

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 17 日現在

機関番号：14401  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2014～2016  
課題番号：26350487  
研究課題名(和文) フェーズドアレイ気象レーダと雷放電標定装置を併用した気象災害防災システムの構築

研究課題名(英文) Development of weather disaster prevention system with Phased Array Weather Radar and Lightning Location System

研究代表者  
牛尾 知雄 (Ushio, Tomoo)  
大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：50332961  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：竜巻等の突風，雷放電，局地的大雨による甚大な気象災害の防止に対する社会的要求は，年々その重要性が認識されるようになってきている。本研究では，昨年開発に成功した超高速走査が可能なフェーズドアレイレーダネットワーク，広帯域レーダネットワークそして雷放電の3次元標定装置を核として，大阪，神戸地域を中心に観測網を構築，そのデータ配信処理アルゴリズムの開発とデータ配信システムの構築を行った。

研究成果の概要(英文)：Recently, it has been required to mitigate hazardous meteorological phenomena such as tornado, heavy rainfall event, lightning. In this research, Phased Array Weather Radar Network, Broad Band Ku-band Radar Network, and lightning location system are put together in Osaka Bay Area to monitor severe thunderstorm. Especially data processing algorithm and data distribution system are developed and evaluated.

研究分野：レーダリモートセンシング

キーワード：レーダ 降水 積乱雲 防災

## 1. 研究開始当初の背景

近年の日本社会の情報化、高度化に伴い、集中豪雨などに伴う土砂災害、竜巻、雷放電等、災害気象に対する警報、正確な情報伝達の必要性は、年々広く認識されるようになってきている。このような災害気象現象に対する社会的な損失は莫大であり、例えば、平成24年5月に茨城県、平成25年9月に埼玉県・栃木県・群馬県で発生した竜巻は、住宅街を中心として、死者や多数の負傷者、家屋損壊など多くの被害をもたらした。あるいは、平成24年8月には、大阪市長居公園において野外コンサートを訪れた観客が雨宿りの最中に落雷を受け、死に至る被害が出た。このような竜巻や集中豪雨をもたらす積乱雲を観測する最も有効な手段は、気象レーダであり、また雷放電を検出するシステムは、雷位置標定システムとして知られている。これらの気象レーダを核とした気象災害警報システムは、その被害を未然に防ぐ最も重要なインフラシステムといえる。

こうした大型レーダを用いた現在の気象災害警報システムは、しかし、以下のような制約を受けることが近年指摘されている。1) 3次元スキャンを行うのに要する時間が10分以上である。集中豪雨や竜巻は、しばしば、数分といった短時間で生成し、発達するためレーダの時間分解能が不足する。2) 地表面付近が観測できない。地球の曲率のため、100km以上の観測範囲を有する現在の大型レーダでは、実際に被害の起こる地表面付近が観測できないため、警報あるいは予知の精度が制限される。3) 現在の雷位置標定システムは、落雷ポイントのみを検出するため、3次元的に広がった積乱雲のどの場所で、放電が生起しているのか情報を得ることが難しい。

以上のような制約に対して、申請者らは、最新の情報通信技術を用いて、電子走査に高速スキャンが可能なフェーズドアレイドップラーレーダの開発に成功した(図1)。本レーダでは、半径60km圏内を10秒から30秒といった短時間で3次元観測することが可能であり、今後の防災システムに極めて有効であると期待されている。しかしながら、これらの高分解能レーダによって観測された3次元高分解能データを、防災システムで、どのようなモードで運用し、どのようなプロダクトを作成・合成し、どのように利用し、そしてどのように予知や警報に結び付けるのかは今後の検討課題となっている。特に、近年の情報通信技術の進歩の結果、スマートフォンやタブレット端末等が急速に普及し、また高速大容量光ファイバーネットワークが各家庭まで整備されるようになってきている。このような高度にネットワーク化された社会においては、上記の高分解能観測データを活用した新たな形態での防災システムが可能になると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、2012年に開発に成功した超高速走査が可能なフェーズドアレイレーダネットワーク、広帯域レーダネットワークそして雷放電の3次元標定装置を核として、大阪、神戸地域を中心に観測網を構築、そのデータ配信処理アルゴリズムの開発とデータ配信システムの構築を行う。

## 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、フェーズドアレイレーダ、広帯域レーダネットワーク、広域3次元雷放電標定装置を用いた観測実験を行い、1) データ処理アルゴリズムの開発、2) データ統合アルゴリズムの開発、3) データ表示・配信処理システムの構築、を行う。

## 4. 研究成果

大阪大学吹田キャンパスに設置されているフェーズドアレイ気象レーダおよび西神戸に設置されている同じフェーズドアレイ気象レーダの2台のネットワークを用いて、研究期間を通じて観測実験を行った。図1に研究に用いたフェーズドアレイレーダの配置図を示す。



