

上向き雷放電

Upward Lightning

石井 勝

Masaru Ishii

東京大学

The University of Tokyo

Abstract

Upward lightning is initiated from tall objects on ground. It is not a usual form of lightning discharges. Nevertheless, tall objects have been the platform for observation of lightning current; therefore, direct observation of current of upward lightning has been carried out since 1930s. Rocket-triggered lightning is also upward lightning. So, upward lightning has been regarded as an important phenomenon for lightning research, rather than a dangerous phenomenon until recently. Now it is known that in winter, upward lightning is the principal cause of severe transmission-line faults and of damages of wind turbines on the coastal area of the Sea of Japan. Lightning observation at Tokyo Skytree is also reported on.

1. はじめに

積乱雲の中での電荷分離によって発生する自然雷のうち、災害と関わりが深いのは雲と大地の間の放電である。この落雷の形態の中で圧倒的に多いのは、雲の中の高電界領域で放電が開始し、下降する超高電圧のリーダ先端が大地に接近して、リーダ先端と大地の間でファイナルジャンプと呼ばれる最終的な放電が起こり、リーダと大地が電氣的に接続されることで放電路が完成される下向き落雷である。地球上の落雷の恐らく 9 割以上が、雲の負極性電荷が大地に流入する負極性下向き落雷で、残りの大部分が正極性下向き落雷である。更にその残り、恐らく落雷の中の 1%にも満たない形態が、この講演の主題の上向き雷放電である。上向き雷放電は、リーダが地上の構造物から発生し、雲の中の電荷が集積している領域に向かって伸展して行く現象である。落雷全体の中ではきわめて稀な現象と位置づけることができるが、実は雷研究、そして近年は災害との関わりが深い。

2. 上向き雷放電の発生

上向き雷放電は、地上の背の高い構造物、樹木などからしか発生しない。雷雲が上空にあつて、地表面での静電界が強くなると、地上の草木など、あらゆる尖ったものの先端から容易にコロナ放電が発生する。尖端放電と呼ばれるこの現象は、地表面近傍に数十 m の厚さの空間電荷層を形成し、地表面の静電界を弱める方向に作用する。上向き雷放電のリーダは容易には発生しない。それが発生するためには、発生元の構造物の高さがこの空間電荷層の厚さを上回り、かつ強い静電界が存在する必要がある。雲からの下向きのリーダ先端が大地面に近づくと、地表面の電界はきわめて高くなり、水面からでも上向きのコネクティングリーダが発生する。これは長さが数十 m 以下で、伸展速度も速い。上向き雷放電のリーダは、夏季には特に、静電界のみで発生することはほとんどなく、強い静電界のもとでの、トリガとなる近傍での雷放電による電界変化や、同じ条件下での遙か上空における下向きリーダや雲放電の放電路の存在が発生のきっかけとなる。一度リーダが発生してしまえば、強い静電界のもとで、 $1 \times 10^5 \text{m/s}$ のオーダの速度で上方の電荷領域に向け、リーダは伸展を続ける。

ロケット誘雷では、接地したワイヤをつけたロケットを、地表の静電界が十分高くなった状況で打ち上げると、ロケットが百数十 m 以上の高さまで上昇した頃に、ロケットから上向きリーダが伸び出し、その後、上空に下降するリーダがない場合の自然の上向き雷放電と似た経過をたどる。自然の上向き雷放電を発生させる平地の高構造物よりも低い高さで、上向き雷放電がトリガできるのは、高構造物と異なって、上昇するロケットの先端付近にコロナ放電による空間電荷が存在しないためと推測される。

ひと頃はレーザ誘雷が話題になった。これは空間に部分的に導電性の細い通路を形成し、その上下端からリーダを発生させて雲と大地を結ぶ雷放電を誘導しようという目論見である。ロケット誘雷実験では、ワイヤの地上側を大地に接続せず、数十 m のワイヤをロケットで引き上げることによって誘雷する技法があり、成功を収めている。飛行中の航空機への落雷や、大型ロケットの上昇中の被雷も、同様のメカニズムで生じる。しかしレーザ誘雷の成功例はこれまで皆無である。レーザ誘雷が成功するためには、少なくとも数十 m 以上の長さの導電性の通路を空間に形成し、その導電性がリーダ電流で維持できるようになるまで保たれる必要がある。

下向きリーダが最初に雲から下降してくる通常の負極性落雷では、ステップトリーダに続く最初の帰還雷撃は後続雷撃とやや異なる性質を持ち、その電流も平均的に大きい。このため耐雷設計上重視されるのは第一雷撃の電流パラメータである。また雷しゃへいの問題は、ステップトリーダの地上の構造物との結合過程をどうモデル化するかの問題である。上向き雷は、自然雷では圧倒的な少数派にもかかわらず、高構造物に集中的に落ち、人工的に発生させることもできるため、電流の直接観測や至近距離からの光学観測等は比較的容易である。しかし第一雷撃がないため、自然雷では圧倒的な多数派で重要な第一雷撃の研究が、上向き雷よりも進んでいないのは、皮肉な話である。

