

ホーン・アンテナの位相中心
武安義幸 / JA6XKQ

NEC2++ を用いてパラボラ・アンテナの要素毎にフィード・ホーン、サブ・リフレクタ、そしてメイン・リフレクタとシミュレーションを行ってきた。フィード・ホーンとサブ・リフレクタ間の距離を変えてパラボラ・アンテナ総合での利得とラジエーション・パターンを求め、いわゆる「焦点合わせ」を検証した。[1] [2] 「焦点合わせ」の結果とホーン・アンテナ単体での位相中心 (Phase Center) の関係を明らかにすべく、ホーン・アンテナの位相中心をシミュレーションにて求めた。

はじめに

カセグレン・アンテナ総合でゲインが最高となるフィード・ホーン・アンテナの位置を求めた。いわゆる「焦点合わせ」としては、サブ・リフレクタの虚焦点にフィード・ホーン・アンテナの位相中心を合致させるのだらうと理解していたが、シミュレーションの結果は、その理解とは異なるように思える。[2] それでは、ホーン・アンテナ単体での位相中心は何処であるのかを、改めてシミュレーションする。

位相中心に関する文献を調査してみると、位相中心の定義自体が一つではなく複数存在し、位相中心を求める手法も各種各様であることが判明した。理論的な背景は文献を参照することとし、ここでは試してみたシミュレーションとその結果を述

Dimension (mm)	Type : F = 0.5	Type : F = 0.7
R0	10.41	10.41
L0	23.6	23.6
R1	17.5	24.0
L1	9.54	27.01
L2	12.55	42.65

表-1 : W2IMU ホーン・アンテナの寸法パラメータ

べる。

カセグレン・アンテナのシミュレーションにおいてフィード・アンテナとして用いた W2IMU ホーンの F = 0.5 タイプと F = 0.7 について位相中心を求める。ホーン・アンテナの寸法を 表-1 に示す。

手法 その1

文献を調査するなかで、電磁界シミュレーション・ソフトウェア FEKO の Example Guide [3] に記載されている位相中心の定義とその算出方法がもっとも簡単に理解できたので、最初に試してみた。

位相中心は次のように定義されている。

遠方界 (Far Field) での電界は、距離 r に反比例して $1/r$ で減少する。
そして、その減少の原点を位相中心 (Phase Center) とみなせる。

その算出方法は次のように示されている。

- アンテナのボアサイト軸上の遠方界の二点 (100 ~ 150 波長) での電界を求める
- 求めた電界の逆数をプロットする
- そのプロットを内挿して、距離軸との交点 (切片) を求める
- その交点が位相中心である

NEC2++ を用いてラジエーション・パターンを求める際は、これまで専ら遠方界を計算していた。NEC2++ では距離を指定した近傍界 (Near Field) を計算することができるので、今回はその機能を用いる。近傍界の計算には、“NE” (Near Electric Field) コマンドを使用する。“NE” コマンドのパラメータ定義は次のとおり。[4]

- 1 NEAR Coordinate system type. 0 = rectangular coordinates, 1 = spherical coordinates.
- 2 NRX Number of points desired in the X, Y and Z directions respectively.
- 3 NRY
- 4 NRZ
- 5 XNR The (X, Y, Z) coordinate position respectively, in meters of the

first filed point.

- 6 DXNR Coordinate stepping increment in meters for the X, Y and Z coordinates respectively.
- 7 DYNR
- 8 DZNR

ここでは直交座標系を用いて、ボアサイトである Z 軸上の 1.8 m から 0.6 m 毎に 6 点での電界を求める。通常のラジエーション・パターンを求める NEC2++ インプット・ファイルに下記の“NE” コマンドを追加する。

```
NE 0 1 1 6 0 0 1.8 0.6 0.6 0.6
```

図-1 と 図-2 は、W2IMU ホーンの F = 0.5 タイプと F = 0.7 タイプについて近傍界をプロットしたものである。距離に反比例して電界が減少していることが見て取れる。図-3 と 図-4 は、図-1 と 図-2 の電界の逆数をプロットしたもので、グラフ中の式はプロットの直線近似式(直線の傾き m と y 軸切片 c)を示す。

