

局地的豪雨探知システムの開発

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR EARLY DETECTION OF A SEVERE STORM

片山勝之¹・山路昭彦²・中村文彦³・森田宏⁴・中北英一⁵
Masayuki KATAYAMA, Akihiko YAMAJI, Fumihiko NAKAMURA,
Hiroshi MORITA and Eiichi NAKAKITA

¹非会員 理修 一般財団法人日本気象協会 事業本部防災ソリューション事業部
(〒170-6055 東京都豊島区東池袋三丁目1-1)

²正会員 工修 一般財団法人日本気象協会 事業本部防災ソリューション事業部
(〒170-6055 東京都豊島区東池袋三丁目1-1)

³非会員 国土交通省 近畿地方整備局 河川部水災害予報センター センター長
(〒540-8586 大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

⁴非会員 国土交通省 近畿地方整備局 淀川ダム統合管理事務所 所長
(〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町10-1)

⁵正会員 工博 京都大学防災研究所教授 気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Localized torrential rainfall often cause heavy rainfall disasters in a small river channel. To prevent these disasters, Japanese government recently installed network of X-band Multi Parameter radars (X-MP radars) over near urban areas in Japan. X-MP radar is suitable to realize earlier and more detailed detection of the baby rain cell, because X-MP radar has higher sensitivity and spatial resolution. In this study, using the 3-D volume scanning information from the X-MP radar, we calculate five indicators (Increment of rain top height, velocity of vertical development, vertical integrated reflection intensity, vorticity and convergence). Then we identify the “torrential rainfall index” by integrating five indicators on the basis of fuzzy logic and the warning level of torrential rainfall cell by cell. Using the algorithm to detect and trace the movement of rain cell (nakakita et al., 2011), we develop a system which indicate the dangerous rain cell on a monitor by circle in real time.

Key Words : Urban, Flash Flood, XRAIN, X-MP radar, Baby rain cell, First echo, Doppler radar, Polarimetric radar, Evacuation, Early warning

1. はじめに

2008年7月28日に発生した兵庫県都賀川での鉄砲水による水難事故では、突発的に発生した局地的豪雨により急激な水位上昇が発生し、親水公園で遊んでいた人を含め5名の尊い命が奪われた。この事故をきっかけに、迅速かつ詳細に降雨強度を推定できるXバンドMP（マルチパラメータ）レーダによる観測が国土交通省により全国的に展開されるようになった。中北ら^{1),2)}は、XバンドMPレーダによる3次元観測値を用いて、局地的豪雨をもたらす積乱雲が急激に発生・発達するごく初期の段階に、「ゲリラ豪雨のタマゴ」が上空で出現すること、ドップラー風速から計算される渦度が確認されることを明らかにした。本研究では、大阪・神戸・京都を含む近畿地域

において、国土交通省XRAINの5サイトの観測値から、水平・鉛直方向ともに格子間隔500mの等高度面データ（CAPPI）を1分毎に高度10kmまで作成し、渦度や収束量に加えて、エコー頂高度差（セル発生時からのエコー頂高度増加量）、鉛直発達速度（エコー頂高度差を時間で除した値）、鉛直積算反射強度と豪雨をもたらす降水セルとの関連性を調査すること、ファジー理論を用いて上記5指標を統合した豪雨危険度指数を作成し、各セルの豪雨警戒ランクを3段階で判定する手法を開発すること、Webでリアルタイム表示するシステムを構築することを目的とする。

2. 探知・追跡に必要な3次元データの作成

(1) XバンドMPレーダによる3次元観測

国土交通省が全国に整備しているXバンドMPレーダによる3次元観測は、一定仰角で方位方向にアンテナを360度回転させる走査（PPI：Plain Position Indicator）を、1分間に3仰角行っている（図-1）。最初の仰角は、毎分とも低仰角観測を行うことで1分毎の合成雨量に利用されており、残りの2仰角は5分間で1セットのCAPPI観測を行っている。近畿地域にあるXバンドMPレーダ（田口、鷺峰山、六甲、葛城、鈴鹿）は、5基のレーダが互いに観測していない空間を補完し合うような仰角運用を行っている。例えば、田口と鈴鹿が高い仰角で観測している時間帯（5分サイクルのうちの5分）では、両サイトの間に位置する鷺峰山が低い仰角で観測し、低高度の空間をカバーしている（図-2）。このように、時空間ともに密な3次元観測を行うことで、短時間で急発達する積乱雲の動向を把握することが可能となる。

