

4 人体に対する電波ばく露評価技術

4 *EM Wave Exposure Assessment Technology for Human Bodies*

4-1 数値人体モデルの開発と電波ばく露評価

4-1 *Development of Computational Human Models and Evaluation of Human Body Exposure to Radio Waves*

長岡 智明

NAGAOKA Tomoaki

電波利用技術の急速な進展・発展に伴い、今後電波利用の多様化が進むことが予想されている。その一方でこれらの多様化した電波発生源から放射される電波の健康影響についての関心も高まっている。NICTでは、電磁界シミュレーションにより人体に対する電波ばく露量を精密に推定するために、これまでに解剖学的な構造を有した日本人成人男女数値人体モデルや妊娠女性数値人体モデル、国際標準小児数値人体モデル等を開発するとともに、従来の数値人体モデルの開発法とは異なるアプローチによるテーラーメイド数値人体モデルや成長・発育数値人体モデルの開発を行ってきた。さらに、数値人体モデルの利用範囲を拡大するための高機能化として、数値人体モデルの姿勢変形手法に取り組んできており、これらのモデルを用いたばく露量評価が、電波防護の国際ガイドラインの制限値の根拠となっている。

With the rapid progress and development of radio technology, it is expected that the use of radio waves will become more diversified in the future. At the NICT, we have developed computational human models with anatomical structures of adult Japanese males and females, pregnant women, and children, etc., and have also developed personalized computational models, human growth models, etc., based on different approaches from the developing method for conventional computational models, in order to accurately evaluate of human body exposure to radio waves by electromagnetic field simulation. In addition, the studies have been done on postural deformation methods for computational human models to extend the range of use of these models. Exposure assessments using these computational human models provide the basis for the limits in the International Radiation Protection Guidelines.

1 まえがき

電波利用技術の急速な進展・発展に伴い、今後電波利用の多様化が進むことが予想されている。その一方でこれらの多様化した電波発生源から放射される電波の健康影響についての関心も高まっている。国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) は、人体への好ましくない健康影響を防護するため、電磁界ばく露を制限するためのガイドラインを策定している [1]。当該ガイドラインは我が国の電波防護規制の根拠として採用されており、電波防護指針に基づく人体防護を行うためには、電波に人体がさらされた人体の各部に吸収

される単位質量あたりの電力である比吸収率 (SAR: Specific Absorption Rate) を正確に評価する技術が必要である。人体内部の電波ばく露量を実験的な手法によって測定することは非常に困難であることから、人体を模擬したモデルを用いた数値シミュレーションが、ばく露量評価に有効である。NICTでは、人体に対する電波ばく露量を高精度に推定するために必要不可欠な人体の解剖学的な構造を有した数値人体モデルの開発に取り組んでいる。本稿では、これまでに開発した数値人体モデルとその高機能化、さらに数値人体モデルを用いた電波ばく露評価について概説する。

2 解剖学的構造を有した数値人体モデルの開発

2.1 日本人成人男女の数値人体モデル開発

ばく露評価に利用されたモデルは当初、人体を球体もしくは回転楕円体として表現されていたが、1980年代には、200個から1,000個程度のブロックで人体を模擬した簡易モデルが開発され、1990年以降は、医療診断技術の進歩に伴い、人体を忠実に模擬した高精細数値人体モデルが開発されている(図1)。また、電波ばく露のシミュレーションに利用するための計算機性能の向上により、高精細数値人体モデルを用いた電磁界シミュレーションにより人体の電波ばく露量を精密に推定することが可能になってきている。NICTでは、2004年に日本人男女の平均身長と平均体重に合致した健常なボランティアのMRI(Magnetic Resonance Imaging)データに基づいて、図2に示す成人男女の数値人体モデルを開発した。このモデルは2mmの空間分解能を有しており、男性モデルは約800万個、女性モデルは約630万個の微小なブロック(ボクセル)の集合体で構築されている。これらの男女モデルは51種類の異なる組織・臓器を有した、日本人の平均体型に合致したモデルである[2]。各国の研究機関が後発で様々な数値人体モデルを開発しているが、NICTで開発し

