

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360121

研究課題名(和文) 風力発電施設への落雷の予知技術による新しい耐雷対策手法の確立に関する研究

研究課題名(英文) New method for the prediction of upward lightning flash from a windmill and its protection tower

研究代表者

高木 伸之 (TAKAGI, NOBUYUKI)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：80179415

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円

研究成果の概要(和文)：冬季雷雲下の風力発電設備において上向きに開始する落雷を数十秒前に予知するための手法の開発に成功した。本手法は雷雲下の空間電荷と地上電界を計測して空間電荷による緩和効果を削除して雷雲電界を推定しようとするものである。多地点での地上電界と空間電荷の測定結果より雷雲電界マップを作成し雷放電の予知を試みた。自発型落雷の場合、雷雲電界が -3kV/m に達すれば30秒前に確率50%以上で予知することができ、 -4kV/m では1分前に100%の確率で予知できる。一方、他発型落雷の場合は(雷雲電界/最大電界までの距離)が -2.43kV/m/km 以上になると90%以上の確率で予知できる。

研究成果の概要(英文)：New method for the prediction of upward lightning flash from a windmill and its protection tower is developed using the electric field mapping technique considering the electric field caused by the space charge above the ground. This method is also tested with measurement data of electric field and space charge density at multiple sites around the windmill. The tested result shows that it is possible to predict the upward lightning flash from the windmill and its protection tower at least 30 seconds before the discharge with over 50% occurrence probability for the self-triggered upward lightning and 30 seconds before the discharge with over 90% occurrence probability for the other-triggered upward lightning respectively.

研究分野：電気エネルギー工学

キーワード：雷 風力発電 落雷予知 防雷対策 空間電荷

1. 研究開始当初の背景

落雷の予知において知りたい情報は落雷地点の位置、日時、電流ピーク値等の放電規模である。現状における国内外の落雷予知の実現性を、何秒前に、どれだけの位置精度で予知できるかを表1に示す。位置の予知精度は短いほど良いが実用的には10m~100m以内が望ましい。予知時間はなるべく前が良いが10秒前に分かれば様々な保護対策が可能となる。しかし現状では実用的な予知技術は確立できていない。ただし、位置の誤差が100km程度ならば、現在の気象予報では前日には十分に予測できている。気象庁が今年から運用を開始したLIDASは10分前に位置精度10km程度で予知可能である。また、予知という目的では実現はされていないが雷放電波放射源位置の可視化装置を用いれば位置精度1km程度で10ms前までに予知することは技術的に実現可能である。同様に雷撃進展撮影装置を用いれば10m以下の位置精度で予知できるが、せいぜい10 μ 秒前が限度である。本研究で目指している落雷の予知精度は風力発電設備への落雷の場合は数秒前に予知することであり(表中の網掛部分右)、自然の雷によって風力発電への雷が誘発される場合もありこのケースでは位置精度1kmで数秒以内である(表中の網掛部分左)。これが可能となれば、これまでの流れ込んでくる雷撃電流からどのように機器等を耐えさせるかという発想から行われてきた風力発電設備の耐雷対策を根底から変えることとなり、被害範囲と耐雷費用を大幅に縮小することが可能となる。

表1 落雷予知の現状

○：実現 △：可能 ×：不可能

予知精度	100km	10km	1km	10m
1 日前	○	×	×	×
1 時間前	○	×	×	×
10 分前	○	○	×	×
1 分前	×	×	×	×
10 秒前	×	×	×	×
10ms 前	△	△	△	×
10 μ s 前	△	△	△	△

2. 研究の目的

日本海側地方の冬季雷は、落雷のエネルギーや中和電荷量が太平洋側の夏季雷に比べて大きく、雷雲高度が低いために高建造物では雷撃を受ける頻度が夏季より著しく高いといった特徴を有するために、日本海側地方の風力発電施設は甚大な被害を被っている。そこで本研究では風力発電施設への落雷をその数秒前に予測することによ

