

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（案）

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（案） 目次

審議事項	1
委員会及び作業班の構成	1
審議経過	1
審議概要	3
第1章 局所吸収指針の概要	3
1.1 審議の背景	3
1.2 電波防護指針	3
1.3 現在の局所吸収指針	4
第2章 3GHz以上の周波数についての局所吸収指針の在り方	5
2.1 3GHz以上の局所吸収指針の課題	5
2.2 3GHz以上の局所吸収指針についての検討	6
2.3 電波防護指針全体の整合性	7
第3章 今後の検討課題	8
審議結果	8

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局所吸収指針委員会構成員
別表3	情報通信審議会情報通信技術分科会局所吸収指針委員会局所吸収指針作業 班構成員
参考資料	局所吸収指針概要（現行）と局所吸収指針概要（改定案）

審議事項

電波利用環境委員会は、情報通信審議会諮問第2030号「局所吸収指針の在り方」(平成21年7月28日諮問)について審議を行った。

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及び別表2のとおり。

なお、検討の促進を図るため、委員会の下に作業班を設けて検討を行った。作業班の構成については別表3のとおり。

審議経過

1 局所吸収指針委員会(平成23年1月17日まで)

第1回(平成21年8月24日)

委員会の運営方法について審議を行ったほか、審議の促進を図るため、作業班を設置した。また、局所吸収指針の概要及び比吸収率(SAR)測定方法の概要について説明が行われた。

第2回(平成22年7月1日)

作業班から審議状況の報告がなされ、質疑応答が行われた。

第3回(平成22年12月7日)

局所吸収指針の改定案について審議を行った。

SAR: 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。

2 電波利用環境委員会(平成23年1月18日から)

第1回(平成23年2月14日)

委員会報告の審議及び取りまとめを行った。

3 局所吸収指針委員会 局所吸収指針作業班（平成23年1月17日まで）

第1回（平成21年9月4日）

作業班の運営方法について審議を行った。また、局所吸収指針の概要及び比吸収率（SAR）測定方法の概要について説明が行われた。

第2回（平成21年11月27日）

局所吸収指針の改定に向けた検討事項について整理を行った。

第3回（平成22年3月26日）

第2回会合で整理した各検討事項について審議を行った。

第4回（平成22年5月18日）

第3回会合に引き続き局所吸収指針の改定に向けた審議を行い、委員会に対する審議状況報告の案について取りまとめを行った。

第5回（平成22年11月9日）

これまでの作業班における審議結果を踏まえ、局所吸収指針の改定案について審議を行った。

審議概要

第1章 局所吸収指針の概要

1.1 審議の背景

無線通信技術の飛躍的な発展に伴い、近年、携帯電話をはじめとする個人利用の無線局が爆発的に普及し、無線局数は1億局を超えるまでに増加しており、電波利用は質・量ともに飛躍的に発展している状況である。

このように、電波利用がますます日常生活と密接になってきている一方で、携帯電話等の無線設備から発射される電波が人体や電子機器等に与える影響に対する関心も非常に高くなってきており、より安心して安全に電波を利用できる環境の整備がますます重要になっている。

このような中、我が国においてはこれまで、電気通信技術審議会答申「電波利用における人体の防護指針」(平成2年6月)において、基地局や放送局鉄塔等に適用する電波防護指針(電磁界強度指針)が策定され、また、電気通信技術審議会答申「電波利用における人体防護の在り方」(平成9年4月)において、携帯電話端末など身体に近接して使用される無線機器に適用する電波防護指針(局所吸収指針)が策定されており、それら指針に基づき電波法令による規制を設けているところである。

このうち、局所吸収指針においては、3GHzまでの周波数帯を適用範囲としているが、現在、無線LANの利用の進展や第4世代携帯電話等において3GHz以上での電波の使用が想定されていることから、この周波数帯についての局所吸収指針の策定が必要となっている。

このような状況を踏まえ、3GHz以上の周波数についての局所吸収指針の在り方について諮問が行われたものである。

なお、電波の安全性に関するこれまでの研究で得られた知見では、電波防護指針に定められている基準値を超えない強さの電波により健康に悪影響を及ぼさずという確固たる証拠は認められないとされており、本審議では、当該基準値そのものの見直しについては対象とはしていない。

1.2 電波防護指針

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」と「管理指針」から構成されている。

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、電流刺激、高周波熱傷等)に基づいて、人体の安全性を評価

するための指針である。但し、実際の評価に用いるのではなく、管理指針の根拠を与える指針である。一方、管理指針は、基礎指針を満たすための実測できる物理量（電界強度、磁界強度、電力束密度、電流及びSAR）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、基礎指針を満たすための電界強度、磁界強度、電力束密度を導く際に、簡易に評価できるように安全側の仮定を用いており、これを超える数値が測定されても防護指針を満たさないとはいえない。この場合は、補助指針を用いる。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をいう。

局所吸収指針は、携帯電話端末など身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身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。

1.3 現在の局所吸収指針

現行の局所吸収指針は次の通り定められている。

(1) 適用範囲

本指針は、周波数100kHz から3GHz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。

本指針は、電磁放射源（主にアンテナ）や金属（筐体等）と人体との距離が、周波数100kHz以上300MHz未満で20cm以内、周波数300MHz以上3GHz未満で10cm以内の場合に原則として適用される。また、それ以外の距離においても、従来の管理指針（電磁界強度指針および補助指針）あるいは局所吸収指針のどちらか一方を満たせば基礎指針を満たしていると判断できる。

(2) 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、 0.4 W/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 10 W/kg （四肢では 20 W/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。

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き評価を行う必要はない。

(3) 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、 0.08 W/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 2 W/kg (四肢では 4 W/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。

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き評価を行う必要はない。

第2章 3GHz以上の周波数についての局所吸収指針の在り方

2.1 3GHz以上の局所吸収指針の課題

携帯電話端末等の身体に近接して使用する無線設備に対し、300MHz以上3GHz未満の周波数範囲において、主に身体から10cm以内(周波数100kHz以上300MHz未満では20cm以内)に近接して使用される無線設備に対しては局所吸収指針が適用されている。しかし、その適用される周波数の上限である3GHz以上の周波数では、局所吸収指針は適用されない。したがって、現行の電波防護指針の管理指針においては、3GHz以上の周波数については、電磁界強度指針又は補助指針が適用される。しかし、これらの指針値は電磁放射源及び金属物体から10cm以上離れた空間で適用される。すなわち、現行の電波防護指針には3GHz以上で身体から10cm未満に近接して使用される無線設備に適用できる管理指針が存在していない。

このことから、3GHz以上で身体から10cm未満に近接して使用される無線設備に適用できる管理指針が必要である。このため、局所吸収指針の在り方として、現

行の管理指針を改定しなければならない。これには以下の2つの案が考えられる。

- (1) 電磁界強度指針(補助指針)の離隔距離条件(10cm以上)を変更し、より身体に近接した場合でも適用する。
- (2) 現行の局所吸収指針の適用可能周波数の上限(3GHz)を変更し、より高い周波数でも適用する。

本委員会では、これらの妥当性及び適用条件の変更に伴う電波防護指針全体の整合性について審議を行ったところ、その概要について次節以降で述べる。

2.2 3GHz以上の局所吸収指針についての検討

2.2.1 電磁界強度指針(補助指針)の離隔距離変更の可能性

3GHz以上において電磁界強度指針(補助指針)は電磁放射源及び金属物体から10cm以上離れた空間で適用される。この離隔距離条件は次の現象を考慮して定められている。

- (1) 身体から10cm未満で使用される無線設備は、身体による影響を受けるため無線設備から放射される電磁界分布が変化してしまい、電磁界強度指針値(補助指針)が適用される身体が占める空間に入射する電磁界強度と実際に身体に近接して使用される無線設備から放射される電磁界強度が異なる可能性がある。
- (2) 電磁界強度を測定する測定装置自身が近傍に位置する無線設備と電磁氣的に結合して影響し合い、正確な電磁界強度の測定が困難となる。

しかし、離隔距離の条件は、波長との相対的な距離で決められるものであり、3GHz以上の周波数では波長が短くなることを考慮すれば、離隔距離を10cm未満とできる可能性がないとはいえない。さらに、電磁界強度指針(補助指針)が策定された1990年当時に比べて、現在は電磁界評価技術が進展しているところ、この離隔距離条件を緩和し、より身体に近接した無線設備に適用することが可能かどうか検討を行った。

この結果(詳細は別紙1のとおり)、3GHz以上6GHz以下の周波数において、身体との距離が10cm未満の無線設備に対して電磁界強度指針(補助指針)を適用するように改定することは妥当でないとの結果が示された。

2.2.2 局所吸収指針の適用可能上限周波数変更の妥当性

局所吸収指針は300MHzから3GHzまでの主に身体から10cm以内に近接して使用される無線設備に対して適用することができる。3GHzという適用可能上限周波数は局所吸収指針策定当時(平成9年)の無線設備の利用状況をふまえて設定されたものであるが、局所吸収指針を3GHz以上の周波数に拡張するためには次の問題について検討が必要となる。

