

データ伝送帯域に適用可能な 電磁誘導予測シミュレータの開発

山口 大介* 竹内 恵一* 林 雅江**

**Circuit Simulator for the Prediction of Electromagnetic Induction up to the Data Transmission Frequency
in Railway Environment**

Daisuke YAMAGUCHI Keiichi TAKEUCHI Masae HAYASHI

On the traction circuit, the feeding current causes inductive interferences with metallic telecommunication lines. Therefore, we need to reduce the influence of electromagnetic induction by computer simulation. A circuit analysis program for railway environment named ABTAC is available, but the calculation method is applicable only for a low frequency and conductors in structure are ignored. Nowadays, high speed data transmission systems using metallic telecommunication lines such as xDSL (Digital Subscriber Line) are being introduced and a higher frequency than the audio frequency is used by these systems. Considering the electromagnetic screening effect of conductors in structures enables the prediction of electromagnetic induction to be more accurate. In this study, we developed new circuit simulator. It can take conductors in structure into account and it can calculate voltage and current up to data transmission frequency.

キーワード：通信障害，ケーブル，電磁誘導，誘導妨害，誘導雑音，大地帰路回路

1. はじめに

鉄道沿線に敷設されるメタリック通信線には、き電電圧やき電電流により、誘導電圧、誘導電流が発生する。この誘導電圧、誘導電流によって、通信設備の利用者や保守作業員が感電したり、通信品質に影響したりすることのないよう、あらかじめ誘導予測計算を行い、計算結果に基づいて対策が実施される。

現在、誘導予測計算に用いられているシミュレータでは、音声周波数帯域しか扱えず、また、ケーブル構造や土木構造物中の鉄筋等の影響は、ごく簡単なモデルでしか考慮できなかったため、計算結果に補正値を掛けて、誘導発生量を多めに見込んでいた。そこで、音声帯域以上の周波数に対応でき、かつ多数の導体を考慮できる誘導予測シミュレータを開発した。

2. 誘導予測計算の現状と課題

2.1 メタリック通信線やレールに対する誘導現象

電気鉄道では、並行するメタリック通信線やレールに対して、静電誘導および電磁誘導が発生し、誘導電圧や誘導電流を生じさせる。

静電誘導は電圧が原因となって発生するもので、き

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

** 鉄道力学研究部 計算力学研究室

電電圧が印加されるトロリ線、き電線等との静電結合によって生じる。

電磁誘導は電流が原因となって発生するもので、レールが比較的抵抗で大地に分布接地された状態となっており、帰線電流が大地に流出してトロリ線とレールが電流不平衡となるために生じる(図1)。電磁誘導の原因となる、大地に流出する電流の分布は、レール漏れ抵抗(路面の状態に依存)、列車位置によって変動する。

2.2 誘導予測計算による評価

昭和42年に締結された国鉄と電電公社協定の運用に関する細目協定¹⁾によって、メタリック通信線に生じる誘導電圧には制限値²⁾が定められており、新線建設時

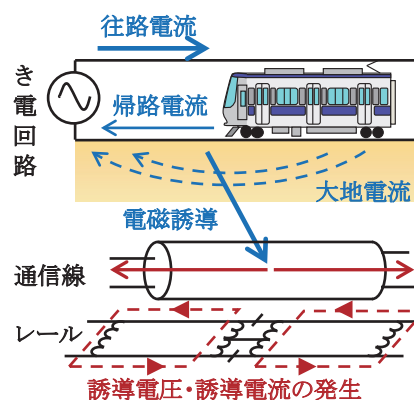


図1 電磁誘導による誘導電圧・誘導電流

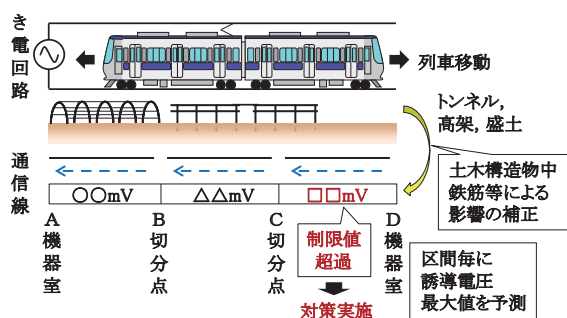


図2 誘導予測計算による評価と対策

や設備改修時等の設備計画段階で誘導予測計算が必ず実施される。誘導予測計算では、メタリック通信線の区間毎に誘導電圧の最大値を予測し、制限値を超過している場合には対策が実施される(図2)。

