

電気鉄道が放射する電波雑音のシミュレーション手法の検討

信号通信技術研究部 通信
主任研究員 川崎邦弘

1. はじめに

近年、電気鉄道においてインバータ駆動方式が導入され、また、鉄道システム内外に電子機器や通信機器が多数導入されていることに伴い、これまで電磁的な干渉が発生していなかった周波数域において、信号設備を含む電子機器の動作や無線伝送・放送受信に影響を与える電波雑音が発生する可能性が出てきている。このうち、電気鉄道から沿線に放射される電波雑音については、測定評価法は確立されているものの、列車走行に伴う強度変化特性や周波数特性などを推定する手法が確立されていない。このため、放射特性の把握や放射防止対策の効果の確認は、コストのかかる実車走行による測定試験に抛らざるを得ない。機器単体や車両単体からの放射に関しては、シミュレーション手法が研究されているが、鉄道の特徴を考慮して地上の給電系も含めたシステム全体からの放射をモデル化した例は少ない。これらの放射現象のシミュレーションが可能となれば、費用対効果の高い対策の机上検討や対策効果の予測が可能となるため、現地試験を繰り返す必要がなくなり、コストの低減が期待できる。また、鉄道用 EMC 国際規格との整合性を確認する際にも、試験前に放射状況を推測することができる。そこで、鉄道総研では、沿線への電波雑音の放射をシミュレーションする手法の確立を目指して、平成 17 年度より基礎的な検討を行ってきた。本発表では、昨年度までに得られたシミュレーション手法の基礎検討結果と、単純化したモデルに基づく放射シミュレーションの試行結果を紹介する。

2. 電気鉄道が放射する電波雑音の現状

2.1 EMC と電波雑音

電気を利用して稼動する電気電子機器やシステムは、動作時に不要な電磁界や電磁波を放射する可能性がある一方、逆に外部から到来する電磁界や電磁波によって動作が妨害される可能性がある。このような電磁界・電磁波によって引き起こされる障害を「EMI (ElectroMagnetic Interference : 電磁障害)」と呼ぶ。電磁障害は、発生源からの放射が様々な結合経路を経て被害側の機器に到達することによって起こる。従って、同じ場所 (= 同じ電磁的な環境) で複数の電気電子機器・システムが同時に動作する場合には、互いに妨害を与えないよう電磁的に両立できる性能を、相互に有している必要がある。このように、ある電磁環境に置かれた機器あるいはシステムが、他に電磁的な妨害を与えず、かつ影響を受けずに満足に動作できる能力を、「EMC (ElectroMagnetic Compatibility : 電磁両立性)」と呼ぶ。EMC を実現するためには、不要な放射を抑制する必要があるが、電気を利用する以上、放射を完全に無くすことは不可能であり、抑制対策にも限界がある。従って、影響を受ける側でも電磁界や電磁波が到来しても正常に動作できるよう、イミュニティ (性能低下を起こさずに動作できる能力) を有することが求められる。本発表で扱う「電波雑音」とは、不要に放射される電磁波のうち、機器もしくはシステムの動作を妨げ、悪影響を及ぼすような 9kHz 以上の電磁波をいう。

2.2 電気鉄道による電波雑音

電気鉄道による電波雑音の放射源には、集電機構やき電電流に含まれる高調波成分等が考えられる。VVVF 制御車が登場する以前は、電波雑音の放射源は集電機構での放電現象が主要因であり、VHF 帯を利用するアナログテレビ放送への影響が主な測定評価の対象であった。新幹線では、テレビ放送帯域における電波雑音の放射防止を目的とした各種の対策（高圧母線の引き通し、パンタグラフの改良など）が開発、実施され、電波障害防止に大きな効果を挙げている。しかし、VVVF 制御車の登場以降は、離線に伴う電波雑音の放射は低減しているが、10MHz 以下の中波帯や長波帯において、車上の電力変換器が発生源と推定される電波雑音の発生が見られるようになってきている。100MHz など VHF 帯以上の周波数では列車通過時のみに電波雑音が測定される事例が多いのに対し、1MHz など中波帯以下の周波数の電波雑音は、列車が沿線の受信点から遠い位置でも受信され、列車の接近・通過に伴って強度が波のように大きく変動する特徴がある。

3. 沿線に対する放射現象のシミュレーション手法の検討

3.1 検討の前提条件

理想的には、鉄道の構成要素を全てモデル化し、最終的な目標である強度の絶対値を推定できることが望ましい。しかし、非常に複雑なシステムと現象を対象としているため、最初から全てをモデル化するアプローチは現実的ではない。そこで、始めは単純なモデルから検討を開始し、定性的な特徴を再現できる基礎的な手法を構築したうえで、徐々にモデルを詳細化して強度値を推定できる手法へと発展させていくこととした。ここでは、最初の段階として昨年度まで検討してきた最も単純なモデルによるシミュレーション手法について述べる。この手法では、鉄道システム全体を、変電所、トロリ線、電車、レールの4つの部品からなる構成に単純化した（図1）。き電方式は最も単純な直流の直接き電方式、電車は集電機構と駆動用の電力変換器（主回路）のみを搭載する1両編成の金属の箱と考え、電車に搭載されている集電機構と電力変換器を電波の発振器とみなした。集電機構や電力変換器から放射される実際の電波雑音は、複数の周波数成分を含み、かつ振幅・周波数とも変動するが、ここでは各発振器が発生する電波は無変調の単一周波数波とした。さらに、電車の走行は、電車と変電所間の距離の変化として表現することとした。

