

詳細人体腕部モデルを用いた電磁界共振結合によるボディエリア通信の生体安全性の検討

Biosafety investigation of Body Area Communication Using Electromagnetic Resonance Coupling Using Realistic Human Arm Model

○湯山菜奈子(国士館大) 越地福朗(国士館大) 越地耕二(東京理科大)

Nanako YUYAMA, Kokushikan University
Fukuro KOSHIJI, Kokushikan University
Kohji KOSHIJI, Tokyo University of Science

Abstract: In this study, a new, highly efficient wireless communication using electromagnetic resonance coupling between wearable devices located on the forearm and upper arm are investigated. We employed a realistic human arm model based on the MRI data, provided by NICT, for the investigation of the transmission characteristics S_{21} and electromagnetic field distributions and specific absorption rate (SAR) in body area communication using electromagnetic resonance coupling. As a result, it is found that the transmission characteristics S_{21} and electromagnetic field distribution characteristics, obtained from the models employing the realistic arm and the simplified cylindrical arm, agreed well with each other. Furthermore, it is also found that the SAR of the body was less than a three-hundredth compared with the safety limit of 2 W/kg.

Key Words: Electromagnetic resonance coupling, Body area network, wearable device, Specific absorption rate, FDTD method

1. はじめに

近年、ボディエリアネットワークとよばれる人体周辺通信ネットワーク技術に注目が集まっている⁽¹⁾。著者らは、電磁界共振結合を利用したボディエリア通信を提案し、人体に接触する電極を利用する人体通信と比べて、100倍以上の良好な伝送特性を実現することを確認している。しかしながら、これまでの検討では、筋肉の電気特性(導電率、誘電率)を有する円柱状均一媒質の単純化した腕部モデルを用いた検討であった⁽²⁾。

本稿では、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)から提供されたMagnetic Resonance Imaging(MRI)撮影データに基づく、生体組織を詳細に再現したモデル⁽³⁾を用いて、電気信号伝送特性 S_{21} および電磁界分布の検討を行い、さらに、Specific Absorption Rate(SAR)による生体安全性の検討を行う。

2. システム構成

図1に、本稿で想定するボディエリアネットワークの構成を示す。図1(a)に示すように上腕部および前腕部に装着したウェアラブル機器同士の通信を想定する。また、同図(b)に示すように、通信用のアンテナはウェアラブル機器を腕部に固定するバンド部分にリング状に内蔵する構成とする。

3. 電磁界解析モデル

図2は、本稿で検討する2種類の電磁界解析モデルを示したものである。同図(a)は、NICTから提供された日本人男性の平均体型を有する全身モデルから腕部を切り出し、送受信アンテナを装着したモデルである。本モデルを構成する生体組織は、皮膚、脂肪、筋肉、血液、腱、皮質骨、海綿骨の7つであり、ボクセルサイズは、2mm角である。腕部長は、 $L_{arm} = 732$ mmである。

同図(b)は、腕部を円柱状に単純化し、筋肉の電気特性を有する均一媒質でモデル化したものに、送受信アンテナを装着した、従来から検討を行ってきたモデルである。各寸法は、腕部長 $L = 650$ mm、腕部半径 $R = 40$ mmである⁽⁵⁾。

