

TSUBAME 共同利用 平成 30 年度 産業利用 成果報告書

利用課題名 車載電子システムの低周波漏えい磁界のシミュレーション

英文: Simulation of Low frequency Magnetic Field Leakage from an automotive electrical system

松沢晋一郎

Shin-ichiro Matsuzawa

株式会社 豊田中央研究所

Toyota Central R&D Labs., Inc.

<http://www.tytlabs.co.jp>

#### 邦文抄録

kHz 帯の低周波の電磁界解析では、周波数領域の有限要素法のシミュレータが一般的に用いられるが、周波数点数にほぼ比例して計算時間が増えるという課題がある。本報告では、時間領域の結果からフーリエ変換で周波数特性を求め、周波数点数が増えても計算時間がほとんど変化しない、時間領域の FI(Finite Integral)法のシミュレーションを TSUBAME により検討した。

#### 英文抄録

In the low frequency electromagnetic field analysis of the kHz band, a simulator of the finite element method in the frequency domain is generally used, but there is a problem that the calculation time increases in proportion to the number of frequency points. In this report, TSUBAME is used to study time domain simulation of FI (Finite Integral) simulation with almost no change in calculation time even if the number of frequency points increases

*Keywords:* 電磁界シミュレーション、低周波磁界

#### 背景と目的

#### 概要

##### 1.はじめに

EV,PHV では、DCDC コンバータ等により大電流を高速に切り替えるため、低周波磁界が発生する。しかし、現状では、ボデーの機械的要件を満足するために DCDC コンバータは、厚い鋼板によって囲われているため、結果的にその漏えい磁界はシールドされ、車室内の磁界強度は十分弱くなっている。しかしながら、ボデーの軽量化のため、従来の鋼板以外に一部に CFRP (炭素繊維強化プラスチック)等の樹脂が用いられるようになってきている。一般的に樹脂には、磁界シールド効果はほとんどないため磁界シールド効果は低下することになり、それを考慮したシミュレーション技術の開発が重要となる。

kHz 帯の低周波の電磁界解析では、周波数領域の有限要素法のシミュレータが用いられることが多いが、周波数の点数にほぼ比例して計算時間が増えると

いう課題がある。しかし、FDTD(Finite Difference Time Domain)法やFI(Finite Integral)法等の時間領域の解析は、時間領域の結果からフーリエ変換(FFT)で周波数特性を求め、周波数点数が増えても計算時間はほとんど増えないため、その短縮が期待できる。

本報告では、車室内のケーブルが人の足元を通る場合を例に、0.01kHz~10,000kHz の車室内の電磁界分布を FI 法の時間領域のシミュレータ Microwave Studio(CST 社、以下 MWS と記載)で TSUBAME を用いて評価し、可能性を検討した。

##### 2. 電磁波の人体ばく露の指標

本報告では、車室内の電磁界分布を求め、人体ばく露について評価した。人体ばく露の指標について、以下に説明する。電磁波が人体に与える影響には、低周波領域で支配的な刺激作用と、高周波領域で支配的な熱作用がある。そのガイドラインとして、国際非電離放射防護委員会(ICNIRP)によりガイドラインが定められている[1]。

表 1 ICNIRP のガイドライン(公衆のばく露)

熱作用(0.1MHz～)			
基本制限	全身平均 SAR	局 所 平 均 SAR(頭部)	局所平均 SAR(四肢)
	0.08[W/kg]	2[W/kg]	4[W/kg]

そのガイドラインは基本制限と参考レベルの 2 段階からなる。人体内における影響に関連した実効的な指標である基本制限は、刺激作用(10MHz 以下)と熱作用(0.1MHz 以上)が示されている。熱的作用を表す SAR(Specific Absorption Rate)の定義は以下の通りである。

$$SAR = \sigma E^2 / \rho \quad (1)$$

ここで、 $E$  は体内の電界強度、 $\sigma$  は導電率、 $\rho$  は密度であり、SAR の単位は W/kg である。SAR の値を表 1 に示す。刺激作用を表す体内誘導電界のガイドラインについては、本報告書では評価していないので、省略する。

