

A User's Guide to FrontFlow/violet-HC

Ver.000

Center of Research on Innovative Simulation Software
Institute of Industrial Science
The University of Tokyo

2013 年 12 月 10 日

目次

第 1 章	はじめに	2
1.1	Front Flow/violet とは	3
1.2	ユーザガイドの利用方法	3
第 2 章	インストール	4
2.1	TextParser のインストール	4
2.2	Polylib のインストール	4
2.3	Cutlib のインストール	4
2.4	PMlib のインストール	4
2.5	BCMTools のインストール	4
2.6	FrontFlow/violet のインストール	4
2.7	VisIt のインストール	4
2.8	ParaView のインストール	4
2.9	FFV のインストール	4
第 3 章	基礎方程式と解析手法	6
3.1	基礎方程式	6
3.2	空間離散化	6
3.3	時間離散化	6
3.4	線形方程式ソルバー	6
第 4 章	ソルバーの実行	7
4.1	実行方法	7
第 5 章	設定	8
5.1	入力パラメータファイル	8
5.2	入力パラメータ	8
第 6 章	解析モデルの作成	24
第 7 章	出力	25
第 8 章	チュートリアル	26
8.1	球	26
第 9 章	アップデート情報	37
	参考文献	38

第1章

はじめに

1.1 Front Flow/violet とは

Front Flow/violet(以下, FFV) は, 直交等間隔格子を用いた流体解析システムです.

1.2 ユーザガイドの利用方法

FFV は直交等間隔格子を用いています. そのため, 市販の流体解析ソフトの利用に慣れたユーザには, 少しとっつきにくい面があるかも知れません*¹. そのため, 本ユーザガイドには, FFV の設定や実行に関するだけでなく, 支配方程式の離散化方法や, 計算プログラム中でのデータ構造などについても, 詳細に記述しています*². パラメータの設定や計算モデルの作成などで参考にしてください.

*¹ 開発者の視点からは, FFV の方が色々な点で簡略化されている分, むしろ容易に利用できるものと考えます.

*² 2013/12/10 時点, 未記述.

第2章

インストール

2.1 TextParser のインストール

2.2 Polylib のインストール

2.3 Cutlib のインストール

2.4 PMlib のインストール

2.5 BCMTools のインストール

2.6 FrontFlow/violet のインストール

2.7 Vislt のインストール

2.8 ParaView のインストール

2.9 FFV のインストール

■ソースファイルの展開

```
$ tar zxvf FFV-HC-x.x.x.tar.gz
```

■ソースファイルの内容

```
FFV-HC-x.x.x
|
+- AUTHORS
+- COPYING
+- ChngeLog
+- INSTALL
+- LICENSE
+- NEWS
+- README
|
+- bin/
| +- ffv
|
+- doc/
| +- ug.pdf
|
+- examples/
| +- FlowPastASphere/
|
+- src/
  +- FFV/
```

第3章

基礎方程式と解析手法

3.1 基礎方程式

3.2 空間離散化

3.2.1 変数配置

3.2.2 埋め込み境界法

3.3 時間離散化

3.4 線形方程式ソルバー

第4章

ソルバーの実行

4.1 実行方法

■ FFV 実行コマンド

```
$ mpirun -n 2 ./ffv sphere.tpp
```


第5章

設定

5.1 入力パラメータファイル

5.1.1 記述構文

FFV で用いる設定ファイルの記述には、簡易テキストパーサ (TextParser) ライブラリを利用します。TextParser の記述構文では階層構造、連番、条件分岐などを表現することができるため、シミュレータに与える複雑なパラメータ群を柔軟に設定することができます。また、TextParser の開発においては、計算機間の移植性（ポータビリティ）や軽量性が考慮されていますので、汎用性が高く、メンテナンスが容易という特徴があります。

TextParser の記述構文については、付属のマニュアルをご参照ください。

5.1.2 種類と構造

FFV の実行には、2 種類の設定ファイルが必要です。1 つは FFV の動作全般に関わるパラメータを記述した動作設定ファイル、もう 1 つは流路や、流路内に配置された物体の幾何学的な情報を記述した形状設定ファイルです。これらのファイル名はユーザが自由に変更することが可能ですが、本マニュアルでは、便宜上、それぞれ "solver.tpp", "geometry.tpp" というファイル名を持つものとします。

表 5.1 入力ファイルの種類

ファイル	ファイル名	記述内容
動作設定ファイル	solver.tpp	FFV の動作全般に関するパラメータの設定
形状設定ファイル	geometry.tpp	流路や流路内に配置された物体の幾何形状の設定

以下では、動作設定ファイルの記述方法について解説します。なお、形状設定ファイルの記述方法については、?? をご参照ください。

5.2 入力パラメータ

5.2.1 ApplicationControl

アプリケーションの全般的な動作に関する設定を行います。

フィル操作

FFV-BCM では、解析領域を流体領域と固体領域に分けて考えます。そして、流体領域は 1 つしか存在しないものと仮定します。なお、固体領域は複数存在しても構いません。

フィル操作では、解析領域全体から流体領域を抽出します。このフィル操作を実行するためには、操作の起点となる点を、流体領域から、予め指定する必要があります。

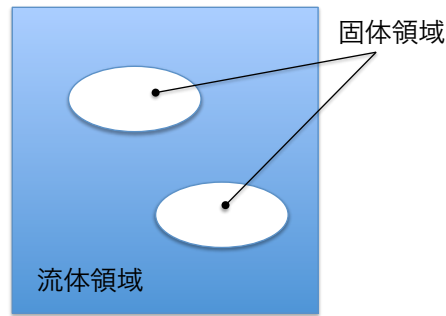


図 5.1 流体領域と固体領域

- `/ApplicationControl/CheckParameter`
パラメータチェック機能の有効化/無効化します。
- `/ApplicationControl/Operator`
解析実行者の名前を記述します。
- `/ApplicationControl/Filling/Medium`
フィル操作の対象となる媒質（流体）を `/MediumTable` の中から選択します。
- `/ApplicationControl/Filling/Origin`
フィル操作の起点を指定します。流体領域から任意の 1 点を選びます。

5.2.2 ConvectiveTerm

対流項の計算スキームに関する設定を行います。

- `/ConvectiveTerm/Scheme`
計算スキームを表 5.2 から選択します。

表 5.2 対流項計算スキーム

値	計算スキーム	備考
"U1"	1 次精度風上差分法	
"C2"	2 次精度中心差分法	
"E3"	3 次精度 ENO 法	
"W3"	3 次精度 WENO 法	

