

令和元年度研究報告書  
準ミリ波・ミリ波ばく露時の生体作用  
の調査

総 務 省  
令 和 2 年 3 月

(以下、久留米大学受託分)

## 目次

1. 要旨.....	2
2. 研究目的.....	3
3. 実験環境と生体信号測定システム.....	4
3.1. 実験環境.....	4
3.2. 電波ばく露装置.....	4
3.3. 生体信号測定システム.....	5
3.4. まとめ.....	5
4. 成人に対する局所電波ばく露実験および解析.....	6
4.1. 方法.....	6
4.1.1. 被験者とインフォームド・コンセント.....	6
4.1.2. 実験手順.....	6
4.2. 実験結果.....	8
4.2.1. 皮膚表面温度.....	8
4.2.2. 皮膚血流量.....	9
4.2.3. 心電.....	10
4.2.4. 呼吸数.....	11
4.2.5. 指尖脈波.....	12
4.2.6. アミラーゼ・コルチゾール（ストレスマーカーとして）.....	13
4.3. 考察.....	14
5. 高齢層被験者に対する局所電波ばく露実験.....	16
5.1. 方法.....	16
5.1.1. 被験者とインフォームド・コンセント.....	16
5.1.2. 実験手順.....	16
5.2. 実験結果.....	16
6. ミリ波帯電波局所ばく露装置構築のサポート.....	17
7. まとめ.....	18
8. 参考文献.....	19

## 1. 要旨

本研究は、2020年に導入が検討されている次世代通信方式“第5世代移動通信システム（5G）”で用いられる準ミリ波・ミリ波帯域の超高周波電波に人体が局所ばく露された場合の生体影響について調査することを目的としている。

本研究は2017-2020年度までの4カ年計画に基づいて実施しており、3年目となる本年度（2019年度）は、(A)成人層被験者実験のデータ解析、(B)高齢者層実験データの取得、(C)ミリ波帯電波局所ばく露装置の開発補助の3課題を実施し、目標を達成した。

まず、成人層被験者に対して28GHz電波の局所ばく露を実施し、各種生理学的パラメータを測定・解析した。その結果、温熱生理学的パラメータについては、皮膚温度および皮膚血流に対して明らかな上昇が認められ、これらの反応にばく露強度に対する閾値が存在する可能性が示唆された。一方、全身性変化の指標となる心電・呼吸・指尖脈波、心理的变化の指標となる唾液中アミラーゼ活性および唾液中コルチゾール濃度については影響が認められなかった。

次に、温熱生理反応や温感は年齢とともに変化することが知られていることから、成人層被験者から得られる結果と対比することを目的として、60～79歳の高齢者層を対象として被験者を募り、男女計15名から電波ばく露中の各種生理学的指標に関するデータを取得した。

最後に、次年度に予定している成人被験者を対象とする60GHz超帯電波ばく露実験に必要な一部装置（アンプ等）を共同研究機関と共同で開発し、導入・構築した。

以上、上記3課題の達成により、最終年度となる次年度に当初の計画通りの成果が得られる見込みとなった。

## 2. 研究目的

現在、次世代通信方式 “第 5 世代移動通信サービス (5G)” の導入を前に、5G で使用される準ミリ波 (20-30 GHz 付近)・ミリ波 (30 GHz 以上) 帯域の超高周波電波に対する国内外の関心が高まっている。一方、超高周波電波のばく露基準を定める防護指針及び国際ガイドラインの策定は遅延しており、従前基準の見直しを含めた改定が急がれている。ただ、この超高周波電波が及ぼす生体影響に関する知見は乏しく、ガイドライン策定に必要な生物学的根拠の蓄積が必要とされている<sup>1)</sup>。

5G 通信方式で用いられる準ミリ波・ミリ波帯電波は、その運用にあたり安全面において解決すべき課題を有している。まず、この種の電波は直進性があり、ビーム状に照射される特徴を持つ。また、その波長特性からとりわけ体表面に吸収されやすい。さらに、運用にあたっては従来の方式と異なり小型 (マイクロセル) の基地局を生活空間に多数設置することになっている。したがって、人体は生活空間のごく近傍から準ミリ波・ミリ波帯電波にばく露され、照射されたエネルギーの多くは皮膚組織に吸収されると予想される<sup>2-7)</sup>。

そこで本研究では、人体 (被験者) が準ミリ波・ミリ波帯電波に局所ばく露された場合における各種生理学的変化を測定し、得られたデータからばく露量とその変化との関係を明らかにする。さらにこの測定データに基づき、各種ばく露様式に対する汎用性の高い人体熱調整系モデルを構築することで安全性評価に資することを目指す。

本研究は全 4 カ年での実施を計画している。3 年目となる本年 (2019 年度) は次の 3 つを年次目標に掲げ、研究を実施した。

- A) 成人層被験者に対する 30 GHz 帯電波ばく露実験を追加すると共に取得したデータを解析する。取得した生理学的データを解析し、ドシメトリ結果と合わせて用量反応関係を明らかにする。また、この中から着目すべき指標を抽出し、生体反応を惹起するばく露強度閾値を推定する。
- B) 成人層とは異なる年齢層の被験者を対象に 30 GHz 帯電波ばく露実験を実施する。倫理審査後に成人とは異なる年齢層の被験者を募り、各人に対して電波ばく露中の各種生理学的指標に関する時系列データを取得する。また、取得データから人体熱調節系モデルに有用と思われるデータを抽出し必要とする研究機関に提供する。なお、本検討については、倫理審査結果や被験者の参加状況などを考慮した上で至適サンプル数等の具体的実施内容を決定することとする。
- C) 2020 年度に成人被験者を対象に 60 GHz 超帯電波ばく露実験を実施するため、これに必要な一部装置 (アンプ等) を共同研究機関の指導のもと当施設内に導入・構築し、初期の動作確認を行う。

### 3. 実験環境と生体信号測定システム

2017 年度の研究で当機関内に構築した実験環境に電波ばく露装置および生体信号測定システムを設置した。

#### 3.1. 実験環境

実験環境は 2017 年度の研究で当機関内に構築したものを利用した。本環境は高精度に温度・湿度を管理することが可能な人工気候空間を再現でき、温度  $26.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度  $45 \pm 5\%$  を保つよう設定した。電波ばく露装置および生体信号測定システムは図に示すようにこの空間に設置した（図 3-1）。

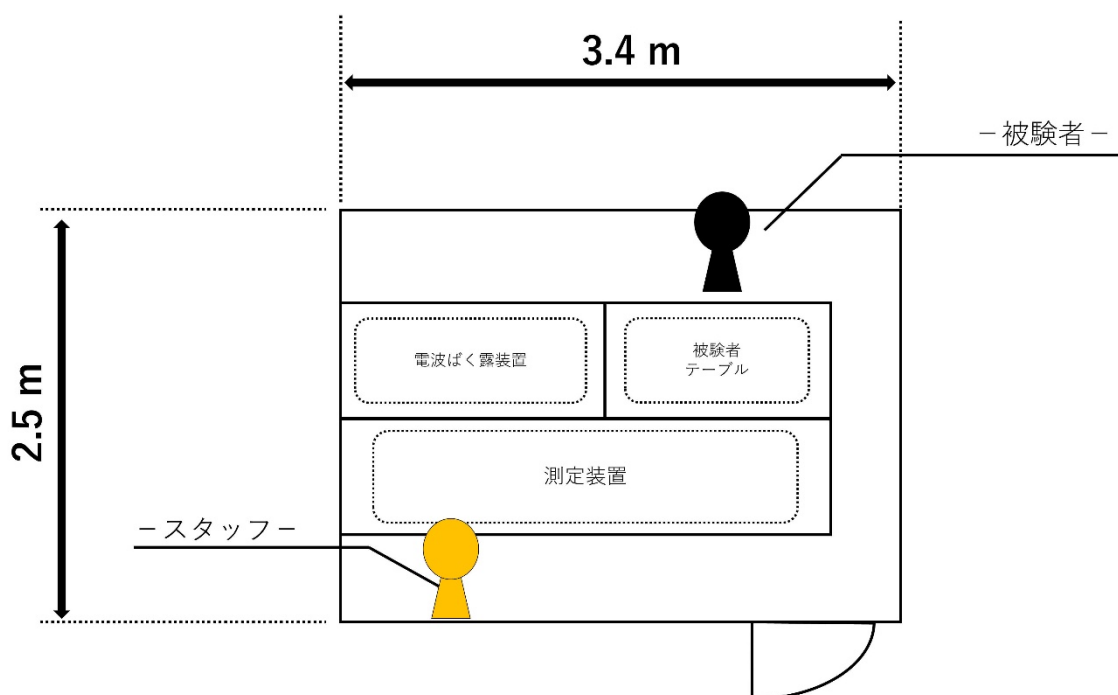


図 3-1 人工気候室内配置図

#### 3.2. 電波ばく露装置

28 GHz 電波ばく露装置は共同研究機関により開発され、人工気候室内に設置した。ばく露装置の主要構成を図 3-2 に示す。発振器で生成した電波（本実験では周波数 28 GHz を選択）をアンプで増幅し、アンテナからばく露対象物に対して照射する構成とした。アンテナは 30 cm 前方の直径 2 cm の円形領域（以下、ターゲットエリアと呼ぶ）に電波が局所的に集光照射されるようレンズ型を用いた。電波ばく露の開始/停止は測定者（実験者）が行うが、温度上昇の異常を検知した場合あるいは被験者自身が感じた場合は、測定者もしくは被験者のいずれかがばく露を緊急停止できるよう安全装置を設けた。また、この安全装置は電波の出力レベルを常にモニタリングしており、機器の故障など不測の事態が生じた場合にも自動的にばく露停止がなされる。

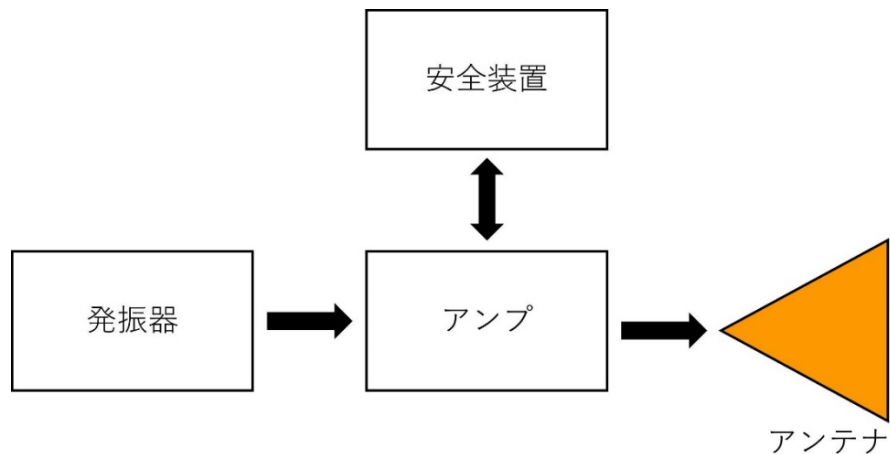


図 3-2 ばく露装置構成概略図

### 3.3. 生体信号測定システム

測定に用いられる各種センサーおよび機器類を表 3-1 に示す。効率的にデータを収集できるようこれらを組み合わせ、且つ電波干渉による影響がないことも確認した。

表 3-1 測定指標と装置

測定対象	主な使用機器	メーカー・型番
皮膚表面温度	サーモグラフィーカメラ	FLIR・T530
深部体温	連続測定型耳式体温計	NIPRO・CE サーモ
皮膚血流量	2次元レーザー血流画像装置	OMEGAZONE・OZ-2
発汗量	換気カプセル型発汗計	スキノス、SKN-2000
温感・熱感	測定用スイッチ	ハンドメイド
心電	ECG クランプ電極、バイオアンプ	AD Instruments・MLA700、FE132
呼吸数	呼吸気温測定用プローブ	AD Instruments・MLT415/AL
指尖脈波	パルストランスジューサ	AD Instruments・TN1012/ST

### 3.4. まとめ

人工気候室内に移設された電波ばく露装置は正常に稼働し、各種測定機器に対する電波干渉も認められなかった。加えて、安全装置が正常に動作することも確認できたことから、倫理審査にて承認を得た実験環境にて実験実施が可能となった。

## 4. 成人に対する局所電波ばく露実験および解析

昨年度までに実施した予備実験の結果に基づき、成人層の被検者を対象に電波局所ばく露実験を追加で実施し、取得したデータを項目別に解析した。なお、当該実験は二重盲検法により実施しており、電波ばく露強度についてはコード化されている。このため、以下の報告においてもばく露強度はA~Hと表記した。

### 4.1. 方法

#### 4.1.1. 被験者とインフォームド・コンセント

本実験では、20歳から39歳の健康な者38名（女性19名、男性19名； $27\pm 6$ 歳）を起用した。本研究では人体（被験者）を対象とした実験を行うため、インフォームド・コンセントを行った。被験者となり得る候補者には、事前説明会を開催し、実験の目的、重要性、内容等について資料と説明文書を用いて説明した。その後、実験に対する十分な理解を候補者に確認したのち同意書への署名にて同意を得た。また、データ取得・解析時に必要となる基本情報（年齢や既往歴、アレルギー等）に関するアンケート調査を行った。なお本研究は、当機関の倫理委員会において倫理審査を受け、平成29年12月8日付けで実験計画の承認を得ている（承認研究番号17192）。同様に、説明会で用いた説明文書およびアンケート資料等も全て同委員会により承認されている。

#### 4.1.2. 実験手順

人工気候室内において前述の測定システムを用いて、被験者に対する28GHz局所電波ばく露を施し、皮膚温度を含む各種生理学的パラメータを測定した。実験環境に身体を慣らすために、被験者には実験専用の衣服を着衣後に人工気候室内で約30分安静に過ごしてもらい、その間に各測定用プローブ等を装着した。被験者は椅子に座り、右腕（前腕）をテーブルの上に乘せた状態で待機した（図3-1、図4-1）。前腕はアンテナから30cm前方に配置し、手首から肘の長さの $3/10$ となる点をターゲットエリアとした（図4-2）。これは、被験者毎の体格の差を統制するための処置である。電波局所ばく露は、熱傷をきたさないことを確認された電波強度を8段階設け（アンテナ入力電力の値で、0, 0.05, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0W）、各強度を1実験につき単回ばく露した。

実験開始に合わせて生理学的パラメータ（口腔内サンプル採取を除く）を同時記録し、電波ばく露開始前の定常状態をコントロールデータとして、また、ばく露開始後からをばく露中データとして記録した（図4-3）。口腔内サンプルについては実験開始前および終了後に採取した。