山陽新幹線の建設に向けて、列車の移動と共に電流分布が複雑に変化するAT(Auto Transformer:単巻変圧器)き電回路方式の検討が行われた際に、ABTACと呼ばれる誘導予測計算用シミュレータが開発され、現在まで使用され続けている³⁾。ABTACは、EMTP(Electro Magnetic Transients Program)やSPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)等に代表される回路シミュレータの一種であるが、列車の走行を模擬するため列車位置を移動させて反復計算を行う点が他の汎用回路シミュレータには無い特徴となっている。

2.3 誘導予測計算における現状の課題

2.3.1 データ伝送帯域への対応

これまでメタリック通信線における誘導予測計算は、制限値が定められている電源周波数と音声通話で使用される音声帯域(~4kHz)のみを対象として実施していた。

近年は既存設備の有効活用を図るため、音声通話だけでなくxDSL等によるデータ伝送にもメタリック通信線が使用されている⁴⁾。しかし、従来のシミュレータでは、データ伝送で使用される1MHz前後の帯域の誘導電圧を予測することはできない。

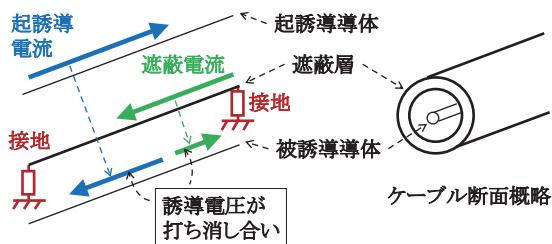


図3 電磁遮蔽の概要

2.3.2 土木構造物による誘導低減効果の模擬

電磁誘導による誘導電圧の低減手法の1つに電磁遮蔽がある。電磁遮蔽は、被誘導導体の近傍に遮蔽導体を設けて遮蔽電流と呼ばれる誘導電流が流れるようにして、遮蔽電流による誘導電圧が被誘導導体の誘導電圧を打ち消すようにする手法である(図3)。

メタリック通信線では、遮蔽層を設けた電磁遮蔽ケーブルを使用し、始端と終端において遮蔽層を低抵抗値となるよう接地することで、電磁遮蔽を行うことができる。さらに、線路周辺の土木構造物に含まれる鉄筋等にも遮蔽電流が流れ、電磁遮蔽が行われる^{5) 6)}。

しかし、従来の誘導予測計算では、線路周辺の土木構造物に含まれる鉄筋等による電磁遮蔽は、無視するか、多数の鉄筋を1つの等価導体に置き換えた近似モデルで計算した補正値(遮蔽係数)を用いて⁷⁾、誘導発生量を大きく見込む安全側予測となるように配慮していた。そのため、予測結果に基づいて実施された対策の一部においては、過剰設計となっている可能性があった。

3. 誘導予測計算手法の検討

3.1 鉄道環境における誘導予測計算の特徴

鉄道環境では、レールが分布接地された状態となっていることから大地に漏れる電流が複雑に変化する。き電回路やメタリック通信線を対象とした誘導予測計算では、これを模擬するために計算モデルを細かく分割する必要がある。このため、シミュレーションモデルの規模は概して大きくなる。

レール漏れ抵抗の抵抗値は、路面の状態で変化することを想定して、複数の値を設定して計算しなければならない。さらに、複数列車の移動を模擬するため、列車本数、列車位置の変化に対応して、モデルの変更と計算を繰り返す必要がある。

このように、鉄道向けの専用シミュレータとしては、規模の大きなモデルを対象として、パラメータやモデルの変化に応じた繰り返し計算を効率的に行えるように開発する必要がある。

