

信号通信ケーブルに発生する雷過電圧解析

小野 雄人* 竹内 恵一** 新井 英樹*
杉本 経嗣* 山口 大介**

Analysis of Lightning Overvoltage on Signalling and Telecommunication Cables

Yuto ONO Keiichi TAKEUCHI Hideki ARAI
Keiji SUGIMOTO Daisuke YAMAGUCHI

When lightning strikes, lightning overvoltage is generated by electromagnetic induction and it sometimes comes to signalling or telecommunication equipment through its cable. Therefore, it is necessary to figure out propagation of lightning overvoltage on cables when considering countermeasures against lightning damage to signalling or telecommunication equipment. The authors tried to apply numerical electromagnetic analysis and electrical circuit network analysis for figuring out lightning overvoltage on cables and found that it is reasonable to apply these analytical methods.

キーワード：数値電磁界解析，FDTD 法，回路網解析，EMTP，雷過電圧，信号通信ケーブル

1. はじめに

信号通信設備の配線に用いられるケーブルは、落雷時に発生した雷過電圧が信号通信設備に流入する経路となる。そのため、ケーブルに発生する雷過電圧を把握することが、信号通信設備の雷害対策を検討する上で必要となる。そのための手法として、実物のケーブルに過電圧を印加して試験を行う手法も考えられるが、あらゆるケーブルの敷設状況について試験を実施することは、労力やコスト上の問題により、困難である。そのため、本研究では、ケーブルを模擬したモデルを作成し、解析を行うことによって雷過電圧の伝搬様相の把握を行った。

解析手法として、Maxwell の方程式を解くことによって電磁界を計算する有限差分時間領域 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 法などの数値電磁界解析がある。また、ケーブルを分布定数回路とみなして、発生する過電圧・電流を解析する、回路網解析の適用も可能と考えられる。

本研究では、ケーブルに発生する過電圧を、FDTD 法によって解析し、実際のケーブルを用いて行った試験の結果と比較することで妥当性を検証した。また、通信ケーブルに発生する雷過電圧を回路網解析によって解析するための基本計算を行い、回路網解析の通信ケーブルへの適用方法を確立した。

2. 解析手法

信号通信ケーブルに発生する雷過電圧を把握するために使用する解析手法について、概要を説明する。

2.1 FDTD 法

数値電磁界解析とは、Maxwell の方程式を、初期条件および境界条件のもとに数値計算することである¹⁾。現状で広範に用いられている数値電磁界解析法としては、FDTD 法、有限要素法、モーメント法などがある。計算機の能力の向上により、利用範囲の拡大とともに、解析法の研究も盛んにおこなわれている。本研究にて行う数値電磁界解析では FDTD 法を用いた。FDTD 法は、アンテナの解析²⁾、電力設備への雷撃時に発生する雷過電圧の解析³⁾ などの分野で幅広く適用されている手法である。

式 (1)、式 (2) に Maxwell の方程式を示す。

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon} E + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times H \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times E \quad (2)$$

ただし E : 電界, H : 磁界, σ : 導電率, ε : 誘電率, μ : 透磁率である。

Maxwell の方程式では、電界の時間微分が磁界の回転、磁界の時間微分が電界の回転、という関係が成立している。そのため、FDTD 法では、図 1 に示すように電界 E と磁界 H は、 $\Delta t/2$ の時間だけずれた時刻に配置される。なお Δt は、解析を行う時間の最小単位 (時間ステップ) である。

* 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 ネットワーク・通信研究室

また、FDTD法では、図2に示すように、解析対象とする空間を、一辺 Δs の細かな立方体（セル）に分割し、セルの辺の中心に電界を、面の中心から面と垂直の方向に磁界を割り当てて、空間の電磁界を表現する。この場にMaxwellの方程式を適用し、電界と磁界の時間変化を直接解いていく。時間ごとに結果が得られるため、直観的に理解しやすい、プログラミングが比較的簡単などの特長がある。しかし、計算機資源（メモリ容量、CPUの処理時間）を必要とするという短所がある。

