

富士山頂の雷測定で見える雷現象

安本勝¹, 鴨川仁², 佐々木一哉³, 土器屋由紀子¹, 鈴木智幸², 村田浩太郎⁴

1.富士山環境研究センター, 2.静岡県立大学, 3.弘前大学, 4.埼玉県環境科学国際センター

1. はじめに

接地線電流測定を始めた切っ掛けは、雷対策のため、接地システムの接続状態を調査したとき、接地線が山麓と繋がっていることが分かったことから直撃雷の測定ができるのではないかと、2012年夏の観測から接地線電流の測定を始めた。

この時、直撃雷は観測されませんでした。周辺雷による接地線電流が観測され、以降の観測では直撃雷だけでなく、周辺雷現象による接地線電流測定も行っている。2015年に上向きリーダの直撃雷が観測され、1秒近くの前兆現象も観測された。2017年の観測では回路、及びトリガーのオフセット対策により高感度測定が可能にできステップリーダが観測できた。2019年はステップとリーダとそれに続くリターンストロークの全体像の測定が可能になるように測定時間を長くする改良を加えた。この改良で、リーダとリターンストローク、および二重落雷の全体像を捉えることができた。

2021年は、第1雷撃が大電流の上向きリーダと考えられる二重落雷が観測された。2022年は、直撃雷大電流測定系でリーダと多重落雷が複数観測された。

測定系の改良を進めたことで富士山の雷現象が見えるようになってきている。本報告は測定から見える富士山の雷現象の特徴、及び今後の測定で改良すべき点について報告する。

2. 雷現象観測装置の構成

雷現象による接地線電流測定は、富士山体を活用した新しい手法の雷観測装置である。富士山測候所の既存の接地線内蔵の電源引込設備を生かして開発したもので、図1に示す構成(赤色部)になっている。

測候所は山麓から高压ケーブルを引込、測候所と山麓接地極は図2に示す高压ケーブル内蔵接地線で繋がっている。

測候所被雷電流は、測候所接地抵抗が大きく大半が接地線を通して接地抵抗が小さな山麓側に流れるため、ケーブル内接地線電流を測定することで知ることができる。

測候所と山麓は、接地線だけでなく富士山山体抵抗も繋がっていることになるため、この大きな循環路で落雷電流が作る磁束を高感度で捉えることができるようになってきている。

また、測候所は3776mの高さにあり雷雲の誘導電荷変化が受けやすく、静電誘導電流を検出することも可能になっている。この電流変化は、当初オフセットの変動によるものと考えていたが、誘導電荷の変化によるものであることがわかっている。

以上の雷現象により接地線に流れる電流は、ログウスキーコイル電流計で高压ケーブル全体の電流を測定することで得ている。ちなみに高压ケーブルには電源電流も流れるが、電源

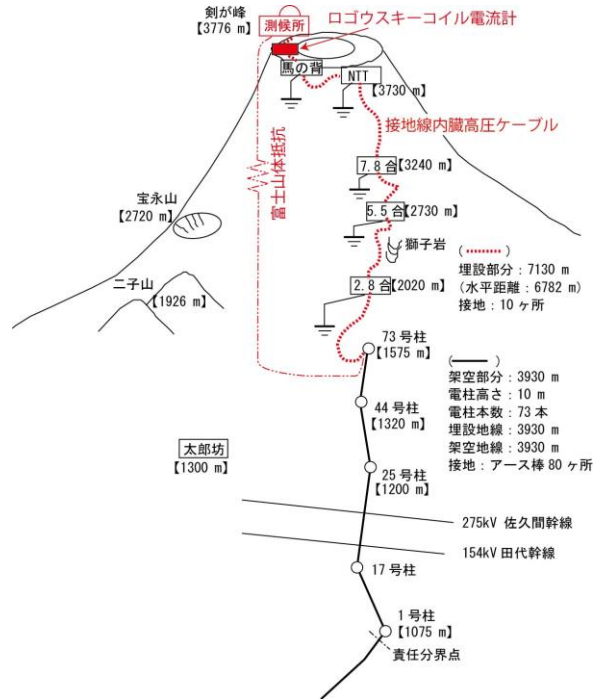


図1 富士山体測定系の構成

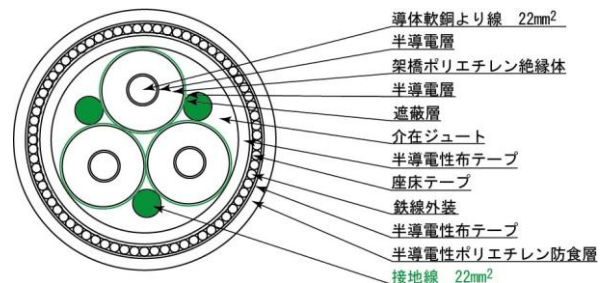
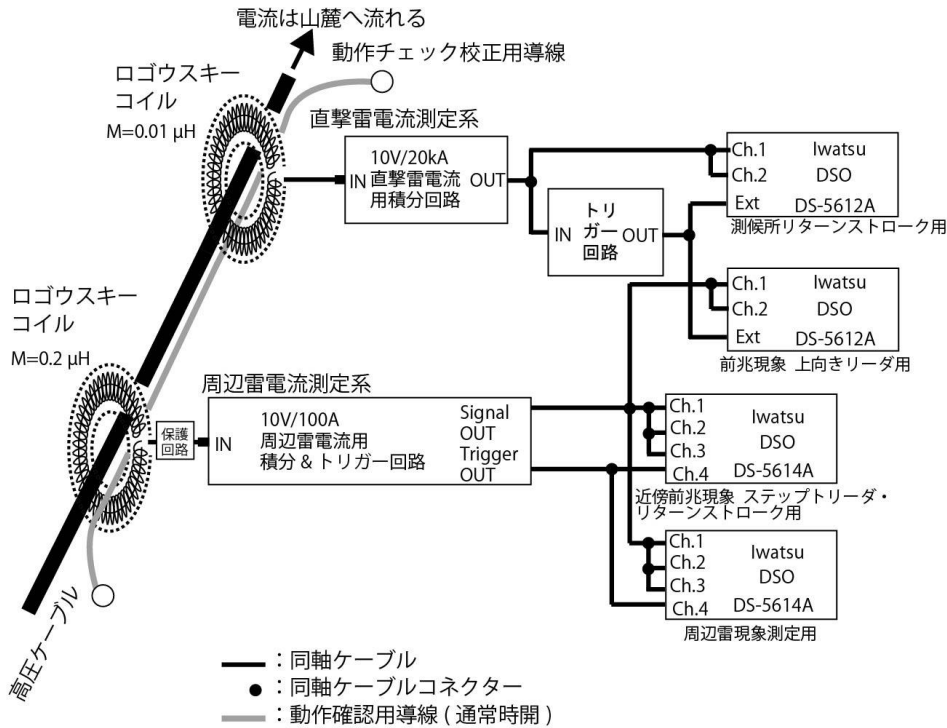


