

## 2008年雑司が谷大雨当日における積乱雲群の 振舞いと局地的大雨の直前予測 II

—積乱雲に伴う局地的大雨の直前予測の試み—

石 原 正 仁\*

### 要 旨

2008年8月5日に首都圏では多数の積乱雲が発生し、東京都豊島区雑司が谷では局地的大雨による被害が生じた。第1部(石原 2012)ではこの日に首都圏で発生した積乱雲群のレーダーエコーの形態を統計的に調べた。この第2部では、この日大雨警報が発せられた地域に発生した積乱雲を対象として、気象庁の3次元レーダーデータを用いて降雨のピークの時刻と量を直前に予測することを試みた。「上空における降水のコア」、「鉛直積算雨量」、「エコー頂高度」、「雷放電」、「降水セル強度と鉛直積算雨量の変化」の5つの指標を検討したところ、各積乱雲においてこれらの手法のうちいくつかには効果が認められたが、効果の程度や有効な手法の組み合わせは降水セルによって異なった。「上空における降水のコア」は雑司が谷に局地的大雨をもたらした積乱雲においては有効であった。

### 1. はじめに

石原(2012)は、東京都豊島区雑司が谷において局地的大雨が発生した2008年8月5日に、東京都とその周辺域に発生した179個の気団性の積乱雲群の形態を気象庁の3次元レーダーデータを使って統計的に調べ、その全体像を示した。積乱雲の総数の1/3は直径3.5km以下、平均値は5.5kmと全体に小規模であった。寿命の最頻値は20~40分であり、全体の86%が80分以下であった。積乱雲からもたらされた推定総降水量は約半数では40mm未満であったが、総数の1/3では60mm以上を示した。積乱雲がレーダーによって降水セル(定義は後述する)として認められてから地上で降雨のピークが現れるまでの時間値は、ほとんどの事例で10~30分であった。これらの結果は、予報現場で“不安定降水”とよばれる気団性の積乱雲がもたら

す局地的大雨の監視・予測が困難であること(大久保ほか 2007)を裏付けている。

降水の短時間予測(ナウキャスト)は各国気象機関における懸案事項であり、各種のナウキャストシステムが開発され、運用されている。わが国の気象庁の「降水短時間予報」(牧原 2007)や「降水ナウキャスト」(杉浦ほか 2005)、米国気象局のWDSS(Warning Decision Support System)-II(Lakshmanan *et al.* 2007)、米国NCARのTITAN(Thunderstorm Identification Tracking Analysis and Nowcasting)(Dixon and Wiener 1993)、イギリス気象局のNimrod(Automated precipitation nowcasting system utilising rainfall radar data)(Golding 1998)やGenerating Advanced Nowcasts for Deployment in Operational Land-based Flood forecasts(GANDORF)(Pierce *et al.* 2000)、カナダ気象局のCARDS(Canadian Radar Decision Support system)(Lapczak *et al.* 1999)、ドイツ気象局などによるNinJo(Koppert *et al.* 2004)がその例である。これらの中のいくつかは2000年のシドニーオリンピック

\* 気象研究所(現:京都大学)。

—2011年3月8日受領—

—2012年3月19日受理—

及び2008年の北京オリンピックにおいてWMOの予報デモンストレーションの一環として比較実験が行われた (Pierce *et al.* 2004; Joe *et al.* 2004; Wilson *et al.* 2010). ただし, これらのシステムにおける予測手法は基本的にはレーダーの実況値を初期値とし, それまでの移動速度と変化傾向をもとに時間外挿する手法が基礎となっているため, 積乱雲の突然の発生, 発達, 衰弱, 分離, 併合, さらに組織化などのプロセスに対応できる能力を有しているとはいえない (Pierce *et al.* 2004).

レーダー観測によって積乱雲の発生, 発達, 大雨の発生プロセスを知るには, レーダーエコーの水平分布とともにその3次元的な降水分布を調べることが必要である. 気象庁のレーダー気象観測業務においては近年まで反射強度の鉛直分布は利用されてこなかったが, 2005年の運用システムの更新に伴い全国一円で水平・鉛直に1 km メッシュの反射強度データ (以後これを「3次元レーダーデータ」という) をリアルタイムに10分間隔で作成するようになった (気象庁観測部 2007). 同庁ではこの3次元レーダーデータを使って大雨の監視・予測を強化するための調査を実施している (佐藤ほか 2009).

本論文では主に3次元レーダーデータを用いて, 大雨のピークの時刻とそのときの降水強度を数十分前を目標に運動学的に予測することを検討する. 今回これを「直前予測」と呼ぶことにする. 当日, 大雨警報が発表された4つの地域に発生した8個の積乱雲を対象として, 反射強度の鉛直分布, 鉛直積算雨量 (VIL: Vertically Integrated Liquid water, Greene and Clark 1972) などの時間変化や雷放電の状況を予測因子として, 地上における降雨のピークを直前に予測する手法について論じる. 本調査では, 発生から消滅までの間に高度2 kmにおける反射強度 ( $Z_{2km}$ ) が35dBZ以上であり, 反射強度の極大点がひとつ存在する対流性エコーを積乱雲とみなし, これを「降水セル」と呼ぶことにする. この日は反射強度が35dBZを超える領域はすべて対流性エコーであった. なお気象庁の予報業務においては, 大雨を「災害が発生するおそれのある雨」と定義している (気象庁 2011). 気象庁の注意報は「災害が起るおそれがある場合にその旨を注意して行う予報」であるから, 大雨注意報の対象となる雨が大雨ともいえる.

## 2. 使用するデータ

3次元レーダーデータは全国20地点の気象レーダーから得られる26仰角の極座標上の反射強度データ (分解能は動径方向500m, 方位方向0.7度) を, 全国を覆う東西・南北1 km, 高度1~15km, 15層の直角座標 (正確には地表に沿った緯度0.50分, 経度0.75分, 高度1.0km間隔の直交座標) の格子上に変換したものである. 各高度の値はそれを上下に挟む2つの仰角のデータを線形内挿して得られる. レーダーから遠く離れた地点では高度1 kmより下に極座標データが存在しないこともあり, そのときには高度1.9kmまでにデータがあればそれを高度1 kmのデータとする外挿処理している. ただし, 本調査では千葉県柏市に位置する東京レーダーのデータを使用しており, 本調査の解析領域はレーダーから比較的近く高度1 kmより低い高度にも極座標データが得られているので, この外挿処理は行っていない. 3次元レーダーデータからは二次プロダクトとして鉛直積算雨量 (VIL) をはじめとして, 鉛直方向に見た反射強度の最大値, 雨水の平均密度, 雨水の重心高度なども算出している. 本調査では15層の反射強度データとVILのデータを使用する. 15の各層の雨量  $M$  を反射強度  $Z$  から  $M = 3.44 \times 10^{-3} Z^{4/7}$  として計算し (Greene and Clark 1972) ( $M$  の単位は  $\text{gm}^{-3}$ ,  $Z$  は  $\text{mm}^6\text{m}^{-3}$ ), この  $M$  を15層にわたって積算してVILを求める. 本調査ではVILの単位には  $\text{kgm}^{-2}$  を使用する.

## 3. 解析方法

積乱雲に伴う雨に対し空振率を増やさずにできるだけ早く大雨警報や洪水警報を発表することは, 予報現場における懸案事項である (大久保ほか 2007). 積乱雲に伴う降雨の直前予測には, 次のような作業が想定される.

