

## 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング用フレネルレンズの設計

滝本 未来<sup>†</sup> 中田 淳<sup>††</sup> 佐藤 弘康<sup>†</sup> 澤谷 邦男<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻 〒980 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6 6 05

<sup>††</sup> 中央電子株式会社 〒192-8532 東京都八王子市元本郷町 1 丁目 9 番 9 号

E-mail: †{takimoto,sahiro,sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし フレネルレンズは軽量化, 薄型化可能なレンズとして期待されている. フレネルレンズを微弱な熱雑音を検出するミリ波パッシブイメージングに用いるためにはゾーニングによる集光特性の劣化を詳細に評価する必要がある. 本論文では, 2次元 FDTD 解析を用いて口径 100 mm のミリ波帯フレネルレンズの焦点位置, 焦点における電界強度分布等の基本特性を定量的に求め, 非球面レンズとの性能の比較を行っている. 特に, レンズのベース厚に対する基本特性の変化を詳細に検討し, 機械的強度とともに高い電界強度を有するフレネルレンズ構造パラメータを求めている. その結果, 同一口径の非球面レンズに比べ, 集光位置における 76.5 GHz の電界振幅の低下は 0.5 dB 程度であることが明らかとなった. さらに, 設計した構造を試作し, 測定を行い解析の妥当性を示している.

キーワード フレネル領域, フレネルレンズ, 位相補正, パッシブイメージング, レンズアンテナ

## Design of Fresnel Lens Used for 77 GHz Passive Millimeter-wave Imaging

Miki TAKIMOTO<sup>†</sup>, Jun NAKADA<sup>††</sup>, Hiroyasu SATO<sup>†</sup>,

and Kunio SAWAYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba-ku, Sendai 980 8579, Japan

<sup>††</sup> Chuo Electronics Corporation Ltd

Tokyo 192-8532, Japan

E-mail: †{takimoto,sahiro,sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** Fresnel lens is well known as a low-weight and thin-structure. In order to use Fresnel lens for passive millimeter-wave imaging, it is necessary to evaluate degradation of focusing property by zoning. In this paper, fundamental characteristics of Fresnel lens such as focusing point and electric field intensity around focal point are numerically analyzed by using two-dimensional FDTD (Finite-Difference Time-Domain) analysis and compared with the case of aspheric lens. Detailed study of effect of the base thickness of lens on fundamental characteristics is performed, and structure parameters of Fresnel lens having mechanical strength and high electric field intensity are obtained. It is observed that electric field intensity of Fresnel lens around focal point is only 0.5 dB less than that of aspheric lens. Fresnel lens designed by FDTD analysis is fabricated and its characteristics are measured confirming the validity of the design based on FDTD method.

**Key words** Fresnel Resion, Fresnel Lens, Phase-correcting, Passive imaging, Lens Antenna

### 1. ま え が き

ミリ波パッシブイメージングは, 物体が放射するミリ波帯の熱雑音を受信し, 人が所持する衣服下の不審物を非接触・非侵襲で検知可能な技術として実用化が期待されている [1]. 受信信号が極めて微弱な熱雑音であることから, 高感度なイメージング素子, 高効率で高分解能の

レンズが要求される.

筆者らはこれまで, 空港等の水際において使用するための 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を開発し, 評価を進めている [2]-[3]. 開発した装置のレンズは口径が 50 cm の非球面ポリエチレンレンズであり, 空間分解能 20 mm 程度が実現できたものの, レンズの重量が 30 kg 程度と重く, 装置全体の重量を左右するため大

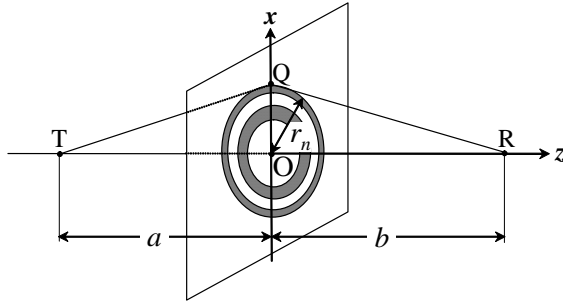


図1 フレネルゾーン .

