

# Femtet流体解析セミナー

## 基礎編

1. 流体解析概要
2. 流体解析の解析設定
3. モデル作成
4. 結果表示

## 応用編

5. 熱流体解析
6. その他の機能
7. 収束しない場合の対応方法

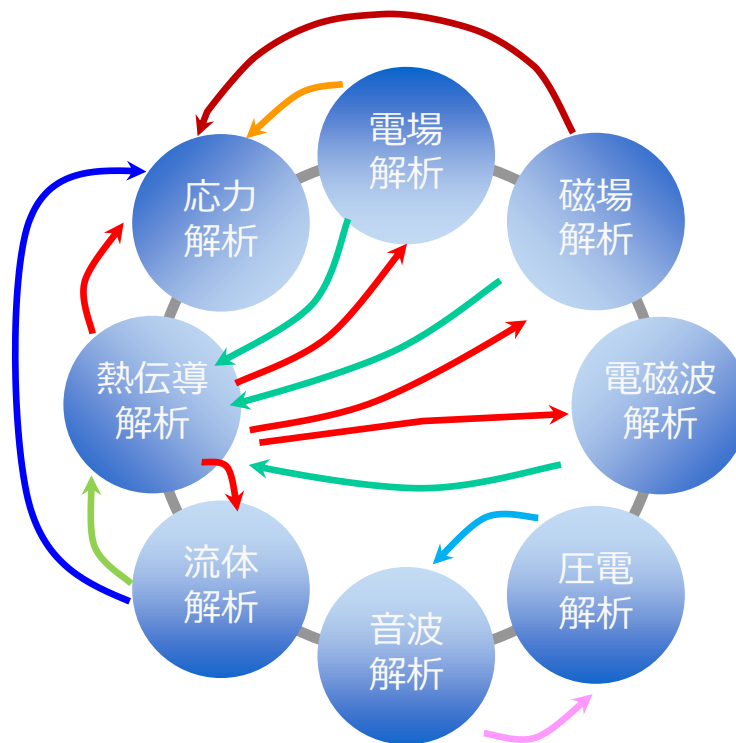
## 付録

8. 壁面近傍のメッシュ設定

# 1. 流体解析・熱流体解析概要



基本解析機能



連成解析機能

- 発熱密度分布
- 温度分布
- 変位分布
- 流速分布
- 電磁力分布
- 静電力、電歪分布
- 音圧分布
- 圧力分布

## 解析の種類

- ・ 定常解析
  - ・ 過渡解析
- ※自由表面解析は過渡のみ

## 計算手法

- ・ 層流
- ・ 乱流(Realizable K- $\epsilon$ モデル)

## オプション

- ・ 拡散解析
- ・ 自由表面解析(VOF法)

## 前提条件

- ・ 非圧縮性流れ

密度が変わらない

流入と流出はセットで設定する必要あり

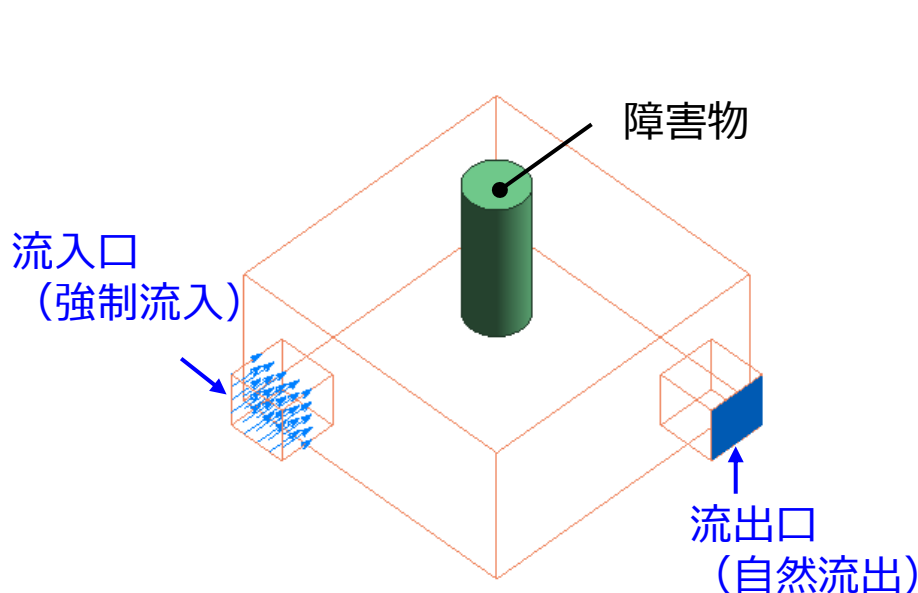
目安：流速が音速の1/3以下

空気 ~100m/s

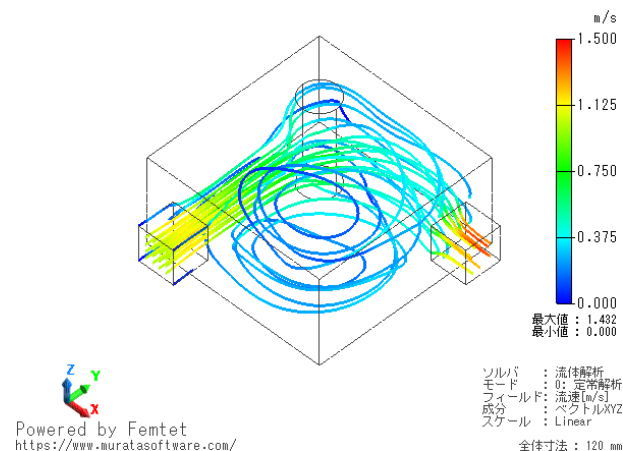
水 ~500m/s

※自然対流の計算（浮力を考慮）を行う場合、熱流体解析を使用します。

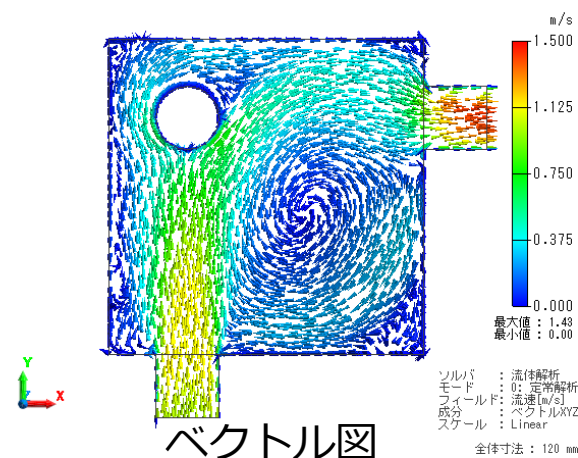
## 解析例：流路中に円柱状の障害物のある場合の流れ（チュートリアル）



- ・ 固体部（障害物）に加わる力[N]
  - ・ 流入から流出までの圧力損失[Pa]
- なども出力することが可能です。

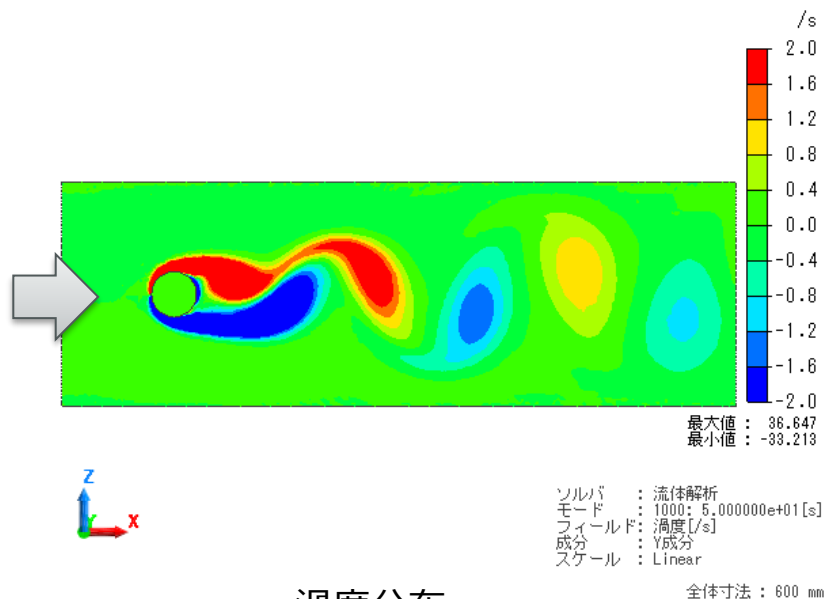


流線

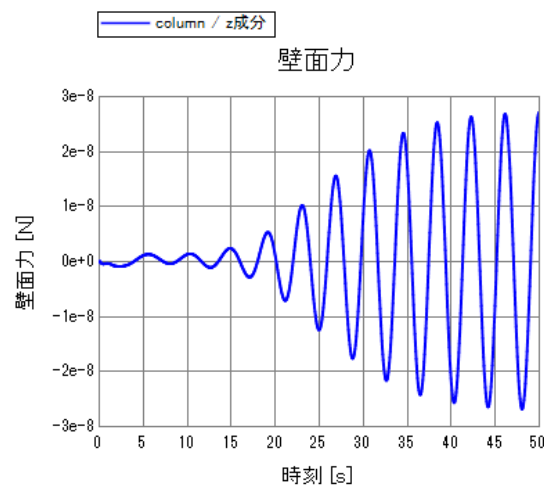


ベクトル図

## 解析例：円柱周りの流れの過渡解析（流体解析例題5）



渦度分布



円柱が受ける揚力(z方向の力) の周期振動

- ・円柱の後ろに周期的に渦が放出する様子が確認できます。
- ・この渦はカルマン渦と呼ばれるもので、定常解析では解析できない事例になります。

## 2. 流体解析の解析設定



## <基本手順（ソルバ共通）>

### ①解析条件

解析ソルバなどの設定

### ②ボディ属性/材料定数

ボディ属性入力

材料DBから選択 or 材料定数直接入力

### ③境界条件

ボディ表面の状態を境界条件として入力

### ④メッシュサイズ

空間精度に関する設定

## <基本手順>

### ①解析条件

流体解析を選択

### ②ボディ属性/材料定数

ボディ属性は名前のみ入力  
材料DBから空気or水を選択

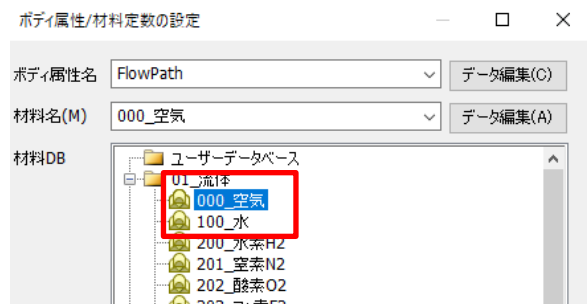
### ③境界条件

「流入」：強制流入(流速)を設定

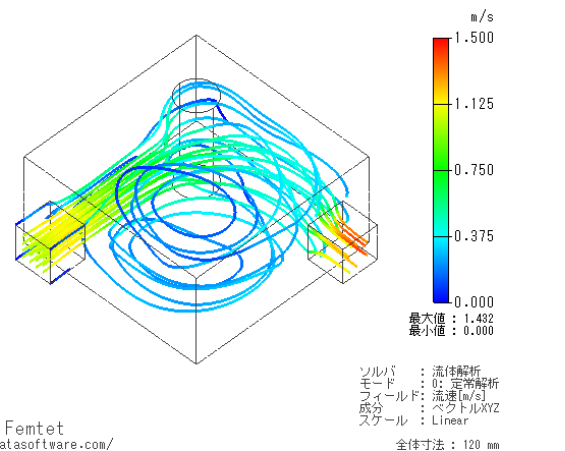
「流出」：自然流出を設定

### ④メッシュサイズ

### ②空気or水の選択



### ③流入の設定



Powered by Femtet  
<https://www.muratsoftware.com/>

チュートリアルの問題は上記設定のみで解析可能

## 2. 1 解析条件

ソルバの選択

流体解析

メッシュ

過渡解析

高度な設定

モニタリング

結果インポート

説明

ソルバの選択

電磁界

電場解析 *Coulomb*

磁場解析 *Gauss/Luvsens*

電磁波解析 *Hertz*

熱

熱伝導解析 *Watt*

応力・圧電

応力解析 *Galileo*

圧電解析 *Rayleigh*

音波・流体

流体解析 *Bernoulli*

音波解析 *Mach*

簡易流体解析 *Pascal*

## 解析条件の設定

ソルバの選択

流体解析

メッシュ

高度な設定

モニタリング

説明

流体解析

解析の種類

定常解析

過渡解析

層流/乱流

層流

乱流

オプション

拡散解析の設定 ...

混相流の設定 ...

初期値/リスタート

前回の解析結果を使用する

他の解析結果を使用する (結果インポート)

リスタートの詳細設定 ...

壁表面の積層メッシュ設定

全体設定 ...

定常/過渡の選択

層流/乱流の選択

拡散解析オプション  
を使用する場合

自由表面解析オプションを  
を使用する場合

## 定常解析

十分に時間がたって安定した状態を解析する。  
時間が変化しても状態が変わらない場合の状態を計算する。  
常に状態が変化する非定常の現象は計算できない。

## 過渡解析

時間とともに変化する状態を解析する。  
非定常の現象も解析することができる。

以下の設定が必要になります。

- ・ 時間ステップの設定
- ・ 熱流体解析の場合、初期温度の設定

解析条件の設定

ソルバの選択  
熱流体解析  
メッシュ  
**過渡解析**  
高度な設定  
モニタリング  
結果インポート  
説明

**過渡解析**

時間ステップ  
 指定  自動

リスタート  
 前回の続き

| No. | ステップ数 | 出力間隔 | 時間ステップ[s] |
|-----|-------|------|-----------|
| 1   | 10    | 1    | 1.0       |
| 2   |       |      |           |
| 3   |       |      |           |
| 4   |       |      |           |
| 5   |       |      |           |

指数

行の挿入(D) 行の削除(D) インポート(M)

テーブル表示(T)

初期温度  
環境温度を使用する  分布取込  
25.0 [deg]  分布データ

## 時間ステップ設定

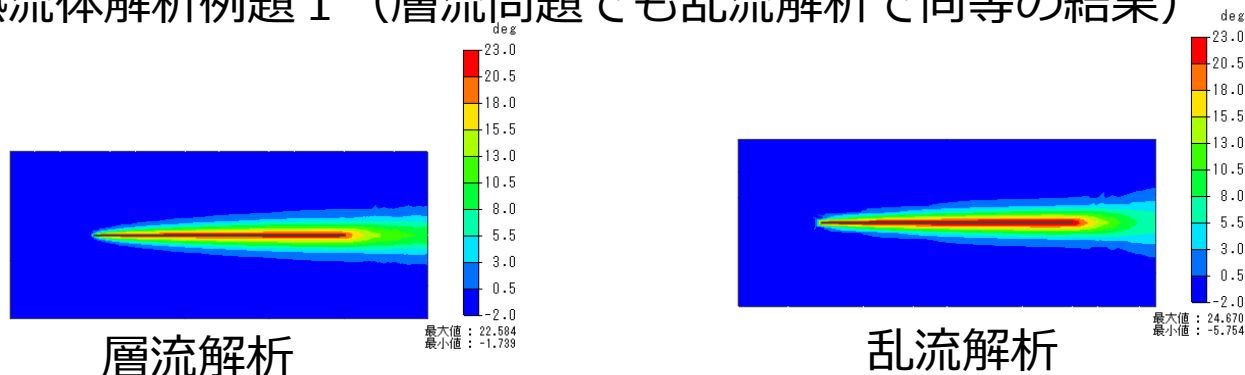
## 乱流解析（推奨）

- ・ 乱流 <不規則な現象> を時間的or空間的に平均化して計算する
- ・ 発生する細かい渦の影響を乱流量を使用してモデル化する
- ・ 収束性/精度が安定している
- ・ 流速が小さい場合、層流解析の結果に漸近するため、層流の問題も解ける

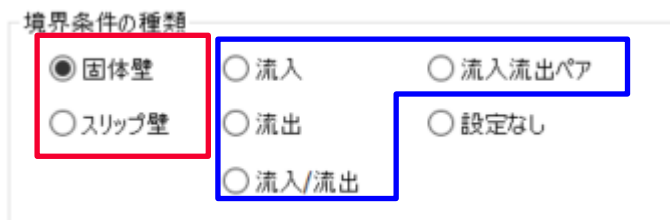
## 層流解析（非推奨）

- ・ カルマン渦のような非定常の変動を解析したい場合のみ使用
- ・ メッシュサイズが不十分な場合、収束しない/精度が著しく悪化するなどトラブルの元となる
- ・ 定常解析で解けないケースが多い

### 熱流体解析例題 1（層流問題でも乱流解析で同等の結果）



## 2. 2 境界条件



## 壁境界条件：流体の出入りがない

- 固体壁：固体との境界
- スリップ壁：流体の出入りのない仮想的な壁

## 流れ境界条件：流体の出入りがある

- 流入（入口:Inlet）：流入すると分かっている
- 流出（出口:Outlet）：流出すると分かっている
- 流入/流出（開口:Opening）：流入するか流出するか分からない
- 流入流出ペア：ある面から流出した流体が、別の面から再び流入する



# 壁境界条件の種類

境界条件の種類

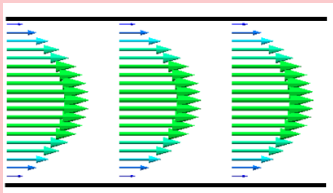
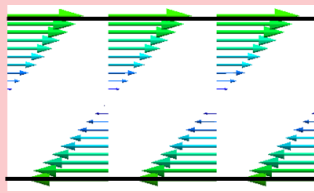
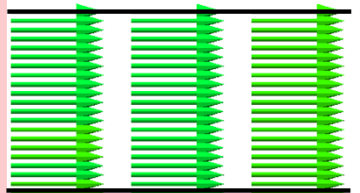



固体壁     流入     流入流出ペア  
 スリップ壁     流出     設定なし  
 流入/流出

固体壁の種類

静止壁    ...  
 移動壁    ...

積層メッシュ設定

解析条件の値を使う    ...  
 境界条件毎に指定する    ...

|         | 固体壁[静止壁]   | 固体壁[移動壁]  | スリップ壁  |
|---------|--|---|--|
| 壁面上流速   | ゼロ固定<br>      | 壁に沿う方向：指定値に固定<br>法線方向の流速はゼロ<br> | 法線方向の流速のみゼロ<br> |
| 壁面せん断応力 | 流速に応じて発生<br> | 壁面速度と流速に応じて発生<br>              | 発生しない<br>      |
| 用途      | 固体との境界に設定<br>(固体ボディとの境界には自動的に設定される)  | 並進/回転運動している<br>物体の表面  | 流体の出入りのない仮想的な壁<br>対称境界条件   |

# 流れ境界条件の種類

## 流入（入口:Inlet）

### 強制流入

- ・流速指定
- ・流量指定
- ・圧力指定
- ・ファン

### 自然流入

デフォルト →

流入の種類

自然流入

強制流入

流速指定

流量指定

圧力指定

ファン

流速

0.1 m/s  時間依存 重み関数

方向・分布入力 速度ベクトル指定

直交座標入力 X方向 0.0

円筒座標指定 Y方向 0.0 m/s

任意 ... Z方向 0.0

角速度 0.0 deg/s

## 流出（出口:Outlet）

### 強制流出

- ・流速指定
- ・流量指定
- ・圧力指定
- ・ファン

### 自然流出

デフォルト →

流出の種類

自然流出

強制流出

流速指定

流量指定

圧力指定

ファン

環境の圧力

環境の圧力は0[Pa]とします ⓘ

## 流入/流出（開口:Opening）

— 自然流入/流出

流速の方向指定、分布指定も可能

過渡解析の場合、流速指定、流量指定、圧力指定は時間依存の設定も可能

## 強制流入

- 入口から風を送る
- 入口から力を加える  
(出口に対する圧力差)

## 強制流出

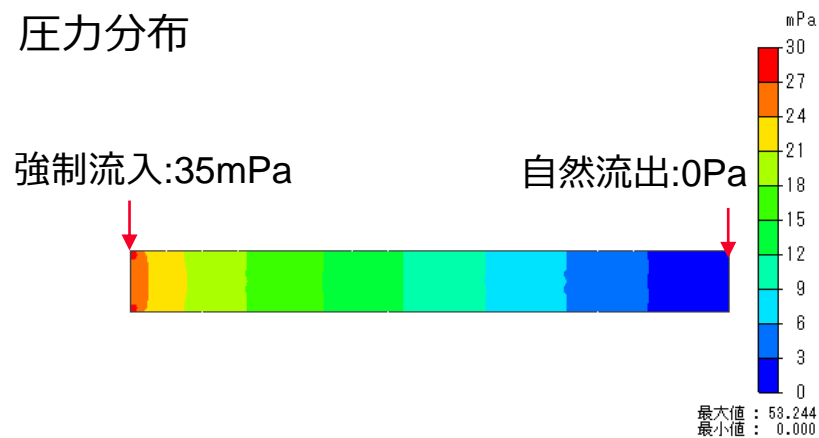
- 出口から風を排出する (換気)
- 出口から吸引する  
(入口に対する圧力差)

## 自然流入、自然流出

計算領域内部の流速、圧力に応じて、  
環境からの流入、環境への流出が起  
こる

環境の圧力 = 0Pa とする

### 圧力分布



Powered by Femtet  
<https://www.muratasoftware.com/>

Femtetで扱う圧力は、環境の圧力を基準とした相  
対圧力表記 (ゲージ圧)

上記の例では、流入口では環境に対して、  
35mPa高い圧力になっていると解釈する。

※環境が1気圧(101325Pa)の場合

流入 : 101325.035Pa

流出 : 101325.0Pa

# 流入流出の組み合わせ

流入と流出をセットで設定する

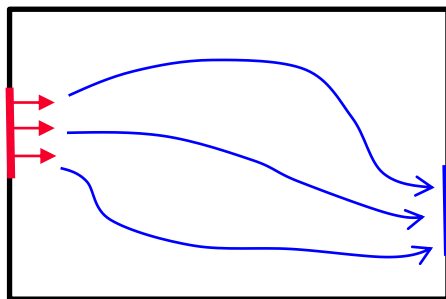
非圧縮性流れを前提としているので必須

強制境界と自然境界をセットで設定する

計算を安定して解くためのノウハウ  
※浮力を考慮する場合、強制境界なしでも良い

<強制流入型>

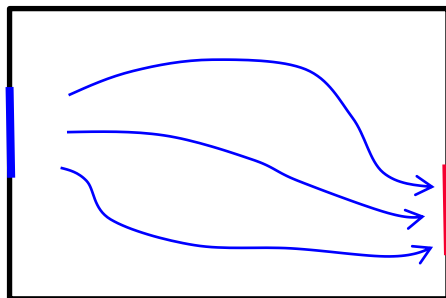
強制流入



自然流出

<自然流入型>

自然流入



強制流出

例外：ボディ属性で流れ指定を行っている場合、強制流入-強制流出がセットで設定されているが、流入量/流出量が一致するように計算されるため、自然境界は不要。

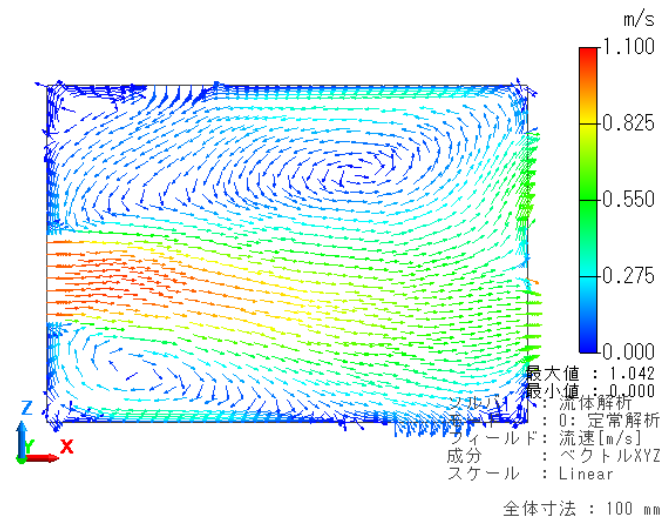
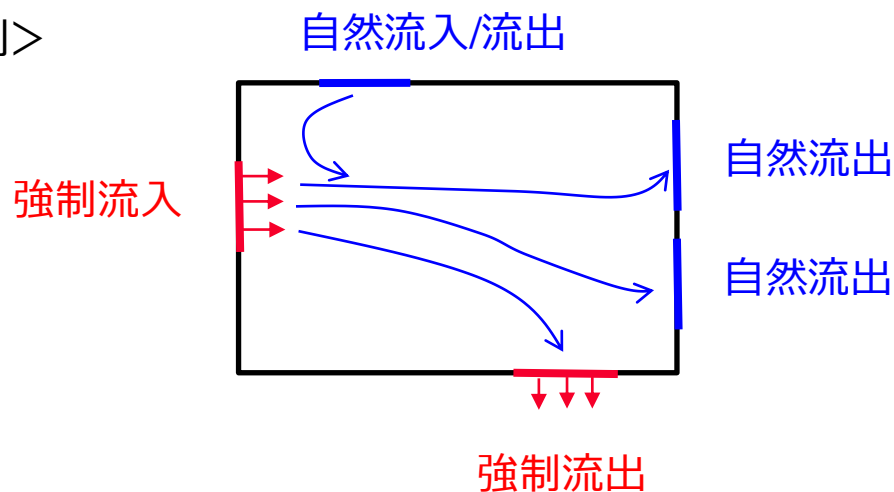
# 複数の流入流出

