

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13618

研究課題名(和文) 三次元雷可視化システムを用いた発電用大型風車からの上向き雷成因の解明と予知

研究課題名(英文) Study on the mechanism and prediction of upward lightning from windmills with a 3-D lightning mapping system

研究代表者

ウ ティン (Wu, Ting)

岐阜大学・工学部・助教

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)：本研究では雷三次元可視化システムFALMAを用いて、北陸地方で大型風車からの上向き雷を中心に冬季雷観測を行った。主に以下の成果をあげた。(1)正極性上向き雷の開始過程である上向き負リーダの速度、電界変化の特徴及び誘発機構等を解明した。(2)正極性上向き雷の主な原因である強い負極性落雷について、普通の落雷と違う非常に強く放電路が非常に短い特殊な落雷が冬季に発生することを初めて明らかにした。(3)負極性上向き雷の主な原因である正極性落雷について、正極性多地点雷の特性と発生メカニズムを解明した。更に、夏季雷観測も行い、初期放電、高高度雲放電、正極性リーダ等雷放電現象のメカニズムも解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本では風力発電の普及は他国に比べて進んでいない。その最大要因は日本海側で発生する冬季雷による風車での落雷事故である。大型風車への落雷の99%は風車側から放電が進展を開始する上向き雷である。本研究では上向き雷のリーダ進展速度、電界変化波形の特徴、誘発機構等について多くの成果をあげた。これらの成果をもとに、上向き雷を遠隔で監視する方法を提案した。これが可能になったら、風車の雷被害の早期発見に繋がる。また、上向き雷の誘発機構の解明は上向き雷を予測する可能性を示した。この成果で将来大型風車の雷被害の低減が期待できる。

研究成果の概要(英文)：During this project, we carried out winter lightning observations focusing on upward lightning flashes from windmills using the 3-D lightning mapping system FALMA. The main achievements are as follows. (1) Velocities, electric field change characteristics and triggering mechanisms of upward negative leaders are clarified. (2) Positive upward lightning flashes are often triggered by a special type of strong negative cloud-to-ground lightning, and this special type of lightning has extremely short channel and is identified for the first time in winter thunderstorms. (3) About the positive cloud-to-ground lightning, which is the main cause of negative upward lightning, we investigated those positive flashes containing multiple return strokes and made it clear how multiple positive strokes can be produced in the same positive cloud-to-ground flash. Furthermore, we also made lightning observation in summer and made many new findings on various types of lightning discharges.

研究分野：大気電気

キーワード：上向き雷 冬季雷 雷三次元観測 風車の雷被害

### 1. 研究開始当初の背景

風力発電は温暖化ガスを排出せず、発電単価が火力発電並みに低く、自給エネルギーであるため多くの国で発電容量は急速に拡大している。一方、日本では膨大な導入可能な適地が日本海側に存在するにもかかわらず、風力発電の普及は他国に比して進んでいない。その最大要因は日本海側で発生する冬季雷による風車での落雷事故である。高さ 100m 程度の風車では冬季雷により一冬に 30～50 回落雷が発生する。一方、太平洋側にある同じ高さの風車の落雷頻度は 0.04 回/年程度で十倍もの開きがある。故障した風車の修復には莫大な費用がかかり、修理による長期の運用停止は収入の遺失を招き、さらに落雷による風車の焼損やブレードの落下が安全にも重大な影響を与えている。採算の合う避雷方法は現在開発されていないのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究は申請者が開発した雷放電路三次元進展可視化システム FALMA を用いて大型風力発電施設の最大被害要因である上向き雷を予知し、被害を減少させ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) 上向き雷の主な成分である上向きリーダの速度、三次元進展の様子、電界変化波形の特徴等を解析し、上向きリーダの物理メカニズムを解明する。

(2) 上向き雷に先行して発生する物理現象を、周辺での雷放電路三次元可視化映像、風車電流、地上電界、高速ビデオ映像の同時記録で明らかにし上向き雷の発生機構を解明する。