なお、本実験では二重盲検法を用いるため、被験者には実験全体の所要時間、経過時間および電波ばく露開始のタイミング、さらに電波ばく露強度は伏せた。

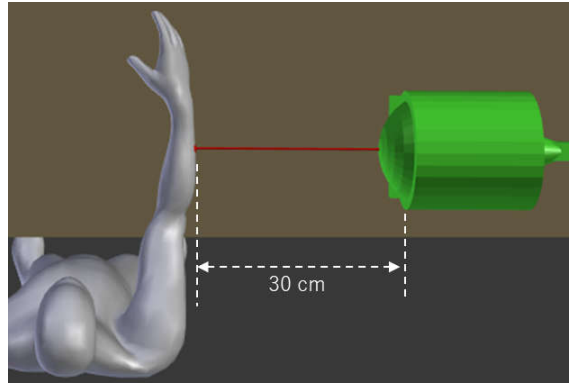


図 4-1 前腕とアンテナの位置関係

電波の局所ばく露はアンテナ（緑）から前方 30cm のターゲットエリア。

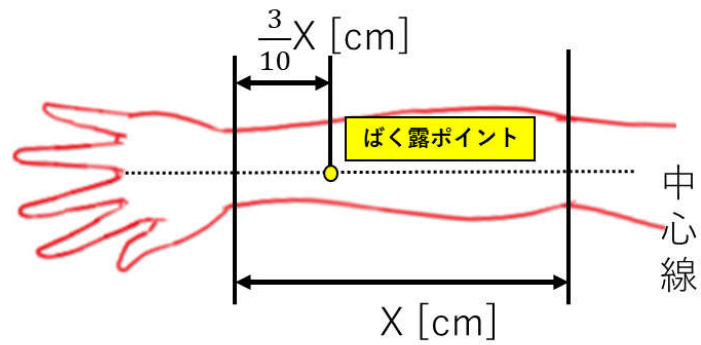


図 4-2 ターゲットエリア中心位置

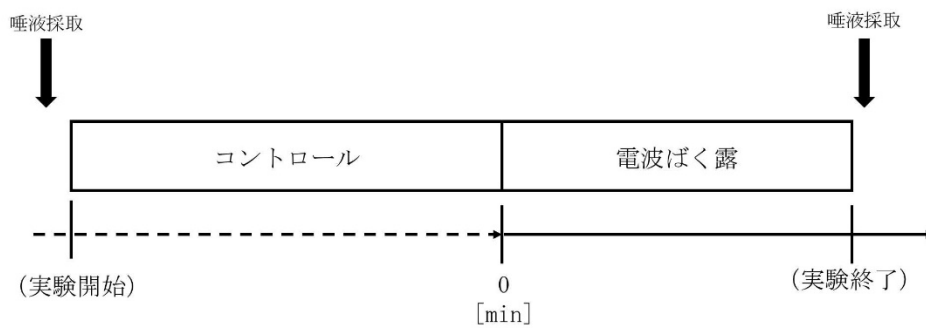


図 4-3 実験プロトコル



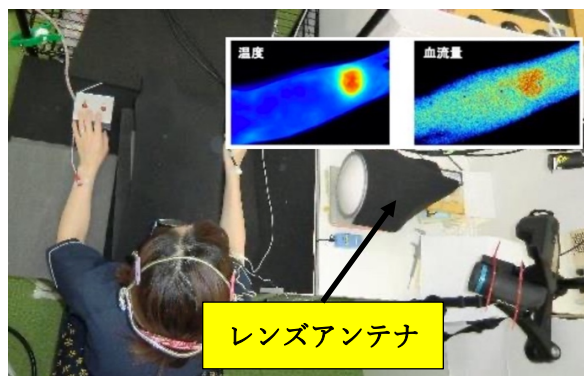


図 4-4 前腕局所電波ばく露実験の様子

## 4.2. 実験結果

### 4.2.1. 皮膚表面温度

被験者の前腕ターゲットエリアに対して、各ばく露強度（コード）に設定した電波を局所ばく露した結果、コードごとに上昇速度について変化が見られた（図 4-5）。ターゲットの皮膚温度は、ばく露開始直後から上昇を始め、コード A では 120 sec でおよそ 5.4℃に達した。一方、コード C および D においては温度上昇が認められなかった。これらの結果から、特定の電波ばく露強度において明らかな皮膚温度上昇が生じるとともに、コード B が閾値であると示唆された。なお、参考として深部体温も測定したが、こちらについてはいずれのばく露強度においても温度上昇は認められなかった。

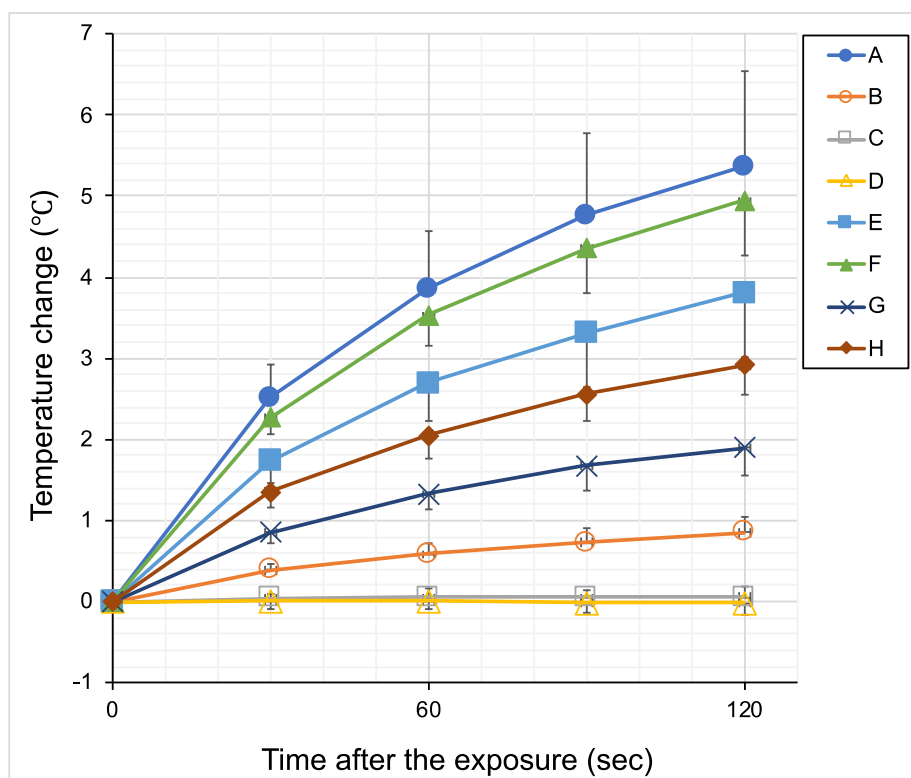


図 4-5 人体前腕ターゲットエリアにおける局所電波ばく露時の温度変化

電波ばく露開始時（0 sec）の温度を 0℃とし、そこからの変化量を平均値と標準偏差で示す。

#### 4.2.2. 皮膚血流量

人体前腕への電波局所ばく露中のターゲットエリアにおける血流変化を調べるため、2次元レーザー血流画像装置を用いて皮膚血流量を測定し、ばく露開始時の血流量を100%とする相対値で評価した(図4-6)。血流量は、120sで最大およそ35ポイント上昇したのも見られた。一方、コードB、C、D、Gにおいては血流上昇は認められなかった。これらの結果から、特定の電波ばく露強度において明らかな皮膚血流上昇が生じるとともに、コードEまたはHに閾値の存在が示唆された。

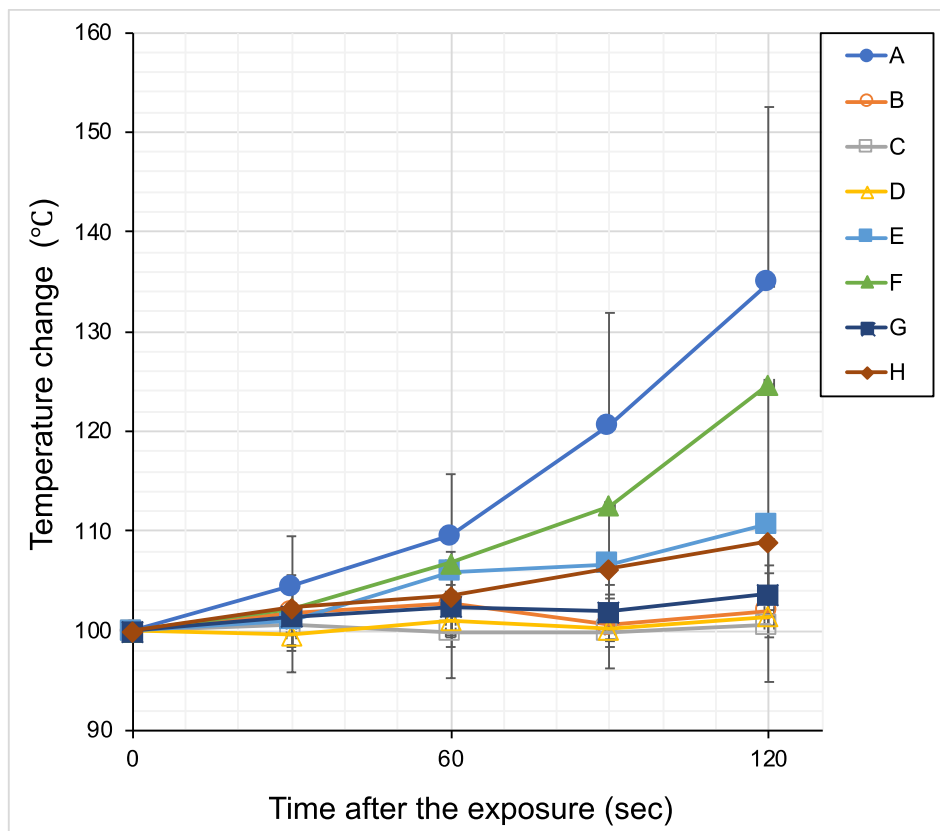


図 4-6 人体前腕ターゲットエリアにおける局所電波ばく露時の血流量変化

電波ばく露開始時 (0 sec) の血流量を 100% とし、そこからの変化量を平均値と標準偏差で示す。

#### 4.2.3. 心電

前腕局所電波ばく露時の心電図の変化については、電波ばく露前 (baseline)・ばく露中 (exposure) の各条件において R-R 間隔 (以下 RRI と略記) を求めた。図 4-7 にコードごとの心拍数の平均値の分布を示す。心拍数はストレスを感じると上昇・低下のどちらも起こりうるということが知られているが、いずれのコードにおいても心拍数の大きな変化は見られなかった。

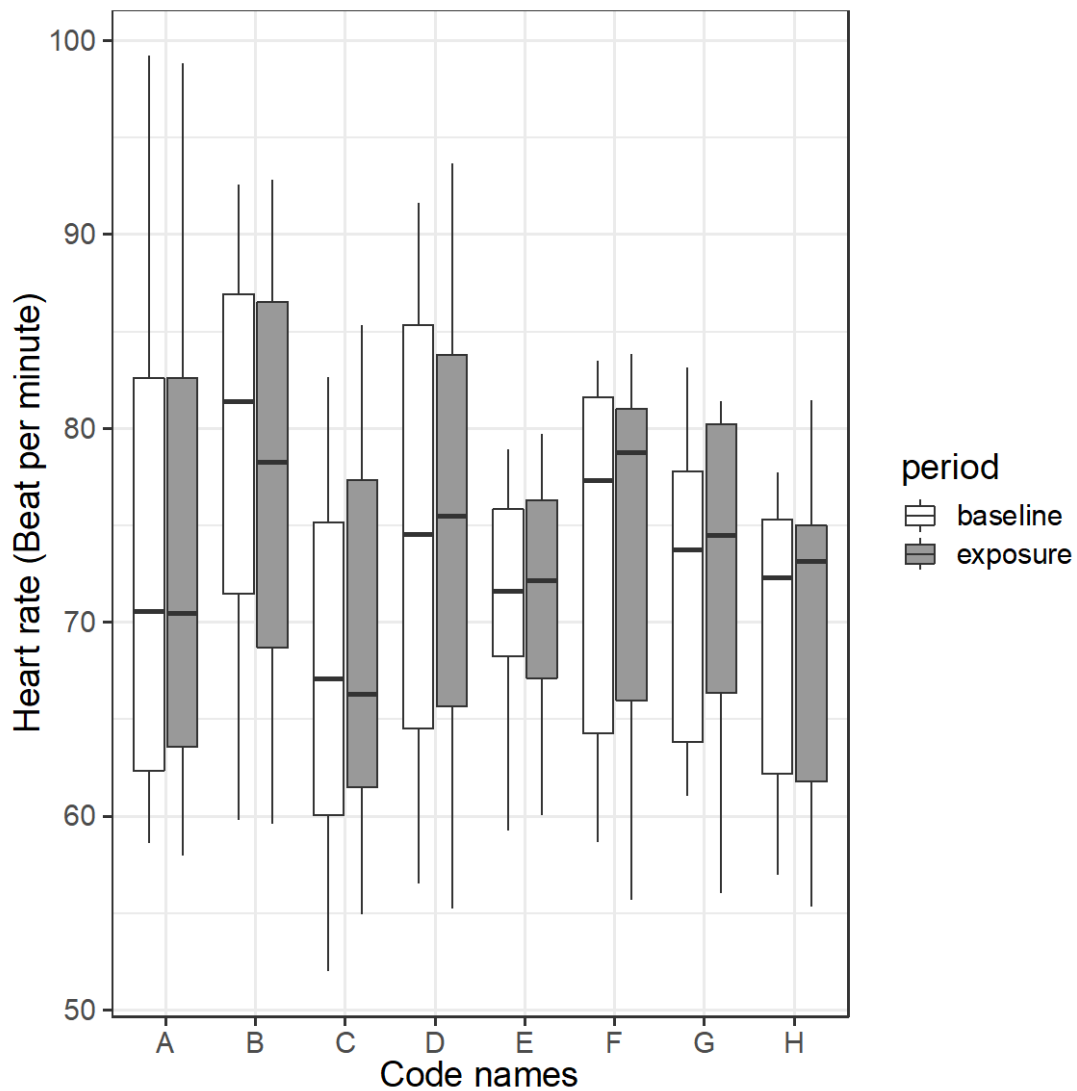


図 4-7 人体前腕局所電波ばく露時の心電変化  
被験者ごとのばく露前・ばく露中の平均値を用いた。

#### 4.2.4. 呼吸数

前腕局所電波ばく露時の呼吸数の変化については、電波ばく露前 (baseline) ・ばく露中 (exposure) の各条件において吸気ピークをかぞえ、これを1分あたり呼吸数に変換した。図4-8に条件ごとの1分あたり呼吸数の平均と標準誤差を、図4-9に1分間呼吸数のばく露前・ばく露中の差を示す。平常時の呼吸数は毎分15~18回程度であるが、暗算課題などの実験的ストレス下においては増加することが知られている。ばく露前・ばく露中の呼吸数の差を取ったところ、各コードとも差の平均値はほぼ±0.5回の中に収まり、標準誤差を含めてもほぼ±1の中に収まった。このことから、ばく露前・ばく露中およびコード間において呼吸数に差はないと考えられ、電波の局所ばく露によるストレス反応は呼吸数によっては見出されなかったと考える。

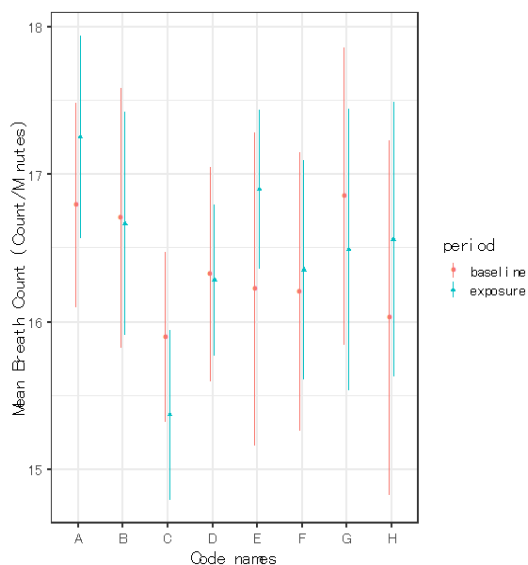


図4-8 前腕局所電波ばく露時の呼吸数変化

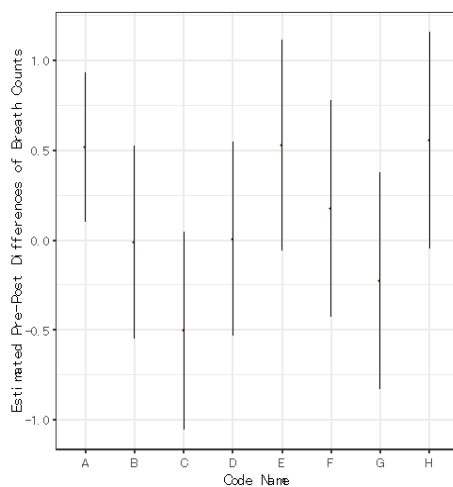


図4-9 前腕局所電波ばく露前・ばく露中の呼吸数の差

#### 4.2.5. 指尖脈波

前腕局所電波ばく露時の指尖脈波の変化については、電波ばく露前 (baseline) ・ばく露中 (exposure) の各条件において Peak 間隔 (以下 PPI と略記) を求めた。各 PPI から心拍数を求め、これらを条件ごとにボックスプロットとして示す (図 4-10)。心拍数変化は指尖脈波においても心電図と同様の解釈が可能である。心電図と同様ばく露前・ばく露中で大きな差は見られなかった。

