

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04077

研究課題名(和文)3次元電磁界解析に基づく中間周波帯の人体ばく露安全評価と国際標準化

研究課題名(英文) International standardization of safety evaluation for intermediate frequencies using three-dimensional electromagnetic field analysis

研究代表者

田口 健治 (Taguchi, Kenji)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：60435485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：IEEE及びICNIRPでは、国際的な電磁波の安全基準ガイドラインが制定されている。特に中間周波における100kHz～10MHz帯では誘導電界に伴う刺激作用、電力吸収に伴う熱作用の双方からの防護が必要とされるが、両ガイドラインでは外部電界強度の制限値に約7.4～12.9倍もの差が存在していた。本研究では、解剖学に基づく人体モデルとFDTD法を用いた高精細ばく露評価により、SARと外部電界強度の関係性を明らかにした。その結果、ICNIRPではより保守的であるのに対し、IEEEでは30MHz未満で僅かな不一致があることが確認された。これらは適切な安全基準の改訂に貢献するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究開始当時におけるICNIRP及びIEEEの両ガイドラインは、解剖学に基づく詳細な人体数値モデルが開発される前に制定されたものであり、高精細な人体数値モデルを用いて人体のSARと外部電磁界強度の具体的な関係性を再検証することに学術的意義がある。更に、全電磁界解析に基づく高精度な3次元全身ばく露解析に基づくばく露評価により、科学的根拠に基づくデータを提供すること社会的意義がある。尚、本研究の結果は、2020年3月に発布されたICNIRP2020ガイドラインに引用されており、適切な安全基準の策定、安心・安全な電磁界利用の促進に貢献している。

研究成果の概要(英文)：In the ICNIRP guideline and the IEEE C95.1 standard, the dominant effect for electromagnetic field exposures at frequencies above 100 kHz is the thermal effect. The external field strengths or incident power density, corresponding to the limit for the whole-body- and 10g-averaged SARs, are also used as metrics for practical compliance purposes. However, the limits for the external field strengths differ by a factor of 7.4-12.9 in an intermediate frequency range (100 kHz to 100 MHz).

In this study, the relationship between the SARs and external field strengths has computed by using the human models. For the main finding, it was also found that the relationship between SARs and external field strength was satisfied, but was more conservative in the ICNIRP guidelines, whereas there were slight discrepancies below 30 MHz in the IEEE standard. The computational results would be useful for revising the permissible external field strength based on scientific results.

研究分野：計算電磁気学

キーワード：中間周波帯 人体ばく露 安全性評価 国際標準化 3次元電磁界解析 FDTD法 FDFD法

1. 研究開始当初の背景

近年、中間周波(世界保健機関(WHO)の定義：300Hz～10MHz)電磁界の利用拡大に伴い、人に与える影響について関心が高まっている。WHOが認める国際ガイドライン IEEE および国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)では、10MHz までの周波数帯では電気刺激、100kHz 以上の周波数帯では熱による影響からの防護のための基準値を定めている。特に 100kHz～10MHz までの周波数帯における電波の生体影響は、誘導電界に伴う刺激作用、電力吸収に伴う熱作用の両方を考慮する必要がある(図1)。刺激は瞬時の影響であるため、体内誘導電界の時空間最大値を用いて制限値が用いられている。一方、熱作用は体内吸収電力の6分間平均を用いて基準値が定められている。また、これら体内誘導物理量を生じさせないための対応する外部電磁界強度も定められている。

