

機関番号：14401
 研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2007～2010
 課題番号：19201036
 研究課題名（和文） 高時空間分解能型広帯域レーダシステムネットワーク
 研究課題名（英文） Radar system network at high resolution
 研究代表者
 河崎 善一郎（KAWASAKI ZENICHIRO）
 大阪大学・工学研究科・教授
 研究者番号：60126852

研究成果の概要（和文）：

降雨および雷放電をこれまでになく高精度かつ高時空間分解能で観測するシステムを開発した。このシステムは、Ku 帯広帯域レーダおよび VHF 帯広帯域デジタル干渉計から構成され、時間分解能 1 分、空間分解能十数メートルで雷嵐の降雨構造および雷放電進展構造を標定することが可能である。さらに本システムを実時間で運用するシステムを開発し、試験観測を行った結果、雷嵐の詳細構造が明らかとなり、有用性が示された。

研究成果の概要（英文）：

A high-resolution precipitation and lightning monitoring system was developed and operated. This monitoring is mainly utilized the Ku-band broadband radar (BBR) and the VHF broadband digital interferometer (DITF). The BBR can accurately measure the radar reflectivity factor and the mean Doppler velocity with 5 m resolution over a range from 40 m to several kilometers for 10 W power using a pulse compression technique. Two or more DITFs make us visualize lightning channel propagations in three dimensions. Moreover, we add new functions that integrate these observation data and disclose integration analyses results with the quasi real-time information disclosure system. Initial observations for severe storms with lightning during summer and winter thunderstorm season by these monitoring instruments indicate that we obtain detailed precipitation distribution and detect active convective cells with lightning discharges.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	17,400,000	5,220,000	22,620,000
2008 年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2009 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2010 年度	0	0	0
年度			
総計	34,100,000	10,230,000	44,330,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：レーダ，大気電気学，気象学，観測ネットワーク，雷放電

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。航空機の離着陸の際にも問題となるダウンバーストの他、毎年夏に繰り返される集中豪雨による水災害や土砂災害など、その例は枚挙にいとまがない。このような気象災害をもたらすシビアな気象条件下では、強い上昇気流が存在し、霰と雪片・氷晶間の接触、衝突により、電荷分離が生ずる。その結果、積乱雲内に電荷が蓄積され、放電という形態をとって雲内電荷が中和される。さらに、竜巻などの生起と雷放電などの大気電気現象との間には、直接的および間接的な因果関係が存在し、実際、米国フロリダの観測結果から竜巻に先行する突発的な雷放電頻度の増加が報告されている。

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が、局地的な集中豪雨の原因である組織化された積乱雲（あるいは巨大積乱雲）を、気象レーダで観測した場合、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）に必要なとされる時間が、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、重要なパラメータの一つである電氣的性質を明らかにすることができない。その結果、以下の点においてその役割が限定的である。

- (1) マイクロバーストのような規模の現象を十分に観測することが出来ない。
- (2) 時々刻々変化する積乱雲の観測には、時間分解能が不足している。
- (3) 電荷分離や電荷分布等の電気現象を明らかにできない。

2. 研究の目的

申請者らの研究グループでは、総務省戦略的情報通信開発推進制度研究主体育成型研究開発（平成14年～17年）の助成を受け、Ku波帯広帯域レーダのプロトタイプを自作、その技術的可能性の検証を行ってきた。このプロトタイプでは、高距離分解能モード、高時間分解能モードの2モード観測で、それぞれについてアルゴリズム開発を行い、可能性を実証した。本提案では、この検証に基づき、高時間かつ高空間分解能であるようオンボード化し、定常的な運用が可能なレーダ開発を行う。一方で、平成4年度より科学研究費補助金等の助成を受け雷放電の観測システム（VHF波帯広帯域干渉計）の開発に従事し、既に実用化の段階に近づいてきている（特許公開中）。これは、雷放電の進展に伴うイン

