

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18740297

研究課題名（和文）

広帯域デジタル干渉計による冬季雷嵐の三次元観測と雲内電荷分布の把握

研究課題名（英文）

Three-dimensional observations for lightning discharges and study on charge distributions inside thunderclouds during winter thunderstorm season by a broadband digital interferometer

研究代表者

森本 健志（MORIMOTO TAKESHI）

大阪大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：60403169

研究成果の概要：研究機関の3ヶ年に亘り、毎年11月から1月にかけて、石川県河北郡内灘町を中心とする地域で冬季雷観測を実施した。冬季雷に特徴的な高構造物からの上向き放電で開始する雷放電に着目し、一連の雷放電現象であるにも関わらず、雷雲内の正負両極性の電荷を中和するような放電現象の観測に成功したり、連続電流発生時の電荷移動の推定に成功したりするなどの成果を挙げた。雷放電起源の高エネルギー粒子の発生を観測することによる雷放電への逃走絶縁破壊の影響を確認したことも特筆すべき成果である。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	270,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：冬季雷雲、雷放電、大気電気学、自然現象観測、気象学、リモートセンシング、大気現象

1. 研究開始当初の背景

20世紀後半以降、日本海沿岸地域における対流活動は、その地形や気団、海流等が絡み合う世界的にみても興味深いものとして注目され、多くの観測プロジェクトが遂行されていた。一般に、冬季に少ないとされている雷活動も、当地域では「雪おこし」「鱒おこし」などと呼ばれ、しばしば発生することが知られており、国内外の研究者が観測を行なった結果、雷雲内正電荷を中和する正極性落雷の多発、雷雲の高度が低いことに起因する

高構造物からの上向き放電で開始する雷放電、「一発雷」と称され突如として発生する高エネルギーな雷放電など、特筆すべき冬季雷嵐の性質が明らかにされてきている。また、近年では、当地域における冬季の正極性落雷が雷雲上の発光現象（TLE）であるレッドスプライトを多く誘発するとされ、これらの現象の解明も進められている。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者ら大阪大学雷研究

グループが平成4年度より開発を行い、実用の段階に達している広帯域デジタル干渉計により、世界的にみても極めて珍しい日本海沿岸での冬季雷を観測し、冬季雷雲の構造を理解しようとするものである。すなわち、雷雲内の微小現象を含む雷放電活動の全体を可視化することで、雷雲内の電荷分布、或いは電荷分離機構を把握しようというのが目的である。この結果は、冬季対流活動を電氣的（大気電気学）・力学的（大気力学）の両面から理解することに大きく貢献するものである。

3. 研究の方法

本研究では、石川県河北郡内灘町周辺の日本海沿岸地域に、広帯域デジタル干渉計を主たる測器とした野外観測を行ない、同地域における雷嵐活動の全体像（Total Lightning Activity）を把握し、雷雲内電荷分布のリモートセンシングを行なおうとするものである。広帯域デジタル干渉計とは、雷放電進展に伴いその先端から無数に放射されるVHF波帯インパルス性電磁波を複数のアンテナで受信し、その放射源を求めることで雷放電の進展様相を時間的・空間的に高分解能で可視化する観測機である。本装置による観測結果から、雷雲内のどの領域で雷放電が開始し、どの領域に進展するかを知ることができる。このような観測結果を、同時に記録する電界変化波形や、雷電流などの観測データと統合し、詳細に解析することで、本来観測が極めて困難である雷雲内の電荷分布のリモートセンシングを、雷放電現象を介して実現する。

観測は、観測場所の選定から開始し、観測地の整備とともに、同地で電界変化や、例年被害を受ける高構造物である風車の支柱で雷電流を測定している関連研究機関との協力体制を整える。研究代表者は、これまでの観測経験から、雷放電に伴い放射されるVHF波帯電磁波の強度は、positive breakdownによるものと比較し、negative breakdownによるものが少なくとも15dB強いことを確認しており、広帯域干渉計で枝分かれを伴い進展する様子が鮮明に再現されるのは、negative breakdownであると結論付けることができる。このように、可視化される雷放電路と、それに対応する電磁波パルスの強度、スペクトル、同時に観測される電界変化波形や、雷電流測定用のロゴスキーコイルを設置した風車への落雷の場合には雷電流の観測データを総合的に解析し、雷雲内の特に正電荷の分布している領域を推定する。

また、近年注目を浴びている、雷放電起源の高エネルギー粒子の測定も実施する。シンチレータや比例計数管などを用いて、高エネルギー粒子の存在だけでなく、そのエネル

ギー分布の特定も行い、広帯域干渉計が観測するVHF波帯電磁波の放射タイミングと、その放射源位置との関係から、高エネルギー粒子の放射原因に迫る。高エネルギー粒子は飛程が短く、地上で観測するのは困難であるが、雷雲高度が低く、特定の高構造物への落雷が年数回見込まれる冬季雷は、この観測に適しているからである。

