

# UWB 電磁ファントム材料の開発

## Development of Ultra Wideband Electromagnetic Phantom Materials

原 大五郎 小林 岳彦  
Daigoro Hara Takehiko Kobayashi

東京電機大学 ワイヤレスシステム研究室  
Wireless Systems Laboratory, Tokyo Denki University

**あらまし** 伝搬路を人体が遮断した場合や、人体近傍で UWB 機器が使われる場合の UWB 信号の伝搬特性を実験的に解明するために用いる UWB 電磁ファントム材料の評価を行った。目標とする人体の高含水組織と実現しうるファントム材料とでは、複素比誘電率の誤差が避けられない。半無限誘電体平面媒質に平面波が入射した場合の UWB 電力反射係数、反射係数の位相、Skin depth、UWB 電力吸収係数を求めた。また、半無限誘電体平面および多層誘電体平面媒質に UWB インパルス信号が入射した場合の反射波形を求めた。その反射波形の違いに着目して誤差の影響を検討し、さらに開発したファントム材料を評価した。開発した液体および固体材料は 3.1-10.6 GHz の帯域で伝搬実験に用いるのに十分な特性を有することを明らかにした。また、人体全身の複素比誘電率を平均したファントム材料について測定を行った。

### 1. まえがき

近年、超広帯域(UWB)技術の開発が進んでいる。UWB は米国連邦通信委員会(FCC)が認可した 3.1-10.6 GHz の周波数帯を使用し、超高速通信や高精度測位に活用できるとともに、実質的に新たなスペクトル資源を開拓するものとして期待されている。WPAN やレーダなどの UWB ワイヤレスシステムは、主として屋内など短距離での使用が想定されている。そのような環境では、代表的な時変の伝搬路遮断物は人体である。人体が伝送路を遮蔽した場合やアンテナが人体近傍に設置された場合の超広帯域(UWB)電波伝搬特性を実験的に解明するためには、人体の電気的特性を模擬した UWB 電磁ファントムが有用である。

しかし、UWB は新しい技術であり従来のファントムは狭帯域での利用を考えたものであり、UWB ファントムの実現例は少ない[1]。そこで本研究では超広帯域で模擬できるファントム材料の開発することを目的としている。また、狭帯域で人体の電気的特性を模擬する場合は、比較的容易である。ファントム材料は、0.3-2 GHz の場合、比誘電率および導電率は目標値の  $\pm 5\%$  以内、2-3 GHz の場合、導電率では  $\pm 5\%$  以内、比誘電率では、 $\pm 10\%$  以内の精度である場合に人体組織の同等の材料として利用できる[2]。しかし、広帯域で実現する場合は難しくどの程度近似すればよいかわかっていない。UWB システムは既存の狭帯域システムと周波数を共用するために低電力で使用されることから、上記のような伝搬実験ではファントムへの吸収電力よりもむしろ反射電力が問題となる。そこで目標とする複素比誘電率の誤差と半無限平面

媒質に平面波が入射した場合の UWB 電力反射係数および反射係数の位相を求め、吸収電力についても Skin depth および UWB 電力吸収係数を求めた。また、UWB 無線システムで使用する UWB インパルス信号が半無限平面媒質および多層平面媒質に入射した場合に反射波の歪みの違いを計算して誤差の影響を検討し、開発した液体および固体ファントムの性能を評価した。また、人体全身の複素比誘電率を平均したファントム材料について測定を行った。本研究では高含水組織の複素比誘電率  $\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$  はおおむね似た特性を持っているということから、高含水組織の代表として筋肉の  $\hat{\epsilon}$  [3] を目標(評価の際の基準値)としている。

### 2. 複素比誘電率の誤差の影響の評価

#### 2.1 半無限平面モデル

##### 2.1.1 UWB 電力反射係数、位相

組織の境界面に平面波が入射した場合の反射と透過は、平面波の周波数と入射角および組織の比誘電率と導電率による。平面波が、二つに分かれた半無限平面媒質の境界面に入射した場合、反射係数  $\dot{R}$  は次の式で与えられる[4]。

$$\dot{R} = \frac{\sqrt{\hat{\epsilon}_2} - \sqrt{\hat{\epsilon}_1}}{\sqrt{\hat{\epsilon}_2} + \sqrt{\hat{\epsilon}_1}} \quad (1)$$

ここで  $\hat{\epsilon}_1$ 、 $\hat{\epsilon}_2$  は媒質の複素比誘電率である。式(2)のように周波数 3.1-10.6 GHz の電力反射係数を求め、それを積分し正規化したものをこの帯域における UWB 電力反射係数とする。また、UWB 電力吸収係数は、式(3)のように UWB 電力反射係数の補数で表せる。

$$|R_\theta|^2 = \frac{1}{f_h - f_l} \int_{f_l}^{f_h} |\dot{R}_\theta(f)|^2 df \quad (2)$$

$$|A_\theta|^2 = 1 - |R_\theta|^2 \quad (3)$$

一方、反射係数の位相は上限および下限周波数について計算する。

さらに、誤差の条件を以下のように定め、同様に目標とする複素比誘電率  $\hat{\epsilon} = \hat{\epsilon}_{\text{target}}(f) = \epsilon'_{\text{target}}(f) - j\epsilon''_{\text{target}}(f)$  に誤差を含めたときの複素比誘電率  $\hat{\epsilon}_{\text{error}}(f) = \epsilon'_{\text{error}}(f) - j\epsilon''_{\text{error}}(f)$  として、UWB 電力反射係数および反射係数の位相を計

