

令和元年6月18日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02597

研究課題名(和文) 雷撃の強弱までも予測可能な落雷予知技術の開発に関する研究

研究課題名(英文) A study on lightning prediction

研究代表者

王道洪 (Wang, Daohong)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20273120

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では落雷の最終雷撃過程観測用の高時間分解能・広ダイナミックレンジ・高感度・超ワイドビューを有する超高速光学イメージングシステム、落雷放電3Dマッピングシステム、および雷雲電界の3D分布計測に適するセンサを開発した。これらのシステムを用いて、複数年にわたって落雷観測実験を行い、多くの観測データを取得した。これらのデータを解析することにより、いくつかの落雷放電過程を明らかにした。また、落雷の強弱と関連する落雷の電荷構造を見出し、落雷の強弱を予測できる可能性を指摘した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

落雷の放電過程をより詳しく解明するための雷観測機器を開発した。これらの観測機器を用いて、いくつかの雷放電過程を解明した。これらの成果は確実に避雷できる避雷針の設計に役に立つ。また、落雷の強弱と関連する落雷の電荷構造を見出し、落雷の強弱を予測できる可能性を指摘した。この成果は落雷の予測精度の向上に役に立つ。

研究成果の概要(英文)：In this study we have developed three types of systems for lightning research. The first system is for measuring the lightning attachment process and it has the features of high time resolution, wide dynamic range, high sensitivity and wide horizontal view. The second system is for locating lightning discharges in 3D. The third system is the sensor for measuring the 3D electric field distribution of thunderstorms. Using these systems, we have carried out lightning observation experiments and obtained many lightning data. After analyzing the data, we have revealed several lightning discharge processes. We have also understood the relation between the thunderstorm electric charge structure and the lightning intensity. We have pointed out the possibility for predicting the lightning intensity.

研究分野：大気電気

キーワード：落雷 落雷の予測

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

落雷は雷雲の放電現象であり、帯電した雷雲の空間電界分布さえ分かれば、いつ落雷するか、どの程度の強度で落雷するかについて予測可能となる。しかし、従来より用いてきた飛行機、ロケット、大型バルーン搭載型電界計による雷雲の空間電界の計測は、コストがかかる上、運用も大変。そのため、一つの雷雲の空間電界を2か所以上での同期計測はどこも行われていない。応募者らは一つの雷雲の空間電界を必要に応じ、複数個所でも簡単に計測できる方法を最近提案した。一方、応募者らは最終雷撃過程観測において超高速光学イメージングシステムを提案した。本研究ではこの二つの最新技術を結び付けることにより、雷雲の電界と落雷の最終雷撃過程との関連性を明らかにし、落雷の予測技術の道筋を先導的に付ける。

### 2. 研究の目的

- (1) 雷雲周辺複数箇所での空間電界の計測技術を確立する。
- (2) 落雷直前の雷雲空間電界分布を実測し、その電界と雷雲からの下向きリーダの進展速度、強度、上向きリーダの開始タイミング、帰還雷撃の開始高度、帰還雷撃の強度との相関性を明らかにする。
- (3) 上記相関性より、雷雲の電界及び雷雲の基本3D電荷構造より、落雷の強度を予測する技術の道筋を付ける。

### 3. 研究の方法

落雷の最終雷撃過程の観測に特化した高時間分解能・広ダイナミックレンジ・高感度・超ワイドビューを有する超高速光学イメージングシステムを開発し、それを用いて、フロリダロケット誘雷実験場での自然落雷とロケット誘雷両方を観測する。また、独自の雷放電3Dマッピングシステムを開発し、落雷強弱別の先駆放電を特徴づけ、落雷強弱の予測の可能性を検討する。さらに、雷雲電界計測用の電極を開発し、室内実験で最適化を行い、実雷雲において検証実験を行う。

### 4. 研究成果

- (1) 高時間分解能・広ダイナミックレンジ・高感度・超ワイドビューを有する超高速光学イメージングシステムの開発

本研究では時間分解能で10nsを有する光学イメージングシステムを開発した。光スプリッタを利用することにより、140dBのダイナミックレンジを実現した。

このイメージングシステムをフロリダ大学ロケット誘雷実験場に設置し、自然落雷およびロケット誘雷を対象に3年間の観測を続けることが出来た。その結果、自然雷観測では、13例の第一雷撃のStepped Leader (SL)、23例のDart Leader (DL)、7例のDart-Stepped Leader (D-SL)を観測することに成功した。従来の観測結果より、下向きリーダと上向き帰還雷撃が両方同時に記録することが出来た。これらのデータを解析することにより、複数の成果を挙げることが出来た。以下にその概要を述べる。

