

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 25 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420251

研究課題名(和文) 磁気共鳴型無線エネルギー伝送に伴う電磁界に対する高速ドシメトリ手法の開発と応用

研究課題名(英文) Fast Electromagnetic Dosimetry Method for Wireless Power Transfer System and Its application to Safety Compliance

研究代表者

平田 晃正 (Hirata, Akimasa)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00335374

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：85kHzから10MHz帯までの周波数領域において用いられる無線電力伝送システムをモデル化し、詳細な人体モデル内に誘導される電界の大規模計算を実施した。また、得られた結果に基づき、人体が存在する領域を通過する磁束が体内誘導電界を決定づけるとの知見を得、外部電磁界と体内に誘導される電界を簡易に関係づける手法を提案した。この知見は、10MHz程度までであれば概ね有用であることを実験的に確認した。一連の成果は、2015年に答申された総務省指針の基礎的なデータとなるとともに、国際標準化においても貢献した。

研究成果の概要(英文)：The internal electric field in anatomical human body models was computed for magnetic field exposure from wireless power transfer system from 85 kHz to 10 MHz. From computational results, the decisive factor for internal electric field is found to be the magnetic flux passing through the human body. The relationship between internal and external electric fields has then been presented. This accomplishment provided the basis of guidelines by Ministry of Internal Affairs and Communications as well as the contribution to the international standards.

研究分野：生体電磁環境工学

キーワード：電磁界の安全性 解析技術 国際標準化 国際研究者交流(イタリア、フィンランド)

1. 研究開始当初の背景

近年、無線エネルギー伝送の実用化動向に注目が集まっており、その方式の一つとして磁気共鳴型が挙げられる。この方式では、同じ共鳴周波数を有するコイルを向かい合わせに置いて一方に電源を接続して給電し、もう一方のコイルで受電するものである。使用が想定される周波数は数百 kHz から数十 MHz 帯が中心であり、自動車あるいは家電製品への充電などが検討されている。別方式である電磁誘導方式での伝送距離が数 mm ~ 十数 cm 程度であるのに比べ、数十 cm ~ 数 m と比較的長距離の伝送が行えることが特長である一方、想定される伝送電力が数 kW あるいはそれ以上であり、また、人体周辺の電磁界分布も複雑であるため、体内に誘導される電界/電流、吸収電力(以降、体内誘導量とする)に関心が寄せられている。国際電波防護ガイドラインによれば、当該周波数帯では、刺激作用および熱作用の双方を検討する必要があると記載されており、多角的な安全性評価が求められる。

磁気共鳴型無線エネルギー伝送システムに対する安全性評価の国際標準化は胎動の段階にある。米国では、製品の実用化に向けた安全性評価法を検討している。しかしながら、その評価法は携帯電話基地局アンテナ(900MHz および 2GHz)に対して用いられていたものをそのまま適用するものである。一方、無線電力伝送では、人体がコイル近傍に存在する可能性があるため電磁界分布が変化し、また、コイルとの多様な位置関係が考えられるため、ばらつきを評価可能にする高速評価法開発が求められる。

研究代表者は、中間周波数帯における接触電流に対する評価法について研究を実施しており、これまでに、簡易化したモデルに対する理論解を導出し、局所ばく露については、数値解析と比較した結果、10MHz 程度までは準静的に電磁界を扱うことができるということを示した(平田ら, 2012)。ここで、準静的な扱いとは、電界と磁界の影響を分離してそれぞれの解析結果の重ね合わせで表現できると定義されることである。本課題は、無線エネルギー伝送に対する装置の安全性評価を簡易に行う手法を検討し、国際標準化および設計指針に貢献するものである。

2. 研究の目的

無線電力伝送システムについて、適合性を評価した例は多くはない。特に、筆者らは、モーメント法(MoM)とSPFD(Scalar Potential Difference)法を組み合わせた準静近似に基づく二段階解析手法を提案してきた。しかしながら、10MHz 帯において二段階解析手法の有効性について検討されているものの、外部磁界の影響が支配的であると簡略化し、外部電界の影響についての検討はこれまでにない。本研究では、準静近似に基づく二段階解析手法の有効性の更なる検討を目的とした検証

を行った。

次に、電気自動車への非接触充電には、周波数 85kHz 帯を利用した磁気共鳴方式による伝送を考え、詳細な人体モデルを用いて適合性を評価する。特に、車両中央にソレノイドコイルあるいは円形スパイラルコイルから構成される2種類の伝送システムを考え、解析結果と国際非電離放射線防護委員会による国際ガイドラインの基準値と比較する。特に、異なるモデル、異なる姿勢を考え、体内誘導量のばらつきについて検討する。