算する。

$$\varepsilon'_{error} = (1+x_1)\varepsilon'_{target}, \varepsilon''_{error} = (1+x_2)\varepsilon''_{target} \quad (4)$$

$$\varepsilon'_{error} = (1+x_1)\varepsilon'_{target} \quad (5)$$

$$\varepsilon''_{error} = (1+x_2)\varepsilon''_{target} \quad (6)$$

$$\varepsilon'_{error}(f) = \left(1+x_3 \frac{f-6.85[\text{GHz}]}{3.75[\text{GHz}]}\right) \varepsilon'_{target}(f),$$

$$\varepsilon''_{error}(f) = \left(1+x_4 \frac{f-6.85[\text{GHz}]}{3.75[\text{GHz}]}\right) \varepsilon''_{target}(f) \quad (7)$$

ここで、誤差を  $x\%$ 、周波数を  $f[\text{GHz}]$  としている。  
 代表的な複素比誘電率に対する UWB 電力反射係数の計算例として、条件(4)のように  $\varepsilon'$  と  $\varepsilon''$  の両方に  $\pm 40\%$  誤差を与えた場合の結果を図 1 に示す。TM 波においてはプリュスタ角付近における誤差が最大 6.0 dB となり、TE 波ではほとんど誤差の影響を受けず、電力反射係数で見た場合は -0.8 dB 以内におさまった。条件(5)のように、 $\varepsilon'$  にのみ誤差を与えた場合、TM 波での反射係数に現れる誤差は、プリュスタ角付近で最大 5.2 dB 程度まで大きくなっている。プリュスタ角でずれが生じるため、反射係数から見た誤差も大きなものとなっている。しかし TE 波では、反射係数に現れる誤差はほとんどなく、最大 0.4 dB 程度まで減少した。条件(6)のように  $\varepsilon''$  のみ誤差を与えた場合では、プリュスタ角の落ち込みの深さが変化し、TM 波では最大 2.5 dB、TE 波では、反射係数に現れる誤差は小さく、最大 0.1 dB 程度まで減少している。条件(7)のように与えた誤差によって、ファントムの複素比誘電率と目標とする  $\varepsilon$  の  $\varepsilon'$ 、 $\varepsilon''$  が交差するような場合、TM 波では最大 0.7 dB、TE 波では、-0.1 dB となった。

以上の結果より、広帯域の全電力による UWB 電力反射係数は、TE 波では、TM 波よりも複素比誘電率の誤差による影響は小さい。特に TE 波では  $\varepsilon'$  よりも  $\varepsilon''$  に TM 波による影響が小さい。

また、条件(7)のように交差するような形に誤差がある場合、電力の打消し合いにより反射係数の誤差が小さくなるという結果が得られた。

複素比誘電率  $\varepsilon'$  と  $\varepsilon''$  において、誤差を与えて UWB 電力反射係数を計算した結果の最大誤差を求めた。それぞれに  $-40 \sim +40\%$  の範囲の誤差を与えた場合の電力反射係数の最大誤差を等値線図に表した結果を図 3 に示す。TM 波において、 $\varepsilon'$  と  $\varepsilon''$  に与えた誤差の符号が逆になるような場合で電力反射係数に現れる最大誤差も大きくなる結果となった。TE 波では、 $\varepsilon''$  に与えた誤差による影響は少なく、 $\varepsilon'$  に与えた誤差によって、電力反射係数に現れる最大誤差が変化している。

複素比誘電率に対する位相の影響として、与えた条件ごとにおいて計算した結果を図 2 に示す。条件(4)のように  $\varepsilon'$  と  $\varepsilon''$  の両方に誤差を与えた場合、TM 波の場合、3.1 GHz で誤差が最大 79° となり、TE 波ではほとんど誤差の影響を受けず 10.6 GHz で最大 1.4° となった。条件(5)のように、 $\varepsilon'$  にのみ誤差を与えた場合、TM 波では 3.1 GHz で最大 -63° となり、TE 波ではほとんど誤差の影響を受けず 10.6 GHz で最大 3.2° となった。条件(6)のように  $\varepsilon''$  のみ誤差を与えた場合、TM 波では 3.1 GHz で最大 18° となり、TE 波ではほとんど誤差の影響を受けず 10.6 GHz で最大 -1.5° と

なった。

以上の結果より、広帯域の全電力による反射係数の位相は、TE 波では、TM 波よりも複素比誘電率の誤差による影響は小さい。特に TM 波では  $\varepsilon''$  よりも  $\varepsilon'$  による影響が大きい。また、周波数では、TM 波の場合 3.1 GHz、TE 波の場合 10.6 GHz が最も大きな誤差となった。

複素比誘電率  $\varepsilon'$  と  $\varepsilon''$  において、誤差を与えて反射係数の位相を計算した結果の最大誤差を求めた。それぞれに  $-40 \sim +40\%$  の範囲の誤差を与えた場合に反射係数の位相の最大誤差を等値線図に表した結果を図 4 に示す。TM 波において  $\varepsilon'$  に与えた誤差による影響は少なく、 $\varepsilon''$  に与えた誤差によって、位相に現れる最大誤差が変化し、TE 波の場合は  $\varepsilon'$  と  $\varepsilon''$  に与えた誤差の符号が逆になるような場合で現れる最大誤差も大きくなる結果となった。