$$y = mx + c$$

位相中心は x 軸との交点であるので、上式に $y = 0$ を代入して x を求める。すなわち、

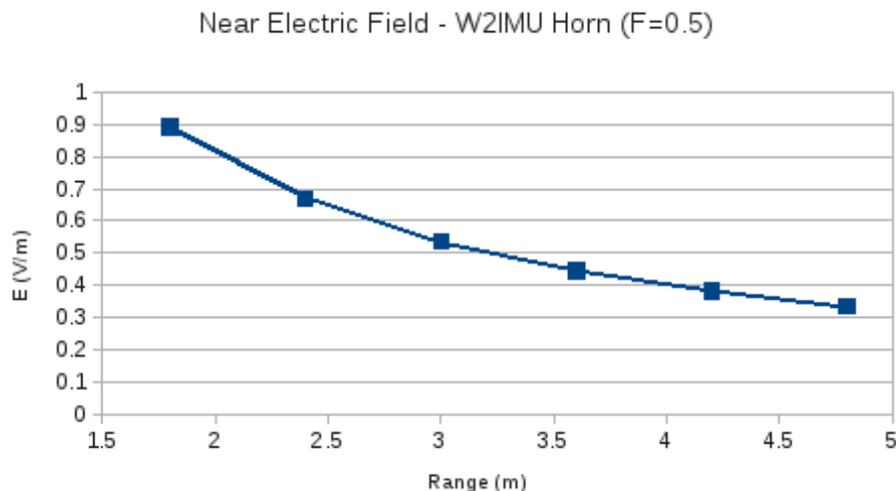


図-1 : W2IMU ホーン F = 0.5 タイプの近傍界

(C) 2015, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

$$x = \frac{-c}{m}$$

図-3 と 図-4 からそれぞれの m と c を代入して位相中心 x を求めると、F = 0.5 タイプでは $x = +1.48$ mm、F = 0.7 タイプでは $x = +2.87$ mm なる値が得られる。 x が正の場合は位相中心がホーン開口面よりも外側で、負の場合は位相中心がホーン開口面よりも内側に位置することを意味する。

手法 その2

カセグレン・アンテナ総合でのシミュレーションからは、フィード・ホーン・アンテナの位相中心がホーン開口面よりも内側に位置するように解釈された。しかし、前述の解析手法では、ホーン単体の位相中心がホーン開口面よりも外側に位置すると結果が得られた。冒頭で述べたように位相中心の定義と計算手法には複数が存在するので、他の手法も試すべきであろう。

W1GHZ はフィード・アンテナの位相中心を求め、それを基に位相誤差を補正した照射効率を計算するツール PHASEPAT.EXE を公開している。[5] その原理と使用法の解説は原典に委ね、ここでは計算結果のみ述べる。

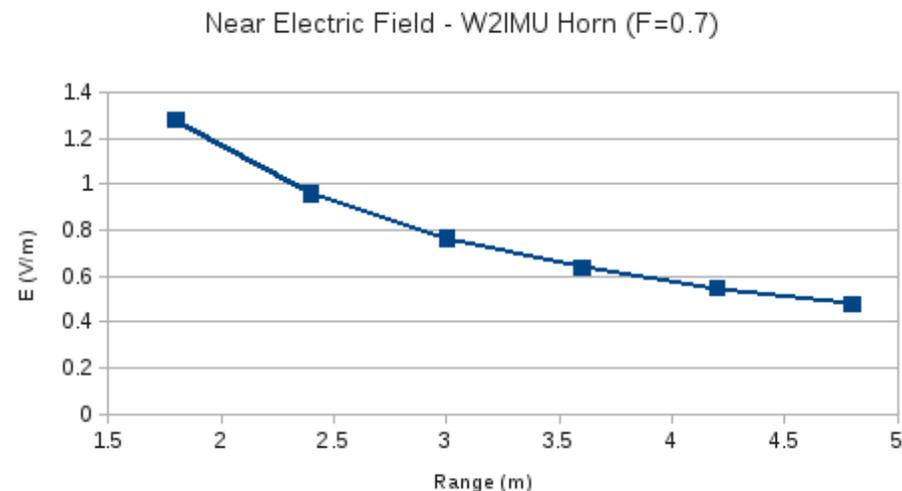


図-2 : W2IMU ホーン F = 0.7 タイプの近傍界

(C) 2015, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

NEC2++ を用いて計算したラジエーション・パターンから E 面と H 面のゲインと位相特性を切り出したファイルを準備し、PHASEPAT.EXE で計算した結果を 図-5 と 図-6 に示す。

計算の結果、F = 0.5 タイプの位相中心は開口面から内側へ $0.003 \lambda = 0.08 \text{ mm}$ 、F = 0.7 タイプは開口面から外側へ $0.0695 \lambda = 2.00 \text{ mm}$ との値を得た。