第一雷撃のSLの速度に関しては、2種類を算出した。1つはSL全体の平均速度、もう1つは帰還雷撃開始前100m前の直近速度の2種類である。SLの平均速度の平均値は $5.9 \times 10^5 \text{ m/s}$ で、SLの直近速度の平均値は $10.9 \times 10^5 \text{ m/s}$ であった。直近速度は平均速度に比べて約2倍速い結果となった。さらに、開始高度については、直近速度で算出した開始高度のほうが約1/2低い高度となった。これらの観測結果をもとに、最終雷撃過程のモデル図を作成した。帰還雷撃のピーク電流値が大きくなるほど、帰還雷撃開始高度が高くなる傾向が見られた。

ロケット誘雷に対して、地上付近での発光モデルを考えた。提案する発光モデルは、避雷針上の約10mからダートリーダ先端の発光が強くなって帰還雷撃が開始するというモデルである。

また、ダートリーダの波形を詳細に解析することにより、ダートリーダの進展様相を明らかにすることが出来た。

- (2) 落雷の強弱を予測する可能性の検討

落雷の第一雷撃の強度と落雷の先駆放電との相関について、多くの観測データを解析した。その結果、preliminary breakdownよりもそのリーダとの相関性の方が高いことが明らかになった。この結果についてシミュレーションを行い、代表的な電荷構造モデルにおいて雷雲の下部のポケット電荷が弱いほど、そして、雷雲の主電荷が横方向広く分布するほど、雷撃が強いことが分かった。これを利用して、落雷の強弱を予測できる可能性を指摘した。

- (3) 雷雲電界計測用センサーの開発と実雷雲の計測実験

雷雲電界計測センサーに用いる電極についてさまざまな形状のものを作成し、実内放電実験を行った。その結果、ばらつきの少ないパルスが得られる最適な電極形状を得ることが出来た。また、電極の静電容量を大きくすることにより得られるパルスの電界値が大きくなることが分かり、導体平板を取り付ける方法を考案した。日本の冬季雷雲の環境の地上付近で検証実験を行い、その有効性を確認できた。最適化した雷雲電界センサーを30個以上作成し、アメリカのNational Severe Storms Laboratory (NSSL、暴風雨研究所、オクラホマ州にある)にて2017年と2018年合計4週間にわたって雷雲の電界計測実験を行った。小型バルーンで複数

の電界センサーを同時に雷雲に飛行することが出来たものの、実験の期間中、いずれの雷雲も弱かったため、期待するデータは得られなかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

(1) Huang, H., Wang, D., Wu, T., & Takagi, N. (2018). Formation Features of Steps and Branches of an Upward Negative Leader. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123. <https://doi.org/10.1029/2018JD028979>. 査読有.

(2) Shi, D., Wang, D., Wu, T., Thomas, R. J., Edens, H. E., Rison, W., Takagi, N., & Krehbiel, P. R. (2018). Leader Polarity - Reversal Feature and Charge Structure of Three Upward Bipolar Lightning Flashes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 9430-9442, doi:10.1029/2018JD028637. 査読有.

(3) Wu, T., Wang, D., & Takagi, N. (2018). Locating preliminary breakdown pulses in positive cloud - to - ground lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 7989-7998. <https://doi.org/10.1029/2018JD028716>. 査読有.

(4) Wu T., D. Wang, N. Takagi (2018), Lightning Mapping with an Array of Fast Antennas, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 3698-3705, doi:10.1002/2018GL077628.

(5) Naoki Tsukamoto, Ting Wu, Daohong Wang, Nobuyuki Takagi (2017), Light Intensity Profiles of Return Strokes at the Bottom of Rocket-triggered and Natural Lightning Channels, *Journal of Atmospheric Electricity*, 37(1), 1-9, doi:10.1541/jae.37.1. 査読有.

(6) Wang, D., N. Takagi, M. A. Uman, and D. M. Jordan (2016), Luminosity progression in dart-stepped leader step formation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 14,612-14,620, doi:10.1002/2016JD025813. 査読有.

