

レーダ雨量計を用いた地上雨量予測のためのレーダ定数同定手法の検討

九州大学工学部 学生員 ○古川 節

九州大学工学部 正会員 河村 明

九州大学工学部 正会員 神野 健二

1. はじめに 水文学解析の基礎情報としての地上降雨は、渇水や洪水、その他の災害を防止する上で重要な要素となる。レーダ雨量計による雨量観測は、短時間に高密度、広範囲にわたる雨量情報を観測できることから、地上雨量の短時間予測を行う上で有力な手段であるが、実際の地上雨量へのキャリブレーションは容易でないのが現状である。キャリブレーションの為の手法として従来はレーダ定数を固定、あるいは時間的に逐次設定し、レーダ反射因子を雨量強度に変換して地上雨量と比較する方法<sup>1)</sup>等が行われているが、本研究では、カルマンフィルタ理論によりレーダ定数を時空間的に逐次推定して地上雨量の予測を行い、その精度を検討することにより本手法の実用性についての検討を行っている。

2. 地上雨量のモデル化 レーダ雨量計は、回転するアンテナから放射された電波が空中の雨滴群に当たって散乱し、同一アンテナに帰ってくる受信波の大きさ(レーダ反射因子 $Z(\text{mm}^6/\text{m}^3)$ )を用いて降雨強度 $(\text{mm}/\text{hour})$ を求めるものである。この場合全方向から受信電力が得られ、それを方向別距離別に時空間的平均化(例えば時間的には5分間の平均値、空間的には $3\text{km} \times 3\text{km}$ 平均値を $Z$ とする)を行った後、レーダ反射因子 $Z$ と降雨強度 $R_r$ との関係を次式で表されるレーダ方程式を用いて降雨強度に変換する<sup>2)</sup>。  $Z = BR_r^\beta \dots (1)$

ここに、 $B, \beta$ はレーダ定数と呼ばれ、降雨の種類によって異なり、また時空間的に変動するが、従来簡単のため $B, \beta$ を固定して $R_r$ が求められている。通常、地上雨量 $R_g$ は1時間の総降雨量として測定されるので、本研究では $R_g(\text{mm}/\text{hour})$ とレーダ反射因子 $Z$ との関係を次式でモデル化する。

$$R_g(i, k) = \sum_{n=1}^{12} \frac{1}{12B(i, k)^{1/\beta(i, k)}} Z_n(i, k)^{1/\beta(i, k)} + w(i, k) \dots (2)$$

ここに、 $R_g(i, k)$ : 観測点 $i$ において時点 $(k-1)$ から時点 $k$ までの1時間内に観測された地上雨量 $(\text{mm}/\text{hour})$

$Z_n(i, k)$ : 直上レーダメッシュにおいて同時間内に5分おきに観測されるレーダ反射因子 $(\text{mm}^6/\text{m}^3)$

$n$ : 1時間を5分ごとに区切った場合の各5分間(ここでは $n=1 \sim 12$ )  $w(i, k)$ : 誤差項

すなわちレーダ反射因子は5分おきに観測されるので、これを単純平均して時間雨量に変換する。

3. カルマンフィルタによる定式化 カルマンフィルタ理論は、式(3)に表されるようなシステムの状態量 $x$ を推定するのに適用され、そのシステムの状態量は式(4)の観測方程式を通して観測される。

