

# 電気回路的に見た富士山測候所接地線電流測定による雷観測結果 (SR04-4)

安本勝<sup>1</sup>, 鴨川仁<sup>2</sup>, 佐々木一哉<sup>3</sup>, 向井啓祐<sup>4,5</sup>, 土器屋由紀子<sup>1</sup>

1.富士山環境研究センター, 2.静岡県立大学, 3.弘前大学, 4.京都大学, 5.核融合研

## 1. はじめに

富士山測候所の接地線電流測定は、測候所が岩盤上で、3776mの高位置にあり、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年夏の観測で初めて実施した。この時、直撃雷は観測されなかったが、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、周辺雷現象も測定できるように対象雷現象の特性が測定できるように測定系に改良を加えて接地線電流の測定を行っている。この間の測定は毎年7月上旬から8月下旬までの2ヶ月弱になる。この期間に測定された雷現象には雷現象特徴を反映した多数の測定結果がある。①2015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。②2017年ステップリーダが観測できた。③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。④2021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。⑤2022年は、正極性下向き雷、及びリーダと多重落雷が複数観測された。

最初は測候所落雷電流のみを測定対象に考えていたが、周辺の落雷現象により接地線に電流を流すことがわかり、現象に合わせた改良を進めたことで他の落雷現象による接地線電流の測定も可能になった。富士山体を聴診器として広範囲の雷現象が観測できるようになっている。このことは測定系の改良により雷現象だけでなく接地線に電流を流す雷以外の自然現象にも適用可能であり、自然現象発現との相関を取ることで広範囲で他の自然現象の解明も可能になると考えている。本研究では接地線電流測定による雷観測結果を電気回路的に見て接地線電流測定による現象解明を行った。

富士山測候所は3776mの高さにあり、雷雲に近く高電界が得られ、接地線は山麓の低抵抗接地極に繋がっている。回路として見た場合、主要回路定数は絶縁破壊等で定数変化せずに安定な回路定数になっていると考えられ、再現性の得られる測定が可能である。そのため、落雷現象は複雑であるが、単純化した電気回路に置き換えることで理解が得られ易くなる。ここでは、この方法で観測結果を整理検討した解析結果、2023年雷現象測定結果、及び今後の測定で改良すべき点について報告する。

