

# 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

安本勝<sup>1</sup>, 鴨川仁<sup>2</sup>, 佐々木一哉<sup>3</sup>, 土器屋由紀子<sup>1</sup>

1. 富士山環境研究センター, 2. 静岡県立大, 3. 弘前大

## 1. はじめに

富士山測候所(以下, 測候所)の電源は, 山麓から高压ケーブルを引き込んで得ている. 高压ケーブル内に電源供給の高压線と対に接地線があり, この接地線は山麓の接地極に繋がっている. このことに着目し, 測候所の直撃雷が観測できると考え 2013 年に測定を開始した. この年の観測期間には落雷が無かったが周辺雷による電流が観測された. 以降はこの周辺雷現象により流れる電流も観測している. しかし, 雷頻度に比較し観測できる雷信号電流頻度は著しく小さかった. この原因は, オフセットによる電流変動が大きくてトリガーレベルを超えてしまい測定できなくなるという現象によるものであった. その後, その対策をすることで高い測定頻度が得られるようになっていた. 開発を通じて本観測装置がかなりの高感度が得られることも分かってきた. 例えば, 当初はゼロレベルの変動は回路に起因するものと考えていたが, 雷雲との静電誘導によるものが支配的で, 測定系が雷雲による電界変化を高感度で捉えていることも分かった. 本報告は, 今までの開発経過で明らかになったことを報告し, 及び今後どのように進めるべきかを提案する.

## 2. 接地線電流の測定方法

図1は測候所引き込み高压ケーブルの構成を示している.

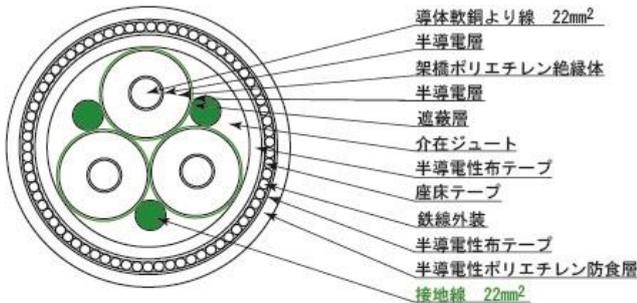


図1 富士山測候所引き込み高压ケーブルの構成  
架橋ポリエチレン絶縁ポリエチレンシースー重鉄線外装ポリエチレン防食ケーブル

高压ケーブルは測候所内に引き込まれ, 内蔵接地線は端末より引き出され測候所共通接地極に接続されている. 他方の端末は山麓側の接地極に繋がっている. 従って, もし測候所が被雷すれば雷電流はこの高压ケーブル内蔵接地線を通して山麓側に流れる. このことに着目してこの高压ケーブルにログウスキーコイル電流検出器を取り付け, 流れる電流を測定できるようにした. 因みにログウスキーコイルは軸方向の磁場には感応せず接地線に電流が流れることにより生じる周方向の磁場のみで感応するようになっている. 山麓

に繋がる接地系統は, 併設された接地線及び測候所接地極が複数になるため, 高压ケーブルの内蔵接地線の電流を校正して直撃雷電流が求まるようにする必要がある.

直撃雷電流測定用に用いたログウスキーコイル電流検出器の基本回路を図2に示す. ログウスキーコイル出力電圧は, 高压ケーブルに流れる電流が作る周方向磁束の微分値に比例する. 従って, 電流に比例する出力電圧を得るために積分回路を通す回路構成にしている. 出力電圧は図中の式になり高压ケーブル内蔵接地線に流れる電流に比例した値になる. 直撃雷電流は大きいので, 感度を落とし, 高压ケーブルとログウスキーコイルの相互インダクタンスは  $0.01 \mu\text{H}$  とした. 電流計出力電圧の接地線電流への換算は図中の式に設計値を代入し求めている.

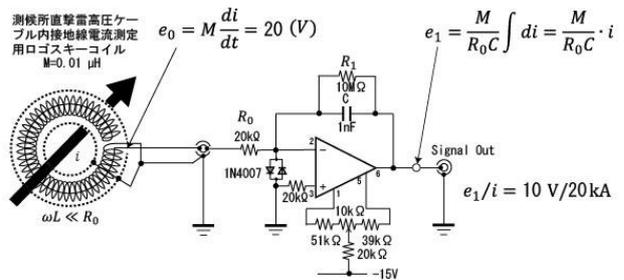


図2 測候所直撃雷電流測定用ログウスキーコイル電流計

一方周辺雷用のログウスキーコイル電流計は, 図3に示す回路構成で基本回路は直撃雷電流測定用と同じである. しかし周辺雷現象による電流は小さくなるため, 感度を大きくしている. 例えば高压ケーブルとログウスキーコイルの相互インダクタンスは  $0.2 \mu\text{H}$  にしている. このため直撃雷があった場合, ログウスキーコイル出力電圧は過大な電圧になり回路を破損させる. これを防止するためログウスキーコイル出力に低静電容量の避雷器(ネオン管で代用)を設けることで保護するようになっている.

