

短時間都市規模地上降雨の時空間特性と 実時間予測について

On the Temporal and Spatial Characteristics of Short-Term Urban-Scale Rainfall
and Its Real-Time Prediction.

河村 明^{*}・神野健二^{**}・Janusz Niemczynowicz^{***}
Ronny Berndtsson^{***}・Magnus Larson^{***}

By Akira KAWAMURA, Kenji JINNO, Janusz NIEMCZYNOWICZ,
Ronny BERNDTSSON and Magnus LARSON

This paper firstly presents the temporal and spatial characteristics of short-term urban-scale rainfall. The studies are based on measurements of rainfall made on a network of 12 gauges situated in the city of Lund, Sweden. Three-year series of one-minute rainfall records from each gauge are used for the analyses such as areal intensity-duration-frequency relationships. Secondly, a method for real-time prediction in time and space of urban-scale rainfall under the assumption that the rainfall process is governed by the stochastic convective-dispersion equation. The method is applied to the short-term rainstorm prediction in the city of Lund.

Keywords: rainfall characteristics, short-term rainfall, urban-scale rainfall,
real-time rainfall prediction, convective-dispersion model

1. はじめに

水文現象の素過程としての降雨現象は、水文学者および現場技術者の最も重要かつ興味ある研究課題の一つである流出予測の基礎的入力として、非常に大きなウェイトを占めている。流出モデルについては数多く提案され、実用上かなりの精度で流出予測ができるようになっている。しかし、入力となる降雨が、従来の計画降雨のように流域内の概して1地点での降雨波形として与えられ、その降雨が流域全体に等しく降るものとして流出解析を行った場合、結果は実際とはかなり食い違ったものとなるであろう。また降雨の統計的性質および流域特性が同じであっても雨域の移動方向、移動速度によって、特に都市域では道路の走る方向や下水道管の敷設方向の影響により評価地点のハイドログラフが異なってくる¹⁾。このため、流域内の1地点の観測降雨による流域平均降雨と流域規模の関係、空間的な降雨強度・降雨継続時間・再現期間の関係等のような降雨の時間的・空間的特性の把握が重要となってくる^{2), 3)}。また、市街化にともなう急激な雨水流出

* 正会員 工博 九州大学助手 工学部水工土木学科
(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科
(同上)

*** Dr.Sc. University of Lund, Department of Water Resources Engineering
(Box 118 S-22100 Lund, Sweden)

に対する都市流出の実時間予測は、下水管からの氾濫等の浸水問題を最小限に食い止め、下水道システムの実時間最適運用を行う上で非常に重要な問題となってきている。この場合、短時間間隔での都市規模（1～50km²）の降雨現象の時間的・空間的特性の解析および実時間予測が、今後人口集中の著しい都市域における雨水排除システムにおいて、より木目の細かい下水道運用を行うために必要になってくるものと思われる。

本研究では、上記のことを考慮し、まず都市域にかなり密に地上雨量計を配置し、短時間間隔（1分間隔）で降雨データを収集しているスウェーデンのルンド市を例にとり、その3年間400以上の降雨現象のデータより短時間都市規模地上降雨の時間的・空間的特性の解析を行う。すなわち、1地点の降雨強度と空間的降雨強度との降雨強度・降雨継続時間・再現期間の関係および雨域の移動速度・移動方向に関する統計的性質について検討を行う。次いで、短時間都市規模降雨の実時間予測の第一段階として、まず上記の解析結果より短時間都市規模地上降雨現象の時空間分布変動を、確率的移流分散現象としてモデル化する。そしてこれを2重フーリエ級数を使って波数空間に展開し、そのフーリエ係数およびモデル中の物理パラメーター（雨域の移動速度や分散係数など）を実時間で逐次同定しながら短時間の降雨分布を予測してゆく手法を検討する。さらに本手法をルンド市の降雨データに適用して、その予測精度より本手法の実用性および確率的移流分散現象による降雨現象のモデル化の妥当性について検討を行う。

