O-05: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

安本勝 1 、佐々木一哉 2 、高橋浩之 1 、中村安良 3 、大胡田智寿 4 、土器屋由紀子 4 、鴨川仁 5 1. 東京大学、2. 東海大学、3. 茨城県立土浦工高、

4.NPO 法人「富士山測候所を活用する会」、5.東京学芸大学

1. はじめに

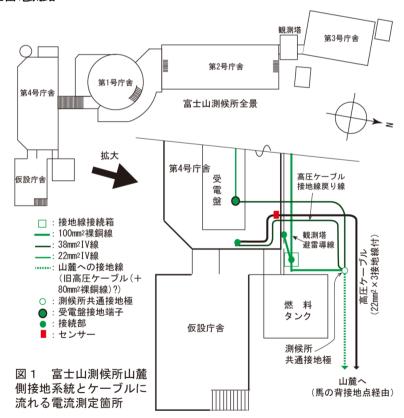
富士山測候所を活用する会では富士山測候所の特徴を生かした様々な観測・研究を実施している。その充実をはかるため、通年の安定な電源確保は必要であり、そのため、山麓からの通常電源以外に太陽光発電等自然エネルギーも活用した電源確保を予定している。将来的には全てを自然エネルギーで賄う予定である。しかし、富士山測候所の落雷頻度は高く、安定な太陽光発電等の電源確保のため、また安定な観測・研究を可能にするためにも外部観測機器等への落雷対策は必須である。

既に富士山測候所(以下、測候所)の雷対策上の問題点を明らかにし、雷対策方法を提案した。 具体化には手間暇、大きな費用が伴うため、実施には高い優先度が必要であり、関係者の援助や理解を得ることが必要である。また効果的な雷対策を進めるため、落雷電流の大きさ等の実態を知ることは重要である。今まで落雷時のすさまじい実態は伝え聞きしているがどのようなものか実際に定量的に把握されていない。その落雷電流の実態を知るため、本年度は山麓からのケーブルに冨士山測候所の落雷電流の大半が流れることに着目して、そのケーブル用雷電流測定器を開発し冨士山測候所落雷電流の観測を実施した。実施した結果、1ヶ月半ばかりの夏季観測器間に測候所への落雷は無かったが、周辺の雷現象を捉えていた。開発した雷電流検出器、及び新たな雷観測手段にもなり得るその一連の雷観測内容について報告する。

2. 山麓からのケーブルの構成と雷電流路

2-1 測候所落雷電流路

富士山測候所は、3776mの 剣ヶ峰(緯度35.4,経度138.7) にあり、建物基礎は導電性の 低い熔岩堆積物のため、建物 基礎以外にも接地極を設けたり、また導線を引き下げるなど 接地抵抗値を小さくするようにしているが、小さくできず大きい。一方、山麓からの接地線 が測候所と繋がり、山麓側の 接地抵抗は10Ω以下である。 そのため、測候所への落雷電 流の大半は山麓側に流れる。



また、熔岩堆積物上のため、建物 基礎の接地抵抗な小さくできず、測候 所に流れる落雷電流にも影響する。 基礎から大地に逃がすことができな いため、測候所内を流れる落雷電流 は、落雷点から山麓側共通接地極に、 電流路抵抗の逆数に案分され流れる。 理想的にはファラデーケージを構成 し、外表面を通して山麓側に流れるこ とが好ましいが、接地系統を構成する 接地線や屋根・外壁の構造材の接続 状態は不十分である。そのため、主に 低抵抗にして流路を確保している接 地線に流れるが、一部は測候所内に 配線された接地線に侵入して流れ、 山麓側にある共涌接地極に流れてい る。

2-2 引き込み部分の山麓からのケーブルと接地線の構成

富士山測候所の高圧ケーブル及び 接地線(以下、ケーブル)の引き込み 部分は図 1 のようになっており、変電 室のある南端の第 4 号庁舎に引き込 まれている。使用されている高圧ケー