さらに、携帯情報機器等の非接触充電に用いられる 100 kHz 帯無線電力伝送システムを対象に、人体モデルの複数の部位における体内誘導量の解析を行った。

3. 研究の方法

3.1 数値人体モデル

基礎検討には、筋肉組織の電気定数を 2/3 倍した仮想的な媒質である 2/3 筋肉組織で構成された均質円柱モデルを用いた。なお、人体における高含水組織と低含水組織の割合がおおよそ 2 対 1 であり、また、前者の電気定数は後者のものに比べて十分大きい。そのため、高含水組織の代表例である筋肉組織の電気定数に 2/3 を乗じた値がしばしば用いられており、本研究でもその値を用いることとした。均質円柱モデルは、成人人体の寸法を考慮し、高さおよび半径を、それぞれ 1.7m、0.14m とした。

解剖学的人体モデルには、情報通信研究機構が開発した日本人成人男女モデル(TARO、HANAKO)、英国放射線防護局(NRPB: National Radiological Protection Board、現在 Health Protection Agency)開発による平均的な欧米人の数値モデルである NORMAN [3] および NAOMI、国際プロジェクトで開発された Virtual Family と名付けられた数値モデル群のうち、Duke、Ella、Thelonious を用いることとした。これらの数値人体モデルは、皮膚、筋肉、脂肪、骨、脳、心臓、血管など数十種類の組織で構成されている。また、Virtual Family では複数の解像度が提供されているが、2mm の分解能を用いることとした。人体組織の電気定数は Gabriel ら(1996)より引用した。各数値人体モデルについて、図 1 にモデルの概観を、表 1 にモデルの身長、体重を示す。

本研究では、電磁界解析手法として商用ソフトである FEKO(EM Software & System-S.A. (Pty) Ltd, Suite 6.1)を用いた。FEKO は、積分方程式に基づく数値解析手法であり、コイルのような曲線を有する複雑な構造を模擬することに適したモーメント法と、損失性媒質モデルを扱う場合に有効である有限要素法を組み合わせたソフトウェアである。

3.2 準静近似に基づく解析手法

3.2.1 スカラーポテンシャル有限差分法

準静近似が有効とされる十数 MHz 以下の

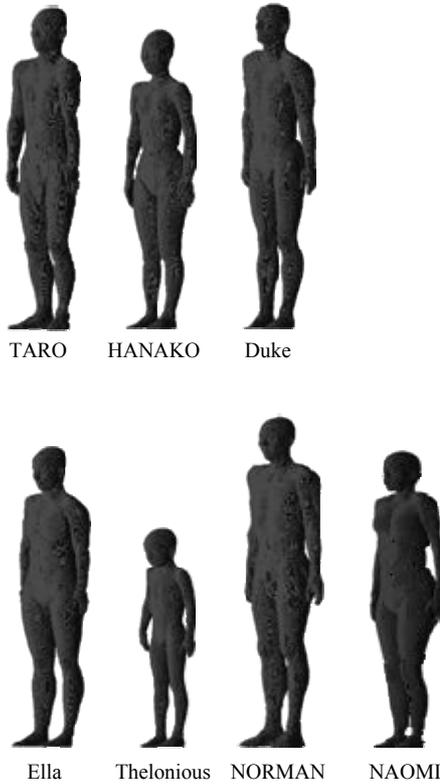


図1 数値人体モデルの概観

表1 数値人体モデルの諸元

Models	TARO	HANAKO	Duke
Height[m]	1.73	1.61	1.74
Weight[kg]	65	53	70

Models	Ella	Thelonious	NORMAN	NAOMI
Height[m]	1.60	1.17	1.76	1.63
Weight[kg]	58	17	76	60

周波数帯において、電磁界ばく露は、電界ばく露と磁界ばく露に分けて考えることが可能となり、その解析は飛躍的に簡易となる。特に、磁界分布は人体の存在により変化しないため、極低周波におけるドシメトリでは、この仮定に基づき解析が行われている。準静近似に基づく2段階解析手法は、人体が存在しない場合におけるベクトルポテンシャルもしくは電流分布を計算し、得られたベクトルポテンシャル分布を波源としてドシメトリを行う手法である。本研究では、磁界結合コイルにより生じる磁界に対する体内誘導量を full-wave 電磁界解析手法と準静近似に基づく2段階解析手法を用いて解析し、SARの比較を行うことでさらなる有効性を検証する。本研究で用いる2段階の解析として、まず、モーメント法を用いて、磁界結合コイルにより自由空間中に発生する磁界分布の

