

# **ADVENTURE\_Thermal**

**Steady / Non-steady Heat Conductive Analysis with HDDM**

**Version 1.0**

**プログラム使用マニュアル**

**July, 2005**

**ADVENTURE Project**

## 目次

1	はじめに.....	1
1.1	本モジュールの特徴.....	1
1.2	稼動環境.....	1
1.3	コンパイルとインストール.....	2
1.3.1	コンパイル.....	2
1.3.2	インストール.....	3
1.4	実行方法.....	3
2	並列処理機能及び線形方程式ソルバについて.....	5
2.1	並列処理機能.....	5
2.2	ソルバの特徴.....	10
2.3	領域分割(ADVENTURE_Metis)について.....	11
3	解析機能.....	13
3.1	解析の流れ.....	13
3.2	非定常解析機能.....	16
3.3	入出力データについて.....	16
3.4	単位系について.....	17
3.5	境界条件.....	17
3.6	物性値.....	18
3.7	解析結果出力.....	18
4	コンパイルとインストール.....	19
4.1	コンパイル.....	19
4.2	実行モジュールのインストール.....	21
5	実行方法.....	22
5.1	入出力ファイル名.....	22
5.2	実行時オプション.....	23
5.2.1	線形ソルバの指定.....	23
5.2.2	非定常解析の指定.....	23
5.2.3	要素に関するオプション.....	24
5.2.4	反復法のコントロールオプション.....	24
5.2.5	BDD ソルバのオプション.....	25
5.2.6	入出力ファイル名の変更オプション.....	25
5.2.7	その他のオプション.....	26
Appendix	.....	28
A	要素について.....	29
A.1	4面体1次要素.....	29

A.2	4面体2次要素	30
A.3	3角形1次要素	31
A.4	3角形2次要素	32
B	境界条件について	34
B.1	温度規定境界条件	34
B.2	熱流束規定境界条件	35
B.3	熱伝達規定境界条件	36
B.4	熱ふく射規定境界条件	36
B.5	物性値	37
C	ツール類について	38
C.1	一体型解析モデル変換フィルタ so2th	38
C.2	一体型解析モデルファイル作成ツール makefem_thermal	38
C.3	熱伝達及び熱ふく射境界条件変換ツール mkbc4th	39
C.4	温度分布可視化ツール advauto_thermalview	41
D.1	定常解析例(温度境界条件)	42
D.1.1	解析モデル	42
D.1.2	入力データの作成例	42
D.1.3	出力データ	47
D.2	定常解析例(内部発熱考慮)	49
D.2.1	解析モデル	49
D.2.2	入力データの作成	49
D.2.3	出力データ	50
D.3	定常解析例(熱流速)	51
D.3.1	解析モデル	51
D.3.2	入力データの作成	51
D.3.3	出力データ	52
D.4	定常解析例(対流熱伝達)	54
D.4.2	入力データの作成	55
D.4.3	出力データ	57
D.5	その他の解析例	58
	参考文献	59

# 1 はじめに

本書はADVENTURE Project[1]において開発中の、固体中熱伝導解析のための有限要素解析ソルバ, ADVENTURE\_Thermalの使用マニュアルである.

1章ではADVENTURE\_Thermalの概要及び実行までの操作手順を説明し, 2章以降では本プログラムの解析機能等を紹介する.

## 1.1 本モジュールの特徴

ADVENTURE\_Thermalは以下のような特徴を持っている.

- 定常/非定常問題の解析が可能
- 4面体1次/2次要素に対応
- 階層型領域分割法(HDDM)[2,3,4]による負荷分散を行った並列処理が可能
- 線形ソルバにバランシング領域分割法(BDD)[8,9]が使用可能
- 領域分割法を逐次処理するシングル版が使用可能

## 1.2 稼動環境

本プログラムは以下の環境で動作確認を行っている.

対応プラットフォーム	UNIX, Linux
並列通信ライブラリ	MPI

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

- MPICHの入手先

<http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/mpich/>

- LAMの入手先

<http://www.lam-mpi.org/>

## 1.3 コンパイルとインストール

### 1.3.1 コンパイル

ADVENTURE\_Thermalモジュール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, 及びADVENTURE\_IOがインストールされている必要がある.

ADVENTURE\_Thermalモジュールをコンパイルするには, 以下の手順に従えばよい.

- (1) アーカイブファイルを展開する.

```
% gunzi p -c AdvThermal -1.0. tar.gz | tar xvf -
```

ただし, “%” はコマンドプロンプトを表しているため, 実際には入力する必要はない. アーカイブの展開により, AdvThermal -1.0 ディレクトリが作成される. また, AdvThermal -1.0 は次のサブディレクトリを含んでいる.

サブディレクトリ名	内容
hddmsrc	ADVENTURE_Thermalのソースファイル
doc	ドキュメント類
tools	境界条件設定ツール
libfem	有限要素ライブラリ
sample_data	熱伝導問題サンプルデータ

- (2) 展開したディレクトリに移動し, コンパイルを行なう.

```
% cd AdvThermal -1.0  
% ./configure  
% make
```

configure は, 環境に依存する部分を解決し, 適切な Makefile を作成するためのシェルスクリプトである. configure に渡せる主なオプションを以下に示す. ただし, 以下で用いるディレクトリの指定には, 絶対パスを指定する必要がある. その他のオプションについては4.1節を参照のこと.

- `--prefix=install_dir`  
インストール先のトップディレクトリを `install_dir` にする. 実行モジュールは, `install_dir/bin`にインストールされる. デフォルトは `$HOME/ADVENTURE` である.

- `--with-advio=directory`  
ADVENTURE\_IOがprefixの指定(あるいはデフォルトの)場所と異なる場所にインストールされている場合に、そのインストール先ディレクトリを指定する。

## 1.3.2 インストール

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が行なわれる。

```
% make install
```

ただし、インストール先ディレクトリへの書き込み権限を持ったユーザによって行なう必要がある。また、インストールするディレクトリを `configure` 時から変更するには、以下のように指定すればよい。

```
% make install prefix=install_dir
```

ただし、`install_dir` はインストールするディレクトリの絶対パスを指定する必要がある。これらの操作により、以下のファイルが `install_dir` の下にインストールされる。

- |                                                |                  |
|------------------------------------------------|------------------|
| • <code>bin/advthermal -s</code>               | シングル版実行モジュール     |
| • <code>bin/advthermal -p</code>               | 静的負荷分散版実行モジュール   |
| • <code>bin/advthermal -h</code>               | 動的負荷分散版実行モジュール   |
| • <code>bin/mkbc4th</code>                     | 境界条件設定ツール        |
| • <code>bin/makefem_thermal</code>             | 一体型 FEA モデル作成ツール |
| • <code>bin/so2th</code>                       | 解析データ変換ツール       |
| • <code>doc/AdvThermal/manual -j p. pdf</code> | 日本語ユーザーマニュアル     |
| • <code>doc/AdvThermal/manual -eg. pdf</code>  | 英語ユーザーマニュアル      |
| • <code>doc/AdvThermal/README. ecuJP</code>    | 日本語の簡易情報         |
| • <code>doc/AdvThermal/README</code>           | 英語の簡易情報          |
| • <code>doc/AdvThermal/copyright</code>        | 著作権規定            |

## 1.4 実行方法

ADVENTURE\_Thermal には、シングル版の `advthermal -s`、並列版として静的負荷分散型の `advthermal -p` と、動的負荷分散型の `advthermal -h` の計3つの実行モジュールがある。解析を行う際には、計算機環境に応じてこれらを使い分けることになる。それぞれのモジュールの詳細については2.1節を参照のこと。

また、並列処理にはMPIを用いているが、ここではMPICHにおける実行方法を例とし

で紹介する。MPIには種々の実装があり、コンパイルや実行方法は実装系に依存しているため、それぞれの実装系におけるマニュアルを参照し、適宜該当部分を置き換えることで実行が可能である。

- ・シングル版の場合

```
% advthermal -s [options] data_dir
```

- ・並列版(静的負荷分散型)の場合

```
% mpi run [options for mpirun] advthermal -p [options] data_dir
```

- ・並列版(動的負荷分散型)の場合

```
% mpi run [options for mpirun] advthermal -h [options] data_dir
```

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

- -np *n*  
起動するMPIプロセスの数 *n* を指定する。
- -machinesfile *machine\_file*  
並列計算に使用するマシン名のリストファイルを指定する。指定しない場合は、システムで設定されているデフォルトファイルが使用される。

また、[options] はADVENTURE\_Thermalに対するオプションであり、基本的に3つの実行モジュール全てに対して共通である。このオプション指定により、解析種類の指定や種々の設定を行う。オプションに関する詳細は5章において述べる。

以下に、サンプルデータを静的負荷分散版で解析する場合の例を示す。

```
% mpi run -np 2 advthermal -p ./sample_data/conv
```

このサンプルデータでは、ADVENTURE\_Metisにより部分(Part)数を2で分割しているため、静的負荷分散版では起動するMPIプロセス数を部分数と同じ2に指定している。

## 2 並列処理機能及び線形方程式ソルバについて

### 2.1 並列処理機能

ADVENTURE\_Thermalでは、階層型領域分割法[2, 3,4]を用いることで並列処理を実現している。図1に領域の階層型分割を模式的に示す。一階層目の大きな分割単位を“部分”(Part)と呼び、二階層目の細かい分割単位を“部分領域”(Subdomain)と呼ぶことにする。これらの領域分割はADVENTURE\_Metisによって行うことができる。

ADVENTURE\_Thermalは並列ライブラリとしてMPI[6]を用いており、起動時には指定に応じて複数のプロセス(環境によってはスレッド)が起動される。1ノード(CPU)あたり1プロセスを起動するのが一般的であるため、以下では分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用いている。ただし、1ノードに対して複数のプロセスを割り当てることももちろん可能である。

また、並列処理の方法によって3つの実行バイナリが用意されている。使用可能な並列処理は以下のようになっている。

#### (1) シングル版(モジュール名: advthermal -s)

並列計算は行わずに、全ての計算をひとつのプロセスとして実行する。MPIなしでコンパイル・実行が可能である。部分数、領域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る(図2)。基本的に、次の静的負荷分散版において各部分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る。

**使用可能な線形方程式ソルバは HDDM のみである。**

#### (2) 静的負荷分散版(モジュール名: advthermal -p)

図3に示すように、1つの部分を1つのプロセスに静的に割り当てることで並列に計算を行う。次の親子型の動的負荷分散において子に割り振っている仕事を、親が自分で順に行うのと同じである。領域分割における部分数と実行プロセス数が同じであるため、ADVENTURE\_Metisにおける部分分割数を静的負荷分散で使用するプロセス数に揃える必要がある。

動的負荷分散版と比べて通信量が少ないため、各ノードの性能が均質な並列計算環境においては、この静的負荷分散版が有効である。

**使用可能な線形方程式ソルバは HDDM, BDD, BDD-DIAG, IBDD, IBDD-DIAG である。**

(3) 動的負荷分散版(モジュール名: advthermal -h)

図4に示すように、各プロセスを各領域の計算を行う“子”と部分単位で取りまとめを行う“親”とに分け、“子”への領域の割り当てを動的に行うことで動的な負荷分散を図る並列方式である。各親には1つの部分が静的に割り当てられるため、全プロセスのうち部分数個が親となり、残りのプロセスが子となる。そのため、ADVENTURE\_Metisにおける部分分割数を動的負荷分散で使用するプロセス数より少ない数にしておく必要がある。“子”が多くなった場合でも、“親”を複数用いることで通信の分散を実現している。

非均質な並列環境や、マシン環境自体は均質でも他にCPUを食うプロセスが走っていて実質的には非均質となるような場合では、この動的負荷分散版が有効である。

**使用可能な線形方程式ソルバは HDDM, BDD, BDD-DIAG である。**

静的負荷分散版と比べると、動的負荷分散の場合“親”と“子”の間で部分領域データの送受信が多く行われるため、多くの並列計算機環境では静的負荷分散版の方が良い性能を示す。

