

局地的豪雨探知システムの探知範囲の拡大等について

小林 宏樹¹・中村 正樹²

¹近畿地方整備局 淀川ダム統合管理事務所 防災情報課 (〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町10-1)

²近畿地方整備局 淀川ダム統合管理事務所 防災情報課 (〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町10-1)

2013年度に、XバンドMPレーダを活用して豪雨となる可能性がある積乱雲を数分から10分程度前に探知する局地的豪雨探知システムを整備した。本論文では、2015年度より開始された近畿地方整備局管内のCバンドMPレーダ2局（深山、城ヶ森山）の3次元観測値を活用し、局地的豪雨探知システムの探知範囲を近畿全域に拡張する可能性について検討した。また、新たな豪雨事例を追加したメンバーシップ関数の更新と積乱雲のライフステージによる指標数の切り替えを行い、豪雨探知精度が更に向上することを確認した。

キーワード XバンドMPレーダ, CバンドMPレーダ, 豪雨のタマゴ, 早期探知

1. 局地的豪雨探知システムの概要

(1) 背景, 目的および範囲

局地的豪雨探知システム（以下、本システム）は、XバンドMPレーダ（以下、X-MPレーダ）による高頻度・高分解能の3次元観測値を利用し、発生から数分から10分程度で豪雨をもたらす積乱雲を早期探知することを目的として、2013年度に整備された¹⁾。本システムの探知対象は、発生から30分以内に地上付近の降水強度が50mm/h以上に急発達する孤立した積乱雲（以下、豪雨セル）であり、対象範囲は、大阪、神戸、京都、堺の重点監視地域を含み、複数台のX-MPレーダで観測される図-1に示す範囲である。

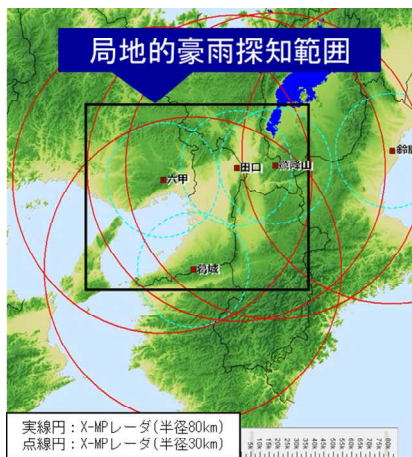


図-1 局地的豪雨探知システムの対象範囲

(2) 豪雨の危険度判定の手順

本システムは、中北ら^{2), 3), 4), 5)}の手法に基づき、上空で発生する積乱雲をレーダで早期探知し、その内部の反射強度やドップラー風速から計算される渦などの情報（図-2）から、豪雨セルに発達する危険度を3ランクで判定して通知する。危険度ランク判定の流れを以下に示す。

a) 等高度面データ（CAPPI）の作成

5台のX-MPレーダ（田口（たのくち）、六甲、鷲峰山（じゅうぶさん）、葛城、鈴鹿）から水平・鉛直ともに500mメッシュの等高度面データ（CAPPI）を上空10kmまで1分毎に作成する。

b) 降水セルの抽出および追跡

京都大学防災研究所で開発されたプログラムを基に、反射強度20dBZ（降水強度1mm/h相当）以上の閉曲面を1つの降水セルとして抽出する。抽出された各降水セルについて、1分前に抽出した降水セルの体積と重心位置が最も近いものを検索し、紐付けすることで追跡を行う。

c) 各降水セルの指標計算

反射強度、渦度、収束量のCAPPIから、図-3のようにエコー頂高度差、鉛直発達速度、鉛直積算エコー強度、渦度、収束量の5指標を各降水セルで計算する。各指標値が大きいほど、豪雨セルに発達する可能性が高い。

