

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20360125

研究課題名（和文） 風力発電設備への落雷の前兆現象の解明とそれを利用した防雷対策

研究課題名（英文） The lightning protection method using pre-phenomena prior to the lightning hitting to a windmill

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

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の前兆現象を3つ確認した。一つは落雷開始の数秒前から数アンペアの電流が流れる前兆電流である。二つ目は落雷前に発生する微弱な発光を伴う放電現象で風車先端から数メートル程度進展して停止する現象である。三つ目は落雷前に風力発電設備周辺での地上電界強度が正または負の極性に偏る現象である。前兆電流については2秒前には落雷の発生を予測できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

We have found the occurrence of three pre-phenomena immediately prior to the lightning hitting to a wind mill and its protection tower. The first one is the pre-current with a magnitude of several amperes which flow for a few seconds before the initiation of an upward lightning. The second one is the pre-light-emission from the tip of the wind turbine blade associated with an un-continuous progressing discharge over a distance of several meters. The last one is the phenomenon of increasing electric field strength in the area of several kilometers around the windmill. We have confirmed the possibility of forecasting lightning two seconds ahead using the pre-current.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	9,800,000	2,940,000	12,740,000

研究分野：電気エネルギー工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：雷、風力発電、防雷対策

1. 研究開始当初の背景

エネルギー枯渇問題・地球環境問題を本質的に解決するため、風力発電や太陽光発電といった自然エネルギー発電への期待が高まっている。これを背景に、近年、大型風力発電所が次々と建設され、注目を浴びているが、

北陸の日本海沿岸地域に建設された発電用大型風車では、冬季雷の被害が深刻な問題となっている。また、冬季雷は放電エネルギーが大きいという特徴を有しており、風力発電用ブレードが焼失し長期間の運転停止、多額の修理費用の必要性という理由のため発電

事業からの撤退する施設も多数出ている。1シーズン、1基あたりの落雷頻度が複数回と極めて高い。一方、北陸地方の夏季には風力発電施設への落雷がないことから、冬季の風車への落雷は風車側からの上向き放電により開始すると考えられる。そこで本研究では上向き放電発生の前兆現象を明らかにし、全く新しい防雷対策手法を提案できないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究グループは平成17年度より風力発電設備の耐雷対策に必要な雷放電開始条件を研究対象とした雷観測を雷撃進展撮影装置(ALPS)、雷雲内放射源可視化装置、空間電荷分布測定装置、多地点電界測定システム、放電電荷密度推定装置、全方位ビデオカメラ等を用いて行っている。その結果、本研究開始前に2つの重大な事実が明らかとなった。一つは、風力発電設備周辺の地上電界が $\pm 5\text{kV/m}$ 程度に達すると落雷が発生することである。ただし、この電界値はおおよそ目安であって臨界値ではない。二つ目は、風車への落雷の場合(観測した4例中全て)、図1に示すように落雷の数秒前から数アンペアという電流が風車から流れ出すことを発見した(下図：電流波形の縦軸を拡大してある。ノイズ成分が $\pm 20\text{A}$ あるが、落雷(横軸の10秒の地点、 -12kA 以上のピーク値に達した160ms後に $+12\text{kA}$ 以上流れている)の約4

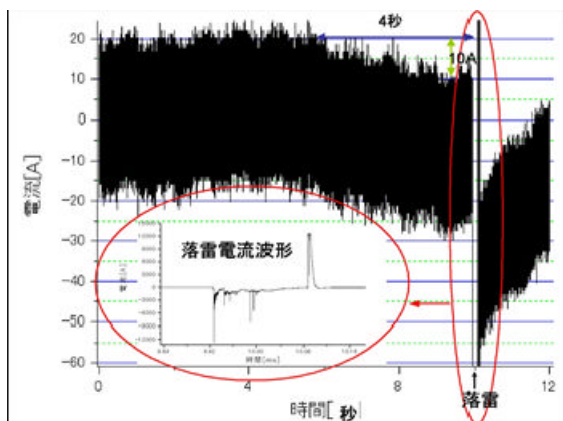


図1 風車への落雷に伴う前兆電流

秒前から電流が負側に増加し落雷直前に10Aに達している)。この2つの観測結果は風力発電設備での落雷の場合、数秒というオーダーの『前兆現象』が存在することを示している。この数秒という時間があれば被雷対象である風車本体を風力発電の変電設備や電力系統から完全にかつ安価に切り離す事が可能となり、被害範囲を大幅に縮小することが可能となる。これが事実であるとすれば、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る。そこで本研究では

