

機関番号：13301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860038

研究課題名（和文） 雷空電理論波形の伝搬解析に基づくポータブル雷モニタの開発

研究課題名（英文） Development of a new portable lightning location system based on theoretical propagation analysis of sferics

研究代表者

尾崎 光紀 (OZAKI MITSUNORI)

金沢大学・電子情報学系・助教

研究者番号：70422649

研究成果の概要（和文）：本研究は雷放電による電磁波放射（雷空電）を測定し、数百 km 圏内の雷活動（位置と規模）を単体でモニタする小型軽量のポータブルシステムの開発に関する研究を行った。特に、雷空電の理論伝搬解析に力点を置き、電離層反射の入射角依存性を定量的に明らかにし、落雷位置推定精度向上に成功した。これらの結果は、雷空電に関連する電磁気学に新しい知見をもたらしただけでなく、雷害に対する防災科学発展にも貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：In order to develop a new portable lightning detection system, we have studied about the propagation characteristics of the VLF sferics. We have succeeded in the location accuracy improvement by mitigating the effects of the incident angle dependence of ionospheric reflection coefficient. This study would be important and useful to protect us from lightning hazard.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,060,000	318,000	1,378,000
2010 年度	970,000	291,000	1,261,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,030,000	609,000	2,639,000

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、落雷位置推定、電波工学

## 1. 研究開始当初の背景

1990年代に雷活動が地球温暖化をモニタする有用な物理量であると報告され、また雷放電に伴う超高層大気での放電発光現象、さらには雷活動に由来すると考えられる地球起源ガンマ線放射の発見など、雷に関する新しい物理現象の発見が相次いでいる。これらはその発見からの経過が浅く、理論モデル、発生メカニズムは十分解明されていない。そのため国内外の共通認識として雷に関する電磁気学の理解と雷活動の把握が課題とな

っており、特に雷活動の柔軟なモニタリングシステムの開発が重要な基礎研究課題となっている。

雷は放電に伴い広帯域電磁波（雷空電）を放射する。そのピークはVLF帯（数百Hz～数十kHz）に存在するため、雷空電は電離層―大地導波管内を千km以上伝搬する。雷空電の電磁波としての特徴は1970年代に見出され、今日では雷空電を用いて落雷位置やその規模が推定されている。代表的なものとしては、100km以上離れた複数のVLF帯雷空電受信局によって計測される到来波の時間

差や到来方向を利用し落雷位置を推定する手法がある。この手法を用いたシステムは雷観測網として構築され、現在国内外で実用化されている。しかし、従来の雷活動モニタリングシステムは、波長オーダーの間隔で配置された複数の電磁界センサを必要とするため、「固定観測」に限られ、海洋などでの雷観測には限界がある。また広域の雷活動を把握するために科学衛星による監視も行われているが、雷検出感度は地上観測に比べ悪い。

このような落雷位置推定システムの固定観測という現状と雷に関する新しい物理現象の理解への貢献を見据え、我々は一刻も早く「柔軟で手軽な観測形態」を確立するため、雷活動を単体でモニタするポータブルシステム開発に関する研究を行った。

## 2. 研究の目的

本研究は雷放電による電磁波放射（雷空電）を一地点で測定し、雷活動（位置と規模）を単体でモニタする小型軽量のポータブルシステムの開発を研究目的とする。このために、一地点の観測情報のみから落雷位置を検出する、一地点観測による落雷位置推定法を採用する必要がある。一地点観測による落雷位置推定法とは、電離層―大地導波管内で反射した雷空電反射波の到来時間差から落雷位置までの距離を、雷空電直接波のエネルギーの方向から落雷方位を推定するものである。特に、一地点観測による落雷位置推定法の十分な精度を実現するために、雷空電に対する電離層反射の影響など、従来定量的に明らかになっていない雷空電の伝搬特性の理解が重要である。このために、我々は電離層の影響を厳密に考慮した雷空電の理論波形を用いて、雷空電の伝搬解析を行った。