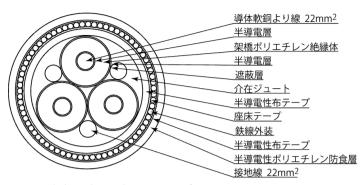


図2 富士山測候所引き込みケーブル 架橋ポリエチレン絶縁ポリエチレンシース一重鉄線外装ポリエチレン 防食ケーブル

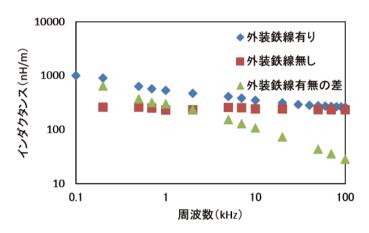


図3模擬外装鉄線有無のインダクタンスの周波数特性

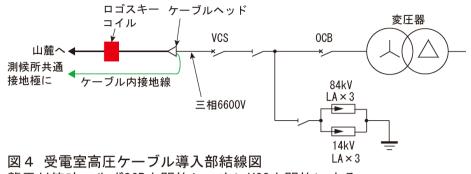
ブルは図2の構成の外装鉄線ケーブルである。遮蔽層のある3本の高圧線の導体は22mm²、3本の接地線も22mm²で、全体を外装鉄線で保護し最外装はポリエチレン防食層になっている。外径は56mmになっているが、引き込み部では補強してあるためか径は若干大きく61 mmである。高圧線の遮蔽層と接地線は絶縁物を介在させていないため接続状態にあると見なされる。測候所の山麓からの電力供給はこの3本の高圧線から三相電力の供給を受けている。接地系統は高圧線ケーブル内接地線のみではなく、旧高圧ケーブルの流用と旧来からの裸銅線(記録では80mm²とされているが、現規格では存在せず、記録誤りで、60mm²の可能性もある。)で構成されていることになっている。しかし、裸導線は馬の背の接地状態の調査では確認されておらず、現在は使用されていないようである。現在の接地系統は、基本的に現り用高圧ケーブル内の接地線と接地線に流用した旧高圧ケーブルで構成されているようである。ただし、裸導線を積極的に取り外しているのではないため、所々接続状態になっていると推測している。

測候所の共通接地極は、図1に示す山麓からのケーブル引き込み部分の手前に設けられている。

2-3 測候所引き込み口受電部高電圧回路

測候所の引き込みは、図4に示す構成になっており、真空スイッチ、断路器、遮断器を通して変圧器の高圧側に接続されている。引き込み高圧系統は接地系統とは避雷器を通して接続されている。測候所では、被雷の可能性が高まったとき、電源のダメージを避けるため、高圧系統を切り離している。この操作はオイル遮断器(OCB)を開放し、次に真空スイッチ(VS)を開放にする。この操作により、雷対策を実施した時間帯は測候所の高圧電源系統は真空開閉器で切り離された状態になる。

遮断器操作時は負荷電流が流れている状態であり、一方距離長があるため、山麓側のインダクタンスも無視できない。遮断操作時にその負荷電流を遮断するが、インダクタンスによる電流変化を保持しようとするいわゆる慣性効果が現れる。このためにサージ電圧が発生し、避雷器を作動させ、サージ電流を流す回路を構成することになるものと考えられる。



襲雷対策時、先ずOCBを開放し、次にVCSを開放にする

2-4 電力供給線、及び接地線と接地

電力供給線は、電力ケーブルを使用した埋設部分、及び架空線部分に分けられる。接地線もそれぞれに対応した施工が行われている。埋設部分の総延長は6764m、電柱による架空部分の総延長は3930mである。埋設部分の接地線は、高圧ケーブル内接地線、旧高圧ケーブルからなる。以前は裸導線も使用されていたが現在は使用されていないが、撤去されているわけでは無く、現在も接続状態になっている個所が残っていると考えられる。架空部分は1号柱から73号柱までの73本の電柱で構成されている。電力供給線とそれを保護する架空地線と電柱埋設部に連なる38mm²裸銅線による埋設地線がある。電柱の高さは地上高約10mであり(パンザーマストR39)、架空地線の高さは、ほぼこの電柱の高さになる。

接地は、埋設ケーブル部分では 10 箇所で実施されている。架空部分では、電柱間で1接地棒を設け 埋設地線に接続されている。途中5箇所の電柱で複数の接地棒で接地され、架空地線と接続している。

土質は低抵抗が得にくく一箇所当たりの接地抵抗値は大きい。例えば 2007 年に調査した測候所に最も近い経路(約 300m の距離)にある馬の背ハット接地の接地抵抗は、径 $10\,\mathrm{m}$ 、 $70\mathrm{mm}^2$ の環状線に $21\,\mathrm{am}$ $70\mathrm{mm}^2$ 導線が接続され放射状に敷設されているが、それでも $120\,\Omega$ しか得られないことが報告されている。これは土質の関係によるもので施工部分全般にあてはまり、そのための対策として多数の接地がなされている。

埋設部分の接地線は、架空部分の架空地線と埋設地線に繋がり、東京電力の責任分界点では東京電力側の架空地線に接続されている。従って、接地線は東京電力側の網の目状になっている架空地線に接続されていると考えられる。

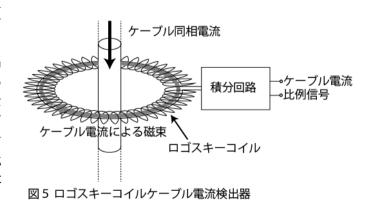
3. ケーブルの雷観測電流の測定方法

3-1 ケーブル電流の測定方法

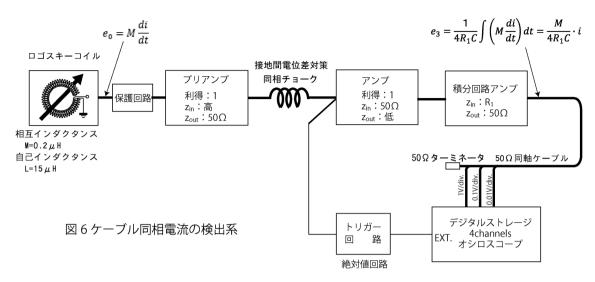
ケーブル電流はケーブル寸法に合わせ設計製作した図5に示すロゴスキーコイルにより検出した。内径 $0.0645 \, \mathrm{m}$,外径 $0.105 \, \mathrm{m}$ 、平均径 $0.085 \, \mathrm{m}$ コイル断面積 $7 \times 10^4 \, \mathrm{m}^2$ 、および巻数 $60 \, \mathrm{color}$ である。ケーブル同