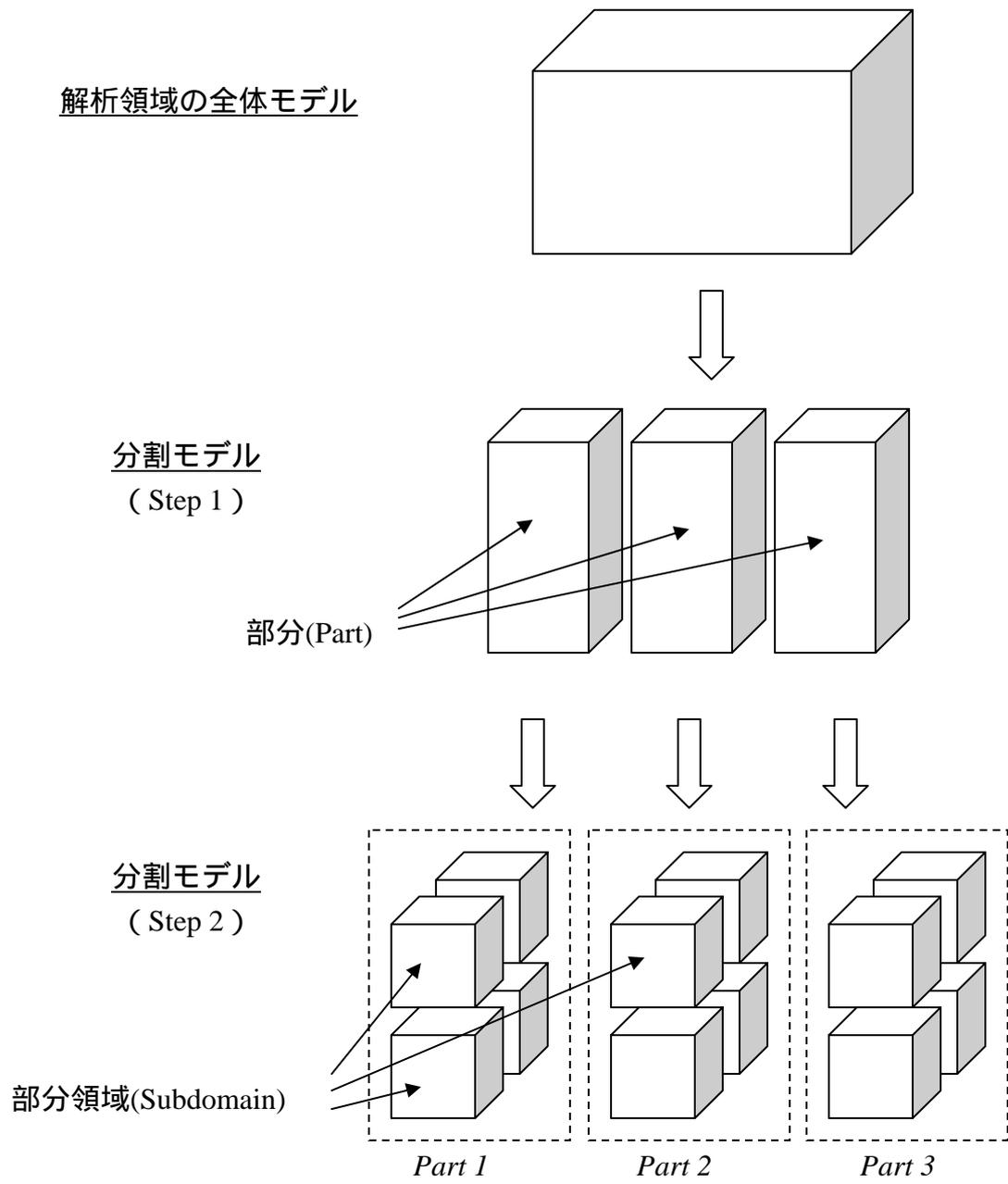


図 1 : 階層型領域分割

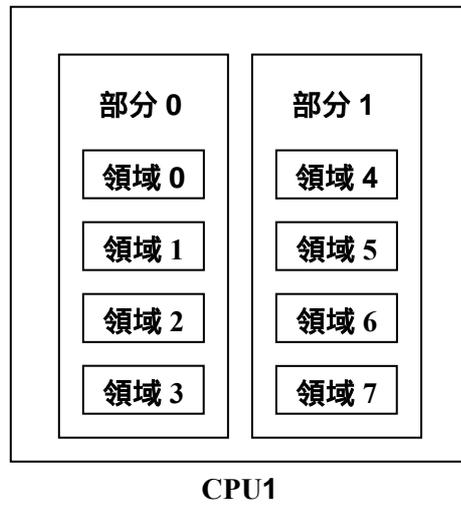


図 2：領域の CPU への割り当て シングル版

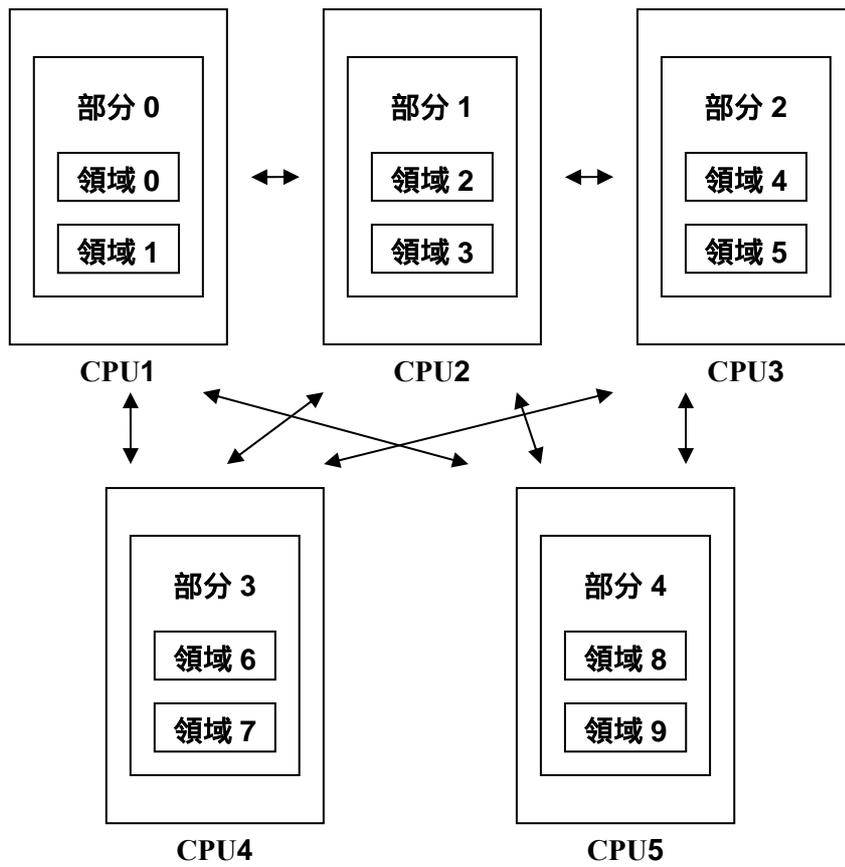


図 3：領域の CPU への割り当て 静的負荷分散版

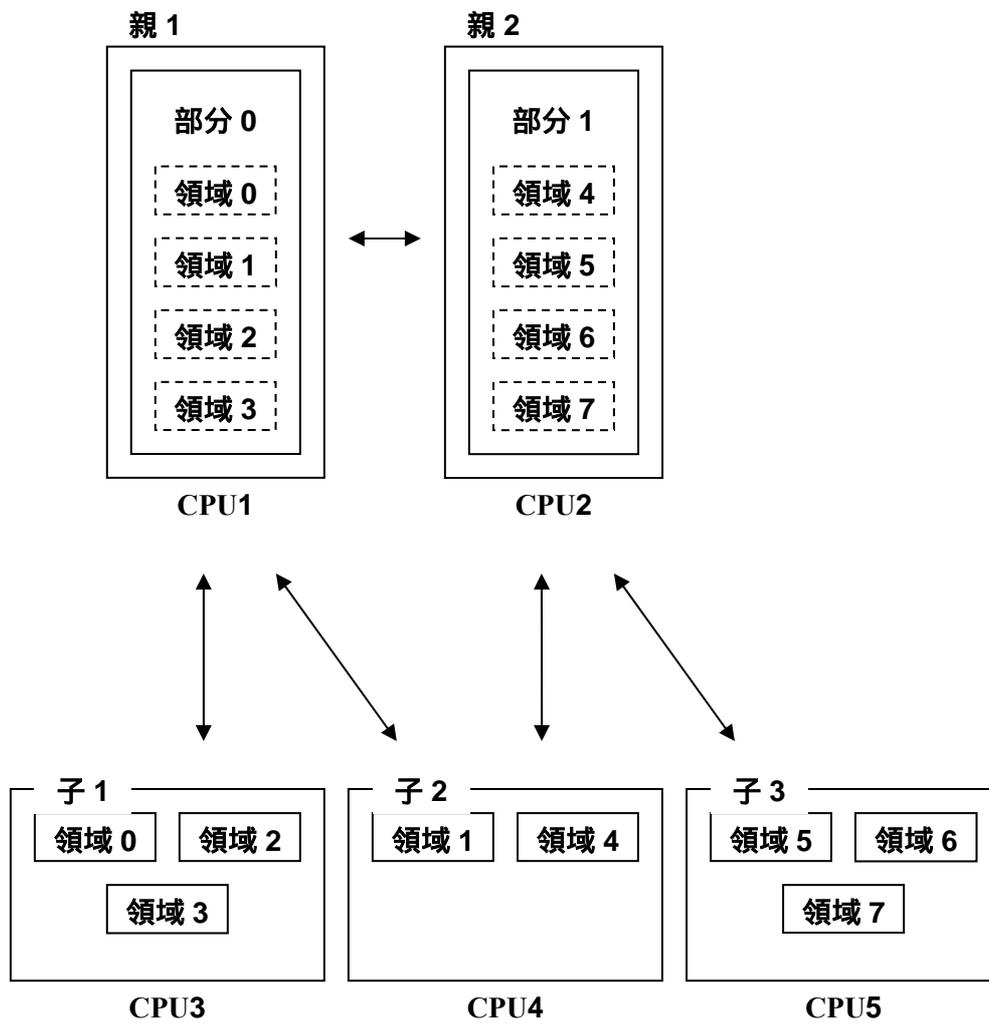


図 4：領域の CPU への割り当て 動的負荷分散版

## 2.2 ソルバの特徴

ADVENTURE\_Thermal は、部分領域間の境界温度を共役勾配(CG)法反復処理によって求め、その後部分領域内部の温度を求める、いわゆる反復型領域分割法[3]による有限要素解析ソルバである。また、階層型領域分割法(HDDM)[4]に基づく並列化を行っている。定常問題及び非定常問題における各時間ステップにおける線形方程式ソルバとして、以下の5つのソルバが実装されており、それらはCG法における前処理によって分類されている。

- **HDDMソルバ**

HDDMソルバは、CG法の前処理として対角スケーリング前処理を使用している。他のソルバと比べて最もメモリ使用量が少ないという特徴がある。熱伝導問題においては対角スケーリング前処理でも十分な収束性が得られることも多いため、1万自由度程度までの問題や温度規定境界条件数が多い問題であれば、HDDMソルバの使用を薦める。 実行時にソルバオプションを指定しない場合は、HDDMソルバが用いられる。

**使用可能モジュール:** advthermal -s, advthermal -p, advthermal -h

- **BDDソルバ**

BDDソルバは、非常に強力な前処理法であるBDD法[8]を使用している。BDD法はNeumann-Neumann前処理の改良であり、各CG反復において解析領域よりも少ない自由度をもつ“コース問題”を解いている。熱伝導解析において、コース問題は各部分領域につき1自由度によって構築されており、コース問題における係数行列であるコースマトリックスは部分領域数と同じ次元数を持つ。なお、コース問題は並列直接法ソルバによって解いている。

BDDソルバは、HDDMソルバに比べて反復回数を大きく減少させることができ、計算時間の高速化が期待できる。ここで、初期CG反復時に前処理行列を形成するが、前処理の計算コストは対角スケーリングに比べて大きくなるため、その時間は全体の計算時間のおおよそ15-25%程度となる。ただし、反復回数の減少が大きいため、解析時間全体では高速化が期待できる。また、使用メモリ量はHDDMソルバよりも大きくなる。十分なメモリを確保できる計算機環境のユーザーはBDDソルバの使用を薦める。

BDDソルバでは、前処理の中でNeumann問題を解く必要があるが、本実装では非負のパラメータで正則化する手法を採用している。

**使用可能モジュール:** advthermal -p, advthermal -h

- **BDD-DIAGソルバ**

BDD-DIAGソルバは, BDD法におけるNeumann-Neumann前処理を対角スケーリングに置き換えた修正BDD法[10]を使用している. BDDソルバに比べ, 反復回数が増加するかもしれないが, 少ないメモリ使用量で実行することができる. BDDソルバを使用するのに十分なメモリを確保できない場合はBDD-DIAGソルバの使用を薦める. これまでの経験上, BDD-DIAGソルバはBDDソルバに比べ, 約70%のメモリ量しか必要としないことが分かっている.

**使用可能モジュール:** advthermal -p, advthermal -h

- **IBDDソルバ**

IBDDソルバは, BDD法に不完全コース問題を採用した改良BDD法[10]を使用している. 大規模自由度問題を解く場合において, BDDソルバに比べて計算時間の高速化と並列効率の改善が期待できる. ただし, 一般的に反復回数はBDDソルバよりも増加する. これまでの経験上, IBDD-DIAGソルバの方が計算時間は高速であることが多いため, 大規模自由度問題においてIBDD-DIAGソルバで収束が得られない場合に使用することを薦める. また, 解析手法の性質上, 同じ問題であっても使用するプロセッサ数によって反復回数が増加することがあるが, 解析結果には影響しないことが得られている.

**使用可能モジュール:** advthermal -p

- **IBDD-DIAGソルバ**

IBDD-DIAGソルバは, BDD-DIAGソルバに不完全コース問題を採用した改良BDD法[10]を使用している. 大規模自由度問題を解く場合において, BDD-DIAGソルバに比べて計算時間の高速化と並列効率の改善が期待できる. ただし, 一般的に反復回数はBDD-DIAGソルバよりも増加する. これまでの経験上, BDD, BDD-DIAG, IBDDと比べて最もメモリ使用量が少なく, IBDDソルバよりも少ない反復回数となることが多い. メモリ容量が少ない環境や数百万自由度規模以上の問題においてはIBDD-DIAGソルバの使用を薦める. また, 解析手法の性質上, 同じ問題であっても使用するプロセッサ数によって反復回数が増加することがあるが, 解析結果には影響しないことが得られている.

