

人体表面近傍の電磁波源と電磁界について

東京工業大学 西方敦博

1 はじめに

人体に近接して置かれる無線機器による電磁界曝露量を評価する上で問題となるであろう、次の 3 つの問題を考える。

1. 人体近傍では、人体表面での電波の反射により、無線機器のアンテナ電流が変化することが予想される。
2. 仮に、アンテナ電流が人体によって変化しないとみなせる場合でも、自由空間において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、異なる様相を示すことが考えられる。
3. 人体内部で電磁波が短距離で減衰するような周波数では、人体等価ファントム内でも同様となるため、プローブの大きさが有限である制限から、電界強度の測定が困難になると考えられる。

1 と 3 について考察するために、平面電磁波が人体表面でどの程度反射され、どの程度の深さまで浸透するかを数値計算した。

2 について考察するために、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調べた。

2 平面波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 2mm）、脂肪層（厚さ 10mm）、および筋肉層（半無限厚）からなり、各層は z 軸に垂直かつ無限大とした。各層には図 2 に示す複素誘電率を与えた。同解析モデルについて、伝送線路アナロジーにより厳密解を求め、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。電力密度とは、入射電力密度を 1 としたときの全電力密度である。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。表面から入った正味の電力を 100 % とし、表面から深さ z までに消費される電力の割合を z に対して表したのが下段のグラフである。皮膚層による電力の吸収があり、脂肪層ではあまり吸収されずに透過し、筋肉層で徐々に吸収されることが分かる。また、表面から入った電力のうちの 50 % が消費されるための深さは、約 20mm であることが分かる。

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。概して周波数が高いほど皮膚による吸収が大きくなるが、3GHz から 6GHz にかけては逆に吸収が小さくなり、電界の極大点が脂肪層の深い側に移動する傾向が見られる。10GHz では電界の浸透は弱くなり、60GHz においては皮膚層でほぼ完全に減衰することが分かる。

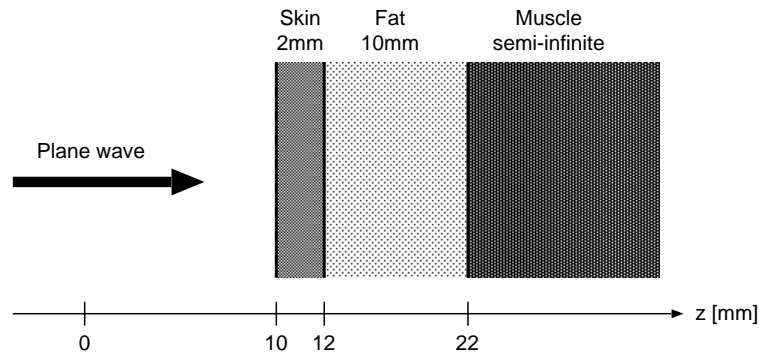


図 1 多層平板媒質で模擬した人体と垂直入射平面波のモデル

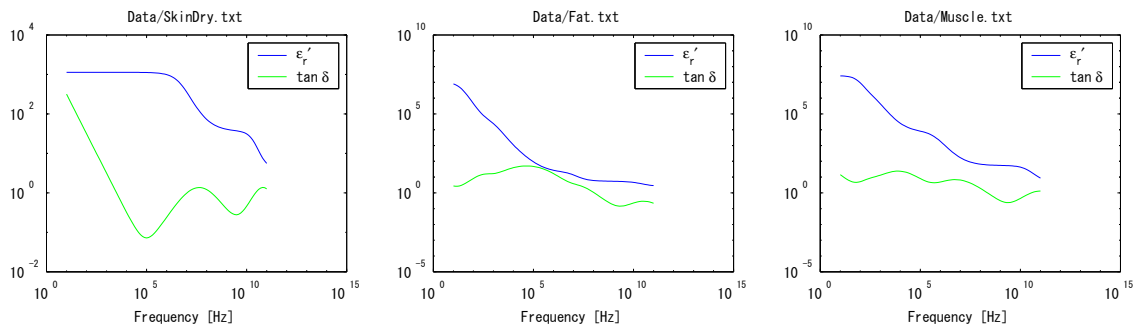


図 2 計算に用いた皮膚（左）・脂肪（中央）・筋肉（右）の比誘電率と誘電正接 (Dielectric Properties of Body Tissues, Italian National Research Council, <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/> より)

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 ~ 6GHz 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に人体が与える影響は無視できないことが推測される。

