

Simulation of Multi Mode Horn using openEMS

Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

openEMS によるマルチ・モード・ホーンのシミュレーション

武安義幸 / JA6XKQ

モーメント法による電磁界解析プログラム NEC2++ を用いて、マルチ・モード・ホーンのシミュレーションを行ってきた。[1] NEC2++ の Surface Patch を用いて、果たして正しくマルチ・モードをシミュレーションできているのか疑問が残るので、FDTD 法 (Finite Difference Time Domain Method) による電磁界解析プログラム openEMS を用いて、マルチ・モード・ホーンのシミュレーションを行う。シミュレーションの結果、openEMS においても NEC2++ と同様な放射パターンが得られた。

はじめに

これまで、パラボラ・アンテナのフィード・ホーンとして 3 セクション・コニカル・ホーン、W2IMU ホーン、そして Chaparral ホーン等のシミュレーションを NEC2++ を用いて行ってきた。[2] [3] [4] 金属面で構成されるホーン・アンテナを NEC2++ でシミュレーションするには、ワイヤ・グリッドまたは Surface Patch で金属面をモデル化する手法がある。これまで専ら Surface Patch でモデル化を行ってきたが、閉じた面への適用に限定される Surface Patch を開口面を有するホーンに適用した結果に対して、シミュレーションの精度に疑問を残してきた。なお、NEC2++ の Surface Patch での開口面に対する制限はモーメント法そのものに起因するものではない。

NEC2++ の Surface Patch のような開口面に対する制限のないシミュレータを探したところ、FDTD 法による openEMS というオープン・ソースのプログラムを見つけた。[5] FDTD 法を用いたオープン・ソースのプログラムは openEMS の他にも幾つかあるが、使い慣れた GNU Octave または MATLAB でモデル生成を記述できることから、採用を決定した。

シミュレーションの要点

シミュレーションの要点についてまとめる。シミュレーションの要点は大きく三つに分類される。一番目は対象物であるホーンの形状記述、二番目は FDTD 法による解析の計算パラメータ、そして三番目は計算結果の処理である。

対象物であるホーンの外観を 図-1 に示す。FDTD 法では対象物と解析空間をセルと呼ぶ小区間に分割する。図-1 の XY/YZ/ZX の各面に見える網掛け (Meshing = メッシング) が、解析空間とセルのサイズを示している。セルは直方体であり、円錐形のホーンは階段状に近似してモデル化される。したがって、階段状の近似を滑らかにするには、セル・サイズを解析する周波数の波長に比較して十分に小さくしなくてはならない。FDTD 法は差分が基本であるから、セル・サイズは細かければ細かいほど精度の高い結果を得ることができる。[6] openEMS の解説によると、解析する最高周波数波長の 1/15 以下にするようにとある。[7] ここでのシミュレーションではセル・サイズを順次小さくしてゆき、解析結果に有意な変化がないセル・サイズ (1/30) とした。ただし、セル・サイズに対して指数関数的に反比例して計算時間が増大するので、対象物のみ解析する最高周波数 (32 GHz) の 1/30 で高細分化し、その他の解析空間は中心周波数 (10 GHz) の 1/30 で分割した。図-1 のメッシングに濃淡が見えるのは、セル・サイズの違いによるものである。なお、前述の「最高周波数」及び「中心周波数」の定義については後述する。

