

# **User Guide of FFV-C**

## **Frontflow / violet Cartesian**

**Ver. 0.8.1**

Institute of Industrial Science  
**The University of Tokyo**

<http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/>

Advanced Institute for Computational Science  
**RIKEN**

<http://www.aics.riken.jp/>

**September 2013**



---

FFV-C	Version 0.8.1	12 Sep.	2013
	Version 0.8.0	22 Aug.	2013
	Version 0.7.1	12 July	2013
	Version 0.6.0	3 June	2013
	Version 0.5.0	14 July	2012
CBC	Version 1.1.9	7 Nov.	2011
	...		
	Version 1.0.0	9 Oct.	2010

**(c) Copyright 2007-2011**

VCAD System Research Program, RIKEN. All rights reserved.

2-1, Hirosawa, Wako, 351-0198, JAPAN.

**(c) Copyright 2012-2013**

Advanced Institute for Computational Science, RIKEN. All rights reserved.

7-1-26, Minatojima-minami-machi, Chuo-ku, Kobe, 650-0047, JAPAN.

**(c) Copyright 2011-2013**

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo. All rights reserved.

4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 JAPAN.

# 目次

第 1 章	FFV-C の概要	1
1.1	FFV-C の特徴	2
1.2	FFV-C の開発経緯とライセンス	3
第 2 章	インストール	4
2.1	FFV-C のコンパイルとインストール	5
2.2	MPI ライブラリのインストール	5
2.3	ffvc_package	6
2.3.1	環境変数の設定	9
2.3.2	configure オプション	9
2.4	個別のインストール	9
2.5	FFV-C ソルバーのインストールとコンパイル	10
2.5.1	アーカイブの解凍	10
2.5.2	倍精度計算	11
第 3 章	基礎方程式と解析方法	12
3.1	支配方程式	13
3.1.1	非圧縮性流体	13
3.2	無次元化	14
3.2.1	無次元化された支配方程式	14
3.2.2	無次元化パラメータの選択	15
	純強制対流	15
	熱対流	15
	浮力の効果を考慮しない場合	15
	浮力の効果を考慮する場合	15
	純自然対流	16
	固体熱伝導	16
	共役熱移動	16
3.3	解法アルゴリズム	16
3.3.1	Fractional Step 法	16
	Euler Explicit	16
	Navier-Stokes equations	17
	Thermal transport equation	17
第 4 章	解析モデルの作成	18
4.1	形状近似度による解析モデルの分類	19
4.1.1	Binary Voxel	19

4.1.2	体積率モデル	19
4.1.3	距離情報モデル	20
4.2	ポリゴンによる境界条件の指定	20
4.3	形状データからの解析モデルの作成手順	22
4.4	組み込み例題	22
4.4.1	IP_PMT クラス	22
4.4.2	IP_Rect クラス	22
4.5	例題	24
第 5 章	入力パラメータ	25
5.1	パラメータの記述構文	26
5.2	FFV-C の指定パラメータ	27
5.2.1	ApplicationControl	27
	任意オプション	27
5.2.2	ConvectionTerm	28
5.2.3	DomainInfo	29
5.2.4	GeometryModel	30
5.2.5	GoverningEquation	31
5.2.6	IntrinsicExample	32
5.2.7	Iteration	33
5.2.8	MediumTable	35
5.2.9	MonitorList	36
5.2.10	Output	39
	Log	40
	Data	40
	BasicVariables	40
	DerivedVariables	41
	AveragedVariables	41
	FormatOption	41
	PLOT3D	41
5.2.11	Reference	44
5.2.12	ReferenceFrame	45
5.2.13	ShapeApproximation	46
5.2.14	SolvingMethod	47
5.2.15	StartCondition	48
	InitialState	48
5.2.16	TimeControl	50
	Acceleration	50
	TimeStep	50
	Session	51
	Average	51
5.2.17	TreatmentOfWall	53
5.2.18	TurbulenceModeling	54
5.2.19	Unit	55

第 6 章	境界条件	56
6.1	境界条件の概要	57
6.1.1	外部境界条件と局所境界条件	57
6.1.2	BcTable ノードのパラメータ構造	57
6.1.3	OuterBoundary	58
6.1.4	LocalBoundary	60
6.1.5	計算格子と内部・外部領域	61
6.2	外部境界条件	62
6.2.1	壁面境界	62
	流れの境界条件	62
	ThermalOption	63
	断熱境界	63
	熱流束境界	63
	熱伝達境界	63
	等温境界	66
6.2.2	対称境界	67
6.2.3	流境界	68
6.2.4	速度指定境界	69
6.2.5	周期境界	70
6.2.6	トラクションフリー境界	72
6.3	局所境界条件	73
6.3.1	壁面境界	73
	流れの境界条件	73
	熱境界条件	73
	熱境界条件の指定方法	73
	断熱境界	74
	熱流束境界	74
	熱伝達境界	74
	等温壁境界	75
6.3.2	流境界条件	76
	流れの流境界	76
	熱流境界	76
6.3.3	速度指定条件	76
	流れの境界条件	76
	熱境界条件	77
6.3.4	周期境界条件	78
	流れの境界条件	78
	熱境界条件	78
6.3.5	セルボリュームに対する熱境界条件	79
	SpecifiedTemperature	79
	HeatGeneration	79
6.3.6	モニタ	80
6.4	外力項を用いた境界条件	82
6.4.1	圧力損失境界条件	82
	熱交換器のモデル化	82

6.5	静止座標系と移動座標系の場合の境界条件	85
第 7 章	モニタリング機能	86
7.1	パラメータファイルで指定する方法	87
7.1.1	値の採取方法	88
	nearest	88
	interpolation	88
	smoothing	89
7.1.2	指定パラメータの制限およびエラー処理	89
7.1.3	出力ファイルフォーマット	89
	ヘッダ領域	89
	データ領域	90
7.2	局所境界条件で指定する方法	91
7.3	モニター例	92
7.3.1	初期化時の出力情報	94
7.3.2	単一ファイル出力	95
7.3.3	分散ファイル出力	95
7.3.4	Sampling_Mode の指定例	96
7.3.5	スキップモニタ点がある場合のファイル出力例 (単一ファイル)	97
第 8 章	ファイル管理とリスタート	98
8.1	リスタート	99
	粗格子の結果を用いたリスタート	99
第 9 章	ソルバーの実行	101
9.1	FFV-C ソルバーの実行	102
9.2	出力ファイル	103
9.2.1	出力ファイルの種類と指定	103
9.2.2	解析条件情報 [condition.txt]	104
9.2.3	領域情報 [DomainInfo.txt]	105
9.2.4	基本履歴 [history_base.txt]	106
9.2.5	コンポーネント履歴 [history_compo.txt]	107
9.2.6	流量収支履歴 [history_domainflux.txt]	108
9.2.7	反復履歴 [history_iteration.txt]	109
9.2.8	サンプリング履歴 [sampling.txt]	110
9.2.9	性能情報	111
9.2.10	その他のファイル	112
9.2.11	モデルファイル	113
9.2.12	結果ファイル	114
9.2.13	メモリ使用量の情報	115
9.3	並列計算	116
9.3.1	MPI 並列	116
9.3.2	スレッド並列	117
9.4	各プラットフォームにおける実行	118
9.4.1	RICC	118

目次	vi
第 10 章 アップデート情報	120
参考文献	122
索引	123

## 第 1 章

# FFV-C の概要

本ユーザーガイドでは、三次元非定常非圧縮熱流体解析ソルバー FFV-C について、その利用方法を説明します。



## 1.1 FFV-C の特徴

FFV-C(FrontFlow/Violet Cartesian) は、直交等間隔格子上で三次元非定常非圧縮性熱流体を解析するシステムです。ソルバーを構築する上で必要な、パラメータハンドリング、主要な境界条件処理とパラメータの関連づけ、ファイル入出力、並列計算処理、組み込み例題など、コアアルゴリズム以外の部分は、FlowBase クラスなどにパッケージ化しています。

FFV-C ソルバークラスは、下記のような特徴を持っています。

形状近似	: キューブ近似 (Binary), 任意形状 (距離情報)
変数配置	: コロケート
離散化	: 有限体積法, 差分法
時間積分	: 一次精度 Euler 陽解法
空間スキーム	: 一次精度風上, 三次精度 MUSCL
解法	: Fractional Step 法
反復法	: Point SOR, 2-colored SOR-SMA (ストライドメモリアクセス版)
スタート機能	: Initial(Impulsive, Smooth), 指定時刻からの再スタート, 粗格子からの内挿リスタート
入力ファイル	: モデルファイル (STL/拡張 STL フォーマット), テキストファイル (計算条件など)
出力ファイル	: sph フォーマット, PLOT3D フォーマット, 履歴ファイル, モニター出力, 性能情報など
外部境界条件	: 固定・移動壁面, 流入, 流出, 周期, 対称, トラクションフリー
内部境界条件	: 壁面, 速度規定, 流出, 部分周期境界, 圧力損失, 多孔質
温度境界条件	: 断熱, 熱伝導, 熱伝達, 輻射, 熱流束, 等温
並列化	: 等分割, Hybrid 並列 (プロセス並列と OpneMP によるスレッド並列)
組み込み例題機能	: キャピティフロー問題など, 基本的な問題
利用ライブラリ	

図 1.1 に FFV-C のモジュール構造を示します。各ライブラリは次のような機能を提供します。

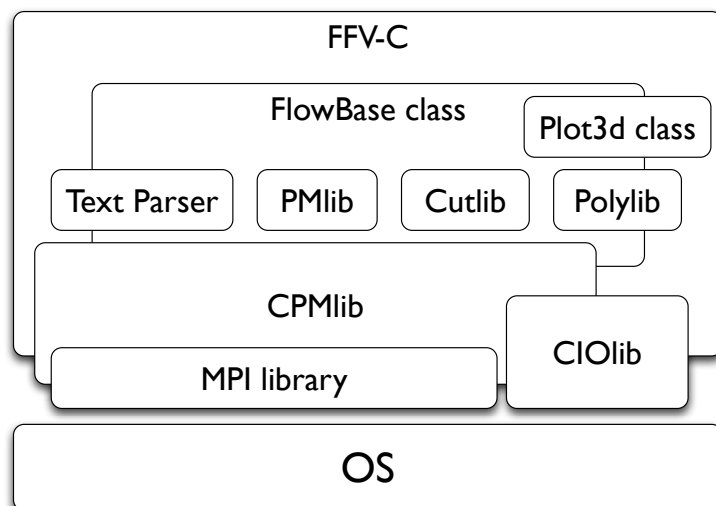


図 1.1 FFV-C の内部モジュール構造

---

CIOLib	ファイル入出力の管理を行う機能ライブラリ
Cutlib	幾何形状が表す面と背景の直交格子の交点を計算するライブラリ
CPMlib	直交等間隔格子の並列領域管理ライブラリ
OpenMPI	プロセス並列ライブラリ
PMLib	性能測定パッケージライブラリ
Polylib	幾何形状データを並列領域で管理する機能を提供するライブラリ
TextParser	YAML に類似した形式で記述されたテキストのパラメータをパースするライブラリ

---

## 1.2 FFV-C の開発経緯とライセンス

FFV-C は、HPCI 戦略プログラム「分野 4 次世代ものづくり」プロジェクトのもと、東京大学生産技術研究所において研究開発を推進しているシミュレーションソフトウェアで、理化学研究所 VCAD システム研究プログラム (<http://vcad-hpsv.riken.jp/jp/>) で開発されてきた V-Sphere::CBC ソルバークラスをオリジナルとして、大規模並列解析を実施するために改変が加えられたプログラムです。CBC の場合には V-Sphere ミドルウェアを利用して記述されていましたが、FFV-C ではよりコンパクトなアプリケーションミドルウェアである CPMlib を用いた記述になっています。また、入力パラメータの形式が XML から独自の簡単な YAML ベースの記述形式になっています。

ライセンスについては、2 つのライセンス形態を用意しています。

- VCAD ライセンス

VCAD ライセンスについては、上記の VCAD システム研究プログラムホームページからお問い合わせください。

- 修正 BSD ライセンス

## 第 2 章

# インストール

この章では、MPI 通信ライブラリや必要な機能ライブラリなど、FFV-C に必要なライブラリ群のインストールとコンパイル、および FFV-C のコンパイルについて説明します。

## 2.1 FFV-C のコンパイルとインストール

FFV-C は図 1.1 に示すようなサブモジュールにより構成されており、各機能はライブラリ化されています。このため、各ライブラリのコンパイルと FFV-C のコンパイルが必要になります。

## 2.2 MPI ライブラリのインストール

OpenMPI<sup>\*1</sup>のインストールについて説明します。

### 1. autotools によるコンパイル

autotools(autoconf & automake)<sup>\*2</sup>を用いて作成されたパッケージは容易にインストールができます。典型的な場合、インストールまでの全工程が自動化され、ソースコードを展開した後、以下のコマンドを入力するだけで完了します。

```
./configure && make && make install
```

この時点で autotools のバージョンが違う場合には以下のコマンドを実行し、環境を合わせます。

```
$ aclocal
$ autoconf
$ automake -a
```

### 2. シェルスクリプトを用いたコンパイル環境の設定

configure のために、次のようなスクリプトを用意して実行します。インストールディレクトリは/opt/openmpi とします。コンパイラは、Intel Compiler icpc/fort の利用を指定しています。

```
$ cat config_ompi.sh

#!/bin/sh
export CC=icc
export CFLAGS=-O3
export CXX=icpc
export CXXFLAGS=-O3
export F77=ifort
export FFLAGS=-O3
export FC=ifort
export FCFLAGS=-O3
#
./configure --prefix=$1

$ ./config_ompi.sh /opt/openmpi
```

### 3. コンパイルの実行とインストール

```
$ make
$ sudo make install
```

### 4. PATH の設定

---

<sup>\*1</sup> [urlhttp://www.open-mpi.org/](http://www.open-mpi.org/)

<sup>\*2</sup> <http://www.gnu.org/software/autoconf/>

実行時の `mpirun`<sup>\*3</sup> が正しいパスになっているかどうかを `which` コマンドで確認します<sup>\*4</sup>。

```
$ which mpirun
```

## 5. 環境変数の設定

実行時に必要な環境変数をホームディレクトリの `.bash_profile` などに記述しておきます。

```
export LD_LIBRARY_PATH=/opt/openmpi/lib:$LD_LIBRARY_PATH
export DYLD_LIBRARY_PATH=/opt/openmpi/lib:$DYLD_LIBRARY_PATH
```

## 2.3 ffvc\_package

`ffvc_package` は各ライブラリと FFV-C アプリケーションを同梱したパッケージです<sup>\*5</sup>。このパッケージを展開すると、下記のようになり、各ライブラリの末尾 3 桁の数字はリリースバージョン番号を示しています。

```
$ tar xvfz ffvc_package-1.2.3.tar.gz
$ ls
CI0lib-1.3.3.tar.gz
CPMlib-1.1.0.tar.gz
Cutlib-3.1.2.tar.gz
FFVC-1.2.3.tar.gz
PMLib-1.9.5.tar.gz
Polylib-2.6.4.tar.gz
TextParser-1.3.6.tar.gz
ffvc_install_all.sh
```

`ffvc_install_all.sh` がインストールシェルになります。このインストールシェルは、Intel 系の CPU に対して、Intel コンパイラと OpenMPI を用いてコンパイルする場合の例です。

```
$ cat ffvc_install_all.sh
#!/bin/sh
#
#####
# Edit MACRO for your target machine

export TP=/usr/local/TextParser // インストール先のディレクトリの指定
export PL=/usr/local/Polylib
export CT=/usr/local/Cutlib
export PM=/usr/local/PMLib
export CPM=/usr/local/CPMlib
export CI0=/usr/local/CI0lib
export FFV=/usr/local/FFVC

export TMP_CXX=mpicxx // MPI ラッパーコンパイラの指定
export TMP_F90=mpif90

#####

# decompress
```

<sup>\*3</sup> `mpiexec` でも動きます。

<sup>\*4</sup> Mac OSX の場合にはデフォルトでインストールされている OpenMPI の方を見に行くので、インストールした OpenMPI の PATH を最初の方に書いておきます。

<sup>\*5</sup> [https://github.com/avr-aics-riken/ffvc\\_package](https://github.com/avr-aics-riken/ffvc_package) から入手できます。

```
tar xvfz TextParser-?.?.?.tar.gz
tar xvfz PMLib-?.?.?.tar.gz
tar xvfz Polylib-?.?.?.tar.gz
tar xvfz Cutlib-?.?.?.tar.gz
tar xvfz CPMLib-?.?.?.tar.gz
tar xvfz CIOlib-?.?.?.tar.gz
tar xvfz FFVC-?.?.?.tar.gz

# TextParser
#
echo
echo -----
echo Install TextParser
echo
cd TextParser-?.?.?
./configure --prefix=$TP \
             CXX=$TMP_CXX \
             CXXFLAGS=-O3
make && make install
cd ..

# PMLib
#
echo
echo -----
echo Install PMLib
echo
cd PMLib-?.?.?
./configure --prefix=$PM \
             CXX=$TMP_CXX \
             CXXFLAGS=-O3
make && make install
cd ..

# Polylib
#
echo
echo -----
echo Install Polylib
echo
cd Polylib-?.?.?
./configure --prefix=$PL \
             --with-parser=$TP \
             CXX=$TMP_CXX \
             CXXFLAGS="-O3 -Wall -fno-strict-aliasing"
make && make install
cd ..

# Cutlib
#
echo
echo -----
echo Install Cutlib
echo
cd Cutlib-?.?.?
./configure --prefix=$CT \
             --with-parser=$TP \
             --with-polylib=$PL \
             CXX=icpc \
             CXXFLAGS="-O3 -Wall -openmp"
make && make install
cd ..
```

```
# CPMlib
#
echo
echo -----
echo Install CPMlib
echo
cd CPMlib-?.?.?
./configure --prefix=$CPM \
            --with-pm=$PM \
            --with-parser=$TP \
            --with-comp=INTEL \
            CXX=$TMP_CXX \
            CXXFLAGS=-O3 \
            F90=$TMP_F90 \
            F90FLAGS=-O3
make && make install
cd ..

# CIOlib
#
echo
echo -----
echo CIOlib
echo
cd CIOlib-?.?.?
./configure --prefix=$CIO \
            --with-parser=$TP \
            CXX=$TMP_CXX \
            CXXFLAGS=-O3
make && make install
cd ..

# FFVC
#
echo
echo -----
echo Install FFVC
echo
cd FFVC-?.?.?
./configure --prefix=$FFV \
            --with-cpm=$CPM \
            --with-cio=$CIO \
            --with-cut=$CT \
            --with-pm=$PM \
            --with-polylib=$PL \
            --with-parser=$TP \
            --with-comp=INTEL \
            CC=mpicc \
            CFLAGS=-O3 \
            CXX=$TMP_CXX \
            CXXFLAGS="-O3 -openmp -par-report=3 -vec-report=2" \
            F90=$TMP_F90 \
            F90FLAGS="-O3 -Warn unused -fpp -openmp -par-report=3 -vec-report=2"
make && make install
cd ..
```

ffvc\_install\_all.sh を用いてコンパイルするには、まず、定義されている環境変数と、計算機環境に合わせてコンパイラオプションを指定します。

### 2.3.1 環境変数の設定

設定する環境変数は、インストールシェルの冒頭に記述されており、それぞれ下記ようになります。

TP	Text Parser ライブラリのインストールディレクトリ
PL	Polygon Management ライブラリのインストールディレクトリ
CT	Cut Information ライブラリのインストールディレクトリ
PM	Performance Monitor ライブラリのインストールディレクトリ
CPM	Cartesian Partition Manager ライブラリのインストールディレクトリ
CIO	Cartesian Input/Output ライブラリのインストールディレクトリ
FFV	FFV-C アプリケーションのインストールディレクトリ
TMP_CXX	C++ コンパイラ (MPI のラッパーコンパイラ)
TMP_F90	F90 コンパイラ (MPI のラッパーコンパイラ)

使用するコンパイラは、MPI ライブラリが提供するラッパーコンパイラを指定し、あらかじめ環境変数 PATH を設定しておきます。

### 2.3.2 configure オプション

提供するライブラリと FFV-C アプリケーションは、autotools を使ってパッケージしています。このために、configure 時に計算機環境に応じて適切にオプションを与える必要があります。各計算機向けのオプションの例については、展開したライブラリ内にある INSTALL を参照して、configure のオプションを指定してください。

make install を行うと、指定したディレクトリにライブラリやアプリケーションがインストールされます。

## 2.4 個別のインストール

提供されるモジュール毎にコンパイルを行います。あるモジュールだけアップデートされた場合に行います。インストール方法は各モジュールのディレクトリ内にある INSTALL を見てください。autotools によりパッケージ化していますので、前述のような configure && make && make install でコンパイルとインストールができます。また、Makefile.hand も提供されていますので、手動でのコンパイルも可能です。

ライブラリをアップデートした場合には、FFV-C アプリケーション本体も再コンパイル (あるいは再リンク) してください。

インストールされたライブラリのバージョンは、Polylib の場合、下記の方法で調べることができます。

```
$ cd /usr/local/Polylib/bin
$ polylib-config --version

Polylib - Polygon Management Library Ver. 2.6.4 (20130627_2359)

Copyright (c) 2010-2011 VCAD System Research Program, RIKEN.
All rights reserved.

Copyright (c) 2012-2013 Advanced Institute for Computational Science, RIKEN.
All rights reserved.
```



## 2.5 FFV-C ソルバーのインストールとコンパイル

本節では、FFV-C アプリケーションのコンパイルとインストールについて説明します。提供されるアーカイブ FFVC-x.x.x.tar.gz は、<https://github.com/avr-aics-riken/FFVC> から最新版が入手できます。

### 2.5.1 アーカイブの解凍

```
$ tar xvfz FFVC-x.x.x.tar.gz
```

解凍すると、以下のようなファイル構成になります<sup>\*6</sup>。

```
FFVC-x.x.x
  AUTHORS      開発者のリスト
  COPYING      コピーライト
  ChangeLog    リビジョンの履歴
  INSTALL      インストール方法
  LICENSE      ライセンスファイル
  Makefile.am
  Makefile.in
  Makefile_hand
  NEWS         リリースの履歴
  README       最初に見るべきファイル
  aclocal.m4
  chk-uname
  config.h.in
  configure
  configure.ac
  depcomp
  doc
    Makefile
    Makefile.am
    Makefile.in
    fffc_ug.pdf   ドキュメント
    readme.pdf   メモ

  doxygen
    Conf

  examples
    2Dcavity
    Cavity_binary 三次元のキャピティフロー例題（パイナリモデル）
    Jet           噴流の例題
    LDC           辺長比 1:1:2 のキャピティフロー例題（実験値との比較）
    PMT           性能測定用例題
    Sphere       球周りの流れの例題

  fffc-config
  fffc-config.in
  install-sh
  missing
  src
    FB          FlowBase クラス
    FFV         FFV-C ソルバの Fortran ファイル
    F_CORE      Fortran のコアプログラム
    F_VOF       VOF クラスの Fortran ファイル
    IP          組み込み例題クラス群
    Makefile_hand
    PLOT3D      PLOT3D 出力クラス
    Util_Combsp 分散ファイルの結合ユーティリティ
```

<sup>\*6</sup> doxygen ディレクトリについては、doxygen ファイルを生成するために必要な設定ファイルのみを提供しています。Conf ディレクトリ内で make を実行すると各ディレクトリに doxygen ファイルが生成されます。

Util_Layout make_setting	PLOT3D ファイルのレイアウトファイル作成ユーティリティ
-----------------------------	--------------------------------

コンパイルとインストールについての詳細は、INSTALL ファイルをご覧ください。

### 2.5.2 倍精度計算

倍精度計算を行う場合には、Cutliv, CPMLib, FFV-C の各コンパイル時に倍精度オプションを指定する必要があります。詳細は、各モジュールの INSTALL ファイルをご覧ください。

## 第 3 章

# 基礎方程式と解析方法

本章では, FFV-C が扱う流体の基礎方程式について簡単に説明します. 詳細は FFV-C 説明書 (Inside\_FFV-C.pdf) を参照してください.

