

# **User Guide of FFV-C Frontflow / violet Cartesian**

**Ver. 0.7.0**

Center of Research on Innovative Simulation Software  
Institute of Industrial Science (2011-2013)

**The University of Tokyo**

VCAD System Research Program (2007-2011)  
Advanced Institute for Computational Science (2012-2013)

**RIKEN**

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

**June 2013**



FFV-C	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	2
第 2 章	インストール	4
2.1	MPI ライブラリのインストール	5
2.2	TextParser のインストール	6
2.2.1	configure によるコンパイル環境の設定	6
2.3	CPMlib のインストール	6
2.3.1	configure を用いたコンパイル環境の設定	6
2.3.2	モジュールの作成とインストール	7
2.3.3	Fortran インターフェイスと倍精度計算モジュール	7
2.4	FFV-C ソルバーのインストールとコンパイル	7
2.4.1	アーカイブの解凍	7
第 3 章	基礎方程式と解析方法	9
3.1	支配方程式	10
3.1.1	非圧縮性流体	10
3.2	無次元化	11
3.2.1	無次元化された支配方程式	11
3.2.2	無次元化パラメータの選択	12
	純強制対流	12
	熱対流	12
	浮力の効果を考慮しない場合	12
	浮力の効果を考慮する場合	12
	純自然対流	13
	固体熱伝導	13
3.3	解法アルゴリズム	13
3.3.1	Fractional Step 法	13
	Euler Explicit	13
	Navier-Stokes equations	14
	Thermal transport equation	14
第 4 章	解析モデルの作成	15
4.1	形状近似度による解析モデルの分類	16
4.1.1	Binary Voxel	16
4.1.2	体積率モデル	16

4.1.3	距離情報モデル . . . . .	17
4.2	ポリゴンによる境界条件の指定 . . . . .	17
4.3	形状データからの解析モデルの作成手順 . . . . .	19
4.4	組み込み例題 . . . . .	19
4.4.1	IP_PMT クラス . . . . .	19
4.4.2	IP_Rect クラス . . . . .	19
4.5	例題 . . . . .	21
第 5 章	制御と物理パラメータ . . . . .	22
5.1	入力パラメータファイルの記述構文 . . . . .	23
5.1.1	パラメータ記述 . . . . .	23
5.1.2	パラメータファイルの種類と構造 . . . . .	23
5.2	計算領域情報ファイル . . . . .	24
5.2.1	DomainInfo . . . . .	24
5.3	入力パラメータファイル . . . . .	25
5.3.1	Steer セクション . . . . .	25
	Algorithm . . . . .	25
	AverageOption . . . . .	26
	CheckParameter . . . . .	27
	ConvectionTerm . . . . .	28
	DerivedVariable . . . . .	29
	全圧 (総圧) . . . . .	29
	渦度ベクトル . . . . .	29
	ヘリシティ . . . . .	29
	速度勾配テンソルの第二不変量 . . . . .	29
	Example . . . . .	30
	FileIO . . . . .	31
	GeometryModel . . . . .	32
	Iteration . . . . .	33
	LESoption . . . . .	35
	Log . . . . .	36
	MonitorList . . . . .	37
	PLOT3Doptions . . . . .	38
	ReferenceFrame . . . . .	40
	StartCondition . . . . .	41
	SolverProperty . . . . .	42
	TimeControl . . . . .	44
	Acceleration . . . . .	44
	時間積分幅 $\Delta t$ の指定 . . . . .	44
	計算時間の指定 . . . . .	45
	TreatmentOfWall . . . . .	46
	Unit . . . . .	47
5.3.2	Parameter セクション . . . . .	48
	InitTempOfMedium . . . . .	48
	IntrinsicExample . . . . .	49

Reference . . . . .	50
Temperature . . . . .	51
5.3.3 MediumTable セクション . . . . .	52
第 6 章 境界条件 . . . . .	53
6.1 境界条件の概要 . . . . .	54
6.1.1 外部境界条件と局所境界条件 . . . . .	54
6.1.2 BcTable セクションのパラメータ構造 . . . . .	54
6.1.3 OuterBoundary . . . . .	55
6.1.4 LocalBoundary . . . . .	57
6.1.5 計算格子と内部・外部領域 . . . . .	58
6.2 外部境界条件 . . . . .	59
6.2.1 壁面境界 . . . . .	59
流れの境界条件 . . . . .	59
熱境界条件 . . . . .	59
断熱境界 . . . . .	60
熱流束境界 . . . . .	60
熱伝達境界 . . . . .	60
等温境界 . . . . .	63
6.2.2 対称境界 . . . . .	65
6.2.3 流出境界 . . . . .	66
6.2.4 速度指定境界 . . . . .	67
6.2.5 周期境界 . . . . .	68
6.2.6 トラクションフリー境界 . . . . .	69
6.2.7 遠方境界 . . . . .	70
6.3 局所境界条件 . . . . .	71
6.3.1 壁面境界 . . . . .	71
流れの境界条件 . . . . .	71
熱境界条件 . . . . .	71
熱境界条件の指定方法 . . . . .	71
断熱境界 . . . . .	72
熱流束境界 . . . . .	72
熱伝達境界 . . . . .	72
等温壁境界 . . . . .	73
6.3.2 流出境界条件 . . . . .	73
流れの境界条件 . . . . .	73
熱流出境界 . . . . .	74
6.3.3 速度指定条件 . . . . .	74
流れの境界条件 . . . . .	74
熱境界条件 . . . . .	74
6.3.4 周期境界条件 . . . . .	75
流れの境界条件 . . . . .	75
熱境界条件 . . . . .	75
6.3.5 セルボリュームに対する熱境界条件 . . . . .	76
SpecifiedTemperature . . . . .	76

HeatGeneration . . . . .	76
6.3.6 不活性セル指定 . . . . .	76
6.3.7 モニタ . . . . .	77
6.4 外力項を用いた境界条件 . . . . .	77
6.4.1 圧力損失境界条件 . . . . .	77
熱交換器のモデル化 . . . . .	78
6.5 静止座標系と移動座標系の場合の境界条件 . . . . .	80
第 7 章 モニタリング機能 . . . . .	81
7.1 パラメータファイルで指定する方法 . . . . .	82
7.1.1 値の採取方法 . . . . .	83
nearest . . . . .	83
interpolation . . . . .	83
smoothing . . . . .	84
7.1.2 指定パラメータの制限およびエラー処理 . . . . .	84
7.1.3 出力ファイルフォーマット . . . . .	84
ヘッダ領域 . . . . .	84
データ領域 . . . . .	85
7.2 ボクセルモデルのセル ID で指定する方法 . . . . .	86
7.2.1 モニター部の指定 . . . . .	86
7.3 モニター例 . . . . .	87
7.3.1 初期化時の出力情報 . . . . .	89
7.3.2 単一ファイル出力 . . . . .	90
7.3.3 分散ファイル出力 . . . . .	90
7.3.4 Sampling_Mode の指定例 . . . . .	91
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) . . . . .	92
第 8 章 ファイル管理とリスタート . . . . .	93
8.1 リスタート . . . . .	94
粗格子の結果を用いたリスタート . . . . .	94
第 9 章 ソルバーの実行 . . . . .	96
9.1 FFV-C ソルバーの実行 . . . . .	97
9.2 出力ファイル . . . . .	98
9.2.1 出力ファイルの種類と指定 . . . . .	98
9.2.2 解析条件情報 [condition.txt] . . . . .	99
9.2.3 領域情報 [DomainInfo.txt] . . . . .	100
9.2.4 基本履歴 [history_base.txt] . . . . .	101
9.2.5 コンポーネント履歴 [history_compo.txt] . . . . .	102
9.2.6 流量収支履歴 [history_domainflux.txt] . . . . .	103
9.2.7 反復履歴 [history_iteration.txt] . . . . .	104
9.2.8 サンプリング履歴 [sampling.txt] . . . . .	105
9.2.9 性能情報 . . . . .	106
9.2.10 その他のファイル . . . . .	107
9.2.11 モデルファイル . . . . .	108
9.2.12 結果ファイル . . . . .	109

---

9.2.13	メモリ使用量の情報 . . . . .	110
9.3	並列計算 . . . . .	111
9.3.1	MPI 並列 . . . . .	111
9.3.2	スレッド並列 . . . . .	112
9.4	各プラットフォームにおける実行 . . . . .	113
9.4.1	RICC . . . . .	113
第 10 章	アップデート情報	115
参考文献		117
索引		118

## 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), GMRES(m) 法
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 OpenMP 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:	

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。

- V-Sphere::CBC

CBC の場合には、VCAD ライセンスという独自ライセンスが適用されます。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。

- FFV-C

FFV-C の場合には、VCAD ライセンスと修正 BSD ライセンスから選択できます。

## 第 2 章

# インストール

この章では、MPI 通信ライブラリ、CPMlib、TextParser 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 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 [1] 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全てが完了します。

```
./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

実行時の mpirun<sup>\*2</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>\*3</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。

---

<sup>\*1</sup> <http://www.open-mpi.org/>

<sup>\*2</sup> mpiexec でも動きます。

<sup>\*3</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。

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

## 2.2 TextParser のインストール

MPI 通信ライブラリのインストールの後に、TextParser をインストールします。インストールの詳細は、TextParser の INSTALL をご覧ください。幾つかのインストール方法がありますが、ここでは configure を使った方法を説明します。

### 2.2.1 configure によるコンパイル環境の設定

```
$ cat config_tp.sh
$ ./configure --prefix=$1 \
               CXX=mpicc \
               --enable-mpi
$ config_tp.sh /usr/local/TextParser
$ make
$ sudo make install
```

上記の例では、TextParser ライブラリを /usr/local/TextParser にインストールします。

## 2.3 CPMlib のインストール

CPMlib のインストールを行います。

### 2.3.1 configure を用いたコンパイル環境の設定

まず configure の設定を行います。次のスクリプトの例では、インストールディレクトリを /usr/local/cpm/ に指定、既にインストールした MPI ライブラリと TextParser ライブラリのインストールディレクトリパスを指定しています。もし、/usr/local/ 領域へのアクセス権限がない場合には、各ユーザが書き込める場所を指定します。インストールの詳細は CPMlib の INSTALL をご覧ください。

