

2 地上レーダーによる気象現象の観測

2 Observation of Meteorological Phenomena by Terrestrial Radars

2-1 偏波化されたフェーズドアレイ気象レーダー (MP-PAWR) 開発

2-1 Development of Multi-Parameter Phased Array Weather Radar (MP-PAWR)

花土 弘 高橋暢宏 中川勝広 佐藤晋介 川村誠治 岩井宏徳

Hiroshi HANADO, Nobuhiro TAKAHASHI, Katsuhiko NAKAGAWA, Shinsuke SATO, Seiji KAWAMURA, and Hironori IWAI

ゲリラ豪雨や竜巻・突風などの早期検知や予測を目指して開発されたフェーズドアレイ気象レーダー (Phased Array Weather Radar: PAWR) が有する高時間・空間分解能に加え、送受信を二重偏波化 (水平・垂直偏波)、偏波降雨観測することで高精度な降雨強度推定・降雨減衰補正を実現する、偏波化されたフェーズドアレイ気象レーダー (Multi-Parameter Phased Array Weather Radar: MP-PAWR) 開発の紹介を行う。

A phased array weather radar (PAWR) has an innovative high temporal and spatial resolution by applying electronic scanning and digital beamforming technology, as compared with a conventional parabolic antenna type weather radar, which is expected to be useful for early detection and prediction of local heavy rainfall, tornado, and gust. It is MP-PAWR (Multi-parameter Phased Array Weather Radar: MP-PAWR) that adds dual polarization function to this PAWR and enables highly accurate rainfall intensity estimation and rainfall attenuation correction. This paper introduces the outline of MP-PAWR development.

1 まえがき

短時間で急速に生成・発達する積乱雲による豪雨による被害が発生している [1]-[3]。従来型の気象レーダーはパラボラアンテナを機械的に方位方向と仰角方向に走査し降雨を観測するため、上空を含む三次元的な観測を行うのに必要な時間が5～10分であり、前述の急激に高く発達する積乱雲の観測に適していない。時間高度分解能の向上を目的にフェーズドアレイ気象レーダー (Phased Array Weather Radar : 以下 PAWR) が開発され [4]-[6]、2012年に大阪大学吹田キャンパス、2014年にNICTの未来ICT研究所 (兵庫県神戸市)と沖縄電磁波技術センター (沖縄県恩納村)、2015年に気象庁気象研究所 (茨城県つくば市)と日清紡ホールディングス (株) 中央研究所 (千葉県千葉市) [7]に新型気象レーダーが設置観測開始している。これら5台の新型レーダーは水平偏波を使用する単偏波気象レーダーで、国土交通省・自治体等で使われている二重偏波型の気象レーダーに比べ、降雨強度推定精度、降雨減衰補正精度の点で劣る欠点がある。この欠点の解消を目的として、二重偏波機能を有し降

雨強度推定精度・降雨減衰補正精度が優れ、フェーズドアレイアンテナによる高速ビーム走査による高い時間高度分解能を備えた、更なる新型のPAWRが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」(2) 豪雨・竜巻予測技術の研究開発「マルチパラメータフェーズドアレイレーダー等の開発・活用による豪雨・竜巻予測情報の高度化と利活用に関する研究」で開発され、2018年

