

携帯電話における電磁界ドシメトリ評価技術の研究

学位論文内容の要旨

携帯電話を始めとする電波利用システムにおける EMC(Electromagnetic Compatibility; 電磁界両立性)の最も重要な目的の1つは、意図的に発する電波に関わる安全性に知見を明らかにし、関連の技術を確立することである。そしてその対象分野は、“基準・規格への適合確認”と“電磁界両立性の探索”という2つのカテゴリに大別できる。電波の生体への安全性評価の上では、前者は“ある装置の発した電波による生体のエネルギー吸収量について予め定められた限度値を満足しているか”、後者は“電波による生体のエネルギー吸収量がどのくらいになると生物学上の有意差もしくは影響が出るのか”ということに相当する。したがって、電波による生体のエネルギー吸収量の定量的評価、いわゆる電磁界ドシメトリは、どちらのカテゴリにおいても非常に重要な技術である。

“基準・規格への適合確認”の一つに、携帯電話端末の SAR(Specific Absorption Rate; 比吸収率)測定がある。一般的に、液体ファントムを用いた SAR 測定装置が用いられている。液体ファントム内で電界プローブを走査して詳細な SAR 分布を得るので精度の高い測定が可能であり、適合性評価に供している。一方、水分の蒸発等により電気的特性の変化への注意が必要であり、取扱いが容易ではないというデメリットもある。そこで、固体ファントムを用いることでそれらを解決することを提案した。側頭部の SAR 測定に対応すべく、頭部形状の固体ファントムと電界プローブを組み合わせるにより測定系を構築した。液体中のように電界プローブを動かすことはできないが、手早く簡易に側頭部の SAR を得られる特長を有する。FDTD(Finite Difference Time Domain)法を用いた数値計算により、固体ファントムの電界プローブ挿入穴の直径と電気的特性の範囲について設計を行い、測定装置を構成した。携帯電話機 32 機種を用いた実測を行い、標準化された電界プローブ走査法によって得られた結果と比較したところ、約 77 パーセントの携帯電話機に対して偏差 30 パーセント以内で 10 g 平均 SAR を求めることができた。残り 23 パーセントの機種についても、偏差 50 パーセント以内で 10 g 平均 SAR を求めることができた(第2章)。さらに、側頭部以外の SAR 測定に対応すべく、平板状の固体ファントムと複数の電界プローブを組み合わせるにより測定系を構築した。ファントム形状の対称性から、携帯電話等の評価対象を走査することで詳細な SAR 分布が得られ、SAR 測定法規格に沿った厳密な局所 SAR 測定が可能となる特長を有する。FDTD 法を用いた数値計算により、ファントムの大きさ、プローブの径、およびプローブの間隔について設計を行い、測定装置を構成した。標準化された電界プローブ走査法によって得られた結果と比較したところ、設計どおりのパラメータであれば偏差 10 パーセント以内で 10 g 平均 SAR を求めることができた。IEC(International Electrotechnical Comission; 国際電気標準会議)規格 62209-2(ドラフト)および IEEE(Institute of Electrical and Electronic Engineers; 電気電子学会)規格 1528-200X(ドラフト)にて SAR 測定の時間短縮技術として引用されている通り、産業的観点から有用である(第3章)。

“電磁界両立性の探索”の一つに、電波の生体影響評価がある。中でも in vitro(細胞)実験は、in

vivo(動物) 実験と比較してサンプル数を多くできる、また電波ばく露量を制御しやすいという特長がある。In vitro 実験用電波ばく露装置としては、導波管や TEM セル内に細胞と培養液を満たした培養皿を設置し、電界を閉じ込めて印加するタイプのものでよく用いられている。しかし、一度に取り扱える培養皿の数が少ないことや、細胞の様子を観察するためには培養皿を一度取り出さなければならぬという問題点があった。そこで、培養装置自体を電波の透過する材料で構築し、外部から電波を吹き付ける方法を提案し、評価・構築を行った。この構成により、同時に電波照射できる細胞サンプル数を閉じ込め型に比べて格段に増やすことができる。培養液中の SAR 評価にあたっては、培養皿の形状や培養液の量を忠実に再現するために、任意形状や不連続形状の電磁界解析に適した FDTD 法を用いた。また、培養液の温度上昇を把握することは in vitro 実験用電波ばく露装置に開発において非常に重要である。温度評価にあたって、ドシメトリ計算結果をそのまま熱源として取り込むことのできる、熱輸送方程式を用いた。温度、湿度、二酸化炭素濃度などの細胞培養環境が安定的に供給できていることを実測し、また、実際に細胞を電波ばく露インキュベータ内で繁殖させてその増殖度を測定することにより、in vitro 実験における汎用的な細胞培養環境が供給できていることを確認した。本装置の構築により大規模な in vitro 実験が実施可能となり、携帯電話オペレータ 4 社共同実験や ARIB(Association of Radio Industries and Businesses; 電波産業会) 委託実験にも利用された(第 4 章)。