手法 その3

手法 その1 と その2 で異なる計算結果が出てきた。さて、いずれが正しいのだろうか？ それでは、もう一つ計算を試してみる。

PHASEPAT.EXE の解説に次式が示されている。[5]

$$d = \frac{\Delta\phi \cdot \lambda}{2\pi(1 - \cos\theta)}$$

ここで、 d は位相中心と Azimuth 回転軸とのずれ、 θ は Azimuth の回転角度、 $\Delta\phi$ はボアサイトとの位相偏差である。

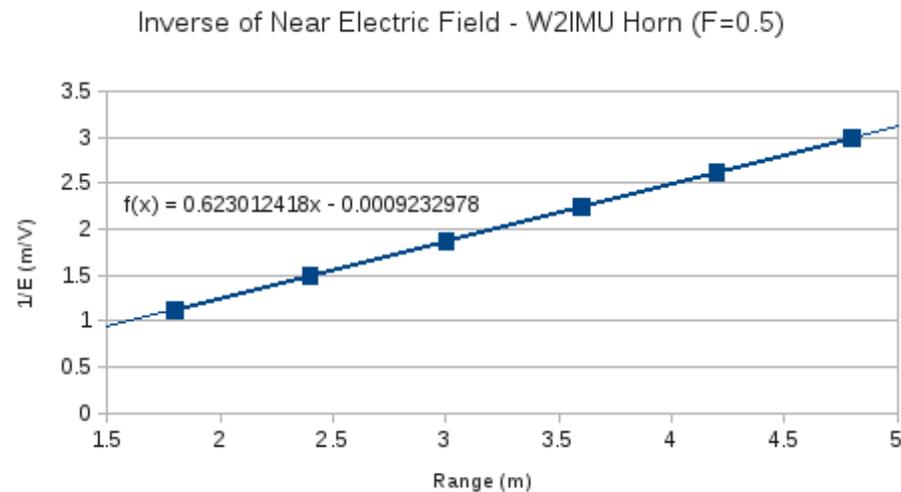


図-3 : 近傍界の逆数 - W2IMU ホーン F = 0.5 タイプ

(C) 2015, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

図示してみても $(1 - \cos\theta)$ の項が良く理解できないので、さらに文献を調査したところ、遠方界を仮定した近似式であることが判明した。[6] 遠方界での位相中心と Azimuth 回転軸との関係を 図-7 に示す。遠方界を仮定することで、電界測定点から見た位相中心と Azimuth 回転軸間の視差角度がゼロとなることを示している。

この図が意味するところは、アンテナのラジエーション・パターンの測定では、位相中心と Azimuth 回転軸を一致させると、位相偏差がゼロ(最小)になることである。これを換言すれば、Azimuth 回転軸をずらしてアンテナを回転させ、位相偏差が最小となる回転軸位置を探せば、そこが位相中心である。

実測で Azimuth 回転軸を幾く通りも試すことは非効率的だが、NEC2++ ではいとも簡単に可能だ。アンテナ・モデルの記述において、座標原点をずらすだけでよい。座標原点をずらすコマンドとして“GM”(Coordinate Transformation)が準備されている。[4] 原点を 5 mm ずらしたモデルの例を 図-8 に示す。

原点を -5 mm、0 mm、+5 mm ずらして NEC2++ で計算したラジエーション・パターンの位相特性を 図-9 と 図-10 に示す。ラジエーション・パターンと言えば、一般的には振幅情報だけのゲイン特性をプロットするが、ここでは位相特性、すなわち、ボアサイト方向 ($\theta = 0 \text{ deg.}$) との偏差 $\Delta\phi$ をプロットしている。原点 (回

