

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760226

研究課題名(和文) 高速度カメラを用いたスカイツリーでの上向き雷の観測

研究課題名(英文) Observation of upward lightning hitting Tokyo Skytree by using high-speed camera

研究代表者

齋藤 幹久 (Saito, Mikihisa)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：90599218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、構造物への着雷様相を観測することを目的として行われた。構造物への着雷様相の観測は送電線や風力発電用風車の耐雷設計の他、避雷針の保護範囲等の検討を行うために大変重要であるが、雷は何時何処に落ちるか判らないため、近年高速度カメラが発達してくる以前は、観測する事が大変難しかった。上記の目的のために、本研究では、高速度カメラを用いた東京スカイツリーへの着雷様相の観測を行った。2013年12月までに11例の雷放電が観測され、その多くは耐雷設計上最も重要である下向き落雷であった。

研究成果の概要(英文)： Observation of lightning attachment process is necessary for improvement of lightning protection of transmission lines and wind turbines, and for a survey of protective zone of a lightning rod. However, without a high-speed camera, which developed recently, the observation was quite difficult. Because no one knows the time and place of lightning strokes.

A high-speed camera was used for the observation. As of December of 2013, 11 lightning flashes were observed. Most of the lightning flashes were negative downward flashes, which is most important for lightning protection.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：雷 第一雷撃 高速度カメラ 東京スカイツリー

## 1. 研究開始当初の背景

現在、日本海沿岸では冬季に上向き雷が多く観測され、風力発電用風車に大きな被害を与えて問題になっている。今後は風力発電用風車の大型化に伴い、太平洋沿岸の風力発電設備でも被害が発生する可能性がある。上向き雷は海外でも研究が行われているが、各国によってパラメータが異なることが明らかになっており、日本の上向き雷の対策には、日本国内での観測が欠かせない。

上向き雷以上に重要なのが下向き落雷の第一雷撃の観測である。これは送電線等の耐雷設計に必要である。しかし、下向き落雷の第一雷撃は何処に何時落ちるか判らないため、観測は困難であり、研究当初はこの下向き落雷の第一雷撃は解析対象として想定していなかった。これに対して上向き雷は高構造物に集中して発生するため、観測が比較的容易である。そのため、本研究は太平洋側の高構造物である東京スカイツリーからの上向き雷の観測を行うという目的で開始した。

しかし、4.研究成果で述べるとおり、科研費交付期間中には下向き落雷の第一雷撃が多く観測されたため、研究当初の計画から研究範囲を広げて解析を行った。

## 2. 研究の目的

科研費交付期間中に下記の事項を明らかにすることを目的とした。

- (1) 上向き雷の自動観測手法の確立
- (2) 上向き雷の伸展様相の各パラメータの解析。

上記に加え、本研究の交付期間中では上向き雷よりも重要な下向き落雷の観測が行えたため、以下の目的を追加した。

- (3) 下向き落雷の自動観測手法の確立
- (4) 下向き落雷の着雷様相の解析

## 3. 研究の方法

### (1) 高速度カメラによる観測

東京スカイツリーから 1.2 km 南南西の位置に 5672fps の高速度カメラ (Fastec HiSpec1) を設置して観測を行った。観測は 24 時間無人で行われており、落雷に伴う光および磁界変化でトリガし、データを保存する。時刻は GPS 時計で管理されているため、他の観測機器で得られたデータと合わせて解析することも容易である。

### (2) 他の観測機器のデータとの照合

東京スカイツリーへの落雷は 3. (1) で述べた高速度カメラだけではなく、他のシステムでも観測されており、複数の観測システムで得られたデータを合わせて解析を行う。他の観測システムを以下①～③に示す。それぞれ、無人で観測を行っており、GPS 時計で時刻管理されている。また、①～③の観測機器は(一財)電力中央研究所によって運用され

ている。

### ①雷電流観測システム

東京スカイツリーの 497m に雷電流観測システムが設置されている。このシステムは高周波用と低周波用と 2 つ設置されており周波数帯域は高周波用が 1.5 kHz～5 MHz、低周波用が 0.5 Hz～250 kHz である。

### ②電磁界観測システム

東京スカイツリーから 27 km、57 km、101 km 離れた箇所に電界観測システムおよび磁界観測システムを設置している。観測している周波数帯域はそれぞれ 750 Hz～1 MHz である。

### ③民生用デジタルカメラを用いた光学観測システム

東京スカイツリーから 4.4 km 西北西に離れた位置から民生用のデジタルカメラ (600 fps) で光学観測を行っている。3. (1) で述べた高速度カメラと合わせて 2 方向から観測を行うことで、雷放電路の 3 次元的な構造が観測可能となる。

## 4. 研究成果

研究当初には海外での報告から、上向き雷のデータが殆どを占めると考えられた。そのため、本研究は上向き雷の観測を目的として開始したが、科研費交付期間中に観測されたデータの多くが、耐雷設計上最も重要である下向き落雷の第一雷撃、およびそれに伴う後続雷撃であった。そこで、解析対象をより重要な下向き落雷にまで広げて研究を行った。

なお上向き雷が発生しないというわけではなく、高速度カメラでの観測を開始する直前には、多くの上向き雷が電流観測システムで観測されていた。また交付期間中の期末である 2014 年 3 月にも観測された。そのため、今後も観測を継続することにより上向き雷のデータの蓄積および解析は可能であり、結果がまとまり次第報告する予定である。

負極性下向き第一雷撃は夏季に多く観測される一般的な落雷であるが、何時何処に落ちるのか判らないため、観測そのものが難しく、今回のように光学、電流、電磁界が同時に観測されたのは海外でもほとんど報告が無い。そのため、今回多くのデータが得られた事は望外の大成功であると言える。得られた主な結果は以下である。

