

60GHz 無線ボディエリアネットワークの動的環境における設計および電磁両立特性評価

代表研究者

李 鯤

香川大学 創造工学部 情報通信コース 助教

1 はじめに

無線ボディエリアネットワーク (WBAN: Wireless Body Area Network) は、脳波・心電・筋電・脈波・酸素飽和度などの生理センサ、速度や加速度などの運動センサ、ドラッグデリバリーや神経刺激などの制御信号を送るネットワークであり、人体表面または内部に取り付けられるセンサ/アクチュエータノードと、情報を集約するハブノードから構成される。無線ボディエリアネットワークは IEEE802 委員会での標準化の影響もあり、近年盛んに研究されている。令和元年の情報通信審議会では、「小電力の無線システムの高度化に必要な技術的条件」のうち、「60GHz 帯の周波数の電波を使用する無線設備の高度化に向けた技術的条件」が報告され、60GHz 帯無線システムの新たな利用形態として、生体情報取得による個人健康・見守りシステムへの応用拡大が期待されている。しかしながら、標準化された IEEE802.15.6 は標準化プロセスの時間的制約から無線通信路の動的特性のモデルがないままに無線通信方式 (物理層・アクセス制御層) が決定され、また複数の物理層に共通のアクセス制御層を構築したために処理負荷が重くなり、実装上のボトルネックになってしまった結果、同標準を用いた商品は殆ど製造されていないままである。特に、60GHz 帯信号を用いたミリ波生体センサは人体が介入するため、その周辺における伝送路において大きな伝搬損失が発生するため、ウェアラブルアンテナの設計指針として RF 信号のダイナミックな伝送路特性を把握する必要がある。

本研究では、超高信頼性ウェアラブル医療機器のより安全で実用的な技術標準を構築するため、60GHz 帯における WBAN のシステム・デバイス設計手法の確立および電磁両立特性の評価を目的とした。図 1 に示すように、人体周辺におけるミリ波電波伝搬路の動的変動特性に対して、様々な場所に装着した On-Body アンテナに対する動的チャネル特性をモデル化した。提案モデルに基づいて、60GHz 帯でのウェアラブルアンテナの垂直と水平偏波に関するチャネルパラメータを抽出することによって、チャネル応答や累積分布関数などの統計特性を評価し、マルチパス・シャドウイング電波環境を克服できるミリ波アンテナの設計指針を確立した。独自に開発した伝搬解析手法と、60GHz 帯アンテナ設計および特性評価の手法を組み合わせ、動的環境における無線通信路特性の信頼できるモデルを構築するとともに、アンテナの設計および伝送方式 (物理層・アクセス制御層) を再検証して設計指針を明らかにしながら、ミリ波を用いた WBAN システムにおける無線通信路特性の改善が期待できる。