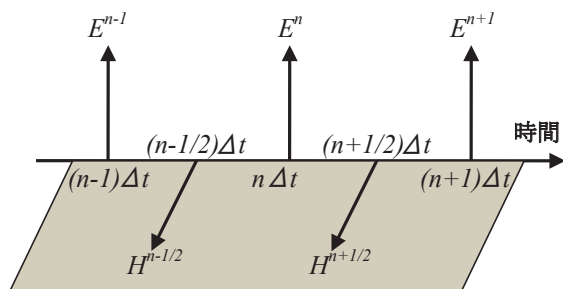


図1 時間軸上の電界および磁界の配置

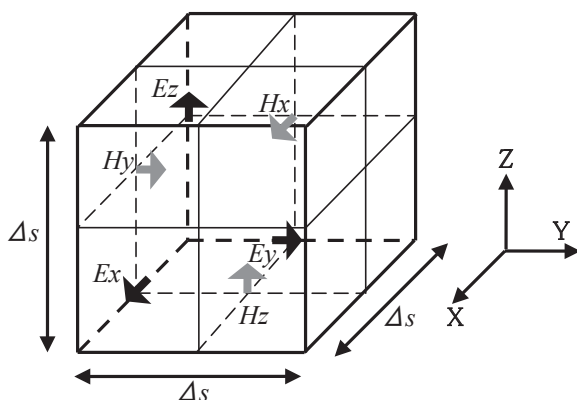


図2 セル中の電界および磁界の配置

2.2 回路網解析

回路網解析は、TEM (Transverse Electro Magnetic) モード伝搬を前提として、解析モデルを電気的な等価回路で表して解く手法である。ケーブルは、線路定数であるR (抵抗)、L (インダクタンス)、C (キャパシタンス)、G (漏れコンダクタンス) がケーブルの長さ方向に様に分布している等価回路とみなせることから、回路網解析によるケーブルの電気的特性の解析がなされている。また、一般的には、ケーブルのように長い導体の解析においては、数値解析に比べて回路網解析は計算時間が短い傾向にある。

これまで、他分野における研究開発で、回路網解析を用いた雷過電圧解析に関する計算手法等が考案されている。また、鉄道の分野においても、信号設備における雷過電圧解析の研究開発⁴⁾で回路網解析を用いた計算手法が提案されている。

今回、鉄道用通信ケーブルにおける雷過電圧解析にお

いては、鉄道沿線に敷設された線路長の長い導体の解析が考えられることから、回路網解析を用いることとした。また、既存の研究開発の知見を活かしつつ、鉄道環境特有の条件として、通信ケーブルに平行して敷設されている多数の導体が存在すること、通信設備の特有の条件として、ケーブル内部構造の違い、伝送品質の劣化を評価できる出力パラメータが得られることを考慮した。

3. FDTD法による解析結果の検証

3.1 1線のケーブルへの印加試験

FDTD法によるケーブル上の雷過電圧の伝搬様相の解析の妥当性を検証するため、1線のケーブル上に過電圧を印加した際の伝搬様相の把握を、試験による観測とFDTD法による解析によって実施し、両者の結果の比較を行った。

3.1.1 試験構成

1線のケーブルに過電圧を印加する試験の試験構成を図3に示す。印加するケーブルには3m長のIV線を用いた。印加した電圧波形は、パルス幅を100nsに、電圧を100Vに設定したパルス波とした。電圧源として用いるパルスジェネレータ (PG) から発生するノイズ等の影響を避けるため⁵⁾、7.5mの同軸ケーブルを介して、IV線にパルス波を印加し、IV線の印加端 (送端) に発生した電圧を、オシロスコープを用いて測定した。

3.1.2 FDTD法による解析

FDTD法による解析においては、図3の試験構成を模擬するため、IV線と銅板についてモデル化を行った。作成した解析モデルを図4に示す。IV線を模擬した細線導体については、半径は1mmとしたが、厚さ0.8mmの絶縁被覆は模擬していない。銅板は、抵抗率 $1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 、厚さ20mmの土壌として模擬した。解析モデルでのセルの大きさは一辺5mmとした。また、境界条件として、6面とも一般的によく使われるLiaoの吸収境界を適用した。Liaoの吸収境界とは、伝搬してきた電磁波を反射せず、あるいは吸収し、境界内部の電磁界に影響を与えないようにする、仮想的な境界である¹⁾。