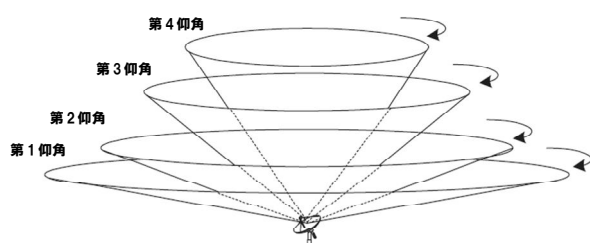


図-1 レーダによる3次元観測の概念図

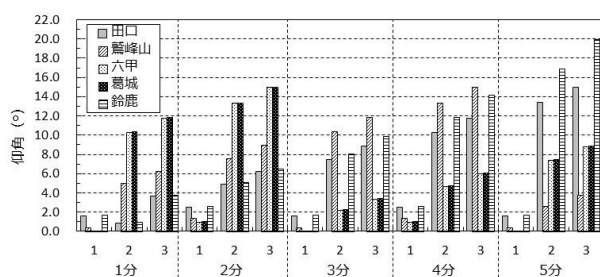


図-2 近畿地域の5基のXバンドMPレーダの仰角運用スケジュール

(2) CAPPIデータの作成

仰角毎のPPIデータはレーダサイトからの距離により観測高度が異なるため、解析には利用しづらい。また、動径風速はレーダに近づく成分と遠ざかる成分のみのため、単サイトの動径風速から渦度を計算した場合、渦以外の要因でも渦度が計算されることがある。そこで、レーダの3次元観測値を扱いやすく、かつ渦以外の要因で渦度が計算されるのを防ぐため、複数枚のPPIデータを合成し等高度の水平断面データ（CAPPI：Constant Altitude PPI）を作成した。図-3のように、局部的豪雨の早期探知範囲は、大阪市、堺市、神戸市、京都市の政令指定都市を含み、複数のレーダで観測されている北緯34.25°～35.125°、東経134.875°～136.125°に設定し、この範囲内において5基のXバンドMPレーダで得られた複数

のPPI観測値をCressman内挿法により合成しCAPPIデータを作成した。CAPPIデータは、積乱雲の発生初期を解像できるよう、水平・鉛直方向とも500m格子とし、時間間隔を1分とした。なお、5基のレーダ観測値から1分毎に平均76.0%の空間をカバーするCAPPIデータが作成できるが、空間に穴が空いたCAPPIデータでは豪雨のタマゴを見落とす可能性がある。そこで、カバーされない空間は過去4分間の観測値を用いて埋める処理を行った。

CAPPIデータの要素は、降水セルの探知に用いる反射強度と降水セルの発達可否を判定する際に必要な渦度および収束量の3要素とした。渦度を用いる理由として、発達する積乱雲は内部の強い上昇気流により鉛直方向に軸を持つ渦が形成され、その渦が周囲の水蒸気を取り込むことで積乱雲内部の水蒸気量が増え、さらに上昇気流が強まるという正のフィードバック効果が指摘されているためである（中北ら³⁾）。また、収束を用いる理由として、発達する積乱雲の発生初期には強い下層収束が存在するため、降水セルの発達可否を判断する上で有力な指標になるためである。渦度と収束の計算方法を図-4に示す。各レーダのPPIデータにおいて、渦度は方位角方向に、収束は動径方向にドップラー風速値の差分をとり、格子点の距離で除する微分的な方法を用いた。また、収束についてはドップラー風速が動径方向に乱れる傾向があるため、動径方向に前後5メッシュずつ取り、両者の中央値の差を取るメディアンフィルターを施した。

