低サイドローブ誘電体レンズアンテナの給電方法に関する検討

清水 隆志 十 米山 務 ‡

†東北工業大学ハイテクリサーチセンタ 〒982-8588 宮城県仙台市太白区二ツ沢 6 ‡東北工業大学環境情報工学科 〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1

あらまし 本論文では、ミリ波帯低サイドローブ誘電体レンズアンテナの給電方法に関する検討を行っている。具体的な給電構造としては NRD ガイド、方形導波管、円形導波管、マイクロストリップパッチアンテナを考えている。その結果、NRD ガイド、方形導波管、円形導波管給電構造を用いると低サイドローブかつ高利得特性が得られることをシミュレーションおよび実験により実証した。例えば、直径 32mm 誘電体レンズアンテナを使用した場合、60GHz において、最大利得 24.9dBi, サイドローブレベル-27dB 以下, 半値角 9 度と、極めて良好な特性が得られた。

キーワード ミリ波、誘電体レンズアンテナ、低サイドローブ特性、NRD ガイド、導波管

Feed Structures for Dielectric Lens Antenna with Low Sidelobes

Takashi SHIMIZU[†] and Tsukasa YONEYAMA[‡]

† High-Tech Research Center, Tohoku Institute of Technology 6 Futatsusawa, Taihaku-ku, Sendai-shi, Miyagi 982-8588 Japan ‡ Environmental Information Engineering, Tohoku Institute of Technology 35-1 Kasumityou, Yagiyama, Taihaku-ku, Sendai-shi, Miyagi 982-8577 Japan E-mail: † shimizu@tohtech.ac.jp, ‡ yoneyama@tohtech.ac.jp

Abstract In this paper, feed structures are discussed for a dielectric lens antenna with low sidelobe level. Feed structures using NRD guide, rectangular waveguide, circular waveguide and microstrip patch antenna are investigated by simulations and measurements. As a result, it is verified that low sidelobe characteristics can be obtained when NRD guide, rectangular waveguide and circular waveguide are used for the feeding structure. A fabricated dielectric lens antenna with diameter of 32mm, for instance, exhibited excellent performance such as 24.9dBi gain, 27dB sidelobe level suppression and 9-degree half-power width.

Keywords millimeter wave, dielectric lens antenna, low sidelobe level, NRD-guide, waveguide

1. はじめに

非圧縮ハイビジョン映像無線伝送、ホームリンク、 ギガビット無線 LAN などのような超高速・大容量無線 通信システム実現の要望が高まっている。これを実現 するためには、ミリ波帯利用が有効である。

ミリ波帯に適した低損失伝送線路のひとつとして NRD ガイド(非放射性誘電体線路:Nonradiative dielectric waveguide)がある。NRD ガイドは他の誘電体線路 とは異なり、曲がりや不連続部で放射しないという優れた特性を有している[1]。これまで NRD ガイドを用いた様々なミリ波回路デバイスの研究開発が行われて

きた[2][3]。近年ではギガビット級の伝送速度を有し、ハイビジョン映像を非圧縮無線伝送可能なトランシーバが報告されている[4]-[6]。しかしながら、ギガビット級無線伝送では、マルチパスの影響が大きいため、その低減が重要であり、低サイドローブ特性を有するアンテナが望まれる。

そこで本研究では、NRD ガイドトランシーバへの接続に適した NRD ガイド、方形導波管、円形導波管給電およびマイクロストリップパッチアンテナを一次放射器として用いた低サイドローブ誘電体レンズアンテナに関する検討を行っている。

2. 誘電体レンズの設計

レンズ形状とその座標系を図 1に示す。誘電体レンズ曲面 S_2 は、幾何光学に基づいて設計される[7][8]。

まず P_0 を焦点とすると、ここから基準面 S_3 までの 光路長は一定でなければならないから、次式が成り立 つ。

 $[P_0P_1]+[P_1P_2]+[P_2P_3]=[P_0O]+[OP_4]+[P_4P_5]$ (1) ただし、 $[P_1P_2]$ などは P_1P_2 間の光路長を表す。

次に、 P_2 , P_4 からの垂線と各光路との交点を P'_5 , P'_3 とし、近軸光学を考慮すると $P_2P_3=P'_5P_5$ であるので $P_2P'_3=P'_5P_4$ となる。よって、式(1)は次式となる。

$$[P_0P_1]+[P_1P_2]+[P_2P'_3]=[P_0O]+[OP_4]$$
 (2)
上式より、次式が導かれる。

$$\sqrt{F^2 + r_1^2} + n\sqrt{z_2^2 + \left(r_2 - r_1\right)^2} - z_2 = (n-1)T + F \quad (3)$$

