

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 13 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760367

研究課題名(和文) 雷空電の球面波伝搬効果解明とポータブル雷モニタへの応用展開

研究課題名(英文) Spherical wave propagation effects on sferics and development of a new portable lightning monitoring system

研究代表者

尾崎 光紀(OZAKI, Mitsunori)

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号：70422649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、雷から放射される電磁波(雷空電)を対象に、平面波伝搬近似が成立たなくなる100 km圏内の近距離の雷活動を把握する一地点観測による落雷位置推定法と小型軽量の雷活動モニタシステムの開発に関する研究を行った。落雷位置推定法に関し、雷空電直接波を用いることで従来の反射波のみを用いる場合に比べ、近距離で推定値誤差の改善に効果があることが分かった。そして、システム開発に関して、近距離の雷空電観測に重要な電磁界センサの広帯域化を図り、アナログASICによるシステムのアナログ部の超小型化を推し進めた。

研究成果の概要(英文)：In order to estimate lightning activities occurring within horizontal distance of 100 km, we have studied a single station lightning location technique. Additionally, we have developed a new portable lightning location monitoring system for an application of its single station lightning location technique. We have succeeded in the location accuracy improvement by using the information on time difference between the direct wave of sferics and the reflection waves. We have developed a new wideband search coil magnetometer having two resonant frequencies for observation of sferics within 100 km. We have downsized analog circuits of a portable lightning location monitoring system by using an analog ASIC (application specific integrated circuit) preamplifier. These results could be important and useful for development of a new lightning monitor system by a single-station observation technique.

研究分野：電波情報工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：雷空電 電波工学 球面波 落雷位置推定

1. 研究開始当初の背景

雷活動は、一般的に雷に伴う広帯域電磁波（雷空電、主要な周波数帯域は数十 kHz）を用いる。そして、波長オーダー（VLF 帯では数十 km）で配置された複数の電磁界センサにより、雷空電の複数点の電磁界情報（到来時間差など）を利用し推定する。このため、複数点の電磁界情報を必要とし、雷活動の観測にはコスト、可搬性の面から不利となる。一方で、我々は雷活動の多地点観測の欠点を補う一地点の電磁界観測で雷活動を検出する小型軽量の単体システム（以下、ポータブル雷モニタと呼称）の開発研究を継続している。ポータブル雷モニタでは、大地電離層導波管中を伝搬する雷空電の反射波間の時間差情報から落雷位置までの水平距離を推定し、直接波のエネルギー方向から落雷方位を推定している。また、直接波の大きさから、雷電流の大きさも推定可能である。ここで、一地点観測による落雷距離推定は、平面波伝搬が成立つ比較的長距離（数百 km）の落雷を検出するのに適している。このため、球面波として雷空電を考えるべき 100 km 圏内の近距離の雷観測では、位置推定誤差が極端に悪くなるという問題がある。よって、雷害を未然に防ぐ手助けとなる技術開発として、可搬性に優れ、簡易に近距離の雷活動を把握できるポータブル雷モニタの機能改善が重要となる。

2. 研究の目的

一地点観測による落雷距離推定法は、電離層大地導波管モード伝搬もしくは平面波伝搬近似に基づいており、比較的長距離（数百 km）の落雷を検出するのに適していた。しかし、波長に対し近距離といえる 100 km 圏内の落雷に対しては、推定法の近似が成立しなくなるため、落雷距離を推定することが難しくなるという問題があった。つまり 100 km 圏内の推定誤差を改善するには、雷空電の球面波伝搬の特性を明らかにすることが重要となる。このような問題に対し、本研究は従来の一地点観測による落雷距離推定法の問題を明らかにし、その改善を図ること、また雷から放射される電磁波と音波情報の併用により一地点の観測情報だけで雷活動を推定する手法の開発を推定法改善に対する研究目的としている。さらに、近距離の雷活動の推定手法の改良をポータブル雷モニタに適用し、さらにシステムの可搬性を向上させるために、計測システムの機能改善と小型化に関する技術指針の確立をシステム開発に対する研究目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題に対して、以下に示す(1)～(4)の項目について特に検討を進めた。

(1) 雷空電直接波を用いた落雷距離推定

雷空電直接波は大地導電率の影響により、その見かけの伝搬速度は光速よりも遅くなることが知られている。この光速より遅くなる影響は、雷空電を遠方界だけでなく球面波として近傍界、誘導界の影響を考慮することで生じるものといえる。このため、従来、光速伝搬を仮定する一地点観測による落雷距離推定法では、雷空電直接波は推定に用いられてこなかった。しかし、近距離の雷空電観測では、信号の SN 比より雷空電の反射波だけを用いることは難しい。従って、これまで利用されなかったが、近距離観測では SN 的に有利な雷空電直接波を用いた落雷距離推定法の改善について理論計算に基づき解析を行った。なお、理論計算には雷空電を球面波として扱い、大地電離層の多重反射伝搬効果も考慮している。