**使用可能モジュール:** advthermal -p

## 2.3 領域分割(ADVENTURE\_Metis)について

ADVENTURE\_Metisでは, 非常に細かい分割を行った場合, 要素を一つも含まないような領域が作られてしまうことがある. ADVENTURE\_Thermalでは実行時にそのような

領域が見つかり、警告を出して終了するようになっている。また、総要素数に対して非常に粗い分割を行った場合、計算量が多くなったり、メモリ不足になったりすることがあり、このときも警告を出して終了するようになっている。

ADVENTURE\_Thermalの計算性能は、領域分割数に依存している。基本的に、“Part”数は並列処理の手法、使用するノード数や計算機環境に基づいて決定される。“Domain”数は、計算処理に必要なメモリに基づいて決定される。細かく分割すればメモリの使用量を少なくできることは自明のことである。静的負荷分散版の場合、1領域あたりの要素数が180-370のときBDDソルバまたはBDD-DIAGソルバを使用することで最良の性能を得ることができる。一方、動的負荷分散の場合その数は350-450である。この値はこれまでの経験値であるため、必ずしも全てのモデルにおいてこの範囲が最適な領域分割になるとは限らない。

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

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

$N_{element}$  : 総要素数

$N_{subdomain}$  : 領域分割数

$N_{part}$  : 部分数

ただし、部分数は静的負荷分散版においては使用するノード数、動的負荷分散版においては使用するプロセッサ数より少ない数(親プロセス数)となる。

## 3 解析機能

ADVENTURE\_Thermalは、

- 定常熱伝導解析
- 非定常熱伝導解析

の解析が可能である。これらの解析における機能を以下に示す。

### 3.1 解析の流れ

ADVENTUREシステムを用いた一連の解析の流れは図5のようになっている。

#### (1) メッシュデータの作成 (ADVENTURE\_TetMesh)

ADVENTURE\_TetMeshモジュールを用いて、解析モデルのメッシュ分割を行う。

#### (2) 境界条件の付加 (ADVENTURE\_BCtool)

ADVENTURE\_BCtoolの msh2pch を用いてメッシュ表面情報の抽出を行い、bcGUIを用いて境界条件設定を行う。GUIによる条件設定の詳細はADVENTURE\_BCtoolのマニュアル及びAppendix C.2を参照すること。

#### (3) 一体型解析モデルの作成 (makefem\_thermal)

ADVENTURE\_Thermalに含まれる makefem\_thermal を用いて、メッシュ、物性値、境界条件からADVENTURE\_IOフォーマットの一体型解析モデルを作成する。ただし、熱伝達境界条件や熱ふく射境界条件を設定したい場合には、ADVENTURE\_Thermalに含まれる mkbc4th もまた用いる必要がある。詳細はAppendixにおいて実際のコマンドを示しながら述べる。

#### 一体型解析モデル作成に関する注意事項

従来のバージョン(Ver.0.5b以前)では、ADVENTURE\_BCtoolの makefem によって作成した固体解析用データをADVENTURE\_Thermalの so2th によって熱解析用に変換する方法を取っていたが、Ver.1.0からは makefem の代わりに makefem\_thermal を用いており、so2th は用いない方法に変更を行った。また、so2th はバグを含んでいるため、以前作成したデータも新しい方法で作成しなしていただくことを薦める。

#### (4) 領域分割 (ADVENTURE\_Metis)

ADVENTURE\_Metisモジュールを用いて、一体型の解析モデルより階層型に領域分割されたモデルを作成する。なお、実行時にはオプション -di fn 1 を用いる必要がある。

例えば、以下のように実行する。

```
% mpi run [options for mpirun] adventure_metis -di fn 1 [options]
           model_filename directory_name div_num
```

上記は表記上2行に分かれているが、実際には1行のコマンドとして入力する。

オプション `-di fn 1` は、内部境界上節点の自由度を1に指定するためのものである。これは、固体静解析で求める節点変位の自由度は3であるのに対し、熱伝導解析で求める節点温度の自由度が1であるためである。ADVENTURE\_Thermalへの入力モデル作成において、`-di fn 1` は必須オプションである。

#### (5) 熱伝導解析 (ADVENTURE\_Thermal)

ADVENTURE\_Thermal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、有限要素解析を行う。

#### (6) 結果の可視化 (ADVENTURE\_Visual or ADVENTURE\_Auto)

ADVENTURE\_Visualモジュールを用いて、解析結果を可視化する。または、ADVENTURE\_Autoに含まれる `advauto_thermal view` によっても温度のスカラー分布を可視化することができる。詳細はAppendix C.4にて述べる。

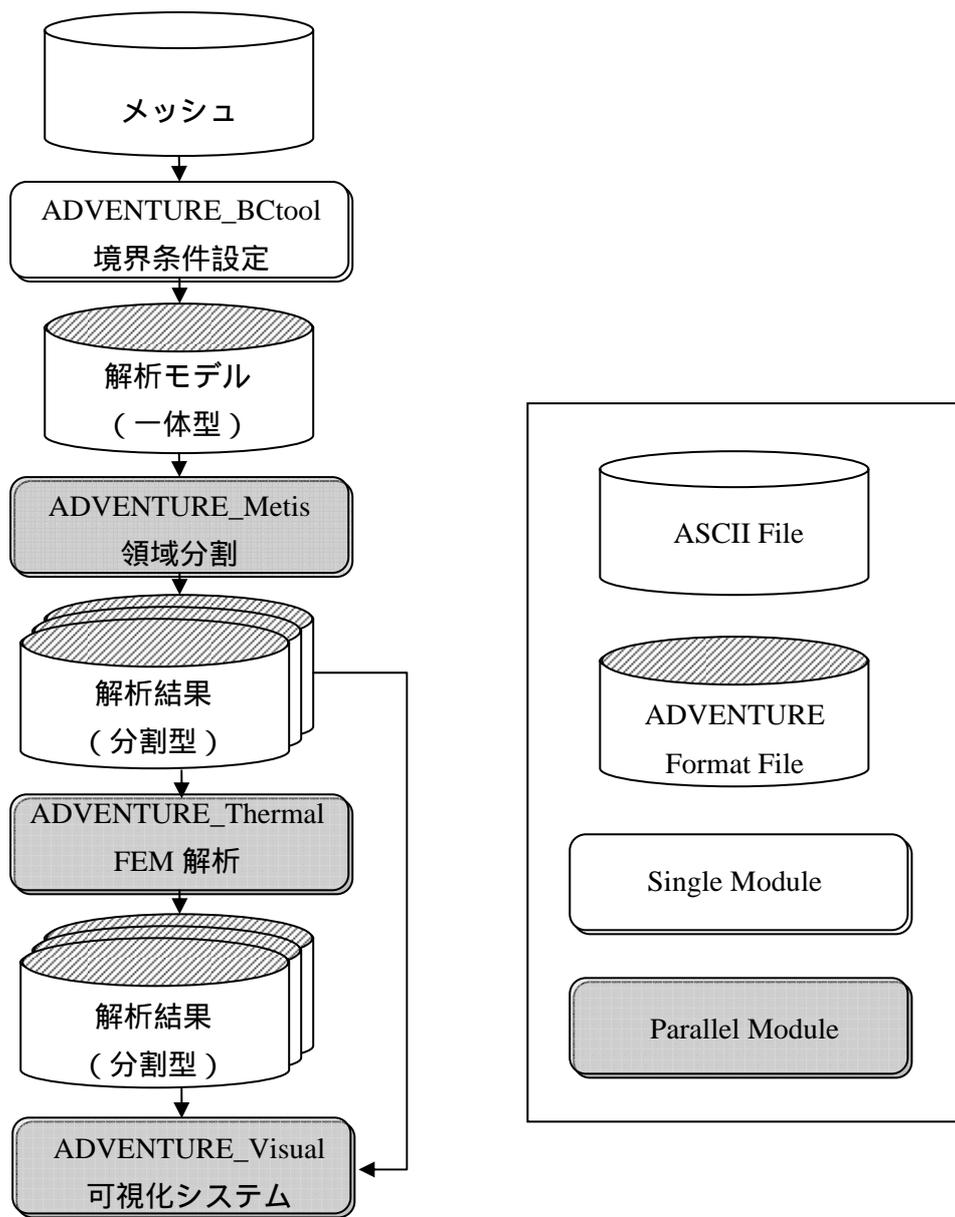


図 5：解析の流れ

## 3.2 非定常解析機能

非定常解析においては、後退差分近似またはクランク・ニコルソン法の2種類による解析が可能である。大まかな処理の流れは図6のようになっている。全体として2重ループ構造になっており、外側のループは時間積分による反復を、内側のループでは階層型領域分割法におけるCG法の反復を行っている[5]。

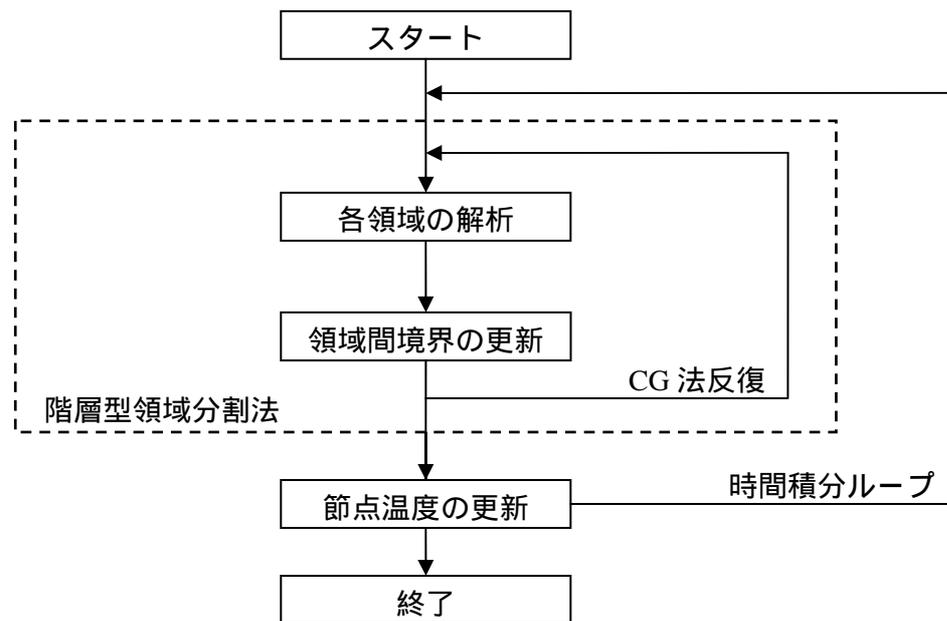


図6：非定常解析の流れ

## 3.3 入出力データについて

ADVENTURE\_Thermalにおける入出力ファイルは図7のようになっている。画面に出力される解析ログ以外は全てADVENTUREフォーマットファイルであり、部分(Part)ごとに1ファイルとなっている。

入力ファイルとなるのは階層型に領域分割された解析モデルファイルである。これは解析に先だってドメインデコンポーザADVENTURE\_Metisによって作成する。

出力ファイルも階層型に領域分割された形式で作成される。節点ごとに温度(摂氏)と熱流速が出力される。非定常解析時には時間積分ステップ毎の出力も可能であり、同じく階層型に領域分割された形式での出力となる。

連続して実行できる時間が限られている環境などでも解析可能なように、途中までの

計算結果を一旦ファイルにセーブし、その時点から計算を再開するためのリスタート機能がある。使用できるリスタートファイルには、(1)CGリスタートファイル、(2)時間積分リスタートファイルの2種類がある。定常解析時にはCGリスタートファイル、非定常解析時には時間積分リスタートファイルを用いることができる。

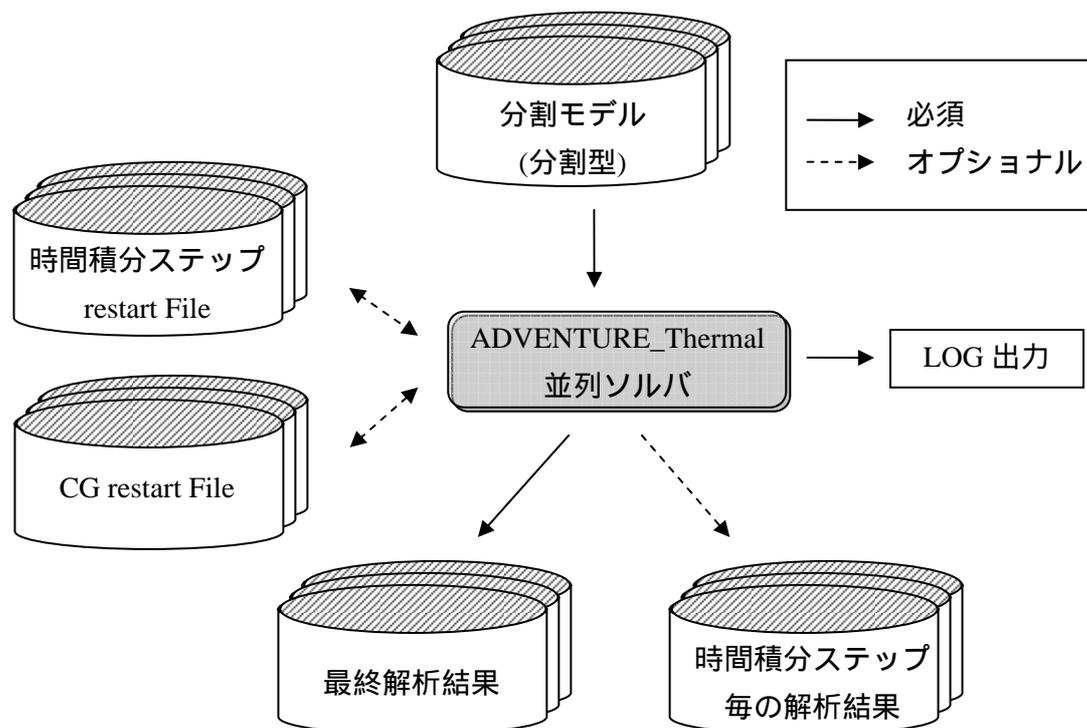


図7：入出力ファイル

### 3.4 単位系について

ADVENTURE\_Thermalでは、入出力データの温度表現に摂氏を採用している。よって、入力ファイル作成時には摂氏を前提とした単位系を用意する必要がある。その他の単位系の指定機能は含まれておらず、入力データ作成時に矛盾のない単位系を使用しておく必要がある。なお、プログラム内部では、入力された摂氏データを華氏に変換した後、後に解析を行い、出力時に摂氏に再変換している。

### 3.5 境界条件

付加できる境界条件には以下のものがある。

- 温度規定境界条件 (節点指定)
- 熱流束規定境界条件 (節点指定)
- 熱伝達規定境界条件 (面指定)

- 熱ふく射規定境界条件 (面指定, 非定常解析時のみ)

熱ふく射規定境界条件については非定常解析時にのみ限り解析可能となっている。

ADVENTURE\_Thermalでは温度表現を摂氏(プログラム内部で華氏に変換)と前提しているのみであるため, その他の単位はメッシュ, 境界条件, 物性値などにおいて矛盾の無いように決定していればよい。

## 3.6 物性値

等方的な材料物性に対し, 以下の物性値が使用できる。

- 熱伝導率
- 比熱(非定常解析時に必要)
- 密度(非定常解析時に必要)
- ステファン・ボルツマン係数(熱ふく射境界指定時に必要)
- 発熱量

ADVENTURE\_Thermalでは温度表現を摂氏(プログラム内部で華氏に変換)と前提しているのみであるため, その他の単位はメッシュ, 境界条件, 物性値などにおいて矛盾の無いように決定していればよい。

## 3.7 解析結果出力

解析結果としては階層型に領域分割された形式で与えられ, 各節点での温度(摂氏)と熱流速が出力される。入力解析モデルと同様に, 部分ごとに1ファイルのADVENTURE\_IOフォーマットで出力される。

