

THE IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS (JAPANESE EDITION)

IEICE 電子情報通信学会 **B** 論文誌

通 信

VOL. J100-B NO. 9
SEPTEMBER 2017

本PDFの扱いは、電子情報通信学会著作権規定に従うこと。
なお、本PDFは研究教育目的（非営利）に限り、著者が第三者に直接配布することができる。著者以外からの配布は禁じられている。

通信ソサイエティ

一般社団法人 **電子情報通信学会**

THE COMMUNICATIONS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

RFIDを用いた乳児姿勢検知システム*

高橋 応明^{†a)} 廣木 朗^{††}

RFID for Monitoring Baby's Posture*

Masaharu TAKAHASHI^{†a)} and Akira HIROKI^{††}

あらまし 本論文では、RFIDを用いた乳児姿勢検知システムを提案する。近年、それまで元気だった乳児が突然死亡する、乳幼児突然死症候群（SIDS: Sudden Infant Death Syndrome）が注目されている。明確な原因は不明であるが、うつぶせの状態寝での発症リスクが高いとされている。そこで本論文ではRFIDを用いて、乳児のうつぶせを検知するシステムを提案した。乳児が着用する服に取り付けるタグアンテナを導電布で設計し、数値シミュレーションと通信実験により評価し、提案するシステムの実現性を示した。

キーワード 布製 RFID タグアンテナ, RFID システム, 医療モニタリング, FDTD, 乳児姿勢検知

1. ま え が き

近年、日本をはじめ先進各国では、少子高齢化が急速に進んでいる。それに伴う医療従事者や介護者の負担増加、医療・介護の質の低下が懸念されている。その中で、無線通信技術の医療応用がこの問題解決の有効な手段になりうるとされ、注目が集まっている。総務省が行っている「ユビキタス健康医療技術推進事業」[1]でも、医療の安全性向上や医療事業者の業務負担軽減のために、無線通信技術を用いたRFID (radio frequency identification) システムの利用が検討されている。

乳幼児突然死症候群（SIDS: Sudden Infant Death Syndrome）という病気が注目されている。厚生労働省の報告によると、年々その発症は減少傾向にあるものの、依然として日本における0歳児死亡原因の第三位である[2]。SIDSの明確な原因は未だに不明とされているが、発症要因の一つとして、乳児がうつ伏せ状態であることがあげられている。これは、乳幼児の異常発現時に47.7%がうつ伏せで発見されたこと等に起

因する[3],[4]。更に、うつ伏せ状態は仰向け状態と比較して、SIDS発症リスクが約3倍高まるという報告もある[5]。

SIDSの予防研究として、カメラを用いたベビーモニターや乳児の音声を利用したベビーセンサーなどが挙げられるが、これらのシステムは常時監視しなければならない、あるいは音声にノイズが入ってしまう等の欠点がある[6]。病院や保育園などでは、常時、人が監視していなくても、SIDSを防ぐためにアラームがなるシステムが必要とされている。

本論文ではSIDSを抑制するために乳児がうつ伏せ状態になったことを感知し、アラームが鳴るシステムを提案した。更に、乳児のうつ伏せを検知するシステム用のアンテナの設計及び、解析を行った。

RFIDは無線通信を利用していることから、ある程度の物体を透過し通信することができる。しかし、アンテナの特性はアンテナ近傍にある誘電体に大きな影響を受ける。自由空間上では通信が行っても、水などを透過しなければならない場合、通信の大きな妨げとなり、一般に通信が困難になる。このことに着目し、本システムではベビー服の背中にタグアンテナを装着し、ベッドの下にリーダアンテナを設置することで乳児の姿勢をモニタリングする(図1)。あおむけの状態では通信が可能であるが乳児がうつぶせになった場合、タグアンテナとリーダアンテナの間に乳児が入り、通信が遮断されるため、通信の有無によって乳児があおむけであるか判断し、アラーム等で知らせることが

[†] 千葉大学フロンティア医工学センター, 千葉市
Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University,
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

^{††} 千葉大学工学部, 千葉市
Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho,
Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

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

* 本論文は、システム開発・ソフトウェア開発論文である。

DOI:10.14923/transcomj.2017APP0006

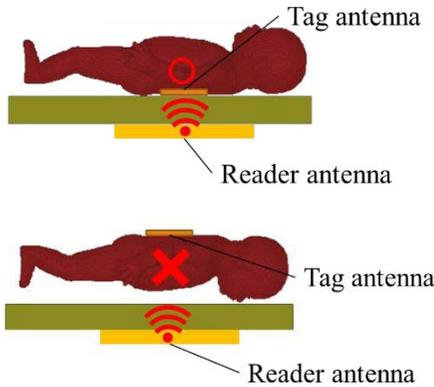


図1 提案する乳児姿勢検知システム
Fig. 1 The proposing monitoring system.

