

富士山体の既存接地線を用いた高感度雷現象測定器の開発

安本勝¹, 鴨川仁², 佐々木一哉³, 土器屋由紀子⁴

1.(株)ヤマザキ, 2. 東京学芸大, 3.弘前大, 4.NPO 法人富士山測候所を活用する会

1. はじめに

筆者らは夏期観測期間に富士山での実証実験を行い、その結果を反映させながら富士山体の既存接地線を用いた高感度雷現象測定器の開発を行っている。

富士山測候所(以下、測候所)電源は、図1のように山麓

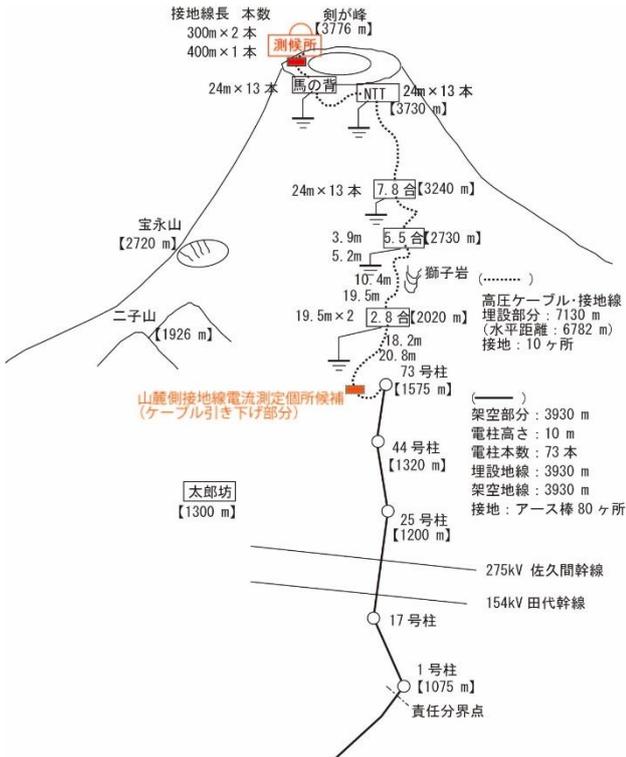


図 1 測候所接地線電流測定箇所(■)、山麓側接地線電流測定箇所候補(■)

から長さ約 7 km になる高圧ケーブルを引き込んでいます。これに伴う測候所接地線は高圧ケーブルに並行し山麓側の接地極に繋がりと山麓送電線の架空地線にも繋がっている。測候所は岩盤上にあるため、測候所接地抵抗は小さくできず大きい。一方、山麓側の接地抵抗は小さい。このことから、接地線で山麓に流れる測候所直撃雷電流を測定できるのではないかと、2012年夏季に初めて測定を行った。この時、直撃雷は無かったが、代わりに周辺雷による電流が多数測定された。以降、直撃雷だけではなく周辺雷現象によって流れる電流も測定している。

2015年には直撃雷が観測され同時に周辺雷測定系に上向き雷の前兆現象も測定された。しかし、現象時間全体を測定できる適切な測定系で無かったため、細切れの測定で全体像の測定はできなかった。翌2016年以降は、改良し全体像が測定できる上向き雷前兆現象用測定系を加えて測定している。

また、2017年度の測定は、従来の測定系がオフセットのために安定なトリガーレベルを確保できていなかったことを改めトリガーはオフセットの影響を受けない測定系にした。その結果安定なトリガーレベルを確保でき、周辺雷現象により生じる接地線電流の安定な測定が可能になり、以下のことも明らかになった。

測候所と山麓を繋ぐ 7 km の接地線は、山体と大きなループを構成することになり、雷放電路との大きな電磁結合ができることが分かった。さらに富士山測候所は接地線に繋がる 3776 m の高さにある大面積電極の爪と考えることができ、雷雲電荷との大きな静電誘導結合ができる。接地線電流を測定することで何れの雷現象に対しても高感度な検出器になる。また、周辺落雷電流の捕集と山麓からの逆流電流の散逸の大面積電極にもなり、これらに対しても高感度な検出器になる。

このため、測候所と山麓を繋ぐ接地線に流れる電流を測定することで、色々な雷現象について、高感度な測定を可能にすることが分かってきた。この接地線を用いた雷現象測定は初めてのものであり、検出器の原理、得られる性能、及びどのような雷現象を測定可能にするか毎年の観測で得た結果を測定系に反映させ検証する方法で改良を進めている。2018年夏季測定では、直撃雷は無く、周辺雷の測定結果は、雷現象に対応するものと推測される多数の電流検出があったが、検出系のトラブルから現象を反映する電流測定がなされなかった。

本報告は今迄の測定結果を見直し、次年度以降の課題を明らかにし、その解決策について今後の測定にどのように対応すべきか検討した内容を報告する。

2. 接地線に流れる電流の測定

2-1 測候所の接地

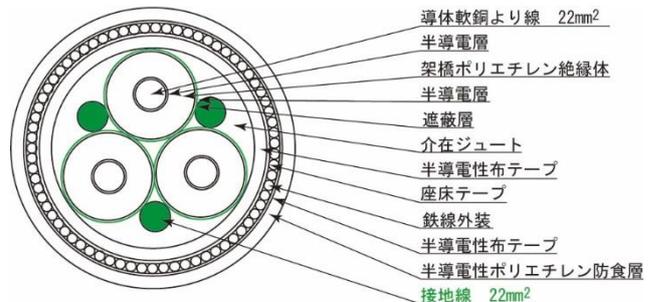


図 2 富士山測候所引き込み高圧ケーブルの構成 架橋ポリエチレン絶縁ポリエチレンシースー重鉄線外装ポリエチレン防食ケーブル

測候所の接地は、測候所を接地極としたものと山麓接地極に繋がる接地線がある。測候所と山麓を繋ぐ接地線には、被測定対象の高圧ケーブル内接地線(図2)、接地線に転用した旧高圧ケーブル、及び接地線の3系統がある。各アドミタンスは図に示すものとしている。このうち測定する接地線電流は高圧ケーブル内接地線に流れる電流である。接地線を介して測候所から山麓に流れる全電流を測定しているのではないため、全電流を知るための校正が必要になる。

