

jh250001

環境因子を考慮した非電離放射線ばく露における安全性評価

小寺紗千子（名古屋工業大学）

概要

第5世代移動通信システム(5G)の実用化、および第6世代移動通信システム(6G)の開発に伴い、準ミリ波帯およびミリ波帯(6~300 GHz)における人体安全性評価への関心が高まっている。本研究では、非電離放射線ばく露における体温上昇評価を目的とし、独自開発した電磁界・熱の複合解析手法を用いて、年齢や体型、外気温などの環境因子を包括的に考慮した高精度な熱評価を行う。本研究では、血流や発汗などの温熱生理応答を導入し、特に知見の乏しい深部体温上昇について年齢依存性を考慮した高精度評価を行う。本研究成果は、5Gおよびサブテラヘルツ帯通信の安全性評価のみならず、暑熱環境下でのリスク評価や熱中症対策の高度化にも寄与することが期待される。

1. 共同研究に関する情報

- (1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名
東北大学 サイバーサイエンスセンター

○野口 耕佑 名古屋工業大学
熱ばく露解析の実施とデータ処理

- (2) 課題分野
大規模計算科学課題分野

- (3) 参加研究者一覧と役割分担
(代表) 小寺 紗千子 名古屋工業大学
コードの並列化と研究統括
(副) 平田 晃正 名古屋工業大学
温熱生理応答の高精度化
(副) 滝沢 寛之 東北大学サイバーサイエ
ンスセンター
ソースコードの最適化
○億田 龍太郎 名古屋工業大学
電磁界ばく露解析の実施とデータ処理
○加藤 将馬 名古屋工業大学
電磁界ばく露解析の実施とデータ処理
○岩井 さくら 名古屋工業大学
電磁界ばく露解析の実施とデータ処理
○松浦 竜也 名古屋工業大学
熱ばく露解析の実施とデータ処理

2. 研究の目的と意義

現在、運用が開始されている第5世代移動通信システム(5G)では、数GHz帯から準ミリ波帯(特に28GHz)まで、広範な周波数帯が利用されている。が見込まれる準ミリ波帯電波に対する人体安全性については、国内外で関心が高まっている。さらに、世界各国において構想が進められている第6世代移動通信システム(6G)では、100GHzを超えるサブテラヘルツ帯の利用も検討されている。今後、高周波電波利用の一層の拡大が予想される中、人体に対する安全性を確保した技術利用を実現するため、科学的根拠に基づいた評価手法の確立が強く求められている。

電波の人体に与える影響は、100kHz以下では刺激作用、100kHz以上では熱作用が支配的となることが知られている。世界保健機関(WHO)が認める電波防護に関する国際ガイドラインとして、国際非電離放射線防護委

員会 (ICNIRP) によるガイドライン (ICNIRP, 2020) や、IEEE 規格 (IEEE C95.1, 2019) が策定されている。

これらのガイドラインでは、熱作用が支配的となる周波数帯において、全身ばく露と局所ばく露に大別し、それぞれ基準値が定められている。両ガイドラインは、2019 年、2020 年に改定されたが、特に全身ばく露に関しては、未だ 6GHz 超における科学的根拠が不足していることから、いずれも保守的な評価基準を設定している。特に、準ミリ波帯・ミリ波帯以上の周波数帯における全身ばく露を対象とした研究は、電磁界ドシメトリ評価に関しても極めて限られた報告のみしかなく、電波の直接的な生体影響である深部体温上昇の評価に至っては、未だ報告例がない。