図 8 の下段は、表面から入った電力の半分が消費される深さ、言い換えれば電力の浸透深さを、周波数の関数として表したものである。特徴的な点としては、

- 低周波側では単調に減少するが、2GHz の前後で 10mm から 2mm へと急激に減少しほぼ一定となること
- 4GHz と 7GHz の間に 5mm ほどのピークがあること
- 10GHz を超えると皮膚厚みの 2mm よりも薄くなっていくこと

である。3GHz から 6GHz にかけては、2mm から 5mm へとむしろ増加する。

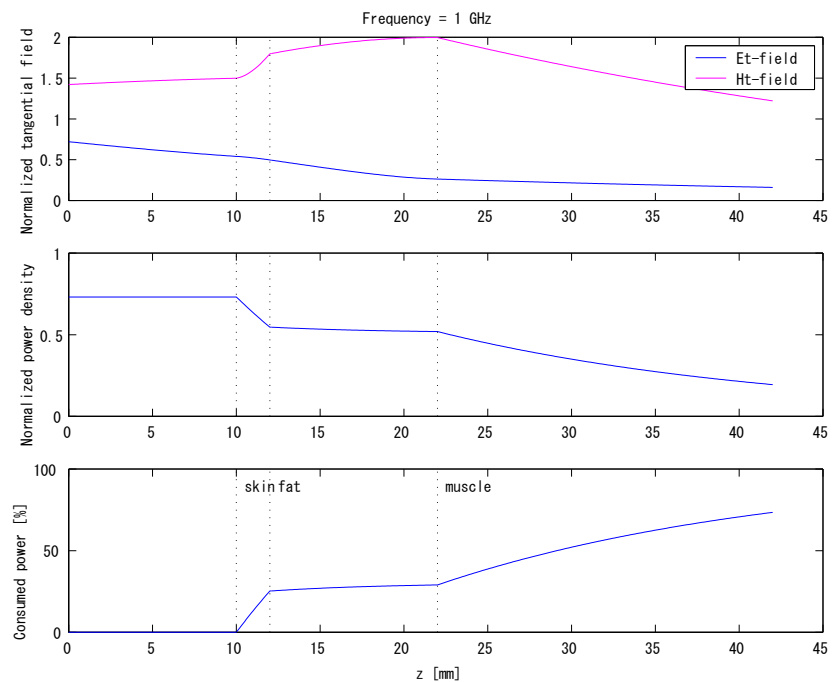


図3 1GHzにおける、電磁界振幅（上段）、 z 方向の電力密度（中段）、表面から深さ z までに消費される電力の割合（下段）

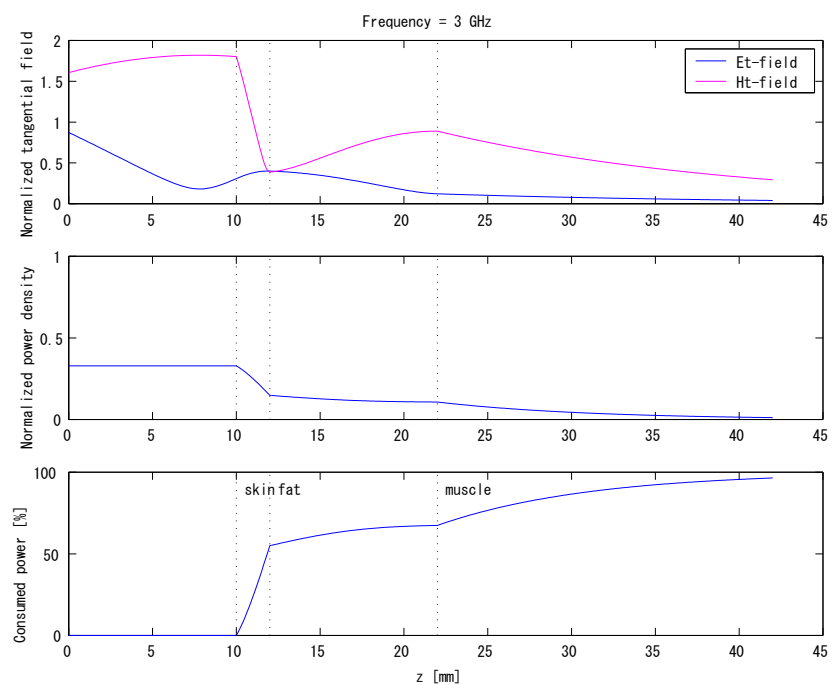


図4 3GHzにおける、電磁界振幅（上段）、 z 方向の電力密度（中段）、表面から深さ z までに消費される電力の割合（下段）