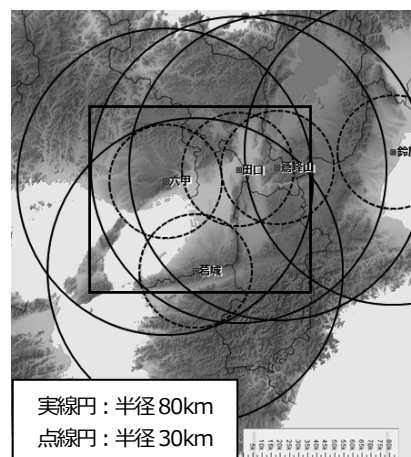


図-3 局部的豪雨探知システムの適用範囲（図の黒四角内）

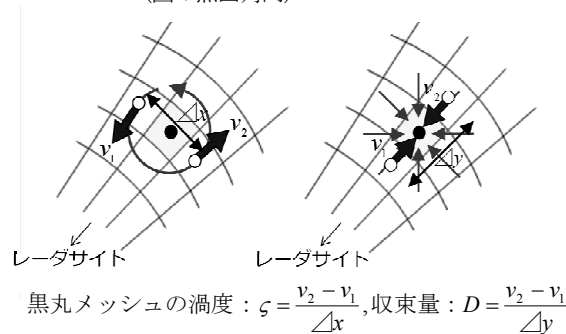


図-4 渦度と収束量の算出方法

3. 渦度と収束量の追跡調査

(1) 豪雨セルと非豪雨セルの抽出

局地的豪雨とレーダから算出される指標との関係解析を行うにあたり、探知対象とする降水セルの抽出を行った。都賀川で水難事故を発生させた積乱雲は、周囲に降水エコーがない場所で新たに発生し、それが急発達して短時間のうちに集中豪雨をもたらすという特徴があった。このような積乱雲は孤立性・突発性・持続性の面から以下のような要件を満たすと考えられる。

- a) 降水セル発生時に、セルが孤立していること
- b) 降水セル発生から30分以内に、降水強度で50mm/h以上に発達すること
- c) 降水セル内部において、降水強度で50mm/h以上の領域が30分以上持続すること

上記3条件を満たす降水セルを「豪雨セル」と定義し、平成23年、24年の2ヶ年において豪雨セルの抽出を行った。また、比較対象として、最発達時に降水強度で5mm/h未満の降水セルを「非豪雨セル」と定義し、同様に抽出を行った。抽出した102個の豪雨セルと79個の非豪雨セルのうち豪雨セルの発生地点（図-5）を見ると、豪雨セルは六甲山や葛城山などの山沿いで多発する他、大阪平野や奈良盆地など平地でも発生することがわかる。

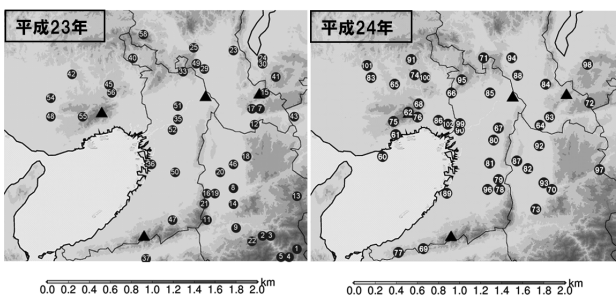


図-5 豪雨セルの発生地点（丸数字はセル番号）

(2) 渦および収束の存在確率と発生時刻

抽出した豪雨セルと非豪雨セルについて、CAPPIデータによる追跡を目視で行い、セル発生から1分毎にセル内部の渦度絶対値の最大値と収束量の最大値を調査した。CAPPIデータで追跡可能であった豪雨セル80個、非豪雨セル73個の調査結果を図-6および図-7に示す。渦および収束の存在しきい値を両者とも $5 \times 10^{-3}/s$ 以上とした場合、渦は豪雨セルの100%、非豪雨セルの60%で存在し、セル発生から渦発生までの平均時間は、それぞれ2分26秒、3分32秒であった。一方、収束は豪雨セルの98%、非豪雨セルの23%で存在し、セル発生から収束発生までの平均時間は、それぞれ6分14秒後、7分53秒後であった。この結果から、豪雨セルの方が非豪雨セルより渦および収束の存在確率が高く、かつセル発生からより短時間のうちに渦や収束が出現することがわかった。