PGは電圧源として模擬し、試験と同様の波形を出力するように設定した。使用したPGの内部抵抗は53.5 Ω であるので、この値を用いた。

電圧測定点は、試験と同様に送端側とした。

3.1.3 試験結果と解析結果の比較

IV線の送端側に発生した電圧波形の試験結果と解析結果を比較したものを図5に示す。過電圧の伝搬速度を光速とすると、長さ3mのIV線を伝搬するのに約10ns、往復に約20nsを要するが、時間が20nsを過ぎた時点で、正反射によって電圧が増加する現象が、解析結果においても再現されている。したがって、試験結果と解析結果

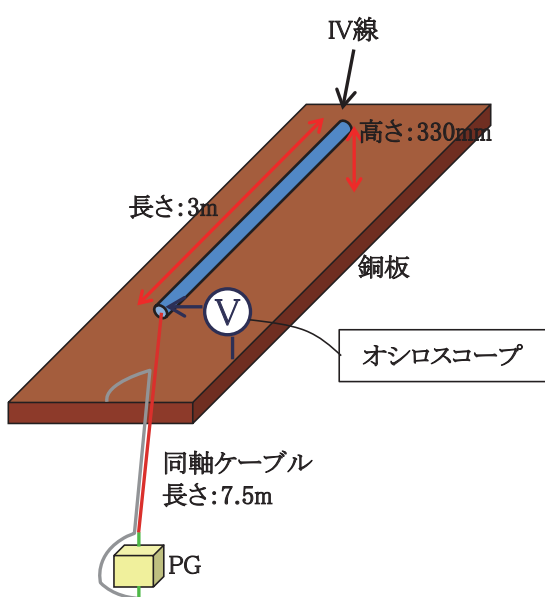


図3 1本の線上における過電圧伝搬に関する試験構成

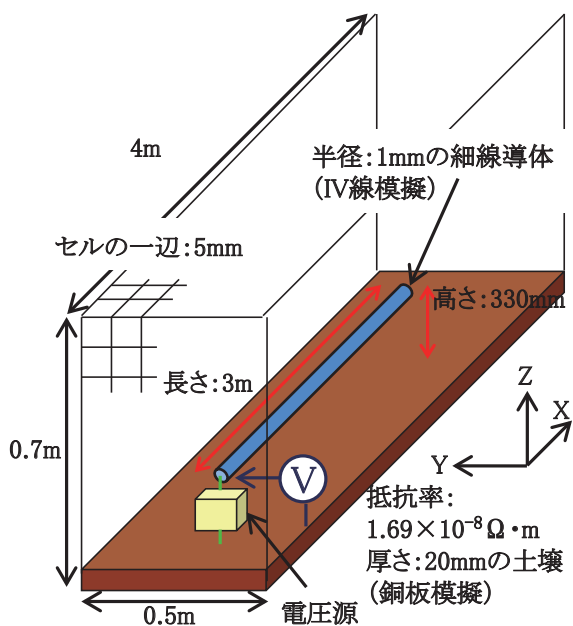


図4 1本の線上における過電圧の伝搬の解析モデル

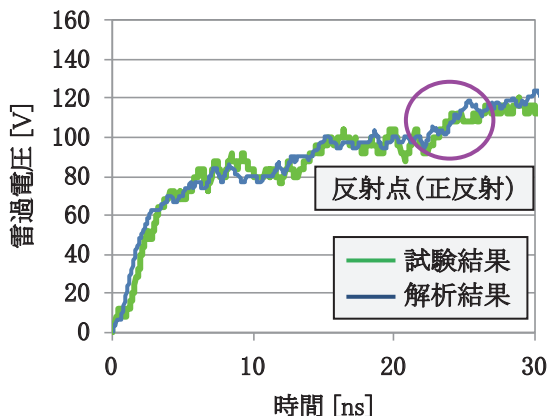


図5 送端側電圧波形

が良好に一致していることが確認できたといえる。

3.2 信号ケーブルを用いた2芯線間の誘導試験

3.1節において、1線のケーブルへの過電圧印加時の、過電圧の伝搬様相が精度よく解析できたため、実際に信号ケーブルとして用いられるSVVケーブル(2mm²×4芯、図6)の1芯に過電圧を印加した際の、隣接する芯線の伝搬様相について、試験結果と解析結果の比較を行った。