(I)落雷数秒前に風車から微少電流が流れる前兆現象が確実に起きているかどうかの検証を電流測定装置以外の他の観測機器も用いて検証を行う。

(II)前兆電流を検出し、電力系統を切り離すためのトリガー信号を出力する回路の製作と動作確認を行う。

(III)風力発電設備で落雷が発生する場合の地上電界マップを多地点での電界計測により描き、落雷が発生可能な最小電界値とその領域および何秒前まで予測可能かを検証する。

(IV)地上電界から落雷を予測するシステムを構築する。

(V)風力発電設備先端からの微小発光や微弱電磁波放射等の他の前兆現象がないか測定を行う。

これらを研究目的としている。

3. 研究の方法

本研究目的を達成するため、風車落雷の前兆現象についての実地観測を冬季に石川県内灘町の風力発電施設で3年間行った。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。

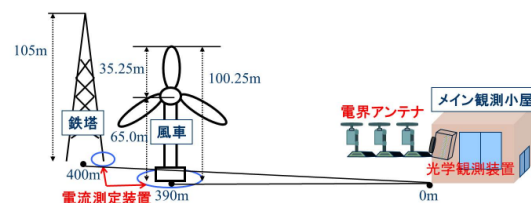


図2 観測方法

4. 研究成果

4.1 成果概要

3年間の観測において記録できた落雷電流は2008年度が11例、2009年度は13例、2010年度は13例の合計37例である。これらの落雷に先立って以下に示す前兆現象(前兆電流、前兆発光、前兆電界)が見られた。以下にそ

の詳細を示す。また、前兆電流については前兆電流の検知システムを試作し落雷前に検知できることを確認している。

4.2 前兆電流

落雷前 10 秒間に流れた微弱電流をタイプ毎に分類しその代表例を図 3 に示す。図において peak to peak 値で約 40~120A の高周波ノイズ成分が見られるが、中央に示した隣接平均値とほぼ同じ変化をしていることがわかる。4 つのタイプは以下のように分類した。
 タイプ①…波形の変動が小さいタイプ
 タイプ②…波形の変動が大きいタイプ
 タイプ③…値が増加または減少し、その後波形の変動がないタイプ
 タイプ④…落雷前に値が増加または減少するタイプ

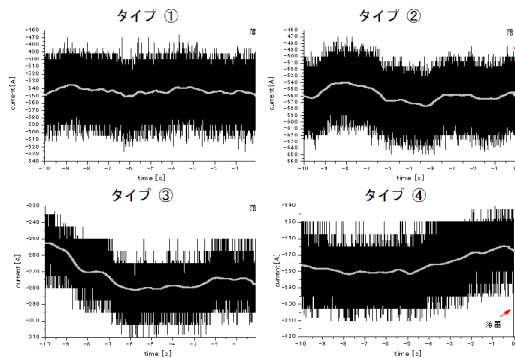


図 3 前兆電流の分類

4 年間で記録された落雷電流は 23 例あり、これをタイプ別に示したものを図 4 に示す。避雷鉄塔では全てのタイプの前兆電流が発生しているが、風車ではタイプ③と④の発生頻度が高いことがわかる。

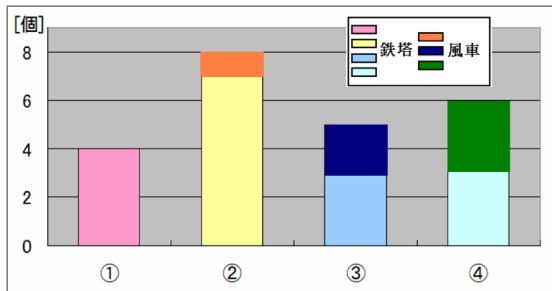


図 4 タイプ別前兆電流発生件数

落雷の開始前に落雷を検知するには図 3 の電流波形のノイズ成分を除去し、トリガレベルを設定して前兆電流を検知する必要がある。そこでパソコン上でデジタルフィルタによりノイズ成分を除去した後、D/A 変換してウィンドウ・トリガーを有する記録計に入力して前兆電流を検知できる最適なウィンドウ・トリガー・レベルを求めた。デジタルフィルタはバンドパスフィルタ用い、その通過帯域は 0.01~2[Hz]とした。前兆電流は正負に変動し、オフセット値があるために様々な