3.2 回路解析による誘導予測計算

従来のシミュレータでは、節点解析法による回路解析を計算手法に用いていた。前述の鉄道環境における誘導予測計算の特徴を考慮し、新しいシミュレータでも引き続き回路解析を計算手法に用いることとした。

回路解析は、回路モデル作成(π 形等価回路等のパラメータを決定する)、連立方程式生成(回路同士が接続されるような形で方程式を連立する)、連立方程式求解(連立した方程式を解く)、という3つのステップで行われる。

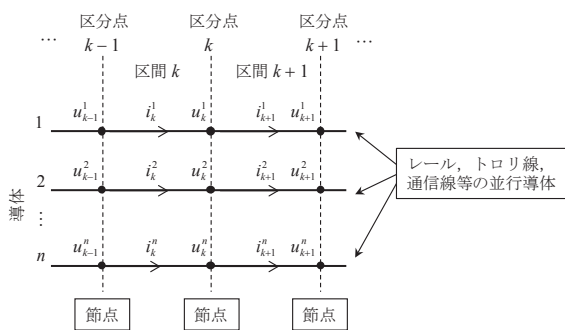


図4 多線条モデル

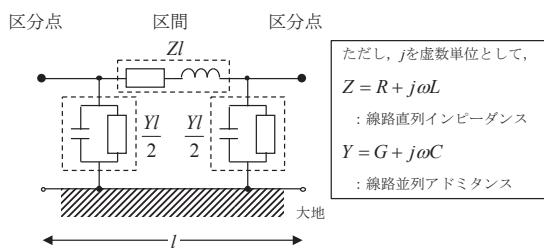


図5 π 型等価回路

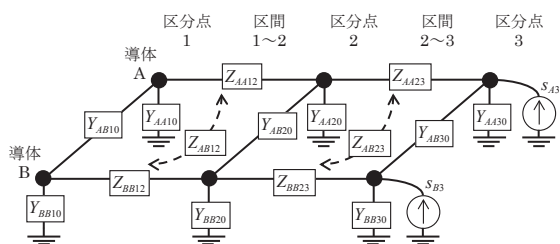


図6 相互結合を持つ π 型等価回路 (2 導体)

3.2.1 回路モデル作成

き電回路や通信線を対象とした回路解析では、レール方向の導体長が長く、導体上の位置によって電流が連続的に変化する分布定数線路として取り扱う必要があるが、数値計算では、計算対象を分割し、各区間を集中定数回路で近似することにより、多線条の網目状回路（多線条モデル）として解くことができる⁸⁾ (図4)。この多線条モデルを基本として、変電所、AT、列車負荷等の導体間の要素を合成する。列車負荷を回路の1つの枝として表わすため、例えば0系新幹線電車12両編成では、先頭と末尾のパンタ間距離 (25m × 10両分 = 250m) よりも長い500mが1区間となるように分割していた⁹⁾。

多線条モデルでは、1導体で分割した1区間は図5に示す π 形等価回路¹⁰⁾ で集中定数回路に近似し、複数導体では図6に示すように導体間で相互結合を持つ形となる。

電位 (u) を未知数とする節点解析法において、キルヒホッフの電流則により回路方程式を連立すると、以下の式(1)が導かれる。

$$\begin{bmatrix} [Y]_1 + [Z]_{12}^{-1} & & & & \\ -[Z]_{12}^{-1} & [Y]_2 + [Z]_{23}^{-1} & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & [Z]_{(m-1)m}^{-1} + [Y]_m & \\ & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [u]_1 \\ [u]_2 \\ \vdots \\ [u]_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [s]_1 \\ [s]_2 \\ \vdots \\ [s]_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

[Y], [Z] はそれぞれ、n 線条分の π 形等価回路の Y, Z に対応する $n \times n$ 行列、[s] は、n 線条分の節점에接続された電流源に対応する n 行ベクトルである。したがって、n: 導体数、m: 区分点数とすると、 $n \times m$ 元連立方程式を解くことになる。