```
$ cat config_cpm.sh
#!/bin/sh
#
# at .bashrc
#
# Compiler options:
#
# --with-comp=INTEL|FJ;      If compiler does not fall under the category, this option is blank.
# --with-mpi=/hoge;         In case of using wrapper compiler, this option may be omitted.
# --with-f90real=4|8;       Specify real type in fortran
# --with-f90example=yes|no; Specify compilation of fortran sample included.
# --host=hostname;          Specify in case of cross-compilation.
#
./configure --prefix=$1 \
            --with-comp=INTEL \
            --with-mpi=/opt/openmpi \
            --with-parser=/usr/local/TextParser \
            --with-f90example=no \
            CXX=icpc \
            CXXFLAGS=-O3 \
```

```
FC=ifort
```

上記のインストールシェルは、引数としてインストールディレクトリを指定し、次のように実行します。  
configure により、利用者の環境を調査し、適切なコンパイル環境を設定します。

```
$ config_cpm.sh /usr/local/CPMlib
```

### 2.3.2 モジュールの作成とインストール

configure の後、次のコマンドを実行します。

```
$ make
$ sudo make install または make install
```

make 時に libimf.so が見つからないなどのメッセージが出る場合は、ホームディレクトリの .bash\_profile など  
にコンパイラの LD\_LIBRARY\_PATH パスを加えておきます。

```
export LD_LIBRARY_PATH=/opt/intel/Compiler/11.1/089/lib:$LD_LIBRARY_PATH
```

### 2.3.3 Fortran インターフェイスと倍精度計算モジュール

C++ 版の CPMlib 自体は、単精度と倍精度に対応しています。Fortran インターフェイスを利用する場合には、  
configure 時に `--with-f90example=yes` を指定してください。また、倍精度計算モジュールを生成する場合には、  
configure 時に `--with-f90real=8` オプションが必要になります。

## 2.4 FFV-C ソルバーのインストールとコンパイル

本節では、ソルバークラスのインストールについて説明します。提供されるソルバークラスのアーカイブ  
ffvc-x.x.x.tar.gz は、ソルバークラスのソースコードです<sup>\*4</sup>。

### 2.4.1 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>\*5</sup>。

```
ffvc-x.x.x
|
+- BUILD                      アプリケーションのコンパイル方法のメモ
+- COPYING                   コピーライト
+- README                    最初に見るべきファイル
+- RELEASE                   リリース情報
|
+- bin
|   +- ffvc                  実行モジュール
|
```

<sup>\*4</sup> ffvc-x.x.x.tar.gz の x.x.x にはリリースバージョン番号が入ります。

<sup>\*5</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。

+-- doc	ドキュメント
+-- ffvc_ug.pdf	FFV-C ソルバーのユーザガイド
+-- doxygen	Doxygen ドキュメントディレクトリ
+-- FFV	FFV クラスのドキュメント
+-- Conf	Doxygen ファイルを生成するための設定ファイル
+-- FB	FB クラスのドキュメント
+-- IP	Intrinsic クラスのドキュメント
+-- example	例題
+-- Cavity_binary	三次元のキャビティフロー例題 (バイナリモデル)
+-- Cavity_cut	三次元のキャビティフロー例題 (カット情報モデル)
+-- LDC	辺長比 1:1:2 のキャビティフロー例題 (実験値との比較)
+-- PMT	性能測定用例題
+-- SHC1D	定常 1 次元熱伝導の例題
+-- src	ソースコードディレクトリ
+-- Cutlib-x.x.x	カットライブラリ
+-- FB	FlowBase クラス (ユーザー定義クラス群)
+-- FFV	FFV-C ソルバの Fortran ファイル
+-- F_CORE	Fortran のコアプログラム (Binary 版)
+-- F_VOF	VOF クラスの Fortran ファイル
+-- IP	組み込み例題クラス群
+-- Polylib-x.x.x	ポリゴン管理ライブラリ

## 第 3 章

# 基礎方程式と解析方法

本章では，FFV-C ソルバー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 ソルバー説明書（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。物性値など有次元であることが明らかなものにはプライムは付けていません。

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

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

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

$\rho'$	[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．

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

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

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

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．

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

## 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  $\Delta \theta'$  と基準温度  $\theta_0'$  で式 (3.1), (3.2), (3.6) を無次元化します．

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

### 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．

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

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

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

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

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、 $u'_0, L', \Delta \theta', \beta, g, \nu, \alpha, Pr$  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、 $u_0'$  は自明でないので、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 [2]、 $Pr$  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。

$$u_0' = \sqrt{g\beta\Delta\theta' L'} \quad (3.12)$$

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。無次元化のスケリングは、 $L'$ 、 $\Delta\theta'$ 、 $\alpha$  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。

$$u_0' = \frac{\alpha}{L'} \quad (3.13)$$

### 3.3 解法アルゴリズム

この節では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する。

#### 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 法を用いる。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ある。

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く。保存的な支配方程式を解くのでセル界面の流束ベースの評価が素直で演算量も少なくなるが、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。

## Euler Explicit

一次精度の時間進行法である。

## 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、Exgen 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タグを付与します。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 [3]。

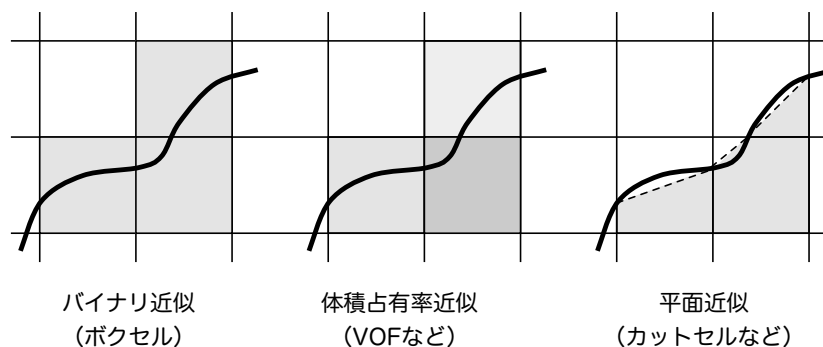


図 4.1 直交格子における形状近似度の分類

### 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。

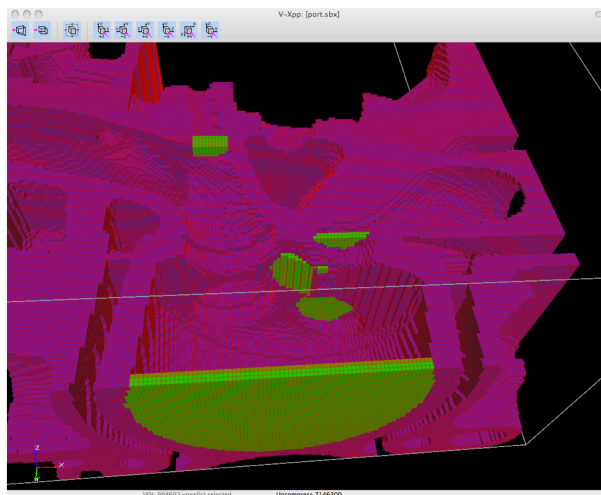


図 4.2 バイナリボクセルによる機械部品の形状表現

### 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 ID を与え、この ID 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 つのグループがあります。

```
$ cat polylib.tp

Polylib {

  Eng_Block {
    class_name = "PolygonGroup"
    filepath = "./geom_scaled/Eng_Block.stl"
    movable = "false"
    id = 3
    label = "Fe-heat_src_1"
  }

  Exhaust {
    class_name = "PolygonGroup"
    filepath = "./geom_scaled/Exhaust.stl"
    movable = "false"
    id = 4
    label = "Fe-heat_src_2"
  }
}
```

ここでは、Eng\_Block には、Fe-heat\_src\_1 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おり、参照される媒質 ID は、Medium\_Table タグによって次のように指定されます。

```
Medium_Table {
  Medium[@] { // Eng_Block
    type = "Solid"
    label = "Fe-heat_src_1"
    Density = 7870.0
    Specific_Heat = 442.0
    Thermal_Conductivity = 80.3
  }
  Medium[@] { // Exhaust
    type = "Solid"
    label = "Fe-heat_src_2"
    Density = 7870.0
    Specific_Heat = 442.0
    Thermal_Conductivity = 80.3
  }
}
```

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

Eng\_Block 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。

```
BC_Table {
```



```
LocalBoundary {  
  
  BC[@] {  
    class          = "HeatTransfer_SN"  
    alias          = "Eng_Block"  
    neighbor_medium = "air-100c"  
    Surface_Temperature = 100.0  
    Ref_Temp_Mode   = "Bulk_Temperature"  
    vertical_laminar_alpha = 0.59  
    vertical_laminar_beta  = 0.25  
    vertical_turbulent_alpha = 0.1  
    vertical_turbulent_beta = 0.3333333  
    vertical_Ra_critial    = 1.0e9  
    lower_laminar_alpha   = 0.27  
    lower_laminar_beta    = 0.25  
    lower_turbulent_alpha = 0.27  
    lower_turbulent_beta  = 0.25  
    lower_Ra_critial      = 1.0e9  
  }  
  
  BC[@] {  
    class          = "HeatTransfer_SN"  
    alias          = "Exhaust"  
    neighbor_medium = "air-100c"  
    Surface_Temperature = 500.0  
    Ref_Temp_Mode   = "Bulk_Temperature"  
    vertical_laminar_alpha = 0.59  
    vertical_laminar_beta  = 0.25  
    vertical_turbulent_alpha = 0.1  
    vertical_turbulent_beta = 0.3333333  
    vertical_Ra_critial    = 1.0e9  
    lower_laminar_alpha   = 0.27  
    lower_laminar_beta    = 0.25  
    lower_turbulent_alpha = 0.27  
    lower_turbulent_beta  = 0.25  
    lower_Ra_critial      = 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、Parameter > Intrinsic.Example 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
Performance.Test	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 {
  Global_origin   = (-0.5, -0.5, -0.5 )
  Global_region   = (1.0,  1.0,  1.0   )
  Global_pitch    = (1.5625e-02, 1.5625e-02, 1.5625e-02)
  ActiveSubDomain_File = ""
}
```

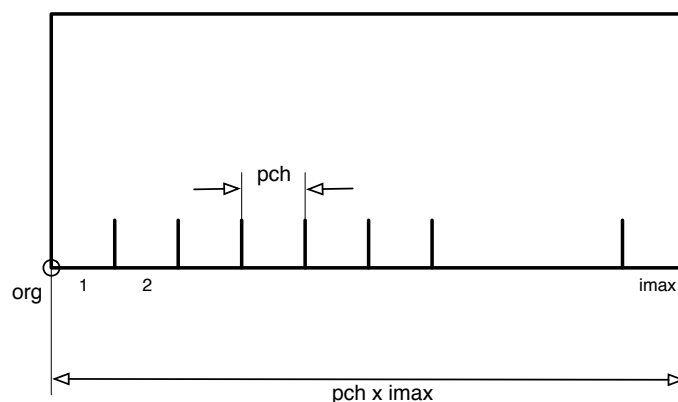


図 4.3 Rectangular クラスのパラメータ設定

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

表 4.2 Intrinsic\_Example 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
Check_Even	Yes   No	分割数が偶数であるかどうかをチェックする
Fluid_Medium	Medium_Table のラベル名	流体の媒質
Solid_Medium	Medium_Table のラベル名	固体の媒質

