

XRAINを活用した局地的豪雨探知システム

土田健次・江崎祐也・片山勝之

1. はじめに

近年、1時間に50mmを超える局地的豪雨により、小河川の急激な水位上昇や、地下空間等での浸水被害が頻発している。2008年7月28日には、神戸市都賀川において、10分間に24mmの局地的豪雨となり、水位が10分で1.34m上昇するなどして、5名が亡くなる事故が発生した（図-1、図-2）。

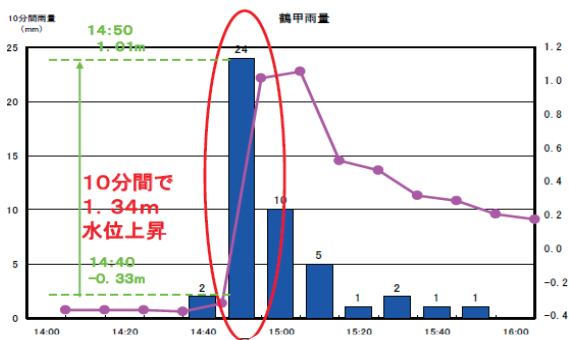


図-1 2008年7月28日の都賀川甲橋水位と降水量

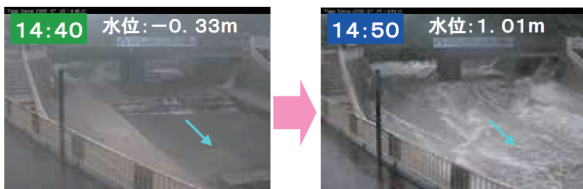


図-2 都賀川甲橋の水位上昇の状況
(神戸市モニタリング画像)

この水難事故などを契機として、国土交通省は、高分解能かつリアルタイムで降雨を観測するXバンドMP（マルチパラメータ）レーダ雨量計を全国の都市域に配備した。また、近畿地方整備局では、このレーダ雨量計の3次元観測値を活用して、積乱雲の発生初期に、上空に雨粒が蓄積され、レーダエコーが検知される現象（以下「豪雨のタマゴ」という。）を早期探知する局地的豪雨探知システムの開発を平成25年度に着手した¹⁾。その後、平成26、27年度に試験運用を行うとともに、継続的にシステム改良を行うことで、豪雨探知精度の向上を図ってきた。ここでは、局地的豪雨探知システムの概要と改良の取り組み、自治体等外部機関に対する試験配信の状況について報告する。

2. 局地的豪雨探知システムの概要

2.1 XバンドMPレーダ雨量計による3次元観測

国土交通省のXバンドMPレーダ雨量計は、近畿地域および近傍に5基（田口、鷲峰山、六甲、葛城、鈴鹿）あり、5分間に全12仰角で上空の雨や風を観測している。毎分それぞれのレーダ雨量計が異なる仰角を観測することで、ビームにより地上から上空10kmまでの3次元空間の76%（1分平均）をカバーしている（図-3、図-4）。本システムは、これらのデータを連続5分間組み合わせ、空間カバー率100%の3次元データを利用した。