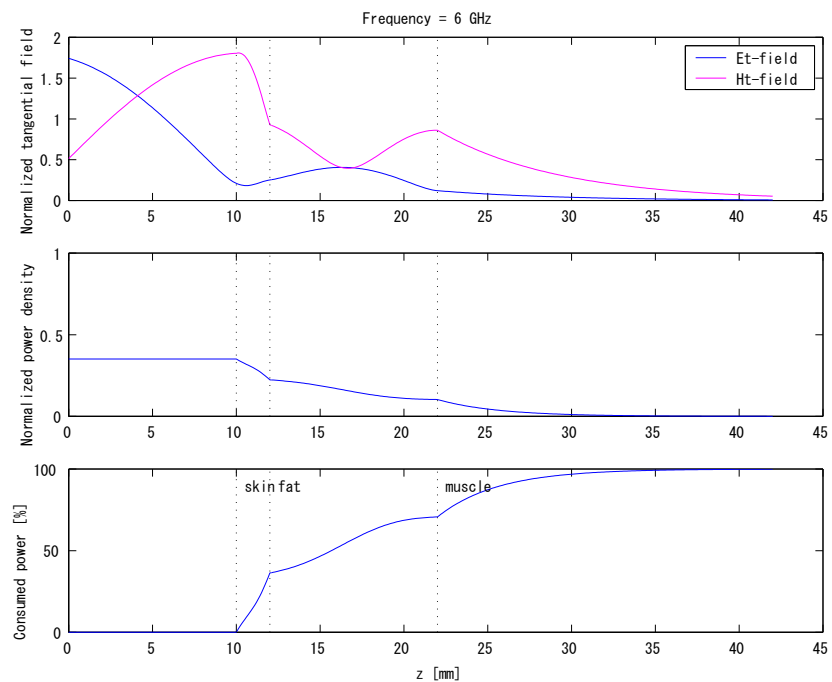


図5 6GHzにおける、電磁界振幅（上段）、 z 方向の電力密度（中段）、表面から深さ z までに消費される電力の割合（下段）

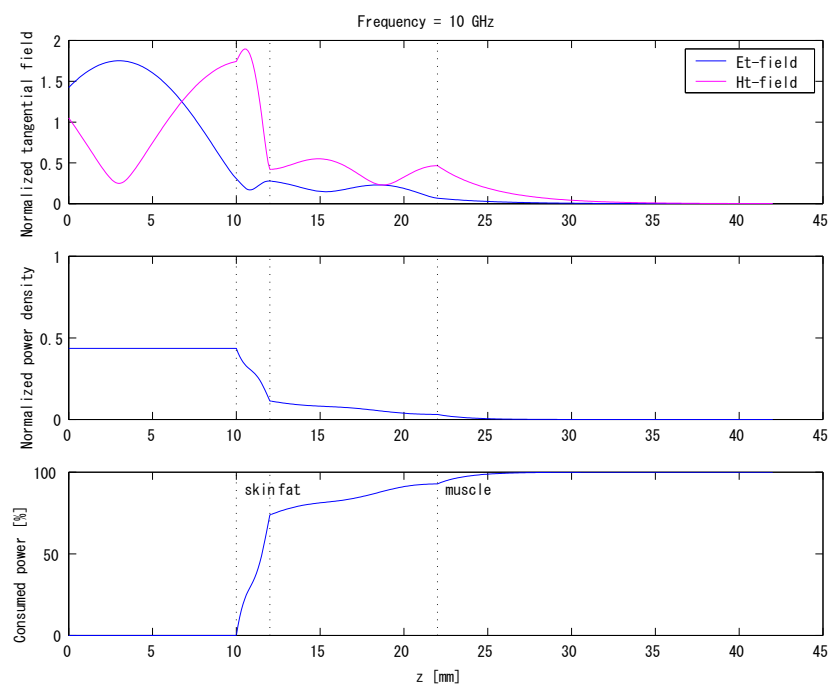


図6 10GHzにおける、電磁界振幅（上段）、 z 方向の電力密度（中段）、表面から深さ z までに消費される電力の割合（下段）

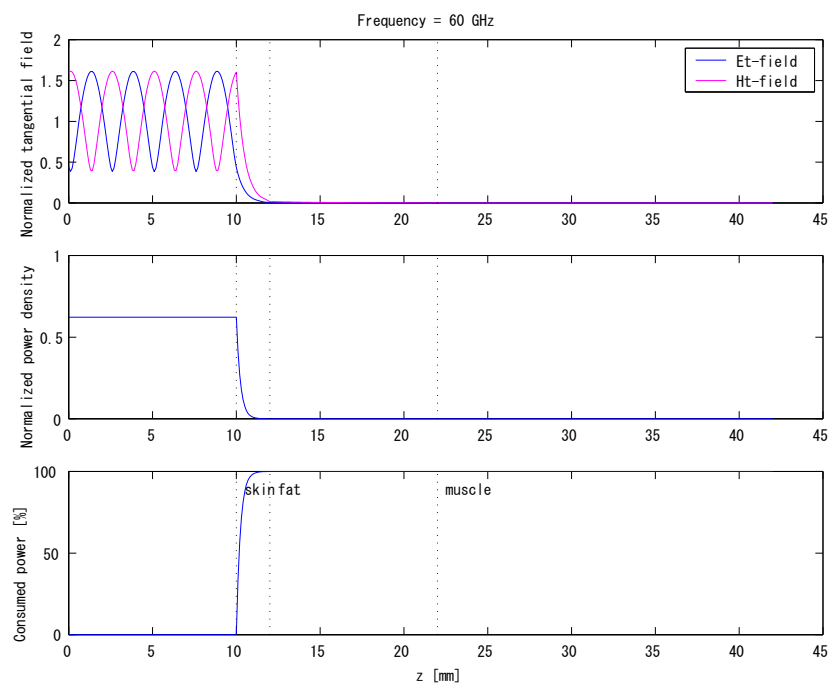


図 7 60GHz における、電磁界振幅（上段）、 z 方向の電力密度（中段）、表面から深さ z までに消費される電力の割合（下段）

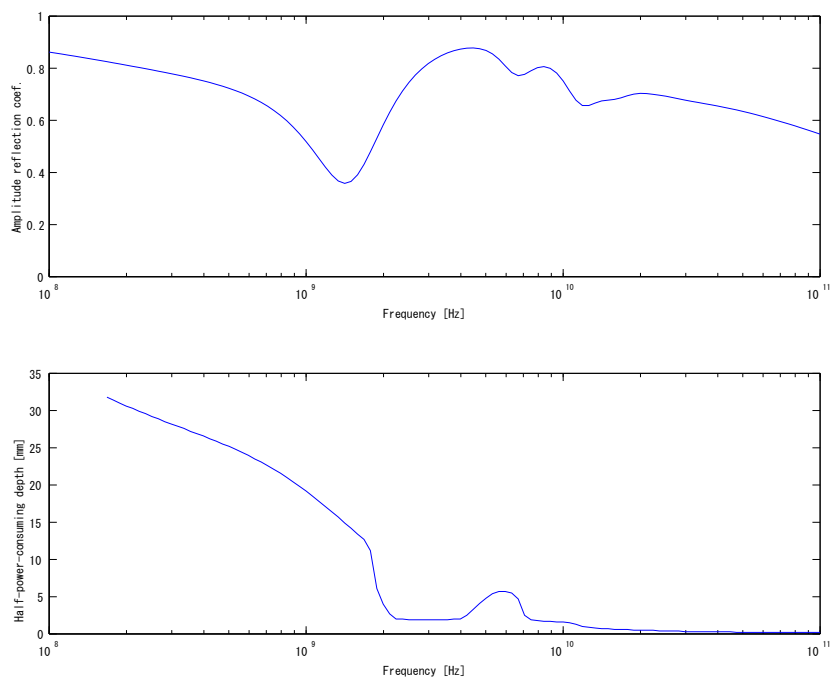


図 8 振幅反射係数（上段）、電力を 50 パーセント消費する深さ（下段）

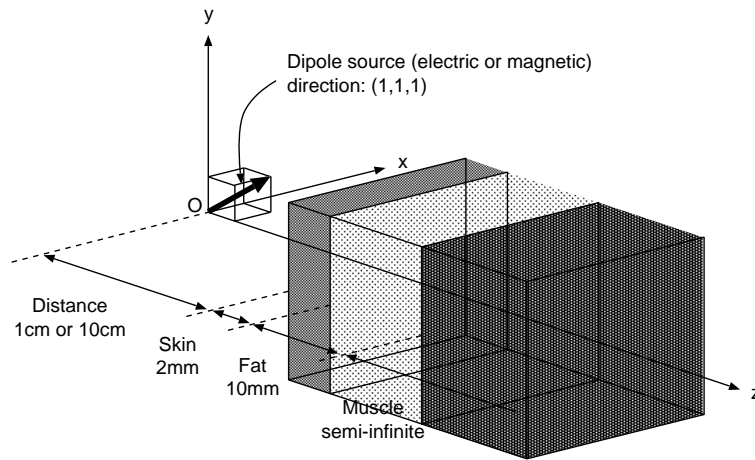


図 9 多層平板媒質で模擬した人体とその近傍にある微小ダイポール波源のモデル

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置かれた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がつくる電磁界を計算した。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。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 9 に示す解析モデルは

- 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 xy 平面に平行
- 微小ダイポール波源は人体表面から 1cm または 10cm 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

