

Bluetooth用機器チップアンテナの開発

青山博志* Hiroyuki Aoyama
菊地慶子** Keiko Kikuchi
外村健一* Kenichi Tonomura

Development of Chip Antennas for Bluetooth Devices

Bluetooth無線通信技術を適用した小型モバイル機器に用いられるアンテナは、プリント基板実装時の占有面積が小さいことが特に重要である。従来の逆F型アンテナのアンテナ構造を改良し、占有面積が小さいにもかかわらず優れたアンテナ特性を持つ当社独自の構造を開発した。すなわち、占有面積が最小の小型（15mm×3mm×3mm）チップアンテナを開発し、広帯域（100MHz以上）、高利得（-5dBi以上）、全周方向で無指向性に近い性能を実証した。したがって本方式は、小型機器への搭載に適し、かつ安定に無線通信できる可能性が高いアンテナであるといえる。

Antennas for portable devices that will use Bluetooth technology must occupy very little room on the printed circuit board (PCB). Improving conventional inverted F antenna, we have found out the original antenna structure, which enabled both little PCB room and good antenna properties. That is, we have developed a ceramic chip antenna requiring the smallest PCB room with a small size (15mm×3mm×3mm). Also, this antenna has a wide frequency range (more than 100MHz), high gain (more than -5dBi), and quasi omni-directional properties. Thus, its use for portable devices will enable highly stable wireless communication.

① 緒言

次世代の無線データ通信技術として、無免許で利用可能な2.4GHz帯を使用する近距離無線規格「BluetoothTM」が世界中で注目されている¹⁾。

図1に、Bluetoothを用いた無線データ通信の概念を示す。Bluetoothとは携帯電話を中心とし、半径10m以内にあるヘッドフォンやパソコン、ノートPC、デジタルカメラなどの周辺機器が相互に通信する無線LAN（Local Area Network）方式の一種である。

携帯電話からは、次世代の通信方式であるW-CDMA（Wide-band Code Division Multiple Access）などの無線回線を介して基地局にアクセスすることにより、インターネットなどの大規模LANにも接続可能である。

Bluetoothの無線帯域であるISM（Industrial Scientific Medical）帯は、工作機械や電子レンジなどからの放射ノイズが多い帯域であることから、通信方式として耐ノイズ性に優れ、回路構成の簡素化にも有効な周波数ホッピング方式が採用されている²⁾。

今後、Bluetoothは前述したモバイル無線機器はもとより、様々なデジタル家電品や自動車の電装品に至るまで、幅広い応用展開が期待されている。

ところで、無線通信に欠くことのできないアンテナについては、これまで携帯電話などの小型無線機器にも、主に感度などの性能面から棒状アンテナが使われてきた。

ただし最近では、機器の小型軽量化やデザインなどの市場要求に応じ携帯電話用アンテナの小型化や内蔵化の動きがあり³⁾、Bluetooth搭載機器についても小型軽量化かつ高性能の内蔵アンテナが求められている。

当社では長年にわたり、金属、磁性体、誘電体などの材料開発を手がけており、これらの材料を基盤として、近年、携帯電話の無線回路部に用いられるモジュール部品⁴⁾

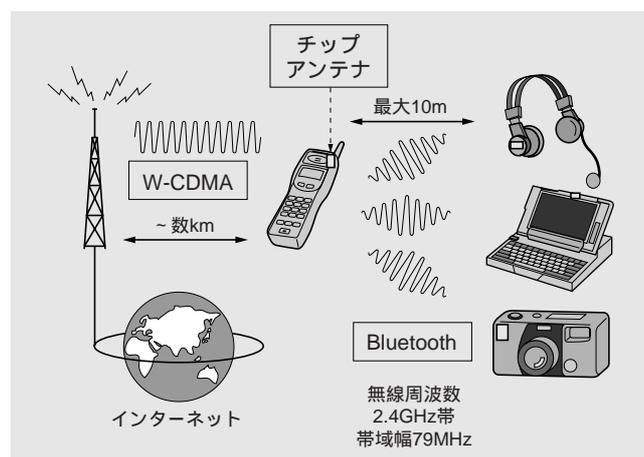


図1 Bluetoothとは？

Fig. 1 What is Bluetooth?

* 日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所

** 日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所 工学博士

* Advanced Electronics Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.