本研究では、非電離放射線ばく露に対し、様々な体型・年齢・外気温など環境因子などを包括的に考慮した体温上昇評価を行うことを目的とした。申請者らが独自開発してきた電磁界・熱の複合物理と血流変化や発汗といった生体温熱応答を組み合わせた混成解析手法を用いて、様々な環境を包括的に考慮した体温上昇評価を行う。特に、様々な年齢・暑熱環境などの高精度な温度上昇評価には、年齢依存性を考慮した生体温熱応答の考慮が必須となる。これは、一般に高齢者では発汗反応や皮膚血流の拡張反応が低下し、熱の放散能力が若年者に比べて低下するためである (Smith et al., 2013)。また、体型 (体脂肪率) の違いによる温熱応答の差も無視できない。脂肪組織は熱伝導率が低く体熱放散の障壁となり得るため、肥満傾向の体型では熱が蓄積しやすく、暑熱負荷に対する脆弱性が高い (Speakman 2018)。様々な体型・年齢・環境因子など、複数の因子を包括的に、より現実的な温度上昇評価に基づいた電波の安全性評価が実現できれば、5G やサブテラヘルツ帯を含む次世代通信技術までも見据えた

評価が実現でき、電波の安全性に関する国際ガイドラインに対する有用な知見の提供につながるなど、その重要性は高い。

また、上記の問題が実現できれば、非電離放射線の一種である太陽光からの影響を高精度に推定することが可能となり、本研究グループがこれまで取り組んできた熱中症リスク評価システム技術の高度化にもつながり、社会的課題である暑熱対策への貢献も期待できる。さらに、例えば白内障形成など暑熱負荷が一因として示唆されている疾病なども多く、様々な環境を想定した暑熱評価技術の応用展開も期待できる。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

前述の通り、本研究で目的とする非電離放射線ばく露における体温上昇評価は、特に、大規模な全身ばく露解析においては、その計算コストの問題から、体内吸収電界評価についてもほとんど報告がなされていない状況である。本研究の基盤となる技術は、申請者らが開発してきた時間領域有限差分法 (FDTD) を用いた電磁界・熱複合解析コードと、それに統合された血流変化・発汗などの温熱生理応答の数値モデルで構成されている。計算に用いる解剖学的人体モデルは、MR 画像より構築されたものであり、オリジナルモデルは、組織数 51 種類、解像度 2 mm、4,433 万ボクセルを有している。特に、電磁界解析においては、周波数が高くなるほど波長に応じて要求解像度が小さくなり、例えば 100 GHz では約 0.1mm の高分解能が要求される。

熱解析技術に関しては、2015 年度から 2022 年度までの学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 公募型共同研究にて、スーパーコンピュータシステム SX-Aurora へ実装、解析コードに対して MPI (Message Passing Interface) による並列化、ループ融合等による手動チューニングを施し、キャッシ

ユ効率を向上させることで、1 プロセスの計算時間を基準として 160 プロセスで約 102 倍の加速率を実現してきた。サブミリメートルスケールの分解能での電磁界・熱計算に加え、並列化・ベクトル化に工夫を要するヒトのシステムバイオロジーを組み込んだ、きわめて高度な複合シミュレーションが可能である点にある。ただし、準ミリ波帯以上のばく露に関して、年齢・体型・環境因子などの多因子を含む評価を行うには、人体モデルのさらなる高分解能化と、それに対応する解析コードの高速化が不可欠となる。また、膨大な計算メモリと計算時間を要するこれらのシミュレーションを効率的に実施するため、本共同研究拠点のスーパーコンピュータシステムの利用支援が不可欠であった。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本研究課題は、2024 年度からの継続課題および JHPCN 萌芽型共同研究課題(課題番号：EX23202)、東北大学サイバーサイエンスセンター共同研究 [A] 若手・女性研究者支援課題においてご支援いただいた研究の継続となる。以下にその概要を示す。

電磁界解析プログラムは、FDTD 法 (Finite-Difference Time-Domain method) を用いており、解析領域を終端する吸収境界として、CPML (Convolutional Perfectly Matched Layer) を使用した。また、平面波計算には、全電磁界・散乱界領域分割法 (Total-Field Scattered-Field Formulation: TF/SF) を用いた。2023 年度 8 月より新たに導入されたサブシステム AOBA-S (SX-Aurora TSUBASA) 上での実行を想定し、最適化および MPI に対する C プリプロセスを導入、大容量のファイル入出力が行えるよう、並列分散 I/O を用い、出力は、各 MPI プロセスが各データのファイル出力を行い、ポスト処理プログラムを用いて最終結果を出力する形に改良を行った。