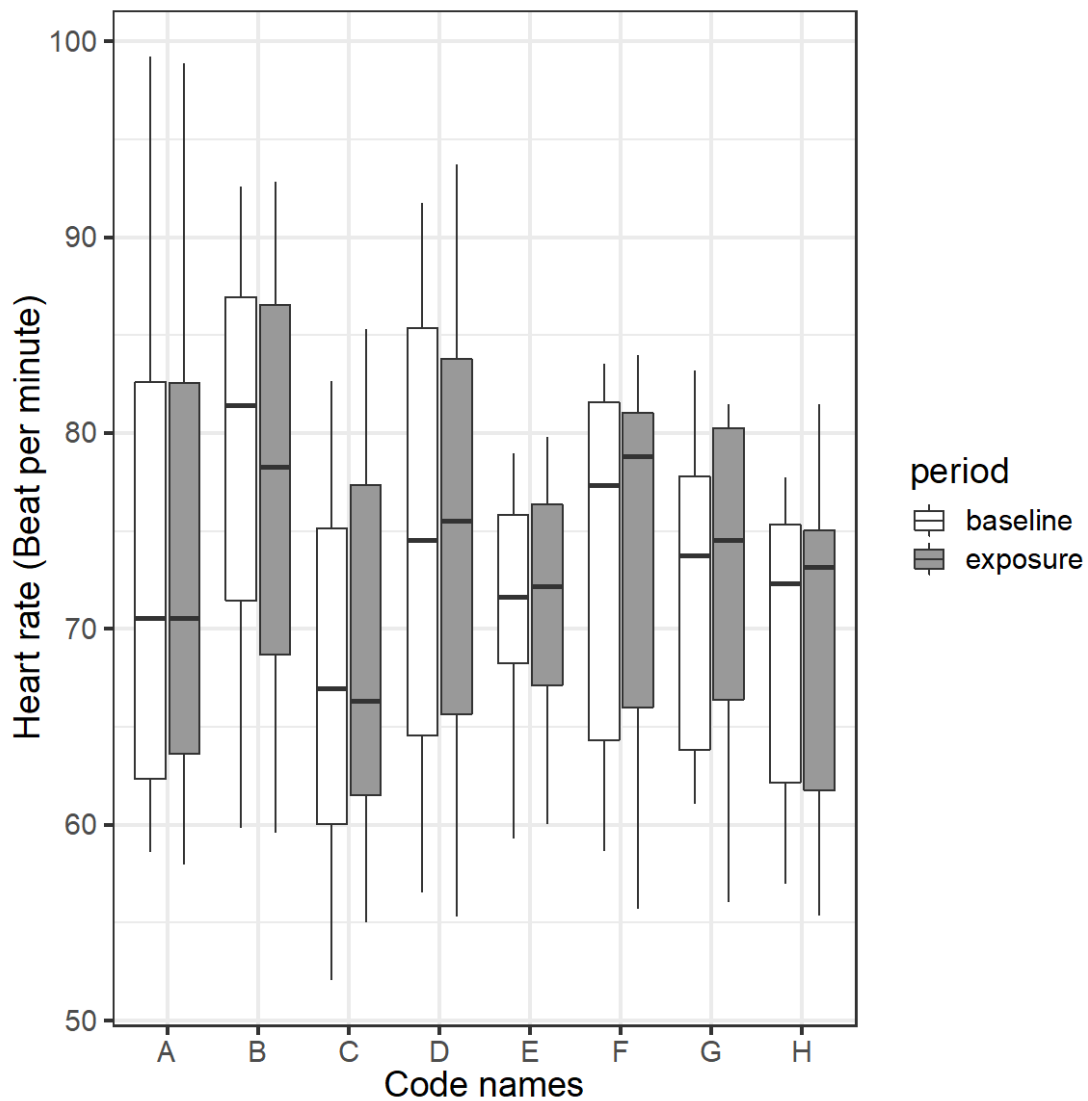


図 4-10 前腕局所電波ばく露時の指尖脈波変化

#### 4.2.6. アミラーゼ・コルチゾール（ストレスマーカーとして）

図 4-11、図 4-12 に実験前後の唾液中アミラーゼ活性レベルおよびコルチゾール濃度それぞれの変化を示す。ベースラインにおける個人差を統制するため、得られたデータを被験者ごとに実験前の値の平均・標準偏差を用いて標準化し、その後の実験前の値の実験後の値からの差を算出した。

アミラーゼはストレス刺激負荷に対して比較的素早く濃度が上昇すると言われているが<sup>8-10</sup>、各コードにおける差の平均値は 0 を上回っており、照射される出力の大きさに関わらず実験前後でアミラーゼ活性が上昇していることが示唆される。

一方、コルチゾールもストレス刺激負荷に対して唾液中の濃度が上昇すると言われており、心理社会的ストレス反応の指標として用いられる。アミラーゼが全体的に濃度の上昇を示したのと対照的に、コルチゾールでは全体的に濃度の低下が見られた。ただし、多くが 0 から 0.5 の間に集中しており、各コード内でのばらつきも 0 を越えるものが多いことから、これが直ちにリラックスの反応であるとはいえず、実験前後であまり変化がないとする解釈が妥当であろう。

アミラーゼ・コルチゾールとも出力との関係に関してはコード開示後の検討が必要であろうが、アミラーゼにおいて全体的な上昇、コルチゾールにおいて実験前後であまり変化がないと捉えるならば、電波の出力によるストレス反応よりも実験状況に置かれたことに対する反応が強く出ている可能性がある。

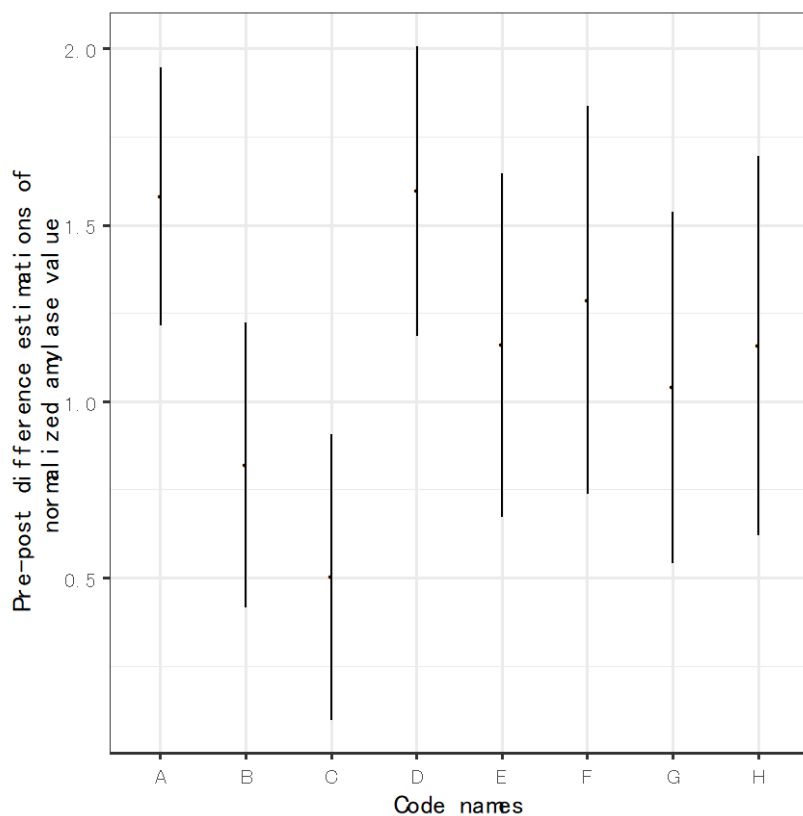


図 4-11 前腕局所電波ばく露時のアミラーゼ変化

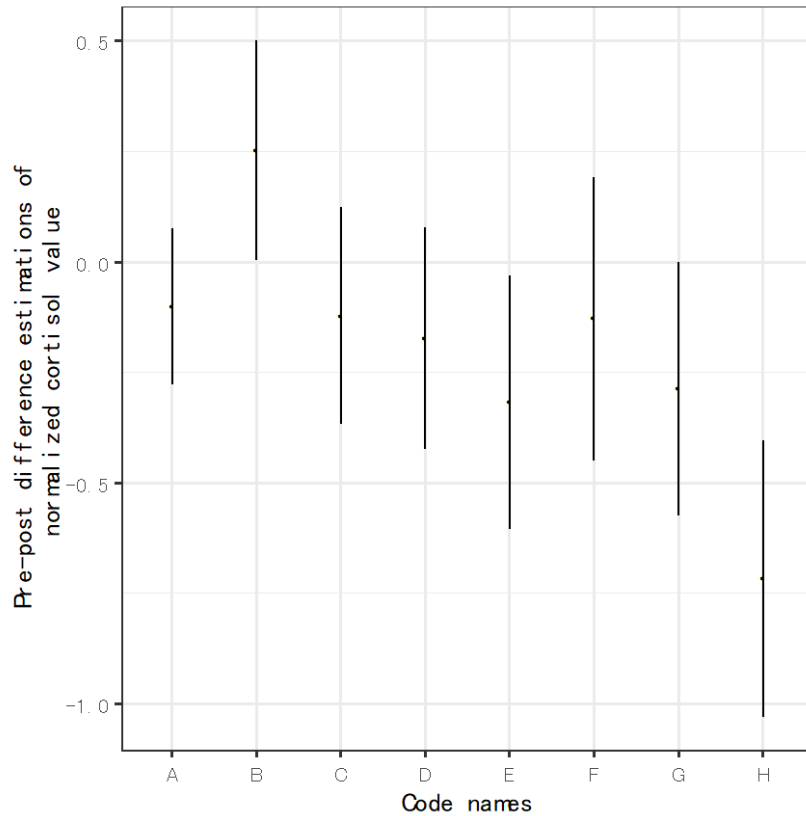


図 4-12 前腕局所電波ばく露時のコルチゾール変化

### 4.3. 考察

成人被験者に対して 28 GHz 電波の局所ばく露を実施し、各種生理学的パラメータを測定した。ファントムに対するばく露実験の結果を踏まえ、アンテナ入力電力として 0~3.0 W の 8 段階のばく露強度を用い、温熱生理学的パラメータおよび心理的パラメータの 2 つの側面からデータを解析した。

まず、温熱生理学的パラメータについて解析した結果、皮膚温度に対して明らかな上昇が認められ、その反応にはばく露強度に対する閾値が存在することが示唆された。同様の結果は皮膚血流においても観察された。最終的にはばく露強度のコード開示後の評価となるが、皮膚温度および皮膚血流量をコード別に比較すると、おそらく皮膚血流上昇は電波ばく露による温度上昇に起因して生じたと考えられる。この結果は、温度上昇を生じないばく露強度で血流上昇が生じていないことから支持される。以上の結果から、今回得られた電波局所ばく露による血流変化は電波の熱的影響によることが示唆される。

一方、温熱生理学的パラメータの中でも、心電・呼吸・指尖脈波においては電波局所ばく露による影響はいずれのばく露強度においても認められなかった。おそらくこれは、深部体温に変化が生じなかったことに起因すると考えられる。心拍および呼吸は視床下部により制御され、また視床下部温度に依存することが分かっている。この視床下部温度は深部体温を反映するが、実際に本実験で深部体温を測定したところ、ばく露中もばく露前の温度が維持されていた。したがって、たとえ局所的に皮膚温が上昇し、同じく皮膚血流が局所的に上昇しても、全身性への変化には移行しないと考えられる。ただし、今回はばく露時

間が比較的短い。高強度で長時間ばく露した場合は、もしかすると深部体温が上昇し、これに伴う心拍等の変動が生じるかもしれない。これについては今後さらなる検討が必要である。

次に、心理的パラメータについてであるが、ストレスマーカーとして知られる唾液中アミラーゼ活性および唾液中コルチゾール濃度を測定した結果、いずれのパラメータも電波局所ばく露による影響を示さなかった。しかも、ばく露強度 A あるいは F のような皮膚温度上昇や皮膚血流増加を伴う条件においても有意な変化は認められなかった。電波が及ぼす健康影響として懸念されている睡眠障害は心理的ストレスも要因とみられているが、本研究の結果をみるかぎりでは、少なくとも電波を局所ばく露した場合は、たとえそれが局所的に生理変化を惹起したとしても、心理的ストレスは与えないといえる。



## 5. 高齢層被験者に対する局所電波ばく露実験

温熱生理反応や温感は年齢とともに変化することが知られている。そこで本研究課題では、成人とは異なる年齢層の被験者を対象に 28 GHz の電波ばく露実験を実施し、成人被験者から得られる結果との比較を試みる。今回我々は 60～79 歳の高齢層を対象として被験者を募り、各人に対して電波ばく露中の各種生理学的指標に関するデータを取得した。

### 5.1. 方法

#### 5.1.1. 被験者とインフォームド・コンセント

本実験では、高齢層（60～79 歳）の健康な者 15 名（女性 7 名、男性 8 名； $67.3 \pm 5.14$  歳）に参加いただいた。人体（被験者）を対象とした実験を行うため、インフォームド・コンセントを行った。被験者候補には、事前説明会を開催し、実験の目的、重要性、内容等について資料と文書（説明文書）を用いて説明した。その後、候補者の実験に対する十分な理解を確認し、本人から同意を得た。また、データ取得・解析時に必要となる基本情報（年齢や既往歴、アレルギー等）に関するアンケート調査を行った。なお本実験は、当機関の倫理委員会において倫理審査を受け、平成 29 年 12 月 8 日付けで実験計画の承認を得ている（承認研究番号 17192）。同様に、説明会で用いた説明文書およびアンケート資料も同委員会により承認されている。

#### 5.1.2. 実験手順

人工気候室内において前述の測定システムを用いて、被験者に対する 28 GHz 局所電波ばく露を施し、各種生理学的パラメータを測定するとともに口腔内サンプルを採取した。被験者は実験環境に身体を慣らすために、人工気候室内で 30 分以上安静に過ごした。その後、各測定装置を身体に装着した。被験者は椅子に座り、右腕（前腕）をテーブルの上に乗せた状態で待機した（図 4-1 に同じ）。被験者前腕は、アンテナから 30 cm 前方に配置した。被験者毎に異なる体軀の差を無くすために、被験者前腕の手首から肘の長さの 3/10 となる点をターゲットエリアの中心とし（図 4-2 に同じ）、ここに向けて電波を照射した。ばく露強度は成人層実験と同様に 8 種類設け（アンテナ入力電力の値で、0, 0.05, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 W）、各強度を 1 実験につき単回ばく露した。実験開始に合わせ生理学的パラメータ（航空内サンプルを除く）を同時記録し、電波ばく露開始前の各パラメータの安定状態をコントロールデータとして、また、ばく露開始後からをばく露中データとして記録した（図 4-3 に同じ）。口腔内サンプルについては実験開始前および終了後に採取した。

なお、本実験では二重盲検法を用いるため、被験者には実験全体の所要時間、経過時間および電波ばく露開始のタイミング、さらに電波ばく露強度は伏せた。また、被験者には実験中の行動を以下のように指示した。