できる。常時通信を行うため、乳児の姿勢検知のみでなく、寝具からの転落や機器の故障に対しても即時対応が可能である。また、一般的に RFID システムでは送信側であるリーダアンテナが円偏波を放射し、直線偏波のタグアンテナがどのような向きになっても受信が可能である。リーダアンテナへの給電は寝具の下から行われるので、ケーブル類が絡まる心配もなく、乳児がベッド上で動いても問題がない。更に、乳児に取り付けるアンテナは小形かつ薄型で柔軟性があるのでストレスも最小限であるといえる。尚、使用周波数は RFID システムで用いられている 920 MHz とした。

本システムでは、各アンテナは人体近傍という特殊な状況下での利用が想定される。そのため、それらを考慮に入れた各アンテナの設計が非常に重要となる [7]。そこで、提案するシステムのため、乳児の背中に収まるサイズで、その上に寝た場合も違和感のない、かつ、人体の極近傍に設置しても動作する RFID タグアンテナを設計しシステム設計を行った。それらを用いた実験により、本システム実現の有用性及び信頼性の検証を行った。

2. 数値シミュレーション

2.1 タグアンテナの設計

提案するシステムで用いる RFID タグは、乳児のベビー服の背中に装着されるので、薄くフレキシブルかつ小形である必要がある。また、タグアンテナが金属製である場合、安全性の観点から好ましくない。以上を満たすタグアンテナの設計を行う。

図 2 に、本システム用に設計したタグアンテナを示す。タグアンテナは乳児の背中に装着することを

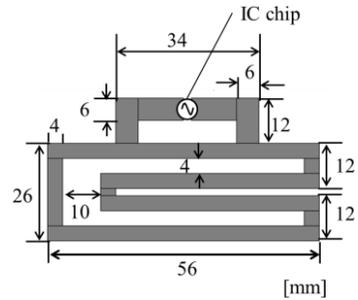


図2 RFID タグの構造
Fig. 2 Structure of RFID tag.

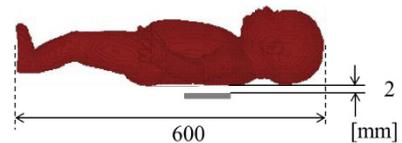


図3 タグアンテナの数値解析モデル
Fig. 3 Numerical calculation model of tag antenna.

想定しており、アンテナに使用している導電性布はタニムラ株式会社の導電性布 MK-KTN260 (導電率 $\sigma = 3.84 \times 10^6$) を使用している。アンテナは先ほどの条件を満たすスタブ構造付き二重折り返しループアンテナを使用した。先行研究において、長さ 90 mm の金属製折り返しダイポールアンテナ [8] を用いていたが、乳児の背中に収まるよう更に折り曲げ、二重折り返しループアンテナとし、人体の波長短縮の影響により、長さ 56 mm、素子長 240 mm となった。

図 3 に、タグアンテナの数値解析モデルを示す。アンテナは近接することにより、その特性が大きく変化する。そのため、実際の環境に即した状態で解析を行った。乳児の身長は生後 0~6ヶ月を想定し、600 mm とした [9]。乳児モデルには、Smith Micro Software 社の Poser[®] により作製した乳児の高精細人体モデルを使用している。人体の電気定数は、筋肉の電気定数に 2/3 を乗じた値 (比誘電率 $\epsilon_r = 37.3$, 導電率 $\sigma = 0.65$) を用いた [10]。また、乳児モデルの背中に RFID タグを装着することを想定し、衣服分として 2 mm の自由空間を設けた。人体との距離は重要なパラメータであるが、仰向けで寝ている最接近時を基準にシステム設計することにより、人体との距離が離れた場合には通信特性が劣化するため、フェイルセーフの設計としている。解析には電磁界シミュレーション手法の一つである FDTD (finite-difference time-domain) 法 [11] を用いた。

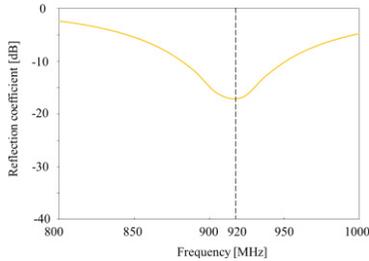


図 4 タグアンテナの反射係数 (計算値)

Fig. 4 Calculated reflection coefficient of tag antenna.

