

狭管壁導波管スロットアンテナに装荷した誘電体レンズの収束効果

竹内 翔太*・伊藤 桂一・松田 英昭・宮田 克正**

On convergence effect of dielectric lens loaded on narrow wall waveguide slot antenna

Shota TAKEUCHI*, Keiichi ITOH, Hideaki MATSUDA and Katsumasa MIYATA**

(平成 26 年 12 月 12 日受理)

In order to improve the radiation power of a waveguide slot antenna, we load a spherical dielectric lens over the narrow wall of a waveguide slot antenna. We examine the convergence effect of the proposed lens by using the FDTD method. The incident wave whose frequency is 12 GHz propagates as TE_{10} mode. The diameter of the spherical dielectric lens is 20 mm with relative permittivity (ϵ_r) 2.2. From the calculation results, the optimal angle and the optimal width of the rotated slot in the waveguide narrow wall is determined as 30 degree and 3 mm, respectively. It is found that the maximum value of the main-lobe of the antenna with the dielectric lens is increased by 1.4 dB as compared with that without the dielectric lens. Moreover, -3dB beam width with the dielectric lens becomes narrow from 80.6 degree to 61.4 degree. The convergence effect of dielectric lens is confirmed for 1-slot narrow-wall waveguide slot antenna.

1. 序論

導波管の壁面にスロットを開け、スロットより電界を放射するアンテナとして動作させたものが導波管スロットアンテナである。この導波管スロットアンテナのスロット開口面上に誘電体レンズを装荷することで、レンズの収束効果により放射特性の改善が期待できる。

導波管には広管壁と狭管壁の 2 つの壁面があり、広管壁にスロットを開けて誘電体レンズを装荷した場合についてはこれまで研究が行われてきた^[1]。本研究ではこれまで行われていなかった導波管狭管壁にスロットを開け、図 1 に示すように誘電体レンズを装荷した場合について放射特性を解析し、レンズの収束効果について検討した。

本研究では導波管スロットアンテナの放射特性の解析に FDTD 法を用いた。FDTD 法とは Finite-difference time-domain method の略であり、日本語で時間領域差分法、有限差分時間領域法を意味する電磁界解析の手法の 1 つである^[2]。FDTD 法ではセルと呼ばれる微小な直方体により解析領域を分割して計算する。セルごとに媒質定数を与えることによりアンテナのモデリングが可能となる。

狭管壁にスロットを開ける場合、斜めスロットにすることが一般的であり、本研究でも斜めスロットにおける誘電体レ

ンズの収束効果について検討した。以後、2 章ではアンテナのモデリングおよびモデリングの概要について述べる。3 章では 1 スロットの場合について数値解析を行い、誘電体レンズ装荷時の斜めスロットの最適なスロット角度、スロット幅を求めた。そして、得られたスロット条件より、狭管壁導波管スロットアンテナにおける誘電体レンズの収束効果について検討した。4 章では発展的にアレー化した場合の誘電体レンズの収束効果についても解析を試みた。

2. 導波管スロットアンテナの概要

2.1 狭管壁導波管スロットアンテナの概要

本研究では導波管に TE_{10} モードの電界を入射している。 TE モードとは電波の伝送方向に電界成分を持たず、磁界成分のみを持つ伝送形態であり、 TE モードの中でも矩形導波管の基本モードとなっているものが TE_{10} モードである。このとき導波管内の壁面には電流が流れる。

狭管壁の電流分布と放射電界を図 2 に示す。スロットから放射が発生するのは導波管壁面を流れる電流がスロットの長手方向に対して垂直に横切るときである。狭管壁には y 方向に電流が流れており、電流の位相は $\lambda_g/2$ の間隔で反転する。ここで λ_g は導波管の管内波長である。図 2 のようにスロットを斜めに空けて並べた場合を考えると放射電界 E は図のようなベクトルとなり、 x 軸方向成分 E_x 、 y 軸方向成分 E_y の 2 つ

