# 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

安本勝<sup>1</sup>、佐々木一哉<sup>1</sup>、高橋浩之<sup>1</sup>、中村安良<sup>2</sup>、大胡田智寿<sup>3</sup>、土器屋由紀子<sup>3</sup> 1. 東京大学、2.茨城県立土浦工高、3. 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。

昨年は、雷対策上の問題点を明らかにし、対策方法を提案した。その提案した方法の中に①ケーブル 等の引込・引出個所でのファラデーゲージの破れの対策、および②ケーブルに侵入する雷サージの抑 制方法、がある。これら2点の方法について適用に際して必要な抑制効果の定量的な評価を行った。

## 2. ファラデーゲージ破れからの雷電流による侵入サージ電圧

昨年の調査で測候所に ファラデーゲージの破れ が見られた。これは庁舎 内にケーブルを導入する 際、ファラデーゲージを 破らないインターフェー ス機能が無いこと、ある いは対策方法が一般化さ れていないことが大きな 要因である。もし破れ個 所になっている電源・信 号配線や水等の配管に避 雷した場合、測候所内に 大きな雷サージ電圧を呼 び込むことになるが、そ のファラデーゲージの破 れによってどの程度のサ ージ電圧を引き込むこと





になるのか単純化した系を元に評価実験をした。

### 2-1 測定評価原理

鉄筋・鉄骨構造建物は近似的にファラデーゲージになると考えることができる。富士山測候所は 屋根外壁は導電性の金属で覆われておりファラデーゲージとしてより好ましい構成である。しかし ファラデーゲージの破れがあり、そこから電気導体が外部から導入されている場合の雷電流による サージ電圧の侵入は図1の(a)、(b)の単純化したモデルで考えることができる。(a)がA・D 種接地極 を独立に設けている場合で、この時に侵入する最大サージ電圧、 $V_L$ は、 $V_L = R_{EAD}i_L + Ldi_L/dt$ で表すことができる。接地極抵抗は、A 種接地の場合 10Ω以下であるが、一般的に数Ω以上あり、 雷電流の大きさを考えると、抵抗成分のみでも内部に大きなサージ電圧を導入することになる。一 方、図1(b)のように構造体を接地極として利用し、接地極でのファラデーゲージの破れを無くすこ とで接地抵抗は無くすことができる。接地抵抗の電圧降下は無くなり、サージ電圧、 $V_L$ は、  $V_L = Ldi_L(t)/dt$ で表すことができ、接地経路のインダクタンスと雷電流の時間変化との積のみに なる。ファラデーゲージ内引込導線の電気抵抗は十分小さく無視できるとして、インダクタンス成 分のみで考えることができる。このインダクタンスは、接地経路の周囲が空気と考えてよいので、 比透磁率はほぼ1で周波数依存性は無く一定になるため、透磁率も一定と考えることができる。従 って、(b)に示すファラデーゲージ構成にケーブル等導体導入部に破れが生じた場合、侵入する雷電 流が分かればインダクタンスを知ることで侵入雷サージ電圧を知ることができる。適用する雷電流 は富士山測候所での被雷電流を反映したものが必要であり、できれば被雷電流の測定を実施する必 要があるが、不明のため一般的な雷電流モデルを適用して評価することになる。

#### 2-2 測定方法

内部に侵入する最大サージ電圧は、侵入雷電流は与 えられるものとして、図1(b)の場合、インダクタンス のみに注目すればよいことになる。従って、図2の模 擬体系で引き込みケーブルの導入部の被覆シールドと ファラデーゲージの破れとの間のインダクタンスを測 定した。

模擬体系は次のようにした。ファラデーゲージはア ルミにより構成し、ファラデーゲージのケーブル導入 部に破れがあることを仮定した。ファラデーゲージは 立方体を仮定し、破れはその一側方面の中心にあるこ とを仮定した。ケーブルの被覆シールド接地は立方体 中心で、下面中心に接地した接地線と接続した。用意 した立方体は三つである。それぞれの一辺は 0.2m、 0.4m、および 0.8m の大きさである。それぞれについ て周波数を変えてインダクタンスを測定した。

また破れに対するインダクタンス低減対策方法を適 用実施した場合のインダクタンスも測定し、対策によ る抑制効果も測定した。

#### 2-3 測定結果·考察

●測定結果は図3に示した。破れからの引込導線と



## 図2 ファラデーゲージを破った引き込 み線のインダクタンス測定

破れ個所のファラデーゲージ導体との間のインダクタンスは寸法の大きさに比例して増加すること が分かる。この結果は以下の円状コイルから類推することが可能である。

インダクタンスは単位電流当たりの鎖交磁束になる。円状1ターンのコイルを考えた場合、次式 になり、インダクタンスは半径に比例する。

$$L = \frac{S \times \mu_0 \frac{I}{2\pi r}}{I} = \frac{\pi r^2 \times \mu_0 \frac{I}{2\pi r}}{I} = \frac{\mu_0 r}{2}$$