### 3. 解析モデル

車両後方にモータ、前方にインバータがあり、その間のフロア部分に、人の足元の下をケーブルが通る場合の車室内の電磁界分布を評価した(図 1)。そのシミュレーションモデルを図 2 に示す。車両の後方にモータのある FR 車を想定した。簡易形状の車体(銅、導電率  $5.8 \times 10^7$  S/m)の内部に、シート(アルミ、導電率  $3.6 \times 10^7$  S/m)があり、運転席に人が座っている。シートは、フレームのみモデル化した。インパネ周辺の金属物、ハンドル、ガラス等は除いている。インバータは、グランドとみなすフロアに接地した電流ポートでモデル化し、ケーブルに接続した。ケーブル長は 2000mm、材質は銅である。本ケーブルモデルの電流に相当するコモンモード電流は、数百 A のモータ電流の約 1/1000 であるため、本報告書では 1A とした。車両後方のケーブル終端は、モータの等価回路を接続した。

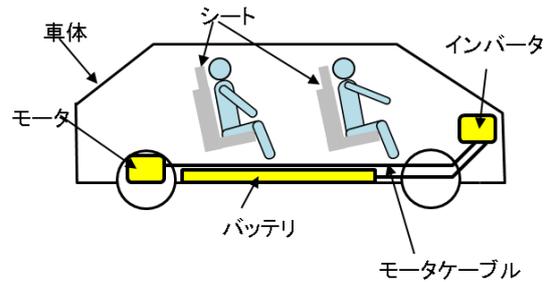
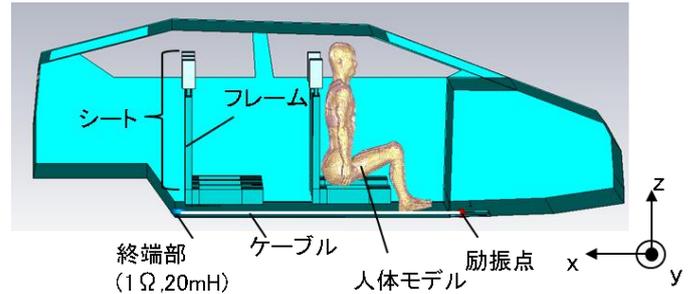
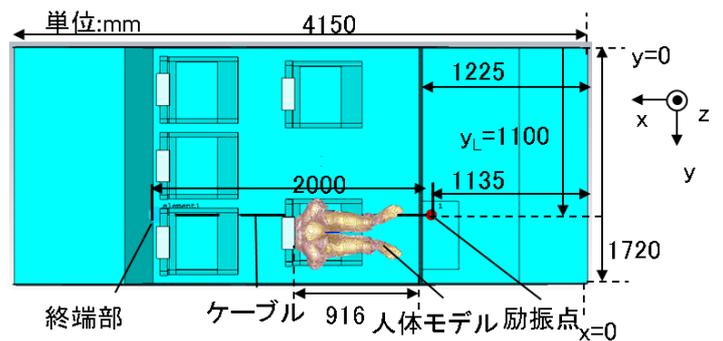


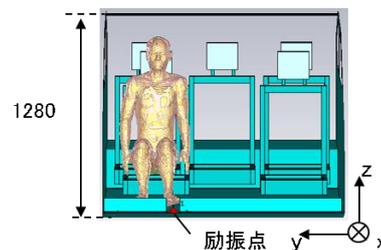
図 1 想定した車両の電動機器の配置



(a) zx 面



(b) xy 面



(c) yz 面

図 2 シミュレーションモデルの構造図

等価回路は、文献[2]を参考に一例として、 $R=1 \Omega$ 、 $L=20 \text{ mH}$  の直列回路とし、その周波数特性はないものとした。ケーブルの  $y$  座標は、ケーブルが人の左足甲のほぼ中心を通るように  $y_L=1100\text{mm}$  とした。ケーブルと足裏までの距離は、約 10mm である。人体モデル

