

X-バンド偏波レーダーによる降水観測技術の開発及び社会実装

—2016年度岸保賞受賞記念講演—

真木 雅之^{*1}・上田 博^{*2}・中北 英一^{*3}

1. はじめに

波長約 3 cm (9 GHz 帯) の X-バンドのレーダーは、波長約 10 cm の S-バンドのレーダーや波長約 5 cm の C-バンドのレーダーと比べて降雨による減衰が大きいため、半世紀にわたって降雨の定量的な観測には適さないと考えられてきた。しかし、水平偏波と垂直偏波の同時送受信による両偏波の受信信号の位相差測定が可能な偏波レーダーが開発され、比偏波間位相差 (偏波間位相差変化率, 付録参照) を用いたレーダー反射因子の補正方法及び降雨強度推定方法が確立し、X-バンド偏波レーダーによる降雨の現業観測が可能になった。同時に、偏波レーダーパラメータを用いた雨滴粒径分布の推定や固体降水粒子のタイプの推定が可能になった。

上述した X-バンド偏波レーダーによる降水観測技術の開発と社会実装には、気象学や水文学の研究者及びレーダー工学や防災関連分野の研究者の密接な協力があった。本賞は研究者グループ及び多くの研究者を代表して三者が受賞したものである。ここでは、三者が協力して、X-バンド偏波レーダーの歴史的発展 (2 章), X-バンド偏波レーダーを用いた降雨量推定方法の開発 (3 章), X-バンド偏波レーダーによる降水粒子判別法の開発 (4 章), X-バンド偏波レーダーの現業観測に向けた取り組み (5 章) について概説し、受賞への謝意を表したい。

2. X-バンド偏波レーダーの歴史的発展

2.1 先駆的研究

在来型気象レーダーやドップラーレーダーは水平偏波のみの単偏波レーダーであるが、1980年代から日本においても、パルス切替えスイッチを用いて水平偏波と垂直偏波をパルスごとに切替えて送受信する偏波レーダー (polarimetric radar) が開発された。しかし、水平偏波と垂直偏波をパルスごとに切替えて、水平偏波のみでドップラー速度を求めると、パルス繰り返し周波数が単偏波のドップラーレーダーの半分になり、 $V_{\max} = f_{\text{PR}} \lambda / 4$ (ここで、 f_{PR} はパルス繰返し周波数、 λ は波長である) で示される折り返し速度 (V_{\max}) が半分になるという問題が生じる。そのため、偏波モードではドップラー速度を求めず、偏波モードとドップラーモードのどちらかを選択する観測を行っていた。

2000年代になって、二系統の45°偏波をアンテナのフィーダーホーンの先端で合成して水平偏波と垂直偏波の同時送受信が可能なシステムが実用化された。これにより、パルス切替えスイッチを用いて偏波レーダーの機能とドップラーレーダーの機能を同時に備え、偏波間相関係数や比偏波間位相差 (偏波間位相差変化率) も同時に測定できるようになった。

日本における最初の偏波レーダーは1986年に土木研究所が開発した C-バンド偏波レーダーである (吉野 1990)。その技術を X-バンド用に転用し、1992年に

*1 (連絡責任著者) 鹿児島大学。

〒 890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40。

maki@gm.kagoshima-u.ac.jp

*2 名古屋大学, h-uyeda-4291@aurora.ocn.ne.jp

*3 京都大学, nakakita@hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp

—2016年10月19日受領—

—2017年8月1日受理—

† 偏波レーダーは二重偏波レーダー (dual-polarization radar) やマルチパラメータレーダー (multiparameter radar) と呼ばれることがある。これらの名称の定義や違いについては付録で述べた。本報では混乱を避けるために偏波レーダーという名称を用いることにする。但し、過去の論文や図表を引用する場合にはこの限りではない。

北海道大学理学部の X-バンドレーダーが偏波レーダーに改造された。このレーダーはフェライトタイプの偏波切替えスイッチにより、偏波機能を実現したものである。降雪雲の観測を目的としたので、偏波切替えスイッチは低温用であった。TOGA-COARE 観測に向けて偏波切替えスイッチのボックスに冷却装置を付加したが十分な冷却を得ることができなかった。しかし、降雪雲の観測では北海道大理学部の偏波レーダーは観測データを蓄積した (Takahashi *et al.* 1996)。

偏波レーダーによる観測経験が生かされ、防災科学技術研究所が1995年1月と1996年1月に石狩湾に偏波レーダーとドップラーレーダーを設置して行った観測により、降雪雲の構造に関する理解が深まった (Katsumata *et al.* 2000; Yamada *et al.* 2004)。1998年末から2000年1月にかけて、北海道大学理学部の偏波レーダーを用いた関西電力との共同研究や若狭湾における冬季の雷雲の構造に関する観測が行われた。また、若狭湾における観測では、北陸電力の C-バンド偏波レーダーと落雷位置標定システムと地上の霰の比

較観測がなされた。これらの経験から、霰と雪片の判別は X-バンド偏波レーダーのレーダー反射因子と反射因子差の 2次元ルックアップテーブルでも可能であるという感触が得られた。

しかし、偏波切替えスイッチを使って水平偏波と垂直偏波を交互に切り替えた場合の両偏波の相関が高くないという問題が残った。また、反射因子差にはバイアスの問題もあり、レーダー反射因子と反射因子差の観測だけでは限界があった。このような背景のもと、2000年に防災科学技術研究所において偏波間位相差を測定できる X-バンドの偏波レーダーが製作され (Iwanami *et al.* 2001)、雨量計による補正なしに降雨強度を高精度で測定できることが示された (Maki *et al.* 2005)。これについては次章で詳しく述べる。

一方、名古屋大学地球水循環研究センター (現 宇宙地球環境研究所) では、文部科学省の特別経費として偏波レーダーの導入が認められ、2007年末に日本で初めて気象観測用の X-バンドの固体化素子の発信器を用いた偏波レーダーが製作された (第1図)。全く同じ性能を持つ 2 台のレーダーシステム (第1表) が、名古屋大学と岐阜大学の屋上に設置され、観測が開始された。2008年岡崎豪雨時の観測で、霰の存在を示唆する偏波パラメータの値が得られるという固体化偏波レーダーのパフォーマンスが示された。また、固体化偏波レーダーは周波数割り当ての点でも利点があることから、国土交通省の X-バンドマルチパラメー



第1図 名古屋大学地球水循環研究センター (現 宇宙地球環境研究所) の X-バンド偏波レーダー。

第1表 名古屋大学地球水循環研究センター (現 宇宙地球環境研究所) の偏波レーダーの諸元。

送信周波数	9375 MHz, 9415 MHz
増幅器	固体化送信ユニット
ピーク送信電力	200 W
パルス幅	1 μ s (短パルス), 32 μ s (長パルス)
PRF	2000 Hz (通常観測モード) 20000 Hz (精細観測モード)
変調方式	無変調 (短パルス) 及び チャープ (長パルス)
占有帯域幅	4 MHz
送信偏波	垂直及び水平独立送受信 (45°偏波)
アンテナ直径	2.0 m
ビーム幅	1.2度
観測範囲	64 km

タレーダー（偏波レーダー）観測網（XRAIN）の展開を加速する役割を果たした。

一方、C-バンドレーダーについても偏波化の研究が急速に進む。米国のNEXRAD（次世代気象レーダー計画）ドップラーレーダーの偏波化の提案（Doviak *et al.* 2000）がなされる頃、情報通信研究機構沖縄電磁波技術センターでC-バンドの偏波レーダー、COBRA（C-band Okinawa Bistatic Polarimetric Radar：沖縄偏波降雨レーダー）が製作され（Nakagawa *et al.* 2003）、偏波レーダーの種々の送信モードがテストされた。COBRAは当時では世界で4基目の水平・垂直偏波同時送受信可能な高機能な偏波レーダーであった。第2表にCOBRAの主な仕様を示す。COBRAを使った降雨特性の研究が進み（Shusse *et al.* 2009；Oue *et al.* 2010）、水平偏波と垂直偏波の位相差（偏波間位相差）も測定できる本格的な偏波レーダーに対する期待が高まった。

このC-バンド偏波レーダーを用いて降雨量推定アルゴリズムが開発され（中北ほか 2007, 2008）、それらがベースとなり、2009年には国土交通省釈迦岳レーダー雨量計が現業用レーダーとしては我が国で初めてフル偏波化されるとともに降雨量推定アルゴリズムが改良された（越田ほか 2012）。この現業化は2016年にXRAINと組み合わせられ日本全国を偏波レーダーネットワークでカバーする拡大XRAINとして発展していくことになる。

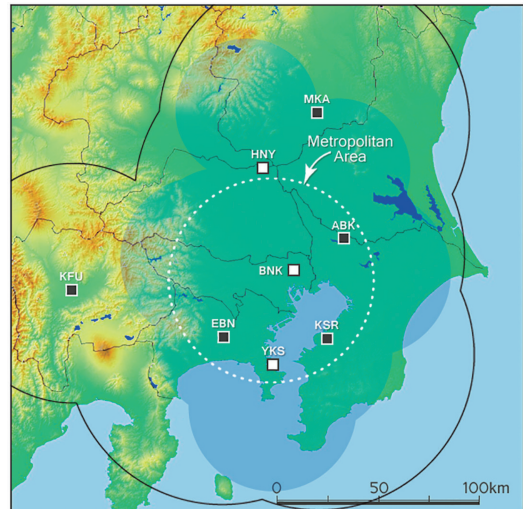
第2表 情報通信研究機構が導入した沖縄COBRA諸元。

レーダー形式	モノスタティックパルスドップラーレーダー
中心周波数	5340 MHz (C帯)
尖頭出力	250 kW 以上 (クライストロン, TWTA: 2台)
パルス幅	0.5, 1.0, 2.0 μ s
パルス繰返し周波数	250~3000 Hz
アンテナ直径	4.5 m
レドーム直径	8 m
交差偏波比	36 dB 以上
アンテナゲイン	42 dB 以上
サイドロープレベル	-25 dB 以下
アンテナ回転速度	水平方向: 0.5~10 rpm 鉛直方向: 0.1~3.6 rpm (0.1 rpm 毎に可変)

2.2 X-バンドレーダーネットワーク

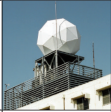







X-バンド偏波レーダーの成功を背景に、2006年、X-NETと名付けられた複数台の偏波レーダーとドップラーレーダーのネットワークの構築が首都圏で進められた（Maki *et al.* 2008；真木 2009）。参加機関は、防災科学技術研究所、中央大学、防衛大学校、日本気象協会、電力中央研究所、山梨大学である。X-NETが目指したことは、研究用レーダーをネットワークで結び、降水と風に関する情報をリアルタイムで配信する技術を確認することであった。X-NETは都市災害の新たな監視システムとして位置付けられ、その特徴として、(1) 都市の優れた通信インフラを活かしたレーダーネットワーク、(2) 既存の研究施設の利用による即効性と経済性、(3) 3000万人の住民が生活する首都圏が試験地、(4) エンドユーザ（研究者、国、地方公共団体防災担当者、民間気象関連会社など）とのやりとりを通じた実用化研究、が挙げられる。

X-NETの特にユニークな点は、上に述べた特性のうち(2)である。即ち、レーダーを所有する大学や研究機関のゆるやかな連携により、迅速で柔軟なネットワークの構築と運用を目指した点である。例えば、各レーダーの運用費はその機関で用意することが原則であり、運用もレーダーの所有者の意見が最優先され



第2図 X-NETを構成するレーダーの配置（□）と観測対象エリア（黒線）、青い薄い影は合成ドップラーレーダー解析エリア。各レーダーの設置場所を3文字の略記号で示す（各レーダーの詳細は第3表を参照のこと）。

第3表 X-NET を構成するレーダーの主な諸元。

Radar (Owner)	EBN (NIED)	MKA (NIED)	KSR (NIED)	KFU (Yamanashi U)	ABK (CRIEPI)	BNK (Chuo U)	HNY (JWA)	YKS (NDA)
Photo								
Frequency	9.375GHz	9.445GHz	9.700GHz	9.720GHz	9.410GHz	9.445GHz	9.390GHz	9.780GHz
Antenna Type	2.13 mφ Parabola	2.2 mφ Parabola	2.2 mφ Parabola	2.2 mφ Parabola	2.2 mφ Parabola	2.2 mφ Parabola	2.2 mφ Parabola	2.2 mφ Parabola
Antenna Gain	41.6 dB	44.6 dB	44.0 dB	42 dB	42.4 dB	44.1 dB	41 dB	40.0 dB
Beam Width	1.3°	1.13° (H), 1.09° (V)	1.1°	1.2°	1.07°	1.03°	≤1.2°	1.2°
Transmitter Tube	Magnetron 50 kW	Magnetron 40 kW	Klystron 50 kW	Solid state 200 W	Solid state 200 W	Magnetron 40 kW	Solid state 200 W	Magnetron 40 kW
Pulse Length	0.5 μs	0.5/1.0 μs	0.5/1.0/2.0 μs	1/32 μs	1/30 μs	0.45/0.90 μs	1.0/32 μs	0.45/0.90 μs
PRF	≤1800 Hz	≤1800 Hz	≤1800 Hz	500~2000Hz	500~2000Hz	2000/1000 Hz	≤1800 Hz	2000/1000 Hz
Min. Detectable Signal	-111 dBm	-114 dBm	-115 dBm	-111 dBm	-111 dBm	-112 dBm	-110 dBm	-105 dBm
Observation Range	80 km	80 km	80 km	64 km	64 km	64/128 km	80 km	64/128 km
Outputs	$T, Z, V, W, Z_{DR}, \rho_{hv}, \Phi_{DP}, K_{DP}$	$T, Z, V, W, Z_{DR}, \rho_{hv}, \Phi_{DP}, K_{DP}$	$T, Z, V, W, Z_{DR}, \rho_{hv}, \Phi_{DP}, K_{DP}$	$Z, V, W, Z_{DR}, \rho_{hv}, \Phi_{DP}, K_{DP}$	$Z, V, W, Z_{DR}, \rho_{hv}, \Phi_{DP}, K_{DP}$	Z, V, W	$T, Z, V, W, Z_{DR}, \rho_{hv}, \Phi_{DP}, K_{DP}$	Z, V, W