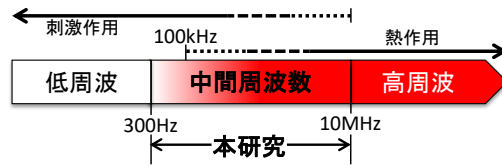


図1 本研究の周波数ターゲット

IEEE および ICNIRP 国際ガイドラインにおける、当該周波数帯での基準値の差は最大で約 10 倍に及ぶ。この要因として、中間周波数帯における生体安全性評価は、十分な理論検討を行わない上で近似解析を行ったこと、特に十分な検討が無いままに低周波における結果を外挿して定めているためと考える。具体的には、50Hz あるいは 20kHz (IH 調理器)の周波数帯においては、外部磁界の影響が支配的、かつ 2 次電流の影響が無視できるとし、解析において変位電流を無視して取り扱ってきた(以降、準静近似という)。一方、30MHz よりも高い無線周波においては、マクスウェル方程式に基礎を置く全電磁界解析を用いて解析がなされており数多くの報告例がある。これらガイドラインは解剖学に基づく人体数値モデルが登場する前に制定されたものであり、現在の高精度な人体モデルを用いて SAR と外部電磁界強度との具体的な関係を再検討する価値がある。全電磁界解析のうち FDTD 法が安定性および高速性などから頻用されるが、FDTD 法を用いた全電磁界解析することができれば、適切な安全基準の策定に大きく貢献でき、電磁界の安心・安全利用を促進できるはずである。尚、数値誤差の問題が中間周波で重要となる理由は、評価指標として一辺 2mm の立方体平均の体内誘導電界が用いられているためであり、高周波(10g 平均)に比べて極めて高い精度での評価が要求されるためである。

2. 研究の目的

本申請の独自性は、これまで低周波、高周波の人体安全性は別々のコミュニティが検討してきた電磁界安全性において、その中間となる周波数帯で十分検討がなされていない点に着眼し、2つの国際ガイドラインの調和に取り組む点にある。このような視点での研究は未だないことを確認している。また、中間周波数における人体電磁界解析において、全電磁界解析を適用するという取り組みには前例がない。この提案ができる技術的優位性は、全電磁界解析である FDTD 法とスーパーコンピュータによる大規模並列電磁界解析により解決を図るものである。更に、低周波解析による結果との比較により、生体電磁界解析を低周波から高周波まで一貫して扱える電磁界解析手法に関するガイドラインを提示する。これらの研究を通して、複数の電磁界解析結果を多角的に分析及び検討することにより、中間周波帯における電磁界安全基準を適切に設定できると考えている。更に、低周波解析技術に関する国際共同比較研究を通して、低周波から高周波まで一貫して扱える生体の電磁界解析手法を確立し、適切な安全基準の策定、安心・安全な電磁界利用の促進に貢献することを目標としている。

表1 人体数値モデルのパラメータ

Name	Height [m]	Weight [kg]	Number of Tissues
TARO	1.73	65	51
HANAKO	1.61	53	51
NORMAN	1.76	73	37
Duke	1.74	70	77
Thelonious	1.17	20	73

3. 研究の方法

(1) 電磁界解析手法

人体ばく露の電磁界解析では約数 100kHz 未満の周波数範囲では準静的近似、10MHz を超える周波数では全波解析が一般的に使用される。本研究では、準静的

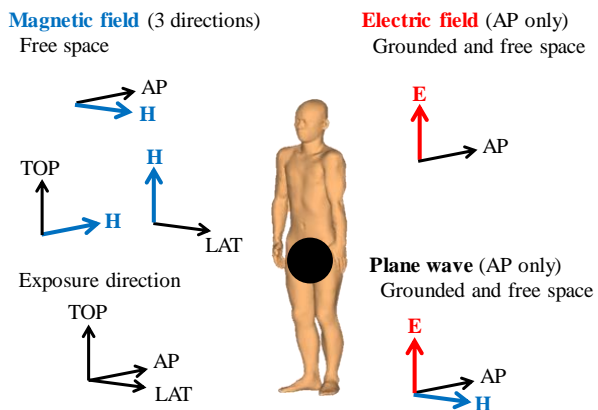


図2 電磁界入射方向の定義

近似としてボクセル要素に基づく準静有限要素法(Quasi-static Finite Element Method)、SPFD(scalar potential finite difference)、インピーダンス法の3手法、全波解析手法としてFDTD(Finite Difference Time Domain)法を用いた。

