

レーダ雨量計精度向上へのKriging 法の活用

Application of Kriging Method to Improvement of Accuracy of Radar Measurements

中村興一*・堀田哲夫**・山下芳浩**・星 清***

By Kouichi NAKAMURA, Tetsuo HOTTA, Yoshihiro YAMASHITA and Kiyoshi HOSHI

The application of radar rainfall measurements to hydrologic practices involves many difficulties in identifying radar constants B and β , calibrating radar information via use of ground measurements and so forth. The currently used method compares radar areal rainfall directly with ground point rainfall in spite of the difference of space scale. It is of practical importance to develop a new method which can take into account the space scale difference for comparing radar measurements with spatial ground information precisely.

The present study converts ground point rainfall to average areal rainfall, using the Kriging method which enables one to estimate the average rainfall over a given catchment area, quantify the accuracy of areal estimates, provide data input for automatic contouring and design the raingauge networks.

Keywords: Radar measurement, Point and areal rainfall, Kriging method, Variogram

1. まえがき

レーダ雨量計は、マイクロ波を利用して広域かつ面的な降雨現象を、瞬時に平均した量として観測できるため、河川・道路管理において積極的活用が図られてきている。しかしながら、レーダ雨量計は、レーダから発射された電波に対する雨滴からの反射エコー強度と雨量強度の間にある関係式（レーダ方程式）が成立するとみなして間接的に雨量を観測するものであるため、観測値には各種誤差が含まれている。

レーダ雨量計による降雨観測での誤差要因としては、①ハード機器の特性、②レーダ方程式の成立要件と実際の気象条件の相違、③レーダビームとその伝播特性、④地形性エコーの処理方法及び⑤レーダ雨量と地上雨量の観測空間スケールの差異等に起因するものがあげられるが、これらの要因を除去するのは現状システムではかなり困難である。そのため、昨今はテレメータ化によってオンラインで入手できるようになった地上点雨量をそのまま用いてレーダ雨量をオンラインで校正しようという試みが行われているが、レーダ雨量計の面雨量（ 3×3 km程度）と地上の点雨量をそのまま対比する場合が多く、誤差要因の⑤に対する本質的な解決とはなっていない。このレーダ雨量と地上雨量の観測空間スケールの差異に起因する誤差というのは、レーダ方程式に含まれる雨量換算定数 B 、 β を気象学的に同定することが困難であるため、地上の点雨量とレーダによる面反射因子を同種のもので対応づけて B 、 β を設定していること

* 正会員 北海道開発局 留萌開発建設部（〒077 留萌市寿町1丁目）

** 正会員 (株)建設技術研究所 東京支社（〒103 東京都中央区日本橋堀留町1-7-7）

*** 正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所（〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目）

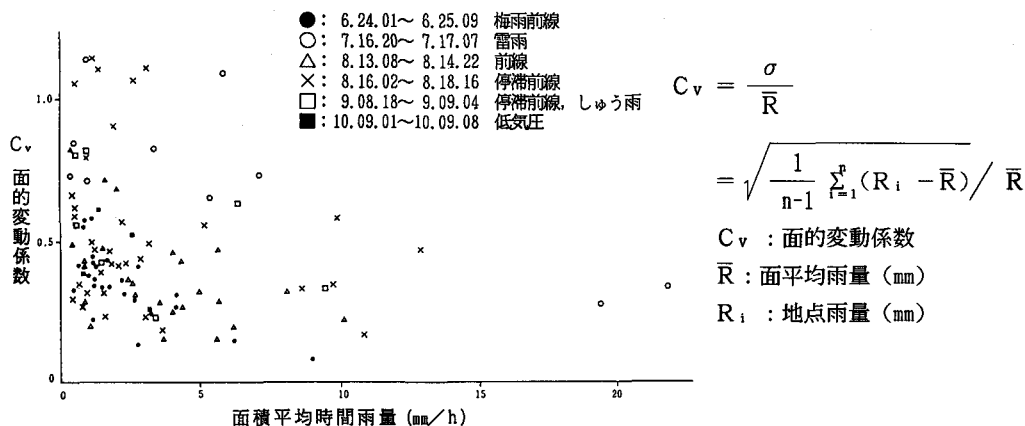


図-1 面積平均雨量と面的変動係数 C_v 値の相関

に起因するものである。ちなみに埼玉県栗橋付近で地上 ($3 \times 5 \text{ km}$) に密に雨量計を配置して観測して得られた点雨量の変動状況は図-1に示す通りであり、¹⁾狭い範囲でも点雨量はかなり変動し、スケールの違いを無視して点と面をそのまま対応づけるのは問題が大きいように思われる。

