

ADVENTURE_FullWave

Full - Wave Analysis with HDDM

Version: β -0.1

プログラム使用マニュアル

September 17, 2019

ADVENTURE Project

目次

1. はじめに	1
1.1. 本プログラムの特徴	1
1.2. 稼働環境.....	1
1.3. コンパイルとインストール	1
1.4. 実行方法.....	5
2. 並列処理機能について.....	6
2.1. 並列処理機能.....	6
2.2. 領域分割(ADVENTURE_Metis)について.....	7
3. 解析機能	8
3.1. 解析の流れ.....	8
4. 実行方法	9
4.1. 入出力ファイル	10
4.2. 単位系.....	11
4.3. 実行時オプション	11
Appendix	14
A. ツール類について	14
A.1. 一体型解析モデルファイル作成ツール adv_makefem.....	14
A.2. 可視化ファイル作成ツール adv_makeUCD	14
A.3. PML 付与ツール adv_makepml	15
B. 入出力ファイルフォーマット	17
B.1. 一体型解析モデルファイル.....	17
B.2. HDDM 型の解析モデル入力ファイル.....	19
B.3. 解析結果出力設定ファイル.....	19
B.4. 解析結果出力ファイル.....	19
B.5. 物性データファイル.....	19
B.6. 形状定義ファイル.....	21
B.7. デルタギャップ給電ファイル.....	24

C. 解析例(モデルの作成から解析まで)	25
C.1. 高周波電磁界問題・簡易的なモデルの解析例.....	25
C.2. 高周波電磁界問題・並列計算環境での解析例.....	33
参考文献	42

1. はじめに

本書は ADVENTURE Project [1]において開発中の電磁界解析のための有限要素解析ソルバ ADVENTURE_FullWave の使用マニュアルである。

本章では ADVENTURE_FullWave の概要および実行までの操作手順を説明し、2 章以降では本プログラムの解析機能等を紹介する。

1.1. 本プログラムの特徴

ADVENTURE_FullWave は以下のような特徴を持っている。

- ・ 高周波電磁界問題の有限要素解析が可能
- ・ 階層型領域分割法(Hierarchical Domain Decomposition Method: HDDM) [2][3][4][5]による負荷分散を行った並列処理が可能
- ・ 領域分割法を逐次処理するシングル版が使用可能
- ・ MPI 並列版が使用可能

1.2. 稼働環境

本プログラムは以下の環境で動作確認を行っている。

対応プラットフォーム : Linux

並列通信ライブラリ : MPI

その他 : C コンパイラ, ADVENTURE_IO

フリーの MPI ライブラリ[6]として有名なものに MPICH [7]がある。最近の Linux ディストリビューションでは標準インストールされる場合もあるが、無い場合にはインストールが必要となる。

- ・ MPICH の入手先

<https://www.mpich.org/>

また, ADVENTURE_IO は ADVENTURE Project のホームページ

<http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>

にアーカイブがあるのでこれをダウンロードし, ADVENTURE_IO のマニュアルに従ってあらかじめインストールしておく必要がある。

1.3. コンパイルとインストール

ADVENTURE_FullWave のモジュール群をコンパイルするには, C コンパイラ, MPI のコンパイル環境, および ADVENTURE_IO がインストールされている必要がある。

ADVENTURE_FullWave のモジュール群のコンパイルとインストールをするには以下の手順に従えばよい。

(1)アーカイブファイルの展開

```
% gunzip -c AdvFullWave-b0.1.tar.gz | tar xvf -
```

ただし、“%”はコマンドプロンプトを表しているため、実際には入力する必要はない。アーカイブファイルの展開により、AdvFullWave-b0.1 ディレクトリが作成される。また、AdvFullWave-b0.1 は次のサブディレクトリを含んでいる。

main	:	ソルバのソースファイル
doc	:	ドキュメント類
tools	:	ツール類
lib	:	ライブラリ群
sample_data	:	サンプルデータ

(2)Makefile.in の編集

展開したディレクトリに移動し、Makefile.in の編集を行う。

```
# *****
#   Copyright (C) 2000, 2001, 2002 Shinobu Yoshimura,
#   The University of Tokyo,
#   the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)
#   Copyright (C) 2003, 2005, 2007, 2014, 2015, 2016, 2017 ADVENTURE Project,
#   All Rights Reserved
# *****

# Include file for each Makefile
# Please modify for your own environment

# path  for  ADVENTURE_IO  system
ADVSYSYD      =      $(HOME)/ADVENTURE/bin      ⇐ (A)

# path for install directory
INSTALL_DIR   =      $(HOME)/ADVENTURE           ⇐ (B)
INSTALL_BINDIR      =      $(INSTALL_DIR)/bin
INSTALL_DOCDIR      =      $(INSTALL_DIR)/doc
INSTALL_DOCMAGDIR   =      $(INSTALL_DOCDIR)/AdvFullWave

# C compiler & linker
CC      =      gcc      ⇐ (C)
LINKER  =      $(CC)
AR      =      ar
ARFLAGS =      cr

# parallel C compiler & linker
MPI_CC      =      mpicc      ⇐ (D)
MPI_LINKER  =      $(MPI_CC)

# Compiler options
CFLAGS      =      -O2  -Wall      ⇐ (E)
CFLAGS_G    =      -g   -Wall
```

- (A) ADVENTURE_IO の advsys-config がインストールされているディレクトリを絶対パスで指定する。advsys-config は ADVENTURE_IO のインストール先として指定したディレクトリの直下の bin ディレクトリにインストールされている。(赤文字の部分を ADVENTURE_IO のインストール先として指定したディレクトリに変更すればよい)

```
# path for ADVENTURE_IO system
ADVSYS = $(HOME)/ADVENTURE/bin
```

- (B) ADVENTURE_FullWave のモジュール群やマニュアルなどをインストールするディレクトリを絶対パスで指定する。(赤文字の部分をインストール先に変更する)

```
# path for install directory
INSTALL_DIR = $(HOME)/ADVENTURE
```

c

- (C) 使用する C コンパイラを指定する。(赤文字の部分を使用する C コンパイラに変更する)

```
# C compiler & linker
CC = gcc
LINKER = $(CC)
```

- (D) 使用する MPI 環境に応じて MPI コンパイラを指定する。(赤文字の部分を使用する MPI コンパイラに変更する)

```
# parallel C compiler & linker
MPI_CC = mpicc
MPI_LINKER = $(MPI_CC)
```

- (E) コンパイラの最適化オプションとオブジェクト・ファイルにシンボリック・デバッグ情報生成するように指示するオプションを指定する。(赤文字の部分を使用するオプションに変更する)

```
# Compiler options
CFLAGS = -O2 -Wall
CFLAGS_G = -g -Wall
```

(3)コンパイルする

```
% make
```

(4)インストールする

コンパイルに成功したら、以下のコマンドによりインストールを行う。

```
% make install
```

ただし、インストール先ディレクトリに書き込み権限を持ったユーザによって行う必要がある。これらの操作により、以下のファイルが(2)の(B)で指定したディレクトリにインストールされる。

高周波電磁界解析用実行モジュール

- ・ bin/adv_fullwave-s : シングル版
- ・ bin/adv_fullwave -p : 静的負荷分散版
- ・ bin/adv_fullwave -h : 動的負荷分散版

ツール類

- ・ bin/adv_makefem : 一体型 FEA モデル作成ツール
- ・ bin/adv_makeUCD : AVS 可視化用 UCD ファイル作成ツール
- ・ bin/adv_makepml : 簡易的 PML 作成ツール

マニュアル

- ・ doc/AdvFullWave/manual-jp.pdf : 日本語マニュアル

1.4. 実行方法

ここでは、ADVENTURE_FullWave の静的負荷分散実行モジュールの実行方法を示す。また、並列処理には MPICH における実行方法を示す。

```
% mpirun [option for mpirun] adv_fullwave-p [option] [data_dir]
```

ここで、[option for mpirun]は mpirun に対するオプションであり、主なものとして以下のようなものがある。詳細は MPICH のマニュアルを参照。

- **-np *n***

起動する MPI プロセスの数 *n* を指定する。

- **-machinefile *machine_file***

並列計算に使用するマシン名のリストファイルを指定する。指定しない場合はシステムで設定されているデフォルトファイルが使用される。

また、[options]は ADVENTURE_FullWave に対するオプションである。

2. 並列処理機能について

2.1. 並列処理機能

ADVENTURE_FullWave では、階層型領域分割法[2][3][4][5]を用いることで並列処理を実現している。図 1 に領域の階層型分割を模式的に示す。1 階層目の大きな分割単位を“部分”(part)と呼び、2 階層目の細かい分割単位を“部分領域”(subdomain) と呼ぶことにする。これらの領域分割は ADVENTURE_Metis によって行うことができる。

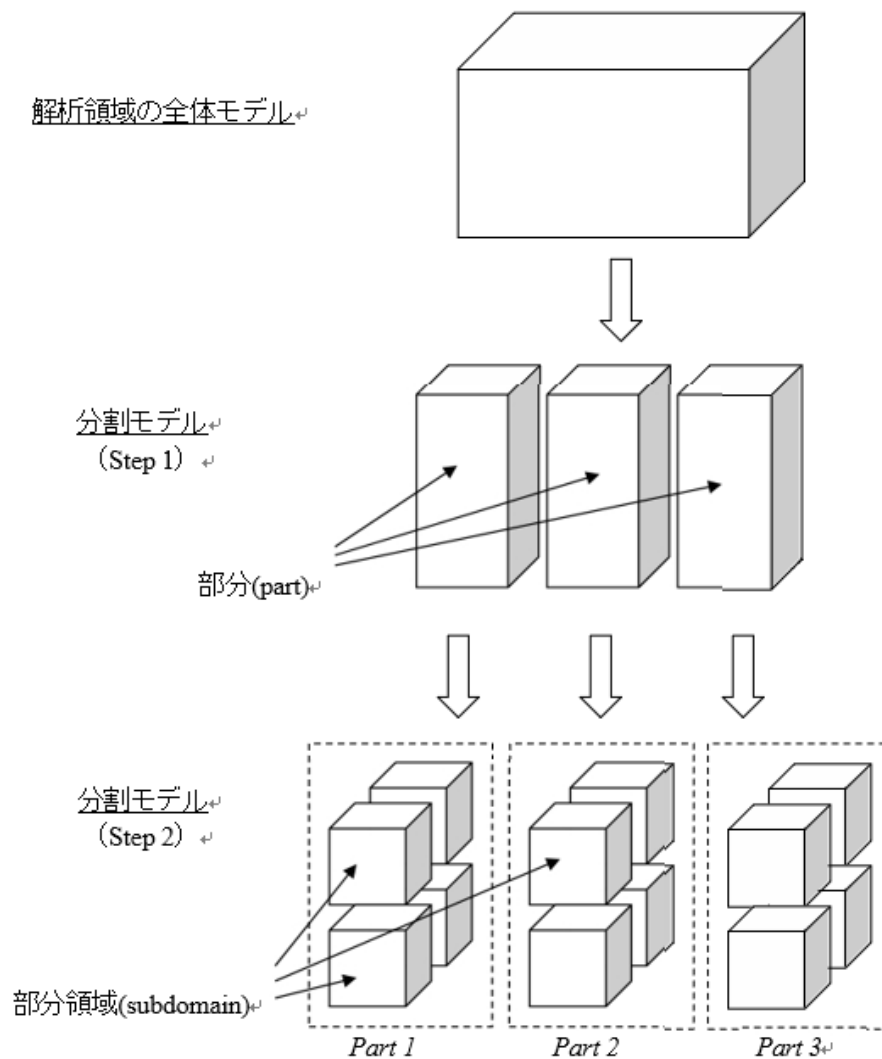


図 1 階層型領域分割

ADVENTURE_FullWave は並列ライブラリとして MPI[2]を用いており、起動時には指定に応じて複数のプロセス(環境によってはスレッド)が起動される。1 ノード(CPU)あたり 1 プロセスを起動するのが一般的であるが、1 ノードに対して複数のプロセスを割り当てることも可能である。

2.2. 領域分割(ADVENTURE_Metis)について

ADVENTURE_Metis では、非常に細かい分割を行った場合、要素を一つも含まないような領域が作られてしまうことがある。ADVENTURE_FullWave では実行時にそのような領域が存在すると、警告を出して終了するようになっている。また、総要素数に対して非常に粗い分割を行った場合、計算量が多くなったり、メモリ不足になったりすることがある。

ADVENTURE_FullWave の計算性能は領域分割数に依存している。基本的に“part”数は並列処理の手法、使用するノード数や計算機環境に基づいて決定される、“subdomain”数は計算処理に必要とされるメモリに基づいて決定される。1 領域あたりの要素数を 100 前後にしたとき、計算時間およびメモリ使用量の面で比較的良好な性能を得ることができることがわかっている[9]。

