

シミュレーションによる雷害対策の定量的評価

信号通信技術研究部 信号
主任研究員 新井 英樹

1. はじめに

電子機器の汎用低廉化が進むにつれ、今後も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の増加が問題となっている。雷害による列車の運行停止・遅延は、社会的にも許容されない時代であることから、適切な雷害対策の確立が求められている。

これまで鉄道総研では、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、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。

本発表では、信号設備の中でも雷害発生率の高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紹介する。また、モデルシミュレーションによる雷害対策効果の定量的評価について示す。

2. 踏切設備の雷サージ解析モデル

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と言える。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、レール部分の雷サージ伝搬モデルの検討を行った。その次に、踏切設備を構成する機器のモデル化を行い、レールの雷サージ伝搬モデルと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。

2.1 レールの雷サージ伝搬モデル

計算ツールとして、EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) を用いた。EMTP は、1966 年に米国政府エネルギー省ボンネビル電力庁 (BPA) で開発された電力系統解析の世界的標準プログラムであり、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 には、大地とは絶縁された架空線路モデル (K. C. Lee モデル) が既に用意されているため、レールの雷サージ伝搬モデルでは、既存の K. C. Lee モデルに、レールー大地間やレール間に存在する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。レールの雷サージ伝搬モデルの構成概略図を図 1 に示す。図 1 中の K. C. Lee モデルに、表 1 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た。また、付加するアドミタンスに関しては、図 2 に示すように、フィールド試験により得られたレールー大地間およびレール間のアドミタンスの周波数特性をある程度反映できること、そしてモデルを極力単純化することを考慮して決定した。なお、適用した定数は、フィールド試験で得られた 100kHz における値である。さらに、モデルは計算対象とするレール長を 8 分割にして構成している。これは、分割数が少な過ぎると、

レールのアドミタンスが 1 箇所に対して、集中定数的に付加されてしまうことと、分割数が多過ぎると計算時間を要することを考慮したことによる。

レールの雷サージ伝搬モデルの妥当性検証のため、フィールド試験を実施した。フィールド試験では、図 3 に示すように、送端側の一方のレールに、直角波電流を印加し、その時、レール

に流れる電流 I および印加側レールの対地間電圧 V_s を測定した。レールの雷サージ伝搬モデルによる上記の計算結果とフィールド試験結果の比較を図 4 に示す。

図 4 に示すように、両者の波形が概ね一致していることから、検討したモデルは妥当であると評価できる。

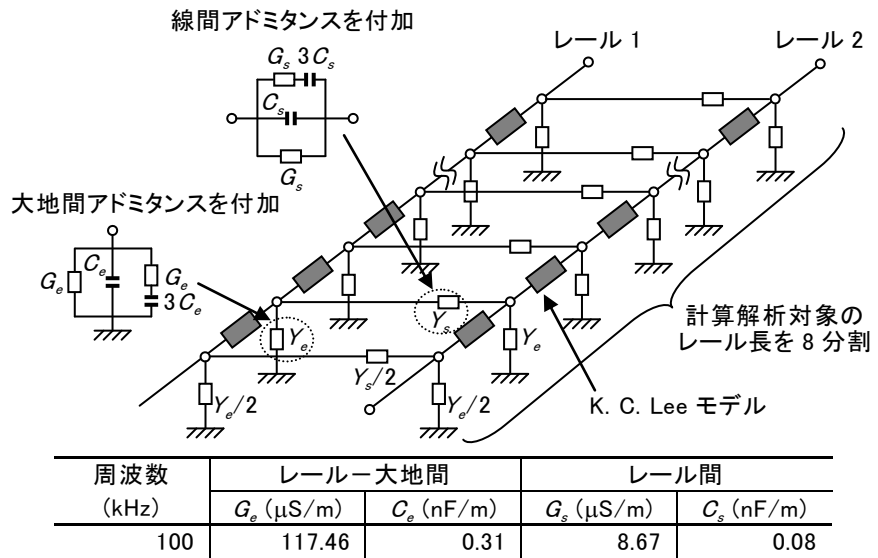
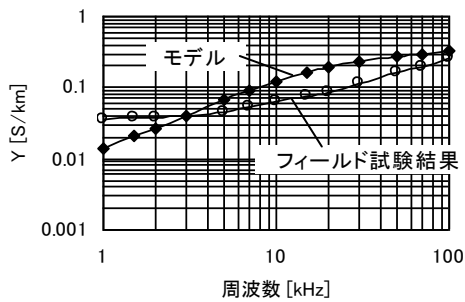


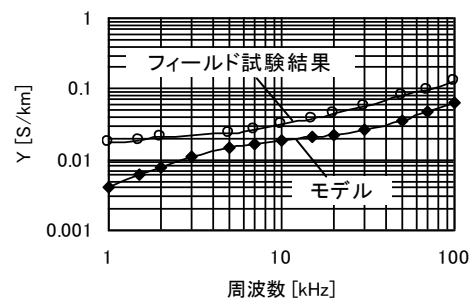
図 1 レールの雷サージ伝搬モデル構成概略図

表 1 レールの幾何学的配置と材質の電気的定数 (50N レール)

| 項目 | 定数 |
|-------------|---|
| 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 | 20.3×10^{-8} ($\Omega \cdot \text{m}$) |
| 比透磁率 | 70 |