- (1) 周波数が高くなると、身体の電波吸収分布における浸透深さが短くなり、より体表に集中した比吸収率分布となる。この場合に10g平均の局所SARが局所加熱の影響の指標として妥当かどうか。
- (2) 3GHz以上で局所SARが局所加熱の影響の指標として妥当と考えられる場合、適用可能な周波数範囲の上限値はどこまでか。

検討の結果(詳細は別紙2のとおり)、3GHz以上6GHz以下の周波数範囲において、身体から10cm以内で使用される無線設備に対して、現行の局所吸収指針が依然として適用可能であることが示された。

また、300MHz以上の周波数領域において、局所吸収指針は主に身体から10cm以内に近接して使用される無線設備に適用されているが、国際電気標準会議(IEC)を始め、諸外国で局所吸収指針の適用対象となっている「身体から20cm以内に近接して使用される無線設備」にも適用できることが確認された。

2.3 電波防護指針全体の整合性

提案する、現行の局所吸収指針の周波数範囲の拡張により、これまで適用可能な管理指針が存在していなかった3GHz以上6GHz以下で身体から10cm未満に近接して使用される無線設備に対して、電波防護指針への適合性確認が行うことが可能となる。

なお、提案する局所吸収指針の拡張では、これまでは300MHz以上の周波数では主に身体から10cm以内に近接して使用する無線設備を対象としていたものを、20cm以内に近接して使用する無線設備を対象を拡張している。このため、身体から10cm以上20cm以下の範囲で使用される無線設備については局所吸収指針と電磁界強度指針(補助指針)のどちらも適用することができる。

一般に、電磁界強度指針(補助指針)は電波の吸収が最大となる最悪条件を想定して指針値が定められているため、局所吸収指針を満足していても、電磁界強度指針(補助指針)を満たさない場合がある。局所吸収指針は、より基礎指針に近い評価を行うものであることから、この場合は電波防護指針を満たすと判断できる。したがって、

100kHz以上300MHz未満で身体から20cm以上離れた無線設備または300MHz以上6GHz以下で身体から10cm以上離れた無線設備に対しては、電磁界強度指針（補助指針）または局所吸収指針のいずれかを満足すれば、電波防護指針を満足していると判断できる。

第3章 今後の検討課題

今後、調査・研究等が進展し、科学的に裏付けされた根拠や新しい考え方が示され、世界保健機関（WHO）国際電磁界プロジェクトにおける健康リスク評価への反映、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）における国際ガイドラインの改定が行われた場合には、それに合わせて電波防護指針の内容を見直し、改定することが必要である。

審議結果

情報通信審議会諮問第2030号「局所吸収指針の在り方」（平成21年7月28日諮問）について、別添のとおり答申（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	ふじわら おさむ 藤原 修	名古屋工業大学工学研究科 教授
専門委員	あめみや ふじお 雨宮 不二雄	N T Tアドバンステクノロジー(株) EMCチーム主幹担当部長
"	あんどう まこと 安藤 真	東京工業大学大学院理工学研究科 教授
"	いけだ すみこ 池田 澄子	(社)全国消費生活相談員協会 専務理事
"	いづえ まさひろ 井上 正弘	一般社団法人関西電子工業振興センター
"	うえの しょうごう 上野 照剛	九州大学大学院工学研究院 特任教授
"	くまだ あきこ 熊田 亜紀子	東京大学大学院工学系研究科 准教授
"	くろだ みちこ 黒田 道子	東京工科大学コンピュータサイエンス学部 教授
"	しのづか たかし 篠塚 隆	(独)情報通信研究機構 EMCグループ
"	しらい ともゆき 白井 智之	名古屋市立大学大学院 医学研究科実験病態病理学 教授
"	たき まさお 多氣 昌生	首都大学東京大学院理工学研究科 教授
"	たなか けんじ 田中 謙治	(財)テレコムエンジニアリングセンター 常務理事
"	たまた かおる 玉田 薫	東北大学電気通信研究所 教授
"	つかはら ひとし 塚原 仁	日産自動車(株) 電子信頼性グループ主査
"	とくだ まさみつ 徳田 正満	東京大学大学院新領域創成科学研究科 客員共同研究員
"	のじま としお 野島 俊雄	北海道大学大学院情報科学研究科 教授
"	はせやま みき 長谷山 美紀	北海道大学大学院情報科学研究科 教授
"	はやし りょうじ 林 亮治	三菱電気(株) 情報技術総合研究所 光マイクロ波回路技術部専任
"	ふくなが かおり 福永 香	(独)情報通信研究機構 EMCグループ 研究マネージャー
"	ほり かずゆき 堀 和行	ソニー(株) 品質センター コンプライアンス推進G p課長
"	やまなか ゆきお 山中 幸雄	(独)情報通信研究機構 EMCグループリーダー
"	わたなべ そういち 渡邊 聡一	(独)情報通信研究機構 EMCグループ 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 局所吸収指針委員会 構成員
(平成23年1月17日まで)

(敬称略、専門委員は五十音順)

	氏名	主要現職
主査	あんどう まこと 安藤 真	東京工業大学大学院 理工学研究科 教授
主査代理	たき まさお 多氣 昌生	首都大学東京大学院 理工学研究科 教授
専門委員	いけだ すみこ 池田 澄子	(社)全国消費生活相談員協会 専務理事
"	うえの しょうごう 上野 照剛	九州大学大学院工学研究院 特任教授
"	おくら しんじ 小倉 紳治	モトローラ(株) 代表取締役社長
"	くまだ あきこ 熊田 亜紀子	東京大学大学院 工学系研究科 准教授
"	じょうない ひろし 城内 博	日本大学大学院 理工学研究科医療・福祉工学専攻 教授
"	しろい とむき 白井 智之	名古屋市立大学大学院 医学研究科実験病態病理学 教授
"	たけばやし とある 武林 亨	慶応義塾大学 医学部衛生学公衆衛生学教室 教授
"	たなか けんじ 田中 謙治	(財)テレコムエンジニアリングセンター 常務理事
"	のじま としお 野島 俊雄	北海道大学大学院 情報科学研究科 教授
"	はたの むつこ 波多野 睦子	東京工業大学大学院 理工学研究科 教授
"	ふくなが かおり 福永 香	(独)情報通信研究機構 電磁波計測研究センター 研究マネージャー
"	ほんだ よしお 本多 美雄	欧州ビジネス協会 電気通信機器委員会 委員長
"	わたなべ そういち 渡邊 聡一	(独)情報通信研究機構 電磁波計測研究センター 研究マネージャー

(計15名)

別表3

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
局所吸収指針作業班 構成員

(敬称略、構成員は五十音順)

	氏名	主要現職
主任	多氣 昌生	首都大学東京大学院 理工学研究科 教授
主任代理	上村 佳嗣	宇都宮大学大学院 工学研究科 准教授
構成員	池畑 政輝	(財)鉄道総合技術研究所 環境工学研究部 主任研究員
"	牛山 明	国立保健医療科学院 生活環境部 快適性評価室長
"	小島 正美	金沢医科大学 看護学部 准教授
"	佐藤 康仁	東京女子医科大学 公衆衛生学 助教
"	城内 博	日本大学大学院 理工学研究科 教授
"	西方 敦博	東京工業大学 教育工学開発センター 准教授
"	花島 律子	東京大学医学部附属病院 神経内科 助教
"	平田 晃正	名古屋工業大学大学院 工学研究科 准教授
"	藤原 晴海	(社)全国消費生活相談員協会 IT研究会 消費生活専門相談員
"	和氣 加奈子	(独)情報通信研究機構 電磁波計測研究センター 主任研究員

(計12名)

局所吸収指針概要（現行）

適用範囲： 本指針は、周波数 100 kHz から 3 GHz までに適用できる。

対象： 身体に近接して使用する小型無線機等に適用できる。

主に、周波数 100 kHz 以上 300 MHz 未満で、電磁放射源との距離 20 cm 以内

周波数 300 MHz 以上 3 GHz 未満で、電磁放射源との距離 10 cm 以内

	管理環境	一般環境
全身平均 SAR	0.4 W / kg	0.08 W / kg
局所 SAR	任意の組織 10 g 当たり 10 W / kg 20 W / kg (四肢)	任意の組織 10 g 当たり 2 W / kg 4 W / kg (四肢)
接触電流	接触ハザードが防止されていない場合 100 kHz から 100 MHz までの周波数 100 mA	接触ハザードが防止されていない場合 100 kHz から 100 MHz までの周波数 45 mA

(任意の 6 分間平均値)

接触電流に関して、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なる場合は、その周波数成分の指針値に対する割合での自乗和を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

局所吸収指針概要（改定案）

適用範囲： 本指針は、周波数 100 kHz 以上 6 GHz 以下で適用する。

対象： 主に身体から 20 cm 以内に近接して使用する無線設備に適用できる。

	管理環境	一般環境
全身平均 SAR	0.4 W / kg	0.08 W / kg
局所 SAR	任意の組織 10 g 当たり 10 W / kg 20 W / kg (四肢)	任意の組織 10 g 当たり 2 W / kg 4 W / kg (四肢)
接触電流	接触ハザードが防止されていない場合 100 kHz から 100 MHz までの周波数 100 mA	接触ハザードが防止されていない場合 100 kHz から 100 MHz までの周波数 45 mA