図2 富士山測候所引き込み高压ケーブルの構成

電流の漏洩が無ければケーブル全体としての電流、すなわち零相電流は流れない。電源電流の影響を受けないようにするため、本来は接地線と電源ケーブルを一体にしてログウスキーコイルで測定することが必要であるが、実現可能にするための費用や手間を考えると現実的でなく、高压システムの絶縁を確保することで高压ケーブルのみの測定で実現している。高压ケーブルに併設している接地線に流れる電流は測定しておらず校正する必要がある。図3が測定系全体を示している。

3. 接地線に電流を流す雷現象

富士山地上接地線に電流を流す雷現象は、観測から図4に示す五つあることが分かっている。



DSO 測定条件

- 水平軸
M Pos.: 0, 100 μs/div. 1kpts.
- 垂直軸
Ch.1: AC 2 V/div. (4kA/div.)
Ch.2: AC 200 mV/div. (400A/div.)
Trigger: エッジ, Ext10, 立上がり,
ノーマル, AC,
トリガーレベル 100 mV (0.2kA)
- 水平軸
M Pos.: +250ms, 100 ms/div. 1Mpts.
- 垂直軸
Ch.1: AC 2 V/div. (20A/div.)
Ch.2: AC 200 mV/div. (2A/div.)
Trigger: エッジ, Ext10, 立上がり,
ノーマル, AC,
トリガーレベル 100 mV (0.2kA)
- 水平軸
M Pos.: 0, 10 ms/div. 100kpts.
- 垂直軸
Ch.1: AC 2 V/div. (20A/div.)
Ch.2: AC 500 mV/div. (5A/div.)
Ch.3: AC 100mV/div. (1A/div.)
Ch.4: トリガーモニター
Trigger: エッジ, Ch.4, 立上がり,
ノーマル, AC,
トリガーレベル 50 mV (0.5A)
- 水平軸
M Pos.: 0, 200 μs/div. 1kpts.
- 垂直軸
Ch.1: AC 2 V/div. (20A/div.)
Ch.2: AC 1 V/div. (10A/div.)
Ch.3: AC 500mV/div. (5A/div.)
Ch.4: トリガーモニター
Trigger: エッジ, Ch.4, 立上がり,
ノーマル, AC,
トリガーレベル 50 mV (0.5A)

図3 接地線に流れる電流測定系の雷現象による測定条件

観測できる対地雷には三つある。一つ目が直撃雷電流である。二つ目が測候所電極捕集電流である。三つ目が山麓側被雷による逆流電流である。三つ目の逆流電流は富士山体抵抗のため電流は小さく数十から数百Aになると推測される。また極性は反転することになる。

対地雷以外で、四つ目に雷電流による電磁誘導電流、五つ目に測候所の静電誘導電荷変化による静電誘導電流がある。

電磁誘導電流は雷電流に比例した鎖交電磁束の微分変化起電圧を山体抵抗で除した電流になるため、電流を積分した値が落雷電流に比例したものになる。

静電誘導電流は雷雲電荷による測候所誘導電荷の変化により接地線に流れる電流である。例えば、雷雲の負電荷が大きくなると測候所の正の誘導電荷は増加する。この電荷は山麓から補給されるため、負の電流として観測される。

本観測装置は、これらの複数現象を同時に捉えることが可能になっている。このことによりより正確な現象解明が可能になっている。

図3はこの測定を実現している測定系の全景である。

接地線電流は、ログウスキーコイルで測定している。大電流用低感度系と小電流用高感度系の2種類を使用している。

DSO-1は直撃雷のような大電流の測定系に使用している。確実に直撃雷電流を捉えるため、トリガーレベルは大きくしており設計値は200Aとしている。

DSO-2は前兆現象上向きリーダ測定用である。DSO-1が動作したときにDSO-2も動作し750ms遡った時から高感度系ログウスキーコイルの出力電流を測定できるようにし上向きリーダ電

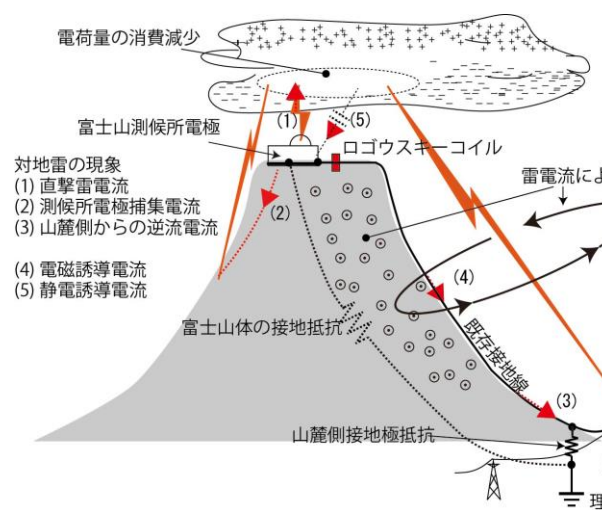


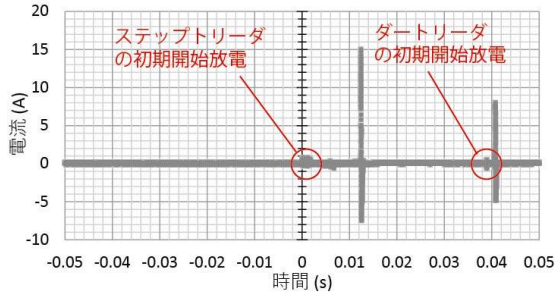
図4 富士山周辺落雷時に測候所と山麓接地極を繋ぐ接地線に流れる電流

流を捉えるようになっている。

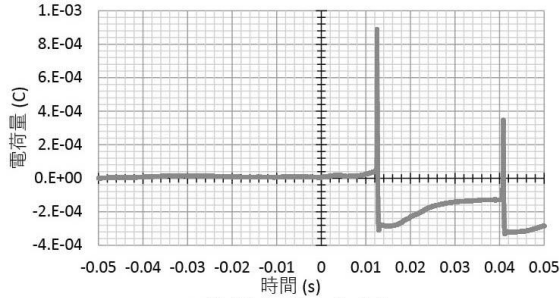
DSO-3は近傍の前兆現象、ステップリーダ・リターンストローク測定用である。また多重落雷の測定も可能である。トリガーレベルは0.5Aとしている。

