

電気鉄道用電波雑音シミュレーション手法の開発

信号通信技術研究部 通信研究室
室長 川崎 邦弘

1. はじめに

鉄道沿線における電波雑音に関する国際規格が 2003 年に発行されているが、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、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のシミュレーション手法に関する基礎検討を 2005 年度～2007 年度に行った。その結果、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計算する手法を提案し、簡略化した鉄道アンテナモデルによる解析の試行を行い、その有効性と課題を示した。2008 年度以降、提案した鉄道アンテナ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た。本発表では、詳細化した鉄道アンテナモデルと解析手法の検討結果について述べ、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検討

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。そこで、鉄道を変電所・トロリ線・電車・レールの 4 つの構成要素に分け、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 2007 年度に提案した。当時のモデルでは、全てのエレメントが線状導体であると仮定し、図 1 のように形状等を大幅に簡略化したため、強度変動の傾向は再現できたものの、計算値と実測値との差異が大きかった。

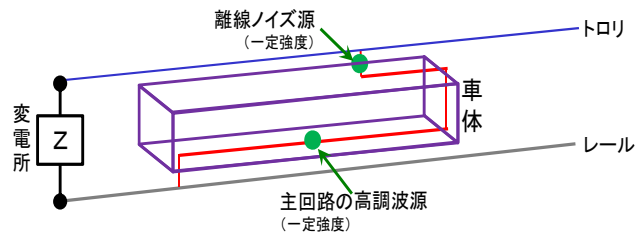


図 1 簡略化した鉄道アンテナモデル

2008 年度以降、簡略化モデルの課題を解決するため、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、より現実に近くなるよう、モデルの詳細化を行った。詳細化したモデルを図 2 に示す。簡略化モデルが 20 本の線状導体のみで構成されていたのに対し、詳細化モデルは 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。走行を模擬する方法としては、列車の位置を固定し、地上設備と沿線に置かれた観測点の位置を相対

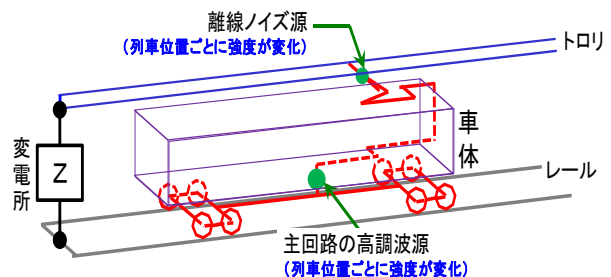
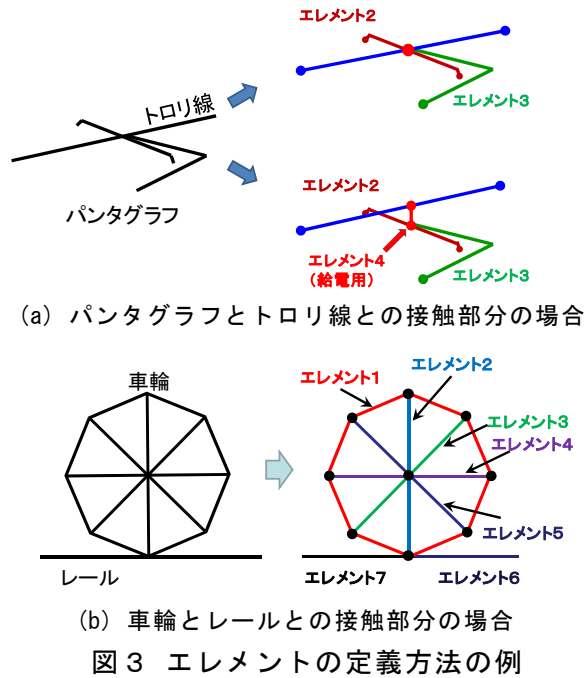


図 2 詳細化した鉄道アンテナモデル

的に変化させる方法を採用した。また、走行に伴う電波雑音源の特性の変動については、列車位置に応じて給電点に与える高周波信号源の振幅を変化させて模擬することとした。

モーメント法で解析する際には、導体をアンテナのエレメントとして定義する必要があるが、導体の区切り方や順番などによって計算精度が大きく変わり、またエレメント数が増加すると指数関数的に計算量が増加する。そこで、図2に示した詳細化モデルを分割してアンテナエレメントとして定義する方法を検討し、①エレメント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、などの方針を整理し、モデルの分割方法と定義する順番などをまとめた(図3)。