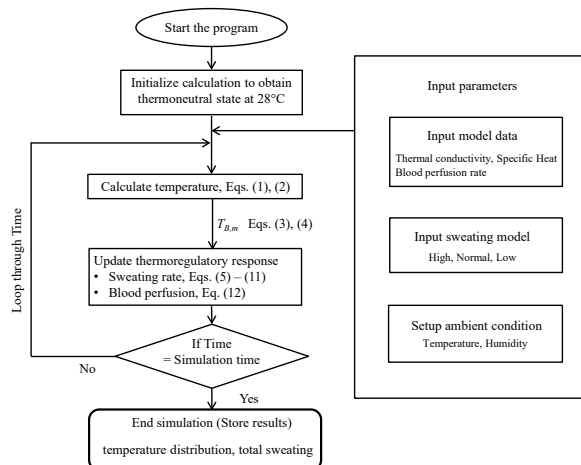


図 1 温熱解析のフローチャート

また、温熱解析プログラムは、生体熱輸送方程式 (Pennes 1948) と、体温上昇に伴う発汗や血流の変化といった温熱生理応答の定式化と融合させたものを時間領域差分により解いたものである。温熱解析のフローチャートを図 1 に示す。

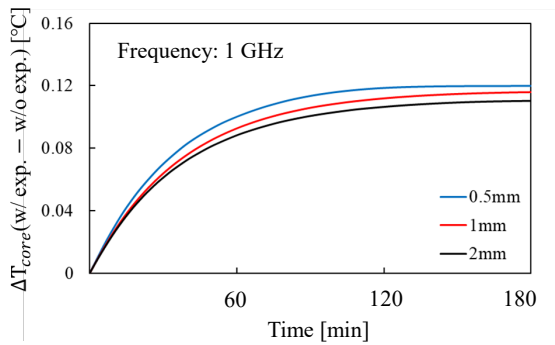
温熱解析プログラムは、2015 年から 2022 年までの JHPCN 公募型共同研究において、スーパーコンピュータシステム SX-Aurora へ実装、解析コードに対して MPI による並列化、ループ融合等による手動チューニングを施したものである。このコードの特徴は、ミリメートル、さらにはサブミリメートル程度の分解能を考慮した電磁界・熱の物理計算に加え、ベクトル化、並列化に工夫を要するヒトのシステムバイオロジーを定式化したものである。さらに、サブシステム AOBA-A に最適化されていたものを、2024 年度の共同研究において、AOBA-S へ移行を完了した。

5. 今年度の研究成果の詳細

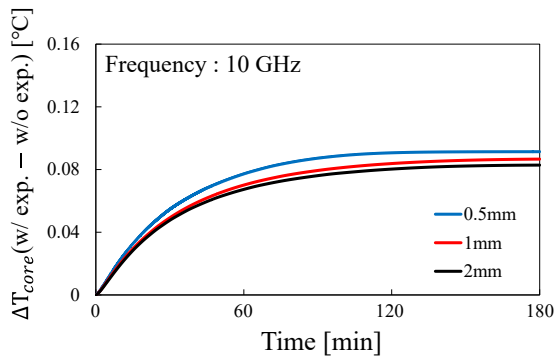
今年度の研究計画として、下記 3 項目を実施した。各研究項目の詳細を以下に述べる。

① 複合物理解析における最適データ受け渡し条件の同定 (2025 年 4 月～7 月)

深部温度上昇を計算する際には、電磁界解析により得られた体内電力吸収分布を熱源



(a) 1 GHz



(b) 10 GHz

図2 深部体温上昇時間変化
(全身平均 SAR = 0.4 W/kg)

