

# 雷過電圧の観測に基づく信号設備の雷リスク評価

新井 英樹\* 小野 雄人\* 藤田 浩由\*

The Lightning Risk Evaluation for Railway Signalling Systems based on Observation of Lightning Overvoltage

Hideki ARAI Yuto ONO Hiroyuki FUJITA

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 measured lightning overvoltage on railway signalling cables laid at ground surface, overhead power lines and rails in the field to enable quantitative analysis of the frequency of lightning overvoltage occurrence. Moreover, we investigated the correlation of lightning overvoltage on signalling cables, power lines and rails with lightning conditions, such as the stroke current and the strike position. This paper describes the lightning risk evaluation for railway signalling systems against lightning conditions.

キーワード：雷過電圧，雷電流値，落雷位置，雷リスク評価，信号設備

## 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。

しかしながら、現状、どの程度の電流値を持つ雷がどれくらい離れた位置に落ちた場合に、信号設備の雷害が発生するのかということが把握されていない。そのため、対策による雷害低減効果を明確にできる雷リスク評価が行えない状況である。雷リスク評価は、雷害対策実施判断のための重要な指標の一つであることから、評価手法の開発が求められている。

本研究では、実際の落雷時において信号設備を構成する基本要素である地上敷設の信号ケーブル、架空に敷設される電源線、そしてレールに発生する雷過電圧の長期測定を行った。また、それら雷過電圧を発生させた落雷を特定することにより、雷電流値と落雷位置までの距離との比で定義する落雷条件から、発生する雷過電圧を推定するための式を導出した。さらに、落雷条件の発生確率から、信号設備が有する耐雷性能に応じた雷害発生確率を算出できる雷リスク評価手法を開発した。以下に、それらについて述べる。

## 2. 落雷時における発生雷過電圧の測定

### 2.1 目的

信号設備は、鉄道設備の中でも設置地上高が高くないため、直撃雷を受けることは極めて稀であると考えられる。そのため、現状の信号設備に対する雷害対策は、直撃雷を対象外とし、誘導雷や信号設備の近傍に落ちる近傍雷を対象としている。しかしながら、各鉄道事業者において、信号設備の雷害が数多く発生しているのが実態である<sup>1)</sup>。

そこで、実際の落雷時において、信号設備の主な構成要素である地上敷設の信号ケーブル、架空敷設の電源線、レールの雷過電圧発生様相を把握し、雷過電圧を発生させた落雷を特定することにより、発生雷過電圧と雷電流値や落雷位置までの距離との相関を調べることにした。

### 2.2 試験概要

#### 2.2.1 試験場所の選定

夏季における多雷地域を試験場所に選定した。また、測定の際の外來からの誘導ノイズを極力減らすことを考慮して、非電化の単線区間を試験場所に選定した。

#### 2.2.2 試験期間

実際の落雷時における発生雷過電圧の測定は、2010年と2011年の夏季に行った。各年の測定実施期間は以下のとおりである。

- (1) 2010年夏季：6月11日～11月25日
- (2) 2011年夏季：6月10日～10月31日

#### 2.2.3 試験構成

試験場所における測定構成概略と仮設状況の写真を図1に

\* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室

特集：信号通信技術

示す。地上敷設の信号ケーブル、架空敷設の電源線、そしてレールのそれぞれと大地間に発生する雷過電圧の測定を行った。

試験場所に 500m 長の信号ケーブルを試験用として地上敷設した。敷設した信号ケーブルは、SVV ケーブル（シースなしケーブル、 $2sq \times 8C$ ）と SEE-SL ケーブル（シース付きツイストペアケーブル、 $2sq \times 4P$ ）の 2 種類である。

レールについては、現用レールを用い、500m に渡りレールボンドにて電氣的に接続した。

一方、地上に敷設されたケーブルやレールに発生する雷過電圧と架空敷設の電源線に発生する雷過電圧の比較を行うため、電力会社の架空配電線から測定小屋に引き込まれている電源線に発生する雷過電圧の測定を行った。引き込み線の長さは 300m である（試験場所周辺に敷設されている架空配電線そのものの長さは不明である）。