2. 1分間隔地上降雨の時空間特性

2・1 1分間隔地上降雨の観測システムについて

1. で述べたように都市域における流出などの問題に対しては分単位の観測データが求められるようになってきている。しかし国内では都市域で分単位かつ多地点で降雨観測を行っている都市は見受けられないようである。そこで本研究では、図-1に示すような流域面積25.2km²の都市域に平均1.3km間隔で合計12の雨量計を配置し、1分間隔で降雨データを収集しているスウェーデンのルンド市を例にとり、短時間都市規模地上降雨現象の特性解析を行う。雨量計はルンド大学で独自に開発作製したもので、測定精度は0.035mm/4.2mm/分の降雨強度まで測定できるようになっている。雨量計からのデータは電話線を介してルンド大学水資源研究室のコンピューターにオンラインで取り込まれる。以下の解析においては1979年1月より1981年12月までの3年間の1分間隔降雨データを用いている。

2・2 降雨強度・降雨継続時間・再現期間の空間的特性

1地点の降雨強度と空間的な降雨強度との比較を統計的に行ってみよう。図-2に、12地点の各々の観測時系列より降雨強度・降雨継続時間・再現期間を求め、それを算術平均したものを示している。また図-3には、各時点毎に12地点の観測データを支配面積加重平均した時系列より求められる降雨強度・降雨継続時間・再現期間の関係を示している。なお、各地点および各地点平均の最大降雨強度は対数ピアソンⅢ型分布に適合していた。図-2、図-3より降雨継続時間が大きくなる程、降雨強度は急激に小さくなっていて、再現期間が大きい程その落差は大きくなっている。また、12地点からの降雨観測による平均降雨強度の方が、1地点からのそれよりもかなり小さく、その差は降雨継続時間が短いほどまた再現期間が大きくなる程大きくなっている。

次に雨量計のカバーする面積と降雨強度の関係を求めるために統計的減衰係数¹⁾を降雨継続時間との関係で図示したものを図-4に示す。統計的減衰係数とは、ある降雨継続時間とある再現期間に対して、考える雨域

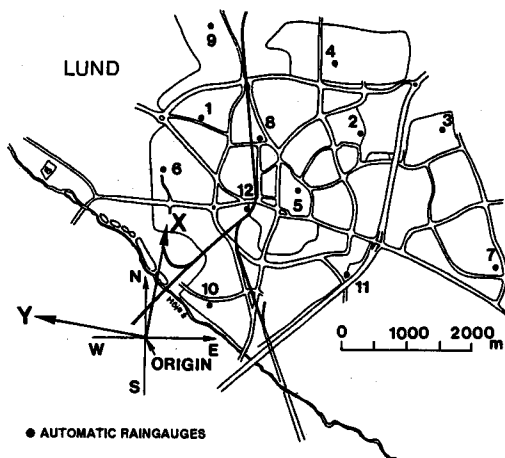


図-1 ルンド市における雨量計の配置図

面積に対する降雨強度の1地点降雨強度に対する比率である。この図より、考える雨域面積が大きくなる程、降雨強度の減衰が大きくなり、その減衰の度合は降雨継続時間が小さくなる程大きくなることがわかる。なお、上記以外の特性として、ある降雨の再現期間は、降雨継続時間や考える雨域面積が異なれば変化することなどが明らかとなった。

2・3 ルンド市における雨域の移動速度と移動方向に関する統計的特性

雨域の移動速度と移動方向を計算するためにHindi and Kelwayによる3地点法⁴⁾を修正して用いた。この手法は、任意の3地点の雨量計から観測される雨量強度のピーク値の時刻より、速度ベクトルを求め、雨域の移動速度と方向を計算するものである。ここでは12地点のすべての3地点の組合せより得られる速度ベクトルを平均した。これから得られる雨域の移動速度と移動方向は上空700mbにおける風速、風向と非常に高い相関を示し、値そのものもほぼ同様であった。移動速度の分布に関しては2変数の対数正規分布によく適合していた。図-5には移動方向の頻度およびその方向の平均移動速度を20度刻みで示している。図-5より移動方向には大きく分けて2つの方向がみられる。すなわち、1つは北もしくは北北東の方向に移動する場合であり、これは主に夏に生起しており、降雨強度は大きく移動速度は概して小さい。他の1つは東もしくは南東の方向へ移動する場合で、これは夏以外の季節に見られ、降雨強度は小さく移動速度は大きい特徴を有している。なお、ルンド市において典型的移流型降雨が発生するのは夏で、特に低気圧がルンド市の北側にあって、