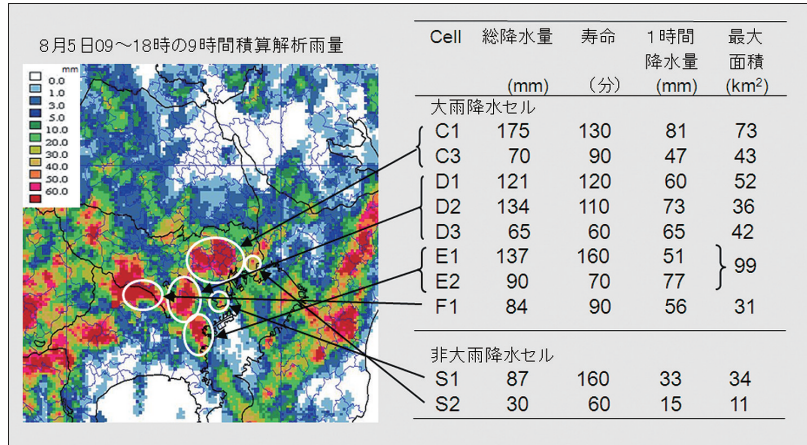
- ①積乱雲の発生地点と発生時刻の予測
- ②発生した積乱雲にともなう降雨のピークの時刻の予測
- ③積乱雲にともなう降雨のピーク時の降水強度の予測
- ④積乱雲の移動ベクトルの予測
- ⑤積乱雲の寿命の予測 (終焉時刻の予測)
- ⑥積乱雲がもたらす総降水量の予測
- ⑦新たな積乱雲の分離 (マルチセル化) や合併による発達, またメソスケール対流システムへの組織化の予測

本論文では積乱雲にともなう降雨を直前予測し大雨警報を発表することを想定し、これらの中の②と③を検討する。①はGPS可降水量 (Inoue and Inoue 2007) や高密度地上観測網のリアルタイム解析などの手法が想定されるが本論文では扱わない。④についてはすでに気象庁の降水ナウキャスト (杉浦ほか 2005) に取り入れられ、効果を示している。⑤～⑦も重要な課題であるが、これらのためには積乱雲の雲物理・雲力学的情報が必要である。そのためには雲解像数値モデルのリアルタイムデータ同化などが想定されるが、今回のようなレーダーデータを主体とする運動学的手法のみでは達成が困難である。

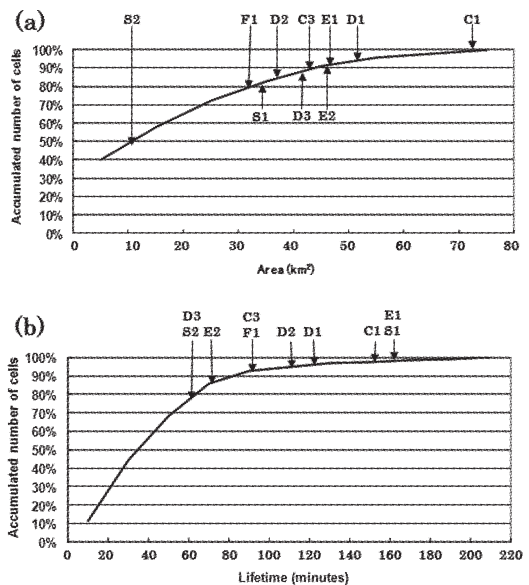
4. 降雨ピークの直前予測の検討

4.1 降水セルの選択

第1図のC, D, E域において大雨警報が発表された時間帯に出現し、1時間あたりの降水量が約50mmを超えた8個の降水セル (C1, C3, D1~D3, E1, E2, F1) を調査対象とし、これらを“大雨降水セル”と呼ぶ。またこれらの対照事例として1時間あたりの降水量が50mmに達しなかった2つの降水セルS1, S2を取り上げ、これを“非大雨降水セル”とする。石原 (2012) が示した2008年8月5日の首都圏に発生した179個の降水セル群の中で、これら10個の降水セルがどのような位置付けにあるかを見るため、各降水セルがその生涯の中で示した最大の面積とその寿命について、それぞれの累積頻度分布図の上に各降水セルの値をプロットした (第2図)。これによると面積に関しては8個の大雨降水セルのうちF1を除く7個は2つの非大雨降水セル (S1, S2) より大きく (第2図a), 179個の降水セル群の中で面積の累積頻度が80%以上に属する大型の降水セルであった。寿命に関してはすべての降水セルが60分から160分の間に分布しており、大雨降水セルと非大雨降水セルの間には系



第1図 降雨ピークの直前予測を調査した10個の降水セルの位置を2008年8月5日09～18時の9時間積算解析雨量分布図に示す。総降水量とは各時刻に各降水セル内で最も大きな値を示した降水強度の値を1/6とし、降水セルの発生から消滅までの期間で積算した値。「1時間降水量」は総降水量/寿命 (時間)。「最大面積」は各降水セルの高度2 kmの降水セルの発生から消滅までにおける最大値。

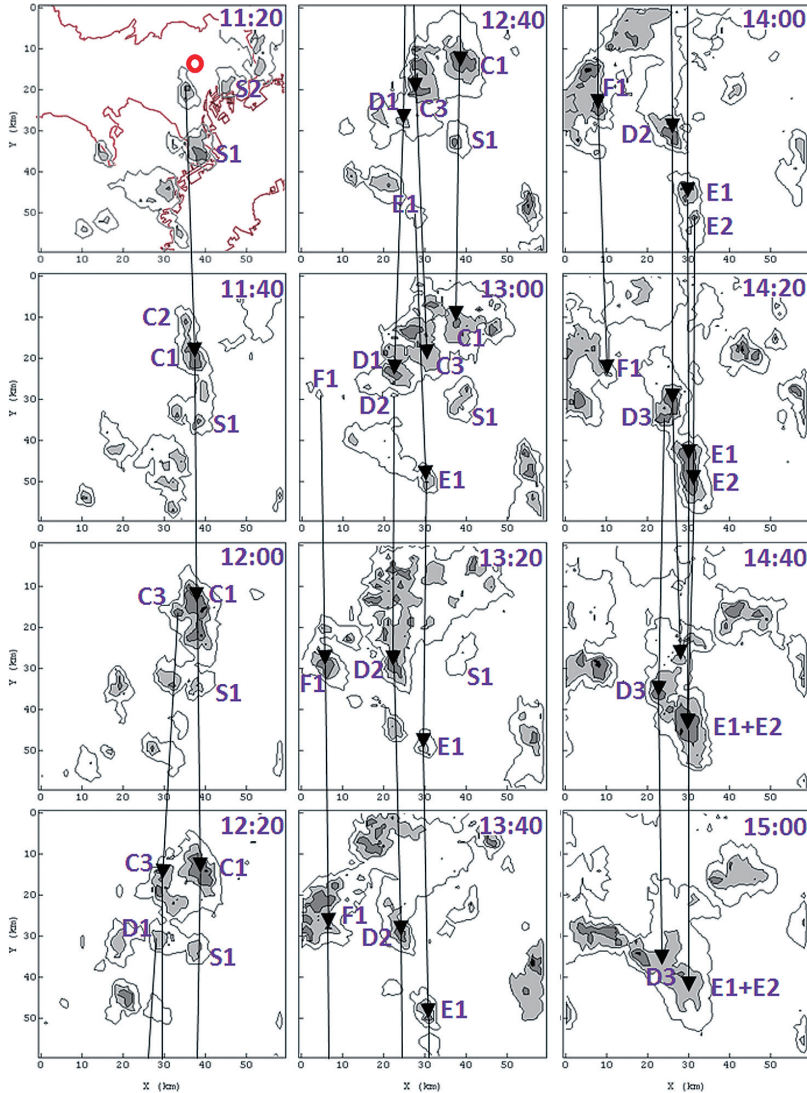


第2図 179個の降水セルの(a)面積, (b)寿命の累積頻度分布 (%) における10個の降水セルの位置。

統的な違いは見られなかった (第2図b)。

第3図は20分ごとの各降水セルのエコーの分布の時間変化であり、第4図はそれらの系統図である。C1は東京都区南部で単独に発生し、その後、その北側に





第3図 10個の降水セルの20分ごとのレーダーエコーの変化。反射強度が10, 35, 45, 55dBZの等値線。35dBZ以上を灰色, 35dBZ以上を濃い灰色, 55dBZ以上を黒色で示す。11時20分の丸印は豊島区雑司が谷の位置を示す。

隣接して発生したC2を併合しながら大型の降水セルに成長し、豊島区雑司が谷付近に到達した時点で局地的大雨をもたらした(東京都下水道局 2008)。C1の西部ではC1から分離してC3が発生した。C1とC3は両者でマルチセル型対流を形成していた。D1は川崎市北部で単独に発生し、途中からD2が分離し、さらにD2からD3が分離した。すなわちD1, D2, D3はひとつのマルチセル型対流を形成していた。E1とE2は

