

2013.12.06 OpenCAEシンポジウム@大阪

Verification & Validation

-OpenFOAM® の熱設計機能検証-

調査状況報告

OpenCAE学会 森 一浩,
他OpenCAE V&V委員会,
OpenCAE勉強会

本日の発表内容

- OpenFOAM®の熱関連機能
- 活動内容(主に電子機器の熱設計関連機能)
- 熱伝導解析機能の検証状況
 - 検証例題1. 単一材料 1次元熱伝導
 - 検証例題2. 複数材料
- 定常固体熱連成問題の検証状況
- 今後の検討予定
- 本日のまとめ

OpenFOAM®の熱関連機能

- 固体: laplacianFoam 非定常熱伝導
- 流体: buoyantPimpleFoam 非定常圧縮性
buoyantSimpleFoam 定常圧縮性
- 流体: buoyantBoussinesqPimpleFoam
非定常非圧縮
- 流体: buoyantBoussinesqSimpleFoam 定常非圧縮
- CHT: chtMultiRegionFoam 非定常圧縮性
- CHT: chtMultiRegionSimpleFoam 定常圧縮性

0. 活動内容 (主に電子機器の熱設計関連機能)

1. ファンP-Q(P-v)特性 → 別途報告

■ 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)

2.0. 熱伝導解析

■ 固体内の熱伝導を他ソルバ・理論解と比較する.

2.1. 強制対流

■ 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

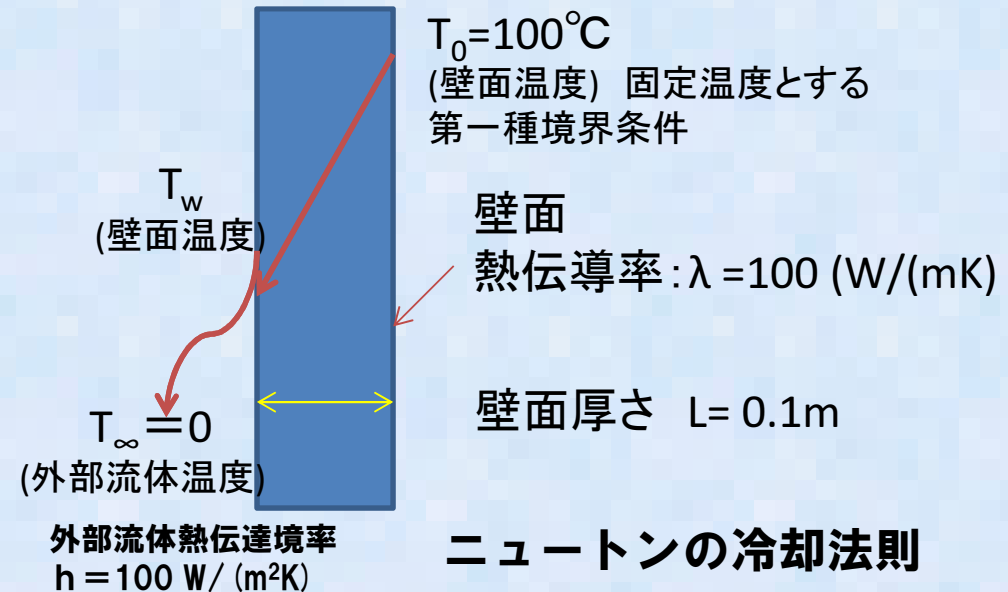
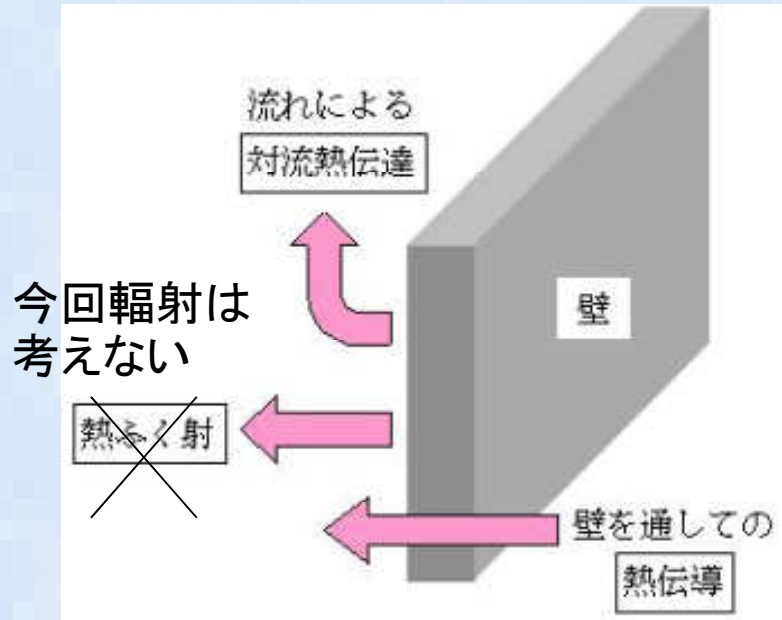
■ 発熱する固体(樹脂, 金属)を空気によって自然空冷する.

- 熱収支の確認.

3. 定常固体熱連成問題(輻射考慮)

検証例題1. 単一材料 1次元熱伝導

-理論解-



ニュートンの冷却法則

$$\frac{\dot{q}}{A} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{: フーリエの法則}$$

q : 単位時間当たりの透過熱量
 A : 断面積, λ : 熱伝導率

$$R_1 = \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{L}{\lambda} = \frac{0.1}{100} = 0.001$$

$$\frac{\dot{q}}{A} = h(T_w - T_\infty)$$

h : 熱伝達率

$$R_2 = \frac{1}{h} = \frac{1}{100} = 0.01$$

$$R = R_1 + R_2 = 0.011$$

$$\frac{\dot{q}}{A} = \frac{(T_w - T_\infty)}{R} = \frac{100}{0.011} = 9090.90 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

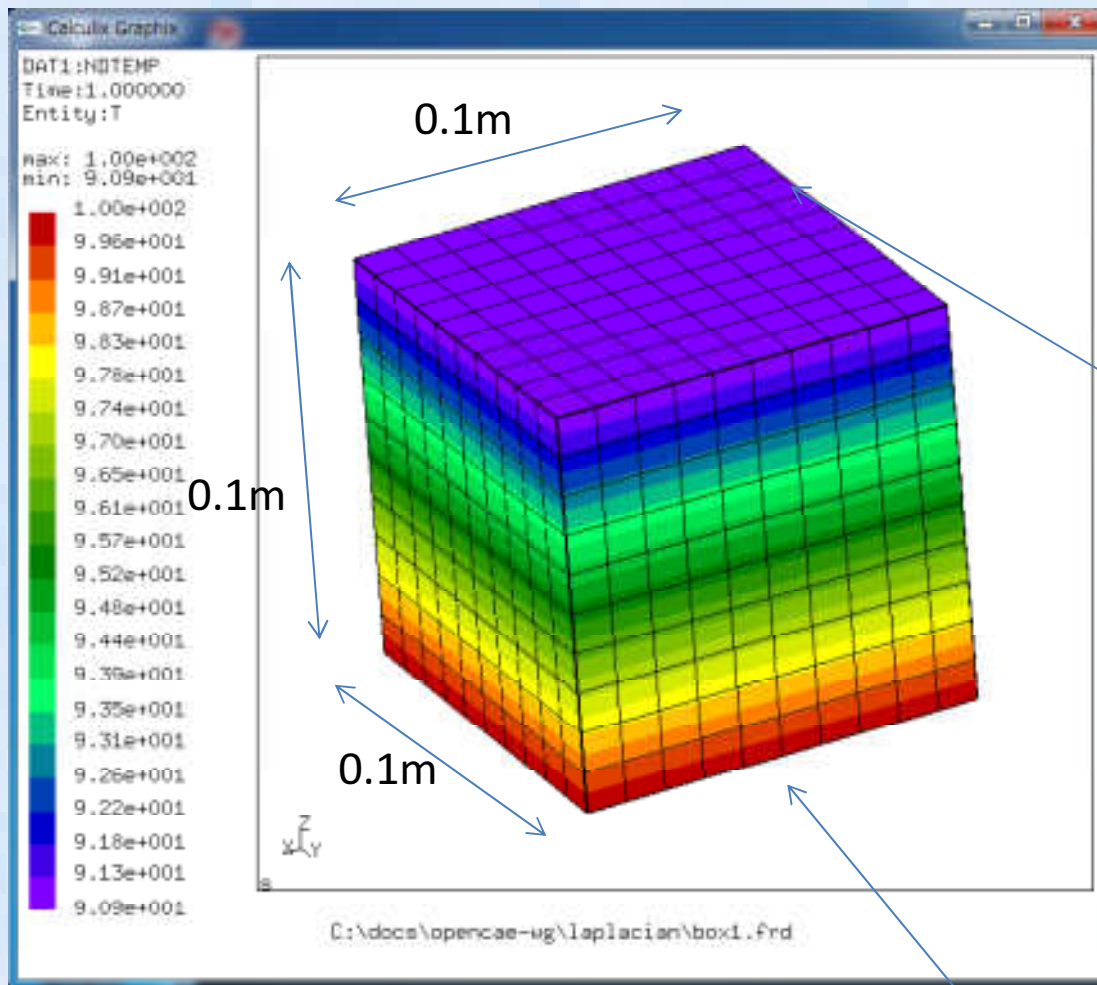
$T_w = 90.9090^\circ\text{C}$

熱伝導解析のできる オープンソースリスト

| 名称 | 入手先 | 特徴 | 解析手法 | 備考・OS |
|-------------------------|--|------------------------------|------------------|--|
| OpenFOAM® | www.opencfd.co.uk/openfoam | 汎用FVM toolBox | 有限体積法 | laplacianFoam ChtMultiResion SimpleFOAM OS: Linux |
| CodeSaturne/ Syrthes | rd.edf.com | EDFツール 熱伝導は Syrthesで計算 | 熱伝導部分は 有限要素法? | OS: Linux, Syrthesのみは Linux/Windows |
| CodeAster | www.code-aster.org | EDF 汎用構造 解析ツール | 有限要素法 | OS: Linux |
| Elmer | www.csc.fi/english/pages/elmer | マルチフィジクス | 有限要素法 | OS: Windows |
| Calculix | www.calculix.de | 構造解析, 熱 伝導 | 有限要素法 | OS: Linux/Windows |

国産: Adventurethermal/FrontISTRなどFEMも熱伝導解析機能がある

検証例題1. 単一材料1次元熱伝導 -Calculix-



Box1

(左:Calculix定常解)
モデル・メッシュはSalomeで作成
Universal fileに出力して
変換ツールunicalでCalculixに変換
(寸法は全て 0.1m)

上面:
0°C, 熱伝達係数
100W/(m²K)
の流体に接する

側面:断熱
(T:zeroGrad)