T : 受信電力, Z : レーダー反射因子, V : ドップラー速度, W : ドップラー速度スペクトル幅, Z_{DR} : 反射因子差, ρ_{hv} : 偏波間相関係数, Φ_{DP} : 偏波間位相差, K_{DP} : 比偏波間位相差

た。2006年、最も早く X-NET への参加を表明したのは中央大学の山田 正教授である。2007年には防衛大学の小林文明教授が、2008年には日本気象協会が参加した。2010年には山梨大学と電力中央研究所が参加し、偏波レーダーを含む計 8 台の X-バンドレーダーからなるネットワークが首都圏に完成した (第 2 図及び第 3 表)。

X-NET の最も大きな成果の一つは、リアルタイムのレーダーデータ処理とデータベース化 (Maesaka *et al.* 2007, 2008) であろう。レーダーデータ処理システムには、開発された様々なアルゴリズムが組み込まれており、一部は特許が取得されている。例えば、「降雨強度と雨水量の 3 次元分布推定装置および方法」(真木・朴 2010)、「降水分布の推定システムおよび降水分布の推定方法」(加藤ほか 2014)、「風予測装置及びプログラム」(前坂ほか 2014)、「降雨減衰判定装置及びそれを用いた降雨観測システム並びに降雨減衰判定方法」(岩波 2011)、「比偏波間位相差演算装置、及びそれを用いた降雨観測システム並びに比偏波間位相差演算方法」(前坂 2015) である。これらの特許のうちいくつかは国土交通省の XRAIN や民間気象会社

の X-バンド偏波レーダーで利用されている (Maesaka *et al.* 2011)。特許以外では、偏波間位相差情報を利用したレーダーパラメータの降雨減衰補正 (Kim *et al.* 2010) や複数レーダーの偏波レーダーパラメータの合成 (Kim and Maki 2012)、山岳地形によるレーダービームの部分遮蔽の補正 (Shakti *et al.* 2013; Shakti and Maki 2014) 等が開発された。

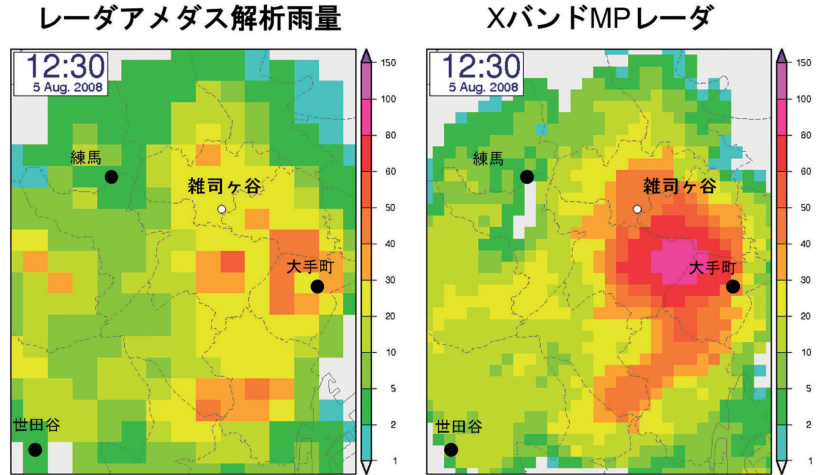
上記の手法研究の他に、X-NET は積乱雲の発達に関する新しい気象学的知見をもたらした。Kim *et al.* (2012) は、積乱雲による局地的な大雨の発生時には上空で“降水コア”が形成されていることを明らかにした。降水コアの検出はいわゆるゲリラ豪雨の早期予測のキーワードになっている。例えば、Shusse *et al.* (2015) は、豪雨事例について、降水コアの検出アルゴリズムの開発や個々の降水コアの振る舞いについて明らかにした。また、Hirano and Maki (2010) は、降水コアそのものではないが、上空の降水コアの情報が必然的に含まれる鉛直積算雨水量の時間変化を利用した降雨のナウキャスト手法を提案した。

X-NET が社会にもたらした効果の一つは、前述したように、国土交通省の XRAIN と名付けられた現

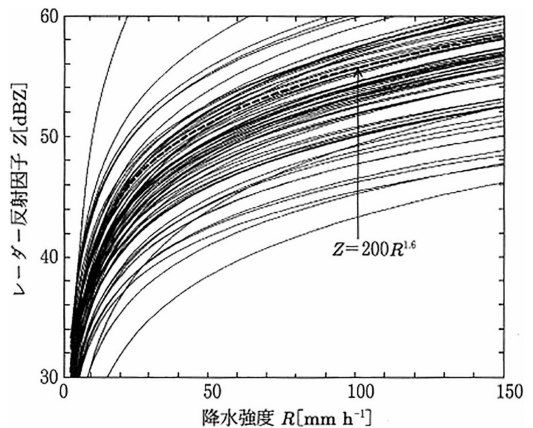
業用X-バンド偏波レーダーネットワーク（例えば、真木 2009）であろう。そのきっかけの一つに、2008年に東京都豊島区雑司ヶ谷で発生した水難事故がある。この事故は、局地的な大雨（ゲリラ豪雨）により下水道の水位が急上し、中で工事をしていた作業員5名が亡くなった事故である。この局地的豪雨を防災科学技術研究所のX-バンド偏波レーダーが捉えていた（第3図）。Kato and Maki (2009) は、初期解析の結果から、偏波レーダーの雨量情報は地上

雨量計の観測値と良く合っていることを示した。この結果を踏まえて、国土交通省はX-バンド偏波レーダーの導入をゲリラ豪雨対策として検討し決定した。真木らは、国土交通省からの委託を受け、2009年に「高精度レーダー処理システムの構築」を、2009年から2012年に「MPレーダーネットワークによる雨と風の3次元分布推定手法の開発」を行った（真木ほか2013）。前者の研究では、X-NETのデータ処理システムを参考にしてXRAINのデータ処理システムが構築された。

X-NETのもう一つの効果は、大型の研究プロジェクト「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」（2010年～2014年）（Maki *et al.* 2012b）の立ち上げに寄与した点であろう。このプロジェクトは、当時、気象研究所の石原正仁博士によりTOMACS（Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities）と名付けられた。プロジェクトの目的は、首都圏をフィールドとして、①都市における極端気象のメカニズム解明、②極端気象の予測技術の向上、③社会実験を通じた高解像度気象データの社会実装を図ることであった。これにより、X-NETを利用した局地的大雨のノウハウや都市型風水害予測の実用化に向けた研究が進められ、自治体や民間会社との実証実験が加速された。次章ではX-NETの降雨量推定アルゴリズムの詳細と実証実験について述べる。



第3図 2008年8月5日雑司ヶ谷（東京都豊島区）で発生した局地的豪雨の1時間積算雨量分布の観測例。X-バンドMPレーダーと気象庁レーダアメダスとの比較。カラースケールの単位はmm。



第4図 69通りのZ-R関係式（Doviak and Zrnica (1984) より）。図中の $Z=200R^{1.6}$ は層状性の雨の場合に良く利用される関係式である。

3. 降雨量推定方法の開発

3.1 従来の方法：Z-R関係式

降水量の定量的推定はレーダー気象学やレーダー水文学の重要なテーマの一つである。気象レーダーの登場から今日までの約70年余りの期間、降水量の定量的評価に関して多くの研究がなされてきた。その中で最も大きな研究成果の一つはZ-R関係式による降雨量推定式の確立である。Z-R関係式は、レーダー反射因子Zから降雨強度Rを推定する関係式で、 $Z=$

αR^β で表される。ここで、係数 α とべき指数 β は、反射因子と地上雨量の散布図の回帰曲線から推定される。Z-R 関係式はその簡便さから、半世紀以上に渡って国内外の現業レーダーに利用されてきた。また、Z-R 関係式は、膨大な数の研究からその特性が明らかにされている。最も大きな特性の一つは、第4図に示したように、様々な要因により一義的な Z-R 関係式が存在しないことである。第4図は、Battan (1973) が過去の文献から調査した69の Z-R 関係式を Doviak and Zrnicek (1984) が図化したもので、文献毎に異なる Z-R 関係式が提案されていることがわかる。Z-R 関係式の多様性は R の推定誤差に直結する。例えば、どの Z-R 関係式を用いるかによって、極端な場合、R の推定誤差は1000%になる場合がある。このような Z-R 関係式の多様性の主な要因を Browning (1981) を参考に第4表にまとめた。以下、それぞれの要因について簡単に説明する。

Z-R 関係式の多様性の第一の要因として Z と R の測定場所の違いが挙げられる。Z-R 関係式は Z と R を比較することにより求められるが、R が地上で測定されるのに対して Z は上空で測定されるため、Z-R 関係式に誤差が生じる。例えば、雲頂や雲底付近の観測では、小さな雨滴の蒸発のために Z の過小評価を引き起こす。山地地形による降雨の増幅、融解層の存在、電波の異常伝播などは Z の過大評価をもたらす。これらの要因は、Z と地上で測定された R との対応を悪化させる。これらは全ての気象レーダー観測が被る要因であり、対策としては、できるだけ地

表近くをレーダーで観測することしかない。

第二の要因は Z の測定誤差である。Z は受信信号の振幅情報から求められるため、様々な測定誤差の影響を受ける。例えば、受信機のキャリブレーション誤差は直接、Z の過小・過大評価につながる。降雨減衰や山地によるビームの部分遮蔽は Z の過小評価につながる。霧雨の観測では小さな雨滴を検出出来ないために Z を過小評価する。また、レーダーサンプリングボリューム内に雹や融解層があると Z は過大評価される。

上述した Z の測定誤差の中で、X-バンドの波長で特に問題となるのは降雨減衰の影響であろう。X-バンドの気象レーダーは高い時間分解能を持つことから、1950年代の開発当初は水文学の分野で大きな期待が寄せられたが、降雨減衰の影響を大きく受けること、さらにその補正方法が難しいことがわかってくるとその期待は急速に薄れていった。そして、X-バンドは定量的な降雨量観測には不向きな波長であるということが常識となった。

第4表に挙げた要因が無視できる場合でも、雨滴の粒径分布の変動により Z-R 関係式の係数とべき指数が変動する。これは、Z-R 関係式が本質的に持っている特性で、Z と R が粒径分布の変動に対して異なる反応を示すことに起因する。単一粒子モデルで考えると、Z は粒径の6.38乗に比例するのに対して、R は3.67乗に比例する (Maki *et al.* 2005)。すなわち、粒径分布の変動により R がわずかに変化しても Z は大きく変化することになる。雨滴粒径分布の変動の影響を抑えるために、降雨のタイプ別に Z-R 関係式を求める方法も提案されている (例えば、Fujiwara 1965)。しかし、同じタイプの降水でも雨滴粒径分布は場所や時間で変動するため、R の推定精度の改善には限界がある。

それでは上に述べた誤差要因に対して X-バンド偏波レーダーはどうであろうか？ 結論から言うと、偏波パラメータを用いた推定式は、第4表に挙げた測定誤差のうち、キャリブレーション誤差、降雨減衰、ビームの部分遮蔽、雹の影響などの影響を受けにくい。また、特筆すべき点として、雨滴粒径分布の変動に大きく左右されないという特性を持つ。次節で、観測例によってこのことを示す。

3.2 偏波レーダーを用いた方法

偏波レーダーを用いた降雨量推定式では、レーダー反射因子 Z のほかに比偏波間位相差 K_{DP} や反射因子

第4表 Z-R 関係式の多様性の要因。

主な要因	Z-R 関係式への影響
Z と R の測定場所の違い	Z を過小評価：落下途中の雨滴の蒸発 雲頂付近
	Z を過大評価：山地地形による降雨増幅 融解層の存在、電波の異常伝播
Z の測定誤差	Z を過小・過大評価：キャリブレーション誤差
	Z を過小評価：降雨減衰、ビームの部分遮蔽、霧雨 Z を過大評価：雹の混在、融解層
雨滴粒径分布の時空間変動	Z への影響：直径の6.38乗 (単一粒子モデル)
	R への影響：直径の3.67乗 (単一粒子モデル)

差 Z_{DR} などの偏波パラメータが用いられる。前述の $Z-R$ 関係式も含めて偏波パラメータを用いた降雨強度推定式を下記に示す (Maki *et al.* 2005)。なお、水平 (垂直) 偏波のレーダー反射因子であることを示すために Z_{HH} (Z_{VV}) または Z_H (Z_V) と下付の添え字を付けた記号を用いる場合がある (本報の付録の脚注[†]を参照)。

$$R(Z_H) = 9.16 \times 10^{-3} Z_H^{0.770} \quad (1)$$

$$R(K_{DP}) = 18.9 K_{DP}^{0.856} \quad (2)$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = 25.2 K_{DP}^{0.916} 10^{-0.114 Z_{DR}} \quad (3)$$

