

レーダーによる降水雲の 3 次元観測

岩波 越 (防災科学技術研究所)

1. はじめに

災害を引き起こす大気現象の多くは、空間的なひろがりや水平 2~2,000km のメソスケール大気現象で、急速に発達する低気圧や台風、集中豪雨・豪雪や局地的大雨、竜巻や降雹、落雷といった激しい現象が含まれている。集中豪雨や局地的大雨に代表される災害につながる激しい現象は、寿命も数十分から数時間程度で時間的・空間的スケールが小さく、現在実用化されている技術による予測精度は十分とは言えない。これらの現象の多くは積乱雲に伴って生じており、その構造や発生・発達・衰弱の過程、組織化の過程の観測に気象レーダーは有効な機器であり、数値予測モデルの高度化や予測結果の検証にも重要な役割を果たす。

テレビのニュースや天気予報で「気象レーダーによる観測から〇〇では時間雨量 100mm を超える雨が降っている」と伝えられたり、スマートフォンで簡単に雨の分布の時間変化を見ることができるようになったり、一般市民にも気象レーダーは身近なものになっている。

本講義では、防災科学技術研究所（以下、防災科研と記す。）で行っている最新の取組を含め、気象レーダーがその機能の進化とともに担ってきた観測、予測、防災における役割を紹介する。

2. 気象レーダーの歴史

レーダー (RADAR : Radio Detection and Ranging) は、電波を使って対象物を検出し、対象物までの距離を測る (位置を知る) ための能動型リモートセンサーである。気象レーダーの場合、対象物は雨滴等の降水粒子であり、使われる電波は 3cm 波 (9GHz 帯 : X バンド)、5cm 波 (5GHz 帯 : C バンド)、10cm 波 (3GHz 帯 : S バンド) のセンチ波が主なものである。近年は 3mm 波 (95GHz 帯 : W バンド) や 8mm 波 (35GHz 帯 : Ka バンド) のミリ波レーダーを用いた非降水雲の観測も行われている。波長 (周波数) が短い (高い) ほど、降雨による減衰を受けやすいが、高い感度が得やすく、機器・付帯設備は小型化しやすい。

例えば、雨量計による降雨観測と比較した場合、気象レーダー観測の特長は、広範囲の面的・立体的

データが、細かい時間変化を含めて、即時性を持って得られることである。

日本気象学会発行の「気象研究ノート」では、第 90 号 (1967)、第 112 号 (1972)、第 139 号 (1980)、第 200 号 (2001)、第 237 号 (2018) で気象レーダーが取り上げられている。石原ほか (2018) でまとめられているとおり、日本では、66 年前の 1954 年に気象研究所、大阪管区气象台に本格的な気象レーダーが最初に設置された (X バンド)。さらに翌年、東京管区气象台と背振山 (福岡管区气象台) に C バンド気象レーダーが設置され、半径数百 km の範囲で降水観測が可能となり、防災情報として、あるいは降水予報、河川管理等のために活用されてきた。現在は気象庁、国土交通省を併せて 46 台 (空港を除く) の C バンドレーダーが運用されている。

1980 年代、1990 年代には、大学、研究機関で降水雲内の風を測れるドップラーレーダーの導入が進み、複数台のドップラーレーダーを用いたデュアル解析が研究プロジェクトで採用された (例えば、菊地 1993 ; 吉崎ほか 2000)。石原 (2019) は「それまでの気象レーダーは“降水”といういわば大気運動の“結果”を見ていましたが、デュアル解析の手法を使えば降水域内に限られるとはいえ、大気の運動場という“過程”を見ることができると思った」と述べている。大雨や突風発生の監視・予測精度の向上を図るため、気象庁の 20 カ所の C バンド気象レーダーのドップラー化も、2005 年に始まり 2013 年に完了している。

防災科研は 2000 年に水平偏波と垂直偏波の同時送信 (受信) タイプの X バンドマルチパラメータ (MP) レーダーを開発導入して (Iwanami et al. 2001)、KDP-R 関係や電波消散領域の検知による降雨強度推定手法の高度化を進めた。2002 年には通信総合研究所 (現情報通信研究機構) が多様な偏波の観測が可能な C バンド MP レーダー (COBRA) を開発し沖縄県名護市に設置した (中川ほか 2002)。

2008 年には、神戸市都賀川水難事故や東京都豊島区雑司が谷での下水道工事事故などの都市型水害を引き起こした局地的大雨 (いわゆる「ゲリラ豪雨」) が大きな社会問題となった。国土交通省は 2009 年か

