

利用課題名 車載非接触充電システムの漏洩磁界に対する体内誘導電界の解析  
英文: Analysis of Electric Field inside Human Body  
induced from Magnetic field of WPT System for PHV/EV

石田 将也  
Masaya Ishida

株式会社 豊田中央研究所  
Toyota Central R&D Labs., Inc.  
URL <http://www.tytlabs.co.jp/>

邦文抄録

EV/PHV の二次電池の充電を簡単便利にする手段として、非接触給電システムが注目されている。非接触給電システムのうち、磁界結合型のシステムでは電力伝送時に、車両周囲に漏洩磁界が発生し、その磁界中に人体が存在する場合、人体内には誘導電界が発生する。人体内の誘導電界は測定不可能な値であるため解析により求める必要があるが、精緻な人体モデルを用いて体内誘導電界をフルウェーブ解析<sup>(1)</sup>すると、膨大な計算リソースが必要となる。このため本研究では、東工大のスーパーコンピュータ(TSUBAME)を用いて体内誘導電界の解析を行い、計算時間及び計算結果を検証した。

英文抄録

Wireless Power Transfer (WPT) system is useful for charging the battery of Electric Vehicle (EV) or Plug-in Hybrid Vehicle (PHV). During the WPT system's operation, that forms the magnetic field around the system. When the human body is located in this field, the body has electric field induced by the magnetic field inside that. Since the induced electric field inside the human body can not be measured, the field has to be calculated by electromagnetic simulation. We calculate the induced electric field inside the human body by the super computer TSUBAME. Then we verify the validity of the calculation time and the results.

*Keywords: Electric Vehicle, Plug-in Hybrid Vehicle Wireless Power Transfer, Magnetic Coupling, Electromagnetic Field Analysis, Induced Electric Field.*

## 1 はじめに

### 1.1 課題の背景

EV/PHV の二次電池の充電を簡単便利にする手段として、非接触給電システムが注目されている。非接触給電の方式には磁界結合型[1-3]、電界結合型[4,5]、マイクロ波型[6,7]があり、本研究では磁界結合型のシステムを対象とする。磁界結合型の非接触給電システムでは送電コイルと受電コイル間に生じる近傍磁界により電力伝送を行うため、車両周囲に漏洩磁界が発生する。その磁界に人体がばく露される場合、人体内には体内誘導電界が生じることから、その人体影響を把握する必要がある。

### 1.2 現状の問題点

磁界の人体ばく露に関する指標として、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)によりガイドラインが定められている[8]。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。基本制限とは人体内における影響に関連した実効的な指標であり、体内誘導電界により定められる。参考レベルとは基本制限に関連して定められた磁界の値である。体内誘導電界は測定不可能であるため、その値はシミュレーションにより求める必要がある。体内誘導電界を計算する際には、必要な計算精度を保つため、ICNIRP では 2 mm 角のボクセル<sup>(2)</sup>で構成された人体モデルを使用することが推奨されている[8]。ただし、このような精緻なモデルはメッシュ数が非常に多く、電磁界シミュレーションをする場合、膨大計算リソースが必要となることが問題となる。

(1)フルウェーブ解析: Maxwell 方程式を全て用いた解析

(2)ボクセル: 3次元空間における正規格子単位

### 1.3 目的

本プロジェクトでは、体内誘導電界の計算に膨大な計算リソースと要するという問題を、スーパーコンピュータ TSUBAME によって解決する。このため、TSUBAME により体内誘導電界を計算し、その計算時間及び計算結果を検証する。

## 2 概要

### 2.1 計算手順

体内誘導電界の解析ソフトには CST MW STUDIO [9](以後 MW-S)を用いる。MW-S には有限積分(FD)法による時間領域解析と有限要素法(FEM)による周波数領域解析のソルバがあり、本研究では前者のソルバを使用した。MW-S は TSUBAME 上では UNIX 環境でのみ実行が可能である。このため、計算手順は図 1 に示すように、計算モデルを自社のコンピュータで作製し、TSUBAME へ JOB を投入し実行、計算結果を自社のコンピュータへ転送して確認することとした。