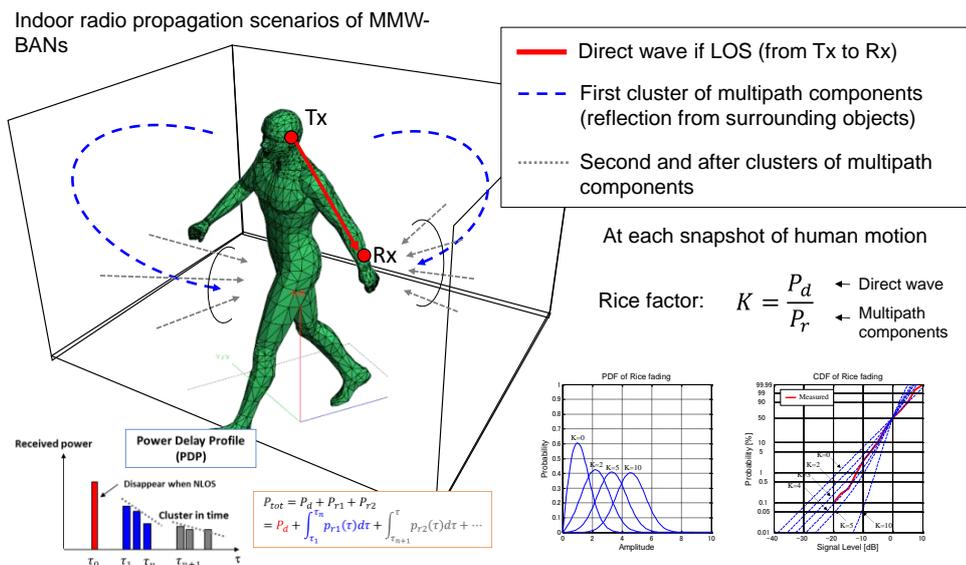


図 1 室内ミリ波 On-Body チャネル

さらに、ミリ波ばく露による人体安全性を評価するため、詳細な皮膚組織モデルに対し、独自に開発した高精度な時間領域電磁界解析技術を用い、ミリ波帯でのウェアラブルアンテナによる電波ばく露量（吸収電力密度）の大規模数値シミュレーションを行った。身に着けるミリ波アンテナによる人体への電波吸収量の評価を行うことによって、安全性ガイドラインの科学的信頼性および国際的な整合性の向上を図り、電波防護指針に基づく安全かつ健全な電波利用環境の構築に貢献できる。これにより、60GHz 無線センサデバイスが人体近傍で動作する際の無線伝送品質と人体に対する生体電磁両立特性が明らかにすることができ、次世代無線設備等の安全かつ効率的な利用を促進し、高度な医療サービスの提供を通じて高信頼性医療 IoT 社会を実現できるよう貢献する。

2 ミリ波動的 WBAN チャンネルの開発

本研究ではまず、人体動的特性を考慮したミリ波 WBAN チャンネルモデルを開発した。図 2 は、ライスファクター（K ファクター）に依存するマルチパス成分と動的な人間の腕振り動作を考慮したチャンネルモデリングの解析手法を示している [1]–[3]。ライス環境における全チャンネル応答は、以下の式で表す。

$$h_{s,c} = \sqrt{\kappa} \cdot h_d + \sum_{n=1}^N h_{nr} \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} \cos(\phi_n - \phi_0)\right\}. \quad (1)$$

$$h_d = \sqrt{\frac{XPR_d}{1 + XPR_d}} E_\theta(\theta, \phi) + \sqrt{\frac{1}{1 + XPR_d}} E_\phi(\theta, \phi). \quad (2)$$

ここでは、 κ は直接波電力とマルチパス多重波平均電力の比で定義される K ファクターを示す。 h_d は各腕振り角度 α における直接波のチャンネル応答を示している。 XPR_d は受信アンテナにおける直接入射波成分の交差偏波電力比を表している [4]。 $E_\theta(\theta, \phi)$ および $E_\phi(\theta, \phi)$ は、 θ および ϕ 成分のアンテナ素子の複素指向性を表す。人体に取り付けられた送信側から受信側への直接波が存在すると仮定し、すなわち、見通し内（LoS : Line-of-Sight）条件の場合、直接波成分には位相差が含まれない。