て、風車本体と変圧施設やその先の電力系統とを完全に切り離すというこれまで行われてきた耐雷対策とは異なる新たな耐雷対策を確立することを目的としている。そのためには落雷の予知技術が必要であり雷雲内の電荷分布と雷雲下の空間電荷分布を予測可能な技術開発を行う。この技術により雷雲下の電界が予測可能となり、風力発電設備先端の電界をリアルタイムで予測し、数秒前に落雷の発生を予知する。本研究は空間電荷測定手法を完成させ落雷の予知技術を確立することを研究目的としている。

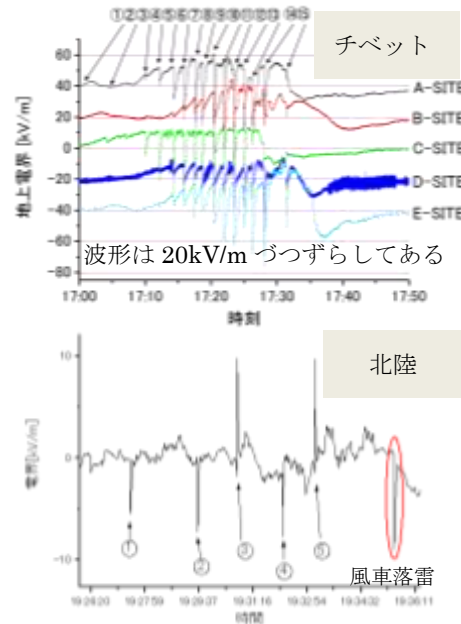


図1 雷雲近傍での地上電界

雷放電に限らず全ての絶縁破壊は臨界電界を超えた時に開始する。そこで、臨界電界を求めるために雷雲内の電荷とそれによって発生した雷雲下の空間電荷分布をリアルタイムで測定できないかと考えた。図1は雷雲近傍での地上電界であり、急峻な大きな電界変化は雷放電があったことを示している(図中の丸数字)。同図上のチベットでは雷放電の後どの観測地点においても時間の経過と共に徐々に電界が上昇しサイト別の臨界値に達すると次の雷放電が発生することが分かり(特に雷雲からの距離がほぼ一定と見なせるC,Dサイトで顕著。他のサイトは雷雲が近づいた後遠ざかるので落雷開始電界は一定値ではない)、雷放電の予知は容易である。一方、同図下の北陸地方では地上でのコロナ放電が活発なために雷雲下に多くの空間電荷が発生し落雷開始電界を識別することは不可能である。しかし、臨界電界に達するかどうかは空間電荷の分布が分かれば推定可能であり、雷雲下の空間電荷分布を測定する技術を開発することを目指す。

3. 研究の方法

雷雲下の空間電荷分布はバルーンやロケットを用いてある時刻のある場所のみの観

測結果しかなく、リアルタイムに3次元空間を測定できる技術はない。4種類の空間電荷測定装置の開発を行った。開発された装置は研究室の保有する空間電荷発生装置を用いて屋内でのテストを行い、その後、積雲発生時に大学の屋外で試験を行った。開発された装置を用いた風力発電設備周辺での実地観測は平成23年度から26年度の冬季に石川県内灘町内の大型風力発電設備周辺で行った。空間電荷測定以外の主な観測項目は電流・電界・光学観測の3つである。

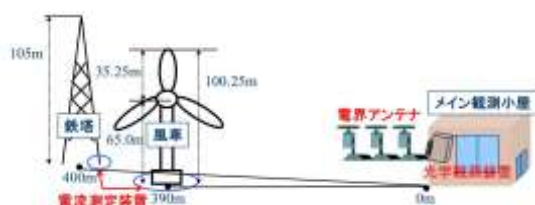


図2 観測方法

本研究目的を達成するため実地観測を冬季に石川県内灘町の風力発電施設で4年間行った。空間電荷測定以外の主な観測項目は電流・電界・光学観測の3つである。観測機器の配置を図2に示す。電流は風車と避雷鉄塔の根本に雷撃電流測定装置を設置して計測している。低周波数(0.04Hz)・低電流(0.1A)まで測定できることが特徴である。電界は直流から5MHzまでの周波数帯域を複数のアンテナでカバーしている。また、これを500m~5km間隔で複数地点に配置し、雷雲の動き、放電の放射源、電荷領域の位置、放電様相の把握に利用している。光学観測では24時間連続の通常のビデオ記録と共に高速での画像記録のためにALPS(Automatic Lightning Progressing Feature Observation System)と高速度ビデオカメラを使用している。ALPSは通常感度タイプのほかに前兆発光現象を撮影するために高感度タイプも使用した。空間電荷観測は北陸地方にある大型風車を対象に、数百メートルから5km離れた7カ所のサイトにて行う。これを図3に示す。