## 4 コンパイルとインストール

### 4.1 コンパイル

ADVENTURE\_Thermalモジュールをコンパイルするには、CコンパイラとMPIのコンパイル環境、ADVENTURE\_IOがインストールされている必要がある。

ADVENTURE\_Thermalのモジュールをコンパイルするには、以下の手順に従えばよい。

```
% ./configure
% make
```

ただし、どちらのコマンドもADVENTURE\_Thermalモジュールのトップディレクトリで実行する必要がある。

configure は、環境に依存する部分を解決し、適切な Makefile を作成するためのシェルスクリプトである。configure に渡せる主なオプションを以下に示す。ただし、ディレクトリの指定には、絶対パスを指定する必要がある。

- `--prefix=install_dir`  
インストール先のトップディレクトリを `install_dir` にする。実行モジュールは、`install_dir/bin` にインストールされる。デフォルトは `$HOME/ADVENTURE` である。
- `--with-advio=directory`  
ADVENTURE\_IOがprefixの指定(あるいはデフォルトの) 場所と異なる場所にインストールされている場合に、そのインストール先ディレクトリを指定する。デフォルトは `$HOME/ADVENTURE` である。
- `--with-mpicc=command`  
MPIのCコンパイラ名を指定する。デフォルトは `mpicc` である。MPIのCコンパイラが見つからない場合は、ADVENTURE\_Thermalの並列版はコンパイルされない。
- `--with-mpi-cflags=CFLAGS`  
MPIプログラムをコンパイルするためのCコンパイルオプションを指定する。例えば、MPIインクルードファイルを指定する必要がある場合には、`--with-mpi-cflags="-I/usr/local/include/mpi"` などとなる。MPIプログラムのコンパイル時には、ここで指定したものに加えてシングル版用に設定されているものの両方が用いられる。

- `--with-mpi -libs=LIBS`

ライブラリをリンクする場合に必要なオプションを指定する。例えば、MPIライブラリを明示する必要がある場合には、

`--with-mpi -libs="-L/usr/local/lib/mpi -lmpi"` などとなる。MPIプログラムのリンク時には、ここで指定したものに加えてシングル版用に必要なものの両方が用いられる。

- `--enable-optimize`

コンパイル時に最適化を行う。これにより設定されるオプション以外の最適化オプションをつけてコンパイルしたい場合は、下の書式を使用する。

`--enable-optimize=CFLAGS`

`CFLAGS`を最適化用のオプションとして、コンパイル時に最適化を行う。

`configure` を使用することで多くの環境ではコンパイル可能と思われるが、うまくいかない場合には `Makefile` のサンプルが各ディレクトリに用意されてあるので、それを用いてコンパイルする。`Makefile.sample` が存在する各ディレクトリにおいて、`Makefile.sample` を `Makefile` にコピーする。加えて、`ADVENTURE_Thermal` モジュールのトップディレクトリにおいて、`Makefile.in.sample` を `Makefile.in` にコピーする。計算機環境に応じて、以下に示す `Makefile.in` 中のマクロはで変更する必要がある。

<code>ADVSYS_DIR</code>	ADVENTUREシステムのトップディレクトリ
<code>ADVIO_CONFIG</code>	ADVENTURE_IOスクリプト <code>advsys-config</code> の絶対パス
<code>MPI_CC</code>	MPIのCコンパイラ
<code>MPI_LINKER</code>	MPIのCリンカ
<code>CC</code>	Cコンパイラ
<code>LINKER</code>	Cリンカ
<code>CFLAGS</code>	最適化オプション

`Makefile.in` を変更した後に、トップディレクトリで `make` を実行する。

```
% make
```

なお、各ディレクトリにおいて手動で `make` を実行する場合は、`hddmsrc` ディレクトリをコンパイルする前に `libfem` をコンパイルしておく必要がある。

## 4.2 実行モジュールのインストール

コンパイルに成功したら、以下によりモジュールのインストールが行われる。

```
% make install
```

インストール先は `configure` で指定した場所である。インストールディレクトリを `configure` 時と変更したい場合は、以下のコマンドを実行すればよい。

```
% make install prefix=install_dir
```

ただし、*install\_dir* にはインストールするディレクトリの絶対パスを指定する必要がある。

以上の作業により、以下のファイルがインストールされる

- |                                                |                  |
|------------------------------------------------|------------------|
| ◆ <code>bin/advthermal -s</code>               | シングル版実行モジュール     |
| ◆ <code>bin/advthermal -p</code>               | 静的負荷分散版実行モジュール   |
| ◆ <code>bin/advthermal -h</code>               | 動的負荷分散版実行モジュール   |
| ◆ <code>bin/so2th</code>                       | 境界条件設定ツール        |
| ◆ <code>bin/mkbc4th</code>                     | 一体型 FEA モデル作成ツール |
| ◆ <code>bin/makefem_thermal</code>             | 解析データ変換ツール       |
| ◆ <code>doc/AdvThermal/manual -j p. pdf</code> | 日本語ユーザーマニュアル     |
| ◆ <code>doc/AdvThermal/manual . pdf</code>     | 英語ユーザーマニュアル      |
| ◆ <code>doc/AdvThermal/README. ecuJP</code>    | 日本語の簡易情報         |
| ◆ <code>doc/AdvThermal/README</code>           | 英語の簡易情報          |
| ◆ <code>doc/AdvThermal/copyright</code>        | 著作権規定            |

## 5 実行方法

ADVENTURE\_Thermalは並列処理方法によって3つのモジュールがある。それぞれ次のコマンドで実行を行う。

- シングル版の場合

```
% advthermal -s [options] data_dir
```

- 静的負荷分散による並列版の場合(MPICH)

```
% mpi run [options for mpirun] advthermal -p [options] data_dir
```

- 動的負荷分散による並列版の場合(MPICH)

```
% mpi run [options for mpirun] advthermal -h [options] data_dir
```

ここで, [*options for mpirun*] は mpi run コマンドに対するオプションであり, [*options*] はADVENTURE\_Thermalに対するオプションである。このオプション指定により, 解析種類の指定や種々の設定を行う。(詳しくは5.2参照)

*data\_dir* は必須オプションであり, 入出力データファイルのトップディレクトリを指定する。この下のディレクトリおよびファイル名は5.1節に示すようになる。

### 5.1 入出力ファイル名

各入出力ファイル名はデフォルトでは以下のようにになっている。*data\_dir* は入出力ファイルのトップディレクトリ名であり, 3.1節で示したADVENTURE\_Metisモジュールで領域分割を行った際に指定した *directory\_name* である。なお, これらのディレクトリ名やファイル名は実行時オプションで変更することも可能(5.2.6)である。

- HDDM型の解析モデル入力ファイル:

```
data_dir/model /advhddm_i n_P. adv
```

- 解析結果出力ファイル(定常解析時):

```
data_dir/result/advhddm_out_P. adv
```

- 解析結果出力ファイル(非定常解析時):

```
data_dir/result/advhddm_out_S_P. adv
```

- CG リスタート入出力ファイル:

```
data_dir/cg-res/advhddm_i n_P. adv
```

- 時間積分リスタート入出力ファイル:

`data_dir/result/advhddm_out_ $S$ _ $P$ .adv`

ここで,  $P$  は部分番号,  $S$  は時間積分ステップ番号を示している.

## 5.2 実行時オプション

実行時に可能なオプションは以下の通りである.

### 5.2.1 線形ソルバの指定

- `-solver hddm`  
線形ソルバにHDDMを指定する. `advthermal -s`, `advthermal -p`, `advthermal -h` において指定可能である.
- `-solver bdd`  
線形ソルバにBDDを指定する. `advthermal -p`, `advthermal -h` において指定可能である.
- `-solver bdd-diag`  
線形ソルバにBDD-DIAGを指定する. `advthermal -p`, `advthermal -h` において指定可能である.
- `-solver bdd -i LU`  
線形ソルバにIBDDを指定する. `advthermal -p` において指定可能である.
- `-solver bdd-diag -i LU`  
線形ソルバにIBDD-DIAGを指定する. `advthermal -p` において指定可能である.

### 5.2.2 非定常解析の指定

- `-ns`  
非定常解析を行う. さらに以下のようなサブオプションが指定可能であり, `-ns` に続けて指定することができる.
- `--cn`  
クランク・ニコルソン法による時間積分を行う. 指定しない場合は後退差分近似を行う.
- `--step  $n$`   
時間積分の反復回数の上限を  $n$  回に指定する. デフォルトは10回.

- `--out-interval n`  
時間積分ステップの最終ステップ以外に、ステップ  $n$  回ごとに解析結果ファイルを出力する。デフォルトでは出力しない。
- `--dt x`  
時間方向の刻み幅を  $x$  に指定する。デフォルトは1.0。
- `--init x`  
全節点における初期温度を  $x$  度に指定する。デフォルトは0度。
- `--use-resi n`  
以前の実行において出力された時間積分ステップ  $n$  におけるリスタートファイルを読み込み、そこから解析を再開する。

### 5.2.3 要素に関するオプション

- `-tet10-integ5`  
4面体2次要素の積分において、5点積分を行う。指定しない場合は4点積分である。

### 5.2.4 反復法のコントロールオプション

ADVENTURE\_Thermalでは、線形方程式を解くためにCG法による反復計算を行っており、それらをコントロールするためにいくつかのオプションがある。

- `-cg-tol x`  
収束判定基準を指定する。これは、CG反復における残差ベクトルの初期残差ベクトルに対するノルムの相対誤差であり、相対誤差がこの値より小さくなった時点でCG法が収束したと判定する。デフォルトは $1.0 \times 10^{-6}$ である。
- `-cgl oop-max n`  
CG反復回数の上限を指定する。反復回数がこの値を超えた場合は、収束に至る前でもプログラムは終了する。デフォルトは1000 である。
- `-use-cg-resi n`  
以前に作成したCGリスタートファイルを読み込み、その時点から解析を再開する。定常解析においてのみ有効である。指定しない場合は読み込まない。
- `-resout-cgl ast`  
CGリスタートファイルの出力を最後のCGステップで行う。収束時、および収束せずに反復回数の上限に達した場合に出力を行う。指定しない場合は出力しない。

## 5.2.5 BDDソルバのオプション

ADVENTURE\_Thermalでは、線形方程式を解くためにBDDソルバによる反復計算を行うことが可能であり、それらをコントロールするためにいくつかのオプションがある。なお、特別に明記していない場合を除き、BDDソルバ、BDD-DIAGソルバ、IBDDソルバ、IBDD-DIAGソルバにおいて有効である。

- `-resout-bdd-cmat`  
LU分解後のコースマトリックスを出力する。指定しない場合は出力しない。
- `-use-bdd-cmat`  
以前に作成したLU分解後のコースマトリックスを読み込み、利用する。指定しない場合は読み込まない。
- `-bdd-dir dir`  
コースマトリックスの入出力データディレクトリ名を指定する。入出力用ディレクトリ下のサブディレクトリ名を指定する。デフォルトは `bdd` である。
- `-bdd-cmat-file file`  
コースマトリックスの入出力ファイル名を指定する。指定した名前に `_P.adv` を付けた ( $P$  はプロセッサ番号) がファイル名となる。デフォルトは、`advhbdd_cmat` である。
- `-glnv-alpha x`  
Neumann - Neumann前処理時に用いる非負の正則化パラメータを指定する。デフォルトは  $10^{-3}$  である。BDDソルバ、IBDDソルバにおいてのみ有効である。

## 5.2.6 入出力ファイル名の変更オプション

入出力に用いるファイルは5.1節で示したものが用いられるが、サブディレクトリ名やファイル名を変更したい場合は以下のオプションを使用する。ただし、 $S$  は時間積分ステップ番号、 $P$  は部分番号を示している。

- `-model-file file`  
解析モデル入力ファイル名を `file` とする。実際のファイル名は、これに `_P.adv` をつけたものとなる。デフォルトは `advhddm_in` である。
- `-model-dir dir`  
解析モデル入力ファイルのあるサブディレクトリ名を `dir` とする。デフォルトは `model` である。
- `-result-file file`  
解析結果出力ファイル名を `file` とする。実際のファイル名は、定常解析時

ではこれに `_P.adv` をつけたものとなり、非定常解析時ではこれに `_S_P.adv` をつけたものとなる。デフォルトは `advhddm_out` である。

- `-result-dir dir`  
解析結果出力ファイルのあるサブディレクトリ名を `dir` とする。デフォルトは `result` である。
- `-ns-resin-file file`  
時間積分ステップリスタート入力ファイル名を `file` とする。実際のファイル名は、これに `_S_P.adv` をつけたものとなる。デフォルトは `advhddm_out` である。
- `-ns-resin-dir dir`  
時間積分ステップリスタート入力ファイルのあるサブディレクトリ名を `dir` とする。デフォルトは `result` である。
- `-cg-resin-file file`  
CGリスタート入力ファイル名を `file` とする。実際のファイル名は、これに `_P.adv` をつけたものとなる。デフォルトは `advhddm_cgres` である。
- `-cg-resin-dir dir`  
CGリスタート入力ファイルのあるサブディレクトリ名を `dir` とする。デフォルトは `cg-res` である。
- `-cg-resout-file file`  
CGリスタート出力ファイル名を `file` とする。実際のファイル名は、これに `_P.adv` をつけたものとなる。デフォルトは `advhddm_cgres` である。
- `-cg-resout-dir dir`  
CGリスタート入力ファイルのあるサブディレクトリ名を `dir` とする。デフォルトは `cg-res` である。

## 5.2.7 その他のオプション

- `-file-para`  
ファイル入出力を各プロセスが並列に行う。指定しない場合は各プロセスが同時にディスクアクセスを起こさないように順番に行う。
- `-memlimit n`  
各プロセスが使用するメモリの上限を  $n$  [MByte] とし、これを越えた場合、その時点で実行を停止する。デフォルトは 256 [MByte] である。
- `-help | -h`  
メインのヘルプメッセージを表示する。
- `-help-ns`

非定常解析のコントロールオプション指定のためのヘルプメッセージを表示する.

- `-hel p-cg`  
CG法のコントロールオプション指定のためのヘルプメッセージを表示する.
- `-hel p-bdd`  
BDDソルバのコントロールオプション指定のためのヘルプメッセージを表示する.
- `-versi on | -v`  
モジュールのバージョンを表示する.