その一方で、ポータブルシステムの構築のために、従来 1 m 程度のセンササイズを有する雷空電計測用の電磁界センサに対し、感度を維持しつつ手のひらサイズまで大幅な小型化を図った。さらに可搬性に優れたシステム利点を活かすため、センサ自身の姿勢を検出し、姿勢に依存せず落雷位置の情報を提供する機能を新たに開発した。

以上の雷空電伝搬特性の解明とシステム技術課題の解決により、小型パソコンと一体で総重量 1500 g 以下のポータブル雷モニタを開発し、落雷位置推定誤差 20 %以下を実現することを本研究の到達目標とした。

## 3. 研究の方法

本研究課題の目的達成のために、以下に示すように、雷空電の理論的振る舞いの定量的理解とシステム技術課題の解決を試みた。

### (1) 雷空電の理論伝搬解析

#### ①雷空電周波数帯域の推定精度への影響

本研究では、数 Hz～UHF 帯までの広い周波数帯域を持つ雷空電に対して、VLF 帯（数百 Hz～数十 kHz）を対象としている。このため遠方（数百 km）の雷活動まで把握できるという利点がある。しかし、後述するパソコンからの雑音の影響を極力低減させるために、VLF 帯の中でも特定の周波数帯域のみを使用できるように、落雷位置推定に対して、計測周波数帯域依存性を定量的に評価する。そのため、波動論的計算手法の一つである Full-wave 解析により、世界でも研究代表者のグループのみが理論計算に成功している大地と電離層の影響を厳密に考慮して計算した雷空電波形を用いて検討した。

#### ②雑音の推定精度への影響

実環境では、必ず測定結果に雑音が含まれる。一方で、従来一地点観測による落雷位置推定法に対し、雑音の影響は十分に議論されてこなかった。そのため、落雷位置推定に対する雑音の影響を理論的に検討した。具体的には、落雷位置の推定式に雑音の項を付加し、理論的にどのように雑音が振る舞うのか定量的に評価した。

#### ③電離層反射の影響

一地点観測による落雷位置推定は、電離層反射波を用いて落雷位置までの距離推定を行う。このため、異方性不均質媒質である電離層プラズマの影響が懸念される。従来は、電離層異方性の推定精度の影響に対し、議論されておらず、平均的な電離層反射高度を仮定した単純な鏡面反射として問題を扱ってきた。そのため、本研究では、Full-wave 解析により、電離層反射係数の入射角依存性を解析し、推定精度への影響について定量的な評価を実施した。そして、得られた知見を活かし、推定精度向上についても検討を行った。

#### ④雷電流の推定精度向上

雷電流の大きさは、遠方界を対象としたとき、磁界強度、落雷位置までの水平距離、雷電流の放電速度を用いて理論的に表すことができる。しかし、雷電流の放電速度は従来電磁界観測だけから知ることは難しく、統計的に知られた値を仮定し、雷電流の推定が行われてきた。放電イベント毎に放電速度は異なり、その結果には曖昧さが含まれるものである。我々は、特に雷空電のスペクトル特徴に注目し、従来未知であった放電速度に関する物理量を電磁界観測から情報を得ることができないか、理論式から検討を行った。

### (2) ポータブルシステム開発研究

#### ①電磁界センサの姿勢検出

ポータブルシステムとしての可搬性の利点を活かすために、電磁界センサの姿勢検出の機能を新規開発する。従来、電磁界計測においてセンサの姿勢は固定というのが通念であり、本研究で試みるような自身の姿勢を検出し、計測結果を補正するというようなインテリジェント電磁界センサは存在せず、非常に挑戦的な研究項目である。これに対し、我々は、加速度、地磁気、ジャイロセンサを用いて静止状態と移動状態での姿勢検出アルゴリズムを開発する。そのために、加速度、角速度、磁北方向の物理量で記述できる姿勢検出アルゴリズムを検討し、シミュレーションにより評価する。そして実際のセンサを用いて、姿勢検出の推定精度を評価する。この際、実際のセンサは理想センサとしては働かないため、姿勢検出の精度劣化が懸念される。そのため、各センサの校正処理についても検討を行った。