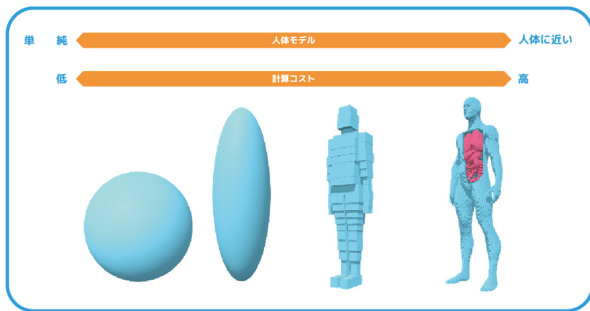


図1 数値人体モデルの変遷

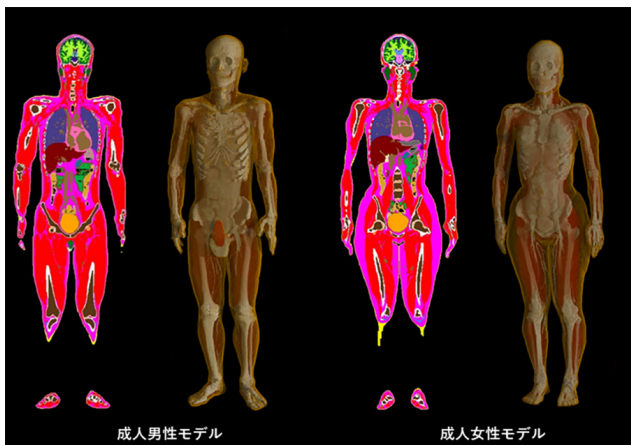


図2 日本人成人男女の平均体型を有する数値人体モデル

た成人男女の数値人体モデルは医療関係者がMR画像に対して手作業で組織を同定し、同定した組織については医学的な監修を実施している世界的に数少ない解剖学的に非常に精度の高いモデルであり、現在でも、世界的に利用可能な数値人体モデルの中で総合的に最も高品質なモデルと位置付けられている。

2.2 妊娠女性モデル開発

2006年には、妊娠女性の腹部MRI画像に基づいた胎児モデルと既存の成人女性モデルを妊娠女性の体型に合致するように腹部を3次元変形したモデルを合体させることにより、妊娠26週の数値人体モデルを開発した。なお、成人女性モデルの腹部変形にはFFD(Free-form Deformation)アルゴリズム[3]を応用した手法を用いた。この手法は変形前の物体の外部を覆う多面体頂点の制御点を移動させることで、制御立体内の物体を大域的に変形することが可能で、変形する物体の形状に制約がないこと、変形時に物体の連続性が保持されること等の利点がある。図3に示す妊娠女性モデルは成人男女モデルと同じ2mmの空間分解能であり、妊娠固有の組織(胎盤、羊水、胎児、胎児の脳、胎児の眼球)を含む56種類の組織・臓器で構成されている[4]。また、胎児や母体の形状は妊娠週によって大きく異なることから、胎児及び妊娠女性固有の組織は国際放射線防護委員会(ICRP: International Commission on Radiological Protection)が定めた標準的な組織・臓

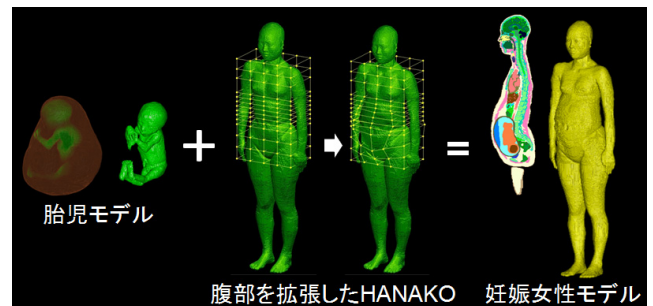


図3 妊娠女性モデル開発(26週)

