

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03681

研究課題名（和文）巨大電流・エネルギーを持つ冬季落雷のメカニズムの解明と予知

研究課題名（英文）Study on the mechanism and prediction of lightning flashes in winter with large peak currents and energies

研究代表者

ウ ティン（Wu, Ting）

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：50789774

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、広範囲の雷三次元可視化システムFALMAを用いて、冬季の日本海沿岸にしばしば発生する大きな電流やエネルギーを持つ巨大落雷の観測を行った。主に以下の成果をあげた。（1）ピーク電流値が150kA以上の非常に強い負極性雷撃の特徴を初めて解明し、通常の負極性雷撃との違いを明らかにした。（2）正極性雷撃のピーク電流値について統計解析を行い、ピーク電流値と初期放電、ステップリーダ等との関連性を明らかにした。（3）機械学習の手法を用いて落雷の高精度自動識別方法を確立し、冬季・夏季落雷の比較等の大規模な統計解析をできるようした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本海沿岸には、夏季ではめったに発生しない巨大なピーク電流を持つ落雷がしばしば起きる。このような巨大落雷は送電鉄塔や大型風車等の施設に大きな被害をもたらしている。本研究では、負極性と正極性両方の巨大落雷の特徴を解明した。特に今まで知られていない負極性の巨大落雷の特徴を初めて明らかにした。負極性巨大落雷は沿岸部の陸地に集中する傾向も判明したので、大型風車等の施設の落雷被害の主な原因になっている可能性が高い。また、正極性落雷のピーク電流値は雷撃の前駆放電過程との関連性を明らかにした。強いピーク電流を持つ正極性落雷を発生する雷雲の電荷構造も判明した。これらの成果は巨大落雷を予測する可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：During this project, using the three-dimensional lightning mapping system FALMA, we carried out observations of lightning flashes with large peak currents and energies that frequently occur along the coast of the Japan Sea. The main achievements are as follows. (1) For the first time we clarified the basic characteristics of strong negative strokes with peak currents larger than 150 kA and elucidated their clear differences with normal negative strokes. (2) We made a statistical analysis of peak currents of positive strokes and established their relationship with characteristics of preliminary breakdown and stepped leaders. (3) We developed a machine-learning method for the classification of lightning return strokes with high accuracy, which is the basis for large-scale statistical analyses such as the comparison of lightning strokes in winter and summer.

研究分野：大気電気

キーワード：冬季雷 雷三次元観測 落雷被害

1. 研究開始当初の背景

日本海沿岸に発生する冬季雷には夏季雷と比べるといくつかの異なる特徴がある。「巨大落雷」という巨大な電流とエネルギーを持つ落雷が頻繁に発生するのが冬季雷の大きな特徴の一つである。夏季落雷のピーク電流値は大半が 50kA 以下であり、100kA 以上の事例は非常に珍しい。一方、冬季落雷ではピーク電流値が 200kA 以上の落雷が多く観測され、送電線での重大事故である送電停止原因の半数以上を占めている。巨大落雷の電流・エネルギーは既存の避雷・防護設備の守備範囲を遥かに超えているため、被害の元凶となる。しかし、巨大落雷に関してまだ解明されていないことが多い。例えば、発生地域の特徴、ピーク電流値の分布、ピーク電流値と他の放電過程の関連性、正極性と負極性巨大落雷の違い、等の基本的な特徴も分かっていない。巨大落雷のメカニズムを解明し、落雷被害を低減するために、本研究を提案した。

2. 研究の目的

本研究は巨大落雷のメカニズムを解明すると共に、巨大落雷の予知技術確立し、送電鉄塔や大型風車の雷被害を低減することを目的としている。具体的には、以下の三つの課題を目標としている。

- (1) 現有の三次元可視化システムを更に改良して、弱い放電過程も可視化できる高感度・広範囲の雷放電路三次元可視化システムを開発する。
- (2) 巨大落雷の種類、ピーク電流値、放電エネルギー、開始機構、放電路の三次元進展等の特徴を解析し、巨大落雷が発生するための物理メカニズムを明らかにする。
- (3) 記録される年間数千個の雷放電データに機械学習の手法を適用し、巨大落雷を予知する技術確立する。