(a) レール-大地間のアドミタンス



(b) レール間のアドミタンス

図 2 モデルに適用したアドミタンスの周波数特性

2.2 踏切制御子の等価回路モデル

JR 会社では、踏切設備を構成する機器のうち、踏切制御子の雷害発生率が高い。ここでは、HC 形踏切制御子の等価回路モデルを代表例として示す。

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。測定した

HC 形踏切制御子の各端子と筐体間の周波数-入力インピーダンス特性に対し、最小二乗近似とな

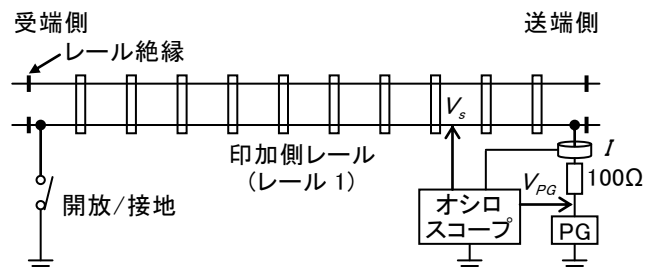


図 3 フィールド試験概略図

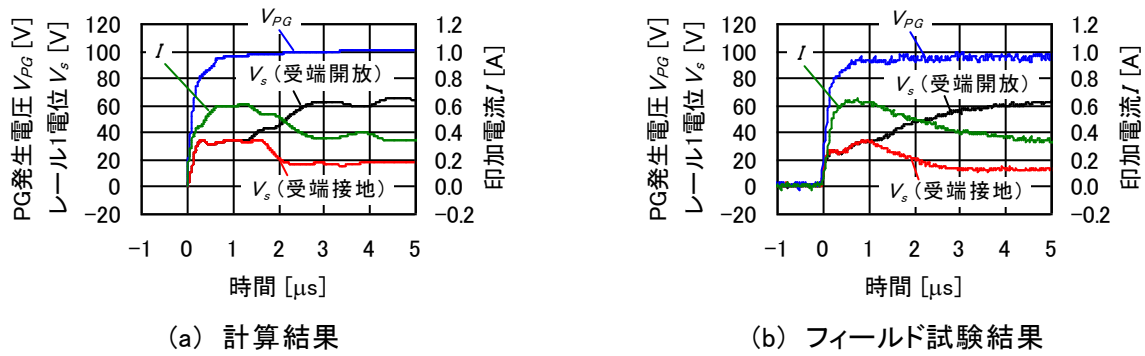


図4 レールの雷サージ伝搬モデルによる計算結果とフィールド試験結果との比較

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。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を測定した結果を図5に示す。また、同図には、HC形踏切制御子の軌道(送)一端子と筐体間の等価回路モデルによる計算結果も併せて示している。

HC形踏切制御子の他の端子についても、上記手法に基づき等価回路モデルを作成した。さらに、2.1節で述べたレールの雷サージ伝搬モデルと接続し、踏切設備の雷サージ解析モデルを構築した。本モデルにより、落雷時において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が可能となる。雷サージ解析モデルでは、落雷の大きさ(雷サージ電流の波高値や波形)、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パラメータとし計算を実行する。なお、本研究では信号設備の中でも雷害発生率の高い踏切設備を対象として雷サージ解析モデルの検討を行ったが、踏切設備は、レール、電源線、制御線、通信線が接続され、信号設備の典型的な構成であると言えるため、ここで示した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。

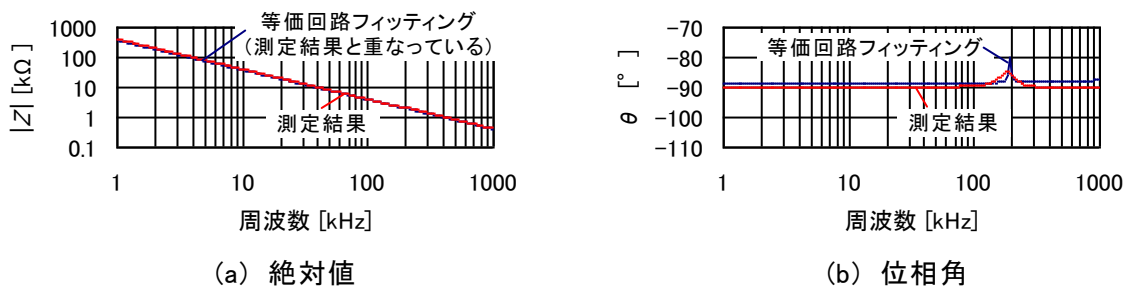


図5 HC形踏切制御子の軌道(送)一端子と筐体間の入力インピーダンス特性

3. 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確認

2章で述べた踏切設備の雷サージ解析モデルの妥当性について検証するため、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。フィールド試験の構成概略図を図6に示す。フィールド試験では、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対し、 $1/100\mu\text{s}$ 、3A(波高値)の雷サージ電流を印加した。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測定した。一例として、HC形踏切制御子の軌道(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の比較を図7に示す。なお、計算の際には、フィールド試験実施箇所の大地抵抗率である $118\Omega\cdot\text{m}$ を適用している。

