

熱流体の数値シミュレーション 入門(実習付)

富山県立大学 工学部 機械システム工学科
講師 中川 慎二

目的

参加者が熱流体シミュレーションソフトウェアを操作し、簡単な流れのシミュレーション・結果の可視化にも挑戦します。

初めて数値シミュレーションに触れる方を主な対象とします。

詳細な理論には踏み込まず、例題への取り組みを通じて、数値シミュレーションを体験することが目的です。

誰でも無料で使えるオープンソース・ソフトウェア“OpenFOAM”を使用します。

講習終了後に、各自で用意したPCにインストールし、シミュレーションすることも可能です。

OpenFOAMに関する詳細は下記のウェブサイトをご覧ください。

<http://www.opencfd.co.uk/openfoam/index.html>

スケジュール

第1日:5月11日(金) 18:00~20:00

1. オープンソース・CFDソフトウェア
“OpenFOAM”について
2. OpenFOAMによる数値シミュレーション1
(cavity流れ1)

第2日:5月18日(金) 18:00~20:00

3. OpenFOAMによる数値シミュレーション2
(cavity流れ2)
4. OpenFOAMによる数値シミュレーション3(ダ
ムの崩壊-自由表面)

講習会で使用する計算機の環境

ハードウェア

機種: Dell OptiPlex GX620
CPU: Intel Pentium-4 640 3.2GHz
メモリ容量: 1GB
グラフィックボード: Intel Graphics Media Accelerator 950
その他: 80GB SATA-HDD, CD/DVD-ROM, USB,
1000Base-T, Keyboard, Optical Mouse

ソフトウェア

OS: vine linux 3.2
<http://vinelinux.org/>
シミュレーションソフトウェア: OpenFOAM 1.2
<http://www.opencfd.co.uk/openfoam/index.html>
注意: 最新バージョンは1.4ですが, OSとの相性から,
旧バージョンを使用します。

計算機の起動とログイン

起動

- 本体中央部の電源ボタンをON

OS選択

- Linuxを選択

ログイン

- ユーザ名 (air???)を入力
- パスワードを入力

数値シミュレーションについて

CFD (Computational Fluid Dynamics): 数値
流体力学, 流体の数値シミュレーション

実現象 → 物理モデル → 数学モデル → シミュ
レーションモデル (様々な仮定)

作業の流れ:

プレ処理 → 計算 → ポスト処理

オープンソース・CFDソフトウェア “OpenFOAM”について

2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

7

数値シミュレーションについて

作業の流れ:

ユーザマニュアル1章 p.17

プレ処理 → 計算 → ポスト処理

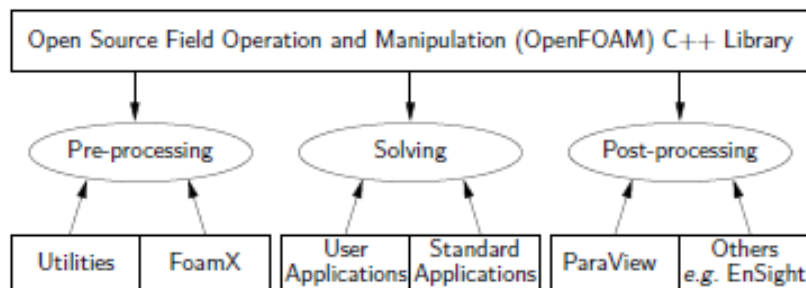


Figure 1.1: Overview of OpenFOAM structure.

2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

8

OpenFOAMで利用するソフト

1. OpenFOAM
OpenFOAM本体, c++で記述されたプログラムの集まり
2. FoamX
OpenFOAMのGUI, 各種設定をマウス操作で設定可能
FoamXがなくても, 設定ファイルを直接書き換えることができる。
3. paraview
オープンソースの可視化ソフトウェア
<http://www.paraview.org/HTML/Index.html>
Windows版, Linux版, MacOS版有り
4. gcc
コンパイラ(GNU Compiler Collection)
ソースコードをコンパイルする場合に必要
5. java
FoamXはjavaにより作成されている