横浜市東部でそれぞれ単独で発生し、その後両者が合併して大型の降水セルになった。F1は東京都八王子市南部で単独に発生し、その後別の降水セルがF1から分離したが、ここでは分離した降水セルは解析しない。S1とS2はそれぞれ単独で発生・消滅した降水セルであり、S1は長寿命、S2は短寿命であった。

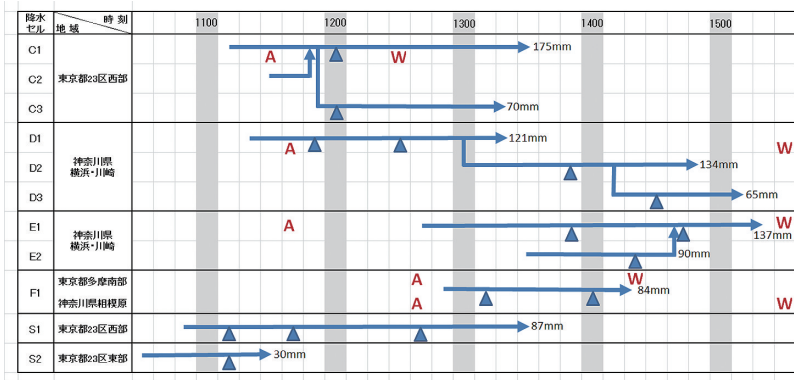
第4図には各降水セルの発生と消滅時刻、及び各気象台から発表された大雨注意報と大雨警報・洪水警報の発表時刻が記されている。大雨注意報・洪水注意報は8つの大雨降水セルの発生前あるいは発生直後に発表されている。一方、大雨警報・洪水警報は各降水セルの発生後あるいは消滅後に発表されており、降雨がピークに達するまでに発表された事例はなかった。

#### 4.2 予測手法

はじめに、降水セル内部の3次元格子上の反射強度の極大点を「コア」と定義する。コアの位置は時間的に変動し、上空にあることもあり地上付近にあることもある。次に、コアを通る

反射強度の鉛直プロファイルをもとに、コアの反射強度の時間高度断面図を作った。高度1kmにおける反射強度から Marshall and Palmer (1948) の雨滴粒径分布にもとづく経験的なZ-R関係式  $Z = 200R^{1.6}$  ( $Z$ の単位は  $\text{mm}^6\text{m}^{-3}$ ,  $R$ は  $\text{mmh}^{-1}$ ) を使って推定した降水強度を地上付近の降水強度とする。以後これを「降水強度」と呼ぶが、雨量計による校正を行っていない点では、これは石原(2012)で使用し





第4図 10個の降水セルの発生から消滅までの系統図。「A」は大雨注意報・洪水注意報の発表時刻を、「W」は大雨警報・洪水警報の発表時刻を示す。△は降雨ピークの発生時刻。矢印の先の数字は、各降水セルの最盛雨地点におけるレーダーから推定した積算雨量。

た降水強度とは異なる。今回こうした雨量計で校正していない降水強度の値を使うのは、VILの値が降水強度と同じく反射強度の値から算出されており、両者間で整合を取るためである。

予測手法として次の5つを用いて、各降水セルにおいて地上付近の降雨のピーク（以後「降雨ピーク」という）の出現を事前に予測することを試みる。

- (1) 上空におけるコアの生成と地上に向かっての降下
- (2) 降水セル内のVILの最大値（VILと略す）の変化
- (3) 反射強度10dBZをしきい値とするエコー頂高度の変化
- (4) 雷監視システムLIDEN（気象庁観測部 2001）によって検出された降水セル内と、降水セルから2 km以内の領域に発生した雲放電と対地雷；  
高橋（1986）によると、積乱雲内部の-10°C以上の温度領域では氷晶とあられが衝突するとそれぞれが負と正に帯電し、ついで落下速度の相違と上昇流の存在により両者が上下に分離が起こり、それに伴い発生した大気電位差を解消する際に雷が発生する。上空の雨水は上昇流によって生成されやがて地上に達して降雨となる。このことから雷放電を強雨の開始の予測因子として検討した。LIDENは雷から発生する長波の電磁波から対地雷を、また超短波の電磁波から雲放電を検出している。なお、当日09時の館野（つくば市）における高層観測によると、0°C高度は4.9km、また-20°C高度は8.3kmであっ

た。

- (5) 降雨ピーク時の降水強度を量的に予測する3つの因子

①現在の降水強度の値が10分後まで継続（継続予測）

気象庁の降水短時間予報は地形の効果による降水の増減を加味はしているが、基本的にこの継続予測手法を使用している。また降水ナウキャストもこの手法に依拠している。

②10分前の降水強度値と現在値からの線形外挿（外挿予測）

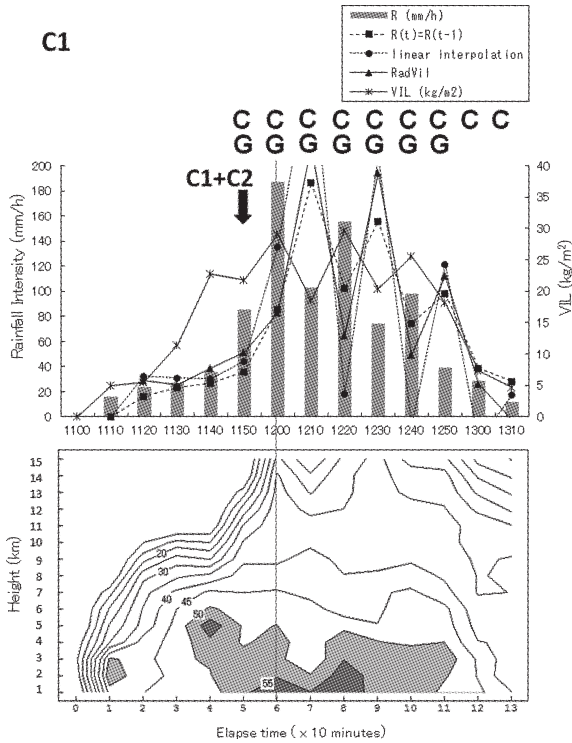
③ Boudevillain *et al.* (2006) の降雨予測モデル RadVil（付録参照）による降水強度値の予測（RadVil予測）；

ある時間内のVILの変化はその間の雨水の生成量と雲底における雨水鉛直フラックス（降水強度）の差である。RadVil予測では予測時刻までは雨水の生成量と同フラックスとの比が現在の値と等しいと仮定し、VILと降水強度の現在値から将来の降水強度を予測する。詳しくは付録を参照のこと。この手法は積乱雲の中における雨水の生成を陽に考慮している点で①や②とは異なっている。今回はこの手法によって現在の観測値から10分後の降水強度を量的に見積もり、その有効性を調べた。算出の手法上、外挿予測とRadVil予測においては観測開始の10分後から、次の10分後の予測値が得られることになる。

### 4.3 降雨ピークの直前予測

#### a. 降水セルC1

第5図は、降水セルC1のコア内で最大の反射強度を示すグリッドを抽出し、そこでの反射強度の鉛直分布を10分ごとに並べた時間高度断面図である。また同図には高度1 kmの降水強度・VIL・3つの予測値の時間変化をグラフで示した。この断面図は反射強度10 dBZのレーダーエコーが出現し降水セルとして特定できなくなるまでの期間を示している。



第5図 降水セルC1内の降水コアを通る反射強度 (dBZ) の鉛直分布の時間高度断面図、及び高度1 kmにおける降水強度 (棒グラフ)、鉛直積算雨量 VIL (実線・星印)、各時刻の10分前に予測された降水強度の継続予測 (点線)、線形外挿予測 (破線)、Boudevillain *et al.* (2006) の RadVil による予測 (実線・三角印) の各時間変化。時間高度断面図内の縦線は地上降雨のピークの発生時刻を示す。各時刻までの10分間に LIDEN によって降水セル内またはそこから2 km 以内に検出された雲放電を図上部に Cで、対地雷 Gで示す。

