

沿線電波環境を予測する

川崎 邦弘

信号通信技術研究部(通信 研究室長)



かわさき くにひろ

はじめに

鉄道沿線の環境に関する話題の一つに電波環境があります。電波環境を整えるためには、鉄道沿線での放送通信に影響を与えるような電波が鉄道から出ていないか、また逆に、鉄道で使われている様々な装置に影響を与えるような電波が周辺から到来していないか、を把握することがまず必要となります。しかし、電波環境を把握するための測定試験は時間と手間がかかり、容易に実施することができません。そこで、鉄道総研では、鉄道沿線における電波環境を予測する手法の開発に取り組んでいます。本稿では、予測手法のなかの一例として、走行列車によって沿線に放射される電波雑音のシミュレーション手法を取り挙げ、検討状況と今後の展開について紹介します。

電波雑音とは

“電波雑音”とは、電気・電子機器や、それらの機器によって構成されたシステムが動作することによって、周囲に放出されてしまう不要な電波を言います。実は、電波雑音という呼び方は慣例的なもので、JIS¹⁾の用語の定義では、“無線雑音”が正しい名称になります。JISでは、「電磁雑音のうち無線周波数帯の成分を有するもの」を無線雑音と定義しており、この中に出てくる“電磁雑音”は、「時間的に変化する電磁的現象の一種で、明らかに情報を伝えず、かつ、希望信号に重畳又は結合する可能性のあるもの」(傍点は筆者追記)と定義しています。つまり、情報を伝えるために音やデータが載せられている電波は電波雑音ではありません(これらが他の通信に影響を与えるような場合は“不要信号”、“妨害信号”と呼ばれます)。また、JISでは電磁雑音を大きく“自然雑音”と“人工雑音”の2種類に分けて用語を定義しています。自然雑音は、宇宙から到来するものや雷によって発生するものです。人工雑音は、まさに人間が作った機器やシステムによって発生するもので、接点などでの放電によって放出される電波やコンピュータのク

ロックやインバータの出力から放出される電波、あるいは電波を送信した際に副次的に放出されてしまう電波が電波雑音になります。ちなみに“電波”は“電磁波”の一部を差す用語で、日本では、300万メガヘルツ(=3THz)以下の周波数の電磁波を電波と定義しています(電波法 第2条)。

電波雑音が放射されますと、周囲で使用している機器の動作を妨げたり、通信や放送の受信品質を劣化させてしまう恐れがあります。このような現象を“電磁障害”と呼んでいます。多数の電気電子機器が利用され、かつ様々な無線通信が利用されている現代では、このような電磁障害の発生を防ぎ、全ての電子機器や放送通信が共存できる環境(=電磁環境)を如何につくるかが課題となっています。

なお、なぜ電気電子機器が動作すると電波が出るのか、また電磁障害を防ぐための考え方はどのようなものか、については、本誌の2010年5月号²⁾に詳しく述べていますので、興味がある方はご参照下さい。

鉄道が放射する電波雑音の特徴

電気鉄道が沿線に放射する電波雑音の放射源には、トロッコ線と集電装置の間における摺動や離線などによって起こる放電現象と、き電電流・帰線電流に含まれる高調波成分などが考えられます。図1は直流電気鉄道の電気回路を簡略化して示した図ですが、図1中に赤字で示した部分が電波

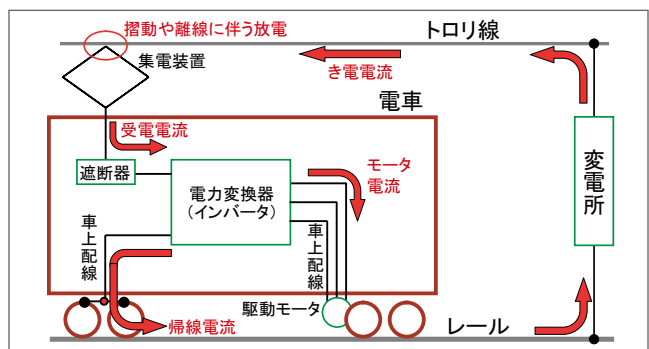


図1 電波雑音の主な放射源(直流電気鉄道の例)

