

ADVENTURE_sFlow / ThermalConvection

Nonstationary Thermal Convection Solver with HDDM

Version 0.5

プログラム使用マニュアル

January, 2009

ADVENTURE Project

目次

1	はじめに	2
1.1	本モジュールの特徴	2
1.2	稼動環境	2
1.3	コンパイルとインストール	3
1.3.1	コンパイル	3
1.3.2	インストール	3
1.4	実行方法	4
2	並列処理機能および非定常解析機能	5
2.1	並列処理機能	5
2.2	非定常解析機能	7
2.3	領域分割 (ADVENTURE_Metis) について	8
3	解析機能	9
3.1	解析の流れ	9
3.2	入出力データについて	11
3.3	単位系について	11
3.4	境界条件	12
3.5	物性値	12
3.6	解析結果出力	12
4	実行方法	12
4.1	入出力ファイル名	13
4.2	実行時オプション	13
4.2.1	非定常解析の指定	13
4.2.2	反復法のコントロールオプション	14
4.2.3	入出力ファイル名の変更オプション	14
4.2.4	その他のオプション	15
4.2.5	defs.h による設定	15
	Appendix	16
A	要素について	17
A.1	4面体1次要素	17
B	境界条件について	18
B.1	自由度指定境界条件	18
B.2	物性値 (動粘性係数)	19
C	ツール類について	19
C.1	一体型解析モデル変換フィルタ non_stationary_makefem	19
C.2	速度・圧力・温度結合用 sflow_hddmmrg	20

C.3	データ変換ツール advsflow_p_rest2ucd.....	21
C.4	プレ処理ツール advmodel.....	21
D	解析例.....	22
D.1	非定常熱対流問題解析例.....	22
	参考文献.....	30

1 はじめに

本書はADVENTURE Project[1]において開発中の、階層型領域分割法(Hierarchical Domain Decomposition Method, 以下HDDM)を用いた並列処理による非定常非圧縮性粘性流問題(Navier-Stokes方程式)解析のための有限要素ソルバ, ADVENTURE_sFlow / ThermalConvectionの使用マニュアルである.

1章ではADVENTURE_sFlow / ThermalConvection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_sFlow / ThermalConvection は以下のような特徴を持っている.

- 熱対流方程式の非定常問題の解析が可能
- 4面体1次要素に対応
- 安定化有限要素法を使用
- 反復解法としてBiCGSTAB法, GP-BiCG法, BiCGSTAB2法が使える
- 階層型領域分割法による負荷分散を行った並列処理が可能

1.2 稼動環境

本プログラムは以下の環境で動作確認をしている.

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ライブラリとして有名なものには, MPICHとLAM/MPIがある. 最近のLinuxディストリビュータではどちらかがインストールされている場合もあるが, 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_sFlow / ThermalConvectionの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_sFlow / ThermalConvection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.

```
gunzip -c tf_nonstationary_sFlow0.5.tar.gz | tar xvf -
```

- (2) 展開したディレクトリに移動し、コンパイルを行う.

ディレクトリにあるMakefile.inを編集する.

以下のマクロを環境に合わせて設定.

ADVSYS_DIR	ADVENTUREシステムのトップディレクトリ
ADVIO_CONFIG	ADVENTURE_IOのスクリプトadvsys-configまでのフルパス
MPI_CC	MPIのCコンパイラ
MPI_LINKER	MPIのCリンカ
CC	Cコンパイラ
LINKER	Cリンカ
CFLAGS	最適化オプション

その後makeを実行

```
make
```

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われる.

```
make install
```

なお、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て行う必要がある。
インストールするディレクトリを変更するには、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*はインストールするディレクトリのフルパスを指定する必要がある。

1.4 実行方法

ADVENTURE_sFlow / ThermalConvection には並列版の静的負荷分散型の **advflow-p** の実行モジュールがある。

また、並列版では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て紹介する。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。

```
mpirun [options for mpirun] advflow-p [options] data_dir
```

[options for mpirun]

mpirunに対するオプションとして主なものに以下のようなものがある。なお、詳細はMPICHのマニュアルを参照のこと。

- **-np** *number_of_hosts*
number_of_hosts に起動するMPIプロセスの数を指定する。
- **-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。

[options]

ADVENTURE_sFlow / ThermalConvectionに対する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。詳しくは後述する。

2 並列処理機能および非定常解析機能

2.1 並列処理機能

ADVENTURE_sFlow / ThermalConvectionでは、階層型領域分割法を用いることで並列処理を可能としている。領域の階層型分割を模式的に図示したものが図1である。一階層目の大きな分割単位を“部分(Part)”とし、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により先だっ

て行っておく必要がある。

ADVENTURE_sFlow / ThermalConvectionは並列ライブラリとしてMPIを用いており、起動時にはユーザーの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。

並列処理には静的負荷分散版(advsflow-p)が実行バイナリとして用意されている。図2に示すように、1つのPart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。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、あらかじめADVENTURE_MetisにおいてPart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。

