特集:信号通信技術

保安器による信号機器室の耐雷設計に関する検討

新井	英樹*	杉本	経嗣**
小野	雄人*	比澤	庸平*

The Study on Lightning Protection Design by using Surge Protection Devices for Railway Signalling Huts

Hideki ARAI	Keiji SUGIMOTO
Yuto ONO	Youhei HIZAWA

Effective and economical lightning protection measures are necessary for railway signalling systems because suspended operation or train delays due to lightning damage may cause social disruption. The authors studied on lightning protection design by using numerical electro-magnetic analysis based on a FDTD (Finite-Difference Time-Domain) method. We analyzed the lightning overvoltage occurrence in the signalling hut when the lightning struck near the hut using the FDTD method. This paper describes analytical results and suggests the lightning protection design by applying surge protective devices.

キーワード:信号機器室,耐雷設計,保安器,数値電磁界解析,FDTD法

1. はじめに

信号設備にマイクロコンピュータ等の電子デバイスを 用いることにより、多機能化・小型化が進んでいる。一方、 電子デバイスは、その動作電圧が低いため、雷サージを はじめとする過電圧・過電流に対して極めて脆弱であり、 信号設備において回路の焼損やシステム停止等の雷害が 数多く発生しているのが現状である。信号設備の雷害に よる列車の運行停止・遅延は、社会的な混乱を招く恐れ があることから、適切な雷害対策の確立が求められている。

現状の信号設備の雷害対策は、保安器に代表される耐 雷機器の適用とその施工方式によって実施されている。 しかしながら、個々の信号機器における耐雷性能につい ては、雷サージ印加試験等で把握することができるが、 実際の雷害対策の施工方式に応じた耐雷性能に関して は、現地試験等による把握が困難と言える。よって、数 値解析により、耐雷性能に関して定量的把握を行うこと ができれば、雷害対策の費用対効果も、現状より明確に できると考えられる。

筆者らは、これまでに鉄道沿線信号設備を対象とし、 解析対象を集中定数や分布定数といった電気回路モデル で表現することにより、落雷時に発生する雷サージ(雷 サージ電圧・雷サージ電流)をシミュレーションする手 法(回路網解析手法)の開発に取り組んできた¹⁾。しか しながら、回路網解析手法では、大地に対して垂直に配 線されるケーブルなど,大地上の三次元立体構造への誘 導現象を精緻に再現することに難があった。

本研究では、数値電磁界解析手法の一つである FDTD (Finite-Difference Time-Domain:有限差分時間領域)法 を用いて、信号機器室近傍への落雷時に機器室内に発生 する雷サージのシミュレーションに取り組んだ。数値電 磁界解析手法では、解析対象の幾何学的配置をそのまま 考慮できるため、信号機器室内で多々見られる大地に対 して垂直に配線されるケーブルや水平に配線されるケー ブルへの誘導現象を詳細に解析することが可能である。 これにより、耐雷機器の施工方式に応じた耐雷性能の定 量的把握を可能とした。さらに、シミュレーション結果 より、保安器の施工方式の違いによる耐雷性能の差異に ついて明確にした。以下、それらについて述べる。

2. 信号設備における雷サージの発生現象

2.1 雷の区分

信号設備に雷サージを発生させる雷は,以下の3つに 区分される。

- (1) 直撃雷
- (2) 誘導雷
- (3) 近傍雷

過去においては, 直撃雷でないものは誘導雷として区 分されていたが, 厳密に言えば, 誘導雷とは, 任意地点 への雷撃時に発生する電磁波により, 他の地点に影響を 及ぼす雷のことを指す。また, 近傍雷とは, 信号設備へ の直撃ではないものの, 近傍への落雷による大地電位上

^{*} 信号・情報技術研究部 信号システム研究室

^{**} 信号・情報技術研究部 信号システム研究室(現 株式 会社三工社)

昇により影響を及ぼす雷のことを指す。地上高の低い箇 所に設置される信号設備に関しては,直撃雷の発生する 可能性は低いため,過去より,誘導雷,近傍雷を対象と した雷害対策が施工されている。