## ②電磁界センサの小型化

(1) ①雷空電周波数帯域の推定精度への影響での検討結果を踏まえ、落雷位置推定に有用な周波数帯域において最適な感度を有する小型の電磁界センサを設計する。特に、試作を繰り返すことなく適切なセンサを開発するために、アンテナシミュレーションを行いセンサ開発の指針を検討した。また、3軸サーチコイルは、強磁性体コア形状の工夫により小型化を試みた。

## ③雑音源近傍での電磁界センサの配置

本研究では、落雷位置と規模推定プログラム実行に用いるパソコン（雑音源）近傍に電磁界センサを配置する必要がある。この解決として、我々はパソコンが放射する雑音の周波数帯域を雷空電から取り除いた変形波形を用いることを考えた。そのため、(1) ①で議論する位置推定に有用な周波数帯域で、さらに雑音が存在する特定の周波数帯域を取り除いた波形の位置推定への影響を議論した。この解析も、雷空電の理論波形を取り扱える我々だからこそ解析することができた研究項目である。

## 4. 研究成果

各研究課題（3. 研究の方法）に対し、次のような研究成果を得た。

### (1) 雷空電の理論伝搬解析

#### ①雷空電周波数帯域の推定精度への影響

中緯度地方においては方位・距離推定に対して下限周波数 400 Hz、上限周波数 30 kHz までの帯域制限を施した波形を用いても帯域制限を行わないものと比べて 10%以下の誤差率で推定可能であることが分かった。これは、周波数に対する電離層反射係数の変化に

起因するものであり、数十 kHz 以上の周波数成分は地上へ反射するのではなく電離層を透過してしまうため影響しないことが分かった。実際に観測される雷空電は、電離層反射波の波頭部が滑らかな凸とならず、距離推定で重要な反射波間の時間差を決定する真のピーク値を捉えることが難しい場合が存在する。従来は周波数帯域の推定精度への影響について十分な議論がなかったため、容易に低域フィルタなどにより高周波成分を除去することはできなかった。しかし、本研究成果により、従来の問題を解決する帯域制限を施した波形を取り扱う場合の推定精度への影響を定量的に示すことができた。

#### ②雑音の推定精度への影響

落雷位置までの距離推定において、雑音により推定に用いる雷空電反射波間の時間差が変化し、推定値に影響を及ぼす。この雑音の影響について推定距離の微小な時間変化つまり時間微分について理論解析を行ったところ、落雷距離推定は、時間に対し光速を超えた変化を示すという結果を得た。これは、水平距離の光速伝搬時間よりも短い反射波間の時間差情報を用いることに起因する。しかし、推定に用いる反射波の数を多くすることで、光速を超えた時間変化は低減でき、推定誤差を低減できることが分かった。

#### ③電離層反射の影響

異方性電離層の反射特性の理論計算より、雷空電の電離層反射に対し、第一反射波が最も電離層への入射角依存性の影響が大きいことを明らかにした。落雷点までの水平距離は、電離層反射波間の時間差を用いて推定しており、従来は反射波の中で SN 比の良い第一反射波を使用してきた。このため、本研究では入射角に対し電離層反射係数が安定しない第一反射波を使わない距離推定法を新たに開発した。そして従来法と推定誤差率を比較したところ、図 1 に示すように従来法は夜間の雷空電に対し距離誤差率 20%以下だったのに対し、新しい推定法は 5%以下となった。よって、第一反射波を用いない新しい距離推定法により大幅な誤差改善を得ることに成功した。

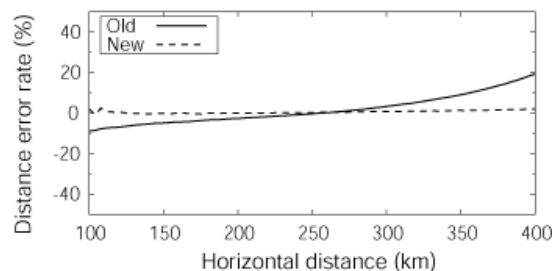


図 1：落雷距離推定誤差率の比較

#### ④雷電流の推定精度向上

雷電流の推定に必要な放電速度に関する物理量（放電時間＝放電長／放電速度）が雷空電スペクトル特徴から得られることを理論的に示すことに成功した。これにより従来、統計的に知られている仮定した放電速度の値を用いてあいまいな雷電流推定が行われていたことに対し、電磁界観測から理論的に根拠のある放電時間を用いた雷電流推定法を確立することができた。