3.2.1 試験構成

SVVケーブルに過電圧を印加する、2芯線間誘導試験の試験構成を図7に示す。

ケーブル長は3m、印加するパルス波等は図3の試験と同様であった。印加線(赤芯線)および誘導線(白芯線)の送端に発生した電圧を、オシロスコープを用いて測定した。

3.2.2 FDTD法による解析

FDTD法による解析のために作成した解析モデルを図8に示す。SVVケーブルの芯線を模擬する細線導体は半径0.9mmとし、それぞれ4mmずつ離隔をとって配置した。4mm間隔で細線導体を配置するため、モデルのセルの大きさは一辺2mmとした。電圧測定箇所は、



図6 SVVケーブル

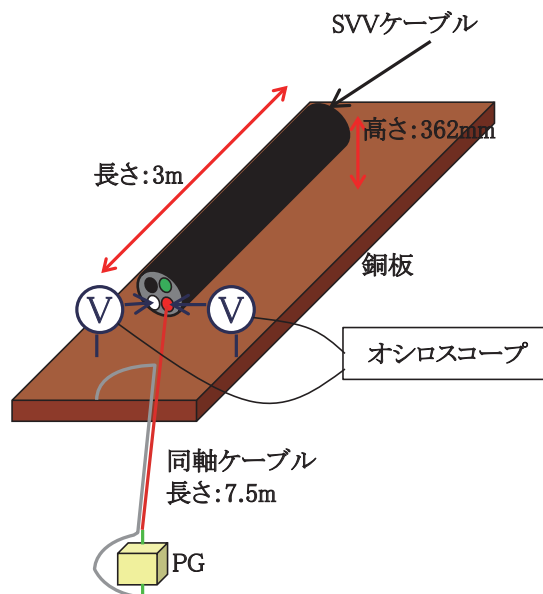


図7 SVVケーブル芯線間誘導試験構成

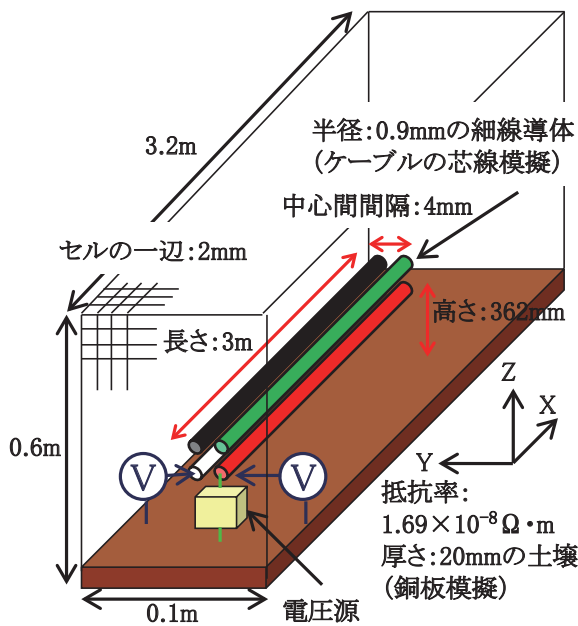


図8 芯線間誘導試験の解析モデル

過電圧を印加する細線導体と、隣接する1本の細線導体の送端側とした。

3.2.3 試験結果と解析結果の比較

SVVケーブルの送端側に発生した電圧波形の、試験結果と解析結果を比較したものを図9に示す。誘導線に発生した電圧について、印加線よりも差異が大きくなっているものの、電圧値の増減する時間などは概ね一致しており、信号設備の雷害対策を検討するために必要な概算値として使用できる精度ではあると考えられる。以上より、解析によって得られた結果を、ケーブルの対雷設計およびケーブルに接続された設備に施す雷害対策の検討に活用することは、可能であると考えられる。

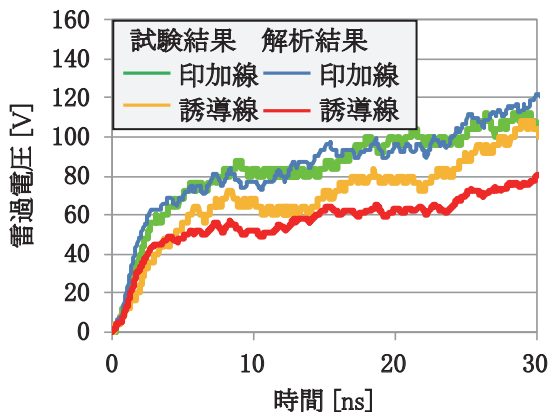


図9 送端側電圧波形

3.3 FDTD法を用いた解析によるパラメータスタディ

3.2節において、FDTD法を用いた解析によって、隣接するケーブル芯線に発生する過電圧の大きさをある程度推定することが可能であることがわかった。この結果を受けて、解析によって対雷設計を検証する手法を検討

