

情報通信審議会 情報通信技術分科会

電波利用環境委員会報告

—「電波防護指針の在り方」のうち、

「高周波領域における電波防護指針の在り方」について—

情報通信審議会 情報通信技術分科会
電波利用環境委員会報告

目次

I	検討事項	3
II	委員会及び作業班の構成	3
III	検討経過	3
IV	検討概要	5
	第1章 電波防護指針の概要	5
	1.1 検討の背景	5
	1.2 電波防護指針の検討範囲	6
	第2章 6 GHz 以上の周波数についての局所吸収指針及び補助指針の在り方	8
	2.1 6 GHz 以上の局所吸収指針の課題	8
	2.2 6 GHz 以上の局所吸収指針についての検討	9
	2.2.1 入射電力密度の平均化面積	9
	2.2.2 局所における入射電力密度の適用性	12
	2.2.3 入射電力密度の指針値	12
	2.2.4 局所吸収指針の改定	14
	2.3 6 GHz 以上の補助指針についての検討	16
	2.4 電波防護指針全体の整合性	17
	2.5 ICNIRP ガイドライン等と電波防護指針の整合性	18
	2.5.1 ICNIRP ガイドラインと電波防護指針の整合性	18
	2.5.2 IEEE 規格と電波防護指針の整合性	19
	2.5.3 今後における ICNIRP ガイドライン等との整合性	20
	第3章 今後の検討課題	21
V	検討結果	21
別表1	情報通信審議会情報通信技術分科会電波利用環境委員会構成員	
別表2	情報通信審議会情報通信技術分科会電波利用環境委員会電波防護指針の在り方に関する検討作業班構成員	
参考資料1	眼球への障害閾値の検索（動物）について	
参考資料2	皮膚への障害閾値の検索（動物）について	

- 参考資料3 皮膚温感閾値の検索（ヒト）について
- 参考資料4 現行の局所吸収指針
- 参考資料5 現行の補助指針
- 参考文献
- 別添

I 検討事項

電波利用環境委員会（以下「委員会」という）は、情報通信審議会諮問第 2035 号「電波防護指針の在り方」（平成 25 年 12 月 13 日諮問）のうち、「高周波領域における電波防護指針の在り方」について検討を行った。

II 委員会及び作業班の構成

委員会の構成については、別表 1 のとおり。

なお、検討の促進を図るため、委員会の下「電波防護指針の在り方に関する検討作業班」（以下「作業班」という）において検討を行った。作業班の構成については、別表 2 のとおり。

III 検討経過

1 委員会

① 第 32 回（平成 30 年 2 月 20 日）

委員会の運営方法について検討を行ったほか、「高周波領域における電波防護指針の在り方」について検討の促進を図るため、作業班で検討することとした。また、6 GHz 以上の人体のばく露評価について説明が行われた。

② 第 34 回（平成 30 年 7 月 13 日）

委員会報告（案）について検討を行った。

③ 第 35 回（平成 30 年 8 月 31 日から 9 月 6 日まで（メール審議））

意見募集の結果、委員会報告の取りまとめを行った。

2 作業班

① 第 7 回（平成 30 年 2 月 20 日）

作業班の運営方法について検討を行った。また、電波防護指針と ICNIRP ガイドラインの概要、国際動向及び 6GHz 以上の人体のばく露評価について説明が行われた。

② 第 8 回（平成 30 年 3 月 16 日）

眼及び皮膚に関する研究動向、電磁界強度指針について検討を行った。

③第9回（平成30年4月20日）

皮膚に関する研究動向、入射電力密度の考え方について検討を行った。

④第10回（平成30年6月4日）

これまでの作業班における検討事項を整理し、6GHz以上で人体から10cm以内に近接した場合の電波防護指針の見直し（案）について検討を行った。

⑤第11回（平成30年7月10日）

これまでの作業班における検討結果を踏まえ、委員会報告（案）について検討を行った。

IV 検討概要

第1章 電波防護指針の概要

1.1 検討の背景

我が国の無線局数は2億局を超えており、本格的なIoT (Internet of Things) 時代の到来に伴い、電波を利用するシステムは、社会・経済基盤としてますます重要な役割を果たすようになってきている。あらゆる分野での電波利用が急速に進展する中で、電波を安心して安全に利用できる環境を維持しつつ、電波のより一層の利活用を図ることが重要となっている。

このような中、我が国における電波の人体への影響については、電波防護指針¹で人体に影響を及ぼさない電波の強さの指針値等が定められている。この電波防護指針に基づき電波法令による規制を設けており、これにより我が国における電波の安全性を確保している。

我が国では、2020年のサービス開始が予定されている第5世代移動通信システム(5G)をはじめ、今後の携帯電話端末等の無線機器においては今まで人体の近傍で用いられていなかった高い周波数帯(6GHz以上)が使われることが想定されているが、電波防護指針のうち局所吸収指針においては、6GHz以下の周波数帯を適用範囲としており、6GHz以上の周波数帯で人体から10cm以内に近接した場合における指針値が存在しないため、その策定が急務である。

国際的な動向としては、6GHz以上の周波数帯での指針値を含め、現在、電波ばく露からの人体防護に関する国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP²)の高周波領域のガイドライン[1](以下「ICNIRPガイドライン」という)、米国電気電子学会(IEEE³)電磁界安全に関わる国際委員会(ICES⁴)のC95.1規格[2](以下「IEEE規格」という)の改定作業が進められている。

本委員会では、このような状況を踏まえ、6GHz以上の周波数帯で人体から10cm以内に近接した場合における、指針値の策定のため、電波防護指針の在り方について検討を行った。

これにより、電波防護指針の国際的ガイドラインとの調和を維持し、引き続き最新の科学的知見に基づいた適切な人体の防護を確保する。ひいては、電波の安心・安全な利用の促進に資する。

¹ 諮問第38号「電波利用における人体の防護指針」についての電気通信技術審議会答申(平成2年)及び諮問第2035号「電波防護指針の在り方」のうち「低周波領域(10kHz以上10MHz以下)における電波防護指針の在り方」についての情報通信審議会答申(平成27年)

² International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

³ The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

⁴ International Committee on Electromagnetic Safety

1.2 電波防護指針の検討範囲

電波防護指針は、社会・経済的に需要の高まっている電波利用の健全な発展を図ることを目的に、電磁波が人体に好ましくない影響を及ぼさない安全な状況であるか否かを判断する際の基本的な考え方や、それに基づく指針値などを示しており、「基礎指針」、「基本制限」及び「管理指針」から構成されている（図1）。

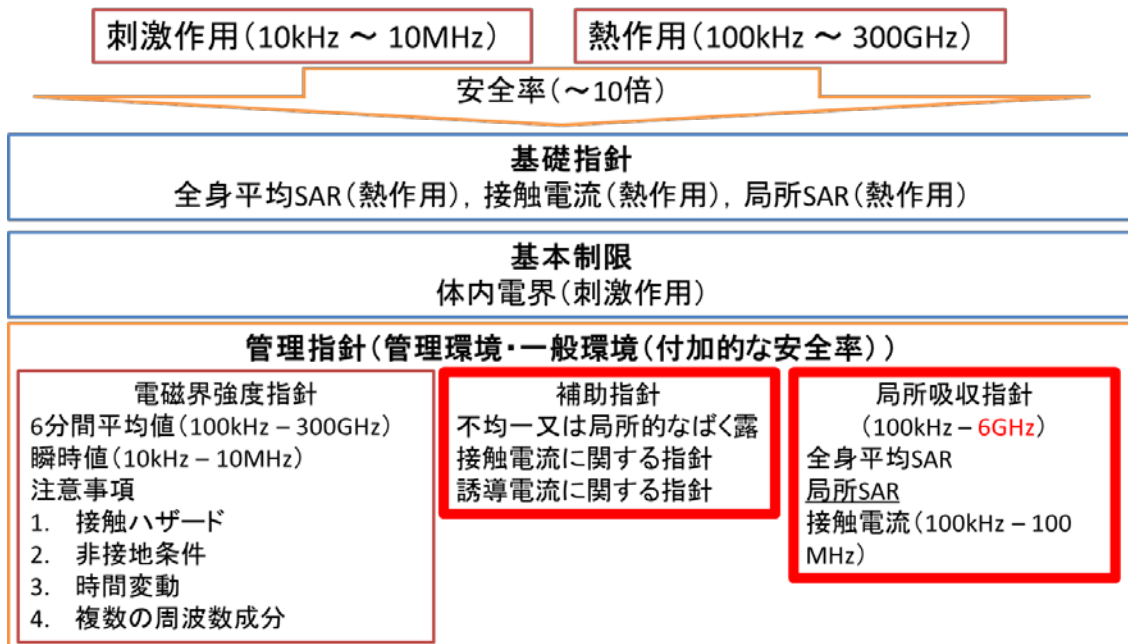


図1. 電波防護指針の構成

基礎指針は、人体が電磁波にさらされるときに人体に生じる各種の生体作用（体温上昇に伴う熱ストレス、高周波熱傷等）に基づいて、人体の安全性を評価するための基礎的な指針であり、実際の評価に用いるのではなく、管理指針の根拠となる指針である。

基本制限は、平成23年の改定の際に導入されたものであり、人体に生じる生体作用に基づいて示された人体防護に関する基礎的な指針であるという点で基礎指針と同様だが、人体防護の実際の評価に用いることを想定しているという点では基礎指針とは異なっている。

管理指針は、基礎指針及び基本制限を満たすための実測できる物理量（電界強度、磁界強度、電力密度、電流及び比吸収率（SAR⁵））で示したものであり、実際の評価に用いる。管理指針は、電磁界強度指針、補助指針及び局所吸収指針から構成される。

電磁界強度指針は、対象とする空間における電界強度、磁界強度及び電力密度によ

⁵ Specific Absorption Rate（生体が電磁界にさらされることによって単位質量の組織に単位時間に吸収されるエネルギー量）

って、当該空間の安全性を評価するための指針をいう。

補助指針は、電磁界強度指針を満足しない場合において、基礎指針に従った詳細評価を行うために使用する指針である。すなわち、電磁界強度指針は、基礎指針及び基本制限を満たすための電界強度、磁界強度、電力密度を導く際に、簡易に評価できるようにより制約的な仮定を用いており、これを超える数値が評価されても防護指針を満たさないとはいえず、補助指針は、この場合に用いられるものである。

局所吸収指針は、携帯電話端末など人体に近接して使われる無線機器等から発射される電磁波のエネルギーが人体の局所に集中して吸収されるような場合における基準値を定めているものである。

現在、6 GHz 以上の周波数帯で人体から 10cm 以内に近接した場合、管理指針である電磁界強度指針、補助指針及び局所吸収指針がいずれも適用できない。

そこで、本委員会では、6 GHz 以上の周波数帯で人体から 10cm 以内に近接した場合について検討を行ったため、電波防護指針の管理指針のうち、局所吸収指針及び補助指針の改定について主に検討を行った。

なお、現状の電波防護指針において、全身ばく露に対する我が国の電磁界強度指針は、ICNIRP ガイドライン、IEEE 規格との比較では一部に相違があるが、電磁界強度指針の根拠である全身平均 SAR の基礎指針値は ICNIRP ガイドラインや IEEE 規格と同一である。将来的には、ICNIRP ガイドライン、IEEE 規格について、最新の研究成果に基づいた、より信頼性の高い電磁界強度指針値に相当する値が設定され、かつ整合される可能性が高いので、これらの国際ガイドラインの最新版と整合させることが望ましい。

第2章 6 GHz 以上の周波数についての局所吸収指針及び補助指針の在り方

2.1 6 GHz 以上の局所吸収指針の課題

電磁界強度指針及び補助指針は、一般に電磁放射源から 10cm 以上（300MHz 以下では 20cm 以上）離れた空間で適用される。これは電磁放射源の近傍で正確な電磁界の測定ができないことによるものであるが、測定条件によっては、これらの距離未満の領域での測定が可能な場合もある。例えば、ワイヤレス電力伝送（WPT）システムにおける中間周波数帯の近傍磁界については、距離 20cm 未満での磁界測定は可能とされている。ただし、仮に近傍で正確な電磁界の測定が可能であっても、不均一な電波ばく露に対する補助指針（空間平均）は電磁放射源から 10cm（300MHz 以下では 20cm）未満の領域で適用できない。

携帯電話端末等の人体に近接して使用される無線機器のうち、波源が人体と強く相互結合している場合には、波源近傍における高周波領域の電磁界を正確に測定することは困難であり、現状において電磁界強度指針及び補助指針を適用することはできない。そのため、電波防護指針では、電磁放射源に寄与するアンテナや筐体が人体に極めて近接して使用される場合に適用される局所吸収指針を定めている。局所吸収指針では、人体から 20cm 以内の電磁放射源からの局所的な電波ばく露に関する安全性の指標として、立方体形状の 10g 組織にわたり平均化された空間最大値による局所 SAR（SAR の 10g 平均の空間最大値）が用いられているが、その適用上限周波数は 6 GHz となっている。

したがって、6 GHz 以上の周波数帯においては、電磁放射源より 10cm 未満の領域における指針値は策定されていない。

ICNIRP ガイドライン及び IEEE 規格の動向を注視し、我が国でも同様に、人体から 10cm 未満に位置する放射源からの皮膚の過度な温度上昇を防護するため、局所吸収指針における新たな指標の導入、適切な指針値の設定、さらには 10cm 未満での電磁界強度指針の設定について検討することが必要である。ICNIRP では、最新のリスク評価に基づいた高周波ガイドライン（100 kHz 以上の周波数帯）改定の検討を行っており、6 月の BioEM2018 会議においては平均化面積等が議論され、7 月にパブリックコメントを求めるための文書を公開した。また、IEEE 規格に関しては、5 G で用いることが想定されている 6 GHz 以上のミリ波に対する安全性評価について米国でも関心が高まり、その基準値が十分ではないことから、100 kHz～300 GHz の周波数帯における基準値の改定を検討中であり、2018 年末に改定する予定である。したがって、現在のところ両ガイドラインとも基準値は確定していない。

