

User Guide of CBC Solver Class

Ver. 1.1.9

**Functionality Simulation and Information Team
VCAD System Research Program
RIKEN**

<http://vcad-hpsv.riken.jp/>

November 2011



First Edition	version 1.0.0	9 Oct.	2010
	version 1.1.0	30 June	2011
	version 1.1.1	9 July	2011
	version 1.1.2	11 July	2011
	version 1.1.3	22 July	2011
	version 1.1.4	28 July	2011
	version 1.1.5	31 Aug.	2011
	version 1.1.6	5 Sep.	2011
	version 1.1.7	6 Sep.	2011
	version 1.1.8	19 Sep.	2011
	version 1.1.9	7 Nov.	2011

COPYRIGHT

(c) Copyright RIKEN 2007-2011. All rights reserved.
2-1, Hirosawa, Wako, 351-0198, Japan

DISCLAIMER

You shall comply with the conditions of the license when you use this program.

The license is available at <http://vcad-hpsv.riken.jp/permission.html>

目次

第 1 章	CBC ソルバークラスの概要	1
1.1	V-Sphere とソルバークラス	2
1.2	CBC ソルバークラス	3
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	V-Sphere のインストール	6
2.2.1	autotools を用いたコンパイル環境の設定	6
2.2.2	モジュールの作成とインストール	6
2.2.3	アンインストール	7
2.2.4	倍精度計算モジュール	7
2.3	CBC ソルバークラスのインストールとコンパイル	7
2.3.1	アーカイブの解凍	7
2.3.2	sphPrjTool を用いた簡単なインストールとコンパイル	8
2.3.3	アンインストール	8
2.3.4	並列計算モジュールのコンパイル	9
2.3.5	Windows でのコンパイルと実行	9
プロジェクトの作成		9
コンパイル		9
CBC の実行		9
逐次実行方法		10
並列実行方法：ローカルホストにて実行		10
2.3.6	OpenMPI バイナリパッケージを用いたコンパイルと実行	10
V-Sphere のコンパイル		10
ソルバ CBC のコンパイル		11
ソルバ CBC の実行		12
第 3 章	基礎方程式と解析方法	13
3.1	支配方程式	14
3.1.1	非圧縮性流体	14
3.2	無次元化	15
3.2.1	無次元化された支配方程式	15
3.2.2	無次元化パラメータの選択	16
純強制対流		16
熱対流		16
浮力の効果を考慮しない場合		16
浮力の効果を考慮する場合		16

純自然対流	17
固体熱伝導	17
3.3 解法アルゴリズム	17
3.3.1 Fractional Step 法	17
Euler Explicit	17
Navier-Stokes equations	18
Thermal transport equation	18
第 4 章 解析モデルの作成	19
4.1 形状近似度による解析モデルの分類	20
4.1.1 Binary Voxel	20
4.1.2 体積率モデル	20
4.1.3 カットモデル	21
4.2 セル ID による境界条件の指定	21
4.3 形状データからの解析モデルの作成手順	22
4.4 組み込みモデル	24
4.4.1 IP_STEP クラス	25
4.4.2 IP_CYLINDER クラス	26
4.4.3 IP_Duct クラス	27
4.4.4 IP_PMT クラス	27
4.4.5 IP_PPLT2D クラス	27
4.4.6 IP_Rect クラス	28
4.4.7 IP_Polygon クラス	29
4.4.8 IP_SHC1D クラス	29
4.5 例題	30
第 5 章 制御と物理パラメータ	31
5.1 XML コンフィギュレーションファイル	32
5.1.1 XML 記述	32
5.1.2 コンフィギュレーションファイルの構造	32
5.2 パラメータの詳細	34
5.2.1 DomainInfo セクション	34
DomainInfo	34
5.2.2 Steer セクション	35
Algorithm	35
Average_Option	36
Check_Parameter	37
Convection_Term	38
Derived_Variable	39
全圧(総圧)	39
渦度ベクトル	39
ヘリシティ	40
速度勾配テンソルの第二不变量	40
Example	41
File_IO	42

InputData	44
Iteration	45
LES_Option	47
Log	48
Model_Setting	49
Monitor_List	50
OutputData	52
Polygon_File	54
Reference_Frame	55
StartCondition	56
Solver_Property	57
Time_Control	59
Acceleration	59
時間積分幅 Δt の指定	59
計算時間の指定	60
Treatment_of_Wall	61
Unit	62
Version_Info	63
VoxelDivisionMethod	64
5.2.3 Parameter セクション	65
Initial_State	65
Init_Temp_of_Medium	65
Intrinsic_Example	66
Reference	67
Temperature	68
5.2.4 Medium_Table セクション	69
 第 6 章 境界条件	70
6.1 境界条件の概要	71
6.1.1 外部境界条件と内部境界条件	71
6.1.2 BC_Table セクションの XML 構造	71
6.1.3 OuterBoundary	72
6.1.4 InnerBoundary	73
6.1.5 計算格子と内部・外部領域	74
6.2 外部境界条件	75
6.2.1 壁面境界	75
流れの境界条件	75
熱境界条件	76
断熱境界	76
熱流束境界	76
熱伝達境界	76
等温境界	79
6.2.2 対称境界	81
6.2.3 流出境界	82
6.2.4 速度指定境界	83

6.2.5	周期境界	84
6.2.6	遠方境界	85
6.2.7	流入出境界	86
6.3	内部境界条件	87
6.3.1	壁面境界	87
	流れの境界条件	87
	熱境界条件	87
	熱境界条件の指定方法	87
	断熱境界	88
	熱流束境界	88
	熱伝達境界	88
	等温壁境界	89
6.3.2	流出境界条件	89
	流れの境界条件	89
	熱流出境界	90
6.3.3	速度指定条件	90
	流れの境界条件	90
	熱境界条件	90
6.3.4	周期境界条件	91
	流れの境界条件	91
	熱境界条件	91
6.3.5	セルボリュームに対する熱境界条件	92
	Specified_Temperature	92
	Heat_Generation	92
6.3.6	不活性セル指定	92
6.3.7	モニタ	93
6.4	外力項を用いた境界条件	93
6.4.1	圧力損失境界条件	93
	熱交換器のモデル化	94
6.5	静止座標系と移動座標系の場合の境界条件	96
第7章	モニタリング機能	97
7.1	XML コンフィギュレーションファイルで指定する方法	98
7.1.1	値の採取方法	99
	nearest	99
	interpolation	99
	smoothing	100
7.1.2	指定パラメータの制限およびエラー処理	100
7.1.3	出力ファイルフォーマット	100
	ヘッダ領域	100
	データ領域	101
7.2	ボクセルモデルのセル ID で指定する方法	102
7.2.1	モニター部の指定	102
7.3	モニター例	103
7.3.1	初期化時の出力情報	105

7.3.2 単一ファイル出力	106
7.3.3 分散ファイル出力	106
7.3.4 Sampling_Mode の指定例	107
7.3.5 スキップモニタ点がある場合のファイル出力例 (单一ファイル)	108
第 8 章 ソルバーの実行	109
8.1 CBC の実行	110
8.2 出力ファイル	111
8.2.1 出力ファイルの種類と指定	111
8.2.2 解析条件情報 [condition.txt]	112
8.2.3 領域情報 [DomainInfo.txt]	113
8.2.4 基本履歴 [history_base.log]	114
8.2.5 コンポーネント履歴 [history_compo.log]	115
8.2.6 流量収支履歴 [history_domainflux.log]	116
8.2.7 反復履歴 [history_iteration.log]	117
8.2.8 サンプリング履歴 [history_sampling.log]	118
8.2.9 性能情報	119
8.2.10 その他のファイル	120
8.2.11 ボクセルファイル	121
8.2.12 結果ファイル	122
8.2.13 メモリ使用量の情報	123
8.3 並列計算	124
8.3.1 MPI 並列	124
8.3.2 スレッド並列	125
8.3.3 Multiply-Connected Partitioning	126
8.4 各プラットホームにおける実行	127
8.4.1 RICC	127
第 9 章 アップデート情報	129
参考文献	132
索引	133

第 1 章

CBC ソルバークラスの概要

本ユーザーガイドでは、物理シミュレータ開発のアプリケーションミドルウェア V-Sphere を用いて開発した三次元非定常非圧縮熱流体解析ソルバー CBC について、その利用方法を説明します。

1.1 V-Sphere とソルバークラス

V-Sphere は、非定常物理シミュレーションのアプリケーションフレームワークとして設計されています。このフレームワークは、図 1.1 に示す様々なライブラリ機能と図 1.2 に示す非定常物理現象のシミュレータに共通する制御構造をソルバー開発者に提供します。例えば、ファイル入出力、ソルバー制御・物理・境界条件パラメータの読み込みと保持、ボクセルデータの前処理、境界条件の制御、並列処理などの機能があり、プログラムに対するユーザーインターフェイスを規定する役割を果たします。

フレームワークでは、時間的に変化する物理現象の解析プログラムはどれも同様な制御により記述できる点に着目し、処理の大まかな流れ（前処理、本計算、後処理の 3 つのステージ）を規定しています。開発者は独自のコードを各ステージのひな形に記述していくことでプログラムを作成します。V-Sphere は、ソルバ開発者にとって本質的でないプログラミングを減らし、開発の効率化を促進することを意図しています。

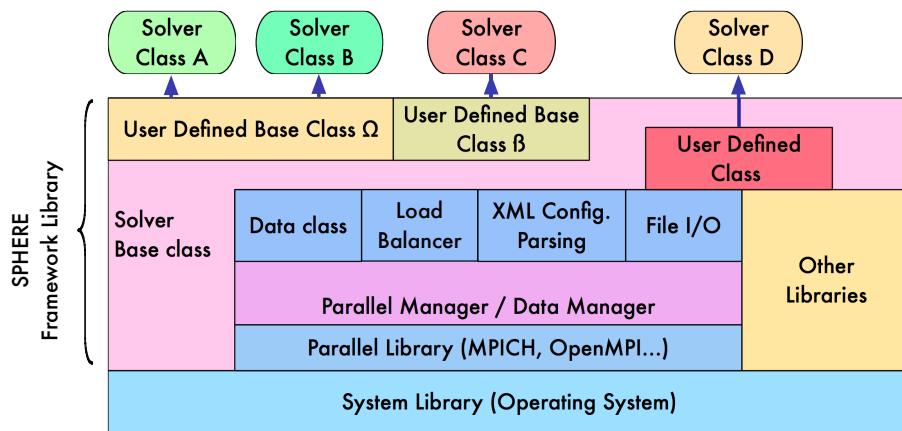


図 1.1 V-Sphere framework のブロック図。V-Sphere は様々な機能、たとえば並列ライブラリ、ファイル入出力、XML 記述によるパラメータハンドリングなどを内包しています。

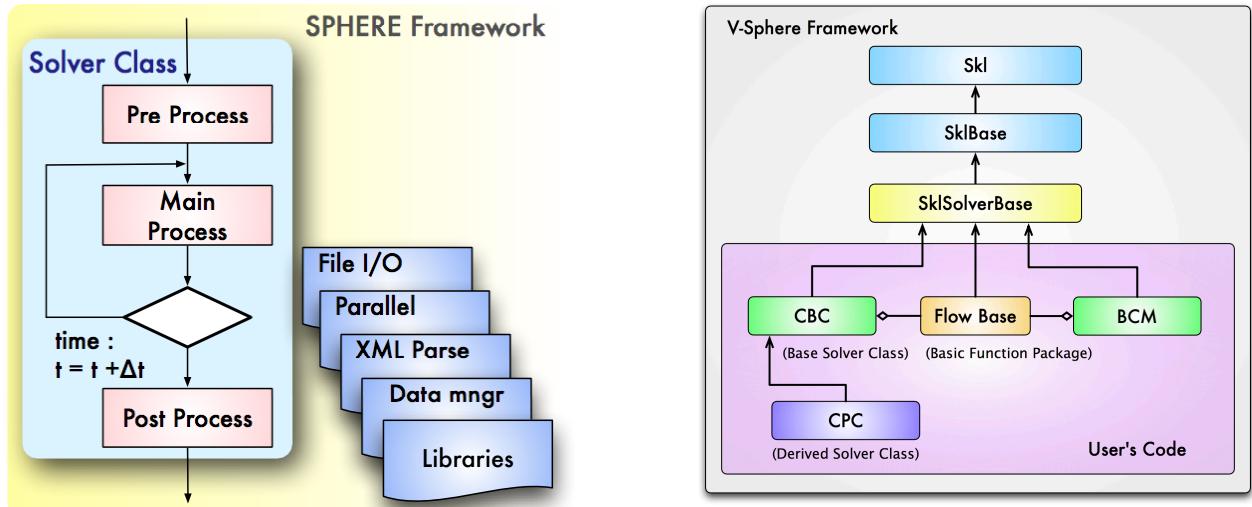


図 1.2 V-Sphere の制御構造。プリ、メイン、ポストの処理プロセスが組み込まれており、提供されるライブラリ機能を用いてソルバークラスを構築します。

図 1.3 差分プログラミングによるソルバークラスの開発。SklSolverBase クラスから派生した FlowBase クラスに共通機能をまとめ、この FB クラスを用いて目的の CBC ソルバークラスを作成します。

V-Sphere の機能を用いて作成したアプリケーションはソルバークラスとして V-Sphere 自身に登録することができ、登録されたソルバークラス群は共通のユーザインターフェイスを備えたアプリケーションとして振る舞います。図 1.3 に示すように Skl クラス、SklBase クラス、および SklSolverBase クラスを提供します。ここでは、SklSolverBase クラスから流体解析に広く用いられる基本機能を抽出した FlowBase クラスを作成しています。ソルバークラスとしては、CBC クラスが派生し、さらに CBC クラスを継承して CPC ソルバクラスが派生しています。また、別の系統として BCM ソルバークラスが作成されています。これらのソルバークラスは、例えば、シミュレートする物理現象や形状近似度、変数配置などが異なるソルバーですが、FlowBase クラスにより統一的な振る舞いをします。つまり、異なるソルバーであっても、ユーザインターフェイスが統一されたアプリケーションとして構築することができます。

1.2 CBC ソルバークラス

CBC (Cartesian based, Binary shape representation, Collocated) ソルバークラスは、V-Sphere コンポーネント群とクラスライブラリを利用して実装した非定常非圧縮性流体のソルバークラスです。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。

CBC 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 Voxel)
変数配置	: コロケート
離散化	: 有限体積法
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	: Jacobi 緩和法, Point SOR, 2-colored SOR-SMA (ストライドメモリアクセス版)
スタート機能	: Initial(Impulsive, Smooth), 指定時刻からの再スタート
入力ファイル	: モデルファイル (svx, sbx フォーマット), XML ファイル (計算条件など)
出力ファイル	: sph フォーマット, 履歴ファイル, モニター出力
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, 辐射, 熱流束, 等温
並列ライブラリ	: mpich, mpich2, OpenMPI
並列化	: 等分割, 多重連結領域分割
組み込み例題機能	: キャビティフロー問題など, 基本的な問題

第 2 章

インストール

この章では，MPI 通信ライブラリ，V-Sphere，CBC ソルバークラスのインストールとコンパイルについて説明します。MPI 通信ライブラリ，V-Sphere の詳細なインストールについては，V-Sphere ユーザガイド (Vsphere_UG.pdf) を，CBC ソルバークラスの詳細については CBC ソルバークラス説明書 (Inside_CBC.pdf) を参照してください。

2.1 MPI ライブラリのインストール

OpenMPI^{*1}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
```

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 /usr/local/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 /usr/local/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 mpiexec^{*2}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^{*3}。

```
$ which mpiexec
```

5. 環境変数の設定

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

```
export LD_LIBRARY_PATH=/usr/local/openmpi/lib:$LD_LIBRARY_PATH  
export DYLD_LIBRARY_PATH=/usr/local/openmpi/lib:$DYLD_LIBRARY_PATH
```

^{*1} <http://www.open-mpi.org/>

^{*2} mpirun でも動きます。

^{*3} Mac OSX の場合には上記のように、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。

2.2 V-Sphere のインストール

V-Sphere のインストールは、MPI 通信ライブラリのインストールの後に行います。

2.2.1 autotools 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/sphere/`に指定しています。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。また、`LDFLAGS` には、コンパイラへの適切なパスを指定します。

```
$ cat configure.sh
$ ./configure --prefix=$1 \
    --with-comp=INTEL \
    --with-ompi=/usr/local/openmpi \
    CC=icc \
    CFLAGS=-O3 \
    CXX=icpc \
    CXXFLAGS=-O3 \
    FC=ifort \
    FCFLAGS=-O3 \
    F90=ifort \
    F90FLAGS=-O3 \
    LDFLAGS=-L/opt/intel/Compiler/11.1/089/lib/intel64
```

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。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 V-Sphere ディレクトリで実行し、環境を合わせます。

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

`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。

```
$ configure.sh /usr/local/sphere
```

2.2.2 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
```

2.2.3 アンインストール

V-Sphere をアンインストールする場合には、インストールしたディレクトリ（configure でオプション指定したディレクトリ：ここでは /usr/local/sphere）の sphere を削除します。

2.2.4 倍精度計算モジュール

単精度計算と倍精度計算では、それぞれ専用の V-Sphere ライブラリが必要になり、単精度計算と倍精度計算で異なる精度のモジュールを別々に用意します。倍精度計算モジュールを生成する場合には、configure 時に --with-real=double オプションを追加してください。このオプションは、コンパイルオプションに下記のように -DREAL_IS_DOUBLE を追加します。

```
CFLAGS      : -O3 -DREAL_IS_DOUBLE
CXXFLAGS   : -O3 -DREAL_IS_DOUBLE
```

両方必要になる場合には、両方の V-Sphere ライブラリを用意しておき、CBC ソルバークラスのコンパイル時にリンク先を変更して、コンパイルします。

2.3 CBC ソルバークラス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 CBC_x.x.x.tar.gz は、ソルバークラスのソースコードです⁴。

2.3.1 アーカイブの解凍

```
$ tar xvfz CBC_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⁵。

CBC_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
+- doc	ドキュメント
+- cbc_ug.pdf	CBC ソルバークラスのユーザガイド
+- vsphere_ug.pdf	V-Sphere のユーザガイド
+- cbc_examples.pdf	検証の例題集
+- doxygen	Doxygen ドキュメントディレクトリ
+- CBC	CBC 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
+- 3Dcavity	三次元のキャビティフロー（立方体領域）
+- LDC112	辺長 1 : 1 : 2 のキャビティフロー

⁴ CBC_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。

⁵ 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。

- +- dragon	ドラゴン形状周りの流れ
- +- Duct3D	管路内流れ
+- inner	ドライバ周期境界指定
+- outer	外部周期境界指定
- +- PMT	性能測定用パラメータ群
- +- SHC1D	定常 1 次元熱伝導
+- src	ソースコード
+ F_CBC	CBC クラスの Fortran ファイル
+- F_CPC	CPC クラスの Fortran ファイル
+- F_VOF	VOF クラスの Fortran ファイル
+- FB	FlowBase クラス (ユーザー定義クラス群)
+- IP	組み込み例題クラス群
+- PRJ_CBC	CBC プロジェクト
+- app	アプリケーションコンパイルディレクトリ
...	他ソースファイル
Makefile	
+- bin	バイナリモジュール格納ディレクトリ
+- CBC	CBC ソルバークラスのソースファイル
+- CBC.xml	CBC クラスのコンパイル環境設定
...	他ソースファイル
Makefile	
+- FB	非ソルバークラスディレクトリ FlowBase
+- FB.xml	FB クラスのコンパイル環境設定
Makefile	
+- IP	非ソルバークラスディレクトリ 組み込み例題クラス群
+- IP.xml	IP クラスのコンパイル環境設定
Makefile	
+- Makefile	アプリケーションコンパイル用 Linux/Mac
PRJ_CBC.xml	CBC のコンパイル設定
+- xsd	
CBC_xxx_FB_xxx.xsd	V-Xpit を用いたパラメータ入力の構造定義ファイル

2.3.2 sphPrjTool を用いた簡単なインストールとコンパイル

既に、並列ライブラリと V-Sphere が正しくインストールされていることを確認します。

まず、sphPrjTool を利用するため、環境変数 SPHEREDIR を設定します。下記で INSTALL_DIR は V-Sphere のインストールディレクトリを指定します。次に、src/PRJ_CBC ディレクトリで引数にファイル名を渡して sphPrjTool を起動し、プロジェクトのコンパイル設定を利用環境に合わせて再構築します。localsettings オプションを指定して reset コマンドを実行すると、sphere ライブラリの config/sph-cfg.xml に記録されているコンパイル環境情報を元にして、プロジェクト環境情報 PRJ_CBC.xml を再設定します。