幅な軽量化が望まれる．また，77 GHz 帯の使用周波数を変えずにさらに空間分解能を上げるためには，レンズ口径をさらに増加させる必要がある．

軽量化，薄型化が可能なレンズとしてフレネルレンズがあり，これまでミリ波帯における様々な研究が行われてきた [4]- [8]．フレネルレンズは凸レンズを径方向でゾーニングされたものが一般的であるが，作製における工程を減らすため，各フルウェーブゾーンをサブゾーンに分割したのや [4], [6], [7], ひとつのフルウェーブゾーンを2分割しただけのフレネル輪帯板 (Fresnel Zone Plate, FZP)，周期的に誘電率を変化させたリング状誘電体を用いたレンズの研究が行われており [6], [8]，レンズ口径，F 値，フルウェーブゾーン数，サブゾーン数等をパラメータとした性能の評価が行われている．

一般に，分割されたフルウェーブゾーンを同一平面上に固定するためには一様な厚さを持つ誘電体ベースが必要となり，機械的強度を保つためにレンズ口径が増加するほどベース厚は増加させる必要がある．ベース厚に対する集光特性については，文献 [4] では，ベース厚を変化して焦点における電界を解析により求め，実効波長程度の周期で約 2 dB の変化があることが報告されている．文献 [7] では，サブゾーン数が2の場合についてベース厚を変化させ，実効波長の 2.3 倍の周期でレンズアンテナの利得が約 4 dB 変化することが報告されている．しかしながら，サブゾーン数とベース厚の双方を変化した場合の特性については検討されておらず，集光位置の変化や集光位置における電界強度については検討されていない．

そこで本論文では，2次元 FDTD 法を用いてミリ波帯フレネルレンズの構造パラメータを変化させたときの集光位置，集光位置における電界の振幅，焦点深度等の基本特性を求め，非球面レンズと性能を比較した結果を述べる．さらに，機械的強度と高い集光特性を有する構造パラメータを有するフレネルレンズを試作し，測定結果と比較した結果を述べる．

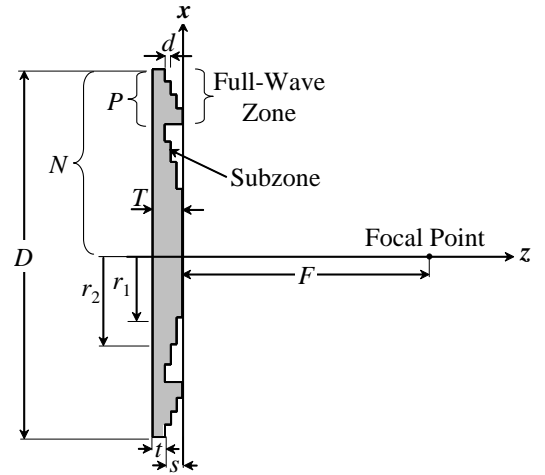


図2  $N = 2, P = 4$  の場合のフレネルレンズの断面図 .

表1 基準としたフレネルレンズの構造パラメータ .

Parameter	[mm]	Number of cells
Diameter of lens	$D = 100$	$1000\Delta x$
Focal length	$F = 152.2$	$1522\Delta z$
Number of full-wave zones	$N = 2$	-

$$\epsilon_r = 2.34, \lambda_0 = 4 \text{ mm}, \Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.1 \text{ mm}$$

## 2. 構造

図1に示すように，送信点 T と受信点 R を光軸上にとったとき，TOR を通る直進波と TQR を通る波の位相差が  $m\lambda/2$  以下となる領域は，一般にフレネルゾーンと呼ばれる [9]．このとき，点 Q における第  $m$  フレネルゾーンの半径を  $r_m$  とすると，

$$\sqrt{a^2 + r_m^2} + \sqrt{b^2 + r_m^2} - (a + b) = \frac{m\lambda_0}{2} \quad (1)$$

が成り立つ．ここで， $\lambda_0$  は自由空間波長である．(1)式において， $a \rightarrow \infty$  のとき  $b$  は焦点距離  $F$  となるので，

$$\sqrt{F^2 + r_m^2} - F = \frac{m\lambda_0}{2} \quad (2)$$

が成り立ち，半径  $r_m$  は

$$r_m = \sqrt{\left(\frac{m\lambda_0}{2}\right)^2 + mF\lambda_0}, m = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