2.2 6 GHz 以上の局所吸収指針についての検討

2.2.1 入射電力密度の平均化面積

2.1 で述べたように、我が国における局所吸収指針では、6 GHz 以下の周波数における局所ばく露の評価指標としては、SAR の 10g 平均の空間最大値が用いられているが、6 GHz 超の周波数における局所ばく露の評価指標は策定されていない。

国際的な動向としては、国際ガイドライン・国際規格である ICNIRP ガイドラインや IEEE 規格では、6 GHz 以上の周波数における局所ばく露の評価指標として、入射電力密度の面積平均の空間最大値が用いられている。ただし、ICNIRP と IEEE とでは、入射電力密度が適用される周波数帯、平均化面積（電波が人体に入射する面を定義し、定めた面積にわたり入射電力密度を平均化した値を用いる際の面積の大きさ）及びそれに対応した指針値で相違がある。まず、入射電力密度が適用される周波数帯については、ICNIRP では 10GHz 以上、IEEE では 3 GHz 以上である。平均化面積及びそれに対応した指針値については、ICNIRP ガイドラインでは平均化面積を 20cm^2 とし、指針値は $10\text{W}/\text{m}^2$ とするとともに、 1cm^2 における入射電力密度が $200\text{W}/\text{m}^2$ を超えてはならないことを定めている。一方、IEEE 規格においては、平均化面積を、3-30GHz では $100\lambda^2[\text{cm}^2]$ (λ : 自由空間での波長[cm])、30GHz 以上では 100cm^2 とし、2-100GHz における指針値は $10\text{W}/\text{m}^2$ であり、100GHz 以上では $(90f_g - 7000)/200[\text{W}/\text{m}^2]$ (f_g : 周波数[GHz]) とするとともに、 1cm^2 における入射電力密度が $1000\text{W}/\text{m}^2$ を超えてはならないことを定めている。なお、ICNIRP ガイドラインや IEEE 規格には、指針値の周波数領域や平均化面積の根拠となる文献は述べられていない。

平均化面積に関する研究としては、Hashimoto らの研究 [3] 及び Foster らの研究 [4] がある。Hashimoto [3] では、4 素子からなるダイポールアンテナを、均質媒質の人体頭部を模擬した多層直方体モデル近傍 (15-40mm) に配置した場合の単位 10g 平均 SAR 及び単位透過電力密度⁶ばく露で生じる 1°C の皮膚温度上昇を生じるのに必要な入射電力密度を求めており、電力密度の平均化面積（正方形形状）を変化させ、皮膚最大温度上昇との比の周波数特性を調査している。また最も近接する距離として、アンテナと人体モデル間距離を 15 mm としている。この報告によれば、図 2 に示すとおり平均化面積を 4cm^2 とした場合には、温度上昇を面積平均の入射電力密度で除した割合は、平面波が均質媒質に入射する状態を想定した 1 次元解析の値に比べて、約 30GHz までは小さいが、30GHz を超えると大きくなる場合もあり、その要因は吸収電力の局在化と考えられ、必ずしもより制約的ではない場合もあることが示されている。この報告では、IEEE 規格の平均化面積は局所温度上昇との相関はなく、また、ICNIRP における 20cm^2 も過大となる場合があることが示されている。さらに、人体に入射するミリ波のビーム幅が数 cm 以下の場合には、皮膚温度上昇は、入射電力密度と、周波数に関連す

⁶ 透過電力密度とは、単位面積あたりに透過される電力。入射電力密度のうち体内に吸収される透過電力密度の割合は概ね 50%以上である。

るビーム幅に比例することが示されている。なお、ICNIRP ガイドラインの基本制限値においては、空間最大値に適用する平均化面積の 1 cm^2 は 30GHz 以上及び 30GHz 以下のいずれの周波数においてもより制約的な評価となっている。Foster [4] では、2次元の皮膚単層モデルを用いて理論解析を行い、皮膚温度上昇と相関の取れる電力密度の空間平均値は、血流の影響を受けばつきがあるものの、 $1\text{--}4\text{ cm}^2$ の範囲にあると算出している。以上より、Hashimoto 及び Foster の両者の数値解析の結果は概ね合致しており、平均化面積 $1\text{--}4\text{ cm}^2$ はより制約的な観点で妥当と考えられる。したがって、平均化面積（電力密度の空間平均化に用いる面積）は、皮膚の温度上昇の防護等の安全性を確保する指針値の策定にとって重要な役割を果たし、最新の知見では、 30GHz 以下であれば 4 cm^2 、それ以上の周波数であれば 1 cm^2 の面積で平均化することにより、最大温度上昇の指標になり得ることが示唆されている。

2017年の電磁界の健康影響に関する国際コーディネイト会合（GLORE⁷）会合において、IEEE規格の見直しに係る議論について、Transmitted Power Density at the Skin（TPD：皮膚における透過電力密度）が提案されているとの紹介があった。その有効性については、例えば、Hashimoto[3]から確認することができる。この指標は、 10g 平均 SAR と同様に、内部吸収電力に基づくものであり、温度上昇との関係が周波数に依存しない。それに対して、透過電力密度に対応する皮膚表面における入射電力密度は、皮膚表面における反射率の周波数依存性のため、周波数によって変化する。そのため、IEEE規格は、皮膚表面の反射率を考慮することで、透過電力密度に対応する電磁界強度指針（入射電力密度）を導出している。その際の平均化面積は周波数に依存せず 4 cm^2 であり、根拠として Hashimoto[3]の論文を引用している。一方、ICNIRP ガイドライン[1]ではより制約的な立場から 1 cm^2 以下のビームを考慮しており、GLORE 会合からも微小なビームを考慮した設定方向であることが確認されている。なお、 1 cm^2 以下のビーム幅が実現できるのは概ね波長と同程度となる 30GHz である。

以上のことから、 30GHz 以下における平均化面積は 4 cm^2 （正方形形状）、 30GHz 以上における平均化面積は、より制約的な立場から 1 cm^2 （正方形形状）が望ましいといえる。

ビーム形成による局在化がないダイポールアンテナを例にとり、 1 W/m^2 又は 1 W/kg の皮膚温度上昇を生じるのに必要な SAR と皮膚における透過電力密度の周波数特性を図3に示す。SAR は 30GHz 以下の周波数、透過電力密度は 10GHz 以上の周波数でほぼ一定の値となっており、これらの指標の有効性を示すものである。

⁷ Global Coordination of RF Communications on Research and Health Policy

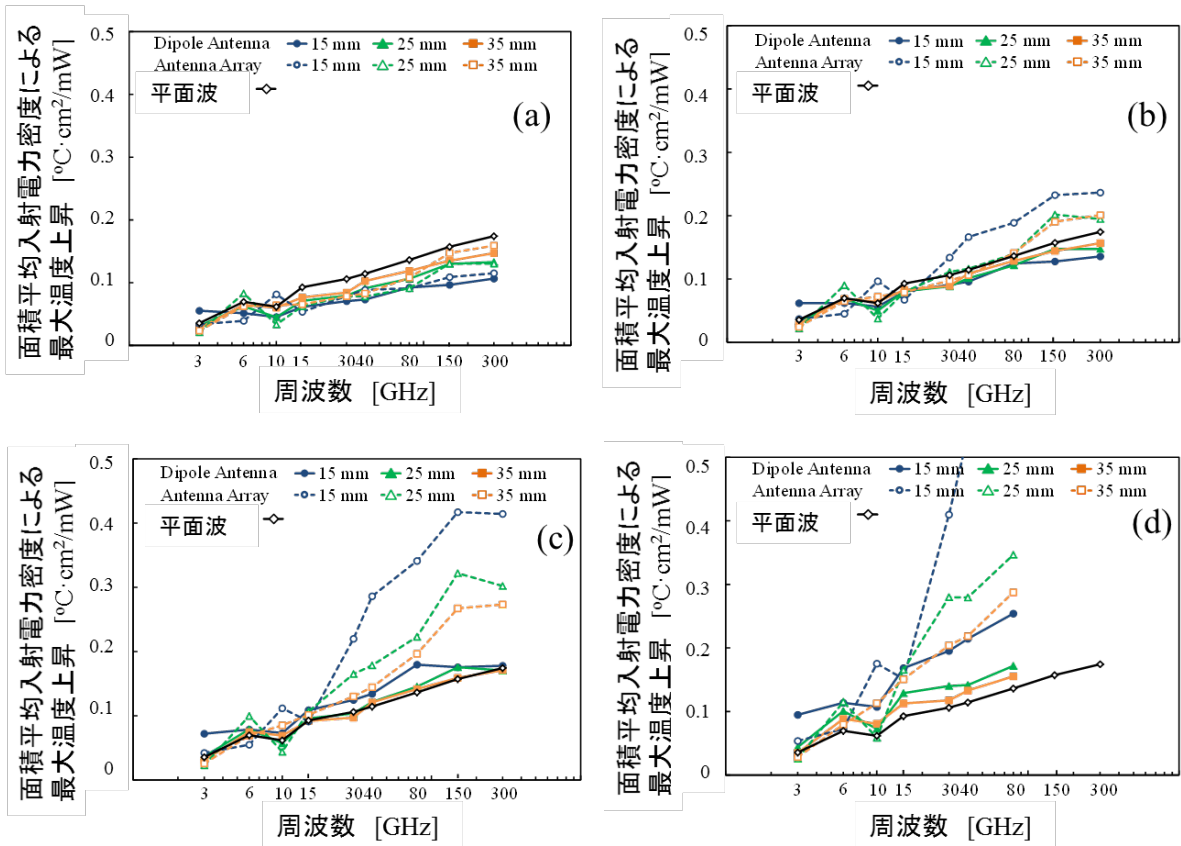


図 2. 異なる平均化面積(a) 1 cm² (b) 4 cm² (c) 9 cm² (d) 20cm²で正規化した入射電力密度における体表温度上昇[3]

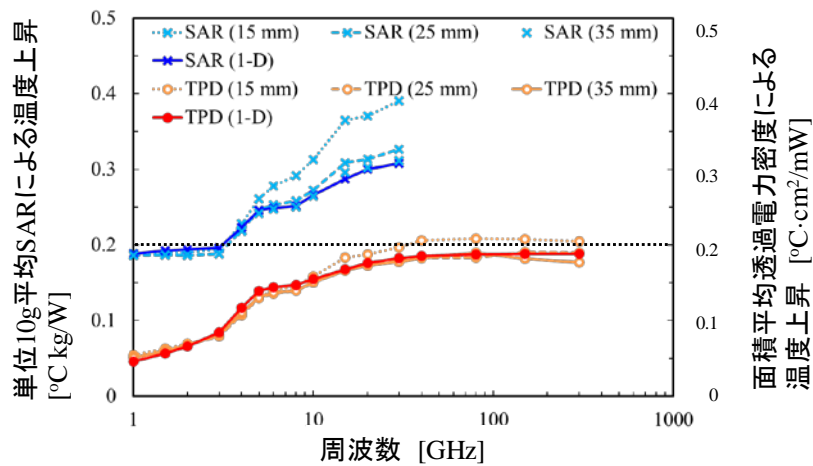


図 3. 10g 平均 SAR 及び透過電力密度（平均化面積 4 cm²）による温度上昇。10gSAR は 3 GHz 以下、透過電力密度は 10GHz 以上で特に有効な指標であることが確認できる[3]。

2.2.2 局所における入射電力密度の適用性

6GHz 以上の周波数帯において、アンテナと人体モデルが 10cm 未満に位置する場合の入射電力密度の適用性についてこれまで十分議論した例はないが、これは本周波数帯において利用される無線機器が想定されていなかったことによる。

図 2 (b) のうち、吸収電力分布が局在化しないダイポールアンテナの結果より、1次元解析（平面波）による結果と、多層直方体モデルに対する 3次元解析による入射電力密度（ 4 cm^2 の平均値）の比は 6 GHz では概ね一定していることが確認でき、これは人体から 10cm 未満の位置において、人体とアンテナの相互作用が十分小さいことを示唆するものである。したがって、局所における入射電力密度の適用は可能と考えられる。

2.2.3 入射電力密度の指針値

前述のとおり、数値シミュレーションに基づいた検討では、電波ばく露による体表での温度上昇は皮膚へ透過する電力密度と優れた相関を有することが示唆されている。一方で、ICNIRP ガイドラインや IEEE 規格では正式に採用されたわけではなく、また測定法の観点からも人体へ透過する電力密度の評価技術は検討途上であり、確立されているとは言い難い。したがって、測定法の観点より、測定可能な物理量である、人体への入射電力密度の指針値を設定することが必要である。

実際には、様々な偏波・入射条件で人体は電波にばく露される。したがって、入射電力密度に対する指針値を規定するにあたり、これらの条件の中で、体表での温度上昇が最大となる条件において指針値を規定することが望ましい。図 4 は皮膚に電力密度 1 mW/cm^2 の平面波が皮膚に入射する際の表面温度上昇の角度依存性を示している。図 4 では、磁界ベクトルが入射面である皮膚表面に直行する垂直偏波（TM 波）が入射する条件において、Sasaki [6] の検討に基づく解析的な手法を用いて評価した結果を示している。垂直偏波が人体へ入射する際には、Brewster 効果により皮膚への透過率が垂直入射時（図 4 において入射角 $\theta=0^\circ$ の条件）よりも大きくなるが⁸、図 4 より 6 GHz 及び 30GHz とともに、皮膚へ垂直に入射する $\theta=0^\circ$ の条件において、表面温度上昇の最大値が得られている。また、電界ベクトルが入射面である皮膚表面に直行する水平偏波（TE 波）が皮膚へ入射する場合には、皮膚への透過率は入射角に対して単調減少する。前述のとおり、電波ばく露による体表組織での加熱特性は皮膚へ透過する電

⁸ 屈折率の異なる 2 つの物質の境界に角度 θ を持って垂直偏波が入射する際には、反射係数の大きさ ($|R|$) が 0 となる角度（Brewster 角）を持ち、 $\theta=0^\circ$ より Brewster 角まで反射係数の大きさは単調減少する。すなわち、透過率 ($1-|R|^2$) は $\theta=0^\circ$ より Brewster 角まで単調増加する。