相電流は、このセンサーを図 1 中■の 位置に設置して測定した。 観測系測定 器は、ケーブルに流れる電流に比例す る信号電圧が得られるように設計した。

被測定電流に比例するロゴスキー出力の検出方法は、①被測定電流が作る磁場による微分出力電圧を積分することで求める方法、および②ロゴスキーコイル出力電流がロゴスキーコイル自己インダクタンスで決まるようにして得られる比例する電流を測定する方法がある。本測定は前者の方法を採用している。



16



測定系の回路構成は図6の回路構成になる。ロゴスキーコイル出力電圧を取り出し、その出力電圧を 積分する回路で構成している。出力電圧は次式になる。

$$e_3 = \frac{1}{4R+C} \int \left(M \frac{di}{dt} \right) dt = \frac{M}{4R+C} \cdot i \qquad (1)$$

ケーブルとロゴスキーコイルの相互インダクタンス M、積分回路の入力抵抗 R_I 、および積分コンデンサーC、各定数の各定数の設計値は、 $0.2~\mu$ H、 $10~k\Omega$ 、および 2~nF である。この条件を式に代入することで被測定ケーブルの単位同相電流当たりの出力電圧は 0.25~V/A になる。積分回路の積分コンデンサー並列抵抗は $10~M\Omega$ とし 1~ms 程度までの十分遅い現象まで観測可能にした。

伝送路には特性インピーダンスが50Ωの同軸ケーブルを採用し、検出器側アンプ出力インピーダンスと観測部積分回路入力インピーダンスは同軸ケーブルの50Ω特性インピーダンスと整合させるため50Ωとし、検出部と観測部とを接続する同軸ケーブルには、それぞれの接地系統には速い周波数成分の電位差が生じることを前提にして、その電位差を吸収する接地間電位差対策用同相チョークを入れた。ロゴスキーコイル出力電圧はケーブル電流の微分値が得られ、それを積分回路で積分することでケーブル電流に比例する出力電圧が得られる。

ケーブル電流の観測は 4 チャネル・デジタル・オシロスコープを用い 1 チャネルを外部トリガー用に使用し、残り3チャネルを 1V/div.、0.1 V/div.、0.01 V/div.で測定することで3桁を超える広範囲の電流測定を可能にして使用した。 電流に換算するとそれぞれ 400 A/div.、40 A/div.、4 A/div.になる。

トリガー回路は、微分出力の絶対値をとることで正負いずれの極性の信号に対してもトリガーできるようにした。

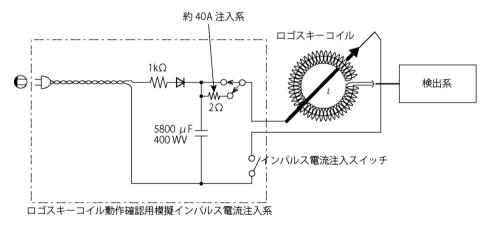


図7 簡易インパルス電流注入試験器

3-2 簡易インパルス電流注入試験器

動作チェック用として、簡単なインパルス電流注入試験器を制作した。100V 電源を半波整流し 1kΩの高抵抗を通して大容量コンデンサに充電してそれを短絡させることで大きなサージ電流を作り出すようにした。図7は簡易インパルス電流注入試験器の回路構成と回路定数である。大容量コンデンサーは廃棄部品を再利用した。

3-3 雷電流検出器収納ケース

検出器に収納ケースを設けた理由は二つある。先ず、①静電誘導結合による影響を避けること、次に②ケーブル外接地線をまとめ全接地系統の電流を求められるようにすること、である。また構成に際しては検出器の電磁誘導結合に影響を与えないようにするため、収納ケースは循環路を構成しない形状、例えば「コ」状をケーブルの周囲を円周上に回転させた構成にしなければならない。図8はこれを実現した構成である。

接地系統は高圧ケーブル内の接地線だけでは無く、別に 2 系統存在することを想定し、これらの系統も接続して一括できる工夫をしている。しかし、この2系統はまだ不明で有り接続できない状態になっている。高圧ケーブル内接地線のインダクタンスは、昨年度測定結果で 88 μ H (測定周波数: 2.4kHz)を得ている。このインダクタンスの存在は、高圧ケーブル内接地線が循環路の一部であることを示している。図3の模擬外装鉄線のインダクタンスと山麓側約 300m の距離にある馬の背ハット中継点で接地系統が一点に接続されている場合に予測される循環路の値に近く、循環路を構成していることに妥当性を与えるものと考えている。従って、ケーブル内接地系統とは別に少なくとも1接地系統は別に存在している。

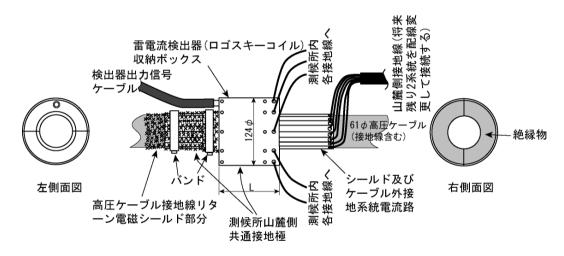


図8 雷電流検出器(ロゴスキーコイル)収納ケースと結線

3-4 観測系の停電対策

測候所で取られている落雷対策は、雷雲の動きから被雷しそうな期間、高電圧ケーブル引き込み口の 遮断器を切る対策をしている。停電期間、重要な電気機器は自家発電に切り換えるが、その区間は停電 することになる。観測系は自家発電に切り換えているが、切り換え区間停電するため、常時インバータ出 力による完全な無停電 UPS 電源から電源を確保するようにし、また停電時間が長時間になることも想定し て、UPS 電源の容量も勘案し、観測系使用電力は6時間の停電でも観測できるようにした。