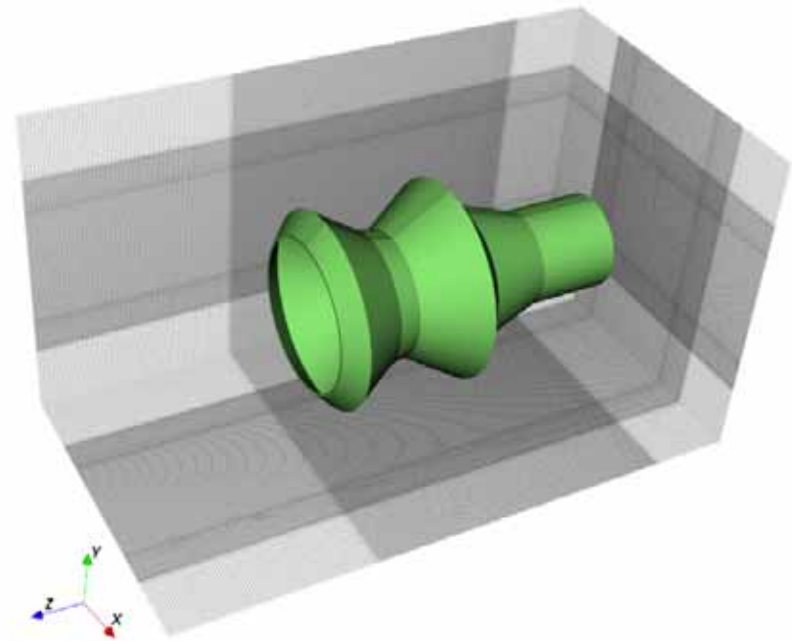


図-1 : PSO (粒子群最適化) による 6 セクション・ホーンの外観

FDTD 法による解析の計算パラメータとして、励振ポートと励振パルスの設定がある。励振ポートは、送信アンテナの給電点と考えると解り易いであろう。そして、電磁波を励振する電圧/電流パルスを励振ポートに印加する。openEMS が備える励振ポートと励振パルス [8] のうち、入門解説のコニカル・ホーンの例題 [9] に倣って円形導波管ポート (Circular Waveguide Port) の TE₁₁ モードとガウス・パルス (Gaussian Pulse) を当初用いた。最終的には、NEC2++ でのモデルと同じ励振とするために円形導波管内に配置したダイポールと集中定数ポート (Lumped Port) と、定常状態の導波管内電界を解析するために正弦波励振 (Sinusoidal Excitation) を用いた。ガウス・パルスのパラメータとして、パルスの中心周波数 f_0 と 20 dB カットオフ周波数 f_c を与える。解析する周波数帯域の最低周波数を f_{start} 、最高周波数を f_{stop} とすると、