3. 研究の方法

- (1) 雷三次元可視化システム FALMA を利用することで、雷の全体の三次元構造、放電の種類、ピーク電流値、放電路の長さ、リーダ進展速度、雲内の電荷構造等様々な情報を取得できる。これらの情報を総合的に解析し、巨大落雷の基礎的な性質と発生メカニズムを解明する。
- (2) 直径 300km ほどの広範囲の雷活動をすべて監視できる FALMA システムを構築し、冬季・夏季両方の雷のデータを大量に取得・解析することで、冬季の巨大落雷の共通の特徴及び夏季雷との違いを見出し、その成因に迫る。
- (3) 機械学習の手法を開発し、気象レーダーの観測データも含めて、巨大落雷発生する前の雷放電の特徴(放電の種類、放電路の三次元構造、放電進展の速度、放電の強さ等)、雲内電荷構造の特徴、雷雲成長の特徴等を特定することで、巨大落雷発生兆しとなる物理量を抽出し、予知する方法確立する。

4. 研究成果

(1) 負極性巨大落雷<sup>①</sup>

負極性巨大落雷について、ピーク電流値が 150kA 以上の非常に強い負極性雷撃の電界変化波形は普通の雷撃の波形と異なることを初めて判明した。図 1 は、ピーク電流値が最も大きい 10 例の負極性雷撃及び 1 例の通常の雷撃の波形を示している。強い負極性雷撃の波形は通常の雷撃と大きく異なることが分かる。具体的に、以下の違いが見られる：

- ① パルス幅が狭い
- ② 立ち上がり時間と立下り時間に大きな差がない

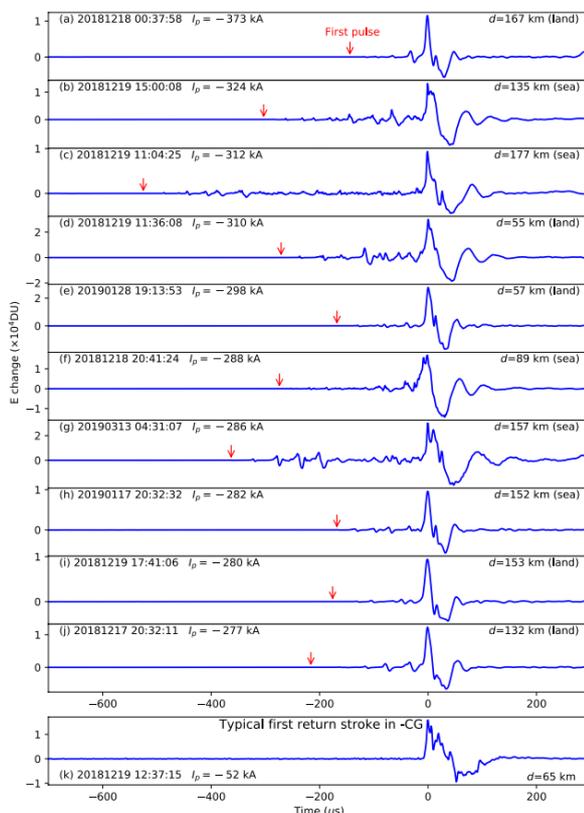


図 1 (a-j) ピーク電流値が最も大きい 10 例の負極性雷撃の電界変化波形 (k) 通常の雷撃の波形

③ 直前のリーダ放電の継続時間が非常に短い

さらに、ピーク電流値が $-335\text{kA}$ の事例が光学観測装置に直接捉えられ、帰還雷撃の速度は $1.5 \times 10^8 \text{ m/s}$ であり、直前のステップリーダの速度は $5.4 \times 10^6 \text{ m/s}$ であることが分かる。これらの結果から、このような特殊な波形は帰還雷撃が生じることを確定できた。また、ステップリーダの速度は通常の落雷のステップリーダより一桁速い。この特徴から、負極性巨大落雷の発生時には、地上付近の電界が非常に強いことが推測できる。

落雷と雲放電との判別は一般的にこのような波形から行うので、強い負極性雷撃の波形が特殊のため、その存在は今まで知られていない。また、このような負極性巨大落雷は日本海沿岸部の陸地に集中する傾向も判明した。風車等の高建造物に落ちる冬季落雷のほとんどは上向き雷であると言われてきたが、本研究の結果を考えると、このような考え方を改める必要がある。負極性巨大落雷は送電鉄塔や大型風車に被害を引き起こす可能性は高いので、今後は更なる研究が必要である。

