

ワイヤレスボディエリアネットワークの ウェアラブルデバイス用アンテナの開発

代表研究者 笹森 崇行 秋田県立大学 システム科学技術学部 准教授

1 はじめに

無線通信技術の発達により世界中で種々の無線通信サービスが提供されており、数多くのユーザによってそれらのサービスが広く利用されているように、無線通信は現代の社会生活に必要な不可欠なものとなっている。近年、次世代の無線通信システムの一つとして、人体の内外に取り付けた無線端末（ウェアラブルデバイス）によって近距離通信を行う WBAN (Wireless Body Area Network) が提案されている。この通信方法は、人体の表面や近傍を電磁波の伝搬路として用いることにより、通信する相手と触れる、握るといった人間にとって自然な動作によって近距離通信を行うものである。WBAN では、基本的には人体に触れることによって回線が接続するという性質から伝送範囲は狭く通信距離が限定されているため、例えばアクティブ RF-ID システム等、他の短距離無線に比べて秘匿性が高く安全であることが利点として挙げられる。WBAN の応用例としては、無線カードをポケット等に入れた状態で手をドアノブに触れることによりドアの鍵を開けたり、自動改札に手を触れることにより通過するといった個人認証や、心拍数、呼吸数、血圧等のバイタル情報の 24 時間監視、胃や小腸等の人体内部の動画情報収集といったヘルスケアや医療分野の他、ゲーム端末や携帯音楽プレーヤ等のエンターテイメントへの利用等が提案されており、今後ますます応用範囲が広がるものと期待されている。とりわけ近い将来に迫り来る高齢化社会に備えて医療・健康分野に WBAN システムを実現し効果的に活用するために、WBAN の国際的な標準化に関する活動も堅調に行われている。

より高性能な WBAN 用ウェアラブルデバイスを実現するためには、人体の近傍に配置するアンテナの形状や電波伝搬の問題を正確に解明することが重要となる。人体近傍の電波伝搬特性の研究については、人体を模擬した生体等価ファントムまたは実際の人体の近傍にアンテナを配置して電界強度等を測定する実験主体の研究と、数値電磁界解析手法の一つである FDTD 法を用いて人体近傍の電磁界を計算する数値的な解析に概ね二つに大別することができる。実験的に行われた研究例としては、UWB バンドを使用して人体の近傍に配置した送受信アンテナ間の伝搬特性を測定し、伝搬損失モデルの導出や符号誤り率特性 (BER: Bit Error Rate) の計算を行ったものや医療用テレメータや ISM (Industry Science Medical) 用等の数百 MHz 程度の周波数帯での測定があげられる。また、FDTD 法によって数値的に解析された WBAN の研究としては、ウェアラブルデバイスから放射する電磁界の人体近傍における強度分布の解析や、種々の姿勢をした場合に関する人体表面の電波伝搬の解析、カプセル内視鏡を想定したインプラント WBAN 用の伝搬特性の解析等が行われている。一方、FDTD 法等の数値解析では電波伝搬機構を解明するのは困難であることから人体を円柱として取り扱い解析的に WBAN の電波伝搬を調べた研究として、10~150MHz の周波数帯域で表面波近似を用いて伝搬損失モデルを求める研究や、2.45GHz 帯や UWB バンドで厳密解を用いて伝搬機構や BER 特性を明らかにする研究が行われている。特に厳密解を用いた研究では、全電磁界の構成成分は観測点が人体表面に近づくに従って主成分である伝搬波の寄与に加えて準静電磁界の寄与が増加するという実験や FDTD 法では得られない結果が得られている。