雷過電圧波形データの記録を行う観測システムのトリガレベルは、地上敷設の信号ケーブルおよびレールについては、 $\pm 125V$  とした。一方、架空敷設の電源線については、 $\pm 625V$  とした。地上敷設の信号ケーブル、架空敷設の電源線、レールのいずれかにトリガレベル以上の雷過電圧が発生した場合に、GPS 時計による発生時刻とともに、全ての雷過電圧波形データを記録した。なお、波形データの記録長は、1 回のトリガあたり、 $102.4\mu s$  ( $50ns \times 2,048$  サンプル) とした。

2.2.4 試験条件

地上敷設の信号ケーブルについては、図 2 に示す条件に設定した。各条件を設定した期間は、図 2 中に示すとおりである。

信号ケーブルの両端に取り付けた  $1k \Omega$  の抵抗は、信号機器の負荷を模擬したものである。また、SEE-SL ケーブルのシースの片端を接地した場合と、両端開放（非接地）した場合について、発生する雷過電圧の比較を行った。なお、シースを接地する際の接地抵抗は  $100 \Omega$  とした。

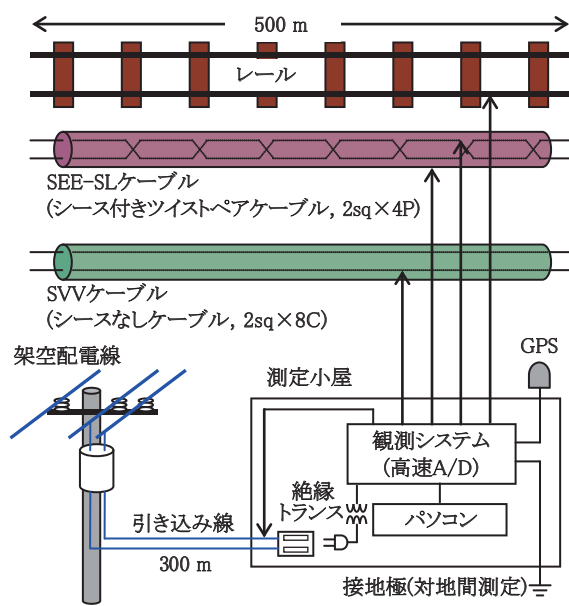
現用レールに発生する雷過電圧の測定については、2.2.2 項で述べた全試験期間を通じて実施した。一方、架空敷設の電源線に発生する雷過電圧の測定については、2.2.2 項で述べた 2011 年夏季のみ実施した。

2.3 試験結果

2.3.1 試験期間中の落雷と発生雷過電圧

2010 年夏季ならびに 2011 年夏季の試験期間中、測定小屋を中心とする半径 10km の範囲内に、4,179 個の雷撃、約 2,010 個の落雷が発生した。通常、1 個の落雷は、複数個の雷撃によって形成される。また、それら落雷の内、292 個の落雷に対して、地上敷設の信号ケーブル、架空敷設の電源線、そしてレールのいずれかにおいてトリガレベル以上の雷過電圧が発生した。

落雷に関するデータは、JLDN (Japanese Lightning Detection Network) と呼ばれる落雷位置標定システム<sup>2)</sup>



(a) 測定構成概略

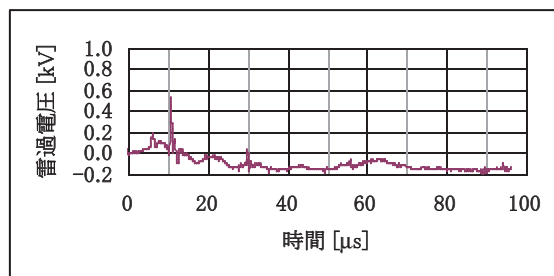
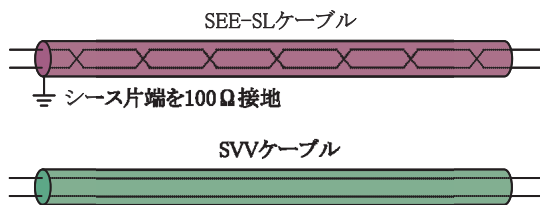


