

## O-01: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ための準備

安本勝<sup>1</sup>、佐々木一哉<sup>2</sup>、高橋浩之<sup>3</sup>、鴨川仁<sup>4</sup>、野村渉平<sup>5</sup>、向井人史<sup>5</sup>、大胡田智寿<sup>6</sup>、土器屋由紀子<sup>6</sup>

1. 東京大学(現(株)アンテック)、2. 東海大学、3. 東京大学、4. 東京学芸大学、5. 国立環境研究所、
6. NPO 法人「富士山測候所を活用する会」

### 1. はじめに

著者らは、測候所の雷対策方法の研究・提案を行っている。本年度は、二つの点について次年度実施のための準備を行った。一つは、昨年度 CO<sub>2</sub> 観測システムが測候所被雷による誘導雷によりデータ送信ができなくなった原因究明とその過程で行った、富士山環境下での測候所に適用する一般的な雷対策方法と問題になっている CO<sub>2</sub> 観測システムの具体的実施案の検討である。二つ目は、山麓側接地線に流れる電流測定方法である。2012 年度に測候所被雷電流を観測する目的で山麓への接地線に流れる電流観測を実施したが、その夏期間測候所への落雷は無く、落雷電流は観測できなかった。代わって予想していなかった周囲の落雷現象により接地線に流れる電流が観測でき、また測候所に電源供給している高圧電源の操作時や地絡時に流れる電流を観測した。このときの周囲の落雷頻度は高く、マニュアル観測では追従できないことが分かり、本年度は次年度自動観測を実施するための準備を行った。またこの接地線の電流検出感度を高めることで目的以外の新たな現象を見いだせることを期待して電流検出感度を向上させた検出器による予備測定の検討も行った。

### 2. 富士山測候所の現状の接地系統

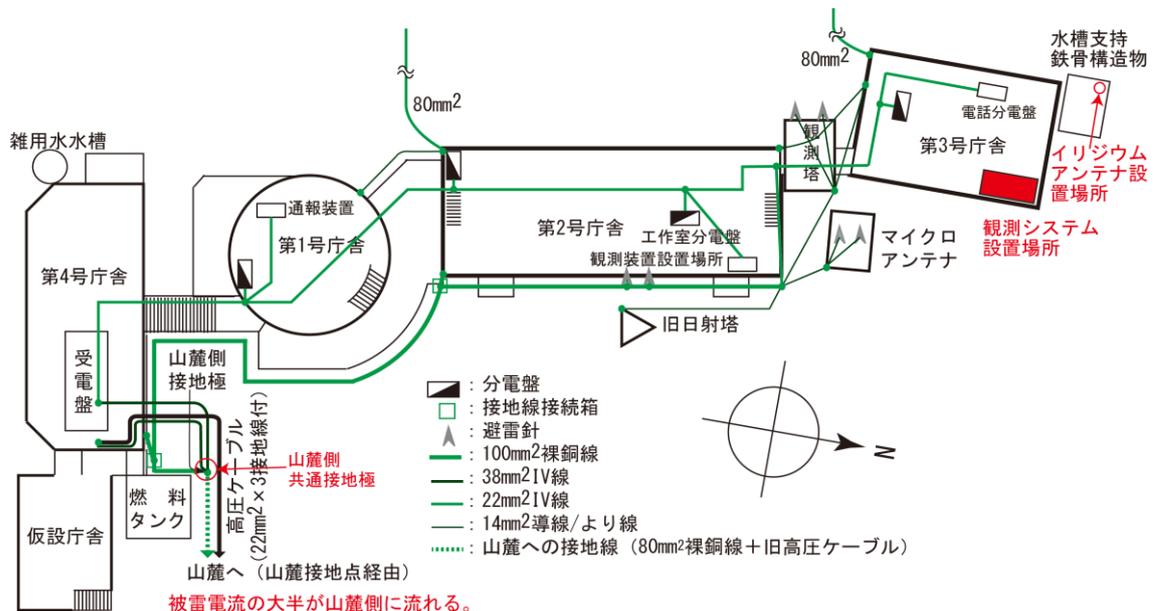


図1 富士山測候所接地系統の概要

富士山測候所は富士山頂の剣が峰(3776 m)にある。標高が高いため落雷頻度は高く、その対応のため各庁舎の外表面は金属製覆いで覆われファラデーケージを考えた構成になっている。ただし部材間の接続や接地経路のインピーダンスは、落雷電流の大きさを考えると無視できるほど小さくなく、理想的になっていない。また、雷電流を大地に逃がすため、接地抵抗の低減がなされているが、岩盤であるため小さくできない。基礎や接地極の接地抵抗は測定限界の300 Ω以上である。測候所全体でも100 Ωを超えているものと推測している。そのため接地は山麓側でも行われ、その接地が測候所と繋がっている。この接地抵抗は10 Ω以下で、測候所の接地抵抗を決めている。図1は富士山測候所の全体の接地系統を示したものである。落雷電流の大半は接地抵抗の低い山麓側接地線に流れるため、測候所の電位