本研究は、WBAN で使用するための高性能なウェアラブルデバイスを実現する第一歩として、厳密解を用いた解析的な手法によって電波伝搬特性を求め BER シミュレーションを行うことにより、人体によるデジタル無線通信への影響を明らかにするものである。解析的に導出した厳密解は短時間で計算することが可能であり、これを BER シミュレーションに利用することにより FDTD 法等の数値解析値を用いた結果と比較する際の規範として使用することが可能となる。まず、第 2 章では人体を模擬した無限長誘電体円柱の解析モデルを説明し、円柱近傍に置いた送信と受信のための 2 つのダイポールアンテナ間の伝達係数を求める。本研究では、検討する周波数帯域として UWB バンドと ISM バンドを取り上げる。UWB バンドは周波数が高くアンテナの小形化に有利であり、放射電力が低いことから安全性や情報の秘匿性の面から WBAN に適していると考えられる。一方、ISM バンドは実験や解析の検討例が少なく、周波数が UWB バンドから十分に離れていることから UWB バンドとは異なる伝搬特性が得られると考え 900MHz 帯を選ぶ。第 3 章では、UWB バンドにおける

UWB-IR (Impulse Radio) 方式と ISM バンドにおいて BPSK 方式を用いたときの BER シミュレーションを行い、誘電体円柱がデジタル無線通信へ与える影響を定量的に明らかにする。BER シミュレーションを用いることにより、アンテナのインピーダンス特性や利得に加えてパルス波形、変調方式、電波伝搬等の影響を含んだ WBAN システムの総合的な評価が可能となる。最後に第 4 章で本研究のまとめを述べる。

2 無限長誘電体円柱近傍に配置した送受信アンテナ

本研究では、ウェアラブルデバイスを腕に取り付けることを想定して、人体を無限長の誘電体円柱として近似する。誘電体円柱は実際の人体に比較すると極めて単純な形状であるが、人体近傍の電波伝搬の基本特性を求めることは十分に可能であると考えられる。

図 1 には自由空間中に置いた無限長誘電体円柱と送信アンテナ、受信アンテナ、および座標系を示す。誘電体円柱の半径を a 、比誘電率、比透磁率、導電率をそれぞれ ϵ_r 、 μ_r 、 σ とする。また、自由空間の誘電率と透磁率をそれぞれ ϵ_0 、 μ_0 とする。図 2 (a)、(b) には誘電体円柱の比誘電率と導電率の周波数特性をそれぞれ示す。本研究では、誘電体円柱の電気定数として人体の筋肉の 2/3 の値を用いる。送信ダイポールアンテナと受信ダイポールアンテナは素子全長がそれぞれ l と l_1 であり、 $l=l_1=20\text{mm}$ とする。また、放射素子の向きは両アンテナともに円柱座標系の r 方向である。ダイポールアンテナは簡単な構造を有する代表的な線状アンテナであり、腕の表面に取り付けるための腕時計型ウェアラブルデバイスと同様に人体表面に対して垂直方向の電界を放射する。送信アンテナと受信アンテナの給電点の座標は、円柱座標系でそれぞれ $Q(r_1, \phi_1, z_1)=(40.5\text{mm}, 0^\circ, 0\text{mm})$ 、 $P(r, \phi, z)=(40.5\text{mm}, 0\sim 180^\circ, 200\text{mm})$ とする。送信ダイポールアンテナから放射された電磁波を解析的に求めることは可能であり、これを入射電界として用いる。電磁波が無限長誘電体円柱に照射されたときに、観測点で観測される散乱電界は固有関数に展開した厳密解表示によって表すことが可能である。Maxwell 方程式の解を変数分離し、円柱表面 $r=a$ における境界条件を適用することにより厳密解の級数表示が導出される。以上のようにして受信アンテナに届く全電界は、入射電界と散乱電界のベクトル和として求められる。本研究の解析では、全電界の支配的な成分であることから、 r 方向成分についてのみ検討を行う。