計算を行う。次に、スカラーポテンシャル有限差分 (Scalar Potential Finite Difference: SPFD) 法(Dawson et al 1996)を用いて体内誘導量の計算を行う。SPFD 法は生体などの計算対象をボクセルでモデル化し、導電率があるボクセルに含まれるすべての節点について、電気スカラーポテンシャルを未知変数とした以下の連立一次方程式を解く有限差分法である。

$$\left(\sum_{n=1}^6 S_n \right) \phi_0 - \sum_{n=1}^6 S_n \phi_n = j\omega \sum_{n=1}^6 (-1)^{n+1} S_n l_n A_n \quad (1)$$

図2にボクセルの節点配置を示す。式(1)は図2に示す節点0を中心とした連立一次方程式であり、 ϕ_0 は節点0における電気スカラーポテンシャル、 ϕ_n は図2に示す節点0を中心とした各軸方向における6つの節点nにおける電気スカラーポテンシャル、 A_n はボクセルの辺nに平行な外部磁気ベクトルポテンシャル、 l_n は辺nの長さ、 S_n は辺nのコンダクタンス、 ω は角周波数である。準静近似に基づく解析手法は、通常、連立一次方程式をベクトル量で表現しているため、唯一スカラー量で表現している SPFD 法は最も計算負荷の小さい解析手法であることが知られている。

3.2.2 多重格子法

式(1)の連立一次方程式の代表的な反復解法として逐次加速緩和(SOR: Successive Over Relaxation)法、共役勾配法などがある。SOR法は連立方程式を解く際の計算を、常に同じサイズのグリッドを用いて行っており、十分な精度を得るには解析時間を要していた。一方、多重格子法は、計算をサイズの異なるいくつかのグリッドを用いて行うことで、誤差を効率的に減衰させる手法である。なお、この多重格子法には、幾何多重格子法、代数多重格子法の2つがある。ここで詳細は示さないが、本問題には前者の方が10倍以上高速であった。ゆえに本研究で前者を多重格子法と呼び、以降その説明に焦点を当てる。

多重格子法では、まず細かいグリッドを用いて SOR 法等の反復計算を数回程度行い近似解 u^h を得る。

$$A^h u^h = b^h \quad (2)$$

次に、得られた近似解 u^h に対する残差 r^h を計算する。

$$r^h = b^h - A^h u^h \quad (3)$$

さらに、残差 r^h を一段階粗いグリッドに補間(制限補間)し、この残差 r^{2h} に関する残差方程式である式(4)に対して再び反復計算を行うことで、残差 r^{2h} に対する誤差 e^{2h} を計算する。

$$A^{2h} e^{2h} = r^{2h} \quad (4)$$

そして、残差方程式の解として得られた誤差 e^{2h} を一段階細かいグリッドに補間(延長補間)し、近似解 u^h の補正を行う。

$$u^h = u^h + e^h \quad (5)$$

これらの操作をさらに粗いグリッドを用いて行うことで、計算に掛かる時間を減少させる。

3.2.3. 多重格子法の実装

本研究では、最も細かいグリッドサイズを2mmとし、4mm、8mmと2の累乗となるようにグリッドを粗くし、6段階のグリッドを作成した。粗いグリッドにおけるボクセルの導電率 σ^{2h} としては、そのボクセルに含まれる8個のボクセルの導電率 σ^h の平均値を用い、多重格子法における反復解法としてはSOR法を用い、各段階においての適用回数は3とした。また、より高精度、高速に数値解を求めるため、以下の制限補間を行った。粗いグリッドの節点 n の残差 r^{2h} は、節点 n を共有する細かいグリッドにおける8個のボクセルに含まれる27個の節点の残差を重み付けした値を用い、以下の式で計算した。

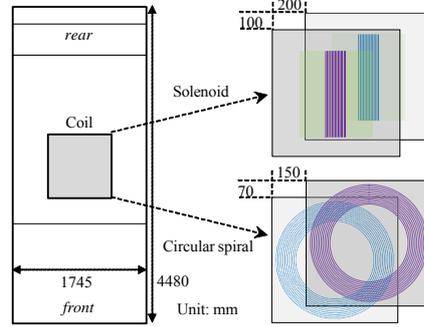
$$r^{2h} = \sum_{i=1}^{27} C_i r_i^h \quad (6)$$