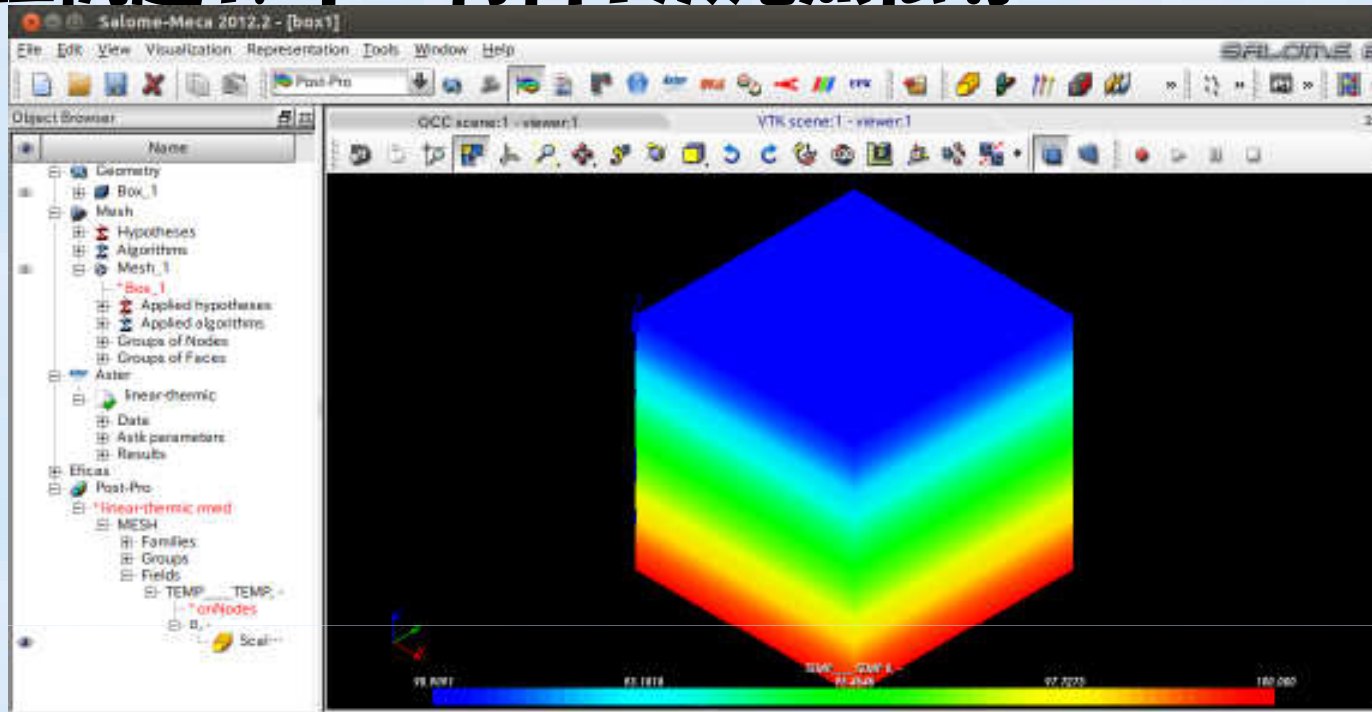
底面100°C固定

Calculix解析結果
上面温度90.9°C

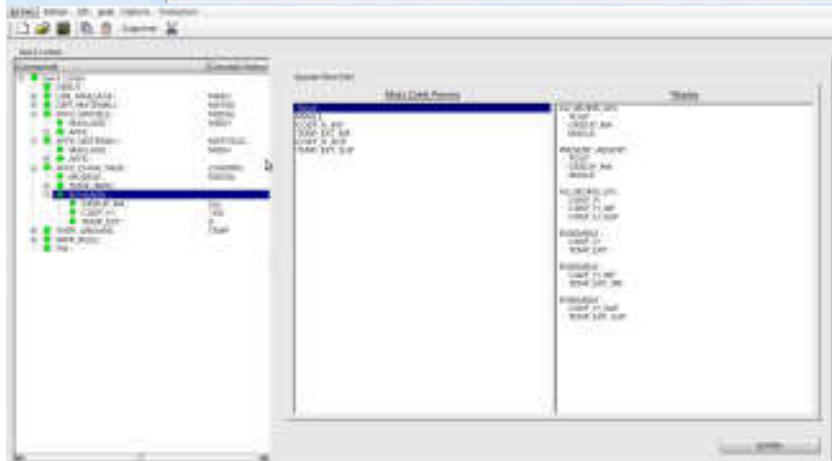
初期全体:25°C

熱伝導率:100W/(mK), 密度: 2000kg/m³, 比熱:0.1

検証例題1. 単一材料1次元熱伝導 -CodeAster-



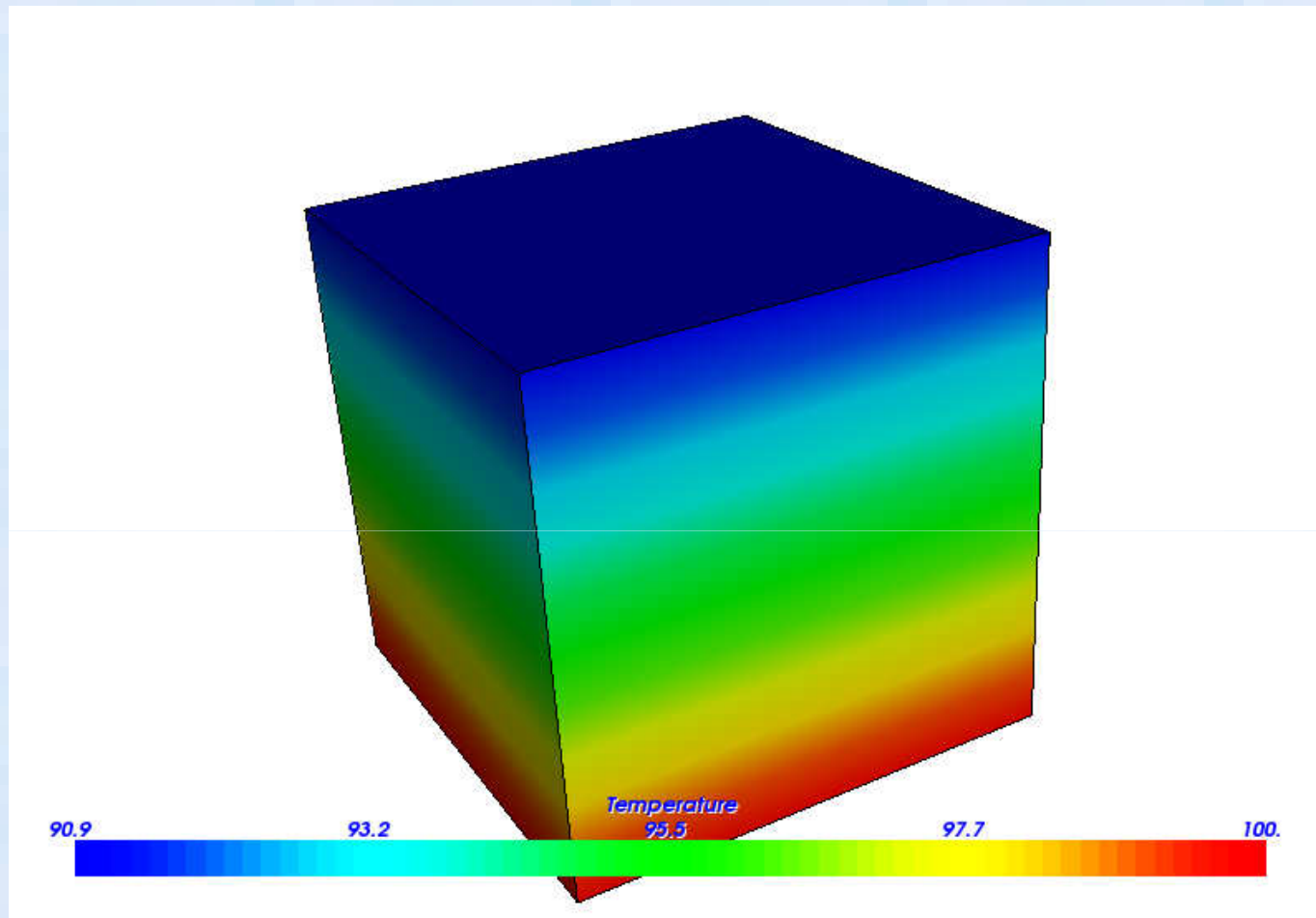
Python Console
Python 2.6.6 (r266:84292, Dec 9 2011, 18:30:59)
[GCC 4.1.2 20061115 (prerelease) (Debian 4.1.1-21)] on linux2
type help to get general information on environment
>>>



- *ポイント
- Salome上で上面(top)/下面(bottom)に面グループ名を設定
- SalomeMechのlinearThermal Wizardで底面の温度条件(100°C 1種境界条件=ディリクレ条件)を設定
- 上面の熱伝達境界条件(3種境界条件)はWizardで設定できないので、Eficas上で設定する
- AFFE CHAR THERの下にECANGEを挿入して左画面の設定する

CodeAster解析結果
上面温度90.9°C

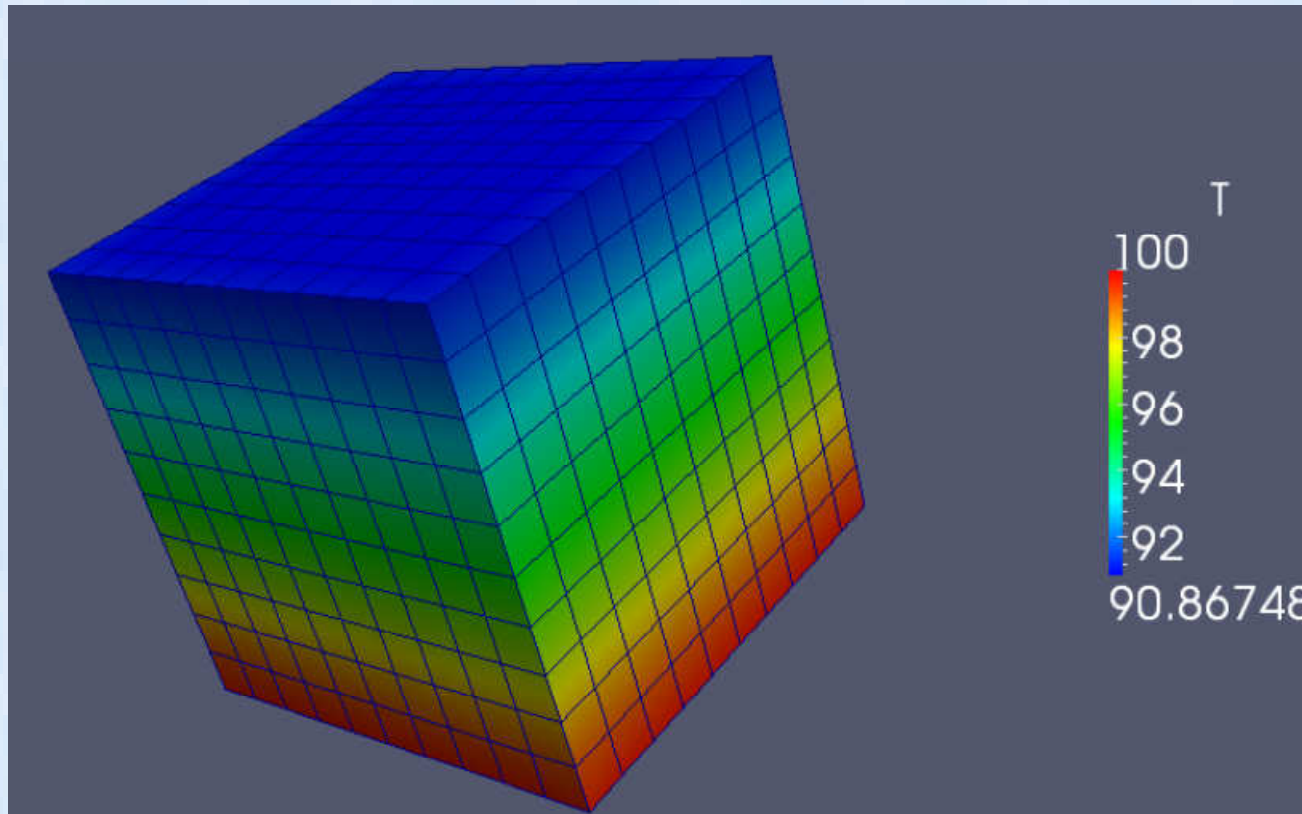
検証例題1. 単一材料1次元熱伝導 -Elmer-



-Elmer のサンプル例題を参照に設定。Elmer-GUI 上で熱伝達境界を含め全て条件設定できるので、今回調査した各ツール中、最も簡単に設定が可能。

Elmer解析結果
上面温度90.9°C

検証例題1. 単一材料 1次元熱伝導 -OpenFOAM v2.2 laplacianFoam-



OpenFOAMの
laplacianFoam
計算結果

t=1 上面温度

91.1687 °C

(ParaView WorkSheet)