## 2. 接地線電流測定系

雷現象により流れ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。

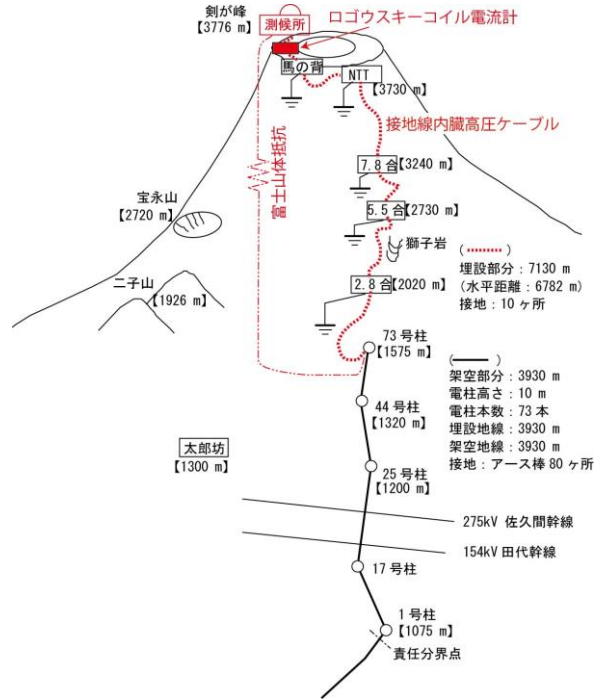


図1 富士山体測定系の構成

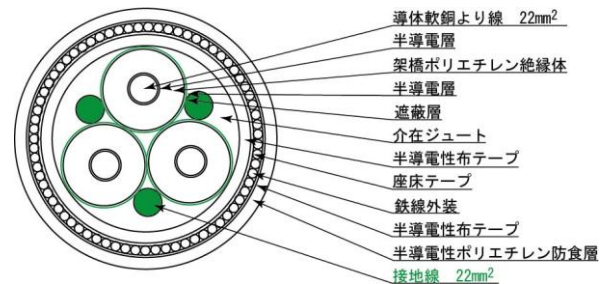


図2 富士山測候所引き込み高圧ケーブルの構成

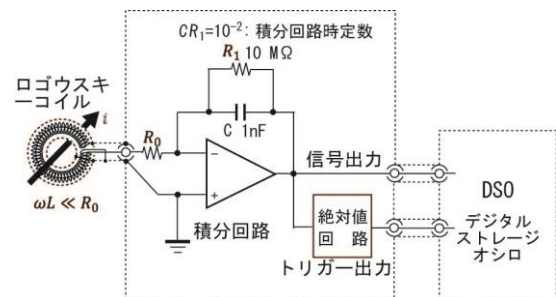
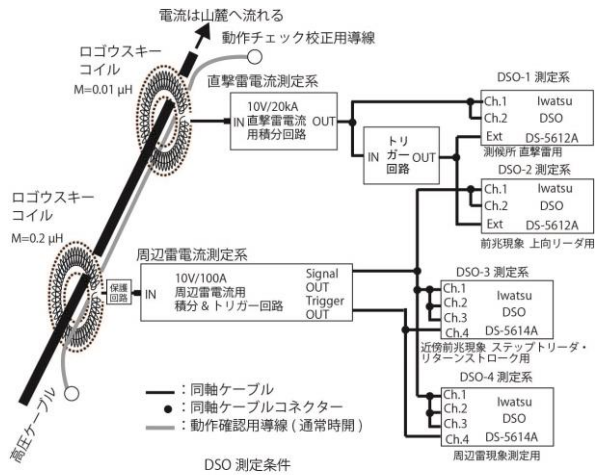


図3 ログウスキーコイル電流計の基本回路



DSO-1 測定系		DSO-2 測定系	
水平軸	M Pos. : 0, 100 μs/div, 1kpts.	水平軸	M Pos. : +250ms, 100 ms/div, 1Mpts.
垂直軸	Ch.1 : AC 2 V/div (4kA/div.)	垂直軸	Ch.1 : AC 2 V/div (20A/div.)
Trigger	Ch.2 : AC 200 mV/div. (40A/div.)	Trigger	Ch.2 : AC 200 mV/div. (2A/div.)
	エッジ, Ext10, 立上がり, ノーマル, AC, トリガーレベル 100 mV (0.2kA)		エッジ, Ext10, 立上がり, ノーマル, AC, トリガーレベル 100 mV (0.2kA)

DSO-3 測定系		DSO-4 測定系	
水平軸	M Pos. : 0, 10 ms/div, 100kpts.	水平軸	M Pos. : 0, 200 μs/div, 1kpts.
垂直軸	Ch.1 : AC 2 V/div. (20A/div.)	垂直軸	Ch.1 : AC 2 V/div. (20A/div.)
	Ch.2 : AC 500 mV/div. (5A/div.)		Ch.2 : AC 1 V/div. (10A/div.)
	Ch.3 : AC 100mV/div. (1A/div.)		Ch.3 : AC 500mV/div. (5A/div.)
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)	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4 接地線に流れる電流の雷現象による測定条件

測候所は山麓から高圧ケーブルを引込、測候所と山麓接地極は図2に示す高圧ケーブル内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とも繋がっていることとなるため、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いく。また、測候所は3776 m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、当初測定器の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く。

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圧ケーブル全体の電流を測定している。ちなみに高圧ケーブルには電源電流も流れるが、電源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、本来は測候所を絶縁させ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、高圧システムの絶縁を確保することで高圧ケーブルのみの電流を測定することで実現している。富士山にも流れる電流は無視できるとしている。また高圧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4に測定系全体と測定条件を示している。

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。後者の高感度系は直撃雷が流れると大きなサージ電圧により高

感度測定系が破損するため、回路特性を損なわない寄生容量が小さく低抑制電圧のネオン管でその保護をしている。

2023年の観測は図4に示す測定系、及び測定条件で行った。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測定値を積分することで可能である。トリガーレベルは0.5A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。

### 3. 接地線に電流を流す現象

#### 3-1 雷現象

富士山体上接地線に電流を流す雷現象は、観測から図5に示す五つあることが分かっている。

観測できる対地雷には以下の三つがある。

- (1) 一つ目が測候所直撃雷電流である。
- (2) 二つ目が測候所電極捕集電流である。対地放電点と測候所との間には大きな電位差が生じ放電点が移動する場合もあると推測される。
- (3) 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山麓側落雷により接地線電位が上昇し、その電位により測候所の富士山山体抵抗に流れる電流である。接

