

鉄道通信設備における雷サージの影響評価手法

竹内 恵一* 川村 智輝* 山口 大介*

An Evaluation Method to influence of Lightning Surge for Railway Telecommunication Systems

Keiichi TAKEUCHI Tomoki KAWAMURA Daisuke YAMAGUCHI

At general buildings, common grounding, which equates the electric potential of the equipment, is one of the effective methods for protecting it from lightning surge. However, in railway telecommunication systems, the merit and the demerit of common grounding are not clarified, and calculation methods for evaluating the influence of lightning surge in railway telecommunication systems are not established. Therefore, the method for protecting the equipment from lightning surge by common grounding has not defined for railway telecommunication systems. In this paper, we propose an analysis model of lightning surge for railway telecommunication systems, and propose an evaluation method for estimating the influence of lightning surge on railway telecommunication systems by this analysis model.

キーワード：雷害，雷サージ，鉄道通信設備，通信ケーブル，共通接地，回路網解析

1. はじめに

近年，情報通信技術の発達により，雷サージ等の過電圧に対して脆弱な半導体部品を使用した通信装置の導入が進んでおり，これらの通信装置の過電圧対策が重要になってきている¹⁾。鉄道通信設備においても，半導体部品を多数使用した装置の導入が進んでおり，雷サージによる障害や焼損等が懸念される。

一般の建物における雷サージ対策の一つとして，共通接地による等電位化が有効であることが示されている²⁾。一方鉄道では，系統毎の設備保護の考え方にに基づき接地が設けられ，さらに，通信設備では目的に応じて接地抵抗値の異なる接地極が設けられている³⁾。これに対して，限られた敷地内に多くの電気系設備が設置されている信号通信機器室などでは，系統別の接地を共通化することで，接地極数を低減しつつ，雷サージの影響も低減できる可能性がある。しかし，接地を共通化することによる通信設備への影響が整理されておらず，共通接地による雷サージ対策の効果を予測評価する手法も確立されていない。このため，国内の鉄道通信設備においては，共通接地による雷サージ対策の方法が明確に定められていないのが現状である。

本報告では，雷サージの侵入により通信設備に印加される電圧と電流を予測するための計算手法について述べ，さらに，従来の独立接地から共通接地に変更した（以下，接地パターンの変更という）場合に，通信設備の雷サージ対策として採用可能か否かを評価する手法について述べる。

2. 前提とする鉄道通信設備と侵入経路

2.1 検討対象とした鉄道通信設備

信号通信機器室において雷サージの侵入による通信設備への影響を把握するためには，接地極と装置の接続状況，機器室外部から侵入経路，施工済みの雷サージ対策を考慮しなければならない。そこで，外部から機器室内に引き込まれるケーブル，接地極と接続されている装置，電源供給線側に挿入される耐雷トランス，通信装置の通信線側に設置される保安器等，雷サージの影響を検討する上で必要となる設備で構成される機器室を仮定した。検討対象とした鉄道通信設備の基本的な構成を図1に示す。

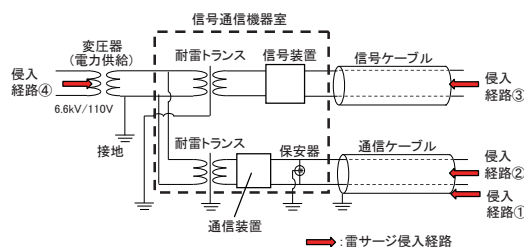


図1 検討対象とした鉄道通信設備

2.2 想定される雷サージの侵入経路

鉄道通信設備に影響を及ぼす雷害は，直撃雷，誘導雷，逆流雷の3つに分類される。

直撃雷を受ける箇所としては，無線基地局等の屋外アンテナが想定されるが，その他の通信設備では直撃雷を受ける確率が非常に低く，侵入経路も限定される。

一方，誘導雷や逆流雷の場合は，直撃雷に比べて印加される電圧値や電流値は小さくなるが，動作電圧が低い

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

特集：信号通信技術

通信設備では焼損や絶縁破壊等が発生する場合があります、侵入経路も複雑となる。また、従来の鉄道通信設備では、主に誘導雷や逆流雷を対象とした雷害対策が施工されている。そこで、本研究では、誘導雷や逆流雷を対象として検討を進めることとした。誘導雷や逆流雷を対象とした場合、図1の構成における雷サージの侵入経路としては、表1に示す4つの経路が想定される。