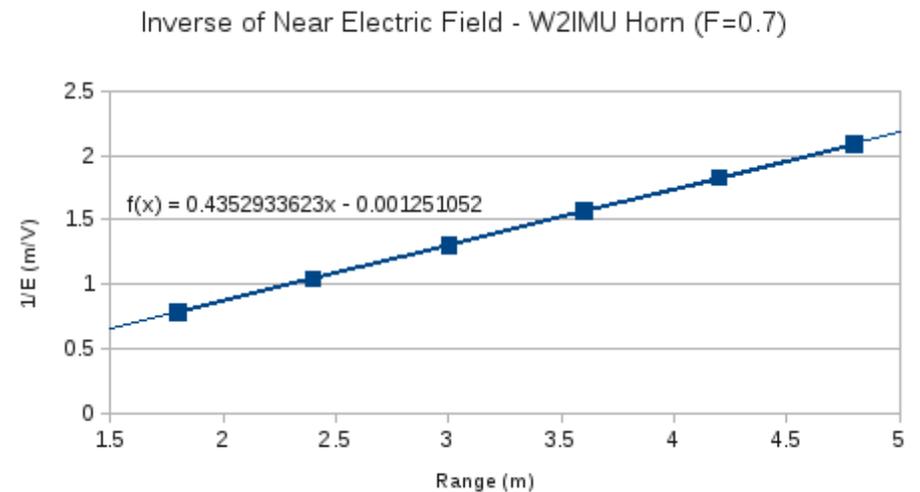


図-4 : 近傍界の逆数 - W2IMU ホーン F = 0.7 タイプ

(C) 2015, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

回転軸) が位相中心に近いであろう 0 mm では位相偏差のうねりが小さく、回転軸がずれた +/- 5 mm では位相偏差のうねりが大きいことが読み取れる。

次に、原点 (回転軸) を 1 mm 毎に +/- 10 mm までずらしたときの位相偏差のうねり具合を計算して、うねり具合が最小となる位置を探索したものが 図-11 と 図-12 である。位相偏差の「うねり具合」の評価は、 図-9 と 図-10 に示す位相偏差の RMS (Root Mean Square) 値を用いる。E 面と H 面の位相中心が異なることが図から読み取れる。前述の W1GHZ の PHASEPAT.EXE では E 面と H 面の位相中心位置の平均値をアンテナの位相中心としているので、 図-11 と 図-12 から概略の平均値を求めると、F = 0.5 タイプでは約 +1.0 mm、F = 0.7 タイプでは約 +2.3 mm が位相中心となる。いずれもホーン開口面よりも外側である。

なお、 図-11 と 図-12 の RMS 位相偏差は、 図-9 と 図-10 に示す位相偏差について、F = 0.5 タイプでは $\theta = 0 \sim 50$ 度、F = 0.7 タイプでは $\theta = 0 \sim 40$ 度で「うねり具合」を算出したものである。これは、 θ の上限値を F 値に対応した照射角度/イルミネーション・テーパー (約 -10 dB) にすることで、位相偏差の大きな領域による計算誤差を排除することが目的である。

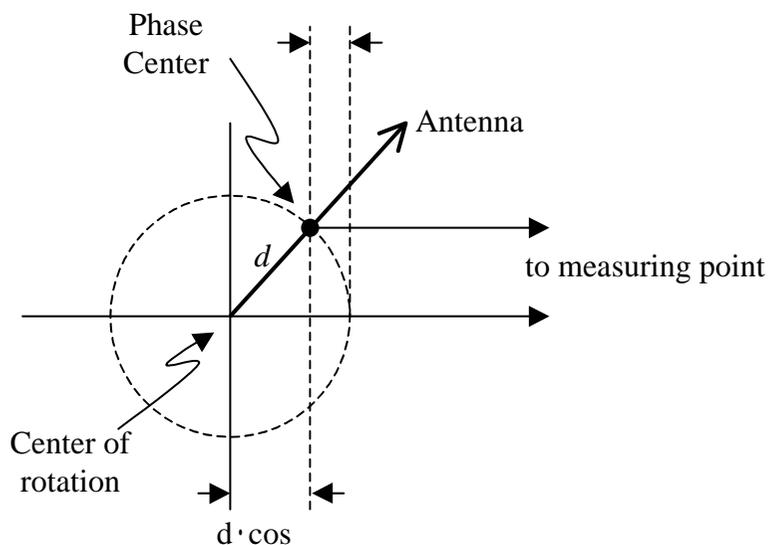


図-7 : アンテナの回転軸が位相中心からずれた場合の位相偏差

考察

三つの手法による位相中心の計算結果を 表-2 にまとめる。

手法 その 1 は、遠方界の電界強度が距離に反比例することを利用したもの。手法 その 2 は、ラジエーション・パターンの位相特性から位相中心を推定するもの。手法 その 3 は、試行錯誤的な位相特性の実測をシミュレーションしたものである。手法 その 2 と その 3 は、遠方界での放射波面 (Wave Front) は球面波で位相が揃っている、という定義に基づく。

表-2 にまとめた結果から、W2IMU ホーンの単体での位相中心は、開口面よりも内側にはないと言えるだろう。それでは、カセグレン・アンテナ総合で求めたフィード・ホーン・アンテナの最適位置と位相中心の関係 (フィード・ホーンをサブ・リフレクタに近づけること) は、どのように解釈できるだろうか？