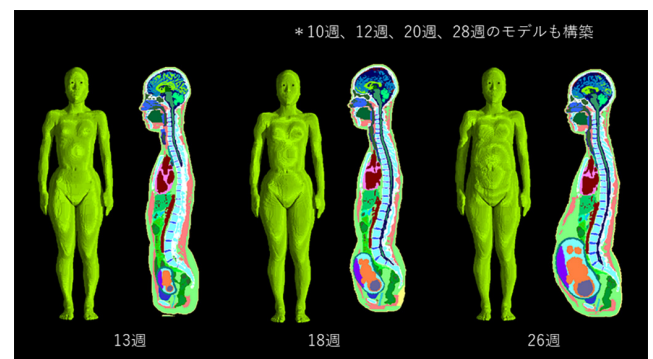


図4 ICRPの参照値に合致した胎児モデルを含む妊娠女性モデル

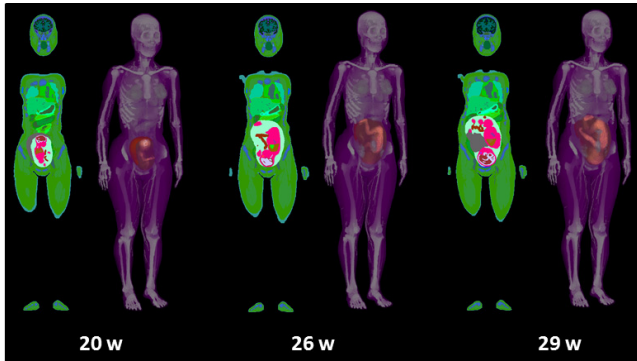


図5 胎児の発育過程を忠実に表現した妊娠女性モデル

器重量 [5] に合致するように、母体の腹部形状は日本人の妊娠時の腹部形状に合致するようにそれぞれ3次元変形させることにより、図4に示す妊娠10週から28週までの複数の妊娠女性モデルも構築した [6]。さらに2014年には、妊娠中高後期の胎児の高分解能MR画像を1名のボランティアから取得し、その胎児の高分解能MR画像に基づいた高精細な胎児モデル(約20組織)を作成し、母体は従来法と同様に成人女性モデルの腹部形状を変形し、それらを合体させることにより、約70組織から構成された胎児の発育過程を忠実に表現した妊娠女性モデルを開発した(図5) [7]。

2.3 小児モデル開発

近年、NICTでは、1歳児、5歳児、10歳児を対象とし、ICRPの基準値に合わせた国際標準小児モデルを開発した(図6) [8]。1歳児モデルは、1歳児の低分解能なMR画像データから体形データを取得し、日本人の3歳児のMR画像データに基づいて開発した3歳児数値人体モデルの内部組織構造データを、ボリウムモーフィング法 [9] を用いて1歳児の体形に合致するように変形した。10歳児モデルでは、10歳児の3次元レーザースキャンにより体形データを取得し、7歳児のMR画像データに基づいて開発した7歳児数値人体モデルの内部組織構造データを、1歳児モデル開発と同様の手法で10歳児の体形に合致するように変形した。5歳児モデルについては、5歳児ボクセルモデルと同じ、5歳児のMR画像データに基づいて開発された数値モデルを使用した。次に、各モデルの身長、体重、組織内質量を、ボリウムモーフィング法と組織臓器の手動編集により、ICRP出版物 [5] の参照値に合致するように調整し、これらの小児数値人体モデルが、年齢に応じた現実的な体形をしており、不自然な解剖学的構造がないことを医師監修により確認した。開発した国際標準小児モデルは日本人の成人男女モデル同様2mmの空間分解能を有しており、約50種類の異なる組織・臓器に分類されている。また、これら

