

# 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

新井 英樹\* 土師 将人\* 藤田 浩由\*

## An Influence of the Ground/Rail Potential Rise due to Lightning on Railway Signalling Equipments, and its Protection Measures

Hideki ARAI Masato HAJI Hiroyuki FUJITA

Lightning protection measures are required for railway signalling systems because the suspension of operation or delays of train due to failure of signalling systems brought about by lightning may cause social confusion. We carried out the field test to examine an influence of the ground/rail potential rise due to lightning on railway signalling equipments. In addition, we implemented experiments for finding out any suitable countermeasures to suppress lightning overvoltage in the train detector for the railway level crossing system as a typical example of wayside signalling equipment. This paper describes the factors to cause lightning damage and effective lightning protection measures for railway signalling equipments.

キーワード：雷サージ，接地電位上昇，レール電位上昇，信号機器，踏切制御子，雷害対策

### 1. はじめに

信号設備では、IC、LSI等の電子デバイスが用いられるようになり多機能化・小型化が進んでいる。一方、電子デバイスは動作電圧が低いため、雷サージをはじめとする異常電圧・異常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被害が数多く発生しているのが現状である。

しかしながら、信号設備の雷害発生要因に関して、特に落雷に伴い発生する大地やレールの電位上昇が信号設備に与える影響に未解明な部分が多く、十分な対策の検討ができていない。また、対策がどの程度の雷害低減効果をもたらすのか明確になっていないため、対策の実施判断が難しいという状況である。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、信号設備における適切な雷害対策の確立が求められている。

筆者らは、落雷時の接地電位上昇によって生ずる周辺大地の電位分布、接地極間の電位干渉に関する試験を行い、信号設備に与える影響解明と対策検討を行った。また、実際の信号設備の設置環境を考慮して、レール電位上昇による影響試験を実施し、JR会社において雷害発生件数の多い踏切制御子<sup>1)</sup>における雷害発生メカニズムを解明した。さらに、踏切制御子の雷害対策を検討し、試験により効果を検証するとともに、雷害低減効果の推定を行った。本稿では、それらの結果について述べる。

\* 信号通信技術研究部（信号）

### 2. 接地電位上昇による信号設備への影響

落雷時の接地極の電位上昇が、信号設備に及ぼす影響を検討するにあたり、基礎的なデータを得るため、接地極の電位上昇による周辺大地の電位分布を把握する試験を行った。さらに、信号設備の雷害発生メカニズムを解明するために、電力用接地極と信号用接地極間の電位干渉の影響に関する試験を実施した。

#### 2.1 接地電位上昇による周辺大地の電位分布

##### 2.1.1 試験方法

落雷時の接地電位上昇を模擬するために、接地極に対し雷サージ電流を印加した。測定概略を図1、測定条件を表1に示す。

図1に示すように、主接地極に対し、Impulse Generator（以下、IG）を用いて、雷サージ電流を印加した。それにより生ずる主接地極の電位上昇および従接地極の電位上昇を測定した。ここで、従接地極について、主接地極からの距離を変化させて電位上昇を測定した。電位上昇の測定にあたっては、各接地極と遠方零電位点との間に発生する電圧をオシロスコープにより測定した。

また、接地電位上昇に伴う周辺大地の電位分布に寄与する要因を調査するために、表1に示す試験パラメータを設定して、各試験ケースを実施した。表1中の大地抵抗率とは、試験区間の土壌の電気的特性を表し、大地比抵抗測定器を用いて測定を行っている。なお、試験ケースDの大地抵抗率を変化させた試験においては、試験区

