

[共同研究成果]

小形レンズアンテナの3次元 FDTD 解析

井上大聡 佐藤弘康 澤谷邦男 水野皓司*

東北大学大学院工学研究科

*東北大学電気通信研究所

1. はじめに

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、危険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。マイクロ波、ミリ波を用いたイメージングは人が所持している危険物の検知を実現する技術として期待されており、特にパッシブイメージングは人や物から放射される熱雑音をパッシブに(発信器を使用せずに)受信し、衣服下の危険物を検知・映像化が可能な技術であるため実用化が期待されている(図1, [1], [2])。受信信号が熱雑音という極めて微弱なものであることおよび高画質を得るため、高効率・高分解能のレンズアンテナが要求される。

筆者らはこれまで、効率よくレンズと整合する軸対称指向性、高分解能を得るための狭い開口幅、高感度を得るための広帯域特性を持つ対せき形フェルミアンテナ (Antipodal Fermi Antenna, APFA) の設計を FDTD 法[3]を用いて行ってきた[4]-[7]。多数の構造パラメータを有する APFA の設計には電磁界解析が有効であるが、レンズの設計には一般に光線追跡法が用いられる。しかしながら、アンテナは波長程度の大きさを持ち、像面に配置されるアンテナの放射特性を考慮したレンズアンテナの電磁界解析が望まれる。また、装置の小型化を図るためにも、レンズ口径がミリ波帯において数十λの小形レンズの特性を明らかにすることが望まれる。

以上の背景を踏まえ、本報告ではミリ波パッシブイメージング用小形非球面アルミナレンズ[8]の特性、および APFA を一次放射器とする小形レンズアンテナの特性を得る目的で、3次元 FDTD 解析を行った結果を述べる[9]-[11]。

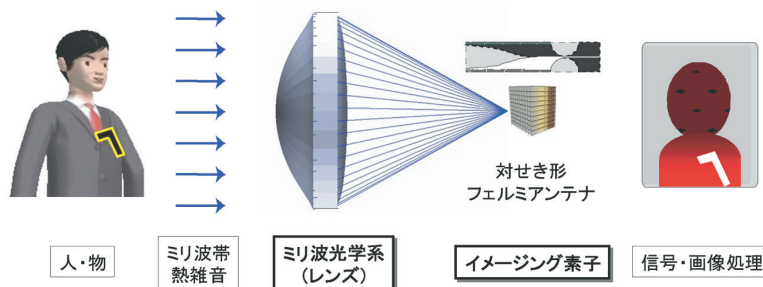


図1 ミリ波パッシブイメージングの概念図

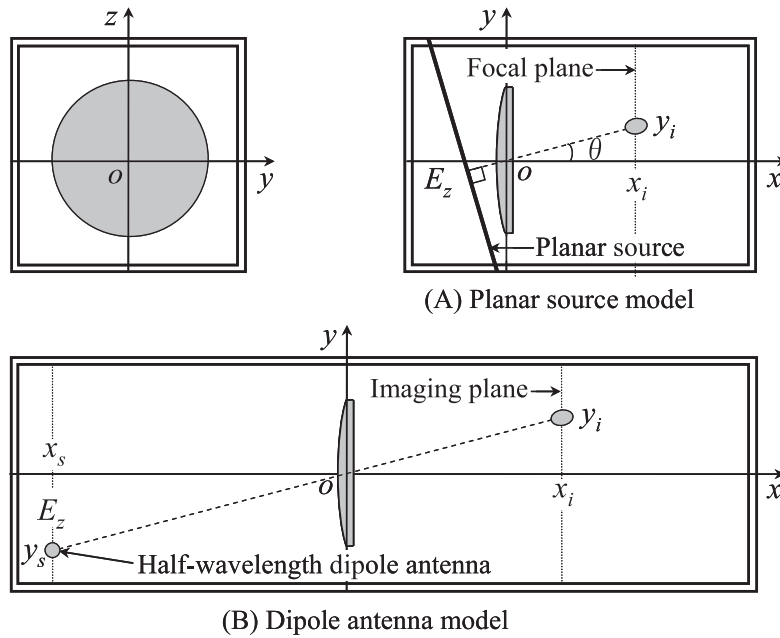


図2 解析モデル (A)平面波入射, (B)半波長ダイポールアンテナ励振

2. レンズの FDTD 解析

2. 1 レンズの構造と解析モデル

レンズは設計周波数を 35GHz ($\lambda = 8.57 \text{ mm}$)とし, 比誘電率が $\epsilon = 9.73$ (アルミナ), 直径 $D = 104.4 \text{ mm}$ (12.2λ), 厚さ $t = 10 \text{ mm}$ (1.17λ)とする. レンズ曲面は光線追跡法を用いて F 値が 1 となるように設計されており, 非球面構造を持っている. レンズの表面には周波数 35GHz に対する整合膜 ($\epsilon = 3.02$, 厚さ 1.2 mm, ポリエーテルエミド) が貼り付けてある[8].