$$f_0 = (f_{stop} + f_{start}) / 2$$

$$f_c = (f_{stop} - f_{start}) / 2$$

という関係にある。

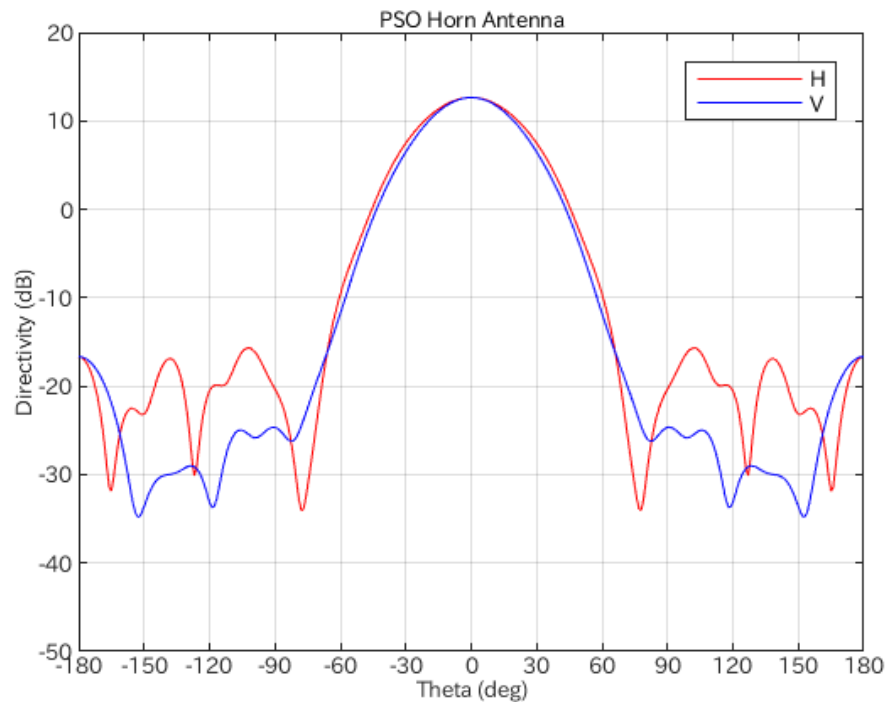


図-2 : NEC2++ による放射パターン

(C) 2019, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

計算結果を処理するにあたっては、そもそも何を結果として出力保存するのかを計算過程で指定しなくてはならない。今回のシミュレーションではマルチ・モードの発生具合を確認したいので、ホーン内の電界とホーンの各セクション開口面での電界を出力保存するように Dump Box を指定した。[10] また、遠方界 (FF = Far Field) での放射パターンを得るために、近傍界 (NF = Near Field) について Dump Box を設定した。近傍界の Dump Box は解析空間の内側で、対象物を内包する閉じた面とする。[11]

上述のプロセスを以って FDTD 法による解析が実行される。openEMS が出力する計算結果を、GNU Octave または MATLAB のプロット機能を用いてグラフ表示する。更には、オープン・ソースで科学データ可視化ツールとしてポピュラーな ParaView [12] を用いて、openEMS の計算結果を多様な視点で可視化する。

