

平成29年度研究報告書

ミリ波ばく露時の温熱知覚閾値に関する研究

平成30年3月

総務省

ミリ波ばく露時の温熱知覚閾値に関する研究 平成 29 年度報告書

1. 緒言

ミリ波は、波長 10mm~1mm、周波数 30GHz~300GHz の電磁波である。日本では、車載レーダー等で既に用いられてはいるが、無線通信での実用化が進められており、今後、人がばく露される機会がますます増えると予測される。しかし、生体ばく露に対する電波防護指針は、マイクロ波や赤外線領域で得られるデータからミリ波領域に推測した値を用いているため、ミリ波の安全指針は根拠に乏しい。本研究は、安全基準策定の基礎データの拡張のために、ミリ波が生体に与える影響として主要な効果と考えられる熱作用に着目し、ミリ波を生体に照射した際に生じる温感の知覚域値について、ミリ波刺激条件の閾値への影響、年齢および性差の検討を目的としている。

平成 27 年度および平成 28 年度は、温度・面積・照射時間・複数の周波数帯域が閾値に与える影響、皮下混合神経の深さに関する研究（ミリ波による末梢神経直接刺激の可能性）に関する実験をおこなった。その結果、刺激面積が広いほど閾値が低く、個人差が小さくなることが確認された。面積については、一定程度大きいと、あとはほとんど変化がないため、204mm²で実験を行うのが良いと考えられた。また、恒常法による測定が極限法よりも適切であると結論づけ、恒常法により実験を施行した。また、刺激時間が長くなると誤答率が增大するため、ばく露時間 10 秒または 30 秒での検査が適切と考えられた。皮下の浅い部位を走る正中神経の手首部での体表からの距離は、男性平均 1.81mm、女性平均 1.67mm であり、ミリ波が正中神経の本幹に与える影響はほとんどないことが示唆された。

これらの結果をふまえ、平成 29 年度は、若年および高齢の 2 群に分けた健常被験者 46 人を対象として、40GHz のミリ波を 204mm²面積の手掌に照射し、感覚閾値を測定した。

2. 方法

2-1. 倫理申請

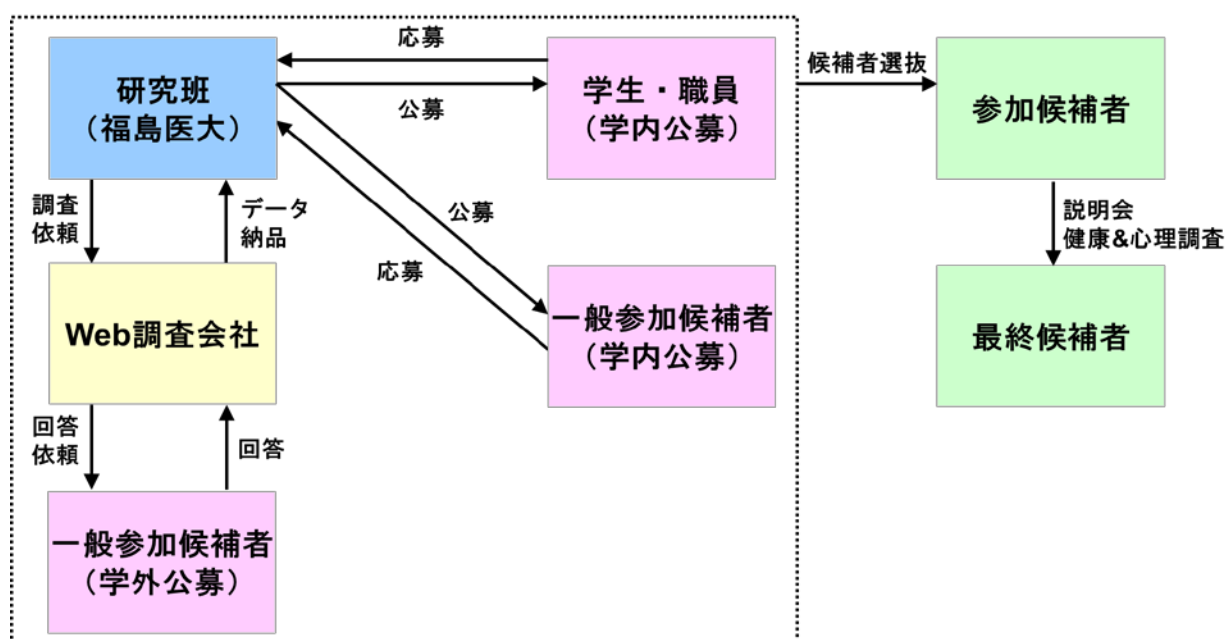
平成 29 年度の研究では一般被験者を対象とすることから、被験者公募や研究方法について、改めて、福島県立医科大学の倫理審査による承認を得た (No. 2476)。

(以下、福島県立医科大学 受託分)

2-1. 対象

対象は祖父母および両親の全てが日本国籍を有する 20 歳から 69 歳までの健康な男女を若年群（45 歳未満）と高齢群（45 歳以上）の 2 群に分け、各群 10 人ずつを目標に閾値を検討することにした。実験参加者は一般公募を基本とするが、不足分は学内公募により被検者を確保した。

図 1. 被験者公募フローチャート



2-2. 実験参加者公募（一般参加）

web 調査会社に依頼し、複数回に分けて、実験参加者の公募をおこなった。募集範囲は福島県全域、山形県南部新幹線沿線地区、宮城県新幹線沿線地区、栃木県北部新幹線沿線地区に在住または勤務地を有する者とした。

① アンケート調査の案内

web 調査会社は、パネラーに本研究の案内を提示した。

- ・ 研究課題名
- ・ 主任研究者名
- ・ 研究目的
- ・ 研究説明会および本実験参加に対する謝金額

(以下、福島県立医科大学 受託分)

- ・ 研究内容の掲載された本学ホームページ

② アンケート配布

調査会社は、複数回に分けて、本研究の趣旨に対する同意と実験参加意思を表明したパネラーに、身体及び精神状態に関するアンケートを web 上で配布した。

(以下、福島県立医科大学 受託分)

調査へのご協力をお願い

「ミリ波ばく露時の温熱知覚閾値に関する研究」

●本研究の概要

波長1mm～10mm、周波数30GHz～300GHzの電波を、「ミリ波」と呼びます。身近なところでは、自家用車の車載接触防止レーダー、空港セキュリティスキャナなどに使われています。日本では、このミリ波を浴びても安全であるとする基

準(電波防護指針)が定められており、電波法令に基づく規制が行われ、適切な電波利用環境が確保されています。

今後、ミリ波の利用がますます増えると予想されることから、安全性の基準を再確認する目的で、われわれはミリ波の温熱知覚閾値(温かいと感じる最小強度)に関する研究を開始しました。この研究は、平成27年度より、総務省より依頼を受け、福島県立医科大学医学部神経内科学講座教授・宇川義一が主任研究者となって、おこなうものです。

●研究の御参加について

「ミリ波ばく露時の温熱知覚閾値に関する研究」にご協力くださる方を募集しています。

福島県立医科大学(福島県・福島市)においていただき、ミリ波閾値の測定実験にご参加いただけます。

この実験で用いるミリ波は微弱なものであり、電波防護指針の基準(管理環境の条件)を守っておこないますので、人体に悪い影響を及ぼすことはありません。

ご興味のある方には、まず、事前説明会においていただき、実験担当者より実験についての説明をさせていただきます。説明を聞いたうえで、実験に参加してもよいと思われる場合には、健康調査と心理検査を受けていただきます。実験に参加してもかまわないとおっしゃってくださった方の中から、無作為に選んだ方に(くじ引きのようなものです)、後日、実験参加をお願いする予定です。

研究への参加は、あなたの自由意思が尊重されます。したがって、一度お引き受けいただいた後であっても、いつでもご協力をお断りになることができます。

●研究スケジュール

1日目. 事前説明会

平成29年●●～平成29年●●の間におこないます。

日程は、福島県立医科大学が候補者の方と個別に相談して決めさせていただきます。

2日目. 実験

平成29年●●～●●のなかの、月曜日から金曜日のウイークデーいずれか1日のうち、午前の部か午後の部のどちらかにご参加いただけます。

午前の部に参加される場合、当日は午前8時30分頃に、福島県立医科大学まで来ていただきます。事務手続きの後、午前9時頃より実験を始め、12時30分頃まで、実験に参加していただきます。

午後の部に参加される場合、当日は12時30分頃に、福島県立医科大学まで来ていただきます。事務手続きの後、13時頃より実験を始め、16時30分頃まで、実験に参加していただきます。

●個人情報の取り扱いについて

みなさまが回答された内容や個人情報が外部に漏れることはありません。

このアンケート結果を、ほかの研究で使用することはありません。

注. 事前説明会および実験の施行期間は配布時に記載している

(以下、福島県立医科大学 受託分)