(任意の 6 分間平均値)

接触電流に関して、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なる場合は、その周波数成分の指針値に対する割合での自乗和を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

電磁界強度指針（補助指針）の離隔距離を小さくした場合の問題点

- 人体表面近傍の電磁波源と電磁界について

1. 検討すべき事項の整理

3 GHz 以上の周波数において、電磁界強度指針（補助指針）の離隔距離条件（現行は 10 cm 以上）を変更し、より身体に近接した電磁放射源にも適用することが妥当かどうかを検討する。この場合、電磁放射源近傍の電磁界を、人体が置かれるであろう距離で、人体の置かれていない条件で測定する必要がある。したがって、離隔距離を小さくした場合において、同測定によって実際に人体表面から入り込む有効電力密度が推定可能かどうかを検証する必要がある。

電磁界プローブを近づけると、電磁放射源の電流分布等を乱してしまう恐れがある。このことは、現行の離隔距離に対する根拠の一つであったが、光センサの利用などにより、電磁界を乱しにくいプローブが開発されればその影響を小さくすることは可能であり、この問題を離隔距離の制限に関するここでの検討には含めない。

以上より、次の 2 点について検討を行う。

- (1) 人体近傍では、人体表面での電波の反射により、電磁放射源の状態そのもの（送信アンテナであればアンテナ電流）が変化していることが予想される。電磁界強度指針（補助指針）では人体の置かれる位置に人体の存在しない条件で電磁界を測定するため、人体による影響がなく、異なる電磁界を測定してしまう恐れがある。そこで、平面電磁波が人体表面でどの程度反射されるかを数値計算により検討する。
- (2) 仮に、人体によって電磁放射源があまり変化しないか、変化を織り込める場合であっても、波長に比べて近距離にある波源近傍領域においては、自由空間での電磁界測定から推定される入射電力密度と、実際に人体表面から入り込む電力密度とでは、異なる様相を示すことが考えられる。そこで、人体に近接する電磁波源がつくる電磁界を数値計算し、電力密度や電磁界強度の関係を検討する。

2. 平面波と多層平板媒質モデルによる解析

多層無限平板媒質で模擬した人体と、それに平面電磁波が垂直入射するモデルを図 1 に示す。人体モデルは、皮膚層（厚さ 2 mm）、脂肪層（厚さ 10 mm）及び筋肉層（半無限厚）の 3 層構造とした。各組織に用いた電気定数を図 2 に示す。これに平面電磁波

が垂直入射するときの電磁界を計算した。

図3に、1GHzの垂直入射平面波に対する、電磁界振幅(上段)、z方向の電力密度(中段)、表面から深さzまでに消費される電力の割合(下段)を、それぞれ示す。人体表面の位置は $z = 10\text{ mm}$ である。電力密度は、入射電力密度で規格化した値である。同グラフより、入射電力のうち7割強が表面から入り、3割弱が反射されることが分かる。

同様に、3GHz、6GHz、10GHz、60GHzにおける結果を、図4、5、6、7にそれぞれ示す。

皮膚表面における電波の振幅反射係数を周波数の関数として示したものが図8の上段である。振幅反射係数は単調でない変化を示し、周波数3GHz以上6GHz以下では0.8以上と高い値を示す。これより、電磁放射源が人体に近接して置かれた場合、反射波の影響で電磁放射源に少なからぬ変化が生じることが予想される。

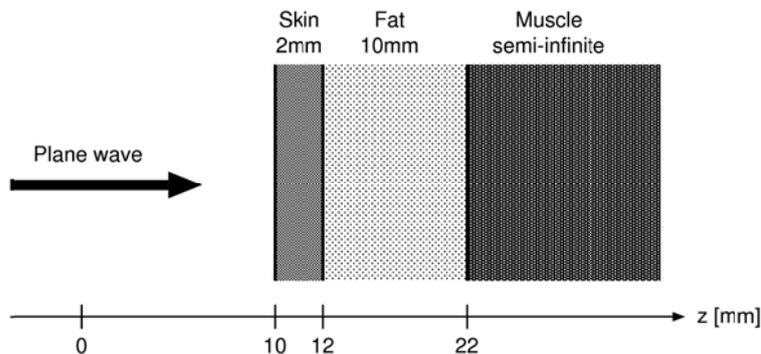


図1 多層平板媒質で模擬した人体と垂直入射平面波のモデル

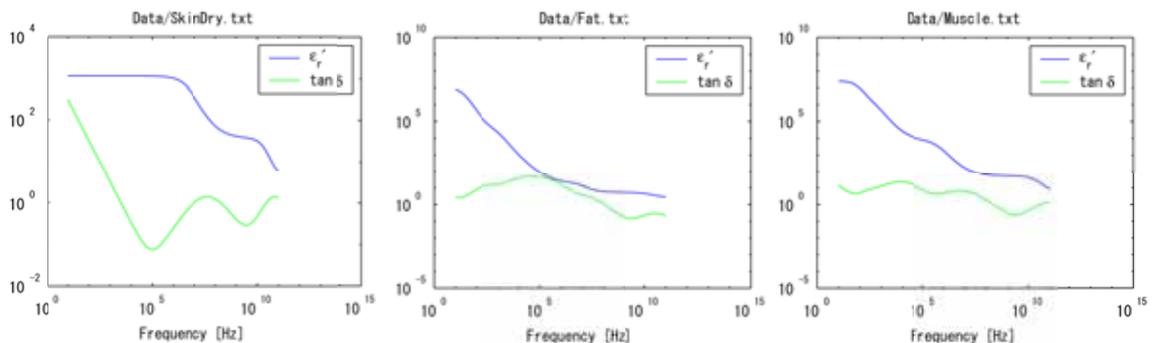


図2 計算に用いた皮膚(左)・脂肪(中央)・筋肉(右)の比誘電率と誘電正接 (Dielectric Properties of Body Tissues, Italian National Research Council, <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/> より)

参考として、図9は平板導体の近傍に置いたアンテナの電流の変化をモーメント法で計算した結果である。周波数6GHz、共振ダイポールアンテナの定電圧駆動、アンテナ

ナ素子と導体平板は平行、とした。導体平板のないときのアンテナ電流を100%とした。アンテナから平板導体までの距離が小さくなるにつれて電流の変化は大きくなる。人体の近傍に置かれたアンテナの電流もこれと似た変化をすると考えられ、人体表面の振幅反射係数0.8を考慮しても $\pm 2.5\%$ 程度の無視できない変化を生じることが推測される。