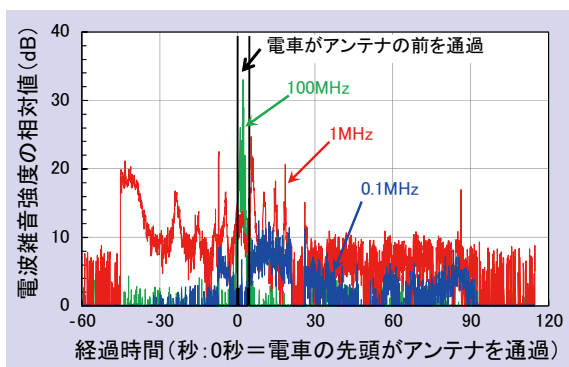


図2 電波雑音強度の時間変化の測定例

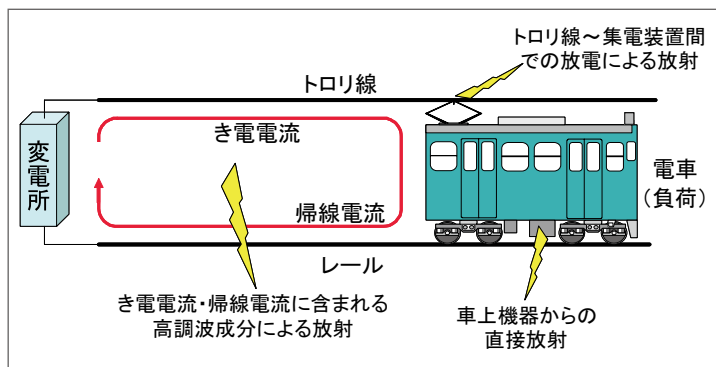


図3 モデルの基本的な構成

雑音の主な放射源となります。VVVF制御車が登場する以前は、トロリ線～集電装置間の放電が主な放射源であり、新幹線においては、VHF帯(30MHz～300MHz)の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が開発、実施されてきました。これにより、現在は、離線に伴うパルス性の電波雑音は、強度・発生頻度ともに低減されています。しかし、VVVF制御車の登場以降、10MHz以下の周波数域において、車上の電力変換器が発生源と推測される電波雑音の発生が見られるようになってきました。

このような鉄道沿線における電波雑音については、既に測定評価法が国際規格として定められています(本誌2010年5月号²⁾参照)。この国際規格に準拠した測定方法により、0.1MHz、1MHz、100MHzの3周波数の電波雑音強度の時間変化を同時に測定した結果の一例を図2に示します。図2の横軸は秒で、電車の先頭がアンテナの前を通過した時刻を0としています。縦軸は電波雑音強度の相対値(dB)です。

図2に例示したように、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受信される事例が多いのに対し、0.1MHzや1MHzなど10MHz以下の周波数の電波雑音には、以下のような特徴が見られます。

- ①列車が測定点の数km手前にいる時点から受信され、
- ②列車が測定点に接近するに従って強度が波のように変動し、
- ③測定点近くでは暗雑音強度近くまで強度が落ち、
- ④列車が測定点を通過した直後に再び強度が上昇し、
- ⑤列車が離れるに従って強度が波状に変化しながら徐々に下がっていく

また、電車の走り方と連動して電波雑音強度が変動する現象も10MHz以下の周波数域での特徴です。

沿線への放射現象のモデル化

前節で述べたように、電気鉄道から沿線に放射される電波雑音の強度変動は複雑で、かつ周波数によって異なる挙動を示します。このような複雑な現象を完全に再現するための計算モデルは、非常に複雑なものとなってしまいます。

