

5 電波の生体影響評価と電波防護指針の適合性評価

5 *Research on Biological Effects of Radiofrequency Radiation and on Evaluation Methods of Compliance with Radiofrequency Radiation Protection Guidelines*

5-1 生体電磁環境における曝露評価技術

5-1 *Studies on Dosimetry of Human-Body Exposure to Electromagnetic Fields*

渡辺聡一 花澤理宏 長岡智明 ポンパイブーン ポーンアノン
和氣加奈子

WATANABE Soichi, HANAZAWA Masahiro, NAGAOKA Tomoaki,
PONGPAIBOOL Pornanong, and WAKE Kanako

要旨

電波の安全性を評価するためには、電波に曝露した人体内部に吸収された単位重量当たりの吸収電力である SAR を、数値シミュレーションにより求める必要がある。この数値解析を高精度に行うため、情報通信研究機構 (NICT) では、高空間分解能を有する数値人体モデルの開発とその高機能化について研究を進めている。また、数値解析方法の改良を行い、複雑な曝露条件下でも高精度な SAR 計算を可能とするための研究を進めている。さらに、これまでにほとんど明らかにされていなかったミリ波帯における生体組織の電気定数を測定するための方法についても研究を進めている。これらの研究を通じて、来たるべきユビキタスネットワーク社会において電波を安全かつ安心して利用できる環境の構築を目指している。

Numerical simulations are required to estimate specific absorption rate (SAR) in a human body exposed to high-frequency electromagnetic fields in order to evaluate the safety of the exposure. Development and improvement of numerical human models to be used for such numerical simulations and improvement of numerical calculation techniques for complex exposure conditions have been studied in NICT. Dielectric properties of biological tissues in millimeter-wave band have furthermore been studied with development of measurement systems. These studies contribute to safety environment with convenient radiofrequency use.

[キーワード]

曝露評価, 比吸収率, 数値人体モデル, 有限差分時間領域法, ミリ波, 電気定数
Dosimetry, SAR, Voxel human model, FDTD method, Millimeter wave, Electric constants

1 まえがき

携帯電話に代表されるように、一般の人々が日常の様々な場所で電波を利用するようになってきている。そのため、人体が電波に曝露することによる健康への影響についての関心が高まってきている。

電波は電磁波の一種であり、電波法の定義によると 3 THz 以下の電磁波が該当する。ただし、一般に 300 Hz 以下の電波は極低周波と呼ばれており、電波ではなく電界又は磁界として扱われることが多い。極低周波の電界又は磁界に人体が曝露すると、人体内部に電流が誘導し、そのため神経が刺激されることがある。これは刺激作用と呼ばれている。

100 kHz 程度以上の電波については、神経が誘導電流に反応しにくくなるため、刺激作用よりも人体における電波エネルギーの吸収による発熱を考慮する必要がある。これは熱作用と呼ばれており、比吸収率(単位重量あたりに吸収される電力)で評価される。比吸収率は SAR (Specific Absorption Rate) とも呼ばれる。生体組織の磁性はほとんどない(比透磁率が 1) ため、生体組織の SAR は式 (1) のように定義される。

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (1)$$

ここで、 dW は生体組織内の微小重量 dm (kg) に吸収されたエネルギー (J) であり、 σ は導電率 (S/m)、 E は生体組織内部の電界強度 (V/m)、 ρ は生体組織の密度 (kg/m³) である。

電波に人体が曝露した場合の安全性を評価するためには、人体内部における SAR を正確に評価することが必要となる。しかし、SAR を評価するためには人体内部の電界強度を知る必要があるが、実験的に人体内部の SAR を測定することは非常に困難である。そこで、NICT では人体の形状と内部構造を忠実に模擬した数値人体モデルを開発し、これらのモデルを用いた数値シミュレーションによる SAR 評価技術について研究を行っている (2 章)。

数値人体モデルを用いた電磁界解析シミュレーションでは数 10 GB ものメモリを必要とする大規模数値解析が必要となる。このためスーパーコン

ピュータ等を用いた計算が必要となるが、様々な曝露条件を評価するためには長大な計算時間が必要となる。そこで、NICT では数値人体モデルを用いた電磁界解析を専用に行うためのスーパーコンピュータを整備するとともに、数値解析手法の改良も行っている (3 章)。

