

鉄道信号用ケーブルに発生する雷過電圧の抑制手法の検討

藤田 浩由* 比澤 庸平* 新井 英樹*

A Study on Reduction Method of Lightning Overvoltage induced in Railway Signalling Cables

Hiroyuki FUJITA Yohei HIZAWA Hideki ARAI

Railway signalling systems of Japanese railway companies have been often damaged by lightning. Therefore, effective and economical lightning protection measures are necessary for railway signalling systems. In this paper, the authors measured lightning overvoltages induced in railway signalling cables installed in the field for experiment, and compared the line voltages of signalling cables with the voltages of signalling cables against the ground. With respect to the current lightning protection measures, it has been made clear that the lightning protection performance between the lines is higher than that against the ground. Therefore, the authors proposed the reduction method of the voltage of signaling cables against the ground used by the SPD (Surge Protective Device) attached to the spare line adjacent to the line, because the stray current through the grounding lines may cause interference with the railway signalling equipment. The validity of this method was confirmed by the FDTD (Finite Difference Time Domain) method.

キーワード：雷サージ，信号ケーブル，大地間電圧，保安器，空き芯線，FDTD 法

1. はじめに

近年，鉄道信号設備への電子機器の導入に伴い，雷被害が数多く発生しており，効果的な雷害対策が求められている。筆者らはこれまでに，実際の落雷時において，試験用に敷設した信号ケーブルに発生する大地間の雷過電圧を測定し，雷電流や落雷位置等の落雷条件との相関について調査を行うと共に，落雷条件より信号設備に雷害が発生する確率を推定する手法について検討してきた^{1)~4)}。

本論文では，レールならびに信号ケーブルの線間に発生する電圧に着目し，これまでに検討してきた大地間電圧との関係について調査を行ったので，その結果について報告する。また，その結果に基づき，鉄道信号で実現しているフェールセーフ性を考慮した雷過電圧抑制手法として，信号ケーブルの空き芯線に保安器を設置する対策を提案すると共に，FDTD (Finite Difference Time Domain：有限差分時間領域) 法による効果検証結果についても言及する。

2. 鉄道信号設備における雷害対策

2.1 鉄道信号設備における雷害発生状況

図1に2010年度から2012年度までの信号設備における雷害発生件数の割合を示す。これらの件数は，障害

* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室

発生により30分以上の運行支障が生じたものを示している。図1より，信号設備障害は鉄道全体の輸送障害の10%程度，雷害発生件数は信号設備障害の10~20%程度であることがわかる。また，自然災害により発生した信号設備障害では，雷害が半数以上を占めているというデータもあり，雷害による輸送障害発生リスクが無視できないほどに高いことが示されている⁵⁾。

2.2 鉄道信号設備の雷害対策

鉄道信号設備における雷害対策としては，侵入してくる雷サージ電圧・電流を予測し，被保護機器の耐サージ電圧・電流の把握を行ったうえで，(1) 機器への雷サージ電流の侵入阻止，(2) 機器に発生する雷サージ電圧の抑制，

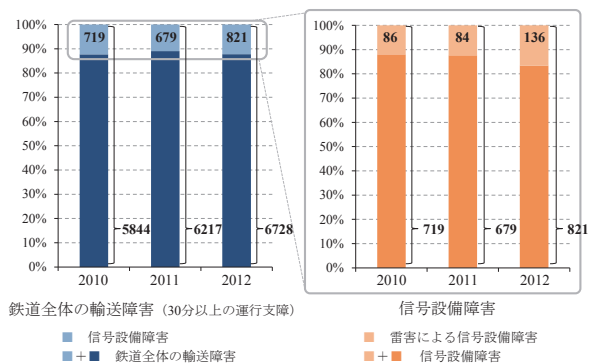


図1 信号設備における雷害発生件数の割合 (出典：鉄道安全データベース)