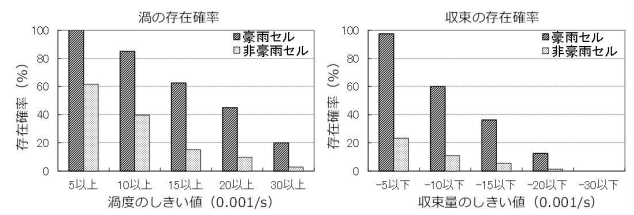


図-6 渦および収束のしきい値と存在確率

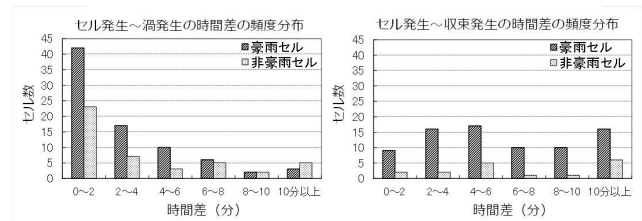


図-7 セル発生から渦発生や収束発生までの時間差

(3) 渦の存在有無による豪雨セルの判定精度

出現した降水セルが豪雨セルになるか非豪雨セルになるかの判定を渦の存在有無によって行い、その判定精度を検証した。本研究は局地的豪雨の早期探知が目的であるため、極力早期に判定を行う必要がある。しかし、セル発生時は豪雨セルでも渦が存在する確率は高くないため、十分な判定精度を得ることができない。そこで、XバンドMPレーダの合成雨量で0.1mm以上の降水強度が出現した時刻を地上降雨開始時刻と定義し、その時刻（豪雨セルではセル発生から平均3分59秒後）において渦が存在するセルを豪雨セル、存在しないセルを非豪雨セルと判定した。判定結果を表-1に示す。判定的中率は $(61+39)/(61+19+34+39) \times 100 = 65.4\%$ であった。また、地上降雨開始時において豪雨セルと判定されたものが95個、そのうち実際に豪雨セルになったものは61個であった。一方、非豪雨セルと判定したものの実際には豪雨セルになったものが19個あった。これらは地上降雨開始時以降に渦が発生した豪雨セルである。

表-1 渦による豪雨セルの判定精度（地上降雨開始時）

		実際		計
		豪雨セル	非豪雨セル	
判定	豪雨セル	61	34	95
	非豪雨セル	19	39	58
計		80	73	153

4. ファジー理論を用いた豪雨危険度指数

(1) 反射強度を用いた指標の追加

表-1からわかるように、地上降雨開始時にまだ渦が存在しない豪雨セルが80個中19個（23.8%）存在する。また、非豪雨セルでも渦が発生するものがあり、渦のみを用いた判定では空振りが多くなる懸念がある。一方、収

束が存在する非豪雨セルは比較的少なく、判定の空振りを軽減する上では有効と考えられるが、収束の発生はセル発生から平均6分14秒後と遅く、早期探知の観点で問題がある。そこで、渦や収束に加えて、反射強度を用いた指標を検討する。図-8は、積乱雲の発達をイメージしたものである。陰影を施した部分がレーダ反射強度で、左から2つ目でセルが発生（ファーストエコーを探知）し、3つ目で地上降雨が開始している。突発的な局地豪雨をもたらす積乱雲は上昇流が強く、発生から短時間で対流圏上部まで発達すること、また積乱雲が発達するほど地上から雲頂までの大気柱に含まれる降水粒子が多くなり、鉛直方向に積算した反射強度が大きくなる。そこで、地上降雨開始時をターゲットとし、図-8に示すA～Dの数値から以下の3つの指標を定義した。