### 3.1 支配方程式

FFV-C ソルバーは、圧力や温度の変化により生じる流体の密度変化が小さく、代表的な流速が音速に比べてかなり低い場合を仮定して、非圧縮性流体の基礎方程式を用いています。

#### 3.1.1 非圧縮性流体

解析対象とする流れの特徴を以下のように仮定し、支配方程式を記述します。

- 流れの速度が音速に比べて十分に低く、流れの運動に対する圧縮性の影響は小さいと仮定して、流れを非圧縮性として取り扱います。
- 温度場の代表的な温度差スケールが 30 °C 以下で、密度変化が小さいと仮定します。この場合、密度変化が質量保存則へ与える影響は小さく、密度変化が流れの運動に及ぼす影響を Boussinesq 近似によりモデル化できます。

支配方程式として、非圧縮性流れに対する質量保存則式 (3.1)、運動量保存則式 (3.2)、エネルギー保存則式 (3.3) を用います。 $\delta$  はクロネッカーのデルタで重力方向 ( $i=3$ ) のときに浮力が作用します。ここで、プライム [ $'$ ] は有次元量を表します。

$$\frac{\partial u_i'}{\partial x_i'} = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho' \frac{\partial u_i'}{\partial t'} + \rho' \frac{\partial}{\partial x_j'} \{ (u_j' - u_j^{g'}) u_i' \} = - \frac{\partial P'}{\partial x_i'} + \frac{\partial}{\partial x_j'} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_j'} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i'} \right) \right] - \rho' g' \delta_{i3} \quad (3.2)$$

$$\rho' C_p' \left[ \frac{\partial \theta'}{\partial t'} + \frac{\partial}{\partial x_i'} \{ (u_i' - u_i^{g'}) \theta' \} \right] = \frac{DP'}{Dt'} + \frac{\partial}{\partial x_i'} \left( \lambda' \frac{\partial \theta'}{\partial x_i'} \right) + \mu' \Phi' + Q' \quad (3.3)$$

$\rho'$	[kg / m <sup>3</sup> ]	density
$P'$	[Pa]	pressure
$C_p'$	[J / (kg K)]	specific heat at constant pressure
$\theta'$	[K]	temperature
$\lambda'$	[W / (m K)]	heat conductivity
$u_j'$	[m / s]	velocity components
$u_j^{g'}$	[m / s]	velocity components of a grid point
$x_j'$	[m]	coordinate axis
$t'$	[s]	time
$\mu'$	[Pa s]	viscosity
$g'$	[m / s <sup>2</sup> ]	gravitational acceleration
$\Phi'$	[1/s <sup>2</sup> ]	dissipation function
$Q'$	[W / m <sup>3</sup> ]	heat source

式 (3.2) は形式的に ALE(Arbitrary Lagrangian and Eulerian) で書かれていますが、速度  $u_j^{g'}$  で移動する格子系での保存則を表現しています。格子点を固定 ( $u_j^{g'} = 0$ ) すれば Euler 表現、流体粒子と一緒に移動 ( $u_j^{g'} = u_j'$ ) させれば Lagrangian

表現となります．ここでは，並進や回転などの任意の格子移動速度を与えるために  $u_j^{g'}$  を利用します．

低マッハ数を仮定すると，散逸関数  $\Phi$  は  $M^2$  に比例するので，その寄与は小さく圧力の全微分の項の影響も小さいので，式 (3.3) は，次のようなパッシブスカラの移流拡散方程式になります．

$$\rho' C_p' \frac{\partial \theta'}{\partial t'} + \rho' C_p' \frac{\partial}{\partial x_i'} \left\{ (u_i' - u_i^{g'}) \theta' \right\} = \frac{\partial}{\partial x_i'} \left( \lambda' \frac{\partial \theta'}{\partial x_i'} \right) + Q' \quad (3.4)$$

ここで  $\alpha$  は温度拡散係数で  $[m^2/s]$  の単位です．

$$\left. \begin{aligned} \alpha' &= \frac{\lambda}{\rho' C_p'} \quad [m^2/s] \\ \nu' &= \frac{\mu'}{\rho'} \quad [m^2/s] \\ p' &= \frac{\tilde{p}'}{\rho_0'} \quad [m^2/s^2] \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

温度拡散係数  $\alpha$  が一定の場合には下記のようになります．

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t'} + \frac{\partial}{\partial x_i'} \left\{ (u_i' - u_i^{g'}) \theta' \right\} = \alpha' \frac{\partial}{\partial x_i'} \left( \frac{\partial \theta'}{\partial x_i'} \right) + \frac{Q'}{\rho' C_p'} \quad (3.6)$$

## 3.2 無次元化

代表速度  $u_0'$ ，代表長さ  $L'$ ，代表温度スケール  $\Delta\theta_0'$  と基準温度  $\theta_0'$  で式 (3.1), (3.2), (3.6) を無次元化します．

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{u'}{u_0'} \\ x &= \frac{x'}{L'} \\ p &= \frac{p' - p_0'}{\rho' u_0'^2} \\ \theta &= \frac{\theta' - \theta_0'}{\Delta\theta_0'} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

### 3.2.1 無次元化された支配方程式

以下の式 (3.8)–(3.10) は，単一成分の熱流動を表します．

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (u_j - u_j^g) u_i \right\} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{Gr}{Re^2} \delta_{i3} \theta \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (u_i - u_i^g) \theta \right\} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \Theta \quad (3.10)$$

$$\left. \begin{aligned}
 Re &= \frac{u'_0 L'}{\nu'} \\
 Pr &= \frac{\mu' C'_p}{\lambda'} = \frac{\nu'}{\alpha'} \\
 Gr &= \frac{g' \beta' \Delta\theta'_0 L'^3}{\nu'^2} \\
 Ra &= Pr \cdot Gr \\
 Pe &= Pr \cdot Re \\
 \Theta &= \frac{Q'}{\rho' C'_p u'_0 \Delta\theta'_0 / L'}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

ここで,

$Pr$	Prandtl 数	粘性と熱の拡散率の比
$Re$	Reynolds 数	慣性力と粘性力の比
$Gr$	Grashof 数	浮力と粘性力の比
$Ra$	Rayleigh 数	不安定性のパラメータ
$Pe$	Peclet 数	対流と熱伝達のエネルギー輸送の比
$\Theta$	-	無次元の温度変化率

式 (3.9) は強制対流と自然対流を表現し, 右辺第三項が自然対流と強制対流の比を表しています. つまり,  $Gr/Re^2 \gg 1$  の場合には自然対流が支配的で,  $Gr/Re^2 \ll 1$  の場合には強制対流が支配的となります.  $Gr = 0$  つまり温度差が無い場合には純強制対流です. 一方,  $Gr/Re^2 \rightarrow \infty$  の場合には純自然対流で, 流れは浮力によって駆動されるため代表速度が自明ではありません. また,  $Gr > 10^9$  となるような流れは非定常性が強くなります.

### 3.2.2 無次元化パラメータの選択

FFV-C ソルバーは, 支配方程式を無次元化して解いています. このため, 無次元化のパラメータを選択する必要がありますが, 解くべき現象に応じて適切に選択します.

#### 純強制対流

式 (3.9) においては  $Gr = 0$  なので  $Re$  が支配パラメータとなります. 無次元化のスケーリングは,  $u'_0, L', \nu', \alpha' (= \lambda'/\rho' C'_p)$  を与えます.

#### 熱対流

浮力の効果を考慮しない場合 式 (3.9) において, 純強制対流と同じく  $Gr = 0$  です. 式 (3.10) では  $Pe$  が支配パラメータとなります. 無次元化のスケーリングは,  $u'_0, L', \nu', \alpha' (= \lambda'/\rho' C'_p)$  を与えます.

浮力の効果を考慮する場合 式 (3.9) では  $Gr, Re$  が, 式 (3.10) では  $Pe$  が支配パラメータとなります. 無次元化のスケーリングは,  $u'_0, L', \Delta\theta'_0, \beta', g', \nu', \alpha', Pr$  を与えます.

#### 純自然対流

浮力の効果を考慮した熱対流と同じです。ただし、 $u'_0$  は自明でないで、純自然対流の場合の代表流速はスケールアナリシスから推測され [1]、 $Pr$  数が小さい場合は次式のように見積もることができます。

$$u'_0 = \sqrt{g' \beta' \Delta \theta'_0 L'} \quad (3.12)$$

自然対流の場合の代表速度は式 (3.12) の関係を用いて見積もり、代表速度パラメータとして与えます。自然対流と強制対流が共存する共存対流の場合には、各々の代表スケールの平均値や大きい方の値を代表速度とします。

#### 固体熱伝導

式 (3.10) の形式で  $Pe$  が支配パラメータとなります。ただし、対流項の寄与はありません。無次元化のスケールリングは、 $L'$ ,  $\Delta \theta'_0$ ,  $\alpha'$  を与えます。 $u'_0$  には、一般に熱輸送の時間スケールと代表速度は熱流の伝播速度に相当すると考え、次式を用います。

$$u'_0 = \frac{\alpha'}{L'} \quad (3.13)$$

#### 共役熱移動

共役熱移動は、固体中の熱移動と流体中の熱流動を同時に扱うので、必然的に多媒質の熱移動問題となります。熱流動は浮力効果を考慮しています。

### 3.3 解法アルゴリズム

前節の支配方程式に対して、非圧縮性流体の解法に使われる分離解法を適用し、有限体積法で離散化します。

#### 3.3.1 Fractional Step 法

非圧縮性の Navier-Stokes 方程式 (3.9) の解法として、Fractional step 法を用います。これは、任意のベクトル場が非回転場と湧き出し無しの直交するベクトル場に分解できる性質を利用して、二つのベクトルの和をとることにより解を求める分離解法です。

離散式のコーディングポリシーとして、各セル単位で計算を進めていきます。保存的な支配方程式を解くのでセル界面の流束を評価する方法が素直で演算量も少なくなります。コロケートでは固体面や境界面の処理を考える上でセル単位毎の方が計算処理がしやすいからです。

#### Euler Explicit

一次精度の時間進行法です。

## Navier-Stokes equations

式 (3.9) の対流項と粘性項をそれぞれ  $C_i$ ,  $D_i$ , 浮力項を外力  $f_i$  で表すと,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + C_i &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + D_i + f_i \\ C_i &= \frac{\partial}{\partial x_j} \{ (u_j - u_j^g) u_i \} \\ D_i &= \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ f_i &= \frac{Gr}{Re^2} \delta_{i3} \theta \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

疑似ベクトルの予測式は,

$$u_i^* = u_i^n + \Delta t (D_i^n - C_i^n + f_i^n) \quad (3.15)$$

連続の式による拘束条件から, 圧力の Poisson 方程式は,

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} = \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial \bar{u}_i^*}{\partial x_i} \quad (3.16)$$

圧力ポテンシャルによるセルセンターとスタガード位置の速度ベクトルの修正式は,

$$u_i^{n+1} = u_i^* - \Delta t \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \quad (3.17)$$

$$u_{i,face}^{n+1} = \bar{u}_{i,face}^* - \Delta t \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \quad (3.18)$$

## Thermal transport equation

式 (3.10) の移流項と拡散項をそれぞれ  $Cs_i$ ,  $Ds_i$  で表すと,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + Cs_i &= Ds_i + \Theta \\ Cs_i &= \frac{\partial}{\partial x_i} \{ (u_i - u_i^g) \theta \} \\ Ds_i &= \frac{1}{Pe} \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

$$\theta^{n+1} = \theta^n + \Delta t (Ds_i^n - Cs_i^n + \Theta^n) \quad (3.20)$$



## 第 4 章

# 解析モデルの作成

この章では、解析モデルの作成方法を説明します。解析モデルの作成については、FXgen アプリケーションを用いて、ポリゴンにラベルと境界条件を付与します。また、形状データが不要な組み込み例題について説明します。

## 4.1 形状近似度による解析モデルの分類

直交格子を用いる流体解析では、解析対象となる形状の近似度を直交格子上でどのように考慮するかにより、計算のロバスト性、予測精度、計算時間、計算格子（解析モデル）の作りやすさなどの特性が異なります。一般には、図 4.1 のように分類することができます [2]。

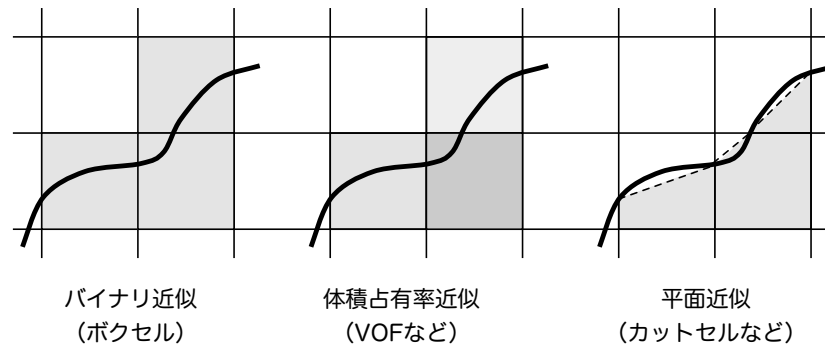


図 4.1 直交格子における形状近似度の分類

### 4.1.1 Binary Voxel

Binary Voxel モデルは、図 4.2 に示すように立方体のセル要素単位で形状を表現する解析モデルです。物体の形状近似としては最も簡単であり、モデル作成時のロバスト性に大きな利点があります。

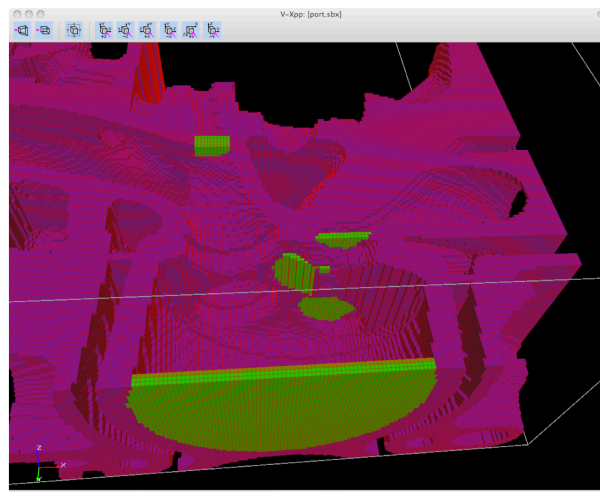


図 4.2 バイナリボクセルによる機械部品の形状表現

### 4.1.2 体積率モデル

Binary Voxel の形状近似度を改善する方法の一つで、セル内における流体の占有率を考慮した計算をする場合に利用します。FFV-C ソルバーでは、圧力損失部などの境界条件の実装に用いています。

### 4.1.3 距離情報モデル

Binary Voxel では形状が階段状に近似されるため、計算精度が不足する場合があります。そこで、格子の定義点から物体表面までの距離を用いて流束計算を行うスキームを用います。

## 4.2 ポリゴンによる境界条件の指定

FFV-C ソルバーでは、解析する形状を表すポリゴンに名前を与え、この名前とパラメータファイルに記述された境界条件情報を結びつけ、境界条件を設定するしくみになっています。

下記のファイルは、計算に利用する解析モデルのポリゴン情報ファイルの内容です。Eng\_Block と Exhaust の 2 つの形状グループがあります。

```
$ cat polylib.tp

Polylib {

  EngBlock {
    class_name = "PolygonGroup"
    filepath = "./geom_scaled/Eng_Block.stl"
    movable = "false"
    label = "Al"
    type = "obstacle"
  }

  Exhaust {
    class_name = "PolygonGroup"
    filepath = "./geom_scaled/Exhaust.stl"
    movable = "false"
    label = "Fe"
    type = "heat_source"
  }
}
```

ここでは、Eng\_Block には、Al(aluminum) のラベルが付与されています。このラベルは媒質を表しています。参照される媒質は、MediumTable によって次のように指定されます。

```
MediumTable {
  Al { // EngBlock
    state = "Solid"
    MassDensity = 7870.0
    SpecificHeat = 442.0
    ThermalConductivity = 80.3
  }

  Fe { // Exhaust
    state = "Solid"
    MassDensity = 7870.0
    SpecificHeat = 442.0
    ThermalConductivity = 80.3
  }
}
```

媒質の指定についての詳細は、MediumTable セクションを参照してください。

EngBlock と Exhaust の各ポリゴン部分が境界条件を表しますが、LocalBoundary で具体的な境界条件の種類を指定します。

```
BcTable {
```

```
LocalBoundary {  
  
  EngBlock {  
    class                = "HeatTransferSN"  
    SurfaceTemperature    = 100.0  
    RefTempMode           = "BulkTemperature"  
    verticalLaminarAlpha  = 0.59  
    verticalLaminarBeta   = 0.25  
    verticalTurbulentAlpha = 0.1  
    verticalTurbulentBeta = 0.3333333  
    verticalRaCritical    = 1.0e9  
    lowerLaminarAlpha     = 0.27  
    lowerLaminarBeta      = 0.25  
    lowerTurbulentAlpha   = 0.27  
    lowerTurbulentBeta    = 0.25  
    lowerRaCritical       = 1.0e9  
  }  
  
  Exhaust {  
    class                = "HeatTransferSN"  
    SurfaceTemperature    = 500.0  
    RefTempMode           = "BulkTemperature"  
    verticalLaminarAlpha  = 0.59  
    verticalLaminarBeta   = 0.25  
    verticalTurbulentAlpha = 0.1  
    verticalTurbulentBeta = 0.3333333  
    verticalRaCritical    = 1.0e9  
    lowerLaminarAlpha     = 0.27  
    lowerLaminarBeta      = 0.25  
    lowerTurbulentAlpha   = 0.27  
    lowerTurbulentBeta    = 0.25  
    lowerRaCritical       = 1.0e9  
  }  
}
```

### 4.3 形状データからの解析モデルの作成手順

### 4.4 組み込み例題

組み込み例題は，FFV-C ソルバーに組み込み済みの解析モデルです．プログラムに組み込まれた解析モデルを用いることにより，解析モデルを作成しなくても計算ができます．ただし，表 4.1 に示すような簡単な形状のモデルに限られます．各モデルに固有のパラメータは，IntrinsicExample セクションで指定します．

表 4.1 組み込み例題クラス

組み込みモデル名	利用クラス	説明
PerformanceTest	IP.PMT	性能測定を行うためのモデル（三次元立方体キャビティフローと同じ問題設定）
Rectangular	IP.Rect	計算領域が矩形で，かつ単一媒質のモデル

#### 4.4.1 IP.PMT クラス

FFV-C ソルバーの基本的性能を測定するための例題クラスです．三次元立方体の空間内のキャビティフローを解きます．性能測定モードとなり，圧力反復の収束判定は行わず，反復回数は固定となります．また，初期化時のファイル出力が抑制されます．

#### 4.4.2 IP.Rect クラス

IP.Rect クラスは三次元の矩形の計算領域を表現するクラスです．計算領域は，次のように Domain ファイルで指定します．ここでは，各方向の格子幅を指定し，基点座標と計算領域の大きさを指定しています．

```
DomainInfo {
  UnitOfLength = "M"
  GlobalOrigin = (-0.5, -0.5, -0.5 )
  GlobalRegion = (1.0, 1.0, 1.0 )
  GlobalPitch = (1.5625e-02, 1.5625e-02, 1.5625e-02)
  ActiveSubDomainFile = ""
}
```

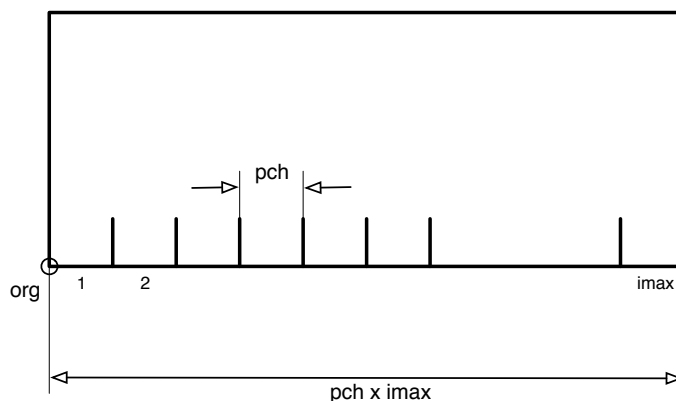


図 4.3 Rectangular クラスのパラメータ設定

表 4.2 のパラメータは，IP.Rect クラスに固有の設定項目で，IntrinsicExample セクションで指定します．

表 4.2 IntrinsicExample タグで設定可能なパラメータ

指定パラメータ	指定値	意味
CheckEven	Yes   No	分割数が偶数であるかどうかをチェックする
FluidMedium	MediumTable のラベル名	流体の媒質
SolidMedium	MediumTable のラベル名	固体の媒質

```
IntrinsicExample {  
  FluidMedium = "air"  
  SolidMedium = "fe"  
  CheckEven   = "yes"  
}
```

上記のパラメータ設定では、分割数の偶数チェックを行い、MediumTable において Air, Fe のラベル名で指定されている物性値を、それぞれ流体と固体として参照しています。

## 4.5 例題

ソースファイルの Example ディレクトリに含まれる例題について説明します．提供される例題は，組み込みモデルや簡単なボクセルモデルを同梱した例題群で，基本的な流れやソルバーの検証のために用意されています．

表 4.3 組み込み例題

Example	Class	Comment
Cavity flow 3D (Cube)	IP_Rect	三次元立方体キャピティフロー
LDC112	IP_Rect	Guermond の実験に対応する辺長が 1:1:2 のキャピティフロー
PMT	IP_PMT	性能測定を行うための例題（三次元立方体キャピティフローの例題と同じ）

表 4.4 サンプル例題

Example	Comment
---------	---------

## 第 5 章

# 入力パラメータ

FFV-C の入力パラメータは，記述性とマルチプラットフォームでの稼働を考慮し，軽量の簡易パースライブラリ（TextParser）を利用しています．構文は階層化され，テキストで容易に記述できます．本章では，FFV-C の制御と物理パラメータについて説明します．



## 5.1 パラメータの記述構文

TextParser ライブラリが扱うパラメータデータベースは、下記のようにノードの階層構造にリーフ（ラベル/値のペア）を格納した構造になっています。パラメータ値のうち、文字列についてはダブルクォーテーションにより囲みます。TextParser ライブラリの Examples ディレクトリにパラメータの様々な記述例があるので、参考にしてください。

```
TimeControl { // ノード
  Acceleration { //ノード
    TemporalType      = "Time" // リーフ=ラベルと値のペア
    AcceleratingTime = 0.0
  }

  TimeStep {
    Mode          = "CFLReferenceVelocity"
    DeltaT        = 0.1
  }

  Session {
    TemporalType  = "step"
    Start        = 0
    End          = 100
  }

  Average {
    TemporalType  = "step"
    Start        = 0
    End          = 0
  }
}
```

上記の TimeStep ノードは TimeControl ノード内にあります。このようなパラメータを、ディレクトリ表現のアナロジーを用いて /TimeControl/TimeStep と表記することにします。

## 5.2 FFV-C の指定パラメータ

実行制御パラメータを記述します。

### 5.2.1 ApplicationControl

FFV-C アプリケーションに関するパラメータを記述します。

```
ApplicationControl {  
  CheckParameter      = "Off"  
  Operator             = "Kenji_Ono"  
  FillMedium          = "air"  
  HintOfFillingFluid  = "Zminus"  
  VariableRange       = "off"  
  VoxelOutput         = "svx"  
  DebugDivergence     = "Off"  
}
```

Operator は FFV-C 実行後に出力される実行時性能測定結果ファイル (profiling.txt) に書き出されます。

HintOfFillingFluid は、自動格子生成時のフィル操作<sup>\*1</sup>でフィルを開始する方向を指定します。通常は、計算領域外部面で、流入面や流出面など流体セルの面を指定します。外部境界面が全周固体壁の場合などには、HintOfFillingFluid="no"を指定することもできます。"no"を指定した場合には、フィル処理の反復回数が増えることがあります。

また、FillMedium はフィル操作を行う場合の媒質名を指定します。

#### 任意オプション

- CheckParameter

CheckParameter を on にすると、ソルバー起動後、パラメータファイルを読み込み、初期化段階まで実行した後、停止します。入力パラメータの妥当性をチェックするために使用します。このとき、初期設定パラメータの内容が conditions.txt に書き出されます。また、初期条件を与えたフィールドファイルが出力されるので、初期条件のチェックが可能です。

- VoxelOutput

VoxelOutput で svx を指定時には、自動生成したボクセルファイルを svx 形式で出力します。

- DebugDivergence

DebugDivergence は、デバッグのため  $\nabla \cdot u$  の値を無次元で出力します。

- VariableRange

VariableRange は、温度計算を実施する場合に変数値を無次元値で [0,1] の範囲に制限することを指定します。保存則を満たさなくなるため、影響を考慮して利用してください。

<sup>\*1</sup> 解析プログラムの実行開始直後、初期化段階で入力パラメータの情報に基づいて、格子が自動で作成されます。この時のフィル処理のヒントとなる方向を指定します。

表 5.1 ApplicationControl の指定パラメータ

ラベル	値	コメント	必須
CheckParameter	on   off	パラメータチェック用	
DebugDivergence	on   off	発散値の出力指定	
FillMedium	MediumTable の媒質名	フィルを行う媒質	
HintOfFillingFluid	Xminus   Xplus   Yminus   Yplus   Zminus   Zplus   no	ヒントを与える面	
Operator	作業者名	レポートに表示	
VariableRange	on   off	on のとき値を無次元で [0, 1] に制限	
VoxelOutput	off   svx	ボクセルファイルを svx フォーマットで出力指定	

### 5.2.2 ConvectionTerm

対流項のスキームに関するパラメータを指定します。

```
ConvectionTerm {
  Scheme = "O3MUSCL"
  Limiter = "minmod"
}
```

Scheme と Limiter のパラメータを表 5.2 に示します。Limiter は制限関数の種類を示し、Scheme=“O3MUSCL”の場合にのみ有効となります。非圧縮流れのように物理量の変化が連続的な場合には不要の場合もあります。

ファイル出力時のオプションでガイドセル出力 GuideOut=“with”を指定している場合には、対流項スキームによってステンシルが変化するので、ガイドセルの値も異なります。

表 5.2 Scheme と Limiter のパラメータ

ラベル	指定スキーム	出力ガイドセルサイズ	ラベル	制限関数
O1Upwind	一次精度風上スキーム	1	Minmod	minmod 型
O2Central	二次精度中心スキーム	1	NoLimiter	—
O3MUSCL	三次精度 MUSCL スキーム	2		

### 5.2.3 DomainInfo

計算対象となる領域の情報を与えます。

```
DomainInfo {
  UnitOfLength    = "NonDimensional"
  GlobalOrigin    = (-0.5, -0.5, -0.5 )
  GlobalRegion    = (1.0,  1.0,  1.0 )
  GlobalVoxel     = (128   , 128   , 128   )

  //GlobalPitch   = (1.5625e-02, 1.5625e-02, 1.5625e-02)
  //GlobalDivision = (1     , 1     , 1     )

  ActiveSubDomainFile = "hoge"
}
```

計算領域情報については、表 5.3 に示す計算領域に関するパラメータを指定します。FXgen を用いて計算領域の検討を行い、その結果を出力すると DomainInfo ノードが得られます。

表 5.3 DomainInfo ノードにおける計算領域パラメータの指定

ラベル	指定内容	補足
UnitOfLength	DomainInfo ファイルに記述された長さの単位を指定する	NonDimensional   M   cm   mm
GlobalDivision	並列計算時の各軸方向の分割数指定	任意
GlobalOrigin	計算空間における座標値の最小値	必須
GlobalPitch	各軸方向の分割幅	GlobalVoxel と排他
GlobalRegion	計算領域の大きさ	必須
GlobalVoxel	計算空間の各軸方向の分割数	GlobalPitch と排他，同時指定時に優先
ActiveSubDomainFile	サブドメインの活性・不活性を指定するファイル名	ファイルがなければブランクを入力