図3 石川県内灘町の観測地点

4. 研究成果

4.1 成果概要

風力発電設備からの上向き雷は、上空に雷雲が近づいてその先端で臨界電界に達したときに発生する場合と、近くで雷放電が発生しその電界変化により誘発される場合の2タイプがある。前者の落雷のタイプを自発型上向き雷、後者を他発型上向き雷と呼ぶ。

測定した地上電界と空間電荷密度より雷雲電界を推定することにより、風力発電施設への落雷を数十秒前に予知することが可能であることがわかった。自発型落雷の場合、雷雲電界が -3kV/m に達すれば30秒前に確率50%以上で予知することができ、 -4kV/m では1分前に100%の確率で予知できる。一方、他発型落雷の場合は(雷雲電界/最大電界までの距離)が -2.43kV/m/km 以上になると90%以上の確率で予知できる。

4.2 空間電荷測定方法

図4に観測システムを示す。地上電界の観測には回転セクター型電界計(フィールドミル)を用いた。周波数帯域はDC~10Hzである。空間電荷測定装置はフィールドミルとファラデーケージを組み合わせた機器で、ファラデーケージ内の電界を測定することで間接的に空間電荷密度を測定することができる。地上電界と空間電荷密度はパソコンにより24時間計測される。地上電界 E_0 =雷雲電界 E_c +空間電荷電界 E_s であり、雷雲電界 E_c と空間電荷電界 E_s の極性は異なるため、常に地上電界 $E_0 < \text{雷雲電界 } E_c$ となる。

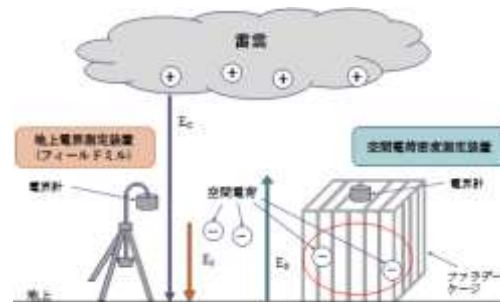


図4 空間電荷観測システム

4.3 自発型上向き雷

2012年12月6日16時2分24秒に発生した風車への負極性自発型上向き落雷の地上の等電界マップと雷雲電界の等電界マップを図5に示す。各マップ共に落雷の1分前から0秒前までの20秒おきの等電界を示している。また、範囲は風力発電施設を含む東西5km、南北5kmである。

風力発電施設のある地点における地上電界は1分前が -0.7kV/m 、40秒前が -1.3kV/m 、20秒前が -0.6kV/m 、0秒前が -0.6kV/m である。これに対して空間電荷による緩和電界を取り除いた雷雲電界は、1分前が -4.7kV/m 、40秒前が -7.8kV/m 、20秒前が -7.1kV/m 、0秒前が -8.4kV/m である。地上高100m、海拔150mの風力発電施設の上端では上述の地上電界や雷雲電界の200倍から500倍高いと予想されており、雷雲電界は風力発電施設の先端に