特集：信号通信技術

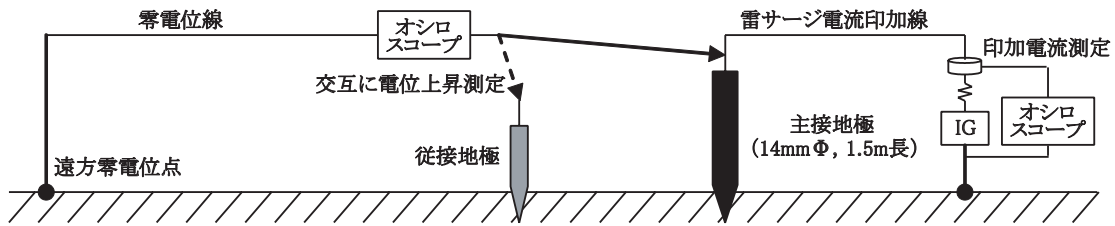


図1 接地電位上昇時の周辺大地の電位分布測定概略図

表1 試験パラメータと試験ケース

試験パラメータ	試験条件
	①主接地極と従接地極間の距離：0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 [m] ②印加雷サージ電流値：20, 40, 80 [A] ③印加雷サージ電流の波頭長：2.5, 8, 15 [μs] ④主接地極の定常接地抵抗：135, 55 [Ω] ⑤大地抵抗率：通常時 194.8 [Ω・m] / 散水時 144.5 [Ω・m]
試験ケース	試験条件
A (印加電流値の影響)	大地抵抗率：194.8 [Ω・m], 主接地極の定常接地抵抗：135 [Ω], 印加雷サージ電流の波頭長：2.5 [μs] 一定 主接地極と従接地極間の距離：0.3～5.0 [m], 印加雷サージ電流値：20～80 [A] 可変
B (印加電流波形の影響)	大地抵抗率：194.8 [Ω・m], 主接地極の定常接地抵抗：135 [Ω], 印加雷サージ電流値：80 [A] 一定 主接地極と従接地極間の距離：0.3～5.0 [m], 印加雷サージ電流の波頭長：2.5～15 [μs] 可変
C (接地極の定常接地抵抗の影響)	主接地極の定常接地抵抗：55 [Ω]に変更 大地抵抗率：194.8 [Ω・m], 印加雷サージ電流の波頭長：2.5 [μs], 印加雷サージ電流値：80 [A] 一定 主接地極と従接地極間の距離：0.3～5.0 [m] 可変
D (大地抵抗率の影響)	大地抵抗率：144.5 [Ω・m]に変更 (主接地極の定常接地抵抗：105 [Ω]に低減した) 印加雷サージ電流の波頭長：2.5 [μs], 印加雷サージ電流値：80 [A] 一定 主接地極と従接地極間の距離：0.3～5.0 [m] 可変

間の土壌に対し、散水することにより大地抵抗率の低減を図った。

2.1.2 試験結果

表1の試験ケースAに関する測定結果を図2に示す。なお、図2の横軸は、従接地極の主接地極からの距離を示しており、0m地点のプロットは、主接地極の電位上昇を表している。また、その他のプロットは、従接地極の電位上昇、すなわち大地電位を表している。

図2に示すように、主接地極に印加する雷サージ電流値（波高値）に応じて、周辺大地（従接地極）の電位分布がほぼ並行に推移していることから、接地極周辺の大地には、接地極に印加される雷サージ電流値に比例した電位上昇が発生することがわかる。

一方、主接地極と従接地極間の電位干渉について見ると、接地極間の離隔を5m以上確保した場合、従接地極の電位は、主接地極の電位の3%未満しか上昇しないことから、ほぼ独立した接地極と見なすことができる。

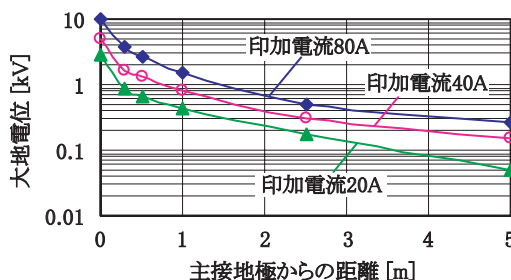


図2 雷サージ電流値の影響（ケースA）

次に、表1の試験ケースBに関する測定結果を図3に示す。いずれの波頭長においても、主接地極に対して、80A(波高値)の雷サージ電流を印加している。なお、図2に示すように、接地極周辺の大地電位上昇は、接地極に印加される雷サージ電流値に比例することから、図3では、主接地極に1A(波高値)の雷サージ電流が印加された時の電位上昇 [V/A] に換算した値を示す。

