

Blockage Loss by Feed Horn Array Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

フィード・ホーン群による遮蔽損失 武安義幸 / JA6XKQ

マルチ・バンドで運用する EME 用の大型パラボラ・アンテナには、そのフィード群に苦労が見て取れる。複数フィードに起因するアンテナ総合性能の劣化ができるだけ少なくなるように、専ら構造的な制約を優先させて配置を決定するのがアマチュアであろう。しかし、「できるだけ少なく」という思い、あるいは設計思想を数値的に予見して、その結果を確認するのは容易ではない。そこで、NEC2++ を用いてシミュレーションを行い、実測値との比較検討を行った。

はじめに

このプロジェクトは、EME のメーリングリスト [1] で見た投稿がきっかけである。それは、DL2LAC Ernst-Guenther Carstensen 氏の “using 4nec2 for modeling 4m dish on 10 ghz?” という投稿で、「4nec2 [2] を用いて 4 m ディッシュの特性シミュレーションを 10 GHz でトライしているが、結果が変だ。4nec2 の使用は不適切だろうか？」という質問であった。4nec2 に始まり、NEC2++ でシミュレーションを続けてきた者としては、「4nec2 の使用は不適切です」と即答したいところである。しかし、他の方の回答を見てみたいので、一週間ほど静観してみた。しばらく様子を見るも、誰からも返信がないので、Carstensen 氏に直接メールを送って、「4nec2 の使用は不適切である」とことと、これまでの NEC2++ での経験を伝えた。

氏のシミュレーションの目的は二つあり、一つは電波防護指針の観点からアンテナの近傍電界を計算すること、もう一つはマルチバンドで運用しているディッシュの 10 GHz での性能に改善の余地があるのではないかと思ひ、それを数値で知りたいことである。

NEC2++ と所有する PC リソースで、氏が目的とするシミュレーションが可能であろうと考え、協力を申し出た。近傍電界のシミュレーションはモデル・サイズと PC リソースとの折り合いが課題であり、近傍電界の計算自体は経験済みで問題は特になく、言わば力技で解決できる。一方、複数のフィード・ホーンを擁したディッシュでは、フィードの輻射パターンが非対称となること、ホーン群による遮蔽によるサイドローブの劣化および遮蔽損失が予想され、これらの評価にはひじょうに興味がそそられる。

ここでは、氏の目的のうち後者についてシミュレーションと考察を行う。

シミュレーションの方針

DL2LAC のアンテナは 図-1 に示すように、直径 4 m のソリッド・ディッシュに 1.2 GHz 帯、2.3 GHz 帯、3.4 GHz 帯および 5.7 GHz 帯のセプタム・ポーラライザ型ホーンと、10 GHz 帯のチョーク・リング型ホーンのホーン群を装備している。ホーン群を 図-2 に示す。各ホーン・アンテナの寸法とその配置を 付録 に示す。ホーン群においては、10 GHz 帯のフィード・ホーンがディッシュの焦点に合致している。その他のフィード・ホーンは、焦点からオフセットした位置にある。ちなみに、このようなマルチ・バンドの大型パラボラ・アンテナを用いて、マルチ・バンドでの EME 運用を維持していることは、驚きである。

直径 4 m のディッシュと 5 バンドのフィード・ホーン群をまとめて一つのモデルとしてシミュレーションできれば、解析として理想的である。しかし、所有する PC リソースのメモリ容量の観点で、一つのモデルとしてシミュレーションできない。したがって、分割したモデルを用いて、次のような方針でシミュレーションを行う。



図-1 : DL2LAC 局の 4 m ディッシュ (写真提供: E. G. Carstensen 氏)

- 1 10 GHz の チョーク・リング型ホーン単独とフィード・ホーン群でのフィードの開口面効率 (Aperture Efficiency) を比較する。
- 2 ホーン群の RCS (Radar Cross Section = レーダー散乱断面積) を用いて遮蔽損失を比較する。
- 3 メモリ容量が許す範囲内で、ホーン群とディッシュの総合特性をシミュレーションする。

当初は、二つの方針でシミュレーションを開始したが、分割したモデルのシミュレーションとアンテナ総合での特性の相関性を確認するために、三つ目の方針を追加した。

ホーン・アンテナのシミュレーション・モデル

ホーン・アンテナを NEC2++ でシミュレーションするにあたっては、Surface Patch を専ら使用してきた。[3] [4] Surface Patch は反射について表裏があること、閉じた面の記述のみに限られること等の制約があり、厳密にはホーン・アンテナのモデル化には適さない。しか

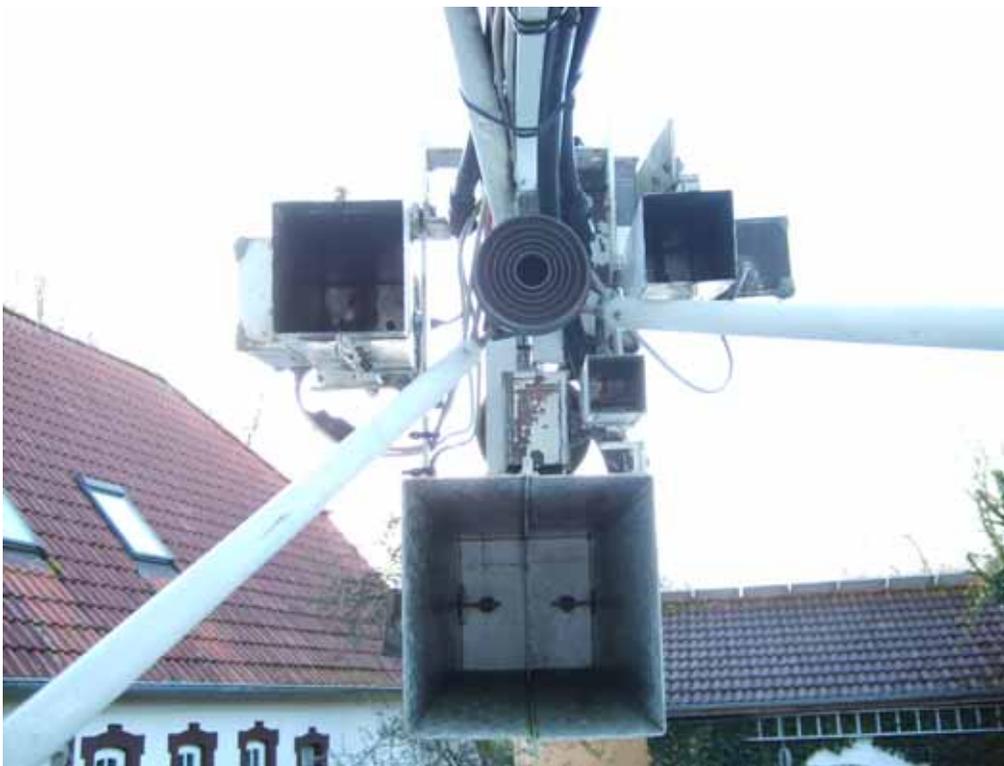


図-2 : フィード・ホーン群 (写真提供: E. G. Carstensen 氏)

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

し、制約を越えて Surface Patch を使用することに起因する結果の誤り/誤差は把握可能であり、Thin Wire で金属面をモデル化するよりも少ないモデル・サイズで有意な結果が得られることが経験則としてある。今回のモデル作成にも Surface Patch を用いるので、モデルの有効性をホーン・アンテナ単体の時点で確認する。今回のシミュレーションでは経験済みの輻射パターンのみならず、平面波を入射させる RCS の評価も行うので、輻射と反射の二つの観点でモデルの有効性を確認する。

モデル有効性確認の詳細は別稿 [5] [6] にまとめる。輻射パターンとその開口面効率のシミュレーションでは、フィードとして輻射を担うチョーク・リング型ホーン・アンテナに内面のみを Surface Patch で記述したモデル (Thin Plate Model と称する) と、ホーン群としては

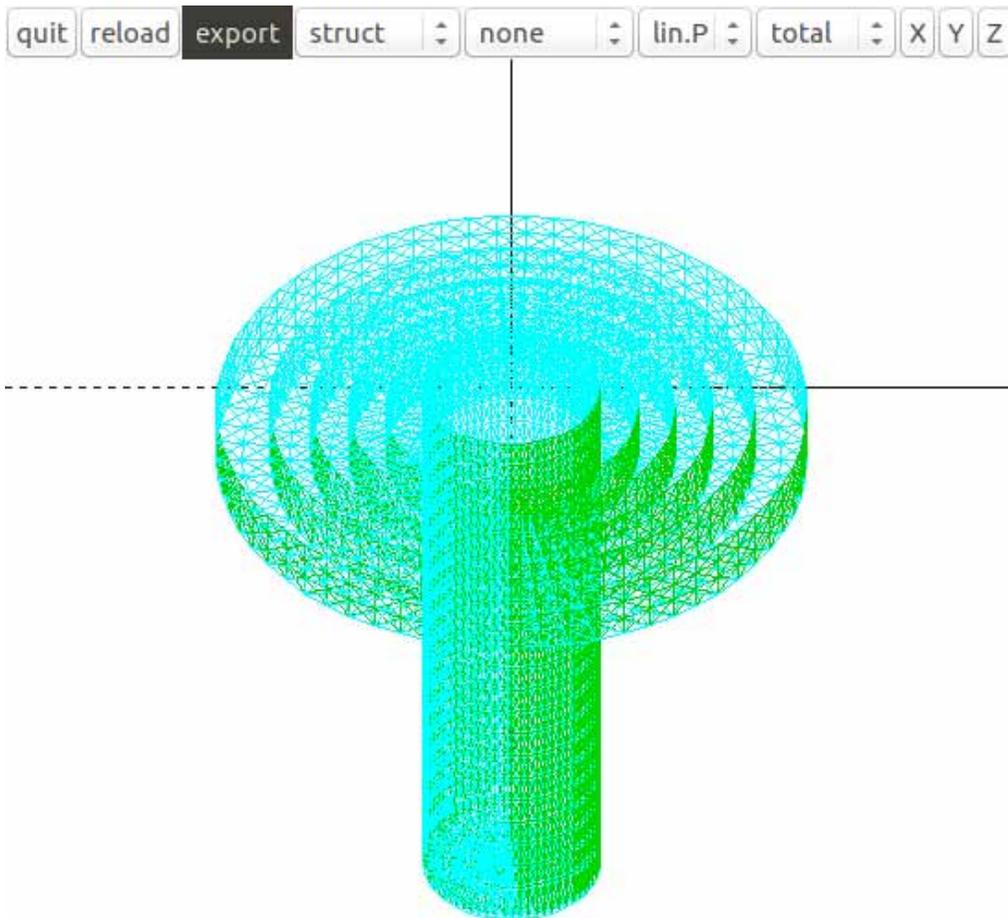


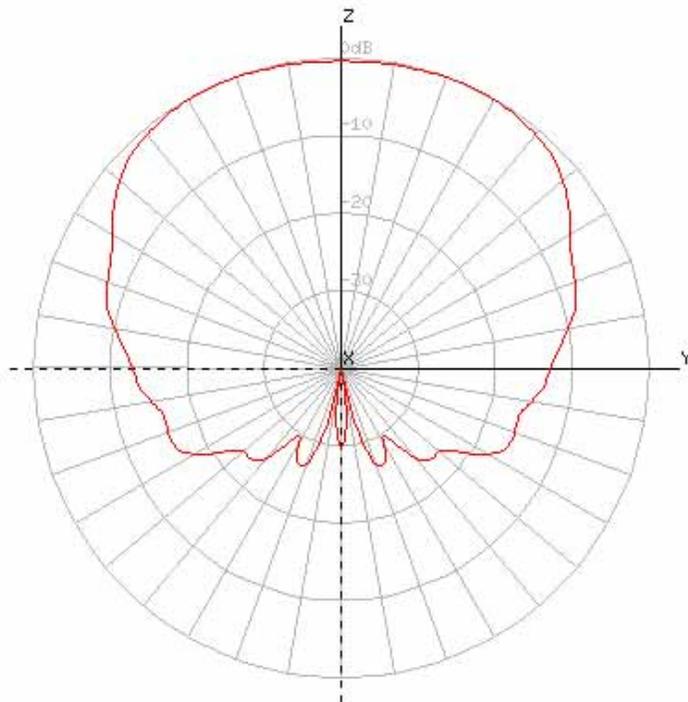
図-3 : チョーク・リング型ホーン・アンテナのモデル

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

単なる反射体であるセブタム・ポーライザ型ホーン・アンテナに内面と外面の両方を Surface Patch で記述したモデル (Thick Plate Model と称する) を使用する。 RCS のシミュレーションでは Thick Plate Model のみを用いる。 ホーン群とディッシュの総合特性のシミュレーションでは PC リソースのメモリ容量の観点から、Thin Plate Model を用いる。

