

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04000

研究課題名（和文）統計計算科学によるミリ波帯無線システム安全性の国際標準化

研究課題名（英文）International Standardization for Millimeter Wave Band Wireless System by Statistical and Computational Method

研究代表者

小寺 紗千子 (Kodera, Sachiko)

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：40874219

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：ミリ波帯におけるばく露量の変動評価を目的とし、温熱生理応答計算モデルを用いてばく露量とそれに伴う温度上昇までを含めた統合的検討を行った。まず、機械学習により、被験者のMRIから直接組織の物理定数を推定する非セグメンテーションモデルを開発、物理定数の個々人間のばらつきを考慮可能とした。次に、ばく露実験で得られた温度上昇と皮膚血流の関係から温熱生理応答モデルの高精度化を行い、物理定数の個々人間のばらつきを考慮することで、ばく露量、温度上昇ともに変動が小さくなることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電波防護に関する国際ガイドラインでは6 GHz超における科学的根拠が不足しており、数値計算にもとづき概算されたものである。本研究で開発した非セグメンテーションモデルにより、組織の水分含有率などに基づく電気・熱定数の個々人間のばらつきを考慮することを可能にした。さらに、これらを考慮することにより、6 GHz超における吸収電力量、温度上昇の個人間の変動は小さくなることなどを明らかにした。本これらの知見は、国際ガイドラインにおける、生物学的変動や環境要因などの不確かさを考慮した低減係数のより詳細な検討を行う際に有効な手法になるといえる。

研究成果の概要（英文）：To evaluate the variation of exposure dose at millimeter wave, we investigated the effect of individual variability on exposure dose and associated temperature rise. First, we developed a free-segmentation model to estimate the dielectric and thermal parameters of tissues directly from the MR images by using machine learning without tissue segmentation. Next, we improved the thermoregulation model based on the relationship between local temperature rise and blood perfusion change in skin tissue. The computed data agreed well with the measured data. Finally, we computed the power absorption and temperature rise using the proposed the free-segmentation and the segmentation-based models. The free-segmentation models reduced the individual differences in power absorption and temperature rise.

研究分野：生体電磁

キーワード：人体ばく露 国際標準化 温度上昇 温熱生理応答

1. 研究開始当初の背景

すでに一部運用が開始された第5世代移動体通信システム(5G)の利用周波数帯は、従来の無線周波数帯と同程度の4GHzからミリ波帯(特に28~80GHz)までと多岐にわたる。WHOでは、電波防護に関する国際ガイドラインとして、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)ガイドライン[1]、IEEE規格[2]を挙げている。5G利用における問題点として、3~10GHz以上の周波数帯における科学的根拠の不足が挙げられる。電波の安全性の評価指標は、その特性により遷移周波数(3~10GHz)を境に異なる。遷移周波数以下では、比吸収率(SAR)が表面および脳内の温度上昇との相関が高いことから評価指標として使用されており、その安全性についても担保されている。しかしながら、遷移周波数以上では評価指標の根拠が十分でない。2019年、2020年に国際ガイドラインは改訂され、吸収電力密度(APD)が安全指標として新たに導入、これまでガイドライン間で3GHz、10GHzと異なっていた遷移周波数も6GHzに統一された。しかしながら、遷移周波数以上における安全性に関する科学的根拠は未だ不足していること、個人や環境因子によるばらつきは明らかになっていない、等の課題が残る。

研究代表者らは、これまでに複合物理解析とそれに伴う温熱調整反応を統合した温度上昇推定計算手法を考案、さらに動物実験で得られた知見に基づき、モデルの高精度化を行ってきた[3](図1)。この技術を人体組織(主に皮膚)に適用することで、高周波ばく露で電波吸収が集中する皮膚組織における温熱調整機能のばらつきを考慮した安全性の検討が可能となるはずである。