(3) FALMA で記録される年間約 5 千の三次元放電路と雷雲レーダーエコー図を合成したビッグデータを解析し次の放電の時間と場所を予知する技術を確立する。

### 3. 研究の方法

(1) 現有の FALMA システムに異なる構造と周波数のアンテナを追加して、風力発電施設側から発生する放電開始高度が低い上向き雷の放電進展も可視化できるようにする。

(2) 上向き雷の発生・進展機構を解明するには上向き雷に先行して発生する物理現象すべてを同時記録する必要があるので、FALMA で風車周辺広範囲に発生する雷放電をすべて記録して、更に風車電流、地上電界、高速ビデオ映像、レーダーエコー等を総合評価して上向き雷の発生・進展条件を明らかにする。

(3) 正極性上向き雷と負極性上向き雷の発生条件は違うと思われるので、両種類の上向き雷を分けてトリガー機構となる雷放電の特徴を調べる。

### 4. 研究成果

#### (1) 上向き負リーダの特徴<sup>①</sup>

上向き負リーダは正極性上向き雷の主な成分である。この研究では FALMA で観測した 24 例の上向き負リーダの特徴を解析した。図 1 は北陸地方に設置された FALMA システムの 14 ヶ所の観測サイトの場所を示している。図 2 は観測された上向き負リーダの 1 例の三次元構造、電界変化波形と速度の推定を示している。今までの上向き負リーダに関する研究は殆ど 2、3 例しか解析していない。この研究では初めて上向き負リーダの特徴の統計的な結果が得られた。主に以下の結果が得られた：

① 上向き負リーダの進展速度は  $1.8 \sim 27.9 \times 10^5 \text{m/s}$ 、平均値は  $10.4 \times 10^5 \text{m/s}$  である。ほかの負リーダと同じ程度の速度で進展することが分かった。

② 上向き負リーダは特徴的な電界変化波形を生じることが分かった。これを利用して上向き負リーダを遠隔で監視する可能性を示した。

③ 多くの上向き負リーダは強い負極性帰還雷撃によって誘発されたことを明らかにした。その中に冬季に特有の特殊な帰還雷撃も存在する。多くの帰還雷撃は上向き負リーダが開始する数十ミリ秒前に数キロメートル離れた場所に落ちたことが分かった。