するため、隣接するケーブルの離隔による、ケーブル間の誘導量（印加過電圧に対する誘導過電圧の割合）の変化を計算するパラメータスタディを行った。隣接線に発生した過電圧による誘導を低減するために必要な離隔の検討を、実際のケーブルを用いずに、解析によって行った。

解析は図10に示すモデルで行った。細線導体を2本とした他は図8とほぼ同様である。2本の細線導体の中心間離隔を4mmから20mmまで、2mm刻みで変化させて解析を行った。

解析結果より、誘導線に発生する電圧の印加線に発生する電圧に対する比率を示したものが図11である。離隔を広げることで誘導量は低下していき、12mmにしたところで印加線のおよそ5割となることがわかった。離隔以外の条件を変更した場合にも、同様に解析を行うことで、誘導量の推定が可能であり、耐雷設計の検討等に活用できると考えられる。

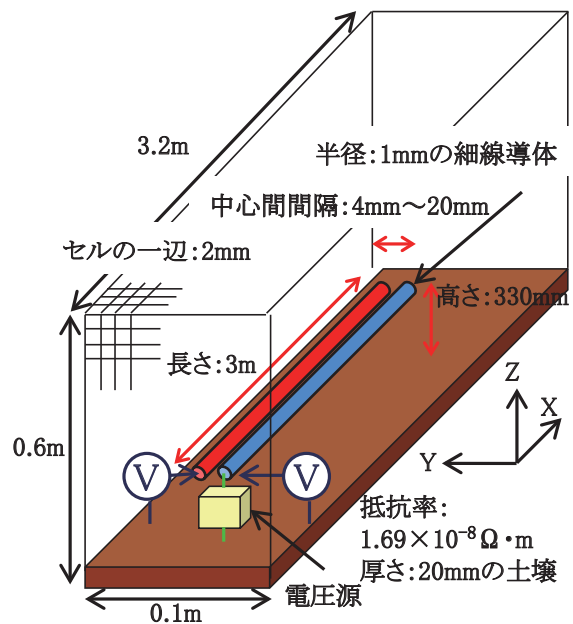


図10 パラメータスタディに用いた解析モデル

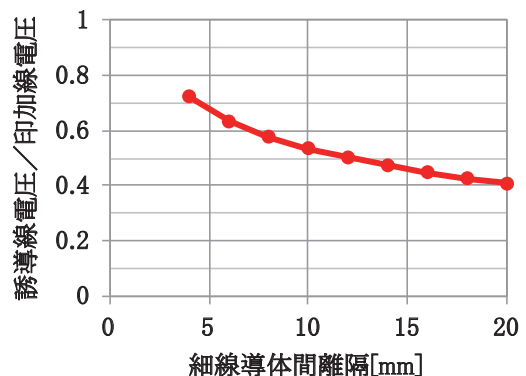


図11 細線導体の離隔と誘導量の関係

4. 鉄道用通信ケーブルにおける回路網解析の検証

鉄道用通信設備では、雷過電圧による設備の伝送品質の劣化、故障、損傷等が発生しているが、雷過電圧の影響を定量的に把握する手法が確立されていない。また、一般的に雷過電圧対策として共通接地により電位差を無くすことで効果があるとされている⁶⁾が、鉄道用通信設備では共通接地とした場合の影響も懸念されており、共通接地による効果や影響について、定量的に把握する手法が確立していない。そこで、鉄道用通信設備を対象として、雷過電圧解析基礎計算モデルを検討し、モデルを用いた基礎計算を試行することとした。

鉄道用通信設備に侵入する雷過電圧の解析を行うためには、雷過電圧の侵入経路を把握するとともに、侵入してくる雷過電圧・電流を解析する手法を確立する必要がある。そこで、今回は研究の最初のステップとして鉄道用通信ケーブルを対象として、雷過電圧解析基礎計算モデルを検討し、モデルを用いた基礎計算を試行した。