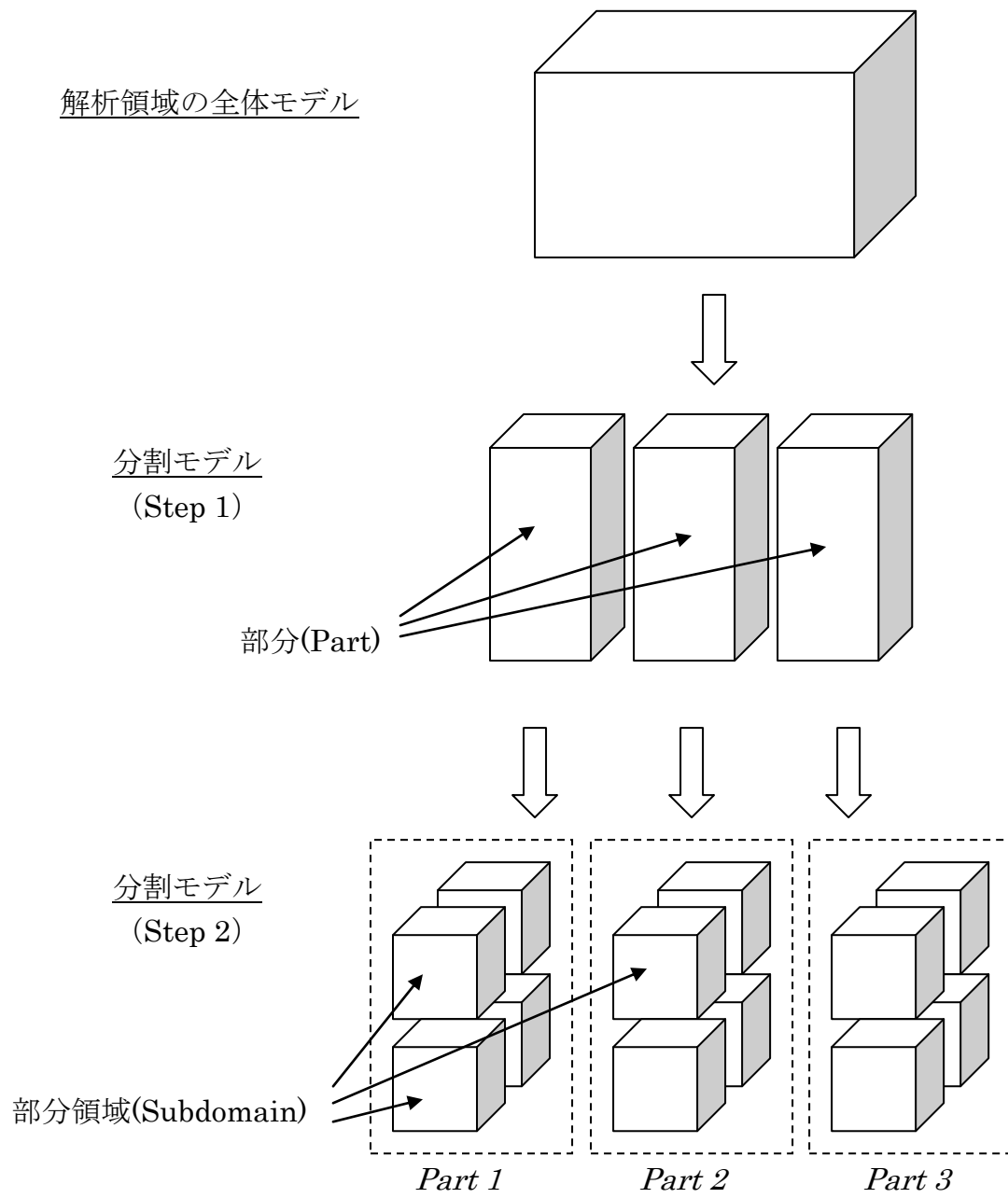


図 1 : 階層型領域分割

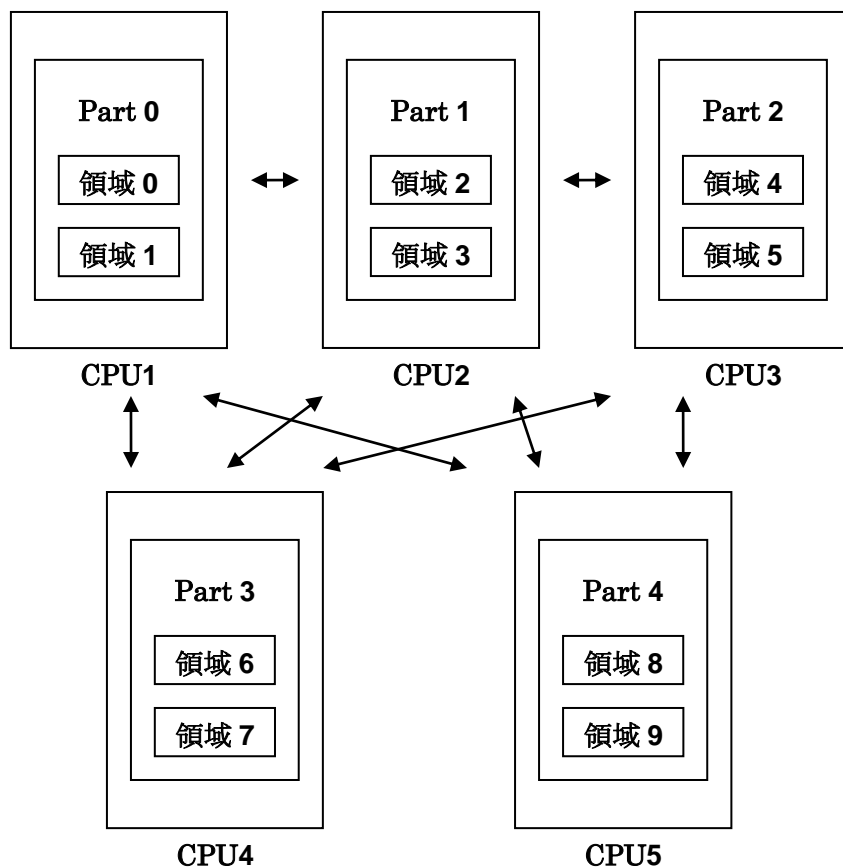


図 2 : 領域の CPU への割り当て—静的負荷分散版

2.2 非定常解析機能

非定常解析においては、後退Euler法を用いている。大まかな処理の流れは図3のようになる。全体として、2重のループになっており、外側のループは非定常反復、内側のループは階層型領域分割法におけるBiCGSTAB法、GP-BiCG法またはBiCGSTAB2法による反復である。

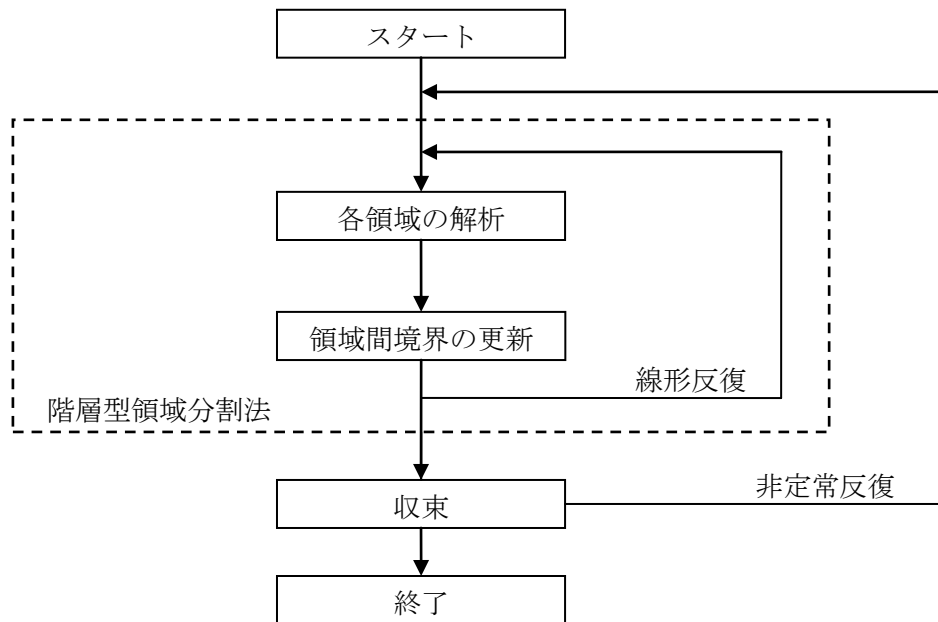


図 3：解析の流れ

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_sFlow / ThermalConvectionでは実行時にそのような領域が見つかると、警告を出して終了するようになっている。また、総要素数に対して非常に粗い分割を行った場合、計算量が多くなりメモリ不足になることがあり、このときも警告を出して終了するようになっている。

このようにADVENTURE_sFlow / ThermalConvectionモジュールの計算性能は、適切な領域分割に依存している。基本的に、“Part”数は並列処理の手法、ネットワークで使用されるノードの数や計算機環境に基づいて決定される。“Subdomain”数は、計算処理に必要とされるメモリに基づいて決定される。細かく分割すればSubdomainあたりのメモリ使用量を少なくできることは自明のことである。

※また、ADVENTURE_Metisの実行においては、3.1節で後述するように内部境界上の節点の自由度を5に指定するためのオプション(-difn 5)がADVENTURE_sFlow / ThermalConvection への入力モデル作成において必須である。