```
$ export SPHEREDIR=INSTALL_DIR
$ cd src/PRJ_CBC
$ sphPrjTool PRJ_CBC.xml
sphPrjTool> reset localsettings
sphPrjTool> print
sphPrjTool> save
sphPrjTool> quit
```

上記の設定の後、コンパイルを行う。

```
$ make
```

2.3.3 アンインストール

アンインストールは、SolverClass のディレクトリごと削除します。

2.3.4 並列計算モジュールのコンパイル

V-Sphere は逐次計算のモジュールと並列計算のモジュールは異なるので、コンパイル時にオプションで切り替えます。並列計算をする場合は、PRJ_CBC.xml 内に下記の記述を追加するか、sphPrjTool を用いて設定を変更します。デフォルトでは逐次実行モジュールになっています。

```
$ sphPrjTool PRJ_CBC.xml
sphPrjTool> module parallel
sphPrjTool> print
sphPrjTool> save
sphPrjTool> quit
```

2.3.5 Windows でのコンパイルと実行

プロジェクトの作成

プロジェクトツール^{*6}を用い Windows 用のプロジェクトを作成します。プロジェクトツールの使用については、V-Sphere_ug.pdf を参照してください。プロジェクトツールによって以下の Makefile が生成されます。提供ファイルの libxml2, zlib, iconv のインストールパスは “C:¥Program Files¥ext_libs¥” 配下になっているので注意してください。

```
PRJ_CBC
  Makefile.win
  project_local_settings
  CBC
    Makefile.win
  FB
    Makefile.win
  IP
    Makefile.win
```

コンパイル

作成した Makefile.win を用いて make を行います。コマンドプロンプトから行うが、Visual Studio の nmake.exe を使用するので「Visual Studio 2008 コマンド プロンプト」を起動して行います。「Visual Studio 2008 コマンド プロンプト」は「Visual Studio 2008」、「Visual Studio Tools」メニューの配下にあります。

以下、nmake によるコンパイルコマンドです。

```
nmake -f Makefile.win
```

CBC の実行

ソルバの実行は必ずローカルディスクにて実行します。ネットワークパス（ネットワークドライブ）で行うとエラーとなります^{*7}。

以下の設定を行います。

1. MPICH2 の bin フォルダへのパスの追加
並列実行ではエラーとなりませんが、逐次実行にてエラーとなります。
2. Windows ファイアウォール設定 sphere.exe を例外へ追加します。コントロールパネル-Windows セキュリティセンター - Windows ファイアウォール-例外に実行を行う sphere.exe を登録します。

^{*6} C:¥Program Files¥sphere¥bin¥sphPrjTool.exe

^{*7} 現時点 2012 年 1 月 11 日では原因不明です。

逐次実行方法 次のように実行します。

```
$ set PATH=%PATH%;C:\Program Files\MPICH2\bin
$ pwd
D:\work\CBC-1.3.0\example\3Dcavity
$ ..\..\src\PRJ_CBC\bin\sphere.exe cavity.xml
```

並列実行方法：ローカルホストにて実行 複数のホストマシンにて実行する方法は、V-Sphere ユーザマニュアル「V-SphereUG.pdf」 - 11. Windows 対応（使用者向け）又は MPICH2 のマニュアルを参照してください。

```
$ pwd
D:\work\CBC-1.3.0\example\3Dcavity
$ "C:\Program Files\MPICH2\bin\mpiexec.exe" -np 4 ..\..\src\PRJ_CBC\bin\sphere.exe cavity.xml
```

2.3.6 OpenMPI バイナリパッケージを用いたコンパイルと実行

OpenMPI 1.5.3 より Windows バイナリーパッケージ^{*8}が提供されています。OpenMPI を以下のフォルダにインストールしたと仮定して説明します。

```
C:\Program Files\OpenMPI
```

V-Sphere のコンパイル Config.win を変更します（<< で示す MPICH_DIR, MPICH_LIBS, MPICH_CFLAGS）。

```
# SPHERE - Skeleton for PHysical and Engineering REsearch
#
# Copyright (c) RIKEN, Japan. All right reserved. 2004-2011
#
#
# folder settings
SPHEREDIR=C:\Program Files\sphere
INTELCXX_DIR=C:\Program Files\Intel\Compiler\C++\10.1.021\IA32
INTELFC_DIR=C:\Program Files\Intel\Compiler\Fortran\10.1.021\IA32
MSSDKS_DIR=C:\Program Files\Microsoft SDKs\Windows\v6.0A
MSVS_DIR=C:\Program Files\Microsoft Visual Studio 9.0
MPICH_DIR=C:\Program Files\OpenMPI <<

EXTLIBS_PATH=C:\Program Files\ext_libs
LIBXML2_DIR=$(EXTLIBS_PATH)\libxml2
ZLIB_DIR=$(EXTLIBS_PATH)\zlib
ICONV_DIR=$(EXTLIBS_PATH)\iconv

# flags ssettings
CFLAGS=/O3 /Qprec-div- /c /TP /MT /DWIN32 /DSKL_TIME_MEASURED /D_CATCH_BAD_ALLOC
#CXXFLAGS=/fast /c /TP /MD /DWIN32 /D_WIN32
#CXXFLAGS=/O3 /c /TP /MD /DWIN32 /D_WIN32
#CXXFLAGS=/O3 /Qipo /c /TP /MD /DWIN32 /D_WIN32
#CXXFLAGS=/O3 /Qprec-div- /c /TP /MD /DWIN32 /D_WIN32
CXXFLAGS=/O3 /Qprec-div- /c /TP /MT /DWIN32 /D_WIN32 /DSKL_TIME_MEASURED/D_CATCH_BAD_ALLOC
FCFLAGS=/O3 /Qprec-div- /c /TP /MT /DWIN32 /D_WIN32 /DSKL_TIME_MEASURED
F90FLAGS=/O3 /Qprec-div- /c /TP /MT /DWIN32 /D_WIN32 /DSKL_TIME_MEASURED

# libs settings
MPICH_LIBS= libmpi.lib <<
#XML2LIBS=libxml2.lib zlib.lib libm.lib ws2_32.lib
XML2LIBS=libxml2.lib zdll.lib libmmmt.lib ws2_32.lib
```

^{*8} OpenMPI_v1.5.3-2_win32.exe

```

# include libpath settings
INCLUDES = \
    /I"$(TOP_BUILDDIR)\include" \
    /I"$(LIBXML2_DIR)\include" \
    /I"$(ZLIB_DIR)\include" \
    /I"$(ICONV_DIR)\include"

LDFLAGS = \
    /LIBPATH:"$(INTELCXX_DIR)\lib" \
    /LIBPATH:"$(LIBXML2_DIR)\lib" \
    /LIBPATH:"$(ZLIB_DIR)\lib" \
    /LIBPATH:"$(ICONV_DIR)\lib"

MPICH_CFLAGS=/I"$(MPICH_DIR)\include" /DOMPI_IMPORTS <<
MPICH_LDFLAGS=/LIBPATH:"$(MPICH_DIR)\lib"

# exec settings
CC="$(INTELCXX_DIR)\bin\icl.exe"
CXX="$(INTELCXX_DIR)\bin\icl.exe"
FC="$(INTELFC_DIR)\bin\ifort.exe"
F90="$(INTELFC_DIR)\bin\ifort.exe"
AR="$(INTELCXX_DIR)\bin\xilib.exe"
LINK="$(INTELCXX_DIR)\bin\xilink.exe"
MANF_TOOL=mt.exe
CP=copy
RM=del /F /Q

# environments
PATH=$(MSVS_DIR)\Common7\IDE;$(MSVS_DIR)\VC\bin;$(MSSDKS_DIR)\bin;$(PATH);
INCLUDE=$(MSVS_DIR)\VC\INCLUDE;$(MSSDKS_DIR)\include;$(INCLUDE)
LIB=$(MSVS_DIR)\VC\LIB;$(MSSDKS_DIR)\lib;$(LIB)
LIBPATH=$(MSVS_DIR)\VC\LIB;$(LIBPATH)

```

1. OpenMPI のインストールパスの変更
2. libmpi.lib の変更
3. OMPI_IMPORTS マクロの追加

V-Sphere をコンパイルし、作成したライブラリとインクルードファイルを C:\program files\sphere_ompi に配置します。

```
$ nmake /f Makefile.win
```

ソルバ CBC のコンパイル project_local_settings を変更します。
SPHEREDIR, MPICH_DIR, MPICH_CFLAGS, MPICH_LDFLAGS, MPICH_LIBS, SPHERE_CFLAGS, SPHERE_LDFLAGS

```

#
# SPHERE - Skeleton for PHysical and Engineering REsearch
#
# Copyright (c) RIKEN, Japan. All right reserved. 2004-2010
#
#
CC=gcc
CFLAGS=-g -O2
CXX="C:\Program Files\Intel\Compiler\C++\10.1.021\IA32\Bin\icl.exe"
CXXFLAGS=/O3 /Qipo /Qprec-div-
FC=f95
FCFLAGS=-g -O2
F90="C:\Program Files\Intel\Compiler\Fortran\10.1.021\IA32\Bin\ifort.exe"
F90FLAGS=/O3 /Qipo /Qprec-div-
LDFLAGS=/LIBPATH:"C:\Program Files\Intel\Compiler\Fortran\10.1.021\IA32\Lib"
LIBS=ws2_32.lib libifport.lib libmmt.lib libifcoremt.lib
SPH_USR_DEF_LIBS=

```

```

UDEF_OPT=-DNON_POLYLIB -DNON_CUTLIB
UDEF_INC_PATH=
UDEF_LIB_PATH=
UDEF_LIB_UPPER=
UDEF_LIB_LOWER=
SPHEREDIR=C:\Program Files\sphere_ompi <<
SPH_DEVICE=IA32_WIN
MPICH_DIR=C:\Program Files\OpenMPI <<
MPICH_CFLAGS=/I"C:\Program Files\OpenMPI\include" <<
MPICH_LDFLAGS=/LIBPATH:"C:\Program Files\OpenMPI\lib" <<
MPICH_LIBS=libmpi.lib <<
XML2FLAGS=/I"C:\Program Files\ext_libs\libxml2\include" /I"C:\Program Files\ext_libs\iconv\include"
XML2LIBS=libxml2.lib zdll.lib
SPHERE_CFLAGS=/DSKL_TIME_MEASURED /D_CATCH_BAD_ALLOC /I"C:\Program Files\sphere_ompi\include" <<
SPHERE_LDFLAGS=/LIBPATH:"C:\Program Files\sphere_ompi\lib" <<
SPHERE_LIBS=libsphapp.lib libsphbase.lib libsphfio.lib libsphdc.lib libsphcrd.lib libsphcfg.lib
          libsphfft.lib libsphvcar.lib
REALOPT=
CXXFLAGS_DEF=/c /TP /MT /DWIN32 /D_WIN32
F90FLAGS_DEF=/c /MT
SPHERE_DEFINE=/DSKL_TIME_MEASURED /D_CATCH_BAD_ALLOC
ZLIB_DIR=C:\Program Files\ext_libs\zlib
ZLIB_LDFLAGS=/LIBPATH:"C:\Program Files\ext_libs\zlib\lib"
INTELCXX_DIR=
INTELF90_DIR=
LIBXML2_DIR=C:\Program Files\ext_libs\libxml2
MSSDKS_DIR=C:\Program Files\Microsoft SDKs\Windows\v6.0A
MSVS_DIR=C:\Program Files\Microsoft Visual Studio 9.0
INTELCXXBIN_DIR=C:\Program Files\Intel\Compiler\C++\10.1.021\IA32\Bin
INTELF90BIN_DIR=C:\Program Files\Intel\Compiler\Fortran\10.1.021\IA32\Bin
INTELCXXLIB_DIR=C:\Program Files\Intel\Compiler\C++\10.1.021\IA32\lib
INTELF90LIB_DIR=C:\Program Files\Intel\Compiler\Fortran\10.1.021\IA32\Lib
ICONV_DIR=C:\Program Files\ext_libs\iconv
XML2LDFLAGS=/LIBPATH:"C:\Program Files\ext_libs\libxml2\lib"
          /LIBPATH:"C:\Program Files\ext_libs\iconv\lib"
SPH_EXTERNAL_HEADER_PATH=/I..\..\Cutlib_2_0_0\include /I..\..\FB /I..\..\F_CBC /I..\..\IP
          /I..\..\Polylib_2_0_2\include
SPH PARA_MODULE=MPI

```

1. OpenMPI 用の V-Sphere のパスの変更
2. OpenMPI のインストールパスの変更
3. libmpi.lib の変更

ソルバ CBC をコンパイルします .

```

$ pwd
D:\work\CBC-1.3.0\src\PRJ_CBC
$ nmake -f Makefile.win

```

ソルバ CBC の実行 sphere.exe を実行する前に OpenMPI へのパスを追加します .

```

$ set PATH=%PATH%;C:\Program Files\OpenMPI\bin

```

ローカルホストにて , mpirun.exe により並列実行を行います*9 .

```

$ pwd
D:\work\CBC-1.3.0\example\3Dcavity
$ "C:\Program Files\OpenMPI\bin\mpirun.exe" -np 4 ..\..\src\PRJ_CBC\bin\sphere.exe cavity.xml

```

*9 逐次実行はエラーとなっています .

第3章

基礎方程式と解析方法

本章では、CBC ソルバークラス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 CBC ソルバークラス説明書 (Inside_CBC.pdf) を参照してください。

3.1 支配方程式

CBC ソルバークラスは、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。 δ はクロネッカーデルタで重力方向 ($i=3$) 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。

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

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

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

ρ'	[kg / m ³]	density
P'	[Pa]	pressure
C_p	[J / (kg K)]	specific heat at constant pressure
θ'	[K]	temperature
λ	[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
μ	[Pa s]	viscosity
g	[m / s ²]	gravitational acceleration
Φ	[1/s ²]	dissipation function
Q'	[W / m ³]	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 Φ 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。

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

ここで α は温度拡散係数で [m^2/s] の単位です。

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

温度拡散係数 α が一定の場合には下記のようになります。

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

3.2 無次元化

代表速度 u'_0 、代表長さ L' 、代表温度スケール $\Delta\theta'$ と基準温度 θ'_0 で式(3.1)、(3.2)、(3.6)を無次元化します。

$$\left. \begin{array}{l} u = \frac{u'}{u'_0} \\ x = \frac{x'}{L'} \\ p = \frac{p' - p_0'}{\rho' u_0'^2} \\ \theta = \frac{\theta' - \theta_0'}{\Delta\theta'} \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

3.2.1 無次元化された支配方程式

以下の式(3.8)–(3.10)は、单一成分の熱流動を表します。

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

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

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

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

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
Θ	-	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

CBC 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リスから推測され [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。無次元化のスケーリングは， L' , $\Delta\theta'$, α , 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,

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

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, 壓力の 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,

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

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

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、2種類の方法があります。まず最初に STL や OBJ などのフォーマットの形状データを基に、ボクセル作成アプリケーション V-Xgen で行う解析モデルの作成法について説明します。次に、組み込み例題を用いたモデルの扱い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]。

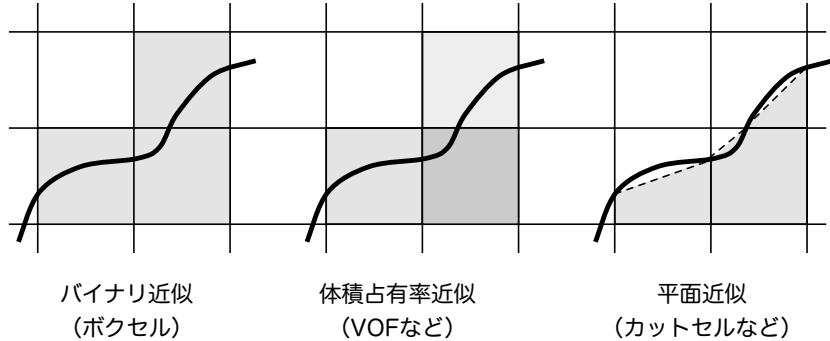


図4.1 直交格子における形状近似度の分類

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。

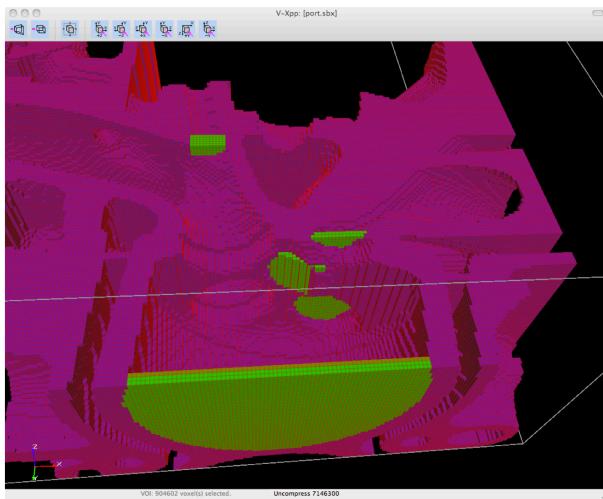


図4.2 バイナリボクセルによる機械部品の形状表現とセル ID 設定

Cell ID list			
ID	Type	Setting	Label
0	None	None	default
1	None	None	
4	None	None	
5	None	None	
6	None	None	

図4.3 V-Xgen でのセル ID 設定リスト

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。陽的な面の情報をもたないので、界面は拡散的に表現される傾向です。補助的に面における開口率を用いる場合には、有限体積法との親和性が高く保存性が改善されます。

4.1.3 カットモデル

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、形状を区分的にカットされた平面として近似するモデルを用います。CPC ソルバー^{*1}では、物理量の定義点から物体までの距離情報を用いることにより、ロバスト性と精度向上の両立を図っています。通常のボクセルについてはバイナリボクセルと同様です。

4.2 セル ID による境界条件の指定

CBC/CPC ソルバーでは、ボクセルの各セルに ID を与え、このセル ID とパラメータファイルに記述された境界条件情報から、境界条件を設定するしくみになっています。例えば、ボクセルモデルのセル ID と XML 記述のパラメータファイル中では、次のように媒質 ID と結びつけられます。

```
<Elem name="Model_Setting">
  <Param name="fluid" id="1"  dtype="INT" value="100" comment="air"/>
  <Param name="solid" id="600" dtype="INT" value="600" comment="wall"/>
  <Param name="solid" id="610" dtype="INT" value="600" comment="piston_head"/>
</Elem>
```

ここでは、流体であるセル ID=1 は媒質 ID=100 によりその物性値が定義され、air のコメントがつけられています。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>
  <Elem name="Fluid" id="100" comment="Air">
    <Param name="density"          dtype="REAL" value="1.1763" />
    <Param name="specific_heat"   dtype="REAL" value="1007" />
    <Param name="thermal_conductivity" dtype="REAL" value="2.614e-02" />
    <Param name="kinematic_viscosity" dtype="REAL" value="15.83e-06" />
    <Param name="viscosity"       dtype="REAL" value="18.62e-06" />
    <Param name="sound_of_speed"  dtype="REAL" value="340.0" />
  </Elem>
  <Elem name="Solid" id="600" comment="Fe">
    <Param name="density"          dtype="REAL" value="7870.0" />
    <Param name="specific_heat"   dtype="REAL" value="442.0" />
    <Param name="thermal_conductivity" dtype="REAL" value="80.3" />
  </Elem>
</Medium_Table>
```

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。

^{*1} 2012 年 1 月 11 日未実装。

4.3 形状データからの解析モデルの作成手順

V-Xgen を用いた解析モデル作成の手順を簡単に示します。操作の詳細は、V-Xgen ユーザーガイド、およびチュートリアルを参照してください。

1. V-Xgen の起動

アイコンのダブルクリック、または下記のようにコマンドラインからアプリケーションを起動します。

```
$ Vxgen.sh または Vxgen
```

2. ファイルの読み込み

入力となる幾何形状 STL ファイルを読み込みます。File > Import > Shape (obj/stl) data files... のコマンドを実行し、ファイルリストから幾何形状ファイルを選択しロードすると、図 4.4 のように形状モデルが描画されます。