分布は、測候所の落雷地点から山麓側の雷電流路に沿って存在するインピーダンスとそこに流れる雷電流との積の電圧降下によって生じることになる。

CO<sub>2</sub>観測システムの設置場所は、図1に示す、第3号庁舎の2階北東角に、データ送信に使用するイリジウムアンテナは雪囲い付水槽支持鉄骨構造物(以下、鉄骨構造物)の北西に設置している。鉄骨構造物と第3号庁舎の基礎鉄骨との接続は最短距離で複数接続されておりインダクタンス低減対策が考慮されていない。このことが、鉄骨構造物が被雷したときに大きな電位上昇をもたらしアンテナから静電誘導によるサージ電圧が侵入したものと推測される。このトラブル例は、測候所の落雷位置によっては十分な小さなインピーダンスの落雷電流路が確保されていない場所があることを示す一例である。

測候所の接地インピーダンスは、測候所設置場所の接地インピーダンスが大きく山麓側の低い接地インピーダンスで決まる。そのため、測候所被雷時の雷電流の大半は山麓側の接地に繋がる接地線に流れる。このことに着目すると、測候所の山麓側に繋がる接地線に流れる電流を測定することで測候所被雷電流の観測が可能になる。しかし、現状の山麓側に繋がる接地線は、①高压ケーブル内の接地線、②80mm<sup>2</sup>裸銅線、および③旧高压ケーブルの3系統がある。将来的には3系統を一つにまとめる必要があるが、必要工事規模や費用等を考慮すると容易ではなく、次年度も前回測定方法と同様に③高压ケーブル内の接地線のみに分流する電流測定になる。

### 3. 測候所の雷対策

#### 3-1. 測候所の一般的な対策方法

測候所はファラデーケージ構成にすることを意識され建設されている。これが理想に近い状態であれば、測候所内は測候所被雷の影響は無い。

しかし測候所は、落雷によるサージ電圧が侵入しトラブルを引き起こしてしまう場合は多くあり、落雷条件によってはファラデーケージを満足しない状態になっている。この原因と対策は以下ようになる。

(1) 落雷電流路で生じる電位差によるもの 図2は落雷電流路で生じる電位差の状態を示したものである。落雷電流は測候所に沿って雷電流路を通り山麓側に流れるが、電流が大きく雷電流路に沿って電圧降下が生じる。測候所内電源は変圧器でB種接地が受電盤共通接地極(山麓側共通接地極)に接続され、従って測候所内の電源対地電位は、山麓側共通接地極電位と同じである。この電源電位は、漏電が無い限り測候所建物内で同じである。一方電源と対になっている接地系統も共通接地極に接続されており、共通接地極と同じであるが、この接地系統は分電盤側配線先で測候所建物構造材と接続している可能性が高く、測候所建物電位分布に応じた電位分布が生じている可能性が高い。測候所内でのこの対策は、①雷電流路になる部材間接続や接地系統インピーダンスをできるだけ小さくする、②電源はノイズカッターを介して導入し電源接地電位の影響を受けないようにする、③測定システムは1点接地を確保することで可能である。もし複数の場所で連携した測定を行う場合、1点接地はできないため、それぞれで1点接地を確保し、それぞれの間を連携するケーブルにコモンモードノイズ対策をすることで、両システム接地間サージ電圧のそれぞれのシステム内部への侵入は抑制できる。