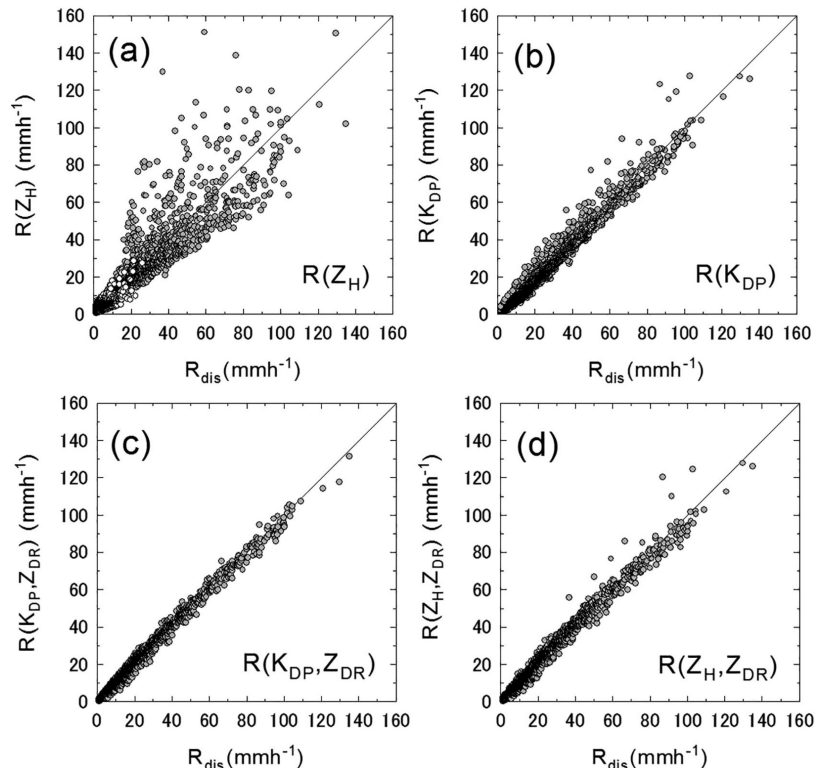
$$R(Z_H, Z_{DR}) = 8.99 \times 10^{-3} Z_H^{0.927} 10^{-0.505 Z_{DR}} \quad (4)$$

関係式中の係数とべき指数は、ディストロメータで測定された1分平均の雨滴粒径分布データを用いた散乱計算から決定された値である。散乱の計算にはTマトリクス法 (Barber and Yeh 1975) を用いている。

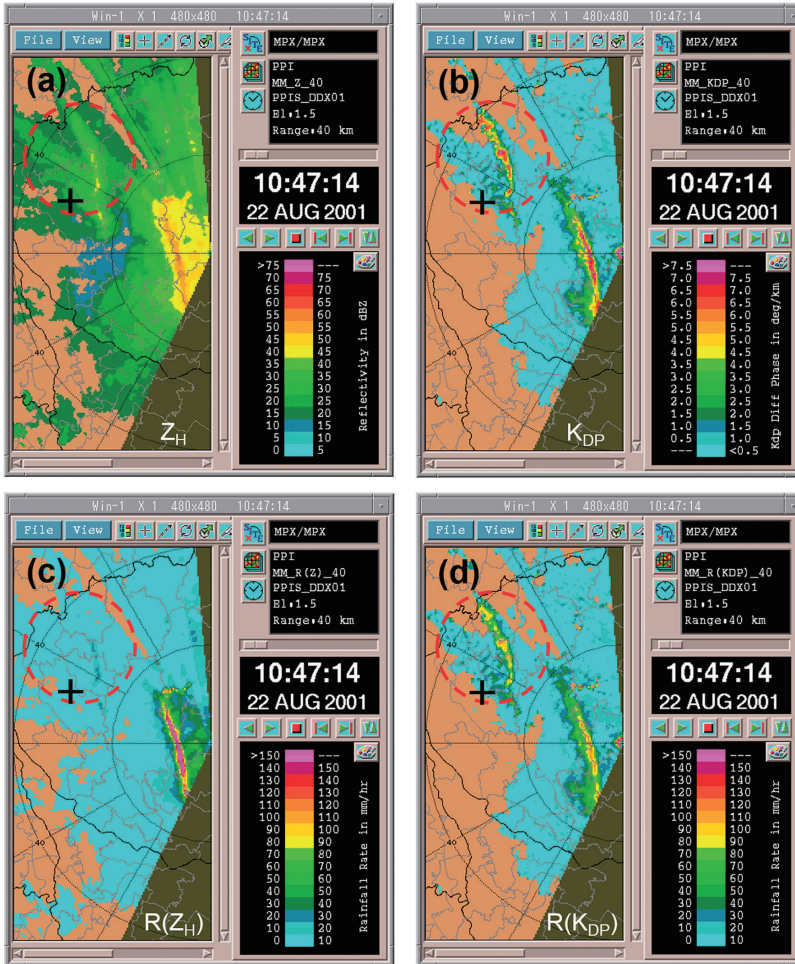
第5図に各推定式から求めた R と実際の観測値 R の散布図を示す。 R の推定値と実測値のばらつきが最も小さいのは $R(K_{DP}, Z_{DR})$ で、次いで $R(K_{DP})$ あるいは $R(Z_H, Z_{DR})$ である。 $R(Z_H)$ 、即ち $Z-R$ 関係式が最もばらつきが大きい。第5図は、雨滴粒径分布の変動のみを考慮した散乱計算の結果であることに注意して欲しい。前述したように、 $R(Z_H)$ のばらつきが大きいのは R が粒径の3.67乗に比例するのにに対して、 Z_H は粒径の6.38乗に比例するためである。これに対して、 $R(Z_H)$ と同じべき乗式で表される $R(K_{DP})$ のばらつきが小さいのは、 K_{DP} が粒径の4.78乗に比例するパラメータであることに起因する (Maki *et al.* 2005)。

一方、 Z_{DR} を含んだ降雨強度推定式のばらつきが小さいのは、 Z_{DR} が雨滴粒径分布情報のパラメータである体積メジアン直径と直接的な関係があるためである。このように理論的には Z_{DR} を考慮した降雨強度推定式が優れているが、実用的な問題点として、 Z_{DR} は降雨減衰の影響やハードウェアの影響を受けるパラメータであることを忘れてはいけない。Seliga and Bringi (1978) によれば、精度良い降雨量推定のためには Z_H の測定誤差が ± 1 dB 以下、 Z_{DR} の測定誤差は ± 0.2 dB 以下でなければならない。実用的には、この要求を実現することはX-バンドの場合かなり難しい。これに対して、 K_{DP} の測定精度は $\pm 0.3^{\circ} \text{km}^{-1}$ (式 (2) によれば、降雨強度 6.7 mmh^{-1} に相当) は可能であり (Park *et al.* 2005b)、 $R(K_{DP})$ はより実用的な降雨強度推定式であると言える。

次に、第4表に示した誤差要因の影響について観測例を挙げる。まず、降雨減衰の影響について、第6図に Z_H と K_{DP} の PPI 観測値を示す (PPI は Plan Posi-



第5図 偏波パラメータを用いた降雨強度推定値と実測値の比較 (Maki *et al.* (2005) より)。



第6図 降雨強度推定式に及ぼす降雨減衰の影響。(a)レーダー反射因子 (Z_H), (b)比偏波間位相差 (K_{DP}), (c) Z - R 関係式から求めた降雨強度, (d) K_{DP} - R 関係式から求めた降雨強度。2001年8月22日, 茨城県, 防災科学技術研究所 X-バンド MP レーダー観測による。図中の同心円はそれぞれレーダーからの距離で20 km, 40 kmである。

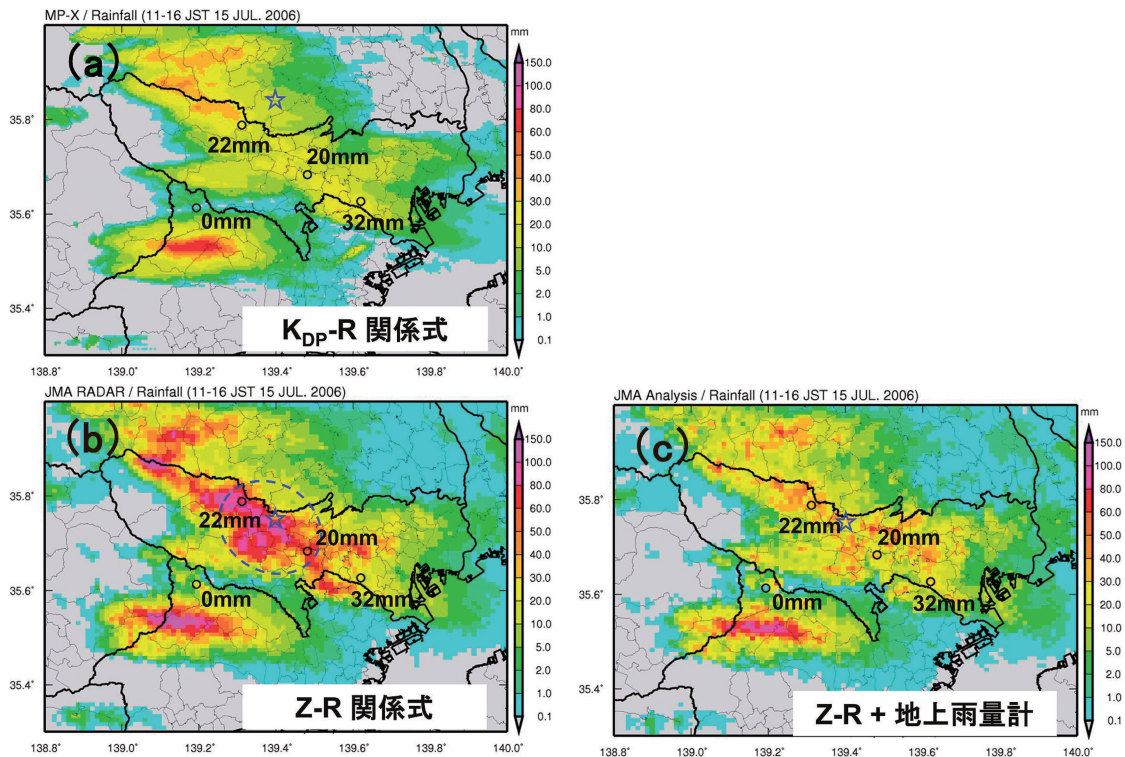
tion Indicator の略で, アンテナの仰角を固定して方位角を回転させることで降水の平面的な分布を観測する方法である)。防災科学技術研究所の X-バンド偏波レーダーによる観測例で, レーダーの西 8 km 付近に線状の強い降水エコーが観測されている。着目すべき点は, 線状エコーの北西方向 30 km 付近に別の降水エコー (赤い破線の円内) が認められることである。 K_{DP} の値はレーダー近くのエコーとほぼ同程度の強さであるのに対して, Z_H は 40 dBZ 程度の値になっている。これは式(1)の Z - R 関係式から降雨強度約 10 mmh^{-1} に相当する。一方, K_{DP} - R 関係式(2)からは

100 mmh^{-1} を超える降雨強度が推定される。この K_{DP} - R 関係式の推定値の妥当性はディストロメータ (図中のプラス点) で測定された降雨強度により確かめられており, K_{DP} は降雨減衰の影響を受けないパラメータであると結論付けられる。詳細は述べないが, このことは, K_{DP} を使った Z や Z_{DR} の降雨減衰補正が可能であることを示唆している (Park *et al.* 2005a, b)。X-バンドレーダーの場合, Z や Z_{DR} の降雨減衰の補正は必要不可欠であり, このことが可能になったことで, 偏波レーダーによる降水の微物理過程の研究, 例えば粒径分布 (Kim *et al.* 2010) や次章で述べる粒子判別などが可能になった。

次に, 降電の影響について観測例を紹介する。第7図は地上で降電が報告された2006年7月15日の降雨事例について, 防災科学技術研究所 X-バンド偏波レーダー雨量 (K_{DP} - R 関係式による雨量), 気象庁 C-バンドレーダー雨量 (Z - R

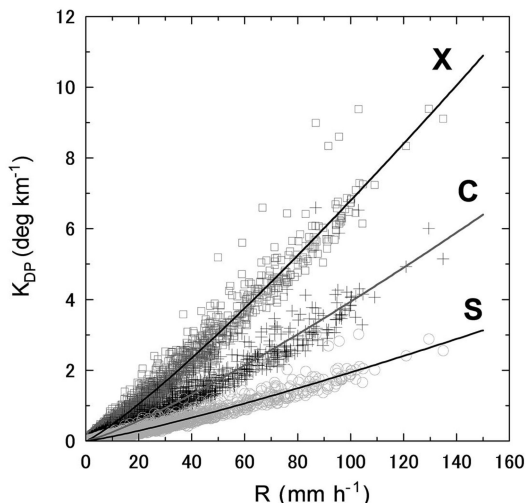
関係式による雨量), 気象庁レーダーアメダス解析雨量 (Z - R 関係式と地上雨量計による雨量) を比較した図である。C-バンドレーダー雨量とレーダーアメダス解析雨量を比較すると前者が過大評価されていることがわかる。これは降電粒子の表面が水膜で覆われ, 過大な Z_H が測定されたためである。一方, 偏波レーダー雨量はレーダーアメダス解析雨量に近い分布となっており, K_{DP} - R 関係式は降電の影響を受けないことを示している。

さらに, 例は示さないが K_{DP} は, Z が被る誤差要因である, ハードウェアのキャリブレーション誤差の



第7図 3時間積算雨量分布, 2006年7月15日, (a)X-バンドMPレーダー (K_{DP} - R 関係式による), (b)気象庁C-バンドレーダー (Z - R 関係式による), (c)レーダーアメダス解析雨量 (Z - R 関係式と地上雨量計による). 星印は降電が観測された地点.

影響や、山地地形等による送信ビームの一部遮蔽の影響などを受けにくいパラメータであることから、 K_{DP} - R 関係式は Z - R 関係式にとって代わる降雨量推定式になる。 K_{DP} - R 関係式の重要度は波長によって異なるが、次の三つの理由からX-バンドの波長での重要度が一番高くなっている。第一は、降雨量推定の鍵となる K_{DP} に対する感度がC-バンドやS-バンドの波長に比べて良い点である(第8図)。例えば、X-バンドはS-バンドに比べて約3.3倍、C-バンドに比べて1.6倍の感度がある。このことはS-バンドのレーダーでは大きな降雨強度でなければ K_{DP} - R 関係式を利用出来ないのに対してX-バンドのレーダーは比較的弱い雨でも適用できることを意味している。例えば、S-バンドのレーダーでは K_{DP} - R 関係式が利用出来る降雨強度は 50 mmh^{-1} (Sachidananda and Zrnich 1986), あるいは 70 mmh^{-1} (Chandrasekar *et al.* 1990) よりも強い雨である。これに対して、X-バンドでは 8 mmh^{-1} の強さの降雨に適用できる (Park *et al.* 2005b)。



第8図 K_{DP} - R 関係式の波長依存性. □はX-バンド, +はC-バンド, ○はS-バンド.