改めてカセグレン・アンテナ総合でのフィード・ホーン・アンテナとサブ・リフレクタの寸法と位置関係を検証すると、サブ・リフレクタがフィード・ホーン・アンテナの遠方界にないことが解る。アンテナに対する遠方界の定義は、

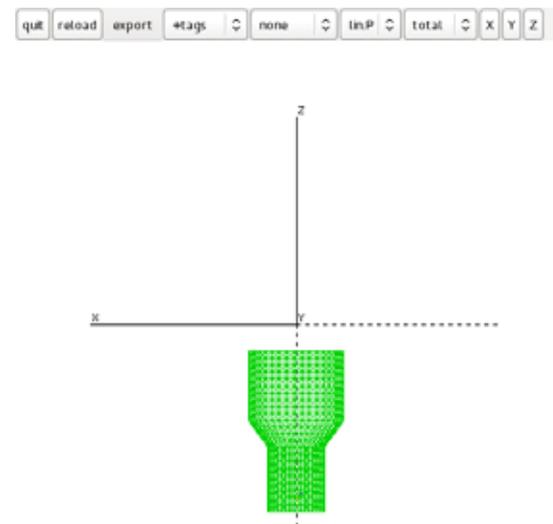


図-8 : 原点をずらしたモデルの例

$$R = \frac{2D^2}{\lambda}$$

である。ここで、 R は遠方界とみなせる最小距離、 D はアンテナの開口直径、 λ は波長。 $D = 35 \text{ mm}$ である $F = 0.5$ タイプでは $R = 85 \text{ mm}$ 、 $D = 48 \text{ mm}$ である $F = 0.7$ タイプでは $R = 160 \text{ mm}$ となる。したがって、サブ・リフレクタ頂点から虚焦点までの距離が 95.61 mm である先の計算例 [2] では、 $F = 0.5$ タイプではわずかに遠方界の関係にあり、 $F = 0.7$ タイプでは遠方界の関係にはない。

試した手法 その 1 ~ 3 は、いずれも遠方界での定義に基づくものであり、遠方界が成立しないフィード・ホーン・アンテナとサブ・リフレクタの関係へ適用することには無理があるだろう。W1GHZ のカセグレン・アンテナの設計ツール [7] では、フィード・ホーン・アンテナとサブ・リフレクタの寸法と配置が遠方界の関係にない場合、その旨の警告を出して再考を促すようになっている。

アンテナ単体での位相中心の定義の他に、カセグレン・アンテナ総合でのフィード・アンテナの位相中心について次のような定義もある。[8] 文献中で引用されている Kildal によれば、

アンテナ総合で最高ゲインを示す位置が位相中心

近似的な仮定に基づく解析ではなく、モーメント法 (MoM = Method of Moment) による力技でアンテナ総合を解析した者にとっては至極もっともな定義であると実感する。

プライム・フォーカスのパラボラ・アンテナでは、フィードとメイン・リフレクタの関係が遠方界にない例は、ほとんど無いだろう。したがって、「焦点合わせ」の初期値として、メイン・リフレクタの焦点にフィード・アンテナの位相中心を配置することが妥当である。しかし、カセグレン・アンテナではフィードとサブ・リフレクタの関係が遠方界にあるか否かを確認することが「焦点合わせ」の第一歩だろう。

Phase Center (mm)	Type : F = 0.5	Type : F = 0.7
Method 1	+1.48	+2.87
Method 2	- 0.08	+2.00
Method 3	+1.0	+2.3

表-2 : 位相中心の計算結果

まとめ

ホーン・アンテナ単体の位相中心を三種類の手法で計算した。結果の数値は完全に一致するものではないが、概ね良好な相関性が確認できた。一方、カセグレン・アンテナ総合の特性に見られるフィード・ホーン・アンテナの位相中心とは異なる結果となった。しかし、両者の違いは定義自体に依存するものであり、遠方界の関係が成立しないカセグレン・アンテナ総合で顕著な相違を生じたと考えられる。

カセグレン・アンテナを構成要素毎に評価し、近似的な仮定に基づいて総合特性を推定するのではなく、モーメント法でアンテナ総合をシミュレーションする意義を再確認できた。

参考文献

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

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

[2] 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,” 2015.

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

[3] “FEKO Examples Guide, Suite 5.1,” December 2005,
EM Software & Systems-S.A. (Pty) Ltd.

