

電車走行時の電波雑音の数値解析

平 尚大[†] 陳 強[†] 澤谷 邦男[†]

[†] 東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻 〒980 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6 6 05

E-mail: {taira, chinq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし これまでに、電車の走行に伴って沿線へ電波雑音が放射されることが実測によって確認されてきている。その電波雑音を抑制するメカニズムを解明する必要があり、低コストな数値解析法が望まれている。しかし現状では、電波雑音を推定できる実用的な解析手法は確立されていない。本稿では、電車、トロリ線、及びレールを含めたモデルへモーメント法を適用し、発振周波数を変化させたときの電車走行時の電波雑音の強度変動を確認した。また、高周波成分に対する近似モデルを考案し、その有用性を示した。

キーワード 電車, 電波雑音, EMC

Numerical Analysis of Radio Noise Emitted by Train Model

Naohiro TAIRA[†], Qiang CHEN[†], and Kunio SAWAYA[†]

[†] Department of Electrical and Communication Engineering,
Graduate School of Engineering, Tohoku University

6-6-05 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980 8579 Japan

E-mail: {taira, chinq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Electromagnetic noises are radiated from a railway system when the train is running. However, there is no valid method to efficiently calculate the strength of electromagnetic noises radiated from the railway systems. In this report, a current distribution on the contact wire and the railroad, and electric field at the point close to the railroad are calculated by using method of moments. Moreover, this report presents an approximate model for the analysis of the train system at a high-frequency region.

Key words Train, Radio noise, EMC

1. はじめに

これまでに、電車の走行に伴って沿線に電波雑音が放射されることが実験的に確認されてきている。しかしながら、電波雑音の放射メカニズムは明らかにされていない[1]。低周波から高周波まで広帯域にわたる成分を有する電波雑音の放射メカニズムを明らかにすることは、コストと時間のかかる実験では困難であることから、数値解析を利用することが適当である。電磁界数値解析法の一つとして、モーメント法[2][3]が挙げられる。モーメント法は導体表面において成り立つ電磁界の境界条件から得られる積分方程式を連立方程式(行列方程式)に変形し、その行列方程式を数値的に解くことにより導体表面の電流を求める手法である。

本稿では、電車・トロリ線及びレールから成る鉄道モデルをモーメント法で解析し、中周波(100 kHz, 1MHz)、高周波(100 MHz)それぞれの場合におけるトロリ線上の電流分布及び沿線での電界強度分布を明らかにする。また、高周波用の近似的な

解析モデルを提案し、その有効性を示す。

2. 鉄道システムのモデル化

本稿における鉄道システムを図1に示す。この鉄道システムは、変電所、トロリ線、電車、レールのみから構成している。発振源は、集電機構とインパータからの放射を考えている。この鉄道システムの解析モデルを図2に示す。線路長パラメータ L_{C1} , L_{C2} を変化させることで、電車の走行を等価的に表す。

2.1 解析モデル

図2の解析モデルの詳細を図3に示す。車両も含め、モデルは全て線状導体として表している。また、また、変電所は短絡負荷とみなす。電波雑音の発振源は電車下部に設置された駆動用の電力変換機と、集電機構における離線の2種類を想定し、それぞれ V_1 , V_2 とする。全ての導線を自由空間中のワイヤグリッドモデルとし、モーメント法により解析する。線路長パラメータ L_{C1} , L_{C2} を変化させることにより、電車モデルが移動することを表し、そのときの近傍電界強度を求める。解析諸元

