

## 踏切設備の雷サージ解析モデルの構築

新井 英樹\*      藤田 浩由\*  
小野 雄人\*      渡辺 郁夫\*\*

### Development of a Lightning Surge Calculation Model on Railway Level Crossing

Hideki ARAI      Hiroyuki FUJITA  
Yuto ONO      Ikuo WATANABE

The development of the effective and economical lightning protection measures is very important for the railway signalling systems because the lightning damages cause the disruption of the railway transportation systems. This paper proposes a calculation model of the lightning overvoltages on the railway level crossing controller. The calculation model consists of the surge propagation model along the rails and the equivalent circuit model of equipment. The authors indicated the validity of the calculation model by comparing with the results of the field test. This model is applicable to the quantitative estimation of lightning protection measures for the railway signalling equipment.

キーワード：雷サージ，雷サージ解析モデル，雷害対策，接地，踏切設備

#### 1. はじめに

電子機器の汎用低廉化が進むにつれ、これら電子機器の信号設備への導入が進むと予想される。一方、電子機器は雷サージに対して脆弱であり、信号設備における回路の焼損やシステム停止といった雷被害が問題となっている。社会の鉄道システムに求めるアベイラビリティが高まっていることを鑑みると、雷害による列車の運行停止・遅延を極力防ぐ必要があり、そのための適切な雷害対策の確立が求められている。

これまで筆者らは、実験的評価に基づく効果的な雷害対策を提案してきたが<sup>1)</sup>、現状、効果的な雷害対策を選定するためには、比較的大規模な実験やフィールド試験を行う必要がある。また、実験であるため時間と経費がかかるとともに、接地抵抗値や大地抵抗率といった条件の違いが対策効果にもたらす影響については、詳細な分析ができないという問題もある。

本研究では、信号設備の中でも雷害発生件数の多い踏切設備を対象とし、雷害発生要因となる雷サージ電圧・電流を計算により求めることが可能な雷サージ解析モデルについて検討した。本稿では、雷サージ解析モデルの構成、フィールド試験結果との比較によるモデルの妥当性、そしてシミュレーションによる雷害対策効果の定量的評価結果について述べる。

#### 2. 信号設備の雷害発生状況

あるJR会社の平成16～20年度における信号設備別の雷害発生割合を図1に示す。なお、図1は、平成16～20年度に信号設備で発生した雷害件数の総数を100%として示している。図1より、信号設備のうち踏切設備における雷害発生率が極めて高いことがわかる。さらに、踏切設備の中でも始動点用踏切制御子の雷害発生件数が過半数を占めると言われている。

以上のような信号設備の雷害発生状況を踏まえるとともに、踏切設備は電源線、制御線、レールと接続され、信号設備の典型的な構成を示していることから、本研究では踏切設備を対象とし、雷害発生要因の解明ならびに雷害対策効果の定量的評価に資する雷サージ解析モデルの検討を行った。

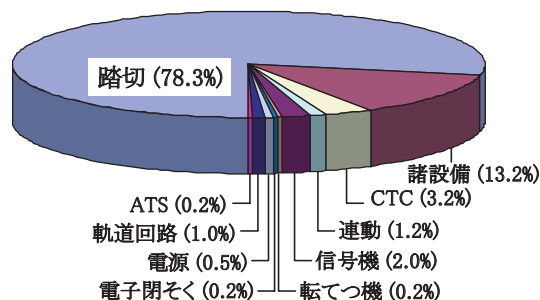


図1 信号設備別の雷害件数割合（平成16～20年度）

#### 3. 踏切設備の雷サージ解析モデルの検討

踏切設備は、レール近傍に設置されるとともに、踏切

\* 信号通信技術研究部（信号）

\*\* 前 信号通信技術研究部

特集：信号通信技術

制御子はケーブルを介してレールと直接接続される。そのため、踏切設備への雷サージ侵入経路の一つとしてレールを想定することができる。よって、レール自体の雷サージ伝搬特性を明らかにすることが重要と言える。

一方、レールは地表面上に置かれた裸導体であり、他産業分野の電気設備では見られない特殊な設置形態の導体である。また、レールのような導体を対象とした雷サージ伝搬特性に関する検討例は極めて少ない。