二組のトリガー・レベルを設定し前兆電流を検知できる確率が最も高くなるトリガー・レベルを求めた。その結果ウィンドウ・トリガ

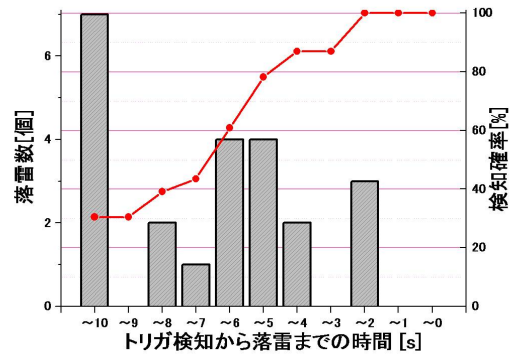


図 5 前兆電流検出から落雷までの時間

一・レベルのハイレベルが 5A、ローレベルが -1A のとき検知してから落雷が発生するまでの時間の結果を図 5 に示す。この結果より、早く検知可能な例では落雷の 10 秒前に可能であり、落雷の 80%は 5 秒前に予知可能である。さらに 2 秒前までなら全ての落雷を予知できる。

4.3 前兆発光

地上の高構造物から雷雲に向かって進展を開始する上向き雷の場合、これまでの観測からその進展が途中で止まってしまう場合があることが分かっていた。そこで上向き進展放電が持続進展する前にもそのような初期放電があるのではないかと考え、高感度の高度別発光強度測定装置を用いて前兆発光の観測を行った。

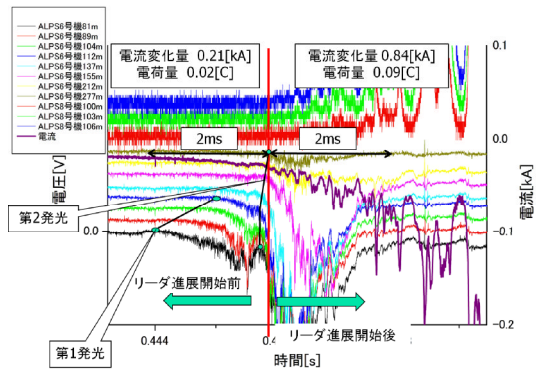


図 6 前兆発光現象の一例

前兆発光現象の一例を図 6 に示す。この落雷は 2009 年 12 月 31 日 23 時 33 分に発生した風車への落雷である。図は落雷の高度別発光強度の時間変化と電流を示している。受光感度の異なる 2 台の高度別発光強度測定装置で測定されている。1 台は正方向に変化 (3 つの高度分を表示) しており、もう一台は負方向に変化 (8 つの高度分を表示) し

ている。負方向に変化する高度別発光強度測定装置の方が受光感度は高い。電流の極性は負であるので負方向に変化（図中の紫色の波形）している。図中の縦の赤線の時刻より持続進展する上向き放電が進展を開始している。負方向に変化する高感度の装置で記録された波形を見てみると、発光変化は 81m～112m の高度で 1 度小さなピークに達した後減少し、その後赤線の時刻より持続進展放電が開始している。81m で時刻 0.444 秒に発光の増加が始まり、少し遅れて 89m で発光が開始し、その発光は高度 112m まで達している。また発光強度も高高度ほど弱くなっていく傾向がある。次に赤線時刻の 0.4457 秒から大きな発光が下から順に上に向かって進展している。赤線時刻の前 2ms と後 2ms での電流変化量は前が 0.21kA、後ろが 0.84kA であり持続進展放電の方が 4 倍も電流値が大きい。またこの時中和された電荷は赤線時刻の前が 0.02C、後が 0.09C であり、電流と同様に持続進展放電の方が大きい(あるいは前兆放電の方が小さい)。