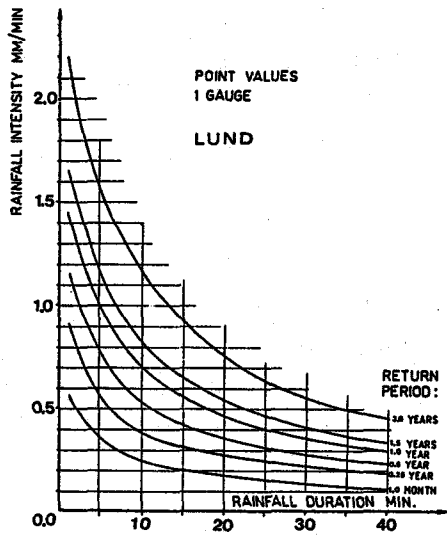


図-2 1地点における降雨強度・降雨継続時間・再現期間の関係

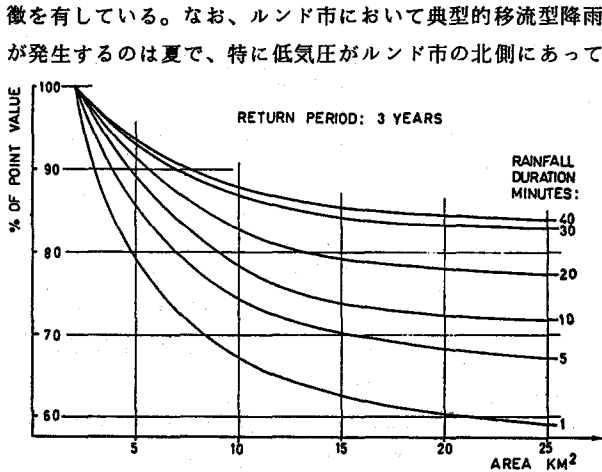


図-4 再現期間3年に対する統計的空間減衰係数

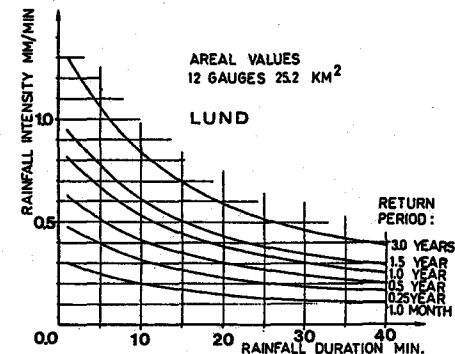


図-3 流域全体における降雨強度・降雨継続時間・再現期間の関係

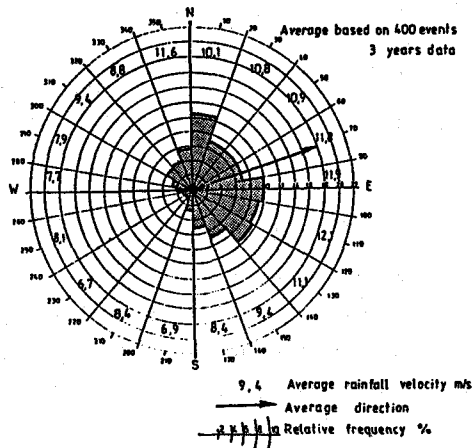


図-5 雨域の移動方向の頻度分布およびその平均移動速度

風が南から吹き込む時に、寒冷前線が通過する場合である。

3. 短時間地上降雨の実時間予測

3・1 予測手法の定式化

ここでは2.で述べたように、雨域の移動方向に関する風向、風速の情報は気象データとして事前に入手できることを積極的に活用し、同定すべき物理パラメーターを減少させるため、次式に示すような雨域の移動方向にx軸をとった場合の定係数2次元確率移流分散方程式を短時間地上降雨現象のモデルとして適用する。

$$\frac{\partial R(x, y, t)}{\partial t} + u \frac{\partial R(x, y, t)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 R(x, y, t)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 R(x, y, t)}{\partial y^2} - \gamma R(x, y, t) + \varepsilon(x, y, t) \quad (1)$$

ここに、R：降雨強度(m/min) x, y：x軸、y軸上の座標(m) u：x軸方向の降雨の移動速度

γ ：1次反応係数(1/min) D_x, D_y ：x, y軸方向の分散係数(m²/min) t：時刻

ε ：平均0、分散 σ_v^2 の正規性白色雑音(m/min²)

