

電車からの電磁波の不要放射の数値解析

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、トロッコ線、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。

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.

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 [1]。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 [2]。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 [3] [4] 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。

今回の解析対象である、電車・トロッコ線及びレールから成る鉄道モデルは、数 km の長さとなる。もし発振周波数が高ければ、波長に対するモデル長は非常に大きくなり、メモリと計算に要する時間が膨大に必要となる。本稿では、鉄道モデルをモーメント法で解析し、低周波 (100 kHz, 1MHz), 高周波 (100 MHz) それぞれの場合におけるトロッコ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。

2. 低周波の解析 (100MHz 以下)

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、トロッコ線、電車、レールのみから構成している。電磁ノイズの発振源は、電線と電車の接続部分となるパンタグラフからの放射や、電車に搭載されたインバータからの放射、車両や電線自体からの放射がある。この鉄道システムを、図 2 に示すようにモデル化する。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し、そのときの放射界を求める。

2.1 解析モデル

シミュレーションに用いる解析モデルを図 3, 図 4 に示す。図 3 は車体を面状導体で表したモデルで、図 4 は線状導体で表したモデルである。これらの解析モデルは、電車の大きさに比べて、電線の長さが非常に大きくなっている。どちらも簡単化のため、変電所は短絡負荷としている。また、電車は 1 両編成の金属の箱としている。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を想定している。解析モデルの詳細を

図5に、解析パラメータを表1に示す。尚、観測点はからy方向に垂直に10 m離れた地点とする。

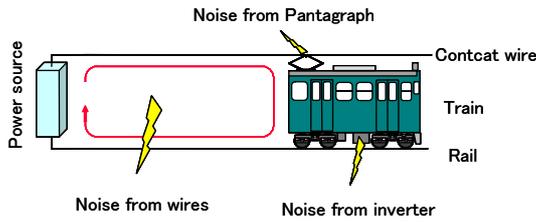


図1 鉄道システムの基本構成

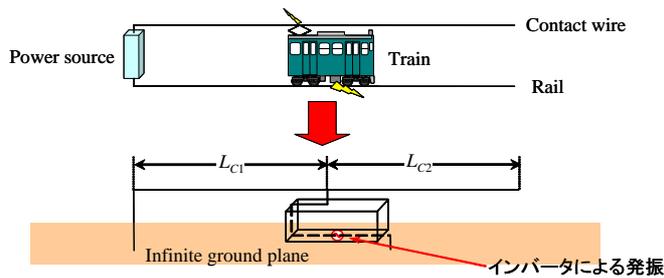


図2 鉄道システムのモデル化

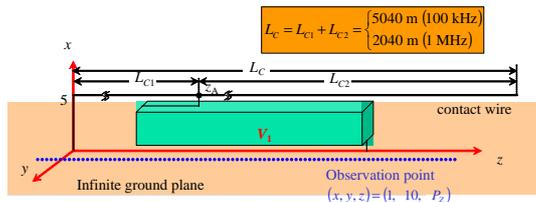


図3 面状モデル

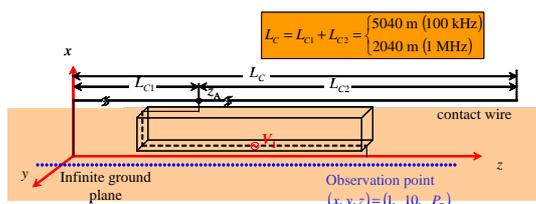


図4 線状モデル

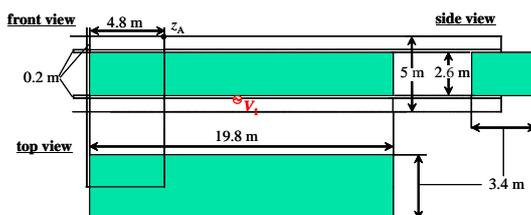


図5 モデルの詳細

表1 解析パラメータ

Frequency	100 kHz, 1 MHz
Length of contact wire (L_c)	5.04 km = 1.68 λ (100 kHz) 2.04 km = 6.8 λ (1 MHz)
Feed voltage	1 V
Height (h)	5 m
Radius of contact wire (r_1)	7.5 mm
Radius of other lines (r_2)	5 mm
Conductivity	5.8×10^7 S/m
Simulation method	Method of Moments