力密度と優れた相関を有することが示唆されていることから、水平偏波が皮膚へ入射する際の表面温度上昇は透過率と同様に入射角に対して単調減少する。人体皮膚へ入射する電磁界は、様々な角度によって入射する垂直偏波と水平偏波の重ね合わせによって表現できることから、入射電力密度の指針値を規定するにあたり、表面温度上昇が最大となる、皮膚に垂直に入射する電力密度を基に規定することが適当と考えられる。

また、国際動向を考慮すると、国際ガイドラインの根拠は熱傷であり、皮膚の熱傷閾値に基づいて、許容できる入射電力密度を規定する必要がある。図5は5℃の温度上昇を得るために必要な入射電力密度（[3][5][6][7]に基づく）を示している。また、表1には図5に示される評価結果の中から、いくつかの周波数において、5℃の温度上昇を得るために必要な入射電力密度を示す。図5は、5℃の温度上昇を得るために必要な入射電力密度は6GHzにおいて68mW/cm²以上（表1）、そして周波数の増加に伴い減少し、300GHzにおいて、25mW/cm²以上（表1）となることを示している。また、10GHzの電波が局所照射される際の、実験動物を用いた皮膚組織に対する熱傷レベルの評価結果においても、5℃の温度上昇が得られる電波ばく露条件では、皮膚組織障害は惹起されなかった（別紙2参照）。これらの結果から、様々な入射条件において最悪条件として考え得る平面波の皮膚への垂直入射時において、6GHzから300GHzの範囲において、20mW/cm²以下の電波ばく露条件では皮膚表面での温度上昇は5℃以下となることから（図5及び表1）、皮膚での熱傷は生じ得ないものと想定される。

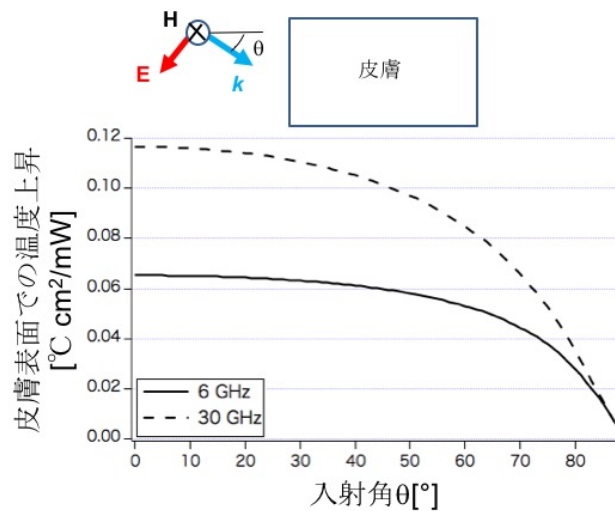


図4. 表面温度上昇の入射角依存性（1 mW/cm² 垂直偏波入射時）[8]

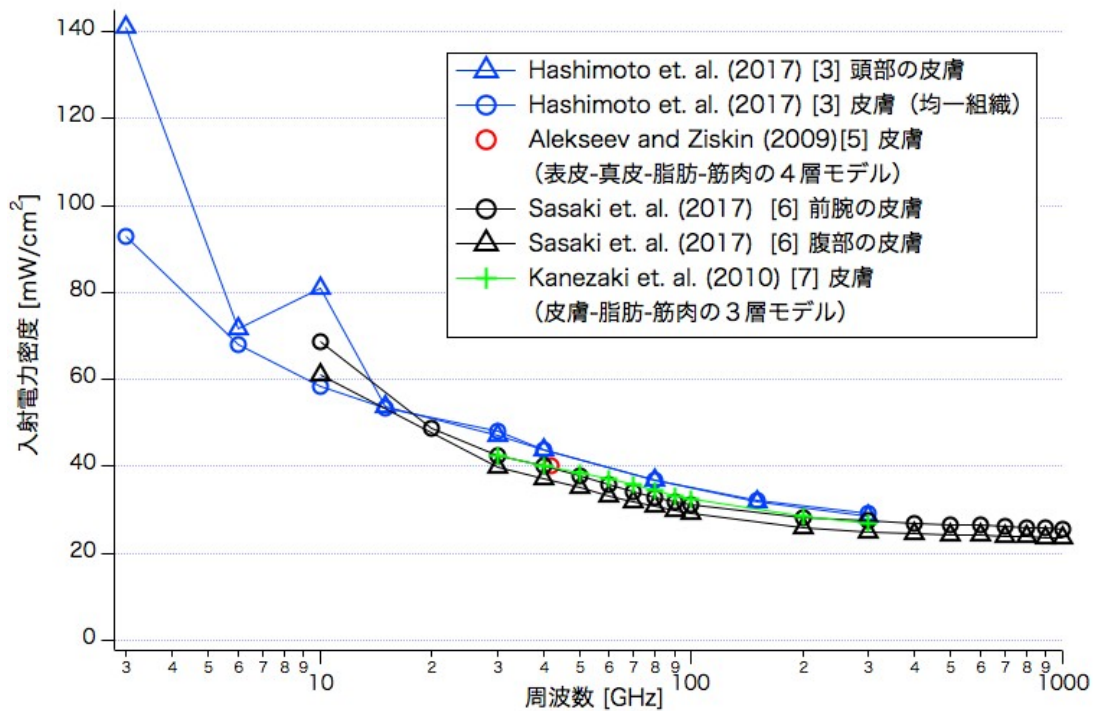


図5. 5°Cの温度上昇を得るために必要な入射電力密度（[3][5][6][7]に基づく）

表1. 5°Cの温度上昇を得るために必要な入射電力密度 [mW/cm²]

ばく露部位	6 GHz	30GHz	300GHz
頭部の皮膚 (注1)	71.8	47.1	28.7
皮膚 (均一組織) (注1)	68.1	48.1	29.1
前腕の皮膚 (注2)	N/A	42.5	27.4
腹部の皮膚 (注2)	N/A	39.7	25.0
皮膚 (皮膚—脂肪—筋肉の三層モデル) (注3)	N/A	42.4	27.0

(注1) [3]に基づき作成、(注2) [6]に基づき作成、(注3) [7]に基づき作成

2.2.4 局所吸収指針の改定

これまでの検討結果をまとめると、6 GHz以上の局所吸収指針における入射電力密度の平均化面積について、2.2.1節では、30GHz以下であれば4 cm²、それ以上の周波数であれば1 cm²の面積で平均化することにより、最大温度上昇の指標になり得ることが示唆されている。このため、各周波数帯に応じた平均化面積を設定することが必要である。

2.2.1 節及び 2.2.2 節では、10cm 未満において人体とアンテナの相互作用が十分小さく、かつ周波数に応じた面積平均を行った入射電力密度の適用が可能であるとしている。

2.2.3 節では、入射電力密度の指針値を定める際、皮膚への垂直入射を基準とすることが適当であることを確認している。また、6 GHz 以上の周波数においては、周波数によらず $20\text{mW}/\text{cm}^2$ とすれば皮膚表面の温度上昇を 5°C 以下に抑え、安全性を担保できるとしている。この値に適切な安全率（管理環境で 2 倍、一般環境で 10 倍）を付与することにより、指針値を設定することができる。

また、従来の全身平均 SAR に関する指針値は、6 GHz までであった。ICNIRP や IEEE では、全身平均 SAR 及びそれに対応する電磁界強度指針の適用周波数を 6 GHz から 300GHz へ拡張することについて議論している。6 GHz 以上の周波数の全身ばく露では深部温度上昇に加えて、皮膚温度上昇も無視できない[9]。一方、深部温度上昇は人体への熱負荷として考えられるため、それ以外の周波数のばく露による重畳効果を考慮するためには 300GHz まで拡張する必要がある。したがって、我が国の局所吸収指針である入射電力密度や全身平均 SAR についても国際動向に合わせて、300GHz まで拡張することが適当であると考えられる。

上記の検討結果に基づき、今回の局所吸収指針の改定案の概要を表 2 に示す。

表 2. 局所吸収指針の改定案（下線部が改定部分）

周波数範囲	要件	管理環境	一般環境
100kHz- <u>300GHz</u>	全身平均 SAR	0.4W/kg	0.08W/kg
100kHz- 6 GHz	局所 SAR	任意の組織 10g 当り 10W/kg (四肢では 20W/kg)	任意の組織 10g 当り 2 W/kg (四肢では 4 W/kg)
<u>6 GHz-30GHz</u>	入射電力密度	<u>任意の体表面</u> ^(※) 4 cm ² 当り 10mW/cm ²	<u>任意の体表面</u> ^(※) 4 cm ² 当り 2 mW/cm ²
<u>30GHz 超-300GHz</u>		<u>任意の体表面</u> ^(※) 1 cm ² 当り 10mW/cm ²	<u>任意の体表面</u> ^(※) 1 cm ² 当り 2 mW/cm ²

(任意の 6 分間平均値)

(※) 人体の占める空間に相当する領域中の任意の面積に相当。

なお、6 GHz 以下の周波数の電波と 6 GHz を超える周波数の電波に同時にばく露する場合には、局所 SAR と入射電力密度のそれぞれのばく露量を足し合わせて評価する必要がある。すなわち、複数の周波数の電波に同時にばく露する場合には、各周波数成分の指針値に対する割合の総和が 1 を超えてはならない。

また、局所吸収指針の適用範囲において、適用除外となる電力が示されている。適用除外となる電力は、全ての電力が人体に吸収される最悪条件を想定して定められている。適用除外となる電力を算出する国際規格（IEC62479）に基づき、全ての電力が

平均化面積に集中して入射するという最悪条件を仮定し、6-300GHzの入射電力密度の指針値に対する適用除外となる電力を計算したものを表3に示す。空中線電力の平均電力が適用除外となる電力以下の無線局については、仮に無線局の全出力が身体のごく一部に吸収される場合でも、改定案の入射電力密度の電波防護指針を満たしており、入射電力密度を評価する必要がないものと考えられる。

表3. 6GHz以上の局所吸収指針の適用除外となる電力

周波数範囲	管理環境		一般環境	
	6GHz-30GHz	30GHz超-300GHz	6GHz-30GHz	30GHz超-300GHz
入射電力密度の指針値[mW/cm ²]	10	10	2	2
平均化面積[cm ²]	4	1	4	1
適用除外となる電力[mW]	40	10	8	2

2.3 6GHz以上の補助指針についての検討

これまで述べたとおり、人体から10cm以内に近接した波源からの電波ばく露に対しては、入射電力密度による指針値の適用が望ましい。

一方で、電波防護指針では、局所吸収指針以外にも、不均一ばく露に関する補助指針において入射電力密度の指針値が定められている。ただし、不均一ばく露に関する補助指針は波源から10cm以上の距離で適用することとなっている。

そこで、局所吸収指針に入射電力密度の指針値を導入するのではなく、6GHz以上の不均一ばく露に関する補助指針の適用可能な距離についての条件を削除し、平均化面積の条件を追加することでも同様の防護が図られる可能性がある。しかしながら、6GHz以上の不均一ばく露に関する補助指針を変更した場合、6GHzを境に適用可能な距離が異なる状況になること、従来の入射電力密度の空間的な最大値については平均化面積の条件は定められていないこと等から、不均一ばく露に関する補助指針内の一貫性を維持することが困難になる。特に、周波数により適用条件が異なると、適合性評価の際に混乱が生じる可能性がある。

他方、2.2.4節の局所吸収指針の改定案では、6GHzの上下周波数での適用条件に違いはなく、人体に近接して使用する無線機器を局所吸収指針のみで統一的に評価できる。

以上により、補助指針を変更する場合には適用条件の一貫性が維持できない等の課題があり、補助指針ではなく、局所吸収指針を改定することがより合理的であると考えられる。

2.4 電波防護指針全体の整合性

6 GHz 以上の局所吸収指針の改定案は、全身平均 SAR と入射電力密度から構成されている。局所吸収指針の管理環境における全身平均 SAR の指針値は、基礎指針における全身平均 SAR の指針値と同一である。また、局所吸収指針の管理環境における入射電力密度の指針値は、基礎指針 4 (b) 3 GHz 以上の眼への入射電力密度の注意事項における入射電力の密度指針値 ($10\text{mW}/\text{cm}^2$) と同一である。

6 GHz 以上の局所吸収指針は、波源から 20cm 以下の場合に適用できるとしているが、波源から 10cm 以上の場合には電磁界強度が測定可能であり、管理指針の電磁界強度指針又は不均一ばく露に関する補助指針も適用することができる。

電磁界強度指針の 6 GHz 以上の入射電力密度の指針値は、管理環境については $5\text{mW}/\text{cm}^2$ であり、一般環境については $1\text{mW}/\text{cm}^2$ であり、改定案の 6 GHz 以上の局所吸収指針の入射電力密度の指針値よりも低く設定されている。電磁界強度指針の指針値は、全身加熱による熱作用を防止するための全身平均 SAR に関する基礎指針を満足するように設定されており、全身平均 SAR が最大となる人体全身に一様平面波が入射する電波ばく露条件を想定しているため、局所吸収指針の入射電力密度よりも低い数値となっている。改定案の 6 GHz 以上の局所吸収指針では、全身ばく露ではなく、人体の一部への局所的な電波ばく露による熱作用を防止するための入射電力密度を設定しているため、電磁界強度指針の入射電力密度よりも高い数値となっている。なお、全身加熱の影響を防止するために、局所吸収指針では、入射電力密度の指針値に加えて、全身平均 SAR の指針値も満足する必要があることから、電磁界強度指針と局所吸収指針の間には不整合はなく、両指針のいずれかを満足していれば、電波防護指針を満足すると判断できる。

