

46 レーダ雨量計による点雨量の短時間予測

九州大学 工学部 ○森山 聡之
九州大学 工学部 平野 宗夫
九州大学 工学部 河村 明

1. まえがき

短時間降雨予測例として、レーダの雨量データを一種の画像として処理する方法（重心法¹⁾，相互関相²⁾，SSDA³⁾，FFT⁴⁾）とモデル方程式をたてて処理する方法（移流モデル⁵⁾，移流拡散モデル⁶⁾）があげられるが、広域の降雨予測を目的としたものが多い。ここでは、土石流や崩壊のための地点降雨の予測を目的とし、移流拡散モデルにカルマンフィルターを適用して、パラメータの同定と短時間降雨予測を試みた。

2. 移流拡散モデル

一般にレーダー反射強度 Z (mm^6/m^6)，雨量強度 R (mm/hr)及び雨滴濃度 C (mg/m^3)の関係式は、Marshall-Palmer⁷⁾によると $Z=190R^{1.72}$ ， $C=80R^{0.83}$ で与えられる。雨滴濃度 C に関する物質保存の式は3次元空間において

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} + W \frac{\partial C}{\partial z} = \lambda_0 + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right\} \quad (1)$$

ここに U, V, W は、 x, y 及び z 方向の平均速度、 D_x, D_y, D_z は、 x, y 及び z 方向の拡散係数、 λ_0 は雨滴の凝結・蒸発を表わす項である。上式は3次元モデルであるのでこれをレーダー雨量計情報に適用するため2次元モデルに変換し、次のようにおく。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \lambda_1 C + \lambda_2 + \frac{\partial D_x}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial D_y}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (2)$$

ここに

$$\lambda_1 C + \lambda_2 = \lambda_0 + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right\} - W \frac{\partial C}{\partial z}$$

拡散を無視し、 $D_x = D_y = 0$ とすれば、(2)式は(3)式のように移流モデルになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \lambda_1 C + \lambda_2 \quad (3)$$

$\partial D_x / \partial x = 0$ ， $\partial D_y / \partial y = 0$ とすれば、(2)式は(4)式のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \lambda_1 C + \lambda_2 + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (4)$$

各モデルのパラメータの同定及び降雨予測にはカルマンフィルターを用いる。

3. カルマンフィルターの計算式

システム方程式

$$\mathbf{x}(k+1) = \Phi \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{u}(k)$$

観測方程式

$$\mathbf{y}(k+1) = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}(k+1) + \mathbf{w}(k)$$

ここに \mathbf{x} は、状態量ベクトル、 Φ は、時間ステップ k から $k+1$ への遷移時の \mathbf{x} の遷移行列、 \mathbf{y} は、観測量

ベクトル、 H は、状態の変化を表わす観測行列、 u と w は、誤差ベクトルである。また、ある点、ある時刻における雨滴濃度 C を $C(x, y, k)$ として(2)式~(4)式の各項の差分をとり離散表示すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{C(x, y, k+\Delta t) - C(x, y, k)}{\Delta t} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} &= \frac{C(x+\Delta x, y, k) - 2C(x, y, k) + C(x-\Delta x, y, k)}{(\Delta x)^2} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} &= \frac{C(x, y+\Delta y, k) - 2C(x, y, k) + C(x, y-\Delta y, k)}{(\Delta y)^2} \\ \frac{\partial C}{\partial x} &= \frac{C(x+\Delta x, y, k) - C(x-\Delta x, y, k)}{2\Delta x} \\ \frac{\partial C}{\partial y} &= \frac{C(x, y+\Delta y, k) - C(x, y-\Delta y, k)}{2\Delta y} \end{aligned}$$

ここに Δx (km)、 Δy (km)及び Δt (分)は x 、 y 及び t の分割幅である。これらを(2)式~(4)式に代入すれば、それぞれのモデルの観測方程式が得られるわけであり、以上の3つのモデルにカルマンフィルターを適用する。以下、観測方程式が(3)式の場合をモデル1、観測方程式が(4)式の場合をモデル2、観測方程式が(2)式の場合をモデル3と称する。なお各モデルのパラメータを表-1に示す。

ここに $\lambda'_1 = \lambda_1 \Delta t + 1$ 、 $\lambda'_2 = \lambda_2 \Delta t$ である。

4. パラメータの同定結果

10時37分から12時36分までの雨滴濃度 C (mg/m^3)を入力として $\Delta t=1$ 分、 $\Delta x=\Delta y=1$ kmとして最適パラメータを同定した。