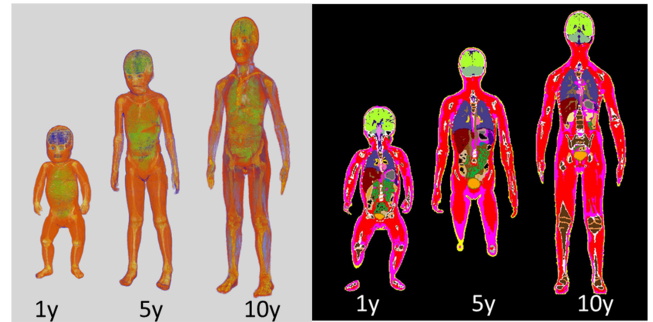


図6 国際標準小児数値人体モデル

のモデルは、身長と体重が1%以内、主な内部組織質量が10%以内でICRP参照値に合致している。

2.4 テーラーメイド数値人体モデル開発

身長、体重、体型、体脂肪率など身体的な特徴は同じ年齢であっても個体差がある。さらにこれらの特徴は年齢、人種、性別によっても異なる。このような人体の身体的な特徴に対する電波ばく露量のばらつきを評価することが、電波防護の研究において非常に重要な課題であった。そこで、既存の数値人体モデルの3次元変形により、新たな異なる体型、内部構造を有する個人の数値人体モデルの構築技術を提案している [10]。図7にテーラーメイド数値人体モデル生成手順を示す。まず、医療画像データから基礎的な画像処理(閾値処理、平滑化処理等)により、体表領域を抽出する。そして、既存の数値モデル(ソース)と、体表抽出データ(ターゲット)の体表面をメッシュ化する。次に、メッシュ化した体表面の各メッシュデータに対して、人体の特徴を示した位置に、約100個の目印を配置した。そしてこれらの目印を用いて、ソースモデルの体表面メッシュをターゲットメッシュに近似するように変形させる。その後、ターゲットの体表面に近似させたソースメッシュに対して、2.3で述べた小児モデル開発に応用したボリウムリフィリング法を用いることで、内部構造を含むボクセルモデルを生成する。しかし、この状態では、内部構造はターゲットデータと一致しない可能性があることから、ターゲットデータを主要なパーツに簡易分類し、非剛性レジストレーション [11] によりターゲットに近似したソースモデルの内部構造を変形させることで、任意の数値人体モデルを生成することが可能である。人体のMRI画像データを取得し、そのデータに基づいて組織分類を行う従来の数値人体モデルの開発方法では、1体の数値人体モデル開発に数年を要したが、本提案手法を用いることで、1体の数値人体モデルを数日で構築できる。内部組織構造の忠実度は既存の開発方法より低いが、体表面及び主要な組織臓器の形状や重量は目標