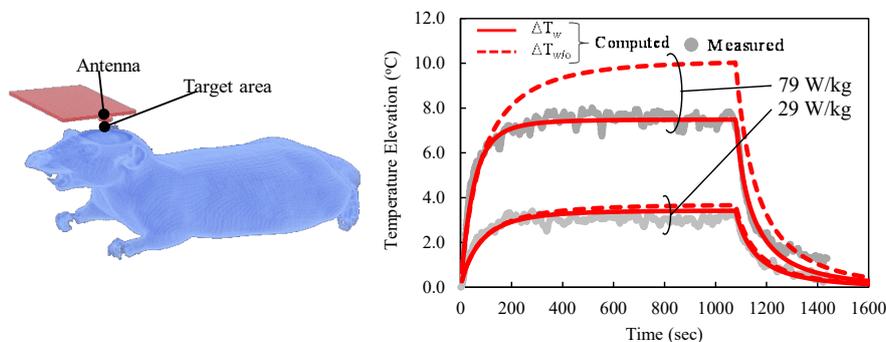


図1 ラット脳表層における温度変化の実測値と計算値の比較。計算値は、温熱生理応答の考慮なし($\Delta T_{w/o}$)とあり(ΔT_w)を示す。温度上昇に伴う血流変化を数値モデル化し、温度解析に組み込んだもの(ΔT_w)のモデルを実験値から構築し、脳温度変化を高精度に推定することが可能。

2. 研究の目的

本研究は、大規模な電磁界・熱の複合物理数値解析により、従来困難であった6GHz以上における電磁ばく露に対する吸収電力と温度上昇との関連性を明らかにすることを目的とし、複数の人体形状、アンテナ種類を考慮した安全性評価を実施した。具体的には、ミリ波ばく露における吸収電力量、それに伴う温度上昇の個人間のばらつきを評価可能な手法を開発、有効性を示したうえで、その変動量について評価した。

3. 研究の方法

(1) 数値人体モデルの構築

従来の数値ドシメトリ解析では、磁気共鳴画像(MRI)のT1、T2強調画像に基づき、各組織にセグメンテーションすることで、その物理特性を考慮する数値人体モデル(Segmentation model)が用いられている。この手法では、同一組織では、すべて単一の物理定数が用いられる。一方、これまでに、機械学習を用いることによって、セグメンテーションを介することなく、T1、T2強調画像から直接、誘電率や導電率、組織密度を推定する手法を開発してきた[4]。この手法を応用することで、図2に示すような、比熱、代謝、血流定数、熱伝導率などの熱特性を推定する手法を開発した(Segmentation-free model)。セグメンテーションを介することなく直接、電気定数や熱定数を推定することで、同一組織においても、水分含有率の違いなどに基づくT1、T2強調画像の濃淡によって異なる物理定数を割り当てることが可能となり、個人間のばらつきが考慮できる特徴がある。また、比較のため従来の Segmentation model についても同様に構築した。なお、各人体モデルのMRI画像は、NAMIC: Brain Multimodality (<http://hdl.handle.net/1926/1687>) データセットのものを用いた($n=8$)。開発した手法により構築したモデルを図3に示す。

(2) 解析手法

電磁界解析にはFDTD(Finite-Difference Time-Domain method)法を使用し、吸収境界条件は10層のCPML(Convolutional Perfectly Matched Layer)を適用した。また、電力吸収による温度上昇は生

体熱輸送方程式に基づき計算した。また、温度上昇に伴う血流変化も考慮することで計算を行った。また、電力吸収の評価指標として、国際ガイドライン (ICNIRP 2020、IEEE C95.1 2019) における局所ばく露の評価指標に従い、6 GHz 以下では局所 10g 平均 SAR を、6 GHz 超では APD を用いた。また、APD の平均化面積は、国際ガイドライン (ICNIRP 2020、IEEE C95.1 2019) に従い、 4cm^2 とした。

