

局所吸収指針作業班 審議状況報告(案)

作業班主任 多氣 昌生

平成22年5月18日

電波防護指針の構成

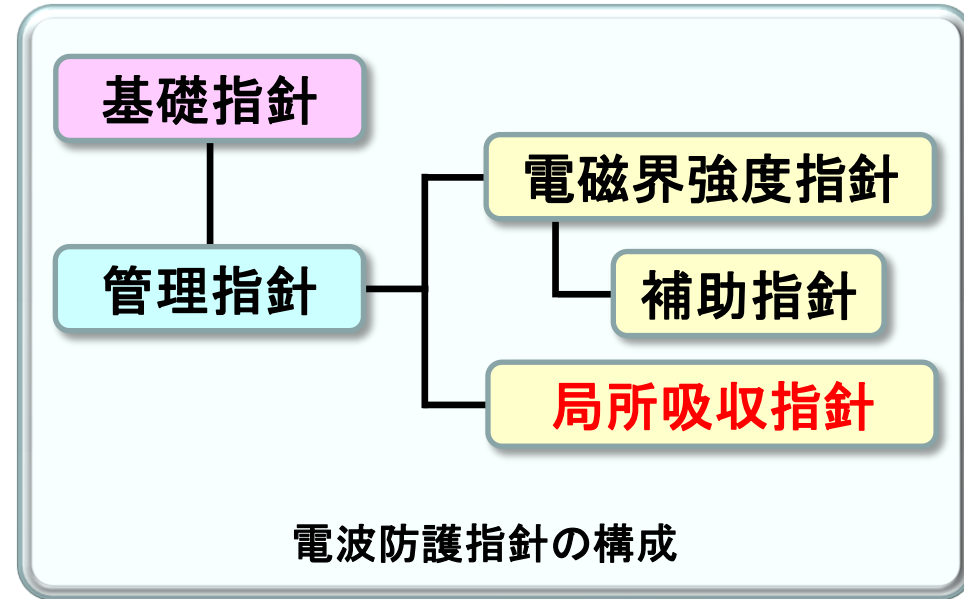
基礎指針の位置づけ

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。

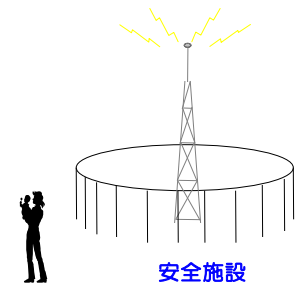


管理指針の構成

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。

電磁界強度指針の適用



電波の強さが許容値を超える場所に安全施設の設置を義務付け（電波法施行規則 21 条の3）

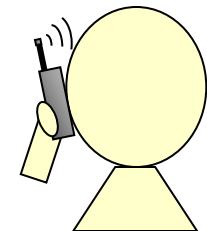
補助指針の位置づけ

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。

局所吸収指針の適用



人体頭部で吸収される電力の比吸収率の許容値(2W/kg)を強制規格化（無線設備規則第14条の2）

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
- 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当たり）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

3GHz以上の周波数にて局所SARを評価する平均化質量の妥当性

- 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*

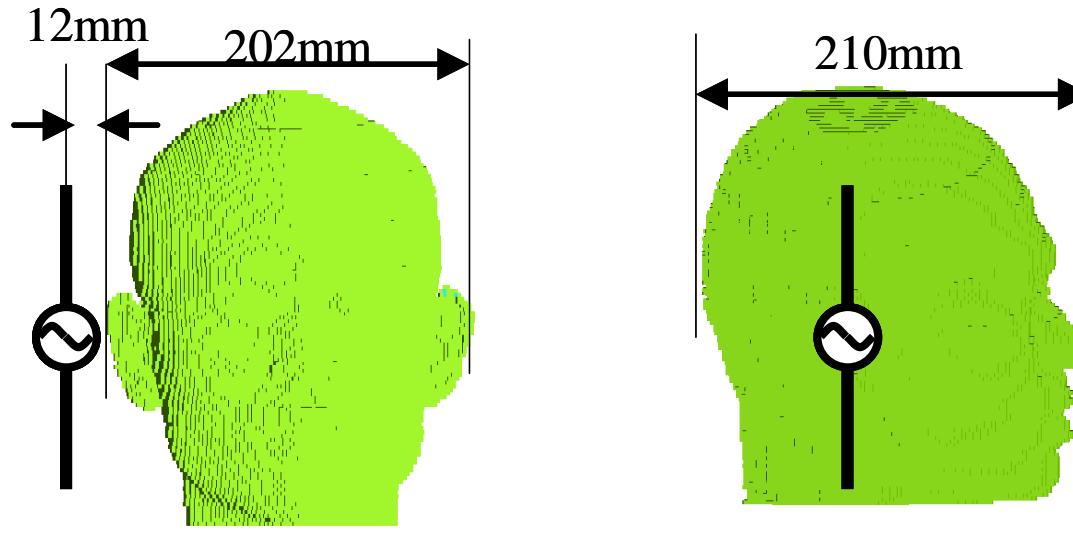
$$\Delta T = a \times SAR \quad (1)$$

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、数値人体モデルの精度は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

