

jh240009

環境因子を考慮した非電離放射線ばく露における体温上昇評価

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、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対して、年齢・体型・外気温などの環境因子を包括的に考慮した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、生理応答を反映した高精度な熱評価を行う。特に、深部体温上昇に関する科学的知見は極めて乏しく、年齢による生理機能の違いを考慮した温熱生理応答の導入が不可欠である。本研究により、5G やサブテラヘルツ帯の安全性評価に貢献するだけでなく、太陽光ばく露等の暑熱環境下でのリスク評価にも応用可能であり、熱中症対策システムの高精度化や関連疾患の予防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

2. 研究の目的と意義

現在、運用が開始された第5世代移動通信システム(5G)の利用周波数帯は、数 GHz から準ミリ波帯(特に 28GHz)までと多岐にわたり、特に、今後利用が拡大する準ミリ波帯電波に対する人体安全性について関心が高まっている。さらに、世界各国において構想が始まっている第6世代移動通信システム(6G)においては、100GHz 超を含むサブテラヘルツ帯の利用も検討されている。今後、これらの高周波電波の利用拡大が見込まれる中、電波の人体に対する安全性を確保した技術利用のための科学的な評価が求められている。

(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
○増田 宏 久留米大学医学部環境医学講座
温熱生理応答の取得
○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
○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

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。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、ICNIRP ガイドライン(ICNIRP, 2020)、IEEE 規格(IEEE C95.1, 2019)が挙げられる。これらガイドラインでは、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・外気温などの環境因子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さらなる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幅広い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、キャッシュ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引き続き不可欠であった。

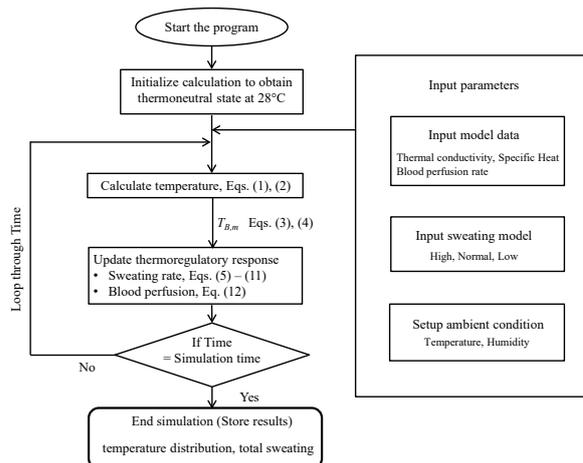


図 1 温熱解析のフローチャート

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 年度からの新規課題となるが、JHPCN 萌芽型共同研究課題(課題番号:EX23202)、および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発展的継続となる。そのため、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 10 月より運用を開始したサブシステム AOBA-S (SX-Aurora TSUBASA)上での実行を想定して MPI 通信を最適化し、大容量のファイル入出力が行えるよう、並列分散 I/O を使い、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。

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電磁界解析プログラムの MPI 化および電磁界解析 (2024 年 4 月～8 月)

電磁界解析プログラムの MPI 化を実施し、分解能 0.1 mm の解剖学的人体数値モデルを用いた電磁界解析の実行環境を構築した。従来の計算環境では処理が困難であった大規模データに対応するため、人体モデルの読み込み処理や並列計算処理の最適化も併せて行った。

具体的には、三次元解析領域を任意の分割数で空間的に分割可能な構成とし、各 MPI プ

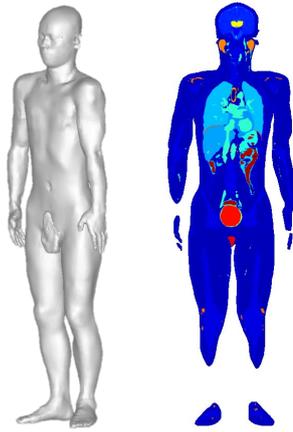


図 2 解剖学的人体数値モデル

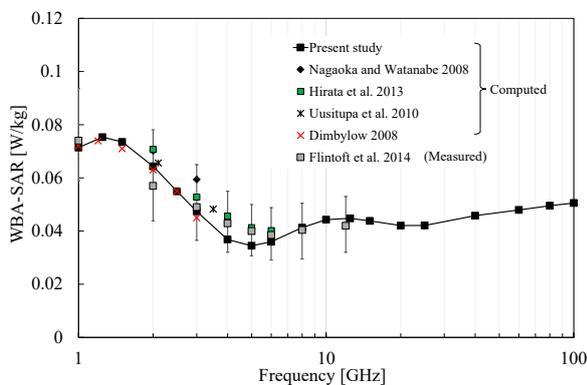


図 3 全身平均 SAR 周波数特性の比較
(入射電力密度 = 10 W/m²)