ら防災科研等の研究成果も活用して、都市域を中心に X バンド MP レーダーの整備を始め、2015 年には 39 台により全政令指定都市、全人口の 90%以上をカバーするレーダー観測網 (XRAIN: 当時は X-band Polarimetric (Multi Parameter) Radar Information Network) が整備された。XRAIN の整備により、世界に先駆けて 1 分間隔で 250m 格子の高精度の降雨情報が利用できるようになった。また、2016 年に国土交通省 C バンドレーダーの MP (二重偏波) 化と X バンドとの合成により配信エリアが大幅に拡大され、XRAIN の正式名称は「Extended Radar Information Network (高性能レーダ雨量計ネットワーク)」に変更された。さらに、気象庁も C バンドレーダーの二重偏波化を開始し、東京レーダーが今年 3 月から二重偏波レーダーとしての運用を開始した。

3. 気象レーダーによる観測・解析

3.1 在来型レーダー

在来型気象レーダーは、レーダー方程式に基づきレーダー反射因子: Z を観測し、 Z - R 関係式を用いて降水強度: R を推定する。降水監視のために幅広く利用されてきたが、 Z - R 関係式は雨滴粒径分布に強く依存すること、降雨減衰により R が過小評価されること等の誤差要因があり、実利用においては地上雨量計の観測結果を用いて補正することにより高精度化が図られた (解析雨量)。レーダー観測による面的把握と雨量計観測の正確さを組み合わせた優れた方法だが、雨量計による観測や補正処理には時間がかかるため、即時性には課題があった。降雨域の時間外挿に基づくナウキャストも、レーダーによる面的降雨分布の把握によって可能になった。

3次元観測と Z - R 関係式の解析例として、図 1 に北海道オロフレ山系で観測された地形性降雨におけるシーダー・フィーダー・メカニズムの解析例を示す (Iwanami et al. 1988)。

3.2 ドップラーレーダー

ドップラーレーダーは、電波のドップラー効果を利用して風で流される降水粒子の移動 (ドップラー速度) を観測する。1 台のドップラーレーダーで計測できるのは視線方向に近づく (または遠ざかる) 速度 (動径風) であるが、2 台以上による重複観測領域を設けると、水平風と鉛直風の三次元分布の導出が可能である。

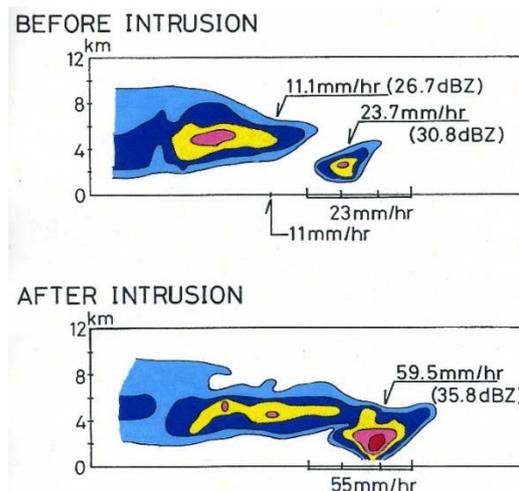


図 1 オロフレ山系南東斜面上空の地形性降水雲の上空を、擾乱に伴う降水雲が通過した際の降雨強度の変化。

パルス型のドップラーレーダーでは、計測できるドップラー速度には上限 (ナイキスト速度) があり、それは利用電波の波長 (周波数) とパルス繰返周波数で決まる。ナイキスト速度を超える速度は折り返されて表現されるため、ドップラー速度の折り返し補正が必要となる。

風の線形変化等を仮定した上で、1 台のドップラーレーダーによって水平風の鉛直分布を推定する VAD (Velocity Azimuth Display) 法や、3次元分布を推定する VVP (Volume Velocity Processing) 法などが提案された。

デュアルドップラー解析の例としては、1 節で例示したプロジェクトによる Yamada et al. (2004)、Moteki et al. (2004) など数多くの報告がある。

また、ドップラーレーダーによる動径風は、データ同化手法によって、数値予測モデルに取り込まれ、精度向上にも寄与している。

3.3 マルチパラメータ (MP) レーダー

マルチパラメータ (MP) レーダーは、複数の波長 (周波数) や複数の偏波の利用によって、多くのパラメータを計測するレーダーの総称であるが、日本では、水平・垂直の二種類の偏波を同時送信 (受信) する二重偏波レーダーを指すことが多い。雨滴は大きくなるほど偏平になるため、降雨域を伝搬中の水平偏波と垂直偏波に偏波間位相差 (Φ_{DP}) が生じる。その距離微分 (偏波間位相差変化率、比偏波間位相差: KDP) と降水強度: R の間の KDP- R 関係式を用いた降雨強度推定は、 Z - R 関係式の弱点を大幅に改善

し、高精度の降雨強度推定が可能になった。雨量計観測による補正を必要としないため、いわゆるゲリラ豪雨のような急激に発生、発達する大雨に関する情報の更新が早くできるようになったことも、MP レーダーの大きな貢献である。

図 2 に 2008 年 8 月 5 日に雑司が谷下水道工事事故を引き起こした局地的大雨の観測結果を示す。X バンド MP レーダーによって従来は困難だった局地的大雨を捉えることに成功した。Kim et al. (2012) は、2 台の X バンド MP レーダーを使ってこの大雨の事例解析を行っている。

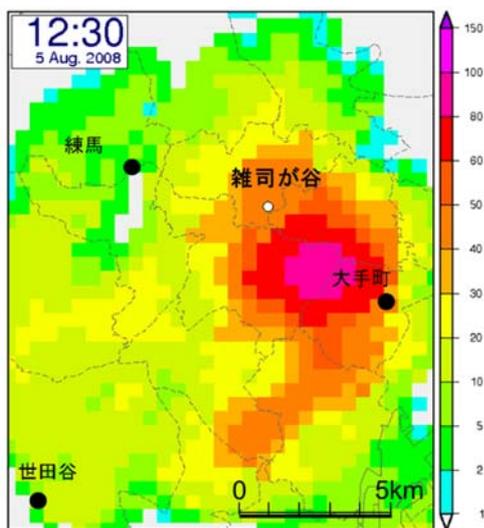


図 2 防災科研 X バンド MP レーダーデータによる 11:30 から 12:30 の 1 時間雨量 (mm) の分布図。

また、MP レーダーは降水粒子の判別 (例えば、Kouketsu et al. 2015) や融解層の検出、データの品質管理にも有効である。

4. レーダーネットワーク

気象庁や国土交通省の現業用 C バンドレーダー観測網は、山地等地形による遮蔽域を考慮しつつ、できるだけ少ないレーダーで広範囲を観測できるように配置で構築されている。1 台の観測距離は長い、遠方では空間分解能が低下する、地球の曲率のため低高度が観測できないという課題もある。一方、国土交通省 XRAIN の X バンド MP レーダーは、降雨減衰によって生じる可能性がある電波消散領域対策として、重点領域は複数レーダーによって観測されるように配置されている。X バンドのため 1 台の観測距離は短いものの、低高度の不可視領域は減り、また 1 台当たりのコストは小さくなっている。MP レーダ

ーはドップラー機能も併せ持っており、重複観測領域ではデュアルドップラー解析が可能になった。既に両者のデータ合成が進んでいるが、短所を補い、長所を活かす組み合わせが望ましい。

5. PAWR、MP-PAWR

4 節までに述べたレーダー観測網では降水雲の 3 次元観測には 5~10 分の時間が必要であり、局地的大雨や竜巻を引き起こす積乱雲が 10 分足らずで急発達する過程を把握するには観測時間がかかり過ぎるという課題があった。この課題に対し、短時間で詳細な 3 次元観測を実現したのがフェーズドアレイ気象レーダー (PAWR) である。このレーダーを使うことで、雨雲の 3 次元観測時間を従来の 10 倍以上にあたる 10~30 秒まで短縮でき、突発的な豪雨等の早期検知に道が開かれた。産官学連携プロジェクトの研究開発によって、2012 年 5 月に大阪大学吹田キャンパスに最初に導入され (Mizutani et al. 2018; Adachi et al. 2016)、現在までに 5 台が研究開発に使われている。気象研究所では、台風から竜巻等の突風までスケールの異なる現象の微細な構造や詳細な時間変化を捉えることに成功している。

ただし、MP レーダーは依然 PAWR よりも雨量の観測精度が高い等の利点があり、2 つのレーダーの強みを併せ持つレーダーの開発が期待されていた。戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 1 期「レジリエントな防災・減災機能の強化」において新たに開発されたのが X バンドマルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダー (MP-PAWR) で、2017 年 11 月に埼玉大学キャンパスに設置された (Takahashi et al. 2019; Kikuchi et al. 2020)。

6. 防災科研の最近の取組

防災科研では、積乱雲の一生をその発達段階に応じた機器で観測し、積乱雲の発達メカニズムを明らかにするとともに、早期検知・予測情報によって被害の防止・軽減を図るための研究開発を行っている。マイクロ波放射計、ドップラーライダー、雲レーダー、X バンド MP レーダーに加えて、2016、2017 年度に雷の放電経路の観測網を整備した (図 3)。観測データはいずれも防災科研に即時送られ、リアルタイム処理を行っている。