なお、“Thin Plate Model” および “Thick Plate Model” なる用語は NEC2/NEC2++ において定義されている用語あるいは概念ではなく、ここで独自に定義したものである。 NEC2 には “Thin Wire Kernel” という用語があるが [7]、本稿での “Thin / Thick” との関連はない。

quit reload **export** none slice log hor. X Y Z



f = 10368 MHz maxgain = 6.07985 dBi vgain = -inf dBi

図-4 : チョーク・リング型ホーン・アンテナの輻射パターン H 偏波 / X 軸

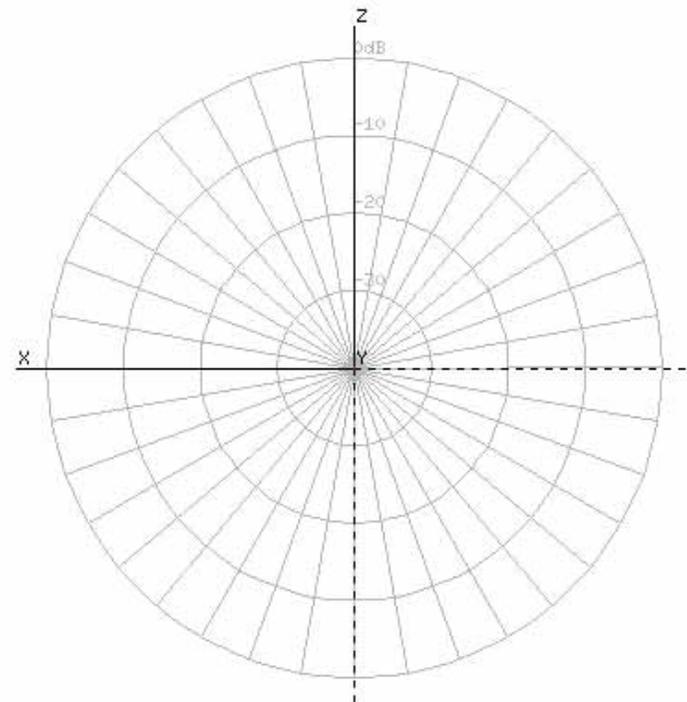
(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

フィードの開口面効率

チョーク・リング型ホーン・アンテナ単体のモデルを 図-3 に、その輻射パターンを 図-4 から 図-7 に示す。次にフィード群のモデルを 図-8、 図-9 および 図-10 に、フィード群での 5 チョーク・リング型ホーン・アンテナの輻射パターンを 図-11 から 図-14 に示す。

図-4 から 図-7 を、図-11 から 図-14 とそれぞれ対比させると、ホーン群が輻射パターンに与える影響が見えてくる。チョーク・リング型ホーン・アンテナ単体では対称であった輻射パターンが、ホーン群の影響で非対称形に歪んでいる。また、ホーン群では交差偏波

quit reload **export** none slice log hor. X Y Z



f = 10368 MHz maxgain = 6.07985 dBi vgain = -6.69272 dBi

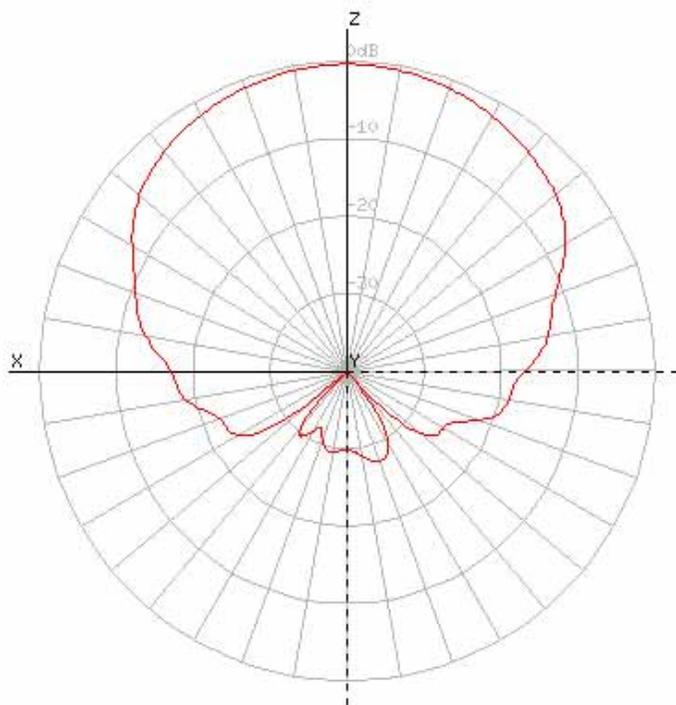
図-5 : チョーク・リング型ホーン・アンテナの輻射パターン H 偏波 / Y 軸

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

が発生している。

シミュレーション方針の第一項に従い、この輻射パターンの違いによるフィードの開口面効率 (Aperture Efficiency) の違いを求め、ホーン群で生じる遮蔽によるディッシュの性能劣化を評価する。フィードの開口面効率を求めるツールとして W1GHZ Paul Wade による PHASEPAT [8] が定番であろう。しかし、PHASEPAT は H 偏波と V 偏波の輻射パターンから、すなわち $\theta = 0 \text{ deg.}$ と $\theta = 90 \text{ deg.}$ の輻射パターンから内挿して、その他の角度の輻射パターンを求め、開口面効率を計算しているの、今回のホーン群のように、その輻射パターンが非対称形の場合に PHASEPAT を適用すると、誤差が大きくなると予想される。したがって、今回は PHASEPAT を使用せずに、 $\theta = 0 \sim 360 \text{ deg.}$ / $\phi =$

quit reload export none slice log vert. X Y Z



f = 10368 MHz maxgain = 5.69 dBi vgain = -38.7263 dBi

図-6 : チョーク・リング型ホーン・アンテナの輻射パターン V 偏波 / Y 軸

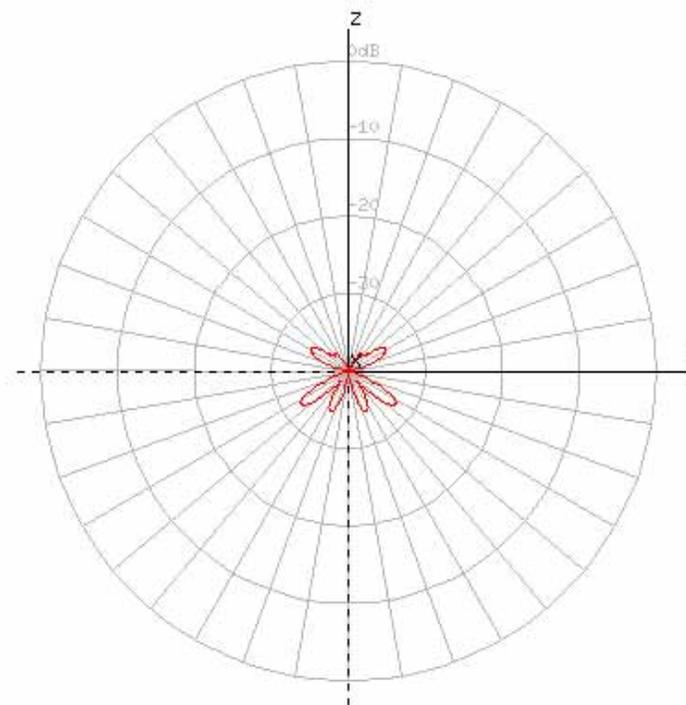
(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

$0 \sim 180 \text{ deg.}$ の全周パターンを積分して開口面効率を求める計算ツールを独自にプログラムした。開口面効率の計算についての詳細は別稿 [9] にまとめる。

チョーク・リング型ホーン・アンテナ単体の開口面効率を、図-15 と 図-16 に示す。ホーン群でのチョーク・リング型ホーン・アンテナの開口面効率を、図-17 と 図-18 に示す。

4 m ディッシュの焦点距離が 1.5 m なので、 $f/D = 0.375$ となる。 $f/D = 0.375$ での開口面効率は 表-1 のとおり。

quit reload export none slice log vert. X Y Z



f = 10368 MHz maxgain = 5.69 dBi vgain = -10.94 dBi

図-7 : チョーク・リング型ホーン・アンテナの輻射パターン V 偏波 / X 軸

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

表-1 : 開口面効率

Choke Ring Horn	Aperture Efficiency (%)		Aperture Efficiency (dB)	
	H-pol	V-pol	H-pol	V-pol
w/o Horn Array	62.8	64.0	-2.02	-1.94
with Horn Array	64.0	64.7	-1.94	-1.89

フィードの RCS

シミュレーション方針の第二項に従い、フィードの RCS を求める。NEC2++ が備えている、対象物に平面波を入射して RCS を計算する機能を用いる。RCS のシミュレーション・モデルには、前述の Thick Plate Model を用いる。RCS とシミュレーション・モデルについては、別稿 [6] にまとめる。なお、ここで示す RCS は Monostatic RCS ではなく、Bistatic RCS である。Bistatic RCS は、一方向の入射に対する全周方向の反射の電力比を示したものである。このポイントがまさにホーン群による遮蔽損失の計算に RCS を用いる理由である。