U, V, D_x, D_y の同定結果、及び $\lambda_1 C$ の時間的变化を図2~図6に示す。各パラメータとも降雨の急激な増加期を除けば安定しているようである。図3、4において、モデル2によるパラメータ U, V の値と、モデル3によるパラメータ U, V の値を比較すると、 U, V

の値はモデル2による場合よりもモデル3による場合の方が増加している。その増加分がパラメータ

$\partial D_x / \partial x, \partial D_y / \partial y$ になっている。つまり(2)式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left[U \frac{\partial D_x}{\partial x} \right] \frac{\partial C}{\partial x} + \left[V \frac{\partial D_y}{\partial y} \right] \frac{\partial C}{\partial y} = \lambda_1 C + \lambda_2 + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$$

と考えれば(4)式と等価である。これは、物理情報を正確に把握するには拡散係数や拡散係数の空間変動を考慮に入れる必要があることを示している。つまり、拡散係数や拡散係数の空間変動を考慮に入れなければ、その分が U, V などの他のパラメータに齎せされてしまうことがわかる。

表-1

モデル	パラメーター
モデル1((3)式)	$\lambda'_1, \lambda'_2, U, V$
モデル2((4)式)	$\lambda'_1, \lambda'_2, D_x, D_y, U, V$
モデル3((2)式)	$\lambda'_1, \lambda'_2, D_x, D_y, U, V, \frac{\partial D_x}{\partial x}, \frac{\partial D_y}{\partial y}$

表-2

予測時間 Δt (min)	Δx (km)	Δy (km)
10	10	10
20	20	20
30	30	30

5. 雨滴濃度 C の予測結果

表-2に予測時間 Δt と、そのとき用いた空間方向の分割幅 $\Delta x, \Delta y$ の値を示す。図-1に示すA地点の10分先, 20分先, 30分先の各モデルによる予測結果を図7~図9に示す。図からも明らかなようにモデル1よりはモデル2, モデル3の方が予測精度は向上している。しかし、モデル2とモデル3の予測結果にはほとんど差異が見られない。これは4.で示したようにモデル2とモデル3は全体として等価なモデルであることを考えれば妥当な結果であるといえる。また、各モデルによる10分予測, 20分予測, 30分予測を比較して気づくことは、10分先, 20分先

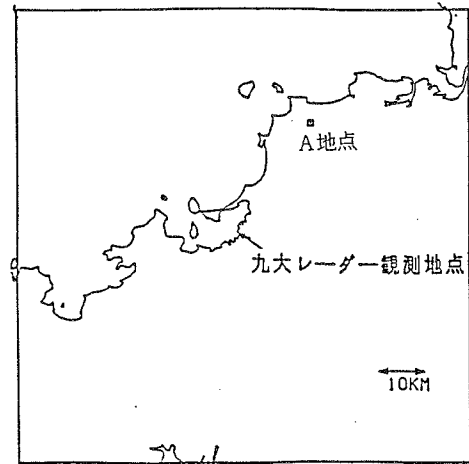


図-1 九大レーダー観測範囲

の予測結果よりも30分先の予測結果の方がかえって予測精度がよくなっている点である。これは、差分のとり方による影響がでたものと考えられる。全体としての予測結果は良好なようである。

6. 結論

本研究で示したようにレーダー雨量計情報により数十分先の降雨予測も可能であり、予測精度は拡散成分を導入した方が向上することが分かった。また、物理現象を正確に把握するには移流成分だけでは不十分であり、拡散項を考慮することが必要である。

なお、今回用いたモデルでは鉛直方向に関する項はすべて $\lambda_1 C + \lambda_2$ に置き換えられていたので3次元観測データにより降雨の発達・衰弱等の物理機構を解析する必要があるであろう。

謝辞 降雨エコーデータは九州大学農学部農業気象研究室より快く提供して頂いた。厚くお礼を述べる次第である。

参考文献

- 1) 日本気象学会：気象レーダ特集。気象研究ノート（1980）
- 2) 元田，早川，坂上，田中：レーダによる降雨の短時間予測について。九州の農業気象（1985）
- 3) 森山，河原田，平野：レーダーエコーの画面処理による雨域追跡の試み。第13回土木学会年講（1984）
- 4) 早川，坂上，元田：豪雨の時間的空間的集中度について
- 5) 高棹，椎葉，宝，中北：移流モデルによる豪雨予測手法の改良とその適用。第21回自然災害シンポジウム（1984）
- 6) 平野，森山：レーダ雨量計による短時間降雨予測に関する2, 3の検討。第21回自然災害シンポジウム（1984）
- 7) J.S.Marshall Wck.Palmer;The distribution of raindrops with size:
The Journal of Meteorology（1948）