巨大システムを対象とする電磁的な解析手法の研究が大学や各種の研究機関で実施されていますが、その多くは軍用や航空機など比較的特殊な用途であることが多く、コストや計算機の規模を考えるととても手軽に利用できる手法はありません。また、鉄道の場合は数十から数百kmオーダーの極端に細長いシステムで、かつ高速で走行する発生源が存在するという特徴があり、世の中の手法をそのまま適用することはできません。

そこで、モデル化の最初の段階として、走行列車から放射される電波雑音の特徴を定性的に模擬できる基礎的なモデルから検討を始めました。理想的には、鉄道を構成する機器やシステムを全てモデル化の対象とすることが望ましいのですが、ここでは、モデルづくりとモデルを使った計算をできるだけ簡単にするため、以下のような前提条件を仮定しました。

- き電方式は、最も単純な直流の直接き電方式とする。
- 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する(図3)。
- 電車は、集電装置と駆動用の電力変換器(主回路)のみを搭載する1両編成大の金属の箱とする。
- 電車に搭載されている集電機構と電力変換器は、電波の発振器とみなす。
- 電車の走行は、電車と変電所間の距離の変化として表現し、走行に伴う電波雑音の発生周波数・強度の動的な変化は、電車に搭載されている発振器の動作特性の変化で模擬する。
- 変電所は一定の電圧を発生する単純な電源とみなす。

具体的なモデルと計算方法

電波の放射をモデル化して解析する具体的な手法としては、電磁界解析手法であるFDTD法やモーメント法など幾つかの方法があります。FDTD法は、電磁波の放射を空間・時間の双方について厳密に解析する手法で、精度の良い解析結果が得られる半面、高性能(高速・大容量メモ

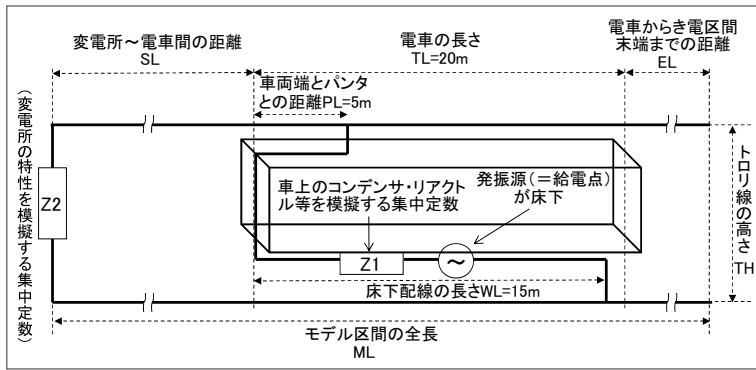


図4 鉄道をアンテナとして表現したモデルの例

り)の計算機でも解析に非常に長い時間がかかります。一方、モーメント法は、境界要素法 (BEM) と呼ばれる数値解析手法の一種で、線状の導体からの電波の放射を比較的少ない計算量で解析することができ、アンテナの動作解析などに多く用いられています。これらの方法を試行した結果、鉄道の放射モデルを解析する際の計算精度と計算時間のバランスが比較的良好なモーメント法が適していることがわかりました。鉄道は、解析モデルとしては極端に細長い形状で、また列車という移動物体が含まれていますので、厳密な解析手法であるFDTD法にとってはやや扱いにくく、もともと線状導体の解析手法として開発されたモーメント法にとっては得意な解析対象であるとも言えるかもしれません。

モーメント法で解析するためには、図3に示した鉄道のモデルをアンテナとして表現する必要があります。前節で述べた仮定条件に基づいて、図3に示した鉄道モデルをアンテナとして表現した例が図4です。

図4に示すように、モデルは全て線状の導体 (ワイヤ) として定義し、車両もワイヤの集合体としています。このモデルでは、変電所と車両の間に接続されるトロリ線とレールを模擬するワイヤの長さを変えることによって、列車位置を変え、走行を模擬します。なお、図4では車上配線を単純化していますが、実際の配線に近いワイヤ配置も可能で、車両に搭載されているフィルタなどの機器のモデルも配置できます。