5.2.3 DomainInfo

解析領域、ならびに、その分割方法に関する設定を行います。

解析領域とルートブロック

FFV-BCM では、解析領域を表現するための基本単位として、ルートブロックを用います。ルートブロックは、全ての辺の長さが同じ立方体です。ルートブロックの 1 辺の長さを L 、原点座標を $O' = (OX, OY, OZ)$ 、各軸方向のルートブロック数を (NX, NY, NZ) としたとき、解析領域の範囲は (OX, OY, OZ) から $(OX + L \times NX, OY + L \times NY, OZ + L \times NZ)$ となります。

逆に、解析領域の範囲が予め与えられている場合には、それに合うように、 L や、 (NX, NY, NZ) を調整します。

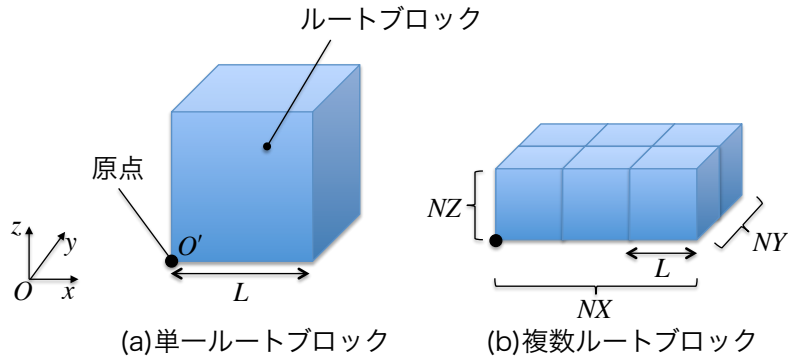


図 5.2 ルートブロックに関する諸元.

解析領域の 8 分木分割

各ルートブロックは、解析に必要な格子解像度の要求を満たすように、8 分木構造で分割、細分化されます。また、細分化によって生成された子ブロックも、やはりある条件に従い、再度細分化されます。この再帰的細分化過程における条件設定を変更することで、計算格子密度の空間的な分布を制御することが可能となります。

具体的な細分化手法は、表 5.3 から選択します。それぞれの細分化手法の詳細は、以下のとおりです。

■ "Uniform"

ルートブロック、および、細分化によって生成された子ブロックを、全て細分化します。ただし、予め設定された細分化レベル (L_{max}) を上限とします。

■ "Polygon"

ルートブロック、または、細分化によって生成された子ブロックが、ターゲット (ポリゴン、もしくは、バウンディングボックスで指定) を含む場合に限り、そのブロックは細分化されます。ただし、それぞれのターゲットに設定された細分化レベルを上限とします。一方、予め設定された細分化レベル (L_{min}) に達するまでは、無条件に細分化されます。

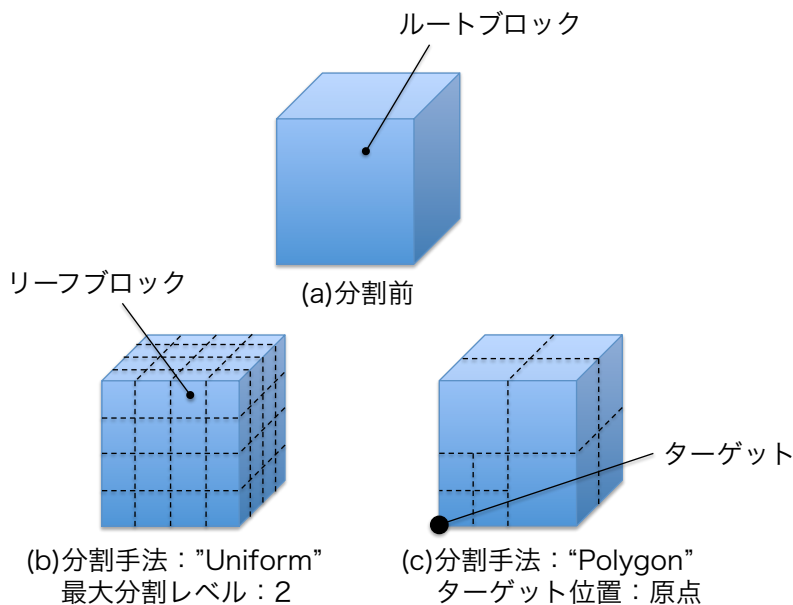


図 5.3 解析領域の 8 分木分割の例. (a) は分割前のルートブロック. (b) は分割方法を "Uniform", 最大分割レベルを 2 とした場合の結果, (c) は分割方法を "Polygon", ターゲット位置を原点とした場合の結果を示す.

リーフブロック

細分化過程によって生成された8分木構造の各ノードをリーフブロックと呼びます。FFV-BCMでは、各リーフブロックに、等しい数 (NC) の計算セルを割り当てます。