2.2 解析結果

2.2.1 発振周波数 100kHz

計算結果の一例として、電車がレールの中心にあるときの電線上の電流分布と、このときの観測点における電界強度を、それぞれ図6、図7に示す。図6より、電車車両の位置 z_A を境に電流分布の不連続点が生じ、短絡側と開放側異なる電流分布となることを確認できる。また、短絡・開放側それぞれで定在波が生じていることがわかる。図7より、半波長ごとの周期的な変動を確認できた。

次に、電車の位置 z_A を変化させたときの、沿線の観測点 ($P_z = L_c/2$) における電界強度、入射電力及び入射電力で規格化した電界をそれぞれ図8、図9、図10に示す。図8~図10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。これは、電車の移動により共振が起こっているためであると考えられる。また、電車が観測点より離れた場所にある場合でも放射界が強くなることを確認できた。

さらに、面状モデルの解析結果と線状モデルの解析結果の変動の様子はおおよそ同じような変動をしていることが確認できる。従って、より計算時間の必要な面状モデルでの計算は不要であることがわかった。

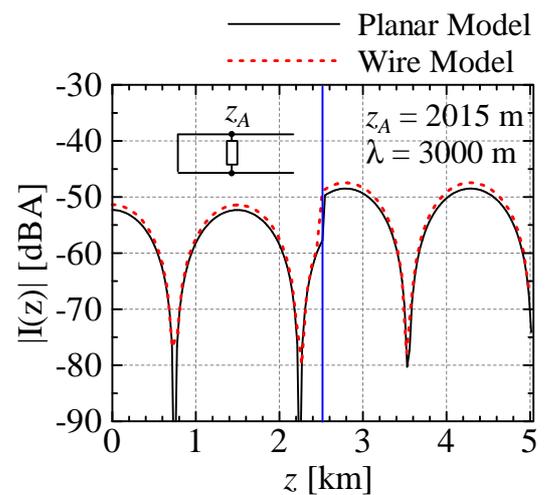


図6 電車がレール中心にあるときのトロリ線上の電流分布 ($f = 100$ kHz)

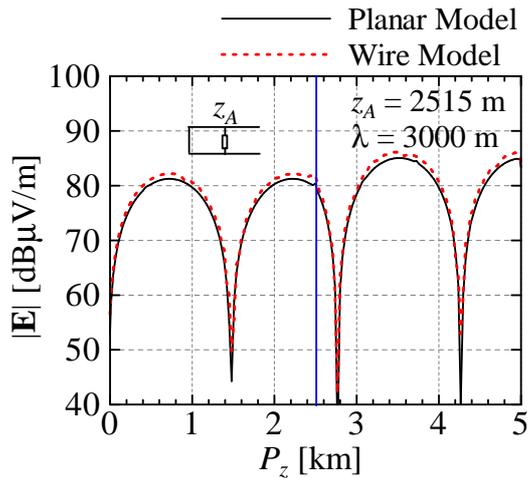


図 7 電車がレール中心にあるときの電界分布
($f = 100$ kHz)

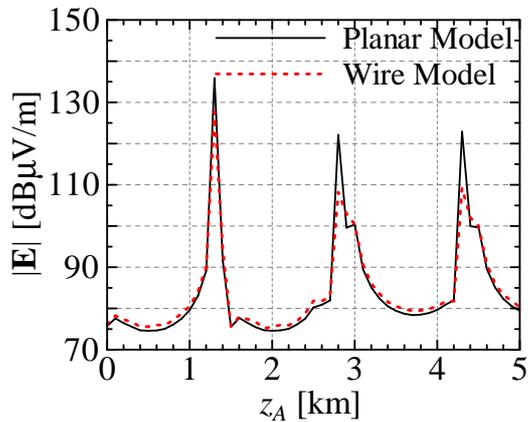


図 8 電車移動による電界変動 (1V 入力したときの電界)
($f = 100$ kHz)