[4] Burke, B. J., and Poggio, A. J., “NUMERICAL ELECTROMAGNETICS CODE (NEC9 METHOD OF MOMENTS, PART III: USER S GUIDE,” 1981.

[5] Paul Wade, W1GHZ, “The W1GHZ Online Microwave Antenna Book Chapter 6, Feeds for Parabolic Dish Antennas, Section 6.1 Phase and Phase Center,” 1998-1999.

<http://www.w1ghz.org/antbook/chap6-1a.pdf>

[6] Riley, J. L., “Determination of the phase-centre of a u.h.f. ruggedised log-periodic aerial in the H-plane,” Research Department, Engineering Division, THE BRITISH BROADCASTING CORPORATION, January 1975.

<http://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/reports/1975-05.pdf>

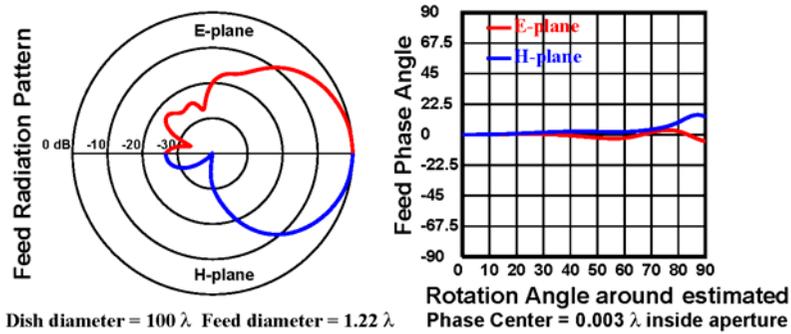
[7] Paul Wade, W1GHZ, “CASSEGRAIN ANTENNA DESIGN CALCULATOR,” 2004.

http://www.w1ghz.org/antbook/conf/Cassegrain_design.xls

[8] A. David Olver, et al, “MICROWAVE HORNS and FEEDS,” IEE, The Institution of Electrical Engineers, 1994.

ISBN 0 7803 1115 9

W2IMU F=0.5



W2IMU F=0.7

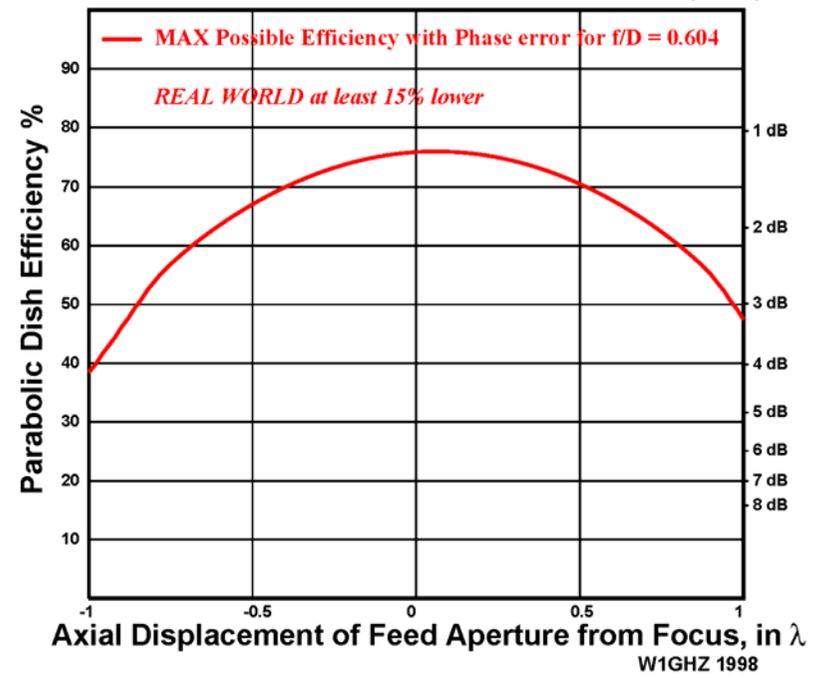
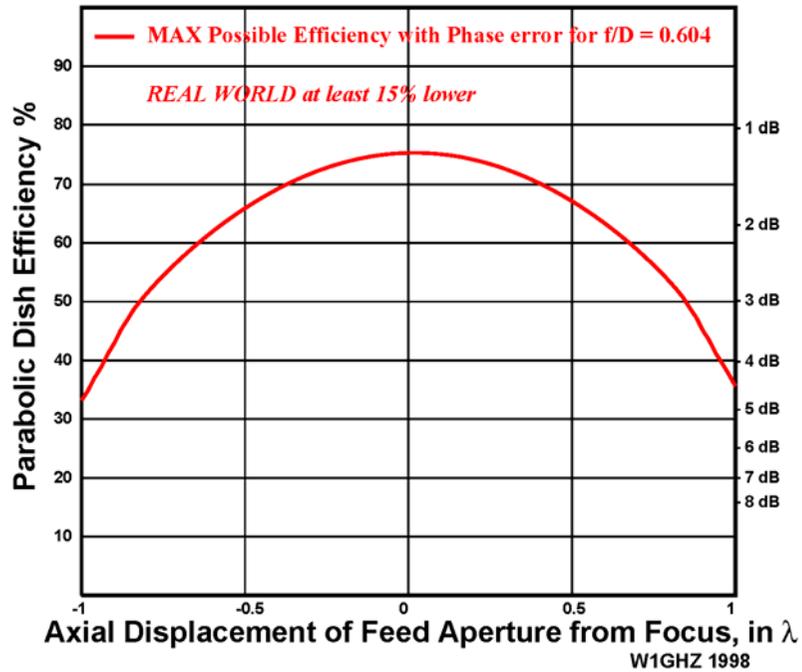
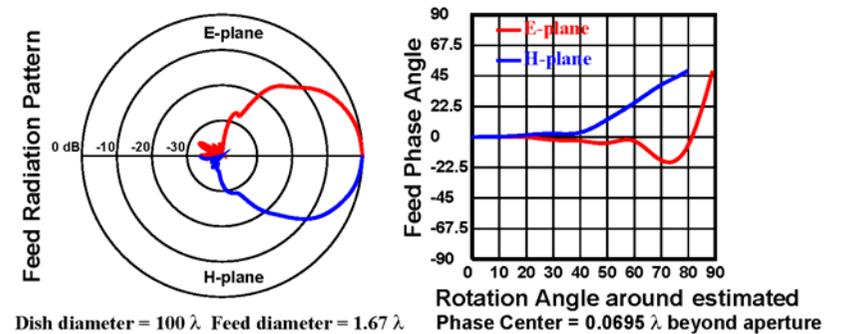