# Appendix

- A 要素について
- B 境界条件について
- C ツール類について
- D 解析例

## A 要素について

ADVENTURE\_Thema1は、4面体1次要素及び2次要素に対応している。ただし、境界条件として熱伝達境界あるいは熱ふく射境界を扱う場合には、境界面ごとに剛性行列を作成する必要がある。このような面に対しては、4面体1次要素の場合は3角形1次要素を、4面体2次要素の場合は3角形2次要素を抽出し、積分を行っている。以下に各要素の積分番号、積分点について示す。

### A.1 4面体1次要素

#### (1) 節点

節点数は4であり、要素コネクティビティでの各節点の節点番号の並び順は図8のようになっている。

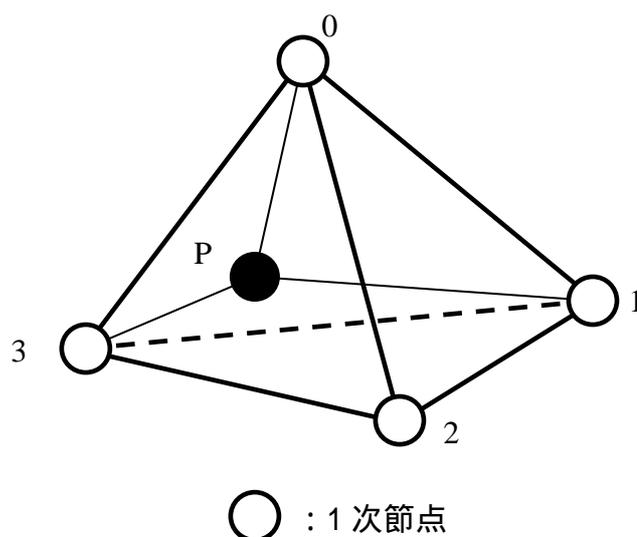


図8: 4面体1次要素

#### (2) 積分点

積分点数は1であり、積分点は体積座標 ( $L_0; L_1; L_2; L_3$ ) を用いて表1のようになっている。ここで体積座標は図8で示されている点Pを

- $L_0 =$  4面体P123の体積 = 4面体0123の体積(1)
- $L_1 =$  4面体P023の体積 = 4面体0123の体積(2)
- $L_2 =$  4面体P013の体積 = 4面体0123の体積(3)
- $L_3 =$  4面体P012の体積 = 4面体0123の体積(4)

で表す座標系である。

表1：4面体1次要素の積分点

積分点番号	$L_0$	$L_1$	$L_2$	$L_3$
0	1/4	1/4	1/4	1/4

## A.2 4面体2次要素

### (1) 節点

節点数は10であり、要素コネクティビティでの各節点の節点番号の並び順は図9のようになっている。

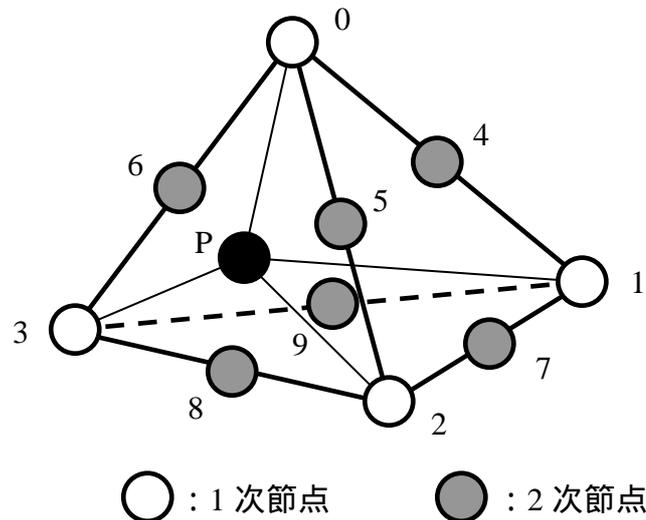


図9：4面体2次要素

### (2) 積分点

積分点数はデフォルトでは4であり、積分点は体積座標 ( $L_0; L_1; L_2; L_3$ ) を用いて表2のようになっている。ここで体積座標は図9で示されている点Pを

- $L_0 =$  4面体P123の体積 = 4面体0123の体積(5)
- $L_1 =$  4面体P023の体積 = 4面体0123の体積(6)
- $L_2 =$  4面体P013の体積 = 4面体0123の体積(7)
- $L_3 =$  4面体P012の体積 = 4面体0123の体積(8)

で表す座標系である。ただし、表2において

$$\alpha = 0:58541019662496845446$$

$$\beta = 0:13819660112501051518$$

である.

また, 実行時のオプション指定により, 5点積分を行うことが可能である. この場合の積分点は, 同様に体積座標を用いて表3のようになっている.

### A.3 3角形1次要素

4面体1次要素を使用する場合, 熱伝達境界あるいは熱ふく射境界面の積分には3角形1次要素を用いてある.

#### (1) 節点

節点数は3であり, 要素コネクティビティでの各節点の節点番号の並び順は図10のようになっている.

表2: 4面体2次要素の積分点 (4点積分)

積分点番号	$L_0$	$L_1$	$L_2$	$L_3$
0	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\beta$
1	$\beta$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
2	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\alpha$
3	$\alpha$	$\beta$	$\beta$	$\beta$

表3: 4面体2次要素の積分点 (5点積分)

積分点番号	$L_0$	$L_1$	$L_2$	$L_3$
0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
1	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$
2	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{6}$
3	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{2}$
4	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$

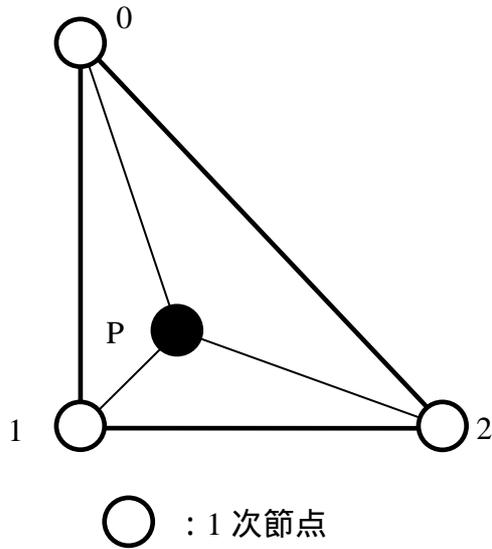


図 10：3 角形 1 次要素

(2) 積分点

積分点数は1であり，積分点は体積座標  $(L_0; L_1; L_2)$  を用いて表4のようにになっている．ここで面積座標は図10で示されている点Pを

- $L_0 =$  3角形P12の面積 = 3角形012の面積(9)
- $L_1 =$  3角形P02の面積 = 3角形012の面積(10)
- $L_2 =$  3角形P01の面積 = 3角形012の面積(11)

で表す座標系である．

表4：3角形1次要素の積分点

積分点番号	$L_0$	$L_1$	$L_2$
0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

## A.4 3角形2次要素

4面体2次要素を使用する場合，熱伝達境界あるいは熱ふく射境界面の積分には3角形2次要素を用いてある．

(1) 節点

節点数は6であり，要素コネクティビティでの各節点の節点番号の並び順は図11のようになっている．

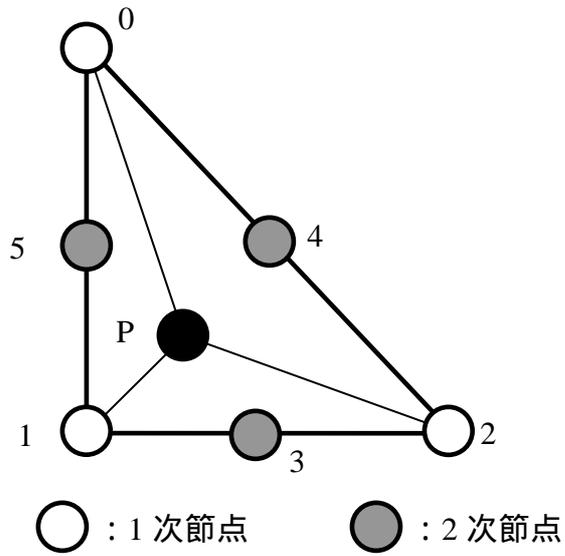


図 11 : 3 角形 2 次要素

(2) 積分点

積分点数は3であり, 積分点は体積座標  $(L_0; L_1; L_2)$  を用いて表5のようにになっている. ここで面積座標は図11で示されている点Pを

- $L_0 =$  3角形P12の面積 = 3角形012の面積(13)
- $L_1 =$  3角形P02の面積 = 3角形012の面積(14)
- $L_2 =$  3角形P01の面積 = 3角形012の面積(15)

で表す座標系である.

表5 : 3角形2次要素の積分点

積分点番号	$L_0$	$L_1$	$L_2$
0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
1	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
2	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$

## B 境界条件について

ADVENTURE\_Thermalで利用可能な境界条件のフォーマットの例を以下に示す。なお、これらはADVENTURE\_IOフォーマットを表示した結果であり、実際にはmakefem\_thermal や mkbc4th によりADVENTURE\_IOフォーマットで作成する。

### B.1 温度規定境界条件

```
[Properti es]
1: content_type=FEGeneri cAttri bute
2: num_i tems=81
3: fega_type=NodeVari abl e
4: l abel =Temperature
5: format=i 4f8
6: i ndex_byte=4
[Data]
0 0 1. 000000e+02
1 0 1. 000000e+02
3 0 1. 000000e+02
58 0 1. 000000e+02
59 0 1. 000000e+02
60 0 1. 000000e+02
...
...
```

[Data]フィールドは左から順に、節点番号、方向成分、温度を示している。ただし、方向成分に関しては、熱伝導解析では1節点あたりの温度の自由度が1のために、構造解析のように方向成分を指定する必要がないため、全境界条件で0と指定しておく。

## B.2 熱流束規定境界条件

```
[Properties]
1: content_type=FEGeneri cAttribute
2: num_i tems=81
3: fega_type=NodeVari abl e
4: l abel =HeatFl ux
5: format=i 4f8
6: i ndex_byte=4
[Data]
0 0 0. 000000e+00
1 0 3. 333333e+01
3 0 0. 000000e+00
58 0 6. 666666e+01
59 0 6. 666666e+01
60 0 6. 666666e+01
...
...
```

[Data]フィールドは左から順に、節点番号、方向成分、熱流束を示している。ここで  
の熱流束は面指定に対する熱流束(単位面積あたりの値で指定)から節点集中熱流束に  
変換したものである。具体的には以下のような変換を想定してある。

この面に面分布熱流束 $q$ が与えられている時、各節点での節点集中熱流束は面の面積  
を $S$ とすれば、4面体2次要素の場合は以下のように表すことができる。

$$P_0 : q_0 = 0 \qquad P_4 : q_4 = q \times \frac{S}{3}$$

$$P_1 : q_1 = 0 \qquad P_5 : q_5 = q \times \frac{S}{3}$$

$$P_2 : q_2 = 0$$

$$P_3 : q_3 = q \times \frac{S}{3}$$

### B.3 熱伝達規定境界条件

```
[Properti es]
1: content_type=FEGeneri cAttri bute
2: num_i tems=8
3: fega_type=El ementVari abl e
4: l abel =HeatConvecti on
5: format=i 4f8f8
6: i ndex_byte=4
[Data]
0 1 1. 000000e+02 1. 231002e+02
5 3 1. 000000e+02 1. 231002e+02
...
...
```

[Data]フィールドは左から順に、要素番号、面番号、外部接触温度、熱伝達係数を示している。ここで、面番号とは各要素を形成する面にそれぞれ与えられるものであり、対する頂点の節点番号と等しくなるような番号付けを行っている。

### B.4 熱ふく射規定境界条件

```
[Properti es]
1: content_type=FEGeneri cAttri bute
2: num_i tems=8
3: fega_type=El ementVari abl e
4: l abel =HeatRadi ati on
5: format=i 4f8f8f8
6: i ndex_byte=4
[Data]
0 1 1. 000000e+02 1. 000000e+00 1. 000000e+00
5 3 1. 000000e+02 1. 000000e+00 1. 000000e+00
...
...
```

[Data]フィールドは左から順に、要素番号、面番号、放射源の温度、放射率、形状係数を示している。

## B.5 物性値

熱伝導解析用の物性値ファイルのフォーマット例を示す.makefem\_thermal への入力ファイルとなる.

### (1) 単一材料モデルの例

```
HeatConducti vi ty 200
Densi ty 10.0
Speci fi cHeat 100.0
StefanBol tzmanConstant 5.667e-8
I nternal HeatGenerati on 0.0
```

上から順に, 熱伝導率, 密度(非定常解析時), 比熱(非定常解析時), ステファン・ボルツマン定数(熱ふく射解析時), 内部発熱である.