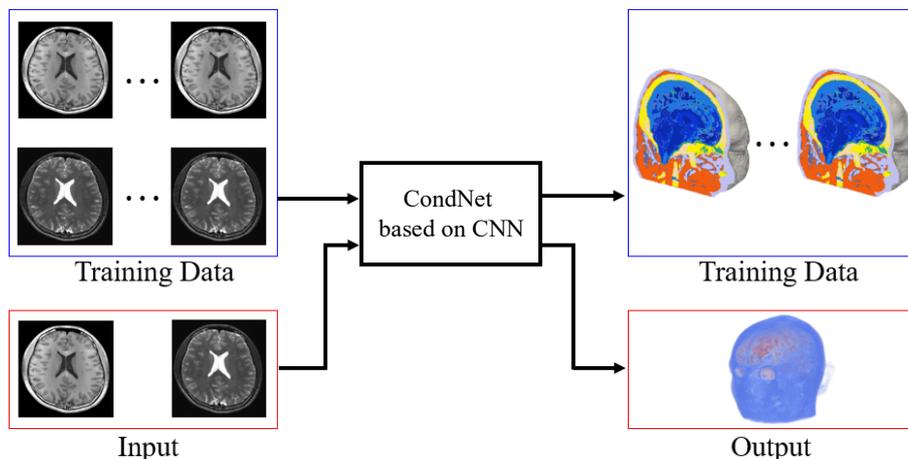


図2 Segmentation-free モデルの生成アルゴリズム

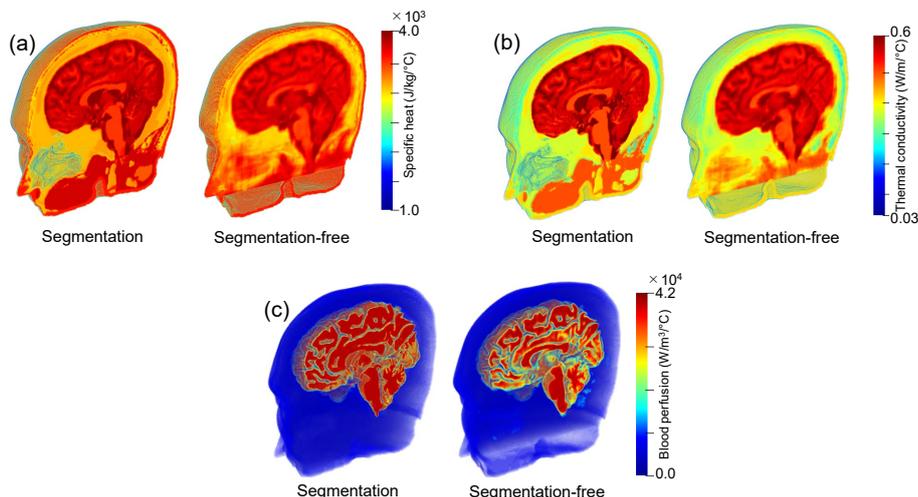


図3 Segmentation モデルと Segmentation-free モデルの比較。(a)比熱、(b)熱伝導率、(c)血流定数を示している。

(2) ばく露実験実測値

温熱調整機能モデルの高精度化を目的に、2つのレンズアンテナから構成されるばく露装置[5]によるばく露実験から得られた測定値を用いた。ばく露実験の詳細は以下のとおりである。被験者は成人3名(年齢: 42.7 ± 12.5 歳, 性別: 女性)とし、被験者の背部表面がアンテナ前方 500 mm に位置するよう、座位安静にてばく露実験を行い、背部皮膚温度、および深部体温の代替指標とされている鼓膜温、および皮膚血流量を測定した。レンズアンテナは、ホーンアンテナと超高分子量ポリエチレン製誘電体レンズで構成されており、信号発生器 (JOGSAG1401, SAF Tehnika, Latvia) で生成した 28 GHz 正弦波が電力増幅器 (AMP6034, Exodus Advanced Communications, United States)、レンズアンテナを介して背部に照射される。皮膚温度測定には、赤外線サーモカメラ (FLIR 社製, T530)、鼓膜温度測定には耳赤外線体温計 (CE サーモ, ニプロ) を用い、背部皮膚温度は、 $16\text{cm} \times 16\text{cm}$ 領域平均値で評価した。