d) 危険度判定

c)の各指標について、指標値と豪雨セルになる確率(%)の関係はメンバーシップ関数（後述）で表される。これらの関数を用いて確率値を計算し、それらを加重平

均することで、豪雨の危険度を0~100の数値で表現する統合指標値Gを算出する。続いて、図4に示す3つのしきい値から、危険度ランク1~3、危険性なしを判定する。

(3) Webによる表示

局地的豪雨探知システムの表示画面を図5に示す。Web表示システムは、降水セルごとに判定された危険度ランクをXRAINの降水分布に重ねて表示する。危険度ランクは色分けした円で降雨域を囲むことにより表現し、追跡終了した降水セルは追跡終了時のランク円を同じ位置に点線で残すようになっている。また、過去1ヶ月程度の履歴表示やGIFアニメの作成も可能である。

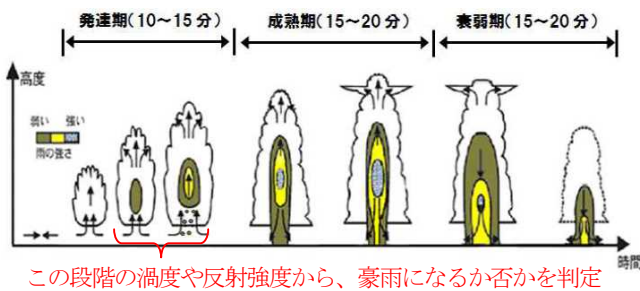
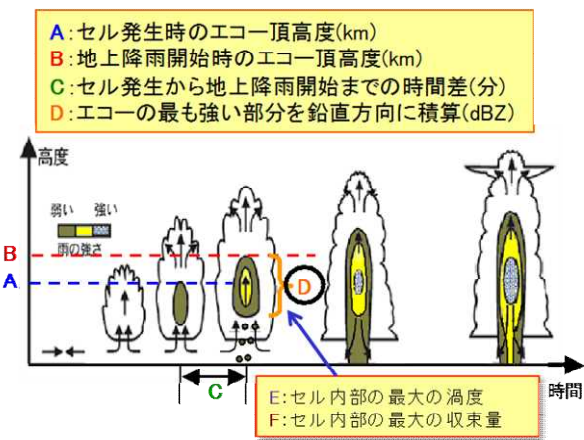


図-2 積乱雲の一生と本システムのターゲット



積乱雲（降水セル）が発達するかどうかは、渦を含めた以下の5指標で判定

- ① エコー頂高度差 [km] ... B-A
- ② 鉛直発達速度 [km/分] ... (B-A) / C
- ③ 鉛直積算エコー強度 [dBZ] ... D
- ④ 渦度 [0.001/s] ... E
- ⑤ 収束量 [0.001/s] ... F

図-3 豪雨の危険度判定に用いる各指標

2. 探知範囲の拡張検討

現在、本システムの探知範囲は複数台のX-MPレーダに囲まれた近畿中央部（図-1、図-6の黒枠内）であるが、2015年度より、近畿地方整備局（以下、近畿地整）管内にあるCバンドMPレーダ（以下、C-MPレーダ）2局（深山、城ヶ森山）の高頻度な3次元観測が開始され、探知範囲の拡張が可能になった。そこで、近畿地整管内全域を囲む図-6の点線枠で示された範囲を拡張領域（案）とし、拡張の実現性について検討を行った。

