

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：54502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820115

研究課題名(和文) 冬季雷活動の統合観測と上向き落雷の解明

研究課題名(英文) Observations for winter lightning activity with upward leader

## 研究代表者

中村 佳敬 (Nakamura, Yoshitaka)

神戸市立工業高等専門学校・電気工学科・准教授

研究者番号：70609817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：上向き落雷は冬季雷の特徴のひとつだが、一般的な雷放電との相違性などについて雲内電荷の観点からの議論がなされていない。冬季雲内の電荷領域、放電規模を放電路可視化装置により実証するため、夏季雷では実績のあるVHF帯干渉計とLF帯受信機を冬季雷に向けて改良した。VHF帯干渉計は記録方式を連続記録にすることで、従来機では制約のあるリコイルリーダを複数可視化し雲内電荷領域を推定した。冬季に発生する水平に広がる雷放電にはLF帯受信機が適しているが詳細な放電過程の可視化には不十分である。この一因にLF帯受信機のアンテナ周波数特性にあると考え、受信アンテナ回路の改良を実施し試験観測によりその有用性を評価した。

研究成果の概要(英文)：The VHF broadband digital interferometer and the LF broadband receiver that have been used successfully for summer lightning, are upgraded to estimate charge regions and scale of lightning discharges in winter thunderstorms. A recording method of the VHF interferometer is changed from a trigger recording method to a continuous recording method. The new one visualizes details of recoil leaders that the current one has limitations to visualize, and estimates charge regions in thunderstorms. The LF receiver is suitable for an overview of horizontal lightning propagation. At the same time, it is not enough for visualizing details of lightning channel propagation. One of the reasons seems to be in frequency characteristic of the LF receiver. An antenna circuit in the LF receiver is improved and evaluated by test observations.

研究分野：大気電気学

キーワード：雷観測

### 1. 研究開始当初の背景

冬季雷は夏季雷とは大きく異なった特徴を示すことがわかってきている。即ち、一回の放電による電荷中和量は通常の夏季雷より大きく、発電用風車のような建造物への雷撃が大きな被害をもたらす一因となっている事もその例である。そのほか、冬季雷では一回の放電で雲内の正電荷領域と負電荷領域を中和する両極性落雷や、放電路が水平方向に数十 km 以上伸びる雷放電、発電用風車や鉄塔など高層構造物から雲に向かって Upward リーダが進展して雲内の電荷を大地へと中和する上向き落雷など、夏季にはほとんど見られない放電現象が多数報告された。一方で、冬季雷に関するこれまでの研究は電界・電流測定に基づくものが主であり、雷放電路の全体像である雲内放電路や電荷領域を含めた議論が不十分である。

近年、雷放電に伴う VHF-UHF 帯電磁波により雲内放電路を可視化する技術が世界各地で開発され、これにより雷放電機構解明の研究がなされている。その技術は到達時間差法と干渉法に大別され、到達時間差法に比べ移送情報を利用する干渉法が時間分解能の観点で優れており、複雑な放電過程を伴う冬季雷の観測に適していると考えられる。これまでの冬季雷の研究で行われてきた電流・電界測定による放電継続時間、中和電荷量に雲内外における放電進展経路の概念を加えることで冬季雷放電現象を電気物理の観点から解明することが期待される。

### 2. 研究の目的

上向き落雷は冬季雷の重要な特徴のひとつであるものの、この上向き落雷の発生要因と一般的な雷放電との相違性について雲内の電荷領域の観点からの議論がなされていない。雲内の電荷領域推定などに用いられる雷放電路可視化装置は、夏季雷の雷放電路可視化としては十分な実績があるものの、冬季雷観測においては実績が少ないため改良が求められる。本研究では冬季雷観測に向けて雷放電路可視化装置である VHF 帯広帯域デジタル干渉計 (VHF 帯干渉計) の改良と、冬季雷に適した放電路可視化装置の検討を行い、雲内の放電進展様相、中和電荷位置、放電の規模を実証することを目的とする。

### 3. 研究の方法

雷放電路可視化装置の改良と冬季雷観測を実施するため、夏季は大阪平野において、冬季は日本海沿岸地域であり例年冬季雷が発生している石川県内灘町で雷観測を実施する。従来の VHF 帯干渉計は夏季雷観測に十分な実績を有しているものの、トリガ記録方式を採用していることと記録容量の観点から、雷に伴い放射される電磁パルスのうち受信強度の弱い信号は記録されず、一方で受信強度の弱い電磁パルスを記録すると放電の途中で観測を終了するなどの制限により、そ