3. 鉄道アンテナモデルに適したモーメント法解析手法の検討

モーメント法は境界要素法の一つで、アンテナの動作解析に用いられる電磁界解析手法の一つである。モーメント法では、アンテナのエレメントをセグメントと呼ばれる微小区間に区切り、エレメントと空間の境界に置いた未知関数を複数の基底関数で近似展開し、境界条件を基に導出した連立方程式を数値的に解くことによって近似的に未知関数を求める。このとき、境界条件を満足しているか否かを評価するために、基底関数によって近似された関数と未知関数との残差に試行関数で重み付け(モーメント)をかけることから、モーメント法と呼ばれている。モーメント法には、基底関数と試行関数に使用する関数の組合せによって複数の解析手法があり、手法によって計算量と計算精度が異なる。

簡略化モデルに適用した解析手法は、計算量が少ない反面、計算精度を高めるためにエレメントを微小に区切る必要があった。このため、極端に細長くまた複雑な詳細化モデルの解析には適しておらず、波長が短くなる100MHz以上の周波数域では計算量が膨大となり実質的には計算できないことがわかった。そこで、詳細化モデルの解析に適用できる解析手法の検討を行った。検討の結果を表1に示す。

表1 詳細化した鉄道モデルに適した手法の検討結果

		基底関数 $f_n(x)$		
		パルス波関数	三角波関数	正弦波関数
		精度: セグメントが粗いと劣化 計算: 簡単・高速	精度: 中程度 計算: 複雑	精度: 高い 計算: やや複雑
試行関数	デルタ関数 δ	精度: セグメントが粗いと劣化 計算: 簡単・高速	詳細化モデルではセグメント数が多くなり過ぎて不適。(Harrington法)	詳細化モデルでは計算が複雑な上にセグメント数が多く適用不可。 (簡略化モデルに適用した手法)
	基底関数と同じ	精度: セグメントが粗くても高い 計算: 基底関数の複雑さに依存	---	詳細化モデルにも適用可能だが、計算が複雑な割には精度が正弦波関数よりも劣る。 詳細化モデルでも少ないセグメントで高い精度が得られる可能性。(Richmond法)

赤: メリット 青: デメリット

表 1 に示したように、基底関数と試行関数に同一の正弦状関数を使用する Richmond 法と呼ばれる手法が詳細化した鉄道モデルに適していることがわかった。Richmond 法は、計算量がやや多いが、セグメントの分割数が少なくても十分な解析精度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手法も開発されており、巨大なアンテナの解析も可能とされている。

4. シミュレーション実行環境の整備と検証

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座標や太さなどの数値データ群を解析ソフトウェアに入力する必要がある。図 1 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 2 のように詳細化・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う。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 2 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電磁界解析ソフトウェアに入力できるデータ形式に変換するソフトウェアを、Windows アプリケーションとして開発した。開発したソフトウェアのスクリーンショットを図 4 に示す。開発したソフトウェアは、表 2 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、電磁界解析ソフトウェアに読み込ませることができるデータファイルを出力する。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与えておくことにより、自動的に列車位置ごとのモデルデータに反映される。また、さらに、Windows 上で実行されている別のアプリケーションウィンドウを自動的に操作するプログラムを利用し、解析ソフトウェアを自動的に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してシミュレーションを実行する機能を実装した。開発したソフトウェアにより、これまで 3~4 日間かかっていたモデルデータの作成作業を数十秒で完了することができる。開発したソフトウェアを使用して詳細化モデルの生成を行った例を図 5 に、