特集：信号通信技術

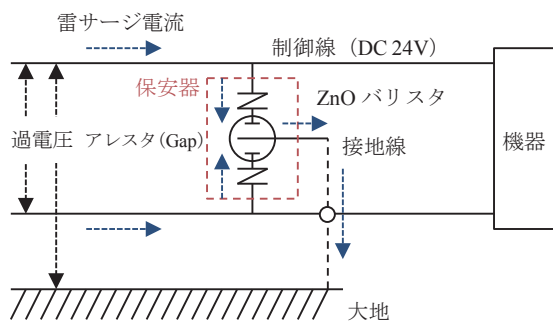


図2 雷サージ電圧の抑制

(3) 機器の等電位化の3項目の実施を基本としている⁶⁾。
 このうち、機器に発生する雷サージ電圧の抑制には、保安器と呼ばれるSPD (Surge Protective Device) を使用した対策が行われている。一般に、保安器は信号設備の制御線の大地間および線間に発生する雷サージ電圧を抑制するため、機器の制御回線に取付けられる。保安器は、被保護機器の通常の動作電圧は感知せず、雷サージが発生したときのみ動作し、雷サージ電流を放流させることで、雷サージ電圧を十分低い制限電圧まで抑制する機能を有している。また、保安器が短絡した状態で故障すると、信号機器の誤動作につながる恐れがあるため、信号設備の雷害対策に用いられる保安器は、図2に示すようなアレスタと呼ばれるギャップ式避雷素子とZnO (酸化亜鉛) バリスタと呼ばれる半導体式避雷素子の組合せで構成されるのが一般的である。ZnOバリスタを用いることで、続流によるギャップ式避雷素子の短絡状態が持続することを防ぐと共に、ギャップ式避雷素子を用いることにより、保安器自体の短絡故障の発生を極力防いでいる。さらに、保安器の短絡故障時に大地を介した閉回路の構成による信号機器の誤動作を懸念し、保安器の接地線を大地とは接続しない非接地方式が一般的である。なお、非接地方式は線間保護を目的としているため、本対策のみでは大地間に発生する雷サージ電圧に対しては保護できない。

2.3 鉄道信号設備の雷害対策の特徴

鉄道信号設備の役割は、列車の安全運行を支えることである。ここで、システム自体の安全性は、機器等に故障が発生した場合に、系全体を安全側に遷移させるというフェールセーフ技術により実現されている。鉄道信号設備における雷害対策では、このフェールセーフ性に影響を与えないことが大前提となる。機器自体を接地あるいは保安器を介して接地することで、大地を介した閉回路が構成され、フェールセーフ性が損なわれる可能性を懸念し、従来から接地することを避けてきた経緯⁵⁾がある。なお、一般に鉄道信号設備の耐雷性能は、大地間電圧10kV、線間電圧2kVと言われており、大地間に対して線間の耐電圧は1/5となっている。

