

UWB 通信帯域における広帯域生体等価固体ファントムの有効性評価

滝本 拓也[†] 大西 輝夫^{††} 齊藤 一幸^{††a)} 高橋 応明^{††}
伊藤 公一^{†††}

Evaluation on Effectiveness of the Biological Tissue Equivalent Solid Phantom for UWB Communications

Takuya TAKIMOTO[†], Teruo ONISHI^{††}, Kazuyuki SAITO^{††a)},
Masaharu TAKAHASHI^{††}, and Koichi ITO^{†††}

あらまし UWB 技術を用いた通信は人体近傍において行われることが想定されるため、人体がアンテナ特性や伝送特性に与える影響を定量的に評価することが重要である。筆者らはこれまでに、人体近傍における高周波電磁界の評価を行うことを目的に、UWB 通信で使用される周波数の全域 (3~10 GHz) において、単一の組成比で ±10% 以内の差異で目標とする人体の電気定数を実現することができる広帯域生体等価固体ファントムを開発した。そこで本論文では、PDA に実装可能な UWB 通信用アンテナの製作を行い、上記ファントムを用いてアンテナ特性の実験的評価を行った。その結果、3~10 GHz の広帯域において、UWB 通信用アンテナの諸特性の計算と測定結果は良好に一致し、本ファントムが実際に広帯域特性をもつ通信端末の性能評価に適用可能であることが分かった。

キーワード UWB, 広帯域生体等価固体ファントム, 時間領域測定, FD-TD 法

1. ま え が き

次世代の通信方式である Ultra Wide Band (UWB) 技術 [1] は、100 Mbit/s 以上の伝送速度を有する超広帯域無線システムとして世界中で研究・開発が進められており、注目を集めている。UWB 技術は、20 m 程度までを通信範囲とし、主に屋内における短距離大容量通信を目指したものであり、時間幅の短いパルスを用いて通信を行うため、3.1~10.6 GHz の広い周波数帯域を利用するとされている。また、Bluetooth や無線 LAN (IEEE 802.11b) よりも高速な通信が可能な無線伝送方式で、通信データを 1 GHz 程度の広い周波数帯に拡散して送受信を行うため、消費電力が少な

く、更には、正確な位置測定やレーダー機能をも可能とする。

UWB 技術を用いた通信は Personal Area Network (PAN) [2] などのように人体近傍で行われることも想定されるため、これに用いるアンテナの開発においては、人体がアンテナ特性や伝送特性に与える影響を定量的に考察することが重要である [3]~[6]。この影響を実験的に評価する際には、人体の電気定数を模擬した“生体等価ファントム”を用いることが有用であり、既に UWB 通信用ファントムに関する検討も行われている [7], [8]。

筆者らはこれまでに、単一の組成比、すなわち一つのファントムで、3~6 GHz の目標とする人体の電気定数 [9] を模擬することができる生体等価ファントムを開発し、このファントムを用いた SAR 測定法に関して検討を行った [10]。更に、このファントムが UWB 通信で使用される周波数の全域 (3~10 GHz) において、±10% 以内の差異で、目標とする人体の電気定数を模擬可能であることを確認した。そして、本ファントムの有効性、すなわち上記の電気定数差異はアンテナ入力インピーダンス、アンテナ放射効率、放射バ

[†] 千葉大学大学院自然科学研究科, 千葉市

Graduate School of Science and Technology, Chiba University, Chiba-shi, 263-8522 Japan

^{††} 千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター, 千葉市
Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University, Chiba-shi, 263-8522 Japan

^{†††} 千葉大学工学部, 千葉市
Faculty of Engineering, Chiba University, Chiba-shi, 263-8522 Japan

a) E-mail: kazuyuki_saito@faculty.chiba-u.jp

ターンなどのアンテナ特性の評価において問題にならないレベルであることを FD-TD (Finite-Difference Time-Domain) 法を用いた数値計算により示した [8].

そこで本論文では, UWB 通信帯域において, アンテナ特性の実験的評価を行うことで, これまでに開発した生体等価ファントムの有効性を確認することを目的とする. ここでは UWB 通信用アンテナの実使用状態を模擬した検討を行うため, まず, PDA (Personal Digital Assistance) を模擬した筐体上に設置した平面型アンテナを試作し, これを上記ファントムの近傍に配置した. また, アンテナ性能の評価項目には, アンテナ入力インピーダンスやアンテナ利得の放射指向性のみならず, 広帯域無線通信において重要な評価項目である遠方領域での位相分布特性や時間領域における受信パルス波形の観測も加えた.

2. では, UWB 通信に対応した広帯域生体等価固体ファントムと製作した UWB アンテナの形状について説明し, 人体近傍における UWB 通信を想定した簡易モデルと解析手法について述べる. 3. では, 製作したアンテナの基本特性確認のため, 自由空間中における入力インピーダンス, 定在波比, 放射指向性の振幅と位相の測定結果と, 数値計算による結果を示す. 4. では, 製作したアンテナを広帯域生体等価固体ファントムの近傍に配置し, 3. と同様の検討を行う. 5. では, 人体近傍の UWB 通信端末において, 時間領域での受信パルスの観測を行う. 最後に, 6. で結論を述べる.

