

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

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

富士山測候所電源は、図1のように山麓から高压ケーブルを引き込んでいる。接地線は高压ケーブルに並行し山麓側の接地極と繋がっている。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期待できる。また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期待できる。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ことが期待できる。

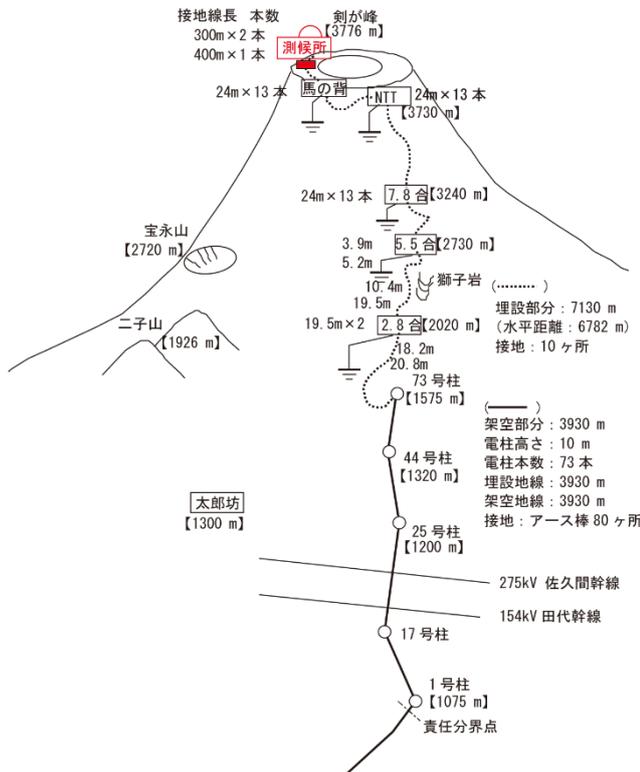


図 1 測候所接地線電流測定箇所 (■)、埋設高压ケーブル・接地線、及び接地箇所

当初、測候所が岩盤上にあり、接地抵抗が大きく、一方、山麓側の接地抵抗が小さいことから、接地線で山麓に流れる測候所直撃雷電流を測定できることを期待して 2012 年に測定を行った。この時は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、直撃雷と共に周辺雷の測定も行っている。2015 年に直撃雷が観測され、上向き雷の前兆現象も測定されたが、現象時間全体を測定できる適切な測定系が無かったため、細切れな測定で全体像の測定はできなかった。以降、上向き雷前兆現象用測定系を加え、全体像が測定できる測定系に改め測定している。

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。具体的にはトリガーに使用するログウスキーコイル電流計出力信号に適度な時定数の AC 結合を通した後に絶対値を取ることによって信号のトリガーレベルがオフセットの影響を受けないようにした。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った。

本報告は、既存接地線を用いた雷現象検出器の原理、及び富士山測候所周辺の雷現象に相応しい測定系を明らかにする。また 2017 年夏季周辺雷の測定結果と他の雷情報から雷現象の解明を行い、今後の課題についても明らかにする。

2. 接地線に電流を流す現象

2-1 雷起因接地線電流測定を満足する測定系

2017 年度の測定は以下を満足する測定系で行った。

(1) 適度な積分時定数

雷現象の特性と積分回路の時定数はログウスキーコイルの出力仕様から適切な値を決める必要がある。コンデンサー C の容量は小さくすることで感度は高められるが測定範囲の上限は小さくなる。C の並列抵抗は充電電荷を放電させるもので、一方で正確な積分電圧を決めるには、信号の出現時間よりも十分大きくする必要がある。被測定信号の電流範囲と信号時間から適切な値を決めている。2017 年度測定では 0.01 s (C=1 nF, R=10 MΩ) とした。

(2) 正負いずれの極性の測定も可能

直撃雷は、一般的に負極性雷であるが正極性雷もあり、また周辺雷の場合、位置等で接地線に電流を流す方向が異なるため、極性等に左右されないトリガーにする必要があり、信号成分の絶対値をトリガー信号に使用した。

(3) オフセット変動によるトリガー変動を避ける

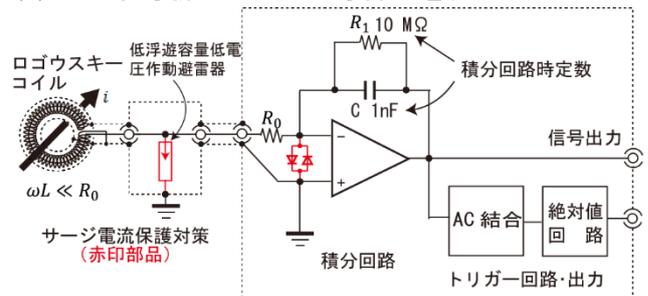


図 2 ログウスキーコイル電流計の基本回路

トリガー信号は信号の絶対値を取るため、トリガー信号がオフセットの変動によりトリガーレベルを超える場合があり、その時トリガーは動作せず、測定漏れが生じる。これを避けるため、トリガー用信号は、信号出力を AC 結合を通してオフセットを無くしてから絶対値を取ることで安定なトリガーを可能にした。

