
Verification & Validation

-OpenFOAM による熱設計機能検証-

2013.09.29

酒井 秀久 森 一浩

0. 活動内容（まずはVerification）

1. ファンP-Q(P-v)特性

- 内部のパッチにP-Q特性を与え、流量を求める.

2. 定常固体熱連成問題(輻射なし)

2.1. 強制対流(冷却)

- 発熱する固体(樹脂, 金属)を空気によって強制冷却する.
- 熱収支の確認.

2.2. 自然対流

- 発熱する固体(樹脂, 金属)を空気によって自然空冷する.
- 熱収支の確認.

3. 定常固体熱連成問題(輻射考慮)

1. ファンP-Q特性

1.0.1. ファンP-Q (P-v) 特性とは？

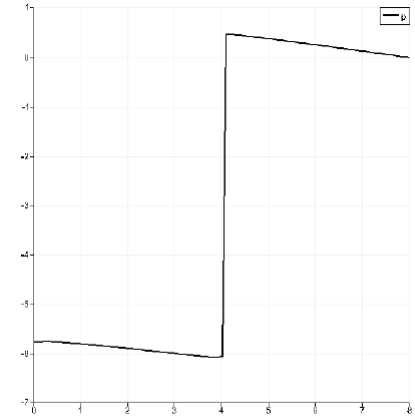
- モデル内部のPatchに与える境界条件として定義できる
- FanとしてPatch前後で圧力上昇させる

The fan BC

\$FOAM_SRC/finiteVolume/fields/fvPatchFields/derived/fan/fanFvPatchFields.C:

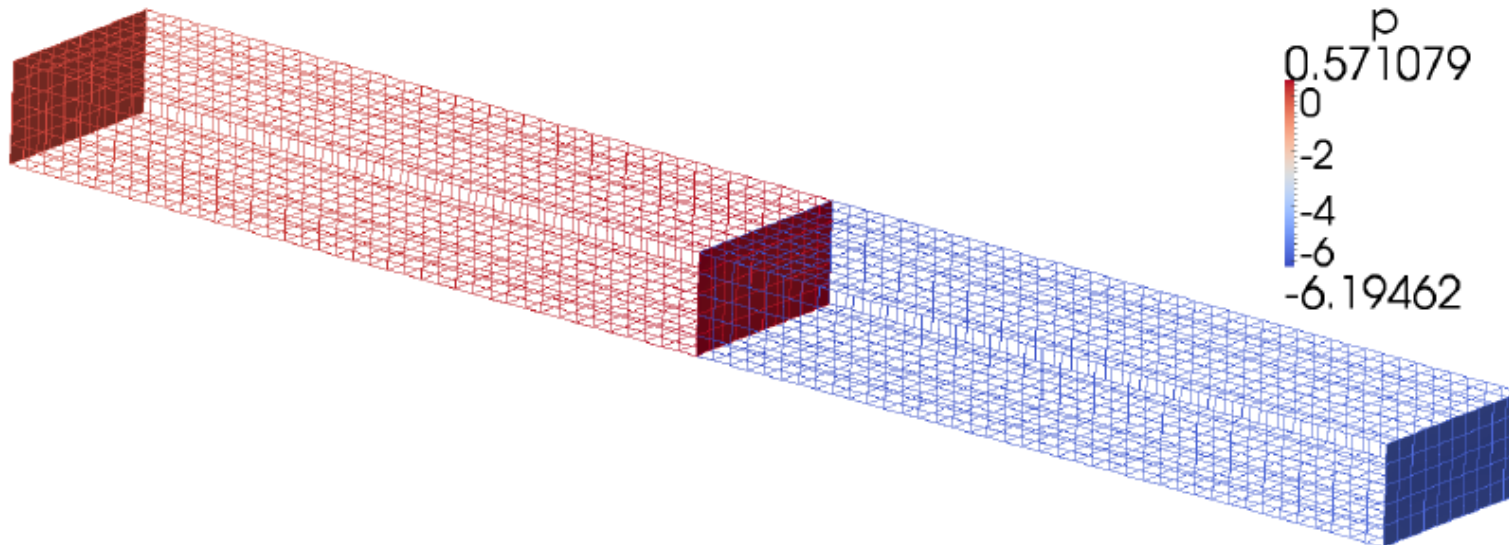
```
for(label i=1; i<f_.size(); i++)  
{  
    jump_ += f_[i]*pow(Un, i);  
}
```

The pressure jump is computed according to $\Delta p = \sum_{i=0}^n f_i \cdot U^i$



Pressure in the flow direction.

The fan BC: pressure



1.0.2. ファンP-Q (P-v) 特性とは？

- 電子機器でファンを使っているものにファンを実際にモデル化する代わりにパッチ面の境界条件として定義できる
- P-Q特性を与える
- T-junctionFanの例題がOpenFOAMではTutorialにある。この例題の解説は関西CAE勉強会のTutorial Projectのページにある。

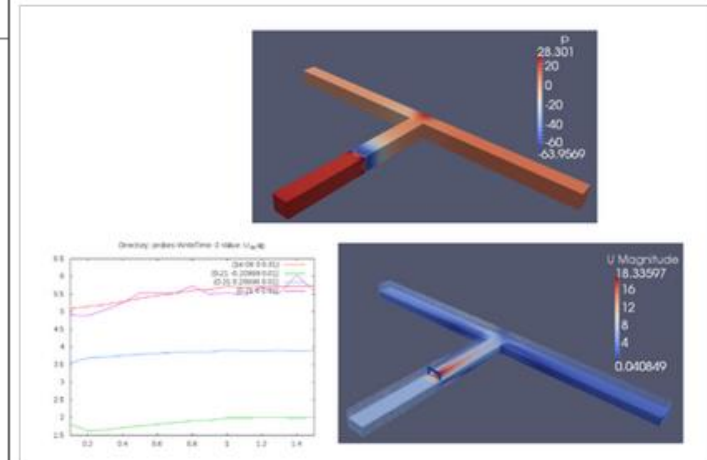
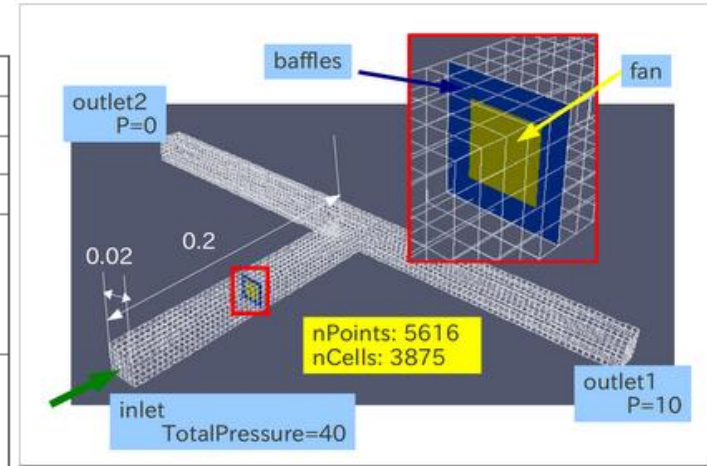
https://sites.google.com/site/freshtamanegi/home/openfoam/tutorial/pimplefoam_TJunctionFan

1.0.3. ファンP-Q (P-v) 特性とは？

pimpleFoam:T型分岐管の流れ(ファン付き)

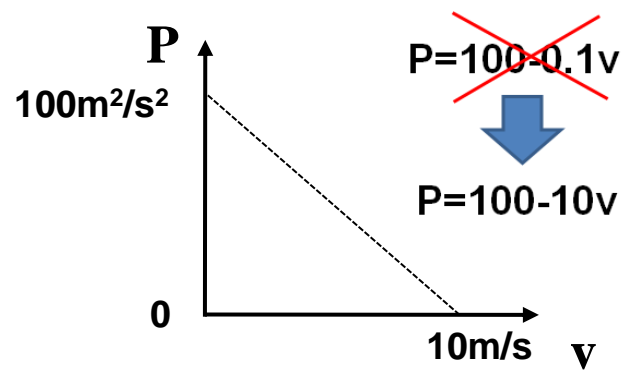
基本情報

Solver	pimpleFoam
Case	TjunctionFan (/tutorials/incompressible/pimpleFoam/TJunctionFan)
Version	2.1.x
Keyword	非定常, 乱流, TotalPressure, table, cyclic-fan
変数	U [m/s] p [m ² /s ²] k [m ² /s ²] epsilon [m ² /s ³]
定数	流体特性<constant/transportProperties> nu [m ² /s] 乱流モデル<constant/RASProperties> RASModel kEpsilon
基礎方程式	
コメント	<p>ファン特性は、境界条件ファイル中、</p> <pre> type fan; patchType cyclic; jump uniform 0; f 2(100 - 0.1); </pre> <p>によって設定されることになり、この場合はUn が通過流量とすると、jump_ (昇圧量) が、 $jump = 100 - 0.1 * Un$ として計算されることになる。</p> <p>(参考) src/finiteVolume/fields/fvPatchFields/derived/fan/fanFvPatchFields.C</p>



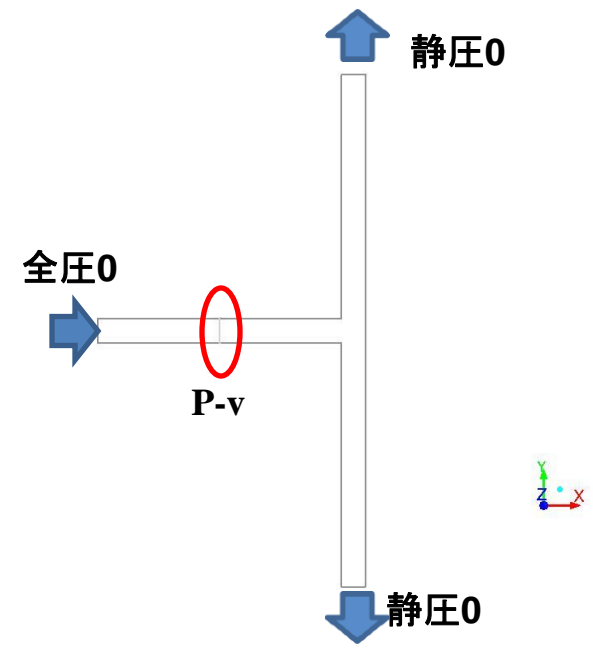
1.1.1. ファンP-Q特性

- TjunctionFanの形状を利用.
- 密度 1kg/m^3 , 粘性係数 $0.001\text{kg/m}\cdot\text{s}$ (層流定常解析).
- 入口全圧0規定, 出口静圧0規定.
- P-Q(P-v)特性を与えて流量を求める.