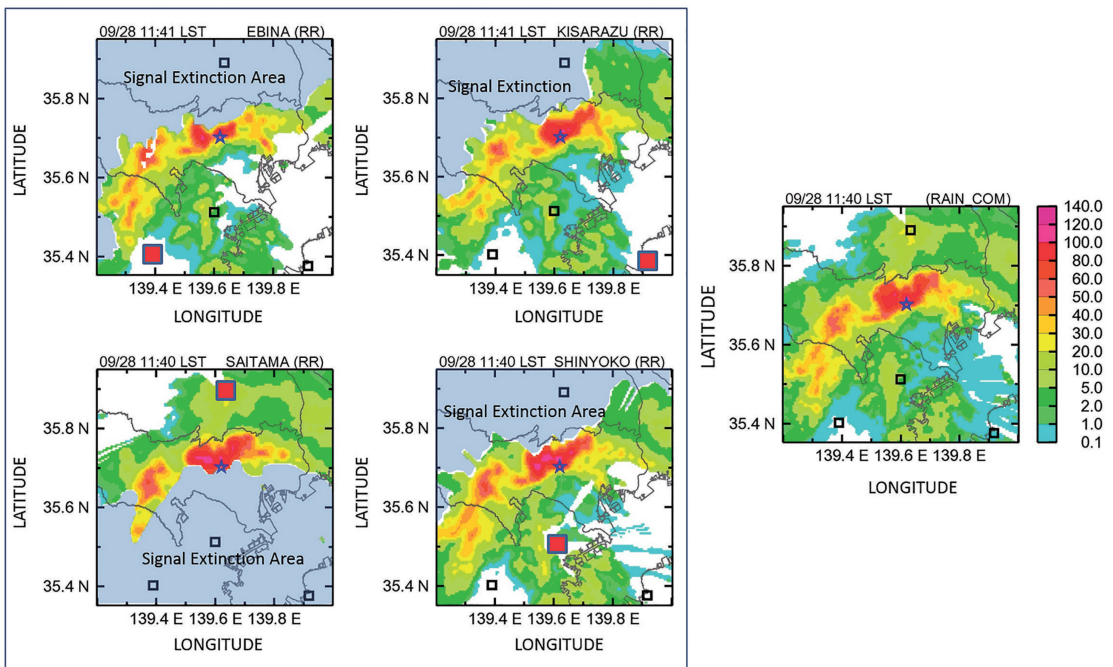
第二は比較的小さな直径のアンテナで高い空間分解能を得ることができる点である。例えば、一般に気象観測で要求される 1° のビーム幅を得るためには、S-バンドのレーダーでは開口直径7 m程度のパラボラアンテナが必要となるが、X-バンドのレーダーでは2 m程度で済む。

第三は、X-バンドのレーダーシステムは、C-バンドやS-バンドのシステムに比べて施設を小型化でき、設置がしやすいため、比較的安価に製造・設置できる点である。この特徴は、都市域の局地的な大雨の監視や大型レーダーでは観測できない山間部の雨量観測に有利である。第二、第三のX-バンドレーダーの特性は偏波レーダーに限らず在来型レーダーの場合にも言えることであった。

もちろん、偏波機能が実用化されたといっても、X-バンドの波長には本質的な欠点がある。第一は、ミー散乱による後方散乱位相差の発生（いわゆる δ 効果）がある。X-バンドの場合、この値は 10° を超えることもあり、 K_{DP} の推定を困難にする場合がある。第

二の問題点は降雨減衰による信号消散領域の発生である。信号消散領域とは降雨減衰のため受信電力が弱くなり信号を取り出せなくなる領域であり、X-バンド波長でしばしば発生する。第三は、信号消散領域の発生とも関係があるが、X-バンドレーダーは探知距離を長く取れない点である。例えば、S-バンドやC-バンドのレーダーの最大探知距離は200 km–300 km程度であるのに対して、X-バンドのレーダーは30 kmから60 km程度と大型レーダーの1/5程度である。

X-バンド偏波レーダーの実利用にあたっては、これらの欠点を克服する必要がある。第一の後方散乱位相差の問題については、フィルター処理 (Hubbert and Bringi 1995) や変分法を用いたアルゴリズム (Maesaka *et al.* 2012) が提案されている。第二の信号消散領域と第三の探知距離の問題は、複数台のレーダーネットワークを利用する方法 (真木 2009; Kim and Maki 2012) が提案されている。第9図に4台のX-バンド偏波レーダーの合成雨量の例を示す。あるレーダーの信号消散領域が他のレーダー情報により補



第9図 複数台のX-バンド偏波レーダー観測から得られた2010年9月28日の合成降雨強度分布の例(右図)。カラースケールは降雨強度 (mmh^{-1}) である。左図(4枚)はそれぞれ海老名、木更津、さいたま、新横浜に設置されたX-バンド偏波レーダーの降雨強度分布。強い降水エコーの後方の灰色の部分は信号消散領域を示す。■は降雨情報を求めたレーダーの位置、□はその他のレーダーの位置、☆はディストロメータの観測点を示す (Kim and Maki (2012) より)。

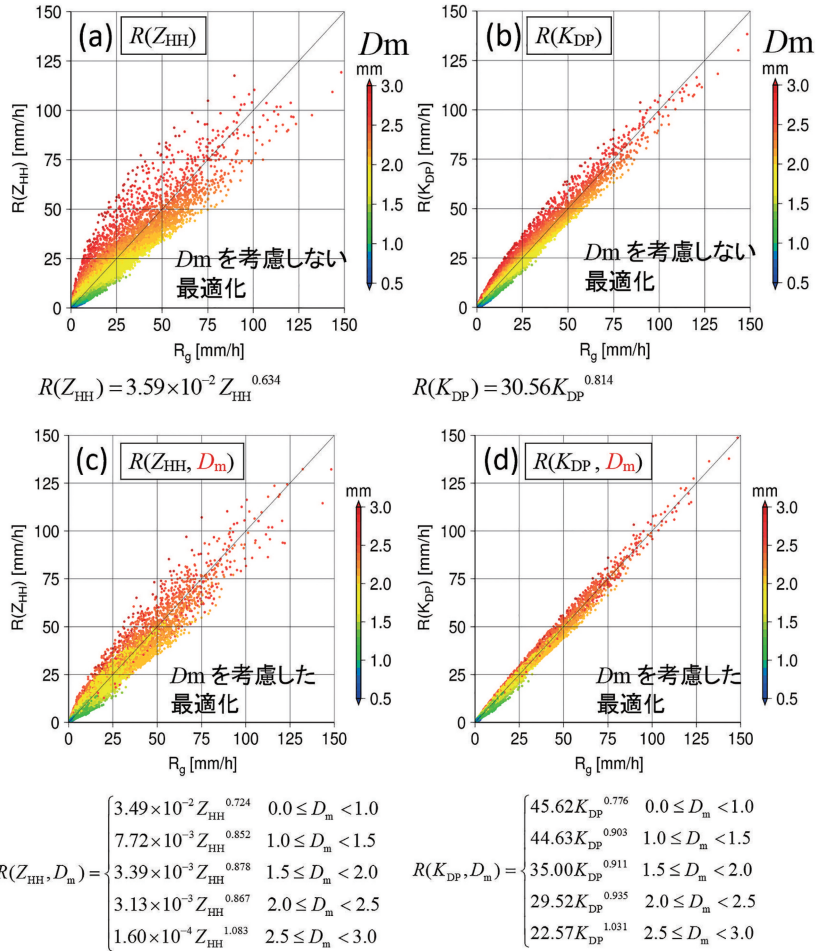
われ、抜けない雨量情報が求まっていることがわかる。第三の探知距離を拡大する方法としてX-バンド偏波レーダーの観測情報にC-バンド在来型レーダーの観測情報を相補的に利用する方法(加藤ほか 2009; Kato *et al.* 2012; Maki *et al.* 2012a)が提案されている。C-バンド偏波レーダーを相補的に利用する方法は国土交通省拡大XRAINでも検討され、試験運用を経て2017年には実運用が始まった。

3.3 C-バンド偏波レーダー

X-バンド偏波レーダーの実用化と並行してC-バンド偏波レーダーによる降水研究が進められた。前述したように情報通信研究機構はC-バンド偏波レーダーCOBRAを沖縄に導入し、それとあわせて地上では、京都大学防災研究所と情報通信研究機構が2次元ビデオディストロメータ(2DVD)観測を実施し、C-バンド偏波レーダーの降雨強度推定アルゴリズム

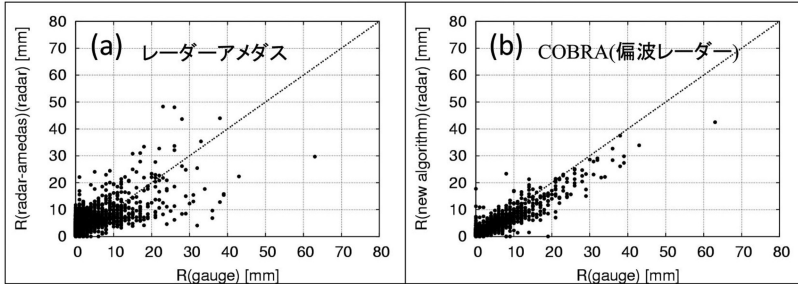
が構築された(中北ほか 2007, 2008)。具体的には、2DVDによって観測された雨滴の粒径分布を用いて、降雨強度 R 、質量で重みづけられた平均粒径 D_m 、レーダー反射因子 Z_{HH} 、反射因子差 Z_{DR} 、位相差 K_{DP} を推定し、 R と D_m 、 Z_{HH} 、 Z_{DR} 、 K_{DP} の関係を明らかにし、最終的なアルゴリズムが構築された。

第10図は、2DVDにより観測された雨滴粒径分布から推定した D_m で場合分けした、地上雨量計による降雨強度 R_g とレーダー反射因子 Z_{HH} 及び比偏波間位相差 K_{DP} の関係である。上段は D_m で場合分けしない関係を示す。上段に比べて下段では、 R_g と Z_{HH} の対応関係ですら、ばらつきがかなり小さい。一方、この下

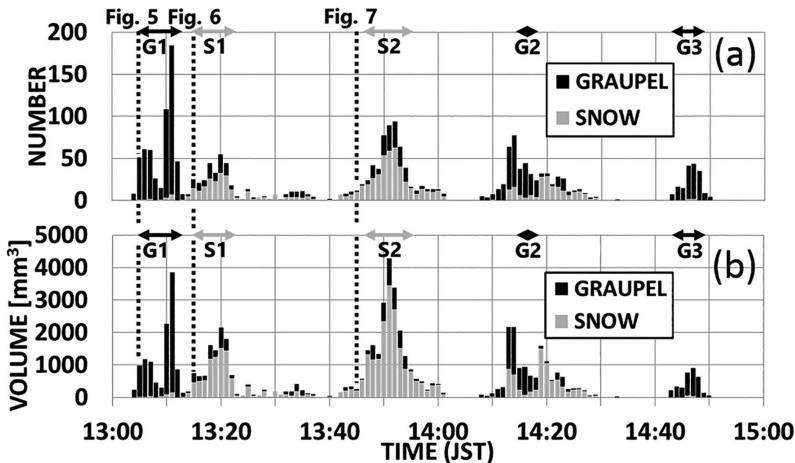


第10図 (a)地上雨量計による降雨強度 R_g と R - Z 関係式による推定降雨強度 $R(Z_{HH})$ との比較, (b) R_g と R - K_{DP} 関係式による推定降雨強度 $R(K_{DP})$ との比較. (c) と (d) はそれぞれ質量重みづけ平均直径 D_m で最適化された R - Z 関係式および R - K_{DP} 関係式を用いた場合の比較.