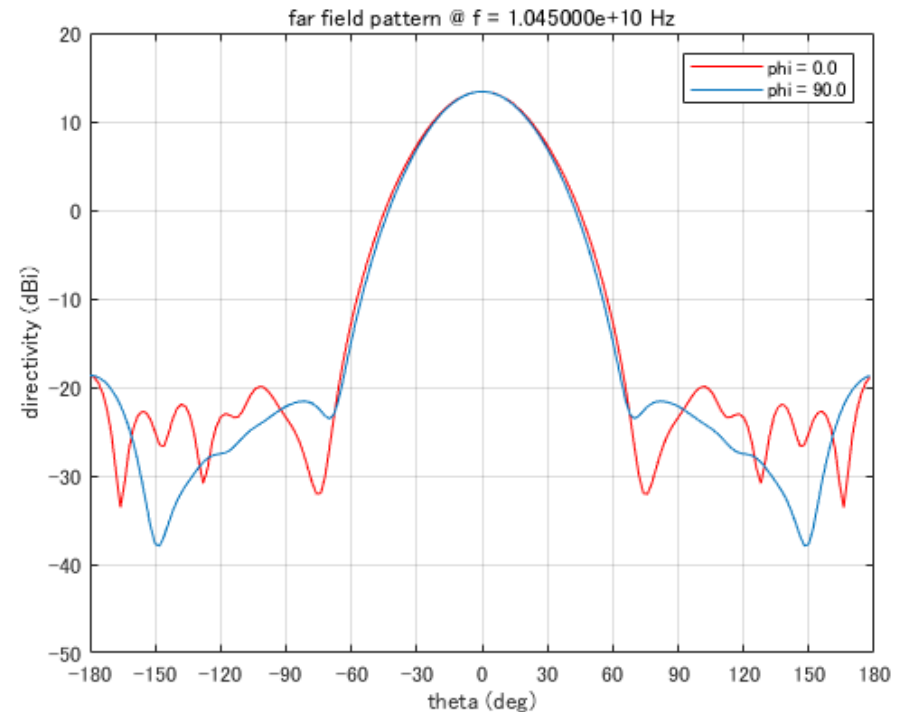


図-3 : openEMS による放射パターン

(C) 2019, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

放射パターン

NEC2++ と openEMS の放射パターンを比較する。 NEC2++ による放射パターンを 図-2 に、 openEMS による放射パターンを 図-3 にそれぞれ示す。

ゲインは NEC2++ では +12.22 dBi、 openEMS では +13.38 dBi と計算された。

ホーン内電界

NEC2++ ではホーン内の電界を計算できないので、マルチ・モードの発生具合を直接的に観察するために openEMS と ParaView でホーン内電界を可視化する。 図-4 にホーン内の Zx 面と Zy 面での電界を示す。

図-5 に示す 6 セクションにおいて、各セクションの開口面での電界を 図-6 から 図-12 に示す。 図においては、電界強度をカラー・スケールで示すとともに、電磁界モードが識別し易いように電界強度を 16 段階の等高線で示した。