3. 夏季雷における上向き雷放電

夏季の負極性上向き雷放電の観測例は多く、解説の文書にも事欠かない。正極性上向きリーダの上昇に伴って、地上に流れる電流は数十 A から数百 A へと増大してゆく。リーダ上昇速度は光速の 1/1000 程度の桁で、放電現象としては非常に遅く、雲の中の電荷領域に達するには 10 ms 以上を要する。ロケット誘雷実験ではこの電流で金属のワイヤが蒸発するが、その跡には直線状の放電路が形成されるので、以後は自然の上向き雷と同様の経過をたどる。このリーダ電流(ICC; Initial Continuous Current)のみで放電が終わってしまうこともあれば、一度電流が切れてから、まだ高温の空気が残っている放電路の跡を上方からダートリーダが進行してきて、帰還雷撃を発生させることもある⁽¹⁾。Berger によるスイスの山上の鉄塔における観測⁽²⁾では、負極性上向き雷の中で帰還雷撃を含むものは 1/4 ほどであった。後述する日本の冬季の上向き雷放電では、それらは 1 割に過ぎない。

正極性上向き雷放電は、通常自然雷においてと同様に少数派である。Berger の夏季のデータでは上向き雷の 16% で、両極性上向き雷は 3%。残りは負極性上向き雷である。通常の下向きリーダで開始する落雷で正極性落雷が少ない理由は、夏季には雷雲の下部に正電荷が溜まるタイプの雷雲が少数派のためだが、それに加えて、負極性上向きリーダが発生するには正極性上向きリーダの発生より強い電界が必要という放電の性質が影響する。これらを勘案すると、Berger のデータでの正極性上向き雷放電の割合は多い。後述する日本の冬季雷では、自然雷の正極性下向き落雷の割合が全体の 3~4 割に達するにもかかわらず、正極性上向き雷の割合は 14% であった⁽³⁾。

Berger による正極性上向き雷の電流パラメータは、耐雷設計において特異な位置を占めている。170 ほどの正極性上向き雷放電電流が記録されているようだが、電流データとして議論されているのは、わずか 30 前後である。下向きの正極性雷電流は全く観測されなかったと解釈されている。この 30 前後の

正極性雷電流の中に、かなり大きなピーク電流、電荷量のデータがふくまれており、データ母数を 30 前後とすると、電流パラメータの最大値の 127 kA、348C、15 MJ/Ω が発現する確率が 5%ほどになってしまう。これは負極性下向き落雷の電流パラメータの 5%値よりも大きい。しかし正極性雷電流の信頼できるデータは他には皆無で、耐雷設計上無視もできないため、雷防護の国際規格では、正極性雷電流パラメータとして、このデータから類推したと見られる 200 kA (10/350μs), 300 C, 10 MJ という数値が 1%値として示されている⁽⁴⁾。これらの数値は負極性第一雷撃の 100kA (1/200μs) という 1%値よりも過酷なため、世界中の SPD (Surge Protective Device) や風力発電用風車の設計は、事実上わずか 30 前後の正極性上向き雷の電流の観測結果に支配されていることになる。これら正極性で大電流の上向き雷放電は、まだ雲の中にある下降するリーダ、または雲放電の放電路に向けて、上向き負極性リーダが伸びたものとする見方⁽¹⁾もある。実際、冬季の上向き雷放電電流波形にも、ICC の小電流が継続している最中に帰還雷撃電流に酷似したパルス電流が重畳する例があり、下降するリーダと上向きリーダが上空で結合したと解釈することが可能である。

4. 冬季雷

日本の冬季雷の、正極性落雷が多く、上向き雷が多発するという特徴は、最初に学界に報告されたときから指摘されていた⁽⁵⁾。しかし上向き雷の電流パラメータについては、Berger の観測データから受ける小電流のものが多くという印象が強く、冬季雷に対する耐雷設計の上では上向き雷は無視され続けてきた。このため 1970 年代に日本海側に建設された 500kV 送電線の冬季の重大事故の多発や、1990 年代に多発した風力発電用風車ブレードの焼損、爆裂も、上向き雷放電と結び付けられることはなかった。真相が明らかにされたのは今世紀になってからである。

冬季の送電線の重大事故の原因は、送電線に GPS を使用したリレーシステムが導入され、ms 単位で事故発生時刻が記録されるようになってから特定された。事故発生時刻には雷放電によって発生したと思われる強い電磁界パルスが、雷放電観測システムによって記録されていた。それらの電磁界パルスは 200 kA 級の帰還雷撃から発生するパルスに匹敵する強さをもつが、波形は帰還雷撃に伴うものとは顕著に異なっていた。それらは従来未知の上向き雷放電によるものと推測され、事故発生時刻との同時性が秒単位の事象まで調査対象を拡げた結果、53 の雷事事故事例が収集された。うち通常の下向き正極性落雷の電磁界波形が記録されていたのはわずか 3 例、下向き負極性落雷の電磁界波形は皆無、残りは GC (Ground to Cloud) 放電と名付けられた、上向き雷放電の放電路を雲中から大電流パルスが下降してくると推測される新発見の現象であった⁽⁶⁾。GC 放電は正極性、負極性ともに存在するが、特に負極性 GC 放電は特徴的な電磁界波形を示す。その電流と推測される雷電流波形も観測されているが、600 超の上向き雷放電電流波形データの中にわずか 2 例ほどしか見つかっておらず、上向き雷放電の中でも稀な現象である。そのため電流波形と電磁界の同時観測記録はまだ得られていない。