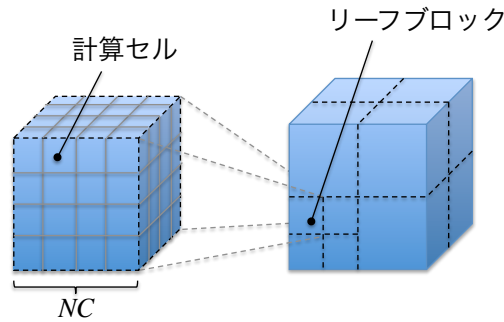


図 5.4 リーフブロックに関する諸元

- `/DomainInfo/RootBlock/Origin`
解析領域を分割するために用いるルートブロックの原点, $O'(OX, OY, OZ)$, を指定します。
- `/DomainInfo/RootBlock/Grid`
各軸方向に対するルートブロック数, (NX, NY, NZ) , を指定します。
- `/DomainInfo/RootBlock/Length`
ルートブロックの1辺の長さ, L , を指定します。
- `/DomainInfo/RootBlock/PeriodicX`
x 軸方向の周期境界条件を有効化/無効化します。
- `/DomainInfo/RootBlock/PeriodicY`
y 軸方向の周期境界条件を有効化/無効化します。
- `/DomainInfo/RootBlock/PeriodicZ`
z 軸方向の周期境界条件を有効化/無効化します。
- `/DomainInfo/Tree/Type`
解析領域を8分木分割するための方法を表 5.3 から選択します。
- `/DomainInfo/Tree/MinLevel`
解析領域の8分木分割における細分化レベルの最小値 (L_{min}) を指定します。
- `/DomainInfo/Tree/MaxLevel`
解析領域の8分木分割における細分化レベルの最大値 (L_{max}) を指定します。
- `/DomainInfo/Tree/PolygonGroupList/PolygonGroup[@]/Name`
解析領域の8分木分割に用いるポリゴンの名前を記述します。なお、ここで記述するポリゴン名は、形状設定ファイルで定義されている必要があります。
- `/DomainInfo/Tree/PolygonGroupList/PolygonGroup[@]/Level`
解析領域の8分木分割に用いるポリゴンに対する細分化レベルを指定します。
- `/DomainInfo/Tree/BoundingBoxList/BoundingBox[@]/Origin`
解析領域の8分木分割に用いるバウンディングボックスの始点を指定します。
- `/DomainInfo/Tree/BoundingBoxList/BoundingBox[@]/End`
解析領域の8分木分割に用いるバウンディングボックスの終点を指定します。
- `/DomainInfo/Tree/BoundingBoxList/BoundingBox[@]/Level`
解析領域の8分木分割に用いるバウンディングボックスに対する細分化レベルを指定します。

- /DomainInfo/LeafBlock/NumberOfCells
各ブロックにおけるセル数 (各軸共通) を指定します.
- /DomainInfo/LeafBlock/NumberOfVirtualCells
各ブロックにおける仮想セル数 (各軸共通) を指定します.

表 5.3 8 分木分割方法

値	方法	備考
"Uniform"	一様均等分割.	
"Polygon"	ポリゴンとバウンディングボックスによる細分化領域の指定.	

5.2.4 GeometryModel

流路や流路内に配置された物体の幾何形状に関する設定を行います.

- /GeometryModel/Source
形状設定ファイルを記述します.

5.2.5 Iteration

線形方程式の解法に関する設定を行います.

- /Iteration/Pressure
圧力に対する線形方程式のソルバーを/Iteration/LinearSolver[@]の中から選択します.
- /Iteration/Velocity
速度の各成分に対する線形方程式のソルバーを/Iteration/LinearSolver[@]の中から選択します.
- /Iteration/Temperature
温度に対する線形方程式のソルバーを/Iteration/LinearSolver[@]の中から選択します.
- /Iteration/LinearSolver[@]/Alias
線形ソルバーの名前を記述します.
- /Iteration/LinearSolver[@]/Class
線形ソルバーの種類を表 5.4 から選択します.
- /Iteration/LinearSolver[@]/MaxIteration
線形ソルバーの最大反復回数
- /Iteration/LinearSolver[@]/ConvergenceCriterion
線形ソルバーの収束判定閾値
- /Iteration/LinearSolver[@]/Omega
線形ソルバーの緩和係数

表 5.4 線形ソルバーの種類

値	線形ソルバー	備考
"PBiCGSTAB"	Jacobi 法を前処理とした BiCGSTAB 法	

5.2.6 MediumTable

媒質の物性値に関する設定を行います。

- /MediumTable/MediumName
媒質名を記述します。
- /MediumTable/MediumName/State
媒質の状態を”Fluid”(流体) と”Solid”(固体) から選択します。
- /MediumTable/MediumName/MassDensity
媒質の質量密度を指定します。
- /MediumTable/MediumName/SpecificHeat
媒質の定圧比熱を指定します。
- /MediumTable/MediumName/ThermalConductivity
媒質の熱伝導率を指定します。
- /MediumTable/MediumName/Viscosity
媒質の粘性係数を指定します。
- /MediumTable/MediumName/COLOR
媒質の色番号を指定します。FXgen で使用します。

5.2.7 Output

解析結果の出力に関する設定を行います。

- /Output/Log/Base
実行時の基本的情報の出力を有効化/無効化します。
- /Output/Log/Profiling
実行時性能のプロファイリング情報の出力を有効化/無効化します。
- /Output/Log/Laptime
各ステップの経過時間の出力を有効化/無効化します。
- /Output/Log/Iteration
線形ソルバーの実行状況の出力を有効化/無効化します。
- /Output/Log/Block
BCM ブロック生成結果の出力を有効化/無効化します。
- /Output/Log/Statistics
流体変数の統計情報の出力を有効化/無効化します。
- /Output/Log/FilenameBase
実行時の基本的情報の出力ファイル名を記述します。
- /Output/Log/FilenameProfiling
実行時性能のプロファイリング情報の出力ファイル名を記述します。
- /Output/Log/FilenameLaptime
各ステップの経過時間の出力ファイル名を記述します。
- /Output/Log/FilenameIteration
線形ソルバーの実行状況の出力ファイル名を記述します。
- /Output/Log/FilenameBlock
BCM ブロック生成結果の出力ファイル名を記述します。

- /Output/Log/FilenameStatistics
流体変数の統計情報の出力ファイル名を記述します。
- /Output/Log/History/TemporalType
各種ログ情報をファイルに出力するための時間間隔の型を表 5.5 から選択します。
- /Output/Log/History/Interval
各種ログ情報をファイルに出力するための時間間隔を指定します。
- /Output/Log/Console/TemporalType
各種ログ情報をコンソールに出力するための時間間隔の型を表 5.5 から選択します。
- /Output/Log/Console/Interval
各種ログ情報をコンソールに出力するための時間間隔を指定します。
- /Output/Data/BasicVariables/Format
基本変数 (圧力, 流速, 温度) をファイル出力する際に用いるファイルフォーマットを表 5.6 から選択します。
- /Output/Data/BasicVariables/TemporalType
基本変数 (圧力, 流速, 温度) をファイル出力するための時間間隔の型を表 5.5 から選択します。
- /Output/Data/BasicVariables/Interval
基本変数 (圧力, 流速, 温度) をファイル出力するための時間間隔を指定します。
- /Output/Data/DerivedVariables/Format
派生変数をファイル出力する際に用いるファイルフォーマットを表 5.6 から選択します。
- /Output/Data/DerivedVariables/TemporalType
派生変数をファイル出力するための時間間隔の型を表 5.5 から選択します。
- /Output/Data/DerivedVariables/Interval
派生変数をファイル出力するための時間間隔を指定します。
- /Output/Data/DerivedVariables/Qcriterion
Q 値のファイル出力を有効化/無効化します。
- /Output/FormatOption/PLOT3D/Path
PLOT3D フォーマットの出力先を記述します。
- /Output/FormatOption/PLOT3D/Prefix
PLOT3D フォーマットのファイル接頭辞を記述します。
- /Output/FormatOption/VTK/Path
VTK フォーマットの出力先を記述します。
- /Output/FormatOption/VTK/Prefix
VTK フォーマットのファイル接頭辞を記述します。