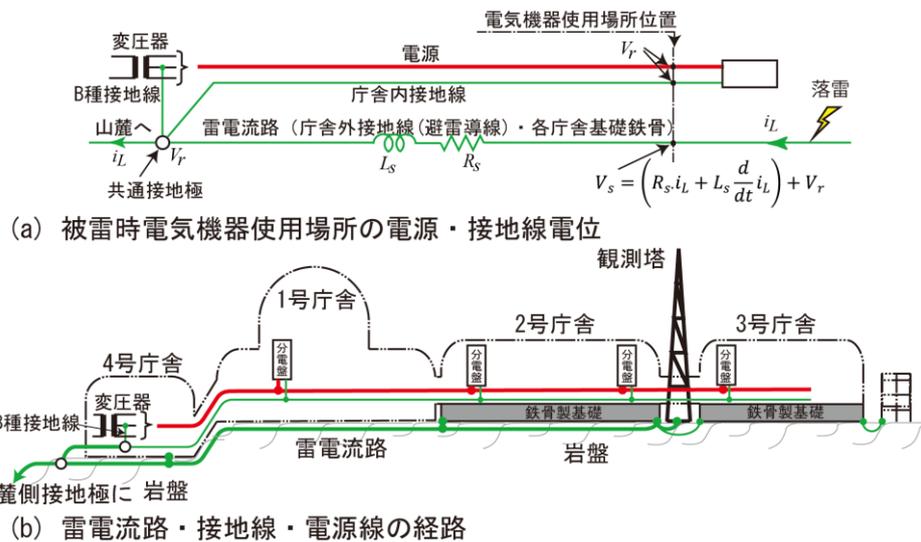


図2 被雷時電気機器使用場所電源・接地線電位と雷電流路・接地線・電源線

## (2) 測候所外部の観測施設被雷対策

富士山は岩盤であるため接地抵抗は小さくできない。そのため、観測施設の被雷電流は、設置場所の接地で大地に逃がせないため、測候所と接続する接地線に流れる。その電流と接地線インピーダンスにより観測施設と測候所との間に大きな電位差を作る。観測施設で使用する電源・信号系統が測候所の電位で決まっていると、電源・信号系統にはこの大きな電位が加わり絶

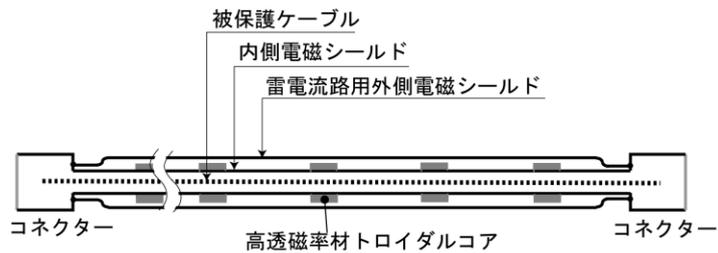


図3 雷対策ケーブル

雷電流が流れ両コネクター間にできる電位差侵入を抑制する。避雷器等侵入電圧抑制方法は、抑制電圧を侵入させるが、雷対策ケーブルの侵入電圧は、著しく小さくでき、容易に1V以下にできる。

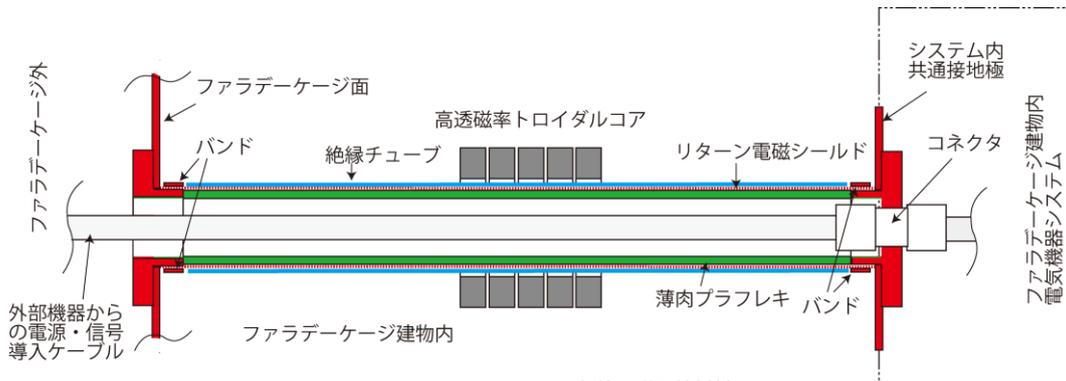


図4 リターン電磁シールド

ファラデーケージ外の導入ケーブルからの侵入電流をファラデーケージに効果的に戻すため、ファラデーケージと電気機器システム共通接地極間の侵入電圧を著しく小さくできる。内部ノイズに対しても循環電流を抑制する大きな効果がある。

縁破壊を引き起こし、雷電流が電源・信号系統に入り込みトラブルを引き起こすことになる。この対策は、被保護ケーブルに図3の構成の雷対策ケーブルを使用することで可能になる。被雷電流は外側電磁シールドに流れ、両端に生じる電位差は、外側電磁シールドの相互インダクタンス、および内側電磁シールドの相互インダクタンスにより相殺することで両端に生じる電位差の侵入を抑制する方法である。避雷器は侵入を前提にして抑制電圧に抑制する方法になるが、雷対策ケーブルは被雷によって生じる電位差を相殺吸収する方法になるため、侵入電圧は避雷器等の抑制電圧よりも著しく小さくできる。被対策観測施設と避雷導線に繋がる測候所内(ファラデーケージ面)導入部との間に適用する方法である。

外部からケーブルを導入する場合、ケーブルの接地系統(同相)サージ電圧は、庁舎外壁(ファラデーケージ面)導入口とケーブル接地電磁シールド線を接続同一電位にできないとそれと繋がる庁舎(ファラデーケージ)内のシステム接地に大きなサージ電圧として侵入することになる(ファラデーホール状態)。この対策は、図4に示すリターン電磁シールドを使用する方法で抑制できる。庁舎内部に導入してからシステム接地に接続せざるを得ないケーブルの接地電磁シールドは、ケーブル導入口のファラデーケージ導入口に電磁シールドで戻すことで、インダクタンスを小さくできる。従って、導入口とシステム接地との間の電位差を小さくでき、侵入電圧を小さくできる。また、トロイダルコアは導入ケーブルからの侵入電流をさらに抑制し、一方内部ノイズに対しては漏出および侵入を抑制する効果がある。