パルス性電磁波の放射源位置を、高い時空間分解能で可視化する装置であり、最近では電波理工学の観点から種々の改良を行い、その測定精度も実稼動可能な域に達している。本研究では、これに実時間で雷放電の三次元像を得るために必要な改良を、ハードウェアおよびソフトウェア両面から加える。上記の機能を有して開発する広帯域レーダと広帯域干渉計を、積乱雲の力学的振る舞いと電磁気力を含む微物理過程を併せて理解するシステム「広帯域レーダシステム」として統合し、大阪大学を中心とする大阪平野一帯を観測範囲とするように複数機設置し、広帯域レーダシステムネットワークの構築を行う。

広帯域レーダおよび広帯域干渉計は、いずれも発展著しいエレクトロニクスの最先端技術を駆使し、申請者らが固有の観測機として独自に開発したものであり、雷雲の立体像を雷放電の素過程に対応する形で記録することができるため、これらの観測データを相補的に考察することにより、雷雲の力学と電気過程という異なる両観点から考慮した新しいモデリングを目指すことが可能となる。

3. 研究の方法

本研究では、広帯域レーダシステムを広帯域レーダ（力学）および広帯域干渉計（電気）を統合する形で設計・製作し、高い時空間分解能の実現に加え、マクロな大気力学、ミクロな大気電気学を相補的に利用できる観測システムとしての構築をする。即ち狭い領域でしかも短時間に発生、成長し、被害をもたらすシビアな積乱雲に対して、より早く、より正確に、予知・予報を行うために、小型低出力の高時間空間分解能型広帯域レーダシステムを設計・製作する。本研究で提案している広帯域レーダは、送信信号に広帯域信号を用いている点が、従来型レーダと異なり、従来型に比して格段に分解能の高い、数十秒程度・数メートルの時間・空間分解能で、地表面付近から数十kmまでの雲の三次元像を詳細に得ることができる。このような緻密なレーダ観測を集中的に配置、有機的に運用すれば、気象庁を初めとする大型レーダ観測網で捉えきれない時間、空間スケールの現象

（特に、直接被害をもたらす地上数十メートルからの低高度の降雨及び風の分布）を詳細に観測でき、時間・空間的に補間することができる。本研究で構築する広帯域レーダシステムネットワークによる観測データは、気象モデル等への入力となり、従来に比してより精度の高い予報と予知に貢献できると思われる。そして従来の各種装置による観測結果との比較を通じての本提案システムの機能検証を行う。

4. 研究成果



図 4.1 広帯域レーダを用いた降雨観測と干渉計を用いた雷放電観測の様子

近畿総合通信局と協議を行い、 $15.75\text{GHz} \pm 40\text{MHz}$ を送信周波数と決定した。従って、本研究では、Ku 帯を用いたレーダネットワークに関する技術開発を行うこととする。この周波数選択に基づき送受信回路の設計を行い、システム全体の諸パラメータを決定した。設計したレーダの外観図を図 4.1 に示す。本レーダシステムは、信号処理部とアンテナ送受信部に分かれており、アンテナ送受信部は屋外、信号処理部は屋内に配置される。固体化素子を使用したパワーアンプ及び LNA を含む最下段コンバータ部はアンテナ直下に配置し、 2GHz の IF 信号がロータリージョイントを通じて、屋内に配信される構成になっている。アンテナは 45cm ルネベルクレンズアンテナを使用し、高速スキャンニングを念頭においたフィードのみが動作するよう設計されている。また、本レーダは固体化素子を用いたパルス圧縮型レーダであり、電力で長パルス幅の広帯域信号を送信することによって雨粒による散乱信号を受信、ルス圧縮処理を施しレーダ反射因子を得る構成になっている。このことにより、寿命化を図り、同時にメンテナンスの手間を削減することが出来る。

一方、雷放電を観測する広帯域干渉計は、主に受信アンテナ、信号増幅部、そして計算機から構成されている。ch1~ch3 用の受信部とトリガ信号生成のため、円形平板アンテナを 4 箇所配置する。ch1 から ch3 までの各アンテナは地上高数 m の大地に平行な直角を挟む 2 辺が 10m の直角二等辺三角形の各頂点に配置する。各 ch のアンテナで受信した信号は通過帯域 $25\text{--}100\text{MHz}$ のバンドパスフィルタ (BPF)、線形増幅器を通過した後、同軸ケーブルを通じて伝送し、専用開発した PCI-bus 対応のサンプリング周波数 200MHz 、分解能 10 bits の A/D 変換ボードを用いて計測データを計算機に取り込む。