(b) 仮設した測定小屋と観測システムの写真

図 1 測定構成図

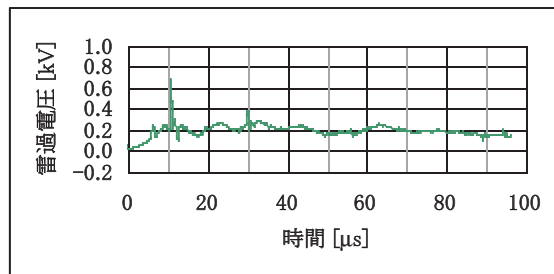
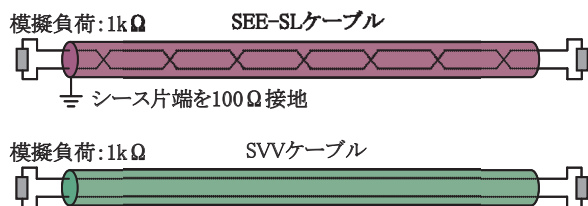
からのデータを使用している。落雷位置標定データからは、落雷位置の他に、雷電流値と GPS 時計による落雷時刻が得られる。この落雷時刻と、同じく GPS 時計による雷過電圧の発生時刻を照合することにより、雷過電圧を発生させた落雷の特定を行った。なお、JLDN によって捕捉できる雷は、夏季雷で 80% 強程度と言われている。また、落雷位置標定誤差も 0.5km 程度あると言わ

試験条件① 期間：2010年6月11日～8月23日



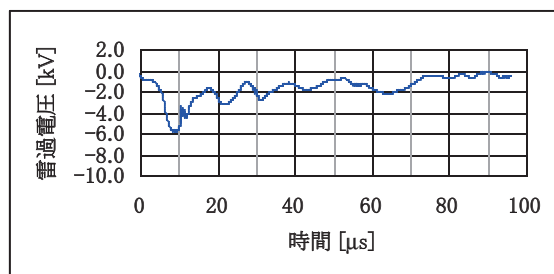
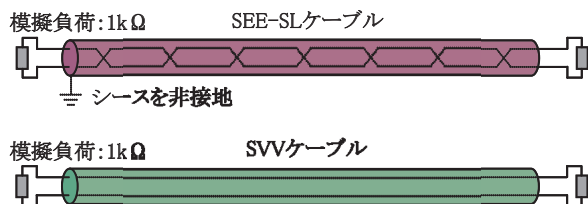
(a) SEE-SLケーブル

試験条件② 2010年8月24日～11月25日, 2011年6月10日～8月7日



(b) SVVケーブル

試験条件③ 期間：2011年8月8日～2011年10月31日



(c) 架空敷設の電源線

図2 地上敷設信号ケーブルの設定条件

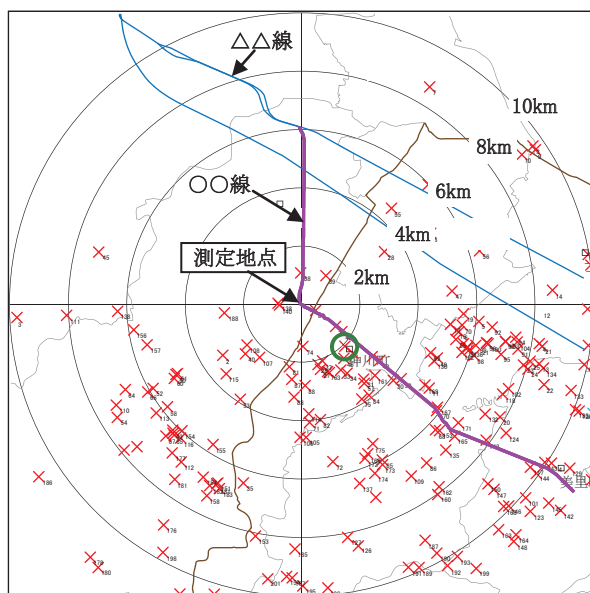
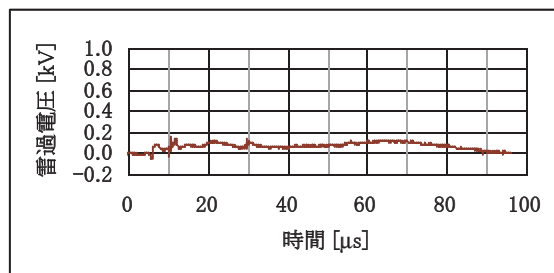


図3 落雷位置の例 (2011年7月30日)

れている。雷電流値 (推定電流値) 誤差も定量的には評価されていないが、存在する。

一例として、2011年7月30日にJLDNにより得られた、測定小屋を中心とする半径10kmの範囲内への落雷位置を図3に示す。図3中の×印が落雷位置を表す。

また、図3中の○印で囲った落雷によって、地上敷設の信号ケーブル (SEE-SLケーブルとSVVケーブル)、架空敷設の電源線、そしてレールに発生した雷過電圧波



(d) レール

図4 発生雷過電圧波形の例

形を一例として図4に示す。なお、落雷の発生時刻は22時12分25.336747秒であり、雷電流値は-72.0kA、測定地点から落雷位置までの距離は2.044kmである。一方、雷過電圧の発生時刻は、22時12分25.336757秒であった。この例では、同じ落雷に対して、地上敷設の信号ケーブルには700V程度、架空敷設の電源線には6kV程度、そしてレールには200V程度の雷過電圧が発生していることがわかる。

### 2.3.2 雷過電圧の発生メカニズム

落雷時に発生する強いインパルス性の電磁界は、静電界、誘導界、放射電磁界が複合したものであり、それぞれが離隔距離の-3乗、-2乗、-1乗に比例するため、ある程度離

れた地点においては、放射電磁界が優勢となる。放射電磁界で発生する電界  $E$  [V/m] は (1) 式によって表される<sup>3)</sup>。

$$E = -\frac{v}{2\pi\epsilon_0 c^2} \cdot \frac{I_{t-r/c}}{r} \quad (1)$$

ここで、 $I$  [A] は雷電流値、 $r$  [m] は測定地点から落雷位置までの距離、 $v$  [m/s] は雷電流の進展速度、 $t$  [s] は雷電流進展開始からの時間である。 $c$  は光速  $3 \times 10^8$  m/s であり、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m である。

(1) 式より、電界の積分である発生雷過電圧が、雷電流値に比例し、測定地点から落雷位置までの距離に反比例することがわかる。よって、雷電流値  $I$  と落雷位置までの距離  $r$  との比を落雷条件  $I/r$  と定義し、発生雷過電圧  $V$  と落雷条件  $I/r$  の相関把握を行った。

### 3. 発生雷過電圧と落雷条件との相関

#### 3.1 SEE-SL ケーブルのシース接地条件およびケーブル種別による発生雷過電圧の差異

SEE-SL ケーブルのシースを片端接地した場合と非接地の場合における発生雷過電圧と落雷条件との関係を比較したものを図5に示す。なお、SEE-SL ケーブルの両端には、信号機器の模擬負荷を取り付けた状態である。図5には、1次近似線も併せて示している。

図5より、SEE-SL ケーブルのシースを片端接地することにより、同じ落雷条件においても発生する雷過電圧が若干大きいように見て取れる。これは、落雷に伴う大地電位上昇の影響を受けているためと考えられる。

しかし、両者の有意差検定を行ったところ、有意差は見られなかった。よって、SEE-SL ケーブルのシースの接地条件による発生雷過電圧に差異はないと言える。

また、SEE-SL ケーブルのシールドを非接地とした場合と SVV ケーブルの場合における発生雷過電圧と落雷条件との関係を比較したものを図6に示す。こちらも、ケーブルの両端に信号機器の模擬負荷を取り付けた状態である。図6には、1次近似線も併せて示している。

図6に示すように、ケーブル種別による発生雷過電圧に差異は見られなかった。

以上より、地上敷設の信号ケーブルに発生する雷過電圧を抑制するために、シース付きケーブルを使用することやシースの接地を行うことによる効果は低いと言える。よって、発生雷過電圧を抑制するためには、ケーブル芯線への保安器の取り付けが必要となる。

#### 3.2 落雷条件に応じた発生雷過電圧の推定

実際の落雷時において、地上敷設の信号ケーブル、架空敷設の電源線、そしてレールに発生した雷過電圧と落雷条件との関係を図7に示す。なお、地上敷設の信号ケーブルについては、ケーブル両端での信号機器の模擬負荷

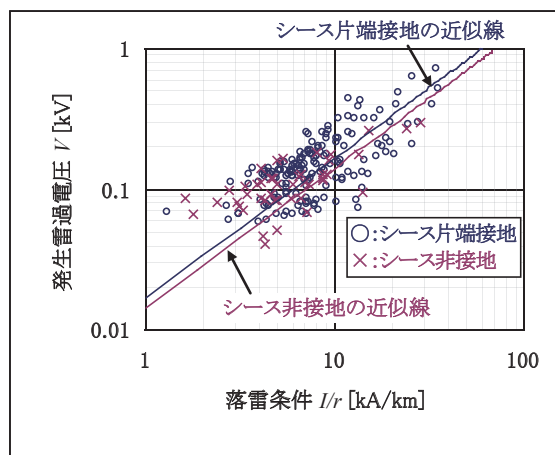


図5 SEE-SL ケーブルのシース接地条件による発生雷過電圧の差異

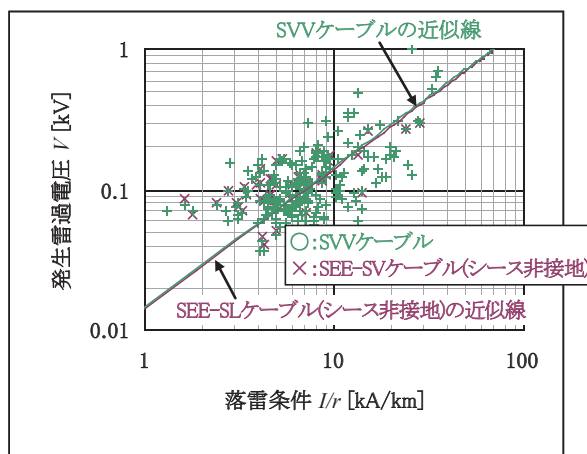


図6 ケーブル種別による発生雷過電圧の差異

の有無に関わらず、落雷条件に対する発生雷過電圧に有意な差は見られなかった。また、3.1節で述べたように、SEE-SL ケーブルと SVV ケーブルとの間にも、発生雷過電圧に有意な差は見られなかった。よって、図7には、地上敷設の信号ケーブルに発生する雷過電圧の代表例として、SVV ケーブルの両端に信号機器の模擬負荷を取り付けた条件を示している。

図7より、同じ落雷条件においても発生する雷過電圧にバラツキが見られるが、この要因として、以下の3つが考えられる。

- ① JLDN による落雷位置標定に誤差があること
- ② JLDN による推定雷電流値に誤差があること
- ③ 一般に雷電流波形が急峻なほど発生する雷過電圧は大きくなるが、現状、JLDN による雷電流波形の推定は研究段階であり、今回は考慮していないこと

ここでは、発生雷過電圧のバラツキを考慮するとともに、落雷条件に応じて発生する雷過電圧を安全側に見積もるために、図7中の発生雷過電圧プロットの97%を包含する近似線を表す式を、落雷条件に対応した発生雷過電圧の推定式とした。各推定式は、(2)～(4)式のとおりである。

地上敷設の信号ケーブルに発生する雷過電圧の推定式

$$V = 0.0145 \times \left( \frac{I}{r} \right) + 0.17 \quad (2)$$

架空敷設の電源線に発生する雷過電圧の推定式

$$V = 0.142 \times \left( \frac{I}{r} \right) + 1.6 \quad (3)$$

レールに発生する雷過電圧の推定式

$$V = 0.0134 \times \left( \frac{I}{r} \right) + 0.19 \quad (4)$$

ここで、 $V$  [kV] は発生雷過電圧、 $I$  [kA] は雷電流値、 $r$  [km] は測定地点から落雷位置までの距離である。

例えば、架空敷設の電源線を引き込んでいる信号設備で、電源部の耐雷性能（耐過電圧）が10kVである場合、(3)式より、落雷条件  $I/r$  が59.2kA/km以上で耐過電圧を超え、雷害に至る可能性があるとして推定できる。これは、平均的な雷電流値31kAの雷が、半径524mの範囲内に落ちた場合に相当する。

このように、落雷条件に対応した発生雷過電圧の推定式より、信号設備が有する耐雷性能に応じて雷害に至る可能性のある落雷条件を推定することができる。

また、図7より、同じ落雷条件においても、架空敷設の電源線には、地上敷設の信号ケーブルやレールと比較し、約10倍の雷過電圧レベルが発生することがわかる。ただし、本測定結果は、架空敷設の電源線として、電力会社の架空配電線から測定小屋に引き込まれている300m長の引き込み線を用いて得られたものである。さらには、試験場所周辺に敷設されている電力会社の架空配電線の長さは不明という条件である。それに対し、地上敷設の信号ケーブルやレールは、試験用に500m長と規定している。今後、架空敷設の電源線に発生する雷過電圧レベルと地上敷設の信号ケーブルやレールに発生する雷過電圧レベルの差異が、敷設地上高に起因するものか、敷設長に起因するものかについて精査する必要がある。