3.2.2 回路解析のデータ伝送帯域への対応

式(1)中のZの各要素は、大地電流の影響を考慮した大地帰路インピーダンスと表皮効果を考慮した導体内部インピーダンスの和とするため、それぞれ Carson の式¹¹⁾、Schelkunoff の式¹²⁾ で算出するが、計算には工夫が必要で、これまでは数学公式を適用することで導出される無限級数の式により計算していた。無限級数の式によるZの計算は、周波数が高くなると、不安定となり、大きな誤差を伴ったり、収束せずに発散したりする可能性がある。

大地帰路インピーダンスの計算に関しては、大地が均一媒質で大地面が無限に水平という仮定があり、導体内部インピーダンスの計算に関しては、レールやケーブル電磁遮蔽層等の透磁率が電流により変化する可能性等の不確定要素を含んでいる。このため、実用上は計算式自体に極端な高精度を追求する必要はなく、既に実用に供されている近似式である Deri の式¹³⁾、雨谷の式¹⁴⁾ を用いることで、大地帰路インピーダンス、導体内部インピーダンスを安定して、なおかつ小さな負荷で計算することができる。

また、 π 形等価回路による集中定数回路近似では、 $\Gamma_v l$ が十分小さいと仮定し、式(2)に示す近似を行っている。

$$\left. \begin{aligned} (\Gamma_v l) \operatorname{cosech}(\Gamma_v l) &\cong 1 \\ (\Gamma_v l / 2)^{-1} \tanh(\Gamma_v l / 2) &\cong 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 Γ_v : 電圧に関する伝搬定数は、式(3)で定義される。

$$\Gamma_v = (ZY)^{1/2} \quad (3)$$

精度良く解析するためには、 $\Gamma_v l$ を十分小さくしなければならないが、周波数が高くなるほど Z, Y は大きくなる。このため、精度を維持するには区間長を十分に短

特集：信号通信技術

くする必要がある。

3.2.3 連立方程式の生成と求解

連立方程式の生成手法には、所要メモリが少なく済む節点解析法に加え、内部抵抗0の理想電圧源の取扱を可能とした修正節点解析法、非線形素子の特性変化を含む解析や時間領域解析で有利と考えられるスパースタブロー法があるが、生成される連立方程式の形式は各手法で異なる¹⁵⁾。新しいシミュレータでは、従来のシミュレータとの比較を行うため、まずは同様の節点解析法を用いることとした。

連立方程式の求解手法には、大きく分けて反復法と直接法がある。反復法は大規模な方程式に適用する際に分散並列化が容易である一方で、反復計算によって得られる解の収束性は係数行列の性質に依るところが大きく、行列の性質に合わせたアルゴリズムの選択、前処理の適用が必要となる。将来的には、時間領域解析にも対応可能なシミュレータへの拡張を考えており、連立方程式の生成手法を切り替える可能性がある。連立方程式の生成手法としてスパースタブロー法を想定した場合、行列の性質から反復法による安定的な求解が難しくなると考えられ、連立方程式の求解手法は直接法を採用することとした。

3.2.4 回路解析の計算大規模化への対応

多線条モデルの節点解析法では、式(1)に示した $n \times m$ 元連立方程式を解くことになるが、高周波数帯域での分割数増加 (m の増加)、土木構造物中鉄筋等を考慮する際の導体数増加 (n の増加) により、処理量の増大と、所要メモリの増大が予想される。そこで、マルチコア、大容量メモリを搭載した高性能なコンピュータを活用した並列化によって大規模な計算モデルへの対応を検討し、まずは連立方程式求解のステップについて、並列化を実施することとした。

なお、土木構造物中の鉄筋等の考慮については、電流が小さい、離隔が大きい等で影響が少ない導体を無視して、処理量を減少させることも、実用上は有効な手法の一つとなる。

3.3 開発したシミュレータの概要

これまでの検討を踏まえ、回路モデル作成と連立方程式生成のステップに対応するプログラムを新たに作成した。また、連立方程式求解のステップは、行列方程式解法の直接法ライブラリで分散並列化にも対応し、大規模な問題にも適用可能な MUMPS (Multifrontal Massively Parallel sparse matrix Solver)¹⁶⁾ を利用することとした。今回開発したシミュレータの概要を図7に示す。