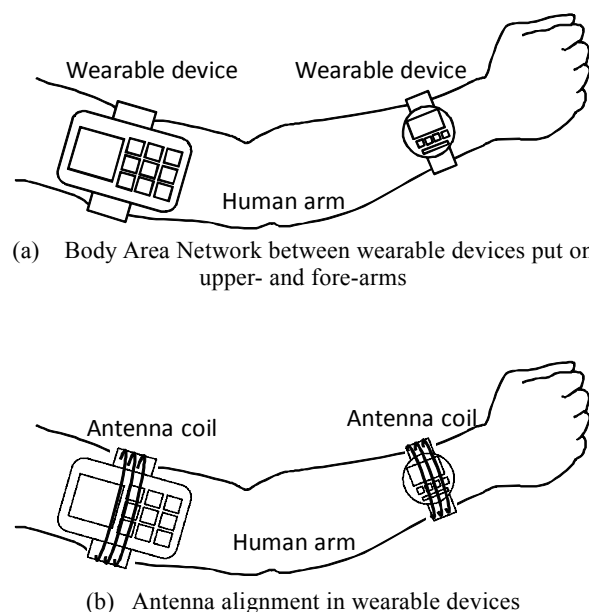


Fig. 1 Body Area Network using magnetic resonance coupling

同図(a), (b)のモデルともに、各生体組織の電気特性は、文献[6, 7]に基づいている。

ここで、送受信アンテナの構造は、半径 $r = 65$ mm、ピッチ $p = 10$ mm、巻数 $n = 5$ 回とし、送信アンテナの励振源には、内部抵抗 50Ω の信号源を用い、受信アンテナの受信抵抗は 50Ω としている。送受信アンテナ間隔は、前腕部と上腕部に装着された場合を想定する $D = 250$ mmとしている。電磁界解析には、Finite Difference Time Domain (FDTD)法を用いる。

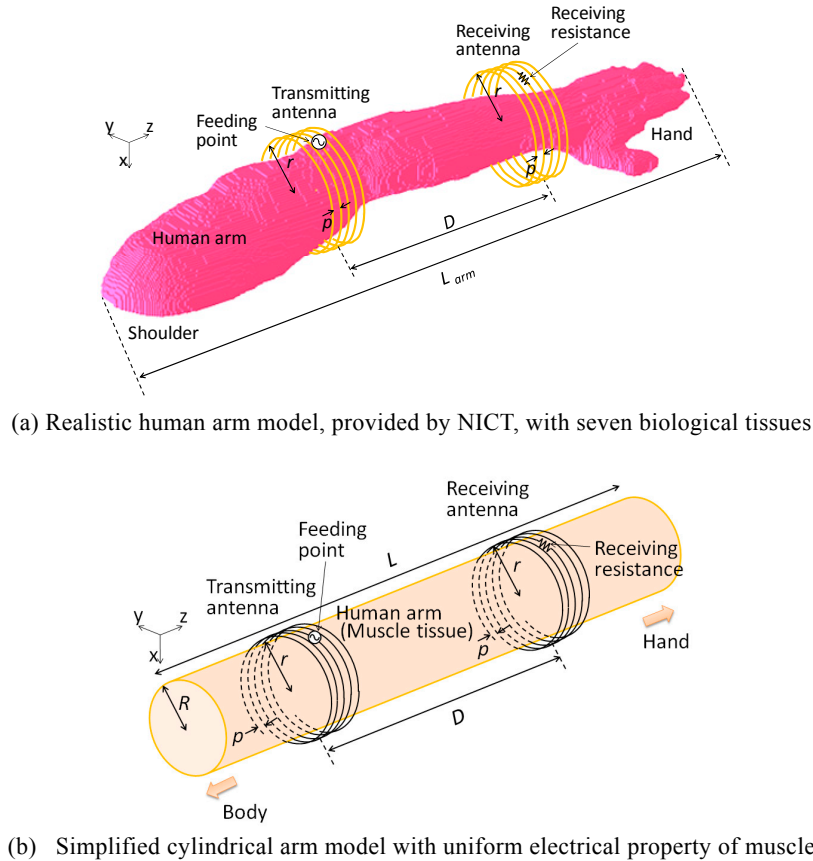


Fig. 2 Human arm models for electromagnetic field analyses

4. 伝送特性

図3は、図2に示す2種類の電磁界解析モデルにおける、送受信アンテナ間の伝送特性 S_{21} を示したものである。

図3からわかるとおり、図2(a)NICT腕部モデルでは、送受信アンテナが47.9 MHzで共振結合し、最大値 $S_{21} = -13.8$ dBが得られ、同図(a)円柱状筋肉均一媒質モデルでは、47.5 MHzで共振結合し、最大値 $S_{21} = -12.9$ dBが得られる。