図3に示すように、主接地極から1m以内の周辺大地に関しては、主接地極に印加される雷サージ電流の波頭長が短いほど、すなわち電流立ち上がり急峻なほど、引き起こされる電位上昇が大きいことがわかる。しかし、主接地極から2.5m以上離れた地点の電位上昇については、雷サージ電流の波頭長の影響が見られなくなる。よって、雷サージ電流波形が急峻なほど、接地極周辺の大地電位分布の傾度が大きくなることから、接地電位上昇時における周辺大地との間の電位差が大きくなると言える。

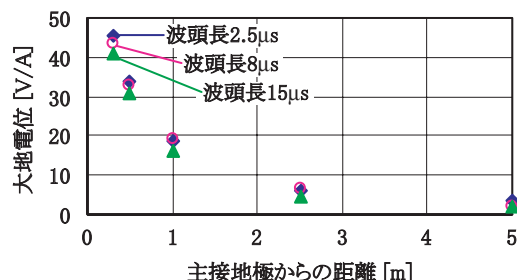


図3 雷サージ電流波形の影響（ケースB）

次に、表1の試験ケースCに関する測定結果を図4に示す。主接地極の定常接地抵抗の低減は、これまで接地棒(14mmφ, 1.5m長)が1本だったのに対し、接地棒3本を接続することにより行っている。主接地極に印加した雷サージ電流は、80A(波高値)で一定である。

図4に示すように、主接地極の定常接地抵抗が高いほど、雷サージ電流印加の際に生じる電位上昇が大きくなる。それに伴い、主接地極から1m以内の周辺大地に関しても電位上昇が大きくなっており、さらに、主接地極の定常接地抵抗が低い場合と比較し、接地極周辺の大地電位分布の傾度が大きくなっている。よって、主接地極の定常接地抵抗が高いほど、接地電位上昇時に周辺大地との間に生じる電位差が大きくなると言える。しかし、主接地極から離れるに従って、大地電位上昇における主接地極の定常接地抵抗の影響が見られなくなる。

最後に、表1の試験ケースDに関する測定結果を図5に示す。大地抵抗率を変化させるために、試験区間の土壤に散水し、大地抵抗率を194.8Ω・mから144.5Ω・mまで低減させた。この影響により、主接地極の定常接地抵抗が、135Ωから105Ωに低下した。主接地極に印加した雷サージ電流は、80A(波高値)で一定である。

図5に示すように、大地抵抗率を低減させた場合、主接地極の定常接地抵抗がやや低下することにより、雷サージ電流印加の際に生じる電位上昇が小さくなっていることがわかる。しかし、接地極周辺の大地電位上昇については、大地抵抗率が低いほど、大きいことがわかる。これは、大地抵抗率が低い方が、電位の伝搬減衰が小さくなることによる。よって、大地抵抗率が低い方が、大地電位分布の傾度が小さくなっている。

一方、主接地極と従接地極間の電位干渉について見る

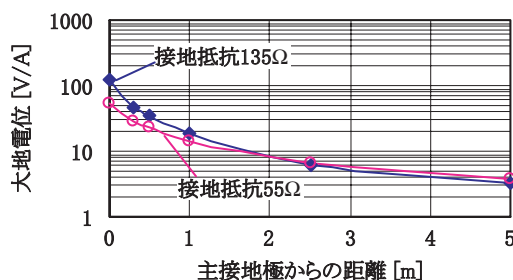


図4 接地抵抗の影響(ケースC)