3GHz以上の周波数にて局所SARを評価する平均化質量 の妥当性 検討のアプローチ



- 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

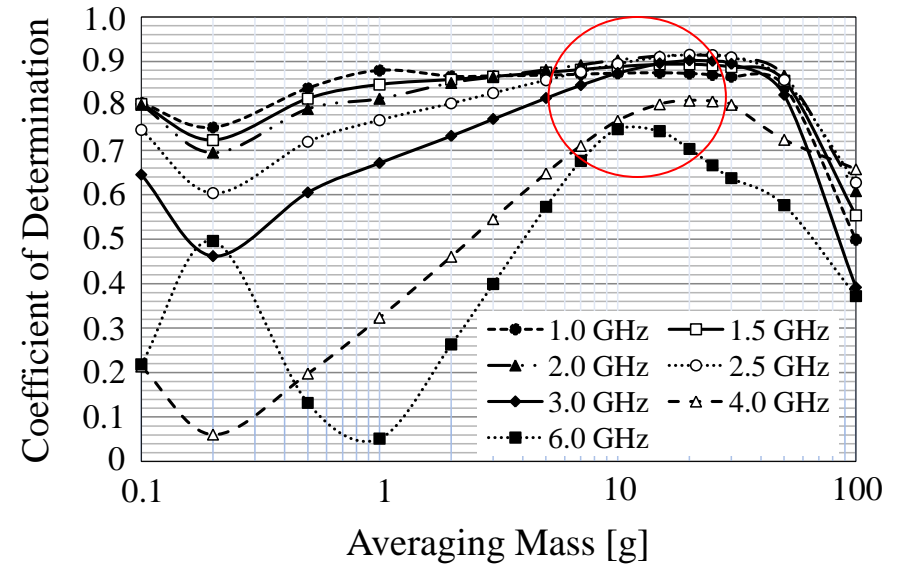
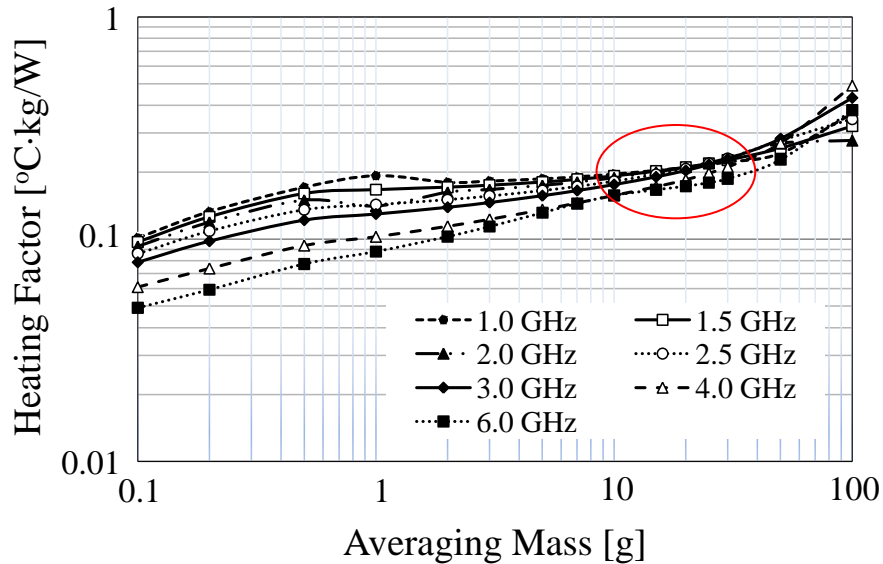
•評価指標: 加温係数および決定係数で評価。

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

3GHz以上の周波数にてSARの評価する単位の妥当性 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）

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との整合性：眼球の温度上昇

出展	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)

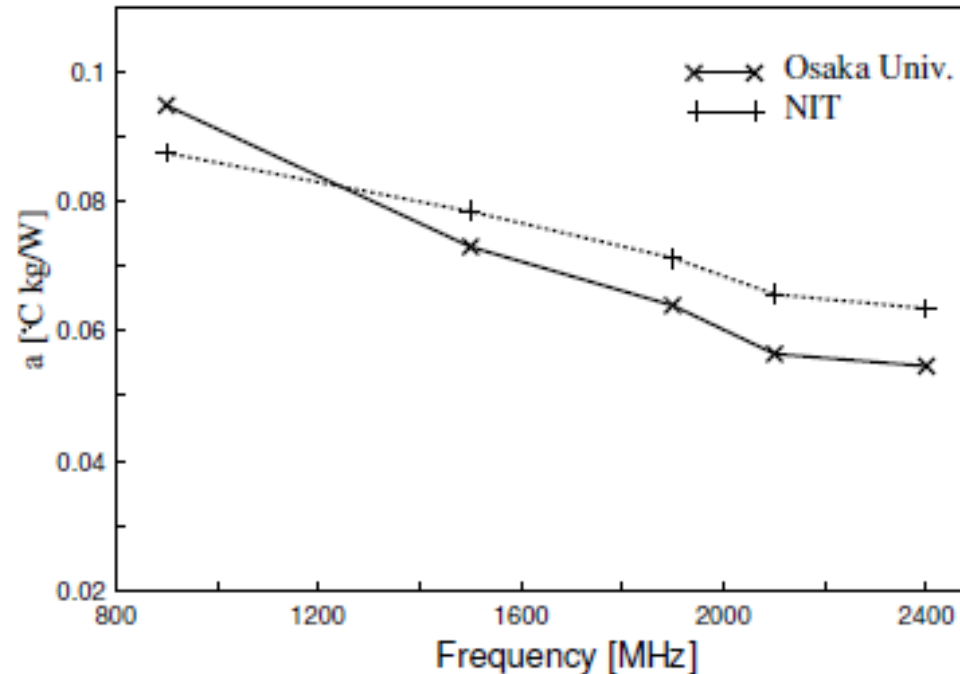
3GHz以下の結果は、Hirata et al, Phys. Med. Biol. (2007)において、複数の論文を同一条件に換算した値

•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 (2007)の結果を、立方体SARを用いて換算した場合、0.9°C@5GHz
 - Laaksoの結果を立方体形状の平均化で表わすと、0.8°C@3GHz, 1.0°C@5GHz, 1.6°C@10GHz
- 10g平均がSAR10W/kgに対して、おおむね眼球温度上昇は1度程度

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との整合性：脳内の温度上昇



- 縦軸は、脳内温度上昇の最大値を頭部10g平均SAR(立方体形状)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に指標は小さくなる傾向。

2-⑤関連事項

入射電力密度とSARの相関関係について

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.

