

電化区間の信号設備に発生する雷サージ電圧の推定

小野 雄人* 新井 英樹* 藤田 浩由*
野村 拓也* 比澤 庸平**

Estimation of Lightning Overvoltage on Signalling Equipment of Electrified Railway

Yuto ONO Hideki ARAI Hiroyuki FUJITA
Takuya NOMURA Yohei HIZAWA

Railway signalling systems have been damaged from lightning. Therefore, effective and economical lightning protection measures are necessary for railway signalling systems. For analysing the lightning risk and making a study of countermeasures against lightning damage, the authors therefore observed lightning overvoltage on electrified railway's signal cables, electrical power lines and rails. From the result, we acquired the correlation of lightning overvoltage with lightning conditions, methodology for estimating the possibility of lightning hazards, and the perception that it is more important to decrease ground voltage than to decrease line voltage for efficient countermeasures against lightning damage.

キーワード：雷サージ，信号ケーブル，電化区間，大地間電圧，線間電圧

1. はじめに

近年，鉄道信号設備への電子機器の導入に伴い，雷被害が数多く発生しており，効果的な雷害対策が求められている。筆者らはこれまでに，非電化区間において，実際の落雷時に，試験用に敷設した信号ケーブルに発生する大地間の雷サージ電圧を測定し，雷電流や落雷位置で定義される落雷条件との相関について調査を行うと共に，落雷条件より信号設備に雷害が発生する確率を推定する手法について検討してきた^{1)~4)}。

本論文では，電化区間における信号ケーブル，レール，電源線に発生する大地間の雷サージ電圧の測定を行い，落雷条件との相関について調査した結果，および非電化区間における測定結果と比較した結果について述べる。また，信号ケーブルの芯線間および左右レール間に発生した線間の雷サージ電圧についても示す。

2. 試験方法

2.1 測定構成

電化区間において実際の落雷時に信号ケーブル等に発生する雷サージ電圧を測定するため，多雷地域にある電化・複々線の営業線区において試験を実施した。測定期

間は，2015年，2016年の各年の5月から10月までとし，夏季の雷を対象とした。

測定構成図を図1，測定機器配置写真を図2に示す。試験用に地表面に敷設した信号ケーブル（SVVケーブル 1.25mm² × 4芯）の長さは466mである。信号ケーブルの他に，付近のレール，信号高圧線および測定装置を稼動するための商用電源線に発生する雷サージ電圧の測定を行った。

測定にあたっては，16chの高速A/D変換ユニットを用い，ケーブルの芯線等と大地間に発生する雷サージ電圧を記録した。高速A/D変換ユニットは，雷サージ電圧を観測しているいずれかのチャンネルに，設定したトリガレベル以上の電圧が印加されると，GPS時刻と共に全チャンネルのデータを測定用PCに送信する。トリガレベルは，信号ケーブル芯線については±156V，レールは±313V，信号高圧線は±479V，商用電源線は±625Vに設定した。これは，落雷時以外の通常時において，不要にトリガがかかることを避けるためである。GPS時刻は，測定された雷サージ電圧と落雷との関係を調査するために記録しているものであり，記録された雷サージ電圧はそれぞれ，JLDN（Japanese Lightning Detection Network）による落雷位置標定データに含まれるGPS時刻との照合を実施している。

供試信号ケーブルについては，信号設備が接続されている状態を模擬するため，ケーブル両端を1kΩの抵抗で終端した。終端のインピーダンスが，ケーブルのイン

* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室

** 信号・情報技術研究部 信号システム研究室
(現 西日本旅客鉄道株式会社)

特集：信号通信技術

ピーダンスに比べて十分に高い場合、ケーブルを伝搬してきた雷サージ電圧は、終端で正反射する⁵⁾。伝搬してきたサージと反射したサージが合成されるので、ケーブルの終端で測定される電圧は、元々発生したサージ電圧のおよそ2倍となる。そのため、測定結果の評価の際には、測定された電圧を1/2倍にして評価を行うこととした。

信号高压線(AC110V)

