

電気鉄道用電波雑音シミュレーション手法の開発

川崎 邦弘*

Development of a Simulation Software to Calculate Fluctuations of Strength of Radio Disturbance Wave Emitted from Railway Systems to Railway Side

Kunihiro KAWASAKI

Measuring methods and emission limits for radio disturbance wave emitted from railway systems have been already established by International Electro-technical Committee (IEC). To evaluate effects of countermeasures to keep the strength of emitted radio disturbance wave within the allowable limits defined by the IEC standards, or, to know characteristics of the radiated emissions, we cannot help carrying out field measuring tests which need so much time and costs. Then, to reduce these time and costs, our institute has carried out a study to establish a method to calculate the strength of the radiated emissions from the railway systems since 2005. One basic method to calculate trends of fluctuations of the strength of the radiated emissions from a running vehicle had been worked out in 2007. We have continued the study on this matter since then, and a detailed railway antenna model has been proposed and a simulation tool for the detailed model has been developed. This paper outlines the detailed railway antenna model and the simulation tool developed by applying Richmond Moment Method. Moreover, this paper presents a future plan for further development of the method.

キーワード：電気鉄道，電波障害，電波雑音，EMC，シミュレーション

1. はじめに

列車の走行に伴って電波雑音が発生し、沿線に放射されることが実測により把握されている。また、鉄道沿線における電波雑音に関する国際規格も発行されている。沿線に放射される電波雑音の諸特性の把握、あるいは規格への整合性や放射防止対策効果の確認を行うためには、現時点ではコスト・時間のかかる現地試験を実施するしか手段がない。そこで、筆者は、実測に拠らない電波雑音強度の評価手法の確立を目標として、列車走行に伴う鉄道から沿線への放射強度を、数値解析により予測する手法の基礎検討を2005年度から行ってきた。

2007年度には、鉄道をアンテナとして表現してモーメント法で解析を行うことによって電波雑音の強度変動を推定する手法を提案し、簡略化したモデルに基づく解析の試行結果から、その有効性と課題を示した¹⁾。その後、モデルの詳細化と解析手法の深度化を進め、シミュレーション実行環境の整備を行ってきた。本稿では、詳細化した鉄道モデルと解析手法について述べたのち、開発したシミュレーション実行環境と解析例を報告する。

2. 鉄道アンテナモデルの詳細化

2.1 簡略化モデルの考え方と課題¹⁾

電気鉄道が放射する電波雑音の放射源は、集電機構における放電や、き電電流に含まれる高調波成分等が支配的と考えられている。列車の走行以外の要因による定常的な電波雑音については、これまでも数値解析手法が研究されており、近年では駆動用の電力変換器単体を対象とした数値解析も可能となってきている。しかし、走行列車を含む電気鉄道が沿線に対して放射する電波雑音の強度変動は複雑であり、かつ周波数によって異なる挙動を示すため、実用的な数値解析手法が確立されていないのが現状である。そこで、最初の検討段階では、鉄道を図1に示すように変電所・トロリ線・電車・レールの4つのサブシステムに分け、各サブシステムをモデル化する手法の基礎検討を行い、モーメント法やFDTD法(Finite Difference Time Domain Method=時間領域差分法)など複数の解析手法を試行した。

検討の結果、走行列車を含む鉄道全体からの放射を、形状が変化するアンテナからの放射として扱い、モーメント法によって解析する手法を提案した。この手法では、各サブシステムを複数のエレメント(=アンテナを構成する金属)で構成し、列車位置に応じてエレメントの長さを変化させていき、モーメント法でエレメント上

* 信号通信技術研究部(通信)