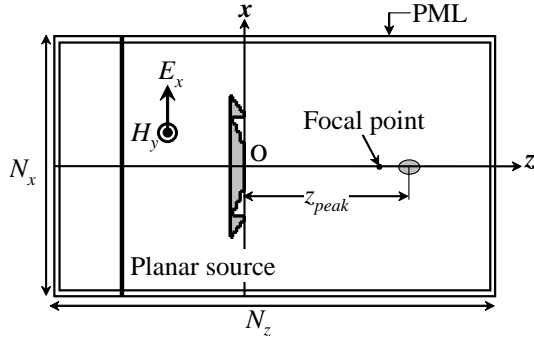
と求められる．

フレネルレンズの基本構造を図2に示す．フレネルレンズの最小段差  $d$  による最小位相差が  $\pi$  の場合は第  $m$  フレネルゾーンの半径は (3) 式で与えられるが，最小位相差を  $\frac{2\pi}{P}$  ( $P = 1, 2, \dots$ ) とした場合は

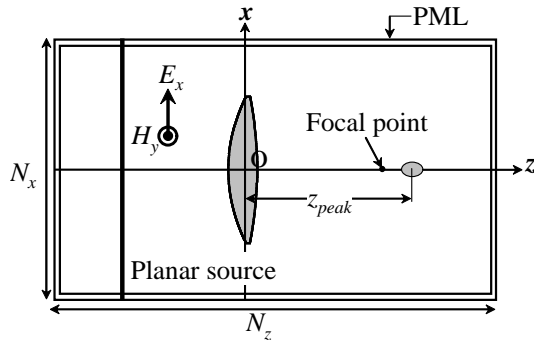
$$r_n = \sqrt{\left(\frac{n\lambda_0}{P}\right)^2 + \frac{2nf\lambda_0}{P}}, n = 1, 2, \dots, NP \quad (4)$$

で与えられる．このときの最小段差は

$$d = \frac{\lambda_0}{P(\sqrt{\epsilon_r} - 1)} \quad (5)$$



(a) フレネルレンズ .



(b) 非球面レンズ .

図3 解析モデル (平面波入射,  $N_x = 2001$ ,  $N_z = 4501$ ) .

で与えられる [4]-[8] . また, レンズ全体の厚さ  $T$  は

$$T = t + s \quad (6)$$

$$s = d(1 - P) = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r} - 1} \left(1 - \frac{1}{P}\right) \quad (7)$$

で与えられる . ここで,  $t$  はレンズのベース厚である .

(4)-(7) 式を用いてフレネルレンズの設計を行った . 基準とした構造パラメータを表 1 に示す . レンズ口径が  $D = 100$  mm のときに焦点距離が  $F = 152.2$  mm となるようフルウェーブゾーン数を  $N = 2$  とした . 設計周波数を 75 GHz ( $\lambda_0 = 4$  mm) とし, レンズの材質として比誘電率が  $\epsilon_r = 2.34$  の高密度ポリエチレンを用いた . 比較として用いる非球面レンズも同様に, 高密度ポリエチレンを使用し, レンズ口径  $D = 100$  mm, 焦点距離  $F = 134$  mm, 厚さ  $T = 20$  mm でその曲面は

$$f(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2r^2}} \quad (8)$$

で与えられる非球面形状である . ここで, 出射面においては  $K = -4.026$ ,  $c = 3.843$ , 入射面においては  $K = -1.353$ ,  $c = 9.465$  である .

### 3. 2次元 FDTD 法による設計

#### 3.1 解析モデル

設計したフレネルレンズおよび非球面レンズについて

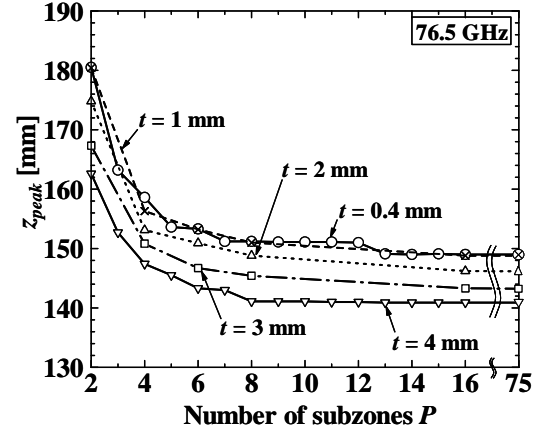


図4 サブゾーン分割数  $P$  に対する集光位置  $z = z_{peak}$  .