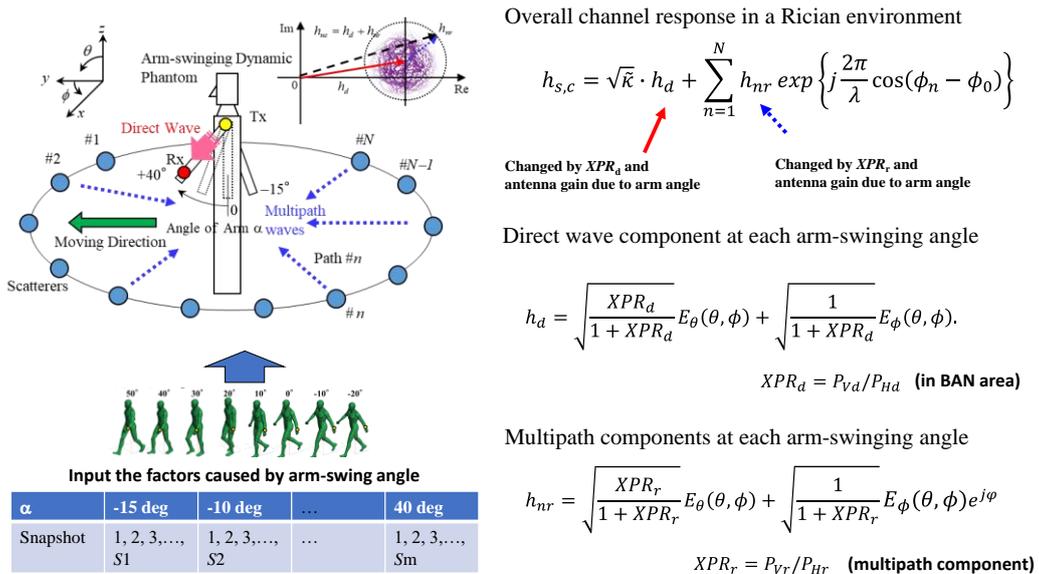


図 2 動的 0n-Body チャンネルの開発

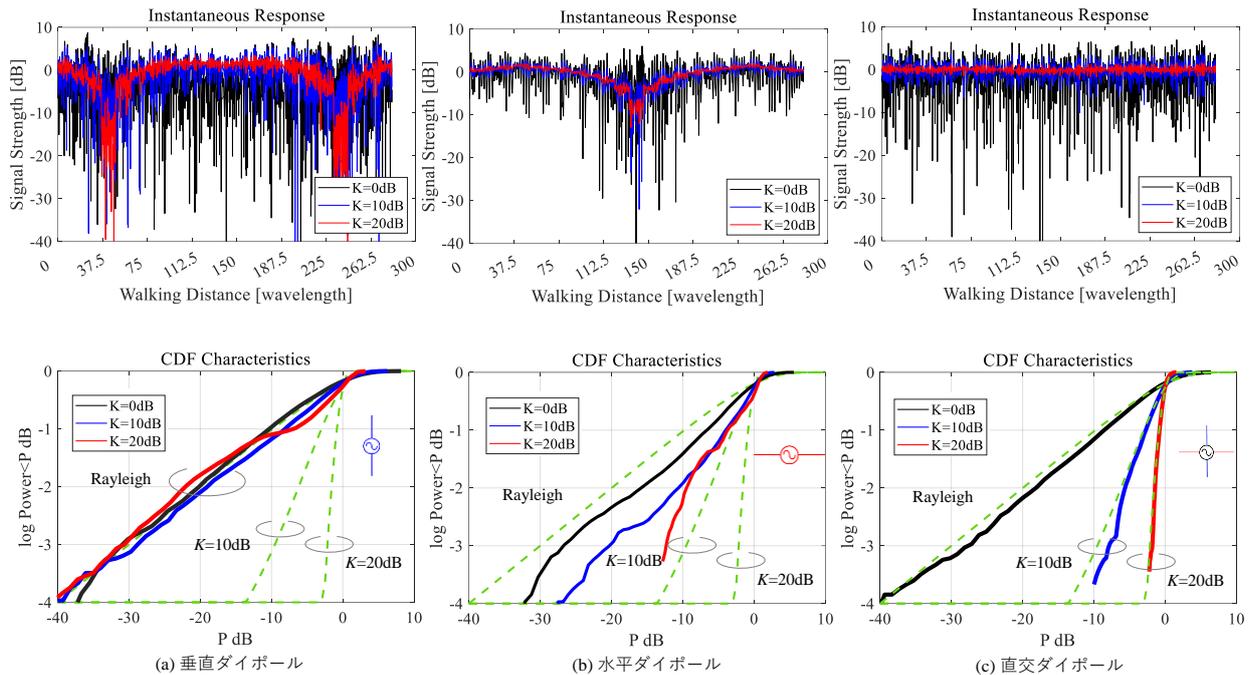


図3 瞬時値応答と累積分布 CDF

上記の式に基づいて、K ファクター、アンテナタイプや配置位置などの様々な条件下でのライス伝搬環境の瞬時チャネル応答と CDF (累積分布関数) 特性を、モンテカルロシミュレーションによって解析を行った。図 3 は、K ファクターの異なる値における 2 歩分 (つまり、ストライド長が 70 cm であり、腕振り角度が 40 度から -15 度まで変化する 1 サイクル) における直接波と多重波信号の結合結果の瞬時値を示している [5]。垂直および水平偏波の半波長ダイポールアンテナと、90 度の位相差を持つ直交ダイポールアレイ、つまり zy 平面で全方向性を持つターンスタイルアンテナの 3 種類の $0n$ -Body アンテナを比較した。XPR₀ およびアンテナの複素指向性は、電気的に大きな構造物のための積分方程式に基づいた CST Microwave Studio を用いて電磁界解析を行った。受信アンテナは腕首に近似する円柱ファントムに取り付けられている。ファントムの電気的特性は、相対誘電率が 7.98 で伝導率が 36.4 S/m であり、60 GHz における人間の皮膚の平均値を表している。図 3 を示すように、K ファクターの値が増加するに伴い、直接波と反射波の電力比が増やすため、深いヌル点が減少している。K ファクターが 10 dB を超える場合、直交偏波アンテナは腕振り角度に関係なく最も少ないヌル位置を有する。また、信号の累積分布関数 (CDF) より、直交偏波アンテナの場合、K ファクターの異なる値における CDF 曲線が理論的な曲線とよく一致していることがわかった。これは、瞬時値応答に対応しており、屋内環境でのミリ波 $0n$ -Body 伝搬特性が開発したチャネルモデルで表現できることを示唆している。一方、線形偏波アンテナの場合、腕振り角度による受信能力の比較的大きな変化により、予想するライス環境と比較して信号電力の低下が観察できる。

3 ミリ波ばく露による安全性評価