電磁界ドシメトリ評価において重要なパラメータの一つに、損失体の電気的特性がある。しかし、特にドシメトリ計算においては外部文献から引用されることが多い。そこで、一般的に損失性媒体の電気的特性の評価に良く用いられている同軸プローブ法だけでなく、電波工学の極めて基本的な原理に立ち返った測定法を提案し、高含水組織の電気的特性を評価した。純水について、一般化された定式とよく一致することが確認できた。また、ヒトと同じ哺乳動物の例として豚、牛、羊、および鶏の食肉について、同軸プローブ法によって電気定数を求めた。各サンプルによって電気定数に大きな差がない、筋肉繊維の方向による電気定数の依存性が小さい、また、電気定数そのものに 10 パーセント程度の偏差が含まれることが分かった。したがって、哺乳動物の各組織の電気定数測定の結果をヒトの各組織に当てはめることが妥当である、ドシメトリ評価において異方性を考える必要がない、ドシメトリ評価においても 10 パーセント程度の偏差が必然的に含まれることが明らかになった。併せて、損失性媒体の中での電磁界の基本的な挙動の把握として、特に携帯電話端末のように波源が近接する場合に注目して評価した。アンテナ近傍においても遠方においても、損失性媒質がない場合と比較して損失性媒質がある場合に磁界強度が大きくなる範囲があることを確認した(第 5 章)。

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 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

携帯電話における電磁界ドシメトリ評価技術の研究

携帯電話を始めとする電波利用システムにおける EMC(Electromagnetic Compatibility; 電磁界両立性)の重要な目的の1つは、意図的に発する電波に関わる安全性に知見を明らかにし、関連の技術を確立することである。その対象分野は、“基準・規格への適合確認”と“電磁界両立性の探索”という2つのカテゴリに大別できる。電波の生体への安全性評価では、前者は“ある装置の発した電波による生体のエネルギー吸収量について予め定められた限度値を満足しているか”、後者は“電波による生体のエネルギー吸収量がどのくらいになると生物学上の有意差もしくは影響が出るのか”ということに相当する。したがって、電波による生体のエネルギー吸収量の定量的評価、いわゆる電磁界ドシメトリは、どちらのカテゴリにおいても非常に重要な技術である。

本論文は、電磁界ドシメトリ計算による設計と測定による妥当性確認を行いながら、測定系および実験装置の構築を行ったものであり、これらの内容につき、各章で詳細を述べている。

第1章は論文の導入部であり、本研究の目的と意義について述べている。

第2章は、携帯電話端末の SAR(Specific Absorption Rate; 比吸収率)測定について、新たに固体ファントムの適用を提案している。FDTD(Finite Difference Time Domain)法を用いた数値計算により、固体ファントムの電界プローブ挿入穴の直径と電気的特性の範囲について設計を行い、測定装置を構成している。携帯電話機32機種を用いた実測を行い、標準化された電界プローブ走査法によって得られた結果と比較して、約77パーセントの携帯電話機に対して偏差30パーセント以内で10g平均SARを求めることができること、残り23パーセントの機種についても、偏差50パーセント以内で10g平均SARを求めることができることを示している。

第3章は、平板状の固体ファントムと複数の電界プローブを組み合わせた測定系について検討している。数値計算により、ファントムの大きさ、プローブ径、およびプローブ間隔について設計を行い、測定装置を構成している。標準化された電界プローブ走査法によって得られた結果と比較し、偏差10パーセント以内で10g平均SARを求めることができることを明らかにしている。これら成果は、IEC(International Electrotechnical Commission; 国際電気標準会議)規格62209-2(ドラフト)およびIEEE(Institute of Electrical and Electronic Engineers; 電気電子学会)規格1528-200X(ドラフト)にてSAR測定の時間短縮技術として引用されており、産業的観点からも有用である。

第4章は、電波の生体影響評価のための *In vitro* 実験用電波ばく露装置について検討している。従来、導波管や TEM セル内に細胞と培養液を満した培養皿を設置し、電界を閉じ込めて印加するタイプのものがよく用いられている。しかし、一度に取り扱える培養皿の数が少ないことや、細胞の様子を観察するためには培養皿を一度取り出さなければならないという問題点があった。そこで、培養装置自体を電波の透過する材料で構築し、外部から電波を吹き付ける方法を提案し、評価・構築を行っている。培養液の温度上昇を把握することは *in vitro* 実験用電波ばく露装置に開発において非常に重要である。そこで、温度、湿度、CO₂ 濃度などの細胞培養環境が安定的に供給できていることを実測し、また、実際に細胞を電波ばく露インキュベータ内で繁殖させてその増殖度を測定することにより、*in vitro* 実験における汎用的な細胞培養環境が供給できていることを確認している。本装置の構築により大規模な *in vitro* 実験が実施可能となり、携帯電話オペレータ 4 社共同実験や ARIB (Association of Radio Industries and Businesses; 電波産業会) 委託実験にも利用されている。

第5章は、損失体の電気的特性測定法について検討している。電波工学の極めて基本的な原理に立ち返った測定法を提案し、高含水組織の電気的特性を評価している。ヒトと同じ哺乳動物の例として豚、牛、羊、および鶏の食肉について、同軸プローブ法によって電気定数を求めている。各サンプルによって電気定数に大きな差がない、筋肉繊維の方向による電気定数の依存性が小さい、また、電気定数そのものに 10 パーセント程度の偏差が含まれることを明らかにし、哺乳動物の各組織の電気定数測定の結果をヒトの各組織に当てはめることが妥当であることを示している。さらに、損失性媒体の中での電磁界の基本的な挙動の把握として、特に携帯電話端末のように波源が近接する場合に注目して評価を行い、アンテナ近傍および遠方においても、損失性媒質がない場合と比較し損失性媒質がある場合に磁界強度が大きくなる範囲があることを明らかにしている。

これを要するに、著者は、携帯電話利用の安全指針などに対する実験的根拠および電波の有効利用拡大に寄与する基盤技術に関して有益な新知見を得たものであり、情報通信技術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。