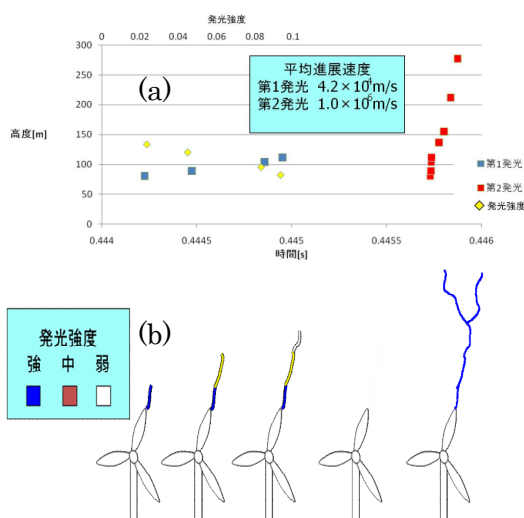


図 7 図 6 に示した前兆発光とその後に続く持続進展放電の (a) 時刻別放電到達高度と (b) その進展様相の模式図

図 6 に示した前兆発光とその後に続く持続進展放電の時刻別放電到達高度とその進展様相の模式図を図 7 に示す。図中 (a) の青色で示した前兆発光(図中には第 1 発光と書かれている)の到達高度は時間と共に上昇し 1ms 弱で 40m ほど進展している。この前兆発光の進展速度は $4.2 \times 10^6 \text{m/s}$ である。同図の黄色の点はこの時の発光強度で高度が上がるほど発光強度は低下していることが分かる。赤色の点で示した持続進展放電(図中には第 2 発光と書かれている)は放電開始直後は風車先端から前兆発光の到達点までは急速に高度を上げ(進展速度 $3.0 \times 10^6 \text{m/s}$)、その後は上昇速度(点の傾きで大きさは $1.0 \times$

10^6m/s)は幾分緩やかになっている。この時の進展様相を同図 (b) に示す。前兆放電は 40m ほど進展した後一旦停止し、その後持続放電が開始していることが分かる。この例では 1.5ms 前に落雷を予知することができるが、さらに感度よく風車先端の発光強度を測定できればもっと早い時間に予知することが可能となるかもしれない。

4.4 前兆電界

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、地上電界から落雷の開始を知ることができないかと考えた。風車から東西方向-3km～+3km、南北方向+1km～-3km の範囲内での落雷前の地上等電界強度マップの時間変化の一例を図 8 に示す。風車は座標(0, 0)の位置にある。発生した落雷は風車からの自発型正極性上向き雷である。落雷の 50 秒前では全ての範囲が負電界を示しているが徐々に正電界領域が増加し、直前では全面積の 52%が正電界領域となり落雷に到っている。一方、負極性落雷の場合は負電界領域が占める割合が高くなってから落雷に到っている場合と負電界領域の占める割合がそれほど変化なく落雷に至る場合とがある。ただし、エリア内の最大電界は空間電荷のために高くならず、せいぜい $\pm 5 \text{kV/m}$ 程度である。

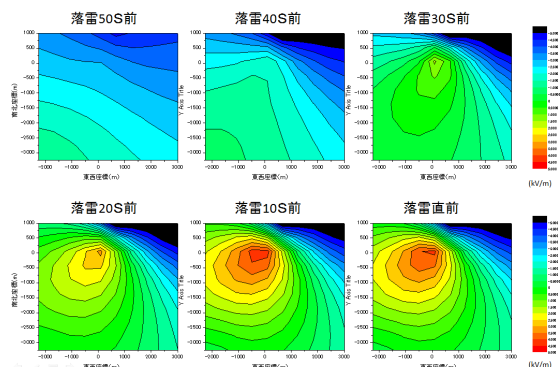


図 8 風車への上向き正極性落雷発生前の地上等電界強度マップの時間変化

正電界領域と電界平均値の時間変化グラフを図 9 に示す。正領域割合は、負極性落雷

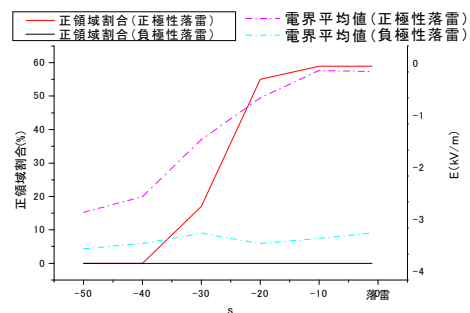


図 9 落雷前の正電界領域の割合とエリア内平均電界の時間変化

が50 s前から落雷直前に至るまで0%なのに対して、図8に示した正極性落雷は40 s前では0%なのに落雷直前では60%にもあがっているのがわかる。それに伴い地上電界の平均値もあがっている。今後これらのデータを数多く集めれば少なくとも10秒前に落雷を予知することが可能となると思われる。

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12件)