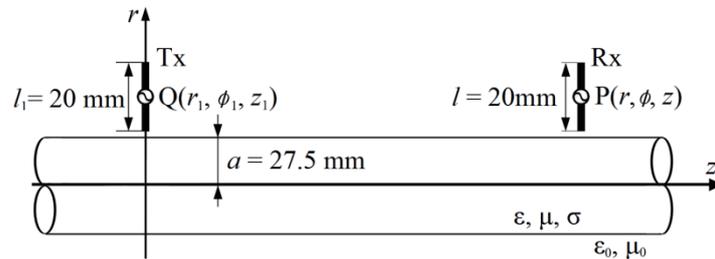
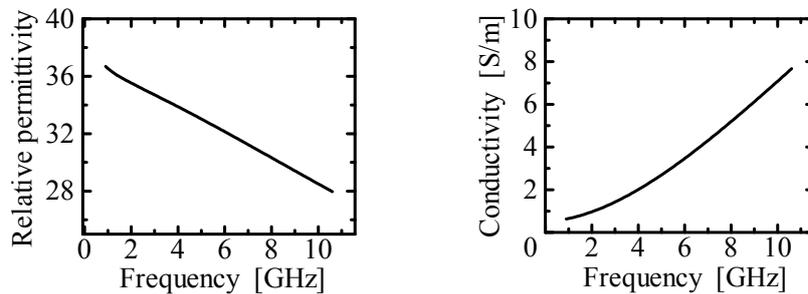


図 1 伝達係数の解析モデル



(a) 比誘電率

(b) 導電率

図 2 誘電体円柱の電気定数

図 3 には、誘電体円柱近傍に置いた送信ダイポールアンテナの反射係数を示す。アンテナの素子長は $l_1=20\text{mm}$ とし、放射素子の先端と誘電体円柱との距離は 3mm である。アンテナへの給電線路の特性インピーダンスを 50Ω とし、アンテナの入力インピーダンスから反射係数を計算する。比較のために円柱が無い場合の結果も示している。誘電体円柱の影響により、共振周波数は変化しないが、共振周波数における反射係

数は 3.1dB 悪化することが分かる。

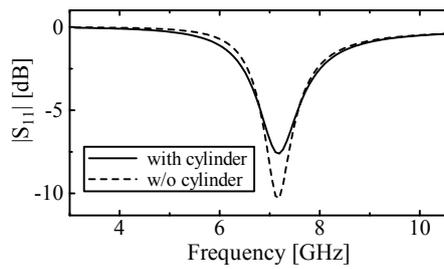


図 3 誘電体円柱近傍におけるダイポールアンテナの反射係数

図 4 には、UWB バンド (3.1~10.6GHz) における伝達係数の計算結果を示す。まず、 $\phi=0^\circ$ と $\phi=180^\circ$ の場合には、伝達係数が最大となる周波数において円柱が無い場合の方が有る場合よりも伝達係数が大きいことがわかる。これらの結果は入射電界と散乱電界の干渉が原因である。一方、 $\phi=90^\circ$ の場合については、円柱が有る場合の方が無い場合よりも伝達係数が大きいことが特徴的である。この場合には、送信アンテナと受信アンテナがほぼ直交しているために入射電界は極めて小さく、円柱表面によるクリーピング波が主な寄与となるため、円柱が有ることにより伝達係数が大きくなると考えられる。また、どの角度においても 7GHz 付近がピークとなっているのは、ダイポールアンテナの周波数特性によるものである。

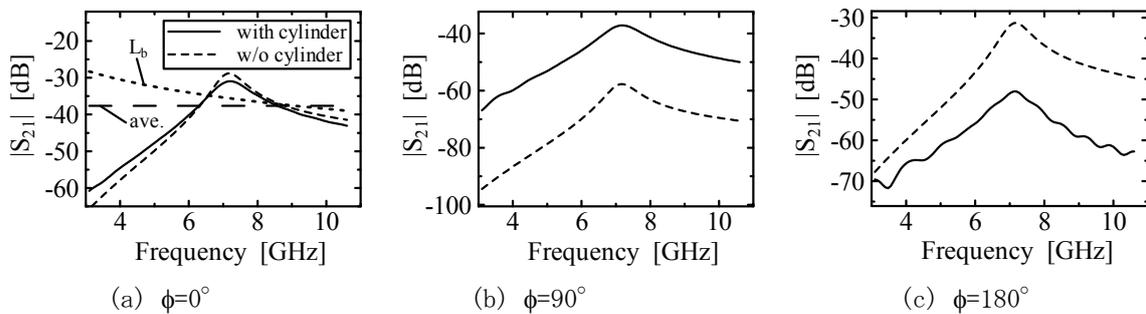


図 4 伝達係数の解析結果 (UWB band)

