

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 信号システムへの 雷サージ影響を探る

高度情報化社会となった現在、あらゆる産業分野において電子機器が広く導入され社会基盤を支えています。しかし、これら電子機器は雷サージに対して脆弱であり、効果的な雷害対策が求められています。一方、雷サージは電気現象であるため、信号ケーブルなどに侵入してくる雷サージを目で見ることができません。そのため、実験やシミュレーションを通して、雷害の発生メカニズムの解明や雷害対策の効果検証が行われます。ここでは、鉄道信号システムへの雷サージ影響を探るために実施したシミュレーションについて紹介します。



**新井 英樹**  
Hideki Arai  
信号・情報技術研究部  
信号システム研究室  
室長  
【専門分野】鉄道信号設備の雷害対策、鉄道信号一般



**藤田 浩由**  
Hiroyuki Fujita  
信号・情報技術研究部  
信号システム研究室  
副主任研究員  
【専門分野】鉄道信号設備の雷害対策、電子機器の劣化・寿命評価

## はじめに

高度情報化社会において多用されている電子機器には、マイクロコンピュータをはじめとする高度に集積化された半導体デバイスが実装されており、また、機器が電源線や通信線の双方に接続され、機器同士がネットワーク構成となっていることが特徴と言えます。これら電子化、ネットワーク化された機器により、電力・通信・ガス・水道などの社会インフラの管理、セキュリティの確保、そして各種サービスの提供が行われています。

しかし、電子機器の動作電圧は、数V程度と非常に低いため、落雷に伴い外部から侵入してくる雷サージ電圧・雷サージ電流(☞参照)に対して極めて脆弱であり、機器の焼損や機能停止といった被害が数多く発生しています。現代社会においては、雷害の発生が重大な問題に発展するおそれがあり、雷

サージの脅威が増していると言えます。

一方、鉄道もほかの社会インフラと同様、生活に必要な不可欠なものとなっています。鉄道の地上電気設備には、電車で電力を供給するための電力設備、列車の安全・安定運行を確保するための信号設備、そして輸送業務に必要な情報を伝送するための通信設備がありますが、これら設備には高機能化、小型化を図るために数多くの電子機器が用いられています。これら電気設備における雷害は、列車の運行停止・遅延の原因となり、社会的な混乱を招くおそれがあります。近年の鉄道信号設備における雷害発生状況として、2010年度から2012年度までの各年度に発生した輸送障害に占める信号設備障害の割合とそれら信号設備障害に占める雷害の割合を図1に示します。なお、図1は、障害発生により30分以上の運行支障が生じたものを計上し

### ☞ 雷サージ電圧と雷サージ電流

サージとは、波のように押し寄せるといふ意味があります。雷サージ電圧とは、落雷時に発生する電磁波が波のように押し寄せることにより、対象物に瞬間的に発生する電圧のことを言います。雷過電圧とも言います。また、発生した雷サージ電圧に応じて対象物に流れる電流のことを雷サージ電流または雷過電流と言います。

ています。図1より、信号設備障害は鉄道全体の輸送障害の1割程度、さらに信号設備の雷害は信号設備障害の2割程度を占めていることがわかります。鉄道信号設備の雷害による輸送障害発生リスクが存在することを考えると、これまで以上に雷害の発生を防ぐ必要があり、効果的な雷害対策の確立が求められています。

ここでは、鉄道信号システムへの雷サージ影響を探るために実施したシミュレーションについて紹介します。

### 数値電磁界解析手法

鉄道の信号機器室の近傍に落雷があった場合に、信号機器室内に発生する雷サージ電圧を定量的に把握するためのシミュレーション手法として、数値電磁界解析という手法があります。数値電磁界解析とは、解析対象空間をあるサイズのセルに分割して構成し、マクスウェルの方程式(☞参照)に従って、各セル位置における電界と磁界(☞参照)を直接数値計算する手法です<sup>1)</sup>。現在、広範に用いられている数値電磁界解析手法の一つとして、FDTD(Finite-Difference Time-Domain:有限差分時間領域)法と呼ばれる手法があります。FDTD法は、古くからアンテナの形状・寸法を設計するために用いられてきた手法ですが<sup>2)</sup>、近年では、電力鉄塔への雷撃時に発生する雷サージ解析への適用実績例があることから<sup>3)</sup>、本研究における数値電磁界解析手法として使