解析モデルを図2に示す. レンズの中心を原点に取り, 平面波入射, 及びダイポールアンテナを波源として用いた. 平面波入射モデルを用いて焦点距離を, ダイポール波源モデルを用いて像面距離を求められる. FDTD 解析において, セルサイズは $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.25 \text{ mm}$, タイムステップ数は 50,000, 励振はガウスパルスとした. 吸収境界条件には 8 層の PML (Perfectly Matched Layer) を用いた. また, レンズから波源までの距離を x_s , レンズから像面までの距離を x_i とする.

2. 2 解析結果

レンズから 200 mm 程度離れた波源の像を得ることを想定し, ダイポールアンテナが $(x_s, y_s, z_s) = (-200 \text{ mm}, 0, 0)$ に置かれた場合の 35 GHz の電界 E_z の強度分布を FDTD 解析により求

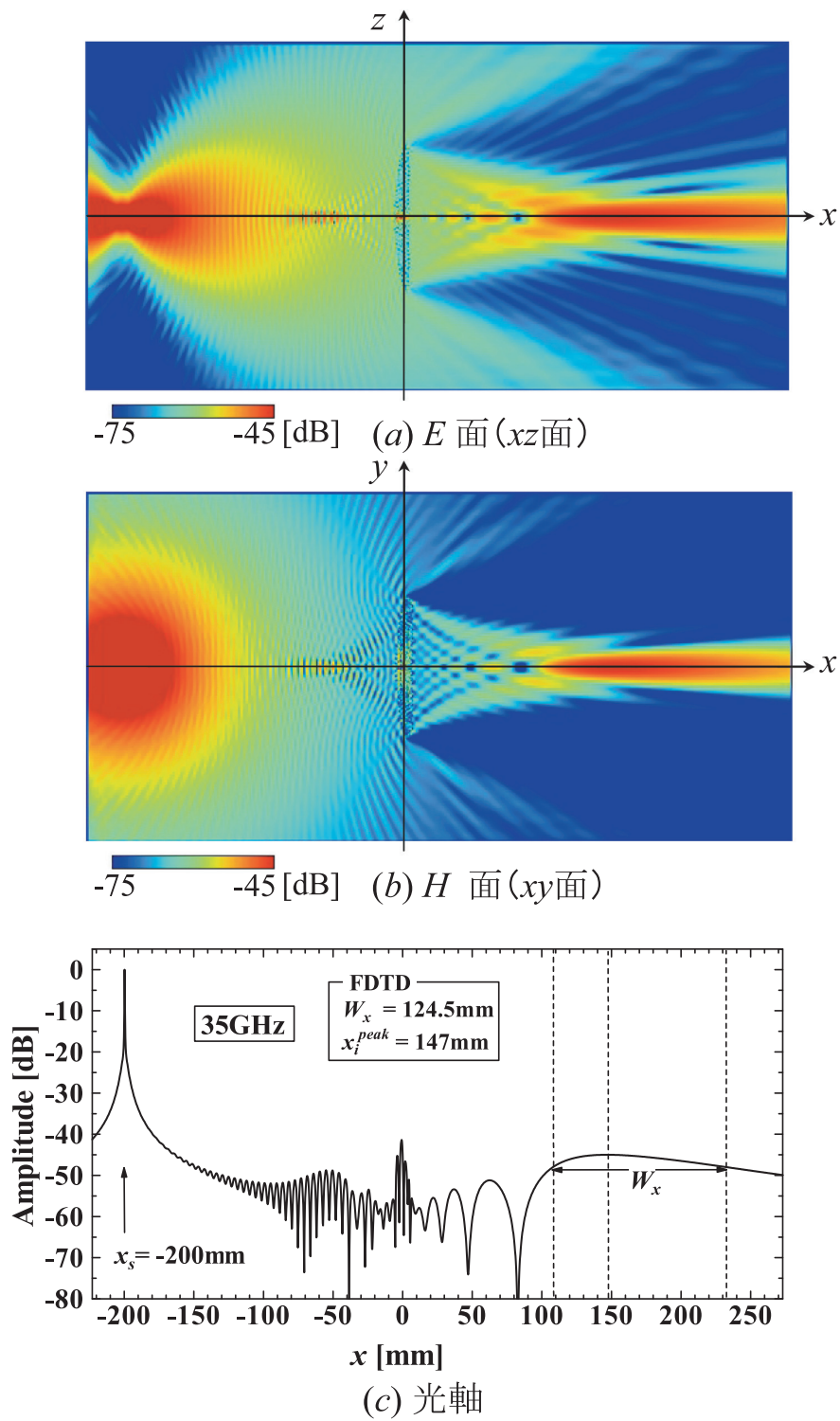


図3 電界強度分布 (ダイポールアンテナ, E_z 成分, $(x_s, y_s, z_s) = (-200\text{ mm}, 0, 0)$, 給電点における振幅で規格化), (a) xy 面 ($z = 0$), (b) x 軸 (光軸) 上

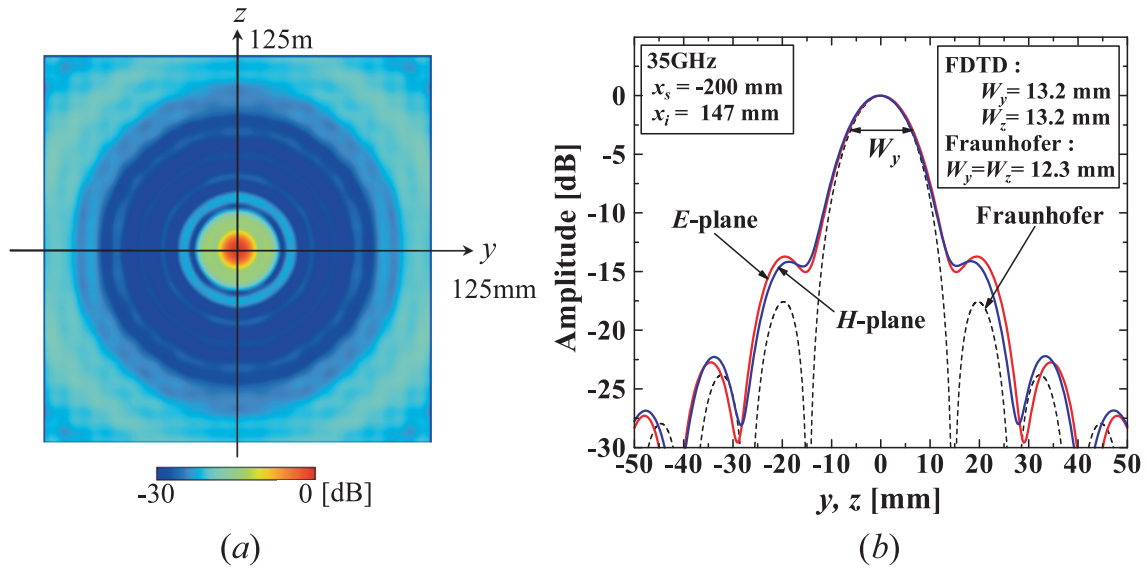