これらの観測機器を用いて得られたデータの統合を全て自動で行うため、すべての観

測機器がインターネットを介してオンラインでデータ統合サーバに接続している。広帯域デジタル干渉計は、観測終了後すぐ電磁波放射源の方向探索を行い、その方向探索結果をデータ統合サーバに転送するよう改良を施した。広帯域レーダにもデータ送信機能を付加し、広帯域レーダによるレーダエコーと、ドップラー速度の推定結果をデータ統合サーバに転送させる。データ統合サーバでは、2 分ごとに各観測点から送られてきた複数の雷放電の方向探索結果から、双方の観測点で同じ雷放電を観測した事例を選択し、交会法を使用して雷放電の三次元標定を実現する。そして、広帯域レーダによる CAPPI に、広帯域レーダ観測終了時間から過去 10 分間にかけて観測された雷放電の三次元標定結果を上書きする。同時に、これらの観測結果は数値データでデータ統合サーバにアーカイブされる。このようにして出力された雷嵐の監視結果は、インターネットを通じて web コンテンツとして閲覧が可能であり、リアルタイムで逐次更新される。

観測結果の一例として、図 4.2 に 17 時 37 分の実時間モニタリングの出力結果を示す。

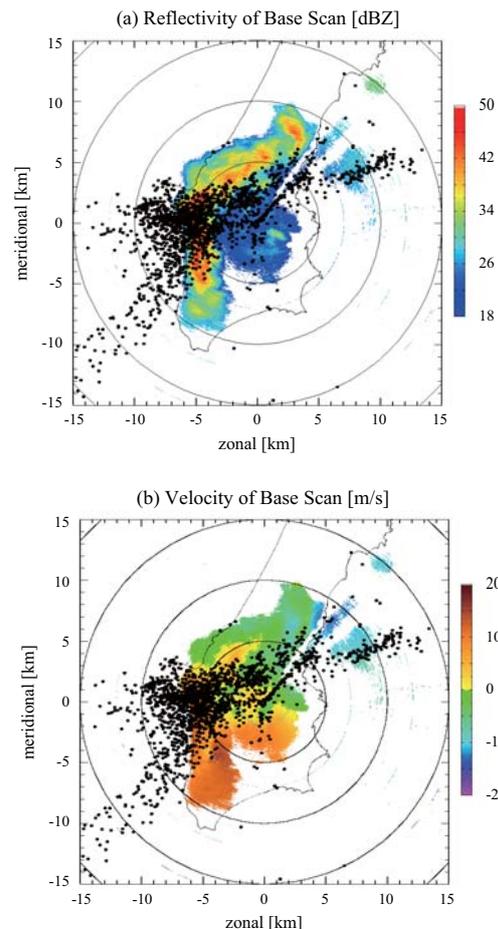


図 4.2 2008 年 9 月 15 日 17 時 37 分の雷嵐モニタリング結果

17 時 37 分の降水構造と 17 時 37 分までの 10 分間に検出した雷放電に伴う VHF 波帯インパルス性電磁波放射源を同時に示している。グラデーションは、広帯域レーダで観測した種子島宇宙センター付近の降水による、ベーススキャンのレーダ反射因子 Z と降水の視線移動速度を表わす。また、図中“・”は広帯域デジタル干渉計で観測した雷放電路の進展に伴い放射される VHF 波帯インパルス性電磁波の位置である。図の中心は広帯域レーダを設置している観測点である。観測結果から、幅が 4 km で東西 10 km, 南北 14 km に広がる L 字型の 30 dBZ を超える強い降雨エコーが観測されていることがわかる。このときの、過去 10 分間の 12 フラッシュによる VHF 波帯インパルス性電磁波放射源は、原点と原点から西へ 10 km 離れたところまでの領域に集中している。一方、北の強い降雨エコーの領域からは VHF 波帯インパルス性電磁波を検出していない。このように、広帯域レーダおよび広帯域干渉計を用いて、これまでになく高精度かつ高分解能に雷嵐の降雨構造および雷放電による電氣的構造を明らかにすることが可能になった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文 (査読有)] (計 13 件)