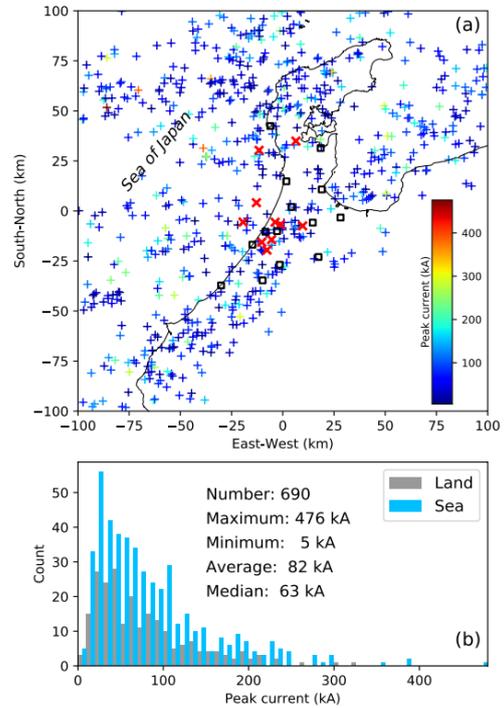


図2 正極性帰還雷撃の雷撃点位置とピーク電流値の分布

(2) 正極性巨大落雷<sup>②</sup>

正極性落雷は負極性よりもっと大きな電流やエネルギーを持つことがよく知られている。しかし、その原因はよく分かっていない。特に、このような正極性巨大落雷はどんな共通の特徴を持つか、そして、どんな電荷構造を持つ雷雲に起きやすいかは

まだ解明されていない。本研究は FALMA で観測された冬季の約700例の正極性落雷を解析することでこれらの問題を解明しようとする。これほど大量な正極性落雷を解析する研究は世界でも珍しい。図2はこれらの正極性落雷の雷撃点の位置およびピーク電流値の分布を示している。

本研究では主に以下の成果が得られた。

- ① 正極性帰還雷撃のピーク電流値と電界変化波形には強い相関がある。特に、ピーク電流値が強いほど波形の立ち上がり時間が長く、パルス幅も大きい。
- ② 非常に強い正極性帰還雷撃の一つ共通の特徴は帰還雷撃の前のリーダ放電の継続時間が非常に短い。帰還雷撃直前のリーダパルスも比較的に大きい。
- ③ 非常に強い正極性帰還雷撃の前の PB パルス（初期放電）の極性は正極性帰還雷撃と同じ極性になる可能性が高い。

以上の結果から、非常に強い正極性帰還雷撃が発生するとき、地面付近の電界が非常に強いことが推測できる。これは、雷雲の中心部に図3が示すように大きな正電荷層が存在することを示唆している。このような電荷構造が存在することで、正リーダが開始した後に速い速度で地面に到達し、強い帰還雷撃を引き起こすことが可能となる。

(3) 機械学習の帰還雷撃判別方法<sup>③</sup>

巨大落雷に関して大規模な統計解析を行うために、落雷、すなわち帰還雷撃の高精度の自動判別が必要である。帰還雷撃は基本的に電界変化波形の特徴から判別されるが、現在主流の方法では判別の精度が90%ほどにとどまっている。

本研究では、機械学習のアルゴリズム Random Forest を利用して、高精度な帰還雷撃の判別方法を開発した。判別の精度は98.84%、検出率は98.81%に達した。図4に示すように、雷放電の電界変化波形に基づいて11個のパラメータを定義し、この判別方法にはこれらの11個の

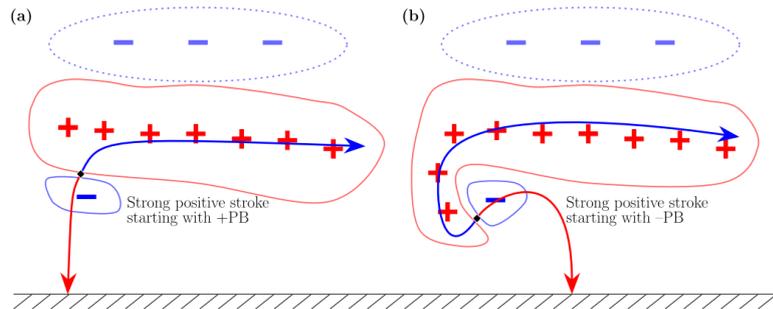


図3 正極性巨大落雷を引き起こす雷雲の電荷構造

パラメータのみが使用される。そのため、さまざまな雷観測システムにこの方法を簡単に適用することができる。

#### (4) 冬季・夏季雷の比較<sup>④</sup>

前述の機械学習の方法を利用して北陸地方で一年間発生した冬季と夏季の落雷を検出し、比較解析を行った。

- ① 夏季に発生した雷の約30%は落雷であるのに対し、冬季に落雷の割合は約44%である。
- ② 夏季に発生した落雷の中に、正極性落雷の割合は10%以下であるが、冬季にその割合は35%に達した。
- ③ 負極性帰還雷撃のピーク電流値について、夏季の平均値は-33kAであるのに対し、冬季の平均値は-46kA、夏季の約1.4倍である。
- ④ 正極性帰還雷撃のピーク電流値について、夏季の平均値は24kAであるのに対し、冬季の平均値は58kA、夏季の約2.4倍である。