*秋田高専卒業生（現：アルプス電気株式会社）

**秋田高専名誉教授

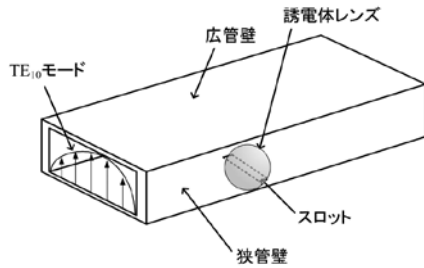


図1 誘電体レンズ装荷導波管スロットアンテナ

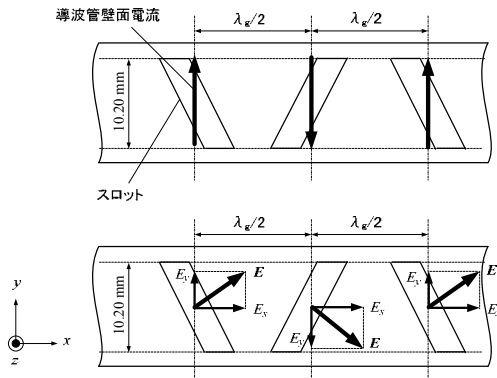


図2 導波管狭管壁の電流分布および放射電界

に分解される^[3]。また、図では隣り合うスロットを同じ角度で反対方向に傾けて交互に空けている。この場合、壁面電流の向きが $\lambda_g/2$ 毎に反転することから E_y はキャンセルされ、 E_x 成分のみが放射される。

2.2 アンテナのモデリング

FDTD 法では有限区間内において電磁波の解析を行うため、解析領域を設定する必要がある。本研究では解析領域を $200 \times 90 \times 75$ mm としセルサイズは $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.5$ mm とした。

図3に解析モデルを示す。導波路は 22.90×10.20 mm のWRJ-10規格となるようにしているが、セルサイズを0.5 mmとしているため導波路の寸法は 23.0×10.0 mm と近似している。また、導波管の壁厚は1.5 mm とした。導波管の終端には吸収境界条件であるPML(Perfectly Matched Layer)を設定し、終端からの反射がない状態としている。励振周波数は12 GHzとして TE_{10} モードの電界を入射しており、計算時間を3,000ステップとした。

図4に示す小判型の斜めスロットについてモデリングした結果については、試作アンテナによる測定結果とよく一致することが文献[4]で報告されている。しかし、小判型斜めスロット端部の半円は比較的複雑なモデルとなるため、モデリングの妥当性を角度毎に検証する必要がある。パラメータを変えて解析するにはもっと簡易なモデルが適切であると考え、本研究では斜めスロットの形状を図4に示す平行四辺形とした。また、スロットの斜め部は階段状に近似してモデリン

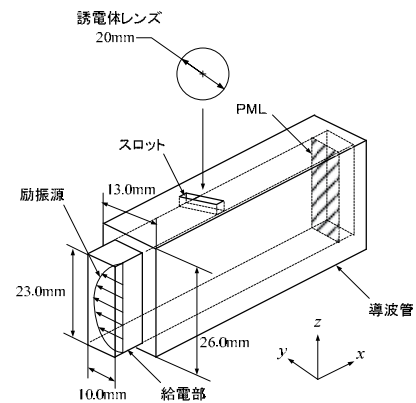


図3 解析モデル

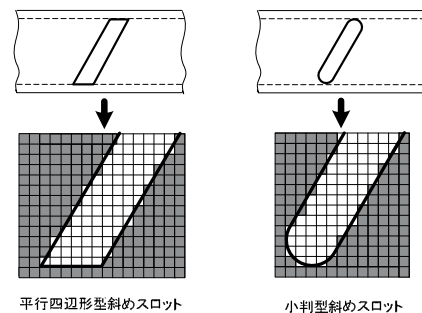


図4 斜めスロットのモデリング

グを行った。

誘電体レンズは直径20 mmで形状は球である。12GHzにおける波長は25mmであり、レンズ直径が波長より小さいことが本レンズの特徴である。比誘電率は2.2としており、これは材料としてポリスチレンを想定している。給電体レンズの形状も階段状に近似してモデリングを行った。

2.3 遠方界解析

本研究ではアンテナの放射パターンを図5のように zx 平面、 yz 平面において極座標で計算している。 ϕ 方向0度で zx 平面、90度で yz 平面の放射パターンが計算される。各平面において計算面に平行な成分を E_θ 、計算面に垂直な成分を E_ϕ として θ 方向に0~360度の電界を計算した。本研究ではスロットを斜めに空けているので E_θ 、 E_ϕ のどちらの成分も放射される。故にレンズの収束効果を議論する場合に2つの平面において E_θ 、 E_ϕ の両成分について検討する。