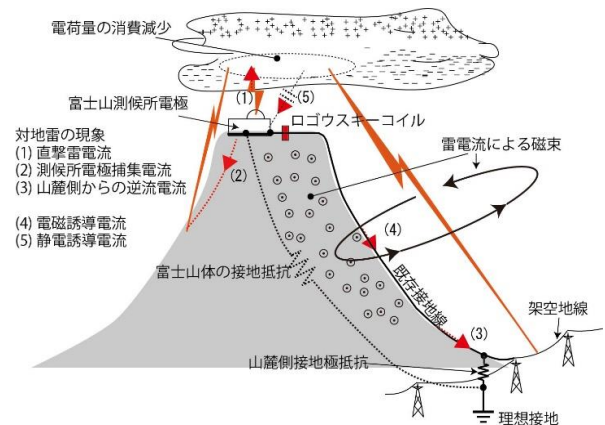


図5 富士山周辺落雷時に測候所と山麓接地極を繋ぐ接地線に流れる電流

地線電位は小さくなる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、以下の2点がある。

- (4) 四つ目に雷電流が作る電磁束による大きな磁束鎖交循環路の電磁誘導電流である。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、測定した接地線電流を積分した値が落雷電流に比例したものになる。
- (5) 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。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。

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である。このことによりより正確に雷現象を解明することが可能になっている。

### 3.2 雷以外の自然現象

本測定系は、雷以外の自然現象によって生じる接地線電流変化の測定を可能にすることで雷現象以外の観測も可能になる。

山麓側の接地線は送電線架空地線や各鉄塔の接地極と広範囲に繋がっている。また空間域でも富士山体と大きく結合している。そのために接地線電流測定域を直流域まで広帯域に測定可能にして十分な測定感度が得られるようにすることで自然現象に対応する接地線電流変化を捉えることが可能になる。

当初の接地線電流測定は、直撃雷電流測定を意図したが直撃雷は無く、別の雷現象による接地線電流変化を捉えた。このことから別の現象変化による接地線電流変化を捉えられるように測定系を改良し、富士山測候所で五つの現象を観測できるようにしている。

こうした経験から雷以外の自然現象でも接地線電流に変化を引き起こす自然現象はあると考えている。十分な感度、及び周波数測定範囲が得られるようにして発現時刻等に高い相関関係がある測定を可能にすることで実現できると考えている。直流域まで測定可能な方法も採用することで周辺の自然現象変化の測定も可能になるのではないかと推測している。

## 4. 落雷

### 4.1 落雷放電路の等価回路

対地雷は、負極性下向き雷の場合、リーダが大地に到達したときリーダの蓄積電荷を中和して流れる。図6はこの等価回路である。Cはリーダの雷放電路静電容量、Lは雷放電路のインダクタンス、Rは大地抵抗になる。高密度の正あるいは負の極性の雷雲からCが充電され、リーダが大地に到達したとき落雷放電スイッチが入ることになる。この回路方程式は以下になる。

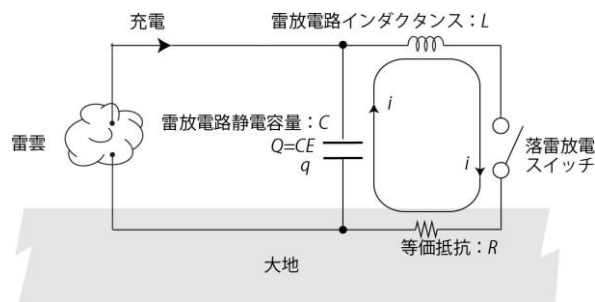


図6 落雷放電の等価回路

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = 0$$

これを電荷qで書き直すと、 $i = dq/dt$ より、

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = 0$$

これを解くと

$$R^2 > 4 \frac{L}{C} \text{ の場合, } P = -\frac{R}{2L} \pm \frac{1}{2L} \sqrt{R^2 - 4 \frac{L}{C}} = -\alpha \pm \gamma$$

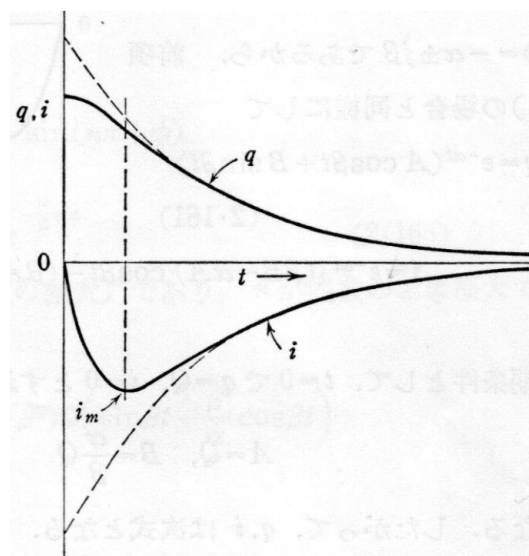


図7 LRC等価回路の放電時のqとi

として

$$q = Q \varepsilon^{-\alpha t} \left( \cosh \gamma t + \frac{\alpha}{\gamma} \sinh \gamma t \right)$$

$$i = -\frac{2E}{\sqrt{R^2 - 4 \frac{L}{C}}} \varepsilon^{-\alpha t} \sinh \gamma t$$