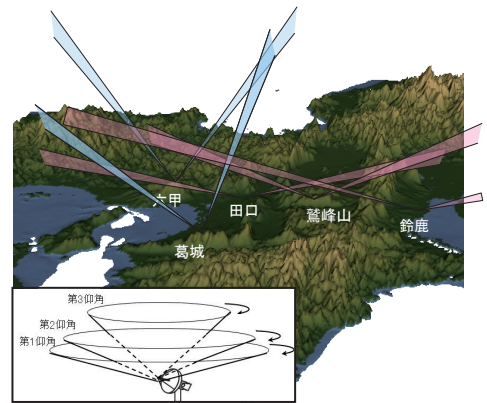


図-3 5基のレーダ雨量計のPPI観測と仰角運用イメージ

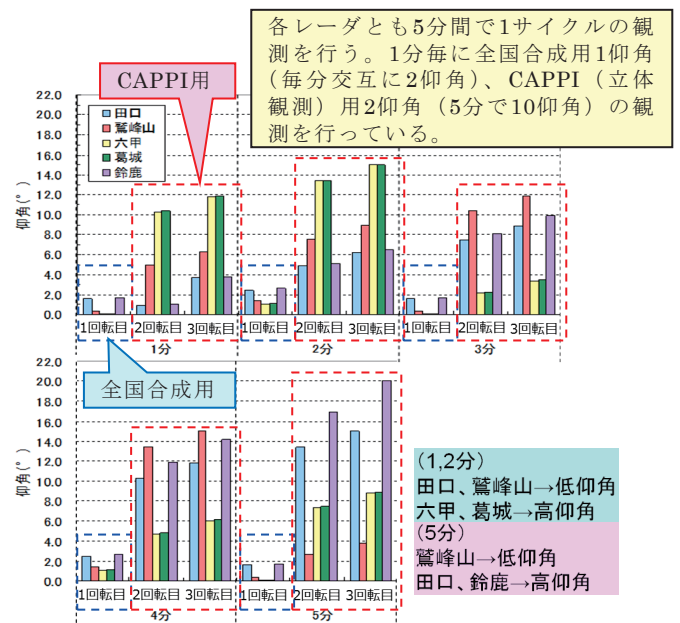


図-4 近畿4基および鈴鹿局の仰角スケジュール

A System for Early Detection of Severe Storms by using XRAIN

2.2 局地的豪雨探知システムの対象範囲

局地的豪雨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以上に急発達する積乱雲（以下「豪雨セル」という。）としている。積乱雲の発生初期は、上空に雨粒が蓄積され、レーダエコーが検知され、これを豪雨のタマゴと呼んでいる。本システムは、中北ら^{2),3),4)}に基づき、XバンドMPレーダ雨量計で豪雨のタマゴを探知し、その内部にドップラー風速から計算される渦が存在する等の条件により、豪雨セルに発達する危険度（以下「豪雨危険度」という。）を判定する（図-5）。

本システムの探知範囲は、XバンドMPレーダ雨量計5基の観測範囲のうち、複数基で観測され、人口が集中している政令指定都市（神戸、大阪、堺、京都）を含むエリアとした（図-6）。

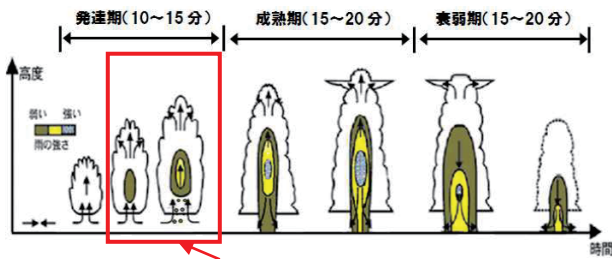


図-5 積乱雲の一生と本システムの探知ターゲット

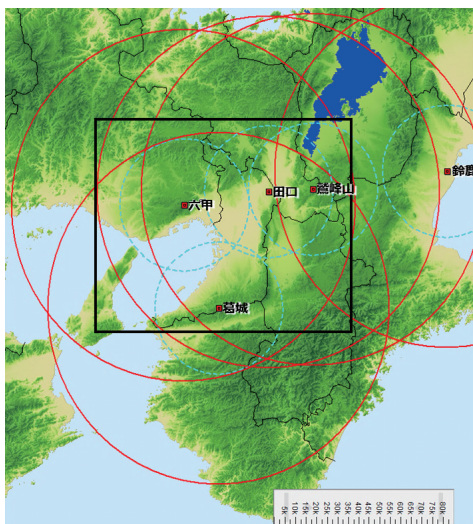


図-6 各レーダ雨量計の観測範囲（実線円内）と局地的豪雨探知システムの探知範囲（黒四角内）

2.3 豪雨危険度の判定手法

本システムは、XバンドMPレーダ雨量計の観測値を用い、以下の4段階を経て、豪雨危険度の判定を行っている。

(1) CAPPIデータの作成

5基のXバンドMPレーダ雨量計の仰角観測値を1分毎に合成し、高度10kmまでの空間を対象に水平・鉛直方向ともに格子間隔500mのCAPPIデータ（等高度の水平断面データ）を作成する。要素は反射強度、渦度、収束量の3種類である。

(2) 降水セルの抽出および追跡

中北ら^{3),4)}の手法を基に、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。また、現時刻と1分前の抽出結果から、体積と重心位置が最も近いセル同士を関連付け、降水セルの追跡を行う。