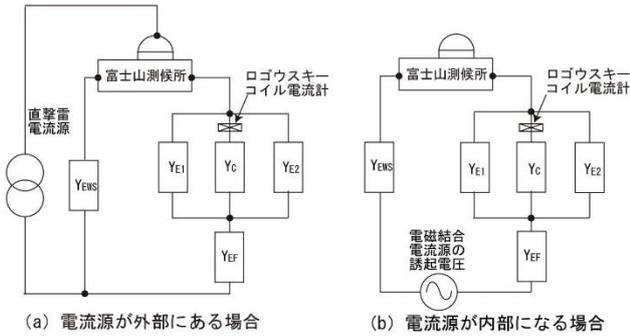


図3 接地回路の電流源位置による等価回路と校正値

雷現象による電流発生源が、測候所接地極と山麓接地極に繋がる接地線が作る接地回路の内部か外部かによって、各接地線への分流値が変わる。

例えば、発生源が接地線回路の外部になる測候所直撃雷の場合、図3(a)のように雷電流は測候所から山麓に繋がる接地線だけでなく、富士山体を通して大地に流れる電流もある。この場合、校正値 c_{LC} は以下の式になる。

$$c_{LC} = \{Y_{EWS}Y_{EF} + (Y_{EWS} + Y_{EF})(Y_{E1} + Y_{E2} + Y_C)\} / Y_C Y_{EF} \quad (1)$$

一方、雷放電路との電磁結合によって流れる電流は、図3(b)のように山麓に繋がる接地線と測候所電極が作る接地回路と雷放電路との電磁結合による誘起電圧によって流れ、この場合、電流発生源は内部回路になる。この場合、校正値 c_{MEC} は以下の式になる。

$$c_{MEC} = (Y_{E1} + Y_{E2} + Y_C) / Y_C \quad (2)$$

2-2 電流測定方法

接地線電流測定の基本回路は、図4に示すログウスキーコイル電流計である。接地線電流測定は、接地線を流れる電流が作る径方向磁界にのみに感応し軸方向磁界には感応しないログウスキーコイルを使用し、出力電圧に比例する

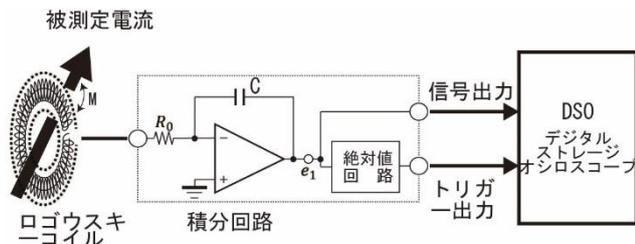


図4 高圧ケーブル内接地線電流測定用のログウスキーコイル電流計

電流を積分する方法で被測定電流に比例する電圧が得られるようになっている。なお、積分コンデンサーには測定に影響しない放電時定数になる抵抗が並列接続されている。

電流計出力電圧はデジタル・ストレージ・オシロスコープ(以下 DSO)のロギング機能により USB メモリーに記録する方法を採用している。

落雷の極性や落雷位置によって得られる電圧の極性が変わるため、正負極性何れの場合もトリガーできるように出力電圧の絶対値をトリガー信号にしている。

データの取得数は、ノイズレベルを十分上回るようにしてトリガーレベルを下げ高感度にすることで落雷情報数に近い信号数が得られることが測定から分かっている。しかし、多量なデータについて自動的に処理する適切な方法はまだ確立されていない。データ処理の自動化による省力化は、測定系の洗練化と同時に進め実現させることが必要である。複数の雷現象による影響が重畳したものになるため、現象の分離方法も含めた解析によるデータ処理の自動化が必要である。より正確な結果を得るためにも他の観測、落雷情報や電界測定と共に行うことが必要である。

3. 接地線に電流を流す雷現象

山麓に繋がる接地線に電流を流す現象は色々と考えられるが、明確なものは測定対象にしている雷によるもので以下の現象がある。(1)測候所直撃雷、(2)放電路との電磁結合、(3)雷雲との静電誘導、(4)測候所電極捕集電流、(5)山麓接地線電位上昇による逆流電流が考えられる。測定される電流はこれらの複数の現象が重畳しているのが一般的と推測される。高圧ケーブル内接地線のみが山麓に繋がる全接地線でないことによる高圧電源の零相電流によるものも観測されることを想定していたが、2012年8月16日の小動物による地絡事故時と遮断器の開閉時に観測されているのみで、通常は観測されず無視できるものと考えている。その他の自然現象によるものもあると予想している。以下、接地線に電流を流す雷現象の特徴をまとめたものである。

3-1 測候所直撃雷

測候所が被雷した場合、図5に示すように落雷電流は測候所電極から山体を通して大地に流れる電流と測候所の共通接地極から山麓側接地極に流れる電流がある。山麓側に繋がる接地線は複数あり、その一つである高圧ケーブル内接地線に分流して山麓側に流れる。被雷電流測定は高圧ケーブルにログウスキーコイルを置いて一部を測定することになるため、全電流に校正が必要になる。

各分流回路の周波数特性が無視できないことも考慮して、その影響を受けない校正方法として、仮設避雷針の被雷電流をシャントにより絶対測定する方法で正確な電流を知り、さらに高圧ケーブル内接地線電流を同時測定し、両者の比

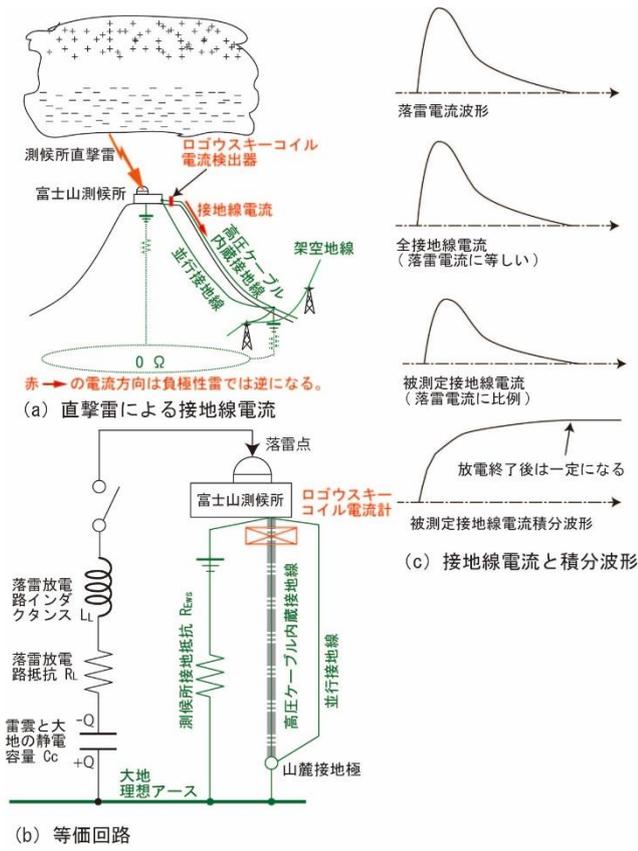


図5 測候所直撃雷電流

を校正値とすることで正確な電流を求めることができる。仮設避雷針には避雷針高さを高くするなどの被雷頻度を高める工夫とシャントによる安定な電流測定を可能にする工夫が必要になる。