になる。

絶対値電流の最大値は次式になる。

$$i_m = -\frac{E}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \left( \frac{\alpha - \gamma}{\alpha + \gamma} \right)^{\alpha/2\gamma}$$



以上の  $q$  と  $i$  を図にすると図7 になる。

測定結果でも上向き雷には適用できないが下向き雷は類似した波形になっており等価回路をほぼ満足しているものと考えている。

#### 4.2 落雷電流

落雷電流はリーダの蓄積電荷を中和していくことで流れる。従って、もし単位長さ当たりの蓄積電荷がほぼ同じであれば、落雷電流はリーダ長に比例することになる。例えば雷雲が高い場合リーダ長は長くなると考えられ、落雷電流も大きくなると考えられる。富士山測候所の直撃雷電流は大きいと聞いていたが測定結果では意外と小さい。これは富士山の雷雲が測候所に近く、リーダの総延長は長くないため中和電流も大きくならないと考えられる。リーダを流れる電流は発光強度に比例しているとも考えることができる。例えば、分岐しているリーダは長さが短く、分岐点での発光量も小さくなる。この考えから一般的に大地落雷点の中和電流が最大で発光量も最大になると考えている。

#### 4.3 放電路残存時間

図8 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。停電時に測定されているため、零相電流の影響は見られない。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30msである。この間、放電路プラズマ状態のイオン・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。

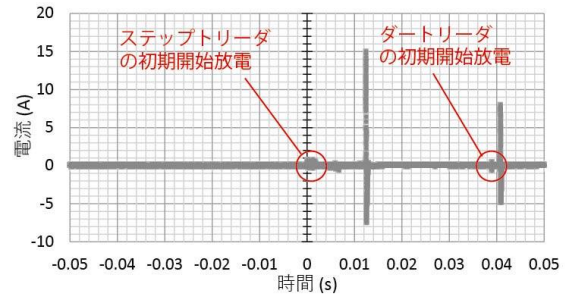
いずれの雷撃にも一般的に観測される初期開始放電が観測されている。前兆現象初期のノイズ状パルスの原因は、図9のように放電路進展前のランダムな多発放電と電離・分極によりリーダに電荷を集めもう一方でステップリーダとして放電が伸びていくものと推測される。

#### 4.4 ステップリーダ

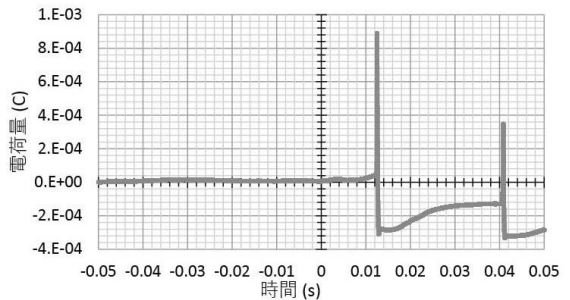
図10(a) はステップリーダと静電誘導による接地線電流変化を測定したものである。ステップリーダによる電流は、リーダと接地線との電磁結合により接地線に流れる電流を測定し、それを積分することでリーダ電流に比例する電荷量として現わされている。

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11 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



(a) 接地線電流測定波形



(b) 接地線電流の積分値

図8 2019年7月23日01:23:50に観測された二重落雷

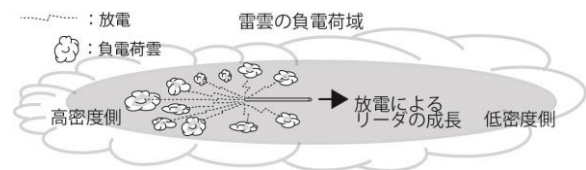
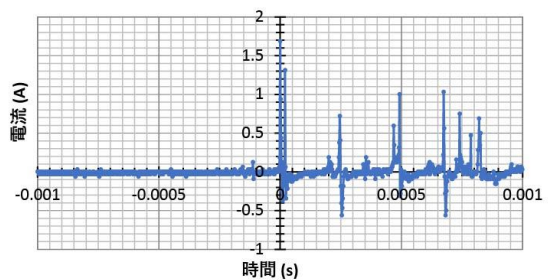
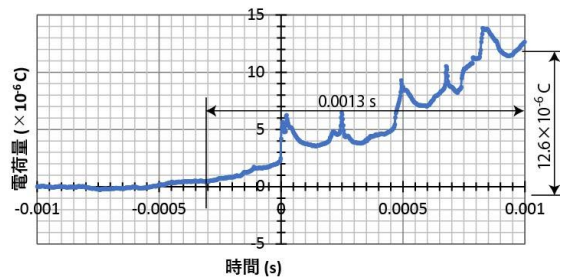