2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

9

ディレクトリ構造

```
$HOME ←ユーザのホームディレクトリ:/nfs20/air001など
├─ OpenFOAM
│   └─ OpenFOAM-1.2
│       ├── applications ←アプリケーションのソースファイル
│       ├── bin ←実行ファイル
│       ├── doc ←マニュアル
│       ├── lib ←ライブラリ
│       ├── src ←各種部品のソースファイル
│       ├── tutorials ←オリジナル例題ファイル
│       └─ wmake ←コンパイル関連(通常使用しません)
├─ linux
│   ├── gcc-4.0.1
│   ├── j2sdk1.4.2_05
│   └─ paraview-2.2.0
└─ air000 ←ユーザの作業用ディレクトリ
    └─ run - tutorials ←例題作業ディレクトリ
```

2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

10

作業:ディレクトリ構造の確認

ファイルビューアの起動

- デスクトップ左上のフォルダ(ログイン名)をダブルクリック
- 起動直後:ホームディレクトリが表示される

OpenFOAMのディレクトリを確認

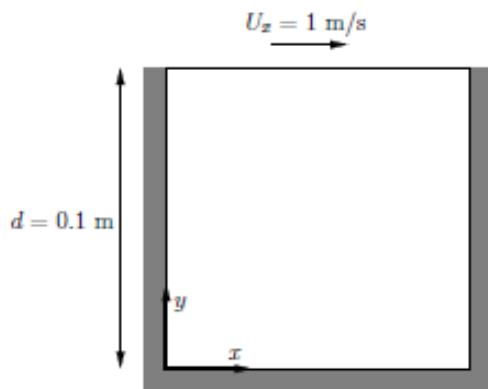
- ホームディレクトリ下に, OpenFOAMが存在することを確認する

作業:端末(ターミナル)の起動

端末(ターミナル)の起動

- デスクトップ左上の「アプリケーション」→「システムツール」→「GNOME端末」を選択

例題1: キャビティ流れ



ユーザマニュアル2.1節 p.19

- 正正方形容器
- 上蓋が移動
- 容器内に非圧縮性流体 (incompressible fluid)
- 層流, 一定温度

Figure 2.1: Geometry of the lid driven cavity. Standard Application の icoFoamを利用する

モデルの幾何形状

ユーザマニュアル2.1.1.1節 p.22

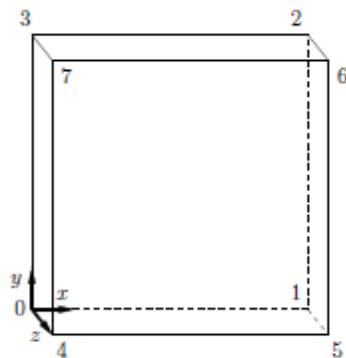


Figure 2.3: Block structure of the mesh for the cavity.

プレ処理 Pre-processing

ユーザマニュアル2.1.1節 p.20

作業内容

- メッシュ生成 (Mesh generation)
- 境界条件と初期条件設定 (Boundary and initial conditions)
- 物性値設定 (Physical properties)
- 計算制御設定 (Control)
- 離散化と行列解法の設定 (Discretisation and linear-solver settings)

2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

15

プレ処理ソフト: FoamX

FoamXの起動

ユーザマニュアル2.1.1節 p.21

- ターミナルで、下記のコマンドを実行
FoamX
- 下図のウィンドウが立ち上がる



2007/05/11

16

FoamXの使い方

FoamXの左側にはケースパネル(case panel), 右側には編集パネル(editing panel), 下には進捗状況パネル(Progress history panel)があります。

FoamXを起動した状態では, ケースパネルにHostが表示されています。Hostを選び, ダブルクリックすると, そのHostに存在するアプリケーションプログラムが一覧で表示されます。

アプリケーションプログラムとは, ある特定の問題をシミュレーションするためのソフトウェアです。問題の種類に応じて(流れが層流か乱流か, 圧縮性か非圧縮性か, など), アプリケーションプログラムを使い分けます。

OpenFOAMでは, シミュレーションで取り扱う問題を, ケースと呼びます。ケースパネルでは, 現在保存されているケース(問題)を一覧できます。ケースをダブルクリックすると, ケースが開かれます。

