

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22221008

研究課題名(和文) 高時空間分解能レーダネットワークの実用化と展開

研究課題名(英文) Development and Deployment of the Radar Network at High Resolution

研究代表者

河崎 善一郎 (Kawasaki, Zenichiro)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：60126852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 77,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では独自開発した気象レーダと雷観測装置で構成した世界トップレベルの高時空間分解能な積乱雲観測ネットワークを構築した。構築した観測ネットワークをより効果的に運用するために、観測データをリアルタイム配信できるような通信技術の開発や、降雨減衰補正手法、地形クラッタ除去法、適応信号処理を用いた雷放電イメージングなど最先端のリモートセンシング技術の開発および検証を行った。さらに、夏季および冬季の積乱雲総合観測を行い、これまで技術的な問題から明らかにされていなかった雷放電の物理過程や積乱雲の力学的過程と電気的活動の関連について新たな知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：We have built a world leading thunderstorm observation network with quite high resolution, including Ku broadband radars, a phased array weather radar, VHF broadband digital interferometers, and Broadband Observation network for Lightning and Thunderstorm (BOLT). We proposed and validated the latest remote sensing technique such as precipitation attenuation correction technique, clutter removal technique, and lightning imaging technique using adaptive signal processing. Thunderstorm observation carried out during summer and winter revealed physics of lightning discharges and relationship between thunderstorm physical process and electrical process.

研究分野：大気電気学

キーワード：雷放電 レーダーネットワーク 積乱雲 豪雨

1. 研究開始当初の背景

我が国は、高度に情報化された社会の実現を目指しており、必要な社会基盤の整備が全国規模で進められている。一方、高度に情報化された社会の脆弱性は、現代人にとって懸念材料ともなっており、起こりうる不測の事態へ如何にして適切に対応するかといった問題が、関連機関で研究対象となっている。不測の事態の一例として、気象災害を挙げることができ、局地的な集中豪雨などの気象災害、それにより引き起こされる土砂災害等の予測・警報の正確な情報伝達の必要性は明らかである。

2. 研究の目的

このような気象災害に対して、雲内の降水量をリモートセンシングで計測することのできる気象レーダは、短時間での移り変わりを捉えることが可能な観測機と考えられ、機能向上を図りながら今日では広く用いられている。しかしながら、局地的な集中豪雨の原因である組織化された積乱雲を、気象レーダで観測した場合、たとえドップラー機能や二重偏波機能を有していたとしても、事前予測に必要な三次元構造の観測（ボリュームスキャンニング）に必要とされる時間が、積乱雲の電荷分離や雷放電を含むライフサイクルに比して無視できない上、ビーム広がりに伴う空間分解能の低下によって詳細な積乱雲の構造を捉えきれないことが大きな障害となっている。また、積乱雲の電氣的側面である雷放電は、激しい上昇気流と多くの降水および雲粒子との相互作用によって生ずるため、放電頻度の急激な増加は、後に気象災害につながるような強い擾乱を示唆している。

このようなことから、申請者らの研究グループでは、科学研究費補助金等の助成により、「Ku 帯広帯域レーダ」、および「VHF 波帯広帯域干渉計」を開発し、同期した初期観測の結果、これまでにない高速かつ高空間分解能で積乱雲と雷放電の3次元像を得ることに成功した。そこで、本研究では、広帯域レーダおよび干渉計の開発実績に基づき、1)レーダネットワークの整備とネットワーク観測による機能実証、2)データ配信・処理システムの構築、3)電氣的過程と力学的過程を併用した積乱雲の動態解析、4)3)に基づいた積乱雲モデルの構築と事前予測モデルの開発、の諸課題に取り組み、これまでの科学研究費補助金で得てきた知見をさらに展開する。

3. 研究の方法

(1)レーダネットワークの整備とネットワーク観測による機能実証

現有する3台の広帯域レーダに加えて、可搬型広帯域レーダを新規製作し、大阪平野一帯が覆われるよう適当な間隔で配置する。また、広帯域干渉計をレーダと同様な地点に展

開し、大阪平野一帯にわたって雷放電路の標定を行うシステムを構築する。これらの観測地点は、高速通信網を介して接続し、観測装置の遠隔監視・操作およびデータ転送を行える体制とすると共に、実運用の形態を目指す。関西空港ドップラーレーダ（気象庁）など、広帯域レーダシステムネットワークの観測範囲内にある既存レーダや電磁界測定など検証用の機器による同期観測を行う。