2. 検討モデルと解析手法

2.1 UWB 通信に対応した広帯域生体等価ファントム

本論文では, 人体の筋肉組織の平均的な電気定数 (Gabriel らの実験値 [9]) に 2/3 を乗じた値を目標値として生体等価ファントムを作製する (以降, 本ファントムを 2/3 筋肉ファントムと記述する).

図 1 に, 2/3 筋肉ファントムの, UWB 通信に用いられる周波数帯域である 3~10 GHz における, 電気定数の測定結果を示す. ここで ϵ_r と σ は, それぞれの周波数における比誘電率と導電率の目標値であり, 実線及び点線はそれぞれの電気定数の測定結果である. 図 1 中のエラーバーは, 各周波数における目標とする電気定数からの $\pm 10\%$ の範囲を示している.

図 1 より明らかのように, 単一の組成比で作製した 2/3 筋肉ファントムの電気定数は, UWB 通信帯域 3~10 GHz の各周波数において目標値から $\pm 10\%$ の

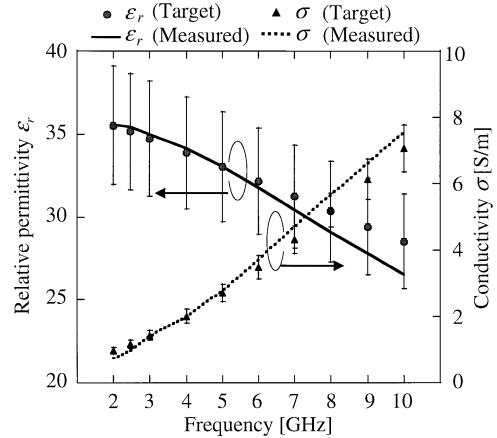


図 1 2/3 筋肉ファントムの電気定数の周波数特性
Fig.1 Electrical properties of the 2/3 muscle phantom vs. frequency.

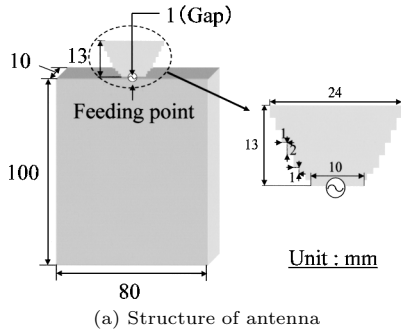
範囲にほぼ収まっており, この程度の差異であれば本ファントムを用いて, UWB 通信帯域の全域において実用上問題のないレベルでアンテナ諸特性の評価が可能であることが分かっている. 例えば, 3~10 GHz において, 本ファントム近傍に配置したダイポールアンテナの入力インピーダンスの変動量は, 電気定数の差 (目標値と測定値) が $\pm 10\%$ 以内であれば, 実部, 虚部ともに $\pm 1\%$ 以内に収まることが明らかになっている. 同様に放射効率の差は最大で 0.2%, 最大利得の差は 0.02 dBi 程度であった [8].

2.2 UWB 通信用アンテナ

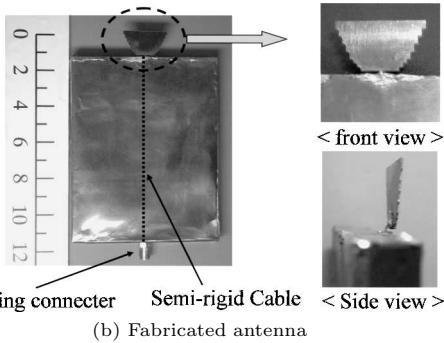
図 2 に, 文献 [11] を参考に構成した平面型の台形状モノポールアンテナを PDA 端末を模擬した金属筐体上に実装したモデルを示す. ここでアンテナ部は, 台形状の金属導体平板からなる構造をしており, 台形の上辺: 10 mm, 下辺: 24 mm, 高さ: 13 mm であり, 左右の辺は階段形状とした. また, PDA 端末を模擬した金属筐体のサイズは $10 \times 80 \times 100 \text{ mm}^3$ であり, その上端部の中心に本アンテナを実装した. 更に, アンテナと金属筐体の間には, 幅 1 mm のギャップを設け, ギャップ給電を行った.

2.3 検討モデルと解析手法

図 3 に, 生体等価固体ファントム近傍にアンテナを配置した解析モデルを示す. ファントムは, COST244 で規定されている形状 [12] を参考に, 1 辺 200 mm の立方体とした. ここで, アンテナ給電点を座標原点とし, 対向しているファントム表面中心の位置を $z = 10 \text{ mm}$ とした. なお, ファントムの電気定数は



(a) Structure of antenna



(b) Fabricated antenna

図 2 PDA 端末導体部への UWB 通信用アンテナの実装
Fig. 2 UWB antenna mounted on PDA metal box.