(3) 降水セルごとの指標計算

CAPPIデータから、降水セル毎に以下の5指標を算出する（図-7）。各指標とも値が大きい程、豪雨危険性が高いと想定する。

- ① エコー頂高度差[km]：セル発生時刻と現在時刻のエコー頂高度の差
- ② 鉛直発達速度[km/分]：①をセル発生から現在までの時間差で除した値
- ③ 鉛直積算反射強度[dBZ]：各高度のエコー強度の最大値を鉛直積分した値
- ④ 渦度[0.001/s]：セル内部の最大渦度
- ⑤ 収束量[0.001/s]：セル内部の最大収束量

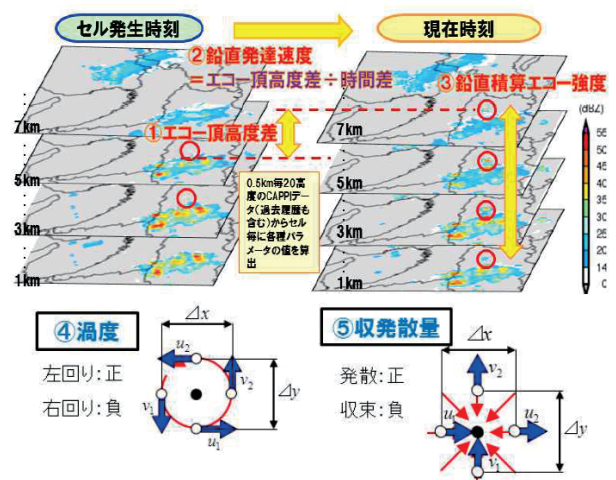


図-7 豪雨の危険度判定に用いる5指標

(4) 豪雨危険度の判定

各指標と豪雨セルになる確率をメンバーシップ関数で表し、それらを加重平均して統合指標値を算出する。次に、統合指標値と渦の有無（渦度が0.005/s以上で渦あり）を加味して、豪雨危険度を3ランクで判定する（図-8）。

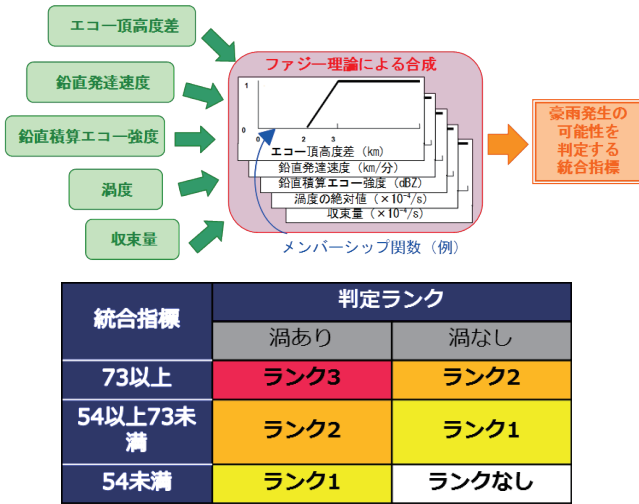


図-8 統合指標の作成と豪雨危険度ランクの判定

2.4 Webによる表示

本システムの表示画面では、XRAINの合成雨量分布に豪雨危険度を円で囲んで表示する。円の色はランク値を表し、円の半径は降水セルの体積と同体積の球の半径としている（図-9）。また、平成26年度には、降水セルの移動方向や通過軌跡を表示する機能を付加した。



図-9 局地的豪雨探知システムのリアルタイム表示画面

3. システム改良と精度向上の取組み

3.1 試験運用で判明した課題

平成25年度に構築し、平成26年4月に試験運用を開始した局地的豪雨探知システムは、試験運用期間中に様々な課題が明らかになったため、平成26、27年度に改良を行った。表-1に判明した課題とその影響および改良を行った年度を示す。

表-1 局地的豪雨探知システムの課題とその影響

H25システム の課題点	影響	改良 年度
降水セルの 不分離	豪雨のタマゴが捕捉できない事例が生じる	H26
	発達途中で追跡不能になり、ランク判定が消滅することがある	H26
層状性雨域 での誤判定	非豪雨事例（豪雨にならない積乱雲）に対して、ランク判定が出る	H26
非発達セル の誤判定		H26
セル移動方向 が不明	実際に豪雨となる地点が推測できない	H26
2次エコーに よる誤判定	非豪雨事例（豪雨にならない積乱雲）に対して、ランク判定が出る	H27
上空エコーに よる誤判定		H27