ここで、 C_i 、 r_i^h はそれぞれ細かいグリッドにおける節点の残差と重み付けの値である。 C_i の値を図3に示す。なお、延長補間としては、線形補間を用いることとした。

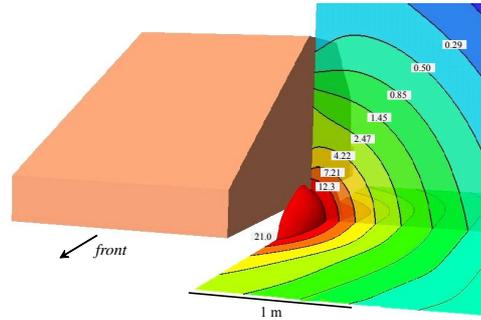
4. 研究成果

4.1. 電気自動車への無線給電における安全性

電気自動車周辺の電磁環境の評価を行うため、ソレノイドコイル、円形スパイラルコイルの各コイルを搭載した伝送システムを車両中央付近に配置した場合における車両周辺磁界を計算した。ソレノイドコイルの外観および磁界分布に対する計算例を図2に示す。次に、体内誘導電界が最も大きくなる基準位置を定め、その点からの最大体内誘導電界距離特性を示す。図3における横軸は車両からの距離であり、縦軸は人体に誘導される電界の最大値である。ここで、成人女性モデルではつま先が、妊婦モデルでは腹部がそれぞれ車体から最も近いため、車両からの距離は、車体からつま先までの長さとして定義することとする。図3より、まず車と人体モデルとの距離が大きくなるほど誘導電界が単調に減少することがわかる。また、成人女性モデルと妊婦モデルを比べると、車両近傍では成人女性が比較的高い値をとるが、車両からの距離15cm以上の範囲では、両コイルとも妊婦モデルが比較的高い値をとっていることがわかる。これは、外部磁界強度が、車両近傍では足付近で高く、足先が車両に近い成人女性で値が大きくなり、ある程度車両から離れると、磁界強度の大きい範囲が垂直方向に高い位置まで及び、胎児を持つ妊婦の腹部で比較的大きな値をとったものと考えられる。さらに、妊婦モデル内の胎児に誘導される最大電界値は、妊婦のそれを下回ることを確認し



(a)



(b)