ここで、R(x, y, t) および $\varepsilon(x, y, t)$ を次式のように変数x, yに関する2重フーリエ級数に展開する。

$$R(x, y, t) = \frac{A_{00}(t)}{2} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^N [A_{mn}(t) \cos F_1(x, y, m, n) + B_{mn}(t) \sin F_1(x, y, m, n)] \\ + \sum_{m=0}^M \sum_{n=1}^N [C_{mn}(t) \cos F_2(x, y, m, n) + D_{mn}(t) \sin F_2(x, y, m, n)] \quad (2)$$

$$\varepsilon(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [E_{mn}(t) \cos F_1(x, y, m, n) + F_{mn}(t) \sin F_1(x, y, m, n) \\ + G_{mn}(t) \cos F_2(x, y, m, n) + H_{mn}(t) \sin F_2(x, y, m, n)] \quad (3)$$

$$F_1(x, y, m, n) = 2\pi m x / \ell_x + 2\pi n y / \ell_y \quad (4)$$

$$F_2(x, y, m, n) = 2\pi m x / \ell_x - 2\pi n y / \ell_y \quad (5)$$

ここに、 $A_{mn}, B_{mn}, C_{mn}, D_{mn}$ ：Rの波数m, nに関するフーリエ係数 (m/min)

$E_{mn}, F_{mn}, G_{mn}, H_{mn}$ ： ε の波数m, nに関するフーリエ係数 (m/min)

ℓ_x, ℓ_y ：x, y軸方向の基本波長(m) M, N：組み込むフーリエ級数の項数

式(2)、式(3)を式(1)に代入して、波数m, nに対するフーリエ係数に関する連立常微分方程式に変形すると次式となる。

$$\begin{bmatrix} dA_{mn}(t)/dt \\ dB_{mn}(t)/dt \\ dC_{mn}(t)/dt \\ dD_{mn}(t)/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_{mn} & -Q_{mn} & 0 & 0 \\ Q_{mn} & -P_{mn} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -P_{mn} & -Q_{mn} \\ 0 & 0 & Q_{mn} & -P_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{mn}(t) \\ B_{mn}(t) \\ C_{mn}(t) \\ D_{mn}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{mn}(t) \\ F_{mn}(t) \\ G_{mn}(t) \\ H_{mn}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{ここに、} P_{mn} = D_x \left(\frac{2\pi m}{\ell_x} \right)^2 + D_y \left(\frac{2\pi n}{\ell_y} \right)^2 + \gamma, \quad Q_{mn} = u \left(\frac{2\pi m}{\ell_x} \right) \quad (7)$$

ここで、式(1)のu, D_x, D_y, γ および式(2)のフーリエ係数 $A_{mn}, B_{mn}, C_{mn}, D_{mn}$ をカルマンフィルターにおけるシステム状態量Xとして推定すべき量にとると、状態量の次元数は(4MN + 2M + 2N + 5)となる。次に、カルマンフィルターの観測量は、空間に任意に配置された観測点(x, y)_j (j=1~M_p)から観測雑音wを含んだ降雨強度Rがあるサンプリング時間間隔で定時的に観測されるとすると、

$$R(x, y, k) = [0, 0, 0, 0, 1/2, \dots, \cos F_1(x, y, m, n), \sin F_1(x, y, m, n), \cos F_2(x, y, m, n), \sin F_2(x, y, m, n) \dots] \\ [u, D_x, D_y, \gamma, A_{00}(k), \dots, A_{mn}(k), B_{mn}(k), C_{mn}(k), D_{mn}(k), \dots]^T + w(x, y, k) \quad (8)$$

後は、式(6)を線形化して離散型拡張カルマンフィルターを適用すれば、各時点毎にXの最適推定値が求めら

れ、これを用いて降雨強度 R の予測が行われる。なお、カルマンフィルターによる詳しい定式化および1次元移流分散確率過程に対する本手法の特性については参考文献5)を参照されたい。

3・2 ルンド市の1分間隔降雨時系列への適用

(a) 適用結果

3・1で定式化した手法を、3・2で述べたように降雨強度が大きく北もしくは北北東方向へ雨域が移動する夏型の典型的降雨現象について適用してみよう。ここではスウェーデンのルンド市で1976年6月25日の午前1時1分から1時23分までの23分間にわたって観測された1分間隔降雨データに本手法を適用した。この場合、風速は1036(m/min)で、雨域は北から時計回りに 10° の方向に移動していた。図-6に降雨観測地点での降雨時系列を棒グラフで示している。ここでは3・1で述べたように雨域の移動方向に沿って図-1に示すように x 軸をとっており、図の上から下に x 座標の値が大きくなるように時系列を並べている。この図より本降雨現象は降雨のピークがひとつしかなく、また実際の降雨はほとんど観測後3分(1時3分)から12分(1時12分)の間に集中して降っている。事実、1時13分以後0.1mm/min以上の降雨は観測されていない。