90.86 °C

(コンター図)

メッシュはその他と同じくSalomeで作成、Universal File からOpenFOAMへ変換

-OpenFOAM laplacianFOAM は定常ソルバでは無い(非定常ソルバ)

-上面の境界条件設定に特殊な設定が必要(次ページ: 参照)

OpenFOAMの熱伝導解析結果比較

ParaViewで温度をSheetで出力すると値が少しずれるが、Cellの値をParaView
上で節点にマッピングする際にズれるのでParaView側に問題のようだ?

検証例題1. 単一材料 1次元熱伝導 -OpenFOAM v2.2 laplacianFoam-

```
internalField uniform 25.0;
boundaryField
{
  defaultFaces
  {
    type zeroGradient;
  }
  bottom
  {
    type fixedValue;
    value uniform 100.0;
  }
  top
  {
    type groovyBC;
    refValue uniform 0;
    refGradient uniform 0;
    valueFraction uniform 1;
    value uniform 0;
    valueExpression "0";
    gradientExpression "gradT";
    fractionExpression "0";
    evaluateDuringConstruction 0;
    variables "Tout=0.0;h_conv=100;cond=100;gradT=h_conv*(Tout-internalField(T))/cond;";
    timelines (
);
    lookuptables (
);
  }
}
```

0/T の定義

-OpenFOAMでは第三種境界条件:熱伝達境界条件の設定は標準のOpenFOAMの機能には無い。
-groovyBCを使う必要があるためユーティリティ swak4Foamをinstallする必要がある(DEXCUSには最初からインストールされている)
-この例題では特に問題ないが、groovyBCを利用すると色々と計算中に問題がある事がある。

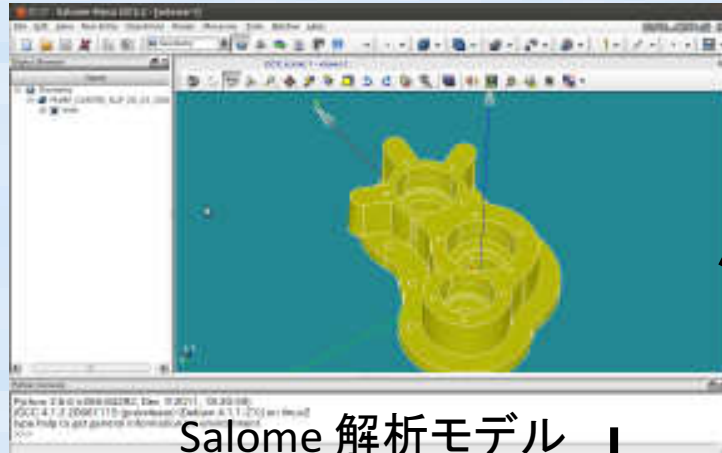
検証例題1. 単一材料1次元熱伝導

-まとめ-

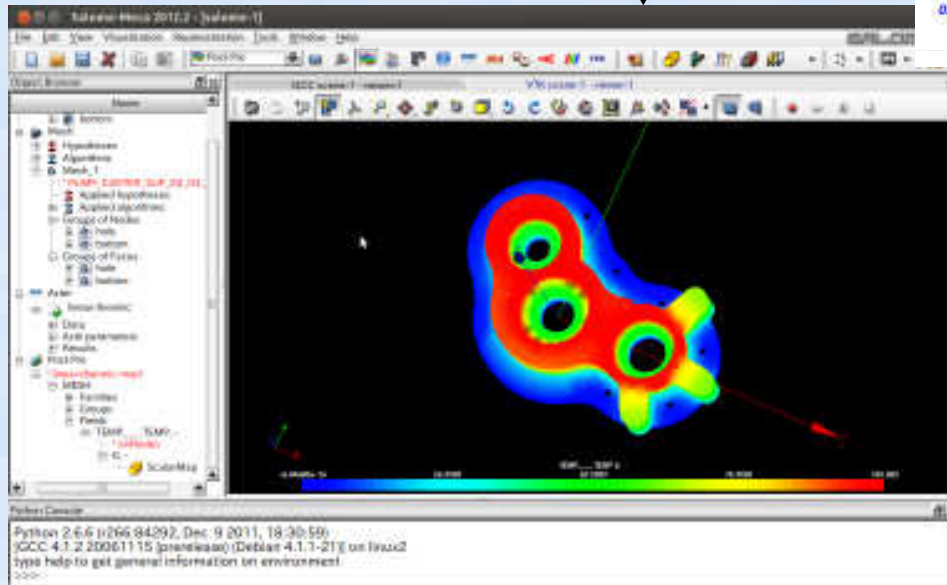
| 解析ソフト | 上面温度(°C) | 備考 |
|------------------------------|----------|-----|
| Calculix | 90.90 | |
| CodeAster | 90.90 | |
| Elmer | 90.90 | |
| OpenFOAM® (laplacianFoam) | 90.86 | 非定常 |
| 理論解 | 90.9090 | |

-簡単な問題なので特に問題なく、正解が得られる。OpenFOAM は有限体積法(FVM) なので有効数字4桁目で結果がズレたが問題ない結果。

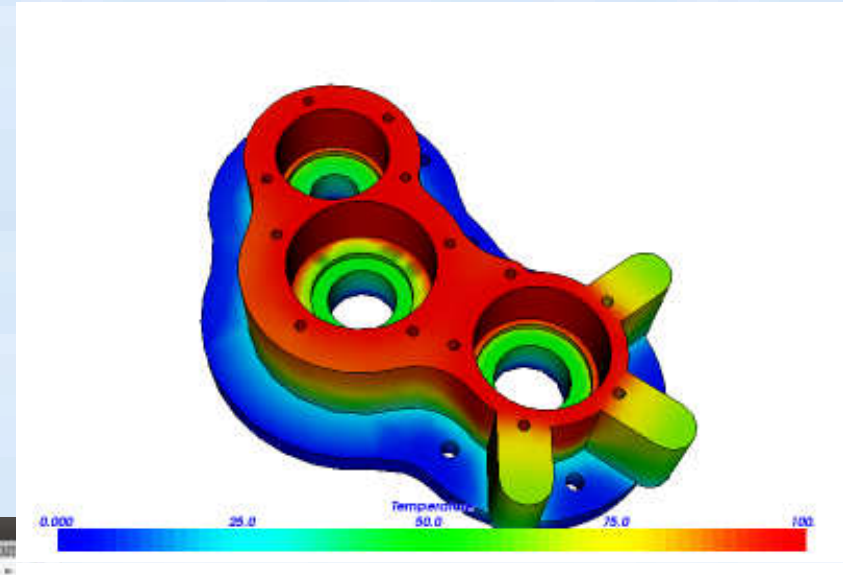
(参考). 3次元単一材料 (途中)



Salome 解析モデル
(NETGEN 1D-2D-3D)



CodeAster 解析結果



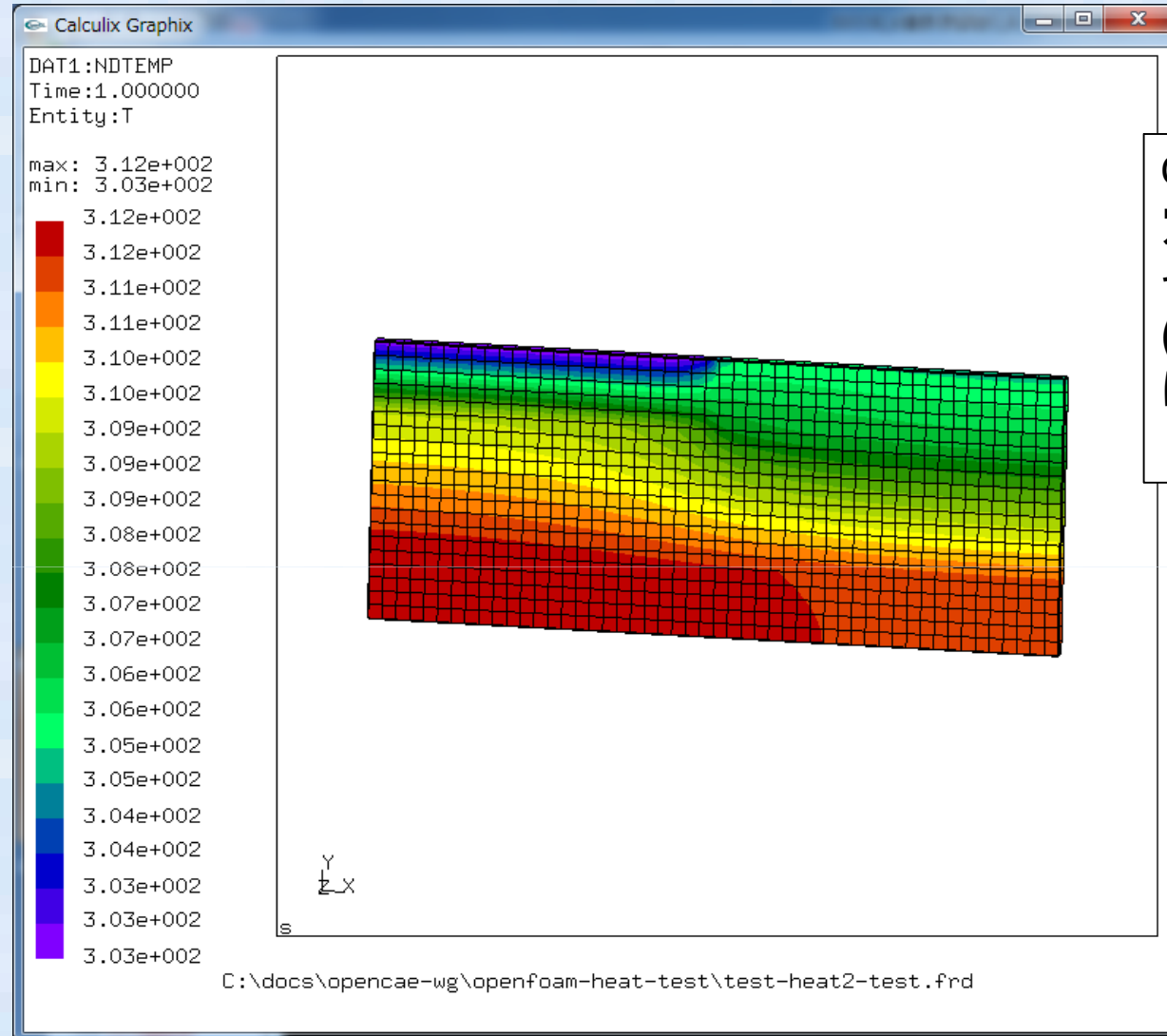
Elmer 解析結果

- 穴の面に100°C, 底面に0°Cの温度境界条件を設定
- Calculixでは何故か NegativeVolumeでエラー? データ変換に問題?