### 5.2.4 GeometryModel

計算に用いる形状を指定します。幾何形状ファイルを指定して計算をする場合には、Polylib<sup>\*2</sup>の入力パラメータファイルを指定します。組み込み例題を指定する場合には、組み込み例題クラスのキーワードを指定します。

```
GeometryModel {  
    Source = "polylib.tp"  
}
```

上記の例では、Polylib ファイルを指定し、ポリゴンモデルを用いた計算を指定しています。

表 5.4 に FFV-C が提供する組み込み例題の一覧を示します。組み込み例題で例題固有のパラメータ設定については、IntrinsicExample をご覧ください。

また、具体的な例題の事例については、例題集をご覧ください。

表 5.4 組み込み例題の指定

ラベル	例題
BackStep	バックステップ形状
Cylinder	円柱・角柱
Duct	直方体と円形断面のダクト
ParallelPlate2D	二次元の並行平板
PerformanceTest	性能評価
Rectangular	矩形計算領域の問題
Sphere	球まわりの流れ

<sup>\*2</sup> 幾何形状データを管理するライブラリ

### 5.2.5 GoverningEquation

FFV-C の支配方程式を設定します。ここでは、支配方程式の型の選択、浮力モード、形状近似などのパラメータを指定します。

```
GoverningEquation {
  FlowEquation      = "Incompressible"
  HeatEquation      = "FlowOnly"
  Buoyancy          = "NoBuoyancy"
  TimeVariation     = "Unsteady"
  PDEType           = "NavierStokes"
}
```

FlowEquation には表 5.5 に示す支配方程式の形式を示します。

表 5.5 FlowEquation のパラメータ指定

ラベル	支配方程式
Incompressible	非圧縮性

HeatEquation には、表 5.6 に計算する問題の熱流動現象の分類（熱流動タイプ）を示します。熱伝導方程式を指定している場合（“SolidConduction”）には、Heat Conduction Equation と表示されます。

Buoyancy の指定は、HeatEquation が必要とする場合にのみ有効になります。

表 5.6 熱対流計算と HeatEquation および Buoyancy の関係

支配方程式	HeatEquation	Buoyancy
純強制対流	FlowOnly	—
強制熱対流（浮力なし）	ThermalFlow	NoBuoyancy
強制熱対流（浮力あり）	ThermalFlow	Boussinesq
自然対流	ThermalFlowNatural	Boussinesq
固体熱伝導	SolidConduction	—

TimeVariation ラベルでは、表 5.7 に示すパラメータにより、解析する現象として定常あるいは非定常を指定します。

表 5.7 非定常モードの指定

ラベル	モードの指定
Steady	定常
Unsteady	非定常

PDEtype で指定する方程式の型は、NavierStokes または Euler から選択します。デフォルトは NavierStokes で、Euler はテスト用のパラメータです。

### 5.2.6 IntrinsicExample

組み込み例題に固有のパラメータを指定します。

```
IntrinsicExample {
  FluidMedium = "air"
  SolidMedium = "fe"
}
```

指定可能なパラメータは 表 5.8 に示すように各組み込み例題毎に異なります。単位は/Unit/UnitOfInputParameter の指定に従います。

表 5.8 IntrinsicExample で指定できるパラメータ

組み込み例題	指定可能なラベル	DataType	指定値
全例題	FluidMedium	STRING	MediumTable 内のノード名
	SolidMedium	STRING	MediumTable 内のノード名
Cylinder, Duct, Sphere, Step	Driver	REAL	ドライバ部分の長さ [m]
	DriverMedium	STRING	MediumTable 内のノード名
	DriverFaceMedium	STRING	MediumTable 内のノード名
Cylinder	Dimension	STRING	2D   3D
	Width	REAL	幅 [m]
	Height	REAL	高さ [m]
Duct	Shape	STRING	Circular   Rectangular
	Diameter	REAL	断面径 [m]
	Direction	STRING	Xminus   Xplus   Yminus   Yplus   Zminus   Zplus
Jet	Dimension	STRING	2D   3D
	Ring1/UseRing	STRING	Yes   No
	Ring1/InnerRadius	REAL	Ring1 の内径 [m]
	Ring1/OuterRadius	REAL	Ring1 の外径 [m]
	Ring1/RotationFrequency	REAL	回転周波数 [Hz]
	Ring1/InletMassFlow	REAL	噴出流量 [ $m^3$ ]
	Ring2/UseRing	STRING	Yes   No
	Ring2/InnerRadius	REAL	Ring2 の内径 [m]
	Ring2/OuterRadius	REAL	Ring2 の外径 [m]
	Ring2/RotationFrequency	REAL	回転周波数 [Hz]
	Ring2/InletMassFlow	REAL	噴出流量 [ $m^3$ ]
Rectangular	CheckEven	STRING	Yes   No
	Dimension	STRING	2D   3D
Sphere	Radius	REAL	球の半径 [m]
Step	Dimension	STRING	2D   3D
	StepLength	REAL	ステップの長さ [m]
	StepHeight	REAL	ステップの高さ [m]

### 5.2.7 Iteration

圧力のポアソン方程式や陰解法のように、得られる線形システムの係数行列が大型疎行列となる場合には反復解法を用います。ここでは流れと温度解析について、反復法のパラメータを指定します。

FFV-C の反復過程は、フラクショナルステップ法を基本としていますが、ダルシー則のような速度の関数で圧力勾配が決まるような境界条件を陰的に扱えるように2段階の反復を用いていますこのため、HSMACのように圧力のアップデートと同時に速度のアップデートも毎回行い、 $u^{n+1}$  の値を毎回計算し、 $\nabla \cdot u^{n+1}$  を評価し、速度の発散が指定値以下になったら収束したと判断しています。つまり、圧力 Poisson の収束と速度の発散値の収束の2つの閾値で収束判定を行っています。

まず、圧力の Poisson 方程式の反復段階では、指定残差まで収束させます。その後、2段階め (VPiteration) では速度と圧力を同時に緩和する反復を行います。

FFV-C では、圧力 Poisson 反復、圧力速度の同時反復、速度の陰解法時の反復、温度解析の反復について、反復法のパラメータを指定できます。反復法を用いる場合は、/SolvingMethod で反復法を含む解法を指定します。

```
Iteration {
  LinearSolver[@] {
    Alias          = "sor2_moderate"
    class          = "sor2sma"
    MaxIteration    = 30
    ConvergenceCriterion = 1.0e-3
    NormType       = "RbyB"
    Omega          = 1.1
    CommMode       = "async"
  }

  LinearSolver[@] {
    Alias          = "vp"
    class          = "VPiteration"
    MaxIteration    = 20
    ConvergenceCriterion = 1.0e-4
    NormType       = "VdivMax"
  }

  LinearSolver[@] {
    Alias          = "sor2_loose"
    class          = "sor"
    MaxIteration    = 20
    ConvergenceCriterion = 1.0e-2
    NormType       = "RbyR0"
    Omega          = 1.1
  }

  Pressure      = "sor2_moderate"
  Velocity      = ""
  VPiteration   = "vp"
  Temperature   = "sor2_loose"
}
```

パラメータの指定は、2段階になっています。まず、LinearSolver[@] ノードで反復解法と収束判定基準をリストアップし、alias で任意の識別名称を与えます。次に、圧力反復 (Pressure)、圧力速度の同時反復 (VPiteration)、速度の陰解法 (Velocity)、温度 (Temperature) のノードで各反復の線形ソルバーの識別名称 (Alias) を指定します。

表 5.9 に LinearSolver[@] で必要な項目を示します。ここに示される項目以外は、各反復解法固有のパラメータとなります。収束判定ノルムについては、表 5.10 に示す種類が指定可能です。

表 5.12 は、各反復法に固有の指定パラメータを示します。



表 5.9 収束判定基準の指定

ラベル	指定内容
Alias	収束判定基準の名称
Class	反復解法
MaxIteration	反復最大回数
ConvergenceCriterion	収束判定閾値
NormType	収束判定ノルムの指定

表 5.10 指定可能な NormType

ラベル	指定内容
DXbyB	変化量を定数項ベクトルの絶対値で割った値 $\sqrt{\sum_{i,j,k}^{Max} \ \Delta \vec{x}\ _2} / \sqrt{\sum_{i,j,k}^{Max} \ \vec{b}^0\ _2}$
RbyB	残差を定数項ベクトルの絶対値で割った値 $\sqrt{\sum_{i,j,k}^{Max} \ \vec{r}\ _2} / \sqrt{\sum_{i,j,k}^{Max} \ \vec{b}^0\ _2}$ , $\vec{r} = \vec{b} - A\vec{x}$
RbyR0	残差を初期残差で割った値 $\sqrt{\sum_{i,j,k}^{Max} \ \vec{r}\ _2} / \sqrt{\sum_{i,j,k}^{Max} \ \vec{r}^0\ _2}$
VdivMax	速度の発散値の最大値ノルム $\max  div \mathbf{u} $
VdivDbg	デバッグ用に履歴を出力, 実行速度低い $\max  div \mathbf{u} $

表 5.11 反復解法の指定

LinearSolver	反復法の指定
Jacobi	Jacobi 法
SOR	PointSOR 法 (並列化不可)
SOR2SMA	ストライドメモリアクセス型の 2 色 SOR 法 (並列化可)
GMRES	Gmres 法
RBGS	Red-Black Gauss-Seidel 法
PCG	前処理付きの CG 法
PBiCGSTAB	前処理付きの BiCGStab 法

表 5.12 固有パラメータの指定

ラベル	指定内容	Jacobi	SOR	SOR2SMA	GMRES	RBGS	PCG	PBiCGSTAB
Omega	加速 (緩和) 係数				—	—	—	—
CommMode	疎通信のモード ”Sync   ”Async”		—		—	—	—	—

### 5.2.8 MediumTable

FFV-C の計算で利用する媒質の物性値テーブルを記述します。ここで記述する媒質は、解析に利用する媒質名をガイドセル部分に与える媒質も含めて、過不足なく挙げる必要があります。媒質は流体と固体が記述でき、表 5.13 により媒質を指定します。

```
MediumTable {
  air {
    State           = "Fluid"
    MassDensity     = 1.1763
    SpecificHeat    = 1007
    ThermalConductivity = 2.614e-02
    KinematicViscosity = 15.83e-06
    Viscosity       = 18.62e-06
    SpeedOfSound    = 340.0
    VolumeExpansion = 0.04e-3
    COLOR           = "23B7A9FF"
  }
  Fe {
    State           = "Solid"
    MassDensity     = 7870.0
    SpecificHeat    = 442.0
    ThermalConductivity = 80.3
    COLOR           = "9C4625FF"
  }
}
```

表 5.13 MediumTable に記述するパラメータ

ラベル	説明
State	Fluid   Solid
Color	色番号 (Fugen が利用, 任意)

各媒質は固体と流体によって記述しなければならない物性値が異なります。指定できる項目を表 5.14 に示します。固体については、密度・比熱・熱伝導率のみの記述となります。各媒質の情報は、ノード名任意によって管理されます<sup>\*3</sup>。

<sup>\*3</sup> FFV-C の内部データ構造の面からは、ノード名が示す物性値は配列に格納されます。その配列の格納番号とノード名がリンクしており、格納番号は ID と呼ぶこともあります。

表 5.14 Medium\_Table における物性値の指定

Fluid のラベル	説明	単位
MassDensity	密度	$kg/m^3$
SpecificHeat	定圧比熱	$kJ/(kgK)$
ThermalConductivity	熱伝導率	$W/(mK)$
KinematicViscosity	動粘性係数	$m^2/s$
Viscosity	粘性係数	$Pa \cdot s$
SpeedOfSound	音速	$m/s$
VolumeExpansion	体膨張率	$1/K$

Solid のラベル	説明	単位
MassDensity	密度	$kg/m^3$
SpecificHeat	定圧比熱	$kJ/(kgK)$
ThermalConductivity	熱伝導率	$W/(mK)$

### 5.2.9 MonitorList

ユーザが指定した物理量を指定した位置でサンプリングし、ファイルに出力する機能です。サンプリングして出力する機能は 2 通りの方法で実装されています。ここでは、指定した座標点で計算結果をサンプリングし、ファイルに出力する方法について説明します。詳細は、第 7 章をご覧ください。もう一つの指定方法は、ポリゴンに与えられたノード名を用いて CellMonitor 機能を使う方法で、これについては境界条件ノードをご覧ください。

```
MonitorList {
  Log           = "On"
  OutputMode    = "Gather"
  CellMonitor   = "on"
  Sampling {
    TemporalType = "time"
    Interval     = 2.0e-5
  }

  list[@] {
    type          = "Line"
    label         = "line1"
    Variable      = "Velocity"
    SamplingMethod = "Interpolation"
    SamplingMode  = "Fluid"
    Division      = 64
    From          = (-0.5, 0.0, 0.0)
    To            = (0.5, 0.0, 0.0)
  }

  list[@] {
    type          = "Line"
    label         = "line2"
    Variable      = "Velocity"
    SamplingMethod = "Interpolation"
    SamplingMode  = "Fluid"
    Division      = 64
    From          = (0.0, 0.0, -0.5)
    To            = (0.0, 0.0, 0.5)
  }
}
```

指定パラメータを表 5.15 に示します。MonitorList には、点群 (PointSet) と線分 (Line) の 2 種類の指定方法があります。それぞれをグループと呼び、PointSet の構成点を set と定義します。

- モニタ出力機能は、Log ラベルで on/off を指定します。
- 出力モードは OutputMode ラベルで指定します。これは並列計算時のファイル出力方式で、マスターノード

表 5.15 モニタリストでの指定パラメータ

ラベル	指定ラベル	指定内容
Log	on   off	ログ出力指定
OutputMode	Gather	マスタープロセスに集約して出力
	Distribute	各プロセス毎に出力
Sampling/TemporalType	Step   Time	出力形式の指定
Sampling/Interval	—	指定間隔
CellMonitor	on   off	モニタ出力指定
PointSet		点群によりモニタ点を指定する
Set		点の座標を指定する
x,y,z		座標
Line		線分によりモニタ点を指定する
From		開始点座標を指定する
To		終了点座標を指定する
Division		開始点と終了点を結ぶ線分の分割数
Variable	Velocity	速度を指定
	Pressure	圧力
	Temperature	温度
	TotalPressure	全圧
	Vorticity	渦度
SamplingMethod	Nearest	モニタ指定点を含むセルの値
	Interpolation	三重線形内挿補間
	Smoothing	局所平均による平滑化
SamplingMode	All	全セルを対象とする
	Fluid	流体セルのみを対象とする
	Solid	固体セルのみを対象とする

ドに集約してファイル出力する場合には Gather を指定し、分散ノード毎にファイル出力する場合には Distribute を指定します。

- Variable ラベルでは、サンプリングする物理量を指定します。物理量は PointSet の例のように複数指定可能です。
- SamplingMethod ラベルで指定されるパラメータは、サンプリング方法を指定します。
- SamplingMode で指定されるパラメータは、サンプリングモードを指定します。
- ファイル出力間隔は、Sampling/Interval で指定し、その指定単位を Sampling/TemporalType で指定します。



## 5.2.10 Output

各種履歴ファイルとフィールドデータ（瞬間値，平均値，派生変数）出力の制御パラメータを指定します．

```

Output {
  Log {
    Base          = "On"
    Iteration      = "Off"
    Profiling      = "On"
    WallInfo       = "Off"
    Console {
      TemporalType = "Step"
      Interval     = 1
    }
    History {
      TemporalType = "Step"
      Interval     = 1
    }
  }
}

Data {
  BasicVariables {
    Format          = "sph"
    TemporalType    = "step"
    Interval        = 10
  }
  DerivedVariables {
    Format          = "sph"
    TemporalType    = "step"
    Interval        = 100

    TotalPressure  = "Off"
    Helicity       = "Off"
    Vorticity      = "Off"
    Qcriterion     = "Off"
  }

  AveragedVariables {
    Format          = "sph"
    TemporalType    = "step"
    Interval        = 100
  }
}

FormatOption {
  SPH {
    GuideOut       = "Without"
    TimeSlice      = "off"
    DirectoryPath  = "hoge"
  }
  PLOT3D {
    filename       = ""
    gridkind       = "single_grid"
    gridmobility   = "immovable"
    stateoftime    = "unsteady"
    setiblackflag  = "off"
    Dimension      = "3D"
    Formattype     = "unformatted"
    Outputxyz      = "off"
    Outputq        = "off"
    Outputfunction = "off"
    Outputfuncname = "off"
    Outputfvbnd    = "off"
  }
}

```

## Log

Log ノードは基本履歴ファイルの on/off を制御し、標準モニタ出力やコンポーネント情報、領域の流量収支履歴の出力を制御します。

Iteration は、各タイムステップの反復数、残差の最大値とそのインデクス値などの圧力の反復過程の履歴を出力します。Iteration="on" とすると反復履歴を出力します。このモードはデバッグモードで実行は遅くなります。

Profiling は実行時に性能測定のための計時を行い、結果をレポートとして出力することを指定します。Detail を指定することにより詳細なレポートを出力します。出力項目の詳細は性能情報をご覧ください。

WallInfo は壁法則を用いた場合の種々の情報を出力しますが、試験的なものです。

Console と History ノードでは、それぞれ標準出力（モニタ画面出力）と履歴ファイルの出力タイミングを指定します。TemporalType により、時刻単位（step/time）を、Interval でファイル出力間隔を指定します。つまり、Console/TemporalType あるいは History/TemporalType="Time" の場合、時刻の単位は UnitOfInputParameter で指定したモードに従います。

表 5.16 履歴ファイルの出力指定

ラベル	指定内容	値
Base	標準履歴ファイル	on   off
Iteration	反復解法の反復履歴	on   off
Profiling	実行性能レポートの作成・出力	on   off   detail
WallInfo	壁面情報履歴	on   off
Console/TemporalType	標準出力の出力指定形式	Step（ステップ数指定） Time（時刻指定）
Console/Interval	出力間隔	ステップ数   時間
History/TemporalType	履歴ファイルの出力指定形式	Step（ステップ数指定） Time（時刻指定）
History/Interval	出力間隔	ステップ数   時間

## Data

Data ノードでは基本変数 (BasicVariables)、派生変数 (DerivedVariables)、平均値 (AveragedVariables) のフィールドデータのファイル出力制御を記述します。

BasicVariables 圧力、速度、温度など基本変数の出力について指定します。Format には出力するファイルフォーマット形式を指定します。指定可能なファイルフォーマットを表 5.17 に示します。各ファイルフォーマットの詳細に関しては、後述の FormatOption で記述します。

表 5.17 FFV-C でサポートするファイルフォーマット

フォーマット	コメント
sph	VCAD SPH フォーマット
plot3d	NASA 開発の構造格子用のフォーマット
bov	VisIt で利用される raw データに近いフォーマット

Interval によりファイル出力間隔を指定します。指定する単位は、TemporalType によって、時刻またはステップの時制単位を指定します。TemporalType="time" の場合、時刻の単位は Unit/UnitofInputParameter で指定したモードに従います。

DerivedVariables ここでは派生変数（基本変数から計算される変数）の生成を指定します．表 5.18 に示す各変数は，on/off のスイッチ指定により有効・無効になり，指定するタイミングでファイルに出力されます．

表 5.18 派生変数の指定

ラベル	生成する派生変数
TotalPressure	全圧
Vorticity	渦度ベクトル
Helicity	ヘリシティ
Qcriterion	速度勾配テンソルの第二不変量

全圧（総圧） 全圧の計算を指定した場合には，tp\*.sph のファイル名でファイルが出力されます\*4．  
全圧は次式で定義され，単位体積あたりのエネルギーを表します．

$$\frac{1}{2}u'^2 + \frac{P'}{\rho'} \quad [Pa] \sim [J/m^3] \quad (5.1)$$

非圧縮の場合には，

$$P_T' = \frac{1}{2}\rho'u'^2 + P' \quad [J/m^3] \quad (5.2)$$

式 (5.2) は無次元化すると，以下ようになります．

$$P_T = \frac{P_T'}{\rho'_0 u_0'^2} \quad (5.3)$$

渦度ベクトル 渦度の計算を指定した場合には，vrt\*.sph のファイル名でファイルが出力されます．

ヘリシティ ヘリシティの計算を指定した場合には，hty\*.sph のファイル名でファイルが出力されます．ヘリシティは速度ベクトル  $\vec{u}$  と渦度ベクトル  $\vec{\omega}$  の内積として定義される量で次式により表せます．

$$H = \vec{u} \cdot \vec{\omega} \quad (5.4)$$

速度勾配テンソルの第二不変量 渦構造を可視化するのに利用され，符号により単純剪断乱流の中の層状渦と管状渦を区別することができます [3]．i2vgt\*.sph のファイル名でファイルが出力されます．

AveragedVariables 平均値の出力フォーマットと出力タイミングを指定します．平均値操作の開始時刻については，TimeControl で指定します．

#### FormatOption

各ファイルフォーマットの詳細を指定します．表 5.19 に指定可能な項目を示します．

GuideOut=“with” を指定した場合の出力ガイドセルのサイズは ConvectionTerm の項を参照してください．

PLOT3D PLOT3D フォーマットで，結果を出力する場合のオプションを記述します．

filename ラベルは，出力される PLOT3D 形式のファイルのファイル名につけられる冠名を指定します．入力がない場合は，“PLOT3Doutput”という冠名が出力ファイルにつけられます．

\*4 ワイルドカード\*には，ステップ数や並列計算時にはランク番号が入ります



表 5.19 ファイルフォーマットの詳細オプション

Format	指定項目	コメント
sph	GuideOut	ガイドセル出力モード { with   without }
	TimeSlice	{ on   off } 並列時に出力タイムスライス毎にディレクトリを作成する
	DirectoryPath	出力ディレクトリファイルの指定
plot3d	filename	出力ファイル名
vtk	Path	?
	Prefix	?