には NICT(独立行政法人 情報通信研究機構)が公開している成人男性の数値人体モデルデータベース TARO[3,4]を用いた。TSUBAME の計算時間は、2 ノードでおおよそ 2 時間であった。

結果および考察

4. 結果

4.1 電磁界分布と SAR の結果

人体、シートを含む図 2 のモデルの  $zx$  面 ( $y=1100\text{mm}$ )における、 $0.01\text{kHz}$  から  $10,000\text{kHz}$  の各周波数の磁界分布を示す(図 3)。ケーブルの真上に足があるため、その部分の磁界が強い。また、ケーブルの周囲の  $0.01\text{kHz}$ 、 $1\text{kHz}$  の磁界強度は、 $x$  方向にほぼ一定だが、 $1,000\text{kHz}$  以上では、ケーブルの終端部に近づくると磁界が弱くなっている。これは、 $1,000\text{kHz}$  以上では、ケーブルが分布定数線路となり、終端の L とグランドーケーブル間の容量 C の関係で、励振点から離れるほど電流が減衰したためと考えられる。

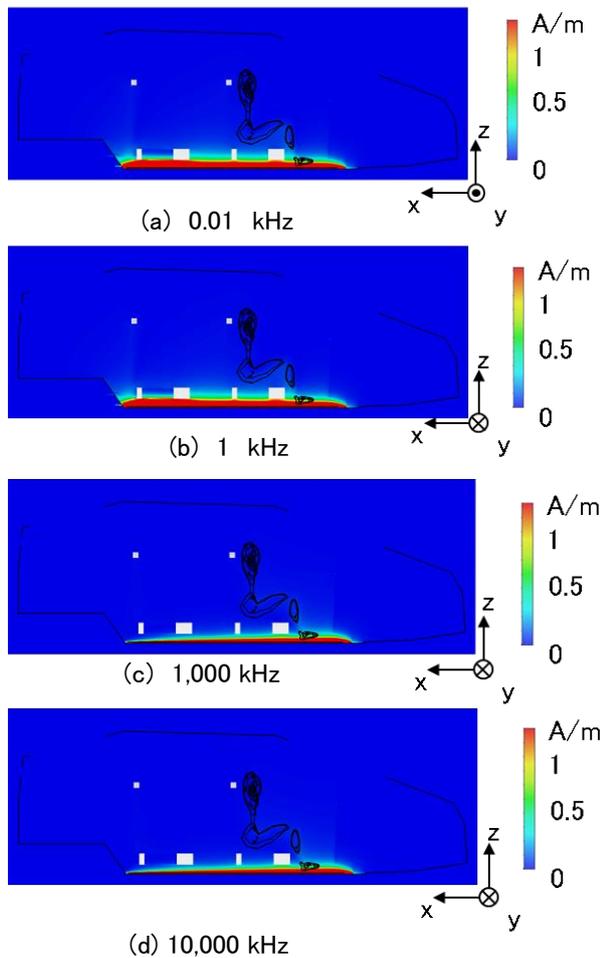


図 3 磁界分布( $zx$  面、 $y=1100\text{mm}$ )