③ 参加候補者の選定

調査会社は、あらかじめ設定された選定条件と健康調査に対する回答を照合し、本研究参加に適した者を選定した。除外項目は、外傷性を含む精神神経疾患の既往のある者、回答内容より精神疾患が疑わしいと思われる者、薬物中毒やアルコール多飲歴のある者、有機溶媒などの特殊薬品を使用する者、何らかの全身性疾患で治療中の者、身体どこかに疼痛あるいは違和感のある者、常用薬のある者、手に湿疹や肌荒れのある者、妊娠中の者である。また、回答内容に妥当性がない者も除外した。日常的に喫煙や飲酒していると回答した者は避け、喫煙および飲酒をしている者の場合は、容易に半日程度休止できるか否かを確認した。

調査会社は、選定された者のうち、本学への個人情報開示に同意した者の個人情報(氏名、年齢、居住地、連絡先、健康調査の回答内容)を、我々に通知した。

④ 説明会開催

実験参加候補者には説明会開催場所までお越しいただき、文書を用いて実験内容に関する説明をおこなった(補足 7-1 参照)。説明を聞いたうえで、実験参加意思を表明した者に対し、実験参加者の要件を満たすか否かの確認をおこなった。すなわち、web 調査で健康状態に問題のないことは確認済みではあるが、再度、同じ内容の調査用紙に回答していただいた。次に、心理調査として、パーソナルコンピューターを用いて日本版 MMPI-1 (Minnesota Multiphasic Personality Inventory) (村上宣寛ら、学芸図書) に回答していただいた。MMPI-1 は、556 の yes-no 形式からなる質問項目に回答していただく心理テストであり、精神疾患の補助診断的役割を果たすことができる。本研究では、コンピューターの自動診断¹をもちいて心理調査の効率化を図ったが、被験者としてお願いできるか否かの最終判定は医師がおこなった。

⑤ 実験参加者決定

健康調査および心理調査に問題のない方の中から無作為に抽出した方を実験参加者として登録した。

2-3. 実験参加者公募 (学内公募)

福島県立医科大学職員または学生を対象に、学内掲示または学内メールによる実験参加者を公募した。学外公募と同様に説明会を開催し、実験内容に関する説明、健康調査、心理調査をおこなった。健康調査および心理調査に問題のないことを確認したうえで、実験参加者として登録した。学内掲示による一般参加者公募も予定していたが、web 調査会社を介した学外公募および学内掲示または学内メールによる学内公募で予定人数を賄うことができた。従って、学内掲示による一般参加者公募は行わなかった。

(以下、福島県立医科大学 受託分)

2-4. 実験方法

実験は被験者の都合にあわせて、午前（10時開始）または午後（13時半開始）のいずれか1回に参加していただいた。被験者には、実験前日は飲酒量を控えめにし、実験当日の0時以降は飲酒せず、早めに就寝し、実験日の眠気や疲労を避けるように依頼した。食事は実験開始の2時間前までに済ますようお願いし、喫煙およびカフェイン含有物も2時間前までとお願いした。

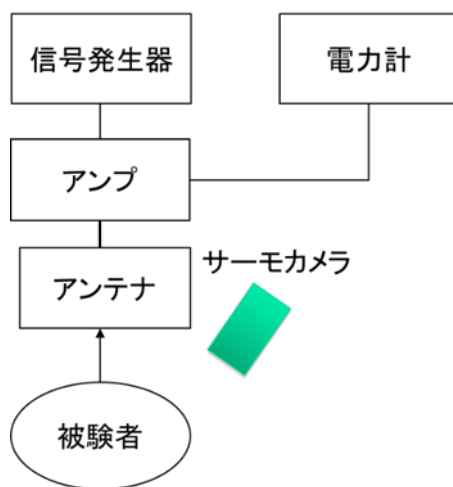
実験は福島県立医科大学内の実験室で行った。雑音はほとんどなく、室温は25度に維持された。冬期の実験では手掌の表面温度が低下している可能性が高いため、実験開始前の健康調査および同意取得（全体で15分程度）は、この実験室内でおこなった。その後、排泄を済ませていただき、10分程度安静にした後、実験を開始した。

東京工業大学工学院が作製した専用の実験装置を用い、安全基準を遵守して、被験者の手掌に204 mm²の範囲で40GHzのミリ波収束ビームを照射した（図2）。1回のばく露は最大30秒間とし、その間に何らかの感覚が生じた時点で照射終了とした。刺激強度はランダムな順序で提示した（恒常法）。1セッション60分間とし、30分間の休憩を挟んで2セッションの刺激実験をおこなった（図3）。ばく露試験中、被験者には出力およびばく露開始のタイミングは知らせず、盲検性を確保した。閾値は知覚確率曲線より求めた（図4）。まず、一施行ごとの結果をドットでプロットした。すなわち、横軸に刺激強度をとり、一回一回の施行で、刺激を感じた場合を1、感じなかった場合を0としてドットでプロットした。その結果から知覚確立曲線を描き、その曲線で50%の確率で刺激を感じる刺激強度（50%刺激閾値）を閾値とした。

安全確保のために、危険と思われる状況、すなわち、照射面の表面温度が40℃以上になった時（平成28年度よりも2℃下げて40℃とした）、異常な電力が検出された時、制御用パソコンが不規則な動作をした時、非常停止ボタンを被験者が押した時に、安全装置の働きで照射が自動停止するようにした。しかし、一連の実験を通して安全装置が作動したことは一度もなかった。

(以下、福島県立医科大学 受託分)

図 2. ばく露装置



発信器の電源強制停止装置一式



内部構造

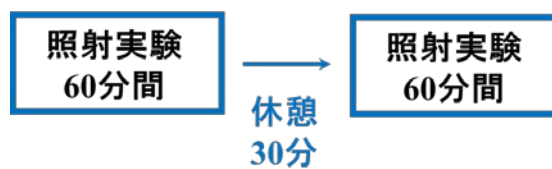


被験者用非常停止ボタン



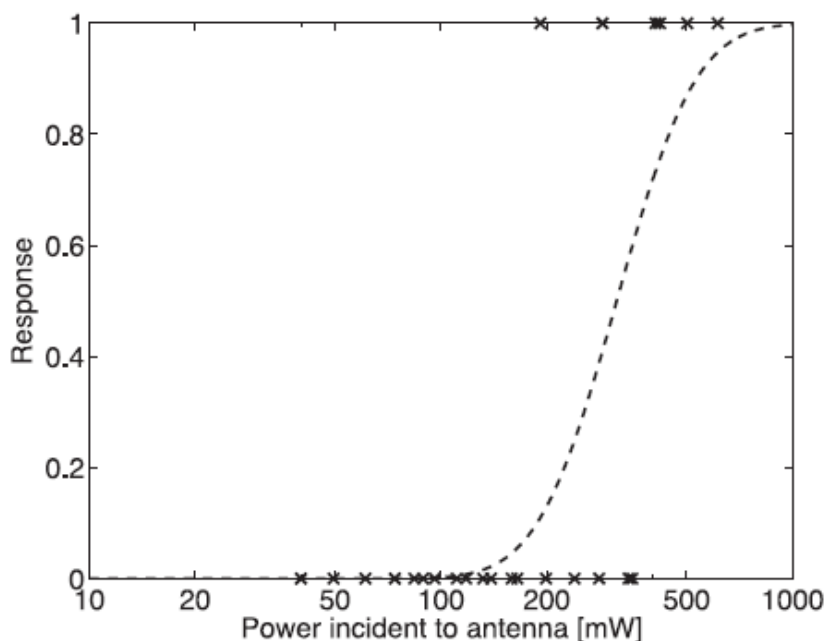
サーモグラフィーによる
照射部位温度測定

図 3. 実験時間



(以下、福島県立医科大学 受託分)

図 4. 知覚確率曲線 (文献 2 より引用)



2-5. 統計

Windows 版 SPSS17.0 (Chicago, IL)をもちい、年齢と性を要因とする二元配置分散分析をおこなった。また、群間差の検定にはt検定をおこなった。

3. 結果

50 人の実験予定を組んだが、体調不良などの理由で 4 人が辞退し、男性 22 人 (若年群 11 人、高齢群 11 人)、女性 24 人 (若年群 12 人、高齢群 12 人) が参加した。このうち、高齢群の男性 1 人は、データ測定不能であった。残る 45 人の最大電力密度で表したばく露開始 30 秒後の閾値 (表 1、図 5) およびその平均値 (平均 \pm 標準誤差 mw/cm^2) を示す (表 2)。なお、最大電力密度とは、ミリ波ビームの電力密度はビームの中心ほど高く、周辺では低くなるため、その中心部分での最大値を表したものである。

(以下、福島県立医科大学 受託分)

表 1. 閾値 (全データ) (mw/cm²)

若年男性			
年齢	1 回目	2 回目	平均
23	169.7	164.8	167.2
24	331.8	259.6	295.7
25	335.0	375.2	355.1
30	340.4	411.9	376.2
30	199.6	270.4	235.0
34	219.2	232.2	225.7
35	246.0	215.4	230.7
40	428.3	402.9	415.6
42	292.3	233.1	262.7
43	227.9	測定不能	227.9

高齢男性			
年齢	1 回目	2 回目	平均
46	269.5	274.3	271.9
48	203.6	210.1	206.8
50	194.0	234.6	214.3
54	343.9	134.2	239.0
55	235.8	111.9	173.9
57	472.3	266.5	369.4
61	測定不能	測定不能	測定不能
63	169.1	113.5	141.3
66	254.4	266.1	260.3
66	444.0	427.4	435.7
67	142.7	測定不能	