## (3) 落雷による静電・電磁誘導サージ電圧対策

理想的ファラデーケージ内であれば落雷があっても静電・電磁誘導の影響は無い。しかし観測機器や信号等送受信のためのアンテナは、外部に設けざるを得なく、雷の静電・電磁誘導の影響を受けることになる。ファラデーケージの外部になる近辺のアンテナや観測施設等は、直撃雷を避けるため一般的に避雷針を設けるが、避雷針は被雷時、雷放電端の避雷針への移動と被雷時の避雷針電位変動により、静電誘導の影響を受ける。この静電誘導サージ電圧は、図5に示すように放電端と避雷針・被雷導線等電位上昇部分からのシールドで抑制できる。この構成方法

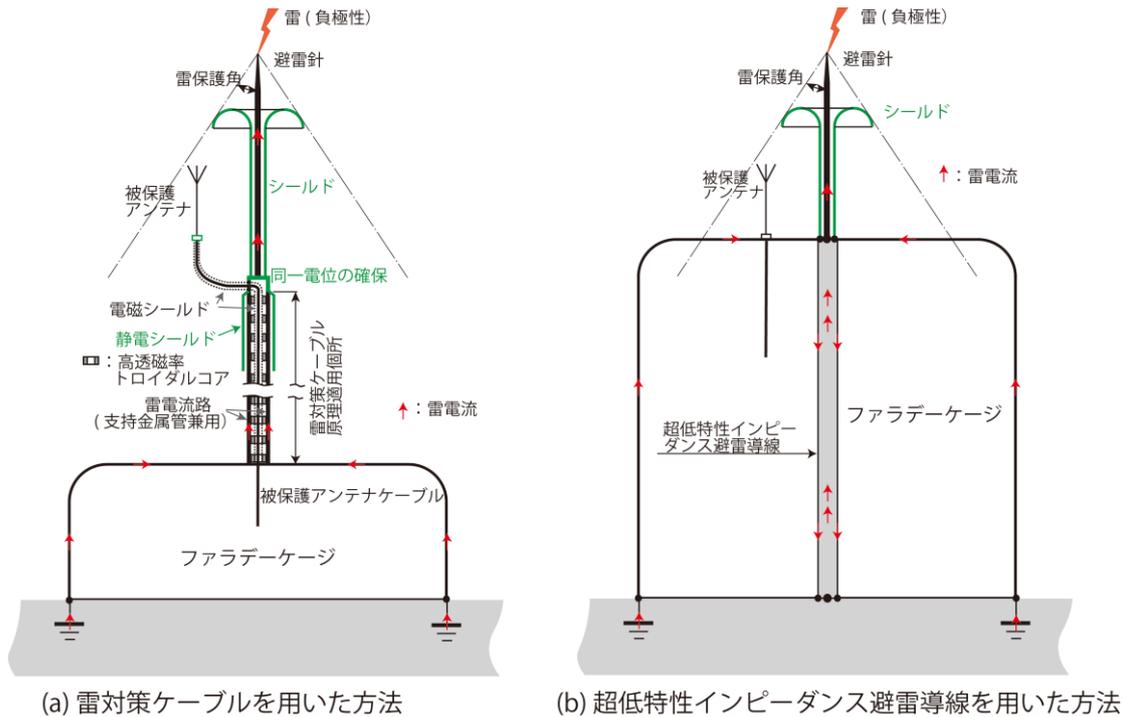


図5 避雷針の落雷電位からのアンテナ等のシールド対策と落雷電流からの電磁誘導対策

は二つ考えられる。一つは(a)のようにアンテナをシールドし、ケーブルはシールド電位個所からファラデーケージ面迄は先の雷対策ケーブルの構成にした避雷針支柱内に収め、ファラデーケージ内に導入する方法である。この方法はシールドとファラデーケージとの電位差を相殺吸収する一方、電磁誘導は雷電流路の内側を通すことで影響を受けないようにする方法である。

もう一つの静電誘導対策方法は(b)に示すようにシールドはファラデーケージと同一電位にしてシールドする方法である。避雷導線の特性インピーダンスは著しく小さくすることで、避雷電流による避雷導線の電位上昇(パルス立ち上がりは充分速いステップ状パルスとして、10 kAの場合0.025Ωで250V)を抑え、特性インピーダンスが高くなる避雷針の電位上昇(10kAの場合、200Ωとして2MVになる)は反射を考えると5mの避雷針で約20ns程度になる。また避雷導線に流れる雷電流による電磁誘導は、超低特性インピーダンス避雷導線のシールドに避雷導線の雷電流を相殺する電流が流れるため、超低特性インピーダンス避雷導線周囲に電磁誘導は生じない。サージ電圧・電流変化を複雑にする反射もない。相殺電流はファラデーケージを流れるが内部には電磁誘導の影響は無い。超低特性インピーダンス避雷導線は、整合抵抗で終端した低特性インピーダンス同軸ケーブル多数を束ね並列に接続することで実現できる。例えば1000本束ね並列接続すれば特性インピーダンスは1/1000にできる。仮に25Ωの特性インピーダンスであれば、0.025Ωになる。この避雷導線の耐圧は原理的に限界があり、避雷針との接続部に大きな電界が加わらないように緩和機能が必要になる。また、終端抵抗は雷エネルギーを消費できる容量が必要になる。

