

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

川崎 邦弘*

Basic Study on a Method 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 has been already established by International Electro-technical Committee (IEC). However, at this time, there are no usable methods yet to calculate the strength of the radiated emissions from operating railway systems that include running trains. Therefore, to know characteristics of the radiated emissions, or, to evaluate effects of countermeasures to reduce the emissions, we cannot help carrying out measuring tests which need so much time and costs. Then, to reduce these time and costs, our institute has started a study to establish a method to calculate the strength of the radiated emissions from railway systems. As a result of the study, one basic method to calculate trends of fluctuations of the strength of the radiated emissions from a running vehicle has been worked out. This paper outlines characteristics of the radiated emissions from railway systems and reports a result of the basic study on the calculation method. Moreover, this paper presents a future plan for the 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。しかし、現状では、列車走行に伴う強度変化などの特性を推定できる実用的な手法が確立されていないため、沿線に放射される電波雑音の諸特性の把握や対策効果の確認を行うためには、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、鉄道総研では、実測に拠らない電波雑音強度の評価手法を確立することを目標として、列車走行に伴う鉄道から沿線への放射強度を推定する手法の基礎検討を2005年度から行っている。

本稿では、鉄道が沿線に放射する電波雑音の特徴について述べたのち、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の基礎検討結果について報告する。

2. 鉄道が放射する電波雑音の特徴

電気鉄道が放射す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（図1）。VVVF制御車が登場する以前は、トロリ線とパンタ

グラフとの摺動など集電部分での放電現象が主な放射源であり、アナログテレビ放送への影響が社会的な問題となっていた。このため、100MHzや200MHzなどのVHF帯が主な測定評価対象とされ、新幹線においては、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が開発、実施されてきた。これにより、離線に伴うパルス性の雑音の強度・発生頻度も低減されている。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いる。

鉄道沿線における電波雑音の測定法を定めている国際規格 IEC 62236-2 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変動を同時に測定した結果の一例を図2に示す。横軸の単位は秒で、電車の先頭がアンテナの前を通過した時刻を0としている。

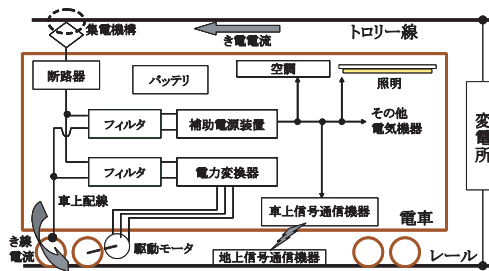


図1 電気鉄道の概要と電波雑音の発生源

* 信号通信技術研究部（通信）

特集：信号通信技術

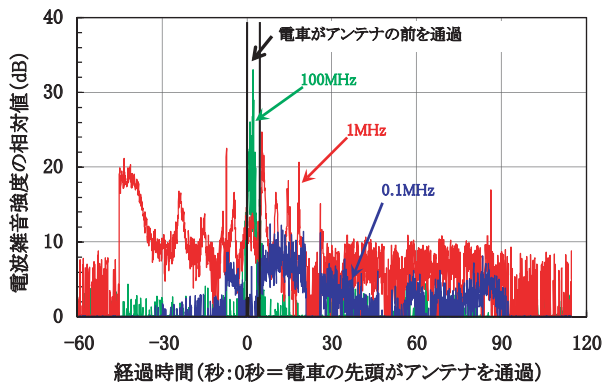


図2 電波雑音強度変動の実測例 (IEC 62236-2 準拠)

縦軸は電波雑音強度の相対値 (dB) である。

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測定される事例が多いのに対し、0.1MHzや1MHzなど10MHz以下の周波数における電波雑音強度の変動には、以下のように推移する特徴が見られる。

- 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列車が測定点を通り過ぎ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、ノッチのON/OFF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ある。

3. 沿線への放射現象のモデル化

3.1 基本的な考え方

前章で述べたように、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。このような複雑な現象をモデル化し、放射強度を計算するためには、モデルもかなり複雑なものとなる可能性がある。しかし、最初から全ての現象あるいは要素を網羅できるようなモデル化を目指してしまうと、モデルの検証が困難になるうえ、モデルを構成する複数の要素の寄与度、あるいは要素間の干渉の影響を分離できないおそれがあり、モデルの修正方針が立てられない可能性がある。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ることとした。