(以下、福島県立医科大学 受託分)

若年女性

年齢	1回目	2回目	平均
21	145.8	135.1	140.5
23	118.2	193.0	155.6
24	371.5	334.3	352.9
24	348.1	423.8	385.9
28	測定不能	62.9	62.9
28	201.7	189.1	195.4
35	281.4	260.0	270.7
35	86.4	84.8	85.6
38	152.9	124.7	138.8
40	259.1	277.6	268.3
40	86.2	85.0	85.6
44	146.9	167.8	157.4

高齢女性

年齢	1回目	2回目	平均
47	170.9	93.0	131.9
47	226.5	270.4	248.4
48	154.5	162.8	158.6
50	450.9	222.0	336.5
55	278.0	224.0	251.0
57	455.0	411.6	433.3
58	92.2	75.2	83.7
59	302.0	122.2	212.1
60	123.9	180.9	152.4
64	389.6	314.8	352.2
64	267.6	226.3	247.0
68	125.4	174.8	150.1

(以下、福島県立医科大学 受託分)

図 5. 閾値

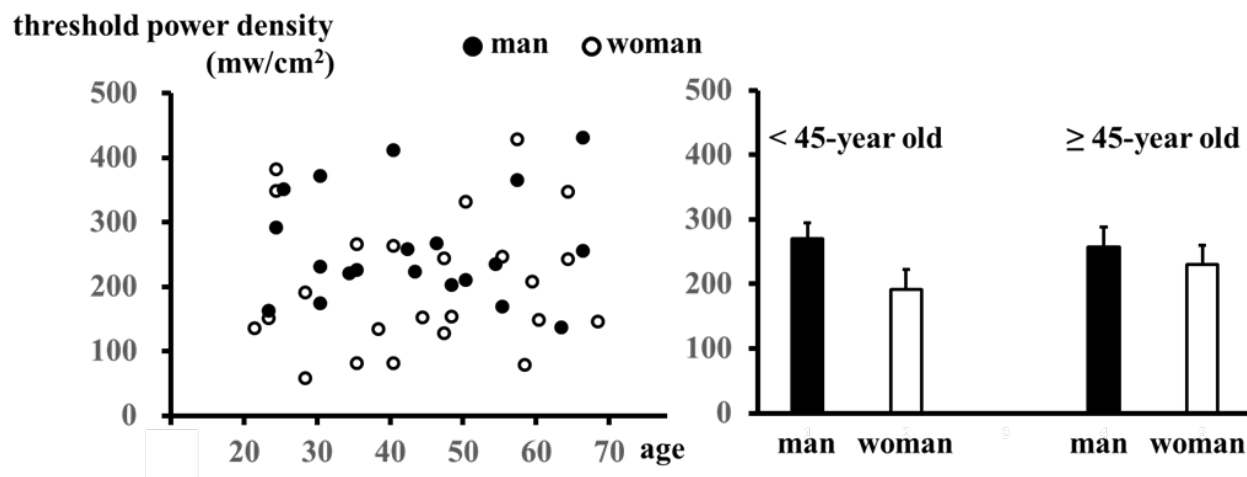


表 2. 閾値平均

	< 45-year old	≥ 45 -year old
Man	270.0 ± 24.5	257.0 ± 31.1
Woman	191.6 ± 30.5	229.8 ± 29.8

(以下、福島県立医科大学 受託分)

二元配置分散分析では、年齢 ($F_{1,40} = 0.181, p = 0.673$)、性 ($F_{1,40} = 3.218, p = 0.080$) であり、いずれも閾値に対して有意な影響を与えてはいなかった。また、交互作用 ($F_{1,40} = 0.757, p = 0.389$) も有意ではなかった。t 検定でも、若年男性と若年女性の比較 ($t = 1.982, p = 0.061$)、高齢男性と高齢女性の比較 ($t = 0.621, p = 0.542$)、若年男性と高齢男性の比較 ($t = 0.335, p = 0.741$)、若年女性と高齢女性の比較 ($t = 0.894, p = 0.381$) であり、若年者で男女での差がある傾向は見られたが、統計的な有意差にいたらなかった。また、他の比較では、いずれの群間にも有意差はなかった。被験者にどのように感じたのかを質問したところ、温かさを感じたという回答が多かったが、一部に、ぴりぴり感として感じたという回答も存在した。

4. 考察

本研究により、40GHz 帯域のミリ波を手掌に照射した際の閾値が明らかになった。また、その閾値は性別や年齢による統計的有意差が明確ではないという結果であった。ただし、若年の男女の比較では、有意ではないものの女性の閾値が低い傾向が見られた ($p = 0.08$)。従って、被験者数が増えれば、統計的に有意な男女差の出る可能性は否定できない。

Walters らによる 94GHz のミリ波をもちいた少ない人数を対象にした実験では、疼痛閾値は皮膚表面の温度上昇に依存しており、ベースラインに対して平均 9.9 度の温度上昇で疼痛を生じていた³。香西らは 60GHz のミリ波を用いて温熱感の閾値を調べた結果、2 度以上の温度上昇が必要だと結論づけている。しかし、年齢や性別が閾値に与える影響は定かではない。

本研究の一番の成果は、恒常法による正確なミリ波の感覚閾値を日本人で測定したことである。

5. 今後の課題

今後の課題としては、被験者数を増やすこと、複数の周波数帯域での検討、感覚の種類による閾値差、疼痛閾値の測定の 4 つが挙げられる。まず、本研究では 46 人の閾値を調べたが、今後は、さらに多くの被験者に御協力頂き、症例数を増やして安定した閾値を得る必要がある。また、ミリ波を有効活用するためには、40GHz のみならず、さまざまな周波数帯域の感覚閾値を調べる必要がある。本研究で感覚閾値を調べた際、出力強度によっては、温かさや熱さを感じる場合と、ぴりぴり感や痛みを感じる場合があった。従って、周波数や刺激強度による感覚の差異を調べるのも有用と考える。さらには、ミリ波の安全使用のためには、ミリ波により生じる疼痛閾値を調べることが望ましい。接触電流や漏洩電流では、安全閾値は感覚閾値ではなく疼痛閾値

(以下、福島県立医科大学 受託分)

が用いられている。また、感覚閾値と疼痛閾値の強度の違いも明らかにされている。ミリ波でも、同様の知見が得られることが望ましい。

6. 参考文献

1. 村上宣寛、村上千恵子. 2009. MMPI-1/MINI/MINI-24 ハンドブッカー自動診断システムへの招待. 学芸図書
2. 香西将樹、西方敦博、酒井泰二、渡辺総一、榎本博之、宇川義一. 2010. 電子情報通信学会論文誌 B J93-B,1456-65.
3. Walters TJ, Blick DW, Johnson LR, Adair ER, Foster KR. 2000. Heating and pain sensation produced in human skin by milliwaves: comparison to a simple thermal model. Health Phys. 78:259-67.

7. 補足

7-1. 説明会の際の説明内容

研究の背景（研究の必要性と意義）

現代では、一般生活環境で様々な波長の電波が生活のために使われています。たとえば、テレビやラジオの放送電波や携帯電話の電波などです。車の自動停止装置などには、ミリ波と呼ばれる波長の電波が使われています。ミリ波とは、波長 10mm～1mm、周波数 30GHz～300GHz の電磁波です。現在日本においては、自動車の自動ブレーキシステムの車載レーダー等に既に用いられており、60GHz の周波数を用いた無線通信の実用化も進められています。

それにともない、ミリ波に人がばく露される機会が増大すると考えられますが、ミリ波が人の体に与える影響の有無に関する検討が十分されておらず、安全性を確認するための研究が求められています。本研究は、ミリ波の安全性の基準を作成するための基礎データを作ることを目的としています。

今後広くミリ波を安心して使用するための、安全性確保の基礎データを作成するという意味で、本研究は非常に意義深いと考えます。

研究の目的（明らかにしたいこと）

安全性を確保するための指標として、ミリ波が生体に与える主要な影響と考えられる熱作用に着目し、ミリ波を生体に照射した際に生じる温感の知覚閾値について検討を行います。我々は、すでに平成 21 年からの 3 年間で数名の予備実験を行っています。そこで、どの波長のミリ波は、どのくらい当てると熱いと感じるかというような、大まかなデータを有しています。そこで今回の研究では、さらに多くの正常な方でミリ波の閾値を測定し、ミリ波刺激の波長・刺激時間などにより閾値がどのような影響を受けるか、刺激閾値の年齢や性別による差異を検討します。

これらの実験で、日本人の年齢や性別を考慮した、ミリ波閾値の正常値を作成することが本研究の一番の目的です。この正常値を元にして、日本でのミリ波の安全基準が作成される

(以下、福島県立医科大学 受託分)

予定です。

研究参加へのお願いをする理由

本研究は、研究内容およびその意義を十分に理解できる成人で、以下の要件を満たす方に、実験参加協力をお願いしています。研究の主旨をご理解頂いたうえで、よろしければ御協力をお願いいたします。御参加いただけるのは、①神経・精神疾患の既往歴や頭部外傷・頭部手術歴がなく、運動機能および感覚機能に異常を認めない者、②手掌皮膚に異常を認めず、かつ、アトピー性皮膚炎や全身性皮膚疾患を有さない者、③満 20 歳から 69 歳の者です。この研究では、約 60 名の計測を予定しています。