それぞれのレーダに関して、ディストロメータ（雨滴粒径分布測定装置）による実験的校正を行う。そして、精緻な降雨減衰補正アルゴリズムの開発を行う。従来、降雨減衰補正に用いられる Hitchfeld-Bordan 解は、減衰が顕著な場合、不安定になることが良く知られている。これに対して、本研究ではベイズ推定等の統計的手法を駆使した降雨減衰補正方法を検討し、複数レーダによるネットワーク観測環境を生かした、より安定的なアルゴリズムの開発を行う。初年度においては、手法の定式化と数値実験による手法の検討を行う。

(2) データ配信・処理システムの構築

高精度高時間空間分解能のレーダが数百機の規模で広域に配置された大規模気象レーダネットワークに適したデータ配信・処理技術について検討する。特に、各レーダノードで発生する大量のデータを、異種通信環境が混在するレーダネットワークにおいて効率的に転送・配信・運用するために必要となる経路制御技術、輻輳制御技術に関する研究課題について検討する。さらに、観測で得られる電力値からアルゴリズムを介して出力される反射強度値、降雨量値また速度等多くのパラメータを一度に出力するのではなく、これらのデータを階層的に再構成し、ユーザの要求に対して柔軟に対応できるようネットワーク制御も含めたスキームについて検討を行う。

(3) 電氣的過程と力学的過程を併用した積乱雲の動態解析

広帯域レーダシステムを定常運用し、様々な様相を示す積乱雲と雷放電を観測する。取得されたデータは以下の各処理過程を経て、データベース化され、蓄積される。

1)降雨減衰の補正、2)各レーダノードデータの統合と直角座標系への変換、3)3次元速度場の計算、4)偏波情報に基づく粒子判別、5)雷放電路の2次元（方位、仰角）計算、6)雷放電路の高精度3次元可視化、7)レーダデータと雷放電データの統合

以上のようにして処理された高分解能レーダデータと高精度雷放電データのデータベースを用いて、特に気象災害を引き起こした事例を中心に、その生成から発達、消滅に至る過程を詳細に解析する。特に、地上で生起する気象災害に先行して上空でどのようなプロセスが進行して、それが雷放電の挙動

にどのように作用しているのか明らかにし、予兆現象の発掘を行う。

一方、夏季積乱雲だけでなく、冬季にも気象災害が発生することが知られている。特に冬季北陸地方での突風、竜巻による列車脱線事故などが記憶に新しい。この冬季日本海側では、竜巻に加えて冬季雷が多発する。冬季雷の特徴は、1) 夏季雷より数百倍にもおよぶ中和電荷量を有する落雷が発生する、2) 正極性落雷の割合が多い、3) 上向き放電で開始する落雷の割合が多い、4) 一発雷が多い等の通常の夏季雷とは異なる性質を示す。これらのことから、冬季における積乱雲の電気的および力学的挙動は、夏季におけるそれとは大きく異なるため、気象災害の予知・予報におけるアプローチも異なると考えられる。そのため、広帯域レーダ3機および広帯域干渉計3機を、冬季北陸地方に移設し、夏季においては大阪平野、冬季においては北陸地方の2極観測体制を整える。得られたデータを用いて、夏季積乱雲との比較を行い、共通点と異なる点を明らかにする。こうした相互比較解析は、気象災害に至る本質的な物理過程を浮き彫りにする。

(4) 積乱雲モデルの構築と事前予測モデルの開発

広帯域レーダシステムネットワークの機能検証を受け、観測結果を積極的に積乱雲の物理モデルへ構築に利用する。広帯域レーダシステムネットワークを構成する広帯域レーダと広帯域干渉計は、積乱雲の力学的側面と電気的側面をそれぞれ捉える装置であり、積乱雲の物理モデルを完成させるためには、両観測結果を相補的に利用する必要がある。積乱雲内にあって、力学的な力が電磁氣的力より卓越していることは事実であろうが、積