(2) 電磁波と超音波を用いた落雷位置推定

水平距離 10 km 圏内の雷から放射された雷空電は、落雷点までの水平距離推定に必要な電離層からの反射波間の時間差情報が得られない。このため、本研究では雷から放射される電磁波だけでなく超音波を用いて両者の時間差を距離推定に用いることを検討した。超音波と電磁波の時間差は、両者の到来方位が一致する場合を対象とすることで誤認識を低減させることとした。この推定法の基礎実験として、雷から放射される超音波の到来方位を推定するために、6 個の超音波センサを持つ超音波センサアレイを試作した。そして試作した超音波センサアレイを用いて、超音波と電磁波の到来方位同時推定のフィールド実験を行い、推定法の検討を行った。

(3) 電磁界センサの広帯域化

これまで雷空電の放射界のみを対象とする際は、10 kHz 程度までの電磁波計測でよかった。しかし、本研究のように近距離の雷空電を対象とする場合、電磁波の水平伝搬距離が短い場合数十 kHz 以上の電磁波減衰の影響が軽減されてしまう。このため、電磁界センサの帯域を広帯域化（1 MHz 程度までへ）することがシステム開発に対して、一つの重要な要素になる。電磁界センサとして、これまで小型化で有利なサーチコイル磁力計を用いてきたが、サーチコイル磁力計は一つのコイルで決まる共振周波数（数 kHz）を持ち、これによりセンサ感度および周波数帯域が決まる。このため、低周波帯の感度を劣化させることなくサーチコイル磁力計の周波数帯域を 1 MHz 程度まで広帯域化することはこれまで困難であった。これに対し、本研究では数 kHz と 100 kHz 付近に共振特性を持つ二つのコイルを一つの磁性体コアで共有させ、二つ以上の共振（複共振特性）により広帯域化の実現を検討した。手法としては、新しい広帯域サーチコイル磁力計の等価回路モデ

ルと試作センサを作成し、実測も行いながら検討を進めた。

(4) システムのアナログ部小型化

ポータブル雷モニタは電磁波受信機を有し、その電磁波受信機のアナログ部がシステムサイズの半分程度の割合を占めている。このため、アナログ部の小型化を進めない限り、システム全体の小型化は見込めない。そこでアナログ回路の小型化について、複数のアナログ回路を CMOS デバイスで一つの集積回路にまとめたアナログ ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 導入について検討を行った。特に CMOS デバイスは、電圧雑音特性が悪いが電流雑音特性は優れているため、電磁界センサで電流を検出し、従来のセンサ感度特性を劣化させることなく小型化を図ることを等価回路モデル、回路シミュレーション、そして実測により検討した。

4. 研究成果

各研究項目(3. 研究の方法)に対し、以下のような研究成果を得た。

(1) 雷空電直接波を用いた落雷距離推定

本研究で用いる落雷距離推定法は、雷空電パルス間の時間差パラメータを用いている。このため、時間差パラメータの微小変動に対する落雷距離推定値変動について数値的に解析を行った。解析の結果として、雷空電の反射波のみを利用する従来法と反射波に加えて直接波も用いた場合の落雷距離推定値の誤差率変化を図1に示す。

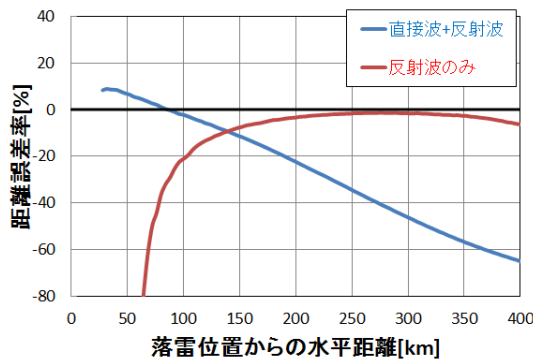


図1: 雷空電の直接波を用いた落雷距離(100 km以下)の推定誤差改善

雷空電の反射波のみを使用する従来法は推定値変動が近距離で無限大に漸近し、図1のように100 km圏内での距離誤差率が極端に低下してしまうことが分かった。これに対し、直接波を用いることで推定距離の誤差変動を光速に漸近させられることが分かった。これにより図1からも分かるように100 km圏内では直接波と反射波を用いた推定を行うことで距離の誤差率を改善できる。また、

100 kmより遠方の雷は従来通り、反射波のみを用いることで良好な誤差率を得ることができる。つまり、落雷距離推定結果の誤差変動は、直接波を用いることで従来法に比べて小さくすることができ、近距離の雷活動の推定に有効であることがわかった。この解析結果により、近距離の雷活動に対する一地点観測による落雷位置推定法の利用範囲を拡大できることが期待される。