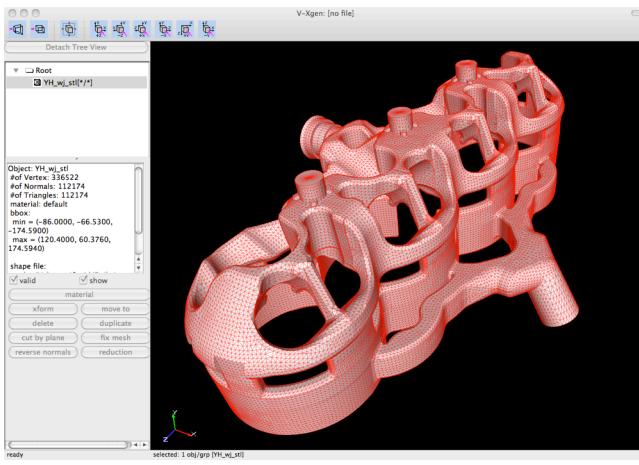


図 4.4 V-Xgen でのファイル読み込み

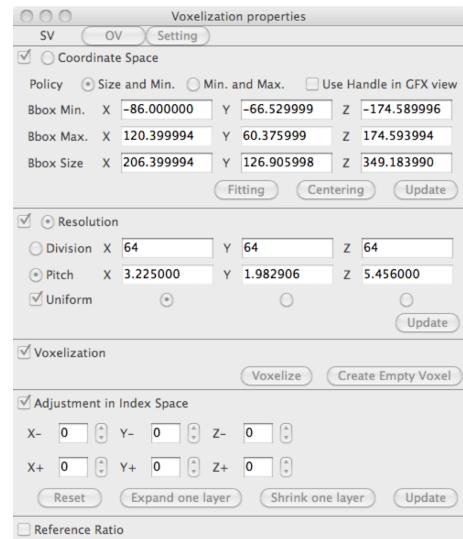


図 4.5 ボクセル作成のパラメータ設定ダイアログ

3. バイナリボクセルの作成

Voxelization > Simple Voxel(SV) ... を実行すると、図 4.5 のような直交等間隔ボクセルを作成するダイアログが表示されます。パラメータを適切に設定して、ボクセルを作成すると、図 4.6 のようなボクセルのバウンディングボックスが表示されます。ここで作成するボクセルモデルの範囲は、図 4.8 に示す計算領域の部分です。計算に必要な計算領域の外部に位置する仮想セル領域の媒質は XML パラメータファイルの OuterBoundary→Face_BC 中の Cell_ID タグで指定します。

4. セル ID の設定

V-Xgen で作成したボクセルモデルファイルを、アプリケーション V-Xpp を用いてセル ID を編集します^{*2}。V-Xpp を起動し、File > Open... を実行してボクセルモデルファイル (*.svx, *.sbx, *.ovx) を選択しロードすると、図 4.7 のようにボクセライズされた形状データが表示されます。

^{*2} 次のバージョンでは、V-Xpp の機能を V-Xgen に統合予定です。

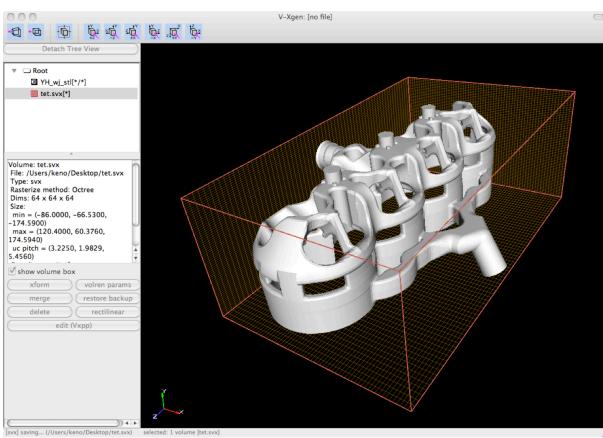


図 4.6 V-Xgen でのボクセル生成

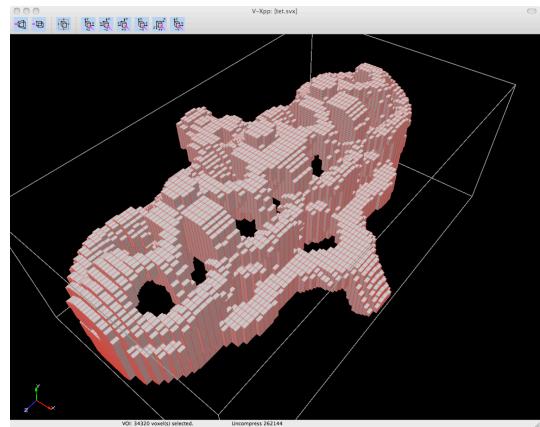


図 4.7 ボクセルモデル . V-Xpp の VOI コマンドによる選択状態の表示

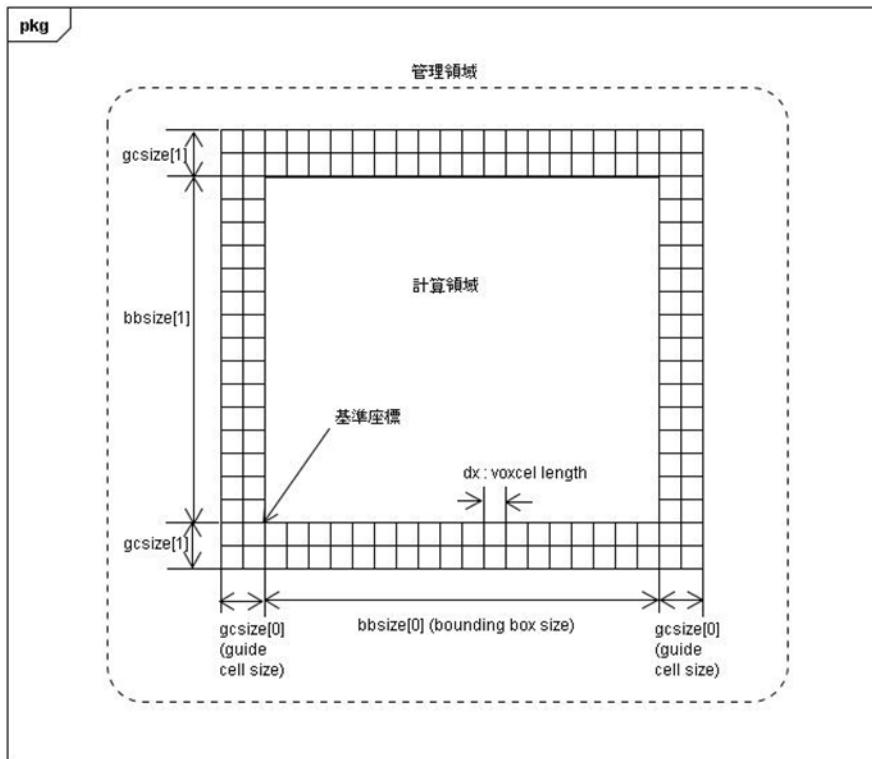


図 4.8 計算領域とガイドセル領域の定義

次に, Volume > Medium List... を選択し, 図 4.9 に示すセル ID リストを編集します。ボクセルモデルを VOI > Select VOI... や VOI > Slice Control... によりボクセルを選択, VOI > Set Cell ID... コマンド(図 4.10)によりセル ID を選択対象セルに設定します。セル ID を編集したボクセルモデルは図 4.11 のようになるのでファイルに保存します。ここで, 約束事として, セル ID=0 は予約番号でユーザは設定しないことに注意してください。

また, 利用できる ID の設定数に関しては, InnerBoundary で説明していますが, 指定できる内部境界条件の数は 30 個が上限で, かつ指定境界条件数と媒質数の和は 63 個以下となる点に注意してください。

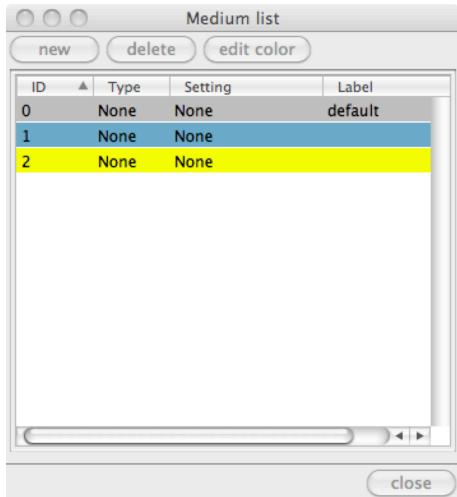


図 4.9 セル ID 編集ダイアログ

ID	Type	Setting	Label
0	None	None	default
1	None	None	
2	None	None	

図 4.10 セル ID 設定ダイアログ

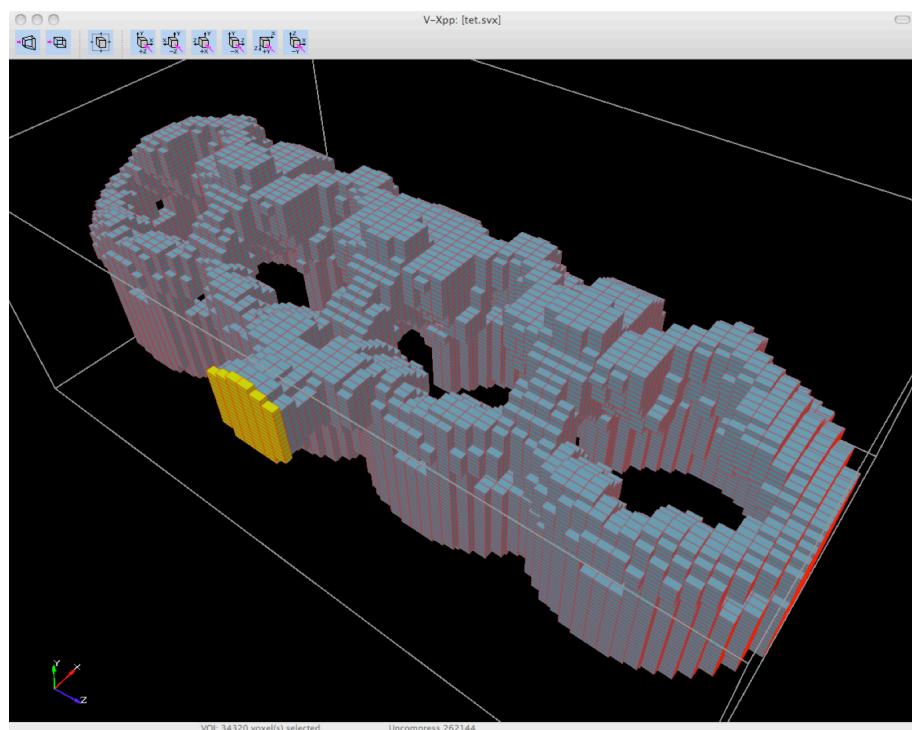


図 4.11 V-Xpp でセル ID を編集したボクセルモデル

4.4 組み込みモデル

組み込みモデルは、CBC 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 組み込みモデルクラス

組み込みモデル名	利用クラス	説明
Users	IP_Users	ユーザ問題(解析モデルファイルを指定する場合)
Back_Step	IP_STEP	バックステップ流れのモデル
Cylinder	IP_CYLINDER	角柱と円柱周りの流れのモデル
Duct	IP_Duct	円形と正方形のダクト流れのモデル
Parallel_Plate_2D	IP_PPLT2D	二次元平行平板のモデル(Poiseuille 流れ, Couette 流れなど)
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)
Polygon	IP_Polygon	距離情報スキームを用いる場合に、入力するポリゴンファイル名と DomainInfo の指定だけで計算するモード
Rectangular	IP_Rect	計算領域が矩形で、かつ単一媒質の例題のモデル
SHC1D	IP_SHC1D	一次元の熱伝導問題のモデル

4.4.1 IP_STEP クラス

バックステップ流れを計算するクラスです。図 4.12 と表 4.2 および表 4.3 に示すパラメータで計算空間を構成します。計算領域は、Domain_Info で指定する VoxelSize, VoxelPitch, VoxelOrigin で決まります。

ドライバー部分については、Duct クラスの設定を参照してください。

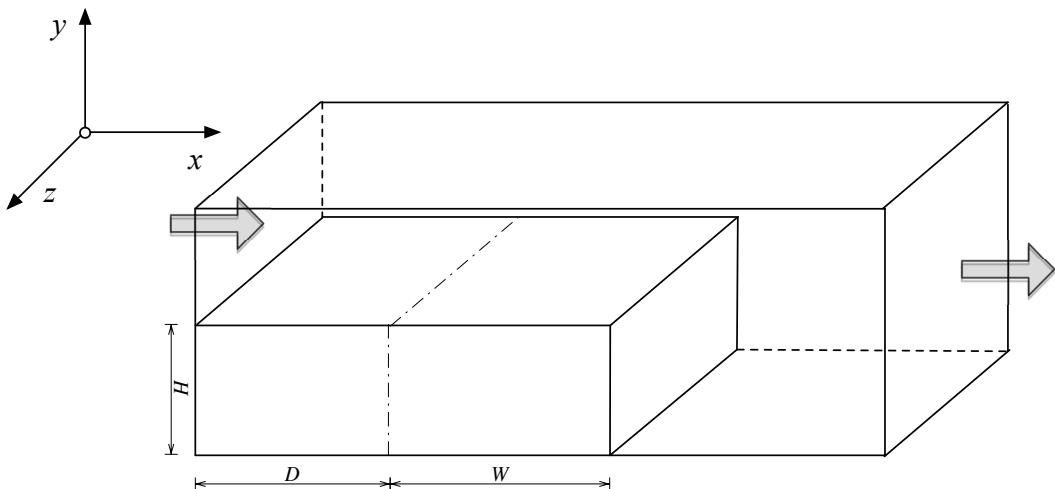


図 4.12 バックステップ流れの計算モデル。

表 4.2 バックステップ問題のパラメータ。

記号	パラメータ
Mode	2D 3D
Width (W)	ステップの x 方向の幅
Height (H)	ステップの y 方向の高さ
Driver (D)	ドライバー部分の長さ(> 0.0 でドライバあり, =0.0 の場合ドライバーなし)

境界条件として、X-方向に流入、またはドライバ境界、X+ 方向は流出条件、Y-方向は壁面、Y+ 方向は壁面またはスリップ条件、Z± 方向は壁面か周期境界を与えて計算します。二次元の問題を解く場合には、Mode=2D を指定、VoxelSize は kmax=3 として、Z 方向は周期境界条件を与えてください。

表 4.3 パックステップ問題の ID 番号 .

ID	属性
1	流体
2	固体
3	ドライバ部分の流体
4	ドライバ流出面(流体)

4.4.2 IP_CYLINDER クラス

二次元と三次元の円柱・角柱まわりの流れを計算するクラスです。図 4.13 と表 4.4 に示すパラメータで計算空間を構成します。断面形状は、円柱と角柱を Shape で指定します。それぞれの断面形状で指定するパラメータが異なります。柱は xy 平面の z - 方向に接しています。これを基準に長さのパラメータを指定してください。

二次元の問題を解く場合には、Mode=2D を指定、VoxelSize は kmax=3 としてください。この場合、パラメータ W は無視されます。

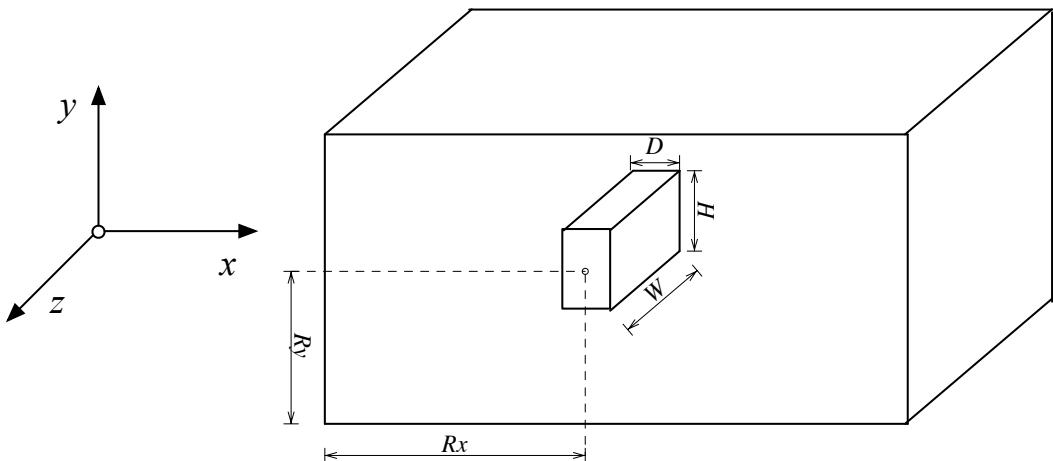


図 4.13 円柱・角柱モデルの計算空間 .

表 4.4 柱状物体の指定パラメータ

記号	パラメータ
Mode	2D 3D
Shape	Rectangular Circular
D	角柱を指定時の角柱の幅
H	角柱を指定時の角柱の高さ
R	円柱を指定時の半径
W	柱の z 軸方向の長さ
R_x	柱の中心位置と x 方向領域境界からの距離
R_y	柱の中心位置と y 方向領域境界からの距離

4.4.3 IP_Duct クラス

図 4.14 のような円形と矩形のダクト流れを計算するモデルで、周期境界条件を用います。流入面には、流れを発達させる機能をもつドライバー部分を指定することができます。

断面形状は、正方形または円形を Shape で指定し、流入部の方向を Direction で指定します。ドライバー部は、Direction で指定した方向にドライバ部分が配置されます。ドライバー部分を指定する場合には、Driver にその長さ D を指定してください。D = 0.0 の場合には、ドライバー無しの指定になります。

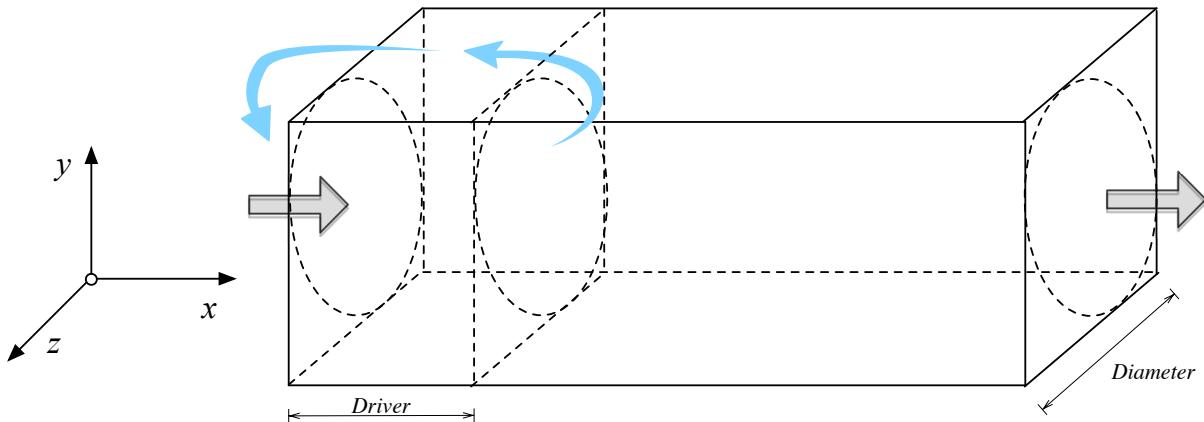


図 4.14 ダクトの計算空間。X- 方向にドライバ部を設置した場合。

表 4.5 ダクトの指定パラメータ

記号	パラメータ
Shape	Rectangular Circular
Diameter	正方形または円の直径
Direction	周期境界と流入の方向 (X_minus, X_plus, Y_minus, Y_plus, Z_minus, Z_plus)
Driver	ドライバー部分の長さ (> 0.0 でドライバあり, =0.0 の場合ドライバーなし)

4.4.4 IP_PMT クラス

CBC ソルバークラス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。

4.4.5 IP_PPLT2D クラス

二次元の平行平板間の流れを計算するためのクラスです。図 4.15 のように辺長比が 2:1 の二次元空間を表現します。z 方向には 3 セルを設けており、単純な周期境界条件を用いて二次元を近似しています。したがって、VoxelSize では “kmax=3” を指定し、分割数 imax と jmax の比は 2:1 となるように指定します。空間格子幅は、x 方向と y 方向で同じ（直交等間隔）としています。

計算領域内部は单一媒質（セル ID=1）が設定されています。この例題は、パラメータ指定 “Unit_of_input_parameter” に無次元を指定します。

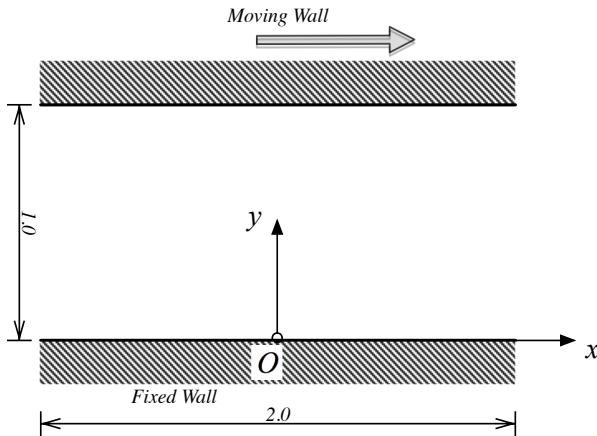


図 4.15 二次元平行平板間の計算空間 .