図2 (a)ソレノイドコイルおよび円形スパイラルコイルの外観 (b)ソレノイドコイルによる車両周辺の磁界分布の解析例

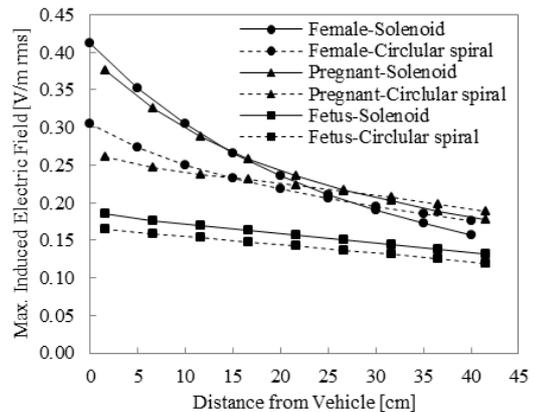


図3 直立時の体内誘導電界の距離特性

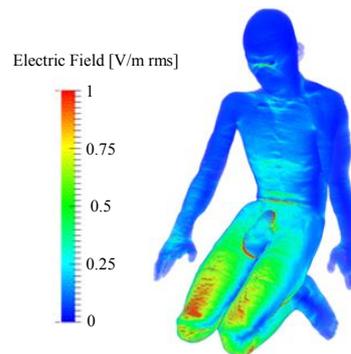


図4 物を拾う姿勢をとった場合の誘導電界

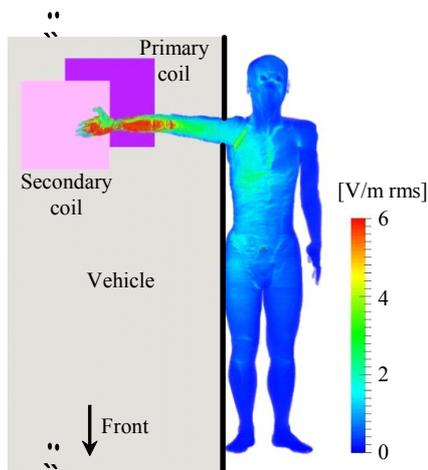


図5 腕を車両下に向けて伸ばした姿勢をとった場合の誘導電界

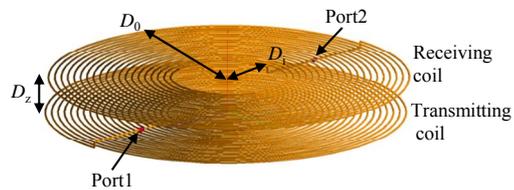
た。

図4に体内誘導電界分布図を示す。図4より、体内誘導電界は、膝付近で大きな値をとることが確認できる。体内誘導電界の最大値は0.92V/mで、自動車側方で直立している状態と比較すると2.3倍大きい値であった。これは、直立時に磁界が鎖交する人体足首付近と比較し、膝付近の面積が大きく、その部分を貫く磁束密度が大きいことに起因するものである。

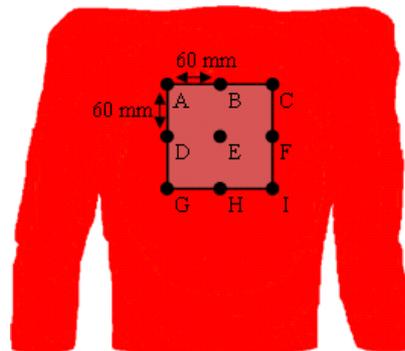
次に、腕がほぼすべて車両の下に入る位置を検討する。腕における誘導磁界が最も大きくなるよう位置を調整したときの体内誘導電界分布図を図5に示す。この際、人体の肩までが車両の下に入る場合を考えている。図5より、体内誘導量の最大値は前腕部付近で出現し、その最大値は5.95V/mであった。なお、肩と車両が水平平面上で重複しない場合、腕を車両方向に伸ばさない場合の体内誘導電界の最大値は、それぞれ、2.83V/m、2.30V/mであった。

4.2. 情報通信機器への無線給電

伝送コイルは、送信側、受信側ともに内径6mm、外径20mm、単層20巻のコイルから構成されている。また、電力伝送に伴う磁界を集束させ、伝送効率を向上するために、磁性体シート(比透磁率:7000)を挿入した。図6に人体とコイルとの相対位置を示す。人体モデル胸部中心にくわえ、そこを基準とし±60mmずらした位置A~Iに伝送コイルをそれぞれ配置した場合の、電力伝送に伴う磁界による体内誘導磁界を準静近似に基づく2段階解析手法を用いて解析する。ここで、胸部と伝送コイルの距離は10mmとした。また、図7に待受状態の磁界分布および体内誘導SAR分布の解析例を示す。さらに、伝送システムの周波数を一例として140kHzとし、出力電力は1Wで規格化した。また、充電状態に対する待受状態として、受信コイルが存在

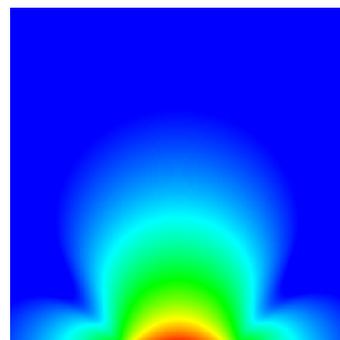


(a)

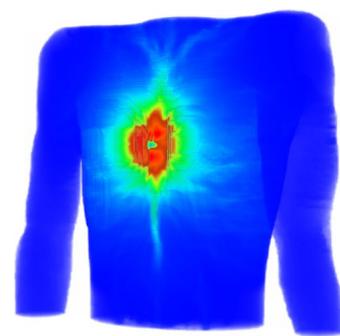


(b)

図6 (a)100 kHz 帯無線電力伝送システムの外観と人体モデルとの相対位置関係



(a)



(b)

図7 (a)無線電力伝送システムからの磁界分布(垂直断面)と体内誘導SAR分布. コイルを位置E(図6)に配置した場合.