(2) 電磁波と超音波を用いた落雷位置推定

雷から放射される超音波の到来方位を全方位で捉えられるように6個の超音波センサのアレイと16 bit マイコンを用いて超音波到来方向システムを試作した。室内実験では、到来方位の推定誤差平均は17度以下、誤差の標準偏差は3.2度以下という結果を得た。この室内実験結果を踏まえ、試作した超音波アレイにより、分解能20度程度の到来方位を推定可能と考え、実際の雷活動を観測するためのフィールド実験を行った。実際のフィールド試験において、試作した超音波アレイが、雷から放射される超音波を捉えることを確認した。そして、観測した超音波の到来時間差の情報を用いて到来方位を推定し、その推定結果を電力会社が公開している雷空電の多地点観測による落雷位置推定結果と比較した。比較の結果は、室内実験で予想された分解能20度よりも悪い精度での超音波方位推定となり、フィールド試験環境における超音波の反射の影響など、誤差改善が課題として残った。

(3) 電磁界センサの広帯域化

本研究では、サーチコイル磁力計の周波数帯域をこれまでの数十kHzから1 MHz程度までの広帯域化を図るために、一つの磁性体コアを共有し低周波用(自己共振が数kHz)と高周波用(自己共振が100 kHz程度)の二つのコイルを一つのコンデンサで結合させた。このような機構で複共振を有する広帯域サーチコイル磁力計の試作を行った。この電磁界センサは、コンデンサによりコイル間が接続されるため、両コイルは誘導性結合を有し、さらに磁性体コアを共有するため、ある周波数帯域では誘導性結合も伴う。ここで結合用コンデンサのインピーダンスは、周波数の増加とともに非常に大きいものから小さいものへと移り変わるので、一種のスイッチとして作用させることが可能である。試作した複共振サーチコイル磁力計は、低周波帯では従来のサーチコイル磁力計と同じ特性を示した。そして、結合コンデンサのインピーダンスが小さくなる高周波帯では、二つのコイルが容量性結合から誘導性結合へと変化し、低周波帯とは異なる共振特性を得ることができた。試作したセンサのゲインと感度特性を図2に示す。図2より試作したセンサは、周波数3 kHzで40 fT/Hz, 140 kHzで14 fT/Hzの感度を有していた。また1 pT/Hzの感度を有していた。また1 pT/Hzの感度を有していた。

雷空電を仮定した場合、20 Hz ~ 1 MHz までの周波数帯域で観測可能であることをセンサ感度より確認した。これらの電気特性は、雷空電計測用として十分な性能を有するものであり、従来のサーチコイル磁力計に高周波用コイルと結合コンデンサの追加だけで広帯域化を図れたことは、電磁界センサの機能改善として重要な成果の一つといえる。

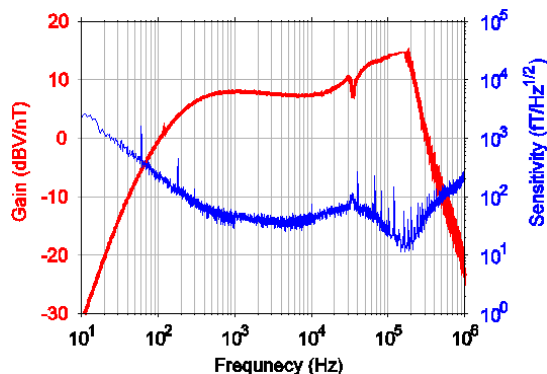


図 2：広帯域化を図ったサーチコイル磁力計のゲインと感度特性

(4) システムのアナログ部小型化

雷から放射される雷空電の主な周波数帯域は 100 kHz 以下であり、このような低周波帯では CMOS デバイスのフリッカ雑音が支配的となる。フリッカ雑音は MOS トランジスタのサイズを大きくすることで低雑音化が可能であるが、一般的に同じサイズであればバイポーラトランジスタの方が、電圧雑音特性が小さい。一方で、MOS トランジスタの電圧雑音特性は悪いが、 fA/Hz オーダーという優れた低電流雑音特性を有する。このため、本研究では MOS トランジスタの低電流雑音特性に着目し、雷空電の誘導電流を検出する CMOS デバイスを用いたアナログ ASIC プリアンプを用いることで、従来のセンサ感度特性を劣化させることなくポータブル雷モニタの小型化を検討した。実際に 5 mm 角のチップに雷空電の誘導電流を検出する 4 入力分の超低雑音電流アンプ、ゲイン調整アンプ、定電圧回路を含んだ ASIC プリアンプを用いてセンサ感度を実測した。その結果、周波数 1 kHz で 40 fT/Hz、10 kHz で 80 fT/Hz の特性を得た。これらは従来のセンサ特性と同等の性能である。よって、雷空電の誘導電流を検出する電磁界センサとアナログ ASIC プリアンプにより、従来と同等の感度を有しながら、ポータブル雷モニタのアナログ部を極端に小型化できるといえる有益な技術指針を明らかにした。

