

O-05: 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

安本勝¹, 佐々木一哉², 鴨川仁³, 野村渉平⁴, 向井人史⁴, 高橋浩之⁵, 大胡田智寿⁶, 土器屋由紀子⁶
1.(株)ヤマザキ, 2.弘前大 3.東京学芸大, 4.国立環境研, 5.東京大, 6.NPO 法人富士山測候所を活用する会

1. はじめに

2011 年測候所接地線の配線および接地状態を調査した折, 山麓接地極を繋ぐ接地線があることが分かり, 2012 年より富士山の落雷現象を観測できる方法として, この接地線に流れる電流の測定を行っている. 観測で注目している現象は, 周辺雷による電流と直撃雷による電流である. 前者は落雷電荷の集電電流と落雷放電路電流が作る磁束による起電力により接地線に流れる電流になる. 2015 年には直撃雷が観測され, 上向雷の特徴と推測される前兆現象も確認された. 色々な条件を考えると上向き雷は富士山頂では頻度高く生じている可能性があり, その観測も実施できるようにするため, 適正に, また確実に測定できる手法が必要になる. 2016 年度夏期観測では直撃雷の観測はできなかったが, 今までの雷現象による山麓に繋がる接地線電流観測結果を含め, フィールドミル観測結果等とも合わせて解析した結果から明らかになったことを示し, 今後の測定にどのように反映させるべきか, また研究活動拠点に相応しい測候所の雷対策について提案する.

2. 2016 年度接地線電流測定

2-1 接地線電流の原因になる現象

山麓に繋がる接地線に電流を流す原因になる現象は, ①測候所直撃雷, ②上向雷の前兆現象, ③周辺雷による電荷の集電, ④雷放電路電流による誘導電流, ⑤雷雲電位による静電誘導電流, ⑥山麓側接地線からの逆流, および⑦高圧電源の零相電流になる.

①測候所直撃雷 負極性雷と正極正雷があり, それぞれのリーダが上向きか下向きがによってそれぞれに上向雷と

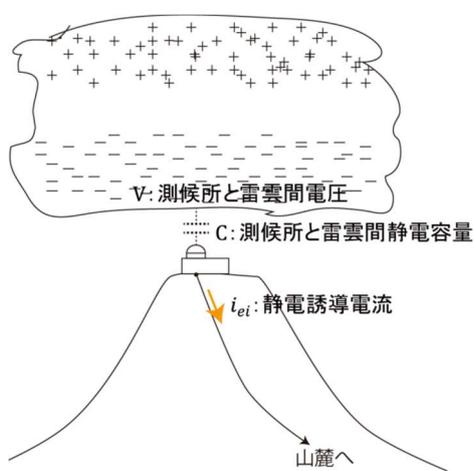


図1 雷雲下部電位変動により山麓に繋がる接地線に流れる静電誘導電流

所では上向雷発生条件があり一般的に生じている可能性が高い.

③周辺雷による電荷の集電 測候所周辺の落雷電荷を測候所が集電極になって集めて流れる電流である. 集電極の大きさは南北に 50 m, 東西に 25 m, および山麓に垂らした接地線(80 mm²×300 m が 2 本, 80 mm²×400 m が 1 本)である. 等価的には 10000m²の集電極になると考えている.

④雷放電路電流による誘導電流 雷放電路電流が作る周方向磁束による誘起電圧により流れる電流である. 循環路インピーダンスは岩盤抵抗が主になるため, 電流は誘起電圧と同じ波形になる. 雷放電路は, 雲と大地, 雲間の放電路になる.

⑤雷雲電位による静電誘導電流 図1に示す雷雲と測候所の静電容量と雷雲電位それぞれの変化により (1) 式の静電誘導電流 i_{ei} が流れる. 結合容量は 100 pF 以下で小さく通常は 0.01 A 以下で無視できると考えている. 測定できるのは雷雲が低くなったとき, また放電等で雷雲電位が大きく変わったときに限られていると推測している.

$$i_{ei} = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{(C+\Delta C)(V+\Delta V) - CV}{\Delta t} \approx \frac{\Delta CV + C\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

⑥山麓側接地線被雷電流の逆流 測候所の山麓に繋がる接地線は, 山麓側で架空地線とも繋がっており, 山麓側の被雷により接地線電位が上昇することで逆に測候所に流れる. 測候所の接地抵抗は大きく, この電流は小さくなると考えている.

⑦高圧電源の零相電流 高圧電源から接地線への漏洩電流, 即ち零相電流は, 例えば高圧ケーブル内接地線に流れるだけであるならば高圧ケーブルに見かけ上流れない. 実際には複数であるため, 零相電流が発生する現象が分流し高圧ケーブルで測定可能になっている. 既に小動物による地絡電流を捉えている.

観測を積み重ねることでそれぞれの起因する現象の特徴を明確にでき整理できるものになると考えている.

2-2 実施した工夫

2016 年度測定は, 昨年度の直撃雷測定を受けて直撃雷のより正確な雷現象が観測可能にするための工夫をした.

一つは①直撃雷全電流を測定可能にし, 山麓に繋がる接地線の測定電流の校正を可能にすることである. 山麓に繋がる接地線は複数であり, また測候所から直接富士山体に流れる電流もあり, 山麓に繋がる 1 線の接地線電流を測定するだけでは測候所被雷電流を知ることはできない. 被雷

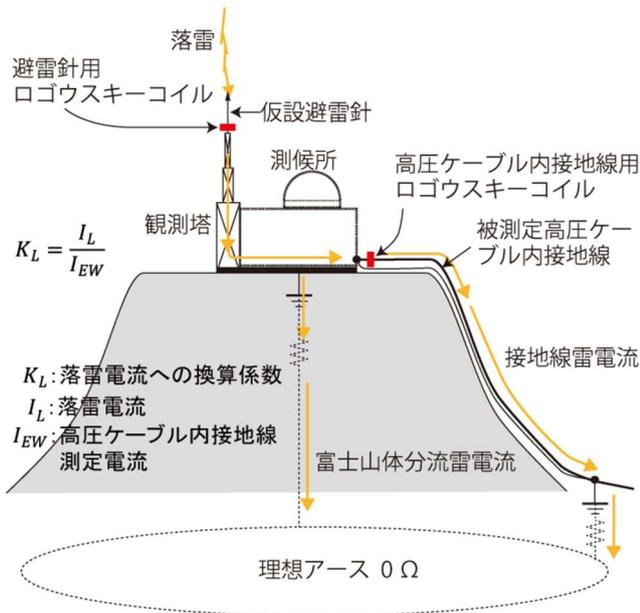


図2 山麓接地極に繋がる接地線電流の校正定数を求める方法

電流の内どの程度被測定高圧ケーブル内接地線に流れるのか知る必要がある。そのため、図2に示すように接地線電流測定と同時に被雷電流も測定することで接地線電流測定値は測候所被雷電流に校正可能である。被雷電流を測定可能にする方法として、被雷頻度が高いと考えられる観測塔にさら仮設避雷針を設けることで被雷箇所を一つにでき、校正可能機会を高めることができる。