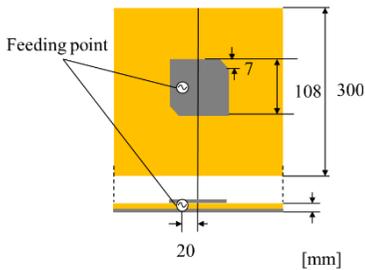


図 5 リーダアンテナの構造

Fig. 5 Structure of reader antenna.

図 4 に、タグアンテナの給電部における IC チップのインピーダンスに対する反射係数の計算結果を示す。一般に、IC チップのインピーダンスは公表されておらず、レジスタンスは数 Ω ~ 数十 Ω 、リアクタンスは数 Ω ~ 数千 Ω 程度といわれており [12], 50 Ω 系の測定器で直接図ることはできない。ここで、測定系とのインピーダンスのミスマッチングに拠る漏れ電流を遮断するために、タグアンテナにバランを用いて測定 [13], [14] し、計算して反射係数を求めている [15], [16]。図 4 より、設計したタグアンテナは、所望の周波数である 920 MHz において IC チップとインピーダンス整合が取れている。

2.2 リーダアンテナの設計

提案するシステムで用いるリーダアンテナは、乳児が寝る寝具の下に設置することを考慮した設計が必要となる。そのため、乳児が睡眠中にストレスを感じず、かつ寝具の下に収まる程度の、小形かつ薄型のアンテナが望まれる。また、乳児の向きに依存しない円偏波を放射する必要がある。

図 5 に、リーダアンテナの構造を示す。リーダアンテナはパッチアンテナを使用した。また、放射板には、円偏波を放射するために縮退分離素子を設けている。これによって、乳児の姿勢に対応することが可能とな

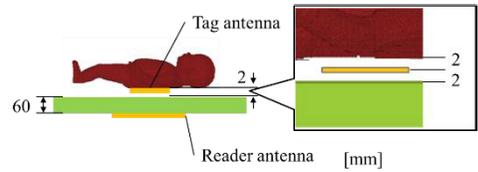


図 6 リーダアンテナの解析モデル

Fig. 6 Numerical calculation model of reader antenna.

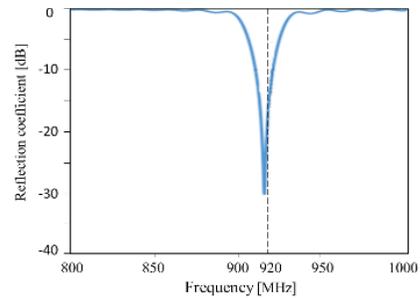


図 7 リーダアンテナの反射係数 (計算値)

Fig. 7 Calculated reflection coefficient of reader antenna.

る [8]。図 6 に、リーダアンテナの数値解析モデルを示す。また乳児の背中にタグアンテナを取り付けることを想定し、乳児とベッドの間に衣服やシーツを考慮して、それぞれ 2 mm の空間を設けた。ベッドの比誘電率は 1.34、リーダアンテナの基板の比誘電率は 2.17 とした。図 7 に、リーダアンテナの給電部における反射係数を示す。所望の周波数である 920 MHz において整合が取れている。

2.3 リーダとタグアンテナ間の透過特性

設計したアンテナを用いて、乳児のあおむけとうつぶせにおけるタグアンテナとリーダアンテナの透過係数を、数値シミュレーションにより評価した。図 8 に、解析モデルを示す。RFID タグとリーダの位置関係は、実際の利用状況を踏まえ、乳児があおむけで寝ている状態 (図 6) とうつぶせで寝ている状態、横向きで寝ている状態 (図 8) を想定している。