1. 安静状態を維持すること。
2. 温かさを感じたら温感スイッチを ON にすること。
3. 熱さを感じたら熱感スイッチを ON にすること。
4. 熱に耐えられなくなったら緊急停止スイッチを ON にすること。

### 5.2. 実験結果

本実験のデータ解析は、次年度（2020 年度）に実施される計画である。

## 6. ミリ波帯電波局所ばく露装置構築のサポート

2020年度に成人層被験者を対象にミリ波帯（60 GHz 超帯）電波ばく露実験を実施するため、これに必要な一部装置（アンプ等）を共同研究機関の指導のもと準備を進めた。

我々が今年度までに取得した準ミリ波のばく露強度と皮膚温度上昇との関係から、ミリ波帯電波に切り替えた場合の温度上昇レベルを予測し、これに必要なミリ波帯電波のアンテナ入力値を算出した。その結果、2つのレンズアンテナを組み合わせた集光型ばく露装置が必要と判明し、必要なアンテナおよびアンプ等が共同機関により設計された。そして、この設計図に基づき各種機器を発注、導入を完了した。

なお、当該ばく露装置構築に関する経緯および小特性データについては共同研究機関より報告される。

## 7. まとめ

本研究では、準ミリ波・ミリ波帯電波を局所ばく露した人体（被験者）における各種生理学的変化を測定し、得られたデータからばく露量とその変化との関係を明らかにする。

当該目的を達成するために、本年度は、(A)成人層被験者実験のデータ解析、(B)高齢者層実験データの取得、(C)ミリ波帯電波局所ばく露装置の開発補助の3課題を達成した。

まず、成人層被験者に対して28 GHz電波の局所ばく露を実施し、各種生理学的パラメータを測定・解析した。その結果、温熱生理学的パラメータについては、皮膚温度および皮膚血流に対して明らかな上昇が認められ、これらの反応にばく露強度に対する閾値が存在する可能性を示した。一方、全身性変化の指標となる心電・呼吸・指尖脈波、心理的变化の指標となる唾液中アミラーゼ活性および唾液中コルチゾール濃度については影響が認められないことを示した。

次に、温熱生理反応や温感は年齢とともに変化することが知られていることから、成人層被験者から得られる結果と対比することを目的として、60～79歳の高齢層を対象として被験者を募り、最終的に男女計15名から電波ばく露中の各種生理学的指標に関するデータを取得した。

最後に、次年に予定している成人層被験者を対象とする60 GHz超帯電波ばく露実験を実施するため、これに必要な一部装置（アンプ等）を共同研究機関と共同で開発し、導入・構築した。

以上、上記3課題の達成により、最終年度となる次年度に当初の計画通りの成果が得られる見込みとなった。

## 8. 参考文献

- 1) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz),” Health Phys, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, Apr. 1998.
- 2) 総務省 「生体電磁環境研究推進委員会の研究結果 - 携帯電話の短期ばく露では脳（血液-脳関門）に障害を与えず-」 <<http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/ele/body/comm/02.htm>>[Accessed 13 November 2017]
- 3) 総務省 「生体電磁環境研究推進委員会の研究結果 - 熱作用を及ぼさない電波の強さでは脳（血液-脳関門）に障害を与えず -」 <<http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/ele/body/comm/03.htm>>[Accessed 13 November 2017]
- 4) 総務省 「生体電磁環境研究推進委員会の研究結果 - 携帯電話の電波による課題学習能力への影響は生じないことを確認 -」 <<http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/ele/body/comm/05.htm>>[Accessed 13 November 2017]
- 5) 総務省 「生体電磁環境研究推進委員会の研究結果 - 長期にわたる携帯電話の使用が脳腫瘍の発生に及ぼす影響は認められないことを確認 -」 <<http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/ele/body/comm/06.htm>>[Accessed 13 November 2017]
- 6) 総務省 「生体電磁環境研究推進委員会の研究結果 - 携帯電話の電波が脳微小循環動態に及ぼす影響は認められないことを確認 -」 <<http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/ele/body/comm/07.htm>>[Accessed 13 November 2017]
- 7) 総務省 「電波の安全性に関する生体電磁環境研究推進委員会の研究結 - 携帯電話使用と聴神経鞘腫との関連性に関する疫学調査結果 -」 [pdf] Available at:<[http://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/258151/www.soumu.go.jp/s0news/2007/pdf/070221\\_6.pdf](http://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/258151/www.soumu.go.jp/s0news/2007/pdf/070221_6.pdf)>[Accessed 13 November 2017]
- 8) 山口昌樹, 花輪尚子, 吉田博, “唾液アミラーゼ式交感神経モニタの基礎的性能,” 生体医工学, 2007.
- 9) 山口昌樹, 金森貴裕, 金丸正史, 水野康文, 吉博, “唾液アミラーゼ活性はストレス推定の指標になり得るか,” 医用電子と生体工学, 2001.
- 10) 松本佳昭, 森信彰, 三田尻涼, 江鐘偉, “心拍揺らぎによる精神的ストレス評価法に関する研究,” ライフサポート学会, 2010.

(以下、北海道大学受託分)

## 目次

1. 要旨	2
2. 研究目的	3
3. 60 GHz 超帯ばく露装置の開発	6
3.1 装置構成の検討	6
3.2 空間合成法を用いた 60 GHz ミリ波ばく露装置の設計と開発	9
3.3 物理ファントムを用いた 60 GHz 帯ばく露装置の基本特性測定	13
4. 30 GHz 帯および 60 GHz 超帯ドシメトリ推定の継続および 数値シミュレーションの妥当性評価	16
4.1 FDTD 法を用いたばく露装置の数値シミュレーション	16
4.2 久留米大学におけるオンサイト測定とばく露装置性能の確認	24
5. まとめ	29
参考文献	30

## 1. 要旨

本研究は、2020 年の本格サービス開始が検討されている次世代通信方式“第 5 世代移動通信サービス(5G)”で使用される準ミリ波・ミリ波帯域の超高周波数電波が局所的にばく露された場合の、人体における生体影響について調査することを目的としている。局所ばく露時の温度変化(皮膚表面温度、深部体温)、皮膚血流変化をはじめとする複数の生理学的指標(生体反応)を同時に測定し、それぞれの用量反応関係を明らかとすること、さらに、各指標間の差異・相関についての調査、準ミリ波・ミリ波帯電波の局所ばく露が人体に及ぼす影響について複合的に捉えることを研究全体の目標としている。

本報告では、これら測定に基づく調査を実現するために必要不可欠な準ミリ波・ミリ波帯域電波のばく露実験系構築と評価法の開発を行う。本年度(令和元年度)は、昨年度パイロットスタディを実施した 60 GHz 超帯ミリ波ばく露装置の設計および構築を完了した。次年度に久留米大学で実施予定のボランティア実験に求められるばく露条件が実現されることを基本特性評価により確認した。さらに、30 GHz 帯ばく露装置のばく露量推定とこれら研究成果の国際会議等における公表、機器の保守、さらに生物実験のプロトコル構築のための補助データの提供を実施した。

## 2. 研究目的

超高周波電波ばく露に関する防護指針の策定あるいは国際ガイドライン見直しが急務となっている。本研究では、準ミリ波・ミリ波の電波が生体に及ぼす影響について人体を対象に調査し、温度に代表される各種生理学的指標の用量反応関係を明らかにする。また、取得した実験データを整理し物理工学的解析法を有する研究機関に提供・フィードバック解析することで、各種ばく露様式に対する汎用性の高い人体熱調整系モデルを構築し安全性評価に資することを研究全体の目標とする。

我が国では、2020年に第5世代移動通信サービス(5G)と呼ばれる通信サービスの本格運用開始が決定しており、3.7 GHz帯や4.5 GHz帯に加えて、準ミリ波・ミリ波帯の電波が利用される [1]。これにより現在問題となっている通信トラフィック急増に対する改善効果だけでなく、動画配信等の高速通信にも容易に対応できることが期待されている。

一方、この5G通信方式の運用にあたっては、安全面において解決しておくべき課題が残っている。本通信方式で用いられる電波は直進性のある絞られたビームである。また、基地局についても従来のような大型ではなく小型(マイクロセル)のものが数十メートル間隔で多数設置される。つまり生活空間において、従来とは異なるタイプの電波が、より身近な距離で日常的に人体に照射される可能性がある。とりわけ準ミリ波・ミリ波帯の電波は、その波長特性から皮膚表面に吸収されやすいため、体表ばく露時の生体影響を温熱生理反応などと合わせて調査した結果が求められている。しかし、現在、これら生体影響に関する知見は乏しく、ガイドラインの指針値を安全側に設定すべきとの見解もある。国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)では、2015年開催したワークショップにおいて、5G通信方式の拡大を見据えて、超高周波電波の局所ばく露で惹起される発熱に対して人体熱調節作用の有効性を検討すべきであると提言している。さらに2016年開催のICNIRP Workshopにおいても、これに関する知見不足が指摘されており、準ミリ波・ミリ波帯電波局所ばく露の安全性評価に対する関心が国際的にも高まっている。世界に先駆けて5G通信方式を導入・拡大、さらには国際標準化を志向している本国においては、上記社会的要請もふまえ、安全性評価においてもいち早くこれに取り組み、情報提供する責務があると考えられる。本研究では、次に示す課題

を計画・実施し、熱調整系シミュレーションを専門とする他の研究機関と連携しながら、国内外のガイドライン策定・改定等に有用な知見の取得を目指す。

ア) 生体影響に関する調査 (久留米大学)

- ・人体を対象とした準ミリ波・ミリ波局所ばく露実験による生理学的変化の測定
- ・取得した生理学的変化の用量反応関係の解析および被験者間差異の評価
- ・必要データの抽出と連携機関への提供およびフィードバック解析

イ) ばく露装置と評価法の開発 (北海道大学)

- ・上記課題アを実施するためのばく露装置の開発
- ・人体モデルを用いたドシメトリ
- ・ばく露装置メンテナンスおよび安全管理

ウ) シミュレーションによる生体影響に関する安全性評価 (北見工業大学)

- ・大規模人体ばく露解析プログラムの開発
- ・準ミリ波・ミリ波帯用人体数値モデルの改良
- ・局所ばく露実験に基づく温熱調整モデルの構築
- ・無線端末を想定した局所ばく露評価

本研究は、久留米大学、北海道大学および北見工業大学の 3 機関が連携し、4 年の実施計画に基づいて進捗させている。北海道大学においては、分担研究 イ) について実施する。本年度(令和元年度)は、以下の計画を実施する。

A) 60 GHz 超帯ミリ波ばく露装置の開発検討

久留米大学にて実施の 30 GHz 帯ばく露実験に要した電波ばく露の強度を参照し、また前年度実施のパイロットスタディに基づき、十分なばく露強度を実現する新たな 60 GHz 帯ばく露装置の設計および構築を行う。さらに、構築したばく露装置の基本特性の評価を行う。

B) 30 GHz 帯および 60 GHz 超帯ドシメトリ推定の継続および数値シミュレーションの妥当性評価

ばく露ドシメトリの高精度化および装置の安全性を担保するため、30 GHz 帯お



よび 60 GHz 超帯において人体モデルを用いたドシメトリを継続し、これら検討結果について国際会議などで成果公表を行う。

C) 研究連携機関へのドシメトリの評価データ提供および生物実験の補助・保守・安全管理

研究連携機関へ 30 GHz 帯および 60 GHz 超帯において実施したドシメトリの評価データを提供し、あわせてばく露実験系の装置の保守管理および安全性確認を実施する。

なお、各実施計画は表 2-1 に示すように本報告書の項目に対応している。

表 2-1 実施計画と対応表

実施計画	対応項目
A) 60 GHz 超帯ミリ波ばく露装置の開発検討	3.1
	3.2
	3.3
	4.1
B) 30 GHz 帯および 60 GHz 超帯ドシメトリ推定の継続および数値シミュレーションの妥当性評価	3.3
	4.1
	4.2
C) 研究連携機関へのドシメトリの評価データ提供および生物実験の補助・保守・安全管理	4.1
	4.2

### 3. 60 GHz 超帯ばく露装置の開発

#### 3.1 装置構成の検討

本研究は、準ミリ波・ミリ波の電波が生体に及ぼす影響について人体を対象に調査し、温度に代表される各種生理学的指標の用量反応関係を明らかにするものである。ここでは、実人体を対象として準ミリ波・ミリ波帯の電波を局所的にばく露し、その際の生体反応を高精度に測定する。この実験は、温度・湿度を管理することが可能な人工気候室内で実施される。ばく露実験および実験環境の様子を図 3.1 および図 3.2 にそれぞれ示す。同図に示されるようなばく露装置および種々の測定装置が配置された実験環境において、準ミリ波・ミリ波局所ばく露時の人体における様々な生体反応が測定される。局所ばく露の対象部位は、図 3.3 に示すような人体前腕部の直径 2cm 程度の円領域であり、複数の成人および高齢被験者を対象に電波ばく露実験が実施される。



図 3.1 人体を対象とした準ミリ波・ミリ波局所ばく露実験

本研究で開発するばく露装置に求められる条件は、以下のとおりである。

- 1) 所望の周波数帯において、被験者（この場合、電波ばく露を受けるもの）の皮膚上に所望の強度で、あらかじめ定めた領域に局所的な電波ばく露を実現すること。
- 2) ばく露領域の温度上昇を測定するためのサーモグラフィカメラや生体反応を測定するための「生体信号マルチ測定システム」が設置可能な空間（人体とばく露装置との距離）を確保すること。

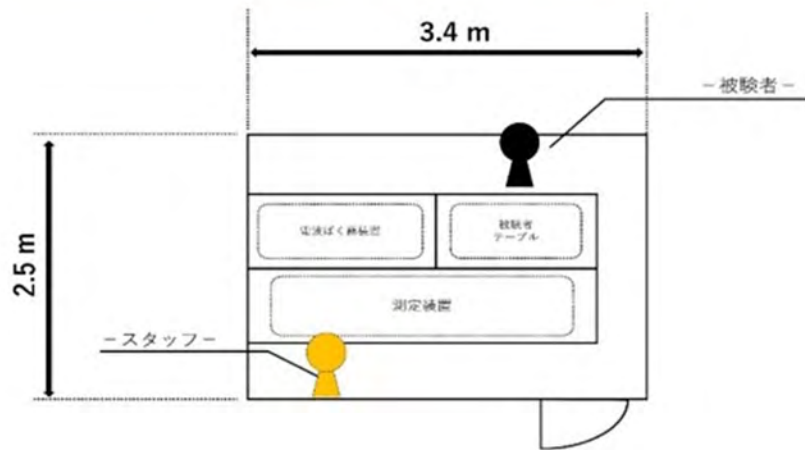


図 3.2 ばく露実験環境 (久留米大学)

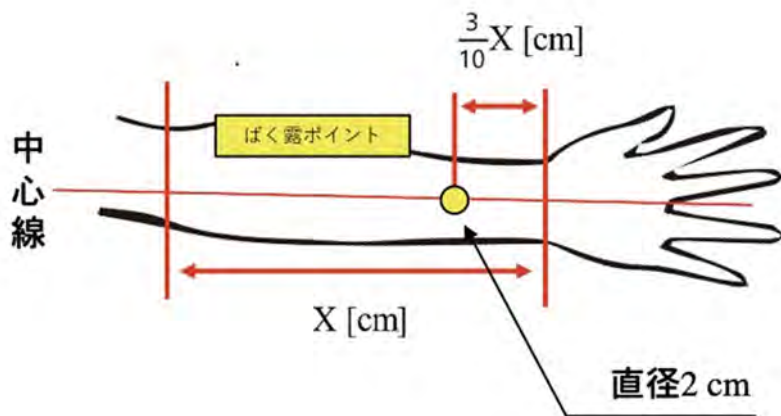


図 3.3 被験者の局所ばく露部位

- 3) 測定者(この場合、電波照射を制御するもの)が、ばく露の ON/OFF をコントロールできること。
- 4) 被験者あるいは測定者が必要と判断した場合に、ばく露装置を安全に停止できること。
- 5) 機器の故障など不測の事態が生じた場合に、ばく露装置が安全に停止すること。