複数の流入/流出条件が存在する場合、以下のように設定する。

流入、流出を少なくとも1か所ずつ設定する

強制境界と自然境界を少なくとも1か所ずつ設定する

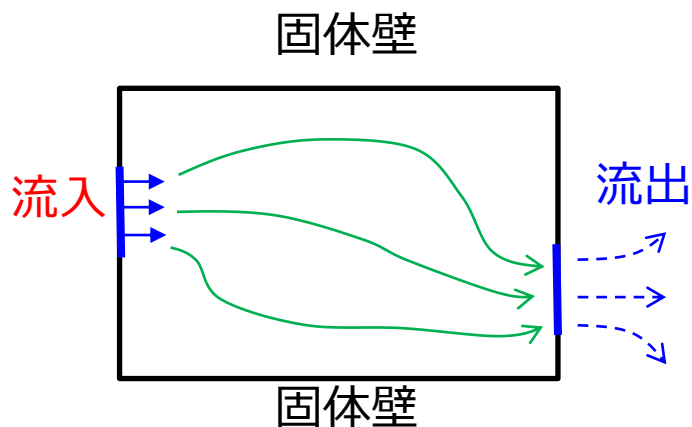
<例>



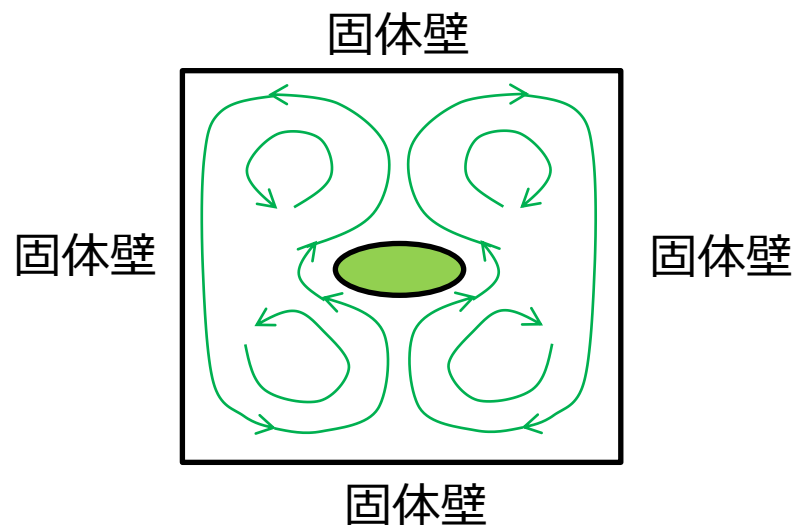
## 2. 3 外部境界条件（周囲境界条件）

内部流れ = 固体に囲まれた領域の流れ  
例：配管内部の流れ、筐体内部の流れ

＜強制対流の場合＞



＜密閉領域の自然対流の場合＞



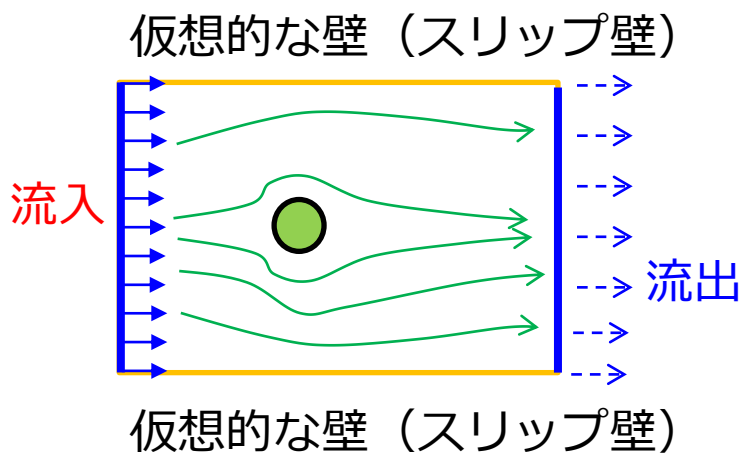
＜周囲の境界条件として妥当な条件＞

- ・ 流入、流出以外の面は固体壁とする

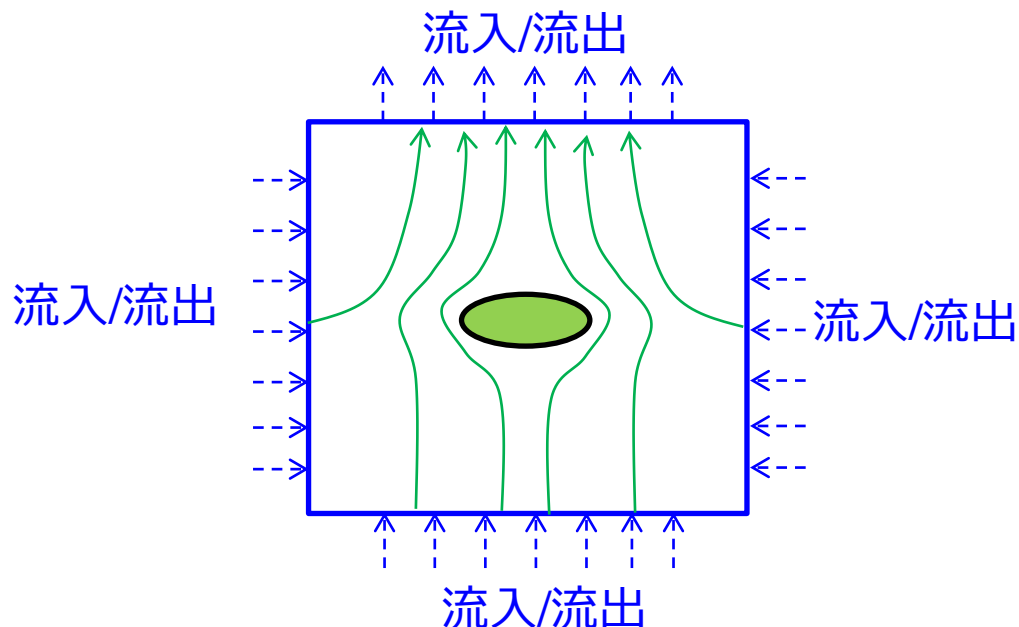
外部流れ = 固体周囲の流れ

例：飛行機周りの流れ、発熱体周りの流れ

<強制対流の場合>



<開放領域の自然対流の場合>



<周囲の境界条件として妥当な条件>

- ・ 強制対流の場合、流入、流出以外の面はスリップ壁とする
- ・ 開放空間の自然対流の場合、周囲の面すべてを流入/流出とする

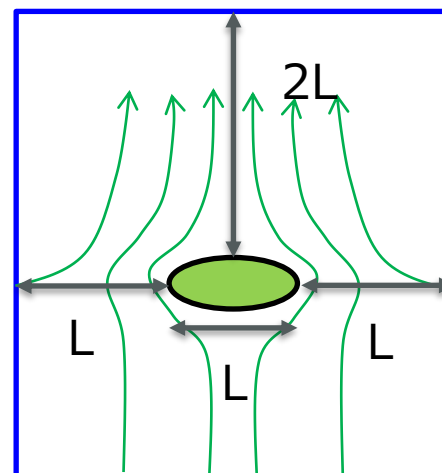


基本的な考え方：流れに影響のない範囲で、なるべく小さい領域を取る

## <自然対流の場合>

必要なサイズは概ね以下の通り

- ・ 構造物のサイズと同等の距離を空ける
- ・ 上方はサイズの2倍程度の距離を空ける

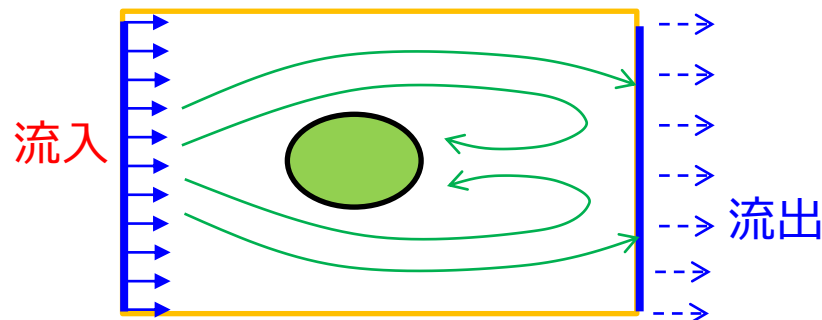


## <強制対流の場合>

必要なサイズはケースバイケース

強制対流の場合で流出面において逆流が生じる場合、逆流領域が解析領域内になるように、後方を広く取る必要がある。

(境界条件：自然流入/流出を使用する場合もある)



# 流体の境界条件のルール

流体の周囲の面は、壁境界条件か流れ境界条件が設定されている必要があります

⇒設定されていない箇所にはメッシュ生成時に自動的に境界条件が設定されます

- 固体材料との境界⇒固体壁
- それ以外の境界⇒外部境界条件で設定した条件

上記の自動設定機能があるので、  
通常は以下の手順で設定すればよい。

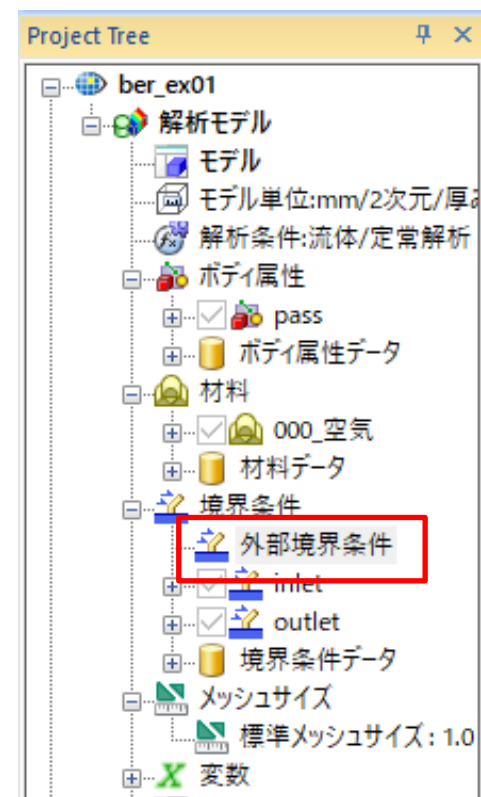
## 手順 1. 外部境界条件で周囲の境界条件を設定

周囲の境界条件として一般的に使用される条件

- ・ 固体壁 (デフォルト)
- ・ スリップ壁
- ・ 流入/流出(自然流入/流出)

流れの種類 (内部流れ/外部流れ等) から判断する

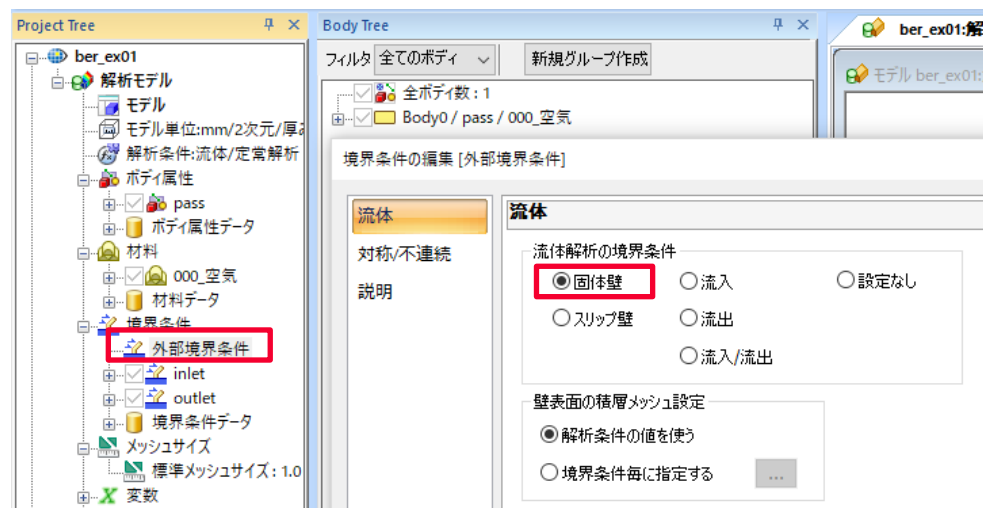
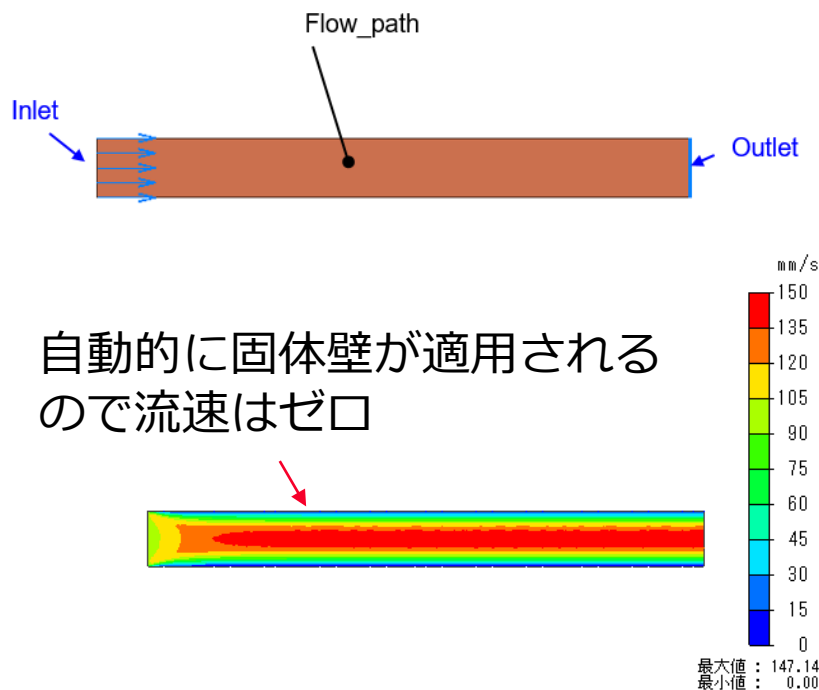
## 手順 2. 流入、流出する面を選択して流れ境界条件を設定



# 外部境界条件の使い方

## 内部流れの強制対流

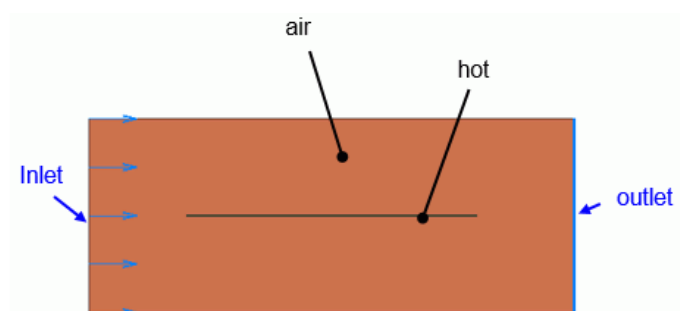
例：平行平板間の流れ：流体解析例題 1  
(上下面は固体壁)



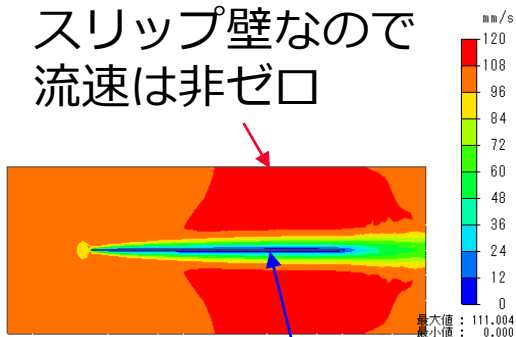
外部境界条件のデフォルト設定が  
固体壁なので設定不要。  
流入、流出の設定のみ行えば良い。

## 外部流れの強制対流

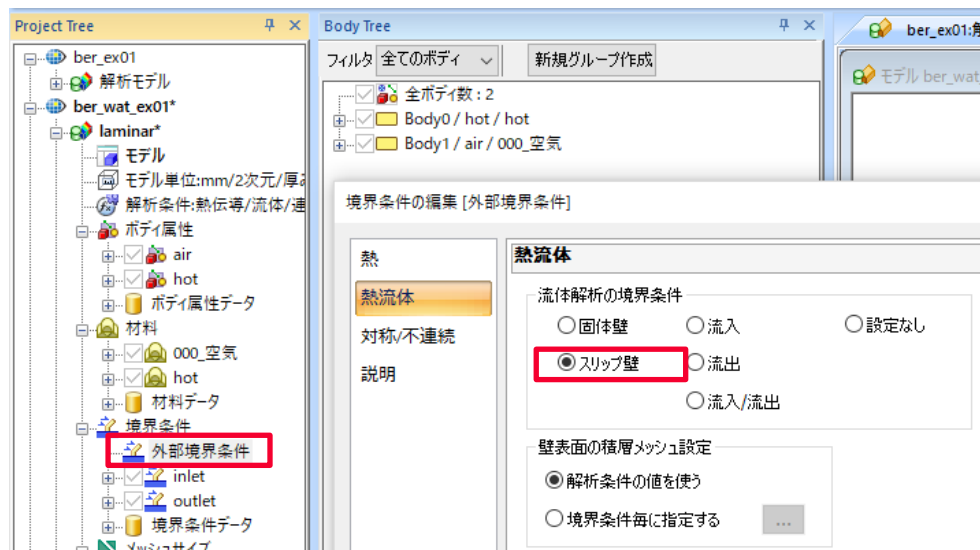
例：平板周りの流れ：熱流体解析例題 1  
(上下面はスリップ壁)



スリップ壁なので  
流速は非ゼロ



固体表面は流速ゼロ

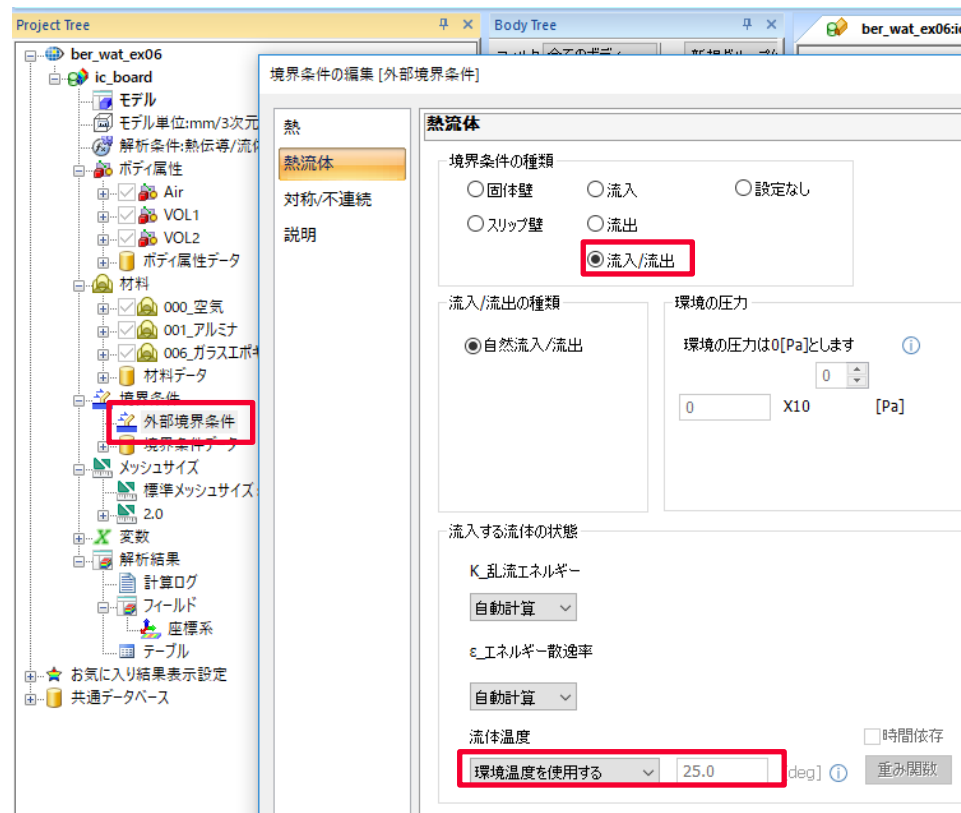
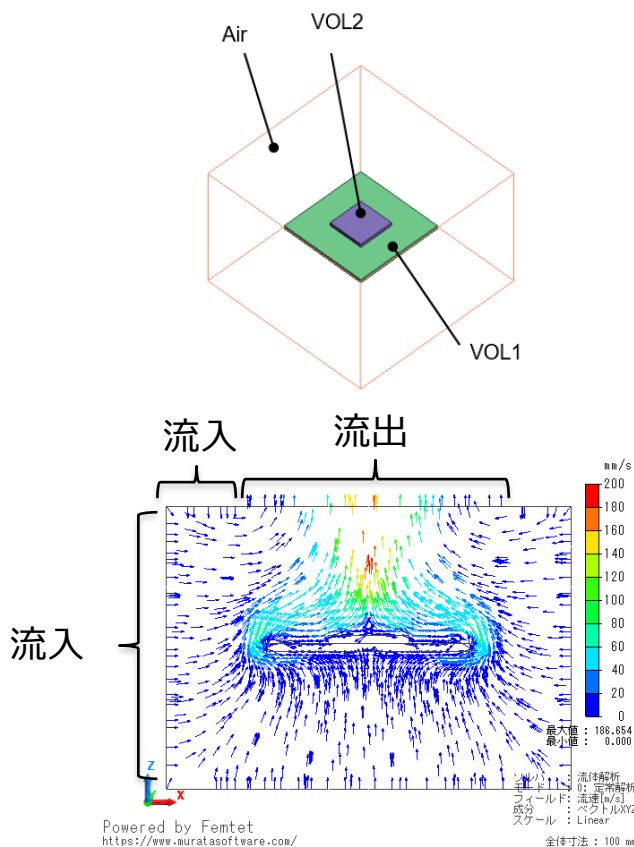


外部境界条件をスリップ壁に設定

# 外部境界条件の使い方

## 開放領域の自然対流の解析

例：自然対流による基板上的のICの放熱：熱流体解析例題6  
(周囲境界を自然流入/流出)



外部境界条件を流入/流出に設定  
流入する流体温度は環境温度を使用

## 2. 4 ボディ属性/材料定数

## 流体解析

- ・通常は、ボディ属性名のみ入力してください。

### 「流体タブ」

- ・流体領域内部に流れを指定
- ・多孔質体を指定

### 「固体タブ」

- ・固体ボディ表面の移動壁の設定
- ・固体ボディ表面の接触角の設定（自由表面解析）

### 「方向タブ」

- ・異方性多孔質体の方向指定

# 流体タブ内部流れ指定

ボディ属性の編集 [ボディ属性\_001]

厚み/幅

流体

固体

方向

解析領域

説明

**流体**

流体ボディの種類

設定なし

**流れ指定**

多孔質体

流入面(吸気側)

選択 設定済み

流出面(排気側)

選択 設定済み

周囲流体ボディ

流れ指定ボディ

流出面 流入面

流入流出の種類

**流速指定**

流量指定

ファン

流速

1 m/s  時間依存 重み関数

方向・分布入力 速度ベクトル指定

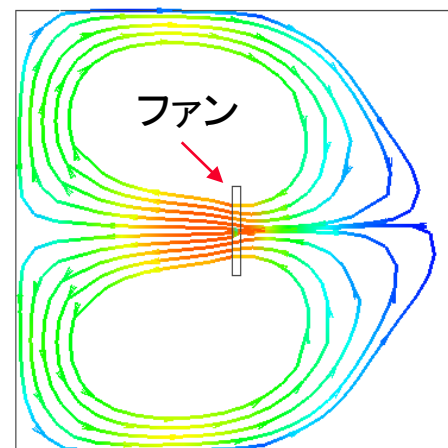
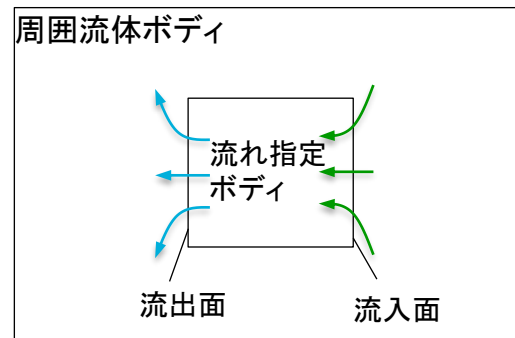
直交座標入力 X方向 0.0

円筒座標指定 Y方向 0.0 m/s

任意 Z方向 0.0

角速度 0.0 deg/s

面のサイズに応じてメッシュを細分化する



Powered by Femtet  
<https://www.muratasoftware.com/>

流れ指定：ファンなどを流体内部に設置して、流れを与えたい場合に使用します。

流入面（吸気側）、流出面（排気側）の面を指定します。

流入/流出の種類については、境界条件の項で説明します。



# 流体タブ多孔質体指定

ボディ属性の編集 [ボディ属性\_001]

厚み/幅

流体

方向

解析領域

説明

**流体**

流体ボディの種類

設定なし

流れ指定

多孔質体

流速依存性

1次式

2次式

ベキ乗

空隙率から計算

空隙率

空隙率

粒子直径  mm

形状係数

固体部材料 未選択

異方性

等方

異方

係数

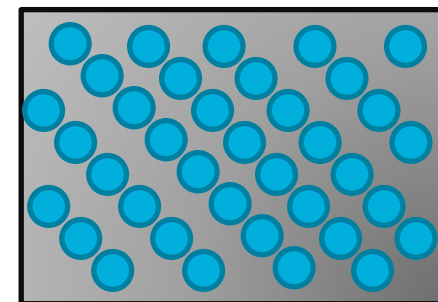
1次係数 C1

X10  [Pa s/m<sup>2</sup>]

グラフ表示-横軸設定

最大値  m/s

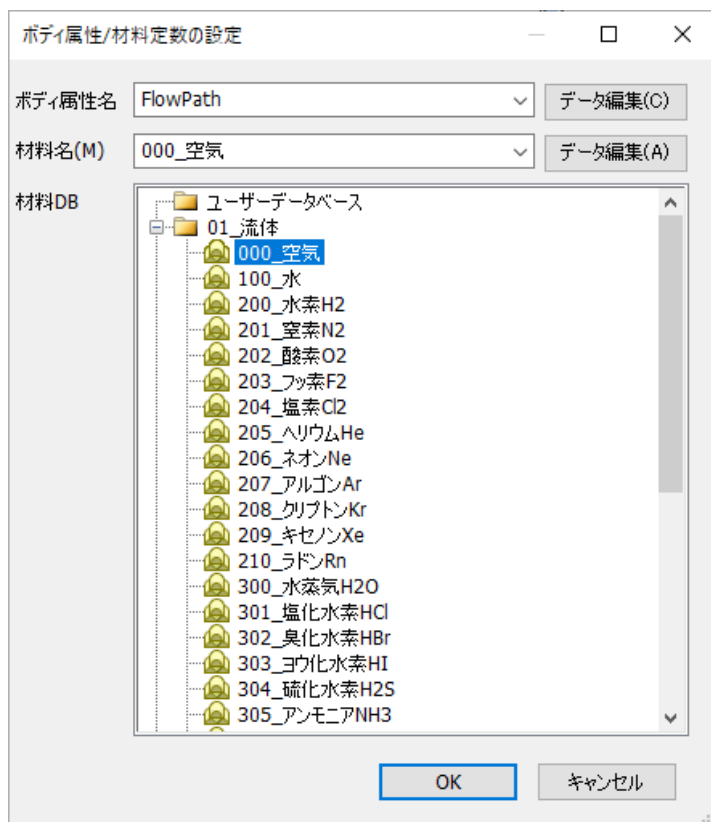
グラフ表示...



