

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**・佐藤康晴**・星 清***

By Kouichi NAKAMURA, Tetsuo HOTTA, Yasuharu SATO and Kiyoshi HOSHI

The application of radar rainfall measurements to hydrologic practices involves many difficulties in identifying radar constants B and β , and calibrating radar information via use of ground measurements and so forth. It is of practical importance to take into account the space scale difference for comparing radar measurements with ground information precisely.

The present study converts ground point rainfalls to the average areal rainfall, using the Kriging method, and shows its effect on the identification of B and β , and calibration.

The Kriging method 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, calibration.

1. まえがき

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、現状システムでこれらの要因を除去するのはかなり困難であるため、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。

しかしながら、この場合も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、 3×3 km程度の狭い範囲でもかなり変動する点雨量と面雨量をそのまま対応づけるのは問題が大きいに思われる。

著者らは、この問題に対し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を面雨量（ 3×3 km²）へ変換することによって、よりの確な地上雨量とレーダ雨量の対応づけが可能となることを明らかにした。¹⁾

本研究は、これらの成果を踏まえ降雨換算定数 B 、 β の同定やキャリブレーションへ Kriging法を活用し、レーダ雨量計の精度向上効果について検討したものである。

* 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）

2. 検討の方法

対象区域としては、地上雨量観測所の分布及びレーダ雨量計による観測の状況等を考慮し、図-1に示すような北海道道央レーダの定量観測範囲のうち東北方面の75km×100kmの区域を設定した。ただし空間構造特性の把握及び B 、 β の同定では、レーダ雨量計による観測精度の均一性が重要であるから、レーダサイトに近い75km×50kmの区域を対象とした。

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4降雨（表-1参照）を選定した。検討の具体的手順は図-2に示す通りである。

表-1 対象降雨一覧

No.	降雨名	最大時間雨量(mm/hr)			成因
		1位	2位	3位	
1	S. 63. 8. 25	83	83	64	前線
2	H. 1. 9. 3	18	17	16	低気圧
3	H. 2. 8. 12	25	23	22	前線
4	H. 2. 9. 3	47	39	38	低気圧