- エコー頂高度差(=B-A)・・・セル発生時のエコー頂高度(A)と地上降雨開始時のエコー頂高度(B)の差
- 鉛直発達速度(=a/C)・・・エコー頂高度差をセル発生から地上降雨開始までの時間(C)で除した値
- 鉛直積算反射強度(=D)・・・地上降雨開始時のエコー強度の最も強い部分を鉛直方向に積算した値

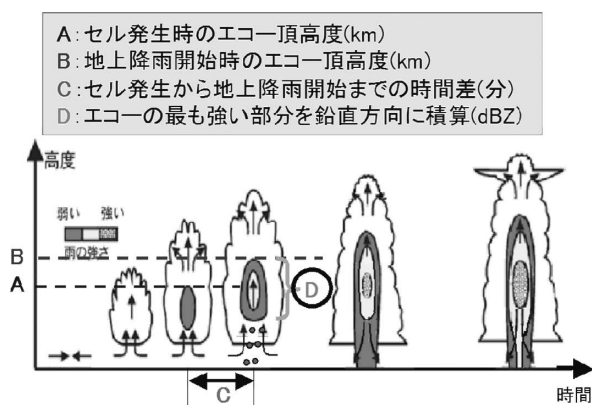


図-8 積乱雲の鉛直発達の時系列イメージ
(陰影はレーダ反射強度の強弱を表す)

(2) 各指標と豪雨との関連性調査

3(1)で抽出した豪雨セルと非豪雨セルについて、1分毎に作成した反射強度のCAPPIデータを用い、4(1)の3指標に渦度と収束量を加えた5指標の値を調査した。図-9は地上降雨開始時における、豪雨セルと非豪雨セルの各指標値の頻度分布である。各指標とも豪雨セルの方が非豪雨セルより高い数値を示すセルが多いことがわかる。また、特にエコー頂高度差や鉛直発達速度において、豪雨セルと非豪雨セルの頻度分布に差があり、両者の重なりが小さいことがわかる。これらのことから、渦度や収束量に反射強度から算出される3指標を加えることは、豪雨セルと非豪雨セルを判別する上で有効であると考えられる。その一方で、どの指標もそれ単体では豪雨セルと非豪雨セルを明確に判別することは難しいことがわかる。

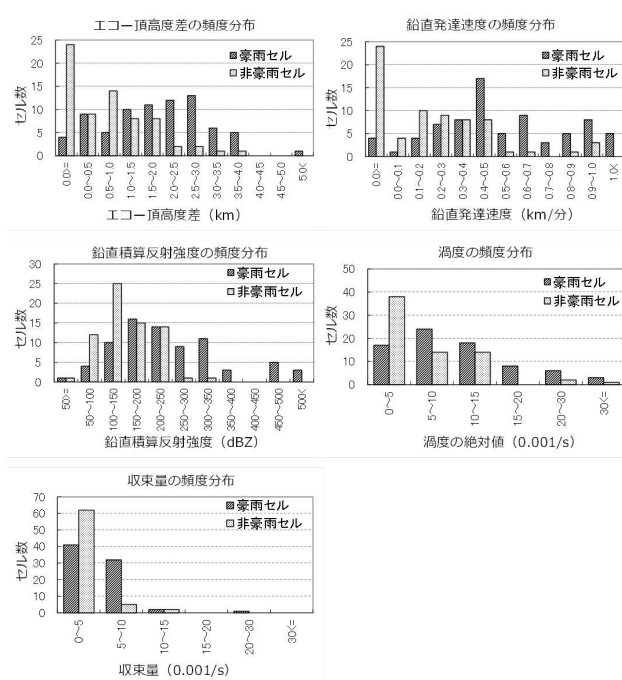


図-9 地上降雨開始時における各指標値の頻度分布

(3) 統合指標による豪雨発生危険度の判定

(2)の調査結果から、単一指標による豪雨セルと非豪雨セルの判別は難しく、どちらの可能性もある「中間領域」の存在がわかった。そこで、ファジー理論によるメンバーシップ関数の導入を考える。ここでは、各指標値と豪雨セルになる割合をメンバーシップ関数で関連付け、豪雨の発生危険度を表す統合指標を作成した。