豪雨危険度指数（統合指標値G）

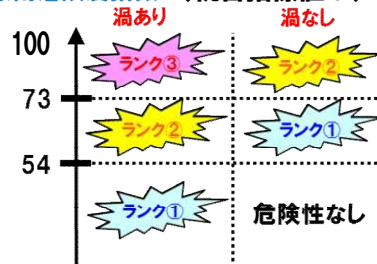


図-4 統合指標値（豪雨危険度指数）と危険度ランク



図-5 局地的豪雨探知システムの表示画面

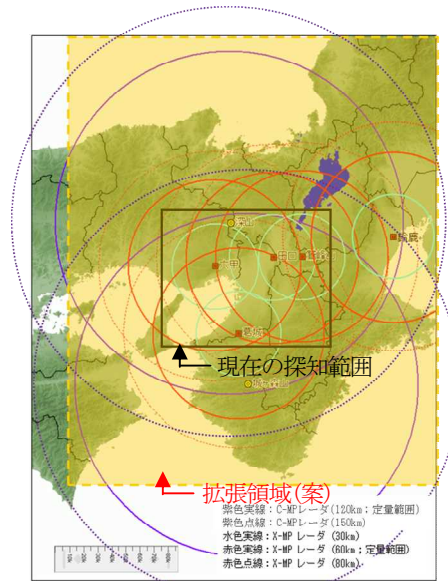


図-6 現在の探知範囲と拡張領域（案）

(1) 空間カバー率の検証

X-MPレーダ5局とC-MPレーダ2局の観測値を合成してCAPPIデータを作成し、空間カバー率を検証した。空間カバー率とは、ある地点の鉛直方向に連なる19メッシュ(1.0~10.0kmまで500m間隔で存在)のうち、レーダのビームが通過するメッシュの割合(%)のことで、空間カバー率が高いほど、空間的に欠落の少ない高密度なデータといえる。最新時刻の観測値のみでCAPPIデータを作成した場合、近畿中央部では70%以上の空間カバー率となっているが、兵庫県や京都府の北部、和歌山県南部では50%未満である(図-7左上)。一方、最新時刻と過去4分の観測値を合成した場合、福井県北部の一部地域を除いて99%以上の空間カバー率である(図-7右上)。また、現在利用しているX-MPレーダ5局に加えて、能美、尾西、熊山、常山の4局のX-MPレーダを追加すると、福井県北部でも80%以上の空間カバー率が得られることがわかる(図-7下)。以上の結果から、CAPPIデータ作成の際に、最新時刻と過去4分の観測値を合成するとともに、X-MP4局(少なくとも能美局)を追加することで、近畿地整管内全域をカバーできることがわかった。

(2) 探知精度の検証

C-MPレーダの高頻度な3次元観測が開始された2015年以降の局地的豪雨事例で早期探知試験を行い、拡張領域での探知精度を検証した。対象事例は、孤立した積乱雲による局地的豪雨が発生した8事例とし(表-1)、対象事例から豪雨セル118個と、非豪雨セル(再発達時の降雨強度が5mm/h未満)401個を抽出して、セルの追跡および危険度ランク判定を行った。

図-8に、上空0.5~10kmを観測しているレーダサイト数を示す。サイト数が多いほど、複数レーダで高密度な観測が行われるため、発生から間もない豪雨のタマゴを

把握するのに有利である。そこで、拡張領域をレーダサイト数で1~5の領域に分け、領域別の精度を比較した。検証に用いる精度指標は、ランク判定と実際のセル種別で4つのカテゴリに分け(表-2)、各カテゴリに入るセル数から、捕捉率(%) = $A \div (A+C) \times 100$ 、的中率(%) = $(A+D) \div (A+B+C+D) \times 100$ の2指標を算出した。

精度検証結果(表-3)を見ると、捕捉率はサイト数が多い領域ほど高く、サイト数4,5の領域では、現行領域とほぼ同等の捕捉率が得られている。一方、サイト数1,2の領域で捕捉率が低下している理由として、観測できる時空間が粗いため、エコー頂高度や鉛直積算反射強度の急発達を見逃してしまうことが考えられる。また、捕捉率ほど顕著ではないものの、的中率についても同様の傾向が見られる。さらに、ランク3の判定が出てから50mm/h以上の豪雨になるまでのリードタイムを比較した結果、現行領域の9分29秒前に対し、サイト数1~5の領域順に、8分24秒前、7分30秒前、8分17秒前、9分05秒前、9分46秒前であった。これらの結果から、探知精度、リードタイムの両方で、サイト数4,5では現行領域とほぼ同等の精度を維持できることがわかった。