不均一ばく露に関する補助指針では、人体の占める空間に相当する全領域の入射電力密度分布の空間的な平均値が電磁界強度の指針値以下であることを求めている。ただし、3-300GHz の周波数領域においては、体表に入射する電力密度の空間的最大値は、管理環境においては $50\text{mW}/\text{cm}^2$ 、一般環境においては $10\text{mW}/\text{cm}^2$ を超えてはならない。さらに、3-300GHz の周波数領域においては、眼に入射する電力密度の空間的最大値は、管理環境においては $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 、一般環境においては $2\text{mW}/\text{cm}^2$ を超えてはならない。改定案の 6 GHz 以上の局所吸収指針の入射電力密度の指針値は、不均一ばく露に関する補助指針の眼に入射する電力密度の空間最大値と同じ値となっている。したがって、不均一ばく露に関する補助指針と局所吸収指針の間には特段の不整合はなく、両指針のいずれかが満足していれば、電波防護指針を満足すると判断できる。

また、局所吸収指針の 6 GHz 以下の周波数領域において導入されている局所 SAR 指針値の平均化質量は 10g であり、一辺約 2.2cm の立方体に相当している。ギガヘルツ程度以上の周波数帯では、電波の皮膚への浸透深さが数センチメートル以下となり、通常、局所 SAR の最大値は体表に現れる。局所 SAR 最大値が現れる体表の 10g 平均化

立方体の体表面部分に相当する面積（一辺約 2.2cm の正方形（4.6cm²））と、改定案の 6-30GHz の周波数領域における入射電力密度の平均化面積である 4 cm²とは概ね合致しており、局所 SAR 指針値と入射電力密度の指針値の適用周波数の境界である 6 GHz において、局所吸収指針の評価指標としての連続性は担保されている。

2.5 ICNIRP ガイドライン⁹等と電波防護指針の整合性

2.5.1 ICNIRP ガイドラインと電波防護指針の整合性

1998 年に発行された現行の ICNIRP ガイドラインでは、10GHz 以下の周波数領域では SAR の基本制限値が、10GHz 以上の周波数領域においては入射電力密度の基本制限値がそれぞれ示されている。

まず 10GHz 以下の ICNIRP ガイドラインとの整合性について考察する。ICNIRP ガイドラインの全身平均 SAR の基本制限値は、改定案の 6 GHz 以上の局所吸収指針の全身平均 SAR の指針値と同一の値（管理環境で 0.4W/kg、一般環境で 0.08W/kg）となっている。ICNIRP ガイドラインの局所 SAR の基本制限値は 6 GHz 以下の局所吸収指針の局所 SAR の指針値と同一の値（管理環境で頭部・体幹の任意の 10g 平均値が 10W/kg、四肢の任意の 10g 平均値が 20W/kg、一般環境で頭部・体幹の任意の 10g 平均値が 2W/kg、四肢の任意の 10g 平均値が 4W/kg）となっている。2.2.1 節の図 3 に示されているとおり、6-10GHz の周波数領域において、入射電力密度の指針値で生じる最大温度上昇は局所 SAR の指針値で生じる最大温度上昇よりも低く、6-10GHz の周波数領域において、改定案の 6 GHz 以上の局所吸収指針を満足する場合、ICNIRP ガイドラインも満足すると考えられる。したがって、6-10GHz の周波数領域において、ICNIRP ガイドラインと電波防護指針の間に特段の不整合はないと考えられる。

次に 10GHz 以上の ICNIRP ガイドラインとの整合性について考察する。10GHz 以上における ICNIRP ガイドラインの入射電力密度の基本制限値（管理環境で 5mW/cm²、一般環境で 1mW/cm²）では、平均化面積として 20cm²が用いられ、かつ 1 cm²において入射電力密度の基本制限値の 20 倍（管理環境で 100mW/cm²、一般環境で 20mW/cm²）を上回らないように設定されている。改定案の 6 GHz 以上の局所吸収指針では、30GHz 以下では 4 cm²、30GHz 以上では 1 cm²の平均化面積を用いており、現行の ICNIRP ガイドラインで用いられている平均化面積とは異なる。

したがって、10GHz 以上かつ 300GHz の周波数領域における ICNIRP ガイドラインと局所吸収指針の入射電力密度について、直接の比較はできないものの、局所吸収指針の入射電力密度の平均化面積（4 cm²）は ICNIRP ガイドラインの入射電力密度の平均化面積である 1 cm²と 20cm²の間である。平均化面積に相当する正方形の 1 辺の寸法でいうと、局所吸収指針の平均化面積に対応する寸法（2 cm）は ICNIRP ガイドラインの

⁹ 2.5 節では 1998 年の ICNIRP ガイドラインを指す。

二つの平均化面積に対応する寸法（ 1 cm^2 が 1 cm 、 20 cm^2 が約 4.5 cm ）のほぼ中心付近である。

また、局所吸収指針の入射電力密度の指針値（管理環境で 10 mW/cm^2 、一般環境で 2 mW/cm^2 ）は、ICNIRP ガイドラインの 20 cm^2 の平均化面積の入射電力密度の基本制限値（職業ばく露環境で 5 mW/cm^2 、一般環境で 1 mW/cm^2 ）に比べて2倍の値となっているが、2.2.1 節の図2に示されているとおり、 20 cm^2 の平均化面積に対して、 4 cm^2 の平均化面積では同じ条件においてより低い温度上昇となることが示されている。したがって、局所吸収指針の 4 cm^2 の平均化面積の入射電力密度の指針値は、ICNIRP ガイドラインの 20 cm^2 の平均化面積の入射電力密度の基本制限値とほぼ同等以上の防護となっている。さらに、2.2.1 節の図2に示されているとおり、 4 cm^2 と 1 cm^2 の平均化面積では、同じ条件での温度上昇は概ね同程度であることが示されている。局所吸収指針の入射電力密度（管理環境で 10 mW/cm^2 、一般環境で 2 mW/cm^2 ）は、ICNIRP ガイドラインの 1 cm^2 の平均化面積の入射電力密度の基本制限値（職業ばく露環境で 100 mW/cm^2 、一般環境で 20 mW/cm^2 ）の $1/10$ の値となっていることから、局所吸収指針はICNIRP ガイドラインの 1 cm^2 の平均化面積の入射電力密度の基本制限値と同等以上の防護になっている。

以上より、 $10\text{--}300\text{ GHz}$ の周波数領域においては、ICNIRP ガイドラインよりも改定案の局所吸収指針の方が制約的と考えられる。

2.5.2 IEEE 規格と電波防護指針の整合性

WHO¹⁰ファクトシート304では、ICNIRP ガイドラインとともにIEEE規格を参照すべき国際ガイドラインとして推奨していることから、IEEE規格との整合性について以下に述べる。IEEE規格の $3\text{--}300\text{ GHz}$ の周波数領域では、入射電力密度の基本制限値を設定しており、平均化面積は周波数に依存して変化するようになっている（ $3\text{--}30\text{ GHz}$ は $100\lambda^2$ 、 $30\text{--}300\text{ GHz}$ は 100 cm^2 及び 1 cm^2 ）。

平均化面積が $100\lambda^2$ 又は 100 cm^2 の入射電力密度の基本制限値は、管理環境において 10 mW/cm^2 、一般環境において $3\text{--}100\text{ GHz}$ は 1 mW/cm^2 、 100 GHz からは周波数が高くなるにつれて増大し、 300 GHz では管理環境における基本制限値と一致するように設定されている（図6）。したがって、局所吸収指針の一般環境の入射電力密度の指針値（ 2 mW/cm^2 ）は、IEEE規格の入射電力密度の基本制限値（ 1 mW/cm^2 ）の2倍である。一方で、局所吸収指針の平均化面積（ $6\text{--}30\text{ GHz}$ で 4 cm^2 、 $30\text{--}300\text{ GHz}$ で 1 cm^2 ）はIEEE規格の平均化面積（ $3\text{--}30\text{ GHz}$ で $100\lambda^2$ 、 $30\text{--}300\text{ GHz}$ で 100 cm^2 ）よりも小さい。したがって、ICNIRP ガイドラインとの比較と同様に、図2に示されている平均化面積と入射電力密度のトレードオフの関係より、局所吸収指針の平均化面積の入射電力密度の電波ばく露による温度上昇は、IEEE規格の平均化面積が $100\lambda^2$ 又は 100 cm^2 の入射電力密度基本制限値

¹⁰ World Health Organization（世界保健機関）

の電波ばく露による温度上昇に対して、同程度かそれ以下になる。したがって、局所吸収指針は平均化面積が $100\lambda^2$ 又は 100cm^2 の IEEE 規格と同等以上の防護になっているものと考えられる。

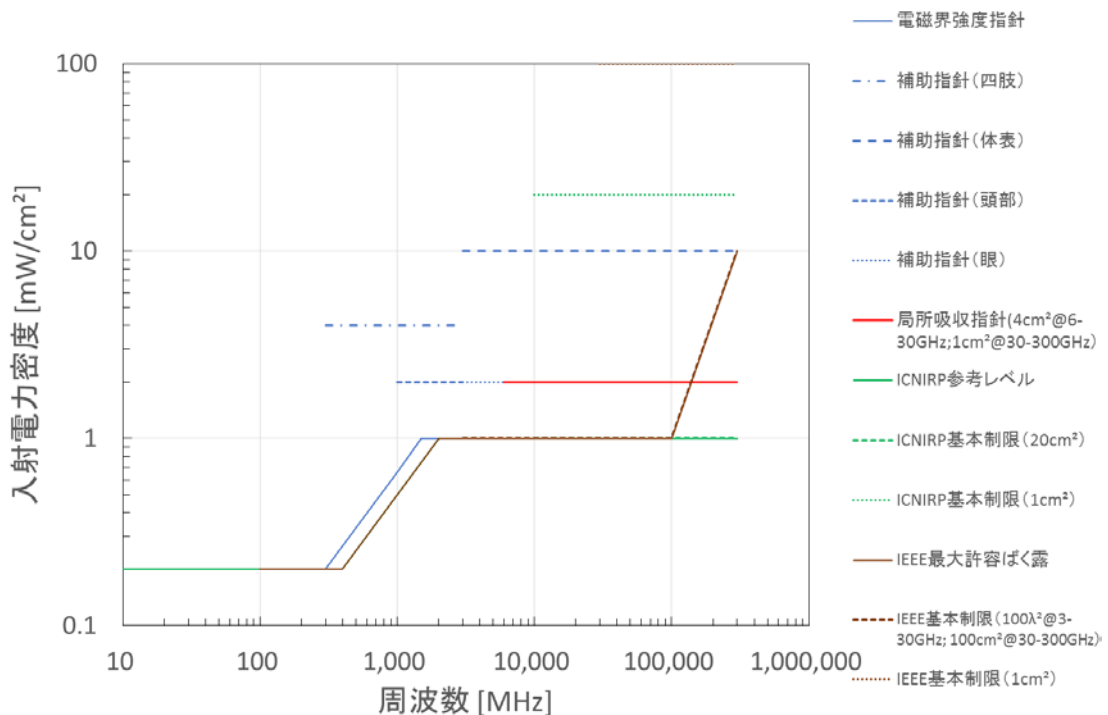


図 6. 入射電力密度の指針値の比較

また、IEEE 規格では 30–300GHz での平均化面積が 1cm^2 の入射電力密度が $100\text{mW}/\text{cm}^2$ を超えてはならないとされており、この場合の平均化面積は局所吸収指針の 30–300GHz の周波数領域における平均化面積と同じであり、かつ局所吸収指針の入射電力密度（管理環境で $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 、一般環境で $2\text{mW}/\text{cm}^2$ ）は IEEE 規格の平均化面積が 1cm^2 の入射電力密度（ $100\text{mW}/\text{cm}^2$ ）の $1/10$ である。したがって、30–300GHz の周波数領域における局所吸収指針は IEEE 規格よりもより制約的になっている。

2.5.3 今後における ICNIRP ガイドライン等との整合性

ICNIRP ガイドライン及び IEEE 規格は、現在改定に向けた作業が進められているが、改定の参考となる最新の研究成果からは 6–300GHz において指針値の大きな変更はないことが予想されている。また、2017 年の GLORE 会合における ICNIRP 及び IEEE の関係者によるそれぞれのガイドライン・規格の改定状況についての発表では、局所吸収指針と同等の平均化面積を用いた入射電力密度が採用される予定であることが報告されている。また、両ガイドラインについて、透過電力密度による基本制限値の設定に

ついて議論が行われていることも報告されているが、いずれも現時点では正式な決定はなされていない。入射電力密度のうち体内に吸収される透過電力密度の割合は概ね50%以上であるため、透過電力密度の基本制限値の導入による入射電力密度の許容値への影響は周波数により変化するものの約2倍以下であること、かつ局所吸収指針の入射電力密度の指針値（管理環境で10mW/cm²、一般環境で2mW/cm²）は国際ガイドラインの改定版で想定される入射電力密度の指針値（職業ばく露環境で10-20mW/cm²、一般環境で2-4mW/cm²）に対してより制約的に設定していることに留意する必要がある。

したがって、これらの国際ガイドラインの改定状況を踏まえ、随時、局所吸収指針を見直すことが重要である。

第3章 今後の検討課題

今回の局所吸収指針の改定案については、適切な人体の防護を図り、電波の安心・安全な利用の促進に資するため、最新の科学的知見や学術的な論文に基づいて電波防護指針の指針値に十分な根拠を与えるとともに、電波防護指針全体の整合性に加え、ICNIRP ガイドラインや IEEE 規格との整合性やこれらの改定に向けた動向等を考慮して、より制約的に設定してまとめたものである。

なお、高周波領域の電磁界については、現在、WHO において健康リスク評価が進められているところである。また、ICNIRP ガイドラインの高周波領域の改定作業についても、改定の方向性が見通しはあるが、現在進行中である。我が国は、引き続き国際動向を注視して、必要に応じて電波防護指針の在り方について改めて検討を行うことが重要である。

V 検討結果

検討の結果、情報通信審議会諮問第2035号「電波防護指針の在り方」（平成25年12月13日諮問）のうち、「高周波領域における電波防護指針の在り方」について、別添のとおり電波防護指針の改定案を取りまとめた。

別表 1

情報通信審議会 情報通信技術分科会 電波利用環境委員会 構成員

(敬称略、専門委員は五十音順)

