

## フレネルレンズの 2 次元 FDTD 解析

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

あらまし ミリ波パッシブイメージングを用いて高分解能のミリ波画像を得るためにはレンズの大口径化が必要となるが、誘電体レンズの場合、重量の増加や製造が容易ではないこと等の問題がある。フレネルレンズはレンズの軽量化、薄型化が期待できるが、ゾーニングによるブロッキング、設計段階における近似等により特性の劣化が発生する。本報告では、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レンズ焦点における電界強度分布、収差等の基本特性を定量的に求め、非球面レンズとの性能比較を行った結果を述べる。

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

## 2D FDTD Analysis of Fresnel Lens

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

**Abstract** Design of Fresnel lens used for passive millimeter-wave imaging is performed by using 2 dimensional FDTD (Finite-Difference Time-Domain) analysis. In order to realize high-resolution of millimeter-wave images, the large diameter of lens is required, however, the weight of lens and difficulty of manufacture are of the problem. Fresnel lens is well known as low-weight, thin-structure, however, the performance of lens characteristics degrade by the blocking caused by zoning and some approximations in a process of design. In this report, fundamental characteristics of Fresnel lens such as electric field intensity along the optical axis and the aberration of lens are numerically analyzed and compared with the case of aspheric lens.

**Key words** Fresnel resion, fresnel lens, phase-correcting, passive imaging, lens antenna

### 1. ま え が き

近年、テロ・犯罪等によって安全・安心な社会が脅かされてきており、液体爆発物やプラスチック爆弾等、金属探知機で検知できない不審物を所持する不審者を迅速に検知する手段が望まれている。ミリ波を用いたイメージングは、人が所持している不審物の検知を実現する技術として期待されている。また、ミリ波パッシブイメージングは人や物から放射されるミリ波帯の熱雑音をパッシブに受信し、非接触・非侵襲で衣服下の不審物を検知可能な技術として、実用化が期待されている [1]。

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、実用性について評価を進めてきた [2-3]。装置は金属探知機による検査を経た人の正面に配置する据え置きタイプとして設計されているが、検査官による詳細な検査

等で使用可能な小型・ハンディータイプのパッシブイメージング装置の開発も望まれている。いずれの装置においても、受信信号が極めて微弱な熱雑音であること、および検知可能な不審物のサイズはできるだけ小さいことが望まれるため、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。

これまで開発してきた 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置のレンズはレンズ口径が 50 cm の非球面誘電体レンズであり、空間分解能約 20 mm が達成されている。さらに高分解能のミリ波画像を得るためにはレンズの大口径化が必要となるが、重量の増加や製造が容易ではないこと等の問題がある。レンズの軽量化、薄型化を図ることが可能なレンズとしてフレネルレンズが考えられるが、ゾーニングによるブロッキング、設計段階における近似などによって特性が劣化する。そこで本報告で



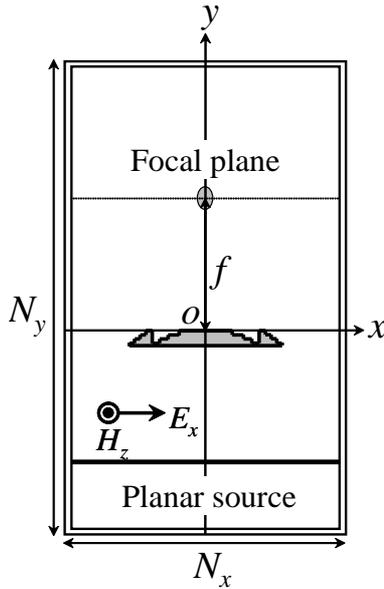


図4 解析モデル

チレンとした。なお，レンズの総厚さ  $T$  はいずれも 9.66 mm であり，口径の変化に因らず一定である。

比較として用いる非球面レンズの構造を図3に示す。非球面レンズは口径  $D = 100$  mm，厚さ  $T = 20$  mm，焦点距離  $f = 134$  mm，材質は比誘電率が  $\epsilon_r = 2.34$  の高密度ポリエチレンとして設計されている[7]。

高密度ポリエチレンの比重を 0.96 として2次元レンズを回転させた形状の重量求めた。その結果， $D = 100$  mm の非球面レンズは 85.4 g， $D = 100$  mm のフレネルレンズは 52.7 g， $D = 140$  mm のフレネルレンズは 99.1 g となり， $D = 100$  mm の場合のフレネルレンズは非球面レンズに比べて 32.7 g 減少できることがわかった。