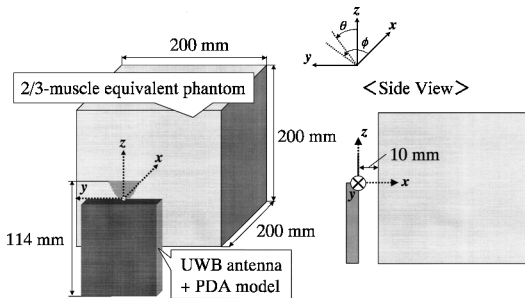


図 3 解析モデル

Fig. 3 Analytical model.

2.1 にて説明した 2/3 筋肉ファントムの電気定数を用いた。

数値解析には、FD-TD 法 [13] を用い、セルサイズは 0.5~1 mm の不均一格子で構成した。また、吸収境界条件には 8 層の PML [14] を用いた。更に、数値解析における 2/3 筋肉ファントムの電気定数 (3~10 GHz) は、以下の Debye の分散式 (1) を用いて、周波数に対して連続的に近似した。

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}$$

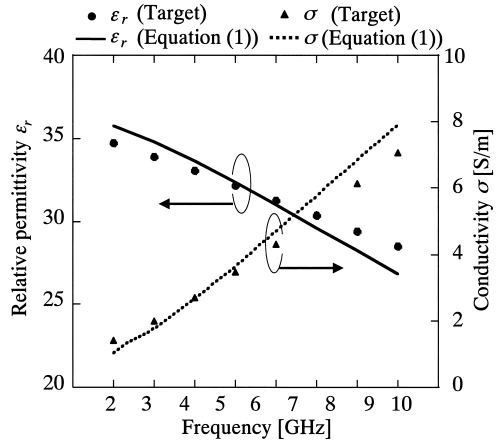


図 4 2/3 筋肉ファントムの電気定数 (計算値 (Debye) と目標値 [9])

Fig. 4 Electrical properties of the 2/3 muscle phantom (Calc.(Debye) vs. Target [9]).

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad \epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (1)$$

ここで、 ω : 角周波数 [rad/s] であり、本論文で用いた各パラメータの値は、 ϵ_s (静的誘電率) = 37.1, ϵ_∞ (光学的誘電率) = 7.2, τ (緩和時間) = 1.15×10^{-11} s である。

このとき、式 (1) により導出した計算値を目標の電気定数 [9] と併せて図 4 に示す。誘電体の電気定数の周波数特性を正確に見積もるには、Debye の分散式よりも高次の近似式を用いる必要があるかもしれない。しかしながら、目標値からの差異が図 4 程度であれば、アンテナ諸特性の評価に影響を与えないことを以前の検討により確認している [8]。したがって、ここでは式 (1) により FD-TD 法にて、ファントムの周波数分散性を考慮した。

3. 自由空間中におけるアンテナ特性の確認

まず、前章で述べたアンテナが UWB 帯域において十分な性能を有するかどうか、自由空間中において数値計算と実測の両面から確認を行った。

3.1 アンテナ入力特性

図 5 に、自由空間中における本アンテナモデルの入力インピーダンス周波数特性の数値計算及び測定結果、図 6 に同モデルの VSWR 周波数特性の数値計算及び測定結果を示す。

図 5 より、アンテナ入力インピーダンスの実部、虚部ともに、計算結果と測定結果において同様の傾向を

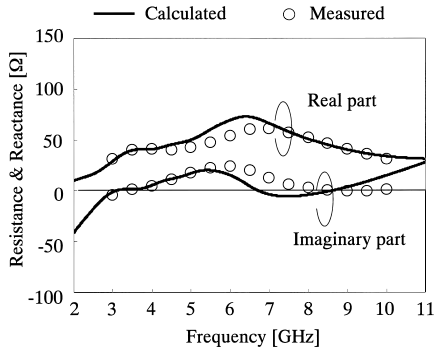


図 5 アンテナ入力インピーダンス
Fig. 5 Input impedance of the antenna (in free space).

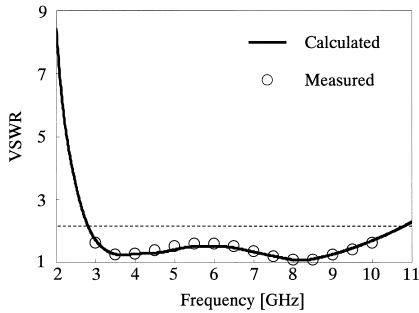


図 6 VSWR 特性
Fig. 6 VSWR of the antenna (in free space).