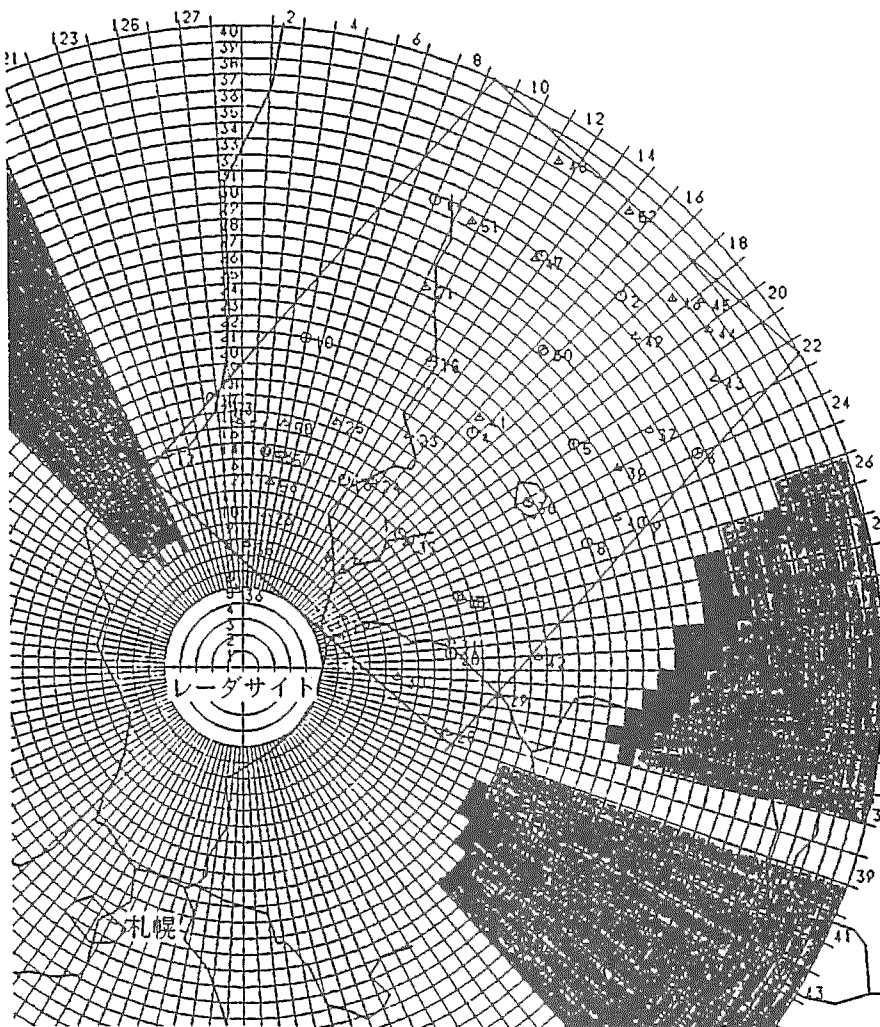


図-1 対象区域図

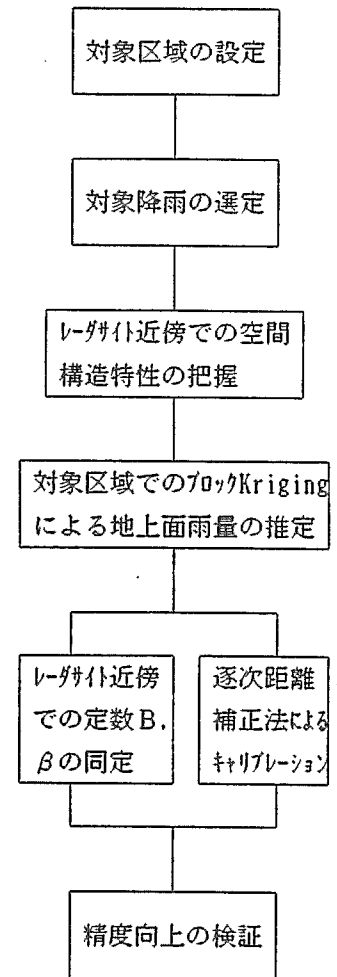


図-2 検討の手順

3. Kriging 法による面雨量の推定

3.1 Kriging 法の概要

Kriging 法は、互いに従属な複数のサンプルを用いて対象場の統計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その他水文観測所配置計画への活用が図られている。²⁾

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）を無視できる場合を考えると、次の 'intrinsic' 仮説が成り立つ。

(i) 確率場の状態変数 $Z(x)$ の期待値が存在し、その値は x に依存しない。

$$E [Z(x)] = m(x) = m \dots\dots\dots (1)$$

(ii) 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。

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

(ii) で定義される $\gamma(h)$ はバリオグラムと呼ばれ $Z(x)$ の統計的な空間分布構造特性を表し、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。

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 の推定値 Z_0^* を次のようなサンプル値の線型結合の形で表わし、バリオグラムを用いて

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \dots\dots\dots (3)$$

次の2つの条件を満たす λ_i を求める。

(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)

$$E [Z_0^* - Z_0] = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \dots\dots\dots (4)$$

(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。

$$\sigma_E^2 = \text{Var} [Z_0^* - Z_0] \rightarrow \text{最小} \dots\dots\dots (5)$$

3.2 空間構造モデルの作成

対象降雨より面的に平均的な降雨最盛期の1時間雨量を抽出し、空間構造特性であるバリオグラムの同定を行った。(5)式のバリオグラムは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。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{ Z(x_i+h) - Z(x_i) \}^2 \dots\dots\dots (6)$$

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

レーダ雨量計データを用いて降雨別に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。また距離との関係では40km以上でバリオグラムが頭打ちの傾向を示している。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。

また作成したバリオグラムは、ユニバーサルKriging 法での定式化²⁾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。ここでユニバーサルKriging 法とは前出のドリフト

$$\gamma(h) = a_1 h + a_2 h^3 + a_3 h^5 \dots\dots\dots (7)$$

トを考慮したものであり、またブロックKriging とは(3)式を基本とした面推定を意味する。

3.3 地上面雨量の推定

3.2で作成したバリオグラムを用いて地上観測点を含むレーダメッシュ対応の3×3kmメッシュでブロックKriging を行い、地上面雨量の推定を行った。具体的な方法は次の通りであり、得られた重み係数 λ_i の一例を図-4に示す。

- ① ブロックKriging は、地上観測所が位置する 3×3 kmのレーダ対応メッシュで行う。
- ② ブロックKriging に用いる地上観測所は既往文献に基づきブロック内も含め近傍8地点とする。
- ③ ②の原則でもバリオグラムが頭打ちとなる範囲外の観測所は使用しない。