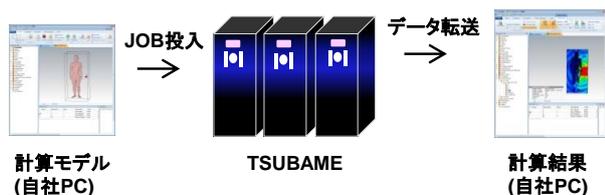


図 1 体内誘導電界計算手順

### 2.2 解析モデル

本計算で用いた解析モデルを図 2 に示す。解析空間は  $10000 \times 10000 \times 5000$  mm のサイズの直方体であり、床面は完全導体、それ以外の 5 面の境界条件は全て吸収壁(無反射壁)とした。受電コイルを搭載する車両は一般的な乗用車を想定し、車両の底面中央に受電コイル、その下の床面上に送電コイルを配置した。なお、座標系の原点は、受電コイル中心直下の床面上の点とした。人体モデルには車両の横に直立するモデルとした。ここで、出力面①、②はともに人体の断面を通る平面( $x=1240$  mm の  $y$ - $z$  面)である。

送電コイルと受電コイルの上面図を図 3(a)に、側面図を図 3(b)示す。送受電コイルの間隔は 150 mm とした。送電コイルと受電コイルには位置ずれが生じることを想定し、受電コイルが送電コイルに対して後方へ 100 mm、左方向へ 150 mm ずれた配置とした。また、伝送電力は 3 kW、伝送周波数は 85 kHz とした。

人体モデルには NICT(独立行政法人 情報通信研究機構)が公開している数値人体モデルデータベースのうち、成人男性の直立人体モデル TARO[10,11]を用いる。本モデルは、人体の存在する  $640 \times 320 \times 1732$  mm の空間を 2 角のボクセルに分け、各ボクセルに、皮膚、血管、骨などのマテリアルフラグを割り当て、各

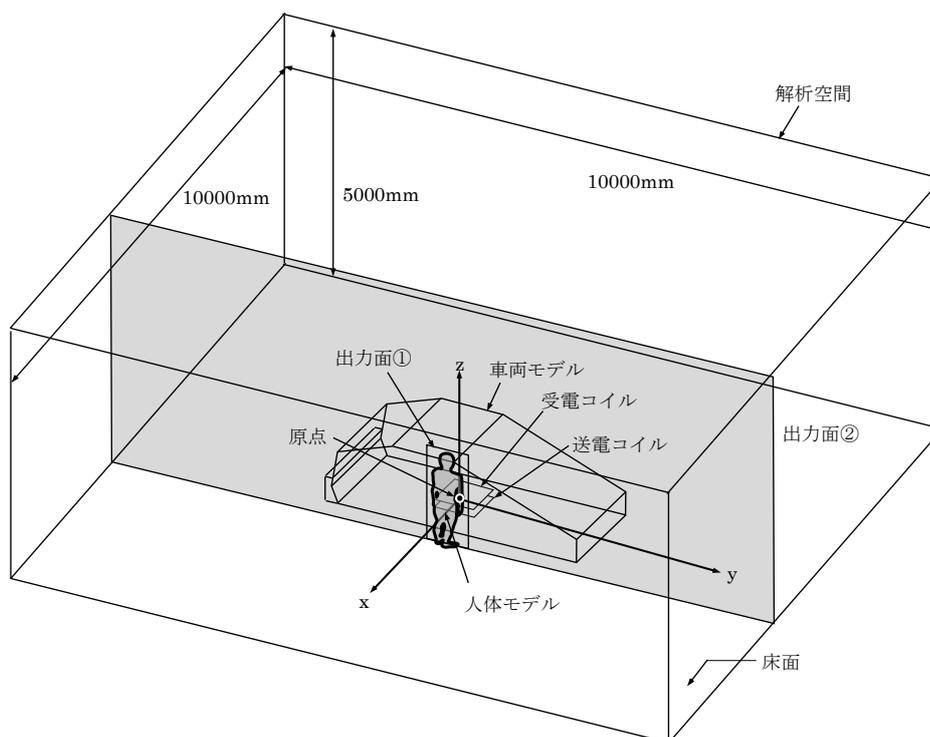
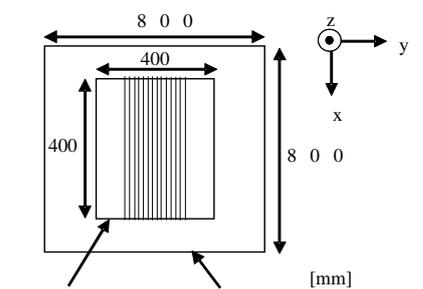