そこで、踏切設備の雷サージ解析モデルを検討するにあたり、まず、レールの雷サージ伝搬特性に関する実験的検討ならびにモデル化を行うこととした。その次に、踏切設備を構成する機器の等価回路モデルについて検討し、レールの雷サージ伝搬モデルとの接続を行うことにより、踏切設備の雷サージ解析モデルを構築するアプローチとした。

3.1 レールの雷サージ伝搬モデル

3.1.1 雷サージ伝搬特性に関する実験的検討

レールの雷サージ伝搬特性を明らかにするために、フィールド試験を実施した。フィールド試験では、実際に敷設されているレールにステップ波電流を印加した時の電流・電圧特性より、雷サージ伝搬特性の重要なパラメータであるサージインピーダンスおよびサージ伝搬速度を求めた<sup>2)</sup>。また、レールの雷サージ伝搬特性に大地抵抗率が与える影響について明らかにするために、異なる大地抵抗率を示す3箇所フィールド試験を実施した。各試験区間の大地抵抗率および試験に用いたレール長を表1に示す。なお、各試験区間におけるレールの設置形態は、いずれもバラスト道床の木まくらぎ上である。また、フィールド試験の際、外来からのレールへの誘導ノイズを極力減らすために、各試験区間とも非電化の単線区間を選定した。

レールのサージインピーダンスと対地間サージ伝搬速度を求めるための試験概略図を図2に示す。

図2に示すように、試験レールの両端にはレール絶縁を挿入し、隣接レールとは絶縁した。パルス発生器(PG)から100Ωの抵抗を介して、送端側の一方のレール(図2の例ではレール1)にステップ波電流を印加した。その時、レールに流れる電流 $I$ 、印加側レールの対地間電圧 $V_s$ および誘導側レールの対地間電圧 $V_m$ をそれぞれCT(Current transformer)および電圧プローブで測定した。また、それらセンサから得られる波形データをデジタル

表1 試験区間の条件

| 試験区間 | 大地抵抗率 (Ω・m) | 試験レール長 (m) |
|------|-------------|------------|
| A    | 1,043       | 329        |
| B    | 534         | 293        |
| C    | 146         | 50         |

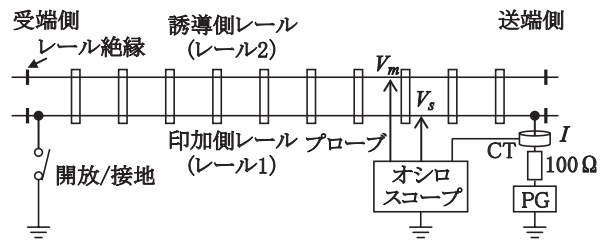
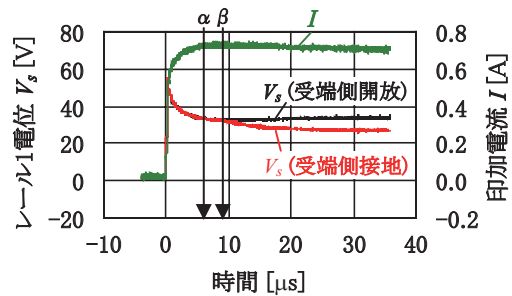
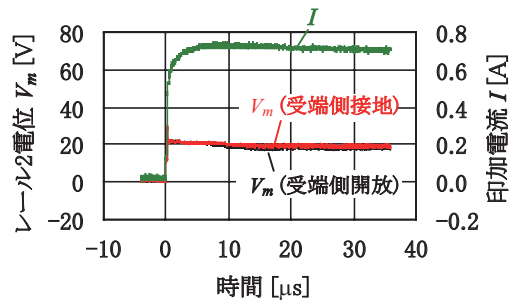


図2 試験概略図



(a) 印加側レール



(b) 誘導側レール

図3 試験区間Bでの測定波形

オシロスコープに記録した。

なお、レールにステップ波電流を印加する際、受端側において印加側レールを接地した場合と開放した場合のそれぞれについて測定を実施した。これは、受端側接地／開放時における印加側レールの対地間電圧波形に差異を生じさせることにより、送端側より伝搬してきたサージの受端側における反射を明確にし、サージの往復伝搬時間の測定を容易とするためである。