(4) 高感度測定系のサージ電流からの保護

測候所に直撃雷があると、山麓に繋がる接地線には大きな直撃雷電流が流れる。この直撃雷用ログウスキーコイル電流計はこの大電流に合わせた感度になるように設計している。しかし、直撃雷前兆現象用電流計、及び周辺雷現象用電流計は、高感度にするため、大電流により破損する可能性があり、大電流により破損されない保護系が必要になる。具体的には図2に示すように高感度系ログウスキーコイル電流計のログウスキーコイル出力に低電圧(約 80V)放電ネオン管を置き入力電圧を抑制し、抵抗を通してオペアンプ入力電圧をダイオード順方向電圧以下に抑えて回路を保護している。いずれも寄生容量の小さなものを選定している。

(5) 前兆現象を測定可能にする

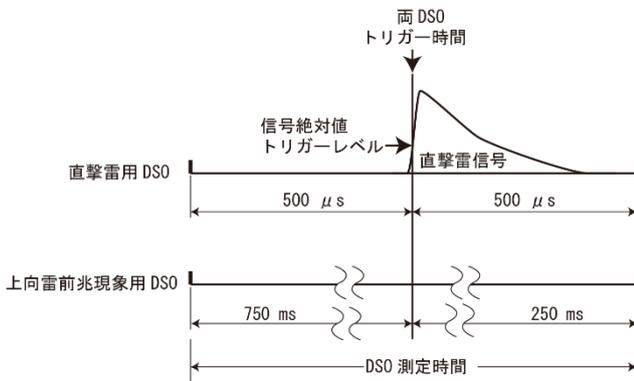


図3 直撃雷と上向き雷前兆現象測定用 DSO の信号トリガーレベル・位置と測定時間幅 (2017 年度)

一昨年の直撃雷時、上向き雷の前兆現象が測定された。細切れの断片的な測定であったが約 1 秒持続していた。もし上向き雷の直撃雷であった場合、前兆現象全体の測定を可能にするため、図3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記録する測定系を設けることで上向き雷前兆現象全体が測定可能になる。

(6) 接地線電流測定系の校正

富士山測候所には山麓側接地極に繋がる複数の接地線がある。接地線の電流測定はそのうちの測候所電源に引き込んでいる高压ケーブル内蔵接地線で行っている。全接地線に流れる電流に換算するため、校正は必要であるが、まだ実現していない。この校正は、測候所の被雷電流を測定可能にし、被雷頻度を高くした避雷針を設けることで可能になる。しかし、まだ被雷を一ヶ所にまとめる仮設避雷針の設置は実現していない。今回の報告も被測定高压ケーブル内蔵の接地線に流れる電流を測定した電流である。測定電流

はログウスキーコイル電流計の設計値から求めている。

校正の実現は正確な被雷電流を知る必要があり、測候所の被雷個所を一ヶ所にまとめるようにして、その被雷電流を正確に測定可能にしたシャントと高压ケーブル内蔵接地線電流測定系と同時測定することで可能になる。

2-2 接地線に電流を流す雷現象

接地線に電流を流す周辺雷現象は、図4に示す、以下の

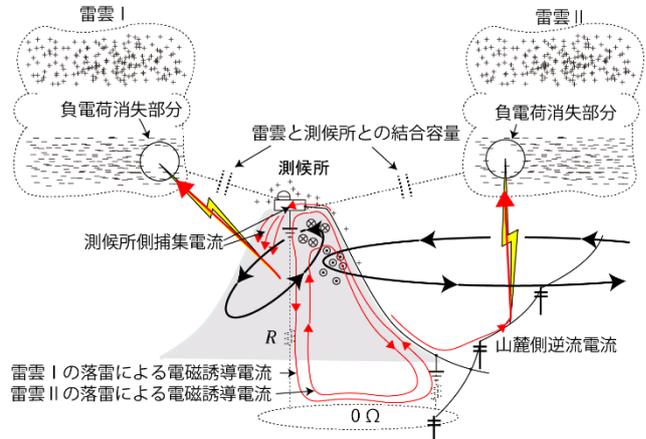


図4 接地線に電流を流す落雷現象 (負極性雷)

電磁誘導電流、静電誘導電流、捕集電流、及び山麓側からの逆流の四つになる。接地線電流はこれらが重畳したものになる。それぞれの現象を解明する上で山麓側からの逆流以外、伝搬時間は測定時間分解能からほぼ同じと見なすことができると考えている。

(1) 電磁誘導電流 電磁誘導電圧は、図5に示す富士山測候所接地線と山体が作る循環路と被測定雷現象の雷放電路電流が作る結合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。

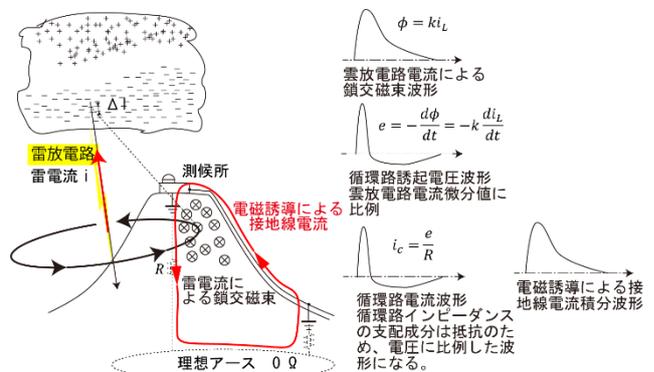


図5 電磁誘導による接地線電流 (測候所西側の負極性対地雷)