電位差は、流路の抵抗とインダクタンスを小さくすることで小さくでき、電磁誘導は、金属製部材間の電氣的結合を良好にしてファラデーケージを近似し、誘導磁界を相殺する遮蔽電流を流れ易くすることで抑制できる。しかし、富士山測候所も該当するが、一般的に理想的なファラデーケージ構成でない場合が多い。ここに提案する(a)(b)の方法は、そのような場合でも新たな電流路を確保するなどファラデーケージを損なう部分の補償対策を提供しやすい方法になる。

また被対象線路の電磁誘導電圧が相殺できるように燃化する、同軸化することで影響を抑制することも必要である。

### 3-2. CO<sub>2</sub>観測システムへの対策案

昨年度、誘導雷によりイリジウムアンテナ送信部が故障しデータ送信ができなくなった CO<sub>2</sub>観測システムの考えられる原因から次年度実施予定の雷対策案は以下の内容になる。

(1)1点接地 観測システムは庁舎から絶縁し、システムの共通接地極を1個所に確保し1点接地とする。今年度、既に観測システムの1点接地に必要な絶縁対策は実施した。

(2)絶縁電源の確保 電源はノイズカットトランスを介して導入する。安全対策のため、漏電および過電流遮断器を通して使用する。観測システムの接地個所と電源B種接地個所は異なるため、落雷電流が流れた際、両者に大きな電位差が発生するが、絶縁させることでそれを防止できる。電源を介したノイズの対策にもなる。

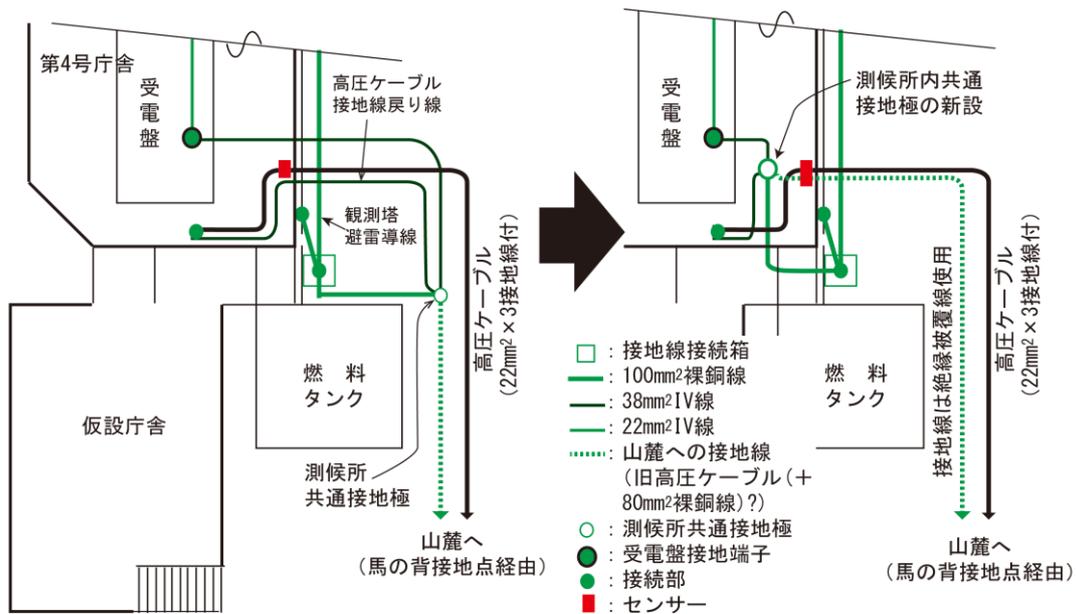
(3)アンテナ設置鉄骨構造物と観測システム設置第3号庁舎間インピーダンスの低減 アンテナを設置している鉄骨構造物の鉄骨同士間の接続を良好にした上で、鉄骨構造物と雷電流の良好な流路になる第3号庁舎基礎鉄骨(良好なファラデーケージ構成部)との間の接続インピーダンスを小さくする。鉄骨同士は38mm<sup>2</sup>銅線により脚部で熔接接続し、その鉄骨柱と第3号庁舎基礎鉄骨間には38mm<sup>2</sup>銅線で最短・最大幅で最低2本を熔接で接続する。