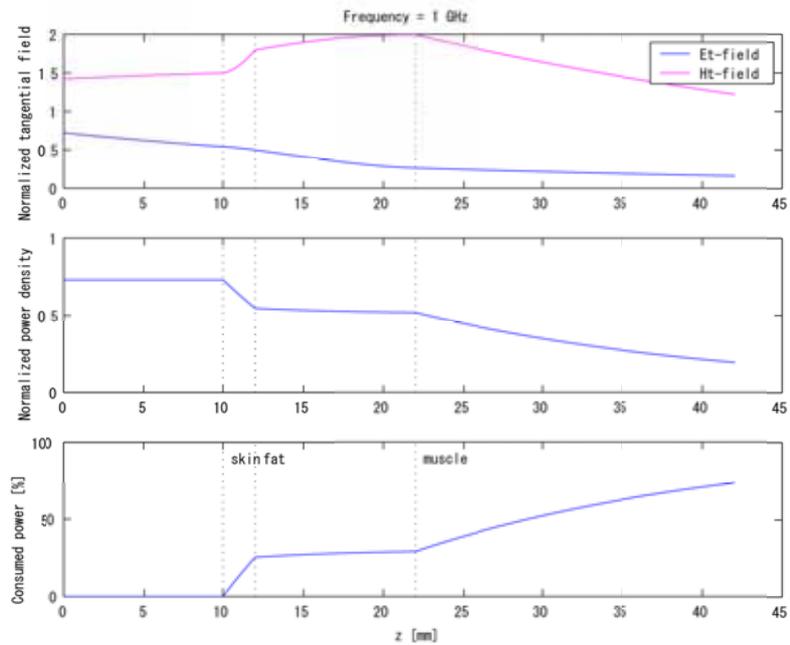


図3 1 GHzにおける、電磁界振幅（上段）、 z 方向の電力密度（中段）、表面から深さ z までに消費される電力の割合（下段）

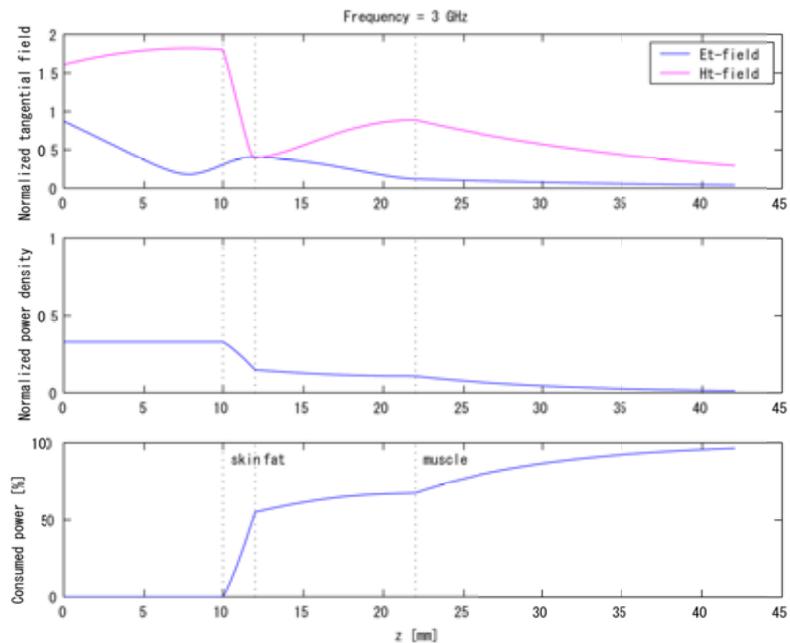


図4 3 GHzにおける、電磁界振幅（上段）、 z 方向の電力密度（中段）、表面から深さ z までに消費される電力の割合（下段）

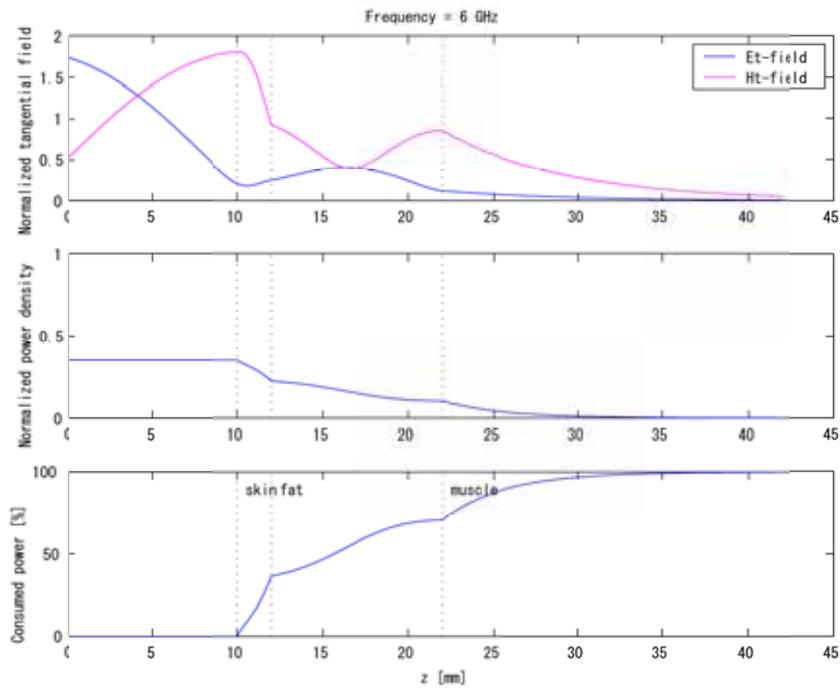


図5 6 GHzにおける、電磁界振幅（上段）、 z 方向の電力密度（中段）、表面から深さ z までに消費される電力の割合（下段）

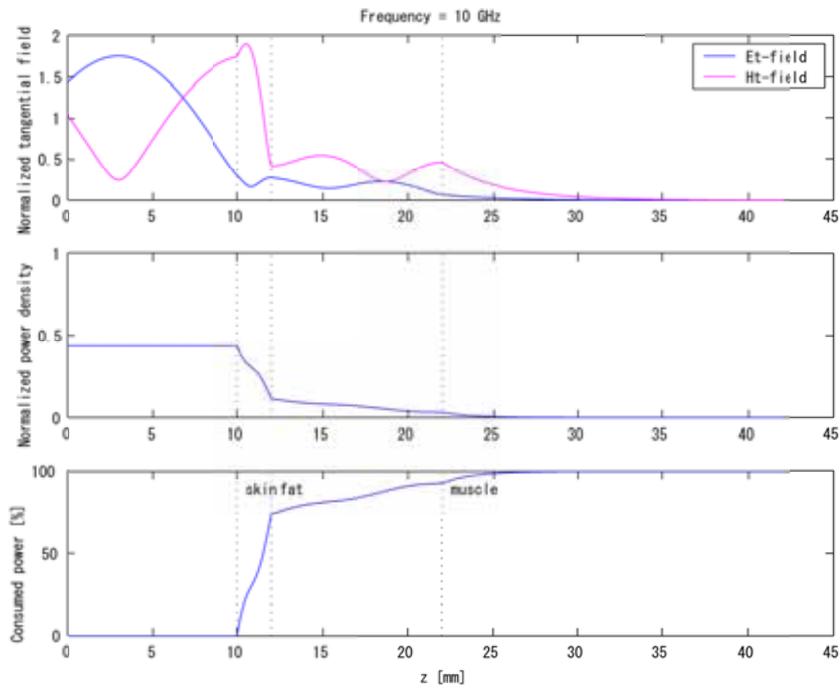


図6 10 GHzにおける、電磁界振幅（上段）、 z 方向の電力密度（中段）、表面から深さ z までに消費される電力の割合（下段）

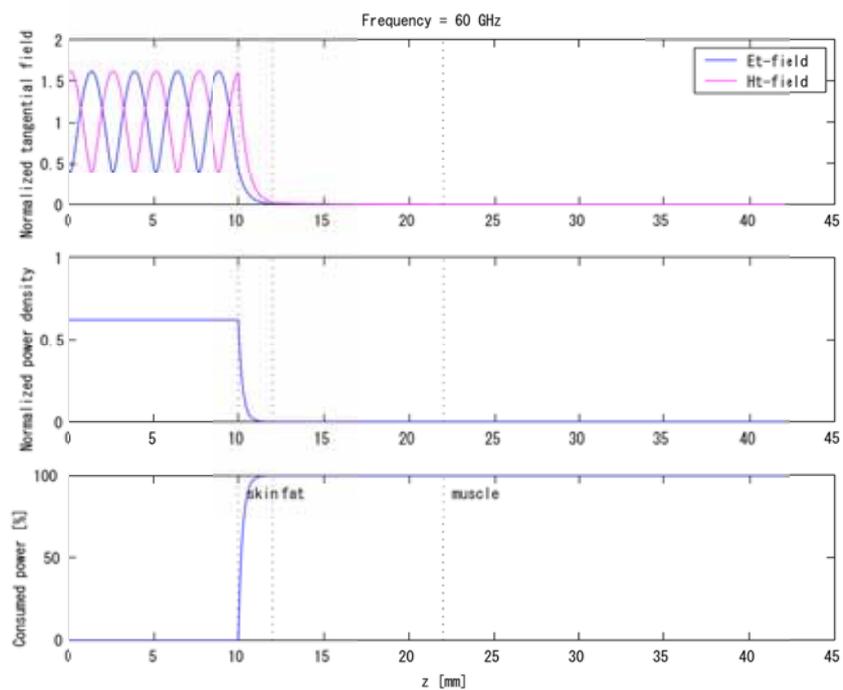


図7 60 GHzにおける、電磁界振幅（上段）、z方向の電力密度（中段）、表面から深さzまでに消費される電力の割合（下段）

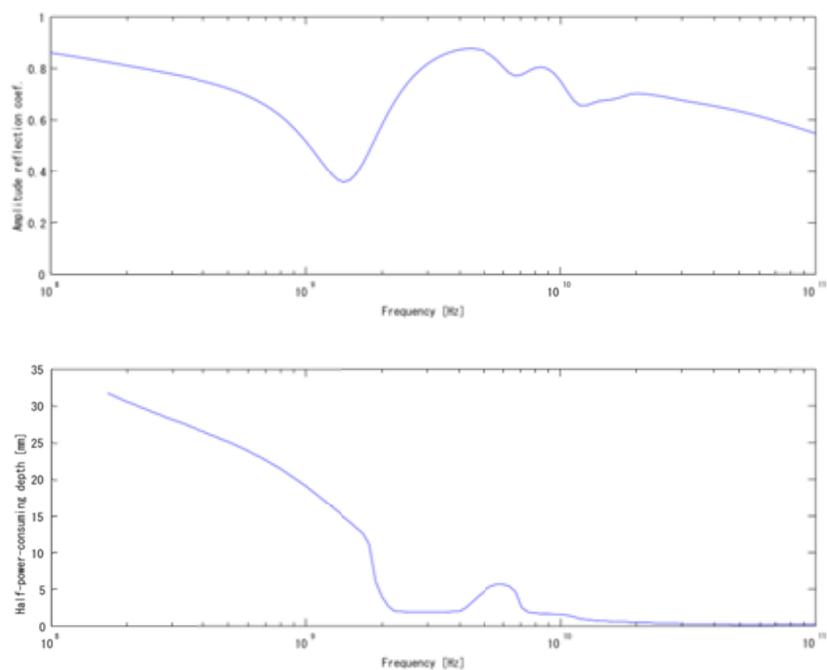


図8 振幅反射係数（上段）、電力を50パーセント消費する深さ（下段）

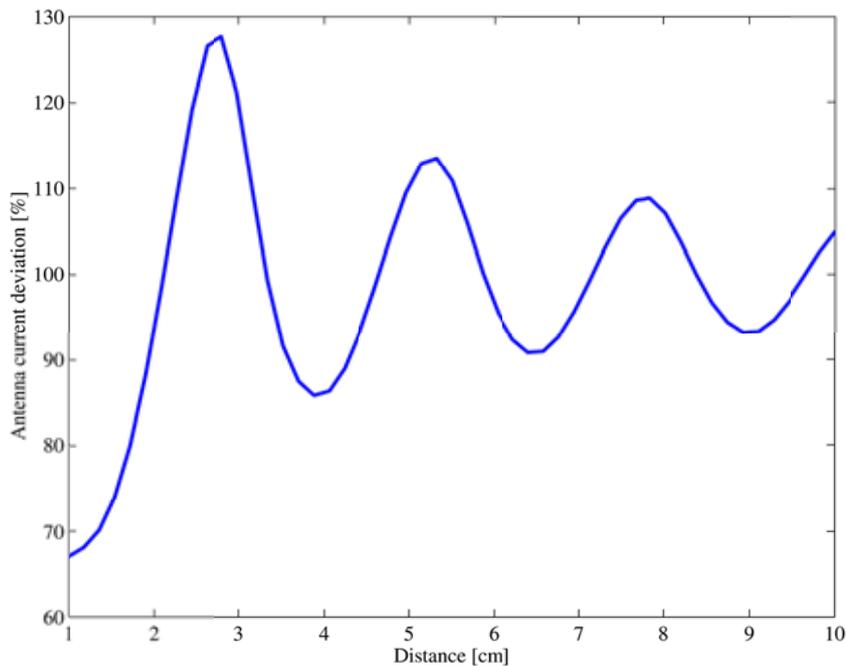


図9 平板導体近傍に平行に置かれた定電圧駆動共振ダイポールのアンテナ電流の距離に対する変化の様子。周波数6 GHz。

3. ダイポール波源と多層平板媒質モデルによる解析

多層平板媒質で模擬した人体の近傍に、微小電気ダイポール波源または微小磁気ダイポール波源を置き、電磁界を計算した。微小電気ダイポールは電流素片に対応し、微小磁気ダイポールは微小電流ループに対応する。ただし、現実の電磁放射源は、これらのダイポールが混合し空間的に分布した複雑なものと考えられる。

電磁界の計算は厳密な積分表示式に基づいている。電磁界が得られれば、電力密度分布や電磁界強度分布が計算できる。

図10に示す解析モデルは次のようにした。

- 人体モデルは平面波入射の場合と同じ無限平板3層モデル(筋肉層は深さ方向に半無限)
- z軸は深さ方向、人体表面はx y平面に平行
- 微小ダイポール波源は人体表面から1 cmまたは10 cmの距離に置かれる
- 微小ダイポール波源の向きは(1, 1, 1)方向

3.1 電気ダイポールを波源としたときの計算結果

図11は、周波数3 GHz、波源距離 $d = 1$ cmの計算結果である。波源から d 隔てた平面上の $-d \leq x \leq d$ 、 $-d \leq y \leq d$ なる正方形領域の界分布を示す(他の図についても同様)。計算結果の数値はデシベルではなく真値で表してある。