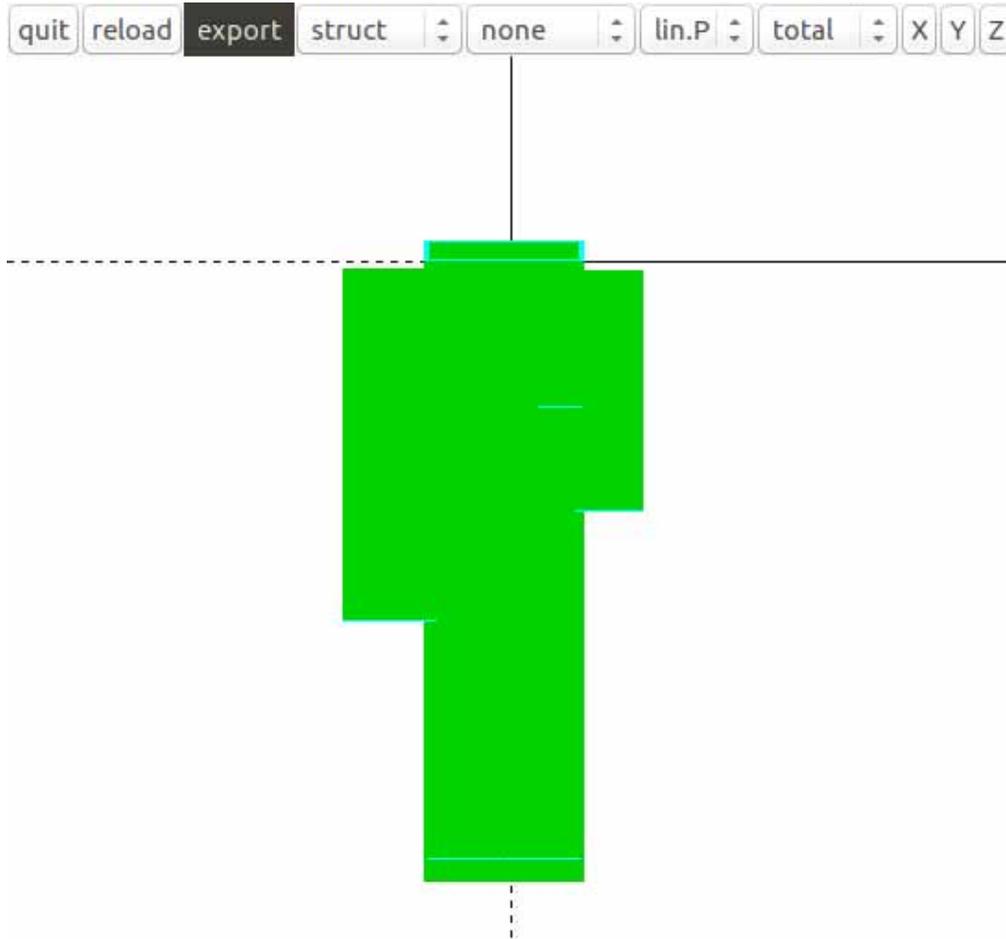


図-8 : ホーン群のモデル X 軸

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

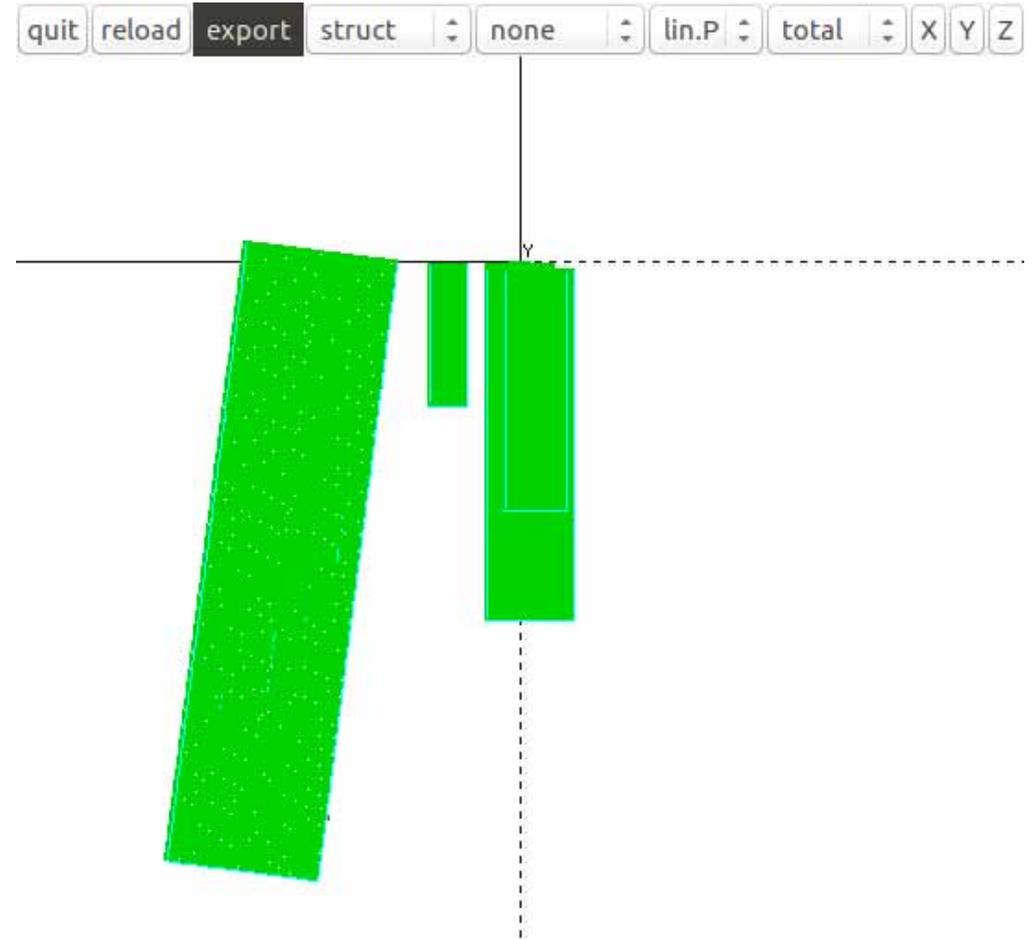


図-9 : ホーン群のモデル Y 軸

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

図-19 と 図-20 にチョークリング型ホーン・アンテナの RCS を示す。平面波は、ディッシュからフィードの方向へ、すなわち +Z 軸方向から入射している。図-21 と 図-22 にホーン群の RCS を示す。ホーン群のモデルを示した 図-8 および 図-9 と比較すると、形状と反射との相関が見てとれる。

図-19 から 図-22 の RCS は、一波長の平方値 (λ^2) を基準としたデシベルで表示されている。RCS から下式を用いて遮蔽損失 (Blockage Loss) を求める。

$$RCS \ \sigma_{Feed_Backward} = 10 \left(\frac{dB}{10} \right)$$

$$RCS \ \sigma_{Dish} = \frac{4\pi^3 r^4}{\lambda^2}$$

$$BlockageLoss = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\sigma_{Dish} - \sigma_{Feed_Backward}}{\sigma_{Dish}} \right)$$