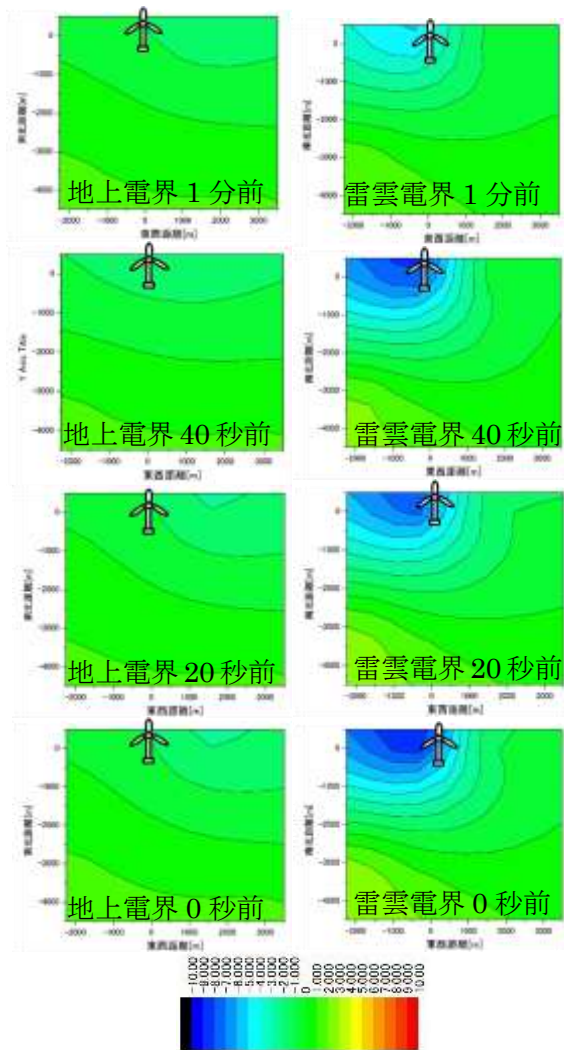


図5 負極性自発型上向き落雷の地上の等電界マップと雷雲電界の等電界マップ

において放電開始電界である 3000kV/m を超えていると考えられる。この落雷の場合は風力発電施設の上端で 3000kV/m を超える電界となる目安の雷雲電界 6kV/m を落雷の 40 秒前に超えており、数十秒前に落雷を予測できることが分かる。一方、風力発電施設のある地点における地上電界は最大でも-1.3kV/m であり、落雷に到ると予想することはできない。地上電界に空間電界による緩和電界を加味して雷雲だけの電界を算出する本手法の妥当性を示している。

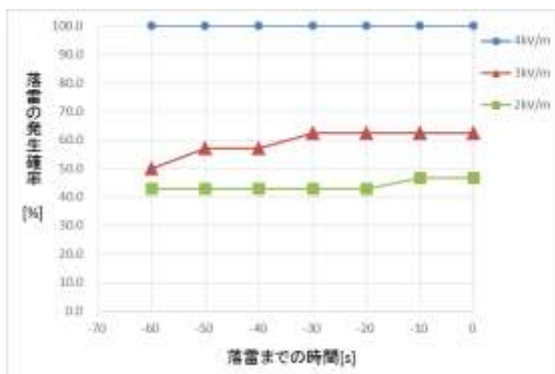


図6 落雷の予知可能時間と落雷の発生確率との関係

また、自発型落雷を何秒前に予知することが可能かどうか検討した。これを図6に示す。落雷予知のための電界閾値毎に落雷発生確率を示してある。閾値が-4kV/mの場合落雷の1分前から落雷を100%予知することができる。電界の閾値を-3kV/mとすれば、落雷の発生確率60%程度で、30秒前から予知が可能である。落雷の発生確率50%であれば、電界の閾値を同じく-3kV/mであっても1分前から予知が可能である。

4.4 他発型上向き落雷

2013年1月3日17時54分16秒に発生した風車への負極性他発型上向き落雷の地上の等電界マップと雷雲電界の等電界マップを図7に示す。各マップ共に落雷の1分前から0秒前までの20秒おきの等電界を示している。また、範囲は風力発電施設を含む東西5km、南北5kmである。