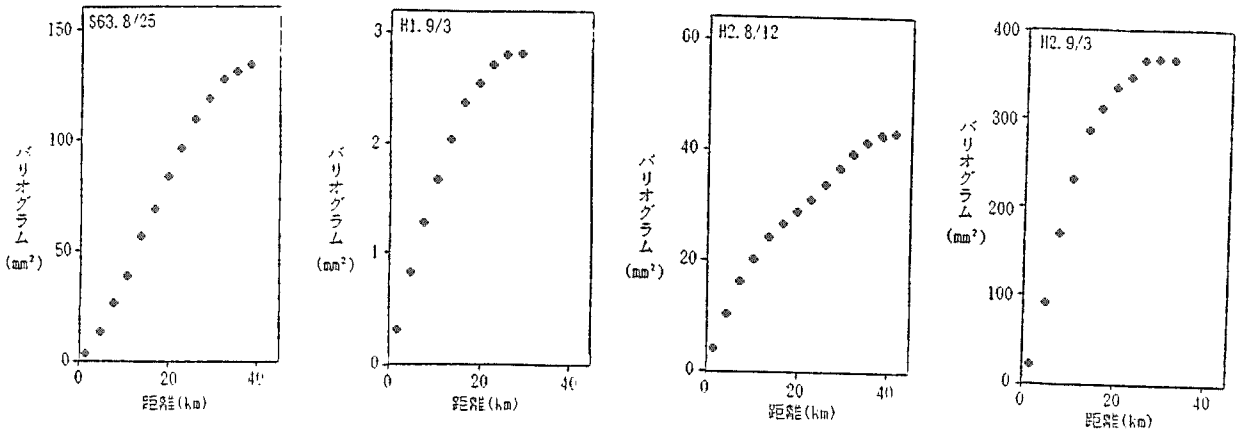


図-3 距離バリオグラム関係図

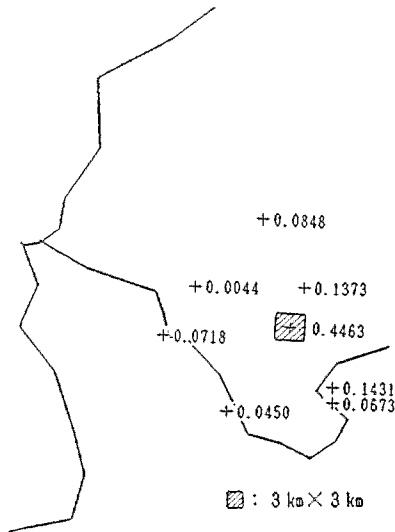


図-4 推定重み係数分布図(例)

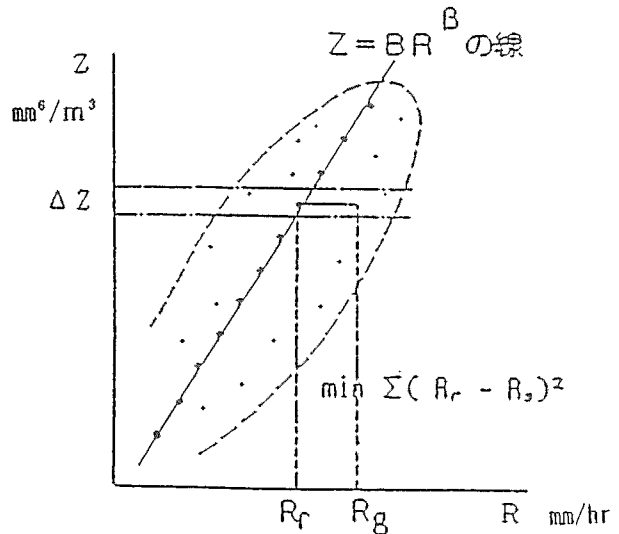


図-5 層別平均法の概念

4. 降雨換算定数 B , β 同定への活用

3.で推定した地上面雨量を用いて主要降雨である S.63.8.25降雨の降雨換算定数 B , β の同定を行い、点雨量をそのまま用いた場合との精度比較を行った。 B , β の同定手法は次の層別平均法⁴⁾であり、各々で同定した B , β を用いて精度評価を行った。結果は図-6に示す通りであり、地上点雨量をそのまま用いるのではなく面雨量に換算した後 B , β を同定する方が推定誤差が小さくなり、レーダ雨量計の精度向上に寄与するものと考えられる。

(層別平均法)

レーダで観測されたある範囲の反射因子 Z ($Z - \frac{\Delta Z}{2} \sim Z + \frac{\Delta Z}{2}$) に対して $Z \sim R$ 図上のその範囲 j 内に含まれる R_g の真数値の平均値 $R_{e,j}$ を求める。この $R_{e,j}$ は $\sum_{i=1}^n (R_{e,i} - R_{e,j})^2$ を最小にする。