解析を行うために入力するデータは、レール方向の要素として、レール、トロリ線、通信線等の各導体の特性(外径、導電率、透磁率など)と装柱(地上高、水平位置)、マクラギ方向の要素として、変電所、AT、接地のキロ程とインピーダンス値、等である。連立方程式の求解で利用する MUMPS が Linux 環境で動作するため、入力ファイルはテキストベースとしたが、一部は Windows 環境で動作する GUI を利用して入力ファイルを作成することも可能とした。

入力データの作成が完了した後、コマンドライン上で実行することで解析が行われる。出力されるファイルは電圧値、電流値を表している。

出力データを CSV (Comma-Separated Values) ファイル等に変換、整理することで、列車の移動に応じた、通信線に生じる誘導電圧やレールに生じる誘導電流を得ることができる。

入力データ作成や出力データ整理を効率的に行うため、入出力インターフェースは改良を引き続き行っていく予定である。

4. 誘導予測計算の結果例

新たに開発した誘導予測シミュレータが、予測周波数が音声帯域の 4kHz からデータ伝送帯域の 1MHz 前後まで拡大されていること、設備条件を詳細に考慮することで鉄筋等による誘導低減効果を再現できていることを確認するため、解析を行った結果の一例を示す。

4.1 データ伝送帯域への対応

図8に示した条件のモデル(起誘導線の往路はトロリ

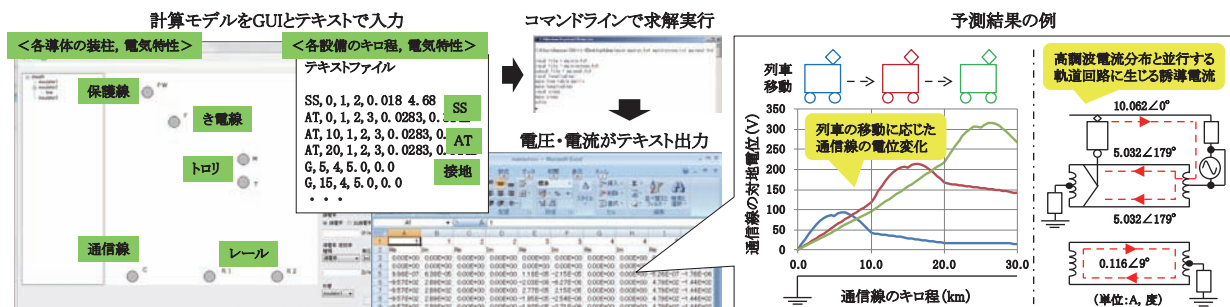


図7 開発したシミュレータの概要

線、帰路はレールを模擬)で、従来のシミュレータと新しいシミュレータにより解析を行い、被誘導線に生じる誘導電圧(対地電圧)の結果を比較した。なお、 π 形等価回路での近似誤差の無いよう、レール方向のモデル全体長を十分に短い5mとし、100区間に分割して計算を行った。比較結果を図9に示す。

被誘導線に生じる誘導電圧は直線上の分布になっている。誘導電圧は起誘導線と被誘導線の相互インピーダンスに比例し、相互インピーダンスは周波数と比例関係にあることから、結果は妥当であると考えており、1MHz前後のデータ伝送帯域でも予測が可能になった。また、4kHzまでの音声帯域では、従来のシミュレータと新しいシミュレータの結果は良好に一致しており、新しいシミュレータにより従来のシミュレータを置き換えることが可能と考えている。

