

令和3年6月30日

第10回気象文化大賞
研究成果報告書

課題名： 雷雲の充放電監視を目的とした地上静電界計測網の拡充
研究代表者： 山下幸三
所属機関： 足利大学

目次

1. 研究背景・目的	2
2. 観測システム	2
3. 観測結果	4
4. 解析	5
4.1. 雲内電荷モデル	5
4.2. 雲内の電荷量・電荷高度の導出	6
5. まとめ・今後の課題	7
成果発表実績	7
謝辞	7
参考文献	8

1. 研究背景・目的

「雷」には、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」の直前発生予測である。雷害低減の新技术を切り開く点において工学的意義がある。また、雷雲内で生じた静電気（以下、雲内電荷）が雲内での放電で収まらず、雲―地面間の落雷に至る原因は何か、という雷研究における根本的問いの一端の解明が期待される点において、理学的意義を有する。

「落雷」の発生予測法開発において、放電に電荷を供給する雲内電荷の動態の把握は不可欠と考えられるが技術的課題は多い。先行研究では、雷雲内における電荷が集中する領域の特定や、電荷高度の推定が検討されている。最新研究では、電磁界計測に基づいた雷放電路の3次元標定データと、気象レーダによるエコー分布を組合せ、雷雲内における電荷領域を推定している[1]。雷放電路の3次元標定データを用い、雷雲内の正負電荷領域の高度を推定した報告もある[2-3]。また、雷雲内部に突入させた静電界センサーから電界の鉛直分布を導出し、雷雲内の電荷構造を推定した事例もある[4-5]。雲内電荷の高度推定が精力的に行われている反面、雷雲全体の巨視的な電荷量の定量評価や、その時間変化の推定を試みた報告はブラジルにおける観測1事例があるのみである。世界各国において、落雷発生と雲内電荷量の盛衰の定量比較は未着手課題とあってよい状況にある。

本申請課題では、雷雲内の総電荷量の定量推定法の開発・確立を目的とし、2018年より構築を進めている地上静電界の多点計測網の拡充に取り組んだ。栃木県・群馬県の県境域に発生する空間的に孤立した雷雲（以下、孤立雲）を観測対象とした。孤立雲は、その内部に単純化した電荷構造モデル（点電荷モデル、二電荷モデル）を仮定しやすい。孤立雲に伴う地上静電界の水平分布を計4点以上で多点計測し、孤立雲内に想定した点電荷の電荷量を1秒分解能で導出した。雷雲内の充電（数分スケールの雲内電荷量の時間変化）と放電（落雷・雲放電による1秒以下の時間スケールでの雲内電荷の消失）の定量比較を可能とするデータセットを世界に先駆けて創出し、「落雷」の直前発生予測法の開発基盤を確立した。

2. 観測システム

申請者らは雷雲近傍の地上静電界の多点計測実施のため、2018年より回転型静電界計測器（以下、フィールドミル）の独自開発に取り組んできた。同システムはGPSにより100ms以下の時刻精度での時刻同期機能を有する。本申請課題では2019年夏季に展開した独自開発システムを刷新した。2020年夏季に計15機のセンサー製造、栃木県足利市周辺域への計12機展開を実施した。2019年版のシステムからの改良点は、下記2点である。

- (1) 省電力化：従来システムの消費電力は約2.4Wであり、ソーラー発電駆動では夜間の観測は困難であった。本申請では省電力化(1.6W程度)による夜間観測を実現した。
- (2) 小型化：従来センサーは本体部重量が4kg程度あり、設置には大掛かりな固定具を要した。今後のセンサー展開(数10機規模)を見据え、軽量化(0.9kg)を実施した。

センサー外観を図.1、センサー本体の拡大写真を図2に示す。また、センサー展開状況を図.3、センサー諸元を表.1にまとめる。



図 1 足利市街地の空き地に設置した2020年版センサーの設置風景



図 2 センサー本体部の拡大写真

図1、図2のフィールドミルは、本申請課題において開発し、2020年夏季観測に適用したセンサーの外観である。2019年夏季観測に適用したセンサーシステムを改善し、小型化、省電力化、動作安定化を実現したものである。