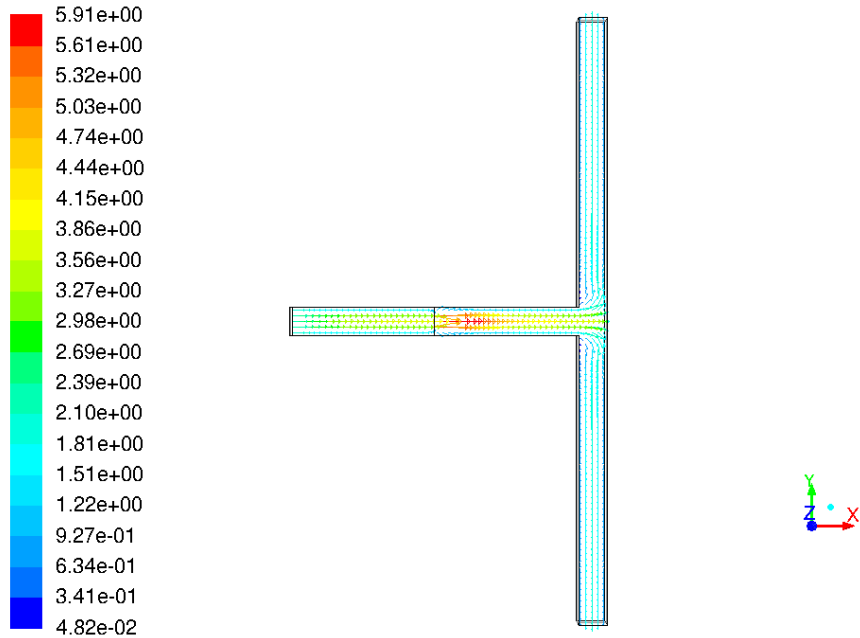
P-v特性

例題設定は実際にはありえないような数字設定のため、現実的な値に修正

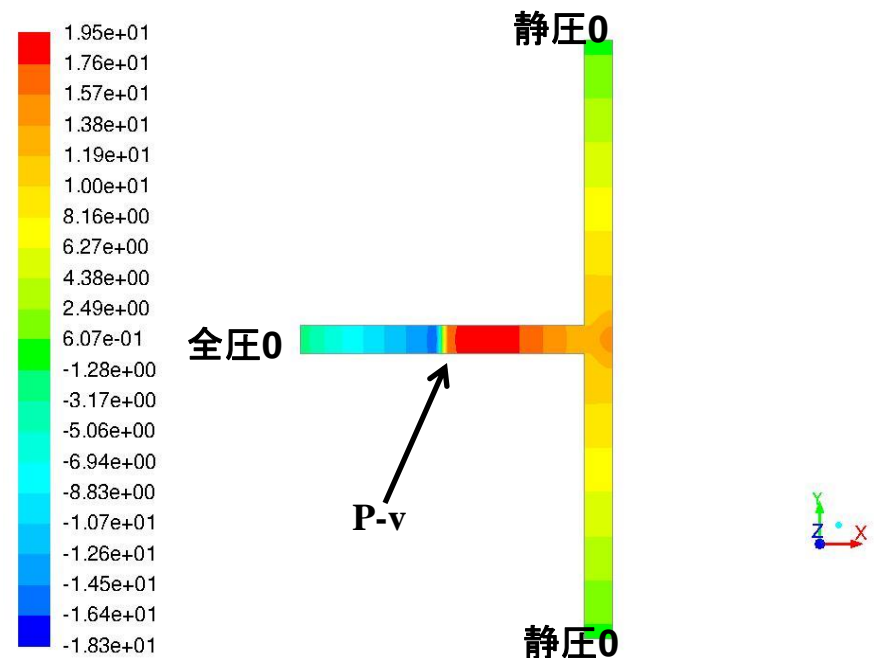


解析モデル

1.1.2. ファンP-Q特性 (FLUENT14.5 & simple)



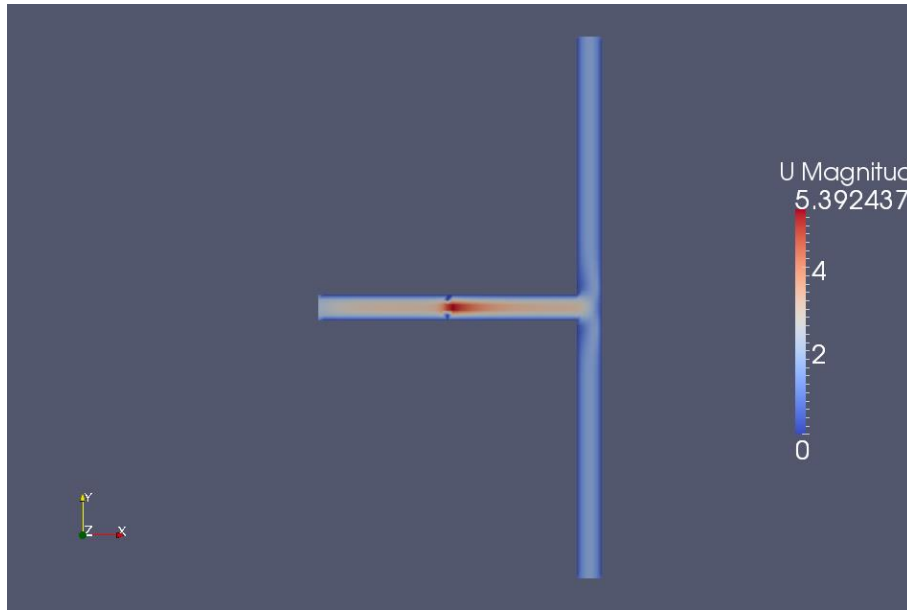
速度ベクトル表示



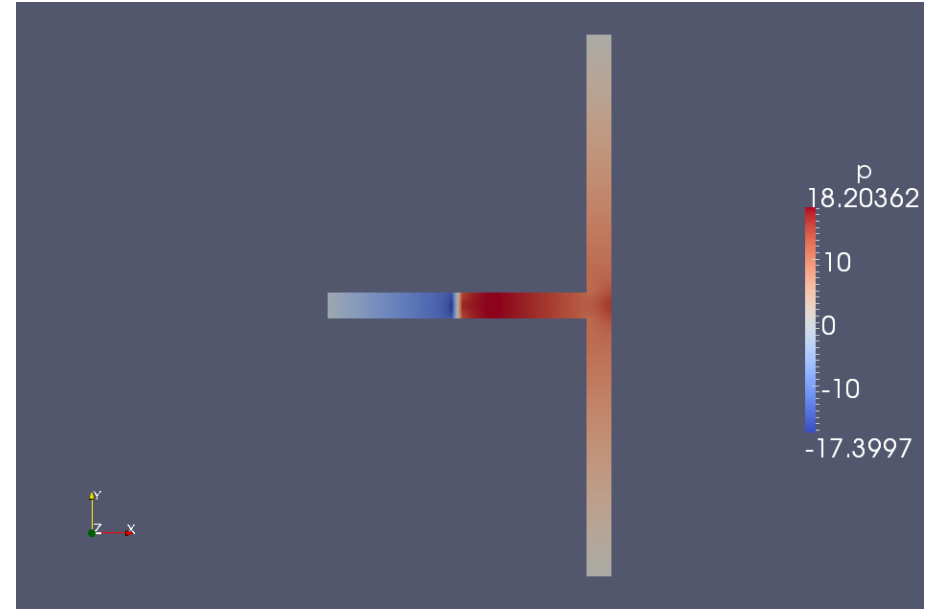
圧力コンター表示

- simple法による定常解析 (緩和係数:U 0.5, p 0.3).
- P-v 特性設定のパッチの下流で圧力上昇.
- 流入量 7.83×10^{-4} kg/s.