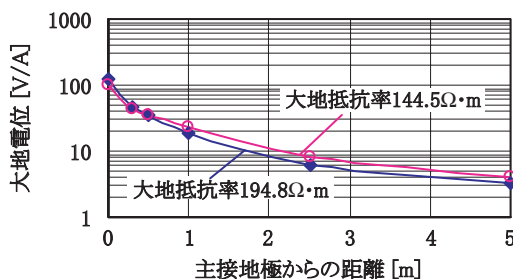


図5 大地抵抗率の影響(ケースD)

と、大地抵抗率が低いほど、接地極間の電位干渉が大きくなると言える。

## 2.2 接地電位上昇による信号設備への影響と対策

鉄道では、電力設備のための接地極と信号設備のための接地極を個別に設けているのが、一般的である。このような点を考慮した上で、接地電位上昇による信号設備への影響、および信号設備の保護方法に関する試験を行い、信号設備の破壊メカニズムと対策を検討した。

### 2.2.1 接地極間の電位干渉による影響

落雷等により電力設備用保安器が動作し、電力用接地極が電位上昇を起こした場合に、2.1節で述べた主接地極を電力用接地極、従接地極を信号用接地極と見なすことにより、電力用接地極と信号用接地極間の電位干渉による信号用接地極の電位上昇を把握することができる。この状況が信号設備に雷被害をもたらすメカニズムについて明らかにするため試験を行った。

まず、図6(a)に示すような試験構成により、接地電位上昇が信号設備に与える影響について検証を行った。接地極間の距離を0.5mとし、表1の試験ケースAの条件下において、信号機器とケーブル間に発生する電位差(雷過電圧)の測定を行った。その結果を図7に示す。なお、実際の電力用接地極の定常接地抵抗は低いいため、例えば10Ωとした場合には、縦軸に10Ω/135Ω(今回の主接地極の定常接地抵抗)を乗じることにより、図7を実際の現象に則した結果として見る事ができる。

信号機器からケーブルが外部に伸びていない場合には、信号用接地極の電位上昇と一緒に信号機器の電位も上昇するため、信号機器が損傷を受ける恐れはない。しかし、信号機器からはケーブルが外部に伸びており、他の信号機器と接続される構成が一般的である。よって、信号用接地極の電位上昇が発生した場合には、他の信号機器と接続されているケーブルとの間に図7に示す雷過電圧が発生することになる。これにより、信号機器が損傷する恐れがある。

次に、図6(b)に示すように、接地電位上昇時の信号設備の保護に関する検討を行った。電力用接地極の電位上昇によりもたらされる信号用接地極の電位上昇時に、外部ケーブルと信号機器との間に発生する雷過電圧を抑制するための保安器を挿入した。信号機器とケーブル間に発生する雷過電圧波形(保安器動作電圧波形)を図8に示す。保安器を挿入することにより、図7に示した雷過電圧が、図8に示すように約1/5に抑制される。

### 2.2.2 信号設備の保護手法

2.1.2項と2.2.1項で述べた検討結果から、電力用接地極の電位上昇によりもたらされる信号用接地極の電位上昇から信号設備を保護する手法としては、以下が有効と考えられる。