示している。

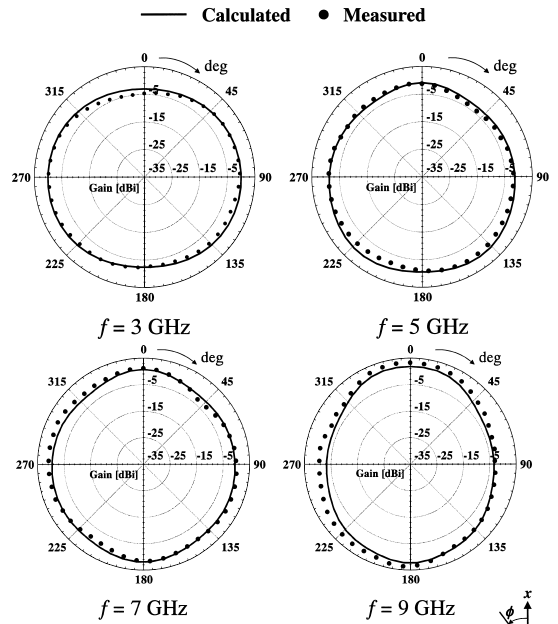
また、図 6 より、 $VSWR \leq 2$ となる周波数範囲が数値計算では 2.87 ~ 10.54 GHz、測定結果では 2.79 ~ 10.60 GHz であり、本アンテナモデルが UWB 通信帯域において十分な性能を有することが確認できた。

3.2 放射指向性

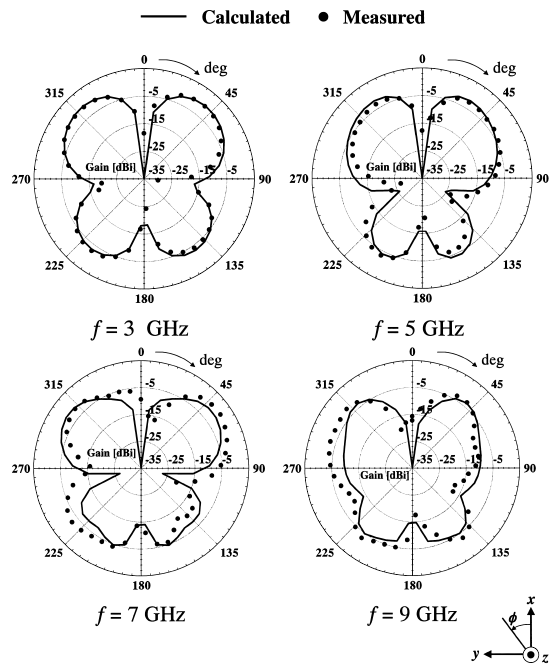
図 7 に、3, 5, 7, 9 GHz における水平面内 $\theta = 90^\circ$ (xy 面) における放射指向性の振幅成分 (E_θ, E_ϕ) の計算及び測定結果を示す。また、図 8 に、同条件における放射指向性の位相成分 (E_θ, E_ϕ) の計算及び測定結果を示す。

図 7 より、自由空間中におけるアンテナの放射指向性振幅成分の 3 ~ 9 GHz の各周波数における計算結果と測定結果の傾向がほぼ良好に一致していることが確認できた。

ここで、図 7(a) より、各周波数において水平面内での E_θ 成分は無指向性が得られ、図 7(b) より E_ϕ 成分はアンテナモデルの構造の対称性より、左右対称の指向性が得られることが確認できた。



(a) E_θ (amplitude)



(b) E_ϕ (amplitude)

図 7 放射指向性の振幅成分 ($\theta = 90^\circ$)
Fig. 7 Radiation patterns (amplitude) of the antenna (in free space).

放射指向性の位相分布特性は、図 8 (a) に示す E_θ 成分においては、いずれの周波数においても計算結果と測定結果の良好な一致を得た。一方、図 8 (b) においては、計算結果と測定結果の差異が大きくなっている。これは、位相成分の測定において、特に振幅レベルが低い角度（例えば、 $\phi = 0^\circ, 180^\circ$ ）において測定誤差が大きくなってしまったことと、周波数が高くなると波長が短くなり、方位角 ϕ の変化に応じて E_ϕ の位相が激しく変動したためであると考えられる。

