

通信設備における接地方式の評価手法

山口 大介* 竹内 恵一* 藤田 浩由**

Evaluation Method of Grounding Characteristics for Railway Telecommunication Systems

Daisuke YAMAGUCHI Keiichi TAKEUCHI Hiroyuki FUJITA

In recent years, the introduction of deep grounding for reducing the ground resistance value and equipotential bonding is studied in railway telecommunication systems. In this paper, first, a calculation method of estimating the earth resistance and the potential interference coefficient is shown, and the development of the calculation tool for estimating characteristics of deep grounding is described. Secondly, on the basis of the estimated characteristics of deep grounding by using the tool, the equipotential bonding with deep grounding for railway telecommunication systems is proposed, which realizes both reduction of grounding resistance and equipotential bonding. Finally, the future study on the proposed grounding configuration is shown.

キーワード：接地抵抗，電位干渉，雷害，地絡故障，電磁誘導

1. はじめに

鉄道通信設備における接地は、き電回路からの誘導現象により発生する誘導電圧を軽減するための誘導防止用接地、装置の動作に必要な基準電位を確保するための通信用接地、落雷や地絡故障による影響から人体や装置を保護するための保安用接地などの用途毎に複数の接地極を設ける個別接地を行ってきた¹⁾。しかし、通信機器室等では接地極を多数設ける必要があることから、設計施工標準（以下、施工標準）等で定められた基準抵抗値を満足し、かつ電位干渉が小さくなるような接地極間の離隔の確保が設計・施工上の課題となっていた。

近年、接地抵抗低減や電位干渉低減を目的として、従来の施工方法とは異なる深打接地の導入が一部で進められている。また、接地極数の削減と落雷や地絡故障時に設備を保護する効果が期待できる共用接地の導入も検討されている。筆者らは、過去に信号通信機器室に設備される機器とケーブルの計算モデルを作成して共用接地の導入に向けた定量的な検討を行った²⁾が、当時は深打接地の適用は考慮されておらず、また深打接地の接地抵抗低減効果や近接する他の接地極への電位干渉の影響に関しても定量的な評価には至っていない。

そこで本研究では、深打接地の特性を把握するため、接地抵抗や電位干渉を定量的に予測できるツールを開発した。さらに、ツールによる深打接地の特性予測結果に基づいて深打接地を含む鉄道通信設備の共用接地構成案を提示し、実際に施工する際の留意点や課題を整理した。

2. 接地抵抗と電位干渉

2.1 鉄道通信設備における接地特性

鉄道通信設備では、目的や対象設備に応じて施工標準等で定められた接地抵抗の基準値を満足するように接地極を設けている。特に、通信機器室周辺では、表1に示すように用途に応じた複数の接地極が設けられている¹⁾。一般的に接地抵抗には、次の3種類の抵抗が含まれている。

- (1) 接地線や接地電極の導体抵抗
- (2) 接地電極表面と土壌の接触抵抗
- (3) 接地電極周囲の土壌の抵抗

接地電極から大地に流れる電流は、無限遠方に放射状に伝導していくが、接地電極近傍では電流経路の断面積が小さいことから抵抗が大きくなる。そのため、接地抵抗への主たる影響項目である(3)を、大地固有抵抗（あるいは大地抵抗率、大地比抵抗）と呼んでいる³⁾。した

表1 主要な接地用途と基準抵抗値（一例）

| 用途 | 対象設備 | 抵抗値 |
|---------------------|---------------------------|--------|
| 電磁誘導防止用 (交流電化区間) | ケーブル遮蔽 | 5Ω以下 |
| 静電誘導防止用 (直流電化区間) | ケーブル遮蔽 | 50Ω以下 |
| 通信用 | 通信機器用直流電源+側 | 10Ω以下 |
| | 地気回路用（電話機他） | 50Ω以下 |
| 保安用 | 保安器、中継線輪ろ波排流用 | 50Ω以下 |
| | 機器きょう体 (電源機器、AC300V以上) | 10Ω以下 |
| | 機器きょう体 (上記以外) | 100Ω以下 |
| | 耐雷トランスシールド | 100Ω以下 |
| | 吊架線 | 100Ω以下 |
| | 屋内金属電線管 | 100Ω以下 |

