

局地的豪雨探知システムの精度向上への 取り組みについて

松田 政裕¹・亀岡 博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) .

平成25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。本システムを試験運用したところ、①降水セルの不分離による豪雨のタマゴの見落とし、②局地的豪雨とは関係のない層状性雨域等における空振り判定、③降水セルの移動が表示されない点の3つの課題が明らかになった。そこで、局地的豪雨探知システムにおけるこれら3つ課題について改良を行い、平成26年度の降雨事例において局地的豪雨をもたらす積乱雲の判定精度が向上したことを確認した。

キーワード XバンドMPレーダ、豪雨のタマゴ、予測

1. 局地的豪雨探知システムについて

(1) 背景、目的および範囲

2008年7月28日に発生した兵庫県神戸市都賀川の洪水を契機に、従来のCバンドレーダよりも高頻度・高分解能で観測を行うXバンドMPレーダが整備された。XバンドMPレーダは上空の高仰角観測を高頻度で行い、上空で発生し、10～20分程度で急発達する積乱雲を早期に探知することができる。そこで、局地的豪雨による災害防止を目的に、XバンドMPレーダを用いて、数分から10分程度先に豪雨となる可能性を予測する局地的豪雨探知システム（以下、本システム）を平成25年度に整備した。

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以上に急発達し、その後も降水強度50mm/h以上の強雨が30分以上継続する孤立した積乱雲（以下、豪雨セル）である。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バンドMPレーダで観測される図-1の範囲である。

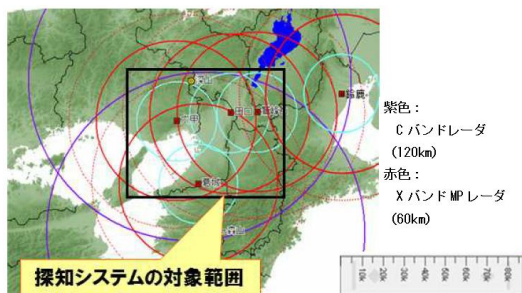


図-1 局地的豪雨探知システムの対象範囲

(2) 豪雨のタマゴ手法

中北ら^{2), 3)}の手法に基づき、上空で発生する積乱雲をレーダで探知し、その内部にドップラー風速から計算される渦が存在すれば、豪雨になる危険性が高い積乱雲（以下、豪雨のタマゴ）として判定する手法である（図-2）。個々の積乱雲（以下、降水セル）が豪雨セルに発達するか否かを3ランクで判定する。本システムでは、判定精度を高めるため、渦に加えて反射強度に関連した指標を用いている。詳細を以下に示す。

a) 等高度面データ（CAPPI）の作成

5台のXバンド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1分毎に上空10kmまで作成する。

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) 降水セルごとの指標計算

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、式(1a)～(1e)のメンバーシップ関数で表さ

れる。これらの式を加重平均した式(1f)により統合指標値Gが算出される。続いて、図-4に示す3つのしきい値から、危険度ランク①②③、危険性なしを判定する。

$$f_1(x_1) = 21.398x_1 + 23.282 \quad (1a)$$

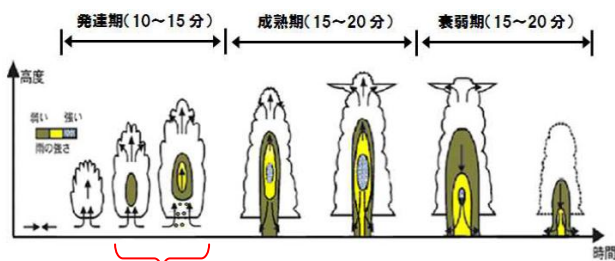
$$f_2(x_2) = 118.548x_2 + 10.734 \quad (1b)$$

$$f_3(x_3) = 0.299x_3 - 5.453 \quad (1c)$$

$$f_4(x_4) = 4.123x_4 + 19.642 \quad (1d)$$

$$f_5(x_5) = 9.560x_5 + 13.614 \quad (1e)$$

$$G = 0.27f_1(x_1) + 0.27f_2(x_2) + 0.24f_3(x_3) + 0.10f_4(x_4) + 0.12f_5(x_5) \quad (1f)$$



