

富士山雷観測によるリーダの進展モデル

安本勝¹, 鴨川仁², 佐々木一哉³, 土器屋由紀子¹

1. 富士山環境研究センター, 2. 静岡県立大学, 3. 弘前大学

1. はじめに

富士山測候所の電源は、図 1 に示すように高圧ケーブルを山麓から引込み、測候所と山麓接地極を繋ぐ接地線が併設されている。高圧ケーブルの内蔵接地線も測候所と山麓を繋いでいる。筆者らはこの測候所から山麓側接地極に繋がる接地線の電流測定による雷現象観測を行っている。ここではことわりが無い限り、負極性雷を扱い、接地線電流方向は山麓側を正とする。接地線の電流は、高圧ケーブル内蔵接地線の電流測定を行い校正値との積により全接地線電流を求めている。高圧ケーブル内蔵接地線電流測定は 2012 年より実施しており、測定系は改良を重ね現在に至っている。2017 年

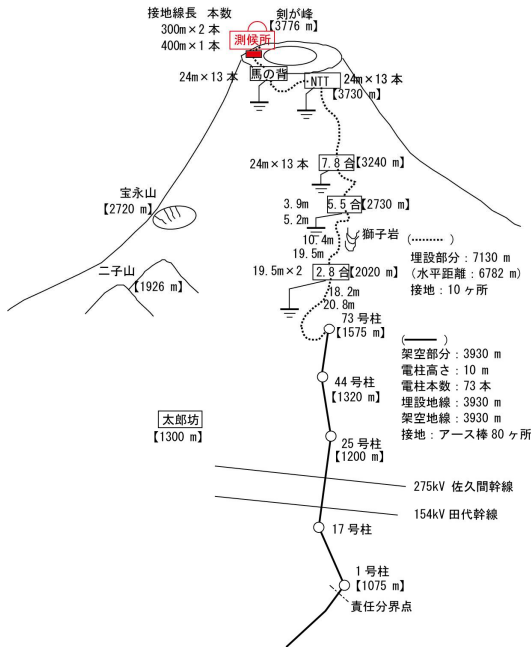


図 1 測候所接地線電流測定箇所 (), 埋設高圧ケーブル・接地線, 及び接地箇所

にトリガーはオフセットの影響を受けないように AC 結合を導入することで雷現象の高感度で安定な測定を可能にしている。本観測系は、複数の雷現象による接地線電流を同時に測定することが可能になっている。電磁誘導と静電誘導による接地線電流からリーダ進展の様子を知ることができ、本報告はこれがどのような進展モデルにした場合に反映されることになるのか考察を試みた。

2. 観測できる雷現象

今迄の観測から、観測できる雷現象による接地線電流は、図2に示すように、対地雷では(1)測候所直撃雷電流、(2)測

候所電極捕集電流、(3)山麓側落雷による逆流電流、さらに(4)雷放電路電流との電磁結合による電流、及び(5)雷雲による測候所誘導電荷量変化による静電誘導電流があることが分かっている。

測候所周辺の雷現象による接地線電流は、一般的に対地雷、電磁誘導、及び静電誘導の3現象による接地線電流が重

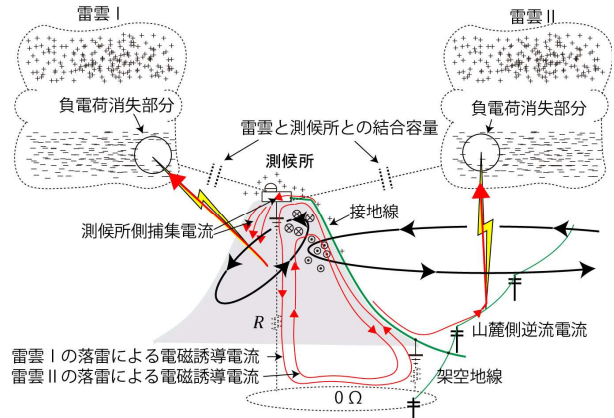


図 2 接地線に電流を流す雷現象 (負極性雷)