(7) D. Wang, N. Takagi, W. R. Gamera, M. A. Uman, D.M. Jordan, Lightning attachment processes of three natural lightning discharges, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, doi:10.1002/2015JD023734. 査読有.

〔学会発表〕(計36件)

(1) 清水千貴, ウ・ティン, 王道洪, 高木伸之. 落雷および雲放電に含まれるPBの発生高度別の特性の比較・検討. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月11日.

(2) 後藤孝平, ウ・ティン, 王道洪, 高木伸之. 落雷強弱別のリーダ放電の特性. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月11日.

(3) 小出雅人, ウ・ティン, 王道洪, 高木伸之. 雷雲の初期発達期における雷放電の特徴. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月11日.

西尾謙, 島佳大, ウ・ティン, 王道洪, 高木伸之. 異なる周波数帯を用いた雷放電経路の3Dマッピングシステムの開発. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月11日.

(4) 藪浦伸介, 王道洪, WU Ting, 高木伸之. 双方向リーダーの進展特性と関連するパルス波形の特徴. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月11日.

(5) Dongdong Shi, Daohong Wang, Ting Wu, Nobuyuki Takagi, Haitao Huang. A study on the initiation of preliminary breakdown process. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月11日.

(6) Haitao Huang, Daohong Wang, Ting Wu, Nobuyuki Takagi. Progression Characteristics of Downward Leaders Observed by LAPOS5. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月11日.

(7) 山田英幸, 黄海涛, ウ・ティン, 王道洪, 高木伸之. LAPOS5号機による自然雷とロケット誘雷の最終雷撃過程の観測結果. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月12日.

(8) 深尾健二, 高木伸之, 王道洪, ウ・ティン. FALMAと高速ビデオカメラの比較検討. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月12日.

(9) 多田健, 高木伸之, 王道洪, ウ・ティン. ハイブリッド雷の特徴. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月12日.

(10) 手嶋健, 倉知純平, ウ・ティン, 王道洪, 高木伸之. ワイヤ付き電極による大気電界計測の検証実験. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月12日.

(11) 浦田政貴, ウ・ティン, 王道洪, 高木伸之. 帰還雷撃の電界波形の微細構造に関する研究. 日本大気電気学会第97回発表会. 岐阜, 2019年1月12日.

(12) Haitao Huang, Daohong Wang, Ting Wu, Nobuyuki Takagi. Optical Progression Features of the Step Formation of Two Negative Stepped Leaders. *Proceedings of the International Conference on Atmospheric Electricity*, Nara, Japan, 2018.

(13) Dongdong Shi, Daohong Wang, Ting Wu, Ronald J. Thomas, Harald E. Edens,

William Rison, Nobuyuki Takagi, Paul R. Krehbiel. Leader Polarity-Reversal Feature and Charge Structure of Upward Bipolar Lightning Flash. Proceedings of the International Conference on Atmospheric Electricity, Nara, Japan, 2018.

(14) Ting Wu, Daohong Wang, Nobuyuki Takagi. Development of Fast Antenna Lightning Mapping Array (FALMA) and preliminary results. Proceedings of the International Conference on Atmospheric Electricity, Nara, Japan, 2018.

(15) Jumpei Kurachi, Daohong Wang, Ting Wu, Nobuyuki Takagi. A method of measuring thunderstorm electric field by using a pair of wire-attached electrodes and LMA. Proceedings of the International Conference on Atmospheric Electricity, Nara, Japan, 2018.

(16) Y. Hideyuki, D. Wang, T. Wu, N. Takagi, D. Jordan, and M. A. Uman. Lightning attachment process of rocket triggered return strokes observed by using LAPOS 5. Proceedings of the International Conference on Atmospheric Electricity, Nara, Japan, 2018.

(17) 王道洪. 雷三次元モニタリング技術の最近の動向と鉄道応用の可能性. 電気学会全国大会. 福岡, 2018年3月14日.

(18) Haitao Huang, Daohong Wang, Ting Wu, Nobuyuki Takagi. Optical progression features of the step formation of two negative stepped leaders. 日本大気電気学会第96回発表会. 東京, 2018年1月7日.

(19) Dongdong Shi, Daohong Wang, Ting Wu, Nobuyuki Takagi. A study on the formation of upward bipolar lightning discharges. 日本大気電気学会第96回発表会. 東京, 2018年1月7日.