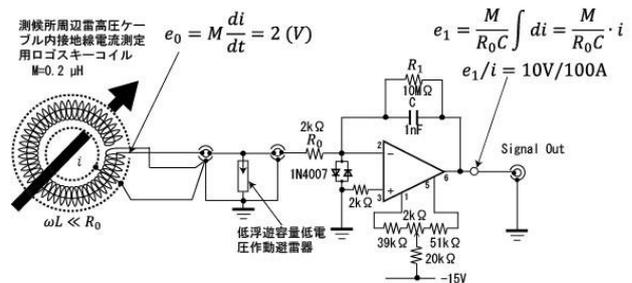


図3 周辺雷接地線電流測定用ログウスキーコイル電流計

最初に用いたトリガー回路は, いずれの極性でも動作するように絶対値回路のみを通してトリガーに使用していた. し

かし、オフセットの影響が無視できず、安定な測定ができなかった。この欠点は、トリガー回路には AC 結合を導入することで解決した。

接地線電流測定系は当初は測候所被雷電流のみを考えた1系統の電流測定であった。現在は直撃雷電流に加えて周辺の雷現象によって流れる電流と雷現象間の相関を見るため4台のデジタルストレージオシロスコープ(以下、DSO)で測定するようになっている。

昨年の夏期測定では測定系は図4の構成で測定した。DSO-1 は測候所が被雷した時の雷電流を観測するよう、直撃雷と認められる十分高い一定レベルの電流(200 A)でトリガーされるようになっている。もし上向き雷であった場合、前兆現象が観測された経緯があり、その現象も捉えて DSO-2 に記録されるようにしている。

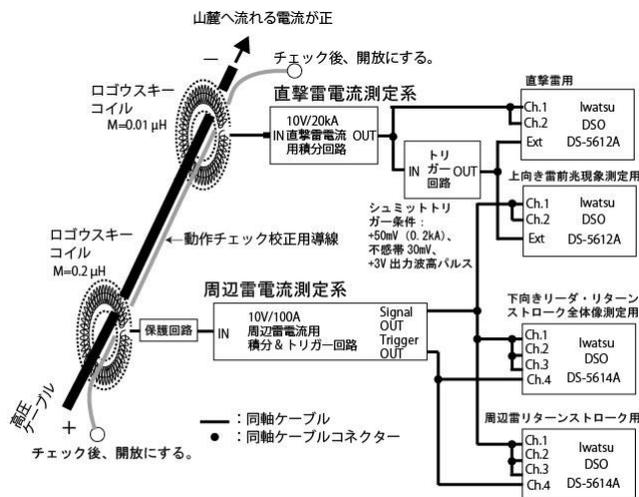
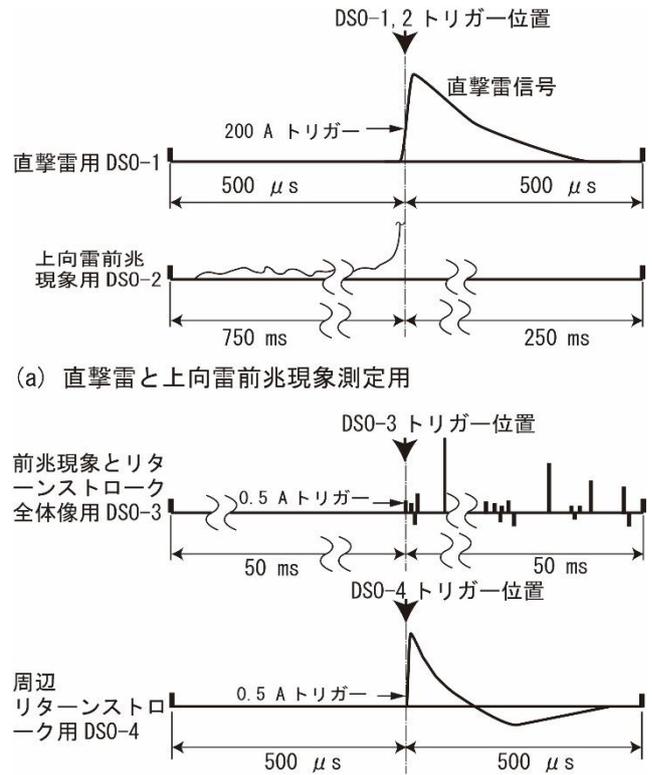


図4 2019年度接地線電流測定系

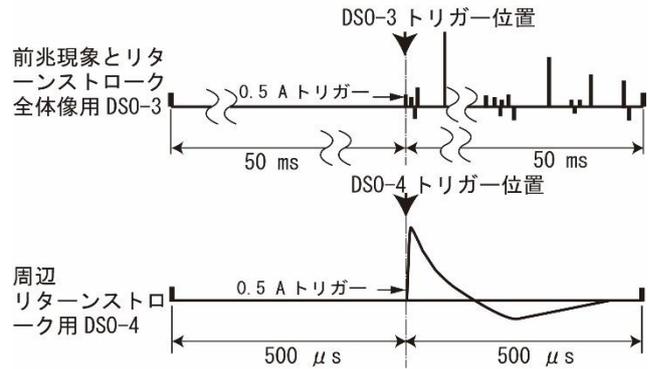
DSO-3 は前兆現象とリターンストロークの全体像を明らかにするため、100 ms の長時間測定で、且つ十分な分解能が得られるようにするため100 kptsで測定している。DSO-4は、周辺雷のリターンストロークを観測することを目的にした。しかし、昨年度は多数の雷現象をとらえたが、感度を高めたことが災いして前兆現象の小さな放電電流を多数捉えたものの、続いて起きるリターンストローク電流迄の測定にならず、リターンストロークの測定頻度は小さい。

各 DSO の設定条件を図5に示す。電流計出力電圧測定は、DSO を使用しているが、1チャンネルの分解能は8 bit である。高分解能を得るため DSO の2ないし3チャンネルを同一信号の測定に使用し、小信号を明確にとらえた。例えば、3チャンネルを使用する場合2 V/div. (20 A/div.), 500 mV/div. (5 A/div.) 及び100 mV/div. (1 A/div.)を割り当てることで、小信号では0.4 mV (4 mA)の高分解能を得ている。