特集：信号通信技術

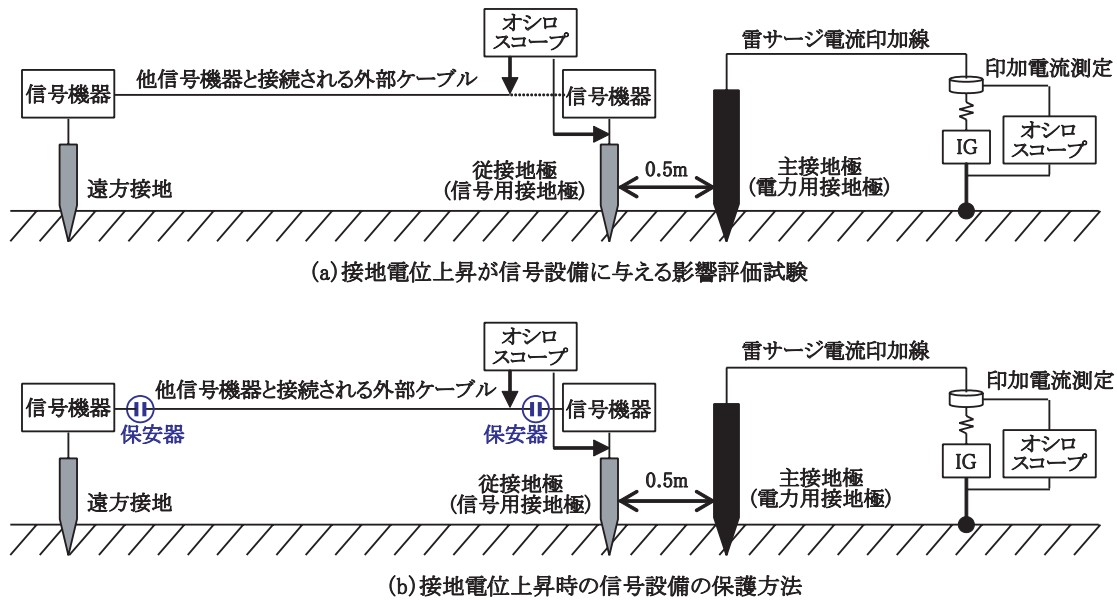


図6 接地電位上昇による信号設備破壊メカニズム

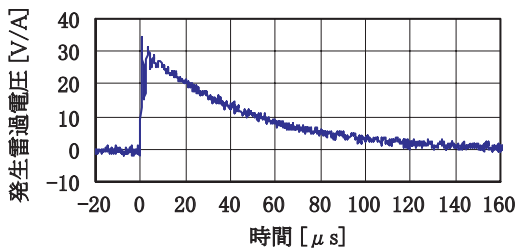


図7 接地極電位上昇による信号機器の発生雷過電圧

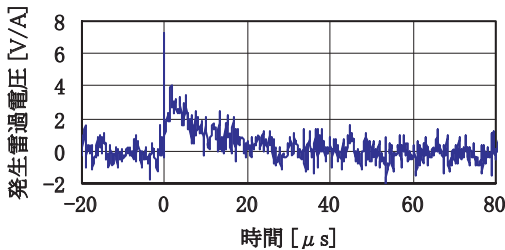


図8 対策による信号機器の発生雷過電圧

- (1) 電力用接地極と信号用接地極とは、5m以上離隔を確保する。
- (2) 信号機器が設置される場所の大地抵抗率の変化も考慮すると信号機器と外部ケーブル間には保安器を挿入し、発生雷過電圧を抑制させる。

2.2.3 信号用接地極間の関係

一つの信号設備の中において、複数の信号用接地極を有している場合には、接地極間の相互離隔がわずかであっても、落雷により接地極が電位上昇を起こすと、他の接地極との間には、2.1節で述べたような電位差が生じることになる。この場合、信号設備内での等電位化が図られなくなり、信号機器の損傷の恐れがある。雷害対策では、等電位化を図ることが重要であるため、同一の信号設備内では一点接地が望ましいと言える。

3. レール電位上昇時の周辺大地の電位分布

3.1 試験方法

信号設備は、レールとケーブルを介して接続される構成となっていることが多い。そこで、落雷時のレール電位上昇に伴う信号設備の破壊メカニズムの解明のため、現地試験にて、レール電位上昇時における近傍大地電位分布の測定を実施した。なお、試験区間の大地抵抗率は、 $200\Omega \cdot m$ であった。落雷時のレール電位上昇を模擬するために、レールに対し雷サージ電流を印加した。測定概略図を図9に示す。