表 1 に、タグアンテナとリーダ間の透過係数を示す。表 1 では、図 6 の状態を“Face up”, 図 8 (a) の状態を“Sideways”, 図 8 (b) の状態を“Face down”と表記している。IC チップの駆動電力が 30 μ W であることをふまえ、うつ伏せ時だけを検知するようにリーダの入力電力は 10 mW と設定した。そのときのしきい値を式 (1) で計算し -25.2 dB とすることにより、表 1 のように、うつ伏せ状態のみを検知することができる。

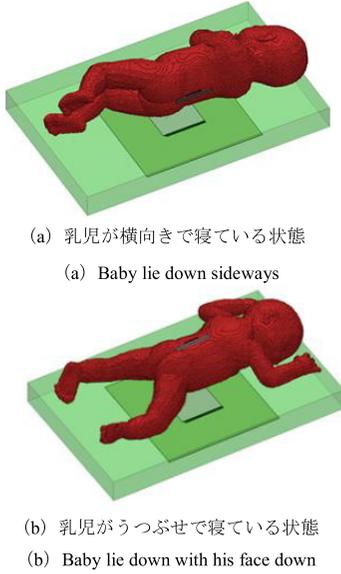


図 8 透過係数算出モデル

Fig. 8 Calculation model for transmission coefficient.

表 1 リーダアンテナと RFID タグの乳児姿勢による透過係数

Table 1 Transmission coefficient due to baby's posture between RFID tag and reader antenna.

Posture	Transmission coefficient [dB]
Face up	-18.2
Sideways	-24.5
Face down	-29.2

$$\text{しきい値} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{IC 駆動電力}}{\text{入力電力}} \right) = -25.2 \text{ [dB]} \quad (1)$$

3. 実験

3.1 アンテナ特性

実験により本システムの有用性を検証した。図 9 に作製した乳児を模擬した 2/3 筋肉等価ファントムを、表 2 にファントムの電気定数を示す。表 2 より、作製したファントムは、目標の電気定数との誤差が 10% 以下であり、十分実験に用いることができる。

図 10 に、試作した RFID タグアンテナを示す。図 10 の RFID タグは導電布を前述の寸法に切りフェルト布の上に接着している。IC チップは上部ギャップに接続する。図 11 に、RFID タグアンテナの給電部における反射係数の測定結果を示す。RFID タグアンテナの



図 9 2/3 筋肉等価ファントム

Fig. 9 2/3 muscle-equivalent phantom.

表 2 乳児ファントムの電気定数 (@920 MHz)
Table 2 Electrical constants of baby phantom (@920 MHz).

	Target	Measured value
Relative permittivity	37.3	40.4
Conductivity [S/m]	0.65	0.62



図 10 試作した RFID タグ

Fig. 10 Fabricated RFID tag.

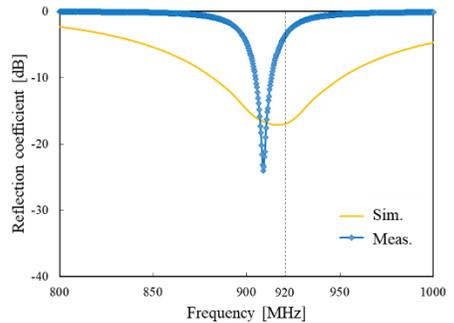


図 11 タグアンテナの反射係数 (測定値)

Fig. 11 Measured reflection coefficient of tag antenna.

測定は、図 12 のようにバランを用いて測定した。試作した RFID タグアンテナは所望の周波数から若干ずれて 910 MHz において IC チップとインピーダンス整合が取れている。バランの特性により、計算値より狭帯域になっている。また、発泡スチロールを用いた固定治具を用いても、布製 RFID タグアンテナとバランとの接続部、ファントムとの位置関係にブレが生じる



図 12 実験風景
Fig. 12 Experimental environment.

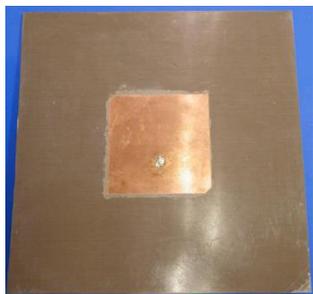


図 13 試作したリーダアンテナ
Fig. 13 Fabricated reader antenna.