図4 $x_i = 147 \text{ mm}$ における回折パターン (E_z 成分, $(x_s, y_s) = (-200 \text{ mm}, 0)$, 最大振幅で規格化), (a) yz 面, (b) ダイポールアンテナの E 面と H 面

めた. これを図3に示す. 振幅はダイポールアンテナの給電点における値で規格化した. 図3(a)はダイポールアンテナの E 面を含む xz 面, 図3(b)は H 面を含む xy 面の分布である. ダイポールアンテナから放射された電界がレンズを介して結像される様子がわかる. E 面と H 面共にレンズ端部における回折が観測されている. また, ダイポールアンテナの E 面の指向性, H 面の無指向性を基にする分布の違いが観測されており, 特に $x > 0$ のレンズ近傍の領域 (フレネル領域) の振幅分布の違いは興味深い. 図3(c)は光軸 (x 軸) に沿う分布である. $x_s = -200 \text{ mm}$ の位置から伝搬損失による振幅の減衰が観測されているが, レンズ内部において共振しており振幅が上昇している. また, $x < 0$ のレンズ近傍では反射の影響により半波長周期の定在波が観測されている. $x > 0$ の領域では像面距離 $x_i^{peak} = 147 \text{ mm}$ において振幅が最大となり, 光線追跡法によって光学的に得られた像面距離 192 mm とは異なる結果であった. 光軸 (x 軸) に沿う方向の 3dB 幅は $W_x = 124.5\text{mm}$ (14.5λ) であり, 広い焦点深度が得られた.