ADVENTURE_Metis では、部分数 N_{part} と、1 部分あたりの領域数 $N_{subdomain}$ を指定して実行するため、総要素数 $N_{element}$ をとすると、1 領域あたりの要素数 n は次式によって与えられる。

$$n = \frac{N_{element}}{N_{part} \times N_{subdomain}}$$

$N_{element}$	: 総要素数
$N_{subdomain}$	: 領域分割数
N_{part}	: 部分数

3. 解析機能

ADVENTURE_FullWave は、高周波電磁界解析が可能である。この解析における機能を以下に示す。

3.1. 解析の流れ

ADVENTURE システムを用いた一連の解析の流れは図 6 のようになっている。詳細は Appendix の C において、実際のコマンドを示しながら述べる。

(1) メッシュデータの作成

ADVENTURE_CAD, ADVENTURE_TriPatch, ADVENTURE_TetMesh, 商用 CAD などを用いて、解析モデルのメッシュ分割を行う。

(2) 境界条件の付加

ADVENTURE_BCtool の msh2pch をもちいてメッシュ表面情報の抽出を行い、bcGUI を用いて境界条件設定を行う。GUI による条件設定の詳細は ADVENTURE_BCtool のマニュアルおよび Appendix の A.1 を参照すること。

(3) 一体型解析モデルの作成

ADVENTURE_FullWave のツール advmag_makefem を用いてメッシュ、物性値、境界条件から ADVENTURE_IO フォーマットの一体型解析モデルを作成する。

次に入出力ファイルのトップディレクトリ data_dir を作成し、一体型解析モデルを data_dir/model_one/ に移動する。

```
% mkdir data_dir data_dir/model_one
% mv input.adv data_dir/model_one/
```

(4) 領域分割

作成した一体型解析モデルをもとに ADVENTURE_Metis を用いて階層型に領域分割されたモデルを作成する。なお、実行時にはオプション -difn 1 を用いる必要がある。このオプションは内部境界上節点の自由度を 1 に指定するためのものである。これは、構造解析で求める節点変位の自由度は 3 であるのに対し、電磁界解析では節点の自由度が 1 であるためである。

(5) 解析の実行

ADVENTURE_FullWave のモジュールを用いて、分割された解析モデルを入力として解析を行う。

(6) 解析結果の可視化

ここでは AVS や ParaView などを用いて可視化する．最初に ADVENTURE_FullWave 付属のツール `adv_makeUCD` を用いて UCD ファイルまたは VTK ファイルを作成しておく．

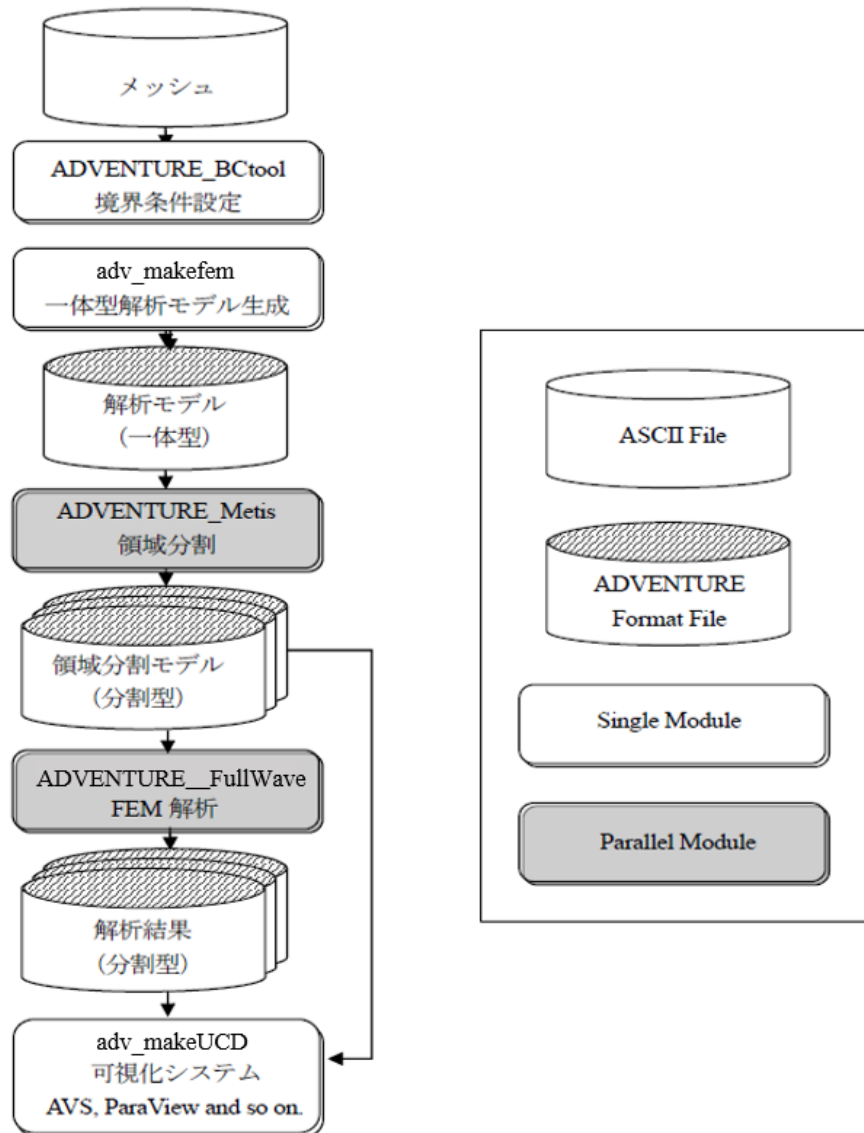


図 2 解析の流れ

4. 実行方法

ADVENTURE_FullWave は並列処理方法にて 2 つのモジュールがある．それぞれ，次のコマンドで実行を行う．

- シングル版の場合


```
% adv_fullwave-s [option] [data_dir]
```
- 静的負荷分散による並列版の場合(MPICH)


```
% mpirun [options for mpirun] adv_fullwave-p [options] [data_dir]
```

ここで、[*options for mpirun*]は *mpirun* コマンドに対するオプションであり、[*options*]は ADVENTURE _FullWave に対するオプションである。このオプション指定により、解析種類の指定や、種々の設定を行う。[*data_dir*]は必須オプションであり、入出力データのトップディレクトリを指定する。この下のディレクトリおよびファイル名は4.1.節に示す。

4.1. 入出力ファイル

4.1.1. ファイル名

各入出力ファイル名はデフォルトでは以下のようにになっている。*data_dir* は入出力ファイルのトップディレクトリ名であり、解析に関係する入出力ファイルは基本的にこのディレクトリ内に置くことになる。なお、これらのディレクトリ名やファイル名は実行時オプションで変更することも可能である。(4.3.5 項参照)

- ・ 一体型解析モデルファイル : *data_dir/model_one/input.adv*
- ・ HDDM 型の解析モデル入力ファイル : *data_dir/model/advhddm_in_P.adv*
- ・ 解析結果出力設定ファイル : *data_dir/result/advhddm_out.adv*
- ・ 解析結果出力ファイル : *data_dir/result/advhddm_out_P.adv*
- ・ 物性データファイル : *data_dir/mtrl.dat*

ここで、**P** は部分番号を表す。

また、これらのファイル以外に、物性データファイル内でファイル名を指定して使用する入力ファイルがある。これらのファイルはディレクトリ *data_dir* 内からの相対パスでファイル名が指定される。これらには以下のようなものがある。

- ・ 形状定義ファイル

なおこれらのファイルのフォーマットについては Appendix の「B. 入出力ファイルフォーマット」を参照のこと。

4.1.2. 使用するファイル

モジュールの入力ファイルと出力ファイルは以下のようにになっている。

adv_fullwave-s, *adv_fullwave-p*

- 入力ファイル
 - HDDM 型の解析モデル入力ファイル
 - 物性データファイル
 - 形状定義ファイル
 - デルタギャップ給電データファイル
- 出力ファイル
 - 解析結果出力設定ファイル
 - 解析結果出力ファイル

4.2. 単位系

入力ファイルでの単位系の指定機能(一部の角度の単位指定を除く)や、プログラム内部での単位系の変換機能は含まれていない。そのため、入力データ作成時に矛盾のない単位系を使用しておく必要がある。

本マニュアルにおいて入出力ファイルフォーマットなどで単位に言及する場合は、すべて国際単位系(SI)である。一部の基本単位を変更する場合には、組立単位など矛盾のないように読み替える必要がある。

例) 長さの単位に m ではなく、mm を使用する場合

物理量	マニュアル上の単位	変更後	
磁気抵抗率	m/H	mm/H	1 m/H = 1,000 mm/H
導電率	S/m	S/mm	1 S/m = 0.001 S/mm
磁束密度・ 磁化ベクトル	T = Wb/m ²	Wb/mm ²	1 T = 10 ⁻⁶ Wb/mm ²
磁場	A/m	A/mm	1 A/m = 0.001 A/mm
強制電流密度	A/m ²	A/mm ²	1 A/m ² = 10 ⁻⁶ A/mm ²
誘電率	F/m	F/mm	1 F/m = 0.001 F/mm

図 3 単位系

4.3. 実行時オプション

4.3.1. すべてのモジュールに共通のオプション

実行時に使用可能なオプションは以下の通りである。なお、オプションのあとにつく n, x, s はそれぞれ整数, 浮動小数点数, 文字列を指定することを示し、その後に続く()はデフォルト値を表す。

- -memlimit n(1000)

各プロセスが使用するメモリの上限を n [MByte]とし、これを越えた場合はその時点で実行を停止する。

- -help または -h

ヘルプメッセージを表示する。

- -version または -v

モジュールのバージョンを表示する。

4.3.2. HDDM に関するオプション

ADVENTURE_FullWave では解法として、領域分割法に反復法を適用し、並列計算機に実装した階層型領域分割法(HDDM)を用いており、それらをコントロールするためにいくつかのオプションがある。これらのオプションは HDDM を行うシングル版(-s)、静的負荷分散版(-p)の各モジュールで指定できる。

- -hddm-pc s(diag)

HDDM で用いる前処理を指定する。s として指定できる文字列は以下の通りである。

- none : 前処理を行わない
- diag : 簡易対角スケーリングを用いる
- -hddm-eps x (時間調和渦電流解析では 1.0e-03)
HDDM の収束判定値を指定する。これは、HDDM 反復における残差ベクトルの初期残差ベクトルに対するノルムの相対誤差であり、相対誤差がこの値より小さくなった時点で HDDM 反復が収束したと判定する。
- -hddm-div x (1.0e+10)
HDDM が発散したと判定する値を指定する。相対誤差がこの値より大きくなった時点で HDDM 反復が発散したと判定し、プログラムを終了する。
- -hddm-max-loop n (4000)
HDDM 反復回数の上限を指定する。この値を超えた場合は、収束に至る前でもプログラムは終了する。
- -hddm-log または -hddm-no-log
HDDM 反復の収束履歴を出力する／しないを指定する。デフォルトでは
`data_dir/calc_log/log_g_HDDM_Full_Wave`
に出力される。

4.3.3. 部分領域の解法に関するオプション

ADVENTURE_FullWave では HDDM の部分領域に用いる線形ソルバとして、反復法または直接法を用いており、それらをコントロールするためにいくつかのオプションがある。

- -l-sol-pc s (ICC)
線形ソルバで用いる前処理を指定する。s として指定できる文字列は以下の通りである。
 - none : 前処理を行わない
 - ICC : 加速係数付き不完全 Cholesky 分解を用いる
- -l-sol-ic-shift x (1.2)
線形ソルバで前処理として不完全 Cholesky 分解を用いる場合の加速係数を指定する。
- -l-sol-eps x (1.0e-09)
線形ソルバの収束判定値を指定する。誤差がこの値より小さくなった時点で線形ソルバが収束したと判定する。
- -l-sol-div x (1.0e+10)
線形ソルバが発散したと判定する値を指定する。誤差がこの値より大きくなった時点で線形ソルバが発散したと判定し、プログラムを終了する。
- -l-sol-log または -l-sol-no-log
線形ソルバの収束履歴を出力する／しないを指定する。デフォルトでは出力しない。

4.3.5. 入出力ファイル名の変更オプション

入出力に用いるファイルは 5.1 節で示したものが用いられるが、サブディレクトリ名やファイル名を変更したい場合は以下のオプションを使用する。ただし、P は部分番号を表している。また、これらのオプションはすべてのモジュールで指定できるわけではなく、実行するモジュールがそれぞれのファイルを使用する場合にのみ指定できる。