理想的には、鉄道を構成するサブシステムを全てモデル化の対象とすることが望ましいが、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た。

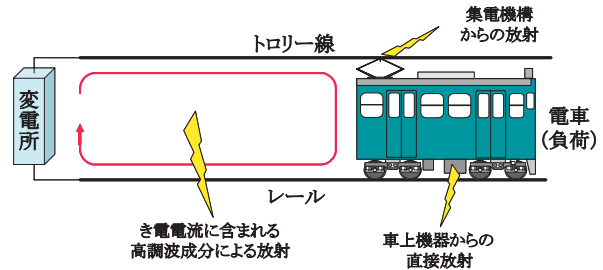


図3 モデルの基本的な構成

- ・き電方式は、最も単純な直流の直接き電方式とする。
- ・電波雑音を放射する鉄道システム全体を、変電所、トロリー線、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。実際には複数の周波数成分が同時に発生し、振幅・周波数も変動するが、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する。
- ・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。
- ・変電所はオフセット電圧を発生する単純な電源とみなす。

3.2 具体的なモデル化手法の基礎検討

電波雑音の放射をモデル化して解析する具体的な手法としては、電磁界解析の手法であるFDTD法やモーメント法など幾つかの手法を利用することが考えられる。

(1) FDTD法によるモデル化の試行

自動車など他の産業分野では、FEM (有限要素法) やFDTD法 (Finite Difference Time Domain Method = 時間領域差分法) による電磁界解析が行われていることから、まず始めに、近年注目されているFDTD法の適用を検討した。FDTD法は、マクスウェルの方程式を時間・空間の双方で差分化して解く手法であり、解析の対象とする空間の電磁界の過渡解と周波数応答を求めることができる。FDTD法はその計算量と計算精度とのバランスが優れていると評価されており、計算機の性能向上に伴って、近年広く利用されるようになってきている。

しかし、トロリー線や変電所、レールなど3次元的に広い空間に要素が分散しており、なおかつ列車という移動体を含む鉄道システム全体をモデル化した場合、3.1で述べたように単純化した条件であっても、その規模や計算量等が膨大となる。詳細についてはここでは述べない

が、PC上で動作する市販のFDTD解析ソフトウェアを用いて電車が停車している状態のモデル化と計算を試行したところ、計算自体は実行できたが、1周波数・1列車位置あたりのモデル作成と計算に4日～7日を要した。列車位置を波長λの1/2～1/10のピッチで変えながら計算した場合、1年間連続して計算しても数十m分の走行しか計算できないことになる。従って、kmオーダーの区間を列車が走行する状況をFDTD法で解析するためには、高度なシミュレーション技術（大型計算機や並列処理など）の利用が不可欠であることがわかった。

FDTD法による解析手法の適用検討は、厳密な解析を行うという目標からは意義があると考えられ、将来実際に供することができる可能性もある。しかし、対策効果の確認や傾向の把握という目的に対しては、厳密な解析はできなくとも、より容易に、手軽に利用できる実用的な手法であることが望まれる。そこで、FDTD法のように複雑な電磁界解析はできないが、線状の解析対象を比較的少ない計算量で解析できるモーメント法の適用を検討することとした。

(2) モーメント法の適用の検討

モーメント法は、境界要素法 (BEM) の一種で、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、一般的な境界要素法と同様に、解析対象の境界に未知数 (未知関数) を並べ、境界条件を基にして解くべき方程式を導出し、導出された方程式を数値的に解いて未知数 (未知関数) を求める。このとき、金属線上の全区間で境界条件を満足させる必要があるため、基底関数に重み付け (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。

これまででも、トロリ線やレールをアンテナとして見なして解析する考え方はあったが、鉄道全体をモデル化して列車走行に伴う強度変動の解析を可能とした実用的な手法はまだ確立されていない。そこで、図3に示した鉄道のモデルをそのままアンテナとして表現し、モーメント法でアンテナとしての動作を解析する手法を試みた。

具体的には、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を電波の発振源=アンテナへの給電点、トロリ線とレールは電波を放射するアンテナの要素としてモデル化を行い、モーメント法によるアンテナ動作解析ソフトウェアを利用して、モデル化されたアンテナに流れる高周波電流と放射される電波強度を求める方法である。