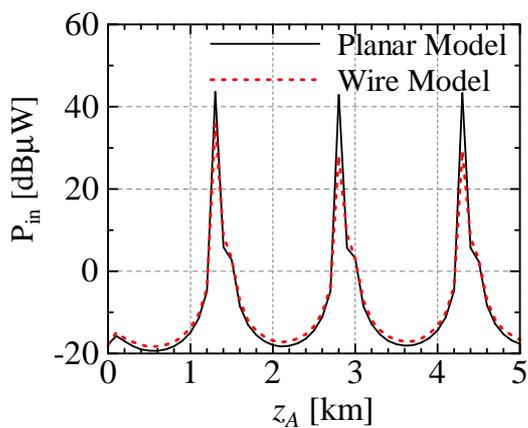


図 9 電車移動による電力の変動
($f = 100$ kHz)

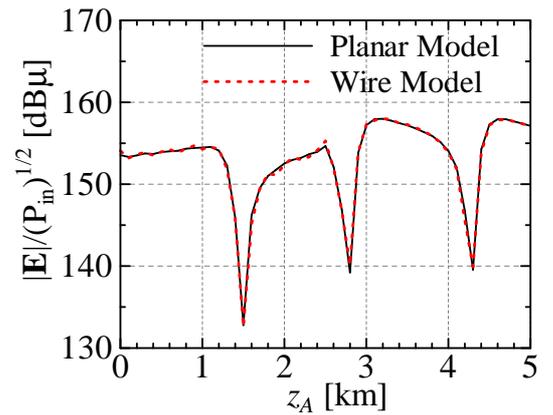


図 10 電車移動による電界の変動 (1W 入力したときの電界)
($f = 100$ kHz)

2.2.2 発振周波数 1MHz

電車がレールの中心にあるときのトロリー線上の電流分布と、このときの観測点における電界強度をそれぞれ、図 11、図 12 に示す。発振周波数 100 kHz の場合の結果と同様に、 z_A を境に電流分布の不連続点が生じ、短絡側と開放側で異なる電流分布となる確認できる。また、短絡・開放側それぞれで定在波が生じていることがわかる。

次に、電車の位置 z_A を移動させたときの、沿線の観測点 ($P_z = L_c/2$) における電界強度、入射電力及び入射電力で規格化した電界をそれぞれ図 13、図 14、図 15 に示す。

図 13～図 15 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放射界が強くなることを確認できた。

1MHz の場合も 100kHz のとき同様に、面状モデルの解析結果と線状モデルの解析結果に大きな違いは見られなかった。従って、面状モデルでの計算は不必要であると考えられる。

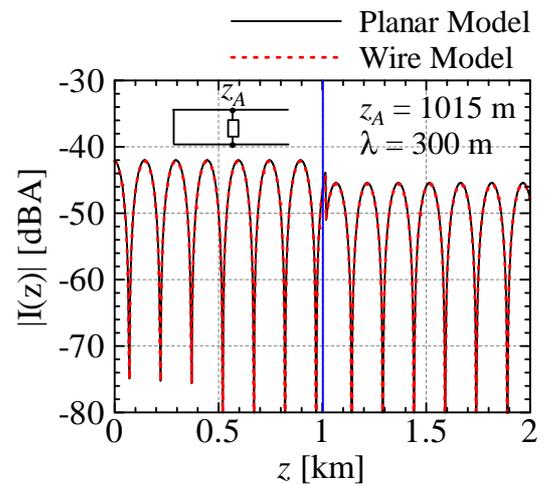


図 11 電車がレール中心にあるときの電界分布
($f = 1$ MHz)