C1は当日の1100JST に東京都区南部に発生した。C1はその後ゆっくりと北上し、その途中でそのすぐ北に発生したC2を併合して急速に発達した。1200 JST に降雨ピーク (降水強度187mm/h) に達し、その前後に豊島区雑司が谷付近に局地的大雨が発生した (村 2009; Kato and Maki 2009)。そしてこの頃C1の北西部に位置していた下水道工事現場では突然の増水が起り、5名の作業員が流され死亡する事故が起きた (東京都下水道局 2008)。C1が特に強い雨をもたらした要因のひとつとして、C2を併合したことが考えられる。

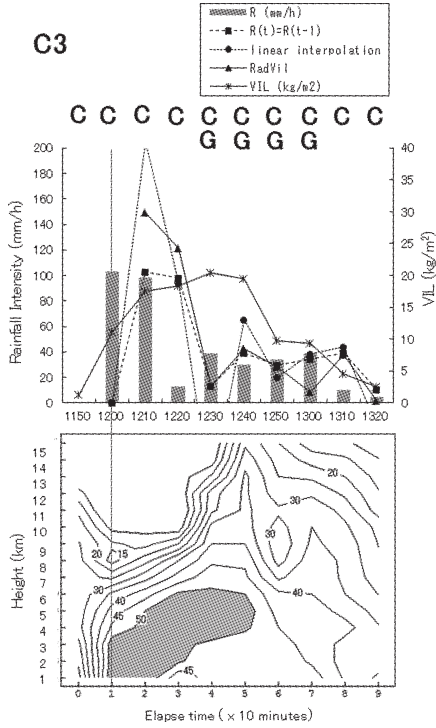
第5図の反射強度の時間高度断面図によると、1110JSTの高度2 kmに現れた49dBZのコアは1130JSTに高度3 kmに、1140JSTには高度5 kmまで上昇して58dBZに成長した。このコアは1150 JSTに高度2 kmに、1200JSTには高度1 kmまで降下し、この時地上降雨のピークを迎えた。同一のコアが高度5 kmから降下したとすれば、1140~1200JSTにおけるコアの降下速度は $3 \text{ ms}^{-1}$ 程度であった。このコアの動向に注目すれば降雨ピークの20分前に強雨の開始が予測できた可能性がある。VILは期間全体では降水強度とほぼ同じ位相をもって変化しているが、1200JSTの降雨のピークに先立ち1130~1140JSTに $7 \text{ kgm}^{-2}$ から $22 \text{ kgm}^{-2}$ へと急増しており、これは降雨ピークの到来と対応しているように見える。ただしこの時刻とは異なる時刻にもVILが急増することはあった。エコー頂高度 (10dBZの等値線) は1140JSTまではほぼ11 kmを保っていたが1150JSTには13 kmに増加し、この頃対流が鉛直方向に急速に発達したことがうかがえる。1200JSTの降雨ピークの10分前から対地雷と雲放電が検出された。

降水強度の量的予測に関しては次のとおりである。降雨ピーク10分前の1150JSTのレーダーによる降水強度の実況値は85mm/hであり、その10分前における継続予測値、外挿予測値、RadVil予測値はそれぞれ36mm/h、44mm/h、51mm/hであった。降雨ピーク時の1200JSTにおいては、実況の185mm/hに対して予測値はそれぞれ85mm/h、135 mm/h、83mm/hであった。一方降水ピークの10分後 (1210JST)には、それぞれ103mm/h、187mm/h、286mm/h、216mm/hであった。すなわち、降雨ピーク時とそれ以前には各予測値は実況値を下回り、ピーク後に各予測値は実況値を上回った。この事例で量的予測を試みるならば、降雨ピークまでは外挿値を使用し、降雨ピーク後は継続値を使用するのが適当である。1種類の予測値に限定するならば、継続値と外挿値の間の値を示したRadVil予測ということになるが、他に比べてRadVil予測が特に優れた値を示したわけではない。

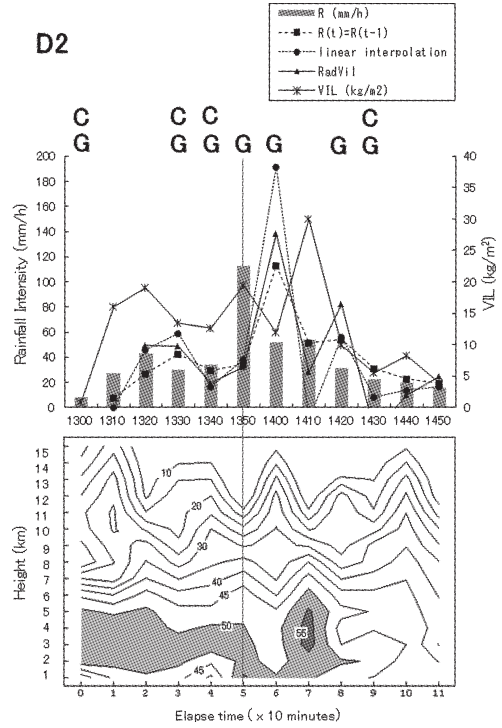
#### b. その他の降水セル

第6~14図はC1以外の9個の降水セルについての状況である。ここでは概要を説明するにとどめ、第1表に各降水セルにおける解析結果をまとめた。

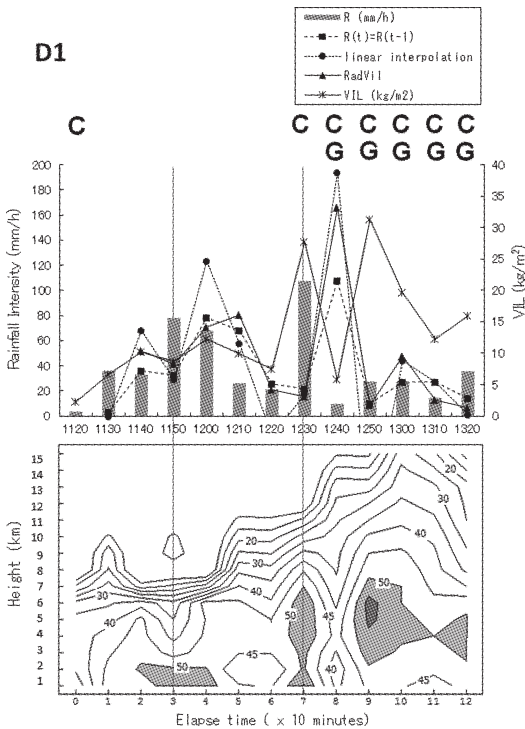
C3 (第6図) ではC1から分離したわずか10分後に



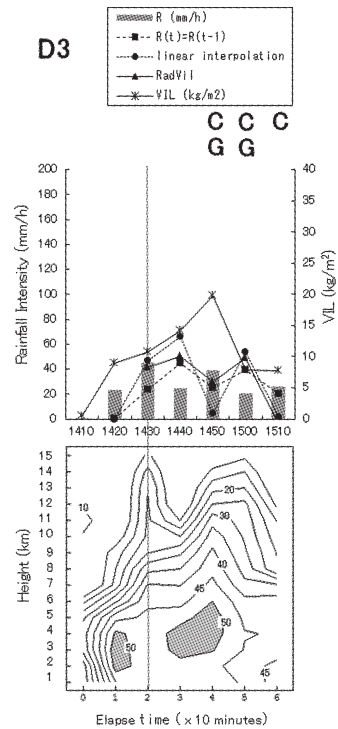
第6図 第5図と同じ。ただし降水セル C3.



第8図 第5図と同じ。ただし降水セル D2.