$x_i^{peak} = 147 \text{ mm}$ における電界強度分布 (回折パターン) を図4に示す. 振幅は最大値で規格化した. 図4(a)は yz 面の分布, 図4(b)は E 面 (z 軸) と H 面 (y 軸) を含む分布である. 比較のため, (b)には円形開口に平面波が入射した場合の遠方近似 (フランホーファー近似) に基づく回折パターン

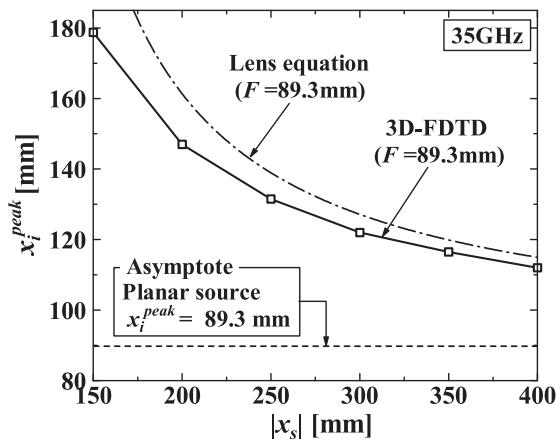


図5 波源距離に対する像面距離の変化

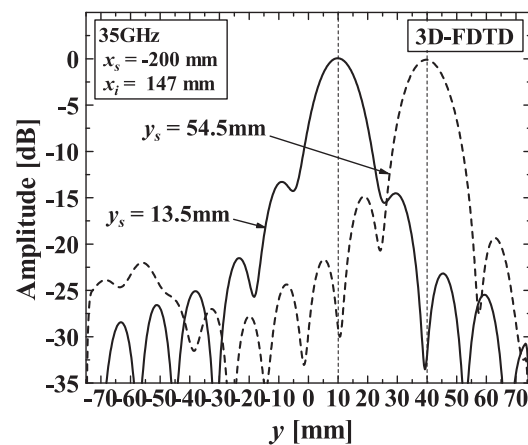


図6 $y_s = 13.5 \text{ mm}, 54.5 \text{ mm}$ のときの回折パターン

$$E(R) = \frac{\pi D^2}{2} \left[\frac{J_1(R)}{R} \right], \quad R = \frac{\pi D r}{\lambda x_i} \quad (1)$$

を合わせて示した. ここで D はレンズ口径, λ は波長, x_i は像面距離であり, J_1 は第1種ベッセル関数である. 図4(a)の分布においてほぼ円形の回折像が観測され, 図4(b)の分布においては E 面, H 面共にほぼ一致する回折パターンが観測された. 式(1)の第1暗線(エアリーディスク)位置は $r = 14.7 \text{ mm}$ であるが, FDTD法による計算値では暗線の位置がほぼ等しいものの, 振幅は -15 dB 程度の高い値であった. 3dB 幅 W_y, W_z は FDTD 解析値が 13.2 mm , 式(1)が 12.3 mm の概ね等しい値であった. 式(1)は遠方近似であるため両者が必ずしも一致する必要はなく, むしろレンズの厚さやレンズ端部の回折波, フレネル領域における電磁界のふるまいを含む FDTD 解析結果が高精度と考えられる.

レンズとダイポールアンテナの距離(波源距離) x_s を変化させたときの像面距離 x_i^{peak} の変化, および図2の平面波入射の解析モデル(A)を用いて得た焦点距離 F を図5に合わせて示す. 平面波入射の解析で得られた焦点距離は $F = 89.3 \text{ mm}$ であり, ダイポールアンテナがレンズから離れるにつれて像面距離 x_i^{peak} は F に漸近する. 参考までに, F と x_s , およびレンズの公式

$$\frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_i} = \frac{1}{F} \quad (2)$$

により算出した像面距離 x_i^{peak} (一点鎖線) も示した. レンズ公式で求めた像面距離は FDTD 法により求めた像面距離とは異なる結果が得られた.