表1に示す試験区間Bで得られたレール1への印加電流 $I$ の波形、印加側レールの対地間電圧(レール1電位) $V_s$ の波形、そして誘導側レールの対地間電圧(レール2電位) $V_m$ の波形を代表例として図3に示す。

ここで、レールのサージ伝搬速度とレールの自己および相互サージインピーダンスの算出法について説明する。図3(a)に示すように、印加側レールの受端側を接地あるいは開放した場合には、印加側レールの対地間電圧 $V_s$ の波形が時刻 $\beta$ より分かれ始めるのがわかる。受端側を接地した場合には負反射を示し、開放した場合には正反射を示している。すなわち、時刻 $\beta$ は、レールの送端側から伝搬してきたサージが、受端側で反射し、送端側に戻ってきた時刻である。よって、時刻 $\beta$ までの時間

がレールにおけるサージ往復伝搬時間となり、既知であるレール長よりサージ伝搬速度を求めることができる。

また、サージが往復伝搬する時刻  $\beta$  までの間に電流、電圧波形が安定した時間帯が見られる。具体的には、図 3 (a) に示す時刻  $\alpha$  と時刻  $\beta$  の間の時間帯である。この時間帯は、レール上をサージが往復伝搬する前であるため、レール長の影響を受けない時間帯である。よって、この時間帯における印加側レールの対地間電圧  $V_s$  を印加電流  $I$  で除したものが、レールの自己サージインピーダンスとなる。同様に、この時間帯における誘導側レールの対地間電圧  $V_m$  を印加電流  $I$  で除したものが、レールの相互サージインピーダンスとなる。

同様の測定をレール 2 にステップ波電流を印加した場合についても実施することにより、2 本のレールのサージインピーダンス行列を求めることが可能となる<sup>3)</sup>。

上述した算出法に基づき、大地抵抗率がそれぞれ異なる試験区間で得られたレールのサージインピーダンス行列と対地間サージ伝搬速度を表 2 に示す。

表 2 より、レールのサージインピーダンスは、大地抵抗率が高い箇所に敷設されているレールの方が、大きくなる傾向を示すことがわかる。一方、レールの対地間サージ伝搬速度は、大地抵抗率が高い箇所に敷設されているレールの方が、遅くなる傾向を示すことがわかる。なお、架空線と比較すると、レールのサージインピーダンスは極めて小さく、サージ伝搬速度は極めて遅いと言える<sup>3)</sup>。これは、レールが大きなアドミタンスを有する導体であることに起因する。

### 3.1.2 レールの雷サージ伝搬モデルの構成

3.1.1 項で述べたレールの雷サージ伝搬特性に関するフィールド試験結果を踏まえて、それらを反映できる EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) を用いたレールの雷サージ伝搬モデルの検討を行った。EMTP は、1966 年に米国政府エネルギー省ボンネビル電力庁 (BPA) で開発が進められた電力系統解析の世界的標準プログラムである<sup>4)</sup>。また、EMTP は、米国の情報公開法に基づき、使用料がかからないプログラムである。

EMTP では、大地とは絶縁された架空線路モデル<sup>4)</sup> が既に用意されているが、レールのような大地との間に漏

れコンダクタンスや漏れキャパシタンスを有する線路モデルは用意されていない。よって、レールの雷サージ伝搬モデルでは、既存の架空線路モデルに表 3 に示すレールの幾何学的配置とレールの材質から決まる電気的定数を反映させるとともに<sup>5)</sup>、それに対し、漏れコンダクタンスや漏れキャパシタンスを付加する構成とした。

一方、レールは分布定数線路として電気回路で表現できることが知られており、図 2 に示すような送端側と受端側で区切られた箇所は、レールという分布定数線路を含む 2 端子対回路と見なすことができる。よって、1 本のレールと大地間ならびに 2 本のレール間のそれぞれにおける受端側短絡/開放インピーダンスを測定し、(1)~(4)式より、レールの分布定数(抵抗  $R$ 、インダクタンス  $L$ 、漏れコンダクタンス  $G$ 、漏れキャパシタンス  $C$ ) を求めることができる<sup>6)</sup>。

$$Z_k(\omega) = \sqrt{Z_o(\omega) \cdot Z_s(\omega)} \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi f$$

