補正係数 f の曲面が滑らかであること。

この条件を定式化し、変分原理を用いて解くと、

$$\alpha (f(x,y) - f_0(x,y)) - \beta \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x,y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} f(x,y) \right) = 0 \quad (2)$$

となる。これを差分式に置き換えれば数値的に解くことができ、レーダー全メッシュでの補正係数 f が決まる。なお、この検討では、これまでの調査結果から $\alpha : \beta = 100 : 1$ とした。

(2) 距離重み法

気象庁のレーダー・アメダス雨量合成図で用いられている方法である。各メッシュの補正係数 f は近隣の補正基準地点の f_0 の値を距離による重み W をつけ平均して求める。

$$f = \frac{\sum W(r_i) \cdot f_{0i}}{\sum W(r_i)} \quad (3)$$

$$W(r_i) = \exp(-r_i^2/A) \quad (4)$$

ここで、 f_{0i} : 補正基準地点 i における補正係数、 $W(r_i)$: 距離によって定まる重み関数、

r_i : 各観測点までの距離、 A : 重みを決める定数

なお、ここでは $A = \pi R^2$ とし、半径 R の値として $R = 10\text{km}$ ($A \approx 300\text{km}^2$)、 $R = 30\text{km}$ ($A \approx 2800\text{km}^2$)、 $R = 100\text{km}$ ($A \approx 31400\text{km}^2$) の3ケースを考えた。

(3) 全領域一様の補正

補正基準地点 i におけるレーダ雨量と地上雨量を用いて、全メッシュに対し一定の補正係数を与える方法である。

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n R_{gi}}{\sum_{i=1}^n R_{ri}} \quad (5)$$

ここで、

f : 各メッシュの補正係数、 n : 補正基準地点数、 R_{gi} 、 R_{ri} : i 地点の地上雨量、レーダ雨量

(4) レンジゾーンごとの補正

レーダ雨量計の定量観測範囲を $0 \sim 40\text{km}$ 、 $40 \sim 80\text{km}$ 、 $80 \sim 120\text{km}$ の3つのゾーンに分割し、それぞれの領域に含まれる補正基準地点のレーダ雨量、地上雨量を用いて、(5)式に準じてゾーンごとの補正係数を設定する。

3. 補正係数の時間外挿手法

この検討では、補正係数の時間外挿手法として次の3手法を設定する。

(1) 前時間帯の補正係数をそのまま用いる方法

これは、補正係数が一定時間の持続性を有するものとして、前時間帯の値を現時刻に適用する方法である。

(2) 前時間帯のまでの補正係数の移動平均値を用いる方法

基準地点の f_0 は地上雨量計のランダムな観測誤差のため、経時的にランダムな変動を示す。同時に、レーダ雨量の系統的な誤差、とくに最適な降雨強度換算定数 (B 、 β) が一降雨期間中でも推移することにより、 f_0 は周期的に変動することが既往の調査²⁾により明らかとなっている。この変動特性を f の時間外挿に応用するため、過去数時間の f を移動平均して次の時刻に適用する方法を考える。

$$f(t+1) = \frac{(1 \cdot f(t-2) + 2 \cdot f(t-1) + 3 \cdot f(t))}{1+2+3} \quad (6)$$

ここで、 $f(t+1)$: メッシュごとの現時刻の補正係数、 $f(t)$ 、 $f(t-1)$ 、 $f(t-2)$: メッシュごとの前3時間帯の補正係数

(3) 前時間帯から現時刻までの雨量強度変化量 (ΔR) に応じて補正係数を調整する方法

これまでに行った多変量解析³⁾の結果を利用し、前時間帯から現時刻までの雨量強度変化量に応じて f を調整する。すなわち、前時間帯における全補正基準地点の $f(t)$ の平均値をメッシュごとに初期値として与え、これに $\Delta R = r_r(t+1) - R(t)$ により変化する関数 $\phi(\Delta R)$ の値を乗じる。

なお、関数 ϕ の形としては、ここでは多変量解析の結果を利用して次のとおり設定した。

$$\phi(\Delta R) = -0.01625 \cdot \Delta R + 1.0 \quad (7)$$

4. キャリブレーション手法の精度評価

4-1 検討ケース

先に設定した補正係数の空間内挿手法及び時間外挿手法を次のとおり組み合わせた12ケースを設定する。

4-2 精度評価の方法

既設のレーダ雨量計の降雨実績データを使用し、4-1の各検討ケースの手法でキャリブレーションを行う。各ケースの精度は、キャリブレーションを行ったレーダ雨量と地上雨量の実測値との差異に関する統計値を求めて検討する。

(1) 対象レーダ雨量計

建設省関東地方建設局の赤城山レーダ雨量計とする。

(2) 対象降雨

台風性、前線性、低気圧性、熱雷性の各成因3降雨計12降雨とする。

(3) 補正基準地点

赤城山レーダ雨量計定量観測範囲(半径 120km)のテレメータ雨量計約 170ヶ所の中から、レーダ雨量との相関性や全体配置密度などを考慮し40ヶ所の補正基準地点を選定した。

(4) 検討条件

シミュレーションの時間間隔は、地上雨量テレメータのデータが1時間間隔で収集されているため、1時間とする。図-2の t から $t+1$ の間については細分せず、その間の平均値に対しキャリブレーションを行う。なお、換算定数 B 、 β は全降雨成因対象のものとし、層別平均値法⁴⁾により求めた。

(5) 精度評価指標

テレメータ及び気象庁のアメダスの地上雨量を仮の真値と見なし、以下の指標を用いて精度評価を行った。比較対象地点は、レーダ雨量計の定量観測範囲の中で山岳等による遮蔽域を除いた区域にあるアメダス観測所及び補正基準点も含めた建設省の地上雨量テレメータの全地点とする。なお、地上雨量の観測値は一般に周囲の面積雨量とは一致せず、この不一致が精度評価指標に含まれていることに、注意しなければならない。

相関係数 (r)

$$r = \frac{n \sum Rr \cdot Rg - \sum Rr \cdot \sum Rg}{\left[\{n \sum Rr^2 - (\sum Rr)^2\} \cdot \{n \sum Rg^2 - (\sum Rg)^2\} \right]^{1/2}} \quad (8)$$

表-1 検討ケース

番号	手 法 名	補 正 係 数 の 内 ・ 外 挿 法	
		空 間 内 挿 法	時 間 外 挿 法
1	二宮・秋山 (I)	二宮・秋山の方法	前時間帯の値をそのまま使用する。
2	距離重みR10 (I)	距離重み法	"
3	" R30 (I)	"	"
4	" R100 (I)	"	"
5	全領域一様 (I)	全領域一様の補正	"
6	レンジゾーンごと	レンジごとの補正	"
7	二宮・秋山 (II)	二宮・秋山の方法	前時間帯の値の重みつき移動平均
8	距離重みR10 (II)	距離重み法	"
9	" R30 (II)	"	"
10	" R100 (II)	"	"
11	全領域一様 (II)	全領域一様の補正	"
12	ΔR による補正	"	ΔR に応じた補正

二乗平均誤差 (Me)

$$Me = \left\{ \frac{1}{n} \sum (R_r - R_g)^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

総雨量比 (T.R.R)

$$T.R.R = \sum R_r / \sum R_g \quad (10)$$

ここで、 R_g : 比較対象地点の地上雨量 (時間雨量)

R_r : 比較対象地点直上のレーダ雨量 (時間雨量)

(6) 精度改善度

この検討では精度評価指標値を用いて各ケースごとに次のような精度改善度を求め、キャリブレーション手法の総体的な比較を行った。

$$Q_{mn} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \frac{P_{mni} - P_{ni}}{P_{ni}} \quad (\%) \quad (11)$$

ここで Q_{mn} : mキャリブレーション手法の n 精度評価指標における精度改善度

P_{ni} : キャリブレーションを行わない場合の i 降雨における n 精度評価指標

P_{mni} : mキャリブレーション手法の i 降雨における精度評価指標

4-3 検討結果

(1) 精度改善の状況

表-2~表-4に、精度評価指標ごとに各キャリブレーション手法の精度改善状況を整理した。図中○印等のある手法は、キャリブレーションを行うことによってキャリブレーションを行わない場合に比べ精度評価指標が改善したものである。このうち●は当該降雨の中で精度が最も改善されたもの、⊕は2位、⊙は3位である。

表-2 相関係数の改善状況

手 法	降雨No.	台風性降雨			前線性降雨			低気圧性降雨			熱雷性降雨			精度が改善されたものの割合 (%)	精度改善度 (%)
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3		
二宮・秋山		○	●					○	○					33.3	1.92
全領域一様	(I)	○			○	○		○			○			41.7	-12.53
レンジごと		○				○	●	○	●					41.7	-6.89
二宮・秋山	(II)	○	○		○	●	●	●	○	●	○			75.0	22.38
全領域一様	(II)	○	○		●	○		○			●			50.0	-0.35
△Rによる補正		⊕	○		○	○		●			⊕			50.0	-2.44
距離重みR=10	(I)	○	●					○	○					33.3	-7.34
"	R=30 (I)	○	○		○			○	○					41.7	2.50
"	R=100 (I)	○	○		○			○	○					41.7	0.88
距離重みR=10	(II)	○	⊕		○	●	⊕	○	●	●				66.7	13.91
"	R=30 (II)	●	○		⊕	⊕	○	⊕	⊕	⊕		⊕		75.0	22.63
"	R=100 (II)	●	○		●	○		○	○	○	●	●		75.0	19.69

(2) 結果の総括

以上の結果を整理すると以下ようになる。

- ① 全ての精度指標において f を時間的に平滑化することが有効である。また、地点の情報で f

を定義するかわりに空間的に広がりをもった領域で f を定義すると精度向上に役立つ。ただし、空間的・時間的な平均化のスケールを大きくしすぎると逆に精度が低下する場合がある。

② 相関係数とデータのバラつきを表わす誤差を小さくするためには f を曲面で近似する方法が良い。

③ 総雨量比を 1 に近づけるには全領域一様の f のように地上雨量とレーダ雨量の全体量のバランスを考慮しなければならない。

④ 前時間帯からの雨量強度変化量 (ΔR) することで精度の改善が期待できる。

⑤ 時間移動平均を用いた距離重み付き平均法 ($R=30$)、または二宮秋山の方法は全ての指標において精度向上が図られている。

おわりに

レーダ雨量の時間外挿キャリブレーションでは、ランダムな誤差を含む地上雨量計データを使用して、たえまなく変動する降雨現象の動きを見きわめるという困難な課題を負っている。この検討では、あらかじめいくつかのキャリブレーション手法を設定しシミュレーションを行い、各手法の有効性について統計値による比較を行うことにより、一定の効果のある手法を見い出すことができたが、その手法の有効性に関する気象学的な意味については具体的な検討を行っていない。したがって、次の段階ではまずこのことについて検討を行いこの手法の改良や実用化を図る必要があるものと思われる。

本検討を行うにあたっては国立防災科学技術センター第一研究部 木下武雄部長を座長とする関東レーダ雨量計検討会の委員の方々に貴重な助言をいただいた。ここに厚くお礼申し上げます。

(参考文献)

- 1) 石崎, 中尾, 大倉, 吉野, 河関「レーダ雨量計の降雨観測特性に関する研究」土木研究所報告 167号、昭和61年1月、建設省土木研究所
- 2), 3) 建設省利根川ダム統合管理事務所「レーダ雨量計の調査検討業務(その2, キャリブレーションに関する検討)」, 昭和63年3月
- 4) 上林, 山口, 山本「レーダ定数の同定手法に関する研究」河川情報研究所報告。第1号, 昭和62年9月, 働河川情報センター

表-3 二乗平均誤差の改善状況

手 法	降雨No.	台風性降雨			前線性降雨			低気圧性降雨			熱帯性降雨			精度が改善されたものの割合(%)	精度改善度(%)
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3		
二宮・秋山		○	○					○	○	○				41.7	-13.68
全領域一様 (I)		●			○	○		●			○		○	50.0	-1.17
レンジごと		○				○	○	○	○					50.0	4.00
二宮・秋山 (II)		○	○			●	○	○	●		○			66.7	9.37
全領域一様 (II)		○	○		●	○		○			○	○	○	66.7	-2.03
ΔR による補正		●			○	○	○	●			●		●	58.3	-5.59
距離重み $R=10$ (I)		○	○					○		○				33.3	-23.70
" $R=30$ (I)		○	○					○		○			○	41.7	-8.72
" $R=100$ (I)		○			○			○	○	○			○	50.0	-10.92
距離重み $R=10$ (II)		○	○			○	○	○	○					50.0	1.95
" $R=30$ (II)		○	○		○	○	○	○	○	○		○	○	83.3	11.54
" $R=100$ (II)		○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	75.0	11.31

表-4 総雨量比の改善状況

手 法	降雨No.	台風性降雨			前線性降雨			低気圧性降雨			熱帯性降雨			精度が改善されたものの割合(%)	精度改善度(%)
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3		
二宮・秋山		○		○				○	○	○			○	58.3	3.38
全領域一様 (I)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100.0	17.33
レンジごと		○		○	○	○	○	○	○	○		○	○	83.3	16.22
二宮・秋山 (II)		○	○	○		○	○	○	○	○		○	○	83.3	14.83
全領域一様 (II)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	83.3	14.26
ΔR による補正		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100.0	20.58
距離重み $R=10$ (I)		○	○	○		○	○	○	○	○			○	66.7	6.28
" $R=30$ (I)		○	○	○		○	○	○	○	○			○	66.7	2.98
" $R=100$ (I)		○		○				○	○	○			○	66.7	-1.69
距離重み $R=10$ (II)		○	○	○		○	○	○	○	○		○	○	83.3	14.62
" $R=30$ (II)		○	○	○		○	○	○	○	○		○	○	83.3	13.35
" $R=100$ (II)		○		○		○	○	○	○	○	○	○	○	75.0	11.82