(2) 人体数値モデル

表1に本研究で用いた数値人体モデルを示す。本研究では、代表的な5つの人体数値モデルを用いた。ここで、TARO及びHANAKOは情報通信研究機構で開発された日本の成人男性及び女性モデル、NORMANは英国で開発された成人男性モデル、Duke及びTheloniousはスイスで開発されたヨーロッパ成人男性及び子供男性モデルである。尚、これらのモデルは全て一辺2mmのボクセルで構成されている。本研究では、高精度な人体数値モデルと数値計算を用いて、ICNIRP及びIEEEガイドラインで共通であるSAR(全身平均及び10g平均SAR)制限値に対応する電磁界強度参照レベルを導出する。図2に本研究で検証した電磁界入射方向の定義を示す。

また、SAR(Specific Absorption Rate)は各ボクセルにおける電界強度 $|\mathbf{E}|$ [V/m]、導電率 σ [S/m]、密度 ρ [kg/m³]を用いて以下の式で求められる。

$$SAR = \frac{\sigma}{2\rho} |\mathbf{E}|^2 \quad [\text{W/kg}]$$

4. 研究成果

本報告では、電界及び平面波ばく露の解析結果について示す。尚、電界ばく露は準静有限要素法、平面波ばく露はFDTD法により解析した。また、接地モデルについては完全導体平面上に直立した人体モデルを接地している。

図3にTAROモデルのSAR分布を示す。ここで、(a)及び(b)はそれぞれ60MHz自由空間及び30GHz接地の結果である。自由空間及び接地の両ケースにおいて局所SARは足首の周りにピークを生じている。これは、足首の断面積が小さいためである。電界及び平面波のばく露のSAR分布は互いに類似しており、SARは主に電界に起因することを示唆している。

図4にTAROモデルにおける全身平均(WBA: Whole-Body Averaged)SAR及び10g平均(Local)SAR制限値に対する電界強度参照レベルの周波数特性を示す。ここで、(a)及び(b)はそれぞれ自由空間配置及び接地された人体の結果である。尚、Duke及びTAROモデルについては既存研究の結果も併せて示している。図に示す様に、全身SARは自由空間モデルにおいて電界強度参照レベルを決定する大きな要因となる。一方、接地の場合については、特に四肢のSARがより大きな要因となる。

図5に自由空間配置及び接地モデルにおける全身平均SARの周波数特性を示す。全身平均SARの比較において、誤差が最大10%の範囲に収まる周波数範囲は自由空間モデルでは30MHz未満、接地モデルでは10MHz以下であった。これらの周波数範囲は、本研究における準静的近似の有効性の上限であると考えられる。

図6に接地された各人体数値モデルにおけるSAR制限値に対する電界強度参照レベルの周波数特性を示す。ここで、(a)及び(b)はそれぞれ全身SAR及び10g平均SARの制限値から導出された値である。全身平均SARによる曲線は約30MHzで最小値となる。更に、30MHz