** Advanced Electronics Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.

やアイソレータ⁵⁾を開発量産している。

アンテナについても、当社独自の材料と設計技術を融合した小型高性能の内蔵アンテナの開発に着手し、これまでに車載用途であるカーナビゲーション用アンテナや、ETC (Electronic Toll Collection) システム用アンテナなどを開発してきた。

今回はさらに、機器への実装時の占有面積が最小で、周辺部品の配置による影響を受けにくく、使いやすさに優れたブルートゥース用チップアンテナを実用化した。本報告では、ブルートゥース用途に適した小型(15mm×3mm×3mm厚)、高利得を有するチップアンテナの開発について説明する。

② ブルートゥース用アンテナの仕様

ブルートゥースのシステム仕様は、インターネットなどを通じて公開されているが、アンテナ仕様についてはシステム仕様書にも規定されていない⁶⁾。このことはブルートゥース搭載機器の用途に応じて、ユーザー側で最適なアンテナを選択できることでもある。ただし、無線帯域や送信電力などの仕様は規定されているので、アンテナもこれらの仕様に適合する必要がある⁸⁾。

表1に、ブルートゥースで定められた無線帯域と、送信電力の仕様を示す(国内および米国、欧州の場合)。ブルートゥースでは周波数2.400~2.4835GHzのISM帯のうち、79MHzの帯域が通信に利用される。また、表1に示すように、ブルートゥース機器の送信電力は、クラス1(最大100mW)からクラス3(1mW)までわかれており、必要な通信到達距離に応じて選択される。

ここで、クラス毎に必要なとされるアンテナの利得を計算により求めてみる。送信アンテナおよび受信アンテナの利得をそれぞれ G_{atx} 、 G_{arx} とし、アンテナ間の距離を R [m]とすると、送信側から受信側までの伝播損失 P_{rx} / P_{tx} は次式のように表される。

$$\frac{P_{rx}}{P_{tx}} = G_{atx} \times G_{arx} \times \left(\frac{1}{4R}\right)^n \dots\dots\dots (1)$$

$$= \frac{c}{f} \dots\dots\dots (2)$$

は空中を伝播する電波の波長、 f は周波数、 c は光速(3×10^8 m/s)であり、 $f=2.5$ [GHz]のとき、(2)式より $= 120$ [mm]となる。また n は周囲環境に応じた定数であり、屋外など障害物がない場合(自由空間)では $n=2$ 、障害物の少ない屋内では $n=2.5$ 、壁などで仕切られた屋内では $n=3$ となる。

図2に、伝播周波数2.5GHzにおける自由空間での伝播損失の計算結果を示す。このとき送信受信に同じ利得 $G_a (=G_{atx}=G_{arx})$ のアンテナを使うものとした。クラス3の場合を例にとると、送信電力が1mW (=0dBm)、最小受信感度は-70dBmであることから、アンテナ間10m以内での伝播損失の許容値は-70dB以上となる。図2に示した結果より、アンテナ間10m以内で伝播損失-70dB以上を満足するためには、アンテナ利得が-5dBi以上であれば良いことがわかる。なおクラス1の場合でも、アンテナ利得は同様である。

表1 ブルートゥースシステムの基本仕様

Table 1 Basic specification of Bluetooth system

項目	仕様	
無線周波数帯 (GHz)	2.400 ~ 2.4835	
占有帯域幅 (MHz)	79	
送信電力 (mW)	クラス1	100 (max.)
	クラス2	2.5 (max.)
	クラス3	1

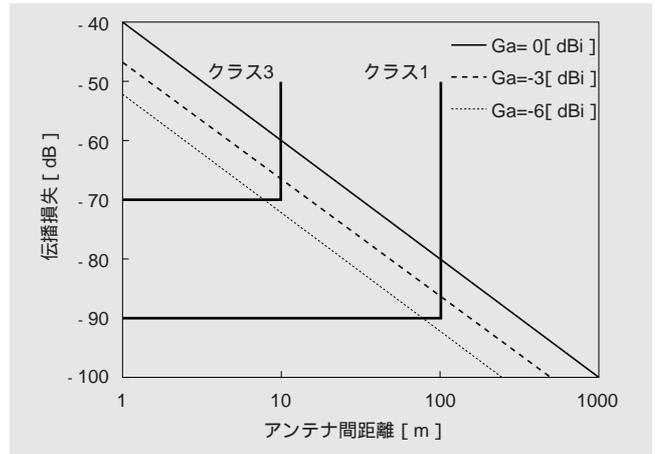


図2 自由空間での伝播損失の計算結果

Fig. 2 Calculated propagation loss

またブルートゥースを運用する際には、国ごとの電波法などで定められた規制を順守する必要がある⁷⁾。国内標準規格として電波産業会のARIB SDT-T66がある。これによれば、アンテナ利得や指向性についての規定はなく、どのようなアンテナでも使用可能であるが、利得が2.14dBi (ダイポールアンテナに相当)を超えるような指向性の強いアンテナを用いた場合には、利得の増加分に相当する送信電力を低減する必要がある⁷⁾。