4. 研究成果

(1) ばく露実験に伴う温度上昇解析の有効性の検証

ばく露実験実測値と温熱調整機能を考慮した温度上昇解析により推定した背部皮膚温度上昇と、深部体温の比較を図4に示す。図4(a)より、ばく露開始10分間では実測値と良い一致が得られたが、10分以降では、実測値の方が最大で10.9%高くなったものの、被験者のばらつきの範囲内で一致した。図4(b)より、解析結果は $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 程度の上昇であったのに対し、実測値では有意な上昇は見られなかった。これは、計算ではばく露実験において生じる椅座位安静による代謝の低下を模擬できていないこと、深部体温の測定分解能が $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ であることによる。以上の結

果より、温熱調整機能を考慮した温度上昇解析の有効性を示した。

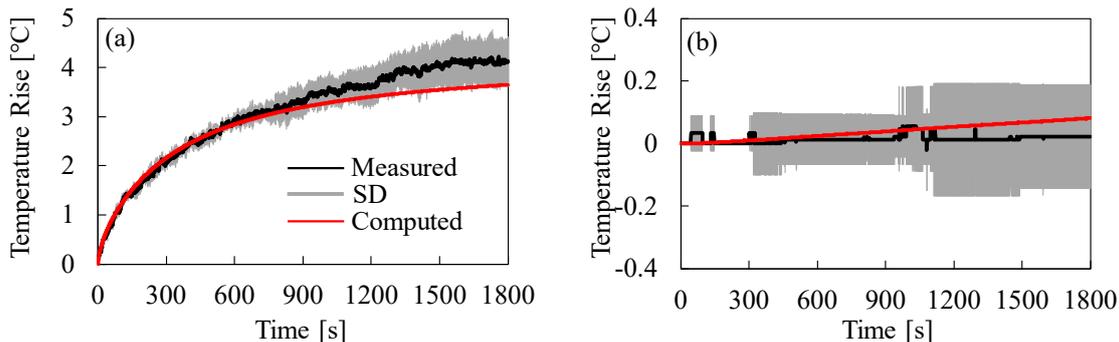


図4 実測値と解析値の比較。(a)背部皮膚温度、(b)深部体温上昇図中のばらつき範囲は、実測値における標準偏差を示す。

(2) Segmentation-free モデルを用いた電力吸収量、温度上昇解析

一例として、ダイポールアンテナを波源とした場合における SAR 分布、温度上昇分布を図4に示す。標的は各頭部モデルのこめかみ部分とし、アンテナとの距離は 15 mm とした。図5より、Segmentation-free モデルにおける SAR 分布は、Segmentation モデルよりも滑らかに分布していることがわかる。これは、図3に示したように、異なる組織の境界において、Segmentation-free モデルでは物理定数が滑らかに変化しているため、組織境界間での数値ドシメトリにおけるアーチファクトが軽減されたためであるといえる。この傾向は、電波の浸透深さが大きい低周波数でより顕著になっている。同様に、温度上昇分布についても、Segmentation-free モデルの方がより滑らかに分布していることがわかる。

