

# **ADVENTURE\_Magnetic**

Electromagnetic Field Analysis with HDDM

**Version 2.0.0**

ユーザースマニュアル

**March 04, 2025**

**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 .....	2
1.2.1. 対応プラットフォーム .....	2
1.2.2. 並列通信ライブラリ .....	2
1.2.3. その他 .....	2
1.3. コンパイルとインストール .....	3
1.4. 電磁界解析モジュールの実行方法 .....	7
1.4.1. シングルモード .....	8
1.4.2. 共有メモリ並列モード .....	8
1.4.3. 分散メモリ並列モード .....	8
1.4.4. ハイブリッド並列モード .....	8
2. 並列処理機能について .....	9
2.1. 並列処理機能 .....	9
2.2. ADVENTURE_Metis による領域分割について .....	12
3. 解析の流れ .....	13
4. 入出力ファイル .....	15
4.1. ファイル名 .....	15
4.2. 使用するファイル .....	16
5. 単位系 .....	17
6. 実行時オプション .....	18
6.1. すべてのモジュールに共通のオプション .....	18
6.2. 入出力ファイル名の変更オプション .....	19
6.3. 非定常解析に関するオプション .....	21
6.4. 非線形解析に関するオプション .....	22
6.4.1. Newton 法, Picard の逐次近似法を用いて非線形解析する際のオプション .....	22
6.4.2. Newton 法を用いて非線形解析する際のオプション .....	22
6.5. 疎行列ソルバに関するオプション .....	23
6.5.1. 並列疎行列ソルバに関するオプション .....	23
6.5.2. 並列化されていない疎行列ソルバに関するオプション .....	26
Appendix .....	27
A. 各モジュールの使用方法詳細 .....	27
A.1. 電磁界解析ソルバモジュール(HDDM 版) advmag2_HDDM_Electromagnetic-* .....	27
A.1.1. (非線形) 静磁場解析 .....	28
A.1.2. 時間調和渦電流解析 .....	29
A.1.3. 非定常渦電流解析 .....	30
A.1.4. 高周波電磁波解析 .....	30
A.2. ADVENTURE ファイル(バイナリ)表示ツール advmag2_advshow .....	31

A. 3.	一体型解析モデルファイル作成ツール	advmag2_makefem_Electromagnetic	32
A. 4.	領域分割データ統合・可視化ファイル作成ツール	advmag2_hddmrg	33
A. 5.	ソースベクトル計算ツール	advmag2_SourceVector	35
A. 6.	解析結果比較ツール	advmag2_compare_results	36
A. 7.	物性値ファイル作成ツール	advmag2_makedat	37
A. 8.	ファイル形式変換ツール	advmag2_mesh_convert_file	38
A. 9.	メッシュ情報解析ツール	advmag2_mesh_property	40
A. 10.	メッシュ部分切出しツール	advmag2_mesh_cut_part	41
A. 11.	メッシュ結合ツール	advmag2_mesh_merge	42
A. 12.	メッシュのアフィン変換ツール		44
A. 12.1.	平行移動ツール	advmag2_mesh_translation	44
A. 12.2.	拡大・縮小ツール	advmag2_mesh_scaling	44
A. 12.3.	回転ツール	advmag2_mesh_rotation	45
A. 12.4.	鏡映ツール	advmag2_mesh_mirror	45
A. 13.	要素分割可視化ファイル作成ツール	advmag2_mesh_separate_elem	46
A. 14.	領域分割可視化ファイル作成ツール	advmag2_mesh_separate_dd	46
A. 15.	メッシュ生成ツール		47
A. 15.1.	直線要素メッシュ生成ツール	advmag2_mesh_make_line	47
A. 15.2.	三角形要素メッシュ(長方形)生成ツール	advmag2_mesh_make_tri	48
A. 15.3.	四角形要素メッシュ(長方形)生成ツール	advmag2_mesh_make_quad	48
A. 15.4.	四面体要素メッシュ(直方体)生成ツール	advmag2_mesh_make_tetra	49
A. 15.5.	六面体要素メッシュ(直方体)生成ツール	advmag2_mesh_make_hexa	49
A. 15.6.	五面体(プリズム・三角柱)要素メッシュ(直方体)生成ツール	advmag2_mesh_make_prism	49
A. 15.7.	五面体(ピラミッド・四角錐)要素メッシュ(直方体)生成ツール	advmag2_mesh_make_pyramid	49
49			
B.	入出力ファイルフォーマット		50
B. 1.	ADVENTURE フォーマット		50
B. 2.	一体型解析モデルファイル		51
B. 3.	HDDM 型の解析モデル入力ファイル		53
B. 4.	解析結果出力設定ファイル		54
B. 5.	解析結果出力ファイル		54
B. 6.	非定常解析の結果出力ファイル		54
B. 7.	非定常解析の初期値設定ファイル, 非定常解析の初期値ファイル		54
B. 8.	リスタート設定ファイル		54
B. 9.	リスタートデータファイル		54
B. 10.	物性データファイル		56
B. 10.1.	基本構成		56
B. 10.2.	全体共通構成		57
B. 10.3.	電磁界源構成		58
B. 10.4.	非線形構成		58
B. 10.5.	複数の同一キーワード, コメント		60
B. 11.	強制電流密度データファイル, 磁化ベクトルデータファイル		61
B. 12.	形状定義ファイル		62
B. 12.1.	形状定義		62
B. 12.1.1.	扇型円筒		62
B. 12.1.2.	平行6面体		64
B. 12.1.3.	形状定義の具体例		65
B. 12.2.	時間変化定義		67

B. 12. 2. 1.	設定時刻の範囲 .....	67
B. 12. 2. 2.	正弦波.....	68
B. 12. 2. 3.	直線.....	69
B. 12. 2. 4.	時間変化定義の具体例 .....	70
B. 12. 3.	複数の同一キーワード, コメント.....	71
B. 13.	特性曲線データファイル.....	72
B. 14.	収束履歴ファイル.....	73
B. 15.	その他のファイル.....	74
B. 15. 1.	MSH ファイル.....	74
B. 15. 2.	FGR ファイル.....	74
B. 15. 3.	MSHX ファイル.....	75
B. 15. 4.	FGRX ファイル.....	76
C.	解析例(モデルの作成から解析まで) .....	77
C. 1.	標準的なモデル作成方法: 時間調和渦電流解析.....	77
C. 2.	材料同士の結合面が不一致な場合のモデル作成方法: 非線形静磁場解析.....	89
C. 3.	非定常渦電流解析.....	104
D.	前バージョンからの差分.....	107
D. 1.	Ver. 1. 9. 2 からの差分 .....	107
	参考文献.....	108

## 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並列有限要素解析ソルバ ADVENTURE\_Magnetic の使用マニュアルです。

本章では ADVENTURE\_Magnetic 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いたします。

### 1.1. 本プログラムの特徴

ADVENTURE\_Magnetic は以下のような特徴を持っています。

- 有限要素法による電磁界解析
  - (非線形)静磁場問題
  - 時間調和渦電流問題
  - 非定常渦電流問題
  - 高周波電磁波問題
- 階層型領域分割法(Hierarchical Domain Decomposition Method: HDDM) [2][3][4][5]による逐次処理, または負荷分散を行った並列処理を行うソルバ
  - シングルモード : 逐次処理
  - 共有メモリ並列モード : OpenMP [6]による並列処理
  - 分散メモリ並列モード : MPI [7]による並列処理
  - ハイブリッド並列モード : MPI による分散メモリ並列と,  
MPI ノード内での OpenMP による共有メモリ並列
- 1,000 億自由度を超える解析実績[8][9]

## 1.2. 稼働環境

本モジュールは以下の環境で動作確認を行っています。

対応プラットフォーム	: Linux, UNIX
並列通信ライブラリ	: MPI (シングルモード, 共有メモリ並列モードでは使用しません)
その他	: C コンパイラ, ADVENTURE_IO

### 1.2.1. 対応プラットフォーム

ADVENTURE\_Magnetic はスーパーコンピュータ上で動作させることを前提として開発しています。そのため対応プラットフォームは Linux, Unix です。これら以外でも, Linux または Unix のエミュレート環境, 例えば Windows では Windows Subsystem for Linux (SWL, SWL2)や Cygwin など動作させられる場合があります。

### 1.2.2. 並列通信ライブラリ

分散メモリ並列モード, ハイブリッド並列モードで並列解析を行う場合は MPI をインストールしておかなければなりません。フリーの MPI ライブラリとして有名なものに MPICH [10]と OpenMPI [11]があります。最近の Linux ディストリビューションではインストール設定ツールなどからインストールできる場合もありますが, できない場合には別途インストールしなければなりません。

- MPICH の入手先  
<https://www.mpich.org/>
- OpenMPI の入手先  
<https://www.open-mpi.org/>

### 1.2.3. その他

共有メモリ並列モード, ハイブリッド並列モードでは OpenMP が必要になります。コンパイラのマニュアルで, そのコンパイラが OpenMP に対応しているか確認してください。

また, ADVENTURE\_IO は ADVENTURE Project のホームページ

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

にアーカイブがあります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いてください。

### 1.3. コンパイルとインストール

ADVENTURE\_Magnetic 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(シングルモード、共有メモリ並列モードでは不要)、および ADVENTURE\_IO がインストールされている必要があります。

ADVENTURE\_Magnetic 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ってください。

#### (1) アーカイブファイルの展開

```
% tar zvfz AdvMagnetic-2.0.0.tar.gz
```

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ありません。アーカイブファイルの展開により、AdvMagnetic-2.0.0 ディレクトリが作成されます。また、AdvMagnetic-2.0.0 は次のサブディレクトリを含んでいます。

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

## (2) Makefile.in の編集

展開したディレクトリに移動し、Makefile.in を編集してください。

```

# *****
# 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, 2018, 2021,
#           2024, 2025, ADVENTURE Project,
# All Rights Reserved
# *****

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

# path for ADVENTURE_IO system
ADVSYS = $(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)/AdvMag

# 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 ← (E)
OMPFLAGS = -fopenmp -lgomp

```

- (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してください。 `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ます。(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してください)

```

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

```

- (B) ADVENTURE\_Magnetic 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してください。(赤文字の部分をインストール先に変更してください)  
またそれぞれの環境(shell)にあわせた方法で指定したディレクトリの下に `bin` ディレクトリ (Makefile.in 内の `INSTALL_BINDIR`)へパスを通してください。

```

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

```



- (C) 使用する C コンパイラを指定してください。  
(赤文字の部分を使用する C コンパイラに変更してください)

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

- (D) 使用する MPI 環境に応じて MPI コンパイラを指定してください。  
(赤文字の部分を使用する MPI コンパイラに変更してください)  
シングルモード, 共有メモリ並列モードのみの場合は不要です。

```
# 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(CFLAGS)を指定してください。  
また共有メモリ並列モード, ハイブリッド並列モードを使用する場合はそのためのオプション(OMPFLAGS)を指定してください。  
(赤文字の部分を使用するオプションに変更してください)

```
# Compiler options
CFLAGS  = -O2
OMPFLAGS = -fopenmp -lgomp
```

### (3) コンパイルする

すべての並列モードのソルバ, およびツール類をコンパイルするには, `Makefile.in` があるのと同じディレクトリで次のコマンドを実行します。

```
% make
```

シングルモード, 共有メモリ並列モード, 分散メモリ並列モード, ハイブリッド並列モードのいずれかのみをコンパイルするには上記のコマンドに半角スペースを入れてから, 「`single`」, 「`s_omp`」, 「`parallel`」, 「`p_omp`」をそれぞれ追加して実行します。例えば分散メモリ並列モードのみをコンパイルするコマンドは次のようになります。

```
% make parallel
```

このコマンドを実行することにより, 分散メモリ並列モードのソルバとツール類がコンパイルされます。

### (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します。

```
% make install
```

「(2) `Makefile.in` の編集」の(B)で指定したディレクトリの中に `bin` ディレクトリを作成し, そこにソルバとツール類の実行ファイルをコピーします。上記のコマンドは, インストール先ディレクトリの書き込み権限を持つユーザで実行してください。またそれぞれの環境(shell)でのやり方に従って, インストール先ディレクトリへパスを通してください。

シングルモード, 共有メモリ並列モード, 分散メモリ並列モード, ハイブリッド並列モードのいずれかのみをインストールするには上記のコマンドの「`install`」のあとにそれぞれ「`-s`」, 「`-s_omp`」, 「`-p`」, 「`-p_omp`」をつけてください。例えば分散メモリ並列モードのみをインストールするコマンドは次のようになります。

```
% make install-p
```

このコマンドを実行することにより, 分散メモリ並列モードのソルバとツール類がインストールされます。

なおまだコンパイルされていない場合には, コンパイルしてからインストールします。

インストールされる実行ファイルは次のとおりです。

電磁界解析ソルバモジュール：HDDM 版

- advmag2\_HDDM\_Electromagnetic-s : シングルモード
- advmag2\_HDDM\_Electromagnetic-s\_omp : 共有メモリ並列モード
- advmag2\_HDDM\_Electromagnetic-p : 分散メモリ並列モード
- advmag2\_HDDM\_Electromagnetic-p\_omp : ハイブリッド並列モード

ツール類

- advmag2\_advshow : ADVENTURE ファイル(バイナリ)表示ツール
- advmag2\_makefem\_Electromagnetic : 電磁界解析用の一体型解析モデル作成ツール
- advmag2\_hddmrg : 領域分割データ統合・可視化ファイル作成ツール
- advmag2\_SourceVector : ソースベクトル計算ツール
- advmag2\_compare\_results : 解析結果比較ツール
- advmag2\_makedat : 物性値ファイル作成ツール
- advmag2\_mesh\_convert\_file : ファイル形式変換ツール
- advmag2\_mesh\_property : メッシュ情報解析ツール
- advmag2\_mesh\_cut\_part : メッシュ部分切出しツール
- advmag2\_mesh\_merge : メッシュ結合ツール
- advmag2\_mesh\_translation : メッシュのアフィン変換・平行移動ツール
- advmag2\_mesh\_scaling : メッシュのアフィン変換・拡大縮小ツール
- advmag2\_mesh\_rotation : メッシュのアフィン変換・回転ツール
- advmag2\_mesh\_mirror : メッシュのアフィン変換・鏡映ツール
- advmag2\_mesh\_separate\_elem : 要素分割可視化ファイル作成ツール
- advmag2\_mesh\_separate\_dd : 領域分割可視化ファイル作成ツール
- advmag2\_mesh\_make\_line : 直線要素メッシュ生成ツール
- advmag2\_mesh\_make\_tri : 三角形要素メッシュ(長方形)生成ツール
- advmag2\_mesh\_make\_quad : 四角形要素メッシュ(長方形)生成ツール
- advmag2\_mesh\_make\_tetra : 四面体要素メッシュ(直方体)生成ツール
- advmag2\_mesh\_make\_hexa : 六面体要素メッシュ(直方体)生成ツール
- advmag2\_mesh\_make\_prism : 五面体(プリズム・三角柱)要素メッシュ(直方体)生成ツール
- advmag2\_mesh\_make\_pyramid : 五面体(ピラミッド・四角錐)要素メッシュ(直方体)生成ツール

マニュアル：bin ディレクトリと同じ場所に doc/AdvMag ディレクトリを作成してインストールします。

- manual-jp.pdf : 日本語マニュアル
- manual-eg.pdf : 英語マニュアル

#### 1.4. 電磁界解析モジュールの実行方法

それぞれの電磁界解析モジュールは(非線形)静磁場解析, 時間調和渦電流解析, 非定常渦電流解析, 高周波電磁波解析のいずれかを実行ごとに行うことができます。そのためいずれの解析を行うかを実行時に指定しなければなりません。指定は次のキーワードを実行ファイルの後に書くことで行います。

- (非線形)静磁場解析 : Magnetostatic
- 時間調和渦電流解析 : TH\_Eddy
- 非定常渦電流解析 : NS\_Eddy
- 高周波電磁波解析 : HF\_EM

大文字, 小文字は異なる文字として認識されますので, 上記のまま入力してください。

また解析を行う際にはそれぞれの計算機環境に応じて4つのモードを使い分けてください。それぞれのモードの詳細については2.1節を参照してください。以下ではそれぞれのモードでの実行例を示します。

#### 1.4.1. シングルモード

シングルモードで(非線形)静磁場解析を行うには次のように実行します。

```
% advmag2_HDDM_Electromagnetic-s Magnetostatic [options]
```

[options]は実行時オプションです。必要に応じて指定してください。何も指定しなければdataディレクトリからデータを読み込んで解析を実行し、その結果もこのディレクトリへ出力します。他のモードでも同様です。また実行時オプションについては6章を参照してください。

#### 1.4.2. 共有メモリ並列モード

共有メモリ並列モードで時間調和渦電流解析を行うには次のように実行します。

```
% advmag2_HDDM_Electromagnetic-s_omp TH_Eddy [options]
```

このモードでは環境変数としてスレッド数をあらかじめ設定しておく必要があります。代表的な環境(shell)での設定方法を以下に示します。nはスレッド数です。

- sh  
% OMP\_NUM\_THREADS=n
- csh / tcsh  
% setenv OMP\_NUM\_THREADS n
- bash  
% export OMP\_NUM\_THREADS=n

設定ファイルに設定していれば、このコマンドを実行する必要はありません。

#### 1.4.3. 分散メモリ並列モード

分散メモリ並列モードで非定常渦電流解析を行うには次のように実行します。

```
% mpirun [options for mpirun] advmag2_HDDM_Electromagnetic-p NS_Eddy [options]
```

[options for mpirun]はmpirunに対するオプションです。主なものとして以下のようなものがあります。詳細はMPICHやその他のMPIライブラリのマニュアルを参照してください。

- **-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。

なおmpirunは、mpiexeやmpiexecなど、他の名称であることもあります。それぞれのMPIライブラリのマニュアルで確認してください。

#### 1.4.4. ハイブリッド並列モード

ハイブリッド並列モードで高周波電磁波解析を行うには次のように実行します。

```
% mpirun [options for mpirun] advmag2_HDDM_Electromagnetic-p_omp HF_EM [options]
```

共有メモリ並列モードと同様に、環境変数としてスレッド数をあらかじめ設定しておく必要があります。また上記のコマンドを実行するコンピュータだけでなく、MPIプロセスを立ち上げるすべてのコンピュータでスレッド数を指定しておく必要があります。

## 2. 並列処理機能について

### 2.1. 並列処理機能

ADVENTURE\_Magnetic 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ます. 図 1 は領域の階層型分割を模式的に示したものです. 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)と呼びます. これらの領域分割はADVENTURE\_Metisによっておこなわれます.

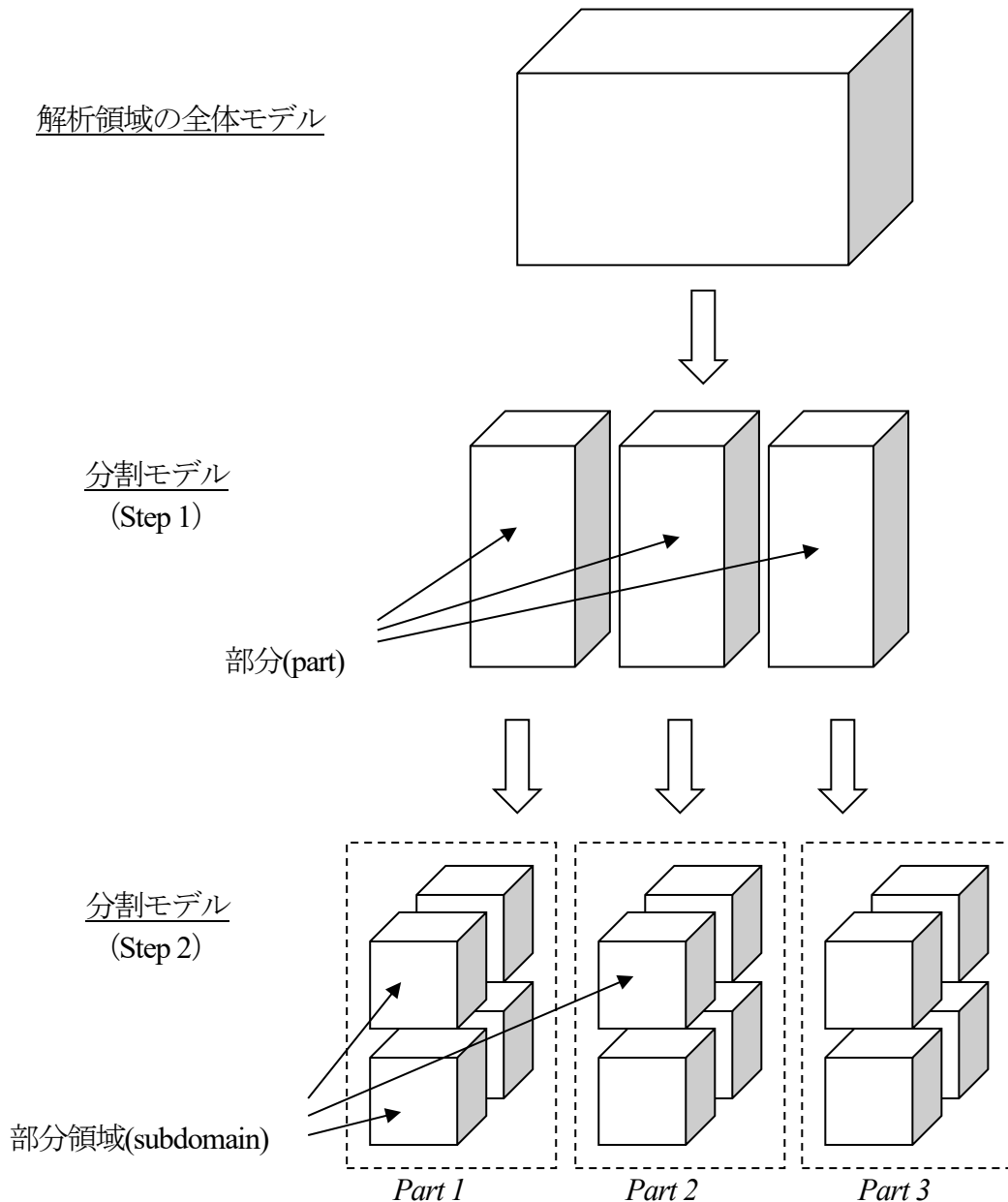


図 1. 階層型領域分割.

ADVENTURE\_Magnetic の分散メモリ並列モード(advmag2\_HDDM\_Electromagnetic-p)では並列ライブラリとしてMPI[7]を用いています。起動時には指定に応じて複数のMPIプロセスが起動されます。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ため、以下ではわかりやすさのためプロセス、ノード、CPUといった言葉は特に区別せずに用います。もちろん、1ノードに対して複数のMPIプロセスを割り当てることも可能です。

分散メモリ並列モードでは、図2に示すようにひとつのpartをひとつのMPIプロセスに割り当てることで並列計算を行います。領域分割におけるpart数と実行プロセス数が同じであるため、ADVENTURE Metisにおいてpart分割数を分散メモリ並列モードで使用するプロセス数に揃えておく必要があります。part数よりも多いMPIプロセス数でも実行できますが、その場合は余剰のプロセスは何もせず、計算資源を無駄にすることになります。またpart数よりも少ないMPIプロセス数ではエラーメッセージを出力して強制終了します。

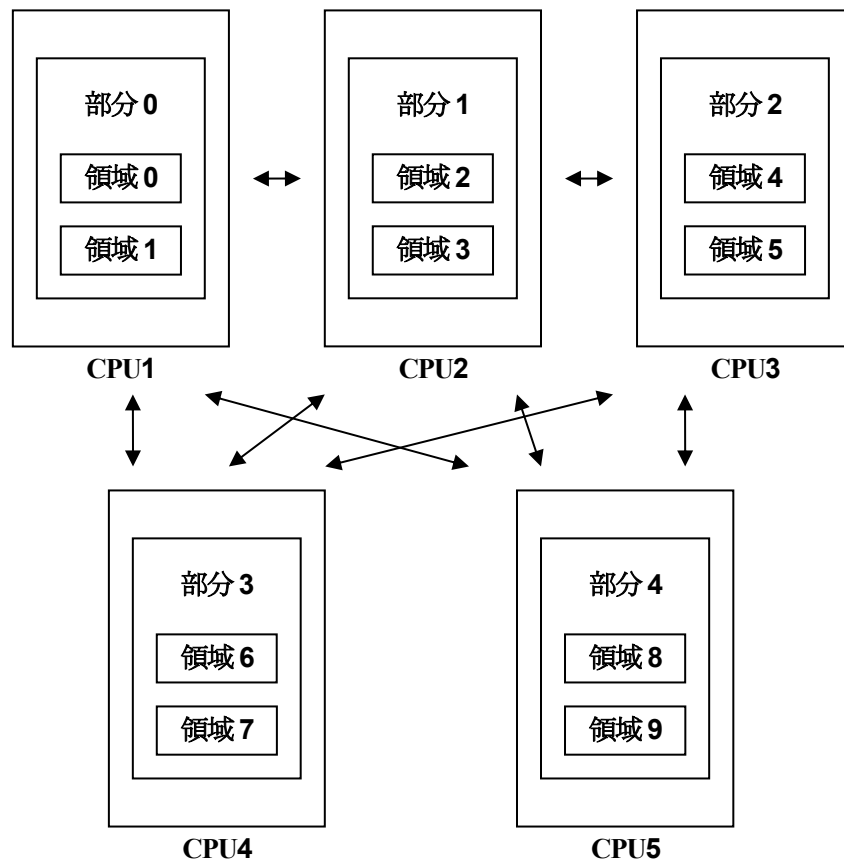


図2. 領域のCPUへの割り当て：分散メモリ並列モード。  
part数5, 各partでsubdomainが2の場合。

ハイブリッド並列モード(`advmag2_HDDM_Electromagnetic-p_omp`)では、分散メモリ並列モードを OpenMP も用いて MPI プロセス内で共有メモリ並列を行うことでハイブリッド並列化しています。ひとつの `part` をひとつの MPI プロセスに割り当てるところは分散メモリ並列モードと同じですが、`part` 内の `subdomain` を OpenMP のスレッドで分担して処理させます(図 3)。

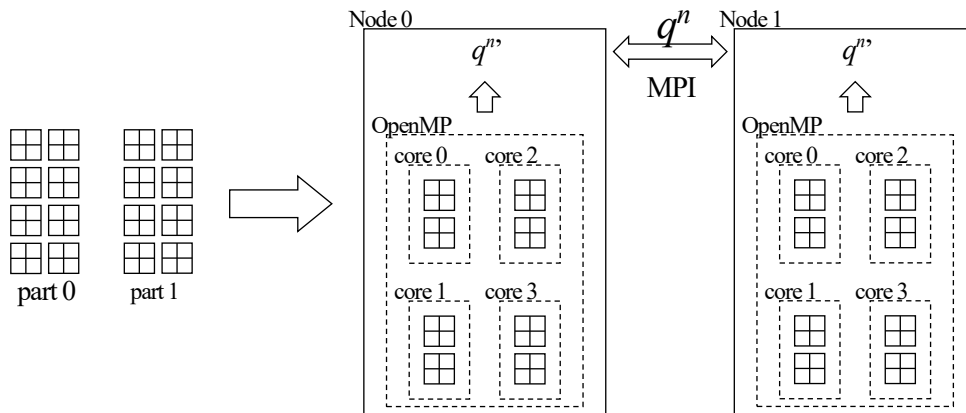


図 3. ハイブリッド並列モード.

シングルモード(`advmag2_HDDM_Electromagnetic-s`)では、並列計算は行わずに、全ての計算をひとつのプロセスで実行します。MPI ライブラリなしでコンパイル・実行が可能です。基本的に分散メモリ並列モードにおいて各 `part` に対して並列実行される計算を、1 プロセス内で順に行うのと同じであり、`part` 内の処理を順に実行してから `part` 間処理を通信なしで行います。そのため `part` 数に関する制限はなく、並列用に領域分割した解析モデルをそのまま使用して実行できます(図 4)。

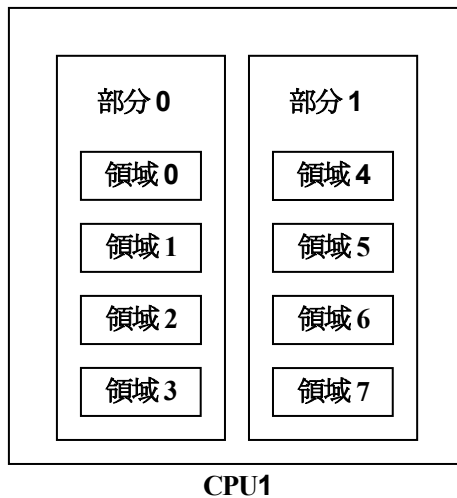


図 4. 領域の CPU への割り当て : シングル版.

共有メモリ並列モード(`advmag2_HDDM_Electromagnetic-s_omp`)では、シングルモードを OpenMP で共有メモリ並列化しています。`part` ごとに `subdomain` を OpenMP のスレッドで分担して処理させます。

## 2.2. ADVENTURE\_Metis による領域分割について

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ります。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ります。

ADVENTURE\_Magnetic の計算性能は領域分割数に依存します。基本的に part 数は並列処理のモードや、使用するノード数などの計算機環境に基づいて決定されます。subdomain 数は計算時間とメモリ使用量に基づいて決定します。ADVENTURE\_Magnetic では、subdomain あたりの要素数を 100~200 程度にしたとき、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られることがわかっています[12]。

ADVENTURE\_Metis では、part 数  $N_{part}$  と、part あたりの subdomain 数  $N_{subdomain}$  を指定して実行しますので、総要素数を  $N_{element}$  とすると、subdomain あたりの要素数  $n_{element}$  は次式によって与えられます。

$$n_{element} = \frac{N_{element}}{N_{part} \times N_{subdomain}} . \quad (1)$$

$N_{part}$  は並列処理のモードと計算機環境によって決まり、 $N_{element}$  は解析するモデルのメッシュによって決まりますので、 $N_{subdomain}$  を次式で決めます。

$$N_{subdomain} = \frac{N_{element}}{N_{part} \times n_{element}} . \quad (2)$$

$n_{element}$  には上記のとおり 100~200 の値を用いてください。

例えば  $n_{element}$  を 100 として、要素数 80 万のメッシュ(約 100 万自由度)を、分散メモリ並列モードで 4 つの MPI プロセス(4 part)を用いて解析する場合は、part 内の subdomain 数は次のようになります。

$$\frac{80 \text{ 万}}{4 \times 100} = 2,000 . \quad (3)$$

このとき、ADVENTURE\_Metis は次のように実行されます。

```
% mpirun -np 4 adventure_metis -HDDM -difn 1 data/model_one/input.adv data 2000
```

赤字になっているのが part 数  $N_{part}$  と、part あたりの subdomain 数  $N_{subdomain}$  です。ここでは MPI ライブラリとして MPICH を使い、マシン名のリストにはシステムで設定されているものを用い、data ディレクトリに入出力すると想定しています。MPI ライブラリ、および ADVENTURE\_Metis の詳細は、それぞれのマニュアルを参照してください。



### 3. 解析の流れ

ADVENTURE システムを用いた一連の解析の流れは図 5 のようになっています. 詳細は Appendix C において, 実際のコマンドを示しながら述べます.

#### (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います.

#### (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(FaceGroup)の抽出を行い, ADVENTURE\_BcGUI を用いて境界条件設定を行います. GUI による条件設定の詳細は ADVENTURE\_BCtool のマニュアルおよび Appendix A.3 を参照してください.

#### (3) 一体型解析モデルの作成

ADVENTURE\_Magnetic のツール `advmag2_makefem_Electromagnetic` を用いてメッシュ, 物性値, 境界条件から ADVENTURE フォーマットの一体型解析モデルを作成します.

次に入出力ファイルのトップディレクトリである解析ディレクトリ `data` を作成し, 一体型解析モデルを `data/model_one/` に移動します.

```
% mkdir -p data/model_one
% mv input.adv data/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します. なお, 実行時にはオプション `-difn 1` を指定してください. 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す. 領域分割については 2.2 節も参照してください.

#### (5) 解析の実行

ADVENTURE\_Magnetic 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います.

#### (6) 解析結果の可視化

可視化に用いるファイルは ADVENTURE\_Magnetic 付属のツール `advmag2_hddmng` を用いて作成します. ADVENTURE フォーマットのファイル(ADVENTURE ファイル)の他に, VTU ファイル(テキスト)および Legacy VTK ファイル(バイナリ)を作成でき, これらは ParaView で読み込めます.