ここに、 $Z_k$ : 特性インピーダンス ( $\Omega$ )、 $Z_o$ : 受端側開放インピーダンス ( $\Omega$ )、 $Z_s$ : 受端側短絡インピーダンス ( $\Omega$ )、 $f$ : 周波数 (Hz)

$$\Gamma(\omega) = \tanh^{-1} \sqrt{Z_s(\omega)/Z_o(\omega)} / l \quad (2)$$

ここに、 $\Gamma$ : 伝搬定数 (1/m)、 $l$ : レール長 (m)

$$Z(\omega) = Z_k(\omega) \cdot \Gamma(\omega) \quad Y(\omega) = \Gamma(\omega) / Z_k(\omega) \quad (3)$$

ここに、 $Z$ : 線路インピーダンス ( $\Omega/m$ )、 $Y$ : 線路アドミタンス (S/m)

$$R(\omega) = Z(\omega) \cos \theta_z \quad L(\omega) = Z(\omega) \sin \theta_z / \omega$$

$$G(\omega) = Y(\omega) \cos \theta_y \quad C(\omega) = Y(\omega) \sin \theta_y / \omega \quad (4)$$

ここに、 $R$ : 抵抗 ( $\Omega/m$ )、 $L$ : インダクタンス (H/m)、 $G$ : コンダクタンス (S/m)、 $C$ : キャパシタンス (F/m)、 $\theta_z$ 、 $\theta_y$ : 線路インピーダンスおよび線路アドミタンスの位相角 (rad)

表 1 に示す試験区間 C において、レール-大地間ならびにレール間の  $Z_o$ 、 $Z_s$  をそれぞれ測定し、(1)~(4)式により得られた漏れコンダクタンスと漏れキャパシタンスの測定結果例を図 4 に示す。

なお、図 4 に示した漏れコンダクタンスおよび漏れキャパシタンスは、実際には、図 5 に示すような回路に

表 2 レールのサージインピーダンスと伝搬速度

| 試験区間                                 | サージインピーダンス ( $\Omega$ )                            | サージ伝搬速度 (m/ $\mu$ s) |
|--------------------------------------|--|----------------------|
| A<br>( $\rho=1,043 \Omega \cdot m$ ) | $\begin{pmatrix} 57 & 43 \\ 43 & 56 \end{pmatrix}$ | 55                   |
| B<br>( $\rho=534 \Omega \cdot m$ )   | $\begin{pmatrix} 45 & 28 \\ 28 & 43 \end{pmatrix}$ | 70                   |
| C<br>( $\rho=146 \Omega \cdot m$ )   | $\begin{pmatrix} 40 & 14 \\ 14 & 38 \end{pmatrix}$ | 92                   |

表 3 レールの幾何学的配置と材質の電気的定数

| 項目          | 定数 (50N レール)                           |
|-------------|--|
| レールの等価円柱体半径 | 93.9 (mm)                              |
| レール間距離      | 1,067 (mm)                             |
| レールの設置高さ    | 地表面                                    |
| 固有抵抗        | $20.3 \times 10^{-8} (\Omega \cdot m)$ |
| 比透磁率        | 70                                     |