ダイポールアンテナを y 方向に移動したときの像面における回折パターンを計算した. W_y の広がり光学における収差を表しており, 収差が小さくなる y の範囲でぼけの少な

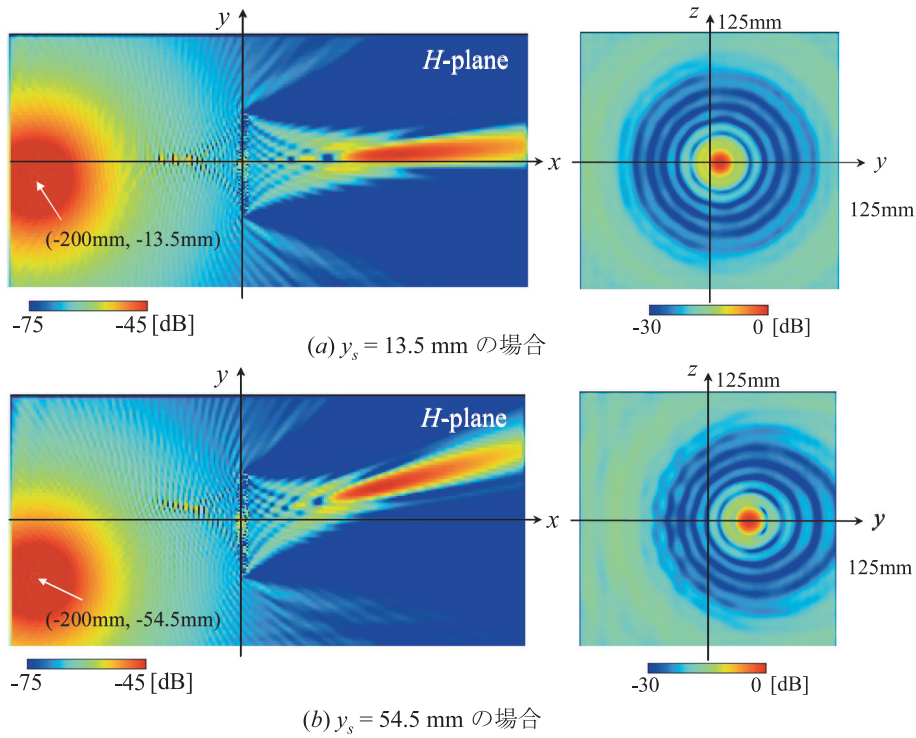


図7 y_s を変化したときの電界強度分布 (ダイポールアンテナ, E_z 成分)
 (a) $y_s = 13.5$ mm の場合, (b) $y_s = 54.5$ mm の場合

い視野が決まる. $y_s = 13.5$ mm, 54.5mm のときの回折パターンを図6に, 電界強度分布を図7に示す. $y_s = 54.5$ mm まで大きくしても W_y の変化, および振幅の低下も小さく, サイドローブはむしろ改善する結果が得られた. 以上の結果から, 距離 $x_s = -200$ mm の物体面では視野 100 mm \times 100 mm においてぼけの無い画像が期待できるものと考えられる.

3. APFA レンズアンテナの FDTD 解析

3. 1 APFA の位相中心

前節で求めたレンズの焦点距離 F の位置に1次放射器を配置してレンズアンテナを構成することを考える. パッシブイメージングにおいて, 検出するミリ波帯の熱雑音電力はアンテナの帯域に比例するため, 広帯域特性を持つアンテナが望まれる. 本稿では受信アンテナとして広帯域特性, およびレンズを見込む角度を照射する軸対称指向性を有する対称形フェルミアンテナ (APFA) を用いたレンズアンテナを解析する[9]. APFA は 35GHz を設計周波数として幅 λ , 長さ 4λ である.