畳し観測される。また対地雷電流が流れない雲放電は電磁結合と静電誘導が重畳した接地線電流が観測される。本報告のステップリーダも雲放電と同様に電磁結合と静電誘導による接地線電流が観測される。近似的に、静電誘導は距離の2乗に反比例し、電磁誘導は距離に反比例する。そのため、遠方雷については対地雷の接地線電流の影響は無くなり、また静電誘導雷による接地線電流は急激に小さくなり、電磁誘導による接地線電流のみが観測されるようになる。測候所周辺の対地雷では対地雷電流に加えて、静電誘導電流と電磁誘導電流が一般的に同時に観測される。雷雲中の小放電は電磁誘導電流による接地線電流のみで電流持続時間によるパルス幅は小さい。

3. 接地線電流の測定方法

測候所と山麓を繋ぐ接地線は複数ある。その中で接地線電流の測定は確実に測候所と山麓を繋いでいることが分かっている図3の 6.6 kV 高圧ケーブル内蔵接地線に流れる電流を測定している。高圧ケーブルに電源電流が流れても零相電流が流れない理想的な条件であれば、測候所と山麓間の接地線に雷現象により流れる電流に電源電流の影響は無く、雷現象により流れる電流のみが観測できる。接地線電流測定は図 4 に示すログウスキーコイル電流計を用いている。高圧ケーブル内蔵接地線電流測定は高圧ケーブルを 2 分割ログウス

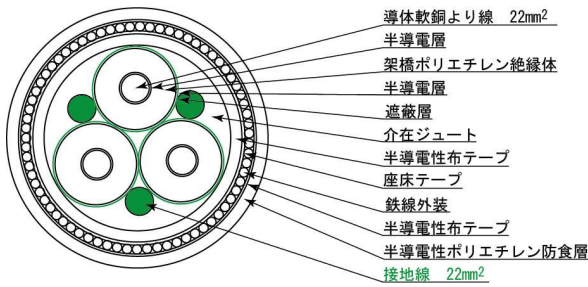


図3 富士山測候所引込高压ケーブルの構成
架橋ポリエチレン絶縁ポリエチレンシースー重鉄線外装ポリエチレン防食ケーブル

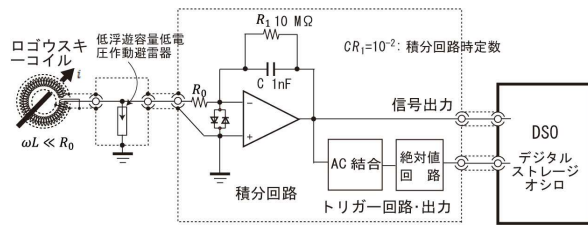


図4 高压ケーブル内接地線電流測定用ロゴウスキーコイル電流計の基本回路

キーコイルで挿み測定できるようにしている。接地線電流は併設接地線にも流れるため、高压ケーブル内蔵接地線に流れる電流に校正値を掛けることで全接地線電流を求めている。

トリガーは、信号の絶対値を取ることで正負いずれの極性の信号に対しても動作するように絶対値を取り、オフセット電圧の影響を受けないように AC 結合を採用し、安定な接地線電流測定を可能にしている。

雷現象による測定時間は、①対地雷(リターンストローク)、②上向き雷前兆現象、③ステップリーダと続くリターンストローク、④遠方雷リターンストローク・ステップリーダに適切な測定時間になるようにしている。

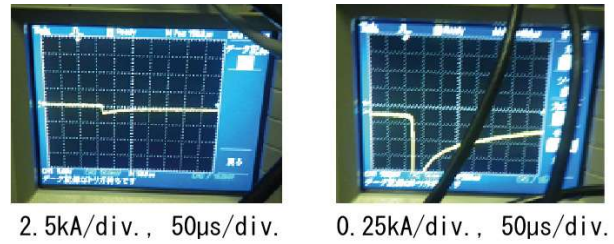
電流測定は、大電流用と小電流用の二つのロゴウスキーコイルを用い、それぞれに対応する現象で観測される電流を桁の単位で高分解能が得られるように設定し測定している。