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

** 信号・情報技術研究部 信号システム研究室

がって、接地抵抗は、大地への電流経路となる接地電極の形状と大地固有抵抗から予測することができる。

図1に示すように、2つの接地電極が近接して設置されている場合、接地電極Aに電流が流れると、周囲に電位が波及し、接地電極Bの電位も上昇する。これを電位干渉という。また、無限遠方を基準点とした2つの接地電極の電位の比で、電位干渉係数が定義される。電位干渉を考慮し、接地電極同士あるいはレール、ケーブル等との離隔は5m以上確保することとしている¹⁾。

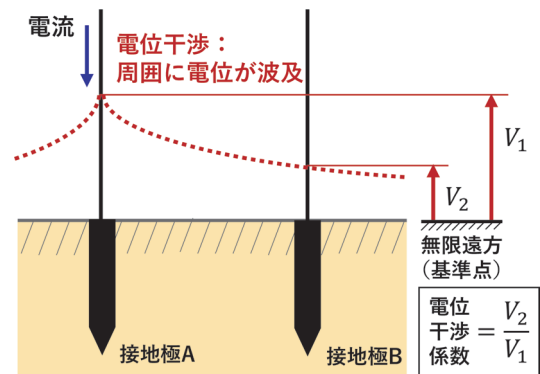


図1 接地電極間の電位干渉

2.2 接地電極形状

2.2.1 通信機器室の接地電極形状

接地電極の形状は分野や設備により異なっている。例えば、変電所では網状電極、送電鉄塔では埋設地線⁴⁾が採用されている。通信機器室では、限られた敷地内に互いに影響のない独立した複数の接地電極を設けるために接地棒が採用され、近年は深打接地も採用されている。

網状電極と埋設地線は、接地抵抗の低減には接地棒より優れた点を有しているものの、地上配線に電圧が誘起される可能性があり⁵⁾、通信機器室の敷地が狭隘で施工が不可能なケースもあるため、本研究では、通信機器室の接地電極の形状を、接地棒または深打接地のような棒状電極として検討を進めることとした。

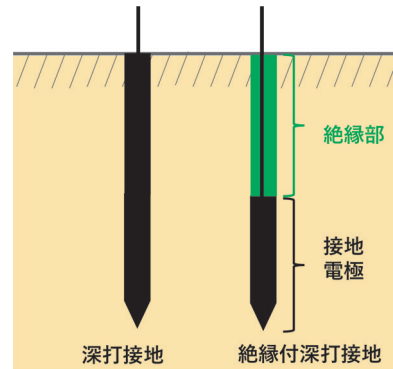


図2 深打接地の概形

2.2.2 深打接地の施工事例

連結用接地棒で接地棒を延長する直列工法において、何本も多重連結することは困難であるため、接地棒とは異なる施工方法で棒状電極を実現したものが図2に示す深打接地である。近年の施工では、ボーリング孔に38mm²程度の軟銅より線や導電性被覆電線を挿入し、空隙を導電性材料で充填する方法が主に用いられており、この充填剤も含めてボーリング径の棒状電極と見なせる。

日本で最初に採用された深打接地は、低抵抗接地の実現が目的であった⁶⁾。鉄道環境においては、接地電極間の電位干渉がない独立接地の実現という異なる目的で、地下の絶縁を通常より長くするために絶縁部を設けた、図2のような絶縁付深打接地が、遠方接地の代替として変電所で採用されている⁷⁾。このため、鉄道環境での接地特性の評価には、接地抵抗だけでなく電位干渉の観点も必要となる。

2.3 大地固有抵抗

大地固有抵抗は、土の種類、土に含まれる水分量やその化学的成分（塩分等の含有物質）、土の温度等の不確定要素によって変化し³⁾、一義的に決めることは難しいという点があるが、接地特性の予測における誤差要因として留意しておく必要がある。

以下では、大地固有抵抗に影響する因子を説明する。

2.3.1 土の種類

土の種類により大地固有抵抗は異なる⁸⁾。過去には国内各地で行った大地導電率（大地固有抵抗の逆数）の測定結果をもとに日本国土の大地導電率分布マップが作成されており⁹⁾、概算値として用いる場合の参考とすることができる。

