

令和 3 年 5 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02069

研究課題名(和文)C帯偏波フェーズドアレイ気象レーダのシステムデザイン

研究課題名(英文)System Design of the Phased Array Weather Radar at C band

研究代表者

牛尾 知雄(Ushio, Tomoo)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：50332961

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、C帯フェーズドアレイレーダ実現に向けて、システム検討、グラウンドクラッタ除去、圧縮センシングによる空間分解能向上技術に取り組んできた。アンテナ形状の検討では、球形形状がサイドローブレベルの方位角、仰角依存性等の特性上最も優れていることがわかった。また、MMSE規範によるビーム形成の検討を行った結果、地面方向へのサイドローブレベルを、パラボラアンテナに比して数十dB低く抑えることができることがわかった。また、圧縮センシング技術の検討では、ビーム幅を数倍程度細くすることと同等の空間分解能向上を得ることができることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

局地的な豪雨や竜巻など、地球温暖化や都市化の進行と共に、気象災害の防止に対する社会的な重要度は年々増している。本研究では、気象庁等での導入が期待されている次世代のC帯偏波フェーズドアレイ気象レーダの研究開発を行った。検討したレーダは、機械的な走査方法を一切用いない、マルチビームが可能な固定型のデジタルビームフォーミング技術を用いたフェーズドアレイレーダ方式であり、アレイ形状や信号処理、ビームスケジューリング等のシステムシミュレーションを実施、その実現の可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have been working on system studies, ground clutter removal, and spatial resolution improvement technology by compressed sensing toward the realization of C-band phased array radar. In the examination of the antenna shape, it was found that the spherical shape is the best in terms of characteristics such as sidelobe level on azimuth and elevation angle dependence. In addition, as a result of examining the beam formation according to the MMSE concept, it was found that the side lobe level toward the ground can be suppressed to several tens of dB lower than that of the parabolic antenna. In addition, in the study of compressed sensing technology, it was shown that the same improvement in spatial resolution as reducing the beam width by several times can be obtained.

研究分野：レーダリモートセンシング

キーワード：レーダ 気象 フェーズドアレイ

## 1. 研究開始当初の背景

### < 豪雨災害 >

近年の社会の情報化、高度化に伴い、集中豪雨や突風など気象災害に対する迅速な観測、警報、避難の必要性は年々広く認識されるようになってきている。例えば、昨年度鬼怒川流域において発生した河川氾濫や今年度に東北や北海道にもたらされた台風に伴う豪雨は、多くの犠牲者と損害を我が国にもたらした。このような甚大な被害をもたらす大気現象の詳細な構造を観測するのに最も有効な手段は、電磁波を用いたリモートセンシング技術であり、レーダ技術として良く知られている。この技術を用いた大型の気象レーダは、気象庁等で従来から、台風や低気圧、梅雨前線などによる降雨を観測するために、日本全土を覆うように配備され、利用されている(図1)。

### < 現状のレーダの課題と今後 >

現在、気象庁等において運用されている 5GHz 帯(Cバンド)の大型気象レーダによる観測網では、パラボラ型の大型アンテナを機械的に走査することによって、地表面付近の降雨をおよそ5分おきに観測、高解像度降水ナウキャストや数値予報のデータとして広く利用されている。しかし一方で、市町村が避難勧告等を判断するために必要な、より正確な雨量予測やきめ細かな雨量情報の提供を行うことができていない問題が指摘されており、今後の技術開発の方向性として次世代のCバンド帯における大型2重偏波フェーズドアレイ気象レーダが望まれている(交通政策審議会気象分科会)。

これに対して、申請者らは、最新の情報通信技術を用いて、電子走査による高速スキャンが可能なXバンドフェーズドアレイ気象レーダの開発に成功している(図2)。このレーダは、降雨の構造を100仰角にわたって30秒以内に観測できる極めて高い性能を有している一方、偏波機能を有しないことや観測範囲が60kmに限られる、降雨減衰等のため、降雨減衰の問題がないC帯で偏波化そして観測半径を現在の大型レーダ観測網の400kmに拡充することが求められている。

## 2. 研究の目的

現在のXバンドのフェーズドアレイ気象レーダでは、仰角方向に電子走査を行い、方位角方向には機械的な走査方法を用いるハイブリッド型走査を行っている。しかし、半径400kmの観測範囲を有するC帯の大型気象レーダにハイブリッド型走査を用いた場合、観測半径の大きさから時間分解能が少なくとも数分間となる原理的な問題点がある。そこで本研究では、機械的な走査方法を一切用いない、マルチビームが可能な固定型のフェーズドアレイレーダ方式を検討する。