校正可能にすることで正確な被雷電流を求めることができる。測定被雷電流パルス波形の時間幅が放電時間になるので、測定電流パルス波形をその時間で積分することで落雷放電電荷量も求めることができる。

3-2 雷放電路との電磁結合

図6(a)に示す測候所接地線と山体が作る循環路の電磁誘導電圧は、その循環路と被測定雷現象の雷放電路電流が作る磁束との結合分を微分したものになる。(b)がその等価回路になる。循環路のインピーダンスは山体抵抗が支配的になるため、接地線電流は、雷放電路電流微分値に比例し、以下の特徴が現れる。

- ① 測定電流積分値が雷放電路電流に比例したものになる。
- ② 放電終了後積分値は0になる。
- ③ パルス幅時間は放電持続時間になる。
- ④ 落雷放電路が鉛直の場合、図21に示すように落雷位置によって山麓に繋がる接地線ループの鎖交磁束方向変換線より東側にある落雷位置の負極性雷の初期ピークは正に、西側にある落雷位置の初期ピークは負に変わる。

雲上部が正極で下部が負極の雲放電の場合、正極性として現れる。スプライトで流れる電流は、正極性雷雲から始ま

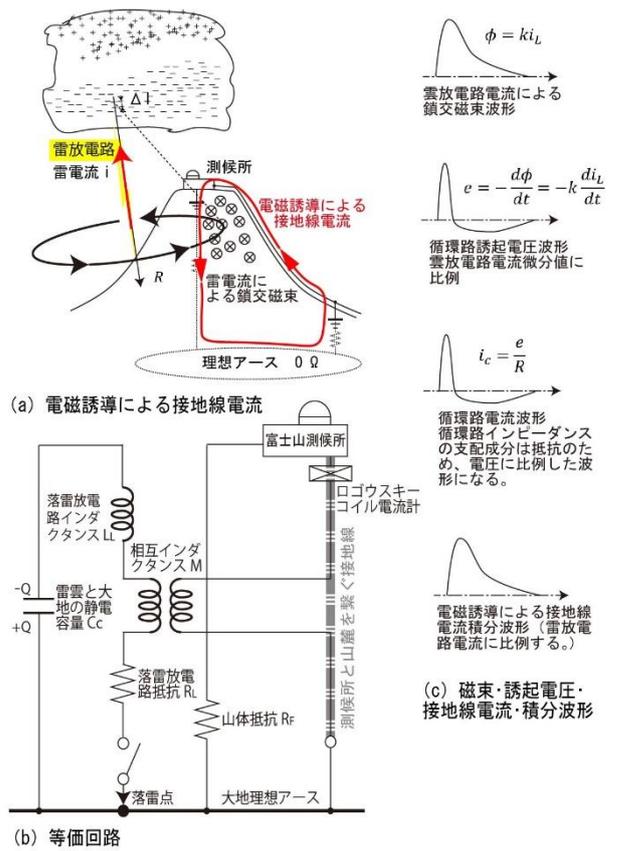


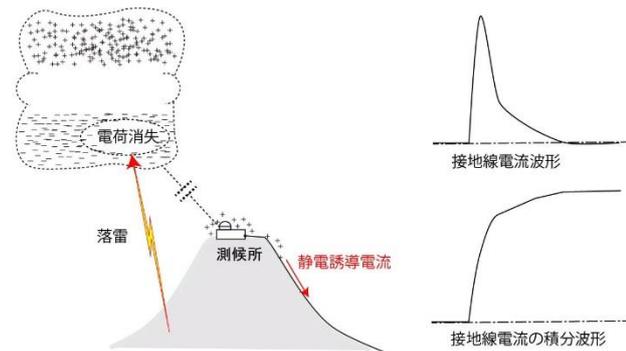
図6 電磁誘導による接地線電流（測候所西側の負極性雷）

るとすれば負極性落雷電流と同一方向であり、位置による電磁誘導による波形の極性も同一である。検出系が高感度であることからかなり遠方のもので測定可能になると推測される。

3-3 雷雲電荷変化による静電誘導

3776 m 上空にある測候所という大面積(南北約 50 m×東西約 25 m)の凧電極と雷雲電荷との等価結合容量により、図7に示す雷雲の移動、雲放電や落雷による雷雲の電荷変化により、山麓接地極と繋がる接地線に静電誘導電流が流れる。この静電誘導電流は以下の特徴がある。

- ① 放電初期の電荷消失が急激になるため、雷雲電荷による静電誘導電流波形は立ち上がり時に鋭く反映する。しかし、放電時の変化は、小さくなり、重畳する電磁誘導電流に埋没し分離しにくくなる。
- ② 放電後雷雲電荷の変化は小さくなり測定静電誘導電流変化に明確に現れないが、測定電流を積分することでバイアス変化が現れ見えるようになる。
- ③ 雷雲の移動が無視でき放電後の雷雲電荷が一定で変化が無い場合は静電誘導電流が0になるため、積分値には変化なく一定になる。なお変化がある場合が一般的であり、その時、使用電流計積分回路の放電時定数より十分速い変化であれば、時定数による誤差混入は小さくなる。
- ④ 誘導電流の積分値から雷雲による測候所の誘導電荷量を求めることができる。