## 2.1.2 UWB 信号の反射波形

次に、UWB システムで使用される UWB 信号が入射した場合を検討する。半無限平面媒質に周波数帯域 3.1-10.6 GHz のガウシアンモジュレイティドインパルスが入射した場合の反射波形を計算し、 $\varepsilon$  に誤差のない場合を基準として、 $\varepsilon$  に誤差を与えた場合の相関係数を求める。入射波の図 5(a) に波形を (b) にパワースペクトルを示す。

UWB インパルスが半無限平面媒質に入射角  $60^\circ$  で入射した場合に [3] の媒質を基準として、 $\varepsilon'$  と  $\varepsilon''$  にそれぞれ誤差を  $\pm x\%$  与えた媒質からの反射波形の相関係数を図 6 に示す。 $\varepsilon'$  と  $\varepsilon''$  にそれぞれ誤差を  $\pm 40\%$  以下の場合について、条件(4)では、 $\varepsilon'$  と  $\varepsilon''$  の両方に誤差を与えた場合の相関係数は 0.9991 以上、条件(5)では、 $\varepsilon'$  にのみ誤差を与えた場合では、最も小さくなり 0.9945、条件(6)のように  $\varepsilon''$  のみ誤差を与えた場合では 0.9991 以上、条件(7)のように交差するような形に誤差がある場合では 0.9995 以上という結果となった。UWB インパルスが入射した場合の、[3] の媒質を基準とした反射波形と条件のような誤差が与えられた場合の反射波形には、ほとんど変化のないことが分かった。

## 2.1.3 表皮深さ、UWB 電力吸収係数

高含水組織 [3] の複素比誘電率  $\varepsilon$  との複素比誘電率である半無限平面媒質に平面波が入射角  $0^\circ$  で入射した場合、UWB 周波数 3.1-10.6 GHz についての表皮深さを計算し、同様に  $\varepsilon$  に誤差を含めたときの表皮深さを計算した結果を図 7 に示す。図 7 の表皮深さでは、 $\varepsilon'$  に  $-40\%$  の誤差を与えた場合では最大で 29.1%、 $+40\%$  の誤差を与えた場合では最大で -15.5% の誤差となった。

UWB 電力吸収係数は、高含水組織 [3] の複素比誘電率  $\varepsilon$  である半無限導体媒質に平面波が入射角  $\theta^\circ$  で入射した場合の電力吸収係数を計算し、UWB 周波数 3.1 ~ 10.6 GHz で積分し、正規化したのを UWB 電力吸収係数として求めた。同様に  $\varepsilon$  に誤差を含めたときの計算した結果を図 8 に示す。条件(4)のように  $\varepsilon'$  と  $\varepsilon''$  の両方に  $\pm 40\%$  誤差を与えた場合、TM 波では誤差が最大で 0.8 dB となり、TE 波では最大で 1.1 dB となった。条件(5)のように、 $\varepsilon'$  にのみ  $\pm 40\%$  の誤差を与えた場合、TM 波では最大 -0.8 dB となり、TE 波では最大 0.7 dB となった。条件(6)のように  $\varepsilon''$  のみに  $\pm 40\%$  の誤差を与えた場合、TM 波では最大 -0.2 dB となり、TE 波で

は最大 0.2 dB となった。条件(7)のように交差するような形に誤差がある場合、TM 波では最大 0.1 dB 以下となり、TE 波では最大 0.1 dB となった。

## 2.2 多層平面媒質モデル

図 9 に示すように空気、皮膚、脂肪、筋肉の複素比誘電率をそれぞれ  $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  [1]として、厚さ 2, 30 mm[5]からなる多層平面媒質に周波数帯域 3.1 ~ 10.6 GHz のガウシアンモジュレイティドインパルスが入射角  $\theta^\circ$  で入射した場合、すべての多重繰り返し反射波を総和し UWB 信号の反射波を計算し、 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  に誤差のない場合を基準として、 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  に誤差を与えた場合の相関係数を求める。

ガウシアンモジュレイティドインパルスが多層平面媒質に代表例として入射角  $45^\circ$  で入射した場合に [3] の媒質を基準として、 $\epsilon'$  と  $\epsilon''$  にそれぞれ誤差を  $\pm x\%$  与えた媒質からの反射波形の相関係数を図 10 に示す。 $\epsilon'$  と  $\epsilon''$  にそれぞれ誤差を  $\pm 40\%$  以下の場合について、条件(4)では、 $\epsilon'$  と  $\epsilon''$  の両方に誤差を与えた場合の相関係数は 0.986 以上、条件(5)では、 $\epsilon'$  のみに誤差を与えた場合では、0.995 以上、条件(6)のように  $\epsilon''$  のみ誤差を与えた場合では 0.999 以上、条件(7)のように交差するような形に誤差を与えた場合では 0.994 以上という結果となった。UWB インパルスが入射した場合の、多層平面媒質モデルの場合について、[3] の媒質を基準とした反射波形と条件のような誤差を与えられた場合の反射波形には、ほとんど変化のないことが分かった。

## 3. UWB ファントム材料の開発

### 3.1 液体材料

液体ファントムは液剤を保持するための容器が必要であるものの、形状が容器により任意に変更でき、ファントムを安価に製作できる利点がある。筋肉を模擬するために高含水組織を狭帯域で模擬する液体材料としてはショ糖および食塩の水溶液[6]やエチレングリコールと食塩水の混合物[7]が知られている。これらの液体ファントムは、水酸基等の水素結合を作る基を有する有極性有機化合物を混合することにより実部を調整している。また、食塩を加え、電解質イオンのイオン伝導により虚部を調整している。