図 4 開発したソフトウェアのスクリーンショット

表 2 設定できる主な条件

き電システムおよび軌道に関する条件		列車に関する条件		
き電システム	き電システムの形式	車体	長さ	
	トロリ線の高さ		幅	
	トロリ線の径		屋根の高さ	
	メッセンジャワイヤの高さ		床面の高さ	
	メッセンジャワイヤの径		台車	1 車両あたりの台車数
	軌間			台車間の距離
軌道	レールの幅	1 台車あたりの車輪数		
	レールの高さ	ホイールベース		
	レールレベル	車輪径		
	接地条件	編成	車両数	
大地面の条件	電動車の数			
変電所	等価インダクタンス	母線の有無		
	等価キャパシタンス	パンタグラフ	形式	
			数	
雑音源に関する条件		雑音源	搭載車両	
発生源の数			集電舟の幅	
雑音源を配置するエレメント				
雑音周波数				
			列車位置ごとの強度テーブル	

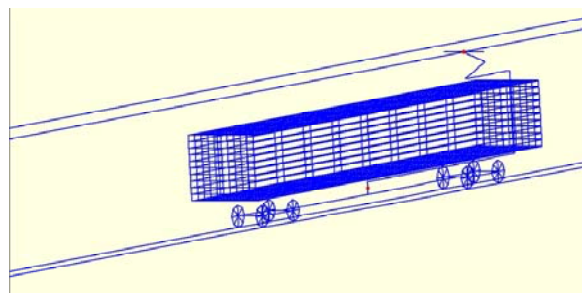


図 5 生成したモデルの例

また生成したモデルによって外部のモーメント法による電磁界解析ソフトウェアで解析を試行した結果を図6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、簡略化モデルによる計算結果の精度に対して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、簡略化モデル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。

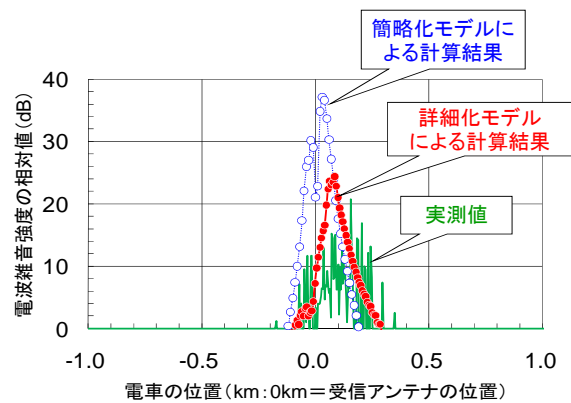


図6 シミュレーション結果の例

5. 対策案の検討とシミュレーションによる対策効果の予測評価の試行

電波雑音の放射対策としては、①発生源での発生強度を下げる、②発生源から被害側への伝播を防ぐ、の2つに大きく分けることができる。①の対策は根本的な対策となるため効果が大きいですが、実現手段に限られるうえ、本来の機能を損なわずに実装することが困難などの課題がある。②の対策は、実現手段の選択肢が多く、設計段階・製造過程・完成後のいずれにおいても実装が可能である反面、得られる効果のばらつきが極めて大きい。そこで、ここでは、②の対策について、電波雑音の主な伝播経路に応じて、接地・フィルタ・遮蔽・配線ルートに適正化、の4つの対策法を整理し、シミュレーションによる対策効果の予測を試行した。その結果、対策効果の相対的な評価が可能であることがわかった。LCフィルタを導入した場合の効果を実測した例を図7に示す。

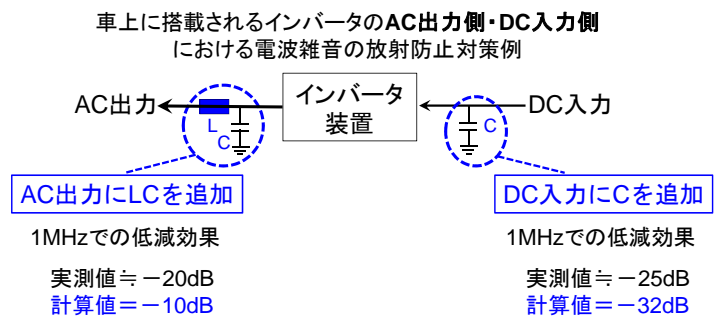


図7 対策効果の予測の試行例

6. まとめと今後の課題

鉄道による電波雑音の放射をシミュレーションする手法について、2007年度に提案した鉄道アンテナモデルの詳細化を行い、詳細化モデルを半自動的に生成するソフトウェアを開発し、モーメント法による電磁界解析を容易に実行できる環境を整えた。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。

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レベルに発展させたいと考えている。