図9 ステップリーダの初期開始放電のモデル



(a) 接地線電流



(b) 接地線電流の積分値

図10 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)

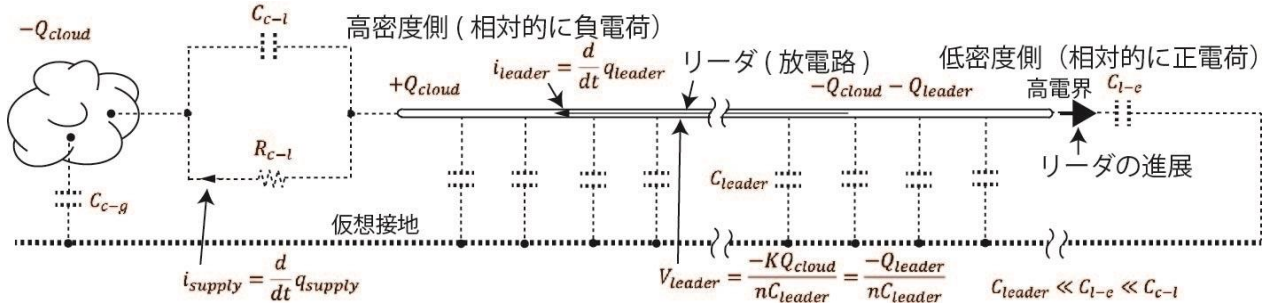


図11 負極性下向き雷のステップリーダの単純化モデルの等価回路

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、低密度側の負電荷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。

#### 4.5 多重落雷

二重雷の最初の落雷は図12(a)のようにステップリーダが初期開始放電から進展、大地に到達してリターンストロークが生じる。この放電路の導電性は暫く確保され、第1雷撃のステップリーダ起点に (b) に示す第2雷撃のステップリーダが浸入しダートリーダに繋がることで第2雷撃のリターンストロークが生じる。そのため、図8に示される第1雷撃の初期放電からリターンストロークまでの時間よりも第2雷撃の初期放電からリターンストロークまでの時間は小さくなっている。

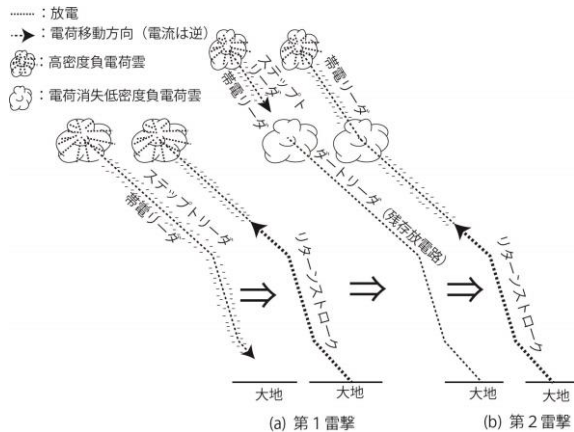


図12 負極性二重落雷発生の仕組み予想モデル

この多重落雷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ステップリーダが生じていて、それがダートリーダの発生場所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。

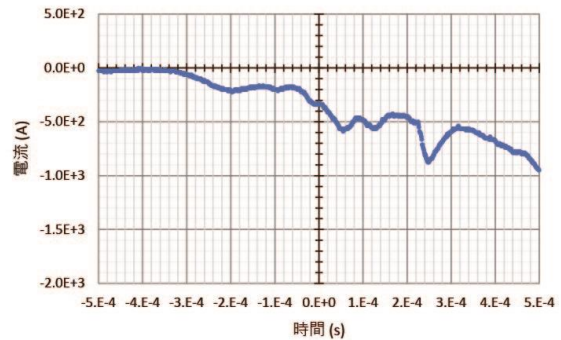
図12に示される二重落雷の場合、1回目のリーダは長い、2回目のリーダは放電路が消滅せずに残っているため成長時間が無い分短くなっていると考えられる。

(1) 負極性上向き二重落雷 (2021年8月18日 10:46:28, 29)

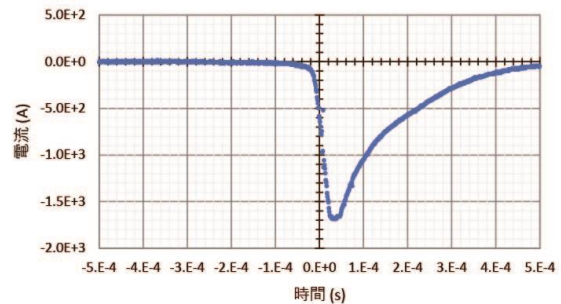
2021年8月18日に図13の二重落雷の測候所直撃雷が観測された。図13(a) が第1雷撃、(b) が第2雷撃である。いずれも観