1. Akita, M., Y. Nakamura, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Z-I. Kawasaki, and D. Wang, Effects of charge distribution in thunderstorms on lightning progression paths in Darwin, Australia, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 68, No. 4, pp. 719-726, 2011.4
2. Yoshikawa, E., S. Kida, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, and Z. Kawasaki, Vertical structure of raindrop size distribution in lower atmospheric boundary layer, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L20802, doi:10.1029/2010GL045174, 2010.10
3. Yoshikawa, E., Tomoaki Mega, Takeshi Morimoto, Tomoo Ushio, Zen Kawasaki, Katsuyuki Imai, and Shin'ichiro Nagayama, Development and Initial Observation of High Resolution Volume Scanning Radar for Meteorological Application, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, VOL. 48, NO. 8, pp.3225-3235, 2010.8
4. Akita, M., S. Yoshida, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Ushio, Z-I. Kawasaki, D. Wang, Lightning Channels of Cloud-to-ground Flashes Neutralizing Multiple Charge Regions inside Winter Thunderstorms, *IEEJ Trans*, Vol. 130-A, No. 5, pp. 467-472, 2010.5
5. Akita, M., Y. Nakamura, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Z. Kawasaki, and D. Wang, What Occurs in K-process of Cloud Flashes?, *J. Geophys. Res.*, 115, D07106, 7 PP., doi:10.1029/2009JD012016, 2010.4
6. 中村 佳敬, 秋田 学, 森本 健志, 牛尾 知雄, 河崎 善一郎, 清水 雅仁, VHF 波帯広帯域干渉計で観測された夏季正極性落雷の特性, *IEEJ Trans*, Vol. 130-A, No. 4, pp. 377-386, 2010.4
7. Yoshida, S., C. J. Biagi, V. A. Rakov, J. D. Hill, M. V. Stapleton, D. M. Jordan, M. A. Uman, T. Morimoto, T. Ushio, Z-I. Kawasaki, Three-dimensional imaging of upward leaders in triggered lightning using VHF broadband digital interferometers, *Geophys. Res. Lett.*, VOL. 37, L05805, doi:10.1029/2009GL042065, 2010.3
8. 牛尾知雄, 吉川栄一, 秋田学, 中村佳敬, 森本健志, 河崎善一郎, 雷放電と積乱雲の高分解能観測技術とその科学, *IEEJ*, Vol.130-A, No.1, pp.10-14, 2010.1
9. Nakamura, Y., E. Yoshikawa, M. Akita, T. Morimoto, T. Ushio, Z. Kawasaki, T. Saito, T. Nishida, and N. Sakazume, High-resolution Lightning and Precipitation Monitoring by the Ku-band Broadband Radar and the VHF Broadband Digital Interferometer, *IEEJ Trans*, Vol. 129-A, No. 12, pp. 845-852, 2009
10. 中村佳敬, 森本健志, 牛尾知雄, 河崎善一郎, 雷嵐観測用 VHF 帯広帯域干渉計の標定精度評価, *IEEJ Trans*, Vol. 129-A, No. 8, pp. 525-530, 2009
11. Yoshikawa, E., T. Mega, T. Morimoto, T. Ushio, and Z-I. Kawasaki, Real-Time spectral moments estimation and ground clutter suppression for precipitation radar with high resolution, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E92-B, No.2, pp.578-584, 2009.2
12. Yoshida, S., M. Akita, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Ushio, Z-I. Kawasaki, D. Wang, and N. Takagi, Evidence of negative leaders prior to fast rise ICC pulses of upward lightning, *J. Atmos. Electr.*, Vol.29, No.1, pp.13-21, 2009.1
13. Mega, T., K. Monden, T. Ushio, K. Okamoto, Z-I. Kawasaki, and T. Morimoto, A low power high resolution broad-band radar using pulse compression technique for

meteorological application, IEEE Geosci. Remote. Sens. Letters, Vol. 4, No. 3, pp. 392 - 396, JULY 2007