3 解析機能

ADVENTURE_sFlow / ThermalConvectionは、並列処理により、非定常熱対流問題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システムにおいて、ADVENTURE_sFlow / ThermalConvectionおよび前後の処理の流れは図4のようになっている。

(1) メッシュデータの作成(ADVENTURE_TetMesh)

解析対象に対してメッシュ分割を行う。

(2) 境界条件の付加(ADVENTURE_BCtool)

解析対象のメッシュに境界条件を付加する。

(3) 解析モデルの変換(fgr_getnode, non_stationary_makefem)

一体型の解析モデルファイルの作成には、付属のツールであるfgr_getnode, 及びnon_stationary_makefemを使用する。これらはそれぞれ境界面に属する節点データの作成を行うためのもの、そして一体型解析モデルファイルを作成するためのものである。詳しい実行方法は後述のAppendixを参照して頂きたい。

(4) 領域分割(ADVENTURE_Metis)

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 - difn 5を用いて、例えば以下のように実行される必要がある。

```
mpirun [mpi options] adventure_metis - difn 5 [options]
      model_filename directory_name div_num
```

このオプション - difn 5は、内部境界上の節点の自由度を5に指定するためのものである。これは、固体静解析では求める節点変位の自由度は3であるのに対し、流れ問題での解析で求める節点の自由度が4であり、さらに温度の要素を加えた自由度が5であるためである。ADVENTURE_sFlow / ThermalConvection への入力モデル作成において、 - difn 5は必須オプションである。

(5) 非定常熱対流問題解析(ADVENTURE_sFlow / ThermalConvection)

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) 可視化(ADVENTURE_Visual)

解析結果を可視化する。

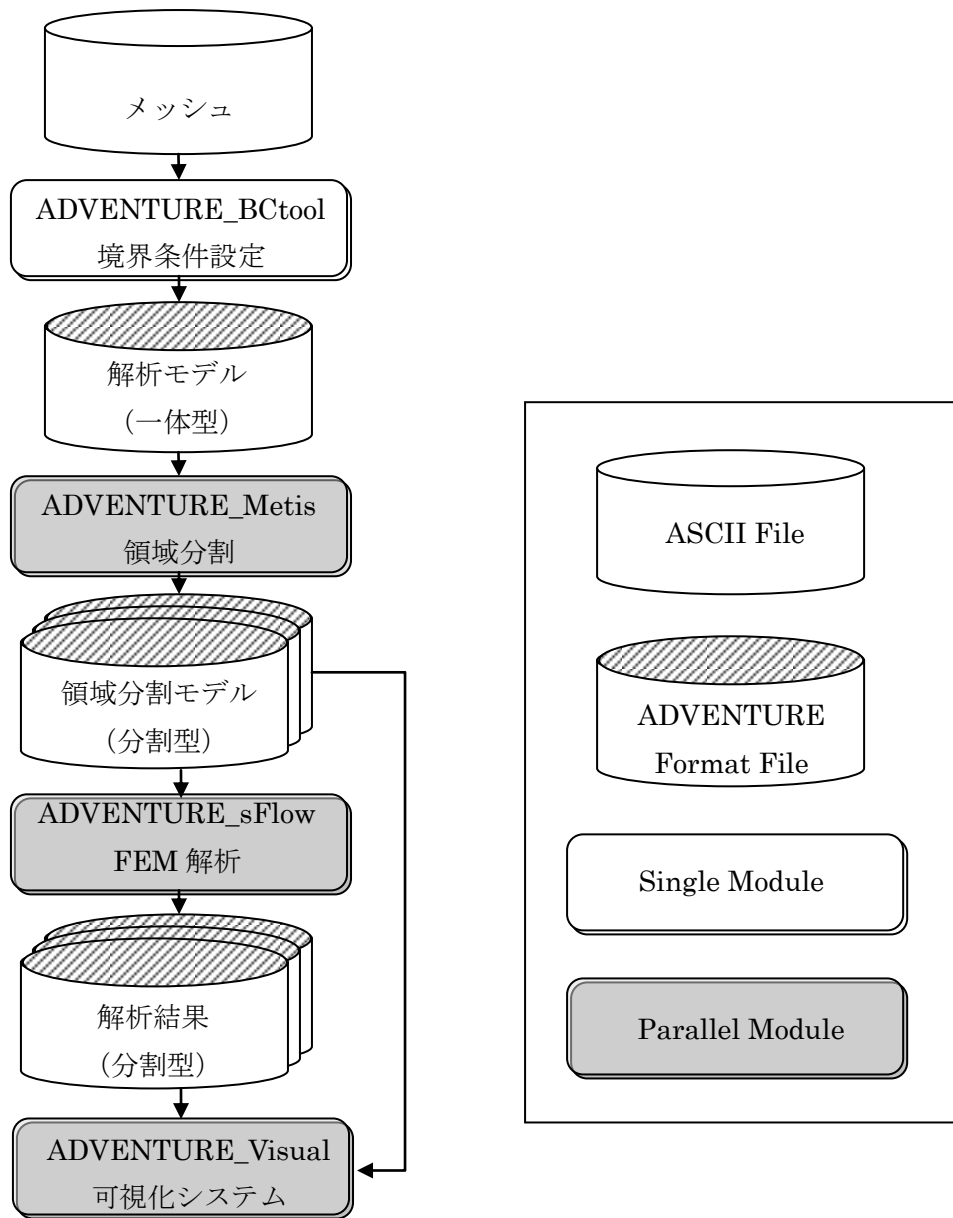


図 4 : 解析の流れ

3.2 入出力データについて

ADVENTURE_sFlowにおける入出力ファイルは図5のようにになっている。画面のログ出力以外のファイルは全て、ADVENTUREフォーマットであり、各Partごとに1ファイルとなっている。