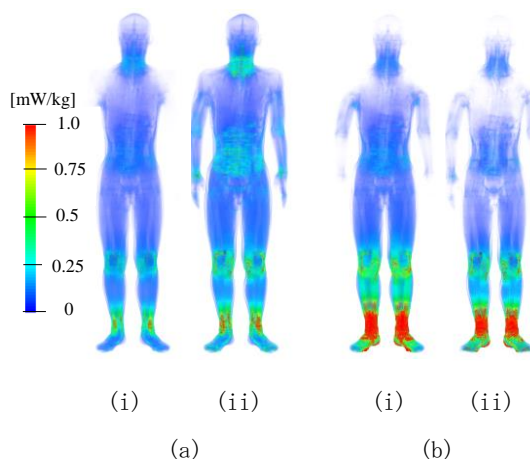


図3 TAROモデルのSAR分布: (a)60MHz自由空間, (b)30MHz接地

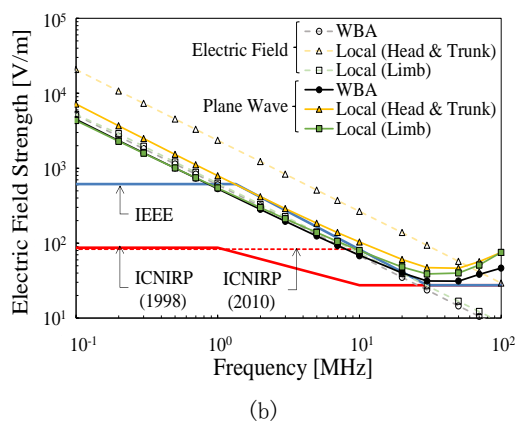
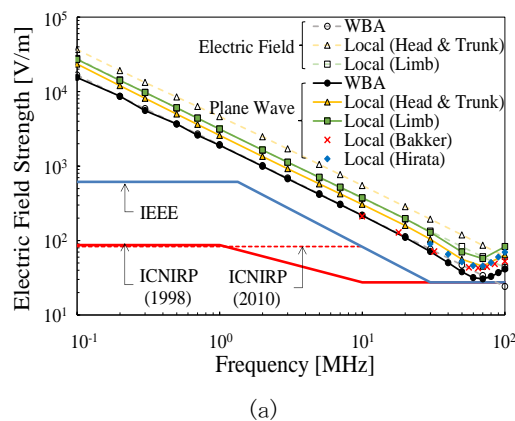


図4 TAROモデルにおける全身平均SAR及び局所SAR制限値に対する電界強度参照レベルの周波数特性: (a)自由空間, (b)接地

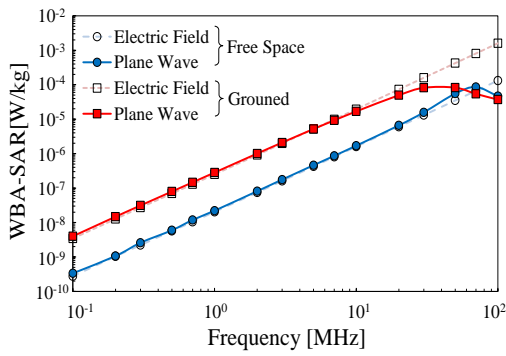


図5 自由空間及び接地モデルにおける全身平均 SARの周波数特性

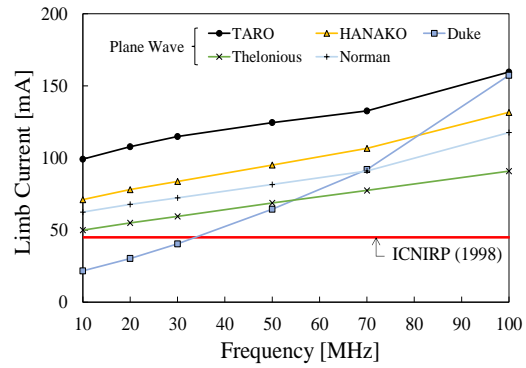
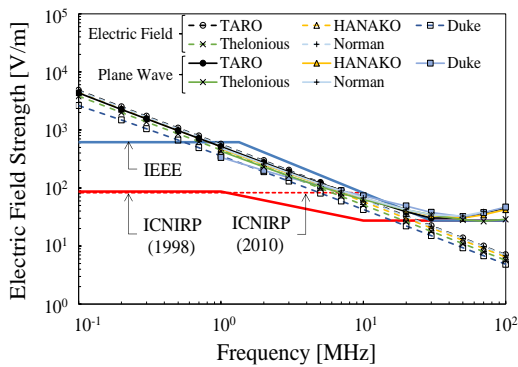
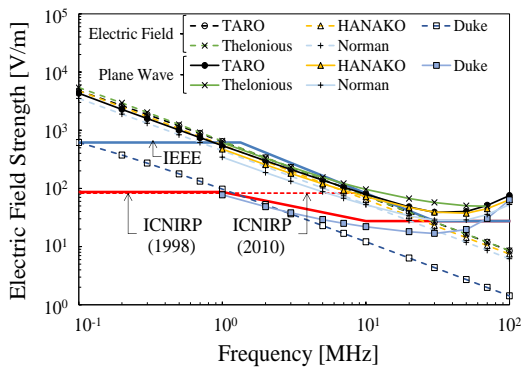


図7 10g平均SAR制限値に対する局所電流値の周波数特性



(a)



(b)