## 3. 研究の方法

こうした機械駆動部のない全面フェーズドアレイ方式の実現には、多くの課題がある。例えば、

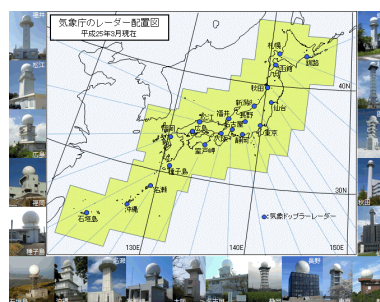


図1 気象庁における大型Cバンドレーダの観測網



図2 大阪大学設置のXバンドフェーズドアレイ気象レーダ

斜め方向や高仰角計測の際の観測パラメータの精度劣化や高サイドローブ化，グランドクラッタ，遠距離における空間分解能劣化などである。本研究では，これらの課題に対して，球型アレイや円柱型アレイなど平面でない形状のアレイ化，各アンテナ素子の受信信号へ最新の信号処理理論の適用，そして竜巻等突風・局地的大雨など短時間で急発達する現象の予測の改善の評価などによって，C帯の偏波フェーズドアレイ気象レーダの成立性を検討する。そのため，様々なアレイ形状の最適設計（図3参照）など，レーダのシステムシミュレーションを実行し，所定の観測精度を満たすC帯大型偏波フェーズドアレイ気象レーダシステムのデザイン研究を行う。

また，大阪大学，NICT，気象庁気象研究所に設置されているXバンドフェーズドアレイ気象レーダ，現在開発中のXバンド偏波フェーズドアレイレーダ等を用いた実験的な検討を行う。特に観測範囲の広い大

型フェーズドアレイレーダでは，グランドクラッタの影響を大きく受けると思われる。そのため，グランドクラッタを効果的に精度良く除去できるビーム形成の

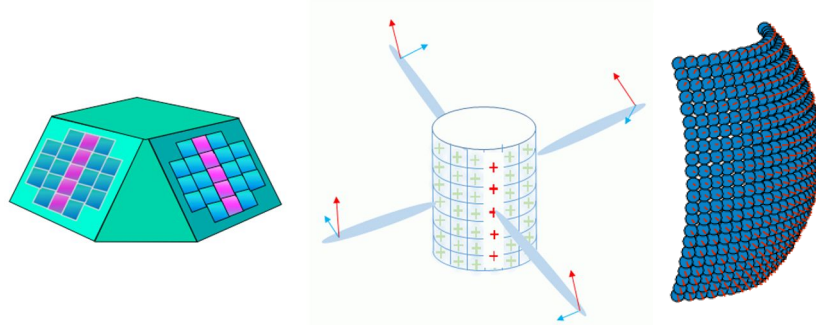


図3 様々なアレイ形状。左から平面型，円柱型，球型アレイ。

信号処理検討が必要不可欠である。各アンテナ素子において受信・出力される中間周波数の実測データに基づき適応的な信号処理理論を適用したC帯大型フェーズドアレイ気象レーダにおけるビーム形成手法を検討する。

#### 4. 研究成果

本検討では，縦軸に方位角方向，横軸に距離を取った水平分布の二次元平面に対して，観測において想定される降雨分布を設定する。降雨分布には観測パラメータとしてレーダ反射因子( $Z_h$ [dBZ])，レーダ反射因子差( $Z_{dr}$ [dB])，偏波間位相差変化率( $K_{dp}$ [deg/km])を用いる。また設定したレーダ反射因子から，レーダ方程式を用いて受信電力を計算しシミュレーションで用いる。そして設定した降雨分布に対して，前項で示されたアンテナ性能を考慮し，複素デジタル信号で形成される受信信号データを算出し，そこから各観測パラメータを得る。

想定した降雨分布はシミュレーションを現実的な観測に近づけるため，実際に運用されているX帯フェーズドアレイレーダの観測データをもとに作成した。この降水コアをレーダからおおよそ90[km]離れた方位角45[deg]方向に設定した。選択した観測データは，孤立積乱雲による局所的に強い降雨である。図4に実際に用いた降雨分布を示す。

数値計算による結果の一例を図5にしめす。平面型のレーダ反射因子においては，降雨を過大に評価する傾向にある。これは平面型アレイでは仰角及び方位角の上昇に伴い，アンテナパターンのビーム幅が広がりサイドローブレベルが上昇したためだと考えられる。また仰角方向への走査よりも方位角方向への走査のほうが，サイドローブレベルが高く，水平分布の降雨に対しより誤差が大きくなり不向きであった。

また，円柱型のレーダ反射因子では，水平分布の降雨に対してはパラボラ型と同等に精度での観測が達成できたが，垂直分布に対しては降雨を過大に評価することがわかった。これは円柱型アレイが仰角方向への走査のみ，ビーム幅の広がりやサイドローブレベルの上昇によるアン