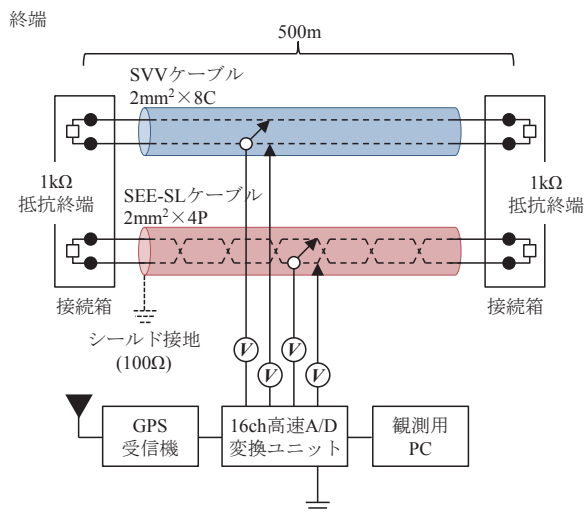


図3 試験構成

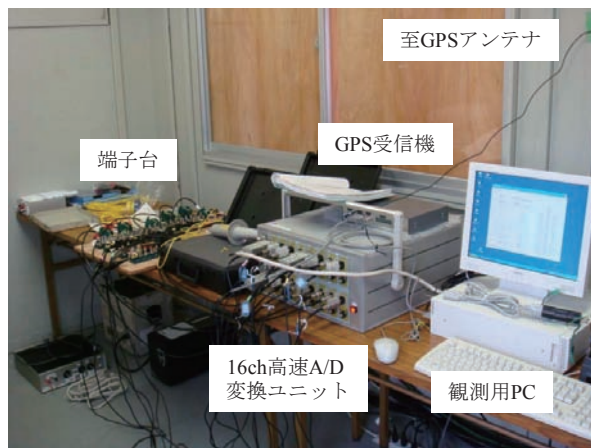


図4 測定機器配置写真

3. 試験方法

3.1 試験構成

実際の落雷時に信号ケーブルに発生する雷過電圧を観測するため、国内有数の多雷地域にある単線・非電化の営業線区において試験を実施した。観測期間は、2010年から2012年の概ね6月から10月までの夏季を対象とした。

試験構成図を図3、測定機器配置写真を図4に示す。試験用に敷設した信号ケーブル(シールドなし2mm²×8CのSVVケーブル、シールド付き2mm²×4PのSEE-SLケーブル)の区間長は500mとし、これら信号ケーブルと大地間に発生する雷過電圧の測定を行った。測定にあたっては、16chの高速A/D変換ユニットを用い、SVVケーブルの6C(茶芯線)と8C(白芯線)、およびSEE-SLケーブルの3P-1と3P-2の4箇所が発生する雷過電圧をそれぞれ大地との電位差(大地間電圧)として記録した。高速A/D変換ユニットは、雷過電圧を観測しているいずれかのチャンネルに設定したトリガレ

表1 信号ケーブルの設定条件

No.	測定期間		SVV	SEE-SL
	開始	終了		
1	2010/08/23	2010/10/04	A	A/b
2	2011/06/10	2011/08/07		A/b
3	2011/08/08	2011/09/02		A/a
4	2012/06/13	2012/10/11		A/b

凡例 A: 1kΩ 終端
a: 非接地, b: 100Ω 片端接地 (シース)

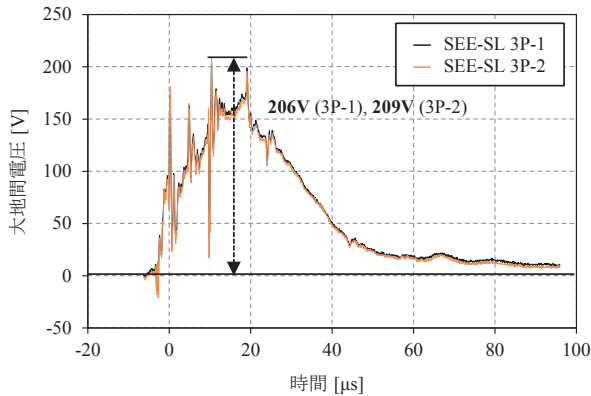


図5 大地間電圧波形 (SEE-SL ケーブル)

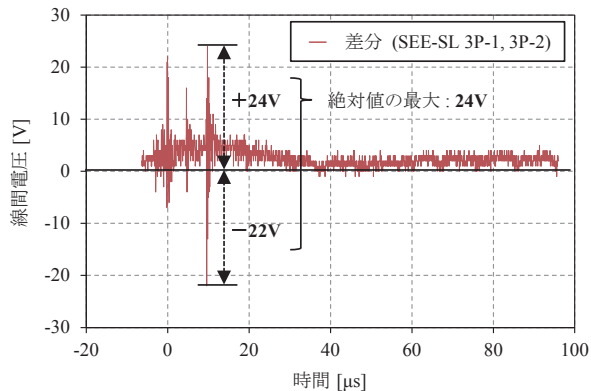


図6 線間電圧波形 (SEE-SL ケーブル)