DSO-4は周辺雷現象による電磁誘導によって流れる接地線電流測定用である。感度が高いため、遠方雷の測定が可能である。また近傍のステップリーダによる電磁誘導電流の測定が可能である。

DSO-2~DSO-4は感度が高く、静電誘導電流の測定が可能である。

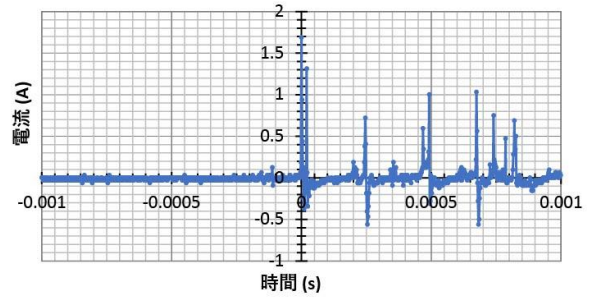


(a) 接地線電流測定波形

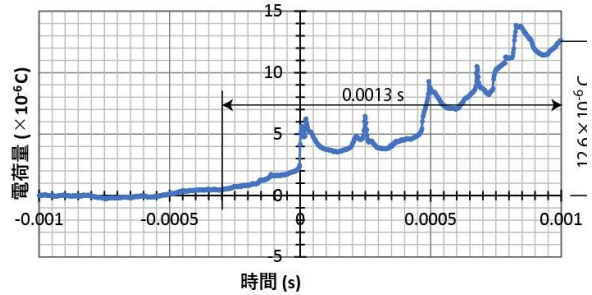


(b) 接地線電流の積分値

図5 2019年7月23日01:23:50に観測された二重落雷



(a) 接地線電流



(b) 接地線電流の積分値

図7 ステップリーダと静電誘導を反映した接地線電流 (at 17:53:14 on July 18, 2017)

4. 観測結果から見える雷現象

4.1 ステップリーダの初期開始放電

図5のDSO-3測定系で測定した電流波形は、電磁結合、電極捕集、及び静電誘導の各電流が重畳したものと考えられる。停車時に測定されているため、零相電流の影響は見られない。

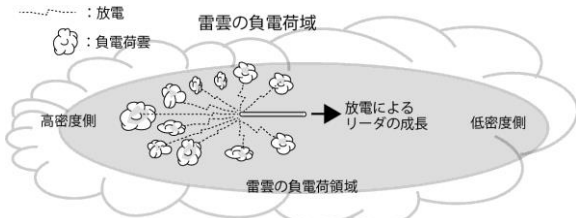


図6 ステップリーダの初期開始放電のモデル

第1雷撃と第2雷撃の積分値に相似性が見られることから、二重落雷であると考えられる。両者の雷撃間隔は約40msである。この間放電路のイオン・電子は再結合によって完全に消滅していないことを示していることになる。

いずれの雷撃にも一般的に観測されるリーダが観測されている。また両波形のステップリーダとダートリーダの初期開始放電が観測された。前兆現象初期のノイズ状パルスの原因は、放電路進展前のランダムな放電によるものと推測される。

リーダが発生する前、放電が頻発し、リーダができ一方で放電が伸びていき、もう一方は電荷密度が高く放電でリーダに電荷を集める。図6はこの状況を図式化したものである。

4.2 ステップリーダの進展

図7はステップリーダと静電誘導による接地線電流変化を測

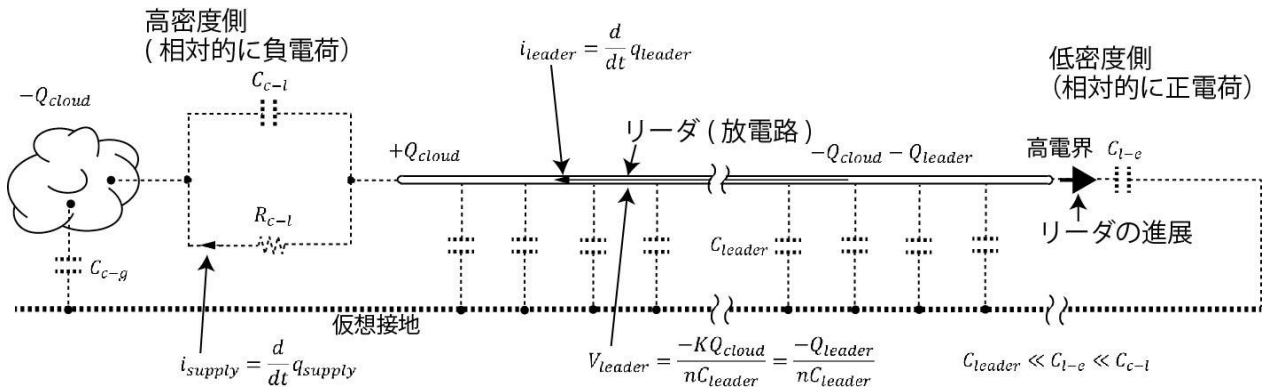


図8 負極性下向き雷のステップリーダの単純化モデルの等価回路

定している。ステップリーダによる電流は電磁誘導により接地線に流れる電流を測定し、それを積分することでリーダの進展で流れるリーダ電流に比例する電荷量として現わされている。パルス部分が放電により電流が流れてリーダが進展していることを示し、底の部分は放電が止まり、もう一方の放電路端で電荷を集めていることになる。電磁誘導電流の積分値はステップリーダ電流に比例するものであり、そのパルス極性が同じであることは電流方向が同じであることを示している。