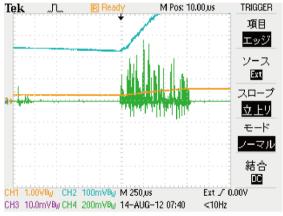
3-5 観測方法

富士山測候所への落雷は、ここ数年間夏季には無い。自動観測を予定していたが間に合わず、落雷に遭遇したときは頻発し観測が間に合わないものと予想されたが、予備的な観測と言うことでマニュアル観測でも十分と考え実施した。マニュアル観測は、ケーブルにサージ電流が流れ、観測に記録された場合、観測表示が現れ、そのことに気がついた時点で観測をUSBメモリーに記録し、測定器のリセットを行うことで引き続き次の観測が行われる。観測記録画面中の時刻表示は、USBメモリーに記録した時の時刻になるが、記録時刻は実時間よりも5分遅れたオシロスコープのクロックが表示されている。

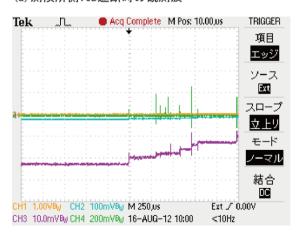
オシロスコープに観測されたときのこの一連の操作は山頂班の方にお願いした。測候所落雷電流を観測するため、雷雲が近づき測候所避雷の可能性が高くなると電源系統保護のため、遮断器を落としているが、そのときにゼロ相電流が流れオシロスコープに記録されてしまう可能性が高いため、リセットしないとその後の測候所落雷電流が観測されなくなってしまう。これを避けるため、遮断器を動作したときには必ずオシロスコープに観測記録表示が現れているか見てもらった。観測されている場合、観測波形を USB メモリに記録しりセットしてもらい、その他は随時見ていただくことをお願いした。

3-6 正確な測候所被雷電流の校正

注目している測候所被雷電流測定箇所は、被 雷箇所によらず測候所の被雷電流が測定できる 山麓からの接地線・ケーブルである。しかし、山麓 側に流れる電流から正確な落雷電流を知るため には測候所での落雷電流を知り、そのうちどの位 が山麓側接地線に流れるかを知る必要がある。こ

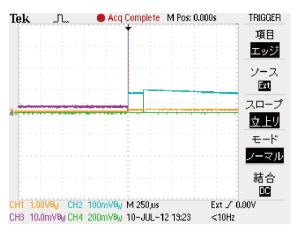


(a) 測候所側VCB遮断時の観測波

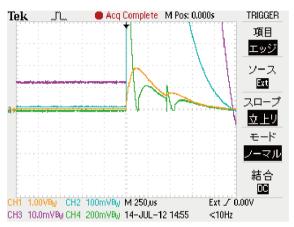


(b) 小動物による停電時観測波形

図10 高電圧電源遮断時ケーブル同相電流観測波形



(a) 約40A注入電流観測波形



(b) 最大注入電流注入時観測波形

図9 簡易サージ電流注入器による観測波形

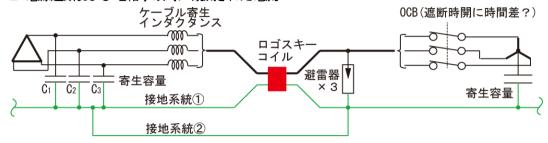
の方法として測候所によく避雷する観測塔避雷針に流れる落雷電流を測定し、それを真値とし、そのときの山麓側接地線に流れる電流を同時に求めることで、両者の等価回路とその定数を決定することができる。これが決まると山麓側ケーブルに流れる電流を求めるだけで正確な測候所の被雷電流を求めることが可能になる。今回は間に合わず実施できなかったが、次年度以降の課題である。

4. 観測結果·考察

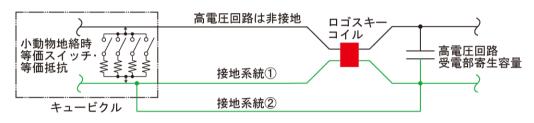
4-1 観測系のチェック

最大インパルス電流は、コンデンサーの最大充電 電圧は約 80V になるがそのコンデンサー両極端 子を短絡させることで得た。最大充電電圧は整流 後の直列抵抗をコンデンサーリーク抵抗が無視で きないほど大きく取っているため、理論上得られる 値よりも小さくなっている。また 40A のインパルス 電流は、80V に充電したコンデンサーを 2Ω抵抗 を入れて放電させることで得た。それぞれの電流 をロゴスキーコイルに流してチェックした。40A インパルス電流を加えた結果は図9(a)で、最大インパルス電流を加えた結果は図9(b)であった。またこのインパルス注入試験器は測候所に観測系をセットした直後、また、撤去直前にも正常に動作することを確認するために使用した。