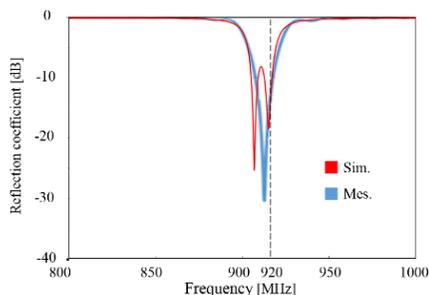


図 14 リーダアンテナの反射係数 (測定値)
Fig. 14 Measured reflection coefficient of reader antenna.

課題があるが、実際の通信実験では、問題となっていない。

図 13 に、試作したリーダアンテナを示す。使用した基板は Arlon 社の「DICLAD 880」であり、比誘電率は 2.17、厚さは 1.6 mm である。図 14 に、リーダアンテナの反射係数の測定結果を示す。図 14 より、リーダアンテナは所望の周波数である 920 MHz においてインピーダンス整合が取れており、数値シミュレーション結果ともおおむね一致している。共振点が二つあるのは、縮退分離素子を用いているためである。

3.2 リーダとタグアンテナの透過特性

試作したアンテナを用いて、リーダとタグの乳児の

表 3 透過係数の計算値と実測値の比較
Table 3 Comparison of calculated and measured of Transmission coefficient.

Baby posture	Transmission coefficient [dB]	
	Calculated	Measured
Face up	-18.2	-15.6
Face down	-28.2	-29.1



(a) 全体図
(b) Overall view



(b) 横からみた図
(b) Side view

図 15 実験の風景
Fig. 15 Experimental environment.

姿勢によるそれぞれの透過係数を、実験により評価した。実験は図 8 の数値シミュレーションと同様のモデルで行った。表 3 に、数値シミュレーションと実験による、リーダと IC チップ間の透過係数の比較を示す。表 3 より、実験と数値シミュレーションの結果はおおむね一致していることから乳児の姿勢検知は可能と判断できる。

3.3 通信実験

試作したタグアンテナとリーダアンテナを用いて、通信実験を行った。実験風景を図 15 に示す。図のように、リーダアンテナを置き、その上にベッド、背中にタグアンテナを装着した乳児用の服を着た乳児ファントムを置き、通信が可能か実験を行った。実験には INPINJ 社製の「MultiReader Inpinj」というソフトを用いて RF タグの検出を行った。実験の結果、あお

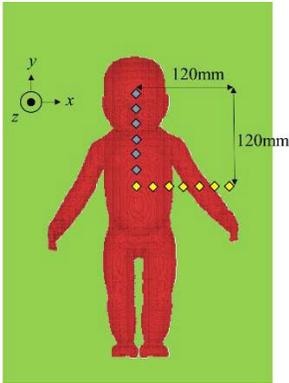


図 16 計測地点
Fig. 16 Measurement point.

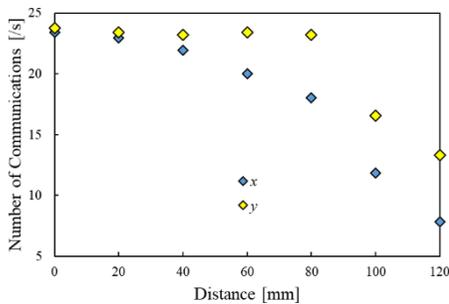


図 17 各地点での通信回数
Fig. 17 Number of communications in each point.

むけでは検出できているが、うつぶせでは検出できていないことが確認できた。この結果から、布製タグアンテナを用いた乳児姿勢検知システムが十分実現可能であるといえる。

3.4 システム評価

試作した RFID タグアンテナとリーダアンテナを用いて、通信可能範囲の測定を行った。測定条件は、図 15 と同じである。リーダアンテナから約 30 回/秒通信を試み、通信できた回数が 10 回以下を通信不可と判断している。実験はベビーベッドで寝ている乳児を想定し、図 16 に示すように、 x 及び y 方向に 20 mm ずつ、最大 120 mm 乳児が移動した場合を想定して測定を行った。図 17 に通信実験の結果を示す。この結果は、30 秒間測定したときの通信可能回数の平均秒間回数を示している。これより、乳児が x 方向に 12 cm、 y 方向に 10 cm で移動しても通信が可能であることが分かり、提案システムの有用性が確認できた。