2.3.2 土に含まれる水分量

土の中に水分が存在すると、大地固有抵抗は急激に低下する。例えば乾燥した砂交じりの土壌に水分を含ませた場合、水分含有率が2%から28%に増加すると大地固有抵抗は約30分の1程度に低下する¹⁰⁾。

2.3.3 土の温度（季節変動）

土壌は地中温度低下とともに大地固有抵抗が増加し、特に凍結した場合は著しく増加する。先行研究¹¹⁾では、大地固有抵抗の温度特性の実測例¹²⁾と地中温度の観測値から、温度を考慮した接地特性の予測も試みられている。しかし、前述の大地固有抵抗の温度特性の実測例を計算目的で用いるべきでないとする文献もあり¹³⁾、本研究の接地特性の予測では温度の考慮は見送ることとした。

3. 接地特性の予測手法

3.1 均一大地を仮定した従来の予測手法

接地特性の予測値は、大地を均一と仮定して、棒状電

極の電流と大地面に対称な影像の電流を考慮して電位分布の解析式を導出し、解析式から得られる電極表面電位を電流で除することで得られる。この際、電位分布の参照方法（接地電極の上端電位、中央電位、平均電位）が異なる複数の計算式が用いられているが、これらの式から得られる値の差は数パーセントである。大地から見れば電極本体の導電率は十分大きく完全導体とみなすことができ、電極表面の電位分布は等電位に近いことから、平均電位から求めた接地抵抗計算式が現実に近いと考えられている¹⁴⁾。

接地電極として用いられる接地棒は電極長が3m程度であり、これまで接地特性は地表付近の浅い地層の大地固有抵抗をもつ均一大地として予測していた。一方で、深打接地は電極長が長く地中深くまで達するため、複数の地層の大地固有抵抗を考慮した予測が必要であると考えられる。

過去に均一大地の解析式を拡張した水平多層構造の解析式も導出されている¹⁵⁾が、煩雑な表現の解析式となっていることや、層数により解析式が異なっていることから、予測ツールへの実装が困難な状況であった。

3.2 多層大地を考慮した予測手法

3.2.1 水平多層構造中の点電流による電位分布

本研究では、図3に示す水平多層構造モデルを用いて点電流源による電位分布を考え、電位分布の漸化式に境界条件を逐次適用する数値計算法によって多層大地の接地特性を予測する手法を適用することとした¹⁶⁾。

電位分布を同図のように円柱座標系で取り扱えば、電流 I の点電流源によって生じた第 j 層内の任意点 (r, z) の電位 v_j は、境界条件によって定まる係数を U_j および D_j として、式(1)の形で表現される。ただし、 J_0 は第1種0次ベッセル関数である。

$$v_j(r, z) = \frac{I}{4\pi} \int_0^\infty [U_j(\lambda) e^{\lambda(z-z_j)} + D_j(\lambda) e^{-\lambda(z-z_j)}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (1)$$

ここで、第 j 層の下部境界： $z=z_j$ 、上部境界： $z=z_{j-1}$ において、電位の連続、境界に電流源が存在しない場合には直交して流れる電流密度は連続、という境界条件を適用し、下方接続： $D_j = T_j U_j$ 、上方接続： $U_j = R_j D_j$ のような線形変換による関係付けを与え、点電流源による影響を表す補正項 S_j 、 G_k を加えることで、点電流源の上部と下部でそれぞれの漸化式が導かれる。

3.2.2 数値計算における課題解決

電位分布の漸化式には指数関数が含まれるため、正の値で発散しないよう、各層の厚さ h_j に対し $u_j = \exp(-\lambda h_j)$ と置き、式(2)のように変換して安定化が必要がある¹⁶⁾。