1.1.3. ファンP-Q特性 (OpenFOAM2.2.1 & pimple)

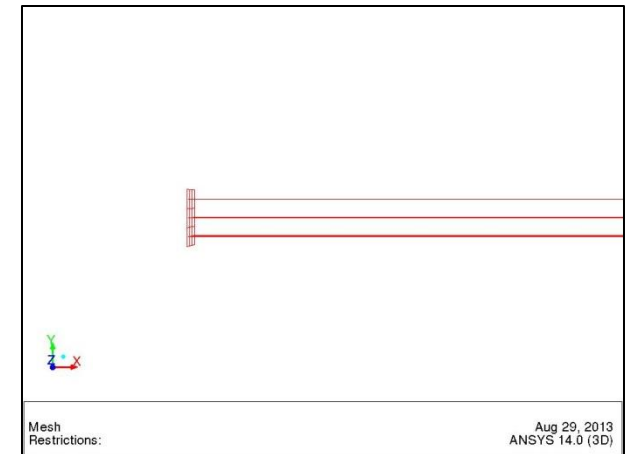


速度コンター表示



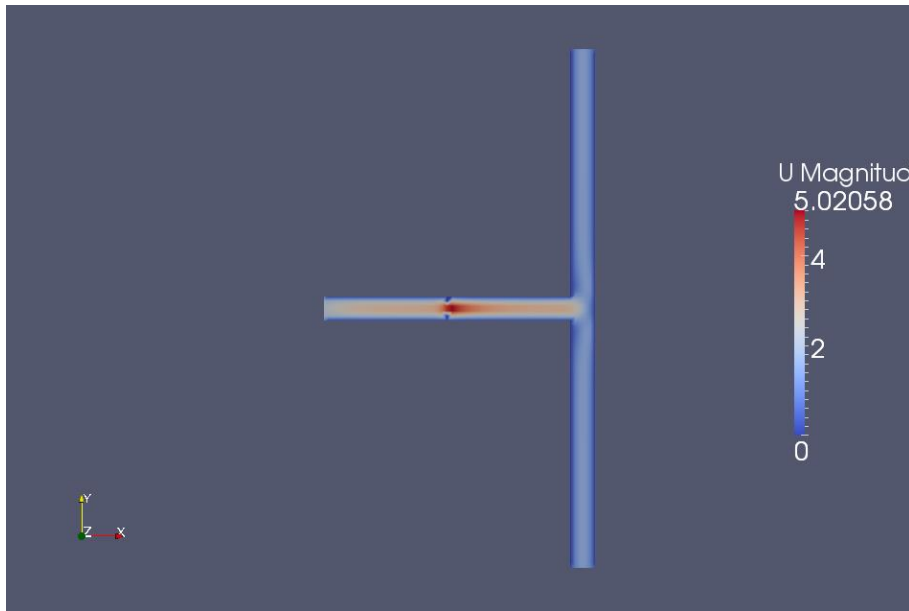
圧力コンター表示

- pimpleによる定常解析(緩和係数:U 1, p 1) .
- P-v 特性設定のパッチの下流で圧力上昇.
- 流入量 7.27×10^{-4} kg/s.

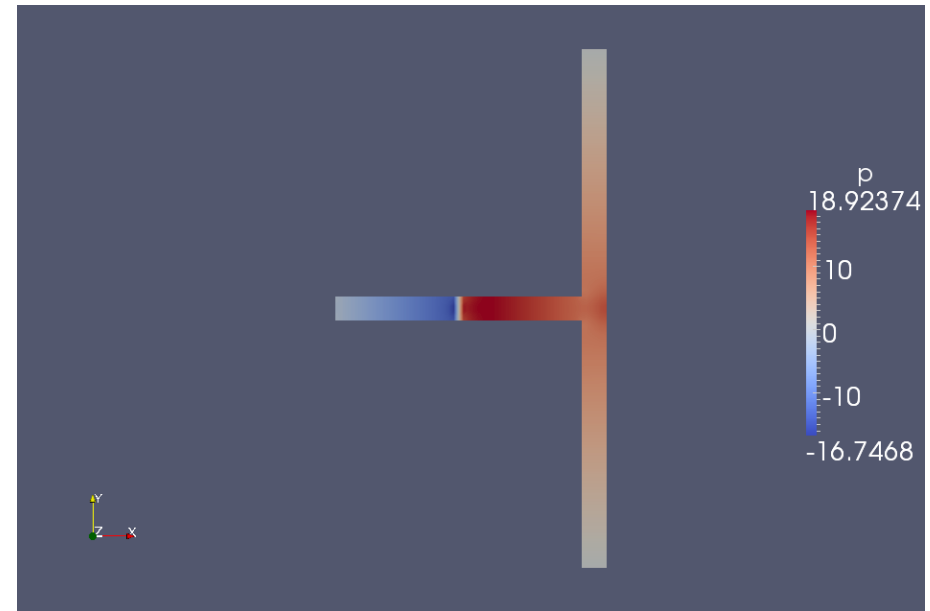


パッチfan_half0のNormal

1.1.4. ファンP-Q特性 (OpenFOAM2.2.1 & simple)



速度コンター表示



圧力コンター表示

- simpleによる定常解析(緩和係数:U 0.5, p 0.3) .
- P-v 特性設定のパッチの下流で圧力上昇.
- 流入量 7.30×10^{-4} kg/s.

1.1.5. ファンP-Q特性（ここまでのまとめ）

まとめ

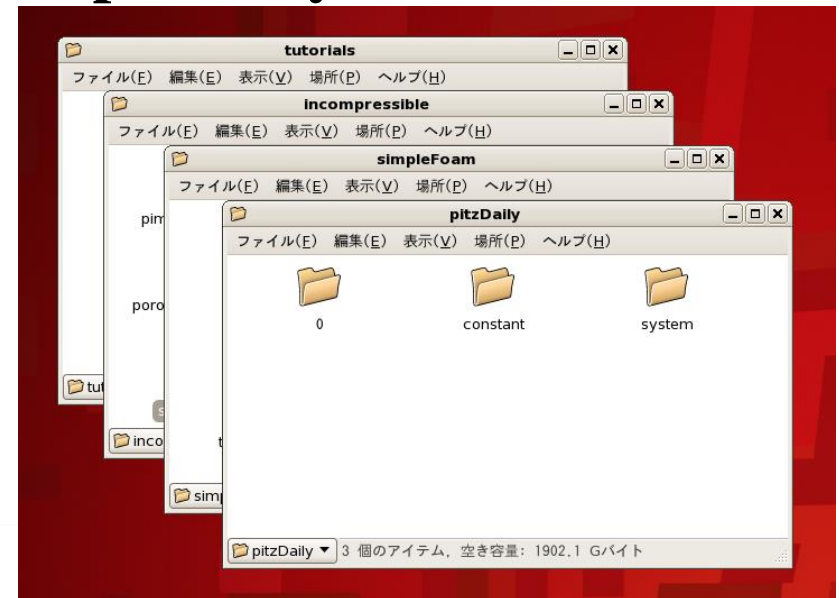
- TjunctionFanの例題モデルをFluent結果と比較しておおむね妥当な結果が得られた。
- 今後はより実用的なモデルで検証を行う予定
- 複数ファンでの検証（課題→次ページ）
- 旋回力は与えられない
（与えられるようにカスタマイズしたレポートはネットに上がっている）



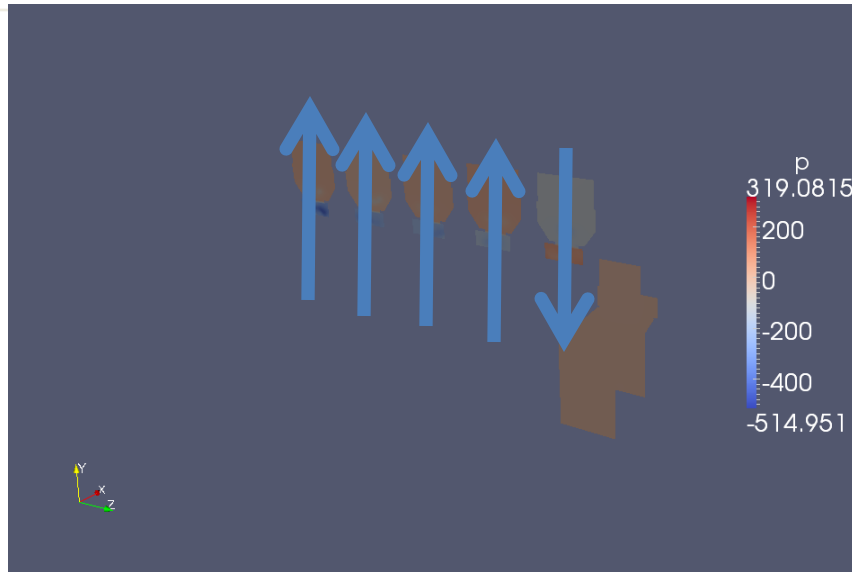
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY CFD WITH OPENSOURCE SOFTWARE 2010	
Implementation of an actuator disk in OpenFOAM	
Developed for OpenFOAM- 1.5-dev	
<i>Author:</i> Erik Svenning	<i>Peer reviewed by:</i> Jelena Andric Johan Magnusson

1.2. 解析条件 (1.3.~1.6.)