4.4.6 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、計算領域内部は単一媒質（セル ID=1）が設定されています。計算領域は、次のように DomainInfo タグで指定します。ここでは、各方向の分割数を 64 に指定し、基点座標が $(-0.5, -0.5, -0.5)$ 、ボクセルピッチを $pch = 1.5625 \times 10^{-2}$ に指定しています。VoxelSize と VoxelPitch のパラメータは、図 4.16 に示すように、格子幅 pch と分割数 $imax$ がそれぞれ対応しています。

```
<DomainInfo>
  <VoxelOrigin ox="-0.5" oy="-0.5" oz="-0.5"/>
  <VoxelSize ix="64" jx="64" kx="64"/>
  <VoxelPitch dx="1.5625e-02" dy="1.5625e-02" dz="1.5625e-02"/>
</DomainInfo>
```

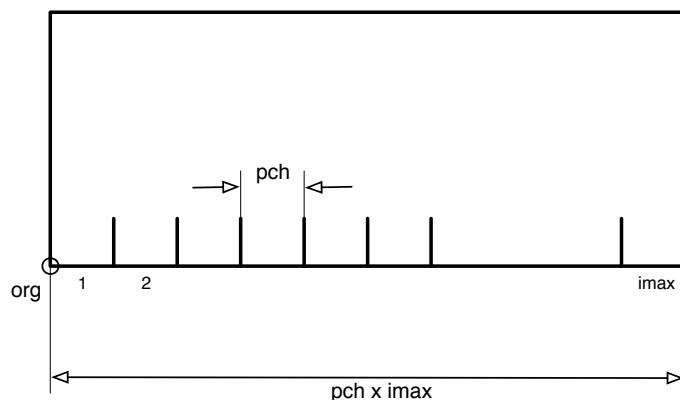


図 4.16 Rectangular クラスのパラメータ設定

表 4.6 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

表 4.6 のパラメータは、Parameter > Intrinsic_Example セクションで指定します。

```
<Elem name="Intrinsic_Example">
  <Param dtype="STRING" name="Check_Even" value="Yes"/>
</Elem>
```

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ます。

4.4.7 IP_Polygon クラス

XML ファイルで，“Steer \downarrow Solver_Property \downarrow Shape_Approximation” で Distance_Info を指定すると、距離情報を用いたスキームで計算します。この IP_Polygon クラスは、入力するポリゴンファイルと、DomainInfo で指定する計算領域情報のみで計算を行うモデルテンプレートです。ポリゴンファイル名は、“Steer \downarrow Polygon_File” で指定します。

4.4.8 IP_SHC1D クラス

図 4.17 に示すような片持ちはりの熱伝導問題を一次元の定常熱伝導問題として解くためのクラスです。この問題には厳密解があり、厳密解と計算結果を比較することにより予測精度の確認ができます。

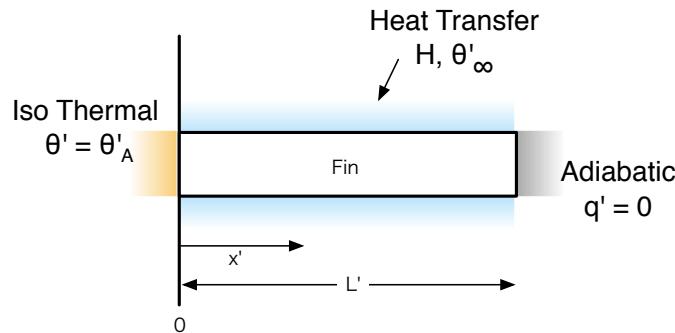


図 4.17 一次元定常熱伝導問題の模式図

計算領域は図 4.18 に示すように x 軸方向に放熱フィンをとり、y,z 方向には 5 つだけセルを設けます。領域の設定パラメータとして、x 方向の分割数を imax により与えます。放熱フィンを 5 分割したい場合には、imax=7 を設定します。その他の方向は jmax = kmax = 5 で固定です。

例題と解析結果の詳細については、例題集をご覧ください。

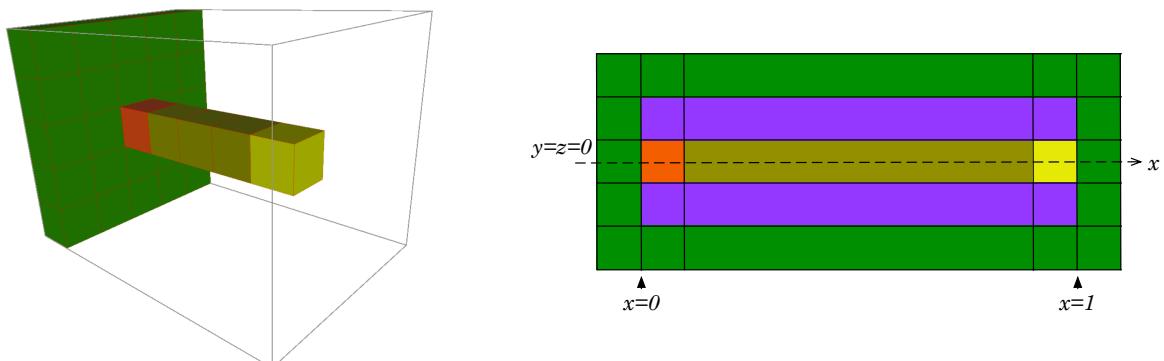


図 4.18 一次元熱伝導問題を計算するための片持ち梁の三次元モデルとセル ID (分割数が $7 \times 5 \times 5$ の場合)

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 4.7 組み込み例題

Example	Class	Comment
Cavity flow 3D (Cube)	IP_Rect	三次元立方体キャビティフロー
LDC112	IP_Rect	Guermond の実験に対応する辺長が 1:1:2 のキャビティフロー
Duct 3D	IP_Duct3D	ダクト流れ
PMT	IP_PMT	性能測定を行うための例題（三次元立方体キャビティフローの例題と同じ）

表 4.8 サンプル例題

Example	Comment
Dragon	Asian Dragon 周りの流れ
Heated Plate	流体中の平板からの放熱
SHC1D	熱伝導計算の解析解との比較

第 5 章

制御と物理パラメータ

V-Sphere システム上の入力パラメータは、データベースなどの再利用性を考慮し、XML(eXtensible Markup Language) 形式で記述します。XML はタグ構造のデータ記述言語で、階層的な要素の記述が可能なマークアップ言語です。この XML データを V-Sphere 内部でツリー状のオブジェクトとして構文解析および操作します。本章では、CBC ソルバークラスの制御と物理パラメータ（これをコンフィギュレーションファイルと呼びます）について説明します。境界条件の詳細については、CBC ソルバークラス説明書をご覧ください。

5.1 XML コンフィギュレーションファイル

5.1.1 XML 記述

XML 文書の先頭行は、`<?xml version="1.0"?>`で始まり、この XML 文書は XML 1.0 の規格を満たす文書であることを示しています。XML の要素は、`<>..</>`で囲まれた対になったタグで表現されます。ここでは、タグで囲まれている部分をセクションと呼びます。

```
<keyword>
  ...
</keyword>
```

一行内で終わるような短い要素の場合は、次のようにスラッシュで終わる形式で記述できます。

```
<Param name="Output_Mode" dtype="STRING" value="forced" />
```

要素を無効にする場合には、前後を`<!-- *** -->`のように！と2連のマイナス記号で囲みます。

```
<!--StartCondition type="Restart"-->
```

5.1.2 コンフィギュレーションファイルの構造

コンフィギュレーションファイルは、ソルバークラスの入力ファイルとしての役割を果たします。コンフィギュレーションファイルの中にある `SphereConfig` タグは、そこに記述された内容が V-Sphere のコンフィギュレーションであることを示します。クオーテーション（“ ”）で囲まれた文字列は、大文字でも小文字でもかまいません。

```
<SphereConfig SolverType="CBC" >
  ...
</SphereConfig>
```

`SolverType="CBC"` は、V-Sphere が実行時にインスタンスするソルバクラスのキーワードを示します。このキーワードが、V-Sphere に登録されていない場合はエラーとなります。`SphereConfig` 内には、表 5.1 に示すタグが記述されています。コンフィギュレーションファイルの名称は任意で、このうち媒質情報と境界条件の内容の記述は `SphereConfig` タグ内に直接記述してもよいし、指定したファイルに記述しても構いません。両方存在する場合には、`SphereConfig` タグ内の記述が優先されます。

表 5.1 `SphereConfig` 内のセクション

タグ	パラメータ
DomainInfo	計算領域
Steer	ソルバー制御
Parameter	計算条件
BC_Table	境界条件
Medium_Table	媒質情報

V-Sphere には、SPHERE 定義要素とソルバ定義要素の 2 種類があります。SPHERE 定義要素は、V-Sphere フレーム

ワーク側で規定されたタグで，ソルバ定義要素は Elem, Param 要素で構成される汎用記述要素です。ソルバ定義要素の dtype はデータの型 (STRING, INT, REAL) を表し，value は指定された型に対応した値をとります。

5.2 パラメータの詳細

5.2.1 DomainInfo セクション

DomainInfo

DomainInfo では、ボクセルモデル情報と外部ファイル情報を指定します。

```
<DomainInfo>
  <VoxelSize ix="64" jx="64" kx="64" />
  <VoxelOrigin ox="0.0" oy="0.0" oz="0.0" />
  <VoxelPitch dx="0.0" dy="0.0" dz="0.0" />
  <Param name="MDMTBL" dtype="STRING" value="xml/medium.xml" />
  <Param name="BCTBL" dtype="STRING" value="xml/boundary.xml" />
  <Param name="MBXTBL" dtype="STRING" value="xml/multibox.xml">
</DomainInfo>
```

ボクセルモデル情報については、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。この計算領域情報は、ユーザ問題と組み込み例題とで指定内容が異なります。組み込み例題の場合には、例題に応じて情報を指定します。一方、ユーザ問題では、入力となる解析モデルファイルから、ボクセルのサイズやピッチなどのパラメータを取得します。

外部ファイル情報については、表 5.3 に示すように、媒質情報ファイル、境界条件情報ファイル、多連結領域の分割情報について、外部ファイルとして記述する場合にファイルのパスを指定できます。

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

タグ	指定内容
VoxelSize	計算空間の各軸方向の分割数
VoxelOrigin	計算空間における座標値の最小値
VoxelPitch	各軸方向の分割幅
VoxelWidth	計算領域の大きさ

表 5.3 外部ファイル指定

タグ	説明
MDMTBL	媒質情報を記述したコンフィギュレーションファイルの指定
BCTBL	境界条件を記述したコンフィギュレーションファイルの指定
MBXTBL	多連結領域分割計算時の分割情報ファイルの指定

5.2.2 Steer セクション

Steer セクションでは、CBC ソルバークラスの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選択するパラメータです。

```
<Elem name="Algorithm">
  <Param name="Flow"    dtype="STRING" value="FS_C_EE_D_EE"/>
  <Param name="Heat"   dtype="STRING" value="C_EE_D_EE"/>
</Elem>
```

表 5.4 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 パラメータ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 5.4 流動解析のアルゴリズム選択パラメータ指定

キーワード	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 パラメータ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示します。指定できるパラメータは表 5.5 に示します。

表 5.5 温度解析のアルゴリズム選択パラメータ指定

キーワード	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）

Average_Option

時間平均操作に関するパラメータを指定します。

```
<Elem name="Average_Option">
  <Param name="Operation"    dtype="STRING" value="On" />
  <Param name="Start_Type"   dtype="string" value="time" />
  <Param name="Start"        dtype="REAL"   value="500.0" />
</Elem>
```

表 5.6 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。CBC ソルバークラス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、Start_Type で指定する方法に依存し、Time を指定した場合には Unit_of_Input_Parameter の次元に従います。つまり、value="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、File_IO の Averaged_Interval で指定します。

表 5.6 Average_Option のパラメータ

キーワード	指定パラメータ
Operation	On Off
Start_Type	開始時刻の指定 (Step Time)
Start	時間平均操作の開始時刻

Check_Parameter

ボクセルモデルと入力パラメータ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。

```
<Param name="Check_Parameter" dtype="STRING" value="On"/>
```

Check_Parameter="On" でチェックが有効な場合、V-Sphere 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 CBC ソルバーを強制終了します。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。

Convection_Term

対流項のスキームに関するパラメータを指定します。

```
<Elem name="Convection_Term">
  <Param name="Scheme"  dtype="STRING" value="O3_MUSCL" />
  <Param name="Limiter" dtype="STRING" value="minmod" />
</Elem>
```

Scheme と Limiter のパラメータを表 5.7 に示します。Limiter は制限関数の種類を示し、Scheme が O3_MUSCL の場合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 Guide_Out="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 5.7 Scheme と Limiter のパラメータ

Scheme	指定スキーム	出力ガイドセルサイズ	Limiter	制限関数
O1_Upwind	一次精度風上スキーム	1	Minmod	minmod 型
O2_Central	二次精度中心スキーム	1	No_Limiter	—
O3_MUSCL	三次精度 MUSCL スキーム	2		

Derived_Variable

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。

```
<Elem name="Derived_Variable">
  <Param name="Total_Pressure"      dtype="STRING" value="off" />
  <Param name="2nd_Invariant_of_VGT" dtype="STRING" value="on" />
  <Param name="Helicity"           dtype="STRING" value="on" />
  <Param name="Vorticity"          dtype="STRING" value="on" />
</Elem>
```

表 5.8 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、File.IO セクションの Instant_Interval で指定するタイミングでファイルに出力されます。value="off" の場合には、OutFile タグの記述は無効となります。OutputData セクションの Interval では設定しません。

表 5.8 派生変数の指定

タグ	生成する派生変数
Total_Pressure	全圧
Vorticity	渦度ベクトル
Helicity	ヘリシティ
2nd_Invariant_of_VGT	速度勾配テンソルの第二不变量

全圧（総圧） 全圧の計算を指定した場合には、同時に OutputData セクションに出力ファイル名を次のように記述します。attr タグには TotalPressure を指定し、basename には任意のプリフィックスを記述します^{*1}。

```
<OutFile attr="TotalPressure" Interval="1" format="SPH" basename="tp" />
```

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、同時に OutputData セクションに出力ファイルを次のように記述します。attr タグには Vorticity を指定し、basename には任意のプリフィックスを記述します。

```
<OutFile attr="Vorticity" Interval="1" format="SPH" basename="vrt" />
```

^{*1} ここで指定する Interval 属性は無効で、Interval セクションでの指定に従います。

ヘリシティ 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。OutFile タグの記述は上記と同様です。

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

```
<OutFile attr="Helicity" Interval="1" format="SPH" basename="hlcty" />
```

速度勾配テンソルの第二不变量 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]。OutFile タグの記述は上記と同様です。

```
<OutFile attr="2ndInvrntVGT" Interval="1" format="SPH" basename="i2vgt" />
```

Example

解くべき問題を指定します。

```
<Param name="Example" dtype="STRING" value="Users"/>
```

表 5.9 に CBC ソルバークラスで提供される組み込み例題の一覧を示します。表の中で、Users はユーザーが準備した解析モデルを用いることを指定します。組み込み例題で固有のパラメータ設定がある場合については Parameter→Intrinsic_Example 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 5.9 Example のパラメータ指定

キーワード	解く問題
Cavity3D	立方体キャビティ
Duct3D	直方体と円形断面のダクト
LDC112	辺長比 1:1:2 の三次元キャビティ
Performance.Test	性能評価
SHC1D	固体熱伝導
Users	ユーザの指定モデル

File_IO

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、入出力ファイルの単位、ガイドセルのモード、ファイル出力モード、並列入出力モード、デバッグ時のファイルなどを指定します。

```
<Elem name="File_IO">
  <Param name="Unit_of_File"          dtype="STRING" value="non_Dimensional" />
  <Param name="Guide_Out"            dtype="STRING" value="with" />
  <Param name="Output_Mode"          dtype="STRING" value="Forced" />
  <Param name="Parallel_Input"       dtype="STRING" value="Master" />
  <Param name="Parallel_Output"      dtype="STRING" value="Master" />
  <Param name="Debug_divergence"     dtype="STRING" value="off" />
  <Param name="Instant_Interval_Type" dtype="string" value="time" />
  <Param name="Instant_Interval"      dtype="real"   value="0.001" />
  <Param name="Averaged_Interval_Type" dtype="string" value="step" />
  <Param name="Averaged_Interval"     dtype="real"   value="200" />
</Elem>
```

表 5.10 に指定するパラメータの内容を示します。Unit_of_File では入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。

Guide_Out タグで **with** を指定した場合の出力ガイドセルのサイズは Convection_Term の項を参照してください。

表 5.10 ファイル入出力のパラメータ指定

タグ	指定項目	キーワード	指定内容
Unit_of_File	入出力ファイルの単位	Dimensional	有次元
		Non_Dimensional	無次元
Guide_Out	ガイドセル出力モード	with	ガイドセルと一緒に出力
		without	内部領域のみ出力
Output_Mode	ファイル出力モードの指定	Every_Time	毎ステップ出力モード
		Forced	強制出力モード
		Normal	通常モード
Parallel_Input	ファイル入力	Master	マスター ノードで単一ファイル入出力
		Local	ローカルノードで分散ファイル入出力
Parallel_Output	ファイル出力	Master	マスター ノードで単一ファイル入出力
		Local	ローカルノードで分散ファイル入出力
Debug_divergence	デバッグ時のファイル出力	On Off	$\nabla \cdot u$ の出力 (無次元値)
Instant_Interval_Type	瞬時値の出力指定形式	Step	ステップ数指定
		Time	時間間隔の指定
Instant_Interval	出力間隔	—	ステップ数 時間間隔
Averaged_Interval_Type	平均値の出力指定形式	Step	ステップ数指定
		Time	時間間隔の指定
Averaged_Interval	出力間隔	—	ステップ数 時間間隔

ファイル出力モードの指定は、3つのモードが指定できます。Normal の場合には、Instant/Averaged_Interval で指定した出力間隔でファイルを出力します。Forced では、通常モードの動作に加えて Time_Control セクションの Calculation_Period で指定した終了時に必ずファイルを出力します。また、Every_Time を指定した場合には、毎ステップファイル出力を行います。

Parallel_Input/Output では、並列計算時のファイル入出力のモードを指定します。逐次実行の場合には、Master を指定します。

デバッグのため、 $\nabla \cdot u$ の値を無次元で出力します。ファイル名の指定は、OutputData をご覧ください。

Interval のキーワードにより、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。Instant_Interval_Type あるいは Averaged_Interval_Type が value=“time” の場合、時刻の単位は Unit_of_Input_Parameter で指定したモードに従います。ファイルの指定については、OutputData を参照してください。

InputData

CBC ソルバークラスで使用する入力ファイル情報を指定します。

```
<InputData basedir=".">
  <InFile attr="SphereSVX"      format="svx" fname="example.svx" />
  <InFile attr="Pressure"        format="SPH" fname="prs0000000940.sph" />
  <InFile attr="Velocity"       format="SPH" fname="uvw0000000940.sph" />
  <InFile attr="AvrPressure"    format="SPH" fname="prsa0000000300.sph" />
  <InFile attr="AvrVelocity"    format="SPH" fname="uvwa0000000300.sph" />
</InputData>
```

InputData セクションの basedir 要素で、ディレクトリを相対パスで指定する場合の起点を指定します。表 5.11 に InFile タグで指定する入力ファイルのパラメータを示します。上記の例では、ボクセルファイルを指定する場合、attr に “SphereSVX” の属性情報を与え、フォーマットに svx を指定しています。ユーザ問題の場合には、ここで指定したファイル名を読み込み、計算を行います。attr 属性に指定できるキーワードを表 5.12 に示します。

ボクセルファイルのフォーマットには svx と sbx の 2 種類があります。svx フォーマットはセル ID、体積率、面積率などを保持できるフォーマットですが、CBC ソルバではセル ID のみを認識します。sbx フォーマットはセル ID と体積率を保持でき、zip により圧縮されます。また、ファイルサイズを小さくするため、体積率は 1Byte(255) で量子化されています。更に、1 バイト内にセル ID(6bit=64 種類) と体積率(2bit, 0,1 とそれ以外の 3 状態) を記録するモードが利用できます。詳細はファイルフォーマットマニュアルをご覧ください。

リスタートを指定している場合には、このセクションでリスタートファイル名を指定する必要があります。

並列時のファイル入力のモードとして、マスターノードで全てのファイル入力をを行うマスター mode、ローカルノードで担当計算領域のみを入力する分散モードがあります。モードの指定は、File_IO を参照してください。