	氏 名	主 要 現 職
主 査	多氣 昌生	首都大学東京システムデザイン学部教授
専門委員	雨宮 不二雄	NTT アドバンステクノロジー株式会社先端プロダクツ事業本部環境ビジネスユニット EMC センタ
"	石山 和志	東北大学電気通信研究所教授
"	熊田 亜紀子	東京大学大学院工学系研究科教授
"	黒田 道子	東京工科大学名誉教授
"	清水 敏久	首都大学東京システムデザイン学部教授
"	清水 久恵	北海道科学大学保健医療学部臨床工学科教授
"	曾根 秀昭	東北大学サイバーサイエンスセンター教授
"	平 和昌	国立研究開発法人情報通信研究機構電磁波研究所所長
"	田島 公博	NTT アドバンステクノロジー株式会社先端プロダクツ事業本部環境ビジネスユニット EMC センタチームリーダー
"	田中 謙治	一般財団法人テレコムエンジニアリングセンター専務理事
"	塚原 仁	日産自動車株式会社電子・電動要素開発本部電子システム開発部電子信頼性グループ主査
"	野島 俊雄	北海道大学名誉教授
"	長谷山 美紀	北海道大学大学院情報科学研究科教授
"	林 亮司	三菱電機株式会社情報技術総合研究所光・マイクロ波回路技術部専任
"	平田 晃正	名古屋工業大学大学院工学研究科電気・機械工学専攻教授
"	堀 和行	ソニー株式会社品質・環境部プロダクトコンプライアンスグループチーフ EMC/RF コンプライアンスマネージャー
"	増田 悦子	公益社団法人全国消費生活相談員協会理事長
"	山崎 健一	一般財団法人電力中央研究所電力技術研究所雷・電磁環境領域リーダー副研究参事
"	山下 洋治	一般財団法人電気安全環境研究所横浜事業所 EMC 試験センター所長
"	和氣 加奈子	国立研究開発法人情報通信研究機構電磁波研究所電磁環境研究室主任研究員
"	渡邊 聡一	国立研究開発法人情報通信研究機構電磁波研究所電磁環境研究室研究マネージャー

(計 22 名)

別表 2

情報通信審議会 情報通信技術分科会 電波利用環境委員会
電波防護指針の在り方に関する検討作業班 構成員

(敬称略、構成員は五十音順)

	氏 名	主 要 現 職
主 任	平田 晃正	名古屋工業大学大学院工学研究科電気・機械工学専攻教授
主任代理	牛山 明	厚生労働省国立保健医療科学院生活環境研究部上席主任研究官
構 成 員	上村 佳嗣	宇都宮大学大学院工学研究科情報システム科学専攻教授
"	小島 正美	金沢医科大学総合医学研究所プロジェクト研究センター環境原性視覚病態部教授
"	佐々木 謙介	国立研究開発法人情報通信研究機構電磁波研究所電磁環境研究室研究員
"	寺尾 安生	杏林大学医学部生理系専攻教授
"	西方 敦博	東京工業大学工学院准教授
"	日景 隆	北海道大学大学院情報科学研究科助教
"	増田 悦子	公益社団法人全国消費生活相談員協会理事長
"	宮越 順二	京都大学生存圏研究所生存圏開発創成研究系特任教授
"	森松 嘉孝	久留米大学医学部環境医学講座准教授
"	渡邊 聡一	国立研究開発法人情報通信研究機構電磁波研究所電磁環境研究室研究マネージャー
オブザーバ	多氣 昌生	首都大学東京システムデザイン学部教授

(計13名)

眼球への障害閾値の検索（動物）について

1. 背景

2020年にサービスの開始が予定されている第5世代移動通信システム（5G）に関し、今まで人体の近傍で用いられていなかった高い周波数帯（6GHz以上）が使われることになる。現行の電波防護指針には6GHzから300GHzまでの周波数において、電磁放射源より10cm未満における指針値は十分に整備されているとは言い難い。

2. 眼への入射規制

基礎指針4(b)には、「3GHz以上の周波数においては、眼への入射電力密度（6分間平均）が $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下とすること」と記載されている[1]。この4(b)は眼に特化して記載された指針である。この基礎指針の根拠は、Rosenthalら[2]の家兎の実験において、35GHz及び107GHzの周波数で $10\sim 50\text{mW}/\text{cm}^2$ 程度の照射で一過性の角膜上皮障害が生じるとする報告に基づくものである。一方、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ を超えると一過性でない影響の可能性も考えられるとされている[2]。Rosenthalら[2]の電波ばく露の方法は、円形ホーンアンテナを眼球にかぶせるように接触させてばく露しているため、人工的な外傷の介入を指摘する報告[3]もある。ミリ波ばく露によって生じる眼障害についてRosenthalら[2]は、ばく露後24時間以内に治癒するsuperficial keratitis（表層角膜炎：角膜表面にある角膜上皮細胞が剥離すること。蛍光染色所見では点状染色所見として観察させる）とdeep keratitis（深部角膜炎：持続性の角膜炎や角膜実質部分に永久的に残存する白斑）に分類している。

Kojimaら[4]は、deep keratitisを眼障害の指標として、40GHz、75GHz、95GHzのミリ波帯電波をレンズアンテナを介して有色家兎眼にばく露した。その結果、眼障害の発症閾値は $50\sim 100\text{mW}/\text{cm}^2$ 内にあると報告している。また、眼障害が50%の確率で発症する際の40GHz、75GHz、95GHzの入射電力密度は、それぞれ206、143、 $146\text{mW}/\text{cm}^2$ であったと報告（図1）しており、これらのデータは眼部の忌避反応を抑制した実験結果である。さらにKojimaら[5]は、家兎角膜内に温度プローブを刺入して、18GHz、22GHz、26.5GHz、35GHz、40GHzを $200\text{mW}/\text{cm}^2$ ばく露中の角膜温度が周波数の上昇ともに有意に上昇したこと[5]を報告している（図2）。眼障害発生閾値と電力密度に対する関係は $18\text{GHz} > 40\text{GHz}$ の関係（周波数が高くなると閾値が低くなる傾向）が類推される。これらの実験結果から、現行の電波防護指針の指針値（補助指針の管理環境で3GHz以上における眼への入射電力密度は $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下）は、より制約的に設定されているといえる。

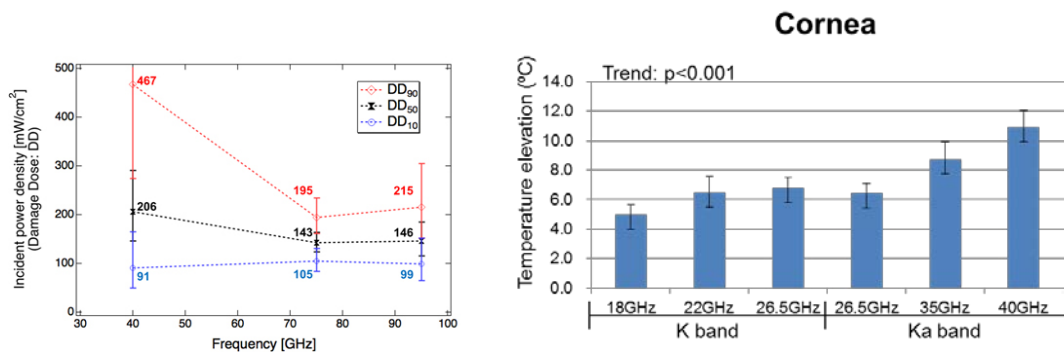


図 1 (左図) : ミリ波ばく露による家兎眼障害閾値検索結果[4]、

図 2 (右図) : 200mW/cm² ばく露時の角膜実質内温度上昇の周波数による相違[5]

3. 考察と今後の課題

電波防護指針の補助指針では、平成9年の改定で、眼への入射電力密度に2段階の数値が導入された[6]。一般環境に5倍の付加的安全率が導入されており、一般環境の3GHz以上の周波数領域における眼への入射電力密度の指針値は2mW/cm²とされている。しかし、一般環境に対して5倍の付加的な安全率を設けている根拠が明確ではない。

国際的には、多くの防護指針において、眼に特化した規制はされていない。我が国以外で眼に対する入射規制を行っていたカナダにおいても、カナダの電波防護規格であるSafety Code 6 (SC6) で眼に対する規制を除去している。その根拠を説明したA Review of Safety Code 6 [7]において、「白内障は、実験動物で生じるが、眼の周りの皮膚に痛みを伴う加熱を引き起こす無線エネルギーのレベルにばく露された場合のみである。」と報告されている。

ヒトの眼表面には表層まで角膜神経が分布しており、眼の違和感に対して、瞬目(まばたき)、閉瞼(まぶたを閉じる)、眼を逸らせる等の忌避反応が生じる。長時間(6分間)に渡り、眼にミリ波ビームが入射し続けるという想定は、ICNIRPの光(レーザー)のガイドライン[8]でも非現実的であるとされていることを考慮すると、現行の眼に対する補助指針値は必ずしも必要ではないとも考えられる。

なお、ビーム形成をする数波長以上のアレーアンテナにより、波源近傍でのばく露面積の変化が単調ではない複雑なものとなり得るため、波源近傍におけるばく露面積と影響の関係について今後更なる調査が必要である。

皮膚への障害閾値の検索（動物）について

1. 背景

現行の電波防護指針には6 GHz から 300 GHz までの周波数において、電磁放射源より 10cm 未満における電波に対する管理指針（局所吸収指針）が設定されていないため、従来の管理指針を6 GHz 以上の電波にも拡張可能かどうか判断するための生物学的根拠が必要とされている[1][2]。

周波数が6 GHz 以上の電波の生体への浸透深さは数センチメートル以下であり、電波は皮膚組織に吸収され熱エネルギーに変わるため、電波ばく露による皮膚組織での熱影響の検討は重要である[1]。そこで、6 GHz 以上の電波が10cm より近接かつ局所にばく露されることを想定するとともに、電波が体表に吸収されることを考慮し、電波ばく露の影響の新たな生理学的指標として皮膚組織に対する熱傷レベルに着目した動物実験を実施した。

2. 評価方法

実験動物（成獣ラット）頭部に対し、モノポールアンテナを用いて10GHz の電波を3種類の強度（偽ばく露を含む）で18分間局所ばく露した後、3日間経過してから頭頂部皮膚を組織学的に観察し、熱傷レベルを評価した。なお、頭頂部皮膚における入射電力密度（IPD）及び皮膚温度上昇について、現時点では10GHz と数十 GHz では浸透深さが同程度であり、かつ熱作用による障害は温度上昇によって生ずることから、ばく露条件を適切に選べば有意な差が見られないため、ここでは10GHz 電波の結果のみに絞っている。

3. 結果

3.1. 電波ばく露の局所性

10GHz の電波をラット頭部に局所ばく露すると、電波は頭頂部皮膚に集中して吸収されることがラット FDTD¹¹モデルを用いたシミュレーション解析により明らかになった。図1は、本実験で用いたアンテナとラット頭部の位置関係及び電波ばく露時の SAR 分布 (W/kg)、さらにその条件での入射電力密度 (IPD) 分布 (mW/cm²) を示す。アンテナとラット頭部との距離は約 0.4cm と今回検討すべき局所ばく露の範囲（6 GHz から 300GHz までの電波で 10cm 以下）を満たしている。この配置で電波をばく露すると、電波の大部分はアンテナ直下の頭頂部皮膚に局所的に吸収され、皮膚より深い頭蓋骨やさらに下層の脳組織に至っては、電波はわずかにしか吸収されないことが分かる。

¹¹ 時間領域法 (Finite Difference Time Domain method)。マクスウェルの電磁界方程式を差分化し、空間・時間領域において解を得る方法。

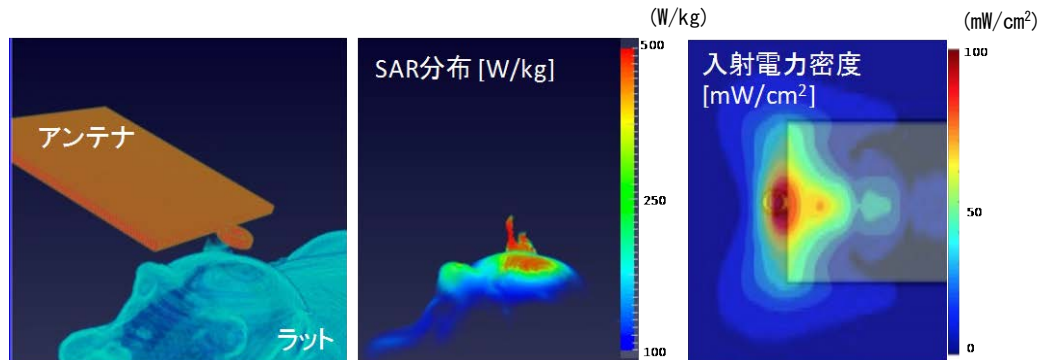


図 1. 局所ばく露時の SAR と入射電力密度 (IPD) 分布 (アンテナ入力 1.0W で計算)

3.2. 皮膚の温度上昇

高出力局所ばく露の場合、18 分間で脳表温度および脳表血流が上昇することが既に報告されている [3] ことから、動物実験では、3 種類の電波強度 (IPD 値で $0\text{mW}/\text{cm}^2$ 、 $150\text{mW}/\text{cm}^2$ 、 $250\text{mW}/\text{cm}^2$) で 18 分間のばく露を実施した。その結果、シミュレーション解析によって最大の電波吸収が予想された頭頂部皮膚組織における温度は、偽ばく露群では 0.5°C 程度の変化しかなかった。これに対しばく露群においては、 $150\text{mW}/\text{cm}^2$ 及び $250\text{mW}/\text{cm}^2$ の時に、それぞれ $+5.1^\circ\text{C}$ 及び $+10.2^\circ\text{C}$ と、入射電力密度に依存した顕著な温度上昇が認められた (表 1)。

表 1. 18 分間ばく露後の皮膚温度

IPD [mW/cm^2]	皮膚温度 (ΔT)
0	33.5°C ($+0.5^\circ\text{C}$)
150	38.6°C ($+5.1^\circ\text{C}$)
250	43.2°C ($+10.2^\circ\text{C}$)