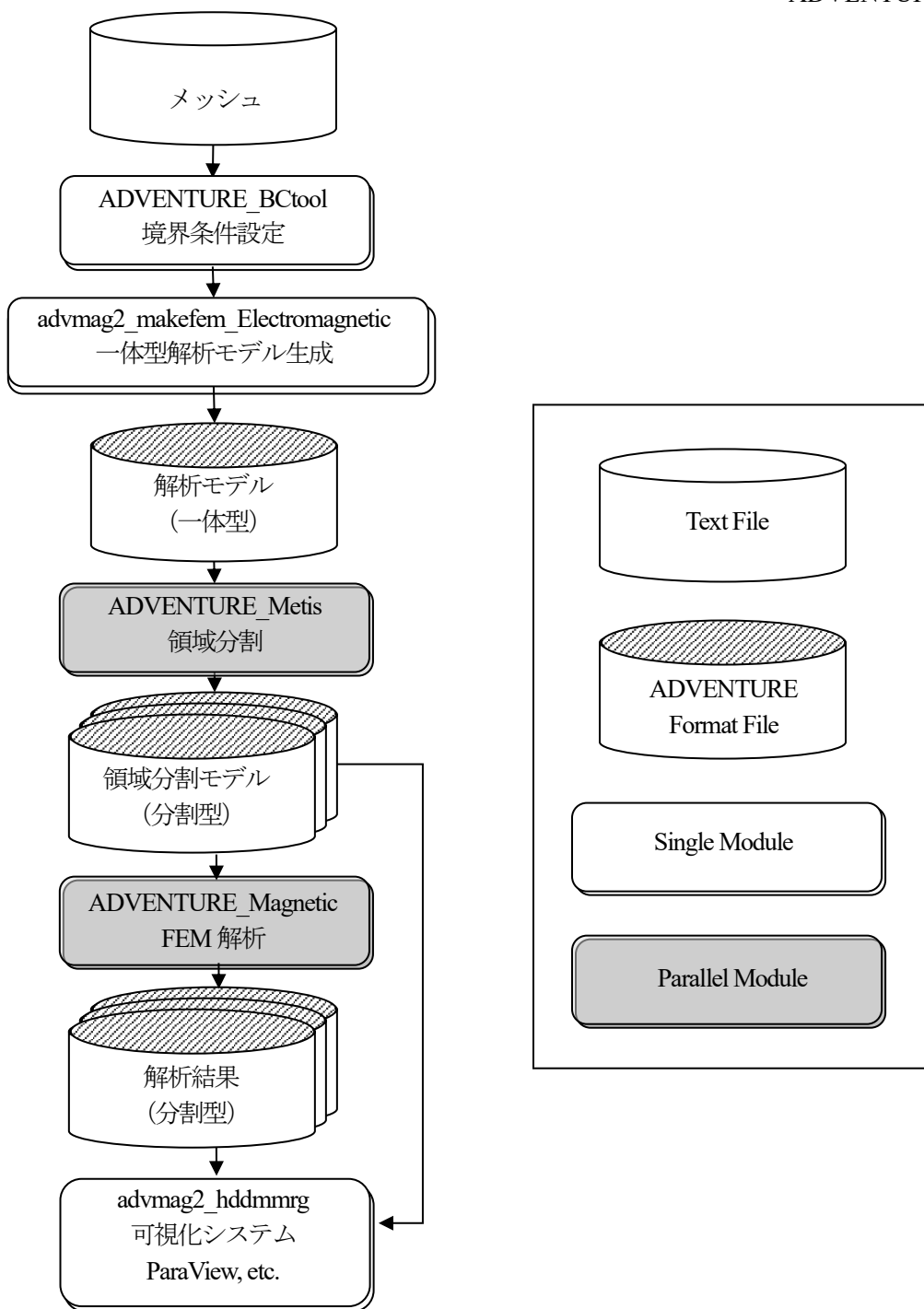


図 5. 解析の流れ.

## 4. 入出力ファイル

### 4.1. 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なっています。 *data* 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ります。これを解析ディレクトリと呼びます。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ができます。(6.2 節参照)

- 解析ディレクトリ : *data*
- 一体型解析モデルファイル : *data/model\_one/input.adv*
- HDDM 型の解析モデル入力ファイル : *data/model/advhddm\_in\_P.adv*
- 解析結果出力設定ファイル : *data/result/advhddm\_out.adv*
- 解析結果出力ファイル : *data/result/advhddm\_out\_P.adv*
- 非定常解析の結果出力ファイル : *data/result/advhddm\_out\_T\_P.adv*
- 非定常解析の初期値設定ファイル : *data/initial/advhddm\_out.adv*
- 非定常解析の初期値ファイル : *data/initial/advhddm\_out\_P.adv*
- リスタート設定ファイル : *data/restartR/advhddm\_restart.adv*
- リスタートデータファイル : *data/restartR/advhddm\_restart\_P.adv*
- 物性データファイル : *data/mtrl.dat*
- 収束履歴ファイル : *data/calc\_log/log\_g\_\**

ここで、*P* は part 番号、*T* は時間ステップ、*R* はリスタート回数を表します。

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ります。これらのファイルは物性データファイルのあるサブディレクトリ(オプション「-mtrldat-dir」で指定されるディレクトリ)からの相対パスでファイル名を指定します。これらには以下のようなものがあります。

- 強制電流密度データファイル
- 磁化ベクトルデータファイル
- 形状定義ファイル
- 特性曲線データファイル

なおこれらのファイルのフォーマットについては「Appendix B. 入出力ファイルフォーマット」を参照してください。

## 4.2. 使用するファイル

それぞれの解析に必要なファイルは以下のようになっています。

- ・ 共通
  - 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
  - 出力ファイル
    - ◇ 解析結果出力設定ファイル
    - ◇ 収束履歴ファイル
  - (任意) 入出力ファイル：並列疎行列ソルバのリスタートに使用.
    - ◇ リスタート設定ファイル
    - ◇ リスタートデータファイル
- ・ (非線形) 静磁場解析において追加に必要なファイル
  - 入力ファイル
    - ◇ (任意) 強制電流密度データファイル(コイル)  
磁化ベクトルデータファイル(永久磁石)  
形状定義ファイル(コイル, 永久磁石) : 電磁界源として1つ以上必要
    - ◇ (任意) 特性曲線データファイル : 非線形解析を行う場合
  - 出力ファイル
    - ◇ 解析結果出力ファイル
- ・ 時間調和渦電流解析において追加に必要なファイル
  - 入力ファイル
    - ◇ (任意) 強制電流密度データファイル(コイル)  
磁化ベクトルデータファイル(永久磁石)  
形状定義ファイル(コイル, 永久磁石) : 電磁界源として1つ以上必要
  - 出力ファイル
    - ◇ 解析結果出力ファイル
- ・ 非定常渦電流解析において追加に必要なファイル
  - 入力ファイル
    - ◇ 形状定義ファイル(コイル, 永久磁石)
    - ◇ (任意) 非定常解析の初期値設定ファイル  
非定常解析の初期値ファイル : 静磁場解析か時間調和渦電流解析の結果
    - ◇ (任意) 特性曲線データファイル : 非線形解析を行う場合
  - 出力ファイル
    - ◇ 非定常解析の解析結果出力ファイル
- ・ 高周波電磁波解析において追加に必要なファイル
  - 入力ファイル
    - ◇ (任意) 強制電流密度データファイル(コイル)  
磁化ベクトルデータファイル(永久磁石)  
形状定義ファイル(コイル, 永久磁石) : 電磁界源として1つ以上必要
  - 出力ファイル
    - ◇ 解析結果出力ファイル

## 5. 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ありません。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ります。

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)です。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変換してください。

表 1. 単位変換：長さの単位に m ではなく、mm を使用する場合

	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 <sup>2</sup>	Wb/mm <sup>2</sup>	1 T = 10 <sup>-6</sup> Wb/mm <sup>2</sup>
磁場	A/m	A/mm	1 A/m = 0.001 A/mm
強制電流密度	A/m <sup>2</sup>	A/mm <sup>2</sup>	1 A/m <sup>2</sup> = 10 <sup>-6</sup> A/mm <sup>2</sup>

## 6. 実行時オプション

実行時に使用可能なオプションは以下の通りです。なお、オプションのあとにつく  $n$ ,  $x$ ,  $s$  はそれぞれ整数, 実数, 文字列を指定することを示しています。多くのオプションでデフォルト値はモジュールごとに異なります。

### 6.1. すべてのモジュールに共通のオプション

- **-memlimit  $n$**   
並列計算を行うモジュールでは各 MPI プロセス、そうでない場合は単体で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します。搭載メモリ量を大きく超えることによるシステム障害や、ページングによる大幅な計算時間増大を防ぐために使用量を制限しています。デフォルト値は全モジュールで共通の 1,000 です。環境や必要に応じて変更してください。
- **-v** または **-version**  
バージョン情報を表示します。
- **-h** または **-help**  
ヘルプメッセージを表示します。
- **-s** または **-settings**  
設定値を確認できます。このオプションが処理された段階で、各モジュールは実行を停止します。  
実行ファイルにこのオプションのみ付けて実行した場合は、各オプションのデフォルト値が表示されます。  
また様々なオプションを与えて最後にこのオプションを付けて実行すれば、正しく設定を行えているか、解析などを実行せずに確認できます。
- **-op-sw  $s$**   
一つのモジュールの中で同じオプションを複数の機能、目的で用いることがあります。そのような場合にどの機能、目的で用いるかをこのオプションスイッチで設定します。オプションスイッチはそれぞれのモジュールに 1 つしかないことが多いですが、複数持つものもあります。複数持つ場合には [Appendix A](#) のそれぞれのモジュールについての説明で述べていますので、そちらを参照してください。

## 6.2. 入出力ファイル名の変更オプション

それぞれの解析で用いるファイルは4章で示しました。それらの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します。ただし、*dir* はディレクトリ名、*file* はファイル名です。そのあとの括弧書きはデフォルトの名称です。また *P* は part 番号、*T* は時間ステップを表します。

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ます。

- **-data-dir *dir* (data)**  
入出力ファイルのトップディレクトリ、解析ディレクトリの名称を *dir* にします。
- **-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* にします。
- **-onedata-file *file* (input)**  
一体型解析モデルファイル名を *file* に拡張子.adv をつけたものにします。
- **-model-dir *dir* (model)**  
HDDM 型の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* にします。
- **-model-file *file* (advhddm\_in)**  
HDDM 型の解析モデル入力ファイル名を *file* に part 番号と拡張子からなる *\_P.adv* をつけたものにします。
- **-result-dir *dir* (result)**  
解析結果出力設定ファイル、解析結果出力ファイル、非定常解析の結果出力ファイルのあるサブディレクトリ名を *dir* にします。
- **-result-file *file* (advhddm\_out)**  
解析結果出力設定ファイル名を *file* に拡張子.adv をつけたものにします。  
解析結果出力ファイル名を *file* に part 番号と拡張子からなる *\_P.adv* をつけたものにします。  
非定常解析の結果出力ファイル名を *file* に時間ステップと part 番号、拡張子からなる *\_T\_P.adv* をつけたものにします。
- **-inivalue-dir *dir* (initial)**  
非定常解析の初期値設定ファイル、非定常解析の初期値ファイルのあるサブディレクトリ名を *dir* にします。
- **-inivalue-file *file* (advhddm\_out)**  
非定常解析の初期値設定ファイル名を *file* に拡張子.adv をつけたものにします。  
非定常解析の初期値ファイル名を *file* に part 番号と拡張子からなる *\_P.adv* をつけたものにします。
- **-mtrldat-dir *dir* (./)**  
物性データファイルのあるサブディレクトリ名を *dir* にします。
- **-mtrldat-file *file* (mtrl.dat)**  
物性データファイル名を *file* にします。
- **-calc-log-dir *dir* (calc\_log)**  
収束履歴ファイルのあるサブディレクトリ名を *dir* にします。

• `-calc-log-file file (log_g)`

収束履歴ファイル名を *file* にそれぞれの解析の種類を示すキーワードをつけたものにします。

例えば時間調和渦電流解析であればデフォルトでは `log_g_HDDM_TH_Eddy` となります。

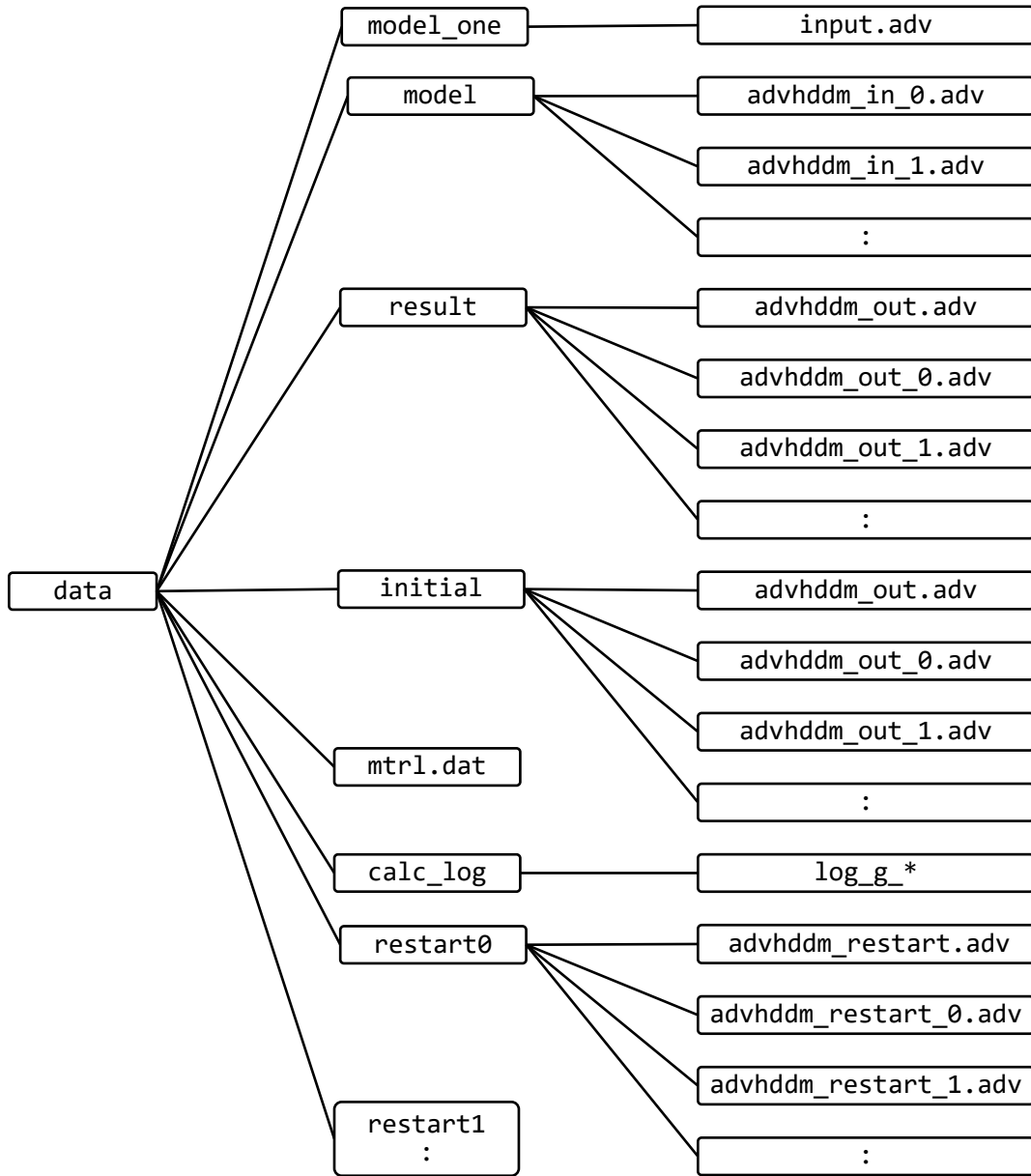


図 6. 解析ディレクトリ内の構造.

ディレクトリ名, ファイル名はデフォルト値.

「result」内は定常解析, 準定常解析の場合.

図 6 は解析ディレクトリ内の構造です. 物性データファイル「`mtrl.dat`」内で物性データファイルのあるサブディレクトリ(オプション「`-mtrldat-dir`」で指定されるディレクトリ)からの相対パスでファイル名が指定される強制電流密度データファイル, 磁化ベクトルデータファイル, 形状定義ファイル, 特性曲線データファイルはここには記述されていません. 下部の「restart」については, 6.5.1 項を参照してください.



### 6.3. 非定常解析に関するオプション

非定常(Non-Steady)解析をソルバモジュールで行う際に用いるオプションです。デフォルト値はモジュールごと、また同じモジュールでも機能ごとに異なりますので、`-s` または `-settings` で確認してください。

- `-ns-delta-t x`  
時間刻み幅 $\Delta t$ を  $x$  として指定します。
- `-ns-end-step n`  
解析する最後の時間ステップを  $n$  として指定します。
- `-ns-start-step n`  
解析を開始する時間ステップ数を  $n$  として指定します。  
通常は初期値(0 ステップ目の値)に 0 か非定常解析の初期値ファイルから読み込んだ値を用いて 1 ステップ目から解析しますが、このオプションはいったん解析を終了した後、さらに解析する時間ステップ数を増やしたいときに用います。解析を再開する際には、前の解析の解析結果出力設定ファイルと  $n-1$  ステップ目の非定常解析の結果出力ファイルが必要です。
- `-ns-inivalue-type s`  
非定常解析の初期値の種類をキーワード  $s$  で指定します。指定できるキーワードは次の4つです。
  - `zero` : すべての未知数の初期値を 0 にします。
  - `static` : 静解析の解析結果出力ファイルを非定常解析の初期値設定ファイルとして用います。
  - `real` : 時間調和解析の解析結果出力ファイルを非定常解析の初期値設定ファイルとして用います。時間調和解析で得られる結果は複素数です。このキーワードを指定した場合は複素数の実部を用います。
  - `imaginary` : 時間調和解析の解析結果出力ファイルを非定常解析の初期値設定ファイルとして用います。このキーワードを指定した場合は複素数の虚部を用います。
- `-ns-out-interval n`  
非定常解析の結果出力ファイルを出力する間隔を  $n$  として指定します。  
ディスク使用量を節約したいときなどに用います。ただし、出力しなかったステップのデータは解析をやり直さなければ得られませんので、注意してください。

## 6.4. 非線形解析に関するオプション

非線形(Non-Linear)解析をソルバモジュールで行う際に用いるオプションです。デフォルト値はモジュールごと、また同じモジュールでも機能ごとに異なりますので、`-s` または `-settings` で確認してください。

- `-nl-method s`  
非線形解析に用いる解法をキーワード  $s$  で指定します。指定できるキーワードは次の4つです。
  - `None` : 非線形解析を行わず、ただの線形解析を行います。
  - `Newton` : Newton 法(Newton-Raphson 法)を用いて非線形解析を行います。
  - `Picard` : Picard の逐次近似法を用いて非線形解析を行います。
  - `Explicit` : 非線形解析にも対応した非定常解析を行う際に、前の時間ステップの解析結果を用いて物性値を決定する陽的非線形解析を行います。
 どの解法を用いるかは、解析機能によって異なります。
  
- `-nl-param x`  
非線形解析のパラメータを  $x$  として指定しますが、現時点ではどのモジュールでも使用していません。

### 6.4.1. Newton 法, Picard の逐次近似法を用いて非線形解析する際のオプション

- `-nl-max-loop n`  
非線形反復回数の上限を  $n$  として指定します。
  
- `-nl-conv x`  
非線形反復の収束判定値を  $x$  として指定します。
  
- `-nl-div x`  
非線形反復が発散したと判定する値を  $x$  として指定します。

### 6.4.2. Newton 法を用いて非線形解析する際のオプション

- `-nl-newton-hor s`  
Newton 法で使用する特性曲線をキーワード  $s$  で指定します。指定できるキーワードは次の2つです。違いは横軸(*horizontal axis*)の値をそのまま用いたグラフと、2乗した値を用いたグラフのどちらを非線形解析に用いるかです。
  - `Original` : 横軸の値をそのまま用いたグラフを非線形解析に用います。
  - `Squared` : 2乗した値を横軸に用いたグラフを非線形解析に用います。  
このグラフは特性曲線データファイルから入力された値からモジュール内で作成します。

## 6.5. 疎行列ソルバに関するオプション

ソルバモジュールでは、HDDM においてインターフェース問題を解くための並列疎行列ソルバと、subdomain 内の疎行列を解くための並列化されていない疎行列ソルバが用いられます。

### 6.5.1. 並列疎行列ソルバに関するオプション

#### • -hddm *s*

HDDM においてインターフェース問題を解くための並列疎行列ソルバをキーワード *s* で指定します。指定できるキーワードは以下の通りです。使える行列が限られている場合はその行列の種類を付記します。

- 一般的なソルバ
  - ◇ CG : 共役勾配法(Conjugate Gradient method: CG 法)  
(実対称行列, エルミート行列)
  - ◇ CR : 共役残差法(Conjugate Residual method: CR 法)  
(実対称行列, エルミート行列)
  - ◇ BiCG : 双共役勾配法(Bi-Conjugate Gradient method: BiCG 法)
  - ◇ BiCR : 双共役残差法(Bi-Conjugate Residual method: BiCR 法)
  - ◇ COCG : 共役直交共役勾配法(Conjugate Orthogonal CG method: COCG 法)  
(複素対称行列)
  - ◇ COCR : 共役直交共役残差法(Conjugate Orthogonal CR method: COCR 法)  
(複素対称行列)
  - ◇ MINRES : 最小残差法(Minimal Residual method: MINRES 法)  
(実対称行列, エルミート行列)
  - ◇ MINRES-like\_CS : MINRES-like\_CS 法(複素対称行列)
  - ◇ QMR : 準最小残差法(Quasi-Minimal Residual method: QMR 法)  
(実対称行列, エルミート行列)
  - ◇ QMR\_SYM : QMR\_SYM 法(複素対称行列)
- 自乗系積型反復法
  - ◇ CGS : 自乗共役勾配法(CG Squared method: CGS 法)
  - ◇ CRS : 自乗共役残差法(CR Squared method: CRS 法)
  - ◇ COCGS : 自乗共役直交共役勾配法(COCG Squared method: COCGS 法)  
(複素対称行列)
  - ◇ COCRS : 自乗共役直交共役残差法(COCR Squared method: COCRS 法)  
(複素対称行列)
- 安定化自乗系積型反復法
  - ◇ SCGS : 安定化自乗共役勾配法(Stabilized CGS method: SCGS 法)
  - ◇ SCRS : 安定化自乗共役残差法(Stabilized CRS method: SCRS 法)
  - ◇ SCOCGS : 安定化自乗共役直交共役勾配法(Stabilized COCGS method: SCOCGS 法)  
(複素対称行列)
  - ◇ SCOCRS : 安定化自乗共役直交共役残差法(Stabilized COCRS method: SCOCRS 法)  
(複素対称行列)
- 安定化系積型反復法
  - ◇ BiCGSTAB : 安定化双共役勾配法(BiCG Stabilized method: BiCGSTAB 法)
  - ◇ BiCRSTAB : 安定化双共役残差法(BiCR Stabilized method: BiCRSTAB 法)
  - ◇ COCGSTAB : 安定化共役直交共役勾配法(COCG Stabilized method: COCGSTAB 法)  
(複素対称行列)
  - ◇ COCRSTAB : 安定化共役直交共役残差法(COCR Stabilized method: COCRSTAB 法)  
(複素対称行列)

- 一般化系積型反復法
  - ◇ GPBiCG : 双共役勾配法に基づく一般化積型法  
(Generalized Product-type methods based on BiCG method: GPBiCG 法)
  - ◇ GPBiCR : 双共役残差法に基づく一般化積型法  
(Generalized Product-type methods based on BiCR method: GPBiCR 法)
  - ◇ GPCOCG : 共役直交共役勾配法に基づく一般化積型法  
(Generalized Product-type methods based on COCG method: GPCOCG 法)  
(複素対称行列)
  - ◇ GPCOCR : 共役直交共役残差法に基づく一般化積型法  
(Generalized Product-type methods based on COCR method: GPCOCR 法)  
(複素対称行列)
- STAB2 系積型反復法
  - ◇ BiCGSTAB2 : BiCGSTAB2 法
  - ◇ BiCRSTAB2 : BiCRSTAB2 法
  - ◇ COCGSTAB2 : COCGSTAB2 法(複素対称行列)
  - ◇ COCRSTAB2 : COCRSTAB2 法(複素対称行列)
- -hddm-param  $x$   
並列疎行列ソルバのパラメータを  $x$  として指定しますが、現時点ではどのモジュールでも使用していません。
- -hddm-max-loop  $n$   
並列疎行列ソルバの反復回数上限を  $n$  として指定します。
- -hddm-conv  $x$   
並列疎行列ソルバの収束判定値を  $x$  として指定します。
- -hddm-div  $x$   
並列疎行列ソルバが発散したと判定する値を  $x$  として指定します。
- -hddm-pc  $s$   
並列疎行列ソルバの前処理手法をキーワード  $s$  で指定します。指定できるキーワードは以下の通りです。
  - None : 前処理手法を用いません。
  - Diag : 前処理手法として簡易対角スケーリングを用います。
- -hddm-pc-param  $x$   
並列疎行列ソルバの前処理手法のパラメータを  $x$  として指定しますが、現時点ではどのモジュールでも使用していません。
- -hddm-mat-type  $s$   
並列疎行列ソルバの行列格納形式をキーワード  $s$  で指定します。指定できるキーワードは以下の通りです。
  - implicit : インターフェース問題の行列を陽には作成しません。
- -hddm-log / -hddm-no-log  
並列疎行列ソルバの収束履歴を収束履歴ファイルに出力します/しません。
- -hddm-keep-dom-mat / -hddm-no-keep-dom-mat  
subdomain の行列をメモリ上に記憶するか、並列疎行列ソルバの反復ごとに作り直すかを設定します。記憶させておくと計算時間が短くなりますが、メモリ使用量が増えます。

- **-hddm-restart-out**

並列疎行列ソルバの反復を再開するのに必要なリスタートデータを出力させます。最初に設定した収束判定値では解析結果の精度が不十分であった場合に、収束判定値をより厳しくして反復を途中から再開できます。リスタートデータがない場合は、最初から計算し直さなければなりません。リスタートは繰り返すことができます。

- **-hddm-restart *n***

何度目のリスタートデータを用いて再開するかを *n* として指定します。リスタート回数は0(まだリスタートしていない)からカウントします。例えば、次のように収束判定値を変更しながら繰り返します。

```
% advmag2_Electromagnetic HF_EM -hddm-conv 1.0e-05 -hddm-restart-out
% advmag2_Electromagnetic HF_EM -hddm-conv 1.0e-07 -hddm-restart-out -hddm-restart 0
% advmag2_Electromagnetic HF_EM -hddm-conv 1.0e-08 -hddm-restart-out -hddm-restart 1
```

なおリスタート設定ファイルから前の設定を読み込みます。そのため収束判定値、反復回数上限以外の設定は変更できません。また上記のコマンドでは、収束履歴ファイル名がそれぞれ `log_g_HDDM0_HF_EM`, `log_g_HDDM1_HF_EM`, `log_g_HDDM2_HF_EM` となります。

- **-hddm-restart-dir *dir* (restart)**

リスタート設定ファイル、リスタートデータファイルのあるサブディレクトリ名を *dir* にリスタート回数を加えたものにします。リスタートデータを記録するごとに `restart0`, `restart1`, `restart2`, ... のようになります。

- **-hddm-restart-file *file* (advhddm\_restart)**

リスタート設定ファイル名を *file* に拡張子 `.adv` をつけたものにします。

リスタートデータファイル名を *file* に part 番号と拡張子からなる `_P.adv` をつけたものにします。

## 6.5.2. 並列化されていない疎行列ソルバに関するオプション

- **-solver *s***  
 subdomain 内の疎行列を解くための並列化されていない疎行列ソルバをキーワード *s* で指定します。HDDM においてインターフェース問題を解くための並列疎行列ソルバ(-hddm オプション)で指定できるキーワードに加え、以下のキーワードを指定できます。使える行列が限られている場合はその行列の種類を付記します。
  - 直接法
    - ✧ LDL :  $LDL^T(LDL^H)$ 分解法(実対称行列, 複素対称行列, エルミート行列)
    - ✧ LU : LU分解法
    - ✧ LU<sub>p</sub> : ピボット付き LU 分解法

ただし不定性のある行列に直接法を適用すると計算途中で破綻しますので注意してください。また、一般的に反復法に比べてメモリ使用量が大きく増えます。
- **-solver-param *x***  
 疎行列ソルバのパラメータを *x* として指定しますが、現時点ではどのモジュールでも使用していません。
- **-solver-max-loop *n***  
 疎行列ソルバの反復回数上限を *n* として指定します。
- **-solver-conv *x***  
 疎行列ソルバの収束判定値を *x* として指定します。
- **-solver-div *x***  
 疎行列ソルバが発散したと判定する値を *x* として指定します。
- **-solver-pc *s***  
 疎行列ソルバの前処理手法をキーワード *s* で指定します。指定できるキーワードは以下の通りです。使える行列が限られている場合はその行列の種類を付記します。
  - None : 前処理手法を用いません。
  - Diag : 前処理手法として対角スケールリングを用います。
  - ICC : 前処理手法として不完全コレスキー分解を用います。  
(実対称行列, 複素対称行列, エルミート行列)
  - iLU : 前処理手法として不完全 LU 分解を用います。
- **-solver-pc-param *x***  
 疎行列ソルバの前処理手法のパラメータを *x* として指定します。前処理手法が不完全コレスキー分解, 不完全 LU 分解の場合に加速係数として用いられます。
- **-solver-mat-type *s***  
 疎行列ソルバの行列格納形式をキーワード *s* で指定します。指定できるキーワードは以下の通りです。
  - AIJ : AIJ 形式を用います。
- **-solver-log / -solver-no-log**  
 疎行列ソルバの収束履歴を収束履歴ファイルに出力します/しません。

## Appendix

### A. 各モジュールの使用法詳細

#### A.1. 電磁界解析ソルバモジュール(HDDM 版) `advmag2_HDDM_Electromagnetic-*`

並列化の方式によって4種類の実行ファイルがあります。

- `advmag2_HDDM_Electromagnetic-s` : シングルモード
- `advmag2_HDDM_Electromagnetic-s_omp` : 共有メモリ並列モード
- `advmag2_HDDM_Electromagnetic-p` : 分散メモリ並列モード
- `advmag2_HDDM_Electromagnetic-p_omp` : ハイブリッド並列モード

このモジュールの入出力ファイルについては4章を参照してください。

固有オプション(Local options):

- `-specificate-bc file`  
`file` で指定した解析条件ファイル(拡張子.cnd, 詳細は ADVENTURE\_BCtool のマニュアルを参照)から読み込んだ境界条件を使用して解析を行います。HDDM 型の解析モデル入力ファイルから読み込んだ境界条件は破棄されます。  
この機能を使うには、一体型解析モデル作成ツール `advmag2_makefem_Electromagnetic` で一体型解析モデルファイルを作成する際に、必ず `FaceGroup` データを出力させるようにしてください。
- `-output-bc`  
解析に使用した境界条件を解析結果出力ファイル, または非定常解析の結果出力ファイルに出力します。

以下ではそれぞれの電磁界解析についての詳細を述べます。

### A. 1. 1. (非線形)静磁場解析

線形、または非線形の静磁場解析を行います。行列は実対称です。

非線形静磁場解析を行う際には、 $B-H$  特性曲線( $B$  は磁束密度[T],  $H$  は磁界[A/m])を記録した特性曲線データファイルが必要です。 $B-H$  特性曲線を元に、磁気抵抗率 $\nu$  [m/H] (透磁率 $\mu$  [H/m]の逆数)の非線形性を考慮します。Newton 法、または Picard の逐次近似法を使用できます。Newton 法では、「-nl-newton-hor」で「Original」を指定した場合には $\nu B$  曲線、「Squared」を指定した場合には $\nu B^2$  曲線を、特性曲線データファイルから読み込んだ  $B-H$  特性曲線から計算して用います。

静磁場解析で解くのは磁気ベクトルポテンシャル  $A$  [Wb/m]を未知数とする  $A$  法です。

静磁場解析では、解析結果出力ファイルに以下のものを出力します。単位はすべての入力<sup>3</sup>が SI 単位系の場合です。必要に応じて換算してください。また()内は ADVENTURE ファイル内での label です。