```
Intrinsic_Example {  
  fluid_medium = "air"  
  solid_medium = "fe"  
  check_even = "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、Medium\_Table 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

# 制御と物理パラメータ

FFV-C ソルバー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 ソルバーの制御と物理パラメータについて説明します。

## 5.1 入力パラメータファイルの記述構文

### 5.1.1 パラメータ記述

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 {
  AccelerationType = "Time"
  Acceleration     = 1.0
  DtType           = "CFLReferenceVelocity"
  DeltaT           = 0.2
  PeriodType       = "step"
  CalculationPeriod = 20
}
```

上記の TimeControl セクションは Steer セクション内にあります。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/Steer/TimeControl と表記することにします。

### 5.1.2 パラメータファイルの種類と構造

FFV-C では、実行時の引数として入力ファイル名を指定し、次のようにコマンドラインで実行します。

```
$ ffvc input.tp
```

入力パラメータファイルには、表 5.1 に示すセクションがあります。

表 5.1 パラメータファイル内のセクション

セクション	パラメータ
DomainInfo	計算領域の情報
Steer	ソルバー制御
Parameter	計算条件
BcTable	境界条件
MediumTable	媒質情報

## 5.2 計算領域情報ファイル

計算対象となる領域の情報を与えます。

### 5.2.1 DomainInfo

```
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 5.2 に示す計算領域に関するパラメータを指定します。

表 5.2 DomainInfo セクション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

## 5.3 入力パラメータファイル

### 5.3.1 Steer セクション

Steer セクションでは、実行制御パラメータを記述します。

#### Algorithm

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。

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

表 5.3 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 5.3 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 5.4 に示します。

表 5.4 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）



## AverageOption

時間平均操作に関するパラメータを指定します．

```
AverageOption {
  Operation      = "Off"
  SpecifiedType = "Time"
  Start          = 0.0005
  Interval       = 0.001
}
```

表 5.5 に物理量の時間平均操作を指定するパラメータを示します．FFV-C ソルバーは非定常解析を行いますので，流れの挙動が準定常状態になったところで時間平均操作を開始し，十分な長さで時間平均操作が行われた速度場や温度場を定常解とみなします．時間平均操作の開始時刻は Start で指定し，この開始時刻以降，毎ステップごとに時間平均操作を行います．平均操作の開始時刻は，StartType の指定内容に依存し，Time を指定した場合には UnitOfInputParameter の次元に従います．つまり，UnitOfInputParameter=“DIMENSIONAL” の場合には有次元時刻で時間平均操作の開始時刻を指定することになります．時間平均場の出力タイミングは，Interval で指定します．

表 5.5 AverageOption のパラメータ

ラベル	指定パラメータ
Operation	{ On   Off }
StartType	開始時刻の指定 { Step   Time }
Start	時間平均操作の開始時刻
Interval	時間平均場の出力インターバル

### CheckParameter

入力パラメータの初期化処理時の整合性のチェックを行い，初期設定後にソルバーを停止します．

```
CheckParameter = "Off"
```

CheckParameter="On" でチェックが有効な場合，FFV-C を起動してパラメータを読み込み，前処理が終了した段階で強制終了します．このとき，初期設定パラメータの内容が conditions.txt に書き出されているので，パラメータのチェックができます．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．

## 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 5.6 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 5.6 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		

## DerivedVariable

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．

```
DerivedVariable {
  TotalPressure      = "Off"
  Helicity           = "Off"
  Vorticity          = "Off"
  2ndInvariantOfVGT = "Off"
}
```

表 5.7 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，/Steer/FileIO/InstantInterval で指定するタイミングでファイルに出力されます．

表 5.7 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
2ndInvariantOfVGT	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<sup>\*1</sup>．  
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，以下のようになります．

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

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 [4]．i2vgt\*.sph のファイル名でファイルが出力されます．

<sup>\*1</sup> 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

## Example

解くべき問題を指定します。

```
Example = "PerformanceTest"
```

表 5.8 に FFV-C ソルバー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、/Parameter/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 5.8 Example のパラメータ指定

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
SHC1D	固体熱伝導
Sphere	球
Users	ユーザ例題

## FileIO

ファイル入出力モードを指定します．このセクションでは，ガイドセルの出力モード，ファイル出力インターバル，デバッグ時のファイルなどを指定します．

```
FileIO {
  GuideOut          = "Without"
  DebugDivergence   = "Off"
  InstantIntervalType = "step"
  InstantInterval    = 10
  VoxelOutput        = "svx"
  Output {
    FileFormat       = "sph"
    DirectoryPath     = "hoge"
    TimeSlice         = "off"
  }
  Plot3d {
    IntervalType      = "step"
    Interval           = 10
  }
}
```

表 5.9 に指定するパラメータの内容を示します．

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

表 5.9 ファイル入出力のパラメータ指定

ラベル	指定項目	ラベル	コメント
GuideOut	ガイドセル出力モード	with without	ガイドセルと一緒に出力 内部領域のみ出力
DebugDivergence	デバッグ時のファイル出力	{ On   Off }	$\nabla \cdot u$ の出力（無次元値）
InstantIntervalType	瞬時値の出力指定形式	Step Time	ステップ数指定 時間間隔の指定
InstantInterval	出力間隔	—	{ ステップ数   時間間隔 }
VoxelOutput	ボクセルファイルの出力指定	{ off   svx }	
FileFormat	出力ファイルのフォーマット		
DirectoryPath	出力ファイルのディレクトリ指定		
TimeSlice	出力タイムスライス毎にディレクトリを作成する	{ On   Off }	

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

Interval のラベルにより，瞬時値のファイル出力間隔を指定します．指定する単位は，InstantIntervalType によって，時刻またはステップ数を指定できます．InstantIntervalType が "Time" の場合，時刻の単位は/Steer/Unit/UnitOfInputParameter で指定したモードに従います．

ボクセルファイルを確認のため出力する場合には，ファイル形式を指定します．

## GeometryModel

計算に用いるポリゴンファイル名を指定します。幾何形状ファイルを指定して計算をする場合には ,Example=“users” を指定します。

```
GeometryModel {  
  PolylibFile      = "polylib.tp"  
  FluidMediumForFill = "air"  
  SolidMediumForFill = "fe"  
  HintOfFillingFluid = "Zplus"  
}
```

表 5.10 形状データの指定

ラベル	指定内容
PolylibFile	Polylib の入力ファイル名
FluidMediumForFill	フィルに用いる流体の媒質名
SolidMediumForFill	フィルに用いる固体の媒質名
HintOfFillingFluid	フィルを実行する場合の基点方向 { Xminus   Xplus   Yminus   Yplus   Zminus   Zplus }

## 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 は、2 段階の反復を用いています。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工夫されています。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、最初の反復では、指定する反復解法で指定残差まで収束させます。その後、2 段階めでは速度と圧力を同時に緩和する反復を行います。

```
Iteration {
  Flow {
    Poisson {
      Iteration    = 20
      Epsilon      = 1.0e-4
      Omega        = 1.1
      Norm         = "RbyR0"
      LinearSolver = "sor2sma"
      CommMode     = "async"
    }
    VP {
      Iteration    = 50
      Epsilon      = 1.0e-4
      Norm         = "VdivMax"
    }
  }
  Heat {
    EulerImplicit {
      Iteration    = 30
      Epsilon      = 1.0e-2
      Omega        = 1.1
      Norm         = "TResL2Absolute"
      LinearSolver = "SOR"
      CommMode     = "sync"
    }
  }
}
```

まず、反復法を用いる場合は、/Steer/Algorithm で反復法を含む解法を指定します。/Steer/Iteration/Flow の次のレベルで指定するラベル（上記の例では“Poisson”）は指定するアルゴリズムに応じて異なります。表 5.11 に指定アルゴリズムと指定ラベルの関係を示します。

表 5.11 流動解析のアルゴリズムと指定ラベル

Algorithm	必要なラベル
FS.C_EE.D_EE	"Poisson"

表 5.12 には、流動解析の反復解法の指定パラメータを示します。

表 5.13 に 2 段階目の速度圧力同時反復で指定するパラメータを示します。

温度計算で反復法を用いる場合は、/Steer/Algorithm セクションで反復法を含む解法を指定します。

Flow, Heat のラベルは、それぞれ、流れ計算と熱計算のパラメータであることを示します。表 5.15 に、指定アルゴリズムと指定ラベルの関係を示します。

温度解析の反復解法のパラメータは、表??と同じです。収束ノルムのタイプは表 5.16 で指定します。



表 5.12 第 1 段階の反復条件の指定

ラベル	指定内容	コメント
Iteration	最大反復回数	反復回数の上限
Epsilon	収束閾値	指定値以下になったら収束したと見なす
Omega	加速（緩和）係数	反復解法のパラメータ
Norm	収束ノルムの種類	
	"DXbyB"	変化量を定数項ベクトルの絶対値で割った値
	"RbyB"	残差を定数項ベクトルの絶対値で割った値
	"RbyR0"	残差を初期残差で割った値
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
CommMode	袖通信のモード	
	"Sync"	同期通信モード
	"Async"	非同期通信モード

表 5.13 第 2 段階の反復条件の指定

ラベル	指定内容	コメント
VdivMax	$\max  \operatorname{div} \mathbf{u} $	速度の発散値の最大値ノルム
VdivDbg	$\max  \operatorname{div} \mathbf{u} $	VdivMax と同じですが、デバッグ用に反復履歴を出力するので実行速度は低下。

表 5.14 流動計算における圧力反復のノルムの指定

ラベル	収束判定基準	履歴出力のラベル
VDivMax	発散の最大値 $\max  \operatorname{div} \mathbf{u} $	V_Div_Max
VDivMaxMonitor	発散の最大値 $\max  \operatorname{div} \mathbf{u} $ の値とセル位置を出力する	V_Div_Max
VDivL2	発散の自乗和平方根 $\sqrt{\sum_{i,j,k}^{Max} (\operatorname{div} \mathbf{u})^2}$	V_Div_L2
PResL2_Absolute	絶対残差の RMS $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j,k}^{Max} \ \vec{b} - A\vec{x}\ _2}$	PResL2A
PResL2Relative	相対残差の RMS $\sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i,j,k}^{Max} \ \vec{b} - A\vec{x}\ _2}{\sum_{i,j,k}^{Max} \ \vec{b}\ _2}}$	P_Res_L2_R

表 5.15 温度解析のアルゴリズムと指定ラベル

Algorithm	必要なラベル
C_EE_D_EE	—
C_EE_D_EI	Euler_Implicit

表 5.16 温度計算における反復のノルムの指定

ラベル	収束判定	履歴出力のラベル
T_Res_L2_Absolute	絶対残差の RMS $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j,k}^{Max} \ \vec{b} - A\vec{x}\ _2}$	T_Res_L2_A
T_Res_L2_Relative	相対残差の RMS $\sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i,j,k}^{Max} \ \vec{b} - A\vec{x}\ _2}{\sum_{i,j,k}^{Max} \ \vec{b}\ _2}}$	T_Res_L2_R

## LESoption

LES(Large-Eddy Simulation) のオプションパラメータを指定します\*2 .

```
LESoption {
    LEScalculation = "Off"
}
```

指定できる LES のモデルを表 5.17 に示します .