- 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6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の変換線より東にある落雷位置の初期ピークは正に、西にある落雷

位置の初期ピークは負に変わる。

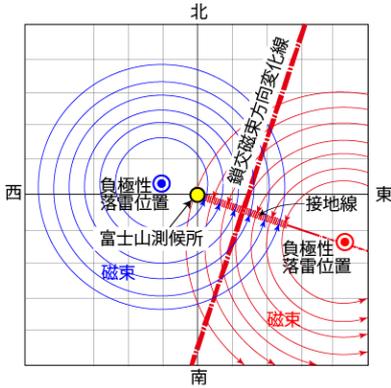


図6 鎖交磁束方向変化線

ピークは斜めの放電路が作る鎖交磁束によって決まることになる。

(2) 静電誘導電流 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) の昇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。

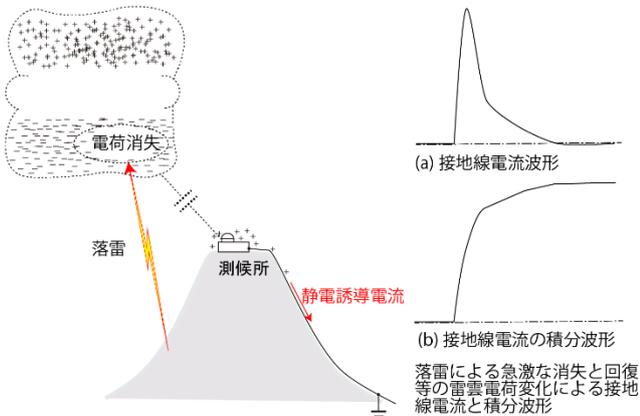


図7 雷雲電荷変化による静電誘導電流

① 放電初期の電荷消失時立ち上がりが大きくなるため、雷雲電荷による静電誘導電流は大きくなる。しかし、放電時は、電磁誘導電流と重畳するため、一般的に見えなくなっている。

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変化が見えるようになる。

③ 放電後の雷雲電荷が一定の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、積分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い。

(3) 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

この変換線は暫定的に敷設高压ケーブル中央の垂直面を考えているが正確には変換線近傍の落雷位置の電流波形から決めることになる。

実際は放電路が鉛直で無く斜めになる場合も多くあり、その場合は初期ピ

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著しく上昇するため、測候所との電位差により被雷点から測候所に両者の抵抗で除した電流が流れることになる。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。

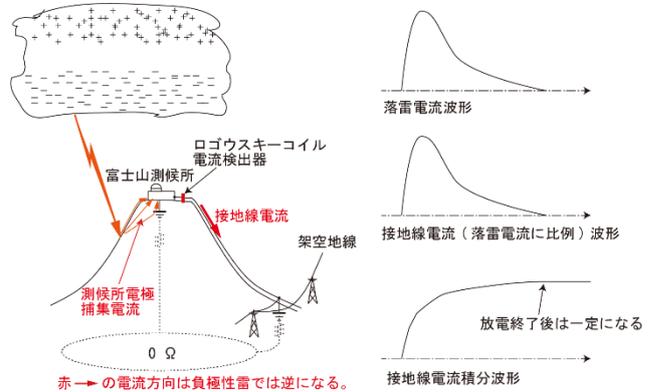


図8 測候所電極捕集電流

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。

(4) 山麓からの逆流電流 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、測候所で散逸し大地に流れることで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

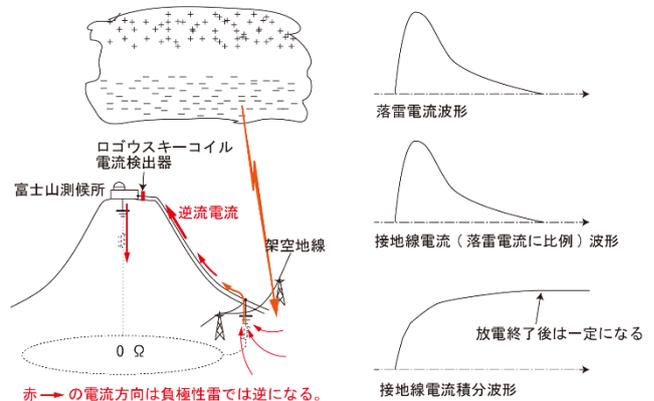


図9 山麓からの逆流電流

環路の誘起電圧による電流も考えられるがこの電流は積分することで0になる。大地への落雷は、接地系統の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を可能にすることで詳細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、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 雷放電時間の積分値で一定になる.
- ③ 山麓側接地系統の被雷による電位上昇で流れる電流がある.
- ④ 山麓接地系統の被雷は遠方でも検出する.

なお, 雷現象でない高圧電源同相電流が流れた場合, 接地線が複数でその内の1線を測定しているため同相電流の一部を測定することになる. この電流は遮断時, 事故時などに流れる.