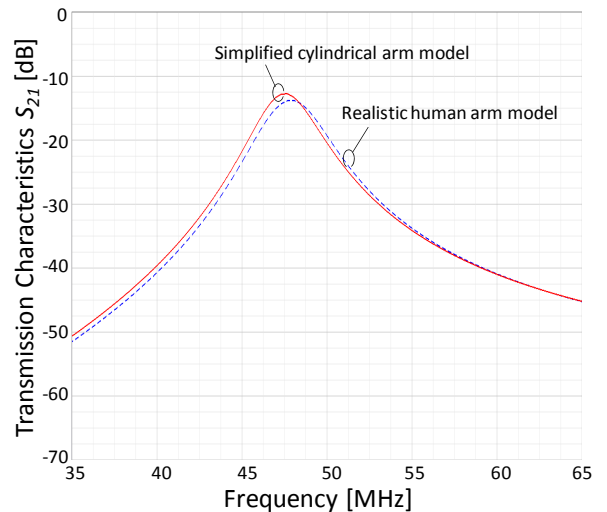
両者を比較すると、差異は、共振周波数において0.4 MHz、伝送特性 S_{21} において0.9 dBであり、両者は良く一致していることがわかる。このことは、伝送特性の検討において、円柱状筋肉均一媒質の腕部モデルを用いることで、実使用状態に極めて近い、十分な評価が可能であることを意味している。

ここで、伝送特性 S_{21} および共振周波数の若干の差は、NICT腕部モデルでは、送受信アンテナの装着部となる上腕部および前腕部の太さが異なり、送受信アンテナと腕部との間の分布容量が異なるため、送受信アンテナの共振周波数が円柱状均一媒質モデルを用いた場合とは異なることに起因すると考えられる。

5. 電磁界分布

図4、5は、図2に示す2種類の電磁界解析モデルにおける電界分布(図4)および磁界分布(図5)を示したものである。図4、5における電界分布および磁界分布は、それぞれ、最大電界強度、最大磁界強度を0 dBとして規格化して表示したものである。

図4の電界分布において、同図(a)NICTモデル、同図(b)円柱状筋肉均一媒質モデルの両者の分布の傾向は良く一致

Fig. 3 Transmission characteristics S_{21} between transmitting and receiving antennas

しており、腕部内部には電界がほとんど入り込まないことが確認できる。

一方、図5の磁界分布も同様に、同図(a)NICTモデル、同図(b)円柱状筋肉均一媒質モデルの両者の分布の傾向は良く一致しており、腕部の影響を受けずに送信アンテナから受信アンテナへと効果的に伝送している様子が確認できる。