多孔質形状

多孔質形状や穴あき板、放熱フィン等の詳細モデルを作成することなく解析を行うことができます。

あらかじめ実測や単位モデルでの解析により求めた係数を入力します。  
多孔質形状の場合、粒径、空隙率などを設定するだけで解析可能です。



空気、水は材料DBから選択可

## 個別に作成する場合

① 固体/気体/液体を設定



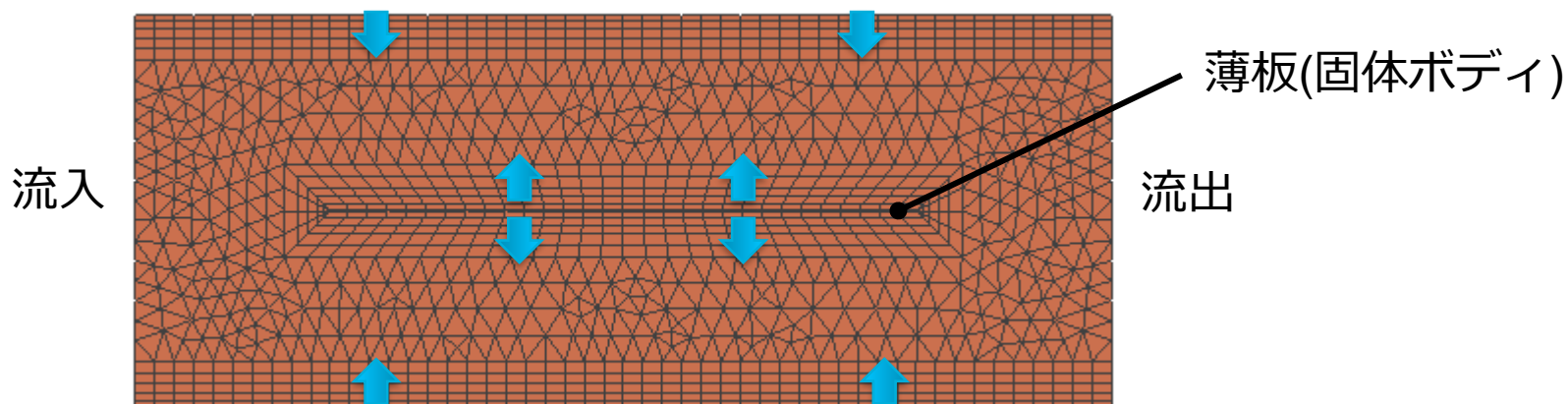
② 固体か流体(気体/液体)かに応じて各種材料定数を設定

## 流体解析

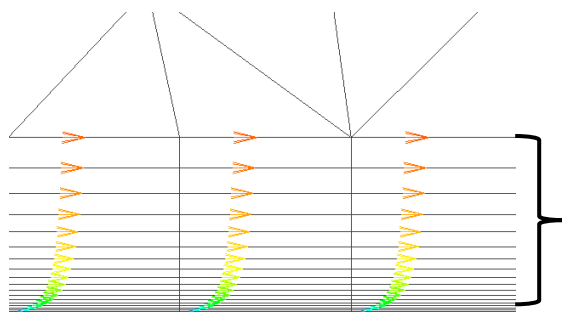
|    | 固体部 | 流体部 |
|----|-----|-----|
| 密度 | -   | ○   |
| 粘度 | -   | ○   |

## 3. モデル作成/メッシュ生成

## 3. 1 積層メッシュ設定



壁面からメッシュを積層していきます。  
二次元の場合四角形メッシュ、三次元の場合三角柱メッシュが使用されます。



固体壁近傍では、流れ方向の流速の変化に比べて高さ方向の流速の変化が大きいため、高さ方向のみメッシュの細かい「積層メッシュ」が相性が良い。

Powered by Fentet  
<https://www.muratsoftware.com/>

壁表面流速ベクトル図

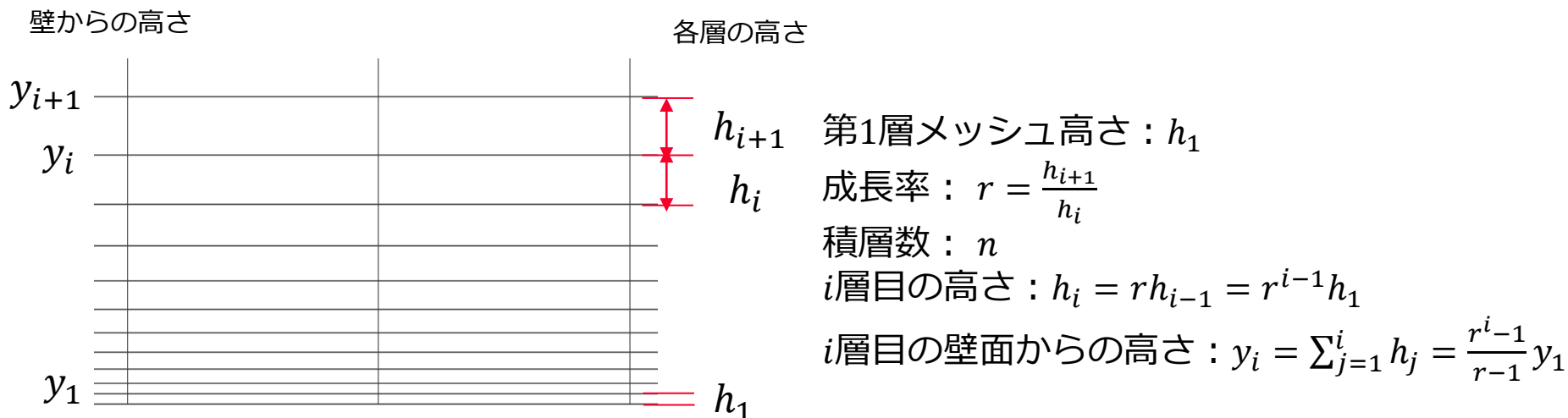
固体壁/スリップ壁を設定した面には自動的に積層メッシュが生成されます。(生成しない設定も可)

# 積層メッシュの設定

高さ、層数等を指定します。

Femtetでは今のところ、以下の指定方法に対応しています。

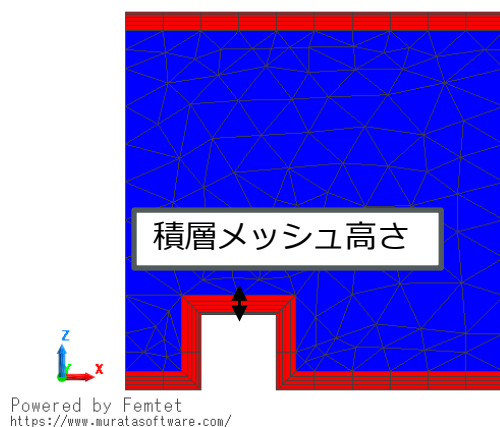
- ・自動
- ・第1層メッシュ高さ指定（第1層メッシュ高さ、成長率、積層数）
- ・トータル高さ指定（トータル高さ、成長率、積層数）



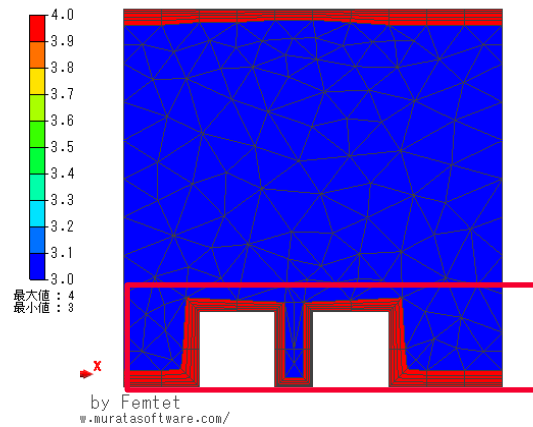
解析条件から全体設定、境界条件から個別設定が可能です。

狭い領域がある場合など、指定通りのメッシュ高さでメッシュを生成することができない場合があります。  
⇒厚みが自動的に調節されます。

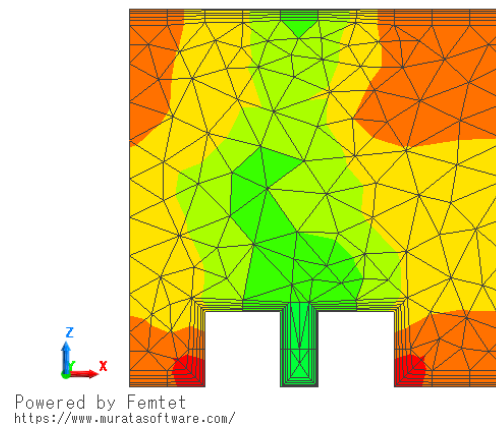
狭い領域が存在する場合



指定メッシュ高さ通り



自動補正



補正係数分布

出力ウィンドウ：調整された補正係数を表示

補正係数 最小/平均/最大: 0.5,0.741067,1

トータル高さ[mm] 最小/平均/最大: 0.0025,0.00458702,0.00969186

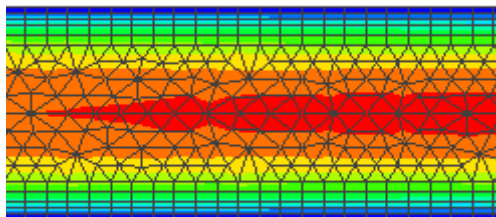
注) 補正係数が極端に小さい場合、意図しない隙間が存在するなど、モデルに問題がある場合があります。

# 流路における最適な積層メッシュ

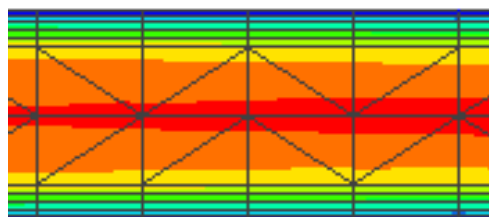
流路幅に対して、放物線状の分布を再現できるメッシュ状態になっている必要がある。

(積層メッシュ、通常メッシュ含めて、均等に3~4メッシュ程度)

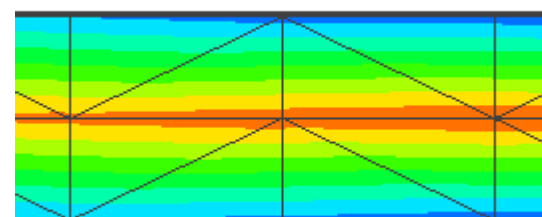
メッシュサイズ小



メッシュサイズ大

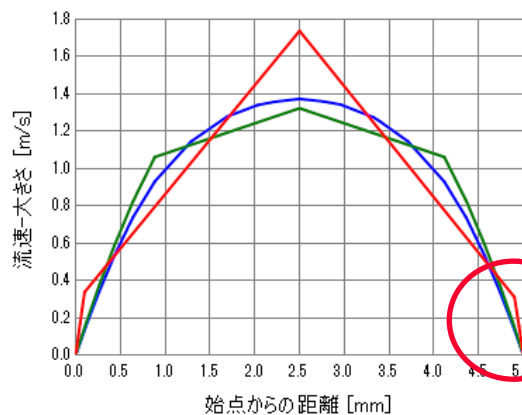


メッシュサイズ大  
積層メッシュ薄い



— メッシュサイズ小  
— メッシュサイズ大  
— メッシュサイズ大、積層メッシュ薄い

流速-大きさ



積層メッシュで流路内が均等に近い状態で分割されていると、精度を保つことができるが、積層メッシュが薄すぎると精度が落ちる。

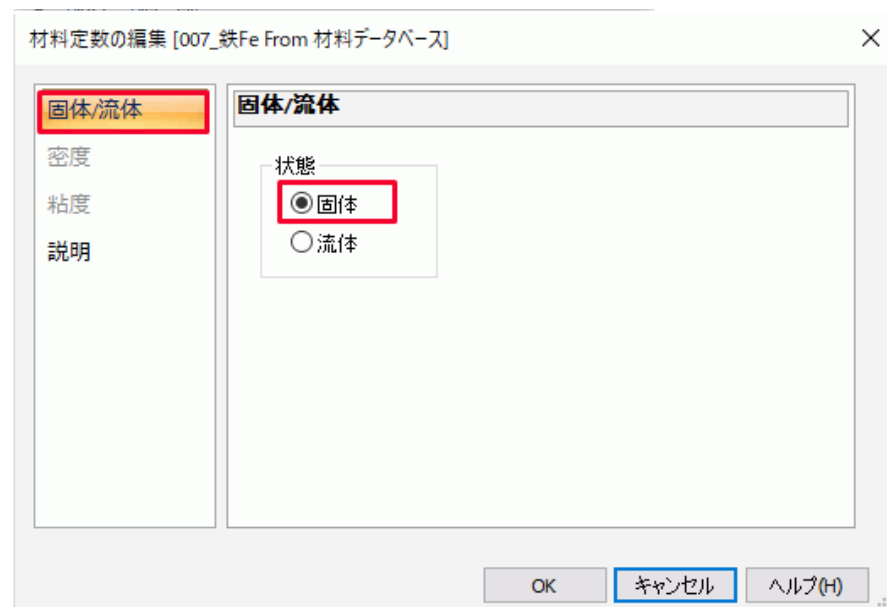
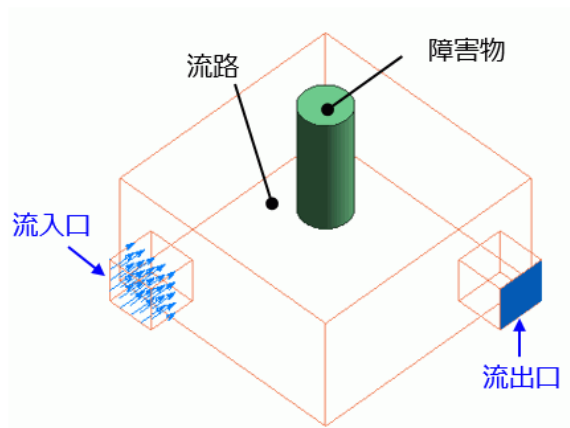
壁面付近の傾きが正しく計算できていることが重要



## 3. 2モデル作成

流体解析では、固体材料を設定した材料は障害物とみなします。

例：チュートリアルモデル

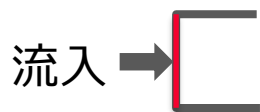


※熱流体解析ではない場合、鉄など適当な材料を材料DBから選択しても良い

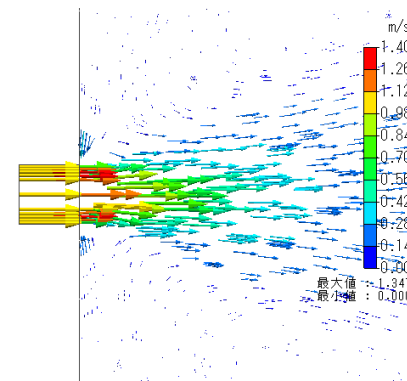
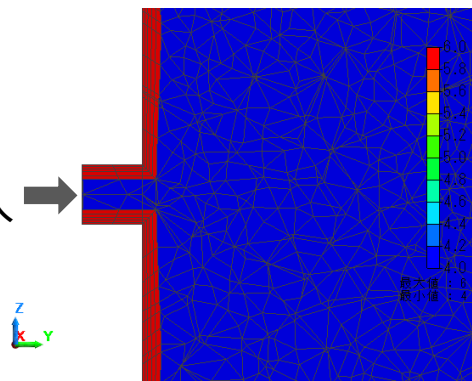
※流体とのブーリアン（差）は不要

# モデル作成の注意事項（流入出面）

凸面（推奨）



流入

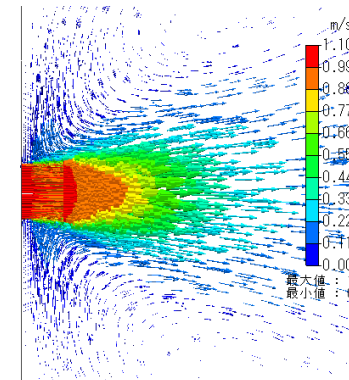
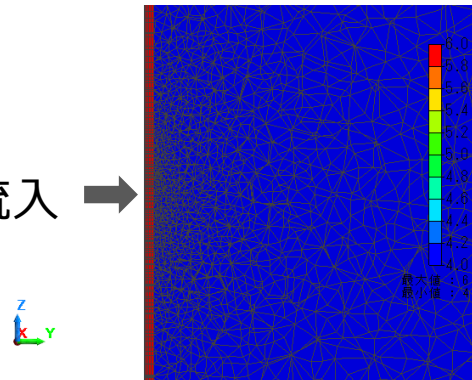


フラット面（非推奨）

流入



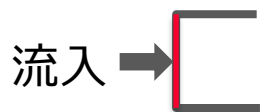
流入



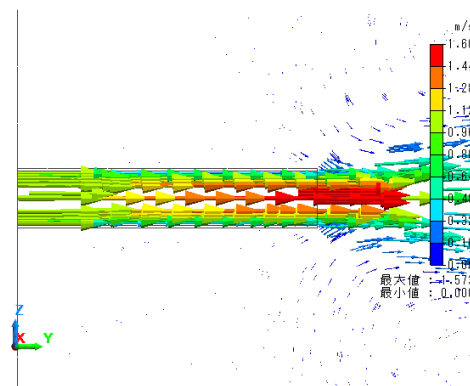
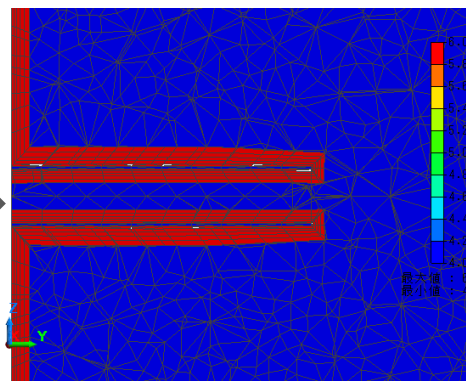
- 流入出面は凸面に設定できるようにモデルを作成する
- 凸面に設定することで適切な積層メッシュが作られる
- 凸面でない場合、流入出面細分化オプションが必要/解析時間増

# モデル作成の注意事項（流入出面）

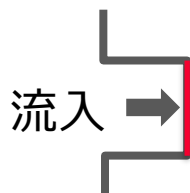
凸面（推奨）



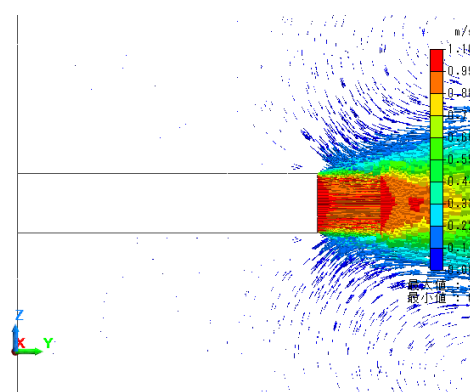
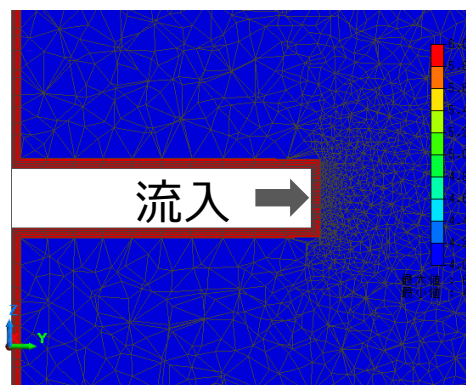
流入



凹面（非推奨）



流入



- 流入出面は凸面に設定できるようにモデルを作成する
- 凸面に設定することで適切な積層メッシュが作られる
- 凸面でない場合、流入出面細分化オプションが必要/解析時間増

# 流入出面が凸面ではない場合

凸面以外に流入出面を設定している場合、「流入出面のメッシュ細分化」オプションを使用する。メッシュが細かくなり、解析時間が増加する。

**流体**

境界条件の種類

固体壁     流入     流入流出ペア  
 スリップ壁     流出     設定なし  
 流入/流出

流入の種類

自然流入  
強制流入  
 流速指定  
 流量指定  
 圧力指定  
 ファン

流速

1 m/s     時間依存性    重み関数

方向・分布入力    速度ベクトル指定

直交座標入力    X方向 0.0  
 円筒座標指定    Y方向 0.0 m/s  
 任意 ...    Z方向 0.0  
角速度 0.0 deg/s

流入する流体の状態

流体温度

時間依存性

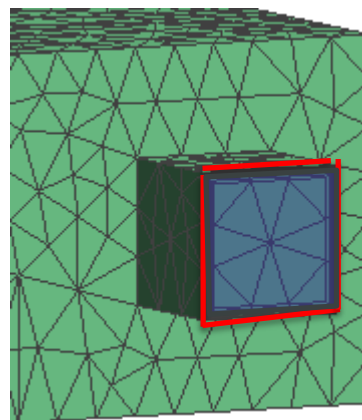
環境温度を使用する    25.0 [deg]    重み関数

乱流の設定 ...