研究方法の概略

(1) 被験者公募

被験者公募は、学内公募（本学関係者）および学外公募（調査会社を通じて応募された方・学内掲示を御覧になり応募された方）により行います。皆さまには、この公募過程を経て本日の説明会に参加して頂いています。このたびは、御応募、誠にありがとうございます。

(2) 説明会・健康調査・心理調査

公募の際にもご説明したとおり、この説明会で実験の趣旨をご理解頂いたうえで参加しても構わないと思われた場合には、健康調査（約 30 分）と心理調査（約 60 分）への回答をお願いいたします。実験参加意思を取り消す場合には、回答頂かなくても構いません。また、健康調査および心理調査に回答されない場合には、実験に参加することはできません。実験に参加するかどうか迷った場合でも、参加する可能性がある場合には、健康調査および心理調査に回答いただけますと幸いです。最終的に実験にご参加いただく際の手続きがスムーズになります。

(3) 実験参加者の決定

本日の説明会にご参加頂いた方の全員に研究参加をお願いするわけではなく、説明会に参加頂いた方から無作為に抽出した方に、最終的に実験参加をお願いすることになります（クジ引きのようなものです）。本実験にご参加頂く場合は、後日、担当者より日程相談のメールを差し上げます。残念ながらクジに漏れた方には、本日から 1 ヶ月以内に、担当者からメールでご連絡致します。

(4) 実験方法

ミリ波ばく露は、専用の実験装置を用いて行います。手のひらを、専用のレンズアンテナからのミリ波収束ビーム（60GHz）の焦点距離（電界強度最大となる点、約 161mm）およびそこから 20、40 mm 離れた距離にかざしていただきます（場所は検者が誘導します）。一回のばく露は 10 秒から 2 分です。その間に温かさを感じたら、手を照射野から外していただき、その時点で終了です。感じたことを検者に教えてください。知覚閾値を恒常法で計測するため、出力値はランダムとし、照射の開始と出力値はお知らせしません。同様の手順を 20-30 回繰り返します。施行ごとに 30 秒くらいの間隔をあけます。

検査装置には、2つの安全装置が組み込まれています。あなたの手の温度をビデオカメラ

(以下、福島県立医科大学 受託分)

観測し、最高温度が 45℃を越えると、自動的に照射は止まります。また、照射出力を監視するセンサーも設けられており、これが設定した出力以上の出力を検知しても、自動的に照射が止まります。また、照射部分をはじめ、なんらかの異常を感じた場合や、実験を苦痛と感じた場合は、すぐに検者にお申し出て下さい。実験全体で、約3時間の予定です。

研究期間

平成27年 9月～32年 3月(4年7月間)

研究場所

福島県立医科大学内、9号館4階・オープンスペースラボ4

同上、2号館1階・臨床第2生理学室

同上、神経内学講座医局

研究計画の詳細

詳細は、この説明書で御説明したとおりです。

予測される研究結果

健常者におけるミリ波照射時の刺激条件別の温感知覚閾値が明らかになり、現在の防護指針の検討が可能となります。

研究によって生じる可能性のある、ご本人にとっての危険性又は不利益事項

本研究で用いるミリ波収束ビームは低出力なものであり、使用機器には安全装置も備えており、御参加された方に危険性が加わる可能性は極めて低いと考えられます。照射中に手掌(皮膚)の違和感または不快感を生じる可能性はありますが、照射を中止することで速やかに消退すると考えられる強度です。実験には3時間程度を要するため、集中を強いられることでの疲労を生じる可能性があります。

医療の提供に関する対応

特になし

個人情報の秘密保持に関する事項 (個人データの保存・管理の方法等)

本研究によって得られる実験データは、データの信頼性を確保するため、連結可能匿名化を行います。具体的には、実験参加者に、それぞれ識別可能なIDを付与し、その実験データはIDで管理します。これらの情報は、電子媒体または紙媒体を用いて記録され、主任研究者が神経内科学講座教授室内の鍵のかかる場所で保管し、外部への遺漏がないよう最大限留意します。IDと個人情報とを照合可能とする対応表を管理するコンピューターには専用のものを使用し、このコンピューターを用いてデータ解析や実験データの保管は行うこととはない。結果を発表する際には、個人を同定できる内容は一切含みません。

試料等(検体やデータ)の保存、利用等について

(1) 試料等の保存の有無

■ 保存します。

→■ 人体から採取された試料等を利用します。

→□ 人体から採取された試料等は利用しません。

(以下、福島県立医科大学 受託分)

保存しません。

(2) 試料等を保存する場合の使用方法及び保存期間

全ての実験が完了した後、被験者の皆さまの個人情報および実験結果は、平成32年3月末まで、主任研究者の責任のもとに継続保管いたします。保管時期を過ぎますと、全ての個人情報および実験結果は破棄いたします。

(3) 試料等の廃棄方法及びその際の匿名化の方法

保管期間終了後、電子媒体は回復できない方法で破壊し、紙媒体はシュレッダーにより破棄いたします。

(4) 将来の研究のために試料等を用いる場合について

本研究で得られた実験結果を、本研究以外の目的に使用することはありません。

研究内容の公開等に関する事項

(1) 「人を対象とする医学系研究に関する倫理指針」により、倫理委員会が公表すべき事項

《公表すべき事項》

- ・ 研究課題名
- ・ 研究者氏名（研究責任者及び委員会当日の説明者）
- ・ 当該研究に係る本学倫理委員会の会議の概要
- ・ 審査結果

■ ア 上記の全項目について公表する。

イ 「人を対象とする医学系研究に関する倫理指針」第10の2（3）のただし書きに該当するため、一部非公表とする必要がある。

（非公表とする事項）

（理由）

ウ 上記「イ」に該当しないが、非公表又は一部非公表とする必要がある。

→ 全て非公表とする。

（理由）

→ 一部非公表とする。

（非公表とする事項）

（理由）

(2) 報道機関等に対する公開

■ ア 全面的に公開する。

イ 部分的に公開する。

課題名

研究者氏名

当該研究に係る本学倫理委員会の会議の概要

審査結果

(以下、福島県立医科大学 受託分)

その他（内容：)
(理由)

ウ 一切公開しない。
(理由)

(3) ご本人がご自身に関する情報の開示について請求される場合について
被験者本人からの希望があれば、本人の結果は開示します。

(4) ご本人以外の方に関する情報の開示について請求される場合について
実験全体の進捗状況および全体の結果を開示することはできません。

研究資金の調達方法

(1) 研究資金について

本研究は、総務省における「ミリ波ばく露時の温熱知覚閾値に関する研究」の委託研究であり、総務省より資金提供を受けています。皆さまへの謝金は、この中から支給されます。

(2) 利益相反についての特記事項

本研究従事者は、総務省が主催する報告会や説明会での発表の際に、総務省の規定する日当を得る場合があります。営利企業および営利団体とは何ら関係がありません。

研究のモニタリング及び監査について

特になし

その他本研究に関する特記事項

特になし

(以下、東京工業大学 受託分)

平成 29 年度総務省生体電磁環境研究

【ミリ波ばく露時の温熱知覚閾値に関する研究】

研究成果報告書

1 まえがき

近年、ミリ波帯における電波利用が拡大しているが、ミリ波帯における生体電磁環境研究は十分でない。すなわち、

- 3GHz より高い周波数での温熱知覚閾値の特性が必ずしも明確でない。
- ミリ波帯の電波防護指針では入射電力密度の空間平均の定義が不明確。
- 国際ガイドライン間で条件が異なっている。

そこで、ミリ波の温熱知覚閾値についての知見の蓄積が求められている。本研究は福島県立医科大学と東京工業大学との共同研究（平成 27 年度から 29 年度までの 3 カ年で提案）により、ミリ波温熱知覚閾値実験を系統的に行い、データ及び知見を蓄積する。その中で東京工業大学は実験装置の構築を主に担当する。初年度（平成 27 年度）は次の項目を行った。

- 95GHz ミリ波ばく露装置の構築
- 安全性への配慮
- レンズアンテナの特性把握（at 95GHz）
- 恒常法の実験効率を高める刺激選択アルゴリズムの開発
- 金属接触子による予備実験装置の構築

2 年目の年度（平成 28 年度）は次の項目を行った。

- 40GHz ミリ波ばく露装置の構築
- 装置構成の変更に合わせて制御プログラムと安全装置の改造
- レンズアンテナの特性把握（at 40GHz）

(以下、東京工業大学 受託分)

- 不測の停電にも安全かつ装置損傷せずに停止するための無停電電源装置導入
- 実験装置の動作音の評価と静穏化対策

最終年度である本年度（平成 29 年度）は次の項目を行った。実験装置としては昨年度に引き続き、40GHz ばく露実験を行うため、同実験用の装置を対象とした。

- サーモグラフィの時間同期改良
- パワーモニタの不確かさ評価
- 数値ばく露評価および温度上昇のモデル計算

以下、本年度行った各項目の内容を順に述べる。

2 サーモグラフィの時間同期改良

本実験装置では被験者の反応記録とサーモグラフィ記録を別個の PC にて行っているため、記録データの時間が同期していなかった。そのため、データ処理において時間のオフセットを推定する手順が含まれていた。この手順を不要にするために、両者の時間同期を実現した。方法としては、クロス LAN ケーブルで 2 台の PC を接続し DOS コマンドで定期的に時計の同期を行う方法と、情報通信研究機構の提供する NTP サーバを参照する方法の 2 案を検討した。結果として、汎用性に優れた後者を採用した。