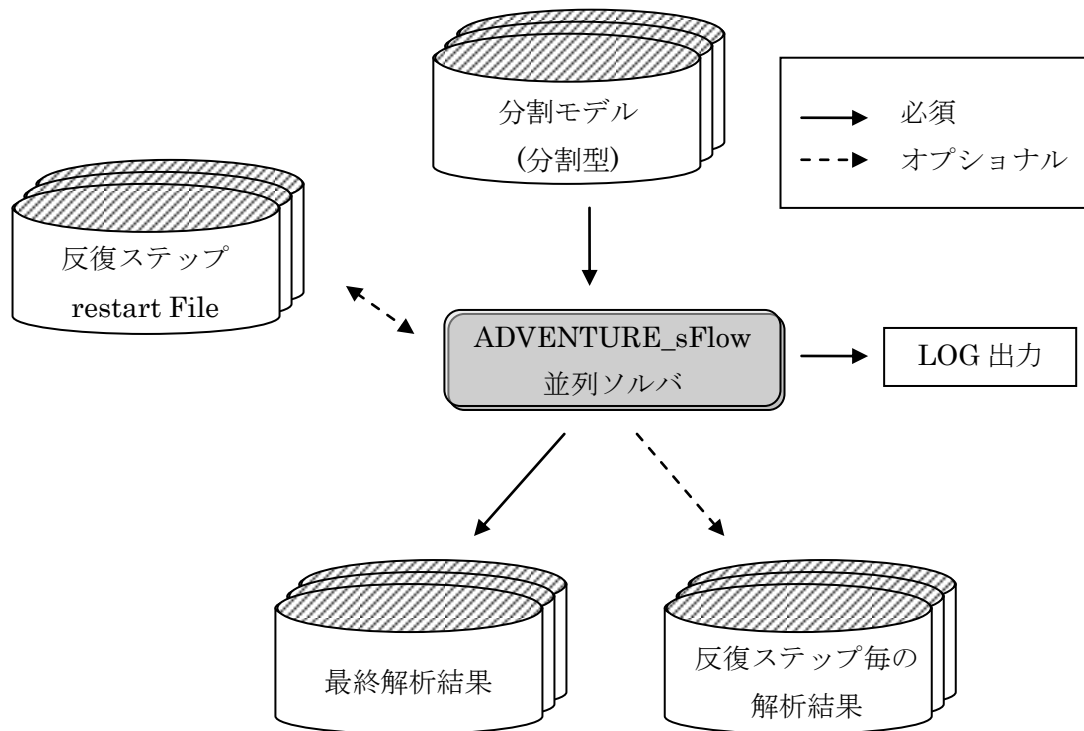


図5：入出力ファイル

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与えられ、節点ごとに速度と圧力、並びに温度の物理量を持つ。非定常解析時には反復ステップ毎の出力も可能である。これらも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、非定常反復リスタートファイルがある。

3.3 単位系について

ADVENTURE_sFlowでは、速度、密度で正規化した圧力（以下圧力）、温度の値を自由

度として採用している。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。

3.4 境界条件

付加できる境界条件には以下のものがある。

- 自由度指定境界条件（節点指定）
- 自然境界条件（表面力無し，温度勾配無し）

3.5 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。

- 動粘性係数
- 温度伝導率（拡散係数に相当）
- 熱膨張率
- 参照温度

3.6 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，各節点での速度，圧力，温度が出力される。

解析モデルと同様にPartごとに1ファイルのADVENTUREフォーマットで出力される。

4 実行方法

起動のコマンドは，並列版の起動にはMPIが必要である。mpichでの起動コマンドは

```
mpirun [options for mpirun] advflow-p [options] data_dir
```

である。

ここで，[options for mpirun]は**mpirun**コマンドに対するオプションである。

[options]はADVENTURE_sFlow自身に対するオプションであり，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4.2参照）

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次節に示すようになる。

4.1 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であり、各ファイルはこの*data_dir*以下に置かれる。

- 解析モデルファイル:

data_dir/model/advhddm_in_*P*.adv

- 解析結果ファイル:

data_dir/result/advhddm_out_*P*.adv

- リスタートファイル(非定常解析時の途中ファイル):

data_dir/result/advhddm_out_*S*_*P*.adv

ここで、*P*はPart番号、*S*は後退Euler法のステップ番号を示している。

4.2 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。

4.2.1 非定常解析の指定

- **-ns**
非定常解析を行う。このオプションをつけないとStokes問題となる。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。
- **--ns-tol** *x*
収束判定のためのトレランスを指定する。これは後退Euler法における相対変化量であり、これより相対変化量が小さくなった時点で定常解に達したとみなす。デフォルトでは 1.0×10^{-4} に設定してある。
- **--step** *n*
後退Euler法の反復回数の上限を*n*回に指定する。デフォルトでは20になっている(デフォルト値は便宜上の値である)。
- **--out-interval** *n*
後退Euler法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。
- **--use-resin** *n*
以前の実行において出力された後退Euler法のステップ*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。
- **--dt**
時間刻みを指定する。

4.2.2 反復法のコントロールオプション

ADVENTURE_sFlowでは、内部境界自由度に対する線形方程式を解くためにBiCGSTAB法またはGP-BiCG法、BiCGSTAB2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。

- **-solver [bicgstab, gpbicg or bicgstab2]**
BiCGSTAB法またはGP-BiCG法、BiCGSTAB2法を指定する。デフォルトではBiCGSTAB2法に設定してある。
- **-cg-tol x**
収束判定のためのトレランスを指定する。これは反復における初回での残差に対する相対誤差であり、反復においてこれより相対誤差が小さくなった時点で収束とする。デフォルトでは 1.0×10^{-6} に設定してある。
- **-cgloop-max n**
反復回数の上限を指定する。デフォルトでは10,000になっている。

4.2.3 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の指定方法は、基本的にそれらのトップディレクトリのみを指定し、そこからのファイル、ディレクトリ名はデフォルト値を用いるようになっている。これらを変更する場合は、以下のオプションを使用する。以下では S が反復ステップ番号、 P がPart番号を示している。

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

4.2.4 その他のオプション

- **`-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 1,024 [MByte] である。
- **`-help` または `-h`**
メインのヘルプメッセージを表示する。
- **`-version` または `-v`**
モジュールのバージョンを表示する。
- **`-help-ns`**
非正常反復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。
- **`-help-iter`**
反復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。

4.2.5 defs.hによる設定

- **`NORM [0 or 1]`**
0のときは反復法の相対残差をMaxノルムで取る。1のときは反復法の相対残差を2ノルムで取るようにする。デフォルトでは1の2ノルムである。
- **`DIAG_SIGN [0 or 1]`**
0の時は反復法の対角スケーリング前処理を符号付で計算する。1のときは反復法の対角スケーリング前処理を絶対値で計算する。デフォルトでは0の符号付きである。ただしBiCGSTAB2法の場合は絶対値で計算すると発散することが多いので注意が必要である。

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_sFlow / ThermalConvectionは、4面体1次要素に対応している。

A.1 4面体1次要素

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6のようになっている。

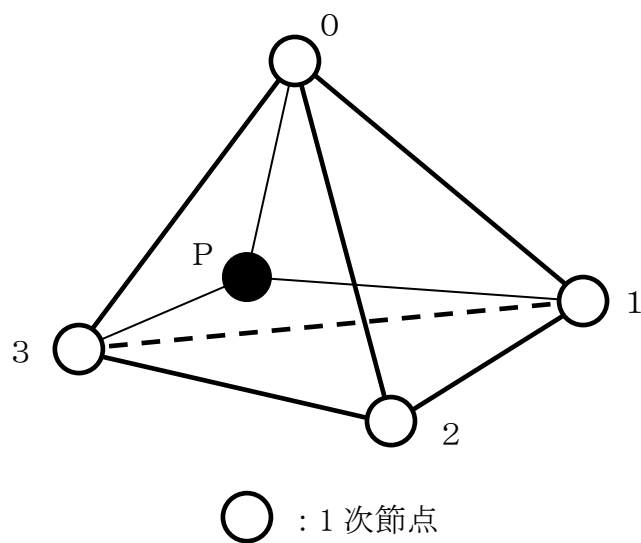


図6: 4面体1次要素

B 境界条件について

ADVENTURE_sFlow / ThermalConvection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.

