

令和3年9月30日

第11回気象文化大賞
研究成果報告書

課題名： 雷雲内の電荷量・電荷高度の変動検出による落雷発生の短時間予測
研究代表者： 山下幸三
所属機関： 公立小松大学

目次

1. 研究背景・目的	2
2. 観測	2
3. 結果・考察	3
3.1. 「帯電」の観測	3
3.2. 「放電」の観測	4
4. まとめ・今後の課題	5
成果発表実績	6
謝辞	6

1. 研究背景・目的

雷は雲内で放電が生じる「雲放電」と、雲―地面間での放電が生じる「落雷」（もしくは対地雷放電）の二種に大別される。本研究課題の最終目的は、着雷点に甚大な経済的、人的被害をもたらす落雷の「位置」および「時刻」の直前発生予測である。活発な夏季雷が見られる北関東では、雷サージ(雷に伴う電線内の突発電流)対策として「雷鳴が聞こえたら工場内の精密機器の電源コード(サージ侵入路)を抜く」などの曖昧な対応が為されている。導入コスト数1000万円の工場生産ラインが1回の雷雨通過で故障、等の報告もある(申請者らの調査)。落雷の直前発生予測に基づいた電源ラインの自動切り離し等は、雷サージ対策としての高い有効性が期待される。

申請者は落雷直前予測の実現を目的とし、放電前に雷雲内に蓄積される静電気(以下、雷雲電荷)の定量推定アルゴリズム開発を2018年より進めている。雷雲電荷と地上静電界の一対一対応を把握しやすい空間的に孤立した雷雲(以下、孤立雲)を観測対象とする。栃木県・群馬県の県境域に観測網を構築し、同域に発生する孤立雲下の地上静電界を多点計測する。雲内に単純化した電荷構造モデル(点電荷モデル、2電荷モデル、3電荷モデル)の適用を検討し、雷雲電荷の高度・電荷量の時間変化を導出する。

本申請課題では孤立雲内に点電荷構造を仮定し、雷雲下の静電界分布に適合する雲内電荷の高度・電荷量の定量推定法を開発した(成果発表実績[1])。電荷量・電荷高度の変動検出による落雷の短時間予測の実現可能性を示す結果を得た。2021年夏季の雷雲観測では、雷雲電荷(帯電)に伴う地上静電界の多点計測網の拡充と共に、落雷(放電)観測にも取り組んだ。本報告書では重点課題とした下記2点の初期結果を報告する。

- (1) 「帯電」の観測：静電界計測を拡充(観測点数および観測領域の拡大)し、孤立雲内に仮定する電荷構造モデルの拡張(2電荷モデル・3電荷モデル)を検討した。
- (2) 「放電」の観測：静電界計測に基づいた雷電荷量(雲放電・落雷により消失する電荷量)算出のためのセンサーを新規開発し、5点以上多点展開した。

2. 観測

本申請が扱う静電界センサー2種は、申請者が2013年より独自設計し、2018年からは連携企業と再設計・製造してきた。雷雲センサーは雷雲電荷に伴う地上静電界 E_S [V/m]の計測に、雷センサーは雷放電により消失する電荷に対応した静電界変動 ΔE [V/m]を捉えるためのセンサーシステムである。センサー2種はそれぞれ雷雲の「帯電」と「放電」の観測を担うものである。各システムの概要を表.1に示す。

表1 本申請課題で用いる静電界センサー2種と観測パラメータの概要

名称	計測量	観測パラメータ	分解能	設置数
雷雲センサー(回転型静電界計測器)	雷雲電荷に伴う静電界: E_S [V/m]	雷雲電荷の盛衰・移動、電荷急変動	1 s	20 機
雷センサー(容量性センサー)	雷に伴う静電界変動: ΔE [V/m]	電荷消失の時刻、位置、電荷量	10 μ s	5 機