次に、図 5 には、ISM バンド (902~928MHz) における伝達係数の計算結果を示す。ISM バンドについては、全ての角度 ϕ について円柱が有る方が伝達係数が大きい。これは、UWB バンドよりも ISM バンドの波長の方が使用した円柱による影響が大きく、散乱電界が主な寄与となったためである。また、ISM バンドの方が UWB バンドよりも伝達係数が小さいのは、波長に比べてダイポールアンテナの素子長が短いことにより整合がとれていないためである。

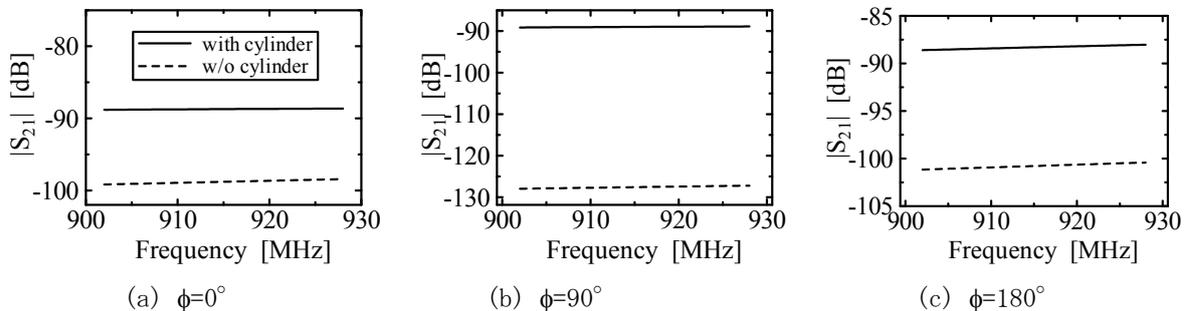


図 5 伝達係数の解析結果 (ISM band)

表 1 には、UWB バンドと ISM バンドの中心周波数である 6.85GHz と 915MHz において誘電体円柱が有る場合と無い場合の伝達係数の差を示している。この結果から、ISM バンドの方が UWB バンドよりも誘電体円柱によって伝達係数が大きくなる事が分かる。

表 1 周波数帯域の中心周波数における伝達係数の円柱の有無による差の比較

ϕ	UWB Band	ISM Band
0°	-1.6dB	10.1dB
90°	21.3dB	38.6dB
180°	-16.3dB	12.5dB

3 BER シミュレーション

本章では、誘電体円柱がデジタル無線通信へ与える影響を定量的に調べるために BER シミュレーションを行う。通信方式として、UWB バンドでは UWB-IR 方式、ISM バンドでは BPSK (Binary Phase Shift Keying) 方式を用いる。

図 6 (a), (b) には UWB-IR 方式と BPSK 方式の BER シミュレーションのフローチャートをそれぞれ示す。伝達係数には前章で求めた複素数の伝達係数の周波数特性を使用する。本研究では BER を 1 ビット当たりの信号エネルギー対雑音電力密度比 (E_b/N_0) の関数として示す。その際の信号エネルギーとして、受信パルス 1 ビット当たりの信号エネルギーを用いて定めた受信 SNR と、送信パルスのエネルギーから定めた送信 SNR の 2 種類の方法で BER を比較する。図 7 において UWB バンドでは伝達係数を掛ける直前 (T) と掛けた直後 (R)、ISM バンドにおいては入力データの直後 (T) と低域通過フィルタの直後 (R) の信号エネルギーを用いて定める BER がそれぞれ送信 SNR と受信 SNR である。いずれの方法で BER を比較しても、伝達係数を 1 にすることにより BPSK の理論値に一致する。また、本シミュレーションでは受信信号に対して位相補償は行っていない。これは、伝達係数には送受信アンテナおよび伝搬空間の特性のみが含まれているために位相変化は線形であり、検波における信号の同期によって、位相変化の影響は解消されているものと考えたためである。UWB バンドと ISM バンドにおける伝送レートをそれぞれ 500Mbps と 5Mbps とし、UWB バンドでは送信パルスの波形関数としてコサインロールオフパルスを使用する。