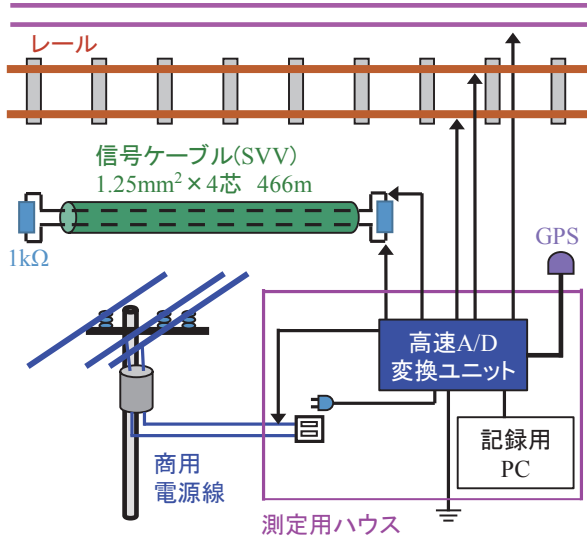


図1 測定構成

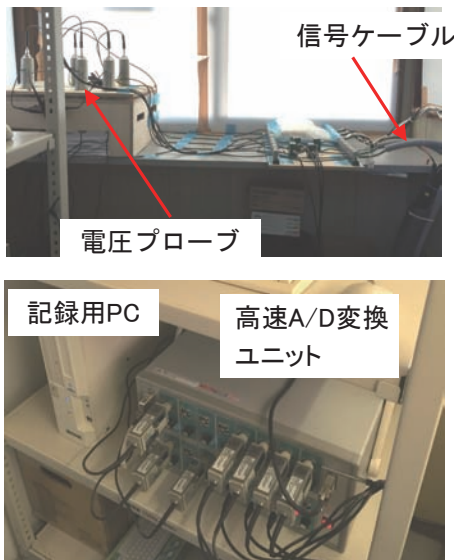


図2 測定システム

2.2 線間電圧の評価方法

本測定においては、各測定箇所が発生する大地間電圧を記録しており、線間電圧は直接測定していない。そこで、信号ケーブルの2つの芯線に発生した大地間電圧の差分を、信号ケーブルの線間電圧と定義した。レールについても、進行方向に対して左右のレールの大地間電圧の差分を線間電圧と定義した。この線間電圧は、各

サンプリングデータに対して大地間電圧の差分値計算を行い導出した。ここで例として、レールにて観測された大地間電圧波形から線間電圧を導出する過程を説明する。図3は、ある落雷により観測された、進行方向左側レールおよび右側レールの大地間電圧波形である。大地間電圧の最小値は、左側レールで-6.05kV、右側レールで-6.20kVであった。得られた大地間電圧波形の差分をとったものが、図4に示す波形となり、これを線間電圧波形とした。線間電圧は、線間電圧波形における絶対値の最大値(図4の場合は0.40kV)とした。このようにして線間電圧を導出すると共に、線間電圧の大地間電圧に対する比率について、測定データの集合から評価を行うこととした。

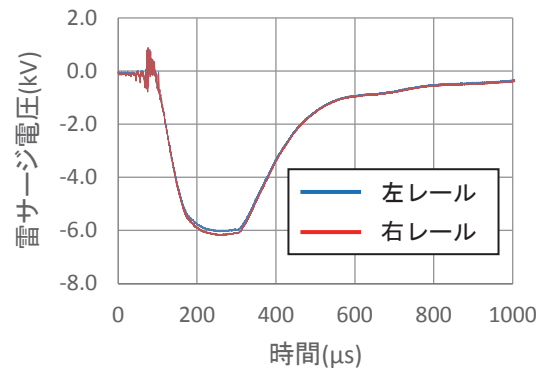


図3 左右レールに発生した大地間電圧の波形

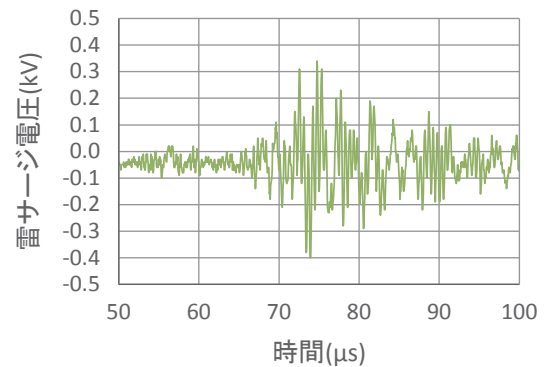


図4 左右レール間に発生した電圧の波形

2.3 雷サージ電圧発生メカニズム

落雷時に発生する強いインパルス性の電磁界は、静電界、誘導電磁界、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、ある程度の遠方地点では、放射電磁界が優勢となる。放射電磁界で発生する電圧 V は(1)式によって表される⁶⁾。