観測システムの外観を図.1～3 に、センサー2種の諸元を表.1 および表.2 に示す。

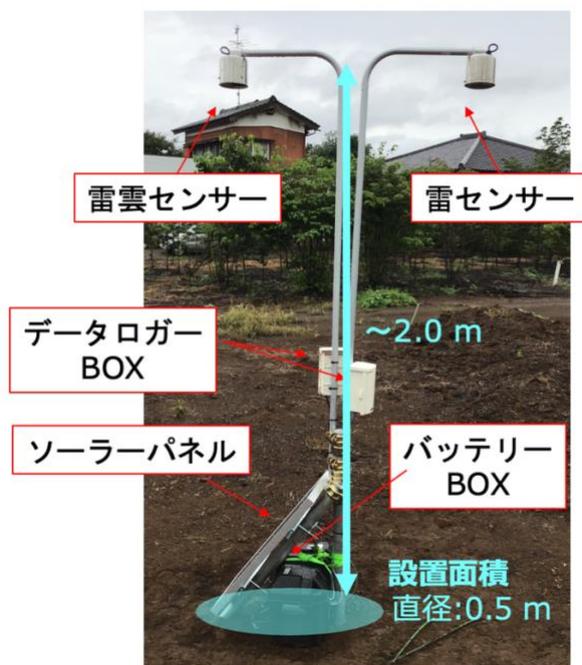


図 1 2021 年夏季に北関東へ展開したセンサーシステムの外観(写真は雷雲センサーと雷センサーを併設した観測拠点)



図 2 雷センサーのセンサー部



図 3 雷雲センサーのセンサー部

表 2 雷雲センサーシステムの諸元

項目	詳細
電源電圧	11.0 - 15.0 V
消費電力	～1.6 W
センサー時刻	GPS 時刻同期
サンプリング周波数	10 Hz (連続波形記録)

表 3 雷センサーシステムの諸元

項目	詳細
電源電圧	11.0 - 15.0 V
消費電力	～0.8 W
センサー時刻	GPS 時刻同期
サンプリング周波数	10 kHz (トリガ記録)

3. 結果・考察

3.1. 「帯電」の観測

2021 年夏季は計 20 地点に雷雲センサーを配備し、雷雲下の地上静電界の多点計測に取り組んだ。雷雲電荷と地上静電界の一対一対応を把握しやすい孤立雲を計測対象とし、5 事例を取得した。計 18 地点に配備したセンサーで孤立雲に対応した静電界分布を計測した事例を図.4 に、同事例に対応した C-band 気象レーダ網によるエコー分布を図.5 に示す。

雷雲直下の観測点では 3 電荷構造モデルに、雷雲から距離がある観測点では 2 電荷構造

モデルに対応した波形が得られた。現在、2電荷構造モデルに対応した波形群より雷雲内の正・負電荷の位置および電荷量の時間変化の算出を行い、解析の妥当性検証に取り組んでいる。