数値シミュレーションにより電磁界解析を行う場合には、人体を構成する各組織や器官の電気的特性を考慮する必要がある。生体組織の電気定数はこれまでに様々な研究グループにより評価されてきているが、最近では米国空軍研究所の報告書 [1] が最も網羅的で信頼性が高いものとして引用されている。しかし、この報告書を含め、これまでのほとんどの研究では、主に数 GHz までのマイクロ波帯を対象としており、30 GHz 以上のミリ波帯における生体組織の電気定数測定はほとんど行われていない。しかし、近い将来、ミリ波帯における電波利用が広く普及するものと考えられていることから [2]、NICT ではミリ波帯における生体組織の電気定数測定に関する研究を進めている (4 章)。

次節以降にて、これらの研究の概要について述べる。

2 数値人体モデルの開発と高機能化

2.1 数値人体モデルの開発とデータベース公開

近年の医療診断技術の向上により、人体内部の断面画像を比較的容易に取得できるようになってきたため、最近では MRI 画像データを元に人体を細かなブロックで構築した数値人体モデルが開発されている。特に、数 mm 程度の高空間分解能を有するモデルのブロックは画像のピクセルを模倣してボクセルと呼ばれている。

これまで、携帯電話使用時の人体頭部 SAR を計算するために多数の頭部ボクセルモデルが開発されてきている。しかし、今後は、携帯電話以外の様々な携帯無線端末が人体の様々な部位に装着して利用されると考えられるため、人体頭部だけでなく人体全身を対象としたボクセルモデルの開発が必要となっていた。しかし、人体全身を含むボクセルモデルは欧米人男性をモデルとしたものしか利用できなかった。そこで、北里大学、慶應

義塾大学、東京都立大学、NICT(当時は通信総合研究所)により、日本人成人男女の平均体形を有するボランティアのMRI画像を取得し、人体全身ボクセルモデルを開発している[3][4](図1)。

これらの人体全身ボクセルモデルは男女それぞれ約800万個及び600万個の2mmのボクセル(立方体ブロック)で構成されている。それぞれのボクセルには51種類の組織・器官を示すタグがつけられており、それぞれの組織・器官に対応する電気的特性を各ボクセルに与えることで、電磁界解析シミュレーションに使用することができる。

これらの人体全身ボクセルモデルは、日本人を対象としたものとしては初めての開発であり、女性モデルに関しては世界でも初の開発となり、国内外から大きな反響があった。さらに、各ボクセルに定義されている組織・器官の種類に対応する様々な物理パラメータを定義することで、様々な分野での数値シミュレーションに利用が可能である。例えば、放射線吸収定数や弾性定数を与えることで、放射線治療解析や衝突時の人体損傷シミュレーション等にも利用できる。このため、国内外の様々な研究機関から数値人体モデルデータベースの利用についての問い合わせがあり、NICTでは2004年11月より非営利の研究目的に対して無償提供を開始している[5]。なお、男性モデル

はTARO、女性モデルはHANAKOと呼ばれている。

2.2 数値人体モデルの高機能化

前節で述べた人体全身ボクセルモデルを含め、これまでに開発されてきたほとんどの人体全身ボクセルモデルは直立姿勢(又は仰向け姿勢)のものである。一方で、来たるべきユビキタスネットワーク社会では無線機器を身体のような場所で使用するため、実際に電波を利用しているときの姿勢でのSAR評価が必要とされている。このため、NICTでは人体全身ボクセルモデルの姿勢変形を可能とする高機能化に取り組んでいる(図2)。

最近、携帯電話等は成人だけでなく未成年にも広く利用されていることから、小児におけるSAR計算の必要性も高まってきている。しかし、小児を長時間MRI装置等に固定することについては倫理的な課題があるため、小児を対象とした人体全身ボクセルモデルは開発されてきていない。そこで、NICTでは名古屋工業大学と共同で、成人の人体全身ボクセルモデルをベースに内部構造も含めて小児体形に変形する手法について研究を進めている。この研究を進めるに当たり、小児の体形寸法の計測を行い、小児体形を忠実に模擬したボクセルモデルの開発に成功している(図3)。

上記以外にも、人体全身ボクセルモデルの空間分解能の向上、同定組織・器官の追加と修正、妊娠女性モデルの開発等を進めている。これらの高機能化モデルについても適切な医学監修作業を経た後にデータベース公開をしていく予定である。