帰還雷撃のピーク電流値の分布は図5に示している。

これらの結果から、冬季の落雷は夏季よりずっと強いこと、すなわち、巨大落雷は冬季に発生しやすいことが分かる。さらに、負極性落雷より正極性落雷がもっと大きな電流を持つ可能性が高いことも分かる。

#### <引用文献>

- ① Wu, T., Wang, D., Huang, H., & Takagi, N. (2021). The Strongest Negative Lightning Strokes in Winter Thunderstorms in Japan. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL095525, doi:10.1029/2021GL095525.
- ② Wu, T., Wang, D., & Takagi, N. (2022). On the Intensity of First Return Strokes in Positive Cloud-To-Ground Lightning in Winter. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD037282, doi:10.1029/2022JD037282.
- ③ Wu, T., Wang, D., & Takagi, N. (2023). High-accuracy classification of radiation waveforms of lightning return strokes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2023JD038715, doi:10.1029/2023JD038715.
- ④ T. Wu, D. Wang, N. Takagi. New FALMA Observations Reveal Systematic Differences between Lightning Discharges in Winter and Summer in Hokuriku, Japan. AGU Fall Meeting 2023. San Francisco, USA. 2023. (招待講演)

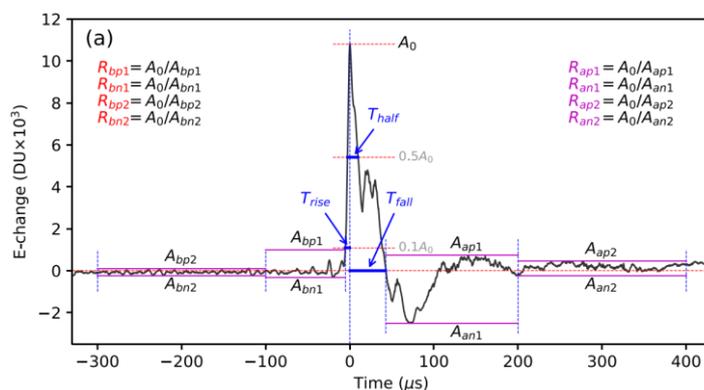


図4 帰還雷撃の判別に使われる11個のパラメータ (青、赤、紫のパラメータ)