実測値との比較については今後の課題であり、データの取得方法を検討している。

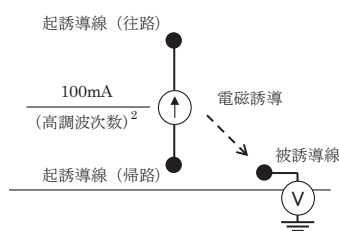


図8 対応周波数の確認に用いた計算モデル

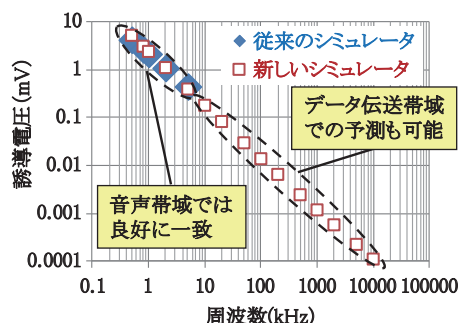


図9 図8のモデルにおいて被誘導線に生じる誘導電圧

4.2 土木構造物中铁筋等による誘導低減効果の模擬

土木構造物中铁筋等による誘導低減効果を再現できていることを確認するため、過去の実測例¹⁷⁾を参考として、図10に示した条件の構造物に対し、補正用近似モデル(従来のシミュレータ)と詳細モデル(新しいシミュレータ)で、被誘導線に生じる誘導電圧(対地電圧、1500Hz)の予測値を比較することとした。高架のレール方向の鉄筋本数は238本で、レール方向のモデル全体長は100mとした。実測値と予測値の比較結果を表1に示す。

予測値同士を比較すると、従来のシミュレータに対し新しいシミュレータでは、誘導電圧が10%程度小さくなっており、高架の鉄筋による誘導低減効果を従来よりも精度良く模擬することができたと考えている。

実測値と予測値を比較すると、実測値よりも予測値のほうが誘導電圧は大きくなっている。実測では、橋脚の基礎が接地となって橋脚の鉄筋を介して、誘導電圧を低

減する遮蔽電流が流れているためと推測され、接地抵抗が小さいほど遮蔽電流が多く流れ、誘導電圧は小さくなると考えられる。しかし、接地抵抗値は不確定要素であり、また実用上も予測値による評価では安全側のマージンを見込む必要があり、解析では橋脚による接地を模擬しないこととした。このことから、実測値と予測値に差が生じたものと考えている。

表1 図10のモデルにおいて被誘導線に生じる誘導電圧

条件	誘導電圧
実測値	3.77mV
従来のシミュレータによる予測値	4.95mV (+ 31%)
新しいシミュレータによる予測値	4.50mV (+ 19%)