3.2 システム改良の実施例

ここでは、表-1の課題点のうち、平成26年度に実施した降水セル不分離への対応および平成27年度に実施した2次エコーによる誤判定への対応について詳述する。

3.2.1 降水セルの不分離への対応

システム改良前は、新たな豪雨セルが既存の豪雨セル近傍で発生する場合、上空で両者が結合していると、新たな豪雨セルが抽出できなかった。また、追跡途中で異なる豪雨セルと併合すると、以後の追跡ができず、危険度ランクが消滅した。そこで、降水セルの抽出に用いる反射強度の閾値を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-10に3段階抽出法の概念図を示す。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）がある場合、抽出の閾値を30dBZまで引き上げることで、対流コアCを1個のセルとして分離・識別することができる。この手法によって、それまで抽出できなかった豪雨セルの半数以上が抽出可能となった。

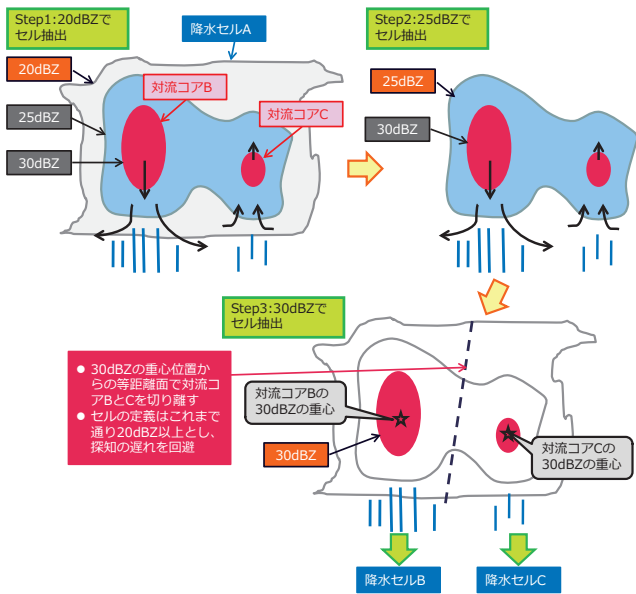


図-10 3段階抽出法の概念図

※30dBZで新たに発生した豪雨セルが抽出される

3.2.2 2次エコーへの対応

2次エコーとは、レーダ雨量計観測範囲(80km)よりも遠方にある降水域が、レーダサイト近傍に虚像として映る現象である。鷲峰山のレーダ雨量計には時々2次エコーが混入し、豪雨とは関係のない領域でランク判定が出る場合があった。そこで、2次エコー域の速度幅(ドップラー風速の分散)が大きいことを利用し、次の3条件に合致する領域を2次エコー域として欠測処理した(図-11)。

- ① 速度幅が2.5m/s以上である
- ② 両隣のセクターの速度幅が欠測である
- ③ レンジ方向の前後5km以内に、①を満たすメッシュが5メッシュ以上存在する

これにより、2次エコーが顕著に見られた3事例日(2014年6月17日, 8月3日, 2015年6月14日)について、豪雨危険度ランク1の誤判定が約64%減少した。

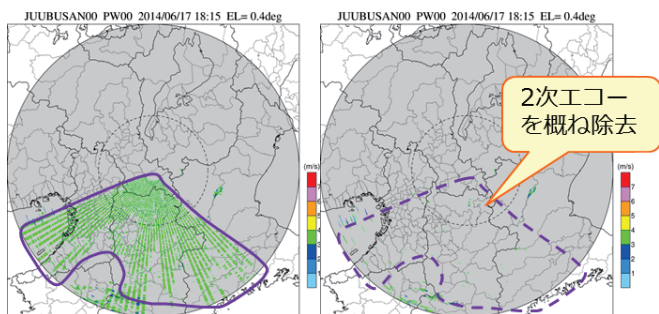


図-11 2次エコー除去前(左)と除去後(右)

3.3 システム改良前後の精度比較

3.3.1 非捕捉率の検証

非捕捉率とは、実際に豪雨をもたらした積乱雲に対し、事前に危険度ランクが全く判定されなかった割合で、値が小さい程精度がよい。以下に、検証方法と検証結果を示す。

(1) 検証方法

まず、2011年～2013年から134個の豪雨セルを抽出し、豪雨セルの重心から半径5km以内に事前に危険度ランク1以上が判定された事例を捕捉事例、全く判定されなかった事例を非捕捉事例として判別した(図-12)。次に、非捕捉事例数を全豪雨セル数で除して非捕捉率を算出した。また、捕捉事例については、危険度ランク判定後に地上で50mm/hの豪雨となるまでの時間(先行時間)も集計した。

