

ミワ ケイシ

氏 名 三輪 圭史

学 位 の 種 類 博士（工学）

学 位 記 番 号 博第1241号

学 位 授 与 の 日 付 2022年3月31日

学 位 授 与 の 条 件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学 位 論 文 題 目 Human Dosimetry and Compliance Assessment for Low Frequency Magnetic Field Exposure  
(低周波磁界ばく露に対するドシメトリと適合性評価)

論文審査委員 主査 教授 平田 晃正  
教授 菊間 信良  
教授 王 建青  
教授 上村 佳嗣  
(宇都宮大学)

## 論文内容の要旨

電磁界が生体に与える影響の安全性を担保するために、ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection : 国際非電離放射線防護委員会) や IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers : 米国電気電子学会) は、ガイドライン／規格を発行している。それらのガイドライン／規格では、10MHzまでの周波数帯では神経刺激に対する防護を目的とし、体内誘導電界を用いた制限（基本制限）が規定されている。しかし、体内誘導電界を測定することは困難なため、人体全身が一様でばく露されると仮定した上で、体内誘導電界が基本制限値を下回る外部磁界強度の制限値（参考レベル）が導出された。しかしながら、実際のばく露環境では、電磁界分布は非一様で、且つばく露される人体の部位は四肢が主となる場合（以下、局所ばく露）が多いため、過度に安全側の参考レベルになる可能性がある。2002年に発行されたIEEE規格(IEEE C95.6-2002)では、人体モデルとして橢円モデルを用い、四肢に対する参考レベルが制定されているが、依然として一様ばく露を前提とされている。ICNIRPガイドラインでは、局所ばく露が考慮された参考レベルは存在していないものの、2020年に発行された高周波ガイドラインでは新たに導入されている。一方、適合性評価規格IEC (International Electrotechnical Commission)においては、実測可能な外部磁界強度での適合性が重視されており、体内誘導電界に対する磁界強度の寄与率を示す結合係数（緩和係数）が、局所ばく露の評価手法として定義されている。しかしながら、ICNIRP/IEEEにおいて結合係数の学術的根拠が示されてない。そこで本論文は、数値解析と理論式に基づき、人体にばく露する外部磁界分布から簡易的に体内誘導電界を予測する手法の構築を目的とし、国際ガイドラインに知見を提供するものである。

まず、体内誘導電界の簡易予測手法構築を目的に、直方体の簡易人体モデルを用いて、一様磁界にばく露されたモデル上のスカラーポテンシャルと体内誘導電界の関係性を調査した。その結果、スカラーポтенシャルは、直方体の長辺上で一次関数的に増減し、それ故、長辺上での体内誘導電界が短辺より大きい値を示していた。また、モデル頂点のスカラーポтенシャルの値は、人体に垂直に貫く磁界の面積積分値の半分となった。以上の知見より、磁界分布とばく露する人体の形状から体内誘導電界を理論的に導出する方法を提案した。数値解析で求めた結果と比較すると、直方体のアスペクト比が1:2より大きい場合、8%以内の精度で予測できることが分かった。一方、1:2より小さい場合、各頂点のスカラーポтенシャルの値が磁界の面積積分値の半分より小さい値になるため、予測式の方が数値解析で求めた結果より33%超過することがわかった。さらに、IEEE C95.6-2002で用いられた2次元の楕円モデル、TARO、Dukeモデルに体内誘導電界の予測式を適用した結果、99%ileアルゴリズムにおいて、最大23%未満の精度であり、その有効性を確認した。またTAROモデルの足に一様磁界がばく露された場合、結合係数が0.02となり、安全側の結果であることを示した。

次に、車両に搭載された無線電力伝送（WPT）を磁界発生源として、運転席、後部座席の乗員へのばく露を想定した際の、人体各部位（足、腕、太腿と臀部、胴：自動車の製品規格IEC TS 62764で定義）における外部磁界強度、体内誘導電界、結合係数を導出した。その結果、外部磁界強度は、後部座席の乗員の足において最も高く、ICNIRP 2010の参考レベルの1.1倍となった。しかし、体内誘導電界は基本制限値の0.04倍となり、一様ばく露が想定されている現在の参考レベルを局所ばく露に適用した場合、安全側の評価となつた。また結合係数は、最小値は運転者の腕部で0.045、最大値は後部座席乗員の太腿と臀部で0.098と、部位によって最大で2倍程度異なる値を示した。従って、ばく露シナリオ毎に、体内誘導電界や結合係数を導出する必要があり、適合性評価を容易に実施できないことが明らかとなつた。今後、想定されるばく露シナリオで予測式を適応し、評価手法の構築を実施する。