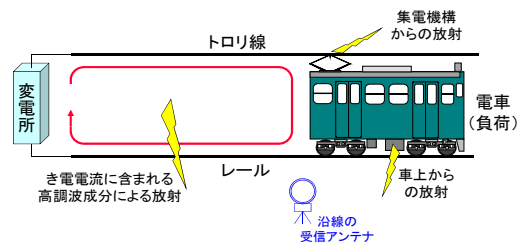


図1 モデルの基本構成

3.2 具体的なシミュレーション手法の検討

図1に示したモデルでシミュレーションを実行する具体的な計算手法として、次の3つの手法を取り挙げ、実際にモデル化と計算を試行してシミュレーションの可否と計算結果の妥当性の確認（強度変動の定性的な特徴の再現ができていないか、など）を行った。

- ①LCR で構成される高周波回路で表現する手法
- ②有限要素法などによる電磁界解析手法
- ③アンテナとして表現してモーメント法で解析する手法

その結果、①・②の方法は、図1に示したような単純化した対象であっても、シミュレーションモデルが複雑となり、また定数が一意に決められないなどの課題が多く、放射強度変動の定性的な特徴を再現する手法としては適さないことがわかった。特に、列車の走行、すなわち列車の

位置が変わることによる放射への影響を模擬することは、不可能ではないが、膨大な計算量となり、現時点では実用的ではないことがわかった。これに対し、③の手法では、図1に示したモデルをそのままアンテナとして扱うため、比較的容易に放射される電波強度を計算できる。具体的には、トロリ線・レール・電車は電波を放射もしくは反射するアンテナのエレメント、車両に搭載されている電力変換器と集電機構における離線はアンテナへの給電点としてモデル化を行い、モーメント法によってアンテナのエレメントに流れる高周波電流の分布を求め、この高周波電流から沿線のある地点で受信される電波強度を計算する。この手法によれば、列車の位置が変わることによる影響を、①・②の手法より容易に計算できることがわかった。次節に、本手法に基づく具体的なモデルの例とシミュレーションの試行結果を示す。

3.3 アンテナモデルによるシミュレーションの試行

図1に示したモデルをアンテナとして表現した例を図2に示す。モデルは全て線導体（ワイヤー）として定義しており、車体もワイヤーの集合体としている。このモデルにおいては、トロリ線とレールを模擬するワイヤーの長さ（図中のSLおよびEL）を変えることによって、列車位置を変えることができる。なお、図2では車上配線はかなり単純化しているが、実際の配線に近いワイヤー配置も可能であり、リアクトルやコンデンサに相当する集中定数を配置することもできる。アンテナへの給電点は、図2では床下1か所（駆動用の電力変換器を想定）としているが、任意の位置に2つ以上の給電点を設定することも可能である。ただし、同時に解析できる周波数は単一周波数のみであるため、同じモデルを使って周波数を変えて解析する必要がある。