表1 想定される雷サージの侵入経路

侵入経路	経路概要
①	外部から通信ケーブルのシースに侵入
②	外部から通信ケーブルの心線に侵入
③	外部から信号ケーブルの心線に侵入
④	外部から電源線に侵入

3. 雷サージによる印加電圧・電流の予測計算

本章では、雷サージの侵入により通信設備に印加される電圧や電流を予測するための計算方法について述べる。

3.1 雷サージ予測計算手法の考え方

これまで、著者らは、通信ケーブルに雷サージが侵入した際に印加される電圧や電流を予測するため、回路網解析手法を用いた基礎的な計算モデルを検討してきた⁴⁾。また、一般に通信ケーブル等の電気的特性の解析においては、回路網解析手法が広く用いられている。そこで、本研究では、このケーブルの計算モデルを拡張し、回路網解析手法を用いて鉄道通信設備の雷サージを解析するための計算モデルを検討することとした。

なお、数値計算は雷サージ解析のシミュレーションツールとして広く利用されている、EMTPを用いて実施することとした。

3.2 鉄道通信設備の雷サージ計算モデル⁵⁾

回路網解析手法により雷サージ解析を実施するため、図1に示した鉄道通信設備を等価回路で表現した計算モデルを作成した。作成したモデルを図2に示す。また、通信設備を構成する装置をモデル化する際の考え方は以下の通りである。

(1) 雷サージ波形と波形発生器

雷は自然現象であるため、雷サージが発生した際の電圧・電流波形は場所や条件によりその都度異なる。予測計算では、雷サージ波形の変動により、計算結果が変動することがないように、雷サージ発生回路をモデル化し、同一の雷サージ波形の入力による検討を行う必要がある。一般的に、耐雷性能の評価は装置の使用条件毎に定められた規格波形を用いて実施されており、本研究でも、国際規格 IEC 61000-4-5 で規定される雷インパルス試験波形 (1.2 μ s/50 μ s コンビネーション波形) を入力波形とし、試験用のサージ発生器の等価回路に基づきモデル化した。

(2) ケーブル

信号ケーブルはシースが接地されず、雷サージの侵入経路とならないため、心線のみを分布定数回路としてモデル化した。通信ケーブルは接地極に接続されたシースも雷サージの侵入経路となる可能性があることから、シースと心線間の影響も考慮した分布定数回路としてモデル化した。計算時に必要となる各種パラメータは、ケーブルの仕様値と内部構造に基づき算出した。

(3) 耐雷トランス

変圧器の等価回路を基に、トランスの u 相と v 相間の静電容量、一次側と二次側間の静電容量を反映するモデルとした。さらに u 相と v 相の間の巻線静電容量を考慮することで、サージの移行に加え、線間電圧の計算や変圧器の変圧動作の模擬が可能なモデルとした。