3. 測定

3-1 被測定接地線

山麓に繋がる接地線は少なくとも 2 系統ある. 一つは測候所電源を確保するため, 測候所内に引き込んでいる図 10 に

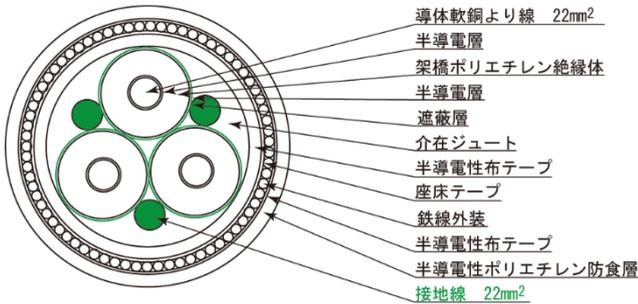


図 10 富士山測候所引き込み高圧ケーブルの構成
架橋ポリエチレン絶縁ポリエチレンシースー重鉄線外装ポリエチレン防食ケーブル
示す高圧ケーブル内蔵接地線で, 他は高圧ケーブルに併設されている接地線, 及び旧埋設高圧ケーブルを接地線に流用したものである.

埋設高圧ケーブル長は約 7 km になる. 帰還接地回路深さを考えると等価ループ面積はかなり大きくなると考えられ, 他のループアンテナとの測定比較により測定感度を定めることは可能と考えている.

山麓に流れる接地線電流の測定は, 測候所内引き込み個所にログウスキーコイルを設置し測定している. 電流の方向は山麓側に流れる電流を正としている.

3-2 接地線電流測定系

雷現象による接地線電流測定は, 図 11 に示すように 3 系統のログウスキーコイル電流計から構成されている. ①直撃雷電流用, ②前兆現象上向き雷電流用, 及び③周辺雷電流用である.

デジタルストレージオシロスコープ (DSO), 及び回路系 ±15V 電源の 100V 電源は, ノイズカットトランスを介して B 種

接地から絶縁し, さらに UPS を使用している. ログウスキーコイルは高圧ケーブルをアルミfoilでシールドし取り付け, また回路等の設置場所はアルミfoilシールド上でやっている. それぞれシールド網線で接続し一点で接地している. 本測定のための独立した接地体系を構成し, 一点接地

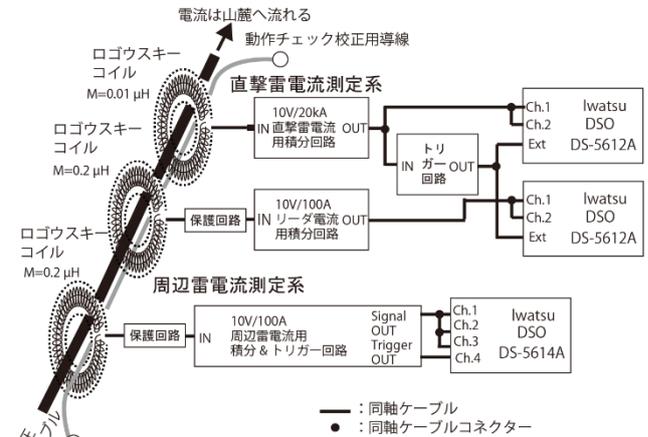


図 11 2017 年度接地線電流測定系

していることになる. 高圧ケーブル, 及びその端末と共通接地極を繋ぐ並列接地線のシールドは, ループを構成して, ログウスキーコイルに遮蔽電流を流さないようにシールドしている. 図 12 は設置した測定系全景である.

ログウスキーコイル電流計の校正は, 被雷確率が高い測候所の観測塔に仮設避雷針を設け, 被雷した時に避雷導線終端に付けたシャントで測定した電流を高圧ケーブル内蔵



図 12 測定系全景

接地線に流れた電流で除すことで補正係数を求めることができる. 測定した高圧ケーブル内蔵接地線電流にこの補正係数をかけて全接地線に流れる全電流を求めることができる. この補正計数は, 被雷電流だけでなく, 周辺雷現象による電磁誘導, 及び静電誘導電流の校正にも適用できる.

3-3 測定条件

DSO 入力信号の分解能は, 各チャネルとも 8 bits のため, 最大値の 1/256 になる. そのため, 最大入力に対し小さな

入力信号は分解能を悪くすることになる。

この対策として、直撃雷用と前兆現象上向きリーダ用各2チャンネル DSO は、同一信号入力電圧に対し 2V/div.及び 200 mV/div.に振り分けしている。トリガー信号はいずれも Ext.トリガー入力を使用した。

周辺雷用4チャンネル DSO は3チャンネルを 2 V/div., 500mV/div., 及び 100 mV/div.に振り分けしている。残り信号入力1チャンネルは、信号入力チャンネルが安定なトリガーレベルを確保できるため、トリガー用に使用している。

トリガーレベルは直撃雷用と上向きリーダ用は 0.4 kA とした。一方、周辺雷用は当初 0.5 A としたが 7月18日設置中に雷雲が襲来し、頻繁に作動したため、20時15分頃に 2A に変更した。