この段階の渦度や反射強度から、豪雨になるか否かを判定

図-2 積乱雲の一生と本システムのターゲット

- ① エコー頂高度差 ... セル発生時と最新時刻におけるエコー頂高度の差(単位:km)
- ② 鉛直発達速度 ... ①のエコー頂高度差をセル発生からの時刻(分)で除した値(単位:km/分)
- ③ 鉛直積算エコー強度 ... 最新時刻における0.5km~10kmのCAPPI高度面における反射強度の積算値(単位:dBZ)
- ④ 渦度 ... 最新時刻における0.5km~10kmのCAPPI高度面における渦度の最大値(単位:0.001/s)
- ⑤ 収束量 ... 最新時刻における0.5km~10kmのCAPPI高度面における収束量の最大値(単位:0.001/s)

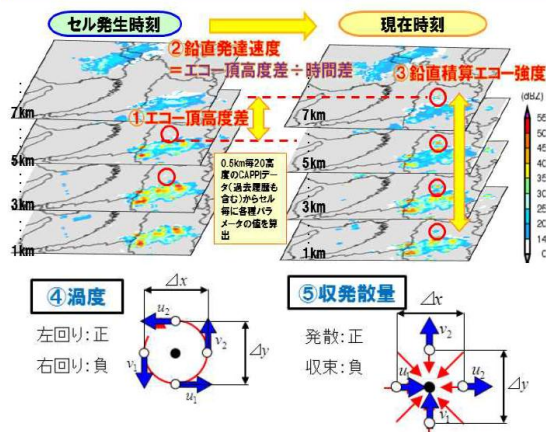


図-3 豪雨の危険度判定に用いる各指標

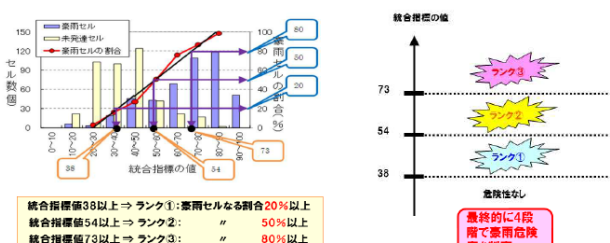


図-4 統合指標値の分布と危険度ランク

(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。



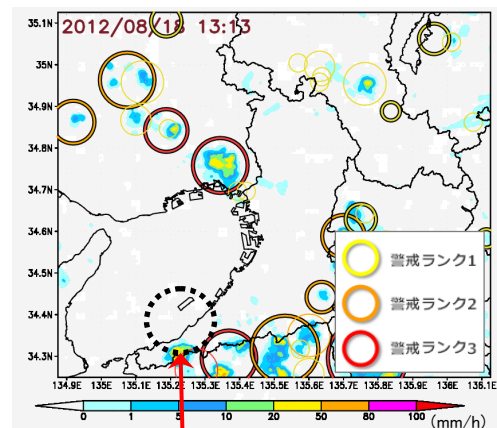
図-5 局地的豪雨探知システムの表示画面

2. 試験運用で判明した課題

平成25年度に整備した局地的豪雨探知システム（以下、H25システム）の課題点を以下に述べる。

(1) 降水セルの不分離による豪雨のタマゴの見落とし

抽出プログラムでは、反射強度20dBZ以上の閉じた領域を1個の降水セルとしているが、すでに発達した豪雨セルの近傍で新たな豪雨のタマゴが出現する場合、両者の反射強度20dBZ以上の領域が結合し、豪雨のタマゴが抽出できないことがある（図-6）。また、抽出できた場合でも、追跡途中に周囲の降水セルと併合すると、以後追跡不能となり、危険度ランク判定が消えてしまう。