以上のことから、電磁界分布の検討においても、円柱状

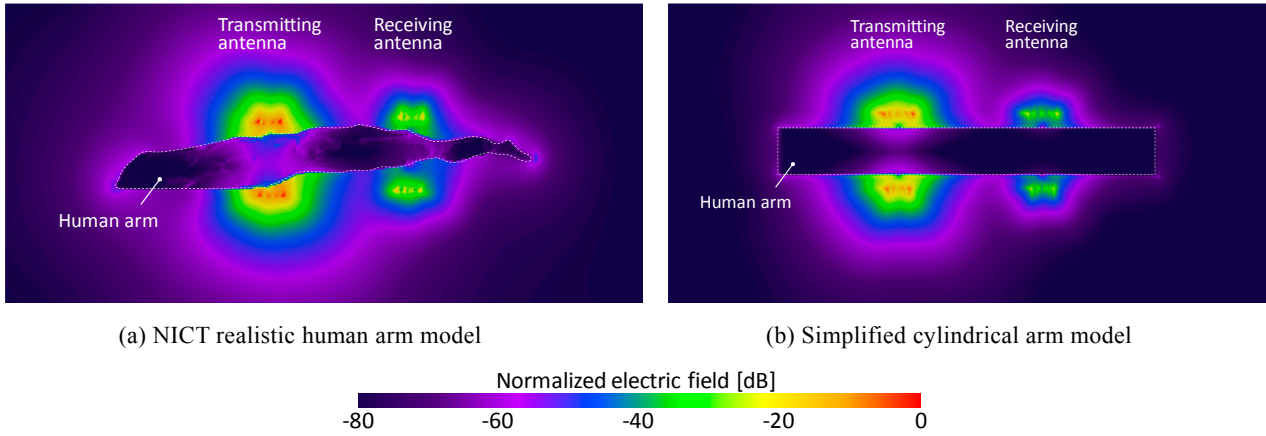


Fig. 4 Electric field distribution

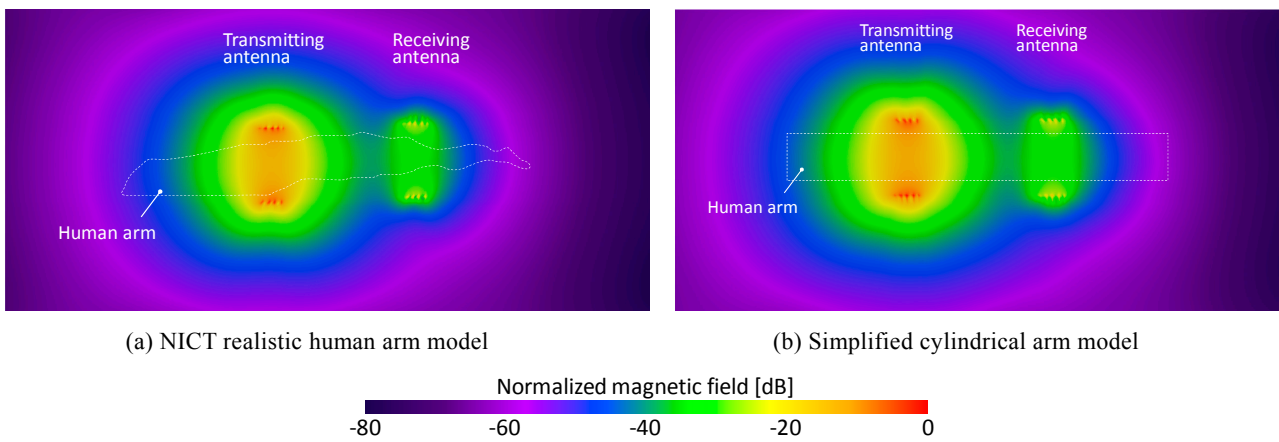


Fig. 5 Magnetic field distribution

筋肉均一媒質の腕部モデルを用いることで、実使用状態に極めて近い、十分な評価が可能となった。

6. 生体安全性評価

電磁界共振結合を利用したボディエリア通信は、新しい通信方式であるため、生体への安全性についても検討する必要がある。ここでは、通信時の生体安全性について、局所 Specific Absorption Rate (SAR) 値によって評価する。

局所 SAR の制限値は、任意の 10 g 当たりの生体組織に 6 分間に吸収されるエネルギー量の平均値が 2 W/kg 以下となるように定められている⁽⁶⁾。

図 6 は、送信アンテナの出力電力を 1 mW としたときに、局所 SAR の制限値である 2 W/kg を基準(0 dB)として表示したものである。同図(a)は NICT モデル、同図(b)は円柱状筋肉均一媒質モデルにおける SAR 分布を示している。

ここで、設定したアンテナの出力電力 1 mW は、Bluetooth の標準的なデバイスが出力する電力⁽⁷⁾と等しいものであり、ここではこれをアンテナの送信出力とした。

図 6 からわかるとおり、同図(a)NICT モデル、同図(b)円柱状筋肉均一媒質モデルの両者の分布の傾向は良く一致しており、送信アンテナ装着部分であっても、SAR 値は -25 dB 以下の値となっており、制限値である 2 W/kg の 1/300 以下と、生体の安全性も十分確保されていることが確認できる。