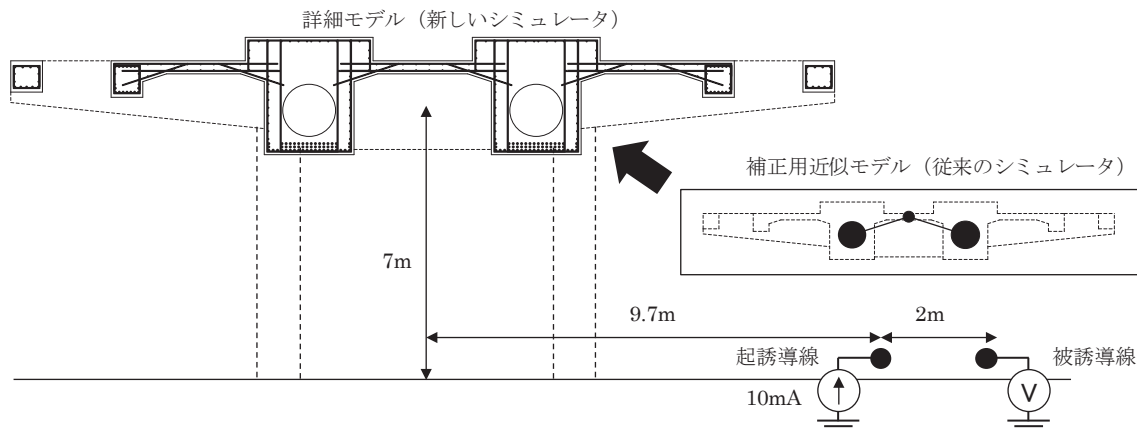


図10 土木構造物中铁筋による誘導低減効果の確認に用いた計算モデル

高架の鉄筋の配置や種別が高架橋の構造や径間で異なることによる、誘導低減効果の差異は、今後、解析例を蓄積していくことで明らかにしたいと考えている。

5. おわりに

音声帯域以上の周波数に対応でき、かつ多数の導体を考慮できる誘導予測シミュレータを開発した。

従来のシミュレータである ABTAC に対し、予測周波数が音声帯域の 4kHz からデータ伝送帯域の 1MHz 前後まで拡大され、開発当時の計算機性能により課せられていた数十本オーダーという导体数の制限が無くなり、設備条件を詳細に考慮することで、土木構造物中の鉄筋等による誘導低減効果を再現できるようになった。

本シミュレータを用いることで、電力、通信の設備の新設、更新に際し、メタリック通信線に対する誘導電圧、誘導電流の発生量や、誘導対策の効果を定量的に予測することが可能である。また、本シミュレータは、レールに対する誘導電圧、誘導電流の予測も可能である。今後、誘導への対策効果把握や対策手法検討に本シミュレータを活用していく予定である。

文 献

- 1) 日本鉄道電気技術協会：通信線路の誘導防止（参考資料），2008
- 2) 日本鉄道電気技術協会：鉄道における電磁環境解説集，p.122，2008
- 3) 山口大介：通信誘導計算のシミュレーション環境，RRR，Vol.71，No.4，p.41，2014
- 4) 進藤正昭，中村一城，関清隆：鉄道における高速メタリック伝送の検討，鉄道総研報告，Vol.16，No.7，pp.45-50，2002
- 5) 奥谷民雄，中村信幸，寺田夏樹，福田光芳，館裕，稲田聡，伊藤秀憲，若尾真治：山岳トンネルの電磁遮蔽効果に対する解析手法の高度化，電気学会論文誌 D，Vol.127，No.4，pp.391-399，2007
- 6) 奥谷民雄，中村信幸，寺田夏樹，館裕，稲田聡，小川知行，孫佳男，若尾真治：鉄道高架橋の電磁遮蔽効果解析手法の高度化，電気学会論文誌 D，Vol.128，No.3，pp.310-320，2008
- 7) 日本国有鉄道大阪幹線工事局：東海道新幹線電気工事誌，pp.7_10-7_12，1965
- 8) 鉄道通信協会：大電流交流き電回路による誘導に関する研究報告書，p.28，1969
- 9) 酒井洋，森武昭，岸野裕一：多線条系への四端子回路網理論の適用による AT き電回路の解析，電気学会論文誌 B，Vol.94，No.7，pp.351-358，1974
- 10) 雨谷昭弘：分布定数回路論，コロナ社，p.26，1990
- 11) John R. Carson：Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return，Bell System Technical Journal，Vol.5，No.4，pp.539-554，1926.
- 12) S. A. Schelkunoff：The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields，Bell System Technical Journal，Vol.13，No.4，pp.532-579，1934.
- 13) A. Deri，G. Tevan，A. Semlyen，and A. Castanheira：The complex ground return plane: A simplified model for homogeneous and multi-layer earth return，IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，Vol.PAS-100，No.8，pp.3686-3693，1981.
- 14) 雨谷昭弘，布施郁子：任意断面導体よりなる多導線系インピーダンス近似計算法，電気学会論文誌 B，Vol.111，No.8，pp.896-902，1991
- 15) 三浦道子，名野隆夫，盛健次：回路シミュレーション技術と MOSFET モデリング，リアライズ理工センター，pp.17-25，2003
- 16) P. R. Amestoy，I. S. Duff，and J.-Y. L'Excellent：Multifrontal parallel distributed symmetric and unsymmetric solvers，Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering，Vol.184，pp.501-520，2000.
- 17) 電気ワーキンググループ：新幹線総合試験（小山地区）昭和 53 年度試験報告－電気編－，鉄道技術研究所速報，No.79-89，pp.130-134，1979