として用い、熱解析により体温上昇を計算している。電磁界解析では、皮膚内での電磁波の波長を考慮し、空間分解能を皮膚内波長の1/10未満とする必要がある。一方、体内温度上昇解析においては、空間分解能を小さく設定するほど、数値解析安定性の制約から、要求される時間分解能も小さくなり、結果として計算時間が膨大となる。一方、定常温度を求める際、熱解析においては、空間分解能の制約は求められない。そのため、体内温度上昇解析に適した空間分解能の設定、および電磁界解析と熱解析との間における適切なデータ受け渡し方法の検討が不可欠である。そこで今年度は、対象周波数を10 GHzとし、温熱解析の空間分解能を変更した場合に、深部体温上昇に与える影響について検証を行った。

具体的には、電磁界解析を空間分解能

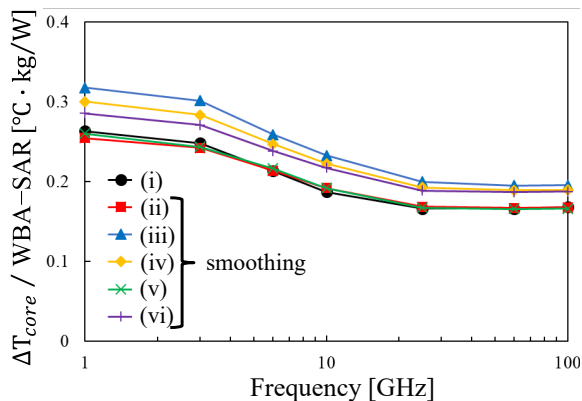
0.5 mm で実施し、得られた体内電力吸収分布を0.5 mm、1 mm、2 mm に変換して温熱解析を行い、深部体温上昇値を比較した。なお、全身平均 SAR は職業ばく露における基本制限値である0.4 W/kgに規格化した。また、電力吸収分布の空間分解能を変更する際は、隣接ボクセル間の単純平均を用いて変換を行った。

図2に温熱解析の空間分解能を0.5 mm、1 mm、2 mmとした場合の深部体温上昇の時間変化を示す。また比較のため、1 GHzにおける解析結果も併せて示す。図より、定常状態における深部温度上昇の相対誤差は、1回の空間平均(1 mm)で約5%、2回の空間平均(2 mm)で約9%となった。昨年度報告した1 GHzにおける結果と比較すると相対誤差は増加しているものの、2回の空間平均を行った場合でも深部体温上昇への影響は10%未満に抑えられており、計算効率と精度の両立に向けた有用な指標が得られた。

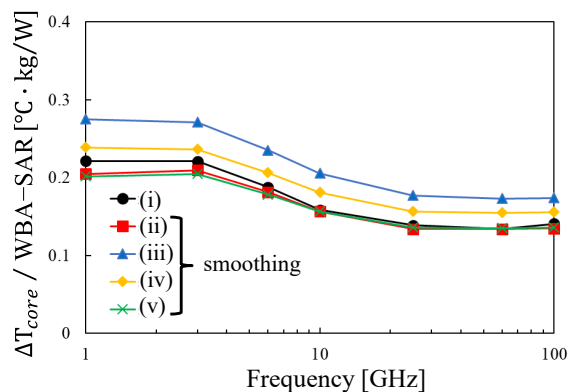
② 温熱調整機能モデリングの高精度化に関する検討 (2025年7月~2025年12月)

準ミリ波帯およびミリ波帯における全身ばく露研究においては、皮膚モデリングの信頼性が重要な課題の一つである。体を対象とした電波ばく露実験は倫理的・技術的制約から容易ではなく、数値シミュレーションによる評価が広く用いられている。6 GHz以上の周波数帯では、電波の浸透深さが浅く、吸収エネルギーの大部分が皮膚組織に集中するため、高精度な解析には皮膚厚みおよび皮膚構造の適切なモデル化が不可欠である。