4.1 通信ケーブルの基礎計算モデルで考慮すべき点

鉄道用通信ケーブルを対象とした雷過電圧解析の基礎計算モデルを検討する際に考慮すべき条件について整理した。

4.1.1 鉄道特有の条件

図12に鉄道における主要な線の配置の概要を示す。鉄道用通信ケーブルは、トロリ線やレールなどの多数の線と近接並走する形で設置されている。特に、レールのように分布接地とみなせる線が、通信ケーブルと近接並走する状況は鉄道特有の条件となる。また、図13に信号通信機器室における接地の例を示す。鉄道の設備はシステム毎に異なる接地としており、さらに通信設備であっても、用途や目的毎に異なる接地をとることとされている。

4.1.2 通信設備特有の条件

通信ケーブルの内部構造や配置は電力ケーブルや信号ケーブルと異なっており、2回線（4心線）で1つのカッドを構成し、5つのカッドが集まり、ユニットを構成している。また、搬送回線については別に搬送カッドを構成している。図14に通信ケーブルの内部構造の例を示す。提案するモデルでは、図14に示した通信ケーブルの構造や配置を考慮した計算モデルとする必要がある。また、通信設備では伝送品質の劣化を示す指標として線間電圧での評価を行うことから、線間電圧も算出可能な計算モデルとしなければならない。

4.2 想定する通信ケーブルへの雷過電圧の侵入経路

通信ケーブルを介して雷過電圧が侵入する経路を検討した。その結果、通信ケーブルを介して雷過電圧が通信設備に侵入する主な経路は電位上昇によるものと、電磁誘導

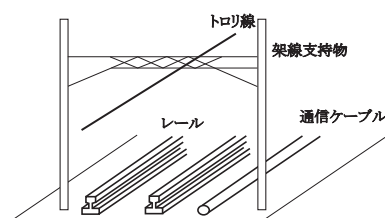


図12 鉄道における主要な線の配置

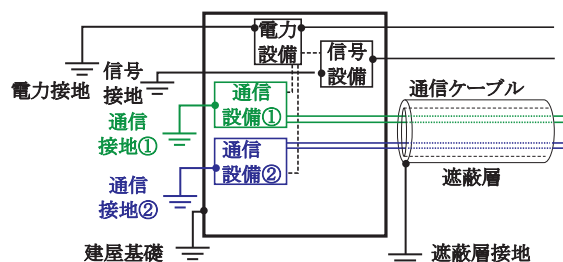


図13 信号通信機器室における接地の例

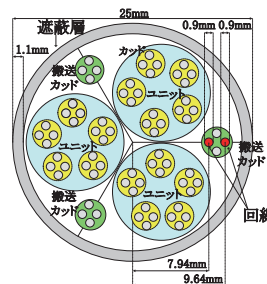


図14 通信ケーブルの内部構造（X-9030Aの例）

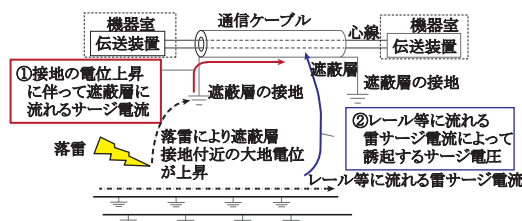


図15 通信ケーブルを介した主要な侵入経路

の影響によるものが支配的であると考えられる。図15に通信ケーブルを介した雷過電圧の主要な侵入経路を示す。

4.3 雷過電圧解析の基礎計算モデル

4.3.1 通信ケーブルのモデル化

通信ケーブルのモデル化では、通信ケーブルの内部構造を考慮し、断面図を基にして、解析しようとする回線と他の回線や遮蔽層との間の相互インダクタンスを決定することとし、回路網解析が必要となる通信ケーブルの各種パラメータは仕様値を用いることとした。本報告では、鉄道用通信ケーブルX-9030Aの搬送回線（図14中の赤い丸）を例としてモデル化し、以後の計算を行うこととした。表1にX-9030Aの主要なパラメータを示す。

表1 X-9030Aの主な仕様

導体種別	外径 [mm]	内径 [mm]	抵抗率 [$\Omega \cdot m$]	比透磁率
心線	0.9	0.0	1.7241×10^{-8}	1
シース	25.0	22.8	2.82×10^{-8}	1