モバイル機器に搭載されるアンテナの条件として、機器の姿勢によらず安定に通信可能な無指向性アンテナが理想的である。ただし、ブルートゥース搭載機器の利用形態により、指向性をもったアンテナが適する場合もある。

表2に、ブルートゥース用アンテナにおける、開発目標仕様を示す。アンテナ入力側のインピーダンスを50とし、反射の大きさを表す指標であるVSWR⁸⁾ (Voltage Standing Wave Ratio: 電圧定在波比)については3以下を目標値とした。また外形寸法の目標仕様15×3×3mmについては、次章で詳しく説明する。

表2 ブルートゥース用アンテナの開発目標仕様

Table 2 Target specification of Bluetooth antenna

項目	仕様
伝播周波数 (GHz)	2.400 ~ 2.484
帯域幅 (MHz)	84
利得 (dBi)	-5以上
指向性	無指向性
入力インピーダンス ()	50 (typ.)
VSWR	3以下
外形寸法 [mm]	15(L)×3(w)×3(H)

3 アンテナ設計

図3(a),(b)に、Bluetoothシステム構成⁹⁾、アンテナ実装方法の一例をそれぞれ示す。無線回路の小型化および高集積化を図るため、図3(a)に示すような送信回路と受信回路を同じパッケージに内蔵した専用ICが用いられる。またクラス1では、送信電力が大きいため、送信側にパワーアンプ(出力100mW)が付加される場合もある。Bluetoothでは、送信と受信をスイッチにより切り替える半二重通信であることから、一般に送受信兼用アンテナが用いられる。通信帯域外への送信電力の放射を抑制し、帯域外の不要な電波の受信を防ぐ目的で、通常はアンテナとスイッチの間に帯域通過フィルタが挿入される。

図3(b)に示すように、Bluetoothの無線回路は底面が15mm×30mm、高さ約3mmのモジュールに一体化され、アンテナとともに回路基板に実装される。システム全体の占有面積を減らすことにより小型化を図るためには、回路モジュールとアンテナを近接して実装することが望ましく、アンテナ部の占有面積低減がシステム小型化のキーポイントになる。

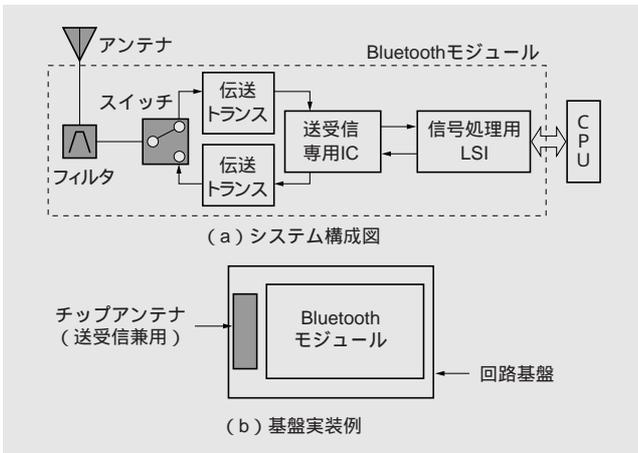


図3 Bluetoothシステム構成例
Fig. 3 Configuration of Bluetooth system

Bluetooth用チップアンテナの設計にあたり、下記の項目について、それぞれ設計仕様を求めた。

(1) 小型化および占有面積低減

アンテナ実装部の占有面積低減のため、表2に示すようにアンテナの長さ15mm、幅3mmを目標とした。特に占有幅を狭くすることにより、機器への搭載時にアンテナの突起部分を小さくできるため、破損防止やデザイン性向上のメリットがある。アンテナの高さは、モジュール高さと同じ3mmを目標とした。