表 5.17 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

\*2 2013 年 6 月 22 日現時点で機能未実装 .

## Log

各種履歴ファイル出力の制御パラメータを指定します。

```
Log {
  LogBase           = "On"
  LogIteration      = "Off"
  LogProfiling      = "On"
  LogWallInfo       = "Off"
  ConsoleIntervalType = "Step"
  ConsoleInterval    = 1
  HistoryIntervalType = "Step"
  HistoryInterval    = 1
}
```

LogBase は基本履歴ファイルの on/off を制御します。つまり、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。

LogIteration 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。LogIteration="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。

LogProfiling ラベルは、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 オプションにより、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。

LogWallInfo 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。

Interval のラベルにより、ファイル出力間隔を指定します。対象となる出力ファイルに対して、時刻またはステップ数によりファイル出力間隔を指定できます。ConsoleIntervalType あるいは HistoryIntervalType が "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 5.18 履歴ファイルの出力指定

ラベル	指定内容	ラベル   指定内容
LogBase	標準履歴ファイル	{ ON   OFF }
LogIteration	反復解法の反復履歴	{ ON   OFF }
LogProfiling	実行性能レポートの作成・出力	{ ON   OFF }
LogWallInfo	壁面情報履歴	ON   OFF
ConsoleIntervalType	標準出力の出力指定形式	Step (ステップ数指定) Time (時刻指定)
ConsoleInterval	出力間隔	ステップ数   時刻
HistoryIntervalType	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)
HistoryInterval	出力間隔	{ ステップ数   時刻 }

## 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??章をご覧ください。もう一つの指定方法は、モデルに与えられたラベルを用いて指定する方法で、これについては境界条件セクションをご覧ください。

```

MonitoList {
  Log                = "Off"
  OutputMode         = "Gather"
  SamplingIntervalType = "step"
  SamplingInterval    = 100
  CellMonitor        = "off"

  List[@] {
    type              = "Line"
    label             = "line1"
    value             = "x"
    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 5.19 に示します。MonitorList 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。

- 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、SamplingInterval で指定し、その指定単位を SamplingIntervalType で指定します。
- Unit ラベルでは、MonitorList セクションで指定するパラメータの単位と出力するログの単位を指定します。指定パラメータと出力ログの単位は同じになります。

表 5.19 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" "Distribute"	マスタープロセスに集約して出力 各プロセス毎に出力
SamplingIntervalType	{ Step   Time }	出力形式の指定
SamplingInterval	—	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		開始点を指定する
To		終了点を指定する
x,y,z		座標
Variable	Velocity Pressure Temperature TotalPressure Vorticity	速度を指定 圧力 温度 全圧 渦度
SamplingMethod	Nearest Interpolation Smoothing	モニタ指定点を含むセルの値 三重線形内挿補間 局所平均による平滑化
SamplingMode	All Fluid Solid	全セルを対象とする 流体セルのみを対象とする 固体セルのみを対象とする

### PLOT3Doptions

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。File\_IO ので PLOT3D 出力形式のファイル出力を On にした場合に設定する必要があります。

```

PLOT3D_Options {
  filename      = "hoge_"
  grid_kind     = "single_grid"
  grid_mobility = "immovable"
  state_of_time = "unsteady"
  Iblank       = "off"
  Dimension     = "3D"
  Format_type   = "unformatted"
  Output_xyz    = "on"
  Output_q      = "on"
  Output_function = "on"
  Output_func_name = "on"
  Output_fvbnd  = "on"
  Divide_func   = "off"
}

```

PLOT3D\_Options ラベルでは、PLOT3D 形式の出力ファイルに関するさまざまな指定を行います。

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。

grid\_kind 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 multi\_grid 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。

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	—
grid_kind	grid の指定	single_grid   multi_grid
grid_mobility	grid の時間による変化の有無	immovable   movable
state_of_time	定常・非定常	steady   unsteady
Iblank	Iblank の出力指定	ON   OFF
Dimension	次元の指定	2 D   3 D
Format_type	出力フォーマット指定	
	Fortran Formatted	Formatted
	Fortran Unformatted	Unformatted
	C Binary	C.Binary
Output_xyz	形状ファイル出力	ON   OFF
Output_q	圧縮性流体計算結果出力	ON   OFF
Output_function	計算結果出力	ON   OFF
Output_func_name	計算結果出力項目	ON   OFF
Output_fvbnd	境界面定義ファイル出力	ON   OFF
Divide_func	計算結果の項目別出力	ON   OFF

grid\_mobility 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。

state\_of\_time 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。ffvc では計算は常に 3 次元で行われるため、2 D を指定した場合もプログラム中で 3 D に変更されます。

Format\_type 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が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。

Output\_xyz 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。

Output\_q 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、ffvc 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。

Output\_function 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 Solver\_Property ラベルで指定する Kind\_of\_Solver の指定によります。

Output\_func\_name 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。

Output\_fvbnd 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。

Divide\_func 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。

## ReferenceFrame

観測の座標系を指定します。

```
ReferenceFrame {  
    ReferenceFrameType = "Stationary"  
}
```

FFV-C ソルバーでは、表 5.21 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 5.21 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

## StartCondition

計算のスタート条件を指定します．FFV-C では，幾つかのリスタートのモードを用意しています．詳細は，第 8 章をご覧ください．

```

StartCondition {
  StartType      = "Initial"

  DFIfiles {
    Velocity      = "vel.dfi"
    Pressure      = "prs.dfi"
    Temperature   = "tmp.dfi"
  }
  InitialState {
    Density       = 1.0
    Pressure      = 0.0
    Temperature   = 20.0
    Velocity      = (0.0, 0.0, 0.0)
  }
}

```

表 5.22 StartCondition のパラメータ指定

ラベル	指定値	コメント
StartType	Initial	時刻ゼロからの初期スタート
	Restart	リスタート
DFIfiles	Velocity	速度の DFI ファイル名
	Pressure	圧力の DFI ファイル名
	Temperature	温度の DFI ファイル名
InitialState		初期条件を指定
	Density	密度
	Pressure	圧力
	Temperature	温度
	Velocity	速度ベクトル

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，/Steer/SolverProperty で KindOfSolver="FlowOnly" を指定した場合のみ，無次元での指定も可能です．圧力値は，/Steer/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．

$$\left. \begin{aligned}
 \rho &= \frac{\rho'}{\rho'_0} \\
 p &= \frac{p' - p'_0}{\rho'_0 u_0'^2} \\
 u_i &= \frac{u'_i}{u'_0} \\
 \theta &= \frac{\theta' - \theta'_0}{\Delta\theta'}
 \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$



## SolverProperty

ソルバーの基本的なパラメータを設定します。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。

```
SolverProperty {
  BasicEquation      = "Incompressible"
  Buoyancy           = "NoBuoyancy"
  KindOfSolver       = "FlowOnly"
  PDEtype            = "NavierStokes"
  ShapeApproximation = "Binary"
  TimeVariation      = "Unsteady"
  PressureShift      = "Off"
}
```

BasicEquation には、表 5.23 に示す支配方程式の形式を示します。

表 5.23 BasicEquation のパラメータ指定

ラベル	支配方程式
Incompressible	非圧縮性

PDEtype で指定する方程式の型は、表 5.24 から選択します。デフォルトで NavierStokes で、Euler はテスト用のパラメータです。

表 5.24 PDEtype のパラメータ指定

ラベル	PDE の型
NavierStokes	Navier-Stokes 方程式
Euler	Euler 方程式

KindOfSolver には、表 5.25 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 (KindOfSolver="SolidConduction") には、Heat Conduction Equation と表示されます。また、Buoyancy の指定は、KindOfSolver が必要とする場合にのみ有効になります。

表 5.25 熱対流計算と KindOfSolver および Buoyancy の関係

支配方程式	KindOfSolver	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	—

ShapeApproximation ラベルには、表 5.26 に示す解析モデルの形状近似モードを指定します。

表 5.26 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

TimeVariation ラベルでは、表 5.28 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 5.27 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

PressureShift ラベルは、圧力値をシフトします。指定方向の計算領域の最外側セルにおける空間平均値を全計算空間から差し引き、指定面の圧力をゼロとします。

表 5.28 PressureShift の指定

指定値	
off	圧力値をシフトしない
XMinus	X-面
XPlus	X+ 面
YMinus	Y-面
YPlus	Y+ 面
ZMinus	Z-面
ZPlus	Z+ 面

## TimeControl

時刻設定に関するパラメータを指定します．