次に、ミリ波ウェアラブルアンテナの放射による人体へのばく露安全性について検討を行った。国際安全性機関は、電磁界への人体の保護に関する標準とガイドラインの見直しに共同して取り組んでいる [6]-[9]。6~300 GHz の周波数範囲では、主に温熱生理モデルから導かれる空間平均吸収電力密度 (APD: Absorbed Power Density) が基本制限値とされている [10]-[12]。しかし、人体組織内の APD の平均化方法に関しては、異なるばく露条件と数値解析手法を用いた計算が多い。したがって、本研究ではミリ波帯の異なる周波数源にさらされた人体モデル内の APD 平均値の相互比較を行った。今回訪問した IETR 研究所を含めて、11 の研究グループによるミリ波ドシメトリ解析結果の比較を行った。計算では、平面皮膚モデルを使用して、異なる数値電磁解析手法による計算結果の差異を明らかにすることを目的とした。各研究機関の数値計算方法による

空間平均 APD の偏差を評価するために、統一した皮膚モデルとアンテナモデルを使用して、10~90 GHz の範囲で皮膚表面の空間平均 APD を計算した。数値計算のばらつきを、各研究機関のシミュレーションコードと商用電磁 (EM) ソルバーを用いて比較した。

図 4 に、数値解析用皮膚とアンテナモデルを示した。10 GHz と 30 GHz の周波数では、アンテナと皮膚表面の間の分離距離は 5~15 mm の範囲で考慮した。90 GHz では、分離距離は 2~10 mm に設定され、ウェアラブルアンテナを想定した極近接のばく露条件が考慮した。ミリ波のばく露放射源として、半波長ダイポールアンテナと 4×4 ダイポールアンテナアレイが使用した。半波長ダイポールは完全電気導体としてモデル化されました。各研究機関によって 10 GHz、30 GHz、90 GHz でダイポールが設計されました。ほとんどの研究機関では、アンテナは最大限の放射電力を設定するため、アンテナの長さを共振させるように調整した。人体皮膚における吸収電力密度 APD の空間平均値の計算式は以下となる [13]-[18]。

$$sAPD = \frac{1}{A} \iint_A \operatorname{Re}(\mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \mathbf{H}^*(\mathbf{r})) \cdot d\mathbf{s}, \quad (3)$$