また、 図-13 および 図-14 に、電界のベクトルを示す。

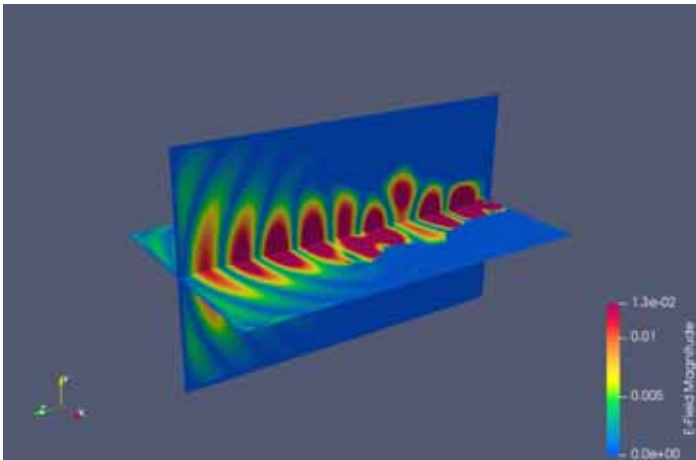


図-4 : ホーン内
Zx 面と Zy 面の電界

考察

6 セクション・ホーンは 図-6 と 図-13 に示すように、凡そ TE11 モードで励振されている。各セクションのフレアによって TE11 モードから異種モードが励起される様子が 図-7 から 図-12 の電界分布から読み取れる。 単一の高次モード [13] と比較すると、複数の高次モードが合成されていると判断される。 図-7 の Section-1 出力部 (R1) では、TE22 または TM22 が励起されているようである。 しかし、いずれの高次モードが如何なる比率で合成されているかを、電界分布から定性的かつ定量的に判断するには至っていない。

複数の高次モードの効果を定量的に捉えたものとして、最終的には放射パターンの比較となる。 図-2 と 図-3 の放射パターンを比較すると、

- メイン・ローブは良い一致を示している
- サイド・ローブのエンベロープ形状は良い一致を示している

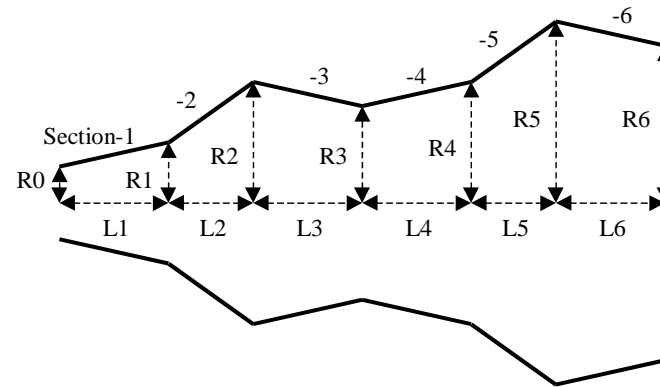


図-5 : 6 セクション・
ホーンの寸法定義

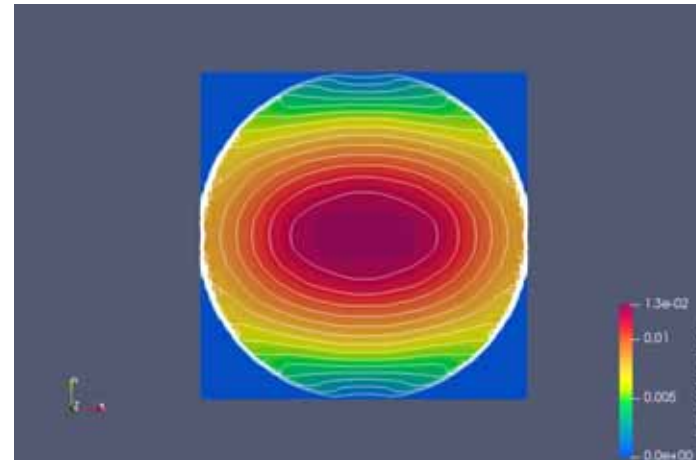


図-6 : Section-1 入
力部 (R0) = 励振電
界

- 各ローブのナルの角度は良い一致を示している
- サイドとバック・ローブのレベルに差異がある

openEMS でのサイドとバック・ローブのレベルについては、別稿 [14] でのベンチマークにおいて他の手法によるシミュレーションと比較した際にも、差異が認められた。 NEC2++ でのサイドとバック・ローブのレベルについては、Surface Patch のサイズに依存して計算結果が変化することを確認している。 [2] したがって、サイドとバック・ローブの差異を論じるには、更なる検証が必要であろう。