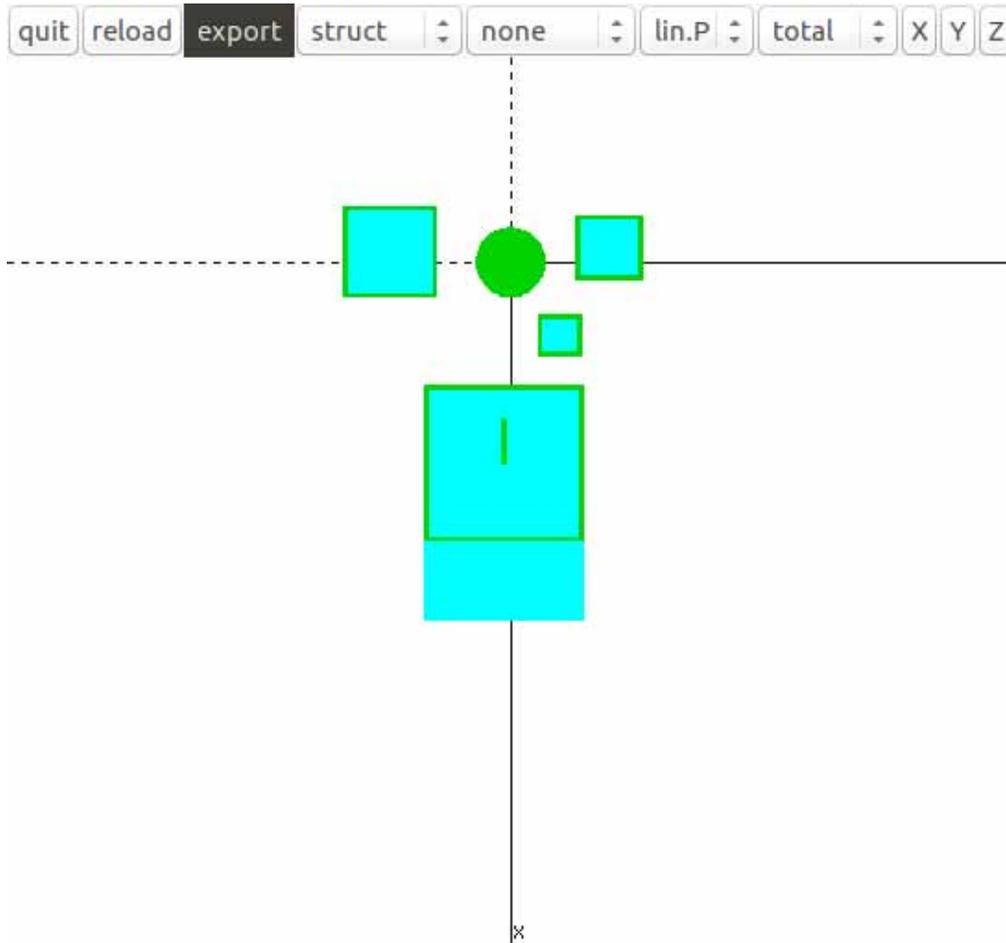


図-10 : ホーン群のモデル Z 軸

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

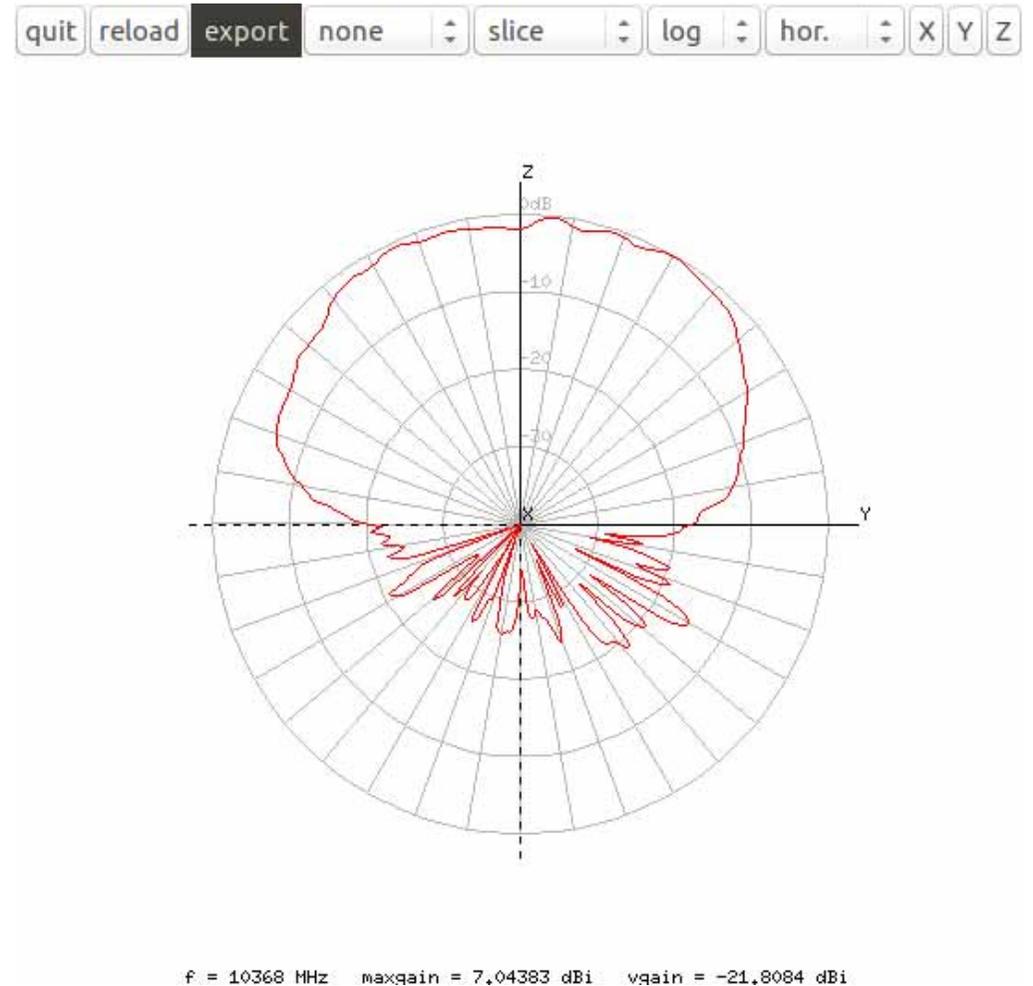


図-11 : ホーン群有りでの輻射パターン H 偏波 / X 軸

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

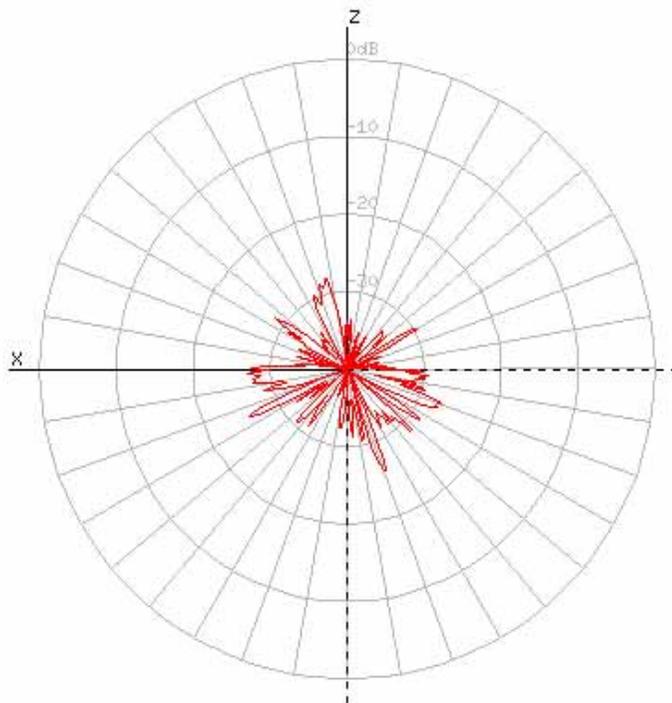
カセグレン・アンテナのサブ・リフレクタの遮蔽損失を求める場合、一般的に、メイン・リフレクタとサブ・リフレクタの円板としての物理的(光学的)な面積比から損失を求める。しかし、ここでは物理的な面積比ではなく、電磁気的な面積である RCS から遮蔽損失を求める。上記の式を用いて求めた遮蔽損失は **表-2** のとおり。実際の運用では垂直偏波を用いているので、V-pol の値を計算に用いる。

ちなみに、カセグレン・アンテナで用いる直径 0.3 m のサブ・リフレクタの遮蔽損失を、直径 4 m のメイン・リフレクタとの物理的な面積比から求めると、-0.024 dB である。比較として参照する。

表-2 : RCS と遮蔽損失

	Forward (dB/ ^2)	Backward (dB/ ^2)	Forward (/ ^2)	Backward (/ ^2)	Blockage Loss (dB)
Choke Ring Horn	24.86	21.12	306	129	-0.0002
Choke Ring Horn with Feed Horn Array	49.0	40.63	79433	11561	-0.021

quit reload **export** none slice log hor. X Y Z

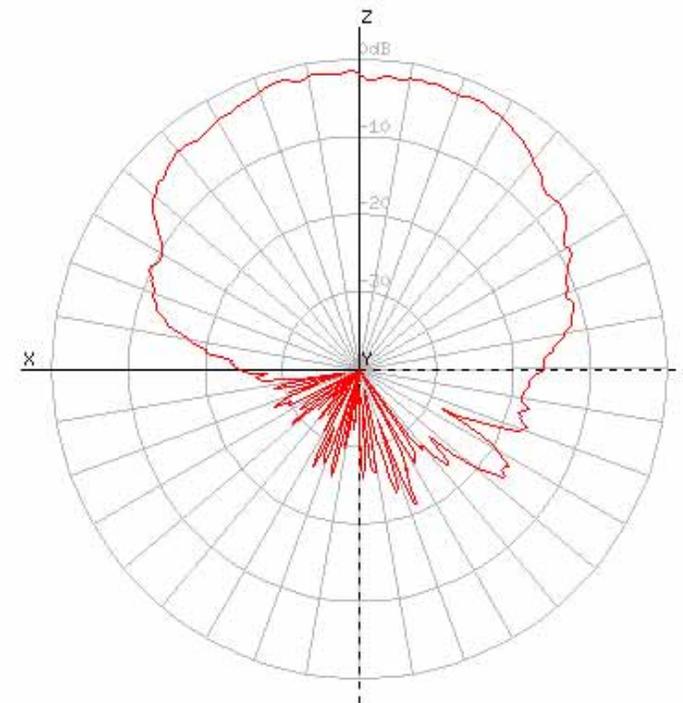


f = 10368 MHz maxgain = 7.04383 dBi vgain = -10.5288 dBi

図-12 : ホーン群有りでの輻射パターン H 偏波 / Y 軸

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

quit reload **export** none slice log vert. X Y Z



f = 10368 MHz maxgain = 5.77118 dBi vgain = -23.8235 dBi

図-13 : ホーン群有りでの輻射パターン V 偏波 / Y 軸

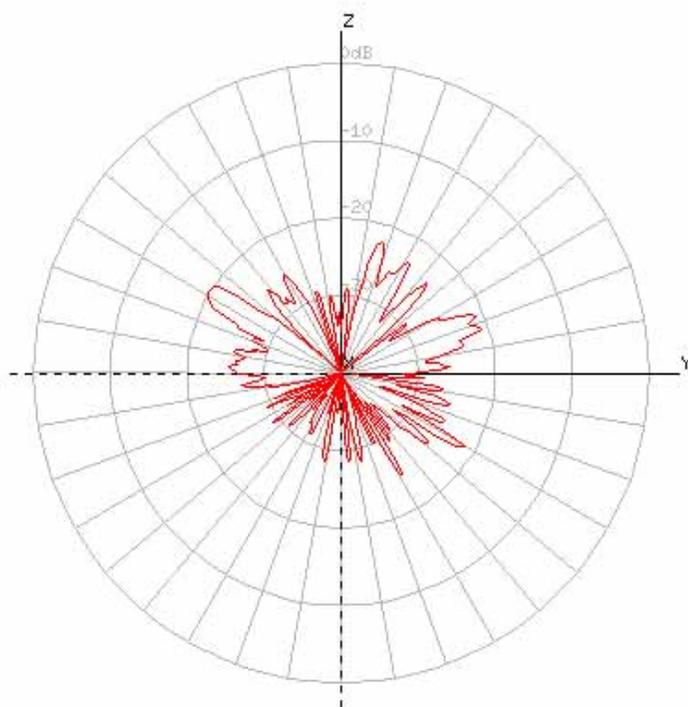
(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

ゲインの推定

ここまで求めたフィードの開口面効率と遮蔽損失を用いて、アンテナ総合でのゲインを推定する。以降の計算は、DL2LAC の運用が V 偏波であるので、V 偏波のみの計算とする。

開口面アンテナの理想的な、すなわち、フィードの開口面効率が 100% であり、いかなる損失もない場合のゲイン G は次式で与えられる。ここで、 A は直径 4 m ディッシュの開口面積である。したがって、10.368 GHz での理想的なゲインは、52.76 dBi となる。

quit reload **export** none slice log vert. X Y Z



f = 10368 MHz maxgain = 5.77118 dBi vgain = -17.2548 dBi

図-14 : ホーン群有りでの輻射パターン V 偏波 / X 軸

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

$$G = \frac{4 \pi A}{\lambda^2}$$

この理想的なゲインに対して前述の開口面効率と遮蔽損失を考慮すると、チョーク・リング型ホーン・アンテナ単独の場合とホーン群の場合の総合ゲインは表-3 となる。

表-3 : 総合ゲイン

	Choke Ring Horn w/o Horn Array (dB)	Choke Ring Horn with Horn Array (dB)
Ideal Gain (dBi)	52.76	52.76
Feed Efficiency (dB)	-1.94	-1.89
Blockage Loss (dB)	-0.0002	-0.021
Total Gain (dBi)	50.82	50.85

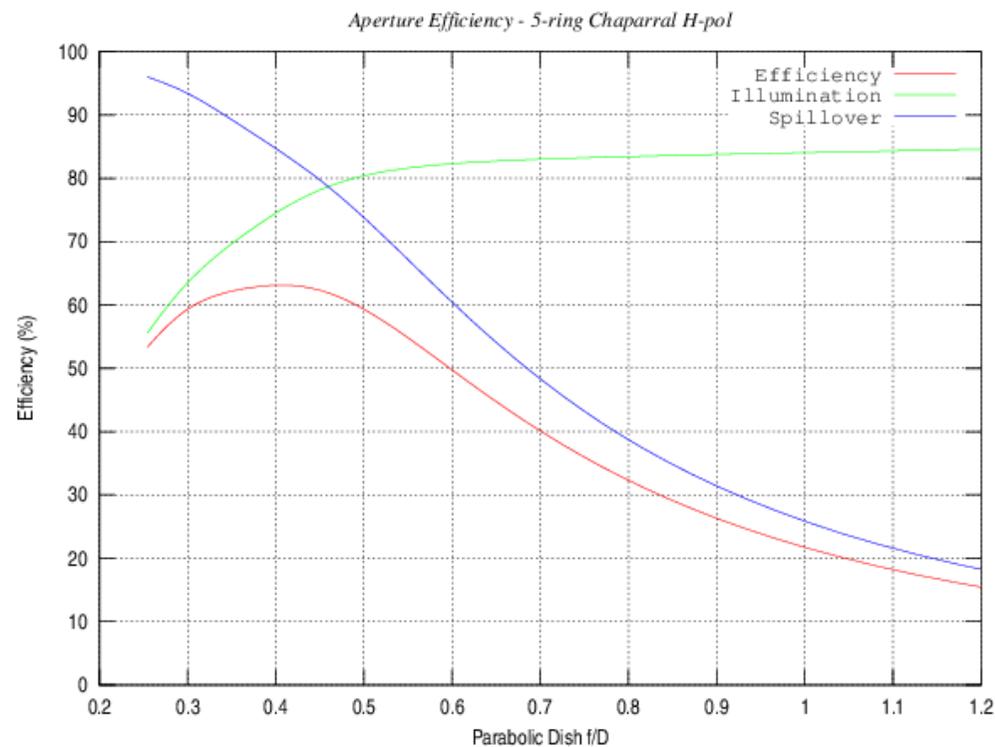


図-15 : チョーク・リング型ホーン・アンテナの開口面効率 H 偏波

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

フィード群とディッシュの総合特性

ここまで、ホーン群の開口効率と遮蔽損失を個別に求め、理想的なゲインからそれらを減ずることで総合的なゲインを算出した。しかし、開口効率も遮蔽損失も、ホーン群とメイン・リフレクタ間の相互の影響を考慮したものではない。これは、カセグレン・アンテナについて、フィード・ホーンとサブ・リフレクタに分割して総合特性を解析を試みた際に遭遇した限界と同様である。 [10] そこで、分割したモデルのシミュレーションとアンテナ総合での特性の相関性を確認するために、当初のシミュレーション方針の第三項に掲げたように、PC のメモリ容量が許す範囲内でホーン群とディッシュの総合特性をシミュレーションする。