となっている。

3.1 電気ダイポールを波源としたときの計算結果

図 10 は、周波数 3GHz、波源距離 1cm の計算結果である。 x, y の絶対値が波源距離以下となる正方形領域の界分布を示す。計算結果はすべて波源の強さで正規化したものであり、数値はデシベルではなく真値で表しており、比較が可能である。

上段左の図は人体表面から入り込む正味の電力密度の分布を表す。

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電力密度である。さきの図と比べると、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いという（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考えることがで

きる。

電力密度の測定には、電界の接線成分（2成分）と磁界の接線成分（2成分）の同時測定が必要であり実用的でない。実用性を考えると、等方性の電界強度プローブまたは磁界強度プローブの利用が現実的である。そこで、自由空間の電界強度の2乗、磁界強度の2乗を計算した。

下段中央の図は電界強度の2乗を表し、下段右の図は磁界強度の2乗を表す。自由空間の電力密度の2乗と比較すると、値が異なるだけでなく、電界強度においては分布の形も大きく異なる。

以上より、自由空間での電力密度、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示すことが分かる。これは、波源の距離が0.1波長と近傍であるためである。

図11は、波源距離10cm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12は、周波数6GHz、波源距離1cmの計算結果、図13は、周波数6GHz、波源距離10cm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てはいるが、3GHz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

図14は、周波数3GHz、波源距離1cmの計算結果である。下段の自由空間の分布については、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同一である。上段左の人体表面での正味の電力密度で興味深い点は、人体表面から電力が入り込む場所だけでなく、人体表面から電力が湧き出る場所も弱いながら存在することである。これは、周波数を6GHzとした図16にも同じように見られる。

図15、図17は波源距離がそれぞれ1波長、2波長となる条件であるが、人体表面での反射の影響を除けば、すべての分布がほぼ同様になることが分かる。

4 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～6GHz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に人体が与える影響は無視できないことが推測される。
- 周波数の増加とともに電力の浸透の深さは減少する傾向があるが、3GHzから6GHzにかけては、2mmから5mmへとむしろ増加する。