表 5.20 PLOT3D 形式ファイルの出力指定

ラベル	指定内容	ラベル   指定内容
filename	出力ファイルの prefix 指定	—
GridKind	grid の指定	SingleGrid   MultiGrid
GridMobility	grid の時間による変化の有無	Immovable   Movable
StateOfTime	定常・非定常	Steady   Unsteady
Iblank	Iblank の出力指定	on   off
Dimension	次元の指定	2D   3D
FormatType	出力フォーマット指定	
	Fortran Formatted	Formatted
	Fortran Unformatted	Unformatted
	C Binary	Cbinary
OutputXYZ	形状ファイル出力	on   off
OutputQ	圧縮性流体計算結果出力	on   off
OutputFunction	計算結果出力	on   off
OutputFuncName	計算結果出力項目	on   off
OutputFvbnd	境界面定義ファイル出力	on   off
DivideFunc	計算結果の項目別出力	on   off

GridKind ラベルは、グリッドが 1 つしかない場合 Single=Grid を、グリッドが複数ある場合 MultiGrid を指定します。グリッドとは計算領域セルを構成する格子点のことで、Domain ラベル、Subdomain ラベルで指定される計算領域が複数ある場合、グリッドも複数領域があると考えます。

GridMobility ラベルは、グリッドが時間発展計算中に変化しない場合 immovable を、変化する場合 movable を指定します。

StateOfTime ラベルは、定常計算の場合 steady を、非定常計算の場合 unsteady を指定します。

Iblank ラベルは、On の時、計算領域中流体セルでない領域を非計算グリッドとして出力します。

Dimension ラベルは、次元を指定します。FFV-C では計算は常に 3 次元で行われるため、2D を指定した場合もプログラム中で 3D に変更されます。

FormatType ラベルは、出力するファイルのフォーマットを指定します。指定できるフォーマットは、Fortran 言語で出力される Formatted 形式、Unformatted 形式、C 言語で出力される Binary 形式があります。Formatted 形式で出力した場合、ファイルはテキストエディタで見ることが可能になりますが、ファイルサイズが大きくなります。Unformatted 形式、Binary 形式で出力した場合はテキストエディタで見ることができません。Unformatted 形式を選択した場合、出力項目数分だけプログラム内で領域を確保する必要があるため、Binary 形式に比べ大きなメモリ領域が必要になります。ただし、出力は単精度、倍精度の計算結果どちらにも対応します。一方、Binary 形式を選択した場合、メモリ領域は出力領域分のスカラ値相当のメモリ領域で十分ですが、倍精度の計算結果も単精度出力に変更されます。

OutputXYZ ラベルは、計算領域の形状データファイルの出力の有無を指定します。

OutputQ ラベルは、圧縮性流体計算結果の出力の有無を指定します。現在、FFV-C は非圧縮性流体のみを扱っているため、入力の指定によらず、プログラム内で off にされます。

OutputFunction ラベルは、計算結果ファイルの出力の有無を指定します。出力項目は GoverningEquation ラベルで指定する HeatEquation の指定によります。

OutputFuncName ラベルは、計算結果ファイルに出力される項目ファイルの出力の有無を指定します。計算結果項目ファイルは、テキストファイルで出力します。

OutputFvbnd ラベルは、現在、境界面定義ファイルの出力は、入力の指定によらず、プログラム内で off にされます。

DivideFunc ラベルは、計算結果出力ファイルを項目ごとに分割するかどうかのオプションになり、on を指定した場合、項目別に結果ファイルが分割されて出力されます。

## 5.2.11 Reference

解析に用いる無次元化の基準量，あるいは無次元パラメータを指定します．

```
Reference {
  Length      = 0.046
  Velocity     = 50.14
  BasePressure = 0.0
  Temperature {
    Base       = 20.0
    Difference  = 35.0
  }
  Medium       = "air"
}
```

表 5.21 に示すように基準量を必要に応じて記述します．無次元パラメータである Reynolds 数と Prandtl 数は，/Unit/UnitOfInputParameter の指定が無次元のときのみ指定できます．Medium で指定する名前は，MediumTable 内でリストアップされている必要があります．固体熱伝導解析の場合には固体のラベルを指定し，それ以外の（熱）流動解析の場合には流体のラベルを指定します．

表 5.21 無次元化の基準パラメータ

ラベル	意味	単位
Length	代表長さ	$m$
Velocity	代表速度	$m/s$
BasePressure	基準圧力	$Pa$
Temperature/Base	基準温度	$[K]^\circ C$
Temperature/Difference	温度差	$[K]^\circ C$
Gravity	重力加速度	$m^2/s$ 9.8 $[m^2/s]$ で固定
Prandtl	プラントル数	—    無次元のときのみ指定
Reynolds	レイノルズ数	—    無次元のときのみ指定
Medium	代表物性値として指定する媒質ラベル	—

Temperature/Base, Difference では，温度計算を実施する場合の基準量を有次元値で指定します．基準温度 (Base) と温度差 (Difference) は，非圧縮計算のパスシブスカラーによる温度計算では温度場を特徴づける代表量となります．単位は/Unit/Temperature で指定します．

### 5.2.12 ReferenceFrame

観測の座標系を指定します。

```
ReferenceFrame {  
  Mode = "Stationary"  
}
```

FFV-C では、表 5.22 に示す選択肢があります。移動座標系を指定する場合には、格子の移動速度の各方向成分（有次元では  $[m/s]$ ）を入力します。座標系は右手系をとり、各軸  $x, y, z$  方向の速度成分をそれぞれ  $u, v, w$  とします。静止座標系と移動座標系とでは、同じ問題を解く場合でも与える境界条件が異なるので注意します。

表 5.22 Reference\_Frame の指定

ラベル	指定パラメータ	参照座標系
Stationary	—	静止座標系
Translational	$u, v, w$	並進運動する移動座標系

### 5.2.13 ShapeApproximation

このパラメータは形状近似レベルを指定します。

```
ShapeApproximation {  
  Method = "Binary"  
}
```

ShapeApproximation ラベルには、表 5.23 に示す解析モデルの形状近似モードを指定します。

表 5.23 形状近似モードの指定

ラベル	形状近似
Binary	バイナリボクセル近似
DistanceInfo	距離情報近似

### 5.2.14 SolvingMethod

時間積分と解法アルゴリズムの組み合わせを指定するパラメータです。

```
SolvingMethod {  
  Flow = "FS_C_EE_D_EE"  
  Heat = "C_EE_D_EE"  
}
```

表 5.24 に時間進行法と分離解法の種類の組み合わせを示します。Flow ラベルでは流動の支配方程式の時間積分法と解法アルゴリズムの組み合わせを指定します。

表 5.24 流動解析のアルゴリズム指定

ラベル	時間積分法と解法の組み合わせ
FS_C_EE_D_EE	Fractional Step 法 + 時間一次精度 Euler 陽解法（対流項と拡散項）

温度解析の場合には、Heat ラベルで温度輸送方程式の時間進行法と解法アルゴリズムの組み合わせを表 5.25 に示します。

表 5.25 温度解析のアルゴリズム指定

ラベル	時間積分法と解法の組み合わせ
C_EE_D_EE	時間一次精度 Euler 陽解法（対流項と拡散項）
C_EE_D_EI	時間一次精度 Euler 陽解法（対流項） + Euler 陰解法（拡散項）

## 5.2.15 StartCondition

計算のスタート条件を指定します。

```

StartCondition {
  Restart {
    Staging      = "off"

    DFIfiles {
      Velocity    = "vel0.dfi"
      Pressure    = "prs0.dfi"
      Fvelocity   = "fvel.dfi"
    }
  }

  InitialState {
    MassDensity = 1000.0
    Pressure    = 0.0
    Velocity     = (0.0, 0.0, 0.0)

    MediumTemperature {
      Fe  = 150.0
      Air = 100.0
    }
  }
}

```

表 5.26 StartCondition のパラメータ指定

ノード	ラベル	指定値	コメント
Restart	Staging	on   off	リスタート指定
	DFIfiles/Velocit		ステージングオプション
	DFIfiles/Pressure		速度の DFI ファイル名
	DFIfiles/Temperature		圧力の DFI ファイル名
	DFIfiles/Fvelocity		温度の DFI ファイル名
	DFIfiles/Fvelocity		セルフェイス位置の速度の DFI ファイル名
InitialState			初期条件を指定
	MassDensity		密度
	Pressure		圧力
	Velocity		速度ベクトル
	MediumTemperature		熱計算をする場合に MediumTable でリストアップした媒質に対する初期温度を指定する [°C]

## InitialState

物理変数の初期値を指定します。記述する初期値は有次元量で指定しますが、/GoverningEquation/HeatEquation="FlowOnly" と選択した場合のみ、無次元での指定も可能です。圧力値は、/Unit/Pressure で指定する圧力の単位に従います。各変数の無次元化は以下のようになり、添え字の 0 は代表値または基準値を意

味します .

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{\rho'}{\rho'_0} \\ p &= \frac{p' - p'_0}{\rho'_0 u'^2_0} \\ u_i &= \frac{u'_i}{u'_0} \\ \theta &= \frac{\theta' - \theta'_0}{\Delta\theta'_0} \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

InitialState/MediumTemperature では , MediumTable でリストアップした媒質に対して , 初期温度を与えます .



## 5.2.16 TimeControl

時刻制御に関するパラメータを指定します．

```

TimeControl {
  Acceleration {
    TemporalType      = "Time"
    AcceleratingTime = 0.0
  }

  TimeStep {
    Mode              = "CFLReferenceVelocity"
    DeltaT            = 0.1
  }

  Session {
    TemporalType      = "step"
    Start             = 0
    End               = 100
  }

  Average {
    TemporalType      = "step"
    Start             = 0
    End               = 0
  }
}

```

## Acceleration

Acceleration ノードは、イニシャルスタートの場合にのみ有効なパラメータで、一定速度になるまでの時間を指定します。TemporalType で指定する時間の単位を指定します。指定単位が Time の場合、加速時間の値は/Unit/UnitOfInputParameter で指定するモード ("Dimensional" | "NonDimensional") に従います。計算初期の急加速による発散を防ぐため、格子の移動速度や指定流速をゼロから徐々に加速し、指定の値に漸近させる目的で利用します。加速時間を長くすると流れの発達に時間がかかるので、発散しない程度の時間を設定します。加速時間  $t_0$  は全計算領域を通過する時間程度が適切で、 $t_0 = L'/u'_0$  を参考にします。ここで  $L'$  は領域長さで  $u'_0$  は代表速度とします。値として 0.0 を指定すると急加速になります。加速時間中は、参照速度  $u_{Ref}$  に対して次式の加速曲線を与え、図 5.1 のように滑らかに一定速度に漸近させます。

$$u_{Ref} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \left( \frac{t}{t_0} \pi \right) \right) & (t < t_0) \\ 1.0 & (t \geq t_0) \end{cases} \quad (5.6)$$

## TimeStep

時間積分幅  $\Delta t$  を指定します。表 5.27 に時間積分幅  $\Delta t$  の指定方法を示します。拡散数  $D$  は一次元の拡散方程式の場合  $D = \alpha' \Delta t' / h'^2$  で与えられます。 $\alpha$  は拡散係数で、Navier-Stokes 方程式の場合  $1/Re$ 、温度の輸送方程式の場合には  $1/Pe$  となります。安定性解析から  $D < 1/2$  であることが要請されます。多次元の場合には、 $d_m$  を次元数として  $\Delta t < h'^2 / (2d_m \alpha')$  となります。

DeltaT には CFL 数、または  $\Delta t$  を記述します。時間積分幅の選択は、熱解析ソルバの種類を示す HatEquation のパラメータと関連があり、SolidConduction の場合には Direct のみ選択できます。



時間平均場の出力タイミングは , /Output/AveragedVariables/Interval で指定します .

## 5.2.17 TreatmentOfWall

壁面の扱いについて指定します．本パラメータは実験的実装です．

```
TreatmentOfWall {
  PressureGradient = "GradZero"
  VelocityProfile  = "NoSlip"
}
```

各パラメータの意味について，表 5.28 に示します．圧力勾配は法線方向の圧力勾配ゼロと Navier-Stokes 方程式の圧力項を評価する 2 つの扱いが選択できます<sup>\*5</sup>．速度プロファイルについては，滑りなし条件と壁関数を用いた近似が選択できます．壁関数は対数則が実装されています．詳細は FFV-C の説明書をご覧ください<sup>\*6</sup>．

表 5.28 壁面条件の指定

ラベル	パラメータの値	説明
PressureGradient	GradZero	圧力勾配ゼロ
	GradNS	Navier-Stokes 方程式から計算する
VelocityProfile	NoSlip	滑りなし壁面条件
	Slip	滑り壁条件
	LawOfWall	壁法則

<sup>\*5</sup> 現時点では，圧力勾配ゼロのみが選択できます．

<sup>\*6</sup> 2013 年 9 月 13 日未リリース．

### 5.2.18 TurbulenceModeling

LES(Large-Eddy Simulation) のオプションパラメータを指定します<sup>\*7</sup> .

```
TurbulenceModeling {  
  Model = "Smagorinsky"  
  Cs     = 0.2  
}
```

指定できる LES のモデルを表 5.29 に示します .

表 5.29 LES のモデル指定

ラベル	モデル
Smagorinsky	標準スマゴリンスキーモデル

<sup>\*7</sup> 2013 年 9 月 13 日現時点で機能未実装 .

## 5.2.19 Unit

入力ファイルと出力ファイルで用いる単位を指定します<sup>\*8</sup>。

```
Unit {
  UnitOfInputParameter = "Dimensional"
  UnitOfOutput          = "Dimensional"
  Pressure               = "Gauge"
}
```

各ラベルは、表 5.30 に示す単位の指定に用いられます。有次元のファイル出力時には、圧力単位としてゲージ圧 (Gauge Pressure) と絶対圧力 (Absolute Pressure) が選択できます。

UnitOfOutput では出力する結果ファイル (\*.sph) の単位を指定し、有次元か無次元を指定できます。

式 (5.7) に示すゲージ圧を式 (5.8) により無次元化する場合に、基準圧として  $p'_0 = 1.01325 \times 10^5$  [Pa] を用い、動圧が  $10^0 \sim 10^3$  程度とすると、 $p \sim O(1)$  程度となるので、単精度計算では 4 桁程度有効桁が失われる場合もあります。そのような場合、有次元値のファイル出力単位としてゲージ圧  $p'_g$  を用います (非圧縮流れの場合には圧力差が意味をもつので、ゲージ圧でもかまいません)。ゲージ圧の基準となる大気圧  $p'_0$  [Pa] は BasePressure で指定します。圧力単位の指定は、履歴ファイルのモニタ値にも適用されます。

$$p'_g = p' - p'_0 \quad (5.7)$$

$$p = \frac{p'_g}{\rho'_0 u'^2_0} \quad (5.8)$$

表 5.30 単位の指定

ラベル	指定値	説明
UnitOfInputParameter	Dimensional   NonDimensional	入力パラメータファイルの単位を指定します (*1)
UnitOfOutput	Dimensional   NonDimensional	出力ファイルの単位を指定します
Pressure	Gauge   Absolute	入力パラメータの単位が有次元のときに有効となります
Temperature	Celsius   Kelvin	入力パラメータの単位が有次元のときに有効となります

<sup>\*8</sup> 温度単位は Celsius で固定です。

## 第 6 章

# 境界条件

本章では、FFV-C で設定できる境界条件の設定について説明します。まず境界条件と媒質を指定するパラメータの構造について述べた後、流れと熱の境界条件について説明します。

## 6.1 境界条件の概要

### 6.1.1 外部境界条件と局所境界条件

FFV-C では、境界条件を外部境界条件と局所境界条件の 2 つに分けて指定します。外部境界条件は計算領域外部面に指定する境界条件で、局所境界条件は計算領域内部に指定する境界条件です。図 6.1 に示すように、計算領域を構成する 6 面が外部境界面で、この部分に与える境界条件が外部境界条件です。それ以外の内部領域に作用する境界条件は局所境界条件として扱います。外部境界面には、外部境界条件が各面に対して 1 種類のみ与えることができ、局所境界条件を部分的に適用することができます。

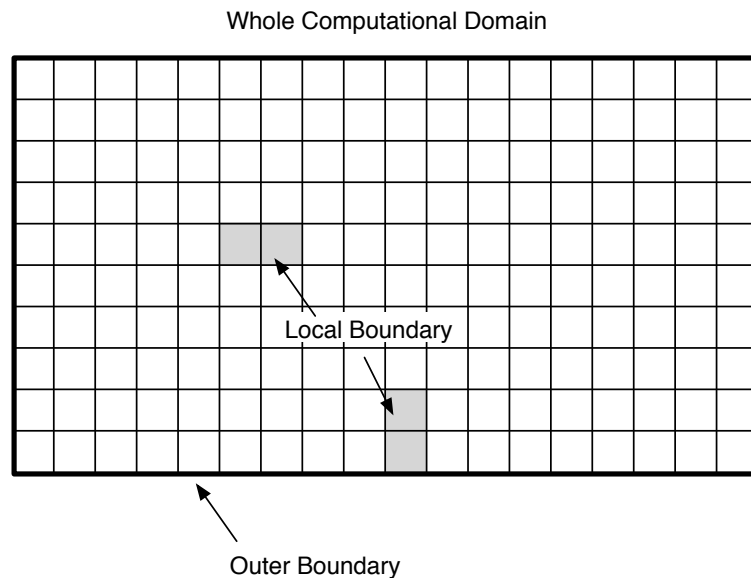


図 6.1 計算領域における外部境界と局所境界の指定場所

### 6.1.2 BcTable ノードのパラメータ構造

BcTable ノードでは、次のように局所境界条件 LocalBoundary と外部境界条件 OuterBoundary の 2 つを記述します。

```
BcTable {
  LocalBoundary {
    Suction {
      class      = "SpecifiedVelocity"
      Medium     = "fe"

      type       = "velocity"
      profile    = "constant"
      velocity   = 50.14
      Normal     = (0.0, 0.0, -1.0)
      FluidDirection = "OppositeSideOfNormal"
      frequency  = 0.0
      initialphase = 0.0
      constantbias = 0.0
      temperature = 35.0
    }
  }

  Sensor {
    class      = "CellMonitor"
    Medium     = "air"
  }
}
```



```

    shape          = "polygon"
    Normal         = (0.0, 0.0, -1.0)
    SamplingWidth  = "singleCell"

    Variables {
        velocity    = "on"
        pressure     = "on"
        temperature  = "off"
        TotalPressure = "on"
    }
}

Tube {
    class          = "Obstacle"
    Medium         = "fe"
}

OuterBoundary {

    outer_wall {
        class      = "Wall"
        Type       = "fixed"
        Medium     = "fe"
    }

    inlet {
        class      = "SpecifiedVelocity"
        Medium     = "air"
        Profile    = "Constant"
        Normal     = (1.0, 0.0, 0.0)
        velocity   = 27.8
    }

    outlet {
        class      = "Outflow"
        Medium     = "air"
        PressureType = "dirichlet"
        PrsValue   = 0.0
    }

    tfree {
        class      = "TractionFree"
        Medium     = "air"
    }

    FaceBC {
        Xminus = "inlet"
        Xplus  = "outlet"
        Yminus = "outer_wall"
        Yplus  = "outer_wall"
        Zminus = "tfree"
        Zplus  = "outer_wall"
    }
}
}

```

### 6.1.3 OuterBoundary

計算領域の外部境界条件を次の方針により指定します。

1. 候補となる境界条件を OuterBoundary ノード内にリストアップし、基本リストを作成します。境界条件の基本リストには、class に表 6.1 表 6.2 で示すキーワードを与え、グループ名にユニークな名称を与えます。同時に、

各面のガイドセルの媒質名を Medium により指定します。こ媒質名は、MediumTable ノードにリストアップされた媒質ラベルを参照します。Class と Medium が必須の項目で、残りの項目は境界条件固有のパラメータとなります。

2. FaceBC ノード内において、境界条件の基本リストのグループ名を参照して、計算領域の外部境界の各面における境界条件を指定します。

前述の例では、境界条件の候補として class=Wall, SpecifiedVelocity, Outflow, TractionFree の 4 種類がリストアップされています。X マイナス方向の外部境界面に流入条件 (inlet) を与え、X プラス方向の外部境界面に流出境界条件 (outlet)、Z マイナス面にはトラクションフリー条件 (tfree)、それ以外の面には壁面条件 (outer.wall) を与えています。

外部境界条件は、計算領域を構成する外部境界面の各面ごとに異なる境界条件となります。

指定できる境界条件の種類を表 6.1 と表 6.2 に示します。壁面境界については、表 6.2 のように詳細な指定が可能です。

表 6.1 外部境界での境界条件の種類 (1)

Class	流れの境界条件	熱流れのときのオプション	熱境界条件
Outflow	流出境界	—	対流流出
Periodic	周期境界	—	周期境界
SpecifiedVelocity	流入境界	Temperature	流入温度指定
Symmetric	対称境界	—	断熱
TractionFree	遠方境界	—	流出と断熱

表 6.2 外部境界での境界条件の種類 (2)

Class	流れの境界条件	ThermalOption	熱境界条件
Wall	壁面境界	Adiabatic	断熱指定
		HeatFlux	熱流束指定
		HeatTransferS	熱伝達係数と表面温度から熱伝達を計算
		HeatTransferSF	強制対流の層流・乱流熱伝達境界
		HeatTransferSN	自然対流の乱流熱伝達境界
		IsoThermal	等温指定

### 6.1.4 LocalBoundary

計算領域内に存在する局所的な境界条件を記述するノードで、表 6.3 に示す種類を指定できます。FFV-C は、局所境界条件と計算に用いる媒質をコンポーネントとして扱います。局所境界条件を指定する位置には、セル要素に対して作用するものとセル界面に作用する 2 種類のコンポーネントがあります。

局所境界条件の位置と形状は、解析幾何形状モデルに与えられたラベルにより判断します。また、境界条件の詳細は、LocalBoundary ノードの対応するラベルに記述します。局所境界条件で指定する各コンポーネントの個数と実際の解析モデル中のコンポーネントの個数は一致している必要があります。指定できるコンポーネントの数は 30 個が上限、つまり指定境界条件数と媒質数の和は 30 個以下となります<sup>\*1</sup>。

Inactive は計算空間内で計算しない不活性セルを指定します。

CellMonitor は境界条件ではありませんが、境界条件と同じ指定方法を用いて実装しているので、このノードに設けています。

表 6.3 局所境界条件（コンポーネント）の種類

Class	境界指定位置	適用	実装形式	コンポーネントの説明
SpecifiedVelocity	セル界面	Cold/Thermal flow	対流流束	速度指定境界
Outflow	セル界面	Cold/Thermal flow	対流流束	流出境界
Periodic	セル界面	Cold/Thermal flow	参照値指定	部分周期境界
Inactive	セル要素	Cold/Thermal flow	マスク	不活性化する計算空間内のラベルを指定
CellMonitor	セル要素	Cold/Thermal flow	—	物理量のモニター位置の指定
Obstacle	セル界面	Cold/Thermal flow	熱流束マスク	断熱物体
DirectHeatFlux	セル界面	Thermal flow	熱流束	熱流束指定
HeatTransferS	セル界面	Thermal flow	熱流束	熱伝達係数と表面温度により計算
HeatTransferSF	セル界面	Thermal flow	熱流束	強制対流の層流・乱流熱伝達境界
HeatTransferSN	セル界面	Thermal flow	熱流束	自然対流の乱流熱伝達境界
IsoThermal	セル界面	Thermal flow	熱流束	等温面指定
HeatSource	セル要素	Thermal flow	外力項	吸発熱指定
SpecifiedTemperature	セル要素	Thermal flow	温度指定	温度指定

<sup>\*1</sup> これらの制限は、境界条件を効率よく実装する方法の制約から来るものです。

## 6.1.5 計算格子と内部・外部領域

非圧縮性流体の境界条件で参照する計算領域と格子配置について説明します．計算領域とコロケート変数配置の変数のインデックスの表記を図 6.2，図 6.3 に示します．

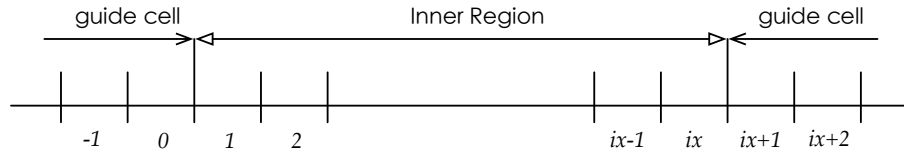


図 6.2 計算領域のインデックス

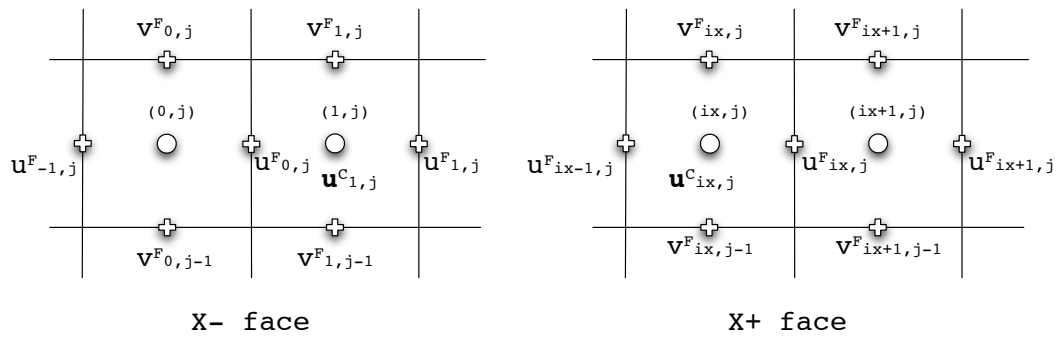


図 6.3 コロケート配置の変数のインデックス．基本変数 ( $u_i^C$ ,  $p$ ,  $\theta$ ) は全てセルセンタ位置に配置され，補助的な速度ベクトル  $u_i^F$  がスタガード位置に配置されます．

## 6.2 外部境界条件

### 6.2.1 壁面境界

#### 流れの境界条件

壁面の速度境界条件では，指定する境界面の移動速度を与えます．壁面速度が時間的に変化する場合と一定の場合があります．ただし，壁面速度ベクトルは壁面と平行なスライド成分のみで，壁面と垂直な成分はゼロである点に注意します．

壁面境界は，与えられた速度からセルフェイス位置の運動量流束を計算して，境界値として与えます．外部境界では下記のような入力パラメータで指定します．次の境界条件の例では，Y 方向に 7[m/s]，2[Hz] で平行振動する壁の境界条件を指定しています．

```
OuterBoundary {
  inlet_2 {
    Class      = "SpecifiedVelocity"
    Medium     = "Fe"
    Type       = "slide"
    Profile     = "Harmonic"
    Normal     = (0.0, 1.0, 0.0)
    Amplitude  = 7.0
    Frequency  = 2.0
    InitialPhase = 0.0
    ConstantBias = 0.0
  }
}
```

表 6.4 壁面の速度境界条件の指定パラメータ

ラベル	指定オプション	説明
Type	Fixed   Slide	固定壁かスライド壁を指定
Profile	Constant   Harmonic	指定速度のタイプ
Normal	—	法線ベクトルの成分
Velocity	—	指定単位 [m/s]，Profile=Constant の場合のみ
Amplitude	—	速度，以下のパラメータは Profile=Harmonic の場合のみ
Frequency	—	周波数 $f$ [Hz]
InitialPhase	—	初期位相 $\phi$ [Rad]
ConstantBias	—	一定値 $b$ [m/s]
ThermalOption	表 6.2 の ThermalOption	Cold flow の場合は不要

壁面の速度境界の指定パラメータを表 6.4 に示します．時間変化を伴う速度指定は Profile=“Harmonic” を指定し，式 (6.1) の形式の単振動の境界条件を周期や初期位相，固定バイアスと供に与えます．時間的に変化しない壁面境界の場合には Profile=“Constant” を指定し，周波数，初期位相，固定バイアス値の指定は不要です．

$$V = A \sin(2\pi ft + \phi) + b \quad (6.1)$$

固定壁 (fixed) の場合には，与えるパラメータは Class, Medium, Type のみです．

壁面境界に対する圧力の境界条件は，Navier-Stokes 方程式から Neumann 型の圧力境界条件が得られます．高レイノルズ数流れにおいては，粘性項の寄与が小さいと仮定し粘性項を省略し  $\nabla p = 0$  の形式になります．圧力の壁面境界条件については，内部と外部の扱いは同じで，スキーム中で壁面を認識し  $\nabla p = 0$  が満たされるようになっていますので，明示的な境界条件の指定は必要ありません．

## ThermalOption

計算領域の外表面における壁面に対する熱境界条件としては，断熱，熱流束，熱伝達，等温，固定参照温度が指定できます．熱伝達境界は，さらに幾つかの指定パターンがあります．詳細は Inside\_FFVC.pdf をご覧ください．

断熱境界 熱流束がゼロ，つまり  $q' = 0$  を指定します．下記の例では，Insulator と名付けられた外部境界条件候補に対して，固定壁の断熱条件を指定しています．Insulator の境界面のガイドセルとして Fe の媒質属性もつことを指定しています．

```
OuterBoundary {
  Insulator {
    Class      = "Wall"
    Medium     = "Fe"
    Type       = "fixed"
    ThermalOption = "Adiabatic"
  }
}
```

熱流束境界 境界面で指定の熱流束  $q'[W/m^2]$  を与えます．符号は計算領域内に流入する熱流束の場合に正，流出する熱流束の場合に負とします．下記の例では heatflux1 に  $12.0[W/m^2]$  で流入する熱流束をもつ面を指定しています．

```
OuterBoundary {
  heatflux1 {
    Class      = "Wall"
    Medium     = "Fe"
    Type       = "fixed"
    ThermalOption = "Heatflux"
    Flux       = 12.0
  }
}
```