ベル以上の電圧が印加されると、GPS 時刻とともに 4ch すべてのデータを観測用 PC に送信する。ここで、1 回あたりの波形データの記録長は、102.4μs (50ns × 2048 サンプル) とし、トリガレベルは電圧測定 4 チャンネルにおいて ± 125V の設定とした。なお、GPS 時刻は、観測された雷過電圧と落雷との関係を調査するために記録しているものであり、各測定記録は JLDN (Japanese Lightning Detection Network) による落雷位置標定データ (GPS 時刻、落雷位置、雷電流) との照合を実施している^{1)~4)}。

信号ケーブルにおいては、信号機器が接続されていることを模擬するため、終端に 1kΩ の抵抗を接続した。さらに、SEE-SL ケーブルについては、観測期間中にシールドを片端接地ないし非接地の条件にて測定を行った。信号ケーブルの設定条件を表 1 に示す。

3.2 線間電圧の評価方法

今回の測定においては、各測定箇所に対して大地間電圧を記録しており、線間電圧は直接測定していない。そこで、各測定箇所を得られた波形データのトリガ時刻が完全に一致しているものとみなし、回線間での大地間電圧の差分を線間電圧と定義した。この線間電圧は、サンプリング毎に回線間の大地間電圧波形データの差分値計算を行い導出した。ここで例として、SEE-SL ケーブルにて観測された大地間電圧波形から線間電圧を導出する過程を紹介する。図 5 は、ある落雷により観測された SEE-SL ケーブルの 3P-1 および 3P-2 の大地間電圧波形である。大地間電圧の最大値は、3P-1 で 206V、3P-2 で 209V であることがわかる。得られた 3P-1 および 3P-2 の大地間電圧波形の差分をとったものが、図 6 に示す線間電圧波形となる。線間電圧は、図 6 の波形の最大・最小値を絶対値により比較し、最大となる値 (ここでは 24V) とした。このようにして、各測定箇所得られた波形データから線間電圧を導出すると共に、線間電圧の大地間電圧に対する比率について、観測データの集合から線形近似により求め、その傾きによって評価を行うこととした。

4. 試験結果・考察

4.1 観測期間中の落雷と観測データ

観測期間中に測定地点を中心とする半径 10km の領域において、2,834 回の雷撃、約 1,390 回の落雷 (一般に 1 回の落雷は、複数の雷撃から構成される) が発生した。このうち設定したトリガレベル以上の雷過電圧は、308 回観測された。表 1 に示した設定条件毎の雷過電圧観測数は、SEE-SL ケーブルの片端接地条件である No. 1, 2, 4 において 262 回、非接地条件である No. 3 において 46 回であった。

4.2 測定対象の線間電圧の比較

測定対象とした SVV ケーブルおよび SEE-SL ケーブルの線間電圧と大地間電圧の相関を図 7、図 8 にそれぞれ示す。図 7、図 8 は、横軸に大地間電圧、縦軸に線間電圧をプロットしたものである。大地間電圧は、条件の同じ回線であれば発生する雷過電圧に差異はないとするこれまでの研究¹⁾を踏まえ、各測定対象の 2 本の芯線のうち、代表の各 1 本 (SVV : 6C, SEE-SL : 3P-1) を選択した。

また、線間電圧と大地間電圧の関係を数値化するため、最小自乗法による線形近似を行い、近似直線の傾きの係数を求めた。ここで、SVV ケーブルと同条件での比較とするため、SEE-SL ケーブルのシース非接地条件を代表させた。SVV ケーブルおよび SEE-SL ケーブル

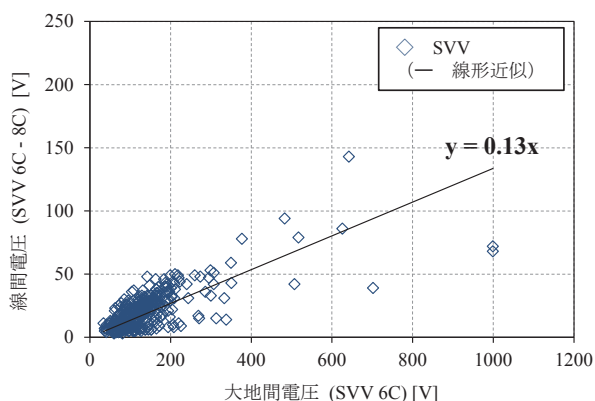


図7 線間電圧と大地間電圧の相関 (SVV ケーブル)

