

コデラ サチコ

氏名	小寺 紗千子
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	論博第302号
学位授与の日付	平成31年3月27日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当 論文博士
学位論文題目	Dosimetric Evaluation in Rats and Humans for Radio-Frequency Exposure with Multiphysics Simulation (複合物理解析を用いたヒト・ラットに対する高周波ドシメトリ評価)
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

論文内容の要旨

電波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、100kHz 以上では電力吸収による熱作用が支配的である。電波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 規格などで許容体内誘導物理量が定められている。携帯型端末などからの局所的なばく露に対する評価指標として、局所 10g 平均 SAR (Specific Absorption Rate : 比吸収率) が用いられている。これらの基準値は、倫理上の理由などから、動物実験などから得られた知見を人体に外挿し、低減係数をかけることによって定められている。しかしながら、国際ガイドラインにおける局所 SAR の適用上限周波数は、ICNIRP ガイドラインでは 10GHz、IEEE 規格では 3-6GHz と異なるなど、十分な生物学的根拠に基づいて定められているとは言い難い。近年、10GHz 帯第 5 世代移動体通信システム (5G) の研究開発が進んでおり、今後予想される高周波数帯の利用拡大に向けて国際ガイドラインの改定が行われている。このような背景のもと、高強度なばく露領域において血流変化などの温熱生理学的反応を惹起するしきい値の検索は重要である。また先行研究において、温熱調整機能を考慮した局所ばく露における温度上昇を計算した例はなく、動物とヒトの温度上昇を比較した報告もない。従って、これらの点が明らかになれば、国際ガイドライ

ンに有用な知見を提供できると考えられる。

本研究では、ヒト・ラットにおける高周波局所ばく露における温度上昇を、温熱調整機能を考慮した複合物理解析を用いて計算し、両者の差異を明らかにすること、また高周波ばく露の誘導物理量評価を目的とした。

まず、ラット頭部局所ばく露実験で得られた脳温度、血流変化の測定値を用いた脳血流モデルの高精度化を行った。生体における熱調整が体内深部と局所の温度変化に寄与するとの仮説から、脳血流は直腸温と脳温度に依存するとみなし、脳血流モデル式のパラメータを最小二乗法により抽出、得られたモデル式で、ラット頭部局所ばく露の脳温度変化を複合物理解析により計算した。周波数 1.5, 6, 10GHz において、計算値は、実測値と誤差 10%以内で一致しており、提案モデルの有効性を確認した。

次に、得られた血流モデルを人体に外挿し、周波数 3-10GHz において、ダイポールアンテナによる局所ばく露時のラットおよびヒト頭部における最大温度上昇と熱時定数を比較した。頭皮から脳表までの深さの違いから、脳組織の最大温度上昇は、ラットよりもヒトのほうが低くなることを確認した。また、皮膚における熱時定数は周波数の増加と共に減少し、有効 SAR 体積によって特徴付けられることを示した。

次に、ヒトの定常温度分布を考慮して、0.3-10GHz の周波数帯域において皮膚・脳における局所ばく露温度上昇解析を行った。その結果、脳の最大温度上昇は、通常、脳中心部より 0.5-0.6℃ 低い脳表に現れ、基準値の 10 倍の電波強度において 40℃ に達した。脳内 SAR の温度上昇に対する寄与率は、1GHz で 25%程度、周波数が高くなるにつれてさらに減少することから、脳の温度上昇は皮膚などの外部組織からの熱伝導によると言える。そのため、周波数が高くなるにつれて脳の最大温度は低くなるが、著しい低下はない。また、基準値強度のばく露による脳の温度変化は約 1℃ であり、日常生活における変動の範囲内であることを示した。

最後に、短時間ばく露における温度上昇について検討を行った。局所 SAR の平均時間は 6 分と定められており、2018 年に発行された ICNIRP 草稿では、6 分未満の短時間ばく露からの過度な加熱を避けるために、吸収エネルギーに対する制限が設定された。しかしながら、このエネルギーが短時間に集中した場合、過度な温度上昇を引き起こす可能性がある。そこで、吸収エネルギーを一定にした場合の最大温度上昇をばく露時間ごとに計算した。その結果、特に 400MHz 以上の高周波数帯において、短時間でエネルギーが収集した場合、過度な温度上昇を引き起こす可能性を示唆した。また、ばく露時間に依存する回帰曲線からエネルギー制限を提案し、その回帰曲線を用いてエネルギー制限した場合の複数パルスばく露における温度上昇を、多層直方体モデル、人体頭部モデルにて計算した。その結果、連続ばく露における最大温度を数%上回る場合もあるが、提案回帰曲線によるエネルギー制限は、おおむね有効であることを示した。

論文審査結果の要旨

本論文に対し、平成30年11月20日に情報工学専攻内審査、平成31年2月5日に公聴会および審査が行なわれた。

本論文は、温熱調整機能を考慮した複合物理解析手法を用いて、ラットおよびヒトの電波ばく露にもなう温度上昇について定量的に評価、また電波の安全性について議論したものであり、全7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、本論文で用いた複合物理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、Modeling of Thermoregulationと題し、ラット頭部局所ばく露実験で得られた脳温度、血流変化の測定値から、脳血流モデルの高精度化を行っている。脳血流モデル式のパラメータを最小二乗法により抽出し、得られたモデル式を複合物理解析に組み込み、ラット脳温度変化を実測値と誤差10%以内で推定可能な技術としている。

第4章では、Comparison of Thermal Response for RF Exposure in Human and Rat Modelsと題し、局所ばく露時のラットおよびヒト頭部における最大温度上昇、熱時定数の相違を明らかにしている。現在の国際ガイドラインは動物実験で得られた知見を人体に外挿することで定義されているため、両者の相違を明らかにすることはガイドラインへの有用なデータとなる。

第5章では、Temperature Elevation of Brain and Skin in Humansと題し、ヒトの定常温度分布を考慮した皮膚・脳における高周波局所ばく露時の温度上昇について示している。脳内における最大温度上昇が、脳中心部より0.5–0.6℃低い脳表に現れること、また、基準値強度のばく露による脳の温度変化は約1℃であり、日常生活における変動の範囲内であることを示している。

第6章では、Temperature Elevation for Brief Exposureと題し、短時間ばく露における温度上昇について検討している。吸収エネルギーを一定にした場合のばく露時間ごとの最大温度上昇から、回帰曲線によるエネルギー制限を提案し、複数パルスばく露においても提案回帰曲線によるエネルギー制限がおおむね有効であることを示している。

第7章は、第3章から第6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、電子情報通信学会論文誌に1篇、International Journal of Environmental Research and Public Healthに2篇、BioMedical Engineering OnLineに1篇、IEEE Accessに1篇の合計5篇が論文として公表されており、温熱調整機能を考慮した局所ばく露における温度上昇や、短時間ばく露におけるエネルギー制限法など、得られた結果は電波の安全性評価や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。