4. 観測結果よるリーダの進展モデル

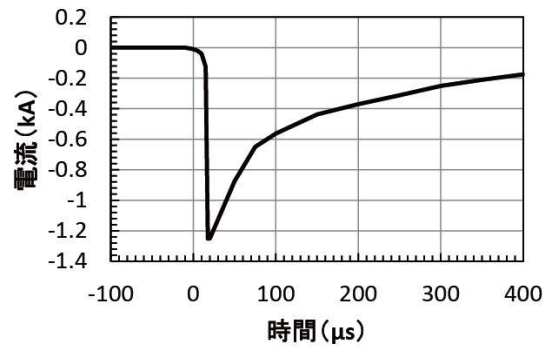
4.1 上向きリーダ

図5は2015年8月13日直撃雷が観測された。2012年より観測を開始して毎年夏期の約2ヶ月の観測期間で初めて観測された直撃雷である。この時に接地線電流に図6の前兆現象が観測された。

測候所のレーダドームがまだ活躍していた時に測候所にいた方の話として、避雷針を高くすることで被雷頻度は多くなることを聞いている。このことは落雷点が広範囲になる下向き雷による被雷ではなく、雷雲の高電界によって測候所の観測塔や避雷針にリーダが発生する上向き雷が多く生じていたの



(a) DSOによる観測波形



(b) DSO 観測波形からの再現波形

図5 2015年8月13日5時6分落雷による高压ケーブル内接地線観測電流

ではないかと推測している。

下向き直撃雷の場合、ステップリーダの進展範囲に測候所が入ることが必要になるが、リーダが測候所に近づかないと成立しにくく可能性としては小さく推測している。

上向き雷は大きな電荷量の雷雲により測候所の観測塔、または避雷針等の高電界発生個所にリーダが発生し、それが避雷針効果で伸びリターンストロークになったと推測される。

図6が図5の直撃雷の前兆現象として観測された接地線電流である。初期の部分①では電流は負方向で不安定な変動を伴い増加し、②から③、④と電流は連続的に負方向に大きく増加している。この急激な増加は直撃雷の立ち上がり部分のエッジが取れ丸くなっていることにも現れている。この前兆現象は、500 µs の測定時間で、測定は14秒台で3回、15秒台で1回記録された。前兆現象は、測定の都度 USB メモリーに記録される時間を考慮すると、最大で1秒を超えている。

観測結果から上向き雷のリーダの進展は連続的であり、約1秒持続することが示されたことになる。上向き雷の発生は測候所が山麓側接地極と接続し、測候所の電位は山麓電位であり電荷補給が山麓側から連続的になされるため発生し易いと考えられる。