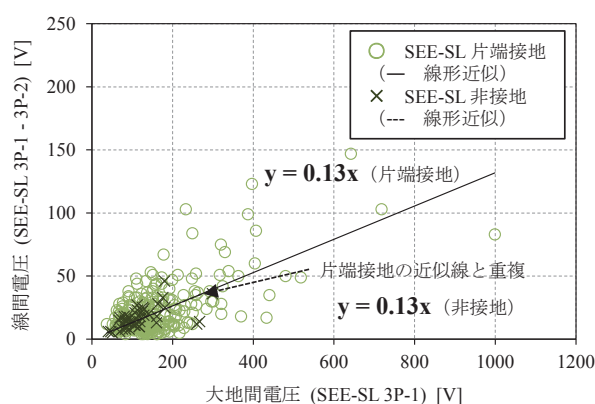


図8 線間電圧と大地間電圧の相関 (SEE-SL ケーブル)

の係数は、いずれも 0.13 となり、信号ケーブルではほぼ同じ値となった。なお、相関係数はともに 0.7 程度となり、比較的高い相関関係にあると言える。つまり、信号ケーブルにおいて、発生する線間電圧は大地間電圧の概ね 13% となることが示された。今回の試験構成では、測定対象である信号ケーブルの芯線は終端を 1kΩ の模擬負荷を接続していること以外、他の回線等との接続は一切行っていない。落雷により生じる強いインパルス性の電磁界は、ある程度の遠方地点においては放射電磁界が支配的⁴⁾となるため、本来回線間には等しく大地間電圧が誘起され、ノーマルモードである線間電圧は発生しない。しかし、均質に製造されているケーブルであっても完全に平衡状態となっているわけではなく、芯線導体径や被覆の厚み等に多少のばらつきが存在し、大地間との結合状態が回線間で異なっている。それゆえ、大地間電圧の約 13% の電圧が線間に発生したと考えられる。

一方で、通信ケーブルにおける線間電圧と大地間電圧の比は、複数の研究において、1/1000 ~ 1/100 程度との報告がある^{7) 8)}。今回、結果として得られた値は、通信ケーブルの約 10 ~ 100 倍となっていることから、信号ケーブルの平衡度が通信ケーブルと比較して低いという点もさることながら、測定環境の影響についても考慮し

なければならない。本測定においては、線間電圧を直接測定しておらず、大地間電圧の差分として導出を行っている。各測定チャンネルで得られたサンプリングデータに時刻のずれが生じていないことを前提とすると、電圧プローブの個体差が誤差要因として残留する。ここで、電圧プローブに個体差があると、誤差を含んだ大地間電圧に基づき差分計算を行うこととなるため、見かけの線間電圧は大きく導出される傾向にある。したがって、本測定での結果は大地間電圧に対して、大きめに見積もった線間電圧の値であることに注意が必要である。

4.3 接地条件による線間電圧の比較

SEE-SL ケーブルにおいては、シールドの接地条件を片端接地 (100Ω) ないし非接地として観測を行った。それぞれの線間電圧と大地間電圧の相関を図 8 中に示す。図 8 より、接地条件によらず両者共発生する線間電圧は大地間電圧の 13% 程度であることが見てとれる。

なお、落雷条件 (I/r : 雷電流 I , 落雷位置から測定地点までの距離 r) に対する大地間電圧の値は、片端接地条件が非接地条件よりも大きいという結果が示されていることから³⁾、線間電圧はケーブル芯線の平衡度にのみ依存すると考えられる。