図8はこの過程の負極性下向き雷のステップリーダの単純化モデルの等価回路になる。放電路は導体とみなすことができる。リーダの進展と共に放電路が伸び、雷雲からの電荷補給が間に合わず放電路の電圧低下、従って電界低下により放電が止まる。リーダ放電路は雷雲から電荷補給され、電圧が上昇、従って電界上昇により放電が再開する。同一極性の電荷密度が希薄な方向に高電界が生じ放電路が伸びていく。負極性下向き雷のステップリーダ電流は、低密度側進展方向と逆方向になる。高密度側の雷雲からの電荷移動は、ランダムな多数の放電路になり、ベクトル和としての電流は特定方向に成りにくい。

4.3 多重落雷

この放電の仕組みは電荷高密度側で複数の大きく帯電した放電路が生じていて、それがダートリーダに繋がることで多重落雷が生じているものと推測される。

図5に示される二重落雷の場合、1回目のリーダは長い、2回目のリーダは放電路が消滅せずに残っているため成長時間

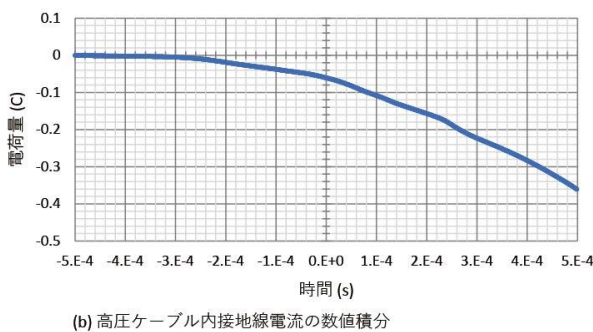
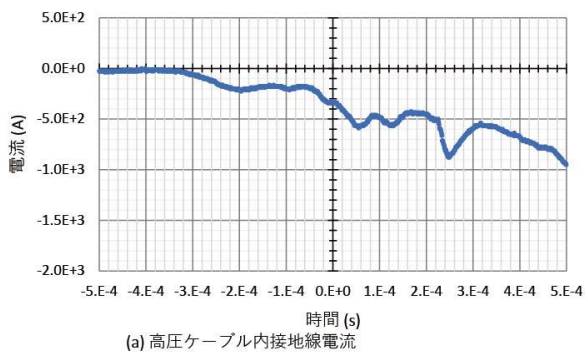
が無い分短くなっていると考えられる。

2021年8月18日に図9の二重落雷の測候所直撃雷が観測された。左の図が第1雷撃、右の図が第2雷撃である。上が観測された高压ケーブル内接地線電流である。下がその数値積分波形で電荷量になる。いずれも高压ケーブル内接地線に流れる電流で、接地線全体の電流に校正されていない。校正値を2とすれば、全接地線電流は2倍したものになり、電荷量も2倍したものになる。

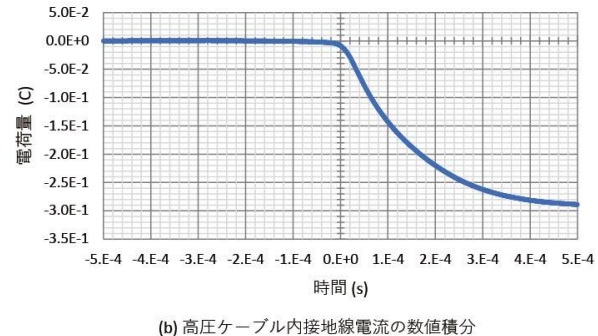
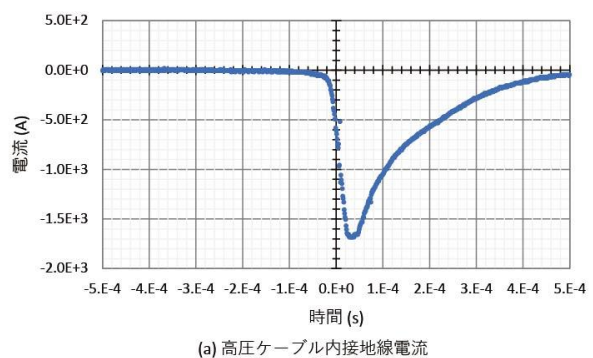
第1雷撃には、前兆現象が見られず、大電流の上向きリーダの可能性が高い。測定電流は測定時間には収まっておらず、測定範囲だけでも第2雷撃よりも大きな電荷量の落雷である。大きなリーダは他の観測でも見られることから富士山のように単独峰で雷雲が近く、大きな気流変化が伴うことによる高電界が生じる富士山特有の現象の可能性があると考えている。第2雷撃は第1雷撃の放電路をダートリーダとしたリターンストロークと考えている。

測候所周辺の下向き雷、上向き雷進展の特徴は以下のようにになる。下向き雷は測候所周辺の電界により進展方向は決まり、必ずしも測候所被雷とはならない。他方、上向き雷は電荷補給が得られる測候所から連続的に進展するケースが多いと考えられる。

多重落雷は、下向き雷の避雷箇所が測候所以外の岩盤である場合、大地側からの電荷補給は十分でなく多重雷が生じにくいと考えられ、他方、測候所の場合、山麓接地極から電荷

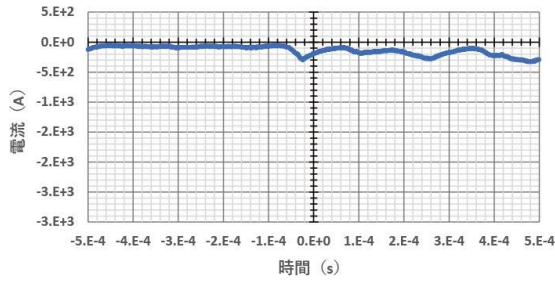


(1) 測候所の第1雷撃 (at 10:46:28 on August 18, 2021)

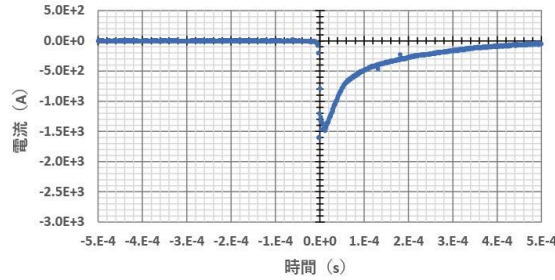


(2) 測候所の第2雷撃 (at 10:46:29 on August 18, 2021)