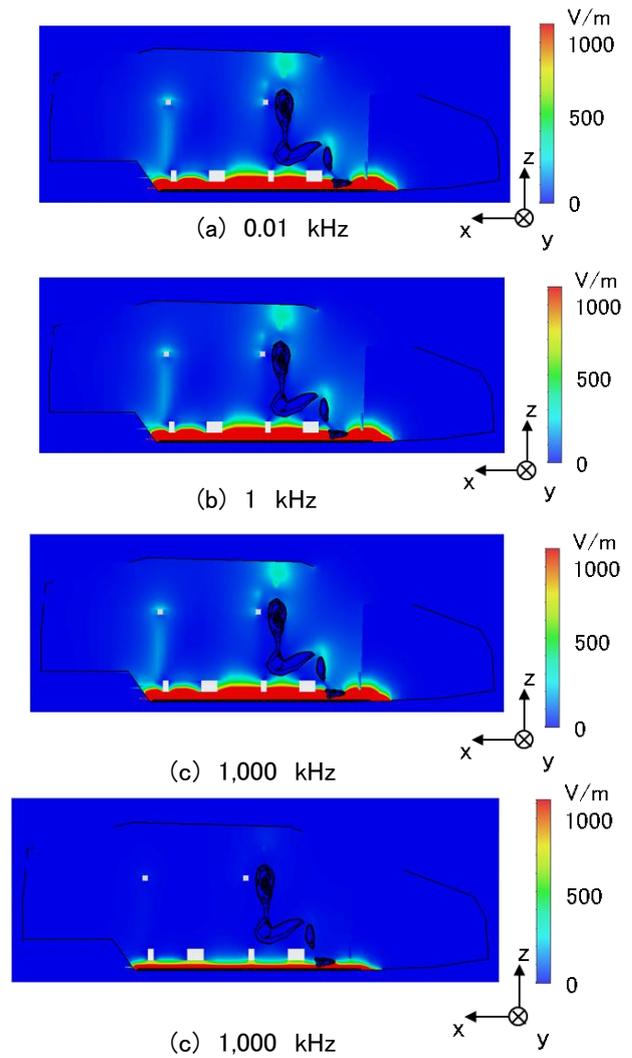


図 4 電界分布( $zx$  面、 $y=1100\text{mm}$ )

$zx$  面 ( $y=1100\text{mm}$ )の電界分布の周波数変化を図 4 に示す。ケーブル終端が低インピーダンスのため、ケーブルの周囲の電界は、 $1000\text{V/m}$  と高く、また  $1,000\text{kHz}$  以下では、足元以外に、人体頭部とルーフの間の距離が約  $40\text{mm}$  と近く、約  $200\text{V/m}$  の電界が生じている。

図 5 に、組織  $10\text{g}$  平均の SAR 分布の変化を示す。左足、特にその足首部分の SAR が高くなっている。これは、一般的に知られているように断面積の狭い箇所 の値が高くなる傾向と一致している。また周波数が高いほど SAR が低い傾向が分かる。図 6(a)に全身平均 SAR, 図 6(b)に局所 SAR の周波数特性を示す。全身平均 SAR, 局所 SAR のどちらの場合も  $100\text{kHz}$  の場合に最も高く、ICNIRP のガイドラインと比べると、全身平均で約  $1/33$ 、局所 SAR は約  $1/20$  分である。