```
TimeControl {
  AccelerationType = "Time"
  Acceleration     = 1.0
  DtType           = "CFLReferenceVelocity"
  DeltaT           = 0.2
  PeriodType       = "step"
  CalculationPeriod = 20
}
```

Acceleration Acceleration ラベルは，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．AccelerationType 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/Steer/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．

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

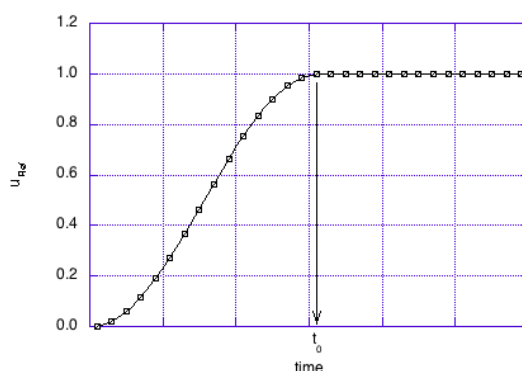


図 5.1 加速中の速度プロファイル

時間積分幅  $\Delta t$  の指定 表 5.29 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，ソルバの種類を示す KindOfSolver パラメータと関連があり，SolidConduction の場合には DtDirect のみ選択できます．

表 5.29 Time\_Increment のパラメータ指定

DtType	時間積分幅の決定方法	DeltaT への指定数値
Direct	$\Delta t$ を直接指定する	$\Delta t$
CFLReferenceVelocity	CFL 数を指定し, 代表流速から $\Delta t$ を決定	CFL 数
Diffusion	拡散数から $\Delta t$ を決定	—
CFLDiffusionReferenceVelocity	代表流速に対する CFL 数と拡散数から $\Delta t$ を決定	CFL 数

計算時間の指定 PeriodType で計算する時間の記述単位を指定します。計算時間を時間で指定する場合, 時間の単位は UnitOfInputParameter のモードに従います。指定された単位の数値を CalculationPeriod で指定します。

## 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 5.30 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>\*3</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 ソルバーの説明書をご覧ください<sup>\*4</sup>．

表 5.30 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>\*3</sup> 現時点では，圧力勾配ゼロのみが選択できます．

<sup>\*4</sup> 2013 年 6 月 22 日未リリース．

## 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．

```
Unit {
  UnitOfInputParameter = "NonDimensional"
  UnitOfOutput          = "NonDimensional"
  Pressure               = "Gauge"
  Temperature            = "Celsius"
}
```

各ラベルは，表 5.31 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  $p'_0 = 1.0325 \times 10^5$  [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．

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

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

表 5.31 単位の指定

ラベル	指定パラメータ	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

### 5.3.2 Parameter セクション

パラメータセクションでは、FFV-C ソルバーの実行に必要な物理パラメータを記述します。

#### InitTempOfMedium

温度計算の場合に、割り当てた媒質に対して初期温度を設定します。

```
InitTempOfMedium {  
  air-100c      = 72.0  
  Al-insulator  = 72.0  
  Fe-heat_src_1 = 100.0  
  Fe-heat_src_2 = 500.0  
  Fe-heat_src_3 = 150.0  
  Fe-heat_src_4 = 400.0  
  Fe-heat_src_5 = 340.0  
}
```

## 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 5.32 に示すように各組み込み例題ごとに異なります。

表 5.32 IntrinsicExample セクション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 内のラベル名
	SolidMedium	STRING	MediumTable 内のラベル名
共通			
Cylinder	Driver	REAL	ドライバ部分の長さ [m]
Duct	DriverMedium	STRING	MediumTable 内のラベル名
Sphere	DriverFaceMedium	STRING	MediumTable 内のラベル名
Step			
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" }
	InnerRadius	REAL	Ring1 の内径 [m]
	OuterRadius	REAL	Ring1 の外径 [m]
	RotationFrequency	REAL	回転周波数 []
	InletMassFlow	REAL	噴出流量 []
	Ring2		
	UseRing	STRING	{ "Yes"   "No" }
	InnerRadius	REAL	Ring2 の内径 [m]
	OuterRadius	REAL	Ring2 の外径 [m]
	RotationFrequency	REAL	回転周波数 []
	InletMassFlow	REAL	噴出流量 []
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]



## 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      = 1.0
  Velocity    = 1.0
  Gravity     = 9.8
  BasePressure = 0.0
  Reynolds    = 1000.0
  Prandtl     = 0.71
  Medium      = "air"
}
```

表 5.33 に示すように基準量を必要に応じて記述できます．無次元パラメータである Reynolds 数と Prandtl 数は，Unit 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，モデル内で使わ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 5.33 Reference セクションで指定できるパラメータ

値	意味	単位
Length	代表長さ	$m$
Velocity	代表速度	$m/s$
BasePressure	基準圧力	$Pa$
Gravity	重力加速度	$m^2/s$
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

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。

```
Temperature {  
  Base      = 20.0  
  Difference = 35.0  
}
```

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 Temperature ラベルで指定します。

### 5.3.3 MediumTable セクション

ソルバー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の基本リストは、解析に利用される候補です。媒質は流体と固体が記述でき、表 5.34 により媒質を指定します。

```
Medium_Table {
  Medium[@] {
    Type           = "Fluid"
    Label          = "Air"
    Density         = 1.1763
    SpecificHeat    = 1007
    ThermalConductivity = 2.614e-02
    KinematicViscosity = 15.83e-06
    Viscosity       = 18.62e-06
    SoundOfSpeed    = 340.0
    VolumeExpansion = 0.04e-3
  }
  Medium[@] {
    Type           = "Solid"
    Label          = "Fe"
    Density         = 7870.0
    SpecificHeat    = 442.0
    ThermalConductivity = 80.3
  }
}
```

表 5.34 MediumTable に記述するパラメータ

ラベル	説明
Type	Fluid または Solid
Label	媒質名

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 5.35 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、任意に指定する ID 番号によって管理されます。

表 5.35 Medium\_Table における物性値の指定

Fluid のラベル	説明	単位
Density	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	$Pa \cdot s$
SoundOfSpeed	音速	$m/s$
VolumeExpansion	体膨張率	$1/K$

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

## 第 6 章

# 境界条件

本章では、FFV-C ソルバー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 ソルバーでは、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。

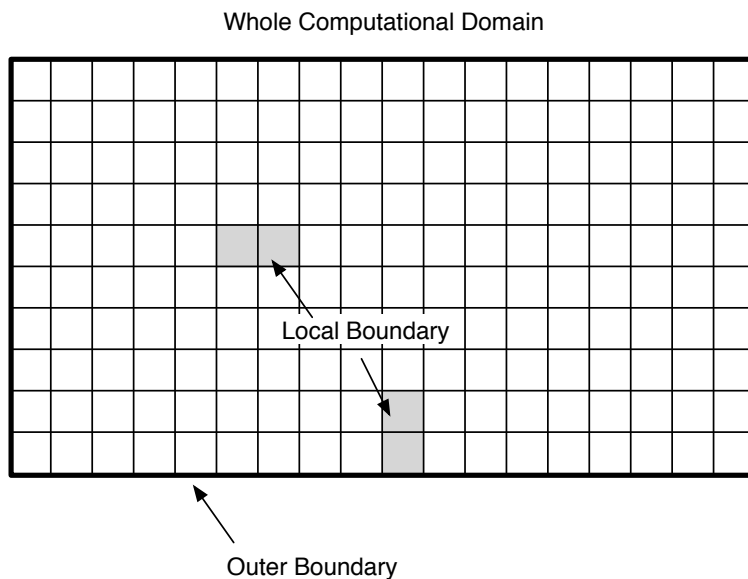


図 6.1 計算領域における外部境界と局所境界の指定場所

### 6.1.2 BcTable セクションのパラメータ構造

BcTable セクションでは、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 {
    BC[@] {
      Class      = "SpecifiedVelocity"
      Alias      = "Blower"
      Type       = "Velocity"
      Profile    = "Constant"
      Velocity   = 3.4
      Normal     = (-1.0, 0.0, 0.0)
      FluidDirection = "SameSideOfNormal"
      Frequency  = 0.0
      InitialPhase = 0.0
      ConstantBias = 0.0
      Temperature = 35.0
    }
  } //LocalBoundary

  OuterBoundary {
    // 境界条件候補リスト
```

```

BasicBCs[@] {
  Alias    = "outer_wall"
  Class    = "Wall"
  Type     = "fixed"
}
BasicBCs[@] {
  Alias    = "slide_wall"
  Class    = "Wall"
  Type     = "slide"
  Profile  = "Constant"
  Normal   = (1.0, 0.0, 0.0)
  Velocity = 1.0
}
BasicBCs[@] {
  Alias    = "inlet_2"
  Class    = "Specified_Velocity"
  Profile  = "Constant"
  Normal   = (1.0, 0.0, 0.0)
  Velocity = 5.0
}
BasicBCs[@] {
  Alias      = "outflow_1"
  Class      = "Outflow"
  VelocityType = "Average"
}

//外部境界条件
FaceBC {
  Xminus {
    Alias      = "inlet_2"
    MediumOnGuideCell = "air"
  }
  Xplus {
    Alias      = "outflow_1"
    MediumOnGuideCell = "air"
  }
  Yminus {
    Alias      = "outer_wall"
    MediumOnGuideCell = "Fe"
  }
  Yplus {
    Alias      = "outer_wall"
    MediumOnGuideCell = "Fe"
  }
  Zminus {
    Alias      = "outer_wall"
    MediumOnGuideCell = "Fe"
  }
  Zplus {
    Alias      = "slide_wall"
    MediumOnGuideCell = "Fe"
  }
}

