

局所吸収指針作業班 審議状況報告

作業班主任 多氣 昌生

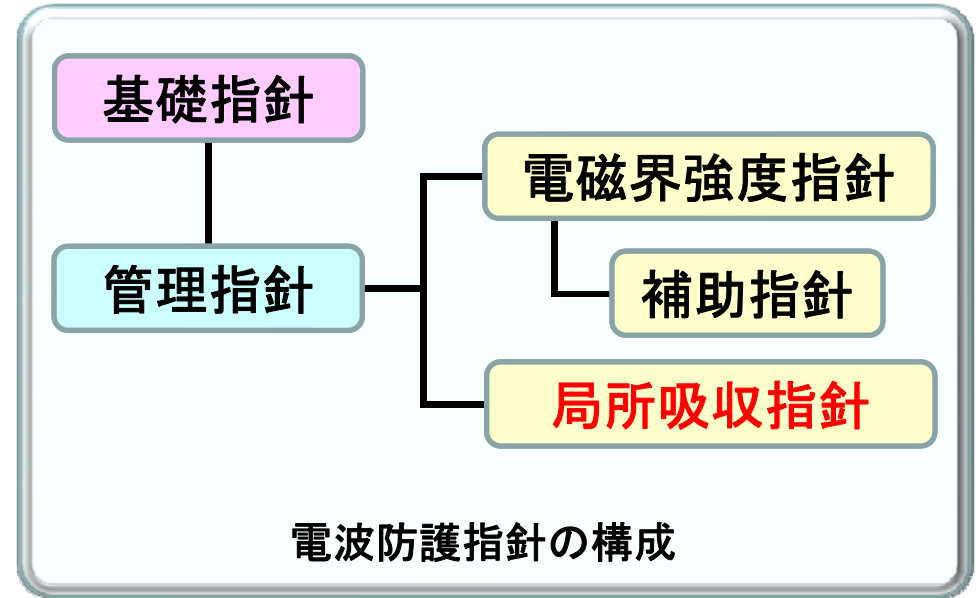
平成22年7月1日

電波防護指針の構成

基礎指針の位置づけ

人体が電磁界にさらされる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、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。電波防護指針の考え方の根拠として位置づけられ、SAR※、誘導電流、接触電流等についての指針である。

※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。



管理指針の位置づけ

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、電力密度、電流及び比吸収率）で示した指針。測定・評価方法が与えられる。管理指針は電磁界強度指針、補助指針、局所吸収指針から構成される。

管理指針の構成

電磁界強度指針の位置づけ

対象とする空間における電界強度、磁界強度、電力密度によって、当該空間の安全性を評価するための指針。電磁界強度指針が満足されれば、基礎指針を満たすと判断する。しかし、電磁界強度指針を超える値が測定されても、基礎指針を満たさないとは限らない。この場合は、補助指針でより詳細な評価を行うことができる。電磁界強度の測定は、波源からの距離が原則として300MHz未満の周波数では20cm以上、300MHz以上の周波数では10cm以上とされている。すなわち、波源近傍では原則として適用されない。



補助指針の位置づけ

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。①人体電磁界に不均一又は局所的にさらされる場合の指針、②接触電流に関する指針、③足首誘導電流に関する指針、がある。①は、300MHz未満の周波数では20cm以上、300MHz以上では10cm以上離れた点に適用。すなわち、波源近傍では適用されない。

局所吸収指針の位置づけ

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使用する指針。基礎指針に従った詳細評価を行うもので、現在は、100kHzから3GHzの周波数で、SARによる評価を用いた指針が示されている。すなわち、主に波源の近傍で適用される。



諮問の背景の再確認

1. 現在の管理指針では3GHz以上の周波数で身体に近接して使用する無線機等に対して適用する指針がない。
2. 今後、3GHz以上の周波数で身体に近接して使用する無線機等が広く普及する見込み。

局所吸収指針(概要): 諮問第89号答申(1997年)より

適用範囲 : 周波数 100kHzから3GHz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100kHz以上300MHz未満で、電磁放射源との距離20cm以内
周波数300MHz以上3GHz未満で、電磁放射源との距離10cm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10g 当たり 10 W/kg 20W/kg(四肢)	任意の組織10g 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 100kHzから100MHzまでの周波数 100mA	接触ハザードが防止されていない場合 100kHzから100MHzまでの周波数 45mA

(任意の6分間平均値)

主な検討事項の整理

【検討事項1】 指針[※]としてふさわしい評価手法

※3GHz以上の周波数で近接して使用する無線機等に適用する指針

- 1-① a. 局所吸収指針を改定（上限周波数を変更する等）
b. 電磁界強度指針（補助指針）を改定（近接距離の条件を変更する等）
c. 上記以外

【検討事項2】 SARを評価手法とした場合（局所吸収指針を改定する場合）

- 2-① 3GHz以上の周波数でのSAR測定の可否（比吸収率測定法作業班）
- 2-② 適用可能な周波数の上限値
- 2-③ 3GHz以上の周波数にてSARによる評価を適用した場合の基礎指針（基準）との整合性
 - 基礎指針は局所の温度が過度に上昇しないことを意図している。これまでの研究では1°C程度までの温度上昇を伴わないばく露が健康に悪影響を及ぼすことを示すデータはない。
- 2-④ 3GHz以上の周波数にて局所SARを評価する平均化質量（任意の組織10gあたり）の妥当性
- 2-⑤ 局所吸収指針の改定に伴う電波防護指針全体の整合性

平均化質量と周波数上限 (2-②, ④) [1]
検討のアプローチ

- IEEEは2005年に改訂を行い、平均化質量を1gから10gに変更
- 根拠は、SARの平均化質量を10gとした方が1gの場合に比べて局所温度上昇との相関が良い*

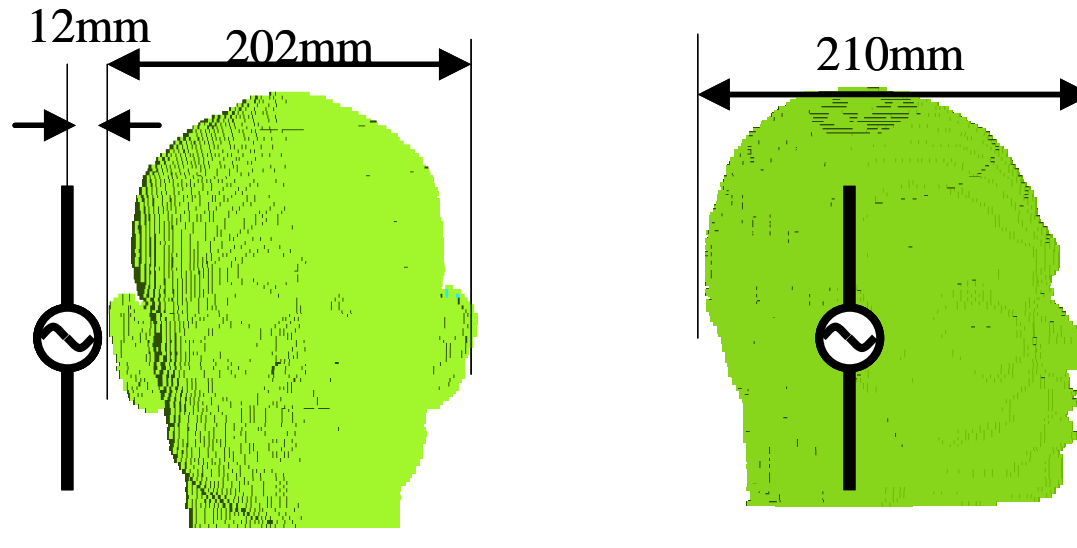
$$\Delta T = a \times SAR \quad (1)$$

ΔT : 温度上昇, a : 加温係数, SAR : 局所質量平均SAR

- 2005年当時、検討した周波数の上限は3GHz*
- 式(1)における加温係数 a が周波数を含めた外部要因にあまり依存しなければ、局所SARより温度上昇が推定できることとなる。
- 現状の解析によるアプローチは、数値人体モデルの分解能は1mm程度であり、対応できるのは6GHz程度まで(検討項目2-②の現状での限界)