2019年に測定した各DSOのトリガー条件と測定時間を図5に示す。オフセットの影響が受けないようにDSO入力の各信号及びそのトリガー信号は、全てAC結合とした。DSO-1及びDSO-2のトリガーは、Ext10トリガーを使用するため、ト



(a) 直撃雷と上向き雷前兆現象測定用



(b) 前兆現象とリターンストロークの全体像と周辺リターンストローク測定用

図5 2019年接地線電流測定用DSOの信号トリガーレベル・位置と測定時間幅

リガー条件を超える信号に対しシュミットトリガー回路で必要条件のパルスを作り加えている。いずれの測定系もAC結合(カットオフ周波数7.5 Hz)を使用しているため、10 Hz以下の周波数成分の測定は困難になる。積分回路の時定数CRは、0.01 sである。

DSOの測定結果は、ロギング機能によりUSBメモリーに記録するようになっている。この記録中は、DSOの測定はできず、デッドタイムになる。デッドタイムは、相関関係のある現象間の時間が測定時間より小さくなる場合および現象の頻度が小さくランダムであれば無視できる。しかし、雷現象が頻発する場合、デッドタイムにより測定できなくなる雷現象は多くなる。雷雲が来た場合、落雷現象の発生頻度は高く、デッドタイムにより測定できなくなるものが多くなる。

### 3. 接地線電流を流す雷現象

雷現象により接地線に流れる電流は、直撃雷電流、雷放電路との電磁結合、測候所電極捕集電流(以下、捕集電流)、雷雲電荷変化による静電誘導電流、及び山麓からの雷逆流電流の五つが考えられている。接地線の電流 $i_{gw}$ は、複数の現象による電流が重畳している場合が一般的で、全ての現象が重畳した場合、次式で表される。このうち $i_{DL}$ 、 $i_c$ 、 $i_{bf}$ はいずれか一つであり、それと $i_{EMI}$ 及び $i_i$ の三つの現

象の重量が一般的である。

$$i_{gw} = i_{DL} + i_{EMI} + i_c + i_i + i_{bf} \quad (1)$$

$i_{DL}$ : 直撃雷電流,  $i_{EMI}$ : 電磁誘導電流,  $i_c$ : 捕集電流,  $i_i$ :

静電誘導電流,  $i_{bf}$ : 山麓からの逆流

ここでは雷現象がどのように接地線に電流を流すか説明する。

### 3-1 測候所直撃雷

測候所が被雷した場合, 落雷電流は測候所接地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と山麓側接地極を繋ぐ接地線に流れる電流がある(図6)。前者の接地抵抗は山麓側接地抵抗よりも1桁以上大きいいため山麓側に繋がる接地線に大半が流れている。しかしその接地線は複数あり, 高压ケーブル内接地線はその一つである。被雷電流測定は高压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, 被雷全電流は校正して求める必要がある。

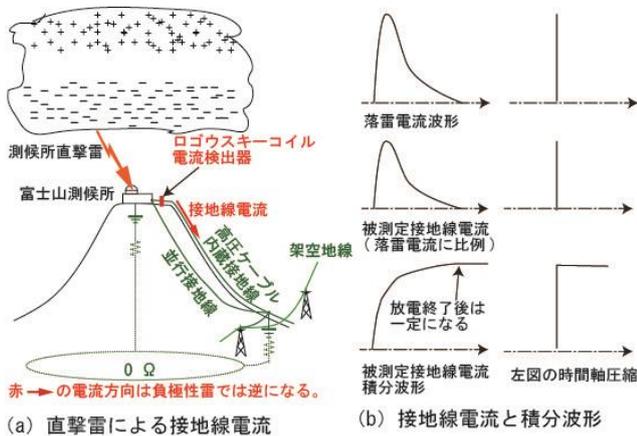


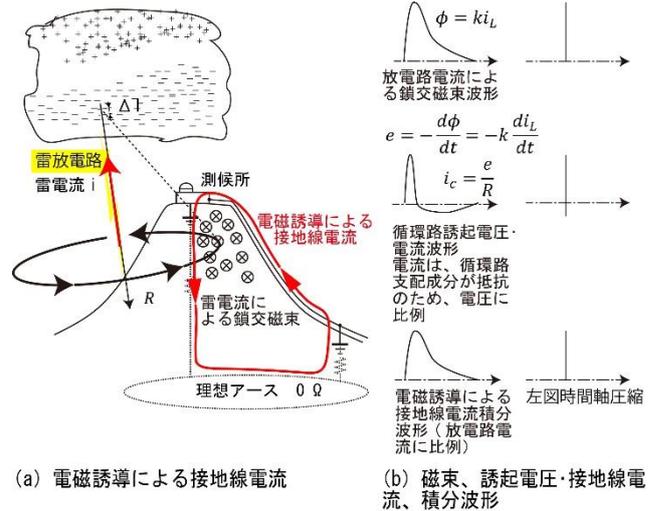
図6 測候所直撃雷電流

直撃雷電流の校正方法は二つ考えられる。一つは, 測候所に, 測候所全体を保護下に置くことができるとともに測候所の被雷個所が一ヶ所に集まるように工夫した避雷針を設け, 被雷電流を絶対測定し, 被測定高压ケーブル接地線電流を校正する方法である。精度の高い校正が可能になる。これは測候所の耐雷脆弱個所を保護することにもなる。もう一つは, 落雷情報より測候所直撃雷位置の落雷電流を知り校正する方法である。この場合の誤差は落雷情報の電流測定精度で決まることになる。

校正の実現で正確な被雷電流を求めることができ, 測定電流パルス波形の時間積分により落雷放電電荷量も求められる。この校正值は, 電磁誘導以外は電流信号源から見て同一の回路構成になるため, 同じとして適用できる。また山体抵抗が大きいため, 電磁誘導電流も近似的に適用可能と考えている。