4-2 電源遮断および地絡事故時に観測された電流



(a) OCB遮断時、回路不平衡による同相電流が流れる。



(b) 小動物地絡時に流れた同相電流

図11 高圧電源遮断時に流れるケーブル同相電流の等価回路 電源周期は観測時間幅よりも十分大きく、一定と見なすことができる。

測候所の避雷対策に雷雲が近づいたとき、山麓からの高圧電源の遮断を行う。 (1) OCB 遮断時雷流 この操作は図4に示す引き込み部分にある OCB 遮断器で先ず遮断し、次に VS 遮断器を動作させる。 図 10(a)の観測波形は OCB 遮断時の観測波形と考えられる。図 10(a)はトリガー動作前に既に約 100A 流れ ており、トリガーしてから電流は上昇し 750 µ s でほぼ一定の約 200A になっている。 先行する約 100A を 流す現象がなぜトリガーにかからず測定できなかったか不明であるが、たまたま誤動作でトリガーにかか らなかったものと推測される。 測定結果を説明する等価回路は図 11(a)になる。 もしこの電流全てがケーブ ル内接地線に戻り流れるならばケーブルを流れる同相電流は発生しない。たまたま、別の接地系統②が あるために、ケーブルに同相電流が流れるようになり、図 10(a)の電流が観測されたものと考えられる。 観 測された電流は一部が別の接地系統に分流しているものを観測したものであることを考慮すると、電源に 起因する発生電流はさらに大きなものだったと考えられる。しかし、負荷を考慮したとき、高圧電源に流れ る各線の電流は大きくても数十Aと考えられ、遮断電流はこの電流を維持しようとして避雷器や不平衡寄 生容量を诵して流れるはずで有り、100A は大きく、直接遮断から生じたものとは考えにくい。 図 11(a)の等 価回路から、OCB で遮断したとき、OCB の 3 回路の遮断が時間差を持って動作したとすれば、最初に 1 回路の遮断がトリガー時間前の約100Aの観測波形でトリガー後が2回路目の遮断による観測波形である と考えられる。いずれも回路の不平衡静電容量によって接地系統に流れるようになった電流と考えられる。 接地系統にサージ電圧源ができていると大きな電流が流れる場合があり、この回路の存在も疑う必要が ある。例えば、引き込み口の接地系統である高圧ケーブル内接地線と旧高圧ケーブルは循環路を構成し、 その循環路は高圧ケーブル外装鉄線を一巻きした循環路を構成している。遮断時に生じる電源同相電 流により作られる外装鉄線の磁束変化で生じる発生起電力によるものの可能性も考えられる。原因を明確 にするため、次年度 OCB 遮断を実施し確認する必要がある。なお、図 10(a)の観測波形は Ready 状態で あるが、先にリセットボタンを押した操作ミスにより生じたと推測している。

(2) 地絡遮断時電流 東京電力との責任分界点にある1号キュービクル内で小動物による地絡事故により停電が生じた。この時の観測波形は動作時間から1号キュービクル内の遮断器の遮断動作を観測したものでは無く、小動物の地絡時の電圧喪失時に流れる同相電流によるものと考えている。図 10(b)の電流観測波形は、小動物の動きによって階段状の電流変化になっており、最終値でも流れる電流は約3Aである。この等価回路は図 11(b)で表すことができる。高電圧回路が非接地のため、地絡すると対地静電容量通して電流が流れるが、その値は地絡状態の進展に対応した地絡抵抗の減少に対応し流れることになる。地絡抵抗が階段状に小さくなった結果、階段状に電流が増加したものと推測している。この電流は高圧電源線、及び接地系統①と②の全てをロゴスキーコイルで測定するようになっている場合には検出されない。ちょうどそのうちの一部が図 11(a)と同様にロゴスキーコイルを通らず図 11(b)の接地系統

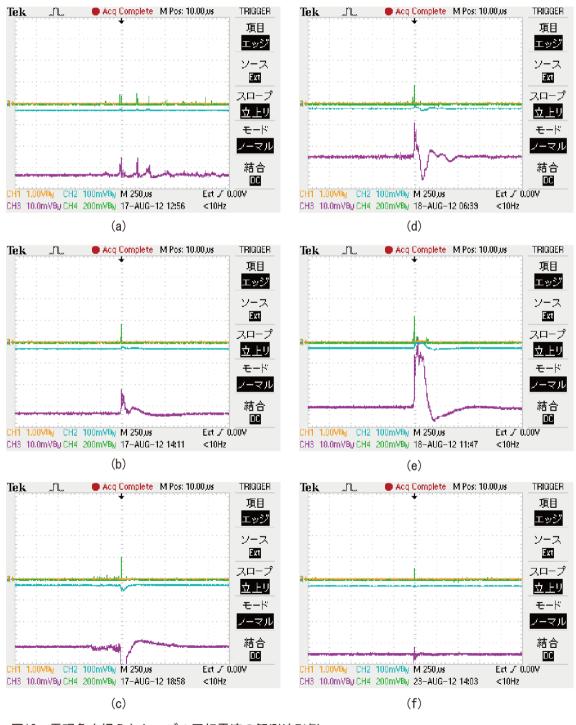


図12 雷現象を捉えたケーブル同相電流の観測波形例

②に流れたことにより、ケーブル同相電流としてロゴスキーコイルで検出されたものと推測している。

電源遮断時の電流波形は、オシロスコープ画面時間幅が1.25 ms であることを考慮すると、電源周波数が50Hz で周期は20 ms と長いため、いずれの観測結果も、等価的に各相に直流の電圧・電流が流れているときに生じる現象として捉えることができる。