$$V = A \cdot \frac{I}{r} \quad (1)$$

A : 比例定数, I : 雷電流, r : 落雷位置からの距離

(1)式より、レールやケーブルに発生する雷サージ電圧 V は、雷電流 I に比例し、落雷位置から測定地点までの距離 r に反比例する。そこで本研究では、 I/r を落雷条件として定義し、 V (発生した雷サージ電圧) との相関を求めることとした。

雷電流 I および距離 r は落雷位置標定データに基づく。落雷位置標定データでは落雷位置、雷電流と GPS 時計による落雷時刻が得られ、2.1 節で示したように、雷サージ電圧を発生させた落雷の特定は GPS 時計による落雷時刻と、同じく測定システムの GPS 時計による雷サージ電圧の発生時刻を照合することで行った。

なお、JLDN によって捕捉できる雷は、夏季雷で 90% 強と言われている。また、落雷位置の誤差も 0.5km 程度あるものとされている。雷電流値の誤差も、量的には評価されていないが存在する。

3. 試験結果

3.1 測定期間中の落雷

測定期間中、測定地点より半径 10km 以内の領域において、1,391 回の落雷が発生した。測定期間中に発生した落雷の内、126 回において、トリガレベル以上の雷サージ電圧が観測された。測定地点から落雷位置までの距離を横軸、雷電流の絶対値を縦軸として、トリガレベル以上の雷サージ電圧を発生させた落雷を○で、その他の落雷を×でプロットした散布図を図 5 に示す。図 5 より、測定地点と落雷位置との距離が近いほど、また雷電流が大きいほど、トリガレベル以上の雷サージ電圧が発生しやすい傾向が読み取れる。なお、落雷位置が大地であるか、建物などの構造物であるかといった区別は行っていない。

図 6 は、2016 年 8 月 5 日の落雷位置標定データに基づいて作成された落雷位置の地図図である。図 3 にて例示した雷サージ電圧の波形は、図 5、図 6 に示した落雷によって発生したものである。雷電流値は -90kA、落雷地点と測定地点との距離は 1.28km であり、落雷条件は 70.3kA/km となる。図 7 は、このとき信号ケーブル、信号高圧線、商用電源線に発生した雷サージ電圧の波形である。雷サージ電圧の最大値、最小値、サージの持続時間などが、測定対象ごとに異なっていることがわかる。

3.2 落雷条件と発生雷サージ電圧の関係

測定期間中に、信号ケーブル、レール、信号高圧線、商用電源線に発生した雷サージ電圧の絶対値を縦軸とし、その雷サージ電圧を発生させた落雷の落雷条件を横軸として、プロットしたものを図 8 に示す。落雷条件と発生雷サージ電圧は、正の相関関係があると見受けられる。これらのデータにおいて、97% が含まれる雷サージ電圧と落雷条件の関係を「推定式」として表 1 に示す。

