

温帯低気圧に伴う前線による降雨のシミュレーションについて

名古屋大学工学部 正員 松林宇一郎

1. まえがき 降雨はその空間的構造として、Synoptic Area (SA: 10^4 km^2 へ、低気圧など)、Large Mesoscale Area (LMSA: $10^3 \sim 10^4 \text{ km}^2$ 、降雨バンドなど)、Small Mesoscale Area (SMSA: $80 \sim 10^3 \text{ km}^2$ 、組織化された積雲対流など)、Convective cell (CC: $\sim 80 \text{ km}^2$ 、積雲対流)といったスケールに分類される。そして、より大きなスケールの中に小さなスケールの現象が幾つか含まれる形で生起する。こうした降雨の模擬発生には、Mejia&Rodriguez-Ilturbe(1974)、Waymire(1984)、Kavvas et.al(1987)などの研究がある。本研究では、Kavvasらのモデルを基礎にして、時間空間的変化の表現に確率微分方程式を導入したものである。

2. モデルの構造

対象とした降雨は、温帯性低気圧に伴う前線に沿って生ずる降雨バンドによるものである。モデル化において取り扱った降雨の要素は、前線 (LMSA)、降雨バンド (SMSA)、コア・セル (CC) である。降雨のシミュレーションは最小単位としての円形のコアやセル (以下 CPA と略称する) を発生させることによって行う。その発生数は平均値関数を $\nu(x, y, t)$ とする空間的に不均質なポアソン過程として取り扱う。降雨バンドは CPA が組織的に集まって生ずる領域、すなわち ν の値が大きい領域である。 ν の変化はこれを確率微分方程式として表し、前線に伴う降雨バンド上に与えられた ν の初期値に対する解として求められる。

こうして、CPA が発生すると、つぎに、それらの半径、降雨強度 (CPA 内で一様)、低気圧の中心に関する相対速度、寿命等のパラメータを規定する。実際の降雨は、こうして次々に発生し死滅する CPA によってもたらされる降雨が重なり合ったものとする。

3. ν に関する確率微分方程式

ν は物理的には CPA の平均的発生数を意味し、これは空気の上昇・下降流、成層の不安定性、湿った空気の側方流など、つまりは風速、温度、湿度と大気圧などの気象要素に関係している。一般に大気の運動は移流と拡散を含む方程式で記述される。従って大気の状態量と関係した ν も同様な方程式で書き表されると考えられる。 ν について、もう一つの重要な要素はその生産と消費である。すなわち高濃度の水蒸気と空気の収束が十分ある間は、新しい CPA は容易に発生するが、降雨としてこの水蒸気が消費され、上昇気流がなくなると CPA の発生は次第に減少する。これらから ν は次の偏微分方程式に支配されるものとする。

$$\partial \nu / \partial t - D_x \cdot \partial \nu^2 / \partial x^2 - D_y \cdot \partial \nu^2 / \partial y^2 + u \cdot \partial \nu / \partial x + v \cdot \partial \nu / \partial y = s \quad \cdots (1)$$

$$\nu(\pm\infty, \pm\infty, t) = 0, \quad \nu(x, y, 0) = f(x, y) \quad \cdots (2)$$

ここで、 D_x 、 D_y は拡散係数、 u 、 v は ν の移流速度、 s は ν の生産と消費、 $f(x, y)$ は ν の初期値であり、前線に沿って生ずる降雨バンド内で一定値をとりその外ではゼロとする。

ν を確率過程として取り扱うにあたり、ここでは第 1 段階として、 ν の成長と減衰に対して最も支配的な役割を果たすと考えられる生産と消費の項 s を確率的に取り扱った。

$$s = \nu(x, y, t) \cdot \{d\beta(t)/dt + g(t)\} \quad \cdots (3), \quad g(t) = g_0 \cdot (T_0/2 - t) \quad \cdots (4)$$

ここで、 $g(t)$ は、生産と消費の母集団平均に関する項であり、 $d\beta(t)$ は白色ガウス雑音過程である。式(5)の解は、移動座標、 $x' = x - ut$ 、 $y' = y - vt$ 、 $t' = t$ を用いると次式で与えられる。

$$\nu(x', y', t') = 1/(4t' \sqrt{D_x D_y}) \iint \exp \{-(x' - x'')^2 / 4D_x t' - (y' - y'')^2 / 4D_y t'\} \\ + d\beta(t') + G(t') \} f(x, y) dx'' dy'' \quad \cdots (5)$$