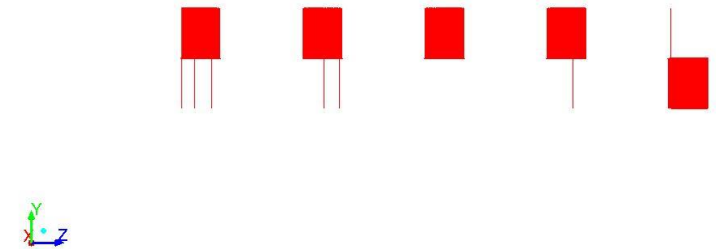
- 4 ケースを Fluent と比較.
- Fluent cas ファイルを fluent3DMeshToFoam で変換.
- 密度 1 kg/m^3 , 粘性係数 $1.502 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ (層流定常解析).
- 入口全圧 0 規定, 出口静圧 0 規定.
- P-Q (P-v) 特性を与えて流量を求める.
- tutorials/incompressible/simpleFoam/pitzDaily ベース
- 圧力はAMG 使用.
- simple 10回.
- 緩和係数 : U 0.1~0.2.
- 緩和係数 : p 0.2~0.3.



1.3.1. ファンP-Q特性（複数ファン）



圧力コンター表示(x一定断面)



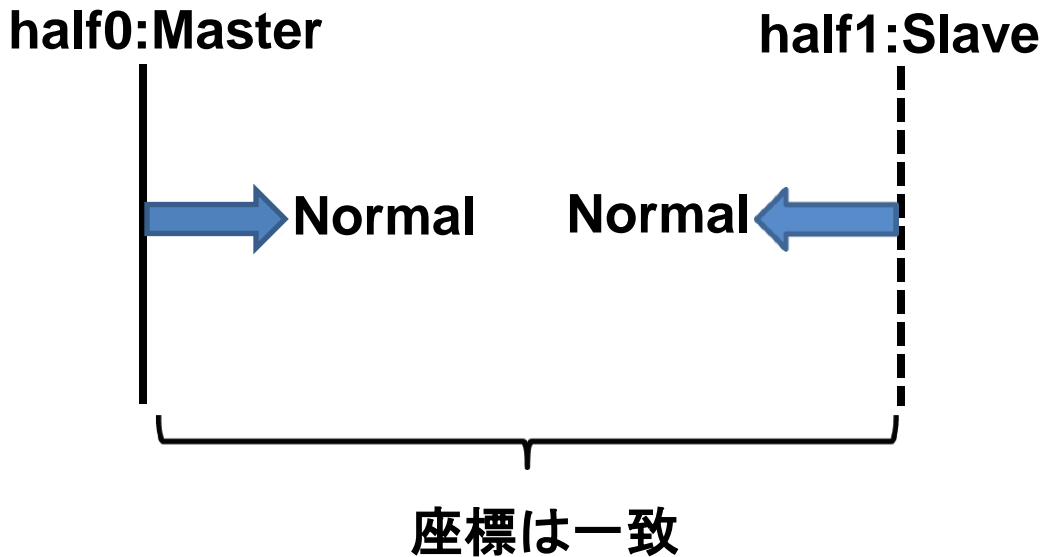
パッチfan_half0のNormal

- 四角い箱の5つの上面にファン設定.
- 圧力上昇の方向がパッチfan_half0のNormalに一致していそう.



- ファンの方向を自由に設定(入力)できねばならない.
- 現状, 具体的にどうすればいいか?

1.3.2. ファンP-Q特性（圧力上昇の方向の変更1）



```
/*-----* C++ *-----*/
|=====|
| %% / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| %% / O p e r a t i o n | Version: 2.1.x
| %% / A n d | Web: www.OpenFOAM.org
| %%/ M a n i p u l a t i o n |
/*-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        polyBoundaryMesh;
  location     "constant/polyMesh";
  object       boundary;
}
// ***** //
7
(
  (
    . . . . .
    fan_half0
    {
      type      cyclic;
      nFaces    9;
      startFace 10132;
      matchTolerance 0.0001;
      neighbourPatch fan_half1;
    }
    fan_half1
    {
      type      cyclic;
      nFaces    9;
      startFace 10141;
      matchTolerance 0.0001;
      neighbourPatch fan_half0;
    }
    . . . . .
  )
)
// ***** //
```

圧力上昇が逆の場合はMasterとSlaveを入れ替える。

- さきに定義されるのが "Master".
- Master 側に対して Slave 側の圧力が上昇する。 boundary ファイル
- それぞれの Normal は相手側を向く。
- Normal がそろわない場合がある(課題).

1.3.3. ファンP-Q特性（圧力上昇の方向の変更2）

```
fan_half0
{
  type          fan;
  patchType     cyclic;
  jump          uniform 0;
  f             2(100 -10);
  value         uniform 0;
}

↓ （逆方向にしたい）

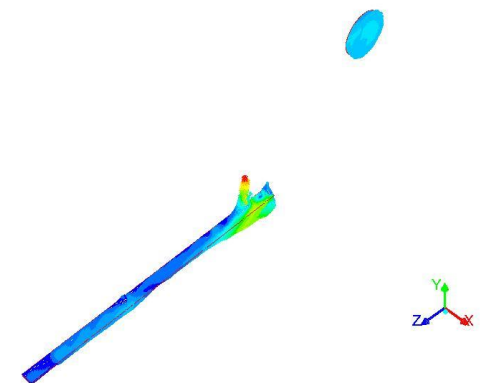
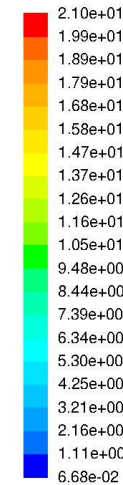
fan_half0
{
  type          fan;
  patchType     cyclic;
  jump          uniform 0;
  f             2(-100 10);
  value         uniform 0;
}
```

fanの定義(0/pファイル)

- $P = 100 - 10v$ を $P = -100 + 10v$ に変更する.
- TjunctionFan 改では問題なし.
- 他の事例では未確認.

1.4.1. ファンP-Q特性事例1（ファン1個，ポリヘドラ要素）

	OpenFOAM2.2.1	Fluent 14.5
メッシュ	⇒	ポリヘドラ
メッシュ数	⇒	2519803
最大Skewness	⇒	2.97
最大Aspect比	⇒	12.3
最大圧力	258 m ² /s ²	170 m ² /s ²
最小圧力	-474 m ² /s ²	-348 m ² /s ²
最大流速	58.10 m/s	22.07 m/s
流量	0.0079 kg/s	0.0083 kg/s

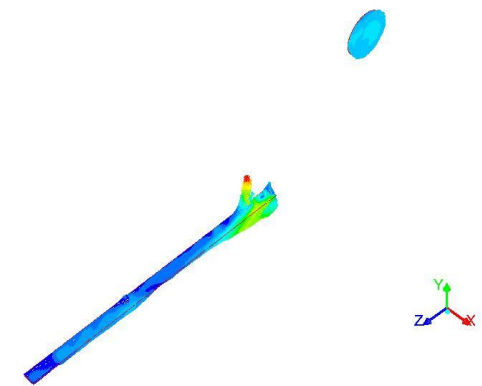
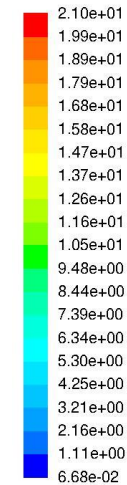


OpenFOAM2.2.1
速度ベクトル表示
(ファン部と出口部)

- 流量は単調に増加したあと減少し始めた。
- 出口の逆流がだんだん大きくなっている。
- 最小圧力がだんだん大きくなっている(出口の逆流の影響)。
- 出口境界を inletOutlet に変更したが，発散。

1.4.2. ファンP-Q特性事例1（ファン1個，テトラ要素）

	OpenFOAM2.2.1	Fluent 14.5
メッシュ	テトラ	ポリヘドラ
メッシュ数	9277756（流体）	2519803
最大Skewness	1.66	2.97
最大Aspect比	20.5	12.3
最大圧力	197 m ² /s ²	170 m ² /s ²
最小圧力	-177 m ² /s ²	-348 m ² /s ²
最大流速	19.38 m/s	22.07 m/s
流量	0.0073 kg/s	0.0083 kg/s

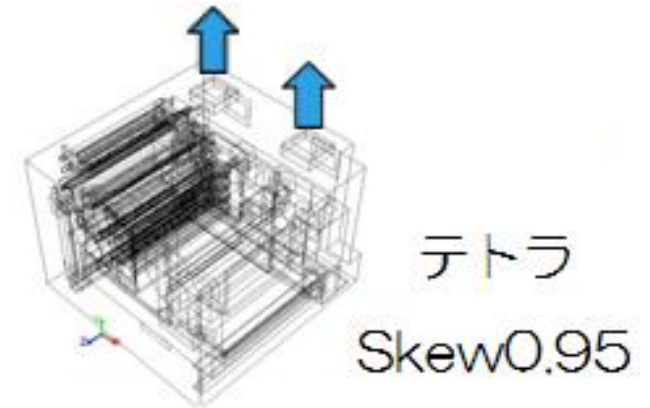


OpenFOAM2.2.1
速度ベクトル表示
(ファン部と出口部)

- 流量は単調に増加したあと減少し始めた。
- 出口の逆流がだんだん大きくなっている。
- 最小圧力がだんだん大きくなっている(出口の逆流の影響)。

1.5.1. ファンP-Q特性事例2-1（ファン2個，テトラ要素）

	OpenFOAM2.2.1	Fluent 14.5
メッシュ	⇒	テトラ&プリズム
メッシュ数	⇒	4377045
最大Skewness	⇒	1.55
最大Aspect比	⇒	15.27
最大圧力	39.2 m ² /s ²	36.2 m ² /s ²
最小圧力	-53.5 m ² /s ²	-15.1 m ² /s ²
最大流速	12.54 m/s	8.75 m/s
流量1	0.02270 kg/s	0.01627 kg/s
流量2	0.02333 kg/s	0.01658 kg/s



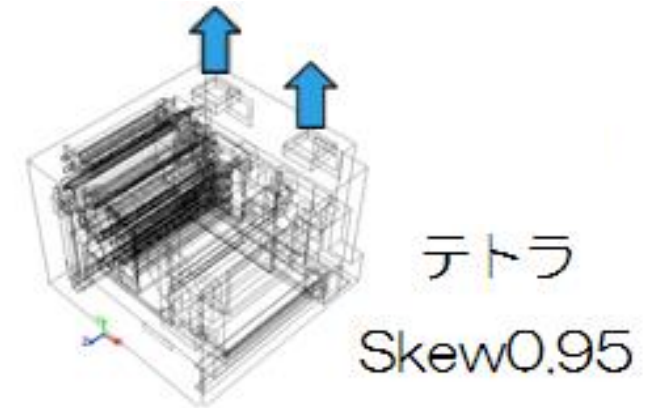
装置形状

(2013年学会発表済み)

- AMG法で解けない(圧力).
- PCG法使用(圧力). 時間がかかる.