被雷電流検出用ロゴウスキーコイルと電流増幅器との間は長距離になるため、インピーダンス整合していないとケーブル両端で反射が生じ正確な信号伝達ができなくなる。そのため、ケーブル両端でインピーダンス整合が必要になる。

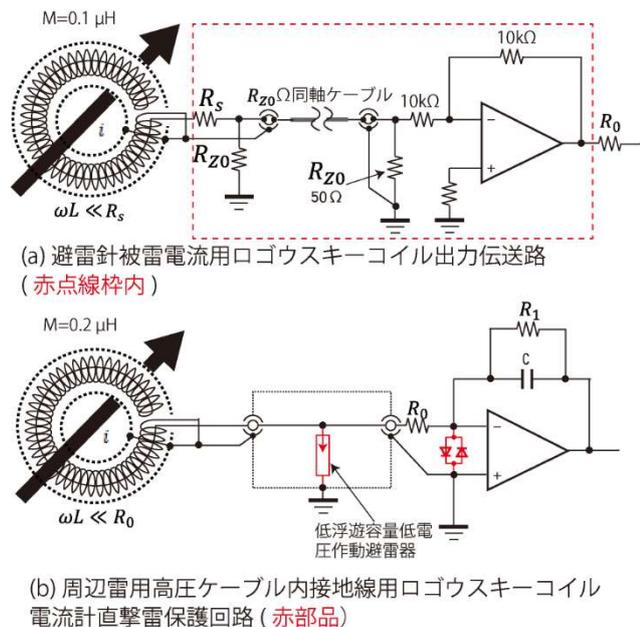


図3 ロゴウスキーコイル電流計入力部追加付属回路

この実現に図3(a)に示すように反射が生じないようにするためロゴウスキーコイル出力ラインピーダンスと増幅器入力インピーダンスは伝送路ケーブルの特性インピーダンスに合わせるようにした。

二つ目は②後述する2015年8月13日に観測された直撃雷に前兆現象が観測されており、その持続時間が1s程度で、その時間も観測可能にする必要があった。実現にはデジタルストレージオシロスコープ(以下 DSO)に十分な時間分解能が得られて1s近い記録が可能メモリー長のあるものを使用した。

最後に③周辺雷現象により接地線に流れるロゴウスキーコイル電流検出器は、0.1 A 台の測定を可能にする高感度検出器になるが、一方で直撃雷電流が流れると大きな出力電圧になり破損するため、保護回路を加えた。この実現は図3(b)に示すようにロゴウスキーコイル出力部に電圧抑制に約80Vで放電し、回路への影響が小さい寄生容量が小さいネオン管を用いた。さらに増幅器入力に寄生容量が小さい保護ダイオードを設けた。

2-3 測定と結果

雷電流測定系は仮設避雷針用、高圧ケーブル内接地線直撃雷用、および同周辺雷用の三系統のロゴウスキーコイル電流計で測定した。それぞれの(被測定電流/出力電圧)は、仮設避雷針被雷電流測定用 10 V/100 kA, 高圧ケーブル内接地線電流測定用で直撃雷電流測定用 10 V/50 kA, 上向き雷前兆現象測定を兼ねた周辺雷用 10 V/100 A である。それぞれの測定時間幅は 500 μs, 10 ms, および 100 ms で行った。

直撃雷電流は仮設避雷針を設け、その被雷電流を測定する予定であったが、準備不足のため実現できず、代わって観測塔の下部にあった避雷導線に設置し落雷電流の一部を測定できるようにした。しかし、直撃雷は無く観測できなかった。一方、測定系設置調整時に他の接地系統と接続されていることが原因とみられ

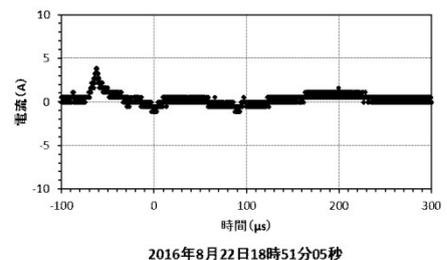
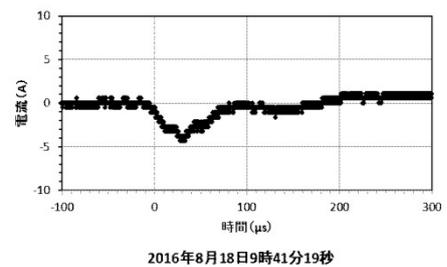


図4 2016年8月22日7時30分以降 2.5 A を超えた観測結果

る小さな電流変動が DSO のベースラインに認められた。被測定接地線に測候所使用電気機器の漏洩電流が循環していたと推測している。

直撃雷が無かったことで高圧ケーブル内接地線にも直撃雷電流は観測されなかった。

周辺雷用高圧ケーブル内接地線電流測定計の測定時間は、直撃雷の前兆現象測定用も兼ねるようにしたため、周辺雷現象で生じる電流変化に使用した時間幅の 200 倍にした。周辺雷による高圧ケーブル内接地線電流観測頻度は高いが、今回測定は、設定の誤りのため、8 月 18 日 7 時半に設定の誤りを訂正するまで測定が記録されなかった。図4は 8 月 18 日に観測されたものの中で 2.5 A 以上の結果である。測定結果はオフセットをゼロとして作成している。オフセットは大きく、高感度 Channel 側ではスケールオーバーしていた。長期間自動記録にこの変動は無視できず対策が必要である。2A 以下の観測は多数観測されている。波形の形状から周辺の落雷による集電荷を集めた現象は少なく、一方電磁結合による現象は小さなものまで多数観測されている。電磁誘導結合によるものは遠方まで測定可能であるためと推測している。測定結果は分解能が悪い結果になっている。これは、DSO の観測に感度の桁を変え 2Channel で測定したが高感度側がオフセットが大きかったため、スケールオーバーで使用できず、低感度側 Channel の記録を使用したためである。因みに図4はオフセットをゼロレベルとして示している。

今後も観測を継続し積み重ねることで2-1に挙げた①～⑦のいずれに起因する現象が明らかになり、より正確に整理できるものになると考えている。

3. 過去の測定で得られた雷現象の特徴と対策方法

3-1 直撃雷の特徴

直撃雷は負極性雷と正極性雷があり、それぞれにリーダが上向きか下向きかによって、上向き雷と下向き雷がある。測候所の上向き雷の場合、測候所の接地抵抗は小さくリーダ電流による自己バイアスによる抑制効果は小さく連続的に電荷補給がされていると考えることができる。一方、下向き雷は雷雲からの電荷補給が間に合わず、中断しながら進展する。負極性雷の場合、上向き雷と下向き雷は図5に示すものになり、上向き雷は避雷針を空間電荷層から突出させることで発生位置を避雷針位置に制御でき、周辺に与える影響も含めリーダの伸長過程の前兆現象が観測可能になる。一方下向き雷の場合、接地線電流に前兆現象は無いいきなり直撃雷電流が現れることになる。