- **-onedata-dir *dir* (model_one)**

一体型解析モデルファイルのあるサブディレクトリ名を *dir* とする。

- **-onedata-file *file* (input)**

一体型解析モデルファイル名を *file* とする。実際のファイル名は、これに *.adv* をつけたものとなる。

- **-model-dir *dir* (model)**

解析モデル入力ファイルのあるサブディレクトリ名を *dir* とする。

- **-model-file *file* (advhddm_in)**

解析モデル入力ファイル名を *file* とする。実際のファイル名は、これに *_P.adv* をつけたものとなる。

- **-result-dir *dir* (result)**

解析結果出力設定ファイルおよび解析結果出力ファイルのあるサブディレクトリ名を *dir* とする。

- **-result-file *file* (advhddm_out)**

解析結果出力設定ファイル名および解析結果出力ファイル名を *file* とする。実際のファイル名は、解析結果出力設定ファイルがこれに *.adv* をつけたもの、解析結果出力ファイルがこれに *_P.adv* をつけたものとなる。

- **-mtrldat-dir *dir* (デフォルト値なし)**

物性データファイルのあるサブディレクトリ名を *dir* とする。

- **-mtrldat-file *file* (mtrl.dat)**

物性データファイル名を *file* とする。

Appendix

A. ツール類について

ADVENTURE_FullWave には、本体モジュールの他に以下のツールが含まれている。

A.1. 一体型解析モデルファイル作成ツール **adv_makefem**

adv_makefem は、電磁界解析用の一体型解析モデルファイル作成ツールである。このコマンドを使用することで、ADVENTURE_BCtool において作成したメッシュ表面情報ファイルと境界条件設定ファイルを用いて、電磁界解析用一体型解析モデルファイルを作成することができる。

実行方法は、ADVENTURE_BCtool の構造解析用一体型解析モデルファイル作成モジュール **makefem** とほぼ同様である。以下に実行方法を示す。

```
% adv_makefem mshFILE fgrFILE cndFILE matFILE advFILE [options]
mshFILE   : メッシュデータファイル(入力)
fgrFILE   : メッシュ表面データファイル(入力)
cndFILE   : 解析条件ファイル(入力)
matFILE   : 物性値ファイル(入力)
advFILE   : 一体型解析モデルファイル(出力)
```

ただし、*fgrFILE* は *mshFILE* から ADVENTURE_BCtool の *msh2pch* により作成されるファイルであり、*cndFILE* は ADVENTURE_BCtool の *bcGUI* により作成されるものである。ここで、*bcGUI* が作成するファイルは構造解析用であるため、電磁界解析用の境界条件設定メニューはない。そこで、ADVENTURE_FullWave では x 軸方向の変位を 0 に設定することで代用するものとする。

オプションについては 4.3.1 項を参照。

A.2. 可視化ファイル作成ツール **adv_makeUCD**

adv_makeUCD は、解析結果出力設定ファイルと解析結果出力ファイルを読み込み、可視化するための UCD ファイルまたは VTK ファイルを作成するツールである。これらのファイルを用いて AVS / Express, Micro AVS, ParaView などで可視化できる。どの種類のファイルを作成するかを指定するため、*-avsfile* (AVS / Express), *-avsfile-micro* (Micro AVS)または*-vtkfile*(ParaView)のいずれかを実行時に必ずオプションで指定する。以下に実行方法を示す。

```
% adv_makeUCD [options] data_dir
```

入力ファイル

一体型解析モデルファイル

HDDM 型の解析モデル入力ファイル

解析結果出力設定ファイル

解析結果出力ファイル

出力ファイル

UCD ファイル

高周波電磁界解析では磁界の実部(Hr)・虚部(Hi), 電界の実部(Er)・虚部(Ei), 電流密度の実部(Jer)・虚部(Jei)の6つのファイルを出力する. 出力先は `data_dir/result/` であり, ファイル名は `avs_*.inp` となる. *にはそれぞれの値の種類を表す文字列(Hr, Ei 等)が入る.

- `-avsfile-dir dir (result)`

サブディレクトリ名を `dir` とする.

- `-avsfile-file file (avs)`

ファイル名を `file` とする. 実際のファイル名はこれに `_*.inp` をつけたものとなる. (*は Hr, Ei などの値の種類を表す文字列)

また, 以下のオプションを指定することで, Micro AVS のフォーマットで UCD ファイルを出力させることができる.

- `-avsfile-micro`

VTK ファイル

以下のオプションを指定することで, VTK ファイルを出力させることができる.

- `-vtkfile`

ParaView などで扱え, 高周波電磁界解析では磁界の実部(Hr)・虚部(Hi), 電界の実部(Er)・虚部(Ei), 電流密度の実部(Jer)・虚部(Jei)の6つのファイルを出力する. 出力先は `data_dir/result/` であり, ファイル名は `res_*.vtk` となる. *にはそれぞれの値の種類を表す文字列(Hr, Ei 等)が入る.

- `-vtkfile-dir dir (result)`

サブディレクトリ名を `dir` とする.

- `-vtkfile-file file (avs)`

ファイル名を `file` とする. 実際のファイル名はこれに `_*.vtk` をつけたものとなる. (*は Hr, Ei などの値の種類を表す文字列)

A.3. PML 付与ツール `adv_makepml`

PML(Perfect Matchd Layer: 完全整合層)とは, 入射した電磁波を反射させずに減衰させ, 開放領域を再現する吸収境界条件の一つである. `adv_makepml` は, 元のメッシュの形状表面分割パターンと完全に一致した, 元のメッシュを完全に取り囲む複数層のメッシュを作製するツールである. このコマンドを使用することで, 作製したモデルに吸収境界条件である PML を付与することができ, 開放領域を再現することが可能になる. ただし, 付与する PML は方向性を持たず, 簡易的なものとする. 以下に実行方法を示す.

```
%adv_makepml mshFILE mahFILEwithPML nlayers width_layer1 [ . . . ]
```

`mshFILE` : メッシュデータファイル(入力)

`mshFILEwithPML` : PML を含むメッシュデータファイル(出力)

n_{layers} : PML の層数

$width_layer^*$: PML の各層の厚さ

$width_layer^*$ の単位は元のメッシュと合わせる必要がある。 N_{layers} で指定した数だけ与える必要がある。 PML の厚さは波長の 1/10 程度にする。

A.3.1. PML 生成手順

PML を生成する手順の概要を下図に示す。

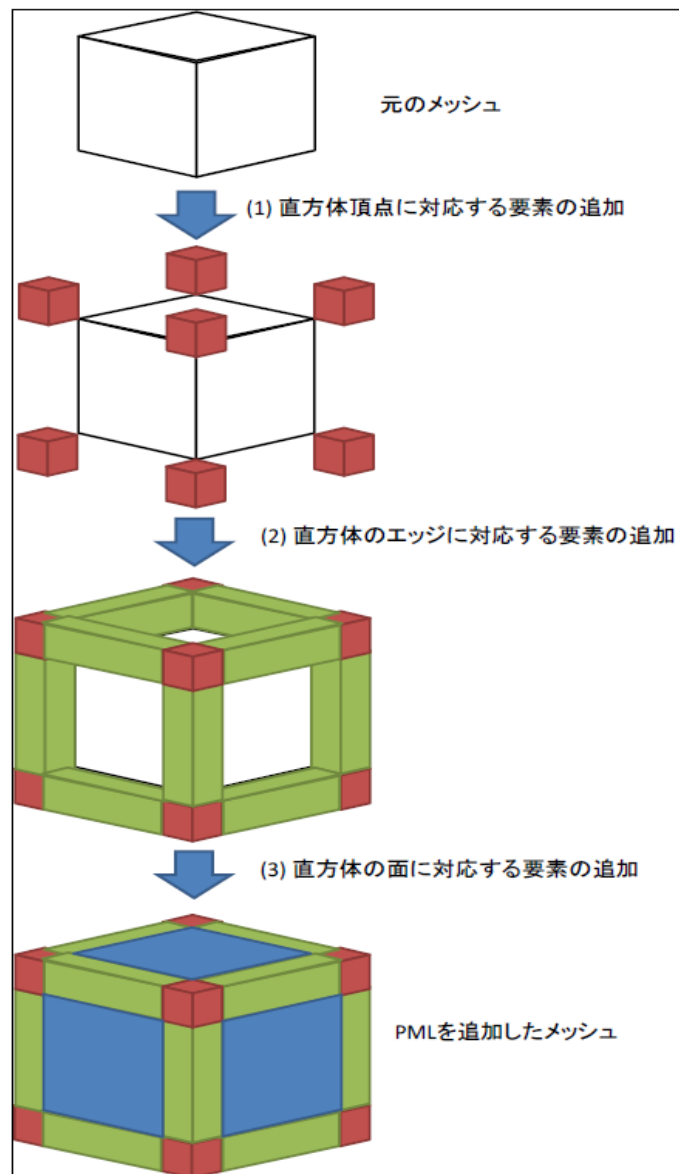


図 4 PML 生成手順の概要

元のメッシュの外形が直方体である(ただし寸法は任意)ことを前提として、

- ① 直方体頂点に対応する要素の追加
- ② 直方体のエッジに対応する要素の追加
- ③ 直方体の面に対応する要素の追加

の順番で PML を追加したメッシュを生成する。

ただし、各層に導電率を与える必要があり、外側の層になるにつれて徐々に導電率を大きくしなければならない。また、直方体頂点・エッジに対応する要素の導電率は、面に対応する層の導電率の平均値とする。

B. 入出力ファイルフォーマット

ADVENTURE_FullWave では、入出力ファイルとして以下のようなファイルを使用する。

- ・一体型解析モデルファイル
- ・HDDM 型の解析モデル入力ファイル
- ・解析結果出力設定ファイル
- ・解析結果出力ファイル
- ・物性データファイル
- ・形状定義ファイル
- ・デルタギャップ給電データファイル

これらのファイルのフォーマットを以下に示す。

B.1. 一体型解析モデルファイル

このファイルは adv_makefem によって作成される ADVENTURE_IO 形式のファイルである。このファイルのデータ構造、特に Property 部分を以下に示す。

```
#####
要素コネクティビティ
#####
[Properties]
1: content_type=Element
2: num_items=(要素数)
3: num_nodes_per_element=10
4: dimension=3
5: element_type=3DQuadraticTetrahedron
6: format=i4i4i4i4i4i4i4i4i4

#####
節点座標
#####
[Properties]
1: content_type=Node
2: num_items=(節点数)
3: dimension=3
4: format=f8f8f8
```

#####

境界条件

#####

[Properties]

1: content_type=FEGenericAttribute

2: num_items=(境界条件数)

3: fega_type=NodeVariable

4: label=DirichletBCs_Axn0

5: format=

6: index_byte=4

#####

物性番号

#####

[Properties]

1: content_type=FEGenericAttribute

2: num_items=(要素数)

3: fega_type=AllElementVariable

4: label=Flag

5: format=i4

6: index_byte=4

#####

設定, その他

#####

[Properties]

1: content_type=FEGenericAttribute

2: num_items=0

3: fega_type=AllElementConstant

4: label=Options

5: format=

6: index_byte=4

7: ADVFW_NAME=(モジュール名“ADVENTURE_FullWave”)

8: N_VERSION=(このファイルを作成したモジュールのバージョン)

9: DirichletBCs_Axn0=NEED

B.2. HDDM 型の解析モデル入力ファイル

このファイルは ADVENTURE_Metis によって作成される ADVENTURE_IO 形式のファイルであり、階層型の領域分割をされたメッシュデータが記録されている。このファイルのフォーマットについての詳細は ADVENTURE_Metis のマニュアルを参照されたい。

B.3. 解析結果出力設定ファイル

このファイルは解析モジュールにより作成されるファイルであり、解析を行った際の条件などが記録されている。

B.4. 解析結果出力ファイル

このファイルは解析モジュールにより作成されるファイルであり、解析結果が記録されている。記録される解析結果は未知自由度である電界・磁界・電流密度になる。

B.5. 物性データファイル

このファイルは解析に必要な物性値や領域を設定するために使用されるもので、ユーザが作成する。このファイルを変更、または複数用意することで、物性値の変更などを伴う、パターンの違う解析を手軽に行うことができる。ただし、境界条件の変更や、メッシュ自体の変更を伴う場合には、ADVENTURE_BCtool、またはメッシュ作成からのやり直しが必要となる。

このファイルで設定することのできる物性値や領域は以下の通りである。

- ・ 誘電率[F/m] (必須、すべての物性番号に対して 1 つずつ値を設定)
- ・ アンテナ領域とアンテナに流す強制電流密度[A/m²] (任意、複数の指定が可能)
- ・ 導体領域と導電率[S/m]
- ・ アンテナに流す交流電流の角周波数[rad/s]

それぞれの設定の仕方は以下の通り。

(1)誘電率[F/m] (必須)

この値はすべての物性番号に対して 1 つずつ値を設定する。

Permittivity 4	←設定キーワード と 設定数
0 7.957747e+05	←物性番号 と 誘電率[F/m]
1 7.957747e+05	:
2 7.957747e+05	: 設定数分記載する
3 7.957747e+05	:

(2)アンテナ領域とアンテナに流す強制電流密度[A/m²]

アンテナ領域は物性番号単位で設定を行う。次にアンテナに流す電流密度の値を強制電流密度データファイルから読み込むか、形状定義ファイルから設定を読み込んで作成するかを選択し、そのファイル名を設定する。アンテナ領域は複数指定することができ、ファイル名はそれぞれのアンテナ領域で設定することができる。もちろん、同一のファイルを複数のアンテナ領域で指定することも可能である。

Antenna 2	←設定キーワード と 設定数
1 rf Jo	←物性番号, ファイルの種類, ファイル名
3 md antenna.dat	: 設定数分記載する

ここで, rf とは強制電流密度の値を直接強制電流密度データファイルから読み込む(Read from File)ことを意味し, md は形状定義ファイルから読み込んだ値の定義から, 強制電流密度の値を作成する(Make from Definition)ことを意味する. また, 設定するファイル名は data_dir からの相対パスで指定する. 強制電流密度データファイル名はここで指定した文字列の末尾に, 時間調和渦電流では r(実部), i(虚部)をつけたものとなる. よって, この例ではそれぞれのファイルは以下の場所から読み込まれる.

