

## [共同研究成果]

# コルゲート構造付ミリ波フェルミアンテナの FDTD 解析

佐藤弘康 澤谷邦男 新井直人\* 我妻寿彦\* 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

ミリ波を用いたパッシブイメージングは天候に左右されずに対象物のイメージを得ることができることから、その実用化が期待されている。高性能なリアルタイムミリ波パッシブイメージングを実現するためには、イメージング用受信素子に適したアンテナの開発が重要である。要求されるアンテナの特性は、広帯域でかつ集積化やアレー化が容易であることに加え、アレー素子の数がイメージングの画素を決定することから所定の面積にできるだけ多くのアンテナを配列できること、レンズアンテナとの整合のために E 面指向性と H 面指向性がほぼ等しいことなどが挙げられる。

これらの要求を満足するアンテナとして、筆者らはフェルミアンテナと呼ばれるテーパスロットアンテナ(Tapered Slot Antenna, TSA)の研究を行ってきた[1],[2]。フェルミアンテナはテーパ形状がフェルミディラック関数で表され、また誘電体基板の外側にコルゲート構造を持つ TSA である。フェルミアンテナを含む TSA はテーパ形状の関数、アンテナ長、開口幅、有限の基板幅、厚さ、比誘電率など多数の構造パラメータを有し、これらの変化に対して放射特性が大きく変化する。このため設計は主に実験による経験的な方法や、近似的な計算によるが多かった。

一方、近年の計算機能力の進歩により、複雑な構造のアンテナに対して高精度な電磁界の数値解析が可能となってきた。また数値解析を用いて電磁界を視覚的に表すことにより、動作メカニズムの把握が可能であるため、実験と補対的な役割を担う手段として盛んに用いられるようになった。特に FDTD (Finite Difference Time Domain) 法(有限差分時間領域法)[3]はモーメント法や有限要素法に比べて定式化が簡単であり、比較的容易に誘電体を含む問題に対して解析が可能であるという特徴を有している。

そこで本論文では、コルゲート構造付フェルミアンテナの広帯域 FDTD 解析を行い、動作のメカニズムについて検討した結果を述べる。

## 2. 解析モデル

フェルミアンテナの構造を図1に示す．このアンテナの特徴は，フェルミディラック関数(以下フェルミ関数)で表されるテーパ形状，及び誘電体基板の外側に歯形周期構造であるコルゲート構造を持つことである．フェルミ関数は量子力学において電子のエネルギー準位を表す関数として知られており，

$$f(x) = \frac{a}{1 + e^{-b(x-c)}} \quad (1)$$

で与えられる．ここで  $a, b, c$  はテーパの形状を表すパラメータである． $a$  は  $x \rightarrow \infty$  における関数の漸近値を表わし， $c$  は関数の変曲点である．また， $f'(c) = ab/4$  であり， $b$  は変曲点における接線の傾きを決めるパラメータとなる．ここで  $f(c) = a/2$  の関係があり，また， $b(L-c) \gg 1$  であれば，開口幅は  $W = 2a$  で与えられる．

設計周波数を 35GHz としたときのフェルミアンテナの構造パラメータを表1に示す．誘電体基板の比誘電率は 3.7 とした．解析においてセルサイズは  $\Delta x = 0.1714\text{mm}$   $\Delta y = 0.1\text{mm}$ ， $\Delta z = 0.05\text{mm}$ ，解析領域は  $319 \times 59 \times 339$  とし，吸収境界条件は 8 層の PML (Perfectly Matched Layer) を用いた．また，給電は図1の原点でガウスパルスを励振して行った．