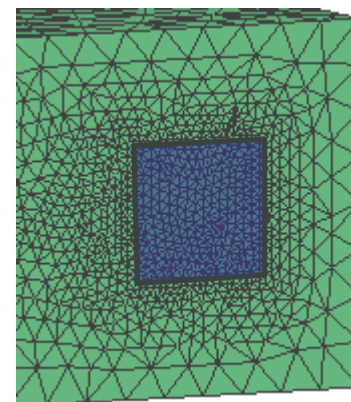
拡散解析の設定 ...

混相流の設定 ...

面のサイズに応じてメッシュを細分化する



①押し出しによる凸面化



②細分化オプション

流入出面を押し出した場合  
メッシュ数：23154  
解析時間：1min23s

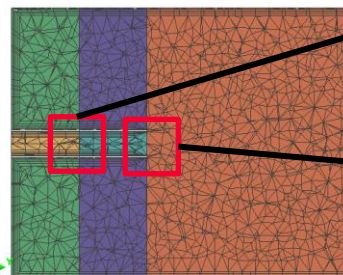
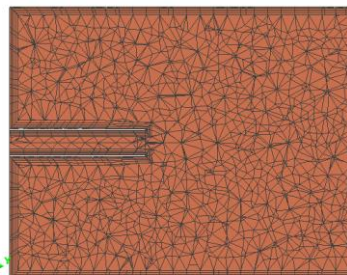
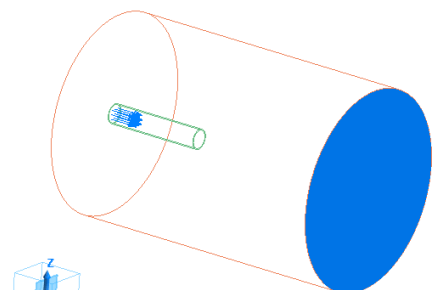
メッシュを細かくした場合  
メッシュ数：69497  
解析時間：5min43s

メッシュを細かくした場合、解析時間が増える傾向あり。  
凸面化したほうが効率が良い。

# モデル作成の注意事項（複数ボディ）

1つのボディ

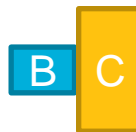
分割されている場合



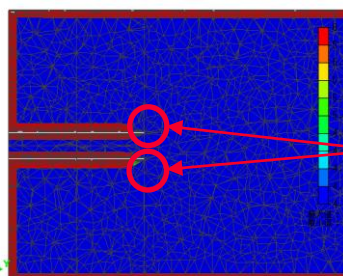
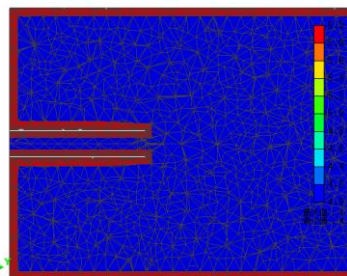
境界が一致



境界が一致しない



全体寸法：150 mm

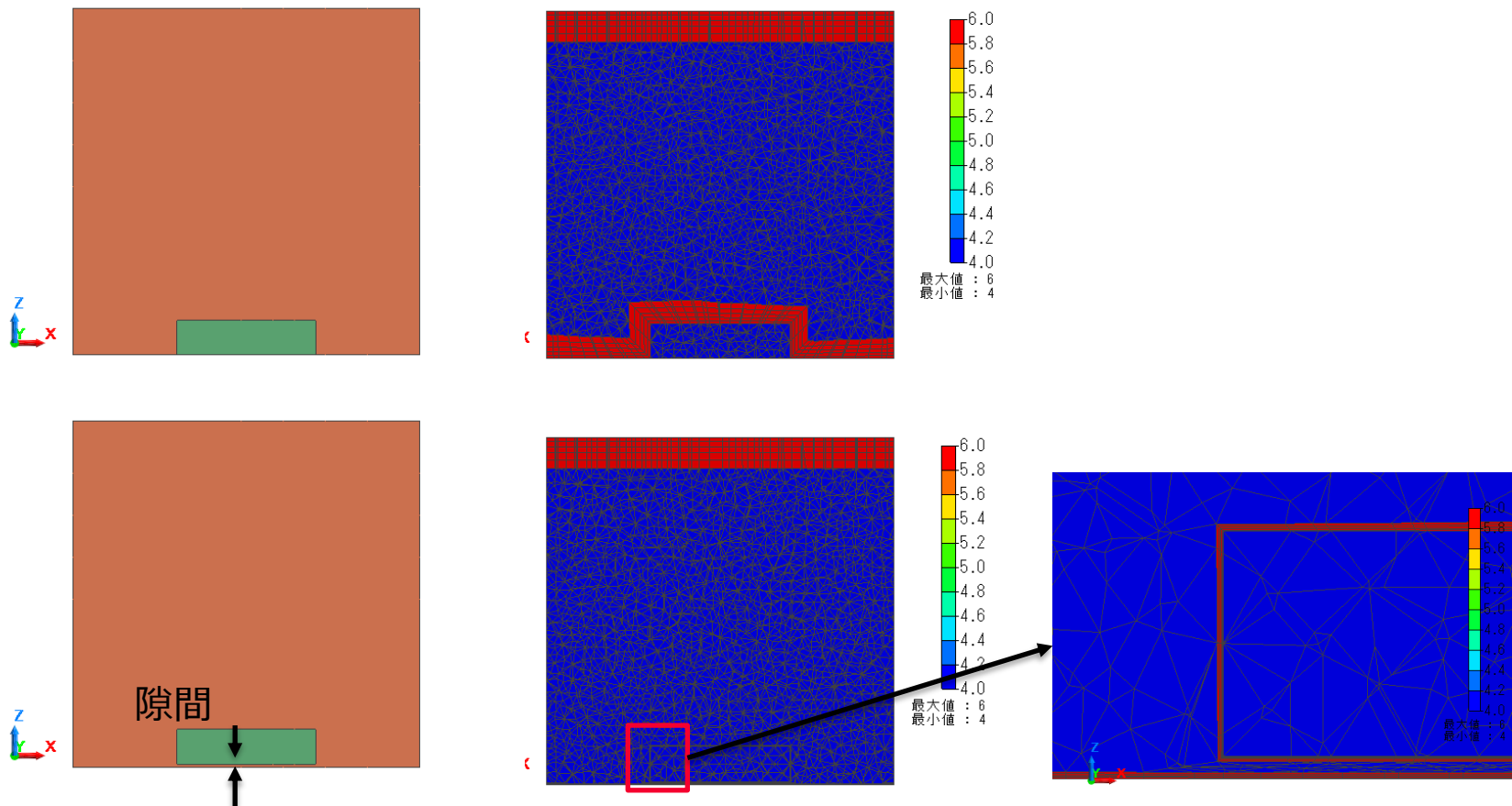


積層メッシュが生成できない箇所

- ・ 流路が複数のボディで分割されている使用場合、境界の状態によって積層メッシュが生成できない箇所が生じ、収束しない（正しく計算できない）場合があります
- ・ 1つのボディに結合することで改善する場合があります



# モデル作成の注意事項（隙間）

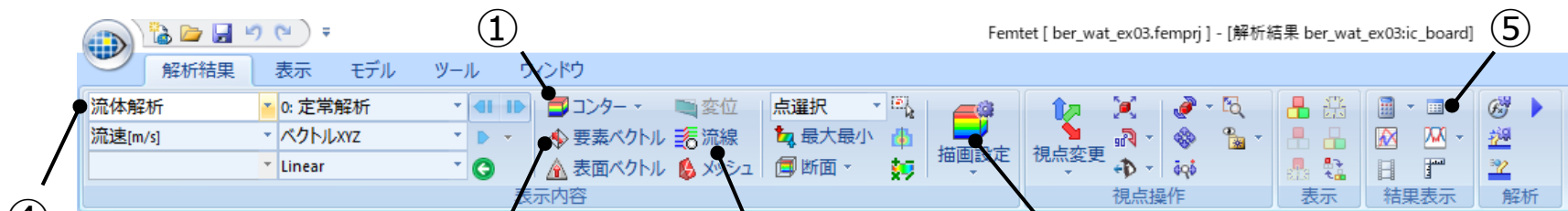


- ・ 隙間が存在すると周囲の積層メッシュも薄くなり精度が低下する場合があります。
- ・ 意図しない隙間は極力作らないようにモデルを作成する必要があります。

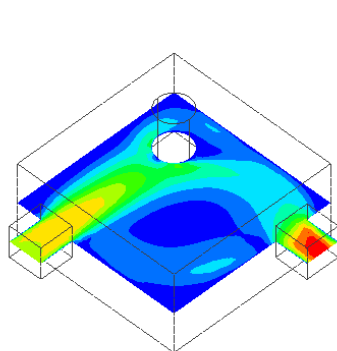
## 4. 結果表示



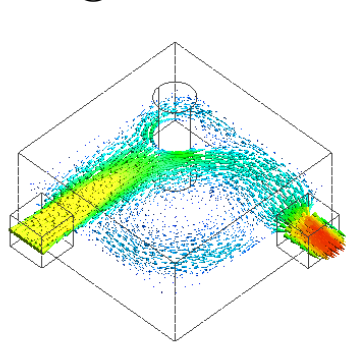
# 表示できる結果



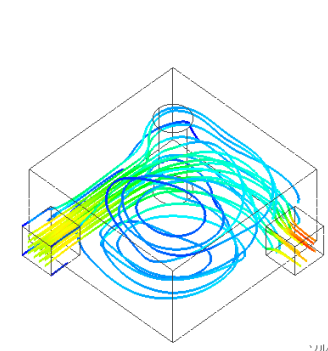
① コンタ図、ベクトル図、流線等の描画設定



最大値 : 1.43  
最小値 : 0.00  
ソルバ : 流体解析  
モード : 0: 定常解析  
フィールド : 流速[m/s]  
成分 : 大きさ  
スケール : Linear  
全体寸法 : 120 mm



最大値 : 1.43  
最小値 : 0.00  
ソルバ : 流体解析  
モード : 0: 定常解析  
フィールド : 流速[m/s]  
成分 : ベクトルXYZ  
スケール : Linear  
全体寸法 : 120 mm



最大値 : 1.432  
最小値 : 0.000  
ソルバ : 流体解析  
モード : 0: 定常解析  
フィールド : 流速[m/s]  
成分 : ベクトルXYZ  
スケール : Linear  
全体寸法 : 120 mm  
Powered by Femtet  
<https://www.muratasoftware.com/>

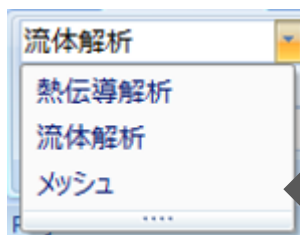
① 流速コンタ図

② 流速ベクトル図

③ 流線

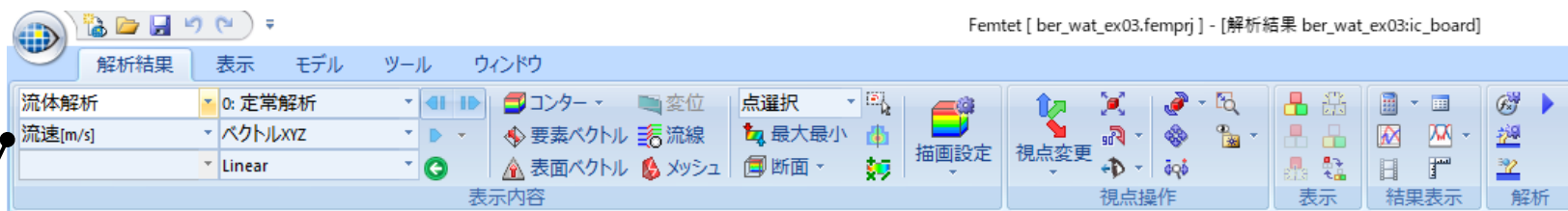
④ ソルバ切り替え (熱流体/拡散解析の場合)

⑤ 結果テーブル



メッシュの状態確認はこちら

# 表示できる結果フィールド



## フィールド切り替え

- 流速[m/s]
- 渦度[1/s]
- 圧力(静圧)[Pa]
- 圧力(全圧)[Pa]
- 浮力[N/m<sup>3</sup>]
- クーラン数
- 壁面せん断応力[Pa]
- 壁面力(節点力)[N]
- y\_壁面第1層メッシュ高さ[m]
- y+\_壁面第1層メッシュ無次元高さ
- K\_乱流エネルギー[m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]
- ε\_エネルギー散逸率[m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]
- エネルギー生成率[m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]
- 乱流粘性係数[Pa·s]
- 乱流粘性比
- y\_壁面からの高さ[m]
- Rey\_壁面レイノルズ数
- 壁面近傍層
- ....

メッシュ状態に関する量

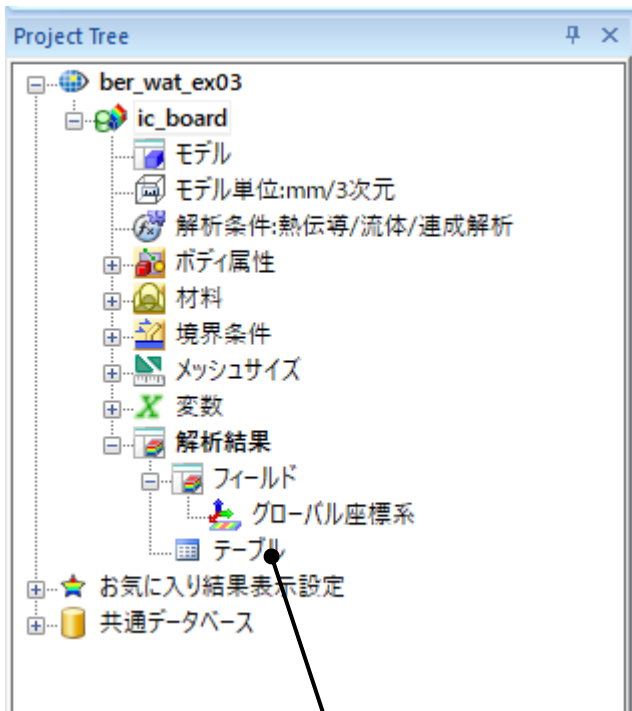
乱流に関する量

- 温度[deg]
- 熱流束[W/m<sup>2</sup>]
- 壁面熱流束[W/m<sup>2</sup>]
- 対流の熱伝達係数[W/m<sup>2</sup>/deg]
- 乱流熱伝導率[W/m/deg]
- 温度勾配[deg/m]
- ....

— 乱流に関する量

流速ベクトル、圧力、温度、熱流束ベクトルなどを表示することができます。

# 表示できる結果テーブル



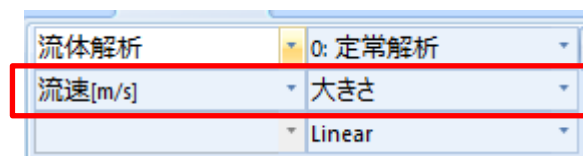
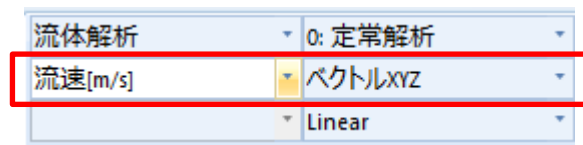
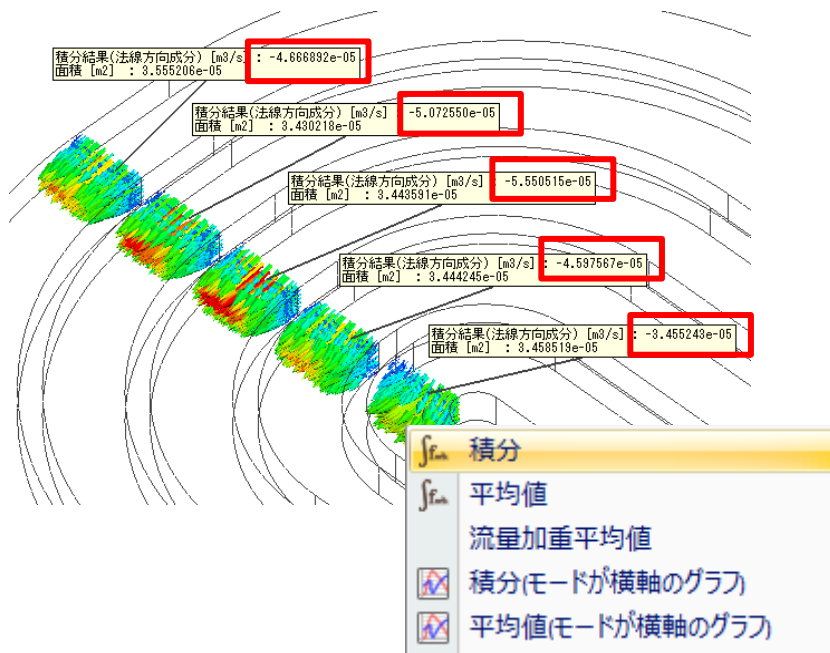
結果テーブル表示

|                          | 表示条件                                      | 説明  |
|--------------------------|---|---|
| 壁面力[N]<br>壁面トルク[N・m]     | 境界条件<br>・ 固体壁<br>・ スリップ壁<br>ボディ属性<br>・ 固体 | 壁面が流体から受ける力、トルク<br>抗力や揚力の算出に使用することができます<br>トルクは移動壁(回転)使用時のみ |
| 体積流量[m3/s]               | 境界条件<br>・ 流入<br>・ 流出<br>・ 流入/流出           | 境界を通して<br>単位時間あたりに流入、流出する体積量                                |
| 圧力損失[Pa]                 | 境界条件<br>・ 流入-流出間                          | 流入境界-流出境界間の圧力損失   |
| ファン動作点[m3/s]             | 境界条件<br>・ ファン<br>ボディ属性<br>・ 流れ指定          | ファンの動作点(流量[m3/s]、圧力[Pa])                                    |
| y+値                      | 境界条件<br>・ 固体壁                             | 第1層の無次元メッシュ高さy+の平均値   |
| y+分布[%]                  | 境界条件<br>・ 固体壁                             | 第1層の無次元メッシュ高さy+について、<br>5つの範囲に含まれる割合[%]                     |
| 第1層メッシュ高さ[m]<br>※単位は解析単位 | 境界条件<br>・ 固体壁                             | 第1層メッシュ高さの<br>・ 平均値<br>・ 推奨値                                |

流入、流出、流入/流出境界条件上の流量はテーブルで表示される。  
任意の断面の流量を取得する場合、積分機能を使用する。

- ①流速ベクトルを表示、  
もしくは、流速（大きさ）コンタを表示
- ②断面を選択して、右クリックメニュー「積分」

例：複数流路それぞれの流量



乱流の度合いを測る指標であるレイノルズ数は、強制流入、強制流出が設定された箇所について、流速、水力直径、材料定数から計算した値が目安として出力ウィンドウに表示される。

```
Bernoulli
<<定常解析:層流モデル>>
移流項計算手法
流速:2次精度風上差分

強制流入 流速指定:境界条件「inlet」
内部/外部:外部流れ
流速 = 1.000e-01 [m/s]
水力直径(代表長さ) = 2.000e-01 [m]
動粘度 = 1.510e-05 [m2/s] 材料定数「000_空気」
レイノルズ数: 1324
```

水力直径(2次元)

$$l = L [m]$$

水力直径(3次元)