メンバーシップ関数の算出例を図-10に示す。まず各指標について、指標値を複数の数値帯に分割し、各数値帯に含まれる全てのセルに対する豪雨セルの割合を求めた。次に、各数値帯の中央値と豪雨セルの割合を一次回帰式で関連付け、メンバーシップ関数とした。なお、サンプル数が少ない（全サンプル数の5%未満の）数値帯は、メンバーシップ関数の算出には用いなかった。メンバーシップ関数を次の式(1a)で表した場合、各指標の傾き a と切片 b を表-2に示す。

$$f_i(x_i) = ax_i + b \quad (1a)$$

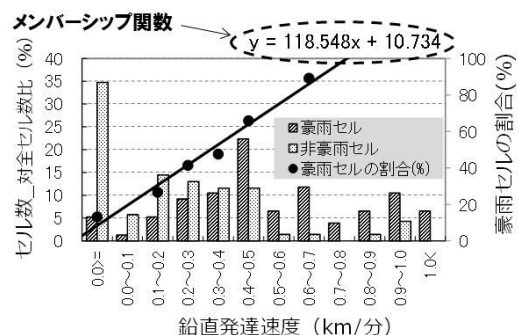


図-10 メンバーシップ関数の設定例（棒グラフ：豪雨/非豪雨セルの頻度分布、黒丸：各数値帯に含まれる全セルに対する豪雨セルの割合、黒線：回帰直線）

続いて、5指標それぞれで求めたメンバーシップ関数を加重平均し、豪雨危険度指数を次の式(1b)で定義した。

$$G = \sum_{i=1}^5 w_i f_i(x_i) \quad (1b)$$

各指標の重み w は、豪雨セルと非豪雨セルの頻度分布（図-9）において、両者の頻度分布の平均値 $\pm 1\sigma$ が重なるサンプル数から重複率(%)を計算し、(100-重複率)をその指標の重みとした。重みの和が1となるように正規化した結果を表-2に併せて示す。

表-2 各指標のメンバーシップ関数と重み

指標	a	b	w
エコー頂高度差(km)	21.398	23.282	0.27
鉛直発達速度(km/分)	118.548	10.734	0.27
鉛直積算反射強度(dBZ)	0.299	-5.453	0.24
渦度(0.001/s)	4.123	19.642	0.10
収束量(0.001/s)	9.560	13.614	0.12

5. 局地的豪雨探知システムの整備

(1) 豪雨警戒ランクの設定

4.で作成した豪雨危険度指数は0～100の数値であり、情報が細かすぎて利用しづらい面がある。そこで、豪雨危険度指数を数段階のランク値に変換した。図-11は、地上降雨開始時刻から5分後までの豪雨危険度指数の頻度分布である。豪雨セルの方が非豪雨セルよりも指数が高く、豪雨セルは80～90、非豪雨セルは40～50が最も多い。全セルに対する豪雨セルの割合を示した回帰直線を見ると、豪雨セルの割合が20、50、80%となる時の指数はそれぞれ38、54、73となっている。そこで、豪雨危険度指数にこれら3つのしきい値を設け、豪雨警戒ランク1～3とした（図-12）。また、豪雨セル発生初期の見落としを軽減するため、指数が38未満であっても渦または収束が存在する場合は、豪雨警戒ランクを1とした。

