

氏名	セキバ ヨウイチ 関場 陽一
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1335号
学位授与の日付	2024年6月19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	Dosimetry of Internal Electric Field in Human Body for Exposure to Low- and Intermediate-Frequency Electromagnetic Fields (低周波-中間周波の環境電磁界による人体内誘導電界のドシメトリ評価)
論文審査委員	主査 教授 安井 晋示 教授 平田 晃正 准教授 日景 隆 (北海道大学)

論文内容の要旨

低周波から中間周波までの電磁界の生体に与える影響は、100kHz 以下では誘導電流による神経などへの刺激作用が支配的である。電磁界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) ガイドラインやIEEE 規格など(以下、国際ガイドラインと総称)で許容体内誘導物理量が定められている。これら国際ガイドラインにおいては、電磁界により人体内に誘導される電界(体内誘導電界)の許容値である基本制限値と、基本制限値を下回る外部電磁界強度に対する制限値(参考レベル)が定められている。ICNIRP ガイドラインの磁界ばく露に対する参考レベルは、数値人体モデルによる電磁界解析結果に安全率を掛けたものとして定められているが、IEEE 規格における磁界の参考レベルは一様な磁界中の均質な楕円体モデルにおける誘導電界の解析解に基づいて定められており、磁界と人体のカップリングが精緻に考慮されているとは言い難い。また、国際ガイドラインの参考レベルは電界と磁界への個別のばく露に対し定められているが、電力設備の周囲においては電界と磁界の両方へのばく露(電磁界の重畳ばく露)も生じ得るため、そのような状況下においても参考レベルが安全側の閾値として裕度を有しているか検証が必要である。加えて、送電線下など一部の電力設備周囲においては、電界と磁界に位相差が生じるが、電磁界の重畳ばく露条件においてこの位相差が体内誘導電界に与える影響は明らかにされていない。

なお、国際ガイドラインの適合性評価に一般的に用いられる解像度 1~2mm の数値人体モデルは数百万~数千万のボクセルから構成され、ドシメトリ解析には計算機メモリや計算所要時間の面で多大な計算コストを要する。特に低周波の電界ばく露に対するドシメトリ解析においては、静電誘導により人体表面に生じる表面電荷が体内に容量性電流を誘起するという物理過程の複雑さに起因し、準静的時間領域差分(FDTD)法などの従来手法では莫大な計算コストを要するため、この点についても技術的な課題として対処が必要である。

本研究では、上述した、国際ガイドラインの低周波~中間周波における電磁界の参考レベルの妥当性に関する課題を、数値人体モデルを適用したドシメトリ解析に基づき検証することを目的とした。

本研究ではまず、ドシメトリ解析の計算コストを低減するため、高速多重極表面電荷法とスカラーポテンシャル有限差分法(SPF)法の 2 段階計算による電磁界解析手法を開発した。具体的には、前段の表面電荷法によって人体の表面に誘導される表面電荷を解析し、その表面電荷により体内に生じる誘導電界を後段の SPFD 法によって解析するものである。最も計算コストを有する表面電荷法の支配方程式の求解部分に高速多重極法を適用し、高速化を実現した。結果として、開発手法では、従来手法である準静的 FDTD 法の約 1/5 の所要時間、約 2/5 の計算メモリで同程度の計算精度が得られることを示した。

次に、IEEE 規格における、参考レベルと基本制限の整合性について、成人男女の数値人体モデルを用いたドシメトリ解析により検証した。周波数 0.5 Hz ~5 MHz を対象とし、参考レベルの強度をもつ空間的に一様な磁界を人体モデルに印加し、同規格の基本制限対象である脳、心臓、四肢、その他の部位についてドシメトリ解析により体内誘導電界を評価した。その結果、一部の部位（心臓、四肢、その他の部位）においては、体内誘導電界強度が基本制限値を超過することを示した。この結果は、個別の部位に対する部分ばく露に対して定められた IEEE 規格の参考レベルが、全身のばく露条件下では基本制限に対する裕度を有していないことを示唆している。

最後に、電磁界の重畳ばく露条件における電磁界の位相差の体内誘導電界への影響について、成人男女および小児の数値人体モデルを用いたドシメトリ解析により検証した。ICNIRP ガイドラインおよび IEEE 規格の参考レベル相当の強度をもつ周波数 50 Hz の電界・磁界を人体モデルに印加し、ドシメトリ解析により体内誘導電界を評価した。なお、電界と磁界の位相差は -90° ~ $+90^{\circ}$ とした。解析の結果、体内誘導電界は位相差に応じて変動し、その変動度合いは部位に依存することを明らかにした。また、ICNIRP ガイドラインの参考レベル相当のばく露条件では今回考慮した全範囲の位相差において基本制限値を下回ることを示した。一方、IEEE 規格の参考レベルのばく露条件では一部の部位で基本制限値を上回ったが、上述の検証で明らかにしたように、これは IEEE 規格の磁界の参考レベルが基本制限に対する裕度を有していないためである。

論文審査結果の要旨

本論文に対し、2024年1月24日に電気・機械工学専攻内審査、2024年5月8日に公聴会および審査が行なわれた。

本論文は、環境電磁界による健康影響について、数値人体モデルを用いたドシメトリ解析に基づき低周波～中間周波の電磁界防護に関わる検討を目的としたものであり全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モデルと解析手法について述べている。

第3章では、高速多重極表面電荷法とスカラーポテンシャル有限差分法 (SPFD) 法の2段階計算による電磁界解析手法を開発、低～中間周波におけるドシメトリ解析の計算コスト低減を図っている。最も計算コストを有する表面電荷法の支配方程式の求解部分に高速多重極法を適用することで、従来手法である準静的FDTD法の約1/5の計算時間、約2/5の計算メモリに削減することを実現した。

第4章では、解剖学的人体数値モデルを用いた精緻なドシメトリ解析に基づき、IEEE規格における参考レベルと基本制限の整合性について議論している。各周波数の参考レベルと同強度の一樣磁界ばく露解析を行い、基本制限対象である脳、心臓、四肢、その他の部位における体内誘導電界を算出し、一部の部位においては、体内誘導電界強度が基本制限値を超過することを示唆した。

第5章では、電磁界の重畳ばく露条件における電磁界の位相差の体内誘導電界への影響について検証を行っている。電界と磁界の位相差 ($-90^\circ \sim +90^\circ$) を考慮した際の、参考レベル相当の強度をもつ電磁界の重畳ばく露における体内誘導電界を算出し、体内誘導電界は位相差に応じて変動し、その変動度合いは部位に依存すること、ICNIRPガイドラインの参考レベルにおける体内誘導電界値は基本制限値を下回ること、IEEE規格の参考レベルのばく露条件では一部の部位で基本制限値を上回ることを示唆した。

第6章は、第3章、第4章、第5章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 Accessなど査読付原著論文3篇として公表されており、低～中間周波における基本制限値と参考レベルの関係性や、電磁界の重畳ばく露における影響の評価など、得られた結果は電磁界の安全性評価に関する国際ガイドラインに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。