測候所に直撃雷があった場合、上向き雷は測候所が放電路の起点、下向き雷は終点になる。図6に示すように水平位置検知電流ベクトル位置が放電路の平均値とすれば、検出位置と測候所との差の倍の位置が上向き雷の終点、下向き雷の起点ということになる。正確な起点、終点が決まるため誤

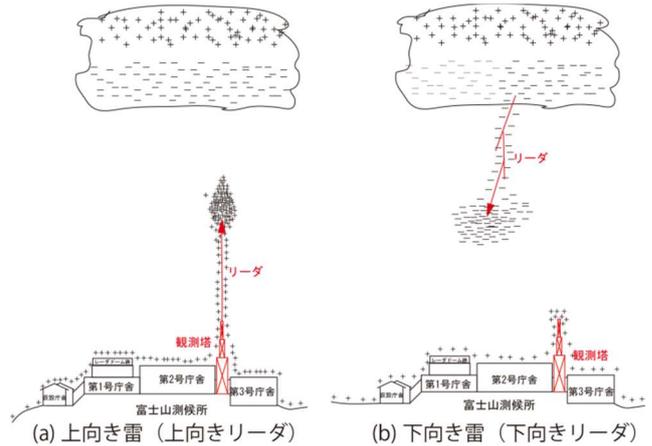


図5 負極性雷の場合の上向き雷と下向き雷
差原因解析に有力な情報になると考えている。2015 年 8 月 13 日測候所への直撃雷の落雷位置は、東に約 1.5 km の位置であり、位置を同定した測定点との間で誤差を作る現象があると推測している。例えば放電路が鉛直で無くだいぶ寝た状態であったか、あるいは御殿場山麓に繋がる長い接地線に落雷電流が流れたことなどによる影響の可能性もあると考えている。

(1) 高圧ケーブル内接地線電流の前兆現象 測定された直撃雷は前兆現象が観測されており上向雷と考えられる。周辺雷用ログウスキーコイル電流計には図7の 4 観測波形が前兆現象として測定された。周辺用ログウスキー電流計に使用した DSO はデータロギングによる USB メモリーへの記録時間中はデッドタイムとなり画面も変化しない。この USB への記録時間は、使用した設定メモリー長 1k サンプルルコードの場合で、USB メモリの種類や空き容量で変わるが ~ 500 ms になる。前兆現象で観測された波形 4 点の内 3 点は

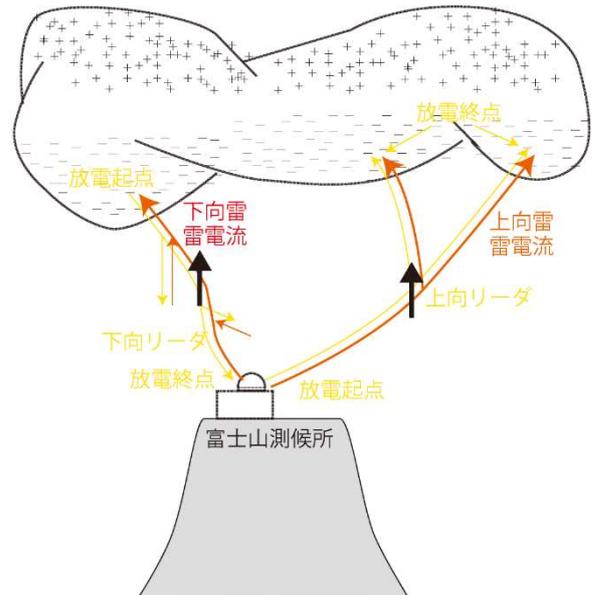


図6 測候所直撃雷の雷放電路の起点・終点、水平位置検知電流ベクトル位置 (↑) (負極性雷の場合)

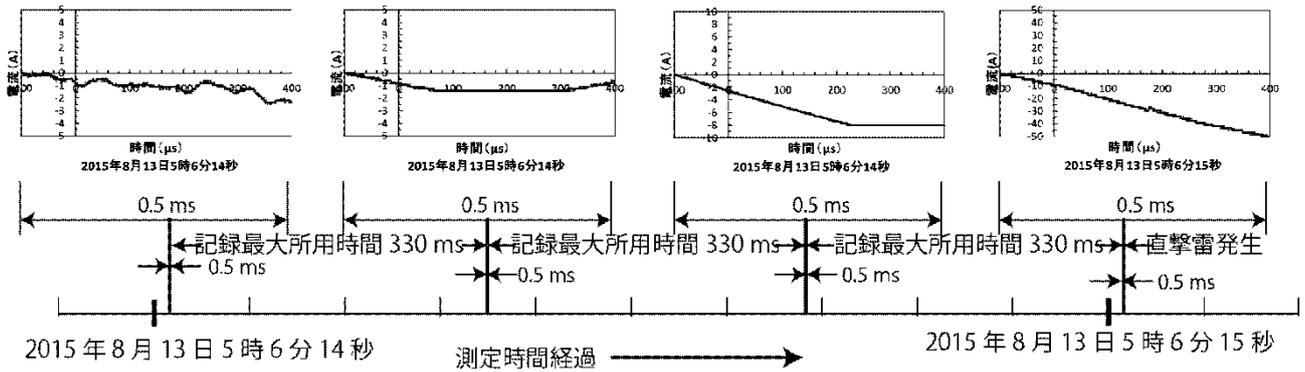


図7 2015年8月13日5時6分直撃雷の前兆現象
 5時6分14秒台に観測され、最後の1点は15秒台に入っている。従って本測定ではデータロギングによる記録時間は最大でも330msと考えられる。一方、画面上測定波形の測定時間は、50μs/divから500μsになる。直撃雷は、4点目の記録に後続して発生しUSBメモリーへの記録中に終了したものと推測される。前兆現象は約1秒前から始まっており、最長間隔の場合で、330ms毎に500μs4点が記録されたことになる。なお測定波形はオフセットをゼロとしている。平らな部分はスケールオーバーしているためである。

(2)フィールドミルに現れた直撃雷と前兆現象 直撃雷はフィールドミルでも対応する時間に図8が観測されている。フィールドミルの仕様に示されている応答時間0.1sを考えると落雷現象時間は3桁小さく観測できるのか疑問があるが、実際に測定できていることを考えると、測定可能にする現象が伴っていることが推測される。