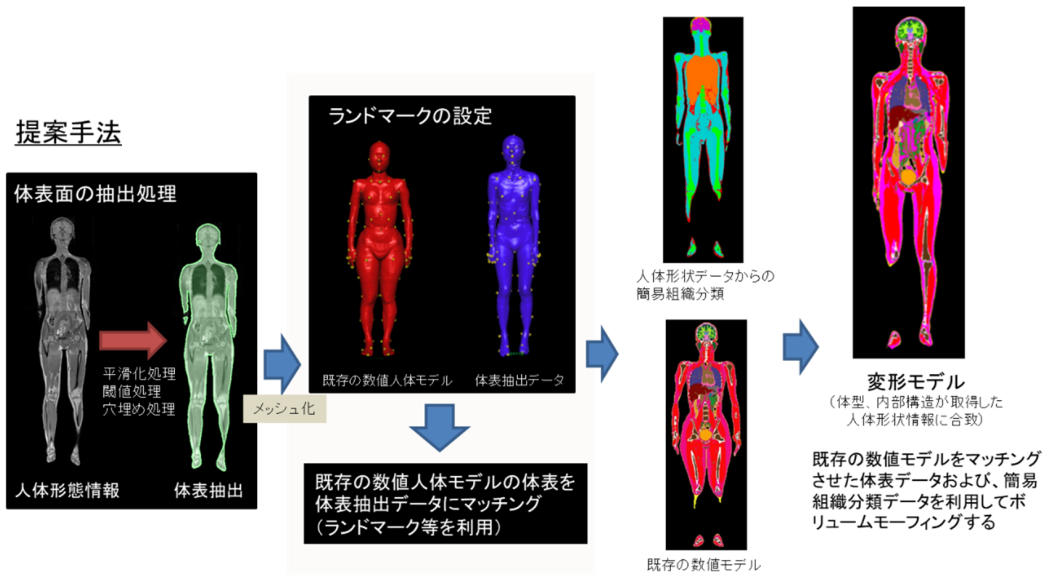


図7 テーラーメイド数値人体モデル生成手順

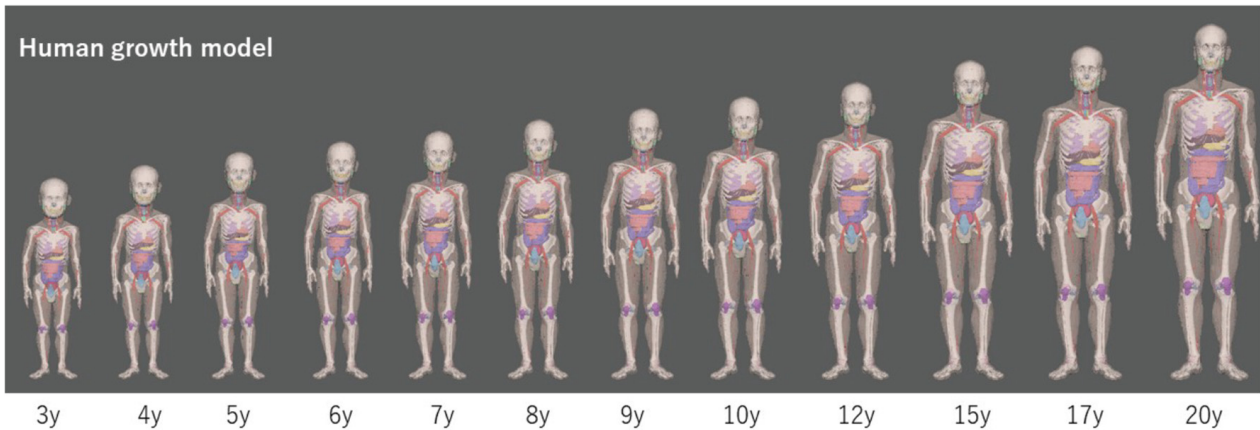


図8 成長・発育モデル

データに合致させることができたことから、非常に有効なモデル生成法の一つである。

2.5 成長・発育モデル開発

電波ばく露における年齢依存性等の評価を実施するために、これまでに様々な年齢の数値人体モデルが開発されてきているものの、これらの数値人体モデルは個体差に加えて、組織数、解像度等も異なるため、必ずしも年齢依存性の評価に適さないという問題があったが、近年、この問題を解決可能な、人体の成長と発育を模擬した数値人体モデルを開発した[12]。成長・発育モデルの開発手順は、まず、既存の数値人体モデルの各組織をポリゴンメッシュモデル(ソースモデル)に変換し、コンピュータグラフィックソフトウェア Autodesk MAYA 2020 に搭載されている変形方法であるラップデフォーメーションを使用して、ソースモデルを変形の基準となる異なる年齢モデル(目標モデル)

に合致させるように体形及び内部構造を変形させる。その後、目標モデルに合致したソースモデルに MAYA に搭載されたブレンドシェイプアニメーションの機能を付与することで、目標とした年齢モデルを生成する。最後にメッシュモデルを再ボクセル化することで、任意年齢の数値人体モデルを生成可能である。図8に開発例として、日本人成人男性の成長・発育モデルを示す。変形基準とした目標データは筆者が開発した小児モデルであり、この例では、12体の異なる年齢の数値人体モデルを生成した。この例に示す、数値人体モデルの分解能及び組織数は日本人成人男性モデルと同じである。本手法は、1体の数値人体モデルから様々な年齢、すなわち小児から成人、さらには老人までの解剖学的な構造を保持した数値人体モデルをシームレスに生成可能である。

3 数値人体モデルの高機能化

2に示した数値人体モデルは直立姿勢であるため、無線通信端末の実際の利用状況(姿勢)を模擬した数値シミュレーションは直立の姿勢だけに制限される。そこで数値人体モデルの高機能化の一つとして、姿勢変形手法を開発した。2008年にFFDを応用した姿勢変形手法を開発した[13]。この手法では、数値人体モデルの関節を基準にしてモデルを複数のパーツに分割し、それらのパーツをモデル周囲に配置したFFDの制御点に関連づける。分割したパーツを任意の方向に移動もしくは回転することで、様々な姿勢の数値人体モデルを生成することが可能である。この手法は数値人体モデルの内部組織の連続性及び体積を保持した姿勢制御が可能であるものの、FFDの制御点を内部組織の解剖学的な構造や連続性を考慮しながら設定する必要がある、制御点の配置位置や数が姿勢変更後の内部構造の質に大きく依存するという問題点があった。その後、この問題を改善した手法を開発した[9]。この姿勢変形手法(図9)では、立位の数値人体モデル(ボクセルモデル)からの体表面のメッシュ(ソースメッシュ)を