次節以降に、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 アンテナとして表現した鉄道モデル

3.1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を図4に示す。

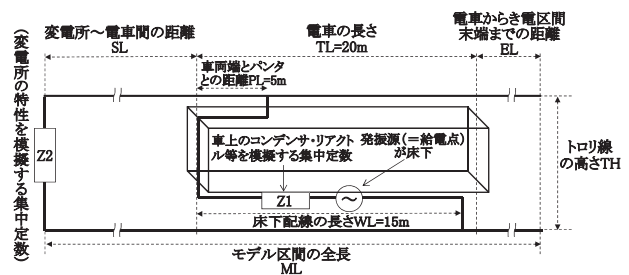


図4 アンテナとして表現した鉄道モデルの例 (発信源が床下にある場合のモデル例)

図4に示すように、モデルは全て線導体 (ワイヤー) として定義し、車両もワイヤーの集合体としている。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ーの長さを変えることによって、列車位置を変えている。具体的には、モデル区間全長 (ML) = 変電所～電車間距離 (SL) + 電車の長さ (TL) + 電車～き電区間末端距離 (EL) を満足するように SL と EL を変化させて、モデルにおける列車の位置を設定する。なお、図4では車上配線を単純化しているが、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も配置できる。

電波雑音の発振源については、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) としているが、集電機構での離線で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もできる。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。

3.4 モーメント法による実際の計算方法

3.3節で述べたアンテナモデルによる解析計算は、NEC (Numerical Electromagnetic Code) と呼ばれるモーメント法による解析アルゴリズムを利用したアンテナ動作解析ソフトウェアを用いて行った。

計算を行う際には、使用するアンテナ動作解析ソフトウェアの仕様に従ってアンテナモデルをソフトウェアに入力しなければならないが、エレメントの定義方法や、計算条件の設定に注意する必要がある。特に、以下の点については、十分に留意する必要がある。

- ① エレメントを定義する順番
- ② 給電点とエレメントとの接続条件
- ③ エレメント上の高周波電流を計算する際の分割数と分割方法

上記のうち、③は計算結果に大きく影響し、設定によっては計算ができない場合もある。分割数は多いほどよいが、計算速度が遅くなりメモリも大量に必要となる。アンテナエレメントで表現された鉄道は、極端に細長いループアンテナと言えるので、長いエレメントは

特集：信号通信技術

テーピング（分割の細かさを変化させる方法）による分割を行い、電車や、電車とトロリ線・レールとが接続される部分は等間隔で細かく分割するなどの方法が有効である。なお、次節以降で述べる計算では、分割区間長を $\lambda/100 \sim \lambda/400$ （ λ は波長）とし、分割間隔は等間隔としている。

3.5 アンテナモデルを使った計算結果

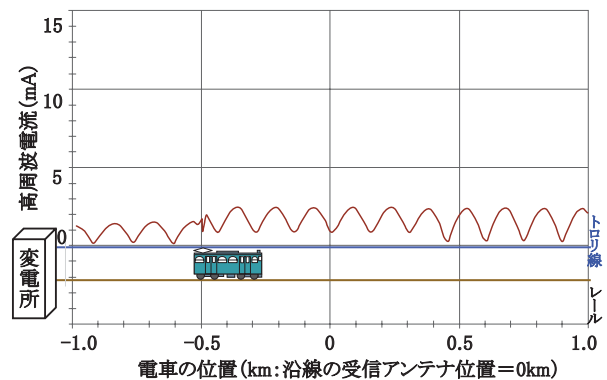
図4に示したモデルを使ってモーメント法により高周波電流の分布を計算した結果の一例を図5 (a) (b) (c) に示す。図5は、車上に配置した発振源が単一の周波数の電波雑音を一定強度で発生しながら長さ約2kmのき電区間内を走っている状態をモデル化し、トロリ線上の高周波電流の分布を計算した結果である（図4中のML = 2020m, TH = 5mとし、集中定数Z1・Z2は純抵抗として設定）。図5の横軸は電車の位置を示しており、ここではトロリ線と電車上のパンタグラフとが接触している位置（キロ程）とした。キロ程=0kmは地上にアンテナがある想定した位置（ここでは変電所から1kmの位置）であり、電車は変電所側から走行開始し、変電所から遠ざかる方向に走行するものとした。なお、図5中の電車の絵は実際のモデルを示すものではないので、その大きさは無視して頂きたい。図5 (a) は電車のキロ程=-0.5km（変電所～電車間の距離SL=500m）の場合、(b) は電車のキロ程=0km（変電所～電車間の距離SL=1000mで、電車がアンテナのほぼ正面にある）の場合、(c) は電車のキロ程=0.5km（変電所～電車間の距離SL=1500m）の場合である。いずれの図も、列車上の発振源から給電された周波数1MHzの高周波電流が、トロリ線上にどのような強度で分布しているかを示しており、上方向に行くほど高周波電流が大きいことを示している。