また、S₁面上において、スネルの法則を適用すると、

$$\frac{r_1}{\sqrt{F^2 + r_1^2}} = \frac{n(r_2 - r_1)}{\sqrt{z_2^2 + (r_2 - r_1)^2}}$$
(4)

が成りたち、式(3)、(4)を整理すると、次式が得られる。

$$r_2 = r_1 \left(1 + \frac{z_2}{\sqrt{n^2 (F^2 + r_1^2) - r_1^2}} \right)$$
 (5), $z_2 = \frac{AB}{n - B}$ (6)

ただし、 $n=\sqrt{\varepsilon_r}$ は屈折率、 ε_r は比誘電率、F は焦点距離、T はレンズの厚さであり、また、A, B は、

$$A = (n-1)T + F + \sqrt{F^2 + r_1^2}, \qquad B = \sqrt{1 - \frac{r_1^2}{n^2(F^2 + r_1^2)}}$$

である。

3. 給電方法の検討

NRD ガイドトランシーバ給電に適した一次放射器 として NRD ガイド、方形・円形導波管、マイクロス トリップアンテナに関して検討を行う。

3.1. NRD

NRD ガイドトランシーバからの給電の基本構造となる NRD ガイドを用いた一次放射器について検討する。その構造の断面図を図 2に示す。

NRD ガイドは、遮断平行平板に方形断面の誘電体ストリップを挿入した構造であり、したがって、平行平板間隔は $60 {\rm GHz}$ 帯で半波長以下となるように $2.25 {\rm mm}$ としている。また、誘電体ストリップには、比誘電率 ε_r = 2.04 ± 0.01 、誘電正接 $\tan\delta$ = $(2.1\pm0.1){\rm x}10^{-4}$ の PTFE を用い、その寸法は高さ $2.25 {\rm mm}$ 、幅 $2.5 {\rm mm}$ である[1]。 誘電体レンズは、焦点距離 F に等しい高さをもつ円筒形状の発泡ポリスチレン(ε_r 1)に固定され、さらに発泡ポリスチレン円筒の他端は同直径 D、厚さ t の金属円板に固定されている。この金属板の中心部には、一次放射器のための開口部として、開口径 d の小孔が開け

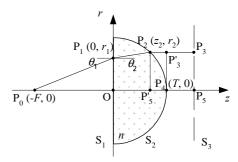
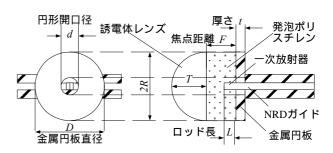
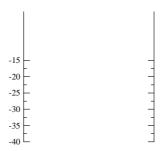


図 1 レンズ形状と座標系



(a) 正面図(b) 側面図図 2 NRD ガイド給電構造誘電体レンズアンテナの断面図



られている。一次放射器には、NRD ガイドを金属円板の小孔中心部から長さ $L=1\,\mathrm{mm}$ 突き出し、その先端に $1\,\mathrm{mm}$ のテーパをつけたロッドアンテナを用いる。

製作の容易さと低損失性の観点から誘電体レンズ 材料として高密度ポリエチレンを採用した。このポリ エチレンの ε_r と $\tan\delta$ は、それぞれ 2.29 ± 0.02 , (2.6 ± 0.3)



図 5 試作した NRD ガイド給電構造レンズアンテナ

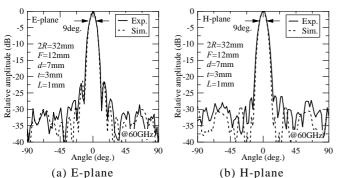


図 6 NRD ガイド給電時の放射パターンの測定結果

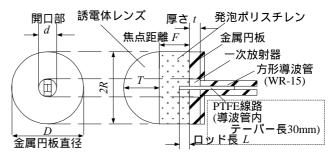
 $x10^{-4}$ である。また、誘電体材料の複素誘電率は遮断円 筒導波管法[9]により $48\mathrm{GHz}$ にて測定した値を用いて いる。

まず、レンズ直径 $2R=32\,\mathrm{mm}$, $F=12\,\mathrm{mm}$, 金属円板直径 $D=32\,\mathrm{mm}$ とし、d および t に対する $60\,\mathrm{GHz}$ における放射パターンを Ansoft HFSS により計算した。ただし、計算はすべて無損失条件にて行っている。その計算結果を図 3、図 4に示す。これより $t=3\,\mathrm{mm}$, $d=7\,\mathrm{mm}$ とした場合、E 面、H 面のサイドローブが最も低下し、 $-30\,\mathrm{dB}$ 程度と低サイドローブ特性が得られることがわかる。

