

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04039

研究課題名（和文）超高解像度人体モデルと大規模解析に基づく準ミリ波・ミリ波帯人体ばく露の安全性評価

研究課題名（英文）Safety evaluation of human exposure using large-scale analysis based on ultra-high resolution body model in quasi-millimeter and millimeter wave bands

研究代表者

田口 健治（Taguchi, Kenji）

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：60435485

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超高解像度化技術を応用した解剖学に基づく高精細人体数値モデルを開発し、並列型スーパーコンピュータと超大規模電磁界解析技術の有機的な結合により、従来困難であった準ミリ波・ミリ波帯における高精度な人体電磁ばく露評価を実現した。具体的な局所ばく露におけるAPD評価及び全身ばく露における全身平均SAR評価により、本周波数帯における皮膚モデリングの重要性と皮膚厚みが評価指針に与える定量的な影響を初めて明らかにした。これらは次世代無線通信の国際電波防護ガイドライン改訂のための科学的根拠に基づく重要な知見及びデータである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超高解像度化技術を応用した解剖学に基づく高精細人体数値モデルと大規模解析技術により、これまで数値解析が困難であった準ミリ波・ミリ波帯において体温上昇と関係が深い人体局所及び全身の電磁吸収解析を実現し、具体的な人体安全性の評価を世界に先駆けて実施したところに学術的意義がある。本研究により得られた知見及び数値データは、次世代無線通信の国際電波防護ガイドライン策定及び改訂のために有用であり、直接的には人体の安全性、間接的には通信速度の向上に大きく寄与出来ることが社会的意義となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the exposure evaluation of human body for electromagnetic fields with highly accurate in the quasi-millimeter wave and millimeter wave bands, which has been difficult in the past, by organically combining ultra-high resolution numerical models of the human body based on anatomy using high-resolution technology, and the large-scale electromagnetic field analysis technology using a parallel supercomputer. The importance of skin modeling and the quantitative influence of skin thickness on the evaluation guidelines in this frequency band are clarified for the first time through the evaluation of APD for local exposure and the whole-body average SAR for whole-body exposure. These are important scientific knowledge and data for the revision of international radio protection guidelines for next-generation wireless communications.

研究分野：計算電磁気学

キーワード：準ミリ波帯 ミリ波帯 超高解像度人体ボクセルモデル 人体ばく露 安全性評価 国際標準化 SAR APD

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

日本では、2020年に都市部を中心に6GHz未満のsub6帯、28GHz準ミリ波帯を用いた第5世代移動通信サービスが開始された。更に、次世代となる6G移動通信システムでは、国際電気通信連合(ITU)での議論に基づき国内でも300GHz周辺のミリ波帯が候補に挙げられている。一般的に高周波電磁界における人体の影響は電力吸収に起因する熱効果だとされているが(図1)、6GHz以上の周波数帯では人体表面の皮膚あるいは皮下組織近傍の加熱が支配的であるとされており適切な基準値策定が肝要となる(図2)。この状況に対応するため、世界保健機関(WHO)が推奨する国際規格である国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)および米国電気電子学会(IEEE)は、6GHz以上の高周波に対応する人体防護の最新ガイドラインをそれぞれ2020年3月、2019年10月に発布した。

これらの国際規格では、皮膚近傍における電力吸収が生体効果に関連することから、局所ばく露については表面温度上昇と密接に関連のある単位面積あたりの吸収電力である Absorbed Power Density (APD) が新たに導入された。しかし、APD 評価に関する先行研究の多くは簡易な1次元解析による物理的検討が殆どであり、解剖学に基づく詳細な人体数値モデルを用いた解析例は少ない。特に、局所的なばく露ではなく人体のより広い領域が電波に晒された際の安全性の検討はまだ殆ど行われていない。更に、高周波化による体内波長の短縮に伴い、高精度なばく露解析を行うには特に人体皮膚表面について平滑かつ皮膚厚みを精巧に再現した人体数値モデルの必要性が高まっている。

今後、ICNIRP2020を実機の安全性評価に適用するにあたり、引き続き更なる科学的根拠による知見に基づき、国際標準化のために必要なデータの取得が求められている。