図5より、電波雑音の放射エネルギー源となる高周波電流の大きさが列車の位置によって変化しており、放射される電波強度の計算結果も列車位置に応じて波状に変動することが予測できる。このような電流の変動は、発振源から供給される電波の周波数（波長）と、トロリ線やレールで構成される大きなループアンテナの周波数特性とによって決まると推測される。

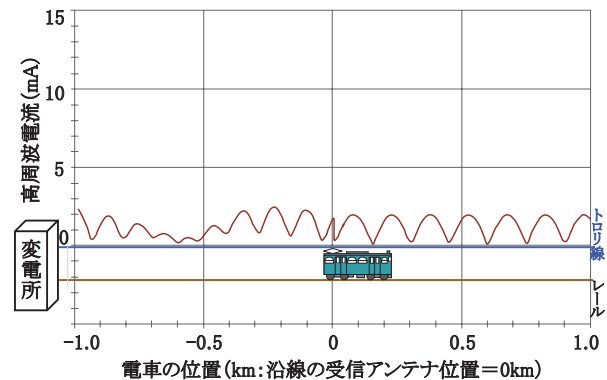
図5に示したように、電車の位置を変えることによって高周波電流の分布が変化する状況を計算できることがわかったことから、次に、沿線の地上に固定されたアンテナで受信される磁界強度（30MHz未満の周波数）または電界強度（30MHz以上の周波数）の計算を行った。計算結果の例を図6 (a) (b) に示す。両図とも、●のプロットが計算結果の値である（グラフ上では各プロット間を直線で結んでいる）。

図6では、VVVFインバータの高調波成分によって放射される100kHz（図6 (a)）と、離線に伴う放電によ

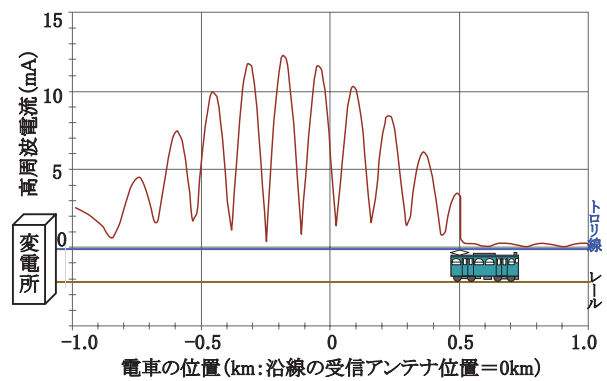
て放射される100MHz（図6 (b)）を計算対象とした。モデルの構築にあたっては、給電点が2か所あるものとし、100kHzは床下の電力変換器から、また、100MHzは走行に伴うパンタグラフとトロリ線との離線から発生することを想定した。計算対象とする区間長は、図5に示したモデルよりも長い約5km（図4のML=5020m）とし、地上の受信アンテナは計算対象区間のほぼ中心（SL=2500mの位置）の沿線に固定されているものとした。すなわち、変電所～電車間の距離が2500mの時に、地上の受信アンテナのほぼ正面に電車がある状態となる。なお、地上の受信アンテナと線路の離隔距離は、IEC 62236-2に基づく測定に準じて10mとした。



(a) 変電所～電車間が0.5km



(b) 変電所～電車間が1km
(地上の受信アンテナのほぼ正面に電車がある)



(c) 変電所～電車間が1.5km

図5 高周波電流分布の計算結果例
(周波数1MHz, 発振源が床下の場合)