ここで、E と H はそれぞれ人体表面内の複素電界と磁界の有効値を示し、*は複素共役を表す。ds は、積分領域 A に垂直な方向を持つ積分変数ベクトルである。

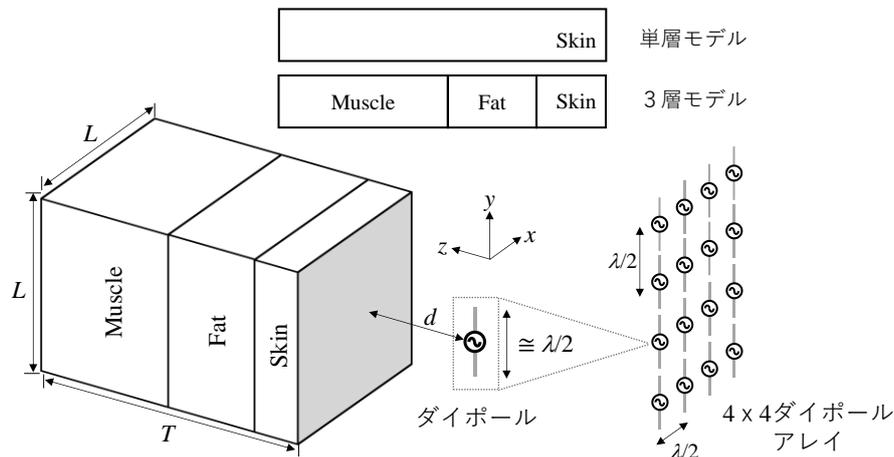


図 4 ミリ波ばく露評価用解析モデル

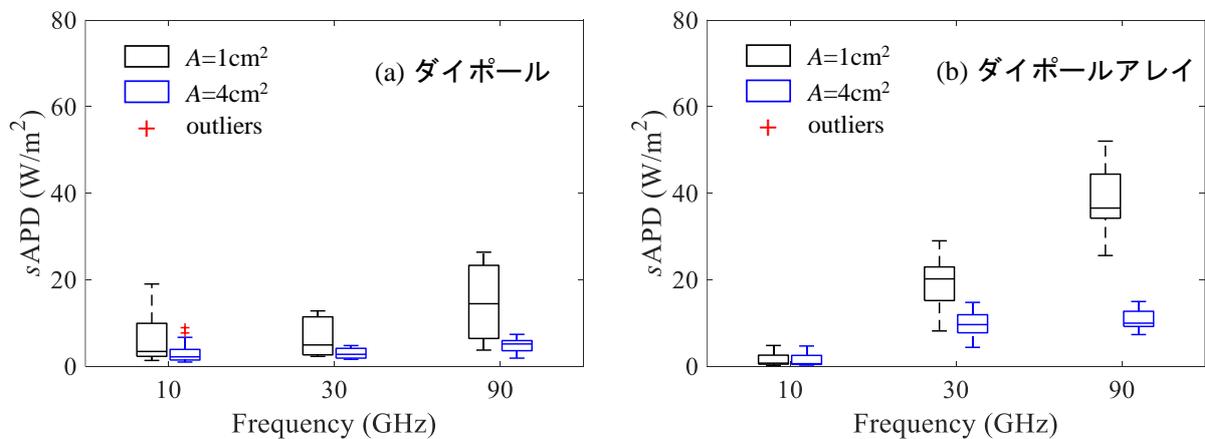


図 5 人体皮膚表面における吸収電力密度の統計解析

図5は、周波数10~90 GHz帯におけるAPDの最大空間平均値（psAPD）の箱ひげ図を示している。それぞれ、半波長ダイポールと4×4ダイポールアレイを使用した場合の結果を示す。図6では、長方形の箱の高さが四分位範囲（IQR）を示し、それぞれ第75パーセンタイルと第25パーセンタイルの範囲である。箱の中央にある水平線は、異なるグループからのAPDの統計的な中央値を示している。エラーバーは最大値から最小値までの範囲、プラス記号は外れ値を示している。特に、エラーバー付きの各箱には、アンテナと皮膚間の距離（5 mm、10 mm、および15 mm または 2 mm、5 mm、および10 mm）の3つのセットと皮膚モデルの2つのタイプ（1層と3層）が含まれているため、統計分析に十分なデータがあった。