もし、測候所で無く、十分な電荷補給が期待できない山体の場合、上向きリーダは進展できず、山体への落雷は下向き雷に限られるのではないかと推測している。

図7の⑤も上向き雷と考えられ観測された負の電流パルスはステップリーダによるもので、対向する上向きリーダに正の誘導電荷増加量が接地線電流積分値の負電荷により示さ

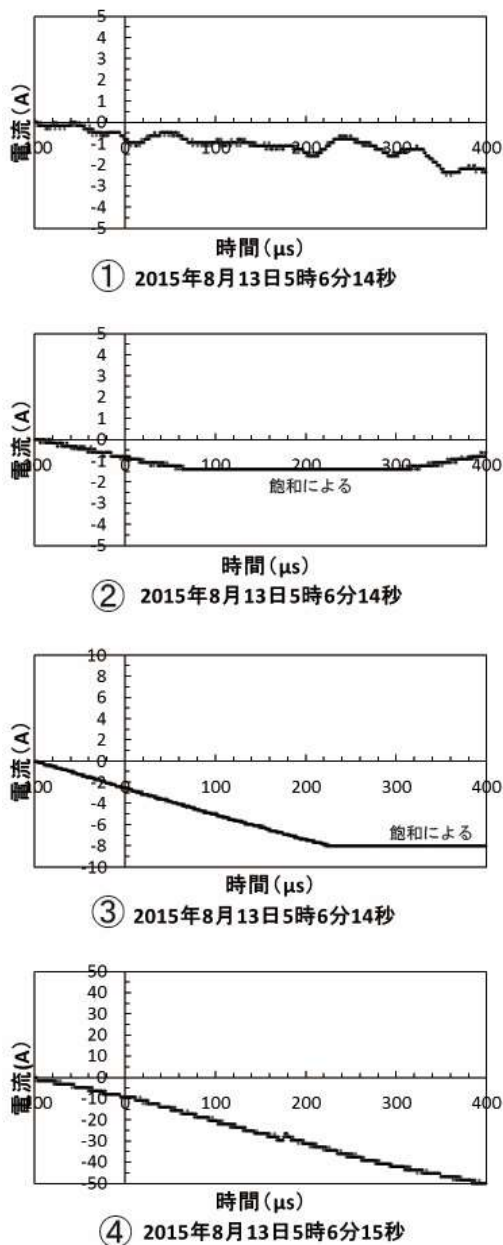


図6 2015年8月13日5時6分に観測された落雷初期の接地線電流

れている。リターンストロークまでの観測はされていないが、回合前の測候所直撃雷の上向きリーダとステップリーダ進展による測定例である。

4.2 ステップリーダ

図7に示す観測例の測定時間は、小さいため、全て前兆現象のみで終わっている。リターンストロークまでは測定できていない。この観測結果と他の観測結果も合わせ、ステップリーダモデルは以下のように考えている。

(1) ステップリーダの進展方向

図7の⑤以外の観測波形は全て鎖交磁束変換線より東にあり、接地線電流の先行パルス極性は正である。接地線電流

積分値のパルス終了後の値は立ち上がり前とほぼ同じであり、雷放電路電流の電磁誘導によるものであることが分かる。

図7の⑤の観測波形は鎖交磁束変換線より西側で観測されたステップリーダである。電流パルスの先行極性は負方向を示している。

図7の全ての観測結果の先行パルスの極性は同一と考えてよく、ステップリーダ放電路電流は同一方向に流れることを示し、同一方向への進展を示している。

図7の①～④、⑥の接地線電流の積分値の各パルス幅時間はステップリーダ電流が流れていることを示し、ステップリーダが進展している時間になる。パルス間の時間帯は休止時間で周囲の電荷をステップリーダ放電路に集めている時間になる。

ステップリーダの進展時の測定結果は、一般的に測候所から見た雷雲負電荷を減少させ、そのため測候所の誘導正電荷を減少させ、正の接地線電流を流すことを示している。⑤は測候所直撃雷でステップリーダと測候所からの上向きリーダが回合する前のリーダ電流による接地線電流とその積分値である。それぞれのリーダは対向するため、上向きリーダ先端にはおおきな正の誘導電荷が生じることを示している。

(2) ステップリーダに見られる休止と進展

放電路は導体と考えてよく雷雲中の電荷を放電路に集電し放電進行方向放電路端に大きな電界を作り、放電を進展させる。この進展で電荷密度が低下し放電路端電界低下を伴い放電を維持できなくなり進展は停止する。絶縁破壊を生じる電界であることが必要である。リーダ放電路に絶縁破壊を可能にする一定以上の電荷が集まると再度放電を開始する。リーダ進展に該当する測定電流積分値パルス幅、及び集電時間に該当するパルスとパルスのゼロ区間は、 $100\ \mu\text{s}$ ～ $300\ \mu\text{s}$ 、及び集電停止時間は $50\ \mu\text{s}$ である。これは既に報告されていることとほぼ合致する。

(3) リーダ放電路への集電機構

本観測系は、電磁誘導に対し高感度のため、短時間放電で終わる多数の小放電が観測された。この時に多数の短放電路が発生しそれらが再結合で消滅する前にさらに合体し、電荷を集め大きな放電路に成長すると考えられる。

多数の小放電路が激しい気流変化等によりほうきの穂先のように集まりほうきの柄のようにステップリーダ放電路に発展していくものと推測される。この現象には一端の放電路が伸びる方向に負電荷が集まりもう一端には正電荷を帯び、そこに雷雲中の激しい気流変化も加わりほうきの穂先が形成されるものと推測される。

激しい気流変化により放電路が変化することで放電路周囲の電荷を集めるスイープ効果、放電進展端の反対側に周囲の電荷を集める多くの放電分岐路が生じることにより主放電路に電荷を集めると推測される。