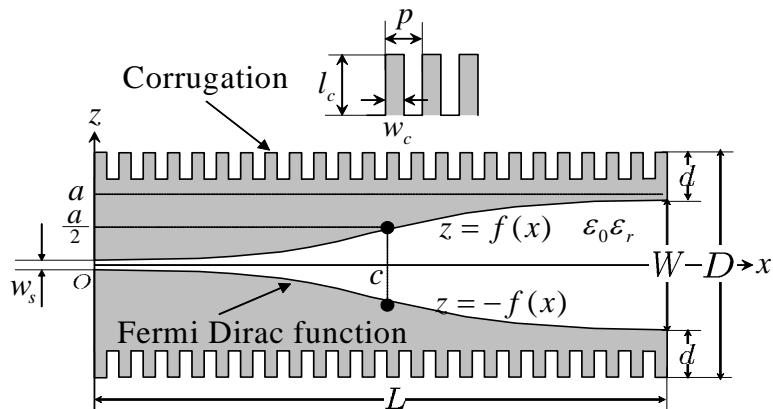


図1 フェルミアンテナの構造

表 1 フェルミアンテナの構造パラメータ

寸法の名称	[mm]	$\lambda@35\text{GHz}$	セル分割数
アンテナ長 $L$	34.28	4	$200\Delta x$
開口幅 $W$	7.8	0.91	$156\Delta z$
基板端・開口端距離 $d$	1.15	0.13	$23\Delta z$
基板幅 $D$	10.1	1.18	$202\Delta z$
基板厚さ $h$	0.2	0.02	$2\Delta y$
コルゲート長 $l_c$	1.1	0.13	$22\Delta z$
コルゲート幅 $w_c$	0.3428	0.04	$2\Delta x$
コルゲートピッチ $p$	0.6856	0.08	$4\Delta x$
スロット線路幅 $w_s$	0.1	0.01	$2\Delta z$

$$a=1.35\text{mm}, b=280, c=17.14\text{mm}, 2a=W, f(c)=a/2$$

$$\Delta x=0.1714\text{mm}, \Delta y=0.1\text{mm}, \Delta z=0.05\text{mm}$$

### 3. 解析結果

まず、コルゲート構造の有無に対する考察を行った。VSWR (Voltage Standing Wave Ratio: 電圧定在波比) の周波数特性を図 2 に示す。VSWR が 1 に近いほど給電スロット線路との整合が取れていることを表す。コルゲート構造がない場合、VSWR は大きく振動し、広帯域性をもっていないのに対して、コルゲート構造がある場合、 $VSWR < 2$  となる比帯域 1:2 が得られ、広帯域性をもっている。

周波数 35GHz における E 面及び H 面の動作利得パターンを図 3 に示す。コルゲート構造がある場合、主ビームの軸対称性が改善され、E 面、H 面共に低サイドローレベルとなる結果が得られた。コルゲート構造がある場合とない場合の動作利得はそれぞれ 14.4dBi, 9.7dB であり、コルゲート構造を設けることにより 4.7dB 利得が増加した。

なお、計算に要した CPU 時間はスーパーコンピュータ (SX-7: NEC 製) の 32 並列処理を用いて約 130 分であった。

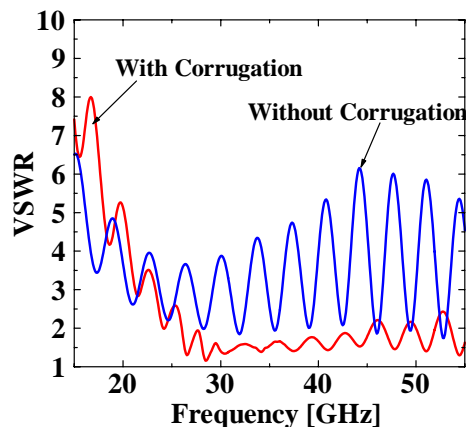
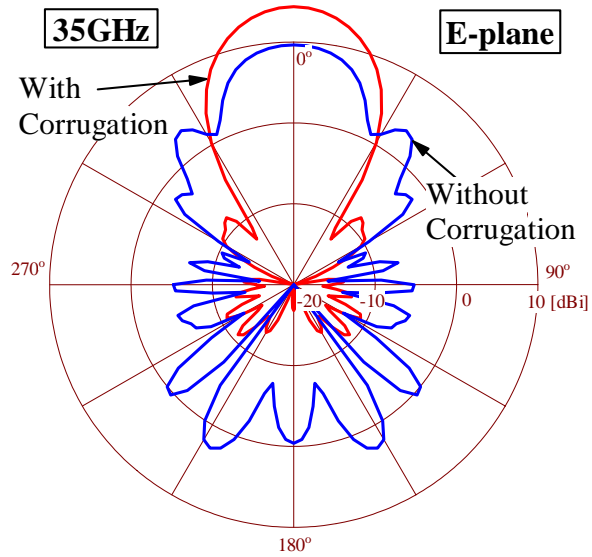
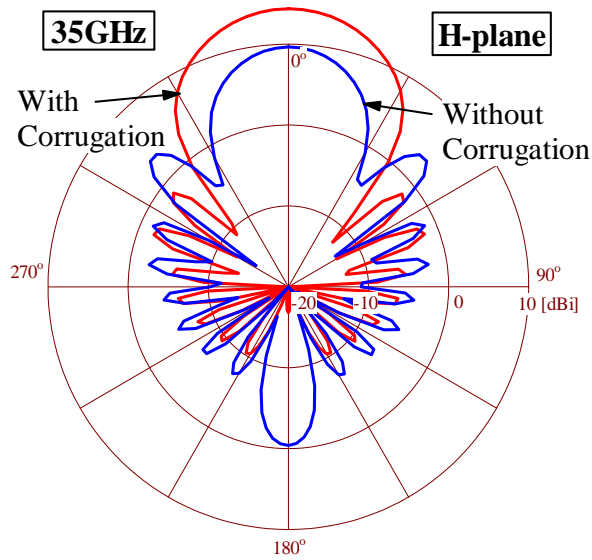