初めに APFA の複素振幅放射パターンを FDTD 解析により求め, APFA の位相中心 p_x

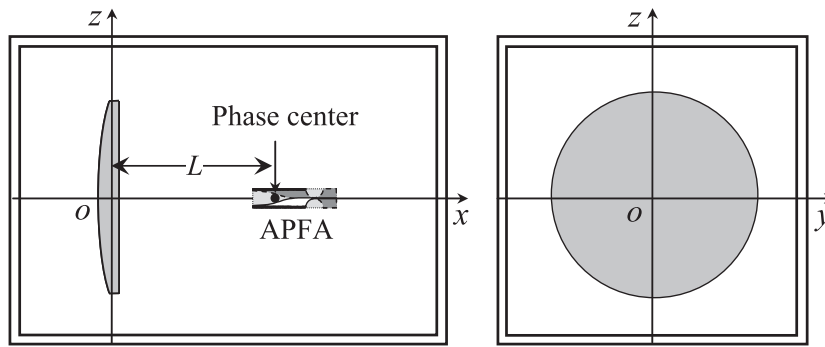


図8 APFAを素子とするレンズアンテナの解析モデル

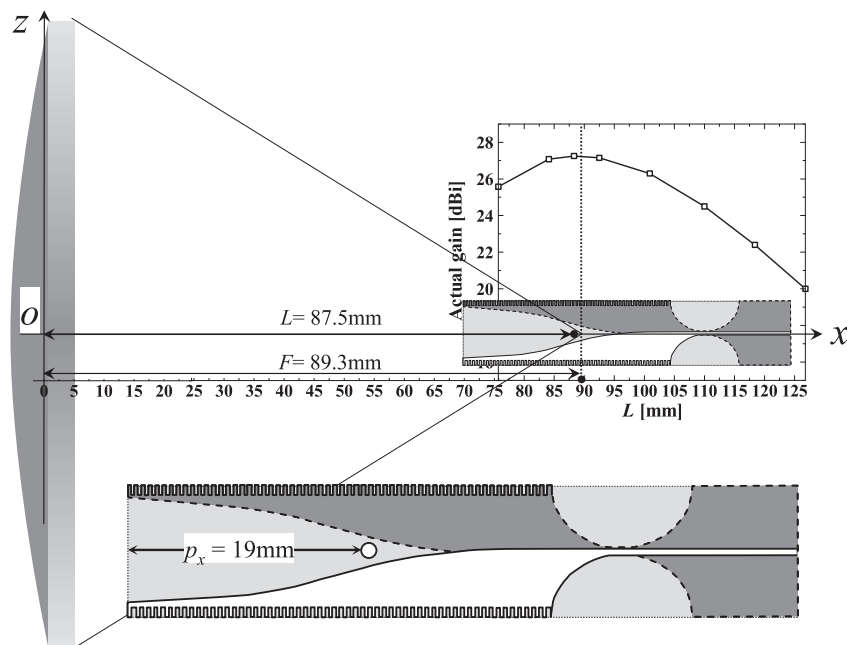


図9 レンズと位相中心間の距離 L を変化したときの APFA レンズアンテナの動作利得

を求めた。位相中心とは、その位置を中心とした場合に指向性の位相が一定となる位置である[6]。本稿では紙面の都合上導出過程を省略するが、APFAのE面とH面の位相中心の平均値として定義した位相中心は、アンテナ先端から $p_x = 19\text{mm}$ であった。これをアンテナの形状と共に図9に示す。

3.2 解析結果

APFA レンズアンテナの解析モデルを図8に示す。レンズとAPFAの位相中心間の距離を L とし、 L を変化させたときのレンズアンテナの動作利得を求めた。これを図9に示す。レンズとアンテナの相対的な大きさがわかるように工夫してある。 $L = 87.5\text{mm}$ のときに最大の動作利得 27.2dBi が得られた。この結果から、2節で得られたレンズの焦点距離 $F =$