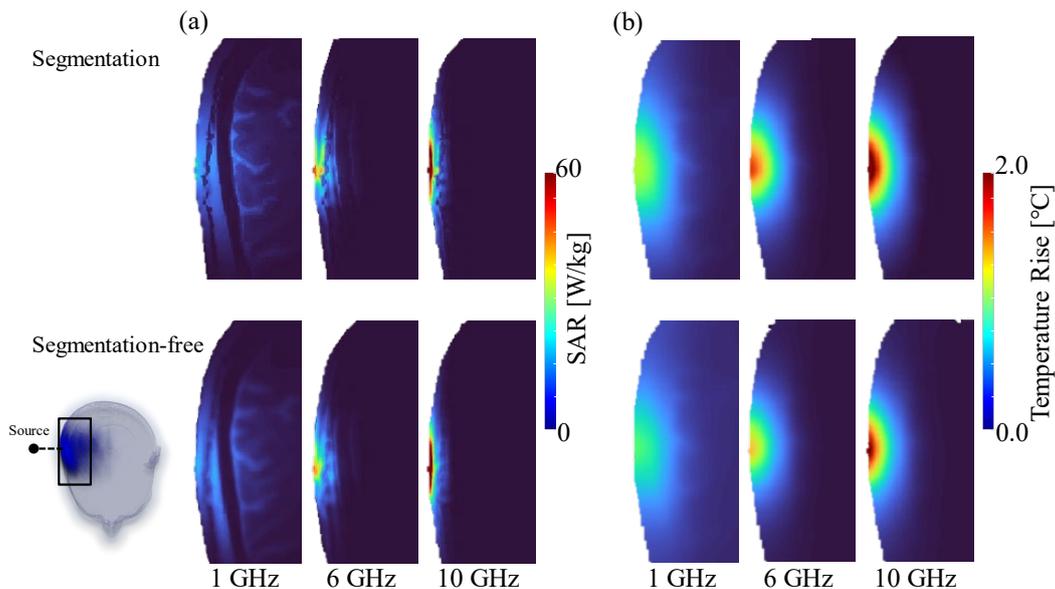


図5 Segmentation モデルおよび Segmentation-free モデルにおける(a) SAR 分布および(b) 温度上昇分布。アンテナ入力電力は 1 W とした。

(3) 個々人のばらつきを考慮した電力吸収量、温度上昇の統計的評価

図6に、Segmentation モデルおよび Segmentation-free モデルにおける 10gSAR、APD および最大温度上昇値を示す。図6(a)より、Segmentation モデルおよび Segmentation-free モデル間での誤差は最大で 14.5 %であり、平均値もおおむね一致していることがわかる。また、図6(b)より、異なる物理定数モデル間における最大温度上昇の平均値はおおむね一致し、モデル間の誤差は最大で 7.0 %となった。以上より、異なる手法を用いたモデル間において、10gSAR、APD および最大温度上昇値はそれぞれよく一致しており、Segmentation-free モデルを用いた手法の有効性が示唆された。また、被験者間の変動は、1 GHz を除いて、Segmentation-free モデルを用いたほうが、一般的に小さい傾向を示した。

図7に、加温係数の変動を示す。加温係数とは、単位電力吸収評価指標あたりの最大温度上昇

の比で表されるものであり、電波ばく露における熱作用を評価する際に、よく使われる指標である。図7より、Segmentationモデルと Segmentation-freeモデルの最大誤差は15.1%となり、加温係数の平均は両モデル間でよく一致した傾向をとった。また、加温係数も同様に、1 GHzを除き、被験者間の変動は、1 GHzを除いて、Segmentation-freeモデルを用いたほうが、一般的に小さい傾向を示した。

以上より、本研究で開発した被験者のMRIからセグメンテーションを介することなく、直接組織の物理定数を推定する Segmentation-freeモデルを用いることで、人体組織の水分含有率の変動を考慮可能な解析手法の有効性を示した。さらにそれらを考慮することにより、ばく露量および最大温度上昇における個々人間の変動が小さくなることを示唆した。これらの知見は、国際ガイドラインにおける、生物学的変動や環境要因などの不確かさを考慮した低減係数のより詳細な検討を行う際に有効な手法になるといえる。

