

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06288

研究課題名(和文)大規模精密解析に基づくミリ波帯人体ばく露安全性評価と国際標準化

研究課題名(英文) International standardization of safety evaluation for millimeter wave exposure using large-scale accurate computation

研究代表者

柏 達也 (KASHIWA, Tatsuya)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：30211155

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：人体電磁ばく露に対する国際ガイドラインでは、現在、国際ガイドラインが改定中であり、十分なデータがないミリ波である10GHzから300GHzのデータが必要である。本研究ではシミュレーションにより安全性評価を行った。この周波数帯では皮膚厚みの影響が大きく、皮膚厚みの影響を調べる事が重要である。本研究では主にこの皮膚厚みの人体ばく露への影響について調べ有意義な結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人体電磁ばく露に対する安全性評価では、現在、国際ガイドラインが改定中であり、十分なデータがないミリ波である10GHzから300GHzのデータが必要である。実験的アプローチは社会的に難しく、シミュレーションによる安全性評価が必須である。この周波数帯では皮膚厚みの影響が大きく、皮膚厚みの影響を調べる事が重要である。本研究では主にこの皮膚厚みの人体ばく露への影響について調べ有意義な結果を得た。

研究成果の概要(英文)：In the current international guidelines/standards for human protection from radio waves, the whole-body averaged specific absorption rate (SAR) is used as a metric. The upper frequency of the whole-body average SAR will be revised from 10 GHz to 300 GHz in the revision of ICNIRP guidelines. However, the rationale for this exposure restriction is insufficient above 6-10 GHz due to the reliability of the human modeling. The skin modeling may become important because most electromagnetic power is absorbed in the skin layer. In this study, we fine-tuned the numerical human models into high resolution models with arbitrary skin thickness by mediating polygon model. Additionally, we showed the effect of skin thickness on the whole body average SAR.

研究分野：電磁波工学

キーワード：人体電磁ばく露 ドシメトリ評価 ミリ波 国際標準化 安全性評価 スーパーコンピュータ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、無線通信技術の発展に伴い、電波の人体に与える影響について関心が寄せられている。電波が人体に与える影響は、周波数 100kHz 以下では刺激作用、100kHz 以上では熱作用が支配的となる。電波の安全性については、国際ガイドラインである国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) ガイドライン、IEEE (米国電気電子学会) 規格、日本の電波防護指針などにより定められている。熱作用に対する指針値として、全身平均 SAR (比吸収率) と局所 10g 平均 SAR などが定義される。これらは、深部温度上昇、局所的な温度上昇とよい相関があることから、温度上昇の代用として用いられている。現在、28GHz を主要な周波数帯域とする第 5 世代移動通信システム (5G) の開発が進められており、我が国でも 2020 年より実用化される予定である。また、2019 年に ICNIRP、IEEE の改訂版が発行される予定である。これまで、3GHz ないしは 10GHz までを SAR の適用上限周波数とされていたが、改訂版の ICNIRP ガイドラインでは、全身平均 SAR の適用が 300GHz まで拡大、また IEEE 規格では、全身ばく露に対する参考レベルを引き下げる予定である。しかしながら、6GHz 以上の全身ばく露に対する根拠は、未だ不足しており、安全側の観点から導入されたものである。

### 2. 研究の目的

6GHz 以上の周波数帯ドシメトリ評価の問題点のひとつに、人体モデリングの信頼性が挙げられる。電波の浸透深さがミリメートル程度になり、電波はほぼ皮膚組織に吸収されるため、皮膚の厚さのモデル化が重要となる。一方、従来のボクセルモデルを用いた場合、その厚みは分解能の整数倍として表される。現在ドシメトリ評価に用いられている数値人体モデルの解像度は数ミリであるため、皮膚厚みは、その整数倍に依存する。GHz 帯における全身平均 SAR は、皮膚の厚みに影響されるため、より現実に近い皮膚のモデル化が必要となる。本稿では、既存の人体数値モデルを改良することで、任意の皮膚厚みを持つ高解像度ボクセルモデルを作成し、皮膚厚みの変化が、全身平均 SAR の周波数特性に与える影響について明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 解剖学的人体数値モデルの改良