図 2 VSWR の周波数特性



(a) E 面



(b) H 面

図 3 動作利得パターン

#### 4．動作メカニズムの考察

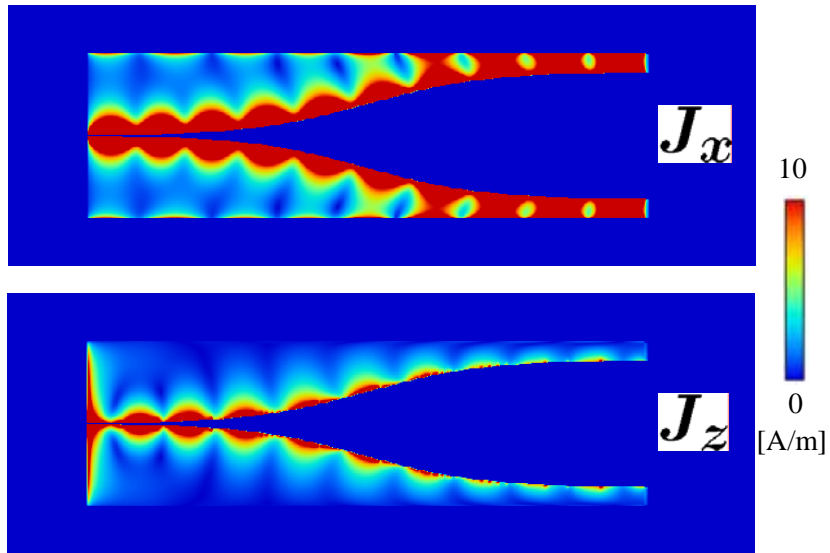
周波数 35GHzにおけるアンテナ導体面の電流分布を図 4 に示す．(a)，(b)はそれぞれコルゲート構造がない場合とある場合の結果である．ここで，電流の振幅は入射電力 1W に対する値を表す．コルゲート構造がない場合，電流 $J_x$ はテーパに沿って先端まで強く，変曲点付近から基板端も励振されており，電流 $J_z$ はテーパに沿って減衰している．コルゲート構造がある場合，電流 $J_x$ はテーパに沿って減衰し，電流 $J_z$ はコルゲート構造全体で強く励振されている．

周波数 35GHzにおけるアンテナ導体面を含む面の電界 $E_z$ 位相分布を図 5 に示す．コルゲート構造がない場合，テーパの内側で進行波が観測されているが，テーパの外側の位相は内側と異なっている．一方，コルゲート構造があるとテーパの外側にも進行波が観測されており，内外の位相が等しく，アンテナの実効開口面積が広がっている．