本研究では、この他ブドウ糖、t-ブチルアルコールなどと食塩水の混合物を試みたが、最も簡単なレシピの一つであるショ糖( $C_{12}H_{22}O_{11}$ )水溶液によって高含水組織の  $\epsilon$  と最も近い結果が得られた。測定条件は温度 25 において、2 ~ 12 GHz の帯域幅で開放端同軸プローブ法[8]を用いて測定を行った。開放同軸プローブ法はネットワークアナライザの  $S_{11}$  より複素比誘電率を求める方法である。文献[9]では、機器の測定精度は実部で  $\pm 5\%$ 、虚部で  $\pm 10\%$  である。

濃度を 0.6-1.2 mol/l のショ糖水溶液の複素比誘電率を測定した結果を図 11 に示す。 $\epsilon'$  においては、1 mol/l 水溶液で傾きに違いがあるが、 $\epsilon''$  に一番近い結果が得られた。 $\epsilon'$  と 6 GHz において交差し、10.6 GHz で誤差が最大-11%程度となった。 $\epsilon''$  では、下限周波数では濃度が高い方が  $\epsilon''$  も高いが、中心周波数を超えたあたりで濃度の高い方が  $\epsilon''$  も低くなり、周波数 7 GHz で最大 28%程度となるような特性となった。

## 3.2 固体材料

生体組織の大部分は高含水性であるため、ファントム材料も水を多量に含む液体やゲルなどの流動性材料を用いることで比較的容易に構成できる。しかし液体ファントムやゲルファントムは、容器を必要とし、また水分の蒸発やカビの発生などにより特性の長期安定性を保持することが困難といった欠点を克服することができる。

高含水組織の  $\epsilon$  を模擬する固体材料としては増粘剤 TX-151、ポリエチレン粉末などと水を混和した材料[10]知られている。この TX-151 ファントムは、寒天により自立形状の保持を可能にし、また水分の分離を防いでいる。ポリエチレン粉末により実部を、食塩により虚部を調整する。寒天溶液とポリエチレン粉末はそのままでは均一に混合できないので、TX-151 を増粘剤として用いている。TX-151 ファントムは周波数 0.9-6 GHz 程度まで使用できると報告されている。

本研究で行った測定は、TX-151 固体ファントムを試作し、2 GHz-12 GHz の周波数帯での特性を測定し、高含水組織の  $\epsilon$  と比較し  $\epsilon'$  を調整するため文献[9]組成(表 1 の Recipe 1)および食塩以外の質量比は固定して、食塩量のみを変化させたもの(Recipe 2-3)を試作した。液体材料と同様に同軸プローブ法により測定した結果を図 12 に示し、 $\epsilon$  と比較した。この中では、[9] 比べて食塩の量を半減させた Recipe 2 が最もよく  $\epsilon$  を模擬しており、 $\epsilon'$  では、10 GHz で最大 8%、 $\epsilon''$  では下限周波数 3.1 GHz で最大-12%の誤差という結果となった。

## 4. UWB ファントム材料の評価

### 4.1 UWB 電力反射係数、位相

3.1 および 3.2 項において測定した液体材料と固体材料を第 2 章で述べた計算に適用した場合の UWB 電力反射係数を図 13 に示す。液体材料では、UWB 電力反射係数の誤差は TM 波の場合、プリユースタ角近傍で [3] の媒質と比べて 1.9 dB の誤差となるが、入射角  $0^\circ$ - $75^\circ$  の範囲では 0.4 dB 以下、TE 波の場合、0.1 dB 以下となった。固体材料では、TM 波の場合、プリユースタ角近傍で [3] の媒質と比べて -0.7 dB の誤差、入射角  $0^\circ$ - $75^\circ$  は 0.3 dB 以下、TE 波の場合、0.1 dB 以下となった。

同様に第 2 章で述べた計算に適用した場合の反射係数の位相を図 14 に TM 波の場合を (a)、TE 波の場合を (b) に示す。液体材料では、位相の誤差は TM 波の場合、3.1 GHz で最大- $14^\circ$ 、TE 波の場合、10.6 GHz で最大  $1.2^\circ$  以下となり、固体材料では TM 波の場合、10.6 GHz で最大- $8^\circ$ 、TE 波の場合、3.1 GHz で最大- $0.4^\circ$  となった。

### 4.2 UWB 信号の波形

同様に第 2 章で述べた計算に適用する。UWB インパルスが入射した場合の、[3] の媒質を基準として、液体および固体材料媒質からの反射波形の相関係数は、それぞれ 0.99961 および 0.99998 と、ほとんど反射波形に変化のないことが分かった。

### 4.3 表皮深さ、UWB 電力吸収係数

同様に第 2 章で述べた計算に適用する。高含水組織 [3] の複素比誘電率  $\epsilon$  と試作した液体(1.0-mol/l)および

固体(Recipe-2)材料についての表皮深さを計算した。計算した結果を図 15 に示す。図 14 の表皮深さでは Gabriel とファントムの誤差は、液体材料の場合、周波数 7.6 GHz で最大となり-11.4 %、固体材料場合は周波数 3.1 GHz で最大となり 6.8 %となった。