4.4 雷害対策との関係

信号ケーブルに発生する線間電圧は、大地間電圧の概ね 13% となることが示された。一般に、鉄道信号設備の耐雷性能として大地間電圧は 10kV、線間電圧はその 1/5 である 2kV と言われている。そのため、現在実施されている雷害対策において、大地間に 10kV の雷過電圧を誘起する落雷が発生した場合、線間電圧は信号ケーブルで 1.3kV 程度となることから、耐圧範囲内となる。つまり、現状の対策において、信号設備の雷害は線間電圧ではなく、大地間電圧に起因するものの方が支配的であると推定できる。したがって、雷被害に対する効果的な対策としては、大地間電圧の発生抑制が必要であると言える。

5. 保安器を用いた大地間電圧抑制手法の検討

5.1 提案対策

4 章で述べた試験結果より、雷被害に対する効果的な対策は大地間電圧の発生抑制であると言える。交流電源回線においては、耐雷トランスを接続することにより、大地間電圧の発生抑制が可能である。一方、制御回線では保安器による対策が実施されているが、保安器の短絡故障に伴う信号機器の誤動作を懸念し、一般に保安器の接地線を大地とは接続していないため、大地間に発生する電圧に対しては保護されていない。そこで、空き芯線

を活用することで保安器の短絡故障時においてもフェールセーフ性を確保しつつ、大地間電圧を抑制する手法を提案する。提案手法では、大地間電圧の抑制対象である信号機器と接続されている芯線ではなく、当該芯線と隣接する空き芯線に対して保安器を設置する。これにより、保安器を設置した空き芯線の電圧が抑制されることで、抑制対象である芯線においても抑制効果が得られることが期待される。

5.2 解析モデル

提案手法の有効性を確認するために FDTD 法を用いた解析を実施した。FDTD 法とは Maxwell の方程式を解析対象空間における初期条件および境界条件のもとに直接数値計算する電磁界解析手法の一つであり、この解析手法を用いて信号機器の耐雷性能の定量的把握を実現している⁹⁾。今回、信号ケーブルとして広く使用されている SVV ケーブル ($2\text{mm}^2 \times 4\text{C}$) の空き芯線に保安器を設けた状態で直近に落雷があった場面を想定して解析モデルを作成した。なお、信号ケーブルに対する雷過電圧の伝搬に対する解析については、過去に同様の解析モデルを用いて実測値との整合性を確認済みである¹⁰⁾。作成した解析モデルを図 9 に示す。本解析モデルの解析対象空間は x, y, z の 3 次元であり、 $x = 2,000\text{mm}$, $y = 8,000\text{mm}$, $z = 2,000\text{mm}$ とし、信号ケーブルの芯線間隔ならびに計算時間を考慮して、解析セルサイズを $\Delta x = 0.004 \sim 0.1\text{mm}$, $\Delta y = 0.05 \sim 0.5\text{mm}$, $\Delta z = 0.004 \sim 0.1\text{mm}$ の幅とした。SVV ケーブルは芯線半径 0.9mm 、芯線間隔 4mm の細線導体で模擬し、長さ $2,000\text{mm}$ 、高さは大地から 500mm とした。保安器については信号用保安器として広く使用されている S100 形と同程度の保護性能を模擬するため、両端の電圧が 800V 未満の場合は $1\text{M}\Omega$ 、 800V 以上の場合は 1Ω の抵抗を持つように設

表 2 幾何および電気的条件

対象	条件	設定内容	設定値
信号ケーブル SVV $2\text{mm}^2 \times 4\text{C}$	幾何条件	線路長	2,000mm
		設置高さ	500mm
		芯線半径	0.9mm
		芯線間隔	4mm
大地	幾何条件	厚さ	100mm
	電气的条件	抵抗率	$1.69 \times 10^{-8}\Omega\text{m}$
雷撃電流	電气的条件	波頭長 / 波尾長	1/50 μS
		電流値	10kA
保安器	電气的条件	動作電圧	800V
		接地抵抗	10 Ω