一つは測定された図7の前兆現象の最後が直撃雷のリーダが増殖進展し雷雲に達するまでの電流増加時間変化に伴い生じる電界変化がフィールドミルの測定を可能にしていたと考えられる。DSOに観測された前兆現象が1sと長く、この現象による電界変化は充分観測できるものになる。しかし、この場合でも電界は正までは振れるとは考えられず、別の現象もあると考えている。

もう一つフィールドミルが雷放電検出を可能にしているものは、雷放電後の雷雲電荷空間分布の時間変化、落雷に伴う空間電荷層を構成するイオン分布の時間変化が空間電界にフィールドミルにより検出可能な時間変化を伴ったためと推測している。

図8のフィールドミルに観測された被雷時被雷前変化は5~6min、約60kVから徐々に減少し約20kV/m付近で雷放電が開始している。これは観測塔から徐々にリーダが伸び周囲の遮蔽効果が徐々に高くなっていることを示している。図7に示す高圧ケーブル内接地線に流れる電流に見られる前兆現象は約1sと短い。リーダが伸ばし電流が増加しログウスキーコイル電流計で検出可能になる迄急激に増加し始めたことを示している。以上を考え合わせると、雷雲が作る強電界によりリーダの高さが変動を伴いながら数分掛けて伸び、ある一定電流以上で急激に放電へと進展したものと推測される。

(3)空間電荷層の生成 図9は雷雲襲来時の空間電荷層の生成機構と高さ方向の空間電荷密度を示している。負極性雷の場合、雷雲の負電荷による電界により地表面のコロナ放電による電離イオンの正イオンは上方に移動し一部が雷雲から下方向に移動してくる微少の電子・負イオンと再結合し消滅するが、これは小さいとしている。電離により生じた

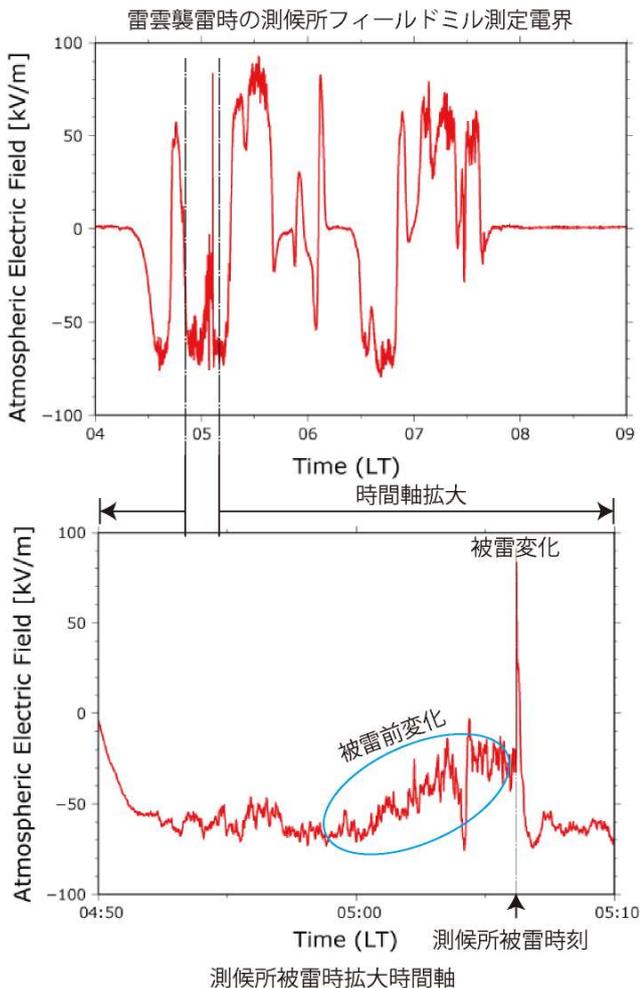


図8 フィールドミル測定電界に現れたの被雷前変化

電子・負イオンは下方方向に移動し地表面での再結合で消滅する。結局、高さ方向の空間電荷分布は図9の空間電荷密度分布に示す変化になる。

(4) 落雷による測候所での空間等電位面・電界 落雷時に生成される電界は、測候所の場合、大地と異なる状況になる。測候所の場合、導体構造物でできている測候所が山麓に低抵抗で接地されているが、落雷電流は大きくその電流による接地極抵抗の電圧降下は非常に大きなものになり、それが測候所の電位になる。その結果、図 10(a)に示すような等電位面を構成し、測候所の電界は大きく緩和される変化になる。この現象の時間変化は速い。この変化を緩和させる現象として落雷による電界変化により空間電荷層等の変化をもたらし平衡状態になるまでの時間変化が大幅に緩和され、フィールドミルによる測定が可能になったものと推測している。この変化があるとすれば、正まで振れることはあるのではないかと考えている。

(5) 落雷による平地での空間等電位面 図 10(b)は平地に生じる落雷による等電位面を示している。考えるにあたって大地地質の抵抗率は一定とし落雷電流は等方的に拡散するものとした。図はそのときにできる大地の電位と空間の等電位面を示している。落雷電流 I_L が落雷点から等方的に

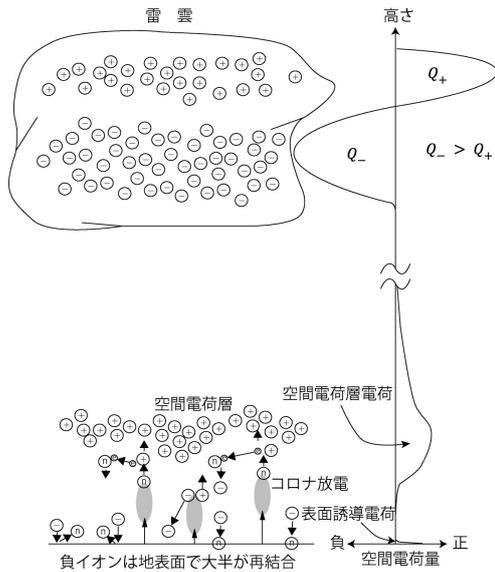


図9 負極性雷雲による空間電荷層生成と垂直軸空間電荷分布

$$V_r = I_L \int_{\infty}^r \rho \frac{1}{2\pi r^2} dr = \frac{-\rho I_L}{2\pi r} \quad (2)$$

この電位と雷雲と大地間の空間電位から落雷個所周辺の電位は概略図10(b)のようになるものと考えている。公開計算プログラムを使用し、上述の境界条件を与えることで正確な等電位分布が求められる。