3.3. 皮膚の熱傷レベル

シミュレーション解析で電波吸収が最大と予想された部位、すなわちアンテナ直下のラット頭頂部皮膚組織を採取し、電波ばく露 3 日後の組織学的観察を行った。電波ばく露 3 日後の皮膚では最大ばく露強度 (入射電力密度: $250\text{mW}/\text{cm}^2$) においてのみ熱傷と判断される組織学的所見が認められた (表 2)。皮膚損傷については、今回観察した 4 カ所の部位 (表皮、真皮、皮下組織、毛包) から判断できるが、入射電力密度

150mW/cm²以下のばく露ではいずれも形態学的変化は認められなかった。また、このばく露条件では熱傷を深達度により評価した場合でも熱傷には相当しないと判断された。これに対し、入射電力密度 250mW/cm²のばく露では、4カ所の部位全てにおいて浮腫や肥厚などの形態学的変化が認められ、さらに熱傷深達度においては III 度熱傷時に認められるような皮下組織に達する所見が得られた[4]。なお、熱傷分類と熱傷深達度の関係を図 2 に示す。

表 2. 電波ばく露 3 日後の皮膚の組織学的所見

IPD [mW/cm ²]	表皮	真皮	皮下組織	毛包	熱傷分類 (深達度から)
0	(-)	(-)	(-)	正常	相当せず
150	(-)	(-)	(-)	正常	相当せず
250	境界不明のわずかな浮腫	浮腫状	筋繊維の肥厚	毛包の縮小 顆粒の消失	III 度

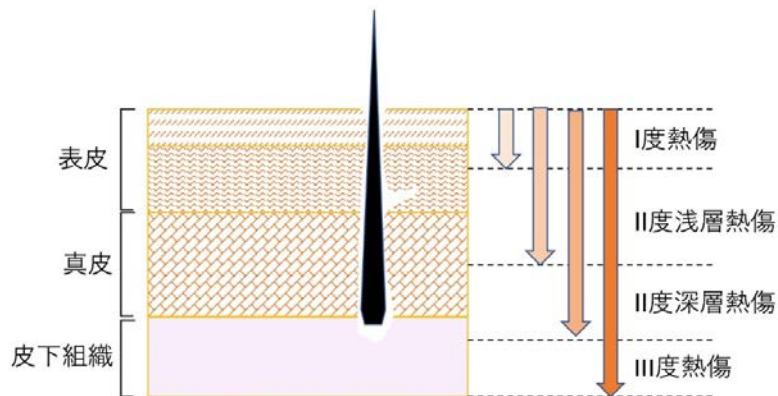


図 2. 熱傷分類と熱傷深達度の関係

4. 考察と今後の課題

実験動物（成獣ラット）を用いた局所電波ばく露実験を実施した結果、10GHz の電波が局所照射されると、入射電力密度が 150mW/cm²以下の条件では今回着目した評価指標の範囲では熱傷が示唆されるような所見は認められなかった。一方、入射電力密度 250mW/cm²のばく露強度では、アンテナ直下の頭頂部皮膚組織において人体皮膚の熱傷時に認められるような組織障害が生じた。

今回の皮膚組織障害は、電波ばく露による組織温度上昇、つまり熱的影響であることが示唆される。まず、組織障害を生じた部位はアンテナ直下の皮膚に局限されていた。ラット FDTD モデルを用いたシミュレーション解析による SAR 分布及び IPD 分布は、電波エネルギーがアンテナ直下の頭頂部のごく浅い組織、つまり皮膚組織に吸収

されていることを示している。このばく露の局所性は、電波ばく露中の成獣ラット体表温度からも明らかで、アンテナ直下の皮膚組織温度は周囲に比べて最も上昇していた。そして、皮膚組織障害が生じた入射電力密度 $250\text{mW}/\text{cm}^2$ ばく露時ではその上昇温度は約 10°C に達していた。これらの結果から、皮膚組織障害は組織温度上昇を伴い、しかもその温度上昇が最大となる部分で惹起されたといえる。

本実験結果から、皮膚組織障害（熱傷深達度）という点からみても、現在の管理指針（入射電力密度 $50\text{mW}/\text{cm}^2$ ）[2]は今回用いた 10GHz を含む 6GHz 以上の周波数電波においてもより制約的に設定されていることが示唆された。これまで 6GHz 以上の周波数帯電波に対する電波防護指針の根拠としては、眼球角膜上皮障害や皮膚における温感・熱痛が考慮されていた。なかでも皮膚への影響については体表の広範囲ばく露に基づいた知見であった。これに対し本実験では、モノポールアンテナと皮膚との距離を約 4mm とし、近接かつ局所性の高いばく露を行った際の皮膚組織障害を観察し、眼球角膜上皮障害同様に障害深度（レベル）による客観的な生体影響評価を行った。その結果、現在の管理指針値である $50\text{mW}/\text{cm}^2$ の3倍にあたる $150\text{mW}/\text{cm}^2$ のばく露強度でも皮膚組織障害は惹起されないことが確かめられた。

本実験結果はあくまで実験動物を対象とした知見であり、人体皮膚組織に外挿する場合は種差はもとより、皮膚組織の構造的違いなどを考慮する必要がある。また、今回は深達度を基準に熱傷レベルを分類・評価した。皮膚組織障害評価に用いられる指標は、免疫系細胞の活性化など、他にも複数知られており、今後、生体影響閾値をより明らかにするためにも、こういった他のパラメータの変化についても詳細に調査する必要があるといえる。

皮膚温感閾値の検索（ヒト）について

1. 背景

電波防護指針の基礎指針 4 (a) は「熱痛」をその根拠の 1 つとしている [1]。一般に、熱痛を生じる強さよりも下に、温感を生じる強さがある。電波が人体の局所に照射される場合の例で、熱痛の閾値 $2500\text{mW}/\text{cm}^2$ (3GHz、30 秒間照射時、内腕) に対して、温感閾値は $27\text{mW}/\text{cm}^2$ (2.45GHz、10 秒間照射時、内腕) のように小さくなる [2]。

2. ミリ波温感閾値の面積依存性

ヒトの掌へのミリ波集束ビーム照射時の温感閾値測定結果を図 1 に示す (60GHz、10 秒間照射時) [3]。実験に用いた最小のばく露面積 (0.34cm^2) は空間伝搬によって絞ることのできる回折限界に近い。周波数、実験条件が異なるが、全身ばく露に近い背中への照射時の結果 [4] についても図 1 内に参考として記載している。同図より、最大入射電力密度で表した温感閾値はばく露面積の増大とともに減少し、60GHz の実験の範囲ではばく露面積の平方根にほぼ反比例することがわかる。図 2 は 60GHz の温感閾値を照射 5 秒間での上昇温度で表したものである。ばく露面積がおおよそ 1cm^2 以下では約 2°C で一定になることが伺える。

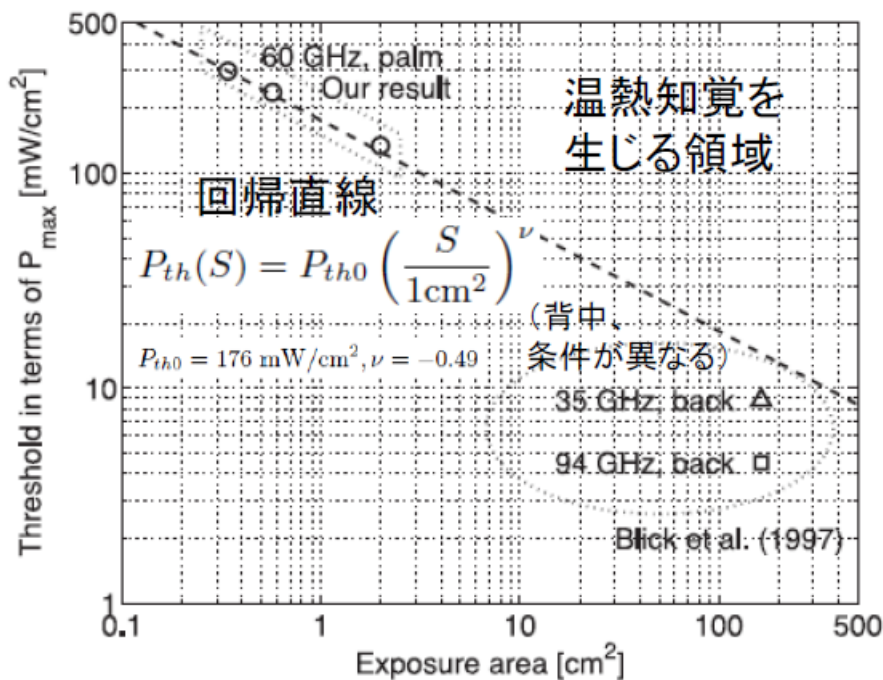


図 1. 掌の 60GHz 集束ビーム 10 秒照射による温感閾値測定結果 [3] [4]

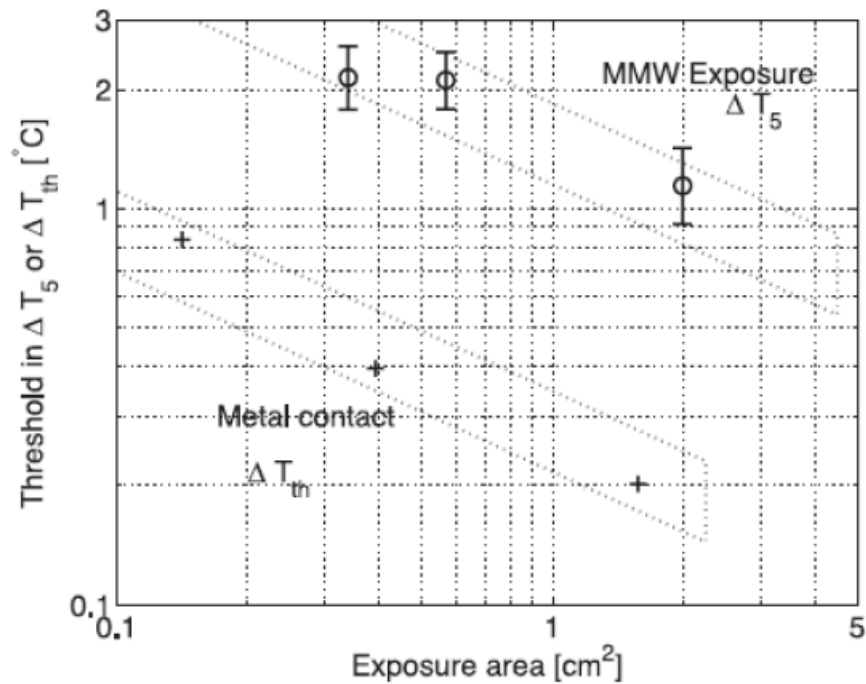


図2. 照射5秒間での上昇温度で表した温感閾値[3]

3. 周波数6 GHz 以上で距離10cm以内に近接する波源

集束ビーム波源のような特殊な波源を例外とすれば、波源距離が近いほど、ばく露面積は小さくなると考えられる。現行の補助指針の管理環境で3 GHz 以上における体表の入射電力密度は50mW/cm²以下（ただし波源から10cm以上離れて評価）と定めている。図1で入射電力密度を50mW/cm²としたとき、ばく露面積13cm²以上で温感を生じる（10秒間照射時）。しかし、仮に10cm以上という距離条件をなくした場合を考えると、体表の入射電力密度が50mW/cm²以下に制限されている限り、波源が近づくにつれてばく露面積は減少し、左上がりの閾値回帰直線から遠ざかることになる。したがって、現行の電波防護指針で生じる以上の新たな温感が生じないと考えられる。

4. 考察と今後の課題

1. で述べた例では温感と熱痛の閾値には約2桁(92倍)の開きがあるため、温感が生じたとしても熱痛までには十分な余裕があり、熱痛に起因する健康障害を回避するという点では現行の電波防護指針値はより制約的に設定されていると考えられる。

なお、ビーム形成をする数波長以上のアレーアンテナにより、波源近傍でのばく露面積の変化が単調ではない複雑なものとなり得るため、波源近傍におけるばく露面積と影響の関係について今後更なる調査が必要である。

現行の局所吸収指針

現行の局所吸収指針は次のとおり定められている。

(a) 適用範囲

本指針は、周波数 100kHz から 6 GHz までに適用する。

局所吸収指針の主な対象は、携帯電話端末等の小型無線機であり、電磁放射源に寄与するアンテナや筐体が人体に極めて近接して使用される場合を想定している。

具体的には、本指針（局所吸収指針）は、電磁放射源（主にアンテナ）や放射に関わる金属（筐体等）と人体との距離が 20cm 以内の場合に適用される。また、それ以外の距離においても、電磁界強度指針、補助指針又は局所吸収指針のいずれか 1 つを満たせば基礎指針を満たしていると判断できる。ただし、周波数が 300MHz 以上 300GHz 未満であって、10cm 以上 20cm 以内の距離における電磁界強度指針又は補助指針の適用は排除されない。

なお、空中線電力の平均電力が 20mW 以下の無線局については、仮に無線局の全出力が身体のごく一部に吸収される場合でも、局所 SAR の電波防護指針を満たしており、評価の必要性はないものと考えられる。また、管理環境においては、同 100mW 以下の無線局については、評価の必要性がないものと考えられる。

(b) 管理環境

次の要件を全て満たすこと。

- <1> 全身平均 SAR の任意の 6 分間平均値が、0.4W/kg 以下であること。
- <2> 任意の組織 10g 当りの局所 SAR (6 分間平均値) が 10W/kg (四肢では 20W/kg) を超えないこと。
- <3> 接触ハザードが防止されていない場合は、100kHz から 10MHz までの周波数において接触電流が 40mA 以下（実効値）であり、100kHz から 100MHz までの周波数において接触電流が 100mA 以下（平均時間 6 分間）であること。

ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、100kHz から 10MHz までの周波数については、その各周波数成分の指針値（40mA（実効値））に対する割合の和の総和を求めるか、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。さらに、100kHz から 100MHz までの周波数については、その各周波数成分の指針値（100mA（平均時間 6 分間））に対する割合の自乗和を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