(20) Ting Wu, Daohong Wang, Nobuyuki Takagi. Development of Fast Antenna Lightning Mapping Array (FALMA). 日本大気電気学会第96回発表会. 東京, 2018年1月7日.

(21) Daohong Wang, Yasuhumi Hisai, Haitao Huang, Ting Wu, and Nobuyuki Takagi. A comparative study on intermittent propagation mode of positive and negative leaders. Proceedings of the International Conference on Lightning & Static Electricity, Nagoya, Japan, 2017.

(22) Daohong Wang, Haitao Huang, Hideyuki Yamada, Naoki Tsukamoto, Ting Wu, Nobuyuki Takagi. Observation of Lightning Attachment Process Using a New LAPOS. Proceedings of 10th Asia Pacific International Conference on Lightning, 2017.

(23) Naoki Tsukamoto, Ting Wu, Daohong Wang, Nobuyuki Takagi. Return Stroke Light Intensity Profiles in the Bottom of Rocket-Triggered Lightning and Natural Lightning. Proceedings of 10th Asia Pacific International Conference on Lightning, 2017.

(24) D. Wang, T. Wu, N. Takagi. Charge Structure of Winter Thunderstorm in Japan: a Review and an Update, the 4th International Symposium on Winter Lightning, Joetsu, Japan, 2017.

(25) 倉知純平, 高木伸之, 王道洪, 呉亭. 電界センサーの電界極性効果の検証. 平成29年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会. 名古屋, 2017年9月8日.

(26) 杉浦敬, 浅井弥呂稀, 呉亭, 王道洪, 高木伸之. 多地点ファストアンテナによる落雷位置の標定. 平成29年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会. 名古屋, 2017年9月8日.

(27) 島佳大, 高木伸之, 王道洪, 呉亭. 電波放射源 3D マッピングシステムの開発と初期観測結果. 平成29年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会. 名古屋, 2017年9月8日.

(28) 山田英幸, 塚本直樹, 王道洪, 高木伸之, 呉亭. LAPOS5号機による落雷最終雷撃過程の観測結果. 平成29年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会. 名古屋, 2017年9月8日.

(29) 山田英幸, 塚本直樹, 呉亭, 王道洪, 高木伸之. LAPOS5号機による落雷最終雷撃過程の観測結果. 日本大気電気学会第95回発表会. 神戸, 2017年1月7日.

(30) 塚本直樹, 呉亭, 王道洪, 高木伸之. 最終雷撃過程における帰還雷撃の光強度の高度プロファイル, 電気学会東海支部研究フォーラム「電力システムに対する雷・自然災害と環境問題に関する研究」, 2016年10月8日.

(31) D. Wang, S. Okumura, T. Wu and N. Takagi. Optical Progression Characteristics of the Transient Discharges Occurred at the Trails of Positive Upward Leaders, 2016 AGU Fall Meeting, San Francisco, 2016.

(32) D. Wang, N. Sawamura, N. Takagi. A Positive Lightning Discharge that Caused Severe Damage to the Blade of a Windmill, Proceedings of 33rd International Conference on Lightning Protection, Paper number 152, 2016.

(33) D. Wang, S. Kuroda, N. Takagi. Lightning Attachment Process Parameters Measured by Using LAPOS, Proceedings of 33rd International Conference on Lightning Protection, Paper number 47, 2016.

(34) 塚本直樹, 呉亭, 王道洪, 高木伸之. フロリダロケット誘雷並びに自然落雷の発光プロフィール, 平成28年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2016年9月12・13日.

(35) 波多野陽, 呉亭, 王道洪, 高木伸之. 電界センサーの屋外観測結果, 平成28年度電

気・電子・情報関連学会東海支部連合大会，2016年9月12・13日。

(36) 瀧森良造, 吳亭, 王道洪, 高木伸之, ワイヤー付き短ギャップによる電界測定, 平成28年度電気・電子・情報関連学会東海支部連合大会, 2016年9月12・13日

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<https://www1.gifu-u.ac.jp/~lrg/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：高木 伸之  
ローマ字氏名：Takagi, Nobuyuki  
所属研究機関名：岐阜大学  
部局名：工学部  
職名：教授  
研究者番号 (8桁)：80179415

研究分担者氏名：ウ ティン  
ローマ字氏名：Wu, Ting  
所属研究機関名：岐阜大学  
部局名：工学部  
職名：助教  
研究者番号 (8桁)：50789774

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：  
ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。