表-1 拡張範囲の精度検証における対象8事例

No.	対象日時	No.	対象日時
1	2016/07/22 11~15時	5	2016/08/16 11~18時
2	2016/07/28 11~16時	6	2016/08/18 12~17時
3	2016/08/06 11~17時	7	2016/08/25 14~19時
4	2016/08/14 13~18時	8	2016/09/06 12~17時

表-2 精度検証における4カテゴリに入るセル数(A~D)

		実際のセル種別	
		豪雨セル	非豪雨セル
判定	ランク判定あり	A	B
	ランク判定なし	C	D

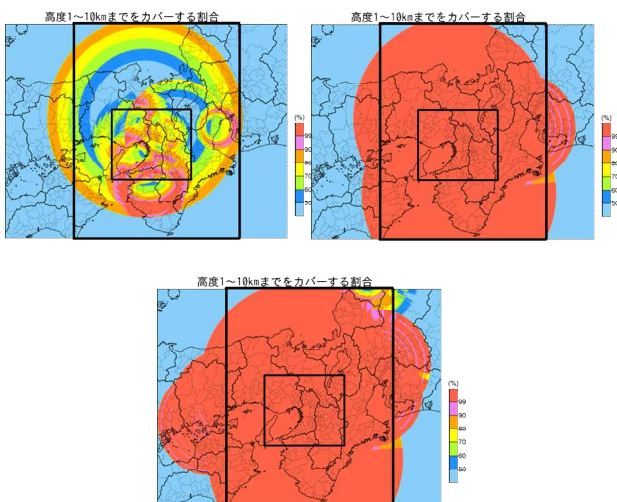


図-7 空間カバー率の検証結果

(左上:最新時刻の観測値のみ, 右上:左上の図と過去4分の観測値を合成, 下:右上の図にX-MP4局を追加)

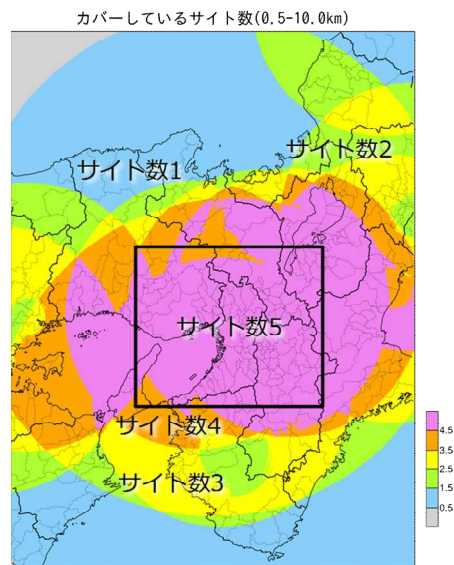


図-8 上空0.5~10kmを観測しているレーダサイト数(黒枠は現在の探知範囲)

表-3 領域別の捕捉率と的中率の検証結果

(赤字：現行領域と同等以上の精度)

		危険度ランク		
		ランク 1	ランク 2	ランク 3
捕捉率 (%)	現行領域	100.0	100.0	73.5
	サイト数 1	100.0	94.4	55.6
	サイト数 2	92.3	84.6	30.8
	サイト数 3	100.0	91.7	58.3
	サイト数 4	100.0	100.0	76.5
	サイト数 5	100.0	100.0	81.3
的中率 (%)	現行領域	50.7	89.4	91.5
	サイト数 1	81.5	97.5	90.1
	サイト数 2	58.1	82.3	79.0
	サイト数 3	64.2	90.6	90.6
	サイト数 4	57.8	95.3	92.2
	サイト数 5	51.9	89.4	94.9