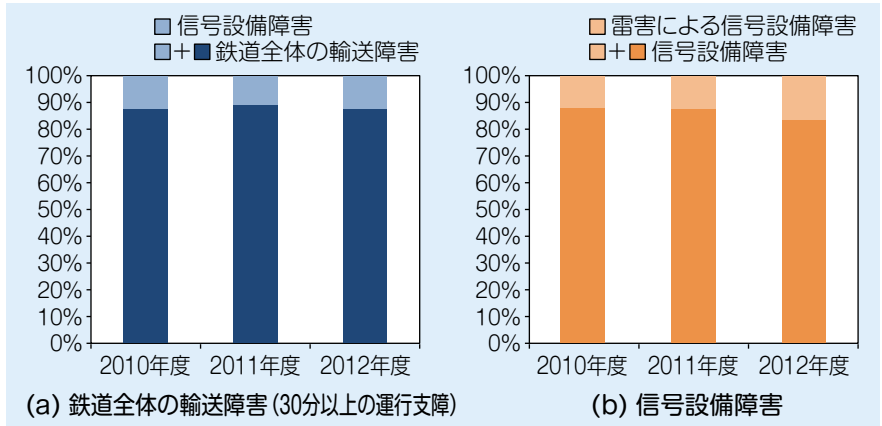


図1 鉄道信号設備の雷害発生状況(出典:鉄道安全データベース)

用しました。

FDTD法では、図2に示すように、解析対象空間を、一辺 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ からなるセルに分割し、各セルにおける電磁界成分については、マクスウェルの方程式の関係を満たすように、セルの辺の中心に電界(図2中の $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$ )を、面の中心には面と垂直の方向に磁界(図2中の $H_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$ )を置いて表します。その初期条件の下、マクスウェルの方程式を適用し、解析対象空間の電界と磁界の時間変化を計算していきます。

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ります。しかし、多くの計算機性能(メモリー容量、CPUの処理時間)を必要とするという課題があります。

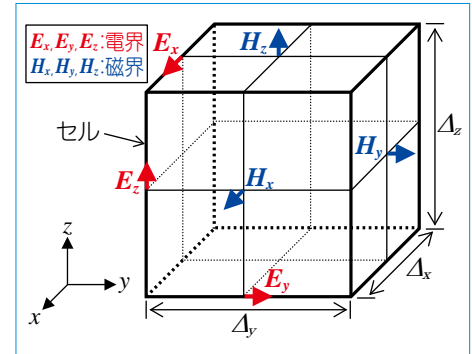


図2 セルにおける電磁界成分の配置

### 雷サージ伝搬様相

鉄道信号ケーブルとして広く使用されているSVVケーブル(2mm<sup>2</sup>×4芯)の1芯にインパルス波を印加(☞参照)した際の、印加芯線に発生する導電性サージ(☞参照)と隣接する誘導芯線に発生する誘導性サージ(☞参照)の伝搬様相について、実験結果とFDTD法によるシミュレーション結果を比較しました。

#### ☞ 電界と磁界

電界とは、電圧がかかっている空間のことであり、電気が流れているところにはどこでも一定範囲で電界が発生します。電界は、V/mという単位で表します。磁界とは、磁気が働く空間のことであり、電気が流れているところには磁界が発生します。磁界は、A/mという単位で表します。マクスウェルの方程式は、「電界の時間変化により磁界が生じる」、「磁界の時間変化により電界が生じる」という電界と磁界の関係を表しています。

#### ☞ 導電性サージと誘導性サージ

導電性サージとは、雷電流の一部が信号ケーブルに直接的に侵入してくるものです。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す。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)が生じます。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します。