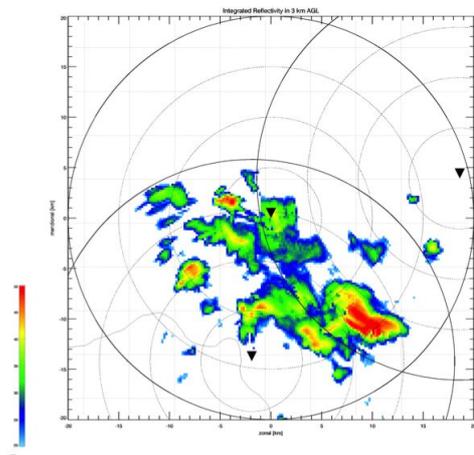


図1: 3機の広帯域レーダで構成されたレーダネットワークにより観測されたレーダ反射強度。提案した降雨減衰補正手法を適応。

乱雲内の電荷分布は、温度、圧力、雲水量という諸パラメータに支配され極めて限られた位置に存在することから、「不安定な中の安定」例えば起き上がりこぼしの安定状態であると想像できる。それゆえ電磁力が力学的力にとって「摂動」として作用すると考えられる。従って、力学および大気電気学を相補的に利用する形の観測結果から、力学と電気の両方を取り入れ、物理的に完備で自己矛盾の無い新しい積乱雲モデルを提案する。ここでは、必要に応じ、すでに協力関係にあり降水の数値シミュレーションで実績を挙げている、気象研究所からの指導を受け、議論を行いながら進めることとする。

4. 研究成果

本研究はレーダネットワークの整備とネットワーク観測による機能実証、データ配信処理システムの構築、電気的過程と力学的過程を併用した積乱雲の動態解析、積乱雲モデルの構築に分けられる。それぞれについて成果を示す。

(1) レーダネットワークの整備とネットワーク観測による機能実証

研究初年度である平成22年度から平成23年度で本研究の基本となる観測体制の確立に注力し、ネットワークの整備を行った。夏季積乱雲を観測するために大阪北部を中心とした観測ネットワークと冬季積乱雲を観測するために滋賀県北部にそれぞれ観測ネットワークを構築した。

夏季積雲の観測では、3台のレーダを用いたネットワーク観測に成功した。さらに平成24年度には広帯域レーダ観測域のほぼ中央にX帯フェーズドアレイレーダを設置し、さらなるネットワークの拡充に成功した。広帯域レーダ、フェーズドアレイレーダのレーダネットワークを用いて、ベイズ推定に基づいた降雨減衰手法の開発、クラッタ除去手法の開発などを実施し、ネットワーク観測の機能を実証し、その有用性を確かめた(図1)[4, 5, 9, 12, 18]。一方、滋賀県北部の冬季積乱雲観測では冬季特有の局所的なドップラ速度に捉えることにも成功し、夏季・冬季どちらにおいてもレーダ観測体制が十分に整った。さらに情報通信研究機構が神戸市西区に新たにX帯フェーズドアレイレーダを整備し、平成26年度から同時観測を行った。複数台のフェーズドアレイレーダを用いた降水の同時観測はこれまでにない観測であり、学会でも大きな注目を集めた。Ku帯広帯域レーダネットワーク、2機のフェーズドアレイレーダをネットワーク化し新たな降雨減衰補正アルゴリズムを提案・検証を行い、その降雨減衰補正結果が妥当であることを確認している。

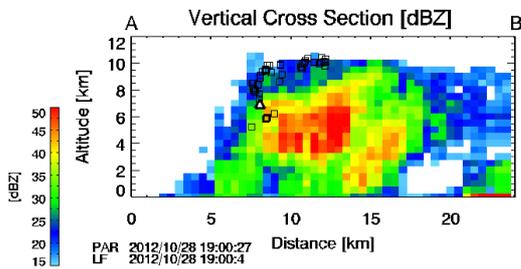


図 2：レーダ反射強度の垂直断面に対して雲放電の標定点を示す。□：雲放電の標定点 ○：後続の標定点。

雷放電観測網の拡充も同時に行った。申請段階で予定していた VHF 帯干渉計だけではなく、より広く観測することのできる LF 帯センサネットワーク (Broadband Observation network for Lightning and Thunderstorm; BOLT) も開発し、レーダネットワーク観測域のほぼ全域をカバーする雷放電観測網を整えてきた [2]。BOLT で得られた雷観測データから LF 帯電磁波波源の位置標定方法として到達時間差法を適用できることを示し、その特性を詳細に示した。フェーズドアレイレーダとの比較から BOLT で標定された電磁波源はそれぞれ正電荷領域、負電荷領域に対応することを示した (図 2)。VHF 帯広帯域干渉計の標定点と BOLT の標定点を比較し、同時に標定された事例に関してはほぼ同じであることが確認され、雷放電観測機器に関してもネットワーク観測が有用であることを示した。[2, 3]。