メッシュ

- 計算領域を多くの小さな領域に分割する
- 小領域をセルという
- 分割線をメッシュという
- シミュレーションでは, 各セルでの物理量を予測する

メッシュ生成

単純なメッシュ

- OpenFOAMで作成できる
- blockMeshDictというファイルにメッシュの生成方法を記述 → メッシュ生成コマンド

メッシュ作成指令書: blockMeshDict

ユーザマニュアル2.1.1節 p.21

convertToMeters 0.1; ← これから書く数字を, 0.1倍すると, 単位がmになる

vertices ← 節点

```
(  
  (0 0 0) ← 0から6までの各点の座標。この値を0.1倍するとm単位になる。  
  (1 0 0)  
  (1 1 0)  
  (0 1 0)  
  (0 0 0.1)  
  (1 0 0.1)  
  (1 1 0.1)  
  (0 1 0.1)  
);
```

blocks ← ブロック(直方体(hex), 節点番号で指定する)

```
(  
  hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1)  
  ← 節点0~6で直方体を作る。 x, y, z方向に20, 20, 1分割(等間隔)してメッシュをつくる  
);
```

メッシュ作成指令書: blockMeshDict

ユーザマニュアル2.1.1節 p.21

```
patches ← 同じ境界条件をまとめる
(
  wall movingWall ← 境界条件: 壁面が動く(一定の速度)
  (
    (3 7 6 2) ← 4つの節点で構成される面
  )
  wall fixedWalls ← 境界条件: 固定された壁(速度は0)
  (
    (0 4 7 3) ← 4つの節点で構成される面
    (2 6 5 1) ← 4つの節点で構成される面
    (1 5 4 0) ← 4つの節点で構成される面
  )
  empty frontAndBack ← 境界条件: 対称面(物理量の勾配は0)
  (
    (0 3 2 1) ← 4つの節点で構成される面
    (4 5 6 7) ← 4つの節点で構成される面
  )
);
```

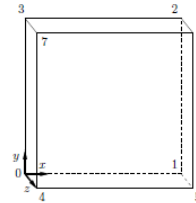


Figure 2.3: Block structure of the mesh for the cavity

2007/05/11

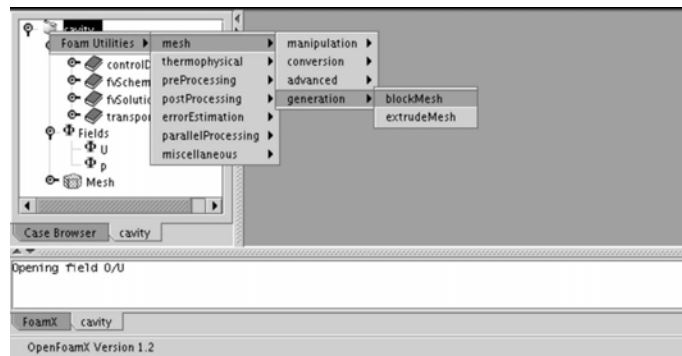
CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

21

FoamXでblockMeshを実行

ユーザマニュアル2.1.1.1節 p.22

- ディレクトリツリーでケース名 (cavity) 上で右クリック
- 開いたメニューから, mesh → generation → blockMesh



2007/05/11

22

境界条件

ユーザマニュアル2.1.1.2節 p.23

- ケースのMesh上で, 右クリック
- 「Read Mesh&Fields」を選択
 - メッシュに関する情報が FoamXに読み込まれる
- MeshフォルダーPatchesフォルダ内にpatch名の一覧
- patch名をクリック→the physical boundary typesの選択
 - patch名:fixedWalls, movingWall →物理的境界条件:wall
 - patch名:frontAndBack → empty
- 物理的境界条件に応じて, 速度Uや圧力pの条件が決まる
- 壁ではUは一定の値, 圧力pの勾配は0。(圧力勾配0→壁に垂直な方向の速度は0→壁を通り抜ける流れはない)

2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

23

物性値設定

ユーザマニュアル2.1.1.3節 p.24

- ~Propertiesという名のディクショナリに物性値を記録
- 動粘度 ν はtransportPropertiesディクショナリ
- 今回は $\nu = 0.01 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ と設定

2007/05/11

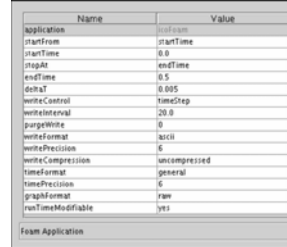
CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

24

計算制御設定

ユーザマニュアル2.1.1.4節 p.24

- 計算時間, データ読み込み, 書き出しなどの制御に関する情報は controlDict ディクショナリに記録



| Application | Name | Value |
|-------------|-------------------|--------------|
| | startFrom | startTime |
| | startTime | 0.0 |
| | stopAt | endTime |
| | endTime | 0.5 |
| | deltaT | 0.005 |
| | writeControl | timeStep |
| | writeInterval | 20 0 |
| | purgeWrite | 0 |
| | writeFormat | ascii |
| | writePrecision | 6 |
| | writeCompression | uncompressed |
| | timeFormat | general |
| | timePrecision | 6 |
| | graphFormat | raw |
| | runTimeModifiable | yes |