表 5.5 時間の型

値	型	備考
"Step"	タイムステップ型	

表 5.6 ファイルフォーマット

値	型	備考
"VTK"	VTK 形式	
"PLOT3D"	PLOT3D 形式	

5.2.8 ShapeApproximation

形状近似手法に関する設定を行います。

- /ShapeApproximation/Method
形状近似手法を表 5.7 から選択します。
- /ShapeApproximation/Cutoff
距離情報のカットオフ値を指定します。形状近似手法として”DistanceInfo”を選択した場合のみ有効となります。

表 5.7 形状近似手法

値	型	備考
”Binary”	バイナリボクセル近似	
”DistanceInfo”	距離情報近似	

5.2.9 SolvingMethod

支配方程式の解法に関する設定を行います。

- /SolvingMethod/Flow
流体の運動量方程式の時間積分法を表 5.8 から選択します。

表 5.8 時間積分法

値	型	備考
”Explicit”	陽解法	
”Implicit”	陰解法	

5.2.10 StartCondition

解析開始条件に関する設定を行います。

- /StartCondition/InitialState/Pressure
圧力の初期値を指定します。
- /StartCondition/InitialState/Velocity
流速ベクトルの初期値を指定します。
- /StartCondition/InitialState/Temperature
温度の初期値を指定します。
- /StartCondition/Restart/InputPath
リスタート用ファイルが格納されたディレクトリを記述します。
- /StartCondition/Restart/OutputPath
リスタート用ファイルを出力するためのディレクトリを記述します。
- /StartCondition/Restart/Prefix
リスタート用ファイルの接頭辞を記述します。

- /StartCondition/Restart/Interval
リスタート用ファイルを出力する間隔を指定します。

5.2.11 TimeControl

アプリケーション内の時間に関する設定を行います。

- /TimeControl/Acceleration/TemporalType
流入速度を変化させるための時間間隔の型を表 5.5 から選択します。
- /TimeControl/Acceleration/AcceleratingTime
流入速度を変化させるための時間間隔を指定します。なお、本パラメータを 0 とすると、impulsive スタートとなります。
- /TimeControl/TimeStep/Mode
時間刻みを指定するための方法を表 5.9 から選択します。
- /TimeControl/TimeStep/DeltaT
時間刻みを指定します。
- /TimeControl/Session/TemporalType
シミュレーションの開始時刻と終了時刻の型を表 5.5 から選択します。
- /TimeControl/Session/Start
シミュレーションの開始時刻を指定します。
- /TimeControl/Session/End
シミュレーションの終了時刻を指定します。

表 5.9 時間刻みの指定方法

値	型	備考
"Direct"	時間刻みの値を直接指定します。	

5.2.12 GridGeneration

格子生成に関する設定を行います。

- /GridGeneration/HoleFilling
格子生成時に生じる"穴"に対する対策 1 を有効化/無効化します。
- /GridGeneration/HoleFilling2
格子生成時に生じる"穴"に対する対策 2 を有効化/無効化します。
- /GridGeneration/OutputSTL
格子生成時に用いたカット情報 (ただし、ボクセル的に 2 値化しもの) のファイル出力を有効化/無効化します。

5.2.13 Tuning

計算速度の高速化に関する設定を行います。

- /Tuning/Masking
SIMD 化率向上を目的として、仮想セルをマスキングすることにより、3 重ループを 1 重ループ化します。

- /Tuning/Ordering

BCM ブロックのノード割り当て時に用いる空間充填曲線を表 5.10 から選択します。

- /Tuning/VCUpdate

仮想セルの同期手法を表 5.11 から選択します。

表 5.10 空間充填曲線

値	空間充填曲線	備考
"Z"	Z-order(Morton-order) curve.	
"Hilbert"	Hilbert curve.	

表 5.11 仮想セル同期手法

値	仮想セル同期手法	備考
"AtOnce"	全方向同時同期.	

5.2.14 BCTable

境界条件に関する設定を行います。

外部境界条件

FFV-BCM では、解析領域を表す直方体の各面 (すなわち、 $\pm x$ 方向、 $\pm y$ 方向、 $\pm z$ 方向の計 6 面) を外部境界面と呼びます。全ての外部境界面に対して境界条件を設定する必要があります。ここでは、外部境界面に対する境界条件の設定方法について述べます。

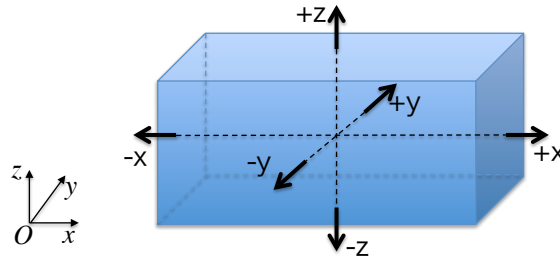


図 5.5 外部境界面

それぞれの外部境界面に対する境界条件は、表 5.12 から選択します。なお、各種類の境界条件において、実際に用いている境界条件の型と右辺値は以下のとおりです。また、"Direct" は、ここにはない組み合わせの境界条件を用いる場合に選択します。

$$\text{"FixedWall"} : u_n = 0, u_s = 0, u_t = 0, \partial_n p = 0. \quad \dots\dots\dots 5.1$$

$$\text{"SlidingWall"} : \partial_n u_n = 0, u_s = u_{c1}, u_t = u_{c2}, \partial_n p = 0. \quad \dots\dots\dots 5.2$$

$$\text{"Inlet"} : u_n = u_c, u_s = 0, u_t = 0, \partial_n p = 0. \quad \dots\dots\dots 5.3$$

$$\text{"Outlet"} : \partial_n u_n = 0, u_s = 0, u_t = 0, p = p_c. \quad \dots\dots\dots 5.4$$

$$\text{"Slip"} : u_n = 0, \partial_n u_s = 0, \partial_n u_t = 0, \partial_n p = 0. \quad \dots\dots\dots 5.5$$

ここで、 u_n および u_s , u_t はそれぞれ、外部境界面の法線方向および接線方向に対する速度成分を表し、 p は圧力を表しています。また、 ∂_n は外部境界面の法線方向に対する偏微分を表しています。