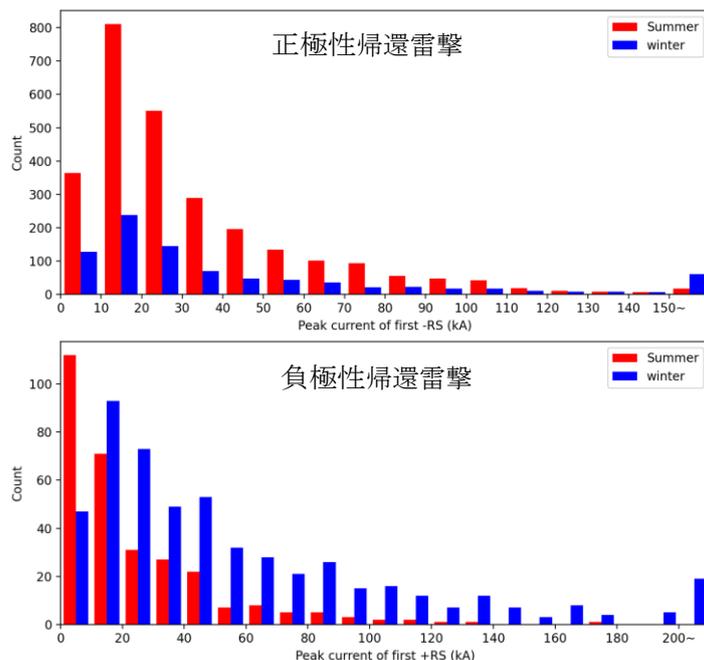


図5 夏季・冬季の負極性と正極性帰還雷撃のピーク電流値の分布

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ortberg John, Smith David M., Kamogawa Masashi, Dwyer Joseph, Bowers Gregory, Chaffin Jeffrey, Lapierre Jeff, Wang Daohong, Wu Ting, Suzuki Tomoyuki	4. 巻 129
2. 論文標題 Two Laterally Distant TGFs From Negative Cloud To Ground Strokes in Uchinada, Japan	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023JD039020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wada Y., Wu T., Wang D., Enoto T., Nakazawa K., Morimoto T., Nakamura Y., Shinoda T., Tsuchiya H.	4. 巻 128
2. 論文標題 Termination of Downward Oriented Gamma Ray Glow by Normal Polarity In Cloud Discharge Activity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023JD038606	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wu Ting, Wang Daohong, Takagi Nobuyuki	4. 巻 128
2. 論文標題 High Accuracy Classification of Radiation Waveforms of Lightning Return Strokes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023JD038715	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsurumi M., Enoto T., Ikkatai Y., Wu T., Wang D., Shinoda T., Nakazawa K., Tsuji N., Diniz G. S., Kataoka J., Koshikawa N., Iwashita R., Kamogawa M., Takagaki T., Miyake S., Tomioka D., Morimoto T., Nakamura Y., Tsuchiya H.	4. 巻 50
2. 論文標題 Citizen Science Observation of a Gamma Ray Glow Associated With the Initiation of a Lightning Flash	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023GL103612	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yang Junchen, Wang Daohong, Huang Haitao, Wu Ting, Takagi Nobuyuki, Yamamoto Kazuo	4. 巻 15
2. 論文標題 A 3D Interferometer-Type Lightning Mapping Array for Observation of Winter Lightning in Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1923 ~ 1923
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs15071923	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wu Ting, Wang Daohong, Takagi Nobuyuki	4. 巻 127
2. 論文標題 On the Intensity of First Return Strokes in Positive Cloud To Ground Lightning in Winter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 e2022JD037282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022JD037282	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Huang Haitao, Wang Daohong, Yang Junchen, Wu Ting, Takagi Nobuyuki	4. 巻 41
2. 論文標題 Complicated aspects of a CG lightning flash observed in winter storm in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Atmospheric Electricity	6. 最初と最後の頁 11 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/jae.41.11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shi Dongdong, Gao Panliang, Wu Ting, Wang Daohong, Jiang Wei	4. 巻 14
2. 論文標題 Pulse Parameters and Peak Currents of Return Strokes Observed by the Ningxia FALMA in the Chinese Inland Areas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1838 ~ 1838
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs14081838	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wu Ting, Wang Daohong, Huang Haitao, Takagi Nobuyuki	4. 巻 48
2. 論文標題 The Strongest Negative Lightning Strokes in Winter Thunderstorms in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL095525	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wu Ting, Wang Daohong, Takagi Nobuyuki	4. 巻 126
2. 論文標題 Compact Lightning Strokes in Winter Thunderstorms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JD034932	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 王道洪, Yang Junchen, 楊青柳, ウティン
2. 発表標題 冬季正極性落雷の発生メカニズムに関する事例解析
3. 学会等名 令和6年度電気学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Daohong Wang, Junchen Yang, Qingliu Yang, Ting Wu and Nobuyuki Takagi
2. 発表標題 Initiation, progression and attachment process of Hokuriku winter lightning
3. 学会等名 日本大気電気学会第102回研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ting Wu, Daohong Wang, and Nobuyuki Takagi
2. 発表標題 Comparison of lightning flashes in winter and summer in Hokuriku region
3. 学会等名 日本大気電気学会第102回研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Qingliu Yang, Daohong Wang, Junchen Yang, Ting Wu and Nobuyuki Takagi
2. 発表標題 A detailed examination on the preliminary breakdown process of a winter cloud-to-ground lightning flash
3. 学会等名 日本大気電気学会第102回研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Wu, D. Wang, N. Takagi
2. 発表標題 New FALMA Observations Reveal Systematic Differences between Lightning Discharges in Winter and Summer in Hokuriku, Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 J. Yang, D. Wang, H. Huang, T. Wu, N. Takagi, K. Yamamoto
2. 発表標題 A Strong Positive CG flash That Was Simultaneously Recorded by Multiple Observation Systems
3. 学会等名 APL 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ウティン, 王道洪, 高木伸之
2. 発表標題 正極性帰還雷撃の強さについて
3. 学会等名 日本大気電気学会第101回研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ting Wu, Daohong Wang, Haitao Huang, Nobuyuki Takagi
2. 発表標題 Strongest negative return strokes in winter produce special LF waveforms
3. 学会等名 日本大気電気学会第99回研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木暹士, ウティン, 王道洪, 高木伸之
2. 発表標題 FALMA による冬季落雷の予知の可能性について
3. 学会等名 日本大気電気学会第99回研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 角亮佑, ウティン, 王道洪, 高木伸之
2. 発表標題 FALMA の観測データに基づく冬季落雷の基礎特性の解析
3. 学会等名 日本大気電気学会第99回研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------