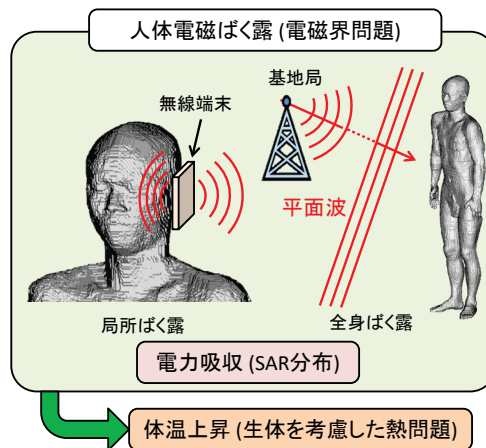


図1 高周波電磁界による人体の影響

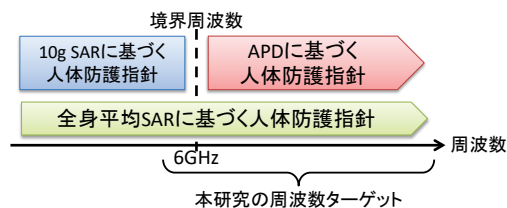


図2 本研究の周波数ターゲット

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が保有する超高解像度化技術を応用した解剖学に基づく高精細人体数値モデルと大規模な電磁界解析により、従来困難であった準ミリ波・ミリ波帯における人体電磁ばく露に対する評価指針との関連性を明らかにし、次世代無線通信の国際電波防護ガイドライン策定及び改訂に貢献することを目的としている。特に、安全性を考慮した最大許容送信電力を明確にすることで受信端末及び基地局を含めた通信システム設計の簡易化を促進するなど、産業界への波及効果も期待できる。

3. 研究の方法

研究代表者はこれまで、FDTD法を用いた大規模電磁界解析における数値安定性、精度並びに高速計算を実現するための手法開発を行ってきた。また、2016年よりIEEE規格団体の小委員会より中間周波数帯をはじめとした電磁界の安全性に関わる電磁界と熱の数値計算に従事し、電磁界に関する生体安全性評価技術についても実績を積み重ねてきた。更に、2017-2020年度の総務省委託研究においてはボクセルモデルの超高解像度化及び組織厚みコントロールする基本技術を確立している。

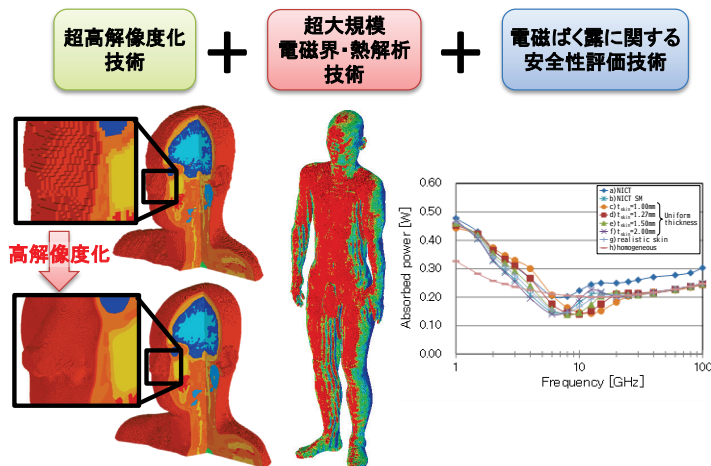


図3 研究の方法

本研究では、これまで開発してきたこれら高解像度技術、大規模電磁界解析技術、並びに電磁界に関する生体安全性評価技術を有機的に結合することにより、これまで困難とされてきた準ミリ波・ミリ波帯における詳細かつ高精度な人体ばく露評価解析を実現する。

電磁界解析手法はFDTD法を用いる。本手法は解析空間全体を直方体セルに分割して各セルへ割り当てられた電磁界成分を中心差分に基づき時間軸に沿って逐次計算する時間領域型の手法である。また、連立方程式を解く必要が無いため大規模計算においても常に安定して解を得ることが可能である。不均一かつ多媒質な人体ばく露評価に非常に適した手法であり、並列型スーパーコンピュータとの併用により具体的な準ミリ波・ミリ波帯の大規模ばく露評価を実現できる唯一の解析手法である。