- ① D.Wang and N.Takagi, Characteristics of winter lightning that occurred on a windmill and its lightning protection tower in Japan, Proceedings of 3rd International Symposium on Winter Lightning, 査読有, 2011
- ② D.Wang and N.Takagi, Initiation characteristics and protection of upward lightning discharges, Proceedings of 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, Toyama Japan, September, 査読有, 2010, 22-26
- ③ D. Wang, N. Takagi, Y. Takaki, A comparison between self-triggered and other-triggered upward lightning discharges, Proceedings of 30th International Conference on Lightning Protection, 査読有, Paper number 1206, 2010, 1-4
- ④ D.Wang and N.Takagi, Characteristics of lightning to a wind turbine and its lightning protection tower, 4th International Workshop on Electromagnetic Radiation from lightning to tall Structures, Montreal Canada, 査読有, July 29, 2009
- ⑤ D.Wang, N.Takagi, W.Lu, Y.Zhang, On the lightning protection of high structures, Proceedings of the IAMAS/IAPSO/IACS 2009 Joint Assembly, Montreal Canada, 査読有, M17, July 19-29, 2009, 00147
- ⑥ S.Yoshida, M.Akita, Y.Nakamura, T.Morimoto, T.Ushio, Z.-I.Kawasaki, D.Wang and N.Takagi, Evidence of negative leaders prior to fast rise ICC pulses of upward lightning, J. Atmos. Elect., 査読有, Vol.29, No.1, 2009, 13-21
- ⑦ W. Lu, D. Wang, Y. Zhang, N. Takagi, Two associated upward lightning flashes that produced opposite electric field changes, Geophysical Research Letters, 査読有, VOL. 36, L05801, 2009, doi:10.1029/2008 GL036598R
- ⑧ S. Yoshida, T. Morimoto, T.Ushio, Z.-I. Kawasaki, T. Torii, D. Wang, N. Takagi, and T. Watanabe, High energy photon and electron bursts associated with upward lightning strokes, Geophysical Research Letters, 査読有, VOL. 35, L10804, 2008,

doi:10.1029/2007 GL032438

- ⑨ D. Wang, V.A. Rakov, N. Takagi, and T. Watanabe, A discussion of traveling waves involved in the return stroke process. J. Atmos. Electr., 査読有, Vol.28, No.2, 2008, 71-77
- ⑩ D.Wang, N.Takagi, T.Watanabe and M.Hashimoto, Observed Characteristics of the lightning striking on a windmill and its lightning-protection tower, Proceedings of 29th International Conference on Lightning Protection, Uppsala, Sweden, 査読有, 9c-1, 2008, 1-7
- ⑪ D.Wang and N.Takagi, Characteristics of Upward Bipolar Lightning Derived from Simultaneous Recording of Electric Current and Electric Field Change, Proceedings of URSI, 査読有, 2008, E06.2
- ⑫ D. Wang, N. Takagi, T. Watanabe, H. Sakurano, and M. Hashimoto, Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower, Geophysical Research Letters, 査読有, VOL. 35, L02803, 2008, doi:10.1029/2007 GL032136

[学会発表] (計12件)

- ① 安藤豪規、王道洪、高木伸之、自発型と他発型上向き雷放電の進展様相の比較、日本大気電気学会、2010年7月
- ② 鈴木聖吾、王道洪、高木伸之、風車施設落雷時の電界マッピング、日本大気電気学会、2010年7月
- ③ 高木 良樹、王道洪、高木伸之、自発型と他発型上向き雷放電を引き起こした雷雲電界の比較、日本大気電気学会、2010年7月
- ④ 刘睿子、王道洪、高木伸之、上向き雷の枝特性に関する研究、日本大気電気学会、2010年7月
- ⑤ 渡辺智文、王道洪、高木伸之、上向き正極性リーダに伴うパルス放電の特性、日本大気電気学会、2010年7月
- ⑥ 山本泰裕、王道洪、高木伸之、上向き雷の電流波形の微細構造について、日本大気電気学会、2010年7月
- ⑦ D. Wang and N. Takagi, Optical propagation characteristics of a positive cloud-to-ground lightning flash, 地球惑星連合、2010年5月
- ⑧ 安藤豪規、渡辺智文、丹羽政仁、王道洪、高木伸之、正極性落雷の進展特性、日本大気電気学会、2010年1月
- ⑨ 鈴木聖吾、曾根聡敏、高木伸之、王道洪、上向き雷の開始、進展に関する研究、電気学会東海支部連合大会、2009年9月
- ⑩ 澤田憲和、王道洪、高木伸之、上向き雷の電流特性、電気学会東海支部連合大会、2009年9月

- ⑪ 澤田憲和、王道洪、高木伸之、上向き雷の電流特性、日本大気電気学会、2009年7月
- ⑫ 吉田 覚、王道洪、高木伸之、上向き雷の初期連続電流とその発光強度との相関、日本大気電気学会、2009年1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:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等 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