OpenFOAM®で解析予定

検証例題. 複数材料 固体熱伝導解析

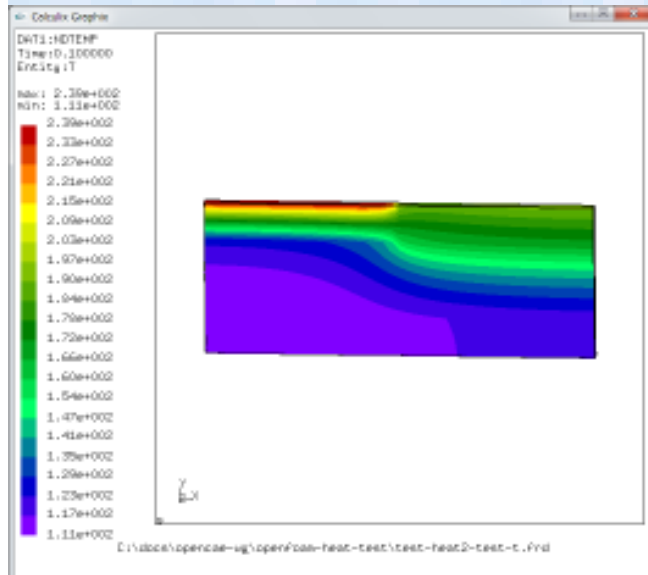


Calculix
定常熱伝導計算
その2
(空気部の熱伝導率を5W/mK
に設定)

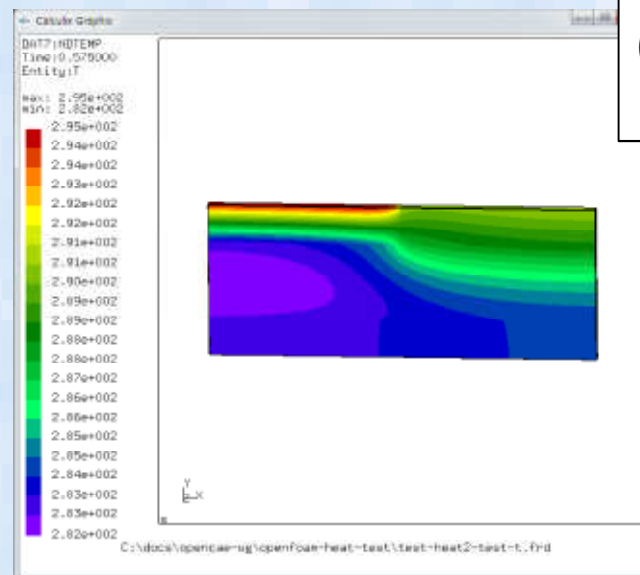
最高温度は312Kになり、一応それらしい結果

検証例題 2. 複数材料

Calculix
非定常熱伝導計算
(空気部の熱伝導率を5W/mK
に設定したもの)

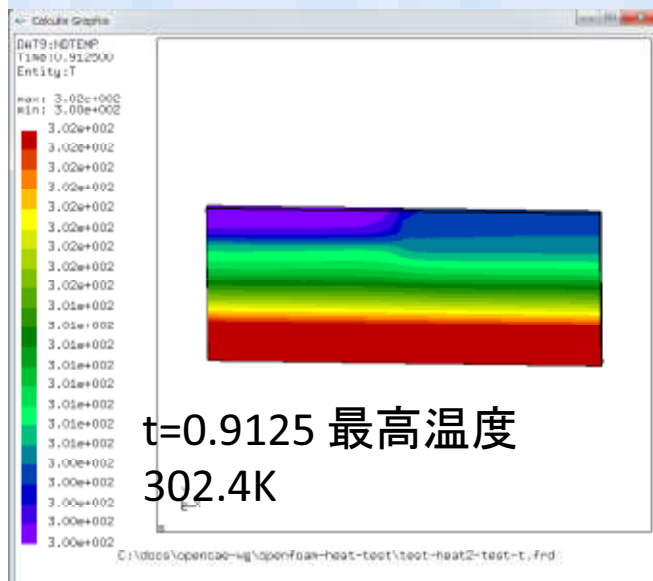


t=0.1 最高温度239.5K

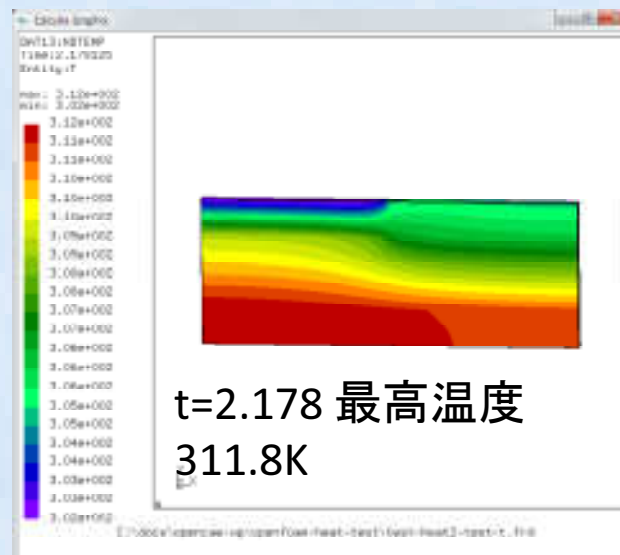


t=0.575 最高温度
294.9K

全ての材料に
密度=200
比熱=0.1
に仮設定



t=0.9125 最高温度
302.4K



t=2.178 最高温度
311.8K

2秒ほどで
最高温度312Kになり、定常
解へ収束

固体熱伝導解析のOpenFOAM解析での問題点

laplacianFoamは単一材料のみ取り扱うので複数材料は扱うことができない

→ laplacianFoamソルバ改良を行う or
ChtMultiRegionSimpleFoamを使う

laplacianFoamには発熱項(Source項)が無い

→ Source 項をソースに追加する

-ChtMultiRegionSimpleFoamは流体領域の無い固体だけの問題でも使用可能

検証例題 2. 複数材料

-複数材料物性への対応: 過去の東京勉強会資料
(Ogataさんのものあり)

-上記+材料異方性+ソース項追加:
オープンCAE富山の西さん
の公開資料あり

詳細は各資料を参照;

今回の問題は西さんの改良ソルバ
“laplacianFOAMSourceTensor”
を使って計算

第9回OpenFOAM勉強会for beginner

ソルバー改良事例発表

id:oga_shin
小縣信也
ogata shinya

2011.09.26 第9回OpenFOAM勉強会for beginner

OpenFOAMによる
電子機器シミュレーション
その1

オープンCAE学会 西 剛伺

検証例題 2. 複数材料

西さんの改良ソルバ“laplacianFOAMSourceTensor”
の設定例：物性値、発熱量は全てsetFieldsで定義する

```
regions(  
boxToCell { box (0.00 0.00 0.00) (0.5 0.05 0.01);  
            // box-a Die, Need to Input as "Meter"  
fieldValues  
( volScalarFieldValue ST 200 ); }  
boxToCell { box (0.00 0.00 0.00) (0.5 0.05 0.01);  
            // box-a Die, Need to Input as "Meter"  
fieldValues ( volSymmTensorFieldValue DT (5.0 0 0  
5.0 0 5.0) ); }
```

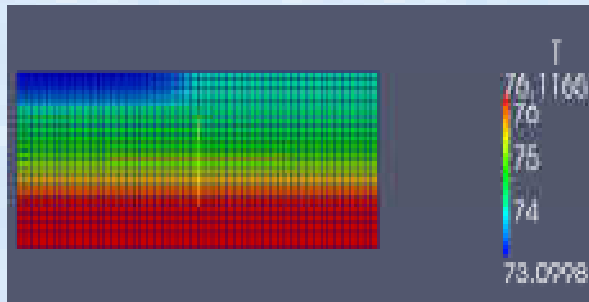
boxToCellで領域指定して指定した領域単位で発熱量や物性値(熱伝導率(熱拡散係数))を指定する

ST: 単位体積あたり発熱量を C_p で割ったもの

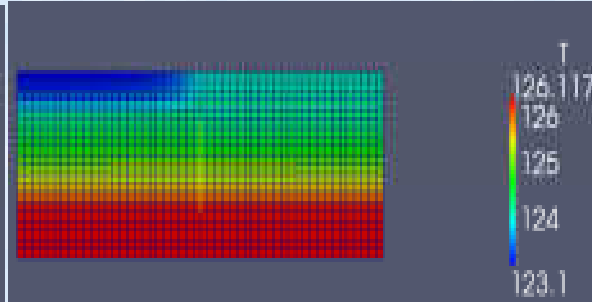
DT: 異方性熱拡散係数(λ/C_p)

検証例題 2. 複数材料 -固体熱伝導解析-

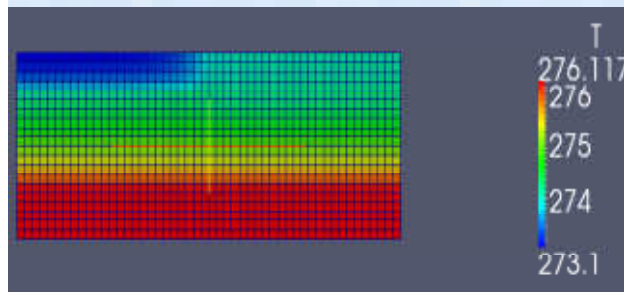
OpenFOAM
非定常熱伝導計算
(空気部の熱伝導率を5W/mK に
設定したもの)