特集：信号通信技術

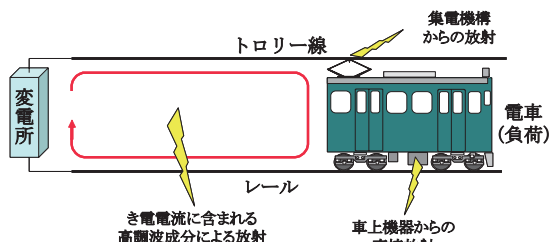


図1 電気鉄道からの放射モデル

の電流分布とエレメントからの放射強度を計算する。この手法の試行にあたっては、計算量を抑えるため、全てのエレメントが線状導体であると仮定し、大幅に簡略化したモデルを作成した(図2)。また、アンテナの給電点に供給される電波雑音源(高周波信号の発振源)についても簡略化し、発振強度・周波数とも一定という仮定を行った。この簡略化モデルを、NEC(Numerical Electromagnetic Code)²⁾と呼ばれるモーメント法によるアンテナの動作解析ソフトウェアで解析を試行した結果、解析が可能であり、走行に伴う電波雑音強度の変動を再現できる可能性があることなどが確認できた。

しかし、鉄道と鉄道周辺の環境条件を大幅に簡略化して解析を試行したため、計算値と実測値との差異が大きく、強度変化の計算精度を向上するためにはモデルを改善する必要があることもわかった。また、試行にあたって使用したモーメント法による解析ソフトウェアでは、扱えるエレメント数や、解析性能に限界があり、鉄道のような極端に細長いアンテナの解析には向いていないこともわかった。特に、100MHz以上の周波数域では波長が短くなるため、解析の際の分解能を細かくする必要があり、計算量が膨大となって数kmにおよぶ区間を一度に解析することは現実的ではないことがわかった。

2.2 モデルの詳細化

前節で述べたように、走行に伴う電波雑音強度の変動をモーメント法により解析できることが確認できたことから、次の段階として、モデルを詳細化して計算精度の向上を図ることとした。モデルの詳細化にあたっては、形状と、アンテナに給電される電波雑音源の2点について検討を行った。

2.2.1 形状の詳細化

図2に示した簡略化モデルに対し、形状を現実近づ

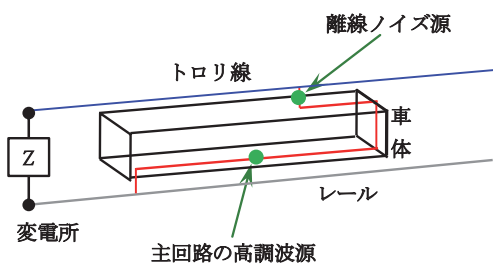


図2 簡略化した鉄道モデル

けた鉄道モデルを作成した。具体的には、以下のような項目を変更した。

- ・線路：1本→2本
- ・トロリー線：ちょう架線を追加
- ・車体：外枠のみ→車体の金属面を模擬
- ・車輪：1本の線→車輪と車軸、台車枠で表現

詳細化したモデルの例を図3に示す。図2に示した簡略化モデルは20本の線状導体のみで構成されていたが、図3の詳細化モデルは約150本の線状導体と6枚の面状導体によって構成されている。

走行に伴う列車位置の変化を模擬する方法としては、列車の位置を固定し、図2の簡略化モデルで採用した方法と同様に、地上設備と沿線に置かれた観測点の位置を相対的に変化させる方法を採用した。すなわち、変電所の位置座標(図3中の S_s)と、き電システムを構成する線状導体の長さ(図3中の L_{t1}, L_{t2})、レールを構成する線状導体の長さ(図3中の L_{r1}, L_{r2})を変化させることによって模擬している。この方法により、列車の複雑な形状を定義する多数の座標値を変化させる必要がなくなり、少数の座標値の変更のみで走行の模擬が可能である。

2.2.2 電波雑音源の詳細化

電波雑音が発生する周波数は、離線やインパタなどのスイッチングによって数kHzから百数十MHzまでの広い周波数範囲の成分が出力されており、かつ各周波数成分の強さも走行によって時々刻々変化する^{1) 3)}。図3に示したモデルにおける発生源として、実際に近い時間変動を考慮した発生源を置くことにより、より現実に近い特性を計算で求められる可能性がある。そこで、給電点に与える高周波信号源の振幅を、列車位置に応じて変化させながら繰り返し計算させる方法をとることとした。