熱伝達境界 熱伝達境界は次式の形式で熱流束を与える条件で，幾つかの種類を用意しています．熱流体解析のモードと指定できる熱伝達境界の関係を表 6.5 に示します．

表 6.5 熱伝達境界条件と HeatEquation の関係

eatEquation	指定できる熱伝達境界の種類
FlowOnly	—
ThermalFlow   ThermalFlowNatural	TypeS   TypeSN   TypeSF
SolidConduction	TypeS

$$q' = -H' (\theta'_{sf} - \theta'_{\infty}) \quad (6.2)$$

$H'$	$[W / (m^2 K)]$	Coefficient of heat transfer
$\theta'_{sf}$	$[^{\circ}C]$	Surface temperature of solid
$\theta'_{\infty}$	$[^{\circ}C]$	Temperature at outer boundary layer

TypeS 表面温度と熱伝達係数により計算 TypeS は表面温度と熱伝達係数を与え、熱流束を計算します。式 (6.2) において、熱伝達係数  $H'$  と固体表面温度  $\theta'_{sf}$  を与え、図 6.4 に示す固体表面に隣接する流体セルの値を  $\theta'_\infty$  として、界面での熱流束を計算します。

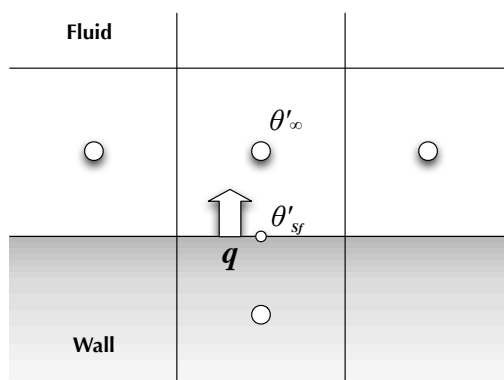


図 6.4 TypeS の熱伝達境界

以下に、熱境界部分のみパラメータ指定の一例を示します。

```
OuterBoundary {
  Type_S {
    Class      = "Wall"
    Medium     = "Fe"
    Type       = "Fixed"
    ThermalOption = "HeatTransferS"
    SurfaceTemperature = 300.0
    CoefOfHeatTransfer = 20.0
  }
}
```

表 6.6 熱伝達境界 TypeS の指定パラメータ

指定キーワード	パラメータの説明
CoefOfHeatTransfer	熱伝達係数 [ $W/(m^2 K)$ ]
SurfaceTemperature	表面温度 [ $^{\circ}C$ ]

TypeSN 自然対流の乱流熱伝達 自然対流の場合の乱流熱伝達の実験式を実装した境界条件です。文献 [4] には、平板に対する自然対流の層流と乱流の熱伝達に関する近似式が説明されています。雰囲気流体の温度に比べ加熱面の温度が非常に高い場合、平板が長くなると境界層が不安定になり、ほぼ  $Ra > 10^9$  で層流から乱流へ遷移します。垂直平板に関する平均熱伝達 ( $\overline{Nu}_L$ , 代表長  $L$ ) は次式で整理されます。

$$\left. \begin{array}{l} \text{層流} \quad \overline{Nu}_L = 0.59 Ra_L^{1/4} \quad (10^4 < Ra_L < 10^9) \\ \text{乱流} \quad \overline{Nu}_L = 0.10 Ra_L^{1/3} \quad (10^9 < Ra_L < 10^{13}) \end{array} \right\} \quad (6.3)$$

一方、水平平板の場合には、加熱面が上面と下面にある場合で雰囲気流体の挙動が異なるため、式 (6.4) のように整理されています。

$$\left. \begin{array}{l} \text{上面加熱} \quad \overline{Nu}_L = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad (10^4 < Ra_L < 10^7) \\ \text{上面加熱} \quad \overline{Nu}_L = 0.15 Ra_L^{1/3} \quad (10^7 < Ra_L < 10^{11}) \\ \text{下面加熱} \quad \overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{1/4} \quad (10^5 < Ra_L < 10^{10}) \end{array} \right\} \quad (6.4)$$

上式を形式的にまとめると，

$$H' = \alpha' Ra_L^\beta \frac{\lambda'}{L'} \quad (6.5)$$

TypeSN の境界条件は，上式のパラメータを実装しています．ここでは，垂直平板と水平平板の上面は，同じ係数を用いています．

式 (6.2) は，固体壁面に隣接する流体セルの温度と SurfaceTemperature との温度差を用いて評価します．

```
OuterBoundary {
  Type_SN {
    Class          = "Wall"
    Medium          = "Fe"
    Type           = "Fixed"
    ThermalOption   = "HeatTransferSN"
    SurfaceTemperature = 100.0
    VerticalLaminarAlpha = 0.59
    VerticalLaminarBeta  = 0.25
    VerticalTurbulentAlpha = 0.1
    VerticalTurbulentBeta = 0.3333333
    VerticalRaCritical   = 1.0e9
    LowerLaminarAlpha    = 0.27
    LowerLaminarBeta     = 0.25
    LowerTurbulentAlpha  = 0.27
    LowerTurbulentBeta   = 0.25
    LowerRaCritical      = 1.0e9
  }
}
```

表 6.7 熱伝達境界 TypeSN のパラメータ

パラメータタグ	記号の意味
VerticalLaminarAlpha	垂直平板と水平平板（上面）の層流時の係数 $\alpha$
VerticalLaminarBeta	垂直平板と水平平板（上面）の層流時の係数 $\beta$
VerticalTurbulentAlpha	垂直平板と水平平板（上面）の乱流時の係数 $\alpha$
VerticalTurbulentBeta	垂直平板と水平平板（上面）の乱流時の係数 $\beta$
VerticalRaCritical	垂直平板と水平平板（上面）の臨界 Ra 数 $Ra_L$
LowerLaminarAlpha	水平平板（下面）の層流時の係数 $\alpha$
LowerLaminarBeta	水平平板（下面）の層流時の係数 $\beta$
LowerTurbulentAlpha	水平平板（下面）の乱流時の係数 $\alpha$
LowerTurbulentBeta	水平平板（下面）の乱流時の係数 $\beta$
LowerRaCritical	水平平板（下面）の臨界 Ra 数 $Ra_L$
SurfaceTemperature	表面温度 [°C]

TypeSF 強制対流の層流・乱流熱伝達 強制対流の場合の層流・乱流熱伝達の実験式を実装した境界条件です．文献 [4] から，平板に対する発達した強制対流の乱流熱伝達は，実験による摩擦係数の測定結果とチルトン・コルバーンのアナロジーを用い，温度一定で平板が遷移長さよりも十分に大きいと仮定すると，式 (6.6) のように表せます．実験式を整理すると，熱伝達係数は以下のような表現ができます．

$$\overline{Nu_L} = 0.037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3} \quad (6.6)$$

形式的に次式のように表し，パラメータを求めます．

$$H = \alpha Re_L^\beta Pr^\gamma \frac{\lambda}{L} \quad (6.7)$$



温度差の定義にはバルク温度と隣接セルの値を用いたオプションが選択できます．以下に，パラメータ指定の一例を示します．

式 (6.2) は，固体壁面に隣接する流体セルの温度と SurfaceTemperature との温度差を用いて評価します．

```
OuterBoundary {
  Type_SF {
    Class          = "Wall"
    Medium          = "Fe"
    Type           = "Fixed"
    ThermalOption   = "HeatTransferSF"
    SurfaceTemperature = 500.0
    alpha          = 0.037
    beta           = 0.8
    gamma          = 0.333333
  }
}
```

表 6.8 熱伝達境界 TypeSF のパラメータ

タグ	記号の意味
Alpha	式 (6.7) 中の係数 $\alpha$
Beta	係数 $\beta$
Gamma	係数 $\gamma$
SurfaceTemperature	表面温度 [°C]

等温境界 等温壁境界は，指定面で温度が一定となる境界条件で，面温度を一定に保つような熱流束が発生します．例えば X マイナス側の外部境界面のセル界面位置では，次の形式の熱流束となります．

$$q'_{ISO,1/2} = -\lambda'_1 \frac{\theta'_1 - \theta'_{sf}}{h'/2} \quad (6.8)$$

```
OuterBoundary {
  isothermal {
    Class          = "Wall"
    Medium          = "Fe"
    Type           = "Fixed"
    ThermalOption   = "IsoThermal"
    Temperature     = 100.0
  }
}
```

表 6.9 等温壁の指定パラメータ

指定キーワード	パラメータの説明
Temperature	表面温度 [°C]

### 6.2.2 対称境界

外部境界にのみ用いられる境界条件で，指定する面が対称面であると仮定します．図 6.5 に X プラス方向の境界面における対称境界面の速度ベクトルの境界条件を示します．速度については，面直な成分のみ固体壁と同じで，残りはフリーとします．圧力は勾配がゼロとします．

```
OuterBoundary {
  SymWall {
    Class = "Symmetric"
    Medium = "Fe"
  }
}
```

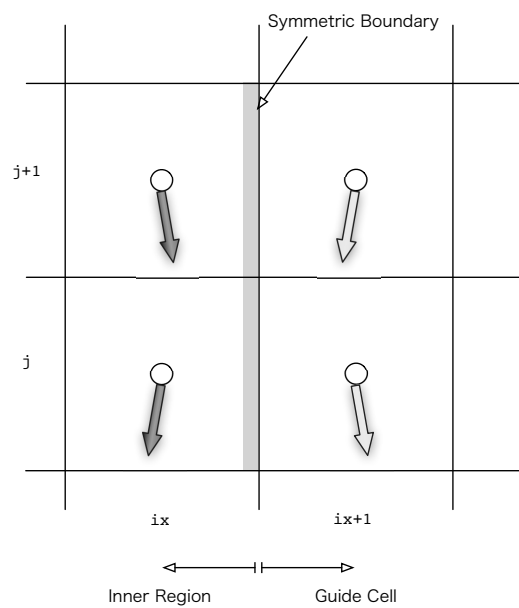


図 6.5 対称境界面における境界条件

熱計算では，対称境界が指定された面は断熱境界となります．

### 6.2.3 流境界

流境界を指定する場合には、流出方向は既知とします。外部境界では図 6.6 に示すようにガイドセルのセル属性は流体である必要があります。

```
OuterBoundary {
  outlet {
    Class      = "outflow"
    Medium     = "air"
    PressureType = "dirichlet"
    PrsValue   = 0.0
  }
}
```

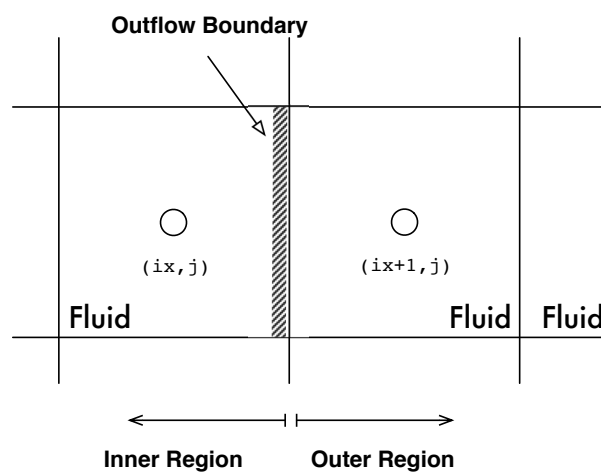


図 6.6 外部境界面における流境界． $x+$  方向の例．

圧力境界条件としては表 6.10 に示す 2 種類の境界条件を与えることができます。

熱境界も速度と同様に対流流出型の境界条件となります。逆流がある場合には、ノイマン条件、つまり計算領域に入る流束をゼロに制限します。

表 6.10 流出圧力境界条件

ラベル	パラメータ
PressureType	Dirichlet   Neumann
PrsValue	指定圧力値，または圧力勾配値

### 6.2.4 速度指定境界

この境界条件はセル界面における運動量流束の形で実装されています。

```
OuterBoundary {
  inlet {
    Class      = "SpecifiedVelocity"
    Medium     = "air"
    Profile     = "Harmonic"
    Normal     = (0.0, 1.0, 0.0)
    Amplitude  = 7.0
    Frequency   = 2.0
    InitialPhase = 0.0
    ConstantBias = 0.0
    Temperature = 30.0
  }
}
```

境界面の指定方法は、表 6.11 に示すパラメータを与えます。時間変化を伴う速度指定は Profile=“Harmonic” を指定し、式 (6.1) の形式の単振動の境界条件を周期や初期位相、固定バイアスと供に与えます。時間的に変化しない壁面境界の場合には Profile=“Constant” を指定し、周波数、初期位相、固定バイアス値の指定は不要です。

圧力の境界条件は、Neumann 型の圧力境界条件  $\nabla p = 0$  が用いられます。

熱流れの問題の場合には流入温度を指定する必要がある、単位は Unit ノードの Temperature で指定した単位になります。

表 6.11 速度指定境界のパラメータ

ラベル	指定キーワード	パラメータの説明
Profile	Constant   Harmonic	一定、または式 (6.1) の形式
Normal	—	法線ベクトルの成分
Velocity	—	指定単位 $[m/s]$ 、Profile=Constant の場合のみ
Amplitude	—	速度、以下のパラメータは Profile=Harmonic の場合のみ
Frequency	—	周波数 $f [Hz]$
InitialPhase	—	初期位相 $\phi [Rad]$
ConstantBias	—	一定値 $b [m/s]$
Temperature	—	指定温度 $[^{\circ}C]$

### 6.2.5 周期境界

周期境界条件には、外部境界に対する周期境界と計算内部領域に設定する部分的な周期境界条件を併用する条件の 2 種類があります。外部境界に対する周期境界条件では、図 6.2 において、Inner Region の両端の境界が重なる状態を想定しています。

外部境界に対する周期境界条件には表 6.12 に示す 3 つのモードが指定できます。下記には、各モードの例を示します。SimpleCopy モードは、周期境界条件面の両端で、単純に計算内部領域の値を他方のガイドセルにコピーします。PressureDifference モードは、両端で圧力差を与える周期境界条件で、速度や温度については SimpleCopy モードと同じですが、圧力は指定の圧力差を与えます。上流側と下流側の設定が必要です。Driver モードは、乱流計算などで発達したチャネル流を上流境界として与えるためのしくみで、局所境界条件との組み合わせで利用します。Driver モードの説明は局所境界条件をご覧ください。

```
OuterBoundary {
  x-dir_periodic_1 {
    Class      = "periodic"
    Mode       = "SimpleCopy"
  }

  x-dir_periodic_2 {
    Class      = "periodic"
    Mode       = "Directional"
    FlowDirection = "Upstream"
    PressureDifference = 8.148e-3
  }

  x-dir_periodic_3 {
    Class      = "periodic"
    Mode       = "Directional"
    FlowDirection = "Downstream"
    PressureDifference = 8.148e-3
  }

  x-dir_periodic_4 {
    Class      = "periodic"
    Mode       = "driver"
    DriverDirection = "Xminus"
  }
}
```

表 6.12 周期境界条件のモード

キーワード	モードの説明
SimpleCopy	周期境界の両端で物理量をガイドセルにコピーします。
Directional	圧力差を与える周期境界条件で、上流と下流の境界面を指定します。
Driver	計算領域内で部分的な周期境界条件を設定します。

Directional モードでは、表 6.13 に示すパラメータが必要で、PressureDifference の値が、Upstream と Downstream で同じ値である必要があります。

表 6.13 Directional モードに必要なパラメータ

必要なキーワード	パラメータの説明
PressureDifference	両端にかかる圧力差 [ $Pa$ ]
FlowDirection	Upstream (上流面) または Downstream (下流面)

### 6.2.6 トラクションフリー境界

遠方境界条件として，トラクションフリー条件を用います．

トラクションフリー条件は，外部境界に対してのみ指定できる境界条件で，計算対象の主領域から遠方の挙動を仮定した条件です．つまり，圧力の遠方条件  $p = 0$ （基準圧）を考慮し，計算外部境界において流体の内部応力の法線方向成分がゼロである仮定を用いています．ガイドセルは流体の属性である必要があります．

この境界条件は，噴流のエントレインメントの効果などを考慮できる利点がありますが，渦が流出するような境界には適用できません．

```
OuterBoundary {  
  FarField {  
    Class          = "TractionFree"  
    Medium         = "air"  
  }  
}
```

熱流れの場合には，流出の場合には outflow と同じになります．

## 6.3 局所境界条件

内部領域の境界条件は、コンポーネントとして実装しています。局所境界条件の多くは、計算空間内に局所的に存在し、複雑な計算処理を行います。コンポーネントはそれらを効率よく取り扱うための機能です。1 つのセルを構成する 6 つの面にはそれぞれ別の境界条件を指定できますが、1 つのセルには流出境界は 1 面だけしか設定できません。

表 6.3 を以下に再掲します。

表 6.14 局所境界条件（コンポーネント）の種類

Class	境界指定位置	適用	実装形式	コンポーネントの説明
SpecifiedVelocity	セル界面	Cold/Thermal flow	対流流束	速度指定境界
Outflow	セル界面	Cold/Thermal flow	対流流束	流出境界
Periodic	セル界面	Cold/Thermal flow	参照値指定	部分周期境界
Inactive	セル要素	Cold/Thermal flow	マスク	不活性化する計算空間内のラベルを指定
CellMonitor	セル要素	Cold/Thermal flow	—	物理量のモニター位置の指定
Obstacle	セル界面	Cold/Thermal flow	熱流束マスク	断熱物体
DirectHeatFlux	セル界面	Thermal flow	熱流束	熱流束指定
HeatTransferS	セル界面	Thermal flow	熱流束	熱伝達係数と表面温度により計算
HeatTransferSF	セル界面	Thermal flow	熱流束	強制対流の層流・乱流熱伝達境界
HeatTransferSN	セル界面	Thermal flow	熱流束	自然対流の乱流熱伝達境界
IsoThermal	セル界面	Thermal flow	熱流束	等温面指定
HeatSource	セル要素	Thermal flow	外力項	吸発熱指定
SpecifiedTemperature	セル要素	Thermal flow	温度指定	温度指定

### 6.3.1 壁面境界

#### 流れの境界条件

解析モデルのポリゴンに Obstacle を指定すると、そのポリゴンと交差するセルは固体として認識されます。固体壁のセル界面においては、指定する壁面速度から運動量流束が直接計算され、スキーム中で境界条件として与えられます。

壁面境界に対する圧力の境界条件は、Navier-Stokes 方程式から Neumann 型の圧力境界条件が得られます。高レイノルズ数流れにおいては、粘性項の寄与が小さいと仮定し粘性項を省略し  $\nabla p = 0$  の形式になります。Binary 近似の場合には、固体壁面との界面で  $\nabla p = 0$  を満たすようにスキームが構成されています。

#### 熱境界条件

壁面に対する熱境界条件としては、断熱、熱流束、熱伝達、等温、温度条件を指定できます。熱境界条件の実装の詳細は Inside-FFVC.pdf をご覧ください。

**熱境界条件の指定方法** 熱境界条件はポリゴンモデルに与えます。多くの場合は流体と固体の界面ですが、固体熱伝導と共役熱移動の場合には、固体-固体界面の場合もあります。

コンポーネントに熱境界条件を与える場合、コンポーネントの媒質名（固体媒質）を指定します。熱流束の符号は、図 6.7 において、流体から熱が奪われる場合を負、流体に熱を与える場合を正にとります。

FFV-C の熱流体解析には幾つかのモードがあります。HeatEquation の指定モードによって、計算空間内の計算対象とする部分が異なります。ThermalFlow と ThermalFlowNatural の場合は、熱流動計算で流体の温度のみを解きます<sup>\*2</sup>。したがって、固体部分は計算対象とはならず不活性セルとして扱います。これより、流体-固体の境界面で与える熱境界条件（熱流束）は、流体セル側のみに指定されます。

<sup>\*2</sup> 計算の実装上、固体部分も解いていますが、その値はマスクされ無効化されています。



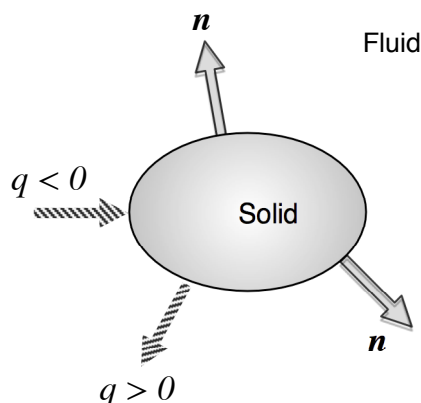


図 6.7 流体-固体界面における熱境界条件の熱流束の方向

一方，SolidConduction の場合は，固体部分の熱伝導のみを解くので，流体部分を不活性セルとして扱います．したがって，流体-固体の境界面で与える熱境界条件は，固体セル側のみに指定されます．

ConjugateHeatTransfer の場合には，流体と固体の両方の熱移動を計算します．したがって，流体-固体の境界面では熱境界条件は不要です．精度の高い計算のためには，温度境界層を解像できる格子密度が必要になります．

**断熱境界** 断熱壁では指定面で熱流束がゼロ，つまり  $q' = 0$  となります．

```
LocalBoundary {
  Body {
    Class = "Obstacle"
    Medium = "Al"
  }
}
```

この例では，形状モデルで Body と名付けられたポリゴン表面が断熱壁に指定されています．バイナリモデルでは，Body の固体ボクセルに隣接する流体セルの面が断熱境界条件となります．

**熱流束境界** 熱流束境界は境界面で指定の熱流束を与えます．

```
LocalBoundary {
  exhaust {
    Class = "DirectHeatFlux"
    Medium = "Fe"
    Heatflux = 10.0
  }
}
```

**熱伝達境界** 熱伝達境界は次式の形式で熱流束を与える条件で，幾つかの種類があります．固体-流体セル間の熱伝達境界の与え方は，外部境界条件の熱伝達境界で説明した内容と同じです．

**TypeS** 表面温度と熱伝達係数により計算 TypeS は固体表面温度と熱伝達係数を与え，熱流束を計算します．式 (6.2) において， $\theta_{\infty}$  を固体表面に接する流体セルの値と仮定します．以下に，熱境界部分のみパラメータ指定の一例を示します．

```
LocalBoundary {
```

```

exhaust {
  Class          = "HeatTransferS"
  Medium         = "Fe"
  SurfaceTemperature = 300.0
  CoefOfHeatTransfer = 20.0
}
}

```

**TypeSN** 自然対流の乱流熱伝達 自然対流の場合の乱流熱伝達の実験式を実装した境界条件です。

```

LocalBoundary {
  catalizer {
    Class          = "HeatTransferSN"
    Medium         = "Fe"
    SurfaceTemperature = 500.0
    RefTempMode    = "Bulk"
    VerticalLaminarAlpha = 0.59
    VerticalLaminarBeta  = 0.25
    VerticalTurbulentAlpha = 0.1
    VerticalTurbulentBeta = 0.333333
    VerticalRaCritical = 1.0e9
    LowerLaminarAlpha = 0.27
    LowerLaminarBeta  = 0.25
    LowerTurbulentAlpha = 0.27
    LowerTurbulentBeta = 0.25
    LowerRaCritical = 1.0e9
  }
}

```

**TypeSF** 強制対流の層流・乱流熱伝達 強制対流の場合の層流・乱流熱伝達の実験式を実装した境界条件です。

```

LocalBoundary {
  catalizer {
    Class          = "HeatTransferSF"
    Medium         = "Fe"
    SurfaceTemperature = 500.0
    RefTempMode    = "Local"
    Alpha          = 0.037
    Beta           = 0.8
    Gamma          = 0.33333
  }
}

```

**等温壁境界** 等温壁境界は、指定面で温度が一定となる境界条件で、面温度を一定に保つような熱流束が発生します。

```

LocalBoundary {
  HeatedWall {
    Class          = "IsoThermal"
    Medium         = "Fe"
    Temperature    = 300.0
  }
}

```

### 6.3.2 流出境界条件

流れの流出境界 計算領域内部に設定する流出境界について説明します．局所境界の場合には流出側のセルは固体セルであることに注意してください．つまり，図 6.8 においては，セル  $(i, j)$  は流体，セル  $(i + 1, j)$  は固体を指定します．ハッチング部分，つまり  $(i, j)$  セルの固体セルに隣接する面が流出境界として指定されています．速度の流出面における対流速度の評価方法として流出コンポーネントの平均速度を用い，流出面における圧力境界は圧力勾配ゼロとしています．圧力の指定については，外部境界面での指定と同様で表 6.10 を参照してください．

```
LocalBoundary {
  Outlet_1 {
    Class      = "Outflow"
    Medium     = "Fe"
    PressureType = "Neumann"
    PrsValue   = 0.0
  }
}
```

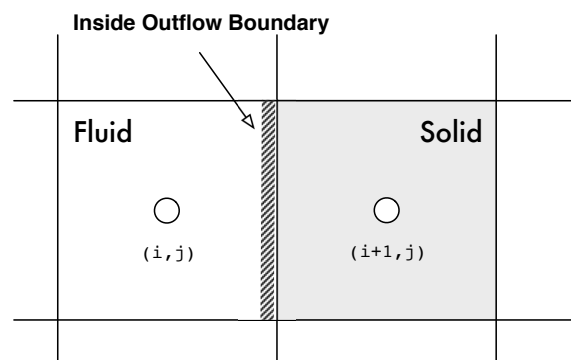


図 6.8 計算内部領域における流出境界の設定

熱流出境界 熱の流出境界は，流出界面の対流熱流束  $\tilde{f}$  を一次風上形式で評価します．

$$\tilde{f} = \frac{\partial}{\partial x'} (u' \theta')_{upstream\_face} \quad (6.9)$$