表 5.11 InputData セクションの InFile のパラメータ指定

タグ	パラメータ
attr	属性情報
fname	任意のファイル名
format	ファイルフォーマットの拡張子 (svx sbx sph)

表 5.12 attr 属性に指定可能なキーワード

キーワード	指定内容
SphereSVX	ボクセルファイル名 (svx フォーマット)
SphereSBX	ボクセルファイル名 (sbx フォーマット)
Pressure	圧力のリスタートファイル名
Velocity	速度のリスタートファイル名
Temperature	温度のリスタートファイル名
AvrPressure	時間平均圧力のリスタートファイル名
AvrVelocity	時間平均速度のリスタートファイル名
AvrTemperature	時間平均温度のリスタートファイル名

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。

```
<Elem name="Iteration">
  <Elem name="Flow">
    <Elem name="Poisson">
      <Param name="Iteration"      dtype="INT"      value="50"/>
      <Param name="Epsilon"        dtype="REAL"     value="1.0e-3"/>
      <Param name="Omega"         dtype="REAL"     value="1.2"/>
      <Param name="Norm"          dtype="STRING"   value="v_div_max"/>
      <Param name="Linear_Solver" dtype="STRING"   value="SOR2SMA" />
    </Elem>
  </Elem>

  <Elem name="Heat">
    <Elem name="Euler_Implicit">
      <Param name="Iteration"      dtype="INT"      value="30"/>
      <Param name="Epsilon"        dtype="REAL"     value="1.0e-2"/>
      <Param name="Omega"         dtype="REAL"     value="1.2"/>
      <Param name="Norm"          dtype="STRING"   value="T_res_L2_absolute"/>
      <Param name="Linear_Solver" dtype="STRING"   value="SOR" />
    </Elem>
  </Elem>
</Elem>
```

反復法を用いる場合は、Algorithm セクションで反復法を含む解法を指定します。第2 レベルで指定する Elem_name のキーワードは、指定するアルゴリズムに応じて異なり、表 5.13 に指定アルゴリズムと指定キーワードの関係を示します。

表 5.14 には、流動解析の反復解法の指定パラメータを示します。また、指定可能な収束判定ノルムの種類を表 5.15 に示します。

表 5.16 に CBC ソリバークラスで選択できる反復解法を示します。表中の¹は、並列処理時のデータ依存性(再帰干渉)のために、逐次と並列時で異なる収束特性を示すことを意味します。

表 5.13 流動解析のアルゴリズムと指定キーワード

Algorithm	必要なキーワード
FS_C_EE_D_EE	Poisson

表 5.14 反復条件の指定

タグ	指定内容
Iteration	最大反復回数
Epsilon	収束閾値
Omega	加速(緩和)係数
Norm	収束ノルムの種類
Linear_Solver	反復法の指定

¹ サーチを行うので、実行速度は遅くなる(デバッグ利用)。

表 5.15 流動計算における圧力反復のノルムの指定

キーワード	収束判定基準	履歴出力のキーワード
V_Div_Max	発散の最大値 $\max div \mathbf{u} $	V_Div_Max
V_Div_Max_Monitor	発散の最大値 $\max div \mathbf{u} $ の値とセル位置を出力する ^{*1}	V_Div_Max
V_Div_L2	発散の自乗和平方根 $\sqrt{\sum_{i,j,k}^{\text{Max}} (div \mathbf{u})^2}$	V_Div_L2
P_Res_L2_Absolute	絶対残差の RMS $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j,k}^{\text{Max}} \ \vec{b} - A\vec{x}\ _2^2}$	P_Res_L2_A
P_Res_L2_Relative	相対残差の RMS $\frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j,k}^{\text{Max}} \ \vec{b} - A\vec{x}\ _2^2}}{\sum_{i,j,k}^{\text{Max}} \ \vec{b}\ _2}$	P_Res_L2_R

表 5.16 Linear_Solver のパラメータ指定

キーワード	反復解法	並列計算への適用
Jacobi	緩和 Point Jacobi 法	
SOR	Point SOR 法	
SOR2SMA	ストライドメモリアクセス型の 2 色 SOR 法	

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

第 2 レベルで指定する Elem.name のキーワードは、指定するアルゴリズムに応じて異なります。表 5.17 に、指定アルゴリズムと指定キーワードの関係を示します。

温度解析の反復解法のパラメータは、表 5.14 と同じです。収束ノルムのタイプは表 5.18 で指定します。

表 5.17 温度解析のアルゴリズムと指定キーワード

Algorithm	必要なキーワード
C_EE_D_EE	—
C_EE_D_EI	Euler_Implicit

表 5.18 温度計算における反復のノルムの指定

キーワード	収束判定	履歴出力のラベル
T_Res_L2_Absolute	絶対残差の RMS $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j,k}^{\text{Max}} \ \vec{b} - A\vec{x}\ _2^2}$	T_Res_L2_A
T_Res_L2_Relative	相対残差の RMS $\frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j,k}^{\text{Max}} \ \vec{b} - A\vec{x}\ _2^2}}{\sum_{i,j,k}^{\text{Max}} \ \vec{b}\ _2}$	T_Res_L2_R

LES_Option

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

```
<Elem name="LES_Option">
  <Param name="LES_Calculation" dtype="STRING" value="on"/>
  <Param name="Model"          dtype="STRING" value="smagorinsky"/>
  <Param name="Cs"            dtype="REAL"   value="0.15"/>
  <Param name="Damping_factor" dtype="REAL"   value="0.2"/>
</Elem>
```

指定できる LES のモデルを表 5.19 に示します。

表 5.19 LES のモデル指定

タグ	モデル
Smagorinsky	標準スマゴリンスキーモデル

^{*2} 2012 年 1 月 11 日現時点での機能未実装。

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。

```
<Elem name="Log">
  <Param name="Log_Base"          dtype="STRING" value="ON" />
  <Param name="Log_Iteration"    dtype="STRING" value="OFF" />
  <Param name="Log_Profiling"    dtype="STRING" value="ON" />
  <Param name="Log_Wall_Info"    dtype="STRING" value="Off" />
  <Param name="Console_Interval_Type" dtype="string" value="step" />
  <Param name="Console_Interval"   dtype="real"   value="1" />
  <Param name="History_Interval_Type" dtype="string" value="step" />
  <Param name="History_Interval"   dtype="real"   value="1" />
  <Param name="Unit_of_Log"       dtype="STRING" value="non_Dimensional" />
</Elem>
```

Log_Base タグでは、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。

Log_Iteration タグは、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。このタグを指定すると、残差は強制的に V_Div_Max (発散の最大値) となり、Interation タグでのノルムの指定は無効になります。反復履歴は他の種類のノルムには対応していません。

Log_Profiling タグは、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。ログファイル名の指定は OutputData セクションで行います。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。

Log_Wall_Info 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 のキーワードにより、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。Console_Interval_Type あるいは History_Interval_Type が value="time" の場合、時刻の単位は Unit_of_Input_Parameter で指定したモードに従います。ログファイルのファイル名の指定は OutputData セクションの表 5.24 に示します。

Unit_of_Log ではログ出力の有次元・無次元を指定します。

表 5.20 履歴ファイルの出力指定

タグ	指定内容	キーワード 指定内容
Log_Base	標準履歴ファイル	ON OFF
Log_Iteration	反復解法の反復履歴	ON OFF
Log_Profiling	実行性能レポートの作成・出力	ON OFF
Log_Wall_Info	壁面情報履歴	ON OFF
Console_Interval_Type	標準出力の出力指定形式	Step (ステップ数指定) Time (時刻指定)
Console_Interval	出力間隔	ステップ数 時刻
History_Interval_Type	履歴ファイルの出力指定形式	Step (ステップ数指定) Time (時刻指定)
History_Interval	出力間隔	ステップ数 時刻
Unit_of_Log	ログファイル中の記述単位	Dimensional Non_Dimensional

Model_Setting

Medium_Table セクションで記述する媒質 ID とボクセルモデル内のセル ID の関係を記述します。

```
<Elem name="Model_Setting">
  <Param name="fluid" id="1"      dtype="INT" value="800"  comment="air"/>
  <Param name="solid" id="310"    dtype="INT" value="600"  comment="wall"/>
</Elem>
```

上記の例では、セル ID=1 で指定される流体の物性値は Medium_Table にリストアップされる媒質 ID=800 であることを指定しています。同様に、セル ID=310 のボクセルは媒質 ID=600 により、その物性値が指定されます。モデル作成時には、セル ID ≥ 1 である点に注意します。

表 5.21 セル ID と媒質 ID の関連づけ

タグ	説明
Param name	セルの媒質の状態、Fluid or Solid
ID	セル ID
value	媒質 ID
comment	コメント

Monitor_List

ユーザが指定した物理量を指定した位置でサンプリングし、ファイルに出力する機能です。サンプリングして出力する機能は2通りの方法で実装されています。ここでは、指定した座標点で計算結果をサンプリングし、ファイルに出力する方法について説明します。詳細は、第7章をご覧ください。もう一つの指定方法は、ボクセルモデルのセルID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。

```
<Elem name="Monitor_List">
  <Param name="Log"          dtype="STRING" value="On" />
  <Param name="Output_File"  dtype="STRING" value="sample.log"/>
  <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="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>
```

指定パラメータを表5.22に示します。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タグでON/OFFを指定します。
- 出力ファイル名は、Output_Fileタグで指定します。
- 出力モードはOutput_Modeタグで指定します。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タグでは、サンプリングする物理量を指定します。物理量はpoint_setの例のように複数指定可能です。
- Sampling_Methodタグ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。

表 5.22 モニタリストでの指定パラメータ

タグ	指定キーワード	指定内容
Log	On Off	ログ出力指定
Output_File	—	出力ファイル名
Output_Mode	Gather	マスタープロセスに集約して出力
	Distribute	各プロセス毎に出力
Unit	入力パラメータと出力単位の指定	Dimensional Non_Dimensional
Sampling_Interval_Type	Step Time	出力形式の指定
Sampling_Interval	—	指定間隔
Point_Set		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	速度を指定
	Pressure	圧力
	Temperature	温度
	Total_Pressure	全圧
	Vorticity	渦度
Sampling_Method	Nearest	モニタ指定点を含むセルの値
	Interpolation	三重線形内挿補間
	Smoothing	局所平均による平滑化
Sampling_Mode	All	全セルを対象とする
	Fluid	流体セルのみを対象とする
	Solid	固体セルのみを対象とする

- Sampling_Mode で指定されるパラメータは、サンプリングモードを指定します。
- ファイル出力間隔は、Sampling_Interval で指定し、その指定単位を Sampling_Interval_Type で指定します。
- Unit タグでは、Monitor_List 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。

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。

OutputData

出力ファイルの指定を行います。

```
<OutputData basedir=".">
  <History attr="log_base"      interval="1" fname="history_base.log" />
  <History attr="log_compo"     interval="1" fname="history_compo.log" />
  <History attr="log_domainflux" interval="1" fname="history_domainflux.log" />
  <History attr="log_iteration"  interval="1" fname="history_iteration.log" />
  <History attr="log_wall_info"   interval="1" fname="history_wallinfo.log" />
  <OutFile attr="condition"      interval="1" format="ascii" basename="condition" />
  <OutFile attr="profiling"       interval="1" format="ascii" basename="profiling" />
  <OutFile attr="Velocity"        interval="1" format="SPH"  basename="vel"/>
  <OutFile attr="Pressure"        interval="1" format="SPH"  basename="prs"/>
  <OutFile attr="Temperature"      interval="1" format="SPH"  basename="tmp"/>
  <OutFile attr="AvrVelocity"      interval="1" format="SPH"  basename="vela"/>
  <OutFile attr="AvrPressure"       interval="1" format="SPH"  basename="prsa"/>
  <OutFile attr="AvrTemperature"    interval="1" format="SPH"  basename="tmpa"/>
  <OutFile attr="Divergence"        interval="1" format="SPH"  basename="div" />
</OutputData>
```

- basedir 要素では、指定ディレクトリを相対パスで指定する場合の起点を指定できます。
- 表 5.23 に History, OutFile タグで指定するパラメータを示します。
- basename は出力するファイル名のプレフィックスを記述します。ファイル名にはプレフィックスの後にタイムスタンプを表す数字が続き、拡張子がつきます。
- ファイルフォーマットには、ascii, sph, fdv などが指定できます。
- 出力間隔はこの Interval タグでは行わず、Interval セクションで指定します。
- コンディションファイル (condition.txt) は、前処理計算が終了した時点で計算に関する設定や条件などが出力されます。
- プロファイリングファイル (profiling.txt) は、実行性能の測定 (実行時プロファイリング) 情報が出力されます。実行時プロファイリングの有効化の指定は、Log セクションの Log_Profiling で行います。

表 5.23 OutputData セクションのパラメータ指定

タグ	指定パラメータ
attr	属性情報 (固定キーワード)
basename	出力ファイルの接頭子
fname	任意のファイル名
format	ファイルフォーマットの拡張子
interval	出力ステップ間隔

履歴ファイルは表 5.24 に示すものが指定できます。History で指定される履歴ファイルの出力インターバルは Log セクションの History_Interval で指定します。XML によるサンプリングについては Monitor_List を参照してください。

並列時のファイル出力のモードとして、マスター ノードで全てのファイル出力をを行うマスター モード、ローカル ノードで担当計算領域のみを入出力する分散 モードがあります。モードの指定は File_IO セクションの Parallel_Output を参照してください。

表 5.24 履歴ファイルおよび結果出力ファイルの種類

attr	履歴の種類
log_base	標準履歴ファイル（モニタ出力）
log_compo	コンポーネントに関する履歴
log_domainflux	計算領域の外部境界における流束の履歴
log_iteration	反復履歴
log_wall_info	壁面情報
Pressure	圧力の瞬間値
Velocity	速度の瞬間値
Temperature	温度の瞬間値
AvrPressure	圧力の平均値
AvrVelocity	速度の平均値
AvrTemperature	温度の平均値
TotalPressure	反復履歴
Vorticity	XML 指定のサンプリング履歴
Helicity	壁面情報
2ndInvrntVGT	速度勾配テンソルの第二不变量
Divergence	速度の発散値（無次元）

Polygon_File

ポリゴンファイル名を指定します。

Shape_Approximation で Distance_Info を指定すると、距離情報を用いたスキームでの計算となります。この場合、ポリゴンファイルが必要となります。そのポリゴンファイルを記述したファイル名をこのセクションで指定します。ポリゴンファイルと DomainInfo の指定のみで計算をする場合には、IP_Polygon クラスを指定します。

```
<Elem name="Polygon_File">
  <Param name="File_Name" dtype="string" value="polygon.xml"/>
</Elem>
```

Reference_Frame

観測の座標系を指定します。

```
<Elem name="Reference_Frame">
  <Param name="Reference_Frame_Type" dtype="string" value="translation"/>
  <Param name="u" dtype="REAL" value="0.0"/>
  <Param name="v" dtype="REAL" value="0.0"/>
  <Param name="w" dtype="REAL" value="0.0"/>
</Elem>
```

CBC ソルバークラスでは、表 5.25 に示す選択肢があります。移動座標系を指定する場合には、格子の移動速度の各方向成分（有次元では $[m/s]$ ）を入力します。座標系は右手系をとり、各軸 x, y, z 方向の速度成分をそれぞれ u, v, w とします。静止座標系と移動座標系とでは、同じ問題を解く場合でも与える境界条件が異なるので注意します。

表 5.25 Reference_Frame の指定

タグ	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

計算のスタート方法を指定します。

```
<StartCondition type="Initial"/>
```

表 5.26 に選択肢を示します。リスタートの場合、ファイルは InputData セクションの InFile で指定します。

表 5.26 Start Condition のパラメータ指定

タグ	スタートの種類
Initial	ゼロスタート
Restart	リスタート

Solver_Property

CBC 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。

```
<Elem name="Solver_Property">
  <Param name="Basic_Equation"          dtype="STRING" value="Incompressible"/>
  <Param name="Buoyancy"                dtype="STRING" value="No_Buoyancy" />
  <Param name="Kind_of_Solver"          dtype="STRING" value="Flow_Only" />
  <Param name="PDE_type"               dtype="STRING" value="Navier_Stokes" />
  <Param name="Shape_Approximation"    dtype="STRING" value="binary" />
  <Param name="Time_Variation"         dtype="STRING" value="Unsteady" />
</Elem>
```

Basic_Equation には、表 5.27 に示す支配方程式の形式を示します。

表 5.27 Basic_Equation のパラメータ指定

タグ	支配方程式
Incompressible	非圧縮性

PDE_type で指定する方程式の型は、表 5.28 から選択します。デフォルトで Navier Stokes で、Euler はテスト用のパラメータです。

表 5.28 PDE_type のパラメータ指定

タグ	PDE の型
Navier-Stokes	Navier-Stokes 方程式
Euler	Euler 方程式

Kind_of_Solver には、表 5.29 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 (Kind_of_Solver="SOLID_CONDUCTION") には、Heat Conduction Equation と表示されます。また、Buoyancy の指定は、Kind_of_Solver が必要とする場合にのみ有効になります。

表 5.29 热対流計算と Kind_of_Solver および Buoyancy の関係

支配方程式	Kind_of_Solver	Buoyancy
純強制対流	Flow_Only	—
強制熱対流（浮力なし）	Thermal_Flow	No_Buoyancy
強制熱対流（浮力あり）	Thermal_Flow	Boussinesq
自然対流	Thermal_Flow_Natural	Boussinesq
固体熱伝導	Solid_Conduction	—

Shape_Approximation タグには、表 5.30 に示す解析モデルの形状近似モードを指定します。

表 5.30 形状近似モードの指定

タグ	形状近似
Binary	バイナリボクセル近似
Distance_Info	距離情報近似

Time_Variation タグでは、表 5.31 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 5.31 非定常モードの指定

タグ	モードの指定
Steady	定常
Unsteady	非定常

Time_Control

時刻設定に関するパラメータを指定します。

```
<Elem name="Time_Control">
  <Param name="Acceleration_Type"  dtype="string" value="time" />
  <Param name="Acceleration"       dtype="REAL"   value="0.0"  />
  <Param name="Dt_Type"           dtype="string" value="CFL_Reference_Velocity" />
  <Param name="Delta_t"            dtype="REAL"   value="0.1"  />
  <Param name="Period_Type"       dtype="string" value="time" />
  <Param name="Calculation_Period" dtype="REAL"   value="5.0"  />
</Elem>
```

Acceleration Acceleration タグは、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。Acceleration_Type で指定する時間の単位を指定します。指定単位が Time の場合、加速時間の値は Unit セクションの Unit_of_Input_Parameter で指定するモード (Dimensional/Non_Dimensional) 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。加速時間を長くと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。

$$u_{Ref} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{t}{t_0} \pi \right) \right) & (t < t_0) \\ 1.0 & (t \geq t_0) \end{cases} \quad (5.5)$$

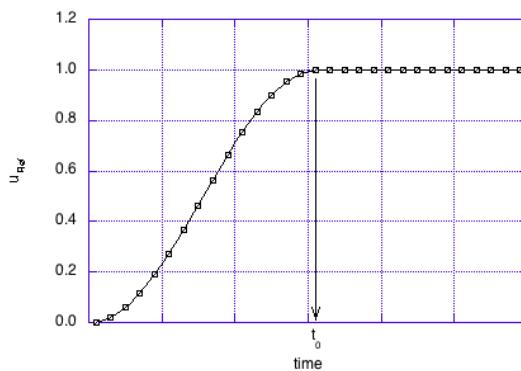


図 5.1 加速中の速度プロファイル

時間積分幅 Δt の指定 表 5.32 に時間積分幅 Δt 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。 α 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。

Delta_t には CFL 数、または Δt を記述します。時間積分幅の選択は、ソルバの種類を示す Kind_of_Solver パラメータと関連があり、Solid_Conduction の場合には Dt_Direct のみ選択できます。

表 5.32 Time_Increment のパラメータ指定

Dt_Type	時間積分幅の決定方法	Delta_t への指定数値
Direct	Δt を直接指定する	Δt
CFL_Reference_Velocity	CFL 数を指定し、代表流速から Δt を決定	CFL 数
Diffusion	拡散数から Δt を決定	—
CFL_Diffusion_Reference_Velocity	代表流速に対する CFL 数と拡散数から Δt を決定	CFL 数

計算時間の指定 Period_Type 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 Unit_of_Input_Parameter のモードに従います。指定された単位の数値を Calculation_Period で指定します^{*3}。

^{*3} SPHERE フレームワークでは、SPHERE 定義要素として CalculationSteps がありますが、内部的に上書きしています。

Treatment_of_Wall

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。

```
<Elem name="Treatment_of_Wall">
  <Param name="Pressure_Gradient" dtype="string" value="grad_zero"/>
  <Param name="Velocity_Profile"  dtype="string" value="no_slip"/>
</Elem>
```