$$\text{システム方程式: } x(k+1) = \Phi(k)x(k) + \alpha(k) + u(k) \dots (3)$$

$$\text{観測方程式: } y(k+1) = \Gamma(k+1)x(k+1) + s(k+1) + w(k+1) \dots (4)$$

ここに  $k$ : 時点  $x$ : システム状態量ベクトル  $\Phi$ : 既知の状態遷移マトリクス  $\alpha$ : 既知の定数ベクトル

$\Gamma$ : 既知の変換行列  $u$ : システム雑音  $y$ : 観測量ベクトル  $s$ : 既知の観測行列  $w$ : 観測雑音

式(3), 式(4)を定式化することにより、時点 $(k+1)$ までの観測量による $x(k+1)$ の最適推定値 $\hat{x}(k+1|k+1)$ はカルマンフィルタのアルゴリズムに従い逐次推定される<sup>3)</sup>。カルマンフィルタで推定すべき状態量として $x = [x_1, x_2]^T = [B, \beta]^T$ ( $T$ : 転置)とするとベクトル $x$ の遷移方程式は $dx/dt=0$ であるので、式(3)の $\Phi=I$ (単位行列),  $\alpha(1)=0$ となる。次に式(2)の観測点 $i$ の $R_g(i, k)$ の値を観測方程式(4)の観測量 $y$ にとり、式(2)の右辺を関数 $g(B, \beta)$ とおくと式(4)は $y=g(x)+w \dots (5)$ となる。ここで、 $g(x)$ は非線形関数であるから $g(x)$ を $x$ の近傍 $x^*$ においてTaylor級数展開し、1次の項までとり線形化すると $g(x)=J(x^*)x+g(x^*)-J(x^*)x^* \dots (6)$  ( $J(x^*)$ : ヤコビアン行列)となるので、式(6)を式(5)に代入すると結局、観測方程式は $y=J(x^*)x+g(x^*)-J(x^*)x^*+w \dots (7)$ となる。式(7)は、式(4)の $\Gamma=J(x^*)$ ,  $s=g(x^*)-J(x^*)x^*$ に相当し、この場合 $\Gamma$ は2次の列ベクトル、 $s$ はスカラーで、

$$\Gamma = \left[ -\frac{1}{12B\beta} \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{Z_n}{B}\right)^{1/\beta}, -\frac{1}{12\beta^2} \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{Z_n}{B}\right)^{1/\beta} \ln\left(\frac{Z_n}{B}\right) \right] \dots (8)$$

$$s = \frac{1}{12\beta} \sum_{n=1}^{12} \left[ (1 + \beta \ln \frac{Z_n}{B}) \left( \frac{Z_n}{B} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right] \dots (9) \text{となる。}$$

4. 適用結果 本研究では、札幌市周辺の半径120Kmの円を半径方向に40、円周方向に128分割した全5120個のメッシュにおいて、1988年8月25日午前10時から8月26日午後1時までの27時間に観測された停滞前線による降雨のレーダ反射因子Z、および同円内の133地点のうち地上雨量データに欠測のない117地点において観測された地上雨量 $R_g$ に対して上記で定式化した拡張カルマンフィルタを適用した。この場合、状態量 $x$ の初期推定値は $B=180$ 、 $\beta=1.6$ を与え、システム雑音 $u$ の分散は $\hat{x}$ の共分散行列の期待値の1%とし、観測雑音 $w$ の分散は1.0とした。地上雨量の時点 $k$ の予測値 $\hat{R}_g(i, k)$ は、 $(k-1)$ 時点までのデータを用いてカルマンフィルタにより同定されたレーダ定数 $\hat{B}(i, k)$ 、 $\hat{\beta}(i, k)$ 及び時点 $(k-1)$ から時点 $k$ までの12個のZを用いて次式により求める。

$$\hat{R}_g(i, k) = \sum_{n=1}^{12} \frac{1}{12 \hat{B}(i, k)^{1/\hat{\beta}(i, k)}} Z_n(i, k)^{1/\hat{\beta}(i, k)} \dots (10)$$

なお、 $k$ 時点までのデータを用いて同定されたレーダ定数でその時点( $k$ 時点)の地上雨量を計算した場合は推定と呼ぶことにする。図-1に117観測地点のうち2地点における地上降雨の予測、推定結果、および予測誤差を示している。また図-2にレーダ定数の同定過程を示している。次に比較のため、レーダ定数を $(B, \beta) = (180.0, 1.6)$  if  $Z \leq 5000.0$ ,  $(B, \beta) = (410.0, 1.2)$  if  $Z > 5000.0$ のように前もって設定されている値に固定して地上降雨予測を行った結果を図-3に示している。