特集：信号通信技術

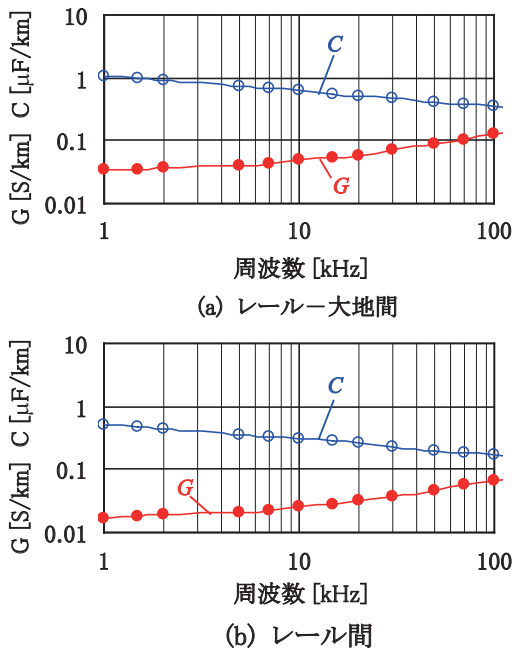


図4 試験区間Cにおけるレールの漏れコンダクタンスGと漏れキャパシタンスCの測定結果例

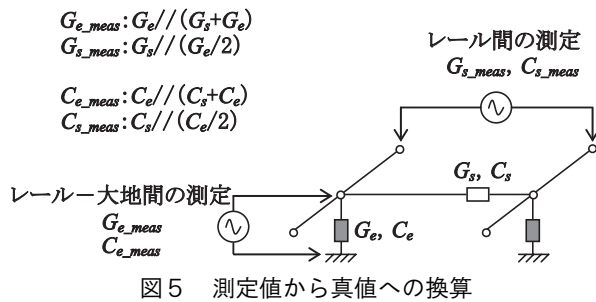


表4 モデルに適用したアドミタンス定数

| 周波数 (kHz) | レール-大地間                          |              | レール間                             |              |
|-----------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|
|           | $G_e$ ( $\mu\text{S}/\text{m}$ ) | $C_e$ (nF/m) | $G_s$ ( $\mu\text{S}/\text{m}$ ) | $C_s$ (nF/m) |
| 100       | 117.46                           | 0.31         | 8.67                             | 0.08         |

対するものである。よって、図4 (a) に示したレール-大地間の測定値を、あらためてそれぞれ  $G_{e\_meas}$ ,  $C_{e\_meas}$  とすると、(5)式より、図5に示すレール-大地間に存在する  $G_e$  ならびに  $C_e$  を算出できる。同様に、図4 (b) に示したレール間の値である  $G_{s\_meas}$ ,  $C_{s\_meas}$  から図5に示すレール間に存在する  $G_s$ ,  $C_s$  を(5)式より算出できる。

$$\begin{aligned}
 G_e &= \frac{2G_{e\_meas} \cdot G_{s\_meas}}{4G_{s\_meas} - G_{e\_meas}} \\
 G_s &= \frac{4G_{s\_meas}^2 - 2G_{e\_meas} \cdot G_{s\_meas}}{4G_{s\_meas} - G_{e\_meas}} \\
 C_e &= \frac{2C_{e\_meas} \cdot C_{s\_meas}}{4C_{s\_meas} - C_{e\_meas}} \\
 C_s &= \frac{4C_{s\_meas}^2 - 2C_{e\_meas} \cdot C_{s\_meas}}{4C_{s\_meas} - C_{e\_meas}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

以上のように求めたレール-大地間ならびにレール間の漏れコンダクタンスと漏れキャパシタンスを既存の架空線路モデルに付加した。なお、雷サージに含まれる主要な周波数成分は100kHzとされていることから、付加するアドミタンスは、全て100kHzにおける定数を適用した。モデルへの適用定数を表4に示す。

3.1.3 レールの雷サージ伝搬モデルの妥当性評価

3.1.2項で述べたレールの雷サージ伝搬モデルを用いて、図2に示したフィールド試験を模擬し、電流・電圧特性に関する計算を行った。また、レールの雷サージ伝搬モデルの妥当性評価のため、表1に示した試験区間Cにおけるフィールド試験結果との比較を行った。なお、計算の際の大地抵抗率は、試験区間Cと同じ  $146 \Omega \cdot \text{m}$  としている。レールの雷サージ伝搬モデルによる計算結果を図6に、フィールド試験結果を図7に示す。

図6と図7を比較すると、完全な一致にまで至っていないものの、概ね一致していると言える。また、3.1.1項で述べたように、電流、電圧波形から求めることができるサージインピーダンスならびにサージ伝搬速度に関しても、雷サージ伝搬モデルによる計算結果は、フィールド試験結果と概ね一致した。