分離解法において温度輸送方程式を解く過程では，速度は既知なので上式は直ちに計算できます．

### 6.3.3 速度指定条件

流れの境界条件 この境界条件は，セル界面の運動量流束の形で実装されています．

```
LocalBoundary {
  Inlet {
    Class      = "SpecifiedVelocity"
    Normal     = (0.0, 0.0, -1.0)
    Type       = "Velocity"
    Profile    = "Constant"
    Velocity   = 3.0
    FluidDirection = "Opposite"
    Temperature = 60.0
  }
}
```

境界面の指定方法は表 6.15 に示すパラメータを与えます。時間変化を伴う速度指定は Profile=“Harmonic” を指定し、式 (6.10) の形式の単振動の境界条件を周期や初期位相、固定バイアスと併に与えます。時間的に変化しない壁面境界の場合には Profile=“Constant” を指定し、周波数、初期位相、固定バイアス値の指定は不要です。

$$V = A \sin(2\pi f t + \phi) + b \quad (6.10)$$

表 6.15 コンポーネントの流束指定のパラメータ

ラベル	指定キーワード	パラメータの説明
Normal	—	法線ベクトルの成分
Type	Velocity   Massflow	速度指定、または流量指定
Profile	Constant   Harmonic	指定速度のタイプ
Velocity	—	速度 $[m/s]$ または 流量 $[m^3/sec.]$ 、Profile=Constant の場合のみ
Amplitude	—	速度、流量、以下のパラメータは Profile=Harmonic の場合のみ
Frequency	—	周波数 $f [Hz]$
InitialPhase	—	初期位相 $\phi [Rad]$
ConstantBias	—	一定値 $b [m/s]$ または $[m^3/sec.]$
Temperature	—	熱計算の場合に流入温度 $[^{\circ}C]$ を指定

熱境界条件 指定面での対流熱流束を式 (6.9) で評価します。

### 6.3.4 周期境界条件

内部周期境界条件は外部の周期境界条件と組み合わせて利用します。このため、外部境界条件指定で、次の指定が必要です。

```
<OuterBoundary>
  <Elem name="Basic_BCs">
    <Elem name="periodic" id="10" >
      <Param name="mode" dtype="string" value="driver" />
      <Param name="driver_direction" dtype="string" value="x_minus" />
    </Elem>
  </Elem>
</OuterBoundary>
```

表 6.16 Driver モードのパラメータ

必要なキーワード	
DriverDirection	Xminus   Xplus   Yminus   Yplus   Zminus   Zplus

流れの境界条件 内部の周期境界条件は、計算外部と計算領域内で部分的な周期境界条件を設定します。モードとして Driver を指定した場合には、下記のように同時に内部周期境界を指定しなければなりません。UpstreamDirection と OuterBoundary で指定する DriverDirection の方向は一致する必要があります。

```
<LocalBoundary>
  <Elem name="periodic" id="4" comment="inner_driver" >
    <Param name="upstream_direction" dtype="string" value="x_minus" />
    <Param name="pressure_difference" dtype="REAL" value="1.636e-4" />
  </Elem>
</LocalBoundary>
```

現時点では、逐次計算しかできません。

熱境界条件 熱境界に対しては、指定するパラメータはありません。

### 6.3.5 セルボリュームに対する熱境界条件

セル体積要素に作用するコンポーネントの熱境界条件を説明します．この境界条件は，全てのセルに対して適用可能です．

#### SpecifiedTemperature

以下の形式で指定温度を与えます．

```
LocalBoundary {
  cylinder {
    Class      = "SpecifiedTemperature"
    Medium     = "Fe"
    Temperature = 600.0
  }
}
```

表 6.17 温度指定のパラメータ

指定キーワード	パラメータの説明
Temperature	表面温度 [K]°C]

#### HeatGeneration

表 6.18 に示すように，発熱量または発熱密度を指定ポリゴンに与えることができます．発熱量を指定した場合には，ポリゴンで指定されたセルの体積を前処理で計算し発熱密度に変換します．次の例では，cylinder に 100[W] の発熱量を与えています．

```
LocalBoundary {
  cylinder {
    Class      = "HeatSource"
    Medium     = "Fe"
    HeatReleaseValue = 100.0
  }
}
```

表 6.18 発熱量の指定方法

キーワード	パラメータの種類	単位
HeatReleaseValue	発熱量	[W]
HeatGenerationDensity	発熱密度	[W/m <sup>3</sup> ]

### 6.3.6 モニタ

局所境界条件のしくみを用いたサンプリング設定について説明します。計算空間内の任意の位置に配置されたポリゴンに対して、物理量をサンプリングします。これは形式的に局所境界条件の一つとして実装されています。

下記の例では、Sensor と名付けられたポリゴンに対応する領域をモニタ部とし、そこで速度、圧力、全圧をモニタすることを指定しています。Normal はモニタ面の法線を指定しています。

```
BCTable {
  LocalBoundary {
    Sensor {
      class          = "CellMonitor"
      Medium          = "air"

      shape          = "polygon"
      Normal          = (0.0, 0.0, -1.0)
      SamplingWidth   = "singleCell"

      Variables {
        velocity      = "on"
        pressure      = "on"
        temperature   = "off"
        TotalPressure = "on"
      }
    }
  }
}
```

表 6.19 セルモニターで指定できるパラメータ

ラベル	指定キーワード	コメント
Shape	Cylinder	円筒形状のモニタ領域
	Box	矩形のモニタ領域
	Polygon	ポリゴンによる領域指定
SamplingWidth	SingleCell	ポリゴンと交差するセルのみ
	NeighborCell	ポリゴンの両面のセル
Normal	—	法線ベクトル
Reference	yes   no	
Variables		
	Pressure	on   off
	Velocity	on   off
	Temperature	on   off
	TotalPressure	on   off

表 6.20 各 shape のパラメータ

Shape	ラベル	コメント
Cylinder	Center	円筒の中心座標 $(x, y, z)$
	Radius	円筒の半径
	Depth	円筒の深さ
Box	Center	矩形の中心座標 $(x, y, z)$
	Dir	方向ベクトル $(V_x, V_y, V_z)$
	Depth	矩形の深さ
	Width	矩形の幅
	Height	矩形の高さ



## 6.4 外力項を用いた境界条件

流動現象の中には空間スケールの異なる流れがあり相互に影響するような問題、例えば、多孔質層を通過する大空間の流れを解析する場合、興味の対象は大空間内の流動挙動であり、多孔質層内はマクロに見て適切な流れ場になっていればよいことも多くあります。メッシュ解像度以下の微細な構造が流動特性に与える影響は、ダルシー則などのように理論的、あるいは実験式などで与えられます。このような流体特性をもつ境界条件について説明します。

### 6.4.1 圧力損失境界条件

熱交換器やファンなどの圧力損失・利得をモデル化した境界条件について説明します。熱交換器は、圧力損失を生じる多孔質物体として扱い、流出方向を法線で指定します。この条件は、通過流量（流速）と圧力損失量の関係式が与えられるものとします。

一方、ファンは圧力利得が関係式として与えられます。ファンの場合には旋回成分などもありますが、ここでは軸流方向のみを考えます。このような流体部品のモデル指定は、セルボリュームに作用する局所境界条件として指定します。具体的には、コンポーネントの PressureLoss として扱い、式 (6.11) の外力項  $F_i$  として実装します。 $\beta$  はセル内部におけるコンポーネントの体積占有率 (Volume Fraction; VF) です。外力項として、表 6.21 のようなモデルが実装されています。

この境界条件に対応するモニタ量として、指定部の平均速度・流量や圧力損失量が history\_compo.log に書き出されます。詳細はコンポーネント履歴を参照してください。

表 6.21 セルボリュームに作用する局所境界条件

キーワード	境界条件モデル
PressureLoss	熱交換器モデル

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + (1-\beta) \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \beta F_i^{n+1} \quad (6.11)$$

熱交換器のモデル化 圧力損失の一つである熱交換器モデルは、式 (6.11) に式 (6.12) の実験式を適用します。

$$F_i = -\operatorname{sgn}(u_i) \left( \frac{\Delta p}{\Delta r} \right)^R n_i^R \quad (6.12)$$

ここで、 $R$  は熱交換器を表し、 $\Delta p$ ,  $\Delta r$ ,  $n_i$  はそれぞれ圧力損失量、熱交換器の厚さ、法線方向を表します。熱交換機の通過ベクトルとは逆方向に圧力損失が発生するモデルとなっています。ただし、パラメータ vector が directional でない場合には、速度ベクトルは熱交換器の流出方向には揃わず、単に、圧力損失が計算された速度ベクトルと逆向きに作用するモデルとなります。圧力損失パラメータは、熱交換器の性能試験結果により、図 6.9 に示すような実験値が得られます。 $\Delta p - V$  の性能線図を  $[mmAq - m/s]$  を単位とした場合のパラメータの取得について示します。熱交換器の圧力損失は、二次多項式で近似できます。図 6.9 のグラフの読みからカーブフィットを行い、式 (6.13) に対応する数値  $c_1 - c_4$ ,  $u_{threshold}$  を得ます。ダッシュは有次元を表します。このとき、圧力損失ヘッ드의単位に応じて、パラメータは無次元に変換されます。

$$h' = \begin{cases} c_1 u'^2 + c_2 u' + c_3 & (u' \geq u'_{threshold}) \\ c_4 u'^2 & (u' < u'_{threshold}) \end{cases} [mm] \quad (6.13)$$

図 6.10 に計算パラメータの取得方法を示します。一般に、低速域のデータは得られない場合が多く、推定が必要です。図では が測定結果を示し  $2[m/s]$  より低速域のデータはありません。そこで、測定値を元にカーブフィッティン

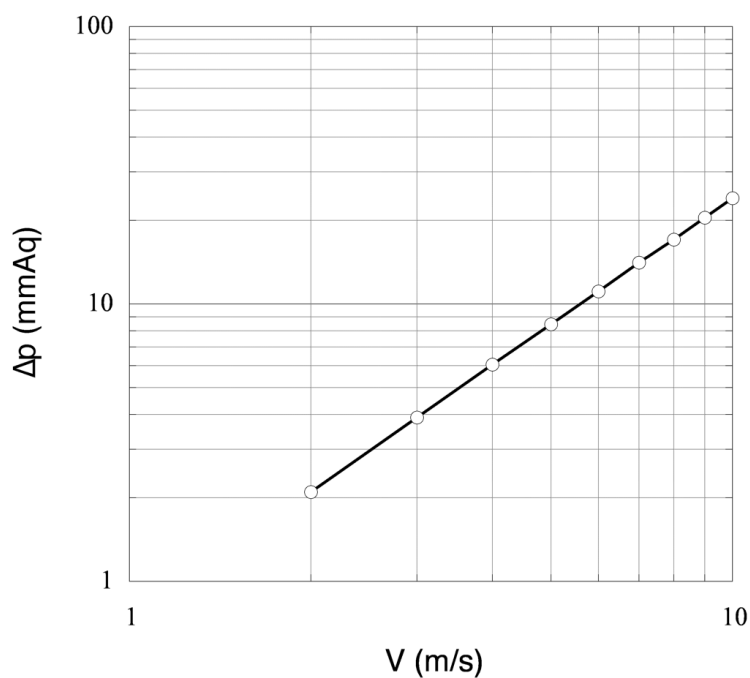
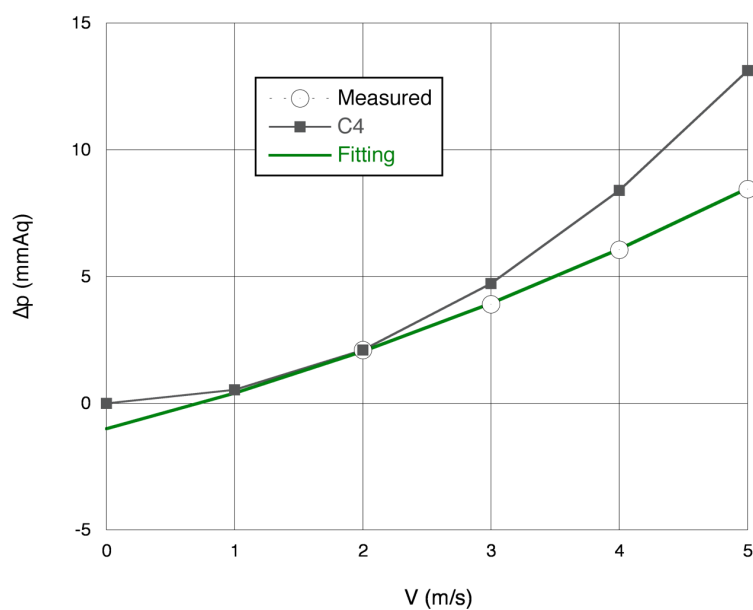
図 6.9  $\Delta p - V$  性能線図 (対数表示)

図 6.10 パラメータの取得 (図 6.9 と同じものを線形表示)

グを行い (図中の緑色の曲線), 算出された係数  $c_1 = 0.12321$ ,  $c_2 = 1.2806$ ,  $c_3 = -1.0074$  ( $2 - 10 [m/s]$ ) を計算パラメータとします。この場合,  $h'$  切片がマイナスになるため, 熱交換機の通過速度がゼロに近い場合に急にマイナスの圧力損失 (つまり圧力利得) が発生し, 実際の現象とは異なり計算上好ましくありません。そこで式 (6.13) に示すようにある閾値で曲線を切り替えます。ここでは, 測定された最小速度  $u_{threshold} = 2 [m/s]$  を閾値として, C4 のカーブ  $c_4 = 0.525$  ( $0 - 2 [m/s]$ ) で切り替えます。熱交換器厚さは実務での観点から単位を  $[mm]$  で指定するので, 注意してください。

次の例では, 境界条件番号 8 に圧力損失条件を設定します。ここで各パラメータは表 6.22 に対応します。

```

<LocalBoundary>
  <Elem name="Pressure_Loss" ID="8" comment="radiator"/>
    <Param name="Unit"      dtype="STRING" value="mmAq"/>
    <Param name="Normal_x"   dtype="REAL"  value="1.0" />
    <Param name="Normal_y"   dtype="REAL"  value="0.0" />
    <Param name="Normal_z"   dtype="REAL"  value="0.0" />
    <Param name="c1"         dtype="REAL"  value="0.8" />
    <Param name="c2"         dtype="REAL"  value="0.0" />
    <Param name="c3"         dtype="REAL"  value="0.0" />
    <Param name="c4"         dtype="REAL"  value="0.8" />
    <Param name="u_threshold" dtype="REAL"  value="0.2" />
    <Param name="Thickness"  dtype="REAL"  value="80" />
    <Param name="Vector"     dtype="STRING" value="Directional" />
  </Elem>
</LocalBoundary>

```

表 6.22 圧力損失モデルのパラメータ

キーワード	パラメータの説明
Normalx	熱交換器の法線ベクトルの x 方向成分 法線は単位ベクトル
Normaly	熱交換器の法線ベクトルの y 方向成分 法線は単位ベクトル
Normalz	熱交換器の法線ベクトルの z 方向成分 法線は単位ベクトル
c1	熱交換器の圧力損失係数 c1 [mmAq mmHg Pa Nondimension]
c2	熱交換器の圧力損失係数 c2 [mmAq mmHg Pa Nondimension]
c3	熱交換器の圧力損失係数 c3 [mmAq mmHg Pa Nondimension]
c4	熱交換器の圧力損失係数 c4 [mmAq mmHg Pa Nondimension]
uthreshold	圧力損失カーブの切り替え速度 $u_{threshold}$ [m/s Nondimension]
thickness	熱交換器の厚さ [mm Nondimension]
unit	圧力損失 $\Delta p - V$ 線図のヘッドの単位 [mmAq mmHg Pa Non - Dimension] <sup>*4</sup>
vector	速度ベクトルの法線方向への強制 [Directional NonDirectional]

<sup>\*4</sup> mmAq は水 ( 300K, p=101.325kPa ) 996.62 [kg/m<sup>3</sup>] , mmHg は水銀 ( 300K ) 13538 [kg/m<sup>3</sup>] をプログラム中でハードコード .

## 6.5 静止座標系と移動座標系の場合の境界条件

外部流を考えます．図 6.11(a) の静止座標系と図 6.11(b) の移動座標系のように異なる座標系で物体まわりの流れを計算する場合，境界条件の与え方が異なります．静止座標系は風洞実験に相当し，静止した対象物に対して風をあてている状況です．テスト区間（この場合は計算領域）から出ていく流れが流出風に相当します．一方，移動座標系では対象物に固定した計算格子が対象物とともに静止流体中を移動します．この場合は，計算領域そのものと内部の格子が物体とともに動きます．一定速度  $V$  で動いている座標系の添え字を  $_M$  とし，静止した座標系の添え字を  $_S$  とします．いま，静止座標系で観測される流体の速度を  $u_S$  と表すと，同じ速度は移動座標系では  $u_M - V$  のように観測されます．つまり，

$$u_S = u_M - V \quad (6.14)$$

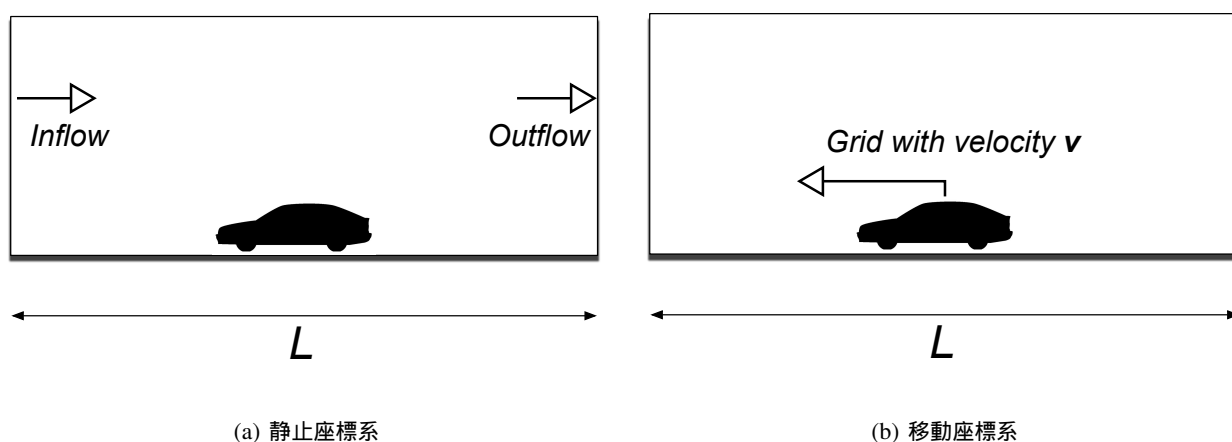


図 6.11 静止座標系と移動座標系の観測点の違い

静止座標系において図 6.11(a) のような境界条件を与える場合，流入部では  $u_0$  を与えます．一方，移動座標系では静止流体の条件，つまり  $u = 0$ ,  $p = 0$  を想定し，格子速度  $V = -u_0$  を与えると両者は等価になります．

移動座標系の場合注意を要するのが，物体と地面の境界条件です．物体は移動しているので格子速度と同じになります．一方，地面は静止している地面と動いている地面の二通りが考えられます．前者は風洞実験で固定地面板に相当し，後者はムービングベルトに相当します．ムービングベルトの場合には物体と格子速度だけ相対速度をもっていることになります．したがって，

$$u_{\text{ground}} = \begin{cases} -u_0 & (\text{Stationary ground}) \\ 0 & (\text{Moving ground}) \end{cases} \quad (6.15)$$

移動格子の移動速度は ReferenceFrame ノードで与えます．

## 第 7 章

# モニタリング機能

FFV-C ソルバーには、計算中の任意点の物理量をモニターする仕組みがあります。本章では、その指定方法について説明します。

物理量モニタリング機能は、ユーザが指定した位置で指定した物理量をファイルに出力する機能です。位置の指定には、パラメータファイルで指定する方法と解析モデルのラベルで指定する方法の2種類があります。

## 7.1 パラメータファイルで指定する方法

モニタリングの指定は、Monitor List セクションに記述します。

```
<Elem name="Monitor_List">
  <Param name="Log" dtype="STRING" value="On" />
  <Param name="output_mode" dtype="string" value="Gather" />
  <Param name="Unit" dtype="STRING" value="Non_Dimensional" />
  <Param name="Sampling_Interval_Type" dtype="string" value="Time" />
  <Param name="Sampling_Interval" dtype="real" value="0.1" />

  <Elem name="point_set" comment="p1">
    <Param name="variable" dtype="string" value="velocity" />
    <Param name="variable" dtype="string" value="temperature" />
    <Param name="sampling_method" dtype="string" value="interpolation" />
    <Param name="sampling_mode" dtype="string" value="all" />
    <Elem name="set" comment="10_Eng_ctr">
      <Param name="x" dtype="REAL" value="-0.217" />
      <Param name="y" dtype="REAL" value="-0.006" />
      <Param name="z" dtype="REAL" value="0.715" />
    </Elem>
    <Elem name="set" comment="102_Eng_mnt_Rh_Fr">
      <Param name="x" dtype="REAL" value="-0.204" />
      <Param name="y" dtype="REAL" value="0.495" />
      <Param name="z" dtype="REAL" value="0.574" />
    </Elem>
  </Elem>

  <Elem name="line" comment="line_y=0">
    <Param name="variable" dtype="string" value="velocity" />
    <Param name="division" dtype="int" value="64" />
    <Param name="sampling_method" dtype="string" value="smoothing" />
    <Param name="sampling_mode" dtype="string" value="fluid" />
    <Elem name="from">
      <Param name="x" dtype="REAL" value="0.0" />
      <Param name="y" dtype="REAL" value="0.0" />
      <Param name="z" dtype="REAL" value="-0.5" />
    </Elem>
    <Elem name="to">
      <Param name="x" dtype="REAL" value="0.0" />
      <Param name="y" dtype="REAL" value="0.0" />
      <Param name="z" dtype="REAL" value="0.5" />
    </Elem>
  </Elem>
</Elem>
```

表 7.1 モニター機能の設定

ラベル	キーワード	説明
Log	On   Off	機能の有効・無効
Output_Mode	Gather   Distribute	モニターログの出力モード
Unit	Dimensional   Non_Dimensional	指定パラメータと出力ログの単位指定
Sampling_Interval_Type	Step   Time	間隔の指定形式
Sampling_Interval	—	サンプリング間隔

Monitor List には、点群 (point\_set) と線分 (line) の2種類の指定方法があります。それぞれをグループと呼び、point\_set の構成点を set と定義します。ファイルへの出力はグループ毎に書き出されます。XML ファイル中の

point\_set または line のパラメータの comment は、履歴ファイルの名前の末尾に追加されます。各 point\_set/line タグの comment は、履歴ファイル中で各モニタ点を識別するヘッダになり、ヘッダには座標も記述されます。もし、set の comment の記述がない場合には、「point #」(#にはモニタ点番号) がヘッダとして与えられます。

出力モードは Monitor\_List セクションの sampling\_output タグで指定します。出力モードは並列計算時のファイル出力様式で、マスターノードに集約してファイル出力する場合には gather を指定し、分散ノード毎にファイル出力する場合には distribute を指定します。ファイル名の命名ルールは以下のようになっています。

- 逐次実行時は OutputData の log\_sampling で指定されるファイル名 (例えば, history\_sampling.log) に、グループ名 (point\_set または line のコメントで指定された文字列) を追加したファイル名となります。例えば, point\_set で p1 がコメントとして与えられるグループに対しては, history\_sampling\_p1.log というファイル名となります。
- 並列実行時, sampling\_output=gather を指定した場合, ファイル名は逐次と同じになります。
- 並列実行時, sampling\_output=distribute を指定した場合, 上記のファイル名に対して, 更にランク番号を追加したファイル名となります。例えば, OutputData の log\_sampling で history\_sampling.log が指定され, line で line\_y=0 がコメントとして与えられるグループに対しては, history\_sampling\_line\_y=0. \*.log となります (\*にはランク番号が入ります)。

Pram name="variable" で指定されるパラメータは、以下のキーワードによりモニタリングする物理量を指定します。

Velocity	速度
Pressure	圧力
Temperature	温度
Total_Pressure	全圧
Vorticity	渦度

物理量は point\_set の例のように複数指定可能です。

Pram name="sampling\_method" で指定されるパラメータは、以下のキーワードにより採取方法を指定します。

nearest	モニタ点を含むセルでの値
interpolation	三重線形補間
smoothing	局所平均による平滑化

Pram name="sampling\_mode" で指定されるパラメータは、以下のキーワードにより採取モードを指定し、各採取方法での対象セルを指定します。

all	全セルを対象
fluid	流体セルのみを対象
solid	固体セルのみを対象

モニタリング指定された点はセル ID="255" が割り当てられ、測定位置情報が書き込まれた svx/sbx ファイルが出力されます。

### 7.1.1 値の採取方法

nearest モニタ点を含むセルのセル中心での値を採取します。nearest では Sampling\_Mode="All" に固定です。

interpolation モニタ点を囲む 8 つセル中心位置での値を採取し、xyz の 3 方向に対して線形補間を行いモニタ点での値を評価します。sampling\_mode="all" の場合には、モニタ点を囲む 8 つセルの状態 (流体/固体) によらず、常に三重線形補間を行います。sampling\_mode="fluid" の場合には、モニタ点を囲む 8 セル全てが流体セルの場合のみ三重線形補間を行い、それ以外の場合にはモニタ点を含むセル中心での値を採取します (nearest 相当)。sampling\_mode="solid"

の場合も同様に，モニタ点を囲む8セル全てが固体セルの場合のみ三重線形補間を行い，それ以外の場合にはモニタ点を含むセル中心での値を採取します (nearest 相当) ．

smoothing モニタ点を含むセルおよびその隣接セルでのセルセンタの値を採取して，その平均値 (局所平均値) を計算します．sampling\_mode=“all” の場合には，6 つの全隣接セルを用いて，合計7セルでの値を採取して平均します．sampling\_mode=“fluid” の場合には，モニタ点を含むセルと，そこに隣接する流体セルのみから平均値を計算します．sampling\_mode=“solid” の場合には，モニタ点を含むセルと，そこに隣接する固体セルのみから平均値を計算します．