図-5 : PHASEPAT.EXE による計算 - W2IMU ホーン F = 0.5 タイプ

図-6 : PHASEPAT.EXE による計算 - W2IMU ホーン F = 0.7 タイプ

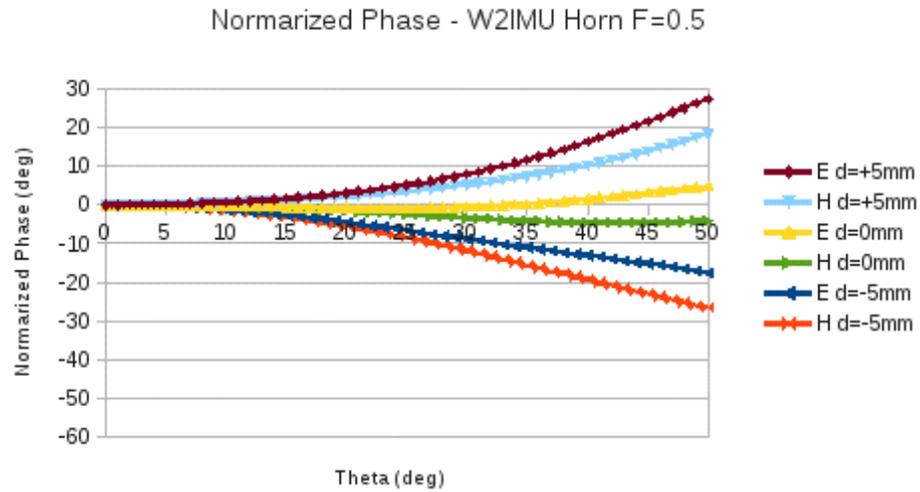


図-9 : 原点をずらした時の位相特性 - W2IMU ホーン F = 0.5 タイプ

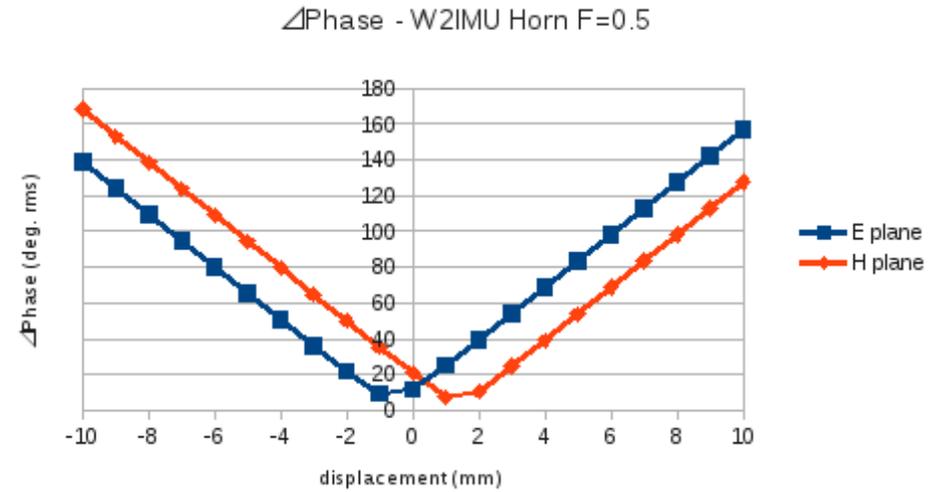