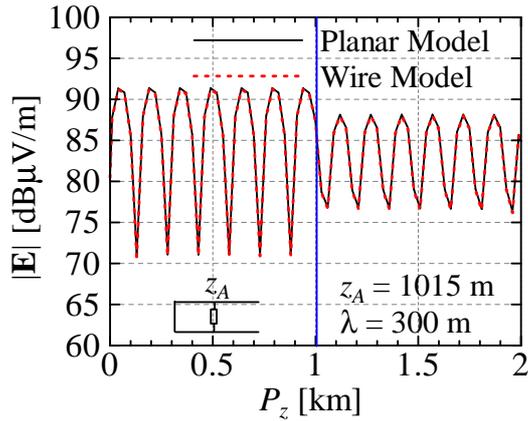


図 12 電車がレール中心にあるときの電流分布 ($f=1$ MHz)

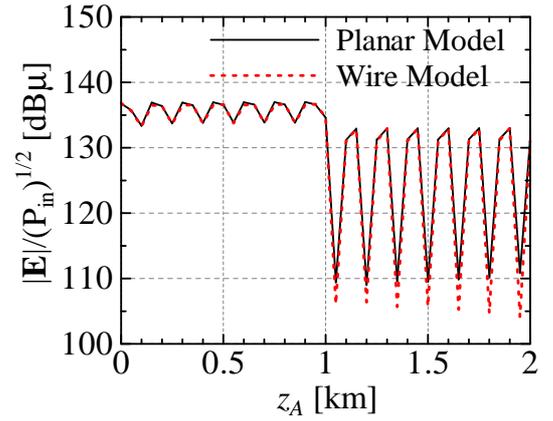


図 15 電車移動による電界変動 (1V 入力したときの電界) ($f=1$ MHz)

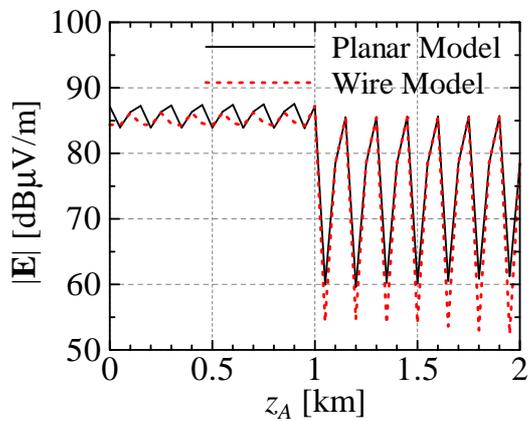


図 13 電車移動による電界変動 (1V 入力したときの電界) ($f=1$ MHz)

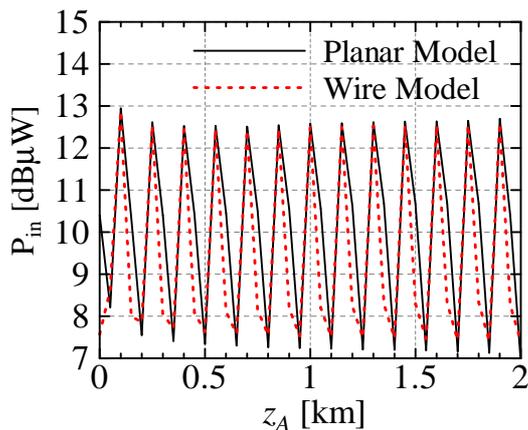


図 14 電車移動による電力の変動 ($f=1$ MHz)

3. 発振周波数 100 MHz

3.1 解析モデル

高周波に対する鉄道システムの解析モデルを図 16 に示す。高周波モデルにおいては、電線・電車・変電所を全て線状導体で表している。給電点は短絡部分の中心に設定している。解析パラメータを表 2 に示す。

尚、観測点は、 y 方向に垂直に 10m 離れた点とする。

3.2 解析結果

解析結果の一例として、電車がレールの中心にあるときの電線上の電流分布を、図 17、図 18 に示す。図 17 は電線上全体の電流分布を、図 18 は図 17 を拡大した図であり、電車付近の電線上の電流分布を表している。図 17 より、電車車両の位置 z_A を境に電流分布の不連続点が生じ、短絡側と開放側で異なる電流分布となることを確認できる。また、図 17 より定在波が生じていることが確認できる。低周波のときの結果である図 6、図 11 と図 17 を比較して大きく異なる点は、図 17 においては電車前後約 100 m でのみ 10 dB 程度減衰し、その後おおよそ一定の値を振動しているという点である。このときの観測点における電界強度を、図 19 に示す。図 19 は、図 17 のような電線上の電流分布と同様の変動となることを確認できた。すなわち、電線上の電流が影響していることがわかった。