同様に第 2 章で述べた計算に適用する、高含水組織 [3]の複素比誘電率  $\hat{\epsilon}$  と試作した液体(1.0-mol/l)および固体(Recipe-2)材料についての UWB 電力吸収係数を計算した。計算した結果を図 16 に示す。UWB 電力吸収係数では[3]とファントムの誤差は、TM 波の場合、液体材料は最大で 0.1 dB 以下、固体材料は 0.1 dB 以下、TE 波の場合、液体材料は最大で-0.1 dB 以下、固体材料は-0.1 dB 以下となった。

## 5. $\hat{\epsilon}$ の 2/3 の複素比誘電率のファントム材料

人体全身のファントムを伝搬実験で用いる場合は、高含水組織と低含水組織が 2:1 であることから筋肉の複素比誘電率の 2/3 を人体全身の平均[11]としている。

固体材料では、実部を調整するために、Recipe 1 のポリエチレンパウダーの量を変化させたもの(表 2 の Recipe 4-5)を試作し測定を行った。測定した結果を図 17 に示す。Recipe 5 では、目標とする複素比誘電率に近い結果となったがポリエチレンパウダーの量の多いためファントムを製作するのが困難となってくる。

## 6. まとめ

周波数 3.1-10.6 GHz の範囲で高含水組織の  $\hat{\epsilon}$  を模擬するファントム材料の複素比誘電率の誤差の影響を検討し、さらに、固体および液体ファントム材料を評価した。複素比誘電率の誤差は、UWB 反射信号波形には影響が小さい。また、UWB 信号が高含水組織に入射した場合の反射波とファントムに入射した場合の反射波を数値上で比較すると強い相関関係があり、ほとんど反射波形に変化のないことが分かった。開発した液体および固体材料は 3.1-10.6 GHz の帯域で伝搬実験に用いるのに十分な特性を有することが明らかとなった。また、 $\hat{\epsilon}$  の 2/3 の複素比誘電率のフ

アントム材料では液体および固体材料については今後も検討していく予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、総務省戦略情報通信研究開発推進制度(特定領域重点型開発研究)研究課題による受託研究、および、東京電機大学総合研究所 2Q240 により得られたものである。

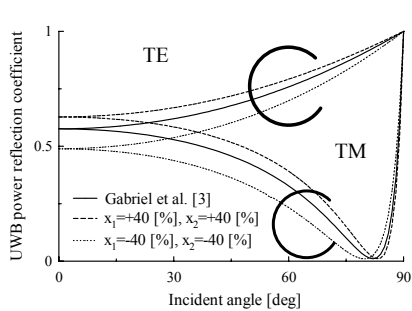


図1 Gabriel を基準とした複素比誘電率  $\epsilon$  に  $x_1$  および  $x_2$  の誤差を与えた場合の UWB 電力反射係数

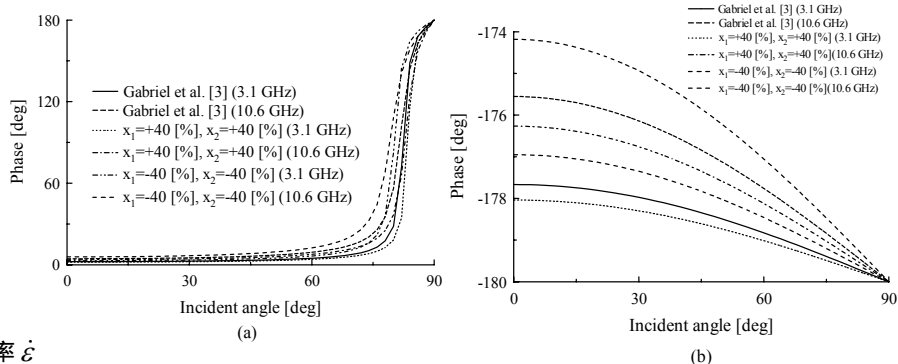


図2 Gabriel を基準とした複素比誘電率  $\epsilon$  に  $x_1$  および  $x_2$  の誤差を与えた場合の反射係数の位相: (a)TM 波, (b)TE 波

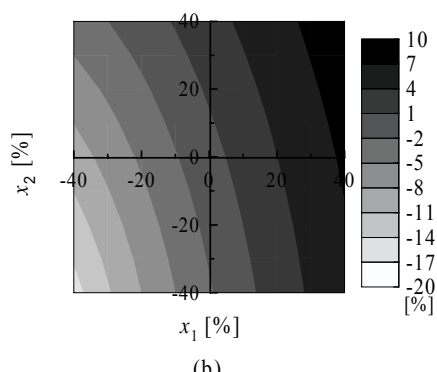
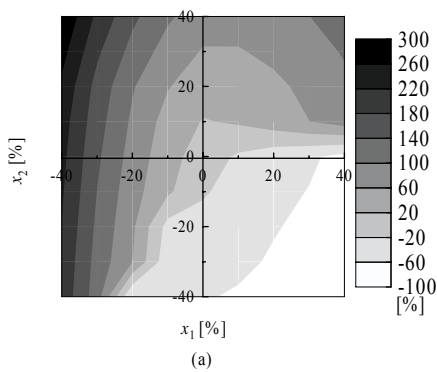


図3 Gabriel を基準とした複素比誘電率  $\epsilon$  に誤差がある場合の UWB 電力反射係数の最大誤差の等値線図: (a)TM 波, (b)TE 波