ロセスが担当領域を効率的に処理できるよう改良を加えた。また、大容量データに対応するために、ファイル入出力処理を MPI 対応とし、各プロセスが分散してデータを読み書き可能とした。さらに、MPI プロセスマッピングにはカルテシアン・トポロジーを採用し、細分化された計算領域間における隣接ランクの管理を効率化した。

これらの改良により、1,024 MPI プロセス分割において、最大 4,440 × 7,640 × 18,560 格子点 (約 40 TB) におよぶ大規模モデルに対する電磁界解析が可能となった。これにより、100 GHz までの超高周波数帯域における全身ばく露解析が実行可能な解析基盤が整備された。

開発された解析環境を用いて、全身ばく露における体内電力吸収量を算出した。対象周

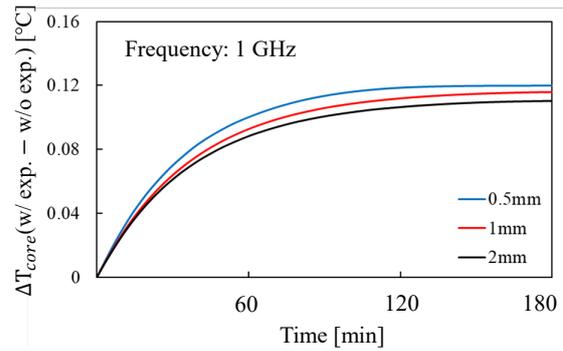


図 4 深部体温上昇時間変化
(全身平均 SAR=0.4 W/kg)

波数は 1 GHz から 100 GHz とし、入射電力密度を 10 W/m² とした。体内電力吸収量は、国際ガイドラインで基本制限値として用いられている評価指標に従い、全吸収電力量を体重で除した全身平均 SAR (Specific Absorption Rate [W/kg]) を用いている。図 2 に、本研究で用いた解剖学的数値人体モデルを示す。本モデルは、情報通信機構 (NICT) で開発された日本人男性モデル TARO (Nagaoka et al., 2004) を基に、皮膚厚みを調整し、組織ごとにポリゴンモデルを介することでスムージングを施し、高分解能化したものである。モデルは 51 種類の組織によって構成されており、分解能は皮膚内の波長の 1/10 未満となるよう、1-10 GHz では 0.4 mm、10-30 GHz では 0.2 mm、30-100 GHz では 0.1 mm とした。

得られた全身平均 SAR の周波数特性を図 3 に示す。比較のため、文献値も合わせて示す。図より、全身平均 SAR は 1 GHz 付近で極大値、5 GHz 付近で極小値を示した。5GHz 以降は周波数の増加に伴い、ゆるやかな上昇傾向を示した。また、1-10 GHz では、他の文献値とおおむね一致しており、そのばらつきの範囲内に収まった。

②電磁界－熱解析間のデータ受け渡し方法の検討 (2024 年 9 月～2025 年 1 月)

全身ばく露における温度上昇を解析する場合、はじめに電磁界解析を行い、得られた

体内電力吸収分布を、熱解析における熱源として組み込むことで、電波ばく露における体温変化を計算する手法をとる。電磁界解析では、上述の通り、波長に応じた高分解能なモデルでの解析が必要となる。一方、温熱解析における空間分解能は、電磁界解析よりも要求要件は高くないが、空間分解能を細かくするほど必要な時間分解能も小さくなるという制約がかかる。そのため、電磁界—熱解析間の適切なデータの受け渡し方法および空間分解能の設定をする必要がある。

検証として、対象周波数を 1 GHz に固定し、温熱解析側の空間分解能を変更した場合の深部体温上昇への影響を調査した。具体的には、まず 0.5 mm の空間分解能で電磁界解析を行った後、温熱解析における空間分解能を変更し、各条件での深部体温上昇を比較した。なお、全身平均 SAR は職業ばく露環境の基本制限値である 0.4 W/kg とし、空間分解能変更時には隣接ボクセルとの単純平均によって電力吸収分布をリサンプリングした。

図 4 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。図より、定常状態における深部体温上昇値の相対誤差は、1 回の空間平均 (1 mm 相当) で約 3%、2 回の空間平均 (2 mm 相当) で約 8% となった。また、空間分解能が粗くなるほど、深部体温上昇の時定数は減少する傾向を示した。すなわち、熱解析の空間分解能を 2 mm 程度まで低減しても深部体温上昇への影響を 10% 未満に抑えられることが示されており、シミュレーション計算の効率化に関する有用な指標となる。今後、他の周波数帯においても同様の検証を進める予定である。