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

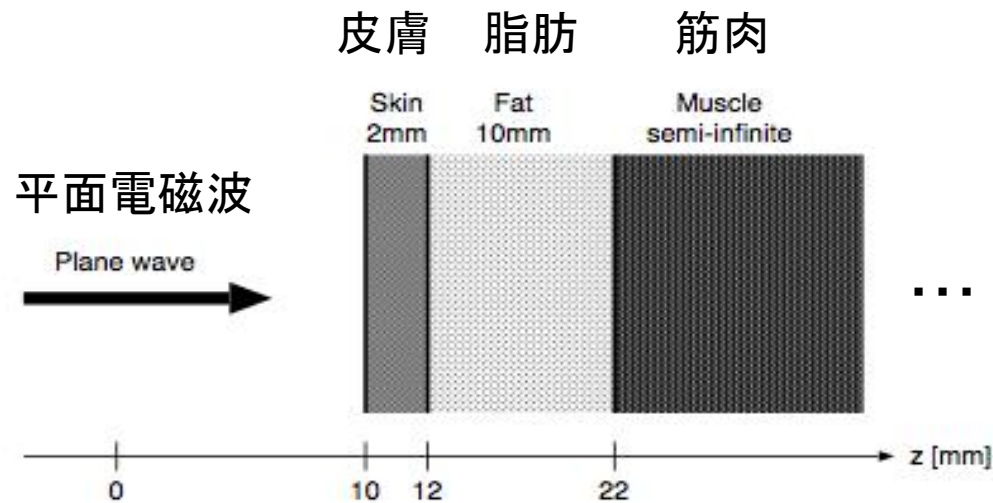
- 人体からの反射波により、アンテナに流れる電流が変化
(人体と切り離れた評価は、実使用状態と異なる可能性あり)

→ 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

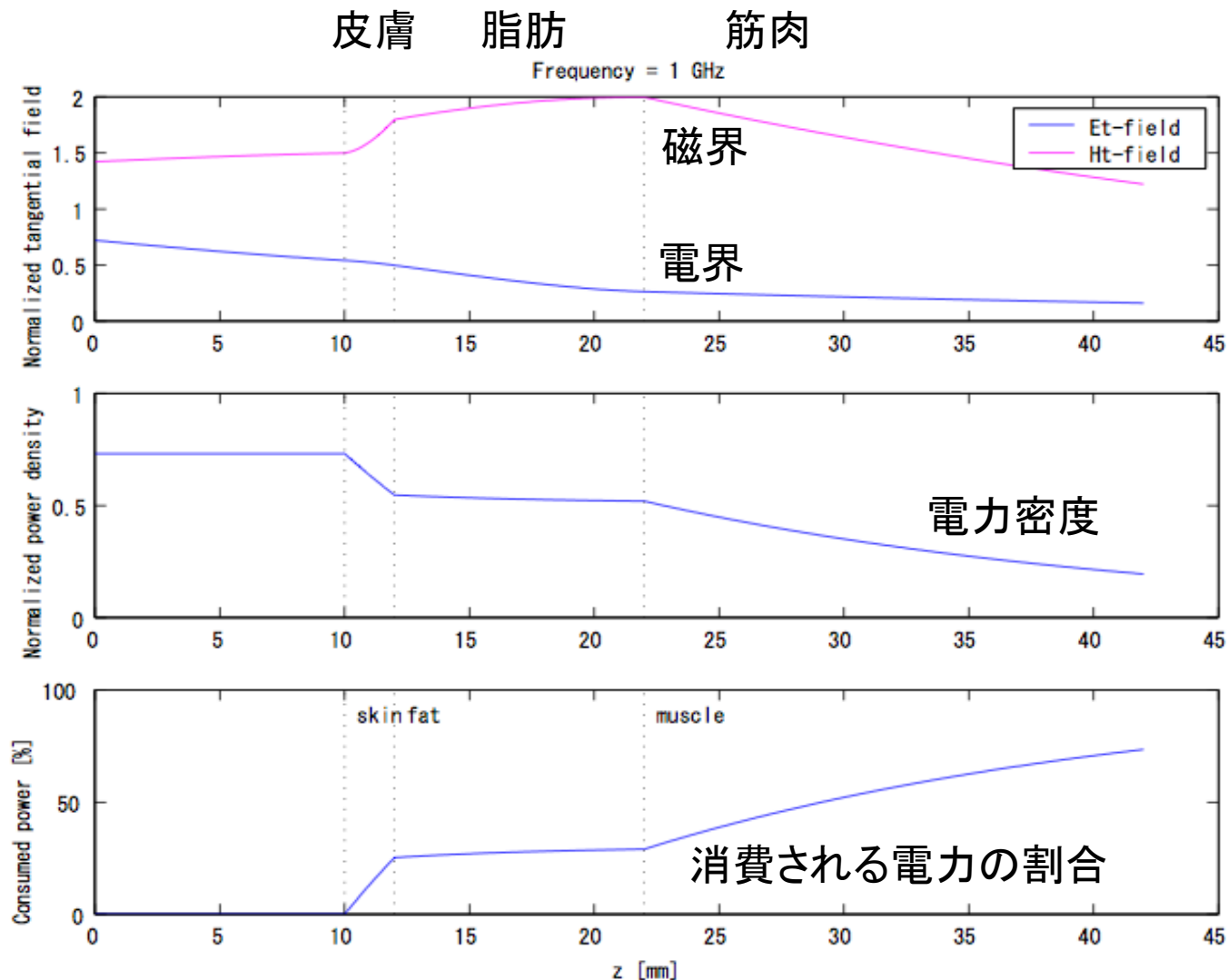
→ 人体に近接する波源による、電力密度や電磁界強度の関係を数値計算

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

平面波と多層平板媒質モデルによる解析 ($f = 1\text{GHz}$)