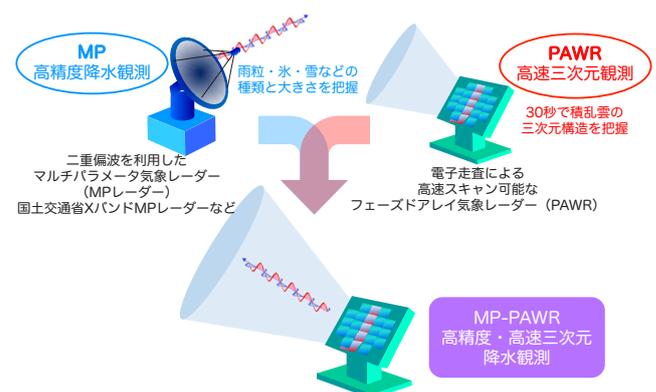


図1 MP-PAWRの開発コンセプト

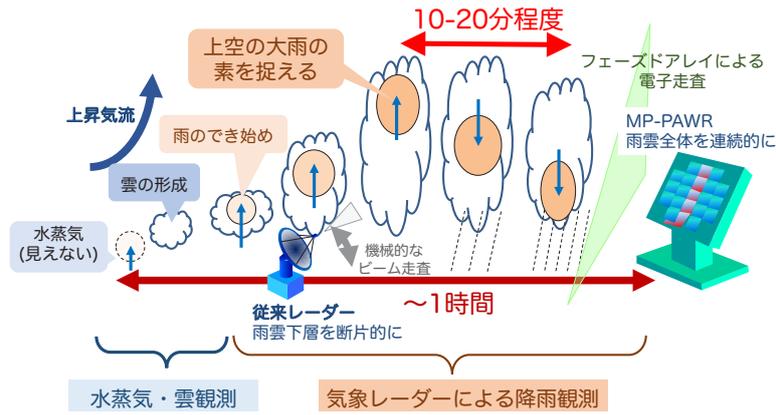


図2 積乱雲の生成・発達過程(時間スケールと観測方法)

3月から埼玉大学で観測を開始した[8][9]。本稿ではこの偏波化されたフェーズドアレイ気象レーダー(Multi-Parameter PAWR:以下MP-PAWRと略す)を紹介する。MP-PAWRの開発コンセプトを図1に、積乱雲の生成・発達過程の時間スケール、従来気象レーダーとPAWR, MP-PAWRの観測方法の違いを図2に示す。従来、気象レーダーは地表付近の雨層の下層の水平分布の観測を中心に行い、上空の降雨の観測は限定的であったのに対し、PAWR, MP-PAWRでは、最下層から上空までの雨雲全体を高頻度で観測することで上空に発生する大雨の素[10]をより早い時間にとらえ、局所的な豪雨の予測を的確に実施することを目的としている。

2 フェーズドアレイ気象レーダー(PAWR)

2.1 フェーズドアレイアンテナによる高速ビーム走査

従来型気象レーダーはパラボラアンテナによる鋭いペンシルビームを方位角方向に回転させ、1回転ごとに仰角方向を変更し、複数の仰角のデータを合成してレーダーを中心とする領域の三次元観測を実施している。PAWRでは、送信時のワイドビームの電子走査と受信時のデジタルビームフォーミングによる同時複数のペンシルビームを合成することでほぼ瞬時に鉛直断面での観測を実施し、方位角方向の1回転で三次元観測が可能となる大きな違いである。X帯の気象レーダーとして国土交通省が全国に39台(平成30年8月時点)整備しているXバンドMPレーダー雨量計の場合には、方位角の回転速度は約2RPMで、5分間の1シーケンスで15周、12方向の仰角での観測^{*1}を行う。それに対し、MP-PAWRでは、方位角方向には比較的低速度による回転で、観測半径80kmの場合:1分、観測半径60kmの場合:30秒で三次元観測が可能である。XバンドMPレーダー雨量計と

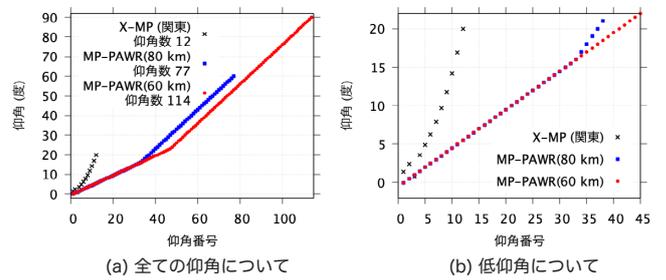


図3 観測仰角の比較(XバンドMPレーダーとMP-PAWR)