- data_dir/Jor : 強制電流密度データファイル(時間調和渦電流解析・実部)
- data_dir/Joi : 強制電流密度データファイル(時間調和渦電流解析・虚部)
- data_dir/antenna.dat : 形状定義ファイル

(3)導体領域と導電率[S/m]

導体領域は物性番号単位で設定を行う. 次にそれぞれの導体領域での導電率の値を設定する. 導体領域は複数設定することができる.

Conductor 1	←設定キーワード と 設定数
0 7.700000e+06	←物性番号 と 導電率[S/m]
	: 設定数分記載する

(6)アンテナに流す交流電流の角周波数[rad/s] (時間調和渦電流解析で必須)

この値はすべてのアンテナで共通の値を 1 つだけ設定する. 複数の設定はできない.

AntennaOmega	←設定キーワード
3.769911e+02	←角周波数[rad/s]

実際の例を図 5 に示す.

```

Permittivity  2
0    8.854e-12
1    8.854e-10

Antenna  1
1    md    antenna.dat

Conductor  2
0    0.0
1    0.0

AntennaOmega
3141592653.59

```

図 5 物性データファイル

B.6. 形状定義ファイル

このファイルは解析領域内での強制電流密度を定義するためのファイルであり，ユーザが作成する．定義域として使用できる形状は以下の通りである．

- ・扇形円筒(円筒の一部，または全部)
- ・平行 6 面体(直方体，立方体等)

このファイルのフォーマットは以下の通りである．

全体

```

Full-Wave          ←解析の種類
:
:   扇形円筒，平行 6 面体，時間変化の定義が並ぶ
:

```

扇形円筒

```

DoubleSectorialCylinder ←扇形円筒の定義キーワード
x y z    ←基点の座標[m]
(x, y or z)  h    ←高さ方向(x,y,z のいずれか)   高さ
(deg or rad)   $\theta_1$   $\theta_2$     ←角度の単位の選択と角度
(内側の半径[m]) (外側の半径[m])
(強制電流密度[A/m2])

```

まず，最初に扇形円筒の定義キーワードを書く．扇形円筒の定義キーワードは“DoubleSectorialCylinder”である．次に基点となる点の座標を記載する．3 行目では基点からどの方向

が高さ方向であるかを、高さとともに x , y , z のいずれかで指定する。4 行目では扇形円筒の底面がどの範囲であるかを指定する。まず、角度を 1 周 360° の度数法で表現するか、1 周 2π の弧度法で表現するかをそれぞれ“deg”または“rad”で指定する。次に 2 つの角度を指定する。扇形円筒の底面は 2 つの曲線(内径と外径)と 2 つの線分からなるが、この線分のうち 1 つが x , y , z 軸のいずれかとなす角度(θ_1)と、この線分ともう 1 つの線分がなす角度(θ_2)を指定する(図 10 参照)。なお、 θ_1 を決定する場合に基準となる軸は次のようになる。

- ・高さ方向に x を選んだなら、底面は yz 平面にあり、 y 軸が基準となる。
- ・高さ方向に y を選んだなら、底面は zx 平面にあり、 z 軸が基準となる。
- ・高さ方向に z を選んだなら、底面は xy 平面にあり、 x 軸が基準となる。

5 行目では円筒の内側の半径と外側の半径を指定する。最後に強制電流密度の大きさを指定する。その向きは高さ方向に選んだ軸と垂直な平面内を、高さ方向から見て右ねじの方向とする。

- ・高さ方向に x を選んだなら、電流は yz 平面を y 軸から z 軸の方向に回る。
- ・高さ方向に y を選んだなら、電流は zx 平面を z 軸から x 軸の方向に回る。
- ・高さ方向に z を選んだなら、電流は xy 平面を x 軸から y 軸の方向に回る。

また、強制電流密度は解析の種類によって値の数が違ってくる。時間調和渦電流解析では実部と虚部の 2 つの値を指定しなければならない。

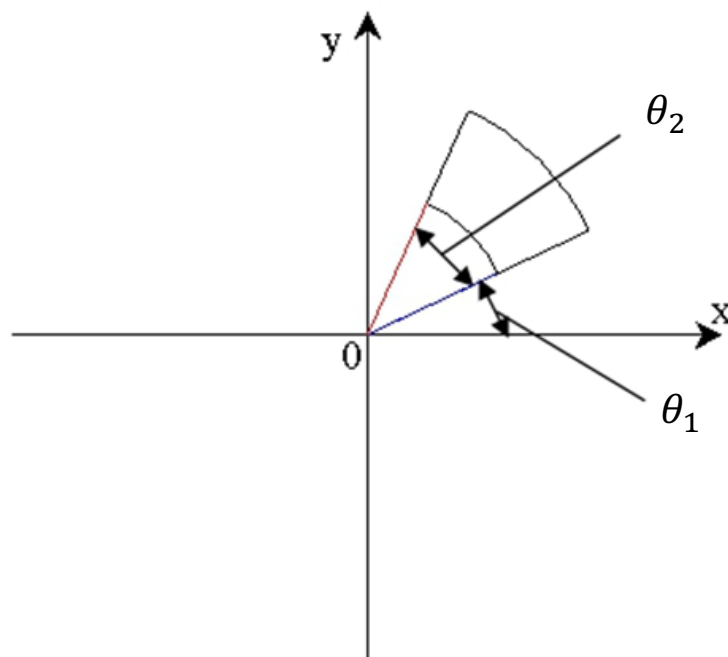


図 6 θ_1 と θ_2 (z を高さ方向に選んだ場合)

平行 6 面体

Parallelpiped	←平行 6 面体の定義キーワード
x0 y0 z0	←基点の座標[m]
x1 y1 z1	←基点と隣り合う点の座標[m], その 1
x2 y2 z2	←基点と隣り合う点の座標[m], その 2
x3 y3 z3	←基点と隣り合う点の座標[m], その 3

(強制電流密度[A/m²])

まず、最初に平行 6 面体の定義キーワードを書く。平行 6 面体の定義キーワードは“Parallelpiped”である。次に基点となる点の座標を記載する。3～5 行目では基点と隣り合う 3 点の座標を記載する(図 7)。最後に強制電流密度をベクトルで与える。また、強制電流密度は解析の種類によって値の数が違って来る。

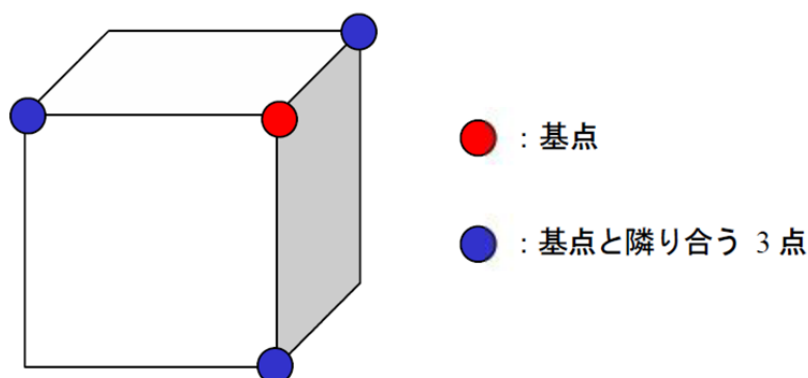


図 7 アンテナの定義(平行 6 面体)

形状定義ファイルを作成する上で注意すべきことは以下の通りである。

- ・ これらの形状は複数のものを組み合わせて使うことができる。
- ・ 形状の定義は実際のアンテナの寸法よりも若干大きめにとる。

実際のアンテナと全く同じ寸法により定義した場合、定義域の隅において、数値計算上の誤差のためにその定義域に本来含まれているはずの節点が含まれていないと判定されてしまうことがある。このため、定義は実際の寸法よりも若干大きめにとる方がよい。ただし、他の形状定義との重なりには注意すること。

- ・ 形状定義が重なった場合、先に定義されている方が優先される。

B.7. デルタギャップ給電データファイル

このファイルは解析領域内でのデルタギャップ給電を定義するためのファイルであり，ユーザが作成する．このファイルのフォーマットは以下の通りである．

1	←与えるギャップ給電の数
x0 x1	←ギャップ幅の x 座標
y0 y1	←ギャップ幅の y 座標
z0 z1	←ギャップ幅の z 座標
V	←与える電位

まず，与えるギャップ給電の数を決める．次にギャップ幅の座標を決める．座標の決め方は，図 8 のような関係で決定する．

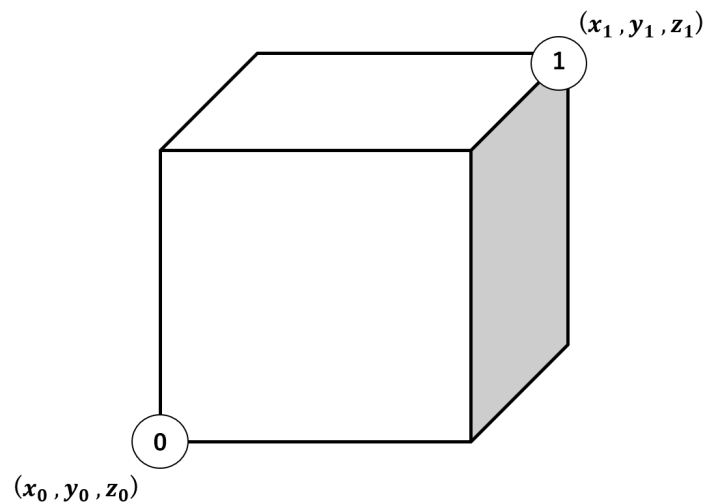


図 8 ギャップ幅の座標の決め方

最後に与える電位を決める．また，複数ギャップ給電を与える場合は，与えるギャップ給電の数を決め，その分のギャップ幅の座標と与える電位を決める．

デルタギャップ給電を使用せず，強制電流密度を与える場合は，与えるギャップ給電の数を”0”とする．

C. 解析例(モデルの作成から解析まで)

ここでは ADVENTURE System を用いたモデル作成と、ADVENTURE_Metis による領域分割、このモデルの ADVENTURE_FullWave による解析例を示す。モデル作成には ADVENTURE_CAD、ADVENTURE_TriPatch、ADVENTURE_TetMesh、ADVENTURE_BCtool の各モジュールを用いる。なお、本解析例で使用する各モジュールのバージョンは以下の通りである。各モジュールについての詳細はそれぞれのモジュールのマニュアルを参照のこと。

- ・ ADVENTURE_CAD : 1.8
- ・ ADVENTURE_TriPatch : 1.8
- ・ ADVENTURE_TetMesh : beta-0.91
- ・ ADVENTURE_BCtool : 2.1
- ・ ADVENTURE_Metis : 1.1

C.1. 高周波電磁界問題・簡易的なモデルの解析例

解析例として図9の簡易的なモノポールアンテナモデルを使用する。空気領域は、半径 1.0[m]、高さ 0.4[m] の円柱空間で、この空間内に 0.015[m]×0.015[m]×0.4[m]のモノポールアンテナモデルを設置する。透磁率 μ は解析領域全体で $1/(4\pi \times 10^{-7})$ [m/H], 誘電率 ϵ は空気領域で 8.854×10^{-12} , モノポールアンテナ部分で 8.854×10^{-10} , 導電率 σ はどちらの領域でも 0.0[S/m], 解析周波数を 500[MHz]とするために角周波数は $2\pi \times 500 \times 10^6$ [rad/s]とする。アンテナに流れる強制電流密度 J の実部、虚部の大きさは 0.08, 0[A/m²]とする。