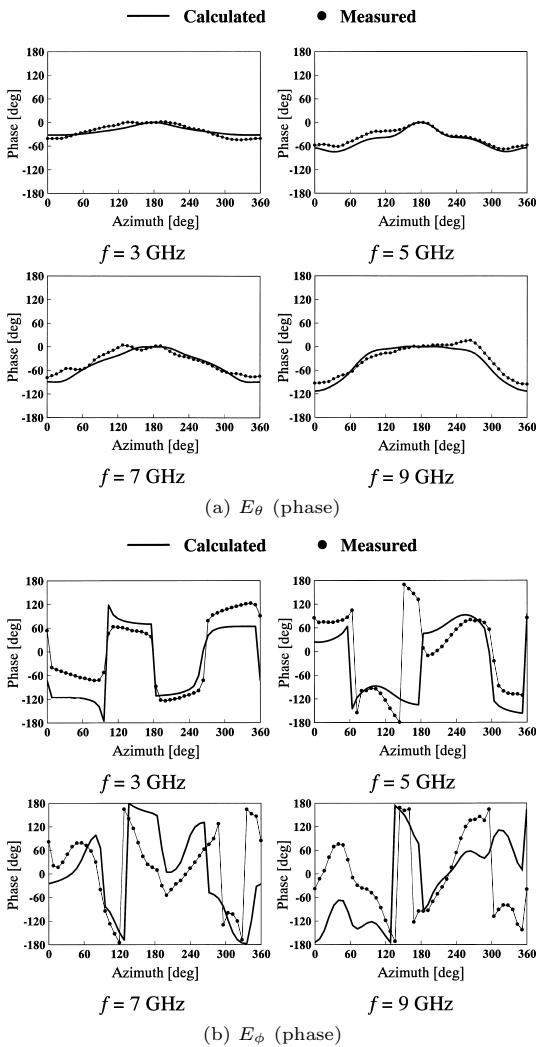


図 8 放射指向性の位相成分 ($\theta = 90^\circ$)
 Fig. 8 Radiation patterns (phase) of the antenna (in free space).

4. 生体等価ファントム近傍のアンテナ特性評価

4.1 アンテナ入力特性

図 9 に、本検討モデルの入力インピーダンスの周波数特性の計算及び測定結果、図 10 に同モデルの VSWR の周波数特性の計算及び測定結果を示す。

図 9 より、アンテナ入力インピーダンスは実部、虚部ともに自由空間中の結果（図 5）と同様に、ファントム近傍においても計算結果と測定結果が同様の傾向を示している。

図 10 より、アンテナの VSWR 特性は計算結果と測定結果が良好に一致していることが分かる。ここで、 $VSWR \leq 2$ となる周波数範囲が数値計算では 2.54 ~ 10.29 GHz、測定結果では 2.75 ~ 10.18 GHz である。この結果についても、自由空間中（図 6）の結果とほぼ同様である。したがって、本論文で検討した条件では、その近傍に生体組織が存在しても入力特性に大き

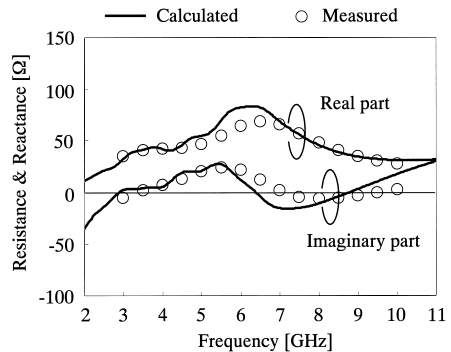


図 9 アンテナ入力インピーダンス
 Fig. 9 Input impedance of the antenna (with the phantom).

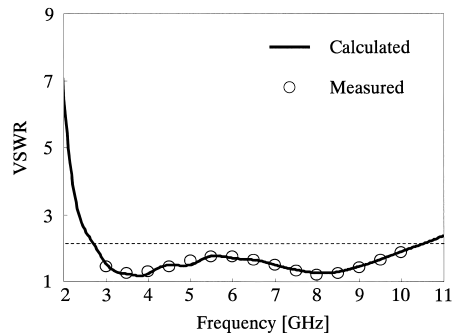


図 10 VSWR 特性
 Fig. 10 VSWR of the antenna (with the phantom).

な影響が現れないことを数値計算と実測の両面から確認できた．なお，アンテナ-ファントム間距離 10 mm を 1 mm, 5 mm と変化させて同様の検討を行った結果，1 mm まで近接させた場合には入力特性は変動するものの，5 mm 程度であればアンテナ入力特性は 10 mm のときとほぼ同一であることが分かった．なお，本検討に用いた UWB 通信用アンテナは，実使用状態を考慮するとケースで被う必要があり，アンテナ-ファントム間距離は最低でも 5 mm 程度必要であると考えられる．したがって，実験の容易さ等も考慮して本検討では距離 10 mm のみを検討した．

4.2 放射指向性

図 11 に，3, 5, 7, 9 GHz における水平面内 $\theta = 90^\circ$ (xy 面) の放射指向性の振幅成分 (E_θ, E_ϕ) の計算及び測定結果を示す．また，図 12 に，同条件における放射指向性の位相成分 (E_θ, E_ϕ) の計算及び測定結果を示す．

図 11 より，放射指向性の振幅成分については，各周波数において計算結果と測定結果の良好な一致を確認できた．一方，図 12(a) に示す E_θ 成分の位相分布は， 180° 方向，すなわちファントムが存在しない方向では計算結果と測定結果の良好な一致を確認したものの， 0° 方向では振幅レベルが低いため，若干の誤差を含む結果となった．なお，図 8(a) と図 12(a) を比較すると，ファントムが存在することにより 0° 方向付近での位相が激しく変動することも分かる．これは，ファントムが存在することによって 0° 方向付近の振幅レベルが小さくなることと，アンテナ近傍に配置されたファントムによる回折波の影響や，ファントムの形状に起因して，ファントム背面方向での E_ϕ の位相が激しく変動したためであると考えられる．