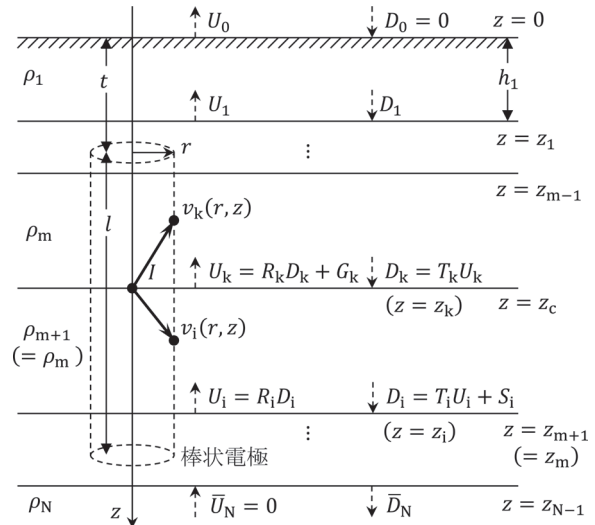


図3 水平多層構造モデルによる地中電位分布

$$T_j = \hat{T}_j u_j, R_j = \hat{R}_j u_j^{-1}, S_j = \hat{S}_j u_j \quad (2)$$

また、電位分布の漸化式は、関数 g に対する Hankel 変換（または Fourier-Bessel 変換）と呼ばれる式(3)の形の積分になっており、高精度に解を得るのは難しいとされている¹⁷⁾。ただし、 J_n は第1種 n 次ベッセル関数である。

$$H(r) = \int_0^\infty g(\lambda) J_n(\lambda r) d\lambda \quad (3)$$

そこで本研究では、近年提案された、交代級数の収束加速法である離散 Euler 変換を数値積分に応用した連続 Euler 変換により、Fourier 積分の収束性を改善することで一般的な有限区間の数値積分手法で計算する手法¹⁷⁾を用いることとした。

しかし、この手法に分割数に比して精度が良いとされているが被積分関数に依存せず分割する Gauss-Legendre 公式のような数値積分手法を用いると、積分区間の始端付近において被積分関数が急激に変化することが誤差の要因となり、精度良く計算できない事例があった¹⁸⁾。

そこで、このような被積分関数にも対応できる数値積分手法として、被積分関数が急激に変化するところでは分割を細かく、比較的穏やかなところでは分割を粗くする、適応型自動積分¹⁹⁾を用いることで解決を図った。

3.2.3 接地電極の電流換算

電位分布の漸化式は、点電流源に対応するものであるため、接地電極電流により生じる電位分布を求めるには、埋設深さ t から電極長 l の分だけ積分をする必要がある。ここで、深度 z における電位分布は式(4)で表される。

表2 接地抵抗の実測値と予測値の比較

| | 深打接地の形態 | | 実測値 (Ω) | 予測値 (Ω) | 誤差 | 第1層 | | 第2層 | | 第3層 | | 第4層 | | 第5層 | |
|------|-------------|------------|------------|------------|------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| | 到達深さ (m) | 絶縁部 (m) | | | | 厚さ (m) | 抵抗 (Ω・m) | 厚さ (m) | 抵抗 (Ω・m) | 厚さ (m) | 抵抗 (Ω・m) | 厚さ (m) | 抵抗 (Ω・m) | 厚さ (m) | 抵抗 (Ω・m) |
| A機器室 | 20 | 5 | 3.7 | 2.4 | -35% | 0.50 | 47 | 1.25 | 24 | 1.73 | 41 | 9.25 | 17 | ∞ | 53 |
| B機器室 | 24 | 0 | 3.1 | 3.6 | 17% | 0.45 | 93.3 | 1.39 | 74.6 | 3.34 | 255 | 12.28 | 94.5 | ∞ | 52.4 |

$$v(r, z) = \int_t^z v_1(r, z') dz' + \int_z^{t+l} v_k(r, z') dz' \quad (4)$$

式(4)を用いて、電極半径 a の棒状電極の表面電位分布を求める場合は $r=a$ とし、水平離隔 d に波及する電位分布を求める場合は $r=d$ とする。

接地抵抗 R は、棒状電極の表面電位分布の平均として、式(4)を埋設深さ t の電極長 l に沿って積分し、式(5)で表されるように電極長 l で除すことで計算される。

$$R = \frac{1}{l} \int_z^{t+l} v(a, z) dz \quad (5)$$

4. 接地特性の予測例

4.1 実測値との比較

予測手法の精度を確認するため、Wennerの四電極法²⁰⁾により大地抵抗を推定した結果に、前章で提案した新たな予測手法を適用して接地抵抗を計算した。計算した予測値と、施工ときに電位降下法²¹⁾により測定された接地抵抗の実測値を比較した結果を表2に示す。