各パラメータの意味について、表 5.33 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^{*4}。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 CBC ソルバークラス説明書をご覧ください^{*5}。

表 5.33 壁面条件の指定

タグ	パラメータの値	説明
Pressure_Gradient	Grad_Zero	圧力勾配ゼロ
	Grad_NS	Navier-Stokes 方程式から計算する
Velocity_Profile	No_Slip	滑りなし壁面条件
	Slip	滑り壁条件
	Law_of_Wall	壁法則

^{*4} 現時点では、圧力勾配ゼロのみが選択できます。

^{*5} 2012 年 1 月 11 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。

```
<Elem name="Unit">
  <Param name="Unit_of_Input_Parameter" dtype="STRING" value="Dimensional" />
  <Param name="Pressure" dtype="STRING" value="gauge" />
  <Param name="Temperature" dtype="STRING" value="Celsius" />
</Elem>
```

各タグは、表 5.34 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。式 (5.6) に示すゲージ圧を式 (5.7) 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 $10^0 \sim 10^3$ 程度となると、 $p \sim O(1)$ 程度となるので、単精度計算では 4 衔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 Base_Pressure 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。

$$p'_g = p' - p'_0 \quad (5.6)$$

$$p = \frac{p'_g}{\rho' u'^2_0} \quad (5.7)$$

表 5.34 単位の指定

タグ	指定パラメータ	説明
Unit_of_Input_Parameter	Dimensional or Non_Dimensional	入力パラメータファイルの単位を指定します (*1)
Pressure	Gauge or 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 or 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

Version_Info

CBC ソルバークラスと FlowBase クラスのバージョン番号を指定します。異なる番号を指定している場合には、修正すべきバージョン番号が表示されるので XML ファイルを変更します。

```
<Elem name="Version_Info">
  <Param name="CBC"      dtype="INT"  value="127" />
  <Param name="Flow_Base" dtype="INT"  value="225" />
</Elem>
```

VoxelDivisionMethod

並列計算時の領域分割をユーザーが明示的に指定します。直方体領域の計算空間を想定し、I, J, K の各方向の分割数を指定します。この指定が無い場合には、Sphere フレームワークがロードバランスが等しく、かつ通信面積が細小となる適切な分割を行います。

```
<Elem name="VoxelDivisionMethod">
  <Param name="I"    dtype="INT"   value="8" />
  <Param name="J"    dtype="INT"   value="4" />
  <Param name="K"    dtype="INT"   value="5" />
</Elem>
```

5.2.3 Parameter セクション

パラメータセクションでは、CBC ソルバークラスの実行に必要な物理パラメータを記述します。

Initial_State

物理変数の初期値を指定します。

```
<Elem name="Initial_State">
  <Param name="Density"      dtype="REAL" value="1.25e00" />
  <Param name="Pressure"    dtype="REAL" value="0.0" />
  <Param name="Temperature" dtype="REAL" value="20.0" />
  <Elem name="Velocity">
    <Param name="u" dtype="REAL" value="0.0"/>
    <Param name="v" dtype="REAL" value="0.0"/>
    <Param name="w" dtype="REAL" value="0.0"/>
  </Elem>
</Elem>
```

記述する初期値は有次元量で指定しますが、Solver.Property セクションで Kind_of_Solver="Flow_Only" 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、Unit 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ます。添え字の 0 は代表値または基準値を意味します。

$$\left. \begin{array}{l} \rho = \frac{\rho'}{\rho'_0} \\ p = \frac{p' - p'_0}{\rho'_0 u'^2_0} \\ u_i = \frac{u'_i}{u'_0} \\ \theta = \frac{\theta' - \theta'_0}{\Delta\theta'} \end{array} \right\} \quad (5.8)$$

Init_Temp_of_Medium

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。媒質 ID と流体・固体の種別は Model_Setting と一致している必要があります。

```
<Elem name="Init_Temp_of_Medium">
  <Param name="fluid" id="1"   dtype="real" value="20.0" />
  <Param name="solid" id="2"   dtype="real" value="34.0" />
  <Param name="solid" id="6"   dtype="real" value="34.0" />
  <Param name="solid" id="3"   dtype="real" value="35.0" />
  <Param name="fluid" id="4"   dtype="real" value="20.0" />
  <Param name="fluid" id="5"   dtype="real" value="20.0" />
  <Param name="fluid" id="10"  dtype="real" value="20.0" />
</Elem>
```

Intrinsic_Example

組み込み例題に固有のパラメータを指定します。

```
<Elem name="Intrinsic_Example">
  ...
</Elem>
```

指定可能なパラメータは、表 5.35 に示すように各組み込み例題ごとに異なります。

表 5.35 Intrinsic_Example セクションで指定できるパラメータ

組み込み例題	指定パラメータタグ	dtype	指定値
Duct3D	Shape	STRING	Circular, Rectangular
	Diameter	REAL	断面径 [m]
	Direction	STRING	X_minus X_plus Y_minus Y_plus Z_minus Z_plus
	Driver	REAL	ドライバ部分の長さ [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。

```
<Elem name="Reference">
  <Param name="Length"      dtype="REAL" value="1.0" />
  <Param name="Velocity"    dtype="REAL" value="1.0" />
  <Param name="Base_Pressure" dtype="REAL" value="101325" />
  <Param name="Gravity"     dtype="REAL" value="9.8" />
  <Param name="Reynolds"    dtype="REAL" value="1000.0" />
  <Param name="Prandtl"     dtype="REAL" value="0.71" />
  <Param name="Ref_ID"      dtype="INT"  value="1" />
</Elem>
```

表 5.36 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。Ref_ID で指定する ID は、ボクセルモデル内で使われ、かつ Model_Setting セクションで記述されている必要があります。固体熱伝導解析の場合には固体の ID を指定し、それ以外の（熱）流動解析の場合には流体の ID を指定します。

表 5.36 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
Base_Pressure	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
Ref_ID	代表物性値として指定する媒質 ID	—

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。

```
<Elem name="Temperature">
  <Param name="Base"      dtype="REAL"   value="293.15" />
  <Param name="Difference" dtype="REAL"   value="35.0" />
</Elem>
```

基準温度 (Base) と温度差 (Difference) は、非圧縮計算のパッ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 タグで指定します。

5.2.4 Medium_Table 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 5.37 により媒質を指定します。

```
<Medium_Table>
  <Elem name="Fluid" id="100" comment="Air">
    <Param name="density"          dtype="REAL" value="1.1763" />
    <Param name="specific_heat"   dtype="REAL" value="1007" />
    <Param name="thermal_conductivity" dtype="REAL" value="2.614e-02" />
    <Param name="kinematic_viscosity" dtype="REAL" value="15.83e-06" />
    <Param name="viscosity"        dtype="REAL" value="18.62e-06" />
    <Param name="sound_of_speed"   dtype="REAL" value="340.0" />
    <Param name="volume_expansion" dtype="REAL" value="0.04e-3" />
  </Elem>
  <Elem name="Solid" id="600" comment="Fe">
    <Param name="density"          dtype="REAL" value="7870.0" />
    <Param name="specific_heat"   dtype="REAL" value="442.0" />
    <Param name="thermal_conductivity" dtype="REAL" value="80.3" />
  </Elem>
</Medium_Table>
```

表 5.37 Medium_Table に記述するパラメータ

タグ	説明
Elem name	Fluid または Solid
ID	媒質 ID
comment	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 5.38 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 5.38 Medium_Table における物性値の指定

Fluid のキーワード	説明	単位	Solid のキーワード	説明	単位
Density	密度	kg/m^3	Density	密度	kg/m^3
Specific_Heat	定圧比熱	$kJ/(kgK)$	Specific_Heat	定圧比熱	$kJ/(kgK)$
Thermal_Conductivity	熱伝導率	$W/(mK)$	Thermal_Conductivity	熱伝導率	$W/(mK)$
Kinematic_Viscosity	動粘性係数	m^2/s			
Viscosity	粘性係数	$Pa\ s$			
Sound_of_Speed	音速	m/s			
Volume_Expansion	体膨張率	$1/K$			

第 6 章

境界条件

本章では、CBC ソルバークラス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 XML タグ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 外部境界条件と内部境界条件

CBC ソルバークラスでは、境界条件を外部境界条件と内部境界条件の 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、内部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（セル体積とセルフェイス）に作用する境界条件は内部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、内部境界条件を適用することはできません。

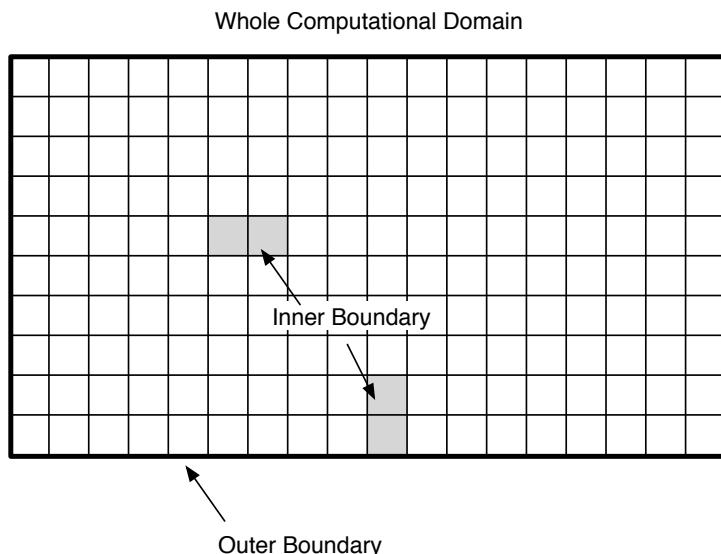


図 6.1 計算領域における外部境界と内部境界の指定場所

6.1.2 BC_Table セクションの XML 構造

境界条件を記述する BC_Table セクションは、SphereConfig 内に記述しても良いし、独立したファイルに記述しても構いません。独立ファイルとして扱う場合には、DomainInfo セクションで次のように外部ファイルとして記述します。value には、V-Sphere を起動するディレクトリからの相対パスとなるように記述しておきます。

```
<Param name="BCTBL" dtype="STRING" value="xml/boundary.xml"/>
```

BC_Table セクションでは、次のように内部境界条件 InnerBoundary と外部境界条件 OuterBoundary の 2 つを記述します。

```
<BC_Table>
<OuterBoundary>
<Elem name="Basic_BCs">
<Elem name="Wall" id="1">
<Param name="Normal_x"      dtype="REAL"   value="0.0" />
<Param name="Normal_y"      dtype="REAL"   value="0.0" />
<Param name="Normal_z"      dtype="REAL"   value="0.0" />
<param name="Profile"      dtype="STRING"  value="Constant" />
<param name="Specified_Type" dtype="STRING"  value="Velocity" />
<Param name="Specified_Value" dtype="REAL"   value="7.0" />
</Elem>
```

```

<Elem name="outflow" id="3">
  <Param name="velocity_type"  dtype="STRING" value="Average" />
</Elem>

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

<Elem name="Face_BC">
  <Elem name="X_MINUS" id="10" comment="periodic">
    <Param name="Guide_Cell_ID" id="1" />
  </Elem>
  <Elem name="X_PLUS" id="3" comment="outflow">
    <Param name="Guide_Cell_ID" id="2" />
  </Elem>
  <Elem name="Y_MINUS" id="1" comment="wall">
    <Param name="Guide_Cell_ID" id="2" />
  </Elem>
  <Elem name="Y_PLUS" id="1" comment="wall">
    <Param name="Guide_Cell_ID" id="2" />
  </Elem>
  <Elem name="Z_MINUS" id="1" comment="wall">
    <Param name="Guide_Cell_ID" id="2" />
  </Elem>
  <Elem name="Z_PLUS" id="1" comment="wall">
    <Param name="Guide_Cell_ID" id="2" />
  </Elem>
</Elem>
</OuterBoundary>
</BC_Table>

```

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。

- 候補となる境界条件の種類を Basic_BCs 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、ユニークな ID (番号) を割り振ります。
- Face_BC タグ内において、境界条件の基本リストの ID を参照し、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 Guide_Cell_ID により指定します。

前述の例では、境界条件の候補として ID=1, 3, 10 をリストアップしています。X マイナス方向の外部境界面に周期境界条件 (ID=10) を与え、X プラス方向の外部境界面に流出境界条件 (ID=3)、それ以外の面には壁面条件 (ID=1) を与えています。各外部境界面のガイドセルには Guide_Cell_ID によって、ID を付与しています。この ID は、Model_Setting セクションにリストアップされた ID 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一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

流れの境界指定のキーワード	流れの境界条件	熱境界指定のサブキーワード	熱境界条件
In_Out	流入出境界	Ambient_Temperature	流入温度指定と対流流出
Outflow	流出境界	←	対流流出
Periodic	周期境界	←	周期境界
Specified_Velocity	流入境界	Temperature	流入温度指定
Symmetric	対称境界	←	対称境界
Traction_Free	遠方境界	Ambient_Temperature	遠方温度指定
Wall	壁面境界	Adiabatic HeatFlux HeatTransfer Type_S HeatTransfer Type_SF HeatTransfer Type_SN HeatTransfer Type_B IsoThermal	断熱指定 熱流束指定 熱伝達係数と表面温度から熱伝達を計算 強制対流の層流・乱流熱伝達境界 自然対流の乱流熱伝達境界 固体壁からの放熱条件 等温指定

6.1.4 InnerBoundary

計算領域内の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。CBC ソルバークラスは、内部境界条件をコンポーネントとして扱います。内部境界条件を指定する位置には、ボクセルの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。

内部境界条件の位置は、外部境界面を除く計算領域内に対して、ボクセルモデルのセル ID により指定します。境界条件の詳細は、XML の InnerBoundary セクションの ID 番号に記述します。内部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。指定できる内部境界条件の数は 30 個が上限です。また、指定境界条件数と媒質数の和は 63 個以下となります^{*1}。

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。Cell_Monitor は境界条件ではありませんが、同じ仕組み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 内部境界条件（コンポーネント）の種類

タグ	指定位置	計算モード	実装形式	コンポーネントの説明
Specified_Velocity	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
Cell_Monitor	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
Direct_Heat_Flux	セル界面	熱流れ	熱流束	熱流束指定
HeatTransfer_B	セル界面	固体伝熱	熱流束	固体壁からの放熱条件
HeatTransfer_S	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
HeatTransfer_SF	セル界面	熱流れ	熱流束	強制対流の層流・乱流熱伝達境界
HeatTransfer_SN	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
Heat_Source	セル要素	熱流れ	外力項	吸発熱指定
Specified_Temperature	セル要素	熱流れ	温度指定	セルの温度指定

^{*1} 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。

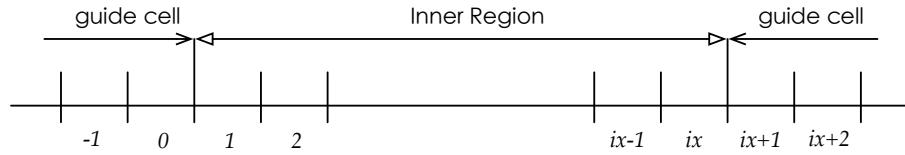


図 6.2 計算領域のインデックス

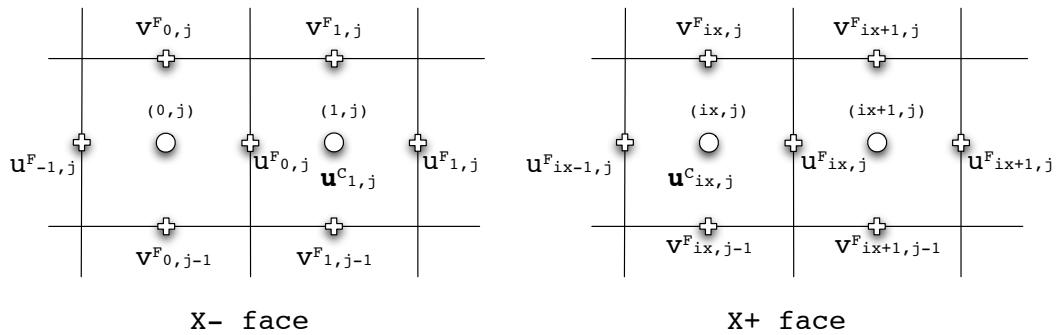


図 6.3 コロケート配置の変数のインデックス。基本変数 (u_i^C, p, θ) は全てセルセンタ位置に配置され、補助的な速度ベクトル u_i^F がスタガード位置に配置されます。

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 XML 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>
  <Elem name="Basic_BCs">
    <Elem name="wall" id="1">
      <Param name="Normal_x"          dtype="REAL"   value="0.0" />
      <Param name="Normal_y"          dtype="REAL"   value="1.0" />
      <Param name="Normal_z"          dtype="REAL"   value="0.0" />
      <param name="Profile"          dtype="STRING"  value="Harmonic" />
      <param name="Specified_Type"   dtype="STRING"  value="Velocity" />
      <Param name="Specified_Value"  dtype="REAL"   value="7.0" />
      <Param name="Frequency"        dtype="REAL"   value="2.0" />
      <Param name="Initial_Phase"   dtype="REAL"   value="0.0" />
      <Param name="Constant_Bias"   dtype="REAL"   value="0.0" />
    </Elem>
  </Elem>
</OuterBoundary>
```

表 6.3 壁面の速度境界条件の指定パラメータ

タグ	指定キーワード	パラメータの説明
Normal_x	—	法線ベクトルの x 方向成分 法線は単位ベクトル
Normal_y	—	法線ベクトルの y 方向成分
Normal_z	—	法線ベクトルの z 方向成分
Profile	Constant Harmonic	指定速度のタイプ
Specified_Type	Velocity	指定単位 [m/s]
Specified_Value	—	速度
Frequency	—	周波数 f [Hz]
Initial_Phase	—	初期位相 ϕ [Rad]
Constant_Bias	—	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、固定バイアスと共に与えます。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。

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

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_CBC.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>
  <Elem name="Basic_BCs">
    <Elem name="wall" id="1">
      <Param name="Normal_x"      dtype="REAL"  value="0.0" />
      <Param name="Normal_y"      dtype="REAL"  value="1.0" />
      <Param name="Normal_z"      dtype="REAL"  value="0.0" />
      <param name="Profile"      dtype="STRING" value="Constant" />
      <param name="Specified_Type" dtype="STRING" value="Velocity" />
      <Param name="Specified_Value" dtype="REAL"  value="0.0" />
      <Param name="Heat_Type"      dtype="STRING" value="Adiabatic" />
    </Elem>
  </Elem>
</OuterBoundary>
```

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>
  <Elem name="Basic_BCs">
    <Elem name="wall" id="1">
      ...
      <Param name="Heat_Type"      dtype="STRING" value="HeatFlux" />
      <Param name="Heat_Flux"      dtype="REAL"   value="12.0" />
    </Elem>
  </Elem>
</OuterBoundary>
```

熱伝達境界 热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 热伝達境界条件と Kind_of_Solver の関係

KIND_OF_SOLVER	指定できる熱伝達境界の種類
FLOW_ONLY	-
THERMAL_FLOW THERMAL_FLOW_NATURAL	Type_S Type_SN Type_SF
CONJUGATE_HEAT_TRANSFER	Type_N
SOLID_CONDUCTION	Type_B

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

H [W / ($m^2 K$)] Coefficient of heat transfer

θ'_{sf} [K] Surface temperature of solid

θ'_{∞} [K] Temperature at outer boundary layer

Type_S 表面温度と熱伝達係数により計算 Type_S 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 θ'_{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 θ'_{∞} として、界面での熱流束を計算します。

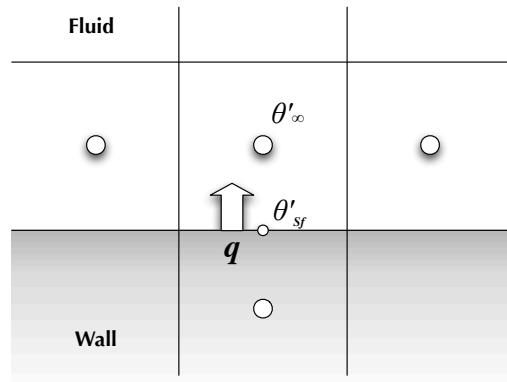


図 6.4 Type_S の熱伝達境界

以下に、熱境界部分のみパラメータ指定の一例を示します。