のままでは放電路の詳細な解析が困難である。従って、本研究では連続記録方式の VHF 帯干渉計の提案、VHF 帯干渉計に代わる広域雷観測網である LF 帯広帯域受信機 (LF 帯受信機) の性能評価、そして LF 帯受信機の標定数向上と標定分解能の改善を目標とした現行の LF 帯受信機に代わる新たな受信機を提案し、その有用性を検証する。

### 4. 研究成果

トリガ記録方式の VHF 帯干渉計に代わり連続記録方式の VHF 帯干渉計を提案するにあたり、雷放電発生の元となる積乱雲の電気的活動を包括的に観測することを目的に、積乱雲内の降水セルの寿命に対応する最長 40 分間連続して記録できる仕様を検討した。電磁波の通過帯域は 25-80MHz、サンプリング周波数は 200MHz、鉛直分解能は 14bit と、従来の VHF 帯干渉計と共通の仕様としているが、受信信号を蓄積するメモリを 3.84TB 搭載することで、連続して雷放電由来の電磁パルスを記録できる長時間記録計を提案した。この長時間記録計の有用性を評価するために、大阪府豊中市において夏季雷を対象とした試験観測を実施した。2013 年 7 月 14 日 17 時 30 分 51 秒と同年 8 月 23 日 20 時 37 分 58 秒に観測された雷放電路の二次元標定結果を図 1-2 に示す。標定点の色が時間に対応してお

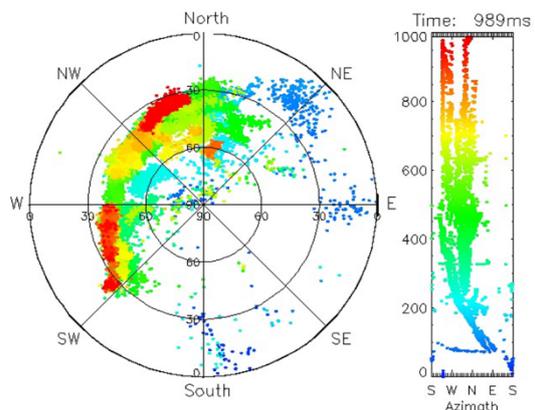


図 1. 2013/7/14 17:30:51 に長時間記録計で観測された雷放電の二次元標定結果

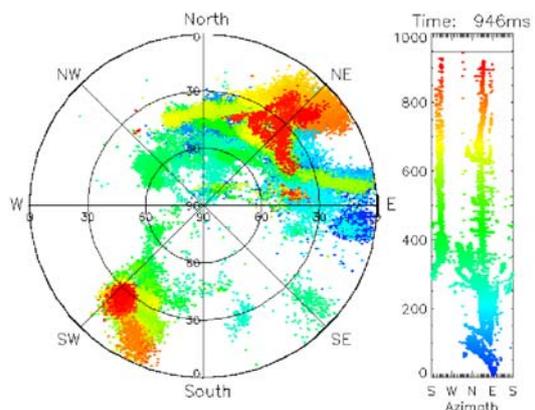


図 2. 2013/8/23 20:37:58 に長時間記録計で観測された雷放電の二次元標定結果

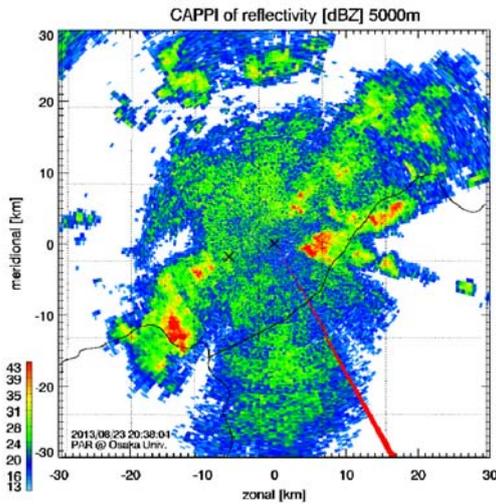


図3. 2013/8/23 20:38の高度5kmにおけるレーダ反射因子の水平分布

り、どちらの事例においても放電路の進展様相の詳細が明瞭に可視化なされた。また、進展している放電路が雲内の電荷領域に到達したときに、電荷領域に蓄積された電荷を放電開始点のほうへと移動させるごく短時間な現象であるリコイルリーダも複数可視化された。8月23日は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レーダによる降水観測が実施されており、その20時38分の観測結果(例えば図3)から長時間記録計より東に位置する対流性セルにある負電荷領域から放電が開始し、北東に位置する融解層周辺の正電荷領域へと進展しており、このとき検出されたリコイルリーダが融解層周辺に散在する正電荷領域を示すものである。このように、従来のVHF帯干渉計では制約のあったリコイルリーダの進展の詳細を複数検出しており、長時間記録計による詳細な放電プロセスの過程と雲内電荷領域の可視化を実証した。