図 12(b) に示す E_ϕ 成分の位相分布は，自由空間中での結果 (図 8(b)) と同様に E_θ 成分に比べ角度による変動が大きいことが計算結果と測定結果の双方より観測できる．

以上より，振幅レベルが小さい方向における位相成分の高精度な測定は注意が必要であるものの，最大放射方向 (180° 方向) 付近においては，生体等価ファントムを使用して UWB 通信帯域の全域において，アンテナの放射指向性の測定が可能であるといえる．

5. 時間領域における受信パルスの観測

ここでは，アンテナ近傍にファントムを配置した際の時間領域におけるパルスの観測を行う．

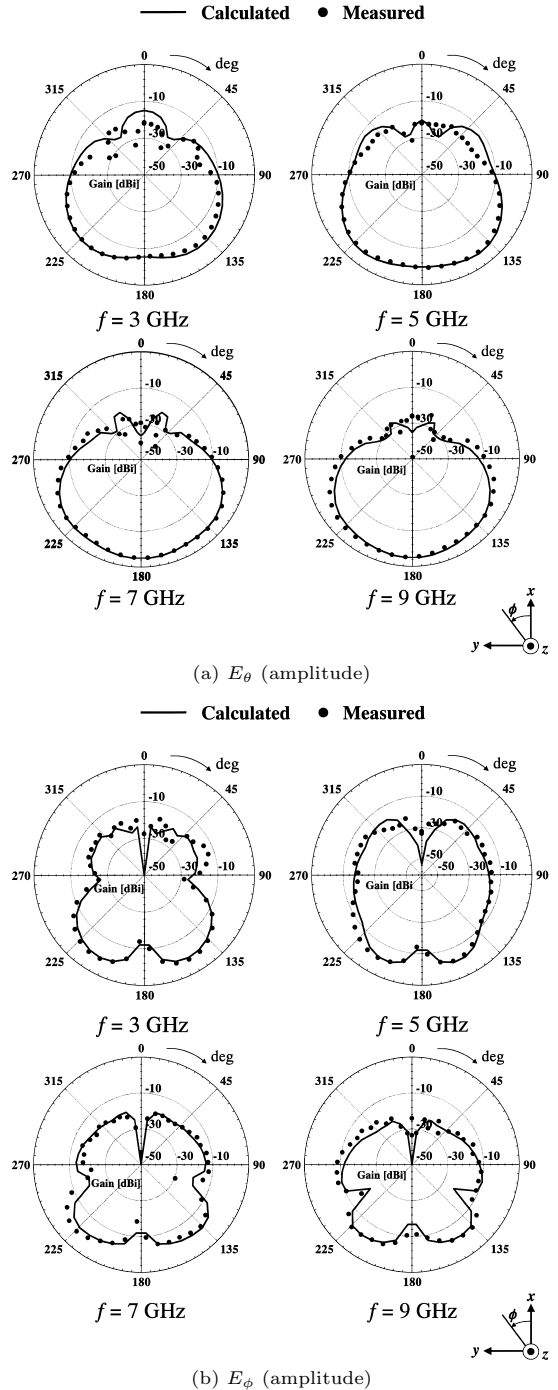
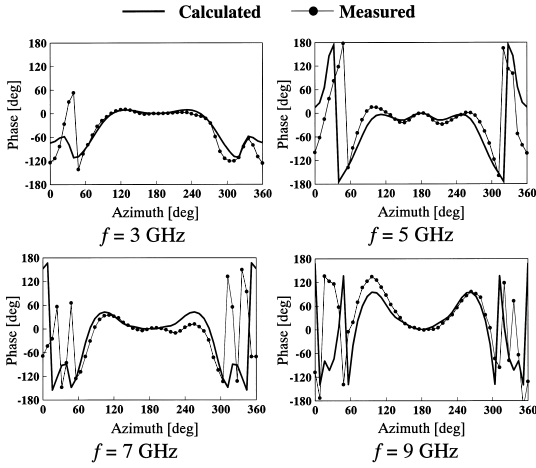
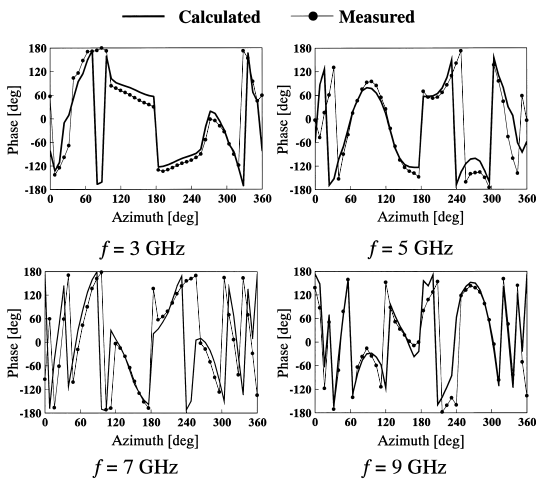


図 11 放射指向性の振幅成分 ($\theta = 90^\circ$)
 Fig. 11 Radiation patterns (amplitude) of the antenna (with the phantom).