2.2.3 エレメントの構成方法の検討

複雑な形状のアンテナをモーメント法で解析する場合、エレメントの構成をどのように定義するかによって計算量と精度が大きく左右される。たとえば、図4(a)のようなパンタグラフとトロリー線の接触点付近のモデルの場合、図4(b)のように3本のエレメントで定義すると、図4(b)中の○の箇所では導体同士が接続されない

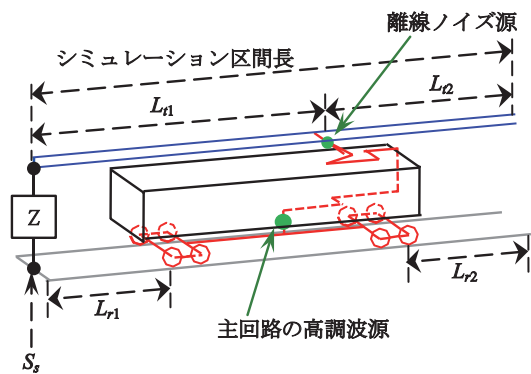


図3 詳細化した鉄道モデル

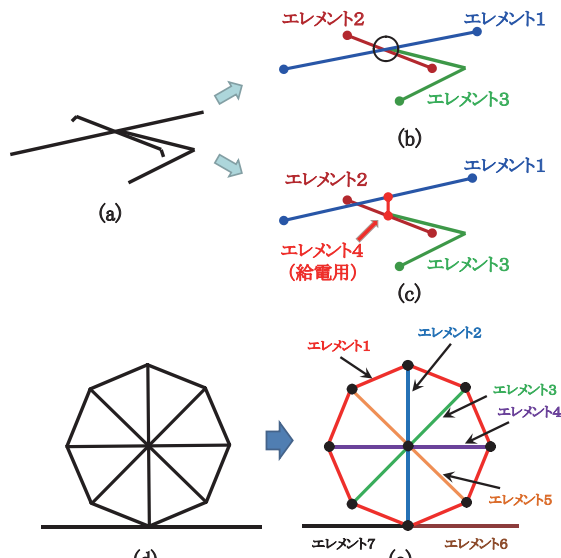


図4 エレメントの定義方法

ため本来流れるべき電流が流れず、正しい解析結果を得ることができない。また、電波雑音源となる給電点をどの導体上に配置するかによっても計算結果が変わってしまう。従って、図4(c)のように、給電点用の導体を挿入して4本のエレメントとして定義し、かつ電流が流れる接続点でエレメントを区切る必要がある。

しかしながら、モーメント法では、3章で述べるようにエレメントをセグメントと呼ばれる微小区間に分割して行列計算を行うため、エレメント数の増加に対して指数関数的に計算量が増加する。従って、エレメント数はできるだけ少なくすることが望ましい。例えば、図4(d)のような車輪とレールとの接触部分の場合には、各エレメントを1本ずつの導体で定義するのではなく、図4(e)のように円周方向のエレメント1本と直径方向のエレメント4本で定義する方法が考えられる。

このように、エレメントの構成には複数のパターンがあり、図3に示した詳細化モデルでは非常に多くの定義方法が考えられるため、最適な構成を一意に決定することが難しい。ここでは、検討と試行を繰り返した結果、①エレメント本数が最小となるようにモデルを分割する、②屈曲点ができるだけ少ない直線で定義する、③給電点には専用の導体を挿入する、などの方針をとることとした。この方針によれば、詳細化モデルを約50本の線状エレメントと6枚の面状エレメントで構成することができる。これは、1線状導体＝1エレメントとして定義した場合に対し約3分の1の量となる。

2.3 前処理ソフトウェアの開発

モーメント法による数値解析を行うためには、アンテナを構成するエレメントの位置や太さなどの数値データに変換する必要がある。図2のような単純なモデルであれば、手作業でも数値テーブルを作成できるが、図3の

表1 詳細化モデルの主な設定パラメータ

トロリ	高さ	車体	長さ	
	吊架線		幅	
	ツイン		高さ	
	トロリ半径		床面高	
レール	軌間	台車	軸間	
	幅		台車数	
	高さ		台車間	
	接地の有無		車端～台車間	
変電所	インダクタンス	台車	車端～パンタ間距離	
	静電容量		船体の幅	
雑音源	周波数		編成	1車両あたりのパンタ数
	給電電圧			両数
		M車の号車		
		パンタ搭載の号車		
		高圧母線の有無		