(4) 通信装置

通信装置に雷サージが侵入した際の電源線側と通信線

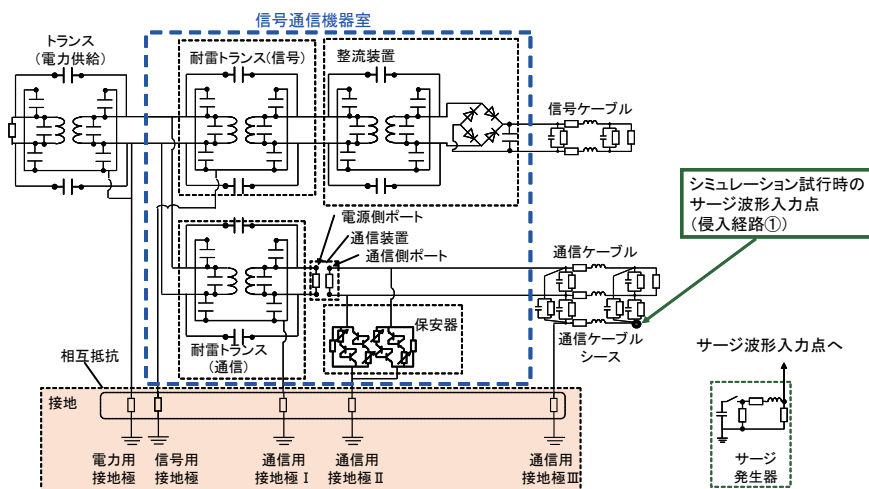


図2 通信設備の雷サージ計算モデル⁵⁾

側の間のサージ移行量は0.2%程度にとどまるという検討結果があることから⁶⁾、本研究では電源線側と通信線側をそれぞれ入力インピーダンスに基づく抵抗で終端するモデルとし、抵抗に生じる電圧・電流により雷サージの影響を予測することとした。

(5) 保安器

保安器は通信装置と通信ケーブルの接続箇所を使用される避雷管を想定し、トライアックを用いた回路モデルで避雷管の動作特性を模擬した。

(6) 整流装置

整流装置は鉄道信号用として使用されているシリコン定電圧整流装置の回路に基づき、モデル化を行った。整流動作については全波整流回路で模擬し⁷⁾、全波整流回路に直列に接続される変圧器は、耐雷トランスのモデルを用いた。

(7) 接地極間の影響

信号通信機器室周辺のように複数の接地極が埋設されている状況では、接地極同士が相互に影響し合う⁸⁾。例えば、電極長がLの2つの接地極が埋設されている状況を考えると、2つの接地極間には式(1)で表される相互抵抗が存在するとみなすことができる。

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\log_e \frac{2L}{r} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right\} + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right] \quad (1)$$

ただし、R：相互抵抗 [Ω]、ρ：大地抵抗率 [Ω・m]、r：接地極間距離 [m]、L：接地電極長 [m] である。

提案した計算モデルでは、この相互抵抗を用いて、接地極間の影響を模擬することとした。

3.3 計算モデルによる予測計算の試行例

提案した計算モデルを用いて予測計算を試行した。本節では計算条件と試行結果について述べる。

3.3.1 計算条件

計算試行時の主な条件は以下の通りとした。

(1) 雷サージ入力波形と波形入力点

雷サージ入力波形はピーク電圧値が2kVの雷インパルス試験波形とした。入力波形を図3に示す。また、侵入経路は表1に示した侵入経路①（外部から通信ケーブルシースに侵入）を想定し、図2に示したサージ波形入力点に雷サージ波形を入力した。

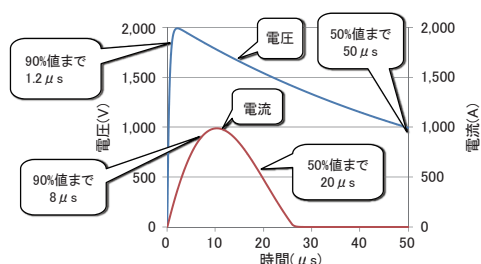


図3 予測計算試行時の入力波形

(2) ケーブル

通信ケーブルは鉄道用通信ケーブルである X9030-CA を、信号ケーブルは鉄道用信号ケーブルである SVV ケーブルを想定し、計算モデルを構成する定数は仕様値から算出した。また、ケーブル長は、過去に鉄道総研所内で実測によりケーブルの計算モデルの検証を行った⁵⁾時と同じ条件となる 100m とした。

(3) 耐雷トランス

3kV の耐雷トランスの実測値に基づき、モデルの定数を設定した。

(4) 大地抵抗率と接地極

平地における大地抵抗率は 10 ~ 1000Ω・m が目安とされており⁹⁾、鉄道総研所内及び線路沿線での実測でも概ね数百 Ω・m 程度であったことから、本試行では 500Ω・m とした。接地極は電極長 3m とし、図2に示した順に施工標準の異種接地間の最低離隔である 5m 間隔で直線状に設置されているものとした。また、接地抵抗値は表2のとおり施工されている状況を想定した。