openEMS によるホーン内電界分布と放射パターンの相関性から、 NEC2++ においてもマルチ・モードがシミュレーション可能と判断される。

まとめ

「 NEC2++ でマルチ・モードがシミュレーション可能か? 」との疑問を確認すべく、 FDTD 法による openEMS を用いてシミュレーションを行った。 ホーン内電界分布について定性的かつ定量的にマルチ・モードの発生量を論じることはできなかったが、電界分布の多様性から判断して、 6 セクション・ホーンがマルチ・モードを利用していることが確認できた。 openEMS と NEC2++ の放射パターンを比較することで、 NEC2++ がマルチ・モードをシミュレーション可能との結論を得た。

//

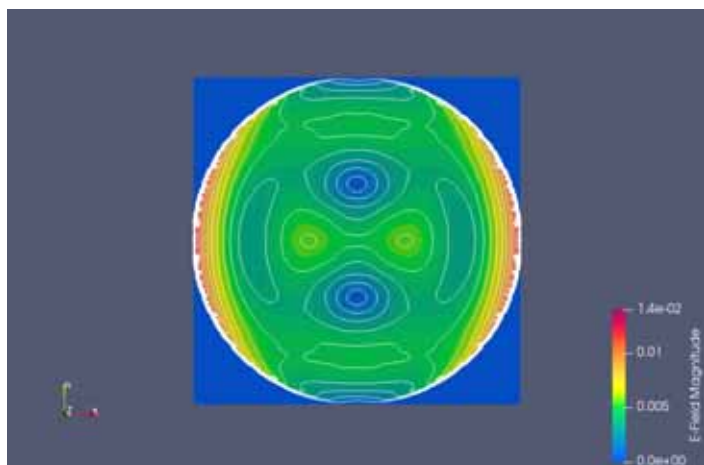


図-7 : Section-1 出力部 (R1) の電界

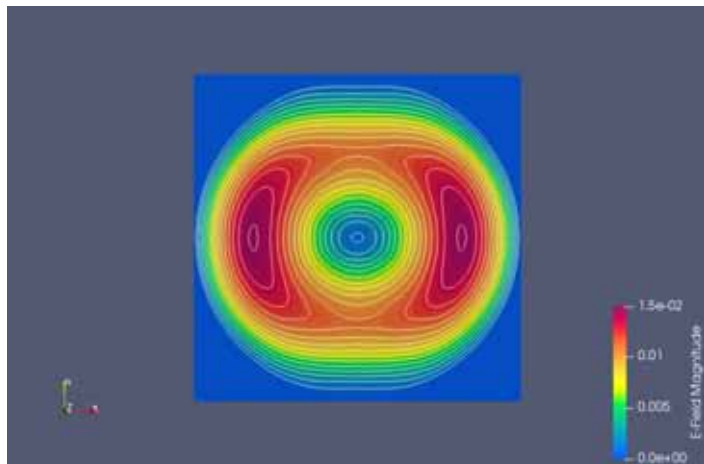


図-8 : Section-2 出力部 (R2) の電界

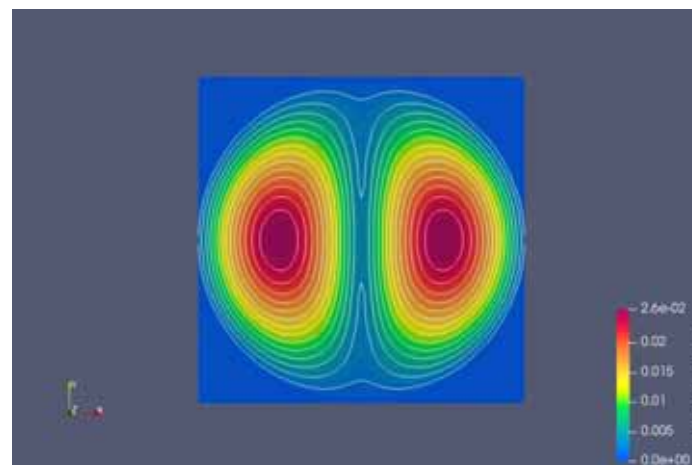


図-9 : Section-3 出力部 (R3) の電界

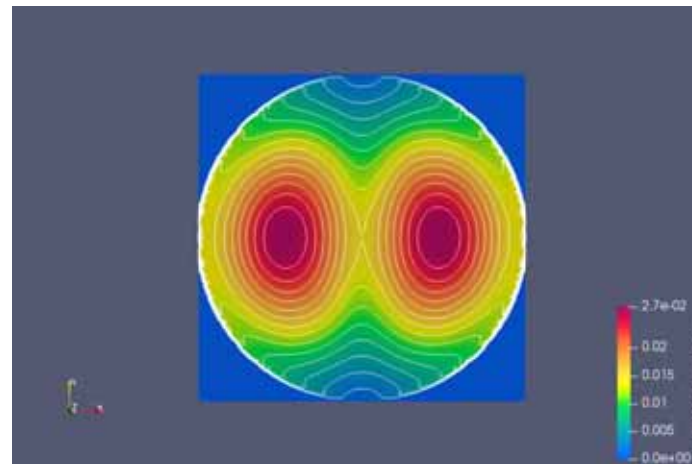


図-10 : Section-4 出力部 (R4) の電界

参考文献

[1] 武安義幸, JA6XKQ, “粒子群最適化アルゴリズムによるフィード・ホーン・アンテナの最適化設計.” Dec. 20. 2014

http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Nec2ppPSO_1.pdf

[2] 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/AntNoiseTemp_2.pdf

[3] 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>

[4] 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,” Sep. 23. 2018.

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

[5] Thorsten Liebig, openEMS - Open Electromagnetic Field Solver, General and Theoretical Electrical Engineering (ATE), University of Duisburg-Essen

<https://www.openEMS.de>

[6] 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, ISBN 978-4-339-00689-6