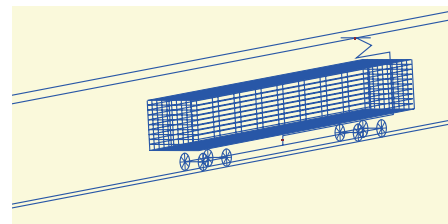


図5 生成された詳細化モデルのデータ例

ように詳細化・複雑化したモデルでは膨大な時間と労力が必要となってしまいます。さらに、走行を模擬するため、エレメントの長さや、給電点に供給する高周波信号の振幅を変えていく必要もあり、図3の詳細化モデルを手作業で数値データに変換することは現実的ではない。

そこで、モデルの形状や条件等を設定することにより、モーメント法による数値解析プログラムに入力できるデータ形式に変換する前処理ソフトウェアを開発した。

開発した前処理ソフトウェアでは、表1に示したパラメータについて、任意の数値を入力、もしくは予め内蔵されている設定値の中から選択することにより、自動的に座標テーブルを生成し、数値解析ソフトウェアに入力できるデータ形式で出力する。また、アンテナモデルの給電点に与える高周波信号についても、列車位置に応じた値を予めソフトウェアに読み込ませておくことにより、自動的に列車位置ごとのモデルデータに反映される。生成された詳細化モデルデータの例を図5に示す。本ソフトウェアを利用することにより、これまで手作業で3～4日程度かかっていた数値モデルデータの作成を、数秒で完了することができる。

なお、ここで開発した前処理ソフトウェアでは、交流電方式のモデルを直接生成できないが、自動生成されたモデルに手動で電線とATを模擬する定数を追加することにより、モデルを作成することができる。

3. 詳細化モデルに適したモーメント法の検討

3.1 検討の目的

2.1で述べたように、基礎的な検討段階で試行した際に利用したモーメント法の解析ソフトウェアでは、計算精度を向上させるためには分解能を細かくする必要があっ

において、 $Z_{ji}=Z_{ij}$ という関係になるため、行列の計算量が軽減される。これに対し、点整合法では、デルタ関数の特性から(3)式の積分の計算が不要となるため、プログラム化が容易で計算速度が速いという利点がある。しかし、残差の評価が解析領域内のある点でのみとなるため、評価点の設定位置によって計算結果が異なるという問題があり、高精度の解析が期待できない。

3.3 詳細化モデルに適用する解析手法

2.1で述べた基礎検討の初期の段階では、基底関数にパルス関数、試行関数にデルタ関数を用いた最も簡易な解析手法を用いたため、簡略化した鉄道モデルであっても、セグメントの分割数や分割点の設定によって計算結果が大きく異なっていた。また、基礎検討の最終段階で使用したNECでは、基底関数に正弦関数と余弦関数の組合せを採用しているが、試行関数としてデルタ関数を用いている(点整合法)。NECは図2の簡略化モデルであれば解析領域を数kmに延長しても計算が可能であったが、セグメントの分割数や分割点の設定によって計算結果が大きく異なり、また計算結果が発散するなどの問題があった。点整合法を用いている限り、セグメント分割数Nを小さくすることができないため、図3に示した詳細化したモデルでは膨大な計算量となってしまう。さらに、NECではセグメント数の制限(最大約11,000)により、精度を確保できる解析周波数が数MHz以下に制約される。

以上のことを考慮すると、精度を確保しつつ複雑かつ長大な詳細化モデルを解析できる手法としては、セグメントの分割数Nが小さくてもよい手法が望ましい。そこで、ここでは、基底関数と試行関数に同じ関数を用いる Galerkin 法のうち、基底関数として(5)式に示す正弦状関数を使用する Richmond 法と呼ばれる手法を採用することとした。

$$f_i(x) = \begin{cases} \frac{\sin k_o(x-x_{n-1})}{\sin k_o \Delta l} & x_{n-1} \leq x \leq x_n \\ \frac{\sin k_o(x_{n+1}-x)}{\sin k_o \Delta l} & x_n \leq x \leq x_{n+1} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (5)$$