設計したフレネルレンズおよび非球面レンズに対して2次元 FDTD 法による解析を行った。解析モデルを図4に示す。レンズ表面の中心点を原点に取り，入射波源は TM 波 ( $E_x, E_y, H_z$ ) とし，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。

#### 4. サブゾーン分割数 $P$ による影響

フレネルレンズのサブゾーンの分割数  $P$  による影響を検討するために，設計した  $D = 100$  mm のフレネルレンズの  $P$  を 2~16 まで変化させて解析を行った。それぞれの最大受信点における振幅を比較した結果を図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おり， $P = 2$  の場合の値で規格化している。 $2 \leq P \leq 6$  においては  $P$  の増加に伴って振幅も増加したが， $P = 7$  以降は 0.5 dB 程度減少し，収束する傾向が見られる。

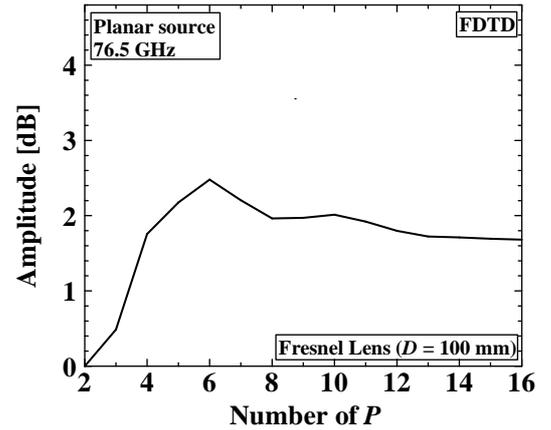


図5 サブゾーン分割数  $P$  による振幅への影響

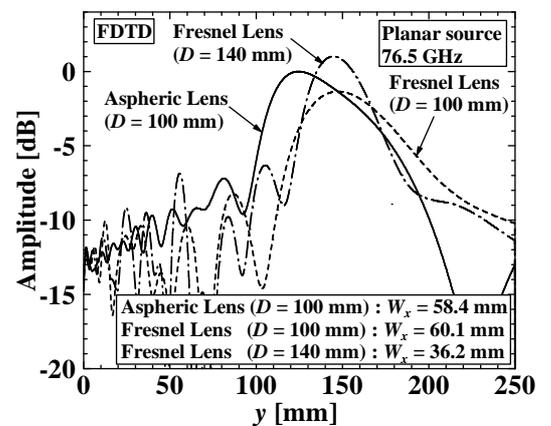


図6 光軸上の電界強度分布

$P$  は位相補正距離  $d$  を決める係数でもあり， $P$  を増加させることは位相補正を厳密化することに相当する。そのため， $P$  が増加することにより焦点における振幅も増加すると予想されていた。 $P = 7$  以降で 0.5 dB 程減少した理由としては，FDTD 解析の際のセルサイズ 0.1 mm では段差  $d$  の精度を表現できなかったものと考えられる。

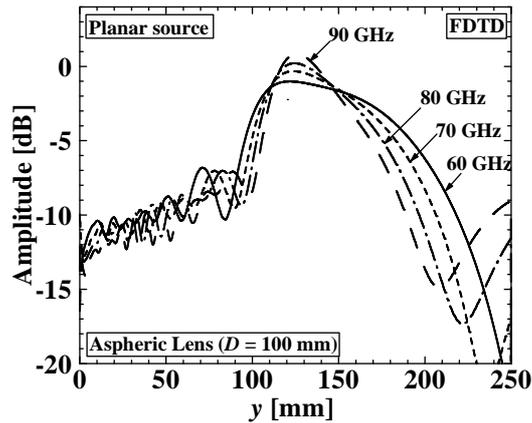
以上の結果から， $P = 4$  程度で十分な振幅が得られることが確認できた。 $P$  が大きくなるとレンズ表面は曲線に近似されるため，加工が複雑になるが， $P = 8$  までの場合には加工が容易である。従って，フレネルレンズの使用により，製造工程の簡易化が図れることになる。