4. 研究成果

研究機関を通じて、毎年11月下旬から2月下旬または3月上旬にかけて、石川県河北郡内灘町を中心とする日本海沿岸地域で、雷観測を実施した。観測地として、同地を選定した理由は、平地で電波障害物が少なく、見通し伝播のVHF波帯電磁波を対象とする広帯域デジタル干渉計による観測に適していること、積雪がさほど多くなく研究代表者が所属する大阪大学からのアクセスも容易なことに加えて、内灘風力発電所の風車が存在し、毎冬数回の被雷（大半が風車への直接雷撃ではなく、これを防ぐために設置された避雷鉄塔へのもの）があることが挙げられる。また、岐阜大学や名古屋大学などのグループも、同地で雷観測や誘雷実験を実施していることから、これらの機関との協力体制の構築を行なった。

表1. 設置した観測装置

年度	装置
2006年度	広帯域デジタル干渉計 2機 電界測定装置（フィールドミル） 1機 電界変化測定用アンテナ 1機 シンチレータ 1機
2007年度	広帯域デジタル干渉計 3機 （2007年度から設置場所1カ所変更、1カ所追加） 電界変化測定用アンテナ 2機 シンチレータ 1機 比例計数管（2種） 2機 マイクロ波アンテナ 1機
2008年度	広帯域デジタル干渉計 3機 （2007年度から設置場所2カ所変更） 電界変化測定用アンテナ 2機

各年度に設置した観測装置を、表1に示す。複数の観測地は、それぞれPHS回線等で通信環境を確保し遠隔操作や監視、データ転送を可能とした。2006年度は、観測史上最高とも称される暖冬で、冬季雷放電を引き起こす寒気の流入が弱く、観測された雷活動は3イベントに止まったが、各観測機で雷放電やそれに伴う関連データを取得し、必要な調整を実施した。少数ではあるが、雷放電路の三次元可視化にも成功している。また、雷放電発生時に、同期して高エネルギー粒子が観測されることを確認した。

2007年度は、広帯域デジタル干渉計を追加した。また、雷放電起源の高エネルギー粒子の発生に関する観測体制を強化した。すなわち、2006年度は高エネルギー粒子の存在が確認できたことに対し、2007年度はそのエネルギー分布や、より高精度な発生時刻の記録を可能とした。センサの追加や高機能化に加えて、校正や機能検証のための室内実験を、観測期間前に繰り返し行い、不安要素の排除に努めた。この結果から、高エネルギー粒子の放射源は、VHF 波帯電磁波の放射源と同じか極めて近いと考えることができ、雷雲内での放電開始や進展に、逃走絶縁破壊が少なからず影響していると考えられる。また、同年の観測では、冬季においてその頻度が高いことが知られている、高構造物の先端から上向き放電で開始する雷放電を多数記録した。上向き放電の光学的手法による可視化については、これまで報告されているものの、雲内の現象も含めた電磁波観測による可視化の例はほとんどなく、本研究の目的である雲内電荷分布の把握に繋がる有効なデータが取得できた。

2008年度は、電磁波観測に専念した。2007年度までの観測結果、および夏季の予備観測から、2カ所の新しい観測地点を含む3カ所に広帯域デジタル干渉計を配置した。観測装置としては、観測地点間の時刻同期とノイズ対策の面で改良し、配置を含めて上向き放電で開始する雷放電現象の三次元観測に標準を絞った観測体制としている。この結果、一連の雷放電現象であるにも関わらず、雷雲内の正負両極性の電荷を中和するような放電現象の観測に成功した。これは本研究の目的である「三次元観測と雲内電荷分布の把握」を行なったために得られた新発見と言えるものであり、本研究の特筆すべき成果である。また、広帯域デジタル干渉計観測結果と、岐阜大学のグループが観測を行なった落雷時の電流測定結果を統合し総合的に解釈することで、initial continuing current (ICC) パルスに伴う電荷移動の推定に成功した。風車の避雷鉄塔に対し上向き放電で開始する落雷について、6例の ICC パルスを観測し、このうち2例については、直前に負リーダの進展が観測され、これが連続電流チャンネルへ接続している。この観測結果は、負リーダが雷雲電荷と大地間に電離チャンネルを生成し、ICC パルスを発生させたことを示すもので、電荷構造とその移動についても新たな知見をもたらすものである。これらの成果は、学術雑誌や学会等で発表し、関連研究者の間で注目を浴び、活発な議論を行なった。

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4件)

- ① S. Yoshida, 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”, *Journal of Atmospheric Electricity*, vol.29, no.1, pp.13-21 (2009) 査読有
- ② S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, T. Torii, D. Wang, T. Takagi, and T. Watanabe, “High energy photon and electron bursts associated with upward lightning”, *Geophysical Research Letters*, vol.35, L10804, doi:10.1029/2007GL032438 (2008) 査読有
- ③ S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, and Z. Kawasaki, “Energetic radiation bursts associated with lightning”, *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, vol.128, no.1, pp.9-13 (2008) 査読有
- ④ T. Morimoto, and Z. Kawasaki, “VHF broadband digital interferometer,” *Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol.1, Issue 2, pp.140-144 (2006) 査読有

[学会発表] (計20件)

- ① 秋田, 村田, 中村, 吉田, 森本, 牛尾, 河崎, 「広帯域干渉計による三次元雷放電進展路と雲内電荷構造について」, 日本大気電気学会第80回研究発表会, 東京 (2009年1月8日)
- ② 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” AGU 2008 Fall Meeting, California, U.S.A. (December 15, 2008)
- ③ 秋田, 村田, 中村, 吉田, 森本, 牛尾, 河崎, 山本, 「広帯域干渉計による三次元雷放電進展路と雲内電荷構造について」, 平成20年電気関係学会関西支部連合大会, 京都 (2008年11月8日)
- ④ 吉田, 秋田, 森本, 牛尾, 河崎, 王, 高木, 「ICC パルスを引き起した直前のリーダ進展」, 平成20年電気関係学会関西支部連合大会, 京都 (2008年11月8日)
- ⑤ T. Morimoto, T. Ushio, and Z. Kawasaki, “Comprehensive thunderstorm observations by the broadband radar network,” The XXIXth URSI General Assembly, Illinois, U.S.A. (August 11,

- 2008)
- ⑥ 秋田, 吉田, 森本, 牛尾, 河崎, 「広帯域デジタル干渉計による両極性落雷の放電進展様相」, 日本大気電気学会第 79 回研究発表会, 沖縄 (2008 年 7 月 10 日)
 - ⑦ 吉田, 二改, 森本, 牛尾, 河崎, 王, 高木, 「上向き放電で始まる落雷で見られた ICCパルスについて」, 日本大気電気学会第 79 回研究発表会, 沖縄 (2008 年 7 月 10 日)
 - ⑧ 吉田, 西川, 二改, 森本, 牛尾, 河崎, 王, 高木, 「雷放電に関するマイクロ波放射」, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 千葉 (2008 年 5 月 29 日)
 - ⑨ 秋田, 佐藤, 森本, 牛尾, 河崎, 「VHF波帯広帯域デジタル干渉計を用いたK変化を伴う雲放電観測」, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 千葉 (2008 年 5 月 29 日)
 - ⑩ 秋田, 森本, 牛尾, 河崎, 「雷嵐観測用VHF波帯広帯域干渉計の開発 (5) - 冬季雷観測 -」, 日本気象学会 2008 年度春季大会, 神奈川 (2008 年 5 月 19 日)
 - ⑪ 吉田, 西川, 二改, 森本, 牛尾, 河崎, 王, 高木, 「冬季雷に見られた低高度の電荷領域」, 日本気象学会 2008 年度春季大会, 神奈川 (2008 年 5 月 19 日)
 - ⑫ 吉田, 森本, 牛尾, 河崎, 「夏季雷に伴うマイクロ波の観測」, 日本大気電気学会第 78 回研究発表会, 千葉 (2008 年 1 月 11 日)
 - ⑬ M. Akita, K. Hirai, M. Satoh, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Ushio, and Z. Kawasaki, “Three-dimensional VHF observations using advanced VHF broadband digital interferometer,” 13th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE), Beijing, China (August 17, 2007)
 - ⑭ S. Yoshida, M. Satoh, T. Morimoto, T. Ushio, Z. 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 (ICAE), Beijing, China (August 15, 2007)
 - ⑮ 吉田, 佐藤, 森本, 牛尾, 河崎, 鳥居, 王, 高木, 渡邊, 「冬季雷から発生する放射線バースト」, 日本大気電気学会第 77 回研究発表会, 愛知 (2007 年 7 月 20 日)
 - ⑯ 吉田, 佐藤, 鳥居, 森本, 牛尾, 河崎, 「雷放電に関連した放射線バースト」, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 千葉 (2007 年 5 月 24 日)
 - ⑰ T. Morimoto, M. Akita, T. Ushio, and Z.

- Kawasaki, “An operational VHF broadband digital interferometer and winter thunderstorm observations,” 28th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Kanazawa, Japan (September 20, 2006)
- ⑱ 佐藤, 秋田, 森本, 牛尾, 河崎, 「広帯域デジタル干渉計による雲内の放電進展様相」, 日本大気電気学会第 75 回研究発表会, 大阪 (2006 年 7 月 20 日)
 - ⑲ 佐藤, 森本, 牛尾, 河崎, 「雷嵐観測用VHF波帯広帯域干渉計の開発 (4) - 雷放電進展様相と雲内電荷分布 -」日本気象学会 2006 年度春季大会, 茨城 (2006 年 5 月 23 日)
 - ⑳ 佐藤, 森本, 牛尾, 河崎, 「広帯域デジタル干渉計でみた雷放電路と雷雲内電荷分布」, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 千葉 (2006 年 5 月 15 日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森本 健志 (MORIMOTO TAKESHI)
大阪大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号：60403169

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者