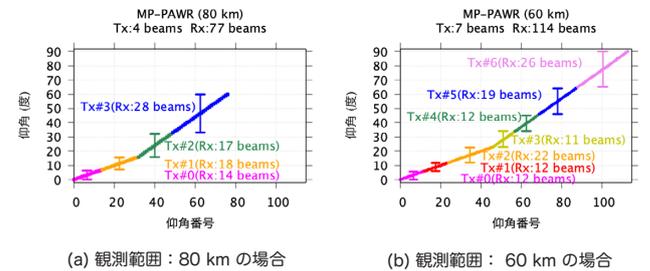


図4 電子走査の送信ビームとデジタルビームフォーミングによる同時受信ビームの関係

PAWRの仰角の違いを図3に示す。図3(a)は、XバンドMPレーダー関東局の12方向の仰角と、MP-PAWRの2つの観測モード:観測半径80kmと観測半径60kmの全仰角を示している。XバンドMPレーダー雨量計の場合、複数のレーダーでのネットワーク的な観測を行う配置でもあり、最大仰角は20度までであるのに対し、MP-PAWRは観測半径が80kmとXバンドMPレーダー雨量計同様の場合に最大仰角60度、少し観測半径が小さい60kmの場合には天頂方向まで観測可能な最大仰角90度と仰角範囲の大幅な拡大が可能なのは仰角方向のビーム走査を機械的で

*1 2つの低い仰角については、1分間隔で交互に観測し、5分間の1シーケンスで5周回り、残りの10周で異なる仰角での観測を行うため、5分間で15周、12方向の仰角での観測となる。

表1 フェーズドアレイアンテナの構成の違い

	PAWR (東芝製)	PAWR (JRC製)	MP-PAWR (東芝製)
アンテナ素子	導波管スロットアンテナ		偏波共用パッチアンテナ
送信アンテナ	受信アンテナ128素子の下側の32素子を共用	受信アンテナの上側に別のアンテナ	受信アンテナの下側に別のアンテナを設置
受信アンテナ	128素子	128素子	112素子
外観	 [4]より	 [7]より	 [8]より

表2 MP-PAWRの主要諸元

名称	MP-PAWR (偏波化されたフェーズドアレイ気象レーダー)											
中心周波数 (占有帯域幅)	9425 MHz (4.4 MHz)											
送信偏波	偏波面45度の直線偏波 (水平・垂直同時送信)											
送信尖頭出力	4.8 kW (水平: 2.4 kW + 垂直 2.4 kW)											
送信アンテナ	偏波共用平面パッチアンテナから構成された長方形アンテナ											
受信アンテナ	偏波共用平面パッチアンテナから構成された八角形アンテナ											
レドーム	直径 4.3 m											
観測モード	通常観測						研究観測					
観測範囲	半径 80 km						半径 60 km					
観測仰角範囲	0度~60度						0度~90度					
時間分解能	60 秒						30 秒					
短パルス幅	1.0 μsec											
仰角数	77						114					
送信ビーム数	4						7					
送信ビーム番号	#0	#1	#2	#3	#0	#1	#2	#3	#4	#5	#6	
DBFによる同時受信ビーム数	14	18	17	28	12	12	22	11	12	19	26	
観測ヒット数	68	78	63	122	48	20	20	20	20	20	36	
長パルス幅	74 μsec			48 μsec			32 μsec					

なく、電子走査を採用しているためである。受信時のデジタルビームフォーミングによる同時複数ビームの採用は仰角数の向上に大きく寄与し、観測半径 80 km で仰角数 77、観測半径 60 km で仰角数 114 と仰角方向のビーム幅 1 度弱に対して、仰角 20 度以下では、その半分の 0.5 度、仰角 20 度以上で 1 度の間隔での観測を行い、仰角方向について抜けない観測が可能である。図 3 (b) は図 3 (a) を低い仰角について拡大したものであり、上述の MP-PAWR が仰角方向に抜けない観測が可能であることが確認できる。また、一番低い仰角についても、X バンド MP レーダーの場合、仰角番号 3 が 0.79 度であるのに対し、それより小さな仰角 0 度、0.5 度のビームでの観測を行っていて、低い仰角の場合には地表物からの反射 (クラッター) の影響が大きくデータの解析が難しくなるが、地表付近の観測データ取得が高い時間間隔で実施できることは特筆すべきことである。図 4 に示したのは、電子走査を行う送信ビームとそれぞれの送信ビーム内をデジタルビームフォーミングで同時に形成され