(2) 高性能化

伝播周波数、利得、その他の電気特性については、表2のアンテナ目標仕様を満たすこと。

(3) 使いやすさ

アンテナ近傍のモジュール、回路基板などの形状と配置により、伝播周波数や利得、VSWRなどの特性が変動

または劣化し難いこと。このことはBluetoothのように、多種多様な機器に搭載され、使用環境が著しく変化しやすいアンテナにとっては重要である。

4 アンテナ構造および原理

4.1 従来構造

図3に示したチップアンテナの構造検討にあたり、はじめに従来から小型モノポールアンテナとして広く知られている、逆F型アンテナを検討対象とした¹⁰⁾。

図4に、逆F型アンテナの構成例を示す。アンテナの占有幅Wを小さくするため、基板上のアンテナ導体は折り曲げ形状となり、接地端と開放端を有する構造である。また接地端に近い位置に給電点を設け、接地導体上に実装された無線モジュールにより給電する。このときアンテナから放射された電波の一部が、モジュール回路内に伝播して誤動作を引き起こさないよう、モジュール周囲を金属ケースなどにより静電遮蔽(へい)する。

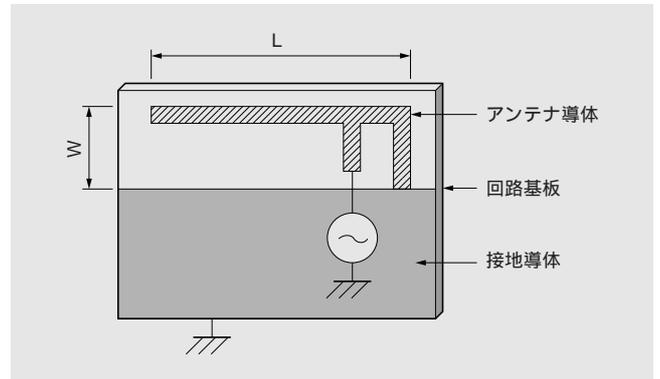


図4 従来の逆F型アンテナ構成例
Fig. 4 Structure of planer inverted F antenna

送信時には、アンテナ導体の開放端付近と接地導体の間に強い電界が発生することにより、電波が空間に放射される。回路基板の比誘電率 ϵ_r が空間の比誘電率1より大きいため、基板内部に発生する電界の波長短縮効果により小型のアンテナを構成できる。すなわち、アンテナの長さLは大略次式で表される。

$$L \approx \frac{1}{4} \times \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\epsilon_r \approx \frac{1 + \epsilon_r}{2} \dots\dots\dots \epsilon_r: \text{実効比誘電率} \dots\dots\dots (4)$$

(3),(4)式より、回路基板として一般的なガラスエポキシ基板($\epsilon_r=4.6$)と、高誘電率のセラミクス基板($\epsilon_r=10$)を比較した結果、周波数2.5GHzでのL値は、エポキシ基板で約18mm、セラミクス基板で約13mmであることから、後者を用いることによりアンテナ長15mm以下の目標値を満足できることがわかる。

そこで、底面15mm×3mm、高さ3mmのセラミクス基板の表面に、図4のアンテナ導体(L=13[mm], W=3[mm])を設けた逆F型構造について、有限要素法による電磁界シミュレーションを行った。この結果、クラス3でのVSWR<3の条件を満足する伝播周波数は2.42~

2.47GHz, このときの帯域幅は50MHz程度であり, 表2に示した帯域幅の目標値84MHzを達成できないことが明らかとなった。

このため図4に示した逆F型アンテナ構造をもとに, さらなる広帯域化について検討した。

4.2 広帯域構造

図4の逆F型アンテナは, アンテナ導体と接地導体それぞれのリアクタンス成分により, 特定の周波数で電氣的に共振する。このとき, アンテナの共振周波数を f_r [Hz], 帯域幅を f_{bw} [Hz], 共振の良さをQとするとQ1のとき次式が成り立つ¹¹⁾。

$$\frac{f_{bw}}{f_r} = \frac{1}{Q} \dots\dots\dots (5)$$

(5)式より, f_r が一定の場合, f_{bw} を大きくするためにはQを小さくすれば良いことがわかる。また(5)式についてまとめると, f_{bw} を満足するQの範囲は次式のように表される。

$$Q = \frac{f_r}{f_{bw}} \dots\dots\dots (6)$$

ここで表2の目標仕様から, $f_r=2.442$ [GHz] (伝播周波数の中心値), $f_{bw}=84$ [MHz]とし, これらを(6)式に代入すると, 目標帯域幅を満たすための条件としてQ 29が得られる。