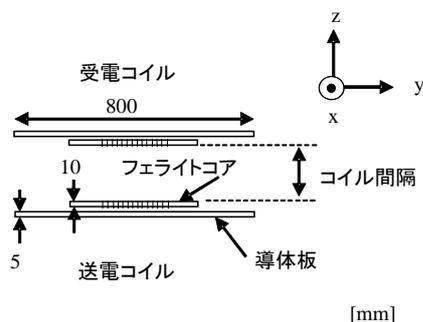
図 2 解析モデル

マテリアルフラグに導電率、誘電率などの対応する物性値を与えることで詳細な電磁界特性解析を可能にしたものである。人体の導電率や誘電率などの物性値は Gabriel らにより周波数特性が公開されている[12]。

図 2 の出力面②上のメッシュ構成を図 4 に示す。MW-S では直交グリッドを用いているため、人体モデルの 2 mm 角ボクセル形状を維持してメッシュを生成する場合、図 4 に示すように人体以外の部分においても 2 mm 間隔のメッシュ幅が維持される。本モデルにおけるメッシュ数は約 8938 万メッシュであった。



(a) 上面図



(b) 側面図

図 3 コイル構成

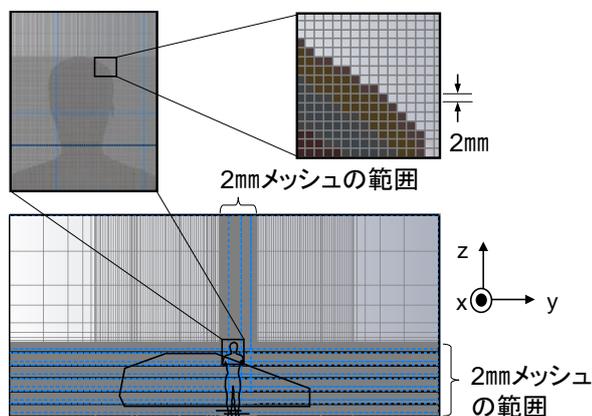


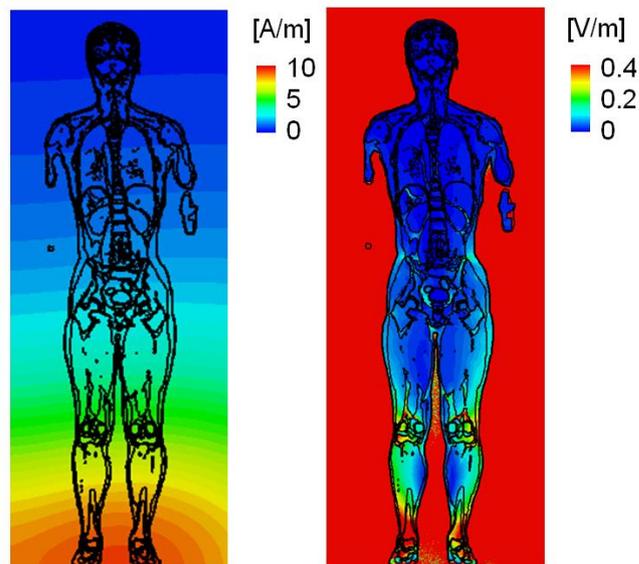
図 4 メッシュ構成

### 3 結果および考察

電磁界解析により、磁界および電界の分布を得ることができた。時間領域の解析は、1 回計算すれば、任意の周波数における結果を出力できる。このため、本解析は体内誘導電界の周波数依存性を調査する目的に対して有用となる。

図 2 の出力面①の電磁界分布の計算結果を図 5 に示す。同図(a)が磁界分布、図 5(b)が電界分布である。本結果から、磁界は人体の内外で同等の大きさであるのに対し、電界は人体外部に比較して人体内部では大幅に小さくなっていることがわかる。これは、人体が導電率を有していることから、電界が人体内へ入らないからであると考えられる。