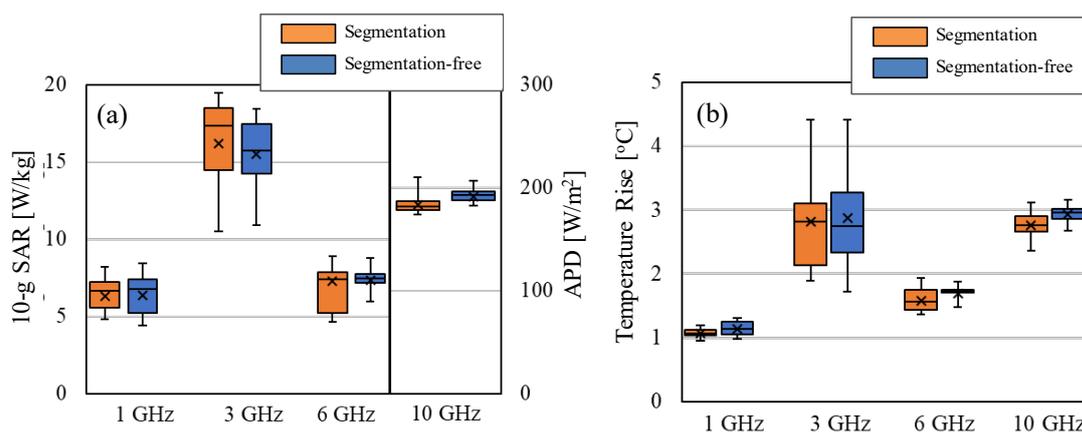


図6 Segmentationモデルおよび Segmentation-freeモデルにおける(a) ピーク 10 g SAR (> 6 GHz) とピーク APD (>6 GHz)、(b) 最大温度上昇。アンテナ入力電極は 1 W とした。

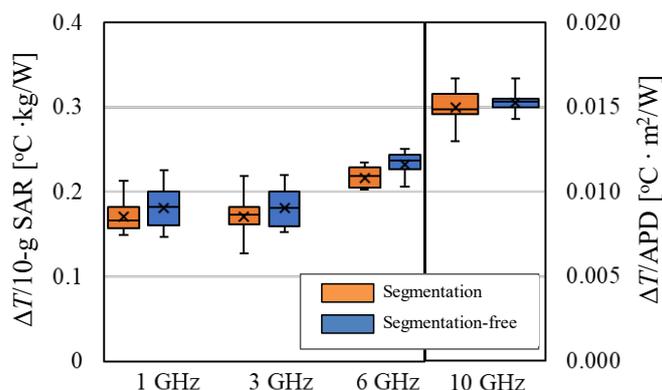


図7 Segmentationモデルおよび Segmentation-freeモデルにおける加温係数

参考文献

- [1] ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz),” *Health Phys.*, vol. 118, no. 5, pp. 483–524, May 2020.
- [2] IEEE C95.1, “IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz,” *IEEE Std*, 2019.
- [3] S. Kodera, R. Morimoto, A. Hirata, H. Masuda, T. Arima, and S. Watanabe, “Accurate multi-physics analysis of temperature elevation in rat brain for localized microwave exposure (in Japanese),” *Inst. Electron. Inf. Commun. Eng.*, vol. J100-C, no. 5, pp. 200–207, 2017.
- [4] E. A. Rashed, J. Gomez-Tames, and A. Hirata, “Deep Learning-Based Development of Personalized Human Head Model with Non-Uniform Conductivity for Brain Stimulation,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 39, no. 7, pp. 2351–2362, 2020.
- [5] S. Kodera, N. Miura, Y. Diao, M. Inoue, T. Hikage, K. Taguchi, H. Masuda, and A. Hirata, “Whole-Body Exposure System Using Horn Antennas with Dielectric Lens at 28 GHz,” *IEEE J. Electromagn. RF Microwaves Med. Biol.*, vol. 7, no. 1, pp. 65–72, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Kodera Sachiko, Taguchi Kenji, Diao Yinliang, Kashiwa Tatsuya, Hirata Akimasa	4. 巻 72
2. 論文標題 Computation of Whole-Body Average SAR in Realistic Human Models From 1 to 100 GHz	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques	6. 最初と最後の頁 91 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMTT.2023.3289562	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 木下 晃太郎、増田 宏、小寺 紗千子	4. 巻 J107-C
2. 論文標題 28GHz人体背部ばく露による体温上昇解析	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C電子情報通信学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 225 ~ 227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transelej.2023STF0001	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 Kodera Sachiko, Miura Norika, Diao Yinliang, Inoue Miyako, Hikage Takashi, Taguchi Kenji, Masuda Hiroshi, Hirata Akimasa	4. 巻 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 65 ~ 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