次に、電車の位置 z_A を移動させたときの、沿線の観測点 ($P_z = L_c/2$) における電界強度、入射電力及び入射電力で規格化した電界をそれぞれ図 20、図 21、図 22 に示す。図 20～図 22 より、電車が観測点より離れるにつれ、電界は減衰することがわかった。

本稿で解析したモデルにおける、周波数と解析時間との関係を表 3 に示す。Total CPU time と Total memory は、電車がある一点に固定したときの総計算時間と総メモリを表している。3 より、周波数が高くなるにつれ、計算時間と使用メモリが増大することがわかる。高周波に対する計算時間が膨大であることから、今後は近似的な計算法の確立を目指す。

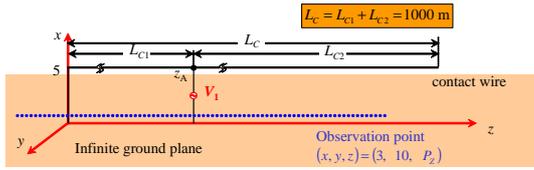


図 16 解析モデル ($f = 100$ MHz)

表 2 解析パラメータ

Frequency	100 MHz
Length of contact wire (L_C)	1 km = $333\lambda(100 \text{ MHz})$
Feed voltage	1 V
Height (h)	5 m
Radius of contact wire (r_1)	7.5 mm
Radius of other lines (r_2)	5 mm
Conductivity	$5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$
Simulation method	Method of Moments

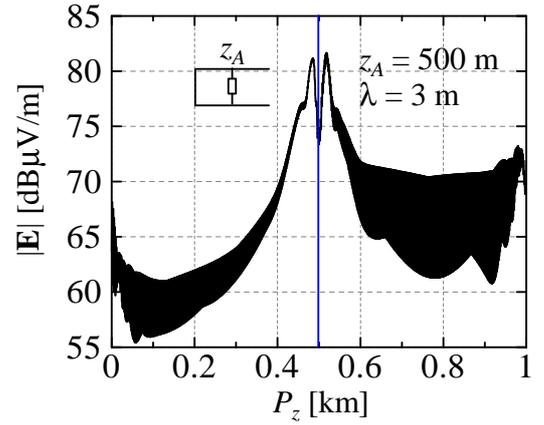


図 19 電車がレール中心にあるときの電界分布 ($f = 100$ MHz)

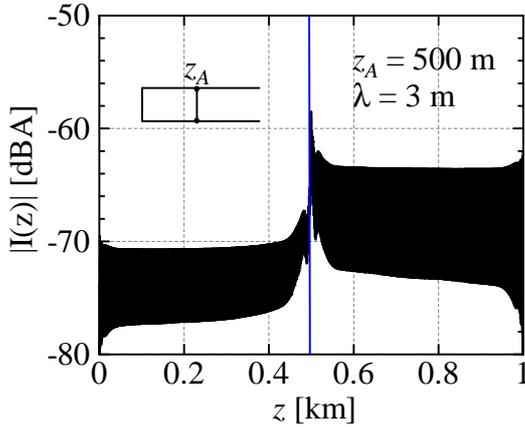


図 17 電車がレール中心にあるときの電流分布 全体 ($f = 100$ MHz)