まず、PC のメモリ容量に収まるホーン群のモデルを検討する。ホーン群の RCS を計算したモデルと直径 4 m のメイン・リフレクタを組み合わせると PC のメモリ容量 (RAM 384 GB + SSD スワップ・ファイル 256 GB) を超過したのになってしまう。ホーン群のモデルサイズを小さくするために、セプタム・ポーラライザ型ホーンの開口面を閉じた単純な直

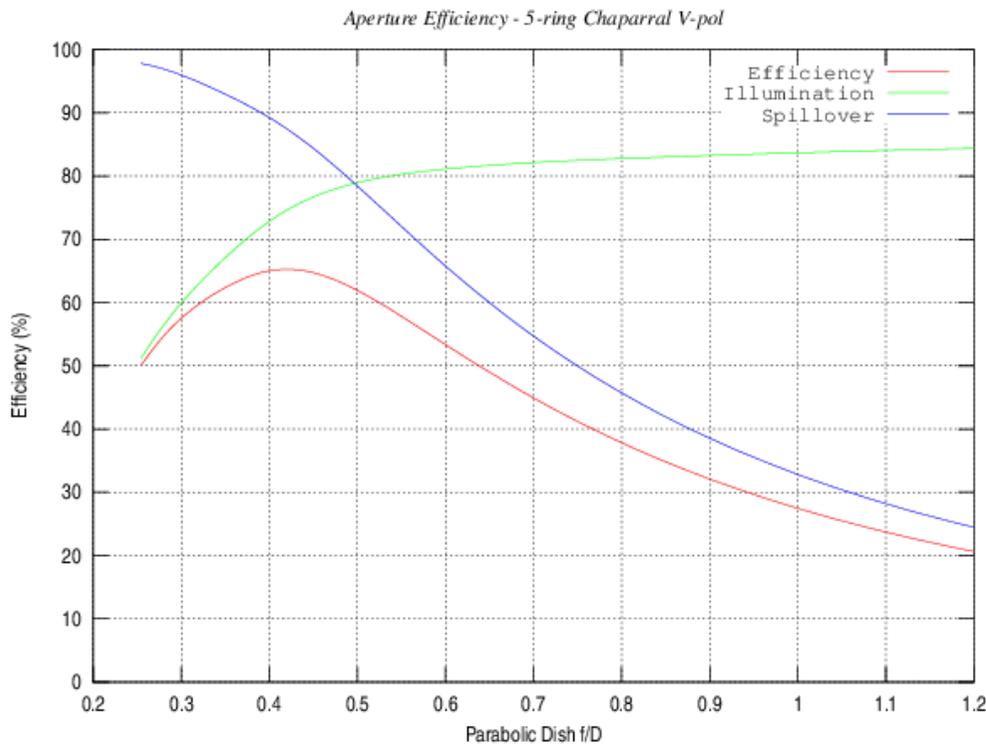


図-16 : チョーク・リング型ホーン・アンテナの開口面効率 V 偏波

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

方体とした。また、1.2 GHz 帯、2.3 GHz 帯、3.4 GHz 帯および 5.7 GHz 帯のホーン群全てを単純化した直方体でモデル化しただけではメモリ容量に収まらないので、一番影響が大きであろう 1.2 GHz 帯フィード・ホーンのみを 10 GHz 帯フィード・ホーンと組み合わせることとした。RCS のシミュレーション過程で、セプタム・ポーラライザ型ホーンを単純化した直方体モデルにすると、正確なモデルとは異なる RCS を示すことが判明しているし、また、RCS はホーン群の数にも依存することは判明している。しかし、PC のメモリ容量の制限から止むを得ずの選択となった。本稿をまとめる過程で、シミュレーションの論旨に矛盾を感じたので、SSD スワップ・ファイル容量を 712 GB まで拡張して、ホーン群全てを直方体としたモデルのシミュレーションを追加した。ちなみに、ホーン群の正確なモデルは、RAM 384 GB + SSD スワップ・ファイル 712 GB でも計算できなかった。

“10 GHz フィード + 4 m ディッシュ” の総合特性を 図-23 に、“10 GHz + ホーン群 + 4 m ディッシュ” の総合特性を 図-24 (1.2 GHz 帯ホーンのみ) と 図-25 (ホーン群) に示す。 図-23 のゲインは 49.9 dBi で、 図-25 のゲインは 50.18 dBi である。 図-24 と 図-25 を比較すると、全てのホーン群をシミュレーションした 図-25 においてサイド・ローブの非対称性が大きくなっていることが判る。

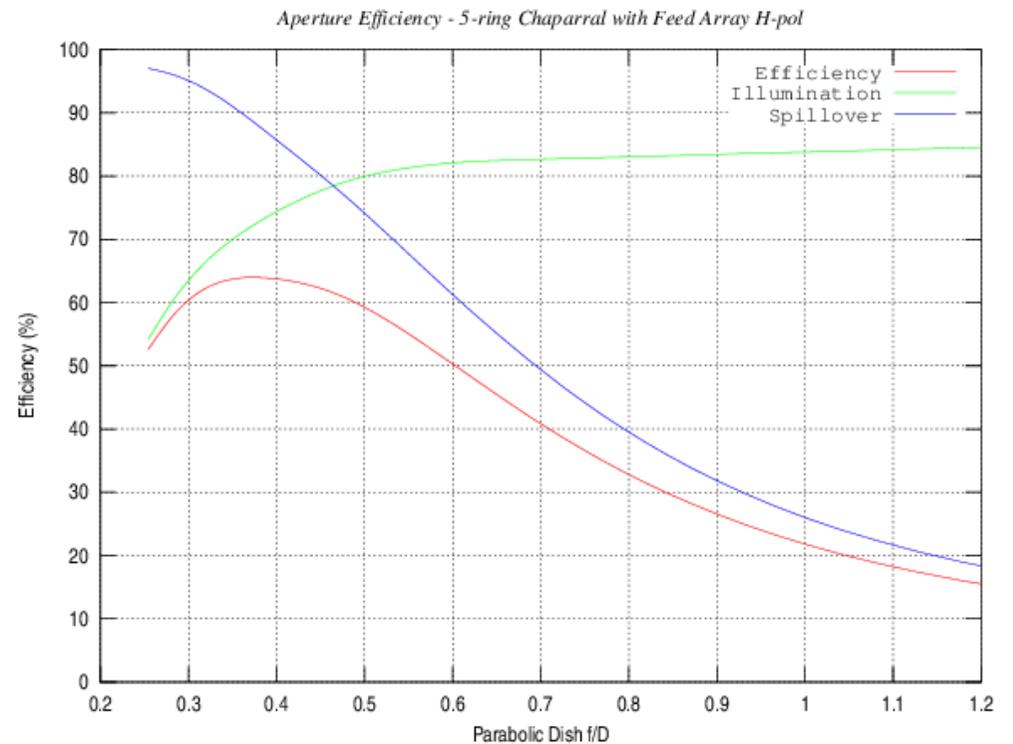


図-17 : ホーン群有りでの開口面効率 H 偏波

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

考察

当初掲げたシミュレーション方針に従って考察を進める。開口面効率のシミュレーション結果をまとめた表-1によると、フィード・ホーン単独よりもホーン群を伴った方が若干ではあるが、効率が高い。フィード・ホーン単独の開口面効率を示す図-15 および図-16 から、その開口面効率が $f/D = 0.4$ にピークを持っており、ディッシュの $f/D = 0.375$ に対して最適ではないことが読み取れる。一方、ホーン群は $f/D = 0.375$ 近辺で照射効率 (Illumination) が上がり、ディッシュからのこぼれ落ち効率 (Spillover) が下がった (こぼれ落ちが増えた) 結果、それらの総合である開口面効率がフィード・ホーン単独よりも高い値であることが、図-17 および図-18 から読みとれる。ホーン群の影響が、10 GHz フィード・ホーンの輻射パターンを開口面効率を上げる方向に作用している。それぞれの輻射パターン (図-4 ~ 図-7, 図-11 ~ 図-14) を比較すると、バックロブの変化や交差偏波の発生に目を奪われるが、開口面効率の観点ではホーン群が著しい悪影響を与えていないと判断される。

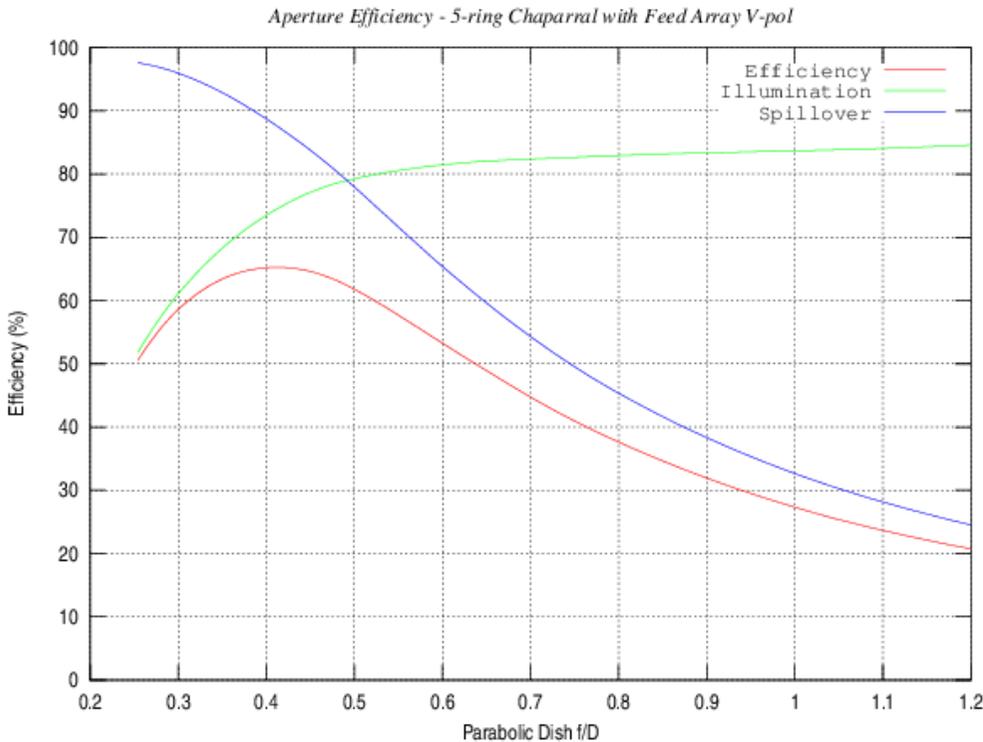


図-18 : ホーン群有りでの開口面効率 V 偏波

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

次に、RCS について表-2 で比較すると、ホーン群の RCS はフィード・ホーン単独の $11561/129 = 89.6$ 倍と大きいことが解る。しかし、直径 4 m のディッシュに対する遮蔽損失で比較すると、ホーン群の -0.021 dB の損失は無視できる、あるいはゲインとして実測困難と言えるだろう。これは、ディッシュ直径との相対比較であり、ディッシュ直径が小さくなれば遮蔽損失 (ゲイン低下) として無視できないことは言うまでもない。

上述の開口面効率と遮蔽損失のシミュレーション値とディッシュの理想的なゲインから求めた総合ゲインを表-3 にて比較すると、ホーン群の影響は無視できるレベルと言える。一方、ホーン群とディッシュを総合的にモデル化したシミュレーションでは、ホーン群の方が $50.18 - 49.9 = 0.28$ dB 高い総合ゲインを示す結果となった。0.28 dB のゲイン差は有