### 3-2 雷放電路との電磁結合

図7に示す測候所接地線と山体が作る循環路の電磁誘



(a) 電磁誘導による接地線電流

(b) 磁束、誘起電圧・接地線電流、積分波形

図7 電磁誘導による接地線電流 (測候所西側の負極性雷の場合)

導電率は, 被測定雷現象の雷放電路電流が作る磁束の中でその循環路と鎖交する磁束を微分したものになる。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 測定電流の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。電磁結合の影響を知る指標になる。
- ③ 測定電流積分値のパルス幅時間は放電持続時間になり, そのパルスの積分量が放電電荷量に比例する。
- ④ 雷放電路が鉛直の場合, 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。一昨年の測定からこの鎖交磁束方向変換線は以下の式を得ている。

$$y = 1.98x - 3.54 \quad (2)$$

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で表される。

$$y = -0.506x \quad (3)$$

今後観測を蓄積することでさらに精度の高い鎖交磁束方向変換線を求めていくことが必要である。

落雷放電路の位置や方向によって感度は変化する。落雷放電路を鉛直であると仮定することで落雷情報から得た落雷位置と電流の情報を測定電流と比較することで, 落雷位置による電流検出感度を定量化できる。また等価的な循環路の位置と断面積も決定可能になると考えている。精度を高めるため, データの蓄積が必要である。

雲上部が正極で下部が負極の上下間の雲放電の場合, 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、かなり遠方のものまで測定可能になると推測される。

### 3-3 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、一般的に山体抵抗が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。従って時間軸を圧縮するとステップ状の変化になる。
- ③ 電流極性は、負(正)極性落雷の場合、負(正)になる。

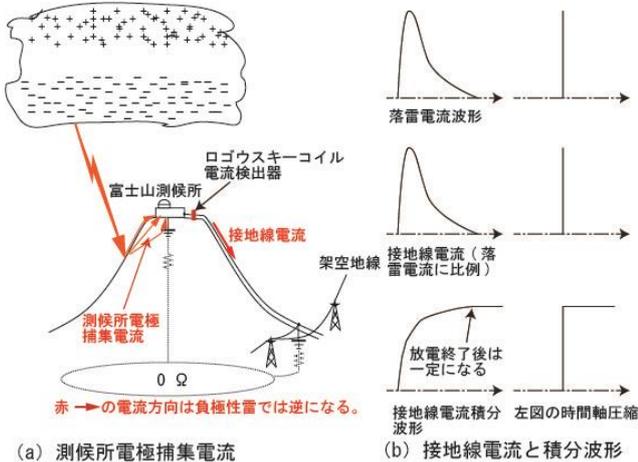


図8 測候所電極捕集電流

### 3-4 雷雲電荷変化による静電誘導

3776 mにある測候所という大面積(南北約50 m×東西約25 m)の風電極と上空の雷雲との等価結合容量を考えると、図9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、測候所の電界が変化し、次式で表される静電誘導電流が山麓接地極と繋がる接地線に流れる。

$$i_i = S \epsilon_s \epsilon_0 \frac{d}{dt} E_s \quad (4)$$

ここで、 $i_i$ : 静電誘導電流、 $S$ : 測候所等価表面積、 $E_s$ : 測候所表面電界、 $\epsilon_0$ : 真空中の誘電率、 $\epsilon_s$ : 測候所周囲大気の比誘電率、である。

式中の $S$ は概数として知ることができるので、接地線電流測定系は、十分応答性の高い電界測定器により絶対測定した電界により誘導電荷量を求めることができる。電界の時間変化で校正することにより測候所表面の電界変化率検出器としても利用できる。電界変化率を時間積分することで電界を求めることが可能である。長期の絶対的安定性は確保で

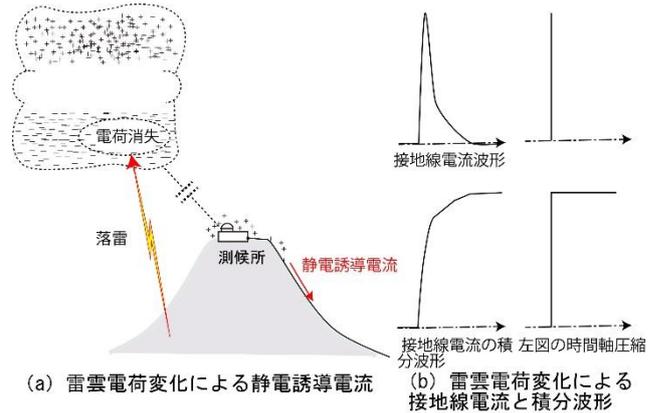


図9 雷雲電荷変化による静電誘導電流

きず、基準電界を決めるには、絶対測定が可能な電界測定器の併用が必要になる。

この静電誘導電流は以下の特徴がある。

- ① 放電初期、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が明確に現れないが、測定電流を積分することで放電時にステップ状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、積分値は変化せず一定になる。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( $CR = 0.01$  s)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。

### 3-5 山麓からの雷逆流電流

この逆流電流は、図10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

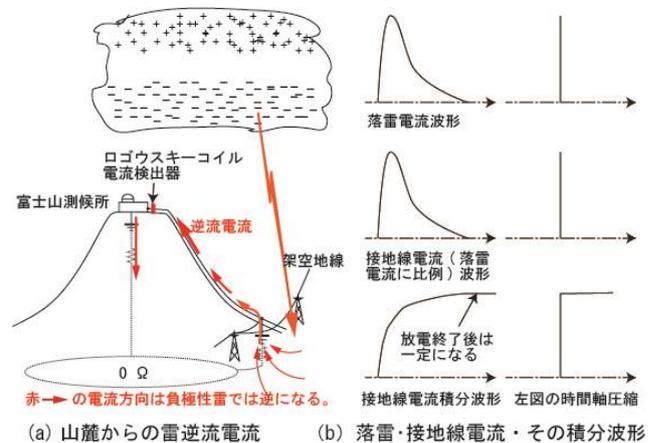


図10 山麓からの雷逆流電流の等価回路

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体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。時間軸を圧縮した場合、負極性雷は正のステップ状変化として重畳する。