図1 フェーズドアレイレーダネットワークの配置図

この観測実験に先立ち、バルーンを用いたレーダの較正実験および近隣の建屋屋上からのホーンアンテナを用いた対向較正を行った。その結果、約1dB以内の精度で、レーダシステム全体の絶対較正をすることができた。フェーズドアレイレーダは100度仰角にわたる3次元観測を30秒以内に終了できる性能を有している。そのため、従来型のパラボラアンテナを用いたレーダに比して、バルーンなどの飛行体を効率的に補足することが可能である。本研究によって、そのようなフェーズドアレイ気象レーダの利点を示すことができた。

また、2台のフェーズドアレイレーダネットワークによる、高精度な降雨減衰補正アルゴリズムの研究開発、そしてデータ合成手法の検討を行った。本研究で用いているフェーズドアレイ気象レーダは、X帯の電波を用いている。そのため、降雨減衰の影響を受けやすく、データ利用には補正処理を行う必要がある。本研究では、複数台のレーダを用いた確率論的なアプローチによって、補正アルゴ

リズムを検討した。一般的に、降雨減衰の補正解は、以下の Hirschfeld-Bordan (HB) 解によって与えられる。

$$Z_{HB}(r) = Z_m(r) \left[ 1 - 0.2b \ln 10 \int_0^r a Z_m^b(r) \right]^{-1/b}$$

ネットワーク環境下においては、この HB 解がそれぞれのレーダノードにおいて求められる。この時、それぞれのレーダノードからの HB 解の分散は以下の式で近似的に与えられることがわかった。

$$\text{Var}(Z_{HB}(r)) = \text{Var}(Z_{HB}(r-1)) \cdot (1 + 0.2a \frac{b}{10} \log 10 \cdot \exp(\frac{b}{10} \log 10 \cdot Z_{HB}(r-1)))$$

その結果、ネットワーク環境下におけるレーダ反射因子の最適解は、以下の式で与えられることになる。

$$Z_{int} = \frac{W_{PAR1} Z_{HB}^{(PAR1)} + W_{PAR2} Z_{HB}^{(PAR2)}}{W_{PAR1} + W_{PAR2}}$$

$$W_i = \frac{1}{(S_{HB}^{(i)})^2}$$

このような本手法を評価した結果、偏波レーダと同等な精度を有する降雨減衰補正・ネットワーク合成アルゴリズムを開発することができた。

また、デジタルビームフォーミング技術を用いた本フェーズドアレイ気象レーダの場合、送信に仰角方向にビーム幅の広い送信波を送信する。そのため、仰角方向のサイドローブレベルが従来型のパラボラアンテナに比して 10dB 以上高くなり、グラウンドクラッタおよび強い降雨域の影響を受けやすい。そのため、適応的な信号処理手法が有効であると考えられ、本研究では MMSE 法を応用したグラウンドクラッタ除去アルゴリズムを検討した。

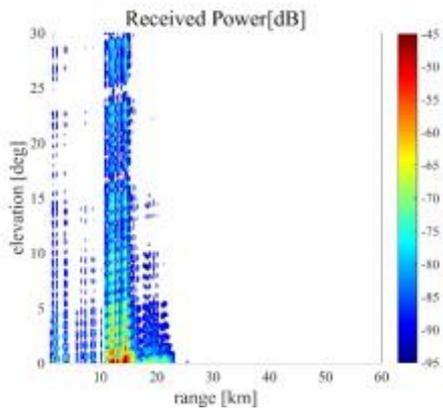


図 2 Ground Clutter の影響を示す図

図 2 に、とある方位角におけるレーダ反射因子の鉛直断面図を示す。このように、半径方向に 10km から 20km の範囲において、業買う 20 度以上の領域まで数十 dB 程度までデジタルビームフォーミングに因るとされるクラッタエコーが観測されている。これに対し、MMSE (Minimum Mean Square Error) 規範に基づいたアルゴリズムを適用した結果を図 3 に示す。

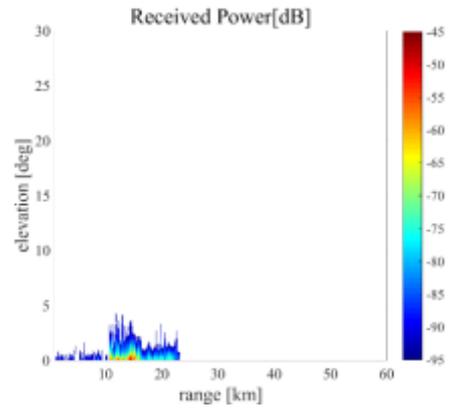


図 3 MMSE 法を適用した場合

このように MMSE 規範を適用した結果、仰角数十度以上に見られたグラウンドクラッタエコーが除去され、一方で仰角数度以下においては、高層ビルと思われる散乱を適切に捉えていることがわかる。結果、開発したアルゴリズムによって、20dB 以上の改善を見込むことができるようになった。

また一方、フェーズドアレイレーダネットワークは単偏波のレーダであり、定量的な雨量推定が比較的難しいことが知られている。そこで、本研究では XRain における地上付近の雨量とフェーズドアレイレーダにおける最低仰角におけるレーダ反射因子を比較し、動的な Z-R 関係を求めることによって、3 次元的に密でかつ、30 秒毎の雨量を求めるアルゴリズムの開発を行った。図 4 にその結果を示す。このように、フェーズドアレイレーダから推定される雨量は、XRain における推定雨量と相関係数 0.85 以上の相関をゆうしており、平均バイアスが 0.2mm/h 以内であることがわかった。