防災科研と日本気象協会は、雨雲の立体構造、雨水量をすき間なく高頻度・高精度に観測可能な

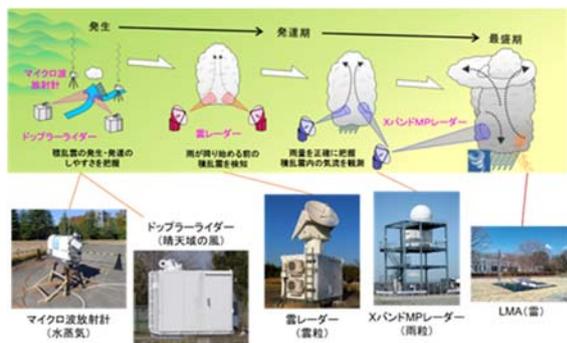


図 3 首都圏における防災科研の積乱雲の一生の観測の模式図。

MP-PAWR の特長を活かした大雨直前予測情報による実証実験を 2018、2019 年に実施した (図 4)。予測手法として用いた VIL ナウキャスト (Hirano and Maki 2018) は、地面付近のレーダー雨量分布の代わりに、鉛直積算雨水量 (VIL: Vertically Integrated Liquid Water Content)、すなわち上空の雨雲の中の水の量の分布を入力として用い、より早く上空の雨を検知することで、降雨の始まりや急発達時に予測が遅れるという従来のナウキャスト手法の課題解決を図ったものである。

両年の暖候期に MP-PAWR のデータを入力として、250m 格子毎の 10 分間雨量を 30 分先まで 1 分間隔で予測し、E メールと専用ウェブサイトを通して情報提供を行った。E メールは、2 箇所までの登録地点で 30 分先までに利用者の設定値 (10 分間雨量 0.2、1、5、10、15mm から選択可) 以上の雨が予測された場合に配信した。市民の利用目的は通勤・通学等の日常生活と身の回りの注意等の防災の両面にわたり、自治体からは住民からの通報より早く状況把握が可能という評価も得た。

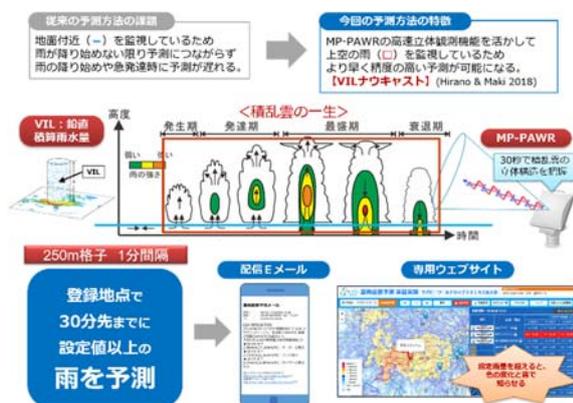


図 4 MP-PAWR を活用した VIL ナウキャスト手法による実証実験の模式図。

2018 年の 44 降雨事例に対し、国土交通省 XRAIN による雨量分布を真値として、位置ずれを許さず 250m 格子毎に評価した予測精度 (CSI: Critical Success Index) を既存のナウキャスト (気象庁高解像度降水ナウキャスト) と比較した結果、30 分先についてはほぼ同等だが、10 分先、20 分先予測値については、Eメールの配信基準として選択可能にしたものの降雨強度でも、実験に用いた VIL ナウキャストの方が既存手法より精度が高かった。2015 年の実験結果 (Iwanami et al. 2019) と同様に、いずれの予測時間、降雨強度でも空振り率が小さいことが高精度の理由であった。

MP-PAWR の活用を視野に入れ、積乱雲の発達初期の 2 台の XバンドMPレーダーのセクタースキャンデータを使った熱力学リトリーバルの結果 (温位偏差) を数値予測モデルに同化して大雨の予測精度を向上させる取組 (Shimizu et al. 2019) や、1 時間先までの降雨予測精度の向上のため、様々な観測データをデータ同化技術で取り込んだ数値予測を行い (Kato et al. 2017)、さらに VIL ナウキャストの結果を組み合わせるブレンド予測の手法開発も行っている。近年、大規模な水害を頻繁に引き起こしている線状降水帯の発達予測にも、ブレンド予測手法を適用している。