- 未知数  $A$  (MagneticVectorPotential)
- 要素ごとの物性番号(MaterialID)
- コイルに与えた強制電流密度(CurrentDensity) [J/m<sup>2</sup>] : 与えた場合
- 永久磁石に与えた磁化ベクトル(MagnetizationVector) [T] : 与えた場合
- 磁束密度(MagneticFluxDensity) [T]
- 節点力(NodalForce) [N]
- 物性番号ごとの節点力(NodalForce\_MatID) [N]
- 要素ごとの磁気抵抗率(MagneticReluctivity) [m/H] (透磁率の逆数)



### A. 1. 2. 時間調和渦電流解析

商用電源など、比較的低い周波数で、電圧が正弦波状に変化する電流の時間調和渦電流解析を行います。時間調和問題(準定常問題)を解きます。時間調和問題は、本来は時間ステップごとに実行列を解かなければならない時間発展問題を、時間微分項 $\partial/\partial t$ を $-i\omega$ 、または $i\omega$  ( $i$ :虚数単位,  $\omega$ :電流の角周波数[rad/s])とおくことで複素行列を一度だけ解けば良い準定常問題に変換したものです。行列は複素対称です。

時間調和渦電流解析で解くのは磁気ベクトルポテンシャル  $A$  [Wb/m]を未知数とする  $A$  法、または  $A$  と電気スカラーポテンシャル  $\phi$  [V]を未知数とする  $A$ - $\phi$  法です。次のようにオプションで指定します。

- -formulation A :  $A$  法
- -formulation APhi :  $A$ - $\phi$  法

一般に  $A$ - $\phi$  法の方がメモリ使用量は数割増えますが、反復法の収束が早く、計算時間が短くなります。

時間調和渦電流解析では、解析結果出力ファイルに以下のものを出力します。単位はすべての入力がある SI 単位系の場合です。必要に応じて換算してください。また()内は ADVENTURE ファイル内での label です。

- 未知数  $A$  (MagneticVectorPotential) : 複素数
- 未知数  $\phi$  (ElectricScalarPotential) : 複素数,  $A$ - $\phi$  法のみ
- 要素ごとの物性番号(MaterialID)
- コイルに与えた強制電流密度の実部(CurrentDensityReal) [J/m<sup>2</sup>] : 与えた場合
- コイルに与えた強制電流密度の虚部(CurrentDensityImaginary) [J/m<sup>2</sup>] : 与えた場合
- 永久磁石に与えた磁化ベクトルの実部(MagnetizationVectorReal) [T] : 与えた場合
- 永久磁石に与えた磁化ベクトルの虚部(MagnetizationVectorImaginary) [T] : 与えた場合
- 磁束密度(MagneticFluxDensity) [T] : 複素数
- 渦電流密度(EddyCurrentDensity) [J/m<sup>2</sup>] : 複素数
- 要素ごとの内部発熱(InternalHeatGeneration) [W/m<sup>3</sup>]

### A. 1. 3. 非定常渦電流解析

商用電源など、比較的低い周波数の電流を扱う時間発展問題を解きます。行列は実対称です。

非定常渦電流解析で解くのは、時間調和渦電流解析と同様に、 $A$  法、または  $A-\phi$  法です。それらは時間調和渦電流解析と同様に指定できます。

前の時間ステップの解析結果を用いて物性値を決定する陽的非線形解析を行えます。非線形解析を行う際には  $B-H$  特性曲線( $B$  は磁束密度[T],  $H$  は磁界[A/m])を記録した特性曲線データファイルが必要です。 $B-H$  特性曲線を元に、磁気抵抗率 $\nu$ [m/H] (透磁率 $\mu$  [H/m]の逆数)の非線形性を考慮します。

非定常渦電流解析では、非定常解析の結果出力ファイルに以下のものを出力します。単位はすべての入力が SI 単位系の場合です。必要に応じて換算してください。また()内は ADVENTURE ファイル内での label です。

- 未知数  $A$  (MagneticVectorPotential)
- 未知数  $\phi$  (ElectricScalarPotential) :  $A-\phi$  法のみ
- 要素ごとの物性番号(MaterialID)
- コイルに与えた強制電流密度(CurrentDensity) [J/m<sup>2</sup>] : 与えた場合
- 永久磁石に与えた磁化ベクトル(MagnetizationVector) [T] : 与えた場合
- 磁束密度(MagneticFluxDensity) [T]
- 渦電流密度(EddyCurrentDensity) [J/m<sup>2</sup>]
- 要素ごとの内部発熱(InternalHeatGeneration) [W/m<sup>3</sup>]
- 節点力(NodalForce) [N]
- 物性番号ごとの節点力(NodalForce\_MatID) [N]
- 要素ごとの磁気抵抗率(MagneticReluctivity) [m/H] (透磁率の逆数)

### A. 1. 4. 高周波電磁波解析

高周波電磁波解析は MHz 帯から GHz 帯の電磁波を対象にする解析であり、時間調和問題(準定常問題)を解きます。行列は複素対称です。

高周波電磁波解析で解くのは電界  $E$  [V/m]を未知数とする  $E$  法です。

高周波電磁波解析では、解析結果出力ファイルに以下のものを出力します。単位はすべての入力 SI 単位系の場合です。必要に応じて換算してください。また()内は ADVENTURE ファイル内での label です。

- 未知数  $E$  (ElectricFieldOnEDGE) : 複素数
- 要素ごとの物性番号(MaterialID)
- コイルに与えた強制電流密度の実部(CurrentDensityReal) [J/m<sup>2</sup>] : 与えた場合
- コイルに与えた強制電流密度の虚部(CurrentDensityImaginary) [J/m<sup>2</sup>] : 与えた場合
- 永久磁石に与えた磁化ベクトルの実部(MagnetizationVectorReal) [T] : 与えた場合
- 永久磁石に与えた磁化ベクトルの虚部(MagnetizationVectorImaginary) [T] : 与えた場合
- 磁界(MagneticField) [A/m] : 複素数
- 渦電流密度(EddyCurrentDensity) [J/m<sup>2</sup>] : 複素数
- 電界(ElectricField) [V/m] : 複素数
- 要素ごとの内部発熱(InternalHeatGeneration) [W/m<sup>3</sup>]

## A. 2. ADVENTURE ファイル(バイナリ)表示ツール `advmag2_advshow`

ADVENTURE\_Solid に付属している `advshow` を、複素数、四倍精度浮動小数点数を表示できるよう拡張したツールです。Data 領域に格納されているデータの種別を `format` キーではなく、`order` キーで判断します。ADVENTURE\_Magnetic で出力する ADVENTURE ファイルには `format` キー、`order` キーとも記述されているため、`advshow` でも表示できます。ただし、`advshow` では複素数は実部と虚部が分解されて 2 つの実数として表示されます。また `advshow` では四倍精度浮動小数点数を正しく表示できません。

`advmag2_advshow` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_advshow [input ADVENTURE format file] [options]
[input ADVENTURE format file] : 内容を表示したい ADVENTURE ファイルの名称
```

固有オプション(Local options):

- `-exponential-digit n`  
指数表示における小数点以下の桁数を *n* として指定します。デフォルトは 6 桁、すなわち有効数字 7 桁となります。
- `-only-property`  
Data 領域を表示せず、Property 領域のみを表示します。ADVENTURE\_IO 付属の `advinfo` と同様の働きをします。
- `-cp12real`  
複素数を `advshow` と同様に 2 つの実数として表示します。
- `-output-file file`  
結果をコンソールに表示するのではなく、*file* に書き込みます。
- `-select-document s`  
*s* で指定したキーワードを持つ Document のみを表示します。*s* は Property 領域の `content_type`, `label` から探します。

### A. 3. 一体型解析モデルファイル作成ツール `advmag2_makefem_Electromagnetic`

ADVENTURE\_Metis の入力となる一体型解析モデルファイルを作成するツールです。  
`advmag2_makefem_Electromagnetic` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_makefem_Electromagnetic [mesh] [fgr] [cnd] [mat] [adv] [options]
  [mesh]   : (入力)メッシュ(要素コネクティビティ, 節点座標, ボリューム情報)ファイル.
            MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx), ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
            ※ ファイル形式は拡張子から判断しますので,
            ファイルの内容と拡張子に齟齬がないよう注意してください.
  [fgr]    : (入力)メッシュ表面の FaceGroup を記録したファイル.
            FGR ファイル(.fgr), FGRX ファイル(.fgrx)のいずれか.
            ※ ファイル形式は拡張子から判断しますので,
            ファイルの内容と拡張子に齟齬がないよう注意してください.
  [cnd]    : (入力)境界条件を記した解析条件ファイル(拡張子は.cnd).
            詳しくは ADVENTURE_BCtool のマニュアルを参照してください.
  [mat]    : (入力)物性値ファイル(拡張子は.dat).
            詳しくは ADVENTURE_BCtool のマニュアルを参照してください.
  [adv]    : (出力)一体型解析モデルファイル(拡張子は.adv).
```

固有オプション(Local options):

- `-dim n`  
 MSH ファイルではメッシュの次元を判断することができないため, 3次元以外のメッシュを MSH ファイルから読み込むときはその次元を  $n$  として指定します.
- `-crd-magnification x`  
 節点座標の単位変換をする際の拡大率を  $x$  として指定します. 図面の長さの単位が mm で, CAD データも mm で作成したときに, m に換算する, といったことができます. 例えば mm から m への換算は以下のいずれかで指定します.
  - `-crd-magnification 0.001`
  - `-crd-magnification 1.0e-03`
- `-bc-on-ef`  
 境界条件を要素面(element face)上のデータとして出力させます. 「`-bc-on-nd`」とは両立しません. 領域分割時にメッシュ細分割を利用するにはこちらを指定しなければなりません.
- `-bc-on-nd`  
 境界条件を節点(node)上のデータとして出力させます. 「`-bc-on-ef`」とは両立しません.
- `-no-need-bc`  
 境界条件を出力させません. 一体型解析モデルファイルの容量が減るため ADVENTURE\_Metis の実行時間が短くなるのが期待できますが, ソルバモジュール実行時に「`-specificate-bc`」オプションの指定が必須になります.
- `-face-group / -wo-face-group`  
 一体型解析モデルファイルに FaceGroup データを出力します/しません. FaceGroup データがあるとソルバモジュール実行時に「`-specificate-bc`」オプションの指定ができるようになります. 境界条件の変更に一体型解析モデルファイルの再作成や再度の領域分割が不要になります.

#### A. 4. 領域分割データ統合・可視化ファイル作成ツール `advmag2_hddmrg`

ソルバモジュールが出力する解析結果出力ファイル、非定常解析の結果出力ファイルには、入力である HDDM 型の解析モデル入力ファイルと同様に領域分割されたデータが記録されています。このツールは領域分割されたメッシュと解析結果を統合し、一体型のデータを作成します。出力には ADVENTURE ファイル、VTU ファイル (テキスト)、Legacy VTK ファイル (バイナリ) を選べます。VTU ファイル、Legacy VTK ファイルは ParaView などの可視化ソフトウェアで読み込めます。

解析結果出力設定ファイルから解析時の設定を読み込みます。そのため、ADVENTURE\_Magnetic の解析結果を用いる際には非定常解析のステップ数などを改めて設定する必要はありません。ADVENTURE\_Magnetic 以外の解析結果を用いる場合は解析結果出力設定ファイルがありませんので、固有オプション「-sw-NonSteady」「-sw-DomainDecomposition」と一緒に必要な設定を実行時オプションで与えてください。

`advmag2_hddmrg` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_hddmrg [output file] [Num. of labels (0: all labels)] (labels...) [options]
[output file] : 出力ファイル名。ファイルの種類は拡張子で判定します。
               .adv : ADVENTURE ファイル。
                   ここで与えられた出力ファイル名から新たな解析ディレクトリを作成し、そこへ出力します。
                   例) hoge.adv なら、hoge が解析ディレクトリ名になります。
                   実数はソルバモジュールが出力した精度そのままです。
               .vtu : VTU ファイル(テキスト)。実数は指数表示で有効数字7桁です。
               .vtk : Legacy VTK ファイル(バイナリ)。実数は単精度です。
[Num. of labels (0: all labels)] (labels...) :
  出力させたい／させたくない物理量の label の数を指定した後、
  その数だけ label を並べます。
  label の数が 正なら指定した label の物理量のみを、
                負なら指定した label 以外の物理量を、
                0 ならすべての物理量を、                出力します。
  例 1) 「MagneticFluxDensity」と「EddyCurrentDensity」を hoge.adv に出力させる。
        % advmag2_hddmrg hoge.adv 2 MagneticFluxDensity EddyCurrentDensity
  例 2) 未知数「MagneticVectorPotential」以外を hoge.vtu に出力させる。
        % advmag2_hddmrg hoge.vtu -1 MagneticVectorPotential
  例 3) すべての物理量を hoge.vtk に出力させる。
        % advmag2_hddmrg hoge.vtk 0
```

固有オプション(Local options):

- **-no-output**  
 ファイルを出力しません。以下のような使い方を想定しています。
  - ▶ 自由度が大きいメッシュで、全体の可視化ファイルを作成するとファイル容量が大きくなりすぎたり、可視化が困難になったりするときに、以下の「-cut-part」や「-make-plane」を使って一部のみの可視化ファイルを作成する場合。
  - ▶ 以下の「-analyze-result」を使って解析結果の分析のみを行いたい場合。  
 なおファイルを出力しなくとも、[output file]は省略できません。
  
- **-cut-part *n***  
*n* で指定した物性番号の要素群と、その要素群に属する節点に関する物理量のみを切り出してファイルへ出力します。ファイル名は[output file]で指定した名称から次のように作成されます。
  - 例) *n* に 3 を指定した場合: hoge.vtu → hoge\_MatID3.vtu
  - 物性番号は 0 以上と想定されています。また特別な場合として、*n* として -1 を指定すると物性番号ごとにファイルを出力します。
    - 例) メッシュ内の物性番号が 0~2 の場合, hoge\_MatID0.vtu, hoge\_MatID1.vtu, hoge\_MatID2.vtu を出力。
    - なお *n* として -2 を指定すると物性番号での切出しを無効にします。
  
- **-make-plane *s x***  
 いずれかの座標軸に垂直な平面でカットした面上の物理量のみをファイルへ出力します。ただし、指定した平面がメッシュの境目(きちんと要素面が並ぶ)でなければなりません。つまり要素を平面でカットして補間するような機能は持っていないので、任意の面でカットすることはできません。解析領域が直方体で、メッシュを自動生成していれば、その外側の 6 面でのみ平面を作れます。解析領域の途中でカットしたい場合は、CAD データを作成する際にカットしたい面で分割したうえでメッシュを生成してください。直方体を積み重ねてメッシュを作成した場合は、それらの直方体の境界でカットできます。
  - s* は座標軸、*x* は座標値です。次のように指定します。
    - 例) *y* = 10.0 の面でカットしたい場合: **-make-plane *y* 10.0**
    - ファイル名: hoge.vtu → hoge\_y\_10.0.vtu ※ 座標値は入力したとおりにファイル名へ反映されます。
  
- **-analyze-result**  
 物理量の最大値、最小値、平均値をコンソールに表示します。物理量がベクトルの場合はそれぞれの成分での最大値、最小値、平均値も表示します。
  
- **-sw-NonSteady, -sw-DomainDecomposition**  
 ADVENTURE\_Magnetic 以外の解析結果を用いる場合に使用します。非定常解析であれば「-sw-NonSteady」を指定してください。解析結果出力設定ファイルがなく、ファイルから非定常解析の設定を読み込めませんので、時間刻み幅、最後の時間ステップ、結果を出力する間隔がデフォルト値と異なる場合は、それぞれの実行時オプション(-ns-delta-t, -ns-end-step, -ns-out-interval)で設定してください。またデータが領域分割されていれば「-sw-DomainDecomposition」を指定してください。
  - なお ADVENTURE\_Magnetic による解析結果でも、Ver.1.9.2 以前では解析結果出力設定ファイルの仕様が異なるためこれらの指定が必要です。

A. 5. ソースベクトル計算ツール `advmag2_SourceVector`

形状定義ファイルを正しく記述できているか、解析を実行する前にチェックするためのツールです。指定した座標でのソースベクトル(電磁界解析モジュール内では強制電流密度, 磁化ベクトル)の値を出力します。メッシュは読み込みませんので, 物性番号によるスクリーニングはしません。

`advmag2_SourceVector` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_SourceVector [Shape definition file] [Nodes file] [SourceVector file] [options]
[Shape definition file] : (入力)形状定義ファイル. チェックしたいファイルを指定してください.
[Nodes file]           : (入力)点群の座標値を記したファイル.
                        このファイルに記した点上でのソースベクトルの値を出力します.
                        次のように点の数と, それぞれの座標値(3次元)を記述してください.
                        ※ 赤字の部分は説明であり, 実際には記述しません.
                        ※ 「:」は省略を表します.
```

10			← 点の数
0.0	0.0	0.0	← 0 番目の点の座標
1.0	0.0	0.0	← 1 番目の点の座標
:			
:			
0.0	0.0	1.0	← 9 番目の点の座標

```
[SourceVector file] : (出力)ソースベクトルを[Nodes file]と同じ形式で出力します.
                    (「~番目の点の座標」を,
                     「~番目の点のソースベクトル」に読み替えてください)
                    拡張子を「.adv」にすると ADVENTURE フォーマットで出力します.
```

固有オプション(Local options):

- `-complex-sv`  
複素行列を扱う準定常問題ではソースベクトルも複素数で与えなければなりません。準定常問題用の形状定義ファイルをチェックしたい場合はこのオプションを使ってください。「`-time-evolution`」とは両立しません。  
出力ファイルの名称は[SourceVector file]で指定したファイル名に「`_re`」(実部用), 「`_im`」(虚部用)がつけます。  
例) `hoge.dat` → `hoge_re.dat`, `hoge_im.dat`
- `-time-evolution`  
非定常解析用の形状定義ファイルをチェックしたい場合はこのオプションを使ってください。時間刻み幅, 最後の時間ステップがデフォルト値と異なる場合は, それぞれの実行時オプション(`-ns-delta-t`, `-ns-end-step`)で設定してください。なお「`-complex-sv`」とは両立しません。  
出力ファイルの名称は[SourceVector file]で指定したファイル名に時間ステップ数がつきます。  
例) `hoge.dat` → `hoge_step0.dat`, `hoge_step1.dat`, ...
- `-each-point`  
「`-time-evolution`」を同時に指定している場合に, ソースベクトルの時刻歴を点ごとにファイルへ出力します。出力ファイルの名称は[SourceVector file]で指定したファイル名に点の番号がつけます。  
例) `hoge.dat` → `hoge_point0.dat`, `hoge_point1.dat`, ...  
各行には時刻, ソースベクトルの  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向の値が記述されていますので, `gnuplot` などで可視化できます。  
なお拡張子を「.adv」にしてもテキストデータで出力されます。また時間ステップごとのファイルは出力されません。

## A. 6. 解析結果比較ツール `advmag2_compare_results`

同一のメッシュで、異なる条件で解析した結果を比較するためのツールです。それぞれの物理量の相対誤差を%で出力します。

`advmag2_compare_results` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_compare_results [Num. of labels (0: all labels)] (labels...) [options]
```

```
[Num. of labels (0: all labels)] (labels...) :
```

比較したい／したくない物理量の label の数を指定した後、  
その数だけ label を並べます。

label の数が 正なら指定した label の物理量のみを、  
負なら指定した label 以外の物理量を、  
0 ならすべての物理量を、 比較します。

例 1) 「MagneticFluxDensity」と「EddyCurrentDensity」を比較する

```
% advmag2_compare_results 2 MagneticFluxDensity EddyCurrentDensity
```

例 2) 未知数「MagneticVectorPotential」以外を比較する。

```
% advmag2_compare_results -1 MagneticVectorPotential
```

例 3) すべての物理量を比較する。

```
% advmag2_compare_results 0
```

このツールには2つのオプションスイッチがあります。

`Exact` : 参照解に関するスイッチ。

`Approximation` : 比較対象に関するスイッチ。

例) 解析ディレクトリ `cake` の時間調和渦電流解析を COCG 法, COCR 法で行ったとき、

COCG 法での結果を参照解として渦電流密度(EddyCurrentDensity) [J/m<sup>2</sup>]の相対誤差を計算。

```
% advmag2_HDDM_Electromagnetic-s TH_Eddy -data-dir cake -hddm COCG
```

※ COCG 法で(`-hddm COCG`), `cake` ディレクトリを解析ディレクトリとして(`-data-dir cake`),  
時間調和渦電流解析

```
% mv cake/result/ cake/COCG
```

※ 解析結果が格納されているサブディレクトリをリネーム

```
% advmag2_HDDM_Electromagnetic-s TH_Eddy -data-dir cake -hddm COCR
```

※ COCR 法で(`-hddm COCR`), `cake` ディレクトリを解析ディレクトリとして、時間調和渦電流解析

```
% advmag2_compare_results 1 EddyCurrentDensity -op-sw Exact -data-dir cake -result-dir  
COCG -op-sw Approximation -data-dir cake
```

※ 参照解の解析ディレクトリを `cake` に、解析結果を格納したサブディレクトリを COCG に設定する。  
(`-op-sw Exact -data-dir cake -result-dir COCG`)

※ 比較対象の解析ディレクトリを `cake` に設定する。

解析結果を格納したサブディレクトリはデフォルトの `result`。

```
(-op-sw Approximation -data-dir cake)
```

このツールに固有オプション(Local options)はありません。



## A. 7. 物性値ファイル作成ツール `advmag2_makedat`

物性データファイルから、一体型解析モデル作成ツールの入力である物性値ファイルを作成するツールです。表計算ソフトなどで物性値を管理している場合、物性データファイルへの変換の方が容易なことが多いです。そのような場合にまず物性データファイルを作ってからこのツールで物性値ファイルへ変換する、といった使い方を想定しています。ただし、電磁界解析モジュールでは物性値ファイルに記述されている物性値を参照しませんので、ADVENTURE\_Magnetic 以外の解析モジュールで使用する物性値ファイルを作成するのに使います。

`advmag2_makedat` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_makedat [original MTRL file] [output mat file] [options]
   [original MTRL file]      : (入力)物性データファイル.
   [output mat file]        : (出力)物性値ファイル.
```

このツールに固有オプション(Local options)はありません。

## A. 8. ファイル形式変換ツール `advmag2_mesh_convert_file`

メッシュデータ、メッシュ表面の FaceGroup データを記録したファイルの形式を変換するツールです。メッシュデータを入力した場合は、メッシュ表面の FaceGroup データを出力させることもできます。ただし、ADVENTURE\_BCtool 付属の `msh2pch` と異なり、すべての表面パッチを1つの FaceGroup として出力します。

入力ファイル、出力ファイルの形式は拡張子で判断します。入力ファイルの内容と拡張子に齟齬がある場合には正しく動作しません。

また HDDM 型の解析モデル入力ファイルには対応していません。

`advmag2_mesh_convert_file` で変換できる入力ファイルと出力ファイルの組み合わせは次のとおりです。

組み合わせ 1 :

入力 : メッシュデータ(拡張子 `.msh`, `.mshx`, `.adv`)

出力 : メッシュデータ(拡張子 `.msh`, `.mshx`, `.adv`),

※ ADVENTURE ファイルにメッシュデータ以外が含まれる場合、

MSH ファイル, MSHX ファイルに変換するとメッシュデータ以外は失われます。

FaceGroup データ(拡張子 `.fgr`, `.fgrx`),

可視化ファイル(拡張子 `.vtu`, `.vtk`)

※ ADVENTURE ファイルにメッシュデータ以外が含まれる場合、

VTU ファイル, Legacy VTK ファイルに変換するとメッシュデータ以外は失われます。

組み合わせ 2 :

入力 : FaceGroup データ(拡張子 `.fgr`, `.fgrx`)

出力 : FaceGroup データ(拡張子 `.fgr`, `.fgrx`)

`advmag2_mesh_convert_file` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_mesh_convert_file [input file] [output file] [options]
```

[input file] : 入力ファイルの名称. 入力ファイルとして可能なものは上記参照.

[output file] : 出力ファイルの名称. 出力ファイルとして可能なものは上記参照.

固有オプション(Local options):

- **-dim *n***  
MSH ファイルではメッシュの次元を判断することができないため、3次元以外のメッシュをMSH ファイルから読み込むときはその次元を *n* として指定します。
- **-no-output**  
ファイルを出力しません。以下の「-cut-part」や「-make-plane」を使って一部のみのファイルを作成したり、「-fgr」を使って FaceGroup データの可視化ファイルのみを作成したりしたいときに指定します。なおファイル出力しなくとも、[output file]は省略できません。
- **-cut-part *n***  
入力がメッシュデータの場合のみ使用できます。  
*n* で指定した物性番号の要素群と、その要素群に属する節点に関するデータのみを切り出してファイルへ出力します。ファイル名は[output file]で指定した名称から次のように作成されます。  
例) *n* に 3 を指定した場合: hoge.vtu → hoge\_MatID3.vtu  
物性番号は 0 以上と想定されています。また特別な場合として、*n* として -1 を指定すると物性番号ごとにファイルを出力します。  
例) メッシュ内の物性番号が 0~2 の場合, hoge\_MatID0.vtu, hoge\_MatID1.vtu, hoge\_MatID2.vtu を出力。  
なお *n* として -2 を指定すると物性番号での切出しを無効にします。
- **-make-plane *s x***  
入力がメッシュデータの場合のみ使用できます。  
いずれかの座標軸に垂直な平面でカットした面上の要素面のみをファイルへ出力します。ただし、指定した平面がメッシュの境目(きちんと要素面が並ぶ)でなければなりません。つまり要素を平面でカットして補間するような機能は持っていないので、任意の面でカットすることはできません。解析領域が直方体で、メッシュを自動生成していれば、その外側の 6 面でのみ平面を作れます。解析領域の途中でカットしたい場合は、CAD データを作成する際にカットしたい面で分割したうえでメッシュを生成してください。直方体を積み重ねてメッシュを作成した場合は、それらの直方体の境界でカットできます。  
*s* は座標軸, *x* は座標値です。次のように指定します。  
例) *y*=10.0 の面でカットしたい場合: **-make-plane *y* 10.0**  
ファイル名: hoge.vtu → hoge\_y\_10.0.vtu ※ 座標値は入力したとおりにファイル名へ反映されます。
- **-fgr *file0 file1***  
FaceGroup データの可視化ファイルを作成したいときに使用します。入力ファイルはメッシュデータで、*file0* にそのメッシュデータの FaceGroup データを記録したファイルの名称を与えます。*file1* には可視化ファイルの名称(拡張子.vtu, .vtk)を与えてください。
- **-fgr-vtu / -fgr-vtk**  
メッシュデータを FaceGroup データに変換する際にこれらのオプションを指定すると、FaceGroup データの可視化ファイルを VTU 形式、または Legacy VTK 形式で出力します。それらのファイル名は次のとおりです。  
例) 出力ファイルとして指定した名称: hoge.fgr → hoge\_FGR.vtu / hoge\_FGR.vtk

## A. 9. メッシュ情報解析ツール `advmag2_mesh_property`

メッシュデータの情報を解析するツールです。入力したメッシュの次のような情報を出力します。

- 要素数, 節点数(総数, 1次節点数, 2次節点数)
- 要素の種類
- メッシュが存在する範囲( $x$ 座標,  $y$ 座標,  $z$ 座標それぞれの最小値, 最大値)
- メッシュの体積
- 物性番号ごとの上記4項目の情報

なおHDDM型の解析モデル入力ファイルには対応していません。

`advmag2_mesh_property`の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_mesh_property [input file] [options]
   [input file]       : 入力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                       ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
```

固有オプション(Local options):

- `-dim n`  
MSH ファイルではメッシュの次元を判断することができないため, 3次元以外のメッシュをMSHファイルから読み込むときはその次元を  $n$  として指定します。
- `-fgr file`  
`file` で指定されたファイルに格納されている FaceGroup データの情報を解析します。入力可能なのは FGR ファイル(.fgr), FGRX ファイル(.fgrx)です。[input file]で指定したメッシュデータの FaceGroup データでない場合は正しく動作しません。

A. 10. メッシュ部分切出しツール `advmag2_mesh_cut_part`

オリジナルのメッシュデータから、指定した物性番号の要素群と、その要素群に属する節点に関するデータのみを切り出して新たなメッシュを構成し、出力するツールです。ファイル形式変換ツール `advmag2_mesh_convert_file` でも物性番号単位の切出しはできますが、こちらのツールはより多機能です。

なお HDDM 型の解析モデル入力ファイルには対応していません。

`advmag2_mesh_cut_part` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_mesh_cut_part [input file] [output file] [Num. of Volumes] (Vol.num...) [options]
  [input file]      : 入力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                    ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
                    ※ ADVENTURE ファイルにメッシュデータ以外が含まれる場合は失われます.
  [output file]    : 出力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                    ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
                    ※ ADVENTURE ファイルの場合は、オリジナルメッシュとの要素番号、
                    節点番号、物性番号の索引が、それぞれ label
                    「CutPart_ElementIndex」、
                    「CutPart_NodeIndex」、
                    「CutPart_MaterialID_Index」
                    で記録されます.
                    「20: 369」は、20 番がオリジナルメッシュの 369 番となります.
  [Num. of Volumes] (Vol.num...) :
    切り出したい／切り出たくない物性番号の数を指定した後、
    その数だけ物性番号を並べます.
    物性番号の数が 正なら指定した物性番号のメッシュのみを、
    負なら指定した物性番号以外のメッシュを、 切り出します.
    例 1) hoge.msh から 2 つの物性番号 5, 6 のメッシュを切出し、
          hoge.adv に出力させる.
          % advmag2_mesh_cut_part hoge.msh hoge.adv 2 5 6
    例 2) hoge.adv から物性番号 0, 1 以外のメッシュを切出し、
          hoge.mshx に出力させる.
          % advmag2_mesh_cut_part hoge.adv hoge.mshx -2 0 1
```

固有オプション(Local options):

- `-dim n`

MSH ファイルではメッシュの次元を判断することができないため、3 次元以外のメッシュを MSH ファイルから読み込むときはその次元を  $n$  として指定します。

- `-indexes file`

オリジナルメッシュとの要素番号、節点番号、物性番号の索引を、`file` へ出力させます。`file` の拡張子が `.adv` ならば ADVENTURE フォーマットで、それ以外ならテキストデータで出力します。出力ファイル[`output file`] が MSH ファイル(.msh)、MSHX ファイル(.mshx)で索引が必要などときに用います。

## A. 11. メッシュ結合ツール `advmag2_mesh_merge`

2つのメッシュを結合し、1つのメッシュとして出力するツールです。HDDM型の解析モデル入力ファイルには対応していません。

1次要素と2次要素の結合はできません。異なる次数のメッシュが入力された場合は、エラーメッセージを表示して強制終了します。

2つのメッシュ間で座標値が同じ節点は同一節点として統合します。数値誤差を考慮して、最短要素辺の長さにはオプション「`-ratio-threshold`」で設定できる値(`ratio`)をかけたうえで2乗した値を閾値として座標値の一致を判定します。すなわち、0番のメッシュの節点座標を( $x_0, y_0, z_0$ )、1番のメッシュの節点座標を( $x_1, y_1, z_1$ )としたとき、

$$\{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2\} < (\text{最短要素辺の長さ} \times \text{ratio})^2$$

なら同じ節点とします。うまく統合できない場合は、`ratio`を変更してみてください。

このツールで生成したメッシュを有限要素解析に用いるならば、2つのメッシュの結合面内の要素面形状が一致していなければなりません。しかし、このツールでは要素面が一致しているかどうかは判定しません。したがって、結合面がない場合や、四面体と六面体のように要素面が一致するはずのないものも結合できてしまいます。そのことは了解のうえで用いてください。

`advmag2_mesh_merge`の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_mesh_merge [input file 0] [input file 1] [output file] [options]
[input file 0], [input file 1] :
    : 結合したい2つの入力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh),
    MSHX ファイル(.mshx), ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
    ※ ADVENTURE ファイルにメッシュデータ以外が含まれる場合,
    メッシュデータ以外は失われます.
[output file] : 出力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
また VTU ファイル(.vtu), Legacy VTK ファイル(.vtk)を指定すると,
可視化ファイルのみ出力されます.
    ※ ADVENTURE ファイルの場合は, 結合前のメッシュとの要素番号,
    節点番号, 物性番号の索引が, それぞれ label
    「Merge_ElementIndex」,
    「Merge_NodeIndex」,
    「Merge_MaterialID_Index」
    で記録されます.
    「350: 1 25」は, 結合後の350番が[input file 1]の25番となります.
    また結合前の節点番号と結合後の節点番号の索引もそれぞれ label
    「Merge_NodeIndex_Mesh0ToMerged」,
    「Merge_NodeIndex_Mesh1ToMerged」
    で記録されます.
    「15: 26」は, 結合前の15番が結合後の26番となります.
```