(a) 雷雲電荷変化による静電誘導電流
(b) 静電誘導電流の等価回路
(c) 落雷による急激な消失と回復等の雷雲電荷変化による接地線電流と積分波形

図7 雷雲電荷変化による静電誘導電流

3-4 測候所電極捕集電流

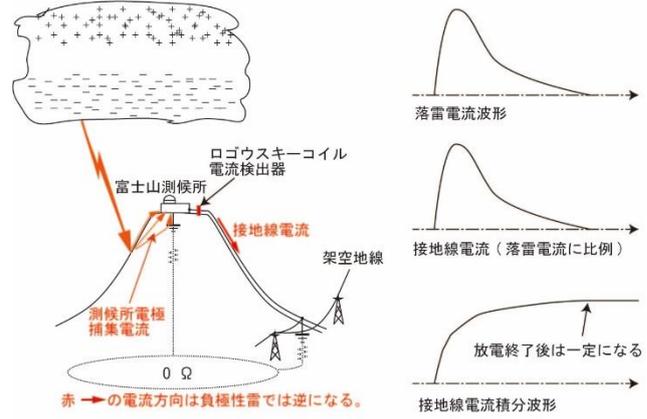
図8に示すように富士山に落雷した電流を測候所に集め接地線を通し山麓に流れる電流である。測候所電位は、接地線で山麓と繋がっているため、山麓電位である。富士山の被雷個所の電位は、一般的に山体抵抗は十分小さくないため、著しく上昇する。測候所との電位差により被雷点から測候所に両者間の抵抗で除した電流が流れることになる。接地線の電流極性は、負極性落雷では負に、正極性落雷では正になる。測候所側の捕集電流は遠方になると小さくなり大地への拡散を考えるとほぼ距離の2乗に反比例するものと考えられる。以下の特徴がある。

- ① この電流は放電持続時間で終了する。
- ② 雷放電時間の積分値で一定になる。
- ③ 電流極性は、負(正)極性落雷の場合、負(正)になる。

3-5 山麓からの雷逆流電流

この逆流電流は、図9に示すように山麓側に落雷することで接地線電位を上昇させ、測候所接地抵抗から散逸し大地に流れる、測候所に逆流する電流である。山麓側接地線の電位は被雷等により上昇すると測候所の電位も同じ電位になり測候所接地極より富士山に散逸する電流が流れる。この電流の積分値は放電終了後最大になり一定になる。

山麓側の架空地線等の接地系統が被雷した場合、接地線電位上昇は遠方でも影響があり、測候所に逆流する電流を



(a) 測候所電極捕集電流
(b) 等価回路
(c) 接地線電流と積分波形

図8 測候所電極捕集電流

流すことになると推測される。また、山麓接地系統が作る循環路の誘起電圧による電流も考えられるが、測定箇所がこの循環路に入らないことからこの電流は積分することで0になり測定結果には現れない。大地や独立の接地体系への落雷は、他の接地系統への影響は小さく電位上昇を小さくするため、遠方では検出できなくなると推測できる。この逆流電流は山麓での測定も可能にすることでより詳細な挙動が解明できるようになると考えている。

空間と接地線線路との到達時間差は、例えば空間と接地線上の電磁波伝播速度は 3×10^8 m/s と 2.5×10^8 m/s、伝播線路長が空間直線距離の1.5倍、落雷位置が測候所から20 kmの位置として、約50 μ sになる。逆流現象を考える上で、時間差の考慮も必要である。

逆流電流の特徴は以下のようになる。

- ① この電流は放電持続時間で終了する。
- ② 雷放電電流の積分値は、放電時間と共に増加し、放電終了で最大値になり、その後一定になる。
- ③ 山麓側接地系統の被雷による電位上昇で測候所に流れる電流である。
- ④ 山麓接地系統の被雷は遠方でも検出する。
- ⑤ 電磁誘導電流と重畳する。両者の波形には伝播時間差の影響が生じる。
- ⑥ 負(正)極性落雷の場合、測定電流は正(負)になる。
- ⑦ 山麓接地極がある東側の落雷で大きく現れ、西側では

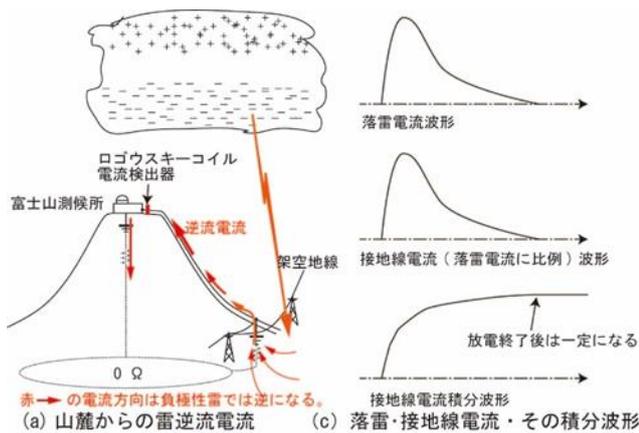


図9 山麓からの雷逆流電流の等価回路

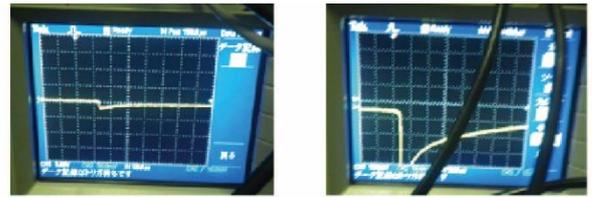
無視できる大きさになると推測される。

4. 観測雷現象より求められる測定系機能

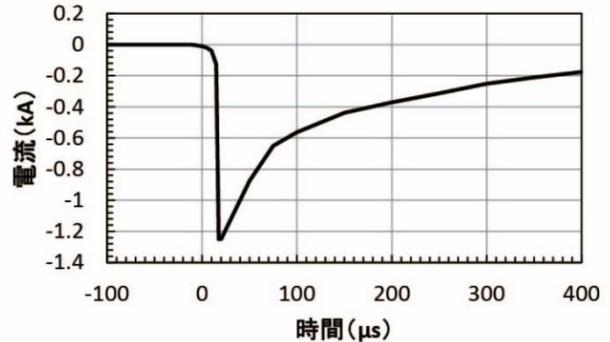
4-1 上向き雷前兆現象

2015年図10に示す直撃雷が観測された時、上向き雷の前兆現象が測定された。しかし、測定時間幅が500μsと短かったため、図11に示す4つの細切れの断片的な測定になってしまった。この現象は、USBメモリーへの書き込み時間が設定した測定条件で最大330msがデッドタイムになることを考えると全体で約1秒持続していたことになる。この結果から、直撃雷が上向き雷であった場合、前兆現象全体の測定を可能にするため、直撃雷の測定系は、図12に示すように直撃雷のトリガーと同時に前兆現象を遡って750ms記録することで、上向き雷についての前兆現象全体が測定可能になるようにした。

観測結果の電流変化は、電荷補給を待ちながら放電が不連続で段階的に進展するようにはなっておらず、連続的な変化で変動しているように思われる。ステップリーダ進展で電荷補給が間に合なくなる雷雲からの下向きでなく、山麓からの連続的な電荷補給が可能になっていることで生じた現象と見ることができ、現象の発生時間全体を観測可能にすることでどのように生じているか正確に現象を知ることができる。