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、測定個所がこの循環路に入らないことからこの電流は小さく、測定結果には現れないと考えられる。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を  $3 \times 10^8$  m/s と  $2.5 \times 10^8$  m/s とすれば、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  $\mu$ 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 山麓架空視線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、西側では無視できる大きさになると推測される。

#### 4. 測定結果および現状の性能と問題点

##### 4-1 2019 年測定結果

図4の周辺雷電流測定系の周辺雷リターンストローク用 DSO-4 には、雷現象により接地線に流れる多数の電流が測定された。一方で、トリガーレベルを下げたことで雷現象による小さな電流パルスで動作し、本来目的としたリターンストロークの記録がデッドタイムに入り、測定できなくなっている。もしこれが十分測定できていれば、他の落雷位置と雷電流の落雷情報とを考え合わせることで、雷現象測定器としてのより正確な特性評価が可能になる。次回測定ではリターンストローク測定のため、トリガーレベルを 200 mV (2A) に上げる必要がある。また、測定時間は、リターンストローク全体像の測定が可能のように 200  $\mu$ s/div. に変更することが好ましい。

以下は、周辺雷電流測定系の下向き雷のリーダとリター

ンストローク全体像測定用測定系 DSO-3 で観測されたものである。

(1) 停電前 2019 年 7 月 23 日 01:20:19 観測例(図 11) 接地線電流測定だけでは高圧電源の漏洩電流は分らない。

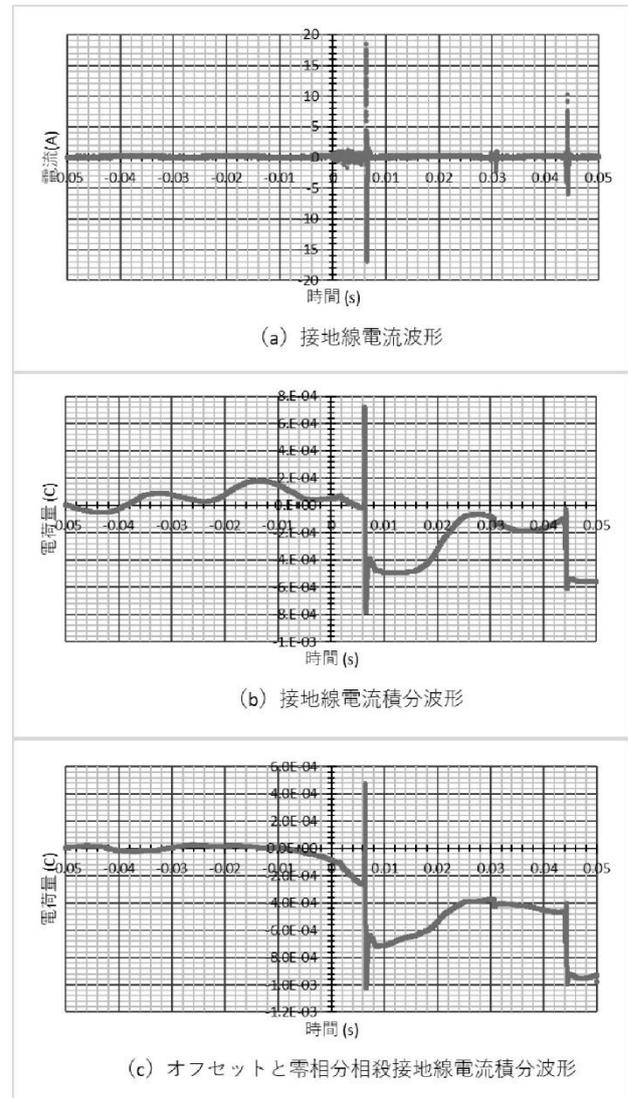


図 11 2019 年 7 月 23 日 01:20:19 観測波形

測定した接地線電流を積分することで零相電流が見えてくる。また複数の雷現象により誘起される電流も見えるようになっている。例えば、0 ms ~ 6 ms の前兆現象での変化は接地線電流ではステップリーダが観測され積分値からは静電誘導電流が観測されている。6 ms のリターンストロークパルスは、測候所周辺に落雷があり負極性雷であれば、その捕集電流が測候所から接地線を通して山麓に流れていることを示している。31 ms 付近の変化は接地線電流とその積分波形から雷雲での小さな放電と静電誘導が重畳した変化と読み取ることができる。44 ms 付近の変化はリターンストロークと捕集電流が測定され、前者は結合が小さいため小さくなっていると考えられる。また短い時間で前兆現象もあり、2 重落雷と考えられる。

(2) 停電時 2019 年 7 月 23 日 01:23:02 観測例(図 12) 停電は、第 1 柱にあるキュービクルの地絡継電器が動作し遮断器が動作し生じたものである。図 12 は地絡継電器が動作時に測定された高圧ケーブルに流れた電流である。この電流は被雷によるものである可能性は高いと考えているが、地絡継電器を動作させた電流とどのように関係するかはまだ不明である。接地線に被雷電流が流れた場合、接地線の特性インピーダンスにより大きな電位になるが、接地線と高圧電源線との結合が十分で無い状態があり、高圧ケーブルが長い(約 7 km)ことから両者に大きな電位差が生じたことにより動作地絡電流が流れたものではないかと推測している。