定した。赤芯線を空き芯線と想定して、保安器を赤芯線のみだけに設けた上で接地 (接地抵抗 10Ω と模擬) している。また、雷撃電流は $1/50\mu\text{s}$ 、波高値 10kA の電流源で模擬した。落雷位置は、SVV ケーブルの保安器設置端から y 方向に約 $4,500\text{mm}$ 離れた位置とした。解析条件をまとめたものを表 2 に示す。なお、解析対象空間における境界面の条件は、6 面とも LIAO の吸収境界 (伝搬してきた電磁波を反射せず、境界内部の電磁界に影響を与えないようにする仮想的な境界) とした¹¹⁾。各芯線に発生する大地間電圧は、赤芯線を V_1 、白芯線を V_2 、緑芯線を V_3 、黒芯線を V_4 とした。

5.3 解析結果

解析結果を図 10 に示す。図 10 より、保安器を取付けていない場合は、いずれの芯線も等しく、高い大地間電圧が発生するが、空き芯線である赤芯線だけに保安器を取付けた場合は、赤芯線の大地間電圧が抑制されるだけでなく、保安器を取り付けていない隣接芯線についても抑制されることがわかる。その抑制効果は、保安器を取付けていない時に発生する雷過電圧と比較し、約 30%

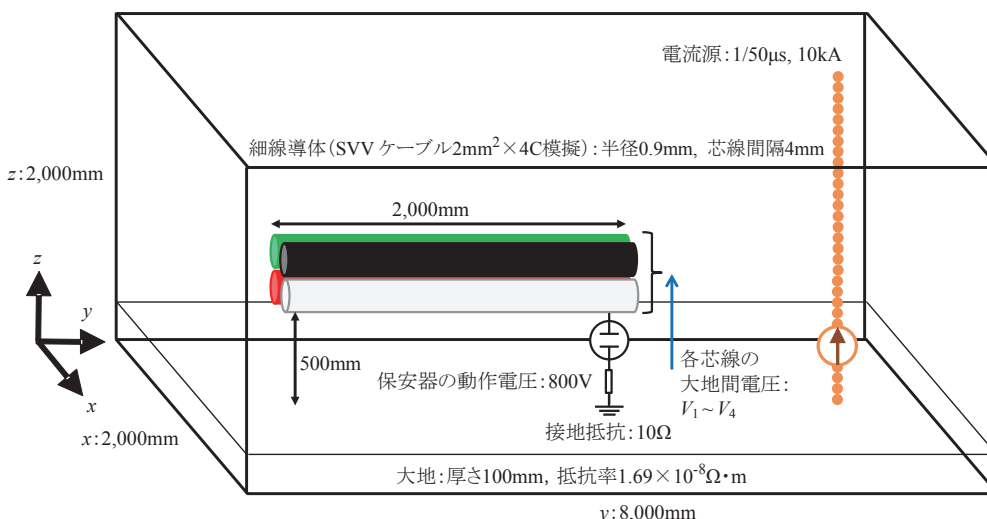


図 9 FDTD 法による解析モデル

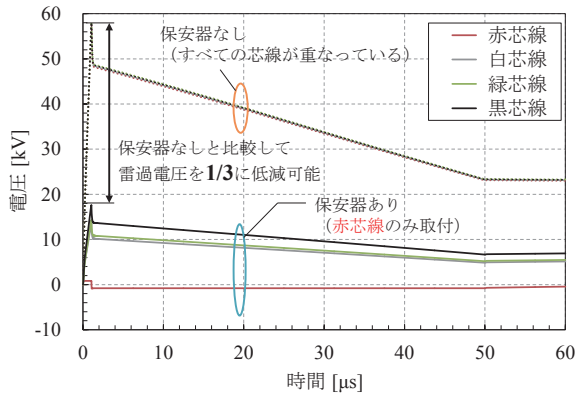


図 10 FDTD 法による解析結果

の発生雷過電圧となる。また、黒芯線の抑制効果が他芯線と比較して若干低いことがわかる。これは、赤芯線から各芯線への影響は、芯線間の静電容量によるものであり、その影響の大きさは芯線間の距離に反比例するためである。具体的には図 9 より、白芯線および緑芯線は、赤芯線と等距離で隣接しているが、黒芯線だけは赤芯線と対角の位置にあることから、赤芯線との距離が白芯線および緑芯線の場合と比べて $\sqrt{2}$ 倍となっているためである。