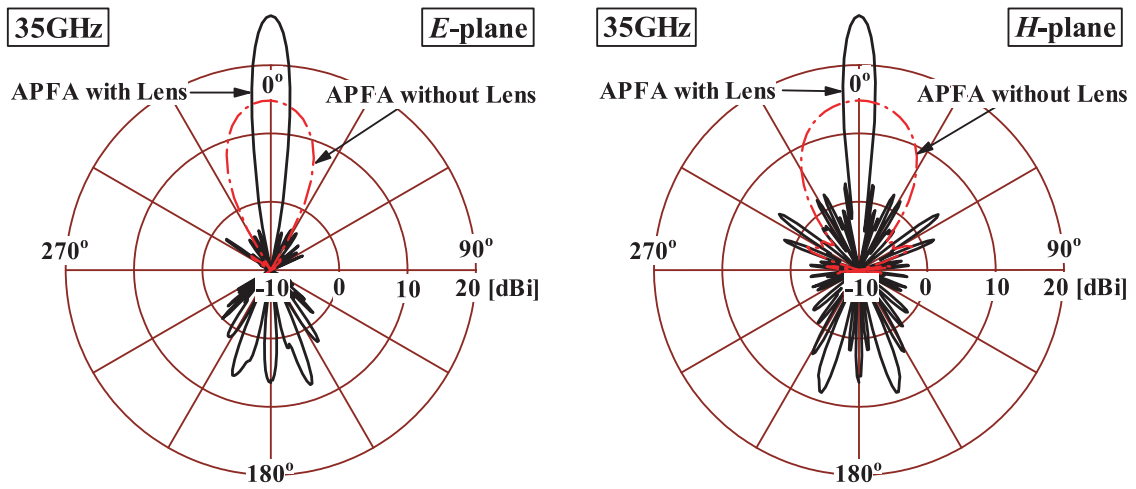
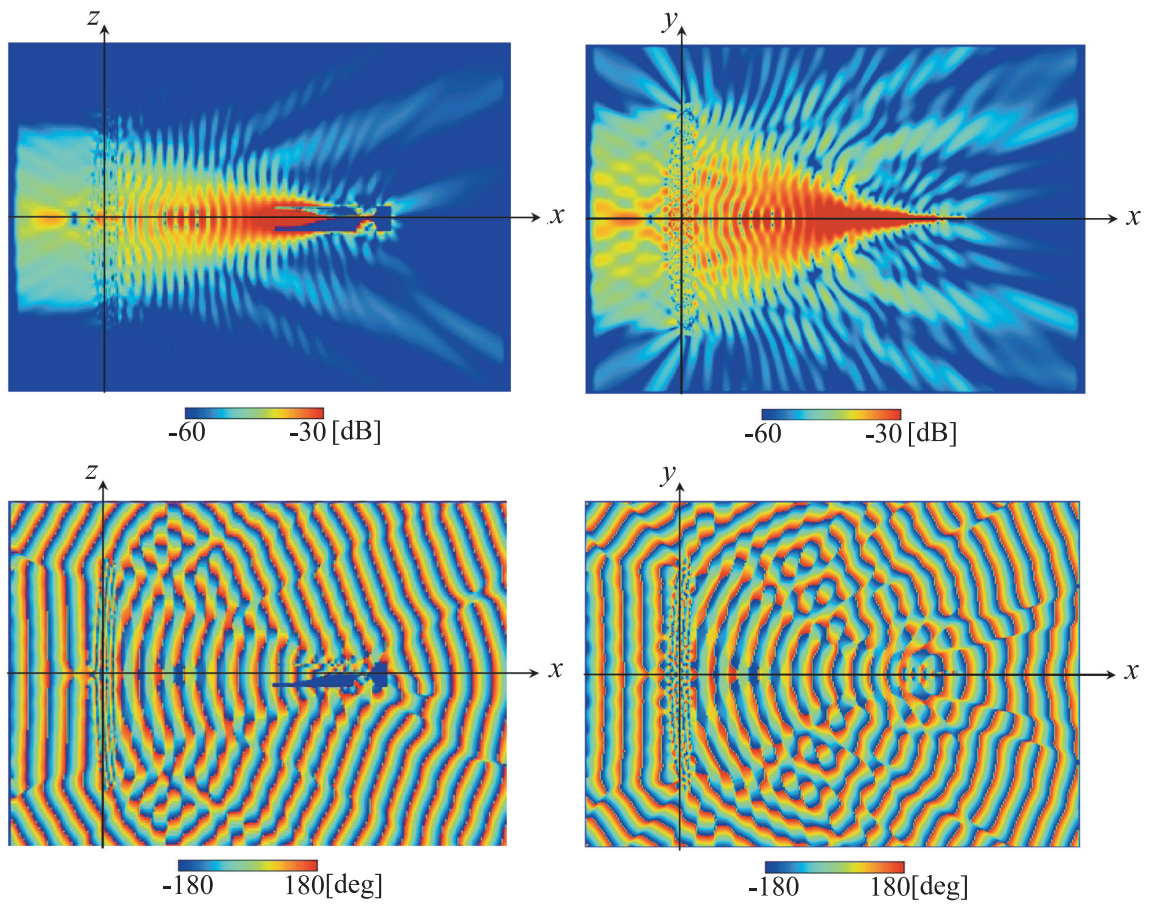


図 10 APFA レンズアンテナの動作利得パターン



(a) E 面 (xz 面)

(b) H 面 (xy 面)

図 11 APFA レンズアンテナの電界 E_z 分布 (上段: 振幅, 下段: 位相)

(a) APFA の E 面 (xz 面), (b) APFA の H 面 (xy 面)