図9に示すように、試験区間長は293mである。試験区間両端には、レール絶縁を挿入することにより、印加する雷サージ電流が現用設備に影響を与えないようにした。さらに、試験区間両端において、レールのサージイ

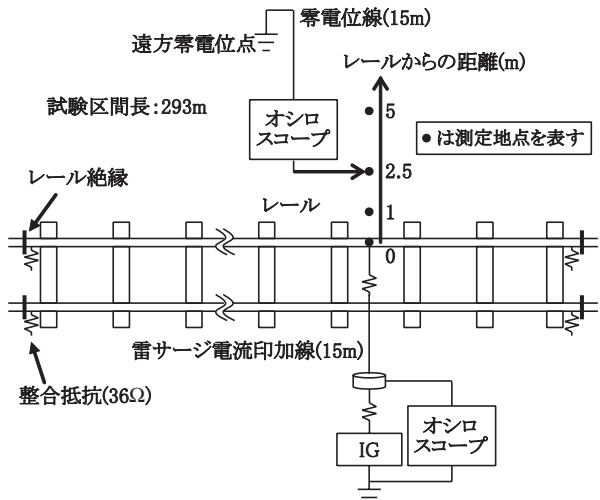


図9 レール電位上昇時の近傍大地電位分布測定概略図

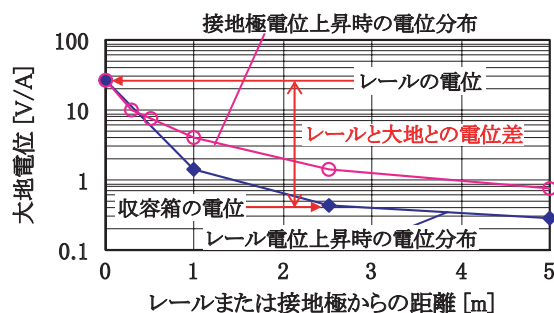


図10 レール電位上昇と接地電位上昇による近傍大地電位分布の比較

ンピーダンス整合 (36Ω) を図った<sup>2)</sup>。これは、試験区間両端におけるサージの反射をなくすことにより、試験区間中における雷サージ電流印加点の位置的影響を無視できるようにするためである。

レールに対し、IGを用いて実際の雷サージ電流波形を模擬した1/100μsの雷サージ電流を5A(波高値)印加した。それにより生ずるレールの電位上昇ならびにレール近傍大地の電位上昇を測定した。なお、測定地点は、図9中の●で示した地点であり、各測定地点と遠方零電位点との間に発生する電圧をオシロスコープにより測定した。

### 3.2 試験結果

レールに雷サージ電流を印加した時のレールおよびレール近傍大地の電位上昇測定結果を図10に示す。なお、図10の縦軸は、レールに1A(波高値)の雷サージ電流が印加された時の電位上昇[V/A]に換算したものである。

図10には、2.1節で示した接地極の電位上昇により生ずる周辺大地の電位分布に関する測定結果も合わせて示す。ここでは、両者を比較するために、レールならびに接地極の定常接地抵抗を正規化している。

図10から、レールあるいは接地極からの距離が1mまでの地点において、レール電位上昇による近傍大地の電位分布の方が、接地極電位上昇による場合に対して傾度が大きく、より大きな電位差が生じていることがわかる。この要因として、レールと路盤間に存在するバラストの影響が考えられる。バラストは土と比較し導電率が低いため、レールと大地間にはバラストという高抵抗物質が介在することになり、レールの電位上昇に伴う近傍大地の電位上昇の多くをバラストが負担すると考えられる。その結果、接地極と周辺大地間と比較し、レールと近傍大地間には大きな電位差が生じると推察される。