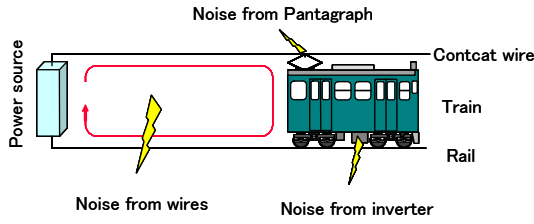


図 1 鉄道システムの基本構成

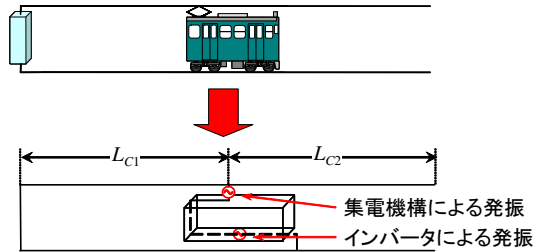


図 2 鉄道システムのモデル化

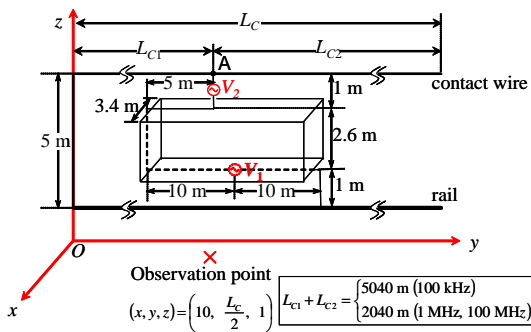


図 3 解析モデル

は表 1 に示すとおりである。尚，観測点はレールの中心から 10 m 離れた点とする。

表 1 解析諸元

Frequency	100 kHz, 1 MHz ($V_1 = 1$ V, $V_2 = 0$ V) 100 MHz ($V_1 = 0$ V, $V_2 = 1$ V)
Rail length	5 km(100 kHz) 2 km(1 MHz, 100 MHz)
Feed voltage	1 V
Radius of rail	87 mm
Radius of contact wire	7.5 mm
Radius of other lines	5 mm
Conductivity	5.8×10^7 S/m
Simulation method	Method of Moments

3. 解析結果

3.1 発振周波数 100 kHz

電車がレールの短絡側，中心，開放側にあるときのトロリー線とレール上の電流分布を，それぞれ図 4，図 5 及び図 6 に示す。それぞれの図より，電車車両の位置 y_A を境に電流分布の不連続点が生じることを確認できる。また，電車の移動によって電界強度も変動することが推測される。電車の位置を移動させたときの，沿線の観測点における電界強度を図 7 に示す。横

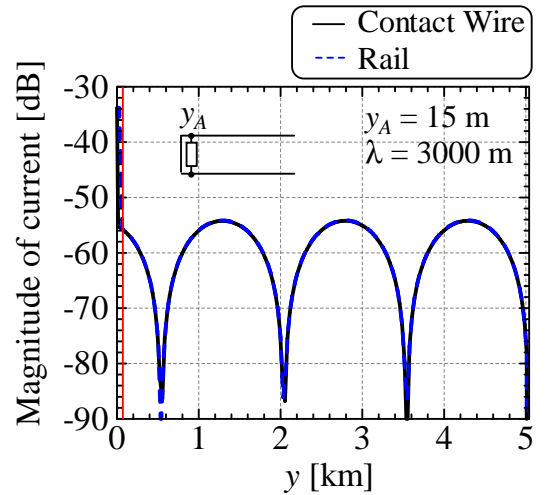


図 4 電車が短絡側にあるときのトロリー線上の電流分布 ($f = 100$ kHz)

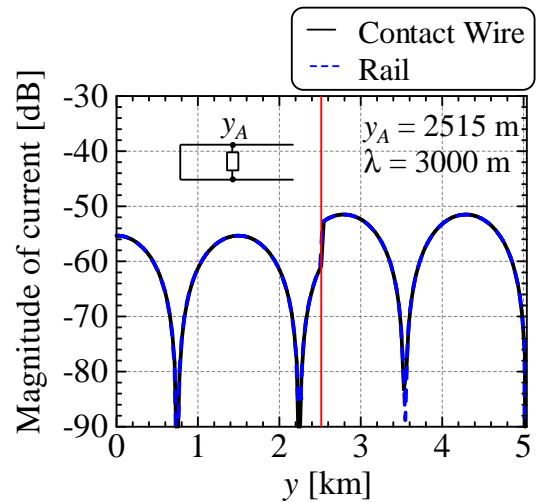


図 5 電車がレール中心にあるときのトロリー線上の電流分布 ($f = 100$ kHz)