以上の成果より、雷活動推定法の改善に対する研究目的に対し、雷空電の球面波の影響により、電離層からの反射波のみを用いていた一地点観測による落雷距離推定（従来法）に比べ、100 km 圏内の落雷位置推定には直接

波を推定パラメータに加えることで距離推定値の誤差変動を低減でき、従来法に比べ距離推定結果の改善に有効となることが分かった。さらに、電磁波と音波を併用した落雷位置推定では、超音波の方位推定が室内実験時より実際の雷観測時の方が悪く、この精度改善が今後の課題となった。そして、ポータブル雷モニタの機能改善と小型化に関する研究目的に対し、近距離の雷活動に適した電磁界センサの広帯域化、さらにシステムのアナログ部をアナログ ASIC により超小型化が図れることを明らかにした。これらの研究成果を踏まえ、今後、近距離の雷活動の把握を可能とするポータブル雷モニタの開発を進めていく。

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)

M. Ozaki, S. Yagitani, K. Takahashi, and I. Nagano, "Dual-resonant search coil for natural electromagnetic waves in the near-earth environment," *IEEE Sensors Journal*, vol.13(2), pp.644 - 650, 2013, 査読有.

doi: 10.1109/JSEN.2012.2224863.

M. Ozaki, S. Yagitani, K. Miyazaki, and I. Nagano, "Development of a new portable lightning location system," *IEICE Transactions on Communications*, vol.E95-B, pp.308 - 312, 2012, 査読有.

http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e95-b_1_308&category=B&year=2012&lang=E&abst=

M. Ozaki, S. Yagitani, K. Miyazaki, and I. Nagano, "An improved distance finding technique for single-site lightning location system using reflection characteristics of the anisotropic ionosphere," *Proceedings of the XXX General Assembly and Scientific Symposium of URSI*, 4 pages, 2011, 査読有.

doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6050699.

尾崎光紀, 八木谷聡, 宮崎和久, 長野勇, "異方性電離層の雷空電への影響と落雷位置推定誤差改善への応用," *電子情報通信学会技術研究報告*, vol.EMCJ2011-53, pp.55 - 58, 2011 査読無.

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008800387>

[学会発表](計 7 件)

尾崎光紀, 高橋健, 八木谷聡, 小嶋浩嗣, "サーチコイル磁力計プリアンプの低電流雑音アナログ ASIC 開発," *地球電磁気・地球惑星圏学会 第 134 回総会・講演会* 2013 年 11 月 2~5 日, 高知大学 高

知県).

M. Ozaki, K. Takahashi, S. Yagitani, H. Kojima, and I. Nagano, "Development of a wideband magnetic search coil and a low noise ASIC preamplifier for natural electromagnetic waves," 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, September 3 ~ 7, 2013, Taipei (Taiwan).
尾崎光紀, 八木谷聡, 高橋健, 長野勇, "自然電磁波観測用サーチコイルの広帯域化に関する検討," 電子情報通信学会総合大会, 2013年3月19~22日, 岐阜大学(岐阜県).

高橋健, 尾崎光紀, 八木谷聡, "自然電磁波観測用サーチコイルの複共振化に関する検討," 地球電磁気・地球惑星圏学会第132回総会・講演会, 2012年10月20~23日, 札幌コンベンションセンター(北海道).

尾崎光紀, 八木谷聡, 石崎正樹, 長野勇, "雷空電直接波による落雷距離推定法への影響," 電子情報通信学会総合大会, 2012年3月20日, 岡山大学(岡山県).

M. Ozaki, S. Yagitani, K. Miyazaki, and I. Nagano, "An improved distance finding technique for single-site lightning location system using reflection characteristics of the anisotropic ionosphere," The XXX General Assembly and Scientific Symposium of URSI, August 15, 2011, Lutfi Kirdar Convention and Exhibition Centre (Turkey).

尾崎光紀, 八木谷聡, 宮崎和久, 長野勇, "異方性電離層の雷空電への影響と落雷位置推定誤差改善への応用," 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, 2011年7月14日, 機械振興会館(東京都).

〔その他〕

ホームページ等

<http://reg.is.t.kanazawa-u.ac.jp/~ozaki>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 光紀 (OZAKI, Mitsunori)
金沢大学・電子情報学系・准教授
研究者番号: 70422649

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし