

鉄道信号設備の雷被害確率の推定

新井 英樹

雷害による列車の運行停止や遅延は、社会的混乱を招くおそれがあるため、鉄道信号設備における雷害対策の検討は重要である。そこで、実際の落雷時において、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観測を行い、気象データを活用することにより雷過電圧を発生させた落雷を特定し、雷電流値や落雷位置といった落雷条件との相関を把握した。得られた結果より、落雷条件に応じた発生雷過電圧の推定を可能とした。本稿では、これらの観測結果について述べるとともに、落雷条件の発生確率を考慮することによる鉄道信号設備の雷被害確率の推定結果について述べる。

キーワード：雷過電圧，雷電流，落雷位置標定システム，雷被害確率，鉄道信号設備

1. はじめに

鉄道信号設備にマイクロコンピュータなどの電子デバイスを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など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おそれがあることから、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に関する評価が行えない状況である。雷害低減効果は、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被害確率を算出できる手法を開発した。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 試験場所と試験期間

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。

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。

2.2 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。

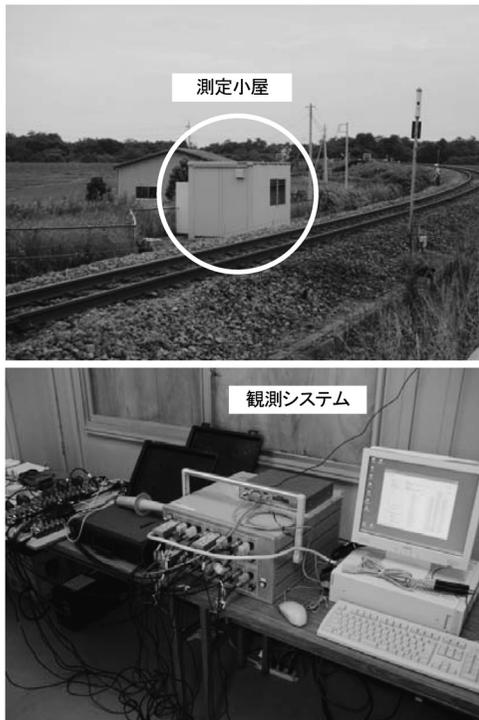
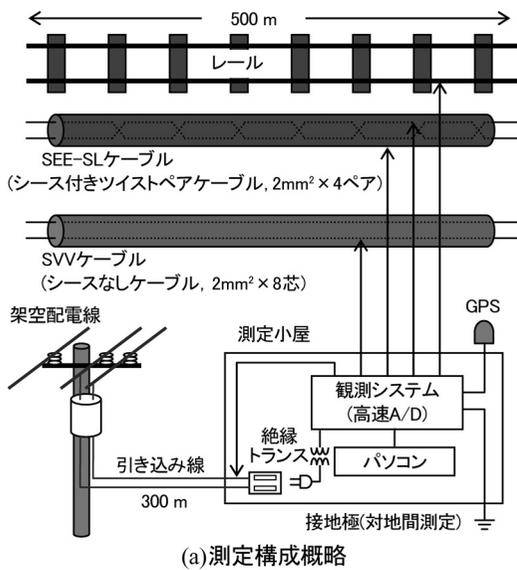
試験場所に500m長の信号ケーブルを試験用として地上敷設した。敷設した信号ケーブルは、SVVケーブル（シースなしケーブル、 $2\text{mm}^2 \times 8$ 芯）とSEE-SLケーブル（シースつきツイストペアケーブル、 $2\text{mm}^2 \times 4$ ペア）の2種類である。

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

一方、地上に敷設された信号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。

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、 $\pm 125\text{V}$ とした。一方、架空敷設の電源線については、 $\pm 625\text{V}$ 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

あらい ひでき
(公財) 鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部信号システム研究室
〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38



(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

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、すべ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、 $102.4 \mu\text{s}$ ($50 \text{ ns} \times 2,048$ サンプル)とした。

2.3 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。なお、試験条件①は2010年夏季の前半、試験条件②は2010年夏季の後半および2011年夏季に設定した。

信号ケーブルの両端に取りつけた $1 \text{ k}\Omega$ 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ケーブルのシースを接地する際の接地抵抗は 100Ω 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、2010年ならびに2011年の夏季を通じて実施した。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、2011年夏季のみ実施した。