段のアルゴリズムをCOBRA観測レーダー情報に適用したのが第11図である。 D_m の推定にはレーダー観測 Z_{HH} と Z_{DR} を利用している。若干のバイアスは残るが、レーダーアメダス降雨強度に比べて本アルゴリズムを用いた推定降雨強度は、地上時間雨量強度の推定を改善していることがわかる。このように、X-バンドだけでなく、C-バンド偏波レーダーにおいても K_{DP} を利用することで降雨強度の推定精度が向上することが明らかとなった。



第11図 レーダー推定降雨強度と地上降雨量の関係。(a)レーダーアメダス解析雨量、(b)開発したアルゴリズムによる推定値。地上雨量としては、我地、辺野喜ダム、フェンチチ、普久川ダム、安波ダム、与那覇岳、排持山、新川ダム、高江、福地ダム、上漢那ダムの内閣府15ヶ所の転倒降雨量計による観測値を用いた。



第12図 2009年1月15日13時～15時の、金沢大学に設置したビデオ画像システムで観測した霰(黒い棒グラフ)と雪片(灰色の棒グラフ)の(a)1分間積算粒子数と(b)等価体積。矢印G1, G2, G3は霰の卓越時間帯を、矢印S1, S2, S3は雪片の卓越時間帯を示す。

4. 降水粒子判別法の開発

4.1 X-バンド偏波レーダー

名古屋大学地球水循環研究センター(現 宇宙地球環境研究所)の偏波レーダーは、XRAINのデータを利用することを想定して、中部地区のXRAINの試験観測開始に合わせて、RHI観測(RHIはRange Height Indicatorの略で、ある方位角の鉛直断面を観測する方法)を行い、2010年7月の可見豪雨の構造の解明などを行った(Oue *et al.* 2014)。また、北陸の降雪観測や沖縄での雲粒子ビデオゾンデとの比較観測のデータを使った検証により、X-バンド偏波レーダーを用いた固体降水粒子の判別法を確立した

(Kouketsu *et al.* 2015)。

この方法はLiu and Chandrasekar (2000)やLim *et al.* (2005)によってS-バンド偏波レーダー用に開発されたメンバーシップ関数を用いたファジーロジック法をベースにX-バンド偏波レーダー用に調整し、雪片、霰、氷晶等の粒子判別を自動的に行うものである。

例えば、霰と雪片の判別では、石川県金沢市にある金沢大学キャンパス内に設置された地上ビデオカメラの画像解析で降雪粒子を自動判別し、その地点に降る可能性のある上空250 mの固体降水粒子について偏波レーダーを用いた自動判別結果と比べた。第12図に地上ビデオカメラ観測点の霰と雪片の観測粒子数と等価体積の時間変化を示す。G1で示される霰が卓越する時間帯について、X-バンド偏波レーダーのレーダー反射因子、反射因子差、比偏波間位相差(偏波間位相差変化率)、偏波間相関係数の値と粒子判別結果の分布を見ると(第13図)、地上観測点から2.5 km以内の霰が地上観測点に到達する可能性のある範囲(扇形で示す)に霰が判別されている(図中の△印)。同様のことが雪片についても確かめられ、X-バンド偏波レーダーによる固体降水粒子タイプの判別と地上観測が非常に良く対応することが確認された。雪片と氷晶の判別については、沖縄における雲粒子ゾンデ観測とX-バンド偏波レーダーによる固体降水粒子タイプの判別との比較によってX-バンド偏波レーダーによる固体降水粒子タイプの判別法の有効性が確認された。

この間、名古屋大学の偏波レーダーを用いて、2011年2月に北海道陸別町における雪雲観測が行われた。

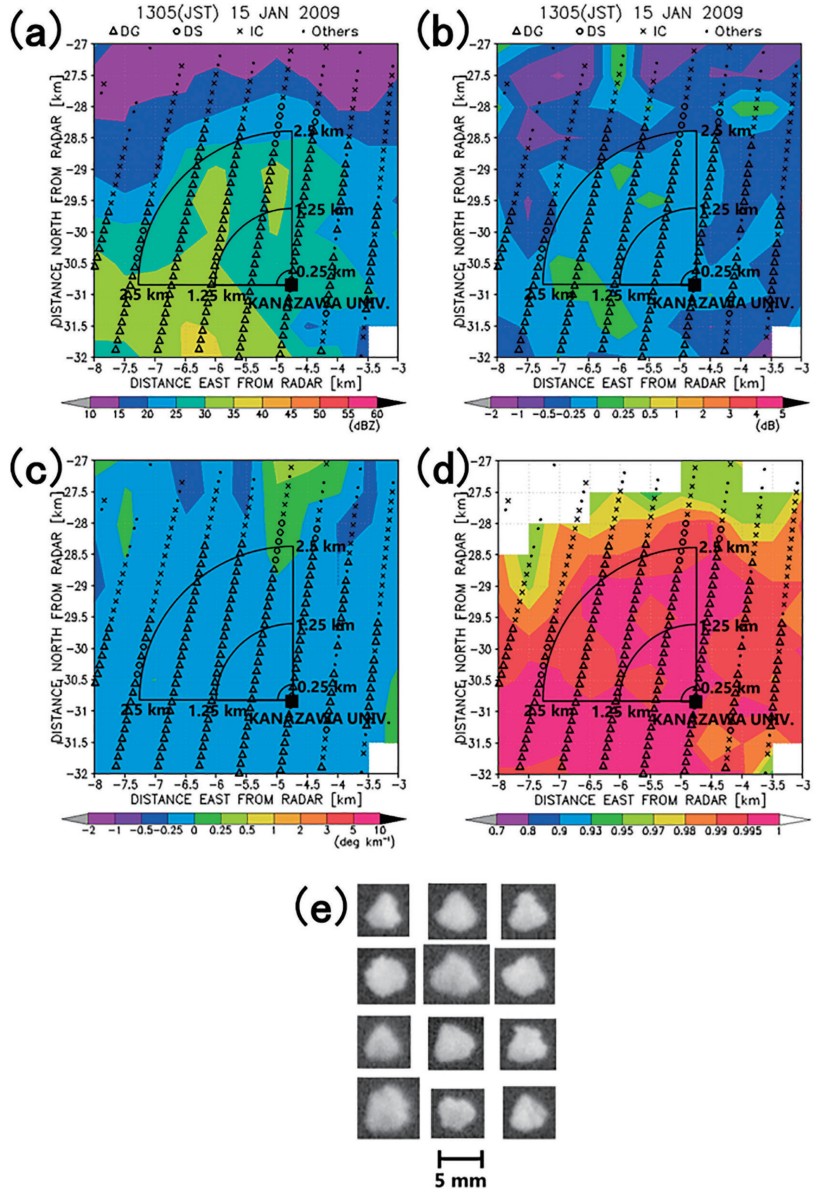
この間、名古屋大学の偏波レーダーを用いて、2011年2月に北海道陸別町における雪雲観測が行われた。

また、2013年6月にはパラオ共和国における台風の種となる強い渦を持つ降水系の構造と形成過程に関する雲粒子ビデオゾンデとの比較観測が行われ、積乱雲内の固体降水粒子の分布特性が明らかにされた。

4.2 C-バンド偏波レーダー

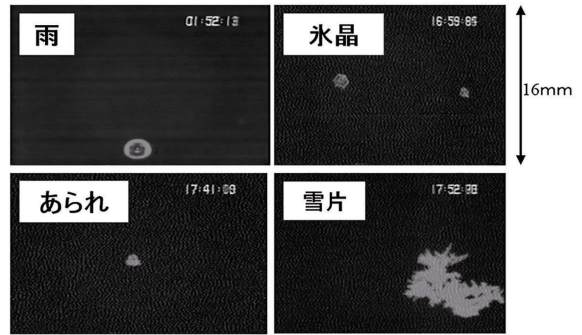
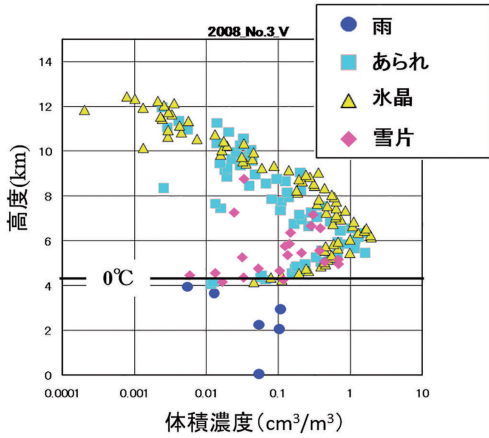
一方、情報通信研究機構が沖縄に導入したC-バンド偏波レーダーCOBRAを用いて、降水粒子の混在状況の識別アルゴリズムが開発された(中北ほか2009)。この混在状態のアルゴリズム開発は、2007年に京都大学、名古屋大学、山口大学、神戸大学、山梨大学、情報通信研究機構が沖縄で行った雲粒子ビデオゾンデとC-バンド偏波レーダーCOBRAとの同期観測(中北ほか2009; Oue *et al.* 2015)により実現している。

雲粒子ビデオゾンデは、センサーをつけたビデオカメラを気球で昇降し、雲内の降水粒子を直接観測する装置である(Takahashi 2006; Suzuki *et al.* 2006)。第14図に観測例を示す(中北ほか2009)。層状性降水域の観測例で、氷晶、あられ、雪片に至るプロセスが観測されている。一方、降水粒子の混在状態の推定は、基本的には沖縄で実施した同期観測時のビデオ観測情報から Z_{HH} 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、偏波間相関係数 ρ_{HV} ごとに氷晶、あられ、雪片、雨滴に対するファジー・メンバーシップ関数を作成し、最大の評価値を持つものを推定タイプとするともに、評価値に近いタイプが存在

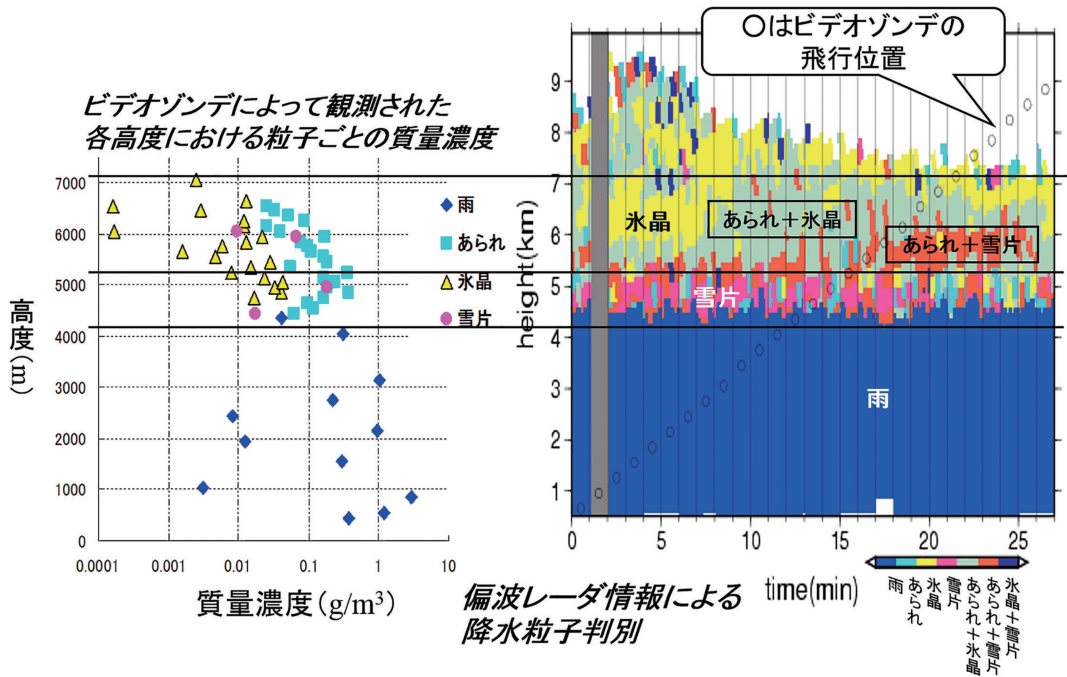


第13図 2009年1月15日13時5分の、最下層(仰角 0.68°)のPPIにおける解像度 0.5 km 四方で示した粒子判別結果(Δ 印は霰を示す)と(a) Z_H 、(b) Z_{DR} 、(c) K_{DP} 、(d) ρ_{HV} の分布。(e)は金沢大学に設置したビデオ画像システム((a), (b), (c), (d)の黒四角で設置位置を表示)で観測した期間G1の霰の画像。

する場合は混在するものとしている。第15図にビデオゾンデ観測で得られた高度ごとの降水粒子タイプと質量濃度、C-バンド偏波レーダーCOBRAを用いて推定した降水粒子の混在状況を示す。混在状況が比較的良く再現されている。開発されたアルゴリズムは、次



第14図 沖縄でのビデオゾンデ観測で得られた高度ごとの降水粒子タイプと体積濃度。右の写真はビデオゾンデで撮影された各降水粒子。



第15図 ビデオゾンデ観測で得られた高度ごとの降水粒子タイプと質量濃度とC-バンド偏波レーダーCOBRAを用いて推定した降水粒子の混在状況。

章で述べるメソ大気モデルによる降雨予測研究に利用されている。

5. X-バンド偏波レーダーの現業観測に向けた取り組み

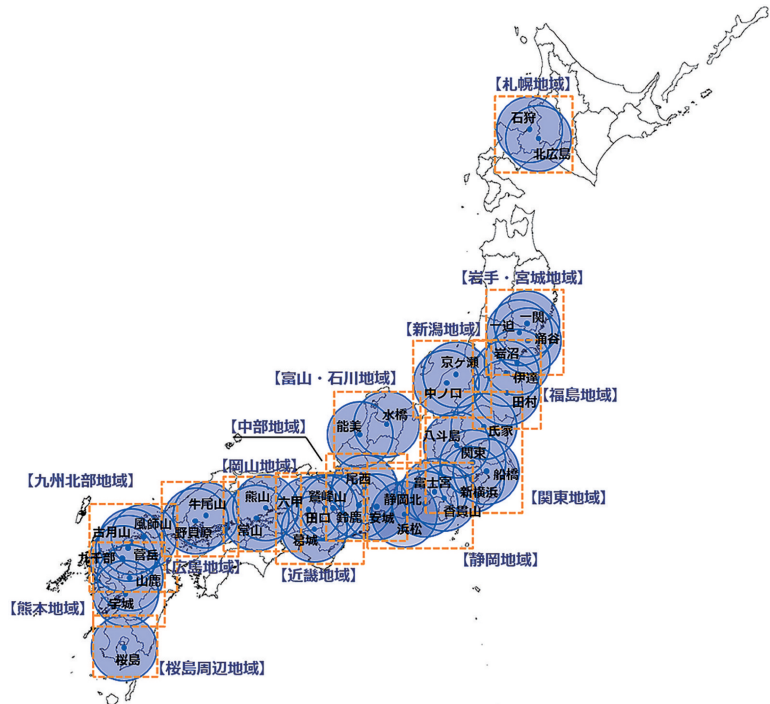
5.1 国土交通省による XRAIN の構築

さて、これまで述べてきたようなフル偏波機能を用いた場合の降雨強度推定精度の飛躍的な向上、都市域

での局地豪雨による鉄砲水災害の顕著化などにより、国土交通省は X-バンド偏波レーダーを政令指定都市に順次導入することを2008年に決断し、まず、2010年には京阪神域に4基、名古屋域に3基、首都圏に2基の合計9基を導入した。そのために、2008年12月には国土交通省により「河川管理におけるレーダー活用検討会」とその下に「X-バンドレーダー分科会」が設けられ、どのようなスペックでどこに X-バンド偏波レーダーを配置するかを検討が開始された。また、並行して種々の試験研究が実施された。筆者らはこの両方に参加した。