Figure 1 PC の時刻同期方式、左：クロス LAN ケーブルによる方法、右：NTP サーバ参照による方法

3 パワーモニタの不確かさ評価

本実験装置では、レンズアンテナから掌に照射されるミリ波の電力密度を把握するために、レンズアンテナに送り込まれるミリ波の電力をパワーモニタにより常時監視している。電力測定値の誤差要因としては、方向性結合器の結合度の変動、パワーセンサの感度の変動が考えられる。方向性結合器そのものは金属製の導波管 4 ポートデバイスであり、特性の変化はほとんど生じないが、実験開始前に行う校正測定ごとに、導波管の脱

(以下、東京工業大学 受託分)

着を行う。Ka 帯においては、方向性結合器の導波管接続部の機械的遊びにより、見かけ上の結合度が脱着のつど変化しうることが懸念された。これが電力測定における主要な不確かさ要因となりうると考え、次の手順により不確かさ評価を行った。

- 不確かさ評価を行うためには正確な値の測定が必要であることから、Ka 帯用方向性結合器に追加工を行い、位置決めピンの孔を設けた。これは実験系の導波管にはピン孔がないため実験では用いないが、精密な測定を行う際の精密級導波管フランジとの位置決めの際に用いる。Figure 2 に追加工前後の方向性結合器の写真を示す。
- 2ポートベクトルネットワークアナライザ(VNA)を用いて、4ポート方向性結合器のSパラメータ測定を行った。その方法としては、4ポートのうち2ポートをVNAに接続し、残りの2ポートを整合負荷で終端し、2ポートSパラメータを測定した。Figure 3 に測定の様子を示す。これを4ポートから2ポートを選び出す4通りすべてについて行うとともに、整合負荷の反射係数をあらかじめ測定しておき、不完全整合終端を前提として、4ポートSパラメータを未知数とする優決定方程式を最小2乗法的に解き、すべてのSパラメータを得た。その結果をFigure 4に示す。ポート1,2,3,4はそれぞれ入力ポート、アンテナポート、リバースポート、フォワードポートである。40GHzにおいて、挿入損失0.2dB、結合度18.55dB、アイソレーション32dBと読み取れる。

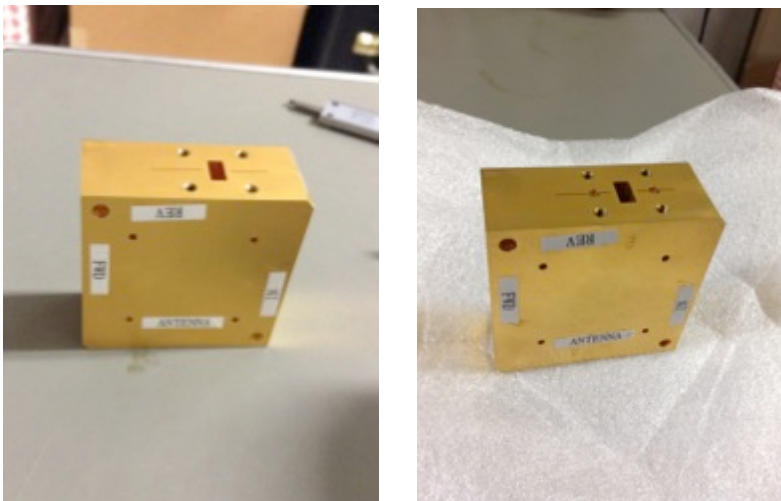


Figure 2 方向性結合器の位置決めピン孔の追加工前（左）と追加工後（右）

(以下、東京工業大学 受託分)



Figure 3 方向性結合器の s パラメータ測定の様子

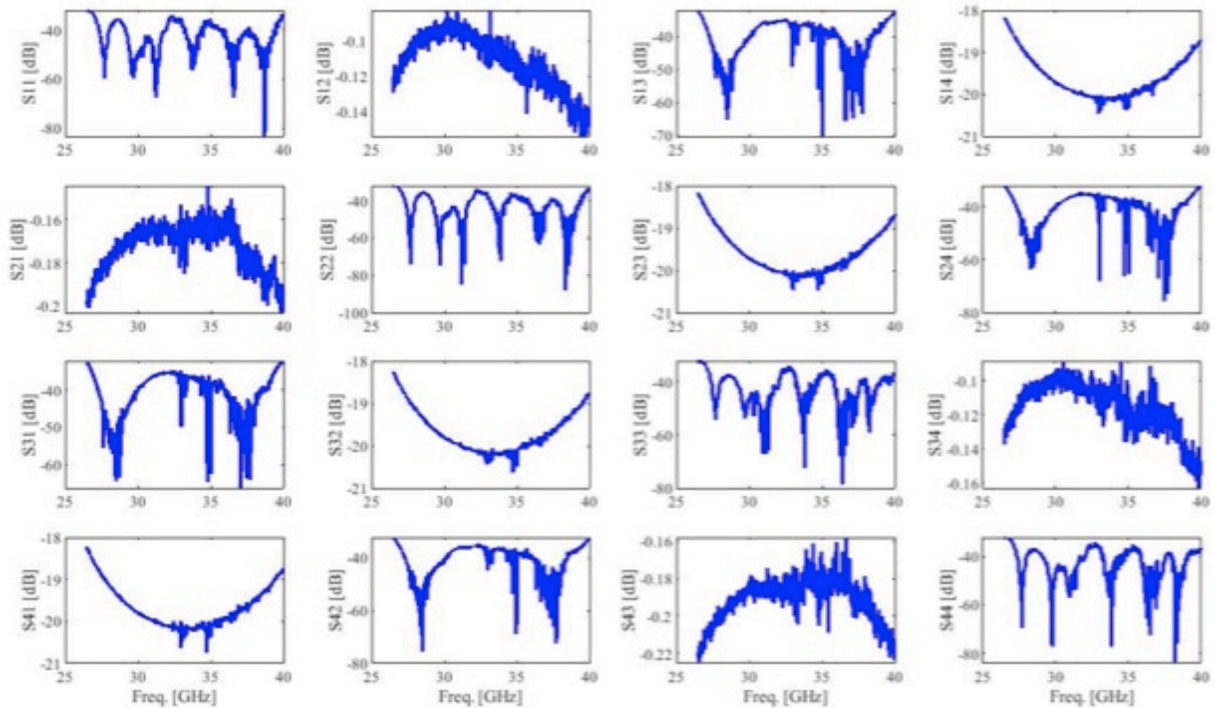


Figure 4 方向性結合器の s パラメータ測定結果

- 導波管接続部の機械的遊びによりどの程度の変動が生じるかを評価するため、ずれのない状態と、意図的に E 面方向、H 面方向、E および H 面方向、に機械的遊びの範囲で最悪のずれを与えた状態において、導波管接続部の s パラメータを測定した。これら 4 通りの接続状態のいずれかを方向性結合器の 4 つのポートに与えることで、4 の 4 乗 = 256 通りの場合を設定し、s パラメータの合成の計算を行い、それぞれにおける結合度 CF を求めた。CF にどの程度の変動が生じるかを、40GHz における値のヒストグラ

(以下、東京工業大学 受託分)

μとして示したものが Figure 5 である。その結果、CF = 18.55 +0.24/-0.10 [dB]の範囲に収まることが分かった。

上述の結果は、最悪の場合に 0.34dB、電力で 8%のずれが起こり得ることを示しているがその確率は低く、そこまで大きい誤差は生じないといえる。ちなみに、本実験で避けられない他の誤差要因として掌の位置の変動があるが、掌の位置が±1mm 変動するときに最大電力密度が最も大きく相対変化する条件は 95GHz、0.52cm²のときであり、変化は±8%と見積られる。導波管接続部の変動による最悪値は、これと同程度以下であるといえる。

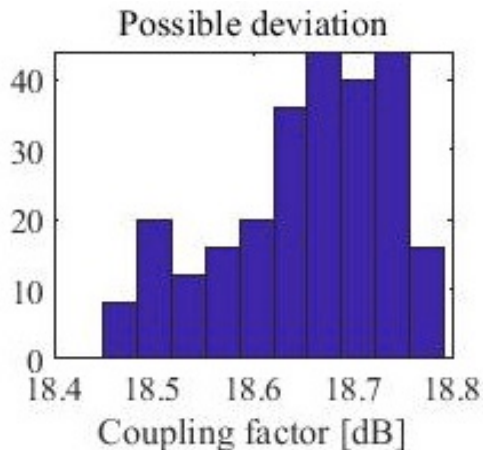


Figure 5 導波管接続部の機械的遊びがもたらす方向性結合器の 40GHz における結合度の変動

4 数値ばく露評価および温度上昇のモデル計算

本実験で行っているミリ波ばく露の電磁界的・熱的状況を把握・理解するため、数値計算を行った。また、観測された温度変化を説明することを試みた。

4.1 平面波による電力反射率・電力透過率の計算

まず、実験を行ったミリ波周波数での皮膚の基本的な電波吸収特性を知るために、1次元伝送線路モデルによる計算を行った。皮膚を表皮と真皮の2層からなる平行平板モデルとし、垂直入射平面電磁波が入射するときの計算を行った。Figure 6 が電力反射率、Figure 7 が電力透過率である。表皮と真皮の電気定数には Gabriel らの skin dry, skin wet の値を用いた。表皮の厚さは前腕部で報告のある $102 \pm 34 \mu\text{m}$ の中点と両端を用いた。電力透過率を見れば、40GHz において表皮の厚さはほとんど影響せず、95GHz において表皮厚の影響は±1.2%程度と小さい。電力透過率は周波数とともに増加し、40GHz でおよそ 0.55、95GHz でおよそ 0.68、両者の比はおよそ 4:5 であることが分かる。表皮の厚さによる共振のような現象は、この計算範囲では見られないことも分かる。