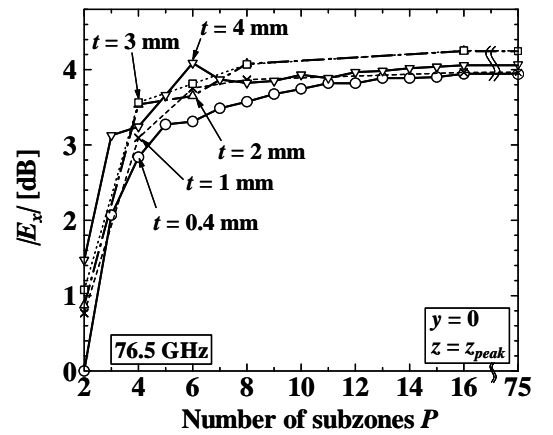


図5 サブゾーン分割数  $P$  に対する集光位置  $z = z_{peak}$  における電界強度 .

2次元 FDTD 法による解析を行った . なお, フレネルレンズの形状は (4)-(7) 式を用いて 75 GHz において設計しているが, 以下の図 4~図 6 では 76.5 GHz における特性を示している . 解析モデルを図 3 に示す . フレネルレンズの場合は出射面の中心点, 非球面レンズの場合は厚さの中心点を原点に取り, 電界の  $x$  成分  $E_x$  のみをもつ垂直入射の平面波を入射させた . 解析において, セルサイズは  $\Delta x = \Delta y = 0.1$  mm で, 吸収境界条件として 4 層 PML を用い, タイムステップ数を 50000, 励振はガウスパルスとした .

#### 3.2 サブゾーン分割数 $P$ 及びベース厚 $t$ による影響

フレネルレンズのサブゾーン分割数  $P$  による影響を検討するために, 設計したベース厚  $t$  の異なるフレネルレンズについて,  $P$  を 2~75 まで変化させて解析を行った .

$P$  に対するそれぞれのレンズの集光位置  $z = z_{peak}$  を図 4 に示す .  $t = 0.4$  mm と  $t = 1$  mm のレンズは  $P$  が大きくなるほど設計焦点距離  $F = 152.2$  mm 付近に収束したが, ベース厚の厚いレンズは  $F$  よりも短い距離に収束した .

それぞれのレンズの集光位置  $z = z_{peak}$  における電界

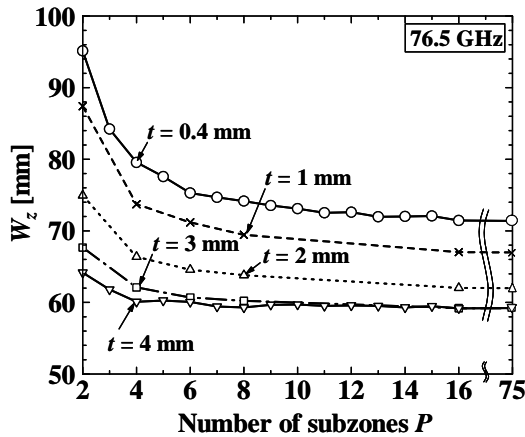


図6 サブゾーン分割数  $P$  に対する焦点深度  $W_z$  .

強度  $|E_x|$  を図5に示す. ただし, 振幅は周波数 76.5 GHz における値を示してあり,  $t = 0.4$  mm,  $P = 2$  の場合の値で規格化している.  $P$  が大きくなるにつれて一定の振幅に収束する傾向が見られた.  $t = 0.4$  mm,  $P = 2$  の場合に対して,  $t = 2$  mm および 3 mm の場合に 4 dB 程度大きい振幅に収束し, 今回の計算の中では最大振幅となった. しかし,  $t = 4$  mm の場合においても  $P = 6$  のときのみ 4 dB 程度の振幅が得られた.

$z$  方向の 3 dB 幅を焦点深度  $W_z$  とし,  $P$  に対する  $W_z$  を図6に示す. ベース厚  $t$  が大きいほど焦点深度は浅くなった. また, いずれのベース厚においても  $2 \leq P \leq 8$  の範囲で焦点深度は浅くなり,  $8 \leq P$  ではそれぞれ収束する傾向が得られた.

以上の結果から,  $P$  が大きいほど集光特性が良くなるということが確認できた.  $P$  は位相補正距離  $d$  を決めるパラメータであり,  $P$  を増加させることは位相補正を精密化することに相当する.