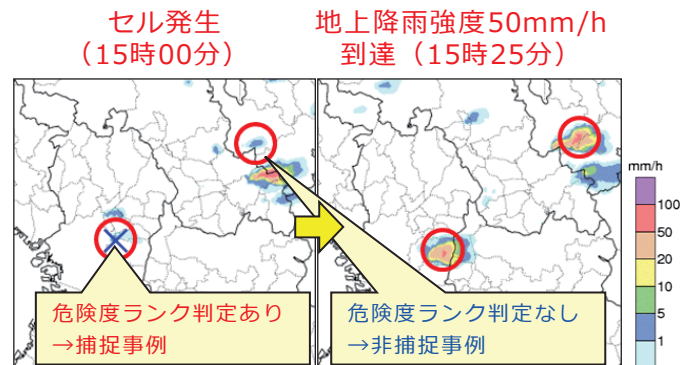


図-12 豪雨セルの捕捉/非捕捉の判別イメージ
(○は豪雨セルの重心から半径5kmの円を、
×は危険度ランクの判定位置を示す。)

(2) 検証結果

表-2を見ると、改良前後で非捕捉率が15%から7%に半減し、精度向上している。これは、3.2.1の3段階抽出法により、それまで抽出できなかった豪雨セルが新たに抽出されたためである。また、50mm/h到達時刻に対する先行時間は43秒遅くなったが、これは新たに抽出可能となった豪雨セルの探知時刻がやや遅いことが影響している。

表-2 非捕捉率と先行時間の検証結果

システム	評価指標	非捕捉率	50mm/h到達時刻に対する先行時間
H25構築版(改良前)		15%	16分6秒前
H27最新版(改良後)		7%	15分23秒前

3.3.2 非豪雨判定率の検証

非豪雨判定率とは、いずれかの危険度ランクが判定されたものの、その後50mm/h以上の豪雨が降らなかった割合で、値が小さい程精度がよい。以下に、検証方法と検証結果を示す。

(1) 検証方法

試験運用を開始してからのすべての日を対象に、危険度ランク判定円の周囲10km以内において、30分後までに50mm/h以上の豪雨が発生すれば豪雨判定、発生しなければ非豪雨判定として判別した(図-13)。次に、非豪雨判定数を全ランク判定数で除して非豪雨判定率を算出した。

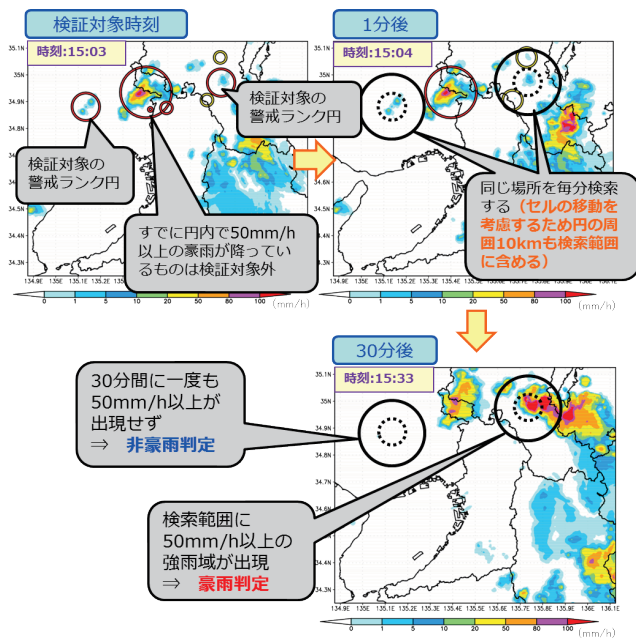


図-13 豪雨判定/非豪雨判定の判別イメージ

(2) 検証結果

危険度ランクごとの検証結果を表-3に示す。高いランクほど非豪雨判定率は低く、豪雨になる確率が高いことがわかる。改良前後を比較すると、各ランクとも非豪雨判定率が低下し、精度向上していることがわかる。これは、平成26年度に行った層状性判別手法の導入や平成27年度に行った上空エコーへの対応による効果である。

表-3 危険度ランクごとの非豪雨判定率の検証結果

危険度ランク システム	ランク1	ランク2	ランク3
H25構築版(改良前)	91.2%	74.2%	52.9%
H27最新版(改良後)	80.7%	48.0%	30.5%