(a) E_θ (phase)



(b) E_ϕ (phase)

図 12 放射指向性の位相成分 ($\theta = 90^\circ$)

Fig. 12 Radiation patterns (phase) of the antenna (with the phantom).

図 13 に、測定系を示す．ここで、送信アンテナは、対数周期アンテナ (AR7-15A, WATKINS JOHNSON 製) であり、受信アンテナである UWB 通信用アンテナは 2/3 筋肉ファントムの近傍 (距離: 10 mm) に配置した．時間領域測定は、ベクトルネットワークアナライザ (HP8510C, アジレント社製) の時間領域測定機能を用いた．

図 14 に測定結果を示す．ここで受信電圧レベル (縦軸) は、測定した受信パルスの最大値で規格化した．

図 14 より、時間領域における受信パルスは、ファントムの有無にかかわらず、受信パルスのピークは、送受信アンテナ間距離にて決定される 3.5 ns 付近に

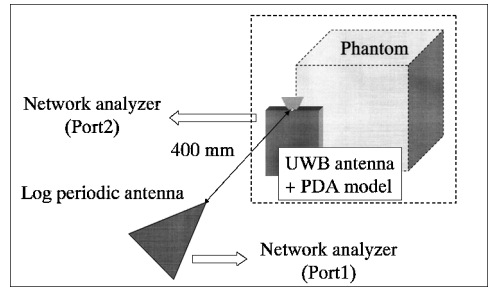


図 13 受信パルス波形の測定モデル

Fig. 13 Experimental model of the received pulse waveform.

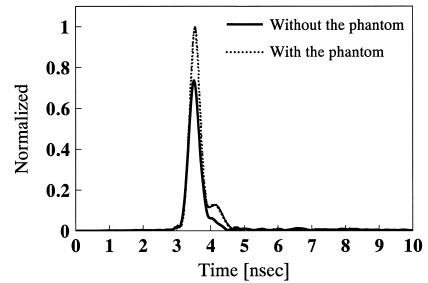


図 14 受信パルス波形の時間特性

Fig. 14 Time response of the received pulse waveform.

現れている．しかしながら、アンテナ近傍にファントムを配置したモデルでは、ファントム表面からの反射波が合成され、受信パルスのピーク値は自由空間中の結果よりも 20% ほど高くなっている．これは、アンテナからファントム表面までの往路長 20 mm を時間に換算すると約 0.067 ns であり、3.5 ns のピークに対して、約 0.067 ns 遅れでファントムからの反射波が合成されたためであると考えられる．更に、ファントムを配置している位置 (受信アンテナとの距離 10 mm) に導体板を配置させて、入射波の全エネルギーが反射するように同様の検討をした結果、ピーク値は自由空間中の結果より 35% ほど高くなった．このことより、このファントムを用いることにより、これに吸収されるパルスのレベル評価も行えることが分かった．更に、ファントムを配置したモデルでは、4.2 ns 付近にも明らかなピークを観測できる．これは、ファントムから反射波を受けることによって、アンテナの金属筐体部分で再度パルスが反射され、そのパルスを観測したためであると考えられる．

このように、生体等価固体ファントムを用いることによって、UWB 通信端末の時間領域における受信パ

ルスを定量的に測定することが可能である。

6. む す び

本論文では、生体等価固体ファントムを用いて、UWB 通信帯域における広帯域アンテナの諸特性を実験的に検討することを試みた。その結果、アンテナ入力特性、放射指向性の振幅・位相成分のそれぞれにおいて、数値計算結果と測定結果の良好な一致を観測した。