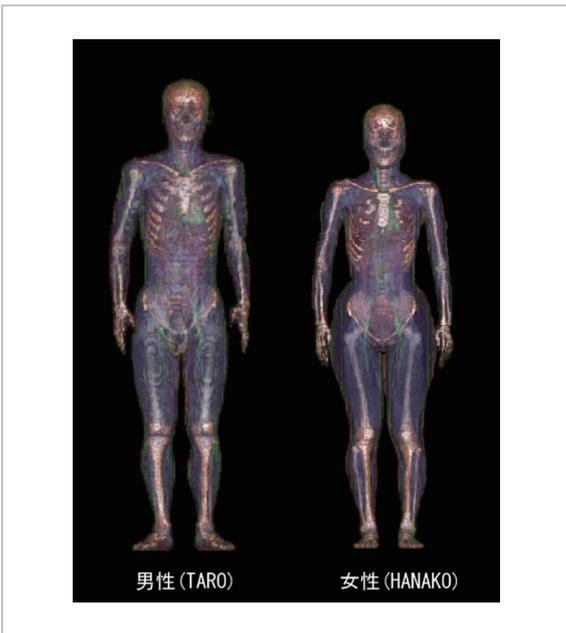


図1 日本人成人男女の平均体形を有する人体全身ボクセルモデル

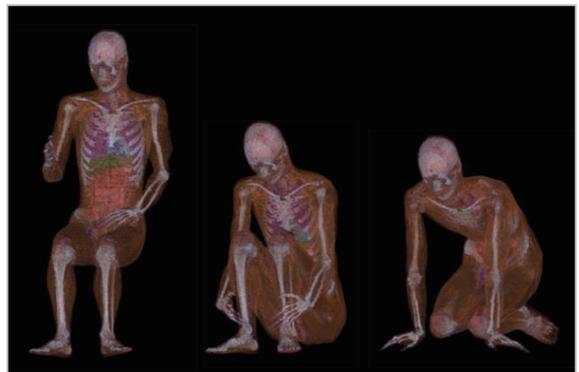


図2 姿勢変形可能モデルの例

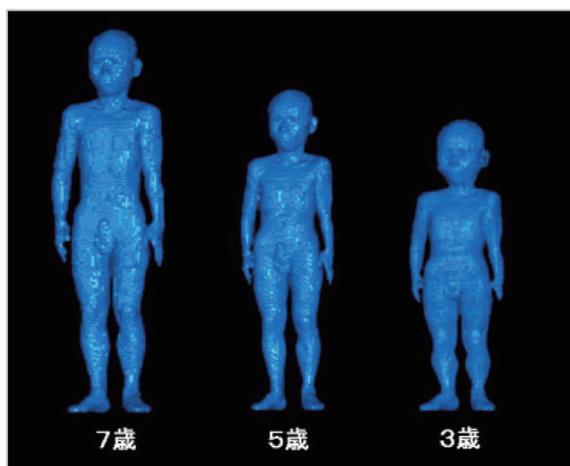


図3 小児モデルの例

3 数値解析手法の改良

3.1 専用スーパーコンピュータの導入

前節で述べた人体全身ボクセルモデルを用いた電磁界解析では 20~30 GB もの巨大なメモリを必要とする。このような大規模数値シミュレーションを効率的に行うために、2003 年に人体全身ボクセルモデル計算専用のスーパーコンピュータを導入した。本システムは NICT の共用スーパーコンピュータ (NEC SX-6) に接続され、共用スーパーコンピュータシステムの一部として運用されている。本システムは 8 CPU と 64 GB メモリから構成されており、人体全身ボクセルモデルの計算を行う登録ユーザに対しては計算時間無制限で利用可能である。また、登録ユーザの計算ジョブがない場合には、8 時間の計算時間上限の制約の下で一般ユーザも利用可能になっている。

3.2 数値解析手法の改良

人体 SAR 計算のための電磁界解析手法としては有限差分時間領域法 (Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法) が用いられる。FDTD 法はマクスウェルの方程式の微分表現を空間と時間に関して差分化することで、初期状態から過渡状態を経て定常状態に至る時間的変化をシミュレートすることができ、モーメント法等では困難であった損失性誘電体から構成される人体内部の電磁界解析が可能である。