ここで、式(6)の離散時間間隔 $\Delta t=0.1(\text{min})$ 、式(4)、式(5)の基本波長 $\lambda_x=30000(\text{m})$ 、 $\lambda_y=10000(\text{m})$ 、式(1)のフーリエ級数の項数は $M=N=5$ とし、降雨強度の予測を行った。この場合、本計算に用いた式(1)の物理パラメーターの初期値としては、 $u=1036(\text{m/min})$ 、 $D_x=5 \times 10^5(\text{m}^2/\text{min})$ 、 $D_y=2.5 \times 10^5(\text{m}^2/\text{min})$ 、 $\gamma=0.0(1/\text{min})$ を与えた。また式(2)のフーリエ係数の初期値は、図-1に示した原点に対し座標 $(-15000, -2300)$ の地点の $10\text{m} \times 10\text{m}$ の正方形に雨量強度500(m/min)の降雨が発生したとして、その雨が式(1)に従って10分間移流分散した場合の降雨形状をフーリエ級数展開し、このフーリエ係数を初期値とした。また、カルマンフィルターのシステム雑音の分散には初期状態量の5%の2乗、観測雑音のそれには0.02mm/minの2乗を与えた。さらに、状態量の誤差共分散行列の初期値には初期状態量の積を与えた。図-6の○印に観測点における1分先降雨予測の結果を、図-7に物理パラメーターの同定結果を、そして図-8に $t=7\text{min}$ における1分先予測降雨分布を示している。

(b) 考察

図-6より1分先降雨予測結果をみると、概ね精度良く予測できているといえよう。この場合の全観測点での予測誤差の標準偏差の平均は0.127mm/minであった。逆に言えば、確率移流分散モデルを用いて本手法により、この程度の精度が期待されるといえる。次に、図-8の1時7分における1分先予測降雨分布形状をみると、本降雨現象に対してピークが1つの正規分布型の降雨分布を予測している。この場合、12点の観測点の値から実際の降雨分布形状を描くのはかなり難しいので、図-8を直接実際の降雨分布と比較することはできないが、これはかなり実際の降雨特性に即しているのではないかと考えられる。次に図-7より、物理パラメーターの同定結果は12分くらいまでか

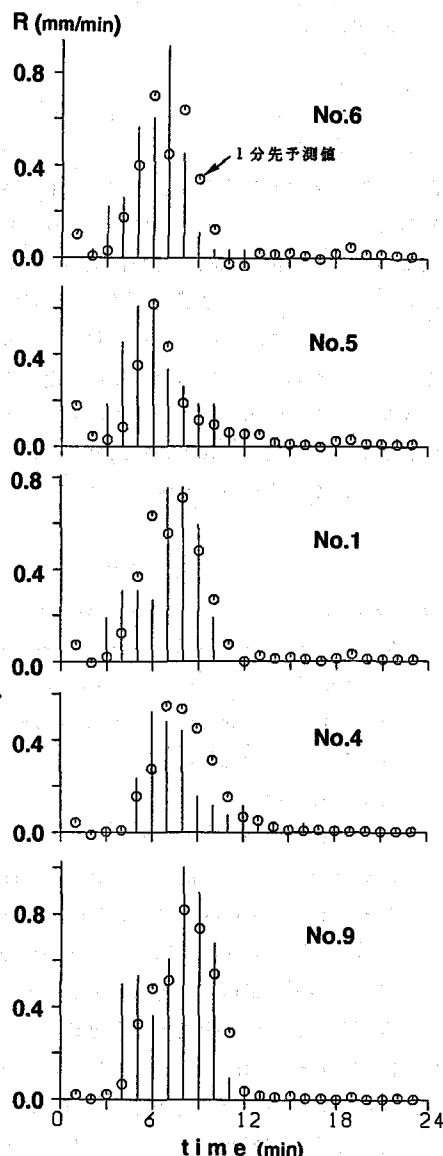


図-6 実測降雨時系列および1分先降雨予測値

なり変化している。特に、5分から7分のところで雨量強度が強くなり始めたときに、物理パラメーターをかなり変化させて降雨の変化に追従させようとしている。次にフーリエ係数の同定結果は、ここには載せていないが、波数の小さい項のフーリエ係数は、降雨が大きくなる所でかなり変動しているが、x方向、y方向に対する波数が共に4以上の高周波数成分のフーリエ係数は実測降雨強度に余り影響されず急激に0に収束していた。これより波数の小さい低周波数成分が予測結果に大きく寄与していると考えられる。またその他に、カルマンフィルターのシステム状態量の初期値の推定が予測精度にかなり影響することが分かった。