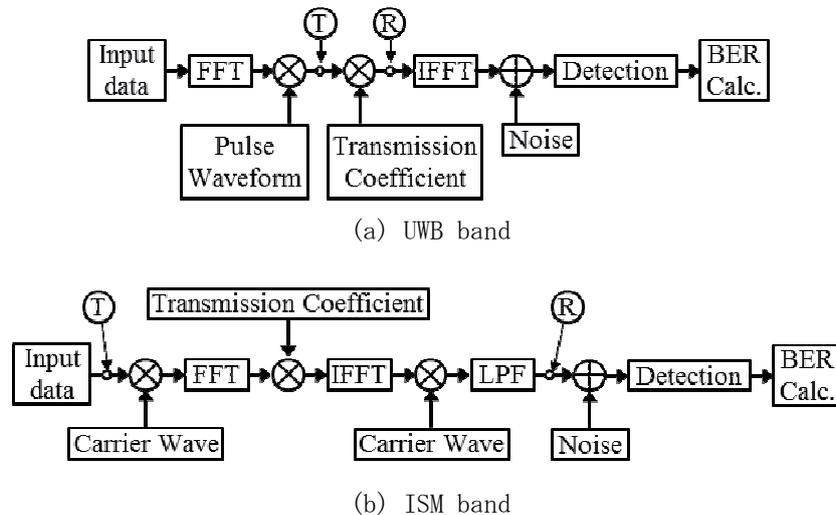


図 6 BER シミュレーションのブロック図

図 7 と 8 には、UWB バンドと ISM バンドにおける受信 SNR に対する BER シミュレーションの結果をそれぞれ示す。BPSK の理論値と比較して本シミュレーション結果の BER 特性が悪い原因は、送受信アンテナと伝搬の周波数特性による波形歪みの影響であると考えられる。また、UWB バンドにおいては誘電体円柱があることによる影響で $BER=10^{-2}$ のときに 0.8dB 改善するが、ISM バンドではほとんど変化が無いことがわかる。受信アンテナの位置 ϕ が 90° と 180° の場合にもほぼ同じ結果が得られた。UWB システムの規格では送信電力密度は -41.3dBm/MHz 以下に定められている。これより、バンド幅 B を 7GHz とすると送信信号の平均電力の上限は $-41.3\text{dBm/MHz} + 10\log_{10}B = -2.8\text{dBm}$ と求められる。雑音指数 F を 6dB としたときに雑音レベルは $N=kTB+NF \sim -70\text{dBm}$ であり、図 7 (a) において例えば $BER=10^{-4}$ のときに $E_b/N_0 \sim 12\text{dB}$ となることから、送信信号電力は -58dBm と求められる。従って、本研究の結果は UWB システムで規定されている送信電力よりも十分に小さいことが

わかる。

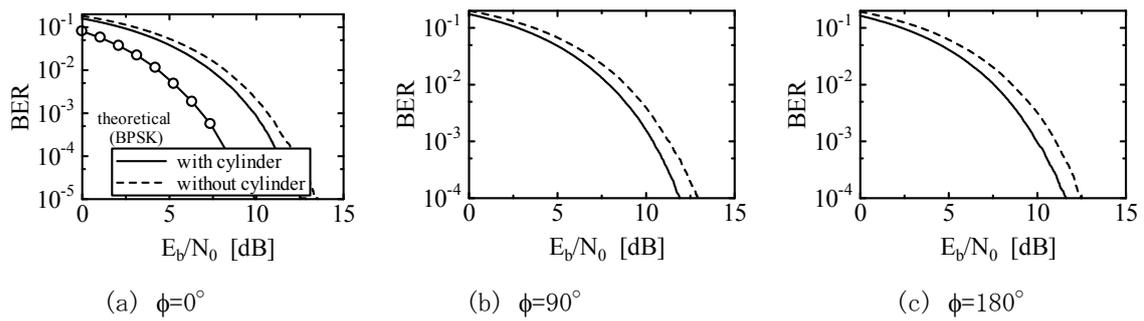


図7 受信 SNR に対する BER 特性 (UWB band)