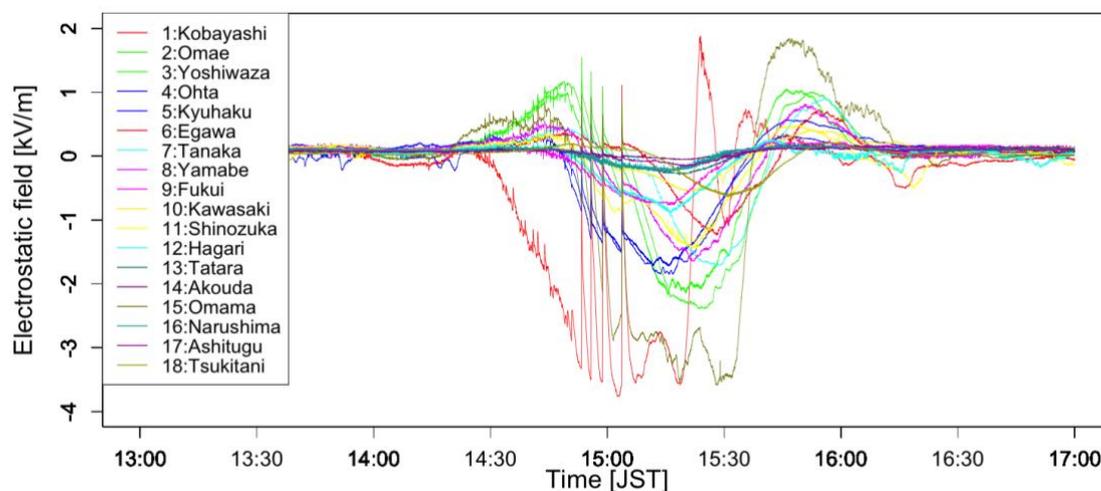


図 4 2021年8月20日 13:00-17:00 [JST]に計 18 地点の雷雲センサーで取得した地上静電界波形

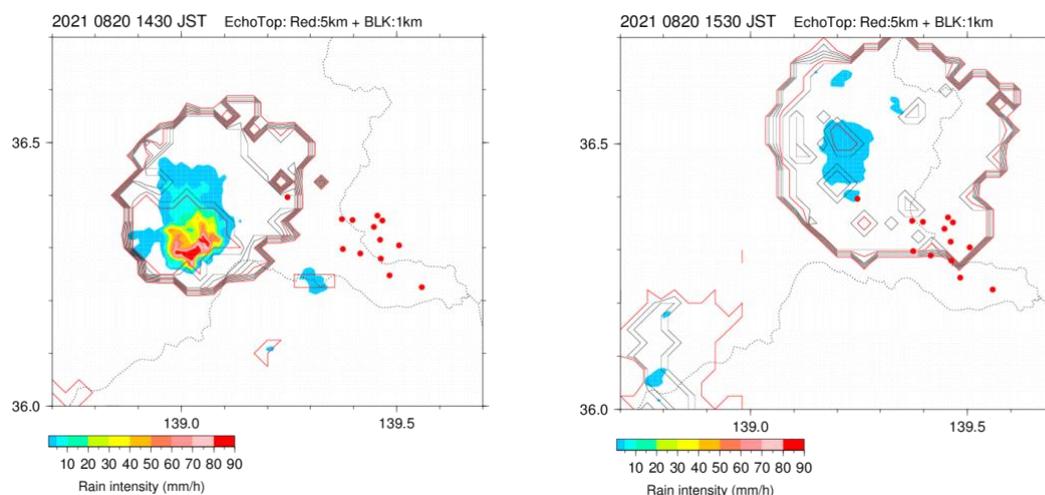


図 5 2021年8月20日 14:30 [JST]および 15:30 [JST]における観測点周辺のレーダーエコー分布

3.2. 「放電」の観測

他手法では導出ができない雷放電による消失電荷の極性、位置、電荷量 $\Delta Q[C]$ の算出法を開発した。2021年夏季の雷雲観測にて、消失電荷(雲放電・落雷)に伴う静電界変動 $\Delta E [V/m]$ の多点計測を可能とする雷雲センサー(サンプリング周波数 1Hz)および雷センサー(サンプリング周波数 10 kHz)を設計・開発した。

図.6 は、雷雲センサーにより時間分解能 1 秒で静電界の変動 ΔE [V/m]を計 18 地点で多点計測した事例である。左図は 2021 年 8 月 20 日取得した静電界変動 ΔE [V/m]の波形、中図はセンサー設置点および落雷位置、右図は、 ΔE [V/m]の計測値と理論計算値の比較結果である。中図の落雷位置は、既存の雷観測網で得られた放電位置および ΔE [V/m]の多点計測値より導出した消失電荷位置である。時間分解能の粗さより、消失電荷位置の精度は 5km 程度となった。

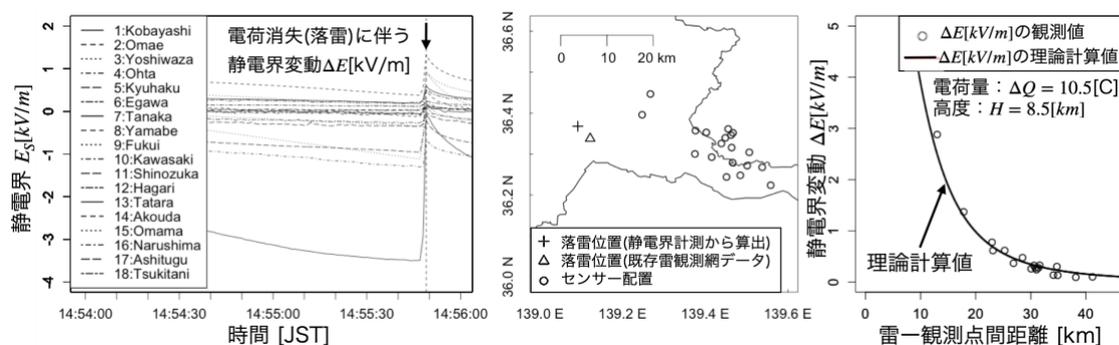


図 6 左図: 夏季雷雲観測(2021)で取得した静電界変動 ΔE [V/m]の多点計測波形(計 18 点で計測)、中図: 落雷位置とセンサー配置、右図: 雷-観測点間距離と各観測点で取得した静電界変動値 ΔE [V/m](丸点)および理論計算から求めた静電界変動 ΔE [V/m]の分布(実線)