一方で、VHF帯干渉計はその観測範囲の限界から放電路が水平方向に数十km以上伸びる雷放電などについての詳細を観測できない可能性がある。そのため、VHF帯干渉計よりも広域な雷観測網の冬季雷観測への適応を評価するため、LF帯受信機で構成されるLF帯雷観測網による電磁波放射源の標定精度の検証についてVHF帯干渉計を用いて実施した。LF帯受信機による電磁波放射源とVHF帯干渉計の電磁波放射源を比較するため、LF帯雷観測網によって標定された電磁波放射源の三次元座標を、VHF帯干渉計の観測点を基準としたLF帯電磁波放射源の到来方向に座標を変換し、VHF帯電磁波放射源の到来方向と比較を行った。なお、この座標変換には地面の曲率を考慮するため測地系日本測地系2000を用いた。また、LF帯雷観測網とVHF帯干渉計で受信された波形のうち、検出時刻の差が10us以内かつ、方位角のずれが20度以内を同一放射源によるものとして選択した。神戸市に設置したVHF帯干渉計による雷

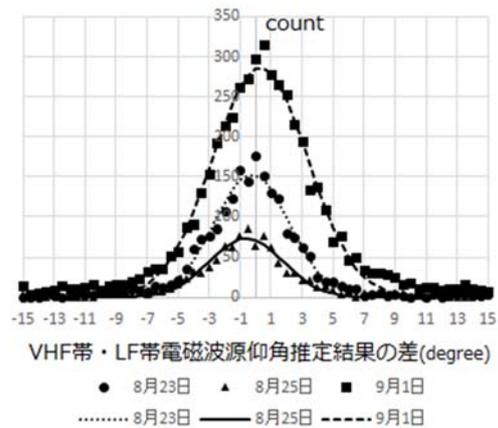


図4. VHF帯/LF帯電磁波の到来仰角推定の差

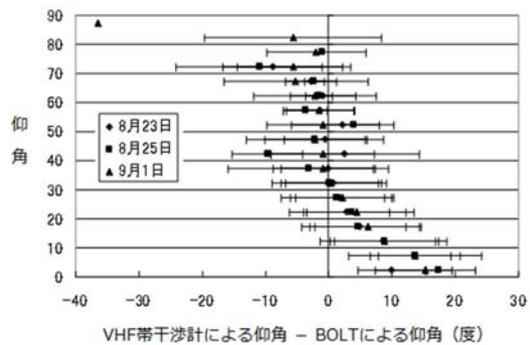


図5. 到来仰角推定差の仰角依存性

放電の標定結果と、それに対応するLF帯雷観測網の標定結果について、神戸市周辺で発雷が認められた3日間の事例からVHF帯電磁波とLF帯電磁波の到来方向推定の差を比較した。仰角の差0.5度ごとに電磁波パルスをカウントしたヒストグラムを図4に示す。この分布を正規分布で近似したところ半値幅はそれぞれ5.7度、5.6度、7.2度となった。また、仰角5度ごとにまとめた仰角の差の平均と標準偏差を図5に示す。30度以下の仰角で、差の平均値が15度程度である。30度以上の仰角では差の平均値が概ね10度以内に収まっている。そしてこれらの結果は3日間とも同じ傾向である。低仰角の誤差の発生要因はVHF帯干渉計周囲の山岳など設置環境に起因するものであり、それゆえLF帯雷観測網の仰角よりVHF帯干渉計の仰角が高く標定されていると推察し、LF帯雷観測網による放電路の三次元標定が有効であると判断した。

このLF帯雷観測網は雷放電路を三次元で可視化出来るだけでなく、受信される電界変化波形による雷放電の物理プロセス判別を実現している。一方で三次元可視化に必要な標定数が現行では十分とはいえない。従って、現在研究代表者らが運用しているLF帯雷観測網で使用されている現行の受信機に替わり、受信帯域をMF帯にまで広げることとLF帯の受信感度を低減することで標定数の向上と標定分解能の改善を目標とする新しい受信機を提案した。現行のLF帯受信機と提