B.1 自由度指定境界条件

```
[Properties]
1: content_type=FEGenericAttribute
2: num_items=81
3: feqa_type=NodeVariable
4: label=DirichletBC
5: format=i4f8
6: index_byte=4
[Data]
0 0 0.000000e+00
0 1 0.000000e+00
0 2 0.000000e+00
1 0 0.000000e+00
1 1 0.000000e+00
1 2 0.000000e+00
2 0 0.000000e+00
2 1 0.000000e+00
3 2 0.000000e+00
3 0 0.000000e+00
...
```

図7：自由度指定境界条件フォーマット例

左から順に、節点番号、方向成分、[圧力、速度、温度]を示している。ただし、方向成分に関しては、非定常熱対流問題の解析では1節点あたりの自由度が5のために、流速の方向成分0, 1, 2のほかに圧力、温度の成分として3, 4が必要になる。

B.2 物性値(動粘性係数)

```
[Properties]
1: content_type=FEGenericAttribute
2: num_items=1
3: fega_type=AllElementVariable
4: label=kinematicViscosity
5: format=i4f8f8
6: index_byte=4
[Data]
1.000000e-02
```

図8：物性値フォーマット例

ここでは動粘性係数の値のみを指定している。

C ツール類について

ADVENTURE_sFlow / ThermalConvectionのアーカイブ中には、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 non_stationary_makefem

non_stationary_makefemは、ADVENTURE_BCtoolにより得られる解析条件ファイル(拡張子は cnd)を非定常熱対流問題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 ⇒ 自由度指定境界条件

実行方法は

```
non_stationary_makefem <kinematic viscosity> <heat conductivity>
<beta> <Tr> mshFile datFile cndFile advFile
```

である。

ここで、*mshFile*は、ADVENTURE_TetMeshにより作成されるメッシュデータ、*cndFile*は、ADVENTURE_BCtoolにより作成されるものである。
<kinematic viscosity>には動粘性係数、<heat conductivity>には温度伝導率、<beta>には熱膨張率、<Tr>には参照温度を指定する。また*advFile*名は各自の好きなように指定できる。

このコマンドを実行することで、ADVENTURE_sFlow / ThermalConvection解析用*advFile*が出来上がる。

また、本ツールにおいて物性値の変換は行うのでADVENTURE_BCtoolにおけるmakefemコマンドにより一体型ファイルを作成する必要はない。

C.2 速度・圧力・温度結合用sflow_hddmmrg

ADVENTURE_Metisにて分割後、ADVENTURE_sFlow / ThermalConvectionにて解析することにより求められた、分割された速度・圧力・温度成分をそれぞれ1つにまとめるものである。

実行方法は

```
sflow_hddmmrg -step <num> [Pressure, Temperature or Velocity]  
directory_for_analysis
```

である。

[*Pressure, Temperature or Velocity*]は、圧力場を求めたいときは*Pressure*を、温度場を求めたいときは*Temperature*を、速度場を求めたいときは*Velocity*を選択する。

*directory_for_analysis*は、ADVENTURE_Metisで分割されたモデル、及びADVENTURE_sFlow / ThermalConvectionにて解析された結果が入っているディレクトリ名を指定する。

このコマンドを実行することで、*Pressure.dat*、*Temperature.dat*もしくは*Velocity.dat*が得られ、各節点ごとの圧力・温度・速度の値を知ることが出来る。また、これらを次節で紹介するデータ変換ツールを実行する際に使う。

C.3 データ変換ツールadvflow_p_rest2ucd

解析結果をAVSのUCD形式に変換するツールである。これにより、Micro AVS等を用いて解析結果の速度場・圧力場・温度場をチェックすることが出来る。

実行方法は

```
advflow_p_rest2ucd advFile ucdFile step del_time
```

である。

*advFile*は、一体型解析モデル変換フィルタnon_stationary_makefemによって求められた*advFile*である。

*ucdFile*は、出力されるUCDファイル名である。ファイル名は各自で自由に指定できる。また、実行する際の注意点として、*advFile*、*ucdFile*の拡張子は入力しないこと。また、前節で紹介したsflow_hddmrgにて出力された*Pressure.dat*、*Temperature.dat* 及び *Velocity.dat*が *advFile*と同じディレクトリにある必要がある。

C.4 プレ処理ツールadvmodel

3次元立方キャビティ問題の専用プレツールである。これにより、拡張子がadvの3次元立方キャビティ型解析モデルファイルを作成することができる。

advmodelを実行するには以下のようにすればよい。

```
advmodel <kinematic viscosity>  
          <Num_division_per_direction> advFile
```

1番目の引数 <kinematic viscosity> には動粘性係数の値を指定する。

2番目の引数 <Num_division_per_direction> 3次元立方キャビティモデルの一辺の分割数を指定する。参考として、一辺分割数49で自由度約50万、一辺分割数62で自由度約100万のモデルが出来上がる。

3番目の引数 *advFile* には任意の出力ファイル名を指定する。(例 test.adv)

D 解析例

D.1 非定常熱対流問題解析例

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_sFlow / ThermalConvection による解析例を示す。モデルの作成には ADVENTURE_CAD, ADVENTURE_TetMesh, ADVENTURE_BCtool の各モジュールを用いる。

以下に、各手順、及びこの例の実行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。

(1) モデル形状の作成

ここでは、簡単な形状モデルの Thermal Cavity 問題の解析例を示していく。まず、geometry file : thermal_cavity.gm3d を作成する。

(2) 表面パッチの作成

ジオメトリファイルをもとに ADVENTURE_CAD を用いて表面パッチを作成する。

まず、節点密度ファイルを適当なエディタで作成する。図 9 に作成例を示す。

thermal_cavity.ptn

```
BaseDistance
0.05
```

図 9 : 節点密度ファイルの作成例

次のコマンドにより、thermal_cavity.pcm が作成される。ここでは、節点密度を 0.05 としている。

```
% advcad thermal_cavity.gm3d thermal_cavity.pcm 0.05
```

(3) メッシュデータの作成

4 面体メッシュを切り、節点要素情報を入力する。

次のコマンドにより thermal_cavityc.pcc が作成され、続いて、thermal_cavityc.msh が作成される。

```
% advtmesh9p thermal_cavity.pcm
```



```
% advtmesh9m thermal_cavityc.pcc
```

(4) 境界条件の付加

ADVENTURE_BCtool を用いて境界条件を付加する.

次のコマンドにより, thermal_cavityc_3.fgr, thermal_cavityc_3.pch, thermal_cavityc_3.pcg, thermal_cavityc_3.trn が作成される.

```
% msh2pch thermal_cavityc.msh 3
```

続いて次のコマンドにより bcGUI を実行すると図 10 のようなウィンドウが開く.

```
% bcGUI thermal_cavityc_3.pch thermal_cavityc_3.pcg
```