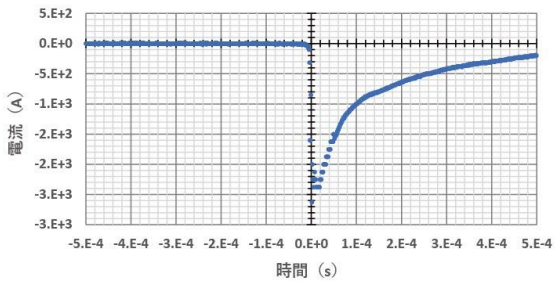
図9 負極性雷の大電流上向きリーダとそのリターンストローク



(a) at 07:37:40 on July 22, 2022



(b) at 07:37:40 on July 22, 2022



(c) at 07:37:40 on July 22, 2022

図10 負極性上向き二重落雷

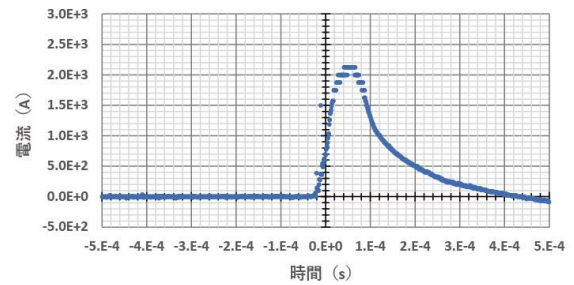
補給があることで多重落雷の条件ができやすくなっていると考えている。

上向き雷の多くが電荷補給が得られる測候所が起点になり、下向き雷の測候所直撃雷頻度は、下向きリーダの統計的な進展方向で決まると考えられる。

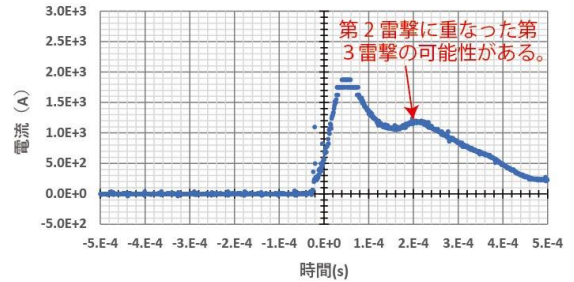
測候所からは山麓に繋がる接地線を通して連続的な電荷補給を受ける。そのため、上向き雷は測候所直撃雷になり、上向き・下向き共に測候所直撃雷はその後の多重落雷の条件を満たす場合が多くなっているのではないかと推測している。

4. 4 2022年に観測された大電流波形

2022年観測では今までにない多数の直撃雷電流が観測された。2022年7月22日にDSO-1測定系で観測された電流波形は、(1)負極性上向きの二重落雷、(2)負極性上向き雷、及び図10に示す(3)負極性上向きの二重落雷の計5個の直撃雷、7月26日には(4)負極性下向き雷、図11に示す(5)正極性下向き二重落雷、及び次の(6)正極性下向き二重落雷 計5個の直撃雷、両日で計10個の直撃雷が観測された。図11に示す正極性下向き雷の(b)の第2落雷電流波形には二つ目のコブがあるが



(a) at 13:46:12 on July 26, 2022



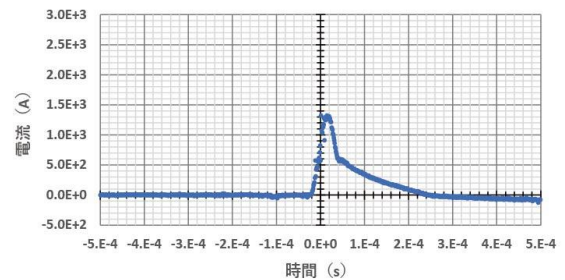
(b) at 13:46:12 on July 26, 2022

図11 正極性下向き二重落雷

第3雷撃が重なったものと考えられる。8月4日に観測された図12の雷電流は測候所電極捕集電流として捉えられた(7)正極性下向き雷の可能性が高い。

傾向として測候所直撃雷と考えられる観測波形には二重落雷が多く観測されている。測候所が低抵抗の山麓接地極に繋がっていることで、電荷補給が得られ易く雷雲電荷高密度側での多重落雷の条件ができやすくなっているのではないかと推測している。(6)の正極性下向き二重落雷は時間差を考えると第2雷撃が第3雷撃で、第2雷撃は測定系のデッドタイムで見えなくなった三重落雷の可能性もある。

(7)の正極性下向き雷は測候所周辺の落雷を測候所電極捕集電流として接地線に流れた電流を測定したものと推測している。下向きリーダによるリターンストロークで富士山体への落雷のため、その一部の電流が接地線を通ったと考えることができ



at 15:3:51 on August 4, 2022

図12 測候所電極捕集電流として捉えられた正極性下向き雷?