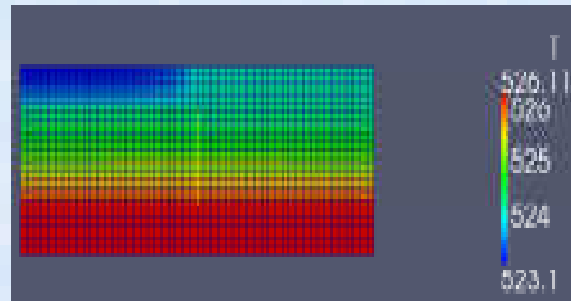
t=1 最高温度76.1K



t=2 最高温度126K



t=5 最高温度267K



t=10 最高温度526K

温度上昇傾向が
Calculixと異なる
最高温度が
上昇しつづける

面内温度分布は両者とも近い
境界条件を変更して再度確認

検証例題 2. 複数材料

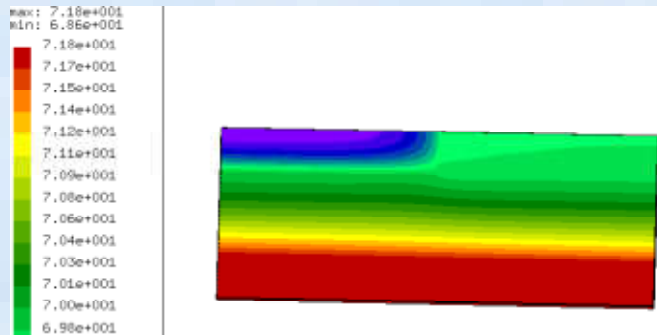
上面の温度条件を温度固定境界条件に変更



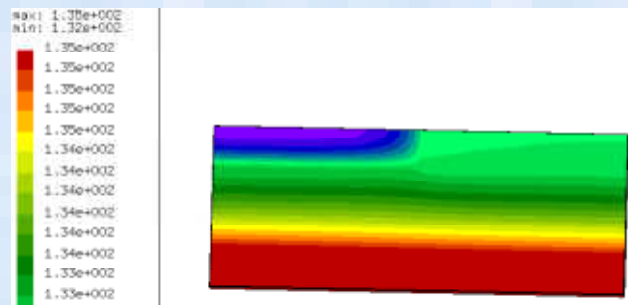
- 密度のみ温度依存性考慮, 定常解析.
- 空気, 粘性係数 $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ (層流).
- $0.5\text{m} \times 0.2\text{m}$ の解析領域 (100 × 40メッシュ).

$$\begin{aligned} q/t &= 1\text{W}/(0.5*0.01*0.05) \\ &= 4000\text{W}/(\text{mm}^3) \\ (q/t)/(cp) &= 4000/20 = 200 \end{aligned}$$