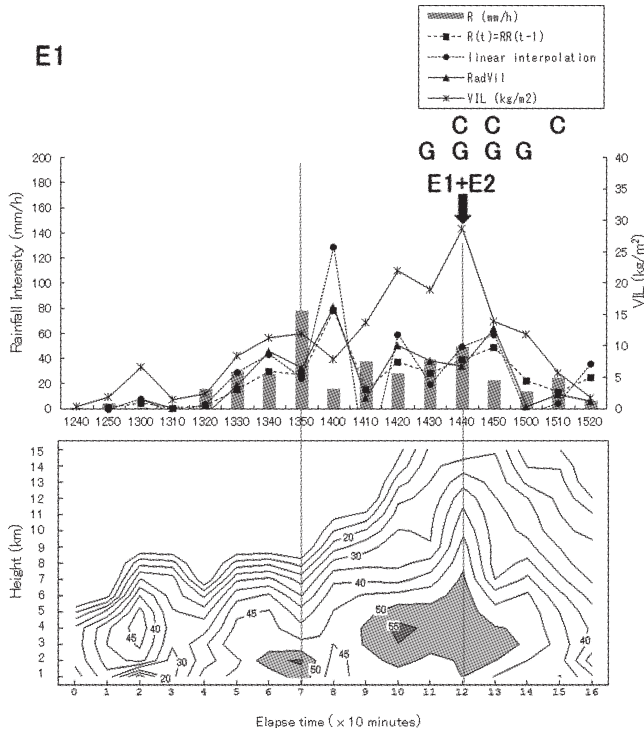


第7図 第5図と同じ。ただし降水セル D1.

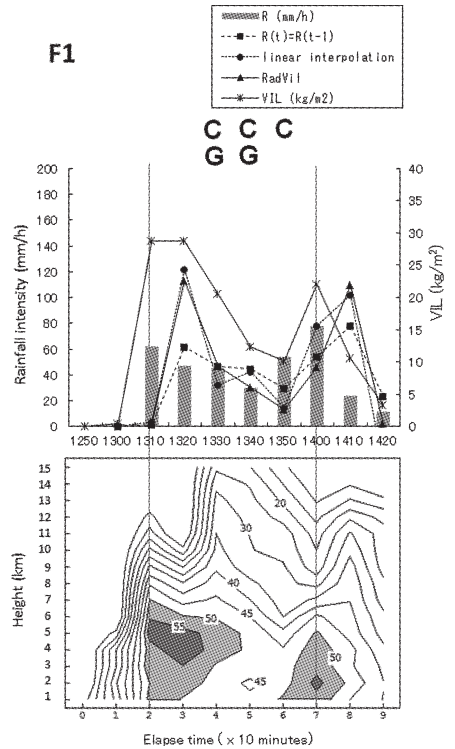


第9図 第5図と同じ。ただし降水セル D3.

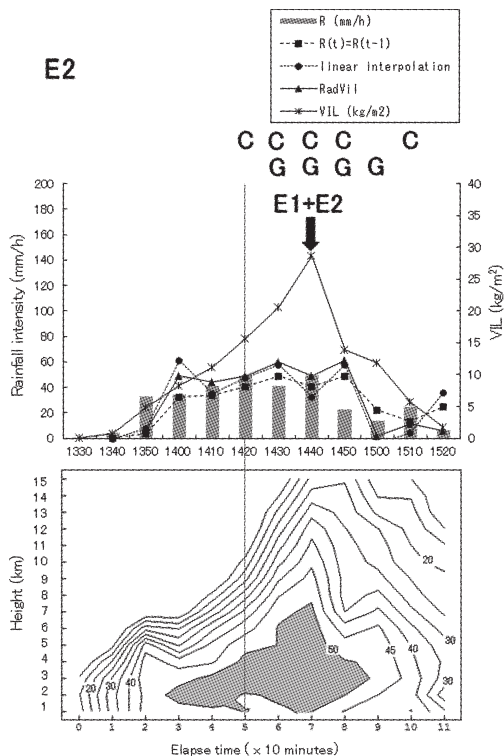




第10図 第5図と同じ。ただし降水セル E1.



第12図 第5図と同じ。ただし降水セル F1.

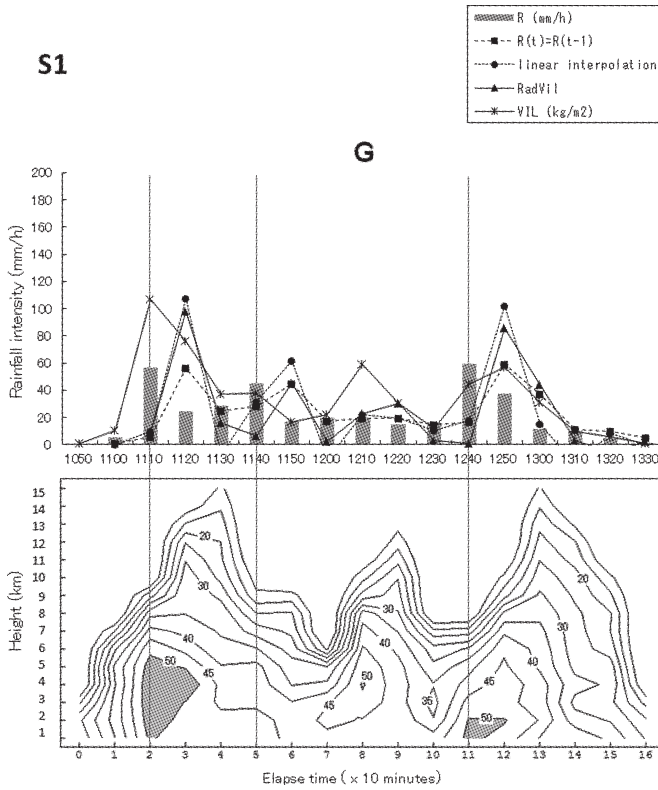


第11図 第5図と同じ。ただし降水セル E2.

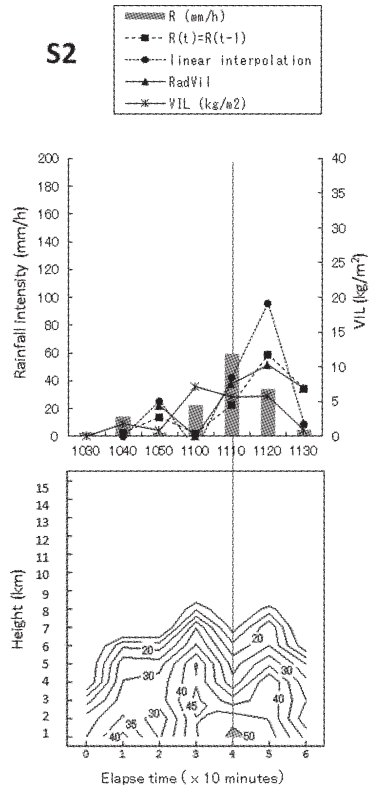
降雨ピークが現れた。レーダーエコーをもとにした予測手法には直前予測の効果は認められなかった。降雨ピークの10分前から雲放電が発生した。外挿予測値とRadVil 予測値の算出は降水のピークには間に合わなかった。

D1 (第7図) は2つの降雨ピークを持っていた。第1の降雨ピークの10分前には高度2 km に51dBZのコアが現れ VIL にもピークが見られた。第2の降雨ピークと高度5 km 付近のコアの出現は同時刻であったが、エコー頂高度はピークの30~20分前に急増した。第1の降雨ピークの30分前に雲放電があったが、その後は第2の降雨ピークまで雷はなかった。第1の降雨ピークの10分後 (1200JST) までは継続予測値とRadVil 予測値は実況値と同様な変化傾向を示しているが、量的には十分な予測とはいえない。

D2 (第8図) では、降水セルの出現から降雨ピークまでの50分間に高度2~5 km 付近に50dBZを超えるコアが存在した。VIL のピークが降雨ピークの30分前に現れた。雲放電と対地雷が降雨ピークの20分前



第13図 第5図と同じ。ただし降水セルS1。



第14図 第5図と同じ。ただし降水セルS2。

に発生した。3つの予測値は降雨ピーク10分前までは量的に精度が良いが、降雨のピーク時刻は的確には予測されていない。

D3 (第9図) では降雨ピーク (1430JST) の10分前に高度3 kmに54dBZのコアが現れ、20~10分前にエコー頂高度が急増した。外挿予測値とRadVil予測値は降雨ピークの値を精度よく予測した。ただしその直後は両者とも実測値を過大評価し、この傾向は外挿予測値において顕著であった。