そこでチップアンテナのQ値低減による広帯域化を図るため, 図4に示したアンテナの導体形状に着目し, 電磁界シミュレーションにより様々な構造を検討した。この結果, 以下に述べる広帯域構造を見いだすに至った。

図5に, 広帯域ブルートゥース用チップアンテナの基本構造を示す。本構造では, アンテナ導体の接地端から開放端に向かうに従い, 導体幅を細くしたことが特長である。また図5に示すように, アンテナ導体の開放端付近に接地導体の一部を延長したほか, アンテナ導体の一端に給電する構造とした。

図6に, シミュレーションにより求めた, アンテナ導体形状とQ値の関係を示す。ここで, アンテナ導体の開放端および接地端の導体幅をそれぞれaおよびb, 図5に示したアンテナ占有部の寸法を $L=15$ [mm], $W=3$ [mm]

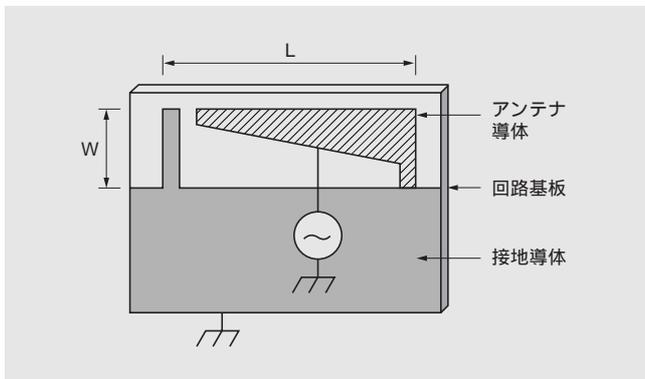


図5 広帯域ブルートゥース用チップアンテナの基本構造
Fig. 5 Structure of wide-band antenna for Bluetooth

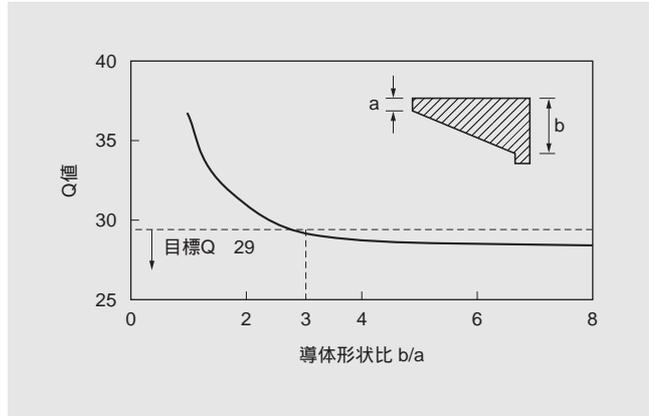


図6 アンテナQ値の導体形状依存性
Fig. 6 Calculated Q factor

とした。図6より, 形状比 b/a が大きくなる, すなわち開放端が接地端に対し細くなるに従い, Q値が減少し広帯域化が図れることがわかった。またQ 29を満たす b/a は3以上であり, b/a が4以上ではQ値がほぼ一定となることが明らかとなった。

図7に, 図5に示したアンテナの等価回路図を示す。アンテナ導体は自己インダクタンス ($L1 \sim L4$) と寄生容量 ($C1 \sim C3$) の型構成であり, これらと接地導体間で共振する。 b/a が大きいほど $C1 < C2 < C3$ となり, 多重共振が生じるためQが低下するものと考えられる。

図8に, 開発したブルートゥース用チップアンテナの外観と, 回路基板への実装例を示す。一辺の長さが15mm, 幅が3mm, 高さが3mmの誘電体セラミクスを製作し, この表面に図5に示したアンテナ導体のほか, 給電導体, 接地導体をそれぞれ形成した。なお紙面の都合上, 素子の製作方法などについては説明を省略する。