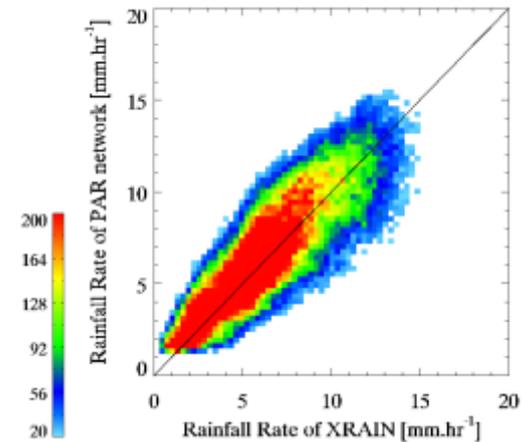


図 4 フェーズドアレイレーダネットワークによって求められる雨量強度と XRain ネットワークによって求められる雨量との比較

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計6件)

1. Miyoshi, T., G. Lien, S. Satoh, T. Ushio, K. Bessho, H. Tomita, S. Nishizawa, R. Yoshida, S. Adachi, J. Liao, B. Gerofi, Y. Ishikawa, M. Kunii, J. Ruiz, Y. Maejima, S. Otsuka, M. Otsuka, K. Okamoto, H. Seko, "Big Data Assimilation" Toward Post-Petascale Severe Weather Prediction: An Overview and Progress, *Proc. IEEE*, 104, 11, pp. 1-25, 2016.11 (Invited paper) (査読有)
2. Shimamura, S., V. Chandrasekar, T. Ushio, G. Kim, E. Yoshikawa, and H. Chen, Probabilistic Attenuation Correction in a Networked Radar Environment, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 54, No. 11, doi: 10.1109/TGRS.2016.2592532, 2016 (査読有)
3. Sallam, T., A. Abdel-Pahman, M. Glghoniemy, Z-I Kawasaki, and T. Ushio, A Neural-Network-Based Beamformer for Phased Array Weather Radar, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 54, No. 9, pp. 5095-5104, 2016.9 (査読有)
4. Adachi, T., K. Kusunoki, S. Yoshida, K. Arai, and T. Ushio, High-Speed Volumetric Observation of Wet Microburst using X-band Phased Array Weather Radar in Japan, *Mon. Weather Rev.*, 144, pp. 3749-3765, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-16-0125.1>, 2016 (査読有)
5. Yoshikawa, E., V. Chandrasekar, T. Ushio, and T. Matsuda, A Bayesian Approach for Integrated Raindrop Size Distribution (DSD) Retrieval on an X-Band Dual-Polarization Radar Network, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0060.1>, 2015 (査読有)
6. Ushio, T., T. Wu, S. Yoshida, Review of recent progress in lightning and thunderstorm detection techniques in Asia, *Atmos. Res.*, 154, 1, pp. 89-102, doi:10.1016/j.atmosres.2014.10.001, 2015.3 (Invited Review Paper) (査読有)

〔学会発表〕(計5件)

1. 藤田秀平, 嶋村重治, 菊池博史, 妻鹿友昭, 呉亭, 金寛, 牛尾知雄, 吉川栄一, X帯フェーズドアレイレーダネットワークにおける降雨減衰補正手法, 日本大気電気学会第94回研究発表会, 電気通信大学, 東京, 2016年1月8日-9日
2. 芝池尚哉, 妻鹿友昭, 嶋村重治, 菊池博史,

- 金寛, 牛尾知雄, 花土弘, 水谷文彦, 気象用フェーズドアレイレーダの較正手法の検討, 日本大気電気学会第94回研究発表会, 電気通信大学, 東京, 2016年1月8日-9日
3. Shimamura, S., V. Chandrasekar, T. Ushio, E. Yoshikawa, PROBABILISTIC ATTENUATION CORRECTION IN MULTIPLE RADAR NETWORK, 1st URSI Atlantic Radio Science Conference, Gran, Canaria, Spain, May.18-22, 2015
  4. T. Adachi, K. Kusunoki, S. Yoshida, K. I. Arai, S. Hayashi, and T. Ushio, High-speed volumetric observation of downburst using X-band phased-array radar, 37th Conference on Radar Meteorology, Oklahoma US, Sept. 2015
  5. Ushio, T., S. Shimamura, H. Kikuchi, T. Mega, T. Wu, G. Kim, F. Mizutani, M. Wada, S. Satoh, T. Iguchi, E. Yoshikawa, Cross sensor comparison of the phased array radar at X band, 9259-32, SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Beijing China, Oct. 13-16, 2014

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牛尾知雄 (Ushio, Tomoo)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50332961

(2) 研究分担者

金寛 (Kim, Gwan)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 90243170

(3) 連携研究者

( )

研究者番号:

(4) 研究協力者

( )