Foam Application

この例題

- 計算を時刻 $t = 0$ から始める
- startFromキーワード = startTime
- startTimeキーワード = 0

2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

25

計算制御設定

ユーザマニュアル2.1.1.4節 p.25

計算を時刻 $t = 0.5$ 秒でとめる

- stopAtキーワード = endTime
- endTimeキーワード = 0.5

時間刻みを0.005秒にする

- deltaT = 0.005

結果を0.1秒(=0.005 × 20)ごとに記録する

- writeControl = timeStep 時間刻みが
- writeInterval = 20 20回ごと

2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

26

離散化と行列解法の設定

ユーザマニュアル2.1.1.5節 p.25

有限体積法での離散化方法

- fvSchemesディクショナリ

解法

- fvSolutionディクショナリ

データの保存

ユーザマニュアル2.1.1.6節 p.25

これまでに設定したデータを保存する

- FoamX上部のメニューボタンから、フロッピーディスクのボタンをクリック

ケースを閉じる

- FoamX上部のメニューボタンから、赤丸ボタンをクリック

メッシュの確認

ユーザマニュアル2.12節 p.26

ポスト処理ソフトParaViewを使って、メッシュを確認する

- 下記のコマンドを実行する
paraFoam \$FOAM_RUN/tutorials/icoFoam cavity
- ParaViewが起動する
- Acceptボタン(緑)を押す
- Displayパネルで下記を選択
 - Color by Property
 - white ← Color
 - Wireframe ← Surface representation

2007/05/11


CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

29

計算 Solving

ユーザマニュアル2.1.3節 p.27

2つの実行方法

- FoamXから, Start Calculation Now button 
- ターミナルから下記コマンドを実行
icoFoam \$FOAM_RUN/tutorials/icoFoam cavity

2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

30

ポスト処理

Post-processing

ユーザマニュアル2.1.4節 p.29

ParaViewを使って結果を可視化

OpenFOAMの結果を可視化するコマンドは
paraFoam

このコマンドは、OpenFOAMの結果をParaViewで
読める形式に変換する

paraFoamの実行

ユーザマニュアル2.1.4節 p.29

下記のコマンドを実行する

```
paraFoam $FOAM_RUN/tutorials/icoFoam  
cavity
```

- ParaViewが起動する
- Timeが0.5になっていることを確認
- Acceptボタン(緑)を押す

カラー等高線図 Contour

ユーザマニュアル2.1.4.1節 p.29

圧力分布の可視化

Color by volPointInterpolate(p)

→ 補間された滑らかな分布

Color by cell(p)

→ 各セルでの値(補間なし)



2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

33

速度ベクトル図 Glyph

ユーザマニュアル2.1.4.2節 p.29

セル中心での速度ベクトル

- Selection Windowで cavity.foamが選ばれていることを確認
- FilterからCellCenters選択
- Acceptボタンを押す
- Selection WindowでCentersが選ばれていることを確認
- FilterからGlyph選択
- Acceptボタンを押す
- 右のようにパネルを設定



2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

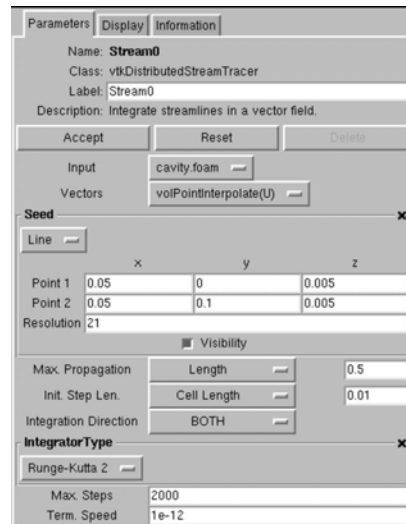
34

流線 Streamline

ユーザマニュアル2.1.4.3節 p.31

流線

- Selection Windowで cavity.foamが選ばれていることを確認
- FilterからStreamTracer選択
- Acceptボタンを押す
- 右のようにパネルを設定
- マニュアルでは, Seedを次のように設定
Num. sides 20; Radius 0.0003;
and, Radius factor 10.



2007/05/11

CFD講習会 @ 富山県立大学 可視化研究会

35