分科会では、名古屋大学で研究が進められていた固体素子発信器を2010年度から現業用に導入するかどうかの議論がなされ、結果、近畿にまず一台を導入することからスタートするとともに次年度以降は固体素子発信器が標準となった。また、学・官・民からなる試験利用のコンソーシアムが設立され、試験現業観測による準リアルタイム情報がすべてのコンソーシアムメンバーに配信された。このことは画期的な試みであり、利用研究の発展に大きく貢献した。

ネットワークの設計思想、アルゴリズムとともに基本的には防災科学技術研究所が進めていた前述の X-NET のものが採用された。X-バンド偏波レーダーネットワークにより高い観測空間分解能 (250 m) で高精度な降雨量観測が実現した。更に、 K_{DP} 観測機能と密なネットワークにより X-バンド偏波レーダーの降雨減衰問題が解決された。また、変化の激しいゲリラ豪雨を早くしっかりと捉えるために、低仰角については1分間隔という高頻度観測と約1分という情報伝達時間が実現した。更に5分間隔の3次元観測の標準化が行われた。従来の国土交通省の降雨レーダー観測は低仰角に限られていたので、5分間隔の3次元観測の標準化は国土交通省としては画期的なことである。



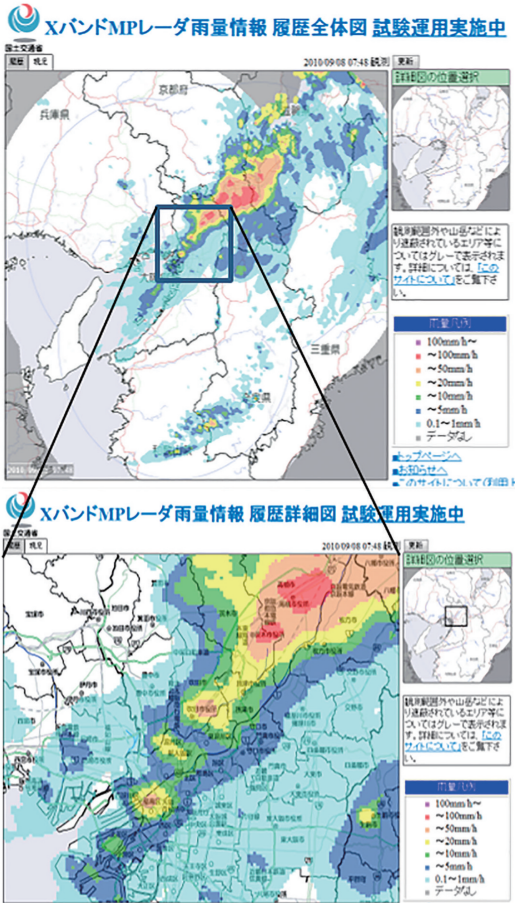
第16図 国土交通省の XRAIN ネットワークを構成する39基の X-バンド偏波レーダー。

さて、数年間の試験運用を経て、第16図に示すように現在では39基による XRAIN と名付けられたネットワークが形成され、ウェブを通してリアルタイムの降雨情報が配信されている。

第17図は、2010年7月に XRAIN の試験運用が開始され画像が一般に公開され始めた直後の豪雨事例である。拡大した下段の画像では、一つ一つの積乱雲に伴う雨域が捉えられていることがわかる。このウェブ情報を加工した複数のスマートフォンアプリも作成され、危機管理をはじめ日常生活の「雨宿りした方が良いかどうか」の判断にも利用されている。また、最新のカーナビゲーションでは降雨強度 50 mmh^{-1} 以上の領域が表示されるようにまでなっている (東ほか 2016)。さらには、3次元観測による上空のファーストエコーや過度に関する情報を利用したゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測手法が開発され (中北ほか 2010, 2013, 2014; Nakakita *et al.* 2017), 2015年度には試験運用が行われた (片山ほか 2015)。

5.2 XRAIN を利用した降雨予測と水位予測

立体観測情報も含めたすべての情報はリアルタイムで気象庁にも配信され、2015年度からは気象庁の高解



第17図 XRAINによる近畿の降雨情報（試験運用開始直後のウェブ画像）。

像度降水ナウキャストにも利用されている。

また、配信されているXRAINによる標準プロダクトを用いた現業的な降雨予測手法とそれを用いた都市河川の出水量の予測手法が、2008年7月の梅雨明け後に河川公園で鉄砲水災害のあった神戸市都賀川流域を例に開発されている（Yoon and Nakakita 2013, 2015）。流域面積は約9 km²と小さいために、上流域での孤立積乱雲による豪雨だけでも、降雨直後に河川公園に鉄砲水がもたらされることが示された。

第18図は、都賀川流域の出水量の予測例を示したものである。上段は予測10分雨量の空間分布例とそのときの出水状況で、ともに2012年7月21日の例である。下段は1時間先までの水位予測例で、グラフの横軸は流域平均の1時間先までの10~60分間継続平均雨量、縦軸は直前の10分平均降雨強度である。これらの値は1

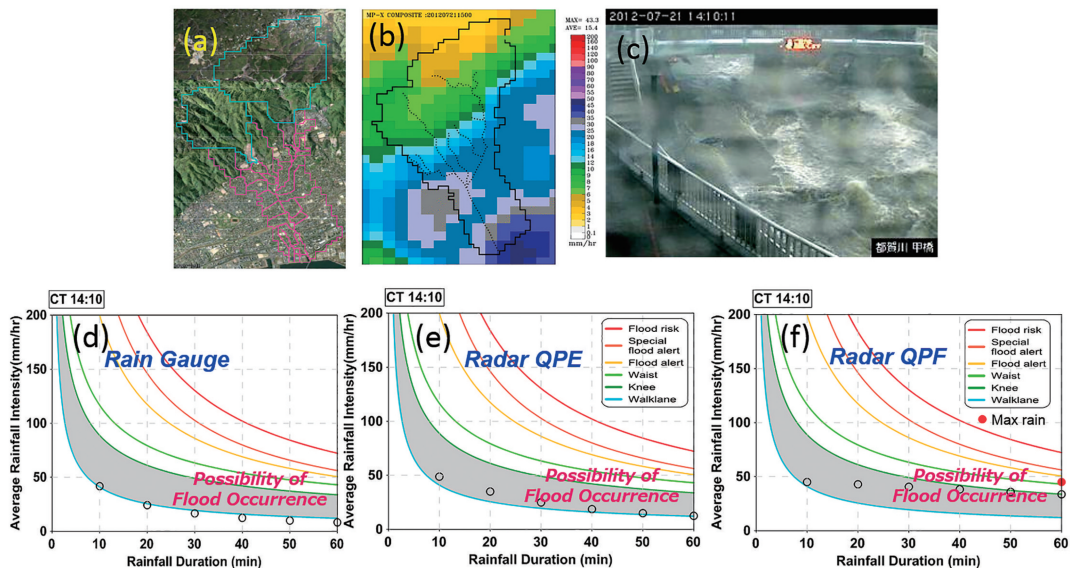
時間先までの降雨予測情報から算出され、各図に○印でプロットされている。一方、グラフ内の曲線は雨水流出モデルによるオフライン計算によりあらかじめ求めておいた等水位曲線で、右上に行くほど水位が高い。○印が各線の右上にプロットされるとそれらの線が表す水位より出水水位が高くなることを意味する。ちなみに、図中青い曲線は遊歩道の高さ（walk lane）、その直ぐ右上の線は遊歩道を歩く人の膝の高さに相当する水位である。

以下、予測結果を説明する。下段左図と中図は地上雨量計（RAIN GAUGE）ならびにXRAIN情報（QPE）から推定した流域10分平均雨量の最新値が今後60分続くとした場合の予測である。右図は降雨予測（QPF）による60分先までの10分雨量予測時系列を用いた予測水位である。降雨予測には雨域の動きを位置の1次関数で表現して予測する移流モデル（椎葉ほか1984）を用いている。地上雨量計を用いた持続性予測の場合は遊歩道の高さを超える水位は予測されていない。XRAIN情報を用いた持続性予測の場合はかろうじて遊歩道の高さを超える数を予測している。一方、XRAIN情報を用いた移流モデルによる予測では膝より高い水位となること、すなわち遊歩道にいる人が極めて危険な状況になることを予測している。これはほんの一例であるが、このように降雨強度を正確に高い時間・空間分解能で提供するXRAINによる情報は、中・小河川の出水量や氾濫水位予測に今後ますます利用されることが期待されている。

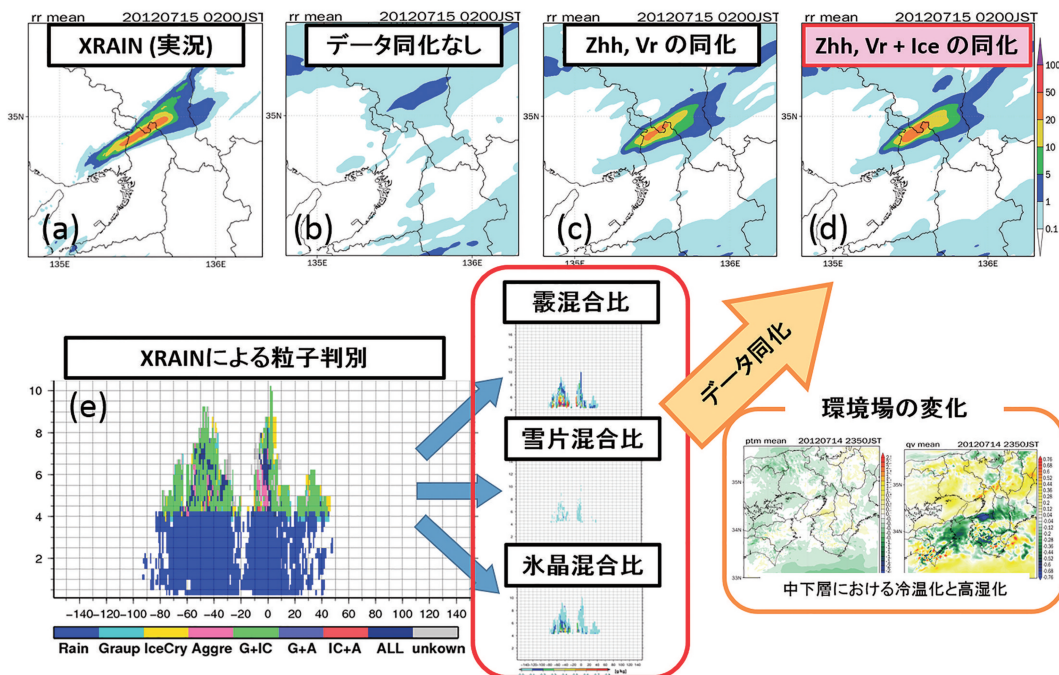
5.3 XRAIN 偏波情報の大気モデルによる同化（積算降水量予測の提案）

2012年8月宇治豪雨、2014年8月広島豪雨のような線状メソ対流系による降雨現象は長時間にわたり一定の場所に強雨をもたらし、河川災害、土砂災害を引き起こす。現象が数時間続くこれらの事例においては数値予報モデルを用いた降水量予測が重要であり、特に積算降水量を高精度に予測することは防災の観点から極めて重要である。モデルを用いたメソ対流系の短時間降水予測においては、最適な初期値をモデルに与えることが重要であり、観測値のデータ同化が有効である。その際、高い時間・空間分解能を持つ気象レーダーのデータ同化は短時間降水予測に期待されており、ドップラー風速やレーダー反射因子の同化研究が行われてきた。

さて、これまで述べてきたようにレーダーの偏波化によって降水量推定精度が格段に向上しXRAINが



第18図 都賀川の出水予測例。(a)出水予測システムの流域分割,(b)XRAINによる降雨分布,(c)出水の様子,(d)雨量計を用いた水位予測結果,(e)XRAIN降雨情報を用いた水位予測結果,(f)レーダー予測分布型降雨量を用いた水位予測結果。○印が各線の右上にプロットされるとそれらの線が表す水位より出水水位が高くなることを意味する。



第19図 2012年京都亀岡豪雨(線状降水帯)に対する観測・予測積算降水量。(a)XRAIN雨量分布の実況値,(b)予測値(データ同化なし),(c)予測値(レーダー反射因子とドップラー速度を同化),(d)予測値(レーダー反射因子,ドップラー速度,氷粒子の判別結果を同化),(e)XRAIN偏波パラメータによる降水粒子判別結果。

導入されたが、大気モデルによる降水予測に偏波情報を十分に活用した研究は少ない。今後この分野の発展が期待されるが、その第一歩として、前述の偏波レーダーを用いた降水粒子タイプの混在状態を推定する手法(中北ほか 2009)をXRAINに適用し、さらに数値予報モデルで表現する霰・氷晶・雪片の各粒子の質量比を推定する手法が開発された。これによって固体粒子の各混合比を推定することが可能となり、その情報を数値モデルに同化する研究が着手された(Yamaguchi *et al.* 2015)。第19図は2012年7月京都・亀岡豪雨事例における同化実験結果である。本事例はレーダー情報を同化しない場合には極めて予測が困難な事例であったが、ドップラー風速とレーダー反射因子を同化することで線状降水システムの形状を予測することができた。さらに、XRAINから推定した固体粒子の混合比を同化することで、降雨強度に関する予測精度が向上した。これは融解層よりも上空において降水粒子を同化したことにより、気温・湿度の大気環境が変化したことも一因であることがわかった。

6. まとめ

XRAINの観測網の展開と並行して、最近10年間に大学・研究機関に研究観測用X-バンド偏波レーダーが普及した。これにより種々の場所で種々の現象の観測がなされるようになった。また、海外の気象機関でもX-バンド偏波レーダーが導入されている。例えば、米国のグラス・フォートワースでは都市型水害や竜巻の予測にX-バンド偏波レーダーネットワークが用いられている。また、フランスの気象局では、山地や盆地における降雪雪にX-バンド偏波レーダーが利用されている。