- /BC/OuterBoundary/BCName
境界条件の名前を記述します。なお、このディレクトリでは、境界条件の処理内容を定義します。
- /BC/OuterBoundary/BCName/Class
境界条件の種類を表 5.12 から選択します。
- /BC/OuterBoundary/BCName/TypeP
圧力に対する境界条件の型を表 5.13 から選択します。
- /BC/OuterBoundary/BCName/TypeUX
速度の x 軸方向成分に対する境界条件の型を表 5.13 から選択します。
- /BC/OuterBoundary/BCName/TypeUY
速度の y 軸方向成分に対する境界条件の型を表 5.13 から選択します。
- /BC/OuterBoundary/BCName/TypeUZ
速度の z 軸方向成分に対する境界条件の型を表 5.13 から選択します。
- /BC/OuterBoundary/BCName/TypeT
温度に対する境界条件の型を表 5.13 から選択します。
- /BC/OuterBoundary/BCName/ValueP
圧力に対する境界条件の右辺値を指定します。
- /BC/OuterBoundary/BCName/ValueUX
速度の x 軸方向成分に対する境界条件の右辺値を指定します。
- /BC/OuterBoundary/BCName/ValueUY
速度の y 軸方向成分に対する境界条件の右辺値を指定します。
- /BC/OuterBoundary/BCName/ValueUZ
速度の z 軸方向成分に対する境界条件の右辺値を指定します。
- /BC/OuterBoundary/BCName/ValueT
温度に対する境界条件の右辺値を指定します。
- /BC/OuterBoundary/FaceBC/Xminus
 $-x$ 方向の外部境界面に対する境界条件名を/BC/OuterBoundary/BCName から選択します。
- /BC/OuterBoundary/FaceBC/Xplus
 $+x$ 方向の外部境界面に対する境界条件名を/BC/OuterBoundary/BCName から選択します。
- /BC/OuterBoundary/FaceBC/Yminus
 $-y$ 方向の外部境界面に対する境界条件名を/BC/OuterBoundary/BCName から選択します。
- /BC/OuterBoundary/FaceBC/Yplus
 $+y$ 方向の外部境界面に対する境界条件名を/BC/OuterBoundary/BCName から選択します。
- /BC/OuterBoundary/FaceBC/Zminus
 $-z$ 方向の外部境界面に対する境界条件名を/BC/OuterBoundary/BCName から選択します。
- /BC/OuterBoundary/FaceBC/Zplus
 $+z$ 方向の外部境界面に対する境界条件名を/BC/OuterBoundary/BCName から選択します。

内部境界条件

FFV-BCM では、流路内においた障害物の表面などを内部境界面と呼びます。全ての内部境界面に対して境界条件を設定する必要があります。現在のところ、内部境界面に対しては、一律に”FixedWall”条件が課されます。

表 5.12 境界条件の種類

値	境界条件の種類	備考
"Direct"	各変数の境界条件の型, 右辺値を直接指定.	
"FixedWall"	固定壁境界条件.	
"SlidingWall"	(接線方向限定) 移動境界条件. 壁面移動速度を指定.	
"Inlet"	入口境界条件. 流入速度を指定.	
"Outlet"	出口境界条件. 圧力を指定.	
"Slip"	スリップ境界条件.	

表 5.13 境界条件の型

値	境界条件の型	備考
"Dirichlet"	Dirichlet 型境界条件. $\phi = const.$ で記述できる.	
"Neumann"	Neumann 型境界条件. $\partial_n \phi = const.$ で記述できる.	

表 5.14: table:パラメータとその役割

ラベル	型	指定内容	備考
/ApplicationControl/	-		
+ CheckParameter	Bool	パラメータチェック	
+ Operator	String	オペレータ名	
+ Filling/	-		
+ Medium	String	フィル操作対象の媒質 (流体)	
+ Origin	Real(3)	フィル操作の起点	
/ConvectionTerm/	-		
+ Scheme	String	対流項の離散化スキーム	
/DomainInfo/	-		
+ RootBlock/	-		
+ Origin	Real(3)	解析領域の原点	
+ Grid	Integer(3)	各軸方向のルートブロックの数	
+ Length	Real	ルートブロックの 1 辺の長さ	
+ PeriodicX	Bool	x 軸方向周期境界条件	
+ PeriodicY	Bool	y 軸方向周期境界条件	
+ PeriodicZ	Bool	z 軸方向周期境界条件	
+ LeafBlock/	-		
+ NumberOfCells	Integer	ブロック内セル数 (各軸共通)	
+ NumberOfVirtualCells	Integer	ブロック内仮想セル数 (各軸共通)	
+ Tree/	-		
+ Type	String	細分化方法	
+ MinLevel	Integer	細分化レベルの下限	
+ MaxLevel	Integer	細分化レベルの上限	
+ PolygonGroupList/	-		
+ PolygonGroup[@]/	-		

Continued on next page

表 5.14: table:パラメータとその役割

ラベル	型	指定内容	備考
+ Name	String	ポリゴン名	
+ Level	Integer	細分化レベル	
+ BoundingBoxList/	-		
+ BoundingBox[@]/	-		
+ Origin	Real(3)	BBox の原点	
+ End	Real(3)	BBox の終点	
+ Level	Integer	細分化レベル	
/GeometryModel/	-		
+ Source	String	Polylib ファイル, または, 組み込み例題名	
/Iteration/	-		
+ Pressure	String	圧力に対する線形ソルバ	
+ Velocity	String	速度に対する線形ソルバ	
+ Temperature	String	温度に対する線形ソルバ	
+ LinearSolver[@]/	-		
+ Alias	String	別名	
+ Class	String	線形ソルバクラス	
+ MaxIteration	Integer	最大反復回数	
+ ConvergenceCriterion	Real	収束判定条件	
+ NormType	Real	ノルム定義方法	
+ Omega	Real	緩和係数	
/MediumTable/	-		
+ MediumName/	String	媒質名	
+ State	String	状態 (流体, 固体)	
+ MassDensity	Real	質量密度	
+ SpecificHeat	Real	定圧比熱	
+ ThermalConductivity	Real	熱伝導率	
+ KinematicViscosiy	Real	動粘性係数	
+ Viscosiy	Real	粘性係数	
+ SpeedOfSound	Real	音速	
+ VolumeExpansion	Real	体積膨張率	
+ COLOR	Real	色番号 (FXgen 用)	
/Output/	-		
+ Log/	-		
+ Base	Bool	標準履歴	
+ Profiling	Bool	実行性能レポートの作成・出力	
+ Laptime	Bool	各タイムステップ毎の計算時間	
+ Iteration	Bool	反復解法の履歴	
+ Block	Bool	格子生成結果	
+ Statistics	Bool	各変数の統計情報	
+ FilenameBase	String	各種ログのファイル名	
+ FilenameProfiling	String	同上	