軸の y_t は電車のモデルの中心の y 座標である。図 7 より，半波長毎の周期的な強弱の変動を確認することができる。また，電車が観測点より離れた場所にある場合でも大きな電波雑音が放射されていることを確認することができる。

3.2 発振周波数 1 MHz

電車がレールの短絡側，中心，開放側にあるときのトロリー線上の電流分布を，それぞれ図 8，図 9 及び図 10 に示す。100 kHz の場合と同様に， y_A を境に電流分布の不連続点が生じることが確認できる。次に，電車の位置を移動させたときの，沿線の観測点における電界強度を図 11 に示す。図 11 より，半波長毎の周期的な強弱の変動を確認することができる。また，図 11 では，観測点を境として電車が短絡端側にあるときは電界強度が強く，開放側では弱くなることからわかる。これは，電車が短絡側にあるとき， L_{C1} と L_{R1} が短く， L_{C2} と L_{R2} が長くなるため，開放側からの放射が強くなったものと考えられる。

3.3 発振周波数 100 MHz

電車がレールの短絡側，中心，開放側にあるときのトロリー

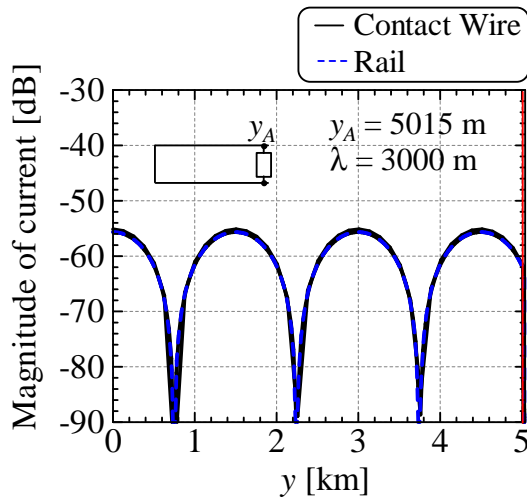


図6 電車が開放側にあるときのトクリ線上の電流分布 ($f=100$ kHz)

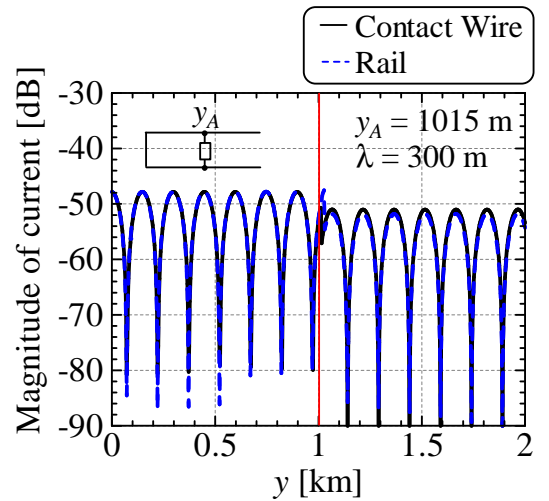


図9 電車がレール中心にあるときの電流分布 ($f=1$ MHz)

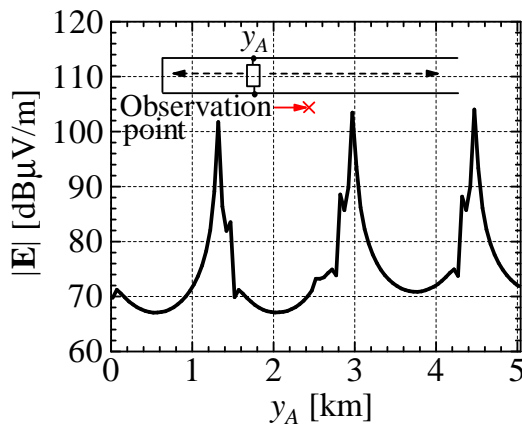


図7 観測点における電界強度 ($f=100$ kHz)