Richmond 法では、セグメントの分割数が波長λの10分の1程度でも十分な精度が得られ、セグメントをより細かく分割する必要のある点整合法よりも大きなアンテナを扱うことができ、比較的短時間で計算結果を得ることができる。また、モデル全体を分割した近似モデルによる計算法も開発されており、複雑かつ巨大なアンテナの解析も可能な手法とされている。図2に示した簡略化モデルの解析においても、100MHz以上の周波数域では列車付近のみを解析対象とすることにより、計算精度を劣化させることなく計算量を軽減できることがわかっている⁸⁾。従って、Richmond 法が詳細化モデルの解析に適していると考えられる。

4. シミュレーション実行環境の整備と検証

4.1 シミュレーションソフトウェアの開発

詳細化モデルをモーメント法により解析するソフトウェアを開発するにあたっては、当初は専用の解析プログラムを記述することを検討していた。しかし、複雑かつ巨大なアンテナモデルを扱える Richmond 法の解析プログラムは、そのコード規模も大きく、確実に動作させるために多くの時間と経費が必要となる。また、将来、さらに優れた解析手法や、モーメント法以外の有効な手法が開発された場合の対応も困難となる。

そこで、鉄道用の電波雑音シミュレーションソフトウェアを単体のソフトウェアとして開発せず、モーメント法解析ソフトウェアは既存のソフトウェアを活用することとした。具体的には、前処理ソフトウェアにシミュレーションに関するパラメータの設定画面を追加し、Windows上でアプリケーションウィンドウの制御を行うソフトウェアと組み合わせ、外部のモーメント法解析ソフトウェアを起動させて列車位置ごとに生成した詳細化モデルのデータファイルを引き渡す機能を追加した。ここで対象としたモーメント法解析ソフトウェアは、東北大学が開発した CALAR と呼ばれる解析プログラムを基に開発されたソフトウェアとした。CALAR は Richmond 法による解析方法を採用しており、複雑かつ巨大な解析対象も扱うことができる。なお、比較のため、前出の NEC や他のモーメント法解析ソフトウェアにも対応できるように、モデルデータの出力形式を切り替えられるようにした。この方法によれば、前処理ソフトウェア、モーメント法解析ソフトウェアの双方ともに大きな改修を加える必要がなく、効率的にシミュレーション実行環境を構築でき、また様々なモーメント法の解析手法を試行することが可能となる。

Windowsアプリケーションとして開発したソフトウェアのスクリーンショットを図7に示す。



図7 開発したシミュレーションソフトウェアのスクリーンショット

特集：信号通信技術

4.2 シミュレータによる解析の試行と検証

図7に示したソフトウェアを用いて、詳細化した鉄道モデルの解析を試行した。試行にあたって設定したシミュレーション条件を表2に示す。100MHz以上の周波数域では波長が短くなるため、モデル全体のセグメント分割数が30,000を超えるが、Richmond法の特徴の一つであるモデルの分割による近似的な解析手法の適用により、セグメント数を12,000程度に減らすことができた。NECではセグメント数の制限により計算できなかった規模のモデルであるが、Richmond法の適用により計算結果を得られることが確認できた。計算結果の一例を図8に示す。

計算値と実測値とを比較した結果、100MHzでは実測値との差異が最小で+5dB程度、最大で十数dBとなっており、基礎検討段階における計算誤差(≧20dB)に対して10dB程度改善した。しかし、100kHz、1MHzにおける計算精度については、基礎検討段階よりは改善できたものの、最小でも+10dB程度の誤差であった。±6dB以内の誤差を目標としていたが、完全には達成できておらず、モデルを改良する余地がまだ残されていると考えられる。また、周囲環境の影響を考慮する必要もあると考えられる。

表2 シミュレーション試行条件

シミュレーション区間長：2,000m
 解析周波数：100MHz
 セグメント長：波長の10分の1(0.3m)