(a) DSOによる観測波形



(b) DSO観測波形からの再現波形

図10 2015年8月13日5時6分落雷による高圧ケーブル内接地線観測電流

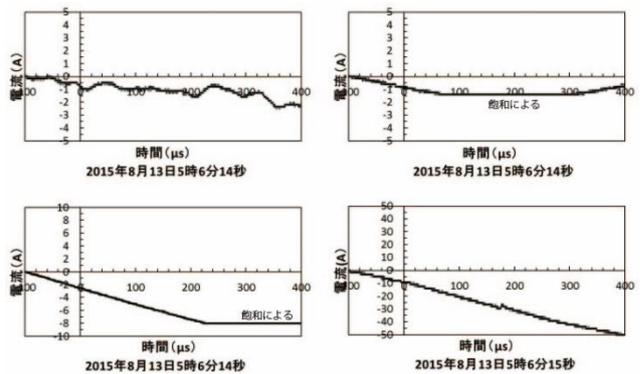


図11 2015年8月13日5時6分に観測された落雷初期の接地線電流変化

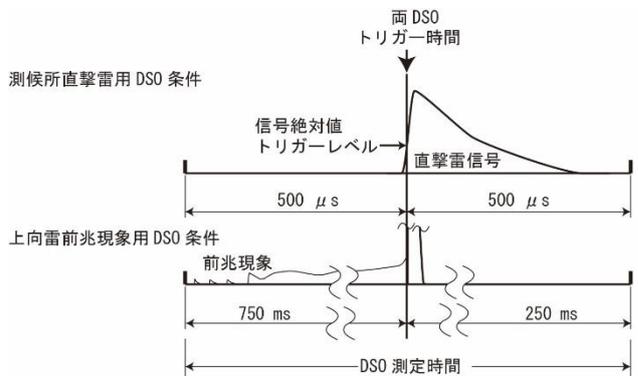


図12 測候所直撃雷と上向き雷前兆現象測定用DSOの信号トリガーレベル・位置と測定時間幅

この測定は、図12に示すように、直撃雷電流測定用と上向き雷前兆現象測定用により行うことになる。直撃雷は大電流測定用ログウスキーコイル電流計で測定するようにし、適切

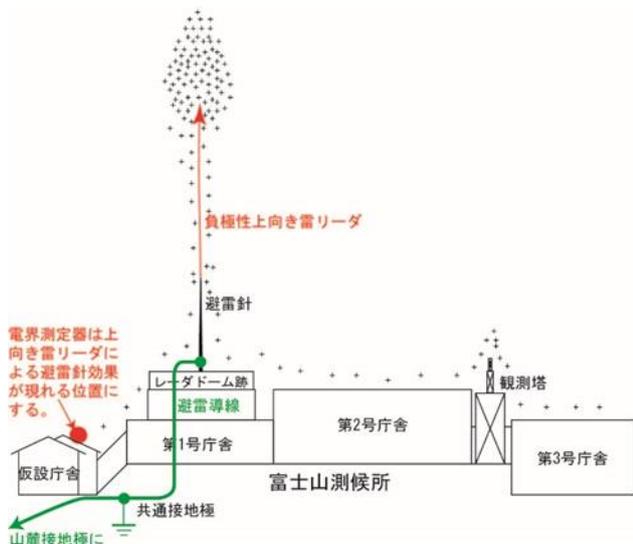


図13 上向きリーダ観測のための理想的な避雷針位置と電界測定器の位置

なトリガーレベルにより、確実に直撃雷信号を測定できるようにし、一方、前兆現象は十分な高感度ログウスキーコイル電流計で測定し DSO の機能を活用し 750 ms 前まで遡って測定電流履歴が十分な分解能で得られるメモリー長で記録できるようにすることで前兆現象を捉えることができるようになる。

また、上向きリーダが進展することで周囲の電界に変化が現れるはずであり十分速い時間応答性のある電界測定計で周囲の電界を測定できるようにすることで前兆現象をより正確に捉えることができるようになると考えている。

この現象の発生頻度を高めるため、効果が現れ易い位置で測候所から突出した高さの避雷針が必要である。この場所として、図 13 に示すように、元レーダドーム中央にあるレーダ支持鉄パイプを利用して、避雷針の強固な基礎になることと、測候所の山麓側代表接地極近くになるため、避雷導線は短くて避雷針の電位上昇を小さくできること、また被雷電流が作る電圧降下による周囲への影響は小さくなる。特に北側になる 2 号、3 号庁舎、及び観測塔は、上流に位置することになり自身への落雷による被雷電流による電圧降下は上流に配置される観測機器に大きく影響することになる。これが小さくなることからレーダドーム跡への避雷針設置は測候所を活用する他の研究にも好ましく、雷の影響を受けにくい環境を提供できるものと考えている。

4-2 ステップトリーダとリターンストローク

2017 年夏季測定で測候所近傍の落雷に図 14 のステップトリーダが測定された。しかし、この前兆現象が使用 DSO の測定時間に収まらなかったため、引き続き生じるリターンストロークは測定できていない。測候所近傍の落雷で観測される下向き雷のステップトリーダ全体を測定できるようにし、且つ引き続き生じるリターンストロークを測定可能にすることが必要である。実現方法として、図 15 のように使用 DSO の電

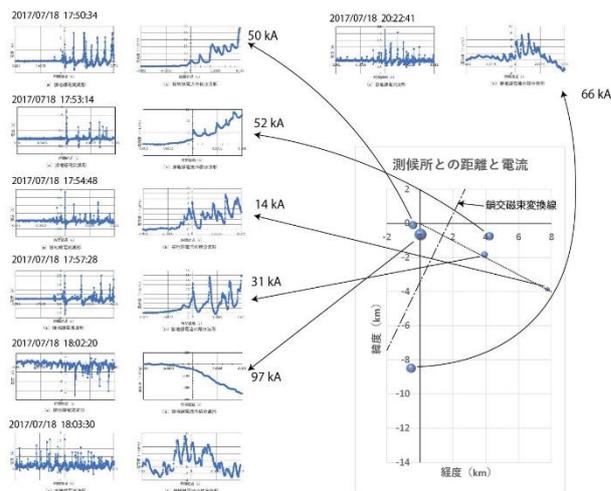


図 14 リーダによる接地線電流測定波形の特徴



図 15 下向き雷ステップトリーダ・リターンストローク測定用 DSO、及び周辺雷現象測定用 DSO のトリガーレベルと測定時間幅

流測定は、電流が小さなステップトリーダから大きなリターンストロークまでの電流に対し、数桁の単位の測定を十分高い分解能で可能になるようにし、他方測定時間は、ステップトリーダ前兆現象に見込まれる時間 20 ms とその後のリターンストロークが十分入る 50 ms を確保し、USB メモリーへの記録は十分な時間分解能が得られるメモリー長で記録することが必要になる。