一方, 製造工程の簡易化を図るためには  $P$  を出来るだけ小さく設計する必要がある. ベース厚  $t$  は機械的強度を確保するために大きくする必要がある. 解析結果より,  $t = 4$  mm,  $P = 6$  で機械的強度を確保しつつ十分な振幅が得られることが分かった.

### 3.3 非球面レンズとの電界強度の比較

前節で求めたパラメータ  $t = 4$  mm,  $P = 6$  で設計したレンズ口径  $D = 100$  mm のフレネルレンズと同一口径の非球面レンズの光軸上の電界強度分布を図7に示す. ただし, 振幅は 76.5 GHz における値を示してあり, 非球面レンズの集光位置  $z = z_{peak}$  における振幅値で規格化している. 解析の結果, フレネルレンズの集光位置  $z = z_{peak}$  における電界振幅は非球面レンズに比べて 0.5 dB の低下であることが明らかとなった.

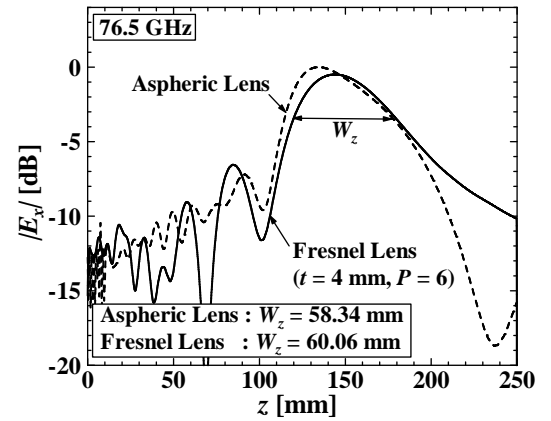


図7 平面波入射した場合の光軸上の電界強度分布 .

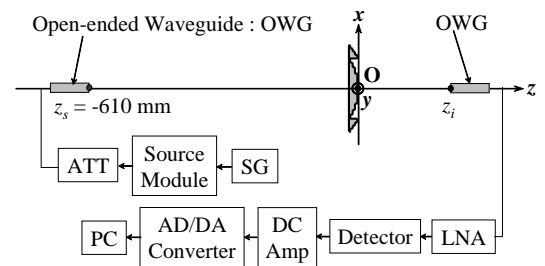
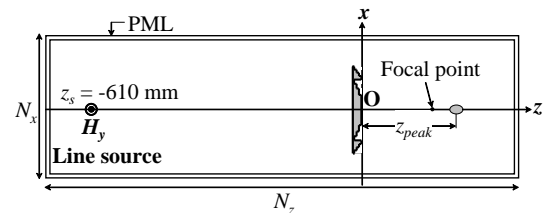
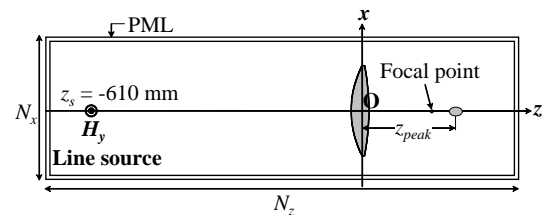


図8 測定系 .



(a) フレネルレンズ .



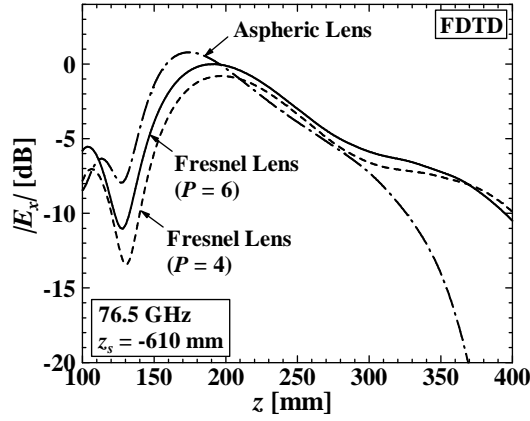
(b) 非球面レンズ .

図9 解析モデル (線波源,  $N_x = 2001$ ,  $N_z = 11001$ ) .