これら条件を全て実現するばく露装置の開発が本研究の第 1 目的である。

条件 1) について、図 3.3 に示されるように人体前腕部の皮膚上、直径 2cm 程度の領域に置いて十分なばく露強度とするため、集光タイプのレンズアンテナおよび十分な出力を実現するための回路構成が必要である。

条件 2) について、生体信号測定装置等の設置位置、向き等を考慮し、被験者の腕部皮膚からばく露装置までの距離は 30 cm 確保することとした。

条件 3) について、導波管スイッチあるいは信号発生器を操作することで測定者がばく露の ON/OFF を容易にコントロールできるようにする。

条件 4) および条件 5) について、ボランティア実験実施機関である久留米大学と検討の上、2種類の安全装置をばく露装置に組み込むこととした。すなわち、被験者あるいは測定者が何らかの理由により即座にばく露を停止させる必要が生じた場合に用いる手動のばく露停止装置、および機器の不具合などが生じた場合の自動停止装置を具備することとした。

平成 30 年度までの研究において、集光レンズアンテナを用いた 28 GHz 帯ばく露装置の設計および構築[2-4]を行い久留米大学に設置済みである。同装置を用いた成人層(20 歳から 39 歳)および高齢者層(60 歳から 79 歳)のボランティア実験が実施されている。本年度は、ばく露周波数を 60 GHz とした新たなばく露装置の設計および開発を以下の通り行った。

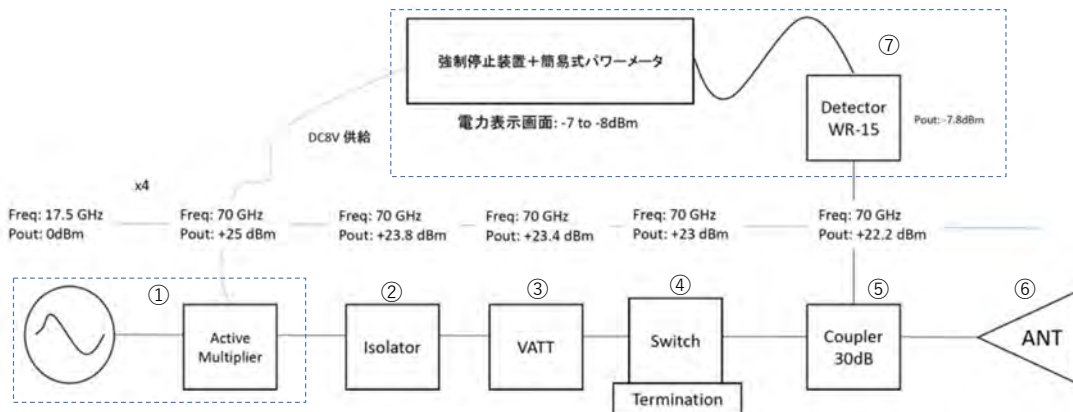
## 3.2 空間合成法を用いた 60 GHz ミリ波ばく露装置の設計と開発

前述のばく露装置に求められる条件を満足する 60 GHz 超帯ばく露装置のアンテナおよび回路構成の検討を行った。前年度検討を行った 60 GHz 超帯ばく露装置のパイロットモデルの基本ブロック図および構成装置を図 3.4 に示す。28 GHz 帯ばく露装置と同様に誘電体レンズアンテナを用い、焦点距離 300mm において-3 dB ビーム幅が 20 mm となるようアンテナ設計を行っている。図 3.5 に示すように、パイロットモデルの基本特性を評価するため、人体上腕形状の疑似人体(腕ファントム)およびサーモグラフィ法を用いた実験系を構築した。ここで、腕ファントムは、60-70 GHz 帯における人体皮膚の電気定数[5]を模擬する材料を用いて作成したものである。増幅器出力を 0.3 W とした場合のファントム表面における温度上昇特性をサーモグラフィにより測定した。ばく露開始から 800 秒後の温度分布画像を図 3.6 に示す。同図より、半径 20 mm の円形領域にビームが集光されていることが確認でき、設計された誘電体レンズアンテナにより所望のばく露特性が実現されていることがわかる。図 3.7 に円形ばく露領域中心における温度上昇の時間特性を示す。集光ビームによる上昇温度は、100 秒後で 0.5°C、200 秒後で約 0.9°C であった。

久留米大学において実施の 28 GHz 帯ばく露装置を用いた実験では、アンテナ入力電力を 3 W 程度まで設定した調査が行われる。すなわち、60 GHz 超帯において出力 3 W 以上の増幅器が必要となるが、単体でそのような高出力増幅器は狭帯域であっても入手が極めて困難である。そこで本研究では、増幅回路および集光レンズアンテナを 2 系統で構成し空間合成により十分なばく露強度を実現する新たなばく露装置を提案した(図 3.8)。5G 以降の周波数帯候補であり、出力 2 W 程度(P1dB: 33dBm)を実現する増幅器が入手可能な周波数として 60 GHz をばく露周波数として選択し、集光レンズアンテナおよび回路を設計し装置を構築した。図 3.9 および図 3.10 に設計したばく露装置のブロック図を示す。空間合成を行うための 2 つのレンズアンテナ間の角度は約 36° である(図 3.10)。

装置構築後、導波管による各接続の減衰量などを測定し、60GHz 帯において所望の電力特性が実現されていることを確認した。さらに、スイッチによりばく露電波の ON/OFF 切り替えが容易に実施されており、安全装置についても設定通り動作することを確認した。

次に、前述の腕ファントムを用い、構築したばく露装置の基本特性を評価する。



(a) ブロック図



(b) 装置構成

図 3.4 60GHz 超帯ばく露装置のパイロットモデル(ブロック図および装置構成)

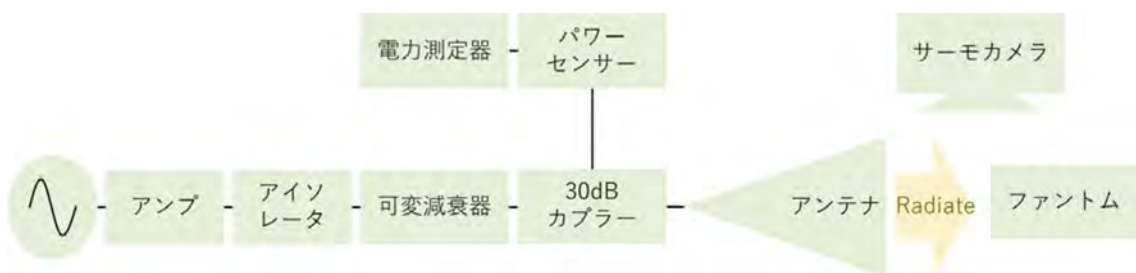


図 3.5 基本特性評価のための実験系のブロック図

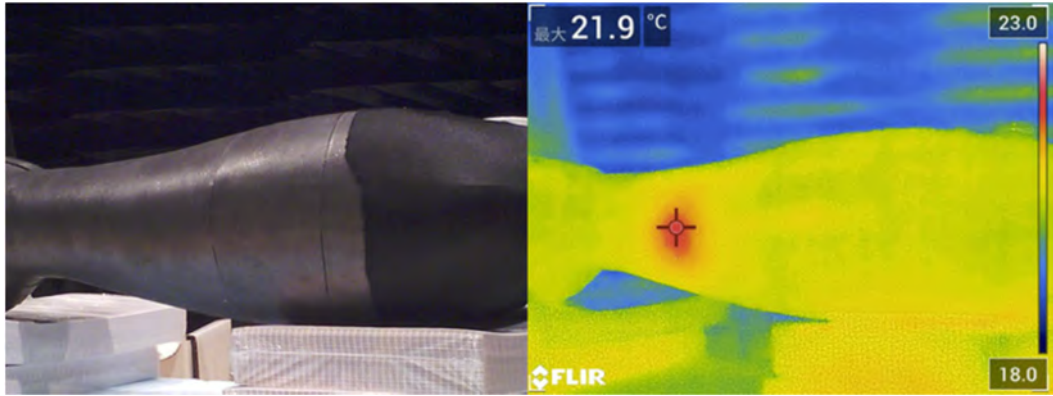


図 3.6 疑似人体を用いた温度上昇特性測定(ばく露開始 800 秒後の分布)

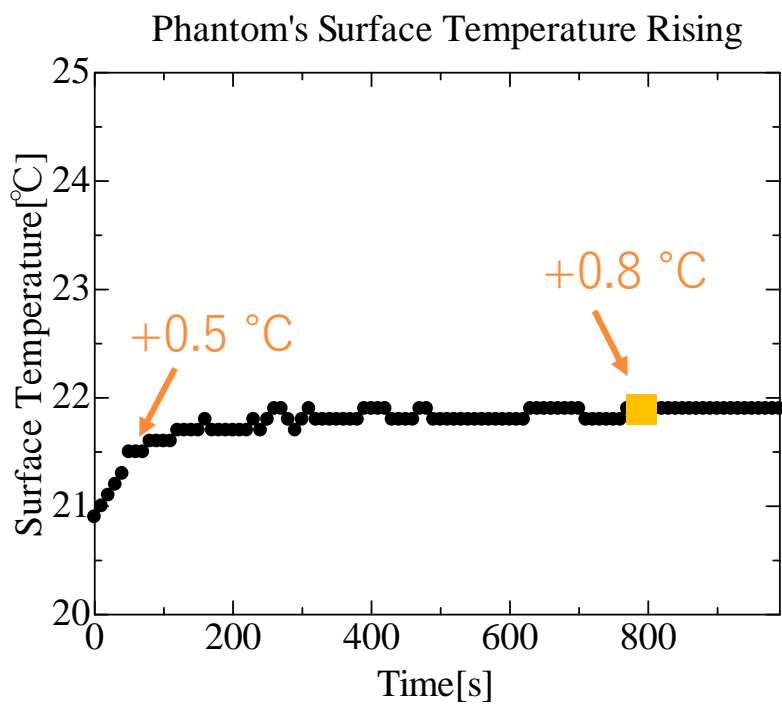


図 3.7 電波ばく露による疑似人体表面の温度上昇特性

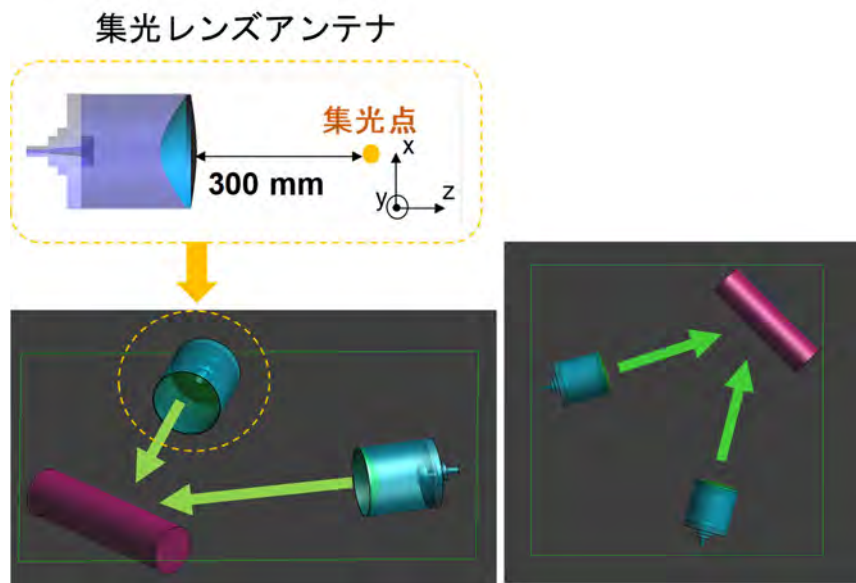


図 3.8 空間合成法の提案

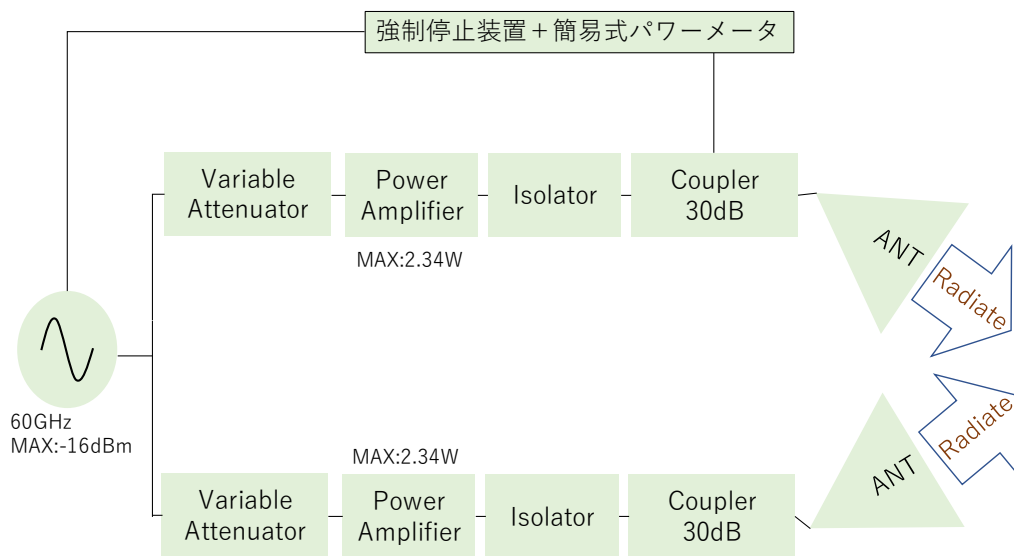


図 3.9 60 GHz 帯空間合成型ばく露装置のブロック図



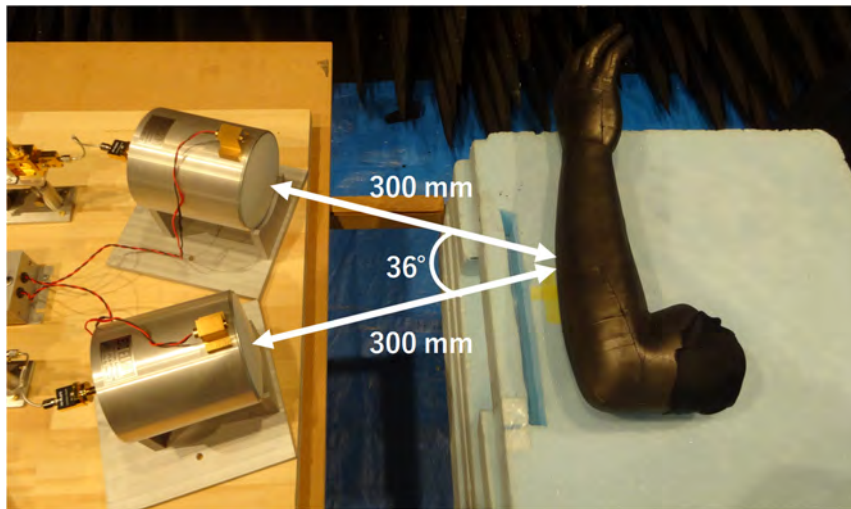


図 3.10 空間合成のためのアンテナ配置

### 3.3 物理ファントムを用いた 60 GHz 帯ばく露装置の基本特性測定

構築した空間合成型ばく露装置の基本特性評価を行う。腕ファントムを用いて、電波ばく露時の温度上昇特性を取得した。図 3.11 に測定の様子を示す。測定に用いた腕ファントムは、前述の 60 GHz 帯の人体皮膚を模擬した材料で製作されている。表 3-1 に測定条件を示す。電波暗室内にばく露装置および腕ファントムを設置し、アンテナ入力電力(2系統の合計)を1.0 W、2.0W および 4.5 W (max.値)と変化させた場合のファントム表面の温度上昇特性をサーモグラフィにより測定した。図 3.12 に、アンテナ入力電力を 1W とした場合のばく露前およびばく露開始から 890 秒後の温度分布特性を示す。同図より、約 2 cmの円領域に集光されたばく露が実現されていることが確認できる。また、ファントム表面温度の上昇特性についてアンテナ入力電力ごとに比較して図 3.13 に示す。構築したばく露装置について、アンテナから 300 mm の位置におけるばく露ターゲット領域の確認、および十分なばく露強度が実現可能であることが確認された。