固有オプション(Local options):

- **-dim *n***  
MSH ファイルではメッシュの次元を判断することができないため、3次元以外のメッシュをMSH ファイルから読み込むときはその次元を *n* として指定します。
- **-ratio-threshold *x***  
座標値の一致判定に用いる値を *x* として指定します。一致判定については上記を確認してください。
- **-fgr *file0 file1 file2***  
メッシュとともに FaceGroup データ(拡張子.fgr, .fgrx)も結合します。*file0* として[input file 0]の、*file1* として[input file 1]の FaceGroup データを格納したファイルの名称を指定します。また結合した FaceGroup データを出力するファイルの名称を *file2* として指定します。次のオプション「-fgr-no-delete」を与えなければ、結合面の FaceGroup データは消去されます。
- **-fgr-no-delete**  
オプション「-fgr」を用いて FaceGroup データを結合する際に、結合面の FaceGroup データを消去せずに残します。
- **-indexes *file***  
結合前のメッシュとの要素番号、節点番号、物性番号の索引、および結合前の節点番号と結合後の節点番号の索引を、*file* へ出力させます。*file* の拡張子が.adv ならば ADVENTURE フォーマットで、それ以外ならテキストデータで出力します。出力ファイル[output file]がMSH ファイル(.msh)、MSHX ファイル(.mshx)で索引が必要などときに用います。

## A. 12. メッシュのアフィン変換ツール

メッシュのアフィン変換を行うツールとして、平行移動ツール、拡大・縮小ツール、回転ツール、鏡映ツールがあります。メッシュの品質が著しく劣化する恐れがあるため、せん断についてはツールを用意していません。また HDDM 型の解析モデル入力ファイルには対応していません。

これらのツールには共通の固有オプション(Local options)があります。

共通の固有オプション(Local options):

- **-dim  $n$**

MSH ファイルではメッシュの次元を判断することができないため、3次元以外のメッシュを MSH ファイルから読み込むときはその次元を  $n$  として指定します。

### A. 12. 1. 平行移動ツール `advmag2_mesh_translation`

メッシュのアフィン変換のうち、平行移動を担うツールです。

`advmag2_mesh_translation` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_mesh_translation [input file] [output file] [Tx] [Ty] [Tz] [options]
  [input file]      : 入力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                    ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
  [output file]     : 出力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                    ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
                    また VTU ファイル(.vtu), Legacy VTK ファイル(.vtk)を指定すると,
                    可視化ファイルのみ出力されます.
  [Tx] [Ty] [Tz]   : それぞれ  $x$  方向,  $y$  方向,  $z$  方向の移動量を与えてください.
```

### A. 12. 2. 拡大・縮小ツール `advmag2_mesh_scaling`

メッシュのアフィン変換のうち、拡大・縮小を担うツールです。

`advmag2_mesh_scaling` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_mesh_scaling [input file] [output file] [Sx] [Sy] [Sz] [options]
  [input file]      : 入力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                    ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
  [output file]     : 出力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                    ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
                    また VTU ファイル(.vtu), Legacy VTK ファイル(.vtk)を指定すると,
                    可視化ファイルのみ出力されます.
  [Sx] [Sy] [Sz]   : それぞれ 0 より大きい  $x$  方向,  $y$  方向,  $z$  方向の拡大率を与えてください.
                    0 や負の値はメッシュとして破綻しますので, 与えられません.
                    すべての拡大率に同じ値を与えれば, 座標値の単位変換にも使えます.
```



### A. 12. 3. 回転ツール `advmag2_mesh_rotation`

メッシュのアフィン変換のうち、回転を担うツールです。  
`advmag2_mesh_rotation` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_mesh_rotation [input file] [output file] [axis of rotation (x, y or z)]
[unit of angle (rad or deg)] [angle of rotation] [options]
  [input file]      : 入力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                    ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
  [output file]    : 出力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                    ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
                    また VTU ファイル(.vtu), Legacy VTK ファイル(.vtk)を指定すると,
                    可視化ファイルのみ出力されます.
  [axis of rotation (x, y or z)] : 回転軸を「x」, 「y」, 「z」のいずれかで指定してください.
  [unit of angle (rad or deg)]   : この後に与える角度の単位を
                                    「rad」(弧度法)か「deg」(度数法)で与えてください.
  [angle of rotation]           : 回転させる角度を指定してください.
```

### A. 12. 4. 鏡映ツール `advmag2_mesh_mirror`

メッシュのアフィン変換のうち、鏡映を担うツールです。x 軸, y 軸, z 軸のいずれかに垂直な面で鏡像を作ることができます。座標値だけでなく、要素コネクティビティの変換も行います。  
`advmag2_mesh_mirror` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_mesh_mirror [input file] [output file] [direction (x, y or z)] [coordinate]
[options]
  [input file]      : 入力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                    ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
  [output file]    : 出力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                    ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
                    また VTU ファイル(.vtu), Legacy VTK ファイル(.vtk)を指定すると,
                    可視化ファイルのみ出力されます.
  [direction (x, y or z)] : 垂直な面を考える軸を「x」, 「y」, 「z」のいずれかで指定してください.
  [coordinate]       : 軸に垂直な面の座標を指定してください.
                    例)y=10.0 の面で鏡像を作る場合.
                    % advmag2_mesh_mirror in.adv out.adv y 10.0
```

固有オプション(Local options): 「-dim」意外に次の固有オプションがあります。

- `-fgr file`

鏡像を作る際に要素コネクティビティの変換も行うため、要素内の要素面番号も変わります。そのため、そのままでは FaceGroup データと齟齬が生じます。このオプションを使うと、`file` から読み込んだ FaceGroup データを鏡像に合わせて変換し、ファイルに出力します。ファイル名は[output file]で与えられたファイル名の拡張子を、`file` と同じものに変更したものになります。

例) [output file]が `mirrored.adv` で、`file` が `original.fgr` -> `mirrored.fgr`

### A. 13. 要素分割可視化ファイル作成ツール `advmag2_mesh_separate_elem`

メッシュがどのように要素分割されているか、確認するための可視化ファイルを作成するツールです。HDDM型の解析モデル入力ファイルには対応していません。

`advmag2_mesh_separate_elem` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_mesh_separate_elem [input file] [output file] [ratio (0 - 1)] [options]
  [input file]      : 入力ファイルの名称. MSH ファイル(.msh), MSHX ファイル(.mshx),
                    ADVENTURE ファイル(.adv)のいずれか.
  [output file]     : 出力ファイルの名称. VTU ファイル(.vtu), Legacy VTK ファイル(.vtk)のいずれか.
  [ratio (0 - 1)]  : 0 より大きく, 1 より小さい値を与えてください.
                    値が小さいほど要素間が広がります.
```

固有オプション(Local options):

- `-dim n`

MSH ファイルではメッシュの次元を判断することができないため、3次元以外のメッシュをMSHファイルから読み込むときはその次元を  $n$  として指定します。

### A. 14. 領域分割可視化ファイル作成ツール `advmag2_mesh_separate_dd`

HDDM型の解析モデル入力ファイルがどのように領域分割されているか、確認するための可視化ファイルを作成するツールです。part 分割と、part ごとの subdomain 分割の可視化ファイルを作成します。HDDM型の解析モデル入力ファイルは解析ディレクトリから読み込みます。

`advmag2_mesh_separate_dd` の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_mesh_separate_dd [output file] [ratio (0 - 1)] [options]
  [output file]     : 出力ファイルの名称. VTU ファイル(.vtu), Legacy VTK ファイル(.vtk)のいずれか.
                    part ごとの subdomain 分割の可視化ファイル名には、
                    ここで指定した名称に part 番号が付きます。
                    例) 2 番の part のファイル : hoge.vtu -> hoge_part2.vtu
  [ratio (0 - 1)]  : 0 より大きく, 1 より小さい値を与えてください。
                    値が小さいほど part 間, subdomain 間が広がります.
```

このツールに固有オプション(Local options)はありません。

## A. 15. メッシュ生成ツール

比較的単純で規則的なメッシュを生成するツールです。

このツールで生成されるメッシュは直線、正方形、立方体の **segment** を基本とします。segment は、

- 1次元では直線 segment が1つの直線要素に、
- 2次元では正方形 segment が2つの三角形要素か1つの四角形要素に、
- 3次元では立方体 segment が6つの四面体要素、1つの六面体要素、  
2つの五面体(プリズム・三角柱) 要素、  
6つの五面体(ピラミッド、四角錐) 要素のいずれかに、

分割されます。この segment を積み重ねていくことで、外観は1次元なら直線、2次元なら長方形、3次元なら立方体になります。それぞれの1次要素、または2次要素を生成できます。

メッシュ全体の大きさは segment の個数と、segment の辺の長さである [BaseDistance] で決まります。

なおファイル名は要素の種類ごとに固定です。

例) **advmag2\_mesh\_make\_tetra** を用いて四面体要素を生成する場合。

メッシュデータ : **tetra.mshx**      FaceGroup データ : **tetra.fgrx**

これらのツールには共通の固有オプション(Local options)があります。

共通の固有オプション(Local options) :

- **-quadratic**  
2次要素を生成します。このオプションを指定しなければ1次要素を生成します。
- **-fgr**  
FaceGroup データを生成し、出力します。

### A. 15. 1. 直線要素メッシュ生成ツール **advmag2\_mesh\_make\_line**

1次直線要素、または2次直線要素を生成します。

**advmag2\_mesh\_make\_line** の実行方法は次のとおりです。

```
% advmag2_mesh_make_line [segments in x axis] [BaseDistance] [options]
[segments in x axis]    : x 軸方向の segment の数を与えてください。
[BaseDistance]         : segment の辺の長さを与えてください。
```

### A. 15. 2. 三角形要素メッシュ(長方形)生成ツール `advmag2_mesh_make_tri`

1次三角形要素, または2次三角形要素を生成します.

`advmag2_mesh_make_tri` の実行方法は次のとおりです.

```
% advmag2_mesh_make_tri [segments in x axis] [segments in y axis] [BaseDistance]
[options]
[segments in x axis] [segments in y axis]      :
           x 軸方向, y 軸方向の segment の数をそれぞれ与えてください.
[BaseDistance]      : segment の辺の長さを与えてください.
```

### A. 15. 3. 四角形要素メッシュ(長方形)生成ツール `advmag2_mesh_make_quad`

1次四角形要素, または2次四角形要素を生成します.

`advmag2_mesh_make_quad` の実行方法は次のとおりです.

```
% advmag2_mesh_make_quad [segments in x axis] [segments in y axis] [BaseDistance]
[options]
[segments in x axis] [segments in y axis]      :
           x 軸方向, y 軸方向の segment の数をそれぞれ与えてください.
[BaseDistance]      : segment の辺の長さを与えてください.
```

A. 15. 4. 四面体要素メッシュ(直方体)生成ツール **advmag2\_mesh\_make\_tetra**

1次四面体要素, または2次四面体要素を生成します.

**advmag2\_mesh\_make\_tetra** の実行方法は次のとおりです.

```
% advmag2_mesh_make_tetra [segments in x axis] [segments in y axis] [segments in x axis]
[BaseDistance] [options]
[segments in x axis] [segments in y axis] [segments in z axis] :
    x 軸方向, y 軸方向, z 軸方向の segment の数をそれぞれ与えてください.
[BaseDistance] : segment の辺の長さを与えてください.
```

A. 15. 5. 六面体要素メッシュ(直方体)生成ツール **advmag2\_mesh\_make\_hexa**

1次六面体要素, または2次六面体要素を生成します.

**advmag2\_mesh\_make\_hexa** の実行方法は次のとおりです.

```
% advmag2_mesh_make_hexa [segments in x axis] [segments in y axis] [segments in x axis]
[BaseDistance] [options]
[segments in x axis] [segments in y axis] [segments in z axis] :
    x 軸方向, y 軸方向, z 軸方向の segment の数をそれぞれ与えてください.
[BaseDistance] : segment の辺の長さを与えてください.
```

## A. 15. 6. 五面体(プリズム・三角柱)要素メッシュ(直方体)生成ツール

**advmag2\_mesh\_make\_prism**

1次プリズム要素, または2次プリズム要素を生成します.

**advmag2\_mesh\_make\_prism** の実行方法は次のとおりです.

```
% advmag2_mesh_make_prism [segments in x axis] [segments in y axis] [segments in x axis]
[BaseDistance] [options]
[segments in x axis] [segments in y axis] [segments in z axis] :
    x 軸方向, y 軸方向, z 軸方向の segment の数をそれぞれ与えてください.
[BaseDistance] : segment の辺の長さを与えてください.
```

## A. 15. 7. 五面体(ピラミッド・四角錐)要素メッシュ(直方体)生成ツール

**advmag2\_mesh\_make\_pyramid**

1次ピラミッド要素, または2次ピラミッド要素を生成します.

**advmag2\_mesh\_make\_pyramid** の実行方法は次のとおりです.

```
% advmag2_mesh_make_pyramid [segments in x axis] [segments in y axis]
[segments in x axis] [BaseDistance] [options]
[segments in x axis] [segments in y axis] [segments in z axis] :
    x 軸方向, y 軸方向, z 軸方向の segment の数をそれぞれ与えてください.
[BaseDistance] : segment の辺の長さを与えてください.
```

## B. 入出力ファイルフォーマット

ADVENTURE\_Magnetic では、入出力ファイルとして次のファイルを使用します。

- ・ 一体型解析モデルファイル : ADVENTURE フォーマット
- ・ HDDM 型の解析モデル入力ファイル : ADVENTURE フォーマット
- ・ 解析結果出力設定ファイル : ADVENTURE フォーマット
- ・ 解析結果出力ファイル : ADVENTURE フォーマット
- ・ 非定常解析の結果出力ファイル : ADVENTURE フォーマット
- ・ 非定常解析の初期値設定ファイル : ADVENTURE フォーマット
- ・ 非定常解析の初期値ファイル : ADVENTURE フォーマット
- ・ リスタート設定ファイル : ADVENTURE フォーマット
- ・ リスタートデータファイル : ADVENTURE フォーマット
- ・ 物性データファイル : テキストファイル
- ・ 収束履歴ファイル : テキストファイル
- ・ 強制電流密度データファイル : テキストファイル
- ・ 磁化ベクトルデータファイル : テキストファイル
- ・ 形状定義ファイル : テキストファイル
- ・ 特性曲線データファイル : テキストファイル

上記以外にもありますが、それらについてはこのマニュアル内で登場する際にどのモジュールのマニュアルに詳細が掲載されているかを示していますので、そちらを参照してください。またそれぞれのファイルの名称は4.1節を参照してください。

ここでは ADVENTURE フォーマットについて述べた後、上記のファイルのフォーマットについて述べます。

### B.1. ADVENTURE フォーマット

ADVENTURE プロジェクトのモジュールでは、バイナリファイルの入出力に ADVENTURE\_IO ライブラリを利用しています。このライブラリは大容量データの取り扱い、分散並列環境での利用、入出力効率の向上、計算機環境によるエンディアンの違いの解消を目的に開発されました。このライブラリで入出力するファイルを ADVENTURE ファイル、そのフォーマットを ADVENTURE フォーマットと呼称しています。

エンディアンの違いについては、それぞれの計算機がリトルエンディアンかビッグエンディアンかに関わらず、リトルエンディアンで記録します。リトルエンディアンで記録された ADVENTURE ファイルを読み込む際には、それぞれの計算機でコンパイルした ADVENTURE\_IO ライブラリを利用することで、それぞれの計算機のエンディアンに変換されて読み込まれます。

ADVENTURE ファイルは Document と呼ばれるデータの単位で入出力します。各 Document は次のもので構成されます。

- ・ Document ID : Document を一意に指定するための ID です。
- ・ Property : Document の属性, Data 領域に格納されているデータの種類や数などを記録する領域。
- ・ Data : 座標値, 要素コネクティビティ, 物理量などをバイナリデータで記録する領域。

Property 領域には情報の種類を示す key と、その値である val が記録されています。

Document の属性を表す key は「content\_type」であり、val は Data 領域に要素コネクティビティ、座標値を格納していることを示す「Element」、 「Node」や、Data 領域に物性番号や物理量など、種々のデータを格納していることを示す「FEGenericAttribute」などがあります。

「num\_items」は Data 領域に格納されているデータ数を示す key です。「content\_type=Element」であれば要素数、「content\_type=Node」であれば節点数などのようになります。

「format」および「order」は Data 領域に格納されているデータの種類を示す key です。「i」「f」「c」はそれぞれ整数、実数、複素数を、それらに続く値はその数に割り当てられている Byte 数です。例えば「i2f8c4」であれば、データ 1 つあたり 2 Byte の整数、8 Byte の実数(倍精度浮動小数点数)、実部、虚部がそれぞれ 4 Byte の複素数(計 8 Byte)からなることを示しています。領域分割されていない場合は「i2f8c4」×「num\_items」が Data

領域に格納されているデータのサイズになります。なお「c」をえるのは「order」のみで、「order」での「c8」は「format」では「f8f8」のように実部と虚部をバラバラにして2つの実数で表します。

「fega\_type」は「content\_type=FEGenericAttribute」において、データの属性を表すkeyです。すべての要素／節点にそれぞれデータがある「AllElementVariable」／「AllNodeVariable」、一部の要素／節点にそれぞれデータがある「ElementVariable」／「NodeVariable」、すべての要素／節点で同じ値が適用される「AllElementConstant」／「AllNodeConstant」などがあります。

「label」は「content\_type=FEGenericAttribute」において、格納しているデータの種類の名称を表すkeyです。

より詳細はそれぞれのファイルについての項目を参照してください。

## B.2. 一体型解析モデルファイル

このファイルは `advmag2_makefem_Electromagnetic` によって作成される ADVENTURE ファイルです。このファイルの Property 領域の主要なものを以下に示します。これらは `advmag2_makefem_Electromagnetic` 実行時に与えたオプションにより一部変化します。

```
#####
```

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

```
#####
```

物性番号

```
#####
```

[Properties]

- 1: content\_type=FEGenericAttribute
- 2: num\_items=(要素数)
- 3: feqa\_type=AllElementVariable
- 4: label=MaterialID
- 5: format=i4

#####

FaceGroup データ

#####

[Properties]

- 1: content\_type=FEGenericAttribute
- 2: num\_items=(要素面数)
- 3: fega\_type=ElementVariable
- 4: label=FaceGroup
- 5: format=i4
- 6: order=i4
- 7: ElementFace=1
- 8: index\_byte=4
- 9: FaceGroup=(FaceGroup 番号)

#####

境界条件

#####

[Properties]

- 1: content\_type=FEGenericAttribute
- 2: num\_items=(境界条件数)
- 3: fega\_type=ElementVariable
- 4: label=DirichletBCs\_Axn0\_EF
- 5: format=i4
- 6: order=i4
- 7: ElementFace=1
- 8: 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: order=
- 7: ADVMAG\_NAME=ADVENTURE\_Magnetic
- 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=NO\_NEED
- 10: DirichletBCs\_Axn0\_EF=NEED



### B.3. HDDM 型の解析モデル入力ファイル

このファイルは ADVENTURE\_Metis によって一体型解析モデルファイルから作成される、ADVENTURE ファイルです。階層型の領域分割をされたメッシュデータと、それに合わせて分割された物理量、領域間境界で共有される節点や通信テーブルなどが、part ごとに記録されます。

part 内では subdomain 分割がされており、一部を除いて Data 領域には subdomain 単位でデータが書き込まれます。そのため Property 領域には、一体型解析モデルファイルにはなかった key があります。たとえば、part 内の subdomain 数を示す「num\_subdomains」、一体型解析モデルファイルでは「num\_items」であった「num\_items\_orig」、subdomain ごとのデータ数の総和である「sum\_items」などです。「num\_items\_orig」は領域分割をする前の元の要素数／節点数などです。「sum\_items」は、領域間で共有されない要素に関するデータであれば part 内の総要素数などになります。領域間で共有される節点に関するデータであれば境界間で重複した節点が複数回カウントされたものになります。

「content\_type=Element」は「content\_type=HDDM\_Element」となり、Data 領域にはまず subdomain 内の要素数、それから subdomain 内の要素コネクティビティが記録されます。これが subdomain 数分繰り返されます(図 7)。「content\_type=FEGenericAttribute」は、「fega\_type」が「AllElementVariable」／「AllNodeVariable」、「ElementVariable」／「NodeVariable」、「ElementConstant」／「NodeConstant」であればメッシュの領域分割に合わせて分割された「content\_type=HDDM\_FEGenericAttribute」となり、「content\_type=HDDM\_Element」と同様に Data 領域には subdomain 単位でデータが書き込まれます。ただし、節点に関するデータであれば、最初に記録されるのは subdomain 内の節点数です。「fega\_type」に「All」がっていない場合は情報が与えられている要素数／節点数になります。また「fega\_type」が「AllElementConstant」／「AllNodeConstant」、「Void」のものは分割されません。

```
[Properties]
1: content_type=HDDM_Element
2: num_subdomains=65
3: element_type=3DQuadraticTetrahedron
4: num_nodes_per_element=10
5: dimension=3
6: sum_items=6545
7: num_items_orig=13075

[Data]
# SubDomain[0]
# num items in SubDomain
101
0: 162 158 168 189 156 157 163 159 169 161
1: 168 158 213 189 159 170 169 160 188 161
:
99: 175 184 189 199 177 173 178 186 192 187
100: 194 189 184 199 191 185 193 186 187 192
# SubDomain[1]
# num items in SubDomain
100
0: 171 192 166 186 173 167 174 168 169 188
1: 181 192 171 186 183 172 175 173 174 188
:
```

図 7. 「content\_type=HDDM\_Element」.

領域間境界で共有される節点や通信テーブルなどとしては、subdomain 内の要素番号からメッシュ全体の要素番号への索引である「label=ElementIndex\_SubdomainToGlobal」、subdomain 内の節点番号から part 内の節点番号への索引である「label=NodeIndex\_SubdomainToPart」、part 内の節点番号からメッシュ全体の節点番号への索引である「label=NodeIndex\_PartToGlobal」、part 間の通信テーブルである「HDDM\_InterfaceDOF」、subdomain が持つ節点のうち、領域間で共有される節点に関する情報である「InterfaceDOF」があります。特有

の key としては part 数を示す「num\_parts」、part 番号を示す「part\_number」などがあります。

このファイルに関するより詳細な情報は、ADVENTURE\_Metis のマニュアルを参照してください。

#### B. 4. 解析結果出力設定ファイル

このファイルはソルバモジュールにより作成される ADVENTURE ファイルです。このファイルには同じディレクトリにある解析結果出力ファイル、非定常解析の結果出力ファイルを得た際の解析条件などが記録されます。

図 8 は非定常渦電流解析を行った(Appendix C.3 参照)際に出力された解析結果出力設定ファイルです。解析の種類を示す「Analysis」、方程式の種類を示す「Formulation」はどのような問題を解いたかを示す key です。

「NS」で始まる key は非定常解析、「NL」で始まる key は非線形解析の設定を示しています。「HDDM」で始まる key は並列疎行列ソルバの設定を、「Solver」で始まる key は subdomain に関する並列化されていない疎行列ソルバの設定を示しています。これらに続く数字は、1 つ目が解析の種類(「2」は非定常渦電流解析)を示しています。2 つ目はその中で「0」が電磁界解析、「1」が電流密度の補正量を求める解析に関する設定であることを示しています。Data 領域には実数の値が記録されています。それらの値の種類を示すのが「Data」に数字がついている key です。「Data0=NS\_delta\_t」は、Data 領域 0 番目の値「0: 8.333333e-04」が非定常解析の時間刻み幅であることを、「Data1=HDDM\_conv2\_0」は Data 領域 1 番目の値「1: 1.000000e-03」が電磁界解析で用いた並列疎行列ソルバの収束判定値であることを示しています。

#### B. 5. 解析結果出力ファイル

このファイルはソルバモジュールにより作成される ADVENTURE ファイルです。定常解析、準定常解析の解析結果が記録されます。未知数の他に、物性番号、電磁界源であるコイルの強制電流密度や永久磁石の磁化ベクトル、未知数から計算された物理量、実行時オプションによっては解析に使用した境界条件が記録されます。

#### B. 6. 非定常解析の結果出力ファイル

このファイルはソルバモジュールにより作成される ADVENTURE ファイルです。非定常解析を行った際に、解析結果出力ファイルを時間ステップごとに作成したものです。

#### B. 7. 非定常解析の初期値設定ファイル、非定常解析の初期値ファイル

非定常解析の初期値として用いるためのファイルです。定常解析、準定常解析の解析結果出力設定ファイル、解析結果出力ファイルを、それらを格納しているサブディレクトリごとコピーして用います。

#### B. 8. リスタート設定ファイル

このファイルはソルバモジュールにより作成される ADVENTURE ファイルです。このファイルには同じディレクトリにあるリスタートデータファイルを得た際の並列疎行列ソルバの設定が記録されます。

#### B. 9. リスタートデータファイル

このファイルはソルバモジュールにより作成される ADVENTURE ファイルです。並列疎行列ソルバをリスタートさせるために必要なスカラーやベクトルが記録されます。

```

[Properties]
1: content_type=FEGenericAttribute
2: num_items=11
3: feqa_type=AllElementConstant
4: label=Options
5: format=f8
6: order=f8
7: NonSteady=Yes
8: DomainDecomposition=Yes
9: Settings=Yes
10: FloatPrecision=2
11: Analysis=NS_Eddy
12: Formulation=APhi
13: NS_end_step=20
14: NS_out_interval=1
15: Data0=NS_delta_t
16: NS_inivalue_type=real
17: NL_method=None
18: HDDM2_0_for=EM
19: HDDM2_0=CG
20: HDDM_mat2_0=implicit
21: HDDM_pc2_0=Diag
22: Data1=HDDM_conv2_0
23: Data2=HDDM_div2_0
24: HDDM_max_loop2_0=-1
25: Solver2_0_for=EM
26: Solver2_0=CG
27: Solver_mat2_0=AIJ
28: Solver_pc2_0=ICC
29: Data3=Solver_pc_icc_param2_0
30: Data4=Solver_conv2_0
31: Data5=Solver_div2_0
32: Solver_max_loop2_0=-1
33: HDDM2_1_for=Jo
34: HDDM2_1=CG
35: HDDM_mat2_1=implicit
36: HDDM_pc2_1=Diag
37: Data6=HDDM_conv2_1
38: Data7=HDDM_div2_1
39: HDDM_max_loop2_1=-1
40: Solver2_1_for=Jo
41: Solver2_1=LDL
42: Solver_mat2_1=AIJ
43: Solver_pc2_1=ICC
44: Data8=Solver_pc_icc_param2_1
45: Data9=Solver_conv2_1
46: Data10=Solver_div2_1
47: Solver_max_loop2_1=-1

[Data]
0: 8.333333e-04
1: 1.000000e-03
2: 1.000000e+10
3: 1.200000e+00
4: 1.000000e-09
5: 1.000000e+10
6: 1.000000e-10
7: 1.000000e+10
8: 1.200000e+00
9: 1.000000e-12
10: 1.000000e+10

```

☒ 8. 「sample\_data/ns\_eddy/done/result/advhddm\_out.adv」.

## B. 10. 物性データファイル

このファイルはユーザが作成するテキストファイルです。物性番号ごとに物性値を設定するために用います。このファイルでは、一般的な物性値を設定するための基本構成、解析領域全体で共通の物性値を設定するための全体共通構成、電磁界源を設定するための電磁界源構成、非線形解析に関する設定を行うための非線形構成を組み合わせて用います。

### B. 10. 1. 基本構成

基本構成は物性値を表すキーワード(*keyword*)の後にここに記す物性番号の数(*num*)を記述し、そのあとに物性番号と物性値をセットで物性番号数(*num*)分書いていきます(図 9)。

- ・ 物性番号は0から順番に並べなければならないわけではありません。
  - ・ メッシュ内のすべての物性番号が並んでいなくともかまいませんが、ここには物性番号には物性値として0が与えられます。
  - ・ 物性番号が重複した場合は、後に書かれている方が優先されます。
- これを物性値の種類だけ並べていきます。

<i>keyword</i>	<i>num</i>
0	7.95e+05
5	1.2
2	0.5
:	

図 9. 物性データファイルの基本構成。

基本構成で電磁界解析モジュールに与えられる物性値は次のとおりです。物性値名の後の括弧内はキーワード(*keyword*)です。

- ・ 磁気抵抗率(Magnetic Reluctivity) [m/H]
  - (非線形)静磁場解析, 時間調和渦電流解析, 非定常渦電流解析, 高周波電磁波解析で必須.
  - 透磁率(Magnetic Permeability) [H/m], 比透磁率(Relative Permeability) [-]でも与えられます.
    - ◇ 同じ物性番号に重複して与えられた場合は磁気抵抗率, 透磁率, 比透磁率の順に優先されます.
- ・ 導電率(Electrical Conductivity) [S/m]
  - 導電率のキーワードには ADVENTURE\_Magnetic Ver.1.9.2 まで使用されていた「Conductor」も使用できます.
  - 時間調和渦電流解析, 非定常渦電流解析, 高周波電磁波解析で必須.
  - 導電率が与えられた物性番号の領域は導体, 与えられなかった物性番号の領域は不導体として扱われます.
- ・ 誘電率(Permittivity)
  - 高周波電磁波解析で必須.
  - 比誘電率(Relative Permittivity)でも与えられます.
    - ◇ 同じ物性番号に重複して与えられた場合は誘電率, 比誘電率の順に優先されます.