3. 1スロット狭管壁導波管スロットアンテナの解析

3.1 解析条件

図6に1スロット狭管壁導波管スロットアンテナの解析モデルを示す。導波管の外形は $63 \times 13 \times 26$ mm としており、スロットは角度 θ だけ傾斜させて空けている。斜めスロットのモ

デリングに関してはスロット角度 θ 、スロット幅 d をパラメータとして計算できるようにした。スロットは y 方向に導波路いっぱいまでスロットを空けるようにしているため、 θ が大きくなるとスロット長も長くなる。つまり、 θ を変化させることはスロット長を変えることと同義である。導波管狭管壁の内寸は 10.20 mm であり、FDTD 法の解析モデルでは 10.0 mm に近似して計算していることから、スロット長は角度 θ によって(1)式により表される。

$$\text{スロット長} = \frac{10}{\cos\theta} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

3.2 解析結果

スロット幅 d 、スロット角度 θ をパラメータとして計算を行い、最適なスロット条件を求めた。

まず、スロット幅 3 mm におけるスロット角度 θ に対する放射電力を図 7 に示す。レンズ非装荷時、装荷時のどちらにおいても 30 度で放射が最大となっていることが分かる。

次に、レンズ非装荷時、装荷時のスロット幅 d に対する放射電力を図 8 に示す。このとき、スロット角度は 30 度で固定とした。各平面において幅 2.5 mm 以上からレンズ装荷による放射量の増大を確認することができ、幅 3 mm 以上からレンズの効果がはっきりと表れている。スロット幅が大きくなるにつれて放射電力は増大していくが、レンズをスロットに装荷することを考えるとスロット幅が大きくなることは好ましくない。よって、最適なスロット幅は 3 mm とした。

以上の結果より、スロット角度 30 度、スロット幅 3 mm の条件でレンズの収束効果について検討した。このときのスロット長は約 11.5mm に相当する。1 スロット狭管壁導波管アンテナの放射パターンを図 9、レンズ装荷によるメインローブの最大電力、-3dB 幅の変化量を表 1 に示す。zx 平面、yz 平面どちらにおいてもレンズ装荷によりメインローブの最大電力が増大し、-3dB ビーム幅が狭まっていることを確認することができる。zx 平面の E_θ 成分はレンズ非装荷時の放射が広角に広がっているために-3dB ビーム幅が広がっており、レンズ装荷による収束効果が大きくなっていることが分かった。

3.3 レンズ収束量の検討

レンズの収束効果を定量的に検討するためにレンズ収束量を計算した。レンズ収束量とはレンズ装荷によりスロットからの放射がどれだけ収束したかを示す値であり、(2)式により求められる^[1]。

$$\text{レンズ収束量} = \frac{P_{\text{Lens}}}{P_0} \cdot \frac{S_0}{S_{\text{Lens}}} \quad (2)$$

ここで P_{Lens} 、 P_0 はレンズ装荷時、非装荷時の遠方界におけるメインローブの最大電力、 S_{Lens} 、 S_0 はレンズ装荷時、非装荷時のスロット電力である。 S_0 、 S_{Lens} はポインティングベクトルにより計算した^[5]。