#### (2) ポータブルシステム開発研究

##### ①電磁界センサの姿勢検出

加速度、地磁気、ジャイロセンサを用いて静止状態と移動状態での姿勢検出システムの開発を行った。しかし、小型ジャイロセンサは、十分な精度を有するものを得ることができず、移動状態に対する姿勢検出の機能は実現することができなかった。特にジャイロセンサは、そのセンサ出力を積分することで角速度を得るが、わずかなオフセット誤差が積分することで蓄積され、リアルタイムで姿勢検出する上で、困難な要因となった。しかし、加速度、地磁気センサを用いた静止状態での姿勢検出は誤差5度以下で検出できるものを開発することに成功した。

##### ②電磁界センサの小型化

効率良く周辺の磁束密度を集中させるため、従来棒状の強磁性体コアの両端を広げた変形コアを用いたセンサの小型化を検討した。1軸分の性能としては、変形コアは感度向上に有利となるという結果を得たが、3軸に組合せた磁界ベクトルを計測する場合、センサ間のカップリングが従来よりも大きくなり精度が劣化してしまうという結果となった。このため、従来の棒状形の強磁性体コアによるセンサの設計を行い、1軸分のセンササイズが直径15mm、長さ40mm、重量20gのものを製作し、これを3軸に組み交流磁界ベクトルを計測できる小型センサを開発した。開発したセンサのゲインと感度を図2に示す。開発した小型センサが、VLF帯において10 pT/√Hzの雷空電に対しSN比40 dBの性能を有し、雷空電観測に十分な性能を有する物を開発することができた。

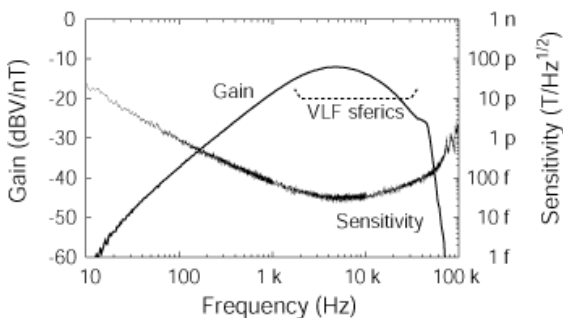


図2：開発した磁界センサのゲインと感度

##### ③雑音源近傍での電磁界センサの配置

システムのポータブル化に際し、パソコンなどの近傍に電磁界センサを配置する必要があるため、(1)①雷空電周波数帯域の推定精度への影響で検討した有効な周波数帯域内にモノクロマティックな雑音が存在する場合についてその影響を検討した。本研究では、ノッチフィルタを用いて雑音を抑制した波形による推定精度への評価を行ったところ、誤差率が容易に増大してしまう結果となった。このため、有効な周波数帯域にモノクロマティックな雑音が存在する場合に対し、効果的な信号処理法を十分に検討することはできなかった。この部分については、システムのポータブル化において重要な研究要素であり、今後さらなる検討を実施する予定である。

以上のような(1)雷空電の理論伝搬解析と(2)ポータブルシステム開発研究の成果に基づき、図3に示すようなポータブル雷モニタの試作機を開発した。試作機の総重量は350g（治具付きセンサ：180g、90×190mmプリント基板：170g）であり、静止状態のシステム姿勢を自動で検出・補正し、GPSモジュールにより現在の位置と時間を取得し、USBでパソコンと接続し、落雷位置をリアルタイムで推定する機能を有するものである。



図3：ポータブル雷モニタの試作機

そして、開発した試作機を用いて落雷位置推定のフィールド試験を行い、多地点観測システムの一つであるWorld Wide Lightning Location Network (WWLLN)の推定結果とMTSAT-1R衛星で観測された可視画像（雲画像）と比較した。図4に比較の結果を示す。図4より、試作機による落雷位置推定結果は多地点観測システムと同様に雷雲周辺に分布し、自身の姿勢によらず自動で落雷位置を検出できる機能を有することが確認された。