る受信ビーム数と仰角の関係で、図 4 (a) が観測範囲 80 km、図 4 (b) が観測範囲 60 km の場合である。

2.2 フェーズドアレイアンテナの構成の違い

「まえがき」で記述した、(株) 東芝と日本無線株式会社による 2 種類の PAWR と MP-PAWR で使用されているフェーズドアレイアンテナは、送受信のアンテナビームを送信時に仰角方向にワイドビーム、受信時にはデジタルビームフォーミングによるペンシルビームという点では全て同一であるが、アンテナの構成は異なる。表 1 にその違いを示す。2 種類の PAWR では水平偏波だけでよいと、効率が良く、工作精度でアンテナ性能を設計どおり得ることが容易な導波管スロットアンテナが利用された。偏波を使った降雨レーダー観測では反射強度に加えて、位相情報を使用するため、偏波間の相関を確保する必要があり、水平偏波と垂直偏波の位相中心を同一にし、ビームの形状を一致させることを実現するため、MP-PAWR では偏波共用の素子アンテナを用いることにした。この偏波共用



図5 埼玉大学に設置された MP-PAWR と観測範囲

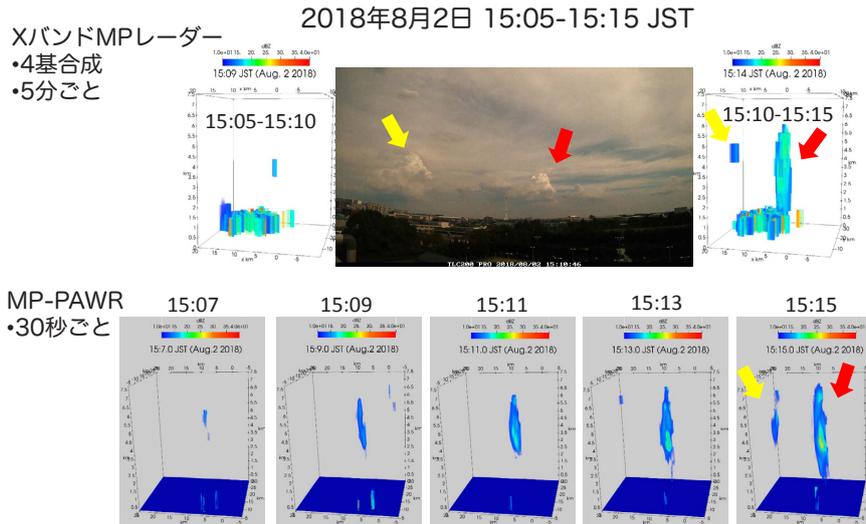


図6 MP-PAWRの観測例(XバンドMPレーダーとの比較)

アンテナの開発は、平成24～26年に実施された電波利用料“周波数の有効利用を可能とする協調制御型レーダーシステムの研究開発”の成果[11]が利用された。

3 偏波化されたフェーズドアレイ気象レーダー(MP-PAWR)