携帯電話等の人体近傍で利用される無線端末による人体 SAR を計算する際には、人体だけでな

く電波を発射するアンテナの形状も高精度にモデル化する必要がある。しかし、数ミリの空間分解能では、ヘリカルアンテナ等の曲線を含む複雑な形状のアンテナを高精度にモデル化することが困難であった。一方で、モーメント法では複雑な形状のアンテナを比較的高精度にモデル化できることが知られている。そこで、アンテナの部分モーメント法で計算し、人体内部については FDTD 法で計算する混成法がこれまでに提案されてきている。しかし、モーメント法と FDTD 法の計算結果を受け渡しする手順が煩雑であるため、実際に複雑な形状のアンテナと人体 SAR の計算に適用することは困難であった。そこで、中央大学、東京農工大学と共同でモーメント法と FDTD 法の混成手法における接続手法の改良を行い、非常に簡単な手順でモーメント法と FDTD 法の混成解析を可能とする方法を開発した [6]。図 4 にダイポールアンテナに近接した人体頭部内 SAR 分布を示す。

ダイポールアンテナは FDTD 法で高精度に計算することが可能であり、混成法による結果と FDTD 法による結果が良好に一致していることから、本混成方法の妥当性が示されている。現在、本手法を用いた複雑形状アンテナ近傍の人体 SAR 計算を進めている。

VHF 帯では人体身長が波長と同程度となるため、人体が共振アンテナとして振舞う全身共振現象が生じることが知られている [7]。特に、人体が大地に直立している場合には、人体足首付近で非常に大きな電流が流れるため、人体足首での局所 SAR が非常に大きくなる。しかし、これまでの研究では大地面は完全金属導体壁として検討されてきたが、実際の大地の電気的特性はむしろ低損失誘電体であることが知られている。低損失大地面を FDTD 法でモデル化するためには数 m 以上の大地層を計算領域に含める必要があり、計算に必要なメモリや計算時間が著しく増大する。したがって、これまでに低損失大地面を想定した人体 SAR 計算が行われてきていなかった。そこで、NICT では東京農工大学と共同で低損失大地面を近似する表面インピーダンス法を開発してきた [8]。図 5 に低損失大地面上の金属ワイヤ誘導電流分布と人体モデルの誘導電流分布を示す。

金属ワイヤの場合、大地層を 5 m 考慮した

FDTD 計算結果と比較的良好に一致したものの、人体誘導電流の場合には足元付近で大きな誤差が生じた。これは、人体と大地の境界条件と自由空間と大地の境界条件が異なるためであると考えられる。現在、人体が大地面に直立するための新たな計算手法の改良に取り組んでいる [9]。

4 ミリ波・準ミリ波帯における生体組織の電気定数測定

人体を含む生体組織の電気的特性には複数の誘電緩和現象が存在し、複雑な周波数特性を有している。数 100 MHz 以上の周波数領域では 22 GHz 付近で共振する水分子の誘電緩和現象が主に支配的であり、特にミリ波や準ミリ波を含む領域では周波数や温度によって生体組織の電気的特性が大

きく変動することが知られている [10]。

生体組織の電気定数はこれまで主に同軸開口プローブを用いて測定されてきた。しかし、ミリ波帯では同軸線路を使用することは容易ではなく、この方法ではミリ波帯における電気定数を測定することが困難であった。そのため、NICT ではレンズアンテナを用いた生体組織の電気定数測定システムの開発に取り組んでいる [11]。図 6 に開発中の測定システムを示す。