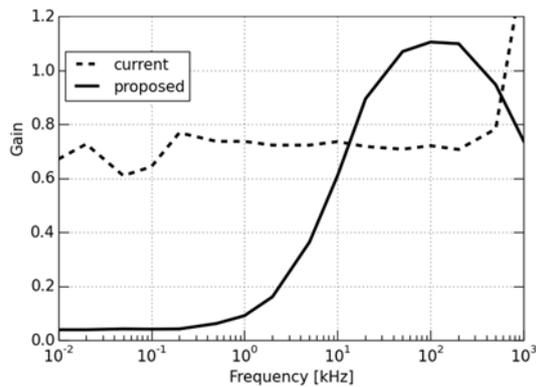


図 6. LF 帯受信機の周波数応答結果

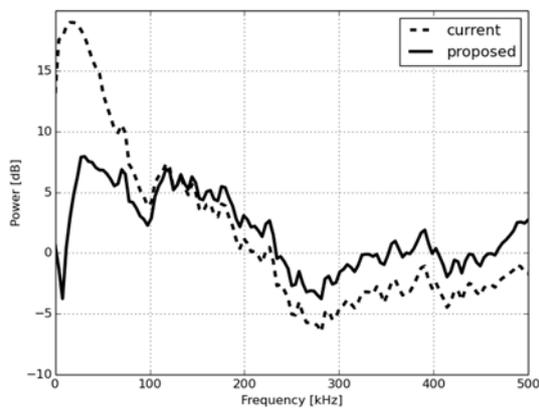


図 7. 電界変化波形のパワースペクトル

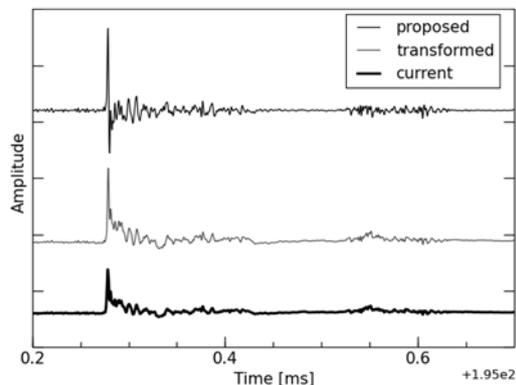


図 8. 提案する LF 帯受信機の波形整合

提案する LF 帯受信機の周波数応答を図 6 に示す。提案する受信機では、時定数を 1 $\mu$ s に設定し、高周波領域の電磁波も受信できるように設計した。2015 年 9 月 10 日 11 時 9 分に観測した雷放電による電界変化波形のパワースペクトルのうち、0-500 kHz について図 7 に示す。ノイズ成分が支配的な低周波領域では提案する受信機の電力が低減された。一方で高周波領域では提案する受信機の電力が従来よりも大きくなった。以上の結果より、提案する受信機は従来の受信機よりも多くの電磁波パルスを受信できると考えられる。提案する受信機と現行の受信機は、受信する周波数帯が異なるため、電界変化波形が異なる。よって物理プロセスを判別するためには、提案する受信機で受信された電界変化波形

が、現行の受信機による受信信号に変換する必要がある。そこで、提案する受信機の観測データにデジタルハイパスフィルタを通し、波形の整合を確認した。図 8 に波形整合結果を示す。波形が良好に一致したため、波形の整合性が保たれた。以上のことから提案した LF 帯受信機は波形整合によって電流推定、雷放電の物理プロセスの可視化を可能にしながら、現行の LF 帯雷観測網の受信機を置き換えることにより詳細な雷放電位置標定の実現が期待される。

本研究によって改良した雷放電路可視化装置を用いた冬季雷観測を継続して実施していく。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

- ① 大森雅斗、中村佳敬、吉田智、Wu Ting、牛尾知雄、雷放電に伴い同時に放射された LF 帯電磁波と VHF 帯電磁波の電磁波源標定の比較、日本大気電気学会第 90 回研究発表会、2014/01/09、東京学芸大学 (東京都)
- ② Y. Nakamura, T. Wu, T. Ushio, L. Elbaghdady, Z-I. Kawasaki, Development and initial observations of a Long-period VHF Broadband Digital Interferometer, 2014 International Conference on Lightning Protection, 2014/10/15, 上海 (中華人民共和国)
- ③ Y. Akiyama, T. Wu, M. Stock, Y. Nakamura, H. Kikuchi, S. Yoshida, T. Ushio, Z. Kawasaki, Upgrade to the Broadband Observation network for Lightning and Thunderstorms, AGU 2015 Fall Meeting, 2015/12/16, サンフランシスコ (アメリカ合衆国)
- ④ 中村佳敬、秋山泰洋、Michael Stock、Wu Ting、牛尾知雄、雷観測用 LF 帯広帯域受信機の改良と初期観測、日本大気電気学会第 94 回研究発表会、2016/01/08、電気通信大学 (東京都)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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