```
<OuterBoundary>
  <Elem name="Basic_BCs">
    <Elem name="wall" id="1">
      ...
      <Param name="Heat_Type"          dtype="STRING" value="HeatTransfer_S" />
      <Param name="Surface_Temperature" dtype="REAL"   value="300.0"/>
      <Param name="Coef_of_Heat_Transfer" dtype="REAL"   value="20.0"/>
    </Elem>
  </Elem>
</OuterBoundary>
```

表 6.5 熱伝達境界 Type_S の指定パラメータ

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

Type_SN 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、

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

Type_SN 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>
  <Elem name="Basic_BCs">
    <Elem name="wall" id="1">
      ...
      <Param name="Heat_Type" dtype="STRING" value="HeatTransfer_SN" />
      <Param name="Surface_Temperature" dtype="REAL" value="500.0" />
      <Param name="Ref_Temp_Mode" dtype="STRING" value="Bulk_Temperature" />
      <Param name="vertical_laminar_alpha" dtype="REAL" value="0.59" />
      <Param name="vertical_laminar_beta" dtype="REAL" value="0.25" />
      <Param name="vertical_turbulent_alpha" dtype="REAL" value="0.1" />
      <Param name="vertical_turbulent_beta" dtype="REAL" value="0.3333333" />
      <Param name="vertical_ra_critial" dtype="REAL" value="1.0e9" />
      <Param name="lower_laminar_alpha" dtype="REAL" value="0.27" />
      <Param name="lower_laminar_beta" dtype="REAL" value="0.25" />
      <Param name="lower_turbulent_alpha" dtype="REAL" value="0.27" />
      <Param name="lower_turbulent_beta" dtype="REAL" value="0.25" />
      <Param name="lower_ra_critial" dtype="REAL" value="1.0e9" />
    </Elem>
  </Elem>
</OuterBoundary>
```

表 6.6 熱伝達境界 Type_SN のパラメータ

パラメータタグ	記号の意味
Vertical_Laminar_Alpha	垂直平板と水平平板（上面）の層流時の係数 α
Vertical_Laminar_Beta	垂直平板と水平平板（上面）の層流時の係数 β
Vertical_Turbulent_Alpha	垂直平板と水平平板（上面）の乱流時の係数 α
Vertical_Turbulent_Beta	垂直平板と水平平板（上面）の乱流時の係数 β
Vertical_Ra_Critical	垂直平板と水平平板（上面）の臨界 Ra 数 Ra_L
Lower_Laminar_Alpha	水平平板（下面）の層流時の係数 α
Lower_Laminar_Beta	水平平板（下面）の層流時の係数 β
Lower_Turbulent_Alpha	水平平板（下面）の乱流時の係数 α
Lower_Turbulent_Beta	水平平板（下面）の乱流時の係数 β
Lower_Ra_Critical	水平平板（下面）の臨界 Ra 数 Ra_L
Ref_Temp_Mode	Bulk_Temperature or Local_Temperature

Type_SF 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>
<Elem name="Basic_BCs">
  <Elem name="wall" id="1">
    ...
    <Param name="Heat_Type"          dtype="STRING" value="HeatTransfer_SF" />
    <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>
</Elem>
</OuterBoundary>
```

表 6.7 熱伝達境界 Type_SF のパラメータ

タグ	記号の意味
alpha	式 (6.7) 中の係数 α
beta	係数 β
gamma	係数 γ
Ref_Temp_Mode	Bulk_Temperature or Local_Temperature

Type_B 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>
<Elem name="Basic_BCs">
  <Elem name="wall" id="1">
    ...
    <Param name="Heat_Type"          dtype="STRING" value="HeatTransfer_SF" />
    <Param name="Bulk_Temperature"   dtype="REAL"   value="500.0"/>
    <Param name="Coef_of_Heat_Transfer" dtype="REAL" value="0.12"/>
  </Elem>
</Elem>
</OuterBoundary>
```

表 6.8 熱伝達境界 Type_B の指定パラメータ

指定キーワード	パラメータの説明
Coef_of_Heat_Transfer	熱伝達係数 [$W/(m^2 K)$]
Bulk_Temperature	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>
```

```
<Elem name="Basic_BCs">
  <Elem name="wall" id="1">
    ...
    <Param name="Heat_Type"  dtype="STRING" value="IsoThermal" />
    <Param name="Temperature" dtype="REAL"   value="100.0"/>
  </Elem>
</Elem>
</OuterBoundary>
```

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 °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>
  <Elem name="Basic_BCs">
    <Elem name="symmetric" id="20"/>
  </Elem>
</OuterBoundary>
```

上記の例では、境界条件番号 20 に対称境界条件を設定します。

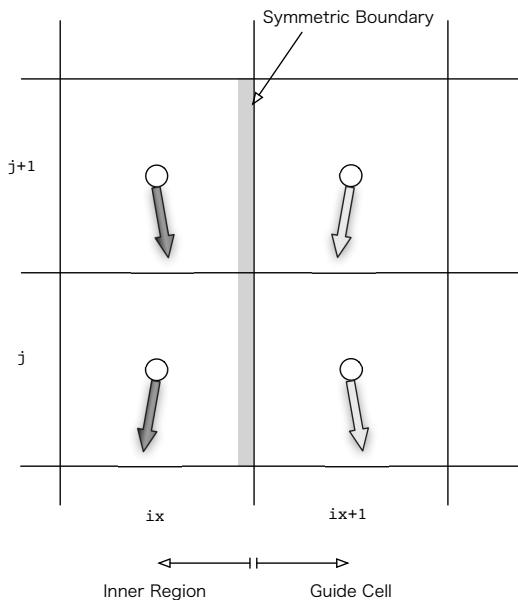


図 6.5 対称境界面における境界条件

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ことが必要です。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>
  <Elem name="Basic_BCs">
    <Elem name="outflow" id="3">
      <Param name="velocity_type" dtype="STRING" value="minmax" />
    </Elem>
  </Elem>
</OuterBoundary>
```

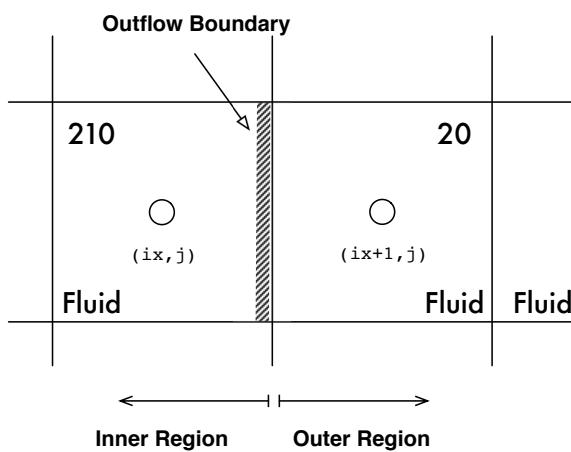


図 6.6 外部境界面における流出境界。x+ 方向の例。

指定するパラメータとして、境界条件番号と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 Velocity_Type タグにて Average または Minmax を指定します。Average は、物体で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

Velocity_Type	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 XML パラメータについて説明します。

```
<OuterBoundary>
  <Elem name="Basic_BCs">
    <Elem name="Specified_Velocity" id="4">
      <Param name="Normal_x"          dtype="REAL"   value="0.0" />
      <Param name="Normal_y"          dtype="REAL"   value="1.0" />
      <Param name="Normal_z"          dtype="REAL"   value="0.0" />
      <param name="Profile"          dtype="string" value="Harmonic" />
      <param name="Specified_Type"   dtype="string" value="Velocity" />
      <Param name="Specified_Value"  dtype="REAL"   value="7.0" />
      <Param name="Frequency"        dtype="REAL"   value="2.0" />
      <Param name="Initial_Phase"   dtype="REAL"   value="0.0" />
      <Param name="Constant_Bias"   dtype="REAL"   value="0.0" />
      <Param name="Temperature"     dtype="REAL"   value="20.0" />
    </Elem>
  </Elem>
</OuterBoundary>
```

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、固定バイアスと共に与えます。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

タグ	指定キーワード	パラメータの説明
Normal_x	—	法線ベクトルの x 方向成分 法線は単位ベクトル
Normal_y	—	法線ベクトルの y 方向成分
Normal_z	—	法線ベクトルの z 方向成分
Profile	Constant Harmonic	指定速度のタイプ
Specified_Type	Velocity	指定単位 [m/s]
Specified_Value	—	速度
Frequency	—	周波数 f [Hz]
Initial_Phase	—	初期位相 ϕ [Rad]
Constant_Bias	—	一定値 b [m/s]
Temperature	—	指定温度 [K °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つがあります。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。Simple_Copy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。Pressure_Difference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Simple_Copy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、内部境界条件との組み合わせで利用します。Driverモードの説明は内部境界条件をご覧ください。

```
<OuterBoundary>
  <Elem name="Basic_BCs">
    <Elem name="periodic" id="7" >
      <Param name="mode" dtype="string" value="Simple_Copy" />
    </Elem>

    <Elem name="periodic" id="8" >
      <Param name="mode" dtype="string" value="Directional" />
      <Param name="flow_direction" dtype="string" value="upstream" />
      <Param name="pressure_difference" dtype="REAL" value="8.148e-3" />
    </Elem>

    <Elem name="periodic" id="9" >
      <Param name="mode" dtype="string" value="Directional" />
      <Param name="flow_direction" dtype="string" value="downstream" />
      <Param name="pressure_difference" dtype="REAL" value="8.148e-3" />
    </Elem>

    <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6.12 周期境界条件のモード

キーワード	モードの説明
Simple_Copy	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、Pressure_Difference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
Pressure_Difference	両端にかける圧力差 [Pa]
Flow_Direction	Upstream(上流面)またはDownstream(下流面)

6.2.6 遠方境界

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。

次の例では、境界条件 ID=4 に遠方境界条件を設定しています。

```
<OuterBoundary>
  <Elem name="Basic_BCs">
    <Elem name="traction_free" id="4">
      <Param name="Ambient_Temperature" dtype="REAL" value="25.0" />
    </Elem>
  </Elem>
</OuterBoundary>
```

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 流入出境界

振動流のための特殊な境界条件で，実験的な境界条件です。

指定された外部境界面において，外部境界面の流速の符号に応じて流出境界と遠方条件を切り替えます。下記の例では，流出境界条件に切り替わった場合の対流流出速度のパラメータを Minmax に指定しています。

```
<OuterBoundary>
  <Elem name="in_out" id="5">
    <Param name="velocity_type" dtype="STRING" value="minmax" />
    <Param name="Ambient_Temperature" dtype="REAL" value="25.0" />
  </Elem>
</OuterBoundary>
```

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 内部境界条件

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。内部境界条件の多くは、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、同種の流出境界は一つ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、ボクセルモデルで固体壁に指定したセルIDが固体として認識され、セル界面の流束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_CBC.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、固体熱伝導と共に熱移動の場合には、固体-固体界面の場合もあります。内部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Def_Face 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をと同じ方向です。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。

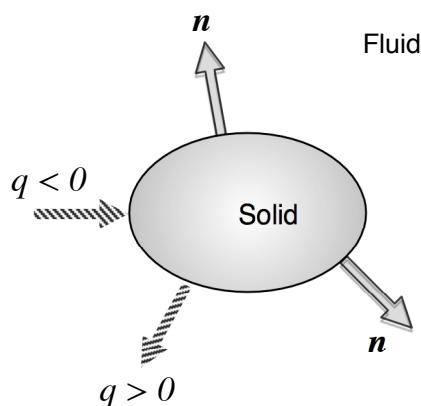


図6.7 流体-固体界面における熱境界条件の熱流束の方向

CBCの熱流体解析には幾つかのモードがあります。Kind_of_Solver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。Thermal_FlowとThermal_Flow_Naturalの場合は、熱流動計算で流体の温度のみを解きます^{*2}。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-固体の界面で与える

^{*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。

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、Solid_Conduction 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。

Conjugate_Heat_Transfer 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 Def_Face 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、Def_Face 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³。

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。

```
<InnerBoundary>
  <Elem name="Adiabatic" ID="6" comment="shield">
    <Param name="Def_Face" dtype="INT" value="3"/>
  </Elem>
</InnerBoundary>
```

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 热流束境界は境界面で指定の熱流束を与えます。

```
<InnerBoundary>
  <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>
</InnerBoundary>
```

熱伝達境界 热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。

Type_S 表面温度と熱伝達係数により計算 Type_S 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、 θ_∞ 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。

```
<InnerBoundary>
  <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>
</InnerBoundary>
```

Type_SN 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。

```
<InnerBoundary>
  <Elem name="HeatTransfer_SN" 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="vertical_laminar_alpha"  dtype="REAL"     value="0.59"/>
    <Param name="vertical_laminar_beta"   dtype="REAL"     value="0.25"/>
    <Param name="vertical_turbulent_alpha" dtype="REAL"     value="0.1"/>
```

³ 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。

```

<Param name="vertical_turbulent_beta" dtype="REAL" value="0.3333333"/>
<Param name="vertical_ra_critial" dtype="REAL" value="1.0e9"/>
<Param name="lower_laminar_alpha" dtype="REAL" value="0.27"/>
<Param name="lower_laminar_beta" dtype="REAL" value="0.25"/>
<Param name="lower_turbulent_alpha" dtype="REAL" value="0.27"/>
<Param name="lower_turbulent_beta" dtype="REAL" value="0.25"/>
<Param name="lower_ra_critial" dtype="REAL" value="1.0e9"/>
</Elem>
</InnerBoundary>

```

Type_SF 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。

```

<InnerBoundary>
<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>
</InnerBoundary>

```

Type_B 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。

```

<InnerBoundary>
<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>
</InnerBoundary>

```

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。

```

<InnerBoundary>
<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>
</InnerBoundary>

```

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。内部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の評価方法として流出コンポーネントの平均速度を用い、流出面における圧力境界は圧力勾配ゼロとしています。

```

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

```

```
</InnerBoundary>
```

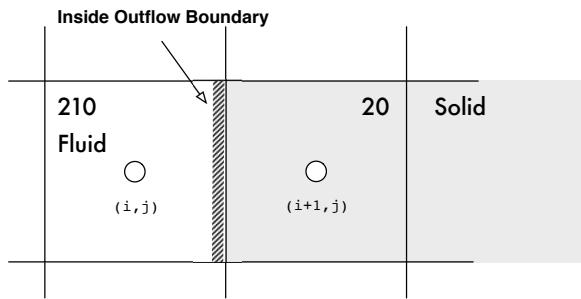


図 6.8 計算内部領域における流出境界の設定

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 XML 入力パラメータについて説明します。

```
<InnerBoundary>
<Elem name="specified_velocity" id="3" comment="inlet">
  <Param name="Normal_x" dtype="REAL" value="0.0" />
  <Param name="Normal_y" dtype="REAL" value="0.0" />
  <Param name="Normal_z" dtype="REAL" value="-1.0" />
  <Param name="def_face" dtype="INT" value="6" />
  <param name="Profile" dtype="string" value="Harmonic" />
  <param name="Specified_Type" dtype="string" value="Velocity" />
  <Param name="Specified_Value" dtype="REAL" value="7.0" />
  <Param name="Frequency" dtype="REAL" value="2.0" />
  <Param name="Initial_Phase" dtype="REAL" value="0.0" />
  <Param name="Constant_Bias" dtype="REAL" value="0.0" />
  <Param name="Temperature" dtype="REAL" value="50.0" />
</Elem>
</InnerBoundary>
```

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、固定バイアスと共に与えます。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

キーワード	パラメータの説明
Normal_x	法線ベクトルの x 方向成分 法線は単位ベクトル
Normal_y	法線ベクトルの y 方向成分 法線は単位ベクトル
Normal_z	法線ベクトルの z 方向成分 法線は単位ベクトル
Def_Face	指定面を特定する相手先のセル ID
Profile	指定速度のタイプ (Constant Harmonic)
Specified_Type	指定速度の単位 (Velocity Massflow)
Specified_Value	速度 $A [m/s]$ または 流量 $[m^3/sec.]$
Frequency	周波数 $f [Hz]$
Initial_Phase	初期位相 $\phi [Rad]$
Constant_Bias	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
Driver_Direction X_minus X_plus Y_minus Y_plus Z_minus Z_plus

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。Upstream_Direction と OuterBoundary で指定する Driver_Direction の方向は一致する必要があります。

```
<InnerBoundary>
  <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>
</InnerBoundary>
```

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。

Specified_Temperature

以下の形式で指定温度を与えます。

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

表 6.16 溫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]

Heat_Generation

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。

```
<InnerBoundary>
  <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>
</InnerBoundary>
```

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
Heat_Release_Value	発熱量	[W]
Heat_Generation_Density	発熱密度	[W/m ³]

6.3.6 不活性セル指定

計算空間内で、不活性化するセル ID 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。

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

6.3.7 モニタ

計算空間内に設定する内部境界条件について、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。

```
<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="off" />
    </Elem>
  </Elem>
</InnerBoundary>
```

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内部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 Pressure_Loss として扱い、式 (6.11) の外力項 F_i として実装します。 β 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内部境界条件

キーワード	境界条件モデル
Pressure_Loss	熱交換器モデル

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

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、 Δp , Δr , 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 $[\text{mmAq} - \text{m/s}]$ 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量に変換されます。

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

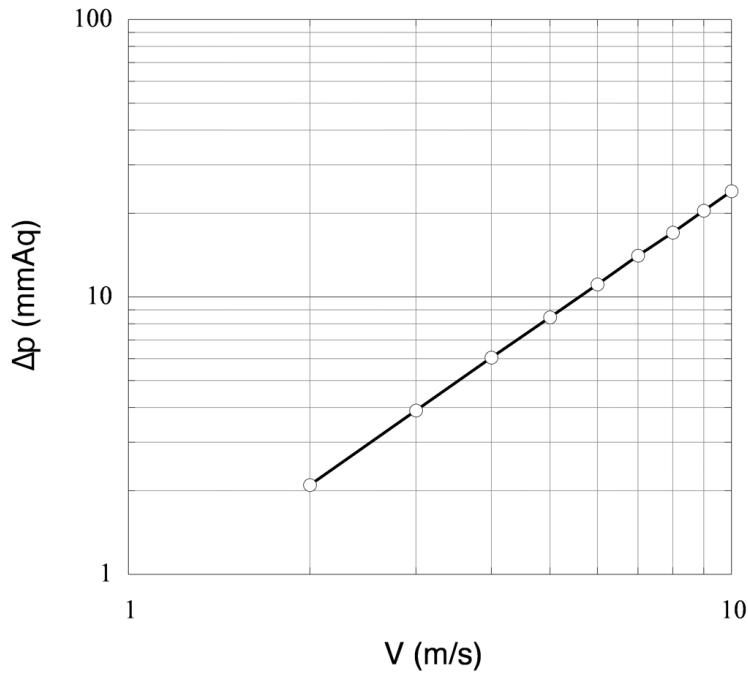


図 6.9 $\Delta p - V$ 性能線図（対数表示）

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、測定結果を示し $2[\text{m/s}]$ 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 $c_1 = 0.12321, c_2 = 1.2806, c_3 = -1.0074$ ($2 - 10[\text{m/s}]$) 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 $u_{threshold} = 2[\text{m/s}]$ を閾値として、 $C4$ のカーブ $c_4 = 0.525$ ($0 - 2[\text{m/s}]$) 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 $[\text{mm}]$ 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。

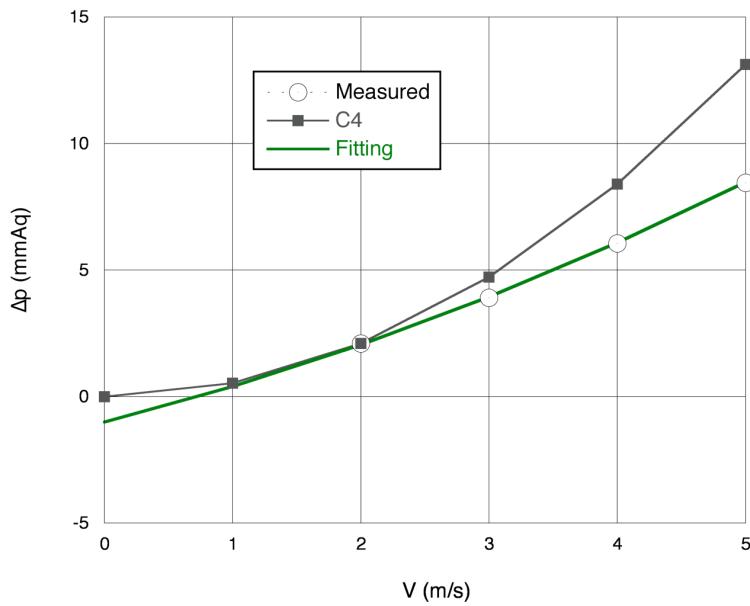


図 6.10 パラメータの取得（図 6.9 と同じものを線形表示）

```

<InnerBoundary>
  <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>
</InnerBoundary>