(以下、東京工業大学 受託分)

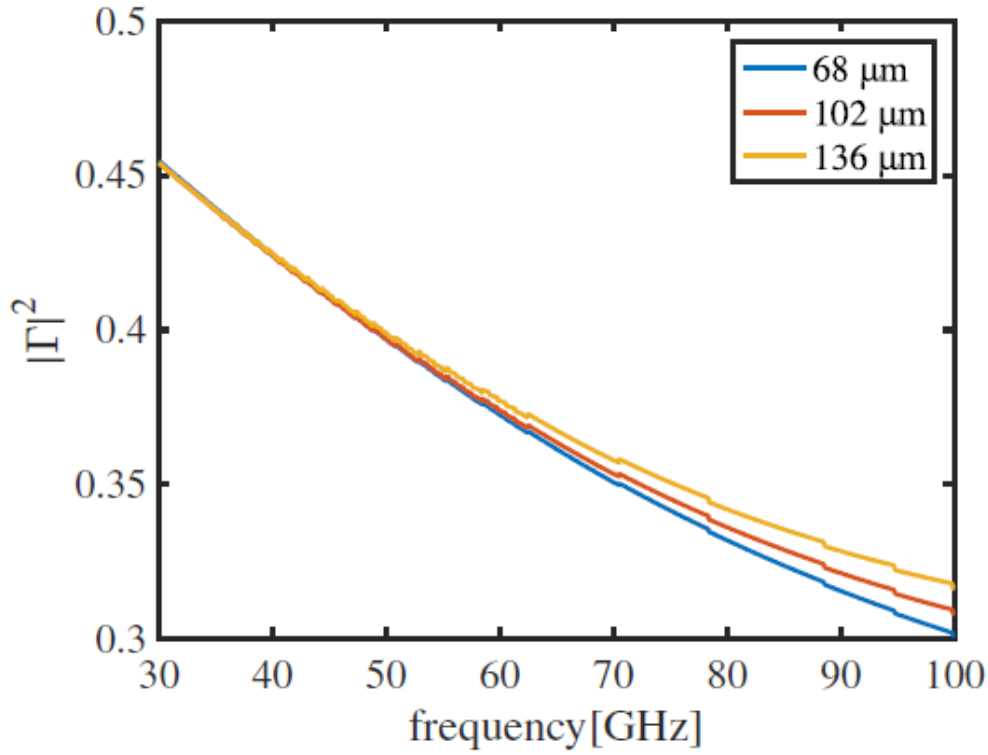


Figure 6 皮膚の2層平行平板モデル(垂直入射)による電力反射係数計算結果

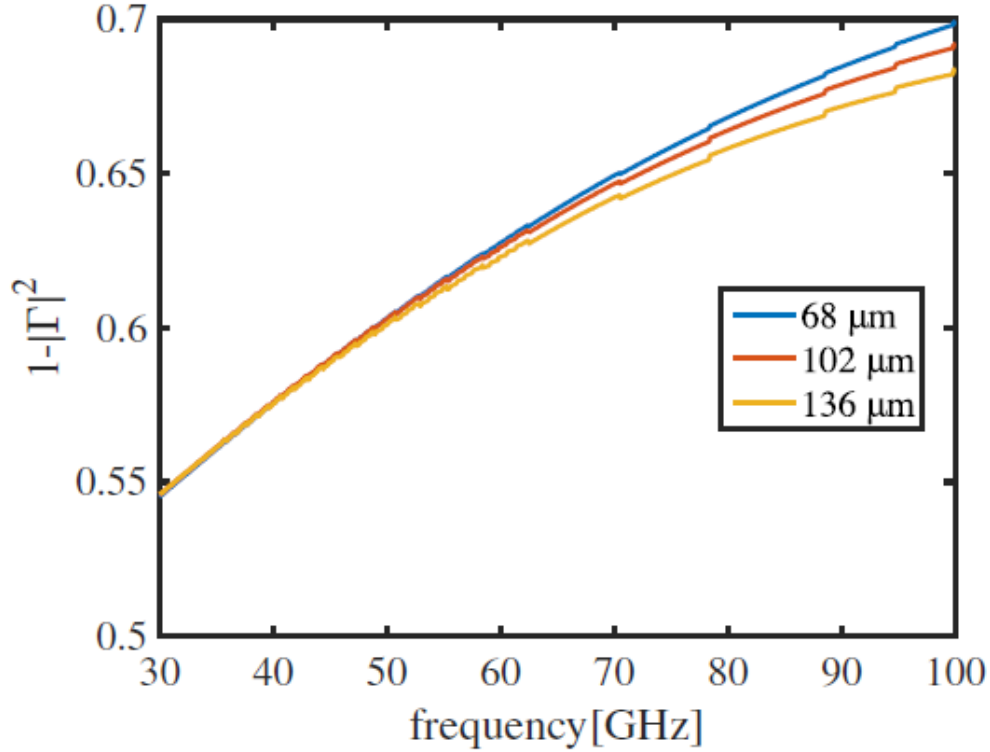


Figure 7 皮膚の2層平行平板モデル(垂直入射)による電力透過係数計算結果

(以下、東京工業大学 受託分)

4.2 ミリ波集束ビームによる電磁界計算

ミリ波ばく露実験は平面波でなく集束ビームで行っている。そこで、実際の集束ビームの電磁界分布を用いて、皮膚に集束ビームが入射する状態をモデル化し、有限要素法による電磁界計算を行った。計算には COMSOL Multiphysics を用いた。解析モデルを Figure 8 に示す。集束ビームはその横断面の電界接線成分の振幅位相分布の測定値を用い、モデル内で励振を行った。皮膚は一辺が 4 波長の領域とした。

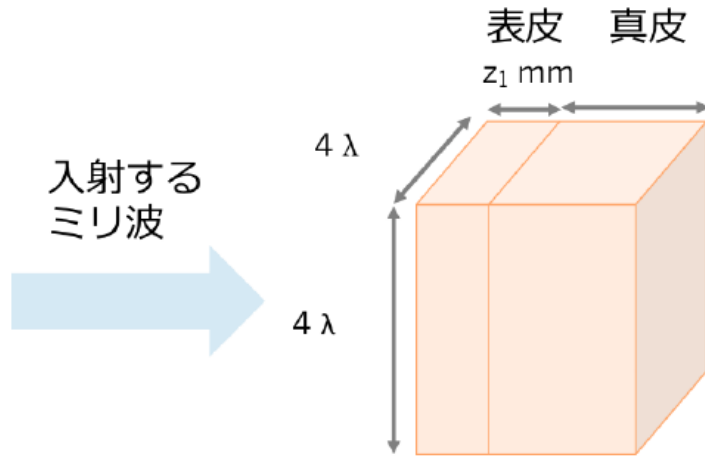


Figure 8 ミリ波集束ビームの入射モデル

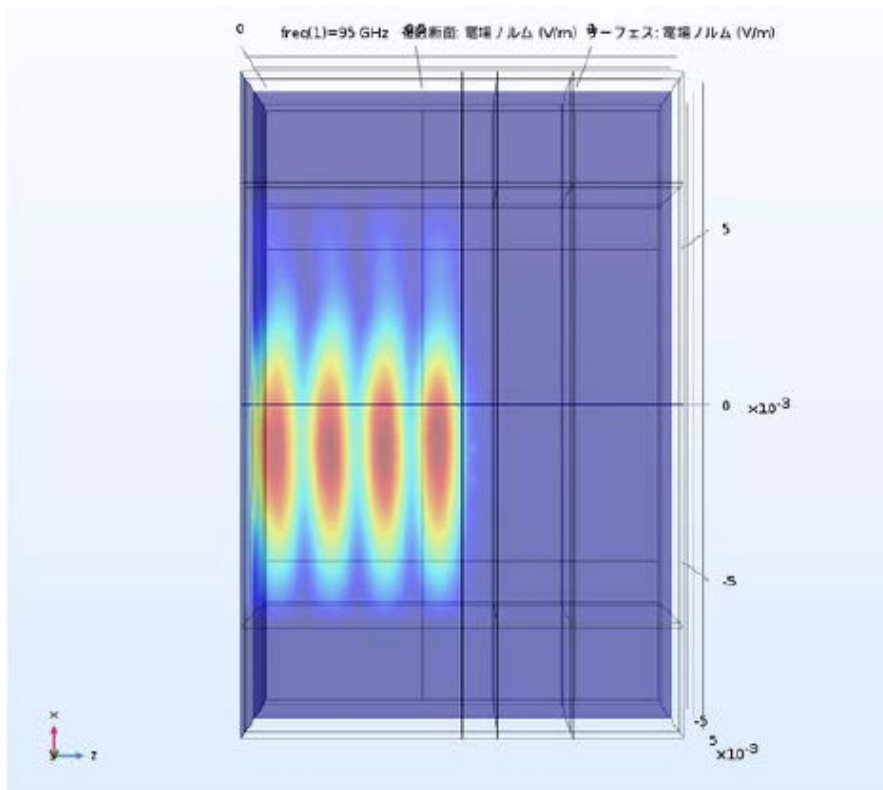


Figure 9 95GH ミリ波集束ビーム入射における電界強度分布

(以下、東京工業大学 受託分)