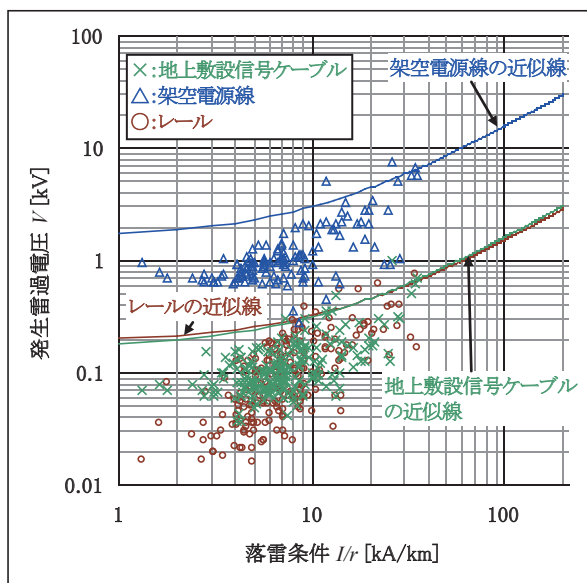


図7 発生雷過電圧と落雷条件との関係

るが、今回得られた結果から、架空敷設の電源線を引き込んでいる信号設備においては、電源部の手前に耐雷トランスを設置することが必須と言える。また、電源部と地上敷設の信号ケーブルが接続される箇所への保安器の取り付けによる等電位化が必要と言える。

#### 4. 落雷条件に応じた発生雷過電圧推定式の妥当性評価

3.2節で導いた推定式の妥当性を検証するため、2010年ならびに2011年に試験場所を含む線区で発生した信号設備の雷害データを調査した。雷害データには、雷害発生時刻と雷害を受けた信号設備の設置位置が含まれている。雷害発生時刻はGPS時計によるものではないが、落雷位置標定データの落雷時刻と照合した結果、12件の雷害に関して、雷害を発生させた落雷を特定することができた。また、雷害を受けた信号設備の設置位置を元に、別途、緯度・経度を測定し、雷害を発生させた落雷位置からの距離を求めた。図8に、信号設備の雷害を発生させた落雷の雷電流値と信号設備から落雷位置までの距離をプロットしたものを示す。

さらに、落雷条件に応じて発生する雷過電圧の推定式を用いることにより、図8中に雷害に至る可能性のある落雷条件を示すことができる。ここでは、現状の信号設備の耐雷性能は概ね10kV程度であることを踏まえ、(3)式より求められる、現状信号設備が雷害に至る可能性のある落雷条件を示している。

図8より、実際に信号設備の雷害が発生した時のほとんどの落雷条件が、推定式から導かれる雷害発生の可能性が高い落雷条件エリアにあることがわかる。一部雷害が発生した時の落雷条件が推定結果と異なるものもあるが、推定の誤差や雷害にあった信号設備の耐雷性能が10kV以下であることが要因として考えられる。

以上より、3.2節で示した落雷条件に応じて発生する雷過電圧の推定式は、概ね妥当であると評価できる。

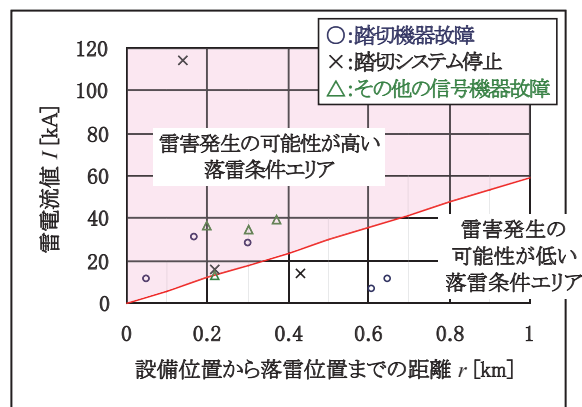


図8 落雷条件に応じた発生過電圧推定式の妥当性評価

### 5. 落雷条件の発生確率を考慮した信号設備の雷リスク評価

3.2節で、信号設備の雷害が発生する可能性のある落雷条件の推定について述べたが、算出された落雷条件の発生確率を考慮することにより、信号設備の雷リスク評価が可能となる。