本開発品の特長は, 回路基板の端部に長さ15mm, 最小幅3mmの省スペースで実装できることにある。

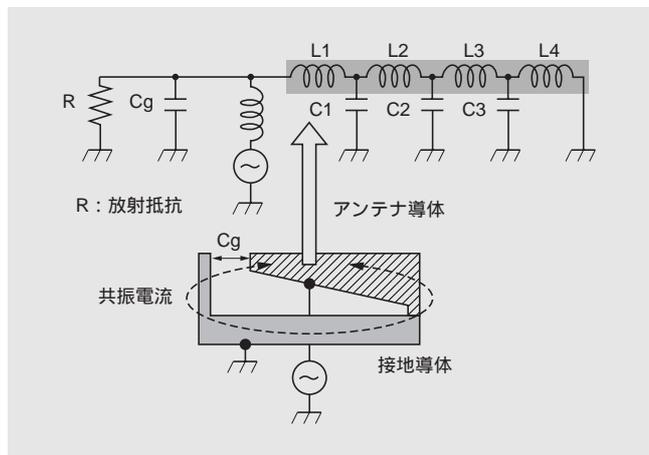


図7 ブルートゥース用チップアンテナの等価回路
Fig. 7 Equivalent circuit of Bluetooth-chip antenna

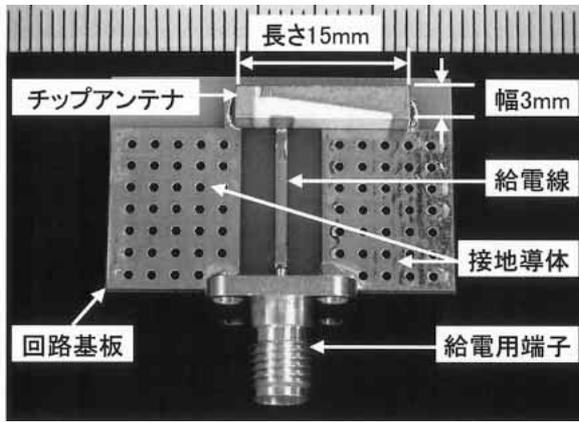


図8 開発したブルートゥース用チップアンテナの回路基板への実装例

Fig. 8 Bluetooth-chip antenna on evaluation board

5 アンテナ特性

5.1 測定方法

図9に示すように、開発したブルートゥース用チップアンテナを、長さ110mm、幅35mm、厚さ0.6mmの携帯電話サイズのプリント基板に実装し評価した。このとき基板の部品実装面において開発品以外の領域には、すべて接地導体パターンを配置するとともに、基板裏面から同軸ケーブルを介しアンテナ部品の端子に給電する構造とした。このアンテナ試料について、同軸ケーブルの他端にネットワークアナライザなどの測定機器を接続し、VSWRと利得(放射指向性)をそれぞれ測定した。

図10に、アンテナ利得(指向性)の測定方法を示す。本測定では、シールドルーム内壁に電波吸収体が隙間なく敷設された、当社所有の電波暗室を利用した。ターンテーブル上で回転するアンテナ試料から電波を送信し、このうち直接波のみホーンアンテナで受信する構成であり、得られた受信電力をもとに利得および放射指向性を求めた。

5.2 評価結果および考察

図11に、図9のアンテナ試料について、VSWRを測定した結果を示す。表2に示したアンテナの伝播周波数(ブルートゥース無線周波数)2.400~2.484GHzにおいて、VSWRの最大値は2.4であり、表2に示した目標3以下を満足したことがわかる。またアンテナ試料を製作する際、開発品の伝播周波数が2.442GHz、このときのVSWRが最小となるよう、開発品の導体形状を最適化した。

図12に、図9の試料について、アンテナ利得および放射指向性を測定した結果を示す。本測定では測定周波数を2.442GHzとし、図9に示したアンテナ周囲のXY、YZ、ZX面内での受信電力をそれぞれ測定し利得を求めた。これらの測定の際、受信用ホーンアンテナの電界面を地面に対し垂直方向と水平方向に傾けることにより、アンテナ試料から放射される電力を、垂直偏波成分と水平偏波成分とにわけて測定した。

図12において、X-Y平面の測定結果に着目すると、水平偏波と垂直偏波の利得が互いに直交した方向で8の字の高利得を有することがわかる。この特性は、ブルー

トゥースのようなモバイル機器に搭載される無線システムにおいて、到来する電波の偏波面が随時変動しやすい場合でも、安定に通信できる可能性の高いことを示している。また最大利得は水平垂直偏波ともに約 - 1dBi、両偏波を合成した平均利得は - 4.8dBiであり、目標利得の - 5dBi以上を満たしたことがわかる。さらにアンテナ全周囲に対し、平均利得が目標利得を超えた方向の割合を算出した結果、約61%が得られた。