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。

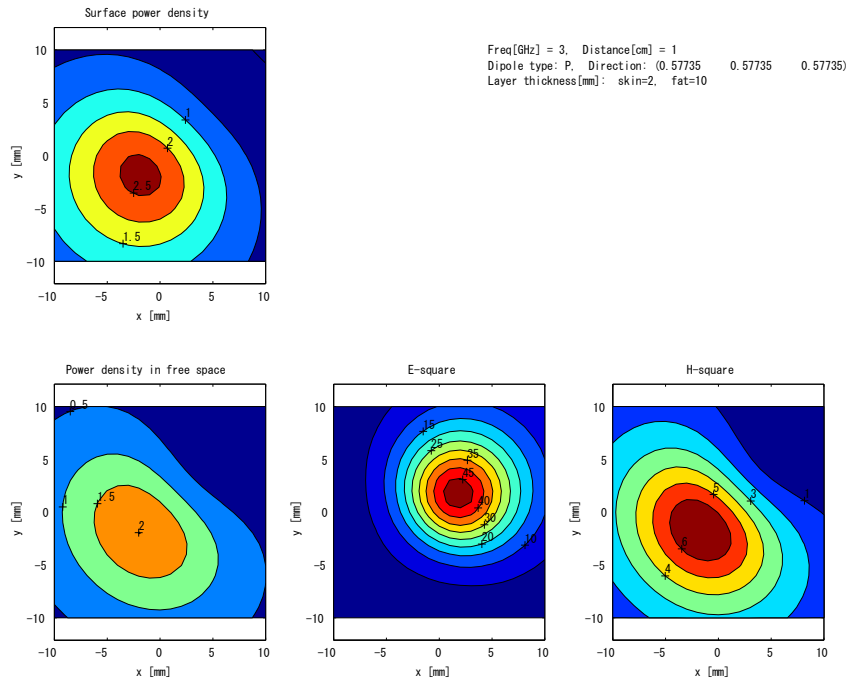


図 10 電気ダイポール波源, 周波数 3GHz, 距離 1cm

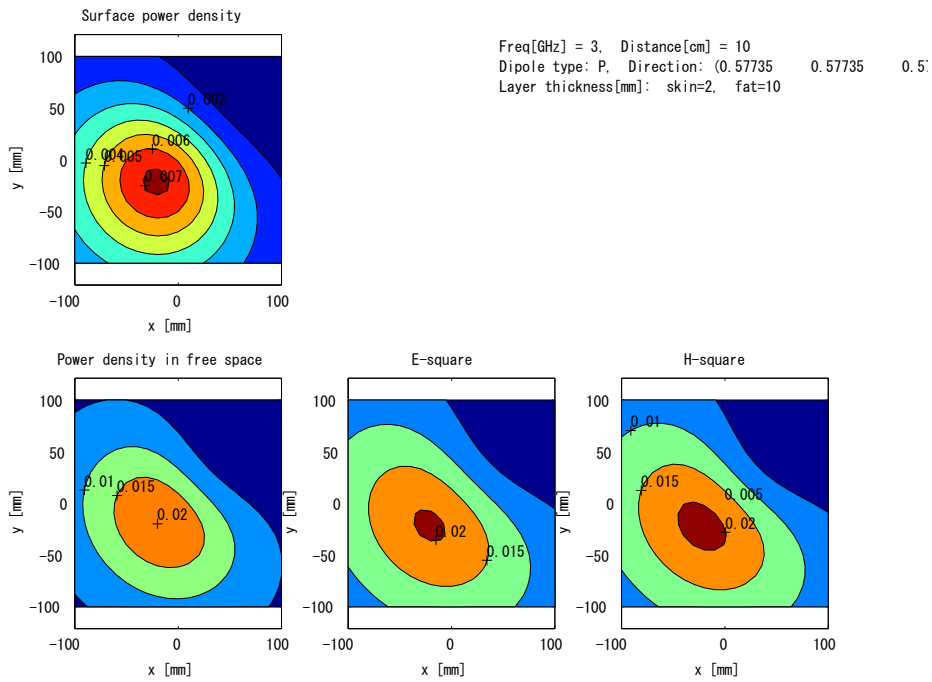


図 11 電気ダイポール波源, 周波数 3GHz, 距離 10cm