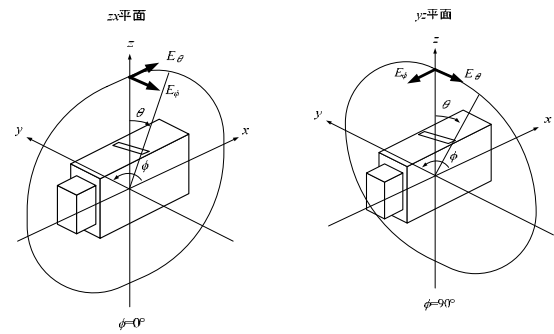


図 5 各平面における遠方界の電界

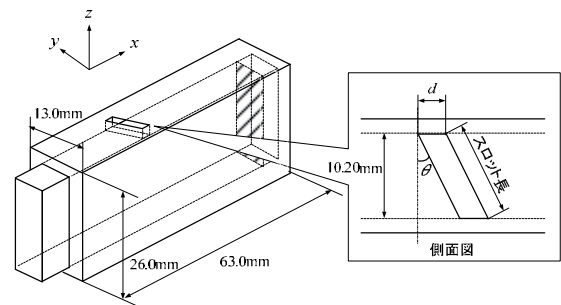


図 6 1 スロット狭管壁導波管の解析モデル

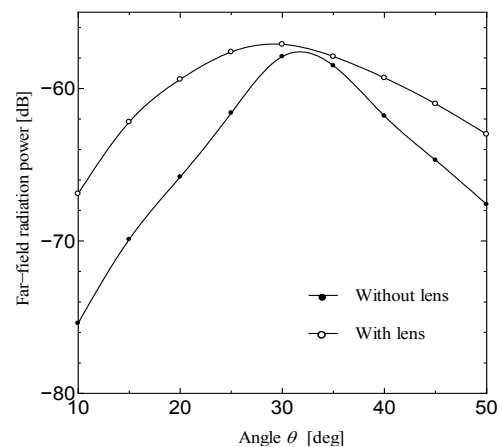


図 7 スロット角度による放射電力の変化

レンズ収束量の計算結果を表 2 に示す。狭管壁に斜めスロットを開けた場合、レンズ収束量は 2.7~3.5 dB となった。広管壁では導波管の長手方向に平行に縦型スロットを開けているため、レンズ非装荷時の E 面はほぼ無指向性となることから 5dB 程度のレンズ集束量が得られていた^[1]。これに対して、狭管壁ではスロットを斜めに空けているので zx 平面、yz 平面のどちらにおいてもレンズ非装荷時でもある程度ビームが指向性をもっている。また、スロット幅が広がるほどスロットから放射されるビームが指向性をもつため、スロットの長手方向ではレンズ装荷による収束効果はそれほど望めない。故