2.4 試験結果

2010年ならびに2011年の夏季の試験期間中、測定小屋を中心とする半径 10 km の範囲内に、 $4,180$ 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、それら落雷のうち、 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 [1] からのデータを使用している。このJLDNは、民間の気象サービス会社により運用されている。落雷位置標定の原理であるが、方位交会法や到達時間差法が用いられている。方位交会法とは、落雷時に生じる磁界を、複数の直交ループアンテナ（東西、南北に配置された大地に垂直なループアンテナ2個で構成）で検出し、磁界の到来方向の交点を求めることにより、落雷位置を標定する手法である。一方、到達時間差法とは、落雷

試験条件①



試験条件②



図2 地上敷設信号ケーブルの設定条件

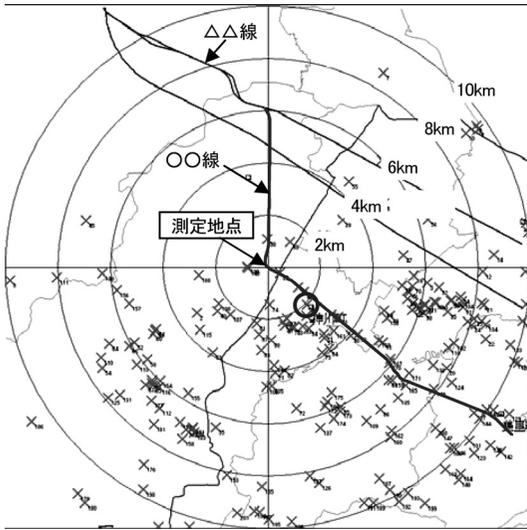
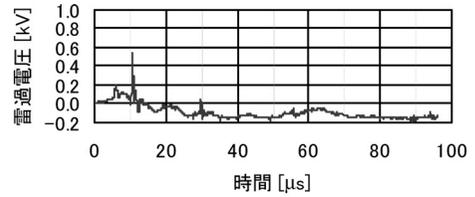


図3 落雷位置の例 (2011年7月30日)

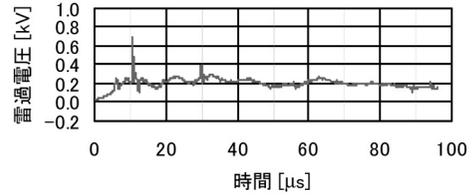
時に生じる電界を、複数の電界センサで検出し、それぞれのセンサでの検出時刻の差を用いて、落雷位置を標定する手法である。落雷位置標定データからは、落雷位置のほか、雷電流値とGPS時計による落雷時刻が得られる。この落雷時刻と、同じくGPS時計による雷過電圧の発生時刻を照合することにより、雷過電圧を発生させた落雷の特定を行った。なお、JLDNによって捕捉できる雷は、夏季雷で80%強程度と言われている。また、落雷位置標定誤差も0.5km程度あると言われている。雷電流値(推定電流値)誤差も定量的には評価されていないが、存在する。

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。

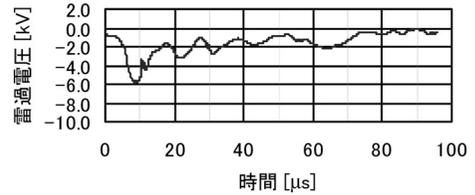
また、図3中の○印で囲った落雷によって、地上敷設の信号ケーブル(SEE-SLケーブルとSVVケーブル)、架空敷設の電源線、そしてレールに発生した雷過電圧波形を一例として図4に示す。なお、落雷の発生時刻は22時12分25.336747秒であり、雷電流値は -72.0 kA 、測定地点から落雷位置までの距離は2.044kmである。一方、雷過電圧の発生時刻は、22時12分25.336757秒であった。この例では、同じ落雷に対して、地上敷設の信号ケーブルには700V程度、架空敷設の電源線には6kV程度、そしてレールには200V程度の雷過電圧が発生していることがわかる。



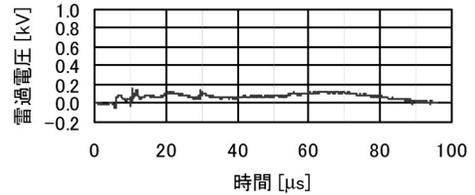
(a)SEE-SLケーブル



(b)SVVケーブル



(c)架空敷設の電源線



(d)レール

図4 発生雷過電圧波形の例

3. 発生雷過電圧と落雷条件との相関

3.1 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[2]。

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

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 3×10^8 m/s であり、 ϵ_0 は真空の誘電率 8.85×10^{-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。