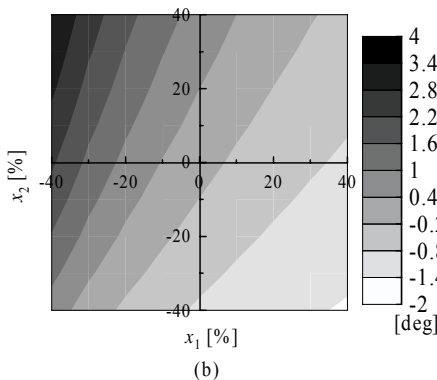
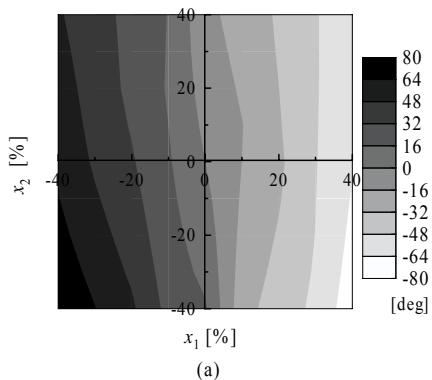


図4 Gabriel を基準とした複素比誘電率  $\epsilon$  に誤差がある場合の反射係数の位相の最大誤差の等値線図(3.1 GHz): (a)TM 波, (b)TE 波