本研究の遂行によりレーダネットワークと雷放電観測ネットワークの両者を結合させた世界トップレベルの防災減災システムのテストベッドが完成した。

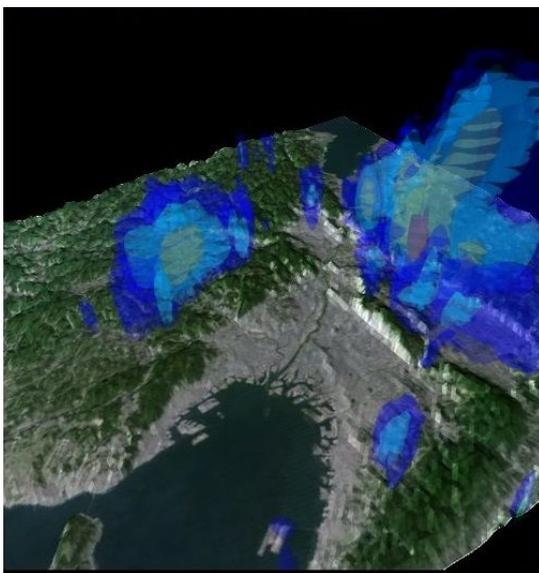


図 3：フェーズドアレイレーダで観測された降雨のリアルタイムモニタリング画面。この画像をインターネット上で公開。

(2) データ配信処理システムの構築

レーダおよび雷放電観測機器の各サイトは有線または無線でインターネットに接続しており、大学の研究室にいながらにして、観測機の操作およびデータのダウンロードが自動でできるまで整備してきた。リアルタイムでデータ表示をするためにデータの削減、圧縮、送信手法の開発を行った。観測データもリアルタイムでウェブ上に公開し、観測結果をすぐに確認できるようになった (図 3、図 4)。特にレーダデータに関しては 3 次元表示が可能となっている。これにより観測機器が正常に動作していることを確認出来るだけでなく、研究を進める上でクイックルックとしても用いることができ、解析を進める上でのツールとしても使用できている。

(3) 電氣的過程と力学的過程を併用した積乱雲の動態解析

Narrow Bipolar Event (NBE) に関する研究 NBE とは通常の雷放電とは孤立して発生する放電で、メカニズムは未解明な点が多い。本観測ネットワークを用いていくつかの特徴が明らかとなった。まず、NBE が非常に発達した積乱雲に発生する特性を持っており、さらに負極性の NBE に関しては対流圏界面近くまで発達した時のみ発生することが明らかとなった。NBE の特徴を明らかにしただけではなく、NBE を観測することが積乱雲の成熟度を推定する上で、ひとつの指標になりうることを示唆している。また雷放電が発生する直前に発生した NBE について解析を行い、発生高度が 10km 以下と低い高度に限られることを示した (図 5) [1, 11]。

冬季特有の電磁パルスの解析

冬季の沿岸領域で発生する特殊な放電を発見し、この電磁パルスはこれまで報告されたパルスとは形状が異なっていることを示した。統計的解析によりこの電磁パルスは、積乱雲の電荷領域が地上に接近した時に発生する雷放電に伴い発生すると考えられる。[6]