解剖学的数値人体モデルは、情報通信研究機構で開発された日本人成人男性モデル (TARO)、日本人成人女性モデル (HANAKO) を用いた。これらのモデルは、構成組織 51 種類、分解能 2mm である。本稿で用いている計算手法である FDTD 法の安定性を確保するためには、モデルの高分解能化が必要となる。特に 6GHz 以上では電波の浸透深さから SAR の分布は皮膚組織に集中するため、数値モデルの皮膚厚みが重要な因子となる。実際の人体の皮膚厚みは、部位ごとによって異なり、0.5mm から 2.0mm 程度である。一方で、従来モデルでは分解能 2mm を基準としているため、皮膚厚みは 2mm 以上となる。そのため、本稿では、任意の皮膚厚みを持つボクセルモデルを、皮膚組織以外の組織に対するボクセルモデルのスミージング、任意の厚みを持つ皮膚ボクセルモデルの生成、を統合することによって任意の皮膚厚みを持つ高解像度ボクセルモデルを作成した。

#### (2) ボクセルモデルの高解像度化

皮膚以外の組織に関しては、組織ごとに高解像度化を行なった。ボクセルモデルの高解像度化には、ポリゴンモデルを仲介する方法で行った。はじめに、マーチングキューブを用いて、従来の 2mm ボクセルモデルからポリゴンモデルを生成した。具体的には、任意の組織ボクセルに 1 を、それ以外のボクセルに 0 を割り当て、MC 法を適用し 0.5 の統治面を探索することで、弱スミージング効果のあるポリゴンデータを取得した。次に、商用ソフトウェア POLYGONALmeister を用いることによって、得られたポリゴンモデルのスミージングを行う。最後に、スミージングを施したボクセル化を行う。ポリゴンモデルの境界を、直交座標系上に置き換えるために、各ポリゴンと隣接するボクセルの中心間ベクトルとで交差判定を行い、交差する場合には、中心間ベクトル上のボクセル側面を表面パネルと定義した。交差判定には Tomas の判定法を用いた。

#### (3) 皮膚厚みの調整

皮膚厚みの調整は、先に述べたボクセルモデルの高解像度化を応用することによって行った。はじめに、従来の人体数値モデルから皮膚組織を取り除いたボクセルモデルを作成し、そのボクセルモデルから、表面ポリゴンモデルを生成した。この表面ポリゴンモデルを基準として、表面法線方向へ任意の皮膚厚み (tskin) だけ移動させた皮膚表面 (外側) ポリゴンモデル、表面ポリゴンモデルを裏返した皮膚裏面 (内側) ポリゴンモデルを生成した。最後に、とを合成することで、皮膚ボクセルモデルを生成した。得られた各組織のボクセルモデルを統合することで、高解像度人体モデルを作成することができる。本稿では、従来モデルを単純分割したもの (単純分割モデル)、皮膚厚みを従来モデルと等価にし、スミージングを施したもの (皮膚厚み等価モデル)、皮膚厚みを 1mm、1.5mm、2mm に変化させたもの、皮膚総重量を統計データに基づき男性 2.4kg、女性 1.8kg となるよう調整したもの (tskin = TARO: 1.27 mm, HANAKO: 1.13mm) の 5 種類を作成した。

#### (4) 解析条件

図 1 に男女の解析モデルを示す。人体モデルを自由空間に配置しモデル正面から平面波を照射した際の全身平均 SAR を計算した。平面波は、入射電力密度 10W/m<sup>2</sup> の垂直偏波とし、周波数は 1GHz から 100GHz とした。また、モデル分解能は、1GHz から 10GHz では 0.5mm、10GHz 以上で

は皮膚内波長の 10 分の 1 以下になるように調整した。

#### 4. 研究成果

図 2 に、一例として日本人成人男性モデルの全身平均 SAR の周波数特性を示す。図 2 より、GHz 帯の全身平均 SAR は、数 GHz で極大値をとる傾向がみられた。単純分割モデル、皮膚厚み等価モデルでは 1.25GHz でほぼ一致しており、 $t_{skin}=2.0mm$  で 1.5GHz、1.5mm で 2GHz、1.0mm で 2.5GHz と、皮膚が薄くなるほど高い周波数で極大値を取った。また、10 Hz 付近でも小さなピーク値があらわれた。これは、皮膚組織における定在波の影響だといえる。皮膚厚み等価モデルの全身平均 SAR は、単純分割モデルよりも平均 12% 高くなった。GHz 帯においては、電力吸収量は体表面積によって影響をうけるためである。また、25GHz 以上においては、スムージングを施した高解像度モデルでは、全身平均 SAR は皮膚の厚みによらず、ほぼ一致しているが、単純分割モデルでは、約 20% 上昇した。これらの結果は、ミリ波帯におけるドシメトリ評価の数値モデルのスムージングの重要性を示唆している。