4. 測定結果と考察

4-1 雷起因電流の雷現象位置

測定期間は、7月18日(火)設置から8月19日(土)撤収までの約1ヶ月である。雷現象により接地線電流が測定された日は7月18・26・29日、8月1・7・12・18・19日である。測定電流は落雷情報に一致し雷起因であった。測候所への直撃雷は無かった。

7月18日(火)設置調整中に雷雲が襲来した。接地線電流トリガーレベルは、当初予定の0.5Aとしたが、頻繁に動作するため、高めの2Aに変更した。測定結果は変更前までは落雷情報の時刻とほぼ一致する測定ができたが、変更後、動作頻度は半分以下になっている。適切なトリガーレベルにすることで、測定手法の違いによる差は現れるが、周辺雷現象の多くが落雷情報と一致するものとして測定可能である。

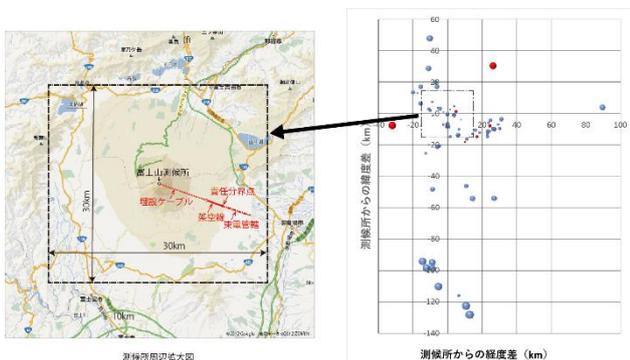


図13 測候所高圧ケーブル内蔵接地線電流で検出した周辺落雷現象 (青:負極性、赤:正極性、円面積:電流値)

図13は落雷情報に一致する測定結果を測候所からの経度と緯度の距離でプロットしたものである。バブルの面積が雷電流に比例している。

4-2 測定結果と結果の整理方法

測定結果では直撃雷は無く、直撃雷と前兆現象上向き雷電流測定系には測定データは得られなかった。しかし周辺雷用測定系には周辺落雷現象に対応した多数の測定が得られた。各測定は、図14に示す「(a)接地線電流波形」と「(b)

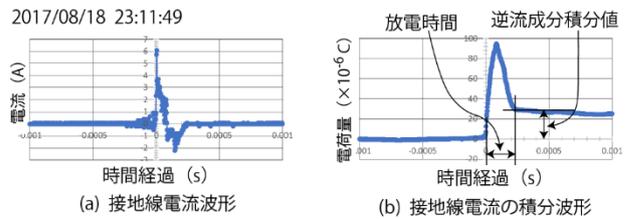


図14 接地線電流測定波形と接地線電流積分波形表示例
測候所起点 経度差: 26.7213 km, 緯度差: -10.0060 km, 電流: -155 kA

接地線電流積分波形」にまとめた。前後者共横軸に時間を、前者縦軸は電流に換算し、オフセットを差し引いた電流値をプロットした波形を、後者縦軸は前電流値を積分した電荷量 ($\times 10^{-6}$ C)をプロットした波形である。後者の電荷量は、横軸時間でのログウスキーコイル検出器を通過した電荷量を現している。

デジタルオシロスコープ(DSO)のデータロギング機能は、トリガーレベルを超えた接地線電流が検出された後、USBメモリーに記録されるまではデッドタイムとなり、記録されない。このデッドタイムは、今回周辺雷用測定系に使用した1kポイントの場合で、一昨年の測定結果から 250 ms~500 ms になる。

落雷情報に対応する測定結果かどうかは、①時刻が誤差範囲内で一致するか、②トリガーレベルに達する現象であるか、③検出可能時間の現象か、④電流極性は合致するか、⑤落雷位置で生じる予測特性が合致するものになるか、で判定した。

雷現象の解明は、測定時刻の測定接地線電流とその積分波形、及び落雷情報(時刻、位置、電流、極性)からはかった。

4-3 雷起因接地線電流の鎖交磁束変換線

接地線と富士山が作る等価的な循環路の鎖交磁束の微分値が循環路の起電圧になり循環路のインピーダンスは抵抗が支配成分になるため測定される接地線電流は鎖交磁束微分値に比例する。電流の向きは(山麓方向を正)循環路の鎖交磁束の向きによって変わり、雷現象位置、及び放電路によって変わる。ここでは放電路が垂直状である場合、放電

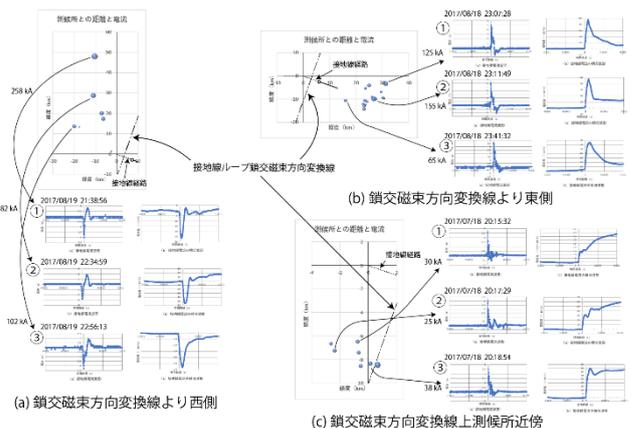


図15 落雷位置による測定波形の特徴

位置によって循環路の支配的な鎖交磁束の方向が決まる循環路の垂直面が存在するはずである。この面を図では鎖交磁束変換線としている。図ではこの変換線を埋設ケーブル中央の垂直面としているが、正確にはこの位置は測定結果から決める必要がある。