夏季雷雲観測(2021)は雷センサーを用い、 ΔE [V/m]波形をサンプリング周波数 10kHz でも取得した。時間分解能 1 秒でしかデータ記録ができない雷雲センサーでは分離できない多重雷の把握も、雷センサーによる時間分解能 100 マイクロ秒で計測可能となった。現在、同データの解析・検証を進めている。取得波形の一例を図.7 に示す。

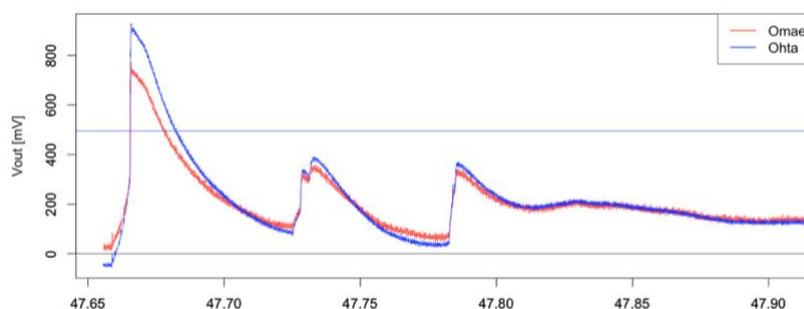


図 7 2021 年 8 月 20 日 14:58:47.6556[LT]に足利大学屋上(Omae)および群馬大学太田キャンパス(Ohta)において、サンプリング周波数 10kHz で取得した静電界変動波形

4. まとめ・今後の課題

本研究課題では、雷雲内の電荷量・電荷高度の定量評価による落雷予測技術の確立を目的とし、雷雲に伴う地上静電界の多点計測に取り組んだ。2021 年夏季、栃木県足利市とその周辺域に雷雲センサー 20 機を展開(2020 年は計 12 機展開)し、観測網の拡充に成功した。

2021 年 8 月 20 日未明に太田市から桐生市に通過した近傍に発生した孤立雲を観測対象

とし、雷雲内の「帯電」と「放電」の定量把握を可能とするデータセットを取得した。現在、前述の孤立雷雲内に単純化した電荷構造モデル（2電荷モデル）を適用し、同データセットの解析を進めている。今後は落雷前後の雷雲電荷の変動を検証し、落雷発生 of 短時間予測の基礎原理確立を目指す。

成果発表実績

- [1] Yamashita K., Fujisaka H., Iwasaki H., Kanno K., Hayakawa M., A New Electric Field Mill Network to Estimate Temporal Variation of Simplified Charge Model in an Isolated Thundercloud. *Sensors*. 2022; 22(5):1884. <https://doi.org/10.3390/s22051884> (査読付)
- [2] 山下幸三、岩崎博之、藤坂浩史: 2021 年夏季における北関東での静電界計測網展開の初期結果, 日本大気電気学会 第 100 回 研究発表会, 2022
- [3] Yamashita K., H. Fujisaka, H. Iwasaki, K. Kanno, M. Hayakawa, Construction of an Electrostatic Sensor Network to Estimate Total Charge in an Isolated Thundercloud, *Proc. of the 35th International Conference on Lightning Protection*, 2021 (査読付)

謝辞

本研究において、センサー設置にご協力頂いた足利市役所、太田市役所、足利銀行各支店、テクノプラザおおた、渡良瀬運動場、ジャングルデリバリー(株)、小堀農園、小林農園、しぜん研究学園、群馬大学本島研究室、足利フラワーパーク、三立応用化工株式会社、株式会社新明工産、今井造園、川島植物園の皆様には感謝致します。気象レーダデータ解析においてご尽力頂きました群馬大学岩崎教授にも感謝致します。

また本研究課題は JSPS 科研費 18K24253002、第 2 回めぶきビジネスアワード大学イノベーション賞(めぶきフィナンシャルグループ)、第 9,10,11 回気象文化大賞(一般財団法人 WNI 気象文化創造センター)、JSPS 科研費 21K18795 の助成を受けたものであり、ここに記して感謝の意を表します。

以上