### (2) 複数材料モデルの例

```
#materi al I nfo
materi al N 2
propertyN 5
HeatConducti vi ty 100
Densi ty 5000
Speci fi cHeat 41.78
StefanBol tzmanConstant 5.667e-8
I nternal HeatGenerati on 0.0
HeatConducti vi ty 50
Densi ty 2500
Speci fi cHeat 20.0
StefanBol tzmanConstant 5.667e-8
I nternal HeatGenerati on 0.0
#vol umel nfo
vol umeN 2
1
0
```

## C ツール類について

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

### C.1 一体型解析モデル変換フィルタ so2th

so2th は、ADVENTURE\_BCtoolに付属する makefem により作成される固体解析用一体型解析モデルを熱伝導解析用に変換するツールである。具体的には以下のような変換を行うことができる。

- 変位境界条件      温度境界条件

なお、荷重境界条件を熱流速境界条件に変換する機能はバグを含んでいるため、温度規定境界条件のときのみ使用できる。以下のコマンドにより、実行を行う。

```
% so2th solid_file
```

ここで、*solid\_file* はADVENTURE\_BCtoolの makefem により作成された一体型解析モデルファイル名である。このコマンドにより、*solid\_file* に *\_thermal.adv* をつけた名前で熱伝導解析モデルが作成される。

so2th では物性値のラベル名変換は行わない。したがって、ADVENTURE\_BCtoolにおける makefem により一体型ファイルを作成する際に、B.5で示した熱伝導解析用の物性値ファイルを用いて作成する必要がある。

本ツールは、古いバージョン(Ver.0.5b以前)において使用されていたものであるが、Ver.1.0以降ではより便利なC.2で示す makefem thermal を用意したので、基本的には利用する必要はない。

### C.2 一体型解析モデルファイル作成ツール makefem\_thermal

makefem\_thermal は、熱伝導解析用の一体型解析モデルファイル作成ツールである。このコマンドを使用することで、ADVENTURE\_BCtoolにおいて作成したメッシュ表面情報ファイルと境界条件設定ファイルを用いて、熱伝導解析用一体型解析モデルファイルを作成することができる。ただし、熱伝達境界条件や熱ふく射境界条件については対応していないので、C.3で述べる mkbc4th を用いる必要がある。

実行方法は、ADVENTURE\_BCtoolの固体解析用一体型解析モデルファイル作成モジュール makefem と同様である。以下に実行方法を示す。

```
% makefem_thermal mshFILE fgrFILE cndFILE matFILE advFILE
```

*mshFILE* : メッシュデータファイル (入力)

*fgrFILE* : メッシュ表面データファイル (入力)  
*cndFILE* : 解析条件ファイル (入力)  
*matFILE* : 物性値ファイル (入力)  
*advFILE* : 一体型解析モデルファイル (出力)

ただし, *fgrFILE* は *mshFILE* から ADVENTURE\_BCtool の msh2pch により作成されるものであり, *cndFILE* は ADVENTURE\_BCtool の bcGUI により作成されるものである。以下に, 解析条件ファイルのフォーマットを示す。

gravity 0 0 -9.8	実際には使用しない。見せかけの値
boundary 2	境界条件のデータ数
dispOnFaceGroup 0 0 0 10	面グループ 0 の温度が 10 [ ]
loadOnFaceGroup 5 0 0 100	面グループ 5 の熱流束が 100

なお, 熱流速に関しては単位指定していないので, メッシュや物性値と矛盾のない値を設定する必要がある。ここで, bcGUI が作成するファイルは固体静解析用であるが, makefem\_thermal では上記のように, 変位拘束を温度指定, 荷重を熱流速と読み換えている。つまり,

- dispOnFaceGroup は面グループの温度
- dispOnVertex は節点の温度
- loadOnFaceGroup は面グループの熱流束

となる。よって, bcGUI において, 温度指定を行いたい箇所には変位拘束条件を, 熱流速を指定したい箇所には荷重条件を設定した境界条件設定ファイルを作成すればよい。ここで, bcGUI では境界条件を与える軸方向を X, Y, Z, Normal(法線方向)から選択する必要があるが, X方向を選択すること。なお, Y, Z方向を選択してもエラーにはならないが, Normalを選択した場合には解析条件ファイルのフォーマットが異なることと, 値が0の条件を設定できないことから, Normalは選択しないこと。

これより, bcGUI における作業手順は以下ようになる。

- 1) 境界条件面または節点を選択
  - 2) メニュー「BC」を選択
  - 3) 温度指定の場合は「Add Displacement」, 熱流速指定の場合は「Add Load」を選択
  - 4) 「X」を選択し, 入力フィールドに境界条件値を入力
- これを, 境界条件数だけ行えばよい。

### C.3 熱伝達及び熱ふく射境界条件変換ツール mkbc4th

mkbc4th は, ADVENTURE\_BCtoolの msh2pch により得られるメッシュ表面データファイル(拡張子fgr), 及び解析条件ファイル(拡張子cnd)から, 熱伝導解析用の熱伝達境界条件及び熱ふく射境界条件のADVENTURE\_IOフォーマットファイルを作成するツールである.

熱伝達境界条件, 及び熱ふく射境界条件のための境界条件設定ファイルはそれぞれ下記のようなフォーマットで作成する必要がある.

- ・ 熱伝達境界条件の場合 ( 拡張子 cnd )

```
boundary 2
convOnFaceGroup 1 100 123.1
convOnFaceGroup 3 100 123.1
```

ただし, 左から順に面番号, 外部接触温度, 熱伝達係数.

- ・ 熱ふく射境界条件の場合 ( 拡張子 cnd )

```
boundary 2
radi OnFaceGroup 1 100 0.5 1
radi OnFaceGroup 3 1000 0.3 1
```

ただし, 左から順に面番号, 放射源の温度, 放射率, 形状係数.

ここで, このファイルを作成するためには境界条件を与えたい面の番号を知る必要があるが, bcGUI を活用することで知りたい面の番号を得ることが可能である. つまり, bcGUI を起動し, 荷重境界条件値100を与える面, 200を与える面をそれぞれ指定した境界条件設定ファイルを作成したとすると, ファイル中に次のような記述がある.

```
...
loadOnFaceGroup 5 0 0 100
loadOnFaceGroup 7 0 0 200
...
```

この情報を活用することで, 与えたい面番号を得ることが可能となる.

境界条件設定ファイルを作成した後に, 次のコマンドを実行する.

```
% mkbc4th fgrFILE cndFILE advbcFILE
```

これにより、熱伝達境界条件や熱ふく射境界条件をADVENTURE\_IOフォーマットで記述した *advbcFILE* が生成される。

ここで、これより得られるのは境界条件のみのファイルであるため、一体型解析モデルを *makefem\_thermal* により作成しておき、ADVENTURE\_IOに含まれる *advcat* コマンドにより結合することで、熱伝達境界条件や熱ふく射境界条件を含んだ一体型解析モデルを作成することができる。

## C.4 温度分布可視化ツール *advauto\_thermalview*

*advauto\_thermalview* はADVENTURE\_Auto-0.1bに含まれるツールであるが、温度スカラー分布を簡単に可視化するために有効なものであるため、ここで紹介を行う。これにより、ADVENTURE\_Visualがコンパイルできない環境においても、ADVENTURE\_Autoがコンパイルできていれば解析結果を確認することが可能となる。

*advauto\_thermalview* は一体型データを入力とするが、ADVENTURE\_Thermalの出力するデータは領域分割された状態のものであるため、ADVENTURE\_Solidに含まれている *hddmrg* によって一体型データへの変換を行う必要がある。以下に、可視化までの手順を示す。

### 1) 一体型データへの変換

```
% hddmrg Temperature data_dir
```

実行に関するオプション等はADVENTURE\_Solidのマニュアルを参照すること。ここで、*data\_dir* は解析に用いた入出力ファイルのトップディレクトリ名である。これにより、*Temperature.dat* というファイルが生成される。

### 2) 温度分布の可視化

```
% advauto_thermalview mshFILE fgrFILE
```

ただし、*mshFILE* と *fgrFILE* はC.2で用いたファイルと同様のものである。また、このコマンドは1)で作成した *Temperature.dat* を置いているディレクトリにおいて 実行する必要がある。

## D 解析例

### D.1 定常解析例(温度境界条件)

#### D.1.1 解析モデル

図12に示すような1[m] x 1[m] x 1[m]の立方体モデルにおける、定常熱伝導問題を考える。

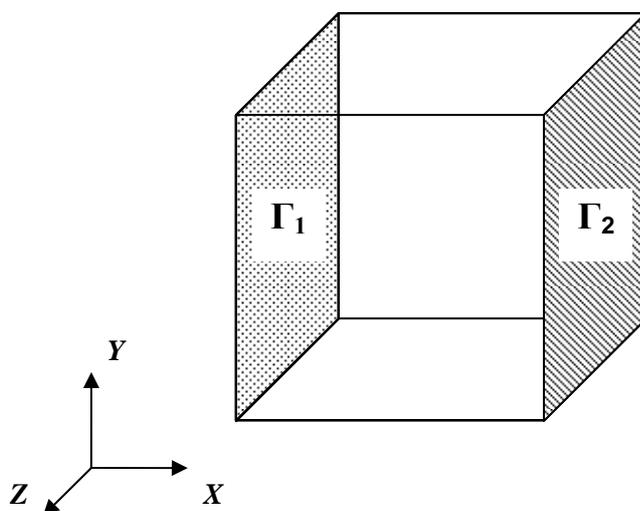


図 12：解析モデル(温度境界条件)

境界条件(基本境界条件)は以下の通りである。

$$\begin{cases} T_1 = 100 \text{ [ ]} & \text{on } 1 \\ T_2 = 0 \text{ [ ]} & \text{on } 2 \end{cases}$$

上記以外の面は全て自然境界条件とする。

また、物性値として熱伝導率に  $k=100$  [W/mK] を用いた。定常解析のため比熱、密度、ステファン・ボルツマン係数及び発熱量は与えていない。作成したモデルの要素数は 6,511、節点数は10,187である。

#### D.1.2 入力データの作成例

ADVENTURE\_Thermalによる解析を行うための入力ファイル作成例を示す。

- (1) メッシュデータ(msh形式)の作成
- (2) msh2pch (ADVENTURE\_BCtool)によりメッシュ表面情報(fgr,pch,pcg,tm形式)の作

成

- (3) bcGUI (ADVENTURE\_BCtool)により温度境界条件設定ファイル(cnd形式)の作成
- (4) 物性値ファイルの作成
- (5) makefem\_thermal (ADVENTURE\_Thermal) により一体型解析モデル(adv形式)の作成
- (6) adventure\_metis (ADVENTURE\_Metis)により領域分割型の解析モデルファイル(adv形式)の作成

以下に各手順及び、このサンプルモデルを作成する際に使用したコマンドを示す。それぞれのコマンドの詳細に関しては各システムのマニュアルを参照していただきたい。なお、以下において、実行コマンド例において*Italic*フォントで記述しているのはファイル名またはディレクトリ名である。

#### • メッシュデータの作成

Step1: CADソフトにより 1辺の長さが 1.0 [m] である sample.igs を作成

Step2: エディタにより節点密度ファイル sample.ptn を作成

##### **sample.ptn**

BaseDistance 0.1
---------------------

Step3: ADVENTURE\_TriPatch-1.8により表面3角形パッチファイルを作成

##### 入力ファイル

sample.igs (IGESファイル)

sample.ptn (節点密度ファイル)

##### 実行コマンド

```
% ADVENTURE_Tripatch sample sample
```

##### 出力ファイル

sample.pcm (表面パッチデータファイル)

sample.pcg (表面パッチデータグループファイル)

sample\_c\_mcp.wrl (表面パッチVRMLファイル)

Step4: ADVENTURE\_TetMesh-0.9bにより4面体メッシュを作成

Step4-1: 表面メッシュ生成プログラムにより表面メッシュデータ中間ファイルと節点密度制御ファイルを作成

入力ファイル

sample.pcm (表面パッチデータファイル)

sample.ptn (節点密度ファイル)

実行コマンド

```
% advtmesh9p sample -d
```

出力ファイル

samplec.pcc (表面メッシュデータ中間ファイル)

samplec.ptn (節点密度制御ファイル)

Step4-2: 4面体メッシュ生成プログラムにより4面体1次要素メッシュデータファイルを作成

入力ファイル

samplec.pcc (表面メッシュデータ中間ファイル)

samplec.ptn (節点密度制御ファイル)

実行コマンド

```
% advtmesh9m samplec
```

出力ファイル

samplec.msh (4面体1次要素メッシュデータファイル)

Step4-3: 2次節点追加プログラムにより4面体2次要素メッシュデータファイルを作成

入力ファイル

samplec.msh (4面体1次要素メッシュデータファイル)

実行コマンド

```
% advtmesh9s samplec
```

出力ファイル

samplecs.msh (4面体2次要素メッシュデータファイル)

- **境界条件の設定**

Step5: ADVENTURE\_BCtool-1.02により境界条件設定ファイルを作成

Step5-1: メッシュの表面抽出によりメッシュの表面を抽出及びグループ化

入力ファイル

sample.ecs.msh (メッシュデータファイル)

実行コマンド

```
% msh2pch sample.ecs.msh 3
```

出力ファイル

sample.ecs\_3.fgr (メッシュ表面データファイル)

sample.ecs\_3.pch (表面メッシュ抽出データファイル)

sample.ecs\_3.pcg (表面パッチグループデータファイル)

sample.ecs\_3.trn (グローバルインデックスファイル)

Step5-2: GUIにより境界条件の設定

入力ファイル

sample.ecs\_3.pch (表面メッシュ抽出データファイル)

sample.ecs\_3.pcg (表面パッチグループデータファイル)

実行コマンド

```
% bcGUI sample.ecs_3.pch sample.ecs_3.pcg
```

出力ファイル

sample.cnd (解析条件ファイル)

**sample.cnd**

```
gravity 0 0 0
boundary 2
di sp0nFaceGroup 0 0 0 100
di sp0nFaceGroup 5 0 0 0
```

- **物性値ファイルの作成**

Step6: エディタにより, C.1節(1), (2) を参照し, 物性値ファイル(\*.dat)を作成する.