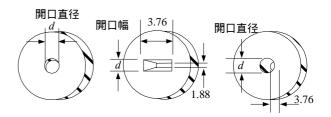
そこで計算結果に基づき、 $2R=32\,\mathrm{mm}$, $F=12\,\mathrm{mm}$, $D=32\,\mathrm{mm}$, $d=7\,\mathrm{mm}$, $t=3\,\mathrm{mm}$, $L=1\,\mathrm{mm}$ とした誘電体レンズアンテナを NC 加工機により試作した。試作した NRD ガイド給電構造レンズアンテナを図 5に示す。 試作したアンテナの $60\,\mathrm{GHz}$ における放射パターンの測定結果を図 6に実線で示す。 測定結果は計算結果とよく一致していることがわかる。 また、測定の際に使用する導波管-NRD ガイド変換器の損失約 $0.5\,\mathrm{dB}$ を含んだ最大利得と開口効率はそれぞれ $24.4\pm0.6\,\mathrm{dBi}$, $68.1\pm10\%$ であり、変換損を考慮すると、それぞれ $24.9\pm0.6\,\mathrm{dBi}$, $76.4\pm10\%$ となる。 さらに E 面、 H 面ともに、サイドローブは- $27\,\mathrm{dB}$ 以下であり、半値角は 9 度と、優れた特性が得られることがわかった。

3.2.

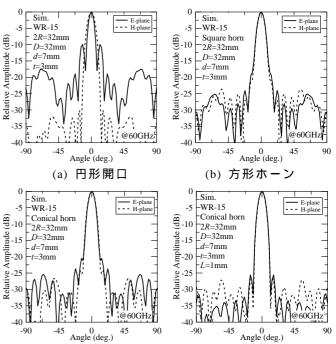
NRD ガイドトランシーバの前段にミリ波増幅器を使用する場合を考慮すると、方形導波管による給電構造が望ましい。そこで、方形導波管給電構造に関して検討を行った。その構造の断面図を図 7に示す。この



(a) 正面図 (b) 側面図 図 7 方形導波管給電構造をもつ誘電体レンズアンテナの断面図



(a) 円形開口 (b) 方形ホーン (c)円錐ホーン 図 8 金属円板開口部の形状



(c) 円錐ホーン (d) 円錐ホーン+誘電体線路 図 9 方形導波管給電時の金属円板開口形状による 放射パターン計算結果

構造は、図 2において NRD ガイドを方形導波管 WR-15 (3.76mm×1.88mm)とした構造であり、金属円板開口部の開口形状は、図 8に示す円形開口、方形ホーン、円錐ホーンの 3 種類を考える。方形ホーンは開口幅1.88mm から dまで広げた形状である。

まず、2R=32mm, F=12mm, D=32mm, d=7mm, t=3mmとし、図 7中の PTFE 線路が無い状態で 3 種の開口形



図 10 試作した導波管給電部構造の写真

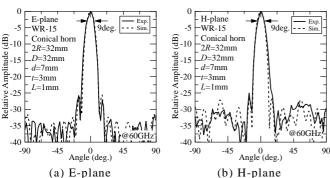
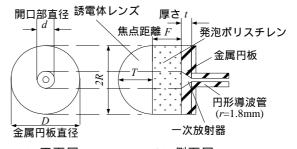


図 11 方形導波管給電時の放射パターンの測定結果

状による放射パターンを $60 {\rm GHz}$ において計算した。図 $9(a) \sim (c)$ にその計算結果を示す。結果より、円形開口の場合、サイドローブは E 面:- $17 {\rm dB}$ 程度、H 面:- $32 {\rm dB}$ 程度である。また、方形ホーンの場合、E 面は- $25 {\rm dB}$ 程度と改善するが、H 面は- $25 {\rm dB}$ 程度と劣化する。また、円錐ホーンの場合もサイドローブは E 面、H 面ともに- $25 {\rm dB}$ 程度であり、その特性は NRD ガイド給電時に及んでいない。