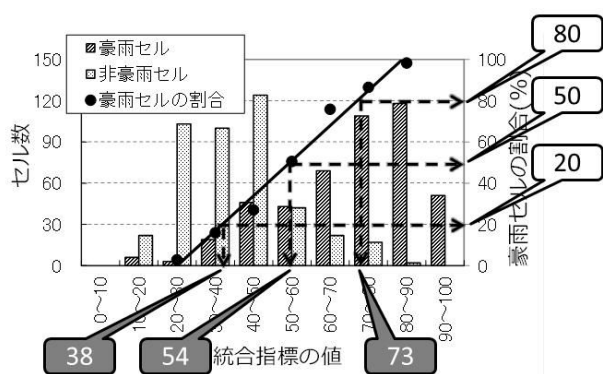


図-11 豪雨危険度指数の頻度分布（棒グラフ：豪雨／非豪雨セルの頻度分布、黒丸：各数値帯に属する全セルに対する豪雨セルの割合、黒線：回帰直線）

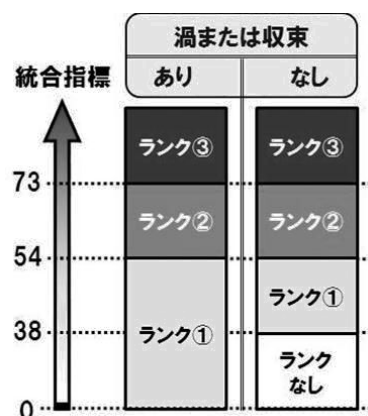


図-12 豪雨警戒ランクの判定方法

(2) 局地的豪雨探知システムの判定精度

(1)で検討した豪雨警戒ランクの判定方法を3.で目視による抽出および追跡を行った豪雨セル、非豪雨セルに適用した。ただし、豪雨危険度指数を算出するために必要な指標のうち、エコー頂高度差と鉛直発達速度の2指標はセル発生時と地上降雨開始時の差分値であるため、セル発生時（ファーストエコー出現時）にすでに地上で降水強度0.1mm/h以上の領域が見られるセルは判定対象から除外した。地上降雨開始時刻において豪雨警戒ランクが2または3であったセルを豪雨セル、豪雨警戒ランクが1またはランクなしであったセルを非豪雨セルと判定した場合の判定結果を表-3に示す。判定的中率は $(58+57)/(58+18+12+57) \times 100 = 79.3\%$ であった。また、地上降雨開始時に豪雨セルと判定された70個のうち、豪雨セルにならなかった空振り事例は12個で、渦の存在有無のみで判定した場合の34個より大幅に減少した。このことから、渦以外の指標は空振りを軽減する上で効果的であったといえる。

表-3 豪雨警戒ランクによる豪雨セルの判定精度（地上降雨開始時）

		実際		計
		豪雨セル	非豪雨セル	
判定	豪雨セル	58	12	70
	非豪雨セル	18	57	75
計		76	69	145

(3) 降水セルの自動抽出・追跡プログラム

降水セルを自動で抽出・追跡し、豪雨警戒ランクの判定を行うことで、局地的豪雨をもたらす可能性のある積乱雲をリアルタイムでWeb表示するシステムを構築した。

降水セルの自動抽出・追跡プログラムは中北ら²⁾が構築したものを利用した。降水セルを抽出するプログラムは、CCL（Connected Component Labeling）という画像処理手法を応用したものである。CCLは画像の連続した領域を抽出する際によく用いられる手法で、この手法により、レーダ反射強度のCAPPIデータから、反射強度

20dBZ（降水強度で約1mm/hに相当）以上の閉領域を1つの降水セルとして抽出を行う。降水セルの自動追跡プログラムは、抽出された降水セルについて、その重心位置を中心とする影響球を仮定し、1時刻前に影響球内にある降水セルの中から、現時刻の降水セルとの重心距離および体積変化量が最小のものを選定することで追跡を行う。なお、影響球の半径に関しては、降水セルの移動速度が最大で60km/h程度とされることから、この速度で1分間に移動する距離である1kmに多少余裕をもたせた半径2kmとした。なお、本研究では、中北ら²⁾が行った抽出・追跡手法に以下3点の変更を加えた。

- 高度1km未満の渦度はクラッタ起因のノイズが多いため、豪雨危険度指数の算出には用いないことにした。
- セルの追跡において、1時刻前に影響球内に3つ以上の降水セルがある場合でも追跡を行うようにした。
- セル発生時に体積下限（0.125km³）を下回ったためタマゴと判定されなかった降水セルでも、その後体積下限を上回れば追跡対象とした。