*A. Hirata , IEEE Trans. Electromagnet. Compat. , 2006

平均化質量と周波数上限 (2-②, ④) [2] 検討方法



- 解像度2.0 mmのものを1.0 mmに細分化*,**

•ダイポールアンテナを仮定

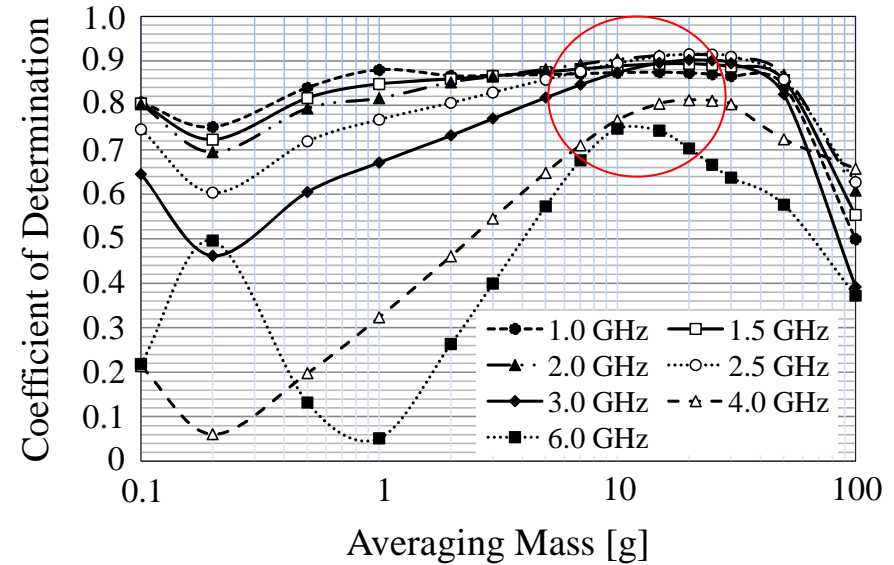
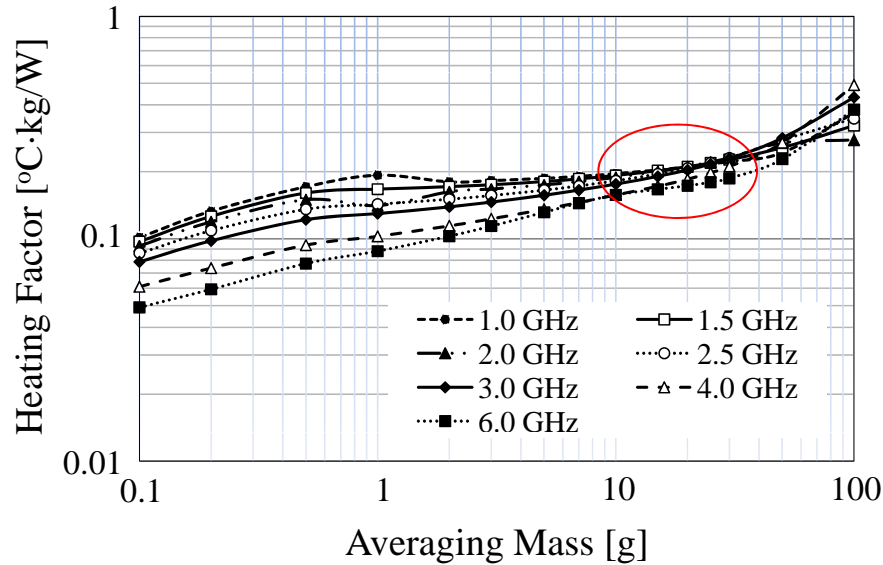
- 周波数は、1.0 GHz, 1.5 GHz, 2.0 GHz, 2.5 GHz, 3.0 GHz, 4.0 GHz, 6.0 GHz
- 各点における局所平均SARおよび温度上昇を計算し、その結果が式(1)の関係を満たすかを最小二乗法で評価
- 評価指標: 加温係数および決定係数で評価。

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が良い。

* J. Wang and O. Fujiwara IEICE Trans. 2001.

** T. Nagaoka et al, Phys. Med. Biol., 2004

平均化質量と周波数上限 (2-②, ④) [3]
 検討結果 (情報通信研究機構構築の頭部モデル) ¹



- 加温係数は6GHzまでの周波数では、10-30g程度の平均化質量に対して周波数依存性が小さい(1gの平均化質量だと1GHzから6GHzで2倍程度の違いがある)。
- 決定係数は4GHzより低下傾向にあるものの、10g平均では6GHzでも0.75以上(1g平均だと6GHzで0.05程度に下がる)

¹A. Hirata and O. Fujiwara, Phys. Med. Biol., 2009

基礎指針との整合性 (2-③) [1]

3GHz以上における局所SAR適用：眼球の温度上昇

出典	眼球平均SAR@10W/kg	
	3 GHz以下	3GHz以上
Flyckt et al (2007)	0.98－1.40°C	－
Wainwright (2007)	1.1－1.44°C	－
Hirata et al (2007)	0.91－1.2°C	0.96-2°C(5GHzまで)
Bucella et al (2008)	1.1°C	－
Laakso (2009)	0.8-1.5°C	0.9-4°C(10GHzまで)

✓3GHz以下の結果は、Hirata et al, Phys. Med. Biol. (2007)において、複数の論文を同一条件に換算した値

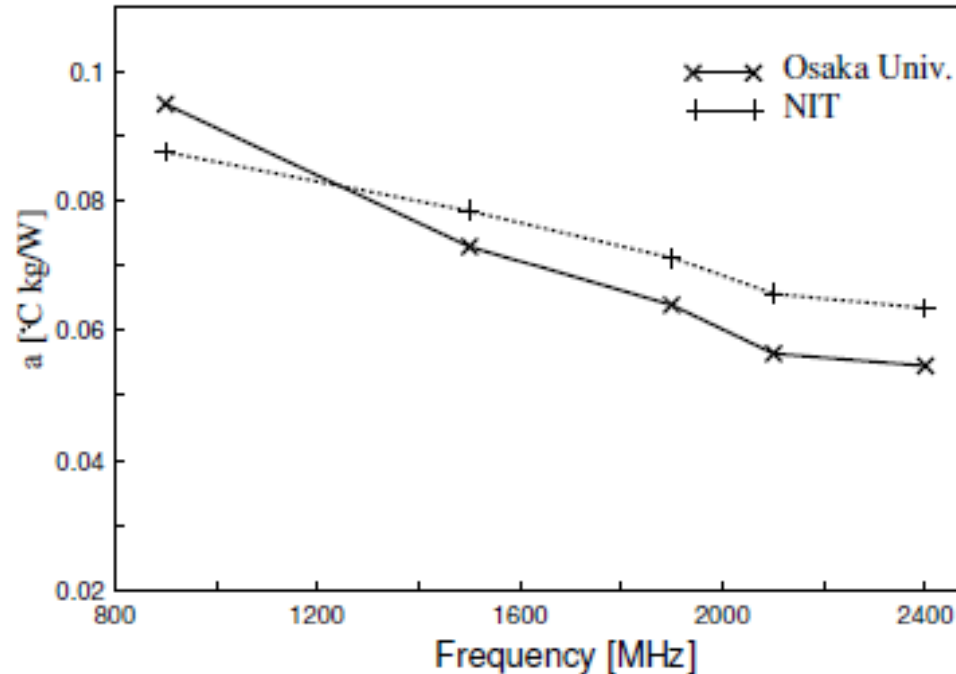
✓上記論文では、近似的に眼球平均SARが用いられている。

✓立方体形状の平均SAR値も示した論文は、Wainwright(2007)およびLaakso(2009)のみ。

- Hirata et alの結果を、立方体形状の局所SARが10W/kgの場合になるように換算すると、眼球内温度上昇は、0.9°C@5GHz
- Laaksoの結果も同様に処理すると0.8°C@3GHz, 1.0 °C@5GHz , 1.6°C@10GHz
- 周波数6GHzまででは、局所平均SAR10W/kgに対して眼球温度上昇は1度程度

基礎指針との整合性 (2-③) [2]

3GHz以上における局所SAR適用：脳内の温度上昇



- 縦軸は、脳内温度上昇の最大値を局所SAR(立方体形状10g)の最大値で除したものの。
- 3GHz以上で上記指標の検討例はない。
- 周波数が高くなるにつれて電波の浸透深さが小さくなるため、指標は小さくなる傾向にある。3GHz以上の周波数で脳内温度上昇がより大きくなることはない。

*A. Hirata , IEEE Trans. Electromagnet. Compat. , 2006

基礎指針との整合性 (2-③) [3]

3GHz以上における全身平均SAR適用の妥当性(1)

- 全身平均SARは、**体内深部温度上昇**と関連のある指標(1°C以下)
- 生体における熱バランスを示す方程式は近似的に以下のように示される¹。

$$M + P_{RF} - P_{conv} = S$$

Mは全身の代謝量、 P_{RF} は電磁電力の吸収量、 P_{conv} は体表面から外気への熱拡散、Sは人体を加熱する電力量

- 上式は、**小動物**に対する考察により有効性を確認
- 式より、吸収電力量が同じであれば周波数には依存しないことを示唆。

・3GHz-6GHzの周波数帯

IEEE基準¹では、拡張する3-6GHz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²。

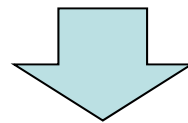
¹E. R. Adair and D. R. Black, Bioelectromagnet., 2003

²IEEE C95-1, 2005.