#### 5. レンズの集光特性

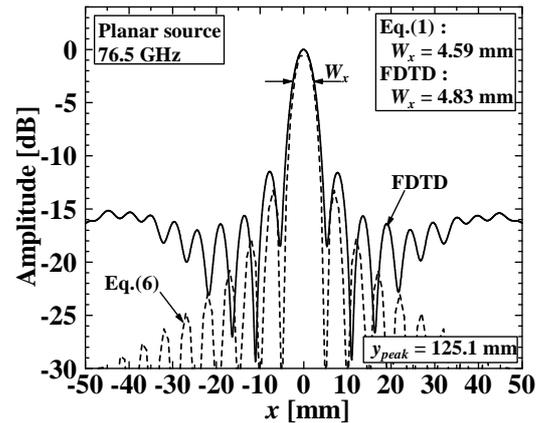
##### 5.1 光軸上の電界強度分布

$D = 100$  mm の非球面レンズと  $D = 100$  mm および  $D = 140$  mm のフレネルレンズについて，光軸上の電界  $E_x$  の振幅分布を計算した結果を図6に示す。周波数 76.5 GHz であり，非球面レンズの最大値で規格化した振幅を示している。

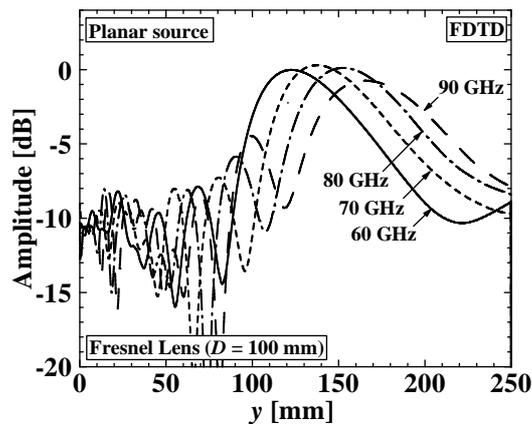
$D = 100$  mm の非球面レンズ， $D = 100$  mm および  $D = 140$  mm フレネルレンズの焦点距離  $y_{peak}$  はそれぞれ，



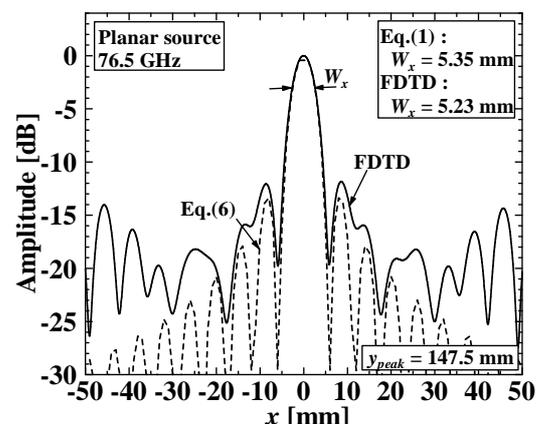
(a) 非球面レンズ ( $D = 100$  mm)



(a) 非球面レンズ ( $D = 100$  mm)



(b) フレネルレンズ ( $D = 100$  mm)

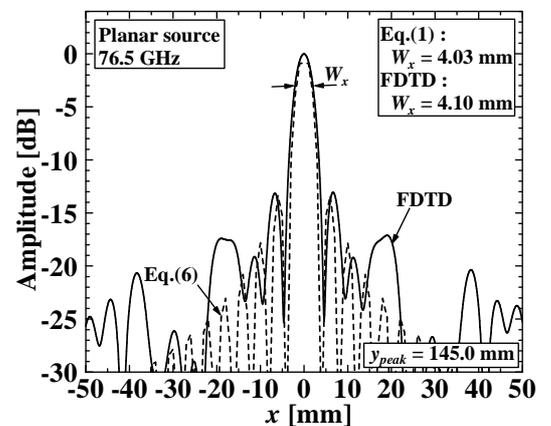


(b) フレネルレンズ ( $D = 100$  mm)

図 7 光軸上の電界強度分布

$y_{peak} = 125.1$  mm,  $147.5$  mm,  $145.0$  mm となり, 設計時の焦点距離  $f = 134$  mm,  $152.24$  mm,  $145.16$  mm とはややずれる結果となった.  $D = 100$  mm のフレネルレンズの振幅は口径が同じである非球面レンズに対して  $1.4$  dB 程低下した. 一方,  $D = 140$  mm のフレネルレンズは  $D = 100$  mm の非球面レンズに対して  $1.0$  dB 上昇する結果が得られた. 以上のように, 同一口径の非球面レンズに比べて焦点における電界振幅が  $1.4$  dB 減少したが, レンズ口径を  $1.4$  倍にすることにより振幅を  $2.4$  dB 向上させることができる.