4. 研究成果

(1) 新並列型ベクトルスパコン用の超大規模ばく露解析プログラム開発

準ミリ波・ミリ波帯解析では高分解能を維持した超大規模計算となるため、ベクトル型スーパーコンピュータを用いた計算が効果的である。本計算には8個のベクトルコアと広帯域HBM2メモリで構成されたPCI-Eカードを大量に搭載した新並列型ベクトルスパコン(東北大学スーパーコンピュータSX-Aurora)を用いる。本スパコンの潜在能力を引き出すためMPI、ベクトル指示文を用いてプログラムの改良を行った。

(2) 準ミリ波・ミリ波解析のための皮膚厚みを考慮した超高解像度人体数値モデルの開発

本周波数帯では、従来の無線周波数と比較して周波数が高くなる。更に、人体組織導電率の周波数依存性との相乗作用が加わることで体内の波長が著しく短縮される。不均一媒質に対する電磁界解析では、FDTD法に代表される空間分割型解法が用いられるが、解析精度を担保するには媒質内波長に対する十分な空間分解能を確保する必要がある。

本研究では、情報通信研究機構から提供されている日本人数値モデルTaroをベースに準ミリ波・ミリ波解析に耐えうる超高解像度人体数値ボクセルモデルを構築した。その際、皮膚厚みコントロール技術を活用して皮膚厚みが異なる複数のモデルを作成している。図3に超高解像度人体モデルの例を示す。ここで、a)は従来のオリジナルモデルを単純に細分化したモデル、それ以外はモデル平滑化及び高解像度化を施したモデルであり、b)はオリジナルモデルから皮膚厚みを変更しないモデル、c)は皮膚厚みを任意の均一厚みに調整したモデル、d)は部位毎に異なる皮膚厚みを考慮したモデルとなっている。尚、例ではモデルの差が明確になるように頭部部分のみを示しているがモデリングは全身を対象に行っている。これらのモデルにより初めて準ミリ波・ミリ波帯の高精度解析が可能となる。

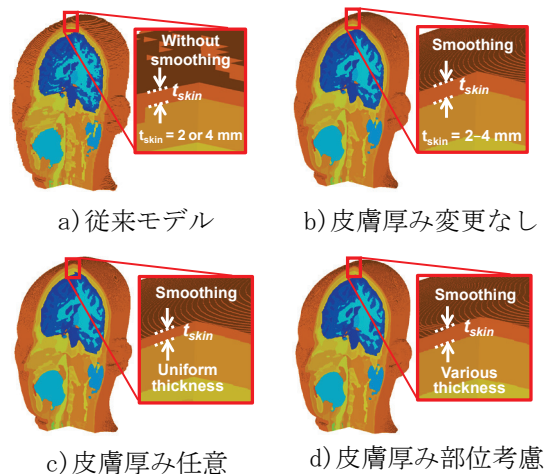


図3 研究の方法

(3) 頭部における局所ばく露評価

超解像度頭部モデルと超大規模ばく露解析プログラムを用いて、平面波による遠方界ばく露、半波長ダイポールによる近傍界ばく露を想定した頭部ばく露評価を行った。具体的には、1GHz~100GHzの広範囲周波数における異なる皮膚厚さモデルの総吸収電力(TAP)、吸収電力密度(APD)の詳細評価を行い、本周波数帯における皮膚厚みに対するばらつきを検証した。図4及び図5に解析結果の一例を示す。ここで、a)はオリジナルモデル、b)はa)に平滑化のみを施したモデル、c)-f)は一様皮膚厚みモデル、g)は部位毎に異なる皮膚厚みを考慮したリアルモデル、h)は全て