図6 接地された各人体数値モデルにおけるSAR制限値に対する電界強度参照レベルの周波数特性: (a)全身平均SAR, (b)局所SAR

未満の周波数範囲においてIEEEガイドラインに対する相違が観察される。一方、10g平均SARによる曲線にも同様に約30MHzで最小値となる。但し、Dukeモデルについては最小値となる周波数は他のモデルと同等だが、周波数全体に渡って電界強度参照レベルが他のモデルより値が小さくなる傾向を示した。これは、Dukeモデルの接地状況が他モデルと異なっており10g平均SAR最大値が親指のつま先の周り集中したためである。尚、他モデルの10g平均SAR最大値は足首の周りで観察されることを確認している。Dukeモデルを除いて約30MHz未満の周波数範囲でガイドラインと僅かな相違が観察された。

図7に10g平均SAR制限値に対する局所電流値の周波数特性を示す。ここでは、2W/kgの10g平均SARに対応した四肢電流値を示している。図6における10g平均SARの説明でも述べた様にガイドラインとの不一致はDukeモデルでのみ観察された。

5. まとめ

本研究では、中間周波数(主に100kHz~10MHz)における人体ばく露に関する内部物理量の相互比較を実施した。本相互比較の特徴は、異なる計算近似、つまり準静的近似と全波解析が適用された点にある。準静的近似が有効な最大周波数は、接地された人体の場合では約10MHz未満、自由空間に配置された人体では30MHz未満であった。更に、10平均SARについて100kHz~100MHzまでの外部電界強度との関係を導出した。その結果、研究開始時のICNIRPのガイドラインは30MHz未満の周波数では非常に保守的であるのに対し、IEEEガイドラインでは僅かな不一致が確認された。尚、本研究の結果は2020年3月に発表されたICNIRP2020ガイドラインに引用されており、適切な安全基準の策定、安心・安全な電磁界利用の促進に貢献している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 中西優大, 伊藤孝弘, 平田晃正, 田口健治, 柏達也	4. 巻 vol. J101-C, no. 5
2. 論文標題 サブグリッド法に基づくSPFD解析による一様磁界ばく露解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 pp. 256-275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Taguchi, I. Laakso, K. Aaga, A. Hirata, Y. Diao, J. Chakrothai, and T. Kashiwa	4. 巻 vol. 6
2. 論文標題 Relationship of External Field Strength with Local and Whole-body Averaged Specific Absorption Rates in Anatomical Human Models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 pp. 70186-70196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2018.2880905	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 平田晃正, 長谷川一馬, 小寺紗千子, Ilkka Laakso, 江川隆輔, 堀江祐圭, 矢崎菜名子, 田口健治, 柏達也	4. 巻 vol. 138, no. 6
2. 論文標題 複合物理解析に基づく熱中症リスク評価と応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 pp. 288-294
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.138.288	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 三隅隆志, 田口健治, 柏達也
2. 発表標題 中間周波数帯人体電磁ばく露評価のためのDFD並列計算の基礎検討
3. 学会等名 令和2年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小寺紗千子, 平田晃正, 田口健治, 柏達也
2. 発表標題 FDTD法によるミリ波帯人体全身SAR評価に関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 エレクトロニクスシミュレーション研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Taguchi, T. Kashiwa, A. Hirata
2. 発表標題 Development on High Resolution Human Voxel Model for High Frequency Exposure Analysis
3. 学会等名 PIERS (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 K. Wake, A. Hirata, K. Taguchi, and etc.	4. 発行年 2019年
2. 出版社 IOP Publishing Ltd.	5. 総ページ数 400
3. 書名 Computational Anatomical Animal Models	

1. 著者名 T. Kashiwa, K. Taguchi, and etc.	4. 発行年 2018年
2. 出版社 ARTECH HOUSE	5. 総ページ数 288
3. 書名 Antennas for Small Mobile Terminals	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	柏 達也 (Kashiwa Tatsuya) (30211155)	北見工業大学・工学部・教授 (10106)	
研究 分担者	平田 晃正 (Hirata Akimasa) (00335374)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13903)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フィンランド	Aalto University			
中国	South China Agricultural University			