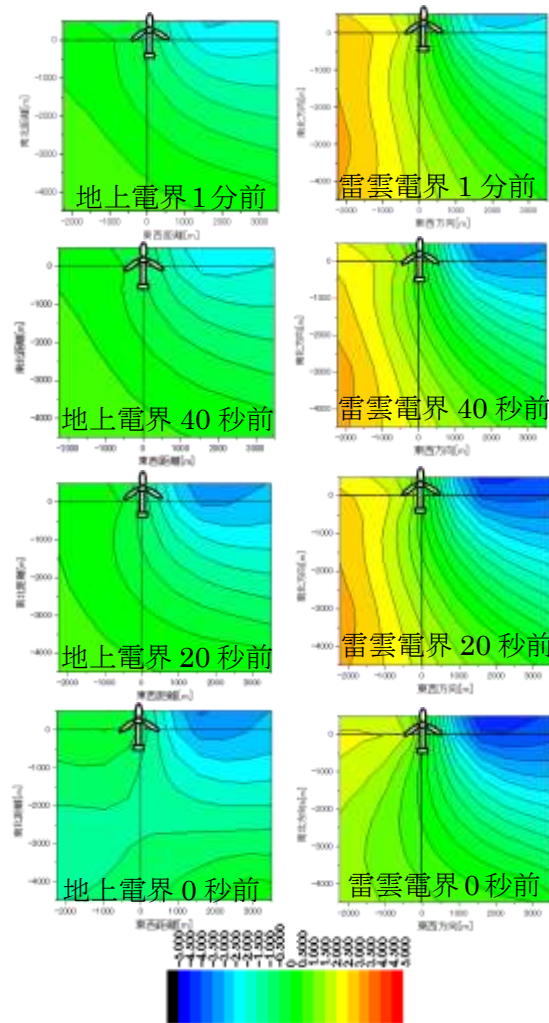


図7 負極性他発型上向き落雷の地上の等電界マップと雷雲電界の等電界マップ

風力発電施設のある地点における地上電界と雷雲電界は共に1分前から0秒前まで+1.1kV/m~+0.8kV/mの範囲にあり、ほとんど変化していない。一方、風力発電設備の東側約2km地点での雷雲電界は、1分前が-4.2kV/m、40秒前が-5.4kV/m、20秒前が-6.2kV/m、0秒前が-6.5kV/mと徐々に増加し、この地点で雲放電が発生している。さらにこの雲放電をき

っかけにして、風車から上向きの負極性落雷が発生した。この事例から -6kV/m 程度あれば雷放電が発生し、その雷放電が風力発電施設から 2km 程度以内であれば風力発電施設から他発型落雷を誘発させることが分かる。

そこで次に、他発型落雷発生時の最大雷雲電界とその場所までの風力発電施設からの距離の関係を調べた。さらに、雷雲通過時に発雷しなかった雷雲電界とその距離も加えてプロットしたものを図8に示す。図中の赤い線を境に右下では他発型負極性落雷が発生し、左上では発生しないことが分かった。その境界線は距離 1km あたり -2.43kV/m である。 2km 離れると -4.86kV/m 以上の雷雲電界がないと他発型落雷は発生しないことを意味している。この結果より90%以上の確率で他発型上向き負極性落雷を予知できることが分かる。正極性落雷の場合は電界の極性を反転して示しているが、発生頻度が少ないため予知は別途検討が必要である。

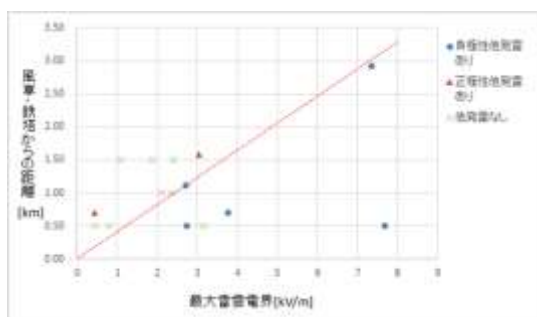


図8 他発型落雷直前の最大雷雲電界と風車・鉄塔からの距離との関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計18件)