隣の降水セルと上空で結合したため、降水セルとして抽出されず、危険度ランクの判定が行われない

図-6 豪雨のタマゴの見落とし事例（H25システム）

(2) 層状性雨域等における空振り判定

局地的豪雨と関係のない水平規模の大きな層状性雨域に対し、統合指標値が危険度ランクの判定基準を超え、豪雨セルと判定する場合がある（図-7）。また、発達しない降水セルでも、その発生初期に豪雨セルと判定される場合がある。これらの判定は、すべて空振りである。

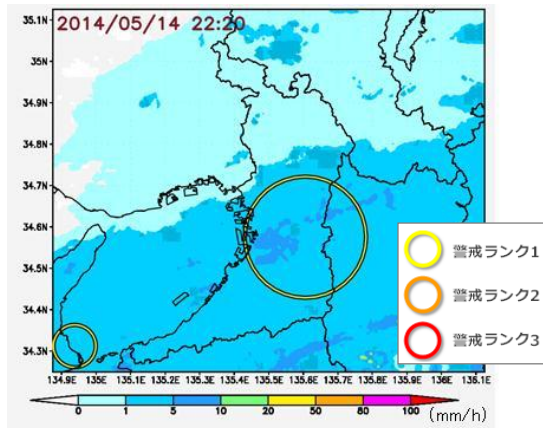


図-7 層状性雨域の空振り判定事例（H25システム）

(3) 降水セルの移動が表示されない点

H25システムで表示されるのは、豪雨のタマゴの現在位置と危険度ランク情報のみである。しかし、降水セルは時々刻々と移動するため、危険度ランク判定された地点（危険度ランク円の表示位置）と実際に50mm/h以上の豪雨となる地点は異なる場合が多く、閲覧者に誤解を与える可能性がある。

3. システムの改良

(1) 降水セル抽出手法の改良

2(1)で述べた降水セルの不分離による豪雨のタマゴの見落としを改善するため、3段階抽出手法を考案した。

a) 3段階抽出法の概要

豪雨のタマゴが、反射強度のしきい値20dBZで周囲の降水セルと結合している場合、しきい値を大きくすれば両者を分離できるが、大きくしすぎると、豪雨のタマゴの分離に時間がかかり、探知が遅れる。そこで、しきい値を20、25、30dBZの3段階で順次大きくして抽出する手法を考案した。図-8のように、降水セルAの内部に最盛期の対流コアBと、発達中の対流コアC（豪雨のタマゴ）があるとする。まず、Step1ではしきい値20dBZで降水セルAを抽出する。次に、Step2、3でしきい値を25、30dBZと順次大きくし、降水セルAから対流コアB、Cを抽出する。最後に、降水セルAを対流コアB、Cの重心からの等距離面で分離し、降水セルB、Cとする。これにより、豪雨のタマゴの探知遅れを極力抑えつつ、複数の降水セルの塊から豪雨のタマゴを抽出することができる。