- 電界がなだらかに減衰

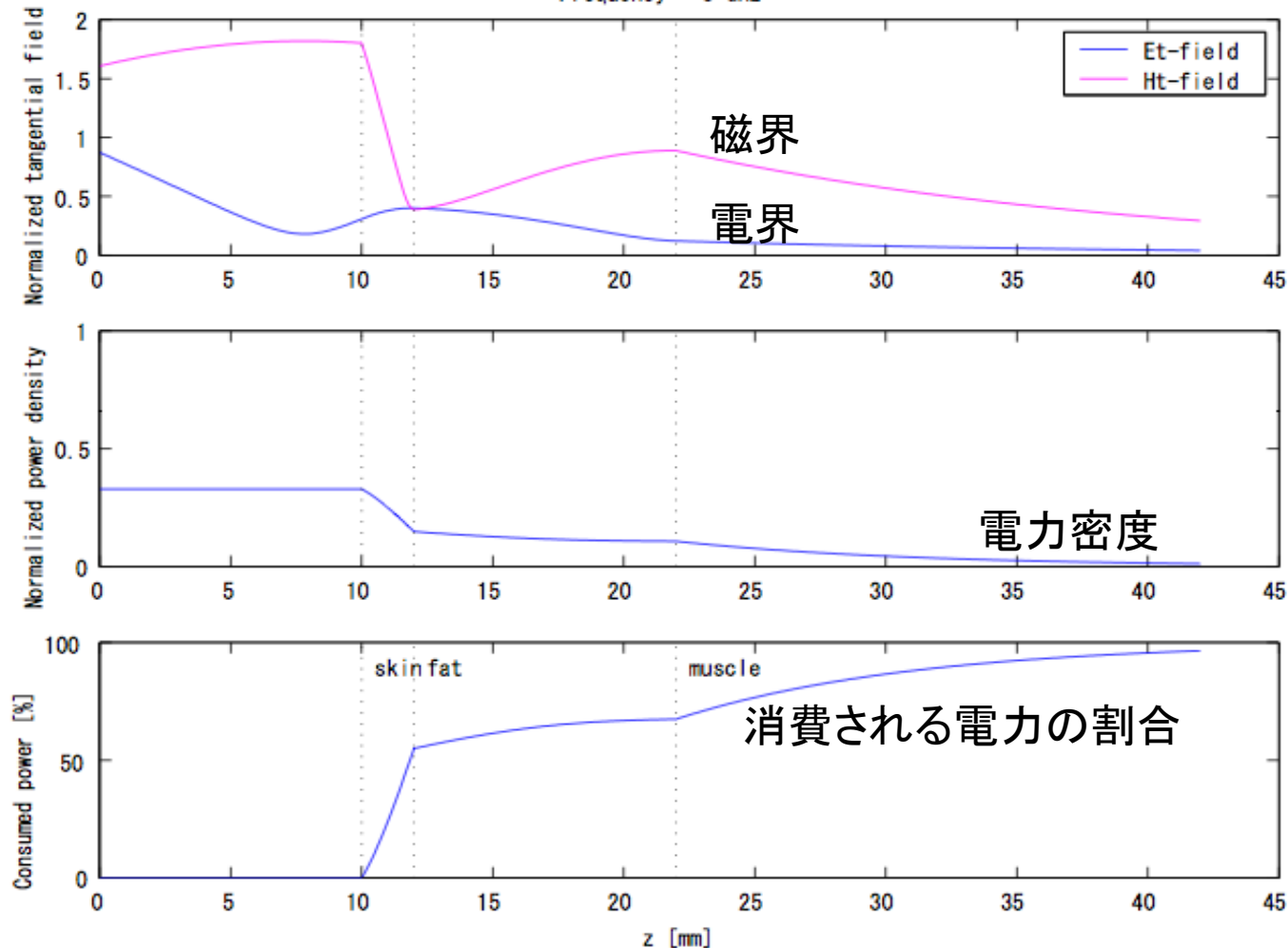
- 7割強が入り込む
(3割弱が反射)

- 深さ20mmまでに
50%消費される

平面波と多層平板媒質モデルによる解析 ($f = 3\text{GHz}$)

皮膚 脂肪 筋肉

Frequency = 3 GHz



- 電界がなだらかに減衰

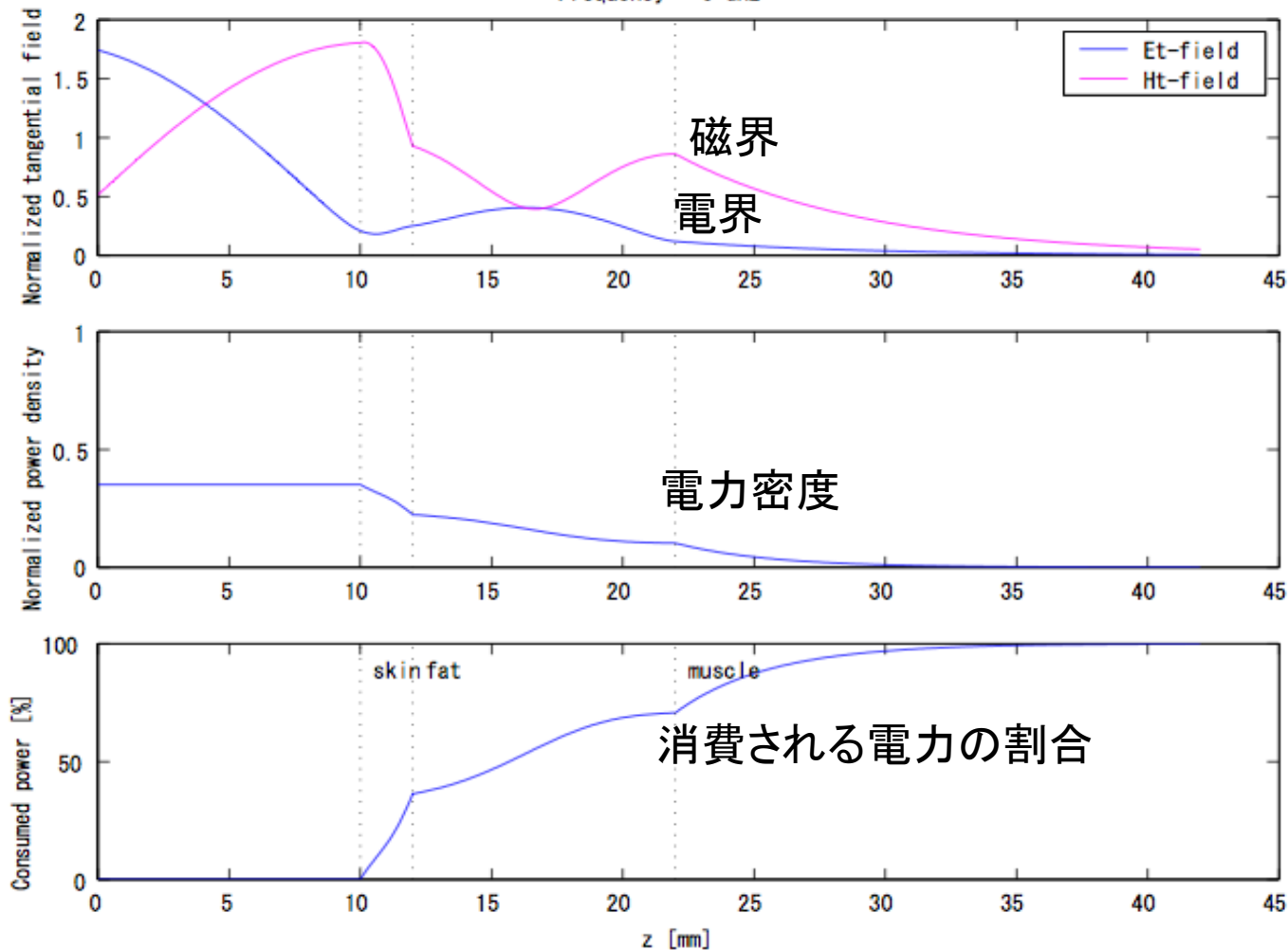
- 3割強が入り込む
(7割弱が反射)