**sample.mat**

```
HeatConductivity 100
```

### • 一体型解析モデルファイルの作成

Step7: ADVENTURE\_Thermal-1.0により一体型解析モデルファイルを作成

#### 入力ファイル

samplecs.msh (メッシュデータファイル)  
samplecs\_3.fgr (メッシュ表面データファイル)  
sample.cnd (解析条件ファイル)  
sample.dat (物性値ファイル)  
samplecs\_3.trn (グローバルインデックスファイル)

#### 実行コマンド

```
% makefem_thermal samplecs.msh samplecs_3.fgr sample.cnd  
sample.dat sample.adv
```

#### 出力ファイル

sample.adv (一体型解析モデルファイル)

### • 領域分割型の解析モデルファイルの作成

Step8: ADVENTURE\_Metis-1.0により領域分割型解析モデルファイルを作成

ここでは、並列計算用としてCPUを2台用いる。解析モデルの要素数が6,511であるので、2.3項の式において

$$\begin{cases} N_{element} = 6511 \\ N_{part} = 2 \end{cases}$$

また、静的負荷分散版における1領域あたりの最適要素数が180-370なので、

$$n = 200$$

とすると、

$$\begin{aligned} N_{subdomain} &= \frac{N_{element}}{n \times N_{part}} \\ &= \frac{6511}{2 \times 200} \\ &= 16.2775 \\ &\cong 16 \end{aligned}$$

よって、ADVENTURE\_Metisにおいて次のコマンドを実行する。

### 入力ファイル

sample.adv (一体型解析モデルファイル)

### 実行コマンド

```
% mpi run -np 2 adventure_metis -di fn 1 sample.adv sample 16
```

### 出力ファイル

sample/model/advhddm\_in\_0.adv (部分番号0の解析モデルファイル)

sample/model/advhddm\_in\_1.adv (部分番号1の解析モデルファイル)

## D.1.3 出力データ

ADVENTURE\_Thermalによる解析後、解析結果は領域ごとに出すようになっている。

### 入力ファイル

sample/model/advhddm\_in\_0.adv (部分番号0の解析モデルファイル)

sample/model/advhddm\_in\_1.adv (部分番号1の解析モデルファイル)

### 実行コマンド

```
% mpi run -np 2 advthermal -p sample
```

### 出力ファイル

sample/result/advhddm\_out\_0.adv (部分番号0の解析結果ファイル)

sample/result/advhddm\_out\_1.adv (部分番号1の解析結果ファイル)

次の図はADVENTURE\_Visual-1.0を用いて可視化したものである。

ADVENTURE\_VisualについてはADVENTURE\_Visual用のマニュアルを参照していただきたい。

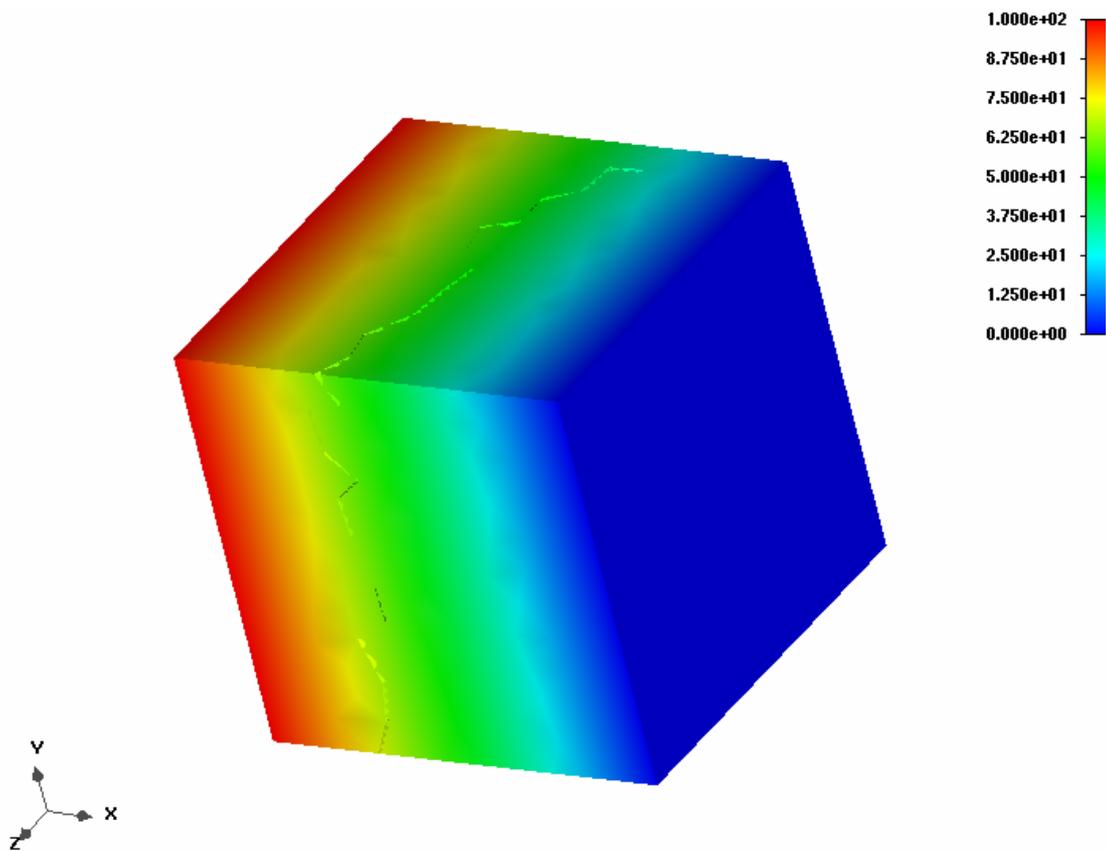


図 13 : 解析モデル(ADVENTURE\_Visual)

## D.2 定常解析例(内部発熱考慮)

### D.2.1 解析モデル

モデルには, 図14のような球の一部を用いる.

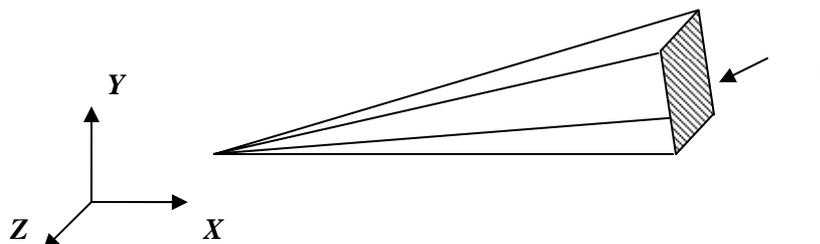


図 14 : 解析モデル(温度境界条件)

境界条件(基本境界条件)は以下の通りである.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = 1.0 \times 10^4 \text{ [ } \quad \text{ ]} \quad \text{on } \Gamma_1 \end{array} \right.$$

上記以外の面は全て自然境界条件とする.

また, この材料の物性値として熱伝導率に  $\kappa = 8.854185 \times 10^{-12}$  [W/mK] 及び内部発熱に  $f = 1.0 \times 10^{-5}$  [W/m<sup>3</sup>]を用いた. 定常解析のため比熱, 密度, ステファン・ボルツマン係数は与えていない. 作成したモデルの要素数は937, 節点数は1,738である.

### D.2.2 入力データの作成

ADVENTURE\_Thermalを用いた解析を行うために用意する入力ファイルは, 以下の手順で作成する.

- (1) メッシュデータ(msh形式)の作成
- (2) msh2pch によりメッシュ表面情報(fgr,pch,pcg,trn形式)の作成
- (3) bcGUI により温度境界条件ファイル(cnd形式)の作成
- (4) 物性値ファイルの作成
- (5) makefem\_thermal により一体型解析モデル(adv形式)の作成
- (6) adventure\_metis により領域分割型解析モデル(adv形式)の作成

以下に, この例の実行に関して作成したファイル及びファイル内容を示す. 具体的な実行方法はD.1と重複するので省略する.

Step1: *sphere.igs* 作成

Step2: *sphere.ptn* 作成(下図)

**sphere.ptn**

```
BaseDistance  
0.1
```

Step3: 省略

Step4: 省略

Step5-1: 省略

Step5-2: *sphere.cnd* 作成

**sphere.cnd**

```
gravity 0 0 0  
boundary 1  
disOnFaceGroup 4 0 0 10000
```

Step6: *sphere.dat* 作成

**sphere.mat**

```
HeatConductivity 8.854185e-12  
InternalHeatGeneration 1.000000e-05
```

Step7: 省略

Step8: 省略

## D.2.3 出力データ

次の図はADVENTURE\_Visualを用いて可視化したものである。

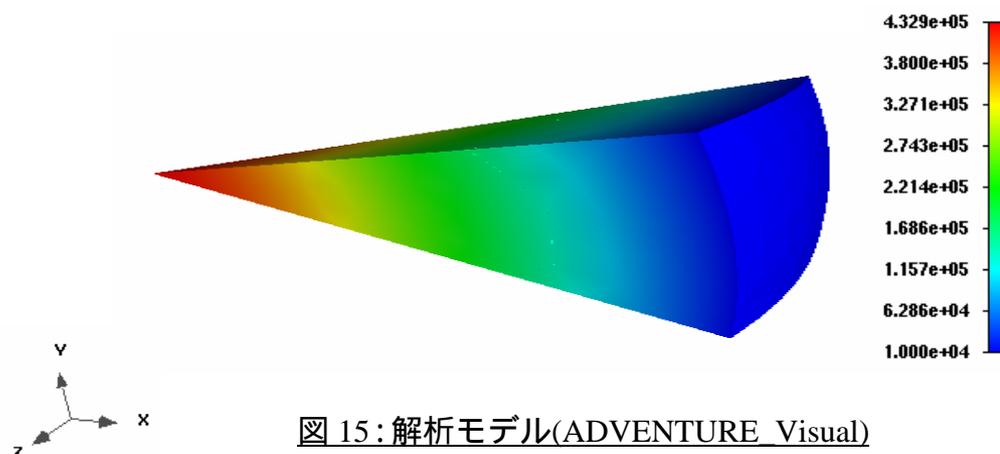


図 15: 解析モデル(ADVENTURE\_Visual)

## D.3 定常解析例(熱流速)

### D.3.1 解析モデル

モデルには, 図16のような円形の一部を用いる.

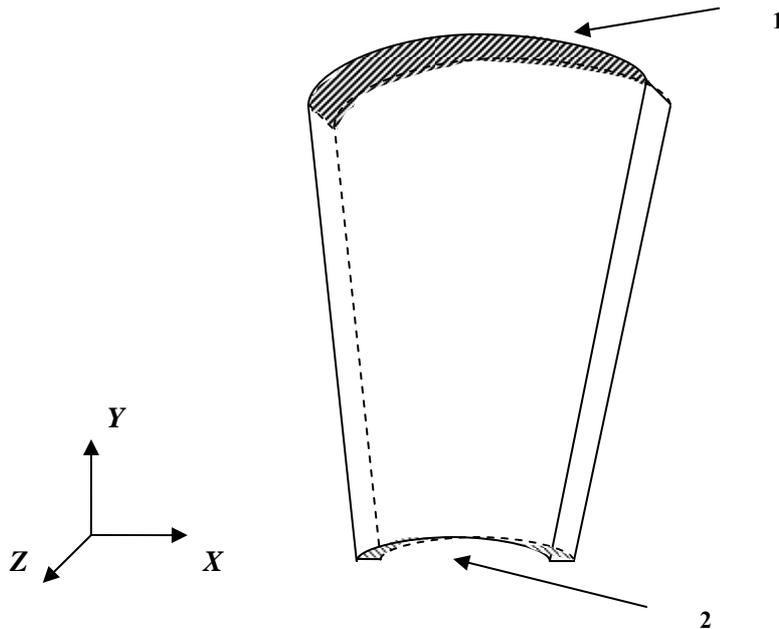


図 16 : 解析モデル(対流熱伝達)

境界条件(基本境界条件)は以下の通りである.

$$\begin{cases} T_1 = 1.0 \times 10^4 & [ ] & \text{on } \Gamma_1 \\ q_2 = 1.0 \times 10^2 & [W/(mm \cdot K)] & \text{on } \Gamma_2 \end{cases}$$

上記以外の面は全て自然境界条件とする.

また, この材料の物性値として熱伝導率に  $= 5.0 [W/mK]$  を用いた. 定常解析のため比熱, 密度, ステファン・ボルツマン係数は与えていない. 作成したモデルの要素数は180,140, 節点数は255,140である.

### D.3.2 入力データの作成

ADVENTURE\_Thermalを用いた解析を行うために用意する入力ファイルは, 以下の手順で作成する.

- (1) メッシュデータ(msh形式)の作成

- (2) msh2pch によりメッシュ表面情報(fgr,pch,pcg,trn形式)の作成
- (3) bcGUI により温度, 熱流速境界条件ファイル(cnd形式)の作成
- (4) 物性値ファイルの作成
- (5) makefem\_thermal により一体型解析モデル(adv形式)の作成
- (6) adventure\_metis により領域分割型解析モデル(adv形式)の作成

以下に, この例の実行に関して作成したファイル及びファイル内容を示す. 具体的な実行方法はD.1と重複するので省略する.

Step1: *flux.igs* 作成

Step2: *flux.ptn* 作成(下図)

**flux.ptn**

```
BaseDistance
2.0
```

Step3: 省略

Step4: 省略

Step5-1: 省略

Step5-2: *flux.cnd* 作成

**flux.cnd**

```
gravity 0 0 0
boundary 2
dispOnFaceGroup 4 0 0 10
loadOnFaceGroup 0 0 0 -100
```

Step6: *flux.dat* 作成

**flux.mat**

```
HeatConductivity 50
```

Step7: 省略

Step8: 省略

### D.3.3 出力データ

次の図はADVENTURE\_Visualを用いて可視化したものである.