遮断器動作時および地絡時に生じた同相電流を観測できたことは、高電圧ケーブル内接地系統以外にも別に接地系統が存在し、分流していることが幸いしていたものと推測している。もし一緒になっていた場合には理想的には測定できない。現実には僅かな不平衡により測定できる可能性はあるが、できても小さなものになっていると推測される。逆に、ケーブル同相電流検出は、接地系統に戻り回路を構成しないようにすることや意図的に分流し、高圧電源異状による電源同相電流がケーブル同相電流として現れる回路を作ることで高圧電源系統の異状の検出にも応用できることを示している。

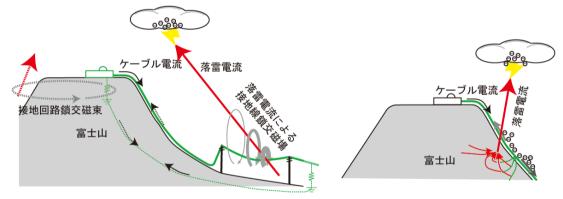
4-3 観測された雷現象

落雷や雲間放電が無いとき、観測系は動作せず、雷現象が生じているときに動作し、撤去時の動作確認試験でも正常に動作していることから、観測期間中、観測系は正常に動作していたとみなしてよい。

測候所に被雷は無かったため、直接の落雷電流の測定はできなかったが、周辺の落雷現象により生じたケーブル・接地系統に流れる電流が観測されていた。図12は、観測結果の一部の観測波形である。

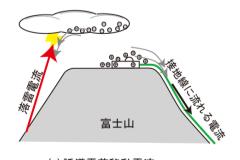
雷現象を捉えた観測波形の一般的特徴は、①10A 以下の大きさであること、②形状は一つを除き全て正に振れていたこと、③アンダーシュートがあるものが多いこと、④現象は大きなものでも $500\,\mu$ s 以内で終えていることである。①は、接地抵抗が数百 Ω であることを考えると接地線には数 kV 程度未満の電圧が加わった場合の現象と考えることができる。また接地ループを考えるとループインピーダンスは数 k Ω 以上あると考えるとループの誘導起電力は数 kV 以上発生しているものと考えることができる。②は、負極雷であることを考えると予想されるところである。③は誘導雷による現象であることを示しているものと考えることができる。④は落雷等の放電現象の持続し時間を示している。

図 12 は観測された波形の内、特徴的なものを観測順に並べた。(a)は多数のインパルス状の電流が観測されたものである。(b)は複数の雷が重畳したものと考えられる。(c)は観測波形の中で唯一負に振れた



(a) 誘導雷による電流検出電流

(b) 測候所と山麓間中途接地線落雷電荷収集電流



(c)誘導電荷移動電流

28分別 第主山

(d) 測候所電極雷電流収集電流

図13 観測ケーブル電流が起因する雷現象モデル

→: 落雷電流、→: ケーブル電流、→: 電荷移動方向

ものである。(d)は複数の雷が重畳した結果と考えられる。(e)は一発の落雷等放電によるものと考えられるが、入手雷情報エリア内に対応する雷現象は無い。(f)は小さいが天候が良い日が続いているときに観測されたものである。

観測波形には通電中と停電中との差、すなわち通電中に現れると思われる電源系統の避雷器動作の痕跡は見られなかった。 従って、電力系統を流れる同相電流は観測されていないことになる。これが無いと言うことは大半の雷現象により流れる同相電流は接地系統を流れていたものと考えることができる。この現象は、多くの測定を得て通電中と停電時の有意な違いがあるかどうか比較することでより、明確にすることができる。

ケーブルの同相電流、主に接地線を流れることによる生じる電流の発生機構は、色々と考えることができ、ここでは図13の(a)~(d)のメカニズムを想定している。落雷等の放電による雷電流の矢印は電流の正方向である。太平洋側では負極性雷が一般的であるため、図では負極性を基準に考えている。従って雷電流の矢印は電荷移動方向と逆方向になる。(a)は、落雷等放電路に流れる電流が作る磁場が接地線と大地帰路が構成する循

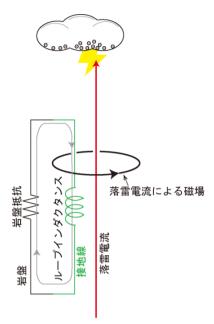


図14 落雷電流と接地線ループの磁気結合による誘導電流モデル

環路とを鎖交する磁束の時間変化により生じる誘起電圧を循環路インピーダンスで除した値の電流が流れる。図の実線は接地線のある御殿場側の落雷の場合を示し、電流は正方向であるが、点線は反対側の落雷の場合を示し、電流は負方向になる。(b)は、測候所と山麓とを繋ぐ接地線が接地線周辺に落雷した落雷電荷を集め、その一部が測候所に流れ測候所基礎等の接地面から大地に流れる。(c)は落雷が生じたとき雲底の雷電荷が変化し、測候所の誘導電荷もそれに従い変化するがこの電荷移動により接地線に電流が流れる。(d)は測候所が山麓側の低接地抵抗と接続されているため、高抵抗の富士山に測候所と言う電極を置いた状態である。そのため測候所の周辺の落雷雷電流はかなり広い範囲で測候所に集まると推測される。(a)(b)(c)いずれも負極性雷の場合、接地線に流れる電流は、山麓側に流れ正の方向になる。(d)は逆方向になる。