③ 様々な暑熱環境下を想定した全身ばく露における深部体温上昇解析 (2025 年 2 月～2025 年 3 月)

日本人成人男性モデルに対して、様々な暑

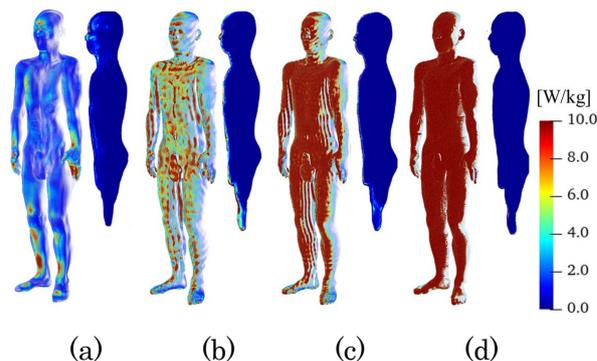


図 5 SAR 分布.

全身平均 SAR=0.4 W/kg. (a)1 GHz, (b)6 GHz, (c)10 GHz, (d)100 GHz

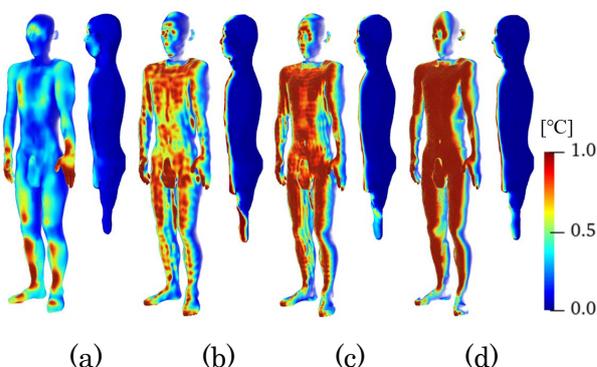


図 6 温度上昇分布.

全身平均 SAR=0.4 W/kg. (a)1 GHz, (b)6 GHz, (c)10 GHz, (d)100 GHz

熱環境を想定し、全身ばく露における電磁界ドシメトリ評価および温度上昇解析を行った。

図 5 に、全身平均 SAR を 0.4 W/kg に規格化した際の、周波数 1, 6, 10, および 100 GHz における SAR 分布を、図 6 に温度上昇分布を示す。図より、周波数が高くなるにつれ、SAR 分布は体表面に広く分布した。温度上昇分布についても同様の傾向を示したが、熱拡散の影響により、熱が 2 cm 程度拡散し、より滑らかな分布となっていることがわかる。

図 7 に、全身平均 SAR が 0.4 W/kg における周波数別の深部温度上昇の時間変化を示す。図より、1-25 GHz にかけて周波数が増加すると、深部温度上昇は減少傾向となり、25 GHz 以降は、周波数に依存せず、ほぼ一定の

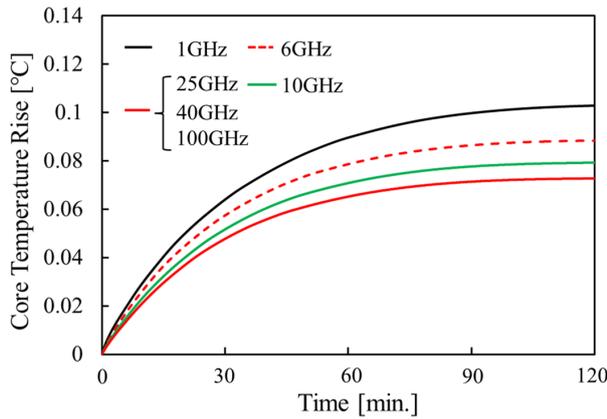


図 7 時間変化による深部温度上昇.
(全身平均 SAR 0.4 W/kg, 外気温 30 °C)

値を示した。また、周波数が高くなるにつれ、時定数が減少した。1 GHz で最大となり 30.6 分、25-100 GHz において最も小さく 27.9 分となった。これは、25 GHz よりも高い周波数帯においては、電波の浸透深さは 1 mm 未満と非常に浅くなるため、熱拡散長の方が支配的となり、その結果、深部温度上昇に周波数が及ぼす影響が小さくなるためである。