3.1 MP-PAWRの諸元と観測範囲

表2にMP-PAWRの主要な諸元を示す。MP-PAWRは国土交通省に整備されているXバンドMPレーダー雨量計と同様の観測範囲80kmの通常観測モードと、それより少し狭い観測範囲60kmの研究観測モードの2つのモードを有する。前者は複数の気象レーダーから構成される観測網を想定し、自局の真上の観測は行わず、周囲の他局による横方向からの観測を利用することを想定し、観測仰角範囲は0～60度と仰角60度以上の観測は行わない。また、偏波観測の測定精度の向上を図るために、同一観測体積の観測に利用するヒット数を60ヒット以上確保するため、方位角方向の回転を一周60秒とし、仰角方向のビーム数を77としている。それに対し、研究観測モードでは一台のレーダーで、自局の真上を含む周囲の降雨三次元観測を行うため、観測仰角範囲は0～90度とし、三次元観測の時間分解能を通常観測モードより良い30秒とするために、方位角方向の回転は一周30秒である。これらのことにより、観測ヒット数が少なくなるビームがあり、20ヒットとかなりヒット数が少ない場合がある。今後、これら2つにモードを適宜変更して降雨観測を行い、目的に応じた観測モードの最適化を行うことを計画している。

図5に埼玉大学に設置されたMP-PAWRの外観の

写真と、2つの観測モードでの観測範囲について違いを地図上に示す。通常観測モードでは、半径80kmの範囲で降雨観測が可能であり、首都圏の大規模河川である一級河川の荒川流域を上流の秩父地方から下流までほぼカバーする。研究観測モードでは、半径60kmの範囲と少し観測領域が狭くなるが、2020年度夏季に開催される東京オリンピック・パラリンピックの開催会場の多くをカバーし、夏季に多い活発な積乱雲の生成・発達を30秒という高い時間分解能で観測できる。

3.2 孤立積乱雲の観測例(2018年8月2日)

図6に、2018年8月2日に観測された孤立した積乱雲の観測結果の例を示す。図6の下段の5枚の図は、MP-PAWRの30秒ごとの観測結果を、2分間隔(15:07～15:15:8分間)に間引き示している。これらには、上空、高度4～6km付近で生成された降雨域が、短時間で成長、地上に向かって落下してくる様子が明瞭にとらえられている(図6下右図の赤色の矢印で示す)。図6中央の写真は埼玉大学から撮影された15:10:46の東～南方向の写真で、赤色と黄色の矢印で示されている積乱雲が、図6下右図の15:15のMP-PAWRでの観測結果のレーダーエコーに対応している。写真とレーダー観測結果と比べると、写真の15:10:46の時点で積乱雲としては明確に生成・発達されている状況がわかるが、レーダーエコーではまだとらえられていない。積乱雲の生成段階では、まだ雲中の水滴が小さく、X帯のマイクロ波レーダーでは観測できず、水滴が大きく、雲粒から雨粒程度になり、観測可能になる(雲粒を観測するにはより高い周波数で波長の短いミリ波の雲レーダーが必要)。図6の左上と右上に示した三次元のレーダーエコーは、関東域に設置された4

台の X バンド MP レーダー雨量計の観測結果を 5 分のシーケンス (15:05 ~ 15:10 が左上図、15:10 ~ 15:15 が右上図) で合成された三次元画像で、左上の図で赤矢印に対応する小さな雨域が上空に観測されているが、その次となる 5 分後には一気に成長し、地上まで達する降雨となっている。従来型の気象レーダーは地表付近の降雨の水平分布を測定する観点で、低い仰角での観測は約 1 分間隔での時間更新がなされているが、上空の降雨観測の時間更新間隔は 5 分程度と大きく、急速に発達する積乱雲の状況把握には十分とは言えず、フェーズドアレイ気象レーダー開発で可能となった、30 秒または 1 分という高い時間分解能が必要であることが分かる。

4 まとめ

MP-PAWR は降雨観測を開始し 1 年余りで、現時点では初期的観測機能確認は行えているがその性能を十分に測定し、最大限の観測性能が確保できるための調整作業は実施できていない。2019 年度は MP-PAWR の性能確認のための観測、外部校正測定を行い、最大限の観測性能の確保に注力するとともに、SIP 第 2 期「国家レジリエンス (防災・減災) の強化」『V. 線状降水帯の早期発生および発達予測情報の高度化と利活用に関する研究』の中心観測機器として安定した運用とデータ配信を実現する。