1.5.2. ファンP-Q特性事例2-2（ファン2個，テトラ要素）

	OpenFOAM2.2.1	Fluent 14.5
メッシュ	テトラ	テトラ&プリズム
メッシュ数	5681929	4377045
最大Skewness	1.55	1.55
最大Aspect比	15.27	15.27
最大圧力	33.7 m ² /s ²	36.2 m ² /s ²
最小圧力	-17.1 m ² /s ²	-15.1 m ² /s ²
最大流速	7.53 m/s	8.75 m/s
流量1	0.01742 kg/s	0.01627 kg/s
流量2	0.01755 kg/s	0.01658 kg/s



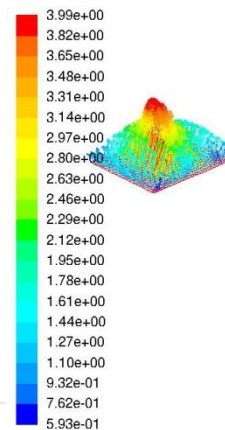
装置形状

(2013年学会発表済み)

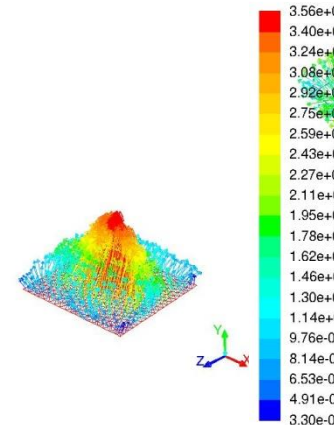
■ AMG法(圧力).

■ 緩和係数:U 0.2, p 0.3.

■ 流量誤差 約8%.



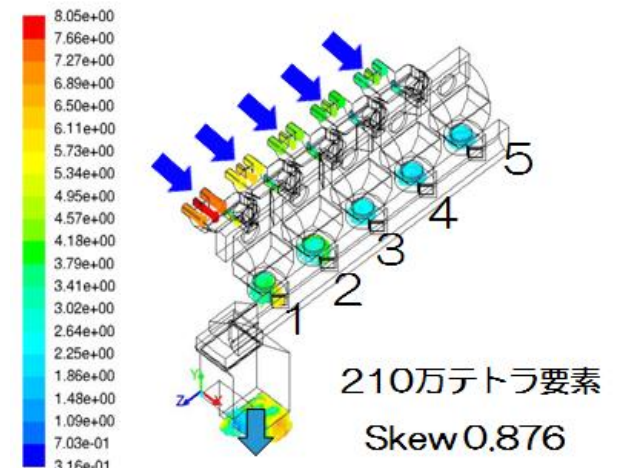
ファン部速度(OF)



ファン部速度(FL)

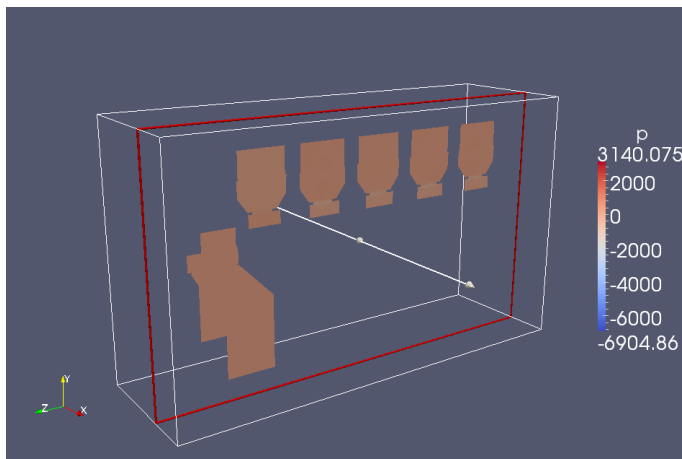
1.6.1. ファンP-Q特性事例3-1（ファン5個，テトラ要素）

	OpenFOAM2.2.1	Fluent 14.5
メッシュ	⇒	テトラ
メッシュ数	⇒	2097822
最大Skewness	⇒	1.125
最大Aspect比	⇒	6.982
最大圧力	3140 m ² /s ²	246 m ² /s ²
最小圧力	-6904 m ² /s ²	-120 m ² /s ²
最大流速	47.3 m/s	21.3 m/s
全流量	0.0217 kg/s	0.0621 kg/s

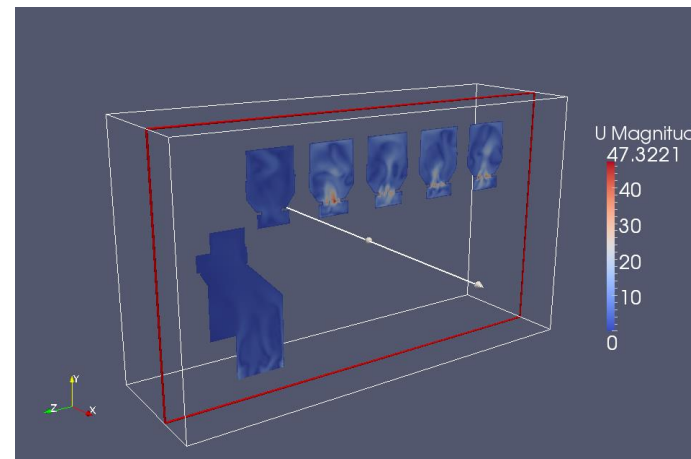


ダクト形状

(2013年学会発表済み)



圧力コンター表示



速度コンター表示

1.6.2. ファンP-Q特性事例3-1（ファン5個，テトラ要素）

```
$ patchIntegrate -time 5 phi blower_1_half0
/*-----**
| ===== |
| %% / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| %% / O p e r a t i o n | Version: 2.2.1 |
| %% / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| %%/ M a n i p u l a t i o n |
|-----*/
Build : 2.2.1-57f3c3617a2d
Exec : patchIntegrate -time 3000 phi blower_1_half0
Date : Sep 06 2013
Time : 10:12:14
Host : "HPZ800RH01"
PID : 19330
Case : /home/kmori/OpenFOAM/kmori-2.2.1/run/Milano/Milano_simple
nProcs : 1
sigFpe : Enabling floating point exception trapping (FOAM_SIGFPE).
fileModificationChecking : Monitoring run-time modified files using timeStampMaster
allowSystemOperations : Disallowing user-supplied system call operations

// ***** //
Create time

Create mesh for time = 5

Time = 5
Area vector of patch blower_1_half0[64] = (0 -0.00499447 0)
Area magnitude of patch blower_1_half0[64] = 0.00501317
Reading surfaceScalarField phi
Integral of phi over patch blower_1_half0[64] = 0.0447094

End
```