ここでは、一例として、架空敷設の電源線を引き込んでいる耐雷性能 30kV の信号設備を考えてみる。(3)式より、雷害に至る可能性のある落雷条件  $I/r$  [kA/km] を求めると、(5)式のとおりとなる。

$$\frac{I}{r} = 200 \quad (5)$$

ここで、 $I$  [kA] は雷電流値、 $r$  [km] は測定地点から落雷位置までの距離である。

また、雷電流値  $I$  [kA] の累積頻度分布  $P(I)$  [%] は、(6)式により求めることができる<sup>4)</sup>。

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (6)$$

一方、半径 10km の範囲内に  $N$  [回/年] の落雷がある地域における、半径  $r$  [km] の範囲内への落雷数  $N(r)$  [回/年] は、落雷が一樣に分布するものと仮定すると、(7)式により求めることができる。

$$N(r) = N \times \frac{\pi r^2}{\pi \times 10^2} \quad (7)$$

よって、(5)～(7)式より、半径 10km の範囲内に  $N$  [回/年] の落雷がある地域において、落雷条件  $I/r$  が 200kA/km 以上となり、信号設備の雷害が発生する確率  $T$  [回/年・設備] は、(8)式のように求めることができる。

$$T = \int_0^{10} N \times \frac{2\pi r}{\pi \times 10^2} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{200r}{31}\right)^{2.6}} dr \quad (8)$$

例えば、 $N=1,000$  回/年の多雷地域では、(8)式より、 $T=0.36$  回/年・設備と求められる。これが、半径 10km の範囲内に 1,000 回/年の落雷がある多雷地域において、耐雷性能 30kV の信号設備が有する雷リスクとなる。

以上の雷リスク評価手順をまとめると図9のようになる。開発した雷リスク評価手法では、信号設備の設備形態(架空敷設の電源線を使用しているか等)や信号設備が有する耐雷性能について、図9の1段目の設定条件に対応して、2段目の落雷条件が変わることにより考慮することができる。また、信号設備が設置される地域の落雷数については、図9の4段目のフローで考慮することができる。一方、本手法により、鉄道事業者で目標とする雷リスク低減に必要なとなる信号設備の耐雷性能を明確にすることもできる。

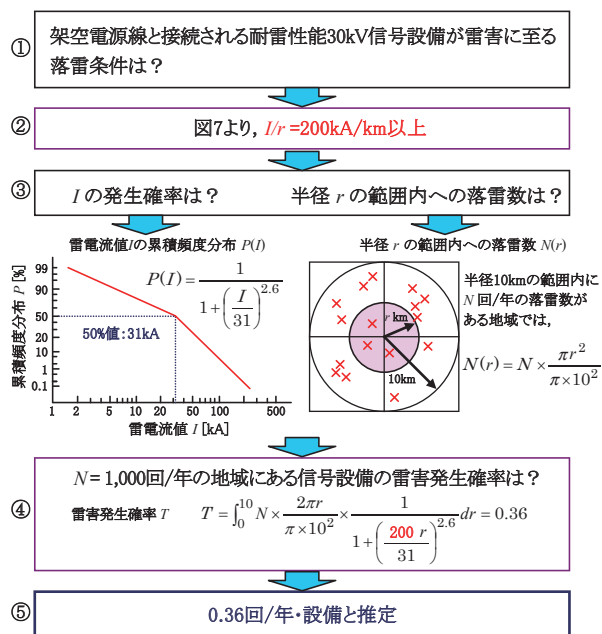


図9 雷リスク評価の例

### 6. おわりに

本稿では、実際の落雷時における、地上敷設の信号ケーブル、架空に敷設される電源線、そしてレールの発生雷過電圧観測結果に基づく信号設備の雷リスク評価手法について述べた。算出される評価結果は、雷害対策実施判断の指標の一つとしての活用が期待される。

### 謝辞

本研究に御協力頂いた JR 東日本研究開発センターテクニカルセンター情報制御グループの関係各位にお礼を申し上げます。

### 文献

- 1) 鉄道電気設備の耐雷害性の向上に関する調査研究委員会：「鉄道電気設備の耐雷害性の向上に関する調査報告書」,(社)日本鉄道電気技術協会, 2010
- 2) 電力設備のための雷パラメータ選定方法調査専門委員会：「電力設備のための雷パラメータの選定法」,電気学会技術報告第 1033 号,(社)電気学会, 2005
- 3) V. A. Rakov and M. A. Uman：“Lightning Physics and Effects”, pp. 159 -161, Cambridge University Press, 2003.
- 4) 雷保護対策検討委員会：「雷と高度情報化社会」,(社)電気設備学会, 1999