$D = 100$  mm の非球面レンズとフレネルレンズについて, 周波数  $60 \sim 90$  GHz における光軸上の電界強度分布を計算した結果を図 7 に示す. ただし, 振幅はそれぞれのレンズの  $76.5$  GHz における最大振幅の値で規格化している. 非球面レンズは焦点位置がほぼ一定で, 焦点深度  $W_y$  が高周波になるほど浅くなった. 一方, フレネルレンズは高周波数になるほど焦点位置は遠くなったが, 焦点深度はほぼ一定であり, 各周波数における最大振幅の変動も少ない. この結果から, フレネルレンズは焦点位置の周波数依存性は強いが, 最大振幅にはあまり影響しないことがわかった.



(c) フレネルレンズ ( $D = 140$  mm)

図 8 回折パターン

## 5.2 回折パターン

一般に, 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に用いられる.

これらはすべて円形開口の場合について定義されたものであるため, 本報告では 2 次元 FDTD 解析結果と比較する回折パターンとして, スリット開口に対する回折パターンを用いた. 波長  $\lambda$  より十分大きな幅  $w$  のスリット

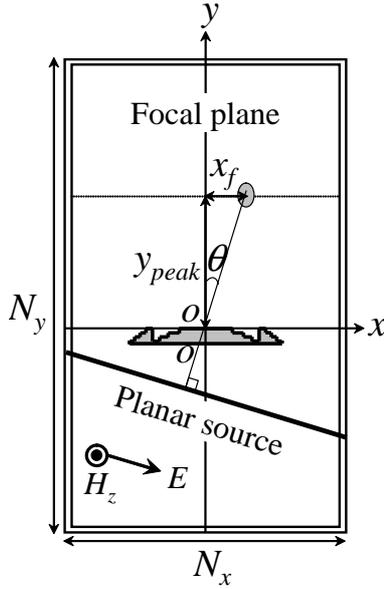


図9 解析モデル (平面波斜め入射)

開口に平面波が入射したとき、開口から十分離れた距離  $L (\gg D^2/\lambda)$  における、フランクフルト回折による像面での回折パターン  $E$  は次式で与えられる。

$$E(x) = \frac{w \sin(wX)}{wX}, \quad X = \frac{\pi x}{\lambda L} \quad (6)$$

このとき、電界強度が零となる位置は

$$x = \frac{n\lambda L}{w}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

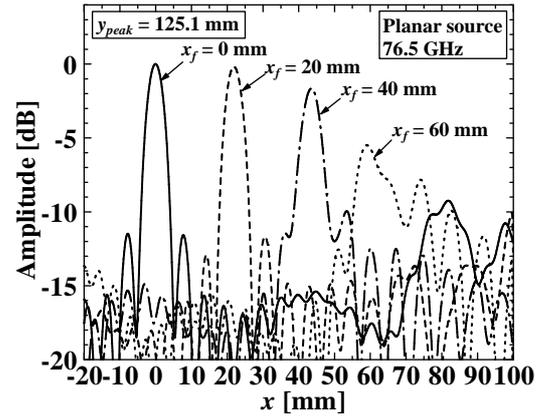
で与えられ、第  $n$  暗線を与える。本報告では (6) 式と 2 次元 FDTD 解析の結果を比較する。

3 種類のレンズの各焦点距離  $y_{peak}$  における回折パターンを図 8 に示す。フレネルレンズについてはサイドローブの乱れが大きい、いずれのレンズもメインビームについては (6) 式と概ね一致した。また、 $D = 140$  mm のフレネルレンズのビーム幅  $W_x$  は他の 2 種類のレンズよりも狭く、高分解能が期待できる結果が得られた。