以降に解析例を示すのだが、ディレクトリ内に

- ・ air.msh : 空気領域のメッシュファイル
- ・ antenna.msh : アンテナ領域のメッシュファイル

を用意しているため、(1)、(2)の手順を省くことができる。

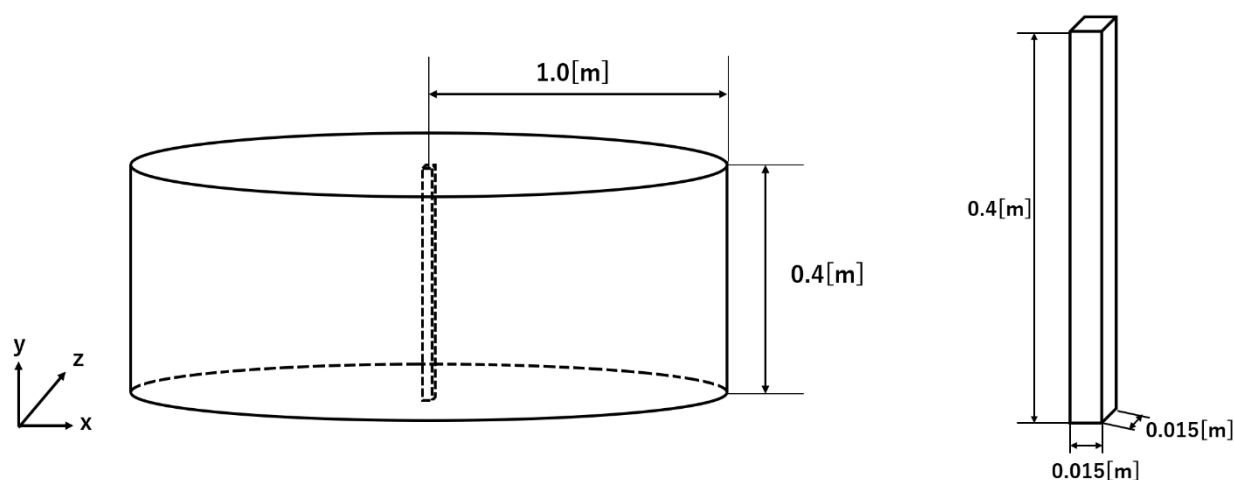


図9 モノポールアンテナモデル(左図: アンテナ全体図 右図: アンテナ部)

(1)解析モデル(モノポールアンテナモデル)の作成準備

まず、ADVENTURE_CAD を用いて解析モデルを作成する。ADVENTURE_CAD で用いる gm3d ファイルのフォーマットについては ADVENTURE_CAD のマニュアルを参照のこと。ここでは（ディレクトリ）にあるファイルを用いる。

- air.gm3d :空気領域
- antenna.gm3d :アンテナ領域
- antenna.ptn :節点密度データファイル

以下に ADVENTURE_CAD の実行方法を示す。

```
% advcad air.gm3d air.pcm (pach_size) -pcm
% advcad antenna.gm3d antenna.pcm (pach_size) -pcm
```

(2)内部に四面体メッシュを生成

ADVENTURE_TetMesh を用いて内部に四面体メッシュを生成する。

```
% advtmesh9m airc -p
% mv airc.msh air.msh
% advtmesh9m antennac -p
% mv antennac.msh antenna.msh
```

(3)メッシュの表面を抽出

msh2pch を用いてメッシュの表面を抽出する。

```
% msh2pch air.msh 3
% msh2pch antenna.msh 3
```

(4)表面パッチの結合

表面パッチ結合プログラム mrpach を用いて結合する。

```
% mrpach air_3.pch air_3.pcg antenna_3.pch antenna_3.pcg
-o monopole_3.pcm -g monopole_3.pcg
```

(5)メッシュデータの作成

表面パッチをもとに ADVENTURE_TetMesh を用いてメッシュ分割を行う。

```
% advtmesh9p monopole_3
% advtmesh9m monopole_3c
% advtmesh9s monopole_3c
```

(8)メッシュの表面を抽出

msh2pch を用いてメッシュの表面を抽出する。

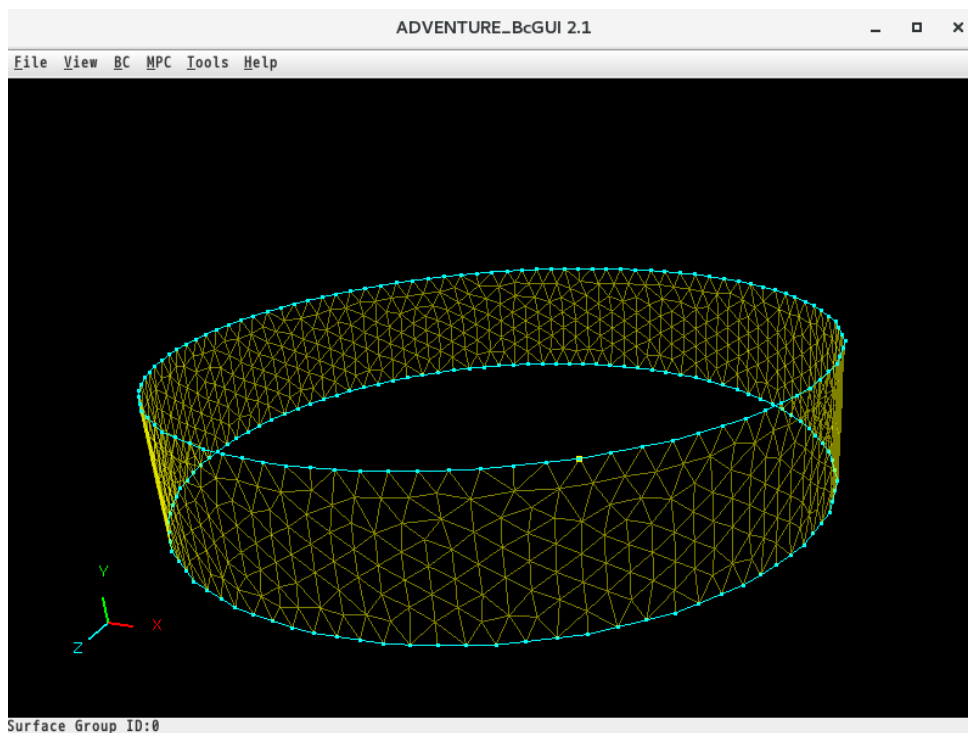
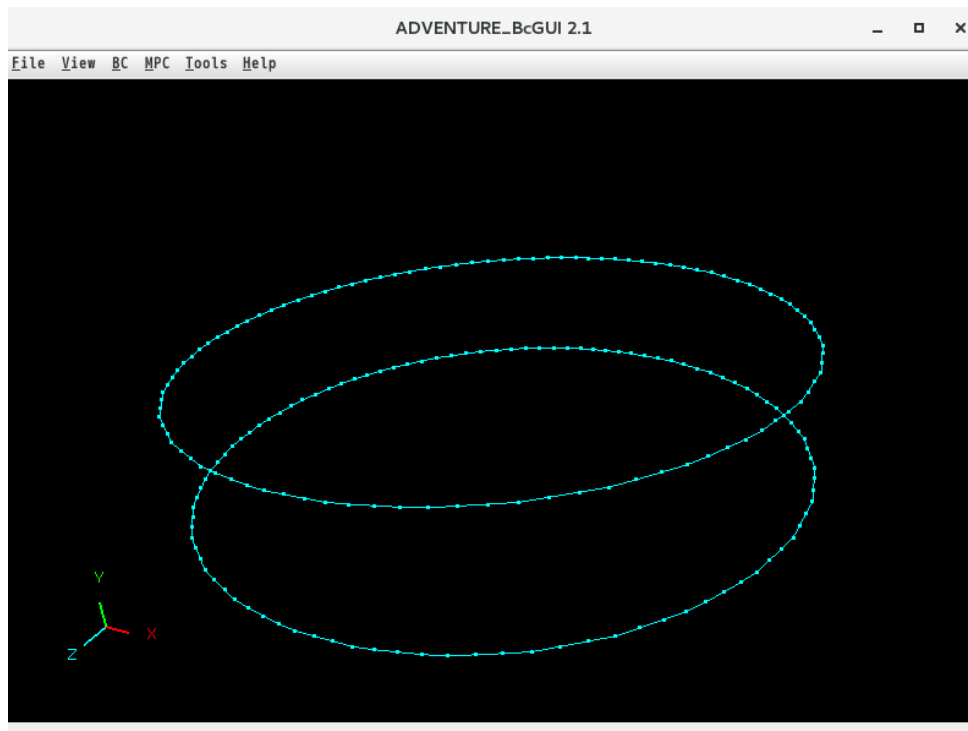
```
% msh2pch monopole_3cs.msh 3
```

(9)境界条件の付加

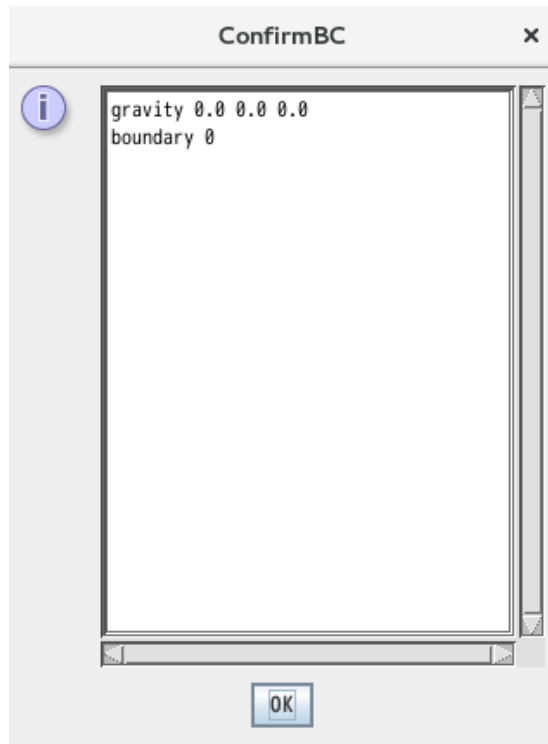
ADVENTURE_BCtool を用いて境界条件を設定する。ただし、一体型解析モデルの作成には次項のように ADVENTURE_FullWave 付属のツールを用いるので、BCtool の makefem3 は使用しない。

```
% BcGUI2 monopole_3cs_3.pch monopole_3cs_3.pcg
```

BcGUI を実行すると以下のようなウィンドウが開く。



今回は、円柱の側面は完全導体壁のため、境界条件は設定しない。
境界条件の設定は、View → Boundary Condition → Cnd format で確認する。



解析条件ファイルを“antenna.cnd”というファイル名で出力する。(File → Save Condition) BcGUI を終了する。(File → Quit)

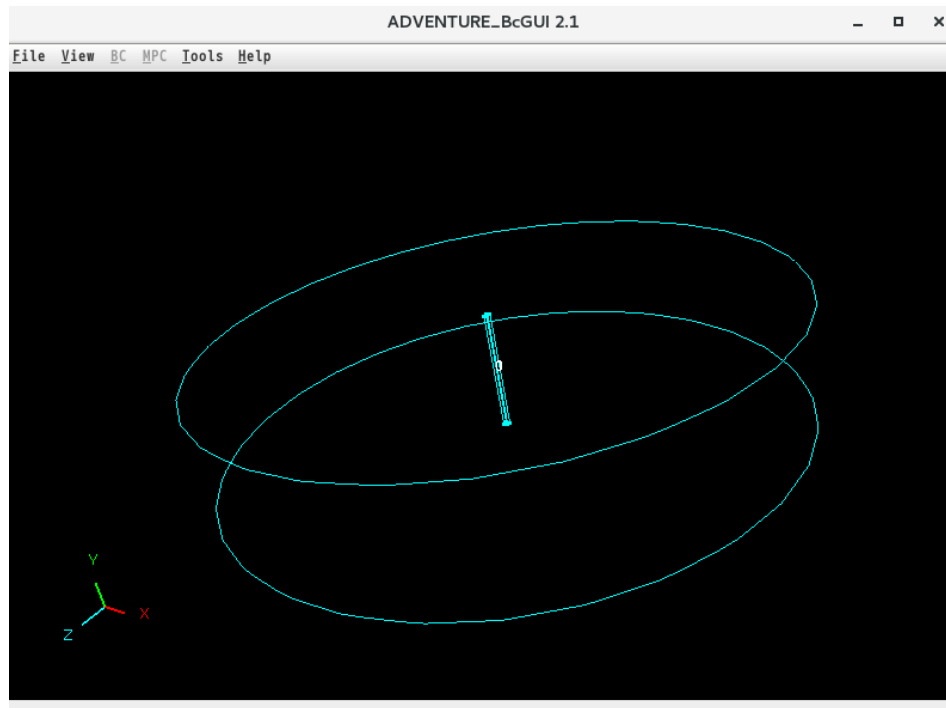
(9)一体型ファイルの作成

ADVENTURE_FullWave のツール adv_makefem を用いてメッシュ、物性値、境界条件から ADVENTURE_IO フォーマットの一体型解析モデルを作成する。