- 厚さ2mmの皮膚で
50%消費される

平面波と多層平板媒質モデルによる解析 ($f = 6\text{GHz}$)

皮膚 脂肪 筋肉

Frequency = 6 GHz

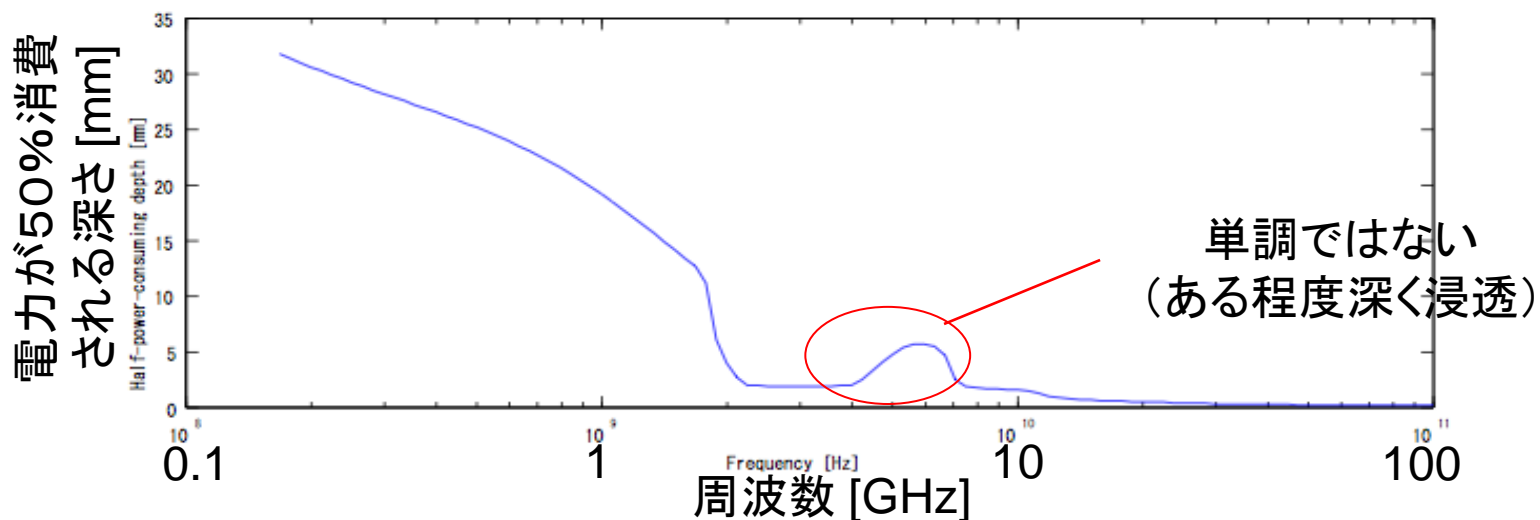
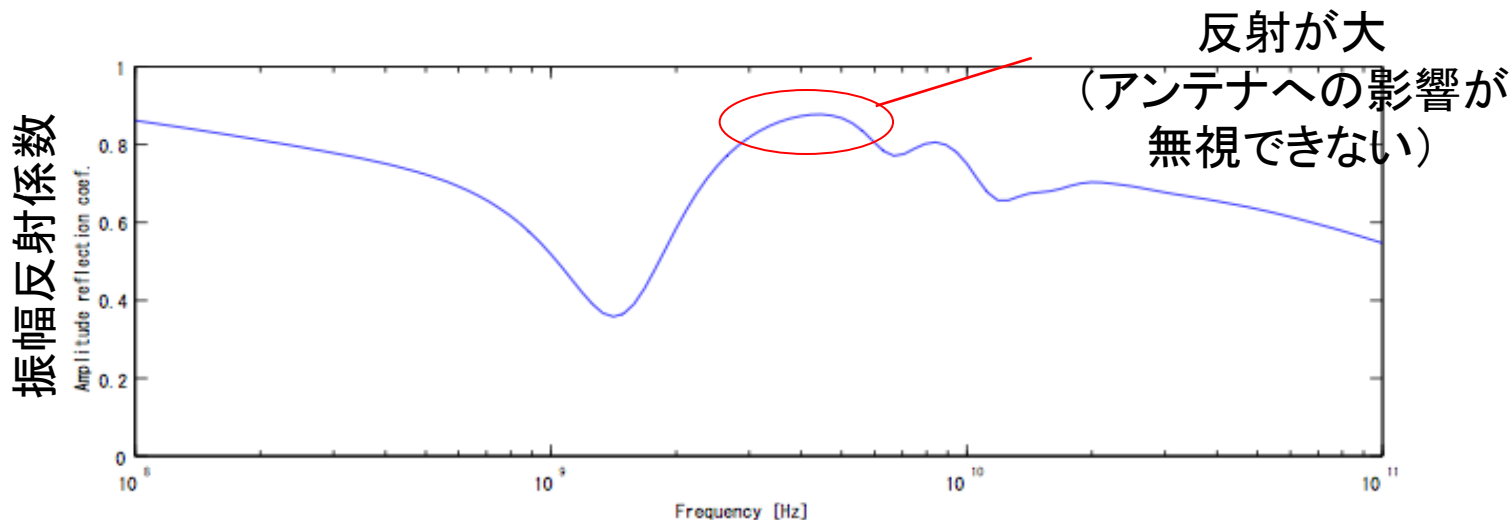