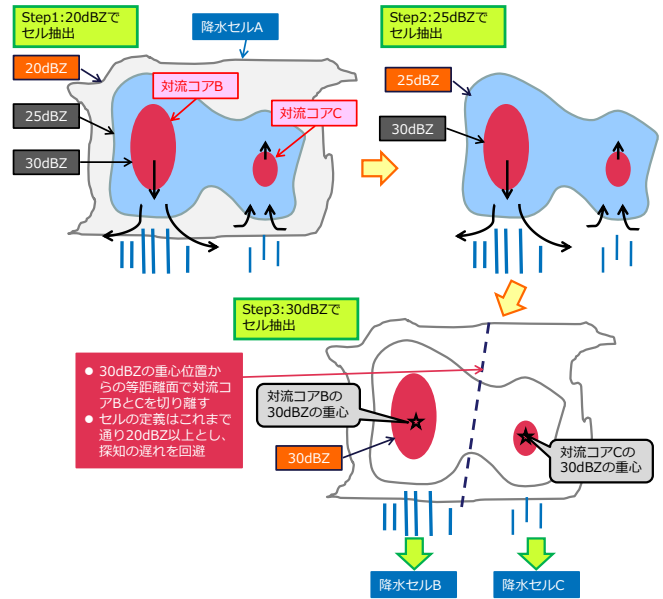
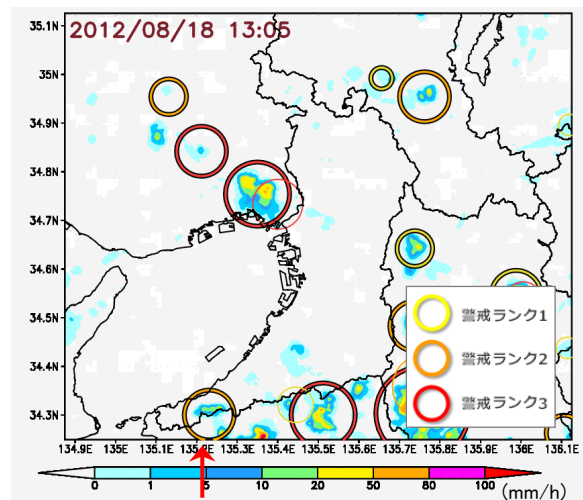


図-8 3段階抽出手法の概念図

b) H25システムで抽出できなかった事例の検証

図-9は、図-6の見落とし事例における、3段階抽出手法の危険度判定結果である。図中の矢印で示した部分にランク②の判定が出ており、見落としが改善している。表-1は、2011年～2013年の3ヶ年において目視で選定した134個の豪雨セルのうち、H25システムで見落としとなった20個について、3段階抽出手法で危険度判定を行った結果である。ランク①～③でそれぞれ13個、10個、8個の豪雨セルに対して危険度判定が行われ、見落としが軽減されている。判定時刻は、地上降雨開始時よりも6～11分遅く、50mm/h到達時よりも4～8分早かった。



50mm/h 到達の 8 分前にランク②で判定できている

図-9 3段階抽出手法を用いた豪雨探知結果（H25システムの見落とし事例）

表-1 新たに危険度判定された豪雨セル数と判定時刻
(H25 システムで見落としとなった 20 個)

		危険度ランク		
		ランク①	ランク②	ランク③
新たに危険度判定が可能になった豪雨セルの数		13	10	8
判定時刻	地上降雨開始時との差	6分後	9分後	11分後
	50mm/h 到達時との差	8分前	6分前	4分前

(2) 層状性判別手法の導入

2(2)で述べた層状性雨域の空振り判定を改善するため、図-10に示す層状性判別手法を考案した。豪雨のタマゴの水平規模が1～数kmであるのに対し、図-7のような温帯低気圧に伴う層状性雨域は、水平規模が10km以上と大きい。そこで、体積が500km³以上の降水セルを対象として対流性/層状性のチェックを行い、層状性と判別された降水セルについては、鉛直方向の発達弱いものを危険度判定の対象外とした。