本結果は、現状、保安器の短絡故障の発生を懸念して実施例の少ない保安器による大地間電圧の抑制対策について、フェールセーフ性を保持したまま実施可能であることを示すものであり、今後の雷害対策手法の一つとして期待できる。なお、保安器を取り付けた芯線とその他の芯線との間に線間電圧が生じてしまうが、線間保安器の等電位化により対策が可能である。

6. まとめ

本論文では、長期観測に基づく測定データより、信号ケーブルの線間に発生する電圧に着目し、大地間電圧との関係について示した。信号ケーブルに発生する線間電圧は、大地間電圧の概ね 13% となり、現状実施されている雷害対策においては、大地間に対して線間の保護レベルが高いことが明らかとなった。そこで、大地間電圧の抑制を目的とし、フェールセーフ性を考慮した雷過電圧抑制手法として、信号ケーブルの空き芯線を保安器を介して大地に接地する対策を提案した。FDTD 法による本手法の効果検証の結果、保安器を設置していない芯線

についても対策前と比較して、雷過電圧が約 30% に抑制されることを確認した。本結果は、現状、保安器の短絡故障の発生を懸念して実施例の少ない保安器による大地間電圧の抑制対策について、フェールセーフ性を保持したまま実施可能であることを示すものであり、今後の雷害対策手法の一つとして期待できる。

最後に、長期にわたる観測にご協力いただいた関係各位に深く感謝する。

文献

- 1) 新井英樹, 小野雄人, 藤田浩由:「雷過電圧の観測に基づく信号設備の雷リスク評価」, 鉄道総研報告, Vol. 26, No. 7, pp. 11-16 (2012)
- 2) 藤田浩由, 新井英樹, 小野雄人, 杉本経嗣, 比澤庸平:「鉄道信号用ケーブルに発生する線間雷サージ電圧および電流の測定」, 電気学会高電圧研究会, HV-15-027 ~ 042, pp. 59-64 (2015)
- 3) Y. Ono, H. Arai, K. Sugimoto: “Methodology to Estimate Lightning Risk for Railway Signalling Systems”, WCRR 2013 Proceedings, ID 106 (2013).
- 4) 小野雄人, 杉本経嗣, 比澤庸平, 新井英樹, 鈴木雅彦, 本間健一:「鉄道信号用ケーブルに発生する雷過電圧の観測に基づく雷リスクの推定」, J-Rail 2013, pp. 569-572 (2013)
- 5) 新井英樹:「鉄道信号設備の雷害対策に関する研究」, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 11, pp. 881-884 (2012)
- 6) 新井英樹:「鉄道信号設備の雷害対策」, OHM, Vol. 99, No. 6, pp. 33-36 (2012)
- 7) 元満民生, 山根宏, 服部光男:「雷サージ横電圧による符号誤り率推定法」, 電子情報学会論文誌 B-II, Vol. J77-B-II, No. 10, pp. 572-580 (1994)
- 8) 山本直樹, 下塩義文, 古賀広昭, 徳田正満:「ツイストペアケーブルの構造的不均等による電気的特性」, 電子情報学会論文誌 B, Vol. J84-B, No. 8, pp. 1529-1543 (2001)
- 9) 新井英樹, 杉本経嗣, 小野雄人, 比澤庸平:「保安器による信号機器室の耐雷設計に関する検討」, 鉄道総研報告, Vol. 28, No. 11, pp. 5-10 (2014)
- 10) Y. Hizawa, H. Arai, H. Fujita: “Analysis of Lightning Overvoltage through Railway Signalling Cables by Using FDTD Method”, APL2015 Proceedings, TC6.1-2 (2015).
- 11) サージ現象に関する数値電磁界解析手法調査専門委員会:「数値過渡電磁界解析手法」, オーム社, 2008