- 電磁界分布がやや複雑に変化

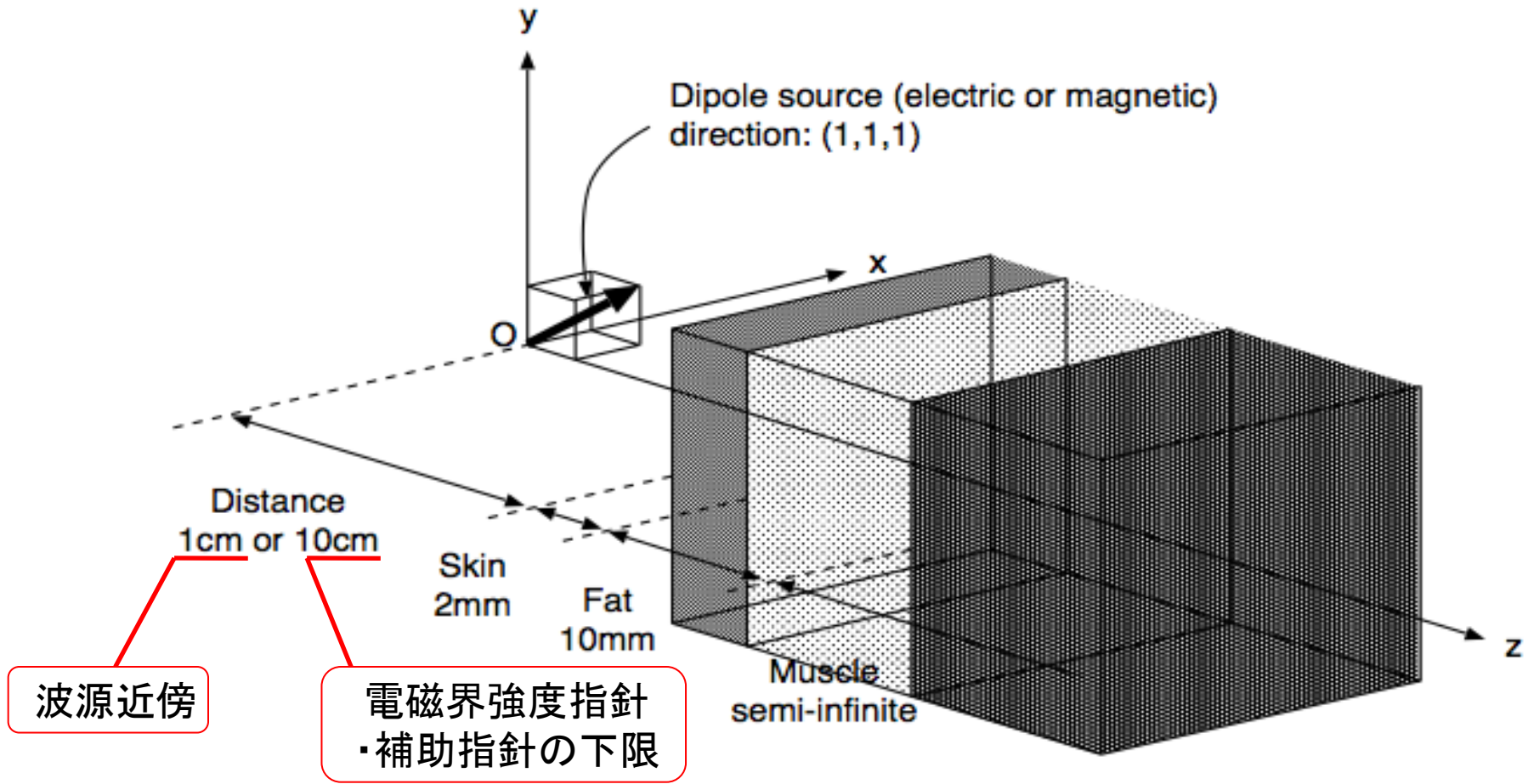
- 3割強が入り込む (7割弱が反射)

- 深さ6mmまでに50%消費される

平面波と多層平板媒質モデルによる解析 (反射と吸収)



ダイポール波源と多層平板媒質モデルによる解析

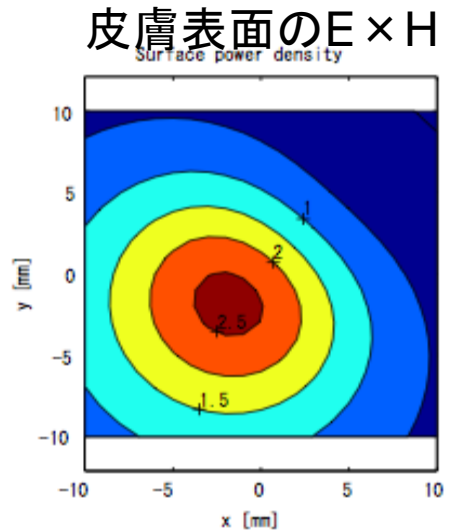


電気ダイポール: 電流素片に対応
磁気ダイポール: 電流ループに対応

} 波源の基本要素

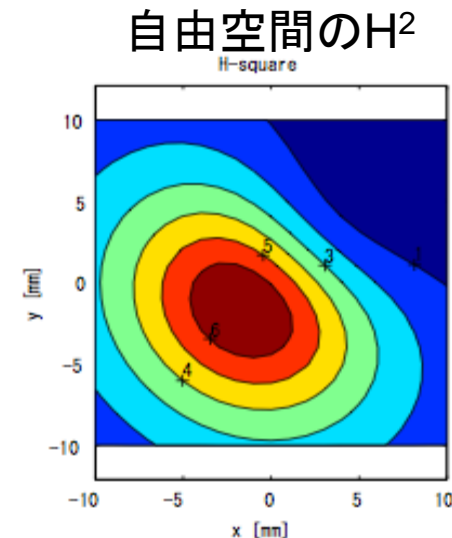
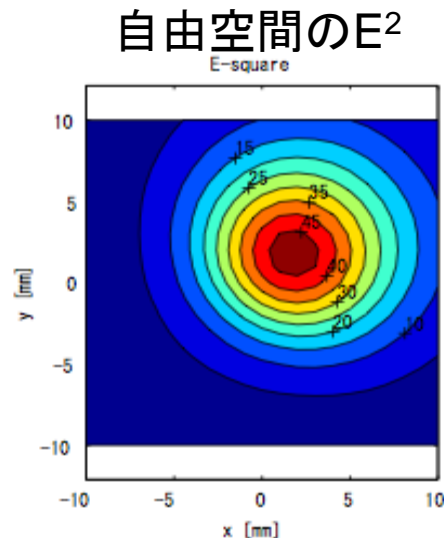
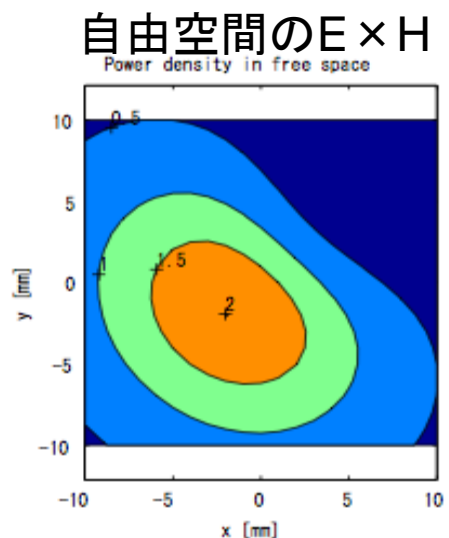
ダイポール波源と多層平板媒質モデルによる解析 (電気ダイポール波源、周波数3GHz、距離1cm)

