# 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 \* 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<sup>†</sup> and Tsukasa YONEYAMA<sup>‡</sup>

† 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、低サイドロープ特性を有する 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プ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<sub>2</sub>は、幾何光学に基づいて設計される[7][8]。

まず P<sub>0</sub>を焦点とすると、ここから基準面 S<sub>3</sub>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<sub>0</sub>P<sub>1</sub>]+[P<sub>1</sub>P<sub>2</sub>]+[P<sub>2</sub>P<sub>3</sub>]=[P<sub>0</sub>O]+[OP<sub>4</sub>]+[P<sub>4</sub>P<sub>5</sub>] (1) ただし、[P<sub>1</sub>P<sub>2</sub>]などは P<sub>1</sub>P<sub>2</sub>間の光路長を表す。

次に、P<sub>2</sub>, P<sub>4</sub>からの垂線と各光路との交点を P'<sub>5</sub>, P'<sub>3</sub> とし、近軸光学を考慮すると P<sub>2</sub>P<sub>3</sub>=P'<sub>5</sub>P<sub>5</sub> であるので P<sub>2</sub>P'<sub>3</sub>=P'<sub>5</sub>P<sub>4</sub>となる。よって、式(1)は次式となる。

[P<sub>0</sub>P<sub>1</sub>]+[P<sub>1</sub>P<sub>2</sub>]+[P<sub>2</sub>P'<sub>3</sub>]=[P<sub>0</sub>O]+[OP<sub>4</sub>] (2) 上式より、次式が導かれる。

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

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。

$$r_{2} = r_{1} \left( 1 + \frac{z_{2}}{\sqrt{n^{2} (F^{2} + r_{1}^{2}) - r_{1}^{2}}} \right) \quad (5), \qquad z_{2} = \frac{AB}{n - B} \quad (6)$$

ただし、 $n = \sqrt{\varepsilon_r}$ は屈折率、 $\varepsilon_r$ 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 60GHz 帯で半波長以下となるように 2.25mm としている。また、誘電体ストリップには、比誘電率  $\varepsilon_r$ =2.04±0.01、誘電正接 tan $\delta$ =(2.1±0.1)x10<sup>-4</sup>の PTFE を 用い、その寸法は高さ 2.25mm、幅 2.5mm 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( $\varepsilon_r$  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







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*=1mm 突き出し、その先端に1mm 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<sub>r</sub>と tanδ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



x10<sup>-4</sup>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 48GHz にて測定した値を用いて いる。

まず、レンズ直径 2*R*=32mm, *F*=12mm, 金属円板直径 *D*=32mm とし、*d* および *t* に対する 60GHz 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*=3mm, *d*=7mm とし た場合、E面、H面のサイドローブが最も低下し、-30dB 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=32mm, F=12mm, D= 32mm, d=7mm, t=3mm, L=1mm 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 60GHz 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 0.5dB を含んだ最大 利得と開口効率はそれぞれ 24.4±0.6dBi, 68.1±10%で あり、変換損を考慮すると、それぞれ 24.9±0.6dBi, 76.4 ±10%となる。さらに E 面、H 面ともに、サイドロー ブは-27dB 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



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、円錐ホーンは直径 3.76mm から *d* まで広げた形状である。

まず、2*R*=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



状による放射パターンを 60GHz において計算した。図 9(a)~(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:-17dB 程度、H 面:-32dB 程度である。また、方形ホーンの場合、E 面は-25dB 程度と改善するが、H 面は-25dB 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-25dB 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*=7mm,*t*=3mm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λ/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 2*R*=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。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-35dB 程度、H 面が-30dB 程度であり、利得は 25.2 ±0.6dBi、開口効率は 82±10%、半値角は 9 度と、極



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。

3.3.

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=32mm, F=12mm, D=32mm, d=7mm, t=3mm とし、2種の開口形状による放射パターンを60GHz に おいて計算した。図 13に計算結果を示す。結果より、 円形開口の場合、サイドローブは E 面:-17dB 程度、H 面:-30dB 程度である。一方、円錐ホーン形状の場合、 E 面:-25dB 程度、H 面:-25dB 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=32mm, F=12mm、 D=32mm, t=3mm とし、d に対する 60GHz における放射 パターンを計算した。その計算結果を図 14に示す。こ れより d=7mm 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=7mm と固定し、 t に対する 60GHz における放射パターンを計算した。 その計算結果を図 15に示す。これより、t=5mm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





図 16 試作した円形導波管給電部構造の写真



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 ープは 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]。

$$f_{0} = x_{11}c/2\pi a_{eff}\sqrt{\varepsilon_{r}}, \quad x_{11} = 1.841, \quad c: \mathcal{H} = a_{eff} = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \varepsilon_{r}} \left( \ln \frac{\pi a}{2h} + 1.7726 \right) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

上式より、共振周波数 f<sub>0</sub>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。



(a) 正面図 (b) 側面図 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





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テ MSA を用いた時の 放射パターンの測定結果

まず、2R=32mm, F=12mm, D=32mm, d=7mm, t=3mm 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 3.76mm 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 60GHz において計算した。その計算結果 を図 20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 0.29mm 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*=0.8mm, *z*=0.25mm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 2*R*=32mm, *F*=12mmの誘電体レンズを固定し、放射パターンの測 定を 60GHz において行った。図 21に測定結果を実線 で示す。サイドローブはE面が-17dB 程度、H面が-25dB 程度であり、利得は 21.0±0.6dBi、開口効率は 31.1± 10%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 ープ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

- 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.