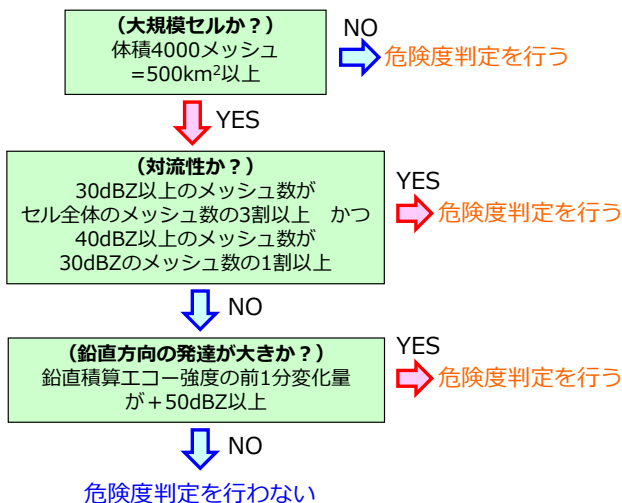


図-10 層状性判別手法のフロー

(3) 危険度ランク判定方法の改修

2(2)で述べた発達しない降水セルの発生初期における空振り判定を改善するため、危険度ランクの判定方法を図-11のように改修した。H25システムでは、渦または収束がない場合でも、統合指標が38以上54未満であればランク①と判定した。しかし、降水セルの発生初期は、統合指標算出に用いる鉛直発達速度が過大に計算され、発達しない降水セルでも統合指標値が38を超えることがある。そこで、渦または収束がなく、統合指標値が54未満の降水セルはランクなしとした。これにより、ランク①の判定条件が厳しくなり空振りが軽減する一方、見落としが増える懸念がある。しかし、中北ら³⁾によると、豪雨セルは100%の確率で渦が存在すると指摘されており、新たな見落としは発生しないと考えられる。

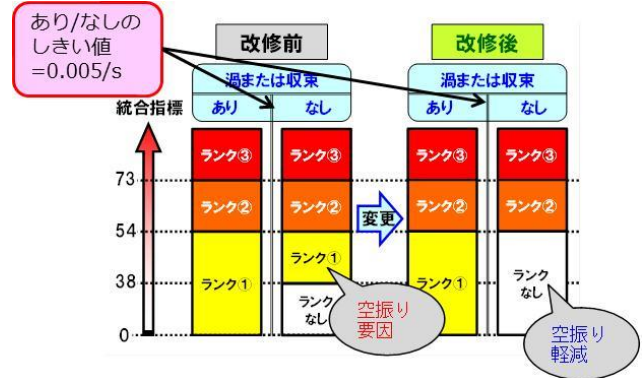


図-11 危険度ランク判定方法の改修

(4) 降水セルの移動を表示する機能の追加

2(3)で述べた降水セルの移動が表現されない点を改善するため、降水セルの移動方向や通過軌跡を表示する機能を追加した。

a) 移動ベクトルの算出方法

降水セルの移動方向を表示するため、降水セルの移動ベクトルを1分毎に計算した。移動ベクトルは、降水セルの現在位置と過去位置の差分から計算されるが、1分毎に求めた移動ベクトルは時間変化が激しく、実際の移動方向がわかりづらい。そこで、過去10分間の移動ベクトルを平均した。ただし、以下2点に該当する移動ベクトルは異常値として平均から除外した（図-12参照）。

- ・ 移動距離が1分あたり2km以上のもの
- ・ 10個の移動ベクトルの移動先を8方位に分類した時、最頻方位から90度以上異なるもの

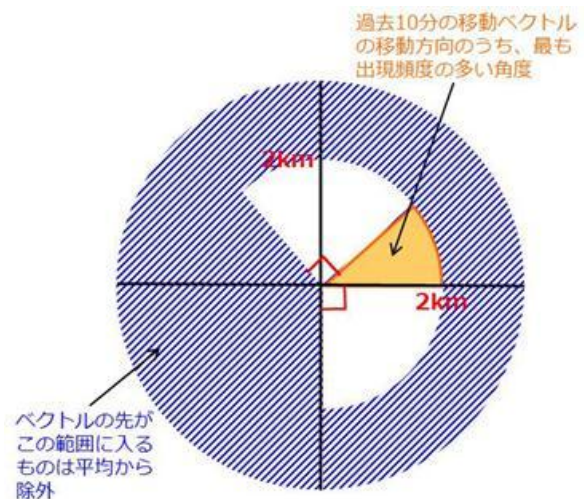


図-12 平均化に用いない移動ベクトルの範囲

b) 移動方向・移動速度の表示

a)で計算した移動ベクトルを局地的豪雨探知システムのWeb画面にて表示する機能を追加した。図-13のように、危険度ランク①～③の各降水セルについて、将来の移動方向の目安になるよう、始点を15分前の位置、終点を現在位置とする移動ベクトルを表示可能とした。