(6) フィールドミルでの測定を可能にする現象 (4)と(5)の両者を比較し、前者の測候所の電位電界は測候所全

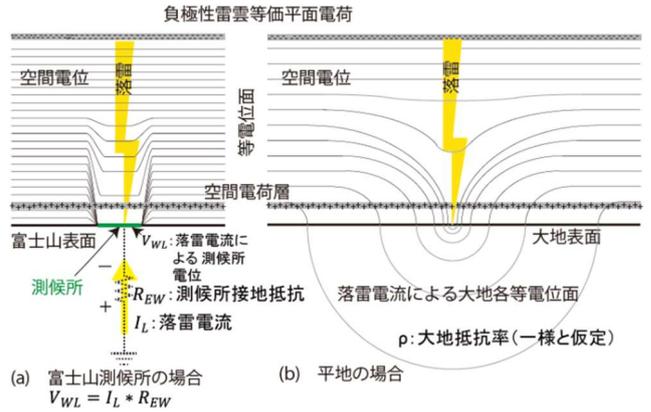


図 10 負極性雷雲下負極性落雷による空間電位・電界 体に一様として考えることができるが、後者は落雷点で突出した高電位・高電界が生じるものと考えられる。この電界により空間電荷層の空間電荷分布に変化をもたらし、それが平衡状態に達する時間がフィールドミルの測定を可能にしているものと考えられる。前述した上向き雷によるものと思われる前兆現象が遅い現象になっており、このときに生じる電界変化も同様の時間変化を伴っているものと考えられる。フィールドミルはこれを捉えたものとも考えられる。上向き雷であったことで観測できたとも考えられる。別に、フィールドミル信号伝送路で減衰を上回る大きな電界変化を拾いそれが現れているとも考えられるが、使用したフィールドミルは光伝送を使用しており考えにくい。現象のメカニズムは今後の観測によって明らかになるものと考えている。

(7) 上向き雷のリーダ伸長による電界変化 上向き雷のリーダは測候所の観測塔から発生したと推測している。リーダが発生する前は図 11 中の黒色点線の等電位面により生じる電界で黒矢印に示す大きさであるが、リーダが発生し伸長する

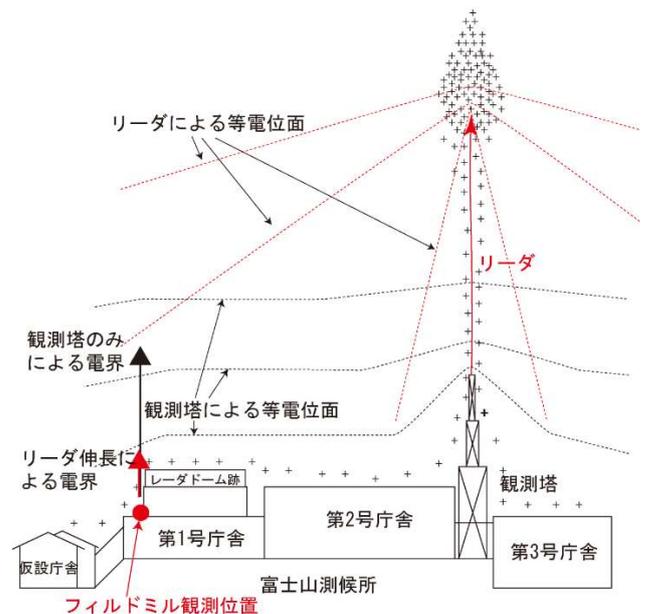


図11 上向き雷のリーダ伸長による電界変化

と赤印点線の等電位面に変わり赤矢印のように電界は小さくなる。測候所に設置したフィールドミルはこの電界変化の影響下にある位置にあったと考えることができる。より精度高い測定が可能な位置に設置することでこの現象をより精度高く把握することが可能になる。

もし、図8のフィールドミルの直撃雷前の電界変化がリーダ伸長によるものであれば、リーダは5～6 min かけ徐々に伸長し、ある一定条件を満たすと図7の前兆現象に示される自己増殖的な成長条件が成立し急激に雷雲に伸長しリターンストロークになったと考えられる。正確な電界を知るため、フィールドミルよりも応答性があり、安定な測定が可能な電界測定器の開発が望まれる。

4. 仮設避雷針の実現

仮設避雷針の目的は、落雷電流と同時に流れる山麓に流れる高圧ケーブル内接地線の電流を比較し校正係数を決めること、上向き雷が観測塔付近から生じている可能性が高いが、それを仮設避雷針にまとめ1個所にすることである。特に上向き雷については周囲より突出した避雷針を設けることで発生個所を仮設避雷針1個所に纏めることができると考えている。

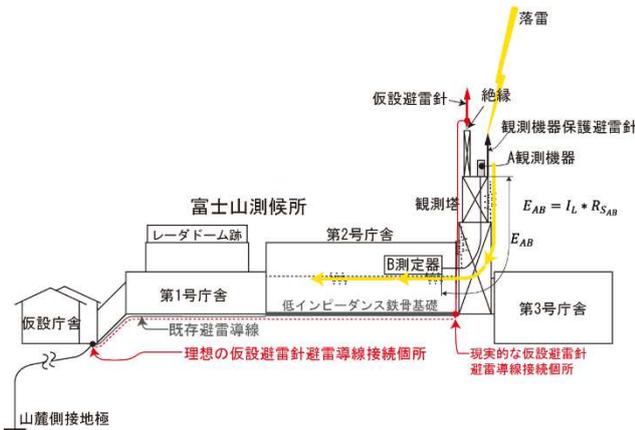


図12 避雷針被雷電流による接地系統電位差を防止する方法

(1) 高圧ケーブル内接地線電流の校正 富士山測候所の接地抵抗は大きく、一方測候所と繋がる山麓側の接地極接地抵抗は小さく、落雷電流の大半が山麓側に流れる。山麓に繋がる接地線は複数であり高圧ケーブル内接地線はそのうちのひとつである。そのため、高圧ケーブル内接地線電流を測定しただけでは測候所落雷電流を測定したことにならない。測定電流から落雷電流を知るには、被測定接地線以外の接地線を通して山麓に流れる電流、および小さいが測候所から直接山体に流れる電流も含めた校正係数を知る必要がある。避雷針の落雷電流の同時測定によりその校正の実現を考えている。

(2) 上向き雷の観測 周囲よりも充分高い仮設避雷針を設けることで今まで観測塔周辺で発生していた上向き雷が

仮設避雷針の1個所に纏められるものと考えられ、落雷電流は測定し易いものになる。フィールドミル等の関連測定器を設置することで詳細な上向きリーダの現象も観測可能になる。

(3) 仮設避雷針の実現 仮設避雷針は観測塔頂部にある固定部フランジに絶縁物を介して避雷針支持用のフランジを強固に固定し、夏季測定期間中に予測される強風に耐えられるものとする。

