

学 位 論 文 題 名

高周波電磁界ばく露における全身平均SAR評価法に関する研究

(A Study of Whole-Body Averaged SAR Estimation Methodologies for Human Exposure to Radio-Frequency Electromagnetic Fields)

学位論文内容の要旨

携帯電話・デジタル放送・無線 LAN 等の無線機器の出力電力は、電磁界強度指針値や全身平均 SAR(Specific Absorption Rate) 等の基礎指針値によって制限されている。これら無線通信電波に対する人体防護に関して、国際的には、国際非電離放射防護委員会 (ICNIRP) や IEEE による指針、我が国においては総務省の防護指針が定められている。近年の高品質・大容量化に向けた新たな無線通信技術の開発により、携帯電話基地局や放送局などからの電波について、強度規格への適合性評価の更なる信頼性向上にむけた取り組みへの社会的要求が世界各国で高まっている。

電磁界強度指針を裏付ける計算推定は、複数の機関により開発された成人男性や女性、あるいは子供の高分解能な数値人体ファントムを用いて実施されるなど、近年の計算機性能の向上を背景として多く実施されている。全身平均 SAR の計算推定値は、ファントム全身に渡る内部電界を体積積分することで与えられる。しかし、これら計算推定値は解析手法やプログラムコード等の違いによりばらつきが生じるとの報告が挙げられており、精度の高い実験データの取得が重要となっている。人体ファントムの電磁波吸収量推定を行う実験手法は過去に、サーモグラフィやカロリメータを用いた結果が報告されているが、これら手法はファントム内部の状態を詳細に測定しなくてはならないことに加え、寸法や姿勢の異なるファントムに対する適用が困難であるという問題点がある。

本論文では、この課題に対し、ファントムの外部電磁界を用いた全身平均 SAR 評価法を新たに提案している。本論にて示される提案手法は、ファントム周辺の環境電磁界計測に基づく全身平均 SAR 評価法であり、ファントムの形状や寸法に変更が生じた場合においても実験計測可能である。全身平均 SAR を計算及び実験の両面から検討することにより、計算推定の裏付けとなる実験値を取得し得る実験系を開発し、電磁界強度指針の妥当性確認に資する実験データを提供する。さらに、計算推定に用いられている数値人体ファントムの年齢や身長、姿勢の違いによる影響を定量的に評価することも含まれる。これらの内容につき、以下の各章により詳細を述べる。

第 1 章は導入部であり、本研究の目的と意義、および電波防護指針と防護指針で用いられる SAR 等の物理量について述べた。本章において、電磁波ばく露により生じる人体全身の吸収電力量である全身平均 SAR について述べ、全身平均 SAR の計算および実験手法を概説した。

第 2 章は、FDTD(Finite Difference Time Domain) 解析を用いた SAR 推定手法について述べた。また、FDTD セルサイズの分解能に起因する SAR 計算値へのばらつきを示した。これにより、全身平均 SAR 推定に人体内部の電界を用いた場合の推定精度について明らかにした。

第 3 章は、外部電磁界円筒走査に基づく全身平均 SAR 評価法を新たに提案し、その原理および基

本特性について述べた。本論文で用いる円筒走査電磁界測定手法は、円筒天頂部の電磁界を計測できない。そこで、円筒天頂部より流出する電力の影響を低減する手法として、測定空間内に電磁界発生装置のみを設置した場合の測定電力を評価系への入力電力とする方法を提案した。本章では、FDTD 解析を用いた数値シミュレーションにより、実験測定による誤差を含まない条件における提案手法の妥当性確認を行った。

第4章は、提案手法に基づく実験系の構成について論じた後、基本幾何形状ファントムを用いた実験系の基本特性について述べた。提案する実験系は、電界測定装置、平面波ばく露装置および人体の電磁気的特性を模擬した物理ファントムにより構成される。電波暗室環境下において基地局等からの遠方界ばく露を実現する電磁界照射系として、一次放射器であるホーンアンテナと誘電体レンズを用いた開放型平面波ばく露装置を提案した。設計した平面波ばく露装置について、FDTD 数値解析および実験計測からばく露領域における電界分布特性を評価し、平面波ばく露平面上の主電界成分の電界強度分布が平均値から 3dB の範囲内となることを示した。さらに、基本幾何形状モデルに対する基本特性評価を行い、提案手法を用いた実験推定値と計算推定値を比較した。基本幾何形状モデルに対し、IEEE 規格で定められた局所 SAR 実験的不確かさと同程度の精度で測定できることを明らかにし、提案する全身平均 SAR 実験評価系の有効性を明らかにした。

第5章は、第4章で構築した全身平均 SAR 実験系を用いた、基本姿勢(立姿勢)ファントムの実験値を取得し、FDTD 数値解析により推定される計算値との比較を行った。立姿勢ファントムは、MRI 画像に基づき作製された高精度数値人体モデルを元に、シリコンゴムとカーボンナノチューブの混合材を母材とする固体ファントム材料を用いて、日本人および欧州人の成人男性・男児の計4種類の物理ファントムを製作した。人体ファントムに対して正面方向から垂直偏波の2GHz帯平面波電磁界をばく露した場合についての全身平均 SAR 評価を実施し、提案実験系を用いた実験値が計算機推定値と比べて30%程度の差で評価できることを確認した。さらに、ICNIRPの参考レベルばく露環境下において、4種の物理ファントムの全身平均 SAR 値と基本制限値との比較を行った。