更に、時間領域における受信パルス測定においても、アンテナ近傍に配置したファントムの影響を観測することが可能であった。

以上より、筆者らが既に提案した生体等価固体ファントムは、広帯域アンテナ諸特性の評価に有効であることが分かった。

文 献

- [1] FCC Part15, "Radio frequency devices," FCC, USA. 2003.
- [2] T.G. Zimmerman, Personal Area Networks (PAN): Near-Field Intra-Body Communication, M.S. Thesis, MIT Media Laboratory, Cambridge, MA, Sept. 1995.
- [3] M.A. Jensen and Y. Rahmat-Samii, "EM interaction of handset antennas and a human in personal communications," Proc. IEEE, vol.83, no.1, pp.7-17, Jan. 1995.
- [4] 渡辺聡一, 多氣昌生, 野島俊雄, "携帯無線機のアンテナ入力インピーダンスに対する人体頭部との相互作用による影響," 信学論 (B-II), vol.J79-B-II, no.9, pp.557-565, Sept. 1996.
- [5] 原田浩樹, 松田 慧, 河野隆二, "人体内通信路における UWB 無線通信の特性解析," 2005 信学ソ大 (基礎・境界), A-5-18, Sept. 2005.
- [6] 浅沼健一, 前田忠彦, "人体近接時における UWB アンテナシステムの受信特性の検討," 信学技報, A-P2005-124, Dec. 2005.
- [7] 西田洋一, 原大五郎, 小林岳彦, "UWB 人体電磁ファントムの開発," 信学技報, A-P2003-298, March 2004.
- [8] 滝本拓也, 大西輝夫, 齊藤一幸, 高橋応明, 上林真司, 伊藤公一, "UWB 通信帯域における生体等価ファントムの特性," 信学論 (B), vol.J88-B, no.9, pp.1674-1681, Sept. 2005.
- [9] S. Gabriel, R.W. Lau, and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz," Phys. Med. Biol., vol.41, pp.2251-2269, April 1996.
- [10] T. Onishi, R. Ishido, T. Takimoto, K. Saito, S. Uebayashi, M. Takahashi, and K. Ito, "Biological tissue-equivalent agar-based solid phantoms and SAR estimation using the thermographic method in the range of 3-6 GHz," IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.9, pp.3733-3741, Sept. 2005.
- [11] 手嶋正雄, 島崎 寛, 峯邑隆司, 天野 隆, "広帯域台形形状モノポールアンテナに関する検討," 2004 信学ソ大 (通信), B-1-73, Sept. 2004.
- [12] COST244 WG3, "Proposal for numerical canonical models in mobile communications," Proc. COST244, pp.1-7, Roma, Nov. 1994.
- [13] K.S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.14, no.3, pp.302-307, March 1966.
- [14] J.-P. Berenger, "A perfect matched layer for the absorption of electromagnetic waves," J. Comput. Phys., vol.114, no.1, pp.185-200, Oct. 1994.

(平成 18 年 1 月 5 日受付, 3 月 27 日再受付)



滝本 拓也 (正員)

平 16 千葉大大学院博士前期課程了。同年 (株)NTT ドコモ入社。在学中、人体と電磁波との相互作用評価に関する研究に従事。平 16 映像情報メディア学会放送技術研究会学生発表の部優秀賞受賞。



大西 輝夫 (正員)

昭 62 東京理科大・理工・物理卒。同年東洋通信機 (株) 入社。日本エリクソン (株) を経て、現在 (株)NTT ドコモ・ワイヤレス研究所 EMC 研究室主任研究員及び千葉大フロンティアメディカル工学研究開発センター特別研究員。平 17 千葉大大学院博士課程了。主に、SAR 測定法、人体と電磁波の相互影響の研究に従事。工博。IEEE, BEMS 会員。



齊藤 一幸 (正員)

平 13 千葉大大学院博士後期課程了。博士 (工学)。現在、千葉大・フロンティアメディカル工学研究開発センター・助手。マイクロ波の医療応用及び人体と電磁波との相互作用評価に関する研究に従事。平 12 IEEE AP-S Japan Chapter Young Engineer Award, 平 16 本会学術奨励賞など受賞。平 12 日本学術振興会特別研究員。IEEE, 映像情報メディア学会, 日本ハイパーサーミア学会各会員。



高橋 応明 (正員)

平元東北大・工・電気卒。平 6 東工大大学院博士課程了。同年武蔵工大・工・電気・助手。同大講師を経て、平 12 東京農工大・工・電気電子・助教授。平 16 千葉大・フロンティアメディカル工学研究開発センター・助教授。衛星放送受信アンテナ、平面アンテナ、小形アンテナ、RLSA、環境電磁工学、人体と電磁波の研究に従事。工博。IEEE シニア会員。

アンテナ、小形アンテナ、RLSA、環境電磁工学、人体と電磁波の研究に従事。工博。IEEE シニア会員。



伊藤 公一 (正員)

昭 49 千葉大・工・電子卒。昭 51 同大大学院修士課程了。同年東工大・工・助手。昭 54 千葉大・工・助手、平元同助教授、平 9 同教授、平 15 同大フロンティアメディカル工学研究開発センター教授、平 18 同大工・教授となり、現在に至る。主として、

がん治療用マイクロ波アンテナ等の医療応用、移動通信用プリントアンテナ、携帯端末用小形アンテナ、ファントムを用いた人体と電磁波との相互影響評価の研究に従事。工博。著書「Handbook of Microstrip Antennas」(UK, 共著)、「ミリ波技術の基礎と応用」(共著)など。IEEE Fellow, AAAS, 映像情報メディア学会, 日本ハイパーサーミア学会, 日本シミュレーション学会各会員。