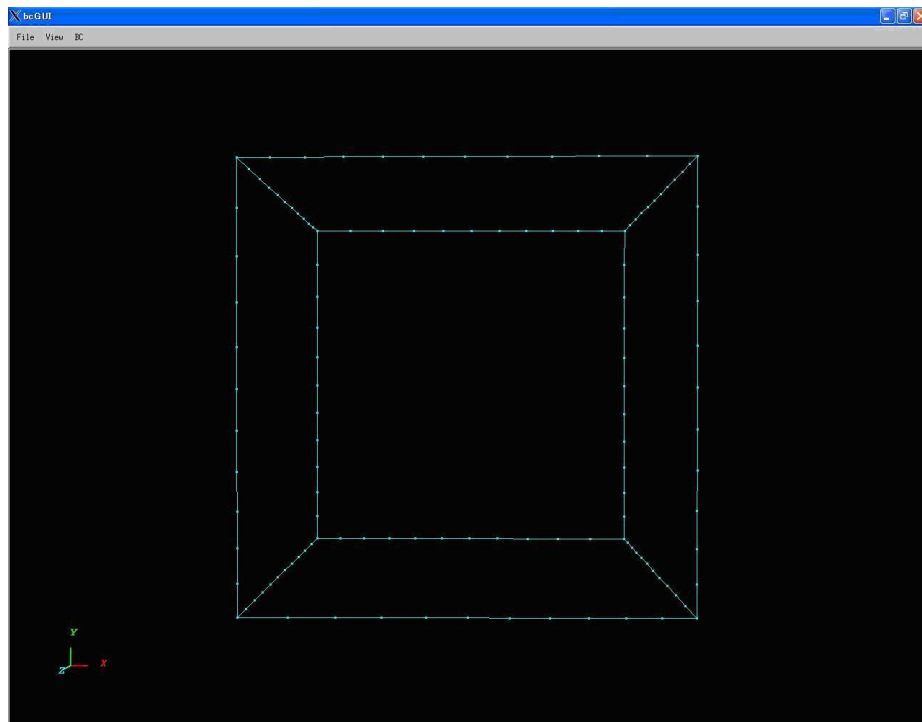


図 10 : bcGUI コマンドによるウィンド表示

まずは, 図 11 に示す面 (黄面) において x , y , z の各面の速度を 0 に指定する. ただし速度の境界条件は変位 (Displacement) で代用する.