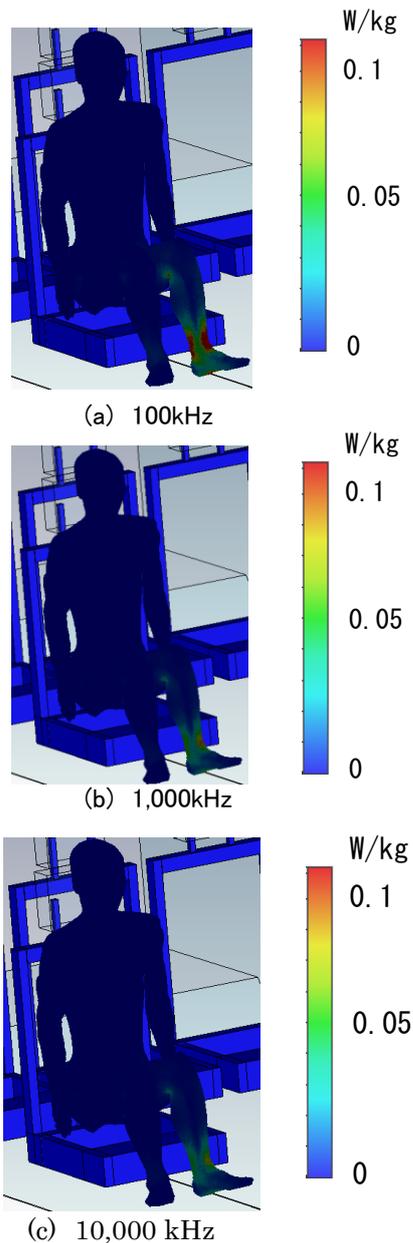
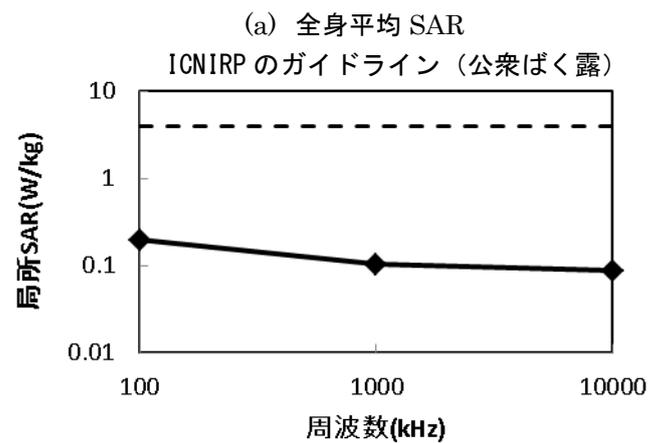
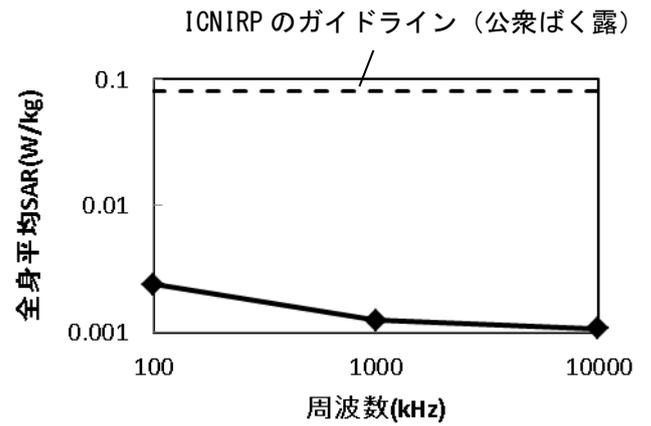


図 5 SAR(組織の 10g 平均)分布の周波数特性



(b)局所 SAR

図 6 全身平均 SAR、局所 SAR の周波数特性

#### まとめ、今後の課題

終端にモータの等価回路を接続したケーブルからの漏えい電磁界(周波数 0.01~10,000kHz)を MWS(時間領域)で評価可能なことを示した。ケーブルの電流が 1A のときの 100kHz の人体の SAR 値を求め、ICNIRP のガイドラインに比べて全身平均で約 1/33、局所 SAR で約 1/20 であることが分かった。今後の課題は、体内誘導電界の 99%ile 値の導出と評価である。

#### [参考文献]

- [1] ICNIRP GUIDELINES for Limiting Exposure to Time-Varying Electric Magnetic Fields (1Hz-100kHz), Health Physics 99(6), 818-836, 2010
- [2] 大濱他, “PM モータの負荷時におえる d,q 軸インダクタンスの測定”, 電気学会, 平成 28 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会.
- [3] 長岡他, ”日本人成人男女の平均体型を有する全

身数值モデルの開発,” 生体医工学 Vol.40, No.4,  
pp.45-52, 2002.

[4] Nagaoka, et al., “ Development of realistic  
high-resolution whole-body voxel models of  
Japanese adult male and female of average height and  
weight, and application of models to  
radio-frequency electromagnetic-field dosimetry ”  
Phys. Med. Biol., Vol.49, pp.1-15, 2004.