テナパターンの劣化があるためだと考えられる。一方、半球型では、ターゲットまた水平分布、垂直分布に関わらずパラボラ型と同等の精度での観測を行うことができた。さらに、偏波パラメータであるレーダ反射因子差と偏波間位相差変化率は、本研究のシミュレーションではどのアレイ形状でも同等の精度で観測することができた。これは本シミュレーションで用いたターゲットでは偏波パラメータの値が大きい部分が、低仰角位置にあったためどの形状でも XPD が十分確保できていたためだと考えられる。

以上のことから、固定型C帯二重偏波フェーズドアレイレーダを開発するにあたり、半球型のアレイを用いることによって、現状運行されているC帯二重偏波気象レーダと同等の精度での三次元観測を行うことが可能であると考えられる。

また、紙面の都合上、全ての結果を記すことが出来ていないことを最後に追記しておく。

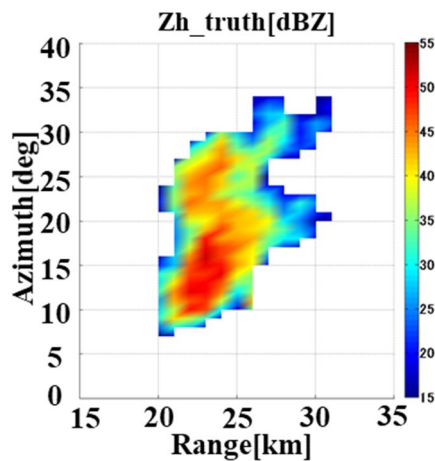


図4 検討に用いた降雨分布図

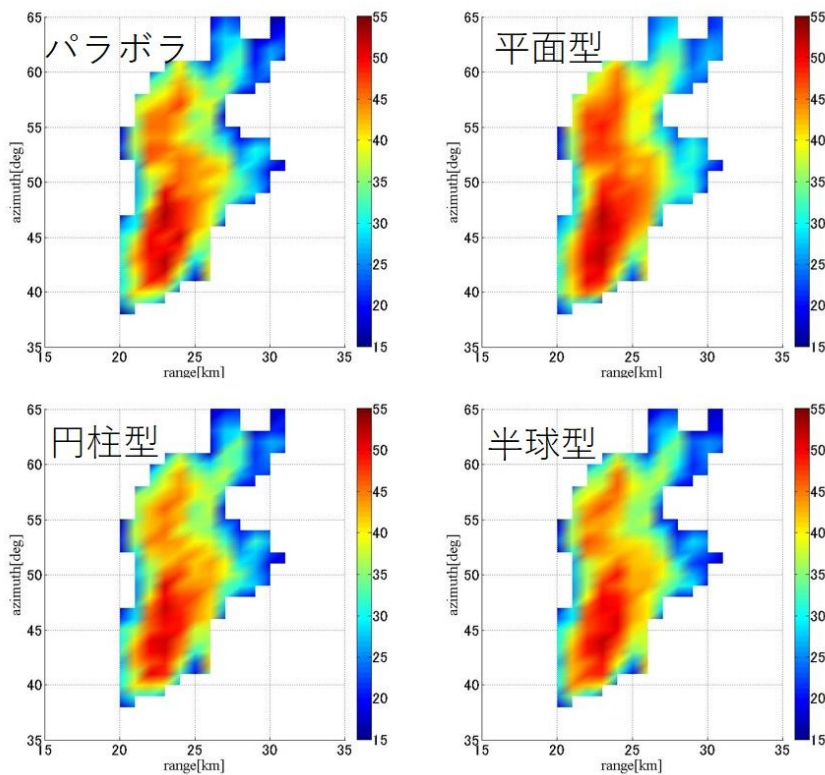


図5 数値計算による想定される様々なアンテナ方式による観測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoshikawa Eiichi, Ushio Tomoo	4. 巻 100
2. 論文標題 Tactical Decision-Making Support Information for Aircraft Lightning Avoidance: Feasibility Study in Area of Winter Lightning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bulletin of the American Meteorological Society	6. 最初と最後の頁 1443 ~ 1452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/BAMS-D-18-0078.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kawami Ryosuke, Kitahara Daichi, Hirabayashi Akira, Yoshikawa Eiichi, Kikuchi Hiroshi, Ushio Tomoo	4. 巻 140
2. 論文標題 Three-Dimensional Data Compression and Fast High-Quality Reconstruction for Phased Array Weather Radar	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 40 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.140.40	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kikuchi, H., T. Ushio, F. Mizutani, and M. Wada	4. 巻 56
2. 論文標題 Improving the Accuracy of Rain Rate Estimates Using X-Band Phased Array Weather Radar Network	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE. Trans. Geosci. Remote. Sens.	6. 最初と最後の頁 pp. 6986-6994
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2018.2846818	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Isoda, F., S. Satoh, and T. Ushio	4. 巻 14
2. 論文標題 Temporal and Spatial Characteristics of Localized Rainfall on 26 July 2012 Observed by Phased Array Weather Radar	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SOLA	6. 最初と最後の頁 pp. 64-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/sola.2018-011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mizutani, F., T. Ushio, E. Yoshikawa, S. Shimamura, H. Kikuchi, M. Wada, S. Satoh, and T. Iguchi	4. 巻 56
2. 論文標題 Fast-Scanning Phased Array Weather Radar with Angular Imaging Technique	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE. Trans. Geosci. Remote. Sens	6. 最初と最後の頁 pp. 2664-2673
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2017.2780847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 123.Kawami, R., A. Hirabayashi, N. Tanaka, T. Ijiri, S. Shimamura, H. Kikuchi, G. Kim, T. Ushio	4. 巻 137-C
2. 論文標題 Simple Compression Technique for Phased Array Weather Radar and 2-Dimensional High-Quality Reconstruction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ	6. 最初と最後の頁 864-870
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kikuchi Hiroshi, Yoshikawa Eiichi, Ushio Tomoo, Mizutani Fumihiko, Wada Masakazu	4. 巻 55
2. 論文標題 Application of Adaptive Digital Beamforming to Osaka University Phased Array Weather Radar	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 3875 ~ 3884