(4) 判定結果のリアルタイム表示

降水セル毎に算出される豪雨警戒ランクを読み込み、画像を作画・表示する処理プログラムを作成した。作画・表示処理は、豪雨警戒ランクの計算処理結果を読み込んで、豪雨のタマゴと判定された場所を円で囲んで表示する。円の色は豪雨警戒ランクにより、ランク3を赤、ランク2を橙、ランク1を黄に分けて表示している。なお、円の半径は、セルの体積と同体積の球を仮定した場合の球の半径とした。下絵はXRAINの合成雨量を使用し、ランク円と地表付近の降雨分布が同時に確認できるようにした。また、途中でセル同士が結合した場合は、それ以上追跡が不能となりランク判定ができないため、追跡終了時のランク円を同じ位置に点線で表示した。

CAPPI作成、セル自動抽出・追跡、豪雨警戒ランク判定、画像生成・表示の各処理を組み合わせることで局地的豪雨探知システムを構築し、国土交通省近畿地方整備局淀川ダム統合管理事務所に設置したサーバに実装し、2014年4月よりリアルタイム表示による試験運用を行っている。



図-12 局地的豪雨探知システムによるリアルタイム表示例

6. まとめと今後の課題

本研究は、国土交通省が展開する近畿地域のXバンドMPレーダ5基の観測値から1分毎にCAPPIを作成し、上空で先行して発生する豪雨のタマゴを検知し、渦度を用いてそれが発達する危険性があるか否かの判断を行う中北ら^{1),2)}の手法を参考に、平成23年、24年の2ヶ年から抽出した153個のセルに対し、渦の存在有無による豪雨判定手法を適用した。その結果、地上降雨開始時の判定的中率は65.4%、空振りは22.2%（34事例）であった。次に、空振り軽減によるさらなる精度向上を検討するため、反射強度のCAPPIからエコー頂高度差、鉛直発達速度、鉛直積算反射強度の3指標を算出し、これらに渦度と収束量を加えた5指標を用いて豪雨危険度指数を作成した。さらに、豪雨危険度指数に3つのしきい値を設け、豪雨に発達する危険性の高い方から順に豪雨警戒ランク3,2,1を設定した。豪雨警戒ランク2,3を豪雨セルと判定した場合の的中率は79.3%、空振り8.3%（12事例）となり、渦のみによる判定手法と比べて判定精度が向上した。本研究で検討した局地的豪雨探知手法をリアルタイム表示するシステムを構築し、淀川ダム統合管理事務所に設置したサーバに実装することで、2014年4月より試験運用を開始した。

今後の課題として、すでに成熟した豪雨セルの直近で新たな豪雨のタマゴが発生する場合、豪雨のタマゴが抽出できず、豪雨警戒ランクが出ないという問題がある。このため、降水セルの抽出を数段階のしきい値で行うなどプログラム改修が必要である。また、局地的豪雨をもたらさない大規模な層状性降水域に対して豪雨警戒ランクが出るなど空振り事例が散見される。さらに、豪雨のタマゴが探知できても、それがどの地域で豪雨をもたらすかまではわからず、降水セルの移動や発達を予測する手法についても検討が必要である。今後、試験運用開始後の精度検証とともに、これらの課題に対してさらなる検討を行い、自治体の警報システムとの連携に利用可能なシステムに向けて改良を進める予定である。

参考文献

- 1) 中北英一・山邊洋之・山口弘誠：ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究，水工学論文集，第54巻，2010
- 2) 中北英一・山邊洋之・山口弘誠：XバンドMPレーダーを用いたゲリラ豪雨の早期探知と追跡，京都大学防災研究所年報，第54号B，2011
- 3) 中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠：ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究，水工学論文集，第57巻，2013
- 4) 中北英一・西脇隆太・山口弘誠：ゲリラ豪雨の早期探知・予報システムの開発，河川技術論文集，第20巻，2014

(2015. 4. 3受付)