図より、ダイポールアンテナを使用したpsAPD値については、 $A = 4 \text{ cm}^2$ の10 GHzで2つの外れ値が発生し、ダイポールアレイを使用した場合、外れ値は発生しない。一方、ダイポールアレイの30 GHzと90 GHzでのpsAPD値のIQRは、ダイポールアンテナと比較して相当なものであることがわかった。これにより、数値計算の手法によるミリ波ばく露のドシメトリ評価は大きな違いがないことを明らかにした。

4 まとめ

本研究では、ミリ波帯におけるOn-Body無線通信の評価のためのチャネルモデルを構築した。60 GHzにおける体表面On-Bodyチャネルが、理論的なライスフェージング信号の分布と良好な一致性を示している。さらに、直交偏波アンテナ（円偏波）は、ミリ波帯における無線On-Bodyチャネルの動的特性を克服するためのデバイスにおいて候補となる可能性を示した。また、ミリ波ウェアラブルアンテナのばく露評価について、異なる数値計算方法による吸収電力密度の統計的分析を行い、ミリ波WBANシステムの電磁安全性の評価手法の妥当性について検証した。今後の研究では、図6を示すように、60 GHzでの実用的なウェアラブル円偏波アンテナの設計とレイトレーシングアルゴリズムを用いて、実環境に基づいたOn-Body伝搬シミュレーション・測定を行い、代表的なライスファクターの導出に取り組む予定である。

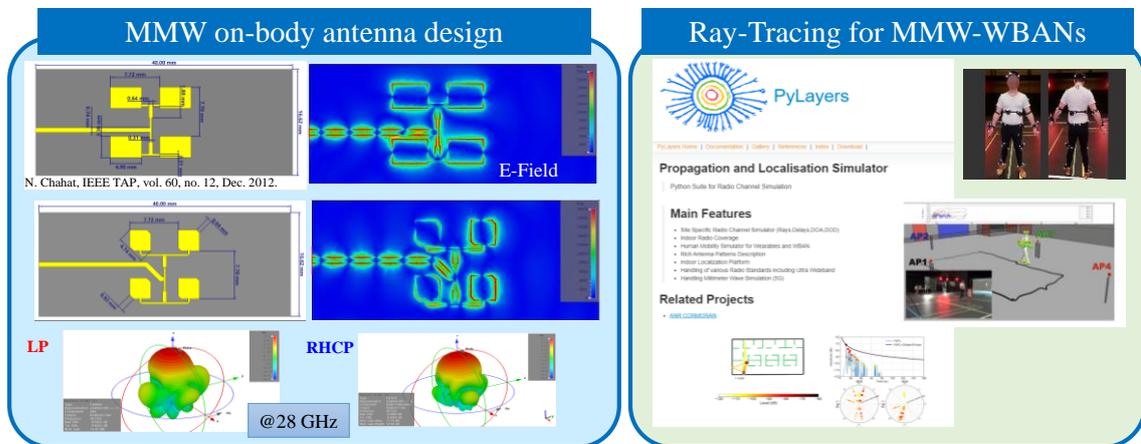


図6 将来課題：ミリ波 On-Body アンテナの設計と伝搬解析・測定

【参考文献】

- [1] K. Li, et al., "Rice Channel Realization for BAN Over-The-Air Testing Using a Fading Emulator with an Arm-Swinging Dynamic Phantom," IEICE Trans. Commun., Vol. E98-B, No. 4, pp. 543-553, Apr. 2015.
- [2] K. Li, et al., "Dual-Discrete Processing for Bit-Error-Rate OTA Testing in Shadowing-Fading BAN Channel," IEEE Antennas and Wireless Propaga. Lett., vol. 16, pp. 1200-1204, 2017.