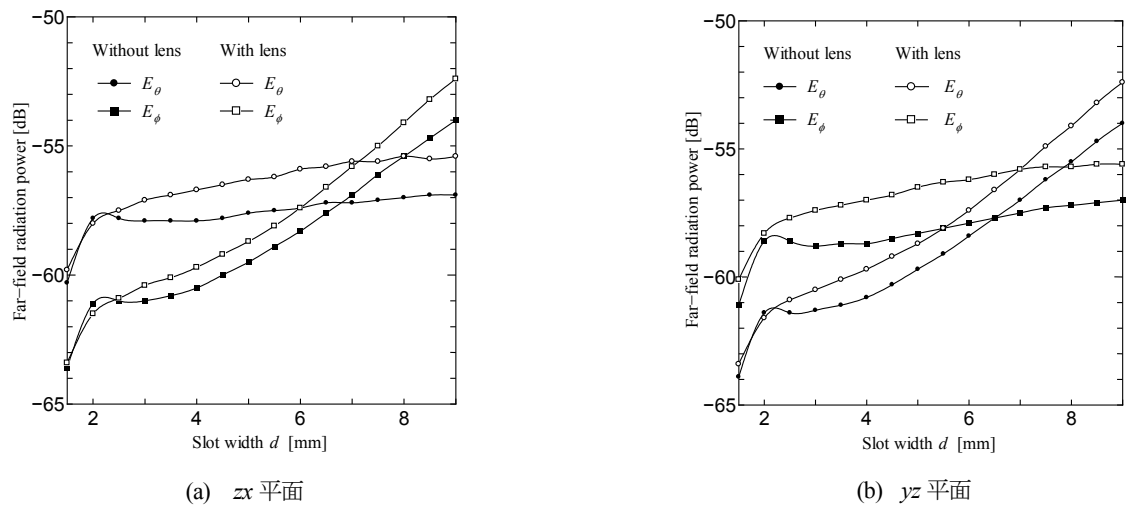


図8 スロット幅による放射電力の変化

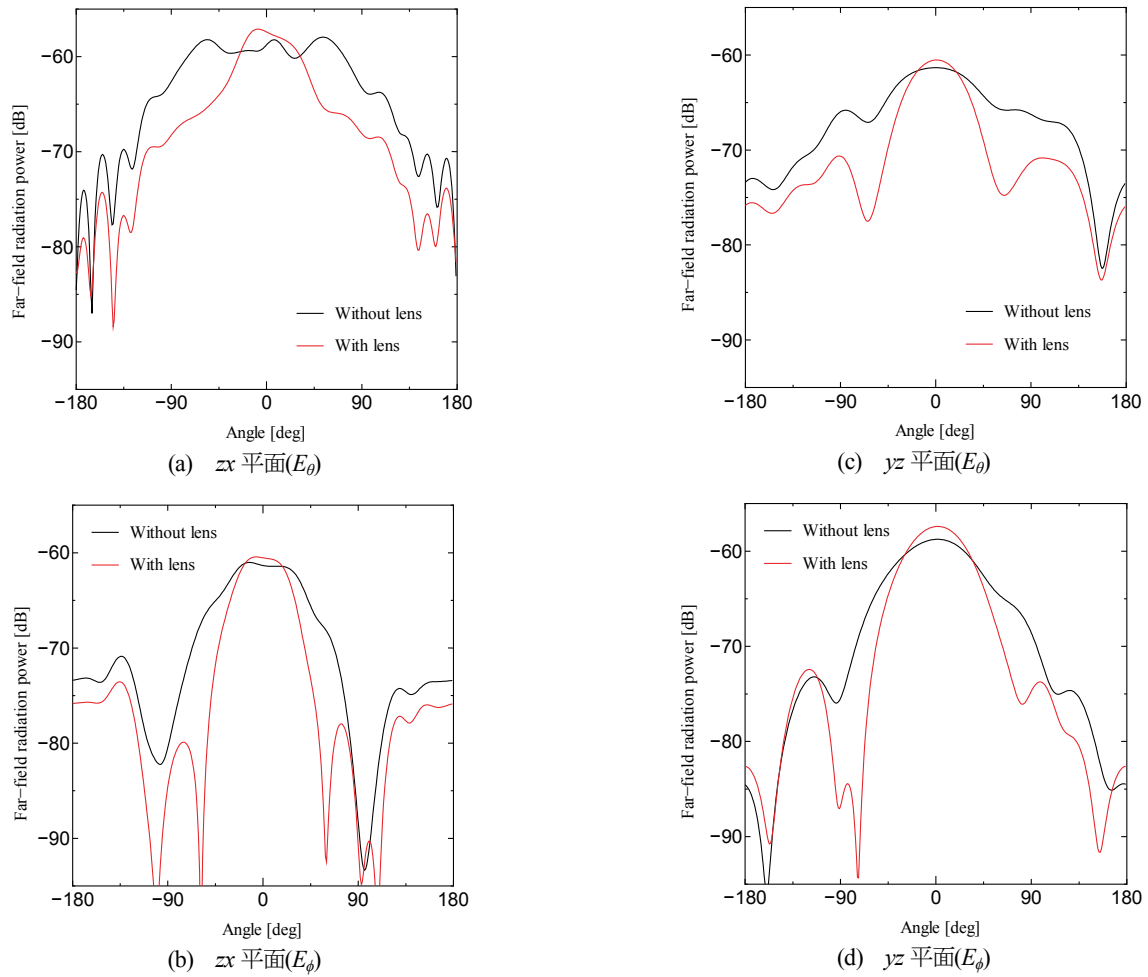


図9 1スロット狭管壁導波管アンテナの放射パターン

に、狭管壁に斜めスロットを開けた場合、結果としてレンズ収束量は小さくなったと考えられる。

また、表 2 では zx 平面の E_θ 、 yz 平面の E_ϕ の収束量が大きくなっていることが分かる。図 2、図 5 より、どちらも E_x 成分が主となる電界成分であることから、スロットの幅方向の電界に対してよりレンズの収束効果が働いていると考えられる。なお、スロット幅を変えてレンズ収束量を計算したところ、スロット幅が広がるほどレンズ収束量が低下する傾向が見られた。スロット幅が広がるほどレンズ非装荷時の指向性が強くなり、レンズの収束効果は小さくなることが考えられる。

4. アレーアンテナにおける誘電体レンズの効果

4.1 解析条件

1 スロットの狭管壁導波管スロットアンテナでは誘電体レンズ装荷により放射特性が改善し、レンズの収束効果を確認することができた。しかし、導波管スロットアンテナを使用する場合、アレー化してレーダなどに利用されることが多い^[9]。本章ではスロット数を 8 スロットにアレー化した場合について解析を行い、誘電体レンズによる収束効果について検討した。グレーディングローブと呼ばれる不要な放射を抑制するためにスロットの間隔は波長以下にする必要があり、特に導波管スロットアンテナでは $\lambda_g/2$ 間隔にすることが一般的である^[3]。