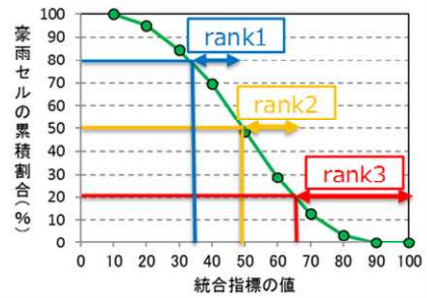


図-9 豪雨セルの累積割合と危険度ランク

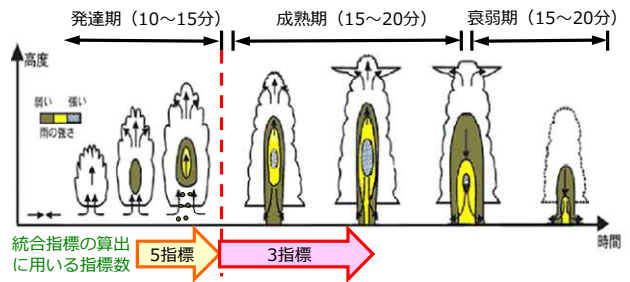


図-10 ライフステージによる指標の切り替えイメージ

3. 探知精度向上の取り組み

2014～2015年度に行ったシステム改良により、豪雨の見逃し、空振りは減少した。一方、豪雨セルに対して、高い危険度ランクが出ないケースが見られた。そこで、新たな事例を追加したメンバーシップ関数の更新と、積乱雲のライフステージによる指標数の切り替えを行い、豪雨探知精度の向上効果を検証した。

(1) メンバーシップ関数の更新

本システムでは、危険度ランク判定のために図-3に示す5指標についてメンバーシップ関数を設定している。メンバーシップ関数は、あらかじめ抽出した豪雨セルと非豪雨セルについて、地上降雨開始時の指標値の頻度分布を作成し、階級別に求めた豪雨セルの割合を一次回帰直線にフィッティングすることで、指標ごとに算出している。

現行では、2011,2012年の事例からメンバーシップ関数を算出したが、新たに2013～2015年の事例を追加して再計算を行った。再計算したメンバーシップ関数を用いて豪雨セルの統合指標値を計算し、指標値の高い方からセル数を累積した割合を図-9に示す。累積割合が20, 50, 80%を超える指標値をそれぞれランク3, 2, 1の閾値とした。

(2) ライフステージによる指標数の切り替え

組織化されたセル内部で新たな豪雨のタマゴが発生する場合など、すでに発達した積乱雲ではエコー頂高度差と鉛直発達速度の値が小さくなり、統合指標値が低くなるという問題がある。そこで、地上降雨開始後はエコー頂高度差と鉛直発達速度を除いた3指標で統合指標値を計算する手法を新たに導入した(図-10)。

表-4 統合指標の計算手法

	メンバーシップ関数算出期間	指標数の切り替え
現行版	2011, 2012年	なし
更新版	2011～2015年	なし
現行版 +指標数切り替え	2011, 2012年	降雨開始前後で 5指標→3指標
更新版 +指標数切り替え	2011～2015年	降雨開始前後で 5指標→3指標

(3) 現行領域と拡張領域における精度比較

(1), (2)で検討した内容を組み合わせ、表-4の4通りの計算手法について精度比較を行った。対象領域は現行領域とし、2013～2015年の事例に対し捕捉率・的中率・空振り数・リードタイムについて精度検証を行った。

表-5～表8は、メンバーシップ関数の更新と指標数の切り替えの有無についての精度検証の結果である。更新版は現行版に比べて空振り数が減少する改善効果が確認できた。また、指標数を地上降雨開始時に切り替えることで、捕捉率が向上し、50mm/hに到達するまでのリードタイムがランク2やランク3で30秒～1分程度改善することがわかった。総合的に見ると、「更新版+指標数切り替え」の精度が最もよいと考えられる(表-9)。

これらの結果より、現行版と「更新版+指標数切り替え」の2通りの手法について、2章で検討した拡張領域で2(2)と同様に精度検証を行った。

その結果、現行版と比べ「更新版+指標数切り替え」では、ランク3の捕捉率やランク1～3の的中率が向上し、空振り数が減少していることがわかった。このことから、拡張領域においても、概ね精度向上の効果を確認することができた(表-10、表-11)。