引き込み導体とファラデーゲージが作る 循環路は、模擬体系では、半分が線状で残 り半分をファラデーゲージ面上を破れ個所 まで戻ることになるが、面上での大きな広 がりが無ければ、1 ターンコイルに近似で きる。従って、得られるインダクタンスは、 図の計算結果との比較からも一般的に近似 的に一辺の長さに比例するといってよい。





もし測候所の大きさを 10m とした場合、ファラデーゲージの破れから導入される引込線には、最大で 10 µ H 以上のインダクタンスになると考えられる。その分内部に侵入するサージ電圧も大きく

なる。例えば、破れによるインダクタ ンスを  $10\mu$  H とし、侵入する雷電流は、 直撃雷を想定し、図 4(a)に示す、最大 値 100kA、立ち上がり  $10\mu$ s、立ち下 がり  $350\mu$ s の三角波を仮定すると、 最大サージ電圧は 100kV 以上が見込 まれることになる。実際の構造物は鉄 骨等の比透磁率の大きなものが使われ ておりインダクタンスは若干大きくな り、さらに大きくなることが推測され る。

●なお、ファラデーゲージの破れを 作らないことが必要であるが、万が一 破れが生じた場合でもその導入ケーブ ル接地線が独立の接地極の場合は抵抗 が支配的になり、サージ電圧は一層大 きな電圧になる。外部に独立接地極を 作らずファラデーゲージに近似するこ とで万一破れがあった場合でも侵入電 圧は小さくなる。



(a) 侵入模擬サージ電流



(b) 導入ケーブルインダクタンス10 µ Hの場合の侵入サージ電圧

### 図4 ファラデーゲージの破れから侵入するサージ電圧

例えば、高圧ケーブルの導入個所は一般的にファラデーゲージが破れている場合が一般的である。 高圧ケーブル引き込み線による接地系統インピーダンスは、引き込みケーブルと接地極までのイン ダクタンスと接地極接地抵抗を流れるサージ電流が内部に侵入するサージ電圧の最大値を決めるこ とになる。ファラデーゲージを構成する場合、接地極抵抗は無くなり、インダクタンスのみで評価 できることになる。

●ファラデーゲージの破れに対する対策を実施することで図3の対策の実施で示された結果が得られた。未対策と対策実施との間は大きさと共に差が拡大する傾向が見られる。実寸法では1桁以上2桁近くインダクタンスを小さくすることができ、その分侵入サージ電圧も小さくできることになる。リターン構成の対策は外部磁束を相殺するため、この実効インダクタンスは同軸の電磁シールド線のインダクタンスが支配的である。リターン構成の実効インダクタンスは磁束が相殺されさらに小さくなりサージ侵入電圧はこの電圧降下になるため、抑制効果は実際には3桁以上になるものと推測される。

ケーブル導入個所ではコネクタを用いることでケーブルの被覆電磁シールド線をファラデーゲー ジに接続でき破れを作らないが、観測実験では仮設・仮配線で使用することも多いことを考えると 適用しやすくないと破って導入してしまう場合も多いと考えられ、この対策方法はその場合でも対 策しやすくする一つの方法だと考えている。

またこの対策方法は電気機器筐体や制御盤にケーブルを引き込み端子盤で接続する場合が多く見られるが、その場合でも適用でき導入しやすい方法である。

#### 3. ケーブル上での雷サージ対策

庁舎外で使用する観測機器等で必要になる電源、制御・信号は、ケーブルを使用する場合が一般 的である。この観測機器が避雷したときケーブル接地系統に大きな雷電流が流れ、ケーブル上に大 きな電圧降下が生じ、それがケーブルの電源や制御・信号系統に大きなサージ電圧として加わる。 ケーブル上の電圧降下が大きな場合、雷電流が絶縁を破り電源や制御・信号系統に入り込むことに なる。過去にあったブレーカの焼損は、絶縁を破り電源系統に侵入した雷電流が B 種接地系統を介 して流れ、経路途中にあったブレーカが焼損したものと推測される。ケーブル上の雷対策はこのよ