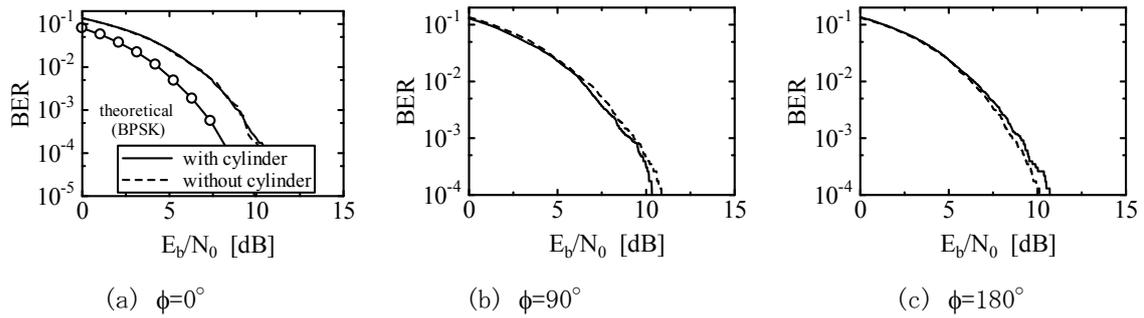


図8 受信 SNR に対する BER 特性 (ISM band)

次に図9と10にUWBバンドとISMバンドにおける送信SNRに対するBERシミュレーションの結果を示す。図9(a)には参考のために、図4(a)に示した円柱があるときの伝達係数の周波数特性の平均電力 (ave.) および自由空間伝搬損 ($L_b=(\lambda/4\pi d)^2$) を伝達係数として用いた場合のBERシミュレーションの結果を併せて示している。伝達係数の平均電力と自由空間伝搬損を用いたときには、解析モデルを用いた結果よりも良いBER特性が得られた。ただし、平均電力による伝達係数はアンテナの特性も含んでいるため、平均電力を用いたBER特性は用いるアンテナによって変動する。また、平均電力と自由空間伝搬損によるBER特性は円柱がある場合と比べてBERが 10^{-2} になる E_b/N_0 がそれぞれ1.5dBと4.7dB小さい。この差はアンテナや伝搬路の周波数特性による影響である。

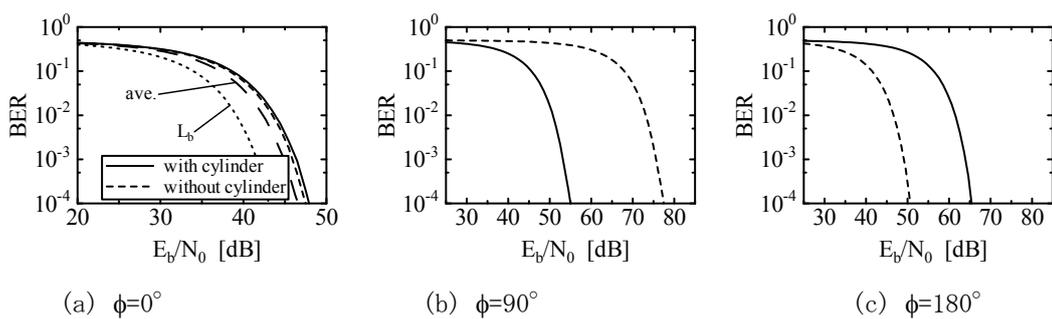


図9 送信 SNR に対する BER 特性 (UWB band)