まず、物性値ファイル“monopole.dat”を作成する (物性値ファイルの詳細については ADVENTURE_BCtool のマニュアルを参照)。ボリューム番号を確認するため、ADVENTURE_BCtool のツール msh2pcm でメッシュ表面とボリューム境界を抽出し、それを BcGUI を用いて確認する。

```
% msh2pcm monopole_3cs.msh
```

```
% BcGUI2 monopole_3cs_V.pcm monopole_3cs_V.pcg
```



この作業により、ボリューム番号がそれぞれの領域を表すかが以下のようにわかる。

- 0 : 空気領域
- 1 : アンテナ領域

よって、材料の数を2とし、それぞれの領域の物性番号を、空気領域は0、アンテナ領域は1、とする。また、ここではヤング率などの物性値は設定しないので、定義する物性値の数は0とする。以上より、このモデルの物性値ファイルは以下になる。

monopole.dat

```
#materialInfo
materialN 2
propertyN 0

#volumeInfo
volumeN 2
0
1
```

以下のコマンドにより、一体型解析モデルを作成する。

```
% adv_makefem monopole_3cs.msh monopole_3cs_3.fgr antenna.cnd monopole.dat input.adv
```

次に、物性データファイル“mtrl.dat”を作成する。このファイルのフォーマットについてはB.5を参照のこと。物性番号は全部で2つあり、誘電率は空気領域で 8.854×10^{-12} [F/m]、モノポールアンテナ部分で 8.854×10^{-10} [F/m]である。また、アンテナ領域は1つで、その物性番号は1である。強制電流密度は形状定義ファイルから読み込むものとし、そのファイル名を“antenna.dat”とする。導

体領域はなく，どちらも導電率は $0.0[\text{S/m}]$ にする．角周波数は $2\pi \times 500 \times 10^6 \cong 3141592653.59[\text{rad/s}]$ である．以上より，物性データファイルは以下のようになる．

mtrl.dat

```
Permittivity 2
0 8.854e-12
1 8.854e-10

Antenna 1
1 md antenna.dat

Conductor 2
0 0.0
1 0.0

AntennaOmega
3141592653.59
```

また，同時に形状定義ファイル“antenna.dat”を作成しておく．このファイルのフォーマットについては B.6 を参照のこと．アンテナの定義域はあらかじめ大きくとっておく．よって，形状定義ファイルは以下のようになる．

antenna.dat

```
Full-Wave

Parallelpiped
0.008 0.4005 0.008
-0.008 0.4005 0.008
0.008 0.4005 -0.008
0.008 -0.0005 0.008
0.0 0.08 0.0 0.0 0.0 0.0
```

また，同時にデルタギャップ給電ファイル“volt.dat”を作成しておく．このファイルのフォーマットについては B.7 を参照のこと．今回はギャップ給電を与えないのでファイルは以下のようになる．

volt.dat

```
0
```

最後に入出力ファイルのトップディレクトリ data_dir を作成し，一体型解析モデル data_dir/model_one/ に移動する．現バージョンでは，data_dir のディレクトリ名を”MODEL”とすること．

```
% mkdir MODEL MODEL/model_one
% mv input.adv MODEL/model_one/
% mv mtrl.dat MODEL/
% mv antenna.dat MODEL/
% mv volt.dat MODEL/
```

(9)領域分割

作成した一体型解析モデルをもとに ADVENTURE_Metis を用いて階層型に領域分割されたモデルを作成する。なお、実行時にはオプション `-difn 1` を用いる必要がある。このオプションは内部境界上節点の自由度を 1 に指定するためのものである。これは、構造解析で求める節点変位の自由度は 3 であるのに対し、電磁界解析では節点の自由度が 1 であるためである。

まず、階層型の領域分割をするために、部分(part)数と部分領域(subdomain)数を決定する。ここでは 1 台の PC の 6 コアを用いて静的負荷分散版で解析することとする。このため、部分数を 6 とする。次に部分領域数であるが、(5)で作成した `input.adv` を ADVENTURE_IO のツール `advinfo` で確認すると要素数が 43,641 であることがわかる。(どの部分が要素数であるかは B.1 を参照のこと、要素数はモデルを作成した環境によって同じ条件でも若干増減する)

```
% advinfo MODEL/model_one/input.adv
```

ADVENTURE_FullWave では 1 部分領域あたりの要素数を 100-200 とすればよい(2.2 節参照)ので、1 部分領域あたりの要素数を約 100 とすると、

$$43,641(\text{要素数}) \div 6(\text{部分数}) \div 100(1 \text{ 部分領域あたりの要素数}) = 72.735$$

となるので、1 部分あたりの部分領域数を 73 とする。なお、解析領域全体での部分領域数は (部分数)×(1 部分あたりの部分領域数)

なので、436 となる。領域分割は次のコマンド例のように行う。

```
% mpirun -np 6 adventure_metis -HDDM -difn 1
MODEL/model_one/input.adv MODEL 73
```

(9)解析の実行

ADVENTURE_FullWave のモジュールを用いて、分割された解析モデルを入力として解析を行う。解析は次のコマンド例のように行う。

```
% mpirun -np 6 adv_fullwave-p MODEL
```

(9)解析結果の可視化

ここでは ParaView による可視化の例を紹介する。まず、ADVENTURE_FullWave 付属のツール `adv_makeUCD` を用いて ParaView で読み込む VTK ファイルを作成する。

```
% adv_makeUCD -vtkfile MODEL
```

図 10 は ParaView を用いて可視化した結果である。

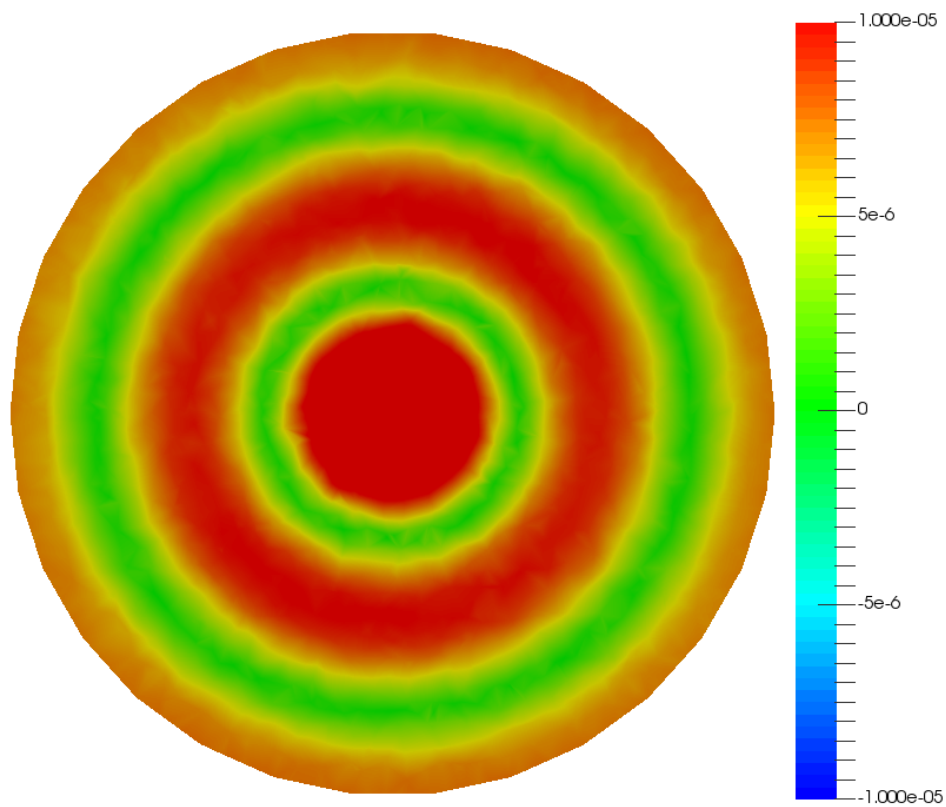


図 10 電界虚部の可視化結果(xz 平面)

C.2. 高周波電磁界問題・並列計算環境での解析例

高周波電磁界解析では、波長に対して十分に小さい要素によって要素分割する必要があるため、要素数の増加を招く。これにより PC 一台では計算できず、PC クラスタを用いて並列計算を行う必要がある可能性がある。そこで並列計算の解析例として図 12 のダイポールアンテナモデルに 8 層の PML を付与したモデルを用いる。空気領域は $0.6[\text{m}] \times 0.6[\text{m}] \times 0.6[\text{m}]$ の空間で、この空間内に $0.015[\text{m}] \times 0.015[\text{m}] \times 0.15[\text{m}]$ のダイポールアンテナモデルを設置する。透磁率 μ は解析領域全体で $1/(4\pi \times 10^{-7})$ $[\text{m}/\text{H}]$ 、誘電率 ϵ は空気領域で 8.854×10^{-12} 、アンテナ部分で 8.854×10^{-10} 、PML は全て 8.854×10^{-12} とする。導電率 σ は空気領域・アンテナ部分は $0.0[\text{S}/\text{m}]$ 、面に対応する PML は外側にいくに連れて徐々に導電率を大きく設定し、頂点・エッジに対応する PML は面に対応する PML の導電率の平均値を設定する。解析周波数を $1.0[\text{GHz}]$ とするために角周波数は $2\pi \times 1.0 \times 10^9 [\text{rad}/\text{s}]$ とする。アンテナに流れる強制電流密度 J の実部、虚部の大きさは 0.08 , $0[\text{A}/\text{m}^2]$ とする。

以降に解析例を示すのだが、ディレクトリ内に

- air.msh : 空気領域のメッシュファイル
- antenna.msh : アンテナ領域のメッシュファイル

を用意しているため、(1), (2)の手順を省くことができる。

また、"dipole.dat", "mtrl.dat" は値が多いので、用意した。

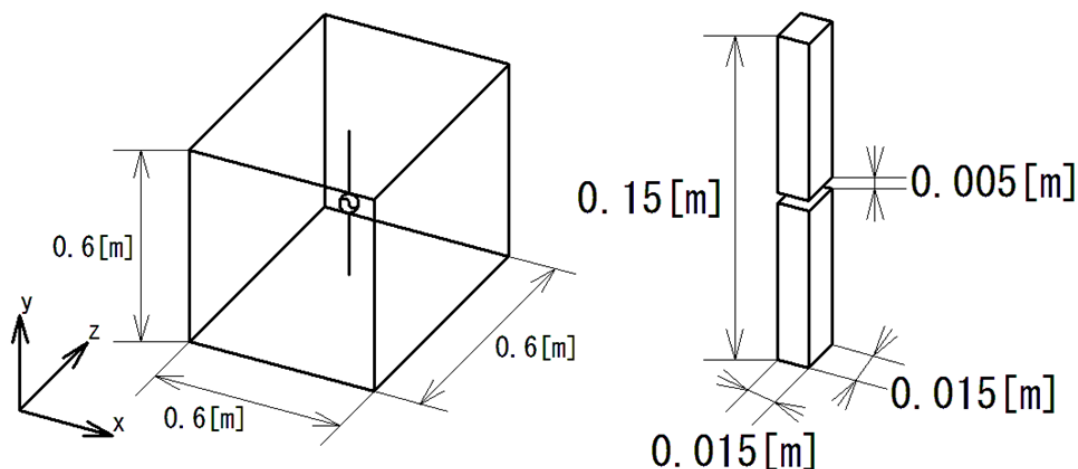


図 12 ダイポールアンテナモデル(左図：アンテナ全体図 右図：アンテナ部)

(1)解析モデ

まず、ADVENTURE_CAD を用いて解析モデルを作成する。ADVENTURE_CAD で用いる gm3d ファイルのフォーマットについては ADVENTURE_CAD のマニュアルを参照のこと。ここでは（ディレクトリ）にあるファイルを用いる。

- air.gm3d :空気領域
- antenna.gm3d :アンテナ領域
- antenna.ptn :節点密度データファイル

以下に ADVENTURE_CAD の実行方法を示す。

```
% advcad air.gm3d air.pcm (pach_size) -pcm
% advcad antenna.gm3d antenna.pcm (pach_size) -pcm
```

(2)内部に四面体メッシュを生成

ADVENTURE_TetMesh を用いて内部に四面体メッシュを生成する。

```
% advtmesh9m airc -p
% mv airc.msh air.msh
% advtmesh9m antennac -p
% mv antennac.msh antenna.msh
```