コマンド

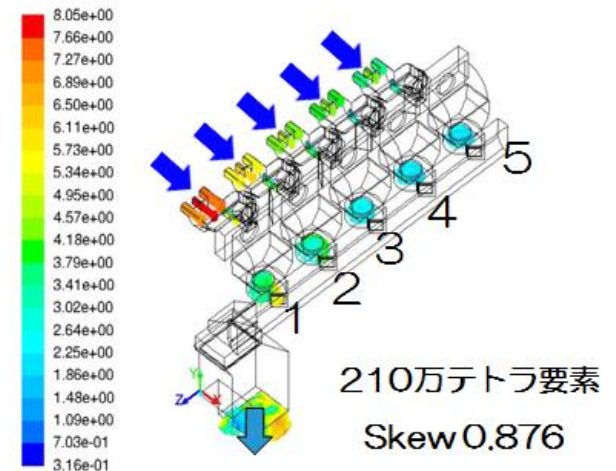
法線方向が一致していない

Mass flux

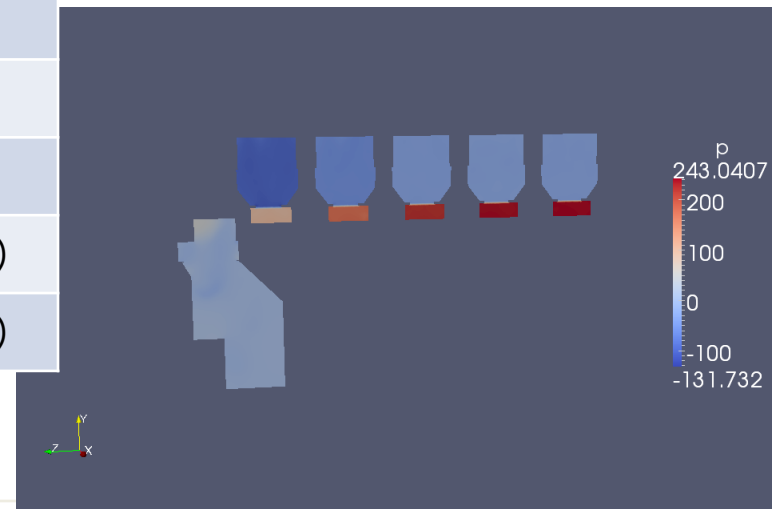
パッチを通過するmass flux の求め方

1.6.3. ファンP-Q特性事例3-2（ファン5個，テトラ要素）

	OpenFOAM2.2.1	Fluent 14.5
メッシュ	テトラ	テトラ
メッシュ数	3000503	2097822
Skewness	1.072	1.125
Aspect比	11.12	6.982
最大圧力	245 m ² /s ²	241 m ² /s ²
最小圧力	-181 m ² /s ²	-157 m ² /s ²
最大流速	19.8 m/s	21.1 m/s
全流量	0.0540 kg/s	0.0558 kg/s
流量1	0.0154 kg/s (0.285)	0.0155 kg/s (0.278)
流量2	0.0118 kg/s (0.219)	0.0121 kg/s (0.217)
流量3	0.00976 kg/s (0.181)	0.0104 kg/s (0.186)
流量4	0.00872 kg/s (0.161)	0.00894 kg/s (0.160)
流量5	0.00837 kg/s (0.155)	0.00871 kg/s (0.156)



ダクト形状
(2013年学会発表済み)

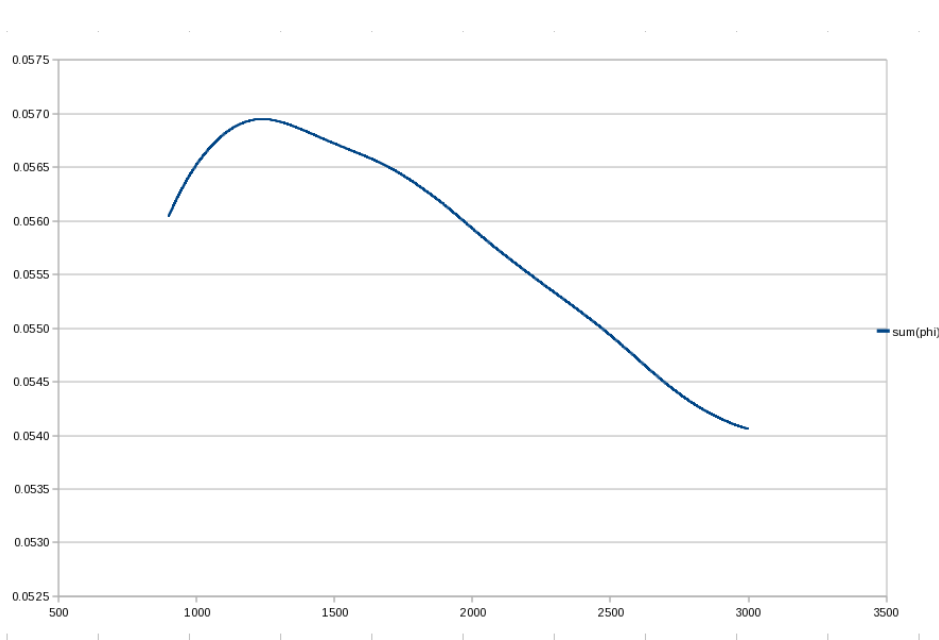


圧力コンター表示

■ 流量は安定している.

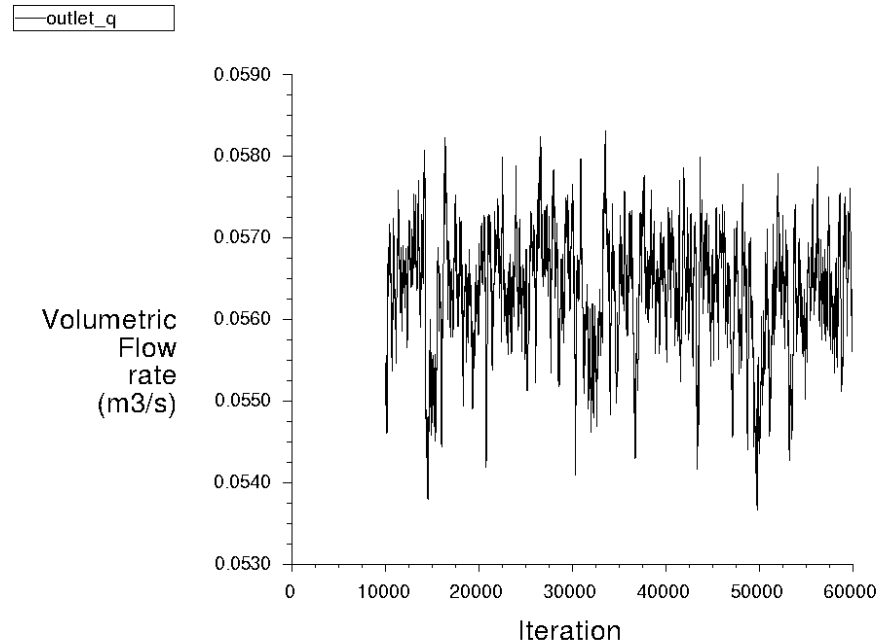
■ 出口の逆流の影響.

1.6.4. ファンP-Q特性事例3-2（ファン5個，テトラ要素）



出口流量変化(OpenFOAM)

0.0540 ~ 0.0570



出口流量変化(Fluent)

0.0540 ~ 0.0580

1.7. ファンP-Q特性事例4（ファン2個，テトラ要素）

	OpenFOAM2.2.1	Fluent 14.5
メッシュ	テトラ	テトラ
メッシュ数	56051132	43611698
最大Skewness	2.10	2.02
最大Aspect比	18.09	19.16
最大圧力	m^2/s^2	$214.88 \text{ m}^2/\text{s}^2$
最小圧力	m^2/s^2	$-544.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$
最大流速	m/s	$24.97 \text{ m}/\text{s}$
Pull 流量	kg/s	$0.01958 \text{ kg}/\text{s}$
Push 流量	kg/s	$0.007239 \text{ kg}/\text{s}$

■ 4361万要素モデルでは初期に発散.

■ 5605万要素モデルでも初期に発散.

1.8.1. ファンP-Q特性まとめ

	FLUENT 14.5		OpenFOAM 2.2.1
TjunctionFan改 六面体	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ■ ファンの方向を指定できない ■ Swirl を考慮できない
事例 1 ポリヘドラ	○	△	<ul style="list-style-type: none"> ■ ファン流量は単調増加のあと減少 ■ 最小圧力は増加 ■ 出口の逆流の影響大
事例 2-1 437万テトラ	○	×	<ul style="list-style-type: none"> ■ AMGで解けない（圧力） ■ 収束しなかった
事例 2-2 568万テトラ	—	○	<ul style="list-style-type: none"> ■ AMGで解けた（圧力） ■ 流量誤差約8%
事例 3-1 210万テトラ	○	×	<ul style="list-style-type: none"> ■ Normalが不一致 ■ 収束しなかった
事例 3-2 300万テトラ	—	○	<ul style="list-style-type: none"> ■ ファン流量は収束 ■ 最小圧力は増加 ■ 出口の逆流大
事例 4 4300万テトラ	○	×	<ul style="list-style-type: none"> ■ 4631万要素モデルでは初期に発散. ■ 5605万要素モデルでも初期に発散.

1.8.2. ファンP-Q特性まとめ

- ファン(圧力上昇)の方向を入力できない.
 - Swirl を考慮できない.
 - Master パッチの Normal 方向に圧力が上昇する.
 - 3/4 ケースについて Fluent 同等の流量が得られた.
 - メッシュ数を増やさないと収束しないケースがあった.
 - 圧力は AMG ソルバーを使用したい.
 - 出口で逆流ある場合, 収束しにくい.
 - メッシュ品質が悪いと収束しにくい.
 - 安定に解析できる条件をさがすのが容易でない.
-

1.8.3. ファンP-Q特性まとめ

	OpenFOAM	iconCFD	Helyx
Ver	2.2.1		
P-Q特性の 多項式入力 (v)	○	○	○
P-Q特性の 折れ線近似入力	× fan pressureでは可能		
圧力上昇の 方向入力	×		
Swirl 考慮	×		

2. 強制対流

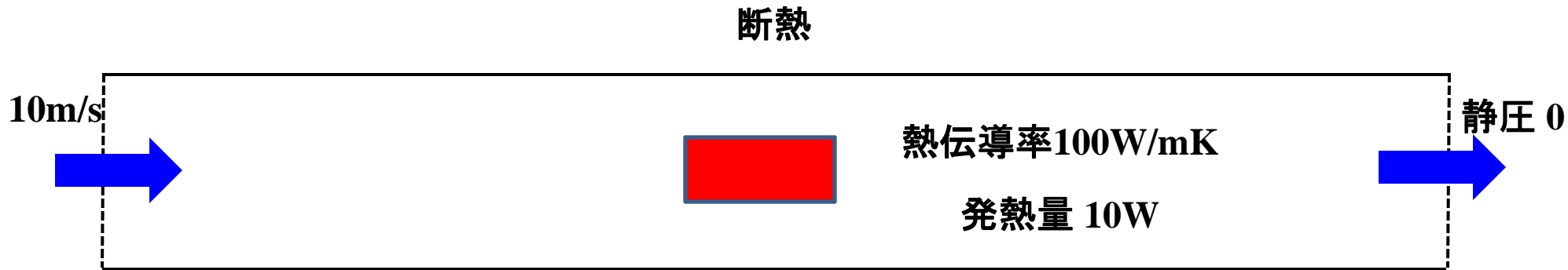
2.0. エネルギー方程式

- 定常解を緩和係数 1 (緩和なし) & 時間間隔 0 で求めたい.
- 熱収支を満足しなければならない.
- 熱伝導率と発熱を考慮したい.
- 熱伝導率は 0.02 W/mK (空気) $\sim 100 \text{ W/mK}$ (金属) のオーダーを扱いたい.
- 商用コードでは可能である.