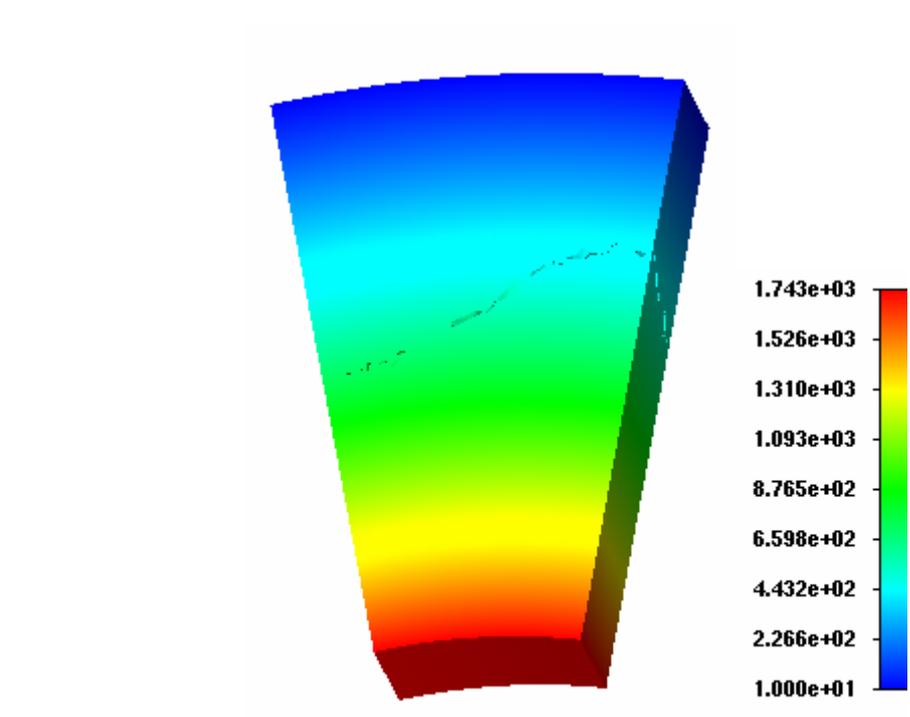


図 17: 解析モデル(ADVENTURE\_Visual)

## D.4 定常解析例(対流熱伝達)

### D.4.1 解析モデル

下図18のようなモデルを用いる。

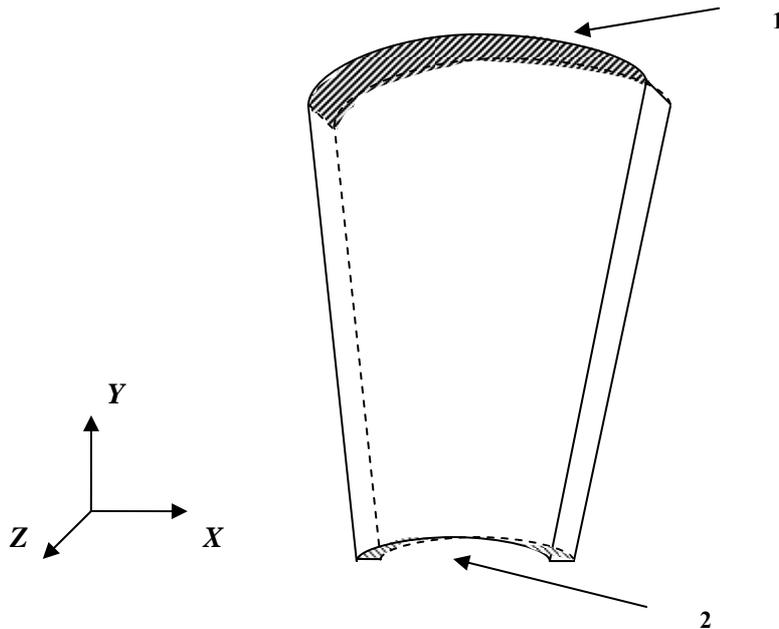


図 18：解析モデル(対流熱伝達)

$\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  における熱伝達率は以下の通りである。

$$\begin{cases} h_1 = 2.837233 \times 10^{-3} \text{ [W / (mm}^2 \text{K)]} & \text{on } \Gamma_1 \\ h_2 = 1.4186 \times 10^{-3} \text{ [W / (mm}^2 \text{K)]} & \text{on } \Gamma_2 \end{cases}$$

また、それぞれの面における外部接触温度は以下の通りである。

$$\begin{cases} T_1 = -1.777 \times 10^1 \text{ [ }^\circ\text{C]} & \text{on } \Gamma_1 \\ T_2 = 3.777 \times 10^1 \text{ [ }^\circ\text{C]} & \text{on } \Gamma_2 \end{cases}$$

上記以外の面は全て自然境界条件とする。

それ以外の、この材料の物性値には熱伝導率に  $k = 8.854185 \times 10^{-12}$  [W/mmK] を用いた。定常解析のため比熱、密度、ステファン・ボルツマン係数は与えていない。作成したモデルの要素数は180,140、節点数は255,140である。

## D.4.2 入力データの作成

ADVENTURE\_Thermalを用いた解析を行うために用意する入力ファイルは、以下の手順で作成する。

- (1) メッシュデータ(msh形式)の作成
- (2) msh2pch によりメッシュ表面情報(fgr,pch,pcg,trn形式)の作成
- (3) エディタにより空の境界条件ファイル(cnd形式)の作成
- (4) 物性値ファイルの作成
- (5) makefem\_thermal により一体型解析モデル(adv形式)の作成
- (6) bcGUI により熱伝達境界条件ファイル(cnd形式)の作成
- (7) エディタにより熱伝達境界条件ファイルの修正
- (8) mkbc4th により境界条件ファイル(adv形式)の作成
- (9) advcat により一体型解析モデルと境界条件ファイルの結合(adv形式)の作成
- (10) adventure\_metis により領域分割型解析モデル(adv形式)の作成

以下に、この例の実行に関して作成したファイル及びファイル内容を示す。基本的な流れはこれまでと同じであるが、熱伝達境界条件を作成するために増える手順について説明する。なお、熱ふく射境界条件の場合も同様の手順で可能である。

### • 空の境界条件 convection\_none.cnd の作成

温度規定条件、熱流速規定条件は与えないため、便宜上次のようなファイルをエディタにより作成する。また、bcGUI によって何も条件設定しないファイルを作成してもよい。

**convection\_none.cnd**

```
gravity 0 0 0  
boundary 0
```

ただし、熱伝達境界条件以外に温度規定条件などがある場合には、これまで通りbcGUI によって作成した境界条件ファイルを用いる。

### • 物性値ファイル convection.dat 作成

**convection.mat**

```
HeatConductivity 50
```

- **makefem\_thermal による一体型解析モデル convection1.adv の作成**

```
% makefem_thermal convectioncs.msh convectioncs_3.fgr
convection_none.cnd convection.dat convection1.adv
```

- **bcGUI による熱伝達境界条件用ファイル convection2.cnd の作成**  
**convection2.cnd**

```
gravity 0 0 0
boundary 2
loadOnFaceGroup 0 0 2 0.0014186
loadOnFaceGroup 4 0 2 0.00283723
```

- **境界条件ファイル convection2.cnd の編集**

**convection2.cnd (編集後)**

```
boundary 2
convOnFaceGroup 0 -17.77 0.0014186
convOnFaceGroup 4 37.77 0.00283723
```

なお、熱ふく射境界条件の場合はC.3に従って radiOnFaceGroup として編集を

- **mkbc4th コマンドによる境界条件ファイル convection2.adv の作成**

```
% mkbc4th convectioncs_3.fgr convection2.cnd convection2.adv
```

- **advcat による一体型解析モデルと境界条件ファイルの結合 convection.adv**

```
% advcat convection1.adv convection2.cnd convection.adv
```

### D.4.3 出力データ

次の図はADVENTURE\_Visualを用いて可視化したものである。

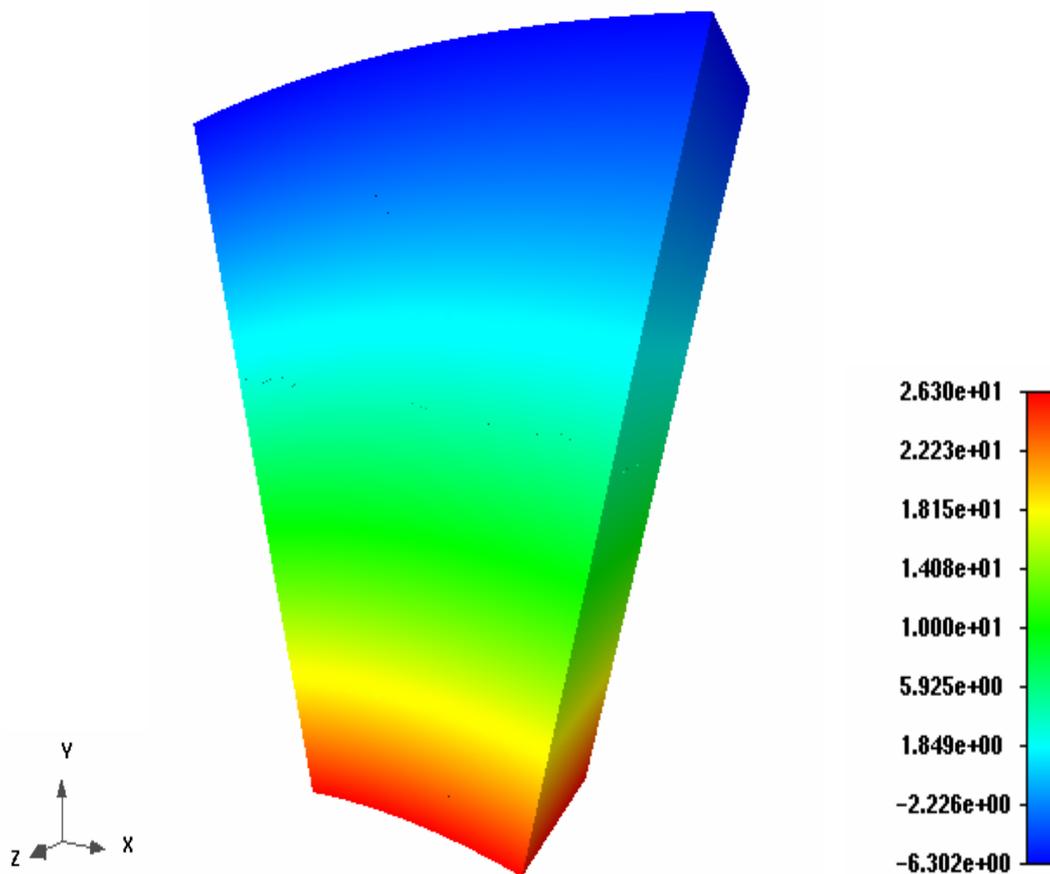


図 19: 解析モデル(ADVENTURE\_Visual)

## D.5 その他の解析例

上記以外の例として比較的自由度の大きいモデルを可視化したものを以下に示す。  
図20は領域分割図を、図21は解析結果を可視化したものである。節点数は1,893,340、要素数は1,167,268である。

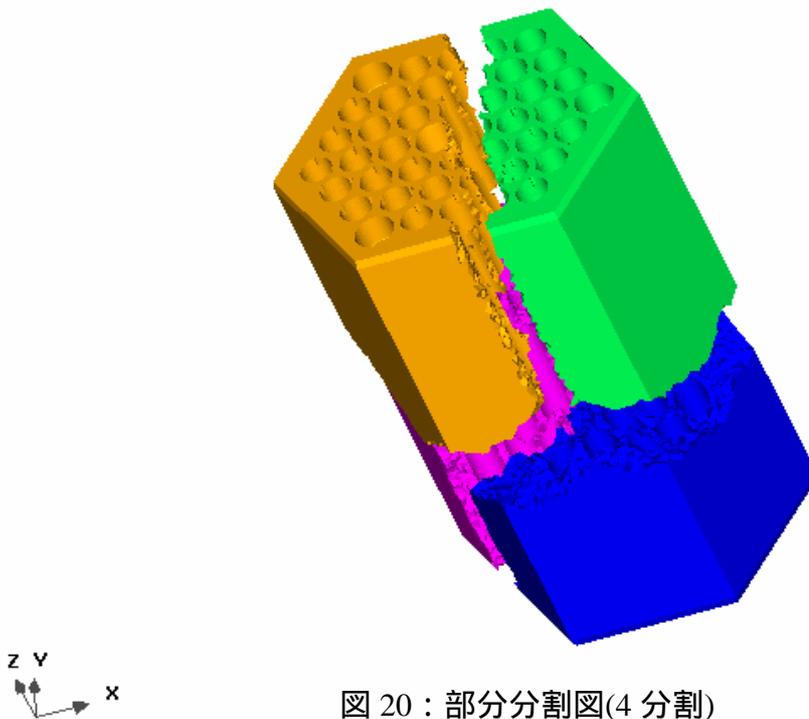


図 20：部分分割図(4分割)

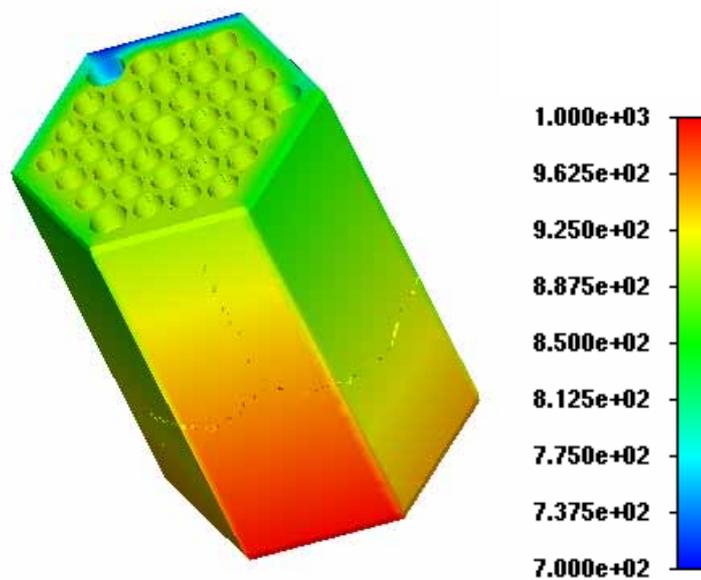


図 21：解析結果(温度分布)

## 参考文献

- [1] ADVENTURE Project: <http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp>
- [2] G.Yagawa and R.Shioya: Parallel Finite Elements on a Massively Parallel Computer with Domain Decomposition, *Computing Systems in Engineering*, 4, Nos. 4-6 (1993), pp. 495-503.
- [3] 矢川元基, 塩谷隆二: 超並列有限要素法, 朝倉書店, (1998).
- [4] 宮村, 野口, 塩谷, 吉村, 矢川: 階層型領域分割法による超並列弾塑性有限要素解析, 日本機械学会論文集A編, Vol.65, No.634 (1999), pp. 1201-1208.
- [5] R.Shioya, H.Kanayama, D.Tagami and E.Imamura: A Domain Decomposition Approach for Non-steady Heat Conductive Analysis, *Advances in Computational Engineering & Science*, 189.pdf, pp. 1-6, 2001.
- [6] MPI: <http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/>
- [7] MPICH: <http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/mpich/>
- [8] Jan Mandel: Balancing Domain Decomposition, *Communications on Numerical Methods in Engineering*, 9 (1993), 233-241.
- [9] R.Shioya, H. Kanayama, A.M.M.Mukaddes, M. Ogino, Heat Conductive Analysis with Balancing Domain Decomposition Method, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 52 (2003), pp.43-53.
- [10] M.Ogino, R.Shioya, H.Kanayama and A.M.M.Mukaddes: Incomplete Balancing Domain Decomposition for Large Scale Thermal-Solid Coupling Problems, Proceedings CD-ROM of the WCCM VI in conjunction with APCOM'04 (2004), M-64\_OginoM.pdf, pp.1-8.