- ① K. Takamatsu, N. Takagi, D. Wang, Characteristics of the brief but bright discharges that often occur along the trails of positive leaders, *J. Atmos. Electr.*, 査読有, Vol.35, No.1, 17-30, 2015
- ② M. Zhou, D. Wang, J. Wang, N. Takagi, W. R. Gamerota, M. A. Uman, D. M. Jordan, J. T. Pilkey, and T. Ngin, Correlation between the channel-bottom light intensity and channel-base current of a rocket-triggered lightning flash, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 査読有, 119, doi:10.1002/2014JD022367, 2014.
- ③ Kaneyoshi Takamatsu, Nobuyuki Takagi, Daohong Wang, Characteristics of the brief but bright discharges that often occur along the trails of upward positive leaders, *XV International Conference on Atmospheric Electricity*, Norman, Oklahoma, U.S.A., O-03-02, 査読有, 2014,1-11
- ④ Kaneyoshi Takamatsu, Nobuyuki Takagi, Daohong Wang, Characteristics of leader/return stroke sequence along one of multiple branches of upward lightning discharges, *XV International Conference on Atmospheric Electricity*,

- Norman Oklahoma, USA, P-03-04, 査読有, 2014, 1-7
- ⑤ Wang D., N.Takagi, W.R.Gamerota, M.A.Uman, and D.M.Jordan, High speed optical observation on the attachment processes of natural downward lightning discharges, *XV International Conference on Atmospheric Electricity*, Norman Oklahoma, USA, O-03-10, 査読有, 2014, 1-6
- ⑥ M. Zhou, D. Wang, J. Wang, N. Takagi, W. R. Gamerota, M. A. Uman, D. M. Jordan, J. Pilkey, and T. Ngin, Correlation between the channel-bottom light intensity versus channel-base current of an artificially triggered lightning flash, *Proceedings of 32nd International Conference on Lightning Protection*, Paper number 328, 査読有, 2014
- ⑦ Wang D., N. Takagi, W. R. Gamerota, M.A. Uman, and D.M. Jordan, Height-dependent attenuation characteristics of lightning return strokes, *Proceedings of 32nd International Conference on Lightning Protection*, Paper number 29, 査読有, 2014
- ⑧ D. Wang, W. R. Gamerota, M. A. Uman, N. Takagi, J. D. Hill, J. Pilkey, T. Ngin, D. M. Jordan, S. Mallick, and V. A. Rakov, Lightning attachment processes of an "anomalous" triggered lightning discharge, *Journal of Geophysical Research*, 119,doi:10.1002/2013JD020787. 査読有, 2014
- ⑨ Y.Takayanagi, M.Akita, Y.Nakamura, S.Yoshida, T.Morimoto, T.Ushio, Z-I.Kawasaki, D.wang, N.Takagi, H.Sakurano, Y.Kubouchi, Upward lightning observed by LF broadband interferometer, *The Institute of Electrical Engineers of Japan, Transaction A*, Vol. 133, No. 3, P132-141, doi.org/ 10.1541/ieejfms.133.132, 査読有, 2013
- ⑩ Wang D., N.Takagi, W.R.Gamerota, M.A.Uman, J.D.Hill and D.M.Jordan, Initiation processes of return strokes in rocket-triggered lightning, *Journal of Geophysical Research*, VOL. 118, 1-9, doi:10.1002/jgrd.50766, 査読有, 2013
- ⑪ D.Wang and N.Takagi, Characteristics of winter lightning that occurred on a windmill and its lightning protection tower in Japan, *IEEJ Transaction on Power and Energy*, Vol.132, No.6, pp.1-5, DOI:10.1541/ieejpes.132.1, 査読有, 2012
- ⑫ D.Wang and N.Takagi, Three unusual upward positive lightning triggered by other nearby lightning discharge activity, *Proceedings of 22nd International Lightning Detection Conference*, Broomfield, Colorado, USA, 2-3 April, 査読有, Vol.1, 2012,1-8
- ⑬ D.Wang and N.Takagi, High speed optical observation on initiation process of lightning return strokes, *Proceedings of 33rd International Conference on Lightning Protection*, Vienna Austria, September, 査読有, 2012, No.126,1-6
- ⑭ 高木伸之, 王道洪, 冬季における風力発電設備への雷撃特性、*電気学会論文誌 B*, 査読有, Vol. 131, No. 7, 2011, 532-535
- ⑮ Daohong Wang, Tomohumi Watanabe, Nobuyuki Takagi, A high speed optical imaging system for lightning

attachment process, Proceedings of 7th Asia-Pacific Lightning Conference, Chengdu China, November, 査読有, 2011