4. 自治体等外部機関への試験配信

平成27年7月より本システムの自治体など外部機関への試験配信が始まり、平成28年5月現在、滋賀県、兵庫県、京都府の9自治体で本システムが閲覧されている。本章では、平成27年7~10月の暖候期を対象に、システムのアクセス回数やアンケートによる調査で明らかになった利用実態について紹介する。

4.1 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だけでなく、台風・前線などの大規模擾乱が含まれていた(表-4)ことから、XRAINの合成雨量分布図として利用されていたか、もしくは、Push通知機能が具備されていないため、豪雨が予想される荒天時に継続して画面監視していたものと思われる。また、8月3日の局地的豪雨事例では、大津市付近で豪雨が発生した17時台の1時間前において、危険度ランクの出現とともにアクセス数が増え、豪雨終了まで監視が行われていることがわかった(図-14)。

表-4 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
平成27年08月03日	大津市、兵庫県	大気不安定
" 08月06日	兵庫県	大気不安定
" 08月17日	兵庫県、野洲市	停滞前線
" 08月25日	兵庫県	台風15号
" 09月01日	兵庫県、野洲市	前線+暖湿流

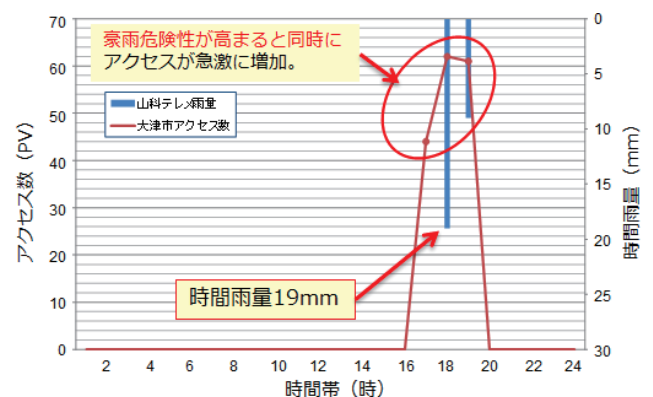


図-14 平成27年8月3日における大津市のアクセス数と近傍雨量計(山科)で観測された雨量の比較

4.2 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、9自治体を対象にアンケート調査を実施した。その結果、平成27年度は顕著な局地的豪雨がなく、有用性の評価ができないとの回答が多かったが、ほとんどの自治体から継続利用の要望があった。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-15）。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必要であることがわかった。

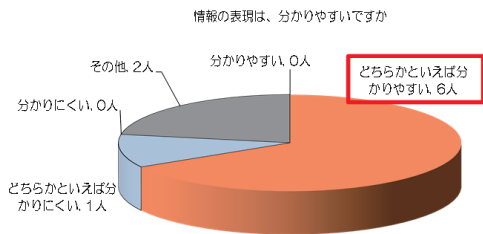


図-15 アンケート調査の結果例

5. 今後の課題

今後、局地的豪雨の監視体制の更なる強化を目的に、システム運用性能と豪雨判定精度の向上に資するため、以下について取り組む予定である。

(1) 本システムの試験運用対象の拡大

平成27年度は、自治体など外部機関に対して、本システムの試験配信を開始し、9自治体に対してアンケート調査を実施した。アンケート結果によりシステム改良の余地が明らかになったことから、今後は対象の自治体を拡大し、さらなる精度向上

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、システム運用性能の向上を図る予定である。

(2) 気象庁GPVデータの利活用

GPV (Grid Point Value) データとは、地球の大気の状態を格子状に区切り、各点で計算された気象要素（風速、気圧、気温など）の数値予測値であり、本システムの豪雨危険度の判定に当たって、レーダ雨量計から得られる観測データに加え、GPVデータを活用することにより、豪雨判定精度の向上が見込まれるかどうか検証を行う予定である。

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

土田健次



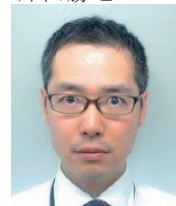
国土交通省近畿地方整備局企画部
情報通信技術課課長補佐
Kenji TSUCHIDA

江崎祐也



国土交通省近畿地方整備局河川部
水災害予報センター流域調査係長
Yuuya EZAKI

片山勝之



(一財)日本気象協会防災ソリューション事業部水防ソリューション課 技師、気象予報士
Masayuki KATAYAMA