国土交通省のC-バンドレーダーの偏波化が進められており、X-バンド偏波レーダーと組み合わせた観測網の展開が可能となってきている。既に2016年7月1日から拡大XRAINとして、国土交通省は北海道、青森県、鹿児島県の一部と沖縄県を除く地域を対象に、これまでのXRAINによる時間・空間分解能で、C-バンドレーダー観測網とX-バンド偏波レーダー観測網の組み合わせによる降雨強度情報提供が試験的に行われている。これに伴い、様々な利用手法やアプリが開発され、防災はもちろんして日々の生活にも有効利用される事になれば、それは筆者らの望外の喜びである。

謝辞

X-バンド偏波レーダーによる観測技術の開発には、防災科学技術研究所、名古屋大学、京都大学、X-NETメンバーである中央大学、日本気象協会、電力中央研究所、山梨大学等の大学や研究機関の研究者の多大な協力があつた。更に、本研究は国内のレーダー製造会社の技術者による新型の偏波レーダー開発の積極的な取り組みがあつてはじめて可能になった。X-バンド偏波レーダーによる観測技術の社会実装には、国土交通省のコンソーシアムならびに「河川管理におけるレーダー活用検討会」によるXRAIN観測データのデータ公開が大きく寄与した。C-バンド偏波レーダーの利用法と検証法に関しては情報通信研究機構、COBRAプロジェクトメンバーの研究協力が重要であった。多くの方々への協力、支援に関して感謝いたします。

付録：用語について

偏波レーダーの呼び方や偏波レーダーパラメータの名称には統一されていないものもあるので、偏波レーダーに関する用語について整理した。その際、American Meteorological Society (2015)を基本に、レーダー気象学の教科書(例えば、Doviak and Zrnich 1984; 深尾・浜津 2005)や公的機関のwebサイト(Government of Canada 2015; 名古屋大学気象学研究室偏波パラメータ日本語名称を考える会 2009)を参照した。

A.1 偏波レーダーの名称

まず、レーダーの呼び方であるが、American Meteorological Society (2015)によれば、偏波機能を持った気象レーダーは、偏波レーダー、二重偏波レーダー、マルチパラメータレーダーなどと呼ばれる。偏波レーダーは、ターゲットの偏波に依存する全てのあるいはいくつかの特徴量を測定できるレーダーと定義される。二重偏波レーダーは偏波レーダーの中で直交する二偏波を送信し受信することができるレーダーである。一方、マルチパラメータレーダーは、あるターゲットのレーダー反射因子と偏波に依存する特徴量、または、レーダー反射因子と波長に依存する特徴量を導出することができるレーダーと定義される。従って、偏波レーダーも二重偏波レーダーもマルチパラメータレーダーに含まれる(Jameson 1983a, b, 1985)。すなわち、「二重偏波レーダー」 \subseteq 「偏波レーダー」 \subseteq 「マルチパラメータレーダー」という関係が

成立する。

米国気象学会のジャーナル検索サービス (<http://journals.ametsoc.org/search/advanced>) から論文のアブストラクト (タイトル) 中に使われているレーダーの名前の頻度を調べると、「偏波レーダー (polarimetric radar)」が最も多く431 (190) 編で、次いで「二重偏波レーダー (dual-polarization radar)」が249 (74) 編であった。これに対して、「マルチパラメータレーダー (multiparameter radar)」は53 (22) 編であった。本報では「偏波レーダー」を用いた。なお、国土交通省が2013年から実運用しているX-バンド偏波レーダーや、現在、偏波レーダー化が進められているC-バンド偏波レーダーはそれぞれX-バンドマルチパラメータレーダー (XMPレーダー)、C-バンドマルチパラメータレーダー (CMPレーダー) と呼ばれている。また、防災科学技術研究所では2000年に導入した二周波レーダーとX-バンド偏波レーダーシステムをマルチパラメータレーダー (MPレーダー) システムと名付けた (Iwanami *et al.* 2001)。このように、日本では既になじんでいることからマルチパラメータレーダーという名称も定着しそうである。

最後に、「レーダー」と「レーダ」と本報の引用文献にいずれの表記が見られるが、前者は気象学、後者は電気工学の分野で一般に用いられているようである。本報の本文では「レーダー」と表記した。

A.2 偏波レーダーパラメータの定義

偏波レーダーでは、レーダー反射因子 (Z_{RH}) やドップラー速度に加えて、反射因子差 (Z_{DR})、直線偏波抑圧比 (LDR)、偏波間相関係数 (ρ_{HV})、偏波間位相差 (ϕ_{DR})、比偏波間位相差 (K_{DP}) など、種々の偏波パラメータが得られる。以下、これらの偏波レーダーパラメータの定義を記した。

a) レーダー反射強度、レーダー反射因子、等価レーダー反射因子

偏波レーダーのパラメータでしばしば混乱しがちな単語としてレーダー反射強度 (radar reflectivity)、レーダー反射因子 (radar reflectivity factor)、等価レーダー反射因子 (equivalent reflectivity factor) がある。厳密にはこれらの単語は異なる。各用語の定義は次の通りである。

レーダー反射強度 η は単位体積内に含まれるターゲットの後方散乱断面積 (backscattering cross section) の総和で、次式で定義される。

$$\eta = \sum_i N_i \sigma_i \quad (\text{A1})$$

ここで、 N_i は単位体積内の i 番目のターゲット粒子の個数、 σ_i は i 番目のターゲット粒子の後方散乱断面積、 Σ は単位体積内の全てのターゲット粒子についての積算を意味する。レーダー反射強度の単位は $\text{cm}^2 \text{m}^{-3}$ 、あるいは、より一般的には cm^{-1} または m^{-1} である。後方散乱断面積はレーダーから放射された平面波がターゲット粒子を照射する時、その照射エネルギーに対するレーダー方向の散乱エネルギーの割合で、ターゲット粒子が降水粒子の場合、降水粒子のサイズ、状態 (氷か水か)、粒子の形状に依存する。降水粒子が球でその大きさが波長に比べて十分小さいとき、即ち、レーリー散乱近似が成り立つとき、後方散乱断面積 σ_i は次式で表される。

$$\sigma_i = \frac{\pi^5 |K|^2 D_i^6}{\lambda^4} \quad (\text{A2})$$

ここで、 λ は波長、 D は直径、 K は誘電ファクターである。

レーダー反射因子 Z は降水粒子の粒径分布により決まる量で、レーリー散乱を仮定して、次式で定義される[†]。

$$Z = \sum_i N_i D_i^6 \quad (\text{A3})$$

ここで、 $N(D)$ は降水粒子の粒径分布、 D は直径である。レーダー反射因子の単位は $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ または対数スケール dBZ が使われる。レーダー反射強度がターゲットの粒径分布以外にレーダーの波長やターゲットの誘電ファクターに関係するのに対して、レーダー反射因子は粒径分布のみに関係する。レーダー気象学ではレーダー反射強度よりもレーダー反射因子が用いられる場合が多い (Doviak and Zrnica 1984) が、これは、レーダー反射因子の方が物理的によりイメージしやすいためであろう。

等価レーダー反射因子 Z_e は、因子特性が不明な

[†] 単偏波の在来型気象レーダーは水平偏波の送受信がほとんどであり、レーダー反射因子は単に Z あるいは Z_{H} と表記される。また、送受信とも水平であることを明確にする時には Z_{HH} と表記される。ここで最初の添え字は受信電波の偏波面を、二番目の添え字は送信電波の偏波面を意味する。本報でもこの方針に従って3つの記号が使われている。

ターゲットが波長に比べて小さな雨滴から成ると仮定した場合のレーダー反射因子で

$$Z_e = \frac{\eta \lambda^4}{0.93 \pi^5} \quad (\text{A4})$$

で定義される。ここで、 λ は波長、0.93は水の誘電ファクターである。レーダー反射因子はターゲットの種類を仮定しないのに対し、等価レーダー反射因子はターゲットを雨滴と仮定している。

以上をまとめると、ターゲット粒子が雨滴でその大きさが波長に比べて十分小さい時（即ちレーラー散乱が成り立つ時）、レーダー反射因子、等価レーダー反射因子、レーダー反射強度は等価な関係になる。様々な論文においてしばしばレーダー反射因子、等価レーダー反射因子、レーダー反射強度が区別なく使われるのはこのためである。本報ではレーダー反射因子を標準に用いたが、対象とするターゲットが氷の場合やレーラー散乱の仮定が成り立たない短波長レーダーの場合にはこれらの用語を区別して使う必要がある。

b) 反射因子差

反射因子差 (differential reflectivity) Z_{DR} は、 Z_{HH} (Z_{VV}) を水平偏波送受信 (垂直偏波送受信) のレーダー反射因子[†]として、次式で定義される。

$$\begin{aligned} Z_{DR} &= 10 \log_{10}(Z_{HH} / Z_{VV}) \quad [\text{dB}] \\ &= 10 \log_{10}(Z_{HH}) - 10 \log_{10}(Z_{VV}) \quad [\text{dB}] \end{aligned} \quad (\text{A5})$$

c) 直線偏波抑圧比

直線偏波抑圧比 (linear depolarization ratio) LDR は、 Z_{VH} を水平偏波送信・垂直偏波受信のレーダー反射因子、 Z_{HH} を水平偏波送受信のレーダー反射因子として、次式で定義される。

$$\begin{aligned} \text{LDR} &= 10 \log_{10}(Z_{VH} / Z_{HH}) \quad [\text{dB}] \\ &= 10 \log_{10}(Z_{VH}) - 10 \log_{10}(Z_{HH}) \quad [\text{dB}] \end{aligned} \quad (\text{A6})$$

d) 偏波間相関係数

偏波間相関係数 (co-polar correlation coefficient) ρ_{HV} は、 S_{HH} (S_{VV}) を水平偏波送受信 (垂直偏波送受信) の散乱強度として、次式で表される。

$$\rho_{HV} = |\langle S_{VV} S_{HH} \rangle| / (\langle |S_{HH}|^2 \rangle^{1/2} \langle |S_{VV}|^2 \rangle^{1/2}) \quad (\text{A7})$$

ここで、 $|\cdot|$ と $\langle \cdot \rangle$ はそれぞれ絶対値と平均値を意味する記号である。

e) 偏波間位相差

偏波間位相差 (differential phase shift) ϕ_{DP} は偏波や波長など特性の異なる二つの信号が伝播するときに生じる位相差である。偏波レーダーの場合、伝播媒体の、位相シフトが最大と最小になる軸に関して定義される。 ϕ_{HH} (ϕ_{VV}) を水平偏波送受信 (垂直偏波送受信) の位相として、次式で表される。

$$\phi_{DP} = \phi_{HH} - \phi_{VV} \quad [^\circ] \quad (\text{A8})$$

f) 比偏波間位相差 (または偏波間位相差変化率)

比偏波間位相差 (specific differential phase) K_{DP} は、単位距離あたりの偏波間位相差の変化であり、 r_1 , r_2 をレーダーからの距離として、次式で表される。

$$K_{DP} = (\phi_{DP}(r_2) - \phi_{DP}(r_1)) / (r_2 - r_1) \quad [^\circ/\text{km}^{-1}] \quad (\text{A9})$$

本報の本文でも述べたように、単位距離当たりの偏波間位相差を specific differential phase と定義する。気象用語や物理用語では、例えば、specific humidity (比湿)、specific gravity (比重)、specific heat (比熱)、specific conductivity (比伝導率)、specific resistance (比抵抗) 等と訳されている。本報でも従来の慣習に従って“specific”を“比”と訳し specific differential phase を比偏波間位相差と訳した。しかしながら、本来の specific の意味は“特定の“あるいは”はっきりと限定された”であり、“比”と訳すのが妥当かどうかの議論がある。より明確な意味を持たせた和訳として深尾・浜津 (2005) は specific differential phase を偏波間位相差変化率と訳している。

参考文献

- American Meteorological Society, 2015: Climatology. Glossary of Meteorology. <http://glossary.ametsoc.org/wiki/climatology> (2017.07.14閲覧).
- 東 俊孝, 古賀光彦, 中北英一, 2016: 新たな道路交通情報サービス (VICS WIDE) における XRAIN の活用. 土木技術資料, 58(7), 30-33.
- Barber, P. and C. Yeh, 1975: Scattering of electromagnetic waves by arbitrarily shaped dielectric bodies. Appl. Opt., 14, 2864-2872.
- Battan, L. J., 1973: Radar Observation of the Atmosphere. The University of Chicago Press, 324pp.
- Browning, K.A., 1981: A total system approach to a