次に、出力面②上の電界の計算結果を図 6 に示す。この結果から、人体の左右方向と上方向の電界値に細かなゆらぎが生じていることがわかる。これは図 6 でも示した通り、MW-S では人体の 2 mm 角のメッシュがそのまま解析空間の上下左右に延びることから、メッシュのグリッド分散[13]により、計算値にゆらぎが生じているためであると推測される。なお、本計算はノード数は 6、CPU 数は 72、メモリ 5,545Mb を使用し、計算時間は約 40 時間であった。



(a) 磁界分布

(b) 電界分布

図 5 計算結果

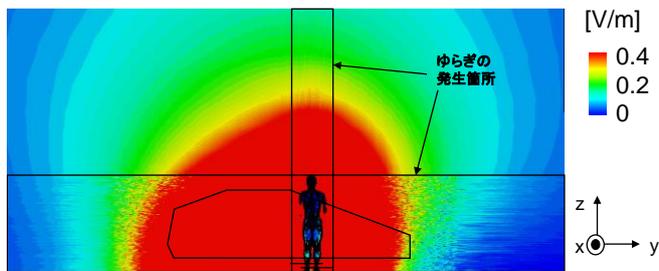


図 6 出力面② の電界分布の計算結果

#### 4 まとめと今後の課題

車載非接触給電システムの漏洩磁界により生じる体内誘導電界をスーパーコンピュータ TSUBAME により計算した。本計算により、体内誘導電界の時間領域解析が可能であることを確認できた。ただし、今回の解析モデルでは電界の計算値にゆらぎが発生する課題があることが分かった。本計算は、ノード数 6、CPU 数 72、メモリ 5,545Mb を使用し、計算時間は約 40 時間であった。

#### 参考文献

[1] T. Hiramatsu, X. Huang, M. Kato, T. Imura, Y. Hori, "Wireless Charging Power Control for HESS Through Receiver Side Voltage Control," The Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 1614-1619, 2015

[2] H. Takanashi, Y. Kaneko, S. Abe, and T. Yasuda, "A Large Air Gap 3 kW Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles," ECCE2012, North Carolina, pp.269-274 Sep 15-20, 2012

[3] Morris P. Kesler, "Highly Resonant Wireless Power Transfer: Safe, Efficient, and over Distance," WiTricity Corporation, 2013

[4] T. Ohira, "Dielectric coupling from electrified roadway to steel-belt tires characterized for miniature model car running demonstration," IEEE MTT-S, 2012

[5] T. Ohira, "Via-wheel power transfer to vehicles in motion," IEEE Wireless Power Transfer, 2013

[6] 篠原真毅, 松本紘, "マイクロ波を用いた電気自動車無線充電に関する研究," 電子情報通信学会論文誌,

J87-C, 433-443, 2004.

[7] T. Takahashi, T. Mizuno, M. Sawa, T. Sasaki, T. Takahashi, N. Shinohara, "Development of phased array for high accurate microwave power transmission," IMWS 2011

[8] ICNIRP GUIDELINES for Limiting Exposure to Time-Varying Electric Magnetic Fields (1Hz-100kHz), Health Physics 99(6), 818-836, 2010

[9] [http://www.aetjapan.com/software/CST\\_Overview.php?Module=MWS](http://www.aetjapan.com/software/CST_Overview.php?Module=MWS)

[10] 長岡智明、櫻井清子、国枝悦夫、渡辺聡一、本間寛之、鈴木保、河合光正、酒本勝之、小川幸次、此川公紀、久保田 勝巳、金鳳洙、多氣昌生、山中幸雄、渡辺敏, "日本人成人男女の平均体型を有する全身数値モデルの開発," 生体医工学 Vol.40, No.4, pp.45-52, 2002.

[11] T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kunieda, S. Watanabe, M. Taki and Y. Yamanaka, "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.

[12] C. Gabriel and S. Gabriel, "Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies", Armstrong Laboratory, Final Technical Report, AL/OE-TR-1996-0037

[13] 宇野亨, "FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析," コロナ社, 1998, pp.265-269