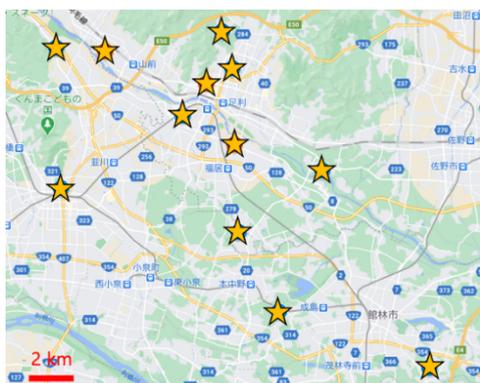


図 3 2020年雷雲観測におけるセンサー配置図

表 1 2020年版センサーの諸元

項目	詳細
動作電圧	11-15 V
動作電流	~130 mA
消費電力	~1.6 W
信号増幅度	×100
サンプリング周波数	100 Hz
センサー部重量	0.9 kg

各センサーには GPS モジュールを接続し、誤差 100ms 以下の精度で時刻同期を実現した。2020年度は計 15 機のセンサーを研究室内で製造し、2020年7月から9月にかけて栃木県足利市、群馬県太田市、群馬県館林市にまたがるエリアに 12 機の配備に成功した。目標設置数は 15 点であったがコロナ禍で大学周辺域との連携が難しく、目標設置数には至らなかった。計画の甘さに起因した事項であり、次年度以降の観測における課題とした。

3. 観測結果

観測事例として、2020年8月27日未明に埼玉県熊谷市上空で発生し、群馬県太田市へ移動した孤立雲を下記に示す。気象レーダによるエコー分布図を図4および図5に示す。また、上記孤立雲に伴う地上静電界波形を計7点で取得した結果を図6に示す。