本研究により、目標であった位置推定誤差20%以下を一地点観測による落雷位置推定法において原理的に実現可能であることを



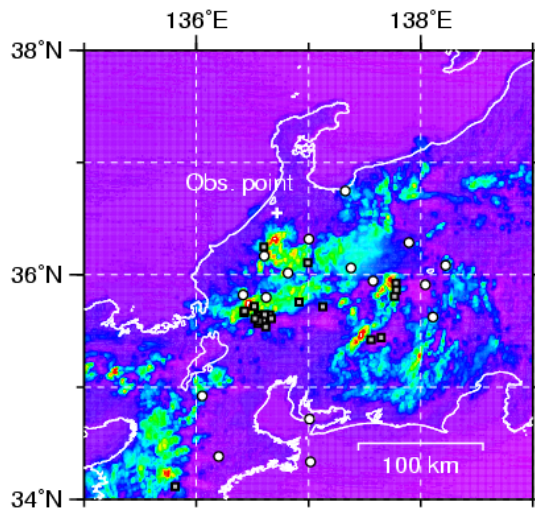


図4：落雷位置推定結果の比較  
 (○：ポータブル雷モニタ、□：WLLN、  
 カラーコンター：可視画像)

明らかにし、推定法に対する電離層や雑音の影響を国内外において初めて定量的に明らかにすることができた。またポータブル雷モニタの試作機の開発を通して、システム姿勢を自身で検出し、目標の小型パソコンと一体で総重量 1500 g のシステム構築が現実的に可能である技術指針も立てることができた。今後の研究項目としては、電離層反射波の情報を使用できない 50 km 圏内の近距離の雷に対して一地点の雷空電情報から落雷位置を推定する手法の開発が挙げられる。また、本研究で十分成果が得られなかった、雑音源近傍での電磁界センサの配置に対し、効果的な信号処理の検討が挙げられる。これらを解決し、雷害に対し安価でありながら高精度な防災システムとして役立つポータブル雷モニタを早急に開発させる必要がある。

#### 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 2 件)

- ① 尾崎光紀, 八木谷聡, 宮崎和久, 長野勇, “雷空電理論波形を用いた一地点観測による落雷位置推定法の誤差評価,” 電子情報通信学会論文誌 B 通信, vol. J94-B, pp. 577-588, 2011, 査読有.
- ② 尾崎光紀, 八木谷聡, 小出拓也, 長野勇, “雷空電を用いた非線形最小二乗法による雷撃電流波形及び電荷量推定,” 電子情報通信学会論文誌 B 通信, vol. J93-B, pp. 711-720, 2010, 査読有.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 尾崎光紀, 雷空電の電離層反射特性を考慮した落雷位置推定, 電子情報通信学会総合大会, 2011年3月16日, 東日本大震災のため発表資料のDVD配布により発表成立.
- ② 尾崎光紀, VLF帯電波伝搬のブリュースター角を考慮した落雷位置推定, 第34回極域宙空圏シンポジウム, 2010年12月2日, 国立極地研究所(東京都).
- ③ 尾崎光紀, 放電速度を考慮した帰還雷撃電流モーメント推定法の検討, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2010年11月2日, 沖縄県市町村自治会館(沖縄県).
- ④ Ozaki, M., Extracting return stroke current moment based on spheric spectrum, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2010.9.23, Toyama International Conference Center (Toyama).
- ⑤ 尾崎光紀, 雷空電スペクトル情報を用いた帰還雷撃電流推定, 電子情報通信学会総合大会, 2010年3月18日, 東北大学(宮城県).
- ⑥ 尾崎光紀, 雷空電起源のハーモニックスペクトル構造を持った極域自然VLF/LF波動, 第33回極域宙空圏シンポジウム, 2009年11月12日, 国立極地研究所(東京都).
- ⑦ 尾崎光紀, ハーモニック・スペクトル構造を持った極域自然VLF/LF波動の解析, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2009年9月28日, 金沢大学(石川県).

[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・助教  
 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