本研究は、このような状況を踏まえ2次元場の空間構造特性を推定して点から面への変換を図る手法であるKriging法を用いて地上点雨量の面雨量への変換を図り、レーダ雨量計による面雨量との対応性について検討したものである。

2. Kriging 法の概要

Kriging 法は、D.G.Krigeにより基礎的研究がなされ、G.Matheronによって理論的確立を見た地球統計法の一手法である。主に鉱山における鉱量・品位の推定に用いられ、最近では地下水や降雨分布の推定への応用も行われている。^{2), 3)}

Kriging 法は、互いに従属な複数のサンプルを用いて、対象場の物理的な空間構造特性を推定し、それを基に特定の点又は領域の値を統計的に最も誤差が小さくなるように推定する方法である。現在の水文学で内挿問題や空間平均に用いられているほとんどの方法では推定精度を定量的に議論することが困難であるが、Kriging 法は推定値の誤差の評価が可能であるという大きな特徴を持っている。そのため内挿問題や面積平均水文量の推定の他水文観測所配置計画への活用が図られている。⁴⁾

互いに従属な水文量のサンプルデータを $Z(X_i)$ とした場合、Kriging 法では点又は面の状態量 Z_0^* を次のようなサンプル値の線型結合の形で表わす。

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad \text{..... (1)}$$

問題は最適な推定量 Z_0^* を与える重み係数 λ_i を決定することであるが、Kriging 法では統計的な推定誤差が最小となるような次の2つの条件を満たす λ_i を求めることになる。

(i) 推定値 Z_0^* が不偏推定値である。即ち両者の期待値が等しい。(不偏条件)

$$E[Z_0^* - Z_0] = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad \text{..... (2)}$$

(ii) 推定分散が最小である。即ち Z_0^* と Z_0 の差の分散が最小である。

$$\sigma_E^2 = \text{Var}[Z_0^* - Z_0] \rightarrow \text{最小} \quad \text{..... (3)}$$

今狭い範囲の対象降雨場においてドリフト(例えば降雨の地形依存性)が存在しない場合を考えると、次の2次安定性の仮説(例えば長期間でみれば雨の降り方がどこでも同じである、エルゴード性)が成り立つ。

(i) $Z(x)$ の期待値が存在し、その値は x に依存しない。

$$E[Z(x)] = m(x) = m \quad \text{----- (4)}$$

(ii) $Z(x)$ の分散が存在し、その値は各点 x に無関係である。

$$\begin{aligned} \text{Var}[Z(x)] &= E[\{Z(x) - m\}^2] \\ &= \sigma^2 = \text{Cov}(0), \quad \forall x \quad \text{----- (5)} \end{aligned}$$

(iii) 全てのベクトル h に対する増分 $[Z(x+h) - Z(x)]$ は、 x に無関係に一定の分散を有する。

$$\text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = E[\{Z(x+h) - Z(x)\}^2] = 2\gamma(h), \quad \forall x \quad \text{---(6)}$$

$$\text{ここで } \text{Cov}(h) = \text{Cov}[Z(x), Z(x+h)] = E[Z(x+h) \cdot Z(x)] - m^2 \quad \text{----- (7)}$$

(iii) で定義される $\gamma(h)$ はバリオグラムと呼ばれ、 $Z(x)$ の統計的な空間構造特性を表し、対象空間内の任意の2点 $\{x, x+h\}$ におけるサンプル値の差の分散は2点間の距離のみに依存し、これらの隣接点のサンプル値は互いに従属の関係にあることを意味する。このバリオグラムは、 h の値を変化させることにより1回の実現値から実験的に作成することが可能である。そして一般には h の関数形で表して用いる。

このバリオグラムと共分散の関係は、2次安定性の条件下では $\gamma(h) = \text{Cov}(0) - \text{Cov}(h)$ で表される。また相関係数 $\rho(h)$ との関係は $\rho(h) = 1 - \gamma(h) / \sigma^2$ で表される。この距離と相関係数の関係を空間構造特性として与える方法として菅原の方法⁵⁾があるが、本質的には2次安定性の条件下でのKriging法と同種のものである。

ただし1回の実現値のみで2次安定性を確認するのは困難であり、ここでは2次安定性よりも弱い‘intrinsic’仮説を仮定する。即ち2次安定性を示す(4)~(6)式の内(5)式がはずれ $Z(x)$ の分散が存在しない条件下での検討となる。

バリオグラムを用いたKrigingシステムは(8), (9)式で表され、(8)式の制約条件下で(3)式で示される推定分散を λ_i に関して最小化することにより(9)式が導かれる。またこの場合の推定分散は(10)式で表される。

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad \text{----- (8)}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma[Z(x_i), Z(x)] + \mu \\ &= \frac{1}{V} \int_V \gamma[Z(x_i), Z(x)] dx \quad (i=1 \sim n) \quad \text{----- (9)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_E^2 &= \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{1}{V} \int_V \gamma[Z(x_i), Z(x)] dx + \mu \\ &\quad - \frac{1}{V^2} \iint_V \gamma[Z(x), Z(x')] dx dx' \quad \text{----- (10)} \end{aligned}$$

ここで V はブロックKrigingを行う領域を、 μ はラグランジュ定数を表す。ポイントKrigingの場合には、 V を点に置き換えれば同様に表される。

3. 対象区域と対象降雨の選定

対象区域としては、地上観測所、レーダ雨量計及び地形の状況等を考慮して、図-2に示す石狩平野の東西78km、南北66kmの区域を設定した。この区域における地上観測所数は37観測所であり、地上観測点密度は約140km² (12×12km) に1箇所となっている。選定にあたっての留意事項は次の通りである。

- ① レーダ雨量計の定量観測範囲 (0~120 km) の中でも極力レーダサイトに近く観測精度の均一性が保たれると思われる区域
- ② ①の条件下で地上地点雨量観測網が整備されている区域
- ③ 平地部でドリフト存在の可能性が低いと思われる区域

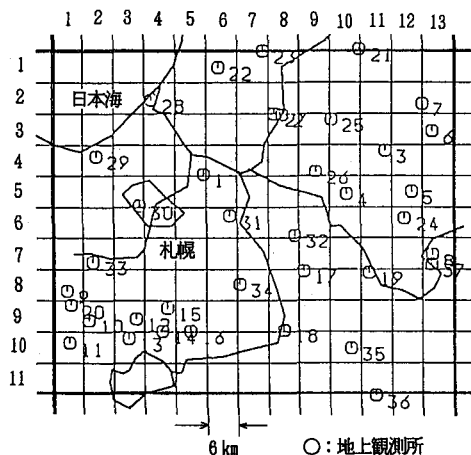


図-2 対象区域図

表-1 対象降雨一覧

No.	降 雨 名	成 因	最大時間雨量 (mm/hr)
1	S. 63. 8. 26	停滞前線	53
2	S. 63. 8. 28	停滞前線	15
3	H. 2. 8. 10	台 風	20
4	H. 2. 8. 23	低気圧	18
5	H. 2. 9. 1	雷 雨	55
6	H. 2. 9. 3	前 線	25

また対象降雨としては、対象区域全般に降雨がありかつ降雨強度の大きい主要6降雨（表-1参照）を選定した。

4. 空間構造特性モデルの作成

対象降雨より面的に平均的な降雨最盛期の1時間及び3時間を抽出し、最盛期の雨量を用いて空間構造特性であるバリオグラムの同定を行った。(7)式のバリオグラムは仮に対象データ地点が規則的に配置されている場合次の形で表される。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i + h) - Z(x_i)\}^2 \quad (11)$$

ここで $Z(x_i)$; x_i 点におけるデータ値, $N(h)$; 距離 h 離れたデータ点の組数

しかしながら実際の場合には、データ点が不規則に配置されているため距離による階層別平均化を行う必要がある。

作成はまず地上37観測所の点雨量データを用いて行ったが、グルーピングを行ってもバリオグラムと距離の関係にかなりばらつきがみられ（特に降雨継続時間が短い程大きい）、1価関係で定式化するのが困難であった。そこでここではレーダ雨量計の広域精密観測性を活用することとし、当区域内ではレーダ雨量が均質であるとみなしてレーダ最小メッシュのレーダ雨量を用い、組合せサンプリング数を極力均一化する形でバリオグラムの作成を行った。距離グルーピングのピッチは 2.5kmである。ただし作成にあたってはまず4つの方向別にバリオグラムを算定し、方向別に大きな差異がない（一般にドリフトの存在する方向でバリオグラムが最大となる）ことを確認した。このようにして降雨別、全降雨で作成したバリオグラムは図-3に示す通りであり、安定したバリオグラムが得られていることがわかる。しかしながら、バリオグラムでは雨量そのものを用いるため距離とバリオグラムの関係は降雨によって大きく異なる。また距離との関係は60kmまでの範囲で作成したが、その範囲でバリオグラムが頭打ちの傾向を示す降雨（例えば H. 2. 9. 1 降雨）もみられる。これは降雨のスケールと関係しており、頭打ちとなる距離を越えると2つのサンプル間の値が互いに独立となることを示す。またこの頭打ち距離は降雨継続時間が長くなる程大きくなる。

また作成したバリオグラムは、ユニバーサルKriging⁶⁾での共分散モデルの定式化で一般に用いられる次の多項式を用いて近似しブロックKrigingに用いることとした。

$$\gamma(h) = a_1 h + a_2 h^3 + a_3 h^5 \quad (12)$$

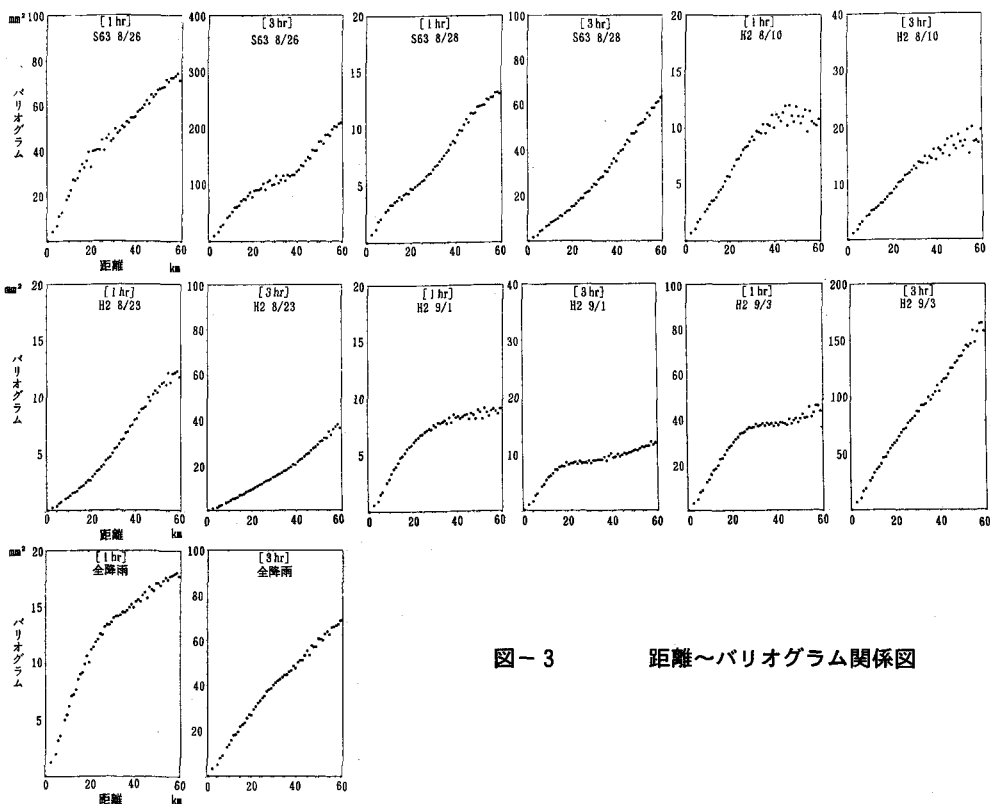


図-3 距離～バリオグラム関係図

5. レーダ面雨量との対応性検討

これまでのレーダ雨量計の精度検討では、地上の点雨量とレーダの面雨量をそのまま対応づけて精度評価を行っている。ここでは前節で作成したバリオグラムを用いて地上点雨量によるブロック Krigingを実施して面雨量の推定を行い、面雨量への変換によるレーダ雨量との対応性の改善度合について検討した。具体的な方法は次の通りである。

- ① 地上点雨量を用いたブロック Krigingは、地上観測所が位置する 3×3 km及び 6×6 kmのメッシュで行う。
- ② ブロック Krigingに用いる観測所は既往文献⁸⁾に基づきブロック内も含め近傍8地点とする。
- ③ レーダ雨量計では広域的な面的特性は把握できるものの、雨量値そのものは現状では相対的なものと考えざるを得ない。そこで対応性の評価は相関係数で行うこととする。
- ④ バリオグラムは降雨別に作成したもの及び全降雨で作成したもの2通りを用いる。

得られた結果は表-2及び表-3に示す通りであり地上点雨量をレーダメッシュ雨量とそのまま対応させた場合に比べ全体的には相関係数で0.02~0.05、最大で0.12程度改善されることが明らかになった。しかしながらバリオグラムの違いによる差はほとんど現れていない。これは図-2からも分かる通り、地上点雨量の密度が小さいため、メッシュ内観測所の重み係数の値が大きくなり、バリオグラムの違いが推定値にあまり大きな影響を与えていないからであると思われる。