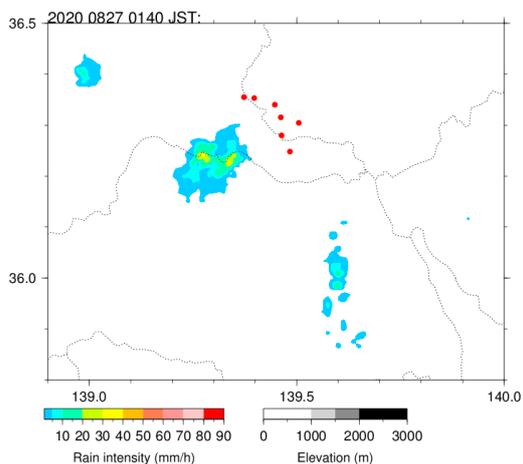


図4 2020年8月27日1:40 [JST] のCバンドレーダーによる高度2kmにおけるエコー分布図

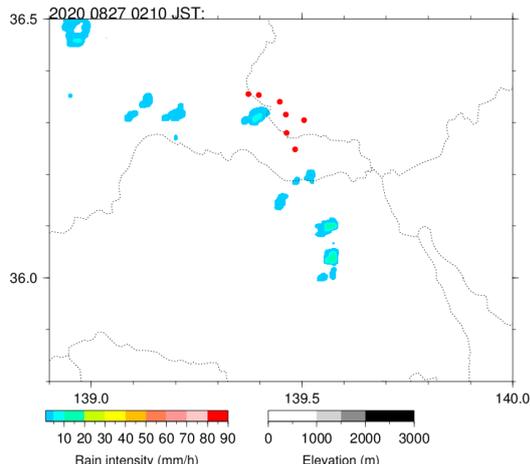


図5 2020年8月27日2:10 [JST]のCバンドレーダーによる高度2kmにおけるエコー分布図

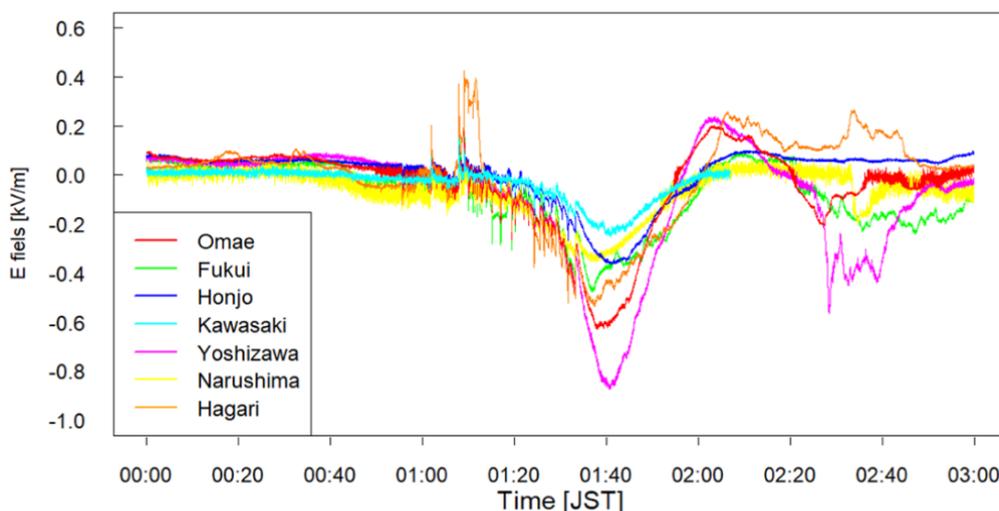


図6 2020年8月27日未明に観測網付近で発生した孤立雲に伴う地上静電界の変動を計7点で多点計測した事例

図4より、8月27日1:40[JST]頃に孤立雲となっていることが確認できた。また、図5に示す2:10[JST]のエコー分布図より、2:00[JST]過ぎには降水領域が消失していることを確認した。解析対象とした孤立雲は、衰退期の雷雲であることが推測される結果となった。

図6では1:40[JST]頃に観測点7点で取得した波形形状が一致したことを確認できた。全観測点で、静電界は負の値（上空のマイナス電荷に対応した極性）をとった。同結果は、観測点7点で同一の点電荷に伴う地上静電界の変動を捉えたものと解釈できる。研究計画当初は、雷雲内に点電荷モデルおよび二電荷モデルの双方を適用することを予定していた。本稿では、点電荷モデルを仮定した際の解析結果を下記に報告する。

4. 解析

4.1. 雲内電荷モデル

図6の結果より、雷雲内に負極性の点電荷を仮定し、電荷量・電荷高度の推定を実施した。想定する座標系を図7に、 i 番目の観測点（水平位置を (x_i, y_i) とした）における地上静電界強度 $E_{Ci}(x_i, y_i)$ [V/m]を式(1)に示す。雲内電荷の電荷量を Q [C]、三次元位置を (x_c, y_c, z_c) とした。

$$E_{Ci}(x_i, y_i) = \frac{Q \cdot z_c}{2\pi\epsilon_0 \cdot \{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + z_c^2\}^{1.5}} \text{ [V/m]} \quad (1)$$

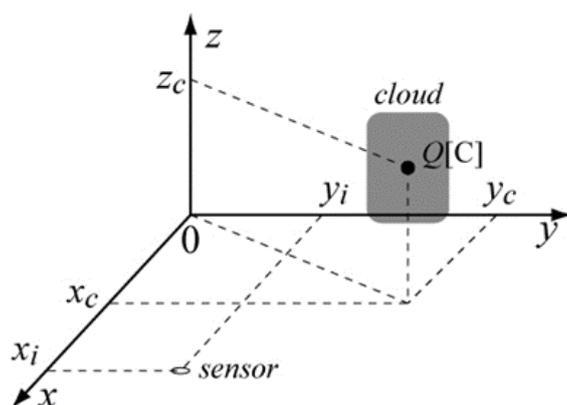


図7 本申請課題で仮定した単電荷モデル

点電荷モデルを仮定した場合、式(1)における電界強度 $E_{Ci}(x_i, y_i)$ [V/m]の多点計測より雲内電荷の位置および電荷量を導出する際の未知数は (x_c, y_c, z_c, Q) の4点である。2020年8月27日の観測事例では計7点で取得した電界強度 E_{Oi} [V/m] ($i = 1 \sim 7$)を用い、雲内電荷における点電荷の位置および電荷量を導出した。