基礎指針との整合性 (2-③) [3]

3GHz以上における全身平均SAR適用の妥当性(2)

- 詳細な人体モデル(子供を含む)に対する数値実験により、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¹。検討の上限周波数は3GHzまで。
- 全身平均SARが制限値である0.08W/kgとした場合の体内深部温度上昇は、成人で0.1°Cよりも小さく、子供は更に小さい値であった。



3GHzから6GHzまでの周波数帯では、従来の周波数帯に比べて深部温度上昇が大きくなることはない。その値は0.1°C以下である。実際には、代謝量の調整のため³、より小さい値であると推察される。

¹A. Hirata et al., Phys. Med. Biol., 2008

電波防護指針全体の整合性 (2-⑤) [1] 入射電力密度とSARの相関について

日本人頭部モデルに補助指針値である $2\text{mW}/\text{cm}^2$ の強度で平面波を照射した場合、

- 眼球平均SARは $0.8 - 1.0\text{W}/\text{kg}$ である*。

欧州人頭部モデルに補助指針値である $2\text{mW}/\text{cm}^2$ の強度で平面波を照射した場合
(文献**より換算)、

- 欧州人モデルの眼球平均SARは $1.0 - 1.2\text{W}/\text{kg}$ であった。
- 欧州人モデルの脳における局所SAR(10g平均)は1-2GHz付近で極大をもち、その値は $0.8\text{W}/\text{kg}$

補助指針と局所吸収指針の関係は矛盾しない

*A. Hirata et al, Phys. Med. Biol., 2007.

**I. Laakso, Phys. Med. Biol., 2009.

電波防護指針全体の整合性 (2-⑤) [2]
局所吸収指針の20cmまでの適用可能性について(1)

第89号答申(1997年)の「局所吸収指針」より

- 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(電磁界強度指針及び補助指針)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。

電波防護指針全体の整合性 (2-⑤) [2]
局所吸収指針の20cmまでの適用可能性について(2)

「それ以外の距離」で適用する場合

- 局所吸収指針では、局所SARの制限とともに全身平均SARについても制限しており、両方の条件を満たす必要がある
 - 波源と人体が非常に接近している場合、局所SARの制限が支配的であることは自明と見なすことができる
 - 波源との距離が十分には近くない場合、局所SARの最大値が指針値を満たしていても、全身平均SARが指針値を超える可能性があることに注意が必要である。

電波防護指針全体の整合性 (2-⑤) [2]

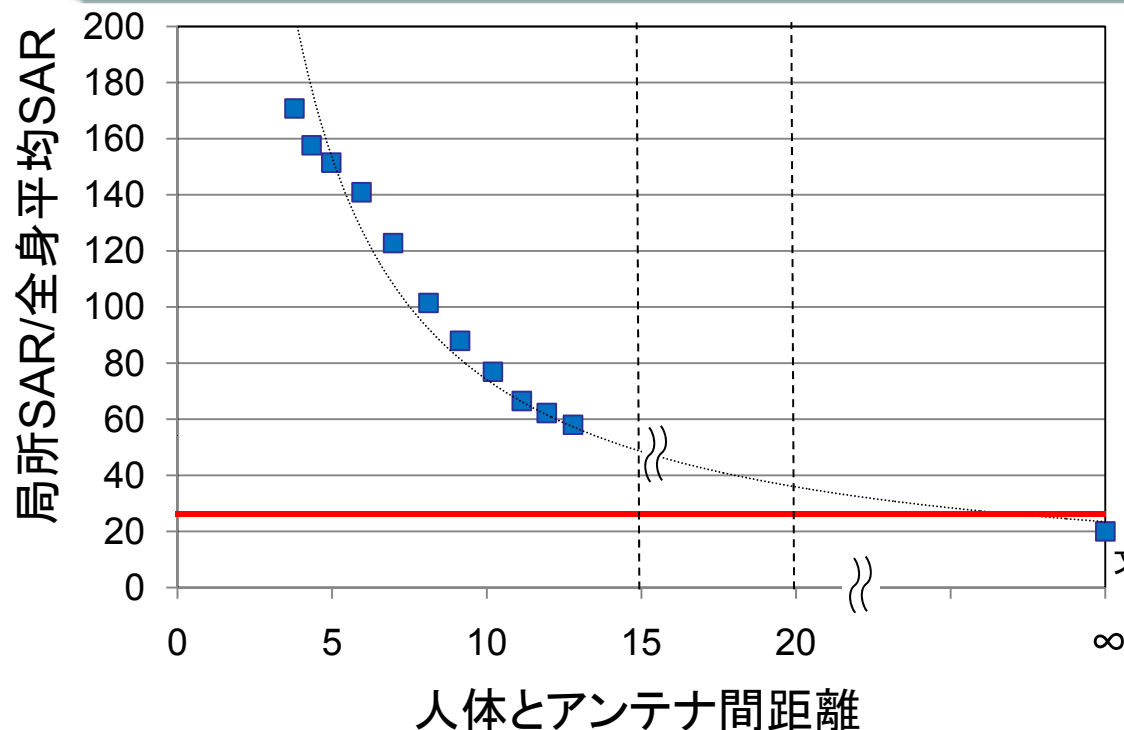
局所吸収指針の20cmまでの適用可能性について(3)

局所SARの最大値と全身平均SARの関係

- 局所SARに関する指針値 2W/kg と全身平均SARの指針値 0.08W/kg の比である25以上であれば、**全身平均SARの制限が不要**
- 1982年のANSI C95.1-1982において、全身が平面波に均一にばく露されても局所SARは不均一であり、最大値は全身平均SARの**10倍以上** (more than an order of magnitude) になるとしている
- ガイドラインの根拠として、比率は**20倍程度**と解説されている
- 平面波による均一なばく露でなく、人体に近接した波源の場合は、**この比率が平面波の場合より大きいと推定され、局所SARの最大値の制限が満たされれば、全身平均SARの制限もほぼ満たされていると推定される**

電波防護指針全体の整合性 (2-⑤) [2]
 局所吸収指針の20cmまでの適用可能性について(4)
 研究報告に基づく検討1

•900MHz帯^{1, 2}において、モノポールアンテナに対する局所SARと人体頭部に吸収される電力量を評価。検討した距離は13cmまで^{1, 2}。
 •局所SARと全身平均SARの比は、900MHzに比べて1800MHzでは大きい³ (平面波に対しても同様の傾向を確認⁴)。



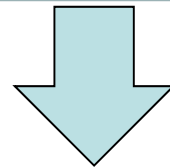
平面波(十分遠方からのぼく露)に対して、局所SARと全身平均SARの比は10-20に収束

- ¹渡辺, 多氣, 野島, 信学論(B), 1996
- ²S. Watanabe et al, IEEE Trans. MTT, 1996.
- ³P. Dimbylow and S. Man, Phys. Med. Biol., 1994.
- ⁴S. Kuhn et al, Phys. Med. Biol., 2009.
- ⁵ANSI C95.1-1982

文献4,5

電波防護指針全体の整合性 (2-⑤) [2]
局所吸収指針の20cmまでの適用可能性について(5)
研究報告に基づく検討2

- 400MHz帯ダイポールアンテナに対し、人体より10cmあるいは20cm離れた場合、放射効率はいずれも70%および80%程度であった¹。
- 全身平均SARの指針値を超えるためには小児(体重20kgで概算)でも5W以上の出力電力が必要。
- 周波数が高くなるにつれて放射効率が高くなるため、より高い出力電力の場合が対象。



人体とアンテナの距離を20cmとしても問題とはならない。

¹K. Kiminami et al, J. Electromagnet. Wave & Appl, 2005.