Z の全範囲の $(R_{e,j}, Z_j)$ の分布は、 $Z \sim R$ 図上ではほぼ直線で表され、この曲線に沿って二乗平均誤差を計算するとその値は最小となる。このようにして求めた曲線から B , β を求める方法を層別平均法という。(図-5参照)

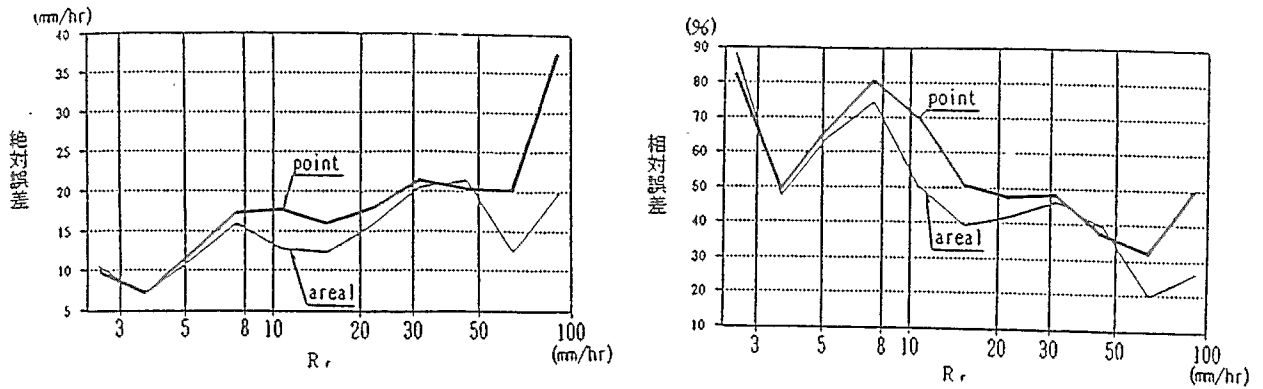


図-6 レーダ雨量計の降雨強度別精度 (点 ; B = 150, β = 1.45, 面 ; B = 80, β = 1.64)

5. キャリブレーションへの活用

北海道道央レーダ雨量計は一仰角での観測であるため、レーダサイトから離れるにつれ観測高度が高くなり降雨観測精度が低下することが明らかにされている。そこでここでは的確な対応づけがなされた推定地上面雨量とレーダ面雨量をレーダサイトからの距離を基本として関連づけ、逐次距離補正による簡単なキャリブレーション法による精度向上効果を検討した。逐次距離補正によるキャリブレーション法の手順は次の通りである。

- ①推定地上面雨量 ($\overline{R_g}$) とレーダ雨量 (R_r) を用いて雨量比率 f_0 を1時間ステップ毎に算出する。
- ②1時間ステップ毎に雨量比率 (f_0) とレーダサイトからの距離 (γ) との関係を次式を基本として最小自乗法で推定する。

$$f(\gamma) = A \exp(B \cdot \gamma) \dots\dots\dots (8)$$

- ③各メッシュ毎のレーダ雨量に補正係数 $f(\gamma)$ を乗じて修正レーダ雨量 (R_r') を算出する。
- ④修正レーダ雨量 (R_r') と地上面雨量 ($\overline{R_g}$) を対比し検証する。

得られた結果は表-2及び図-7に示す通りであり、未補正に比べ一般的にキャリブレーション効果が得られていることがわかる。特に主要降雨である S.63.8.25降雨で効果が大きくなっている。また表-3はレーダの東北方向の区域で設定した距離補正係数をそのまま他の方向でのレーダ雨量に適用して地上面雨量と修正レーダ雨量の関係を示したものであるが、ここでもキャリブレーション効果が得られており、レーダデータの回転方向での均質性がうかがわれる。仮にこの回転方向での均質性の普遍性がある程度確

表-2 キャリブレーション効果 (対象区域内)

降雨		S.63.8/25	H.1.9/3	H.2.8/12	H.2.9/3	備考
未補正	総雨量比	0.86	0.27	0.16	0.73	Rg/Rr
	二乗誤差	10.12	4.03	6.69	12.47	mm/hr
	相関係数	0.61	0.50	0.12	0.28	
補正後	総雨量比	1.07	0.48	0.31	0.42	
	二乗誤差	9.35	2.70	6.43	12.50	
	相関係数	0.76	0.62	0.17	0.39	
効果量	総雨量比	+0.07	+0.21	+0.15	(-0.31)	()悪化
	二乗誤差	-0.77	-1.33	-0.26	(+0.03)	()悪化
	相関係数	+0.15	+0.12	+0.05	+0.11	