それぞれ単独に発生したE1とE2 (第10, 11図) は後半期に合併して大きな降水セルとなった。E1の第1の降雨ピークの10分前の高度2 kmに54dBZのコアが現れた。E1とE2が合併した1440JSTには第2の降雨ピークが起こり、E1ではこの20分前の高度4 kmに56dBZのコアが現れた。VILについては第1の降雨ピークの20分前から増加傾向にあり、第2の降雨ピークの20分前にもピークが現れた。E1では第2の降雨ピークの10分前に対地雷が始まった。3つの予測値は

E1の第1の降雨ピークを予測できなかった。E1の第2のピークでは3つの予測値は良好であったが、ピーク後の予測値は過大評価であった。合併前のE2の降雨ピーク (第11図の1420JST) については3つの予測値が良好な値を示した。

F1 (第12図) には降雨ピークが2つあった。第1の降雨ピークの前にエコー頂高度が急増した。第2の降雨ピークではその30分前から雲放電と対地雷が発生した。3つの予測値に関しては第1の降雨ピーク (1310JST) は全く予測できなかったが、第2のピーク (1400JST) は比較的良く予測ができた。

非大雨降水セルのS1 (第13図) は寿命が160分で、10個の降水セルの中ではE1とともに最長であった。S1は発生から消滅まで単独であったが、エコー頂高度の時間変化によると、その中で3つのコアが交代したように見える。降雨ピークも3つあった。第1の降雨ピークの20~10分前にエコー頂高度が急増した。雷放電に関しては第3の降雨ピークの30分前に対地雷が

第1表 5つの予測手法により10個の降水セルに対して降雨のピークを直前予測した結果のまとめ。－は“効果なし”または“発生なし”を示す。A, Bは降水セル内の2つのコアを, ①, ②, ③はひとつの降水セルにおける3つの降雨ピークを示す。

降水セル	総降水量 (mm)	寿命 (分)	発生・発達状況	地上降雨のピークを予測する手法				
				上空のコア	VIL	エコー頂高度	雲放電 C 対地雷 G	継続予測 外挿予測 RadVil 予測
大雨降水セル								
C1	175	110	単独で発生 前方に発生した C2を併合	20分前・高度 5 km に58dBZ の コア	30分前に急 増し20前に ピーク	20～10分前 に急増	10分前か ら C, G	ピークまでは外挿 値が有効, 全体で は RadVil 値が有 効
C3	70	90	C1の西端から 分離	－	－	－	10分前か ら C	－
D1	121	120	単独で発生 2つの降雨ピー ク	A 10分前・高度 2 km に51dBZ のコア B ー	①10分前に ピーク ② ー	① ー ②10～20分 前に急増	①30分前 に C ②ピーク 時に C	①ピーク10分後ま では継続値, RadVi 値の变化 傾向は良好 ② ー
D2	134	110	D1の南端から 分離	50分前から高度 2～4 km に50 dBZ の層	30分前に ピーク	－	20分前か ら C, G	－
D3	65	60	D2の南端から 分離	10分前・高度 3 km に54dBZ の コア	－	20～10分前 に急増	－	ピーク時外挿値と RadVil 値は有効
E1	137	160	単独で発生 後半期に E2と 合併 2つの降雨ピー ク	A 10分前・高度 2 km に54dBZ のコア B 20分前・高度 4 km に56dBZ のコア	①20分前か ら増加 ②20分前に ピーク	① ー ②30～20分 前に急増	① ー ②10分前 から G	① ー ②ピーク時まで3 つの予測値が有効
E2	84	90	単独で発生 後半期に E1と 合併	10分前・高度 2 km に53dBZ の コア	－	－	ピーク時 に C	3つの予測値が有 効
F1	84	90	単独で発生・消 滅 2つ降雨ピーク	－	－	①20～10分 前に急増 ② ー	① ー ②30分前 から C, G	① ー ②ピーク時は3つ の予測値が有効
非大雨降水セル								
S1	160	180	単独で発生・消 滅 3つの降水コア が交代	－	－	①20～10分 前に急増 ② ー ③ ー	① ー ② ー ③30分前 に G	① ー ②継続値と外挿値 が有効 ③ ー
S2	30	60	単独で発生・消 滅	10分前高度 3 km に46dBZ のコア	10分前に ピーク	－	－	ピーク時は外挿値 と RadVil 値が有 効



検出されたのみであった。予測値については第2のピーク(1140JST)では継続予測値と外挿予測値が比較的良好であった。

10個の降水セルの中で最小面積、最短寿命のS2(第14図)では、降雨ピークの10分前には高度3kmにコアが現れたが、その反射強度は46dBZと小さかった。VILでは降雨ピークの10分前にピークが現れた。その他の予測手法には効果がなかった。降雨ピーク時(1110JST)の予測値に関しては、外挿予測値とRadVil予測値が比較的良好であった。

## 5. 考察

8個の大雨降水セルと2個の非大雨降水セルについて5つの予測手法の有効性を調べた。大雨降水セルC1では量的予測については議論の余地があるが、その他4つの予測手法に関しては、定性的ではあるが30~10分前に降水ピークを予測する効果が認められた。8個の大雨降水セルには合計11の降雨ピークがあり、降雨ピークについて見ると各予測手法の効果にはばらつきがあった。これらをまとめると次のとおりである。

- コア：積乱雲の成長期の上空にコアが形成され、やがて地上まで降下して降雨をもたらす、その状況がレーダーエコーに反映されるというシナリオは観測(例えばChisholm and Renick (1972), Burgess and Lemon (1990)のFig.2.1)や数値モデル(例えばFerrier and Houze (1989)のFig.10)が示している。11の降雨ピークのうち7つの降雨ピークではそれに先立って上空に50dBZ( $Z=200R^{1.6}$ で換算すると49mm/h)を超えるコアが出現した。特にC1においてはこの状況が顕著であった。ただし、このうちの4例ではコアは降雨ピークのわずか10分前の高度2~3kmに出現した。しかし、降雨ピークのわずか10分前にコアが地表近くに現れたとき、これを直前予測に利用することは困難である。
- VIL：11の降雨ピークのうちの5つにおいて、降雨ピークより前にVILがピークを示すか、あるいは急増していた。しかし、全体としてはVILが降水強度とほぼ同位相で変動した。この結果は佐藤ほか(2009)が各地の積乱雲を調査し、地上の降水強度の時系列データとVILの時系列データの相互相関係数がラグゼロのときに最大値を示すという結果と一致する。VILは降水の鉛直方向の情報を含むから降水セルを追跡には有効であったが、今回の事

例では予測手法として多くを期待することはできなかった。

- エコー頂高度：11の降雨ピークのうちの5つにおいてその30~10分前にエコー頂高度が急増する傾向が見られた。気象庁ではエコー頂高度を大雨の監視パラメータのひとつとして使ってきた。今回の事例でも一定の効果は認められたが、半数の事例では見逃しまたは空振りという結果であった。
- 雷放電：11の降雨ピークのうちの3つでは10~30分前に雲放電と対地雷がペアで検出され、2例では10~30分前に雲放電のみが認められた。さらに2例では降雨ピーク時に雲放電が検出された。雷放電を降雨の予測に利用する手法は国内ではこれまでほとんど調査されていない。今回の調査では、直前予測に効果のある事例と効果のない事例に分かれた。雷放電の有無は大気成層と対流の活動度に左右されるので、雷がなくとも大雨をもたらされる事例もある。例えば2010年7月5日に東京都板橋区に1時間107mmの局地的大雨をもたらした積乱雲(山田2010)では、大雨の前後には雷放電は検出されなかった。この事例では積乱雲の高さは10km程度と比較的低く、これまで示されている発雷の条件、例えば反射強度30dBZ以上の領域が $-20^{\circ}\text{C}$ (道本1989)、あるいは40dBZ以上で $-10^{\circ}\text{C}$ (Gremillion and Orville 1999)を満たしていなかった。
- 3つの量的予測：11の降雨ピークのうち予測が比較的良好と判断されたものは6例であった。ただし大雨警報の発表を想定したとき、量的に十分な精度を満たすものはわずか3例であり、これは量的予測の困難さを示している。降雨ピークまでは外挿予測値とRadVil予測値が、その後は継続予測値とRadVil予測値が検討に値する。ただし手法上、3つの予測値はともに実際の降雨ピークの10分後に誤ったピークを示すことが多く、3つの予測値から降雨ピーク時刻を的確に予測することには課題を残す結果となった。