電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討
人体に近接して置かれる無線機器による電磁界ばく露量評価の上での問題点

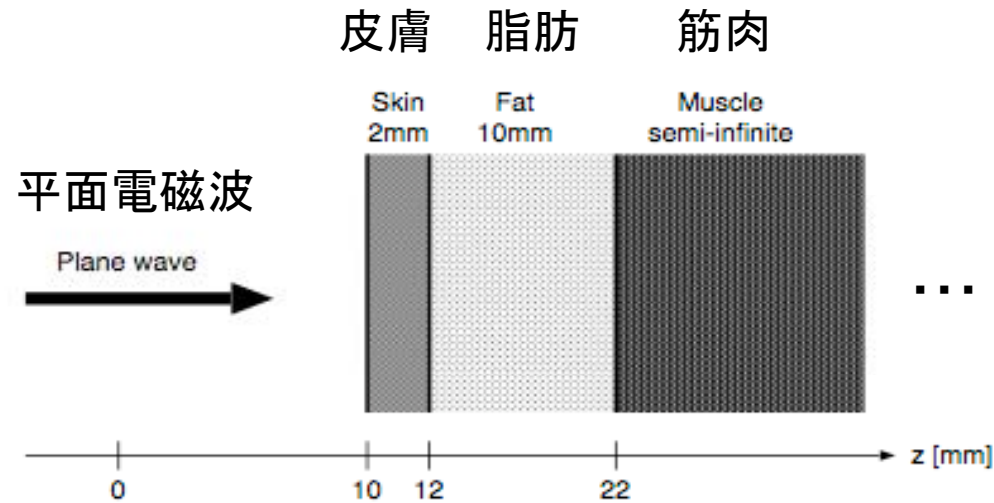
- 人体からの反射波により、アンテナに流れる電流が変化
(人体と切り離れた評価は、実使用状態と異なる可能性あり)

→ 平面電磁波の反射と浸透の様子を計算

- 仮に、アンテナ電流の変化が無視できたとしても、自由空間で測定される入射電力密度と、人体表面から入り込む電力密度とでは、様相が異なる可能性あり

→ 人体に近接する波源による、電力密度や電磁界強度の関係を数値計算

電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討 平面波と多層平板媒質モデルによる解析



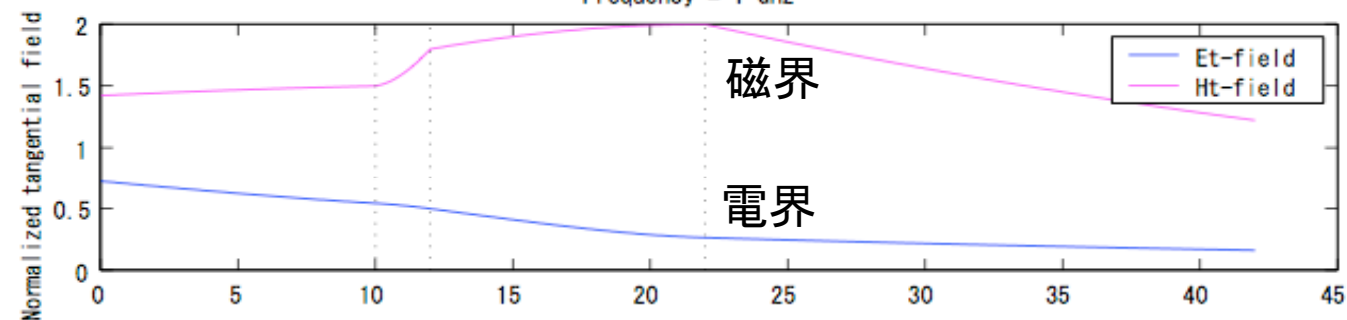
- 人体を3層でモデル化
- 平面波が垂直入射すると仮定
- 人体内外の電磁界を計算

電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討 平面波と多層平板媒質モデルによる解析(1)

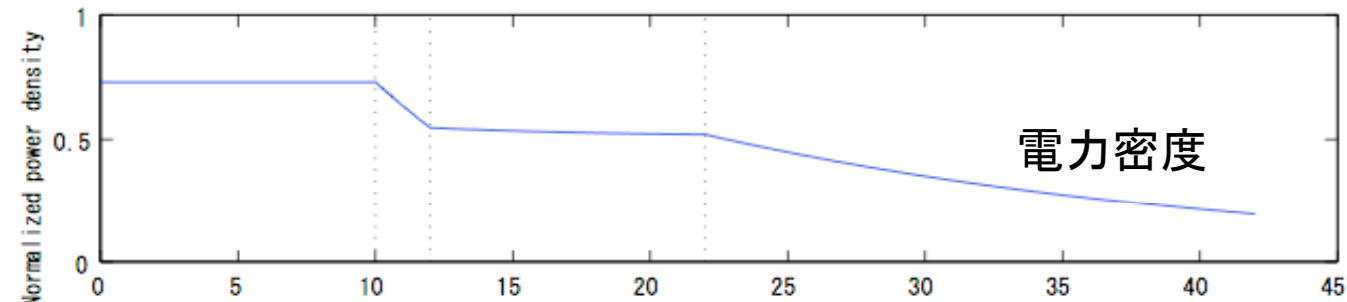
($f = 1\text{GHz}$)