電波雑音の発振源 (=アンテナへの給電点) については、図4では床下1か所 (駆動用の電力変換器で発生する成分を想定) としていますが、トロリ線と集電装置の間での離線から発生する成分を模擬するための発振源を屋根上に配置するなど、任意の位置に給電点を設定することができます。

アンテナモデルによる計算例

図4に示した鉄道のアンテナモデルをモーメント法で解析した結果を図5 (a) (b) に示します。これらの図は、鉄道

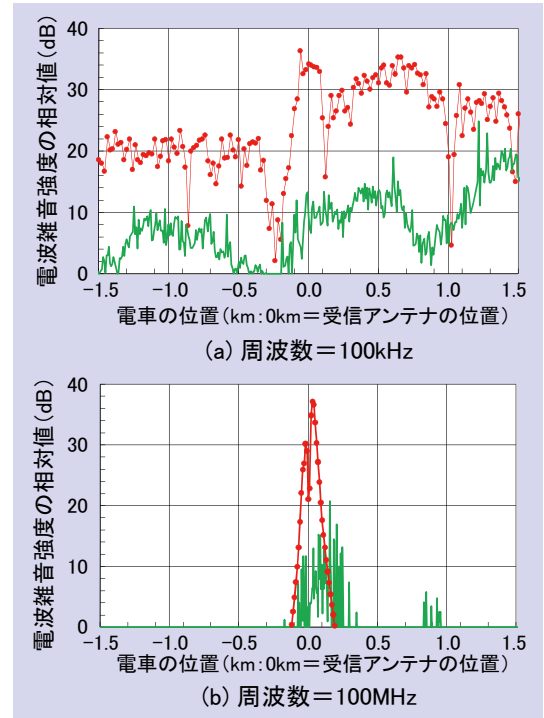


図5 沿線で受信される電波雑音強度の実測結果とアンテナモデルによる計算結果との比較例

沿線の地上に固定されたアンテナで受信される電波の強さの計算結果です。グラフの横軸は、地上の受信アンテナがある位置を0kmとして、相対的な電車の位置を示しています。変電所は横軸のマイナス側にあり、列車は変電所から遠ざかる方向へ走行するものとしています。縦軸は電波の強さの相対的な変化をデシベル (対数) で示した値で、+10dBの差は電力で10倍 (-10dBであれば1/10)、+20dBの差は電力で100倍 (-20dBであれば1/100) になります。

図5 (a) はVVVFインバータの高調波成分によって放射される100kHzの電波、図5 (b) は離線に伴う放電によって放射される100MHzの電波の計算結果です。100kHzは床下の電力変換器から、100MHzは走行に伴うパンタグラフとトロリ線との離線から発生することを想定してモデルを作成しました。なお、計算対象とした区間長は5kmで、地上の受信アンテナは計算対象区間のほぼ中心の沿線に固定されているものとし、地上の受信アンテナと線路の離隔距離は、国際規格の測定方法に準じて10mとしました (図5では、全計算区間のうち、沿線の受信アンテナ付近の結果のみ示しています)。

両図とも、●のプロットが計算結果の値 (グラフ上では各プロット間を直線で結んでいます)、計算モデルに比較的近い条件で実測された値を緑の実線で示しています。

図5より、列車位置の変化に伴って、沿線で受信される電波雑音強度が変化する様子が計算で再現されていることがわかります。計算結果と実測値を比較してみると、強度の絶対値や細かい変動幅は一致していませんが、

100kHzでは列車がアンテナから離れた位置でも電波雑音を受信され、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も求められています。また100MHzでは、列車通過時のみに電波雑音強度が高くなるという実測と同様の傾向が再現できています。計算結果が実測値より大きくなっているのは、今回のモデルでは発振源からアンテナに供給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です。

今後の展開

図5に示したように、図3や図4のような極めて単純な計算モデルでも、実際に近い電波雑音強度の時間変化の様子を再現することができました。このことから、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」として扱い、モーメント法で解析する手法が有効であることがわかりました。