### 7.1.2 指定パラメータの制限およびエラー処理

- point\_set グループに所属するモニタ点に計算対象領域外の座標値があると，初期化時にエラーメッセージを出力してソルバーの実行を停止します．
- Line グループで指定された線分は，必要なら計算対象領域内にクリッピングしてから，線分上の両端を含む分割点をモニタ点に定めます．線分が完全に計算対象領域外にある場合には，エラーメッセージを出力してソルバーの実行を停止します．このようなケースは図 7.1 に示すような場合が想定されます．
- 採取方法が interpolation または smoothing において採取モードが fluid または solid の場合には，次の条件を満たすモニタ点があると，ソルバー初期化時に警告メッセージが出力され，ソルバー実行中にはそのモニタ点での採取はスキップされます．

sampling\_mode=“fluid” だが，モニタ点を含むセルが固体セルであった

sampling\_mode=“solid” だが，モニタ点を含むセルが流体セルであった

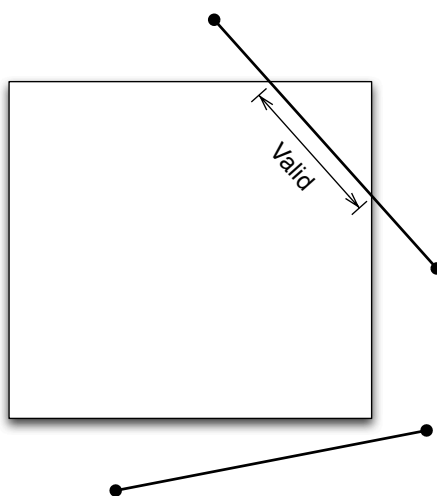


図 7.1 ラインのサンプリング指定で無効なケース

### 7.1.3 出力ファイルフォーマット

採取された物理量は，グループ毎にファイルに出力されます．出力ファイルは，テキストファイルで，モニタ点座標とモニタ変数を記述したヘッダ領域と，それに続く，採取したステップ数個のデータ領域からなります．ヘッダ領域とデータ領域，および，隣接するデータ領域間は1行の空行で区切られています．

ヘッダ領域 1行目の整数  $n$  にモニタ点数と，モニタ対象の物理量を示すキーワード (Velocity, Pressure 等) が並びます．続く  $n$  行に，各モニタ点の座標値および comment が出力されます．なお，分散出力時には， $n$  は担当ノード内のモニタ点数になり，担当モニタ点の座標値のみを出力します．



```

n Velocity Presure Temperature
x1 y1 z1 #comment
x2 y2 z2 #comment
...
xn yn zn #comment

```

n 点で速度, 圧力, 温度をモニタ  
各モニタ点の座標と comment を  
空白区切りで出力

データ領域 1 行目に, 採取時のステップ数 step(整数) とソルバー内部時間 time(実数) が出力されます。続く n 行に, 各モニタ点で採取した値が, ヘッダ領域のキーワードの並び順に出力されます。

```

step time
u1 v1 w1 p1 t1
u2 v2 w2 p2 t2
...
un vn wn pn tn

```

ステップ数=step, 時間=time  
モニタ点毎の採取値が  
空白区切りで並ぶ  
( $u_i, v_i, w_i$ )=速度,  $p_i$ =圧力,  $t_i$ =温度

採取値の有効桁数は, 単精度計算では小数点以下 7 桁, 倍精度計算では 16 桁です。

なお, 採取モードの制限により採取をスキップされたモニタ点では, データ領域の該当する行には, 「\*NA\*」の文字列が出力されます。

## 7.2 局所境界条件で指定する方法

コンポーネントによりサンプリングする場合，`sampling_method="nearest"`，`sampling_mode="all"` の条件でデータサンプリングを行います。

モニター部の指定方法については，6.3.6 を参照してください。

## 7.3 モニター例

以下の指定によって、10 ステップ毎にサンプリングする例を示します。

line "Lx" x 軸にそって 5 点 ( $x = -0.5, -0.25, 0.0, 0.25, 0.5$ )

line "Ly" y 軸にそって 5 点 ( $y = -0.5, -0.25, 0.0, 0.25, 0.5$ )

line "Lz" z 軸にそって 5 点 ( $z = -0.5, -0.25, 0.0, 0.25, 0.5$ )

point.set "P8"  $x = \pm 0.25, y = \pm 0.25, z = \pm 0.25$  の組み合わせで 8 点

```
<Elem name="Monitor_List">
  <Param name="Log" dtype="STRING" value="On" />
  <Param name="output_mode" dtype="string" value="Gather" />
  <Param name="Unit" dtype="STRING" value="Non_Dimensional" />
  <Param name="Sampling_Interval_Type" dtype="string" value="Step" />
  <Param name="Sampling_Interval" dtype="real" value="10" />

  <Elem name="line" comment="Lx">
    <Param name="variable" dtype="string" value="velocity" />
    <Param name="variable" dtype="string" value="pressure" />
    <Param name="sampling_method" dtype="string" value="interpolation" />
    <Param name="sampling_mode" dtype="string" value="fluid" />
    <Param name="division" dtype="int" value="4" />
    <Elem name="from">
      <Param name="x" dtype="REAL" value="-0.5" />
      <Param name="y" dtype="REAL" value="0.0" />
      <Param name="z" dtype="REAL" value="0.0" />
    </Elem>
    <Elem name="to">
      <Param name="x" dtype="REAL" value="0.5" />
      <Param name="y" dtype="REAL" value="0.0" />
      <Param name="z" dtype="REAL" value="0.0" />
    </Elem>
  </Elem>

  <Elem name="line" comment="Lz">
    <Param name="variable" dtype="string" value="velocity" />
    <Param name="variable" dtype="string" value="pressure" />
    <Param name="sampling_method" dtype="string" value="interpolation" />
    <Param name="sampling_mode" dtype="string" value="fluid" />
    <Param name="division" dtype="int" value="4" />
    <Elem name="from">
      <Param name="x" dtype="REAL" value="0.0" />
      <Param name="y" dtype="REAL" value="0.0" />
      <Param name="z" dtype="REAL" value="-0.5" />
    </Elem>
    <Elem name="to">
      <Param name="x" dtype="REAL" value="0.0" />
      <Param name="y" dtype="REAL" value="0.0" />
      <Param name="z" dtype="REAL" value="0.5" />
    </Elem>
  </Elem>

  <Elem name="line" comment="Ly">
    <Param name="variable" dtype="string" value="velocity" />
    <Param name="variable" dtype="string" value="pressure" />
    <Param name="sampling_method" dtype="string" value="interpolation" />
    <Param name="sampling_mode" dtype="string" value="fluid" />
    <Param name="division" dtype="int" value="4" />
    <Elem name="from">
      <Param name="x" dtype="REAL" value="0.0" />
      <Param name="y" dtype="REAL" value="-0.5" />
      <Param name="z" dtype="REAL" value="0.0" />
    </Elem>
    <Elem name="to">
      <Param name="x" dtype="REAL" value="0.0" />
```

```

    <Param name="y" dtype="REAL" value="0.5" />
    <Param name="z" dtype="REAL" value="0.0" />
  </Elem>
</Elem>

<Elem name="point_set" comment="P8">
  <Param name="variable" dtype="string" value="pressure" />
  <Param name="variable" dtype="string" value="velocity" />
  <Param name="variable" dtype="string" value="vorticity" />
  <Param name="sampling_method" dtype="string" value="smoothing" />
  <Param name="sampling_mode" dtype="string" value="fluid" />
  <Elem name="set" comment="[- - -]">
    <Param name="x" dtype="REAL" value="-0.25" />
    <Param name="y" dtype="REAL" value="-0.25" />
    <Param name="z" dtype="REAL" value="-0.25" />
  </Elem>
  <Elem name="set" comment="[+ - -]">
    <Param name="x" dtype="REAL" value=" 0.25" />
    <Param name="y" dtype="REAL" value="-0.25" />
    <Param name="z" dtype="REAL" value="-0.25" />
  </Elem>
  <Elem name="set" comment="[- + -]">
    <Param name="x" dtype="REAL" value="-0.25" />
    <Param name="y" dtype="REAL" value=" 0.25" />
    <Param name="z" dtype="REAL" value="-0.25" />
  </Elem>
  <Elem name="set" comment="[+ + -]">
    <Param name="x" dtype="REAL" value=" 0.25" />
    <Param name="y" dtype="REAL" value=" 0.25" />
    <Param name="z" dtype="REAL" value="-0.25" />
  </Elem>
  <Elem name="set" comment="[- - +]">
    <Param name="x" dtype="REAL" value="-0.25" />
    <Param name="y" dtype="REAL" value="-0.25" />
    <Param name="z" dtype="REAL" value=" 0.25" />
  </Elem>
  <Elem name="set" comment="[+ - +]">
    <Param name="x" dtype="REAL" value=" 0.25" />
    <Param name="y" dtype="REAL" value="-0.25" />
    <Param name="z" dtype="REAL" value=" 0.25" />
  </Elem>
  <Elem name="set" comment="[- + +]">
    <Param name="x" dtype="REAL" value="-0.25" />
    <Param name="y" dtype="REAL" value=" 0.25" />
    <Param name="z" dtype="REAL" value=" 0.25" />
  </Elem>
  <Elem name="set" comment="[+ + +]">
    <Param name="x" dtype="REAL" value=" 0.25" />
    <Param name="y" dtype="REAL" value=" 0.25" />
    <Param name="z" dtype="REAL" value=" 0.25" />
  </Elem>
</Elem>

<InnerBoundary>
  <Elem name="Cell_Monitor" id="20" comment="monitor_inlet">
    <Param name="reference" dtype="string" value="no" />
    <Param name="Norm_x" dtype="REAL" value="1.0" />
    <Param name="Norm_y" dtype="REAL" value="0.0" />
    <Param name="Norm_z" dtype="REAL" value="0.0" />
    <Elem name="Variables">
      <Param name="velocity" dtype="STRING" value="on" />
      <Param name="pressure" dtype="STRING" value="on" />
      <Param name="temperature" dtype="STRING" value="off" />
      <Param name="Total_pressure" dtype="STRING" value="on" />
    </Elem>
  </Elem>
</InnerBoundary>

```

## 7.3.1 初期化時の出力情報

以下に、4 並列実行時の出力例を示します。

```
>> Monitor Information

Output Type : Gather

1 : Line   division=5 [Lx]
  Variables : Velocity Pressure
  Method : Interpolation
  Mode : All
  order :      X      Y      Z : rank : comment
    1 : -5.0000e-01  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_0
    2 : -2.5000e-01  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_1
    3 :  0.0000e+00  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_2
    4 :  2.5000e-01  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_3
    5 :  5.0000e-01  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_4

2 : Line   division=5 [Lz]
  Variables : Velocity Pressure
  Method : Interpolation
  Mode : All
  order :      X      Y      Z : rank : comment
    1 :  0.0000e+00  0.0000e+00 -5.0000e-01 :    1 : point_0
    2 :  0.0000e+00  0.0000e+00 -2.5000e-01 :    1 : point_1
    3 :  0.0000e+00  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_2
    4 :  0.0000e+00  0.0000e+00  2.5000e-01 :    3 : point_3
    5 :  0.0000e+00  0.0000e+00  5.0000e-01 :    3 : point_4

3 : Line   division=5 [Ly]
  Variables : Velocity Pressure
  Method : Interpolation
  Mode : All
  order :      X      Y      Z : rank : comment
    1 :  0.0000e+00 -5.0000e-01  0.0000e+00 :    2 : point_0
    2 :  0.0000e+00 -2.5000e-01  0.0000e+00 :    2 : point_1
    3 :  0.0000e+00  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_2
    4 :  0.0000e+00  2.5000e-01  0.0000e+00 :    3 : point_3
    5 :  0.0000e+00  5.0000e-01  0.0000e+00 :    3 : point_4

4 : Point_set division=8 [P8]
  Variables : Velocity Pressure Vorticity
  Method : Smoothing
  Mode : All
  order :      X      Y      Z : rank : comment
    1 : -2.5000e-01 -2.5000e-01 -2.5000e-01 :    0 : [- - -]
    2 :  2.5000e-01 -2.5000e-01 -2.5000e-01 :    0 : [+ - -]
    3 : -2.5000e-01  2.5000e-01 -2.5000e-01 :    1 : [- + -]
    4 :  2.5000e-01  2.5000e-01 -2.5000e-01 :    1 : [+ + -]
    5 : -2.5000e-01 -2.5000e-01  2.5000e-01 :    2 : [- - +]
    6 :  2.5000e-01 -2.5000e-01  2.5000e-01 :    2 : [+ - +]
    7 : -2.5000e-01  2.5000e-01  2.5000e-01 :    3 : [- + +]
    8 :  2.5000e-01  2.5000e-01  2.5000e-01 :    3 : [+ + +]

5 : Inner Boundary   division=4 [InnerBoundary1]
  Variables : Velocity Pressure
  Method : Nearest
  Mode : All
  order :      X      Y      Z : rank : comment
    1 : -7.8125e-03 -7.8125e-03 -7.8125e-03 :    0 : point_0
    2 : -7.8125e-03  7.8125e-03 -7.8125e-03 :    1 : point_1
    3 : -7.8125e-03 -7.8125e-03  7.8125e-03 :    2 : point_2
    4 : -7.8125e-03  7.8125e-03  7.8125e-03 :    3 : point_3
```

### 7.3.2 単一ファイル出力

以下は、4 並列実行時のファイル出力内容 (monitor\_Lz.log) です。最初の 6 行はヘッダで、5 点のモニタ点 (2~6 行目に座標とラベルが示されています) に対して、速度 ( $u, v, w$  成分) と圧力をモニタすることがわかります。各ステップのモニタ値にはステップ数と時刻のヘッダがつきます。

```
5 Velocity Pressure
0.0000e+00 0.0000e+00 -5.0000e-01 #point_0
0.0000e+00 0.0000e+00 -2.5000e-01 #point_1
0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 #point_2
0.0000e+00 0.0000e+00 2.5000e-01 #point_3
0.0000e+00 0.0000e+00 5.0000e-01 #point_4

10 3.1250e-02
0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00
0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00
0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00
-9.4408710e-26 0.00000000e+00 -1.4733364e-32 1.2573367e-32
1.0951646e-04 0.00000000e+00 7.5170038e-23 -1.3972461e-21

20 6.2500e-02
-1.2704001e-14 -3.9074446e-19 -1.3234890e-21 7.5723732e-20
-1.0800631e-10 -3.4509484e-15 1.3357371e-16 -1.0019127e-15
-4.8423708e-08 -1.4604844e-12 2.6645353e-13 -3.1363824e-12
-1.4771770e-06 -3.9237082e-11 2.1965540e-11 -3.6127115e-10
7.4478355e-04 -5.5457045e-11 4.2911008e-11 -2.1239641e-09

30 9.3750e-02
-3.5265384e-07 -3.4598248e-11 -1.2434498e-13 4.3679508e-11
-4.3679470e-06 -2.3597949e-10 -3.1370462e-12 2.8554661e-10
-2.3169587e-05 -5.8292204e-10 2.8683900e-10 -2.2359627e-09
-6.6163069e-05 -8.1312534e-10 2.1909443e-09 -2.8697086e-08
2.2175554e-03 -3.7072784e-10 8.8358654e-10 -4.6022318e-08

...
```

### 7.3.3 分散ファイル出力

前述と同条件でのファイル出力例 (monitor\_Lz\_1.log) です。

```
2 Velocity Pressure
0.0000e+00 0.0000e+00 -5.0000e-01 #point_0
0.0000e+00 0.0000e+00 -2.5000e-01 #point_1

10 3.1250e-02
0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00
0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00

20 6.2500e-02
-1.2704001e-14 -3.9074446e-19 -1.3234890e-21 7.5723732e-20
-1.0800631e-10 -3.4509484e-15 1.3357371e-16 -1.0019127e-15

30 9.3750e-02
-3.5265384e-07 -3.4598248e-11 -1.2434498e-13 4.3679508e-11
-4.3679470e-06 -2.3597949e-10 -3.1370462e-12 2.8554661e-10

...
```

## 7.3.4 Sampling\_Mode の指定例

全グループで Sampling\_Mode=“fluid” とした場合の初期化時のコンソール出力です。

```
>> Monitor Information

Output Type : Gather

1 : Line division=5 [Lx]
  Variables : Velocity Pressure
  Method : Interpolation
  Mode : Fluid
  order :      X      Y      Z : rank : comment
    1 : -5.0000e-01  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_0
    2 : -2.5000e-01  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_1
    3 :  0.0000e+00  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_2
    4 :  2.5000e-01  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_3
    5 :  5.0000e-01  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_4 *
skip(unexpected solid)*

2 : Line division=5 [Lz]
  Variables : Velocity Pressure
  Method : Interpolation
  Mode : Fluid
  order :      X      Y      Z : rank : comment
    1 :  0.0000e+00  0.0000e+00 -5.0000e-01 :    1 : point_0
    2 :  0.0000e+00  0.0000e+00 -2.5000e-01 :    1 : point_1
    3 :  0.0000e+00  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_2
    4 :  0.0000e+00  0.0000e+00  2.5000e-01 :    3 : point_3
    5 :  0.0000e+00  0.0000e+00  5.0000e-01 :    3 : point_4 *
skip(unexpected solid)*

3 : Line division=5 [Ly]
  Variables : Velocity Pressure
  Method : Interpolation
  Mode : Fluid
  order :      X      Y      Z : rank : comment
    1 :  0.0000e+00 -5.0000e-01  0.0000e+00 :    2 : point_0
    2 :  0.0000e+00 -2.5000e-01  0.0000e+00 :    2 : point_1
    3 :  0.0000e+00  0.0000e+00  0.0000e+00 :    3 : point_2
    4 :  0.0000e+00  2.5000e-01  0.0000e+00 :    3 : point_3
    5 :  0.0000e+00  5.0000e-01  0.0000e+00 :    3 : point_4 *
skip(unexpected solid)*

4 : Point_set division=8 [P8]
  Variables : Velocity Pressure Vorticity
  Method : Smoothing
  Mode : Fluid
  order :      X      Y      Z : rank : comment
    1 : -2.5000e-01 -2.5000e-01 -2.5000e-01 :    0 : [- - -]
    2 :  2.5000e-01 -2.5000e-01 -2.5000e-01 :    0 : [+ - -]
    3 : -2.5000e-01  2.5000e-01 -2.5000e-01 :    1 : [- + -]
    4 :  2.5000e-01  2.5000e-01 -2.5000e-01 :    1 : [+ + -]
    5 : -2.5000e-01 -2.5000e-01  2.5000e-01 :    2 : [- - +]
    6 :  2.5000e-01 -2.5000e-01  2.5000e-01 :    2 : [+ - +]
    7 : -2.5000e-01  2.5000e-01  2.5000e-01 :    3 : [- + +]
    8 :  2.5000e-01  2.5000e-01  2.5000e-01 :    3 : [+ + +]

5 : Inner Boundary division=4 [InnerBoundary1]
  Variables : Velocity Pressure
  Method : Nearest
  Mode : All
  order :      X      Y      Z : rank : comment
    1 : -7.8125e-03 -7.8125e-03 -7.8125e-03 :    0 : point_0
    2 : -7.8125e-03  7.8125e-03 -7.8125e-03 :    1 : point_1
    3 : -7.8125e-03 -7.8125e-03  7.8125e-03 :    2 : point_2
    4 : -7.8125e-03  7.8125e-03  7.8125e-03 :    3 : point_3
```

上例の line グループのように、線分の端点が計算対象領域境界上にある場合には、そのモニタ点がガイドセル側に属すると判断されることがあります。Sampling\_Mode="fluid" と指定したにもかかわらずモニタ点を含むセルが固体セルであるため、警告メッセージ「\*skip(unexpected solid)\*」が出力される場合があります。

この現象を防止するために、line グループ指定時の線分端点座標を、常に実際の計算対象領域よりわずかに小さい領域にクリッピングする仕様としています。したがって、上記の警告メッセージはでないはずです。

### 7.3.5 スキップモニタ点がある場合のファイル出力例 (単一ファイル)

上と同条件の計算でのファイル出力 (monitor\_Lz.log) です。

```

5 Velocity Pressure
  0.0000e+00  0.0000e+00 -5.0000e-01 #point_0
  0.0000e+00  0.0000e+00 -2.5000e-01 #point_1
  0.0000e+00  0.0000e+00  0.0000e+00 #point_2
  0.0000e+00  0.0000e+00  2.5000e-01 #point_3
  0.0000e+00  0.0000e+00  5.0000e-01 #point_4 *skip(unexpected solid)*

10  3.1250e-02
  0.00000000e+00  0.00000000e+00  0.00000000e+00  0.00000000e+00
  0.00000000e+00  0.00000000e+00  0.00000000e+00  0.00000000e+00
  0.00000000e+00  0.00000000e+00  0.00000000e+00  0.00000000e+00
-9.4408710e-26  0.00000000e+00 -1.4733364e-32  1.2573367e-32
*NA*

20  6.2500e-02
-2.3736999e-14 -1.1059020e-18 -1.2751029e-15  7.6158697e-14
-1.0800631e-10 -3.4509484e-15  1.3357371e-16 -1.0019127e-15
-4.8423708e-08 -1.4604844e-12  2.6645353e-13 -3.1363824e-12
-1.4771770e-06 -3.9237082e-11  2.1965540e-11 -3.6127115e-10
*NA*

30  9.3750e-02
-7.0001181e-07 -8.6439161e-11 -1.8219026e-09  1.1022797e-06
-4.3679470e-06 -2.3597949e-10 -3.1370462e-12  2.8554661e-10
-2.3169587e-05 -5.8292204e-10  2.8683900e-10 -2.2359627e-09
-6.6163069e-05 -8.1312534e-10  2.1909443e-09 -2.8697086e-08
*NA*

...

```



## 第 8 章

# ファイル管理とリスタート

FFV-C ソルバーの並列ファイルの管理とリスタート方法について説明します。

## 8.1 リスタート

直交格子を用いる流体解析では、解析対象となる形状を直交格子上でどのように扱うかにより、計算のロバスト性、予測精度、計算時間、計算格子（解析モデル）の作りやすさなどの特性が異なります。一般には、図 4.1 のように分類することができます [2]。

粗格子の結果を用いたリスタート 準定常状態の流れを短時間で計算するために、次の方法により計算を行います。

1. 粗い格子を用いてタイムステップを大きくとり、流れを発達させます。
2. 粗格子の半分のセル幅の格子を用意し、粗格子で計算した結果を初期値としてリスタート計算を行います。
3. 上記の手順を数回繰り返し、所望の格子密度での計算を行います。

この方法は、リスタート時に粗格子から倍の密度を持つ格子に内挿処理を行います。したがって、リスタート時の初期値は方程式を満足しないため反復回数が増加しますが、馴染ませると収束に向かいます。

計算を実行すると、\*.dfi ファイルが生成されます。各出力ファイルに対して、表 8.1 に示すようなデフォルト名が付けられています。

表 8.1 dfi ファイルのファイル名

変数	dfi のファイル名
圧力	prs_
速度	vel_
温度	tmp_
圧力平均値	prsa_
速度平均値	vela_
温度平均値	tmpa_
発散値	div_
ヘリシティ	hlt_
全圧	tp_
速度勾配テンソルの第二不変量 $\lambda_2$	i2vgt_
渦度	vrt_

この dfi ファイルには、次のようにテキストパーサー表記により、並列計算時に各プロセスが書き出すファイルを管理する情報が書かれています。

```
Distributed_File_Info {
    Prefix = "vel_"           // dfi ファイルの接頭子
    RankID_in_MPIworld = 0    // プロセス番号
    GroupID_in_MPIworld = 0   // プロセスグループ番号
    Number_of_Rank_in_MPIworld = 2 // プロセス数
    Number_of_Group_in_MPIworld = 1 // プロセスグループ数
    Global_Voxel = (128, 128, 128) // 計算領域全体の要素数
    Global_Division = (2, 1, 1)    // 計算領域の分割数
    FileFormat = "sph"            // ファイルフォーマット
    GuideCell = 0                 // 出力ガイドセル数
    NodeInfo {                   // 各プロセスの分割情報
        Node[@] {
```

```

    RankID      = 0                // ランク番号
    HostName     = "Iridium.local" // ホスト名
    VoxelSize    = (64, 128, 128)  // サブドメインの要素数
    HeadIndex    = (1, 1, 1)       // グローバルな基点セルインデクス
    TailIndex    = (64, 128, 128)  // グローバルな終点セルインデクス
}
Node[@] {
    RankID      = 1
    HostName     = "Iridium.local"
    VoxelSize    = (64, 128, 128)
    HeadIndex    = (65, 1, 1)
    TailIndex    = (128, 128, 128)
}
}

FileInfo {                          // 出力されたステップ数
    Step[@] = 0
    Step[@] = 100
    Step[@] = 200
    Step[@] = 300
}
}

```

圧力，速度，温度の瞬時値の値のファイル名の接頭子は，デフォルトでそれぞれ prs, vel, tmp です．ファイル名は接頭子にステップ数とランク番号，および拡張子が結合されています．

粗格子の結果を用いてリスタートするケースについて説明します．最初に 10mm の格子を用い，順次 5mm, 2.5mm と細くなる場合を想定します．10mm 格子の計算が 10000 ステップまで終了し prs\_0000010000\_id\*.sph, prs\_.dfi ができます．次に，5mm の計算を行う時にはこの 2 つのファイルを適当なファイル名にリネームし，prs\_10\_0000010000\_id\*.sph, prs\_10.dfi として，パラメータファイルを次のように指定します．

```

Start_Condition {
    start_type           = "restart_from_coarse_data"
    Restart_step         = 10000
    Prefix_of_Coarse_Pressure = "prs_10_"
    dfi_file_pressure    = "prs_10.dfi"
    ...
}