図-13 移動ベクトルのWeb表示画面

c) 通過軌跡の表示

豪雨のタマゴが発達し、周囲の降水セルと併合しだすとそれ以上追跡ができなくなる。そこで、追跡終了となった時刻までの通過軌跡を表示する機能を追加した。図-14のように、追跡終了となった降水セルについて、1分毎の過去位置を折線で結んだ通過軌跡を表示可能とした。



図-14 通過軌跡のWeb表示画面

4. 精度検証

試験運用により得られた事例をもとに、H25システムと3で改良したシステム（以下、H26改良システム）の精度検証を実施した。

(1) 検証対象日

システム改良の効果を検証するには、局地的豪雨と関係のない温帯低気圧などの事例を含める必要がある。そこで、様々な降雨要因の中から局地的豪雨日と非局地的豪雨日を5事例ずつ選定し検証対象日とした（表-2）。

表-2 検証対象 10 事例日

No.	対象日	降雨要因	局地的豪雨日	備考
1	2014/5/26	温帯低気圧	×	
2	2014/6/6	大気不安定	○	大阪府堺市で13.5mm/10分
3	2014/6/26	大気不安定	○	大阪市城東区で冠水被害
4	2014/7/7	梅雨前線	×	
5	2014/7/20	大気不安定	○	奈良市で12.0mm/10分
6	2014/8/23	大気不安定 寒冷前線	○	奈良県天川村で46.5mm/1h
7	2014/9/10	大気不安定	○	大阪府池田市で短時間強雨
8	2014/10/5	台風 18 号	×	
9	2014/10/22	温帯低気圧	×	
10	2015/1/1	冬型	×	

(2) 検証方法

全降水セルを検証することは困難であるため、危険度ランク判定された降水セルのみを対象とした。精度検証イメージを図-15に、検証方法の要点を以下に示す。

- ランク円の出現時刻から30分以内に、円内またはその周囲10km以内に50mm/h以上の降水強度が出現すれば的中、出現しなければ空振りとし、それぞれの数をA、Bとする。周囲10km以内を的中範囲としたのは、降水セルの移動を考慮するためだが、降水セルは30分で30km移動することもあり、移動の影響を完全には考慮できていない点に注意が必要がある。
- 精度指標として、次式に示す的中率 X を用いる。

$$X = \frac{A}{A+B} \times 100 \quad (4a)$$

- ランク円内で降水強度50mm/h以上が出現している降水セルは対象外とする。
- 的中事例について、ランク判定から50mm/h以上の豪雨となるまでの時間差（先行時間）を集計する。