検証例題 2. 複数材料

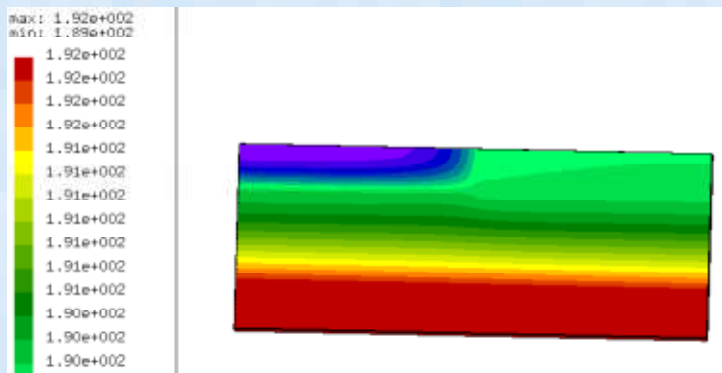


t=0.9125
最高温度 71.85K

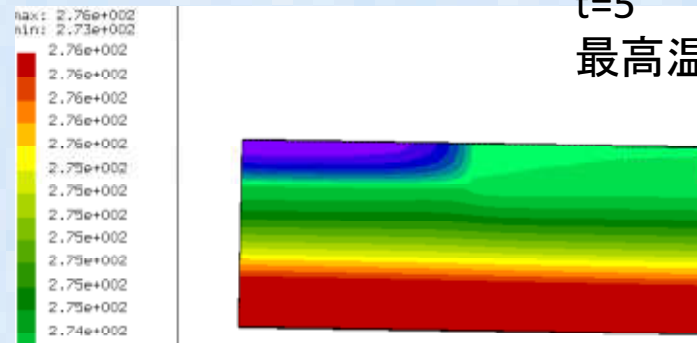


t=2.178
最高温度 135.1K

Calculix
計算結果

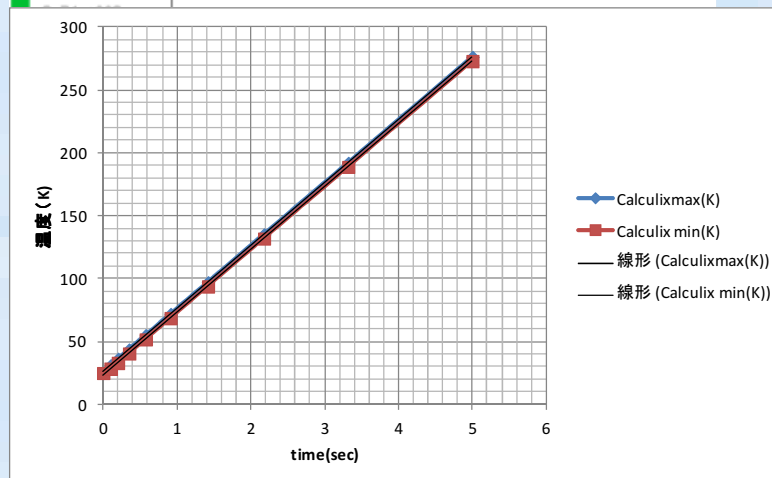


t=3.317
最高温度 192.1K



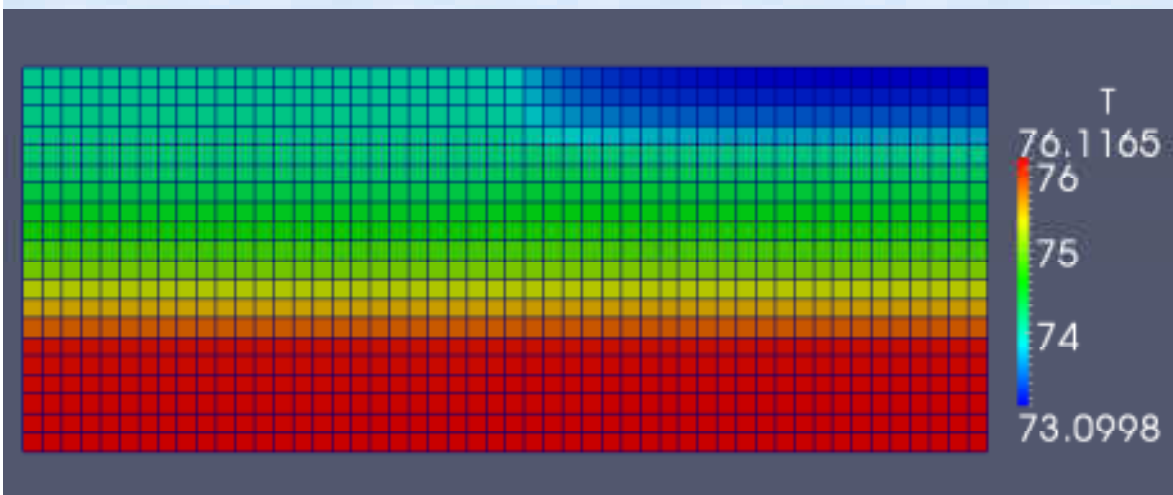
t=5
最高温度 276K

温度はリニアに上昇
最高温度はt=5sec
276K

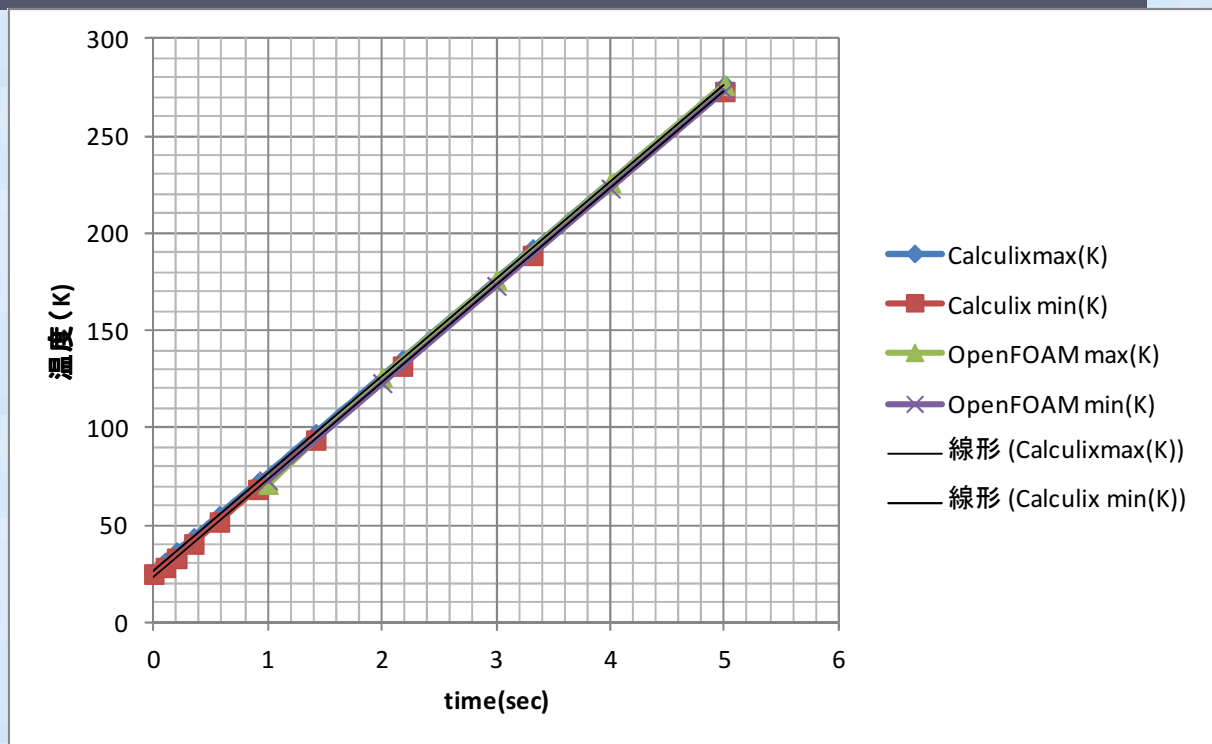


検証例題 2. 複数材料 固体熱伝導解析

OpenFOAM®
計算結果



t=1
最高温度 76.1
最小温度 73.1



境界条件を変更すると
OpenFOAM®と
Calculixの温度上昇が一致



GroovyBCを用いない
場合は問題なく結果が
一致

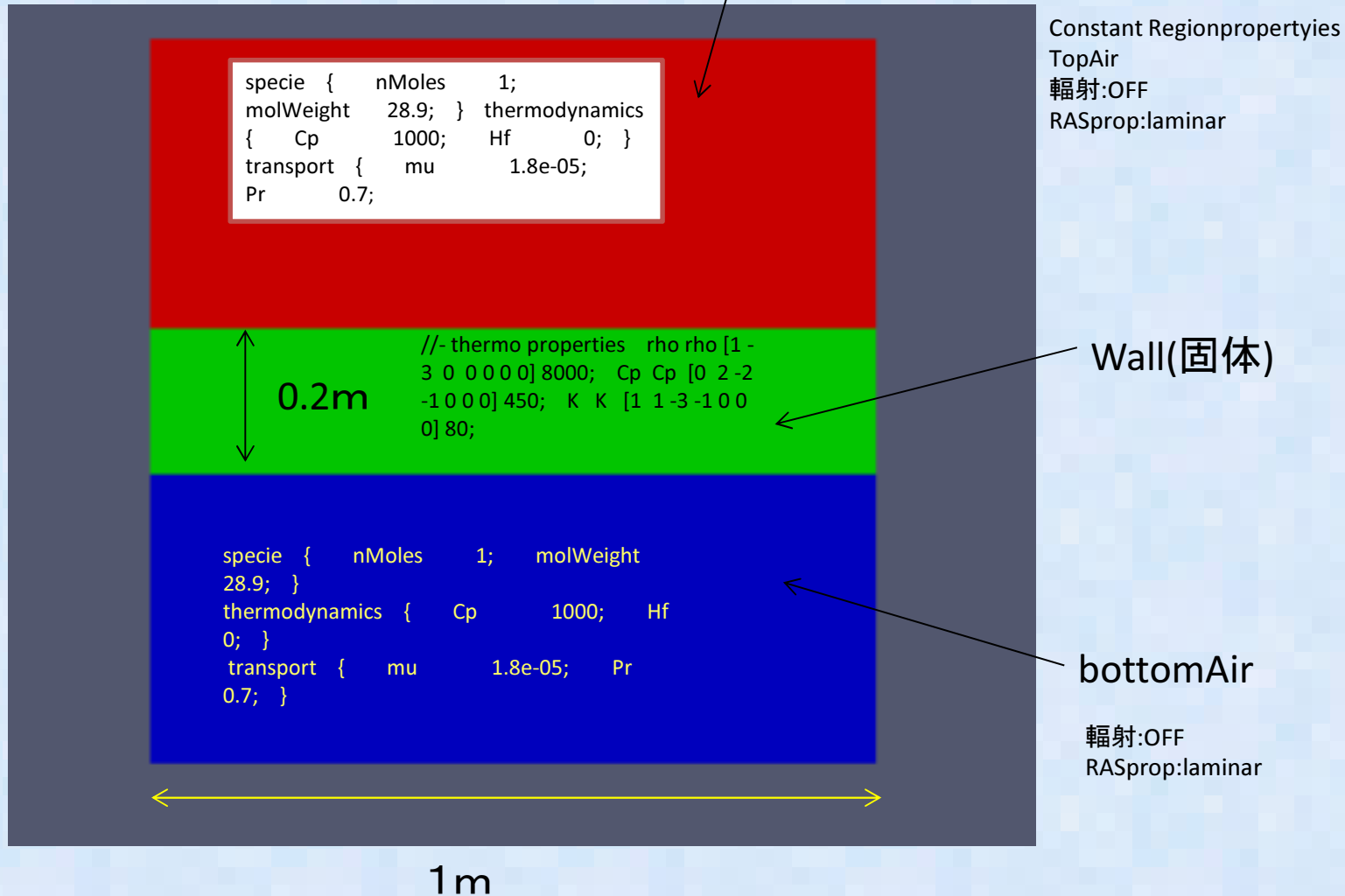
定常固体熱連成問題の検証状況

PlaneWall2D

(OpenFOAM wiki から入手)

OpenFOAM V2.1.1

Solver: chtMultiRegionSimpleFoam

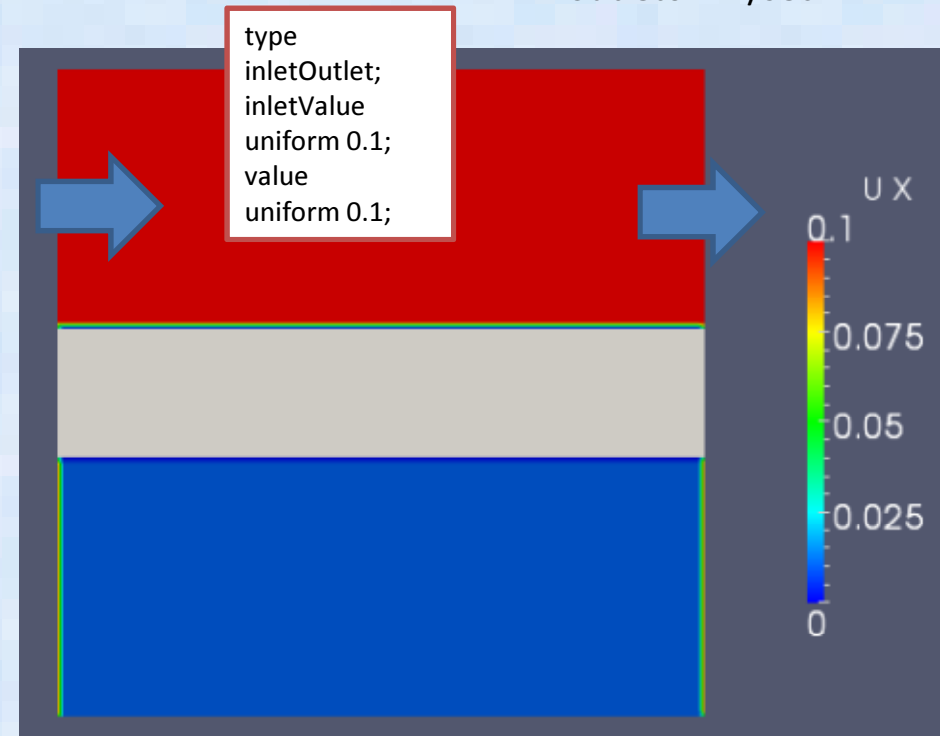
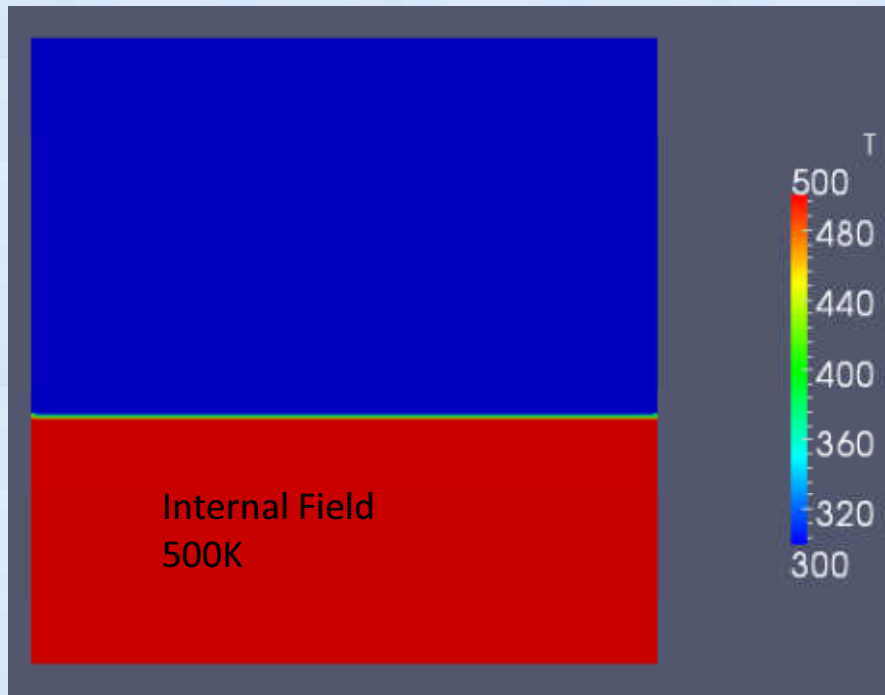


定常固体熱連成問題の検証状況

```
type  
fixedValue;      value  
uniform 0.1;
```

Inlet 0.1m/sec

outlet0.1m/sec



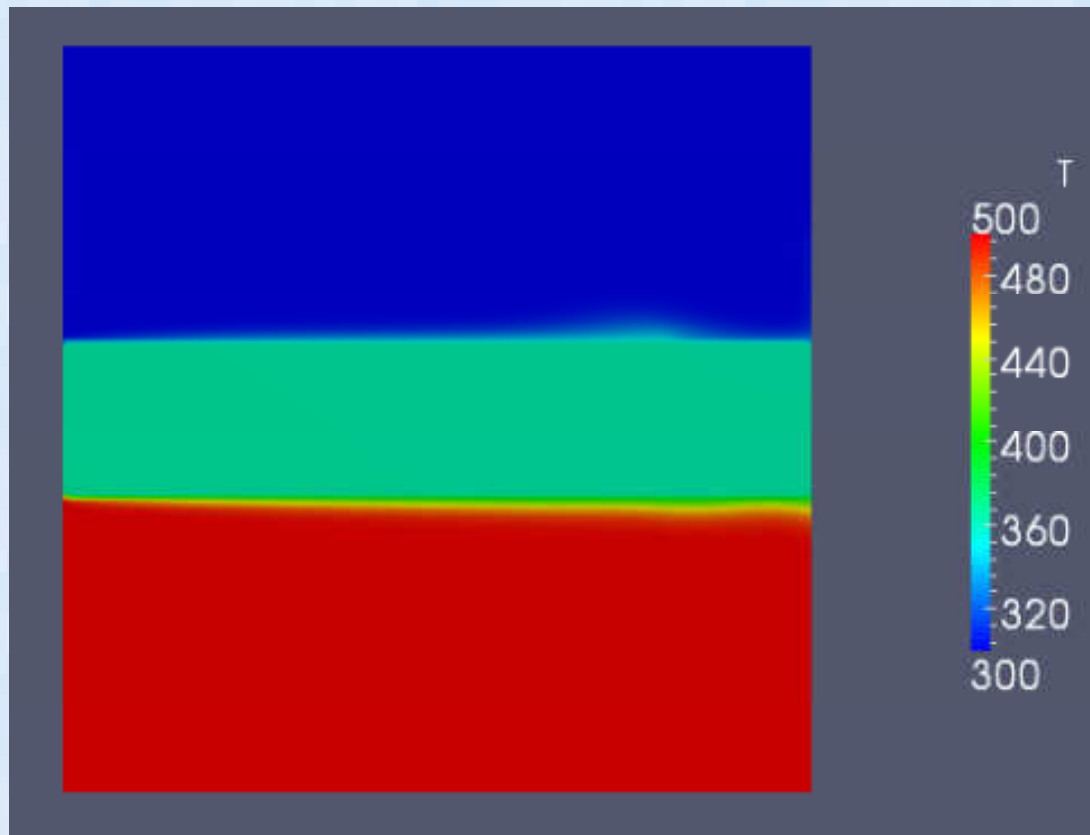
```
type  
inletOutlet;  
inletValue  
uniform 0.1;  
value  
uniform 0.1;
```

初期温度
300°C
500°C(bottom)