その結果、施工箇所の大地抵抗の層構造を反映することで-40~+20%程度の誤差で予測が可能であることを確認した。なお、この誤差範囲は、大地抵抗の推定と接地抵抗値の測定が同時期でないため大地抵抗の変動があること、鉄道沿線ではレールの影響による大地抵抗の測定誤差が生じること等から、設計に用いる際に余裕として見込まなければならない予測誤差である。予測値も実測値も当該箇所の目標値である5Ωの範囲内になっており、予測手法が有効であるといえる。

4.2 大地抵抗が異なる地層の接地抵抗への影響

深度4.5m(接地棒底部よりも深い位置)を境界として、1層目と2層目の大地抵抗が異なる条件における接地抵抗の予測例を図4に示す。

深打接地では、深い地層の大地抵抗が地表と同程度もしくは小さい場合は、電極を地中深くまで到達させるほど抵抗値が低減される。一方、深い地層で大地抵抗が大きい場合は、抵抗値を低減させる効果が小さいことに留意が必要である。

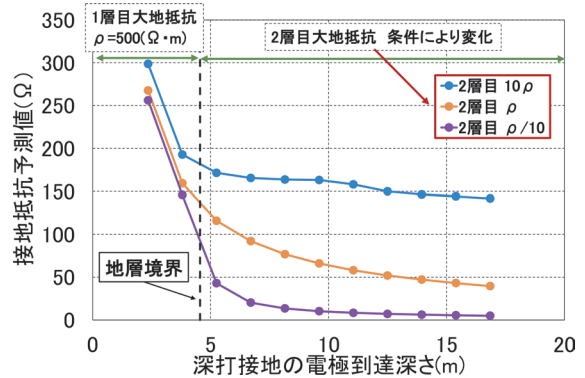
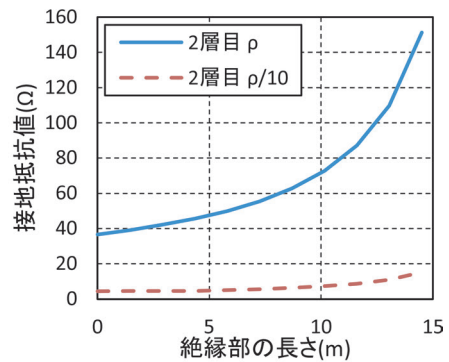
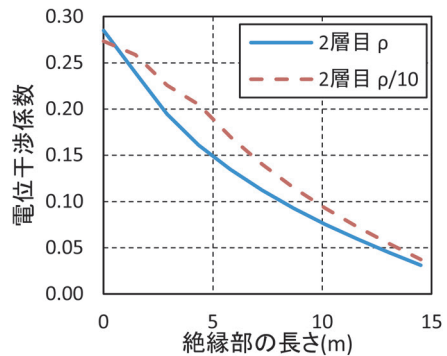


図4 深い地層の大地抵抗と接地抵抗



(a) 接地抵抗



(b) 電位干渉

図5 深い地層の大地抵抗と接地特性

4.3 絶縁部による接地抵抗、電位干渉の変化

前節と同様に、深度4.5mを境界として2つの層の大地抵抗が異なる条件において、絶縁付深打接地の到達深さを16.85mと固定し、絶縁部の長さを変化させた場合の接地抵抗値と、離隔3mの位置にある長さ3mの接地棒に対する電位干渉係数を予測した結果を図5に示す。

その結果、絶縁部を長くするほど、土壌との接触面積が減るため接地抵抗は増加するが、近接した接地棒への電位干渉は減少する。また、電位干渉は接地抵抗と比べて大地抵抗の影響による差が小さいことがわかる。

深打接地は、離隔の確保に代わり絶縁部を設けることで電位干渉を低減できるため、敷地面積の小さい通信機器室では有効である。なお、絶縁部を設けることにより増加する接地抵抗は、深打接地の電極をさらに深くまで到達させれば減少させることが可能である。

したがって、絶縁付深打接地では、近接する他の接地電極等への電位干渉低減に必要な絶縁部の長さを決定し、続いて接地抵抗低減のために電極を到達させる深さを決定する、という手順により、接地抵抗低減と電位干渉低減を両立した接地の設計が可能であると考えられる。