$$l = \frac{4S}{L_{all}} [m]$$

$L [m]$ : 辺の長さ

$L_{all} [m]$ : 周囲の長さ

$S [m]$ : 面積

※強制流入(圧力指定)の場合、圧力を流速に換算した最大流速を使用

$$U_{max} = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} [m/s]$$

代表長さの取り方は様々で、例えば、円柱周りの流れの場合、直径を取るのが一般的なので、換算が必要になる。

## 5. 熱流体解析

## 5. 1 概要

## 流体解析/熱伝導解析の種類

- ・ 定常解析
- ・ 過渡解析
- ・ 流体定常解析⇒熱過渡解析

## オプション

- ・ 浮力を考慮（自然対流）
- ・ 輻射

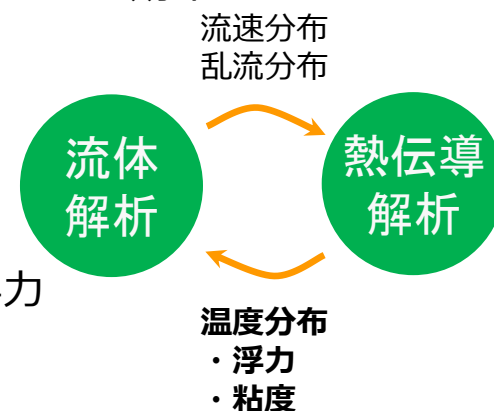
## 連成により考慮されること

流体⇒熱

- ・ 移流（流れによって熱エネルギーが運ばれる）効果
- ・ 乱流により熱移動が促進される効果が考慮されます。

熱⇒流体

- ・ 粘度の温度依存性
- ・ 温度分布により生じる浮力が考慮されます。

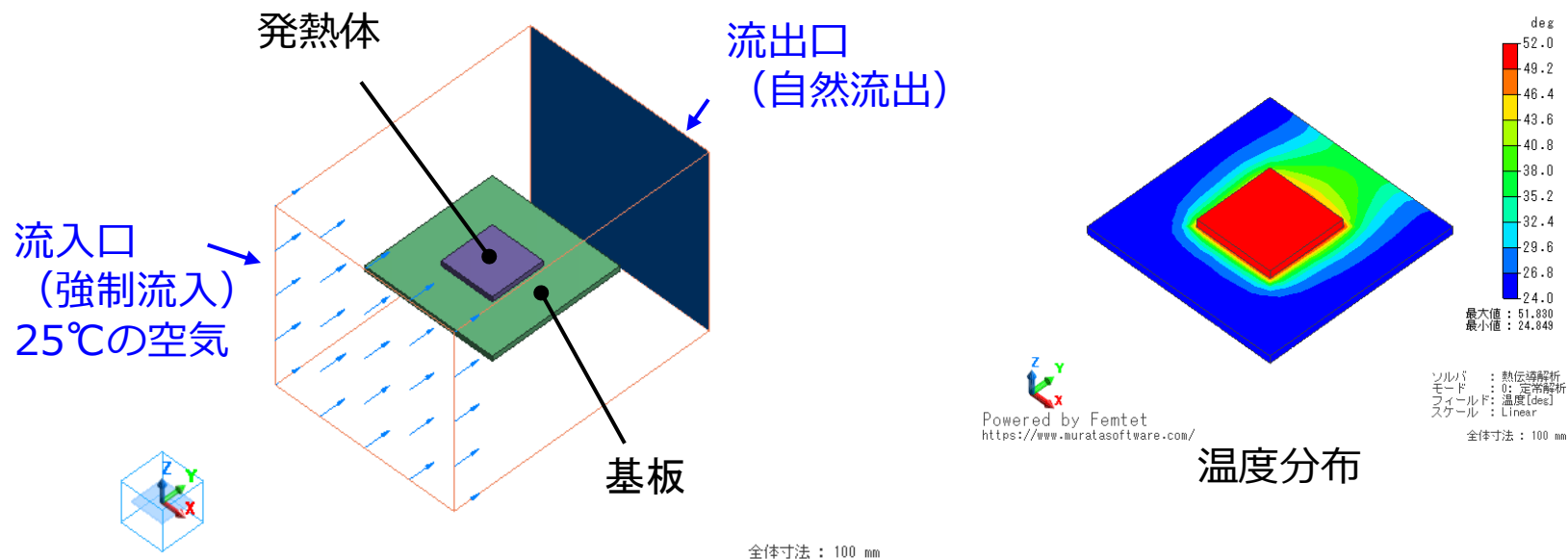


粘度温度依存性なし、浮力考慮なしの場合、1方向連成（流体⇒熱のみ）となり、計算の負荷が少なくなります。

- ・ 流体の状態を計算した後、熱の計算を行います。
- ・ 流体定常解析⇒熱過渡解析が可能です。

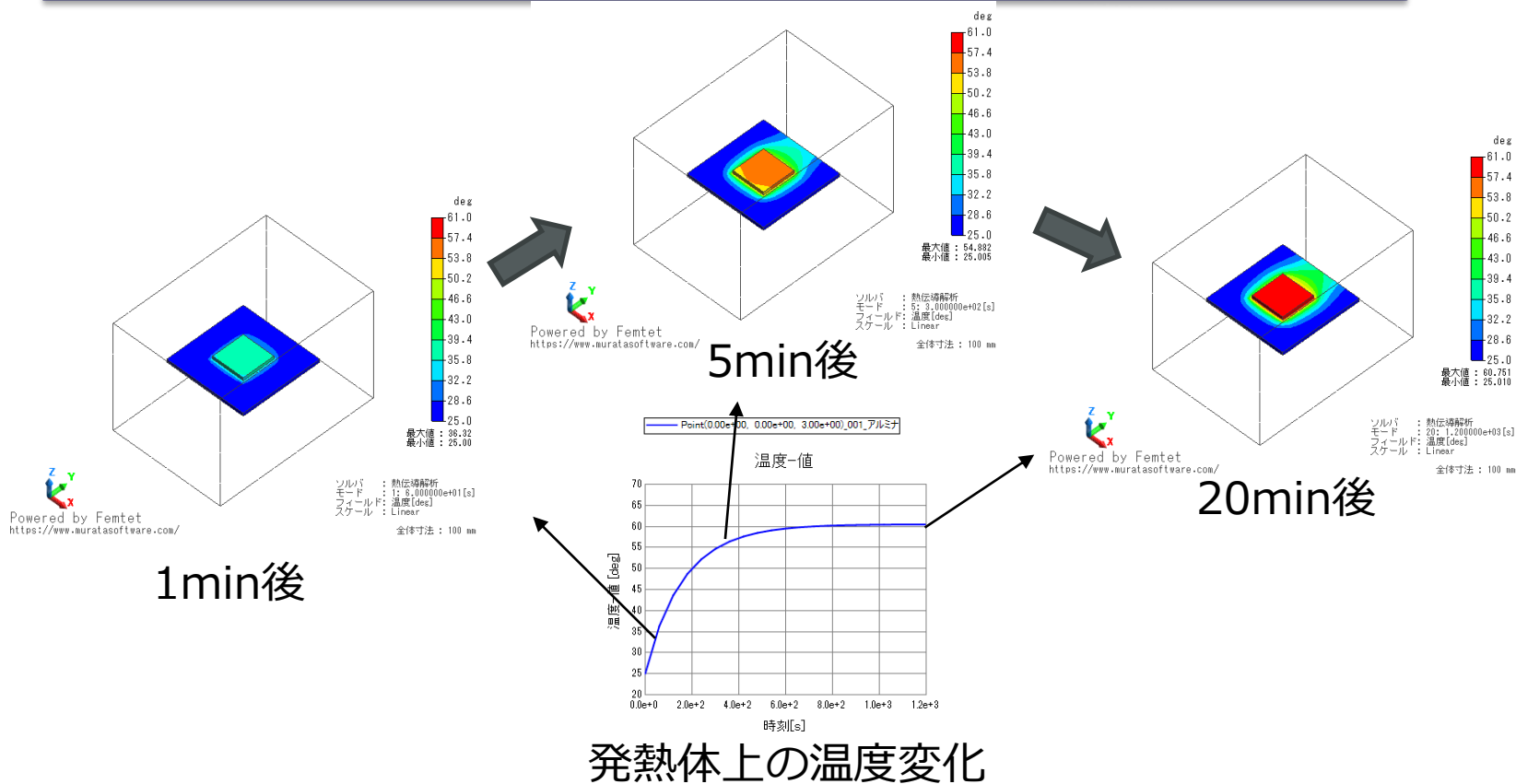


## 解析例：強制空冷される基板と発熱体（熱流体解析 例題3）



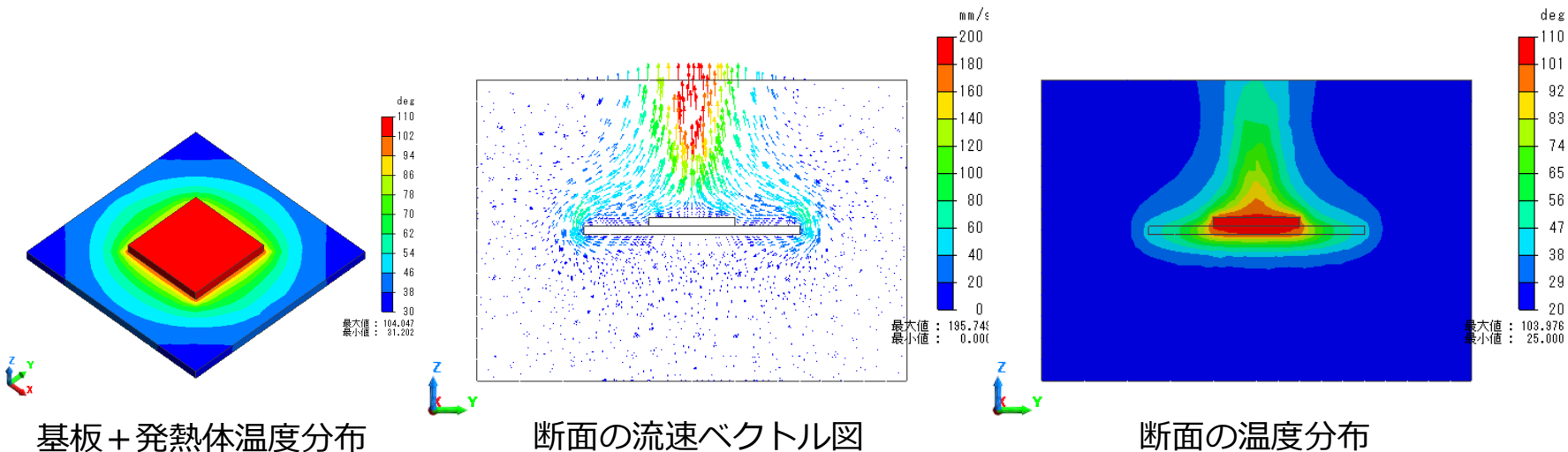
発熱体の発熱が、流れ（強制対流）によって下流側に運ばれます。  
流体部の温度分布も計算されます。

## 解析例：強制空冷される基板と発熱体の熱過渡解析（熱流体解析 例題4）



流れの状態は一定で、発熱開始からの温度上昇の計算を行っています。最終的に定常解析と同じ温度に到達します。

## 解析例：基板と発熱体の自然対流解析（熱流体解析 例題6）



発熱体の熱により上昇気流が生じ、熱が上部へ移動していることが確認できます。

## 5. 2 解析条件

**ソルバの選択**

流体解析  
メッシュ  
過渡解析  
高度な設定  
モニタリング  
結果インポート

**ソルバの選択**

| 電磁界   | 応力・圧電   |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> 電場解析 <i>Coulomb</i>    | <input type="checkbox"/> 応力解析 <i>Galileo</i>  |
| <input type="checkbox"/> 磁場解析 <i>Gauss/Luvs</i> | <input type="checkbox"/> 圧電解析 <i>Rayleigh</i> |
| <input type="checkbox"/> 電磁波解析 <i>Hertz</i>     |   |

**熱**

|  |
|--|
| <input type="checkbox"/> 熱伝導解析 <i>Watt</i> |
|--|

**音波・流体**

|   |
|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> 流体解析 <i>Bernoulli</i> |
| <input type="checkbox"/> 音波解析 <i>Mach</i>                 |
| <input type="checkbox"/> 簡易流体解析 <i>Pascal</i>             |

熱流体解析を行う場合



## 定常解析/過渡解析

設定可能な組み合わせ

|        | 熱定常解析 | 熱過渡解析          |
|--------|-------|----------------|
| 流体定常解析 | ○     | ○<br>(一方向連成のみ) |
| 流体過渡解析 | ×     | ○              |

## オプション「浮力を考慮する」

浮力を考慮して自然対流の計算を行います。  
重力の方向を-z方向として計算を行います。

## 環境温度

環境温度は、以下のように使用されます。

- ・ 浮力を考慮する場合の基準温度
- ・ 境界条件や初期温度のデフォルト値
- ・ 結果フィールド熱伝達係数の基準温度
- ・ 結果フィールド熱流束の基準温度
- ・ 結果テーブル「熱収支」「熱流量」の移流成分

### 熱流体解析

#### 流体解析(Bernoulli)の種類

- 定常解析
- 過渡解析

#### 熱伝導解析(Watt)の種類

- 定常解析
- 過渡解析

#### 層流/乱流

- 層流
- 乱流

#### オプション

- 浮力を考慮する(自然対流)
- 輻射の設定 ...
- 拡散解析の設定 ...

#### 初期値/リスタート

- 前回の解析結果を使用する
- 他の解析結果を使用する  
(結果インポート)
- 時刻を引き継ぐ  
(過渡解析リスタート)

#### 壁表面の積層メッシュ設定

全体設定 ...

#### 連成状態

一方向(流体→熱)

環境温度  [deg]

詳細設定 ...

### <連成状態>

#### 一方向

- ・ 流体が熱の影響を受けない (計算負荷小)
- ・ 流体定常解析⇒熱過渡解析が可能

#### 双方向

- ・ 流体が熱の影響を受ける (計算負荷大)

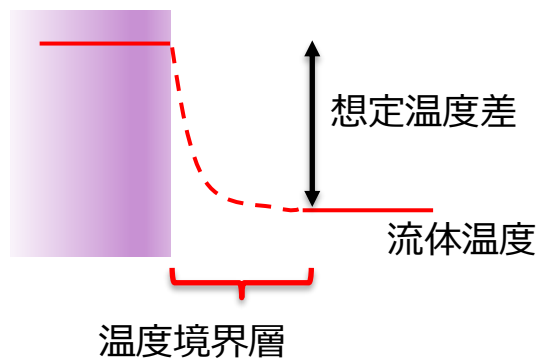
- 環境温度が浮力の基準温度となります。

理論上、環境温度を変えても流れや温度の結果が変わることはありません。

- 圧力の出力値のみ、環境温度によって変化します。
- 収束性（計算時間、計算の成功率）が変わる場合があります。  
(過渡解析の場合、環境温度 = 初期温度で解析することを推奨します。)

- 積層メッシュの設定で想定温度差を入力する必要があります。  
(積層メッシュを自動で設定する場合)

固体表面温度

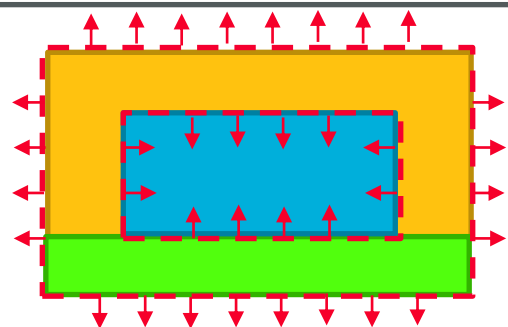





温度境界層のメッシュを生成するため、想定している固体表面と流体との温度差を入力します。

固体表面を自動的に検出して、固体表面間の輻射による熱の移動を考慮することができます。

外部境界条件で輻射の種類の設定が行う必要があります。

## 輻射設定における外部境界



-  固体 1
-  固体 2
-  流体

外部境界条件で輻射条件を設定した場合  
・モデル表面  
・流体と接する固体表面  
に反映される。

## 輻射の種類

- ・ **環境輻射（時間重視）** :  
モデル表面と無限遠環境との間の熱のやり取りを考慮
- ・ **表面間輻射（精度重視）** :  
モデル表面同士、および無限遠環境との間の熱のやり取りを考慮  
相手が近くに存在する場合や密閉空間を含む場合はこちらを使用する。



解析条件 > 輻射の設定でまとめて設定を行う。

**③ 輻射率個別設定**

| ボディ属性 | 表面の境界条件 | 一括設定                     | 輻射の種類     | 輻射率    |      |      | 材料           |
|-------|---------|--------------------------|-----------|--------|------|------|--------------|
|       |         |                          |           | 指定方法   | 温度依存 | 値    |              |
| VOL2  | 外部境界条件  | <input type="checkbox"/> | 表面間(精度重視) | ボディ属性値 | なし   | 0.85 | 001_アルミナ     |
| ケース   | 外部境界条件  | <input type="checkbox"/> | 表面間(精度重視) | デフォルト値 | なし   | 0.8  | 001_アルミニウムAl |
| VOL1  | 外部境界条件  | <input type="checkbox"/> | 表面間(精度重視) | デフォルト値 | なし   | 0.8  | 006_ガラスエポキシ  |

**① 環境(速度重視)or表面間(精度重視)に変更する**

外部境界条件設定

- なし
- なし
- 環境(速度重視)
- 表面間(精度重視)

**② 輻射率デフォルト値を設定する**

デフォルト値

外部境界条件設定

表面間(精度重視)

個別設定

輻射率

0.8

値を反映

- ・他のボディと接していない固体表面
- ・流体材料ボディと接している固体表面
- ※ 境界条件が設定されている面は除く

ボディ属性に設定されている境界条件をすべて表示する

## 5. 3 境界条件

境界条件の編集 [新規]

熱

熱流体

対称/不連続

説明

## 熱タブ

固体表面の境界条件を設定します。(従来の熱伝導解析と同じ)

熱

境界条件の種類

- 温度
- 熱抵抗
- 熱流束
- 測定端子
- 熱伝達・対流
- 断熱(設定なし)

輻射の設定

- なし
- 個別設定

## 熱流体タブ

流体表面の境界条件を設定します。

熱流体

境界条件の種類

- 固体壁
- 流入
- 流入/流出ペア
- スリップ壁
- 流出
- 設定なし
- 流入/流出

## 流体の熱に関する条件設定

### 壁境界条件

- 断熱
- 温度
- 熱流束
- 熱伝達・自然対流

### 流れ境界条件

- 流入する流体温度

## 5. 4 ボディ属性/材料定数

## 「流体タブ」

- ・ 流体領域内部に流れを指定
- ・ 多孔質体を指定

## 「発熱量タブ」

- ・ 固体部の発熱量を指定

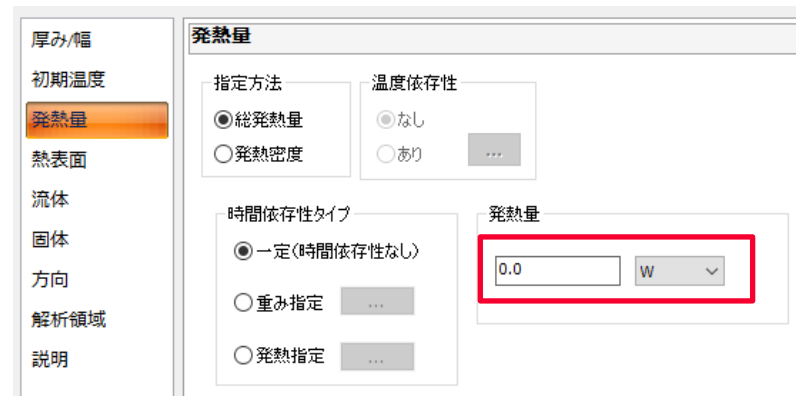
## 「方向タブ」

- ・ 異方性多孔質体/異方性固体材料の方向指定

## 「初期温度タブ」

- ・ 初期温度個別設定（過渡解析の場合）
- 通常は、解析条件の過渡解析タブで設定

## 発熱量タブ



厚み/幅

初期温度

**発熱量**

熱表面

流体

固体

方向

解析領域

説明

**発熱量**

指定方法

総発熱量

発熱量密度

温度依存性

なし

あり

時間依存性タイプ

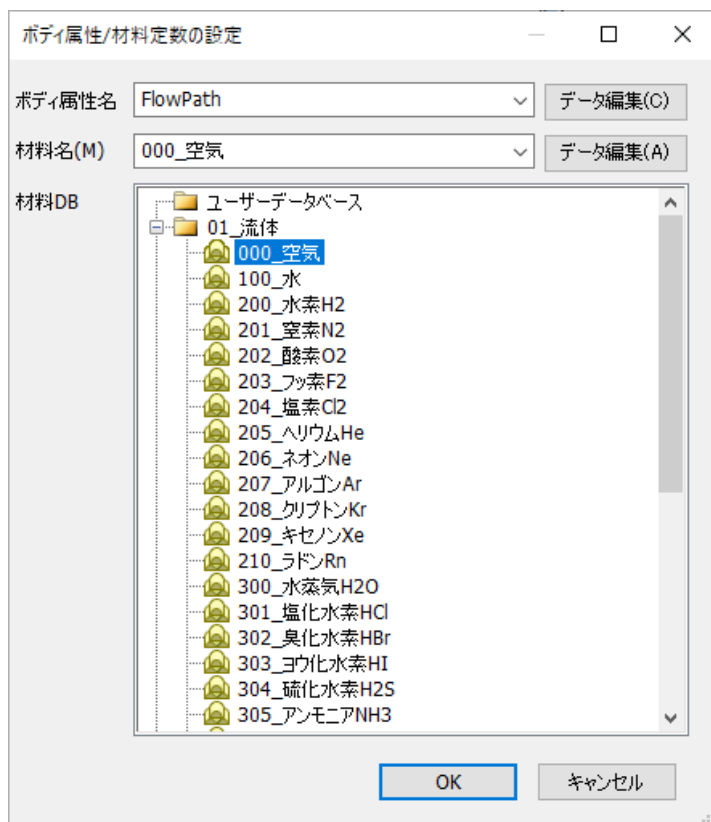
一定(時間依存性なし)

重み指定

発熱指定

発熱量

0.0 W



## 個別に作成する場合

① 固体/気体/液体を設定



② 固体か流体かに応じて各種材料定数を設定

|      | 固体部  | 流体部 |
|------|------|-----|
| 比熱   | 過渡のみ | ○   |
| 密度   | 過渡のみ | ○   |
| 熱伝導率 | ○    | ○   |
| 粘度   | -    | ○   |

空気、水は材料DBから選択可

## 6. その他の解析機能

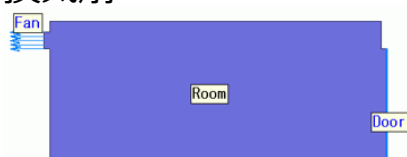
## 6. 1 拡散解析



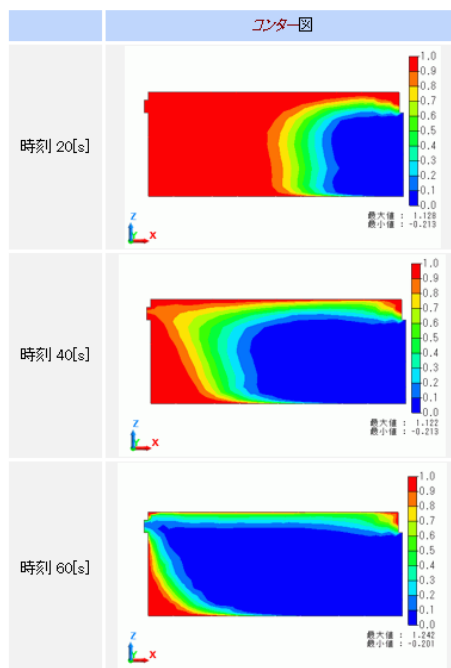
## 解析例：例題 1 2 / 1 3 室内換気の解析

### 例題 1 2 室内換気の解析

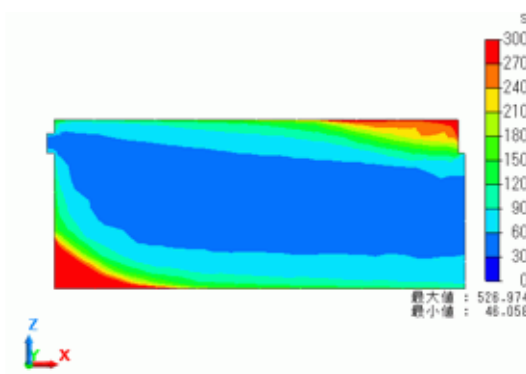
換気扇



ドア



### 例題 1 3 室内換気の解析（空気齢の計算）

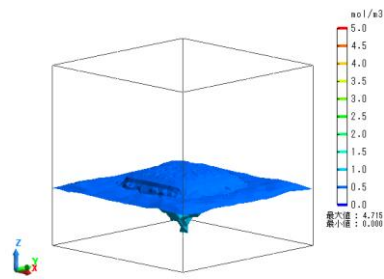
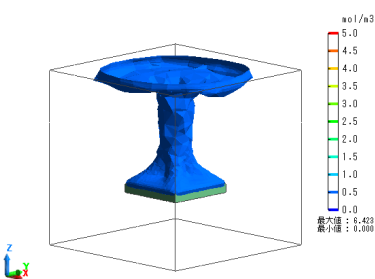
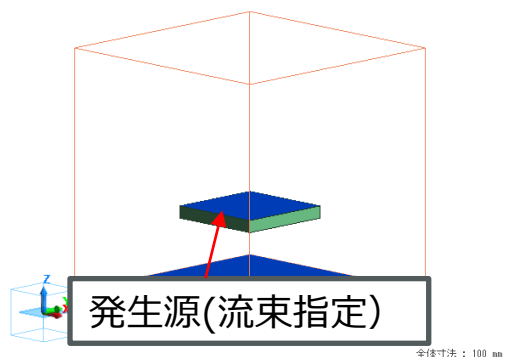


空気寿命表示（換気にかかる時間）

- ・ ドアから新しい空気が流入し換気が行われる様子を確認することができます。
- ・ 空気齢オプションでは、換気が行われやすい/行われにくい箇所を確認することができます。

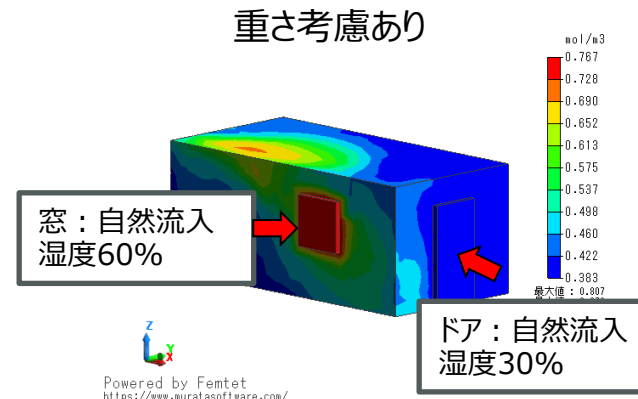
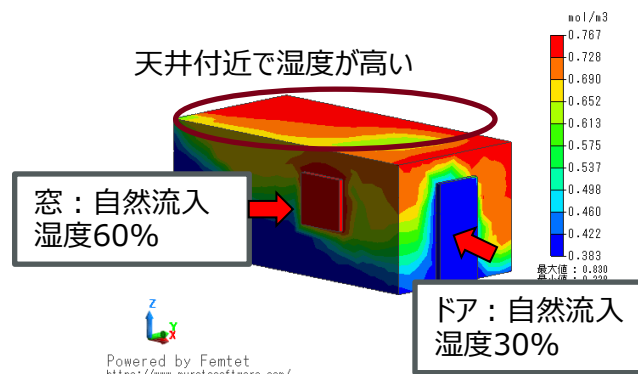
## 解析例：例題 19 不純物物質発生による対流解析 / 例題 20 室内湿度の解析

### 例題19 不純物物質発生による対流解析



濃度分布

### 例題20 室内湿度の解析



重さ考慮なし

空気中の水蒸気や不純物物質の拡散を計算することができます。  
 水蒸気は空気より軽いため、湿度の高い箇所で浮力が生じ、天井付近に溜まる傾向が確認できます。

## 定常解析/過渡解析

設定可能な組み合わせ

|        | 拡散定常解析 | 拡散過渡解析         |
|--------|--------|----------------|
| 流体定常解析 | ○      | ○<br>(一方向連成のみ) |
| 流体過渡解析 | ×      | ○              |

## オプション「空気齢解析」

換気効率の指標である空気齢、空気余命、空気寿命を計算します。

## オプション「拡散物質の重さを考慮する」

拡散物質の重さに起因する浮力を考慮して自然対流の計算を行います。  
重力の方向を-z方向として計算を行います。

## 環境値

環境値は、以下のように使用されます。

- ・ 浮力を考慮する場合の基準温度
- ・ 境界条件や初期値のデフォルト値

## <連成状態>

### 一方向

- ・ 流体が拡散物質の重さの影響を受けない (計算負荷小)
- ・ 流体定常解析⇒拡散過渡解析が可能

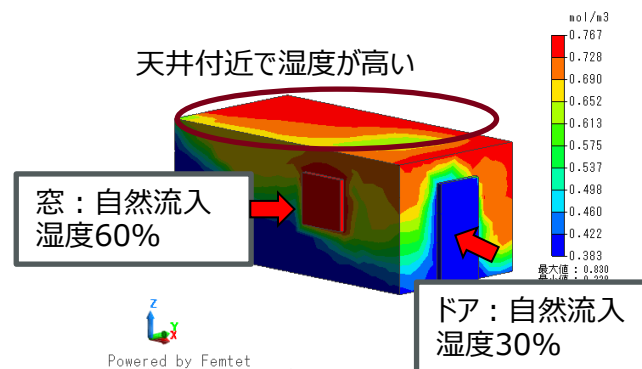
### 双方向

- ・ 流体が拡散物質の重さの影響を受ける (計算負荷大)