6. 考察 図-1より、カルマンフィルタを用いた地上降雨への推定はある程度精度よく行われているが、予測の方はレーダ定数を固定した場合の図-3に比べ同程度かもしくは観測点によっては予測精度がかなり低くなる場合も見られ、今回の定式化による地上降雨の予測は期待した程の成果が得られなかった。この原因として、まず、地上降雨観測が1時間であり、1時間後にはレーダ定数が(特に降雨強度が大きくなった場合)かなり変化すること、本報ではZの強度によらず、1組のレーダ定数のみを用いて予測を行っていること、式(2)の非線形効果が大きいことなどが挙げられよう。

7. むすび 本研究では、レーダ雨量計を用いた地上雨量予測に対して拡張カルマンフィルタを適用したが期待したほどの精度良い結果は得られなかった。今後は本手法をさらに改良して、降雨成因別、地域別、複数の降雨について、その精度を確かめてゆくつもりである。

(参考文献)

- 1) 建設省近畿地方建設局:最適 $B, \beta$ のオンライン逐次設定方法の検討業務報告書,(1992.2)
- 2) (財)河川情報センター:レーダ雨量情報を利用した洪水流出予測に関する研究,河川情報研究所報告,別冊-1, pp. 22, (1990.10)
- 3) 河村明・神野健二・上田年比古・土井敬介:上水道配水管毛系のオンライン予測に関する研究,土木学会論文集, No. 405号/II-11, pp245~254, (1989.5)

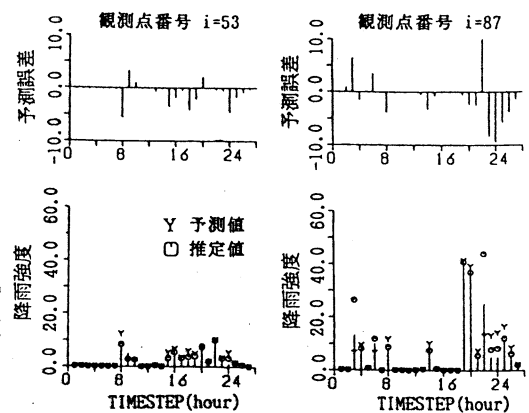


図-1 カルマンフィルタによる地上降雨の予測と予測誤差

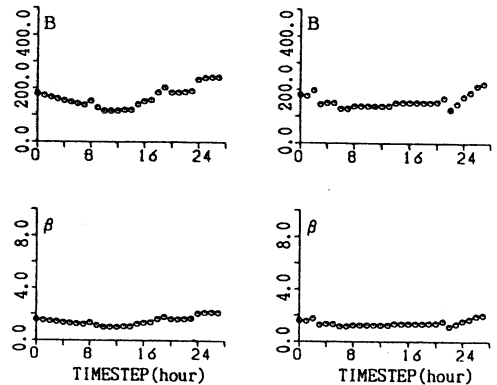


図-2 レーダ定数の同定過程

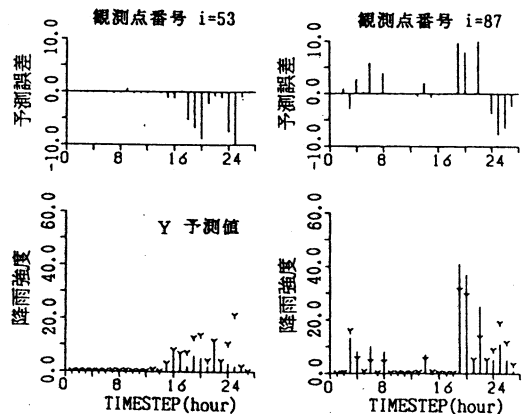


図-3 レーダ定数固定の場合の地上雨量の予測と予測誤差