表2 予測計算試行時の接地抵抗値

電力用 接地極	信号用 接地極	通信用 接地極Ⅰ	通信用 接地極Ⅱ	通信用 接地極Ⅲ
30[Ω]	100[Ω]	100[Ω]	50[Ω]	50[Ω]

3.3.2 予測計算の試行結果

予測計算の試行例として、サージ波形を入力した際に図2の通信装置の電源側ポートと通信側ポートに印加される対地電圧波形の計算結果を図4に示す。図4より、通信装置のポート間に最大で500V程度の電位差が発生しており、この電位差と装置の耐電圧値を比較することで、装置の焼損の可能性を検討することが可能となる。また、様々な条件での試行により、図4に示した電位差が条件により変化することが分かった。

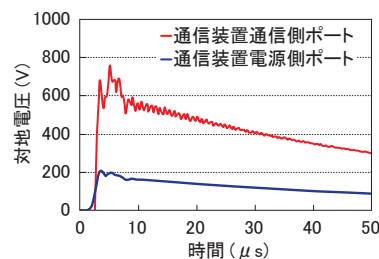


図4 予測計算の試行例

3.4 計算モデルによる予測計算手法の検証

提案した計算モデルの妥当性と予測計算の精度を検証するため、雷サージ印加試験を実施し、計算結果と実測結果との比較を行った。

3.4.1 雷サージ印加試験の概要

研修用に設備された信号通信機器室と信号・通信ケー

特集：信号通信技術

ブルにおいて、雷サージ印加試験を実施した。機器室内では、ケーブルの空き心線に避雷器、整流器、耐雷トランス、通信装置の電源部と通信部を模擬した終端抵抗を接続し、想定されるサージ侵入経路に、雷サージの模擬波形を入力した。試験時の装置間の接続を図5に示す。

試験を実施した箇所では、各接地極の接地抵抗値は図5に示した通りであった。試験時の接地の条件としては、各システムを独立接地にした場合と、全ての接地を信号用接地極に集約して共通接地にした場合の2つのパターンを設定した。

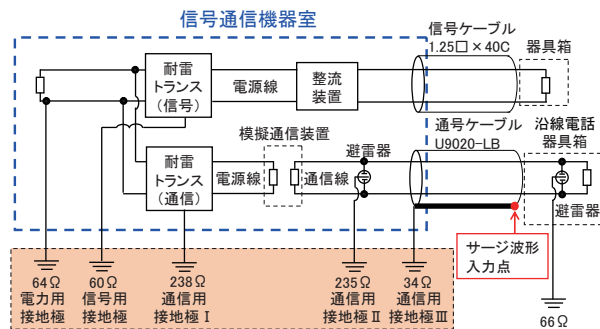
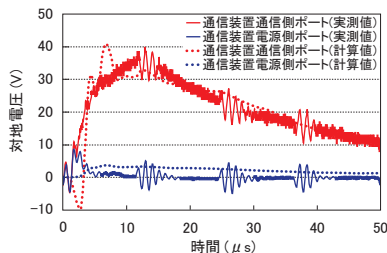


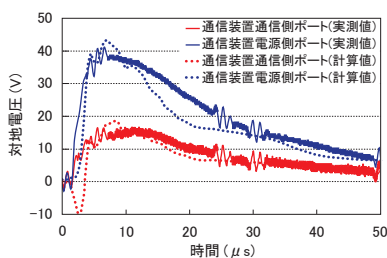
図5 雷サージ印加試験時の装置間の接続

3.4.2 試験結果と計算結果の比較による検証

図5に示した装置間の接続を模擬した計算モデルを作成して予測計算を実施し、計算結果と3.4.1に示した実測結果との比較を行った。図5中の雷サージ波形入力点（表1の侵入経路①）に雷サージ波形を注入した場合の模擬通信装置の通信側ポートと電源側ポートの対地電圧の実測結果と計算結果を図6に示す。図6(a)は独立接地時の実測結果と計算結果であり、図6(b)は共通接地時の実測結果と計算結果である。