現在、本稿で述べた手法を基礎として、モデルをより実物に近づけていくことにより、実用的な予測手法へと展開させるための研究を行っています。例えば、車体の形状や電システムの構成をより実物に近い詳細なモデルを作成したり、交流電化鉄道にも適用できるようにするなどの改良を行っています。また、発振源の周波数についても、実際にはインバータからは数kHzから数MHzまでの広い周波数範囲の成分が出力されており³⁾、かつ各周波数成分の強さも走行によって時々刻々変化していますので、実際に近い周波数成分と時間変動成分を考慮した発振源をモデルに適用することも検討しています。

鉄道沿線における電磁環境を把握するために現在実施している試験を軽減できる予測法とするには、電波雑音強度の絶対値を精度よく求められなければなりません。従って、今後は、絶対値の計算精度を如何に高めるかが大きな課題となります。絶対値を精度よく求める予測計算法の確立は非常に難易度の高い課題ですので、最終的な目標に到達するためには長い時間がかかると予想していますが、段階的に目標をクリアしながら研究を進めていき、将来的には、±6dB程度以内の誤差で計算できる鉄道専用のシミュレーションプログラムを開発したいと考えています。

なお、現段階では、本稿で述べた手法を電波雑音強度の絶対値の推定や対策効果の定量的な検証などにそのまま利

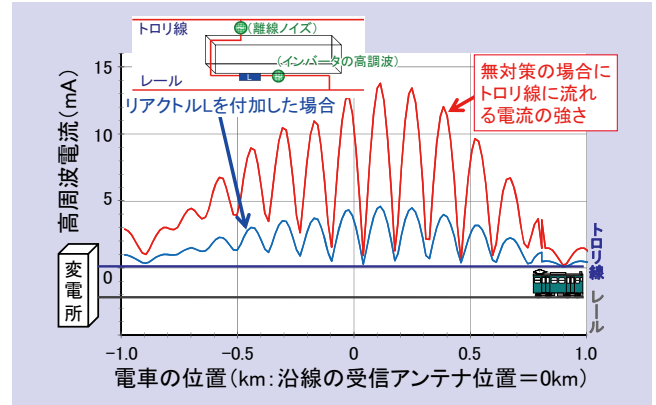


図6 本稿で述べた手法を用いて対策効果の推定を試行した例

用することはできません。ただし、限定された条件下であれば、放射防止対策の導入が電波雑音強度の低減に寄与するか否かの判断に利用することが可能です。例えば、車上にフィルタを搭載することによる放射防止効果が多少はあるのか全くないのか、といった定性的な推定が可能です。

実際に放射防止対策効果の予測を試行した一例を図6に示します。図6は、車上に放射防止対策（ここではフィルタリアクトルL）を導入した場合に、トロリ線に流れる高周波電流（＝空間に放射される電波雑音の素）がどのように変化するかを計算した結果です。図6より、リアクトルを付加したときのトロリ線上の高周波電流が、無対策の状態に比べて小さくなっていることから、リアクトルの導入によって高周波電流がトロリ線に流入するのが阻止され、沿線に放射される電波雑音強度が下がる可能性があることがわかります。このような予測を行うことにより、効果が見込めないような対策の実験を省くことができますので、現地試験の効率を上げることができます。

おわりに

ここでは、鉄道沿線の電波環境を予測するための手法として、鉄道をアンテナとしてモデル化することによって沿線への電波雑音の放射を計算する方法を紹介しました。

今後も、本稿で述べた手法をさらに深度化、発展させていき、走行列車を含む鉄道システムから沿線への放射を予測できる手法の確立に向けた研究に取り組む予定です。RRR

文献

- 1) 日本工業標準調査会：JIS C 60050-161 EMCに関するIEV用語、日本規格協会、1997
- 2) 川崎邦弘：鉄道における電磁的な境界領域、RRR, Vol.67 No.5, pp.14～17, 2010.5
- 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