グラフの横軸は、地上の受信アンテナがあるキロ程を0kmとして、相対的な電車の位置を示している。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している。縦軸は磁界強度もしくは電界強度の変動幅を示す相対値である。なお、100kHzについては、地上で測定するアンテナ（ループアンテナ）の指向性を考慮し、沿線に放射される電波雑音の線路直角方向成分と線路方向成分とを合成している。

図6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緑の実線で示した。

図6より、列車位置の変化に伴い、沿線で受信される電波雑音強度が変動する様子が計算で再現されていることがわかる。強度の絶対値や細かい変動幅は実測値と一致しないものの、100kHz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も求められている。これに対して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った。

4. 今後の展開

4.1 モデルの深度化と推定計算精度の向上

今後、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、実用的な推定手法へと展開できることが期待できる。例えば、発生周波数については、実際にはインバータからはスイッチングによって数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、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。図4に示したモデルにおける発生源として、実際に近い周波数成分と時間変動成分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。

EMC規格への適合性の予測や、測定箇所や周波数の絞り込みなどを行うためには、絶対値を求める必要があり、絶対値の推定計算精度（できれば±4dB以内、最大でも±6dB以内の誤差範囲内）を高めることが最終的な目標となる。しかし、絶対値を精度よく求める推定手法を確立することは非常に難しい課題であることから、当面は、相対的な変動幅の精度の向上（目標誤差は±6～10dB以内）に努め、対策効果の推定に使える手法を目指す予定である。また、交流き電方式への適用や複数車両で構成される列車のモデル化も検討する予定である。

さらに、ここでは汎用のソフトウェアを用いて計算を試行したが、今後モデルの深度化と、エレメントの分割法の最適化等を行うため、鉄道向けの解析ソフトの開発を検討している。具体的には、モーメント法による解析部分にNECを利用し、鉄道モデルに特化した計算ができるよう、線区の条件、電車の条件、発振源の条件からアンテナモデル（エレメントと給電点）と計算条件を生成するプリプロセッサと、NECの出力から受信アンテナの出力端子電圧を算出するポストプロセッサを開発することを検討している。

4.2 現段階での応用例

現段階では、ここ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に利用することは出来ない。しかし、限定された条件下ではあるが、本手法を利用することにより、ある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どうかを判断することが可能と考えられる。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に応用できる可能性がある。

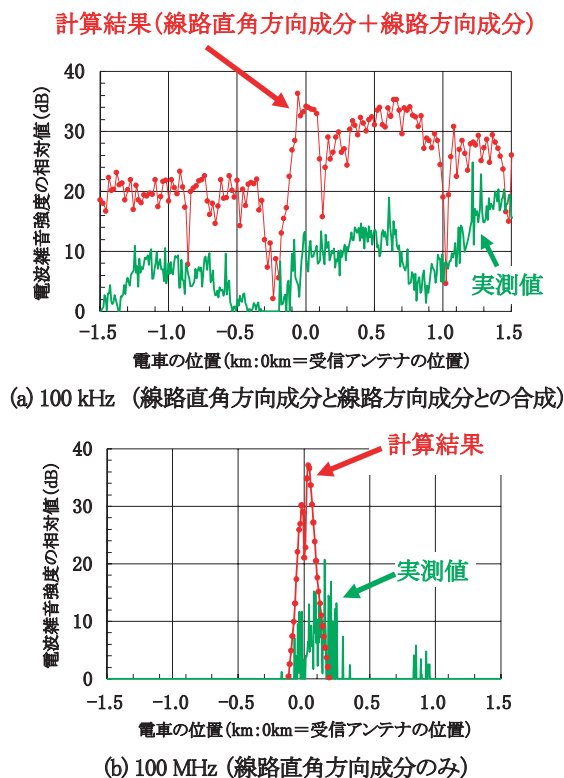


図6 沿線で受信される電波雑音強度の実測結果とモデルに基づく計算結果との比較例

特集：信号通信技術

実際に放射防止対策効果の推定を試行した一例を図7に示す。図7は、図5(c)に示したトロリ線上に分布する1MHzの高周波電流の計算結果と同じモデル・条件を使って、車上に放射防止対策を導入した場合の分布の変化を計算した結果である。図7(a)は車上にリアクトルLを導入した場合、図7(b)は車上にコンデンサCを導入した場合である。両対策とも、車上の床下にあるインバータから出力される高調波成分がトロリ線に流入するのを阻止する効果を期待したものである。