(0.1波長)



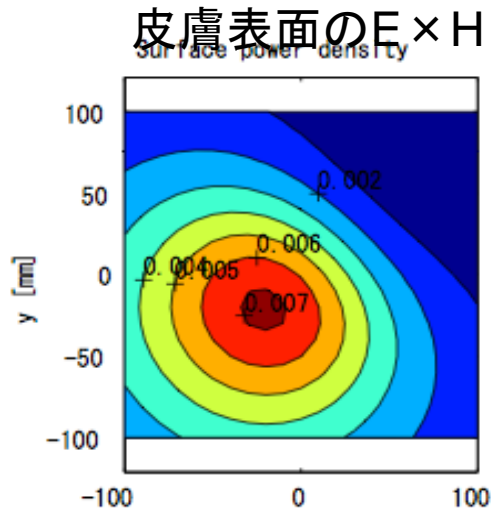
Freq[GHz] = 3, Distance[cm] = 1
Dipole type: P, Direction: (0.57735 0.57735 0.57735)
Layer thickness[mm]: skin=2, fat=10

- 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



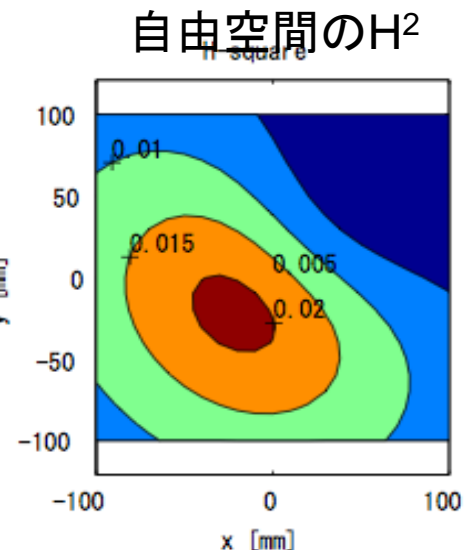
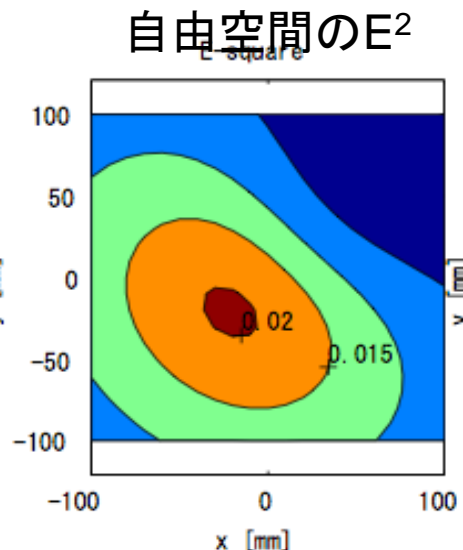
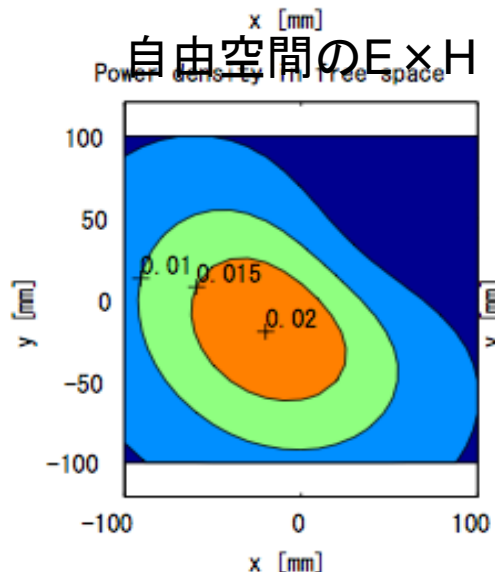
ダイポール波源と多層平板媒質モデルによる解析 (電気ダイポール波源、周波数3GHz、距離10cm)

(1波長)



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

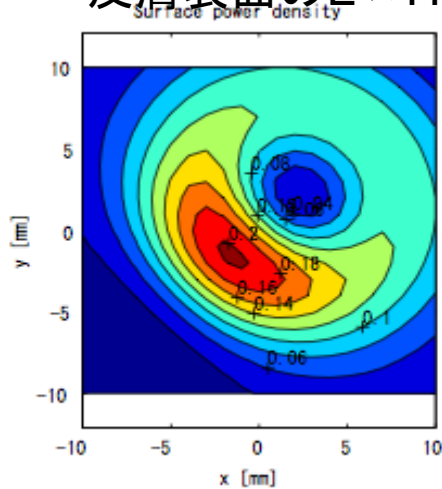
- 人体のあるときの方が最大電力密度が小さい(反射のため)
- 自由空間の諸量は似た分布および数値となる



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)