#### ☞ マクスウェルの方程式

マクスウェルの方程式とは、1864年に、ジェームズ・クラーク・マクスウェルにより導かれた電磁界のふるまい(電界と磁界の関係)を示した方程式です。

#### ☞ 印加

インパルス波(電圧)を供試体にかけることを印加と言います。

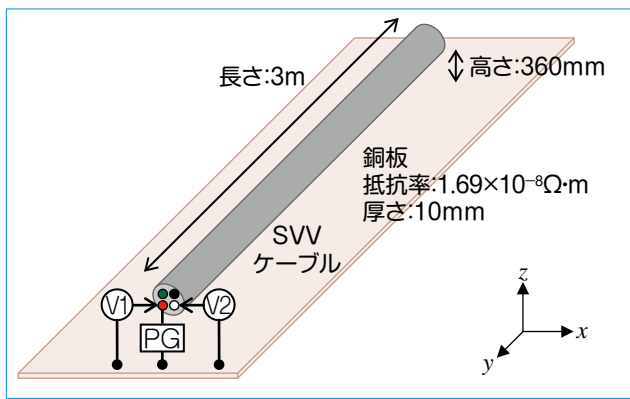


図3 導電性・誘導性サージの実験構成図

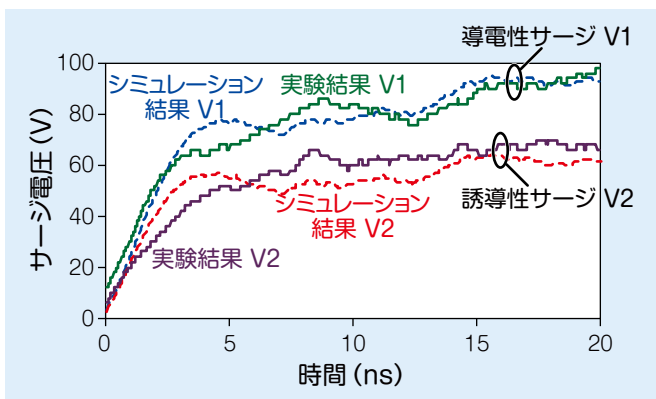


図4 実験結果とシミュレーション結果の比較

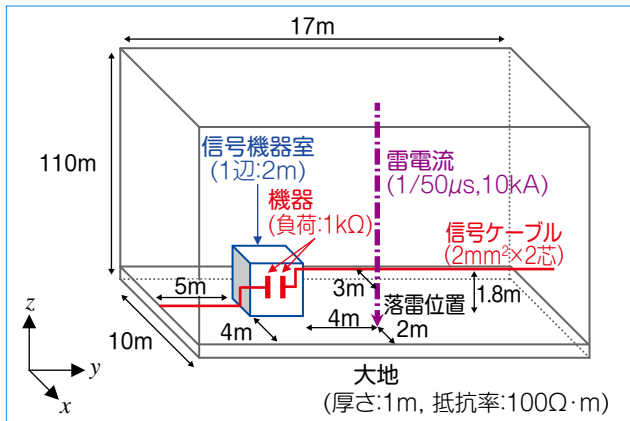


図5 解析モデル

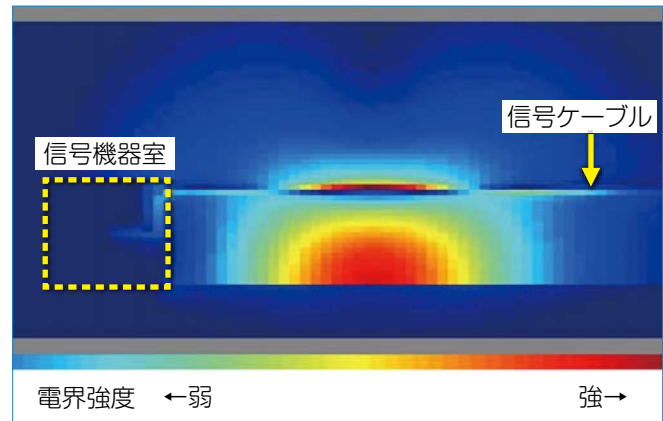


図6 シミュレーション結果(電界分布)の例

図3の導電性・誘導性サージの実験構成図に示すように、SVVケーブルの長さは3m、SVVケーブルの敷設高さは360mmです。実験では、大地(地面)を簡易に模擬するため、銅板を使用しました。また、パルスジェネレーター(PG)より印加したインパルス波形は、パルス幅 $1\mu\text{s}$ 、電圧100Vです。SVVケーブルの印加芯線(赤芯線)および誘導芯線(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ました。

一方、FDTD法によるシミュレーションでは、解析対象空間を $x=0.5\text{m}$ 、 $y=4\text{m}$ 、 $z=0.7\text{m}$ とし、 $\Delta x=2\text{mm}$ 、 $\Delta y=5\text{mm}$ 、 $\Delta z=2\text{mm}$ のセルに分割し、解析を行いました。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ました。

実験において大地を模擬した銅板

は、抵抗率 $1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 、厚さ10mmとして解析を行い、解析対象空間の境界面の条件は、6面とも吸収境界(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)としました<sup>1)</sup>。

SVVケーブルの1芯にインパルス波形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シミュレーション結果の比較を図4に示します。図4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シミュレーション結果がおおむね一致していることが見て取れます。以上により、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をシミュレーションできることを確認しました<sup>4)</sup>。

### 信号機器室の耐雷性能評価

FDTD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電圧の解析を行いました。解析

モデルを図5に示します。解析対象空間を $x=10\text{m}$ 、 $y=17\text{m}$ 、 $z=110\text{m}$ とし、 $\Delta x=2\text{mm}$ 、 $\Delta y=5\text{mm}$ 、 $\Delta z=2\text{mm}$ のセルに分割し、解析を行いました。

実際の信号機器室の壁は、鉄筋メッシュ構造となっていますが、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ました。また、実際の機器室は建屋の床面全体が地面と接して(接地されています)いますが、解析モデルでは、建屋床面の四隅において、大地と接地抵抗 $1\Omega$ で接地されているものとしてしました。機器室内の信号機器については、 $1\text{k}\Omega$ の抵抗で模擬しました。解析モデル中の信号ケーブルは、SVVケーブル( $2\text{mm}^2 \times 2$ 芯)を模擬し、芯線半径0.9mm、芯線間隔4mmとし、また、大地は、厚さを1mとし、首都圏における標準的な大地抵抗率である $100 \Omega \cdot \text{m}$ を採用しました。