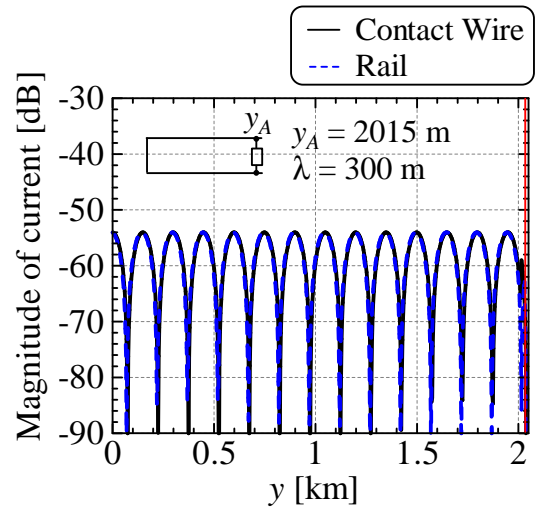


図10 電車が開放側にあるときの電流分布 ($f=1$ MHz)

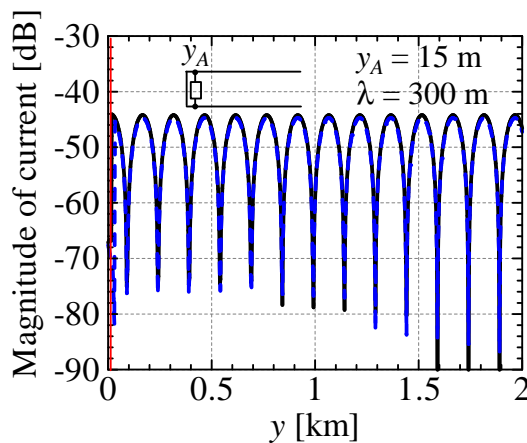


図8 電車が短絡側にあるときの電流分布 ($f=1$ MHz)

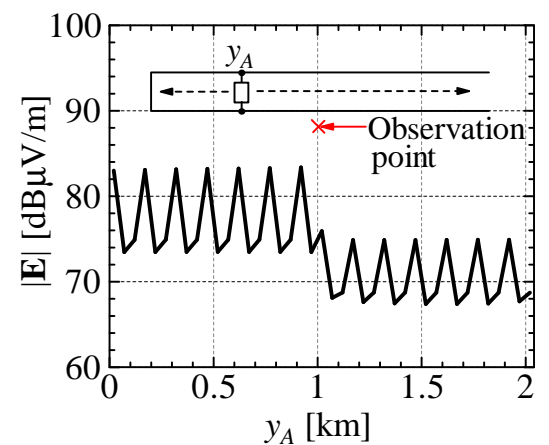


図11 観測点における電界強度 ($f=1$ MHz)

線とレール上の電流分布を、それぞれ図12、図13及び図14に示す。これらの図より、 y_A を境に電流の大きさは減衰し、発振源から500 m以上離れた場所では電流が最大値より約40dB小さくなることわかる。次に、電車を移動させたときの、沿線の観測点における電界強度を図15に示す。図15より、電

が観測点を通過する前後において電界強度が強まり、観測点より500 m離れた場所においては電界強度が最大値より約30dB小さくなることを確認できる。

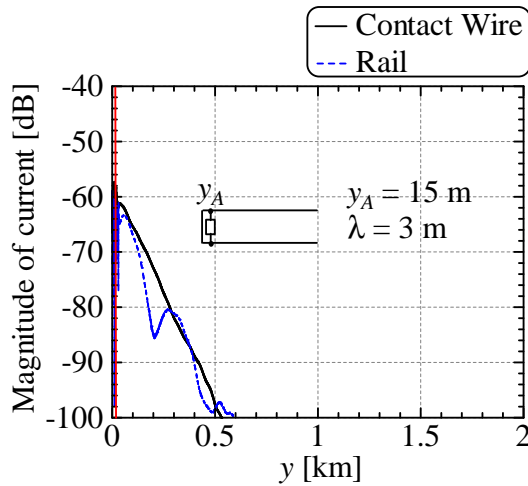


図 12 電車が短絡側にあるときの電流分布
($f = 100$ MHz)