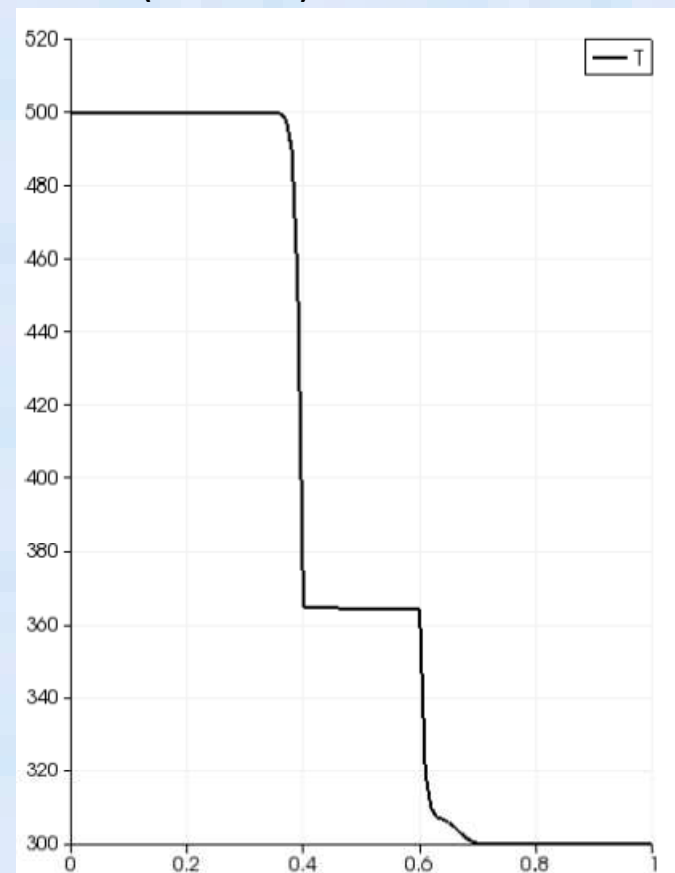
初期流速
0.1m/sec(top)

領域ごとの条件は
system/changeDictionarydictで定義

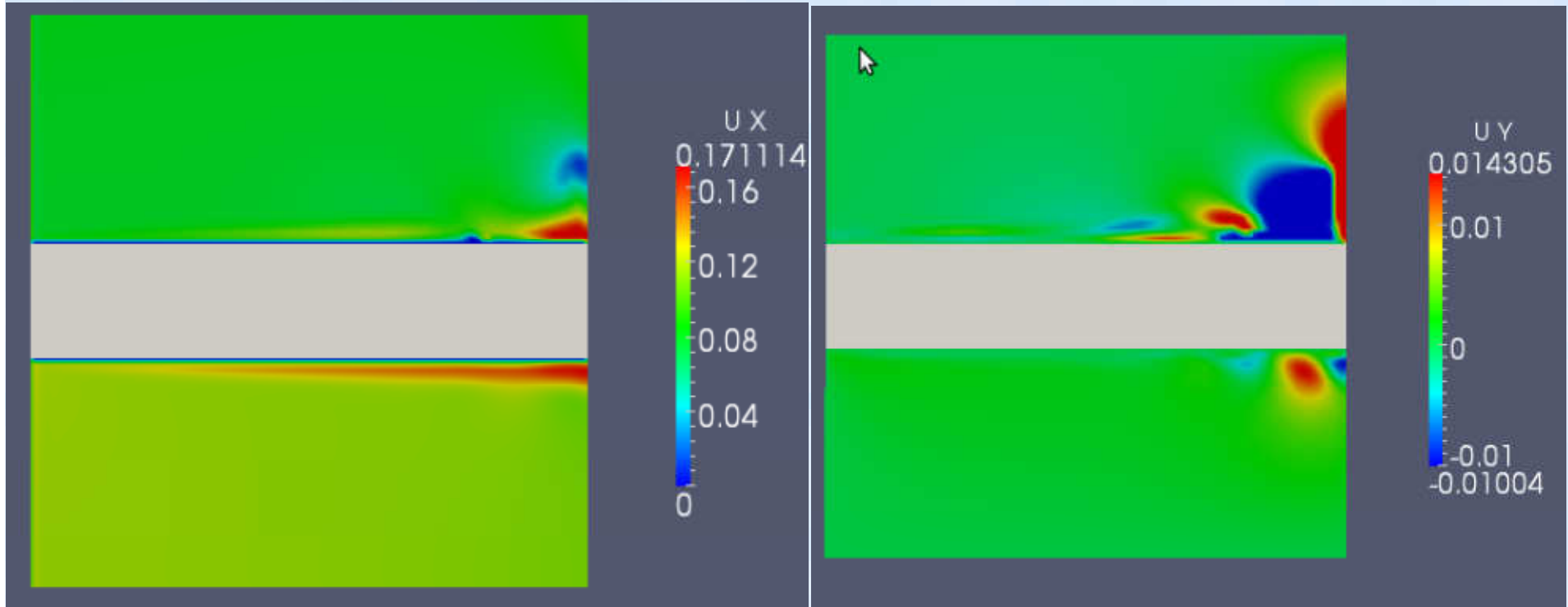
定常固体熱連成問題の検証状況



5000step後
300°C(top)
360°C-500°C(wall)
500°C(bottom)



定常固体熱連成問題(輻射なし)



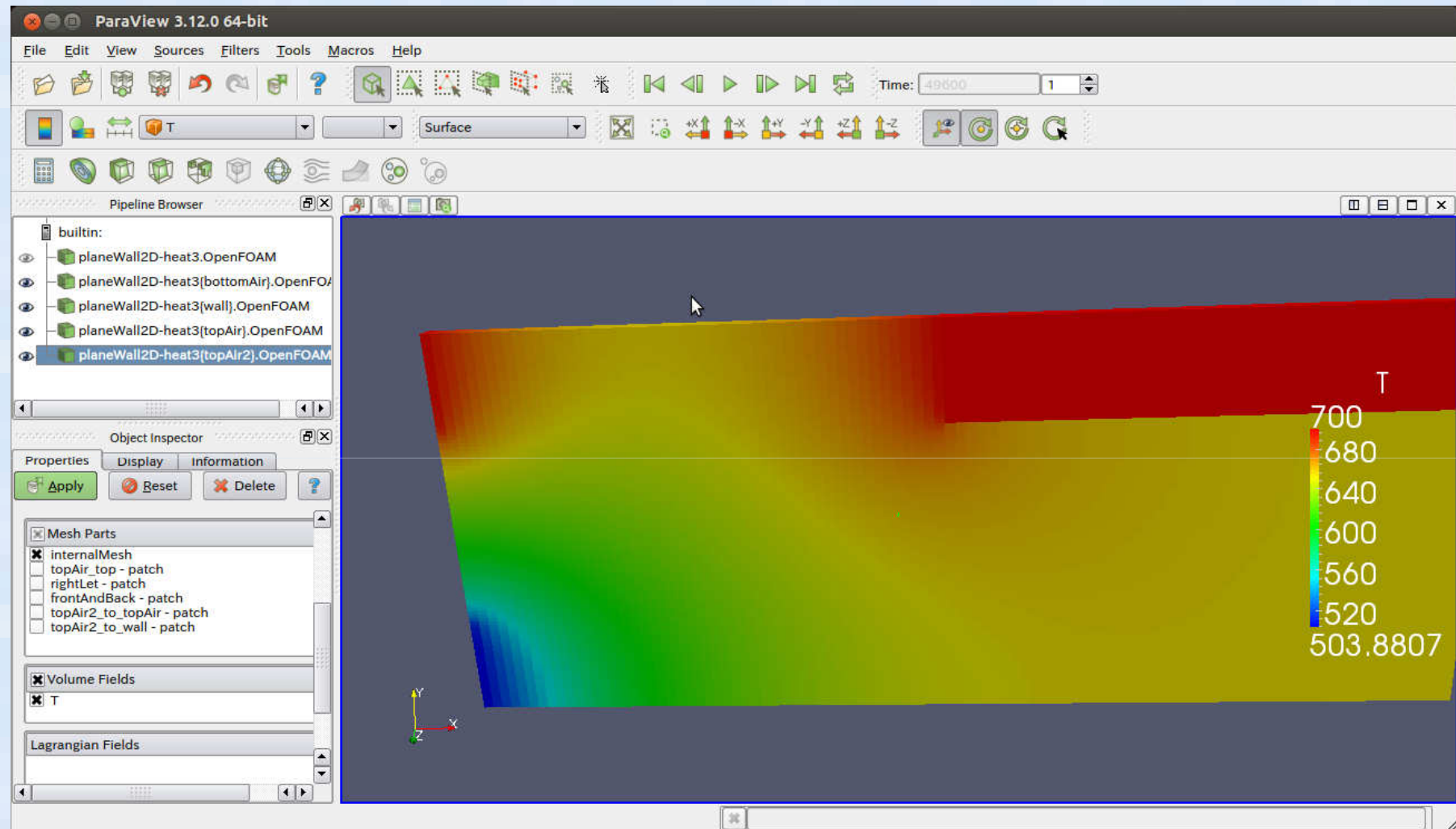
Step=5000 Ux

Step=5000 Uy



一応計算できているようだ。

CHT 固体熱伝導解析の例： 固体の熱伝導解析のみを実施した解析例

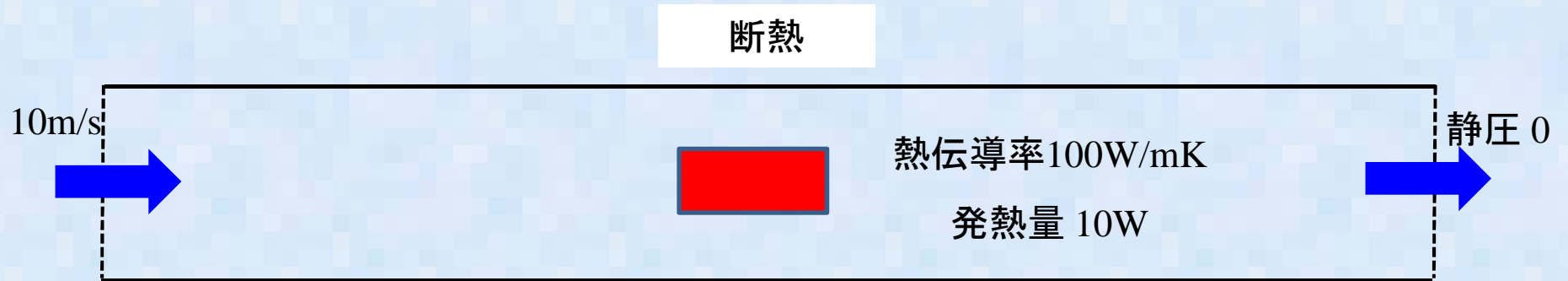


PlaneWallの例題を修正して、材料物性が異なる固体間熱伝導解析のみを実施した解析例： resion.property や流体領域のfvscheme, fvsolution, 物性を修正する。