[学会発表] (計 26 件)

1. T. Morimoto, H. Kikuchi, T. Ushio, Z. Kawasaki, Gradual approach to realize lightning monitoring from space by means of VHF observations, AGU fall meeting 2010, San Francisco, U.S.A., Dec. 13-17, 2010
2. Nakamura; R. H. Holzworth; A. R. Jacobson; J. A. Weinman; L. A. McMurdie; H. Meng; R. R. Ferraro; T. Morimoto; T. Ushio; Z. Kawasaki, Global characteristics between lightning activity and frozen hydrometeor from WLLN and AMSU-B/MHS, AGU fall meeting 2010, San Francisco, U.S.A., Dec. 13-17, 2010
3. M. Akita, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Z. Kawasaki, D. Wang, Relationships between the Lightning Leader Progression Characteristics and Local Charge Structures in Thunderclouds, AGU fall meeting 2010, San Francisco, U.S.A., Dec. 13-17, 2010
4. Eiichi Yoshikawa, Satoru Yoshida, Takeshi Morimoto, Tomoo Ushio, Zen Kawasaki, Network Retrieval Technique for Precipitation Attenuation on Ku-band Broadband Radar Network, IEICE International Conference on Space Aeronautical and Navigational Electronics, pp.255-259, Jeju, Oct. 27-29, 2010.
5. Eiichi Yoshikawa, Satoru Yoshida, Takeshi Morimoto, Tomoo Ushio, Zen Kawasaki, Initial Observation Results for Precipitation on the Ku-band Broadband Radar Network, IEICE International Conference on Space Aeronautical and Navigational Electronics, Jeju, pp.25-29, Oct. 27-29, 2010.
6. M. Akita, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio and Z. Kawasaki, "A Study on the Effects of the Charge Distributions on Lightning Leader Progressions Using the VHF Broadband Digital Interferometer", IEICE Tech. Rep., vol. 110, no. 250, SANE2010-71, pp. 19-24, Jeju, Korea, Oct. 27-29, 2010.
7. Akita, M., T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, and D. Wang, The Relationship between the leader progressions and the charge distributions (Invited), Asia Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2010), E3-4, Toyama Japan, September 23-26, 2010.9
8. S. Yoshida, C. J. Biagi, V. A. Rakov, M. A. Uman, D. M. Jordan, J. D. Hill, T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, Rocket-triggered lightning observed by VHF broadband digital interferometers, 2009 AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., Dec. 14-18, 2009.
9. Y. Nakamura, M. Akita, T. Morimoto, T. Ushio, Z. Kawasaki, M. Shimizu, and M. Miki, The bi-directional leader observation in positive cloud-to-ground lightning flashes during summer thunderstorm season, 2009 AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., Dec. 14-18, 2009.
10. Akita, M., S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, Observations of bipolar lightning flashes using the VHF broadband digital interferometer, 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 24S2-2, pp. 785-788, Kyoto Japan, July 20-24, 2009
11. Nakamura, Y., T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, and M. Shimizu, Three-dimensional VHF Observations of positive cloud-to-ground flashes in summer thunderstorm, 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 24S2-1, pp. 781-784, Kyoto Japan, July 20-24, 2009
12. E. Yoshikawa, T. Ushio, T. Morimoto, Z. Kawasaki, T. Mega, K. Imai, T. Nishida, T. Saito, and N. Sakazume, Rainfall observation with high resolution using Ku-band broad band radar, IEEE Radar Conference, Pasadena CA USA, May 4-18, 2009
13. S. Yoshida, M. Akita, T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, D. Wang, and N. Takagi, Evidence of negative leaders which precede fast rise ICC pulses of upward lightning, (Abstract) AGU 2008 Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., Dec. 15-19, 2008.
14. Z.-I. Kawasaki, T. Morimoto, M. Akita, Y. Nakamura, T. Ushio, VHF Broadband Digital Interferometer for Real-time Operation, (Invited) AGU fall meeting 2008, San Francisco, U.S.A., Dec.