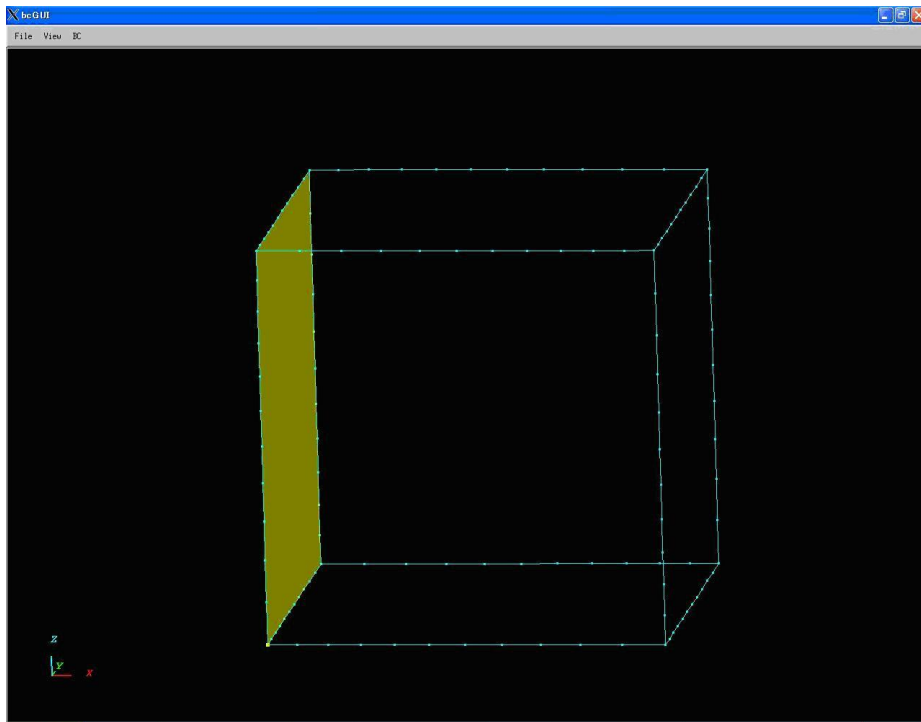


図 11：境界条件指定例 1

次に、上と同様に、図 12 に示す 6 つの面それぞれに適切な境界条件を設定する。温度の境界条件設定は後に説明する。

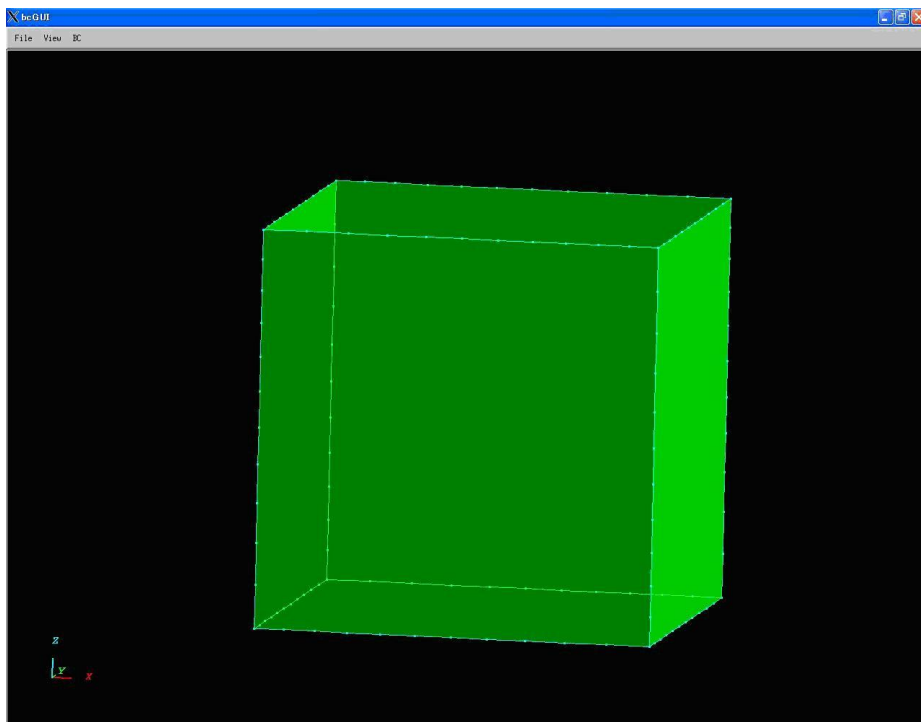


図 12：境界条件指定例 2

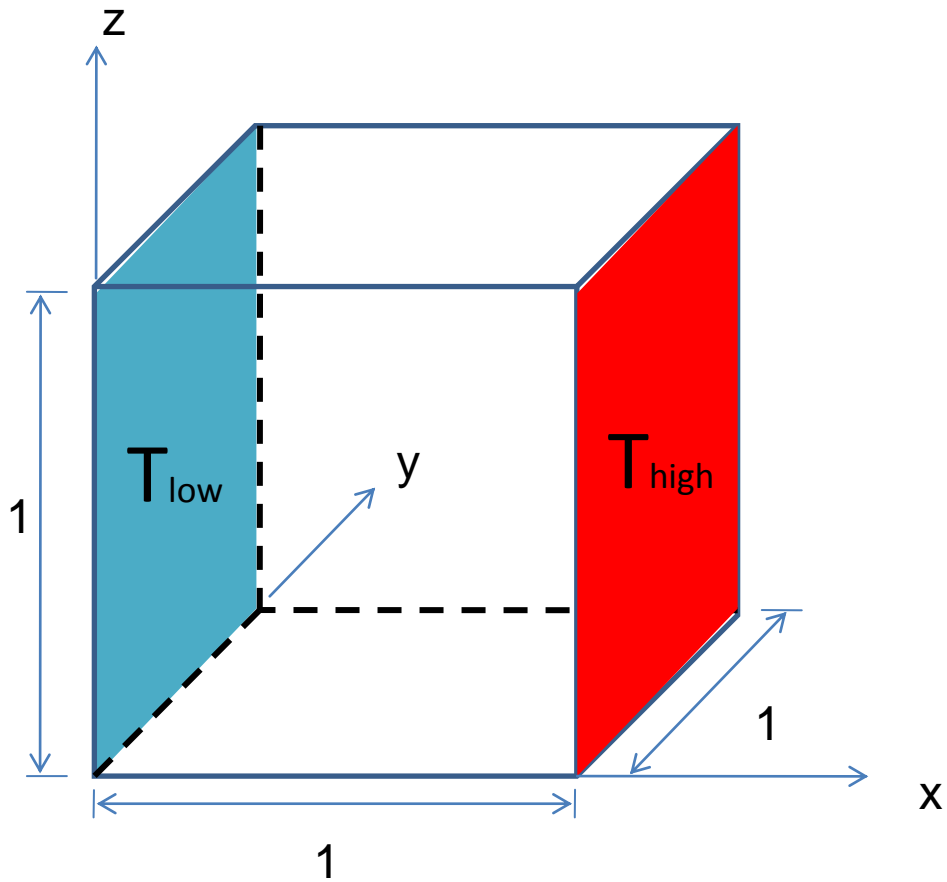
すべての境界条件を設定し終わったら、“thermal_cavity.cnd”というファイル名で出力する。

温度の境界条件は直接入力する必要がある。図 13 に示すように、この場合 16 ある境界条件のうち下から 1 つ目と 2 つ目が温度の境界条件を示している。4 つある番号の 1 個目が面の番号を示し、3 個目の 3 が温度の境界条件を示し、4 個目が温度 1 [K], 0[K]を示している。

詳しくは、ADVENTURE_BCtool プログラム使用マニュアルを参照のこと。

```
gravity 0 0 -9.8
boundary 16
dispOnFaceGroup 0 0 0 0
dispOnFaceGroup 0 0 1 0
dispOnFaceGroup 0 0 2 0
dispOnFaceGroup 1 0 0 0
dispOnFaceGroup 1 0 1 0
dispOnFaceGroup 1 0 2 0
dispOnFaceGroup 2 0 0 0
dispOnFaceGroup 2 0 1 0
dispOnFaceGroup 2 0 2 0
dispOnFaceGroup 3 0 1 0
dispOnFaceGroup 4 0 1 0
dispOnFaceGroup 5 0 0 0
dispOnFaceGroup 5 0 1 0
dispOnFaceGroup 5 0 2 0
dispOnFaceGroup 0 0 3 0
dispOnFaceGroup 5 0 3 1
```

図 13 : 解析条件ファイル(拡張子 cnd)フォーマット例



温度指定 : $T_{\text{high}} = 1.0[\text{K}]$, $T_{\text{low}} = 0.0[\text{K}]$

速度指定 : 面番号 0, 5 [x=0.0, x=1.0] (u, v, w) = (0, 0, 0) [m/s]

面番号 3, 4 [y=0.0, y=1.0] v = 0 [m/s]

面番号 1, 2 [z=0.0, z=1.0] (u, v, w) = (0, 0, 0) [m/s]

図 14 : Thermal Cavity 解析モデル境界条件例

(5) 一体型解析モデルの作成

non_stationary_makefem は ADVENTURE_BCtool により得られる解析条件ファイルを非定常熱対流問題解析用に変換するツールである。

まず、初めに fgr_getnode で各面の節点一覧を作成する。以下のコマンドを入力する。出力ファイルは “thermal_cavity.dat” である。

```
% fgr_getnode thermal_cavityc_3.fgr thermal_cavity.dat
```

続けて、以下のコマンドにより一体型解析モデルを作成する。ただし、出力されるファイルは `thermal_cavity.adv` である。

```
% non_stationary_makefem 0.71 1.0 710 0.5 thermal_cavityc.msh  
thermal_cavity.dat thermal_cavity.cnd thermal_cavity.adv
```

(6) 領域分割

作成した一体型解析モデルをもとに `ADVENTURE_Metis` を用いて階層型に領域分割されたモデルを作成する。なお、実行時にはオプション `-difn 5` を用いる必要がある。これは、熱対流問題では1節点あたりの自由度が5であることによる。

まず、階層型の領域分割をするために、部分 (Part) 数と部分領域 (Subdomain) 数を決定する。ここでは、10 台の PC を用いて静的負荷分散版で解析することとする。このため、Part 数を 10 とする。

ここで、解析モデルの要素数は 95,182 であり、1 部分領域あたりの要素数を 100 とすると、

$95,182$ (要素数) $\div 10$ (Part 数) $\div 100$ (1 部分領域あたりの要素数) $= 95.182$ となるので1部分あたりの部分領域数を 96 とする。なお、解析領域全体での部分領域数は

$$(\text{Part 数}) \times (1 \text{ 部分領域あたりの部分領域数})$$

なので、960 となる。領域分割は次のコマンド例のように行う。

```
% mpirun -np 10 -machinefile machinefile adventure_metis  
-difn 5 thermal_cavity.adv out 96
```

ここで、`-machinefile` は MPI のオプションである。なお、`out` は入出力用のディレクトリである。

(7) 解析の実行

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

```
% mpirun -np 10 -machinefile machinefile advsflow-p -ns --dt 0.01
--ns-tol 0.6 --out-interval 1 --step 61 -solver gpbcig out
```

ここで、`-ns` は `ADVENTURE_sFlow` に対するオプションであり、非定常解析を行うための必須オプションである。解析終了時間は `--ns-tol` (0.6) と、ステップ数×時間刻み ($=61 \times 0.01 = 0.61$) の小さいほうの値で決定される。

(8) 解析結果の可視化

ここでは、MicroAVS による可視化までの例を紹介する。ADVENTURE_sFlow 付属の `advsflow_p_rest2ucd` を使うことで MicroAVS 用の UCD ファイルを作成することができる。

まず、解析結果の出力ファイルより圧力、速度、及び温度のデータを取り出す。実行方法は以下のとおりである。

```
% sflow_hddmmrg -step 61 Pressure out
% sflow_hddmmrg -step 61 Velocity out
% sflow_hddmmrg -step 61 Temperature out
```

これにより、各節点ごとの圧力、速度、及び温度の値を知ることができる。

次に、出力されたこれらのデータ (`Pressure.dat`, `Velocity.dat`, `Temperature.dat`) と `thermal_cavity.adv` のファイルより、UCD ファイルを作成する。以下にコマンド例を示す。

```
% advsflow_p_rest2ucd thermal_cavity thermal_cavity 61 0.01
```

ここで、前者の `thermal_cavity` は ADV ファイル名であり、後者の `thermal_cavity` は UCD 形式のファイル名である (出力は `thermal_cavity.inp`)。

また、`thermal_cavity.adv`, `Pressure.dat`, `Velocity.dat`, `Temperature.dat` が同じディレクトリにあることに注意する。