表-3 キャリブレーション効果 (区域外)

S.63.8.25降雨

種別		区域内	区域外
未補正	総雨量比	0.86	0.90
	二乗誤差	10.12	8.39
	相関係数	0.61	0.46
補正後	総雨量比	1.07	0.93
	二乗誤差	9.35	8.02
	相関係数	0.76	0.65
効果量	総雨量比	+0.07	+0.03
	二乗誤差	-0.77	-0.37
	相関係数	+0.15	+0.19

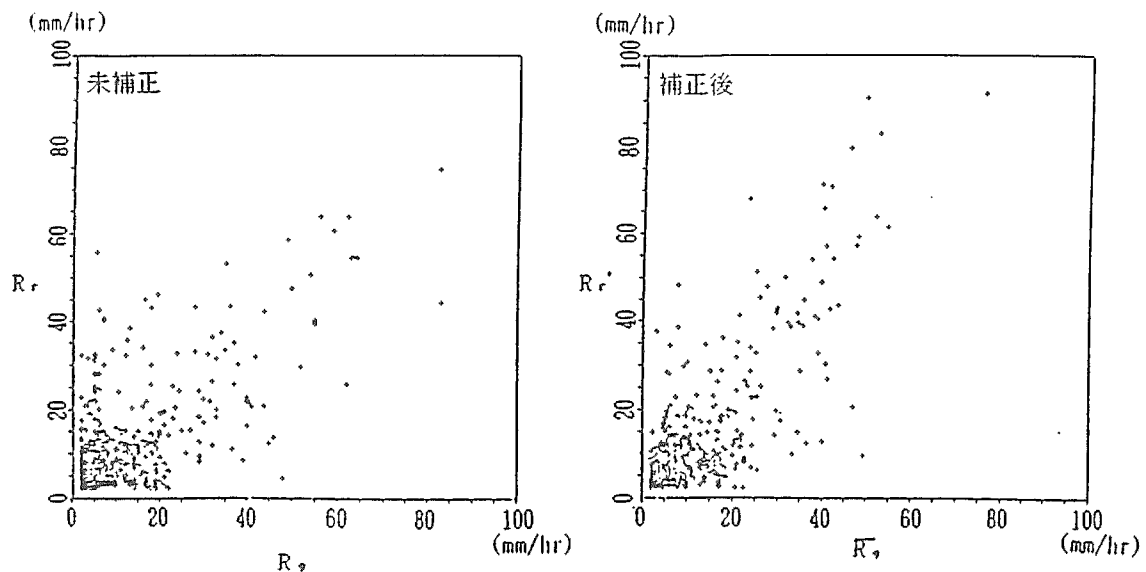


図-7 地上雨量～レーダ雨量関係図 (S. 63. 8. 25)

認できれば、キャリブレーション手法として逐次距離補正法を採用することによりキャリブレーション用テレメータ観測所数の削減や海上部分の補正が可能となる。

6. おわりに

本研究で得られた結論は、次の通りである。

- ①Kriging 法を用いて地上点雨量を面雨量へ変換することにより地上面雨量とレーダ雨量の的確な対応づけが可能となる。
- ②この推定地上面雨量を用いて降雨換算定数 B , β を同定することによりレーダ雨量計の観測精度を向上させることができる。
- ③推定地上面雨量とレーダ雨量を、レーダサイトからの距離別に対応させれば簡単な距離補正法でキャリブレーションが可能となり、その改善効果も高い。
- ④逐次距離補正法のレーダ回転方向での普遍性が確認できればキャリブレーション用テレメータ観測所数の削減や海上部分の補正が可能となる。

今後はより多くの事例にこの手法を適用し、点雨量の面変換のための重み係数の普遍性、逐次距離補正法のレーダ回転方向への適用性等を検証していく必要がある。

参考文献

- 1) 中村興一, 堀田哲夫, 山下芳浩, 星清: レーダ雨量計精度向上への Kriging法の活用, 水工学論文集 第36巻 pp. 489-494, 1992. 2
- 2) Delhomme, J.P.: Kriging in the Hydrosociences, Advances in Water Resources, 1(5). pp. 251-266, 1978. 5
- 3) Kafritsas, J., Bras, R.L.: The Practice of Kriging, Ralph M. Parsons Laboratory Report No. 26, MIT, 1981. 1
- 4) 上林好之, 山口高志, 山本晃一: 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, 1987. 9
- 5) Nakatsugawa, M., K. Hoshi, T. Hotta: Application of Kriging Method to Improvement of accuracy of Radar Measurements, 2nd International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, 1992. 9