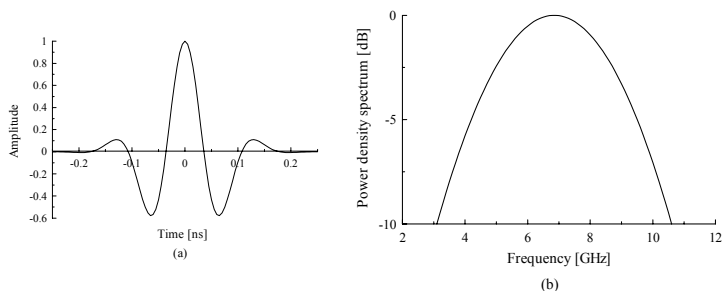


図5 周波数帯域 3.1-10.6 GHz のガウシアンモジュレイティドインパルスの入射波: (a)波形, (b)パワースペクトル

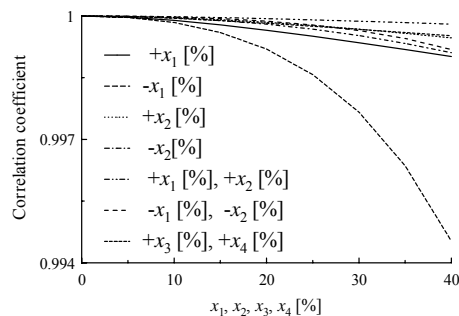


図6 Gabriel を基準とした複素比誘電率  $\epsilon$  の反射波と  $\epsilon$  に誤差を与えたときの反射波の相関係数

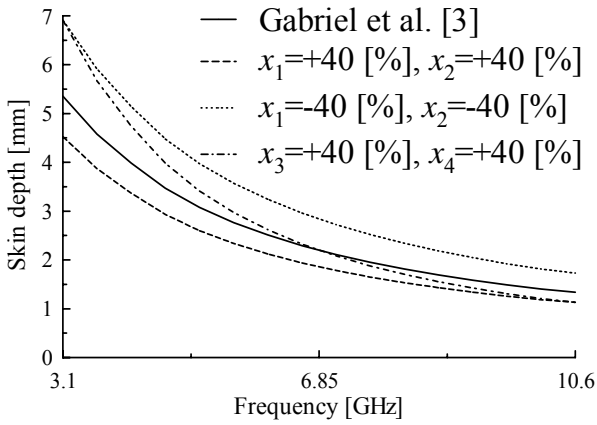


図 7 Gabriel を基準とした複素比誘電率  $\epsilon$  に誤差がある場合の Skin depth

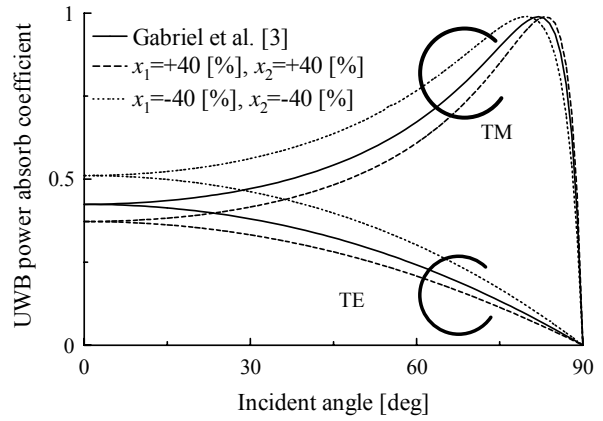


図 8 Gabriel を基準とした複素比誘電率  $\epsilon$  に誤差がある場合の UWB 電力吸収係数

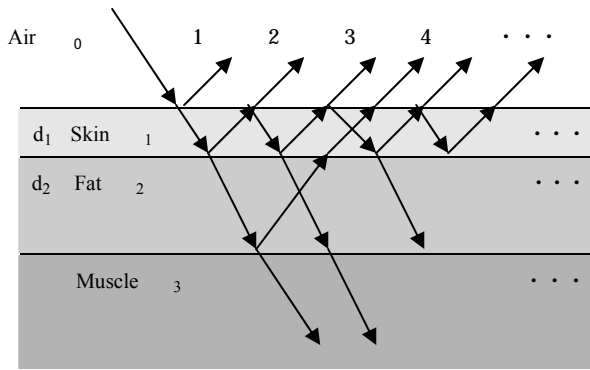


図 9 多層平面媒質モデル

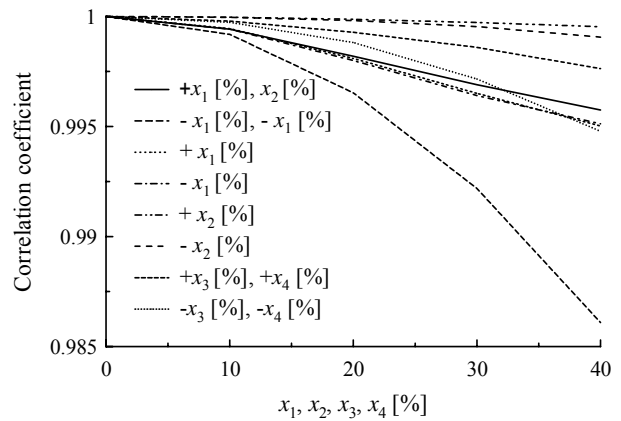


図 10 Gabriel を基準とした複素比誘電率  $\epsilon$  の反射波と  $\epsilon$  に誤差を与えたときの反射波の相関係数

表 1

	Composition of solid material [% by weight]					
	Deionized water	Agar	Sodium Chloride	Preservative	TX-151	Polyethylene powder
Recipe 1	85.60	2.65	0.99	0.05	2.14	8.56
Recipe 2	86.04	2.67	0.49	0.05	2.15	8.60
Recipe 3	86.26	2.67	0.24	0.05	2.16	8.63

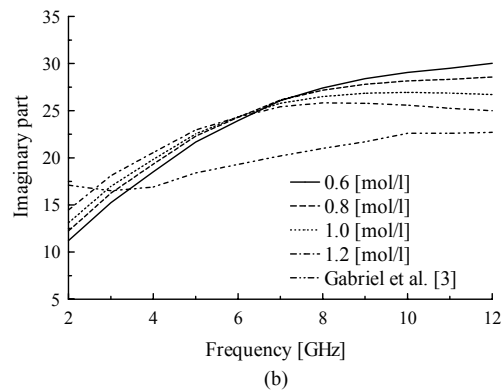
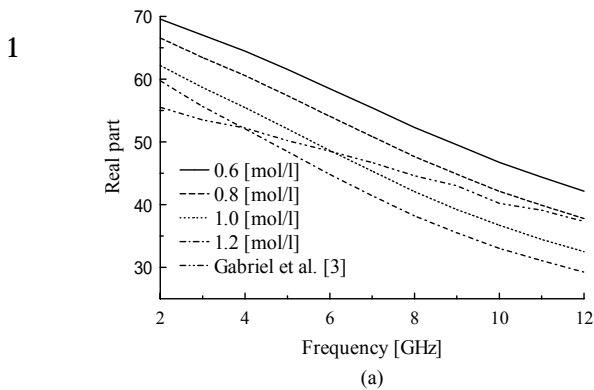