# 拡散物質の重さを考慮した解析

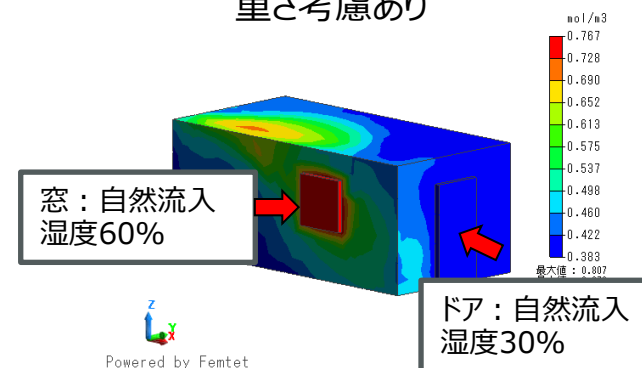


## 例題20 室内湿度の解析



Powered by Femtet  
<https://www.muratasoftware.com/>

重さ考慮あり



Powered by Femtet  
<https://www.muratasoftware.com/>

重さ考慮なし

- 拡散物質を材料DBから指定することで、拡散物質の重さを考慮することができます。
- 例えば空気中の水蒸気等の拡散を計算することができます。水蒸気は空気より軽いため、湿度の高い箇所で浮力が生じ、天井付近に溜まる傾向が確認できます。

## 流体の拡散に関する条件設定

### 壁境界条件

- ・ 移動なし
- ・ 拡散値
- ・ 拡散流束
- ・ 伝達係数

### 流れ境界条件

- ・ 流入拡散値

## 壁境界条件の設定

### 拡散境界条件の種類

- 移動なし
- モル濃度
- 流束
- 伝達係数

### モル濃度流束

0.0 [mol/m<sup>2</sup>/s]

## 流入境界条件の設定

### モル濃度

環境値を使用する

0.0

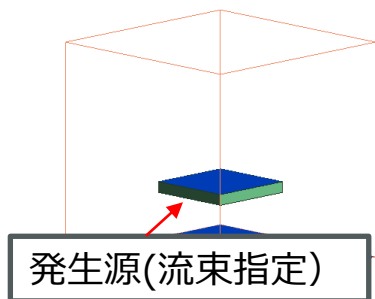


[mol/m<sup>3</sup>]

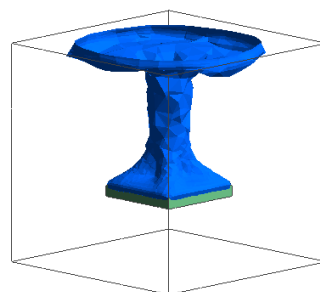
時間依存性

重み開放

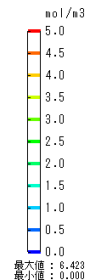
## 例題19 不純物物質発生による対流解析



全体寸法 : 100 mm



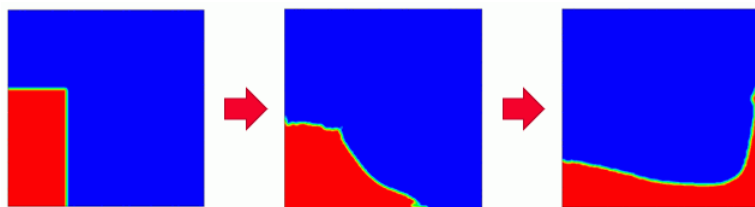
濃度分布



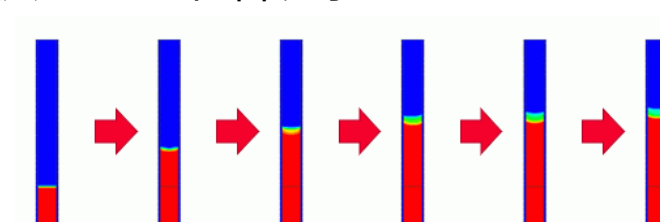
## 6. 2 自由表面解析

## 解析例：自由表面解析（流体解析例題14～17）

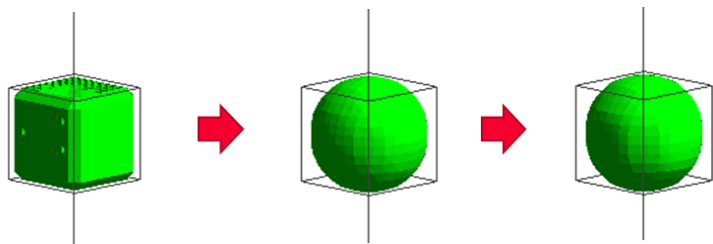
例題14 ダムブレイク



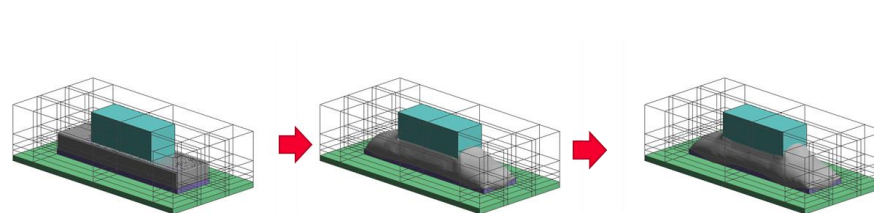
例題16 毛細管現象



例題15 表面張力による水滴形成



例題17 はんだの濡れ上がり



- 複数の流体（気体/流体）を含む混相流の解析が可能です。
- 重力や表面張力/濡れ(接触角)による気液界面の移動を計算することができます。

**流体解析**

解析の種類

定常解析

過渡解析

層流/乱流

層流

乱流

オプション

拡散解析の設定 ...

**混相流の設定 ...**

初期値/リスタート

前回の解析結果を使用する

他の解析結果を使用する (結果インポート)

リスタートの詳細設定 ...

壁表面の積層メッシュ設定

全体設定 ..

詳細設定 ...

**オプション**

**混相流の設定**

自由表面(VOF法)の解析を行う

自由表面(VOF法)の設定

相の設定

材料定数名

100\_水

追加

削除

変更

相 No | 流体材料名

|     |        |
|-----|--------|
| 相 1 | 000_空気 |
| 相 2 | 100_水  |

重力を考慮する

表面張力を考慮する

OK

キャンセル

ヘルプ(H)

浮力を考慮する場合、同時に温度分布を計算する必要があります。  
ソルバの選択で熱伝導解析にもチェックを入れてください。

- 重力の考慮 重力の方向を-z方向として計算
- 表面張力の考慮 表面張力係数/接触角の設定が必要

## <注意点>

- 過渡解析のみの機能となります。
- 界面の移動を計算するため、細かい時間ステップの設定が必要となります。
- 界面の形状を再現するには、可能な範囲で規則正しい細かいメッシュが必要となります。  
(スweepメッシュ推奨)

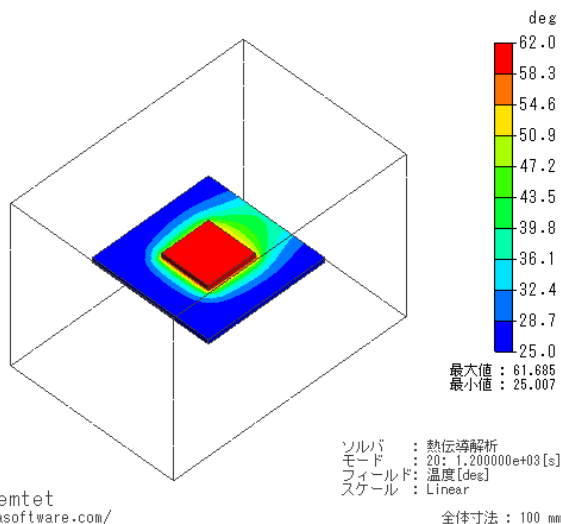


## 6. 3 応力との連成解析

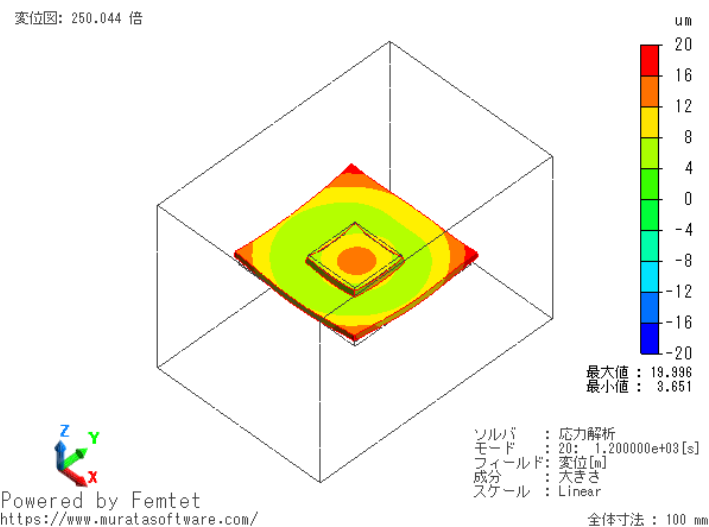
- 熱流体解析の温度分布を使用して応力解析を行います。
- 熱⇒応力の1方向の連成のため、変形の流れ場、温度場への影響は考慮できません。

## 熱流体応力連成解析例題1 ICの発熱による基板の反り解析

### 温度分布（チップの発熱）



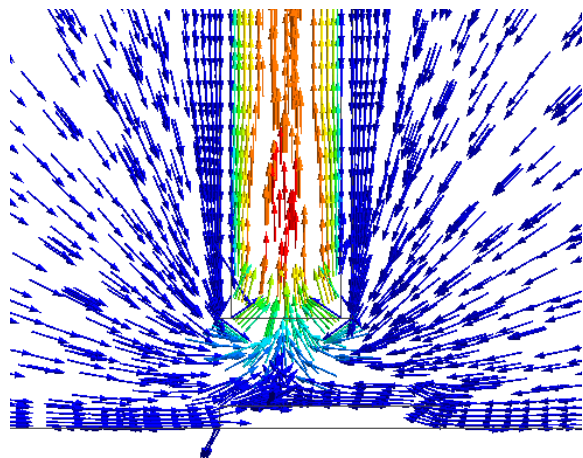
### 変位分布（基板の反り）



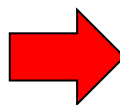
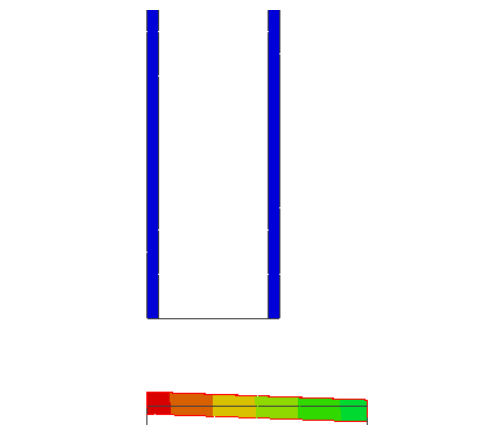
- 流体解析で解析した固体表面の圧力/せん断応力分布を使用して応力解析を行います。
- 流体⇒応力の1方向の連成のため、変形の流れ場への影響は考慮できません。  
(この例題の場合、吸い上げ直後の挙動のみ解析可)

## 流体応力連成解析例題1 ノズル吸着力の解析

吸い上げ時の流速分布



吸い上げ開始直後の移動



## 5. 収束しない場合の対応方法

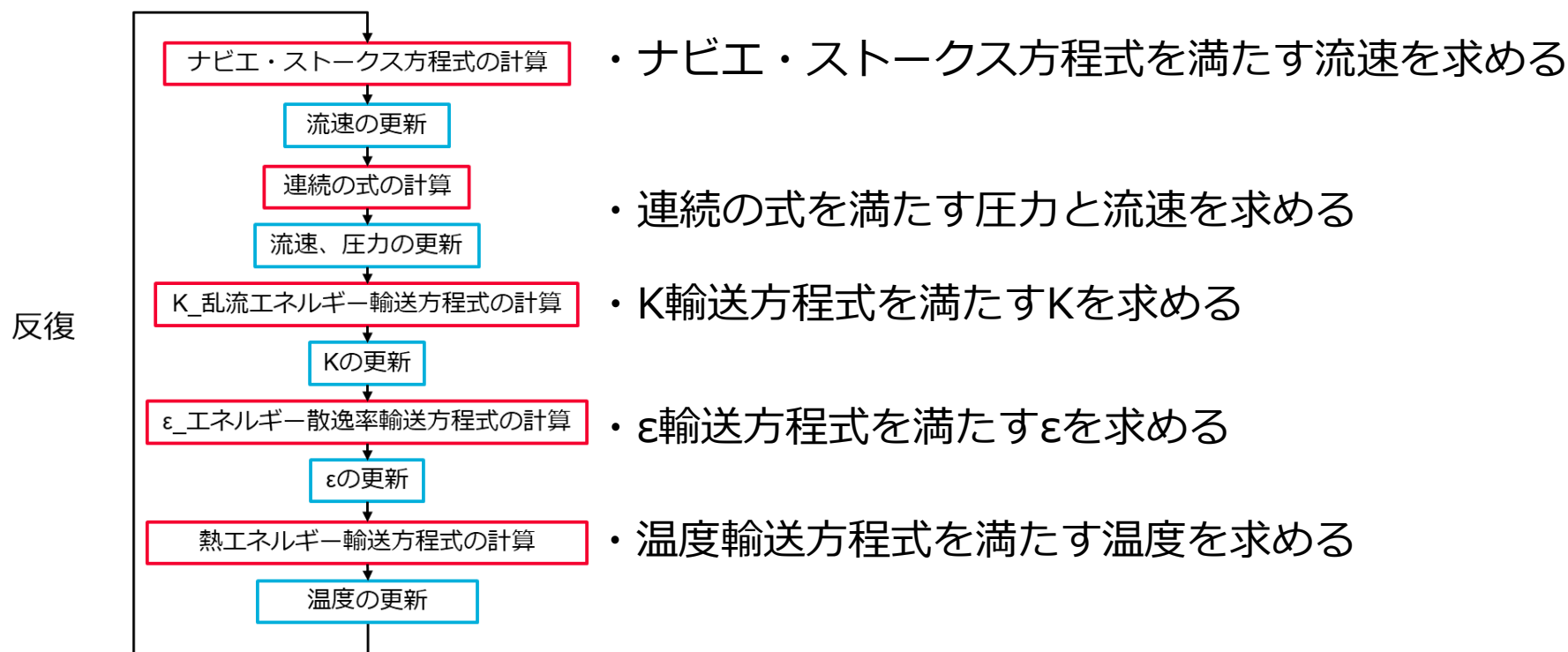
同様の内容がヘルプ

ホーム / テクニカルノート / 流体解析/熱流体解析 / 流体解析/熱流体解析が収束しない場合  
にも記載されています。

## 5. 1 流体解析の反復計算

流速、圧力、 $K$ 、 $\varepsilon$ 、温度を順番に計算します。

1つの方程式を満たす状態が求まっても他の方程式を満たしていない場合があるので、何度も反復して、すべての方程式を満たす状態になるまで計算を繰り返します。



熱流体双方向連成の場合

# 流体解析の反復計算

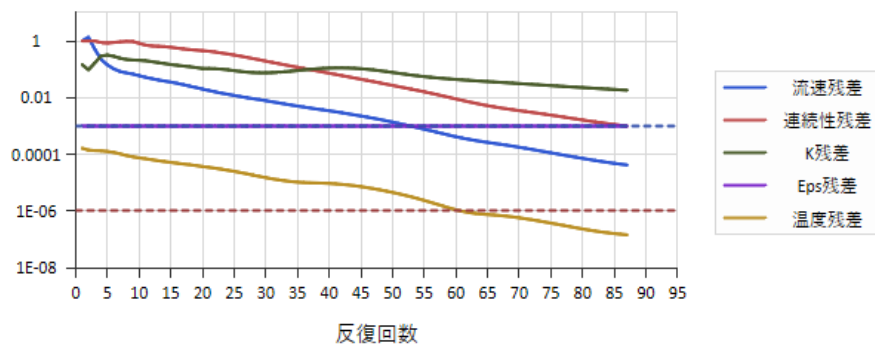
各方程式に関する残差が収束判定値以下になるまで計算します。

残差：どの程度対応する方程式を満たしているかを示す指標。

小さいほど方程式を満たしていると言える。

| 残差            | 対応する方程式          |
|---------------|------------------|
| 流速残差          | ナビエ・ストークス方程式     |
| 連続性残差         | 連続の式             |
| K残差           | K輸送方程式           |
| $\epsilon$ 残差 | $\epsilon$ 輸送方程式 |
| 温度残差          | 熱エネルギー輸送方程式      |
| 拡散残差          | スカラー輸送方程式        |

非線形残差



流体解析詳細設定

移流項計算手法

速度: 2次精度風上差分

温度: 2次精度風上差分

---

収束判定設定

|              | 定常      | 過渡 |
|--------------|---------|----|
| ステップ毎の最大反復回数 | 300     | 20 |
| 収束判定(熱)      | 1.0 X10 | -6 |
| 収束判定(流体)     | 1.0 X10 | -3 |

モニター値による収束判定を行う

許容温度差: 0.5 [deg]

過渡解析で定常解析と同じ圧力計算手法を使用する

反復途中の結果も出力する

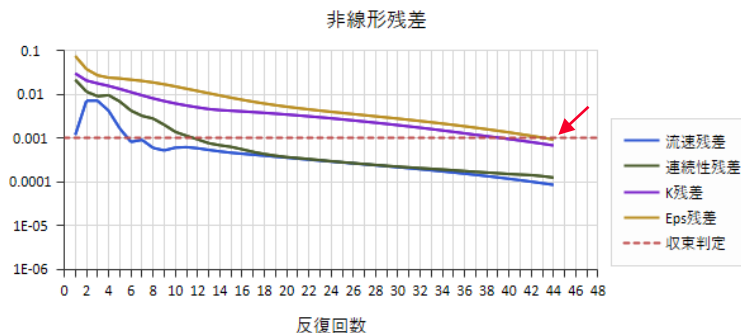
OK    キャンセル    ヘルプ(H)

詳細設定で以下の設定が可能

- 最大反復回数
- 収束判定 (流体) : 流速/連続性/K/ $\epsilon$ の判定
- 収束判定 (熱) : 温度/拡散値の判定

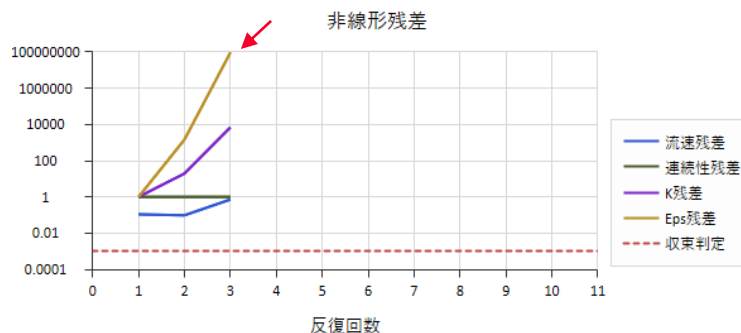
## ①計算が収束

残差が十分に小さくなった状態。  
正しい結果と言える。



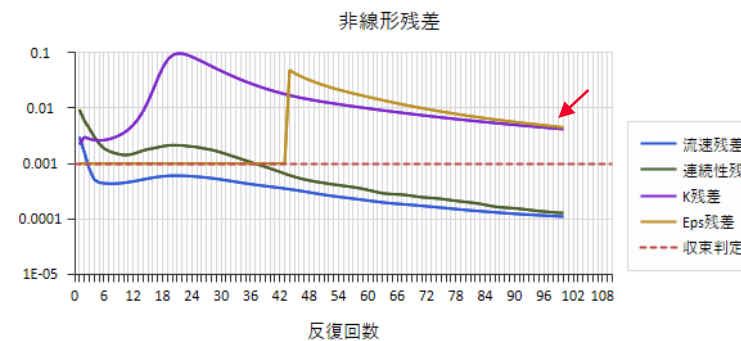
## ②計算が発散

反復を繰り返しているうちに残差  
が大きくなる。無茶苦茶な結果。



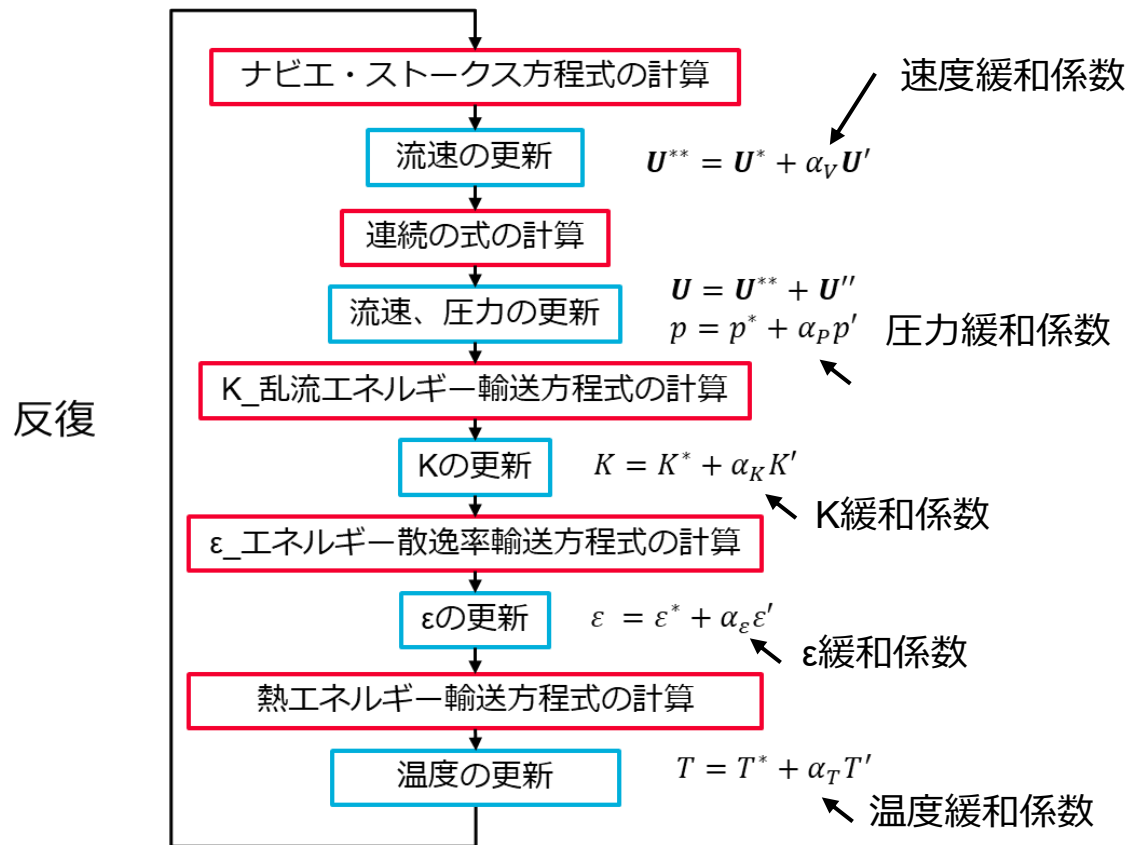
## ③計算が未収束

反復を繰り返しても、残差が小さく  
ならず、精度が悪い。  
当たらずとも遠からず。





# 緩和係数（熱流体双方向連成の場合）



反復毎に方程式を満たすようにそれぞれの解を更新すると発散が起こるため、更新する量を少なくして発散を防いでいます（緩和係数 $<1$ ）。緩和係数は小さいほど発散しにくくなりますが、小さいと反復回数が増え、解析に時間がかかります。

# 緩和係数の設定

## 熱流体解析

### 流体解析(Bernoulli)の種類

- 定常解析  
 過渡解析

### 熱伝導解析(Watt)の種類

- 定常解析  
 過渡解析

### 層流/乱流

- 層流  
 乱流

浮力を考慮する(自然対流)

環境温度  [deg]

詳細設定

### 初期値/リスタート

- 前回の解析結果を使用する  
 他の解析結果を使用する(結果インポート)  
 時刻を引き継ぐ(過渡解析リスタート)

### 壁表面の積層メッシュ設定

全体設定

### 連成状態

双方向(流体 $\leftrightarrow$ 熱)  
・浮力

## 流体解析詳細設定

### 移流項計算手法

速度   
温度

### 収束判定設定

|              | 定常                                   | 過渡                              |
|--------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| ステップ毎の最大反復回数 | <input type="text" value="300"/>     | <input type="text" value="20"/> |
| 収束判定(熱)      | <input type="text" value="1.0"/> X10 | <input type="text" value="-6"/> |
| 収束判定(流体)     | <input type="text" value="1.0"/> X10 | <input type="text" value="-3"/> |

モニター値による収束判定を行う  
許容温度差  [deg]