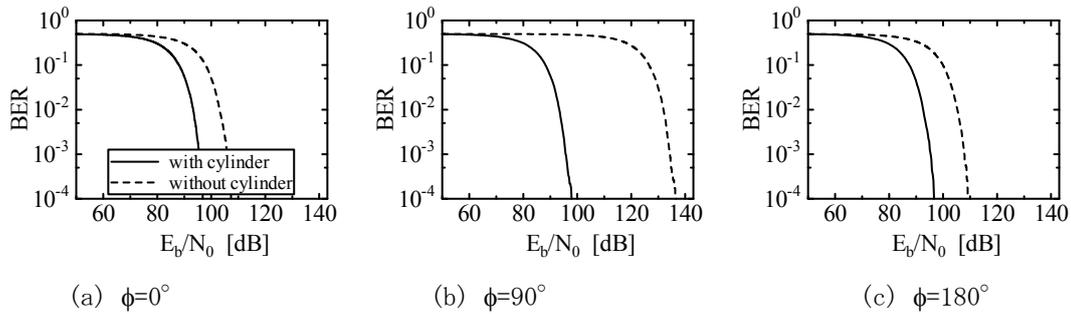


図 10 送信 SNR に対する BER 特性 (ISM band)

表 2 には、送信 SNR に対する BER が 10^{-2} になる E_b/N_0 について、円柱の有無による差を示す。全体的に UWB バンドよりも ISM バンドにおける差のほうが大きい傾向がある。これは ISM バンドの方が波長が長いために、使用している誘電体円柱による散乱が起こりやすいことによるものと考えられる。また、両バンドともに $\phi=90^\circ$ のときに、BER 特性が大きく改善していることが示されている。

表 2 BER= 10^{-2} における E_b/N_0 の円柱の有無による差の比較

ϕ	UWB Band	ISM Band
0°	-0.4dB	9.8dB
90°	22.3dB	38.6dB
180°	-14.9dB	12.5dB

4 おわりに

本研究では、厳密解を用いた解析的な手法によって無限長誘電体円柱近傍に配置した送受信ダイポールアンテナ間の伝達係数を求め、UWB バンドと ISM バンドを用いたデジタル無線通信へ与える影響を定量的に明らかにした。まず、人体を模擬した無限長誘電体円柱の近傍に配置したダイポールアンテナから電磁波が入射する場合の散乱電界の厳密解を導出し、電界分布を計算した。その結果、円柱の表面近傍に沿って強い電界が分布することを示した。次に、円柱近傍に置いた 2 つのアンテナ間の伝達係数を求め、生体等価ファントムおよび実人体を用いた測定結果と比較することにより、解析結果の妥当性を示した。受信アンテナが $\phi=90^\circ$ の位置に有るときには円柱によって散乱界の寄与が大きくなるために伝達係数が大幅に大きくなることを明らかにした。また、UWB バンドにおける UWB-IR 方式と ISM バンドの一つである 915MHz 帯において BPSK 方式を用いたときの BER シミュレーションを行い、ほとんどの場合について円柱の存在によって BER 特性が改善することを示した。特に受信アンテナの位置が $\phi=90^\circ$ の場合は、UWB バンドと ISM バンドにおいて BER が 10^{-2} となる送信 SNR がそれぞれ 22dB と 39dB 小さくなることがわかった。今後は、さらに周波数帯域として 2.4MHz の ISM バンドを用いた場合や変調方式を変えて BER シミュレーションを行い、WBAN に適した周波数や変調方式について検討する予定である。

【参考文献】

- [1] T. G. Zimmerman, "Personal area networks: Near-field intra-body communication," IBM Systems Journal, vol. 35, no. 3&4, pp. 609-617, 1996.
- [2] M. Shinagawa, M. Fukumoto, K. Ochiai, and H. Kyuragi, "A near-field-sensing transceiver for intrabody communication based on the electro optic effect," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.53, no.12, pp.1533-1538, Dec. 2004.
- [3] A. W. Astrin, H.-B. Li, and R. Kohno, "Standardization for body area networks," IEICE Trans. Commun., vol.E92-B, no.2, pp.366-372, Feb. 2009.
- [4] A. Alomainy, Y. Hao, C. G. Parini, and P. S. Hall, "Comparison between two different antennas for UWB on-body propagation measurements," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol.4, pp.31-34, 2005.