避雷針の避雷導線は直ぐに鉄骨に接続する場合は一般的で、既存の観測塔避雷針も鉄骨に接続されている。このような場合、図12に示すように避雷針の落雷電流は観測塔鉄骨に流れ山麓側に流れることになる。仮に避雷針の被保護観測機器の制御器が第2号庁舎にあるとすると落雷電流が観測塔鉄骨に流れることで生じる観測塔鉄骨の電圧降下がサージ電圧として観測機器と制御機器間に加わることになる。これを防止するには仮設避雷針の避雷導線は観測塔鉄骨に接続せず、理想的には山麓側の共通接地極に、現実的には第2号庁舎の低インピーダンス鉄骨基礎に接続することで観測塔鉄骨電圧降下による周囲の観測機器への影響はなくなる。

(4) 安定なトリガーの確保 過去の測定を整理して、観測では周辺雷があったにもかかわらず動作しない場合があることが分かった。一つは、DCカップリングの場合、オフセットが変動しエッジ・トリガーレベルを超えたことで動作しなかったと考えられる。二つ目は、オフセットの影響を避けるため、ACカップリングとしエッジ・トリガーで行ったが、ACとしたことで周波数特性が影響し、エッジ・トリガーレベルよりも大きくなければ動作しない。三つ目は、Ext.トリガーに一定レベルのトリガーパルスでなく信号の絶対値を加えたことがトリガー動作の不安定性をもたらした、などの不安定性が原因になっていることなどで引き起こされていた可能性が高い。落雷現象の発生頻度が高い場合はデッドタイムによる不動作も多いと考えられる。安定で正確な基準でトリガー動作を確保する必要がある。デッドタイムを少なくすることも必要である。

5. 今後の測定系

5-1 高圧ケーブル内接地線電流の測定

昨年の高圧ケーブル内蔵接地線電流のロゴウスキーコイル電流測定系は直撃雷用と周辺雷用の2系統で、上向き雷の前兆現象測定用は周辺雷用測定器で兼ねた。前兆現象の持続時間は長く1sが見込まれたため、周辺雷の測定もその時間に合わせ測定した。その結果、直撃雷は無かったため、前兆現象は観測されず、短い現象時間の周辺雷現象によるもののみであった。短い時間で終わる現象を長い時間で測定することは、使用しない部分のデータ処理が加わり煩雑にするだけではなく、また測定時間とUSBメモリーへのデ

ータ転送時間中はデッドタイムになるため、引き続き生じる現象の観測を見落とす確率も大きくなり好ましくない。

このような状態を改善するため、次年度観測では上向雷の前兆現象測定用のログウスキーコイル電流測定系を新たに設ける必要があると考えている。図13に示すように直撃雷測定用と上向雷前兆現象測定用のいずれの DSO も Ext. trigger とし、いずれもある一定の直撃雷立ち上がりレベルをトリガーとし、上向き雷前兆現象測定用は、図 14 に示すように直撃雷トリガー前 750 ms の前兆現象時間を測定できるものにするを予定している。使用 DSO は十分な時間分解能が得られ記録可能なメモリー長にすることが求められる。

このような状態を改善する手段として、上向き雷前兆現象用ログウスキー電流測定系を新たに設け、頻度高く現れる周辺雷用は専用の測定系にすることで周辺の雷現象の測定漏れを少なくし、より正確に測定できることになる。

将来的には長時間観測が必要であるが、このデッドタイムはメモリー長を長くするほど大きくなる。雷現象には多重雷もありメモリー長を大きくすると共に十分な分解能が得られるようにする必要がある。またデッドタイムを短くする工夫も必要である。例えば同じ測定系を複数設け 1 測定系が測定に入ると、次の測定系が測定を開始するようにする工夫をすることでデッドタイムは確率的により小さくすることができる。

5-2 避雷針電流測定系

使用ログウスキーコイルは予測される被雷電流を検出できるものにする必要がある。

避雷針電流を検出するログウスキーコイル検出器と庁舎内に設置する測定系との間に距離があるため、正確な信号伝送のため、ログウスキーコイル検出器出力インピーダンスと積分増幅器入力インピーダンスは同軸ケーブル特性インピーダンス(2016年は50Ωを使用)にあわせる必要がある。満足しないと反射の影響で正確な信号伝送ができない。ログウスキー検出器出力電圧は適度に大きくし、減衰させて出力インピーダンスを同軸ケーブルの特性インピーダンスに合

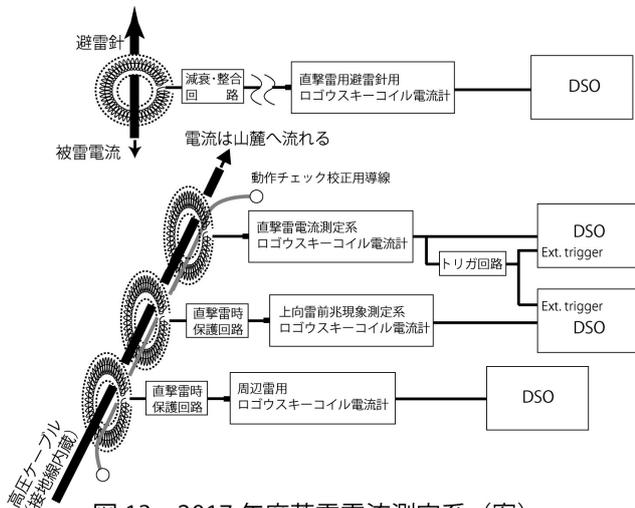


図13 2017年度落雷電流測定系(案)

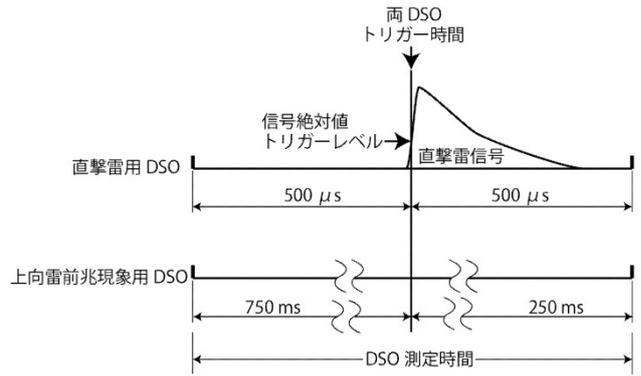


図14 直撃雷と上向雷前兆現象測定用 DSO の信号トリガーレベル・位置と測定時間幅 (2017年度予定)

わせるようにする。積分増幅器入力インピーダンスは同軸ケーブル特性インピーダンスに合わせ、積分機能が動作させるため出力インピーダンス変換(理想は0Ω)を入れる必要がある。

また、ログウスキーコイル雷電流検出器は、設置場所の電界変化の影響を受けないように、且つ雷電流検出に影響しないようにシールドする必要がある。シールドには検出電流を抑制する遮蔽電流が流れないようにループを構成しないように切れ込みを入れるが必要になる。さらにケーブルには雷対策ケーブルなどを使用するケーブル上でサージ電圧が侵入しないようにする必要がある。