図15では接地線電流は、変換線の東側で先ず正のピークが、西側で負のピークが測定されている。変換線上近くで測候所近傍の雷現象は、静電誘導電流が大きく影響しているが、小さな正のピークがあり、東側に位置する極性である。この結果から変換線は、西側に推移したものになる。

4-4 雲放電

一般的に雷雲上部が正電荷で下部が負電荷であることを考えると、落雷情報では雲放電は正極性落雷に含まれることになる。雲放電は大地への落雷ではないので接地線電流には電磁誘導電流と静電誘導電流が重畳した電流になる。

パルス幅時間は放電の持続時間と同一になる。従って放電路の傾きが小さくなることで放電路が長くなるため持続時間も長くなり、パルス幅時間も長くなる。

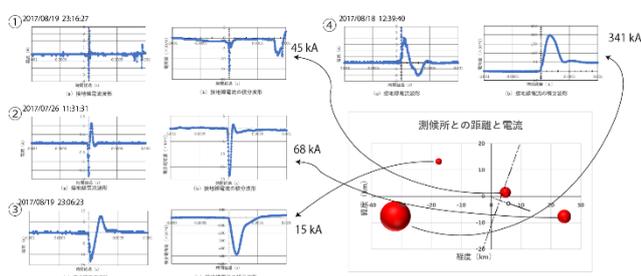


図16 雲放電による接地線電流測定波形

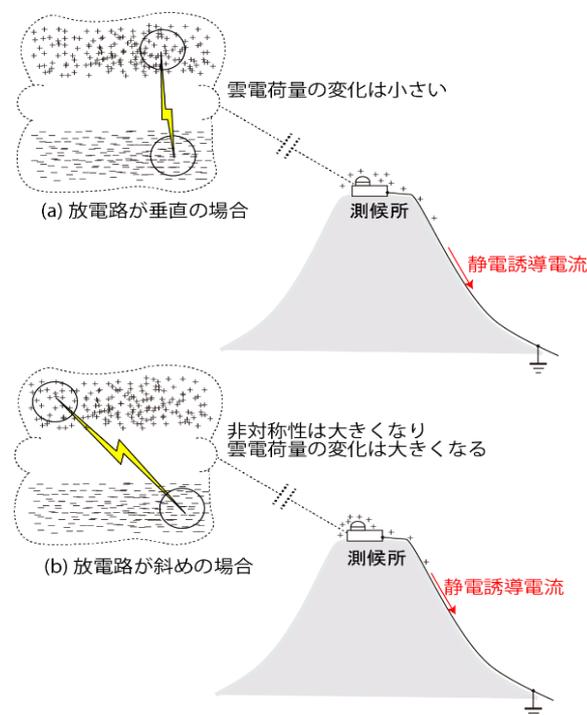


図17 雲放電の放電路による静電誘導電流

雲放電では正電荷と負電荷が等量消失するため、遠方では雷雲電荷に変化は生じない。しかし、近くではそれぞれの電荷からの距離差により影響を受け静電誘導電流が流れることになる。図17に示すように垂直な放電の場合、距離の差は小さいが、放電路が斜めの場合、距離の差は大きくなり、静電誘導電流も大きくなる。図16④の場合はパルス幅時間と電流の極性から放電路は西から東に斜めと考えられる。またトリガーと同時に現れるインパルス状パルスは、消失正電荷と消失負電荷それぞれの距離差から放電開始と同時に接地線電流に大きな静電誘導電流が流れたと考えられ、一定になる正電荷は放電持続時間中積分した静電誘導電流の積分電荷である。

4-5 ステップリーダ電流

測候所近傍の負極性落雷に観測された接地線電流には正のインパルス状パルスが測定されている。そのパルスの積分値が0になる傾向があることを考えると電磁誘導によるものであることを示している。このこととパルス間隔を合わせ考えると、段階的に電荷を補給され延びていくステップリーダ電流との電磁結合が測定されたものである。

伝送路の反射の影響も検討したが、山麓の接地線に該当する終端が伝送路特性インピーダンスよりも小さい場合、反射電流は反対極性になるはずである。その影響は見られず反射の影響は無視できると考えられる。

測候所近傍に多くの測定されたリーダには、静電誘導電流の正方向への増加が重畳している。この傾向は、リーダ進展による雷雲電荷消失による誘導電流が山麓に流れていることを示している。リーダ進展によるリーダ先端電荷によるものではなくリーダは測候所とは別方向に進展していることになる。リーダ電荷が影響する場合、誘導電流は負方向に減少することになる。

図18は下向き(①, ②, ③, ④, ⑥, ⑦)と上向き(⑤)リーダによる接地線電流の測定例である。リーダは進展と補給を繰り返し進展し、最終的にリターンストロークになる。測定波形ではリーダによる電流でトリガーリーダの進展途上を捉