上段左の図は人体表面から入り込む正味の有効電力密度の分布を表す。それに対して、

下段の3つの図は人体モデルを取り除き、自由空間とした場合の、人体表面があった平面における計算結果である。下段左の図は自由空間における有効電力密度である。上段左の図と比べると、分布形状が異なるだけでなく、ピーク値をみると、実際に人体表面から入り込む電力密度のほうが、自由空間の電力密度よりも大きくなっており、入射した以上の電力を受け取るという、一見奇妙な関係になっている。これは、エバネッセント電磁界の電力を人体が吸い取ったためと解釈することができる。

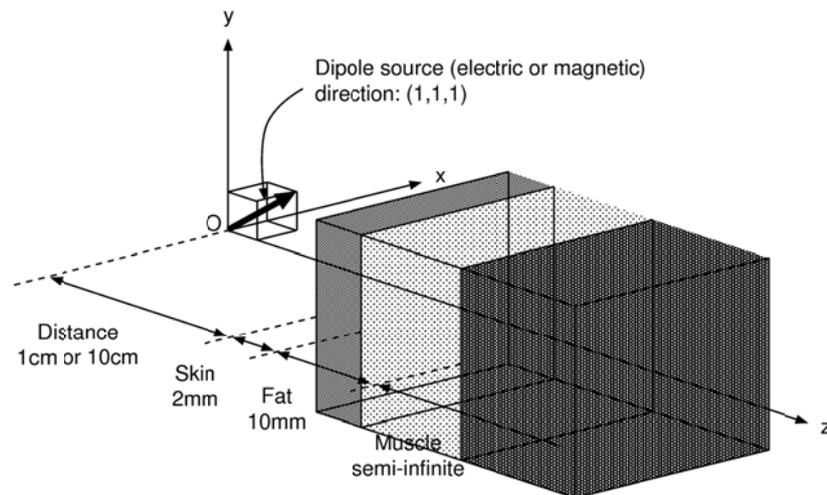


図 1 0 多層平板媒質で模擬した人体とその近傍にある微小ダイポール波源のモデル

通常、電力密度は電界強度または磁界強度の測定値から換算されて求められる。(厳密には、電界の接線成分(2成分)と磁界の接線成分(2成分)を位相差も含めて測定すれば求められるが、実用的でない。)下段中央の図は電界強度の2乗($\eta_0 = 377 \Omega$ で割って電力密度に換算)を表し、下段右の図は磁界強度の2乗($\eta_0 = 377 \Omega$ を掛けて電力密度に換算)を表す。下段左の自由空間の電力密度と比較すると、電界強度の2乗は値が桁違いに異なる上、分布の形も異なる。値が大幅に異なるのは、電気ダイポールの近接界は電界が優勢となり、波動インピーダンス η_0 が377よりも高いためと説明できる。

以上より、自由空間での有効電力密度、電界強度の2乗、磁界強度の2乗、の3つがすべて異なる様相を呈す。これは、波源の距離が0.1波長と近傍であるためである。また人体表面から入り込む有効電力密度とも合わないことが分かる。

図 1 2 は、波源距離 10 cm つまり 1 波長離れた場合の計算結果である。下段の3つの図(自由空間の電力密度、電界強度の2乗、磁界強度の2乗)がほぼ同じ値になっていることが分かる。これは、遠方界の性質に近づいたためであると解釈できる。上段左の人体表面での正味の電力密度は、自由空間の電力密度と分布の形は似ているが、値が小さくなっているのは、人体表面での反射によるものと考えられる。

図 1 3 は、周波数 6 GHz、波源距離 1 cm の計算結果、図 1 4 は、周波数 6 GHz、波源距離 10 cm の計算結果である。周波数が2倍になった分、近傍界の性質が弱まっ

ではいるが、3 GHz の場合と定性的には同様の特徴が見られる。

3.2 磁気ダイポールを波源としたときの計算結果

電気ダイポールの代わりに磁気ダイポールを仮定して同様の計算を行った。図示を省略するが、電界強度の2乗と磁界強度の2乗の関係が逆になっていることを除けば、電気ダイポールを波源とした場合と似た結果を得た。