上記検討と並列に、数値解析における体内誘導電界の特異点除去アルゴリズムの検討をした。従来検討では先行研究で提案された99.9%ile値を用いていたが、IEEE C95.1-2019規格に皮膚間に生じる体内誘導電界の特異点を除去するアルゴリズムが規定された。そのためIEC TS 62764で定義された人体部位における体内誘導電界／結合係数を算出することで、最適なアルゴリズムを検討した。先の検討（車両搭載されたWPT）と同様なばく露環境とした場合、IEC TS 62764で規定される人体の部位において、結合係数の相違は1%未満であった。そのため、先行研究で提案されていた特異点除去アルゴリズムにおいて、IEEE C95.1-2019のアルゴリズム追加は、保守的な手法でないことが明らかとなつた。従って、本論文では99.9%ile値と皮膚間に生じる体内誘導電界の特異点除去を採用した。

# 論文審査結果の要旨

本論文に対し、2021年12月13日に電気・機械工学専攻内審査、2022年2月21日に公聴会および審査が行なわれた。

本論文は、電磁界に関する理論および関連する解析手法およびを用いて、低周波磁界からの生体防護ガイドラインの策定、また関連する製品安全性担保手法を提案するものであり、全6章より構成される。

第1章は、序論であり、本論文の研究背景と研究目的について述べている。

第2章では、本論文で用いた解析手法および数値モデルの概要について述べている。

第3章では、A Method for Predicting the Induced Electric Field for Local Exposureと題し、体内誘導電界の簡易予測手法構築を目的に、直方体の簡易人体モデルを用いて、一様磁界にばく露されたモデル上のスカラーポテンシャルと体内誘導電界の関係性を調査した。その結果、スカラーポテンシャルは、直方体の長辺上で一次関数的に増減、長辺上での体内誘導電界が短辺より大きい値を示すことを示した。この知見より、磁界分布とばく露する人体の形状から体内誘導電界を理論的に導出する方法を提案している。

第4章では、Compliance Assessment for Wireless Power Transfer System in Vehicle for Local and Nonuniform Exposureと題し、車両に搭載された無線電力伝送（WPT）を磁界発生源として、運転席、後部座席の乗員へのばく露を想定した際の、人体各部位（足、腕、太腿と臀部、胴：自動車の製品規格IEC TS 62764で定義）における外部磁界強度、体内誘導電界、結合係数を導出した。ばく露シナリオ毎に、体内誘導電界や結合係数を導出する必要があり、適合性評価を容易に実施できないことを明らかにしている。

第5章では、Effects of Skin-to-Skin Contact for Post-processing Algorithmと題し、数値解析における体内誘導電界の特異点除去アルゴリズムの検討をした。従来検討では先行研究で提案された99.9%ile値を用いていたが、IEEE C95.1-2019規格に皮膚間に生じる体内誘導電界の特異点を除去するアルゴリズムが規定された。IECで規定される人体の部位に適用したところ、結合係数の相違は1%未満であった。そのため、先行研究で提案されていた特異点除去アルゴリズムにおいて、IEEE C95.1-2019のアルゴリズム追加は、保守的な手法でないことを明らかにしている。

第6章は、第3章から第5章までの研究成果を総括し、将来課題について述べている。

以上の研究成果は、IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibilityに査読付原著論文2篇、EMC Europeに査読付国際会議論文1篇の計3篇において公表されており、低周波の生体防護に関する物理知見、さらにはその知見の実デバイスに対する適合性評価法などへの適用と、それにより得られた結果は電波の安全性評価に関する国際ガイドラインにおいて多大な貢献をするものと認められ、その価値は学術的にも高い。

以上を総合して、本論文は博士（工学）の学位論文として十分値するものと認める。