測された高压ケーブル内接地線電流である。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倍したものになる。

第1雷撃には、前兆現象が見られず、不安定変動を伴って増加する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。大電流の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



(a) 第1雷撃の高压ケーブル内接地線電流 (at 10:46:28)

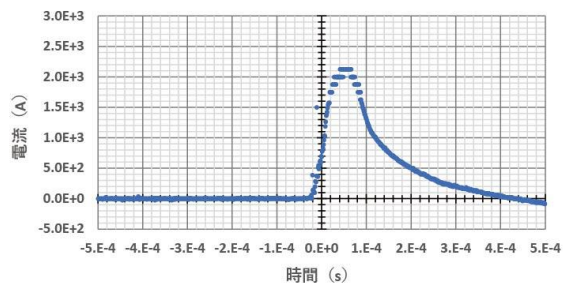


(b) 第2雷撃の高压ケーブル内接地線電流 (at 10:46:29)

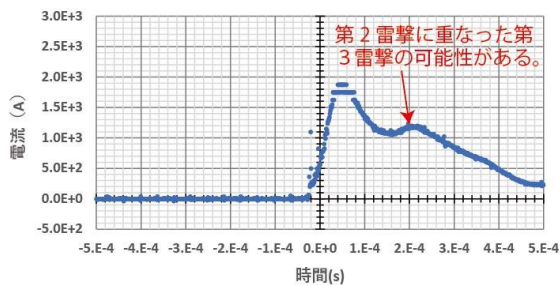
図13 測候所負極性上向き二重雷 (on August 18, 2021)

流変化が伴うことによる高電界が生じ、山麓から接地を取っていることで成長に必要な電荷補給も得られるという富士山測候所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ステップリーダのリターンストロークと考えている。





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



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

図 14 正極性下向き二重落雷

#### (2) 正極性下向き雷 (2022年7月26日 13:46:12)

2022年7月26日に図14の二重落雷の測候所直撃雷が観測された。正極性下向き雷の二重雷である。(b)の第2雷撃には減衰域にコブがあり三重雷が重畳したものと考えられる。

#### 4.6 上向き雷・下向き雷

測候所での上向き雷の発生条件は、①上向きリーダの発生条件として高電界があり、②成長条件として十分な電荷補給ができる必要がある。前者は、測候所が3776 mの高さにあり雷雲近くで高電界が生じ易くなっていると考えている。後者は山麓の接地抵抗は小さく、接地線の電流容量も大きい。測候所ではこの2条件を満たしている。図13(a)の第一雷撃はこうした条件で生まれたものと推測される。上向き雷は上向きリーダ発生点が落雷位置になる。見方によっては落雷点を制御できる落雷ということになる。

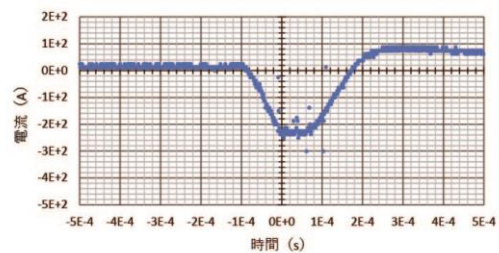
下向き雷は測候所周辺の電界の影響を受けて進展方向が決まり、必ずしも測候所被雷とはならない。測候所近くになると高電界によりリーダが発生成長し、避雷針が伸びる効果が現れると考えている。確実とはならないが、測候所ではある程度制御できる落雷ということになる。

落雷位置が定まるということは落雷が必要な実験研究、及び落雷保護にとって好都合な条件になる。

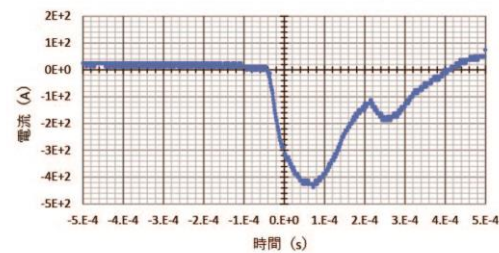
### 5. 2023年に観測された測候所直撃雷電流

#### (1) 大電流測定系測定結果

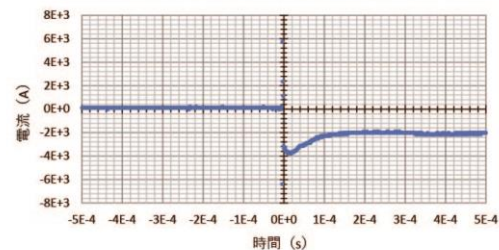
DSO-1測定系で観測された接地線電流波形である。図12に示す波形が8月1日に観測された3回の波形である。1回目負極