このステップトリーダとリターンストロークの測定は、図 16 に示す測定系の測候所近傍雷ステップトリーダ・リターンストローク用で行うことになる。ステップトリーダの初期の現象は周辺雷用の高感度測定系でも捉えることは可能になる。

測定電流はできるだけ小さな値から大きな値まで桁の単位で測定可能にするため、ログウスキー電流計の電流分解能、及び直線性はできるだけ高くすることが必要である。そのため SN 比もできるだけ大きくすることが必要である。

4-3 仮設避雷針の実現と実現までの校正方法

仮設避雷針の実現は、被雷電流の絶対測定を測定可能にして被測定高圧ケーブル内接地線電流との同時測定により校正を可能にするだけでなく仮設避雷針からの上向き雷現象の観測等に使用できる。

高圧ケーブル内接地線測定電流を全接地線に流れる電流に換算するため、校正が必要であるが、まだ実現していない。この校正は、測候所被雷を一個所にまとめられる避雷

針を設けることで可能になる。しかし、まだ測候所への被雷を一ヶ所にまとめられる仮設避雷針の設置は実現していない。2018 年度夏期測定期間も高压ケーブル内接地線電流を測定していたのみである。

なお、接地線回路を構成する各回路インピーダンスの周波数特性は全て同じで周波数依存性は無いことを仮定できれば、以下のように校正値を決めることが可能になる。

測候所が作る接地線回路の外部に電流発生源が起因する雷現象で電流を既知のものとするのは、測候所の直撃雷である。この被雷電流を測定し、同時に測定した被測定接地線電流との比を取ることで校正値を決めることが可能である。

測候所の被雷は頻繁にあるわけではないので、測候所への被雷個所は一個所にまとめられるようにし、被雷時確実に直撃雷電流と被測定接地線電流を同時測定できるようにする必要がある。直撃雷電流は正確な電流を絶対測定可能なシャントにより測定する必要がある。

費用等で測候所被雷個所を一個所にまとめられない状況もあるので、実現できるまでは落雷情報の落雷時刻・位置・電流から測候所の直撃雷電流を知り、同時測定した被測定接地線電流との比から校正値を求める方法もある。高い校正精度を得るため仮設避雷針の実現は必要であるが、校正用仮設避雷針を実現するまではこの方法を適用せざるを得ないと考えている。

測候所が作る接地線回路の内部に電流源ができる電磁結合による電流に対する校正方法は異なる。外部の場合は(1)式になり、内部の場合は(2)式になる。しかし、測候所接地極抵抗が大きく、山麓側接地抵抗は小さく $Z_{EF} \ll Z_{EWS}$ ($Y_{EF} \gg Y_{EWS}$) の場合、外部の場合でも(2)式に近似でき校正値は同じと考えてよい。

4-4 富士山雷現象を観測可能にする測定系

必要な測定系は、測候所から山麓に繋がる接地線に電流を流す3-1~3-5の現象による電流が測定でき、上向き雷とステップトリーダの何れの現象の特徴も捉えることができる測定系でなければならない。これを満足できる測定系として、考案したものが図16の測定系である。

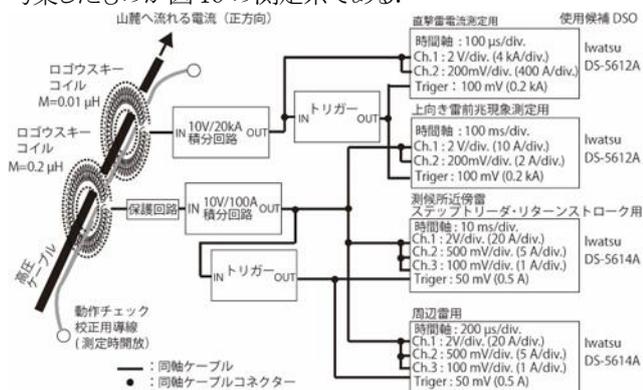


図 16 富士山測候所での雷現象観測に必要な接地線電流測定系

測定系は、オフセットの低減、高い直線性、及び大きなSN比が求められる。

電流計出力のオフセット変動がトリガーレベルを超える場合、トリガーできなくなり測定すべき信号を測定できなくなるので、できるだけオフセットを小さくすると共に電流出力信号のSN比はできるだけ大きくして、トリガーレベルはできるだけ小さくすることが必要である。その結果、小さな電流になる雷現象や減衰量が大きくなる遠方の雷現象が測定可能になる。

ログウスキーコイル電流計の低雑音化は、自身の低ノイズ化と同時に測定系に侵入する外部ノイズの侵入も小さくできる測定系にすることが必要である。

ログウスキーコイル電流計のオフセットは、できるだけ小さくすると共に測定周波数範囲に影響しないAC結合を通して安定なトリガーレベルを決めることが必要になる。現在使用している測定系のトリガーは、AC結合を通してオフセットのバイアスを抑制してから絶対値を取ることでトリガーできるようにして正負極性何れの雷にも安定なトリガーを可能にしている。

DSO 各入力 of 垂直軸は、8 bit 分解能であるが、その分解能を実質的に高くする方法として、レンジを変えた複数チャンネルを使用する方法を採用している。例えば、直撃雷測定系では2V/div.と200 mV/div.を採用するため、16 bitの分解能が得られる。

DSO 各入力 of 水平軸は、必要とされる測定時間を十分な分解能が得られるメモリー長のあるものが必要である。

4-5 山麓側での接地線電流測定の実現、及び接地線電流の位置情報への影響評価

ログウスキーコイル電流計は、図1の山麓側で架空線から埋設高压ケーブルの立ち下げ部分に設置することになる。しかし、100 VAC 電源が無いため、天候に左右されず長期間連続使用が可能な太陽光発電とバッテリー等を組み合わせたコンパクトな電源が必要になる。これを実現することで、山麓での接地線電流測定は、夏期に限らず通年測定が可能になるため、冬期の落雷現象も知るようになる。

山麓側接地線電流の測定を可能にすることで、測候所側で測定した接地線電流と比較することで逆流電流の影響を知ることができ、また測候所で測定した接地線電流より逆流電流の影響を取り除くことができる。測候所側接地線電流評価が定量的にでき解析し易いものになる。