<4> 100kHz から 10MHz において体内電界強度が $2.7 \times 10^{-4} \times f$ (Hz) V/m を超えないこと。

ただし、体内電界強度がこの指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の和を求め、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均（付属書参照）を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

なお、周波数 100MHz 以上の無線局は、<3>に述べた接触電流に関する指針に基づく評価を行う必要はない。また、周波数 10MHz 以上の無線局は、<4>に述べた体内電界強度に関する指針に基づく評価を行う必要はない。

(c) 一般環境

次の要件を全て満たすこと。

<1> 全身平均 SAR の任意の 6 分間平均値が、0.08W/kg 以下であること。

<2> 任意の組織 10g 当たりの局所 SAR（6 分間平均値）が 2W/kg（四肢では 4W/kg）を超えないこと。

<3> 接触ハザードが防止されていない場合は、100kHz から 10MHz までの周波数において接触電流が 20mA 以下（実効値）であり、100kHz から 100MHz までの周波数においては接触電流が 45mA 以下（平均時間 6 分間）であること。

ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、100kHz から 10MHz までの周波数については、その各周波数成分の指針値（20mA（実効値）に対する割合の和を求め、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。さらに、100kHz から 100MHz までの周波数については、その各周波数成分の指針値（45mA（平均時間 6 分間）に対する割合の自乗和を求め、これらの総和が 1 を超えてはならない。

<4> 100kHz から 10MHz までにおいて体内電界強度が $1.35 \times 10^{-4} \times f$ (Hz) V/m を超えないこと。

ただし、体内電界強度がこの指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の和を求め、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均（付属書参照）を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

なお、周波数 100MHz 以上の無線局は、<3>に述べた接触電流に関する指針に基づく評価を行う必要はない。また、周波数 10MHz 以上の無線局は、<4>に述べた体

内電界強度に関する指針に基づく評価を行う必要はない。

現行の補助指針

現行の補助指針は次のとおり定められている。

電磁界強度指針だけでは防護指針を満たしていることを示すことができない場合に、人体が電磁波にさらされる状況、考慮すべき生体作用等に着目してより厳密に評価するための指針である。

(1) 人体が電磁界に不均一又は局所的にさらされる場合の指針

周波数に応じて該当する条件が全て満たされている場合は、管理指針を満足しているものとみなす。対象とする周波数が以下の区分にまたがって存在する場合は、①(b)、②(a)及び(b)、③(a)及び(b)、並びに④(a)、(b)及び(c)については、電界強度及び磁界強度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求め、電力密度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の和を求める。これらの総和が1を超えてはならない。

なお、人体から20cm以内(300MHz以上の周波数では10cm以内)の空間で使用する機器等については、その状況ごとに個別の判断が必要である。基礎指針を超えるおそれがある場合には、局所吸収指針に基づく評価を行なうことが望ましい。

① 周波数が300MHz以下の場合

- (a) 10kHz から10MHz未満における刺激作用からの防護に関して、電磁放射源及び金属物体から20cm以上離れた空間において、人体の占める空間に相当する全領域の電界強度又は磁界強度の空間的な平均値(単純平均値)が、対応する環境(管理環境あるいは一般環境)の電磁界強度指針(2.2.1項表2(b)または表3(b))以下であること。その場合、局所的ばく露は電磁界強度指針値を上回ってもよいが、基本制限を上回ってはならない。

なお、表2あるいは表3の注1と注4は、本項でも適用する。

- (b) 100kHz から300MHz未満における熱作用からの防護(平均時間6分間の電磁界強度指針値)に関して、電磁放射源及び金属物体から20cm以上離れた空間において、人体の占める空間に相当する全領域の電力密度分布の空間的な平均値(電界強度又は磁界強度の場合は自乗平均値の平方根である。)が、対応する環境(管理環境あるいは一般環境)の電磁界強度指針(2.2.1項表2(a)または表3(a))以下であること。

なお、表2あるいは表3の注1～注4は、本項でも適用する。

② 周波数が300MHzから1GHz未満の場合

- (a) 電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間において、人体の占める空間に相当する全領域の電力密度分布の空間的な平均値(電界強度又は磁界強度の場合は自乗平均値の平方根である。)が、対応する環境(管理環境あるいは一般環境)の電磁界強度指針(2.2.1 項)以下であること。
- なお、表 2 あるいは表 3 の注 3 及び注 4 は、本項でも適用する。
- (b) 四肢を除く人体の占める領域内における電力密度の空間的な最大値が、管理環境では 20mW/cm²以下(6 分間平均値)、一般環境では 4mW/cm²以下(6 分間平均値)であること。ただし、電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間のみを対象とする。
- なお、表 2 あるいは表 3 の注 3 及び注 4 は、本項でも適用する。
- ③ 周波数が 1GHz から 3GHz 未満の場合
- (a) 電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間において、人体の占める空間に相当する全領域の電力密度分布の空間的な平均値(電界強度又は磁界強度の場合は自乗平均値の平方根である。)が、対応する環境(管理環境あるいは一般環境)の電磁界強度指針(2.2.1 項)以下であること。
- なお、表 2 あるいは表 3 の注 3 及び注 4 は、本項でも適用する。
- (b) 四肢を除く人体の占める領域内における電力密度の空間的な最大値が、管理環境では 20mW/cm²以下(6 分間平均値)、一般環境では 4mW/cm²以下(6 分間平均値)であること。ただし、電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間のみを対象とする。
- なお、表 2 あるいは表 3 の注 3 及び注 4 は、本項でも適用する。
- (c) 頭部に入射する電力密度の空間的な最大値が、管理環境では 10mW/cm²以下(6 分間平均値)、一般環境では 2mW/cm²以下(6 分間平均値)であること。ただし、電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間のみを対象とする。
- なお、表 2 あるいは表 3 の注 3 及び注 4 は、本項でも適用する。
- ④ 周波数が 3GHz 以上の場合
- (a) 電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間において、人体の占める空間に相当する全領域の電力密度分布の空間的な平均値(電界強度又は磁界強度の場合は自乗平均値の平方根である。)が、対応する環境(管理環境あるいは一般環境)の電磁界強度指針(1.2.1 項)以下であること。
- なお、表 2 あるいは表 3 の注 3 及び注 4 は、本項でも適用する。
- (b) 電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間での体表に入射する電力密度の空間的な最大値が、管理環境の場合は 50mW/cm²以下、一般環境の場合は 10mW/cm²以下(いずれも 6 分間平均値)であること。
- なお、表 2 あるいは表 3 の注 3 及び注 4 は、本項でも適用する。
- (c) 電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間での眼に入射する電力密度が、管理環境の場合は 10mW/cm²以下(6 分間平均値)、一般環境の場合は 2mW/cm²以

下(6分間平均値)であること。

なお、表2あるいは表3の注3及び注4は、本項でも適用する。

以上の各条件を表4-1に示す。

表4-1 不均一又は局所的にさらされる場合の補助指針

	10kHz ~100kHz	100kHz~ 10MHz	10MHz~ 300MHz	300MHz ~1GHz	1GHz~3GHz	3GHz~ 300GHz
電磁界強度の 単純平均値 (刺激作用)	管理環境：表2(b)の電磁界 強度指針値以下 (注1と注4も適用) 一般環境：表3(b)の電磁界 強度指針値以下 (注1と注4も適用)					
電磁界強度の 空間的平均値 (熱作用)	管理環境：表2(a)の電磁界強度指針値以下(注1から注4も適用) 一般環境：表3(a)の電磁界強度指針値以下(注1から注4も適用)					
電磁界強度の 空間的最大値			四肢以外： 管理環境：20mW/cm ² 一般環境：4mW/cm ²		体表： 管理環境： 50mW/cm ² 一般環境： 10mW/cm ²	
					頭部： 管理環境： 10mW/cm ² 一般環境： 2mW/cm ²	
適用する空間	電磁放射源、金属物体から20cm以上離れた 人体の占める空間		電磁放射源、金属物体から10cm以上離れた 人体の占める空間			

(2) 接触電流に関する指針

(a) 管理環境で接触ハザードが防止されていない場合

- ①10kHz から 10MHz までの周波数においては、測定された接触電流が次の条件を満たすこと。

・ 10kHz から 100kHz までの周波数においては、 $0.4f$ (kHz)mA 以下（実効値）。

・ 100kHz から 10MHz までの周波数においては、40mA 以下（実効値）。

ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の和を求め、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均（付属書参照）を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

②100kHz から 15MHz までの周波数においては、測定された接触電流が 100mA 以下（平均時間 6 分間）であること。ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

※100kHz から 10MHz においては、①と②の両方を満たす必要がある。

(b) 一般環境で接触ハザードが防止されていない場合

①10kHz から 10MHz までの周波数において、極端に大きな非接地金属体に電流が誘導されるような場合や、磁界の影響による接触電流が想定される場合等においては、測定された接触電流が次の条件を満たすこと。

・ 10kHz から 100kHz までの周波数においては、 $0.2f$ (kHz)mA 以下（実効値）。

・ 100kHz から 10MHz までの周波数においては、20mA 以下（実効値）。

ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の和を求め、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均（付属書参照）を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

②100kHz から 15MHz までの周波数においては、測定された接触電流が 45mA 以下（平均時間 6 分間）であること。ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

※100kHz から 10MHz においては、①と②の両方を満たす必要がある。

(3) 足首誘導電流に関する指針

(a) 管理環境で非接地条件を満たさない場合

3 MHz から 300MHz までの周波数で測定された足首における誘導電流（平均時間 6 分間）が、片足当たりで 100mA 以下であること。

ただし、足首誘導電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求め、これらの総和が 1 を超えてはならない。

(b) 一般環境で非接地条件を満たさない場合

3 MHz から 300MHz までの周波数で測定された足首における誘導電流（平均時間 6 分間）が、片足当たりで 45mA 以下であること。

ただし、誘導電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求め、これらの総和が 1 を超えてはならない。

■参考文献

報告書本文

- [1] ICNIRP 1998 Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) *Health Phys.*, vol.74, pp.494-522, 1998.
- [2] IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, C95-1, 2005.
- [3] Hashimoto Y, Hirata A, Morimoto R, Aonuma S, Laakso I, Jokela K, Foster K R. On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz. *Phys. Med. Biol.* 2017; 62(8): 3124-38.
- [4] Foster K R, Ziskin M C, Balzano Q. Thermal modeling for the next generation of radiofrequency exposure limits: commentary. *Health Phys.* 2017; 113(1): 41-53.
- [5] Alekseev S I and Ziskin S I. Influence of blood flow and millimeter wave exposure on skin temperature in different thermal model. *Bioelectromagnetics* 2009; 30 (1): 52–8.
- [6] Sasaki K, Mizuno M, Wake K, and Watanabe S. Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz. *Phys. Med. Biol.* 2017; 62 (15): 6993-7010.
- [7] Kanazaki A, Hirata A, Watanabe S and Shirai H. Parameter variation effects on temperature elevation in a steady-state, one-dimensional thermal model for millimeter wave exposure of one and three-layer human tissue. *Phys. Med. Biol.* 2010; 55 (16): 4647–4659.
- [8] 電波防護指針の在り方に関する検討作業班（第9回）資料 9-3
- [9] M C Ziskin et.al., Tissue models for RF exposure evaluation at frequencies above 6 GHz., *Bioelectromagnetics.* 2018 Apr;39(3):173-189.

参考資料 1 眼球への障害閾値の検索（動物）について

- [1] 情報通信審議会答申 諮問第 2035 号 「「電波防護指針の在り方」のうち「低周波領域（10kHz 以上 10MHz 以下）における電波防護指針の在り方」（2015 年）
- [2] Rosenthal S. W., Birenbaum L., Kaplan I. T., Metlay W., Snyder W. Z. and Zaret M. M. Effects of 35 and 107 GHz CW Microwaves on the rabbit eye, *Biological effects of electromagnetic waves. Selected Papers of the USNC/URSI Annual Meeting, Boulder, Colorado, October 1975* Rockville, Maryland, US Department of Health, Education, and Welfare, HEW Publication (FDA) 77-8010, vol. 1, pp. 110-128, 1976.
- [3] Chalfin S., D'Andrea J. A., Comeau P. D., Belt M. E., Hatcher D. J., Millimeter wave absorption in the nonhuman primate eye at 35 GHz and 94 GHz, *Health Phys*, vol. 83, pp. 83-90, 2002.
- [4] Kojima M., Suzuki Y., Sasaki K., Taki M., Wake K., Watanabe S., Mizuno M., Tasaki T., Sasaki H. Ocular Effects of Exposure to 40, 75, and 95 GHz Millimeter Waves. *J Infrared Milli Terahz Waves*, <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0497-z>
- [5] Kojima M, Suzuki Y, Tsai C-Y, Sasaki K, Wake K, Watanabe S, Taki M, Kamimura Y, Hirata A, Sasaki

K, Sasaki H. Characteristics of ocular temperature elevations after exposure to quasi- and millimeter waves (18-40 GHz). *J Infrared Milli Thrahz Waves*, vol. 36, pp. 390-399, 2015.

- [6] 電気通信技術審議会答申 諮問第 89 号「電波利用における人体防護の在り方」(1997 年)
- [7] Demers P, Findlay R, Foster K, Kolb B, Moulder J, Nicol A-M, Prato F, and Stam R. A review of safety code 6 (2013): Health Canada's Safety Limits for Exposure to Radiodfrequency code 6 (2013): Health Canada's Safety Limits for Exposure to Radiodfrequency Fields. The Royal Society of Canada. 2014.
- [8] ICNIRP, "Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 μm," *Health Phys.*, vol. 105, no.3, pp. 271-295, 2013.

参考資料 2 皮膚への障害閾値の検索（動物）について

- [1] 移動通信システムの高度化、総務省ホームページ、
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/html/nc263210.html>
- [2] 電気通信技術審議会答申 諮問第 38 号「電波利用における人体の防護指針」(平成 2 年 6 月)、総務省ホームページ、<http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/material/dwn/guide38.pdf>
- [3] Kodera S, Gomez-Tames J, Hirata A, Masuda H, Arima T, Watanabe S. Multiphysics and Thermal Response Models to Improve Accuracy of Local Temperature Estimation in Rat Cortex under Microwave Exposure. *IJERPH* 14: 358-18, 2017.
- [4] 創傷・熱傷ガイドライン委員会報告-6: 熱傷診療ガイドライン, 日本皮膚科学会ガイドライン, 日本皮膚科学会誌:121(14), 3279-3306, 2011.