5. 通信設備における接地方式と課題

5.1 深打接地の導入と課題

5.1.1 電磁誘導防止用接地への導入

電磁誘導防止用接地は、き電回路からの電磁誘導現象により発生する誘導電圧軽減のため、平常時でも最大で数 A の遮蔽電流が通電することから、当該接地の基準抵抗値は表 1 に示す通り最小の 5 Ω となっている。

前章での接地特性予測結果より、絶縁付深打接地は、接地抵抗低減と電位干渉低減の両立が可能であるため、鉄道通信設備向け接地の中では電磁誘導防止用接地への導入に適していると考えられる。

5.1.2 過渡接地抵抗の評価

接地抵抗値は、法令への適合性を確認する際には直流や商用周波数 (50/60Hz) などの低周波で測定され²¹⁾、現時点では後述のように商用周波数を中心とした遮蔽電流の流入の予測を見込んで定常接地抵抗として評価を行っている。

落雷の影響のような高周波現象を対象として接地特性の予測を行う場合は、電流立ち上り時に時間変動を伴う過渡接地抵抗としての評価が必要となる^{22) 23)}。

5.2 共用接地の導入と課題

5.2.1 一点接地構成

共用接地を構成する場合、直流通電による電食や閉回路形成によるノイズ受信を防止するため、一点接地による共用化が望ましいとされている。

なお、一点接地に変更することで従来は通信用接地から帰還していた地絡電流の新たな通電経路となる可能性のある範囲では、接地線の発生電位や接続機器の耐圧の確認が必要となる。

5.2.2 各接地のノイズ状況の把握

共用接地構成とした接地極間では、相互にノイズの流

入が懸念されるため、現状の個別接地構成における接地極のノイズ実測結果を参考に、共用接地構成でのノイズの流出入を推定する必要があると考えている。ノイズ電流は特に、電磁誘導防止用接地から他の接地に向かって流出すると考えられる。遮蔽電流は、き電回路の構成や通信ケーブルの構成、列車位置による変動が大きく、実測だけでなく予測計算による評価も必要になる。

5.2.3 通信用接地の電位変動の影響

通信用接地は、通信装置の基準電位であり、前述のノイズ流入による電位変動が通信装置の伝送品質に影響を与える可能性があることから、その評価が必要となる。

5.2.4 保安器を介した接地接続

電話交換機では、従来は個別に設けていた電源側の通信用接地と回線側の保安用接地の間に保安器を挿入することで、平常時は個別接地、異常時は連接接地 (共用接地) となるように構成した実績がある²⁴⁾。

この事例を参考に、電磁誘導防止用接地との間に保安器を挿入し、平常時は個別接地として遮蔽電流流出を防ぐノイズ対策とし、異常時は共用接地として等電位化する案を提案する。

5.2.5 将来に向けた共用接地の構成案

前項までに述べた事柄を踏まえ、共用接地を導入した接地構成として、図 6 のような案が考えられる。ただし、当該構成案には前述したような課題があることから、今後、提案した構成案の実現に向け検討を深度化する予定である。

6. まとめ

本研究では、深打接地や共用接地など新しい接地方式の導入効果の評価に向け、まず深打接地を含む通信機器室の接地電極の接地特性を定量的に評価できるツールを開発した。さらに、開発したツールを用いて深打接地の接地特性を予測した結果、絶縁付深打接地は、離隔の確保に代わり絶縁部を設けることで電位干渉を低減でき、敷地の狭い通信機器室で有効であることを示した。

また、絶縁付深打接地は、接地抵抗低減と電位干渉低減の両立が可能であることから、電磁誘導防止用接地に

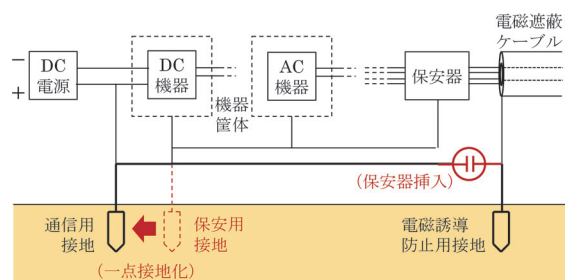


図6 共用接地構成の検討案

用いることが効果的である。そこで、絶縁付深打接地を含めた共用接地の構成案を提示して、検討すべき課題を整理した。

今後も共用接地構成の導入に向けた研究を引き続き実施し、その効果の定量的評価や懸案事項の解決を図っていく予定である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、接地抵抗実測値等を提供頂いた九州旅客鉄道株式会社の関係各位に深く感謝する。