## 6. まとめと今後の課題

2008年8月5日に積乱雲によって東京都豊島区雑司が谷に局地的大雨が発生した。この日大雨警報が発せられた地域に発生した積乱雲を対象として、主にレーダー3次元データを用いて大雨の直前予測の可能性を検討した。5つの予測手法(上空におけるコア・VIL・エコー頂高度・LIDENによる雷放電・

Boudevillain *et al.* (2006) などによる降水強度の量的予測)を検討した。雑司が谷に大雨をもたらした降水セル C1においては、量的予測値の精度は十分とはいえないまでも、すべての手法において一定の有効性が認められた。調査対象を大雨警報が発表された期間に発生した8個の降水セルに広げたところ、各降水セルにおいて5つの予測手法のうちのいずれかは有効であった。ただ、有効の程度や有効な手法の数は降水セルによって異なり、共通する規則性を見出すためには今後さらなる調査が必要である。

一方で今回の調査の結果、5つの手法によって得られる値を独立変数とする多変量時系列分析によって地上降雨のピークを直前予測することを検討することには価値があるとも考えている。このためには資料数を増やすことがまず必要である。今回の調査は特定の日に限定されていたので、この結果を他の地域や季節に直接適用することはできない。様々な大気条件のもとで発生する多様な積乱雲について事例数を増やすとともに、検証では的中率だけでなく見逃率や空振率も検証する必要がある。このとき、雷放電を除く4つの手法は基本情報としてレーダーの反射強度を使用している。石原(2012)が示したとおりそれらの間には相互に相関があり、重回帰解析などにおいてはパラメータの多重共線性について注意する必要がある。

今回、直前予測を困難にした原因のひとつは、降水セルの分離や併合のプロセスにあると思われる。調査対象の中には3つのマルチセル型対流が含まれていた。そのひとつは分離した降水セルを再び併合し、その直後に大雨が発生した。2つが合併して大型の降水セルとなるケースもあった。積乱雲のナウキャスト手法を開発するにあたっては、分離・併合・合併などの対流間の相互作用とそれによる降雨の急変や延伸などの効果を手法に取り入れることが必要である。

レーダーの観測間隔、すなわちデータの時間分解能も改善すべき課題である。今回は10分間隔で得られた3次元レーダーデータを利用した。今回調査した降水セルの中には、ある時刻にコアが上空に突然現れ、それが地上に達せず消滅するように見えた事例が数例あった。VILやRadVil値の利用においても10分という時間分解能では不十分である。今回のように内部構造の時間変化が大きい対流システムを対象とする場合には、より短い時間間隔、できれば1~2分程度の間隔で3次元レーダーデータ取得し、それらによって予測因子の効果を評価し直すことが望まれる。複数の

レーダーのドップラー速度から積乱雲内の鉛直流を算出しそれを降水セルの同定に利用する手法(Stalker and Knupp 2002)は、予測因子として利用できる可能性がある。調査の効率化・実用化には降水セルの自動追跡やコアの自動判別(深町ほか 2008)などが必要である。2010年から試験運用が始まった静止衛星ひまわりの高頻度観測(日本付近を数分の頻度で観測)の結果を使うと、降水粒子が生成される以前の雲粒や氷晶が卓越するステージの対流の挙動を追跡できる可能性がある(岡部ほか 2011)。

今回のようなレーダー観測をもとにした運動学的手法によって積乱雲の発達を予測することは、現状のレーダーの性能から見て限界がある。既存の観測システムに加え高速走査レーダー(牛尾ほか 2009)・二重偏波レーダー・高密度の地上/GPS観測網、雲解像モデルへのデータ同化等を統合した手法を検討する必要がある。実際、こうした手法を首都圏に適用し、雲物理・雲力学的な視点に立って積乱雲の発生・発達・消滅プロセスや力学的メカニズムを調べる観測・解析的研究(石原ほか 2011)、及びそれを包括し監視・予測システムの開発や防災情報の有効な提供・伝達に至るまでの一貫した総合研究(真木ほか 2011)が2010年から開始されている。

## 謝 辞

本調査で使用した3次元レーダーデータ及びLIDENのデータは気象庁観測部から提供を受けました。気象庁予報部宮城仁史氏からは同データに関する詳細な情報をいただきました。本調査で使用した降水セルを半自動で追跡するプログラム及びアーカイブデータから任意領域の3次元レーダーデータを抽出するプログラムは、それぞれ気象庁観測部の佐藤俊裕氏及び枝元勝悟氏(現:和歌山地方気象台)が作成しました。投稿にあたっては天気編集委員会の藤部文昭氏と茂木耕作氏、及びお二人の査読者から多くの貴重なご意見をいただきました。特に茂木氏からはRadVilの算出式について貴重なご指摘をいただきました。皆様に感謝いたします。本調査は文部科学省の科学技術戦略推進費による2010~2014年度研究プロジェクト「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」の一環として実施した。

## 参 考 文 献

Boudevillain, B., H. Andrieu and N. Chaumerliac, 2006:

- Evaluation of RadVil, a radar-based very short-term rainfall forecasting model. *J. Hydrometeor.* 7, 178-189.
- Burgess, D. W. and L. R. Lemon, 1990: Severe thunderstorm detection by radar. *Radar in Meteorology* (edited by D. Atlas), Amer. Meteor. Soc. 619-647.
- Chisholm, A. J. and J. H. Renick, 1972: The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. *Alberta Hail Studies, 1972*, Research Council of Alberta Hail Studies Rep. No.72-2, 24-31.
- Dixon, M. and G. Wiener, 1993: TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting — A radar-based methodology. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 10, 785-797.
- Ferrier, B. S. and R. A. Houze, 1989: One-dimensional time-dependent modeling of GATE cumulonimbus convection. *J. Atmos. Sci.*, 46, 330-352.
- 深町有佑, 篠田太郎, 上田 博, 坪木和久, 2008: 降水セルの3次元検出アルゴリズムの開発. 日本気象学会2008年度秋季大会講演予稿集, (94), P171.
- Golding, B. W., 1998: Nimrod: A system for generating automated very-short-range forecasts. *Meteor. Appl.*, 5, 1-16.
- Greene, D. R. and R. A. Clark, 1972: Vertically integrated liquid water — A new analysis tool. *Mon. Wea. Rev.*, 100, 548-552.
- Gremillion, M. S. and R. E. Orville, 1999: Thunderstorm characteristics of cloud-to-ground lightning at the Kennedy Space Center, Florida: A study of lightning initiation signatures as indicated by the WSR-88D. *Wea. Forecasting*, 14, 640-649.
- Inoue, H. and T. Inoue, 2007: Characteristics of the water-vapor field over the Kanto district associated with summer thunderstorm activities. *SOLA*, 3, 101-104.
- 石原正仁, 小林隆久, 鈴木 修, 2011: 都市域における局地的大雨のメカニズム解明のための首都圏稠密観測プロジェクト. 日本地球惑星科学連合2011年大会 U22「都市域における極端気象」, U022-02.
- 石原正仁, 2012: 2008年雑司が谷大雨当日における積乱雲群の振舞いと局地的大雨の直前予測 I — 3次元レーダーデータによる積乱雲群の統計解析一. *天気*, 59, 549-561.
- Joe, P., D. Burgess, R. Potts, T. Keenan, G. Stumpf and A. Treloar, 2004: The S2K severe weather detection algorithms and their performance. *Wea. forecasting*, 19, 43-69.
- Kato, A. and M. Maki, 2009: Localized heavy rainfall near Zoshigaya, Tokyo, Japan on 5 August 2008 observed by X-band polarimetric radar — Preliminary analysis —. *SOLA*, 5, 89-92.
- 気象庁観測部, 2001: 雷監視システムの紹介. *気象*, 45, 17426-17429.
- 気象庁観測部, 2007: 新しいレーダー観測システムとレーダー観測資料. *気象庁測候時報*, 74, 38-42.
- 気象庁, 2011: 気象等の知識・予報用語・降水. 気象庁HP. [http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/yougo\\_hp/kousui.html](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/yougo_hp/kousui.html) (2011. 12. 1閲覧)
- Koppert, H.-J., T. S. Pederson, B. Zurcher and P. Joe, 2004: How to make an international meteorological workstation project successful. Preprints, 20th Int. Conf. on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., 11.1.
- Lakshmanan, V., T. Smith, G. Stumpf and K. Hondl, 2007: The warning decision support system — Integrated information. *Wea. Forecasting*, 22, 596-612.
- Lapczak, S., E. Aldcroft, M. Stanley-Jones, J. Scott, P. Joe, P. Van Rijn, M. Falla, A. Gagne, P. Ford, K. Reynolds and D. Hudak, 1999: The Canadian National Radar Project. Preprints, 29th Int. Conf. on Radar Meteorology, Montreal, Canada, Amer. Meteor. Soc., 327-330.
- 真木雅之ほか42名, 2011: 極端気象に強い都市創り社会実験. 日本地球惑星科学連合2011年大会 U22「都市域における極端気象」. U022-01.
- 牧原康隆, 2007: 気象レーダーを利用した短時間の降水・土砂災害予報と気象業務改善の歩み. *天気*, 54, 21-33.
- Marshall, J. S. and W. M. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, 5, 165-166.
- 道本光一郎, 1989: 夏季雷観測速報 (レーダーエコー強度の高度変化と発雷). *天気*, 36, 513-514.
- 村 規子, 2009: 2008年8月5日に東京都で発生した局地的な大雨についての事例解析とJMANHMによる再現実験. *天気*, 56, 933-938.
- 岡部いづみ, 泉川安志, 今井崇人, 2011: 積雲急発達域検出プログラムの開発について. 日本気象学会2011年度春季大会講演予稿集, (99), C456.
- 大久保 篤, 益子直文, 坂巻 昇, 西 峰雄, 長田栄治, 高見敏彦, 2007: シナリオに基づく東京地方における暖候期の不安定降水予測—大雨注意報・警報のリードタイムの改善に向けて—. *気象庁研究時報*, 59, 41-55.
- Pierce, C. E., P. J. Hardaker, C. G. Collier and C. M. Hagggett, 2000: GANDOLF: A system for generating automated nowcasts of convective precipitation. *Meteor. Appl.*, 7, 341-360.
- Pierce, C. E., E. Ebert, A. W. Seed, M. Sleigh, C. G. Collier, N. I. Fox, N. Donaldson, J. W. Wilson, R.