そこで、方形導波管内に図 2に示す NRD ガイド給電時と同様に高さ 2.25mm,幅 1.88mm,ロッド長 L=1mm,テーパ長 1mm,導波管内テーパ長 30mm の PTFE ロッドを挿入し、サイドローブレベルの改善を試みた。その計算結果を図 9(d)に示す。ただし、金属円板開口部は円錐ホーン形状である。これより、サイドローブは E 面:-35 dB 程度、H 面:-30dB 程度となり、NRD ガイド給電時と同等以上の特性を得られることがわかる。また、サイドローブが減少した理由は、誘電体の波長短縮効果により焦点において電磁界が 1 点に集中し、焦点ボケが減少したためと考える。

計算結果に基づき、 $d=7\,\mathrm{mm}$ 、 $t=3\,\mathrm{mm}$ の円錐ホーンをもつ PTFE ロッドが挿入された方形導波管給電部を試作した。試作した給電部の構造を図 10に示す。円錐ホーン付金属円板固定用金属板には、ミリ波の漏れを防ぐために $\lambda/4$ チョークを設けてある。図 10に示す構造に 3.1 節で用いた $2R=32\,\mathrm{mm}$, $F=12\,\mathrm{mm}$ の誘電体レンズを取り付け、放射パターンの測定を $60\,\mathrm{GHz}$ において行った。図 11にその測定結果を実線で示す。測定結果は計算結果とよく一致しており、そのサイドローブは E面が- $35\,\mathrm{dB}$ 程度、H 面が- $30\,\mathrm{dB}$ 程度であり、利得は $25.2\pm0.6\,\mathrm{dBi}$ 、開口効率は $82\pm10\%$ 、半値角は 9 度と、極



(a) 正面図 (b) 側面図 図 12 円形導波管給電構造をもつ誘電体レンズ アンテナの断面図

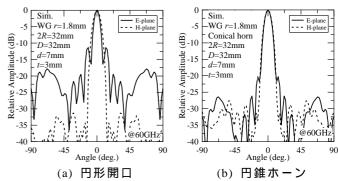


図 13 円形導波管給電時の金属円板開口形状による 放射パターンの変化

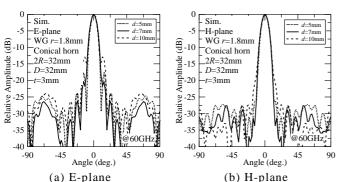
めて良好な特性が得られることがわかった。

NRD ガイド-円形導波管変換器[10]を用いると従来 NRD ガイドトランシーバ筐体側壁に固定されていたアンテナを筐体上に固定できる。このため、本アンテナの円形導波管給電を検討することは応用上重要である。円形導波管給電部構造の断面図を図 12に示す。本構造は、図 2において NRD ガイドを円形導波管とした構造である。また、導波管半径 r は 58-62GHz の範囲でのシングルモード伝送を考慮して 1.8mm とする。金属円板の開口部形状は、図 8(a), (c)に示す円形開口と直径 3.6mm から d まで広げた円錐ホーンを考える。

まず、 $2R=32\,\mathrm{mm}$, $F=12\,\mathrm{mm}$, $D=32\,\mathrm{mm}$, $d=7\,\mathrm{mm}$, $t=3\,\mathrm{mm}$ とし、2 種の開口形状による放射パターンを $60\,\mathrm{GHz}$ において計算した。図 $13\,\mathrm{cl}$ 計算結果を示す。結果より、円形開口の場合、サイドローブは E 面:- $17\,\mathrm{dB}$ 程度、 H 面:- $30\,\mathrm{dB}$ 程度である。一方、円錐ホーン形状の場合、E 面:- $25\,\mathrm{dB}$ 程度、H 面:- $25\,\mathrm{dB}$ 程度である。そこで、円錐ホーンの d, t を変化させた場合、サイドローブレベルをさらに改善可能かを検討した。 $2R=32\,\mathrm{mm}$, $F=12\,\mathrm{mm}$ 、 $D=32\,\mathrm{mm}$, $t=3\,\mathrm{mm}$ とし、d に対する $60\,\mathrm{GHz}$ における放射パターンを計算した。その計算結果を図 $14\,\mathrm{cl}$ に示す。これより $d=7\,\mathrm{mm}$ とした場合、E 面、H 面のサイドローブが最も低下することがわかる。次に、 $d=7\,\mathrm{mm}$ と固定し、t に対する $60\,\mathrm{GHz}$ における放射パターンを計算した。その計算結果を図 $15\,\mathrm{cl}$ に示す。これより、 $t=5\,\mathrm{mm}$ の時、