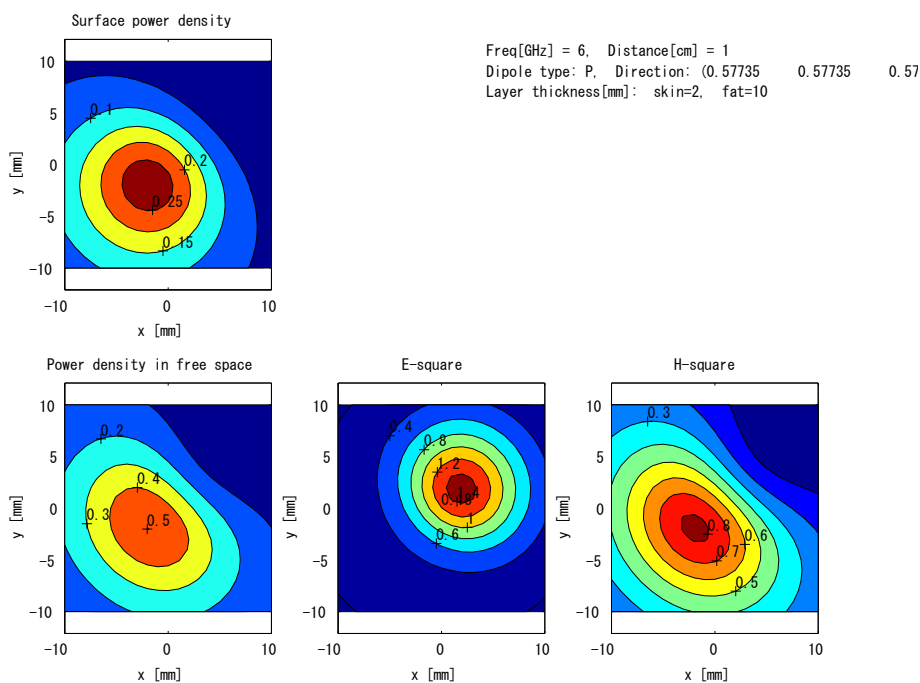


図 12 電気ダイポール波源, 周波数 6GHz, 距離 1cm

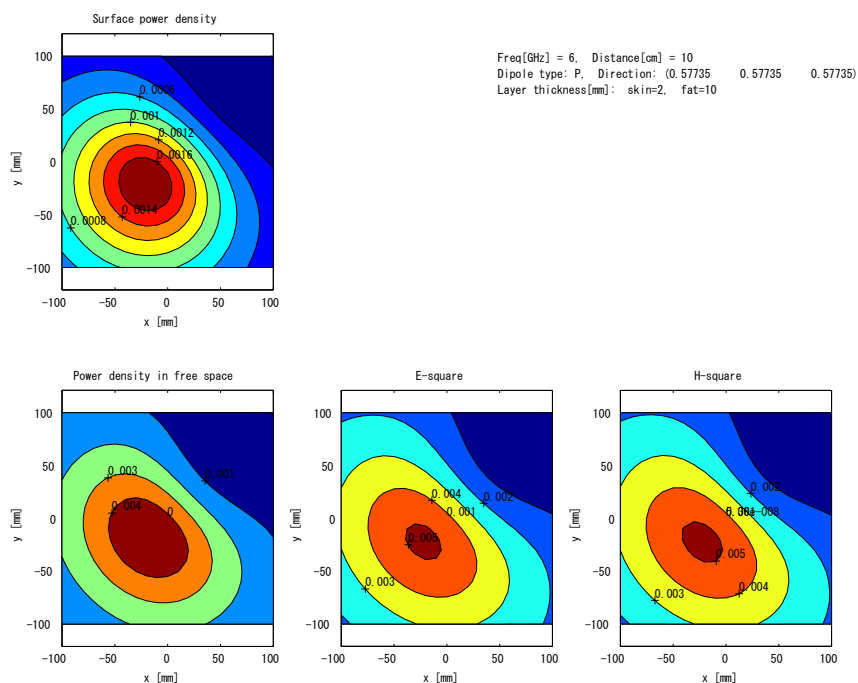


図 13 電気ダイポール波源, 周波数 6GHz, 距離 10cm

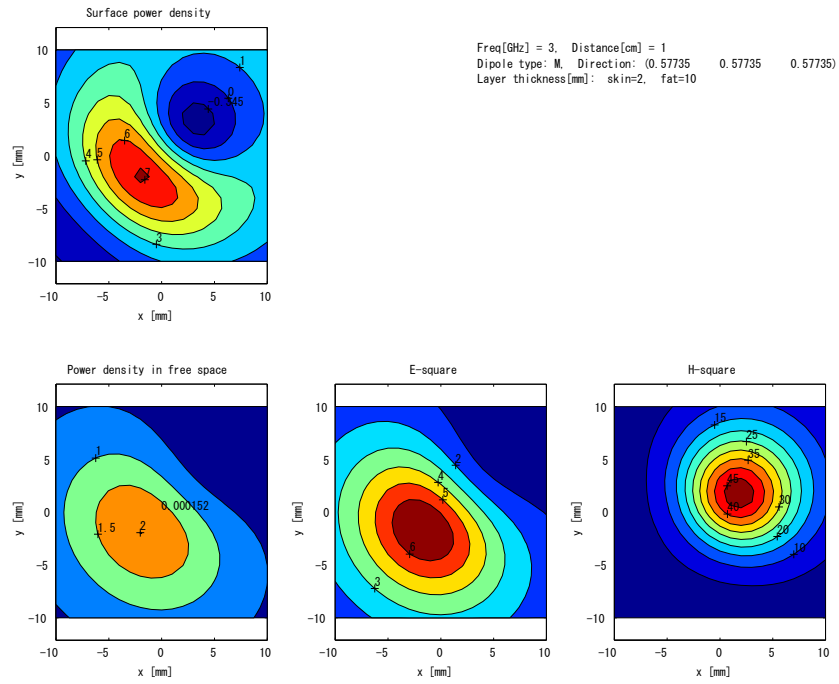


図 14 磁気ダイポール波源, 周波数 3GHz, 距離 1cm