また、最近になって市販された 50 GHz までの測定が可能な同軸開口プローブ型測定装置による血液の電気定数測定も実施している (図 7)。

今後、複数の測定システムを用いて同一試料の電気定数測定を行い、各測定方法の妥当性の評価を行い、より信頼性の高い電気定数データベースを構築していく予定である。

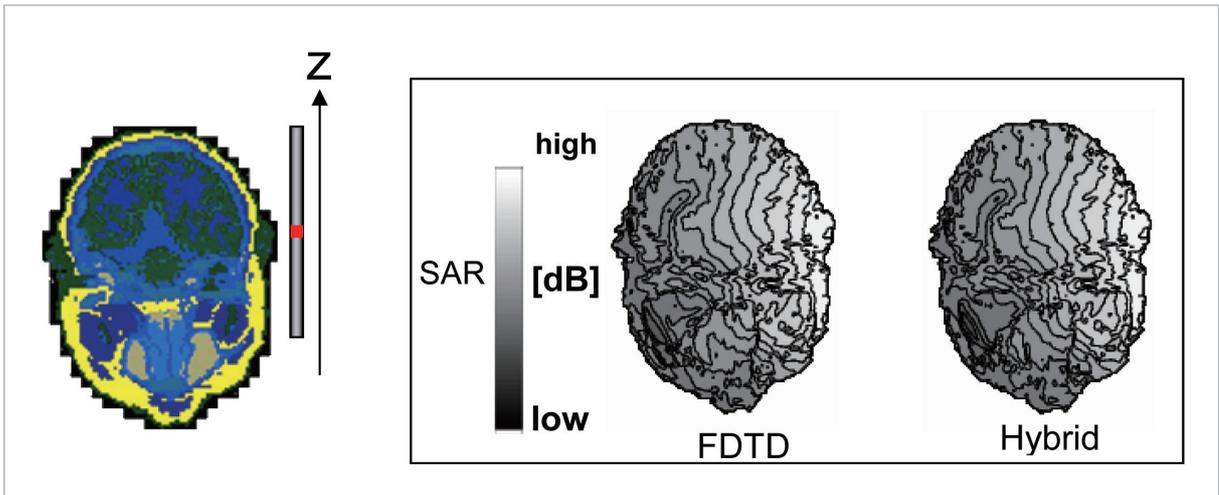


図4 ダイポールアンテナに近接した人体頭部内部の SAR 計算結果

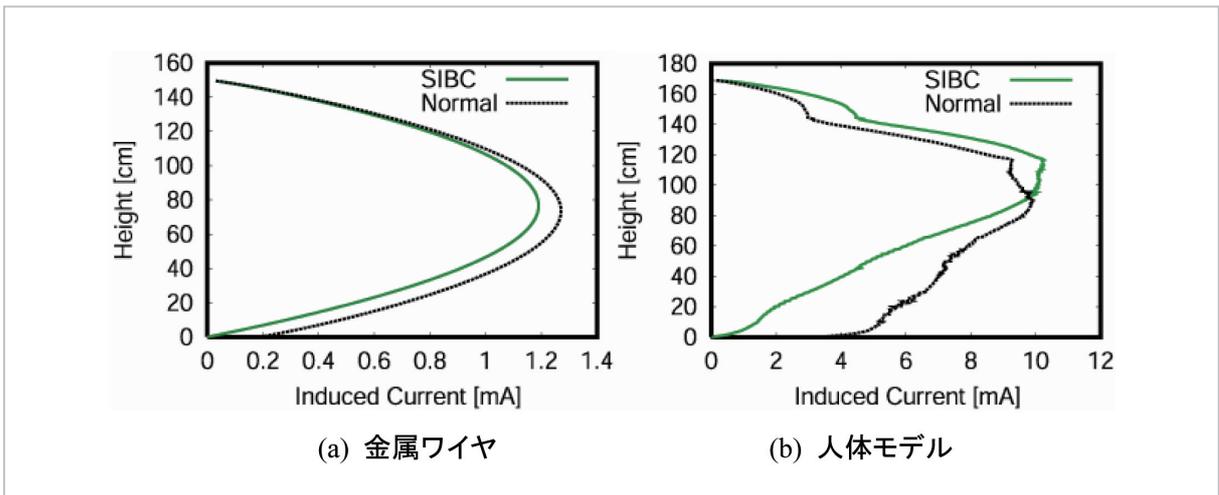


図5 低損失大地面上の誘導電流分布

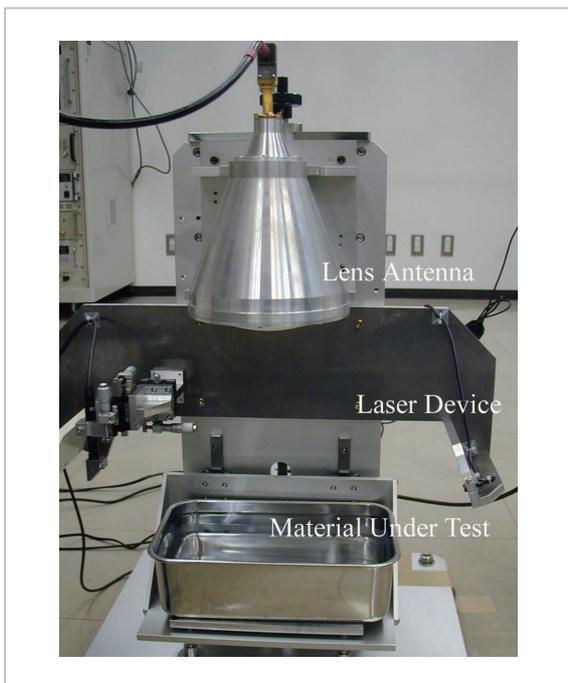


図6 レンズアンテナを用いたミリ波帯生体組織電気定数測定システム

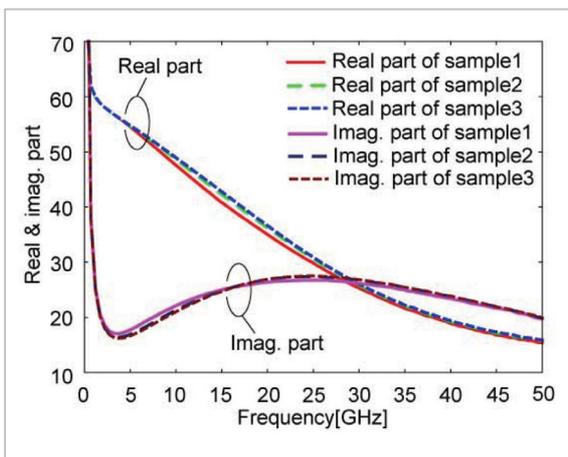


図7 同軸開口プローブを用いた血液の電気定数測定結果

5 むすび

本稿では、NICTにおける人体の電波曝露評価技術に関する研究動向を概説した。来きたるべきユビキタスネットワーク社会では、これまで想像していなかったような様々な状況で電波が利用されるようになると予想される。このような状況に対して適正に電波の安全性評価を行うために、数値人体モデルの高機能化と数値解析技術の改良がますます重要となると考えられる。さらに、曝露評価を行うための基本的な物理パラメータである電気定数測定技術の向上により、今後、利用拡大が見込まれているミリ波帯電波の曝露評価を高精度に行うことができる。本稿では述べなかったが、IH調理器等から発生する中間周波数帯の磁界曝露評価や体内植込み医療機器への影響評価についての研究も進めている。NICTでは、これらの研究を通じて、電波を安全かつ安心して利用できる環境を構築することを目指している。

参考文献

- 1 C. Gabriel, "Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies", AL/OE-TR-1996-0037, Armstrong Laboratory, Brooks Air Force Base, Texas, USA, 1996.
- 2 総務省報道発表資料, "60 GHz帯を使用する無線システムの導入", 2000年2月28日.
- 3 長岡ほか, "日本人成人男女の平均体型を有する全身数値モデルの開発", 生体医工学, Vol.40, No.4, pp.45-52, 2002.
- 4 T.Nagaoka, et al., "Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry", Phys. Med. Biol., Vol.49, pp.1-15, 2004.

- 5 NICT News, <http://www2.nict.go.jp/so/f484/NICT-News/0412/p02.html>