## B. 10. 2. 全体共通構成

準定常問題における角周波数のように、解析領域全体で共通の値を用いる際には全体共通構成を用います(図 10)。この構成は物性値を表すキーワード(*keyword*)と値(*value*)のみからなります。

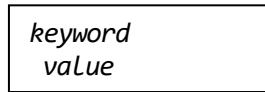


図 10. 物性データファイルの全体共通構成。

全体共通構成で電磁界解析モジュールに与えられる物性値は次のとおりです。物性値名の後の括弧内はキーワード(*keyword*)です。

- 角周波数(*AngularFrequency*) [rad/s]
  - 角周波数のキーワードには ADVENTURE\_Magnetic Ver.1.9.2 まで使用されていた「CoilOmega」も使用できます。
  - 時間調和渦電流解析、高周波電磁波解析で必須。
  - 周期(*Period*) [s], 周波数(*Frequency*) [Hz]でも与えられます。
    - ◇ 重複して与えられた場合は角周波数, 周期, 周波数の順に優先されます。

### B. 10.3. 電磁界源構成

電磁界源構成では、コイルに流す強制電流密度や永久磁石の磁化ベクトルといった電磁界源に関する設定を行います。物性値を表すキーワード(*keyword*)の後にここに記す物性番号の数(*num*)を記述し、そのあとに物性番号(*id*)、電磁界源の設定方法(*mode*)、電磁界源設定情報を記載したファイル(*file*)をセットで物性番号数(*num*)分書いていきます(図 11)。物性番号数(*num*)はコイル、または永久磁石である領域の数です。また電磁界源設定情報を記載したファイル(*file*)は物性データファイルのあるサブディレクトリ(オプション「-mtrldat-dir」で指定されるディレクトリ)からの相対パスで書いてください。

```
keyword num
id mode file
:
```

図 11. 物性データファイルの電磁界源構成。

電磁界源構成で電磁界解析モジュールに与えられる電磁界源は次のとおりです。電磁界源名の後の括弧内はキーワード(*keyword*)です。

- コイル(Coil)
- 永久磁石(PermanentMagnet)

電磁界解析モジュールでは必ず1つ以上の電磁界源が必要です。いずれか1つ以上の物性番号をコイルか永久磁石にしてください。

電磁界源の設定方法(*mode*)は、「rf」(*Read from File*)と「md」(*Make from Definition*)から選べます。

「rf」の場合はこの後の電磁界源設定情報を記載したファイル(*file*)は、コイルであれば強制電流密度データファイル、永久磁石であれば磁化ベクトルデータファイルです。これらのファイルから強制電流密度、または磁化ベクトルの値を直接読み込みます。ファイル名は(非線形)静磁場解析では「*file*」で与えた文字列の後に「s」が付きます。準定常問題である時間調和渦電流解析と高周波電磁波解析では実部と虚部のファイルがそれぞれ必要であり、文字列にそれぞれ「r」、「i」が付きます。非定常渦電流解析ではこの設定方法は選べません。

「md」の場合はこの後の電磁界源設定情報を記載したファイル(*file*)は形状定義ファイルです。読み込んだ定義を元に強制電流密度、または磁化ベクトルを計算して解析に用います。ファイル名はここに書かれているままで用いられます。非定常渦電流解析では必ずこの設定方法を選んでください。

### B. 10.4. 非線形構成

非線形構成では、非線形性を考慮する領域の物性番号(*id*)と特性曲線データファイルの名称(*file*)を与えます。キーワード「NonLinear」に続いてここに記す物性番号の数(*num*)を記述します。そのあとに非線形性を考慮する領域の物性番号(*id*)と特性曲線データファイルの名称(*file*)をセットで物性番号数(*num*)分書いていきます(図 12)。物性番号数(*num*)は非線形性を考慮する領域の数です。また特性曲線データファイルの名称(*file*)は物性データファイルのあるサブディレクトリ(オプション「-mtrldat-dir」で指定されるディレクトリ)からの相対パスで書いてください。

```
NonLinear num
id file
:
```

図 12. 物性データファイルの非線形構成。

### B. 10.5. 複数の同一キーワード、コメント

ADVENTURE\_Magnetic では物性データファイルを読み込む際、ファイルの最初からキーワードを探し、見つけたキーワードを構成の始まりと判断して値を読み込んでいきます。

ファイル内に複数の同一キーワードがある場合、ADVENTURE\_Magnetic はすべての構成を読み込みますが、解析に用いるのは最初の構成のみです。これを理解したうえで意図的に複数配置する(様々な条件で解析するために、解析のたびにコピーで順番を入れ替える)ような使い方もできますが、間違えないよう注意してください。

コメントを挿入することもできますが、構成の途中にはコメントを入れられません。ファイル冒頭や終端、構成と構成の間などに挿入してください。行頭に何かの記号を付けるなどのルールはありません。ただしキーワードと同じ文字列の使用は避けてください。半角スペースや改行で区切らずに1文字以上付いていれば別の文字列と判断されますので、例えばハッシュタグのように「#」を付けて「#NonLinear」などとすれば問題ありません。これを応用すれば、複数の同一キーワードの構成を配置して、解析に用いるもの以外のキーワードの頭に「#」を付けてコメントアウト、といった使い方もできます。

### B. 11. 強制電流密度データファイル, 磁化ベクトルデータファイル

このファイルはユーザが作成するテキストファイルです。強制電流密度データファイルでは強制電流密度[A/m<sup>2</sup>]を, 磁化ベクトルデータファイルでは磁化ベクトル[T]を, 節点に与えるために用います。これらのファイルは非定常渦電流解析では使えません。

このファイルでは, まずこのファイルで強制電流密度, または磁化ベクトルを与える節点数(*num*)を記述します。そのあとに節点番号(*id*)と強制電流密度, または磁化ベクトルの *x*, *y*, *z* 成分(*x y z*)をセットで節点数(*num*)分書いていきます(図 13)。

```
num
id x y z
:
```

図 13. 強制電流密度データファイル, 磁化ベクトルデータファイル。

すべての節点に与える必要はありません。コイル領域, または永久磁石領域に属する 1 次節点のみに与えてください。それ以外の節点に与えても解析には用いられません。また与えられなかった節点では自動的に零ベクトルが与えられます。



## B. 12. 形状定義ファイル

このファイルはユーザが作成するテキストファイルです。読み込んだ定義を元に強制電流密度[A/m<sup>2</sup>]、または磁化ベクトル[T]を計算して解析に用います。このファイルでは形状と時間変化を定義します。定常解析、準定常解析では形状定義のみを行い、非定常解析では形状定義で計算した強制電流密度を時間変化定義で時刻ごとに変化させます。なお磁化ベクトルは永久磁石で用いるので、時間変化定義による変化はさせられません。

ファイル内ではまず形状定義、必要ならばその後に時間変化定義を記述してください。順番を入れ替えたり、混ぜたりすると正しく動作しません。

形状定義ファイルを正しく作成できているかチェックするためのツールとして、ソースベクトル計算ツール `advmag2_SourceVector` があります。詳しくは Appendix A.5 を参照してください。

### B. 12. 1. 形状定義

形状定義として、次の2つがあります。

- ・ 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)

これらの定義は複数組み合わせることができます。また強制電流密度、または磁化ベクトルを与えるかどうかは物性番号で制御します。そのため領域外の節点に与えられることはありませんので、数値誤差で領域端の節点が領域外と判定されないよう、少し大きめに領域を設定してください。これにより定義同士の領域が重なった節点では、ファイル内で先に定義されている方が優先されます。

#### B. 12. 1. 1. 扇形円筒

扇形円筒の形状定義は、円筒の一部、または全部を領域として設定します。この定義の構成は図 14 のとおりです。それぞれの構成要素の一部を図 15、図 16 に示します。

```

DoulbeSectorialCylinder
x y z
dir height
unit  $\theta_1$   $\theta_2$ 
radius_in radius_out
magnitude
  
```

図 14. 形状定義：扇形円筒。

1行目は扇形円筒による形状定義のキーワードです。2行目には円筒の中心軸上にあり基点とする点の座標[m]を3次元(x y z)で与えます。この点が存在する平面が円筒の底面になります。3行目は中心軸の方向(*dir*)と円筒の高さ(*height*) [m]です。方向は「x」、「y」、「z」のいずれかで与えてください(図 15)。4行目には扇形の範囲を決めるための、図 16 に示された角度を2つ記述します。まず角度の単位(*unit*)を弧度法なら「rad」、度数法なら「deg」で記述します。角度は2つとも同じ単位で記述します。なお $\theta_1$ がどの軸からの角度になるかは3行目で記述した中心軸の方向(*dir*)によって決まります。

- ・ 中心軸の方向(*dir*)に「x」を選んだなら、底面はyz平面にあり、 $\theta_1$ はy軸からの角度となる。
- ・ 中心軸の方向(*dir*)に「y」を選んだなら、底面はzx平面にあり、 $\theta_1$ はz軸からの角度となる。
- ・ 中心軸の方向(*dir*)に「z」を選んだなら、底面はxy平面にあり、 $\theta_1$ はx軸からの角度となる(図 16)。

5行目には扇形円筒の内側の半径(*radius\_in*) [m]と外側の半径(*radius\_out*) [m]を記述します。6行目には強制電流密度の大きさ[A/m<sup>2</sup>]、または磁化ベクトルの大きさ[T]を記述します。大きさですが、方向が存在します。中心軸(*dir*)に対して右ねじ方向に回る(図 15)ときを正、これとは反対方向に回るときを負としてください。また準定常問題である時間調和渦電流解析、高周波電磁波解析では複素数で与えなければなりませんので、実部と虚部、

2つの値を記述してください。虚数単位は不要です。実部は正弦波の腹での値、虚部はそこから90°先の節での値とするか、実部は正弦波の節での値、虚部はそこから90°先の腹での値とすることになります。三相電流のような場合には、いずれか1相を前述のとおり決めて、残り2相はそこから位相をずらした値を与えてください。

例) 1相目の実部を腹(90°), 虚部を節(180°)の値とすると,

2相目は実部が-30°, 虚部が60°の値, 3相目は実部が210°, 虚部が300°の値。

扇形円筒の形状定義の具体的な例は, B.12.1.3項, または Appendix C.1, C.2を参照してください。

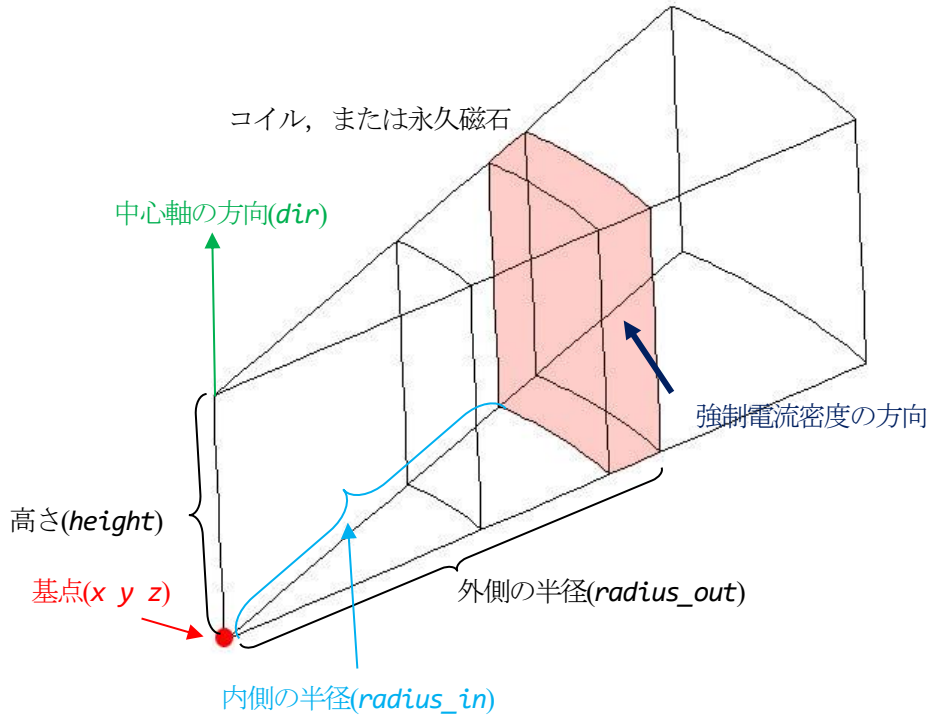


図 15. 扇形円筒 : 各部の名称.

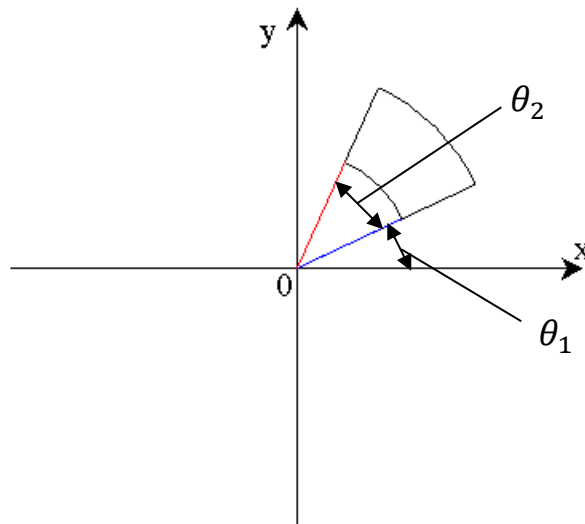


図 16. 扇形円筒 :  $\theta_1$ と $\theta_2$  (z軸を高さ方向に選んだ場合).

### B.12.1.2. 平行6面体

平行6面体の形状定義は、3組の向かい合う平行な2面に囲まれた空間を領域として設定します。直方体、立方体は平行6面体の一種です。この定義の構成は図17のとおりです。それぞれの構成要素の一部を図18に示します。

1行目は平行6面体による形状定義のキーワードです。2行目には基点を平行6面体の頂点のいずれかから1つ選び、その座標( $x_0$   $y_0$   $z_0$ )を記述します。選択する頂点はどれでもかまいません。3~5行目には、基点と隣り合う頂点3つ(図18 青丸)の座標( $x_1$   $y_1$   $z_1$ ,  $x_2$   $y_2$   $z_2$ ,  $x_3$   $y_3$   $z_3$ )を順に記述します。隣り合っさえいれば、順番は任意です。これらのうちの2つと基点で、基点が属する平行四辺形の3面とその範囲を特定できます。それらと向かい合う残り3面は自動的に決まります。6行目には強制電流密度[A/m<sup>2</sup>], または磁化ベクトル[T]を3次元ベクトル( $v_x$   $v_y$   $v_z$ )で記述します。準定常問題である時間調和渦電流解析, 高周波電磁波解析では複素数で与えなければなりませんので、実部と虚部, 2つの3次元ベクトル( $v_{xr}$   $v_{yr}$   $v_{zr}$   $v_{xi}$   $v_{yi}$   $v_{zi}$ )を記述してください。虚数単位は不要です。実部の値, 虚部の値を正弦波のどの部分にするかは、扇形円筒の形状定義と同様です。

平行6面体の形状定義の具体的な例は、B.12.1.3項を参照してください。

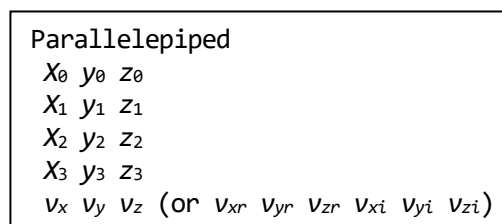


図17. 形状定義：平行6面体.

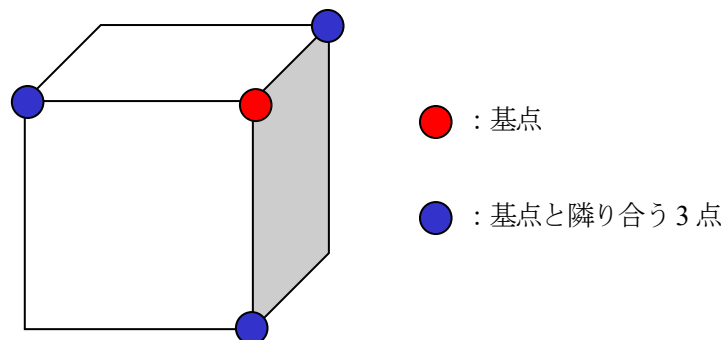


図18. 平行6面体：基点と3点.

### B. 12. 1. 3. 形状定義の具体例

ここでは形状定義の具体例を、TEAM Workshop Problem 7 (図 19, TEAM7) [13]を元に示します。TEAM7は渦電流計算の検証用モデルであり、コイルに対して非対称な穴を持つ導体平板が配置されています。

このモデルのコイルに対して強制電流密度を与えるための形状定義ファイルを図 20 に示します。図 19 では長さの単位は mm ですが、形状定義ファイルではメッシュが m で作られていると仮定しています。電流は図 19 のように z 軸方向から見て反時計回りに流れます。電流密度の大きさを実部は  $1.0986e+06$  [A/m<sup>2</sup>], 虚部は 0 [A/m<sup>2</sup>] とします。

z 軸方向から見て直線の部分を平行 6 面体, R の部分を扇形円筒の形状定義で定義しています。寸法に関する値は概ね 0.005 m 大きく取っています。また R の角度も両端 10° ずつ大きく取っています。これは前述のとおり数値誤差により領域端の節点が領域外と判定されないようにするためです。ただし、平行 6 面体が R と接している面については寸法どおりとしています。これは R 内では平行 6 面体で与える強制電流密度が明らかに実際とは異なる, R 部分の扇形円筒を少し大きく取って境界上の節点を取りこぼすことがない, ただし境界を越えた直線部分では平行 6 面体の定義を先に記述してこちらが優先されるようにしている, といった意図に基づきます。強制電流密度は、扇形円筒では大きさで与えるためいずれも「 $1.0986e+06$  0.0」ですが、平行 6 面体ではベクトルで与えるため場所によって異なることに注意してください。

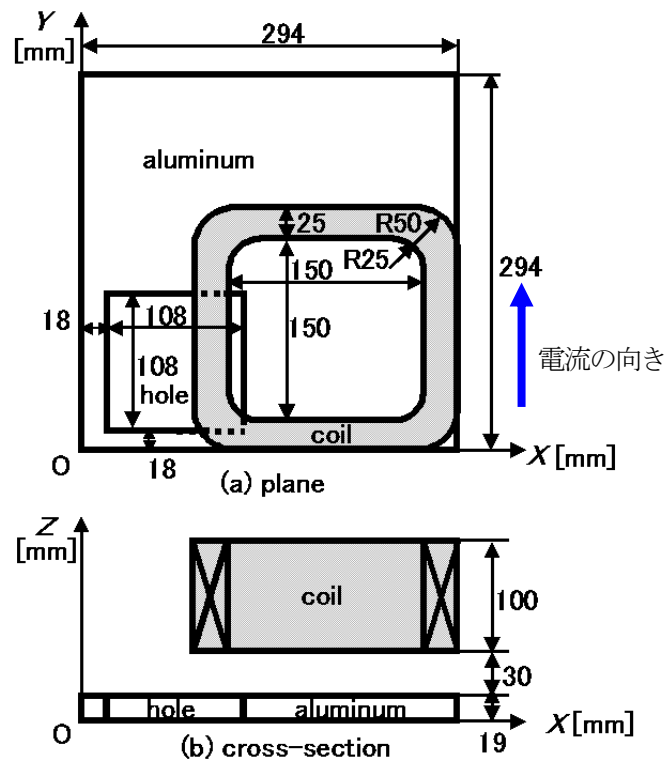


図 19. TEAM Workshop Problem 7.

<pre> Parallelepiped 0.089 0.050 0.044 0.089 0.050 0.154 0.089 0.150 0.044 0.124 0.050 0.044 0.0 -1.0986e+06 0.0 0.0 0.0 0.0  Parallelepiped 0.144 -0.005 0.044 0.144 -0.005 0.154 0.144 0.030 0.044 0.244 -0.005 0.044 1.0986e+06 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  Parallelepiped 0.264 0.050 0.044 0.264 0.050 0.154 0.264 0.150 0.044 0.299 0.050 0.044 0.0 1.0986e+06 0.0 0.0 0.0 0.0  Parallelepiped 0.144 0.170 0.044 0.144 0.170 0.154 0.144 0.205 0.044 0.244 0.170 0.044 -1.0986e+06 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 </pre>	<pre> DoubleSectorialCylinder 0.144 0.050 0.044 z 0.110 deg 170.0 110.0 0.020 0.055 1.0986e+06 0.0  DoubleSectorialCylinder 0.244 0.050 0.044 z 0.110 deg -100.0 110.0 0.020 0.055 1.0986e+06 0.0  DoubleSectorialCylinder 0.244 0.150 0.044 z 0.110 deg -10.0 110.0 0.020 0.055 1.0986e+06 0.0  DoubleSectorialCylinder 0.144 0.150 0.044 z 0.110 deg 80.0 110.0 0.020 0.055 1.0986e+06 0.0 </pre>
--	---

図 20. TEAM Wrokshop Problem 7 の形状定義ファイル.

## B. 12. 2. 時間変化定義

時間変化定義は非定常解析において、コイルに流す強制電流密度を変化させるために用います。形状定義で与えられた強制電流密度の倍率を時間変化定義で与えます。時間変化定義は設定時刻の範囲ごとに、次の2つを用いて行います。

- ・ 正弦波
- ・ 直線

これらの定義は複数組み合わせることができます。複数が定義されている場合にはそれらの重ね合わせとなります。波はフーリエ級数によって正弦波の和として表現できますので、様々な電流の時間変化を定義できます(フーリエ級数の余弦項は正弦波の位相をずらして( $\cos \theta = \sin(\theta + \pi/2)$ )表現してください)。

物性番号が同一のコイル内では同じ変化をさせることになります。異なる変化をさせたい場合は、物性番号を分けてください。これにはCADデータの作成段階から領域を分けておく必要があります。

### B. 12. 2. 1. 設定時刻の範囲

設定時刻の範囲は、キーワード「TimeEvolution」で始まり、次の「TimeEvolution」かファイル終端まで続きます。それぞれの「TimeEvolution」の次にはその設定時刻の終端を秒で書きます(図 21)。「TimeEvolution」が複数ある場合は終端時刻が早い順に並べ替えて適用しますので、実際の時刻と順番を入れ替えてもかまいません。図 21 のような場合には、終端時刻が最も早い「TimeEvolution 1.0」の時間変化定義「Definition 1」を時刻 $t$ に対して $0.0 \leq t < 1.0$ の範囲で適用します。次に早いのは「TimeEvolution 2.0」ですので、その時間変化定義「Definition 3」を $1.0 \leq t < 2.0$ の範囲で適用します。最も遅い「TimeEvolution 3.0」の時間変化定義「Definition 2」については、基本は $2.0 \leq t < 3.0$ の範囲で適用しますが、解析開始から3.0秒以降も解析が続く場合は「Definition 2」を適用し続けます。

```
TimeEvolution 1.0
  Definition 1
TimeEvolution 3.0
  Definition 2
TimeEvolution 2.0
  Definition 3
```

図 21. 設定時刻の範囲.

### B.12.2.2. 正弦波

正弦波の時間変化定義は、次の式を表現するものになります。

$$a \sin(\omega t + \varphi) + C. \quad (4)$$

ここで、 $a$ は倍率、 $\omega$ は角周波数、 $\varphi$ は初期位相、 $C$ は定数で、これらを形状定義ファイルに記述します。また $t$ はそれぞれの時間ステップでの時刻です。この定義の構成は図 22 のとおりです。

1行目は正弦波による時間変化定義のキーワードです。2行目には角周波数の単位(*unit1*)と角周波数( $\omega$ )を与えてください。角周波数の単位が[rad/s]なら「rad」、[deg/s]なら「deg」で記述します。角周波数の代わりに周波数で与えることもできます。その場合は「*unit1*」には「Hz」を、「 $\omega$ 」の箇所に周波数を記述します。3行目は初期位相の単位(*unit2*)と初期位相( $\varphi$ )を記述します。初期位相の単位が弧度法なら「rad」、度数法なら「deg」で記述します。4行目には倍率( $a$ )と定数( $C$ )を記述します。

正弦波の時間変化定義の具体的な例は、B.12.2.4項、またはAppendix C.3を参照してください。

```
TimeEvolutionSinusoidal
  unit1  $\omega$ 
  unit2  $\varphi$ 
  a C
```

図 22. 時間変化定義：正弦波.

## B.12.2.3. 直線

直線の時間変化定義は、次の式を表現するものになります。

$$(\beta - \alpha) \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} + \alpha + C. \quad (5)$$

ここで、 $t_1$ 、 $t_2$ は設定時刻範囲の開始時刻と終端時刻、 $\alpha$ 、 $\beta$ はそれぞれ開始時刻、終端時刻での倍率、 $C$ は定数で、これらを形状定義ファイルに記述します。また $t$ はそれぞれの時間ステップでの時刻です。この定義では、倍率が設定時刻範囲の開始時刻 $t_1$ における $\alpha + C$ から、終端時刻 $t_2$ における $\beta + C$ まで線形に変化します(図 23)。この定義の構成は図 24 のとおりです。

1行目は直線による時間変化定義のキーワードです。2行目には開始時刻での倍率( $\alpha$ )と終端時刻での倍率( $\beta$ )を記述します。3行目には定数( $C$ )を記述します。

直線の時間変化定義の具体的な例は、B.12.2.4項を参照してください。

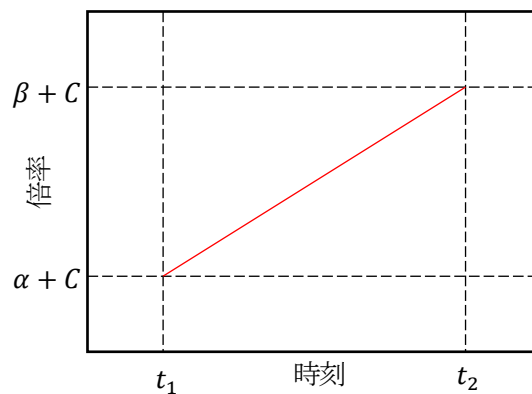


図 23. 時間変化定義：直線の倍率.

```
TimeEvolutionSinusoidal
alpha beta
C
```

図 24. 時間変化定義：直線.



## B. 12. 2. 4. 時間変化定義の具体例

ここでは時間変化定義の具体例として、正弦波から直線への変化(図 25)、正弦波の重ね合わせ(図 26)、正弦波と直線の重ね合わせ(図 27)の例を示します。それぞれの図では形状定義ファイルの時間変化定義の部分が左側に記述されています。右側は、強制電流密度の大きさが形状定義で  $50 \text{ [A/m}^2\text{]}$  として与えられたときのグラフです。横軸が時刻[s]、縦軸が強制電流密度の大きさ  $\text{[A/m}^2\text{]}$  です。

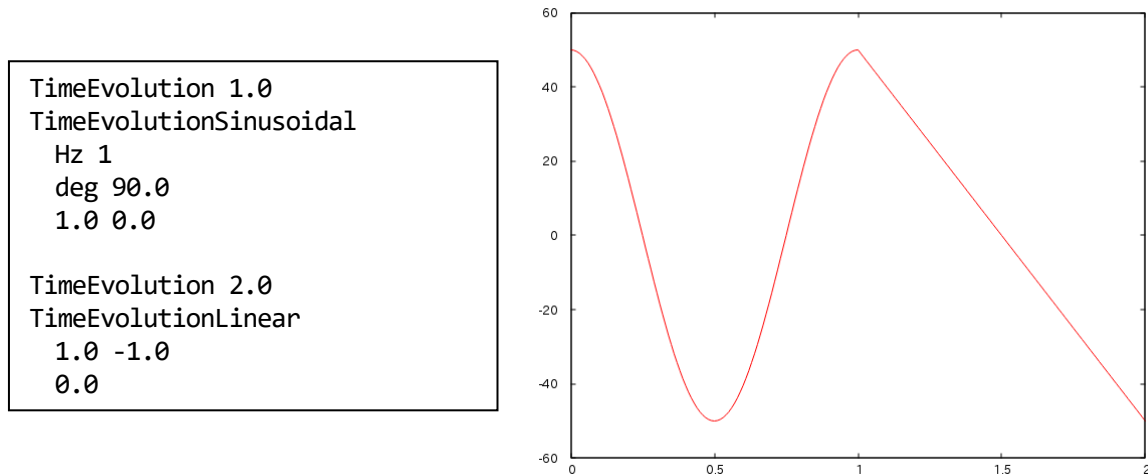


図 25. 正弦波から直線への変化.

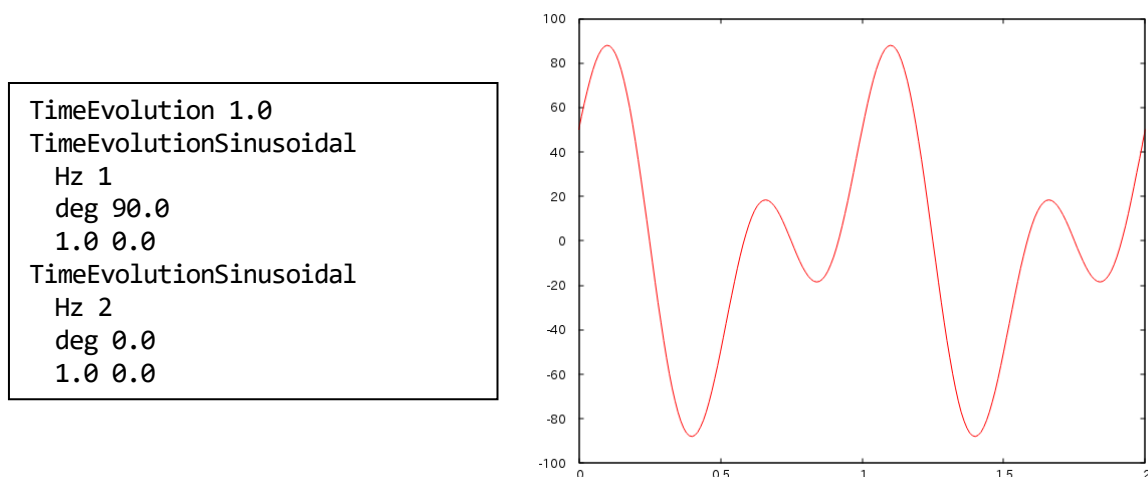


図 26. 正弦波の重ね合わせ.

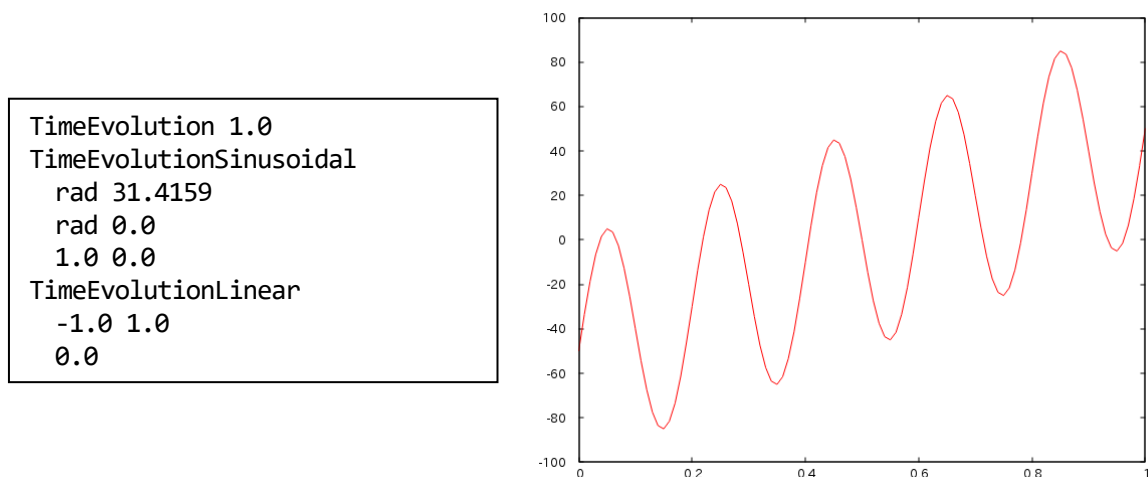


図 27. 正弦波と直線の重ね合わせ.

### B. 12.3. 複数の同一キーワード、コメント

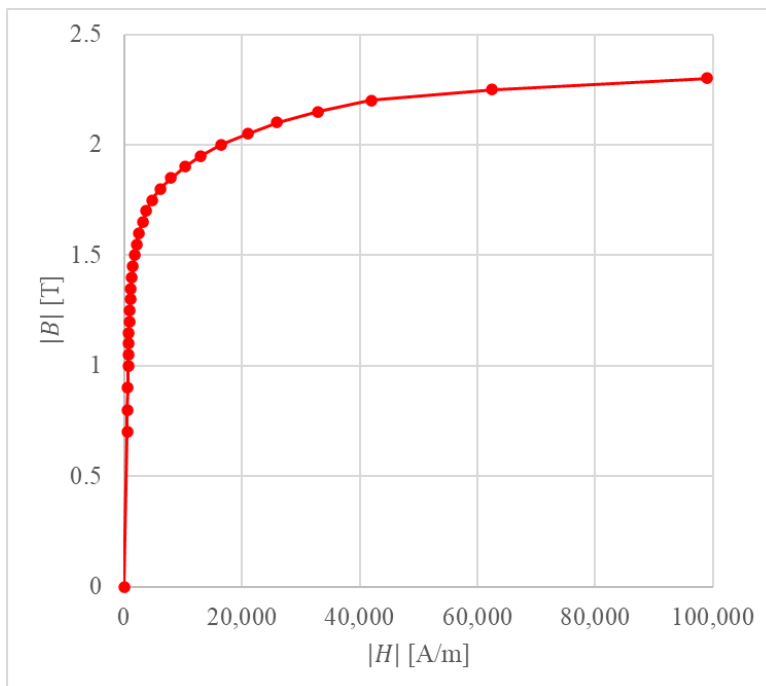
前述のとおり、形状定義、時間変化定義はそれぞれ複数組み合わせで使えます。複数の同一キーワードがあっても、物性データファイルのように解析に用いられるもの／用いられないものの区別はありません。すべて用いられます。

コメントを挿入することもできますが、定義の構成の途中にはコメントを入れられません。ファイル冒頭や終端、定義と定義の間などに挿入してください。行頭に何かの記号を付けるなどのルールはありません。ただしキーワードと同じ文字列の使用は避けてください。半角スペースや改行で区切らずに1文字以上付いていれば別の文字列と判断されますので、例えばハッシュタグのように「#」を付けて「#TimeEvolution」などとすれば問題ありません。これを応用すれば、複数の同一キーワードの定義を配置して、解析に用いるもの以外のキーワードの頭に「#」を付けてコメントアウト、といった使い方もできます。ただし、「TimeEvolution」をコメントアウトする場合、その設定時刻範囲の正弦波、直線のキーワードもコメントアウトしなければ、その前の「TimeEvolution」の設定時刻範囲で有効になってしまいますので注意してください。

### B.13. 特性曲線データファイル

このファイルはユーザが作成するテキストファイルです。非線形解析において、物性値の非線形特性を与えるために用います。

電磁界解析モジュールでは磁気抵抗率[m/H]の非線形特性を考慮するため、 $B-H$ 特性曲線を与えます。 $B-H$ 特性曲線をグラフにすると、横軸が磁場の大きさ( $|H|$  [A/m])、縦軸が磁束密度の大きさ( $|B|$  [T])です。その曲線を点群で表し、ファイルには点の数を最初に記してから、原点に近いところから点の横軸の値と縦軸の値をセットにして順に記していきます(図 28)。



```

31
0.00e+0 0.00
5.30e+2 0.70
5.70e+2 0.80
6.30e+2 0.90
7.00e+2 1.00
7.40e+2 1.05
7.90e+2 1.10
8.40e+2 1.15
9.00e+2 1.20
9.70e+2 1.25
1.05e+3 1.30
1.17e+3 1.35
1.32e+3 1.40
1.52e+3 1.45
1.78e+3 1.50
2.09e+3 1.55
2.50e+3 1.60
3.15e+3 1.65
3.80e+3 1.70
4.76e+3 1.75
6.10e+3 1.80
8.00e+3 1.85
1.03e+4 1.90
1.30e+4 1.95
1.65e+4 2.00
2.10e+4 2.05
2.60e+4 2.10
3.30e+4 2.15
4.20e+4 2.20
6.25e+4 2.25
9.90e+4 2.30

```

図 28.  $B-H$  特性曲線(左)とその特性曲線データファイル(右).