図 8 中には、推定式を表す線も併せて示している。

プロットおよび推定式より、同じ落雷条件下において、商用電源線に発生する雷サージ電圧が、信号高圧線より

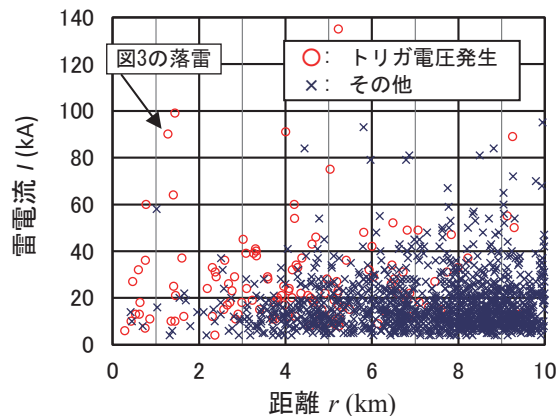


図 5 測定期間中の落雷の電流と距離

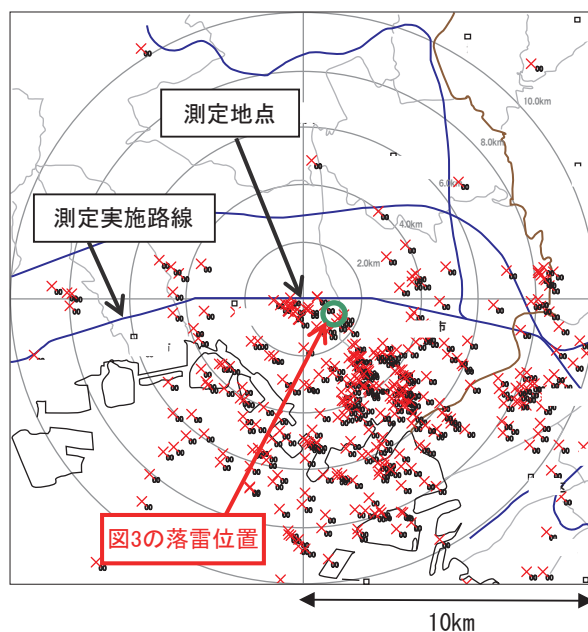


図 6 2016 年 8 月 5 日の落雷位置の地図

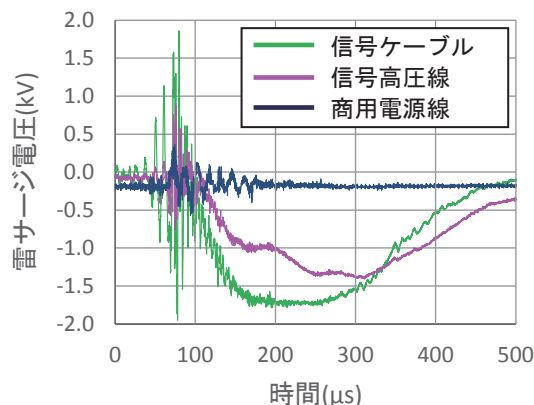


図 7 信号ケーブル等に発生した雷サージ電圧の波形

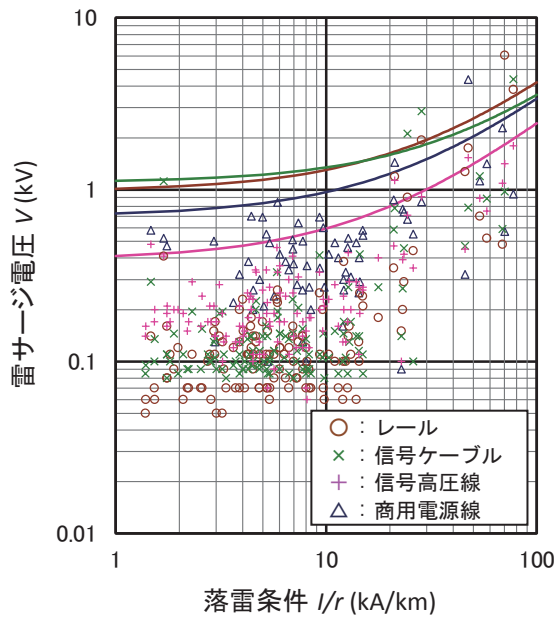


図8 落雷条件と雷サージ電圧の関係

表1 推定式

| 対象物 | 推定式 |
|--------|--------------------------|
| レール | $V = 0.032 (I/r) + 0.98$ |
| 信号ケーブル | $V = 0.025 (I/r) + 1.1$ |
| 信号高圧線 | $V = 0.021 (I/r) + 0.39$ |
| 商用電源線 | $V = 0.027 (I/r) + 0.70$ |

も高い傾向にあることがわかる。このため、商用電源を使用している信号設備においては、信号高圧を使用している信号設備よりも、雷による被害を受ける確率が高く、より高い耐雷性能が必要であると考えられる。

落雷条件が大きくなる（雷電流が大きくなるもしくは距離が近くなる）につれて、最も高い雷サージ電圧が発生するのは、推定式の傾きの値より、レールであると推定される。そのため、次節では、レールに接続された信号設備の雷害のリスクについて考察する。