4.3.2 通信ケーブルと他導体の配置

鉄道沿線の環境に存在する導体として、レールが存在した場合を想定することとし、離隔は施工標準に示された値を採用することとした。図16に、想定した導体配置例を示す。

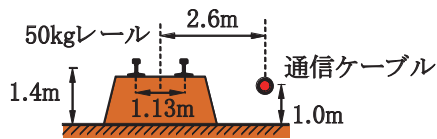


図16 想定する導体配置

4.3.3 通信ケーブルの雷過電圧解析基礎計算モデル

ケーブル内の回線に接続された端末機器は純抵抗で模擬し、抵抗にかかる電圧値や電流値を、端末側設備にかかる負荷とみなすこととした。また、1つの回線を2心線でモデル化することにより、通信設備の伝送品質劣化の指標となる線間電圧を計算可能とした。図17に通信ケーブルの雷過電圧解析基礎計算モデルの例を示す。

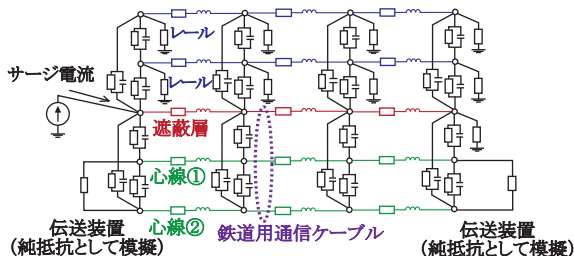


図17 通信ケーブルの雷過電圧解析基礎計算モデルの例

4.3.4 モデルを用いたシミュレーションの試行例

図17に示したモデルを利用し、300mの通信ケーブル(X-9030A)の遮蔽層接地から雷サージ電流が侵入した場合のシミュレーションの試行例を図18に示す。提案した基礎計算モデルを用いて、雷過電圧により通信ケーブル端末側に印加される線間電圧、対地電圧を数値的に解析可能となったことから、本モデルを用いることで、雷サージ対策として通信設備の接地方式を共通接地とした場合の効果や影響について定量的な解析が可能となる。

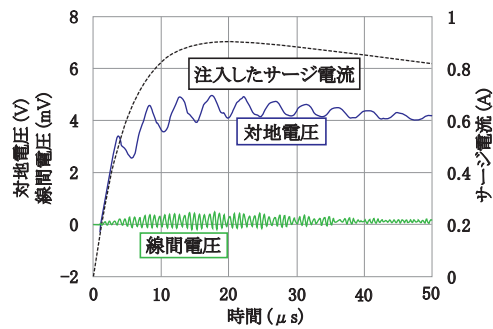


図18 モデルを用いたシミュレーションの試行例

5. まとめ

本稿では、ケーブル芯線に過電圧を印加した際の伝搬様相の、試験結果とFDTD法による解析結果の比較を行い、両者が良好に一致していることを示し、FDTD法による解析結果を、対雷設計の検討に活用する方法の一例を示した。また、これまでに研究が行われた雷過電圧解析手法を、通信ケーブルに適用した回路網解析モデルを構築し、雷過電圧により通信ケーブル端末側に印加される線間電圧、対地電圧を数値的に解析した。これによって、回路網解析を通信ケーブルの解析に適用可能であることを示した。

雷過電圧解析の最終的な目標は、雷によってケーブルに発生する過電圧を、実物を用いた試験によらずに推定し、雷害対策の検討に活用できることである。そのため、様々な条件下において精度のよい解析ができるよう、検証を進めていく予定である。

文献

- 1) サージ現象に関する数値電磁界解析手法調査専門委員会：数値過渡電磁界解析手法，電気学会，2008
- 2) 宇野亨：FDTD法による電磁界およびアンテナ解析，コロナ社，1998
- 3) 野田琢，松原廣治，横山茂：FDTD法による解析結果を用いた新しい雷サージ計算用鉄塔モデル，電力中央研究所報告，H04012，2005
- 4) 新井英樹，藤田浩由，小野雄人，渡辺郁夫：踏切設備の雷サージ解析モデルの構築，鉄道総研報告，Vol.25，No.5，pp.35-40，2011
- 5) 野田琢，横山茂：FDTD法に基づくサージ解析コードの開発，電力中央研究所報告，T00004，2000
- 6) 低圧・制御回路のサージ現象調査専門委員会：低圧・制御回路のサージ現象，電気学会技術報告，第1115号，2010