4. むすび

本論文では、布製 RFID タグアンテナを用いた乳児姿勢検知システムを提案した。本システムは、SIDS の予防のために、背中に装着してある布製 RFID タグアンテナによって寝ている乳児がうつぶせであるかどうかをリアルタイムでモニタリングするものである。本システムの有用性を検証するために、RFID タグとリーダのアンテナをそれぞれ設計し、数値シミュレーションと実験により各アンテナの特性を評価した。その結果、設計したタグアンテナは、乳児に装着した状態で、また、リーダアンテナはベッドの下に設置した状態で、それぞれ良好なアンテナ特性が得られた。また、IC チップの駆動電力とリーダの出力電力から透過係数にしきい値を設けることで、あおむけとうつぶせを明確に検知できることがわかった。また、簡易的な姿勢別の通信実験により、RFID タグが乳児のあおむけ状態ではリーダと通信を行い、うつぶせ状態ではリーダアンテナとタグアンテナの間に乳児が入ることによって通信が遮断された。その結果、通信の有無により乳児の姿勢をモニタリングするという本システムの実現性を示すことができた。

文 献

- [1] 総務省, “事業番号 0081 行政事業レビューシート,” http://www.soumu.go.jp/main_content/000081636.pdf, 参照 May 6, 2012.
- [2] 厚生労働省, “死因順位 (第 5 位まで) 別にみた年齢階級・性別死亡率・死亡率 (人口 10 万対)・構成割合,” <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/suii09/deth8.html>
- [3] 平成 24 年 10 月 25 日 (木) 厚生労働省雇用均等・児童家庭局母子保健課 報道発表資料, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r985200002mqh0.html>
- [4] 厚生労働省大臣官房統計情報部 平成 26 年 我が国の人口動態乳幼児突然死症候群 (SIDS) 対策に関する検討報告
- [5] 厚生省児童家庭局母子保健課, <http://www1.mhlw.go.jp/houdou/1006/h0601-2.html>
- [6] T.F. Budinger, “Biomonitoring with wireless Communications,” Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- [7] U. Kim and J. Choi, “Design of a Compact Wideband UHF RFID Tag Antenna,” Proc. Asia-Pacific Microw. Conf., pp.987-990, Yokohama, Japan, Dec. 2010.
- [8] 佐藤鈴香, 高橋聡明, “RFID を用いた乳幼児姿勢検知システム,” 2016 信学総大, B-20-7, March 2016.
- [9] 厚生労働省, “平成 22 年乳幼児身体発育調査報告書 (概要),” 2010.
- [10] S. Gabriel, R.W. Lau, and C. Gabriel, “The dielec-

- tric 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.
- [11] 宇野 享, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 東京, 1998.
- [12] 上坂晃一, 高橋応明, “無線 IC タグにおけるアンテナ技術,” *信学論 (B)*, vol.J89-B, no.9, pp.1548–1557, Sept. 2006.
- [13] 中嶋宏昌, 高橋応明, 齊藤一幸, 伊藤公一, “RFID 技術を用いた排尿検知システムの開発,” *信学論 (B)*, vol.J96-B, no.12, pp.1378–1385, Dec. 2013.
- [14] 高橋応明, RFID タグ用アンテナの設計, コロナ社, 東京, 2012.
- [15] K. Kurokawa, “Power waves and the scattering matrix,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.13, no.2, pp.194–202, March 1965.
- [16] 山田亜希子, 尾林秀一, 庄木裕樹, 新井宏之, “電力反射係数による RFID タグアンテナのクリアランス評価,” *信学技報*, A-P2010-134, 2011.
- (平成 29 年 1 月 1 日受付, 4 月 21 日再受付,
6 月 2 日早期公開)



高橋 応明 (正員：フェロー)

平元東北大・工・電気卒。平 6 東工大大学院博士課程修了。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・准教授。衛星放送受信アンテナ, 平面アンテナ, 小形アンテナ, RLSA, RFID, 環境電磁工学, 人体と電磁波との相互作用の研究に従事。工博。IEEE シニア会員。



廣木 朗

平 29 千葉大・工・メディカルシステム卒。RFID を用いた医療アプリケーション用アンテナに関する研究に従事。