7. おわりに

現業用 C バンド気象レーダーの二重偏波化が進むとともに、MP-PAWR という極めて高性能な気象レーダーの研究利用が始まった。機械学習を用いたレーダーデータの新たな利用方法の研究開発の進展も期待される。また、新たな技術を前提とした気象レーダーネットワークについても検討が必要と考える。

参考文献

- Adachi, T., K. Kusunoki, S. Yoshida, K. Arai, and T. Ushio, 2016: High-speed volumetric observation of wet microburst using X-band phased array weather radar in Japan. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 3749–3765.
- Hirano, K. and M. Maki, 2018: Imminent nowcasting for severe rainfall using vertically integrated liquid water content derived from X-band polarimetric radar. *J. Meteor. Soc. Japan*, 96A, 201–220.
- 石原正仁, 2019: リモートセンシングシステムの導入による新しい観測システムの構築と社会実装—2017 年度岸

- 保・立平賞受賞記念講演一. 天気, 66, 277-297.
- 石原正仁, 藤吉康志, 上田 博, 立平良三, 2018: 気象レーダー60年の歩みと将来展望. 気象研究ノート, 237, pp. 268.
- Iwanami, K., K. Hirano, and S. Shimizu, 2019: Statistical validation of the predicted amount and start time of heavy rainfall in 2015 based on the VIL nowcast method, *J. Disaster Res.*, 14, 248-259.
- Iwanami, K., K. Kikuchi and T. Taniguchi, 1988: A possible rainfall mechanism in the Orofuro mountain range Hokkaido, Japan -The rainfall enhancement by a two-layer cloud structure-, *J. Meteor. Soc. Japan*, 66, 497-504.
- 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 Inter. Conf. Radar Meteor.*, 104-106.
- Kato, R., S. Shimizu, K. Shimose, and K. Iwanami, 2017: Very short time range forecast using CReSS-3DVAR for a meso- γ -scale, localized, extreme, heavy rainfall event: Comparison with an extrapolation-based nowcast, *J. Disaster Res.*, 12, 967-979.
- Kikuchi, H., T. Suezawa, T. Ushio, N. Takahashi, H. Hanado, K. Nakagawa, M. Osada, T. Maesaka, K. Iwanami, K. Yoshimi, F. Mizutani, M. Wada, and Y. Hobara, 2020: Initial observations for precipitation cores with X-band dual polarized phased array weather radar, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 58, 3657-3666.
- 菊地勝弘, 1993: 都市の豪雪災害の予測と軽減・防除に関する研究, 文部省科学技術研究費重点領域研究「自然災害の予測と防災力」研究成果, pp. 609.
- 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 multi-cellular storm over Zoshigaya, Japan, on August 5, 2008. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90, 701-719.
- 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. Oceanic Tech.*, 32, 2052-2074.
- Mizutani, F., T. Ushio, E. Yoshikawa, S. Shimamura, H. Kikuchi, M. Wada, S. Satoh, and T. Iguchi, 2018: Fast-scanning phased array weather radar with angular imaging technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 56, 2664-2673.
- Moteki, Q., H. Uyeda, T. Maesaka, T. Shinoda, M. Yoshizaki, and T. Kato, 2004: Structure and development of two merged rainbands observed over the East China Sea during X-BAIU-99 Part I: Meso- β -scale structure and development processes. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 19-44.
- 中川勝広, 花土 弘, 佐藤晋介, 井口俊夫, 2002: 沖縄偏波レーダー (COBRA) の開発. 通信総合研究所季報, 48, 203-209.
- Shimizu, S., K. Iwanami, R. Kato, N. Sakurai, T. Maesaka, K. Kieda, Y. Shusse, and S. Suzuki, 2019: Assimilation impact of high-temporal-resolution volume scans on quantitative precipitation forecasts in a severe storm; Evidence from nudging data assimilation experiments with a thermodynamical retrieval method. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 145, 2139-2160.
- Takahashi, N., T. Ushio, K. Nakagawa, F. Mizutani, K. Iwanami, A. Yamaji, T. Kawagoe, M. Osada, T. Ohta and M. Kawasaki, 2019: Development of multi-parameter phased array weather radar (MP-PAWR) and early detection of torrential rainfall and tornado risk, *J. Disaster Res.*, 14, 235-247.
- 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.
- 吉崎正憲, 瀬古 弘, 加藤輝之, 小司禎教, 永戸久喜, 別所康太郎, 郷田治稔, 2000: X-BAIU-99 観測グループ, 1999 年東シナ海・九州梅雨特別観測 (X-BAIU-99) 報告. 天気, 47, 217-224.