- 15-19, 2008.
15. Yoshikawa, E., T. Mega, T. Morimoto, T. Ushio, and Z-I. Kawasaki, Development and observation of the Ku-band broad band radar for meteorological application, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2008, FR4.203.4, Boston USA, July 6-11, 2008
 16. Akita M, T. Ushio, T. Morimoto, and Z. I. Kawasaki, Comprehensive Study on K-Events by Means of VHF Broadband Interferometer Observations, 29th International Conference on Lightning Protection (ICLP) 2008, Uppsala Sweden, 1c-3, June 23 - 26, 2008
 17. Tomoo Ushio, Eiichi Yoshikawa, Tomoaki Mega, Takeshi Morimoto, and Zen-Ichiro Kawasaki, Broad band radar for high resolution observation of precipitation, IEEE Radar Conference, Rome Italy, TH-S3.4, May 27-29 2008
 18. S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, and Z. Kawasaki, ENSO and convective activities in Southeast Asia and western Pasific, The 3rd TRMM International Science Conference, Las Vegas, USA, February 4-8, 2008
 19. K. Imai, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, Development of hight resolution and fast scanning radar, 88th American Meteorological Society Annual Meeting, New Orleans, USA, January 20-24, 2008
 20. Kenji Yamamoto, Yoshihiko Kunieda, Takaaki Hanai, Zen-ichiro Kawasaki, Tomoo Ushio, Effect of Line Configuration on Lightning Flashover Characteristics of Electric Power Line with Insulated Covered Conductor, Proceedings of the 15 International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenija, T4-22, pp.1-6, August, 27-31, 2007
 21. T. Morimoto, Z-I KAWASAKI and T. Ushio, Spaceborne VHF broadband digital interferometer for thunderstorm observations, 13th International Conference on Atmospheric Electricity, Beijing, CHINA, , p 827-830, August 13-17, 2007
 22. M. Akita, K. Hirai, M. Satoh, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Ushio, and Z-I. Kawasaki, Three-dimensional VHF Observations Using Advanced VHF Broadband Digital Interferometer, 13th International Conference on Atmospheric Electricity, Beijing, CHINA, p815-818, August 13-17, 2007
 23. S. Yoshida, N. Nakazato, S. Oita, T. Morimoto, T. Ushio, and Z-I. Kawasaki, Global Impact of ENSO events by TRMM observations, 13th International Conference on Atmospheric Electricity, Beijing, CHINA, p, 665-668, August 13-17, 2007
 24. Y. Nakamura, M. Akita, T. Morimoto, T. Ushio, Z-I. Kawasaki, Lower atmospheric radar observations of thunderclouds in summer, 13th International Coference on Atmospheric Electricity, Beijing, CHINA, p. 585-588, August 13-17, 2007
 25. S. Yoshida, M. Satoh, T. Morimoto, T. Ushio, Z-I. Kawasaki, T. Torii, D. Wang, N. Takagi, and T. Watanabe, Radiation Bursts Synchronizing with Lightning Discharges in Hokuriku, Japan, 13th International Conference on Atmospheric Electricity, Beijing, CHINA, p. 349-352, August 13-17, 2007
 26. Ushio, T., T. Mega, T. Morimoto, Z-I. Kawasaki, and K. Okamoto , A High Resolution and Precision Broad Band Radar, 33rd Conference on Radar Meteorology, Cairns Australia, P8B1, Aug. 6-10, 2007
6. 研究組織
- (1)研究代表者
河崎 善一郎 (KAWASAKI ZENICHIRO)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：60126852
 - (2)研究分担者
牛尾 知雄 (Tomoo Ushio)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号：50332961

森本 健志 (Takeshi Morimoto)
大阪大学・工学研究科・講師
研究者番号：60403169