(a) 各システム独立接地時



(b) 共通接地時（信号接地極に集約）

図6 実測結果と計算結果の比較例

図6より、独立接地時、共通接地時とも、雷サージを入力した際の通信装置の電源側ポートと通信側ポートの対地電圧の計算値は、実測値と比べて多少の差異はあるものの、最大値において10%程度の差であり、概ね一致していることが分かる。なお、図6の実測値において、電圧値が数μs間振動する現象は、測定点におけるノイズであることを確認しており、比較の対象外とした。また、表1に示した、4つの雷サージ侵入経路を想定して雷サージ波形を入力した際の電圧と電流についても、計算値と実測値が概ね一致することが分かった。以上より、提案したモデルが概ね妥当であり、通信設備に印加される電圧や電流を予測できることを確認した。

4. 通信設備における雷サージの影響評価手法

本章では、3章で示した予測計算の結果に基づいて、接地パターンの変更が通信設備における雷サージ対策として有効か否かを評価する手法について述べる¹⁰⁾。

4.1 雷サージの影響評価手法

4.1.1 雷サージ影響評価手法の流れ

雷サージ対策として採用可能か否かを判定する際には、人体防護と装置保護を考慮する必要がある¹¹⁾。そこで、3.2節で提案したモデルによる予測計算結果に基づき、人体防護と装置保護の観点から、雷サージ対策として採用可能か否かを判定する評価手法を検討した。提案した鉄道通信設備における雷サージ影響評価手法の流れを図7に示す。また、評価方法の詳細を以下に示す。

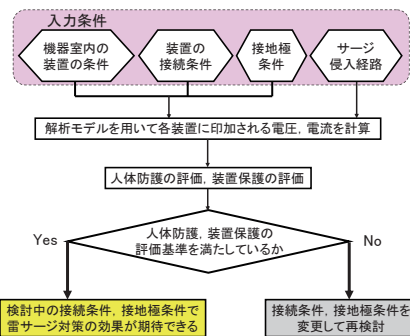


図7 通信設備における雷サージの影響評価手法

(1) 人体防護の観点での評価

IEC TS 60479-1では、感電から人体を防護するための評価基準として、人体に流れる電流値の大きさが示されており、提案した手法でも、この電流値に基づいて感電の判定を行うこととした。具体的には、ケーブルや装置の絶縁抵抗値と人体抵抗値を直列抵抗とみなし、ケーブルや装置に生じる対地電圧の予測計算値から人体に流れる電流値を算出し、評価基準との比較により判定する。

なお、信号設備の絶縁抵抗値は $1M\Omega$ とし¹²⁾、その他は電気設備に関する技術基準を定める省令¹³⁾の最悪値を用い $0.1M\Omega$ とした。また、IEC TS 60479-1に基づき、人体抵抗値を $1k\Omega$ とし、判定基準は離脱電流（人が自力で離れられる最大電流）である $10mA$ とした。

また、本研究では機器室自体は共通接地に含まない前提で実施しており、機器室内に存在する人体は電位が発生しない理想状態の地面に立っている条件とした。この条件では、装置と人体間の電位差は大きくなる傾向になり、人体防護の評価を行う上では安全側となる。

(2) 装置保護の観点での評価

装置保護の判定は、装置の仕様等で定められる耐電圧値・耐電流値と各部の電圧・電流の予測計算値との比較により判定する。本報告内における検討では、通信装置の判定基準は標準的な値³⁾を用い、信号装置の判定基準は JIS 規格の値¹²⁾を用いて、表3の通り設定した。

表3 設定した装置保護の判定条件

装置種別	判定項目	判定基準	
通信装置 ³⁾	線路～接地間	通信装置の電源側 通信装置の回線側	5kV 2kV
	入出力間（通信装置の電源側と回線側）		2kV
	2線間		2kV
信号装置 ¹²⁾	対地／2線間（屋内装置の耐電圧）		1kV