5-3 山麓側高圧ケーブル内接地線電流測定の実現

測候所引込高圧ケーブルは、図15の○の73号柱で架線

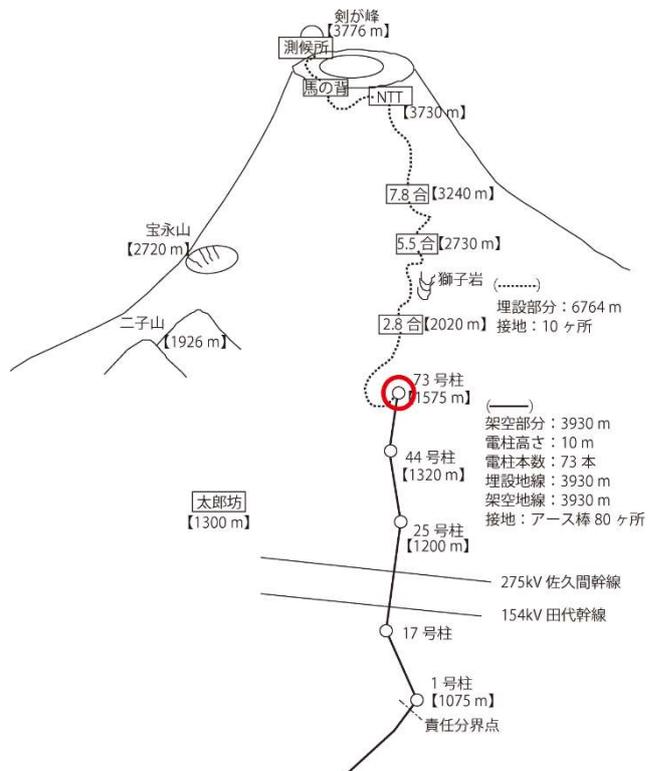


図15 山麓側接地線電流測定箇所(○)

から埋設されている。測候所使用期間外は高圧電源を遮断するが接地線は山麓側と接続状態であり、山麓側で接地線電流の通年観測は、測定環境を整えることで可能である。問題点としては、高圧ケーブルの接地線が途中の接地極に繋がるなどして完全に絶縁されておらず途中の接地の影響を受けることと測候所の測定電流と違いが現れることである。もう一つは電源確保の問題である。100V 電源はないので交換頻度から決まる期間使用可能にする十分な容量のバッテリーが必要になる。

6. 落雷対策

(1) ファラデーケージ構成に近づける

ファラデーケージに近づけるため、導電性の外装材や構造物は等電位ボンディング等をはかり庁舎全体の電氣的接続を良好にすることで内部へのサージ電圧の侵入を抑制できる。大事なことは、庁舎から外部に出る金属配管やケーブル接地系統はファラデーケージに電氣的に完全に接続する必要がある。これが実施されていない場合、外部電位をファラデーケージ内に導入してしまうファラデーホールを作ることになる。

(2) 回転球体法の保護下に置く方法 下向き雷に限られる対策方法になる。上向き雷の対策はできるだけ高い避雷針を設けることになる。高層ビル等の側方雷からも保護する方法として、避雷針の保護角による方法よりも効果的な回転球体法がある。この方法は側方雷が多い富士山測候所にも効果がある方法である。しかし、適用方法には注意が必要である。上方部は避雷針、鉄骨およびファラデーケージ構成の庁舎導電体外装部に接するようにし、他方球体下部は図 16 のように直接大地には接しないように庁舎と電氣的に接続状態にある導電性の鉄柵や簡易避雷針等に接するものにする必要がある。既存のものを流用できなければ簡易避雷針等新たに設ける必要がある。

(3) 回転球体法保護下外観測機器の対策方法 測候所から離れた観測機器は雷が侵入しないようにファラデーケ

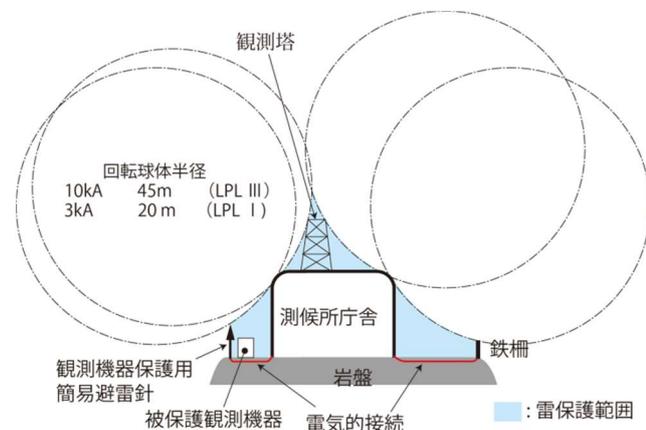


図 16 外部観測機器の落雷対策方法

ージに近づける。その観測機器と測候所を結ぶ信号等の伝達ケーブルは雷対策ケーブルを使用することで観測機器の被雷電流はケーブル上でサージ電圧を侵入させず、ケーブルを通し安全に測候所に流すことができる。この雷対策ケーブルは、また、雷電流が流れ大きなサージ電圧が加わる個所に有効である。

(4) 接地端子間および電源と接地端子間の電位差対策(理想に近い1点接地の実現) 接地はそれぞれの観測システム全体で1点接地になるようにすることが必要である。複数の接地を取った場合複数の接地電位差がシステム内に侵入することになる。また外部に対しては両者の電位差が循環電流を流す原因になる。

どうしても複数接地点が必要となる場合、接地間を繋ぐケーブルは電位差を相殺する雷対策ケーブルや高透磁率トロイダルコアによる同相化が必要である。

一般的に電源も接地されていることが以外と見落とされている。測候所受電室にある電源用変圧器の2次側は一般的に高圧混触保護用として行われているB種接地が実施されている。このため電源の対地電位はB種接地の測候所の共通接地極電位になる。一方接地系統も共通接地極に接続されているため、落雷電流が流れると接地系統に電圧降下を生じ電気機器の電源と接地端子間に共通接地極と接地端子間の電位が加わることになる。サージ電流が大きいと大きなサージ電圧が加わることになる。一般的な対策方法は電源にノイズカットトランスを使用して電源回路を絶縁させることである。最近の電気機器は、省エネ・軽量化等で電源回路