文 献

- 1) 日本鉄道電気技術協会通信技術委員会現場必携編集分科会：通信屋の現場必携，日本鉄道電気技術協会，pp.177-186，2021
- 2) 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に関する検討，電気学会論文誌 D，Vol.138，No.8，pp.699-705，2018
- 3) 高橋健彦：図解 接地技術入門，オーム社，pp.37-38・54-57，1986
- 4) 広瀬胖，水口一，木谷芳一，麻生忠雄，林潔：駿河支線鉄塔電位上昇試験，電気學會雜誌，Vol.74，No.785，pp.170-177，1954
- 5) 山村豊，善波正夫，吉川平八郎，小島基利，横沢転，藤沢喜行：衝撃電流により連接接地網および制御回路に誘起される電圧について，電気學會雜誌，Vol.80，No.861，pp.727-735，1960
- 6) 加藤松政：潤田変電所における多重接地方式の実施成績について (A)，電力，Vol.38，No.12，pp.1113-1117，1954
- 7) 大矢征，藤井正視：深埋設接地工法による最新の接地技術 独立接地と建設物直下の接地，電気評論，Vol.80，No.10，pp.66-69，1995
- 8) 電気学会：電気工学ハンドブック，p.1357，1956
- 9) 誘導調査特別委員会大地導電率小委員会：日本の大地導電率，電気学会・電子通信学会，1969
- 10) 小林勲，池田栄一，山本昇：電気工事設計実務データブック，オーム社，p.432，1966
- 11) 高橋健彦：接地に関する諸問題 (2) 季節変動係数，電設技術，Vol.49，No.5，pp.61-67，2003
- 12) P.J. Higgs, "An investigation of earthing resistances," Journal of the Institution of Electrical Engineers, Vol.68, No.402, pp.736-750, 1930.
- 13) ANSI/IEEE Std 80 - 1986, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," p.72, 1986.
- 14) 三谷正志，高橋健彦：埋設された棒状接地極の電位分布・接地抵抗計算式に関する一考察，電気設備学会誌，Vol.20，No.6，pp.470-476，2000
- 15) 三谷正志，高橋健彦：多層大地に埋設された棒状接地極の電位分布・接地抵抗に関する理論的解析，電気学会論文誌 B，Vol.121，No.3，pp.319-326，2001
- 16) 光畑裕司，上田匠：水平多層構造中の任意電極配置による直流電位応答一点電流源に対する理論電位漸化式の導出，物理探査，Vol.63，No.2，pp.197-208，2010
- 17) 大浦拓哉：連続 Euler 変換と減衰の遅い関数の Fourier 変換への応用，日本応用数理学会論文誌，Vol.9，No.3，pp.109-121，1999
- 18) 水永秀樹：連続オイラー変換を用いた高精度なリアフィルタ，物理探査，Vol.68，No.1，pp.1-12，2015
- 19) 森正武：FORTRAN77 数値計算プログラミング増補版，pp.187-204，岩波書店，1986
- 20) Frank Wenner, "A method of measuring earth resistivity," Bulletin of the Bureau of Standards, Vol. 12, No. 4, pp. 469-478, 1916.
- 21) 日本電気協会発変電専門部会：発変電規程 第 8 版，日本電気協会，pp.317-319，2017
- 22) 森田岳，佐藤大記，田中弘毅，道下幸志：耐雷性評価に対応した接地システム検査手法の開発，鉄道総研報告，Vol.33，No.6，pp.11-16，2019
- 23) 本山英器：各種接地電極の過渡接地抵抗特性の実験的検討，電力中央研究所報告，H04010，2005
- 24) 鈴木誠：デジタル交換機雷害対策の一考察，鉄道技術研究所速報，No.A-86-32，1986