図 3 に、ICNIRP 参考レベルにおける全身平均 SAR を示す。一般環境における全身平均 SAR は、 $0.08W/kg$ 、参考レベルは、 $f < 2 GHz$  では  $f/200 W/m^2$ 、 $f \geq 2GHz$  では  $10 W/m^2$  で与えられる。図より、全身平均 SAR は、TARO、HANAKO どちらの場合でも皮膚厚みが 1mm のときに最大値をとった。また、皮膚厚みが 2mm 以上の場合では、基本制限である  $0.08W/kg$  を下回るが、皮膚厚みが 1.5mm 以下では、2-3GHz 付近で TARO では 4%、HANAKO では 18%、 $0.08W/kg$  を上回る結果となった。

図 4 に、単純分割モデル、スムージングを施した皮膚厚み等価モデル、皮膚総重量から求めた  $t_{skin}=1.27mm$  モデルにおける人体表面 SAR 分布図の結果を示す。1GHz においては、表面分布でもモデル間の差異は少なく、いずれも断面積の小さい手首、指先、ひざ、足首等に分布が集中している。モデル間の差異は、10GHz において最も顕著で、皮膚厚みをコントロールしたモデルで最小となり、図 2 での傾向と一致した。30GHz 付近では、スムージングを施した改良モデルで分布が滑らかになっていることが確認できる。

本稿では、6GHz 以上の周波数帯における全身平均 SAR 導入の根拠、また対応する許容電力密度の設定を目的に、数値ドシメトリ評価のための数値人体モデルの改良を行い、GHz 帯における SAR に対する皮膚厚みの影響について考察した。その結果、皮膚厚みが小さくなるほど、全身平均 SAR の極大値が大きくなること、また、その際の周波数が高くなることを示した。また、25GHz 以上では、スムージングによる影響が大きくなることも示した。さらに、皮膚厚みを小さくした場合、ICNIRP 参考レベルにおける全身平均 SAR が 2GHz では、基本制限を超えることを示唆した。