## うな状況に対応できるものである。

もし可能であるならば、引出部分で、雷対策上、十分な耐電圧性を持たせた電気的に導通状態を 作らないようにすることが好ましい。例えば、電源は耐雷変圧器を介して使用し、制御や信号は光 等導通状態を作らないようにする必要がある。しかし、そのような条件を適用できない場合がある こと、また一般的に導電性ケーブルが多用されていることからケーブル上の導通状態での対策方法 として適用できるものにして置くことが必要である。

## 3-1 原理

ケーブル上でのサージ電圧の抑制は、①ケーブル上の電圧降下を小さくすること、および②ケーブル 各線に同一の電圧降下を作り出す同相化により電源や制御・信号系統にサージ電圧として現れないよう にすることである。そのため、図 5 に示すように分流用の別の接地線路を並列に接続し、電源や制御・信 号ケーブルには高透磁率トロイダルコアを用いている。



 $\omega L_{CM} i_{CM} = \omega M_{P1} i_{CM} = \omega M_{P2} i_{CM} = \dots = \omega M_s i_{CM}$ 

図5 ケーブル上でサージ電圧の侵入を抑制する構成方法

ケーブル上の雷サージ抑制原理は、周波数成分を抵抗とインダクタンスそれぞれに依存する周波数 に分けて考えることができる。

(1) 抵抗依存域周波数成分 抵抗依存する周波数域で数 kHz 以下の周波数成分である。特に持続性の高い雷現象では低い周波数成分が含まれてくることになる。電圧降下を小さくするためできるだけ 抵抗を小さくする必要があり、できるだけ大面積の電気導線を並列に接続することが必要である。

(2) インダクタンス依存域周波数成分 インダクタンスに依存する周波数で数+kHz 以上の周波数 成分である。雷電流は各線路のインダクタンスで分流され、電源や制御・信号接地線に流れる電流、 $i_{CM}$  は、 $i_{CM} = i_L \{L_{sh}/(L_{sh} + L_{CM})\}$ になる。従って、 $i_{CM}$ を小さくするため、 $L_{sh}$ を小さくし $L_{CM}$ を大きくす ればよい。分流用接地線路は、インダクタンス  $L_{sh}$ を小さくするため、電源や制御・信号その対になる接地線路を被覆したものにすることが必要である。電源や制御・信号その対になる接地線路の $L_{CM}$ は、電源や制御・信号系統を被覆したものにし、一括して高透磁率トロイダルコアに通すことで大きくすることが できる。

(3)同相化 電源と制御・信号系統とその接地線との電圧降下を等しく得る方法は、接地系統の自己 インダクタンスの値に接地系統と電源と制御・信号系統との相互インダクタンスの値を近づけることで可能 になる。この実現のため、接地線は、対象になる電源と制御・信号系統を被覆した電磁シールド線にする ことが必要である。相互インダクタンスを自己インダクタンスに近づける方法は、接地系統と電源と制御・ 信号系統 一括して高透磁率トロイダルコアに通すことで得ることができる。こうすることで電源系統と制 御・信号系統へのサージ電圧の侵入を抑制することができる。換言すればケーブル両端間の接地電位 差を吸収することになる。

## 3-2 測定評価実験方法

侵入サージ電圧を評価するため、先ず同軸ケーブル外部導体の実効抵抗を知る必要があり、パルス電流を加え電圧降下パルスから実効抵抗を求めた。次に実際にインパルス電流を印加することで現れる同軸ケーブル出力電圧を高透磁率トロイダルコアを入れることでどの程度抑制されるかを評価した。被測定ケーブルの全長は10m、被雷電流路電磁シールド線は14mm<sup>2</sup>の錫メッキ銅網線、同軸ケーブルはRG58AU(外部導体1.25mm<sup>2</sup>錫メッキ銅網線)、途中の高透磁率トロイダルコアケースは銅製で全長0.42m、使用した高透磁率トロイダルコアは大きな比透磁率が得られる日立金属製ファインメット材トロイダルコアを使用した。

## 3-2-1 被供試同軸ケーブル外部導体の実効抵抗の測定

被測定ケーブルの測定端の被雷電流路電磁シールド線を外し、パルス電圧を10Ωを通して加えること で被雷電流路電磁シールド線と同軸ケーブル外部導体に戻るように電流が流れるようにした。同軸ケー ブルの外部導体の自己インダクタンスによる電圧効果は、外部導体の自己インダクタンスが外部導体と内 部導体との相互インダクタンスがほぼ同じと考えてよいため、相殺効果で無視でき、外部導体抵抗による 電圧降下が同軸ケーブル出力に現れることになる。この同軸ケーブル外部導体の電圧降下をデジタル オシロスコープで測定した。加えた電流はパルス電圧に10Ωを直列に加えて得た。パルス電圧は抵抗で 案分して 1/100 に減衰させてデジタルストレージオシロスコープで測定した。電流は、ケーブルのインピ ーダンスは小さく無視できるとして、パルス印加電圧を直列に加えた抵抗10Ωで除したものである。