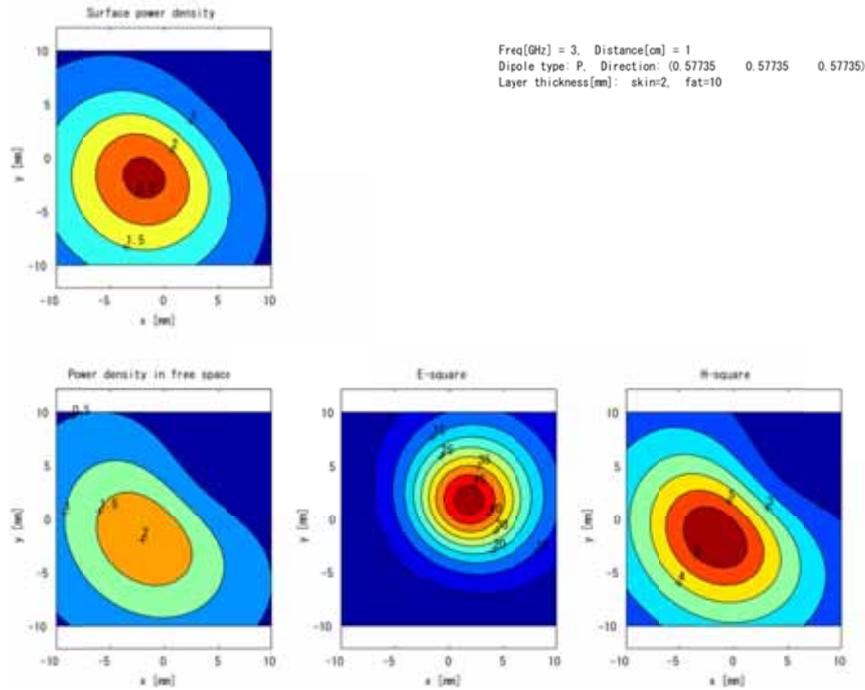


図 1 1 電気ダイポール波源、周波数 3 GHz、距離 1 cm

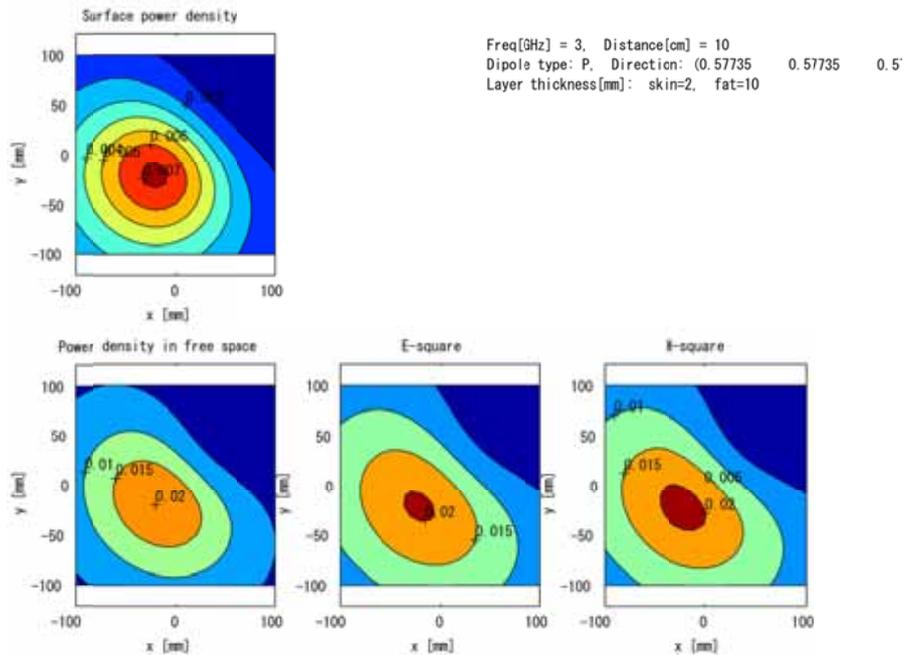


図 1 2 電気ダイポール波源、周波数 3 GHz、距離 10 cm

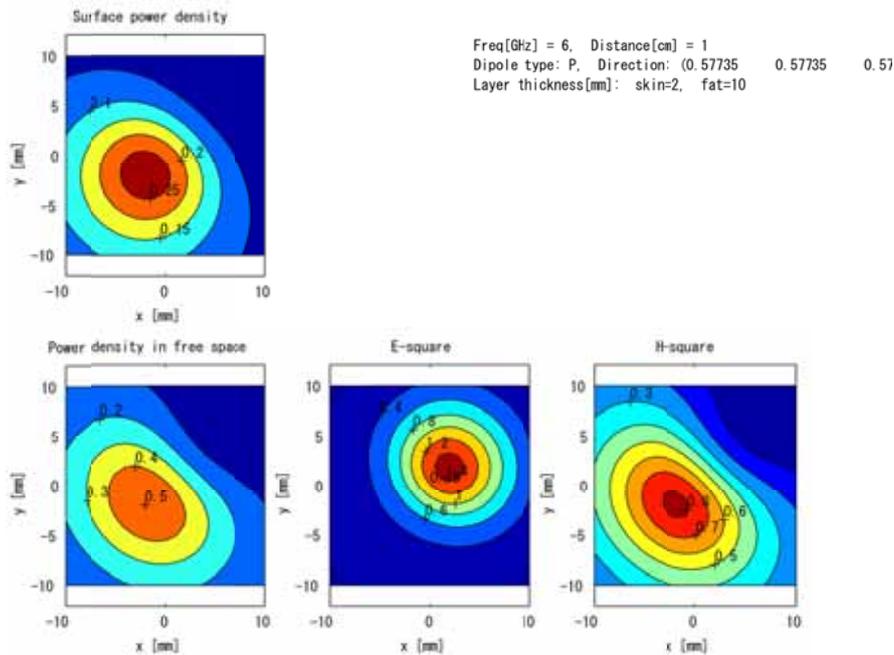


図 1 3 電気ダイポール波源、周波数 6 GHz、距離 1 cm

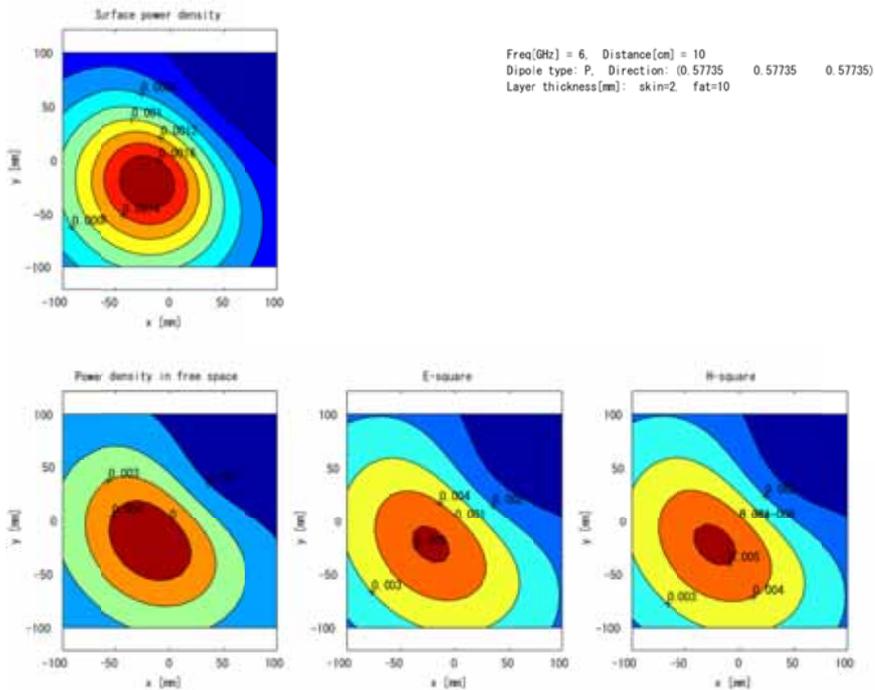


図 1 4 電気ダイポール波源、周波数 6 GHz、距離 10 cm

以上より、距離 1 cm といった(波長の 1 / 10 倍、1 / 5 倍となるような) 近距離においては、電界強度測定または磁界強度測定によって人体表面の電力密度を推定することは難しいと考えられる。一方、現行の距離 10 cm (1 波長以上) では遠方界の性質に近いため、電界強度または磁界強度から人体表面の有効電力密度を推定できる可能性がある。

4. 電力密度の推定

図15は、人体が存在しない自由空間での電界強度分布を電力密度に換算し、垂直入射平面波の人体表面での反射率を考慮して推定した人体に入り込む電力密度分布を、その真値との比で表示したものであり、横軸は周波数である。実線が波源距離10cm、破線が1cmに対応し、赤線が電気ダイポール波源、青線が磁気ダイポール波源についての計算結果である。波源距離が10cmの場合はダイポールの種類によらず推定が良好であるのに対し、波源距離を1cmとすると、誤った推定結果になることが分かる。

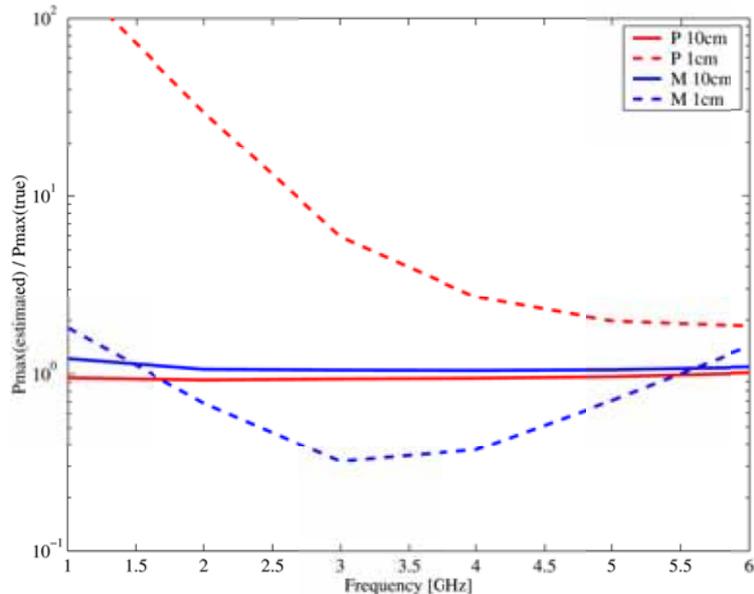


図15 自由空間での電界強度と平面波反射率から推定した人体に入り込む電力密度の対真値比

5. まとめ

垂直入射平面波に対する計算により、次のことが分かった。

- 振幅反射係数は単調でない周波数特性を示し、3GHz以上6GHz以下では0.8以上と高い値を示す。これより、人体に近接して置かれたアンテナの電流が人体の有無で変化するという現象が無視できないと推測される。