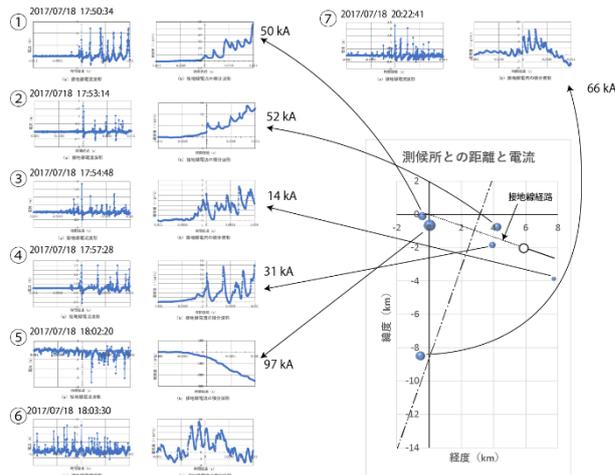


図18 リーダによる接地線電流測定波形

えているが、リターンストロークは測定時間幅が 1 ms と小さいことと記録時間のデッドタイムで記録されていない。

リターンストロークも記録可能にするにはさらに測定系を追加しトリガレベルをリーダによる電流以上にすることでリターンストロークの記録は可能になる。

⑤は上向きリーダと考えられ、測候所に直撃雷が無かったことを考慮すると直接測候所から開始したものではなく、測候所と適度な抵抗を通して繋がる金属から開始したもので、抵抗値はリーダの成長を損なわない適度な値ではなかったかと考えている。

4-6 測候所近傍雷現象による接地線電流

静電誘導電流が顕著に現れるが電磁誘導電流、静電誘導電流、捕集電流、及び山麓からの逆流電流が重畳したものになる。

図19に示す測候所近くの落雷現象による電流には静電誘導電流と考えられる鋭い正の先行パルス電流が発生し、電流の積分値にもそれぞれに正のピークがある。負極性の落雷の場合、負極性雷雲の負電荷が消失するため、測候所の

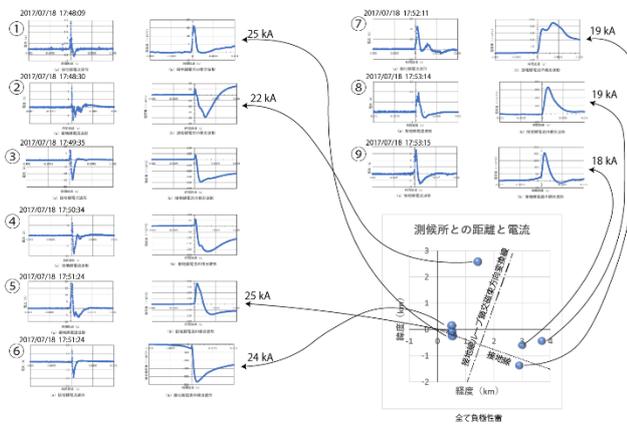


図 19 測候所近く落雷時の接地線電流波形

正の誘導電荷が山麓側に(正の電流方向)流れる。測候所上空の雷雲電荷量との測候所結合容量は無視できず放電初期の電荷消失により正の誘導電荷が山麓側に流れることになり、その電流が測定されたものである。

静電誘導電流は、雲電荷密度分布変化の影響を受ける。測候所近傍のため、放電後の雷雲の電荷変化が大きく影響している。

4-7 駿河湾上大電流雷現象

遠方駿河湾上に図 20 に示す大電流の落雷が観測された。測定された接地線電流の積分値、即ち放電電流の比例分が正負に振れる現象は、鎖交磁束変換線をまたぐ放電路になるか、あるいは下から上へ流れる負極性落雷に引き続き上から下へ流れる雲放電が生じたかいずれかである。