解析では、式(1)に示した地上静電界強度における位置 (x_c, y_c, z_c) および電荷量 Q [C]を変え、各観測点における取得電界強度 E_{Oi} [V/m]と比較した。比較では、下記の式(2)を用いた[6]。式(2)において ν は解析の自由度であり、観測点の数と未知数の数の差分を用いた。 σ_i は各観測点における取得電界強度の不確かさである。

$$\chi_\nu^2 = \frac{1}{\nu} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(E_{Oi} - E_{Ci})^2}{\sigma_i^2} \quad (2)$$

4.2. 雲内の電荷量・電荷高度の導出

式(2)を用い、地上静電界の多点計測データより点電荷の位置および電荷量を推定した結果を図8~10に示す。図8は1:40:00[JST]における点電荷の水平位置を黒四角で示している。図4に示したエコー分布と大まかに一致したことが確認できた。また、図9は観測データと理論式の比較結果である。 χ_v の値は1以下となり、算出した電荷位置および電荷量の妥当性を示唆する結果となった。

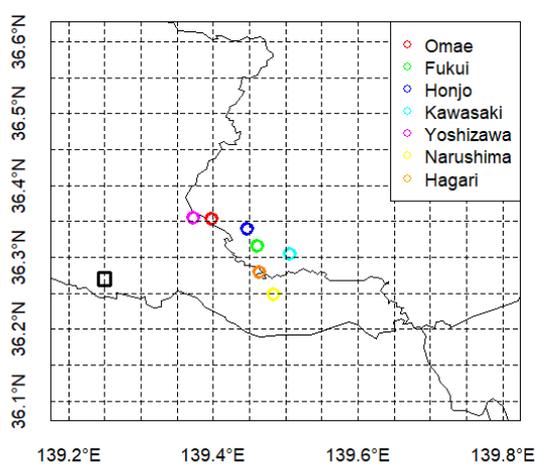


図8 静電界の多点計測データより算出した孤立雲内の点電荷の水平位置

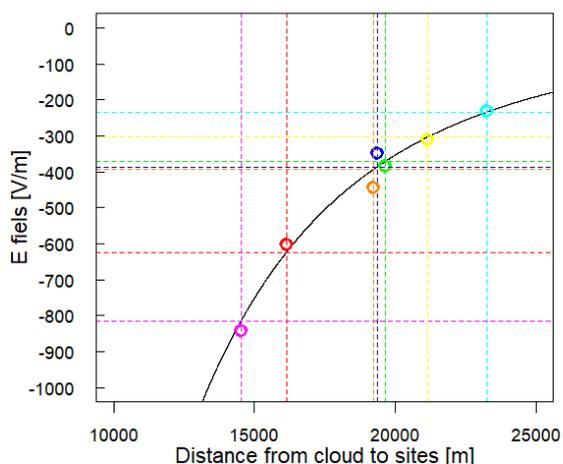


図9 静電界の多点計測データより算出した孤立雲内の点電荷の水平位置

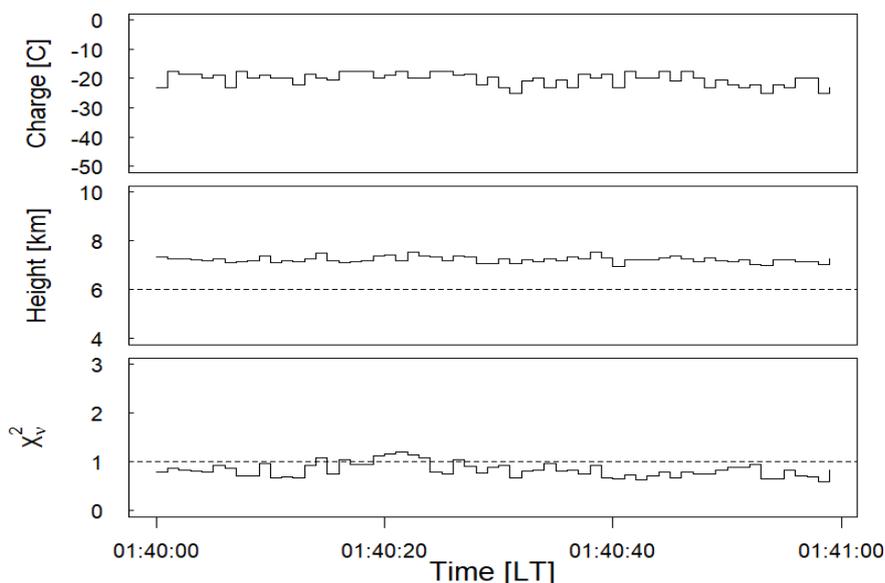


図10 2020年8月27日1:40-1:41[JST]の1分間における雲内電荷(点電荷モデルを仮定)の電荷量、電荷高度の時間変化

孤立雲内の点電荷の電荷量および電荷高度の時間変化を図 10 上段および中段に、1 秒ごとの χ_v の値を図 10 下段に示す。 χ_v は解析の確からしさを表す指標であり、1.0 以下もしくは 1.0 程度であれば測定値の分布と理論式の一致性を示すものとなる。図 10 下段の結果は、本研究の解析の確からしさを示唆する結果と考えられる。電荷量は -20 C 程度、電荷高度は 7 km 程度となった。これらの数値が妥当なものか、現状において検証は不十分な状況である。今後、更なる観測事例の積み増し、気象データとの詳細比較が必要である。

5. 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。2020 年夏季、栃木県足利市とその周辺域に静電界センサー 12 機を展開(2019 年は計 8 機展開)し、観測網の拡充に成功した。

2020 年 8 月 27 日未明に足利市近傍に発生した孤立雲を解析対象とし、雲内電荷の電荷量・電荷高度を算出した。算出した電荷位置は、レーダエコー領域と大まかな一致を確認した。本研究における静電界計測および解析手法の妥当性を示す結果と考えられる。電荷量は -20 C 程度、電荷高度は 7 km 程度と推定された。これらの数値が妥当なものか、現状において検証は不十分である。今後、更なる観測網の拡張、孤立雲取得事例の積み増しに取り組む予定である。

成果発表実績

- [1] 山下幸三, 岩崎博之, 藤坂浩史, 静電界計測に基づいた雷雲充放電監視の初期結果, 日本大気電気学会第 99 回研究発表会, 2021 年 1 月
- [2] 山下幸三, 岩崎博之, 藤坂浩史, 多点静電界計測に基づいた雲内電荷推定の検討, 令和 3 年電気学会全国大会, 7-068, 2021 年 3 月