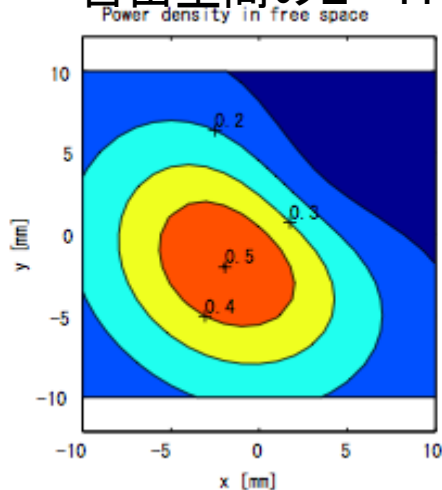
皮膚表面のE×H



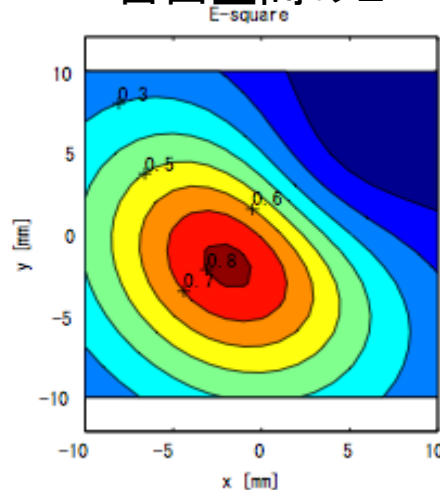
Freq[GHz] = 6, Distance[cm] = 1
Dipole type: M, Direction: (0.57735 0.57735 0.57735)
Layer thickness[mm]: skin=2, fat=10

- 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

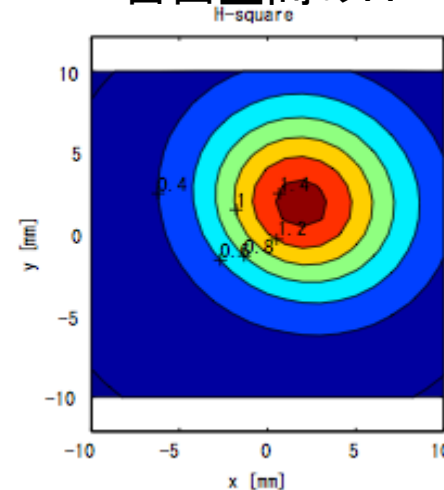
自由空間のE×H



自由空間のE²

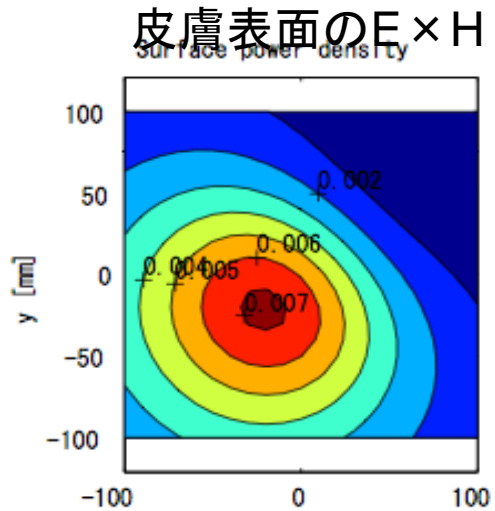


自由空間のH²



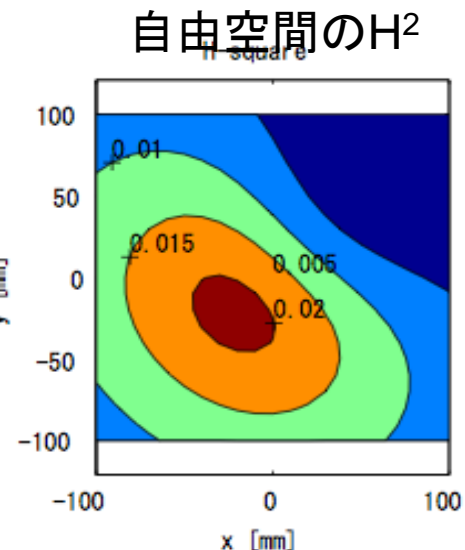
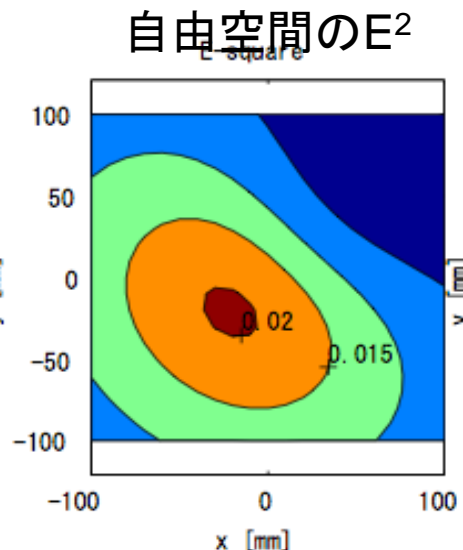
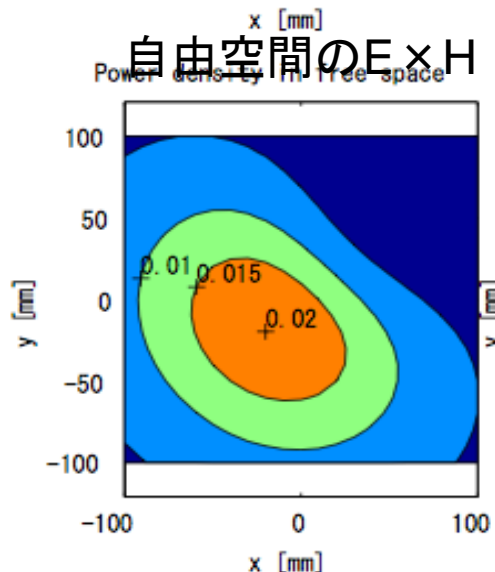
ダイポール波源と多層平板媒質モデルによる解析 (磁気ダイポール波源、周波数6GHz、距離10cm)

(2波長)



Freq[GHz] = 3, Distance[cm] = 10
Dipole type: P, Direction: (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



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)。

これまでの検討結果(まとめ)

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

局所吸収指針の周波数上限の改定の検討

- ・ 6GHz程度まで、温度上昇は平均化質量を10gとしたSARとよい相関を示す
 - 平均化質量を10gとしたSARは6GHzまでの生体影響の指標として適用できる
- ・ 平均化質量10gで10W/kg以内であれば、眼球の温度上昇はおよそ1°C以下である また、2W/kgではおよそ0.2 °C程度である
 - 基礎指針の考え方に矛盾しない
- ・ 眼への入射電力密度が2mW/cm²という従来の条件から導かれる平均化質量10gのSARは、600MHzから6GHzで、0.8～1.2W/kg程度である
 - 3～6GHzにおいて、入射電力密度による条件をSARに置き換えても防護指針の整合性は崩れない

現行の局所吸収指針の上限周波数を3GHzから6GHzへ変更することが適当