Continued on next page

表 5.14: table:パラメータとその役割

ラベル	型	指定内容	備考
+ FilenameLaptime	String	同上	
+ FilenameIteration	String	同上	
+ FilenameBlock	String	同上	
+ FilenameStatistics	String	同上	
+ History/	-		
+ TemporalType	String	履歴ファイルの出力間隔指定形式	
+ Interval	Real/Integer	履歴ファイルの出力間隔	
+ Console/	-		
+ TemporalType	String	標準出力の出力間隔指定形式	
+ Interval	Real/Integer	標準出力の出力間隔	
+ Data/	-		
+ BasicVariables/	-		
+ Format	String	基本変数の出力形式	
+ TemporalType	String	基本変数の出力間隔指定形式	
+ Interval	Real/Integer	基本変数の出力間隔	
+ DerivedVariables/	-		
+ Format	String	派生変数の出力形式	
+ TemporalType	String	派生変数の出力間隔指定形式	
+ Interval	Real/Integer	派生変数の出力間隔	
+ Qcriterion	Bool	速度勾配テンソルの第 2 不変量	
+ FormatOption/	-		
+ PLOT3D/	-		
+ Path	String	出力ディレクトリ	
+ Prefix	String	出力ファイル接頭辞	
+ VTK/	-		
+ Path	String	出力ディレクトリ	
+ Prefix	String	出力ファイル接頭辞	
/ShapeApproximation/	-		
+ Method	String	形状近似手法	
+ Cutoff	Real	IBM のカットオフ値	
/SolvingMethod/	-		
+ Flow	String	運動量方程式の時間積分方法	
/StartCondition/	-		
+ Restart/	-		
+ InputPath	String	入力ディレクトリ	
+ OutputPath	String	出力ディレクトリ	
+ Prefix	String	ファイル接頭辞	
+ Interval	Integer	出力間隔	
+ InitialState/	-		
+ Pressure	Real		
+ Velocity	Real(3)		

Continued on next page

表 5.14: table:パラメータとその役割

ラベル	型	指定内容	備考
+ Temperature	Real		
/TimeControl/	-		
+ Acceleration/	-		
+ TemporalType	String	加速時間間隔指定形式	
+ AcceleratingTime	Real/Integer	加速時間間隔	
+ TimeStep/	-		
+ Mode	String	時間刻み指定形式	
+ DeltaT	Real	時間刻み	
+ Session/	-		
+ TemporalType	String	セッション開始・終了時刻指定形式	
+ Start	Real/Integer	セッション開始時刻	
+ End	Real/Integer	セッション終了時刻	
/GridGeneration/	-		
+ HoleFilling	Bool	HoleFilling	
+ HoleFilling2	Bool	HoleFilling2	
+ OutputSTL	Bool	STL	
/Tuning/	-		
+ Masking	String	仮想セルのマスキングによる 3 重ループの 1 重化	
+ Ordering	String	ブロックの順序 (z, hilbert, etc)	
+ VCUUpdate	String	仮想セルの同期方法 (同時, 軸別, レベル別)	
/BC/	-		
+ OuterBoundary/	-		
+ BCName/	String	境界条件名	
+ Class	String	境界条件の種類	
+ TypeP	String	圧力に対する境界条件の型	
+ TypeUX	String	速度の x 軸方向成分に対する境界条件の型	
+ TypeUY	String	速度の y 軸方向成分に対する境界条件の型	
+ TypeUZ	String	速度の z 軸方向成分に対する境界条件の型	
+ TypeT	String	温度に対する境界条件の型	
+ ValueP	Real	圧力に対する境界条件の右辺値	
+ ValueUX	Real	速度の x 軸方向成分に対する境界条件の右辺値	
+ ValueUY	Real	速度の y 軸方向成分に対する境界条件の右辺値	
+ ValueUZ	Real	速度の z 軸方向成分に対する境界条件の右辺値	
+ ValueT	Real	温度に対する境界条件の右辺値	
+ FaceBC/	-		
+ Xminus	String	-x 方向の外部境界面に対する境界条件名	
+ Xplus	String	+x 方向の外部境界面に対する境界条件名	
+ Yminus	String	-y 方向の外部境界面に対する境界条件名	
+ Yplus	String	+y 方向の外部境界面に対する境界条件名	
+ Zminus	String	-z 方向の外部境界面に対する境界条件名	
+ Zplus	String	+z 方向の外部境界面に対する境界条件名	

第6章

解析モデルの作成

第7章

出力

第8章

チュートリアル

各種の例題を用いて、FFV-BCM の設定方法を解説します。

8.1 球

8.1.1 問題設定

一様流中に置かれた球の周りの流れを考えます。

解析領域は 1 辺の長さが $15D$ の立方体とし、その中心に直径 D の球を配置します。また、流入速度は U とします。作動流体の物性値は、質量密度が ρ 、粘性係数が μ とします。解析領域の概要を Fig. 8.1.1 に示します。

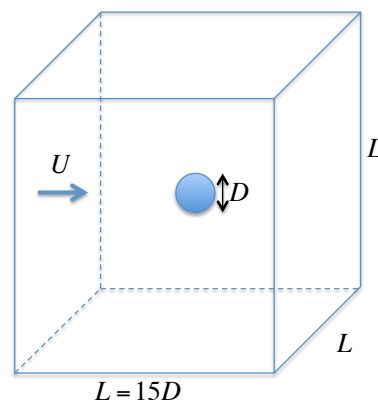


図 8.1 解析領域

本チュートリアルでは、長さを D 、速度を U 、時間を $D/U (= T)$ で、それぞれ無次元化することとします。また、レイノルズ数を $Re = \rho U D / \mu$ とします。

本チュートリアルでは、 $Re = 100$ の場合を考えます。各パラメータの設定例を表. 8.1 に示します。

外部境界面における境界条件を表. 8.2 に示します。 $-x$ 方向の外部境界面では、入口境界として一様流速 U を与えます。一方、 $+x$ 方向の外部境界面では、一定圧力 $p_c (= 0)$ を与えます。 $\pm y$ 方向、および、 $\pm z$ 方向の外部境界面では、圧力および速度ともに Neumann 型の境界条件 (いわゆる "ZeroGradient") を課することとします。