(a) 1回日落雷 (at 01:44:41.5 on August 1, 2023)



(b) 2回日落雷 (at 16:41:12.1 on August 01, 2023)



(c) 3回日落雷 at 16:41:12.1 August 01, 2023

図 15 2023年8月1日観測波形

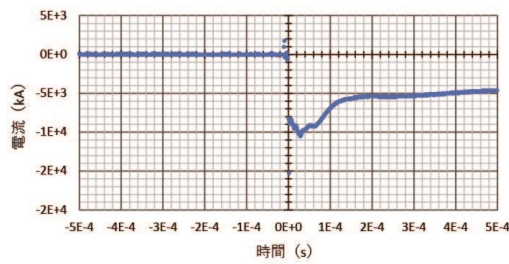
性240 Aと2回目負極性400Aで電流は小さく、立ち上がりがなだらかであるため、測候所電極捕集電流の可能性はある。2回目の立下り部に見られるピークは第1雷撃に第2雷撃が重畳したものと考えられる。2回目の直撃雷電流測定は停電時に測定されたものである。2回目には前兆現象測定用のDSO-2測定系で200 ms前に前兆現象が観測されている。他の直撃雷では前兆現象は観測されていない。2回目と3回目は同一時刻であるが3回目が2回目の後、100ms以内に生じたものになる。3回目は正のピーク10  $\mu$ sパルス幅の6 KAのインパルスがあり、そのアンダーシュートで負の4 kAのピークが観測された。何故このような波形が観測されたのか検討しているがまだ不明である。

8月3日にも三つの負極性直撃雷があった。1回目の直撃雷後、約8分後に2回目、その約1分後に3回目の直撃雷があった。時間間隔から多重雷ではなく、活発な雷雲活動に曝されていることにより生じた間隔が短い直撃雷と考えている。

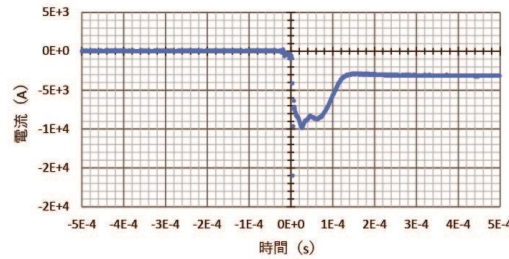
測定波形は等価回路から予測される波形にノイズが重畳しているように思われる。総観測数は1万を超えておりまだ処理きれない状態である。

#### (2) 時刻校正

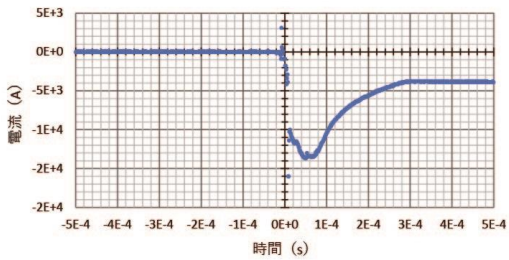
他の落雷情報との比較のため、時刻校正は重要である。JST



(a) 1回日落雷 (at 16:20:36.7 on August 03, 2023)



(a) 2回日落雷 (at 16:28:13 on August 03, 2023)



(a) 3回日落雷 (at 16:29:08 on August 03, 2023)

図 16 2023年8月3日観測波形

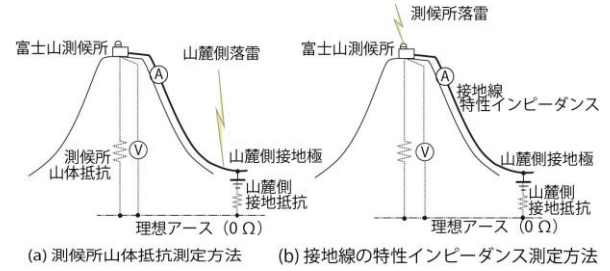


図 17 富士山測候所山体抵抗及び山麓に繋がる接地線特性インピーダンス測定方法

時刻校正は1週間おきに時刻補正したGPSカメラDSOの時刻表示画面を撮影して得た校正時刻差を一次近似して補正した。

DSOの表示時刻は、トリガーがかかって合否判定して結果が出てからUSBメモリーに記録された時刻である。トリガー時刻ではない。測定時間が長いDSO-2以外はトリガー時刻との差は小さい。