(4)アンテナと観測システム間の電位差の相殺吸収 (3)の対策をしてもどうしても生じる電位差に対する対策方法である。3-1(2)の①雷対策ケーブルと②リターン電磁シールドにより行う方法である。①雷対策ケーブルは、両端の電位差を相互インダクタンスで相殺しサージ電圧の侵入を抑制する方法で、原理的に侵入電圧は設計により著しく小さくできる。この対策の設計仕様は0.1V以下を予定している。アンテナと庁舎内導入部間で使用する。

②リターン電磁シールドは、庁舎内導入ケーブルの実効インダクタンスを著しく小さくすることで、庁舎内導入部と観測システム共通接地極間の電位差を小さくし、サージ電圧の侵入を抑制する。内部のノイズに対しても強くなる。庁舎内導入部と観測システム共通接地極間で使用する。

(5)アンテナの組鉄骨電位上昇からの静電シールド アンテナは、雷対策ケーブルアンテナ側端末電位でシールドする。そのため、雷対策ケーブル端末は周囲鉄骨構造物に接続し鉄骨電位に合わせる。避雷針設置による直撃雷対策は、イリジウムアンテナに陰を作るため、実施しない。イリジウムアンテナの設置方法が鉄骨構造物の天井面よりも突出しないので直撃雷の可能性は小さいと考え、誘導雷対策のみである。

以上(1)～(5)の対策を実施することで落雷に強い観測システムになる。



(a) 2012年観測時測定回路(2014年観測時も予定) 高圧ケーブル内接地線電流のみの測定

(b) 山麓側接地線に流れる全電流を測定する回路修正案

図6 山麓側に流れる全電流測定のための接地回路修正案

#### 4. 山麓側接地極に繋がる接地線の電流測定

##### 4-1. 山麓側接地極に繋がる接地線経路

図6(a)に示すように山麓側接地極に繋がる接地系統は3系統ある。①引き込み高圧ケーブル内の高圧線と別に設けられた3本の接地線、②80 mm<sup>2</sup>の裸銅線、および③接地線に転用した旧高圧ケーブルである。次年度は昨年度と同様に電流センサーは引き込み高圧ケーブルに流れる電流のみを測定することになる。全電流測定は(b)のように3系統をまとめ、山麓側接地線は測候所から直接流れ込む電流が無視できるように絶縁させることが必要であるが、この実現には現山麓側共通接地極周辺の掘削による配線変更が必要で費用等を考えると簡単ではない。高圧ケーブルに設置する図7の雷電流センサーケースは他の②③系統の電流をまとめて高圧ケーブル外周軸方向に山麓側に流し、全電流測定を可能にする工夫がされている。電流センサーケースは、設置個所ケーブルの曲率半径でも収められるように短くした。

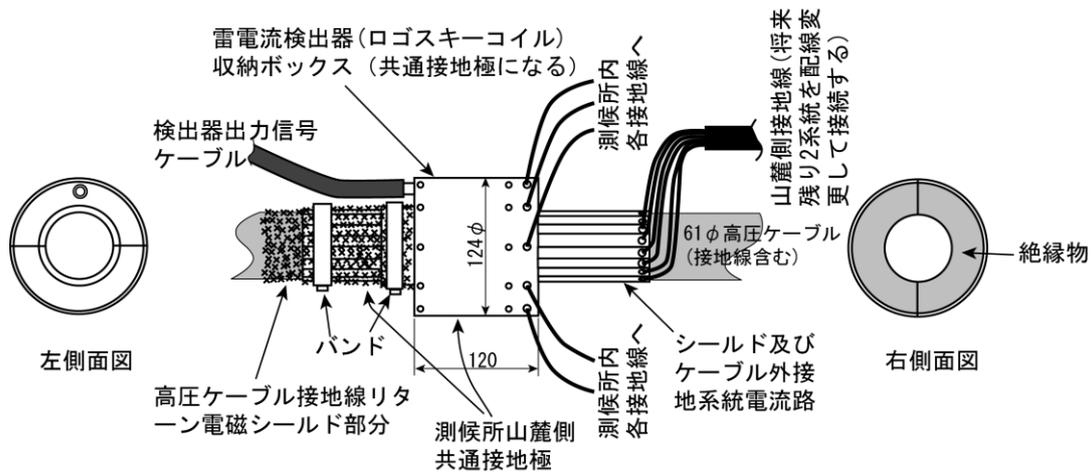


図7 雷電流検出器(ログスキーコイル)収納ケースと結線

##### 4-2. ログスキーコイルによる接地線に流れる電流の測定

高圧ケーブル内の接地線に流れる電流はログスキーコイルにより検出する。観測電流は、(1)測候所被雷電流、および(2)その他の電流、①山麓側接地線周辺の落雷により接地線に流れる電流、と②高圧電源遮断時や地絡事故時等に流れる電流である。(2)の①は昨年度測定で観測されたもので最大で10 Aで、②はVCB遮断時で約160 Aが観測されている。測候所被雷時に流れる電流の上限は100 kA以上