皮膚 脂肪 筋肉

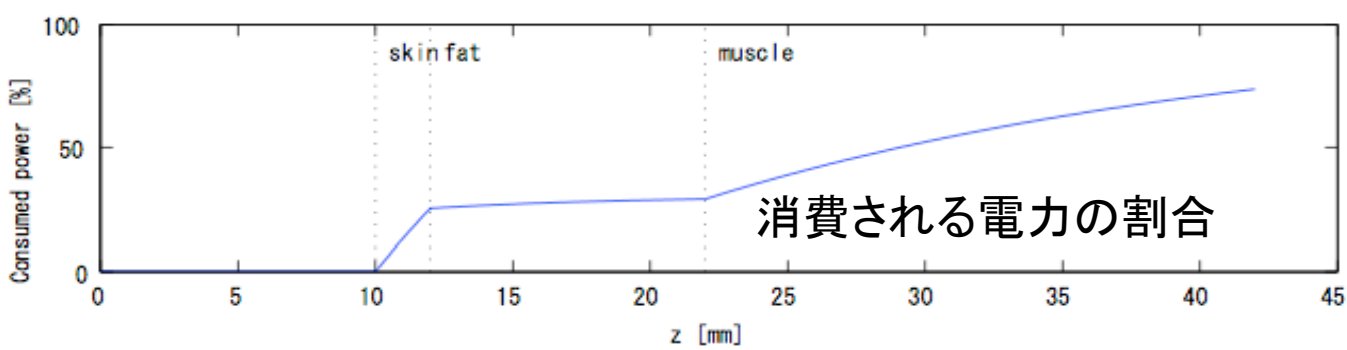
Frequency = 1 GHz



- 電界がなだらかに減衰



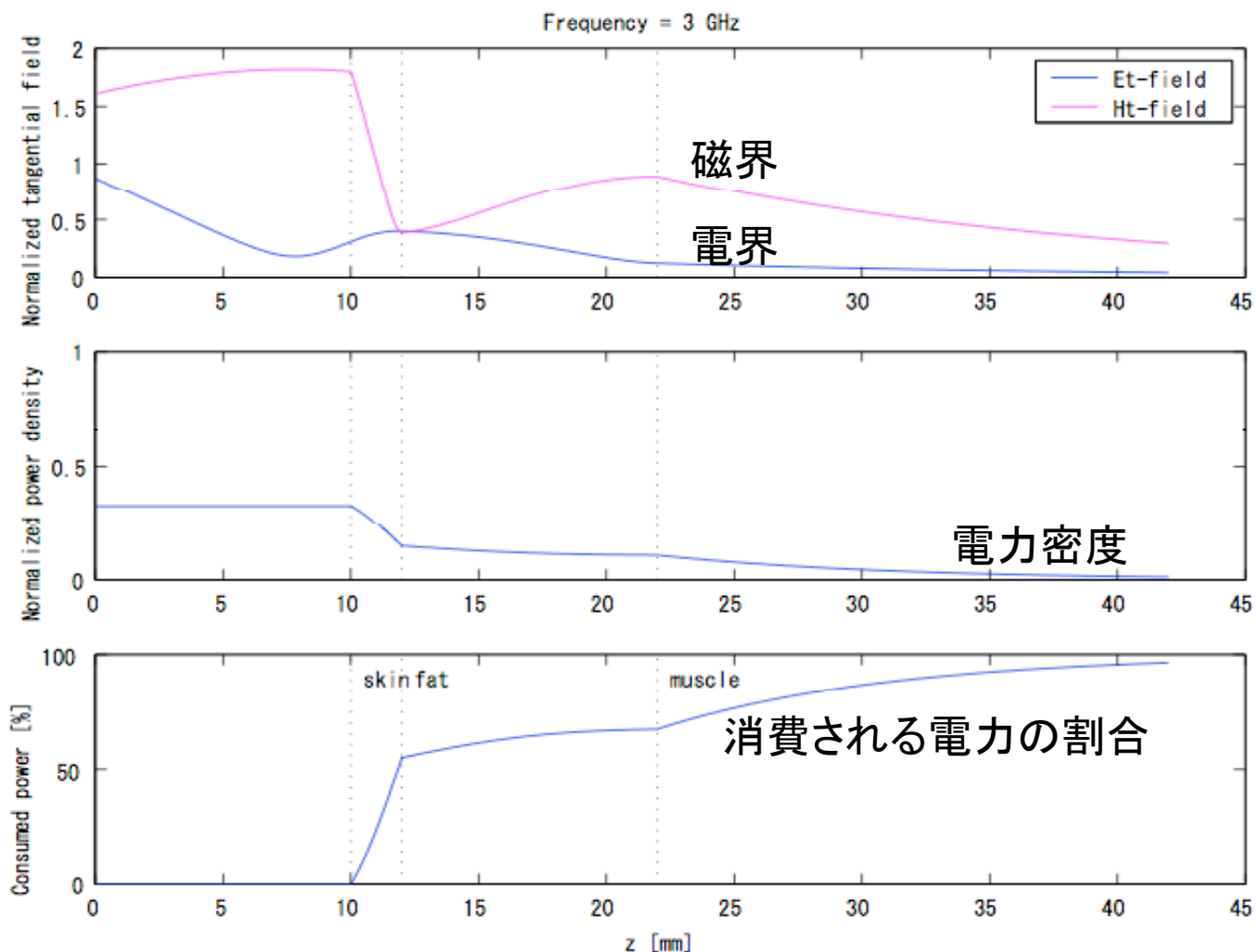
- 7割強が入り込む (3割弱が反射)



- 深さ20mmまでに50%消費される

電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討 平面波と多層平板媒質モデルによる解析(2) (f = 3GHz)

皮膚 脂肪 筋肉



- 電界がなだらかに減衰

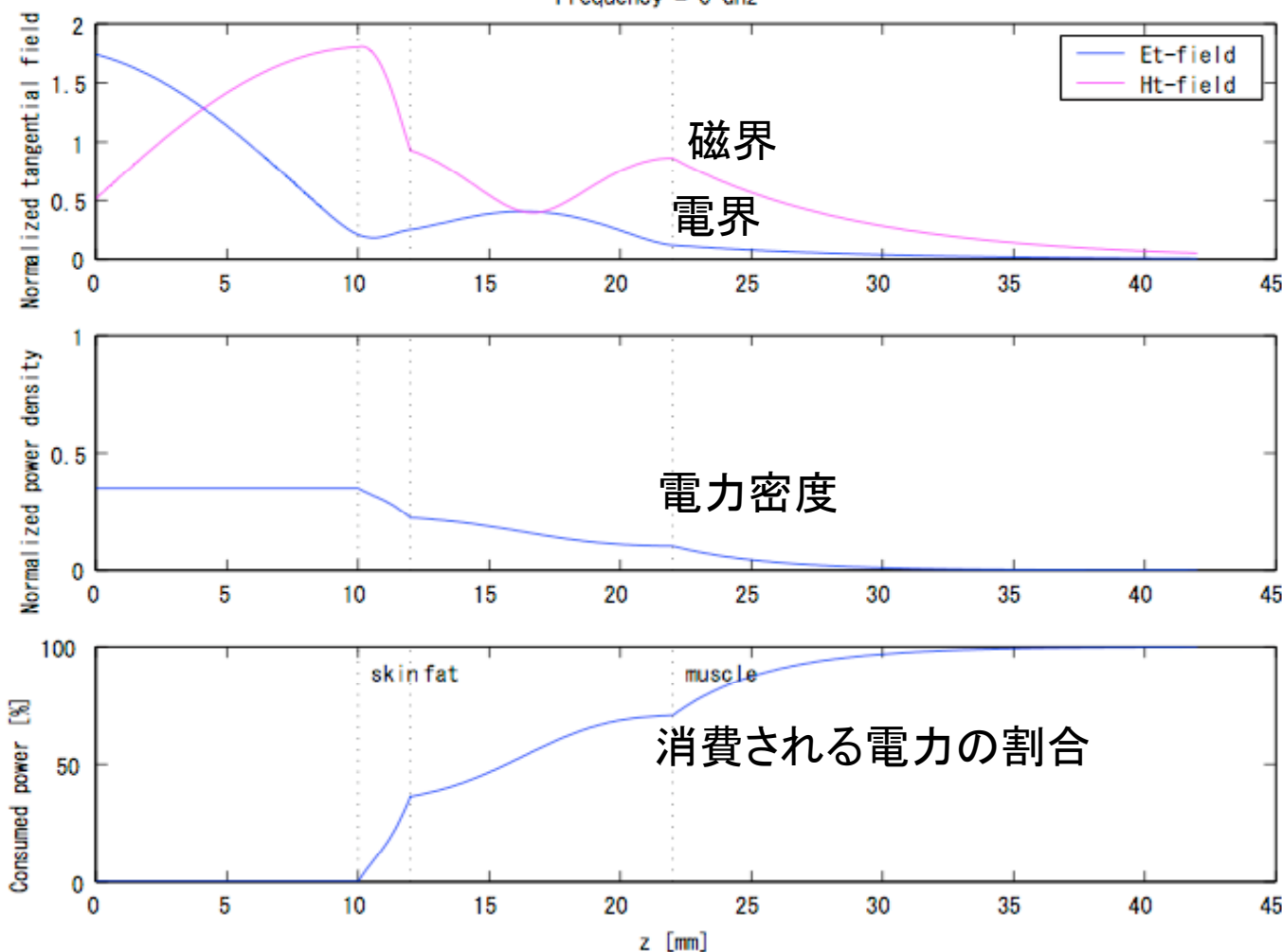
- 3割強が入り込む
(7割弱が反射)

- 厚さ2mmの皮膚で
50%消費される

電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討 平面波と多層平板媒質モデルによる解析(3) ($f = 6\text{GHz}$)