3.3 雷害が発生する確率の推定

雷保護レベルが10kVの雷害対策が施された信号設備が存在し、それがレールに接続されている状況を仮定する。レールに対する推定式によると、発生する雷サージ電圧が10kVに達する落雷条件 I/r は278kA/kmとわかる。よって、雷電流31kA（雷電流の累積頻度分布50%値⁷⁾）の落雷が、信号設備から111m以内の場所に発生した場合、落雷条件 I/r の値が278kA/km以上となり、雷保護レベルを超える雷サージ電圧が発生して、信号設備が雷害に至る可能性があると言える。このような条件を満たす落雷が発生する確率を算出することで、信号設備に雷害が発生する確率を推定することができる。

次に、雷害が発生する確率を算出する。半径10kmの範囲内に M [回/年] の落雷がある地域において、落雷条件 I/r が278kA/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(2)式にて求めることができる^{1) 2)}。

$$T = N \int_0^{10} \left(\frac{1}{1 + (278r/31)^{2.6}} \cdot \frac{2r}{100} \right) dr \quad (2)$$

例えば、 $N=700$ 回/年の地域では、(2)式より、 $T=0.22$ 回/(年・設備)と求められる。これが半径10kmの範囲内に700回/年の落雷がある地域において、レールに接続される耐雷性能10kVの信号設備が有する雷リスクとなる。

3.4 非電化区間における測定結果との比較

過去に実施した、非電化区間における測定の結果を図9に示す。それぞれの推定式は表2の通りである。なお、測定を行った区間では、信号設備の稼動にも商用電源を使用しており、信号高圧線は存在しないため、信号高圧線の測定は実施していない。推定式より、非電化区間においては商用電源線に最も高い雷サージ電圧が発生する傾向にあった。非電化区間における商用電源線に発生する雷サージ電圧の推定式より、商用電源線に10kVの雷サージ電圧が発生する落雷条件は63.6kA/kmとなる。この落雷条件から、 $N=700$ 回/年の地域にて10kV以上の雷サージ電圧が発生する頻度を算出すると、 $T=4.63$ 回/(年・設備)である。したがって、非電化区間において商用電源を使用している信号設備は、電化区間の信号設備よりも雷リスクが高く、より高い耐雷性能を持たせる必要があることがわかる。

電化区間と非電化区間において、落雷条件と発生する雷サージ電圧の相関を、信号ケーブル同士で比較したものが図10、レール同士で比較したものが図11である。なお、実際に信号設備の雷害を発生させる落雷は、ある程度落雷条件の大きいものに限られるため、落雷条件が10以上の時に発生した雷サージ電圧を対象として比較を行った。図中の点線は、それぞれのプロットの近似直線である。

(1)式で示したとおり、雷サージ電圧の大きさは落雷条件に一次比例すると考えられるため、電化・非電化区間における比例定数の差異が、両区間の設備に発生する雷サージ電圧の差異を表すといえる。そのため、図10および図11に示した全プロットの、雷サージ電圧の大きさを落雷条件で除算した値を算出した。この数値の電化・非電化それぞれの平均値に対して、有意水準5%で両側検定のt検定を行ったところ、信号ケーブル、レール共に、平均値に有意の差はなかった。したがって、同

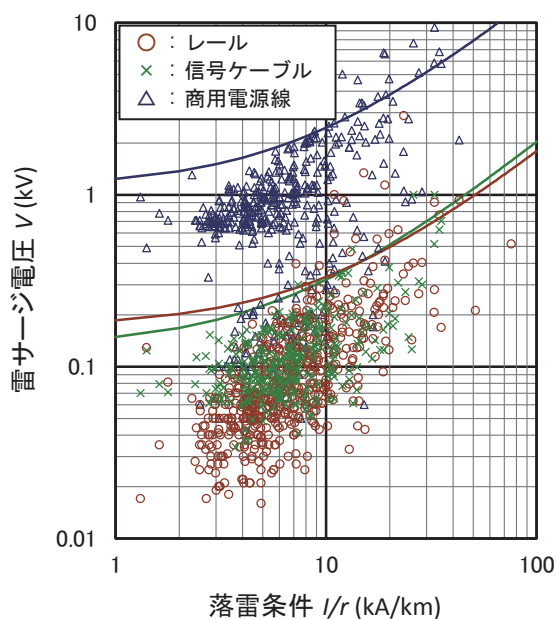


図9 非電化区間における測定結果

表2 非電化区間における推定式

| 対象物 | 推定式 |
|--------|-------------------------|
| レール | $V = 0.016(I/r) + 0.17$ |
| 信号ケーブル | $V = 0.019(I/r) + 0.13$ |
| 商用電源線 | $V = 0.14(I/r) + 1.1$ |