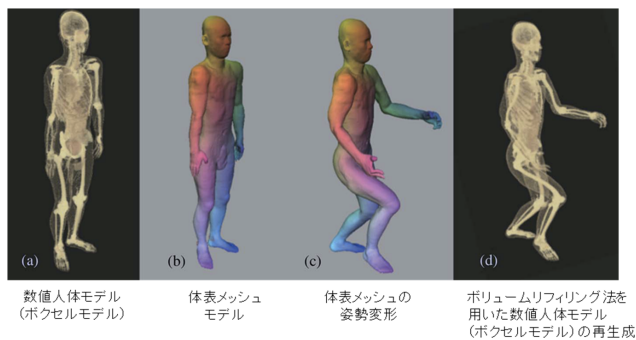


図9 数値人体モデルの姿勢変形手順

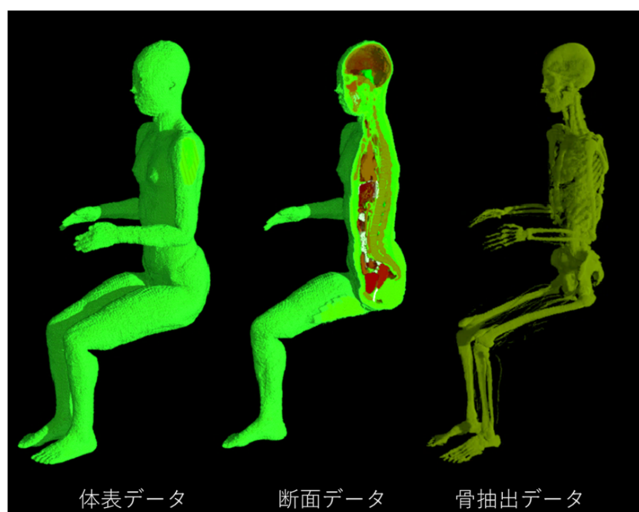


図10 数値人体モデルの姿勢変形例(成人女性モデル)

生成し、市販の3次元コンピュータグラフィックスソフトウェア上でスケルトンアニメーションを使用して、ソースメッシュモデルの姿勢を変形し、そのソースメッシュモデルを再度ボクセル化し2値ボリュームデータを取得、その後、ボクセルモデルの境界(体表面)ボクセルに関連付けられたテクスチャ座標を使用して、ディリクレ境界問題を解き、2値ボリュームの内部点での座標を計算し、最後に、ボクセル座標のマッピングを行うことで、姿勢を変更した数値人体モデルが生成される。この手法が2.4のテーラーメイドモデルの生成に利用したボリュームリフィリング法であり、この手法の特徴は体表面の変形のみをコンピュータグラフィックスソフトウェアで行い、姿勢変形時に内部組織の構造変化を考慮する必要がない点であり、非常に簡単に解剖学的構造を有している数値人体モデルの姿勢を変更することが可能である(図10)。

4 数値人体モデルを用いた電波ばく露量の推定

電磁界シミュレーションの一手法である時間領域差分(FDTD: Finite-Difference Time-Domain)法はマクスウェルの微分方程式を差分化し、時間領域で直接電磁界を解析する手法であり、原理が比較的簡単で高精度な解析が行えることから、電磁界解析に広く利用されている[14]。また、この手法は、解析領域を微小ブロックのセルに分割し、離散的な時間における各セルの電磁界成分を計算するため、数値人体モデルを対象とした電磁界シミュレーションとして、非常に有効である。また、数値人体モデルの組織・臓器に、対応した電気定数(導電率と比誘電率)と密度を与えることで、電波ばく露量を高精度に推定することが可能である。ここでは、国際標準小児数値人体モデルを用いたばく露評価について示す。基地局からの電波による全身ばく露を想定し、FDTD法により10 MHzから6 GHzの垂直偏波及び水平偏波の平面波が人体の前方向から後方に入射した際の人体モデルのSARを算出した。なお、SARの単位はW/gである。解析に用いたセルサイズは2 GHz以下では2 mm、2 GHzから5 GHzは1 mm、6 GHzでは0.5 mmとし、組織・臓器の電気定数は過去の文献値[15]を用いた。図11に入射電力密度を各周波数の参考レベルに設定した際の小児モデルの全身平均SARの周波数特性とICNIRPの基本制限値(一般公衆)0.08 W/kgを示す。なお、この結果は自由空間中での全身平均SARの周波数特性を示している。また、参考レベルとは基本制限から計算等により導かれる実用的なばく露指標である。この結果では、100 MHzと2 GHzの周波数付近で、小児