皮膚 脂肪 筋肉

Frequency = 6 GHz

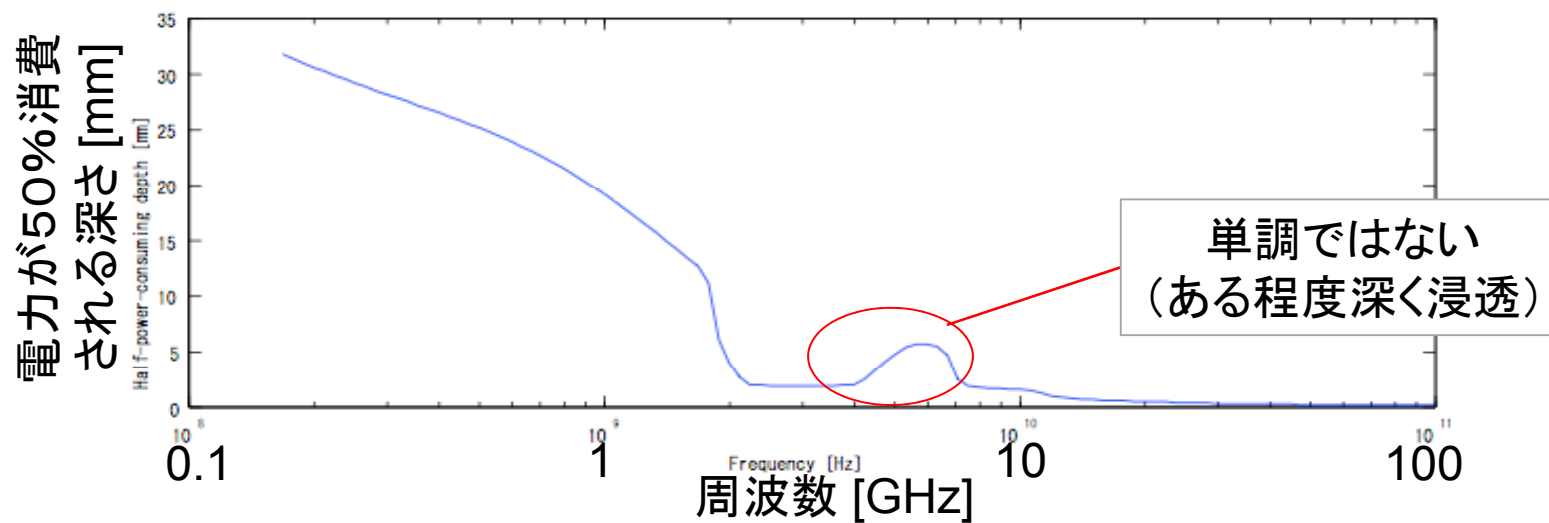
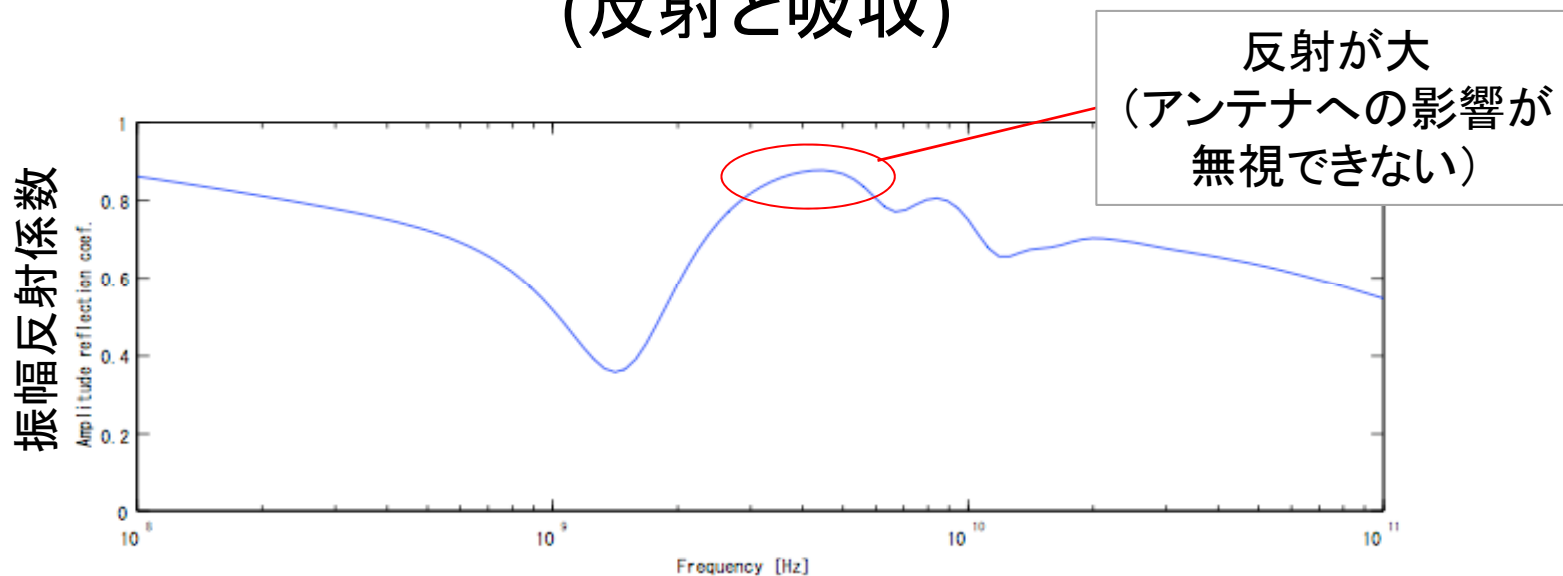


- 電磁界分布がやや複雑に変化

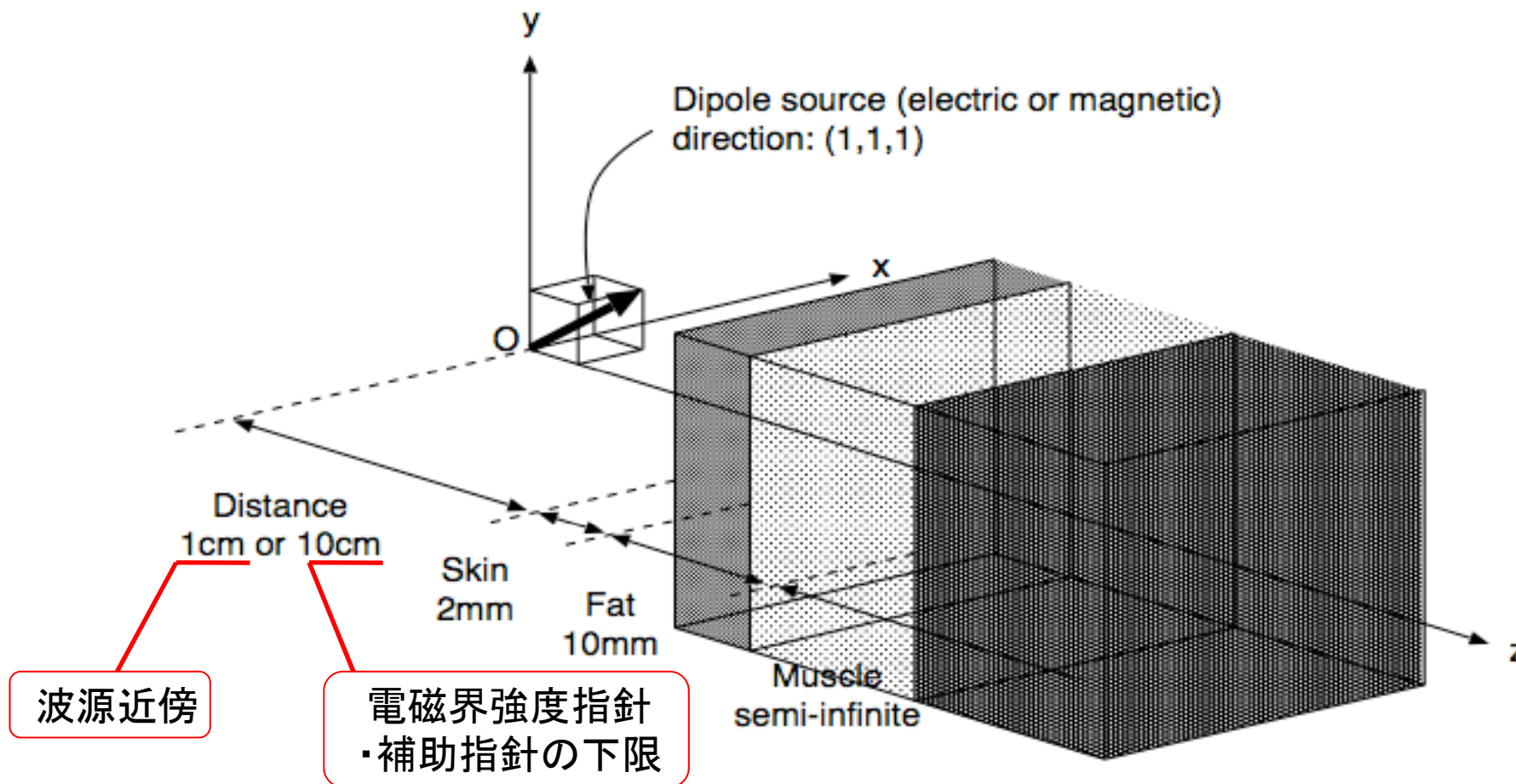
- 3割強が入り込む (7割弱が反射)

- 深さ6mmまでに50%消費される

電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討 平面波と多層平板媒質モデルによる解析 (反射と吸収)