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2017.2682886	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kikuchi Hiroshi, Wu Ting, Yoshikawa Eiichi, Ushio Tomoo, Goto Hideto, Mizutani Fumihiko, Wada Masakazu, Chandrasekar V.	4. 巻 55
2. 論文標題 Performance of Minimum Mean-Square Error Beam Forming for Polarimetric Phased Array Weather Radar	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 2757 ~ 2770
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2017.2653816	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Nakamura, K., H. Kikuchi, T. Mega, and T. Ushio
2. 発表標題 Preliminary analysis to design C-band polarimetric phased array weather radar
3. 学会等名 39th International Conference on Radar Meteorology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ushio, T., H. Kikuchi, T. Suezawa, and A. Onuki
2. 発表標題 Polarimetric Radar Observations with Multiparameter Phased-Array Radar in the Tokyo Area
3. 学会等名 99th AMS Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Uchida, T., E. Yoshikawa, H. Kikuchi, N. Takizawa, T. Mega and T. Ushio
2. 発表標題 Interference Elimination via Minimum Mean Square Error on Phased-Array Weather Radar Using Angular Imaging Technique
3. 学会等名 99th AMS Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Yoshikawa, E., T, Ushio
2. 発表標題 Comb Beam Transmission by Phased-Array Antenna for Troposphere-Adaptive Observation
3. 学会等名 99th AMS Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Kikuchi, H., and T. Ushio
2. 発表標題 Rain rate estimates using phased array weather radar network in Kansai area, Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Ushio, T., H. Kikuchi, T. Mega, and E. Yoshikawa
2. 発表標題 Phased Array Weather Radar Observation; Advantage and Disadvantage -
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Tomoaki Kida, Hiroshi Kikuchi, Tomoo Ushio
2. 発表標題 Design and development of polarimetric phased array weather radar
3. 学会等名 IAPSO-IAMAS-IAGA 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Kikuchi, Tomoo Ushio, Fumihiko Mizutani, Masakazu Wada
2. 発表標題 PERFORMANCE IMPROVEMENT OF DIGITAL BEAMFORMING FOR PHASED ARRAY WEATHER RADAR
3. 学会等名 XXXIIInd URSI 2017 GASS (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 喜田智亮, 菊池博史, 牛尾知雄
2. 発表標題 気象用二重偏波フェーズドアレイレーダのアレイ形状の初期検討
3. 学会等名 日本気象学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 喜田智亮, 菊池博史, 牛尾知雄, 水谷文彦
2. 発表標題 X帯二重偏波フェーズドアレイレーダの偏波観測誤差の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 牛尾知雄
2. 発表標題 フェーズドアレイ気象レーダの概要と今後
3. 学会等名 フェーズドアレイレーダ 第2回シンポジウム - 現在の利用状況から将来展望まで - (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	丸田 章博  (Maruta Akihiro)  (40252613)	大阪大学・工学研究科・教授    (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	楠 研一  (Kusunoki Kenichi)  (40354485)	気象庁気象研究所・台風・災害気象研究部・室長    (82109)	
研究分担者	平林 晃  (Hirabayashi Akira)  (50272688)	立命館大学・情報理工学部・教授    (34315)	
研究分担者	岩波 越  (Koyuru Iwanami)  (60221793)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・総括主任研究員    (82102)	
研究分担者	高橋 暢宏  (Takahashi Nobuhiro)  (60425767)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授    (13901)	
研究分担者	吉川 栄一  (Yoshikawa Eiichi)  (70619395)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員    (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関