$G(t')$ は、 $G(t') = \int_0^{t'} g(t) dt$ である。なお式(5)を実際に計算するには一見すると多大の労力を必要とする

ように見える。しかし、拡散に関する項と、生産・消費に関する確率過程の項を分離することによって容易に計算できるよう工夫した。

4. CPAの特性

ν の時空間分布に基づいてポアソン過程として発生したCPAの半径 $R(t_a)$ 、降雨強度 $r(t_a)$ は次式でモデル化した。

$$R(t_a) = 4 \cdot R_m \cdot t_a \cdot (t_L - t_a) / (t_L)^2 \quad \dots(6), \quad r(t_a) = 4 \cdot r_m \cdot t_a \cdot (t_L - t_a) / (t_L)^2 \quad \dots(7)$$

ここで、 R_m はCPA半径の最大値、 r_m はCPAの最大降雨強度、 t_L はCPAの寿命、そして、 t_a はCPAの誕生からの経過時間である。 r_m は指数分布に従うとしている。以上のモデルに含まれているパラメータや、確率分布はこれまでの研究者によって報告されているデータを整理することにより求めたが、有効なデータがあまり多くないので、パラメータによっては将来の研究により精度を上げるべきものも多い。

5. シミュレーション結果

図1は式(5)中の $\exp\{d\beta(t)+G(t)\}$ の標本関数の例を示している。図には、母集団平均 $\exp\{G(t)\}$ も併記してある。図2は図1で示した発達減少の1時点における降雨バンドとCPAの空間的広がり模擬発生例である。また、図3は図2のA-Bに沿った降雨の空間分布を示したものである。図3から降雨バンドの時間的発達と減衰がよく表されている。図2、図3はそれぞれ降雨のレーダPPI写真や、ハイトグラフとよく似ており、低気圧による前線とCPAが確率的にうまくシミュレートされていることが分かる。

なお、この研究は鹿島財団の奨学金によりウォータールー大学に滞在中に行ったものである。

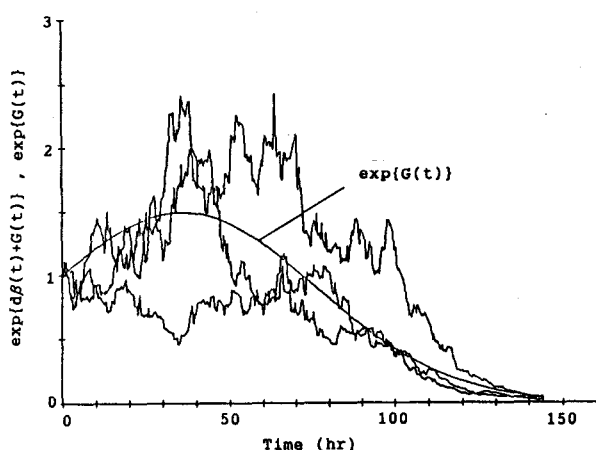


図1 $\exp\{d\beta(t)+G(t)\}$ の標本関数の例

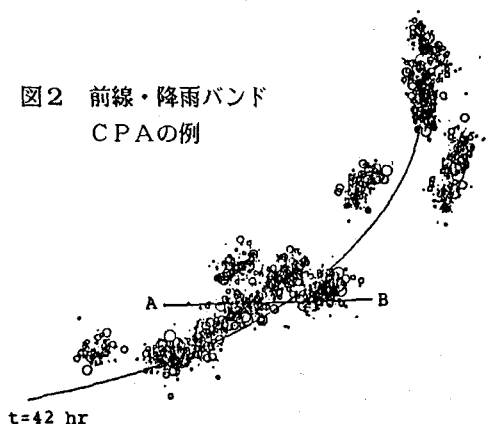


図2 前線・降雨バンド
CPAの例

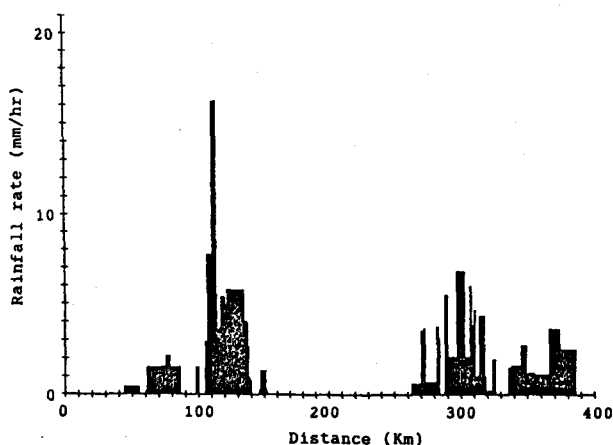


図3 降雨の空間分布例