2.2 雷サージの区分

2.1節で述べた雷によって、信号設備には、

- (1) 導電性サージ
- (2) 誘導性サージ

の2種類の雷サージが発生し、場合によっては雷害に至る。なお、どの雷によってどちらの雷サージが発生するという対応はない。

導電性サージの概念を図1(a)に示す。導電性サージ とは、雷電流の一部が直接的に侵入してくるものである。

一方,誘導性サージの概念を図1(b)に示す。誘導性サージとは、電磁結合により、2次的に侵入してくるものである。例えば、雷電流の流れるルートと信号ケーブルとの間の電磁結合(電磁誘導および静電誘導)が大きい場合には、信号ケーブルには、誘導性サージ(雷サージ電圧・雷サージ電流)が生じる。なお、雷サージ電圧は主に静電誘導により発生し、雷サージ電流は電磁誘導により発生する。

2.3 保安器の施工方式の違いによる発生雷サージ

ここでは,保安器の適用による雷害対策を例とし,施 工方式の違いによって信号設備に印加される雷サージに ついて説明する。

図2のように、信号機器およびそれへの信号ケーブル が隣接して配線されており、そのうちの一方のケーブル のみに雷サージが侵入してきた際の、それぞれの機器に 発生する雷サージについて考える。

機器1への信号ケーブルに誘導雷による雷サージが 発生した時,機器1に発生する対地間電圧V2は,信号 ケーブルに発生している対地間電圧V1とほぼ同じであ る。なお,器具箱は大地と同電位であるため,機器1と 器具箱間にも対地間電圧V2が発生することになる。一 方,機器1と機器2への信号ケーブルが隣接しているた め,機器2にも誘導性サージによって,対地間電圧V3 が生じる。V2とV3の電位差によって機器間あるいは ケーブル間において絶縁破壊が生じると,機器2に導電





(b) 等電位線を接地した場合に発生する雷サージ (一点接地方式)

図3 保安器の施工方式の違いによる発生雷サージ

性サージが侵入することになる。

信号機器間に発生する電位差によって、絶縁破壊が生 じることを回避するための方法として、現状の信号設備 では、図3(a)に示すように、信号ケーブルに保安器 を取り付け、保安器の接地線を相互接続することによる 等電位化(仮想接地方式)が図られている。この場合には、 機器間に発生する電位差(V2-V3)は保安器の制限電圧 以下に抑制されるため、機器間の絶縁破壊は起こりにく いと考えられる。しかし、機器1に発生する対地間電圧 V2は、V1と同等のままであり、機器1と器具箱間(対 地間)の絶縁破壊は起こり得る。

図3(a) で行った対策に加えて,保安器の接地線(等 電位線)を大地に接地する対策(一点接地方式)を行っ た状態が図3(b)となる。この場合には,現状の対策 と同様,機器間に発生する電位差(V2-V3)が保安器に より抑制されるとともに,対地間電圧 V2 や V3 も,図 3(b)に示した接地抵抗 R と,保安器を通過する雷サー ジ電流iの積と同等にまで抑制されることになる。 以上より,保安器の施工方式の違いによっても,信号 機器での雷サージの発生箇所が異なることとなる。

3. 数值電磁界解析手法

落雷時に信号機器室内に発生する雷サージを定量的に 把握するために,本研究で使用した数値電磁界解析手法 について説明する。

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ことを数値電 磁界解析という²⁾。現在,広範に用いられている数値電 磁界解析手法としては,FDTD (Finite-Difference Time-Domain:有限差分時間領域)法,有限要素法,モーメン ト法などがある。計算機能力の向上により,適用範囲の 拡大とともに,解析手法に関する研究も盛んに行われて いる。このうちFDTD 法は,古くからアンテナ解析³⁾ に用いられてきた手法であるが,近年では,電力鉄塔へ の雷撃時に発生する雷サージ解析⁴⁾への適用実績例が あることから,本研究における数値電磁界解析手法とし て使用することとした。

式(1),式(2)に Maxwell の方程式を示す。

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon} E + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times H \tag{1}$$
$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times E \tag{2}$$

ここに, E:電界, H:磁界, $\sigma:$ 導電率, $\varepsilon:$ 誘電率, $\mu:$ 透磁率である(単位は全て MKSA 単位系に従う)。