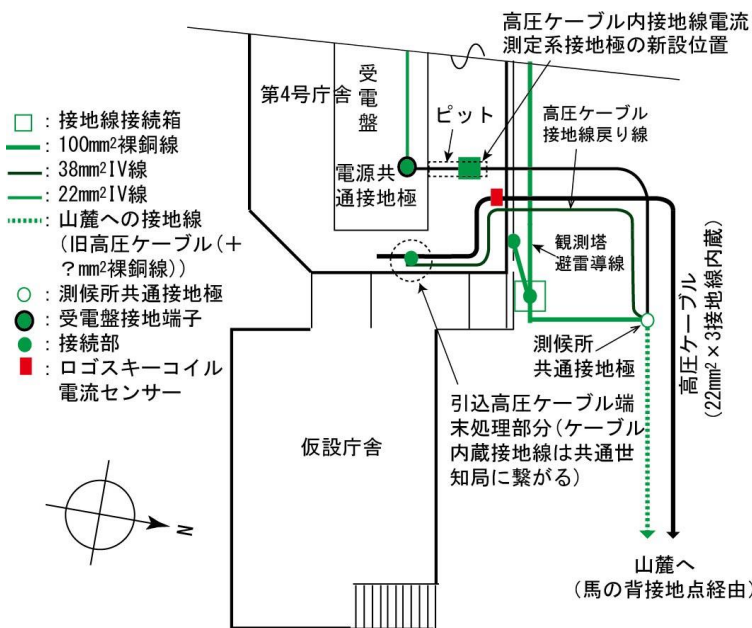


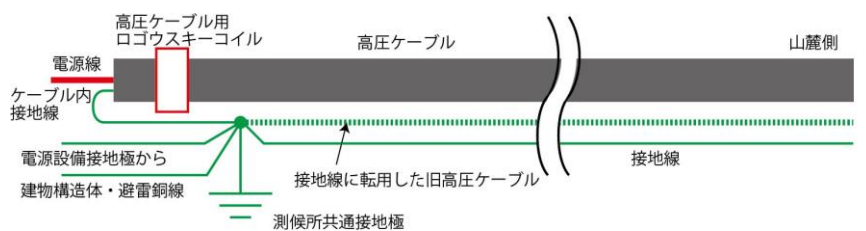
図 13 高圧ケーブル内接地線電流測定系接地極の新設位置と引込部の接地構成

るが大半が接地抵抗が大きな富士山体を経由することになるため、電荷補給は十分得られず、単発で終わったと推測している。

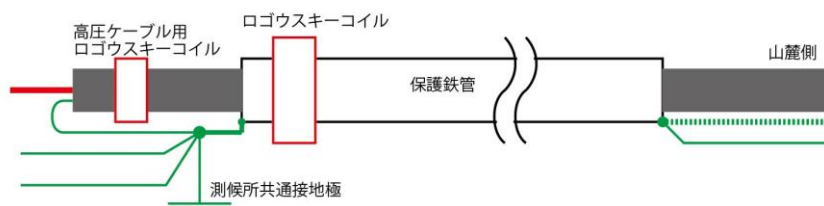
5. 測定系に必要な今後の対策

5.1 接地系統改善と埋設高圧ケーブルの露出対策

(1)接地系統の改善：現在の測定系接地は分電盤筐体を接地極に使用し一点接地としている。安定な接地電位を確保するため、図 13 のようにできるだけ測候所共通接地極に近い位置としてピット内接地線に測定系接地極を確保しこの接地極に測定系接地を一点接地し安定な電位を確保することが好ましい。



(a) 測候所の山麓側既存接地線構成とログウスキーコイル



(b) 高圧ケーブル修繕後の山麓側接地線構成とログウスキーコイル

図 14 高圧ケーブル露出対策修繕方法

(2)埋設高圧ケーブルの露出対策：雷現象による接地線電流測定は、現在高圧ケーブル内臓接地線のための電流を測定している。しかし、山麓接地極に繋がる接地線は、図 13 に示すように高圧ケーブル内臓の接地線だけでなく旧高圧ケーブルを接地線に転用したもの、および接地線の三つがあり、これら全接地線電流を測定しているわけではない。

富士山測候所に引き込んで埋設高圧ケーブル露出に対応する修繕工事（馬の背ハット～旧測候所内）が必要になっている。この時、この保護区間について全接地線電流測定を可能にするため保護鉄管を従来の接地線の代わりにすることで、保護鉄管にログウスキーコイルを設けることで全接地線電流に流れる電流の測定が可能になる。現在は高圧ケーブルの接地線電流のみを測定することになるため、全接地線電流測定は校正して求め

ることになる。

高圧埋設ケーブル露出対策を機会に、全接地線電流も測定可能にする改良工事を実施することが好ましい。

現在、測候所の共通接地極は撤去済の旧燃料タンクの西北角の位置付近にある。この共通接地極の位置を 4 号庁舎内に変更し、全接地線電流測定が可能になる導電性保護管内に高圧ケーブルを収め、他の接地線は保護鉄管にすることで、旧高圧ケーブル、および接地線の代わりになる。保護鉄管の位置でログウスキーコイルを設置し電流測定することにより全接地線電流を求めることができる。

高圧ケーブルの導電性保護管も共通接地極に接続することで全接地線電流を求めることができる。

配線ルート変更により山麓に繋がる全接地線電流測定は原理上しやすくなるが現実的には導電性保護管は大きくできず、コンパクト化を考えると現在の併設接地線（旧高圧ケーブルと銅線）は導電性保護管で代用できるようにすることが必要になる。