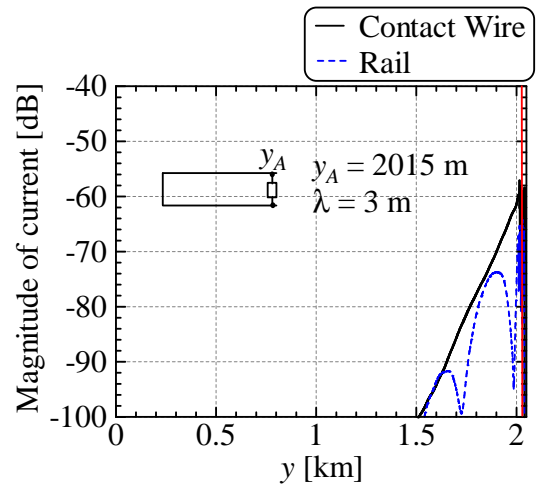


図 14 電車が開放側にあるときの電流分布
($f = 100$ MHz)

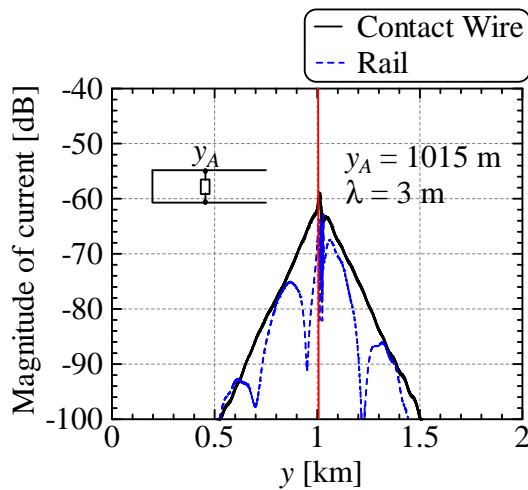


図 13 電車がレール中心にあるときの電流分布
($f = 100$ MHz)

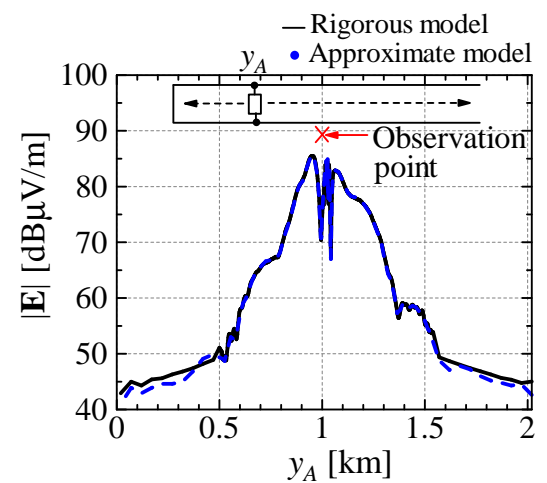


図 15 観測点における電界強度 ($f = 100$ MHz)

3.4 近似モデルでの解析

周波数 100 MHz の場合、100 kHz や 1 MHz の場合と比較し、電流分布や電界強度の計算に膨大なメモリと計算時間が必要となる。これは、波長に比べてモデルが大きくなるためである。そこで、発振周波数が 100 MHz の場合において、近似モデルを提案する。

図 13 の結果より、電車から 500 m 以上離れたところでは、トロッコ線上の電流が最大値よりも 40dB 小さくなることを確認した。これより、モデル長が 1000 m 以上の計算は不必要であると考えられる。近似モデルは図 16(b) に示されているように、厳密モデルに対して約半分の大きさのモデルとし、破線部内のモデルを y 軸方向に移動させて観測点での電界を計算する。このモデルは図 17 に示すように、観測点のみを増やすことで、一度の計算で電車の移動を等価的に表すことができる。一方で、電車が短絡側 ($AB < 500$ m) もしくは開放側 ($CA < 500$ m) にあるときは、図 17 に示すように、短絡側では $CA = 500$ m、開放側では $AB = 500$ m を確保した状態で厳密に計算する必要がある。