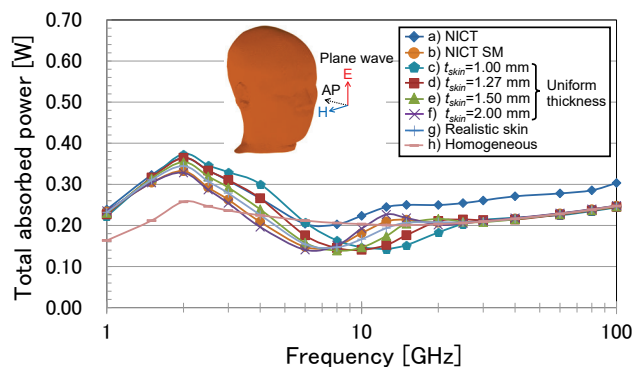


図4 頭部局所ばく露における正面平面波入射に対する総吸収電力の周波数特性

が皮膚組織で構成された一様媒質モデルであり、スムージングのみが施されている。

本解析の結果として、i) 表面平滑化を行わない従来モデルでは平滑化モデルよりも高い TAP を示すこと、ii) 各部位の現実的な表皮厚さを考慮したモデルにおいては強い定在波が抑制されるため周波数領域の TAP 変化量が他モデルより小さくなること、iii) 皮膚厚みの違いによる APD 最大変動割合は平均面積 4cm^2 及び 1cm^2 でそれぞれ 20% 及び 10% 以内になることなどが明らかになった。

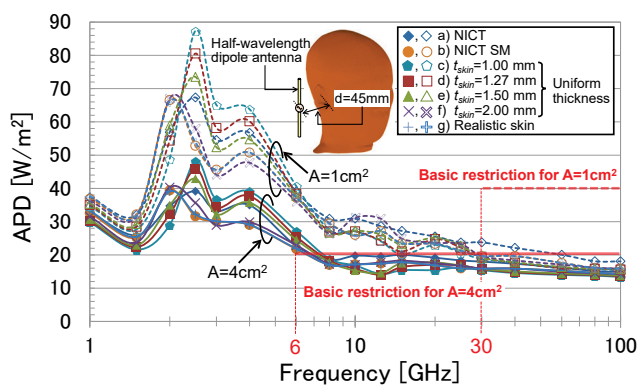


図5 頭部局所ばく露における1/2波長ダイポールアンテナに対するAPDの周波数特性例

(4) 全身ばく露評価

超解像度頭部モデルと超大規模ばく露解析プログラムを用いて、平面波による遠方界ばく露を想定した全身ばく露評価を行った。具体的には、国際ガイドラインにおける外部電力密度の限界値を提供するため $1\text{GHz} \sim 100\text{GHz}$ の広範囲周波数における全身平均比吸収率(WBA-SAR)の周波数依存性を世界で初めて計算した。図6及び図7解析例を示す。ここで、Model I はオリジナルモデルに平滑化のみ施したモデル、Model II は一様皮膚厚みモデルであり皮膚厚みは a, b 及び c でそれぞれ 1.0mm , 1.5mm 及び 2.0mm である。Model III は皮膚総重量が 2.4kg と等しくなる皮膚厚みを採用したモデルである。Model IV は全身の部位毎に異なる皮膚厚みを考慮したリアルモデルである。Model V はオリジナルモデルを単純分割しモデルとなっている。

本解析の結果として、皮膚の厚さは全身電力吸収に影響を及ぼし、そのWBA-SAR値は $1 \sim 10\text{GHz}$ 程度では体内へ侵入深さ及びその内部電界強度、 $10 \sim 20\text{GHz}$ 程度では皮膚近傍の共振吸収に依存するピーク周波数に影響を与えることが確認された。更に、約 20GHz を越えると皮膚表面における反射が支配的になり、その値は皮膚厚みに依存しないことが示された。また、表面平滑化なし及びありの人体モデルの結果を比較したところ、平滑化なしモデルはありモデルと比較してWBA-SARが $10\% \sim 17\%$ 程度高い値を示し、局所ばく露評価と同様に全身ばく露評価においても皮膚平滑化モデル重要性が確認された。