ミリ波集束ビームが入射する解析空間の電界強度分布を Figure 9 に示す。中央から左側が自由空間、中央が皮膚表面、右側が人体内部である。自由空間に集束ビームの入射波と反射波で作られる定在波が生じている。皮膚内部では電界強度は急速に減衰する。深さ方向の電界強度（単位は A.U.）をビーム軸に沿って表示したものが Figure 10 である。人体中の電波は表皮、真皮の中で同程度に吸収され、熱に変わる。

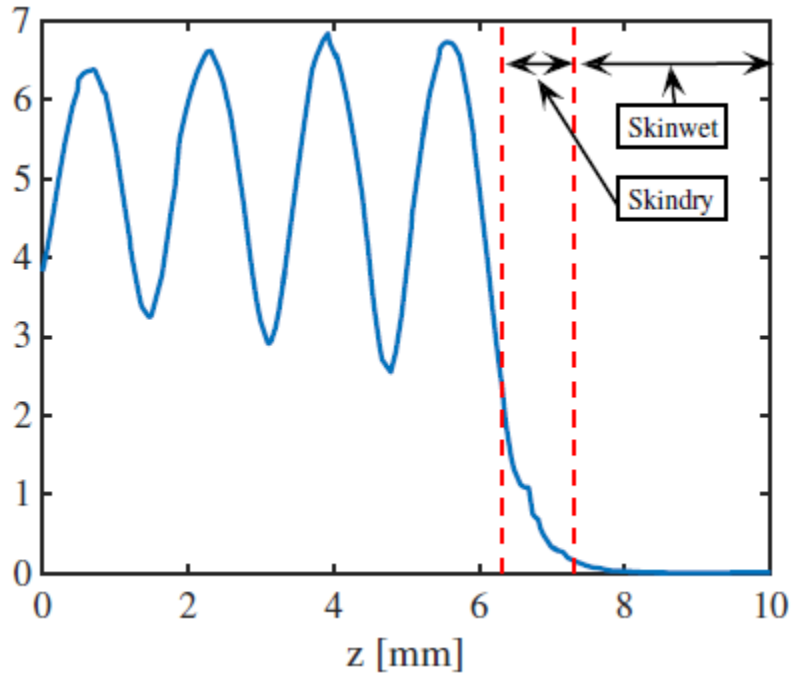


Figure 10 95GH ミリ波集束ビーム入射におけるビーム中心軸上の電界強度分布

4.3 ミリ波集束ビームによる熱計算

次に、有限要素法による熱計算を行った。電磁界計算と同様、計算には COMSOL Multiphysics を用いた。具体的には、電磁界問題の解より熱源 Q_v を求め、次の熱輸送方程式を時間領域で解いた。

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla T) + A_0 + Q_v - b(T - T_b)$$

血液温度 T_b は 303K とし、深部体温も同じ値とした。皮膚表面では輻射による環境温度 300K との熱交換を仮定した。側面 4 枚は断熱条件とした。組織構成は、表皮 0.102mm、真皮 1.080mm、それ以深を脂肪とした。各組織の定数を下表に示す。

組織	k	ρ	c	A_0	b
表皮	0.42	1010	3500	1000	0
真皮	0.42	1010	3500	1000	9100
脂肪	0.25	920	2500	180	520

(以下、東京工業大学 受託分)

実際に起これば火傷となりうる条件での計算例として、周波数 95GHz, ばく露面積 0.151cm², ばく露電力 330mW のもとでばく露開始後 120s 経過したときの表面温度分布を Figure 11 に示す。温度は絶対温度表示である。3 次元的に捉えると、最大温度は人体内部ではなく皮膚表面のビーム中心に生じていることが分かった。

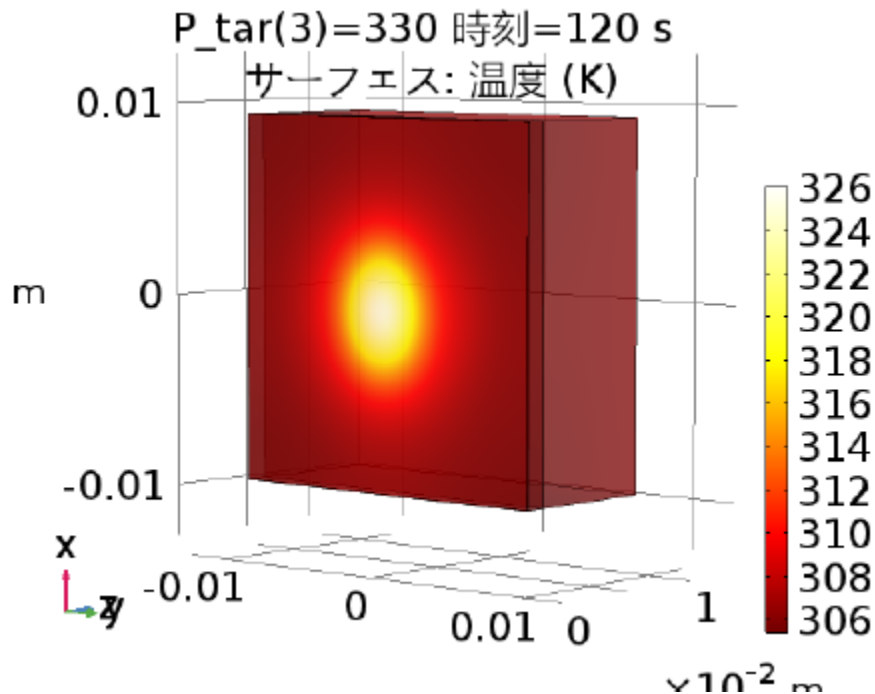


Figure 10 95GH ミリ波集束ビーム入射における 120 秒後の皮膚表面温度分布の計算結果

4.4 皮膚表面温度変化の実験と計算との比較

皮膚にミリ波をばく露すると皮膚表面温度 $T(t)$ が時間とともに Figure 11 の青曲線の例のように上昇する。これは近似的には 1 次遅れ系

$$T(t) - T(0) = T_{rise}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

で表される。Trise は熱定常状態になるまでの上昇温度、 τ は熱時定数である。Trise と τ でフィッティングを行った 1 次遅れ系の曲線を同図に赤線で示す。個々のばく露試行につきフィッティングを行うと Trise が得られる。その結果を、Figure 12 の青色 + で示す。横軸はばく露電力である。(なお、青色・はサーモ画像の加温スポット形状の軸比が 1.5 以上で手の動きが疑われるデータ点を表す。) 同様のことを皮膚表面温度の計算結果 (時間範囲は 0s から 120s) に対してフィッティングを行った。その結果を Figure 12 の赤色 * で表す。このようにすると、Trise は入射電力 P にほぼ比例し、 $Trise/P = 0.059$ [°C/mW] が得られた。ただし、周波数 95GHz, ばく露面積 0.151cm² の結果である。Figure 12 を見ると、実験データの縦軸方向のばらつきが大きいこと、ただ

(以下、東京工業大学 受託分)

しその上限の値は P に比例的に増加することが分かる。また、温度変化の数値計算から求めた回帰直線は実験データのばらつきの上限ラインに近い値となった。これにより、数値計算の妥当性が示された。