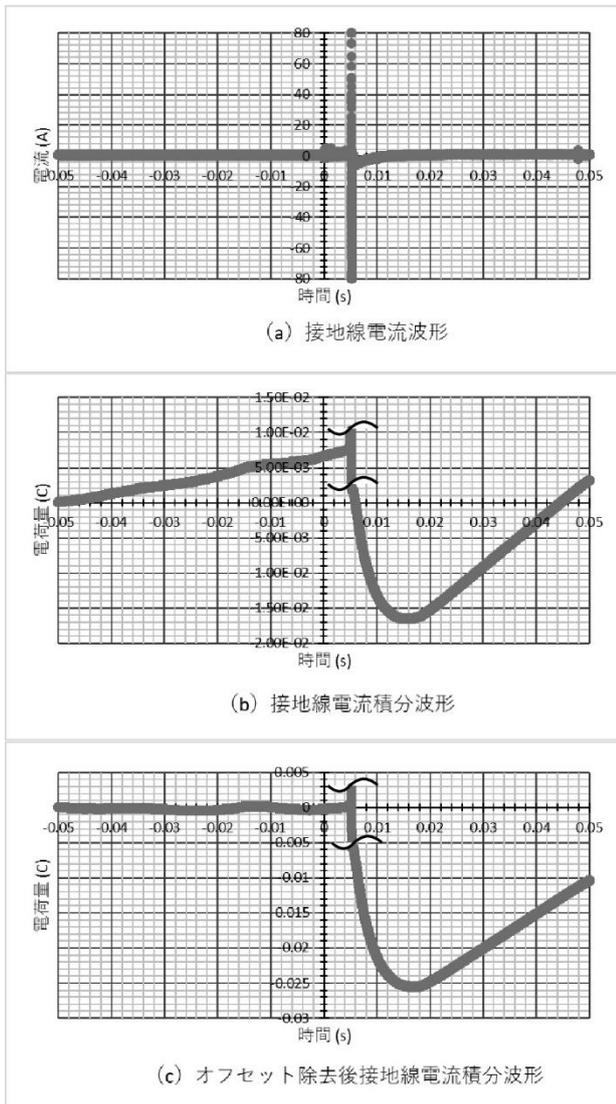


図 12 2019 年 7 月 23 日 01:23:02 観測波形

0~5 ms に現れた前兆現象は、拡大した場合、正の電流が流れ測候所表面電界が減少していることを示しており、ステップリーダと思われる電磁結合による電流が頻発して観測されている。リターンストロークと推測されるインパルス状電流は DSO-3 の測定範囲を超えているが、直撃雷電流測定系では動作するトリガーレベルまで達していない。

引き続生じている変化は、高圧電源遮断により高圧ケーブルの充電電流が流れたことにより生じたものと推測される。(3) 停電中 2019 年 7 月 23 日 01:23:50 観測例(図 13) 図は停電中に観測された接地線電流とその積分波形である。零相電流の影響は現れていない。もし測候所電源が高圧ケーブルから供給を受けない状態であれば、零相電流の影響は受けず測定結果のデータ処理も大幅に少なくなることになる。

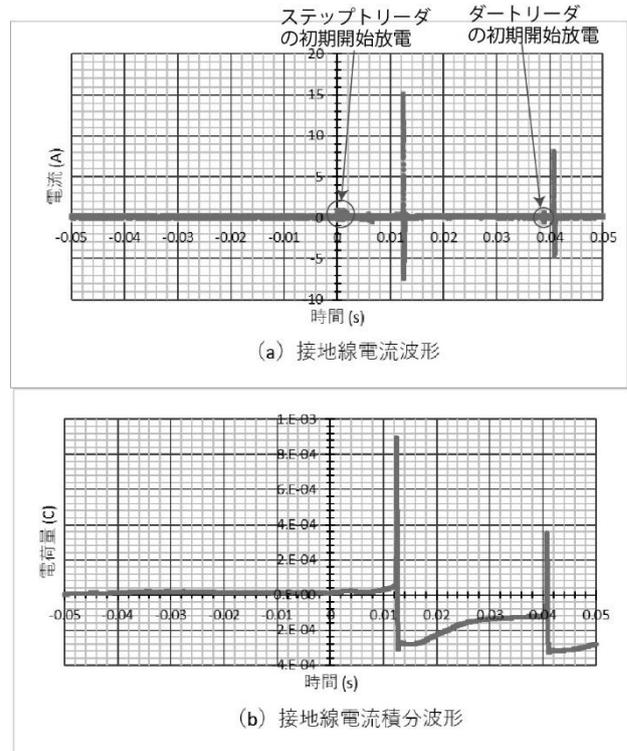


図 13 2019 年 7 月 23 日 01:23:50 観測波形

測定結果は、電磁結合による電流、捕集電流、及び雷雲の静電誘導電流の三つが重畳したものと推測される。最初の落雷のステップリーダと 2 番目の落雷のダートリーダの初期開始放電が観測されている。この前兆現象は他の観測例でも観測される傾向がある。0~12 ms の区間では、図では小さいが静電誘導の影響が見られる。積分値から 12 ms の位置のリターンストロークは、電磁結合による電流と捕集電流が重畳したものである。その位置から正方向への変化は積分回路の時定数による減衰と考えられる。2 番目のリターンストロークの形状が 1 番目と相似していることから、同じ放電路でリターンストロークがあったと考えられ、2 重落雷と推測される。