図7(a)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る。一方、図7(b)より、コンデンサを付加したときには、無対策の状態より上昇していることから、コンデンサを図7(b)の位置に導入しても、沿線に放射される電波雑音強度が低減されない可能性が推測される。これらのことから、実際に現車試験で対策効果を確認する際には、リアクトルを付加した場合の定量的な低減効果の測定(リアクトル値と低減効果の関係の測定)に重点をおき、コンデン

サについては簡単に確認する程度で済ますなど、現地試験の規模を縮小することが可能と考えられる。

5. まとめ

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、いくつかの手法に基づいて実際にモデル化を試行し、目標とする沿線に放射される電波雑音の強度変動特性を求めることができる手法を検討した。

その結果、鉄道全体を、「変電所→トロリ線→車両→レール→変電所」という電流の流れで構成される大きなアンテナとみなし、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を電波の発振源、トロリ線とレールを電波の放射エレメントとしてモデル化する手法が実用的な方法として有効であることがわかった。このモデル化手法に基づき、最も構成が単純な直流電気鉄道をモデルケースとして、列車の位置を変えながらモデル化されたアンテナに流れる特定の周波数の高周波電流分布をモーメント法で求め、沿線を受信される電波雑音強度の変動を計算した結果、実測で見られる強度変動の傾向を再現できることを確認した。

6. おわりに

今後、モデルをより実物の形状に近づけ、また電波の発振源の条件に実際の特性を反映するなどして精度向上を図り、走行列車を含む鉄道システムから沿線への放射を推定する手法の確立に向けて、本稿で述べた手法をさらに深度化、発展させていく予定である。

文献

- 1) 橋本修,阿部琢美;FDTD法 時間領域差分法入門,森北出版,1996
- 2) R. F. Harrington ; Field Computation by Moment Methods, IEEE Press, 1993.
- 3) <http://www.nec2.org>
- 4) 川村武彦,吉田順重;列車の高速走行に伴う電波雑音,鉄道総研報告,Vol.5,No.12,pp.1~8,1991
- 5) 川崎邦弘,鈴木尚子,立石幸也;電気鉄道における電磁環境に関する研究と国際規格制定の動向,鉄道総研報告,Vol.10,No.11,pp.53~58,1996
- 6) 川崎邦弘;鉄道用EMC国際規格の現状と動向,鉄道総研報告,Vol.21,No.11,pp.47~52,2007
- 7) 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

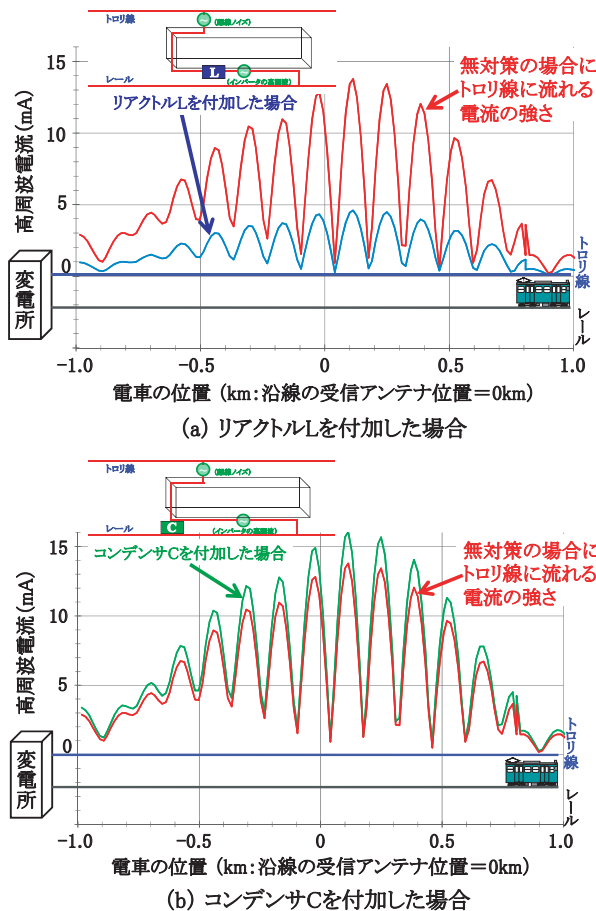


図7 本稿で述べた手法を用いて対策効果の推定を試行した例