次に、全身平均 SAR を 0.4 W/kg に規格化した場合の、外気温変化による深部温度上昇を示す (図 8)。なお、外気温は温熱中間体である 30 °C から 38 °C まで 2 °C 刻みで変化させ、ばく露時間は 1 時間とした。図より、全身平均 SAR を一定に保った場合、外気温が高くなるほど、外部環境からの熱伝達により深部温度が上昇し、その増加量は外気温にほぼ比例した。

電波ばく露に起因する深部温度変化を評価するため、各外気温において、電波ばく露の有無による温度上昇差を評価した (図 9)。図より、周波数によらず外気温の上昇に伴って、電波ばく露による深部温度上昇値は減少し、周波数差による深部温度上昇への影響も小さくなる傾向を示した。すなわち、外気温が高い環境では電波ばく露による深部体温上昇への寄与が相対的に小さくなる。これは、外気温の上昇に伴い、発汗量も増加するため、

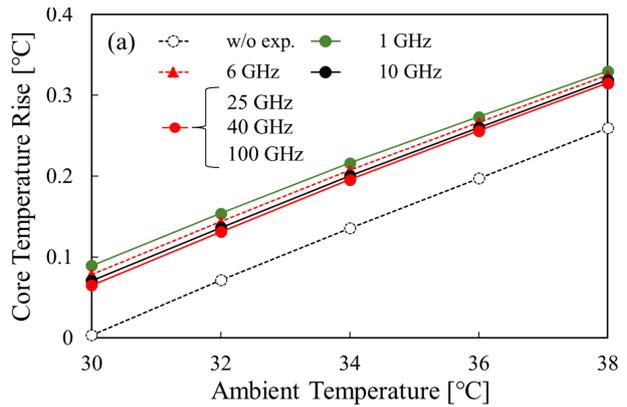


図 8 外気温変化による深部温度上昇.
(全身平均 SAR 0.4 W/kg, ばく露時間 1 時間)

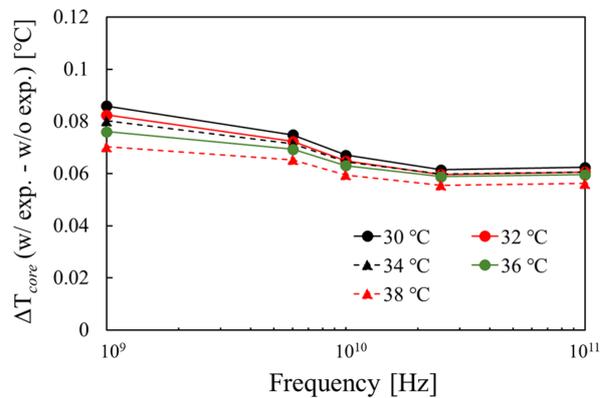


図 9 外気温を変化させた場合の
電波ばく露による深部温度上昇.
(全身平均 SAR 0.4 W/kg, ばく露時間 1 時間)

放熱効果が大きくなるためであると考えられる。

また、申請書にも記載したように、本技術は、熱中症評価技術の高精度化にもつながることから、項目②の一部内容として、5-9 月を中心にマスメディアによる取材対応と解析結果に基づく知見の提供を行った。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

上述の通り、今年度では、①電磁界解析プログラムの MPI 化および電磁界解析、②電磁界-熱解析間のデータ受け渡し方法の検討、③ 様々な暑熱環境下を想定した全身ばく露における深部体温上昇解析、の 3 つの内容について取り組んだ。

①については、電磁界解析プログラムの MPI 化を実施した結果、分解能 0.1 mm のモデルに対してドシメトリ評価が可能な計算環境を整備した。また、構築した環境下で、高精度化した日本人成人男性モデルを用いて 1GHz から 100 GHz までの全身平均 SAR を算出し、文献値と比較することで MPI 化を施した本手法の有用性を示した。

②については、まずは対象周波数を絞り、熱解析へのデータ受け渡しの際の空間平均化による深部体温上昇への影響について調査を行った。その結果、2 回の空間平均化まで行った場合には、深部体温上昇への影響を 10%以下に抑えられることを示した。

③についても、日本人成人男性モデルを対象とし、外気温は温熱中間体である 30 °C から 38 °C まで 2 °C 刻みで変化させた場合の深部体温上昇、および電波ばく露に起因する体温上昇について評価を行った。その結果、外気温が高い環境では電波ばく露による深部体温上昇への寄与が相対的に小さくなることを示した。

以上の通り、計画していた実施事項はすべて達成した。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を活用し、女性モデルや小児モデル、欧米人モデル等、他のモデルについても 6 GHz 超全身ばく露における深部体温上昇解析をについて検討を進めていく。さらに、温熱調整機能モデリングの高精度化に向けた検討も引き続き行う予定である。