89.3 mmの位置に位相中心を一致させたときにレンズアンテナの効率が最大となることがわかった。 $L = 87.5$ mm のときの動作利得パターンを APFA の動作利得パターンと共に図 10 に示す。 APFA レンズアンテナのビーム幅は E 面, H 面それぞれ 6.8° , 6.2° の値が得られた。 $L = 87.5$ mm のときの APFA レンズアンテナの E 面と H 面の電界 E_z 分布を図 11 (a), (b) にそれぞれ示す。 図の上段は振幅分布, 下段は位相分布である。 E 面と H 面共にレンズの開口面において概ね一様な振幅と位相が得られていることがわかる。 実効開口面積は E 面の方がわずかに狭いが, これは APFA 単体の E 面放射パターンのビーム幅が H 面よりもわずかに狭いため, レンズの端部まで照射できなかったためと考えられる。 また, E 面と H 面の振幅分布双方において, レンズの表面における反射によって生じた後方放射が観測されている。 特に H 面の場合の反射が大きく, その効果は図 10 の動作利得パターンのバックローブとして観測されている。

4. むすび

小形レンズの基礎特性について3次元 FDTD 解析を用いて評価した。 また, 対せき形フェルミアンテナを1次放射器とするレンズアンテナの FDTD 解析を行った。 その結果, 光線追跡法や近似解析では得難い知見が得られた。 また, APFA レンズアンテナの動作利得を最大にするためには, APFA の軸対称指向性に加え, レンズの焦点距離と位相中心を一致させる必要があることが解析により明らかとなった。 なお, APFA のように複雑な構造を有するアンテナの3次元電磁界解析には, 大規模なメモリと高速演算処理が不可欠であり, スーパーコンピュータの利用が不可欠であることを付してむすびとする。

謝辞

本研究の一部は東北大学情報シナジーセンター(現東北大学サイバーサイエンスセンター)のスーパーコンピュータを利用し, 同センターとの共同研究で行われたものである。 また, 研究にあたっては同センターの有益なご指導と多大な協力をいただいた。 なお, 本研究の一部は文部科学省安全・安心科学技術研究プロジェクト「ミリ波パッシブ撮像装置の開発」(研究代表者佐藤弘康)の助成を得て行われた。

参考文献

- [1] K. Mizuno, "Millimeter wave imaging technologies (Invited)," Proc. 2001 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.394-398, Taipei, Dec. 2001.
- [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 電子情報通信学会総合大会, CS-4-1, 松山, 2009.
- [3] 宇野亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998.
- [4] Y. Takagi, H. Sato, Y. Wagatsuma, K. Mizuno, and K. Sawaya, "Study of High Gain and Broadband Antipodal Fermi Antenna With Corrugation," Proceedings of 2004 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP'04), 1B2-1, pp69—72, Sendai, 2004.
- [5] H. Sato, Y. Takagi, Y. Wagatsuma, K. Mizuno, and K. Sawaya, "Time Domain Characteristics of Broadband Antipodal Fermi Antenna and Its Application To Through Wall Imaging," 2005 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP'05), Vol. I, pp. 387—390, Seoul, Korea, 2005.
- [6] H. Sato, K. Nakanishi, and K. Sawaya, "Delay Center of Broadband Antipodal Fermi Antenna and Its Application To Localization of Conducting Scatterer," 2007 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP'07), 1A4-5, pp. 41—44, Niigata, 2007.
- [7] H. Sato, Y. Murakami, K. Sawaya, and K. Mizuno, "FDTD Analysis of 81-element Antipodal Fermi Antenna Array with Axially Symmetric Array Element Pattern," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, USA, 2008.
- [8] 的野 春樹, 我妻 壽彦, 水野 皓司, "ミリ波帯小型パッシブイメージング装置, "2004 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-107, 2004.
- [9] 井上 大聡, 村上 仁康, 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 水野 皓司, "誘電体レンズアンテナの 3 次元 FDTD 解析, "2007 年電子情報通信学会総合大会, 名古屋, Mar. 2007.
- [10] 井上 大聡, 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用誘電体レンズの 2 次元 FDTD 解析, "電子情報通信学会技術研究報告, AP2007-142, pp.117-122, 沖縄, Jan. 2008.
- [11] 井上 大聡, 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 水野 皓司, "ミリ波イメージング用小形誘電体レンズアンテナの設計, "電子情報通信学会技術研究報告, AP2008-131, pp.115-120, 金沢, Nov. 2008.