以上より、雷サージ伝搬モデルは、フィールド試験結果と概ね一致したことから、妥当であると言える。

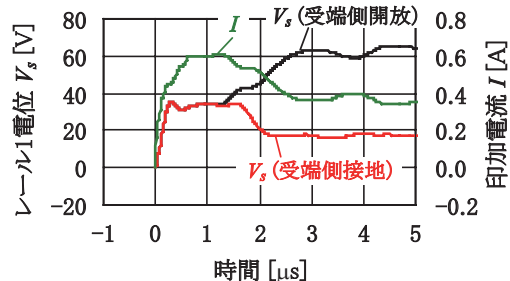


図6 レールの雷サージ伝搬モデルによる計算結果

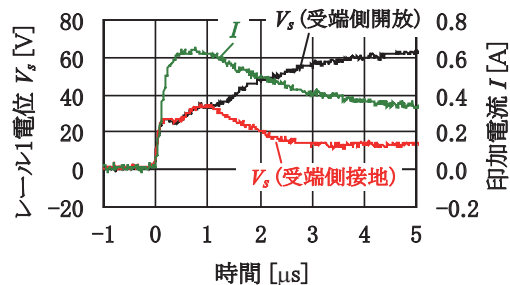


図7 フィールド試験結果 (試験区間C)

3.2 機器の等価回路モデル

ここでは、踏切設備を構成する機器のうち、雷害発生件数が多いとされる始動点用踏切制御子 (HC形) を代表例として、等価回路モデルの作成手法について述べる。

機器の等価回路モデルは、機器の入力インピーダンスを測定することにより、作成可能であることが知られている<sup>7)</sup>。本研究では、HC形踏切制御子の各端子と筐体間

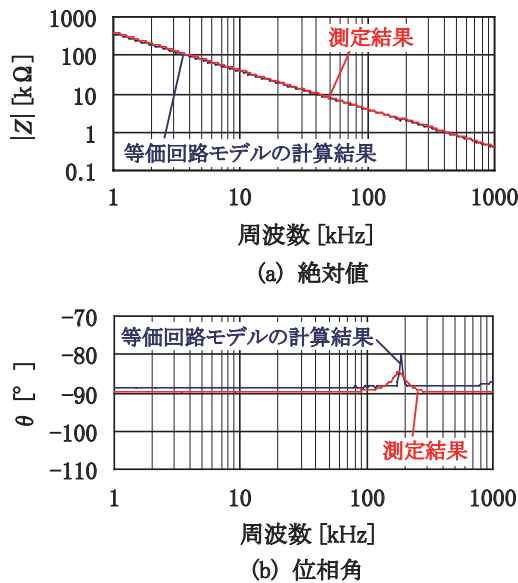


図8 軌道（送）一端子と筐体間の入力インピーダンス

表5 HC形踏切制御子の等価回路モデルの例

|  |   |
|--|---|
|  | <p>R=26k Ω<br/>C1=12pF<br/>L1=62mH<br/>C0=381pF</p> |
|--|---|

の入力インピーダンスを測定し、測定結果に対し、最小2乗近似となるような等価回路フィッティングを行い、等価回路モデルに適用する各素子の定数を算出した。なお、レールの雷サージ伝搬モデルと同様に、100kHzにおける定数をモデルに適用した。一例として、HC形踏切制御子の軌道（送）一端子と筐体間の入力インピーダンスの測定結果を図8に示す。また、図8中には、表5に示した等価回路モデルによる計算結果も併せて示している。

上記手法により、HC形踏切制御子の他の端子についても等価回路モデルを作成した。

### 3.3 踏切設備の雷サージ解析モデル

3.2節で述べたHC形踏切制御子の等価回路モデルを3.1節で述べたレールの雷サージ伝搬モデルに接続することにより、踏切設備の雷サージ解析モデルを構築した。本モデルでは、落雷の大きさ（雷撃電流波高値や波形）、踏切設備が設置されている箇所の大地抵抗率、保安器の取り付け箇所、そして接地抵抗値等を入力パラメータとし、踏切設備に発生する雷サージ電圧や侵入する雷サージ電流の計算結果を出力する。

本研究では、信号設備の中でも雷害発生件数の多い踏切設備を対象にした雷サージ解析モデルの検討を行ったが、踏切設備は信号設備の典型的な構成を示していることから、モデル化の考え方は、他の信号設備に対しても適用できるものである。