8.1.2 入力パラメータファイル

本チュートリアルでは、動作設定ファイルを "sphere.tpp"、形状設定ファイルを "sphere.tpl"、球のポリゴンデータファイル (STL 形式) を "sphere.stl" とします。

以降では、特に注意しない限り、基本的には "sphere.tpp" の編集内容について述べます。

表 8.1 問題設定

項目	値	備考
体系サイズ ($L = 15D$)	15	
球直径 (D)	1	
流入速度 (U)	1	
質量密度 (ρ)	1	
粘性係数 (μ)	0.01	
レイノルズ数 ($Re = \rho UD/\mu$)	100	

表 8.2 境界条件

項目	値	備考
$-x$ 方向	入口境界, 速度一定 ($u_x = 1$)	
$+x$ 方向	出口境界, 圧力一定 ($p = 0$)	
$-y$ 方向	Neumann 型境界条件.	
$+y$ 方向	Neumann 型境界条件.	
$-z$ 方向	Neumann 型境界条件.	
$+z$ 方向	Neumann 型境界条件.	

形状設定

—＜形状設定ファイルの指定＞—

```
GeometryModel
{
  PolylibFile          = "sphere.tpl"          (1)
}
```

(1) 形状設定ファイルを指定します ("sphere.tpl"). なお, 形状設定ファイルの内容は以下で示します.

—＜形状設定ファイル＞—

(sphere.tpl の内容)

```
Polylib {
  root {
    class_name = "PolygonGroup"
    sphere {                                     (1)
      class_name = "PolygonGroup"
      filepath = "sphere.stl"                  (2)
      id = "2"
    }
  }
}
```

- (1) ポリゴンの名前を記述します ("sphere"). なお, このポリゴン名は解析領域設定において用います. また, このディレクトリでは, ポリゴンデータファイル名の指定など, ポリゴンの詳細について設定します.
- (2) 実際のポリゴンデータ (つまり, 頂点や面に関する情報) の書かれたファイル名を記述します. 現時点でサポートされているファイル形式は, STL 形式のみです.

解析領域設定

<解析領域の範囲>

```
DomainInfo {
  RootBlock
  {
    Origin          = (-7.5, -7.5, -7.5)          (1)
    Grid            = (1, 1, 1)                    (2)
    Length          = 15.0                         (3)
    PeriodicX       = "false"
    PeriodicY       = "false"
    PeriodicZ       = "false"
  }
}
```

(2) 本チュートリアルの解析領域は立方体ですから、ルートブロックは1つとします。

(1), (3) ルートブロックの1辺の長さを考慮し、解析領域の中心座標が(0,0,0)となるように、ルートブロックの原点を定めます。

<分割方法>

```
DomainInfo {
  Tree
  {
    Type            = "polygon"                    (1)
  }
}
```

(1) 細分化手法として”polygon”を選択します。

<ターゲットおよび分割レベル>

```
DomainInfo/Tree {
  PolygonGroupList
  {
    PolygonGroup[@]
    {
      Name          = "sphere"                      (1)
      Level         = 5                             (2)
    }
  }
}
```

(1) 細分化時のターゲットとなるポリゴンを指定します(”sphere”)。なお、指定するポリゴン(”sphere”)は、形状設定ファイルで定義されている必要があります。

(2) ターゲットポリゴン(”sphere”)に対する細分化レベルの上限を指定します。この場合、ルートブロックの各軸方向に $2^5 = 32$ 分割した状態が上限となります。したがって、細分化によって生成されたブロックのうち最小のものは、1辺の長さが $15.0/32$ となります。

—＜リーフノードに割当ててる計算セル数＞—

```
DomainInfo {
  LeafBlock
  {
    NumberOfCells      = 8                      (1)
  }
}
```

- (1) ブロックに割当ててる計算セルの数 (各軸共通) を 8 とします。つまり、計算セルの大きさは、ブロックの大きさの $1/8$ となります。なお、計算セルの大きさは、最小のブロックの大きさによって異なります。今回の場合、最小のブロックの大きさは $15.0/32$ ですので、最小の計算セルの大きさは、 $15.0/32/8$ となります。

境界条件設定

—＜各外部境界面に対する境界条件＞—

```
BCTable/OuterBoundary {
  FaceBC
  {
    Xminus      = "Inlet"                      (1)
    Xplus       = "Outlet"
    Yminus      = "Neumann"
    Yplus       = "Neumann"
    Zminus      = "Neumann"
    Zplus       = "Neumann"
  }

  Inlet                      (2)
  {
    Class       = "Direct"                     (3)
    TypeP       = "Neumann"                     (4)
    TypeUX      = "Dirichlet"                   (5)
    TypeUY      = "Dirichlet"                   (6)
    TypeUZ      = "Dirichlet"                   (7)
    TypeT       = "Neumann"                     (8)
    ValueP      = 0.0                           (4)
    ValueUX     = 1.0                           (5)
    ValueUY     = 0.0                           (6)
    ValueUZ     = 0.0                           (7)
    ValueT      = 0.0                           (8)
  }
}
```

- (1) $-x$ 方向の外部境界面に対して，“Inlet”という名前の境界条件を指定します。
- (2) (1) で指定された境界条件 (“Inlet”) の処理内容の詳細を定義します。
- (3) 各変数の境界条件を直接的に指定するため、境界条件の種類を “Direct” とします。
- (4) 圧力に対する境界条件は、Neumann 型で、右辺値が 0 とします。 $-x$ 方向外部境界面の法線方向に注意すると、本境界条件は $\partial p / \partial x = 0$ と記述することができます。
- (5)-(7) 速度に対する境界条件は、Dirichlet 型で、右辺値はそれぞれ 1, 0, 0 とします。 $-x$ 方向外部境界面の法線方向

に注意すると、本境界条件は、 $(u_x, u_y, u_z) = (1, 0, 0)$ と記述することができます。

＜”Outlet”境界条件の詳細＞

```
BCTable/OuterBoundary {
    Outlet                                     (1)
    {
        Class                               = "Direct"           (2)
        TypeP                               = "Dirichlet"         (3)
        TypeUX                              = "Neumann"           (4)
        TypeUY                              = "Neumann"           (5)
        TypeUZ                              = "Neumann"           (6)
        TypeT                               = "Neumann"           (7)
        ValueP                              = 0.0                 (3)
        ValueUX                              = 0.0                 (4)
        ValueUY                              = 0.0                 (5)
        ValueUZ                              = 0.0                 (6)
        ValueT                              = 0.0                 (7)
    }
}
```