電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討 ダイポール波源と多層平板媒質モデルによる解析

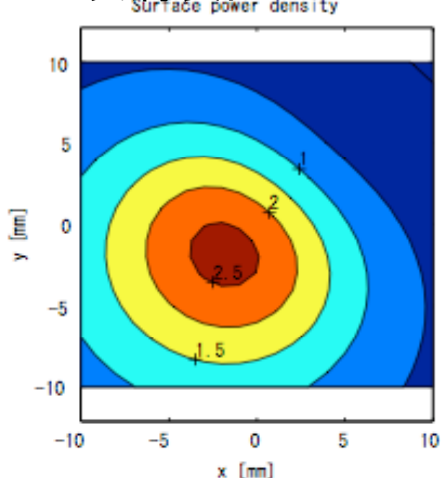


電気ダイポール: 電流素片に対応
磁気ダイポール: 電流ループに対応

} 波源の基本要素

電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討 ダイポール波源と多層平板媒質モデルによる解析 (電気ダイポール波源、周波数3GHz、距離1cm) (0.1波長)

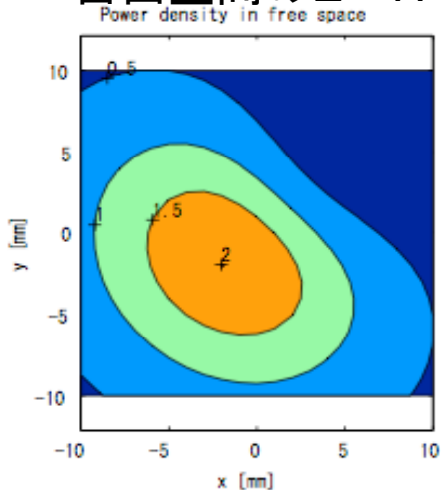
皮膚表面のE×H



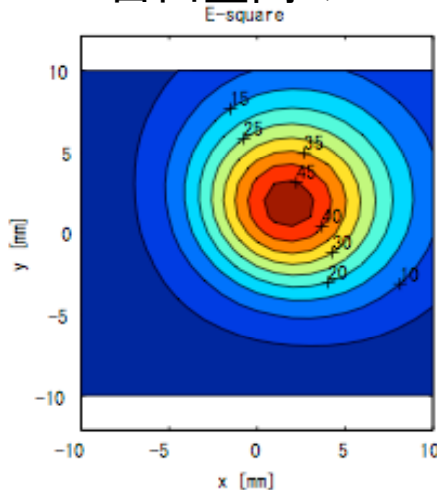
Freq[GHz] = 3, Distance[cm] = 1
 Dipole type: P, Direction: (0.57735 0.57735 0.57735)
 Layer thickness[mm]: skin=2, fat=10

- 人体のあるときの方が最大電力密度が大きい(反射で説明できない)
- 自由空間の諸量はすべて異なる様相を示す

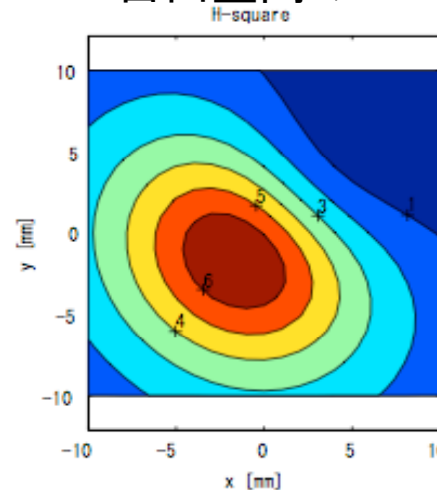
自由空間のE×H



自由空間のE²

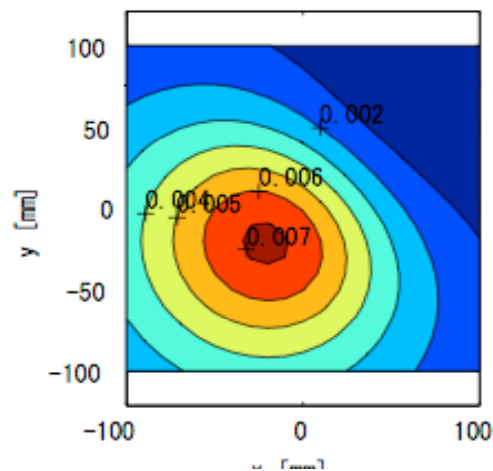


自由空間のH²



電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討
 ダイポール波源と多層平板媒質モデルによる解析
 (電気ダイポール波源、周波数3GHz、距離10cm) (1波長)

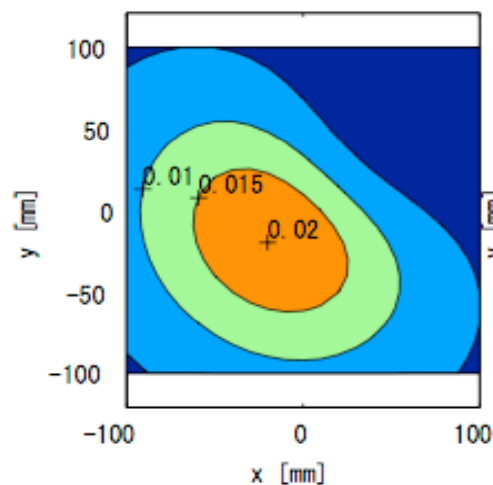
皮膚表面のE×H



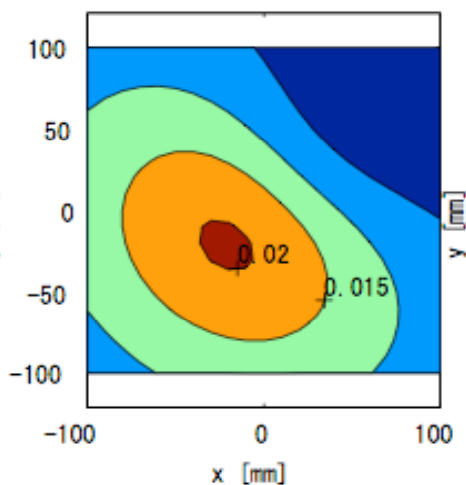
Freq[GHz] = 3, Distance[cm] = 10
 Dipole type: P, Direction: (0.57735 0.57735 1)
 Layer thickness[mm]: skin=2, fat=10

- 人体のあるときの方が最大電力密度が小さい(反射のため)
- 自由空間の諸量は似た分布および数値となる

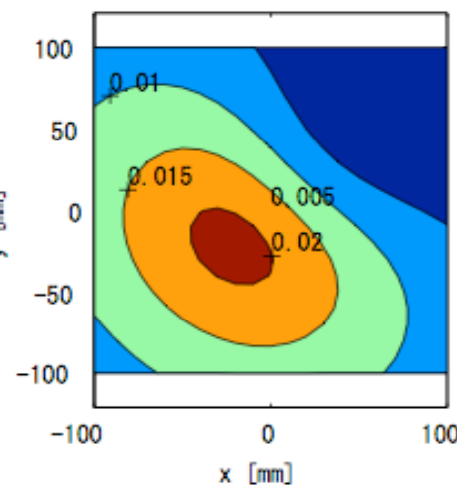
自由空間のE×H



自由空間のE²

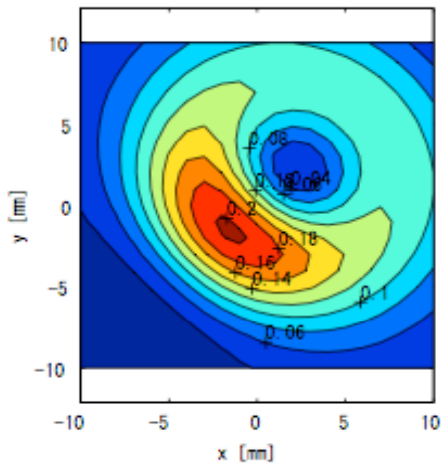


自由空間のH²



電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討
 ダイポール波源と多層平板媒質モデルによる解析
 (磁気ダイポール波源、周波数6GHz、距離1cm) (0.2波長)