今後の検討予定

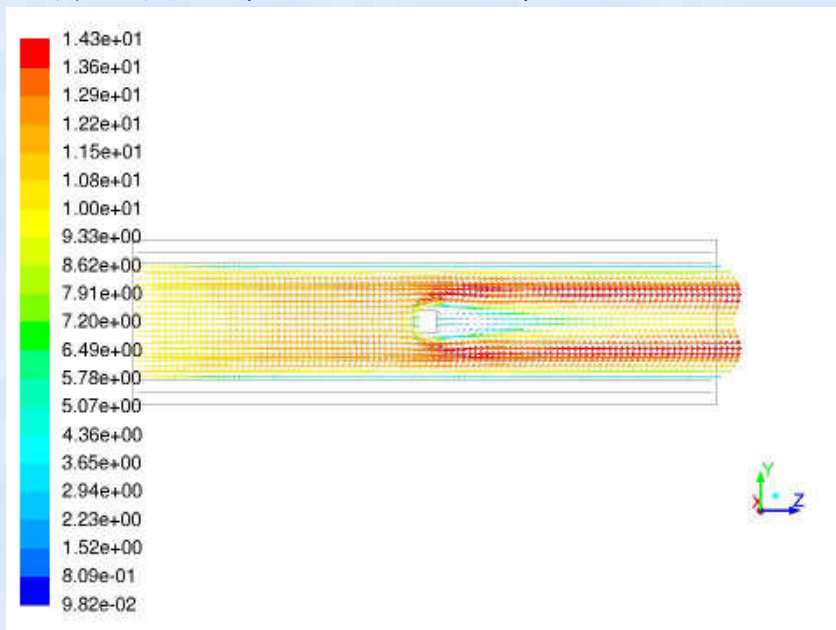
- 強制対流(冷却)
 - 発熱する固体(樹脂, 金属)を空気によって強制冷却する.
 - 熱収支の確認.
- 自然対流
 - 発熱する固体(樹脂, 金属)を空気によって自然空冷する.
 - 熱収支の確認.
- 定常固体熱連成問題(輻射考慮)

強制対流（輻射なし）

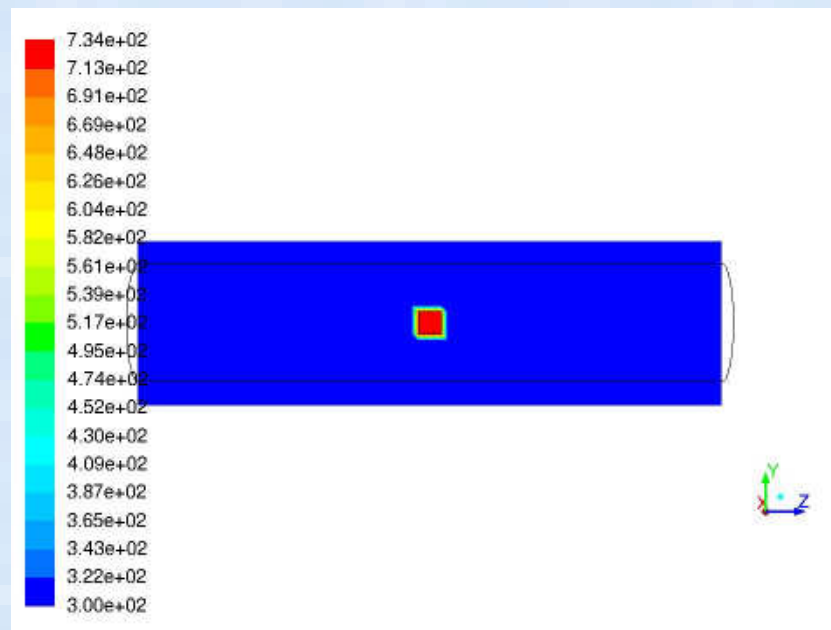


- 非圧縮性定常解析.
- 密度 1kg/m^3 , 粘性係数 $0.001\text{kg/m}\cdot\text{s}$ (層流).
- 入口流速 10m/s 規定, 出口静圧 0 規定.
- まず流れ場を求め, そのあと温度のみ解析.

強制対流 (FLUENT14.5)



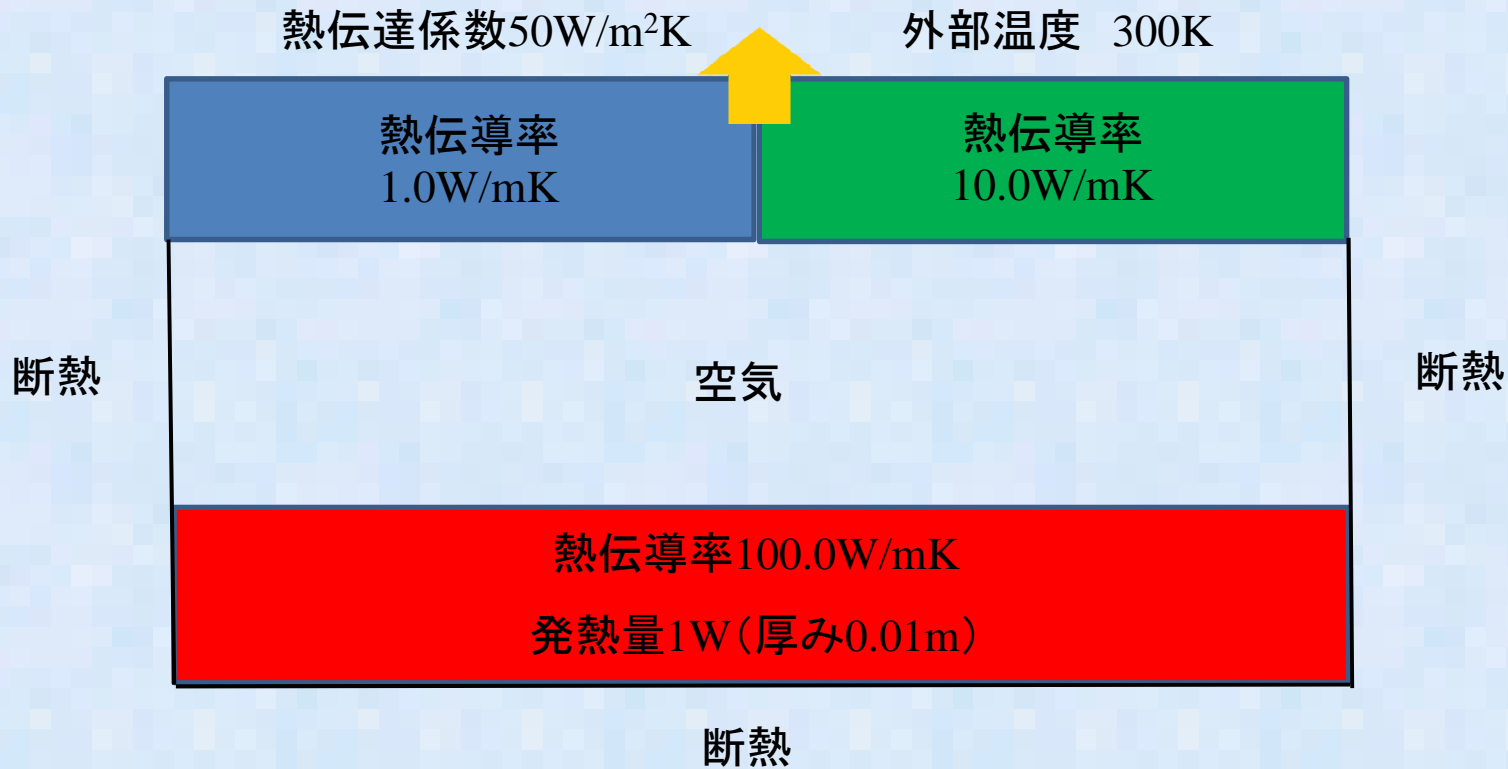
速度ベクトル表示



温度コンター表示

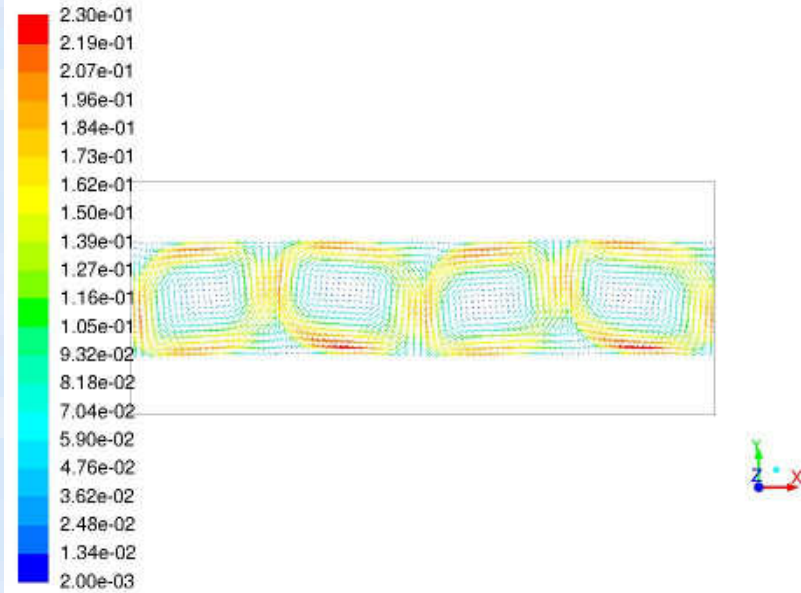
- 温度上昇 334°C .
- 排熱 9.91W .
- 発熱 10W なので, 熱収支誤差 0.9% .

自然対流（輻射なし）

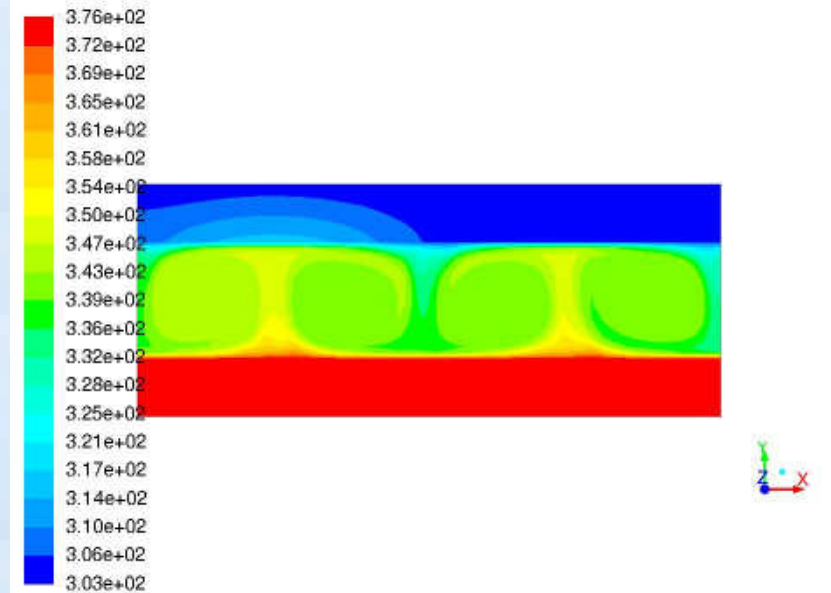


- 密度のみ温度依存性考慮, 定常解析.
- 空気, 粘性係数 $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ (層流).
- $0.5\text{m} \times 0.2\text{m}$ の解析領域 (100×40 メッシュ).

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% .

本日のまとめ

- **OpenFOAM®の熱設計機能のV&Vを実施中。熱伝導計算の簡単な問題では妥当な結果が得られた。**
- **複数材料の実用的な問題では、境界条件設定などで正しい解を得られないことがあり、妥当性確認が重要**
- **熱流体、固体流体熱連成の検証を今後実施予定。**
- **検証ファイルは公開予定**