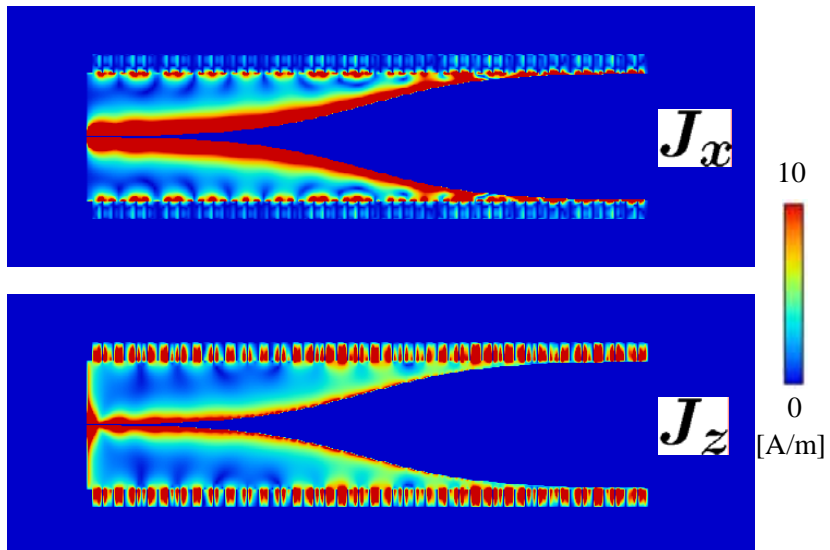
以上の結果から，コルゲート構造付フェルミアンテナの動作を次のように説明することができるものと考えられる．

1. コルゲート構造のない狭い基板幅のフェルミアンテナは電流が基板端で強く励振され，先端開放の平行線路の動作となり，サイドローブ特性及び VSWR 特性を劣化させる．
2. コルゲート構造は電流の  $x$  成分を  $z$  成分に変換する役割をもつ．
3. 電流の  $z$  成分はテーパ内外で  $x$  方向に同位相の電磁波を放射し，アンテナの実効開口面積が大きくなり利得の増加に寄与する．

なお，フェルミ関数テーパ形状は，従来 TSA でよく使用される直線状テーパや指数関数テーパにくらべ電流が基板端で励振されやすくなり，コルゲート構造と相性のよいテーパ形状と考えられる．



(a) コルゲート構造がない場合



(b) コルゲート構造がある場合

図 4 電流分布

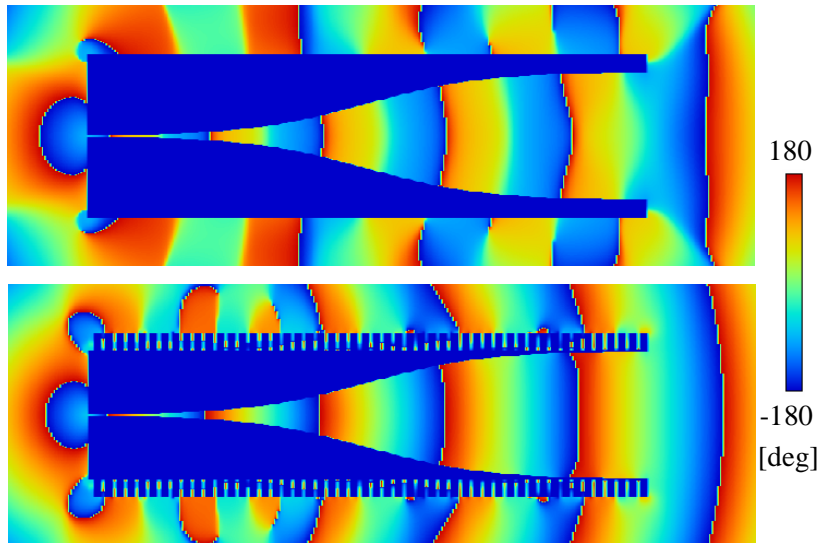


図5 電界 $E_2$ 位相分布

## 5 . むすび

スーパーコンピュータを用いてコルゲート構造付ミリ波イメージング用フェルミアンテナの FDTD 解析を行った。アンテナの動作メカニズムを明らかにするため、いくつかのアンテナ特性を計算した結果、大幅な特性の向上が確認された。

## 謝辞

本研究の一部は東北大学情報シナジー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。

## 参考文献

- [1] H. Sato, K. Sawaya, N. Arai, S. Wagatsuma and K. Mizuno, "Broadband FDTD Analysis of Fermi Antenna with Narrow Width Substrate," 2003 IEEE AP-S Int. Symp. National Radio Science Meeting, June 2003.
- [2] 佐藤, 新井, 我妻, 澤谷, 水野, "コルゲート構造付ミリ波フェルミアンテナの設計", 電子情報通信学会論文誌 (2003年9月掲載予定)
- [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