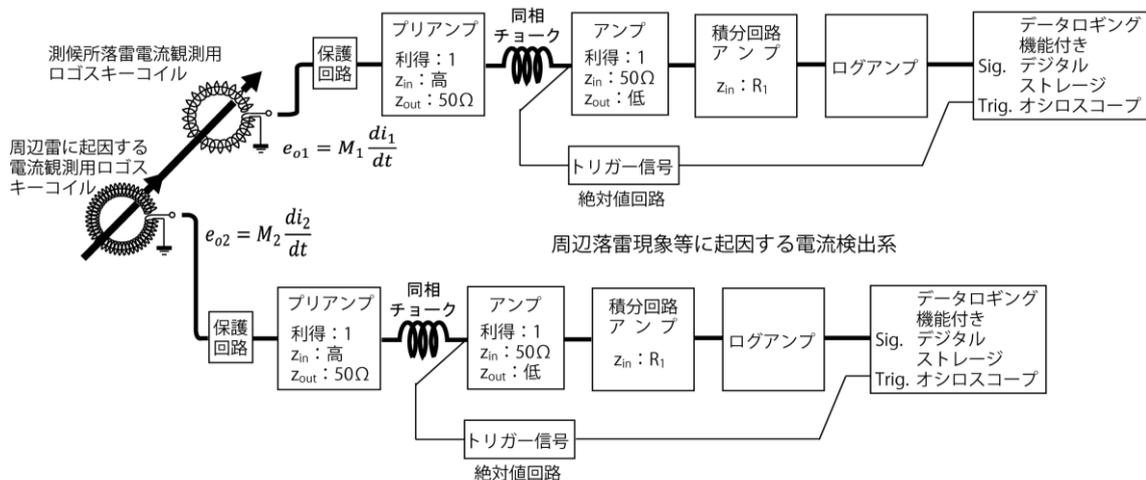


図8 山麓側接地線に流れる電流(引込高圧ケーブル同相電流)の検出系

を考慮する必要があることを考えると(1)と(2)の桁の差は大きくそれぞれ別々の検出系で測定する予定である。オシロスコープはデータロギング機能付きのデジタルストレージオシロスコープを使用することになるが、記録は1チャンネルのみである。従って2系統を用意し、それぞれ数桁の範囲の記録をしなければならず、低い桁でも必要な分解能を確保するため、ログアンプにより対数変換した出力を記録する準備を行っている。測定系は図8になる。観測データのデータ処理は観測後に行うことになるが、データ数が多くなるため、専用データ処理ソフトを開発用意する必要がある。

#### 4-3. 検出感度向上による空地電流等現象により流れる電流測定の検討

測候所を大きな空地電流収集電極と考えると、空地電流は  $1.0 \sim 3.0 \times 10^{-12} \text{ Am}^{-2}$  になるが富士山測候所電極の表面積を約  $1000 \text{ m}^2$  として、電極に集まる電流は  $10^{-9} \text{ A}$  になる。接地線を切り離し電流計を入れることは困難なため、

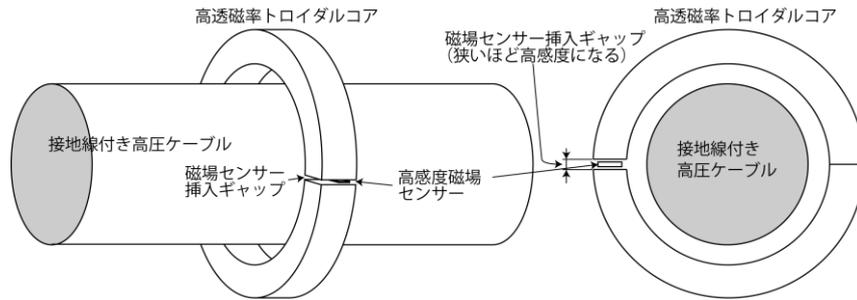


図9 山麓側接地極に繋がる接地線に流れる微小電流の測定方法案

接地線を流れる電流が作る磁場を測定することで電流測定をすることになる。この場合に予測される電流が作る磁界は小さく、検出困難である。しかし、測候所は富士山頂にあるため、①凸型レンズになることによる収集効果、②雷雲の近接効果、および③測候所だけではなく山腹に垂らした引き下げ接地線 ( $300 \text{ m} \times 2$  本、 $400 \text{ m} \times 1$  本)も含めた周辺表面からの収集(雨で濡れればさらに大きくなる)による測候所等価面積の拡大効果により、空地電流は数桁大きくなる可能性がある。磁場の検出感度を高め、地磁気の影響を抑制することで検出できる可能性がある。