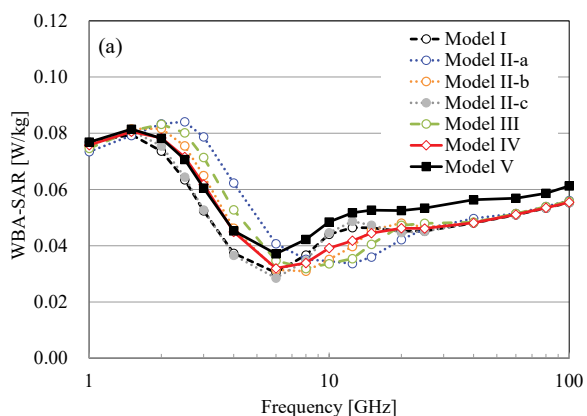


図7 全身ばく露における全身平均SARの周波数特性

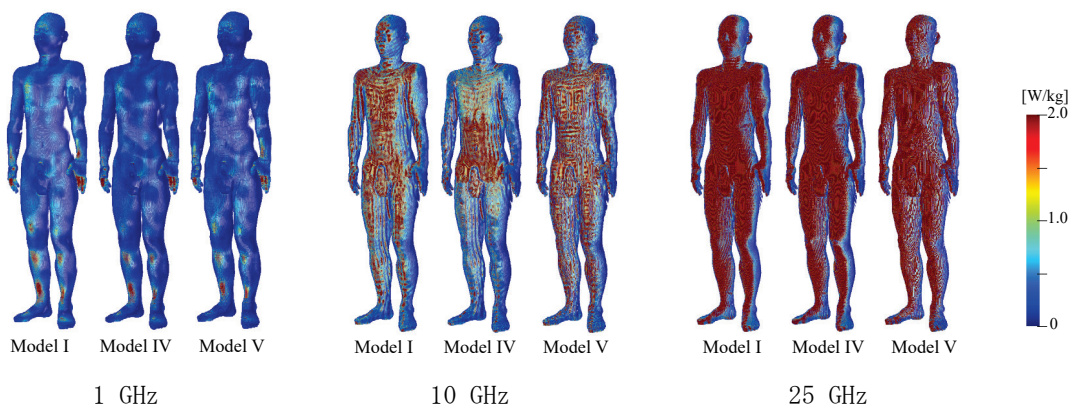


図8 全身ばく露における人体表面SAR分布

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 0件）

1. 著者名 尾崎龍之介, 日景隆, 田口健治, 柏達也, 井上都, 増田宏, 石竹達也	4. 巻 vol. 142
2. 論文標題 60GHz帯電波に対する生体影響の熱閾値評価のための空間合成型ばく露装置開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 pp. 250-256
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, S. Kodera A. Hirata, T. Kashiwa	4. 巻 vol. 6
2. 論文標題 Computation of Absorbed Power Densities in High-Resolution Head Models by Considering Skin Thickness in Quasi-Millimeter and Millimeter Wave Bands	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology	6. 最初と最後の頁 pp. 516-523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JERM.2022.3203576	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 S. Kodera, N. Miura, Y. Diao, M. Inoue, T. Hikage, K. Taguchi, H. Masuda, and A. Hirata	4. 巻 vol. 7
2. 論文標題 Whole-Body Exposure System Using Horn Antennas With Dielectric Lens at 28 GHz	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology	6. 最初と最後の頁 pp. 67-72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JERM.2022.3218812	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 K. Li, S. Kodera, D. Poljak, Y. Diao, K. Sasaki, A. Susnjara, A. Prokop, K. Taguchi, J. Xi, S. Zhang, M. Yao, G. Sacco, M. Zhadobov, W. E. Hajj, and A. Hirata	4. 巻 vol. 11
2. 論文標題 Calculated Epithelial/Absorbed Power Density for Exposure From Antennas at 10-90 GHz: Intercomparison Study Using a Planar Skin Model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 pp. 7420-7435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3238582	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

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 奥野紘平, 田口健治, 柏達也
2. 発表標題 RT法を用いた準ミリ波・ミリ波帯全身ばく露解析に関する一検討
3. 学会等名 令和3年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kodera, K. Taguchi, and A. Hirata
2. 発表標題 Computational Study on Temperature Elevation in Realistic Human Model for Whole-body Exposure
3. 学会等名 URSI GASS 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小寺紗千子, 田口健治, 平田晃正
2. 発表標題 全身ばく露における温度上昇特性に対する皮膚モデリングの影響
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 2021年

〔図書〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------