#### 4-2 今迄の測定で得られている一般的な傾向

(1) 積分で分かる情報 接地線電流を積分することで、電磁誘導による電流は、放電路の雷電流に比例する電流が求められる。また時間圧縮した場合、捕集電流や静電誘導がリターンストローク時の大きな電荷量変化がステップ状変化になる。電磁誘導以外との現象の識別が可能になる。例

例えば測候所電極捕集電流、及び逆流電流は、落雷極性の落雷時の変化になるのでステップ状の変化を伴う。変化の極性から落雷の極性や流す現象が何なのか知ることができる。

(2) 進展せず消滅する放電 観測された雷現象はリーダ、雲間放電や落雷と認められる放電だけではなく進展せずに消滅してしまう小さな放電が多数あることが分かった。

(3) 無視できないデッドタイム 測定の都度 USB メモリーに記録する方法を採用しているため、この記録時間中はデッドタイムとなり測定できない。これが 1~2秒あるため、その時間の雷現象は捉えることができず見落とすことになる。また測定時間を小さくとると測定時間以上の従属現象は捉えることができなくなる。見かけ上、従属現象は測定できないことになる。雷現象が頻発する場合無視できない。

2019 年測定ではトリガーレベルを小さくしたことで、小さな放電の頻度が多く、従属する大きな放電が測定できない場合が多く生じたと推測される。このことからトリガーレベルの設定で考慮すべきは以下の点である。

- ・遠方では前兆現象であるリーダの小さな放電は測定に掛からなくなるので大きな放電だけに着目すればよい。

- ・測候所近傍の雷現象は前兆現象の信号が大きく前兆現象によりトリガーが掛かるため、リターンストロークまでの全体像を測定できる別の測定時間 100 ms の測定系で測定する。

(4) ステップリーダ進展に伴う静電誘導電流変化 ステップリーダの進展に伴い接地線電流は正に増加する傾向があり、雷雲電荷は見掛け上減少傾向にあることになる。測候所の正の誘導電荷量は、山麓側に移動し、小さくなる傾向があることを示していることになる。

(5) ステップリーダに伴う現象 負極性リターンストロークの前兆現象に見られる特徴として雷放電路電流との電磁結合による同一極性の小パルス電流が頻発し、雷雲電荷変化も生じて正の静電誘導電流が観測される。測定結果からこの現象は見掛け上雷雲電荷が小さくなることを示している。ステップリーダの進展過程は線状放電路に電荷を集め蓄積され線状端に高電界が生じることで線状に延びていくことを示していること、またこの中には発展できずに消失してしまうものがあることが推測される。

(6) 複数現象が重畳 重畳する複数の現象を同時に高感度で測定できる結果、雷現象を理解する有益な情報が得られるようになってきている。負極性のリーダが測候所に対抗する場合、誘導電荷は正電荷で大きくなるため、誘導電流は負の方向になると推測される。しかし直撃雷以外のリーダは測候所以外に進展するため、雷雲そのもの見掛け上の電荷は少なくなる。そのためその影響を受ける静電誘導電流は一般的に正方向に流れ、ステップリーダには静電誘導電流が増加する傾向が見られると考えられる。

## 5. 今後の進め方

### 5-1 観測漏れの防止対策

DSO の観測ではトリガーにより測定を開始すると測定時間とその後の記録時間はトリガーを受け付けない。雷現象が頻発する場合、雷現象がデッドタイム、即ち記録時間に入る可能性は大きくなり、その場合その雷現象は測定できなくなる。信号電圧及び記録時間共に高分解能が得られ連続記録が可能なデジタルレコーダがあればデッドタイムは生じなくなる。しかし必要な観測信号の分解能と記録時間分解能を満足させるとなると導入費用はかなり大きくなると推測している。

別の方法として、観測に必要な最小信号レベル以上の雷現象のみを観測可能にすることであれば、最小信号レベル以上の入力で動作し、測定時間は相関がある雷現象の電流測定が十分可能なできるだけ長時間測定ができ、デッドタイムになる時間は別の測定器にボタンタッチすることで実質的なデッドタイムを無くすることができる。実現方法は図 14 に示すようにすることで可能になると考えている。できるだけ長時間測定ができ、且つ記録時間、即ちデッドタイムが小さな測定器が必要になる。それらがどのようになるかによって、ある一定レベル以上の信号に対してデッドタイムの影響を無くす測定器(DSO を考えている)の使用台数が決まる。

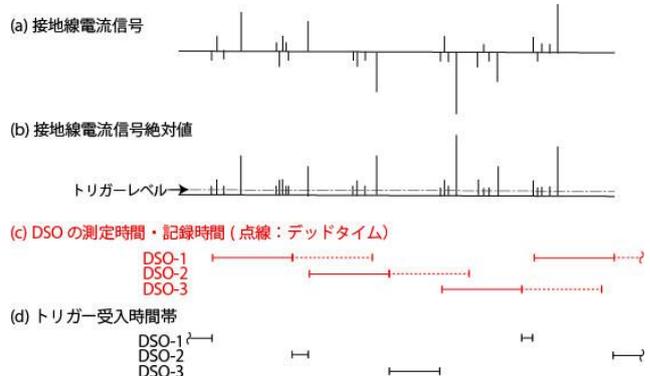


図 14 デッドタイムの無い測定方法例

### 5-2 データ処理方法

処理データ量が大きくなるため、人力に頼らないデータ処理方法の確立が必要である。人力ではデータ処理はエクセルに変換してから行うことになる。データが 1 kpts の場合、人力でもスムーズに処理できるが、100 kpts になると 100 倍以上の時間がかかる。データ量は多くなっているため人力では実質データ処理は行えない。必要と思われるものを選択して処理する以外にない。取得したデータ全体の処理はデータ処理のアルゴリズムを決定しプログラム化して自動処理できるようにすることが必要である。今回の処理手順は以下のようにして行った。