また、以外に他の現象を観測できる可能性もある。測候所の高圧電源に絶縁劣化がある場合、その絶縁劣化によってはその漏洩電流を観測できる可能性がある。高圧電源からの  $50 \text{ Hz}$  漏洩電流は、接地線の3系統に分流するため、高圧ケーブルを流れる高圧電源からの漏洩電流から内蔵の接地線に戻る電流を相殺した電流(漏洩電流の約  $2/3$ )を観測することになる。さらに、接地線は山麓側架空地線とも接続されており、何らかの要因によって流れる電流の存在も見つかる可能性がある。

以上のことが次年度予備測定できないか、測定系の検討を行った。測定は接地線内蔵の山麓からの高圧ケーブルに流れる電流が作る磁場を測定することになる。感度を高めるため、図9のようにセンサーを収めるギャップを設けた高透磁率トロイダルコアを用いる方法を予定している。ケーブルを通して使用することはできないため、2分割にし高圧ケーブルを挟み込むことが可能な方法を検討している。もし興味ある測定が得られれば常時観測を可能にする対策準備が必要である。例えば、落雷があったときに流れる大電流による大磁界からの磁場検出センサー保護と検出感度向上のための磁気回路のギャップ間の吸引力に耐えられるものにするなど、を実施する必要がある。

また、将来は接地系統を1つにまとめさらに感度を高めることが必要である。被測定高圧ケーブル(接地線付)は山麓側の接地線3系統のうち1系統である。高感度微小電流検出器の周波数成分は低く、分流する電流路のインピーダンスは抵抗依存域である。そのため、ケーブル断面積に案分され、高圧ケーブルの測定電流は全接地線電流の約  $1/3$  ほどになると推測される。このことは、接地系統を1つにまとめられれば、3倍に感度を高めることになる。

#### 5. おわりに

富士山測候所環境下で必要な雷対策を一般化し、明らかにした。また対策が必要な  $\text{CO}_2$  観測システムの具体案を提案した。提案した雷対策方法の一部は次年度実施予定である。観測機器の設置場所は山岳地帯など接地抵抗を小さくできない場所である場合が多いと考えられ、提案した雷対策方法の基本

的な考え方は、そのような環境下での避雷対策に適用できる方法である。

また測候所の山麓への接地線に流れる電流の次年度観測は、自動記録を採用するため、記録時間内に現象が引き続き起きない限り取りこぼしは無くなる方法になる。そのため、他から得た落雷情報と比較し、対応付けを行うことでより正確な現象把握ができる。また観測電流は、測候所への落雷電流と昨年に観測された周辺の落雷現象による電流いずれも観測できるように準備している。また、山麓側接地極に繋がる接地線に流れる全電流は、山麓への3系統ある接地系統の内の引き込み高压ケーブル内の接地線に流れる電流のみを観測することになるため、分流割合を推測して求めることになる。正確な測定のため、将来、一本化し全電流を測定できるようにすることが望まれる。

別に高感度な電流検出方法も検討しており、間に合えば予備測定を行う予定である。

## 6. 謝辞

資料や情報提供等で調査にご協力頂いた西濱孝典・東京管区気象台技術専門官、小志度前孝史・関電工、本研究の遂行に際し、予備実験の実施にご協力頂いた伊藤誠二、森田明・東京大学大学院工学系研究科の各氏に感謝する。

なお、この研究の一部は新技術振興渡辺記念会からの委託研究「富士山頂における東アジア越境オキシダント監視システム構築に関する研究」によっている。また、一部「郵便事業株式会社のカーボンオフセット年賀寄付金配分および地球温暖化防止活動事業助成」および三井物産環境基金 2010 年活動助成(10-039)の援助を受けた。記して感謝申し上げる。

## 参考文献

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:「富士山測候所雷対策適用上の調査と対策方法」,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,26-35,2012 年 1 月。  
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:「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(2012)。

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:「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」,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,14-27,2013 年 1 月。

野村渉平,向井人史,寺尾有希夫,野尻幸宏:「富士山の大气中二酸化炭素濃度の通年観測」,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,30-31,2013 年 1 月。

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:「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(2013)。

北川信一郎,河崎善一郎,三浦和彦,道本光一郎:「大気電気学」,東海大学出版会(1996)。

電気・電子機器の雷保護検討委員会(委員長横山茂):「電気・電子機器の雷保護」,電気設備学会(2011-8)

高橋健彦:「接地・等電位ボンディング設計の実務知識」,オーム社(2003)

安本勝:「低い接地インピーダンスが得にくい場所での避雷方法」,H21 年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会報告集,計測・制御・回路技術研究会,3-006(2010)。

関電工:富士山測候所送電線接地調査報告書(H19.9.11)。

土器屋由紀子,佐々木一哉:「よみがえる富士山測候所」,成山堂書店(2012-6)。

志崎大策:「富士山測候所物語」,成山堂書店(2002-9)。

\*連絡先:安本 勝(Masaru YASUMOTO), [mvasumoto.2013@yahoo.co.jp](mailto:mvasumoto.2013@yahoo.co.jp)