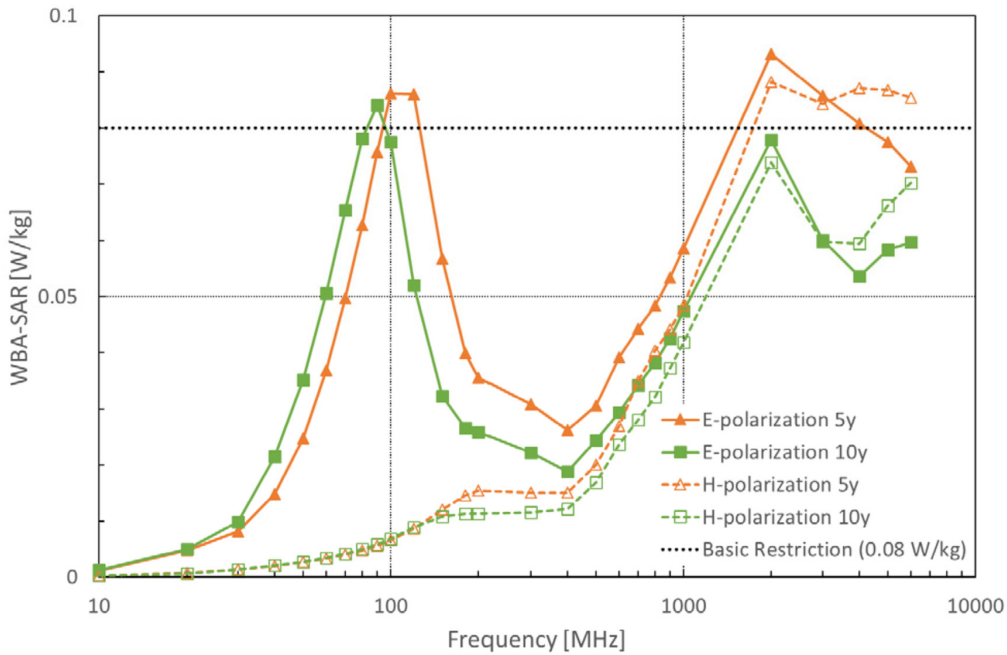


図 11 国際標準小児数値人体モデルの全身平均 SAR

モデルの全身平均 SAR の一部が ICNIRP ガイドラインの基本制限を越えている。しかしながら、5 歳児モデルと 10 歳児モデルでは全身平均 SAR の超過率は最大でも 20 % 程度であり、以前にレビューで報告された値や 40 % よりも低くなることを明らかにした [8]。この結果は小児における基本制限値に対する超過(数 10 %)は、他の要因(例えば、個人差、環境温度、偏波)による影響と同等か、それ以下であると考えられ、小児に対する全身平均 SAR の超過は有意ではなく、従来の電波防護レベルが妥当性あることを明らかにした。2020 年に発行された ICNIRP における国際ガイドラインの改訂版では、本研究成果が引用され、従来の国際ガイドラインで定めていた 2 GHz 周辺の防護レベルが維持されている [1]。

基地局からの電波による全身ばく露を想定し、FDTD 法により 10 MHz から 6 GHz の垂直偏波及び水平偏波の平面波が人体の前方から後方に入射しており、入射電力密度を各周波数の参考レベルに設定している。

5 まとめ

本稿では、NICT で開発してきた解剖学的構造を有した各種数値人体モデル及び数値人体モデルの高機能について概説した。また、数値人体モデルが高精度な電波ばく露評価に必要不可欠であり、数値人体モデルを用いたばく露評価が、電波防護の国際ガイドラインの制限値の根拠や我が国の電波防護指針の根拠となることを示した。現在、普及が進んでいる第 5 世代移動通信システム(5G)ではミリ波帯の電波が利用されてい