補 足

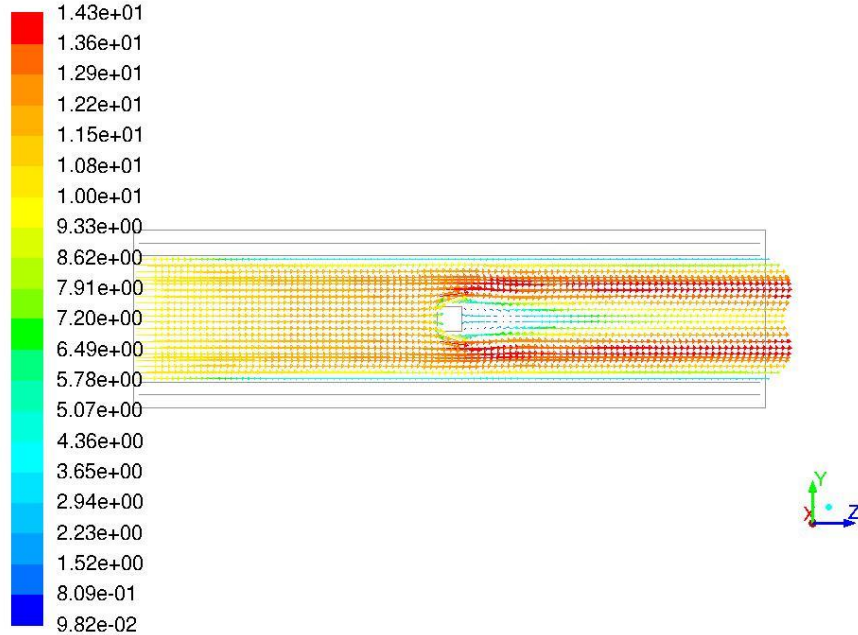
- 行列を反復法で解く場合, 優対角でなければならない.
 - $\times 1/(\text{緩和係数})$ で優対角となる.
 - $1/(\text{時間間隔})$ が対角成分に加わり, 優対角となる.
-

2.1.1. 強制対流（輻射なし）

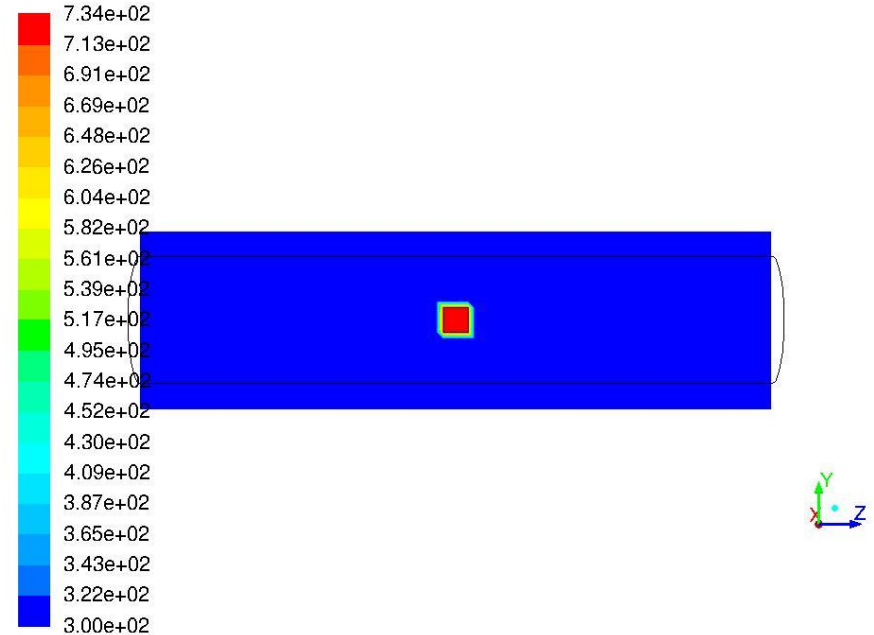


- 非圧縮性定常解析.
- 密度 1kg/m^3 , 粘性係数 $0.001\text{kg/m}\cdot\text{s}$ (層流).
- 入口流速 10m/s規定, 出口静圧 0規定.
- まず流れ場を求め, そのあと温度のみ解析.

2.1.2. 強制対流 (FLUENT14.5)



速度ベクトル表示



温度コンター表示

- 温度上昇 334°C .
- 排熱 9.91W .
- 発熱 10W なので, 熱収支誤差 0.9% .

2.1.3. 強制対流 (OpenFOAM)

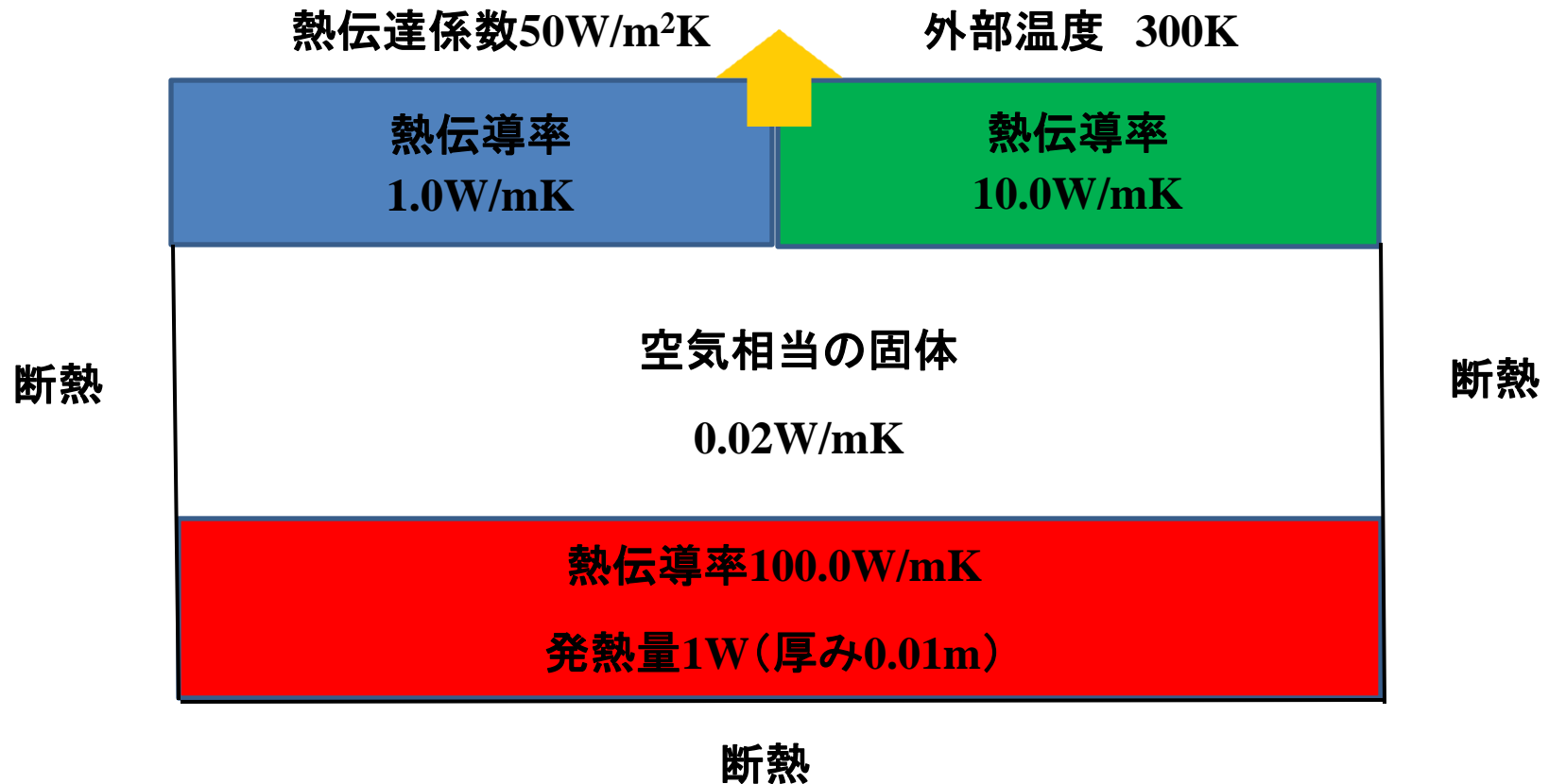
未実施→10月以降実施予定

2.2.1. 強制対流まとめ

	FLUENT 14.5	OpenFOAM	iconCFD	Helyx
強制対流 (輻射なし)	○			
強制対流 (輻射考慮)				