図 15 に MicroAVS を用いて XZ 面の温度分布を可視化した結果を示す。

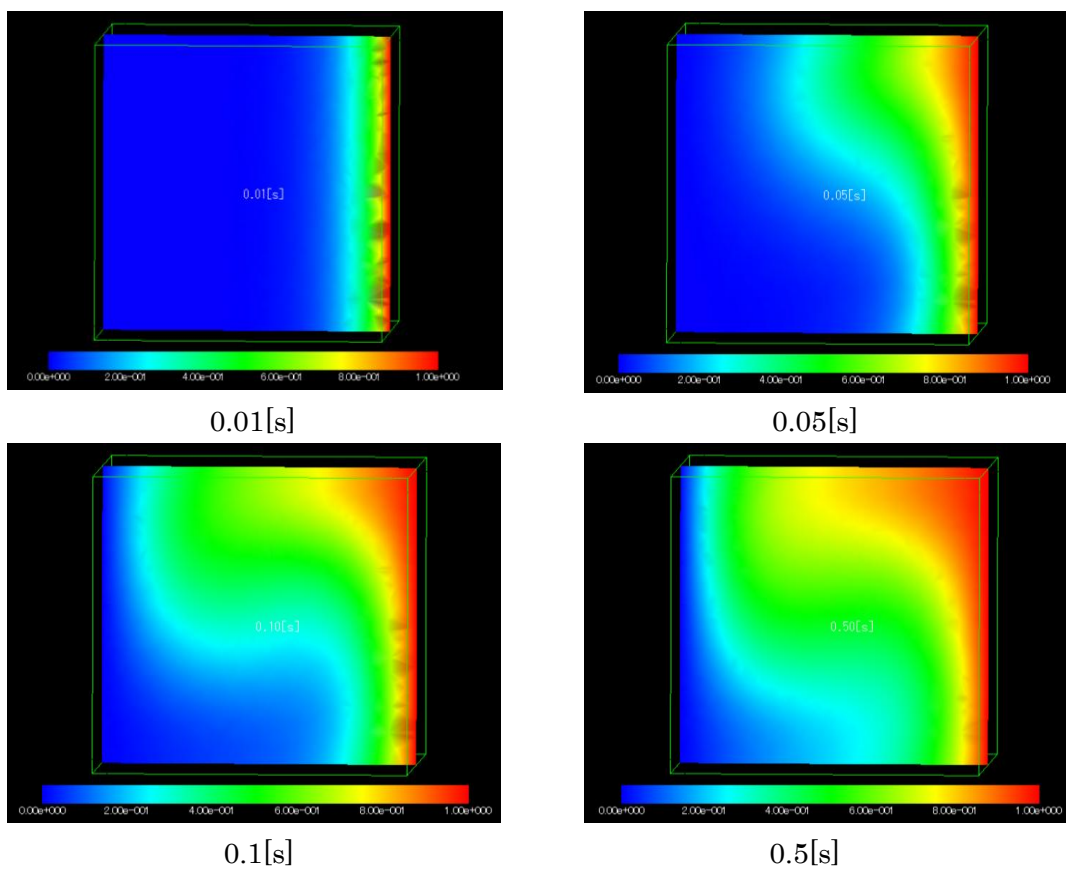


図 15 : 温度分布の可視化

参考文献

- [1] ADVENTURE Project: <http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp>
- [2] Yagawa, G., and Shioya, R.: Parallel finite elements on a massively parallel computer with domain decomposition, *Computing Systems in Engineering*, 4, Nos. 4-6, pp. 495-503(1993).
- [3] Yagawa, G., and Shioya, R.: Massively Parallel Finite Element Analysis, Asakura-Shoten, (1998) (in Japanese) ([10]と同じ)
- [4] Miyamura, T., Noguchi, H., Shioya, R., Yoshimura, S., and Yagawa, G. : Massively parallel elastic-plastic finite element analysis using the hierarchical domain decomposition method, *Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers (JSME)*, 65-A, No.634, pp. 1201-1208(1999) (in Japanese).
- [5] MPI: <http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/>
- [6] MPICH: <http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/mpich/>
- [7] Mandel, J.: Balancing domain decomposition, *Communications on Numerical Methods in Engineering*, 9, 233-241(1993)
- [8] Shioya, R., Kanayama, H., Mukaddes, A.M.M., and Ogino, M. : Heat conductive analysis with balancing domain decomposition method, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.52, pp.43-53(2003).
- [9] Quarteroni, A. and Vali, A. : Domain Decomposition Methods for Partial Differential Equations, Clarendon Press Oxford(1999).
- [10] 矢川元基, 塩谷隆二; 超並列有限要素解析, 計算科学シリーズ, 朝倉書店(1998)
- [11] Franca, L.-P. and Frey S.-L. : Stabilized finite element methods: II. The incompressible Navier-Stokes equations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 99, pp.209-233 (1992).
- [12] Brooks, A. N., and Hughes, T. J. R. : Streamline upwind / Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 32, pp.199-259 (1982).
- [13] Gerard, L. G. S. and Diederik, R.-F. : BiCGSTAB(L) for linear equations involving unsymmetric matrix with complex spectrum, *Electronic Transactions on Numerical Analysis*, Vol. 1, pp. 11-32(1993).
- [14] Hansbo, P. and Szepessy, A. : A velocity-pressure streamline diffusion finite element method for the incompressible Navier-Stokes equations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 84, pp.175-192(1990).
- [15] Hughes, T. J. R. and Brooks, A. N. : A theoretical framework for

- Petrov-Galerkin methods with discontinuous weighting functions : application to the streamline-upwind procedure, *in Finite Elements in Fluids*, Fallagher, R. H., Norrie, D.H., Oden, H.T., and Zienkiewicz, O.C., eds., Vol.4, pp. 47-65(1982).
- [16] Kanayama, H. and Toshigami, K.: Three-dimensional air flow analysis in clean rooms by a finite element method, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 36, pp.35-46(1988).
- [17] Kanayama, H., Toshigami, K., and Motoyama, H. : A partial upwind finite element approximation for the stationary Navier-Stokes equations, *Computational Mechanics*, Vol. 5, pp.209-216 (1989).
- [18] Tabata, M., and Suzuki, A. : A stabilized finite element method for the Rayleigh-Benard equations with infinite Prandtl number in a spherical shell, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, pp. 387-402(2000).
- [19] Tezduyar, T. E., Mittal, S., and Shih, R. : Time accurate incompressible flow computations with quadrilateral velocity-pressure elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 87, pp. 363-384(1991).
- [20] Zhou, T.-X. and Feng, M.-F. : A least squares Petrov-Galerkin finite element method for the stationary Navier-Stokes equations, *Mathematics of Computation*, Vol. 60, pp. 531-543(1993).
- [21] Saad, Y. and Schultz, M. H., GMRES : A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems, *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, Vol.7, pp.856-869(1986).
- [22] Shioya, R. and Yagawa, G. : Iterative domain decomposition FEM with preconditioning technique for large scale problem, *ECM'99, Progress in Experimental and Computational Mechanics in Engineering and Material Behavior*, pp, 255-260(1999).
- [23] Kanayama, H., Tagami, D., Araki, T., and Kume, H. : A stabilization technique for steady flow problems, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol.18, No4, pp.297-301(2004).
- [24] Kanayama, H., Tagami, D., and Chiba, M. : Stationary incompressible viscous flow analysis by a domain decomposition method, *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XVI*, pp.611 – 618(2006).