従来広く使用されてきた人体モデルは、MR画像を基に空間分解能2 mmでセグメンテーションされたボクセルモデルであり、皮膚厚みは分解能の整数倍として一様に近似されている。一方、実際の人体における皮膚厚みは部位により異なり、0.5~2.0 mm程度のばらつきが存在する。この相違が、電波



(a) 男性モデル



(b) 女性モデル

図3 深部温度上昇対全身平均 SAR 比

吸収および温度上昇評価に与える影響を明らかにする必要がある。

そこで本年度は、皮膚厚みの異なる複数の人体数値モデルを用いて複合物理解析を行い、電波吸収量および深部体温上昇への影響について検討を行った。

解析モデルとして、情報通信機構(NICT)開発の日本人成人男性モデル TARO および日本人成人女性モデル HANAKO を基に、ポリゴンモデルを介してスムージング、および高分解能化したものを用いた。基になったモデルは、一辺 2 mm の立方体でセグメントされたボクセルモデルであり、皮膚厚みはおおよそ 2 mm で構成されている。

これらのモデルを基に、皮膚厚みの異なる日本人成人男性モデル 6 体、日本人成人女性モデル 5 体を構築し、以下の 6 種類のモデ

ルについて解析を行った。

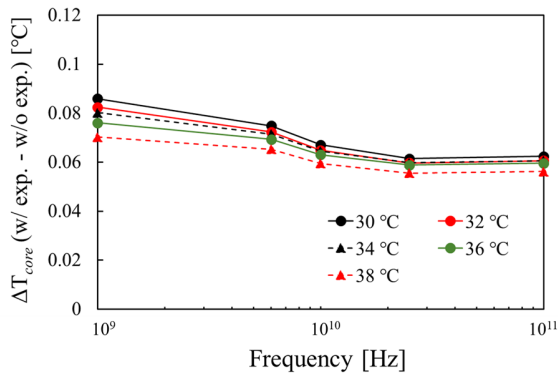
- i. オリジナルモデルを単純分割した単純分割モデル
- ii. 従来モデルと等価な皮膚厚みを保ちスムージングを施した皮膚厚み等価モデル
- iii. 全身皮膚総重量を統計データに基づき男性 2.7 kg、女性 1.8 kg となるよう調整した皮膚総重量モデル（皮膚厚み：男性 1.27 mm、女性 1.13 mm）
- iv. 全身の皮膚厚さを 1.5 mm に調整したモデル
- v. 全身の皮膚厚さを 2.0 mm に調整したモデル
- vi. 人体の皮膚厚さのデータベースに基づき、部位ごとに異なる皮膚厚みを再現した皮膚厚み不均一モデル

図3に、男性モデルおよび女性モデルについて、ばく露開始から 2 時間経過時点の深部体温上昇と全身平均 SAR の比を示す。図より、周波数が高くなるにつれて、モデル間の深部体温上昇差が小さくなる傾向が見られた。また、皮膚厚みが比較的厚い (i)、(ii)、(v) のモデルにおいて、深部体温上昇が小さくなる傾向が見られた。これは、皮膚厚みの増加に伴う血流の増大により、外気との熱交換が促進され、体内で発生した熱が効率的に放散されるためと考えられる。

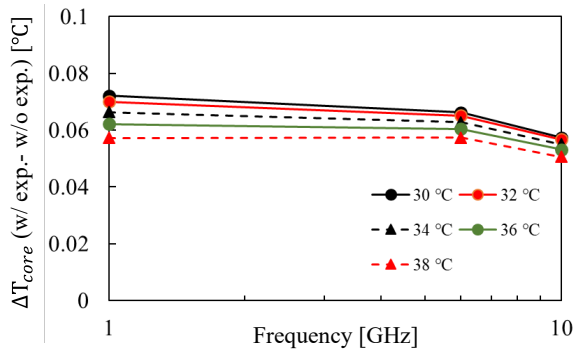
さらに、同一条件で比較した場合、女性モデルは男性モデルに比べて深部体温上昇が小さくなる結果が得られた。これは、女性モデルでは体表面積対質量比が男性モデルに比べて約 9.2% 大きく、体内で吸収された熱が体表面から放散されやすいためであると考えられる。