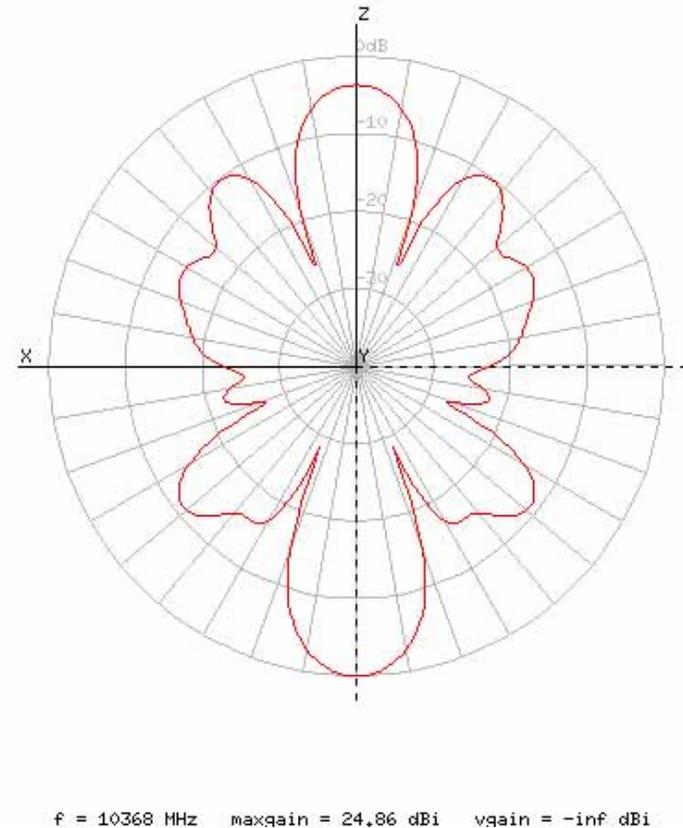


図-19 : チョーク・リング型ホーン・アンテナの RCS H 偏波

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

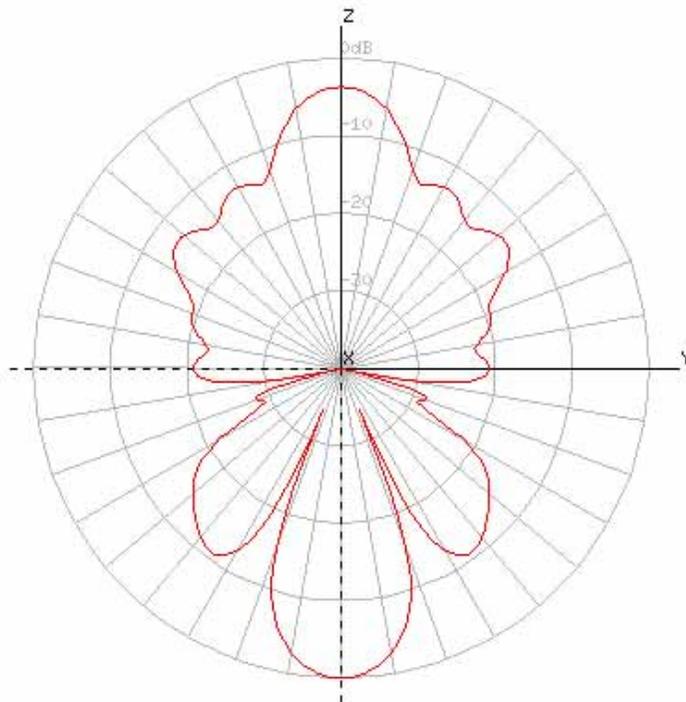
意な差異である。 はたして、シミュレーションは正しいのであろうか？

シミュレーションと実測の比較検討

シミュレーションの検証のために Carstensen 氏に実測をお願いした。 実測が困難なのでシミュレーションを始めたのであり、本末転倒の感がある。 しかし、目安が皆目無い状態での測定とは異なり、シミュレーションに基づく目安ができた状態では、何をどのように測定するのか立案可能である。

ホーン群が装着され完成した状態と分解を必要とする 10 GHz フィード・ホーン単独での測定を両方行うのは困難なので、現状の前者のみの測定とすべきである。 その場合、ゲインの相对比较はできず、ゲインの絶対値を測定することも難しいので、受信での輻射パターン測定を提案した。 輻射パターンの測定であれば相対値の測定で良く、半値角度からゲインの目安を計算可能であり、シミュレーションに現れている非対称なサイドローブのパターンも検証可能である。 ただし、サイドローブを測定するにはダイナミックレンジとして 50 dB 程度を必要とするので、サンノイズ測定では用を為さない。 そこで、10 GHz 帯に近い DTV 衛星放送波を受信することを提案すると、LNC (Low Noise Converter)を取り替えての Thor 衛星による測定結果が返信されてきた。

quit reload **export** none slice log vert. X Y Z

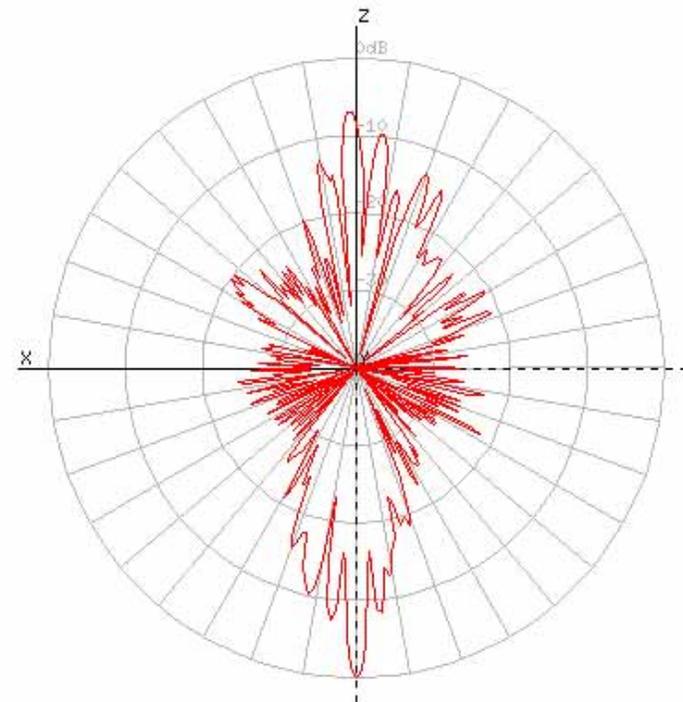


f = 10368 MHz maxgain = 24.86 dBi vgain = -144.998 dBi

図-20 : チョーク・リング型ホーン・アンテナの RCS V 偏波

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

quit reload **export** none slice log hor. X Y Z



f = 10368 MHz maxgain = 48.9997 dBi vgain = 7.81814 dBi

図-21 : ホーン群の RCS H 偏波

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

氏の測定系の制約から、一度に測定できるダイナミック・レンジが約 30 dB であるので、アッテネータを使っての二回の測定値を合成して約 60 dB のダイナミック・レンジを得ている。仰角 EL と方位角 AZ についての輻射パターンを 図-26 と 図-27 に示す。輻射パターンから求めた半値角度は、EL = 0.53 deg. / AZ = 0.49 deg. となる。一度の測定で済む半値角度に着目した実測では、半値角度 EL = 0.43 deg. / AZ = 0.37 deg. とのことなので、輻射パターン測定での誤差は、角度換算で 0.1 ~ 0.12 deg. 程度が発生している。なお、図-26 の Theta = 7 deg. 近辺の信号は、静止衛星軌道上で隣接する衛星のものであり、ピーク値の測定を行っていない。

ゲインの目安となる半値角度を実測とシミュレーションで比較した結果を、表-4 に示す。

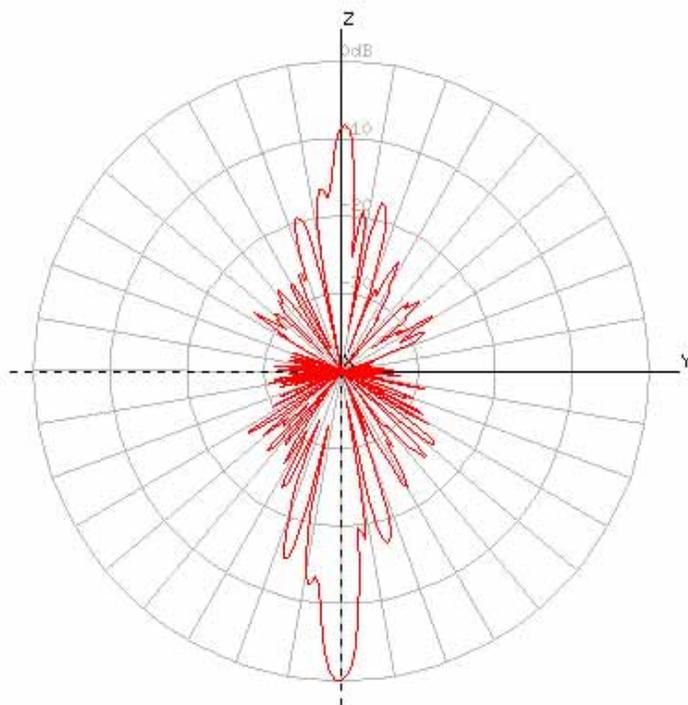


図-22 : ホーン群の RCS V 偏波

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

実測は衛星放送の 11.297 GHz で行われたので、半値角度をシミュレーションの周波数である 10.368 GHz に周波数の逆比で変換した。また、実測での角度読み取りに誤差があっても AZ / EL での相対値の誤差は小さいであろうと考え、H / V 半値角度の比を示した。実測値記録での角度分解能は 0.18 deg. であり、シミュレーションでの角度分解能は 0.1 deg. であるので、半値角度を求めるには補間が必要となる。補間にあたっては、いわゆるペンシル・ビームでの $\cos^{2N}(\)$ 近似を用いた。[11]

表-4 にて半値角度の実測値とシミュレーションを比較すると、実測での角度換算での誤差 0.1 ~ 0.12 deg. を考慮すれば、凡その一致を示していると思わせるかもしれない。他の誤差要因としては、実測とシミュレーションの周波数におけるチョーク・リング型ホーン・アンテナの位相中心 (Phase Center) の偏移に起因する、いわゆる焦点ボケが考えられる。実測とシミュレーションの周波数での位相中心を 図-27 と 図-28 に示す。各周波数でのホーン群とディッシュの総合特性をシミュレーションすれば完璧だが、そのシミュレーション時間の長さ(約 50 時間)から実行を断念した。図-27 と 図-28 によると、周波数差での偏移は約 2 mm である。これは 1/10 波長以下の偏移であり、これまでのシミュレーション経験から [12]、10.368 GHz で焦点調整が為されていれば 11.297 GHz で