} // OuterBoundary
} // BcTable

```

### 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の種類を BasicBCs タグ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 に示すキーワードを与え、alias にユニークなラベルを与えます。
2. FaceBC タグ内において、境界条件の基本リストの alias ラベルを参照して、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。同時に、各面のガイドセルのセル ID を MediumOnGuideCell により指定します。

前述の例では，境界条件の候補として class=Wall, SpecifiedVelocity, Outflow の 3 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\_2) を与え，X プラス方向の外部境界面に流出境界条件 (outflow\_1)，それ以外の面には壁面条件 (outer\_wall, slide\_wall) を与えています．各外部境界面のガイドセルには MediumOnGuideCell によって，媒質をラベルで付与しています．このラベルは，MediumTable セクションにリストアップされた媒質ラベルを参照します．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様な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 に示します．熱流れの場合には，壁面境界の場合に細かい指定が可能です．

表 6.1 外部境界で指定できる流れと熱の境界条件の種類

流れの境界指定のラベル名	流れの境界条件	熱境界指定のラベル名	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	←	対称境界
TractionFree	遠方境界	AmbientTemperature	遠方温度指定
FarField	遠方境界	AmbientTemperature	遠方温度指定 *テスト実装
Wall	壁面境界	Adiabatic	断熱指定
		HeatFlux	熱流束指定
		HeatTransfer TypeS	熱伝達係数と表面温度から熱伝達を計算
		HeatTransfer TypeSF	強制対流の層流・乱流熱伝達境界
		HeatTransfer TypeSN	自然対流の乱流熱伝達境界
		HeatTransfer TypeB	固体壁からの放熱条件
		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セクションで、表 6.2 に示す種類を指定できます。FFV-C ソルバーは、局所境界条件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 セクション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。指定できる局所境界条件の数は 30 個が上限です。また、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 タグは、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、このセクションに設けています。

表 6.2 局所境界条件（コンポーネント）の種類

ラベル名	指定位置	計算モード	実装形式	コンポーネントの説明
SpecifiedVelocity	セル界面	流れ・熱流れ	対流流束	速度指定境界
Outflow	セル界面	流れ・熱流れ	対流流束	流出境界
Periodic	セル界面	流れ・熱流れ	参照値指定	部分周期境界
Inactive	セル要素	流れ・熱流れ	マスク	不活性化する計算空間内のセル ID を指定
CellMonitor	セル要素	流れ・熱流れ	-	物理量のモニター位置の指定
Adiabatic	セル界面	熱流れ	熱流束マスク	断熱セル指定
DirectHeatFlux	セル界面	熱流れ	熱流束	熱流束指定
HeatTransferB	セル界面	固体伝熱	熱流束	固体壁からの放熱条件
HeatTransferS	セル界面	熱流れ	熱流束	熱伝達係数と表面温度により計算
HeatTransferSF	セル界面	熱流れ	熱流束	強制対流の層流・乱流熱伝達境界
HeatTransferSN	セル界面	熱流れ	熱流束	自然対流の乱流熱伝達境界
IsoThermal	セル界面	熱流れ	熱流束	等温面指定
HeatSource	セル要素	熱流れ	外力項	吸発熱指定
SpecifiedTemperature	セル要素	熱流れ	温度指定	セルの温度指定

<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．

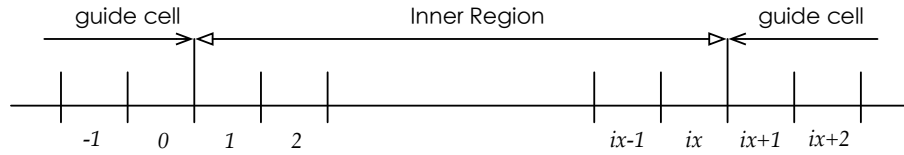


図 6.2 計算領域のインデックス

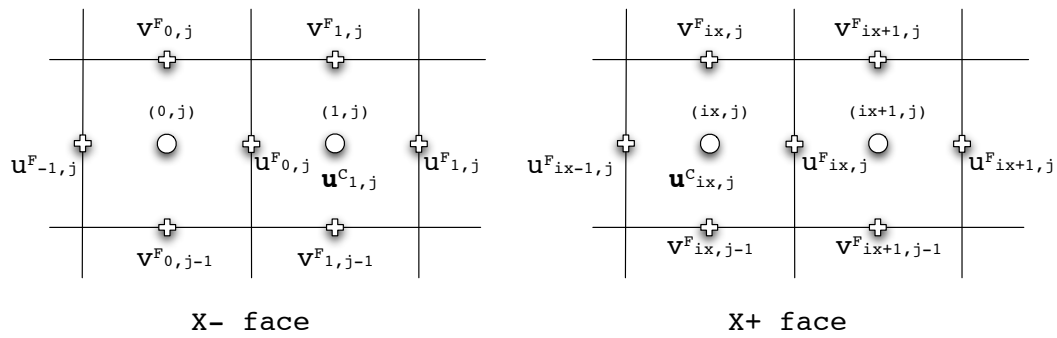


図 6.3 コロケート配置の変数のインデックス．基本変数 ( $u_i^C$ ,  $p$ ,  $\theta$ ) は全てセルセンタ位置に配置され，補助的な速度ベクトル  $u_i^F$  がスタガード位置に配置されます．

## 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，運動量流束を直接与えます．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 {
  BasicBCs[@] {
    Alias      = "inlet_2"
    Class      = "SpecifiedVelocity"
    Profile     = "Harmonic"
    Normal     = (0.0, 1.0, 0.0)
    Amplitude  = 7.0
    Frequency   = 2.0
    InitialPhase = 0.0
    ConstantBias = 0.0
  }
}
```

表 6.3 壁面の速度境界条件の指定パラメータ

ラベル	指定ラベル名	パラメータの説明
Normal	—	法線ベクトルの成分
Profile	{ Constant   Harmonic }	指定速度のタイプ
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]

壁面の速度境界の指定パラメータを表 6.3 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．

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

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．

#### 熱境界条件

計算領域の外部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，固定壁（壁面速度がゼロ）で，断熱条件を指定しています．

```
OuterBoundary {
  BasicBCs[@] {
    Class          = "Adiabatic"
    Alias          = "Eng_Block"
    NeighborMedium = "air-100c"
  }
}
```

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 id=1 の条件として， $12.0 [W/m^2]$  で流入する熱流束をもつ面を指定しています．

```
OuterBoundary {
  BasicBCs[@] {
    Alias          = "Eng_Block"
    Class          = "Wall"
    Type           = "Fixed"
    HeatType       = "heatflux"
    HeatFlux       = 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，幾つかの種類があります．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 6.4 に示します．

表 6.4 熱伝達境界条件と KindOfSolver の関係

KindOfSolver	指定できる熱伝達境界の種類
FlowOnly	-
ThermalFlow   ThermalFlowNatural	{ TypeS   TypeSN   TypeSF }
ConjugateHeatTransfer	TypeN
SolidConduction	TypeB

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

$H$	$[W / (m^2 K)]$	Coefficient of heat transfer
$\theta'_{sf}$	$[K]$	Surface temperature of solid
$\theta'_{\infty}$	$[K]$	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．

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 {
  BasicBCs[@] {
    Alias          = "Exhaust"
    Class          = "Wall"
```

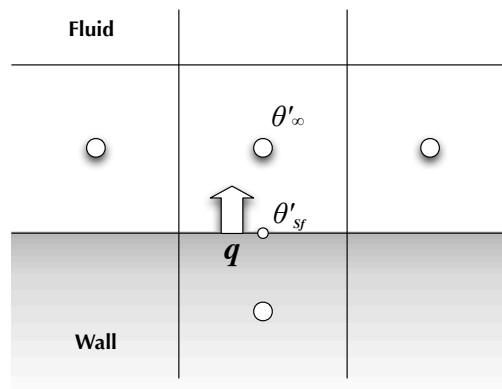


図 6.4 TypeS の熱伝達境界

```

Type          = "Fixed"
HeatType      = "HeatTransferS"
SurfaceTemperature = 300.0
CoefOfHeatTransfer = 20.0
}
}

```

表 6.5 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 $[K   ^\circ C]$

**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 [5] 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．

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

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．

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

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．

```

OuterBoundary {
  BasicBCs[@] {
    Class           = "HeatTransferSN"
    Alias           = "EngBlock"
    NeighborMedium   = "air-100c"
    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
  }
}

```

表 6.6 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 $Ra_L$
RefTempMode	BulkTemperature or LocalTemperature

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 [5] 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。

```

OuterBoundary {
  BasicBCs[@] {
    alias           = "Exhaust"
    class           = "Wall"
  }
}

```

```

    Type           = "Fixed"
    heat_type      = "HeatTransfer_SF"
    SurfaceTemperature = 500.0
    RefTempMode    = "Bulk_Temperature"
    alpha          = 0.037
    beta           = 0.8
    gamma          = 0.333333
  }
}

```

表 6.7 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 $\gamma$
RefTempMode	BulkTemperature or LocalTemperature

**TypeB** 固体壁からの放熱条件 熱伝達係数とバルク温度を与え、熱流束を計算します。固体の熱移動のみを解く場合の境界条件として利用します。以下に、パラメータ指定の一例を示します。

```

OuterBoundary {
  BasicBCs[@] {
    alias      = "Exhaust"
    class      = "Wall"
    Type       = "Fixed"
    heat_type  = "HeatTransfer_B"
    CoefOfHeatTransfer = 0.12
    BulkTemperature = 500.0
  }
}

```

表 6.8 熱伝達境界 TypeB 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 [ $W/(m^2 K)$ ]
BulkTemperature	境界層外層温度 [ $K$   $^{\circ}C$ ]

**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 {
  BasicBCs[@] {
    alias      = "Exhaust"
    class      = "Wall"
    Type       = "Fixed"
    heatType   = "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 [ $K$   $^{\circ}\text{C}$ ]

### 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 {
  BasicBCs[@] {
    Alias    = "left_side"
    Class    = "Symmetric"
  }
}
```

上記の例では，alias に left\_side というラベル名を与え，対称境界条件を指定しています．

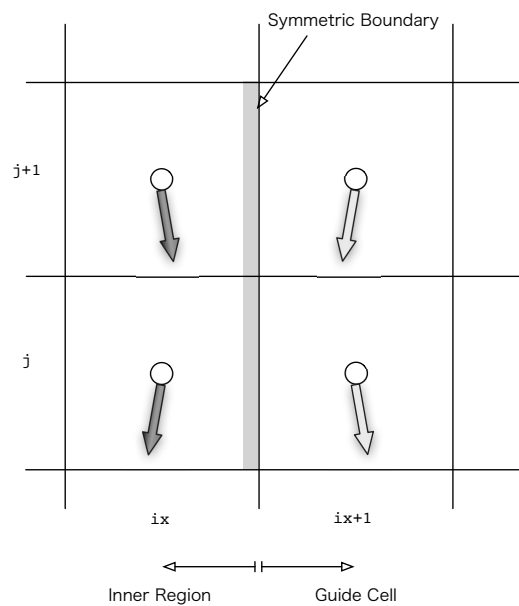


図 6.5 対称境界面における境界条件

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 流出境界

流出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．ガイドセルのセル属性の指定方法については OuterBoundary を参照してください．