### 3.3 レールとレール近傍大地間の電位差による踏切制御子の雷害発生メカニズム

ここで、3.2節で述べたレールの電位上昇に伴い生ず

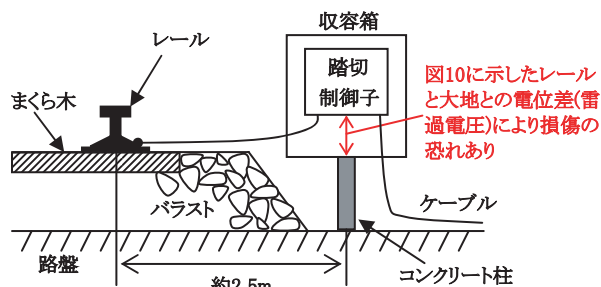


図11 踏切制御子の雷害発生メカニズム

るレールとレール近傍大地間の電位差が、JR会社で雷害発生件数の多い踏切制御子の雷害発生に与えるメカニズムを検討した。図11に示すように、踏切制御子は、通常、レールから直角方向2.5m地点に建植されるコンクリート柱に支持された収容箱に収められている。踏切制御子はケーブルを介してレールと接続されており、落雷によりレール電位上昇が発生した場合には、ほぼレール電位と等しくなる。一方、コンクリート柱に支持された収容箱は、コンクリート柱が建植された地点の大地電位と等しくなる。3.2節で述べた結果より、コンクリート柱の建植地点の大地電位は、レール電位の約10%しか上昇しないため、収容箱と踏切制御子との間には、レール電位の約90%に相当する電位差が生じることになる。この電位差(雷過電圧)により収容箱と踏切制御子間で絶縁破壊が生じた場合に、機器故障の恐れがあると考えられる。これが踏切制御子の雷害発生要因の一つとして挙げられる。

## 4. 踏切制御子の雷害対策

### 4.1 雷害対策の検討と検証

踏切制御子における雷害発生メカニズムを踏まえて、雷害対策の検討を行うとともに、対策効果の実験的検証を行った。

3.3節で述べたように、踏切制御子の現行雷害対策上の問題点として、踏切制御子の各端子と収容箱間(大地間)に発生する雷過電圧に対して、保護がなされていない点が挙げられる。そこで、図12に示すような雷害対策について、現地試験により、対策効果の検証を行った。

対策効果の検証試験方法では、図12に示した雷害対策を施した上で、レールに対し、IGを用いて、1/100μsの雷サージ電流を5A(波高値)印加した際の踏切制御子各部と遠方零電位点との間に発生する雷過電圧をオシロスコープにより測定した。