### (1) 負極性下向き第一雷撃の観測

東京スカイツリーへの負極性下向き第一雷撃の着雷様相の光学観測および、電流、電磁界の同時観測に成功した。

①負極性下向き第一雷撃の雷放電路の 3 次元的な観測に成功した。今回は 3. (1) で述べた高速度カメラおよび 3. (2)③での民生用カメラを用いた 2 方向からの光学観測を行うことで 3 次元的な雷放電路の長さを観測する事が可能であった。2 次元的な放電路の様相や、電流や電磁界が同時に観測されていない結果は高速度カメラの発達に伴い、国内外で多く報告されているが、3 次元的な放電路

の観測結果は少なく、貴重な結果である。

放電路の形状は落雷に伴い発生する電磁界変化波形に影響する。その結果、電磁界変化波形を用いて、遠方から落雷点の位置を推測する落雷位置標定システムの標定精度にも影響する。今後は観測データを蓄積し、3次元的に観測された雷放電路の形状、同時に観測された電磁界変化波形をあわせて解析し、落雷位置標定システムの標定精度に関する研究を行っていく。

②下向き落雷の第一雷撃に伴う下向きリーダが雷雲から大地に伸展するにしたがい、東京スカイツリーの頂部から Upward connecting leader が伸展する様子が観測された。この Upward connecting leader の長さは海外の光学観測のみによる観測結果より、100m程度と推測されていたが、今回の観測例では3次元的な長さで400m以上伸展する例も多く観測された。また、3次元的な伸展速度が光速の1/1000程度であることが確認された。下向き落雷の第一雷撃が、構造物へ着雷する時に、どの程度の長さ、どの程度の速度で Upward connecting leader が伸展するかは送電線等の耐雷設計に重要なパラメータである。今回は電流波形も同時に観測されたので、今後の解析で各パラメータと電流値との関係を明らかにする。

### (2) 近傍への落雷に伴う現象

東京スカイツリー近傍への落雷に伴い、東京スカイツリー頂部から Unconnected upward leader が伸展する様子が観測された。Unconnected upward leader は前述の Upward connecting leader が雷雲から下向きに伸展してくる下向き第一雷撃に繋がらず伸展途中で終わったものである。伸展速度や長さは upward connecting leader と同様であった。この Unconnected upward leader が存在することによって、東京スカイツリー塔内の誘導電流が変化する可能性がある。

建物の近傍に落雷があると、建物内部には雷電流に伴う電流が誘導される。この誘導された電流は建物内部の電気機器などに影響を与える可能性があるため、どのような電流が流れるかを推測することは耐雷設計上重要である。しかし、前述の様に下向き落雷は何処に何時落ちるか判らないため、この建物内部を流れる誘導電流を計測することも大変難しい。そのため、実測を伴わない計算のみであれば国内外を問わず多くの報告があるが、実測結果の報告は少ない。今回の観測では、スカイツリー内部に誘起された電流を計測できただけでなく、東京スカイツリー頂部から伸展した Unconnected upward leader も同時に観測することが出来た。今後はデータを蓄積することによって、塔体内を流れる電流と Unconnected upward leader の関係をより明らかにしていく。

### (3) 上向き雷の観測

当初観測を予定していた上向き雷に関しては2014年3月に観測された。今後データを蓄積し、報告する。

### 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 2 件)

- ①石井勝, 齋藤幹久, 曾根原健夫, 「高速度カメラで観測された東京スカイツリーへの下向き雷撃」, 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 134, No. 1, pp.84-85, (2014), 査読有り, 10.1541/ieejpes.134.84
- ②三木貫, 新藤孝敏, 浅川聡, 本山英器, 石井勝, 齋藤幹久, 鈴木祐介, 福田和也, 「東京スカイツリー®で観測された雷電流波形」, 電気学会論文誌B, Vol.133, No.5, pp. 495-496 (2013), 査読有り, 10.1541/ieejpes.133.495

[学会発表] (計 6 件)

- ① M. Saito, M. Ishii, A. Sugita, “Comparison of directly measured current and JLDN data associated with lightning strokes hitting Tokyo Skytree”, International lightning detection conference (ILDC), Tucson Arizona USA, (2014/03/18-19)
- ②M. Ishii, M. Saito, T. Miki, D. Tanaka, T. Shindo, A. Asakawa, H. Motoyama, Y. Suzuhigashi, H. Taguchi, ” Observation of lightning at Tokyo Skytree”, International lightning detection conference (ILDC), Tucson Arizona USA, (2014/03/18-19)
- ③齋藤幹久, 石井勝, 三木貫, 田中大樹, 新藤孝敏, 浅川聡, 本山英器, 曾根原健夫, 鈴木祐介, 田口浩司, 「高速度カメラで観測された東京スカイツリーへの雷撃」, 電気学会高電圧研究会, 和歌山 (2014/01/23-24)
- ④M. Ishii, M. Saito, T. Miki, D. Tanaka, T. Shindo, A. Asakawa, H. Motoyama, Y. Suzuhigashi, H. Taguchi, “Reproduction of electromagnetic field waveforms and tower currents associated with return strokes struck Tokyo Skytree”, XII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Belo Horizonte, Brazil (2013/10/07-11)
- ⑤齋藤幹久, 石井勝, 三木貫, 新藤孝敏, 浅川聡, 本山英器, 鈴木祐介, 福田和也: 「東京スカイツリーで観測された帰還雷撃に伴う電磁界変化波形の再現」, 電気学会高電圧研究会, 京都 (2013/01/24-25)
- ⑥ T. Miki, T. Shindo, A. Asakawa, H. Motoyama, M. Ishii, M. Saito, Y. Suzuhigashi, K. Fukuda, “Lightning