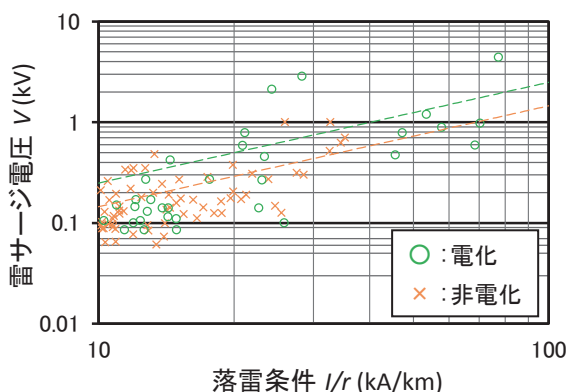


図10 信号ケーブルに発生した雷サージ電圧の比較

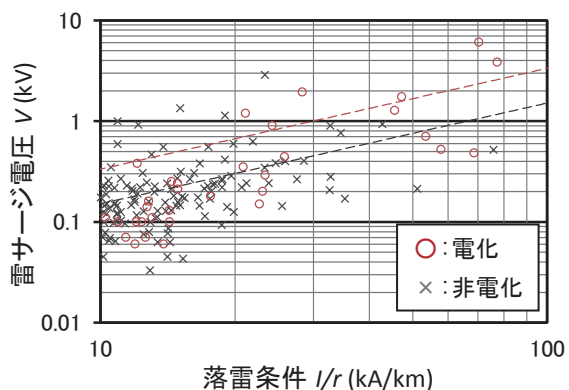


図11 レールに発生した雷サージ電圧の比較

等の落雷条件下において電化区間と非電化区間の信号ケーブルおよびレールに発生する雷サージ電圧に、大きな差異はないことがわかった。

3.5 線間電圧に関する考察

2.2節で記したとおり、本研究においては、測定して得られた大地間電圧の波形から、線間電圧の評価を行った。図12は信号ケーブルとレールに発生した大地間電圧の最大値を横軸に、その時に発生した線間電圧の最大値を縦軸にとったときの散布図である。信号ケーブルよりもレールにおいて、線間電圧が高くなる傾向にある。レールの間隔(軌間1,067mm)が、信号ケーブルの芯線間隔(約4mm)と比べて大きく、落雷により発生する放射電磁界に対する平衡度が低いために、線間電圧が高くなったものと推測される。また、レールには軌道回路が設置されているため、軌道回路の電圧によって線間電圧が大きく測定されたケースもあると推定される。

図13は、大地間電圧に対する線間電圧の割合 [%] を縦軸にとったものである。割合についてはばらつきが大きく、最小で6.45%、最大で115%となった。特に大地間電圧が低い場合に、線間電圧の割合が大きくなる傾向にあった。この要因として、本測定においては、線間電圧を直接測定しておらず、大地間電圧の差分の絶対値によって線間電圧を算出していることがあげられる。この方法ではノイズも線間電圧として測定されることになるほか、測定したプローブごとの誤差による影響も受ける。また、今回使用した測定システムの、電圧測定の最小単位は10Vと大きいので、分解能が低い。このため、大地間電圧の小さい範囲で、比率が大きくなった可能性がある。

大地間電圧が高い場合には、線間電圧の割合は低くなる傾向にある。特に大地間電圧が2kVを超えた時には全て12%を下回っていた。2.2節において線間電圧の算出方法を例示した図3および図4は、測定期間中に最もレールに高い大地間電圧が発生した時の波形であるが、大地間電圧の絶対値の最大値が6.20kVであるのに対し、線間電圧の最大値は0.40kVであり、大地間電圧に対する割合は6.45%である。大地間電圧が高い場合には、電圧測定を行うプローブ等の誤差要因の影響が小さくなるためと考えられる。したがって、より大地間電圧が高い場合であっても、線間電圧の比率は、同等か、より低くなると推測される。