- 6 S.Mochizuki et al., "A new iterative MoM/FDTD formulation for simulating human exposure to electromagnetic waves", IEICE Trans. Commun., Vol.E87-C, No.9, pp.1540-1547, Sep. 2004.
- 7 M.J. Hagmann, et al., "Numerical calculation of electromagnetic energy deposition for a realistic model of man", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol.MTT-27, pp.804-809, 1979.
- 8 S. Watanabe, et al., "Application of {3D-SIBC FDTD} method to electromagnetic dosimetry of whole-body human models standing on non-metal ground planes", International Symposium on Electromagnetic Theory (URSI EMTS 2004), pp.1110-1112, Pisa, Italy, 2004.
- 9 新井ほか, "低損失大地面を考慮した人体における SAR の計算", 電気学会技術報告 EMC-05-30, pp.37-42, 2005.
- 10 M C Sreet et al., "Precision waveguide cells for the measurement of complex permittivity of lossy liquid and biological tissue at 35 GHz", J.Phys E: Sci. Isturum 20, pp.873-877, 1986.
- 11 花澤ほか, "自由空間反射法を用いた液体の複素誘電率測定", 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, EMCJ2005-87, pp.7-11, 2005.



わたなべひろし
渡辺 聡一

無線通信部門生体 EMC グループリーダー 博士 (工学)
生体電磁環境



はなざわひろあき
花澤 理宏

無線通信部門生体 EMC グループ専攻
研究員 博士 (工学)
ばく露装置開発、誘電率測定



ながおともあき
長岡 智明

無線通信部門生体 EMC グループ専攻
研究員 博士 (医科学)
数値モデルの高精度・高機能化、医
用画像解析



ボンパイブーン ポーンアノン

無線通信部門生体 EMC グループ専攻
研究員 博士 (工学)
数値計算を用いた電波曝露評価技術



わきかなこ
和氣 加奈子

無線通信部門生体 EMC グループ主任
研究員 博士 (工学)
生体電磁環境