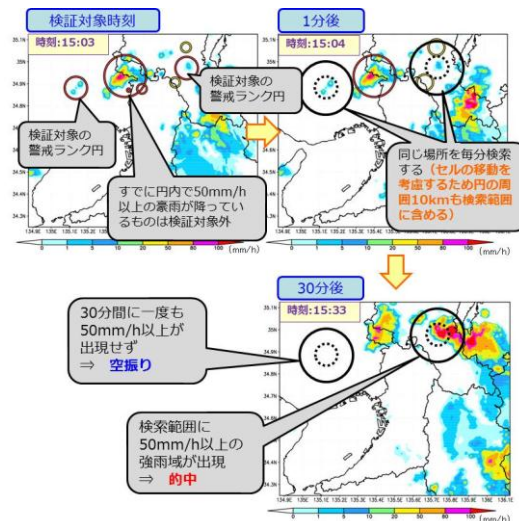


図-15 精度検証方法のイメージ

(3) 検証結果

表-3～表-5にH25システムとH26改良システムの的中率、空振り数、先行時間を示す。層状性判別手法の導入および危険度ランク判定方法の改修により、非局地的豪雨日における空振り数が、各ランクとも5～8割減少した。また、的中率は、全事例日のランク①②で13～14%、ランク③で約20%上昇した。その一方で、全事例日の先行時間は、H25システムの14～16分に対し、H26改良システムは13～15分と1分弱劣っていた。これは、3段階抽出手法で新たに抽出された豪雨のタマゴの検出時間が他と比較して遅いためである。この検証結果から、精度面において、システム改良することのメリットが大きいことが確認された。そこで、H26改良版のプログラムを試験システムに実装した。

表-3 H25 システムと H26 改良システムの的中率

	ランク 1		ランク 2		ランク 3	
	H25	H26	H25	H26	H25	H26
局地的豪雨日	30.1	49.6	51.9	59.0	80.1	81.2
非局地的豪雨日	2.1	4.3	4.1	6.7	6.3	21.1
全事例日	15.1	28.9	31.8	45.7	54.0	74.5

単位：%

表-4 H25 システムと H26 改良システムの空振り数

	ランク 1		ランク 2		ランク 3	
	H25	H26	H25	H26	H25	H26
局地的豪雨日	5035	2782	1784	1597	139	136
非局地的豪雨日	8135	4451	2572	1236	356	71
全事例日	13710	7233	4356	2833	495	207

単位：事例数

表-5 H25 システムと H26 改良システムの先行時間

	ランク 1		ランク 2		ランク 3	
	H25	H26	H25	H26	H25	H26
局地的豪雨日	15.5	14.8	15.3	14.7	14.2	13.5
非局地的豪雨日	16.1	12.4	12.6	11.8	13.6	11.7
全事例日	15.1	14.6	15.1	14.6	14.2	13.5

単位：分

5. 今後の取り組み

都賀川水害のような痛ましい災害を防止するための監視体制強化など中小河川における安全対策に資するため、今後も以下の取り組みを行っていく予定である。

(1) CバンドMPレーダを用いた適用エリアの拡大

平成 26 年度に深山の C バンドレーダが MP 化され、同じく近畿にある城ヶ森山レーダとともに 1 時間に 3 仰角の立体観測を開始した。これらのレーダから得られる観測値を追加することで、本システムの適用エリア拡大

を検討する。また、今後全国的にも C バンドレーダの MP 化が進む予定で、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。

(2) 局地的豪雨の探知結果の一般公開

今年度より、自治体など外部機関に対して、局地的豪雨探知システムの公開を開始する予定である。その後は一般公開を視野に、さらなる探知精度の向上や利用実績のモニタリング、通信ネットワークおよび周辺機器の構成などについて検討を進める予定である。

(3) 自治体の警報システムとの連携

現在、自治体では気象庁が大雨・洪水注意報又は警報を発表すると信号が自動発信され、回転灯が作動するシステムを導入している。本システムはこれら警報システムとの連携を目指し、降水セルの危険度ランクを 500m メッシュの 2 次元データとして配信可能となっている。今後、目先 30 分程度先までの移動を考慮した情報を検討し、自治体システムとの連携を図る方向である（図-16）。

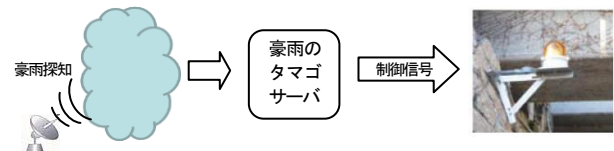


図-16 警報システムのイメージ

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) 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
- 5) 中小河川における水難事故防止検討WG報告書, 2009.
- 6) 中小河川における局地的豪雨対策WG報告書, 2009.