Maxwellの方程式は、「電界の時間微分が磁界の回転」、 「磁界の時間微分が電界の回転」という関係を示している。よって、図4に示すように電界Eと磁界Hは、 $\Delta t/2$ の時間だけずれた時刻に配置される。なお、 Δt は、解析を行う時間の最小単位(時間ステップ)である。

また, FDTD 法では, 図 5 に示すように, 解析対象空間を, 一辺 Δx , Δy , Δz からなるセルに分割し, 電磁界 成分については, 式(1) および式(2)の関係を満たすよ うに, セルの辺の中心に電界を, 面の中心には面と垂直 の方向に磁界を置いて表現する。その上で, Maxwell の 方程式を適用し, 解析対象空間の電界と磁界の時間変化 を直接解いていく。

FDTD 法は,解析対象空間における電界と磁界が時間 領域で得られるため,直観的に理解しやすい,また,プ ログラミングが比較的容易などの特長がある。しかし,



図4 電界 E と磁界 H の時間軸上での配置



図5 セルと電磁界成分の配置

多くの計算機資源(メモリ容量,CPUの処理時間)を 必要とするという短所がある。

4. 雷サージ試験結果と FDTD 法による解析結 果の比較

4.1 導電性・誘導性サージの伝搬様相

信号ケーブルとして広く使用されている SVV ケーブ ル(2sq×4C)の1芯にインパルス波を印加した際の, 印加線に発生する導電性サージおよび隣接する誘導線に 発生する誘導性サージの伝搬様相について,実験結果と FDTD 法による解析結果を比較した。

4.1.1 試験構成

SVV ケーブルの1芯にインパルス波を印加する試験 構成図を図6に示す。SVV ケーブルの長さは3mであ る。SVV ケーブルは高さ360mmの位置に設置した。試 験では、大地模擬として、銅板を使用した。また、パル スジェネレータ(PG)より印加したインパルス波形は、 パルス幅1µs、電圧100Vである。SVV ケーブルの印加 線(赤芯線)および誘導線(白芯線)の印加端側に発生 したサージ電圧(導電性サージ電圧:V1,誘導性サー ジ電圧:V2)をオシロスコープにより測定した。

4.1.2 FDTD 法による解析

FDTD 法による解析対象空間は、x=0.5m, y=4m, z=0.7m とし、 $\Delta x=2mm$ 、 $\Delta y=5mm$ 、 $\Delta z=2mm$ のセルに 分割し、解析を行った。SVV ケーブルの芯線を模擬す る細線導体は、実際のSVV ケーブルと同じ半径 0.9mm



図6 導電性・誘導性サージの試験構成図

とし、各芯線は4mmの離隔をとって配置した。

試験において大地を模擬した銅板は,抵抗率 1.69 × $10^8 \Omega \cdot m$,厚さ 10mm として,解析を行った。なお,解 析対象空間の境界面の条件は,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)条件とした²⁾。

4.1.3 実験結果と解析結果の比較

SVV ケーブルの1芯にインパルス波を印加した際の 印加端側に発生したサージ電圧波形の実験結果と解析結 果との比較を図7に示す。

図7より,導電性サージ波形ならびに誘導性サージ波 形とも実験結果と解析結果が概ね一致していることがわ かる。以上より,FDTD 法を用いた数値電磁界解析により, 導電性・誘導性サージの伝搬様相が再現できると言える。



4.1.4 ケーブル間離隔に応じた誘導性サージ量

上述のように, FDTD 法による解析において, 導電性・ 誘導性サージの伝搬様相を一定の精度で再現できること が把握できたため, 解析により, ケーブル間離隔に応じ た誘導性サージ量の評価を行った。

ここでの解析は、概ね 4.1.2 項で述べたものと同様で あるが、誘導性サージ量の評価を行うため、解析対象空 間に 2 本の信号ケーブルを並行に配置し、ケーブル間離 隔 k を、5mm、50mm、200mm、500mm の 4 通りに変 化させて解析を行った。解析では、印加線に発生する導 電性サージ電圧 V1 と、誘導線に発生する誘導性サージ 電圧 V2 を計算した。

FDTD 法を用いた解析によるケーブル間離隔に応じた 誘導性サージ量の評価結果を図8に示す。図8より、ケー ブル間離隔が大きいほど、誘導性サージ量が低減される ことがわかる。また、印加線に発生する導電性サージに