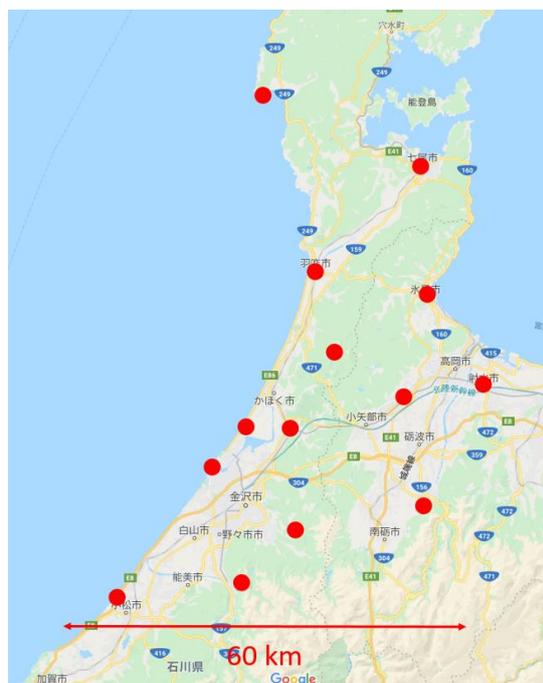


図 1 北陸地方に設置された FALMA システムの 14 ヶ所の観測サイト

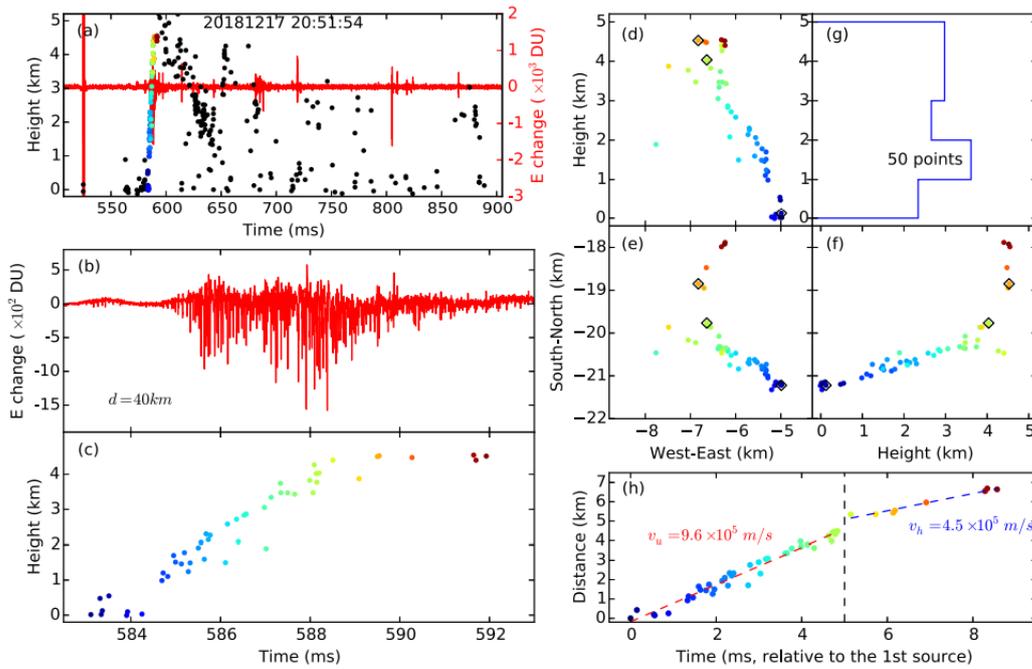


図2 FALMAで観測した1例の上向きリーダの三次元構造、電界変化波形、速度の推定

(2) 正極性多地点落雷の特徴と成因<sup>②</sup>

多くの上向き負極性落雷は正極性落雷によって誘発されることが既に分かっている。本研究はFALMAで観測した47例の正極性多地点落雷（違う場所に落ちた複数の正極性帰還雷撃を含む落雷）の特徴を解析した。図3は5個の正極性帰還雷撃を含む正極性落雷の標定結果と電界変化波形を示している。このような落雷は広範囲にわたって進展することが分かる。この研究では主に以下の結果が得られた：

- ① 正極性落雷の中に約18%は多地点落雷である。
- ② 同じ正極性落雷に含まれる正極性帰還雷撃の強さについて、殆どの場合が一番目の帰還雷撃が一番強い。しかし、二番目以降の帰還雷撃の強さは順番との関連性が見られない。
- ③ 帰還雷撃間の時間差は1ミリ秒から1秒以上までかなり大きな範囲に変動する。
- ④ 二番目からの帰還雷撃を引き起こす正リーダは多くの場合、雲の中にある負リーダから発生したことが分かった。

(3) 夏季雷に関連する成果

予備実験として岐阜県周辺地域にFALMAを設置して、夏季雷観測を行った。この観測でも多くの成果が得られた。

① 正極性落雷の初期放電のメカニズム<sup>③</sup>

図4は夏に観測された1例の正極性落雷の標定結果と電界変化波形を示している。最初の上に進展する放電は初期放電である。赤の十字マークは正極性帰還雷撃を示している。この結果から、正極性落雷の初期放電の本質は負極性リーダということが初めて分かった。