図 11 高含水組織  $\epsilon$  と液体ファントムの複素比誘電率: (a)実部, (b)虚部

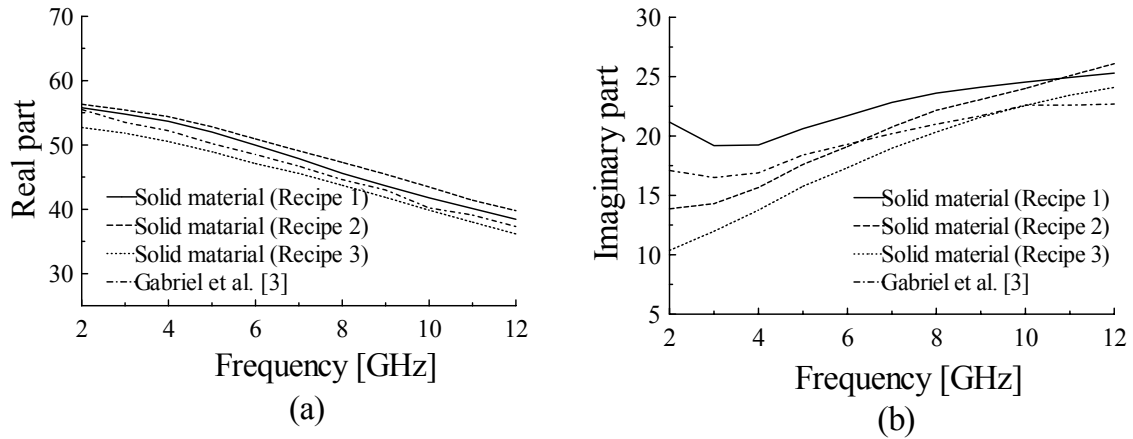


図 12 高含水組織  $\epsilon$  と固体ファントムの複素比誘電率: (a)実部, (b)虚部

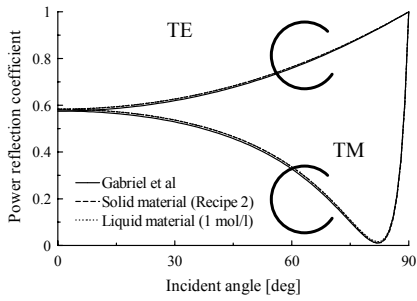


図 13 高含水組織と固体および液体ファントムの UWB 電力反射係数

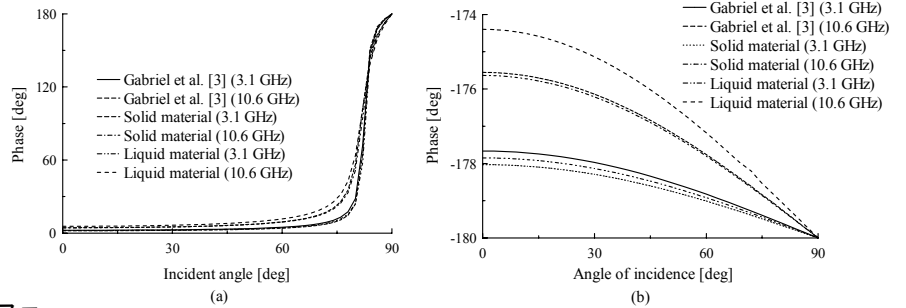


図 14 高含水組織と固体および液体ファントムの反射係数位相: (a)TM 波, (b)TE 波

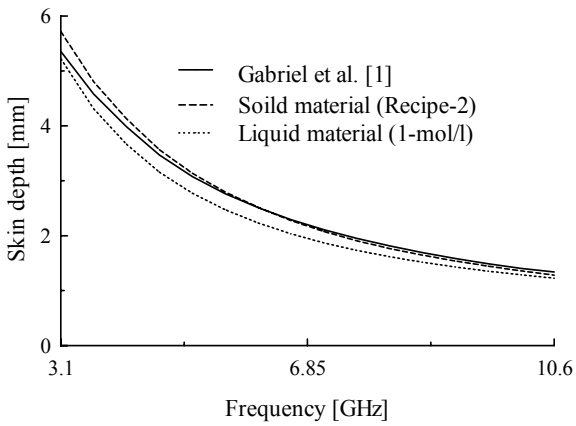


図 15 高含水組織と固体および液体ファントムの skin depth

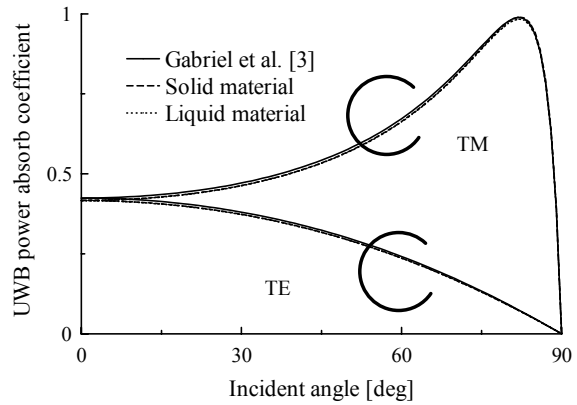


図 16 高含水組織と固体および液体ファントムの UWB 電力吸収係数

表 2  
Composition of solid material [% by weight].

	Deionized Water	Agar	Sodium Chloride	Preservative	TX-151	Polyethylene Powder
Recipe 4	75.86	2.35	0.88	0.05	1.90	18.97
Recipe 5	68.12	2.11	0.79	0.04	1.70	27.25

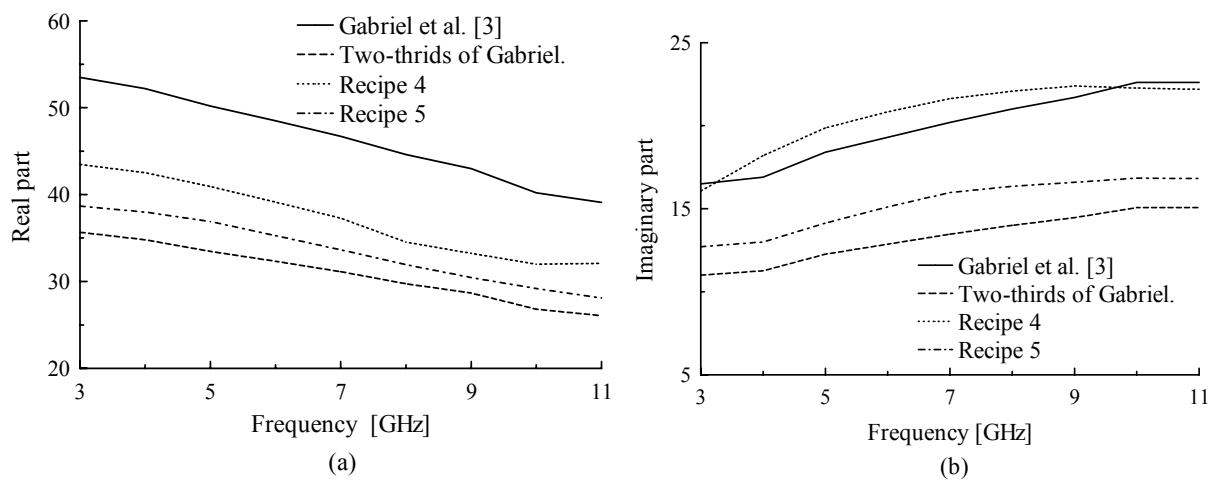


図 17 高含水組織  $\hat{\epsilon}$  , 高含水組織  $\hat{\epsilon}$  の 2/3 および固体ファントムの複素比誘電率: (a)TM 波 , (b)TE 波