```

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
Normal_x	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
Normal_y	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
Normal_z	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]
u_threshold	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 Non_Directional]

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）から出し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、

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

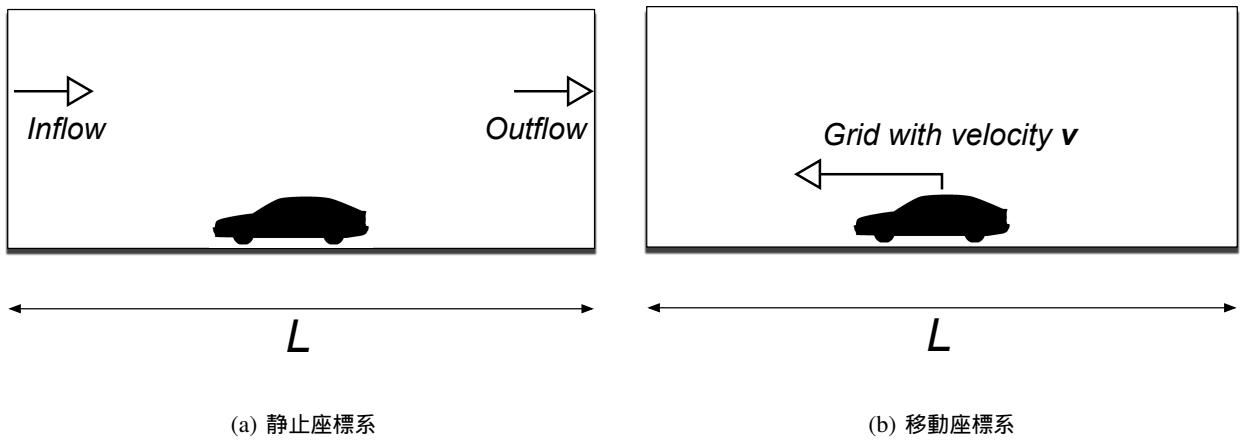


図 6.11 静止座標系と移動座標系の観測点の違い

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、

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

移動格子の移動速度は Reference Frame セクションで与えます。

^{*4} mmAq は水 (300K, p=101.325kPa) 996.62 [kg/m³] , mmHg は水銀 (300K) 13538 [kg/m³] をプログラム内でハードコード。

第 7 章

モニタリング機能

CBC ソルバークラスには、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、XML パラメータファイルで指定する方法とボクセルモデルの ID で指定する方法の 2 種類があります。

7.1 XML コンフィギュレーション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>

<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

タグ	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。

出力ファイルは `OutputData` セクションで指定します。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

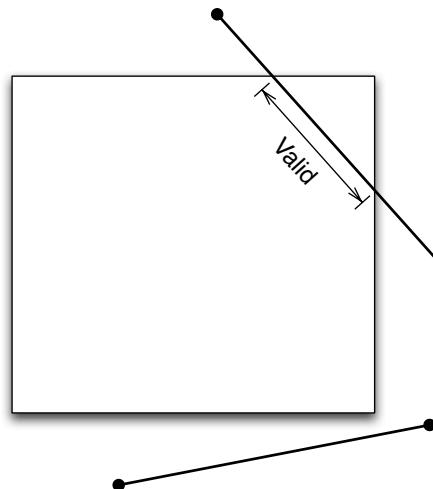


図 7.1 ラインのサンプリング指定で無効なケース

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になります . 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 Pressure Temperature  
x1 y1 z1 #comment  
x2 y2 z2 #comment  
...  
xn yn zn #comment
```

n 点で速度, 壓力, 溫度をモニタ
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 output 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、座標軸に直角な面とします。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できます。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
 0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00
 0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00
 0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00
-9.4408710e-26  0.0000000e+00 -1.4733364e-32  1.2573367e-32
 1.0951646e-04  0.0000000e+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
 0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00
 0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+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(單一ファイル)

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
 0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00
 0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00
 0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00  0.0000000e+00
-9.4408710e-26  0.0000000e+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

ソルバーの実行

CBC ソルバークラスの実行方法と出力ファイルについて説明します。

8.1 CBC 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 sphere 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.xml とします。

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

カレントディレクトリを examples/3Dcavity とし，sphere の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．

```
$ sphere cavity.xml
```

8.2 出力ファイル

8.2.1 出力ファイルの種類と指定

CBC ソルバークラスを実行すると、表 8.1 に示すファイルが生成されます。これらのファイル名は OutputData で指定します。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 8.1 実行時にできるファイル

カテゴリ	attr タグ指定	出力内容
解析条件情報	condition	計算条件、前処理、ソルバー起動時のログ
領域情報	-	並列計算時の計算領域の分割に関する情報
性能情報	profiling	実行時間サンプリング出力ファイル
基本履歴	log_base	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	log_compo	内部境界のモニタ情報
流量収支履歴	log_domainflux	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	log_iteration	反復解法の収束履歴
サンプリング履歴	log_sampling	サンプリング指定時の出力ファイル
壁面情報履歴	log_wall_info	壁面に関する情報の履歴
瞬時値データ	Velocity	速度の瞬時値
	Pressure	圧力の瞬時値
	Temperature	温度の瞬時値
平均値データ	AvrVelocity	速度の時間平均値
	AvrPressure	圧力の時間平均値
	AvrTemperature	温度の時間平均値
派生データ	tp	全圧
	vrt	渦度
	helicity	ヘリシティ
	i2vgt	速度勾配テンソルの第 2 不変量

表 8.1 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 Interval 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。

8.2.2 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 CBC ソルバークラス起動時のログで、ボクセルファイルを読み込み、ソルバーに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 8.2 に示す各セクション毎に記録されています。

表 8.2 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
Voxel file information	計算するボクセルファイルの名称や含まれる情報
Memory required for Preprocesor	前処理に必要なメモリ要求量（概算）
XML Table Info.	Model_Setting タグに記述された内容
XML Components	コンポーネントの種類と個数
Voxel Model Info.	voxel ファイルに含まれる ID の情報
Medium List	Model_Setting タグに記述された媒質情報
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	ソルバー本体で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	XML 指定によるモニター情報

8.2.3 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
```

8.2.4 基本履歴 [history_base.log]

標準履歴ファイルは、下記のような履歴情報が output 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 8.3 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 5.15 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	0.0000e+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 8.3 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	0.0000e+00	1	0.0000e+00	6	9.5454e-05	0.000e+00	0.000e+00	2.654e-01
2	2.5000e-04	0.0000e+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

8.2.5 コンポーネント履歴 [history_compo.log]

コンポーネントに関連する履歴を出力します。

step	time	V[011]	Va[050]	DPa[050]	MonV[020]	MonP[020]	MonTP[020]
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、ID=11 に速度を指定し、その平均速度を出力しています。ID=50 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、ID=20 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 8.4 に示す項目が表示されます。

表 8.4 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 $q [W/m^2]$
	Radiation	熱流束 $q [W/m^2]$
Heat_Volume	Heat_Src	
	Cnst_Temp	
Monitor	Velocity	平均速度 $MonV [m/s]$
	Pressure	平均圧力 $MonP [Pa]$
	Temperature	平均温度 $MonT [K \text{ or } C]$
	TotalPressure	平均全圧 $MonTP [Pa]$

8.2.6 流量収支履歴 [history_domainflux.log]

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	

8.2.7 反復履歴 [history_iteration.log]

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)
step=      2  time= 1.333333e-02  Itration      Norm (    i,    j,    k)
step=      3  time= 2.000000e-02  Itration      Norm (    i,    j,    k)
step=      4  time= 2.666667e-02  Itration      Norm (    i,    j,    k)
step=      5  time= 3.333334e-02  Itration      Norm (    i,    j,    k)
```

8.2.8 サンプリング履歴 [history_sampling.log]

XML の座標値指定によるサンプリング結果を出力します。第7章をご覧ください。

8.2.9 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 8.5 に示します。

Report of Timing Statistics								
Total execution time = 5.960922e+00 [sec]				Total time of measured sections = 5.461881e+00 [sec]				
Statistics per MPI process [Node Average]								
Level	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 8.5 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]

8.2.10 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。

8.2.11 ボクセルファイル

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 などとして書き出されます。また、ユーザ問題で Monitor_List 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。

8.2.12 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る。これらは、V-Isio で可視化できます。

8.2.13 メモリ使用量の情報

CBC ソルバークラスでは、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 中に表示します。表 8.6、表 8.7 にそれぞれファイル入出力時のテンポラリのメモリ使用量のパターンを示します。

svx ファイルの並列処理時の読み込みは、マスター ノードのみでファイルをオープンします。svx は内部に幾つかのデータレコードを持てるが、各データ毎に読み込み処理を順次行うので、テンポラリとしては全計算領域サイズ × 4Byte の大きさとなります。

sbx ファイルの並列処理時の読み込みもマスター ノードのみでファイルをオープンします。また、sbx ファイルは圧縮機能があり、圧縮時と非圧縮時で使用するテンポラリサイズが異なります。圧縮時にはブロックサイズ（デフォルトで、ガイドセルを含む IJ 面のボクセルサイズ）のテンポラリを用いてデータを展開します。非圧縮時にはマスター ノードで全計算領域サイズのテンポラリ配列にデータを読み込み、送信先 ノードのローカルサイズの配列を用意し、これを送信バッファとして用いて送信します。

表 8.6 入力時にテンポラリに確保するメモリ量

動作モード	svx	sbx	sph
逐次	全計算領域サイズ × 4Byte	圧縮時、ブロックサイズ 非圧縮時、全計算領域サイズ	全計算領域サイズ
並列（非分散）	マスター ノードで全計算領域サイズ × 4Byte	圧縮時、マスターでブロックサイズ + 送信先 ノードのローカルサイズ (4Byte) 非圧縮時、全計算領域サイズ + 送信先 ノードのローカルサイズ	マスターで全領域サイズ + 送信先 ノードのローカルサイズ
並列（分散）	設定なし	設定なし	テンポラリ不使用

表 8.7 出力時におけるテンポラリのメモリ使用量

動作モード	sph
逐次	全計算領域サイズ
並列（非分散）	マスターで全領域サイズ + 受信先 ノードのローカルサイズ サイズ (4Byte)
並列（分散）	テンポラリ不使用

8.3 並列計算

8.3.1 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。並列計算は、まず 2.1 で述べたように並列モジュールを指定し、コンパイルします。実行時には、mpirun コマンドで sphere モジュールを起動します。

```
$ mpirun -np 2 sphere hogehoge.xml
```

8.3.2 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。

8.3.3 Multiply-Connected Partitioning

管路網などの内部流を効率よく並列計算するためのしくみとして、多重連結領域分割(Multiply-Connected Partitioning, MCP、または通称マルチボックス)による並列計算ができます。これは図 8.1 に示すような全計算領域を計算量がほぼ同じになるような部分領域に分割し、並列計算を行う方法です。MCP で計算する場合には、計算ボクセルのフォーマットとして sbx を指定して出力する必要があります。

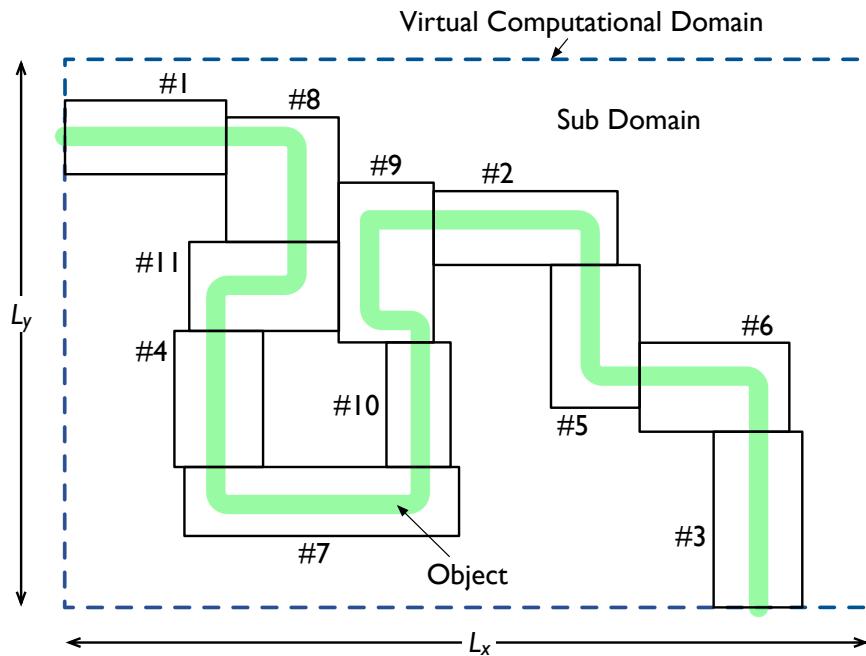


図 8.1 Schematic of Multiply-Connected Partitioning

以下に、マルチボックス計算の手順を示します。

1. ボクセル生成 V-Xgen を用いて sbx フォーマットのボクセルファイルを作成します。
2. マルチボックスツール sphMbxTool^{*1}を用いて分割ファイルを作成します。
3. XML ファイル 分割ファイル情報を DomainInfo セクションの MBXTBL タグに記述します。

```
<DomainInfo>
  <VoxelSize ix="64" jx="64" kx="64" />
  <VoxelOrigin ox="0.0" oy="0.0" oz="0.0" />
  <VoxelPitch dx="0.0" dy="0.0" dz="0.0" />
  <Param name="MDMTBL" dtype="STRING" value="xml/medium.xml" />
  <Param name="BCTBL" dtype="STRING" value="xml/boundary.xml" />
  <Param name="MBXTBL" dtype="STRING" value="xml/multibox.xml">
</DomainInfo>
```

4. 計算実行 \$mpirun -np 8 sphere hoge.xml

^{*1} 09_Multibox.pdf を参照

8.4 各プラットホームにおける実行

8.4.1 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9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 1.1.9 2011/11/7

- 時間平均パラメータの記述を修正しました。

Version 1.1.8 2011/9/19

- 距離情報を用いたスキームの導入に伴い、形状近似度と IP Polygon のパラメータを追加しました。

Version 1.1.7 2011/9/6

- 表 4.1 の PPLT2D のキーワードを Parallel_Plate_2D に変更しました。
- 組み込みモデルの IOP_Duct クラスの説明を追加しました。

Version 1.1.6 2011/9/5

- 組み込みモデルに CYLINDER, STEP クラスを追加しました。

Version 1.1.5 2011/8/31

- 組み込み例題を組み込みモデルとして再編集し、8 章の一部の内容を統合しました。
- 組み込みモデルに PPLT2D クラスの説明を追加しました。

Version 1.1.4 2011/7/28

- 温度計算時、各媒質に対して初期温度を指定できるようにしました。

Version 1.1.3 2011/7/21

- 外部領域面の流出境界条件を修正しました。

Version 1.1.2 2011/7/11

- automake の環境が異なる場合の対応を追記しました。
- V-Sphere の倍精度と並列モジュールのオプション記述を追加しました。
- モデル作成に媒質数の制限について加筆しました。

Version 1.1.1 2011/7/9

- CBC Ver. 1.3.6 対応
- 内部境界条件の設定方法を固体セルをキー ID とする方法に変更しました。

Version 1.1.0 2011/6/30

- 外部境界条件と内部境界条件のポリシを明示しました。
- 内部境界条件の注意事項を追記しました。

Version 1.0.9 2011/6/21

- 体裁を変更しました。
- インストールの章に、Windows でのコンパイルと OpenMPI バイナリパッケージを用いたコンパイルを追記しました。
- 熱境界条件について、指定方法のポリシを追加しました。

Version 1.0.8 2011/6/8

- 境界条件のセクションの構成を変更しました。
- 熱境界条件を加筆しました。

Version 1.0.7 2011/4/11

- 組み込み例題クラスの解析モデルを追記しました。

Version 1.0.6 2011/2/11

- サンプリングのファイル指定を Monitor_List に移動しました。

Version 1.0.5 2011/1/6

- 時間平均操作 Average_Option の XML パラメータ書式を変更しました。
- ファイル入出力 File_IO の XML パラメータ書式を変更しました。
- 入力ファイル InputData の XML パラメータ書式を変更しました。
- インターバルの XML パラメータ指定を File_IO と Log セクションに移動しました。
- 反復パラメータ Iteration に温度の反復パラメータを追加しました。
- ログ出力 Log の XML パラメータ書式を変更しました。
- モニター指定 Monitor_List の XML パラメータ書式を変更しました。

- 時間制御指定 Time_Control の XML パラメータ書式を変更しました。
- 単位指定 Unit の XML パラメータ書式を変更しました。
- 第 6 章の境界条件を変更しました。
- 第 7 章の XML パラメータ書式を変更しました。
- 第 8 章を変更しました。

Version 1.0.4 2010/12/22

- パラメータ外力項を用いた境界条件を追加しました。
- 例題に SHC1D を追加しました。
- 解法アルゴリズムに温度の陽解法と陰解法を追加、関連する変更を Iteration にも行いました。
- 対流項スキームの O3_MUSCL 選択時に, minmod リミターを追加しました。
- ファイル出力指定に Debug_Divergence を追加しました。
- 内部境界に不活性境界条件を追加しました。
- バージョン情報 Version_Info の記述を変更しました。
- 分割方法について, VoxelDivisionMethod を加筆しました。
- 第 7 章のモニタリング機能を追加しました。また, Monitor_List を修正しました。

Version 1.0.3 2010/12/7

- 対流項指定のパラメータ Convection_Term に O2_Central を追加しました。
- 組み込み例題に固体熱伝導 (SHC1D) を追加しました。
- ログ出力 Log で、性能プロファイリング出力に詳細レベルを追加しました。
- 出力ファイル OutputData とログ出力 Log に壁面情報出力を追加しました。また、出力ファイルの種類を追加しました。
- Solver_Property において、PDE_type の表を追加しました。また、定常/非定常の種別のキーワードを Time_Variation に変更しました。
- 並列計算時のボクセル分割の指定方法 VoxelDivisionMethod の説明を追加しました。
- 外部境界条件の指定方法を変更しました。

Version 1.0.2 2010/11/16

- V-Sphere 1.8.2 に対応
- パラメータ Interval, Log, Reference_Frame, Time_Control の指定方法を変更しました。
- パラメータ Iteration, Version の表記を修正しました。
- 境界条件周期境界の指定方法を変更しました。

Version 1.0.1 2010/11/1

- パラメータに Log の説明を追記しました。
- パラメータの Interval と Time_Control の時刻指定について, Step と Time による指定を排他的にしました。
- CBC ソルバークラスのインストールのセクションで、ディレクトリ構成の変更と doxygen ファイルについて追記しました。

Version 1.0.0 2010/10/9

- ユーザガイド (本編:cbc_UG.pdf) と内部情報 (Inside_CBC.pdf) を分離しました。

参考文献

- [1] <http://ja.wikipedia.org/wiki/Autotools>.
- [2] 中山顕, 桑原不二朗, 許国良. 热流体力学 -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	93	sph—	122
アンインストール		Boussinesq 近似	14
SolverClass の—	8	物理パラメータ	65
V-Sphere の—	7	プロセス並列	124
分離解法		並列計算	9, 124
イニシャルスタート	59	変数配置	
インデックス	74	Collocated—	74
XML		密度変化	14
—のセクション	32	無次元化	15
—のタグ	32	リストア	44, 56
温度拡散係数	15	履歴	114
ガイドセル	38	ALE	14
拡散数	59	Binary Voxel	20
基本リスト		Boussinesq	14
境界条件の—	72	CFL	59
媒質の—	69	DomainInfo	71
組み込み例題	41, 66	Fractional step	17
コンポーネント	73, 93, 120	InnerBoundary	71
座標系	55	mpirun	124
移動—	55, 96	OuterBoundary	71
静止—	55, 96	SklBase	3
時間積分幅	59	SolverType	32
時間平均操作	36	SPHERE 定義要素	32
実行制御パラメータ	35	SphereConfig	32, 71
出力ファイル	52	STL	22
初期値	65	Volume Fraction	93
ステンシル	38	V-Sphere	2
スレッド並列	125	V-Xgen	22
制限関数	38	V-Xpp	22
ボクセル ID	49	XML	32
占有率	93		
ソルバ定義要素	32		
単振動	75, 90		
定常解	36		
低マッハ数	15		
熱流動タイプ	57		
媒質 ID	49		
反復解法	45		
ファイル			
コンフィギュレーション—	31		
コンポーネント履歴—	115		
入力—	44		
反復履歴—	117		
標準履歴—	114		
ボクセル—	121		
流量履歴—	116		
履歴—	48, 111		
condition—	112		