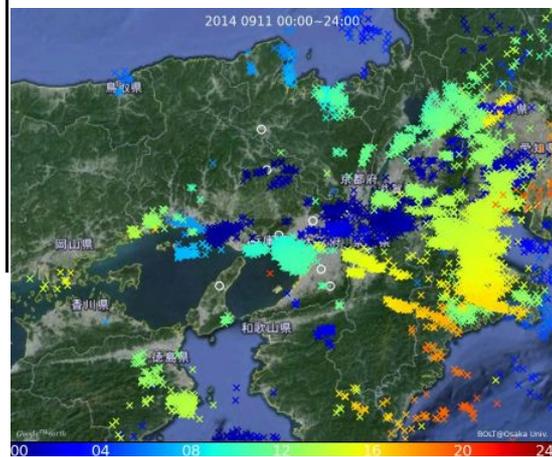


図 4：BOLT により標定された雷放電の表示。

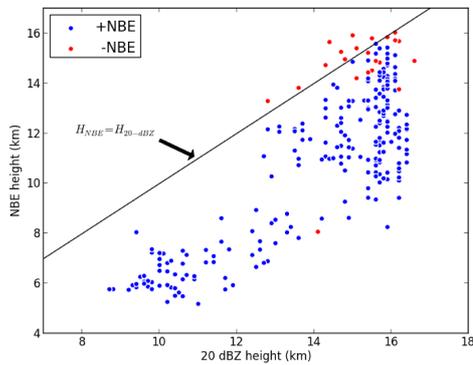


図5：BOLTで標定されたNBEの発生高度とその地点のレーダ反射強度20dBZ高度。

両極性落雷の観測

冬季の日本海沿岸には正電荷と負電荷の両方が中和される両極性落雷が発生する。両極性落雷は一般に中和電荷量が大きく、被雷した地上建造物に時折大きな被害をもたらす。本研究で整備したBOLTにより一般に標定が難しいとされる両極性落雷の標定に成功し、レーダの進展速度など基本的な物理量の計測に成功した[10]。

新たな標定手法の開発

雷放電から放射される電磁波を受信する各アンテナをアレアンテナとみなし、アレアンテナにおけるビームフォーマ法および最小二乗平均誤差規範などを適用、放電の初期に記録されるNBEやPreliminary Breakdown Pulseそして帰還雷撃などの様々な長さを有する放電路のイメージングを行うことにも成功した。これは、今後のBOLTシステムにおける新たな標定手法として極めて興味深い結果であるとともに、積乱雲内の電氣的プロセスを推定する上で重要なツールとなりうる。

(4) 積乱雲モデルの構築

BOLTは雷放電に伴うVLF/LF帯の電磁波を受信するため、雷放電開始点付近の電荷構造の推定が可能である。BOLTによる電荷構造推定結果と積乱雲の盛衰の関係について研究を進めた。正負の電荷領域は積乱雲が発達し成熟期に至ると正電荷領域も上昇し、衰退期に入ると徐々に正電荷領域も同様に下降していく様子をとらえた。[7]

更に別の事例解析では5分以下という非常に短い時間で急発達した上昇気流に伴い、正電荷領域もほぼ同じ速度で上昇している様子が観測された。この結果は強い上昇気流により、正電荷領域が積乱雲上方に運ばれたことを意味している。今後正電荷領域が急激に上昇することを捉えることにより、積乱雲

の急発達を捉え得ることを示しており、非常に興味深い。[17]

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26件内15件を示す)

1. T. Wu, S. Yoshida, T. Ushio, Z. Kawasaki, and D. Wang, Lightning-initiator type of narrow bipolar events and their subsequent pulse trains, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, doi:10.1002/2014JD021842, 2014.
2. S. Yoshida, T. Wu, T. Ushio, K. Kusunoki, and Y. Nakamura, Initial results of LF sensor network for lightning observation and characteristics of lightning emission in LF band, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 21,034–12,051, doi:10.1002/2014JD022065, 2014.
3. Satoru Yoshida, Ting Wu, Tomoo Ushio, Y. Takayanagi, Lightning observation in 3D using a multi LF sensor network and comparison with radar reflectivity, *IEEJ*, **4**, doi: 10.1541/ieejfms.134.188, 2014.
4. 平野裕基, 円尾晃一, 嶋村重治, 吉田智, 牛尾知雄, 水谷文彦, 佐藤晋介, 気象用フェーズドアレイレーダの精度検証, *IEEJ*, **4**, doi:10.1541/ieejfms.134.204, 2014.
5. 円尾晃一, 嶋村重治, 吉川栄一, 吉田智, 牛尾知雄, 水谷文彦, 佐藤晋介, 気象用フェーズドアレイレーダにおける最小二乗平均誤差法を用いたクラッタエコー低減の観測的検討, *IEEJ*, **4**, doi: 10.1541/ieejfms.134.197, 2014.
6. Ting Wu, Satoru Yoshida, Tomoo Ushio, Zen Kawasaki, Yuji Takayanagi, and Daohong Wang, Large bipolar lightning discharge events in winter thunderstorms in Japan, *J. Geophys. Res.*, **1**, 10.1002/2013JD020369, 2014.
7. 河内駿迪, 吉田智, Wu Ting, 牛尾知雄, 雷放電に伴うPreliminary Breakdownの発生高度と積乱雲内電荷構造, *J. Atmos. Electr.*, **1**, doi: 10.1541/jae.34.55, 2014
8. Ting Wu, Yuji Takayanagi, Tsuyoshi Funaki, Satoru Yoshida, Tomoo Ushio, Zen-Ichiro Kawasaki, Takeshi Morimoto, and Yoshitaka Nakamura, Isolated large bipolar pulse (ILBP) produced by lightning discharge in winter thunderstorm, *IEEJ*, **9**, doi: 10.1541/ieejfms.133.451, 2013.
9. E. Yoshikawa, T. Ushio, Z. Kawasaki,