- [3] K. Honda, et al., “Shadowing-Fading BER Characterization of a BAN Diversity Antenna Based on Statistical Measurements of the Human Walking Motion,” *IEICE Trans. on Commun.*, Vol. E96-B, No. 10, pp. 2530-2541, Oct. 2013.
- [4] K. Li, et al., “Analysis of the Body Proximity Cross-Polarization Power Ratio in a Human Walking Motion,” *Proc. Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, vol. 2, pp. 780-782, Nanjing, China, Dec. 2015.
- [5] K. Li, et al., “Shadowing-Fading BER Characterization of BAN Antennas Based on Realistic Walking Models,” *Proc. Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, 2013 7th International Symposium on, pp. 183-187, Tokyo, Japan, Mar. 2013.
- [6] IEEE-C95.1, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*. NY, USA, 2019.
- [7] ICNIRP, “Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz),” *Health Phys.*, vol. 118, no. 5, pp. 483–524, 2020.
A. Hirata et al., “Assessment of human exposure to electromagnetic fields: Review and future directions,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, no. 5, pp. 1619–1630, Oct. 2021.
- [8] W. H. Bailey et al., “Synopsis of IEEE std C95. 1TM-2019 ‘IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 171346–171356, 2019.
- [9] M. C. Ziskin, S. I. Alekseev, K. R. Foster, and Q. Balzano, “Tissue models for RF exposure evaluation at frequencies above 6 GHz,” *Bioelectromagnetics*, vol. 39, no. 3, pp. 173–189, Apr. 2018.
- [10] K. Li, K. Sasaki, S. Watanabe, and H. Shirai, “Relationship between power density and surface temperature elevation for human skin exposure to electromagnetic waves with oblique incidence angle from 6 GHz to 1 THz,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 64, no. 6, Mar. 2019, Art. no. 065016.
- [11] Y. Diao, E. A. Rashed, and A. Hirata, “Assessment of absorbed power density and temperature rise for nonplanar body model under electromagnetic exposure above 6 GHz,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 65, no. 22, pp. 224001, Nov. 2020.
- [12] K. Taguchi, S. Kodera, A. Hirata, and T. Kashiwa, “Computation of Absorbed Power Densities in High-Resolution Head Models by Considering Skin Thickness in Quasi-Millimeter and Millimeter Wave Bands,” *IEEE J. Electromagnetics, RF Microw. Med. Biol.*, Sep. 2022.
- [13] D. Funahashi, A. Hirata, S. Kodera, and K. R. Foster, “Area-averaged transmitted power density at skin surface as metric to estimate surface temperature elevation,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77665–77674, Nov. 2018.
- [14] K. Li et al., “Intercomparison of calculated incident power density and temperature rise for exposure from different antennas at 10-90 GHz,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 151654–151666, Nov. 2021.
- [15] Y. Diao, K. Li, K. Sasaki, K. Sachiko, I. Laakso, W. E. Hajj, and A. Hirata, “Effect of Incidence Angle on the Incident Power Density Definition to Correlate Skin Temperature Rise for Millimeter Wave Exposures,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, no. 5, pp. 1709–1716, Oct. 2021.
- [16] K. Li, K. Sasaki, K. Wake, T. Onishi, and S. Watanabe, “Quantitative comparison of power densities related to electromagnetic near-field exposures with safety guidelines from 6 to 100GHz,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 115801–115812, Aug. 2021.
- [17] Y. Diao, A. Hirata, “Assessment of mmWave exposure from antenna based on transformation of spherical wave expansion to plane wave expansion,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 111608–111615, Aug. 2021.

- [18] G. Sacco, Z. Haider, and M. Zhadobov, “Exposure Levels Induced in Curved Body Parts at mmWaves,” *IEEE J. Electromagnetics, RF Microw. Med. Biol.*, vol. 6, no. 3, pp. 413–419, Jun. 2022.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Analytical Channel Model for On-Body Antenna at 60 GHz	2023 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science	2023年8月（発表予定）
Calculated Epithelial/Absorbed Power Density for Exposure from Antennas at 10–90 GHz: Intercomparison Study using Planar Skin Model	IEEE Access	2023年1月
Clothing Effects on Multilayered Skin Exposure to Millimeter Waves from 20 GHz to 100 GHz	IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology	2023年4月（査読中）