微小ダイポール波源に対する計算により、次のことが分かった。

- 周波数3GHzまたは6GHzで波源距離が1cm(0.2波長以下)となる場合は、電力密度、電界強度の2乗、磁界強度の2乗はすべて異なり、人体表面での正味の電力密度の分布とも類似しない。後者は波源の種類(電気ダイポール、磁気ダイポール)によっても様相が異なる。
- 周波数3GHzまたは6GHzで波源距離が10cm(1波長以上)となる場合は、電力密度、電界強度の2乗、磁界強度の2乗はほぼ一致し、人体表面での正味の電力密度と形の似た分布となる。

また、両方を用いた計算により、電界強度分布と平面波の反射率から推定される人体への入射電力密度は、波源距離が10 cmのときは良い推定となるが、1 cmと近いときは誤った推定となることが分かった。

以上より、3 GHz以上6 GHz以下の周波数において、電磁界強度指針(補助指針)の離隔距離条件(現行は10 cm以上)を短距離側に変更し、身体に近接した電磁放射源に適用することは難しいと結論できる。

局所吸収指針の適用周波数範囲の上限を拡張する場合の妥当性と限界 - 温度上昇との相関と平均化質量の考察

1. 検討事項の整理

現行の局所吸収指針は、SARの評価を用いる点で基礎指針の内容に忠実であり、測定方法の困難が克服されれば、安全性評価を行うためには望ましい方法である。局所SARは、単位質量で単位時間に吸収されるエネルギーであり、組織での発熱量に直接関係するが、組織で生じた熱は、熱伝導および血流によって拡散するので、局所SARが局所の温度上昇と良い相関を持つとは限らない。これまでの研究から、組織10gで平均した局所SARが局所の温度上昇と良い相関を持つことが知られており、現行の局所吸収指針において組織10gで平均した局所SARで評価することの妥当性が裏付けられている。しかし、周波数とともに電波の生体組織への侵入深さが小さくなるため、体表に入射した電波のエネルギー吸収が体表に集中する。その結果、現在の局所吸収指針の適用周波数上限である3GHzをより高い周波数に拡張した場合、その妥当性が成り立つかどうか、またこれが成り立つ場合に、その周波数の上限についての検討が必要である。なお、この検討は平均化質量の妥当性と同時に検討する必要がある。

現行の局所吸収指針が審議された当時に比べて、精密な数値人体モデルを用いた電磁界ドシメトリおよび熱解析の技術の進歩は著しい。局所SARと温度上昇の相関が確認できた場合、局所SARの制限値により、組織の温度上昇が適切な範囲に抑えられることを、最新の電磁界ドシメトリ研究の成果を踏まえて確認する必要がある。また、局所吸収指針における全身平均SARに関する制限が3GHz以上で妥当であるかどうかを検討する必要がある。

以上の検討を踏まえて、局所吸収指針の適用周波数の上限を拡張した場合に、これまで入射電力密度で定められていた3GHz以上における防護指針の内容と整合しているかどうかの検討が必要である。

以下では、上記の検討事項についての検討結果をとりまとめる。

なお、SARで評価を行う周波数を拡張するためには、測定方法が確立されていることが必要である。近年の測定技術の進歩により可能になっていると認識されているが、本答申では、測定方法については検討対象ではないため、ここでは言及しない。

2. SARで評価する方法の周波数の上限および平均化質量について

局所SARの平均化質量と局所温度上昇との相関関係についての研究は次のとおり

である。6 GHz 以下の周波数に対し、独立行政法人情報通信研究機構が構築した日本人頭部モデルにダイポールアンテナより電波を照射しモデルに吸収される電力及び温度上昇を計算し、モデル各点において、得られた局所 SAR と温度上昇の間に線形の関係が成り立つと仮定して最小自乗法を用いて処理し、加温係数(局所温度上昇を異なる平均化質量で定義した局所 SAR で除したものと決定係数の平均化質量に対する依存性をさまざまな周波数について求めた結果が報告されている[1]。その結果を図1に示す。ここで、決定係数とは、相関係数の二乗であり、1に近いほど回帰方程式のあてはまりの良いこと、すなわち、その平均化質量で定義した局所 SAR が温度上昇の良い指標であることを意味する。図1より、平均化質量を10 g とすると、決定係数は3 GHz より高い周波数で小さくなる傾向にあるものの、6 GHz 程度まで加温係数は周波数にほとんど依存性せず、かつ決定係数は0.75以上と高いことが示される。この結果より、少なくとも6 GHz 程度までならば、局所10 g 平均 SAR は温度上昇と相関が高く、その良い指標であることが示唆される。

一方、例えば平均化質量が1 g の場合、6 GHz における決定係数は0.05であり、1 GHz 以上6 GHz 以下で加温係数に2倍程度の相違があった。すなわち、1 g 平均の局所 SAR は、温度上昇の良い指標ではないことが示唆される。

電波の人体組織への侵入深さは6 GHz では数mm程度と小さくなるのに対し、平均化質量の最適値10 g が周波数に大きく依存しないことは注目に値する。この要因の一つは、吸収された電力は、熱となり、拡散するためである[2]。ここでの議論の周波数の上限が6 GHz となっているのは、それ以上の周波数帯を解析するには更に高分解能なモデルが必要であり、現時点では十分な精度を有するものが存在しないためである。

図1の結果は成人の人体頭部モデルで求めたものであるが、ダイポールアンテナによる温度上昇は、成人と子供で大きな差がないことが報告されている[3]。また、頭部に限らず、胴体にアンテナを装着した場合でも、10 g 平均の局所 SAR が温度上昇の良い指標であることが示されている[4]。

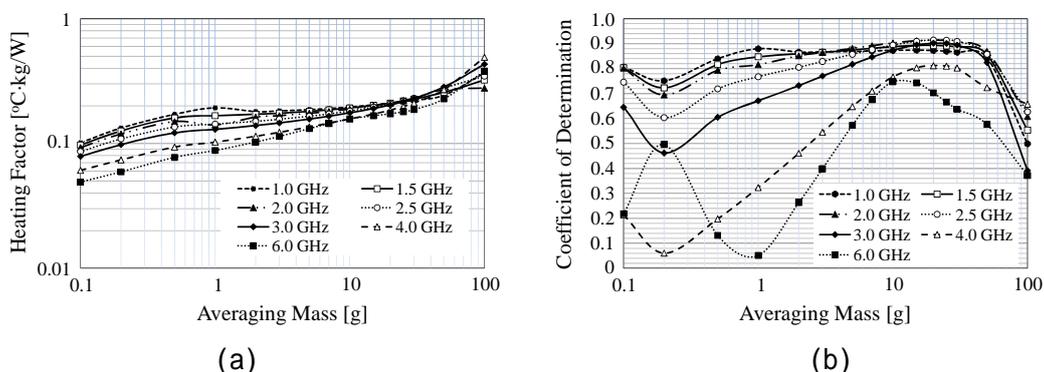


図1 . 日本人男性頭部モデルにおける局所 SAR と温度上昇との相関の周波数特性 , (a)加温係数 , (b)決定係数

3. 局所吸収指針に対する温度上昇

3-1 3 GHz 以上における局所SAR適用：眼球の温度上昇

3 GHz 以上の周波数帯における人体の眼球における温度上昇の報告としては、[5] 及び[6]が挙げられる。[5]における結果は眼球平均SARであるため、立方体形状の10 g 平均SARに概算し、かつその値を現行の局所吸収指針の管理環境における制限値である10 W/kgとした場合の温度上昇は、5 GHzで0.9であった。一方、[6]において、立方体形状10 gで平均化した場合の結果に着目すると、3 GHzでは0.8、5 GHzでは1.0であった。また、3 GHz以下ではあるものの、同一入射電力密度に対して、成人と子供の水晶体における温度上昇は同程度であることも報告されている[7]。以上のことから、管理環境の現行の局所吸収指針の局所SARに関する制限値10 W/kgに対応する眼球温度上昇は、6 GHz以下ではおおむね1以下と言えよう。温度上昇はSAR値に比例するので、一般環境の制限値では、温度上昇は上記の5分の1になる。なお、上述の報告[5][6]では温度上昇に伴う血管拡張など熱調整系作用を考慮せず、また、ばく露時間は熱時定数よりも十分大きいと仮定していた。近年の動物実験およびその解析結果によると、麻酔を施していない場合には、動物の熱調整系が動作するため、温度上昇は小さくなることが報告されている[7, 8]。