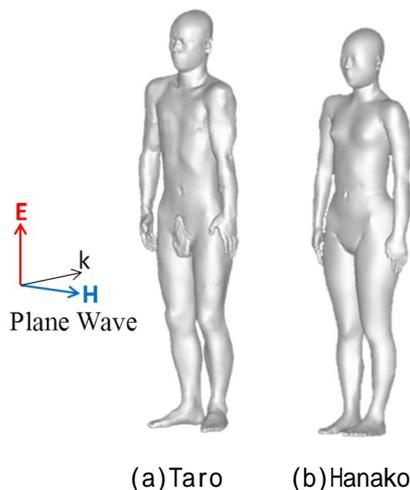


図 1 人体数値モデルと解析条件

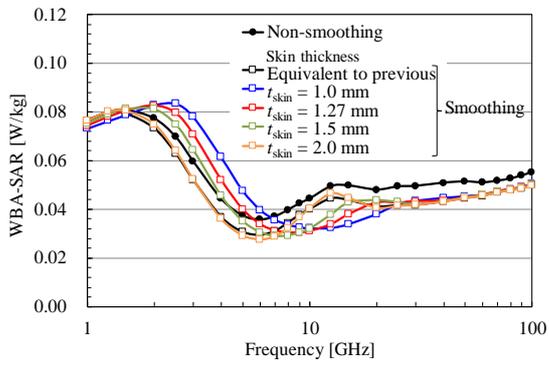


図2 全身平均 SAR の周波数特性

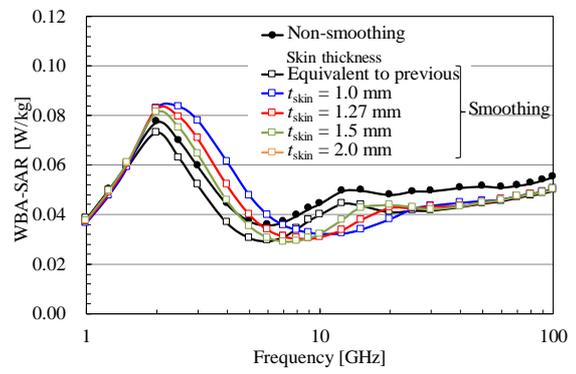


図3 ICNIRP 参考レベルの全身平均 SAR

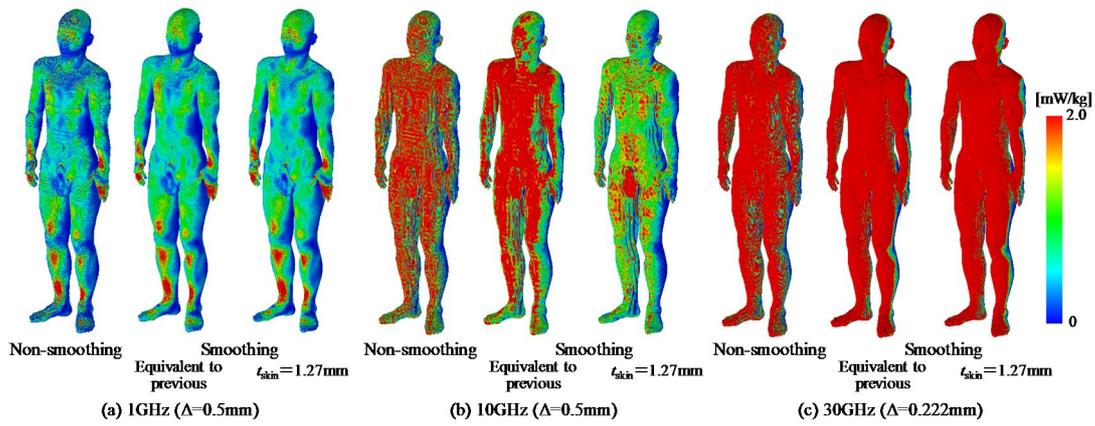


図4 人体表面 SAR 分布 (Taro)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 中西優大, 伊藤孝弘, 平田晃正, 田口健治, 柏達也	4. 巻 vol. J101-C, no. 5
2. 論文標題 サブグリッド法に基づくSPFD解析による一様磁界ばく露解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 pp. 256-257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Taguchi, I. Laakso, K. Aaga, A. Hirata, Y. Diao, J. Chakrothai, T. Kashiwa	4. 巻 vol. 6
2. 論文標題 Relationship of External Field Strength with Local and Whole-body Averaged Specific Absorption Rates in Anatomical Human Models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 pp. 70186-70196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2018.2880905	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 平田晃正, 長谷川一馬, 小寺紗千子, Ilkka Laakso, 江川隆輔, 堀江祐圭, 矢崎菜名子, 田口健治, 柏達也	4. 巻 vol. 138, no. 6
2. 論文標題 複合物理解析に基づく熱中症リスク評価と応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 pp. 288-294
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.138.288	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kojima Kazuya, Hirata Akimasa, Hasegawa Kazuma, Kodera Sachiko, Laakso Ilkka, Sasaki Daisuke, Yamashita Takeshi, Egawa Ryusuke, Horie Yuka, Yazaki Nanako, Kowata Saeri, Taguchi Kenji, Kashiwa Tatsuya	4. 巻 6
2. 論文標題 Risk Management of Heatstroke Based on Fast Computation of Temperature and Water Loss Using Weather Data for Exposure to Ambient Heat and Solar Radiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 3774 ~ 3785
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2018.2791962	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Taguchi, T. Kashiwa, A. Hirata
2. 発表標題 Development on High Resolution Human Voxel Model for High Frequency Exposure Analysis
3. 学会等名 PIERS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田口健治
2. 発表標題 人体ボクセルモデルの高解像度化法に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサエティ大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中西優大
2. 発表標題 サブグリッド法に基づくSPFD解析の高速化に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 電磁界理論研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中西優大
2. 発表標題 サブグリッド法と後処理によるSPFD解析の高速化に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 エレクトロニクスシミュレーション研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田口健治
2. 発表標題 高周波ばく露解析のための高解像度人体ボクセルモデルの構築
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小寺紗千子
2. 発表標題 FDTD法によるミリ波帯人体全身SAR評価に関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会, エレクトロニクスシミュレーション研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 T. Kashiwa, K. Taguchi, and etc.	4. 発行年 2018年
2. 出版社 ARTECH HOUSE	5. 総ページ数 288
3. 書名 Antennas for Small Mobile Terminals	

1. 著者名 K. Wake, A. Hirata, K. Taguchi, and etc.	4. 発行年 2019年
2. 出版社 OP Publishing Ltd.	5. 総ページ数 400
3. 書名 Computational Anatomical Animal Models	

〔産業財産権〕

〔その他〕

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田口 健治  (TAGUCHI Kenji)  (60435485)	北見工業大学・工学部・准教授    (10106)	
研究分担者	平田 晃正  (HIRATA Akimasa)  (00335374)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授    (13903)	