送電線に重大事故を発生させる雷電流は、立ち上がり時間がせいぜい 20μs 以内で、200 kA 級の大振幅のパルスである。それに対して風車のブレードの大被害をもたらす雷電流はエネルギーが大きいものと推測された。大エネルギーの雷放電は電流継続時間が長く、10ms から 1 秒近くにも及ぶことがあり、電磁界ではそれらの特徴は観測できない。このため上向き雷放電が多発する高構造物で電流観測を行うことが、現在でもほとんど唯一の信頼できる観測手段である。日本では 2008 年からの 5 年間に 27 か所の風力発電用風車で落雷電流の直接観測が行われ、うち日本海沿岸の 21 か所で 700 近い雷電流データが記録された。10 データを除き、それらは 10 月から 4 月までに記録され、その中で下向き雷に伴う電流波形はわずか 2 例であった⁽³⁾。風車ブレードの地上高はせいぜい 100m 程度で、平地に建設されたも

のが多い。これで風力発電設備の冬季の雷事故も、ほとんどが上向き雷放電によることが証明された。

冬の日本海側は世界的にも特異な寒冷期の雷の多発地帯だが、それでも通常の下向き落雷の雷放電密度は夏の 1/5 以下の、せいぜい 0.4/km/season と低い。そのため平地の 100m 以下の構造物からの上向き雷放電が多発することは予測できず、人工物に雷被害が多発する結果を招いた。従来の高構造物への落雷数の予測手法は夏季雷に対するもので、雷放電密度を別にすれば、地形の影響も含めた高構造物の等価的な高さのみがパラメータとなっており、冬季雷には適用できない。雷雲内の電荷が蓄積される高度も考慮した、高構造物からの上向き雷の発生数を予測する手法が、日本から提案されている⁽⁷⁾。

5. 東京スカイツリーでの雷放電発生状況

高さ 634 m の東京スカイツリーには上向き雷放電が多発すると予測されたので、計画段階から電流観測装置を取り付ける交渉をタワーの事業主体と進め、2012 年 2 月末から 497 m 点に取り付けたログスキューコイルで観測を開始した。2013 年 8 月の原稿執筆時点までに 16 回の、すべて負極性の落雷が確認され、うち 13 回で電流記録が得られている。これまでの各所の高構造物での雷観測結果から類推して、9 割以上は上向き落雷であることを予想していたが、これまでのところ上向きが 9 回、下向きが 7 回という、予想と大幅に異なる状況にある。また 5 月の落雷が 7 回で最多というのも、予想外であった。上向き雷電流のデータ収集を主な目的として観測装置を設計し、それに関しては、ほぼ予想通りのデータが取れているが、思いがけず下向き雷のデータが収集できているのはうれしい予測違いである。

6. おわりに

これまでに研究がかなり尽くされた感のある高構造物での上向き雷現象だが、日本の冬季雷、東京スカイツリーでの雷現象の様相は、それまでの研究からは予測できなかった。従来、十分な数のデータが収集されている観測地点はいずれも緯度が高く、夏季雷が主な観測対象だったのに対し、冬季雷は寒冷期の雷、東京は平地の観測地点では最も緯度が低く、予測が外れる要素は十分に内包していた。東京スカイツリーの雷電流観測装置は、従来あまり重視されていなかった電流の低い周波数成分も記録できる設計としたため、その面でも新たなデータが収集されている。雷現象には未知の要素がまだ多く残されており、新たな観測装置の投入が新たな発見を生むと信じられる。

参考文献

- (1) V. A. Rakov, M. A. Uman, “Lightning: Physics and Effects”, Cambridge Univ. Press, New York, 2003.
- (2) K. Berger, “Blitzstrom - Parameter von Aufwaltsblitzen”, Bull. SEV, Vol. 69, pp. 353-360, 1978.
- (3) M. Ishii, M. Saito, D. Natsuno, A. Sugita, “Lightning current observation at wind turbines in winter in Japan”, Int. Conf. on Lightning and Static Electricity, Seattle, SEA13-67, Sept., 2013.
- (4) IEC 62305-1 “Protection against lightning — Part 1: General Principles”, 2010-12.
- (5) T. Takeuti, M. Nakano, M. Nagatani, H. Nakada, “On lightning discharges in winter thunderstorms”, J. Met. Soc. Japan, vol. 51, pp. 494-495, 1974.
- (6) M. Ishii, M. Saito, “Lightning electric field characteristics associated with transmission-line faults in winter”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol.51, No.3, pp.459-465, 2009.
- (7) 齋藤幹久, 石井勝, 大西淳之, 藤居文行, 松井倫弘, 夏野大輔: 「風力発電用風車に対する冬季雷による雷撃頻度」電気学会論文誌 B, Vol. 131, No. 12, pp.979-985, 2011.