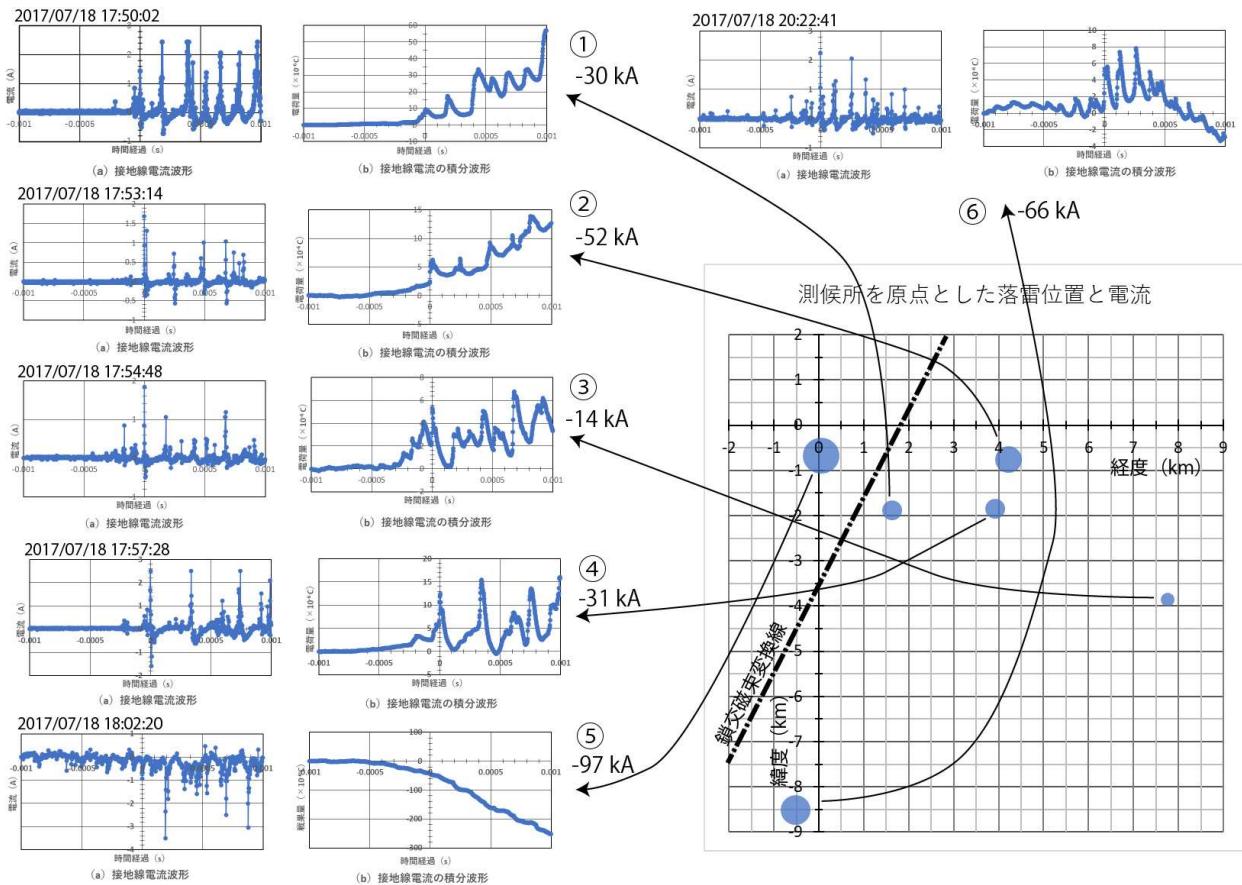


図7 ステップリーダによる接地線電流・同積分値と落雷位置・電流

4.3 ダートリーダ

一旦放電が終わるが、放電路は再結合して完全に消滅する前にトリガーになるダートリーダの初期放電で電荷を集めリーダ放電を開始する。

二重雷の観測結果では一つ目と二つ目のリターンストローク間は 28 ms で、二つ目のダートリーダの初期放電は約 2 ms 手前に生じていた。26 ms の間に気流と静電力で雷雲中の電荷が集められ種になる初期放電がダートリーダの引金となって一気にリーダが対地に放電しリターンストロークになったと考えられる。

5. おわりに

雷現象により富士山体表面の既存接地線に電流が流れる。接地線電流は雷現象を反映して異なる流れ方をするため、複数同時現象であってもそれぞれを分離し、各現象の影響を知ることが可能である。