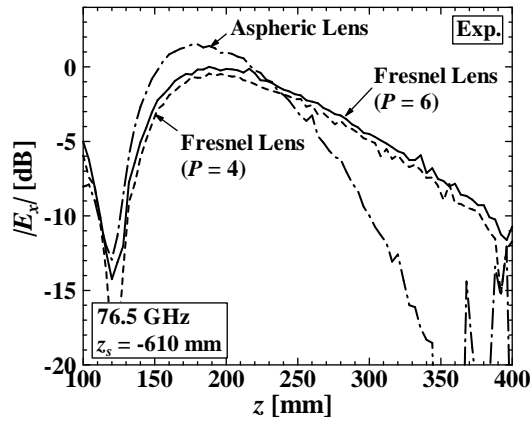
## 4. 実験

### 4.1 測定系

前節で設計したレンズ口径 100 mm で  $P = 4, 6$  のフレネルレンズを試作し, 基本特性の評価を行った. なお, レンズ全体の厚さが  $T = 10$  mm となるように, ベース厚は  $t = 4.34$  mm として製作した. 測定系を図8に示す. 信号発生器から 12 GHz 帯の信号を出力し, ミリ波ソースモジュールで 60~90GHz に周波数を変換し, 減衰器を介して送信アンテナから送信する. また, 受信アンテナ



(a) FDTD 解析結果.



(b) 実験結果.

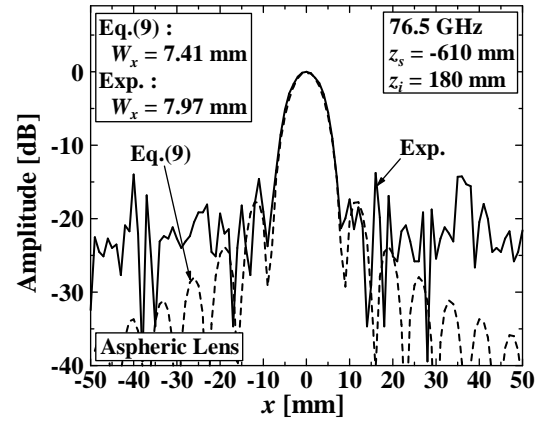
図 10 光軸上の電界強度分布.

で受信したミリ波は低雑音増幅器で増幅し，SBD 検波器で 2 乗検波された検波電圧を DC 増幅器で増幅後，AD 変換器でデジタル信号に変換してパソコンで計測した．送受信アンテナには開口端導波管アンテナ (Open-ended Waveguide : OWG) を用いた．レンズ表面から被写体距離  $z_s = -610$  mm の位置に送信アンテナの先端を配置し，受信アンテナの位置を変化させて受信電圧を測定した．

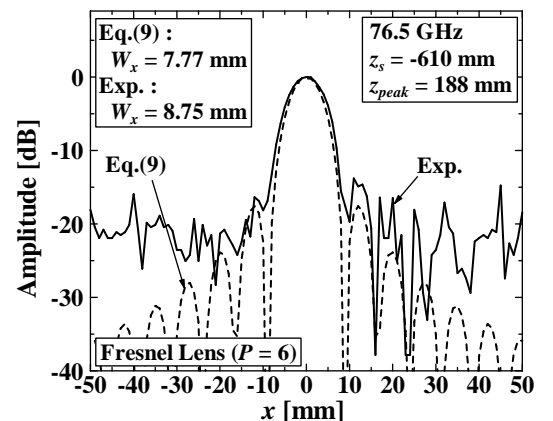
FDTD 解析では有限距離からの入射を考慮するため，図 9 に示すように線波源を用いた．3.1 節と同様の解析条件の下で，距離  $z_s = -610$  mm の位置に線波源を入射させ，タイムステップ数を 120000 とした．

#### 4.2 光軸上の電界強度分布

光軸上の電界強度分布  $|E_x|$  を図 10 に示す．ただし，振幅は 76.5 GHz における値を示しており， $P = 6$  のフレネルレンズの最大受信電圧で規格化している．最大受信点において実験では， $P = 6$  のフレネルレンズに対して  $P = 4$  では 0.5 dB 低下し，非球面レンズは 1.5 dB 上昇した．一方，FDTD 計算結果では  $P = 6$  のフレネルレンズに対して  $P = 4$  では 0.8 dB 低下し，非球面レンズは 0.8 dB 上昇した．即ち，実験，FDTD とともに受信電界強度は  $P = 6$  の方が  $P = 4$  よりも大きくなった．また，最大



(a) 非球面レンズ.