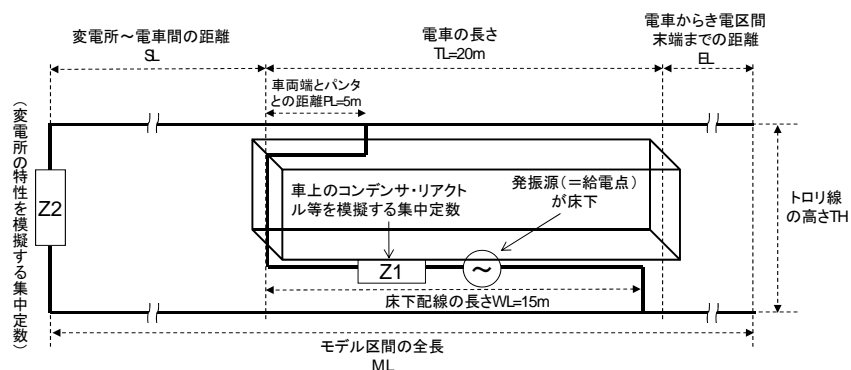


図2 発振源が床下にある場合の最も単純なアンテナモデルの例

図2に示したモデルを使って高周波電流の分布を求め、さらに沿線に固定された受信アンテナで受信される電波雑音の強さを計算した結果を、実測値とともに図3(a)(b)に示す。図3は、電車が一定強度の電波雑音を発生しながら長さ約5kmのき電区間内を走っている状態をモデル化して計算した結果である。車上の給電点は2か所設定し、床下の電力変換器から0.1MHzの成分が、また、パンタグラフとトロリ線との離線によって100MHzの成分が発生することを想定した。電車の位置は、周波数に応じて20mピッチ～1mピッチで変えている。ただし、アンテナに流れる高周波電流を求める際のワイヤーの分割長は、波長の1/100以下の長さとしている。図3の横軸は電車の位置をキロ程で示している。キロ程=0kmは地上にアンテナがあると想定した位置（ここでは変電所から2.5kmの位置）であり、変電所側をマイナス、変電所から遠い方をプラスとしている。電車は変電所から遠ざかる方向に走行させている。縦軸は電波雑音強度の変動幅を示す相対値であり、●のプロットが計算結果の値である（グラフ上では各プロット間を直線で補間）。

図3より、沿線で受信される電波雑音強度が、列車位置の変化に伴って変動する様子が計算で再現されていることがわかる。図3中には、モデルに比較的近い条件で実測された沿線での電波雑音強度の相対的な変化を薄い実線で示したが、強度の絶対値や細かい変動幅は一致しないものの、0.1MHzでは列車がアンテナから離れた位置でも電波雑音が受信されており、列車がアンテナのある位置に接近して再び遠ざかるに従って周期的に変動する状況が計算で求められており、これに対して100MHzでは、列車通過時のみに電波雑音が受信されるという実測と同様の傾向が再現できている。なお、計算結果が実測値より大きくなっているのは、今回のモデルでは給電される電波の強さが実際よりも大きく、また周囲環境も含め、放射される電波が減衰する要素が省かれているためと考えられる。このように、単純なモデルでも実際に近い変動状況が再現できたことから、列車の走行に伴って電波雑音が沿線に放射される現象を「車上の発生源で発生した電波が、トロリ線やレールに流れ、トロリ線とレールがアンテナとして動作することによって放射される現象」として扱う手法は正しいことがわかった。

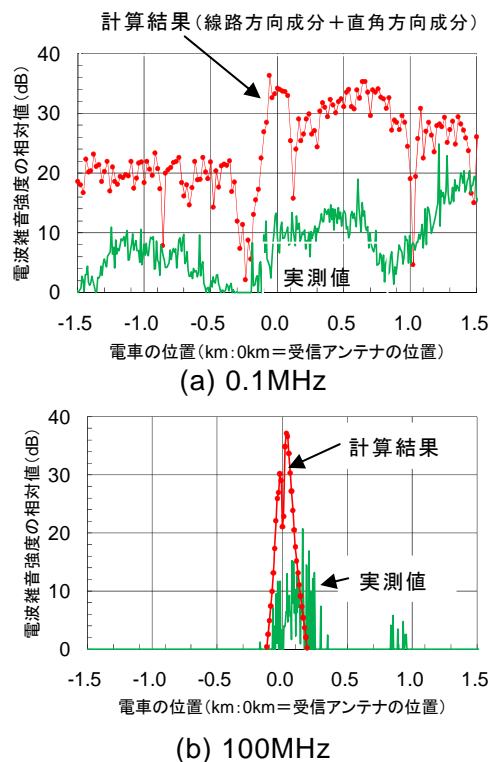


図3 基礎モデルによる計算結果例

4. 今後の展開

本報告で述べた手法は、限定された条件の下での定性的な傾向を推定する基礎的な手法ではあるが、車上の機装配線の変更やコンデンサやリアクトルの付加等の対策が、電波雑音の放射の低減に寄与する可能性があるか否か、といった判断に利用することができる。しかし、実用とするには、モデルをさらに詳細化する必要がある。

今後、本手法を基礎として、3.1で述べた前提条件をより実際に近い条件に近づけていくことにより、実用的なシミュレーション手法へと展開する予定である。対策効果の推定を行うためには、少なくとも相対的な変化量を推定できる必要があるため、相対値の推定精度を高めることが次の目標である。また、交流電方式の鉄道にも適用できるモデルの検討と、出力結果の可視化手法などにも取り組む予定である。最終的には、絶対値の推定できる手法を検討し、コスト効果の高い電磁波放射防止対策の検討や実現、あるいはEMC規格への適合性の予測や試験にかかるコストの低減等に活用できる、より実用的な電波雑音強度の予測手法の確立に向けて、取り組みを継続していく予定である。

5. おわりに

電力業界など他の産業分野でもEMCは重要な課題の一つと位置付けられ、国際規格や国内の規格・基準が着実に整備されつつある。今後も、国内外の動向に留意しつつ、鉄道特有の現象を測定評価できる手法の開発と対策案の検討を継続的に行い、鉄道と周囲環境との関係の保全ならびに鉄道内でのEMCの実現による機器の誤動作・不具合の低減に貢献していきたい。