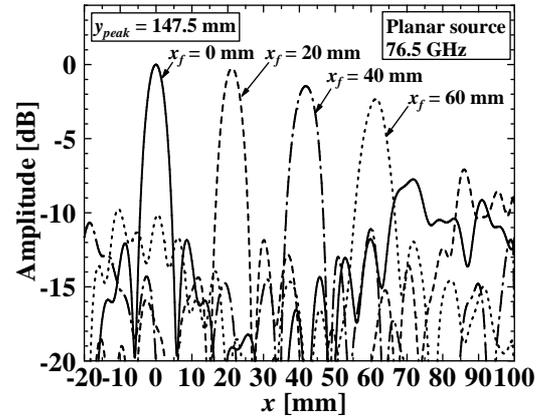
### 5.3 収差

収差について検討するために、 $D = 100$  mm のフレネルレンズと非球面レンズについて光軸からずれた位置の波源励振による 2 次元 FDTD 解析を行った。解析モデルを図 9 に示す。各レンズの焦点距離  $y_{peak}$  における結像点  $x_f$  と原点  $O$  を結ぶ直線に対して垂直な平面波がレンズに一樣に照射するように与えた。この時、 $x_f = 20$  mm, 40 mm, 60 mm となるように角度  $\theta$  をそれぞれ設定した。

$D = 100$  mm の非球面レンズの  $y_{peak} = 125.1$  mm における回折パターンを図 10(a) に、 $D = 100$  mm のフレネルレンズの  $y_{peak} = 147.5$  mm における回折パターンを図 10(b) にそれぞれ示す。非球面レンズについて、 $x_f = 60$  mm の場合の最大振幅は  $x_f = 0$  mm の場合に対して 5.5 dB 減少したのに対し、フレネルレンズは 2.3 dB の減



(a) 非球面レンズ ( $D = 100$  mm)



(b) フレネルレンズ ( $D = 100$  mm)

図10 波源を光軸上からずらした場合の回折パターン

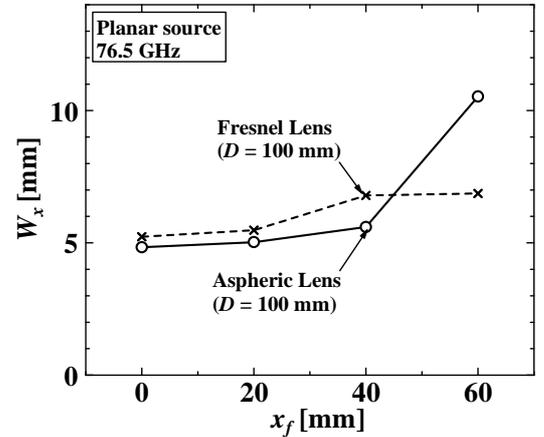


図11  $x_f$  に対するビーム幅  $W_x$  の変化

少であった。

$x_f$  に対するビーム幅  $W_x$  の変化を図 11 に示す。 $x_f = 0 \sim 40$  mm の範囲内では、非球面レンズの方がビーム幅が狭いが、 $x_f = 60$  mm の場合には非球面レンズのビーム幅は 5 mm 程度増加した。いずれのレンズも  $x_f = 0 \sim 40$  mm の範囲内において  $W_x$  の広がりには 1.5 mm 以内であり、この範囲内において収差の影響は少ないと考えられる。

## 6. ま と め

フレネルレンズの設計を行い、2次元FDTD法により3種類のレンズの集光特性を比較・検討した。設計した口径 $D = 100$  mmのフレネルレンズは、同一口径の非球面レンズに比べて焦点における電界振幅が1.4 dB減少したが、レンズ口径を1.4倍にすることにより振幅を2.4 dB向上させることができた。一方、高密度ポリエチレンを材質とした場合のフレネルレンズの重量は、同一のレンズ口径の非球面レンズに比べて32.7 g減少できることがわかった。以上の結果から、フレネルレンズの採用により、口径増加による高分解能化と軽量化の両立が可能であることが明らかとなった。

表1 レンズの基礎特性の比較.

	Asheprc Lens ( $D = 100$ mm)	Fresnel Lens ( $D = 100$ mm)	Fresnel Lens ( $D = 140$ mm)
Weight [g]	85.4	52.7	99.1
Amplitude [dB]	0	-1.4	1.0
$W_y$ [mm]	58.4	60.1	36.2
$W_x$ [mm]	4.68	5.23	4.03

## 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] 安達三郎, “ 電磁波工学, ” コロナ社, 1983.
- [5] 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
- [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] 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.