第6章は、第5章での立姿勢ファントムに対する垂直偏波平面波の正面方向ばく露に加え、様々な電波ばく露環境を想定した全身平均 SAR 評価結果について述べた。本章にて示す全身平均 SAR 評価結果は、人体ファントムの姿勢変更、ファントムに対する電磁界のばく露偏波面、および平面波到来方向の変化に起因する全身平均 SAR へのばらつき量を示したものである。さらに、第5章の評価結果も踏まえ、電波防護指針の適用性を明らかにした。

第7章は、結言であり、本研究の結論と得られた成果を最後に概括した。さらに、今後の課題についても簡潔に述べた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	野島俊雄
副査	教授	宮永喜一
副査	特任教授	小柴正則
副査	教授	小川恭孝
副査	准教授	山本学

学位論文題名

高周波電磁界ばく露における全身平均SAR評価法に関する研究

(A Study of Whole-Body Averaged SAR Estimation Methodologies for Human Exposure to Radio-Frequency Electromagnetic Fields)

携帯電話・デジタル放送・無線 LAN 等の無線機器の出力電力は、電磁界強度指針値や全身平均 SAR(Specific Absorption Rate) 等の基礎指針値によって制限されている。これら無線通信電波に対する人体防護に関して、国際的には、国際非電離放射防護委員会(ICNIRP)やIEEEによる指針、我が国においては総務省の防護指針が定められている。近年の高品質・大容量化に向けた新たな無線通信技術の開発により、携帯電話基地局や放送局などからの電波について、指針への適合性評価の更なる信頼性向上にむけた取り組みへの社会的要求が世界各国で高まっている状況にある。

電磁界強度指針を裏付けるための計算推定は、数値化された疑似人体(ファントム)を用いて実施されている。全身平均 SAR は、ファントム全身の内部電界を体積分することで与えられる値であるが、計算推定値は解析の手法やプログラムコード等の違いによりばらつきが生じるため、精度の高い実験データとの比較による妥当性の確認が重要である。従前、人体ファントムの電磁波吸収量の実験測定として、サーモグラフィやカロリメータを用いた結果が報告されているが、これら手法は高精度化の困難さ等に加え、寸法や姿勢の異なるファントムに対する適用が難しいという課題があった。

本論文は、これら課題に対し、ファントムの外部電磁界を用いた全身平均 SAR 評価法を新たに提案している。提案された手法は、ファントム周辺環境電磁界計測に基づく全身平均 SAR 評価法であり、ファントムの形状や寸法に変更が生じた場合においても実験計測可能である。

第1章は導入部であり、本研究の目的と意義、および電波防護指針と防護指針で用いられる SAR 等の物理量について述べている。電磁波ばく露により生じる人体全身の吸収電力量である全身平均 SAR について述べ、全身平均 SAR の計算および実験手法を概説している。

第2章は、FDTD(Finite Difference Time Domain)解析を用いた SAR 推定手法について述べている。さらに、FDTD セルサイズの分解能に起因する SAR 計算値へのばらつきを示し、全身平均 SAR 推定に人体内部の電界を用いた場合の推定精度について明らかにしている。

第3章は、外部電磁界円筒走査に基づく全身平均 SAR 評価法を新たに提案し、その原理および基本特性について述べている。用いる円筒走査電磁界測定手法は、円筒天頂部の電磁界を計測できないため、円筒天頂部より流出する電力の影響を低減する手法として測定空間内に電磁界発生装置のみ

を設置した場合の測定電力を評価系への入力電力とする方法を提案している。FDTD 解析を用いた数値シミュレーションにより、実験測定による誤差を含まない条件における提案手法の妥当性を確認している。

第4章は、実験系の構成について示し、基本幾何形状ファントムを用いた実験系の基本特性について述べている。提案した実験系は、電界測定装置、平面波ばく露装置および人体の電磁気的特性を模擬した物理ファントムにより構成される。基本幾何形状モデルに対する基本特性評価を行い、提案手法を用いた実験推定値と計算推定値を比較している。IEEE 規格で定められた局所 SAR 実験的不確かさと同程度の精度で測定できることを明らかにし、提案した全身平均 SAR 実験評価系の有効性を確認している。

第5章は、第4章で構築した全身平均 SAR 実験系を用いた、基本姿勢(立姿勢)ファントムの実験値を取得し、FDTD 数値解析により推定される計算値との比較を行っている。立姿勢ファントムは、MRI 画像に基づき作製された高精度数値人体モデルを元にシリコーンゴムとカーボンナノチューブの混合材を母材とする固体材料を用いて、日本人および欧州人の成人男性・男児の計4種類の物理ファントムを製作した。それらファントムに対し正面方向から2GHz帯平面波電磁界をばく露した場合についての全身平均 SAR 評価を実施し、提案実験系を用いた実験値が計算機推定値と比べ30%程度の差で評価できることを明らかにしている。さらに、ICNIRPの参考レベルばく露環境下で4種の物理ファントムの全身平均 SAR 値と基本制限値との比較を行っている。

第6章は、5章で検討されたばく露条件を変更し、人体ファントムの姿勢変更、ファントムに対する電磁界のばく露偏波面、および平面波到来方向の変化に起因する全身平均 SAR へのばらつき量を示している。さらに、電波防護指針の適用性を検証している。

第7章は、結言であり、本研究の結論と得られた成果をまとめている。

これを要するに、著者は、携帯電話等の無線通信周波数帯における電波の安全性評価に資する測定技術に関して有益な新知見を得たものであり、環境電磁工学分野の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。