落雷情報の入手エリア外の現象でも作動しており、かなりの広範囲の雷現象を感度良く観測しているようである。このことは接地線が東京電力管轄内の接地線と接続されていることとも関係しているのではないかと推測している。

検出メカニズムは色々と推測できるが断定できるまでになっていない。多くの観測波形の特徴から多くは図13(a)に示すケーブル・接地線と雷放電路との磁気誘導結合によって流れる電流を観測していたものが多いと考えている。もし、(b)(c)(d)である場合でも、磁気誘導結合の影響は多少なりともあり、いずれもこの現象が合わさったものとして現れていると考えている。

例えば、図 14 に示す接地線ループ雷現象検出等価モデルの等価回路を考えると落雷電流は、一方向のみの極性になるが、誘導結合によりケーブル・接地線が作る循環路の起電力は(2)式のように落雷電流変化を微分したものになる。循環路の電流は(3)式を解くことで得られる。式から、この循環路の自己インダクタンスが支配的であれば、循環路に流れる電流はうまい具合に落雷電流に比例するが、実際には抵抗は無視できず、微分出力電圧の影響が現れ、両極性に振れる波形になる。

$$e_l = M_L \frac{di_L}{dt} \tag{2}$$

$$e_l = R_l i_l + L_l \frac{di_l}{dt}$$
(3)

雷現象時にケーブルに流れる電流を十分な応答で自動観測できるようにし、フランクリンジャパンからの 入手雷現象と対応付けを可能にすることで、落雷現象位置に対する検出系の感度、および検出範囲を明確にすることができ、また雷現象の特徴やメカニズムも明確にできる。

4-4 冨士山周辺の落雷

ケーブル電流の観測期間は、ケーブル電流検出器を設置した2012年7月14日から撤去した2012年8月30日までは測候所への落雷はなかったが、富士山周辺の雷現象は頻繁に捉えていた。しかし、捉えた可能性のある落雷と雲間放電現象落雷頻度は実際の観測結果を上回るかなりの数で起きていた。例えば、フランクリンジャパンの雷情報では落雷と雲間放電現象は、図15に示す30km四方の周辺エリア内(緯度35.21-35.46,経度138.62-138.96)で、8月14日2:17~11:15の間に13回、8月17日11:33~18:02の間に1003回、および8月18日6:34~15:23の間に195回発生している。この8月18日6:34~10:50の間に観測では11回捉えているが、エリア内に雷現象は存在しなかった。山麓と測候所を結ぶ接地線・ケーブルが、広範囲の雷現象を捉え、高検出感度を得ていることが分かった。一方、同一時間内でのマニュアル観測は、2回、9回、および19回であった。この回数は雷現象の発生に全く対応できていない。



図 15 山麓からの接地線・ケーブルの配線経路と入手落雷情報範囲

図 12 の観測波形例に対応すると予想される雷放電の位置(●)

図 12 の各観測波形とフランクリンジャパンの雷情報と対応付けを行った結果、図 12(a)は図 15 中の(a) 点の落雷であった。この落雷は埋設ケーブル近くであり、落雷電流が接地線に流れ込んだもので、図 13(b)モデルによるものと考えられる。図 12(b)は、図 15 中の(b)点の落雷であった。多重雷の誘導雷による電流と考えられ、対応する情報では落雷は1 秒間に4回続けて起きている。図 12(c)は、図 15 中(c)点の落雷であった。負に振れており、図 13(a)モデルで御殿場側と反対側の負極性落雷によるもの、あるいは図 13(d)モデルによるものと考えられる。もし、後者が事実とすると、測候所が接地線経路の反対側の落雷電流を広範囲で集めていることになる。さらに測定による検証を加える必要がある。図 12(d)は、図 15 中の落雷情報エリア内には該当する落雷点は無かった。エリア外の現象を拾っていたことになり、かなり広い範囲に感度があることになるが、別の現象を拾っていた可能性もある。図 12(e)は、図 15 中の(e)点になる。

図 13(a)モデルによるものと考えられる。波形から一つの落雷によるものであるが、約 10A で観測波形の中で一番大きい。対応する落雷電流は 10 kA であり、それほど大きなものでは無い。ある程度距離が離れていたことで磁気結合が良くなった結果と考えられる。図 12(f)は、図 15 中の(f)点に対応する。入手した落雷情報エリアに無く、別途対応するものとして情報を頂いたものである。30 km 近い距離の落雷を捉えていることになるが、二次的な現象の可能性もある。

観測記録はリセットした時点より観測待ち状態になり、トリガーになり得る大きさのケーブル電流が流れたときに動作する。動作して直ぐに記録しリセットすれば良いが、気がつかずリセットされない期間は記録される電現象があっても記録されずに経過することになる。

観測期間中測候所への落雷は無かったが、周辺の雷現象を観測していた。観測系は、周辺に雷現象が無いとき動作せず、あるとき動作し、正常に動作していた。また周辺の雷現象を高感度で検出していることが分かった。周辺の雷現象との相関を見るため、検出部になっていると思われる山麓から敷設されているケーブル・接地系統の一定周辺エリアの雷情報をフランクリンジャパンより購入した。それで分かったことは、実際には落雷は頻繁にあり、今回のようなマニュアル観測系では雷現象に追いつくことができず、全体を観測することは無理であることが分かった。