```

5mm 格子の計算が次の 5000 ステップで終了すると，prs\_0000015000\_id\*.sph, prs\_.dfi ができます．上記の手順を再帰的に繰り返して計算を進めます．

## 第 9 章

# ソルバーの実行

FFV-C ソルバーの実行方法と出力ファイルについて説明します。

## 9.1 FFV-C ソルバーの実行

次のようなディレクトリ構成を仮定し、3Dcavity の例題を実行します。標準の Makefile でコンパイルすると、コンパイル済みの実行モジュールは bin ディレクトリに格納されます。パラメータファイルは、cavity.tp, domain.tp とします。

```
Examples
|
+- 3Dcavity
|   +-cavity.tp
|
:
```

カレントディレクトリを Examples/3Dcavity とし、実行モジュールのディレクトリにパスを通しておくと、以下のよう実行できます。

```
$ ffvc cavity.tp domain.tp
```

## 9.2 出力ファイル

### 9.2.1 出力ファイルの種類と指定

FFV-C ソルバーを実行すると、表 9.1 に示すファイルが生成されます。また、log ファイルについては、Log セクションで生成の有無を指定します。

表 9.1 実行時に生成されるファイル

カテゴリ	ファイル名	出力内容
解析条件情報	condition.txt	計算条件，前処理，ソルバー起動時のログ
領域情報	DomainInfo.txt	並列計算時の計算領域の分割に関する情報
性能情報	profiling.txt	実行時間サンプリング出力ファイル
基本履歴	history_base.txt	ステップ数，時刻，反復回数，収束状況などの情報
コンポーネント履歴	history_compo.txt	内部境界のモニタ情報
流量収支履歴	history_domainflux.txt	計算外部領域における流入出流量，平均速度の情報
反復履歴	history_iteration.txt	反復解法の収束履歴
サンプリング履歴	sampling.txt	サンプリング指定時の出力ファイル
壁面情報履歴	history_log_wall.txt	壁面に関する情報の履歴
瞬時値データ	vel_*.sph	速度の瞬時値
	prs_*.sph	圧力の瞬時値
	tmp_*.sph	温度の瞬時値
平均値データ	vela_*.sph	速度の時間平均値
	prsa_*.sph	圧力の時間平均値
	tmpa_*.sph	温度の時間平均値
派生データ	tp_*.sph	全圧
	vrt_*.sph	渦度
	hlt_*.sph	ヘリシティ
	i2vgt_*.sph	速度勾配テンソルの第 2 不変量

表 9.1 の履歴と瞬時値・平均値のデータ出力については、出力インターバルを指定できます。出力インターバルは File\_IO セクションに記述し、各項目独立に、ステップと時刻のどちらによっても指定可能です。ファイル名のアスタリスク\*には、ステップ数やランク番号などの情報が入ります。また、拡張子の .sph は sph 形式を表しており、PLOT3D フォーマットもサポートします。

### 9.2.2 解析条件情報 [condition.txt]

ソルバーを実行すると、condition.txt ファイルが生成されます。このファイルはソルバーの起動時のログで、必要な境界条件の設定に係わる前処理、チェック内容などが表 9.2 に示す各セクション毎に記録されています。

表 9.2 condition.txt ファイルの表示項目

セクション名	表示内容
Domain Information	計算領域の寸法，配列サイズ，格子ピッチ，原点座標
Memory required for Preprocessor	前処理に必要なメモリ要求量（概算）
XML Components	コンポーネントの種類と個数
Voxel Model Info.	解析モデルに含まれる情報
Medium List	媒質情報
Component List	各コンポーネントの ID，要素数，媒質など
Component Information	各コンポーネントの詳細な情報
Memory required for Solver	ソルバー本体に必要なメモリ要求量（概算）
Solver Control Parameters	制御パラメータ
Simulation Parameters	物理量のパラメータ
Initial Values for Physical Variables	初期値の情報
Effective cells and Open Area of Computational Domain	計算対象セル数と各外部境界面における開口面積の割合
Outer Boundary Conditions	外部境界条件
Monitor Information	モニター情報

### 9.2.3 領域情報 [DomainInfo.txt]

領域全体の情報，および領域分割された各サブドメインの配列サイズ，領域サイズ，原点座標の情報が表示されます．また，各領域に含まれる境界条件コンポーネントの BoundingBox のインデクス情報が含まれます．

```
>> Global Domain Information

imax, jmax, kmax      =           73           28           28

(dx, dy, dz) [m] / [-] = ( 2.0000e-02 2.0000e-02 2.0000e-02) / ( 3.5714e-02 3.5714e-02 3.5714e-02)
(ox, oy, oz) [m] / [-] = ( 2.0000e-02 2.0000e-02 2.0000e-02) / ( 3.5714e-02 3.5714e-02 3.5714e-02)
(Lx, Ly, Lz) [m] / [-] = ( 1.4600e+00 5.6000e-01 5.6000e-01) / ( 2.6071e+00 1.0000e+00 1.0000e+00)

Domain    0
ix, jx, kx      [-] =           37           28           28
(ox, oy, oz) [m] / [-] = ( 2.0000e-02 2.0000e-02 2.0000e-02) / ( 3.5714e-02 3.5714e-02 3.5714e-02)
(Lx, Ly, Lz) [m] / [-] = ( 7.4000e-01 5.6000e-01 5.6000e-01) / ( 1.3214e+00 1.0000e+00 1.0000e+00)
no      Label    ID    i_st    i_ed    j_st    j_ed    k_st    k_ed
  1          Air     4      0      0      0      0      0      0

Domain    1
ix, jx, kx      [-] =           36           28           28
(ox, oy, oz) [m] / [-] = ( 7.6000e-01 2.0000e-02 2.0000e-02) / ( 1.3571e+00 3.5714e-02 3.5714e-02)
(Lx, Ly, Lz) [m] / [-] = ( 7.1999e-01 5.6000e-01 5.6000e-01) / ( 1.2857e+00 1.0000e+00 1.0000e+00)
no      Label    ID    i_st    i_ed    j_st    j_ed    k_st    k_ed
  1          Air     4     14     17      1     28      1     28
```



## 9.2.4 基本履歴 [history\_base.txt]

標準履歴ファイルは、下記のような履歴情報が出力されます。この履歴情報は選択された時間積分スキームや反復解法の収束判定ノルムの種類などにより出力項目は異なります。下記の計算例では、時間積分に Euler 陽解法を用いた流動解析を行い、圧力 Poisson 方程式の反復解の収束判定のノルムに速度の発散の最大値を用いています。各欄のラベルの説明を表 9.3 に示します。

標準出力と history\_base.log ファイルには同じ内容が出力され、時刻と速度の次元は有次元となっています。収束判定のノルムの種類については、表??を参照のこと。ノルムの次元は慣例的に無次元としています。

step	time[sec]	v_max[m/s]	ItrP	V_div_Max	deltaP	avrP	deltaV	avrV
1	4.000000e-05	0.00000e+00	1	2.3687e-07	1.476e-14	-7.991e-17	5.493e-15	5.493e-15
2	8.000001e-05	6.8344e-13	1	1.1870e-06	2.602e-09	1.069e-10	1.878e-10	1.878e-10
3	1.200000e-04	2.4322e-08	1	2.8058e-06	9.901e-09	5.841e-10	8.173e-10	1.003e-09
4	1.600000e-04	1.1977e-07	1	4.6971e-06	2.073e-08	1.737e-09	1.942e-09	2.937e-09
5	2.000000e-04	3.2279e-07	1	6.7086e-06	3.395e-08	3.859e-09	3.487e-09	6.404e-09
6	2.400000e-04	6.6904e-07	1	8.8056e-06	4.920e-08	7.234e-09	5.350e-09	1.171e-08
7	2.800000e-04	1.1826e-06	1	1.0970e-05	6.639e-08	1.214e-08	7.459e-09	1.910e-08

表 9.3 履歴ファイルの出力項目

Label	説明
step	計算ステップ数
time	時刻
v_max	速度の最大値
ItrP	圧力ポアソンの反復回数
V_div_Max	反復の収束判定に用いるノルムの種類とその値。上記の場合は速度の発散値の最大値を用いています。指定するノルムの種類により、ヘッダの記述が変わります。
deltaP	圧力の 1 ステップの変化量の自乗和平方根 $\sqrt{\sum_{i,j,k}^{Max} \ \delta p\ _2}$
avrP	圧力の平均値
deltaV	速度の 1 ステップの変化量の自乗和平方根 $\sqrt{\sum_{i,j,k}^{Max} \ \delta v\ _2}$
avrV	速度の平均値
deltaT	温度の 1 ステップの変化量の自乗和平方根 $\sqrt{\sum_{i,j,k}^{Max} \ \delta \theta\ _2}$
avrT	温度の平均値

下記には、熱流動計算を流動計算に Euler 陽解法、温度場は対流項に Euler 陽解法、拡散項に Euler 陰解法を用いた履歴の出力例を示す。ItrT は温度の反復解法の反復回数を示し、続く T\_Res\_L2\_R はノルムに相対残差を選択していることを示します。また、dT は温度の 1 ステップの変化量の RMS です。

step	time	v_max	ItrP	P_res_L2_R	ItrT	T_res_L2_R	dP	dV	dT
1	1.2500e-04	0.00000e+00	1	0.00000e+00	6	9.5454e-05	0.0000e+00	0.0000e+00	2.654e-01
2	2.5000e-04	0.00000e+00	201	5.2254e-05	11	2.1408e-05	3.962e+05	1.338e+02	2.583e-01
3	3.7500e-04	1.0464e+01	201	4.3515e-05	9	8.5652e-05	3.901e+05	2.599e+02	2.495e-01
4	5.0000e-04	3.0324e+01	201	3.5191e-05	9	2.8809e-05	3.839e+05	3.750e+02	2.386e-01
5	6.2500e-04	5.7543e+01	201	2.8940e-05	8	6.5638e-05	3.789e+05	4.750e+02	2.269e-01
6	7.5000e-04	9.2345e+01	201	2.5224e-05	8	3.7452e-05	3.769e+05	5.584e+02	2.164e-01
7	8.7500e-04	1.3304e+02	201	2.3655e-05	8	2.4891e-05	3.797e+05	6.287e+02	2.091e-01

## 9.2.5 コンポーネント履歴 [history\_compo.txt]

コンポーネントに関連する履歴を出力します。

step	time	V[inlet]	Va[hex]	DPa[hex]	MonV[sensor]	MonP[sensor]	MonTP[sensor]
1	2.9605e-03	-1.6511e-02	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1.0132e+05	0.0000e+00
2	5.9211e-03	-6.6040e-02	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1.0132e+05	0.0000e+00
3	8.8816e-03	-1.4857e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1.0132e+05	0.0000e+00
4	1.1842e-02	-2.6406e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1.0132e+05	0.0000e+00
5	1.4803e-02	-4.1247e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1.0132e+05	0.0000e+00
6	1.7763e-02	-5.9375e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1.0132e+05	0.0000e+00
7	2.0724e-02	-8.0783e-01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1.0132e+05	-2.8205e-33
8	2.3684e-02	-1.0546e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	-7.5572e-24	1.0132e+05	-7.6584e-19
9	2.6645e-02	-1.3340e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	-6.7933e-17	1.0132e+05	-1.3883e-11
10	2.9605e-02	-1.6460e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	-2.4990e-13	1.0132e+05	-7.4992e-08

上記の例では、inlet に速度を指定し、その平均速度を出力しています。hex には熱交換器を割り当て、平均通過流速と圧力損失量を表示しています。また、sensor はモニタで、平均速度、圧力、全圧を出力しています。各表示量は有次元値で、表 9.4 に示す項目が表示されます。

表 9.4 コンポーネント履歴ファイルの出力項目

カテゴリー	コンポーネント	表示項目
Vec.Face	Dirichlet	平均速度 $V [m/s]$
		温度指定の場合、流入熱量 $Q [W]$
Forcing_Volume	HEX	熱交換機平均通過流量 $Va [m^3/s]$
		平均圧力損失量 $DPa [Pa]$
	DARCY	平均通過風速の速度成分 $U, V, W, [m/s]$
Heat.Face	Direct	熱流束 $q [W/m^2]$
	Heat_Transfer_N	熱流束 $q [W/m^2]$
	Heat_Transfer_S	熱流束 $q [W/m^2]$
	Heat_Transfer_B	熱流束 $q [W/m^2]$
	Iso_Thermal	熱流束 $q [W/m^2]$
Heat.Volume	Radiation	熱流束 $q [W/m^2]$
	Heat_Src	
	Cnst_Temp	
Monitor	Velocity	平均速度 $MonV [m/s]$
	Pressure	平均圧力 $MonP [Pa]$
	Temperature	平均温度 $MonT [K \text{ or } C]$
	TotalPressure	平均全圧 $MonTP [Pa]$

### 9.2.6 流量収支履歴 [history\_domainflux.txt]

計算領域の外部境界における流量と速度の履歴を出力します。Q は断面流量 [ $m^3/s$ ] を、Balance は計算内部領域への流入出する流量の和を示します。V は有効断面平均速度 [ $m/s$ ] を表すが、BC で述べるように流出断面を指定している場合には指定される対流速度モードの値となります。

step	time	Q:X-	...	Q:Z+ >>	Balance	V:X-	...	V:Z+
756	1.890020e+00	-7.5980e-02		-1.3623e-01 >>	6.5136e-01	-1.3155e-03		-8.6816e-04
757	1.892520e+00	-7.6318e-02		-1.3660e-01 >>	6.5357e-01	-1.3214e-03		-8.7049e-04
758	1.895020e+00	-7.6656e-02		-1.3696e-01 >>	6.5578e-01	-1.3273e-03		-8.7283e-04

## 9.2.7 反復履歴 [history\_iteration.txt]

Poisson の反復履歴を示します。ノルムの選択に速度の発散を指定している場合には、計算領域内の位置が出力されます。

step=	1	time= 6.666667e-03	Itration	Norm (	i,	j,	k)
			1	3.765856e-05 (	5,	46,	92)
step=	2	time= 1.333333e-02	Itration	Norm (	i,	j,	k)
			1	1.076603e-04 (	5,	46,	92)
step=	3	time= 2.000000e-02	Itration	Norm (	i,	j,	k)
			1	1.823895e-04 (	5,	46,	92)
step=	4	time= 2.666667e-02	Itration	Norm (	i,	j,	k)
			1	2.715028e-04 (	5,	46,	92)
step=	5	time= 3.333334e-02	Itration	Norm (	i,	j,	k)
			1	3.676064e-04 (	5,	46,	92)

### 9.2.8 サンプルング履歴 [sampling.txt]

座標値指定によるサンプルング結果を出力します．第 7 章をご覧ください．

## 9.2.9 性能情報

実行時のタイミングを測定し、サマリーを表示します。各項目の表示内容を表 9.5 に示します。

-----									
Report of Timing Statistics PMLib version 1.2									
Operator : Kenji_Ono									
Host name : Strontium.local									
Date : 2012/07/11 : 20:31:24									
Parallel Mode : OpenMP (24 threads)									
Total execution time = 5.960922e+00 [sec]									
Total time of measured sections = 5.461881e+00 [sec]									
Statistics per MPI process [Node Average]									
Lavel	call	accumulated time				flop	messages[Bytes]		
		avr[sec]	avr[%]	sdv[s]	avr/call[s]	avr	sdv	speed	
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----									
Search Vmax :	25	6.0695e-02	1.11	0.000e+00	2.4278e-03	4.325e+08	0.000e+00	6.64 Gflops	
assign BC :	75	2.1376e-03	0.04	0.000e+00	2.8502e-05	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
Copy Array :	50	3.1872e-01	5.84	0.000e+00	6.3744e-03	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
Pseudo Vec :	25	3.0864e+00	56.51	0.000e+00	1.2345e-01	2.180e+10	0.000e+00	6.58 Gflops	
P Vec FluxBC:	25	1.3652e-02	0.25	0.000e+00	5.4609e-04	1.055e+07	0.000e+00	737.20 Mflops	
Pvec. EE :	25	1.3234e-01	2.42	0.000e+00	5.2938e-03	2.595e+08	0.000e+00	1.83 Gflops	
Pvec. BC :	25	2.2888e-03	0.04	0.000e+00	9.1552e-05	3.870e+04	0.000e+00	16.12 Mflops	
PvecFace BC :	25	8.4519e-04	0.02	0.000e+00	3.3807e-05	1.325e+04	0.000e+00	14.95 Mflops	
assign Array:	50	3.9125e-02	0.72	0.000e+00	7.8251e-04	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
Div CC :	25	2.7460e-01	5.03	0.000e+00	1.0984e-02	8.939e+08	0.000e+00	3.03 Gflops	
Poi Src. BC :	25	9.2988e-03	0.17	0.000e+00	3.7195e-04	5.499e+06	0.000e+00	563.93 Mflops	
Poi Setup :	25	1.5258e-05	0.00	0.000e+00	6.1035e-07	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
Poi SOR2SMA:	50	1.7074e-01	3.13	0.000e+00	3.4149e-03	7.370e+10	0.000e+00	401.97 Gflops	
Poi BC :	50	9.1314e-05	0.00	0.000e+00	1.8262e-06	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
Prj Vec CF :	25	5.7449e-01	10.52	0.000e+00	2.2979e-02	1.398e+09	0.000e+00	2.27 Gflops	
Prj Vec CFBC:	25	1.0159e-02	0.19	0.000e+00	4.0636e-04	1.930e+04	0.000e+00	1.81 Mflops	
Prj Vec CC :	25	3.0391e-01	5.56	0.000e+00	1.2156e-02	1.038e+09	0.000e+00	3.18 Gflops	
Vec. BC :	25	4.4822e-05	0.00	0.000e+00	1.7929e-06	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
Div CF :	25	1.0764e-01	1.97	0.000e+00	4.3057e-03	2.019e+08	0.000e+00	1.75 Gflops	
P Norm Dmax :	25	4.0273e-02	0.74	0.000e+00	1.6109e-03	8.651e+07	0.000e+00	2.00 Gflops	
Updt Vec. :	25	7.0383e-03	0.13	0.000e+00	2.8153e-04	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
Oflow Vel :	25	2.9467e-02	0.54	0.000e+00	1.1786e-03	1.455e+07	0.000e+00	471.01 Mflops	
Avr Space :	25	2.7546e-01	5.04	0.000e+00	1.1018e-02	6.632e+08	0.000e+00	2.24 Gflops	
H Stdout :	25	1.0623e-03	0.02	0.000e+00	4.2495e-05	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
H Base :	25	7.7629e-04	0.01	0.000e+00	3.1051e-05	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
H DomainFlux:	25	3.5381e-04	0.01	0.000e+00	1.4152e-05	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
Monitoring :	25	1.3113e-05	0.00	0.000e+00	5.2452e-07	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
H Component :	25	2.0313e-04	0.00	0.000e+00	8.1253e-06	0.000e+00	0.000e+00	0.00 Mflops	
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----									
Total		5.461881e+00				1.005e+11		17.14 Gflops	

表 9.5 タイミングレポートの表示内容

項目	内容
Initialize	初期化部分
Pseudo Vector	疑似速度ベクトルの計算部分
BC for $u^*$ and $u$	疑似速度と速度に対する境界条件
Projection to $u^{n+1}$	速度の射影
Judge convergence	同時緩和の収束判定, $\nabla(u_i)$ の計算を含む
LES	LES 部分
Src of Poisson	Poisson 方程式のソース項
Simultaneous Relaxation	同時緩和の反復部分
Poisson LS (only)	Poisson の線形計算のみ
BC for Pressure	圧力の境界条件
Thermal Convection	温度計算の対流項部分
Thermal BC	温度計算の境界条件
Thermal Diffusion	温度計算の拡散項部分
Post	後処理
call	実行回数
accm	積算時間 [sec]
avr	1 回あたりの平均実行時間 [sec]

### 9.2.10 その他のファイル

デバッグ時の BCIndex.txt ファイルには, コンポーネントに関する情報が表示されます.

### 9.2.11 モデルファイル

組み込み例題の場合には、内部で生成されたボクセルファイルが `example.svx` として書き出されます。また、ユーザ問題で `MonitorList` が指定されている場合には、サンプル点（セルセンター値）のボクセルに `ID=255` が割り当てられたボクセルファイルが出力されます。



### 9.2.12 結果ファイル

計算結果は、デフォルトで sph ファイルフォーマット出力で書き出されます。これらは、V-Isio で可視化できます。

### 9.2.13 メモリ使用量の情報

FFV-C ソルバーでは、実行中において必要なときに必要な量だけメモリを使用する方針です。このため、プリプロセスとメインループ（計算部分実行中）でメモリ使用量は異なります。プログラム起動中に必要な最大メモリ量を condition.txt 中表示します。

## 9.3 並列計算

### 9.3.1 MPI 並列

本節では、MPI 通信ライブラリを用いたプロセス並列の実行について説明します。並列計算の実行は、`mpirun` コマンドで起動します。

```
$ mpirun -np 2 ffvc hogehege.tp
```

### 9.3.2 スレッド並列

本節では、共有メモリでのスレッド並列の実行について説明します。実行時の環境設定として、環境変数 `OMP_NUM_THREADS` にスレッド数を設定します。次の例では、`bash` で4スレッドを指定しています。

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
```

この後、逐次、並列実行をコマンドラインで指示します。

```
Serial  
$ ffcv hogehege.tp  
  
MPI  
$ mpirun -np 8 ffcv hogehege.tp
```

上記で並列実行の場合には、8 プロセス ×4 スレッドのハイブリッド実行となります。

## 9.4 各プラットフォームにおける実行

### 9.4.1 RICC

バッチジョブのスクリプトファイル例を示します。

```
#!/bin/sh

#----- qsub option
#MJS: -mpc
#MJS: -proc 64
#MJS: -thread 1
#MJS: -mem 1200mb
#MJS: -time 24:00:00
#MJS: -eo
#MJS: -rerun Y
#MJS: -cwd
#MJS: -parallel openmpi

#----- FTLcommand
#FTLDIR: $MJS_CWD
#FTL_SUFFIX: off
#FTL_RANK_FORMAT: 3
#FTL_NO_RANK: off
#
#<BEFORE>
#ALL: sphere_f
#0: P32E_resize_5mm_CutWS.svx
#</BEFORE>
#
#<BEFORE_R>
#ALL: xml
#</BEFORE_R>
#
#<AFTER>
#0: *.sph, *.txt, *.log
#</AFTER>

#----- Program execution
mpirun ./sphere_f xml/p32e.xml
```

次に、利用頻度の高いコマンド類を示します。

#### ジョブ投入

```
$ qsub go.sh
```

#### ジョブ状態表示

```
$ qstat -m 使用メモリ量  
$ qstat -p プライオリティ  
$ qstat -w 実行待ち理由の表示
```

#### 実行中 Job の標準出力表示

```
$ qcat REQID
```

#### Job 優先度変更

```
$ qalter -p <PRIORITY> <REQID>
```

mpc の計算ノード上のファイル一覧 OPTION は ls コマンドと同じである。

```
$ qls REQID[@RankID] [OPTION]
```

mpc の計算ノード上のファイルを取得します。

```
$ qget REQID[@RankID] file
```

## 第 10 章

# アップデート情報

本ユーザガイドのアップデート情報について記します。

Version 0.8.1      2013/9/12

- 1, 2, 3, 5, 6 章のアップデート

Version 0.8.0      2013/8/22

- パラメータの再構成

Version 0.7.1      2013/7/12

- インストール方法改訂
- パラメータ記述構造の改訂  
/Steer/Iteration, /Steer/StartCondition, /OuterBoundary, /MediumTable

Version 0.7.0      2012/10/18

- ファイル出力の指定様式変更
- 反復解法の指定様式変更
- スタート条件の指定様式変更

Version 0.6.0      2013/6/3

- 東大と理研のライセンスを追記 .
- リスタートの章を追加 .

Version 0.5.2      2012/8/23

- 粗格子を用いたリスタートについて追記 .

Version 0.5.0      2012/7/14

- 0.5.0 プレリリース .



## 参考文献

- [1] 中山顕, 桑原不二郎, 許国良. 熱流体力学 -基礎から数値シミュレーションまで-. 共立出版, 2002.
- [2] 小林俊雄 (編) . CFD ハンドブック, 第 10.4 章, pp. 538–545. 丸善, 東京, 2003. 格子形成法 (10.4).
- [3] M. Tanaka and S. Kida. Characterization of vortex tubes and sheets. *Physics of Fluids A*, Vol. 5, pp. 2079–2082, 1993.
- [4] 庄司正弘. 伝熱工学. 東京大学出版会, 1995.

# 索引

圧力損失 .....	82	Binary Voxel .....	19
イニシャルスタート .....	50	Boussinesq .....	13
インデクス .....	61	CFL .....	50
温度拡散係数 .....	14	Fractional step .....	16
ガイドセル .....	28	LocalBoundary .....	57
拡散数 .....	50	mpirun .....	116
基本リスト		OuterBoundary .....	57
境界条件の— .....	58	Volume Fraction .....	82
組み込み例題 .....	30, 32		
コンポーネント .....	60, 82, 112		
座標系 .....	45		
移動— .....	45, 85		
静止— .....	45, 85		
時間積分幅 .....	50		
実行制御パラメータ .....	27		
初期値 .....	48		
ステンシル .....	28		
スレッド並列 .....	117		
制限関数 .....	28		
占有率 .....	82		
単振動 .....	62, 77		
定常解 .....	51		
低マッハ数 .....	14		
熱流動タイプ .....	31		
反復解法 .....	33		
ファイル			
コンポーネント履歴— .....	107		
反復履歴— .....	109		
標準履歴— .....	106		
ボクセル— .....	113		
流量履歴— .....	108		
履歴— .....	39		
condition— .....	104		
sph— .....	114		
Boussinesq 近似 .....	13		
プロセス並列 .....	116		
分離解法 .....	16		
並列計算 .....	116		
変数配置			
Collocated— .....	61		
密度変化 .....	13		
無次元化 .....	14		
履歴 .....	106		
ALE .....	13		