3-2 3 GHz 以上における局所SAR適用：脳内の温度上昇

携帯電話アンテナあるいはそれを簡易的に模擬したアンテナにより、詳細な人体モデルの脳内における温度上昇を解析した事例が報告されている。これらの報告では、ほとんどの場合、異なる組織を含む立方体形状の10 g 平均SARでの温度上昇が計算されている。ICNIRPによるレビューでは、管理環境における現行の局所吸収指針と同じ10 W/kgに対する頭部温度上昇は、体表面付近、特に耳介付近で1.5～2.0に及ぶ場合があることが示されている[9]。また、脳内温度上昇は1あるいはそれ以下となる。脳内温度上昇は、周波数が高くなるにつれて侵入深さが小さくなるため、小さくなる傾向にある[5]。具体的には、2.4 GHzの周波数において、組織10 gあたりの局所SARが10 W/kgに対して、脳内の温度上昇は0.5以下であることが報告されており、このことから3 GHz以上の周波数における脳内温度上昇は1を下回るものと考えられる。なお、前述の通り、同一の電波源に対し、子供の脳内における温度上昇は、成人に比べて大差がないことが示されている[3]。

3-3 3 GHz 以上における全身平均SAR適用の妥当性

IEEE規格[10]では、拡張する3 GHz以上6 GHz以下の範囲において、仮に全身平均SARの制限を超えても局所SARが制限内であれば問題ないと指摘している。根拠として、周波数が高くなるにつれ電力吸収分布が体表面付近に集中するため、深部温度上昇は小さくなる可能性を指摘している。文献[11]では、詳細な人体モデル(子供

を含む)に対する数値解析を行い、3 GHz以下の周波数帯では、一定の全身平均SARに対する深部温度上昇は、周波数が高くなるにつれ減少傾向にはあるものの大きな変化はないことを報告している。一般環境における全身平均SARの指針値である0.08 W/kgとした場合の体内深部温度上昇は、成人で0.1よりも小さく、子供では更に小さい値であった。実際には、人体では熱ストレスに対して代謝量の調整を行うため[12]、より小さい値であると推察される。

4. 電波防護指針全体の整合性について：入射電力密度と局所SARの関係について

補助指針は、1 GHz以上3 GHz以下の周波数では頭部への電力密度、3 GHz以上300 GHz以下の周波数では眼への電力密度がもっとも厳しく、その値は一般環境で2 mW/cm²である。補助指針が適用される実際の曝露状況では、電磁界が不均一となることが想定されるが、最悪の場合を考え、平面波が入射するものとし、眼球平均SARおよび脳内10 g平均と入射電力密度の関係について紹介する。

眼球に関しては、600 MHz以上6 GHz以下の周波数帯において、電波を人体頭部へ照射した場合のSARを評価した報告がある[5, 6]。[5]は、日本人モデルを対象とした報告であり、一定の電力密度に対して上記周波数帯で眼球平均SARが最大となるのは3 GHz付近であった。一般環境下における電力密度に関する補助指針である2 W/cm²のばく露に対して、その値は0.8 - 1.0 W/kgであり、基礎指針2 W/kgよりも小さい。欧州人モデルを用いた検討では[6]、上述のばく露条件に対する眼球平均SARは1.0 - 1.2 W/kgであり、日本人モデルの結果と同程度であった。一方、脳内におけるSARの評価も[6]で行われており、対象とする周波数帯を1 GHz以上10 GHz以下としている。平面波ばく露に対する脳内平均SARは1 - 2 GHz付近で極大をもち、その値は0.8 W/kgであった。上記の結果は、補助指針で定められた電力密度でのばく露は、局所吸収指針で定められたSARを超えない。

5. まとめ

局所SARの平均化質量と温度上昇の関係をさまざまな周波数で数値解析した結果、次のことがわかった。

- 10 gの組織で平均したSARは、温度上昇に対する決定係数が4 GHzより低下傾向にあるものの、6 GHzでも0.75以上であり、良い指標である。
- 加温係数は6 GHz以下の周波数では、10 - 30 g程度の平均化質量に対して周波数依存性が小さく、局所SARの制限値を6 GHz以下で一定値としても温度上昇はほぼ一定の範囲である。

10 g平均の局所SARと眼球及び脳組織の温度上昇についての考察、及び全身平均SARと深部体温の関係の考察から、次のことが分かった。

- 現行の管理環境に対する局所SARに関する制限値である、 10 W/kg による眼球の温度上昇は 6 GHz 以下の周波数で1以下であり、一般環境の制限値では0.2以下である。また、血管拡張などの熱調節系を考慮すれば、実際には温度上昇はさらに小さいと推定される。
- 管理環境の局所SARの制限値 10 W/kg (10 g 平均)で頭部に携帯電話等のアンテナでばく露した場合、脳組織の温度上昇は、 6 GHz 以下の周波数でも1以上にはならないと推定された。一般環境の局所SAR制限値の場合は、温度上昇はさらにその5分の1である。よって、最新のドシメトリによっても、現行の局所SARの制限値によって脳組織の温度上昇は十分に抑えることができる。
- 局所吸収指針では、全身平均SARの制限も課しているが、現行の 3 GHz 以下に適用される全身平均SAR制限値を 6 GHz 以下にまで拡張しても、深部体温の上昇は高い周波数ほど小さく、安全側である。

また、入射電力密度と局所SARの関係についての考察から、より簡易な評価と位置づけられる補助指針を満たしていれば、基礎指針の根拠により整合している局所吸収指針の制限を超えることはないことが確認された。

以上の考察から、現行の 3 GHz 以下を適用範囲とする局所吸収指針を、数値を変えることなく 6 GHz 以下まで拡張することが妥当であるという結論を得た。なお、 6 GHz という上限周波数は、現在の数値解析モデルの分解能の限界によるものであり、 6 GHz 以上への拡張可能性が否定されたわけではない。

参考文献

- [1]. A. Hirata and O. Fujiwara, "Correlation between mass-averaged SAR and temperature elevation in human head model exposed to RF near-fields from 1 to 6 GHz," *Phys. Med. Biol.*, vol.54, pp.7227-7238, 2009.
- [2]. A. Hirata, M. Fujimoto, T. Asano, J. Wang, O. Fujiwara, and T. Shiozawa, "Correlation between maximum temperature increase and peak SAR with different average schemes and masses," *IEEE Trans. Electromagnet. Compat.*, vol.48, no.3, pp.569-578, 2006.
- [3]. M. Fujimoto, A. Hirata, J. Wang, O. Fujiwara, and T. Shiozawa, "FDTD-derived correlation of maximum temperature increase and peak SAR in child and adult head models due to dipole antenna," *IEEE Trans. Electromagnetic Compat.*, vol.48, no.1, pp.240-247, 2006.
- [4]. T. Onishi, T. Iyama, L. Hamada, S. Watanabe, and A. Hirata, "Evaluation of SAR and temperature elevation using Japanese anatomical human models for body-worn devices," *IEICE Trans. Comm.*, vol.E93-B, no.12, pp.3643-3646, 2010.
- [5]. A. Hirata, S. Watanabe, O. Fujiwara, M. Kojima, K. Sasaki, and T. Shiozawa, "Temperature

- elevation in the eye of Japanese male and female models for plane wave exposure,” *Phys. Med. Biol.*, vol.52, pp.6389-6399, 2007.
- [6]. I. Laakso, “Assessment of the computational uncertainty of temperature rise and SAR in the eyes and brain under far-field exposure from 1 to 10 GHz,” *Phys. Med. Biol.*, vol.54, pp.3393-3404, 2009.
- [7]. A. Hirata, “Temperature increase in the human eyes due to near-field and far-field exposures at 900MHz, 1.5GHz, and 1.9GHz,” *IEEE Trans. Electromagnet. Compat.*, vol.47, no.1, pp.68-76, 2005.
- [8]. M. Kojima, I. Hata, K. Wake, S. Watanabe, Y. Yamanaka, Y. Kamimura, M. Taki, K. Sasaki “Influence of anesthesia on ocular effects and temperature in rabbit eyes exposed to microwaves,” *Bioelectromagnet*, vol. 25, pp. 228 - 233, 2004.
- [9]. A. Hirata, S. Watanabe, M. Kojima, I. Hata, K. Wake, M. Taki, K. Sasaki, O. Fujiwara, and T. Shiozawa, “Computational verification of anesthesia effect on temperature variation in rabbit eyes exposed to 2.45-GHz microwave energy,” *Bioelectromagnet.*, vol. 27, pp.602-612, 2006.
- [10].ICNIRP, Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz), 2009.
- [11].IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, C95-1, 2005.
- [12].E. R. Adair and D. R. Black, “Thermoregulatory responses to RF energy absorption,” *Bioelectromagnetics Supplement*, vol.6, pp.S17-S38, 2003.

別 添

諮問第2030号

「局所吸収指針の在り方」に関する答申(案)

諮問第2030号「局所吸収指針の在り方」に関する答申(案)

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」(平成9年4月24日)における局所吸収指針(4.2(3))に関し、以下のとおり適用範囲の改定を行うことが適当である。

(3-1) 適用範囲

本指針は、周波数100kHz以上6GHz以下に適用する。

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。