- S. Yoshida, T. Morimoto, F. Mizutani, M. Wada, MMSE Beam Forming on Fast-Scanning Phased Array Weather Radar, *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, 4, 10.1109/TGRS.2012.2211607, 2013.
10. Y. Takayanagi, M. Akita, Y. Nakamura, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Zen Kawasaki, D. Wang, N. Takagi, H. Sakurano, Y. Kubouchi, Upward lightning observed by LF broadband interferometer, *IEEJ*, 3, doi: 10.1541/ieejfms.133.132 2013
11. T. Wu, Y. Takayanagi, S. Yoshida, T. Funaki, T. Ushio, and Z. Kawasaki (2013), Spatial relationship between lightning narrow bipolar events and parent thunderstorms as revealed by phased array radar, *Geophys. Res. Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50112.
12. Yoshikawa, E., T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, and V. Chandrasekar, Dual-Directional Radar Observation for Performance Evaluation of the Ku-band Broadband Radar Network, *J. Atmos. Ocea. Tech.*, 29, 12, pp. 1757-1768, 2012.12
13. S. Yoshida, C. J. Biagi, V. A. Rakov, J. D. Hill, M. A. Stapleton, D. M. Jordan, M. A. Uman, T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, and M. Akita, The initial stage processes of rocket-and-wire triggered lightning as observed by VHF interferometry, *J. Geophys. Res.*, 117, D09119, doi:10.1029/2012JD017657, 2012.
14. T. Wu, W. Dong, Y. Zhang, T. Funaki, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Z. Kawasaki, Discharge height of lightning narrow bipolar events, *J. Geophys. Res.*, 117, D05119, doi:10.1029/2011JD017054, 2012.
15. S. Yoshida, M. Akita, T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, Propagation characteristics of lightning stepped leaders developing in charge regions and descending out of charge regions, *Atmos. Res.*, 106, doi:10.1016/j.atmosres.2011.11.010 86-92.

{学会発表}(計 38 件 内 3 件を示す)

16. T. Wu, J. Shang, T. Ushio, F. Mizutani, SIMULATION OF DIGITAL BEAM FORMING METHOD ON 2-D PHASED ARRAY WEATHER RADAR, *31st URSI General Assembly and Scientific Symposium*, Beijing, China, Aug.16-21, 2014.
17. Satoru Yoshida, W. Ting, T. Ushio, K.

Kusunoki, Relationship between preliminary breakdown and charge structure revealed by Phased array radar, 2014 *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY*, Norman, June 16-20, 2014.

18. 嶋村重治、吉川栄一 (JAXA)、吉田智、牛尾知雄、河崎善一郎、ベイズ理論に基づいた気象用 Ku 帯広帯域レーダネットワークにおける降雨減衰補正手法の開発、日本大気電気学会、熊本、2013 年

{その他}

ホームページ等

<http://www1a.comm.eng.osaka-u.ac.jp/realtime.html>

<http://www1a.comm.eng.osaka-u.ac.jp/bolt.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河崎善一郎 (Kawasaki, Zenichiro)
大阪大学・産業科学研究所・教授
研究者番号：60126852

(2) 研究分担者

牛尾知雄 (Ushio, Tomoo)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号：50332961

森本健志 (Morimoto, Takeshi)
近畿大学・理工学部・准教授
研究者番号：60403169

吉田智 (Yoshida, Satoru)
気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・研究官
研究者番号：00571564

中村佳敬 (Nakamura, Yoshitaka)
神戸市立工業高等専門学校・電気工学科・講師
研究者番号：70609817