表-5 精度検証の結果 (現行版)

	ランク1	ランク2	ランク3
捕捉率(%)	100.0	98.8	72.9
的中率(%)	50.5	85.1	88.9
空振り数	143	42	9
リードタイム	15:42前	14:05前	11:12前

表-6 精度検証の結果 (更新版)

	ランク1	ランク2	ランク3
捕捉率(%)	100.0	96.5	64.7
的中率(%)	53.3	93.8	88.6
空振り数	135	15	3
リードタイム	15:28前	12:23前	9:25前

表-7 精度検証の結果 (現行版+指標数切り替え)

	ランク1	ランク2	ランク3
捕捉率(%)	100.0	100.0	100.0
的中率(%)	48.4	76.5	95.2
空振り数	149	68	14
リードタイム	15:53前	14:29前	12:11前

表-8 精度検証の結果 (更新版+指標数切り替え)

	ランク1	ランク2	ランク3
捕捉率(%)	100.0	100.0	91.8
的中率(%)	54.0	93.1	96.5
空振り数	133	20	3
リードタイム	15:26前	13:08前	9:43前

表-9 各判定パターンの長所のまとめ (◎:優, ○:良)

	捕捉率	的中率	空振り数	リードタイム
現行版	○			◎
更新版		○	◎	○
現行版 +指標数切り替え	◎			◎
更新版 +指標数切り替え	◎	◎	◎	○

表-10 拡張領域での精度検証 (現行版)

	ランク1	ランク2	ランク3
捕捉率(%)	99.2	96.6	68.6
的中率(%)	60.3	90.9	91.3
空振り数	205	43	8
リードタイム	13:07前	11:06前	9:01前

表-11 拡張領域での精度検証 (更新版+指標数切り替え)

	ランク1	ランク2	ランク3
捕捉率(%)	99.2	95.8	76.3
的中率(%)	63.6	92.9	94.4
空振り数	188	32	1
リードタイム	12:45前	10:05前	7:37前

4. 自治体等外部機関への試験配信

(1) 試験配信の取り組み

2015年7月より、本システムをインターネットにて自治体など外部機関へ配信する取り組みが始まった。2017年5月現在、滋賀県、兵庫県、京都府、大阪府内の14自治体で本システムが閲覧されている。本章では、2016年7~10月を対象に、システムのアクセス回数やアンケートによる調査から利用実態を明らかにし、今後の効果的な情報提供について検討を行った。

(2) アクセス回数の調査結果

各自治体による本システムの閲覧状況についてアクセス回数を基に調査した。アクセス集中日の降雨要因には、本システムの対象である不安定性の局地的豪雨(大気不安定日)が多かったが、低気圧や台風、停滞前線などの大規模擾乱も含まれていた(表-12)。総アクセス数が最も多かった8月25日の局地的豪雨事例では、豪雨の発生時間帯は16~20時であったが、それよりも早い時間帯にアクセスが増加した自治体、豪雨が発生し始めてからアクセスが増加した自治体、常時一定のアクセス数があった自治体に分かれていた(図-11)。これらのことから、閲覧状況として、豪雨が予想される荒天時に自動更新により継続して画面監視する場合や、豪雨発生時に事務所のPC端末で確認を行う場合など様々であることがわかった。

表-12 アクセス回数の多かった日と降雨要因

年月日	閲覧数の多かった自治体	降雨要因
2016年08月04日	大阪市, 大阪府, 枚方市	大気不安定
" 08月16日	神戸市, 枚方市	大気不安定
" 08月25日	神戸市, 大阪市, 枚方市	大気不安定
" 08月29日	枚方市	低気圧
" 09月11日	神戸市	停滞前線