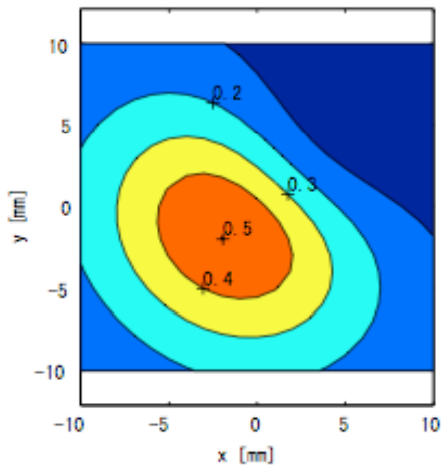
皮膚表面のE×H



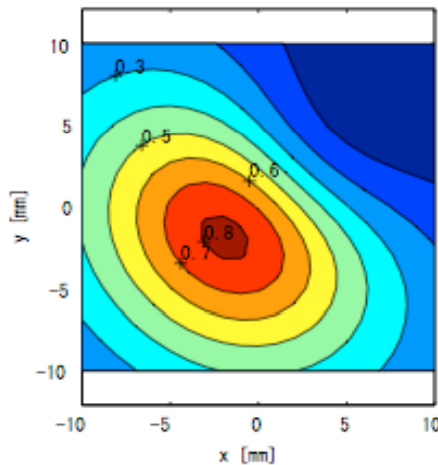
Freq[GHz] = 6, Distance[cm] = 1
 Dipole type: M, Direction: (0.57735 0.57735 0.57735)
 Layer thickness[mm]: skin=2, fat=10

- 人体から逆に電力が湧き出す場所がある
 (遠方界では見られない複雑さ)
- 自由空間の諸量はすべて異なる様相を示す

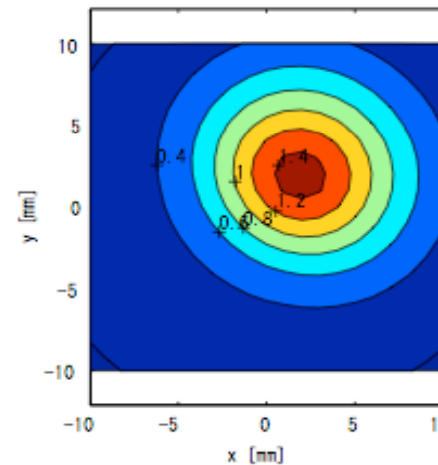
自由空間のE×H



自由空間のE²

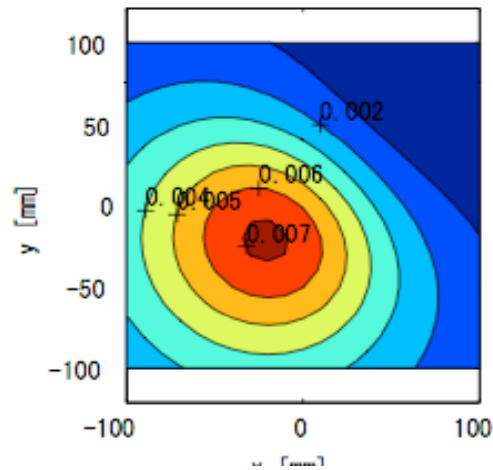


自由空間のH²



電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討
 ダイポール波源と多層平板媒質モデルによる解析
 (磁気ダイポール波源、周波数6GHz、距離10cm) (2波長)

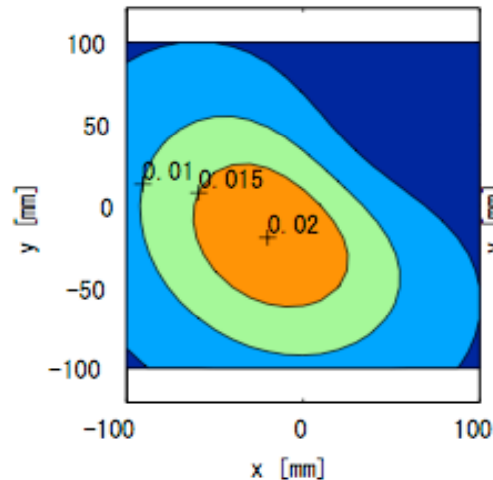
皮膚表面のE×H



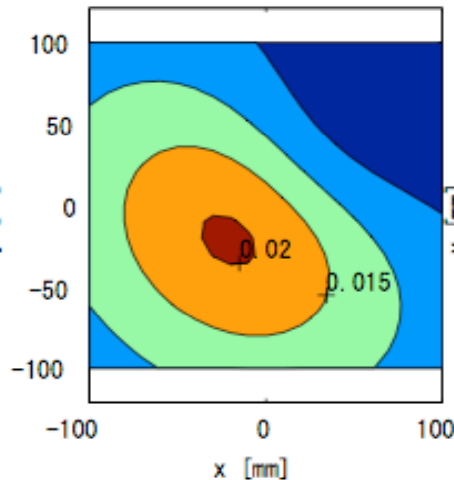
Freq[GHz] = 3, Distance[cm] = 10
 Dipole type: P, Direction: (0.57735 0.57735 1)
 Layer thickness[mm]: skin=2, fat=10

- 人体のあるときの方が最大電力密度が小さい(反射のため)
- 自由空間の諸量は似た分布および数値となる

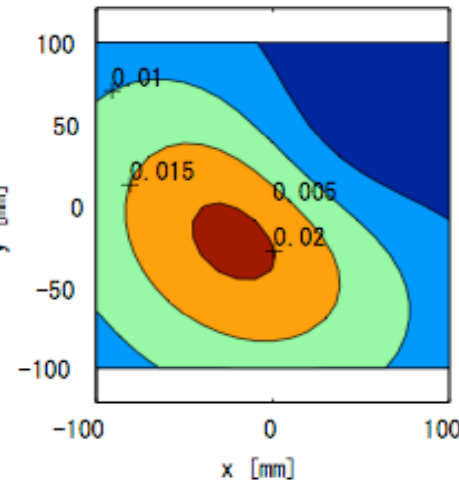
自由空間のE×H



自由空間のE²



自由空間のH²



電磁界強度指針(補助指針)の近接距離変更の可能性の検討 結果の要点

垂直入射平面波に対する計算の結果:

- 振幅反射係数は単調でない周波数特性を示し、3GHz～6GHzでは0.8以上という高い値を示す
→ 人体に近接するアンテナに人体が与える影響は無視できないと推察
- 周波数の増加とともに電力の浸透の深さは減少傾向だが、3GHzから6GHzにかけて、2mmから5mmへと逆に増加

微小ダイポール波源に対する計算の結果:

- 波源距離が1cm(3GHz～6GHzでは0.2波長以下)の場合、自由空間の $E \times H$ 、 E^2 、 H^2 はすべて異なり、人体表面の $E \times H$ とも異なる。後者は波源の種類によっても様相が異なる。
- 波源距離が10cm(3GHz～6GHzでは1波長以上)の場合、自由空間の $E \times H$ 、 E^2 、 H^2 はほぼ一致し、人体表面の $E \times H$ と似た分布となる(反射を考慮するとほぼ一致)。

3～6GHzにおける電磁界強度指針の 近傍距離での適用について

- 人体表面での反射が大きい(特に3～6GHz)
 - 人体が波源に影響を与える可能性があり、人体のない状態で評価する電磁界強度指針の考え方が適さない場合がある
- 波源と人体の距離が10cm以上であれば、入射電力密度、 E^2 、 H^2 は似た傾向
 - 電磁界強度指針や補助指針は波源から10cm以上の空間では適切であるといえる
- しかし、波源が非常に近い場合はこれらが複雑な振る舞いをする
 - 電磁界強度指針や補助指針を人体に極めて近接して使用する機器に適用することはできない
- 電界強度および磁界強度を波源の極めて近傍で測定する場合、測定プローブが電磁界や波源の特性に影響が及ぼす問題が第38号答申で指摘されている(第38号答申4.3(3), p.22)
 - 電磁界強度指針および補助指針を波源近傍で適用することに対しては、測定方法に関する問題が予想される

電磁界強度指針の近接距離の条件を変更することは困難

検討結果のまとめ

- 電磁界強度指針の近接距離の条件を波源と人体の距離が10cm以内でも適用できるように変更することは困難である。
- 現行の局所吸収指針の上限周波数を改訂することが適当
 - 局所吸収指針の上限周波数を、現行の3GHzから6GHzへ変更することが適当
 - 局所吸収指針は300MHz以上3GHz未満では、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10cm以内の場合に原則として適用されるが、20cm程度までの距離まで適用できる