本研究では狭管壁導波管スロットアレーアンテナを 2 本並列に並べ、素子数 2×4 の 8 スロット平面アンテナに誘電体レンズを装荷した場合について検討した。解析モデルを図 10 に示す。アレーアンテナの x 方向の長さを 133 mm とし、レンズを装荷できるように 2 本の導波管の間の壁厚は 3.5 mm とした。図 10 のように導波管を 2 列にすることにより直径 20 mm のレンズを装荷するだけのスペースを確保し、 $\lambda_g/2$ 間隔でスロットを配置できるようにした。

給電方法についてはそれぞれの導波管に個々に給電部を設

け、同相で給電する方式とした。実際に試作する場合には 1 つの給電部から 2 分配する方法を考える必要がある^[6]。

4.2 解析結果

レンズ装荷、非装荷時における放射パターンを図 11 に示す。レンズの装荷により微小ではあるがメインローブの最大電力の増大が確認できる。また、図 11(a)に示すように zx 平面の E_θ ではレンズ装荷により非装荷時に比べてサイドローブを低減する効果も見られた。逆に、 yz 平面ではレンズを装荷することにより逆にサイドローブが増大する結果が得られた。

平面アンテナでは yz 平面における E_ϕ も図 11 に示すようにレンズ非装荷時の指向性が強くなるため、レンズの収束効果が小さくなることが分かる。これより、レンズの収束効果はスロット数が増えるほど小さくなるため、誘電体レンズの収束効果を有効に活用するには小型アンテナが望ましいと考えられる。

5. 結論

本研究では狭管壁導波管スロットアンテナに誘電体レンズを装荷した場合について放射特性を解析し、レンズの収束効果について検討を行った。

1 スロットの狭管壁導波管スロットアンテナに誘電体レンズを装荷した場合について解析を行った。スロット角度、スロット幅をパラメータとして計算することによって最適なスロット条件をスロット角度 30 度、スロット幅 3 mm に決定した。決定したスロット条件のもとで 1 スロットの狭管壁導波管スロットアンテナに誘電体レンズを装荷した場合について解析を行い、誘電体レンズ装荷により -3dB ビーム幅が狭くなり、メインローブの最大電力が増大することを確認した。

また、斜めスロットにおけるレンズの収束効果を定量的に評価するためにレンズ収束量を計算したところ、2.72~3.50 dB と推定することができた。レンズ収束量は広管壁に縦型スロットを開けた場合と比べて 1.5~2.3 dB 低下する傾向が見られ

表 1 レンズ装荷によるメインローブの最大電力、-3dB ビーム幅の変化量

		最大電力 [dB]		最大電力の 変化量 [dB]	-3dB ビーム幅 [deg]		-3dB ビーム幅の 変化量 [deg]
		レンズなし	レンズあり		レンズなし	レンズあり	
zx 平面	E_θ	-57.94	-57.10	0.85	159.11	59.08	-100.02
	E_ϕ	-61.02	-60.43	0.58	76.70	52.85	-23.85
yz 平面	E_θ	-61.33	-60.52	0.81	89.49	55.88	-33.60
	E_ϕ	-58.75	-57.40	1.36	80.60	61.39	-19.22