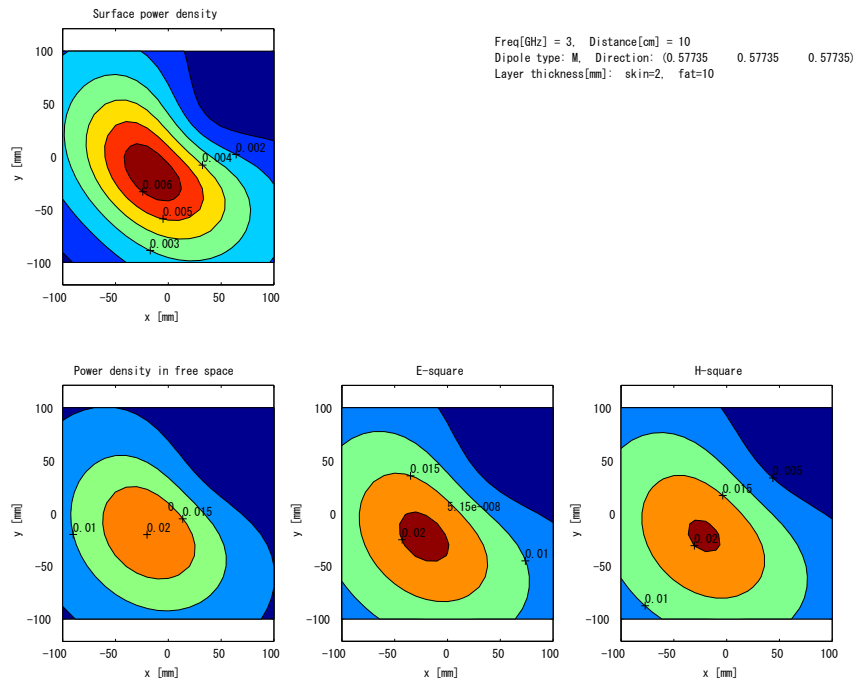


図 15 磁気ダイポール波源, 周波数 3GHz, 距離 10cm

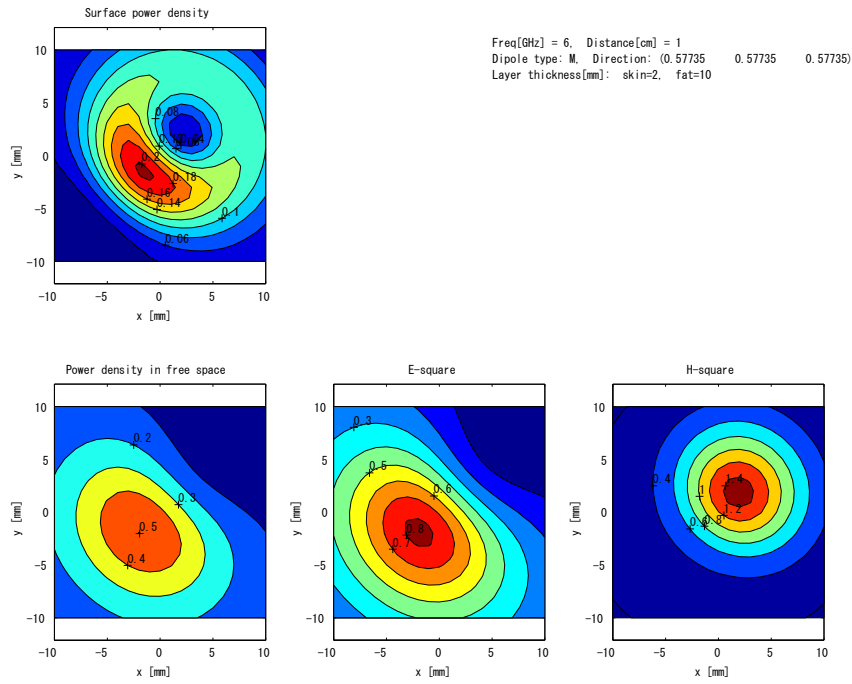


図 16 磁気ダイポール波源, 周波数 6GHz, 距離 1cm

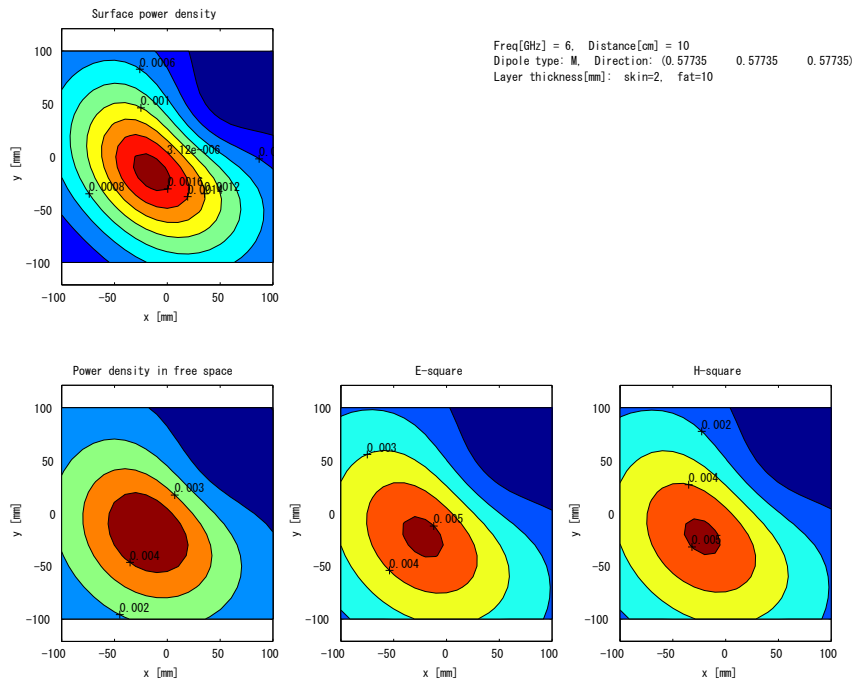


図 17 磁気ダイポール波源, 周波数 6GHz, 距離 10cm