これらにより、所望の周波数および所望のアンテナ入力電力が実現可能であることが確認され、60 GHz 帯ばく露装置に関する基本特性評価が完了した。次年度、開発したばく露装置によるボランティア実験が久留米大学において実施予定である。

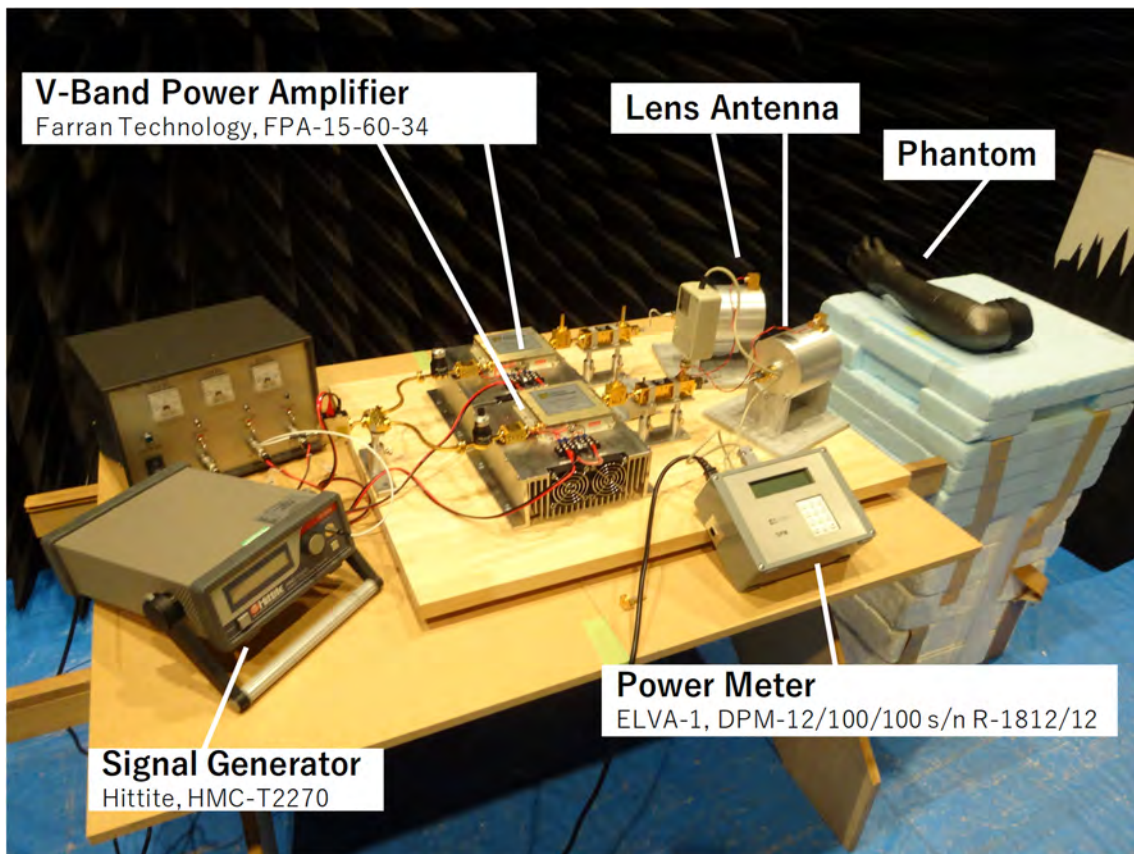


図 3.11 空間合成型 60 GHz ばく露装置の基本特性評価

表 3-1 温度上昇測定条件

室温	20°C
ばく露周波数	60.0 GHz
ばく露時間	0~900 [sec.]
アンテナ入力電力 (2 系統合計)	1 W, 2 W, 4.5 W(max.)

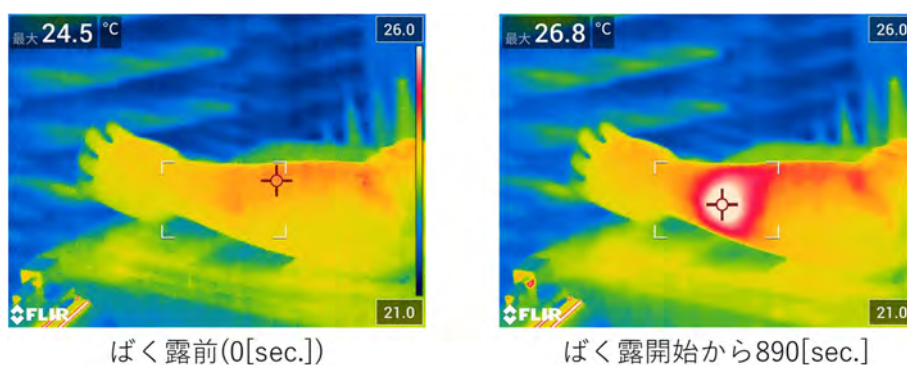


図 3.12 ばく露による温度上昇測定例(アンテナ入力電力:1W)

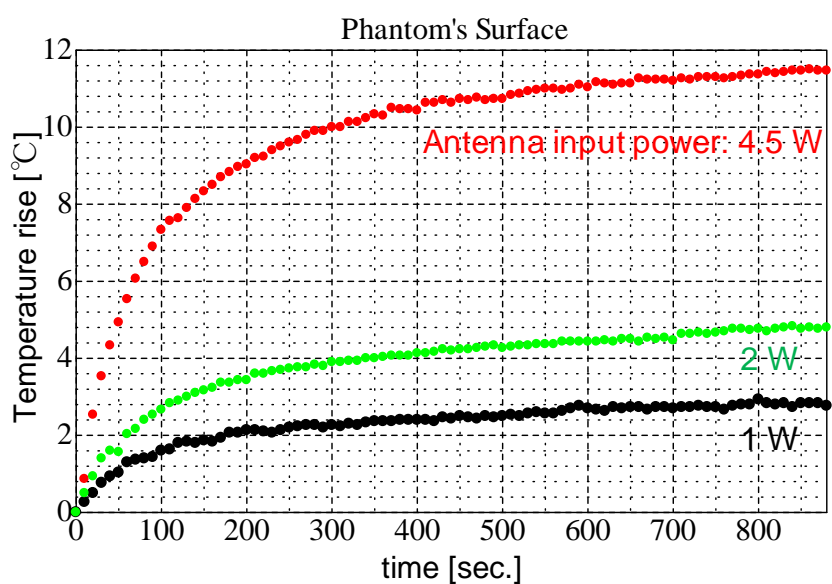


図 3.13 アンテナ入力電力とファントム表面温度上昇特性

## 4. 30 GHz 帯および 60 GHz 超帯ドシメトリ推定の継続および

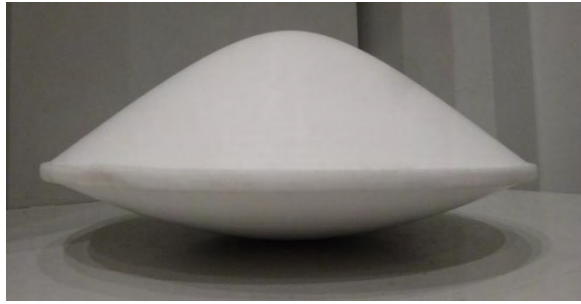
### 数値シミュレーションの妥当性評価

#### 4.1 FDTD 法を用いたばく露装置の数値シミュレーション

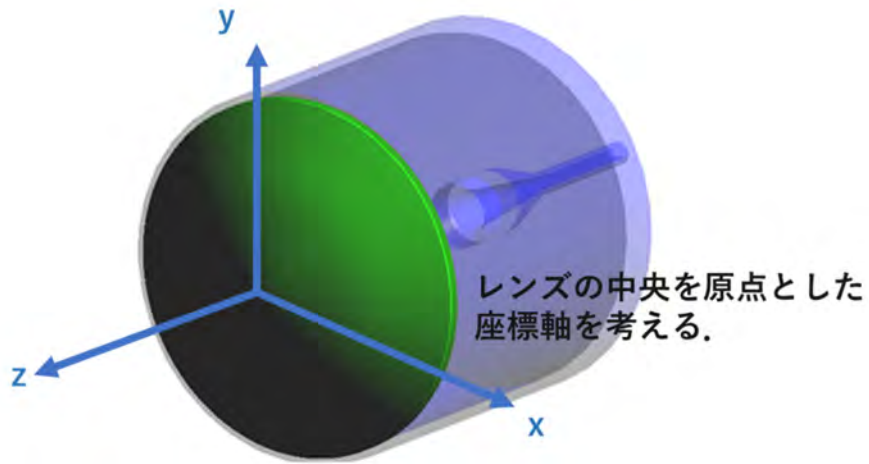
ばく露装置の電磁界強度分布を評価するため、FDTD 法を用いた数値シミュレーションによる特性推定を行った。数値モデルと解析条件について以下に示す。数値モデルは、ばく露装置の集光レンズアンテナ部分を数値化したものである。図 4.1 にモデルを示す。座標原点はレンズの中心としている。解析パラメータを表 4.1 に示す。解析領域は、アンテナ全体とレンズ表面から 500 mm 先までの二次平面(yz 平面)、集光部付近のばく露面(xy 平面)を含む三次元空間とした。セル寸法は、レンズの曲面を精度よく表現するために計算資源の許す限り細かくし、最小で一辺 0.43 mm に設定した。レンズ部分以外は、解析周波数(28 GHz)の波長の 0.07 倍に相当する一辺 0.75 mm のセルでモデル化している。解析空間全体の総セル数は、約 508 メガセルとなる。境界条件は 10 層の U.P.M.L を用いた。励振構造はプローブ給電を用い、アンテナ入力電力は 1 W で規格化して評価する。レンズアンテナからの放射電波が集光されるばく露領域の評価結果について、2 次元分布(電界、磁界、電力密度)および 1 次元分布(電力密度)を図 4.2 から図 4.7 に示す。

さらに、60GHz 超帯のレンズアンテナモデルについても、FDTD 法を用いた解析を実施し(図 4.8)、ばく露位置において同様の集光特性が実現されることを確認している。

これらシミュレーション結果より、レンズアンテナ前面から 300 mm 離れた位置で円形に集光が実現されていることが確認できる。また、電力密度の 1 次元分評価結果より、3 dB ビーム幅が所望の直径 2 cm 以内の円領域におさまっていることが明らかであり、所望のばく露条件が実現できていることを確認した。



(a) 集光レンズの物理モデル

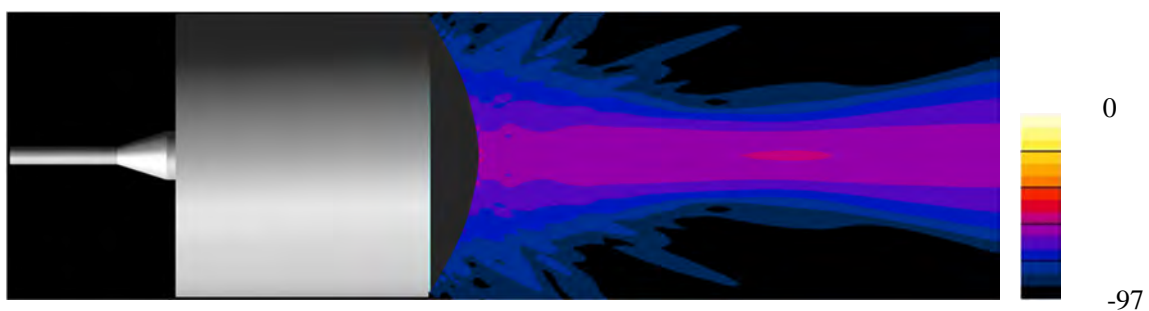


(b) 3次元数値モデル

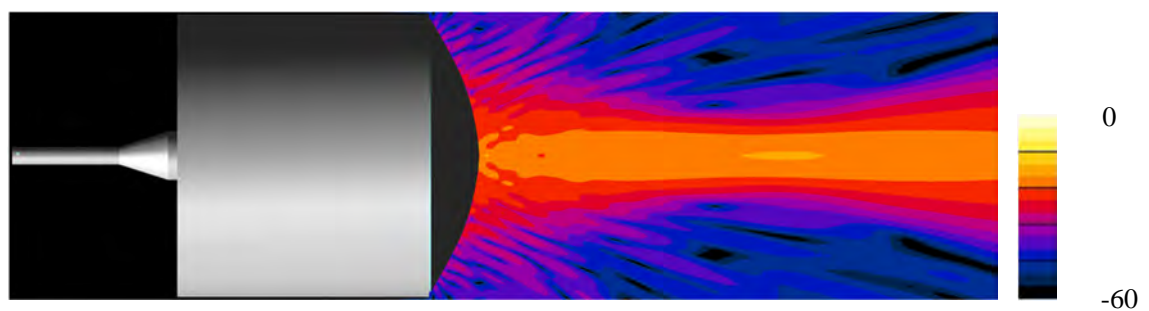
図 4.1 集光レンズアンテナモデル

表 4.1 FDTD 解析のパラメータ

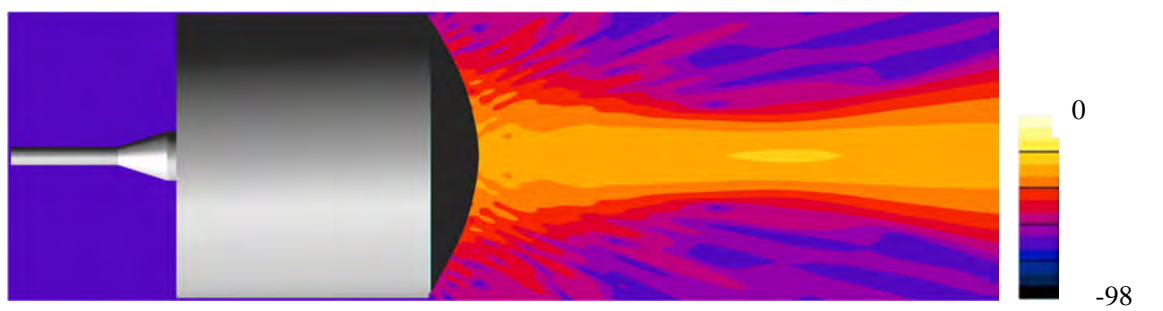
解析領域 [ $mm^3$ ]	yz 平面: $0 \times 198 \times 682$ ばく露面付近: $198 \times 198 \times 300$
セルサイズ [mm](立方体)	レンズ部分: 0.43 その他: 0.75
総セル数 [MCells]	508
境界条件	ABC (U.P.M.L: 10 層)
周波数 [GHz]	28.0
励振構造	プローブ励振 (Input Power: 1 W)
演算繰り返し回数 [period]	200
アンテナの電気定数	誘電体レンズ部分(比誘電率 2.1) 金属部分(P.E.C.)