図8 ケーブル間離隔に応じた誘導性サージ量

対して誘導性サージ量を半減させるためには、ケーブル 間離隔として 50 ~ 200mm 程度必要であることがわかる。

4.2 実際の落雷時を模擬した解析

4.1 節では,実験,解析ともに,SVV ケーブルの芯線 に直接インパルス波を印加することによって,導電性 サージならびに誘導性サージの発生を模擬した。

一方, 実際の誘導雷, 近傍雷においては, 直接的にケー ブルの芯線に雷サージが侵入してくる訳ではない。そこ で, 実際の落雷時における雷サージの発生現象を模擬す るために, 信号ケーブルの敷設箇所近傍に, 雷電流を印 加する人工雷サージ印加試験を実施した。また, SVV ケーブルに発生した雷サージ電圧について, 実験結果と FDTD 法による解析結果との比較を行った。

4.2.1 試験構成

人工雷サージ印加試験の試験構成を図9に,試験風景 を図10に示す。試験に用いたSVVケーブルの長さは 8mであり,信号機器による負荷を模擬するために,ケー ブルの両端において,赤ー白芯線間と緑ー黒芯線間にそ れぞれ1kΩの抵抗を挿入した。試験では,大地模擬と して,銅板を使用し,SVVケーブルを銅板上に直置き した。また,インパルスジェネレータ(IG)より印加し た雷電流波形は,波頭長/波尾長が0.25/50µs,電流波 高値を-1kAとした。なお,雷電流の印加点は,SVVケー ブルの敷設方向から直角方向に1m離れた地点とした。 遠方に設けた接地極(遠方零電位点)を用いて,SVVケー

図10 試験風景

ブルの芯線(赤芯線)に発生した雷サージ電圧をオシロ スコープにより測定した。

4.2.2 FDTD 法による解析

FDTD 法による解析対象空間は、x=4m, y=10m, z=2m とし、 $\Delta x=2mm$, $\Delta y=5mm$, $\Delta z=2mm$ のセルに分 割し、解析を行った。SVV ケーブルの芯線を模擬する 細線導体は、実際のSVV ケーブルと同じ半径 0.9mm と し、各芯線は4mmの離隔をとって配置した。また、実 際の試験と同様、ケーブル両端は1kΩの抵抗で終端した。

人工雷サージ印加試験では、遠方零電位点を用いて SVV ケーブルの芯線に発生する雷サージ電圧を測定し ているため、解析においては、解析対象空間の境界面と SVV ケーブル芯線間に発生する雷サージ電圧を計算した。

その他の解析条件については、4.1.2 項で述べたもの と同様である。

4.2.3 実験結果と解析結果の比較

SVV ケーブルの芯線に発生した雷サージ電圧波形の 実験結果と解析結果との比較を図 11 に示す。発生した 電圧が負の値を示しているのは、印加した雷電流が負極 性のためである。図 11 より、波形変化の時間傾向につ いては一致が見られるが、発生する雷サージ電圧の大き さについては、差異が見られる。

この差異の要因として、実際の試験では遠方に設けた接 地極(遠方零電位点)を電圧基準として用いているものの、 その接地極までの距離は有限長であるのに対して、解析で は解析対象空間の境界面を電圧基準として用いており、理 想的な無限長離れた地点にある遠方零電位点となっている ためと考えられる。また、人工雷サージ印加試験は屋内で実 施しているため、建屋壁面等からの電磁波の反射が起こり 得るが、解析では、解析対象空間の境界面をLIAOの吸収 境界条件としており、理想的な反射のない空間として模擬し ていることが、両者の波形の差異の要因として考えられる。

実際の落雷時を模擬した解析における精度向上につい ては、今後の課題と言える。

5. 数値電磁界解析による耐雷性能の定量化

5.1 解析モデル

信号機器室近傍への落雷時における機器室内に発生す る雷サージ電圧を解析するため,図12に示すような解 析モデルを作成した。解析対象空間は, *x*=10m, *y*=17m, *z*=110m とし, Δ*x*=2mm, Δ*y*=5mm, Δ*z*=2mmのセルに分 割し, 解析を行った。解析対象空間の境界面の条件は, 6 面とも LIAO の吸収境界条件とした。