## 3-2-2 インパルス電流注入による侵入サージ電圧の抑制効果

インパルス電流の注入は、日新パルス電子社のインパルス電圧発生装置 IVG-300A を用いてイン パルス電流を加えた。主な仕様は、公称電圧:  $300kV(50kV \times 6)$ 、利用率: 80%、合成静電容量:  $0.0416 \mu$  F、最大充電エネルギー: 1.875kWs、制動抵抗:  $210\Omega(6 )$ 、放電コイル:  $660 \mu$  H、放 電抵抗:  $480\Omega \times 3$  個である。測定は放電負荷に直接被測定ケーブル加え、図 6 の等価回路で測定 した。先ず、高透磁率トロイダルコアを加えない状態で、次にコア数を増加させて、インパルス電 流を加え、同軸ケーブル外部導体での電圧降下を測定した。同軸ケーブル出力電圧はデジタルオシ ロスコープで測定した。



図6 インパルス注入装置で用いた測定等価回路

#### 3-3 測定結果と考察

### 3-3-1 被供試同軸ケーブルの実効抵抗

測定結果は図 7 に示した。Ch.1 が 10 $\Omega$ と被測定ケ ーブルに加えた電圧波形である。電流に換算すると 5A/div.であり、最大値電流は 8.7A になる。Ch.2 は同 軸ケーブルに流れる電流による電圧降下を同軸ケー ブル出力端で測定した電圧波形である。電圧は 0.5V/div.であり、最大電圧は 1.3V になる。寄生インダ クタンスは小さく無視できるとすると、電圧と電流の比を とると 0.15 $\Omega$ /10m であった。ほぼ同じ断面積の 1.25mm<sup>2</sup>の平編み錫メッキ銅線の抵抗値は 0.176 $\Omega$ /10m である。低めになった原因は無視できるものとし た被測定ケーブルのインピーダンスが影響しているも のと推測している。この混入誤差は評価する上で許容 できるものと考えている。



注入パルス電流と被測定同軸ケーブ ル外部導体の電圧降下パルス波形

#### 3-3-2 インパルス電流注入による侵入サージ電圧の抑制効果

●図8は高透磁率トロイダルコア6組が入る銅製ケースに高透磁率トロイダルコアが無いときと1組の高 透磁率トロイダルコア(5個一組、1kHzで263µH)を用いたときの同軸ケーブル出力をデジタルオシロス コープで観測した波形である。コアが無いときの観測波形は、インダクタンス依存域周波数成分で図5の 同相化による相殺効果によりインダクタンスの電圧降下は無視できると考えると抵抗のみによる電圧降下 分を観測していることになる。この電圧は6.2Vになる。抵抗は同軸ケーブル外部導体(1.25mm<sup>2</sup>)と被雷電 流路電磁シールド線(14mm<sup>2</sup>)との並列抵抗になる。表皮効果を無視し、一様電流になることを仮定し、3-3-1で測定した実効抵抗から見積もると0.012Ωになる。電圧降下 6.2V をこの抵抗値で除すことで 500A になる。

●インパルス電流源は 660 µ H のチョークを考慮すると、被測定ケーブルは被雷電流路電磁シールド線のインピーダンスが支配的で小さく、高透磁率トロイダルコアを被雷電流路兼コア収納銅製ケースに入れることによるインピーダンス変化は無視できる。

●図 8 の観測波形で最初負側に、それから正側に振れている。測定回路上からでは負に振れるはずは ないが図中に示す寄生容量の誘導電荷が、スイッチ投入時にコンデンサー充電電流が抵抗とインダクタ ンスで決まる時定数により立ち上がる前に、局部的な中和等により被測定ケーブル部で逆方向に電流を 流すような回路構成での電荷移動が生じた結果、負に振れたものと推測している。従って、この現象は高 電圧充電部と被測定ケーブルとの間に静電シールドを設けることで防げる現象と考えている。