(3)メッシュの表面を抽出

msh2pch を用いてメッシュの表面を抽出する。

```
% msh2pch air.msh 3
% msh2pch antenna.msh 3
```

(4)表面パッチの結合

表面パッチ結合プログラム mrpach を用いて結合する。

```
% mrpach air_3.pch air_3.pcg antenna_3.pch antenna_3.pcg
-o dipole_3.pcm -g dipole_3.pcg
```

(5)メッシュデータの作成

表面パッチをもとに ADVENTURE_TetMesh を用いてメッシュ分割を行う。

```
% advtmesh9p dipole_3
% advtmesh9m dipole_3c
```

(6)PML 付きメッシュデータの作成

pml を用いて PML 付きメッシュデータを作成する。

```
% adv_makepml dipole_3c.msh dipole_pml_3c.msh 8 0.03 0.03 0.03 0.03 0.03 0.03 0.03 0.03
```

(7)4 面体 2 次要素のメッシュデータの作成

ADVENTURE_FullWave では 4 面体 2 次要素を読み込むので、advtmesh9s を実行する。

```
% advtmesh9s dipole_pml_3c
```

(8)メッシュの表面を抽出

msh2pch を用いてメッシュの表面を抽出する。

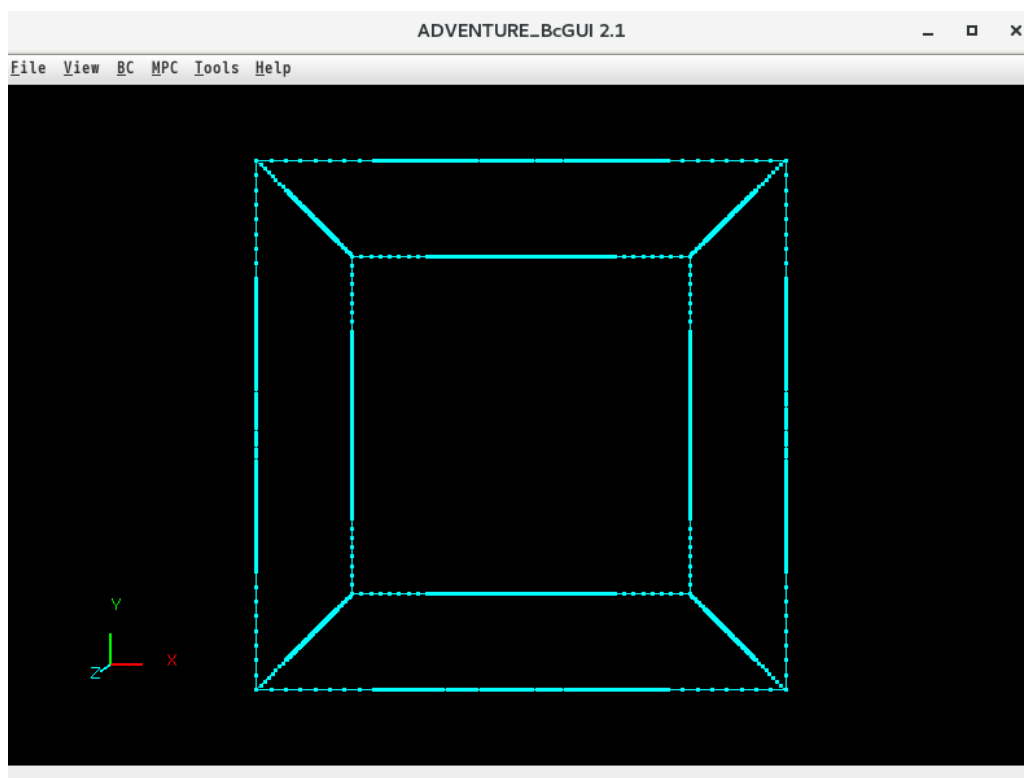
```
% msh2pch dipole_pml_3cs.msh 3
```

(9)境界条件の付加

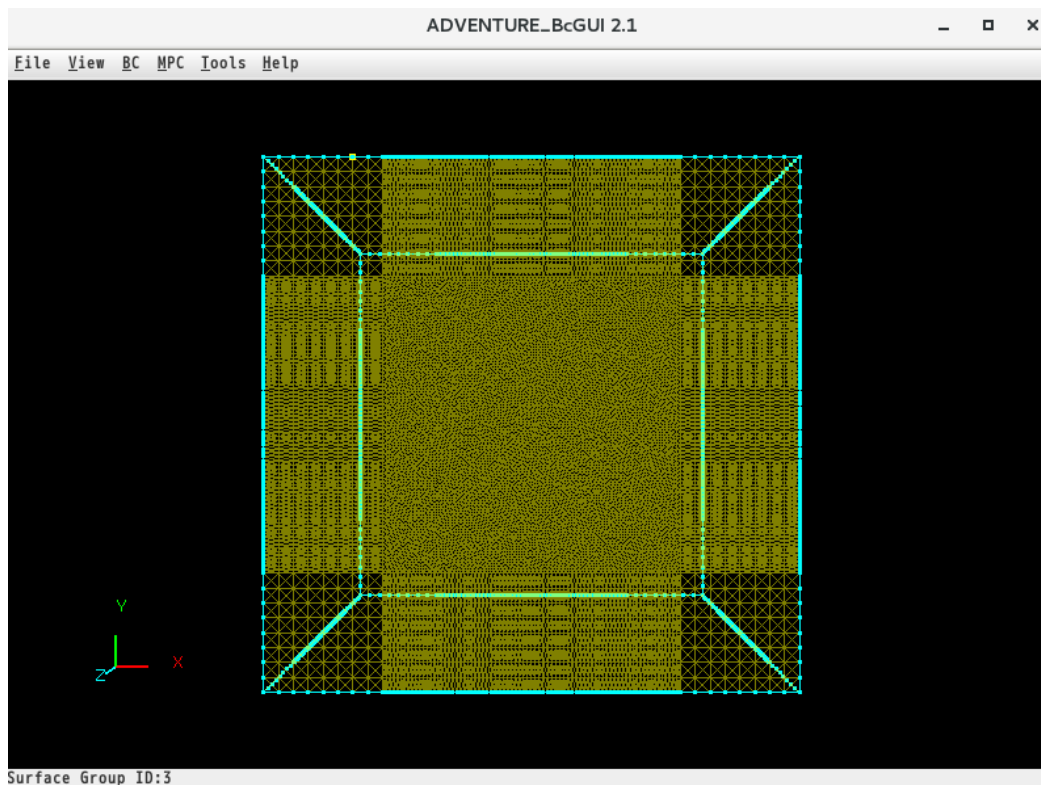
ADVENTURE_BCtool を用いて境界条件を設定する。ただし、一体型解析モデルの作成には次項のように ADVENTURE_FullWave 付属のツールを用いるので、BCtool の makefem3 は使用しない。

```
% BcGUI2 dipole_pml_3cs_3.pch dipole_pml_3cs_3.pcg
```

BcGUI を実行すると次のようなウィンドウが開く。



まず、手前の面に境界条件を設定する。



BC → BC(Solid) → Add Displacement で x にチェックを入れ、境界条件の設定を行う。

BoundaryCondition

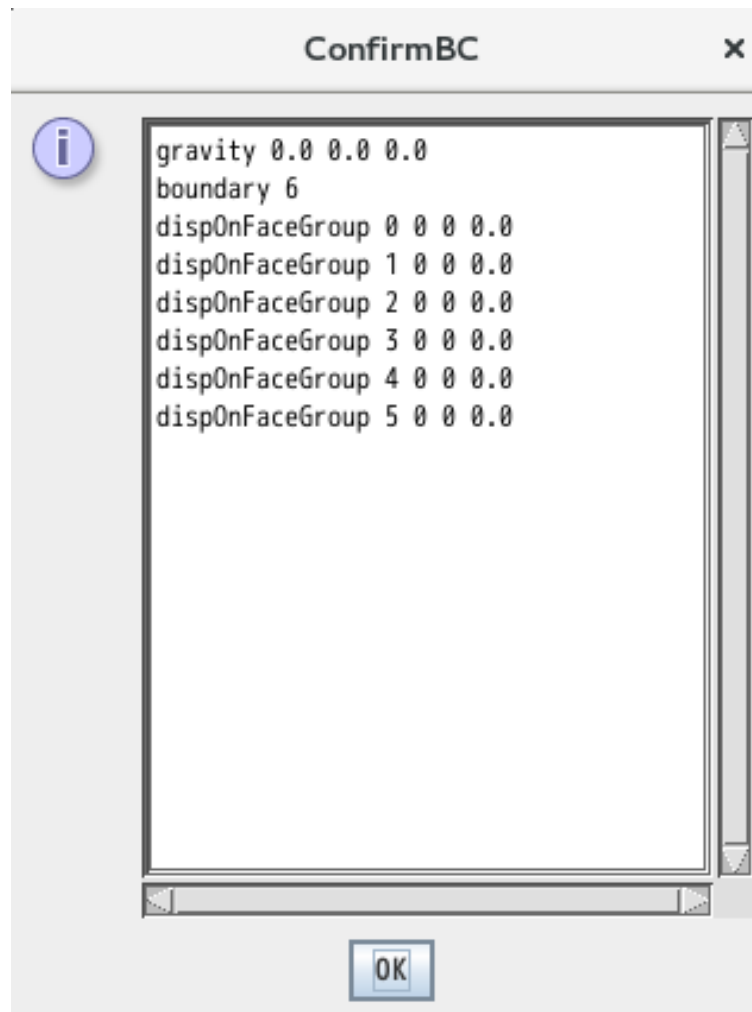
Displacement

	Value	Transient Table ID
☒ X	0.0	
☐ Y	0.0	
☐ Z	0.0	

OK cancel

同様に、残りの面にも境界条件の設定を行う。

境界条件が適切に設定できているかを確認する。(View → Boundary Condition → Cnd format)



解析条件ファイルを“antenna.cnd”というファイル名で出力する。(File → Save Condition) BcGUI を終了する。(File → Quit)

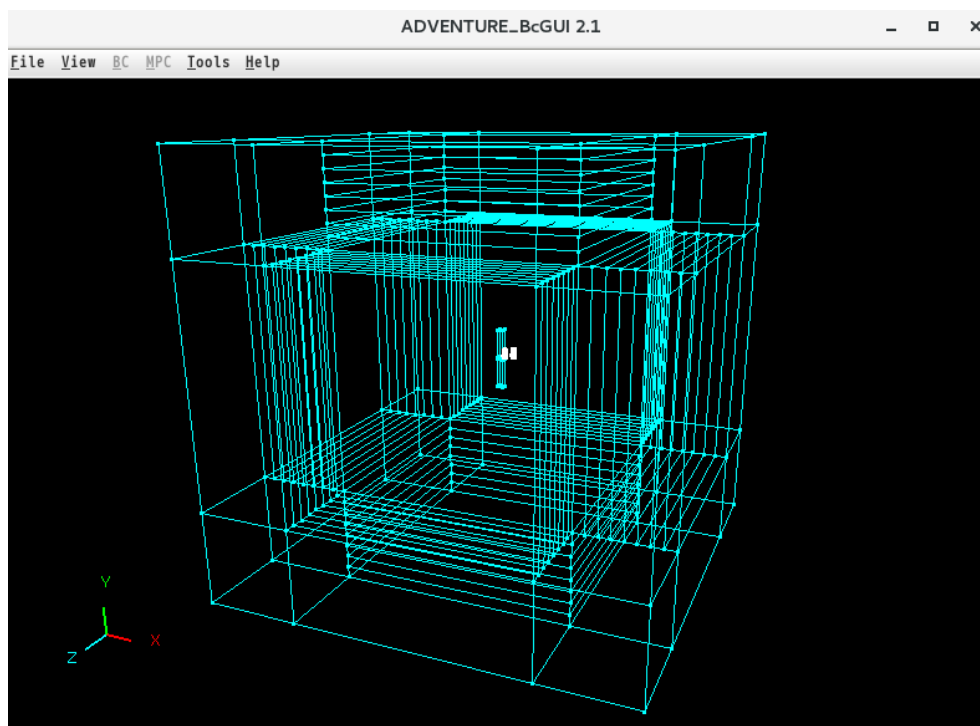
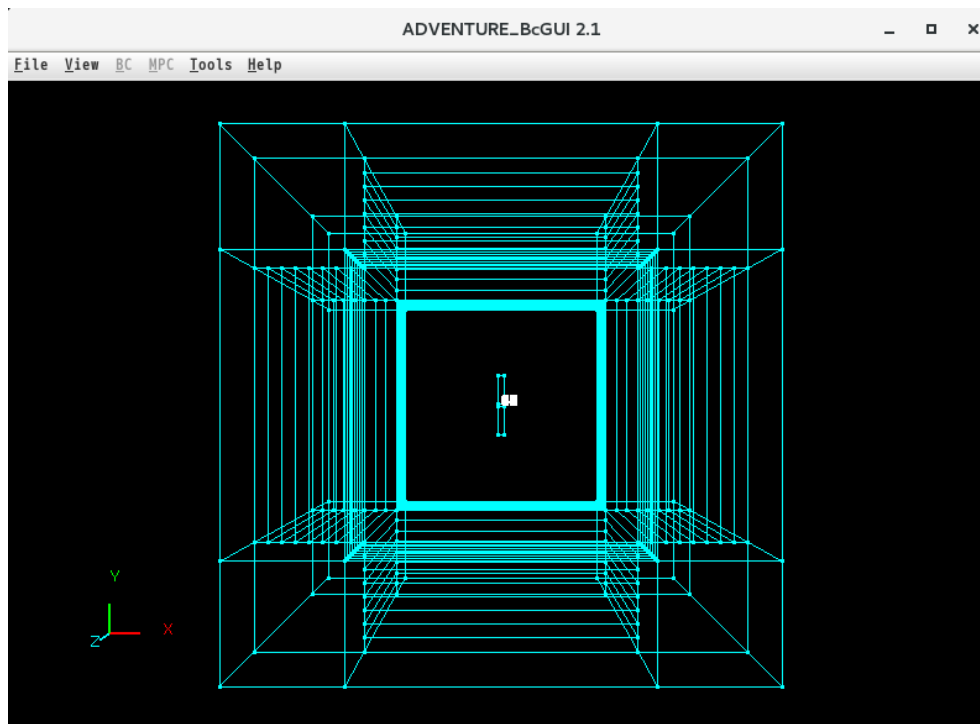
(9)一体型ファイルの作成