しない場合も検討した。詳細は示さないものの、位置B、E、Hにおいて他の位置と比較し、大きな値が得られた。この原因として胸部の中心線付近にある位置B、E、Hでは、導電率の小さい脂肪と骨が主たる組織構成であるためと考えられる。不均質人体モデ

ルに比べ均質人体モデルにおいて、上で挙げた3つの位置以外で誘導電界の最大値は大きくなった。また、直方体モデルでは位置E、H以外の位置で概ね過大評価できることがわかった。

得られた結果を国際ガイドラインに示された人体の電磁界ばく露に対する制限値と比較することにより、許容送信電力を検討した。その結果、1Wの送信電力に対してSARは腕部において最大9.0 nW/kgであり、その際の許容送信電力は220 MWであった。一方、誘導電界は人体胸部において最大30.0 mV/mとなり、その際の許容送信電力は630 Wであった。この結果より、100kHz帯無線電力伝送システムに対しては、SARに比べ誘導電界がより制限的な要因であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6件)

1. 土田昌吾, ラークソイルッカ, 平田晃正: "磁気共鳴型無線電力伝送に対する高速人体数値ドシメトリ解析" 電子情報通信学会和文論文誌(C) J96-C. 122-130 (2013), 査読有
2. I. Laakso and A. Hirata: "Evaluation of induced electric field and compliance procedure for wireless power transfer system in an electrical vehicle" *Physics in Medicine and Biology* 58. 7583-7593 (2013), 査読有
3. T. Sunohara, A. Hirata, I. Laakso, and T. Onishi, "Analysis of in-situ electric field and specific absorption rate in human models for wireless power transfer system with induction coupling," *Physics in Medicine and Biology*, vol.59, pp.3721-3735, 2014.
4. T. Shimamoto, I. Laakso, and A. Hirata, "In-situ electric field in human body model in different postures for wireless power transfer system in an electrical vehicle," *Physics in Medicine and Biology*, vol.60, no.1, pp.163-174, 2015.
5. I. Laakso, T. Shimamoto, A. Hirata, and M. Feliziani, "Quasistatic approximation for exposure assessment of wireless power transfer (invited)," *IEICE Transactions on Communications*, vol.E98-B, no.7, pp.1156-1163, 2015.
6. T. Shimamoto, I. Laakso, and A. Hirata, "Internal electric field in pregnant-woman model for wireless power transfer system in electric vehicle," *Electronics Letters*, vol.51, no.25, pp.2136-2137, 2015.

〔学会発表〕(計 8件)

1. 平田晃正, 伊藤史宏, ラークソイルッカ: "無線電力伝送システムに対する SAR 解析における準性近似の有効性に関する検討" 電子情報通信学会マイクロ波研究会. (20130627-20130628). 名古屋工業大学
2. ラークソイルッカ, 平田晃正: "電気自動

車を充電するための無線電力伝送に伴う磁界に対する人体ばく露評価" 電気学会電磁界理論研究会. (20131114-20131116). 三沢

3. 平田晃正: "無線電力伝送システムに対する体内誘導量の数値評価" 電子情報通信学会総合大会(招待講演). (20140318-20140321). 新潟大学
4. I. Laakso, T. Shimamoto, A. Hirata, and M. Feliziani, "Applicability of quasistatic approximation for exposure assessment of wireless power transfer," *Proc. International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, May 2014 (Tokyo, Japan).
5. 島本拓也, ラークソイルッカ, 平田晃正, "電気自動車無線電力給電におけるコイル形状による体内誘導電界の差異," 信学技報, EMCJ2014-90, Jan. 2015 (沖縄県市町村自治会館).
6. A. Hirata, "Age dependence of thermoregulation, heating of the eye, relationship between SAR and temperature, thermal model for pregnant woman (ambient heat versus HF)," *ICNIRP Workshop on Thresholds of thermal damage* (Istanbul, Turkey), May 2015.
7. 島本拓也, ラークソイルッカ, 平田晃正, "電気自動車への無線電力伝送システムによる女性および妊娠女性モデルにおける体内誘導電界解析," 信学ソ大, B-4-6, Sep. 2015 (東北大).
8. 島本拓也, 岩橋真宏, ラークソイルッカ, 平田晃正, 大西輝夫, "6.78MHz帯無線電力システムに伴う成人および子供のSAR評価," 信学技報, EST2015-112, Jan. 2016 (神戸市産業振興センター).

9. 〔図書〕(計 1件)

1. 平田晃正, 和氣加奈子, "スマートフォン向けワイヤレス給電における生体安全性に関わる適合性評価," 月刊EMC, no.334, pp.68-76, 科学情報出版, Feb. 2016.

6. 研究組織

平田 晃正 (HIRATA AKIMASA)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00335374