① 各チャンネルに記録される採用データは測定範囲を超えない最大値のチャンネルのものを採用している。

- ② オフセットは最初の「全 pts×4/10」(以下, 除去調整区間)の平均値を全体から差し引く.
- ③ 積分処理をする.
- ④ 積分しても偏りが残るのでさらにオフセットの調整をする.
- ⑤ 零相電流が重畳しているので, 重畳分を求めて差し引くことになる. 以下の手順で行うことになる.
- ⑥ 50Hz 正弦波の振幅 $A_m$ は除去調整区間の最大と最小の1/2とする.
- ⑦ 位相差は, 一周期の交点位置を $P_i$ とし, 以下の式から求めることになる.

$$\begin{aligned}\omega t + \varphi &= \sin^{-1}(P_i/A_m) \\ \varphi &= \sin^{-1}(P_i/A_m) - \omega t\end{aligned}\quad (5)$$

解は二つになるので, 測定積分波形と比較し選択することになる.

相殺する零相電流  $I_0$ は, 次式になる.

$$I_0 = A_m \sin(\omega t + \varphi)\quad (6)$$

以上によりオフセットと零相電流分は除去できる. なお, オフセットには回路に起因するものではなく雷雲電荷変化による静電誘導電流が支配的であることに注意が必要である.

富士山測候所の山麓に繋がる接地線は, 高压ケーブル内蔵の接地線だけではなく複数の接地線がある. これを高压ケーブル内蔵の接地線のみでできれば零相電流は大きく抑制できるが富士山測候所建物の接地抵抗を無限にできないため, ゼロにはできない.

高压電源使用時はどうしても零相電流が生じる. これを大幅に抑制するには高压電源を使用しないことであるが, 消費電力が多い夏期研究利用期間中に電源を止めることはできない. 可能にするためには利用期間外に十分な容量のバッテリー電源により稼働することで零相電流の影響を受けない測定が可能になる. データ処理も楽になり, 精度も高まると考えてよい.

自動データ処理体制が確立できなければ, 処理できないデータが蓄積することになってしまう. 解決する別の方法として, 観測データとその処理方法を定めて公開し広く活用してもらう方法もある.

### 5-3 山麓での接地線電流測定の実現

山麓側からの逆流電流はまだ不明な点があるが, 将来落雷電流を山麓側でも観測できるようにすることで逆流電流のより正確な定量評価が可能になり, 新たな知見・情報が得られるようになって考えている. 73号柱の架空線から埋設ケーブルへの立ち下げ部分にログウスキーコイル電流検出器を設けることで可能になる. 基本的には測候所と同一の測定系を設ける必要がある. 測定系を動作させる電源が無いので, 風力発電や太陽光電池付きバッテリー電源で動作させる必要がある. 測定系の省電力化を計り必要な電源容量を小さく済むようにすることも必要である. またボックスに収めるなど設置場所の天候に耐えられるようにすることも必要であ

る. この観測は通年観測が可能である.

### 5-4 観測現象の解明

今迄の測定により得られた現象の特徴の原因解明が必要で, 以下のものがある.

- (1) 前兆現象の放電によるものと考えられる接地線検出電流パルス極性は同一であり線状放電路の進展は同じ方向になると推測される. これを裏付ける放電路帯電機構でなければならぬ.
- (2) 何故遠方駿河湾での落雷は正負に振れるのか, 説明できる発生機構が必要である.
- (3) ステップトリーダの進展に伴う静電誘導電流変化は雷雲電荷の変化を示し, 雷雲電荷の変化傾向は, 見掛け上, 測候所の誘導電荷量を小さくし正方向の電流増加を示していることになる.
- (4) 雷雲電荷は落雷により急激な変化を伴い, 測候所と山麓を繋ぐ接地線にはパルス状の静電誘導電流が流れる. 負極性雷の場合, これによる電流は山麓側(正方向)に流れることになる. その結果, 積分電荷量は正のステップ状変化になる. 山麓側の落雷により測候所に逆流してくる場合も同極性のため, いずれの現象かは電磁結合によるパルスの極性や位置により判定することになる.

### 6. おわりに

2013年の最初の測定から6年目になり洗練された雷現象観測装置になりつつある. まだ色々な問題点も明らかになっており, 改善を図っていくことで雷現象解析に威力を発揮できるものになると考えている.

以下に以上の今迄の成果と今後についてまとめた.

- (1) 雷現象が接地線に電流を流すメカニズムを明らかにした.
- (2) まだ問題点はあるが, 雷現象を反映した安定な高感度測定が可能になっている.
- (3) 雷現象の解析に適したデッドタイム対策方法を提案した.
- (4) 観測データは多くなるため, マニュアル処理では所要時間は膨大になるため自動データ処理を導入し, 省力化を計る必要がある.
- (5) 複数現象の測定が可能のため, 雷現象の全体像が見えるようになり, それぞれの現象を反映した測定評価が可能になっている. 測定を重ねることでより正確な雷現象の機構が明らかになるものと考えている.
- (6) 測定系の評価に必要な回路等定数の求め方について明らかにした.

雷現象により接地線に流れる電流の傾向が明らかになってきており観測の積み重ねによりメカニズムは明確になると考えている. そのためにもデッドタイムの無い測定方法, 及び人力に頼らないデータ処理方法の導入が必要である.

### 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、関電工の小志戸前孝史、井上毅の各氏、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
- 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) 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.
- 10) 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.
- 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) 高橋劭 (2009 年), 雷の科学, 東京大学出版会.
- 14) 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.