(a) 電界強度分布  
 (※分布図中のピーク値  $5.15 \times 10^5$  [V/m]で規格化)

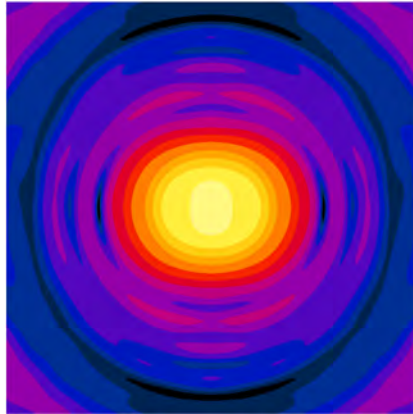


(b) 磁界強度分布  
 (※分布図中のピーク値 36.4 [A/m]で規格化)

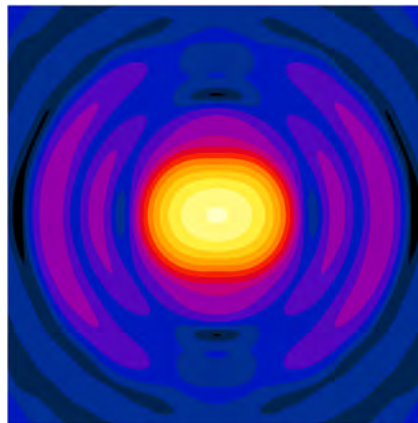


(c) 電力密度分布  
 (※分布図中のピーク値  $4.29 \times 10^5$  [W/m<sup>2</sup>]で規格化)

図 4.2 2次元電磁界強度分布(yz平面, シミュレーション)

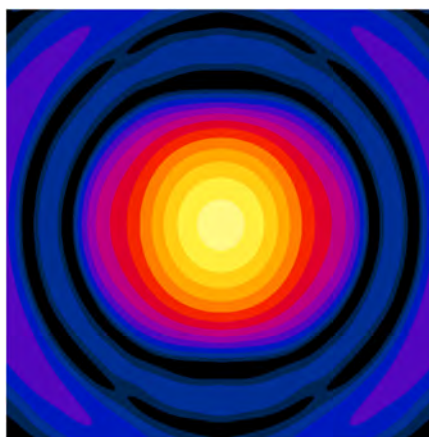


(a) @  $z = 200$  mm (集光部分- 100 mm)



(b) @  $z = 300$  mm (集光部分)

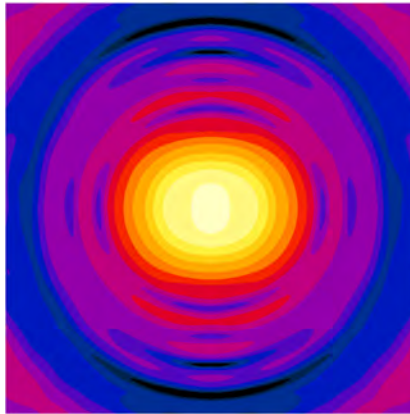
いずれも  
(b)  $z = 300$  mm における  
ピーク値 948 [V/m] で規格化



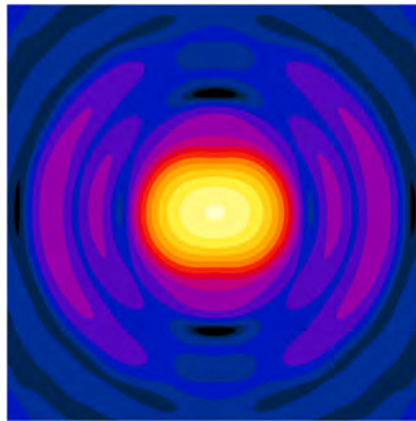
(c) @  $z = 400$  mm (集光部分+ 100 mm)



図 4.3 2次元電界強度分布(集光特性, xy 平面)

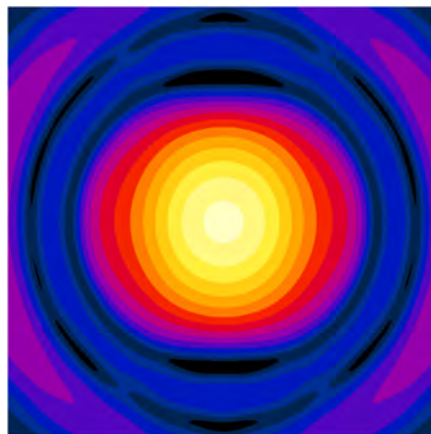


(a) @  $z = 200$  mm (集光部分- 100 mm)



(b) @  $z = 300$  mm (集光部分)

いずれも  
(b)  $z = 300$  mm における  
ピーク値  $1.76$  [A/m] で規格化

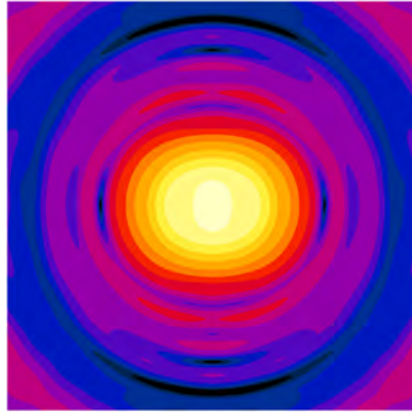


(c) @  $z = 400$  mm (集光部分+ 100 mm)

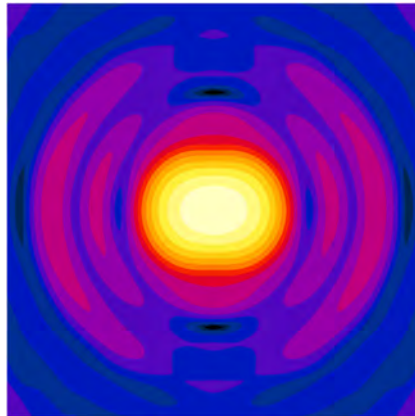


図 4.4 2次元磁界強度分布(集光特性, xy 平面)



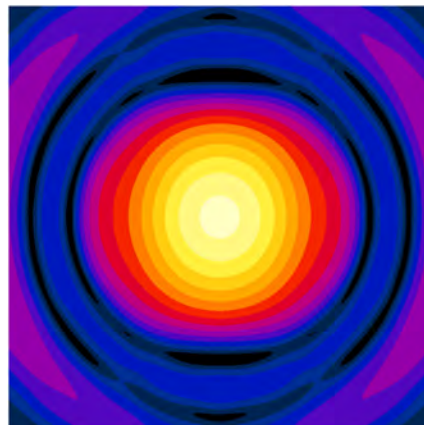


(a) @  $z = 200$  mm (集光部分- 100 mm)



(c) @  $z = 300$  mm (集光部分)

いずれも  
(b)  $z = 300$  mm における  
ピーク値  $1.18 \times 10^3$  [W/m<sup>2</sup>] で規格



(c) @  $z = 400$  mm (集光部分+ 100 mm)



図 4.52 次元電力密度分布(集光特性, xy 平面)

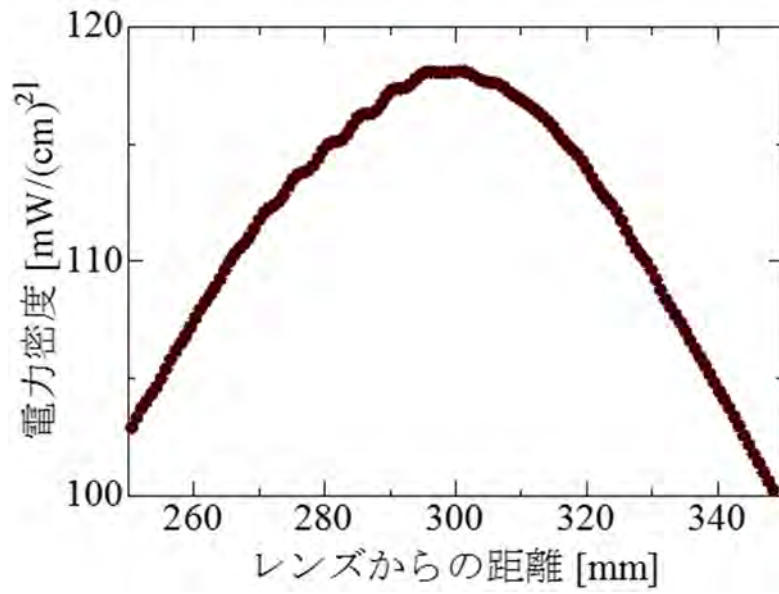


図 4.6 電力密度の距離特性(1次元分布)

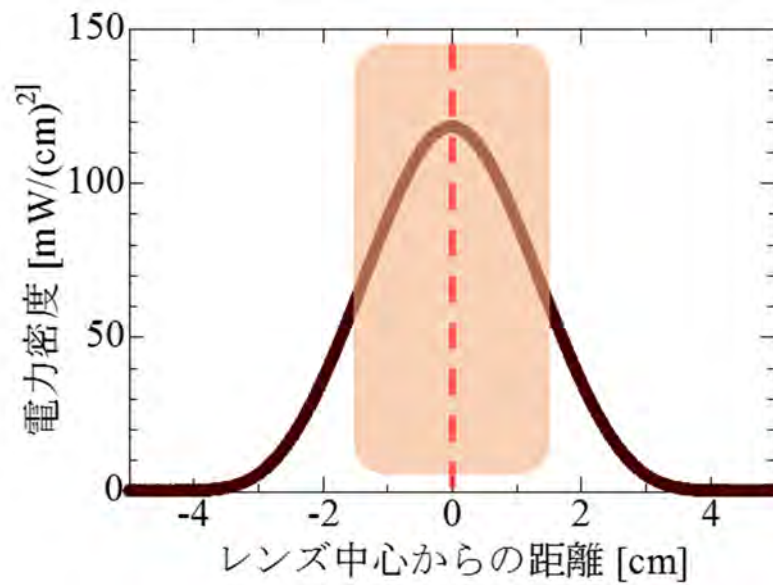
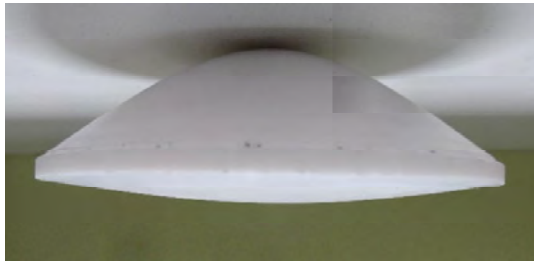
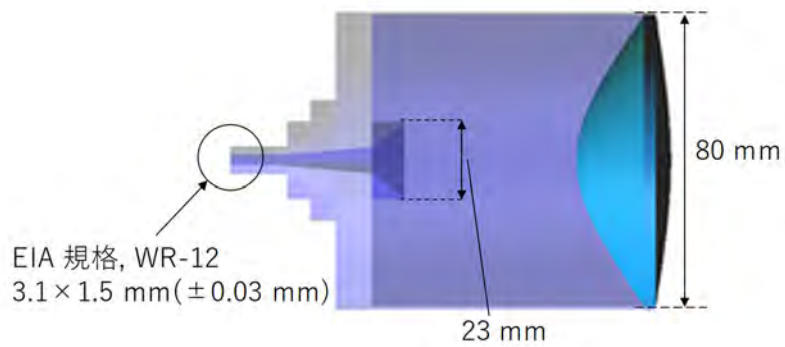


図 4.7 電力密度の集光特性(1次元分布、ハンチング部分は-3 dB ビーム幅を示す)



(a)集光レンズの物理モデル



(b)3次元数値モデル

図 4.8 60 GHz 超帯アンテナモデル

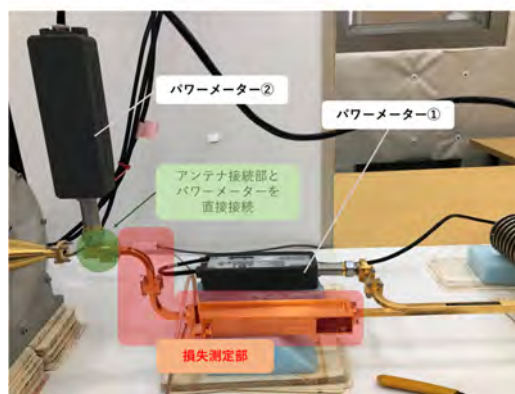
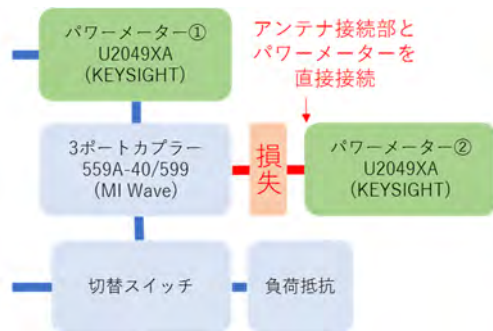


図 4.9 ばく露装置保守および性能確認

## 4.2 久留米大学におけるオンサイト測定とばく露装置性能の確認

久留米大学に設置された 30 GHz 帯ばく露装置について、アンテナ入力電力とばく露強度の関係の明確化、および数値ドシメトリ評価の妥当性検証を目的に、オンサイトでの電磁界分布測定を実施した。ボランティア実験開始から 1 年程度経過した時期において、装置のばく露特性に変化がないことを確認するためアンテナ入力電力などについても再測定(図 4.9)を行った。

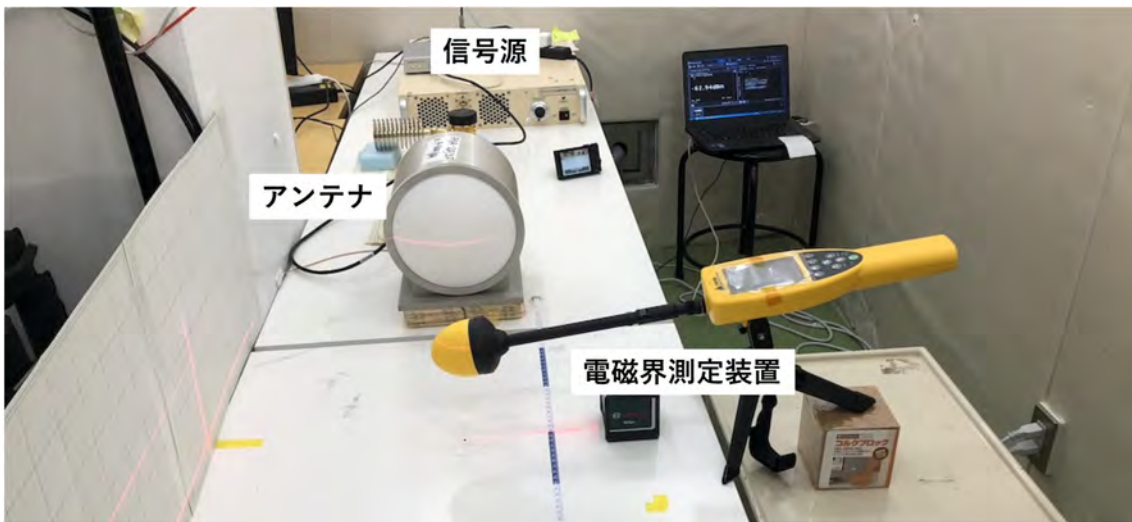
図 4.10 に示す高周波電磁界測定器(NBM - 550, Narda Safety Test Solutions GmbH 社)と EH-5091(プローブ)を用い、ばく露エリアとなる集光部やその周辺における電界  $E$  [V/m]、磁界  $H$  [A/m]、電力密度  $S$  [mW/cm<sup>2</sup>]の測定を実施した。電磁界測定の様子を図 4.11 に示す。測定時、原点はレンズの中心としている。照射電波の周波数帯は 28 GHz、アンテナ入力電力 1 W とし、測定領域はレンズ中心を原点 ( $z = 300$  mm とした距離特性および集光特性である。距離特性および集光特性の測定位置を図 4.12 に示す。