③ 複数人体モデルを用いた全身ばく露における深部体温上昇解析 (2026 年 1 月～2026 年 3 月)

昨年度に実施した日本人成人男性モデルを対象とした評価に引き続き、今年度は日本



(a) 男性モデル



(b) 女性モデル

図 4 電波ばく露時の外気温変化による
深部体温上昇

(全身平均 SAR 0.4 W/kg, ばく露時間 1 時間)

人成人女性モデルを対象として、複数の暑熱環境を想定した全身ばく露条件下における温度上昇解析を行った。

外気温は温熱中間帯である 30 °C を基準とし、2 °C 刻みで 38 °C まで変化させた。全身平均 SAR は、職業ばく露の制限値である 0.4 W/kg に規格化し、ばく露時間は 1 時間、対象周波数は 1 GHz, 6 GHz, 10 GHz とした。また、電波ばく露に起因する深部温度変化を評価するため、各外気温条件において、電波ばく露の有無による温度上昇の差分を評価した。

図 4 に、解析結果を示す。比較のため、男性モデルにおける結果も合わせて示す。図より、いずれの周波数においても、外気温の上昇に伴い、電波ばく露の影響による深部体温上昇の寄与が相対的に小さくなる傾向が見

られた。これは、外気温上昇に起因する体温上昇の影響が支配的となることで、温熱生理応答による熱放散の働きが活性化し、体温上昇全体が抑制されたため、電波ばく露による付加的な体温上昇の影響が相対的に低減されるためであると考えられる。男性モデルと女性モデルは、おおむね同等の傾向を示し、図 3 と同様、暑熱環境下においても、女性モデルのほうが、電波ばく露に起因する深部体温変化が小さくなる傾向となった。今後は、さらに高い周波数帯についても同様の検討を進める予定である。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

上述の通り、今年度は、

- ① 複合物理解析における最適データ受け渡条件の同定、
- ② 温熱調整機能モデリングの高精度化に関する検討、
- ③ 複数人体モデルを用いた全身ばく露における深部体温上昇解析の 3 項目について実施した。

①については、昨年度に得られた結果に高周波数条件を追加し、電磁界解析から熱解析への適切なデータ受け渡し方法に関する検討を進めた。その結果、空間平均化が深部体温上昇に与える影響について、10 GHz では 1 GHz と比較して相対誤差が大きくなる傾向が確認された。しかしながら、1 GHz の場合と同様に、2 回までの空間平均化であれば、深部体温上昇への影響は 10% 以下に抑えられることを示すことができた。これは、今後の大規模シミュレーションにおける計算効率と精度の両立に向けた有用な指標となる。

②については、日本人成人男性モデルと日本人成人女性モデルを対象とし、皮膚厚みの変更が深部体温上昇値に与える影響について評価を行った。その結果、皮膚厚みが比較的大きいモデルでは、深部体温上昇が小さく

なる傾向が確認された。

③については、日本人成人女性モデルを対象とし、外気温は温熱中間帯である 30℃から 2℃刻みで 38℃まで変化させた暑熱環境下において、電波全身ばく露による深部体温上昇について比較を行った。その結果、いずれの周波数においても、外気温の上昇に伴い、電波ばく露の影響による深部温度上昇への寄与が小さくなる傾向を示した。

以上より、今年度に計画していた実施事項はすべて達成されたと評価できる。次年度以降では、今年度構築した実行環境とポストプロセッシング手法を活用し、引き続き、小児モデルや、欧米人モデルなど、他の人体モデルについても 6 GHz 超全身ばく露における体温上昇解析をについて検討を進めていく予定である。さらに、温熱調整機能モデルの高精度化についても、より高精度な推定を実現すべく、継続的な検討を行う予定である。

※7. 研究業績はウェブ入力です