-30dB 程度の良好な低サイドローブ特性が得られるこ とがわかる。

計算結果に基づき、D=32mm, t=5mm, 直径 3.6mm か ら d=7mm までの広げた円錐ホーンをもつ円形導波管 給電部を試作した。NRD ガイド-円形導波管変換器を 含む円形導波管給電部の構造を図 16に示す。図 16に



14 円形開口径 dによる放射パターンの変化

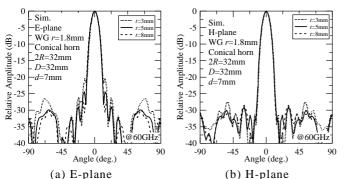


図 15 金属厚さ t による放射パターンの変化



図 16 試作した円形導波管給電部構造の写真

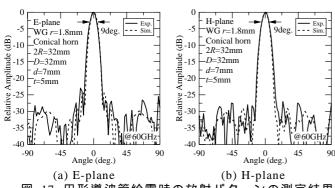


図 17 円形導波管給電時の放射パターンの測定結果

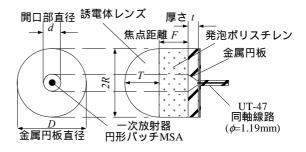
示す給電部構造に 2R=32mm, F=12mm の誘電体レンズ を取り付け、放射パターンの測定を 60GHz において行 った。その測定結果を図 17に実線で示す。測定結果は 計算結果とよく一致していることがわかる。サイドロ ーブは E 面、H 面ともに-27dB 程度以下であり、利得 は 25.4±0.6dBi、開口効率は 85.8±10%、半値角は 9 度である。これより、円形導波管給電構造の場合も良 好な特性が得られることがわかる。

3.4.

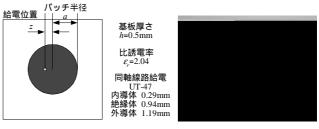
本節では、NRD ガイド-マイクロストリップ線路変 換器[11]を利用して、一次放射器にマイクロストリッ プアンテナ(以下、MSA)を用いた場合について検討す る。一次放射器に円形パッチ MSA を用いた給電部構 造の断面図を図 18に示す。本構造は、図 2において NRDガイドをUT-47セミリジッド同軸線路におきかえ、 同軸線路により円形パッチ MSA に給電している。ま た、円形パッチ MSA の構造を図 19(a)に示す。ただし、 基板厚さ h=0.5mm, $\varepsilon_r=2.04$ とし、パッチ半径 a, 給電位 置zとする。このとき、円形パッチ MSA の縁端効果を 含んだ共振周波数 f_0 は次式で与えられる[12]。

$$f_0 = x_{11}c/2\pi a_{eff}\sqrt{\varepsilon_r}$$
 , $x_{11}=1.841$, c :光速
$$a_{eff} = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \varepsilon_r} \left(\ln \frac{\pi a}{2h} + 1.7726 \right) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

上式より、共振周波数 f_0 が 60GHz 付近となるように、 a=0.8mm と決定し、z は HFSS により反射が最小とな る z=0.25mm と決定した。



(b) 側面図 (a) 正面図 図 18 一次放射器に円形パッチ MSA を用いた給電 部構造をもつ誘電体レンズアンテナの断面図



(a) 上面図 (b) 試作した MSA 図 19 円形パッチ MSA の構造

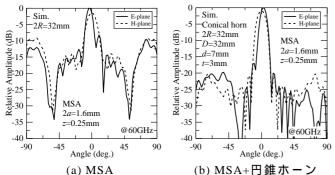


図 20 一次放射器に円形パッチ MSA を用いた時の放射パターンの計算結果

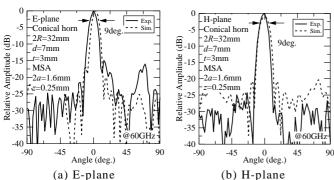


図 21 一次放射器に円形パッチ MSA を用いた時の 放射パターンの測定結果

まず、 $2R=32\,\mathrm{mm}$, $F=12\,\mathrm{mm}$, $D=32\,\mathrm{mm}$, $d=7\,\mathrm{mm}$, $t=3\,\mathrm{mm}$ とし、一次放射器に円形パッチ MSA のみを用いた場合と同 MSA の放射側上部に $3.76\,\mathrm{mm}$ から d まで広げた円錐ホーン開口部を持つ金属円板を取り付けた時の放射パターンを $60\,\mathrm{GHz}$ において計算した。その計算結果を図 $20\,\mathrm{に示す}$ 。これより、円錐ホーン開口部を持つ金属円板を取り付けると、サイドローブが改善されることがわかる。また、放射パターンが非対称であるのは、給電に用いた同軸線路の中心導体が $0.29\,\mathrm{mm}$ と大きく、給電点が広がりをもっているためと考える。