測定への影響を避けるため、零相電流の影響は小さくする必要がある。そのため、高圧系統の絶縁はできるだけ大きなものにして漏れ電流を小さくする必

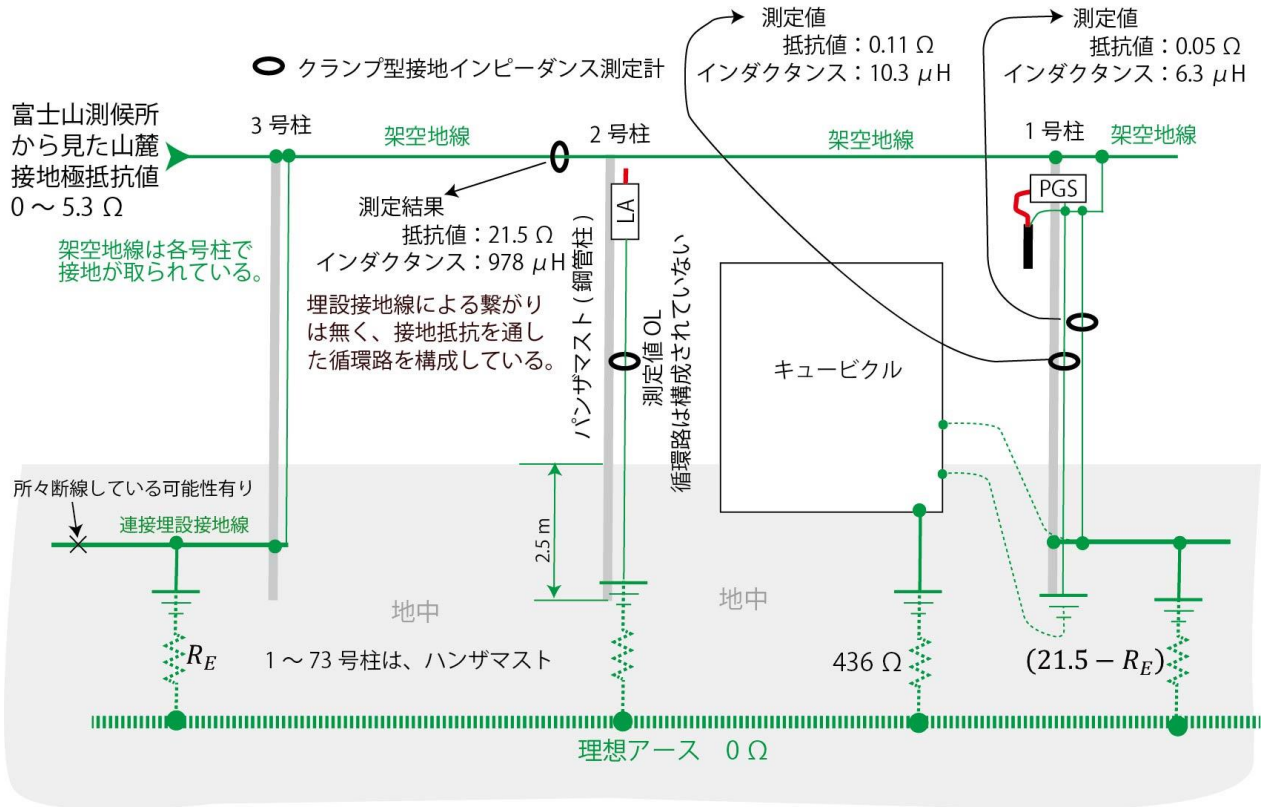


図 15 測定で得られた責任分界点接地抵抗の等価回路

○ ○ : クランプ型接地インピーダンス測定計

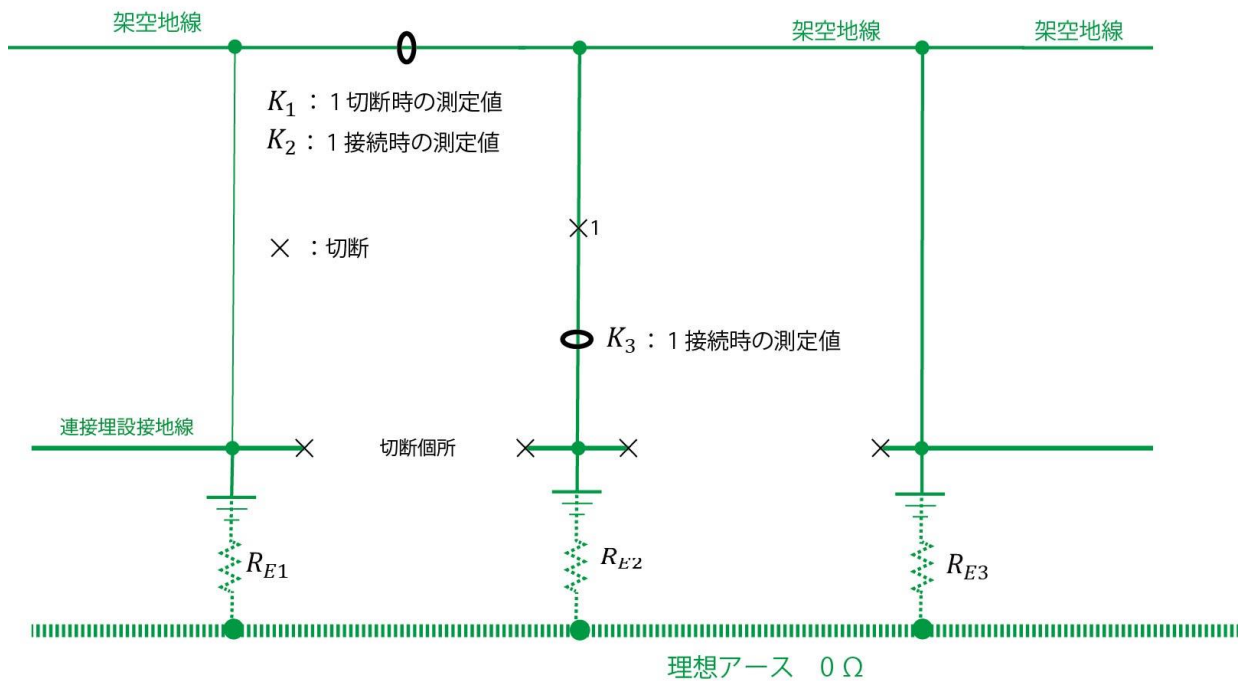


図 16 三極法による接地抵抗測定を可能にする等価回路の条件

要もある。

現在有力な校正手段は測候所直撃雷電流をシャントに

より絶対測定して高圧ケーブル内接地線測定電流との比
を取ることで可能になるが、そのための仮設避雷針を実

現できず実質出来ない状況である。

なお全接地線電流が測定可能になっても測候所から山体に流れる電流があり、この補正のためにも直撃雷電流を測定する必要がある。しかし、この電流は小さいと考えており、大半が接地線に流れると推測している。

周波数成分の高い電流の分流は、接地線特性インピーダンスと富士山体の特性インピーダンスに支配されるため、抵抗値とは別にこの評価方法を確立することが必要である。

5.2 山麓接地極の抵抗値評価

雷現象解明のため、接地抵抗評価は必要である。この抵抗は一定でなく変動を伴うため、定期的な測定が必要である。

(1)責任分界点における接地抵抗：山麓側の接地極抵抗を知る必要があり、観測前の点検に合わせて、架空送電線責任分界点の山麓側接地抵抗を測定した。山麓責任分界点の1号柱接地極接地抵抗は測定により、埋設地線は送電側と受電側で接続されていないことがわかり、図15の等価回路であることがわかった。この等価回路により受電側架空地線から見た接地抵抗 R_{ET} は以下の式になる。

$$R_{ET} = \frac{R_E(21.5 - R_E)}{R_E + (21.5 - R_E)}$$

最大値は次式を満足する値になる。

$$\frac{d}{dR_E} R_{ET} = 0 = 1 - \frac{2R_E}{21.5}$$

この値は、 $R_E = 10.75 \Omega$ になる。従って、この最大の R_{ET} は 5.4Ω で、 R_{ET} は 5.4Ω 以下になる。

(2)山麓側高圧ケーブル立ち下げ部分接地極接地抵抗：測候所に電力を供給する高圧ケーブルの架空送電線立ち下げ部分の71~73号柱、また架空送電側の接地抵抗は次年度測定予定である。もし接地極が三つに分離でき、図16の等価回路が実現できるならば、三接地極の接地抵抗測定は可能である。例えば、クランプ型接地インピーダンス測定計で第2接地極の1で切断時の測定値を K_1 とし、接続時の測定値を K_2 、1で接続時の第2接地極接地線での測定値を K_3 とすることで以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} K_1 &= R_{E1} + R_{E3} \\ K_2 &= R_{E1} + \frac{R_{E2}R_{E3}}{R_{E2} + R_{E3}} \\ K_3 &= R_{E2} + \frac{R_{E1}R_{E3}}{R_{E1} + R_{E3}} \end{aligned}$$