- weather radar network. Nowcasting: Mesoscale Observations and Short-Range Prediction, Proceedings of an international symposium held 25-28 August, 1981 in Hamburg, Germany. Edited by B. Battrock and J. Mort, European Space Agency, 115-122.
- Chandrasekar, V., V. N. Bringi, N. Balakrishnan and D. S. Zrnic, 1990: Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall. Part III: Specific differential phase. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **7**, 621-629.
- Doviak, R. J. and D. S. Zrnic, 1984: Doppler radar and weather observations. Academic Press, 458pp.
- Doviak, R. J., V. Bringi, A. Ryzhkov, A. Zahrai and D. Zrnic, 2000: Considerations for polarimetric upgrades to operational WSR-88D radars. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **17**, 257-278.
- Fujiwara, M., 1965: Raindrop-size distribution from individual storms. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 585-591.
- 深尾昌一郎, 浜津享助, 2005: 気象と大気のレーダーリモートセンシング. 京都大学学術出版会, 491pp
- Government of Canada, 2014: Natural Resources Canada. Earth Sciences. <http://www.nrcan.gc.ca/node/9551> (2017.07.14閲覧).
- Hirano, K. and M. Maki, 2010: Method of VIL calculation for X-band polarimetric radar and potential of VIL for nowcasting of localized severe rainfall - Case study of the Zoshigaya downpour, 5 August 2008-. *SOLA*, **6**, 89-92.
- Hubbert, J. and V. N. Bringi, 1995: An iterative filtering technique for the analysis of copolar differential phase and dual-frequency radar measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **12**, 643-648.
- 岩波 越, 2011: 降雨減衰判定装置及びそれを用いた降雨観測システム並びに降雨減衰判定方法. 特許第4739306, 2011-8-3.
- Iwanami, K., R. Misumi, M. Maki, T. Wakayama, K. Hata and S. Watanabe, 2001: Development of a multiparameter radar system on mobile platform. *Preprints*, 30th International Conference on Radar Meteorology, 104-106.
- Jameson, A.R., 1983a: Microphysical interpretation of multi-parameter radar measurements in rain. Part I: Interpretation of polarization measurements and estimation of raindrop shapes. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1792-1802.
- Jameson, A.R., 1983b: Microphysical interpretation of multi-parameter radar measurements in rain. Part II: Estimation of raindrop distribution parameters by combined dual-wavelength and polarization measurements. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1803-1814.
- Jameson, A.R., 1985: Microphysical interpretation of multiparameter radar measurements in rain. Part III: Interpretation and measurement of propagation differential phase shift between orthogonal linear polarizations. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 607-614.
- 片山勝之, 山路昭彦, 中村文彦, 森田 宏, 中北英一, 2015: 局地的豪雨探知システムの開発. 河川技術論文集, **21**, 401-406.
- 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.
- 加藤 敦, 真木雅之, 岩波 越, 三隅良平, 2014: 降水分布の推定システムおよび降水分布の推定方法. 特許第5570082, 2014-7-23.
- 加藤 敦, 真木雅之, 岩波 越, 三隅良平, 前坂 剛, 2009: Xバンドマルチパラメータレーダ情報と気象庁レーダ情報を用いた降水ノウキャスト. 水文・水資源学会誌, **22**, 372-385.
- Kato, A., M. Maki, K. Iwanami, R. Misumi and T. Maesaka, 2012: Quantitative precipitation estimate by complementary application of X-band polarimetric radar and C-band conventional radar. *Weather Radar and Hydrology, Proceedings of a symposium held in Exeter, UK, April 2011, IAHS Red Book Series*, (351), 169-175.
- Katsumata, M., H. Uyeda, K. Iwanami and G. Liu, 2000: The response of 36- and 89-GHz microwave channels to convective snow clouds over ocean: Observation and modeling. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 2322-2335.
- Kim, D.-S. and M. Maki, 2012: Validation of composite polarimetric parameters and rainfall rates from an X-band dual-polarization radar network in the Tokyo metropolitan area. *Hydrol. Res. Lett.*, **6**, 76-81.
- Kim, D.-S., M. Maki and D.-I. Lee, 2010: Retrieval of three-dimensional raindrop size distribution using X-band polarimetric radar data. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **27**, 1265-1285.
- Kim, D.-S., M. Maki, S. Shimizu and D.-I. Lee, 2012: X-band dual-polarization radar observations of precipitation core development and structure in a multicellular storm over Zoshigaya, Tokyo, Japan, on August 5, 2008. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 701-719.
- 越田智喜, 武中英好, 中北英一, 真木雅之, 中川勝広, 深見和彦, 2012: 現業CバンドMPレーダにおける降雨推定精度. 土木学会論文集B1(水工学), **68**, I_361-I_366.

- Kouketsu, T., H. Uyeda, T. Ohigashi, M. Oue, H. Takeuchi, T. Shinoda, K. Tsuboki, M. Kubo and K. Muramoto, 2015: A hydrometeor classification method for X-band polarimetric radar: Construction and validation focusing on solid hydrometeors under moist environments. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **32**, 2052-2074.
- Lim, S., V. Chandrasekar and V. N. Bringi, 2005: Hydrometeor classification system using dual-polarization radar measurements: Model improvements and in situ verification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **43**, 792-801.
- Liu, H. and V. Chandrasekar, 2000: Classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurements: Development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **17**, 140-164.
- Maesaka, T., M. Maki, K. Iwanami, R. Misumi and S. Shimizu, 2007: Real-time wind field retrieval system by using X-band radar network around Tokyo Metropolitan area. *Proceedings of the 33rd International Conference on Radar Meteorology*. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/123537.pdf> (2017.07.14閲覧).
- Maesaka, T., M. Maki, K. Iwanami, R. Misumi and S. Shimizu, 2008: Surface wind estimation system by X-band radar network around Tokyo metropolitan area. *Proceedings of the 5th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (CD-ROM)*, 5 pp.
- Maesaka, T., M. Maki, K. Iwanami, S. Tsuchiya, K. Kieda and A. Hoshi, 2011: Operational rainfall estimation by X-band MP radar network in MLIT, Japan. *Proceedings of the 35th Conference on Radar Meteorology*. https://ams.confex.com/ams/35Radar/webprogram/Manuscript/Paper191685/35RADAR_Maesaka.pdf (2017.07.14閲覧).
- Maesaka, T., K. Iwanami and M. Maki, 2012: Non-negative K_{DP} estimation by monotone increasing Φ_{DP} assumption below melting layer. *Proceedings of the 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*. http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/QPE_233_ext_abs.pdf (2017.07.14閲覧).
- 前坂 剛, 2015: 比偏波間位相差演算装置, 及びそれを用いた降雨観測システム並びに比偏波間位相差演算方法. 特許第5807961, 2015-11-10.
- 前坂 剛, 清水慎吾, 鈴木真一, 真木雅之, 守屋 岳, 鈴木 靖, 増田有俊, 2014: 風予測装置及びプログラム. 特許第5394690, 2014-01-22.
- 真木雅之, 2009: Xバンドマルチパラメータレーダネットワーク 一局部的気象災害の監視と予測を目指して一. 建設の施工企画, (715), 20-25.
- Maki, M., S.-G. Park and V. N. Bringi, 2005: Effect of natural variations in rain drop size distributions on rain rate estimators of 3 cm wavelength polarimetric radar. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 871-893.
- Maki, M., T. Maesaka, R. Misumi, K. Iwanami, S. Suzuki, A. Kato, S. Shimizu, K. Kieda, T. Yamada, H. Hirano, F. Kobayashi, A. Masuda, T. Moriya, Y. Suzuki, A. Takahori, D.-I. Lee, D.-S. Kim, V. N. Chandrasekar and Y. Wang, 2008: X-band polarimetric radar network in the Tokyo metropolitan area - X-NET-. *Proceedings of the 5th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (CD-ROM)*, 5pp.
- Maki, M., T. Maesaka, A. Kato, D.-S. Kim and K. Iwanami, 2012a: Developing a composite rainfall map based on observations from an X-band polarimetric radar network and conventional C-band radar. *Indian J. Radio Space Phys.*, **41**, 461-470.
- Maki, M., R. Misumi, T. Nakatani, S. Suzuki, T. Kobayashi, Y. Yamada, A. Adachi, I. Nakamura, M. Ishihara and TOMACS members, 2012b: Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities (TOMACS). *Proceedings of the 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*. http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/NET_236_ext_abs.pdf (2017.07.14閲覧).
- 真木雅之, 前坂 剛, 清水慎吾, 平野洪資, P.C. Shakti, 2013: XバンドMPレーダネットワークによる雨と風の三次元分布推進手法の開発. 河川, (807), 18-25.
- 真木雅之, 朴 相郡, 2010: 降雨強度と雨水量の3次元分布推定装置および方法. 特許第4595078, 2010-12-8.
- 名古屋大学気象学研究室偏波パラメータ日本語名称を考える会, 2009: 2009年第1回ミーティング <http://www.rain.hyarc.nagoya-u.ac.jp/MPradar/meetings/20090116.html> (2017.07.14閲覧).
- Nakagawa, K., H. Hanado, S. Satoh, N. Takahashi, T. Iguchi and K. Fukutani, 2003: Development of a new C-band bistatic polarimetric radar and observation of typhoon events. *Proceedings of the 31st Conference on Radar and Meteorology*, Seattle, Amer. Meteor. Soc., 863-866. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/64101.pdf> (2017.07.14閲覧).
- 中北英一, 竹畑栄伸, 中川勝広, 2007: 最新型Cバンド偏波レーダを用いた降雨量推定精度の検証. 水工学論文

- 集, 51, 325-330.
- 中北英一, 竹畑栄伸, 中川勝広, 2008: Cバンド偏波レーダーによる降雨量推定アルゴリズムの構築に関する研究. 水工学論文集, 52, 349-354.
- 中北英一, 山口弘誠, 隅田康彦, 竹畑栄伸, 鈴木賢士, 中川勝広, 大石 哲, 出世ゆかり, 坪木和久, 大東忠保, 2009: 偏波レーダーとビデオゾンデの同期観測および降水粒子タイプ判別. 水工学論文集, 53, 361-366.
- 中北英一, 山邊洋之, 山口弘誠, 2010: ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究. 水工学論文集, 54, 343-348.
- 中北英一, 西脇隆太, 山邊洋之, 山口弘誠, 2013: 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. 土木学会論文集 B1 (水工学), 69, I_325-I_330.
- 中北英一, 西脇隆太, 山口弘誠, 2014: 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, 20, 355-360.
- Nakakita, E., H. Sato, R. Nishiwaki, H. Yamabe and K. Yamaguchi, 2017: Early detection of baby-rain-cell aloft in a severe storm and risk projection for urban flash flood. *Adv. Meteor.*, 2017, doi:10.1155/2017/5962356.
- Oue, M., H. Uyeda and Y. Shusse, 2010: Two types of precipitation particle distribution in convective cells accompanying a Baiu frontal rainband around Okinawa Island, Japan. *J. Geophys. Res.*, 115, doi: 10.1029/2009JD011957.
- Oue, M., K. Inagaki, T. Shinoda, T. Ohigashi, T. Kouketsu, M. Kato, K. Tsuboki and H. Uyeda, 2014: Polarimetric Doppler radar analysis of organization of a stationary rainband with changing orientations in July 2010. *J. Meteor. Soc. Japan*, 92, 457-481.
- Oue, M., T. Ohigashi, K. Tsuboki and E. Nakakita, 2015: Vertical distribution of precipitation particles in Baiu frontal stratiform intense rainfall around Okinawa Island, Japan. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 5622-5637.
- Park, S.-G., V. N. Bringi, V. Chandrasekar, M. Maki and K. Iwanami, 2005a: Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part I: Theoretical and empirical basis. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 22, 1621-1632.
- Park, S.-G., M. Maki, K. Iwanami, V. N. Bringi and V. Chandrasekar, 2005b: Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part II: Evaluation and application. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 22, 1633-1655.
- Sachidananda, M. and D. S. Zrnich, 1986: Differential propagation phase shift and rainfall rate estimation. *Radio Sci.*, 21, 235-247.
- Seliga, T. A. and V. N. Bringi, 1978: Differential reflectivity and differential phase shift: Applications in radar meteorology. *Radio Sci.*, 13, 271-275.
- Shakti, P. C. and M. Maki, 2014: Application of a modified digital elevation model method to correct radar reflectivity of X-band dual-polarization radars in mountainous regions. *Hydrol. Res. Lett.*, 8, 77-83.
- Shakti, P. C., M. Maki, S. Shimizu, T. Maesaka, D.-S. Kim, D.-I. Lee and H. Iida, 2013: Correction of reflectivity in the presence of partial beam blockage over a mountainous region using X-band dual polarization radar. *J. Hydrometeorol.*, 14, 744-764.
- 椎葉充晴, 高棹琢馬, 中北英一, 1984: 移流モデルによる短時間降雨予測手法の検討. 水理講演会論文集, 28, 423-428.
- Shusse, Y., K. Nakagawa, N. Takahashi, S. Satoh and T. Iguchi, 2009: Characteristics of polarimetric radar variables in three types of rainfalls in a Baiu front event over the East China Sea. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 865-875.
- Shusse, Y., M. Maki, S. Shimizu, K. Iwanami, T. Maesaka, S. Suzuki, N. Sakurai and R. Misumi, 2015: Relationship between precipitation core behavior in cumulonimbus clouds and surface rainfall intensity on 18 August 2011 in the Kanto region, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 215-228.
- Suzuki, K., Y. Shigenaga, T. Kawano and K. Yoneyama, 2006: Videosonde observations during the R/V Mirai MR04-08 cruise. *Umi to Sora*, 82, 29-38.
- Takahashi, N., H. Uyeda and K. Kikuchi, 1996: Evolution process and precipitation particles of an isolated echo observed with dual-polarization Doppler radar near Sapporo on July 9, 1992. *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, 10, 135-153.
- Takahashi, T., 2006: Precipitation mechanisms in east Asian monsoon: Videosonde study. *J. Geophys. Res.*, 111, doi:10.1029/2005JD006268.
- Yamada, H., H. Uyeda, K. Kikuchi, M. Maki and K. Iwanami, 2004: Dual-Doppler radar observations on factors causing differences in the structure of snow clouds during winter monsoon surges. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 179-206.
- Yamaguchi, K., K. Furuta and E. Nakakita, 2015: Data assimilation of ice-water mixing ratios estimated from polarimetric radar observation. Abstracts of the 8th European Conference on Severe Storms (ECSS2015-118), Wiener Neustadt, Austria, September 14-18.
- Yoon, S.-S. and E. Nakakita, 2013: The development of

- rain-based urban flood forecasting method for river management practice using X-MP radar observation. *Adv. River Eng., JSCE*, **19**, 223-228.
- Yoon, S.-S. and E. Nakakita, 2015: Application of an X-Band multi-parameter radar network for rain-based urban flood forecasting. *J. Hydrol. Eng.*, **22**, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001281.
- 吉野文雄, 1990: 直交二偏波レーダによる降水現象研究の動向. *天気*, **37**, 145-159.

Development and Societal Implementation of Quantitative Precipitation Measurements with X-band Polarimetric Weather Radar.

Masayuki MAKI*¹, Hiroshi UYEDA*², Eiichi NAKAKITA*³

*¹ (*Corresponding author*) *Kagoshima University, Korimoto 1-21-40, Kagoshima, 890-0065, Japan.*

*² *Nagoya University.*

*³ *Kyoto University.*

(Received 19 October 2016; Accepted 1 August 2017)