- ⑩ Ariadi Hazmi, Kaneyoshi Takamatsu, Nobuyuki Takagi, Daohong Wang, Simultaneous Observations of Red Sprite and its Parent Lightning Current, Proceedings of 14th International Conference on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro, Brazil, 査読有, 2011
- ⑪ D. Wang, N. Takagi, Typical characteristics of upward lightning observed in Japanese winter thunderstorms and their physical implications, Proceedings of 14th International Conference on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro, Brazil, 査読有, 2011,
- ⑫ D. Wang and N. Takagi, A downward positive leader that radiated optical pulses like a negative stepped leader, Journal of Geophysical Research, 査読有, VOL. 116, D10205, doi:10.1029/2010JD015391, 2011

[学会発表] (計 12 件)

- ① D. Wang, R. J. Thomas, H. E. Edens, W. Rison, D. Rodeheffer, N. Takagi, P. R. Krehbiel, LMA による日本の冬季雷の観測, 日本大気電気学会, 千葉大学(千葉県, 千葉市), 2015 年 1 月
- ② 中村謙太, 高木伸之, 王道洪, 雷放電路の途中に接続される後続雷撃の特性, 電気関係学会東海支部連合大会、中京大学(愛知県, 名古屋市), 2014 年 9 月
- ③ 石井清輝, 高木伸之, 王道洪, 正極性リーダの進展特性に関する研究, 電気関係学会東海支部連合大会、中京大学(愛知県, 名古屋市), 2014 年 9 月
- ④ 竹内宏文, 浅川直也, 高木伸之, 王道洪, 落雷の予知に関する研究, 電気関係学会東海支部連合大会、中京大学(愛知県, 名古屋市), 2014 年 9 月
- ⑤ 二村友貴, 王道洪, 高木伸之, 冬季上向き雷開始時の電界強度の計測, 電気関係学会東海支部連合大会、中京大学(愛知県, 名古屋市), 2014 年 9 月
- ⑥ 高木駿介, 高木伸之, 王道洪, 上向き雷における後続雷撃の放電進展様相について, 電気関係学会東海支部連合大会、中京大学(愛知県, 名古屋市), 2014 年 9 月
- ⑦ 高松謙与士, 王道洪, 高木伸之, 道下幸志, 風車施設で発生した多重落雷の雷撃様相, 電気関係学会東海支部連合大会、静岡大学(静岡県, 浜松市), 2013 年 9 月
- ⑧ 杉浦永馬, 高木伸之, 王道洪, 地上電界マッピングによる他発型上向き雷の予知に関する研究, 電気関係学会東海支部連合大会、静岡大学(静岡県, 浜松市), 2013 年 9 月
- ⑨ 高松謙与士, 高木伸之, 王道洪, 正極性リーダの放電路で多発する瞬間再放電現象について, 日本大気電気学会、東

京理科大学(東京都, 新宿区), 2013 年 1 月

- ⑩ 高松謙与士, 高木伸之, 王道洪, 上向き雷において放電路の発光が大地まで達しない放電について, 電気関係学会東海支部連合大会、豊橋技科大(愛知県, 豊橋市), 2012 年 9 月
- ⑪ 高木良樹, 高木伸之, 王道洪, 地上付近高度別の空間電荷密度の連続計測, 日本大気電気学会、電気通信大学(東京都, 調布市), 2012 年 1 月
- ⑫ 高木良樹, 高木伸之, 王道洪, 冬季雷雲下における空間電荷密度, 電気関係学会東海支部連合大会、三重大学(三重県, 津市), 2011 年 9 月

[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:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 伸之 (TAKAGI NOBUYUKI)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号: 80179415

(2) 研究分担者

王 道洪 (Wang Daohong)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号: 20273120

(3) 連携研究者

なし