2015年8月13日5時6分に測候所直撃雷があったが落雷情報による落雷位置は測候所から東に1.4 kmであった。この差の原因は放電路が斜めで実効的に位置がずれたか、あるいは東山麓側接地極に繋がる接地線の流れたことにより実効的な落雷位置がずれたのではないかと推測している。この考えが正しいかどうかは測候所直撃雷時の位置情報の

蓄積から統計的に評価できるものになると推測している。夏期の2ヶ月だけの観測では頻度は少なく、山麓での接地線電流測定を可能にすることで通年観測を可能にして、できるだけ多くの測候所直撃雷を観測可能にする必要がある。

4-6 データ処理方法

多量の測定データが得られることになるため、人手に頼るデータ処理では対応できない。測定データには複数の雷現象が重畳しており、それぞれを分離したうえでそれぞれの現象に対応したデータ処理を行うことになる。

解析方法をどのように行うかを決め、プログラム処理ができるようにすることになる。可能であれば測定の度ごとに処理し、取り出し扱えるようになっていることが必要である。

並行して、どのような測定系にする必要があるか、得られたデータ処理をどのように行うか、仕様を決め、アルゴリズムを作ることが必要である。

時間校正されていることで他の観測、落雷上や電界測定などと合わせて雷現象のより詳細な評価が可能になる。

現在データの記録は4測定系にそれぞれ4台のDSOで記録している。DSOのそれぞれのタイマーは独立であり、それぞれに時間校正が必要である。現在実施している時間校正は、次のようにしている。先ず測候所に搬入前に「117」の時報に一致するように各DSOの時刻を合わせる。測定終了後に各DSOの時間と「117」の時報との時間差、及び測定中の等時現象、例えば遮断器の開放・投入時の測定電流時刻と合わせて校正している。1秒以内の正確度での校正が可能である。一昨年提供頂いた落雷情報は、世界標準時(UTC)を使用しており9時間加えることで日本標準時(JTC)に変換できる。データ処理を考えると将来各DSO共統一した時刻で記録処理されるようにすることが必要である。

5. 雷現象位置による測定電流

5-1 重畳した代表的な測定信号

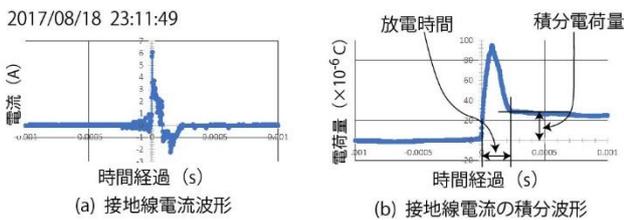


図17 接地線電流測定波形と接地線電流積分波形表示例
測候所起点 経度差：26.7213 km, 緯度差：-10.0060 km, 電流：-155 kA

図17は、重畳した代表的な測定信号の一例として、接地線電流測定波形とその積分波形の表示例を示している。雷位置と両波形から電磁結合による接地線電流と積分電荷が現れる現象が重畳したものになっている。電磁結合による電流変化は、落雷位置の負極性落雷が作る電磁結合による接地線電流極性に合致する。積分電荷が現れる現象は落雷位置と雷極性から測候所電極捕集電流の可能性は無い。静

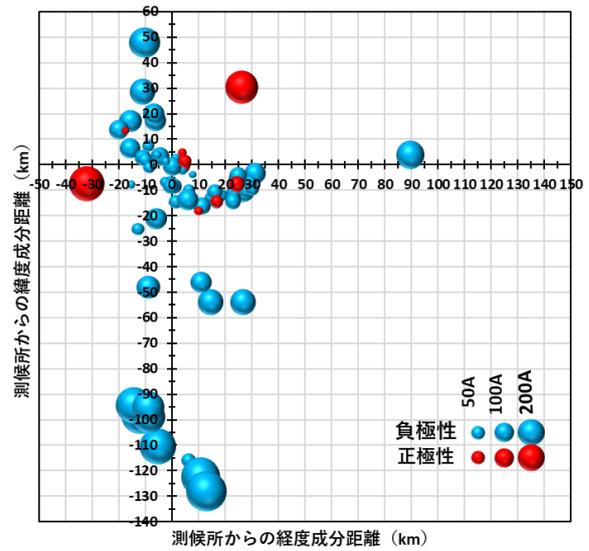


図18 落雷位置とその雷極性・電流

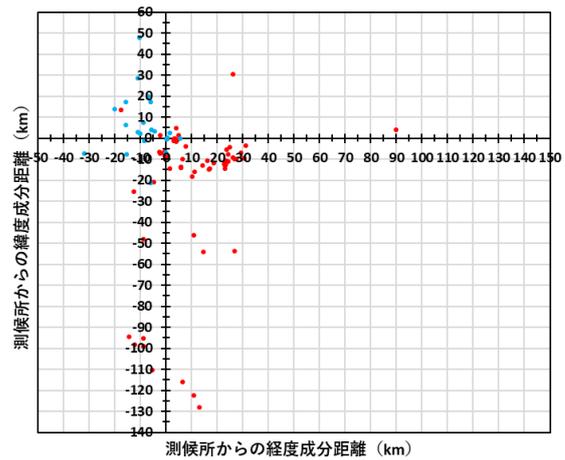


図19 雷測定位置の負極性雷時接地線電流極性

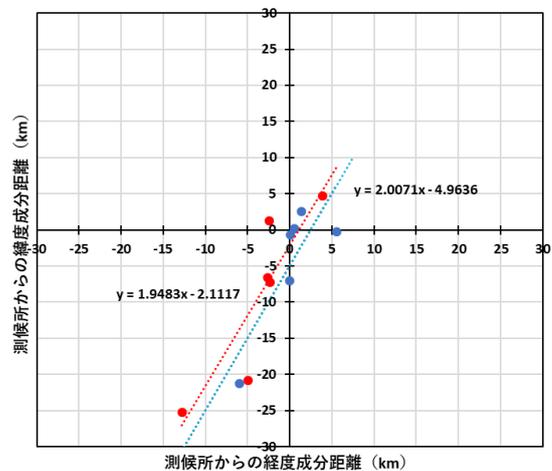


図20 鎖交磁束変換線の求め方

電誘導電流があるいは山麓からの逆流電流によるもの、あるいはいずれも重畳したものと推測される。放電終了後の電荷量の減少変化は電流計積分回路コンデンサの放電時定数によるものか静電誘導電流によるものと推測している。