[7] openEMS Online Manual FDTD Mesh

http://openems.de/index.php/FDTD_Mesh.html

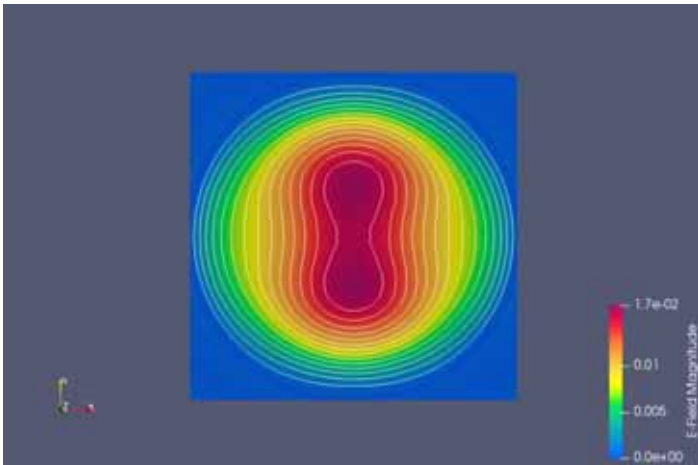


図-11 : Section-5
出力部 (R5) の電界

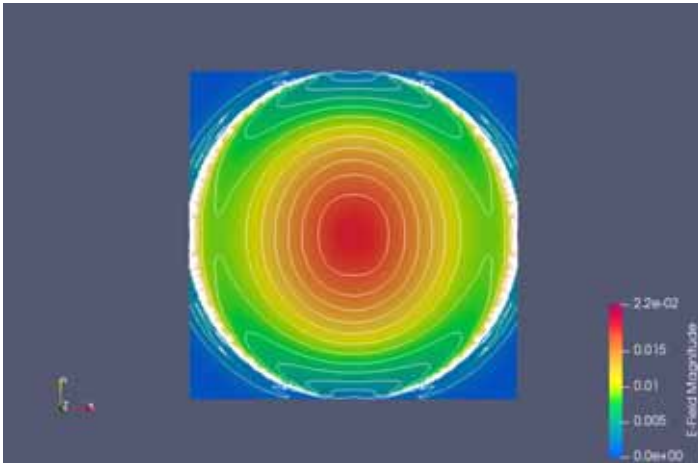


図-12 : Section-6
出力部 (R6) = ホーン
出力の電界

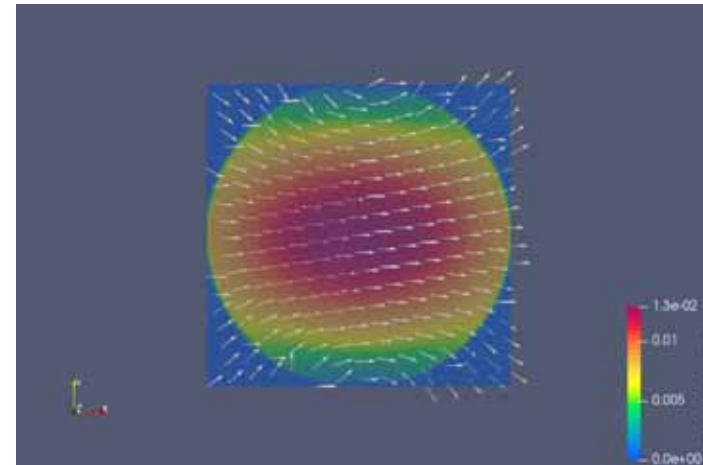


図-13 : Section-1
入力部 (R0) = 励振
電界のベクトル表示

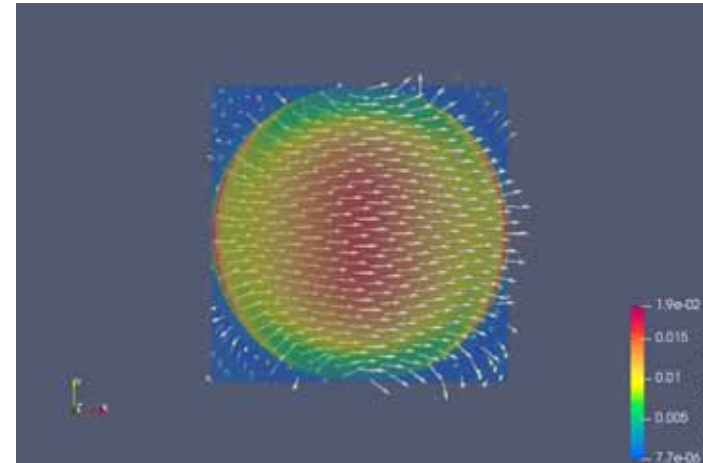


図-14 : Section-6
出力部 (R6) = ホーン
出力電界のベクトル表示

[8] openEMS Online Manual Excitation

<http://openems.de/index.php/Excitation.html>

[9] openEMS Tutorial: Conical Horn Antenna

http://openems.de/index.php/Tutorial:_Conical_Horn_Antenna.html

[10] openEMS Online Manual Dump Box Property

http://openems.de/index.php/Dump_Box_Property.html

[11] openEMS Online Manual NF2FF

<http://openems.de/index.php/NF2FF.html>

[12] ParaView an open-source, multi-platform data analysis and visualization application

<https://www.paraview.org>

[13] Weng Cho CHEW, "Lectures on Theory of Microwave and Optical Waveguides." Fall 2012, University of Illinois

<http://wcc Chew.ece.illinois.edu/chew/course/tgwAll20121211.pdf>

[14] 武安義幸, JA6XKQ, "openEMS による誘電体装荷ホーン・アンテナのシミュレーション." Sep. 15. 2019

http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/openEMS_DielectricRod_2.pdf