- (1) $+x$ 方向の外部境界面に対して指定された境界条件 (“Outlet”) の処理内容の詳細を定義します。
- (2) 各変数の境界条件を直接的に指定するため、境界条件の種類を “Direct” とします。
- (3) 圧力に対する境界条件は、Dirichlet 型で、右辺値が 0 とします。 $-x$ 方向外部境界面の法線方向に注意すると、本境界条件は $p = 0$ と記述することができます。
- (4)-(6) 速度に対する境界条件は、Neumann 型で、右辺値は 0 としています。 $-x$ 方向外部境界面の法線方向に注意すると、本境界条件は、 $\partial u_x / \partial x = 0$ などと記述することができます。

解析時間設定

＜解析時間＞

```
TimeControl {
    TimeStep
    {
        Mode                               = "direct"
        DeltaT                              = 0.005859375           (1)
    }
    Session
    {
        TemporalType                        = "step"
        Start                              = 0                     (2)
        End                                = 1000                   (2)
    }
}
```

- (1) 本チュートリアルにおいて、計算セルの最小値は $\Delta x_{min} = 15.0/32/8 \approx 0.005859375$ です。また、最大流速の大きさは、入口における流入速度の大きさと同じ位で、 $U = 1$ 程度と考えられます。これらの値から、最大 CFL 数は $CFL = U \Delta t / \Delta x_{min}$ と見積もることができます。
- 本チュートリアルでは、 $CFL = 0.1$ となるように、時間刻み Δt を設定します。

- (2) 解析開始時刻および解析終了時刻は、それぞれ 0 ステップおよび 1000 ステップとします。時間に直すと、それぞれ 0 および 5.859375 となります。

流体領域フィルの設定

—<フィルの設定>—

```
ApplicationControl {  
  Filling  
  {  
    Origin          = (-7.5, -7.5, -7.5)          (1)  
    Medium           = "fluid0"                    (2)  
  }  
}
```

- (1) 流体領域に属する 1 点を指定します。

本チュートリアルでは、解析領域の端点とします。

- (2) 流体の名称を指定します ("fluid0")。なお、指定する流体 ("fluid0") は、/MediumTable で定義されている必要があります。

物性値設定

—<物性値の設定>—

```
MediumTable {  
  fluid0 (1)  
  {  
    State          = "fluid" (2)  
    MassDensity     = 1.0     (3)  
    SpecificHeat    = 1.0     (4)  
    ThermalConductivity = 0.01 (5)  
    Viscosity       = 0.01    (6)  
    Color           = "0000FF" (7)  
  }  
}
```

- (1) 媒質の名称を記述します ("fluid0")。

- (2) この媒質の状態を指定します。ここでは、流体とします ("fluid")。

- (3)-(7) 流体 ("fluid0") の各種物性値を指定します。

8.1.3 実行

—<実行>—

```
$ ls
ffv sphere.stl sphere.tpl sphere.tpp
$ ./ffv sphere.tpp
# FFV-BCM(alpha)
#   Version           : 0.9.0
#   Revision           : Unknown
#   Build date        : 1382071894
#   Configuration file : sphere.tpp
#   MPI processes      : 1
#   OpenMP threads     : 6
# Loading configuration file
#   tree type          : polygon
#   ordering            : Z
#   block size         : 8
#   vc width           : 2
# Loading STL file(s)
# Building BCMOctree
#   Partitions         : #00000 [0000:0231] (0232)
# Summarizing block layout
#   num                : 232
#   min level          : 2
#   max level          : 5
# Computing cuts
#   Zero distance      : 0
#   Hole faces(single) : 0
#   Hole faces(multi)  : 0 (#Ite.: 1)
# Filling
#   Seed for FLUID     : -7.500000 -7.500000 -7.500000
#   Iteration          : 11
#   FLUID cells        : 116176
#   SOLID cells        : 2608
# Completed
0000000000 0.0000000000000000e+00
0000000001 1.4802391529083252e+00
0000000002 1.5168449878692627e+00
0000000003 1.0882229804992676e+00
(skip)
0000000999 5.8127093315124512e-01
0000001000 2.1413493156433105e-01
```

—＜出力ファイルの確認＞—

```
$ ls
BIN
VTK
data-block.txt
data-force.txt
data-ils.txt
data-log.txt
data-pm.txt
data-stats.txt
data-times.txt
ffv
sphere.stl
sphere.tpl
sphere.tpp
```

8.1.4 可視化

8.1.5 【発展】領域分割

<例>

```
DomainInfo/Tree {
  BoundingBoxList
  {
    BoundingBox[@]
    {
      Origin      = (0.0, -0.55, -0.55)
      End         = (1.0, 0.55, 0.55)
      Level       = 5
    }
    BoundingBox[@]
    {
      Origin      = (-0.6, -0.6, -0.6)
      End         = (4.0, 0.6, 0.6)
      Level       = 4
    }
    BoundingBox[@]
    {
      Origin      = (-0.6, -0.6, -0.6)
      End         = (8.0, 0.6, 0.6)
      Level       = 3
    }
    BoundingBox[@]
    {
      Origin      = (-0.6, -0.6, -0.6)
      End         = (16.0, 0.6, 0.6)
      Level       = 2
    }
  }
}
```

8.1.6 【発展】リスタート

—<リスタートファイル出力>—

```
StartCondition
{
  Restart
  {
    InputPath      = "BIN"
    OutputPath     = "BIN"
    Prefix         = "dump-"
    Interval       = "1000"
  }
}
```

(1)

—<リスタート>—

```
TimeControl {
  Session
  {
    TemporalType   = "step"
    Start          = 1000                (1)
    End            = 10000              (1)
  }
}
```

(1)

8.1.7 【発展】補間付きリスタート

—<リスタート>—

```
TimeControl {
  Session
  {
    TemporalType   = "step"
    Start          = 10000              (1)
    End            = 20000              (1)
  }
}
```

(1)

—<リーフノードに割当てる計算セル数>—

```
DomainInfo {
  LeafBlock
  {
    NumberOfCells  = 16                (1)
  }
}
```

(1)

第9章

アップデート情報

参考文献