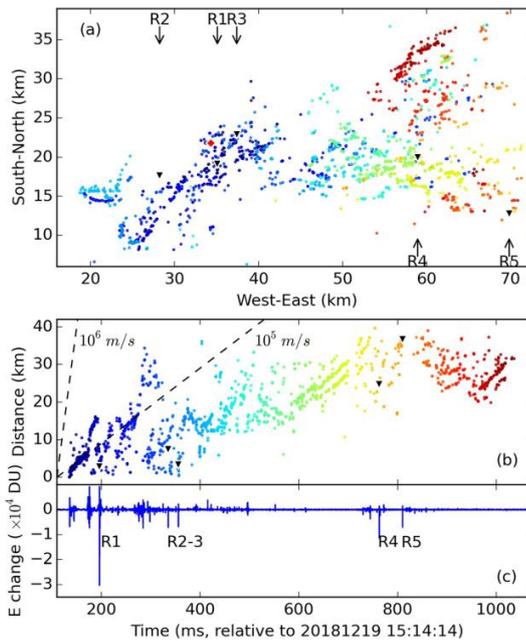


図3 FALMAで観測した5個の正極性帰還雷撃を含む正極性落雷の標定結果と電界変化波形

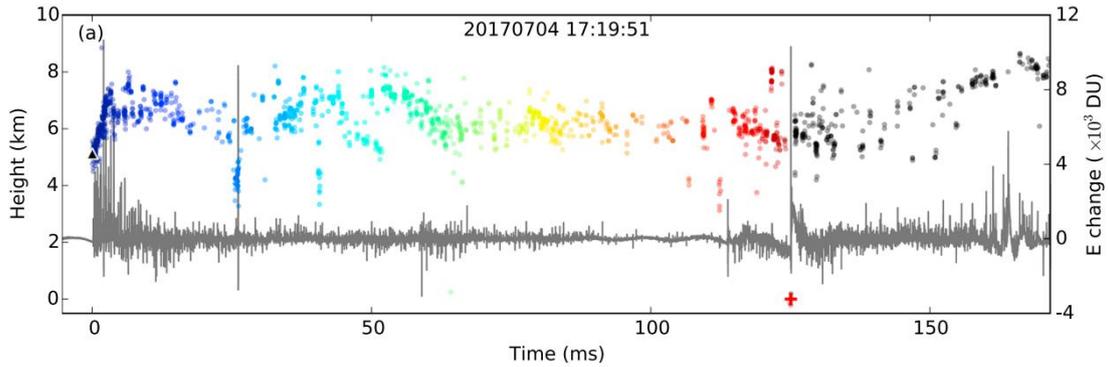


図4 夏に観測された1例の正極性落雷の標定結果と電界変化波形

#### ②高高度雲放電の発見<sup>④</sup>

高さ12キロメートル以上非常に発達した積乱雲の頂上付近から始まって下に進展する高高度雲放電を世界初めて発見した。図5はその1例の三次元標定結果を示している。高高度雲放電と普通の雲放電との多くの違いを明らかにした。また、高高度雲放電の発生と積乱雲の発達との関連性を示した。

#### ③正極性リーダの速度の統計結果<sup>⑤</sup>

雷放電は基本的に正リーダと負リーダに構成される。正リーダは一般的に放射能が弱いため、観測が難しいと言われている。結果的に正リーダの観測は未だ少ない。

FALMA では正リーダの観測も成功した。本研究では553例の雲放電と220例の負極性落雷の正リーダの速度を計算し、統計結果をまとめた。雲放電と負極性落雷の正リーダはほぼ同じ速度で進展すること、高度が高くなるにつれて速度が小さくなること、進展中速度は殆ど変わらないこと等正極性リーダの多くの特徴を明らかにした。