謝辞

本開発は、内閣府 総合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 「レジリエントな防災・減災機能の強化」(2) 豪雨・竜巻予測技術の研究開発「マルチパラメータフェーズドアレイレーダ等の開発・活用による豪雨・竜巻予測情報の高度化と利活用に関する研究」管理人：国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST) で実施された。

【参考文献】

- 1 平成 21 年度河川水難事故防止策に関する担当者会議, “兵庫県 都賀川事故概要,” http://www.thr.mlit.go.jp/sendai/kasen_kaigan/river-attention/pdf/02.pdf.
- 2 土木学会都賀川水難事故調査団, “都賀川水難事故調査について,” <http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/ndic/bunkakai/fujiita2008.pdf>.
- 3 東京都下水道局, 雑司ヶ谷幹線再構築工事事故調査委員会, “雑司ヶ谷幹線再構築工事事故調査報告書,” 平成 20 年 9 月 1 日 <https://www.mlit.go.jp/common/000024056.pdf>.
- 4 情報通信研究機構: プレスリリース, “日本初「フェーズドアレイ気象レーダ」を開発,” 2012 年 8 月 31 日, <https://www.nict.go.jp/press/2012/08/31-1.html>.
- 5 佐藤晋介, 牛尾知雄, 水谷文彦, “フェーズドアレイ気象レーダの研究開発,” NICT News 2013 年 1 月号 no.424, pp.3-5, 2013.
- 6 F. Mizutani, T. Ushio, E. Yoshikawa, S. Shimamura, H. Kikuchi, M. Wada,

S. Satoh, and T. Iguchi, “Fast-scanning phased-array weather radar with angular imaging technique,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 56, pp.2664–2673, 2018. doi: 10.1109/TGRS.2017.2780847.

- 7 日本無線: ニュース, “展示会情報: 『Meteorological Technology World Expo 2016』に気象レーダを出展,” <https://www.jrc.co.jp/jp/about/news/2016/0912-1.html>.
- 8 情報通信研究機構: プレスリリース, “世界初の実用型「マルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダ (MP-PAWR)」を開発・設置,” 2017 年 11 月 29 日, <https://www.nict.go.jp/press/2017/11/29-1.html>.
- 9 N. Takahashi, T. Ushio, K. Nakagawa, F. Mizutani, K. Iwanami, A. Yamaji, T. Kawagoe, M. Osada, T. Ohta, and M. Kawasaki, “Development of Multi-Parameter Phased Array Weather Radar (MP-PAWR) and Early Detection of Torrential Rainfall and Tornado Risk,” Journal of Disaster Research, vol.14, no.2, pp.235–247, March 2019.
- 10 中川勝広, 片山勝之, 増田有俊, 是津耕司, 中北英一, “渦管を用いた局地的豪雨探知手法に関する研究,” 土木学会論文集 B1 (水工学), vol.74, no.5, pp.1_265–1_270, 2018.
- 11 総務省電波利用料, 電波資源拡大のための研究開発の実施, 平成 26 年度終了課題, “周波数の有効利用を可能とする協調制御型レーダシステムの研究開発,” https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/H26_RD06.pdf.



花土 弘 (はなど ひろし)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究マネージャー
理学修士
マイクロ波リモートセンシング



高橋 暢宏 (たかはし のぶひろ)

名古屋大学
宇宙地球環境研究所
飛翔体観測推進センター
教授
博士 (理学)
レーダー気象学



中川 勝広 (なかがわ かつひろ)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
室長
博士 (工学)
レーダー水文学



佐藤 晋介 (さとう しんすけ)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究マネージャー
博士 (理学)
レーダー気象学



川村誠治 (かわむら せいじ)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
主任研究員
博士(情報学)
レーダーリモートセンシング



岩井宏徳 (いわい ひろのり)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
主任研究員
博士(理学)
電波・光リモートセンシング、
メソスケール気象