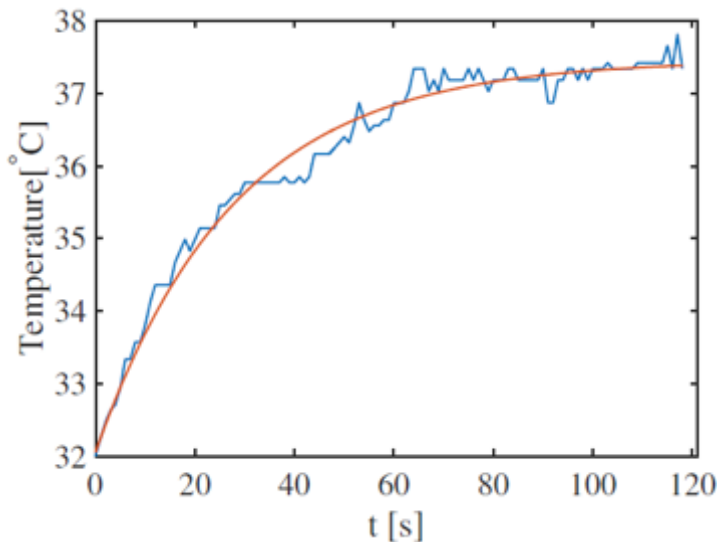


Figure 11 ミリ波ばく露開始からの時間に対する皮膚表面温度最大値の変化の例。青線：実験値、赤線：1次遅れ系でフィッティングした曲線。

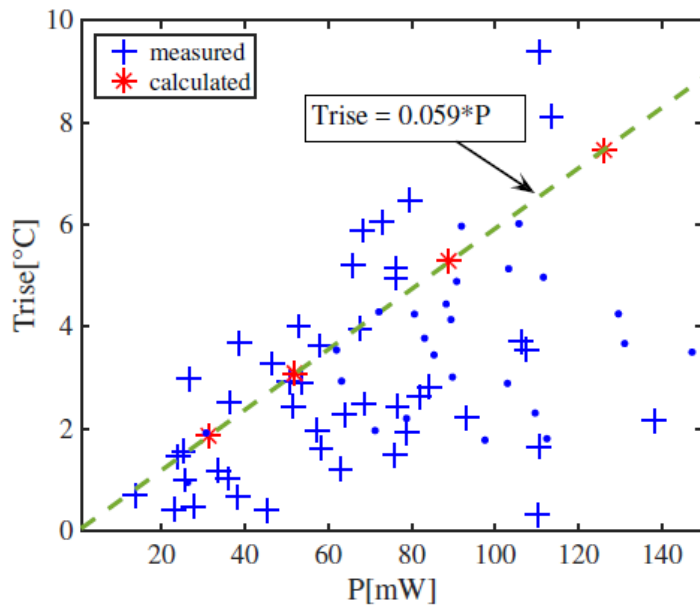


Figure 12 95GHz 集束ビームばく露時のばく露電力に対する上昇温度。ばく露面積 0.151cm^2 ，制限時間 120s。青色 + は実験結果。赤色 * は熱計算による 120s の結果にフィッティングを施した結果。

実験値のばらつきの大きさについて、その原因を探るために、Figure 12 の実験と同じ時間長さで 1 次遅れ系のフィッティングを行った。実験では、被験者が反応した時点でばく露を停止するため、ばく露時間はまちまちとなる。その結果、Trise を抽出するフィッティング時間幅もまちまちである。一方、熱計算の結果にフィッティングを施

(以下、東京工業大学 受託分)

実際の時間長さは 120s で一定としていた。これを実験とあわせるために、実験の際のばく露時間で熱計算結果にフィッティングを施し、 T_{rise} を得た。その結果を Figure 13 に示す。熱計算結果へのフィッティングの時間長さがまちまちであることにより、ばらつきが生じた。この原因は、温度上昇カーブが 1 次遅れ系で正確に表されないことにある。すなわち、実験でのばらつきの主要な原因のひとつは、1 次遅れ系の当てはまりの不完全さであることが分かった。ただし同図は、他にも実験データのばらつきの原因があることを示している。この原因の追究は今後の課題である。

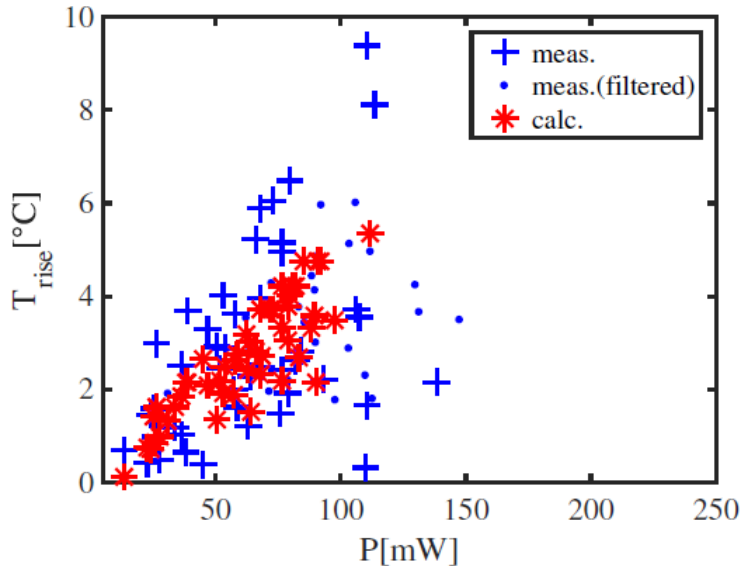


Figure 13 95GHz 集束ビームばく露時のばく露電力に対する上昇温度。ばく露面積 0.151cm^2 ，制限時間 120s。青色 + は実験結果。赤色 * は熱計算によるの結果に実験と同じ時間長でフィッティングを施した結果。

5 総括と今後の課題

以上、本年度の 40GHz ばく露実験装置の開発および数値ばく露評価の内容について述べた。これをふまえて、3 年間で実施した内容を総括する。以下が、3 年間に東工大側が実施したことの概要である。

平成 27 年度

- 95GHz ミリ波ばく露装置の構築
 - 信号発生器、周波数逓倍器、半導体型電力増幅器、アイソレータ、方向性結合器、パワーセンサ、パワーメータ、レンズアンテナ、ばく露位置固定装置、サーモグラフィー、制御用 PC、安全装置用マイコン、押しボタンスイッチ群、などからなる装置を構築した。
- 安全性への配慮

(以下、東京工業大学 受託分)

- 被験者が反応した場合に加え、過大な電力が出力された場合、過大な温度上昇が検出された場合、制御用 PC のハングアップ等が検出された場合、実験者が非常停止ボタンを押した場合、安全に実験を停止する機能を実現した。さらに同一の異常を PC とマイコンで 2 重に監視する構成とした。
- レンズアンテナの特性把握 (at 95GHz)
 - レンズアンテナの集束ビームを定量的に把握するため、電界の横断面内分布を測定し、ばく露面積、最大電力密度の距離特性を計算した。
- 恒常法の実験効率を高める刺激選択アルゴリズムの開発
 - 知覚閾値を求めるのに最適な刺激選択法を確率論的に導出した。その効果を数値シミュレーションで示した。
- 金属接触子による予備実験装置の構築
 - 本実験を始めるまでの期間に行うべき予備実験として、金属接触子による温度差知覚実験を計画し、そのための予備実験装置を構築した。

平成 28 年度

- 40GHz ミリ波ばく露装置の構築
 - ばく露周波数を 40GHz に変更するのに伴い、周波数逓倍器の廃止と高周波スイッチの導入、半導体型電力増幅器の進行波管型電力増幅器への変更を行った。
- 装置構成の変更に合わせた制御プログラムと安全装置の改造
 - 周波数逓倍器の非線形性の代わりに、進行波管型増幅器の非線形を考慮し、異なる制御点やコマンドに対応して安全装置の改造を行った。
- レンズアンテナの特性把握 (at 40GHz)
 - 40GHz においてレンズアンテナの集束ビームを定量的に把握するため、電界の横断面内分布を測定し、ばく露面積、最大電力密度の距離特性を計算した。
- 不測の停電にも安全かつ装置損傷せずに停止するための無停電電源装置導入
 - 進行波管型電力増幅器が停電に弱いことを考慮し、無停電電源装置を導入し、電源喪失の事態に備えた。
- 実験装置の動作音の評価と静穏化対策
 - 進行波管型電力増幅器が大きな騒音を出すことから、その測定評価を行った上で消音ヘッドホンによる対策を行った。

平成 29 年度

- サーモグラフィの時間同期改良

(以下、東京工業大学 受託分)

- サーモグラフィの撮影データ記録用の PC の時計と、温熱知覚実験の反応データ記録用の PC の時計とが同期していない問題を解決するために、NTP サーバを用いる方法を採用して問題解決した。
- パワーモニタの不確かさ評価
 - ミリ波電力をモニターするための方向性結合器の導波管接続部の機械的な遊びによって、最大でどれくらいの不確かさが生じるかを詳細な測定と計算により明確にした。
- 数値ばく露評価および温度上昇のモデル計算
 - ミリ波集束ビームを用いる本実験の状況を数値モデル化し、ばく露状態の電磁界分布、温度分布の時間変化を求めるための数値計算を行った。また、その結果が実験値と近い結果となったことから、計算の妥当性を示すとともに、実験で生じた大きなばらつきに付いて、その原因のひとつが 1 次遅れ系のフィッティングの当てはまりの不完全さにあることを見出した。

これらを踏まえて、今後の課題を以下に掲げる。

- 本実験で得た装置やシステムに関する各種知見を、学術文献で公開する必要がある。
- 温熱知覚閾値を推定する新しい方法として、反応時間を積極的に利用する方法の開発に着手しているが、まだ検討途上である。同方法には知覚を生じる確率モデルの選択に任意性があり、閾値推定結果に同任意性が与える影響を調べる必要がある。また、モデル選択の客観的妥当性を示す必要がある。
- 集束ビームばく露のような局所ばく露の際に、体表面の温度が時間とともに変化する様子は、1 次遅れ系で近似的に表されたが、正確さに欠けることも明らかとなった。そこで、1 次遅れ系に代わるモデルの構築が望まれる。同モデルから、ばく露評価の平均化時間、平均化面積についての知見を導き出すことも課題である