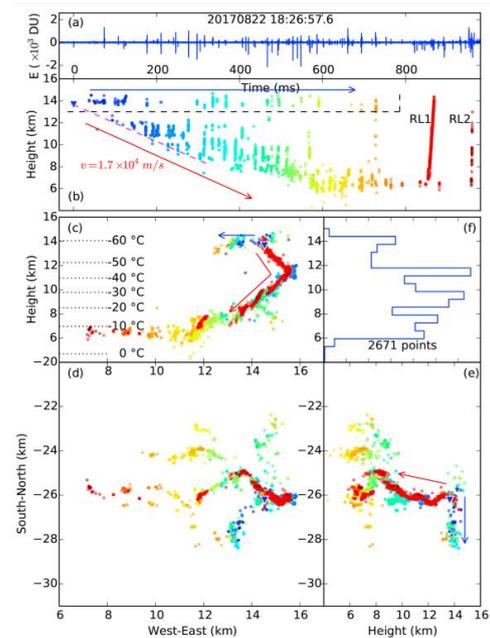


図5 FALMA で観測した高高度雲放電の三次元標定結果

#### <引用文献>

- ① Wu, T., Wang, D., & Takagi, N. (2020). Upward negative leaders in positive upward lightning in winter: Propagation velocities, electric field change waveforms, and triggering mechanism. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD032851.
- ② Wu, T., Wang, D., & Takagi, N. (2020). Multiple-stroke positive cloud-to-ground lightning observed by the FALMA in winter thunderstorms in Japan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD033039.
- 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.
- ④ Wu, T., Wang, D., & Takagi, N. (2019). Intracloud lightning flashes initiated at high altitudes and dominated by downward positive leaders. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 6982-6998.
- ⑤ Wu, T., Wang, D., & Takagi, N. (2019). Velocities of positive leaders in intracloud and negative cloud-to-ground lightning flashes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 9983-9995.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Wu Ting, Wang Daohong, Takagi Nobuyuki	4. 巻 39
2. 論文標題 A negative cloud-to-ground lightning flash initiating at a high altitude and starting without classic preliminary breakdown pulses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Atmospheric Electricity	6. 最初と最後の頁 16 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/jae.39.16	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 125
2. 論文標題 Upward Negative Leaders in Positive Upward Lightning in Winter: Propagation Velocities, Electric Field Change Waveforms, and Triggering Mechanism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 e2020JD032851
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JD032851	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 Shi Dongdong, Wang Daohong, Wu Ting, Takagi Nobuyuki	4. 巻 125
2. 論文標題 A Comparison on the E Change Pulses Occurring in the Bi Level Polarity Opposite Charge Regions of the Intracloud Lightning Flashes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 e2020JD032996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JD032996	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 125
2. 論文標題 Multiple Stroke Positive Cloud to Ground Lightning Observed by the FALMA in Winter Thunderstorms in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 e2020JD033039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JD033039	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 124
2. 論文標題 Intracloud Lightning Flashes Initiated at High Altitudes and Dominated by Downward Positive Leaders	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 6982 ~ 6998
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JD029907	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 Shi Dongdong, Wang Daohong, Wu Ting, Takagi Nobuyuki	4. 巻 124
2. 論文標題 Correlation Between the First Return Stroke of Negative CG Lightning and Its Preceding Discharge Processes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 8501 ~ 8510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JD030593	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 124
2. 論文標題 Velocities of Positive Leaders in Intracloud and Negative Cloud to Ground Lightning Flashes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 9983 ~ 9995
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JD030783	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 Gao, Wang, Shi, Wu, Takagi	4. 巻 10
2. 論文標題 Characterization of Multitermination CG Flashes Using a 3D Lightning Mapping System (FALMA)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 625 ~ 625
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atmos10100625	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, Wang Daohong, Wu Ting, Takagi Nobuyuki	4. 巻 124
2. 論文標題 Temporal and Spatial Characteristics of Preliminary Breakdown Pulses in Intracloud Lightning Flashes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 12901 ~ 12914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JD031130	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 123