このように富士山雷観測では複数の雷現象を同時に観測できるという現象解明に有力な情報が得られる雷観測測定系になっている。本報告ではリーダに着目して、以下の進展モデルについて考察した。

(1) 上向きリーダ 富士山測候所では測候所が山麓電位であり、接地線で電荷補給がされるため上向きリーダの発

生条件を満たす条件があることが推測される。上向き雷のリーダの成長は、測候所上空の高密度負電荷により測候所に高電界が生じることで始まり長い前兆現象時間(約 1 s)になると考えられる。

(2) ステップリーダ ステップリーダは同一方向に進展する様子が測定により明らかになった。もう一方は周囲の電荷を集めリーダ放電路先端に電荷を補給する役目を果たしている。ステップリーダの進展は、雷雲負電荷密度を低下させ、測候所の正の誘導電荷は減少する。

(3) ダートリーダ 先行するリターンストローク放電路が再結合により完全に消滅するまえに雷雲の電荷を集め大きな電位勾配の放電路で放電すると考えられる。

今後、観測をさらに進め、落雷情報と合わせてより明快な進展モデルの構築を図りたい。

7. 謝辞

資料や情報提供等で調査にご協力頂いた東京管区気象台の各氏、雷観測にご協力頂いた NPO 法人富士山測候所を活用する会の山頂班の岩崎洋班長、及び班員の方々、中山良夫 他同 NPO 事務局員の各氏、測候所電気主任の大胡田智寿氏、DSO 使用でご支援いただいた岩通計測、および落雷情報を提供して頂いた中電 CTI のご厚意に感謝する。

なお、本研究は新技術振興渡辺記念会の受託研究費及び(財)トヨタ自動車株式会社のトヨタ環境活動助成プログラム助成「富士山測候所の被雷対策による温室効果ガス常時監視の実現」の研究費が用いられている。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 中村安良, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2012). 富士山測候所雷対策適用上の調査と対策方法. 第 5 回(平成 23 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 26-35.
- 2) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 中村安良, 大胡田智寿, 土器屋由紀子, 鴨川仁(2013). 富士山測候所の山麓からのケーブルに流れる雷観測電流, 第 6 回(平成 24 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 14-27.
- 3) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2014). 富士山環境下での測候所雷対策と山麓への接地線電流測定の準備, 第 7 回(平成 25 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 4-11.
- 4) 安本勝, 佐々木一哉, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 高橋浩之, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2015). 富士山候所の山麓への接地線電流観測と雷対策, 第 8 回(平成 26 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 19-27.
- 5) 安本勝, 佐々木一哉, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 高橋浩之, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2016). 富士山候所導入高圧ケーブル内接地線電流観測結果と今後の観測方法・雷対策, 第 9 回(平成 27 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 16-25.
- 6) 安本勝, 佐々木一哉, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 高橋浩之, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2017). 今後に求められる測候所接地線の落雷電流観測と雷対策, 第 10 回(平成 28 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 11-20.
- 7) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子 (2018). 富士山測候所の山麓に繋がる既存接地線を用いた雷現象検出器, 第 11 回(平成 29 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 22-30.
- 8) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子 (2019). 富士山体の既存接地線を用いた高感度雷現象検出器の開発, 第 12 回(平成 30 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 20-29.
- 9) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子 (2020). 富士山体表面上接地線電流測定による雷現象観測装置の開発状況, 第 13 回富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 15-23.
- 10) 電気・電子機器の雷保護検討委員会(委員長横山茂) (2011-8). 電気・電子機器の雷保護, 電気設備学会.
- 11) 石井勝 (2013-9). 上向き雷放電, 第 31 回レーザーセンシングシンポジウム特別講演.
- 12) 超高構造物における雷撃特性調査研究委員会(委員長石井勝) (2020 年 3 月). 東京スカイツリーで観測された落雷の特性, 電気設備学会誌, Vol.40, No.3, pp 198-202.
- 13) 北川信一郎, 河崎善一郎, 三浦和彦, 道本光一郎 (1996). 大気電気学, 東海大学出版会.
- 14) 北川信一郎 (2001 年). 雷と雷雲の科学, 森北出版.
- 15) 高橋劭 (2009 年), 雷の科学, 東京大学出版会.