3. 自然对流

2.2.1. 固体熱伝導解析



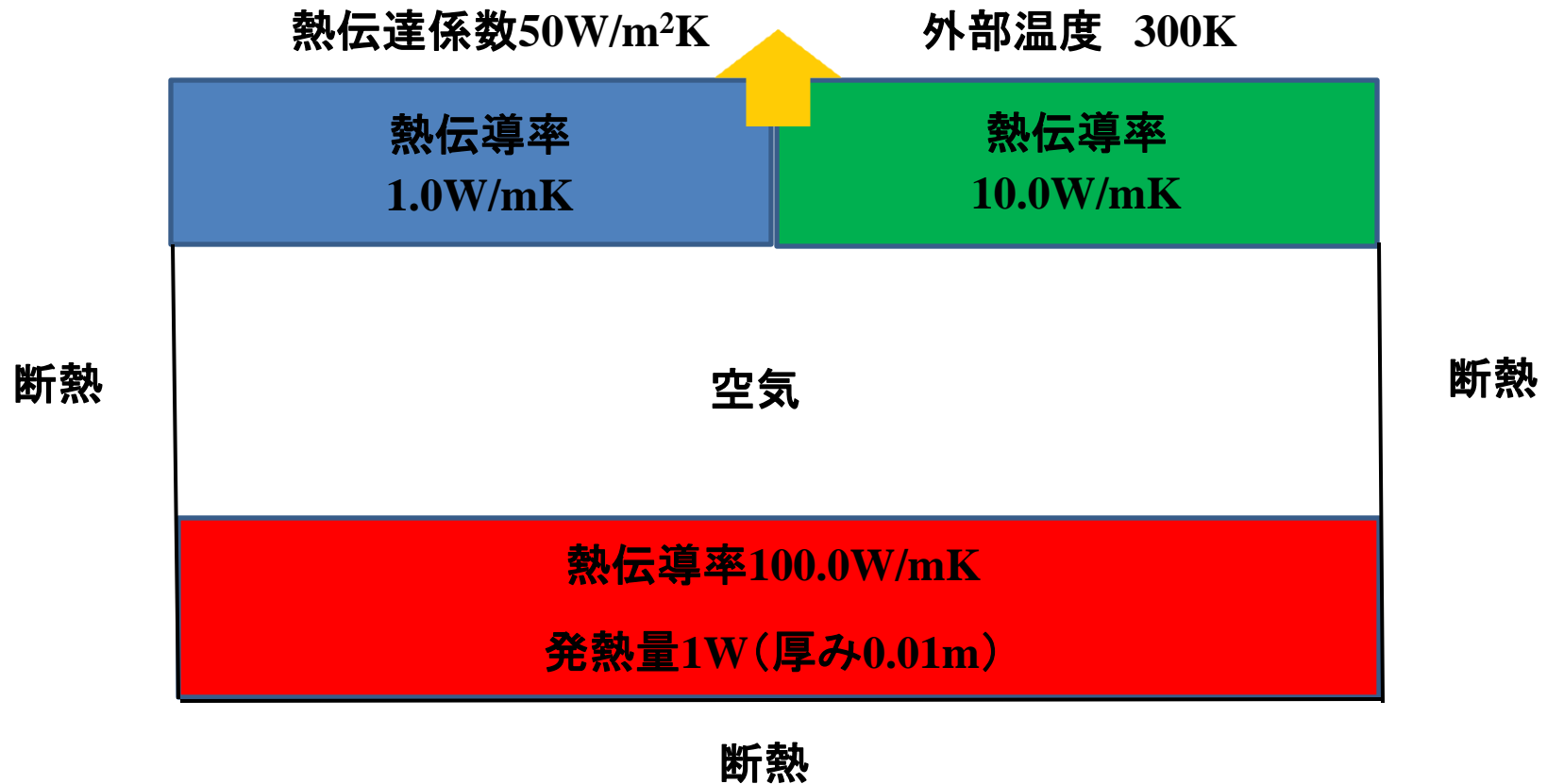
- 固体熱伝導定常解析.
- $0.02\sim 100\text{W/mK}$ までの熱伝導率. 熱収支の確認.
- $0.5\text{m} \times 0.2\text{m}$ の解析領域 (100×40 メッシュ).



固体の複数材料のみの解析はOpenFOAMではどうする？

2.2.2. 固体熱伝導解析

2.2.2. 自然対流（輻射なし）



- 密度のみ温度依存性考慮, 定常解析.
- 空気, 粘性係数 $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ (層流).
- $0.5 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ の解析領域 (100×40 メッシュ).



ChtmultiResionSimpleFoam を使う
HeatSource の定義はどうするか？

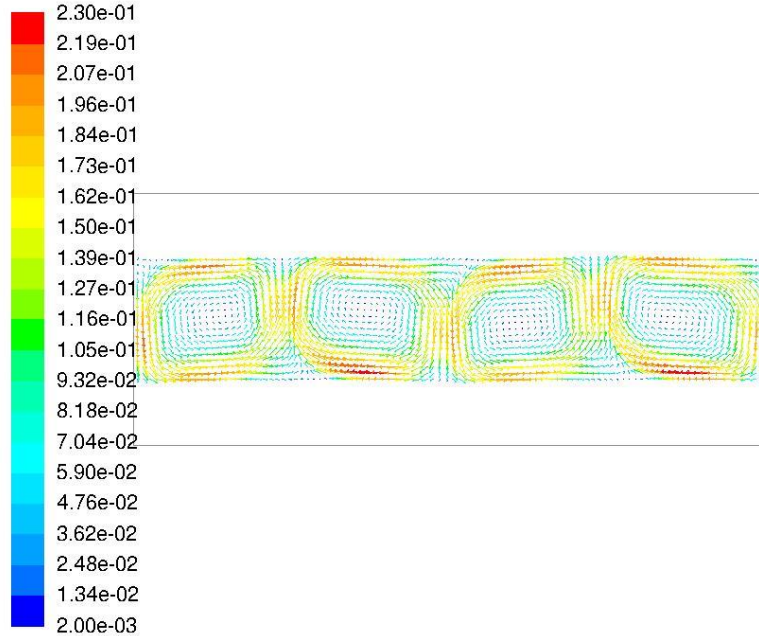
2.2.3. 自然対流（輻射なし）

-固体の発熱はOpenFOAMでは標準機能では与えられないようだ？ではどうする？

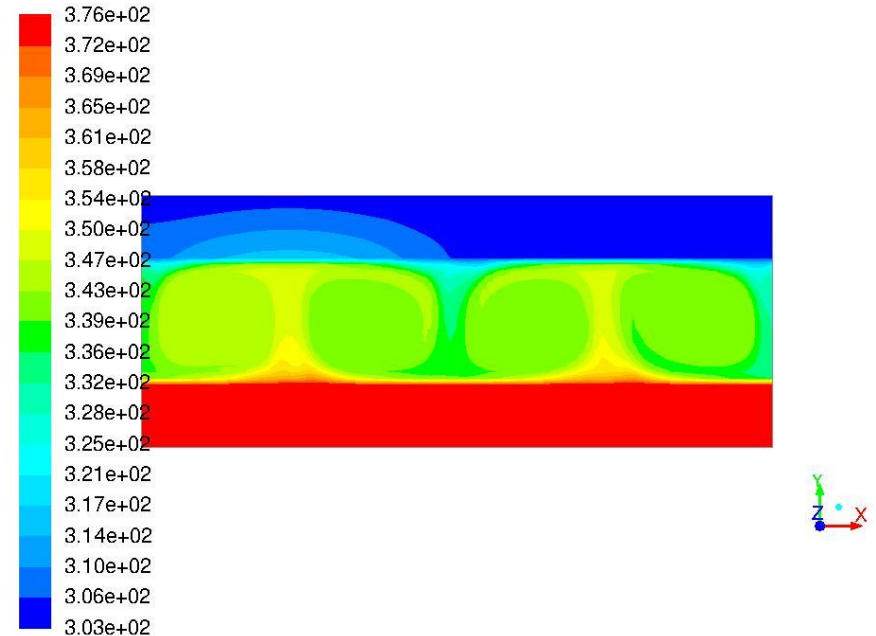
- 1) この例題の場合は流体には1面しか接触していないので面に熱流束を与える。つまり温度勾配をTをfixedgradientで定義する。
- 2) HeatSource項を追加する。下記↓を参考にすれば可能か？

<http://www.opencae.jp/attachment/wiki/OpenFOAM-study-group-for-beginner%28ja%29/20120421OFBeginner.pdf>

2.2.4. 自然対流 (FLUENT14.5)



速度ベクトル表示



温度コンター表示

- 温度上昇 76°C.
- 排熱 0.991W (100サイクル時).
- 発熱 1Wなので、熱収支誤差 0.9%.

2.3.5. 自然対流（OpenFOAM）

未実施→10月以降実施予定

2.4.1. 自然対流まとめ

	FLUENT 14.5	OpenFOAM	iconCFD	Helyx
固体熱伝導				
自然対流 (輻射なし)	○			
自然対流 (輻射考慮)				