マニュアル観測結果では雷現象に対応できる十分なデータが得られず、フランクリンジャパンから得た落雷情報との対応付けが難しい。そのため、センサーとしての測候所と山麓間のケーブルの雷現象の検出位置による感度測定が難しい。次年度以降の測定では雷現象に追従可能な自動雷現象観測系にし、フランクリンジャパンの落雷情報と対応付けを可能にすることで、雷現象の検出感度と検出範囲の特定が可能になる。またどのようなメカニズムで検出されているかも明確にすることができる。

4-5 正確な落雷電流測定

山麓側ケーブル電流測定で正確な測候所被雷電流を知るため、測候所の被雷時、真の測候所への落雷電流を知り、そのときの山麓側ケーブルに流れる電流との比較から、等価回路を決定することで、山麓側ケーブル電流を知るだけで測候所への被雷電流を知ることができる。そのため正確な落雷電流の測定は避雷針に落雷させ、その電流が真値であるとして、測候所から直接大地に流れる電流と山麓側に流れる電流を決める等価回路と定数を決める必要がある。その電流測定は、インダクタンスを無視できないため、インダクタンスの影響を小さくし、無視できるようにした検出器としてシャントがある。測候所で使用する方法にふさわしいものとして図16に示す構成を予定している。ポイントは、円筒状のマンガニン標準抵抗値の電圧降下を正確に測定方法として、シャントのインダクタンス低減方法を採用し、測定部への影響を小さくするため端部をマンガニン抵抗部よりも十分長くし端末効果を小さくする。検出部の出力インピーダンスは使用同軸ケーブルの特性インピーダンスと等しくする。また、シャントの接地部と測定系の接地部とは必ずしも電位は同じにならない。この対策として十分なインピーダンスを確保できる同相チョークを通して信号を得る工夫を考えている。

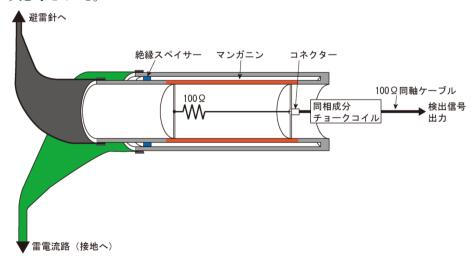


図 16 使用方法を考慮したシャントの構成

6. 終わりに

以上をまとめると以下のようになる。

- (1) 高圧ケーブル・接地線に流れる同相電流を測定するロゴスキーコイルを設計製作した。またそれを用いた測定系を設計開発した。
- (2) 山麓側接地系統を雷現象観測の観点から整理した。
- (3) 雷現象により山麓と測候所をつなぐ接地線内蔵高電圧ケーブルに流れる同相電流を観測した。
- (4) 観測結果から雷現象により山麓からの高圧ケーブルを流れる同相電流の発生メカニズムを提案した。
- (5) 測候所と山麓間の接地線・ケーブルによる雷現象の詳細な検出機能を知るには雷現象への対応付けが可能な自動観測が必要である。
- (6) 広範囲のエリアの雷現象を高感度で観測していることが分かった。
- (7) 電源系統内の同相電圧源で生じる同相電流を、高圧ケーブルを流れる同相電流として、測定する 方法を提案した。
- (8) 冨士山測候所で校正用に使用するために適したシャントの構成を示した。

山麓から測候所までの接地線・ケーブルを活用することで測候所の被雷電流測定だけでは無く、周辺の雷現象のセンサーとしての応用などへの広がりが期待できる。またバックグラウンド磁場、主に地磁気の影響を受けないようにできれば、μA オーダの測定は可能になると考えられる。測候所という大きな電極から、雷雲が近づいたとき、十分な誘導電流が流れる可能性があり、電離電流の観測も可能ではないかと考えている。

また、被雷時の実態を知ることができれば、研究への寄与だけでは無く、測候所の根本的な雷対策に 繋がるものと考えている。

7. 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、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・岩崎洋および越生正文・山頂班長、川原庸照、長門敬明、横山勝丘、楠田寧および増本亮・山頂班員、および中山良夫・事務局員の方々の各位に感謝する。

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及び地球温暖化防止活動事業助成」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,土器屋由紀子:「富士山測候所の雷対策調査と対策の提案」,平成21年度富士山測候所利活用に関する成果報告会,14-19(2010).

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:「富士山測候所落雷対策のための雷サージ抑制効果評価実験」,平成22年度富士山測候所利活用に関する成果報告会,26-33(2011).

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,26-35(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:「富士山測候所のための落雷対策方法の評価」,平成23年度電気学会基礎・材料・共通部門大会,VII-1,200-205 (2011).

安本勝,佐々木一哉,高橋浩之,土器屋由紀子:「富士山測候所接地系統のインダクタンスと経路調査」,第30回電気設備学会全国大会,31-34(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: 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).

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).

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)

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)

日高邦彦: 高電圧工学, 数理工学社(2011).

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(MasaruYASUMOTO)、Yasumoto@n.t.u-tokyo.ac.jp