## B. 14. 収束履歴ファイル

このファイルはソルバモジュールにより作成されるテキストファイルです。図 29 は時間調和渦電流解析の収束履歴ファイルの例(詳細は Appendix C.1 参照)です。このファイルには次のものが記録されます。

- 並列疎行列ソルバの実行条件(HDDM solver's condtions)
- インターフェース問題の自由度(DOF on interface)
- subdomain 内の疎行列を解くための並列化されていない疎行列ソルバの実行条件 (Linear solver's condtions)
- モジュール実行開始からの並列疎行列ソルバ実行開始時間
- 収束履歴
- 並列疎行列ソルバ実行終了時間

収束履歴以外の冒頭には「#」が付いていますので、このまま Gnuplot で収束履歴のグラフを描画できます。

ファイル名には「log\_g\_HDDM\_」の後に、解析のキーワードが付きます。非線形解析ではすべての非線形ステップの収束履歴が同じファイルに記録されます。非定常解析では時間ステップごとに「log\_g\_HDDM\_NS\_Eddy\_10」のように時間ステップ数が付け加えられたファイルに収束履歴を記録します。「Jo」が付いているファイルには強制電流密度の補正量を解析した際の収束履歴が記録されています。非定常解析では物性番号ごとに解析するため「log\_g\_HDDM\_Jo\_2」のようにファイル名に物性番号が付きます。非定常解析以外ではコイルをまとめて解析するため、「log\_g\_HDDM\_Jo」の1つのみが記録されます。

```
# HDDM solver's condtions for Time-harmonic Eddy Current Analysis
# HDDM : COCG
# Matrix format : implicit
# Preconditioner : Diag
# Convergence Criterion : 0.001
# Divergence Criterion : 1e+10
# Maximum number of loop : -1
# Messages from HDDM will be outputted
# Matrixes in subdomains are kept
# HDDM restart file will not be outputted
# DOF on interface : 5680
# Linear solver's condtions for current analysis
# Solver : COCG
# Matrix format : AIJ
# Preconditioner : ICC
# Acceleration factor : 1.2
# Convergence Criterion : 1e-09
# Divergence Criterion : 1e+10
# Maximum number of loop : -1
# Messages from solver will not be outputted
# time 0.0147901 [s]
0 1.000000e+00 # Norm 3.136951e-04
1 2.220798e+00
2 2.381916e+00
:
:
:
70 2.120706e-03
71 1.492400e-03
72 8.941657e-04
# time 0.927617 [s]
```

図 29. 「sample\_data/cake/done/calc\_log/log\_g\_HDDM\_TH\_Eddy」.

## B. 15. その他のファイル

### B. 15. 1. MSH ファイル

メッシュを記録するテキストファイルです。フォーマットは ADVENTURE\_TetMesh のマニュアル 6.3 節を参照してください。

### B. 15. 2. FGR ファイル

FaceGroup データを記録するテキストファイルです。フォーマットは ADVENTURE\_BCtool のマニュアル 9.4 節を参照してください。

### B. 15.3. MSHX ファイル

メッシュを記録するテキストファイルです。MSH ファイルのフォーマットを拡張したものであり、混合要素を記録できます。次元の異なる要素の混合はできません。このファイルではそれぞれの次元で次の要素を扱えます。括弧内の値は後述する要素タイプです

- 1 次元 : 直線 1 次要素(2), 直線 2 次要素(3)
- 2 次元 : 三角形 1 次要素(3), 三角形 2 次要素(6), 四角形 1 次要素(4), 四角形 2 次要素(8)
- 3 次元 : 四面体 1 次要素(4), 四面体 2 次要素(10), 六面体 1 次要素(8), 2 次要素(20),  
五面体(プリズム・三角柱) 1 次要素(6), 五面体(プリズム・三角柱) 2 次要素(15),  
五面体(ピラミッド・四角錐) 1 次要素(5), 五面体(ピラミッド・四角錐) 2 次要素(13)

このファイルのフォーマットは図 30 のようになります。ファイルの冒頭には、このファイルに記録しているメッシュの次元(*dimension*)を記します。その下には要素コネクティビティ、節点座標、ボリューム情報を順に記録していきます。

要素コネクティビティでは、まず要素数(*NumOfElements*)を記し、その下に要素タイプ(*TypeOfElement*)とその要素を構成する節点(*Node0 Node1 ...*)をセットにして、要素数分記します。それぞれの要素を構成する節点の数は要素タイプ(*TypeOfElement*)と一致します。

節点座標では、まず節点数(*NumOfNodes*)を記し、その下に節点の座標(*CoordinateX CoordinateY ...*)を節点数分記します。座標の次元は冒頭の(*dimension*)と一致します。

ボリューム数では、最初にボリューム数(*NumOfVolumes*)を記します。その下にはそれぞれのボリューム情報を、ボリューム数分記録します。例えば 0 番目のボリューム情報は、まず 0 番目のボリュームを構成する要素数(*NumOfElementsInVolume0*)を記し、その下に 0 番目のボリュームを構成するボリュームの 0 番目の要素(*Element0\_0*), 1 番目の要素(*Element1\_0*)と、*NumOfElementsInVolume0-1* 番目の要素まで記します。

```

dimension
NumOfElements
  TypeOfElement Node0 Node1 ...
  :
NumOfNodes
  CoordinateX CoordinateY ...
  :
NumOfVolumes
NumOfElementsInVolume0
  Element0_0
  Element1_0
  :
NumOfElementsInVolume1
  Element0_1
  Element1_1
  :

```

図 30. MSHX ファイル.

#### B. 15. 4. FGRX ファイル

FaceGroup データを記録するテキストファイルです。FGR ファイルのフォーマットから、MSH ファイル、MSHX ファイルから取得できる情報を削減したものです。

このファイルのフォーマットは図 31 のようになります。ファイルの冒頭には、このファイルに記録している FaceGroup の数(*NumOfFaceGroups*)を記します。その下に FaceGroup の情報を記録します。

FaceGroup の情報では、例えば 0 番目の FaceGroup の情報では、まず 0 番目の FaceGroup を構成する要素面の数(*NumOfFacesInFaceGroup0*)を記します。その下に 0 番目の FaceGroup を構成する 0 番目の要素面の情報としてその要素面が属する要素の番号(*Element0\_0*)と要素面の要素内での番号(*FaceInElement0\_0*)をセットで記します。これを *NumOfFacesInFaceGroup0-1* 番目の要素面まで繰り返します。0 番目の FaceGroup の情報を記録したら次は 1 番目の FaceGroup の情報、といった具合に、*NumOfFaceGroups-1* 番目の FaceGroup の情報まで記録します。

```

NumOfFaceGroups
NumOfFacesInFaceGroup0
  Element0_0 FaceInElement0_0
  Element1_0 FaceInElement1_0
  :
  :
NumOfFacesInFaceGroup1
  Element0_1 FaceInElement0_1
  Element1_1 FaceInElement1_1
  :
  :
```

図 31. FGRX ファイル.

## 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\_Magnetic による解析例を示します。モデル作成には商用 CAD、ADVENTURE\_TriPatch、ADVENTURE\_TetMesh、ADVENTURE\_BCtool の各モジュールを用います。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す。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してください。

- ADVENTURE\_TriPatch : 1.8
- ADVENTURE\_TetMesh : 0.91b
- ADVENTURE\_BCtool : 2.1.1
- ADVENTURE\_Metis : 1.1

また、ADVENTURE System でモデルを作成する場合、ADVENTURE\_BCtool においてメッシュの表面を抽出する際に失敗し、モデル作成が行えないことがあります。そこで、ここでは標準的なモデルの作成方法を C.1 で紹介するとともに、C.2 でモデル作成の失敗を回避する例も紹介します。

### C.1. 標準的なモデル作成方法：時間調和渦電流解析

解析例として図 32 の無限長ソレノイドコイルを用いた渦電流解析の精度検証用モデルであるケーキモデル [4][14]を用います。図 33 のように問題の対称性を考慮し、中心角  $20^\circ$ 、高さ  $0.1[\text{m}]$  の領域を解析対象のモデルとします。導体部の半径は  $0.1[\text{m}]$  とします。磁気抵抗率は解析領域全体で  $1/(4\pi \times 10^{-7})[\text{m/H}]$ 、導体部の導電率  $\sigma$  は  $7.7 \times 10^6[\text{S/m}]$ 、角周波数  $\omega$  は  $2\pi \times 60[\text{rad/s}]$  とします。コイルに流れる強制電流密度  $J$  の実部、虚部の大きさは  $50, 0[\text{A/m}^2]$  とします。境界条件は図 34 のように、 $\theta = 0^\circ$  (緑)および  $\theta = 20^\circ$  (赤)の面に  $A \times n = 0$  を課します。

なお、このあとの一連の作業をすべて終えたファイルが、

`sample_data/cake/done/`

にあります。ParaView による可視化結果の PNG ファイルも、

`sample_data/cake/done/result/`

にありますので参考にしてください。

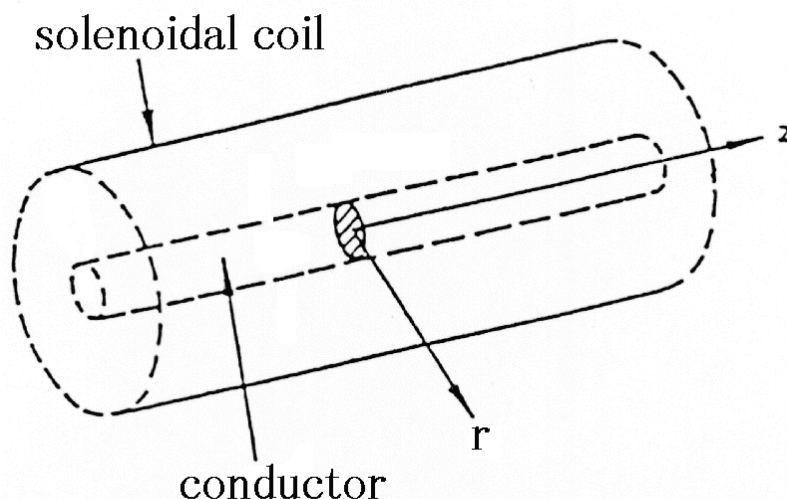


図 32. 無限長ソレノイドコイル。



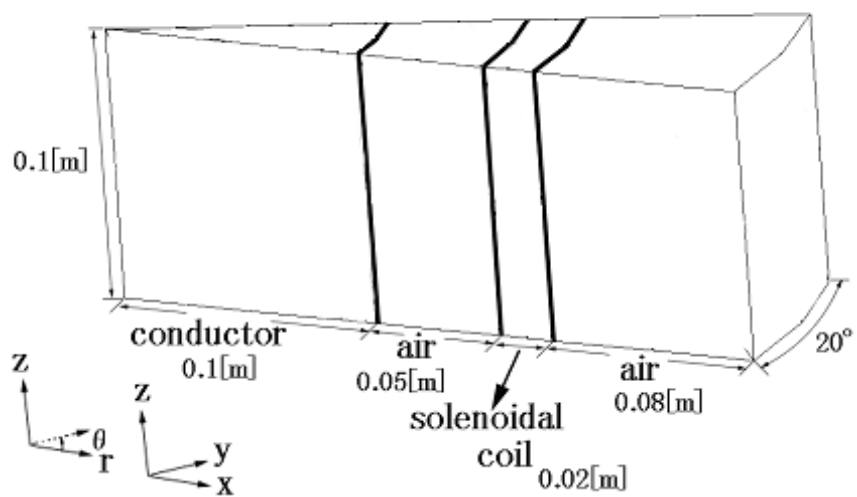


図 33. ケーキモデル.

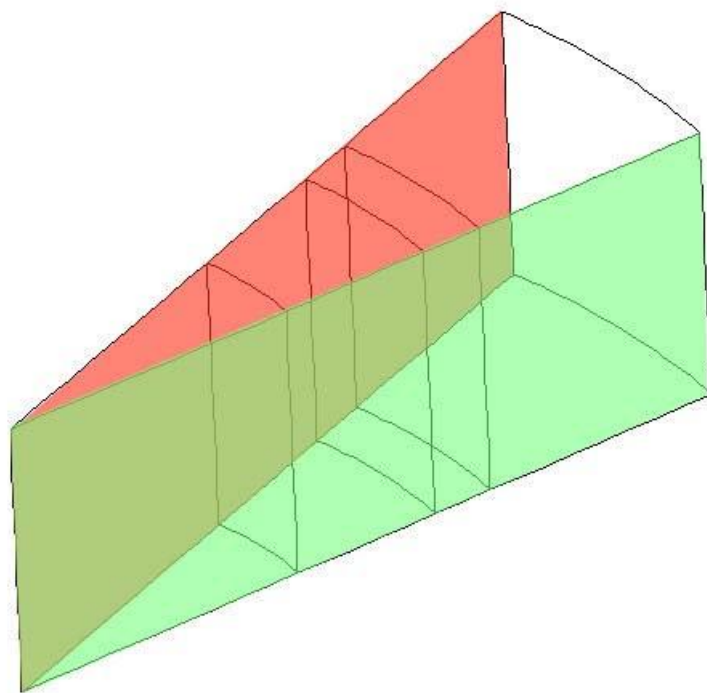


図 34. 境界条件.

## (1) IGES ファイルの用意

まず、商用 CAD などを使って IGES ファイルを用意します。IGES ファイルは ADVENTURE\_TriPatch の入力となりますが、すべての IGES ファイルが受け入れられるわけではありません。IGES ファイルに求められる要件は、ADVENTURE\_TriPatch のマニュアル 6.1 節を参照してください。

ここでは、

`sample_data/cake/igs/`

にあるファイルを用います。

- `conductor.igs` : 導体領域 ( $0 \leq r \leq 0.1$ )
- `air01.igs` : 内側の空気領域 ( $0.1 \leq r \leq 0.15$ )
- `coil.igs` : コイル領域 ( $0.15 \leq r \leq 0.17$ )
- `air02.igs` : 外側の空気領域 ( $0.17 \leq r \leq 0.25$ )
- `cake.ptn` : 節点密度データファイル

節点密度データファイルはメッシュの細かさ(要素の辺の平均長, 粗密)を設定するためのものです。詳細は ADVENTURE\_TriPatch のマニュアル 6.4 節を参照してください。

## (2) 表面パッチの作成

それぞれの IGES ファイルをもとに ADVENTURE\_TriPatch を用いて表面パッチを作成し、表面パッチ結合プログラム `mrpach` を用いて結合します。表面パッチの作成と結合について、詳細は ADVENTURE\_TriPatch のマニュアルを参照してください。

## • 節点密度データファイルの作成(コピー)と表面パッチ作成:

表面パッチデータファイル(.pcm)と表面パッチデータグループファイル(.pcg)が作成されます。

(ADVENTURE\_TriPatch のマニュアル 6.2 節, 6.3 節)

## ➤ 導体領域

```
% cp cake.ptn conductor.ptn
% ADVENTURE_TriPatch conductor conductor
```

## ➤ 内側の空気領域

```
% cp cake.ptn air01.ptn
% ADVENTURE_TriPatch air01 air01
```

## ➤ コイル領域

```
% cp cake.ptn coil.ptn
% ADVENTURE_TriPatch coil coil
```

## ➤ 外側の空気領域

```
% cp cake.ptn air02.ptn
% ADVENTURE_TriPatch air02 air02
```

## • 表面パッチの結合: 内側のものから一時的なファイルに記録しながら結合。

結合するもの同士は隣り合うように選択してください。

また結合した順にボリューム番号が 0 から振られます。

```
% mrpach conductor.pcm conductor.pcg air01.pcm air01.pcg -o tmp01.pcm -g tmp01.pcg
% mrpach tmp01.pcm tmp01.pcg coil.pcm coil.pcg -o tmp02.pcm -g tmp02.pcg
% mrpach tmp02.pcm tmp02.pcg air02.pcm air02.pcg -o cake.pcm -g cake.pcg
```

## (3) メッシュデータの生成

表面パッチをもとに ADVENTURE\_TetMesh を用いてメッシュを生成します。ADVENTURE\_Magnetic では四面体 2 次要素を読み込むので、advtmesh9s を必ず実行してください。メッシュデータの生成について、詳細は ADVENTURE\_TetMesh のマニュアルを参照してください。MSH ファイルについては 6.3 節にて説明されています。

- 表面メッシュデータ中間ファイル(.pcc)の生成。  
advtmesh9m が使用する節点制御ファイル(c.ptn)も生成されます。

```
% advtmesh9p cake -d
```

- 四面体 1 次要素メッシュ(c.msh)の生成。

```
% advtmesh9m cakec
```

- 2 次節点の生成。MSH ファイル(s.msh)が作成されます。

```
% advtmesh9s cakec
```

## (4) 境界条件の設定

ADVENTURE\_BCtool を用いて境界条件を設定します。ここで与える境界条件は図 34 のとおりです。ただし、一体型解析モデルの作成には次項のように ADVENTURE\_Magnetic 付属のツールを用いますので、BCtool の makefem3 は使用しません。境界条件の設定について、詳細は ADVENTURE\_BCtool のマニュアルを参照してください。

- メッシュ表面(.pch, .pcg, .tm)の抽出, FaceGroup データ(.fgr)の作成。  
フォーマットは ADVENTURE\_BCtool のマニュアル 9.5 節, 9.7 節, 9.8 節, 9.4 節を参照してください。

```
% msh2pch cakecs.msh 9
```

- 境界条件の設定：コマンドラインから起動するときは次のコマンドで起動します。

```
% BcGUI2 cakecs_9.pch cakecs_9.pcg
```

デスクトップ上のショートカットなどから起動した場合は、上記のコマンドで渡したのと同じファイルを起動後に選択しなければなりません。(「File」->「Open file」, 図 35, 図 36)

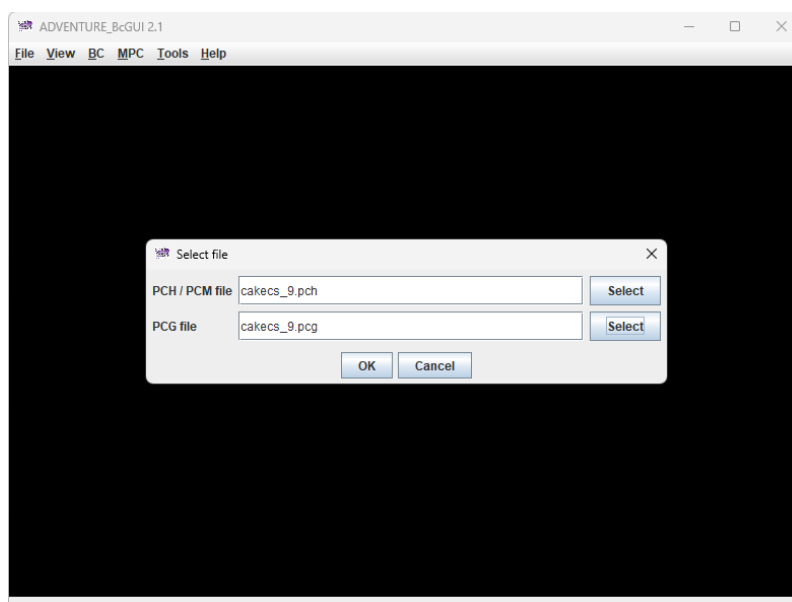


図 35. ファイルの読み込み。

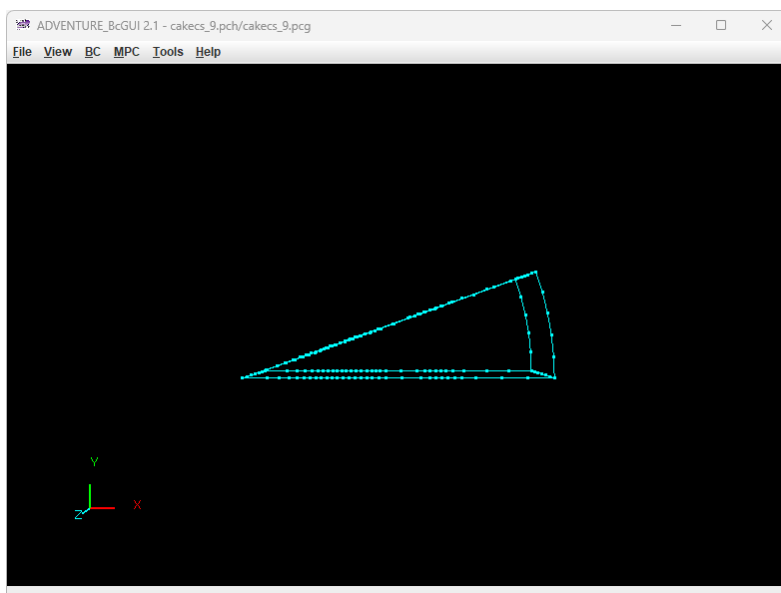


図 36. 起動直後(ファイル読み込み直後).

まず $\theta = 0^\circ$  の面(図 34 の緑の面)に境界条件を設定します. 対象を回転させるなどして, 面に属する辺上の節点を左クリックで選択, 目的の面が黄色くなるまで右クリックします(図 37).

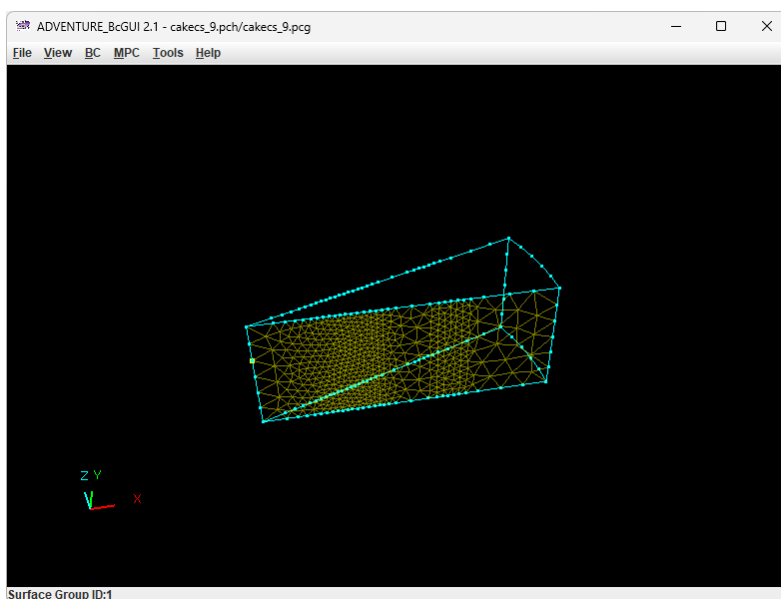


図 37.  $\theta = 0^\circ$  の面の選択.

境界条件の種類を選び(「BC」->「BC(Magnetic)」->「Add Magenetic Vector Potential」), 「Normal」の左隣のボックスにチェックを入れ(図 38)て, 「OK」をクリックします.

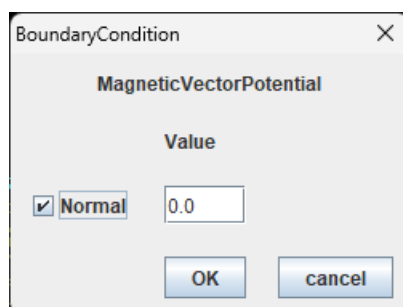


図 38.境界条件 $\mathbf{A} \times \mathbf{n} = \mathbf{0}$ .

次に $\theta = 20^\circ$  の面(図 34 の赤の面)にも同様に境界条件を課します。

境界条件が適切に設定できているかは2つの方法で確認できます。一つは出力される解析条件ファイルの内容を表示させる方法(「View」->「Boundary Condition」->「Cnd format」, 図 39)です。もう一つは境界条件が課されている面を表示させる方法(「View」->「Boundary Condition」->「View Magnetic Vector Potential」, 図 40)です。選択した境界条件が課されている面に色がつきます。面が選択状態だと色つきませんので、選択状態なら右クリックで選択を外してください。

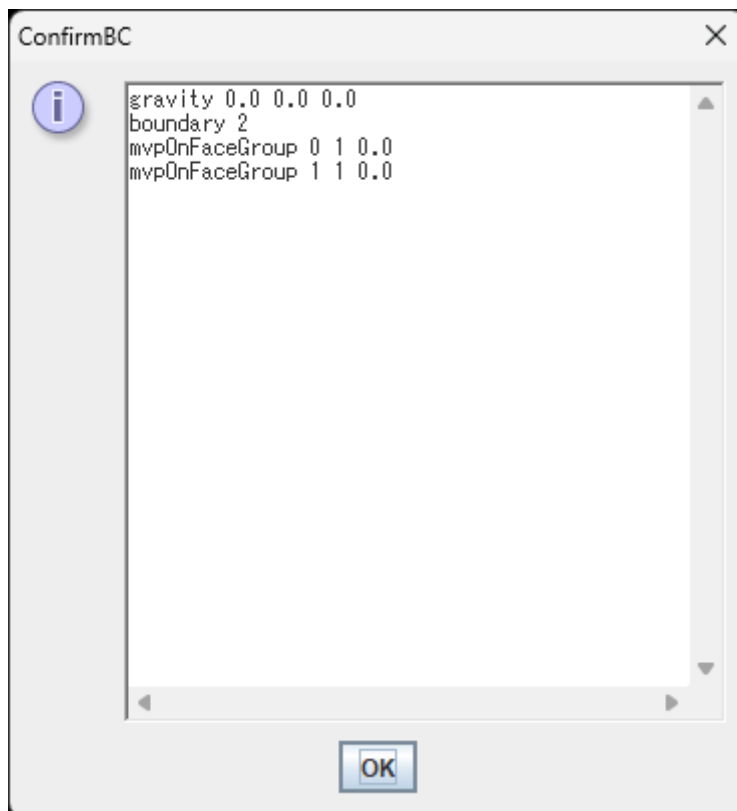


図 39. 解析条件ファイルの内容表示.

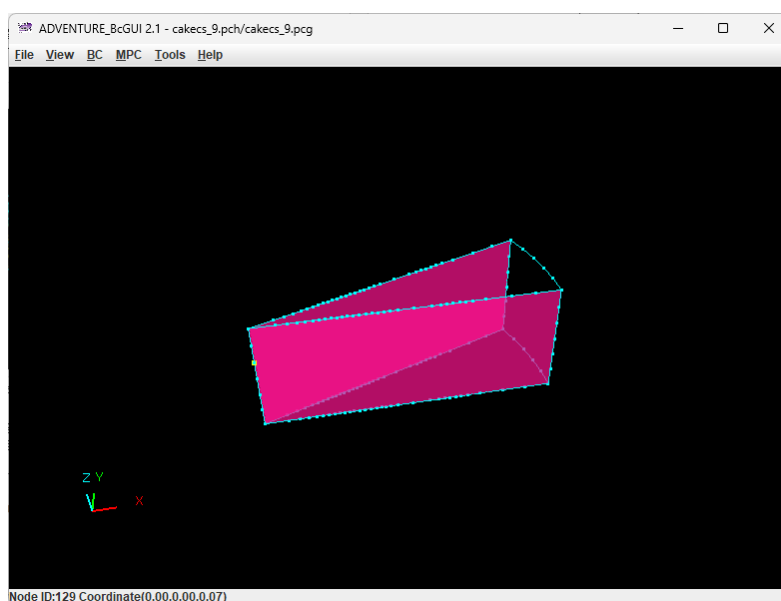


図 40. 境界条件が課されている面の表示.

「File」->「Save condition」から解析条件ファイルを保存します。ここではファイル名を「cake.cnd」とします(図 41)。作業が終了したら、「File」->「Quit」でBcGUI2を終了します。

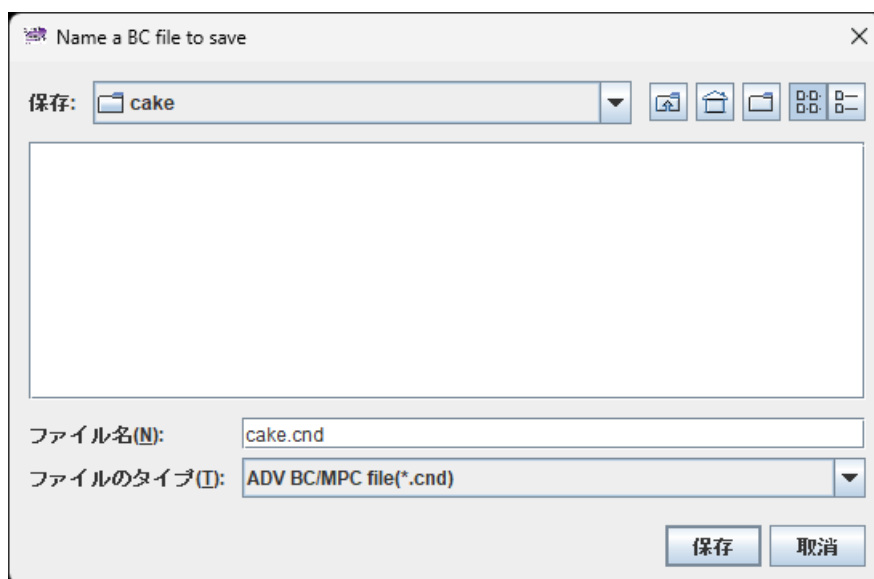


図 41. 解析条件ファイルの保存.

## (5) 一体型解析モデルの作成

ADVENTURE\_Magnetic の一体型解析モデル作成ツール `advmag2_makefem_Electromagnetic` でメッシュ, 物性値, 境界条件から ADVENTURE フォーマットの一体型解析モデルファイルを作成します。

まず物性値ファイル「`cake.dat`」を作成します。物性値ファイルの詳細については, ADVENTURE\_BCtool のマニュアル 9.9 節を参照してください。ADVENTURE\_Magnetic では物性データファイルで物性値を与えます。そのため物性値ファイルの物性値設定機能は使わず, ボリューム番号の物性番号(ADVENTURE\_BCtool のマニュアルでは材料番号と呼称)への変換機能のみ用います。

ADVENTURE\_TetMesh で生成したメッシュのボリューム番号は `mrpach` で表面パッチを結合した順に振られています。また 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すれば, BcGUI2 でも確認できます。

- メッシュ表面とボリューム境界(`_V.pcm`, `_V.pcg`)の抽出。  
フォーマットは ADVENTURE\_BCtool のマニュアル 9.6 節, 9.7 節を参照してください。

```
% msh2pcm cakecs.msh
```

- BcGUI2 の起動。

```
% BcGUI2 cakecs_V.pcm cakecs_V.pcg
```

BcGUI2 が起動すると, 図 42 のようにそれぞれのボリュームに番号がついています。番号の位置がわかりにくい場合はモデルを回してみてください。

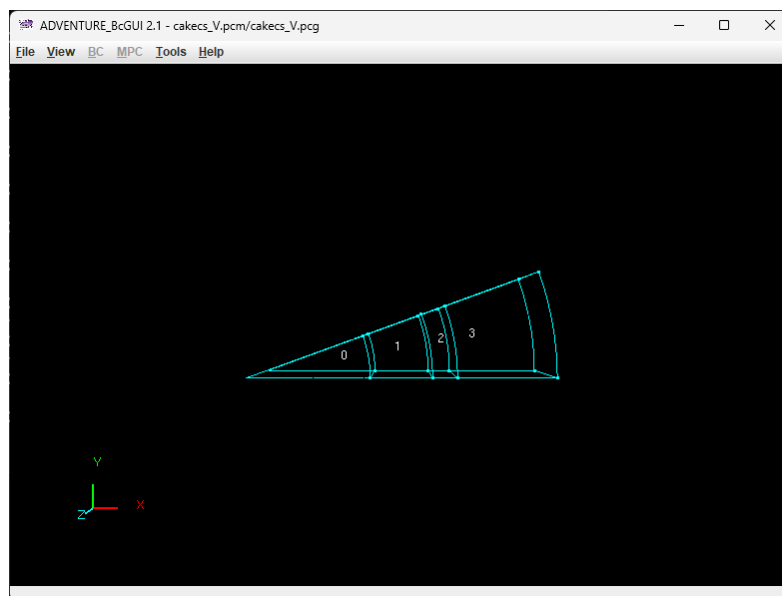


図 42. ボリューム番号の確認。

ボリューム番号と各領域の対応は次のとおりです。

- 0 : 導体領域
- 1 : 内側の空気領域
- 2 : コイル領域
- 3 : 外側の空気領域

ここではボリューム番号をそのまま物性番号にします。ボリューム番号と物性番号が一致しない例は C.2 で示します。

「cake.dat」は図 43 のようになります。「#materialInfo」は物性値設定機能に関わる部分であり ADVENTURE\_Magnetic では使用しません。そのため物性値の種類の数である「propertyN」は「0」です。「#volumeInfo」がボリューム番号の物性番号への変換機能に関わる部分です。「volumeN」はメッシュが持つボリュームの数です。この下に、ボリュームの数だけそれぞれのボリュームに割り当てる物性番号を並べます。

```
#materialInfo
materialN 4
propertyN 0

#volumeInfo
volumeN 4
0
1
2
3
```

図 43. 「cake.dat」の内容.