る。今後 5G では更に高い周波数帯の利用が予定されており、さらに次世代の移動通信システム(B5G / 6G)ではテラヘルツ帯の利用も想定されている。周波数が高くなると電磁エネルギーの吸収は人体表面に集中することから、今後開発すべき数値人体モデルとしては、人体の表面に存在する皮膚や眼球を超高精細かつ忠実に表現した組織モデルであり、これらの組織モデルを用いて、電波ばく露時の人体表面付近での吸収特性等を明らかにすることが、今後の重要な課題である。

謝辞

本研究の一部は、総務省委託研究(JPMI10001)の支援により実施されている。

【参考文献】

- 1 The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)," Health Phys., vol.118, no.5, pp.483-524, May 2020.
- 2 T. Nagaoka et al., "Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult 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.
- 3 T.W Sederberg and S.R. Parry, "Free-form Deformation of Solid Geometric Models," ACM Computer Graphics (SIGGRAPH 86 Conference Proceedings), vol.20, pp.151-160, 1986.
- 4 T. Nagaoka, T. Togashi, K. Saito, M. Takahashi, K. Ito, and S. Watanabe, "An Anatomically Realistic Whole-Body Pregnant-Woman Model and Specific Absorption Rates for Pregnant-Woman Exposure to Electromagnetic Plane Waves from 10 MHz to 2 GHz," Phys. Med. Biol., vol.52, pp.6731-6745, 2007.
- 5 ICRP, "ICRP Publication 89: Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values," 2002.
- 6 T. Nagaoka, K. Saito, M. Takahashi, K. Ito, and S. Watanabe, "Anatomically realistic reference models of pregnant women for gestation

- ages of 13, 18, and 26 weeks," Proc. 30th Ann. Intl. Conf. of the IEEE EMBS, 2008.
- 7 T. Nagaoka, T. Niwa, and S. Watanabe, "Specific Absorption Rate in Mothers and Fetuses in the Second and Third Trimesters of Pregnancy," International Journal of Microwave and Optical Technology, vol.9, pp.34-38, 2014.
 - 8 T. Nagaoka and S. Watanabe, "Development of Voxel Models Adjusted to ICRP Reference Children and Their Whole-Body Averaged SARs for Whole-Body Exposure to Electromagnetic Fields From 10 MHz to 6 GHz," IEEE Access, vol.7, pp.135909-135916, 2019.
 - 9 T. Nagaoka and S. Watanabe, "Voxel-based variable posture models of human anatomy," Proceedings of the IEEE, 97, pp.2015-2025, 2009.
 - 10 T. Nagaoka and S. Watanabe, "Personalized computational models in human anatomy for electromagnetic dosimetry," Proceedings of the 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, 2011.
 - 11 G. E. Christensen, R. D. Rabbitt, and M. I. Miller, "Deformable templates using large deformation kinematics," IEEE Transactions on Image Processing, 5: 1435-1447, 1996.
 - 12 T. Nagaoka and K. Wake, "Computational Human Growth Models with Anatomical Structure for EMF Simulations," URSI GASS 2021, Rome, Italy, 2021.
 - 13 T. Nagaoka and S. Watanabe, "Postured voxel based human models for electromagnetic dosimetry," Phys. Med. Biol., vol.53, pp.7047-7061, 2008.
 - 14 A. Taflove and S.C Hagness, "Computational Electromagnetics. The Finite-Difference Time-Domain Method 3rd edn," London: Artech House Publishers, 2005.
 - 15 C. Gabriel, "Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies," Armstrong Lab., Brooks Air Force Base, San Antonio, TX, USA, Tech. Rep. AL/OE-TR-1996-0037, 1996.



長岡 智明 (ながおか ともあき)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
主任研究員
博士 (医科学)
生体電磁環境
【受賞歴】

2022年 電波功績賞電波産業会会長表彰
2013年 第59回(平成25年度)前島密賞
2004年 Physics in Medicine and Biology
最優秀論文賞 (Robert Prize)