一般的に、鉄道信号設備の耐サージ電圧は、大地間電圧が10kV、線間電圧が2kVといわれているが、仮にレールに10kVの大地間電圧が発生したとしても、発生する線間電圧は最大0.65kV程度と推定され、線間電圧の保護レベルを上回ることはないと考えられる。したがって、

特集：信号通信技術

設備の雷害を効果的に防止するためには、線間電圧を抑制することに加えて、大地間電圧に対する保護も行う必要があるといえる。

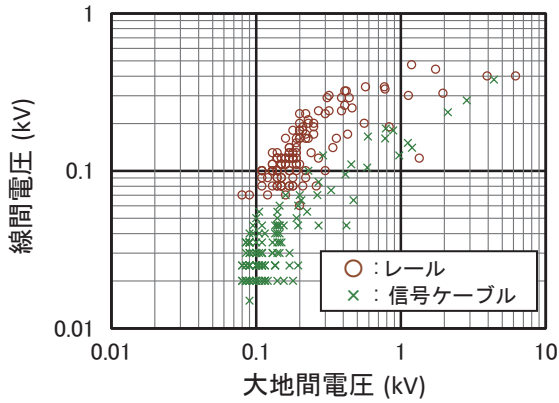


図 12 大地間電圧と線間電圧の関係

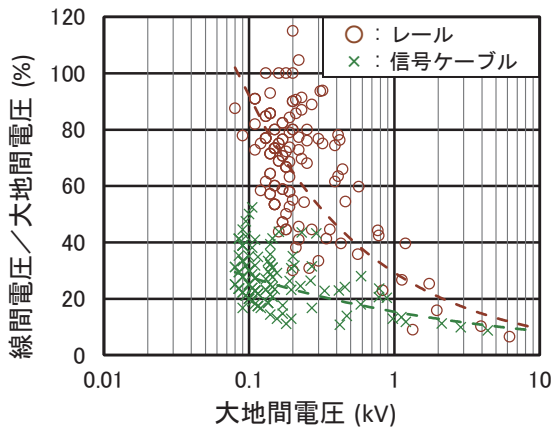


図 13 線間電圧の大地間電圧に対する割合

4. おわりに

電化区間における信号ケーブル、レール、電源線に発生する雷サージ電圧の測定によって、落雷条件と雷サー

ジ電圧の相関を把握した。相関関係から雷サージ電圧の大きさを推定し、信号設備の雷害発生リスクを算出することができた。

今回の測定結果を非電化区間における測定結果と比較した結果、同じ落雷条件下において発生する雷サージ電圧は、電化・非電化に関わらずほぼ同等であることがわかった。

線間電圧と大地間電圧を比較した結果、線間電圧の割合は大地間電圧の12%未満にとどまることがわかった。このため、効果的な雷害対策を行うためには、線間電圧の抑制に加えて、大地間電圧を抑制する対策をとる必要があるといえる。

今後は電磁界解析等を用いて、様々な条件下において発生する雷サージ電圧を推定する手法を確立する予定である。

文 献

- 1) 新井英樹, 小野雄人, 藤田浩由: 雷過電圧の観測に基づく信号設備の雷リスク評価, 鉄道総研報告, Vol.26, No.7, pp.11-16, 2012
- 2) Y. Ono, H. Arai, K. Sugimoto: "Methodology to Estimate Lightning Risk for Railway Signalling Systems", WCRR 2013 Proceedings, ID 106, 2013.
- 3) 小野雄人, 杉本経嗣, 比澤庸平, 新井英樹, 鈴木雅彦, 本間憲一: 鉄道信号用ケーブルに発生する雷過電圧の観測に基づく雷リスクの推定, J-Rail 2013, pp. 569-572, 2013
- 4) 藤田浩由, 比澤庸平, 新井英樹: 鉄道信号用ケーブルに発生する雷過電圧の抑制手法の検討, 鉄道総研報告, Vol.30, No.1, pp.11-16, 2016
- 5) 曾根悟, 檀良: 電気回路の基礎, 明晃堂, pp161-163, 1986
- 6) V. A. Rakov and M. A. Uman: "Lightning Physics and Effects", pp. 159-161, Cambridge University Press, 2003.
- 7) 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