また、保安器接地線を大地に接続する際の接地抵抗の影響を評価するために、接地抵抗が100Ωの場合、あるいは接地抵抗が20Ωの場合について、効果検証試験を実施した。

特集：信号通信技術

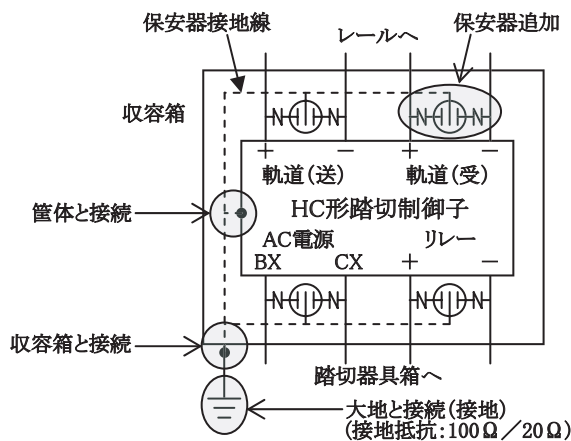


図12 踏切制御子の雷害対策

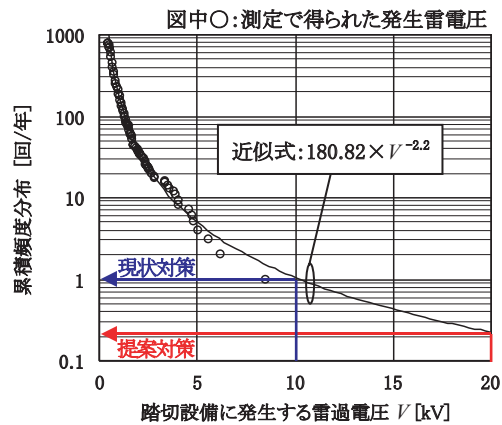


図14 踏切設備の雷過電圧発生頻度分布

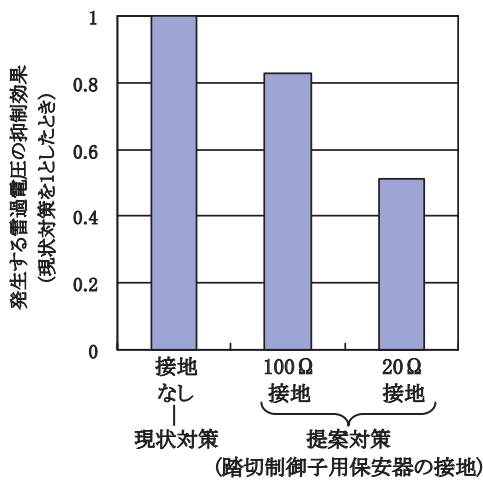


図13 雷害対策による雷過電圧抑制効果

4.2 試験による検証結果

踏切制御子の雷害対策の効果検証結果を図13に示す。図13より、提案対策におけるD種接地(100Ω)相当で雷過電圧の抑制効果が見られるとともに、接地抵抗を低減することにより、雷過電圧抑制効果が高まることがわかる。例えば、20Ω接地を施すことにより、同じ地点に同じ大きさの落雷があった場合でも、踏切制御子に発生する雷過電圧を現状対策の約半分に抑制できることから、踏切制御子の耐雷性能を約2倍に向上できる対策であると評価できる。

4.3 雷害低減効果の推定

踏切制御子における現行雷害対策では、保護レベルが10kVであるため、10kVの雷過電圧が発生した際に、機器故障の恐れがある。図13に示すように、提案対策(20Ω接地)を実施した場合、発生する雷過電圧を現行より約半分に抑制できることから、保護レベルを約20kVに引き上げることができる。

一方、多雷地域に設備されている踏切設備において、落雷時に発生する雷過電圧の頻度分布を図14に示す<sup>3)</sup>。図14中に示す雷過電圧の発生頻度分布を表す近似式を用いることにより、雷害対策効果の定量的評価が可能となる。

例えば、踏切制御子の現行雷害対策の保護レベルである10kVを超えた雷過電圧が発生することにより雷害に至る頻度は、図14中の近似式より、1.06回/年と推定できる。また、提案対策(20Ω接地)とした場合、保護レベルが約20kVとなるため、同じく近似式より、雷害の発生頻度を0.22回/年と推定できる。

よって、提案した雷害対策を実施することにより、現状より、雷被害を1/5程度まで低減可能であると言える。

5. おわりに

本稿では、接地電位上昇ならびにレール電位上昇による、信号設備の雷害発生メカニズムの解明を行うとともに、雷害発生件数の多い踏切制御子を例に挙げ、雷害対策の提案と効果の定量的評価を行った。今後、提案した対策の施工により、雷害件数の減少が期待される。

文献

- 1) 新井英樹, 佐藤和敏, 渡辺郁夫:「踏切設備の雷害対策と効果の定量化に関する実験的検討」, 鉄道総研報告, Vol.18, No.7, pp.5-10, 2004
- 2) 新井英樹, 真部健一, 潮見俊輔, 佐藤和敏:「異なる大地抵抗率でのレールのサージ伝搬特性」, 平成19年電気学会全国大会, 講演論文集(第7分冊), Vol.7, No.99, p.147, 2007
- 3) H. Arai and K. Sato: “Estimation of Occurrence Probability of Lightning Damages on Railway Level Crossing”, 電気学会論文誌B, Vol.127, No.12, pp.1275-1280, 2007