この連立方程式を解いて、 R_{E1} 、 R_{E2} 、 R_{E3} それぞれは以下の値になる。

$$R_{E1} = K_1 - \sqrt{K_1 K_3} \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - 1}$$

$$R_{E2} = \frac{K_1 K_3}{K_2} - \sqrt{K_1 K_3} \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - 1}$$

$$R_{E3} = \sqrt{K_1 K_3} \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - 1}$$

なお以上の接地抵抗の現場調査の折、高圧ケーブルにロゴウスキーコイルを設置可能であり山麓側での高圧ケーブル内接地線電流測定は可能であることも分かった。

5.3 測定系の設置と問題点

(1)組立後の動作確認：事務局で測定系を組立調整し、分解して測候所に搬入して組立を行い測定できるようにする。調整後組立使用するまで長時間電源は OFF になり、ブルドーザで測候所運搬時に振動も伴うため DSO 使用後の測定条件が保存されない場合がある。組み立てた後に正常に動作するかチェック用テストサージ電流を流して確認する必要がある。

確認方法は、以下の方法で確認する。

- ①測定系の DSO の表示灯の点灯状態が正常であることを確認する。
- ②テストサージ電流を流し、動作することを確認する。
- ③表示灯の点灯状態が変わらず正常状態であることを確認する。
- ③テストサージ電流を流し、2回目も動作することを確認する。

DSO のディスプレイ上部中央のアイコンが「STOP」のとき測定条件の「呼び出し」操作を行う必要がある。「Ready」であれば問題ない。

短期間の停電であれば問題なく保存されている。

(2)停電対策：電源は、停電時、自家発電に切り換えて使用するようになっている。切り換え時間の短時間（7分以下）は UPS を用いて停電しないようになっているが今までの使用状況では十分でなく停電してしまう場合もある。大きな容量の UPS にする必要がある。

DSO は停電すると停電前の状態が保存されるが、本来の使用方法でなく、できない場合がある。停電回復後のディスプレイの表示が正常な動作状態でない場合、この時は内部メモリーからの「呼び出し」を行い正常な動作になるようにする必要がある。

(3)循環電流対策：接地系統に循環路ができないように注意する必要がある。接地系統の循環路の抵抗は小さく小さな電圧源で大きな循環電流が流れてしまう。循環電流が流れると高感度ロゴウスキーコイルで検出してしまう。

循環電流源にならないように接地は切り離し、循環路を作らない安定な電位が確保できる接地構成にする必要がある。

(4)オフセットの調節方法：調整位置から DSO-3（あるいは DSO-4）の画面が鏡に入るように鏡の位置を調整する。

DSO の TRIGGER の「AUTO」を押す。

増幅回路の上蓋を開ける。

増幅回路のオフセット調節用トリマー抵抗を調節しオフセットをゼロに調節をする。

内部メモリーから「呼び出し」を押し測定状態にする。

(5)時刻校正：今までの DSO の時刻校正は、測候所に持ち込む前に時刻校正をし、使用後に DSO の時刻校正行い内挿補正をしていた。しかし、DSO に使用している水晶振動子の温度係数による時刻変化は無視できず、他の測定との比較するため、できるだけ正確な時刻校正が必要である。その方法として、GPS 補正による時刻校正は必要である。GPS で補正したカメラあるいは iPhone で DSO の時刻表示を撮影することで DSO 時刻と GPS を対応付けでき時刻校正をすることができる。

6. おわりに

富士山体を雷現象測定系にすることで、雷現象で生じる接地線電流の五つの特徴を明らかにした。

雷現象による電流変化の特徴を同時測定できることで雷現象を正確に捉えることができるようになった。

測定から見える富士山の落雷の特徴、直撃雷、多重雷、及びリーダの特徴を明らかにした。

雷雲が近くなるため、大きな高電界が生じ、大きな電流の上向きリーダ放電路になる場合が多いと推測される。富士山特有の雷現象の可能性が高い。

富士山での観測を積み重ねることで、さらに富士山の雷現象の特徴を正確に知ることができ、富士山の雷現象の特徴も正確に知ることができるものと考えている。継続した観測が必要である。

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、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、大胡田智寿、山頂班および事務局員の方々、さらに DSO 使用でご支援いただいた岩通計測、接地抵抗測定にご協力頂いた関電工、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。

なおこの研究は新技術振興渡辺記念会の受託研究費、および(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」、JSPS 科研費 20H02419、および WNI 気象文化創造センター「富士山体を活用した新しい手法の雷観測」の助成を受

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
- 16) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子 (2021). 富士山雷観測によるリーダの進展モデル, 第 14 回富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 26-30.
- 17) 安本 勝・佐々木一哉・鴨川 仁・大胡田智寿・土器屋由紀子(2020), 2019 年富士山測候所停電時接地線電流, 電気設備学会全国大会, F-11, pp.262-265
- 18) 安本 勝・鴨川 仁・佐々木一哉・土器屋由紀子 (2020), 雷現象により富士山体表面上の接地線に流れる電流, 電気学会全国大会, 1-042, pp.53-54
- 19) .安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 伊高健治,, 鈴木智幸, 林真彦, 器屋由紀子 (2022). 富士山体を検出器とした 2021 年夏期の雷現象観測と今後の指針, 第 15 回富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 29-36.
- 20) 安本 勝・鴨川 仁・佐々木一哉・土器屋由紀子 (2022), 富士山体上接地線電流による雷観測系, 電気学会 A 部門, Vol.142, No.3, 67-79
- 21) 安本 勝・土器屋由紀子・鴨川 仁・佐々木一哉 (2023), 富士山の雷現象観測から見えるリーダの特徴, 日本大気電気学第 101 回研究発表会, P1-13