表-2 レーダ面雨量との相関係数一覧

ブロック 種別		3 × 3 km			6 × 6 km			
		面変換 無	面変換時の雨量 降雨別 全降雨		面変換 無	面変換時の雨量 降雨別 全降雨		
No.	降 雨							
1	S63 8/26	1 hr	0.628	0.646	0.641	0.574	0.500	0.501
		3 hr	0.649	0.718	0.717	0.714	0.753	0.750
2	S63 8/28	1 hr	0.780	0.801	0.795	0.800	0.830	0.827
		3 hr	0.795	0.802	0.812	0.808	0.806	0.810
3	H2 8/10	1 hr	0.783	0.809	0.807	0.802	0.810	0.814
		3 hr	0.493	0.529	0.530	0.801	0.829	0.826
4	H2 8/23	1 hr	0.533	0.809	0.808	0.460	0.491	0.499
		3 hr	0.531	0.649	0.650	0.350	0.364	0.361
5	H2 9/1	1 hr	0.779	0.899	0.899	0.849	0.952	0.951
		3 hr	0.814	0.935	0.918	0.882	0.948	0.955
6	H2 9/3	1 hr	0.757	0.767	0.772	0.685	0.748	0.774
		3 hr	0.536	0.491	0.506	0.550	0.547	0.553
全降雨平均		1 hr	0.710	0.755	0.754	0.695	0.722	0.728
		3 hr	0.636	0.687	0.689	0.684	0.708	0.709

* : 網かけは改善

表-3 面変換による相関係数改善度合

ブロック 種別		3 × 3 km		6 × 6 km		
		面変換時の雨量	面変換時の雨量	面変換時の雨量	面変換時の雨量	
No	降 雨	降雨別	全降雨	降雨別	全降雨	
1	S63 8/26	1 hr	0.018	0.013	-0.074	-0.073
		3 hr	0.069	0.068	0.039	0.036
2	S63 8/28	1 hr	0.021	0.015	0.030	0.027
		3 hr	0.007	0.017	-0.002	0.002
3	H2 8/10	1 hr	0.026	0.024	0.008	0.012
		3 hr	0.036	0.037	0.028	0.025
4	H2 8/23	1 hr	0.076	0.075	0.031	0.039
		3 hr	0.118	0.119	0.014	0.011
5	H2 9/1	1 hr	0.120	0.120	0.103	0.102
		3 hr	0.121	0.104	0.066	0.073
6	H2 9/3	1 hr	0.010	0.015	0.063	0.089
		3 hr	-0.045	-0.030	-0.003	0.003
全降雨平均		1 hr	0.045	0.044	0.027	0.033
		3 hr	0.051	0.053	0.024	0.025

6. おわりに

Kriging法を用いて点雨量から面雨量への変換を図ることによってよりの確な地上雨量とレーダ雨量の対応づけができることが明らかとなった。今後は降雨換算定数 B , β の同定やキャリブレーションへの活用を図っていくのがよいものと思われる。しかしながら適用にあたってはブロック Krigingを行うメッシュの大きさと地上観測所の配置密度との関係を事前に検討しておくのが良いと思われる。

またバリオグラムについては1回の実現値で容易に作成できるが、降雨成因や分析形態、強度等によっても異なる。より応用性を広めるためにはこれらの要因をどのようにとり込みどのように普遍性を高めていくかが課題となる。

参考文献

- 1) 石崎勝義, 中尾宏臣, 大倉博, 吉野文雄, 河関大裕: 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, 第167号, 1986.1
- 2) Delhomme, J.P.: Kriging in the Hydrosociences, Advances in Water Resources, 1(5), pp. 251-266, 1978.5
- 3) 原田守博, 高木不折: 地点観測値に基づく地下水位分布の統計的推定と観測網の評価, 第32回水理講演会論文集, pp. 377-382, 1988.2
- 4) Bastin, G.: Optimal Estimation of the Average Areal Rainfall and Optimal Selection of Rain Gauge Locations, Water Resources Research, 20(4), pp. 463-470, 1984.4
- 5) 菅原正巳: 面積雨量の求め方についての数学的考察, 水利科学 20(5), pp. 23-43, 1976.12
- 6) Kafritsas, J., Bras, R.L.: The Practice of Kriging, Ralph M. Parsons Laboratory Report No. 26, MIT, 1981.1