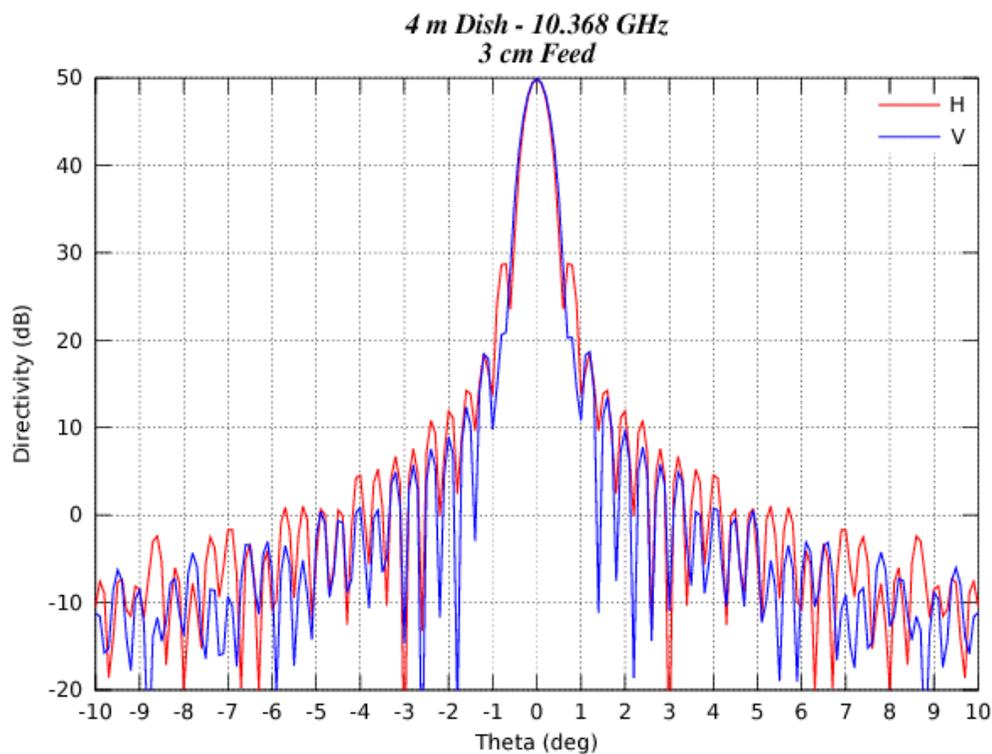


図-23 : “10 GHz フィード + 4 m ディッシュ” の総合特性

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

の特性変化は実質的に無視できると考えられる。したがって、実測値とシミュレーションの定量的な比較は、実測での角度とレベルの分解能が支配的と言えるだろう。

それでは、輻射パターンを定性的に比較する。フィード・ホーン群による遮蔽の影響として、サイド・ローブのレベル上昇が非対称に発生することを予想していた。フィード・ホーン群による遮蔽が無い場合、**図-23** に示されるように輻射パターンは軸対称である。一方、フィード・ホーン群による遮蔽がある **図-25** では、サイド・ローブのレベル上昇が非対称に発生していることが容易に見てとれる。

図-25 と **図-26** および **図-27** を比較すると、次のような相関性が読み取れる。

- 1 第一サイド・ローブの非対称性とそのレベル
- 2 仰角 EL 輻射パターンでの $\pm 5 \sim \pm 10$ deg. サイド・ローブの非対称性とそのレベル
- 3 方位角 AZ 輻射パターンでの $\pm 1 \sim \pm 4$ deg. サイド・ローブの非対称性とそのレベル

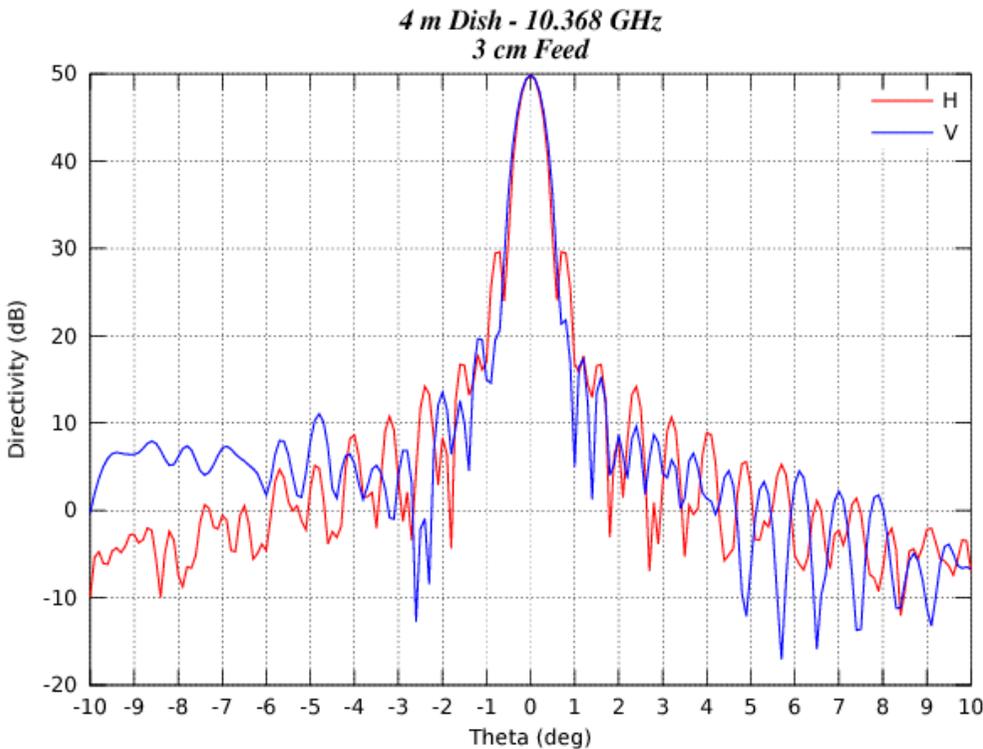


図-24 : “10 GHz フィード + 1.2 GHz ホーン + 4 m ディッシュ” の総合特性

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

図-26 でのサイド・ローブ間のナル(Null)は、測定系のレベルと角度の分解能が不足するので、明確に判別できていない。しかし、シミュレーションの定性的な正しさを示す測定が為されている。また、これは、EME 用の大型パラボラ・アンテナの特性を測定することの難しさを示し、それ故のシミュレーションの有効性を示していると言える。

まとめ

DL2LAC Ernst-Guenther Carstensen 氏の「マルチバンドで運用しているディッシュの 10 GHz での性能に改善の余地があるのではないか？」との疑問に答えるべく、シミュレーションを行った。シミュレーションの結果から、マルチバンドのフィード・ホーン群による遮蔽損失は無視できるとの結論を得た。それでは、氏が悩む VK3UM EME Calculator での推定値との違いは何だろうか？ 期せずして、DTV 衛星放送波を受信する実測でそのヒントが得られた。送受信切替えの導波管スイッチを取り外し、10 GHz 帯 LNA を衛星放送用 LNC に交換してサンノイズをまずチェックしたところ、EME 運用時よりも良いサンノイズ値が得られたとのこと。シミュレーションが示すように遮蔽損失は無視できるレベ

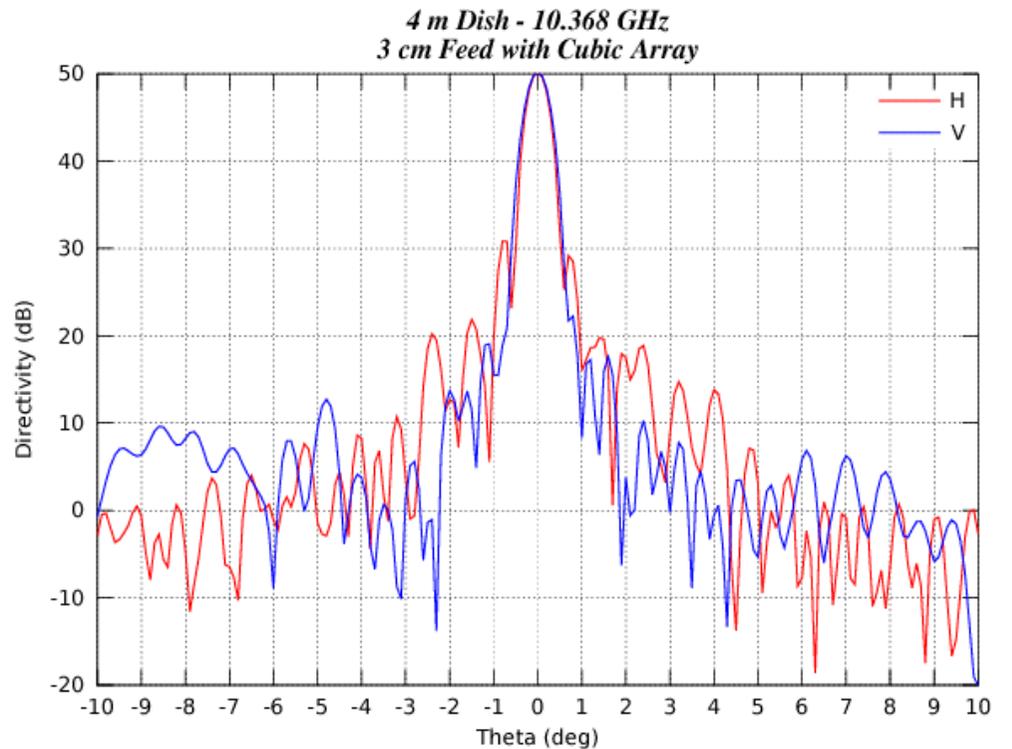


図-25 : “10 GHz フィード + ホーン群 + 4 m ディッシュ” の総合特性

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

ルであり、10 GHz 帯と 11 GHz 帯でのアンテナ性能の差異も無視できるとなると、その結果は LNA の Noise Figure 改善と導波管スイッチの損失改善を意味する。このヒントの発見は、Carstensen 氏のマルチバンド EME 運用に掛ける情熱と高い技術力の賜物である。面倒な実測へ Carstensen 氏をドライブできたことが、一連のシミュレーションの成果である。しかし、シミュレーションのリソースとモデル化に課題を残す結果となった。以前より感じている NEC2++ での巨艦大砲主義の限界を、またもや痛感した次第である。

以前より興味あるテーマ、その実際の諸元、そして実測データを提供して頂いた DL2LAC Ernst-Guenther Carstensen 氏に深謝申し上げる。

//

参考文献

[1] Ernst-Guenther Carstensen, DL2LAC, “[Moon-Net] using 4nec2 for modeling 4m dish on 10 ghz?,” Jan. 23. 2018.

<http://mailman.pe1itr.com/pipermail/moon-net/2018-January/034759.html>

[2] Arie Voors, “4nec2 NEC based antenna modeler and optimizer,” 2005.

<http://www.qsl.net/4nec2/>

[3] 武安義幸, JA6XKQ, “アンテナ雑音温度 - 評価ツール,” Jan. 10. 2011.

http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/AntiNoiseTemp_2.pdf

[4] 武安義幸, JA6XKQ, “NEC2++ によるホーン・アンテナのシミュレーション,” Jan. 24. 2011.