3.2 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5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の有無にかかわらず、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、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5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5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5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

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

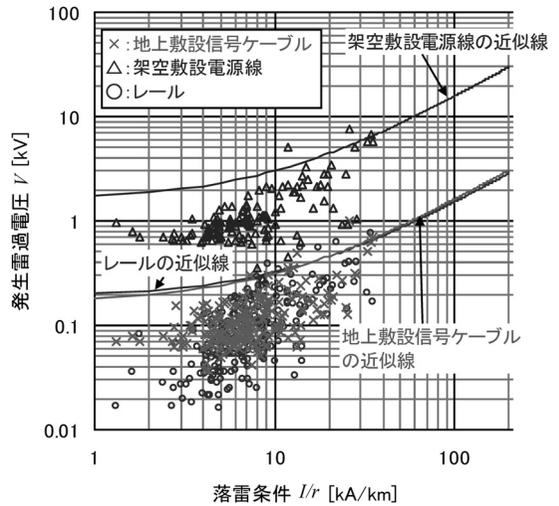


図5 発生雷過電圧と落雷条件との関係

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(対地間耐過電圧)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5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。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間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項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基に、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6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6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(対地間耐過電圧)がおおむね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6より、実際に信号設備の雷害が発生したとき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とき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項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。

5. 落雷条件の発生確率を考慮した信号設備の雷被害確率の推定

3.2項で、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、信号設備の雷被害確率の推定が可能となる。

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。

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

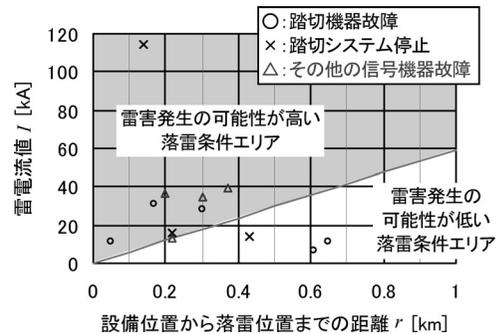


図6 落雷条件に応じた発生過電圧推定式の妥当性評価

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 [3]。

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

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、落雷が一様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200 kA/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被害確率となる。

以上の雷被害確率の推定手法をまとめると図7のようになる。開発手法では、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、など)や信号設備が有する耐雷性能について、図7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7の4段目のフローで考慮す

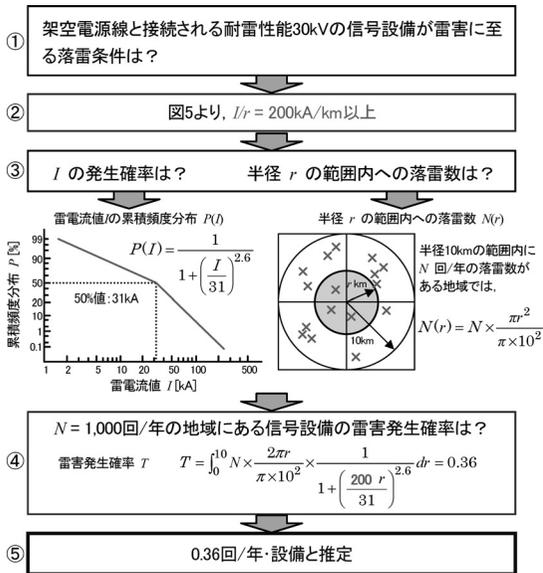


図 7 雷被害確率の推定の例

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害低減に必要となる信号設備の耐雷性能

を明確にすることもできる。

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鉄道信号設備の雷被害確率の推定手法について述べた。なお、雷過電圧を発生させた落雷の特定にあたっては、気象データの一つである落雷位置標定データを活用した。算出される結果は、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。

参考文献

- [1] 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, (一社) 電気学会, 2005.
- [2] V. A. Rakov and M. A. Uman, “Lightning Physics and Effects,” Cambridge University Press, pp. 159–161, 2003.
- [3] 雷保護対策検討委員会, 「雷と高度情報化社会」, (一社) 電気設備学会, 1999.