図7に示すように、両者の波形が概ね一致していることから、踏切設備の雷サージ解析モデルは妥当であると言える。

4. シミュレーションによる雷害対策効果の定量的評価

踏切設備の雷サージ解析モデルによる雷害対策効果の定量的評価の一例として、図8に示す雷害対策を実施した場合の、HC形踏切制御子に発生する雷サージ電圧を計算した。計算結果を図9に示す。なお、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ている。また、図9には、現行対策における計算結果も併せて示している。図9より、提案対策(20 Ω 接地)では、同じ大きさの落雷に対して、HC形踏切制御子に発生する雷サージ電圧を現行対策の約1/2にできることから、保護レベルを2倍に向上できる雷害対策であると評価できる。なお、図8に示した雷害対策については、実験的にも、モデルシミュレーション結果と同じ効果が得られることを確認している。

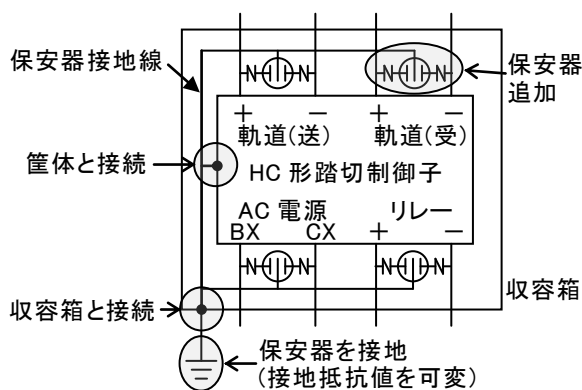


図8 提案雷害対策

5. おわりに

本研究の成果である雷サージ解析モデルにより、実験に拠らず、雷害対策効果を定量的に評価することが可能となり、鉄道事業者における対策実施判断の一助となり得る。

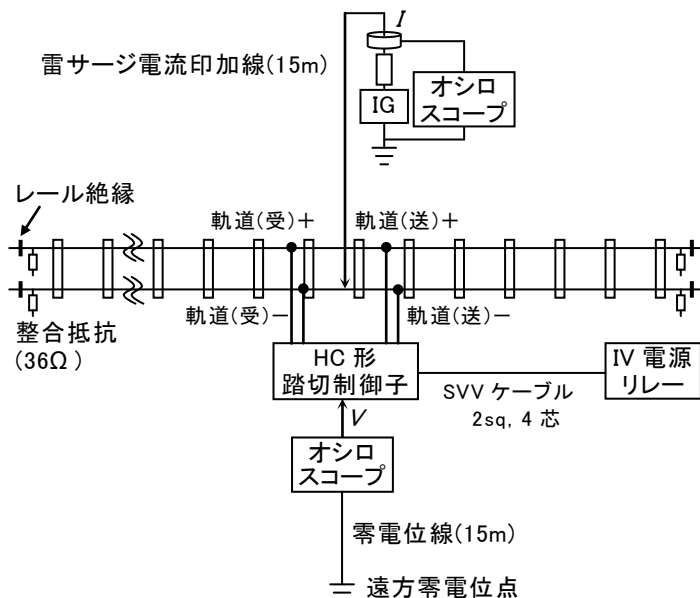


図6 フィールド試験の構成概略図

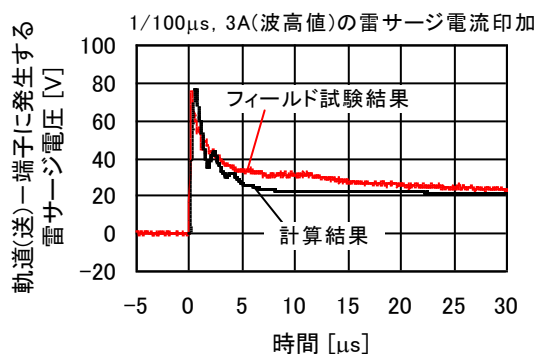


図7 雷サージ解析モデルの妥当性

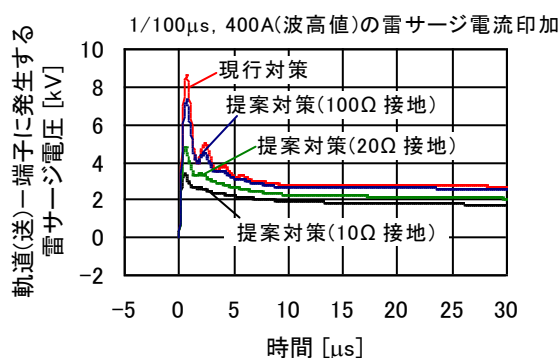


図9 雷害対策効果の定量的評価