- 過渡解析で定常解析と同じ圧力計算手法を使用する  
 未収束時に準定常状態を計算する

### 緩和係数

|  | 定常 | 過渡 |
|--|----|----|
|--|----|----|

|            |                                  |                                   |
|------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 速度         | <input type="text" value="0.7"/> | <input type="text" value="0.9"/>  |
| 圧力         | <input type="text" value="0.3"/> | <input type="text" value="0.99"/> |
| K          | <input type="text" value="0.7"/> | <input type="text" value="0.99"/> |
| $\epsilon$ | <input type="text" value="0.7"/> | <input type="text" value="0.99"/> |
| 温度         | <input type="text" value="0.9"/> | <input type="text" value="0.99"/> |
| 拡散         | <input type="text" value="0.9"/> | <input type="text" value="0.99"/> |

### 結果出力の設定

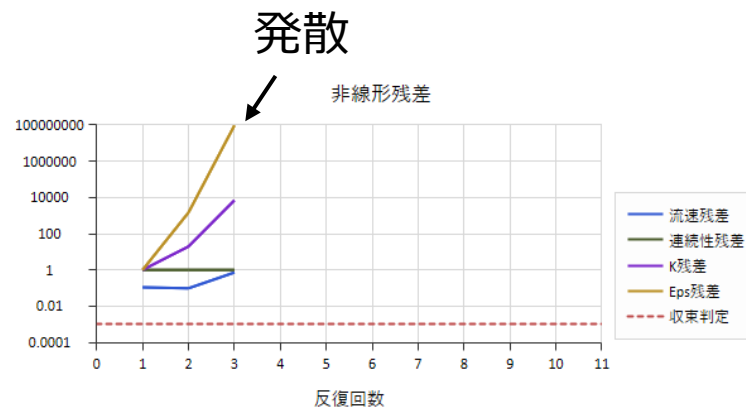
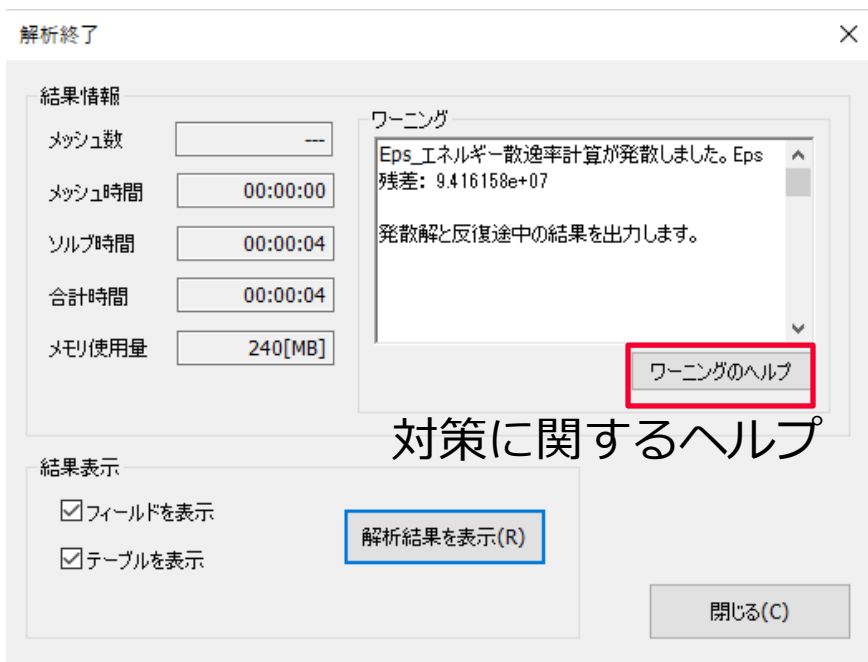
#### 反復途中の結果

- 出力しない  
 収束しなかった場合のみ出力  
 常に出力

発散する原因は、速度、圧力の更新に問題がある場合が多い。  
まずは、速度、圧力の緩和係数を小さくして計算することを推奨します。

※定常解析と過渡解析では使用する緩和係数は異なります。

## 5. 2 発散する場合



発散の場合、上記のワーニングが出ます。

対策に関するヘルプを参照することができます。

# 発散する場合の対策：原因箇所の特定

メッシュの結果表示で積層メッシュ生成状況を確認できます。

## ・メッシュの質

値が大きい箇所(>100)が発散の原因となっている場合があります。

## ・要素の節点数

積層メッシュ生成箇所を確認できます。

積層メッシュ部：三角柱要素：節点数6

内部メッシュ部：四面体要素：節点数4

積層メッシュが極端に薄い場合は、原因を調べる必要があります。

## ・高さ補正係数

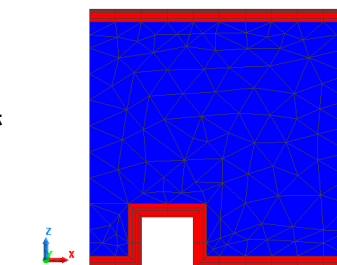
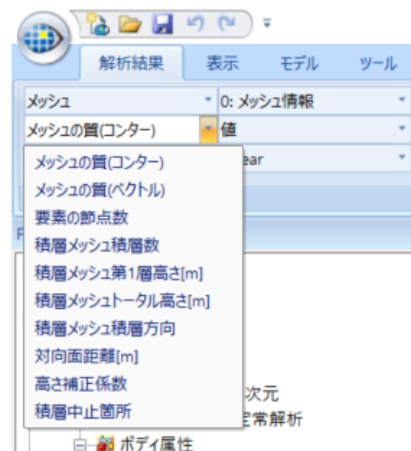
積層メッシュ生成の過程で高さを低く補正した箇所を確認することができます。極端に補正係数が低い箇所はモデルに問題がある可能性があります。

## ・対向面距離

対向する壁までの距離を確認することができます。極端に小さい場合、意図しない隙間が存在する可能性があります。

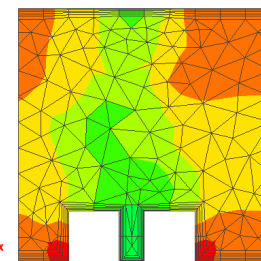
## ・積層中止箇所

積層できなかった箇所を表示することができます。積層できなかった箇所は収束性を悪化させる場合があります。



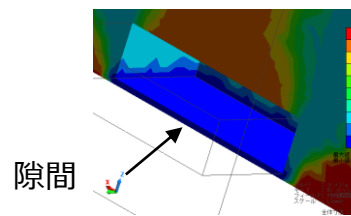
Powered by Femtet  
<https://www.muratasoftware.com/>

要素の節点数



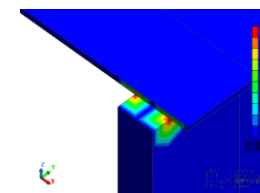
Powered by Femtet  
<https://www.muratasoftware.com/>

高さ補正係数



隙間

対向面距離



積層中止箇所

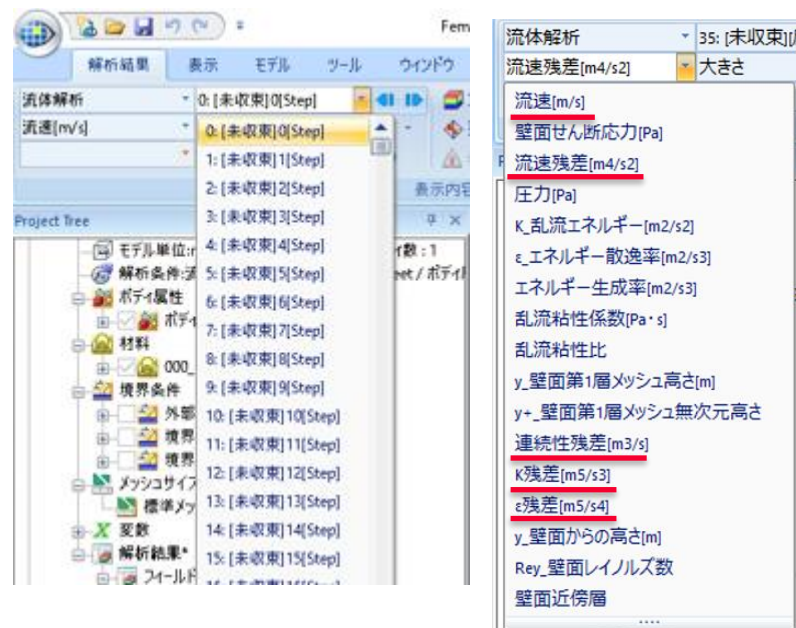
# 発散する場合の対策：原因箇所の特定

発散、もしくは未収束だった場合、反復途中の結果が確認できます。  
流速残差、連続性残差、K残差、 $\epsilon$ 残差の分布が表示可能です。

発散、未収束の原因になっている箇所を確認することができます。

流速の値が極端に大きくなっている箇所や、残差の値が極端に大きくなっている箇所がある場合、その近辺のメッシュの状態が収束性に影響している可能性が高いです。

⇒メッシュの結果表示で、メッシュ状況を確認する必要があります。



- ・ 発散する原因箇所が特定できた場合

⇒モデル/メッシュサイズの修正

- ・ 発散の原因箇所のメッシュサイズを細かくする
- ・ 発散の原因箇所のモデルの修正（狭い隙間を埋める、形状を単純化する）

- ・ 発散する原因箇所が特定できなかった場合

## 1. 「緩和係数」を調整する

設定例)

圧力緩和係数を0.1ずつ下げる

速度緩和係数を0.1ずつ下げる

速度/圧力のバランスを調整する

（0.8/0.2, 0.5/0.5等トータル1になるように）

熱流体浮力考慮で収束しない場合、温度緩和係

数を0.1ずつ下げる

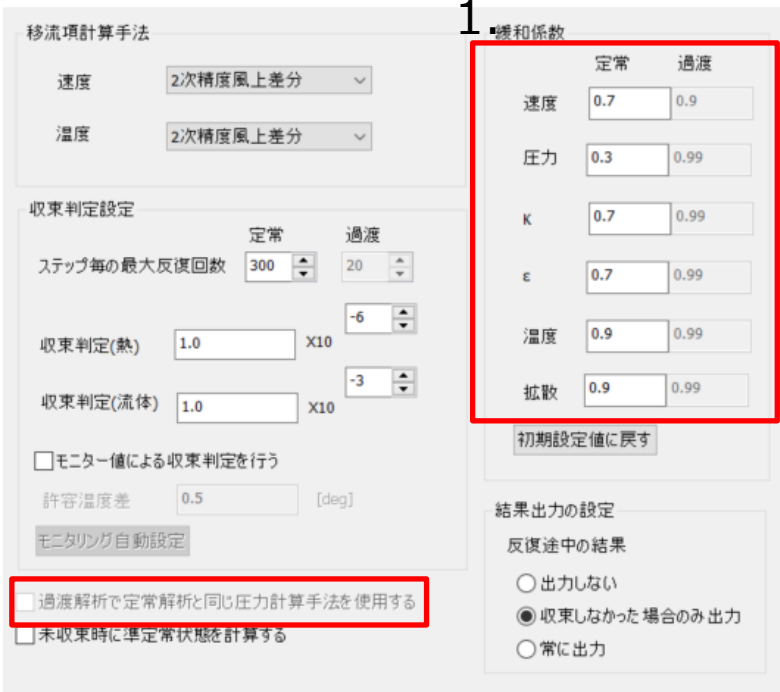
拡散解析拡散物質の重さ考慮で収束しない場合、

拡散緩和係数を0.1ずつ下げる

## 2. 過渡解析の場合で「過渡解析で定常解析と同じ圧力計算手法を用いる」をチェック

※ 1. 2. の対策は発散を防ぐ代わりに解析時間は長くなります

流体解析詳細設定



|    | 定常  | 過渡   |
|----|-----|------|
| 速度 | 0.7 | 0.9  |
| 圧力 | 0.3 | 0.99 |
| K  | 0.7 | 0.99 |
| ε  | 0.7 | 0.99 |
| 温度 | 0.9 | 0.99 |
| 拡散 | 0.9 | 0.99 |

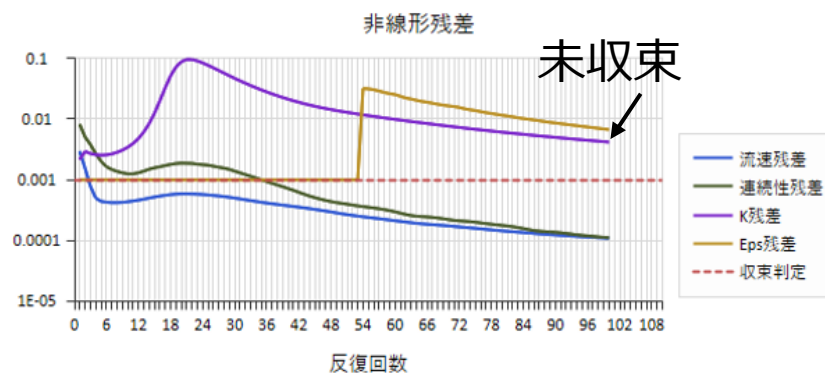
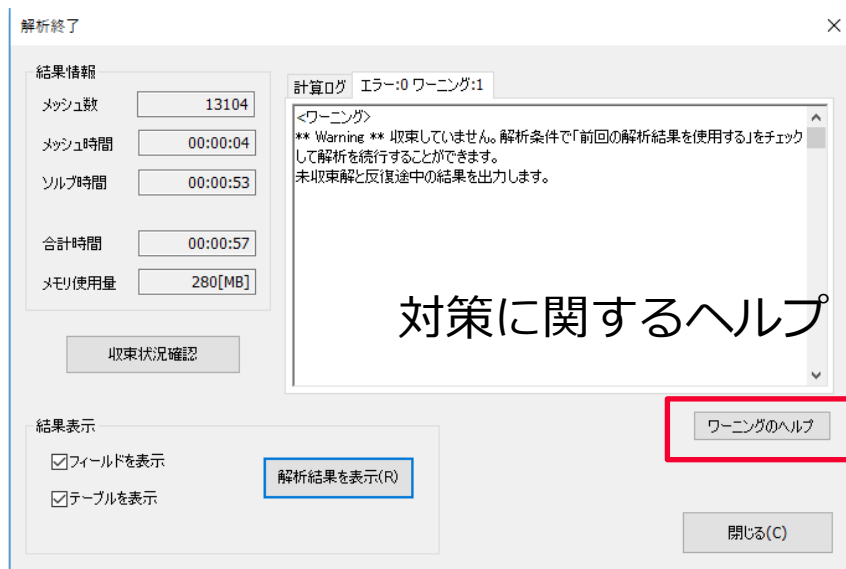
過渡解析で定常解析と同じ圧力計算手法を使用する

未収束時に準定常状態を計算する

流体解析タブ-詳細設定

## 5. 3 未収束の場合





未収束の場合、上記のワーニングが出ます。

対策に関するヘルプを参照することもできます。

- ・ 残差が減少に向かっている場合

リスタートを実施する

- ・ 残差が小さくなっているが、横ばい、あるいは細かく振動して減少する見込みがない場合

1. 「緩和係数」を調整する

設定例)

該当する量の緩和係数を0.1ずつ下げる

速度/圧力のバランスを調整する

(0.8/0.2, 0.5/0.5等トータル1になるように)

2. 過渡解析に切り替える(定常解析の場合)

3. 準定常状態を計算するオプションを使用する (定常解析の場合)

4. 未収束結果を最終結果として利用する

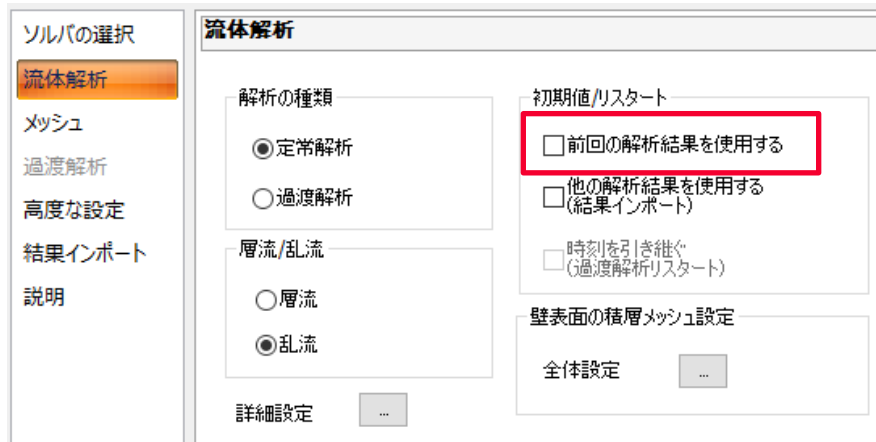
5. 移流項計算手法を「1次風上差分」に変更する

- ・ 残差が小さくならない場合(0.1以上)

- ・ 残差が大きく振動する場合(残差0.1を超える場合がある)

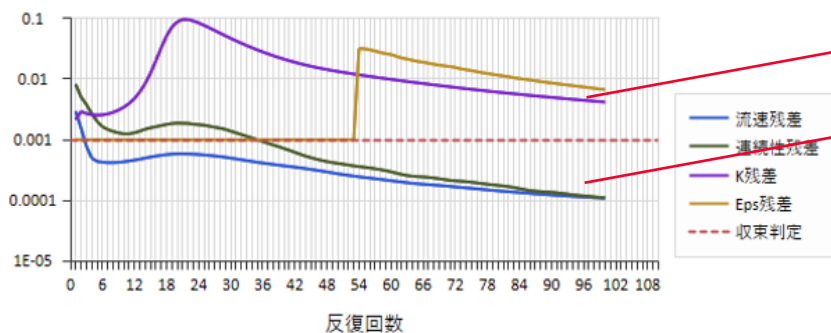
モデルやメッシュに問題がある可能性が高い。発散する場合の対処方法参照。

## 「前回の解析結果を使用する」オプション

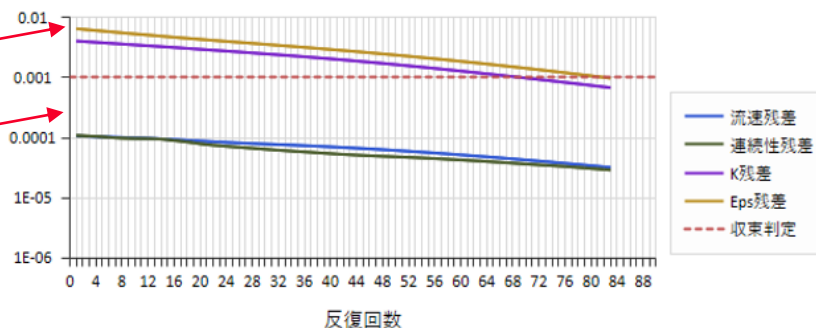


## 続きから解析

非線形残差

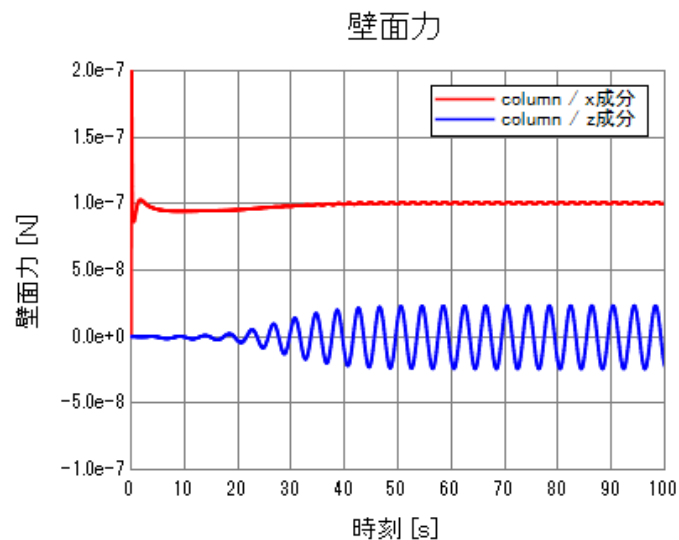
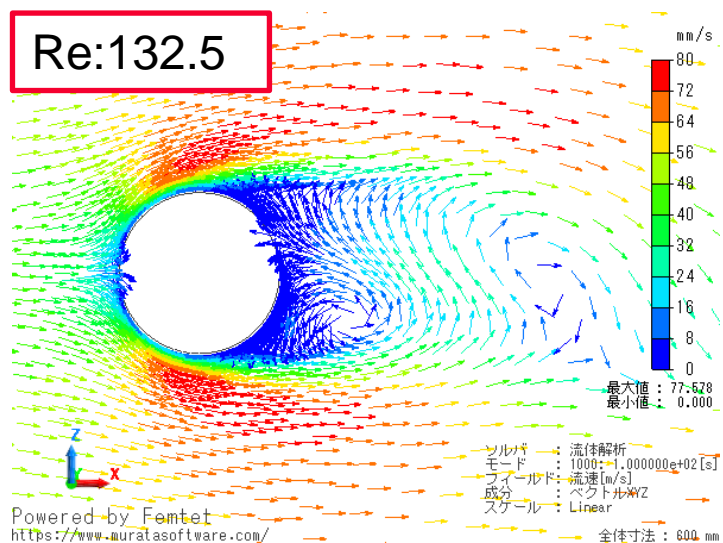


非線形残差



前回の結果を読み込んで解析を続行します。  
緩和係数や収束判定を変更して続行することも可能です。

## 定常解析を過渡解析に切り替える

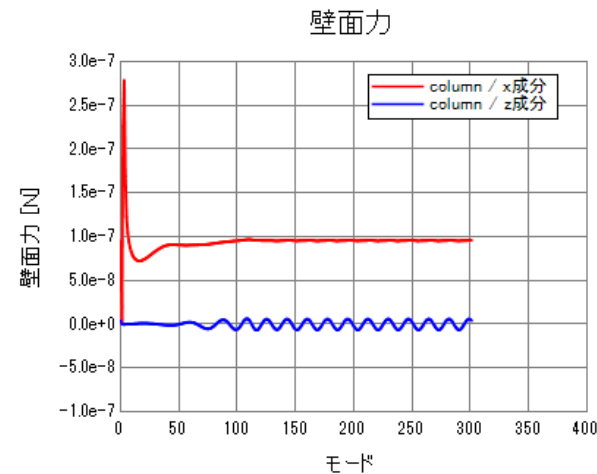
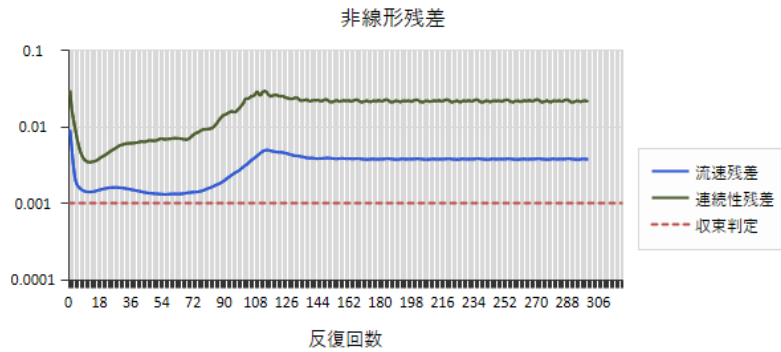


周期的に変動するような、定常解析では解けない問題の場合に有効です。

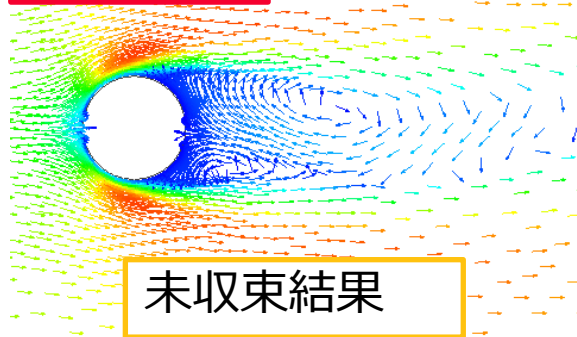
# 未収束結果を最終結果として利用

## 未収束結果を最終結果として利用する

精度は悪くなりますが、結果を確認することができます。  
評価目的とする量が反復回数に対して変化がなくなっている場合、  
十分な精度で結果が得られていると解釈する場合があります。

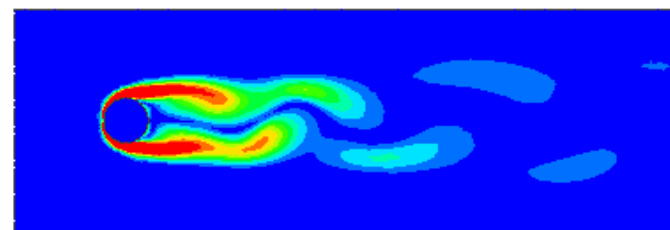
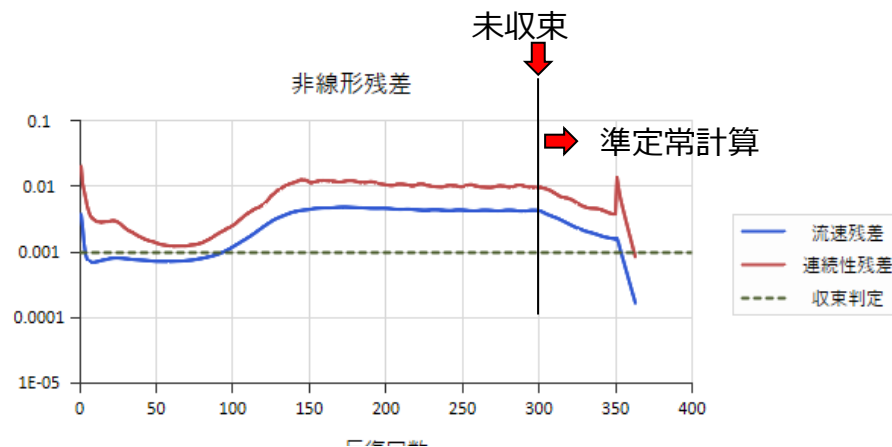