トロリ	高さ：5m	車体	長さ：19,500mm
	トロリ～吊架線間：0.5m カタナリ方式：シンプル トロリ半径：1.5mm		幅：2,850mm 高さ：2,450mm 床面高：1,200mm
レール	軌間：1,067mm	台車	軸間：2,100mm 台車数：2 台車間：14,000mm 車端～台車間：2,750mm 車輪径：860mm
	幅：67mm 高さ：150mm 接地の有無：なし		車端～パンタ間距離：2,750mm
変電所	インダクタンス：なし 静電容量：なし	パンタ	船体の幅：1,400mm 1車両あたりのパンタ数：1 両数：1
雑音源	周波数：100MHz 給電電圧：0.1V	編成	M車の号車：1 パンタ搭載の号車：1 高圧母線の有無：なし

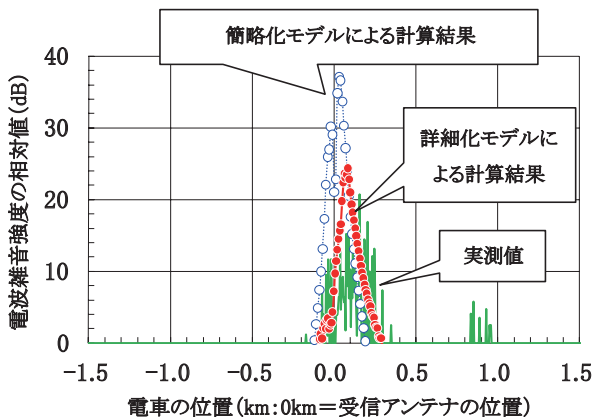


図8 シミュレーション試行結果の例
 (周波数 100MHz)

5. おわりに

鉄道による電波雑音の放射をモデル化する手法について、2007年度に提案したモデルの詳細化を行い、詳細化モデルを生成できる前処理ソフトウェアを開発した。その結果、複雑かつ走行を模擬するための膨大な数のエレメントの定義ファイルを効率よく生成することが可能となった。また、複雑な形状のアンテナでも効率・精度ともバランス良く解析することができるRichmond法によるモーメント法解析ソフトウェアと連携させる手法を検討し、詳細化した鉄道モデルが解析可能となった。解析を試行した結果、2007年度に示した試行結果に対して10dB程度実測値との差異が改善していることを確認した。

2005年度から取り組んできた走行列車を含む鉄道システム全体から沿線への電波雑音の放射に関するシミュレーション手法の開発は、シミュレーションを実行できる環境の整備まで至った。今後は、開発したシミュレーション実行環境を活用して様々なケースの試行を行い、実測値との比較検証を進めていく予定である。それらの検証結果を踏まえ、モデルのさらなる詳細化と周辺環境の考慮の追加、解析手法の深度化を進め、電波雑音強度値の予測が可能なレベルに発展させたいと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東北大学大学院の澤谷邦男教授、陳強教授には多大なるご指導、ご協力を頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

文献

- 1) 川崎邦弘：電気鉄道による電波雑音強度変動の推定手法の基礎検討，鉄道総研報告，Vol.23, No.1, pp.45～50, 2009
- 2) <http://www.nec2.org>
- 3) 電気学会・電気鉄道の電磁環境に関する共同研究委員会：鉄道とEMC，オーム社，2008
- 4) 澤谷邦男：モーメント法によるアンテナ設計，電子情報通信学会論文誌，Vol.J86-B, No.9, pp.1668-1677, 2003
- 5) 陳強：モーメント法によるアンテナ解析の基礎，電子情報通信学会 アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップテキスト，pp.1～29, 2009
- 6) 澤谷邦男：モーメント法によるアンテナ解析，電子情報通信学会 アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップテキスト，pp.12～19, 2003
- 7) R. F. Harrington；Field Computation by Moment Methods, IEEE Press, 1993.
- 8) 平尚大，柴田岳，陳強，澤谷邦男，川崎邦弘，中村一城：電車走行時の電波雑音の数値解析，電子情報通信学会 2010年総合大会，B-4-63, 2010