- Roberts and C. K. Mueller, 2004: The nowcasting of precipitation during Sydney 2000: An appraisal of the QPF algorithms. *Wea. Forecasting*, **19**, 7-21.
- 佐藤俊裕, 津田幸一, 柴田和彦, 安田 操, 安部俊司, 菅原寛史, 新垣秀治, 2009: 降水セルにおけるレーダーエコー指数の特徴. *気象庁測候時報*, **76**, 64-72.
- Stalker, J. R. and K. R. Knupp, 2002: A method to identify convective cells within multicell thunderstorms from multiple Doppler radar data. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 188-195.
- 杉浦伊織, 國次雅司, 辻村 豊, 牧原康隆, 2005: 気象庁降水ナウキャストの概要. *日本気象学会2005年度春季大会講演予稿集*, (87), C463.
- 高橋 勲, 1986: 雷の電気. *気象研究ノート*, (154), 1-16.
- 東京都下水道局, 2008: 雑司ヶ谷幹線再構築工事事故調査報告書. 12pp.
- 牛尾知雄, 吉川栄一, 森本健志, 河崎善一郎, 2009: 高速高分解能 Ku 帯広帯域レーダネットワークの概念と初期観測結果. *日本気象学会2009年度春季大会講演予稿集*, (95), D101.
- Wilson, J. W., Y. Feng, M. Chen and R. D. Roberts, 2010: Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: Successes, failures, and implications for future nowcasting systems. *Wea. Forecasting*, **25**, 1691-1714.
- 山田芳則, 2010: 2010年7月5日東京・板橋区内に豪雨をもたらした積乱雲の構造. *日本気象学会2010年度秋季大会講演予稿集*, (98), C354.

付録: Boudevillain *et al.* (2006) による降水予測モデル RadVil

RadVil は対流内での雨水の収支を考慮した降雨の予測モデルである。地上付近の降水強度と気柱内の雨水を積算した  $VIL$  はともに 3 次元レーダーデータから得られる量である。

ある気柱における  $VIL$  の時間変化は次のように表される。

$$\frac{d(VIL)}{dt} = S(t) - P(t) \quad (1)$$

ここで,  $S$  は気柱内での雨水の生成率を表し, 水蒸気の凝結, 雲水から雨水への変換, 融解から成る。  $P$

は地上付近における雨の降水強度 ( $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) であり, これは気柱からの雨水の出力率である。

$VIL$  と  $P$  との関係を表す。

$$P(t) = \frac{VIL(t)}{\tau(t)} \quad (2)$$

ここで,  $\tau(t)$  を反応時間とよぶ。このパラメータは時間のスケールを持ち, 気柱の中の雨水 ( $VIL$ ) から地上の降水への変換効率を示している。ここでは短時間の予測に関心があるので, レーダーの各水平格子をひとつの気柱とする。

RadVil では, 各時間ステップの初めに 3 次元レーダーデータから降水強度と  $VIL$  を算出する。移流速度は時間的に前後した雨量分布図から相互相関方式で計算する (本論文では各降水セルを主観的に追跡した)。式(1)から  $S$  を次のように求める。

$$S(t) = \frac{VIL(t) - VIL^*(t - \Delta t)}{\Delta t} + P(t) \quad (3)$$

ここで  $*$  は  $\Delta t$  の時間内に  $VIL(t - \Delta t)$  の場が移流することを示す。  $\tau(t)$  を式(2)から求める。

予測時間 (本論文では10分) 内では降雨システムは定常であると仮定し, 移流速度,  $S$ ,  $\tau$  はこの間では一定と仮定する。

式(2)を式(1)に代入すると次のようになる。

$$\frac{d(VIL)}{dt} + \frac{VIL(t)}{\tau(t)} = S(t) \quad (4)$$

この 1 階非同次常微分方程式は定数変化法によって解析的に解くことができ,  $VIL$  の予測式が次のとおり得られる。

$$VIL(t + dt) = VIL^*(t) e^{-\frac{dt}{\tau}} + S\tau(t) (1 - e^{-\frac{dt}{\tau}}) \quad (5)$$

(5)式で得られた  $VIL$  から(2)式によって  $P$  の予測値を求める。

ただし, 式(5)は Boudevillain *et al.* (2006) では Eq.(8)として次のように表現されているが, これは誤りであると思われる。

$$VIL(t + dt) = VIL^*(t) e^{\frac{dt}{\tau}} + S\tau(t) (1 - e^{\frac{dt}{\tau}})$$

Radar Echo Population of Thunderstorms  
Generated on the 2008 Zoshigaya-rainstorm Day  
and Nowcasting of Thunderstorm-induced Local  
Heavy Rainfalls

Part II: A Feasibility Study on Nowcasting of  
Thunderstorm-induced Local Heavy Rainfalls

Masahito ISHIHARA\*

\* *Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency  
(Present affiliation: Kyoto University, Uji, 611-0011, Japan).*

(Received 8 March 2011; Accepted 19 March 2012)

Abstract

Many air-mass thunderstorms were generated in the Tokyo metropolitan area on 5 August 2008, on which a severe local rainstorm caused a flash flood near the center area of Tokyo. Using three-dimensional radar reflectivity data of Japan Meteorological Agency (JMA), nowcastings concerning time and rainfall intensity of rainfall peak of thunderstorms were examined. Five nowcasting methods: formation and descending of precipitation cores aloft, time-changes of vertically integrated liquid water, time-change of echo-top height, lightning activity and quantitative forecasting of rainfall intensity using three parameters, were adopted to eight thunderstorms which were related to the heavy-rainfall warnings being issued from JMA on the day. Some of the five nowcasting methods were effective for every thunderstorm, whereas common methods available for all the thunderstorms were not determined.

---