測定結果の一例を図 4.13 に示す。ここでは、アンテナから  $z$  軸方向に 300 mm の焦点距離と  $\pm 10$  mm の位置で測定したターゲット領域近傍の電界強度について、数値シミュレーション結果と比較して示している。同図より、焦点距離において所望のばく露領域が実現されていることがわかる。また、測定結果と数値シミュレーションの結果はよく一致しており、シミュレーション結果の妥当性が確認できる。

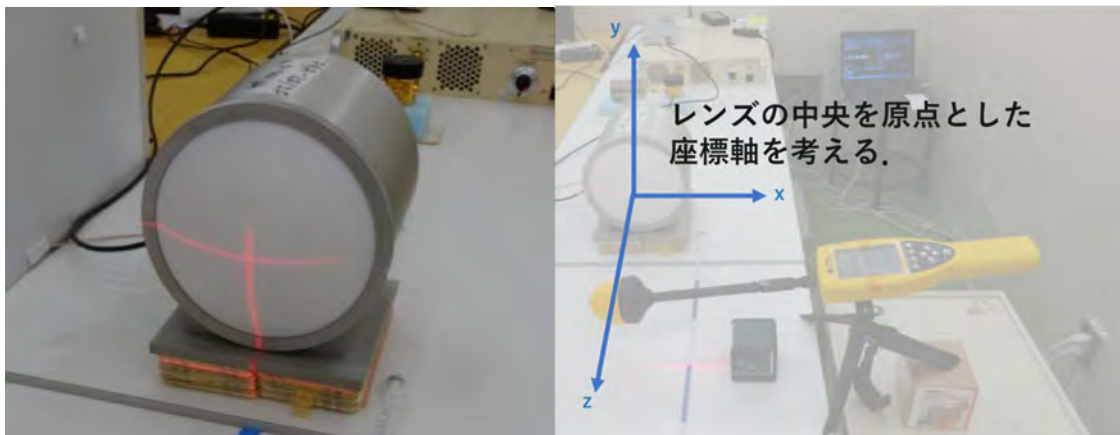
本研究では、準ミリ波・ミリ波帯用人体数値モデルの改良および局所ばく露実験に基づく温熱調整モデルの構築(北見工業大学実施)が行われる。そこでは、数値シミュレーション(電磁界解析および温度解析)を用いて、アンテナ入力電力と皮膚組織の温度上昇評価が行われる。したがって、シミュレーションで用いるばく露系の数値モデルの妥当性検証は必須である。本研究で妥当性を検証されたばく露装置の数値モデルおよびドシメトリデータを連携研究機関へ提供した。



図 4.10 高周波電磁界測定器 ((NBM - 550, EH-5091, Narda STS GmbH 社)

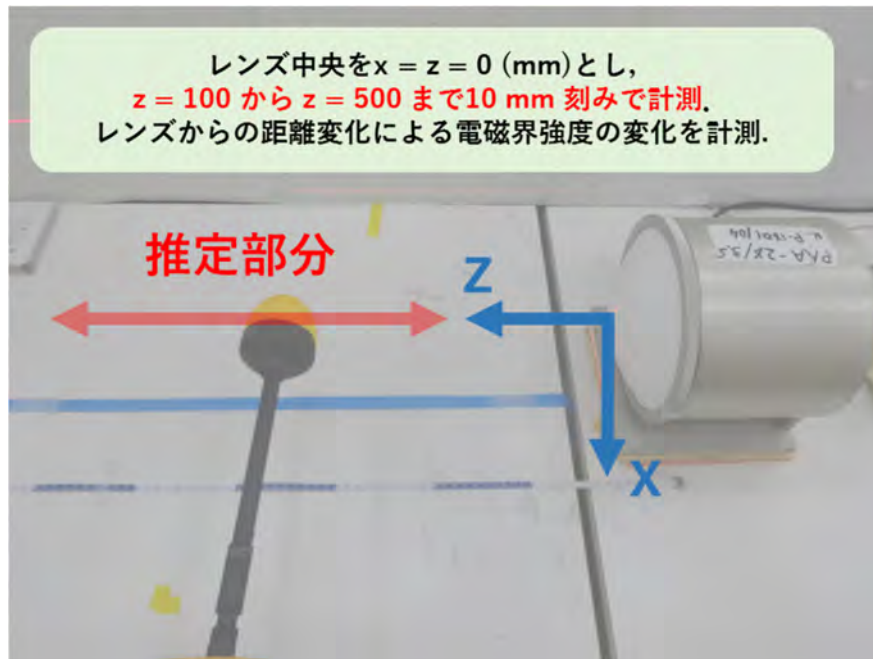


(a) 全体の様子

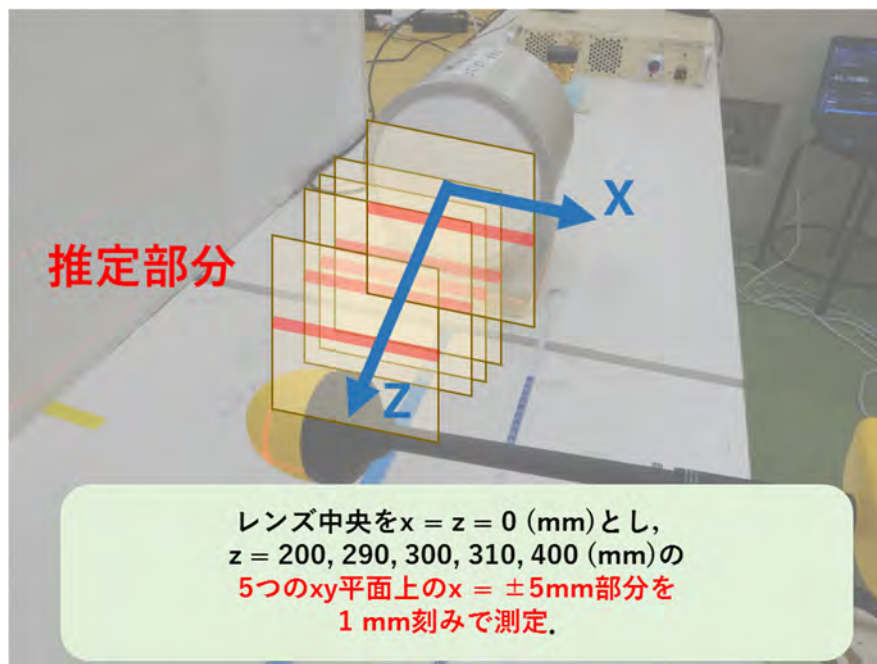


(b) アンテナ中心を基準とした測定ポイントの位置決め

図 4.11 ばく露強度測定の様子

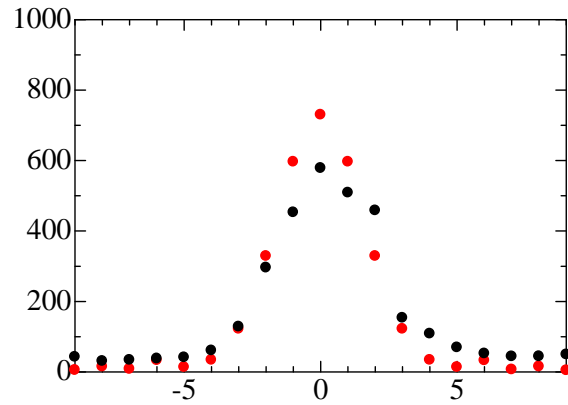


(a) 距離特性

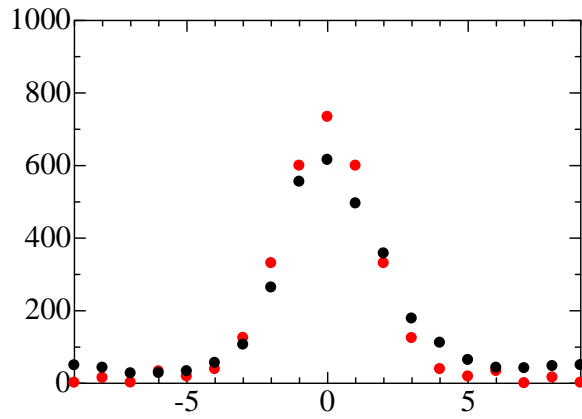


(b) 集光特性

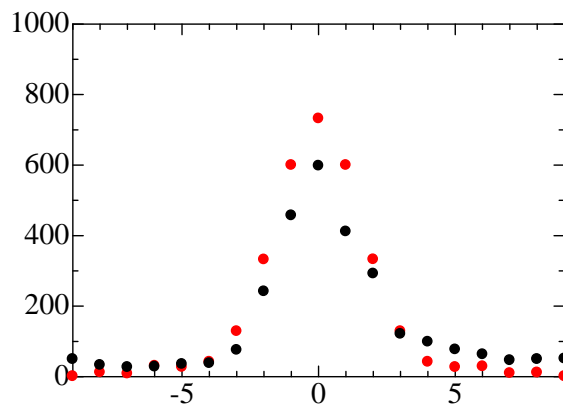
図 4.12 ばく露強度測定エリア



(a)  $z=310$  mm (焦点距離 +10 mm)



(b)  $z=300$  mm (焦点距離)



(c)  $z = 290$  mm (焦点距離 -10 mm)

図 4.13 測定結果と数値シミュレーションの比較 (ばく露電界強度)

これら、30 GHz 帯および 60 GHz 超帯ばく露装置に関する検討結果について、本年度以下の国際会議および国内研究会において成果公表[6-10]を行った。内 1 件[10]については、IEEE Sapporo Section より Best Presentation Award を受賞[11]した。

- 1) Itsuki Kageyama, Takashi Hikage, Keita Sakakibara, Akimasa Hirata, Yoshitaka Morimatsu, Tatsuya Ishitake, Hiroshi Masuda: "Comparison of Temperature Elevation between in Physical Phantom Skin and in Human Skin During Local Exposure to a 28 GHz Millimeter-Wave," proc. of EMC Sapporo & APEMC 2019, pp.766-769, June 2019.
- 2) Itsuki Kageyama, Takashi Hikage, Keita Sakakibara, Akimasa Hirata, Sachiko Kodera, Kenji Taguchi, Tatsuya Kashiwa, Yoshitaka Morimatsu, Tatsuya Ishitake, Hiroshi Masuda: "Characteristics of skin temperature elevation under the local exposure of 28 GHz-millimeter-wave in phantom and real human body," proc. of The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM2019), pp.659-660, June 2019.
- 3) 榊原慶太, 日景 隆, 蔭山逸行, 増田 宏: "第 5 世代移動通信システム候補周波数帯における生体反応閾値評価のための電波ばく露装置開発," 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA2019), p.17, 2019 年 10 月.
- 4) Keita Sakakibara, Takashi Hikage, Itsuki Kageyama, Hiroshi Masuda: "Development of Novel 70 GHz Band Exposure Equipment System for Studies on Thermal Perception Thresholds of Biological Effects Exposed to Millimeter-Wave," proc. of 2019 IEEE CAMA, pp.309-312, Oct. 2019.
- 5) 榊原 慶太, 日景 隆, 山本 学, 蔭山 逸行, 増田 宏: "70 GHz 帯における生体影響の熱知覚閾値評価のためのばく露装置開発", 令和元年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会, p.64, 室蘭市, 2019 年 11 月.



## 5. まとめ

本研究は、準ミリ波・ミリ波の電波が生体に及ぼす影響について人体を対象に調査し、取得した実験データを整理し物理工学的解析法を有する研究機関に提供・フィードバック解析することで、各種ばく露様式に対する汎用性の高い人体熱調整系モデルを構築し安全性評価に資することを目標とするものである。

本年度(令和元年度)、当該研究機関においては、他研究機関と連携しながら次の研究を実施した。

### ① 60 GHz 超帯ミリ波ばく露装置の開発検討

久留米大学にて実施のボランティア実験に要する電波ばく露の強度、および前年度実施したパイロットスタディに基づき、十分なばく露強度を実現するため、新たに空間合成法による 60 GHz 帯ばく露装置の設計、構築および基本特性の測定評価を実施した。次年度、久留米大学に移送し設置の予定である。

### ② 30 GHz帯および 60 GHz 超帯ドシメトリ推定の継続および数値シミュレーションの妥当性評価

ばく露ドシメトリの高精度化および装置の安全性を担保するため、30 GHz 帯および 60 GHz 超帯において人体モデル等を用いたドシメトリを継続し、これら検討結果について国際会議などで成果公表を行った。

### ③ 研究連携機関へのドシメトリの評価データ提供および生物実験の補助・保守・安全管理

研究連携機関へ 30 GHz 帯および 60 GHz 超帯において実施したドシメトリの評価データを提供し、あわせてばく露実験系の装置の保守管理および安全性確認を実施した。

以上により、本年度予定されていた実施計画はすべて達成したと判断する。

## 参考文献

- [1] <https://www.3gpp.org/DynaReport/38-series.htm>
- [2] Keita Sakakibara, Tetsuya Sekiguchi, Takashi Hikage: "Development of 28 GHz band exposure equipment for studies on thermal perception thresholds of biological effects exposed to millimeter-wave at 5th generation wireless systems candidate frequency band," proc. of BioEM 2018, PB-58, pp.646-648, Jun. 2018.
- [3] 榑原慶太, 日景 隆, 山岸誠知, "第 5 世代移動通信システム候補周波数帯における生体作用調査のための 28GHz 帯ばく露装置の開発," 信学技報, EMCJ2018-15, pp. 23-26, 2018 年 6 月.
- [4] 榑原 慶太, 関口 徹也, 日景 隆, "5G 周波数帯における生体反応閾値評価のための電波ばく露装置開発," 77,平成 30 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会, Oct. 2018.
- [5] C. Gabriel, Brooks Air Force Technical Report AL/OE-TR-1996-0037, 1996
- [6] Itsuki Kageyama, Takashi Hikage, Keita Sakakibara, Akimasa Hirata, Yoshitaka Morimatsu, Tatsuya Ishitake, Hiroshi Masuda: "Comparison of Temperature Elevation between in Physical Phantom Skin and in Human Skin During Local Exposure to a 28 GHz Millimeter-Wave," proc. of EMC Sapporo & APEMC 2019, pp.766-769, June 2019.
- [7] Itsuki Kageyama, Takashi Hikage, Keita Sakakibara, Akimasa Hirata, Sachiko Kodera, Kenji Taguchi, Tatsuya Kashiwa, Yoshitaka Morimatsu, Tatsuya Ishitake, Hiroshi Masuda: "Characteristics of skin temperature elevation under the local exposure of 28 GHz-millimeter-wave in phantom and real human body," proc. of The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM2019), pp.659-660, June 2019.
- [8] 榑原慶太, 日景 隆, 蔭山逸行, 増田 宏:"第 5 世代移動通信システム候補周波数帯における生体反応閾値評価のための電波ばく露装置開発,"革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA2019) , p.17, 2019 年 10 月.
- [9] Keita Sakakibara, Takashi Hikage, Itsuki Kageyama, Hiroshi Masuda: "Development of Novel 70 GHz Band Exposure Equipment System for Studies on Thermal Perception Thresholds of Biological Effects Exposed to Millimeter-Wave," proc. of 2019 IEEE CAMA, pp.309-312, Oct. 2019.
- [10] 榑原 慶太, 日景 隆, 山本 学, 蔭山 逸行, 増田 宏: "70 GHz 帯における生体影響の熱知覚閾値評価のためのばく露装置開発", 令和元年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会, p.64, 室蘭市, 2019 年 11 月.
- [11] 2019 IEEE Sapporo Section Student Paper Contest Best Presentation Award, "70 GHz 帯における生体影響の熱知覚閾値評価のためのばく露装置開発," 2019.