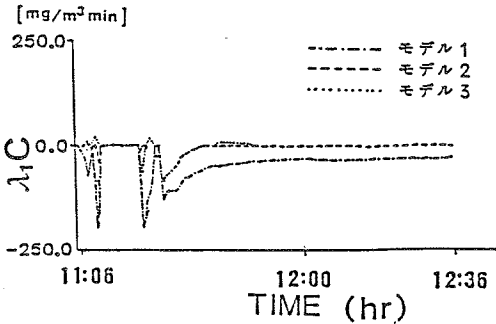


図-2 λ_c の経時変化

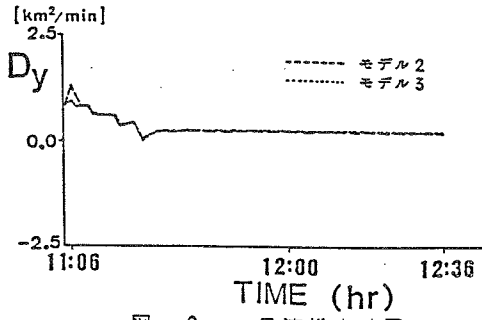


図-6 最適推定値 D_y

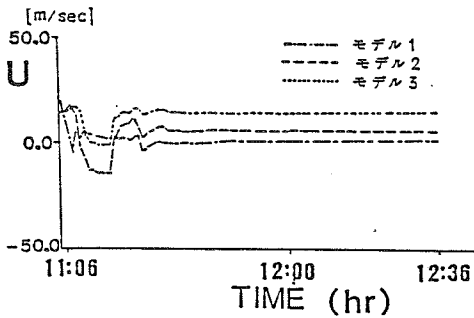


図-3 最適推定値 U

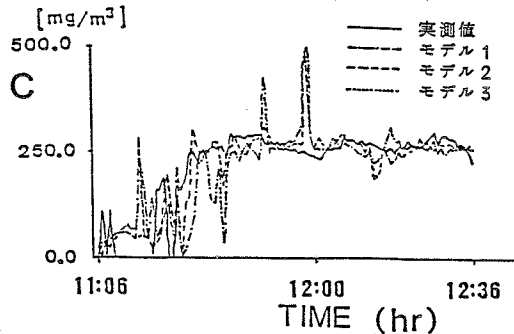


図-7 雨滴濃度 C (10分予測)

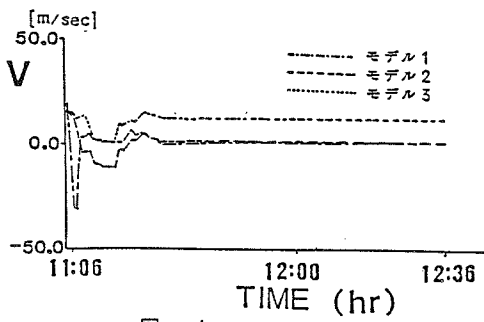


図-4 最適推定値 V

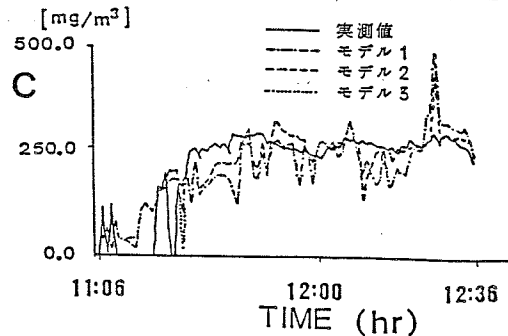


図-8 雨滴濃度 C (20分予測)

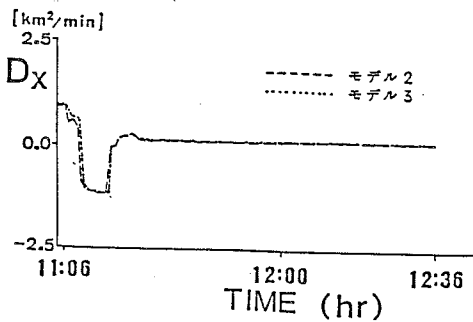


図-5 最適推定値 D_x

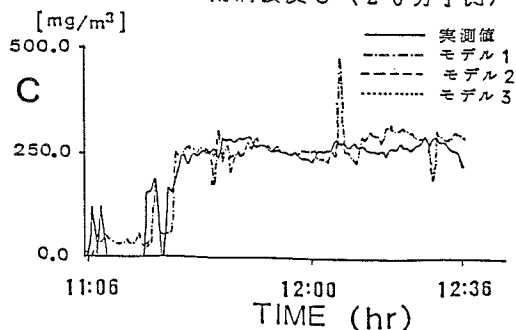


図-9 雨滴濃度 C (30分予測)