ADVENTURE_FullWave のツール adv_makefem を用いてメッシュ、物性値、境界条件から ADVENTURE_IO フォーマットの一体型解析モデルを作成する。

まず、物性値ファイル“dipole.dat”を作成する (物性値ファイルの詳細については ADVENTURE_BCtool のマニュアルを参照)。ボリューム番号を確認するため、ADVENTURE_BCtool のツール msh2pcm でメッシュ表面とボリューム境界を抽出し、それを BcGUI を用いて確認する。

```
% msh2pcm dipole_pml_3cs.msh
```

```
% BcGUI2 dipole_pml_3cs_V.pcm dipole_pml_3cs_V.pcg
```

この作業により、ボリューム番号がそれぞれの領域を表すかが以下のようにわかる。

- 0 : 空気領域
- 1 : アンテナ領域
- 2 : 直方体(空気領域)の頂点に対応する PML
- 3 : 直方体(空気領域)のエッジに対応する PML
- 4～27 : 直方体(空気領域)の面に対応する PML

よって、材料の数を 28 とし、それぞれの領域の物性番号を、空気領域は 0、アンテナ領域は 1、直方体(空気領域)の頂点に対応する PML は 2、直方体(空気領域)のエッジに対応する PML は 3、直方体(空気領域)の面に対応する PML は 4～27 とする。また、ここではヤング率などの物性値は設定しないので、定義する物性値の数は 0 とする。以上より、このモデルの物性値ファイルは以下ようになる。なお、以下は sample_data 内に完成したもの (dipole.dat) がある。

dipole.dat

```
#materialInfo
materialN 28
propertyN 0

#volumeInfo
volumeN 28
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
```

以下のコマンドにより、一体型解析モデルを作成する。

adv_makefem のメモリ使用量の、上限のデフォルト値(1,000MB)では不足するため、オプション“-memlimit 0”を設定すること。

```
% adv_makefem dipole_pml_3cs.msh dipole_pml_3cs_3.fgr antenna.cnd dipole.dat input.adv -memlimit 0
```

次に、物性データファイル“mtrl.dat”を作成する。このファイルのフォーマットについては B.5 を参照のこと。物性番号は全部で 28 あり、誘電率は空気領域で 8.854×10^{-12} [F/m]、アンテナ部分で 8.854×10^{-10} [F/m]、PML は全て 8.854×10^{-12} [F/m] である。また、アンテナ領域は 1 つで、その物性番号は 1 である。

強制電流密度は形状定義ファイルから読み込むものとし、そのファイル名を“antenna.dat”とする。導電率は、空気領域・アンテナ部分は 0.0 [S/m]、面に対応する PML は外側にいくに連れて徐々に導電率を大きく設定し、頂点・エッジに対応する PML は面に対応する PML の導電率の平均値を設定する。角周波数は $2\pi \times 1.0 \times 10^9 \cong 6283185307$ [rad/s] である。以上より、物性データファイルは以下のようになる。今回は、“mtrl.dat”を用意しているため、作成する必要はない。

mtrl.dat

```

Permittivity 28
0 8.854e-12
1 8.854e-10
2 8.854e-12
3 8.854e-12
4 8.854e-12
5 8.854e-12
6 8.854e-12
7 8.854e-12
8 8.854e-12
9 8.854e-12
10 8.854e-12
11 8.854e-12
12 8.854e-12
13 8.854e-12
14 8.854e-12
15 8.854e-12
16 8.854e-12
17 8.854e-12
18 8.854e-12
19 8.854e-12
20 8.854e-12
21 8.854e-12
22 8.854e-12
23 8.854e-12
24 8.854e-12
25 8.854e-12
26 8.854e-12
27 8.854e-12

```

```

Antenna 1
1 md antenna.dat

Conductor 28
0 0.0
1 0.0
2 0.10226
3 0.10226
4 9.32601e-05
5 0.00149216
6 0.00755407
7 0.0238746
8 0.0582876
9 0.120865
10 0.223918
11 0.381993
12 9.32601e-05
13 0.00149216
14 0.00755407
15 0.0238746
16 0.0582876
17 0.120865
18 0.223918
19 0.381993
20 9.32601e-05
21 0.00149216
22 0.00755407
23 0.0238746
24 0.0582876
25 0.120865
26 0.223918
27 0.381993

Antenna0mega
6283185307

```

また、同時に形状定義ファイル“antenna.dat”を作成しておく。このファイルのフォーマットについては B.8 を参照のこと。アンテナの定義域はあらかじめ大きくとっておく。よって、形状定義ファイルは以下のようなになる。

antenna.dat

```

Full-Wave

Parallelpiped
0.008 0.08 0.008
-0.008 0.08 0.008
0.008 0.08 -0.008
0.008 -0.08 0.008
0.0 0.08 0.0 0.0 0.0 0.0

```

また、同時にデルタギャップ給電ファイル“volt.dat”を作成しておく。このファイルのフォーマットについては B.8 を参照のこと。今回はギャップ給電を与えないのでファイルは以下になる。

volt.dat

0

最後に入出力ファイルのトップディレクトリ data_dir を作成し、一体型解析モデル data_dir/model_one/ に移動する。ここでは data_dir を MODEL とする。

```
% mkdir MODEL MODEL/model_one
% mv input.adv MODEL/model_one/
% mv antenna.dat MODEL/
% mv volt.dat MODEL/
```

(9)領域分割

作成した一体型解析モデルをもとに ADVENTURE_Metis を用いて階層型に領域分割されたモデルを作成する。なお、実行時にはオプション -difn 1 を用いる必要がある。このオプションは内部境界上節点の自由度を 1 に指定するためのものである。これは、構造解析で求める節点変位の自由度は 3 であるのに対し、電磁界解析では節点の自由度が 1 であるためである。

まず、階層型の領域分割をするために、部分(part)数と部分領域(subdomain)数を決定する。ここでは 4 コアの PC 25 台でなる PC クラスタを用いて 100 並列で静的負荷分散版で解析することとする。このため、部分数を 100 とする。次に部分領域数であるが、(5)で作成した input.adv を ADVENTURE_IO のツール advinfo で確認すると要素数が 15,712,684 であることがわかる。(どの部分が要素数であるかは B.1 を参照のこと、要素数はモデルを作成した環境によって同じ条件でも若干増減する)

```
% advinfo MODEL/model_one/input.adv
```

1 部分領域あたりの要素数を約 100 とすると、

$$15,712,684 (\text{要素数}) \div 100 (\text{部分数}) \div 100 (1 \text{ 部分領域あたりの要素数}) = 1,571.2684$$

となるので、1 部分あたりの部分領域数を 1,571 とする。なお、解析領域全体での部分領域数は

$$(\text{部分数}) \times (1 \text{ 部分あたりの部分領域数})$$

なので、157,100 となる。領域分割は次のコマンド例のように行う。

```
% mpirun -np 100 -machinefile machinefile.txt adventure_metis -HDDM -difn 1
MODEL/model_one/input.adv MODEL 1,571
```

ここで、-machinefile は MPI のオプションである。

(9)解析の実行

ADVENTURE_FullWave のモジュールを用いて、分割された解析モデルを入力として解析を行う。解析は次のコマンド例のように行う。adv_fullwave-p のメモリ使用量の、上限のデフォルト値 (1,000MB) では不足するため、オプション“-memlimit 0”を設定すること。

```
% mpirun -np 100 -machinefile machinefile.txt adv_fullwave-p
-hddm-eps 1.0e-03 -hddm-max-loop 100000 -memlimit 0 MODEL
```

ここで、-machinefile は MPI のオプションである。また、adv_fullwave-p のオプションを入力しないと正しく解析できない可能性がある。

(9)解析結果の可視化

ここでは ParaView による可視化の例を紹介する。まず、ADVENTURE_FullWave 付属のツール adv_makeUCD を用いて ParaView で読み込む VTK ファイルを作成する。adv_makeUCD のメモリ使用量の、上限のデフォルト値(1,000MB)では不足するため、オプション“-memlimit 0”を設定すること。

```
% adv_makeUCD -vtkfile -memlimit 0 MODEL
```

図 12 は ParaView を用いて可視化した結果である。

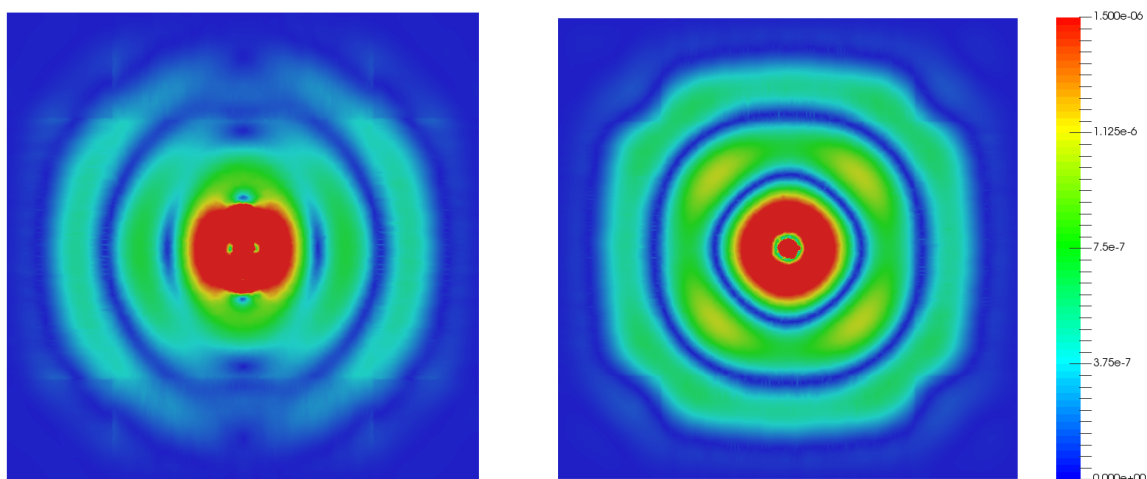


図 12 電界虚部の可視化結果(左図:xy平面 右図:xz平面)

参考文献

- [1] ADVENTURE Project Home Page : <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>
- [2] Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA, “Iterative domain decomposition FEM with preconditioning technique for large scale problem”, ECM’99 Progress in Experimental and Computational Mechanics in Engineering and Material Behaviour, pp.255-260, 1999.
- [3] Hiroshi KANAYAMA, Ryuji SHIOYA, Daisuke TAGAMI and Satoshi MATSUMOTO, “3-D eddy current computation for a transformer tank”, COMPEL, Vol.21, No.4, pp.554-562, 2002.
- [4] Hiroshi KANAYAMA and Shin-ichiro SUGIMOTO, “Effectiveness of A- ϕ method in a parallel computation with an iterative domain decomposition method”, COMPUMAG2005, 2005.
- [5] Hiroshi KANAYAMA, Hongjie ZHENG and Natsuki MAENO, “A domain decomposition method for large-scale 3-D nonlinear magnetostatic problems”, Theoretical and Applied Mechanics, 52, pp.247-254, 2003.
- [6] Message Passing Interface Forum: <http://www.mpi-forum.org/>
- [7] MPICH: <https://www.mpich.org/>