参考資料 3 皮膚温感閾値の検索（ヒト）について

- [1] 情報通信審議会答申 諮問第 2035 号「「電波防護指針の在り方」のうち「低周波領域（10kHz 以上 10MHz 以下）における電波防護指針の在り方」(2015 年)
- [2] Elder J. A. and Cahill D. F. (eds.), 1984, *Biological Effects of Radio Frequency Radiation*, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park. NC27711, Document EPA-600/8-83-026F.
- [3] 香西将樹、西方敦博、酒井泰二、渡辺聡一、榎本博之、宇川義一、"60GHz ミリ波集束ビーム曝露による掌の温熱感しきい値の測定"、*信学論 B*, vol. J93-B, no. 10, pp. 1456-1465, 2010.
- [4] D. W. Blick, E. R. Adair, W. D. Hurt, C. J. Sherry, T. J. Walters and J. H. Merritt, "Thresholds of microwave-evoked warmth sensations in human skin," *Bioelectromagnetics*, vol. 18, no. 6, pp. 403-409, 1997.

別添

諮問第2035号「電波防護指針の在り方」のうち
「高周波領域における電波防護指針の在り方」
に関する一部答申

情報通信審議会答申 諮問第 2035 号「電波防護指針の在り方」のうち「低周波領域（10kHz 以上 10MHz 以下）における電波防護指針の在り方」（平成 27 年 3 月 12 日）における「1. 定義」及び「2.2.3 局所吸収指針」に関し、以下のとおり改定を行うことが適当である。

1. 定 義

電波防護指針の解釈に関しては、次の各号の定義に従うものとする。

- (1) 「電磁波」とは、電界及び磁界の振動が真空中や物質中を伝搬する波動の総称である。電磁波には低周波の電磁界から、通信に使われているいわゆる電波、太陽より放射される光（赤外線、可視光線、紫外線）、医療に応用される放射線（X線、 γ 線）などが含まれる。紫外線より波長の短い電磁波が電離放射線、波長の長いものが非電離放射線に大別される。
- (2) 「電波」とは、電波法第2条に定められた300万MHz(3,000GHz)以下の周波数の電磁波をいう。電波防護指針においては、10kHzから300GHzまでの周波数の電波を対象とする。
- (3) 「電波防護指針」とは、電波利用において人体が電磁界（周波数の範囲は10kHzから300GHzまでに限る。）にさらされるととき、その電磁波が人体に好ましくないと考えられる生体作用を及ぼさない安全な状況であるために推奨される指針のことをいう。
- (4) 「基礎指針」とは、人体が電磁界にさらされるととき人体に生じる各種の生体作用（体温上昇に伴う熱ストレス、高周波熱傷等）に基づいて、人体の安全性を評価するための指針をいう。
- (5) 「基本制限」とは、健康への有害な影響に至る可能性のある電波ばく露による生体内現象と直接関連する物理量についての制限値をいう。
- (6) 「管理指針」とは、基礎指針及び基本制限を満たすための実測できる物理量（電界強度、磁界強度、磁束密度、電力密度、電流及び比吸収率）で示した、実際の評価に用いる指針のことをいう。管理指針は、さらに電磁界強度指針、補助指針及び局所吸収指針から構成される。
- (7) 「電磁界強度指針」とは、対象とする空間における電界強度、磁界強度、電力密度及び磁束密度によって、当該空間の安全性を評価するための指針をいう。
- (8) 「局所吸収指針」とは、主に身体に極めて近接して使用される無線機器等から発射される電磁波により、身体の一部が集中的に電磁界にさらされる場合において、基礎指針に従った詳細評価を行うために使用する指針をいう。
- (9) 「補助指針」とは、電磁界強度指針を満足しない場合において、基礎指針に従った詳細評価を行うために使用する指針をいう。電磁界にさらされる状況（不均一、局所、表面など）、対象とする生体作用（接触電流及び誘導電流）、電波発射源の属性（空中線電力及び周波数帯）が明らかな場合、これらの状況に基づき電磁界強度指針の適用を緩和又は除外する形で表した指針である。
- (10) 「管理環境」とは、人体が電磁界にさらされている状況が認識され、電波の放射源を特定できるとともに、これに応じた適切な管理が行える条件を指す。例えば、電波を日常的に取り扱う環境（放送送信所、高周波加工所等）における作業者が、電磁界にさらされているケース等に適用するものである。管理環境

は、平成2年の電波防護指針の条件Pに相当する。

- (11) 「一般環境」とは、人体が電磁界にさらされている状況の認識や適正管理等が期待できず、不確定な要因があるケース（環境）を指す。一般の居住環境等において住民が電磁界にさらされているケース等がこれに該当する。このため適用する指針においては、一般環境は管理環境に比べて厳しい値となっている。一般環境は、平成2年の電波防護指針の条件Gに相当する。
- (12) 「比吸収率（SAR: Specific Absorption Rate）」とは、生体が電磁界にさらされることによって単位質量の組織に単位時間に吸収されるエネルギー量をいう。SARを全身にわたり平均したものを「全身平均SAR」、人体局所の任意の組織1g又は10gにわたり平均したものを「局所SAR」という。
- (13) 「電磁界」とは、電界、磁界の総称をいう。
- (14) 「電界強度」とは、電磁界の電界の強さをいう。
- (15) 「磁界強度」とは、電磁界の磁界の強さをいう。
- (16) 「電力密度」とは、電磁波伝搬の方向に垂直な単位面積当たりの通過電力をいう。入射電力密度の評価は、人のいない状態で人の存在する可能性のある全空間を対象とすることを原則とする。
- (17) 「誘導電流」とは、電磁誘導によって流れる電流。ここでは人体が電磁界にさらされることにより人体内部に誘導される電流をいう。
- (18) 「接触電流」とは、電磁界中に置かれた非接地導電物体に接地された人体が触れることによって接触点を介して流れる電流をいう。
- (19) 「接触ハザード」とは、潜在的に接触電流を生じさせるような状況をいう。
- (20) 「非接地条件」とは、誘導電流が大地へ流れないような大地の影響が無視できる条件をいう。
- (21) 「均一ばく露」とは、人体が存在する空間領域の電磁界がほぼ均一とみなせる場合であって、全身がその電磁界にさらされることをいう。この場合、自由空間インピーダンスが 120π [Ω]とならない場合も含まれる。自由空間中では、波源からの距離が身長に比べ十分大きい場合（例えば、0.3MHz以下の周波数では15m以上、0.3MHzから300MHzまでの周波数では10m以上、300MHz以上の周波数では5m以上）であれば均一とみなす。
- (22) 「不均一ばく露」とは、均一ばく露とみなせない場合をいう。
- (23) 「局所ばく露」とは、体の一部が集中的に電磁界にさらされる場合をいう。人体の大きさより小さいアンテナのごく近傍での照射や波長の短い電波によるスポット的な照射などの場合を含む。
- (24) 「全身ばく露」とは、局所に偏らず全身が電磁界にさらされる場合をいう。必ずしも均一とは限らないが局所ばく露ではない場合に相当する。
- (25) 「平均時間」とは、指針値への適合性を評価するために、着目した生体作用に基づき設定した測定のための時間をいう。電波防護指針で用いる平均時間は、

刺激作用においては1秒以内、熱作用においては6分間である。

- (26) 「遠方界」とは、電磁波源からの距離が、 $2D^2/\lambda$ 又は $\lambda/2\pi$ のいずれよりも遠い領域にあり、反射又は散乱がない状態の電磁界をいう。ここで、 D はアンテナの最大寸法、 λ は自由空間波長とする。
- (27) 「近傍界」とは、遠方界とならない領域の電磁界をいう。
- (28) 「実効値」とは、周期波形1周期の全体にわたって波形の自乗の平均をとり、その平方根をとった値をいう。周期的に変化する電磁界の電界強度、磁界強度の実効値は、ジュール熱と関連する値である。

2.2.3 局所吸収指針

(a) 適用範囲

本指針は、周波数100kHzから300GHzまでに適用する。

局所吸収指針の主な対象は、携帯電話端末等の小型無線機であり、電磁放射源に寄与するアンテナや筐体が人体に極めて近接して使用される場合を想定している。

具体的には、本指針は、電磁放射源（主にアンテナ）や放射に関わる金属（筐体等）と人体との距離が20cm以内の場合に適用される。また、それ以外の距離においても、電磁界強度指針、補助指針又は局所吸収指針のいずれか1つを満たせば基礎指針を満たしていると判断できる。ただし、300MHzから300GHzまでの周波数において、10cm以上20cm以内の距離における電磁界強度指針又は補助指針の適用は排除されない。

なお、100kHz以上6GHz以下の周波数において、空中線電力の平均電力が20mW以下の無線局については、仮に無線局の全出力が身体のごく一部に吸収される場合でも、局所SARの電波防護指針を満たしており、評価の必要性はないものと考えられる。また、管理環境においては、同100mW以下の無線局については、評価の必要性がないものと考えられる。

6GHz以上30GHz以下の周波数において、空中線電力の平均電力が8mW以下の無線局については、仮に無線局の全出力が身体のごく一部に吸収される場合でも、入射電力密度の電波防護指針を満たしており、評価の必要性はないものと考えられる。また、管理環境においては、同40mW以下の無線局については、評価の必要性がないものと考えられる。

30GHz超300GHz以下の周波数において、空中線電力の平均電力が2mW以下の無線局については、仮に無線局の全出力が身体のごく一部に吸収される場合でも、入射電力密度の電波防護指針を満たしており、評価の必要性はないものと考えられる。また、管理環境においては、同10mW以下の無線局については、評価の必要性がないものと考えられる。

(b) 管理環境

次の要件を全て満たすこと。

- <1> 全身平均 SAR の任意の 6 分間平均値が、0.4W/kg 以下であること。
- <2> 6 GHz 以下の周波数では、任意の組織 10g 当りの局所 SAR (6 分間平均値) が 10W/kg (四肢では 20W/kg) を超えないこと。
- <3> 6 GHz 以上 30GHz 以下の周波数では、任意の体表面 (人体の占める空間に相当する領域中の任意の面積) 4 cm² 当りの入射電力密度 (6 分間平均値) が 10mW/cm² を超えないこと。
- <4> 30GHz 超 300GHz 以下の周波数では、任意の体表面 (人体の占める空間に相当する領域中の任意の面積) 1 cm² 当りの入射電力密度 (6 分間平均値) が 10mW/cm² を超えないこと。
- <5> 複数の周波数の電波に同時にばく露する場合には、前項<2>、<3>及び<4>の各周波数成分の指針値に対する割合の総和が 1 を超えてはならない。
- <6> 接触ハザードが防止されていない場合は、100kHz から 10MHz までの周波数において接触電流が 40mA 以下 (実効値) であり、100kHz から 100MHz までの周波数において接触電流が 100mA 以下 (平均時間 6 分間) であること。
ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、100kHz から 10MHz までの周波数については、その各周波数成分の指針値 (40mA (実効値)) に対する割合の和の総和を求めるか、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。さらに、100kHz から 100MHz までの周波数については、その各周波数成分の指針値 (100mA (平均時間 6 分間)) に対する割合の自乗和を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。
- <7> 100kHz から 10MHz において体内電界強度が $2.7 \times 10^{-4} \times f(\text{Hz}) \text{V/m}$ を超えないこと。

ただし、体内電界強度がこの指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の和を求めるか、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均 (付属書参照) を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

なお、周波数 100MHz 以上の無線局は、<6>に述べた接触電流に関する指針に基づく評価を行う必要はない。また、周波数 10MHz 以上の無線局は、<7>に述べた体内電界強度に関する指針に基づく評価を行う必要はない。

(c) 一般環境

次の要件を全て満たすこと。

- <1> 全身平均 SAR の任意の 6 分間平均値が、0.08W/kg 以下であること。
- <2> 6 GHz 以下の周波数では、任意の組織 10g 当たりの局所 SAR（6 分間平均値）が 2 W/kg（四肢では 4 W/kg）を超えないこと。
- <3> 6 GHz 以上 30GHz 以下の周波数では、任意の体表面（人体の占める空間に相当する領域中の任意の面積）4 cm²当りの入射電力密度（6 分間平均値）が 2 mW/cm²を超えないこと。
- <4> 30GHz 超 300GHz 以下の周波数では、任意の体表面（人体の占める空間に相当する領域中の任意の面積）1 cm²当りの入射電力密度（6 分間平均値）が 2 mW/cm²を超えないこと。
- <5> 複数の周波数の電波に同時にばく露する場合には、前項<2>、<3>及び<4>の各周波数成分の指針値に対する割合の総和が 1 を超えてはならない。
- <6> 接触ハザードが防止されていない場合は、100kHz から 10MHz までの周波数において接触電流が 20mA 以下（実効値）であり、100kHz から 100MHz までの周波数においては接触電流が 45mA 以下（平均時間 6 分間）であること。
ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、100kHz から 10MHz までの周波数については、その各周波数成分の指針値（20mA（実効値）に対する割合の和を求めると、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均を求めると、これらの総和が 1 を超えてはならない。さらに、100kHz から 100MHz までの周波数については、その各周波数成分の指針値（45mA（平均時間 6 分間）に対する割合の自乗和を求めると、これらの総和が 1 を超えてはならない。
- <7> 100kHz から 10MHz までにおいて体内電界強度が $1.35 \times 10^{-4} \times f$ (Hz) V/m を超えないこと。

ただし、体内電界強度がこの指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の和を求めると、各周波数成分の指針値に対する割合について指針値の周波数特性に応じた適切な重み付け平均（付属書参照）を求めると、これらの総和が 1 を超えてはならない。

なお、周波数 100MHz 以上の無線局は、<6>に述べた接触電流に関する指針に基づく評価を行う必要はない。また、周波数 10MHz 以上の無線局は、<7>に述べた体内電界強度に関する指針に基づく評価を行う必要はない。