これで準備ができましたので、advmag2\_makefem\_Electromagnetic で一体型解析モデルファイル「input.adv」を作成します。

- 一体型解析モデルの作成.

```
% advmag2_makefem_Electromagnetic cakecs.msh cakecs_9.fgr cake.cnd cake.dat input.adv
```



## (6) 解析ディレクトリの作成

物性値を与えるためのファイルを作成し、一体型解析モデルファイルとともに解析ディレクトリに格納します。

主な物性値は物性データファイルで与えます。このファイルのデフォルトの名称は「mtr1.dat」です。またコイルに与える強制電流密度を、ここでは形状定義ファイルで与えることとします。このファイルの名称は任意ですが、ここでは「coil.dat」とします。物性値はこの節の冒頭で述べたとおり、磁気抵抗率(MagneticReluctivity)は解析領域全体で  $1/(4\pi \times 10^{-7}) \doteq 7.957747e+05$  [m/H]、導体部の導電率(ElectricalConductivity)は  $7.7 \times 10^6 = 7.7e+06$  [S/m]、角周波数(AngularFrequency)は  $2\pi \times 60 \doteq 376.99$  [rad/s]です。またコイル(Coil)は物性番号2で、形状定義ファイルを用いるのでファイルの種類は「md」です。これらを「mtr1.dat」に記入していきます(図 44)。

```
MagneticReluctivity 4
0 7.957747e+05
1 7.957747e+05
2 7.957747e+05
3 7.957747e+05

Coil 1
2 md coil.dat

ElectricalConductivity 1
0 7.7e+06

AngularFrequency
376.99
```

図 44. 「mtr1.dat」の内容。

次に形状定義ファイル「coil.dat」を作成します。コイル領域は扇型なので、「DoubleSectorialCylinder」を用います。数値誤差でコイル領域端の節点が領域外と判定されないよう、少し大きめに領域を設定します。時間調和渦電流解析は複素数の解析なので、電流密度の大きさは実部と虚部をそれぞれ与えます。コイルに流れる強制電流密度の実部、虚部の大きさは 50, 0[A/m<sup>2</sup>]です。実部は正弦波の腹、虚部はそこから 90° 先の節の部分にあたります。これらを「coil.dat」に記入していきます(図 45)。

```
DoubleSectorialCylinder
0.0 0.0 -0.05
z 0.2
deg -10.0 40.0
0.14 0.18
50.0 0.0
```

図 45. 「coil.dat」の内容。

最後に解析ディレクトリと一体型解析モデルファイルを格納するサブディレクトリを作成し、各ファイルを所定の場所へ移動させます。解析ディレクトリ名は「cake」とします。

```
% mkdir -p cake/model_one
% mv input.adv cake/model_one/
% mv mtr1.dat cake/
% mv coil.dat cake/
```

## (7) 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します。なお、実行時にはオプション「-difn 1」を指定してください。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す。

まず、階層型の領域分割をするために、part 数と subdomain 数を決めます。ここでは 2 台の PC を用いて分散メモリ並列モードで解析することとします。このため、part 数は 2 となります。subdomains 数は 2.2 節の式(2)で決めますので、まずは advinfo で一体型解析モデルファイルの要素数 $N_{element}$ を調べます。

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

「content\_type=Element」の「num\_items」が要素数で、今回は 13,075 です。subdomain あたりの要素数 $n_{element}$ を 100 とすると、

$$\frac{13,075}{2 \times 100} = 65.375 . \quad (6)$$

ここで得られた値そのものにならなければならないわけではありません。きりの良い値にしてかまいません。ここでは subdomain 数を 65 とします。

```
% mpirun -np 2 adventure_metis -difn 1 cake/model_one/input.adv cake 65
```

なお共有メモリ並列モードやハイブリッド並列モードでは subdomain 単位で処理をスレッドに割り当てるので、subdomain 数がスレッド数の倍数になっていると計算資源の無駄が少なくなります。

## (8) 解析の実行

電磁界解析モジュールで時間調和渦電流解析(TH\_Eddy)を行います。解析ディレクトリ名がデフォルトとは異なるため、オプション「-data-dir」が必要です。

```
% mpirun -np 2 advmag2_HDDM_Electromagnetic-p TH_Eddy -data-dir cake
```

## (9) 可視化ファイルの作成

advmag2\_hddmrg を用いて可視化ファイルを作成します。ここでは不定性のある(積分定数分が定まらない)未知数である「MagneticVectorPotential」と「ElectromagneticScalarPotential」は除きます。可視化ファイルの名称は「cake.vtu」とします。

```
% advmag2_hddmrg cake.vtu -2 MagneticVectorPotential ElectromagneticScalarPotential
-data-dir cake
```

## (10) 可視化

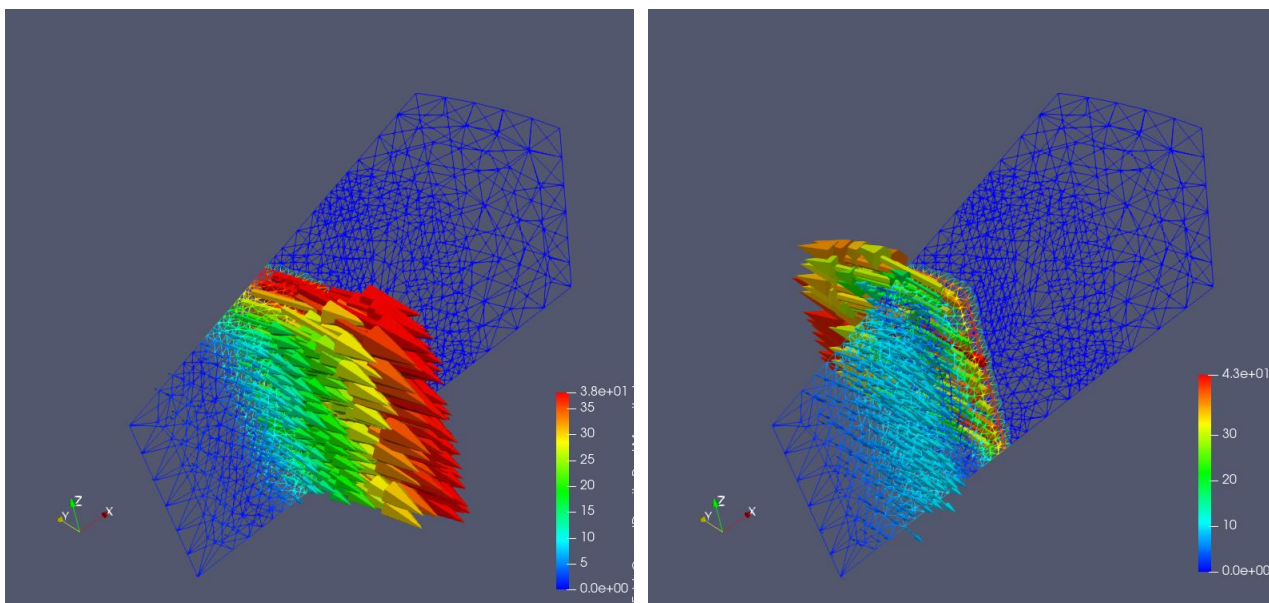
ここではParaViewによる可視化の例を紹介します.

「cake.vtu」を読み込んで「Apply」を押したあとのParaViewの設定を以下に記します.

- データの種類 : 「Solid Color」-> それぞれの図を確認してください.
- モデル表面 : 「Representation」-> 「Wireframe」
- カラーバーの種類 : 「Choose Preset」-> 「Blue to Red Rainbow」
- ベクトル表示 : 「Filters」-> 「Common」-> 「Glyph」
  - スケールのモード : 「Vector Scale Mode」-> 「Scale by Magnitude」
  - スケール : 「Scale Factor」-> それぞれの物理量の倍率は図のタイトルに記載

図 46, 図 47 の作成に用いたVTUファイル, およびこれらの図のPNGファイルは,  
sample\_data/cake/done/result/

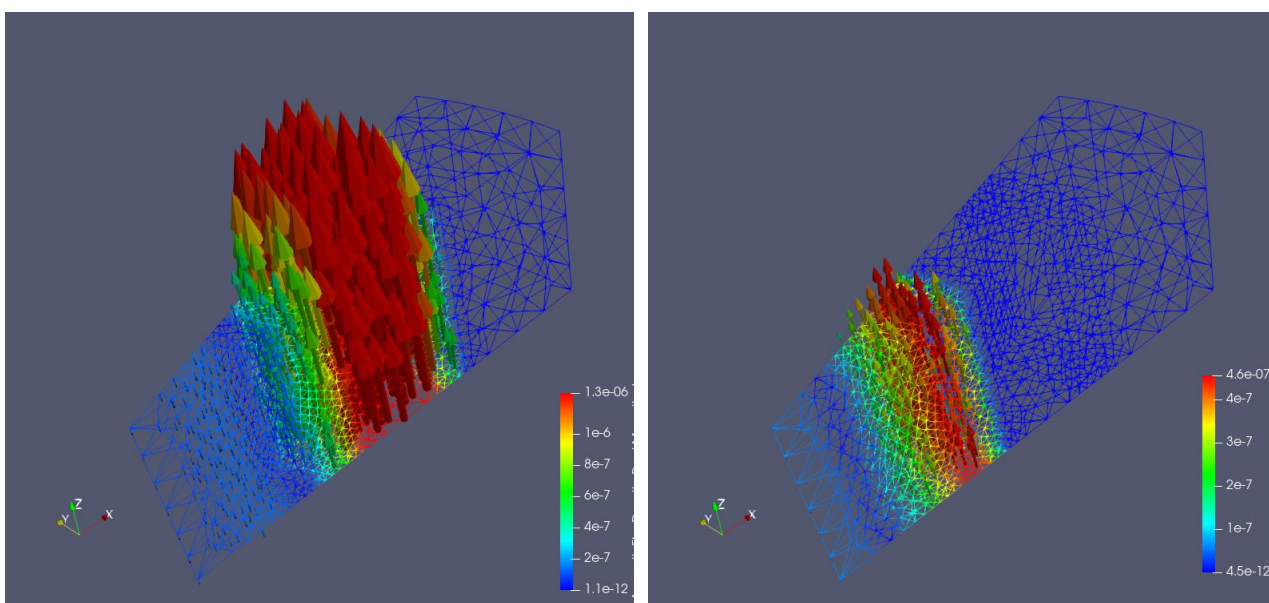
に格納されています. PNGファイルは「File」-> 「Save Screenshot」から保存できます.



(a) 実部(EddyCurrentDensity-Real)

(b) 虚部(EddyCurrentDensity-Imaginary)

図 46. 渦電流密度(スケール 0.002).



(a) 実部(MagneticFluxDensity-Real)

(b) 虚部(MagneticFluxDensity-Imaginary)

図 47. 磁束密度(スケール 50,000).

## C.2. 材料同士の結合面が不一致な場合のモデル作成方法：非線形静磁場解析

電磁界解析で用いられるモデルのほとんどは複数の材料から構成されるため、ADVENTURE\_TriPatch の表面パッチ結合プログラム `mpach` を用いて複数の表面パッチを結合させなければなりません。しかし、図 48 の赤い面のように材料同士の結合面の形状が一致していないとうまく結合されません。このような場合、図 49 のように材料③を④と⑤の 2 つに分割して IGES ファイルを作成することで結合面の形状を一致させれば、成功する場合があります。本節ではこのような場合について具体的な例を挙げて説明します。

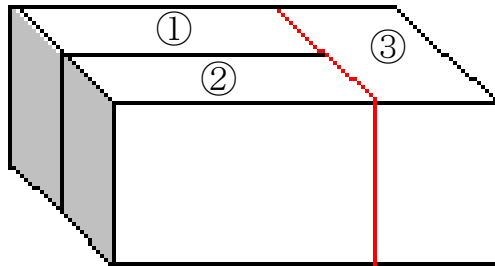


図 48. 結合面の形状不一致.

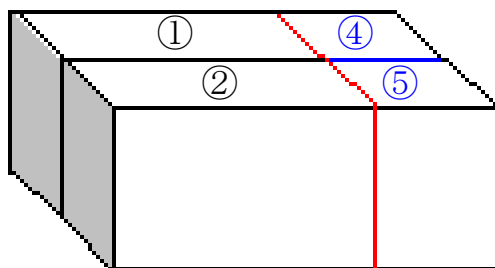


図 49. 材料を分割して、結合面の形状をあわせる.

解析例として図 50 の軸対称モデル[14]を考えます。このモデルは上下の形状が異なる鉄心が対向する空隙部を持つ吸引磁石であり、図 50 はその断面図です。解析対象は図 50 を  $z$  軸周りに 10 度回転させた領域とします。コイル部の強制電流密度は図 50 の断面に垂直な向きに  $3 \times 10^7 [\text{A}/\text{m}^2]$  で流れているとします。磁気抵抗率  $\nu$  は空気とコイルの領域で  $1/(4\pi) \times 10^7 [\text{m}/\text{H}]$ 、環状磁性体の材質は SS41P であり、この領域では図 51 のような非線形性を持つものとして非線形解析をします。境界条件はすべての面において  $\mathbf{A} \times \mathbf{n} = \mathbf{0}$  を課します。

このモデルではコイルの右側の部分(図 50 における  $x = 85 \text{ mm}$ )において、材料同士の結合面が不一致となっています。そこで、コイル領域の一部を図 52 のように分割し、結合面を一致させます。

以下に、その具体的な手順を示します。

なお、このあとの一連の作業をすべて終えたファイルが、

`sample_data/shaft/done/`

にあります。ParaView による可視化結果の PNG ファイルも、

`sample_data/shaft/done/result/`

にありますので参考にしてください。

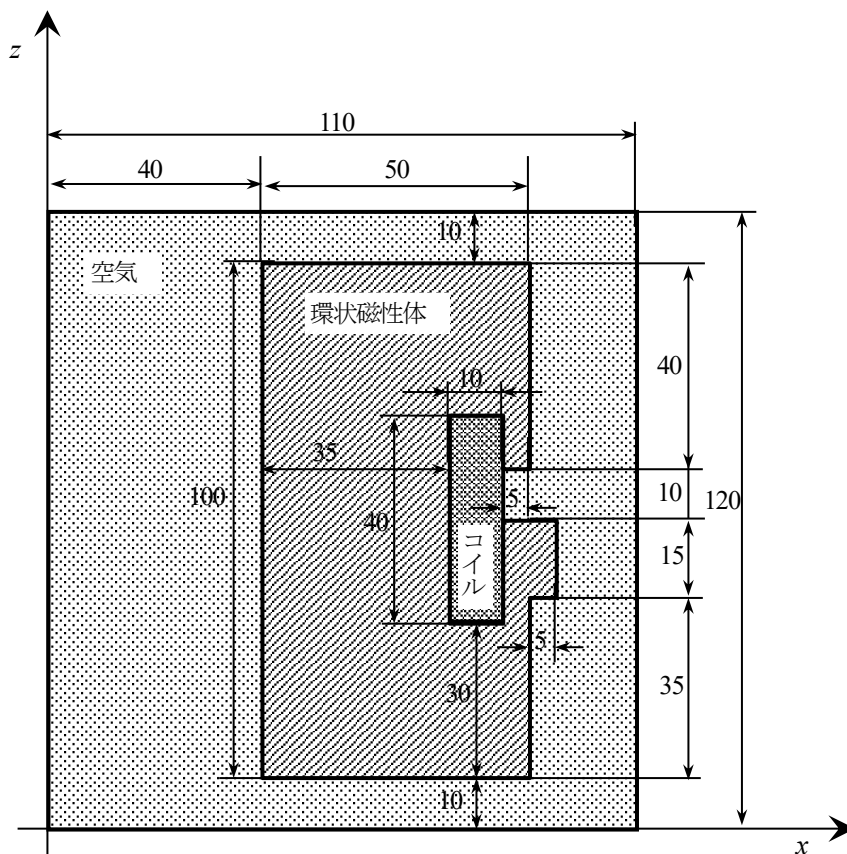


図 50. 軸対称モデルの断面図(単位[mm]).

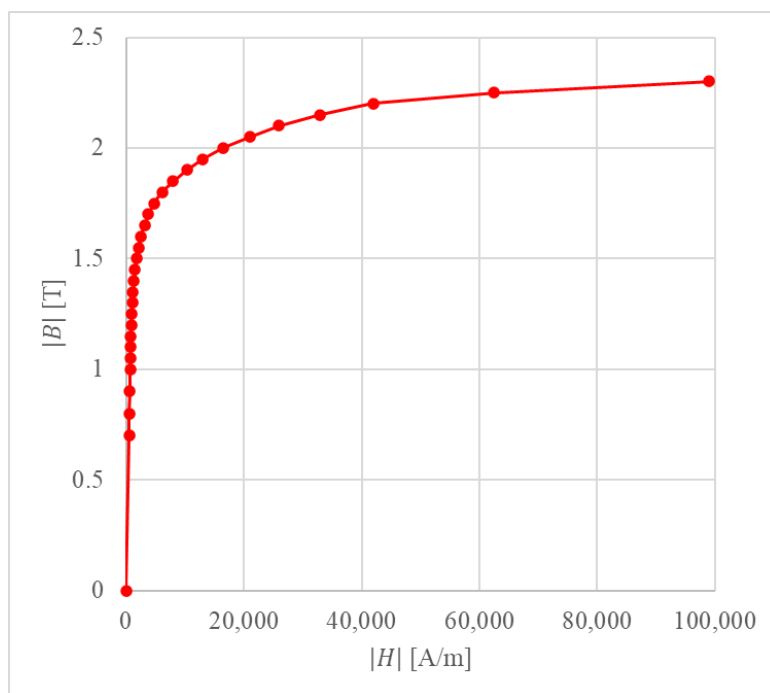


図 51.  $B$ - $H$  特性曲線.

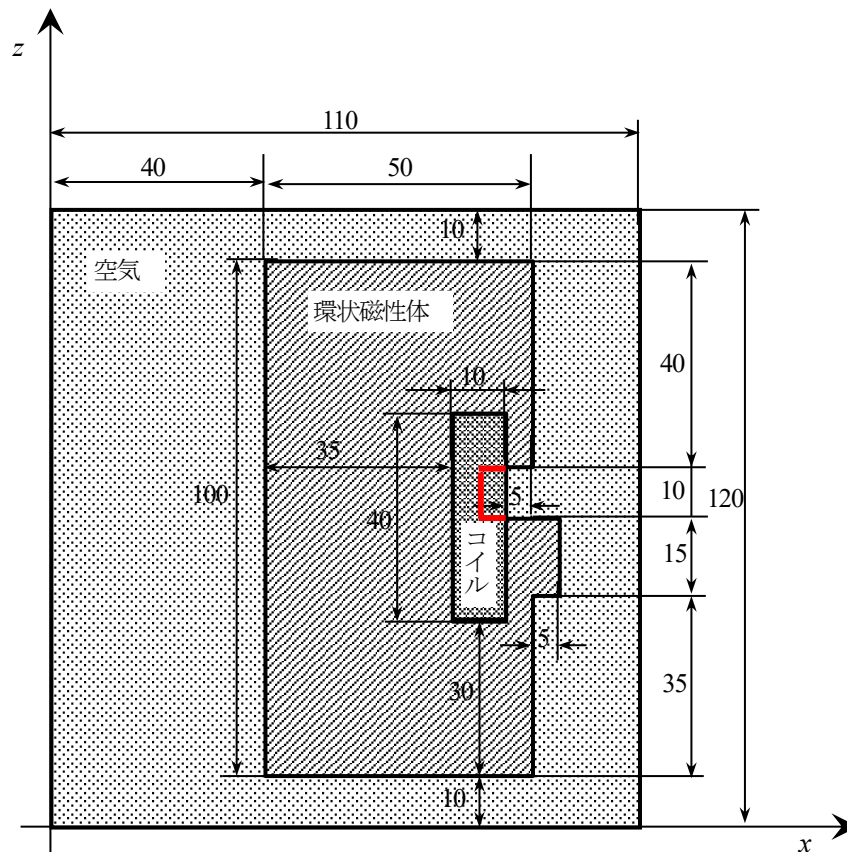


図 52. コイル領域の分割.

## (1) IGES ファイルの用意

まず、商用 CAD などを使って IGES ファイルを用意します。IGES ファイルは ADVENTURE\_TriPatch の入力となりますが、すべての IGES ファイルが受け入れられるわけではありません。IGES ファイルに求められる要件は、ADVENTURE\_TriPatch のマニュアル 6.1 節を参照してください。

ここでは、

`sample_data/shaft/igs/`

にあるファイルを用います。図 50、図 52 では寸法が mm で記述されていますが、これらの IGES ファイルは寸法を m に換算して作成しています。

- `coil01.igs` : コイル領域(図 52 中の赤で囲われた部分以外)
- `coil02.igs` : コイル領域(図 52 中の赤で囲われた部分)
- `mag.igs` : 環状磁性体領域
- `air.igs` : 空気領域
- `shaft.ptn` : 節点密度データファイル

節点密度データファイルはメッシュの細かさ(要素の辺の平均長、粗密)を設定するためのものです。詳細は ADVENTURE\_TriPatch のマニュアル 6.4 節を参照してください。

## (2) 表面パッチの作成

それぞれの IGES ファイルをもとに ADVENTURE\_TriPatch を用いて表面パッチを作成し、表面パッチ結合プログラム `mrpach` を用いて結合します。表面パッチの作成と結合について、詳細は ADVENTURE\_TriPatch のマニュアルを参照してください。

- ・ 節点密度データファイルの作成(コピー)と表面パッチ作成。

表面パッチデータファイル(.pcm)と表面パッチデータグループファイル(.pcg)が作成されます。

(ADVENTURE\_TriPatch のマニュアル 6.2 節, 6.3 節)

- コイル領域(図 52 中の赤で囲われた部分以外)

```
% cp shaft.ptn coil01.ptn
% ADVENTURE_TriPatch coil01 coil01
```

- コイル領域(図 52 中の赤で囲われた部分)

```
% cp shaft.ptn coil02.ptn
% ADVENTURE_TriPatch coil02 coil02
```

- 環状磁性体領域

```
% cp shaft.ptn mag.ptn
% ADVENTURE_TriPatch mag mag
```

- 空気領域

```
% cp shaft.ptn air.ptn
% ADVENTURE_TriPatch air air
```

- ・ 表面パッチの結合：内側のものから一時的なファイルに記録しながら結合。

結合するものは隣り合うように選択してください。

また結合した順にボリューム番号が 0 から振られます。

```
% mrpach coil01.pcm coil01.pcg coil02.pcm coil02.pcg -o tmp01.pcm -g tmp01.pcg
% mrpach tmp01.pcm tmp01.pcg mag.pcm mag.pcg -o tmp02.pcm -g tmp02.pcg
% mrpach tmp02.pcm tmp02.pcg air.pcm air.pcg -o shaft.pcm -g shaft.pcg
```

## (3) メッシュデータの生成

表面パッチをもとに ADVENTURE\_TetMesh を用いてメッシュを生成します。ADVENTURE\_Magnetic では 4 面体 2 次要素を読み込むので、`advtmesh9s` を必ず実行してください。メッシュデータの生成について、詳細は ADVENTURE\_TetMesh のマニュアルを参照してください。MSH ファイルについては 6.3 節にて説明されています。

- ・ 表面メッシュデータ中間ファイル(.pcc)の生成。

`advtmesh9m` が使用する節点制御ファイル(.c.ptn)も生成されます。

```
% advtmesh9p shaft -d
```

- ・ 四面体 1 次要素メッシュ(c.msh)の生成。

```
% advtmesh9m shaftc
```

- ・ 2 次節点の生成。MSH ファイル(s.msh)が作成されます。

```
% advtmesh9s shaftc
```

## (4) 境界条件の設定

ADVENTURE\_BCtool を用いて境界条件を設定します。ここではすべての面に境界条件を与えます。ただし、一体型解析モデルの作成には次項のように ADVENTURE\_Magnetic 付属のツールを用いますので、BCtool の makefem3 は使用しません。境界条件の付加について、詳細は ADVENTURE\_BCtool のマニュアルを参照してください。

- メッシュ表面(.pch, .pcg, .tm)の抽出, FaceGroup データ(.fgr)の作成。  
フォーマットは ADVENTURE\_BCtool のマニュアル 9.5 節, 9.7 節, 9.8 節, 9.4 節を参照してください。  
% msh2pch shaftcs.msh 18
- 境界条件の付加 : コマンドラインから起動するときは次のコマンドで起動します。  
% BcGUI2 shaftcs\_18.pch shaftcs\_18.pcg

デスクトップ上のショートカットなどから起動した場合は、上記のコマンドで渡したのと同じファイルを起動後に選択しなければなりません。(「File」->「Open file」, 図 53, 図 54)

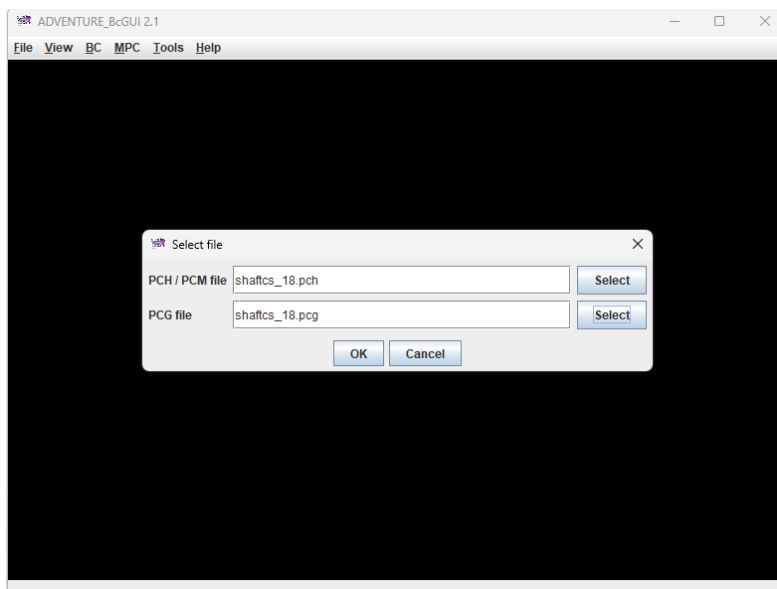


図 53. ファイルの読み込み.

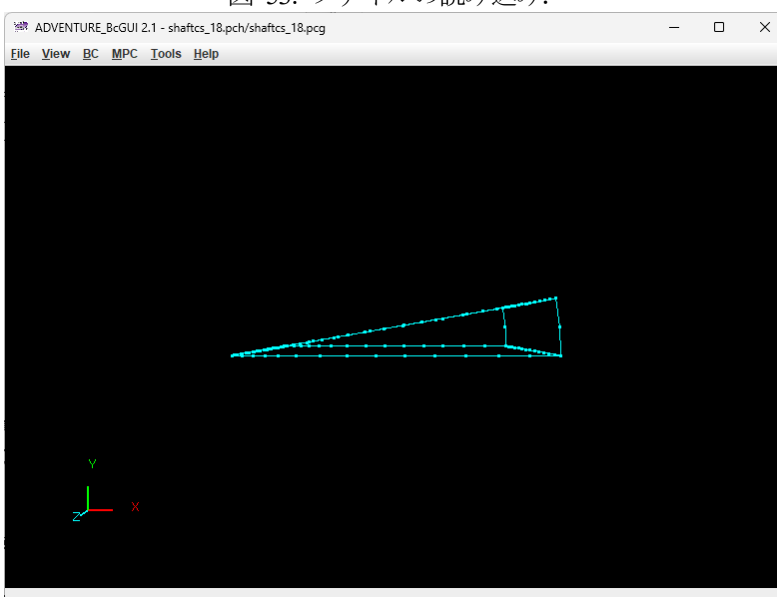


図 54. 起動直後(ファイル読み込み直後).



まず $\theta = 0^\circ$  の面に境界条件を設定します。対象を回転させるなどして、面に属する辺上の節点を左クリックで選択、目的の面が黄色くなるまで右クリックします(図 55)。

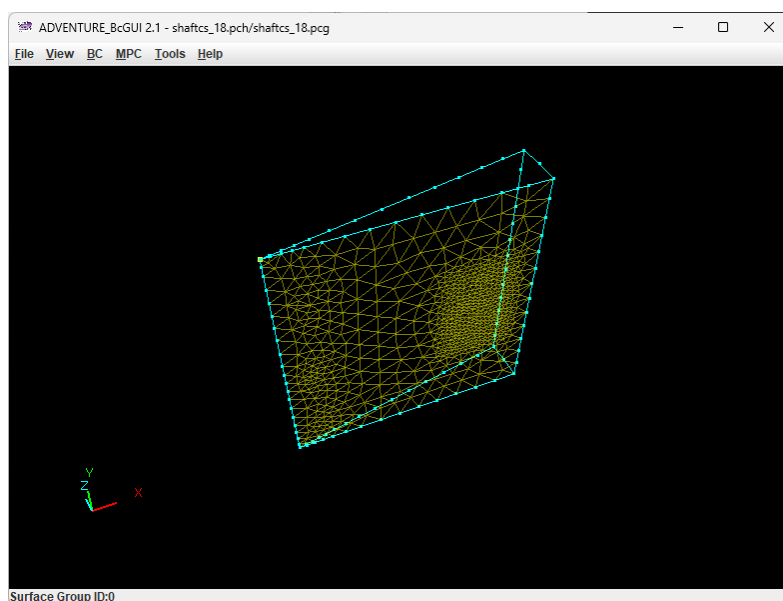


図 55.  $\theta = 0^\circ$  の面の選択.

境界条件の種類を選び(「BC」->「BC(Magnetic)」->「Add Magnetic Vector Potential」), 「Normal」の左隣のボックスにチェックを入れ(図 56)て、「OK」をクリックします。

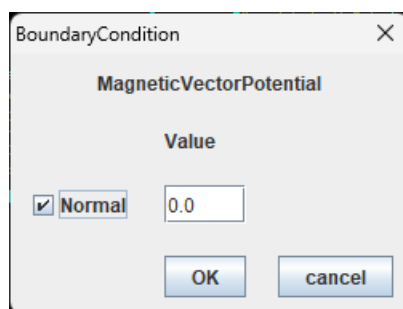


図 56.境界条件 $\mathbf{A} \times \mathbf{n} = \mathbf{0}$ .