表 2 レンズ集束量

zx 平面		yz 平面	
E_θ	E_ϕ	E_θ	E_ϕ
2.99 dB	2.72 dB	2.95 dB	3.50 dB

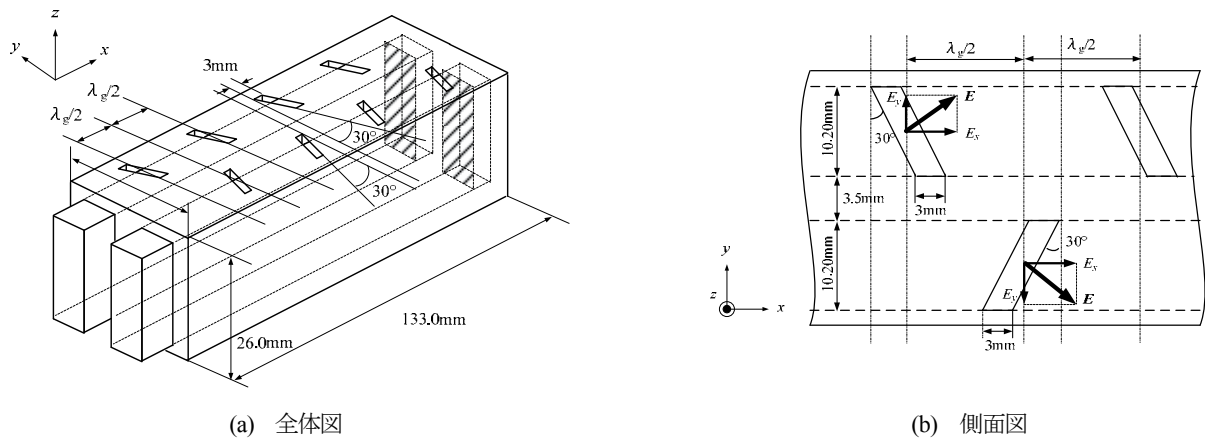


図10 平面アンテナの解析モデル

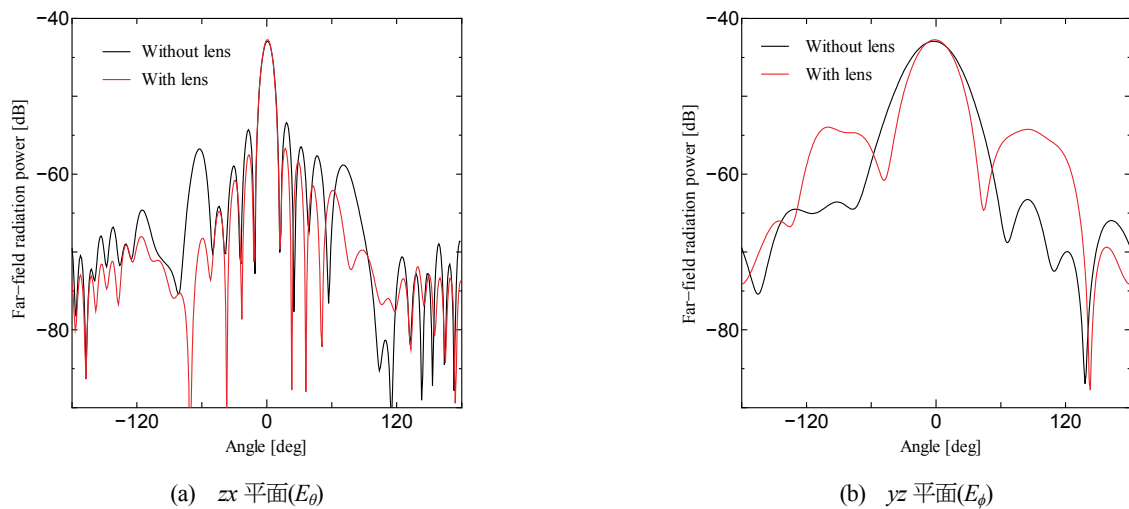


図11 平面アンテナの放射パターン

たが、この差は広管壁と狭管壁のスロットの空け方に起因していると考えられる。

アレーアンテナでもメインローブのビーム幅の変化より、レンズの収束効果を確認することができた。最適化設計を行うことによりサイドローブレベルのさらなる低減は可能であると考えている。

参考文献

- [1] 伊藤, 宮田, 五十嵐: "球形誘電体レンズ装荷による導波管スロットアンテナの放射特性改善", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J92-B, No.7, pp.1185-1192(2009)
- [2] 宇野: "FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析", コロナ社(1998)
- [3] 松田, 宮田, 南部: "電波工学", コロナ社, pp.154-155(2008)
- [4] 松田: "挟管壁導波管スロットアンテナの製作", 秋田工業高等専門学校研究紀要, 第49号, pp.101-102(2014)
- [5] 橋本: "実践 FDTD 時間領域差分法", 森北出版, pp66-70(2006)
- [6] 榊原, 渡辺, 佐藤, 西川: "自動車レーダ用ミリ波帯導波管スロットアレイアンテナ", R&D Review of Toyota CRDL, Vol.36, No.3(2001)