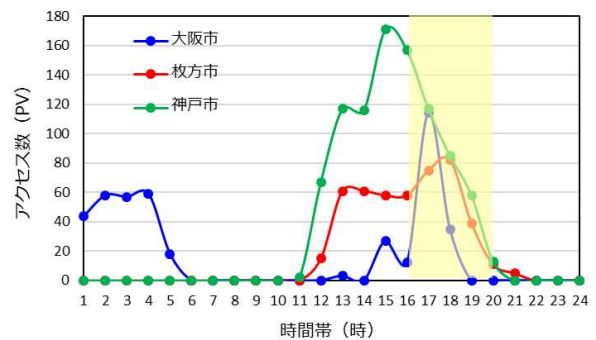


図-11 2016年8月25日における各自治体のアクセス数(黄色の陰影部は豪雨の発生した時間帯を表す)

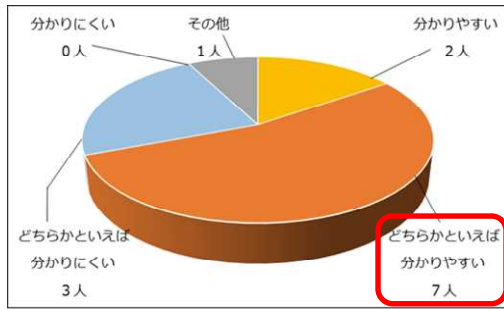


図-12 表現方法のわかりやすさに関する回答結果

(3) アンケートの調査結果

アクセスログでは分からない利用実態を把握するため、14自治体を対象にアンケート調査を実施した。その結果、豪雨時にシステムを閲覧した自治体が多かったものの、本システムの情報により、防災対策を実施した自治体は少なかった。また、表示方法については、「どちらかといえば分かりやすい」との回答が多かった(図-12)。一方で、常時監視ではなく、何かのトリガーにより本システムを閲覧したとの回答が多く、今後はメール等のPush通知機能や自治体の独自システムとの連携が有効であることがわかった。

5. 今後の取り組み

近畿地方整備局管内全域において、中小河川における安全対策や内水氾濫による災害防止のための監視体制強化などに資するため、今後も以下の取り組みを行っていく予定である。

(1) 遠方領域での探知精度確保に向けた検討

2章(2)の領域別の精度検証において、1~2台のレーダのみでカバーされる遠方領域について、捕捉率等の探知精度が現行と比べて低下することがわかった。そこで、ランク判定に用いる渦度のしきい値の変更、反射強度やドップラー風速以外の観測パラメータの活用、気象庁の数値予報GPV(Grid Point Value)の活用等により、レーダサイトから遠方領域における探知精度を確保する検討を行う予定である。

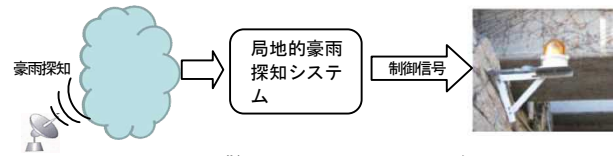


図-13 警報システムのイメージ

(2) Push情報の追加など自治体との連携促進

4章で明らかになったように、メールやポップアップ等のPush通知機能が望まれている。そこで、Web画面で監視枠を設定し、枠内に豪雨のランク円が出現した場合にポップアップやアラーム通知を行う機能を追加する予定である。また、自治体の警報システムとの連携については、自治体で現在運用している回転灯の作動システムとの連携等を通し、促進していく方向である(図-13)。

(3) 全国展開への可能性

本検討では、深山や城ヶ森山のC-MPレーダを用いることで、本システムの探知範囲を拡張できることがわかった。今後全国的にCバンドレーダのMP化が進む計画予定であることから、近畿のみならず他地域においても、本システムを適用できる可能性がある。

謝辞: 本研究において、京都大学防災研究所の中北研究室の皆様にご多大なご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 片山勝之・山路昭彦・中村文彦・森田宏・中北英一：局地的豪雨探知システムの開発, 河川技術論文集, 第21巻, 2015
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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