- [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, 2020[査読有、Accept]

謝辞

本研究にご協力頂いた足利銀行、足利市役所、太田市役所、わたらせ運動場、株式会社ジヤングルデリバリー、大ちゃん農園、小堀農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。

本研究は第 9 回及び第 10 回気象文化大賞に加え、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(常陽銀行/足利銀行)、とちぎ次世代産業創出・育成コンソーシアム 試作開発支援の助成を受けています。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Pilkey, J. T., M. A. Uman, J. D. Hill, T. Ngin, W. R. Gamerota, D. M. Jordan, J. Caicedo, and B. Hare: Rocket-triggered lightning propagation paths relative to preceding natural lightning activity and inferred cloud charge, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, pp.13,427–13,456 (2014)
- [2] Rison, W., Thomas, R. J., Krehbiel, P. R., Hamlin, T., and Harlin, J.: A GPS based three dimensional lightning mapping system: initial observations in central New Mexico. *Geophys. Res. Lett.*, 26(23), pp.3573-3576 (1999)
- [3] Wu, T., D. Wang, N. Takagi: Lightning mapping with an array of fast antennas, *Geophys. Res. Lett.*, 45, pp.3698-3705 (2018)
- [4] Simpson, G. C., and Scrase F. J.: The distribution of electricity in thunderclouds, *Proc. R. Soc. Lond. A*161, pp.309–352 (1937)
- [5] Marshall, T. C. and Stolzenburg, M.: Estimates of cloud charge densities in thunderstorms, *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol.103, D16, pp.19,769-19,775 (1998)
- [6] Taylor, J. R.: *An introductory to error analysis, the study of uncertainties in physical measurements* (2nd edition), University Science Book (2000), S. Hayashi and R. Baba (Japanese translation), Tokyo Kagaku Doujin, pp.264-274 (2000)

以上