5-2 観測された落雷位置とその雷極性・電流

図 18 は、2017 年に観測された落雷位置と雷極性・電流である。測候所を原点に横軸に経度距離、縦軸に緯度距離にした落雷位置の雷極性と雷放電電流が上から下に流れる場合が正極性でバールーンは赤色になる。下から上に流れる場合が負極性でバールーンは青色になる。正極性の全てが雲放電によるものと推測される。図中右下にあるバールーンの大きさが 50 A, 100 A, 及び 200 A の電流の大きさになる。

図 19 は、全ての測定点雷放電位置の雷極性を負極性とし、放電路が鉛直になることを仮定したときに接地線に流れる電流極性を測定結果から決めたものである。雷放電位置の電流極性(山麓方向に流れる電流を正としている)は正を赤点、負を青点として示した。

5-3 鎖交磁束変換線・実効的接地線位置と検出感度

図 20 は、図 19 の赤色測定点西側端 6 点、青色測定点東側端 6 点を選び、それぞれの一次近似線を求めたものである。採用測定点からは、明らかに異常な測定点は外している。鎖交磁束変換線は、両一次近似線の平均をとった結果、以下の一次近似線が得られた。

$$y = 1.98x - 3.54 \quad (3)$$

実効的接地線位置は、測候所を通り鎖交磁束変換線に直角に交わる以下の式になる。

$$y = -0.506x \quad (4)$$

山麓側架空線から高压ケーブルで立下部になる 73 号柱は、 -13° の線上にある。測定結果から求められた鎖交磁束変

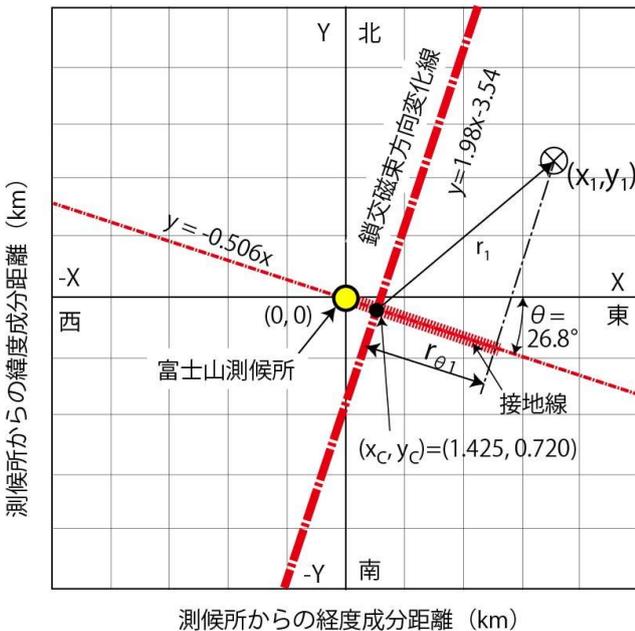


図 21 観測結果から求めた鎖交磁束変換線

換線と直角になる測候所に繋がる既存接地線の等価コイル面は、 -26.8 度で、一致しない。この差は配線経路と山麓までの途中の接地の影響を受けて現れたものと推測している。正確には測定を積み重ね多数の観測から統計的に鎖交磁束変換線を決め、測候所と繋がる既存接地線の等価コイル面の位置を決める必要がある。

図 21 は(3)式の鎖交磁束変換線と(4)式の実効的接地線の直線を示した。この結果から既存接地線雷現象検出器の感度は、図に示した落雷位置と電流から以下の関係式から求めることができる。

落雷電流に比例する検出電流の積分値と、落雷電流が周囲に作る磁束で接地線が作る循環路との鎖交磁束成分との比、 k は以下のようにして求まる。

$$\begin{aligned} \max \int_0^t I_d dt &= k I_{L1} \left(\frac{1}{r_1} \right) \left(\frac{r_{\theta 1}}{r_1} \right) \\ k &= \frac{\max(\int_0^t I_d dt)}{I_{L1}} \left(\frac{r_1^2}{r_{\theta 1}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

なお、

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2} \\ r_{\theta 1} &= (x_1 - x_c) \cos \theta - (y_1 - y_c) \sin \theta \end{aligned}$$

である。

従って、落雷情報の落雷位置と落雷電流から落雷電流放電路と接地線が作る循環路との結合係数を求めることができる。

6. 終わりに

以上、今後に生かされるように今迄の研究開発過程で分かったことをまとめた。

既存接地線に流れる電流を測定することで高感度な雷現象測定器になることも分かり、さらに雷現象をうまく捉える測定系の開発を進めている。図 16 は次年度測定に使用予定の測定系である。直撃雷、上向き雷前兆現象、ステップリーダーとそのリターンストローク、及び周辺雷現象測定を可能になるように設計している。

解決しなければならない課題は多くあり、そのための研究開発も並行して進めている。当面の課題として以下のものがある。

- (1) 仮設避雷針の実現は、①被測定高压ケーブル接地線電流の雷電流への正確な校正値の決めることができ、②上向き雷が周囲に与える変化の観測も可能にする、③落雷の影響を受け難い観測ができ、共同利用研究には好ましい環境が実現できる。
- (2) 測定方法は洗練されてきており、感度を高くすることで多量のデータが取得可能になっている。マニュアル処理では間に合わない状態になることは分かっており、貴重な雷現象によるものを見落とす可能性もある。自動と手動両処理を実施できる体制を確保することが必要

である。

- (3) 山麓での接地線電流測定を可能にすることで測候所被雷を通年観測できる。測候所への逆流電流の影響も評価できるようになりより正確な現象を捉えることができるようになる。
- (4) 十分応答性のある電界測定の実現は、上向き雷の避雷針効果の測定を可能にするだけでなく、測候所誘導電流変化と電界変化が同期することは予測されることであり、より詳細な雷現象を捉えることができるようになると推測している。
- (5) 測定系は観測期間測候所に持ち込み設置し、終了時に撤去する方法で観測を続けているが、基本的に手作りであり、そのためと思われる運搬・設置によるトラブルが発生している。信頼できる測定系の確立は継続した観測に必要である。測候所に設置したままにする、あるいは設置に手間がかからない一体化を進めることも含め検討する必要がある。

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、関電工の井上毅氏、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岩崎洋、川原庸照、長門敬明、横山勝丘、天野和明、佐藤裕介、増本亮、宮城公博、澤田実、及び千田敦司の山頂班の各氏、増田純夫、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、この研究の一部は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」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) 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) 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回レーザーセンシングシンポジウム特別講演.
- 10) 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.
- 11) 北川信一郎 (2001年). 雷と雷雲の科学, 森北出版.
- 12) 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.