次に、計算結果に基づき、 $a=0.8\,\mathrm{mm}, z=0.25\,\mathrm{mm}$ の円形パッチ MSA および円錐ホーン形状をもつ給電部を試作した。金属円板部を取り外した給電部構造を図 19(b)に示す。図 19(b)に示す給電構造に円錐ホーン形状をもつ金属円板を取り付け、そこに $2R=32\,\mathrm{mm}, F=12\,\mathrm{mm}$ の誘電体レンズを固定し、放射パターンの測定を $60\,\mathrm{GHz}$ において行った。図 $21\,\mathrm{lc}$ 測定結果を実線で示す。サイドローブは E 面が- $17\,\mathrm{dB}$ 程度、H 面が- $25\,\mathrm{dB}$ 程度であり、利得は $21.0\pm0.6\,\mathrm{dBi}$ 、開口効率は $31.1\pm10\%$ 程度、半値角は 9 度である。また、計算結果と一致していない原因は、円形パッチ MSA の製作および加工精度によるものと考える。

以上の結果より、一次放射器に円形パッチ MSA を 用いると、NRD ガイドや導波管給電時に比べ、特性が 非常に劣化することがわかった。

4. まとめ

NRD ガイドトランシーバへの接続に適した NRD ガイド、方形・円形導波管給電および円形パッチ MSAを一次放射器として用いた低サイドローブ誘電体レンズアンテナに関して検討を行った。NRD ガイド、方形導波管、円形導波管給電構造を用いると、低サイドローブ特性を有する高効率な誘電体レンズアンテナが実現できることをシミュレーションおよび実験により実証した。さらに、本アンテナは様々なミリ波アプリケーションにも容易に使用可能であると期待できる。

謝辞

ミリ波材料測定システムを御貸し頂いた埼玉大学 小林禧夫教授に深謝致します。また、本研究の一部は、 東北工業大学ハイテクリサーチセンターの援助を受け て行った。

参 考 文 献

- [1] T. Yoneyama and S. Nishida, "Nonradiative Dielectric Waveguide for Millimeter-wave Integrated Circuits," IEEE Trans. Vol. MTT-29, no. 11, pp. 1188-1192, Nov. 1981.
- [2] T. Yoneyama "Millimeter-wave transmitter and receiver using the nonradiative dielectric waveguide," *IEEE International Microwave Symposium*, NN-2, Long Beach, Jun. 1989.
- [3] 内田偉津美, 黒木太司, 米山務, "35GHz 帯 NRD ガイド送受信機の小型化,"信学論, Vol.76-C-I, no.7, pp. 270-276, Jul. 1993.
- [4] 黒木太司、山口倫史、米山務、"NRD ガイド送受信機を用いた 60GHz 帯ギガビット級超高速無線データ伝送、"2003 信学総大、no.SC-3-3、Mar. 2003.
- [5] 川原祐紀, 沢田浩和, 米山務, "簡便・小型・高性能 NRD ガイドミリ波スイッチレス時分割トランシーバ," 2004 信学総大, no.SC-10-3, Mar. 2004.
- [6] 沢田浩和,川原祐紀,米山務,"小型,高性能なミリ波 NRD ガイドスイッチレストランシーバの開発,"信学技報,MW2004-33,pp.1-6,Jun. 2004.
- [7] J. J. Lee, "Antenna Handbook", vol. 2, Chapter 16, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- [8] 西郷拓也,富士本孝文,田中和雄,田口光雄,"誘電体レンズアンテナの解析,"信学技報,ED99-236,MW99-168,pp.91-94,Nov. 1999.
- [9] T. Shimizu, Y. Kobayashi, "Cut-off circular waveguide method for dielectric substrate measurements in millimeter wave range," IEICE Trans. Electron., Vol.E87-C, No. 5, pp.672-680, May 2004.
- [10] 川原祐紀, 米山務, "NRD ガイドに適合したミリ波誘電体アンテナ," 信学技報, AP2003-124, pp.49-52, Aug. 2003.
- [11] 沢田浩和,米山務,黒木太司,"放射損を抑えた NRD-MSL変換器の提案,"信学技報,MW2003-207, pp.55-58, Nov. 2003.
- [12] 羽石操, "平面アンテナの解析と設計," MWE2001 Digest, pp.400-409, Dec. 2001.