<http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Nec2pp3SecHorn.pdf>

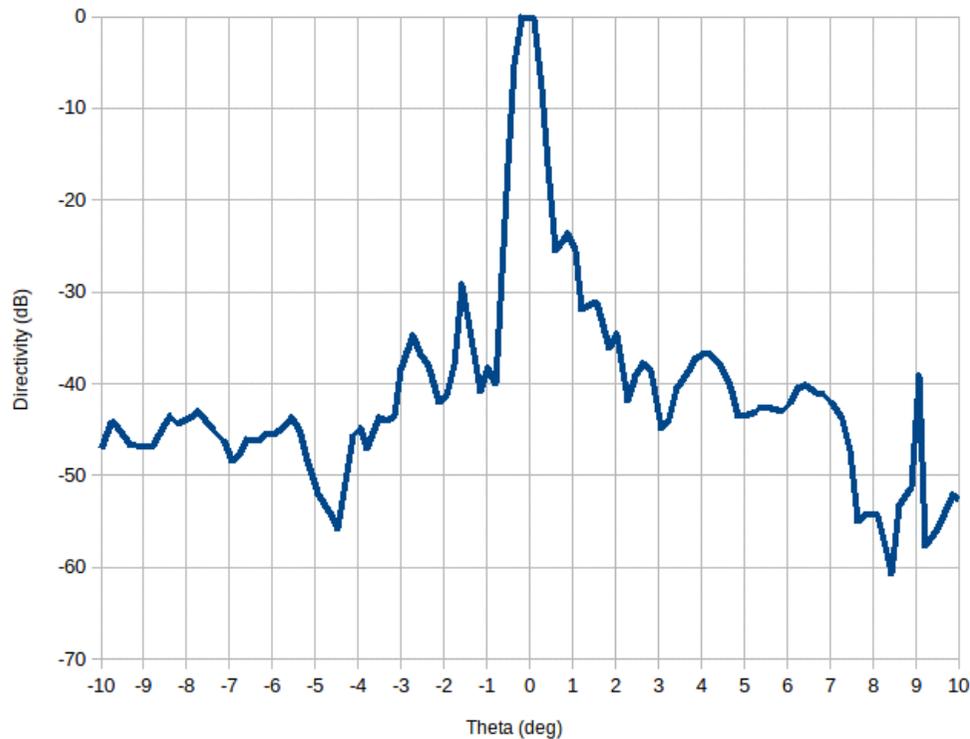


図-26 : 輻射パターンの実測値 (仰角 EL)

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

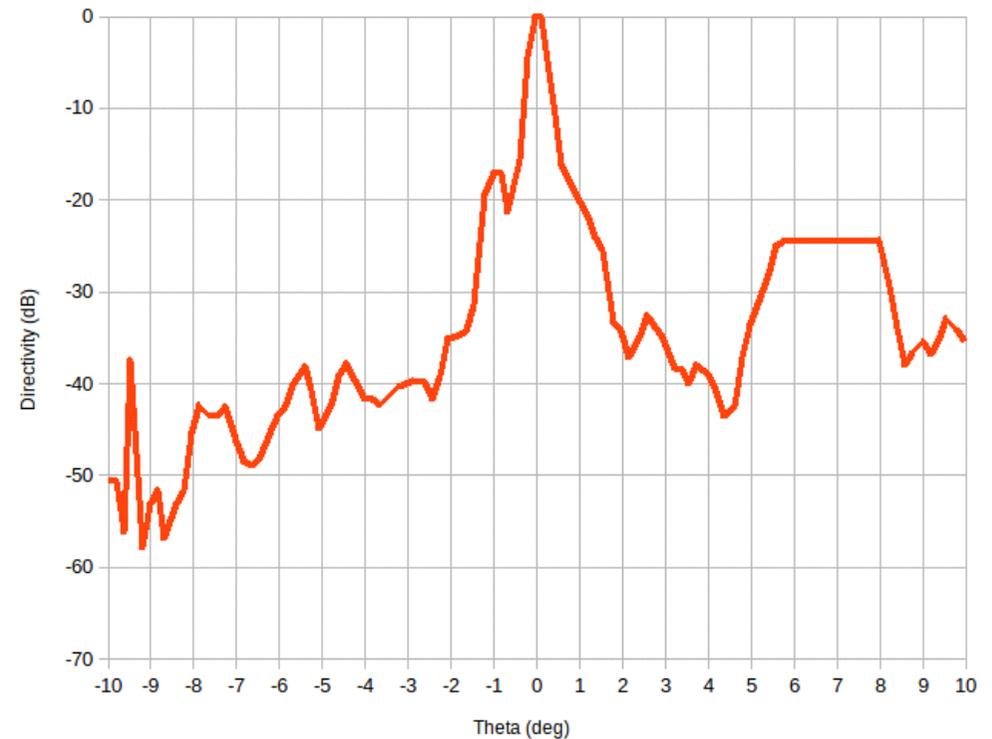


図-27 : 輻射パターンの実測値 (方位角 AZ)

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

[5] 武安義幸, JA6XKQ, “NEC2++ によるチョーク・リング型ホーン・アンテナのシミュレーション,” 2018.

http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/ChaparralHorn_1.pdf

[6] 武安義幸, JA6XKQ, “NEC2++ による RCS のシミュレーション,” 2018.

http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/RCS_1.pdf

[7] Burke, B. J., and Poggio, A. J., “NUMERICAL ELECTROMAGNETICS CODE (NEC) METHOD OF MOMENTS, PART III: USER'S GUIDE,” 1981.

[8] Paul Wade, W1GHZ, “Phasepat Software,” 1999.

<http://www.w1ghz.org/software/phasepat.zip>

[9] 武安義幸, JA6XKQ, “開口面効率のシミュレーション,” 2018.

http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/AprEff_1.pdf

[10] 武安義幸, JA6XKQ, “サブリフレクタからの放射パターン,” Sep. 12. 2015.

http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Nec2ppSubRef_2.pdf

[11] Milligan, Thomas A. “Modern antenna design, Second edition.” John Wiley & Sons, 2005. pp. 11-13

[12] 武安義幸, JA6XKQ, “NEC2++ を用いたカセグレン・アンテナのシミュレーション,” Sep. 12. 2015.

http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Nec2ppMainRef_1.pdf

Configuration	Half-Power Beam Width HPBW			Gain (dBi) calculated by HPBW	Simulated Gain (dBi)
	H (deg.)	V (deg.)	H : V		
Measured at 11.297 GHz	0.49	0.53	1 : 1.081	52.00	-
Translated to 10.368 GHz	0.53	0.58	1 : 1.081	51.28	-
Simulated “10 GHz Feed + 4 m Dish”	0.471	0.508	1 : 1.079	-	49.9
Simulated “10 GHz Feed + Horn Array + 4 m Dish”	0.459	0.502	1 : 1.094	-	50.18

表-4 : 半値角度とゲインの比較

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

△Phase @ 10.368 GHz - 5-ring Chaparral Horn

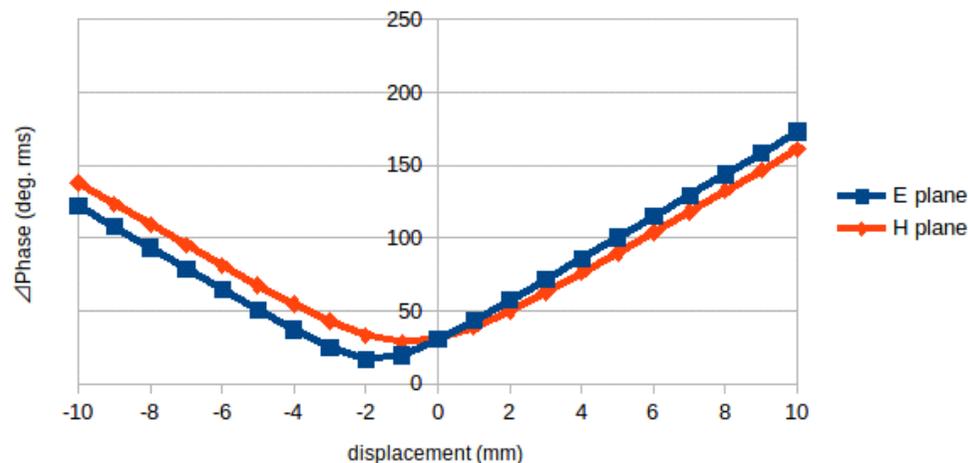


図-28 : チョーク・リング型ホーン・アンテナの位相中心 @ 10.368 GHz

△Phase @ 11.297 GHz - 5-ring Chaparral Horn

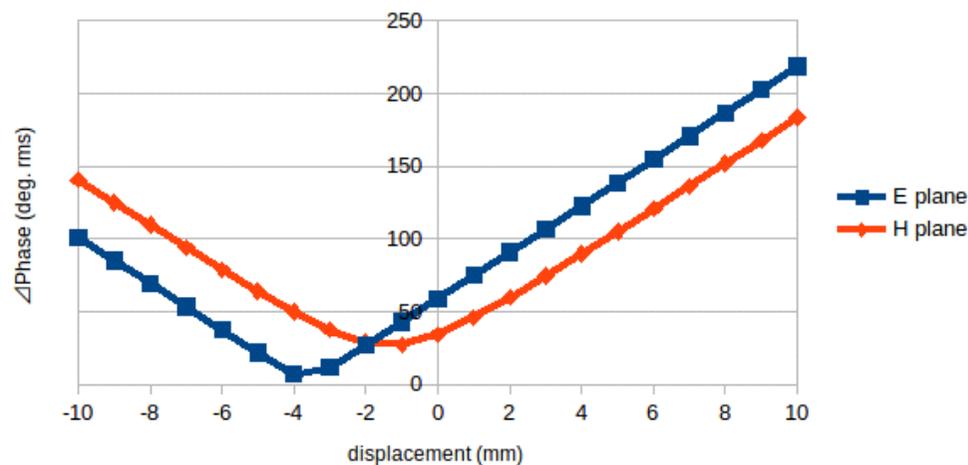
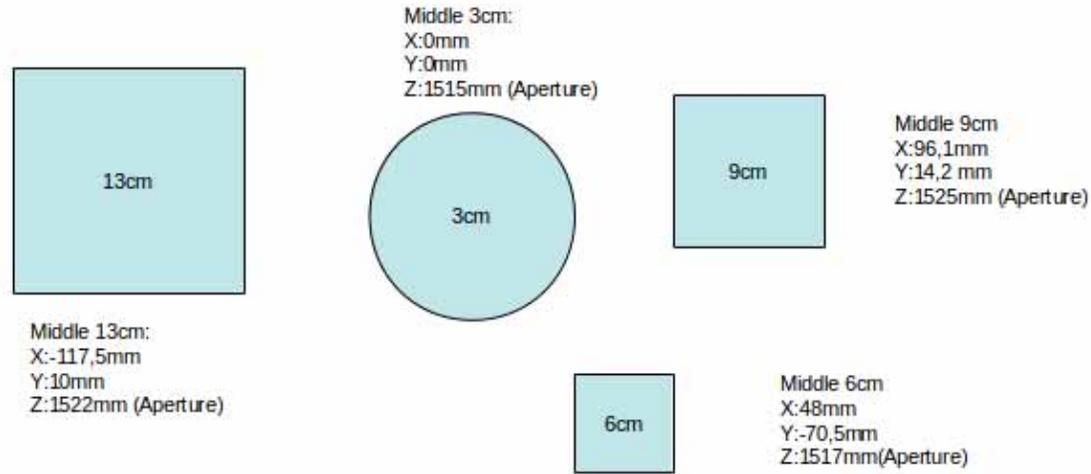


図-29 : チョーク・リング型ホーン・アンテナの位相中心 @ 11.297 GHz

(C) 2018, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ



3cm chapparal feed

Wg inner diameter 19,85mm
Wg outer diameter 22,15mm

1 ring inner diameter 28,33mm
1 ring outer diameter 29,90mm

2 ring inner diameter 36,57mm
2 ring outer diameter 38,23mm

3 ring inner diameter 44,96mm
3 ring outer diameter 46,38mm

4 ring inner diameter 54,42mm
4 ring outer diameter 55,52mm

5 ring inner diameter 66,24mm
5 ring inner diameter 69,87mm

All rings are 7mm high

Offset feed/ choke rings:
Choke rings 3mm behind feed

Aperture size Septum Feeds

6cm septum feed
32,7 x 32,7 mm

9cm septum feed
55 x 55 mm

13cm septum feed
80 x 80 mm

23cm septum feed
145 x 145 mm