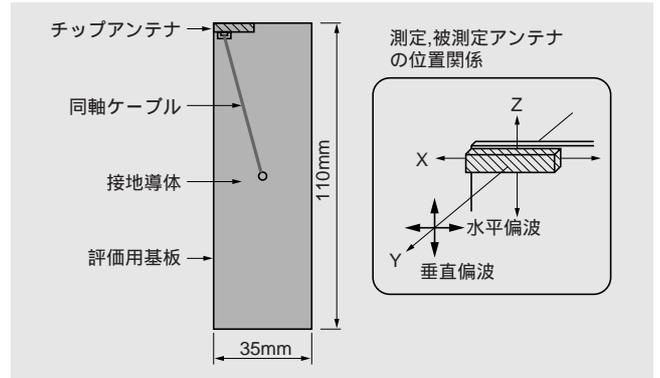


図9 ブルートゥース用チップアンテナの評価方法

Fig. 9 Bluetooth antenna on evaluation board and the coordinate system

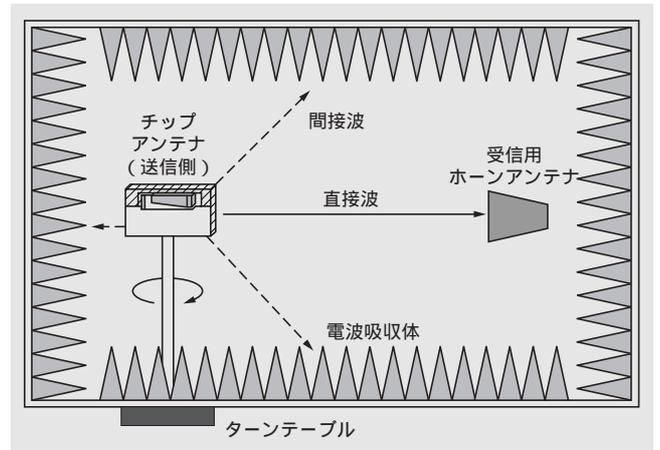


図10 アンテナ指向性の測定方法

Fig. 10 Method for radiation pattern

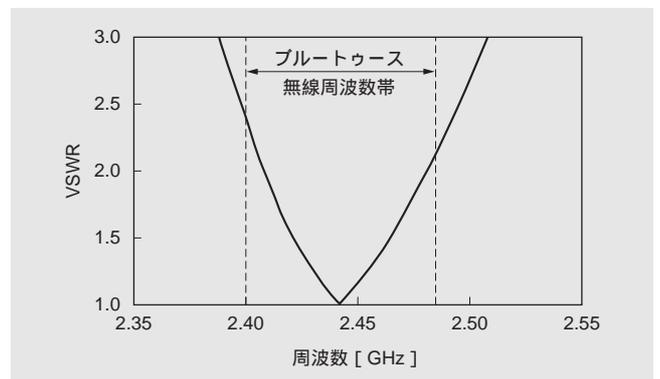


図11 VSWR測定結果

Fig. 11 Experimental result of VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