```
OuterBoundary {
  BasicBCs[@] {
    alias    = "to_exhaust"
    class    = "outflow"
    velocityType = "minmax"
  }
}
```

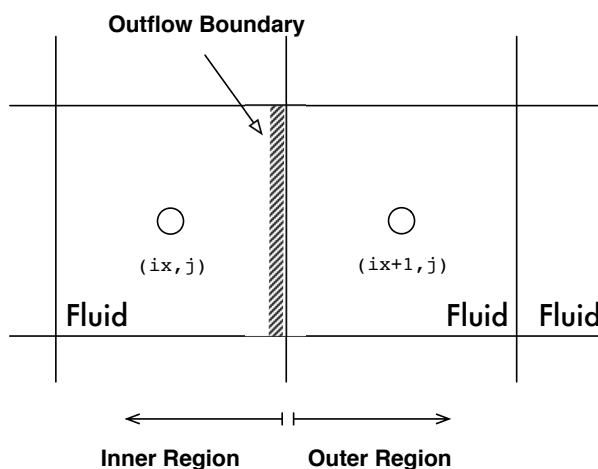


図 6.6 外部境界面における流出境界． $x+$  方向の例．

指定するパラメータとして，対流流出速度の評価方法があります．この例では，流出速度の評価方法に Minmax を指定しています．流出速度の選び方として，流出断面の平均速度や最大値と最小値の算術平均などが提案されており，経験上，内部流の場合には Average が流出速度のよい近似値を与えます．一方，外部流や噴流のような無限空間の境界面の場合には MinMax がよい近似値となります．流出速度の指定は，表 6.10 のように VelocityType タグにて Average または Minmax を指定します．Average は，物体でブロックされていない有効セルの平均値をとります．Minmax は，境界面における有効セルの流速の最大値と最小値の算術平均値を与えます．

表 6.10 対流流出速度の評価方法の指定

VelocityType	パラメータの説明
Average	流出面の有効セルに対する平均値
Minmax	流出面の有効セルに対する最大値と最小値の算術平均値

圧力境界条件としては，Fractional Step 法のアルゴリズムに適合するように，境界面上で  $\nabla p = 0$  を用いています．熱境界としても，速度と同様に，対流流出型の境界条件となります．

### 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。まず、速度指定境界のパラメータについて説明します。

```
OuterBoundary {
  BasicBCs[@] {
    Alias      = "inlet"
    Class      = "SpecifiedVelocity"
    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。

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

温度の指定単位は、Unit セクションの 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
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 $[K   ^\circ C]$

### 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 {
  BasicBCs[@] {
    Alias    = "x-dir_periodic_1"
    Class    = "periodic"
    Mode     = "SimpleCopy"
  }

  BasicBCs[@] {
    Alias      = "x-dir_periodic_2"
    Class      = "periodic"
    Mode       = "Directional"
    FlowDirection = "Upstream"
    PressureDifference = 8.148e-3
  }

  BasicBCs[@] {
    Alias      = "x-dir_periodic_3"
    Class      = "periodic"
    Mode       = "Directional"
    FlowDirection = "Downstream"
    PressureDifference = 8.148e-3
  }

  BasicBCs[@] {
    Alias      = "x-dir_periodic_3"
    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。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 {
  BasicBCs[@] {
    Alias          = "Ambient"
    Class          = "TractionFree"
    AmbientTemperature = 25.0
  }
}
```

熱流れの場合には、遠方場における温度を指定します。

### 6.2.7 遠方境界

外挿境界条件で，実験的な実装です．

指定された外部境界面において，外部境界面の値を内部から外挿して与えます．

```
OuterBoundary {  
  BasicBCs[@] {  
    Alias          = "extrapolation"  
    Class          = "FarField"  
    AmbientTemperature = 25.0  
  }  
}
```

熱流れの場合には，流入時に対応する温度を指定します．

## 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 つのセルには同種の流出境界は 1 種類だけしか設定できません。

### 6.3.1 壁面境界

#### 流れの境界条件

計算領域内部の壁面境界条件は、モデルで固体壁に指定したセルが固体として認識され、セル界面の流速が指定する壁面速度から直接計算されるので、特に明示的な指定はありません。

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、セルの界面に与えます。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。局所境界の場合の界面の指定方法としては、指定する 2 つの ID で挟まれるボクセルの構成面を指定界面とします。指定する ID の一つはキー ID で、主に固体セルを指定します。もうひとつの ID は DefFace ID です。

熱境界条件をコンポーネントとして与える場合、固体面をキー ID に指定します。このときの熱流束の方向は、図 6.7 において、固体面から流体側へ向かう法線と同じ方向です。つまり、この法線方向が指定する値の正の方向とし、流体側への熱移動を正の方向と考えます。

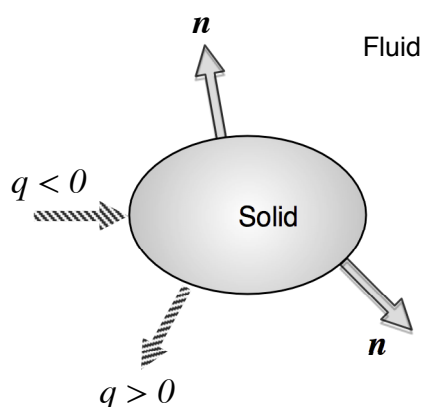


図 6.7 流体-固体界面における熱境界条件の熱流束の方向

FFV-C の熱流体解析には幾つかのモードがあります。KindofSolver 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\*2。

\*2 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。

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。

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-固体の境界面で与える熱境界条件は、流体セルと固体セルの両方で指定されます。

以下の各境界条件の指定で述べるように、ID と DefFace タグの組み合わせにより、流体-固体の境界面を指定します。このとき、**ID** には固体の ID を、**DefFace** には流体または固体の ID を指定することを基本としてください<sup>\*3</sup>。

**断熱境界** 断熱壁では指定面で熱流束がゼロ、つまり  $q' = 0$  を指定します。固体セルと流体セルの界面に何も熱境界条件を指定しなければ、断熱境界条件となります。また、明示的に次のように“Adiabatic”セクションで断熱面を指定することができます。

```
LocalBoundary {
  BC[@] {
    Class           = "Adiabatic"
    Alias           = "Eng_Block"
    NeighborMedium   = "air-100c"
  }
}
```

この例では、ID="6" の固体セルのうち、ID="3" の流体セルに接する面に対して、断熱境界条件を指定しています。

**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>
  <Elem name="Direct_Heat_Flux" ID="6" comment="outer_wall">
    <Param name="Def_Face"      dtype="INT"    value="3"/>
    <Param name="Heat_Flux"     dtype="REAL"   value="10.0"/>
  </Elem>
</LocalBoundary>
```

**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>
  <Elem name="HeatTransfer_S" ID="6" comment="engine">
    <Param name="Def_Face"      dtype="INT"    value="3"/>
    <Param name="Surface_Temperature" dtype="REAL" value="300.0"/>
    <Param name="Coef_of_Heat_Transfer" dtype="REAL" value="20.0"/>
  </Elem>
</LocalBoundary>
```

**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 {
  BC[@] {
    Class           = "HeatTransfer_SN"
    Alias           = "Exhaust"
    NeighborMedium   = "air-100c"
  }
}
```

<sup>\*3</sup> ID に固体を指定する理由は、参照範囲を小さく抑えて効率的な計算をするためです。

```

        SurfaceTemperature      = 500.0
        RefTempMode             = "Bulk_Temperature"
        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>
  <Elem name="HeatTransfer_SF" ID="6" comment="engine">
    <Param name="Def_Face" dtype="INT" value="3"/>
    <Param name="Surface_Temperature" dtype="REAL" value="500.0"/>
    <Param name="Ref_Temp_Mode" dtype="STRING" value="Bulk_Temperature"/>
    <Param name="alpha" dtype="REAL" value="0.037"/>
    <Param name="beta" dtype="REAL" value="0.8"/>
    <Param name="gamma" dtype="REAL" value="0.333333"/>
  </Elem>
</LocalBoundary>

```

TypeB 固体壁からの放熱条件 熱伝達係数とバルク温度を与え、熱流束を計算します。固体熱伝導を解く場合の境界条件として利用します。

```

<LocalBoundary>
  <Elem name="HeatTransfer_B" ID="6" comment="engine">
    <Param name="Def_Face" dtype="INT" value="3"/>
    <Param name="Bulk_Temperature" dtype="REAL" value="500.0"/>
    <Param name="Coef_of_Heat_Transfer" dtype="REAL" value="0.12"/>
  </Elem>
</LocalBoundary>

```

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>
  <Elem name="IsoThermal" ID="6" comment="outer_wall">
    <Param name="Def_Face" dtype="INT" value="3"/>
    <Param name="Temperature" dtype="REAL" value="100.0"/>
  </Elem>
</LocalBoundary>

```

### 6.3.2 流出境界条件

流れの境界条件 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り、かつ流出方向に 2 セル必要にな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。計算内部領域における境界面は、次のように対象となる面を id=20 と id=210 の 2 つの ID で挟むことにより指定します。速度の流出面における対流速度的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。



```

<LocalBoundary>
  <Elem name="outflow" id="20" comment="out">
    <Param name="def_face" dtype="INT" value="210" />
  </Elem>
</LocalBoundary>

```

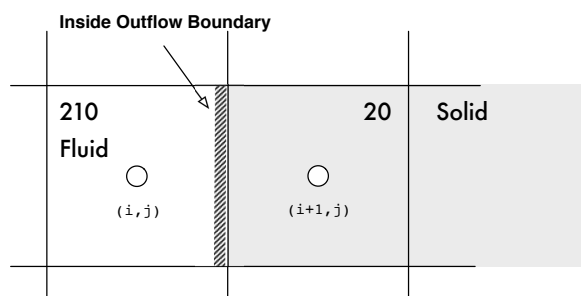


図 6.8 計算内部領域における流出境界の設定

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

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

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．まず，計算内部領域における流入境界の入力パラメータについて説明します．

```

LocalBoundary {
  Alias      = "inlet"
  Class      = "SpecifiedVelocity"
  Normal     = (0.0, 0.0, -1.0)
  Type       = "Velocity"
  Profile    = "Constant"
  Velocity   = 3.0
  Temperature = 60.0
  BCdirection = "Opposite"
}

```

境界面の指定方法は表 6.14 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．

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

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．

表 6.14 コンポーネントの流束指定のパラメータ

ラベル	パラメータの説明
Normal	法線ベクトルの成分
Type	指定速度のモード (Velocity   Massflow)
Profile	指定速度のタイプ (Constant   Harmonic)
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 $[K   ^\circ C]$ を指定

### 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 6.15 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>
  <Elem name="Specified_Temperature" ID="60" comment="engine">
    <Param name="Temperature" dtype="REAL" value="45.0"/>
  </Elem>
</LocalBoundary>
```

表 6.16 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 6.17 に示すように、発熱量または発熱密度を指定セルに与えることができます。発熱量を指定した場合には、該当 ID 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、ID=60 に 10[W] の発熱量を与えています。

```
<LocalBoundary>
  <Elem name="Heat_Source" ID="60" comment="heater">
    <Param name="Type" dtype="STRING" value="Heat_Release_Value"/>
    <Param name="Value" dtype="REAL" value="10.0"/>
  </Elem>
</LocalBoundary>
```