シミュレーションでの雷電流波形は、波頭長/波尾長(☞参照)が $1/50$

$\mu$ s, 電流波高値を10kAとし, 落雷位置は, 極端なケースですが, 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離れた地点としました。

上記の解析モデルを用いてシミュレーションにより求めた解析対象空間に生じる電界の分布の例を図6に示します。図6より, 落雷時にどこに強い電界が発生するのかを把握することができます。このように, 鉄道信号システムへの雷サージ影響をシミュレーションにより可視化することができます。

次に, 雷害対策として使用されている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に関するシミュレーション結果を示します。図7(a)に示すように, 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7(b)に示すように, 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)での解析を行いました。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1M $\Omega$ , 800V以上の場合は1 $\Omega$ の抵抗を持つように設定しています。また, 一点接地方式の解析では, 保安器の接地抵抗を10 $\Omega$ としています。シミュレーションでは, 機器室内信号機器に発生する雷サージ電圧

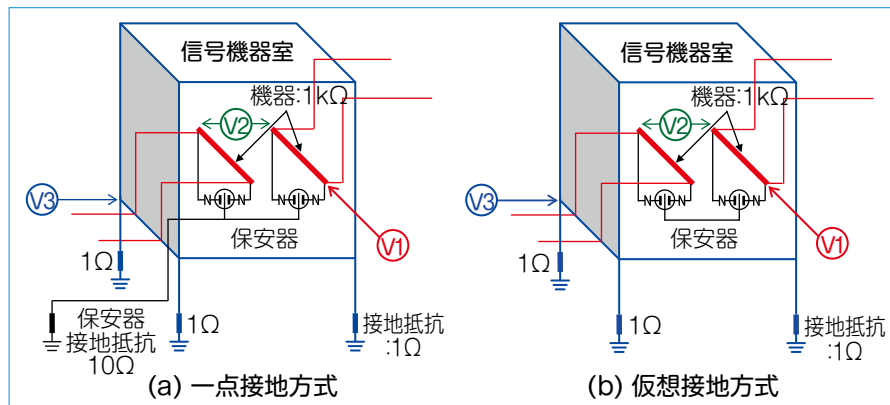


図7 保安器の施工方式

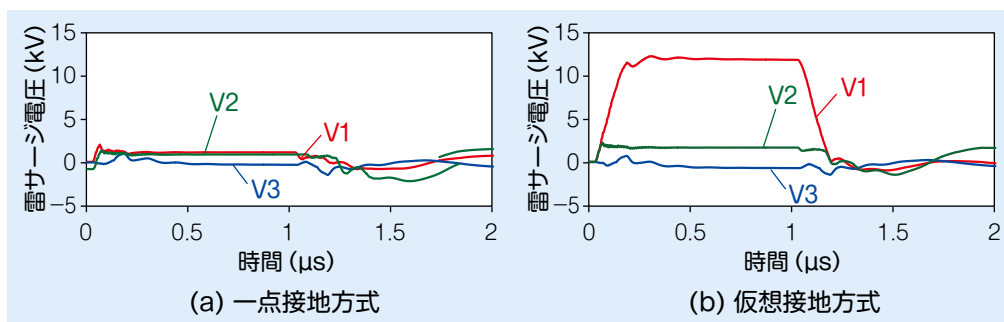


図8 シミュレーション結果

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を計算しました。

一点接地方式でのシミュレーション結果を図8(a)に, 仮想接地方式での結果を図8(b)に示します。図8(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ます。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取れます<sup>4)</sup>。

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るとともに, 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ると言えます。このように, シミュレーションにより雷害対策の効果を評価することができます。

### おわりに

本稿では, 鉄道信号システムへの雷サージ影響の可視化や雷害対策の効果検証のために実施したシミュレーションについて紹介しました。今後も実験とシミュレーションを併用して, 鉄道信号システムの雷害対策強化に関する研究を進めて行きます。RRR

### 文献

- 1) 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, (社)電気学会, 2008
- 2) 宇野亨: FDTD法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998
- 3) 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
- 4) 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

### 波頭長 / 波尾長

波頭長とは, 雷電流波形の立ち上がり時間であり, 波頭長が短いほど, 急峻な波形となります。波尾長とは, 雷電流値が50%まで低下する立ち下がり時間のことであり, 波尾長が長いほど, エネルギーの大きな雷と言えます。このように, 波頭長と波尾長を「/ (スラッシュ)」で結んで雷電流波形を示します。