図-11 : 原点のずれに対する位相偏差 - W2IMU ホーン F = 0.5 タイプ

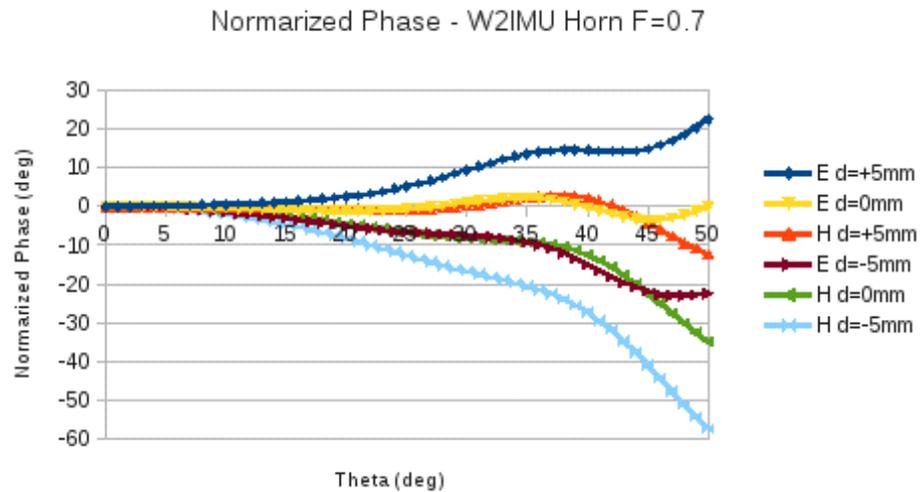


図-10 : 原点をずらした時の位相特性 - W2IMU ホーン F = 0.7 タイプ

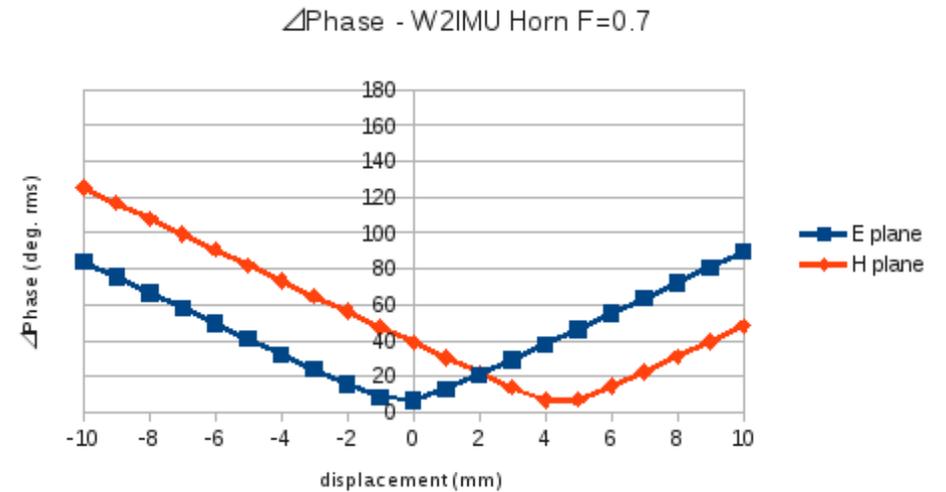


図-12 : 原点のずれに対する位相偏差 - W2IMU ホーン F = 0.7 タイプ