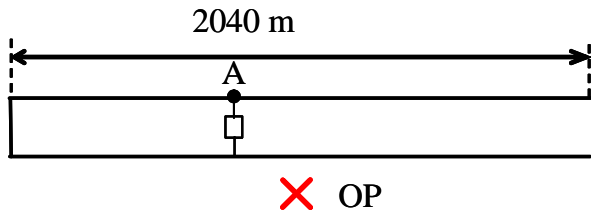
近似モデルを用い、観測点での電界強度を計算した結果を図 15 に示す。厳密モデルとの計算結果と、短縮モデルの計算結果は、電車が 500 ~ 1500 m の部分にあるときはほぼ一致し、それ以外の場所においては最大約 2dB の差を確認できる。この方法により、図 17 に示すように、観測点を増やすことで電車の移動を等价的に表すことができることを示した。また、一回の計算で電車が 500 m ~ 1500 m までの移動させたときの電界強度を計算することができた。

4. まとめ

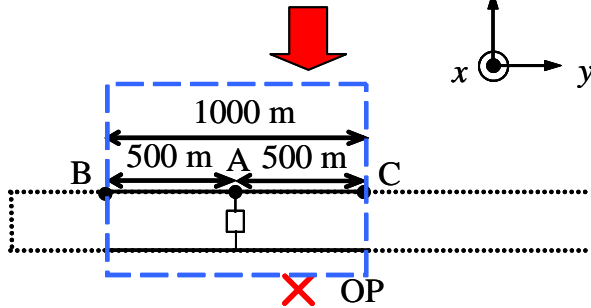
簡易な鉄道モデルに基づいて、モーメント法により電車走行時の電波雑音を計算した。発振周波数が高い場合は、電車から離れた場所での電流が大きく減衰することを確認した。それを利用して、高周波のための近似モデルを提案し、近似モデルから得られた計算結果が厳密解とおおむね一致することを示した。また、近似モデルを用いることによって、使用メモリ及び計算時間を大幅に減らすことができた。

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



(a) Rigorous model



(b) Approximate model

図 16 近似モデル (電車がレール中心部分にあるとき)

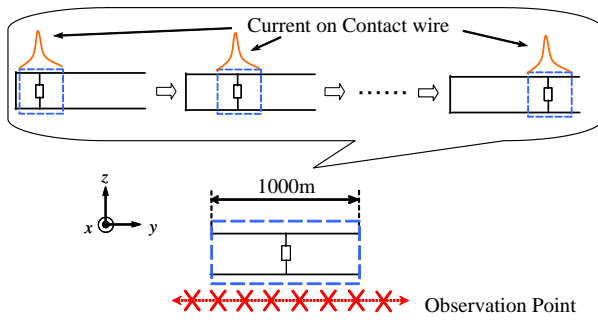


図 17 電車の移動の様子を表す等価モデル

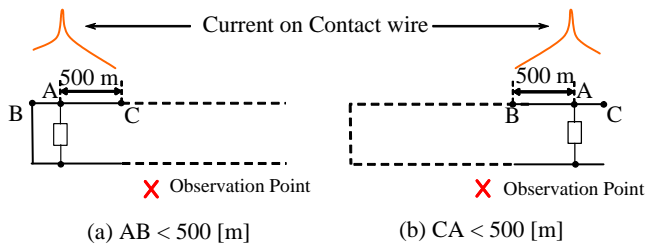


図 18 近似モデル (電車が端部にあるとき)

- 検討”, 鉄道総研報告, Vol. 23, No. 1, pp.45 ~ 50 2009/1
- [2] R. F. Harrington, Field computation by moment method, IEEE Press, New York, 1993.
- [3] 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 2003/9