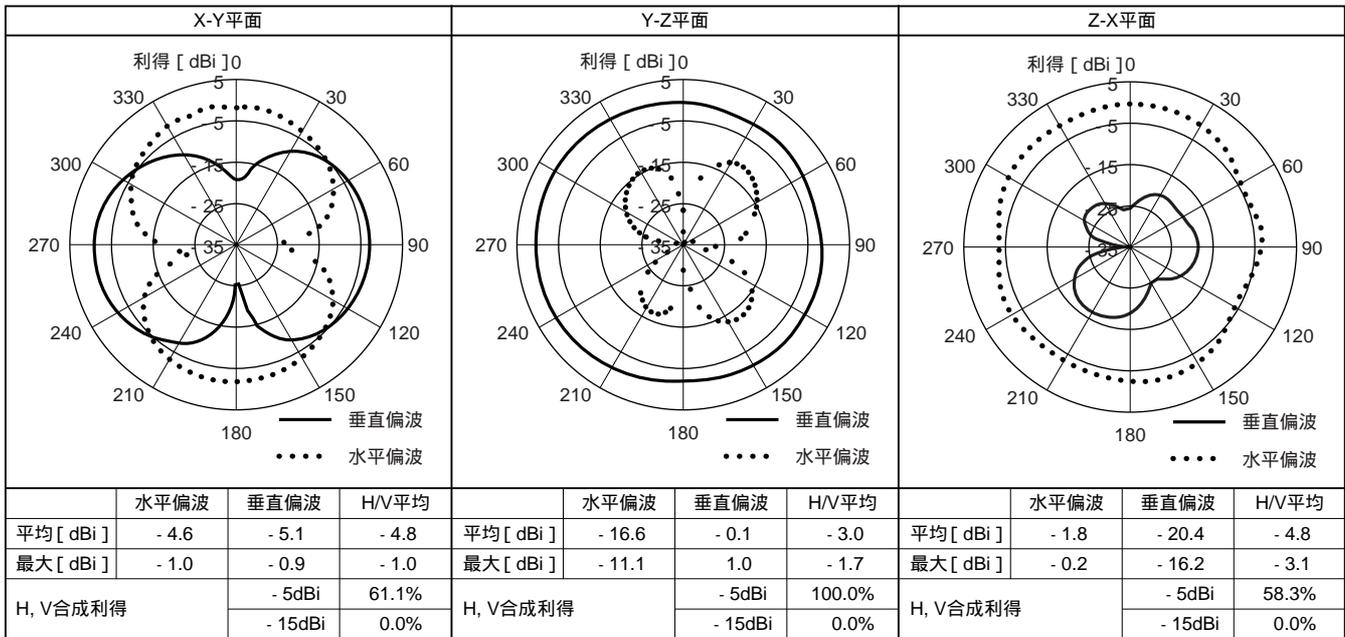


図12 放射指向性の測定結果 (周波数 2.442GHz)

Fig. 12 Experimental radiation pattern

Y - Z平面, Z - X平面については, X - Y方向とは異なり主偏波面は一方向であり, 無指向性であることがわかる。これらの平面においても最大利得はもとより, 平均利得でも目標利得を満足することを確認した。周囲方向に対し, 目標利得を満たした割合はY - Z平面が100%, Z - X平面が約58%であり, 開発品では特にY - Z平面内の無指向性が優れているのがわかる。

以上の検討結果により, 今回開発したブルートゥース用チップアンテナは, 表2の目標仕様を満たす広帯域かつ高利得の性能を有するとともに, 全周方向で無指向性に近い性能が得られることから, モバイル機器に搭載されるブルートゥース用途に適したアンテナであることを実証した。

6 結 言

当社では, 携帯電話用部品の高度な設計・材料技術を応用し, 従来の逆F型アンテナを改良した独自方式による, ブルートゥース用チップアンテナを開発した。

本開発品は, 小型かつ無線機器への実装寸法が最小でありながら, ブルートゥースに用いられるアンテナの帯域幅や利得などの要求仕様を満足できる, 優れた特長を持つ。

さらにアンテナ周囲での無指向性が得られやすい方式であることから, ブルートゥースの主用途である携帯電話やモバイルPCなどの無線機器への搭載に適したアンテナであるといえる。

今後は, さらに小型化や広帯域化などの開発を推進していきたいと考える。

この研究を行うにあたり, 東北大学電気通信研究所坪内和夫教授に有益なご助言をいただきました。また, (株)日立製作所中央研究所の山下喜市研究主管, 岡部寛研究員にご討議いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) <http://www.bluetooth.com>
- 2) 坪内, 他: 「無線LANシステムの構成技術と事例」, ミマツデータシステム, 209-232
- 3) 岡部, 他: 電子情報通信学会技術研究報告, 9 (1998), No. 545, 37
- 4) 鈞持, 他: 日立金属技報, 17 (2001), 印刷中
- 5) S. Takeda, IEEE MTT-S Digest WE2E-2 (1998), 621
- 6) 「Specification of the Bluetooth System v1.0B」, (1999.12), 15-32
- 7) 「第二世代小電力データ通信システム/ワイヤレスLANシステム標準規格」, ARIB STD-T66, 電波産業会 (1999.12)
- 8) 藤本, 他: 「電波応用」, 共立出版 (1993), 24
- 9) 「ROK 101007 Bluetooth Module」, Ericsson Microelectronics
- 10) 藤本, 他: 「移動通信用アンテナシステム」, 総合電子出版 (1996), 118
- 11) 羽石, 他: 「小形・平面アンテナ」, 電子情報通信学会 (1996), 36