2. 論文標題 Locating Preliminary Breakdown Pulses in Positive Cloud-to-Ground Lightning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 7989 ~ 7998
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JD028716	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22件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 馬場翔也, 高木伸之, 王道洪, ウティン
2. 発表標題 Large Bipolar Event の特性とメカニズムの解明について
3. 学会等名 令和2年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村岡音, 高木伸之, 王道洪, ウティン
2. 発表標題 2017年8月22日に東海地方で発生したシビアストームの特性
3. 学会等名 令和2年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩田貴志, 王道洪, ウティン
2. 発表標題 冬季雷における上向き負極性リーダの特性
3. 学会等名 日本大気電気学会第99回発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ウティン, 王道洪, 高木伸之
2. 発表標題 Negative lightning strokes in winter with extremely short preceding discharges
3. 学会等名 日本大気電気学会第99回発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田拓真, 高木伸之, 王道洪, ウティン
2. 発表標題 雲放電内のリコイルリーダ放電の特徴
3. 学会等名 日本大気電気学会第99回発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shi, Dongdong; Wang, Daohong; Wu, Ting; Takagi, Nobuyuki; Huang, Haitao
2. 発表標題 A Study on the Initiation of Initial Breakdown
3. 学会等名 11th Asia Pacific International Conference on Lightning (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Wu, Ting; Wang, Daohong; Takagi, Nobuyuki
2 . 発表標題 Some Abnormal Lightning Flashes Imaged by the FALMA
3 . 学会等名 11th Asia Pacific International Conference on Lightning ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Wang, Daohong; Wu, Ting; Takagi, Nobuyuki
2 . 発表標題 Practical Features of 3D Lightning Mapping System FALMA
3 . 学会等名 11th Asia Pacific International Conference on Lightning ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ting Wu, Daohong Wang, Dongdong Shi, Nobuyuki Takagi
2 . 発表標題 Three-dimensional lightning mapping using low-frequency radio waves
3 . 学会等名 URSI-JRSM ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ting Wu, Daohong Wang, Dongdong Shi, Nobuyuki Takagi
2 . 発表標題 Intracloud and negative cloud-to-ground lightning flashes not producing classic preliminary breakdown pulses
3 . 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Ting Wu, Daohong Wang, Dongdong Shi, Nobuyuki Takagi
2. 発表標題 The Fast Antenna Lightning Mapping Array (FALMA): Applications in lightning research
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ting Wu, Daohong Wang, Nobuyuki Takagi
2. 発表標題 Development of Fast Antenna Lightning Mapping Array (FALMA) and preliminary results
3. 学会等名 The 16th International Conference on Atmospheric Electricity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浦田政貴, ウティン, 王道洪, 高木伸之
2. 発表標題 帰還雷撃の電界波形の微細構造に関する研究
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田健, 高木伸之, 王道洪, ウティン
2. 発表標題 ハイブリッド雷の特徴
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深尾健二, 高木伸之, 王道洪, ウティン
2. 発表標題 FALMAと高速ビデオカメラの比較検討
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ting Wu, Daohong Wang, Nobuyuki Takagi
2. 発表標題 Recent observations with the Fast Antenna Lightning Mapping Array (FALMA)
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 王道洪, ウティン, 高木伸之
2. 発表標題 雷放電3DマッピングシステムFALMAの実用性について
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Dongdong Shi, Daohong Wang, Ting Wu, Nobuyuki Takagi, Haitao Huang
2. 発表標題 A study on the initiation of preliminary breakdown process
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 園浦伸介, 王道洪, WU Ting, 高木伸之
2. 発表標題 双方向リーダの進展特性と関連するパルス波形の特徴
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小出雅人, ウティン, 王道洪, 高木伸之
2. 発表標題 雷雲の初期発達期における雷放電の特徴
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤孝平, ウティン, 王道洪, 高木伸之
2. 発表標題 落雷強弱別のリーダ放電の特性
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水千貴, ウティン, 王道洪, 高木伸之
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本大気電気学会第97回発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

FALMA - Fast Antenna Lightning Mapping Array  
<https://www1.gifu-u.ac.jp/~lrg/falma.html>

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
---------	---------