実際の信号機器室の壁は、鉄筋メッシュ構造となっ ているが、解析モデルでは単純化のため、1 辺 2m の四 角形の金属平板を組み合わせた立方体構造とした。な お、信号機器室は、床面の四隅において、大地に接地抵 抗 1 Ω で接地されているものとした。機器室内の信号機 器については、1k Ω の抵抗で模擬した。解析モデル中の 信号ケーブルは、SVV ケーブル (2sq × 2C)を模擬し、 芯線半径 0.9mm、芯線間隔は 4mm とした。また、解析 モデル中の大地は、厚さを 1m とし、標準的な大地抵抗 率である 100 Ω ・m を採用した。

印加する雷電流波形は,波頭長/波尾長が1/50µs,電流 波高値を10kAとした。落雷位置は,極端なケースではあ るが,信号ケーブルの敷設方向から直角方向に3m離れた 地点,そして信号機器室の壁から4m離れた地点とした。

解析では,機器室内信号機器に発生する雷サージ電圧 V1,信号機器間に発生する雷サージ電圧 V2,そして信 号機器室の電位上昇 V3 を計算した。なお,いずれも電 圧基準は,解析対象空間の境界面としている。

図 12 解析モデル

5.2 保安器の施工方式による雷サージ電圧の差異

保安器の適用による雷害対策が施された条件での信号 機器に発生する雷サージ電圧等の解析結果を示す。

保安器の施工方式の違いによる発生雷サージ電圧の差 異を把握するため、図13(a)に示すような、保安器の 接地線(等電位線)を大地に接地する対策(一点接地方式) での解析と、図13(b)に示すような、保安器の接地線 を大地に接地せず,相互接続のみによる等電位化対策(仮 想接地方式)での解析を行った。なお、解析モデル中の 保安器は、保安器両端にかかる電圧が800V未満の場合 は1MΩ、800V以上の場合は1Ωの抵抗を持つように設 定した。また、一点接地方式の解析は、保安器の接地抵 抗を10Ωまたは100Ωとした場合について行った。 ー点接地方式で接地抵抗 10Ω の場合の解析結果を図 14 (a) に,接地抵抗 100Ω の場合の解析結果を図 14 (b) に示す。また,仮想接地方式での解析結果を図 14 (c) に示す。

図14 (a) と (b) を比較すると,信号機器間に発生 する雷サージ電圧 V2 と信号機器室の電位上昇 V3 に関 しては,差異が見られないものの,信号機器に発生する 雷サージ電圧 V1 に関しては,10Ω 接地の場合の方が, より低いことが見て取れる。よって,一点接地方式にお いて,接地抵抗の低減が耐雷性能の向上に効果的である と言える。

また,図14 (a) (b) と図14 (c) を比較すると,信 号機器間に発生する雷サージ電圧 V2 に差異が見られな いことから,仮想接地方式は一点接地方式と同様,信号 機器間の電位差を抑制するための有効な対策と言える。 しかしながら,信号機器に発生する雷サージ電圧 V1 に 関しては,仮想接地方式では,抑制されないことが見て 取れる。

以上より,信号機器間の電位差を抑制するためには, 等電位化を行う必要があり,さらに,信号機器に発生す る対地間雷サージ電圧を抑制するためには,一点接地方 式が有効であり,耐雷性能が向上する雷害対策と言える。

6. おわりに

本研究では,FDTD 法による数値電磁界解析を用いて, 保安器の施工方式の違いにより発生する雷サージ電圧の 解析を行った。本解析手法により,落雷時に信号機器室 内に発生する雷サージ電圧のシミュレーションが可能と なるとともに,耐雷機器の施工方式に応じた耐雷性能の 定量把握が可能となる。

文 献

- 新井英樹,藤田浩由,小野雄人,渡辺郁夫:「踏切設備の雷サージ解析モデルの構築」,鉄道総研報告, Vol.25, No.5, pp.35-40, 2011
- 2)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」,(一社)電気学会,2008
- 字野亨:「FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析」、コ ロナ社、1998
- 4)野田琢,松原廣治,横山茂:「FDTD法による解析結果を 用いた新しい雷サージ計算用鉄塔モデル」,電力中央研究 所報告, No.H04012, 2005