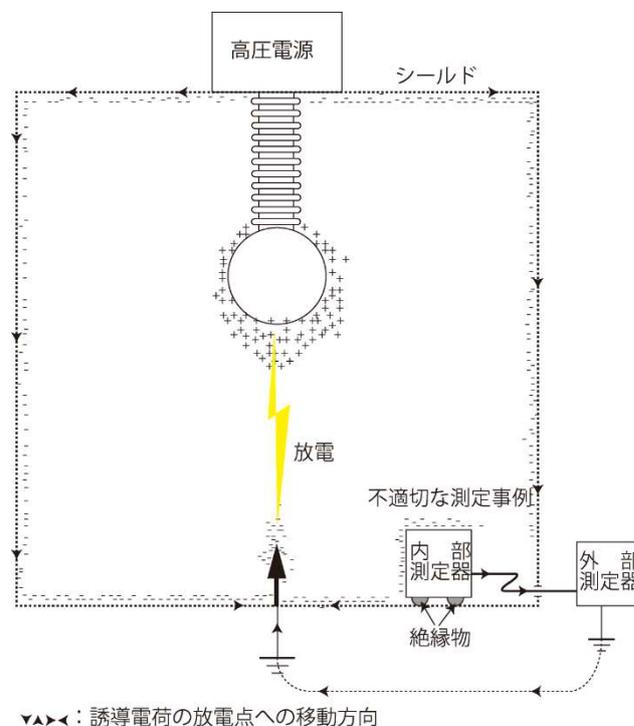


図 17 放電による誘導電荷移動で生じるトラブル発生機構

には絶縁変圧器は使用されなくなっていることで完全に絶縁できず影響を受け易くなっていると考えている。

電源変圧器を混触防止板付き変圧器にすることで二次回路を非接地にすることができる。共同研究場所である測候所には相応しいものであり、将来的には検討すべきことである。但し、万一電源回路に雷サージが侵入する場合、この雷サージを逃がせるようにして対地電圧が上昇しないように変圧器出力端子と接地間に低電圧作動の SPD(避雷器)を設けることが必要である。

(5) 静電誘導 実験設備で見られる静電誘導によるトラブルの発生は図 17 に示すように高電圧放電実験に見られる現象である。図の中央球体が高電圧である場合、周囲の導電性構造物表面に誘導電荷を生じる。もし図に示すように放電させたときに高電圧により誘導されていた電荷は放電個所に移動し中和するが、もし図に示すように導電性構造物内表面と絶縁された内部測定器があった場合、この測定器の誘導電荷は外部測定器を迂回して放電個所に移動することになる。このときに内部、外部測定器間にサージ電圧を発生しトラブルになっている場合が多い。測候所でも外表面の導電性構造物が適切に接地系に接続されておらず、あるいは絶縁されている場合、雷雲電位の誘導変化を受け、その構造物は電位不安定性を生じることになる。露出している検出器でインピーダンスが大きくなる検出器の場合や適切な接地がなされていない場合に影響が現れる。

7. まとめ

今までの山麓接地極と繋がっている富士山測候所接地線電流を測定した結果から測定上の問題点を整理すると共に新たに分かった現象に相応しい測定方法も含め、今後の測定系を考察提案した。また富士山山頂にあることによる接地系統の調査と接地線電流測定から今後の研究拠点に相応しい雷対策方法を示した。

(1) 山麓に繋がる接地線電流により観測できる現象を考察整理した。

(2) 接地線電流測定情報以外にフィールドミルによる電界測定結果および位置情報から上向き雷と思われる直撃雷に伴った現象を考察し、その観測のための測定方法を提案した。

(3) 被雷しても周囲に影響を与えない仮設避雷針の設置方法を明らかにした。

(4) 直撃雷、上向き雷の前兆現象、および周辺雷の今後の対策と測定方法を提案した。

(5) 測候所の共同研究の場としての雷対策方法について以下の提案をした。

①等電位ボンディング強化によるファラデーケージ近似への強化。

②回転球体法の保護下に置く効果的な方法

③回転球体法の保護下に置けない観測機器の対策方法。

④雷電流流ることによる接地系統の電位差対策。

⑤静電誘導対策。

(6) 今後の課題として、山麓での接地線電流測定方法について明らかにした。

8. 謝辞

2015年8月13日に測定された直撃雷の考察に際し、誤りのご指摘を受けアドバイスを頂いた横山茂・静岡大学客員教授、資料や情報提供等で調査にご協力頂いた鈴木寿久・東京管区気象台技術専門官、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・岩崎洋および越生正文・山頂班長、および山頂班員の方々、および事務局員の方々の各位に感謝する。

なお、この研究の一部は三井物産環境基金活動助成(K13-0040)「地球大気環境保全に向けた富士山測候所の戦略的活用計画」その2「世界に開かれた日本一ハイレベルな研究・教育拠点」としての富士山測候所の再生」および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の援助を受けた。記して感謝申し上げる。

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). 富士山測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). 富士山測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) 鴨川仁 (2016). 2015年大気電気・雷研究の成果について

- て, 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, 13-15..
- 7) 大島燦, 安本勝, 鴨川仁(2016). 2015年8月13日の富士山測候所直撃雷, 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, 67-70.
 - 8) 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.
 - 9) 石井勝(2013-9). 上向き雷放電, 第31回レーザセンシングシンポジウム特別講演.
 - 10) 滝川聡, 三宅久仁彦, 横山茂, 横田勤, 酒井勉(1994-10). 冬季雷における放電進展様相と電流波形の特性, 電力中央研究所, T93024.
 - 11) 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.
 - 12) 北川信一郎(2001年). 雷と雷雲の科学, 森北出版.
 - 13) 日高邦彦(2009年1月10日). 高電圧工学, 新電気システム工学 TKE-13, 数理工学社.
 - 14) 高橋健彦(2003). 接地・等電位ボンディング設計の実務知識, オーム社.
 - 15) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 土器屋由紀子, 野村渉平, 向井人史(2013). 富士山測候所観測システムへの雷対策案, 第31回電気設備学会全国大会講演論文, 405-408.
 - 16) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 鴨川仁, 土器屋由紀子, 野村渉平, 向井人史(2014). 超低特性インピーダンスケーブルの接地適用の検討, 第32回電気設備学会全国大会講演論文, 111-114.
 - 17) 安本勝, 佐々木一哉, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 高橋浩之, 土器屋由紀子(2015). ケーブルへの侵入サージ電圧抑制効果評価方法, 第33回電気設備学会全国大会講演論文, 343-346.
 - 18) 安本勝, 佐々木一哉, 鴨川仁, 大島燦, 高橋浩之, 土器屋由紀子:「富士山測候所導入高圧ケーブル内接地線電流の測定」,第34回電気設備学会全国大会講演論文,83-88(2016).
 - 19) 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). 富士山測候所のための落雷対策, 電気学会 A 部門, Vol.132, No.11, 984-992.
 - 20) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 土器屋由紀子(2014年). 超低特性インピーダンスケーブルの検討, 電気学会全国大会講演論文, 電磁環境 ESD, 1-154.
 - 21) 土器屋由紀子, 佐々木一哉(2012-6). よみがえる富士山測候所, 成山堂書店.
 - 22) 志崎大策(2002-9). 富士山測候所物語, 成山堂書店.
 - 23) 土器屋由紀子, 梶山沙織, 鈴木雅史(2016年10月). 日本一の高所・富士山頂は宝の山, 公益財団法人静岡県文化財団.