●図 9 は、高透磁率トロイダルコア数を変えてインダクタンスを変化させたときの同軸ケーブル出力波高 値を見たものであり、インダクタンスを横軸 x ( $\mu$  H)に波高値を縦軸 y にとったものである。図の測定点 は指数関数として  $y = K_r e^{-0.009x} = 5.9374 e^{-0.009x}$  に近似できる。縦軸 y を対数軸にすることで、図に 示すように直線関係で現すことができる。1V に抑制するため必要なインダクタンスは約 200  $\mu$  H、0.1V で は約 500  $\mu$  H になる。 図はインダクタンスが 100  $\mu$  H 以下と越えるところで傾斜が異なるようにも見える。 これは 100  $\mu$  H 以下では $i_{CM}$  が流れることによる透磁率の低下の可能性があり、それ以上になると回復す ることで効果が大きくなったとも考えられる。明確にさせるにはさらに詳細な測定が必要である。



測定で得られたこの図の近似式から電流の大きさ、ケーブル長、および被雷電流路電磁シールド線断面積が分かれば、目標とする抑制波高値にするため、高透磁率トロイダルコアのインダクタンスをどの位にすればよいか求めることができる。但し、雷電流波形の形状は測定に用いたインパルス電流波形と変わらないことを仮定することで採用できる。任意の $i_L l_c / S_{sh}$  ( $i_L$ :雷電流、 $l_c$ :ケーブル長、 $S_{sh}$ :雷電流路電磁シールド線の断面積)で決まる係数を K とすると、測定で求めた近似式の係数  $K_r$  を決めた  $(i_L l_c / S_{sh})_r$ を基準にして $i_L l_c / S_{sh}$  から目標とする抑制波高値に必要な高透磁率トロイダルコアのインダクタンスを求めることができる。目標とする抑制波高値を y とし、そのために必要な高透磁率トロイダルコ

アのインダクタンスをxとすることで次式が得られる。

$$x = \frac{-1}{0.009} \ln \left\{ \frac{(i_L l_c / S_{sh})_r y}{(i_L l_c / S_{sh}) K_r} \right\}$$

例えば、雷電流 10kA、ケーブル長 20m、被雷電流路電磁シールド線 14×10<sup>6</sup> mm<sup>2</sup>の場合の  $i_L l_c/S_{sh} = 1.43 \times 10^{10}$ 、 $(i_L l_c/S_{sh})_r = 3.57 \times 10^8$ 、 $K_r = 5.94$ 、および目標とする波高値を 1V とし 代入することで、高透磁率トロイダルコアは 610( $\mu$  H)になるようにすればよいことになる。目標の抑制波高 値を 0.1V にすると 864( $\mu$  H)になる。

なお、トロイダルコアのインダクタンスは周波数によって変わるが比較上 1kHz での値を採用している。 一般的に高周波になると低下する傾向があり材質の違いによって特性が変わるので本報告以外の材質 のものはその点を考慮して決める必要がある。また、評価精度も考慮して余裕を持たせる必要がある。

#### 4. おわりに

(1) ファラデーゲージにするだけで破れがあった場合でも侵入サージ電圧は小さくできる。

(2) 侵入サージ電圧の指標になるファラデーゲージを破って導入された導体のインダクタンスは建物の 寸法に比例する。

(3) ファラデーゲージを破って導入されたケーブルへの対策方法を明らかにした。
①リターン電磁シールド線は、侵入電流を破れに戻し、実効インダクタンスを小さくできる。
②高透磁率トロイダルコアによりリターン電磁シールド線と導入導体の相互インダクタンスを高める。

(4) ケーブル侵入サージ電圧の抑制効果は、①避雷電流路電磁シールド線は被覆構造にする(同軸構造はインダクタンス低減のため重要)、②避雷電流路電磁シールド線の抵抗は小さくする、高透磁率トロイダルコアにより被保護ケーブルのインダクタンスを大きくする、ことで高めることができる。

(5) 観測等で外部で使用する同上ケーブルの電位差抑制について、必要な抑制波高値を得るため必要条件の決定方法を一般化しうるものとして提示した。

本報告の評価結果は、今後の富士山測候所雷対策に反映させていく予定である。

なお、本報告の内容は富士山測候所だけではなく一般的にも適用できることであり、広く参考に していただければ幸いである。

## 謝辞

資料や情報提供等で調査にご協力頂いた石森啓之・東京管区気象台技術専門官、実験の実施にご協 力頂いた伊藤誠二・東京大学大学院工学系研究科の各位に感謝する。

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。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.(2010)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

安本勝.(2000)ケーブルに柔構造接地システムを適用する場合の考慮点.第 9 回東大原子力研究総合 センター技術発表会技術報告、36-43

\*連絡先:安本勝(MasaruYASUMOTO)、Yasumoto@n.t.u-tokyo.ac.jp