表 6.17 発熱セルの指定方法

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 不活性セル指定

計算空間内で、不活性化するセルを指定します。コンポーネントの機能を使って実装しています。

不活性化の対象は、圧力と温度の計算に対してのみで、流体と固体の両方の属性をもつセル ID に適用できます。不活性を指定されたセルは、圧力と温度の計算に関しては、意味のある計算をしません。代わりに、周囲のセルの平均値が代入されます。この処理はラプラス方程式を解くことに相当しますが、収束判定時にはその残差は考慮しません。下記のように、不活性化するセル ID を指定します。

```
<LocalBoundary>
  <Elem name="Inactive" ID="600" comment="outer_layer"/>
</LocalBoundary>
```

### 6.3.7 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。計算空間内に設定する局所境界条件について、コンポーネント毎の積算値をモニターします。下記の例では、ID=20 で指定される領域をモニタ部とし、そこで速度、圧力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。

```
<LocalBoundary>
  <Elem name="Cell_Monitor" id="20" comment="monitor_inlet">
    <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" />
    <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="off" />
    </Elem>
  </Elem>
</LocalBoundary>
```

指定方法の詳細は、ボクセルモデルのセル ID で指定する方法を参照してください。

## 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 6.18 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 6.18 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，圧力損失ヘッドの単位に応じて，パラメータは無次元に変換されます．

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

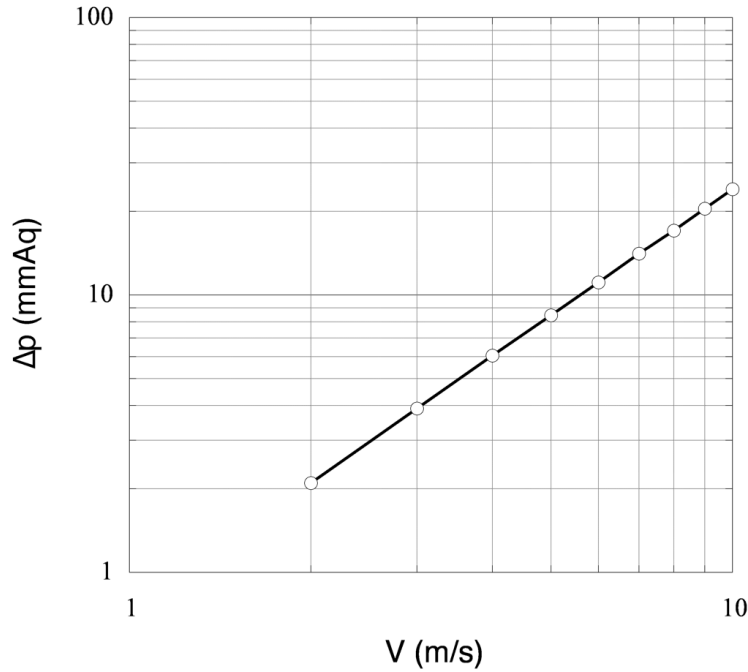


図 6.9  $\Delta p - V$  性能線図 (対数表示)

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 6.19 に対応します．

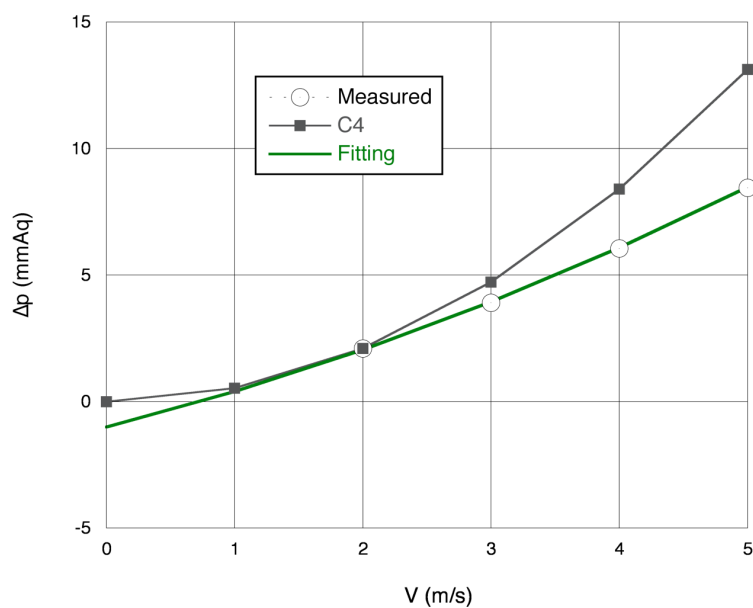


図 6.10 パラメータの取得 (図 6.9 と同じものを線形表示)

```

<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 6.19 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] *4
vector	速度ベクトルの法線方向への強制	[Directional NonDirectional]

## 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．テストセクション（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，

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

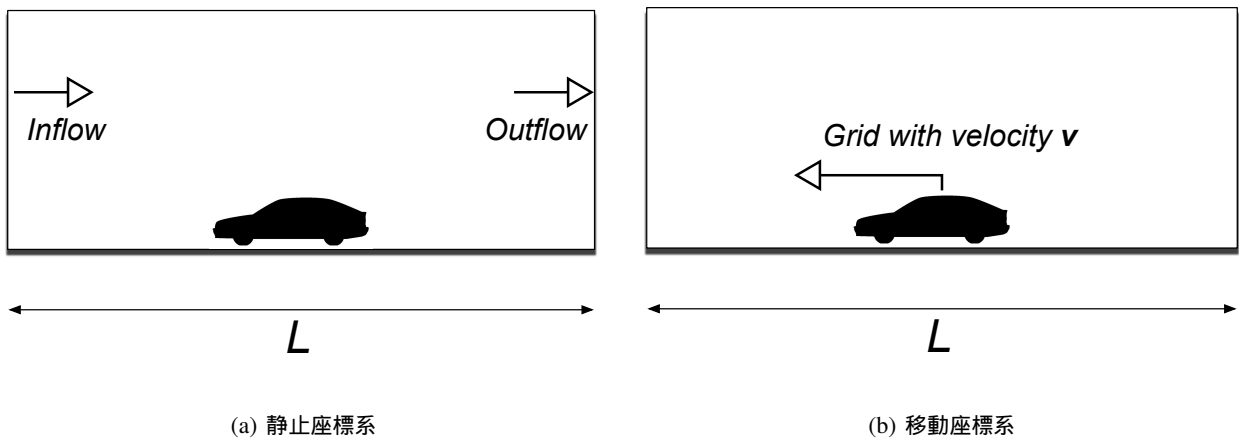


図 6.11 静止座標系と移動座標系の観測点の違い

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 セクションで与えます．

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

## 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

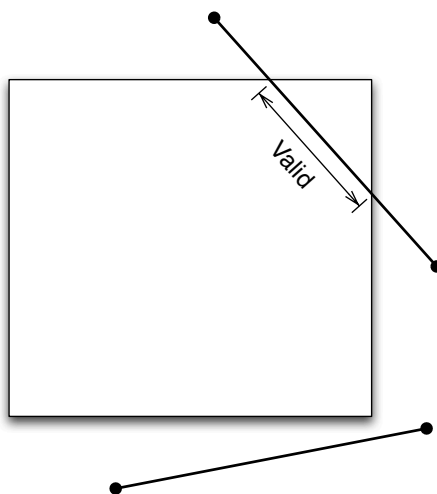


図 7.1 ラインのサンプリング指定で無効なケース

### 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 ボクセルモデルのセル ID で指定する方法

セル ID により指定する方法は、各セル中心をモニタ点として、sampling\_method="nearest", sampling\_mode="all" の条件で採取を行います。

### 7.2.1 モニター部の指定

計算領域の内部において、物理量をモニタしたい部分をボクセルモデルのセル ID により指定します。モニタ面は基本的には、座標軸に面直な面とします。ただし、若干予測精度は低下するが、軸に対して斜めの領域も指定できます。condition.txt 内の Component Information の部分にモニタ面の推定法線と面積の情報が表示されるので、確認してください。ひとつの ID に対しては、単連結領域（一つの塊）となるように ID を割り当てる必要があります。

下記の例では、ID=20 で指定され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。モニタ面の法線を指定しています。

```
<InnerBoundary>
  <Elem name="Cell_Monitor" id="20" comment="monitor_inlet">
    <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" />
    <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 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 [3]。

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  
に実行できます．

```
$ 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 5.14 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 $MonT [K or C]$
	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 hoge hoge.tp fuga fuga.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
$ ffvc hogehoge.tp fugafuga.tp

MPI
$ mpirun -np 8 ffvc hogehoge.tp fugafuga.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 0.7.0      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] <http://ja.wikipedia.org/wiki/Autotools>.
- [2] 中山顕, 桑原不二朗, 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.
- [3] 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).
- [4] M. Tanaka and S. Kida. Characterization of vortex tubes and sheets. *Physics of Fluids A*, Vol. 5, pp. 2079–2082, 1993.
- [5] 庄司正弘. 伝熱工学. 東京大学出版会, 1995.

# 索引

圧力損失 .....	77	履歴 .....	101
イニシャルスタート .....	44	ALE .....	10
インデクス .....	58	Binary Voxel .....	16
温度拡散係数 .....	11	Boussinesq .....	10
ガイドセル .....	28	CFL .....	44
拡散数 .....	44	Fractional step .....	13
基本リスト		LocalBoundary .....	54
境界条件の— .....	55	mpirun .....	111
媒質の— .....	52	OuterBoundary .....	54
組み込み例題 .....	30, 49	Volume Fraction .....	77
コンポーネント .....	57, 77, 107		
座標系 .....	40		
移動— .....	40, 80		
静止— .....	40, 80		
時間積分幅 .....	44		
時間平均操作 .....	26		
実行制御パラメータ .....	25		
初期値 .....	41		
ステンシル .....	28		
スレッド並列 .....	112		
制限関数 .....	28		
占有率 .....	77		
単振動 .....	59, 74		
定常解 .....	26		
低マッハ数 .....	11		
熱流動タイプ .....	42		
反復解法 .....	33		
ファイル			
コンポーネント履歴— .....	102		
反復履歴— .....	104		
標準履歴— .....	101		
ボクセル— .....	108		
流量履歴— .....	103		
履歴— .....	36		
condition— .....	99		
sph— .....	109		
Boussinesq 近似 .....	10		
物理パラメータ .....	48		
プロセス並列 .....	111		
分離解法 .....	13		
並列計算 .....	111		
変数配置			
Collocated— .....	58		
密度変化 .....	10		
無次元化 .....	11		