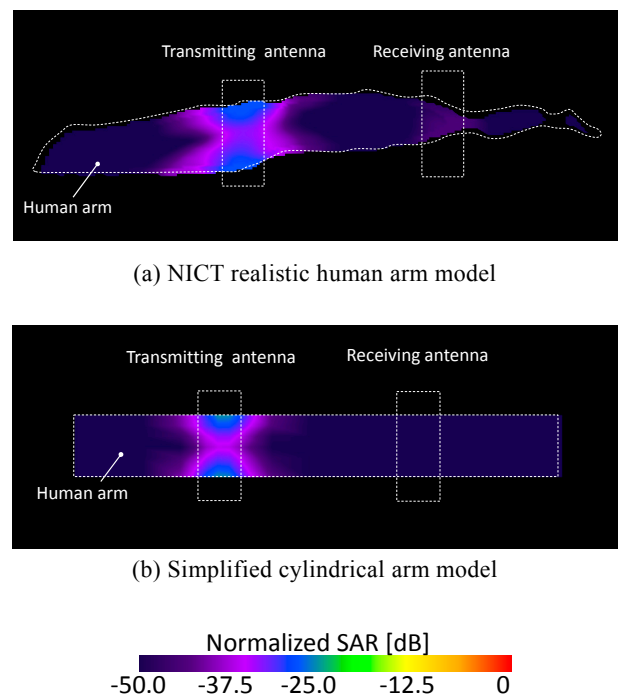


Fig. 6 SAR distribution

7. まとめ

本稿では、電磁界共振結合を利用したボディエリア通信において、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) から提供された Magnetic Resonance Imaging (MRI) 撮影データに基づく、生体組織を詳細に再現したモデルを用い、電気信号伝送特性 S_{21} および電磁界分布の検討を行い、さらに、Specific Absorption Rate (SAR) による生体安全性の検討を行った。

その結果、NICT 腕部モデルを用いた検討では、送受信アンテナが 47.9 MHz で共振結合し、最大伝送特性 $S_{21} = -13.8$ dB が得られた。また、従来から検討を行ってきた円柱状筋肉均一媒質モデルを用いた検討では、47.5 MHz で共振結合し、最大伝送特性 $S_{21} = -12.9$ dB が得られ、両者が良く一致していることを確認した。以上から、伝送特性の検討において、円柱状筋肉均一媒質モデルを用いることで、実使用状態に極めて近い、十分な評価が可能なことが明らかとなった。

さらに、NICT 腕部モデルを用いた電磁界分布の検討も行った。その結果、電界分布は、腕部内部には電界がほとんど入り込まないことを確認した。磁界分布は、腕部の影響を受けずに送信アンテナから受信アンテナへと効果的に伝送している様子が確認された。

また、送信アンテナの出力電力を 1 mW とした時の、局所 SAR 値は、制限値 2 W/kg の 1/300 以下と、生体への安全性も十分確保されていることを確認し、ボディエリア通信技術として有望であることを確認した。

参考文献

- (1) Huan-Bang Li, Kenichi Takizawa, Ryuji Kohno, "Trends and Standardization of Body Area Network (BAN) for Medical Healthcare", European Conference on Wireless Technology (EuWiT 2008), pp.1-4, October 2008.
- (2) Fukuro KOSHIJI, Nanako YUYAMA, Kohji KOSHIJI, "Wireless Body Area Communication using Electromagnetic Resonance Coupling", IEEE CPMT Symposium Japan 2012 (ICSJ 2012), December 2012.
- (3) T. Nagaoka, et al., "Development of Realistic High-Resolution Whole-Body Voxel Models of Japanese Adult Male and Female of Average Height and Weight, and Application of Models to Radio-Frequency Electromagnetic-Field Dosimetry", Physics in Medicine and Biology, Vol.49, pp.1-15, 2004.
- (4) S. Gabriel, et al., "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz", Phys. Med. Biol. 41, pp.2251-2269, 1996.
- (5) International Federation of Automatic Control (IFAC) website (<http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>).
- (6) 総務省電波防護指針 (<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/ele/index.htm>)
- (7) 宮津和弘, "Bluetoothのしくみとハードウェア構成", Design Wave Magazine, No.29, pp.65-73, April. 2000.
- (8) 越地福朗, 佐々木健, "人体内通信におけるウェアラブル送信機の電極構造によるインピーダンス整合と電極設計", エレクトロニクス実装学会誌, Vol.12, No.3, pp.221-232, May 2009.
- (9) Ken SASAKI, Fukuro KOSHIJI, Shudo TAKENAKA, "Intrabody Communication Using Contact Electrodes in

Low-Frequency Bands", CRC Press, Taylor and Francis, "Healthcare Sensor Networks - Challenges toward Practical Application", ISBN-13: 978-1439821817, Chaper 3, pp.51-73, September 2011.

- (10) Fukuro KOSHIJI, Takaaki FUJISAWA, Dairoku MURAMATSU, Ken SASAKI, Kohji KOSHIJI, "Input Impedance Characteristics of Wearable Transmitter Electrodes in Dry/Wet Skin Conditions for Human Body Communication", IEEE-EMBS Micro- and Nanoengineering in Medicine Conference (MNMC 2012), December 2012.