4.1.2 雷サージの影響評価手法の入力条件

図7に従って評価を実施する際には、以下の入力条件を整理する必要がある。

(1) 機器室内の装置の条件

予測計算を実施する際に必要な装置の仕様等を整理し、計算モデルに反映する。

(2) 装置の接続条件

装置間、装置・接地極間、装置・機器室外ケーブル間の接続、接地パターンを整理し、計算モデルに反映する。

(3) 接地極条件

検討する信号通信機器室における接地抵抗値と接地極間の離隔を整理し、計算モデルに反映する。

(4) サージ侵入経路

表1で示した侵入経路を基本とするが、外部から機器室内に引き込まれる、もしくは機器室周辺で接地極に接続される導体がある場合には侵入経路として加える。

4.2 雷サージの影響評価手法による評価の試行例

図2に示した計算モデルの構成で、接地パターンを変更し、提案した影響評価手法による評価を試行した。

4.2.1 評価の試行条件

試行条件は3.3.1に示した計算条件を基本とし、接地パターン、接地抵抗値、雷サージ侵入経路については以下の通りとした。

(1) 想定される接地パターン

図2の計算モデルにおいて、想定される接地パターンを表4に示す。表4において「○」を示した接地は1つの接地極で共通化する部分である。現状の各系統独立接地（パターンA）と全ての接地を1つの接地極に集約した共通接地（パターンG）の他に、一部の接地のみを1つの接地極に集約する接地パターンも想定されることから、7つの接地パターンで評価を試行した。

表4 想定される接地パターン

接地パターン	接地パターン名	通信用接地極			信号用接地極	電力用接地極
		通信Ⅰ	通信Ⅱ	通信Ⅲ		
A	現状（各系統独立接地）					
B	通信の共通接地 a	○	○			
C	通信の共通接地 b	○	○	○		
D	信号・通信の共通接地 a	○	○		○	
E	信号・通信の共通接地 b	○	○	○	○	
F	電力・信号・通信の共通接地 a	○	○		○	○
G	電力・信号・通信の共通接地 b	○	○	○	○	○

(2) 接地抵抗値

接地抵抗値は表2の通りとし、共通接地の接地抵抗値は 50Ω 、 5Ω の2つの場合で実施した。なお、 50Ω は多くの機器室において既存の接地極を使用できるという想定で選択した。また、 5Ω は鉄道通信設備の施工標準に示される最も低い接地抵抗値（交流電化区間のケーブル遮蔽）として設定した。

(3) 雷サージの侵入経路

各接地パターンにおいて検討の際に想定した雷サージの侵入経路は表1に示した通りとした。

4.2.2 評価の試行結果

4.2.1に示した試行条件の下で、提案した評価手法による判定を試行した。まず、入力条件に従って計算モデルを作成し、全ての接地パターンに対して通信装置、耐雷トランスに印加される電圧と電流の予測計算を行った。計算結果の例として、接地パターンAの条件での通信装置の電源側ポートと通信側ポートの対地電圧の計算結果は図4に示した通りとなる。

次に、図7のフローに従って、計算結果を用いて雷サージ対策として採用可能か否かの評価を試行した。評価の試行結果を表5に示す。表中の「○」は全ての評価項目が判定基準を満たしている場合であり、「×」は判定基準を満たせない項目があることを示している。

パターンAは現行の施工標準の通りであり、全ての判定基準を満たす結果となった。また、接地パターンB、D、Fについても全ての判定基準を満たす結果となった。

一方、接地パターンC、E、Gでは、共通接地の接地抵抗値を 50Ω とした場合に、侵入経路①に雷サージが侵入すると、シースの電位上昇の影響を受けて機器室内の通信装置も電位が上昇する計算結果となった。通信装置の電位上昇に伴い、人体を流れる電流が判定基準の