### 6. 富士山体抵抗・接地線特性インピーダンスの測定

雷現象を理解する上で富士山体抵抗、及び接地線特性インピーダンスを知ることは正確な雷現象の解明に必要な情報である。

測候所富士山体抵抗と山麓と繋がる接地線の特性インピーダンスの測定は、図17の方法で行う。①山体の接地抵抗は山麓側落雷による測候所接地極電位を測定できるようにして、その電位が加わった時に流れる電流を同時に測定し、前者を後者で除することで求められる。②山麓に繋がる接地線の特性インピーダンスは、

測候所直撃雷被雷時の測候所電圧と接地線電流の比から求める。

接地線電流測定は雷現象観測に使用している電流測定系を流用している。山麓接地に対する測候所接地極の電位は、電位測定線として測候所の高圧電源引込線を流用することで山麓電位に対する測候所接地極電位が求められるようにして測定できる。電源線に絶縁

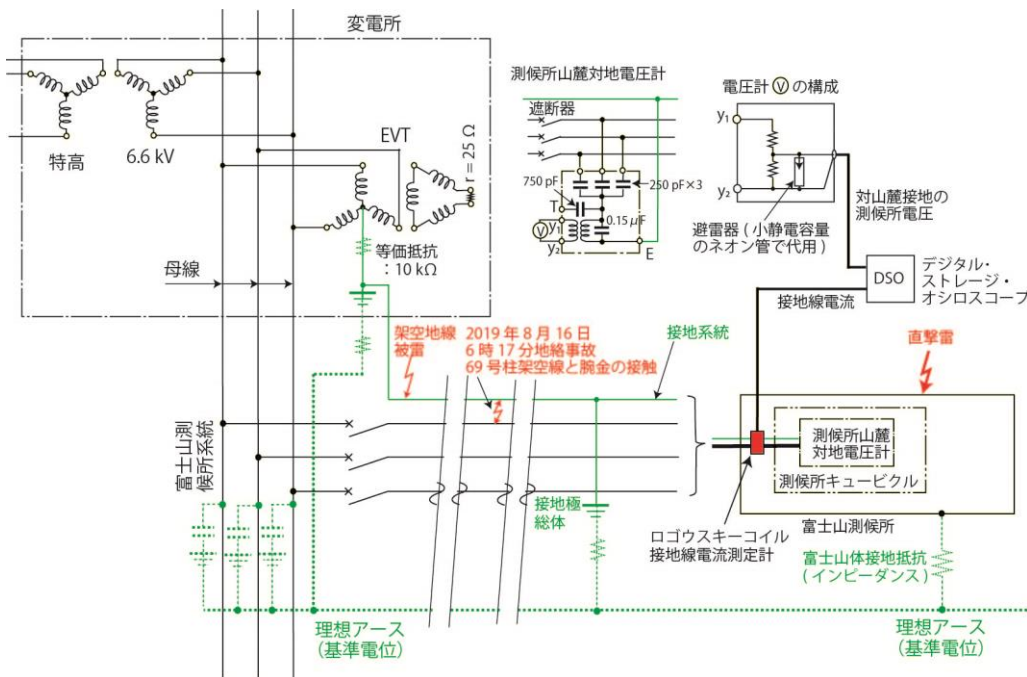


図 18 接地線電流と山麓接地に対する測候所接地極の電圧を測定する具体的測定系

不良が無ければ零相電圧は0 Vになり電源電圧の影響は受けない。山麓側の電源線の大地との静電容量によって接続され、測候所接地極電位が求められる。

## 7. おわりに

以上をまとめると、

- (1) 電気回路的に見て雷現象の解明をはかった。
- (2) 雷現象についての等価回路を提案した。
- (3) 2023年の直撃雷観測結果について報告した。
- (4) 測候所の富士山体抵抗と接地線の特性インピーダンスの測定方法を提案した。

富士山での観測を積み重ねることで、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。

今後は、落雷以外の自然現象の測定を可能にするため、測定器のオフセットを小さくし測定周波数帯域を直流域まで伸ばすことが必要である。

測定数は多くなるため、データ処理できる工夫、対策が必要である。

## 8. 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) 北村覚一(1973年), 基礎過渡現象論, 昭晃堂
- 17) 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.
- 18) 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

- 19) 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
- 20) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 伊高健治, 鈴木智幸, 林真彦, 土器屋由紀子 (2022). 富士山体を検出器にした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.
- 21) 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
- 22) 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
- 23) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子, 鈴木智幸, 村田浩太郎 (2023), 富士山頂の雷測定で見える雷現象, 第16回富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 21-30.