測定結果は、後者の可能性が高く、図21のように負極性落雷と雲放電が時間差を持って続いたものと推測される。

前者の放電路が鎖交磁束変換線をまたがる場合も同様の接地線電流が観測されるが、放電時間を考えると可能性は

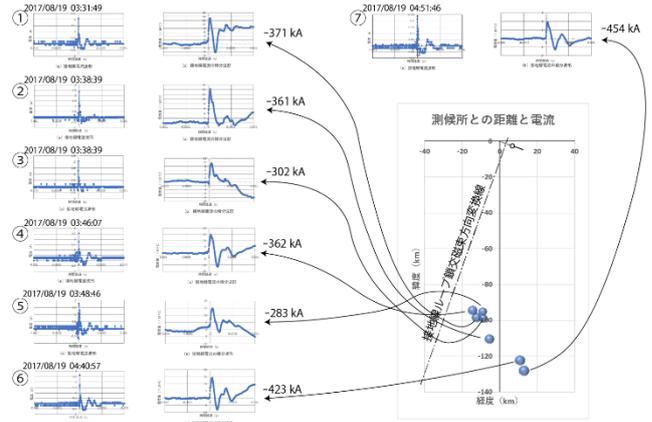


図 20 遠方海上での大落雷電流波形の特徴

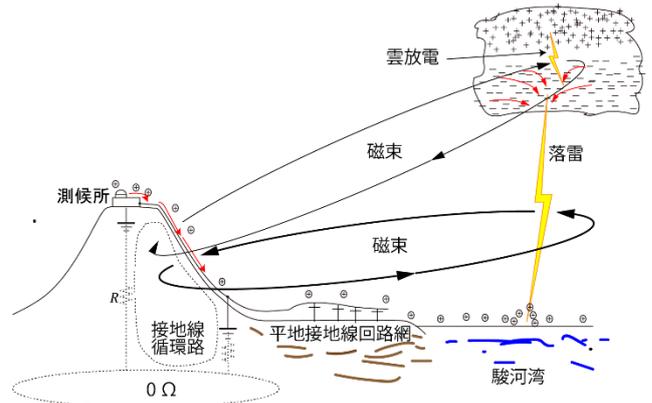


図 21 距離海上での大電流落雷による接地線電流

考えられるが、放電路の長さからは説明が付くか疑問がある。

ベースラインの変動から遠方まで静電誘導電流の影響があることを示している。

4-8 電磁誘導による接地線電流検出感度

接地線電流測定結果と落雷情報により、電磁誘導による接地線電流検出感度を定めることができる。使用する情報は雲放電でパルス時間幅が小さい雷放電路が垂直のものである。落雷情報より電流が分かるので、落雷位置から鎖交磁束が決まり、循環路起電圧を抵抗で除すことで決まる接地線の

電流から検出感度 k が決まる。

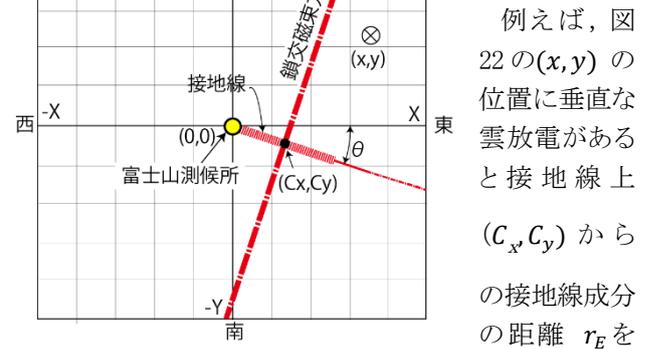


図 22 接地線電流検出器の感度評価方法

の接地線成分の距離 r_E を次式から求め

る。

$$r_E = (x - C_x) \cos \theta - (y - C_y) \sin \theta \quad (1)$$

落雷情報による雲放電電流 i_{CL} 、測定した接地線電流 i_E とこの距離から一般性のある感度係数 K を次式より決めることができると考えている。

$$i_E = \frac{K}{r_E} i_{CL}, \quad K = \frac{i_E}{i_{CL}} r_E \quad (2)$$

5. 終わりに

(1) 富士山測候所周辺の雷現象を測定できる山麓に繋がる既存接地線を用いた雷現象検出器を開発できた。

(2) 富士山及び周辺で生じる雷現象を捉えることができる接地線電流測定系を決めることができた。

(3) 安定なトリガーレベルを得たことで雷現象に起因する接地線電流の安定な測定を可能にした。また、周辺雷現象の高感度検出器になることが分かった。

(4) 雷現象解明は、それぞれの発生時刻に測定した接地線電流、その電流積分値、及び落雷情報(位置、電流、極性)から特徴を明らかにした。

(5) 雷が接地線に電流を流す雷現象の以下のメカニズムを明らかにした。

- ① 磁誘導電流、
- ② 静電誘導電流、
- ③ 測候所電極捕集電流極、
- ④ 山麓側からの逆流電流

今後の課題としては以下がある。

★オフセットは DSO の高感度入力チャネルをスケールオーバさせやすくなり測定結果の分解能に影響を与える。大きくなると分解能を低下させる。今年度測定結果にもそのことは現れており、次年度はより精度の高い測定を可能にするためトリガーのみではなく測定信号にもオフセットを小さくする対策が必要である。

★測候所近傍用としてステップトリガー測定用(低トリガーレベル)とリターンストローク用(高トリガーレベル)二つの測定系を確保する必要がある。

★他の落雷情報も取り込み測定された落雷現象の解明を図ることになるが、測定数は多くなるため、データ処理の自動化が必要である。各現象との相関を明確にし、それを組み込み処理できるデータ処理プログラムが必要である。

6. 謝辞

考察に関して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東京管区気象台の方々、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、生越正文両山頂班長はじめ山頂班員の方々、同 NPO 事務局員各位、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、この研究の一部は一般財団法人新技術振興渡辺記念会の受託事業「富士山噴火予知のための SO₂ 通年観測システム構築に関する研究」として実施し、また、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「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) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 北川信一郎 (2001 年). 雷と雷雲の科学, 森北出版.
- 11) 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.

- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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).
- 16) 安本勝, 佐々木一哉, 鴨川仁, 横山茂, 高橋浩之, 土器屋由紀子:「雷現象による富士山測候所と山麓を繋ぐ接地線電流解析」,第 35 回電気設備学会全国大会講演論文,403-408(2017).
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 志崎大策 (2002-9). 富士山測候所物語, 成山堂書店.
- 21) 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.