## 4. フィールド試験による踏切設備の雷サージ解析モデルの妥当性検証

### 4.1 フィールド試験

3章で述べた踏切設備の雷サージ解析モデルの妥当性検証のため、試験用の踏切設備を現場に仮設し、フィールド試験を実施した。なお、本フィールド試験は、表1の試験区間Bにて実施した。フィールド試験の構成概略図を図9に示す。

図9に示すように、試験レールの両端には、レールのサージインピーダンス相当の整合抵抗を挿入し、レール長の影響を排除した<sup>3)</sup>。また、HC形踏切制御子には、実設備と同様、SVVケーブルを介して、IV電源ならびに反応リレーを負荷として接続した。

フィールド試験では、インパルス発生器(IG)から400Ωの抵抗を介して、HC形踏切制御子の軌道（送）一端子ならびに軌道（受）一端子が接続されるレールに雷サージ電流を印加した。なお、印加した雷サージ電流は、波頭長/波尾長に関して、実際の雷撃電流波形を模擬した1/100μsとし、波高値は3Aに設定した。その際、HC形踏切制御子各部と遠方零電位点との間に発生する雷サージ電圧波形をデジタルオシロスコープに記録した。

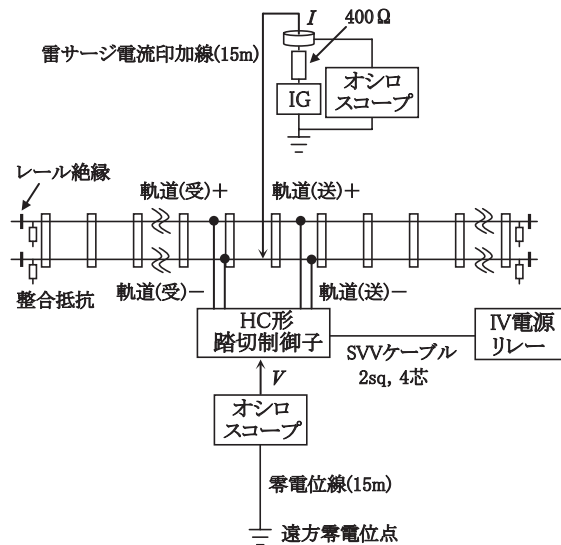


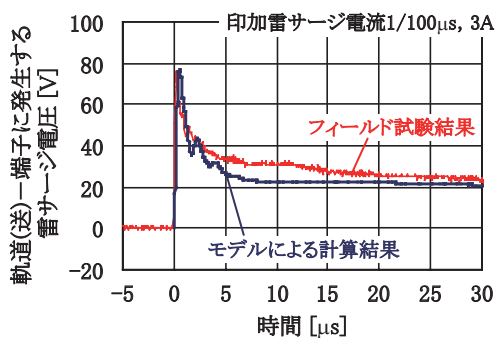
図9 フィールド試験構成概略図

### 4.2 踏切設備の雷サージ解析モデルの妥当性評価

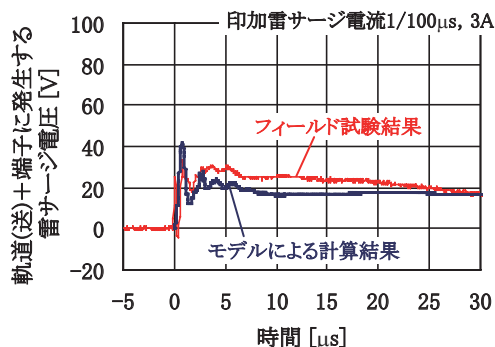
踏切設備の雷サージ解析モデルを用いて、図9に示したフィールド試験を模擬し、HC形踏切制御子に発生する雷サージ電圧の計算を行った。なお、計算の際の大地抵抗率は、試験区間Bと同じ534Ω・mとしている。