表5 評価手法に基づく雷サージの影響評価の試行結果

接地パターン	接地のパターン	共通接地時の接地抵抗値	サージ侵入経路			
			①通信ケーブルのシースに侵入	②通信ケーブルの心線に侵入	③信号ケーブルの心線に侵入	④電源線に侵入
A	現状（各系統独立接地）	—	○	○	○	○
B	通信の共通接地 a	50Ω	○	○	○	○
		5Ω	○	○	○	○
C	通信の共通接地 b	50Ω	× 感電の可能性あり 人体電流 13.4mA	○	○	○
		5Ω	○	○	○	○
D	信号・通信の共通接地 a	50Ω	○	○	○	○
		5Ω	○	○	○	○
E	信号・通信の共通接地 b	50Ω	× 感電の可能性あり 人体電流 13.4mA	○	○	○
		5Ω	○	○	○	○
F	電力・信号・通信の共通接地 a	50Ω	○	○	○	○
		5Ω	○	○	○	○
G	電力・信号・通信の共通接地 b	50Ω	× 感電の可能性あり 人体電流 13.4mA	○	○	○
		5Ω	○	○	○	○

10mA を超えたため、評価結果は「×」となった。また、接地抵抗値を 5Ω とした場合には、通信装置の電位上昇が軽減され、全ての項目で判定基準を満たす評価となった。

以上の試行結果から、提案した評価手法を用いることにより、接地パターンを変更した場合に雷サージ対策として採用が可能か否かを判定できることを確認した。

5. まとめ

本報告では、雷サージ侵入時に通信設備に印加される電圧値と電流値を予測するために開発した計算モデルを示し、計算モデルを用いた計算結果と実測結果との比較により、印加電圧の最大値の誤差が 10% 程度であることを確認した。次に、予測計算結果に基づいて、雷サージ対策が採用可能か否かを判定する評価手法を提案し、接地パターンの変更による対策の評価を試行した。その結果、提案した評価手法を用いて、雷サージ対策として採用可能か否かを判定できることを確認した。

なお、提案した評価手法は、接地パターンの変更の検討だけではなく、保安器等の追加による雷サージ対策を検討する際に、保安器を追加する箇所による対策効果の違いなどの評価にも活用できると考えている。

今後は、提案手法を用いた評価を様々な条件の下で実施し、手法の妥当性を検証する予定である。また、本研究は雷サージを対象としたが、地絡・短絡故障や電磁誘導の影響も考慮できるように予測計算手法と評価手法を拡張していく予定である。

謝辞

本研究における現地試験にご協力いただきました、西日本旅客鉄道株式会社の関係の皆様へ深く感謝いたします。

文献

- 1) 高度情報社会の雷害問題の実情と研究課題，電気学会技術報告，No.902，2002
- 2) 建築物等の雷保護，JIS A4201-2003，2003
- 3) 鉄道における通信ケーブルの Q&A，日本鉄道電気技術協会，2010
- 4) 小野雄人，竹内恵一，新井英樹，杉本経嗣，山口大介：信号通信ケーブルに発生する雷過電圧解析，鉄道総研報告，Vol.27，No.9，pp.5-10，2013
- 5) 川村智輝，竹内恵一，山口大介：鉄道通信設備の雷サージ解析モデルの検討と実測による検証，電気学会通信研究会資料，CMN-16-015，pp.1-6，2016
- 6) 河野秀宏，富永哲欣，倉本昇一：IT 機器を雷サージから防護するためのシミュレーション技術，NTT R&D，Vol.51，No.12，2002
- 7) 規格解説シリコン定電圧整流器（F 形），信号保安，vol.40，No.6，pp.273-276，信号保安協会，1985
- 8) 酒井洋，森武昭，大矢征：ノイズによる誤動作と対策，日刊工業新聞社，1990
- 9) 通信保安体系，サンコーシャ，1992
- 10) 竹内恵一，川村智輝，山口大介：鉄道通信設備における雷サージの影響予測手法，第 53 回鉄道サイバネ・シンポジウム，614，2016
- 11) 接地システムの雷サージ・EMC への影響評価，電気学会技術報告，No.1343，2015
- 12) 鉄道信号保安部品の絶縁抵抗及び耐電圧試験方法，JIS E3021-1999，1999
- 13) 電気設備に関する技術基準を定める省令，経済産業省，2012