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 3件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 S. Kodera, E. A. Rashed, and A. Hirata
2. 発表標題 Evaluation of temperature rise using the human models with non-uniform thermal parameters
3. 学会等名 BioEM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Miura, S. Kodera, J. Higashiyama T. Iyama, Y. Suzuki, A. Hirata
2. 発表標題 Assessment of head exposure at multiple frequencies below and above 6 GHz
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Yokohama, Japan (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新井紀香, 小寺紗千子, Ynliang Diao, Kun Li, 平田晃正
2. 発表標題 吸収電力密度におけるアンテナモデル間相互結合に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三浦乃里佳, 小寺紗千子, 井山隆弘, 東山潤司, 鈴木恭典, 平田晃正
2. 発表標題 6GHz以下および以上の複数周波数ばく露における適合性評価の検討
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 2023年

1. 発表者名 S. Kodera, K. Li, F. Kaburcuk
2. 発表標題 Recent advances and challenges in computational dosimetry above 6 GHz
3. 学会等名 IEEE ICES Workshop on Computational Bioelectromagnetics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 Intercomparison of Spatially Averaged Absorbed Power Density above 10 GHz
3. 学会等名 URSI GASS 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Inoue, S. Matsufuji, E. Ijima, T. Ishitake, S. Kodera, A. Hirata, A. Matsumoto, and H. Masuda
2. 発表標題 Temperature elevation during back skin exposure to 28 GHz wave in human volunteer
3. 学会等名 URSI GASS 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Hikage, H. Masuda, S. Kodera, and A. Hirata
2. 発表標題 Novel whole-body and localized exposure systems to investigate human systems
3. 学会等名 URSI GASS 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木下 晃太郎, 小寺 紗千子, 増田 宏, 平田 晃正
2. 発表標題 ミリ波ばく露における皮膚温度上昇評価
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 2023年

1. 発表者名 2. 新井紀香, 小寺紗千子, 上原信太郎, 湯浅明子, 牛澤一樹, 大高洋平, 日景 隆, 平田晃正
2. 発表標題 28 GHz局所ばく露における知覚温度上昇の検討
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 2023年

1. 発表者名 平田晃正, 小寺紗千子, ラシド エッサム, 田村 学, 本谷 秀堅
2. 発表標題 機械学習を用いたパーソナライズ脳刺激における電界推定
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 加藤将馬, 小寺 紗千子, 平田晃正
2. 発表標題 パッチアレイアンテナを用いた人体背部ばく露装置の開発
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 億田龍太郎, 小寺 紗千子, 平田晃正
2. 発表標題 超高周波全身電波ばく露における人体深部温度の外気温依存性
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 南元佑太, 小寺紗千子, 井山隆弘, 東山潤司, 鈴木恭宜, 平田晃正
2. 発表標題 ミリ波帯域を想定した複数周波数電波における適合性評価の検討
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 2023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
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)	
研究分担者	増田 宏 (Masuda Hiroshi) (10321861)	久留米大学・医学部・助教 (37104)	

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		
中国	South China Agricultural University		