一例として、HC形踏切制御子の軌道（送）一端子ならびに軌道（送）+端子に発生する雷サージ電圧の計算結果とフィールド試験結果を比較したものを図10に示す。

図10に示すように、両者の雷サージ電圧波形は、概ね一致しており、特に雷サージが機器の損傷に影響を及ぼ



(a) 軌道(送)一端子



(b) 軌道(送)+端子

図10 踏切設備の雷サージ解析モデルの妥当性

す波頭部分（波形の立ち上がり部分）に関して，良好な一致が見られる。以上より，踏切設備の雷サージ解析モデルは妥当であると言える。

### 5. シミュレーションによる雷害対策の定量的評価

踏切設備の雷サージ解析モデルを用いた雷害対策効果の定量的評価の一例として，図11に示す提案対策について，HC形踏切制御子に発生する雷サージ電圧を計算し，雷害対策保護レベルの評価を行った。なお，図11に示す提案対策は，実験的に効果が認められた対策である<sup>1)</sup>。

シミュレーションでは，図9に示したフィールド試験を模擬するとともに踏切制御子用保安器を接地する際の接地抵抗値をパラメータとした。また，4章のフィールド試験では現用機器への影響を危惧し，レールに印加する雷サージ電流波高値を3Aとしたが，計算では400A印加とした。雷サージ解析モデルによる提案対策の効果のシミュレーション結果を図12に示す。なお，図12には，現状の雷害対策の計算結果も併せて示している。

図12から，提案対策の実施により，同じ地点に同じ大きさの落雷があった場合でも，現状対策に比べ機器に発生する雷サージ電圧を抑制できることがわかる。また，提案対策（20Ω接地）では，現状対策と比較し，発生雷サージ電圧を約1/2にできることから，雷害対策の保護レベルを2倍に向上させたことと等価となる。なお，図12に示したシミュレーションによる提案対策の効果は，

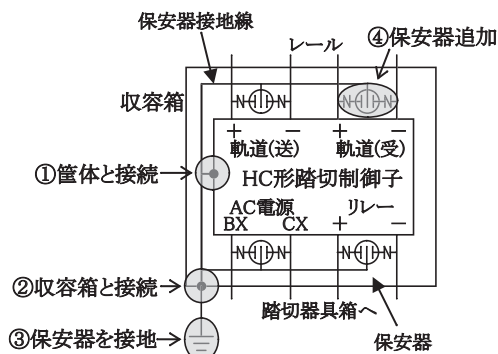


図11 提案雷害対策

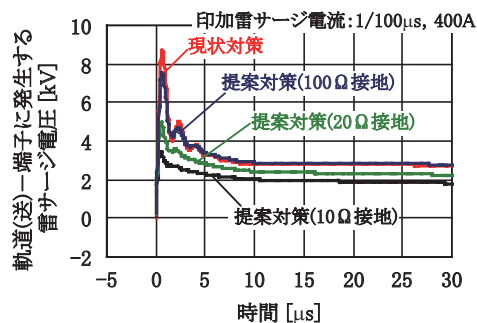


図12 シミュレーションによる雷害対策の評価

文献1)で述べた実験による効果検証結果と一致する。さらに，文献1)で述べたように，落雷時に踏切設備に発生する雷サージ電圧の累積頻度分布を踏まえると，提案対策（20Ω接地）により，雷被害を現状の約1/5に低減できると推定される。

### 6. おわりに

本稿で述べた雷サージ解析モデルにより，シミュレーションによる雷害対策効果の定量的評価が可能となり，雷害対策の実施判断の一助になるものと期待される。

### 文献

- 1) 新井英樹，土師将人，藤田浩由：落雷時の大地/レール電位上昇による信号設備への影響と対策，鉄道総研報告，Vol.23, No.1, pp.23-28, 2009
- 2) 雨谷昭弘：分布定数回路論，コロナ社，1990
- 3) H. Arai, H. Matsubara, K. Miyajima, S. Yokoyama and K. Sato: "Experimental Study of Surge Propagation Characteristics of Rail and Lightning Overvoltages on Level Crossing", IEEJ Trans. PE, Vol.123, No.11, pp.1307-1312, 2003.
- 4) 日本EMTP委員会：ATP Rule Book，2008
- 5) 持永芳文：電気鉄道工学，エース出版，1995
- 6) 河辺一：軌道回路計算法，信号保安協会，1958
- 7) A. H. Whitfield: "Transfer Function Synthesis Using Frequency Response Data", Int. J. Control, Vol.43, No.5, pp.1413-1426, 1986.