4. むすび

本研究ではスウェーデンのルンド市の1分間隔降雨データを例にとり、まず短時間都市規模地上降雨の時空間特性について検討を行った。その結果、1地点から得られる降雨強度と空間的降雨強度との降雨継続時間や再現期間がかなり異なることを示した。また、雨域移動速度、方向などの特性を明らかにした。次いで、短時間降雨を確率移流分散としてモデル化し、降雨分布の1分先予測を行った結果、概ね精度良く予測でき本モデル本手法の妥当性が示された。今後さらに、予測時間を数分先まで延ばし、さらに他の多くの降雨現象に本手法を適用することにより、本手法の特性を確かめてゆくつもりである。

参考文献

- 1) Niemczynowicz, J. : Investigation of the Areal and Dynamic Properties of Rainfall and its Influence on Runoff Generating Processes, Doctoral dissertation, Report No.1005, Department of Water Resources Engineering, University of Lund, December 1984.
- 2) Jinno K., A. Kawamura, M. Larson, R. Berndtsson and J. Niemczynowicz : A Convective-Dispersion Model for Real-Time Prediction of Urban-Scale Rainfall, 図-8 1時7分における1分先予測降雨分布 Fifth International Conference on Urban Storm Drainage, July, 1990.
- 3) 河村 明・神野健二・吉永宙司：移流分散確率過程で表される降雨分布の実時間予測について、水文・水資源学会1990年研究発表会要旨集、pp.102-105、1990年8月。
- 4) Hindi, W.N.A. and Kelway, P.S. : Determination of Storm Velocities as an Aid to the Quality Control of Recording Raingauge Data, Journal of Hydrology, No.32, pp115-137, 1977.
- 5) 河村 明・神野健二・上田年比古・吉永宙司：カルマンフィルターによる定係数一次元確率移流分散方程式のオンライン濃度分布予測について、九州大学工学集報第62巻第1号、pp17-24, 1989年1月。

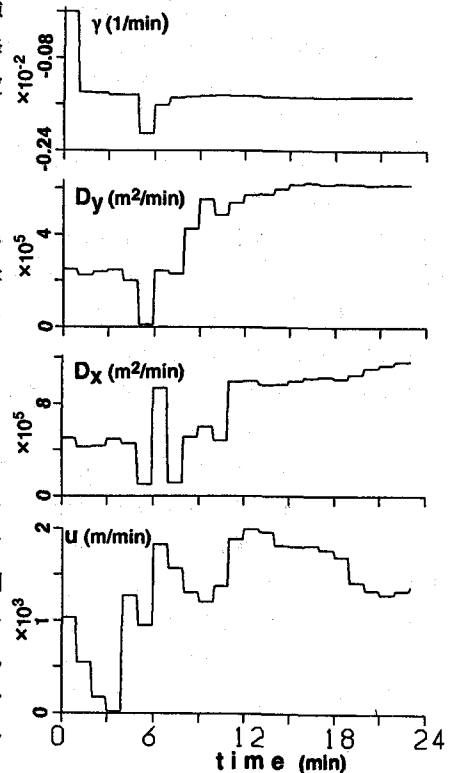


図-7 物理パラメーターの同定結果

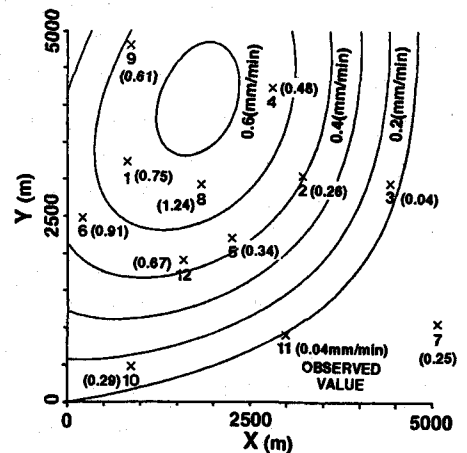


図-8 1時7分における1分先予測降雨分布