(b) フレネルレンズ ( $P = 6$ ).

図 11 回折パターン.

受信点となる集光位置  $z_{peak}$  は実験の  $P = 6$  のフレネルレンズでは 188 mm,  $P = 4$  で 188 mm, 非球面レンズは 180 mm, FDTD の  $P = 6$  のフレネルレンズでは 192.1 mm,  $P = 4$  で 196.7 mm, 非球面レンズは 174.0 mm であり，実験結果と FDTD 計算結果は概ね一致した．

#### 4.3 回折パターン

回折パターンとしてエアリーパターン，第 1 暗線間距離としてエアリーディスク，及び 2 物点間の電力落ち込み量が 74% となるレイリーの分解能が空間分解能の評価基準として広く用いられている．本論文では実験結果と比較する回折パターンとして，円形開口に対するフランホーファ回折パターンの理論値を用いた．円形開口から十分離れた距離  $L (\gg D^2/\lambda)$  におけるフランホーファ回折による像面での回折パターンは

$$P(x) = \left( \frac{\pi D^2}{2} \right)^2 \left[ \frac{J_1(R)}{R} \right]^2, \quad R = \frac{\pi D x}{\lambda z_{peak}} \quad (9)$$

で与えられる．

非球面レンズと  $P = 6$  のフレネルレンズの集光距離  $z = z_{peak}$  における回折パターンの実験結果および (9) 式による理論値を図 11 に示す．メインローブについては (9) 式と概ね一致する結果が得られた．

## 5. ま と め

2次元 FDTD 法を用いてミリ波帯フレネルレンズの構造パラメータを変化したときの集光位置における電界の振幅，焦点深度等の基本特性を求めた．その結果，ベース厚が  $t = 4 \text{ mm}$ ，サブゾーン分割数  $P = 6$  で機械的強度を確保しつつ大きい振幅が得られ，集光位置における電界振幅は非球面レンズに比べ  $0.5 \text{ dB}$  の低下であることが明らかとなった．さらに，設計したフレネルレンズを試作して測定を行った結果，振幅レベルおよび焦点位置が FDTD 解析と概ね一致し，解析の妥当性が確認された．

## 謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学技術振興調整費「安全・安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラム」の助成を得て行われた．

## 文 献

- [1] 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 水野 皓司, “ ミリ波パッシブイメージング技術 (セキュリティ分野への応用を主に), ” 計測と制御, 第 42 巻, 第 1 号, pp. 748-753, 2009.
- [2] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, “ 77GHz 帯ミリ波パッシブ撮像装置の開発, ” 2009 年電子情報通信学会総合大会, CS-4-1, 2009.
- [3] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, “ 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置, ” 2010 年電子情報通信学会総合大会, B-1-150, 2010.
- [4] D. R. Reid and G. S. Smith, “ A full electromagnetic analysis of grooved-dielectric Fresnel zone plate antennas for microwave and millimeter-wave applications, ” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.55, no. 8, pp.2138-2146, Aug. 2007.
- [5] D. R. Reid and G. S. Smith, “ A comparison of the focusing properties of a Fresnel zone plate with a doubly-hyperbolic lens for application in a free-space, focused-beam measurement system, ” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.57, no. 2, pp.499-507, Feb. 2009.
- [6] D. N. Black and J. C. Wiltse, “ Millimeter-wave characteristics of phase-correcting Fresnel zone plates, ” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. MTT-35, pp.1122-1129, Dec. 1987.
- [7] A. Petosa, N. Gagnon, and A. Ittipiboon, “ Effects of Fresnel lens thickness on aperture efficiency, ” in Proc. 10th Int. Symp. Antenna Techniques and applications EM and URSI Conf., Jul. 2004, pp.175-178
- [8] H. D. Hristov and H. A. J. Herben, “ Millimeter-wave Fresnel-zone plate lens and antenna, ” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 43, no. 12, pp.2779-2785, Dec. 1995.
- [9] 虫明康人, 安達三郎, “ 基礎電波工学, ” 共立出版, 1970.
- [10] 滝本未来, 中田淳, 山田康太, 佐藤弘康, 澤谷邦男, “ 77 GHz 帯近距離パッシブイメージング用小型レンズアンテナの特性, ” 電子情報通信学会技術研究報告, AP2010-46, pp.47-51, 2010.