他の4面についても同様に境界条件を課します。

境界条件が適切に設定できているかは2つの方法で確認できます。一つは出力される解析条件ファイルの内容を表示させる方法 (「View」->「Boundary Condition」->「Cnd format」, 図 57) です。もう一つは境界条件が課されている面を表示させる方法(「View」->「Boundary Condition」->「View Magnetic Vector Potential」, 図 58)です。選択した境界条件が課されている面に色がつきます。面が選択状態だと色つきませんので、選択状態なら右クリックで選択を外してください。

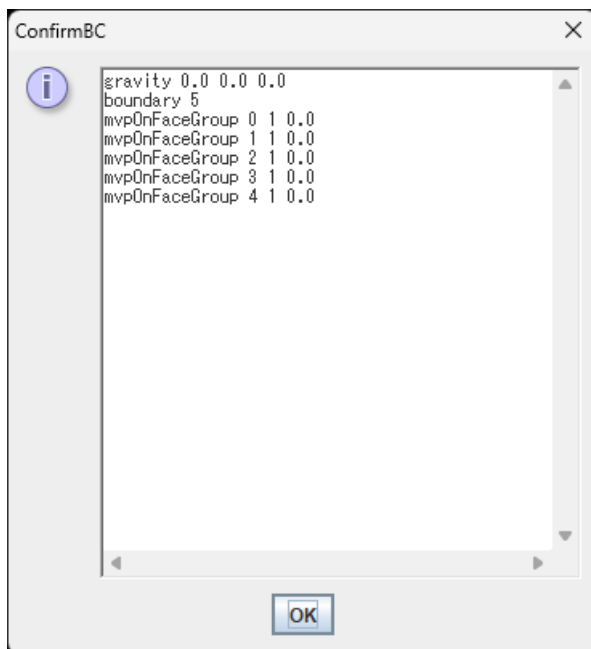


図 57. 解析条件ファイルの内容表示.

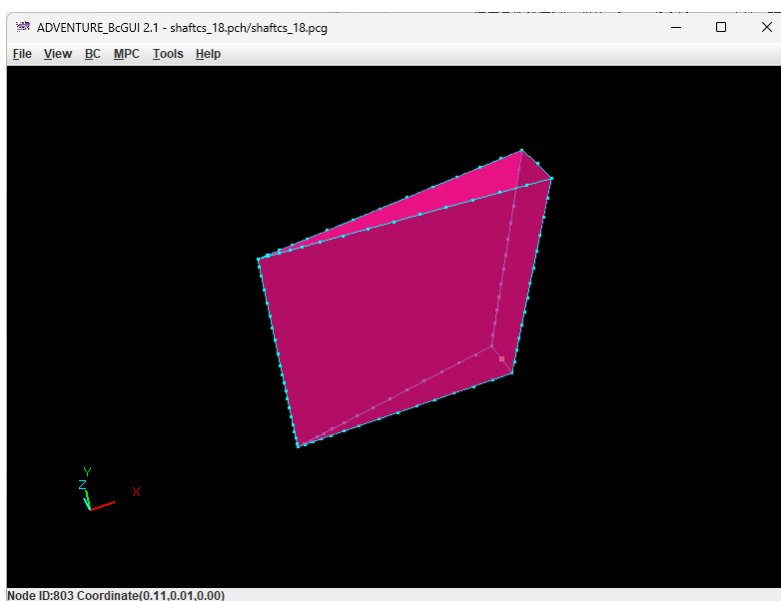


図 58. 境界条件が課されている面の表示.

「File」->「Save condition」から解析条件ファイルを保存します。ここではファイル名を「shaft.cnd」とします(図 59)。作業が終了したら、「File」->「Quit」でBcGUI2を終了します。

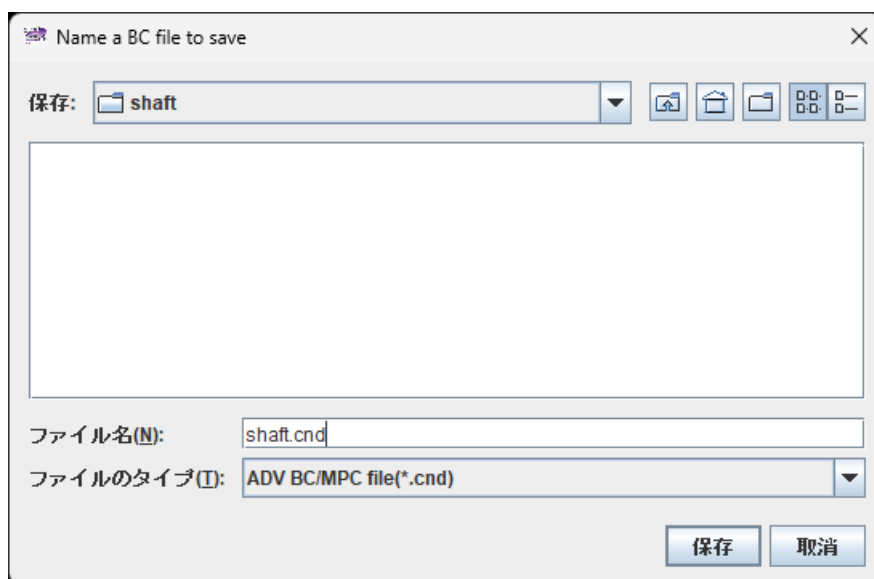


図 59. 解析条件ファイルの保存.

## (5) 一体型解析モデルの作成

ADVENTURE\_Magnetic の一体型解析モデル作成ツール `advmag2_makefem_Electromagnetic` でメッシュ, 物性値, 境界条件から ADVENTURE フォーマットの一体型解析モデルファイルを作成します。

まず物性値ファイル「`shaft.dat`」を作成します。物性値ファイルの詳細については, ADVENTURE\_BCtool のマニュアル 9.9 節を参照してください。ADVENTURE\_Magnetic では物性データファイルで物性値を与えます。そのため物性値ファイルの物性値設定機能は使わず, ボリューム番号の物性番号(ADVENTURE\_BCtool のマニュアルでは材料番号と呼称)への変換機能のみ用います。

ADVENTURE\_TetMesh で生成したメッシュのボリューム番号は `mrpach` で表面パッチを結合した順に振られています。また 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すれば, BcGUI2 でも確認できます。

- メッシュ表面とボリューム境界(`_V.pcm`, `_V.pcg`)の抽出。  
フォーマットは ADVENTURE\_BCtool のマニュアル 9.6 節, 9.7 節を参照してください。

```
% msh2pcm shaftcs.msh
```

- BcGUI2 の起動。

```
% BcGUI2 shaftcs_V.pcm cakecs_V.pcg
```

BcGUI2 が起動すると, 図 60 のようにそれぞれのボリュームに番号がついています。番号の位置がわかりにくい場合はモデルを回してみてください。細かい部品が多いとモデルを回してもわかりにくい場合があります。そのような場合は「View」->「Select the volume to draw」(図 61)で表示ボリュームを切り替えてください。

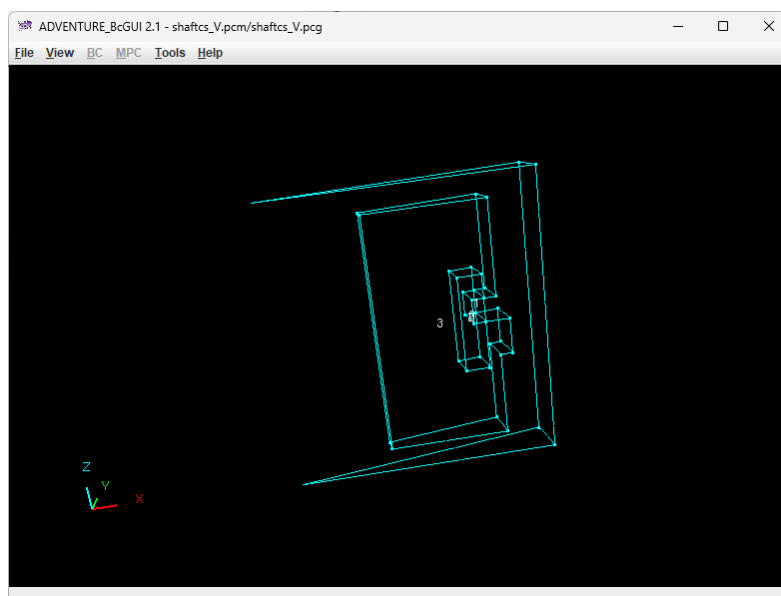


図 60. ボリューム番号の確認。

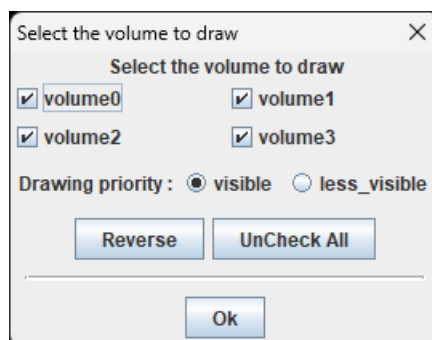


図 61. 表示ボリュームの選択。

ボリューム番号と各領域の対応は次のとおりです。

- 0 : コイル領域(図 52 中の赤で囲われた部分以外)
- 1 : コイル領域(図 52 中の赤で囲われた部分)
- 2 : 環状磁性体領域
- 3 : 空気領域

コイル領域が2つに分かれていますので、これらをまとめて物性番号を0にします。残り2つの領域は順番に1, 2を与えることとします。

「shaft.dat」は図 62 のようになります。「#materialInfo」は物性値設定機能に関わる部分であり ADVENTURE\_Magnetic では使用しません。そのため物性値の種類数である「propertyN」は「0」です。

「#volumeInfo」がボリューム番号の物性番号への変換機能に関わる部分です。「volumeN」はメッシュが持つボリュームの数です。この下に、ボリュームの数だけそれぞれのボリュームに割り当てる物性番号を並べます。最初の2つはコイルとして1つにまとめていますので、物性番号はともに「0」です。後の2つは環状磁性体領域と空気領域なので、順番に「1」、「2」を与えます。なお物性番号は3つになりますので「#materialInfo」の「materialN」は「3」になっています。

```
#materialInfo
materialN 3
propertyN 0

#volumeInfo
volumeN 4
0
0
1
2
```

図 62. 「shaft.dat」の内容。

これで準備ができましたので、advmag2\_makefem\_Electromagnetic で一体型解析モデルファイル input.adv を作成します。

- 一体型解析モデルの作成。

```
% advmag2_makefem_Electromagnetic shaftcs.msh shaftcs_18.fgr shaft.cnd shaft.dat
input.adv
```

## (6) 解析ディレクトリの作成

物性値を与えるためのファイルを作成し、一体型解析モデルファイルとともに解析ディレクトリに格納します。

主な物性値は物性データファイルで与えます。このファイルのデフォルトの名称は「mtrl.dat」です。またコイルに与える強制電流密度を、ここでは形状定義ファイルで与えることとします。このファイルの名称は任意ですが、ここでは「coil.dat」とします。また磁気抵抗率の非線形性を考慮するための特性曲線データファイルも必要です。このファイルの名称も任意ですが、ここでは「bh\_curve」とします。物性値はこの節の冒頭で述べたとおり、磁気抵抗率(MagneticReluctivity)は空気とコイルの領域で  $1/(4\pi \times 10^{-7}) \doteq 7.957747\text{e}+05$  [m/H]です。環状磁性体の磁気抵抗率は非線形解析の初期値になりますが、ここでは  $7.571\text{e}+02$  [m/H]とします。環状磁性体の磁気抵抗率は非線形解析が進むと要素ごとに異なる値になっていきます。またコイル(Coil)は物性番号「0」で、形状定義ファイルを用いるのでファイルの種類は「md」です。非線形解析(NonLinear)を行う環状磁性体は物性番号「1」です。これらを「mtrl.dat」に記入していきます(図 63)。

```
MagneticReluctivity 3
0 7.957747e+05
1 7.571e+02
2 7.957747e+05

Coil 1
0 md coil.dat

NonLinear 1
1 bh_curve
```

図 63. 「mtrl.dat」の内容。

次に形状定義ファイル「coil.dat」を作成します。コイル領域は扇型なので、「DoubleSectorialCylinder」を用います。数値誤差でコイル領域端の節点が領域外と判定されないよう、少し大きめに領域を設定します。コイルに流れる強制電流密度の大きさは  $3 \times 10^7$  [A/m<sup>2</sup>]です。これらを「coil.dat」に記入していきます(図 64)。

```
DoubleSectorialCylinder
0.0 0.0 0.035
z 0.05
deg -10.0 30.0
0.07 0.09
3.0e+07
```

図 64. 「coil.dat」の内容。

特性曲線データファイル「bh\_curve」を作成します。図 51 の *B-H* 特性曲線は SS41P の初期磁化曲線です。これを折れ線で近似します。点の数を最初に書き、横軸の値と縦軸の値をセットにして記入していきます(図 65)。

最後に解析ディレクトリと一体型解析モデルファイルを格納するサブディレクトリを作成し、各ファイルを所定の場所へ移動させます。解析ディレクトリ名は「shaft」とします。

```
% mkdir -p shaft/model_one
% mv input.adv shaft/model_one/
% mv mtrl.dat shaft/
% mv coil.dat shaft/
% mv bh_curve shaft/
```

31
0.00e+0 0.00
5.30e+2 0.70
5.70e+2 0.80
6.30e+2 0.90
7.00e+2 1.00
7.40e+2 1.05
7.90e+2 1.10
8.40e+2 1.15
9.00e+2 1.20
9.70e+2 1.25
1.05e+3 1.30
1.17e+3 1.35
1.32e+3 1.40
1.52e+3 1.45
1.78e+3 1.50
2.09e+3 1.55
2.50e+3 1.60
3.15e+3 1.65
3.80e+3 1.70
4.76e+3 1.75
6.10e+3 1.80
8.00e+3 1.85
1.03e+4 1.90
1.30e+4 1.95
1.65e+4 2.00
2.10e+4 2.05
2.60e+4 2.10
3.30e+4 2.15
4.20e+4 2.20
6.25e+4 2.25
9.90e+4 2.30

図 65. 「bh\_curve」の内容.

## (7) 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します。なお、実行時にはオプション `-difn 1` を指定してください。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す。

まず、階層型の領域分割をするために、part 数と subdomain 数を決めます。ここでは 2 台の PC を用いて分散メモリ並列モードで解析することとします。このため、part 数は 2 となります。subdomains 数は 2.2 節の式(2)で決めますので、まずは `advinfo` で一体型解析モデルファイルの要素数  $N_{element}$  を調べます。

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

「content\_type=Element」の「num\_items」が要素数で、今回は 13,431 です。subdomain あたりの要素数  $n_{element}$  を 100 とすると、

$$\frac{13,431}{2 \times 100} \cong 67.155 . \quad (7)$$

ここで得られた値そのものにしななければならないわけではありません。きりの良い値にしてかまいません。ここでは subdomain 数を 65 とします。

```
% mpirun -np 2 adventure_metis -difn 1 shaft/model_one/input.adv shaft 65
```

なお共有メモリ並列モードやハイブリッド並列モードでは subdomain 単位で処理をスレッドに割り当てるので、subdomain 数がスレッド数の倍数になっていると計算資源の無駄が少なくなります。

## (8) 解析の実行

電磁界解析モジュールで非線形静磁場解析(Magnetostatic)を行います。解析ディレクトリ名がデフォルトとは異なるため、オプション「`-data-dir`」が必要です。また非線形解析を行うために、オプション「`-nl-method`」で非線形解析手法を指定します。ここでは Newton 法を用います。

```
% mpirun -np 2 advmag2_HDDM_Electromagnetic-p Magnetostatic -data-dir shaft -nl-method
Newton
```

## (9) 可視化ファイルの作成

`advmag2_hddmrg` を用いて可視化ファイルを作成します。ここでは不定性のある(積分定数分が定まらない)未知数である「MagneticVectorPotentail」は除きます。可視化ファイルの名称は「shaft.vtu」とします。

```
% advmag2_hddmrg shaft.vtu -1 MagneticVectorPotentail -data-dir shaft
```

また非線形性を考慮した環状磁性体内の磁気抵抗率を確認するため、オプション「`-cut-part`」を用いて環状磁性体(物性番号「1」)のみ、磁気抵抗率(MagneticReluctivity)のみの可視化ファイルを作成します。上記のコマンドで作成した「shaft.vtu」を上書きしてしまわないようオプション「`-no-output`」も用います。

```
% advmag2_hddmrg shaft.vtu 1 MagneticReluctivity -data-dir shaft -cut-part 1 -no-output
```

これにより、「shaft\_MatID1.vtu」が作成されます。



## (10) 解析結果の可視化

ここでは ParaView による可視化の例を紹介します.

「shaft.vtu」を読み込んで「Apply」を押したあとの ParaView の設定を以下に記します.

- データの種類 : 「Solid Color」-> 図を確認してください.
- モデル表面 : 「Representation」-> 「Wireframe」
- カラーバーの種類 : 「Choose Preset」-> 「Blue to Red Rainbow」
- ベクトル表示 : 「Filters」-> 「Common」-> 「Glyph」
  - スケールのモード : 「Vector Scale Mode」-> 「Scale by Magnitude」
  - スケール : 「Scale Factor」-> 「0.02」

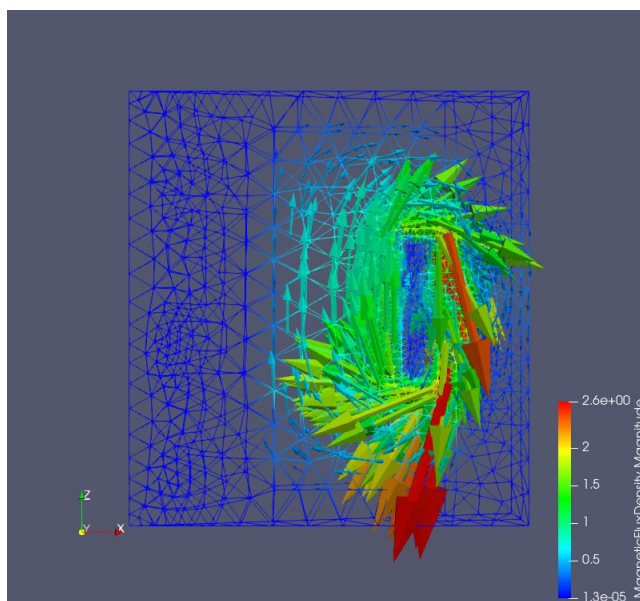


図 66. 磁束密度(MagneticFluxDensity).

次に「shaft\_MatID1.vtu」を読み込んで「Apply」を押したあとの ParaView の設定を以下に記します.

- データの種類 : 「Solid Color」-> 図を確認してください.
- モデル表面 : 「Representation」-> 「Surface」
- カラーバーの種類 : 「Choose Preset」-> 「Blue to Red Rainbow」

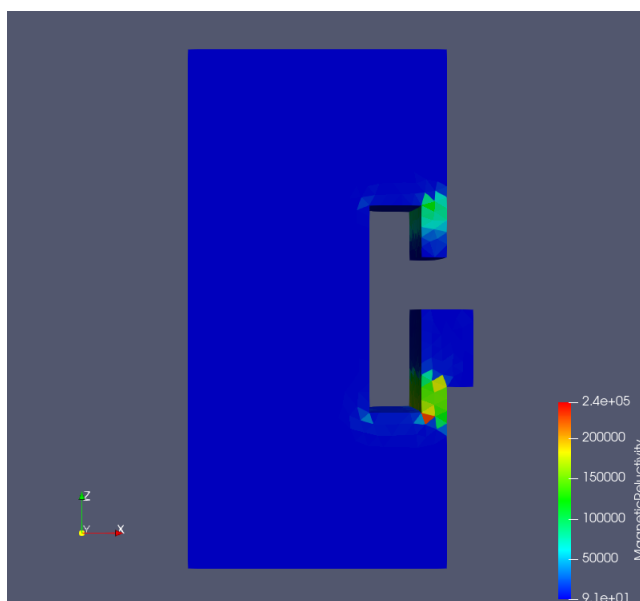


図 67. 磁気抵抗率(MagneticReluctivity).

図 66, 図 67 の作成に用いた VTU ファイル, およびこれらの図の PNG ファイルは,  
sample\_data/shaft/done/result/  
に格納されています. PNG ファイルは「File」->「Save Screenshot」から保存できます.

### C.3. 非定常渦電流解析

解析例として「C.1. 標準的なモデル作成方法：時間調和渦電流」で用いたモデルを用います。また、時間調和渦電流解析の結果のうち、実部を非定常解析の初期値として用います。

なお、このあとの一連の作業をすべて終えたファイルが、

```
sample_data/ns_eddy/done/
```

にあります。ParaViewによる可視化結果のPNGファイルも、

```
sample_data/ns_eddy/done/result/
```

にありますので参考にしてください。

#### (1) データの準備

時間調和渦電流解析または非線形静磁場解析の結果を初期値として用いる場合、HDDM型の解析モデル入力ファイルは同じものを用います。また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を非定常解析の初期値設定ファイルおよび非定常解析の初期値ファイルとして用います。そのために、これらを格納しているサブディレクトリをリネームします。

```
% mv cake/result/ cake/initial
```

次に非定常渦電流解析用の物性データファイル「mtrl\_ns.dat」と形状定義ファイル「coil\_ns.dat」を作成します。物性データファイルはデフォルトの名称とは異なりますので、電磁界解析モジュール実行時にはオプション「-mtrldat-file」が必要です。ここでは時間調和渦電流解析で用いた「mtrl.dat」と「coil.dat」をコピーして用います。

```
% cp cake/mtrl.dat mtrl_ns.dat
```

```
% cp cake/coil.dat coil_ns.dat
```

「mtrl\_ns.dat」は非定常渦電流解析では不要な角周波数(AngularFrequency)を消去するとともに、コイル(Coil)の形状定義ファイルの名称を変えます(図 68)。

```
MagneticReluctivity 4
0 7.957747e+05
1 7.957747e+05
2 7.957747e+05
3 7.957747e+05

Coil 1
2 md coil_ns.dat

ElectricalConductivity 1
0 7.7e+06
```

図 68. 「mtrl\_ns.dat」の内容。

```
DoubleSectorialCylinder
0.0 0.0 -0.05
z 0.2
deg -10.0 40.0
0.14 0.18
50.0

TimeEvolution 1.0

TimeEvolutionSinusoidal
Hz 60
deg 90.0
1.0 0.0
```

図 69. 「coil\_ns.dat」の内容。

「coil\_ns.dat」は強制電流密度の虚部の大きさを削除するとともに、時間変化定義を追加します。時間変化定義は正弦波が1つなので、「TimeEvolution」の終端時刻は0.0より大きければいくつでもかまいませんが、ここでは「1.0」を与えています。正弦波の周波数は、時間調和渦電流解析で用いた角周波数(AngularFrequency)に相当する60Hz(Hz 60)を与えます。また解析結果を初期値として用いる時間調和渦電流解析の実部での強制電流密度と一致するよう位相をずらします。実部の強制電流密度の大きさが50[A/m<sup>2</sup>]で、ここで与えている大きさも50[A/m<sup>2</sup>]ですので正弦波が0秒で1となるように設定(deg 90.0)します。90°先の正弦波(sin 180° = 0)の電

流が0となり、時間調和渦電流解析の強制電流密度の虚部の大きさとも一致します。倍率は1、定数は0(1.0 0.0)です。これらを「coil\_ns.dat」に記入していきます(図 69)。

これらのファイルは

```
sample_data/ns_eddy/
```

に収録しています。

最後にこれらのファイルを解析ディレクトリへ移動させます。

```
% mv mtrl_ns.dat cake/
% mv coil_ns.dat cake/
```

## (2) 解析の実行

電磁界解析モジュールで非定常渦電流解析(NS\_Eddy)を行います。解析ディレクトリ名と物性データファイル名がデフォルトとは異なるため、オプション「-data-dir」「-mtrldat-file」が必要です。その他に、初期値の種類を指定する「-ns-inivaluе-type」、時間刻み幅を指定する「-ns-delta-t」、解析する最後の時間ステップを指定する「-ns-end-step」も必要です。ここでは正弦波1周期分を20ステップで追うこととします。60 Hzを20分割なので、時間刻み幅 $\Delta t = 1/(60 \times 20) \cong 8.333333e - 04$  [s]となります。

```
% mpirun -np 2 advmag2_HDDM_Electromagnetic-p NS_Eddy -data-dir cake -mtrldat-file
mtrl_ns.dat -ns-inivaluе-type real -ns-delta-t 8.333333e-04 -ns-end-step 20
```

## (3) 可視化ファイルの作成

advmag2\_hddmrg を用いて可視化ファイルを作成します。ここでは不定性のある(積分定数分が定まらない)未知数である「MagneticVectorPotentail」と「ElectromagneticScalarPotential」は除きます。可視化ファイルの名称は「cake\_ns.vtu」とします。

```
% advmag2_hddmrg cake_ns.vtu -2 MagneticVectorPotentail ElectromagneticScalarPotential
-data-dir cake
```

非定常解析では、「cake\_ns\_10.vtu」のように、ファイル名に時間ステップを追加したファイルが解析した時間ステップ数分出力されます。また advmag2\_hddmrg に与えたファイル名の拡張子が.vtu の場合、それぞれの時間ステップの時刻を記した ParaView Data ファイル(.pvd)も出力されます。このファイル名は advmag2\_hddmrg に与えたファイル名の拡張子を変えた「cake\_ns.pvd」のようになります。

## (4) 解析結果の可視化

ここでは ParaView による可視化の例を紹介します。

連番になっている非定常解析の結果は ParaView でファイルを開く際に現れるウィンドウの一覧に「cake\_ns.vtu」のように表示されますので、これを指定して読み込めば連番ファイルがまとめて読み込まれます。また ParaView Data ファイル(.pvd)がある場合は、これを読み込ませれば連番ファイルをまとめて読み込ませたときと同じ状態になります。ファイルを読み込んで「Apply」を押したあとの ParaView の設定は時間調和渦電流解析のときとほぼ同様ですので、ここでは非定常解析特有のものを記します。

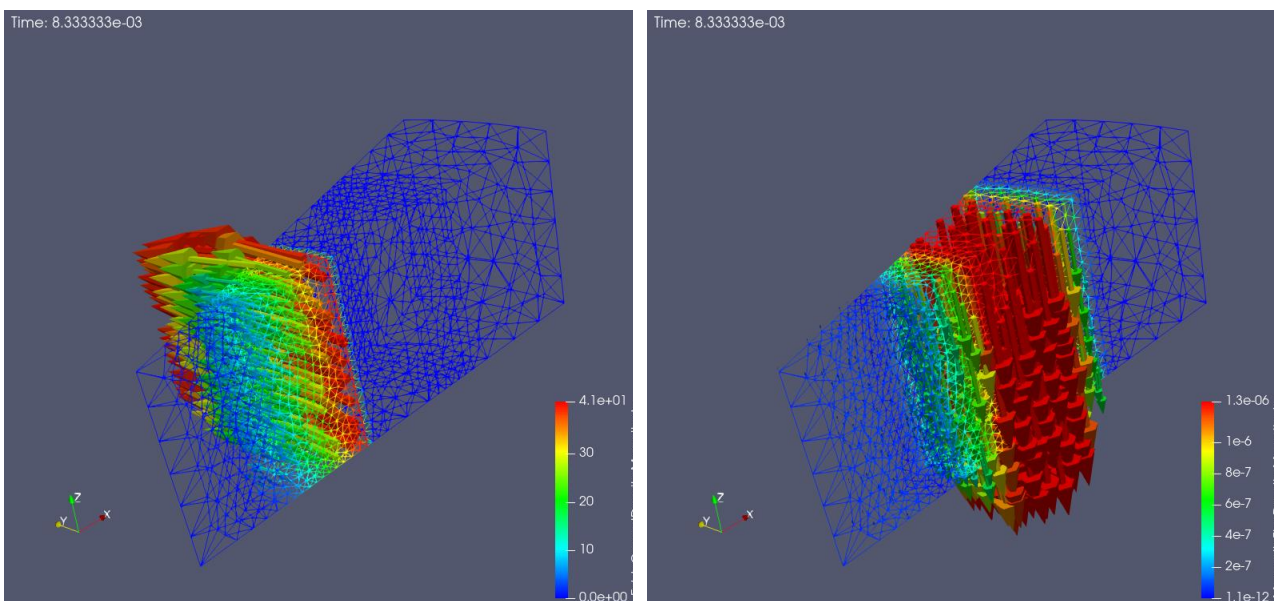
- ・ 時刻表示：ファイルの読み込ませ方に併せてフィルタを選んでください。
  - 連番ファイルまたは PVD ファイル
    - : 「Filters」->「Display」->「Annotation」->「Annotation Global Data」
    - ◇ 「Prefix」->「Time:」
    - ◇ 「Format」->「%8.6e」
  - PVD ファイル : 「Filters」->「Display」->「Annotation」->「Annotation Time Filter」
  - ◇ 「Format」->「Time: {time:e}」

設定が終わってから「Play」ボタンを押すと変化の様子が動画で観られます。

図 70 は 10 ステップ目(時刻 8.333333e-03 [s])の渦電流密度と磁束密度です。図 70 の作成に用いた VTU ファイル、およびこれらの図の PNG ファイルは、

sample\_data/ns\_eddy/done/result/

に格納されています。それぞれの時間ステップでの PNG ファイルは「File」->「Save Screenshot」から保存できます。また、動画は「File」->「Save Animation」から保存できます。「File of type」を適切に変更してから保存してください。



(a) 渦電流密度 (EddyCurrentDensity, スケール 0.002)      (b) 磁束密度 (MagneticFluxDensity, スケール 50,000)

図 70. 非定常解析 10 ステップ目(時刻 8.333333e-03 [s]).

## D. 前バージョンからの差分

ここでは前バージョンから追加された機能について概説します。

### D.1. Ver.1.9.2 からの差分

- Ver.1.9.2 の全機能を引き継いでいるわけではありません。
- これまで静磁場解析，時間調和渦電流解析，非定常渦電流解析でそれぞれ独立していたモジュールを一つに統合し，さらに高周波電磁波解析機能も追加しました。
- 並列形式はシングルモード，共有メモリ並列モード，分散メモリ並列モード(旧 静的負荷分散版)，ハイブリッド並列モードの4種類です。動的負荷分散版は実装されていません。
- 疎行列ソルバとして，新たに BiCG 法，BiCR 法，および 20 種類の積型反復法[15]が選択できるようになりました。
- 一体型解析モデルファイルの作成，領域分割をやり直さずとも，解析実行時に解析条件ファイル(.cnd)を読み込ませるだけで境界条件を変更できるようになりました。
- インターフェース間の処理も含めて，電磁界解析モジュール内で未知数から物理量を計算しています。そのため後処理がこれまでの `advmag_makeUCD`，`advmag_nodalforce` での領域分割データ統合後の物理量計算・可視化ファイル出力から，`advmag2_hddmrg` での領域分割データ統合・可視化ファイル出力へと変更になりました。
- 上記のこともあり，ツール類が刷新されました。
- 物性データファイル，形状定義ファイルにコメントを挿入できるようになりました。
- 多くの実行時オプションが変更されています。

## 参考文献

- [1] ADVENTURE Project Home Page : <https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/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  $A-\phi$  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] OpenMP: <https://www.openmp.org/>
- [7] Message Passing Interface Forum: <http://www.mpi-forum.org/>
- [8] Shin-ichiro SUGIMOTO, Amane TAKEI and Masao OGINO, Finite element analysis with tens of billions of degrees of freedom in a high-frequency electromagnetic field, *Mechanical Engineering Letters*, Vol.3, p.16-0067, 2017.
- [9] Shin-ichiro SUGIMOTO, Amane TAKEI and Masao OGINO, High-Frequency Electromagnetic Field Analysis with 130 Billion of Degrees of Freedom, *The 38th JSST Annual Conference, International Conference on Simulation Technology*, pp.290-295, 2019.
- [10] MPICH: <https://www.mpich.org/>
- [11] OpenMPI: <https://www.open-mpi.org/>
- [12] 杉本振一郎, 金山寛, 浅川修二, 吉村忍, “階層型領域分割法を用いた 4,400 万複素自由度の時間調和渦電流解析”, 日本計算工学会論文集, 20070027, 2007.
- [13] Kohji FUJIWARA and Takayoshi NAKATA, Results for benchmark problem 7 (asymmetric conductor with a hole), *COMPEL*, Vol.9, No.3, pp.137-154, 1990.
- [14] 金山寛; 計算電磁気学, 岩波講座 現代工学の基礎<空間系 IV>, 岩波書店, 2000.
- [15] 杉本振一郎, 曾我部知広, 張紹良, 荻野正雄, 武居周, 電磁界解析の複素対称行列向け積型反復法, 電気学会論文誌 D, Vol.145, No.2, pp.87-97, 2025.