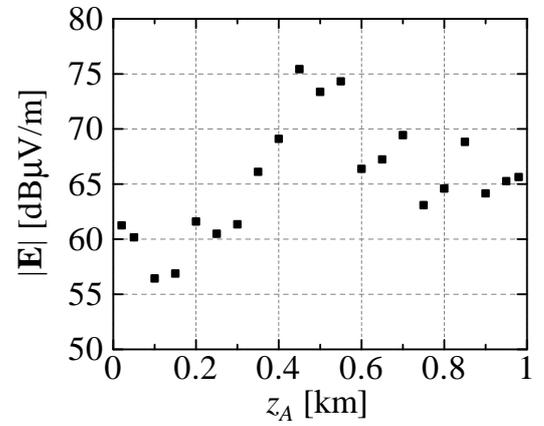


図 20 電車移動による電界変動 (1V 入力したときの電界) ($f = 100$ MHz)

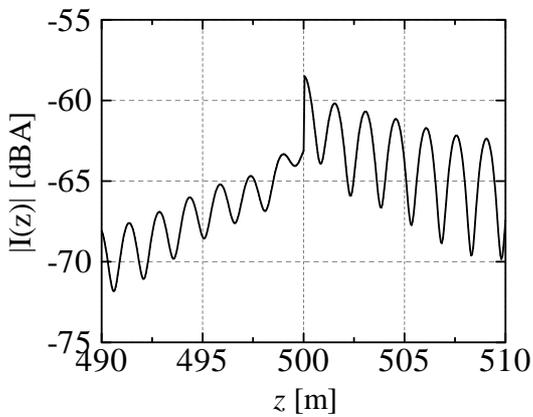


図 18 電車がレール中心にあるときの電流分布 拡大 ($f = 100$ MHz)

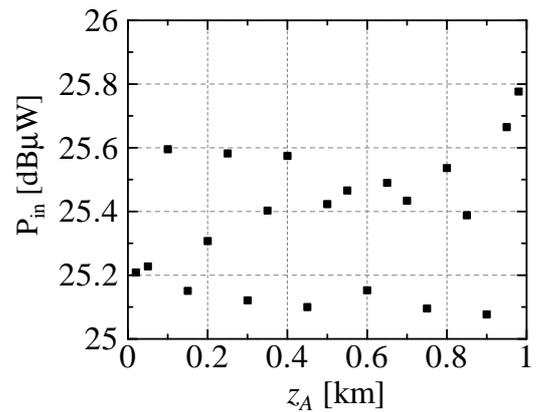


図 21 電車移動による電界変動 (1V 入力したときの電界) ($f = 100$ MHz)

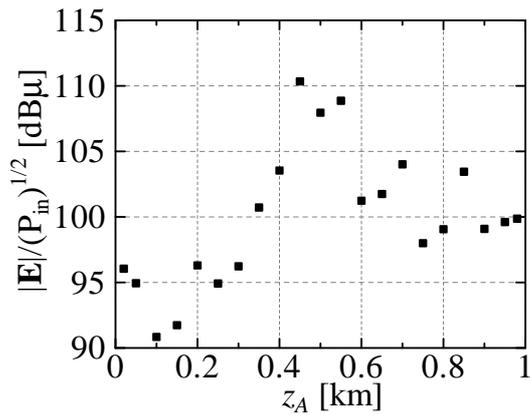


図 22 電車移動による放射 ($f = 100$ MHz)

表 3 周波数による計算量の比較

Frequency [MHz]	L_c	Total CPU time [s]	Total memory [Mbyte]
0.1	1.68λ	0.61	1.13
1	6.8λ	17.1	7.1
100	333λ	4171(=1.15 h)	965

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の移動に伴う電界強度の変動を確認した。車両面状モデルと線状モデルの結果がおおよそ一致していることから、線状モデルでの計算で十分な結果が得られることがわかった。

また、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。今後は、高周波モデルに対して近似的な計算をおこない、電界計算量の短縮を目指す。

文 献

- [1] 藤原修, "摺動集電系における雑音電流を用いた離線アーク放電率の一測定法", 電子通信学会論文誌, Vol. J 68-C, No. 9, pp.731 ~ 736, 1985/9
- [2] 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検討", 鉄道総研報告, Vol. 23, No. 1, pp.45 ~ 50 2009/1
- [3] R. F. Harrington, Field computation by moment method, IEEE Press, New York, 1993.
- [4] 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