- [5] Y. P. Zhang and Q. Li, "Performance of UWB impulse radio with planar monopoles over on-human-body propagation channel for wireless body area networks," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.55, no.10, pp.2907-2914, Oct. 2007.
- [6] 山田宇志, 小林貴志, 松田敬嗣, 山崎宣, 大野光平, 井家上哲史,
"UWB通信における人体周辺の伝送路特性と補償に関する検討," *信学技報*, WBS2006-60, pp. 19-24, April 2007.
- [7] 木村一平, 王瓊, 王建青,
"UWB ボディエリア伝送路の測定及び通信特性の検討," *信学技報*, EMCJ2009-42, pp41-46, Sept. 2009.
- [8] N. Katayama, K. Takizawa, T. Aoyagi, J. Takada, H.-B. Li, and R. Kohono, "Channel model on various frequency bands for wearable body area network," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E92-B, no.2, pp.418-424, Feb. 2009.
- [9] K. Fujii, M. Takahashi, and K. Ito, "Electric field distributions of wearable devices using the human body as a transmission channel," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.55, no.7, pp.2080-2087, July 2007.
- [10] Q. Wang, T. Tayamachi, I. Kimura, and J. Wang, "An On-body channel model for UWB body area communications for various postures," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.57, no.4, pp.991-998, April 2009.
- [11] T. Aoyagi, K. Takizawa, T. Kobayashi, J. Takada, K. Hamaguchi, and R. Kohono, "Development of an implantable WBAN path-loss model for capsule endoscopy," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E93-B, no.4, pp.846-849, April 2010.
- [12] A. Alomainy and Y. Hao, "Modeling and characterization of biotelemetric radio channel from ingested implants considering organ contents," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.57, no.4, pp.999-1005, April 2009.
- [13] J. Wang, Y. Nishikawa, and T. Shibata, "Analysis of on-body transmission mechanism and characteristic based on an electromagnetic field approach," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.57, no.10, pp.2464-2470, Oct. 2009.
- [14] T. Sasamori, M. Takahashi, and T. Uno, "Transmission mechanism of wearable device for on-body wireless communications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.57, no.4, pp.936-942, April 2009.
- [15] 佐藤雄大, 笹森崇行, 戸花照雄, 磯田陽次, 高橋応明, 宇野亨,
"UWB-WBAN システムにおける電波伝搬特性の符号誤り率による評価," *信学技報*, A・P2009-53, pp. 53-58, July 2009.
- [16] "Dielectric properties of body tissues," <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>
- [17] L. B. Felsen and N. Marcuvitz, *Radiation and Scattering of Waves*, Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall, 1973.
- [18] C. T. Tai, *Dyadic Green Functions in Electromagnetic Theory*, 2nd ed. New York, USA: IEEE Press, 1993.
- [19] 安達三郎, *電磁波工学*, コロナ社, 1983.
- [20] 徐暢庸, 藤井勝之, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公一,
"2.4GHz 帯インプラントアンテナ," *信学技報*, AP2005-152, pp.93-96, Jan. 2006.
- [21] 阿部伸也, 高橋直洋, 笹森崇行, 戸花照雄, 磯田陽次,
"UWB-IR システムに使用するアンテナの BER 特性を用いた評価," *信学論(B)*, Vol.J92-B, No.8, pp.1298-1302, Aug. 2009.
- [22] 神谷幸宏, *MATLAB によるデジタル無線通信技術*, コロナ社, 2008.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Evaluation in Terms of BER of the WBAN System Using UWB and ISM Band	Proceedings of 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2011), pp.1709-1713, Rome, Italy	April 10-15, 2011
2.4GHz帯WBANシステムにおける人体が伝搬特性に及ぼす影響の研究	電気関係学会東北支部連合大会 講演論文集, 2I24, p.310	2011年8月25-26日
Study of radio propagation for wireless body area network communication in 2.4 GHz band	2011 International Symposium on Antennas and Propagation, Jeju, Korea	October 25-28, 2011
Bit Error Rate Performance of Ultrawide-Band Wireless Body Area Network System	投稿中	