Re:132.5



反復回数と壁面力

壁面力x成分は変化がなくなって一定値に収束  
(前ページの過渡解析とほぼ同等の値)



カルマン渦の準定常状態

- 未収束時に、有限の時間ステップを使った過渡解析に切り替えて、準定常状態を計算します。
- 振動中のある瞬間の状態が出力されます。
- 未収束終了後、リスタート時に準定常状態の計算を開始することも可能です。

## 5. 4 異常値が発生する場合

流体解析では、移流（運動量や熱エネルギーが流体の流れに乗って運ばれる現象）を計算するとき、数値粘性により解が粘性が高い側に見積もられることが知られています。

- ・ 1次精度風上差分

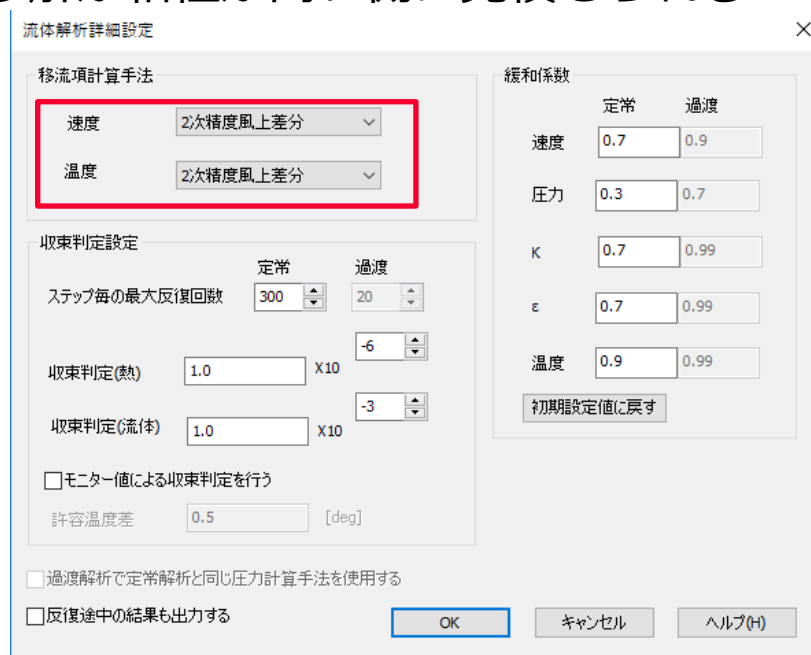
数値粘性が大きく精度は悪い。  
流速差や温度差が実際よりも小さい結果となります。  
収束性は良い。

- ・ 2次精度風上差分（デフォルト）

数値粘性が小さく精度は良い。  
収束性が悪い（反復回数が多い、発散する）場合がある。  
局所的に異常な流速、温度が発生する場合がある。

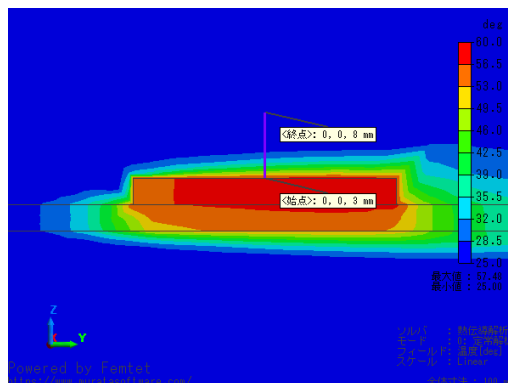
- ・ 2次精度風上差分[異常値抑制大]

2次風上差分と比べて異常値が抑制されやすいが、反復回数が増加する傾向がある。

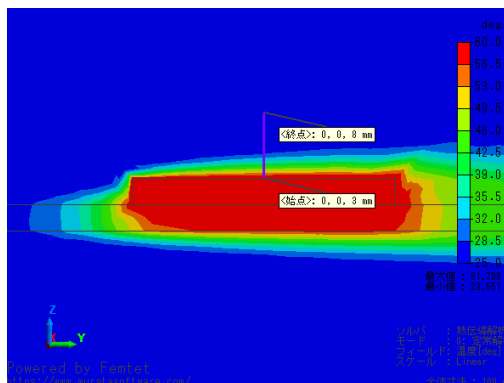




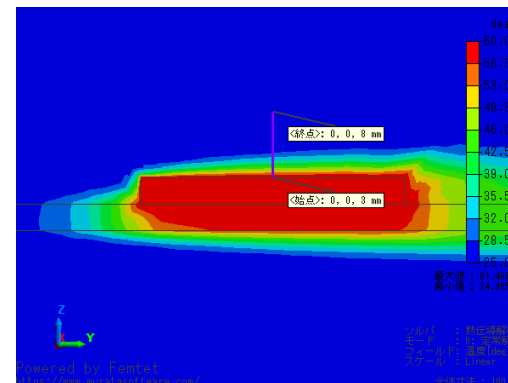
## 熱流体解析例題 3 温度の移流項計算方法を変更



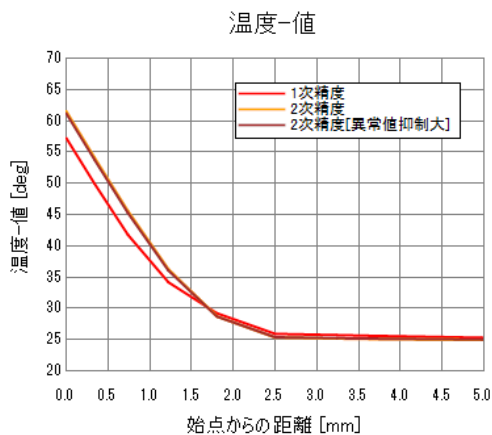
1次精度風上差分



2次精度風上差分

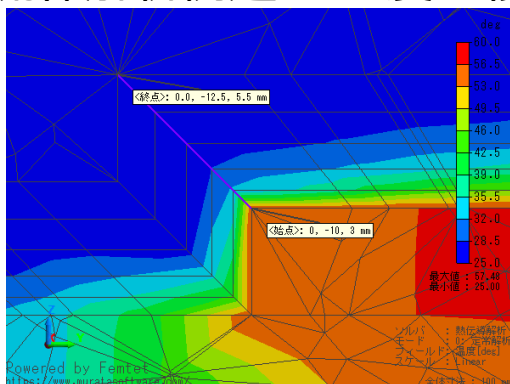


2次精度風上差分  
[異常値抑制大]

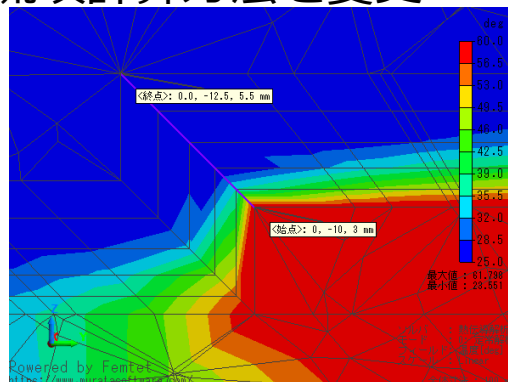


1次精度風上差分の方が発熱体部の温度が低い傾向が見られる。

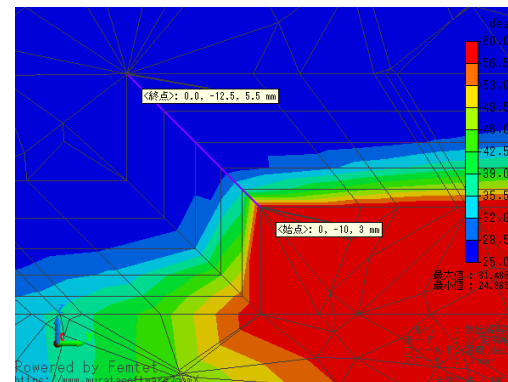
## 熱流体解析例題 3 温度の移流項計算方法を変更



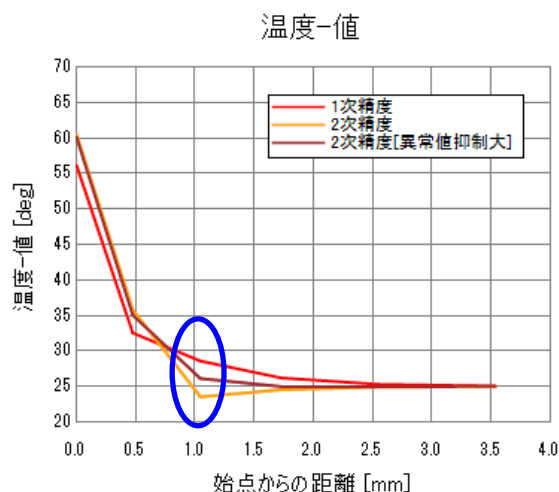
1次精度風上差分



2次精度風上差分



2次精度風上差分  
[異常値抑制大]



発熱体と25℃の空気の計算なので、25℃以下の温度にならないはずだが、  
2次精度風上差分では局所的なアンダーシュートが発生する箇所が見られる。  
「異常値抑制大」を使用した場合アンダーシュートが抑制される。

## 6. 壁面近傍のメッシュ設定

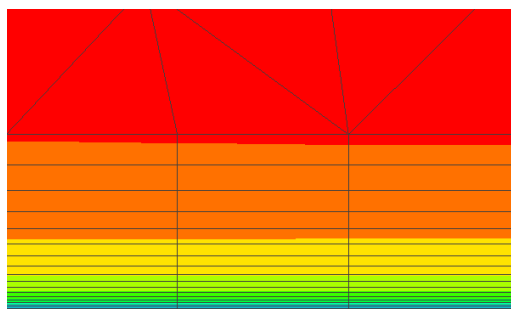
同様の内容がヘルプ

[ホーム](#) / [テクニカルノート](#) / [流体解析](#) / [熱流体解析](#) / [壁面近傍のメッシュ設定](#)

にも記載されています。

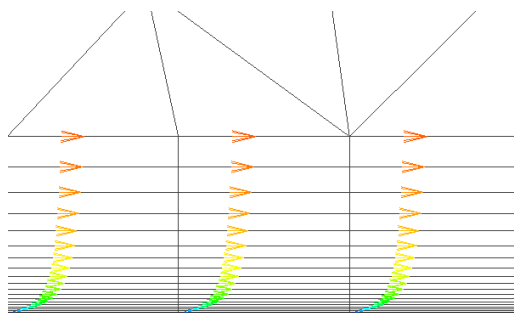
## 6. 1 壁関数

## 壁面近傍の流速分布の例



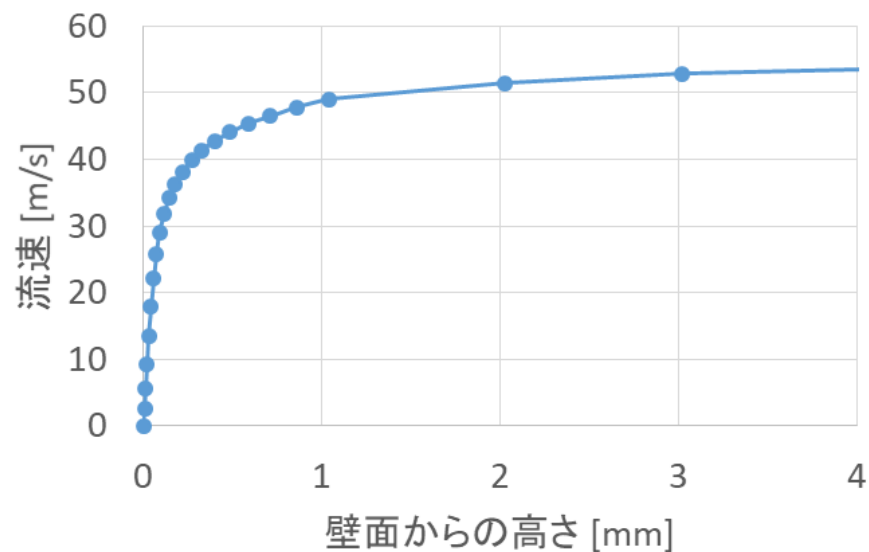
Powered by Femtet  
<https://www.muratasoftware.com/>

コンタ図



Powered by Femtet  
<https://www.muratasoftware.com/>

ベクトル図



### <強制対流の場合の壁面近傍の流速分布の特徴>

- 流速ベクトルは壁面に沿った方向  
(流体が壁に沿って移動する)
- 壁面からの高さで大きく流速分布が変化する

壁面からの高さや流速には法則性があります。

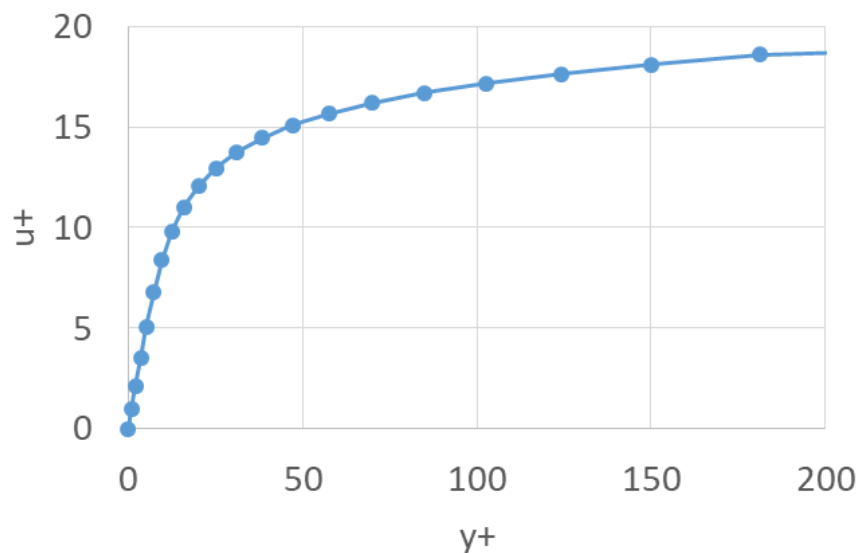
以下のように、無次元高さ $y^+$ 、無次元速度 $u^+$ を定義すると、 $u^+$ と $y^+$ は一定の関係があります。これを壁関数と呼びます。

無次元高さ

$$y^+ = \frac{u_w y}{\nu}$$

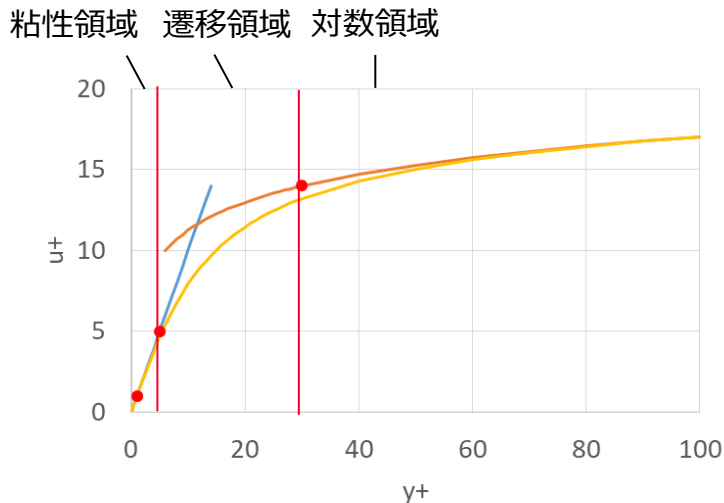
無次元流速

$$u^+ = \frac{u}{u_w}$$



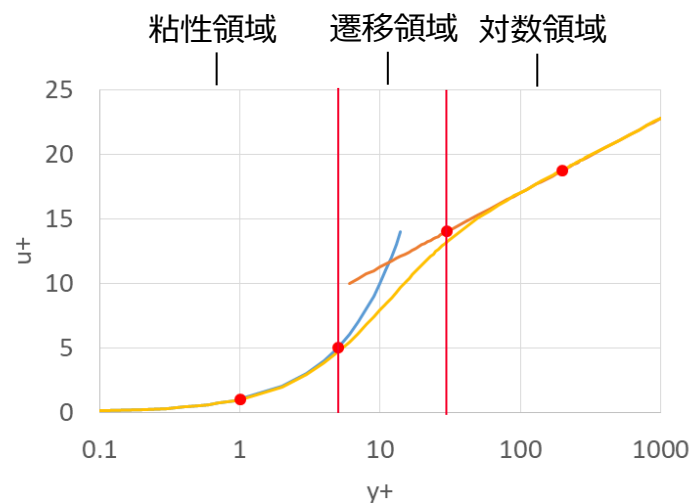
一般的な性質（壁関数）

| 変数            | 説明      |
|---------------|---------|
| $y[m]$        | 壁面からの高さ |
| $u_w [m/s]$   | 摩擦速度    |
| $\nu [m^2/s]$ | 動粘度     |
| $u[m/s]$      | 流速      |



— 粘性領域 — 対数領域 •  $y^+$ 範囲 — 平滑化

線形プロット



— 粘性領域 — 対数領域 •  $y^+$ 範囲 — 平滑化

対数プロット

| 変数                                 | 説明                                    |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| $u^+ = y^+$                        | 無次元速度(粘性領域)<br>$y^+ \leq 5$           |
| $u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+)$ | 無次元速度(対数領域)<br>$30 \leq y^+ \leq 200$ |

| 定数             | 説明            |
|----------------|---------------|
| $E = 9.0$      | モデル定数         |
| $\kappa = 0.4$ | モデル定数(カルマン定数) |

$y^+ < 5$ の領域は、粘性領域と呼ばれ、 $y^+$ と $u^+$ は比例します。  
 $y^+ > 30$ の領域は対数領域と呼ばれ、 $y^+$ の対数と $u^+$ は比例します。

壁面からの高さや温度にも法則性があります。

以下のように、無次元高さ $y^+$ 、無次元温度 $T^+$ を定義すると、 $T^+$ と $y^+$ は一定の関係があります。

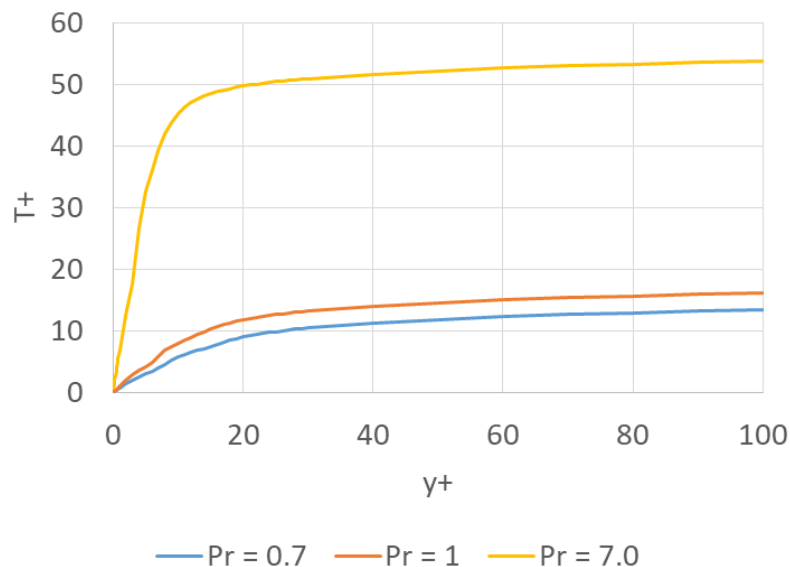
無次元高さ

$$y^+ = \frac{u_w y}{\nu}$$

無次元温度

$$T^+ = \frac{\rho C_p u_w \Delta T}{q_w}$$

| 変数               | 説明      |
|------------------|---------|
| $\Delta T [deg]$ | 壁面との温度差 |
| $q_w [W/m^2]$    | 壁面熱流束   |
| $\rho [kg/m^3]$  | 密度      |
| $C_p [J/kg/deg]$ | 比熱      |



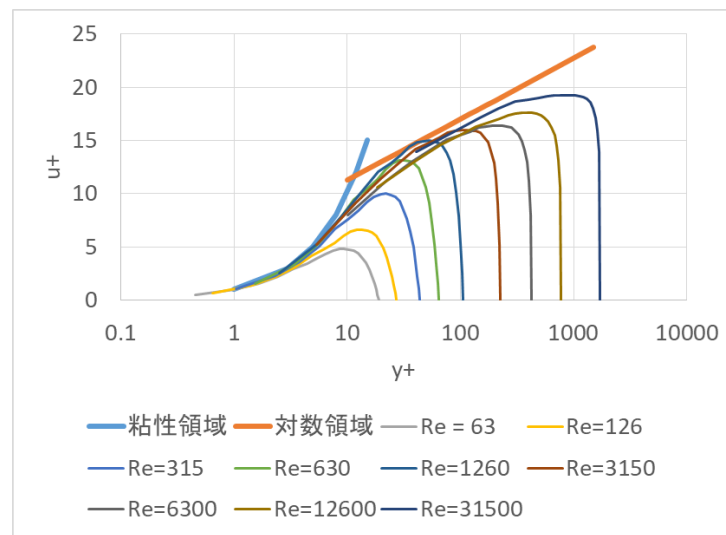
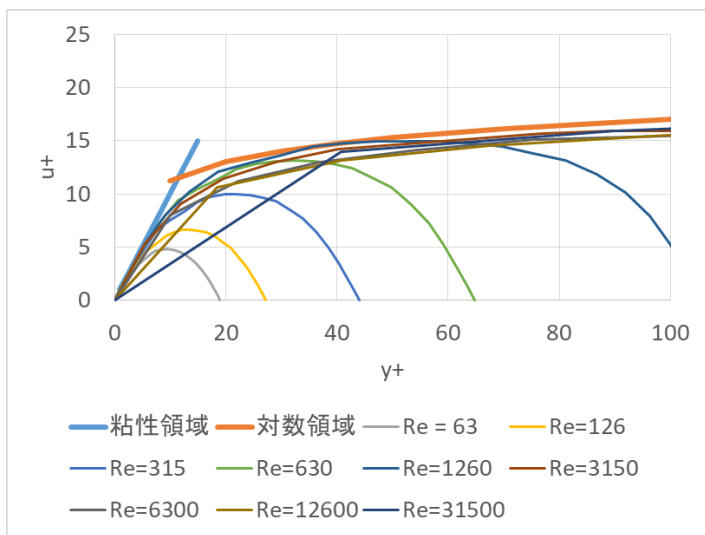
材料（プラントル数 $Pr$ ）によって異なります。

空気： $Pr \sim 0.7$

水： $Pr \sim 7$

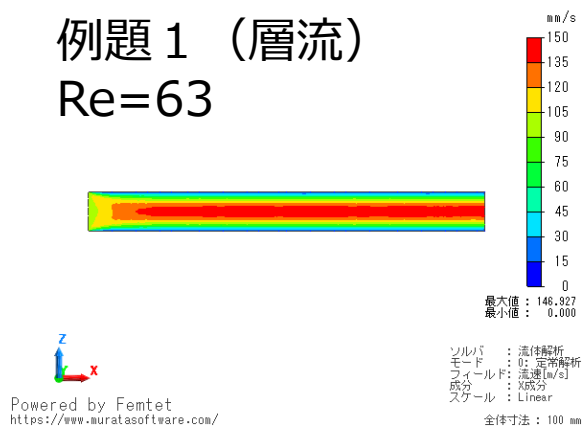


# 壁関数の適用範囲



レイノルズ数が低いほど対数領域がなくなっていく。  
 レイノルズ数1260程度までは粘性によって分布が決まる。

例題 1 (層流)  
 Re=63



例題 2 (乱流)  
 Re=31800



## 6. 2 粘性領域の最適なメッシュ

## 材料空気の場合

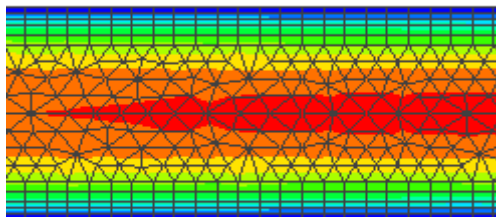
| 流速[m/s] | 流路幅[mm] | レイノルズ数 |
|---------|---------|--------|
| 1       | 1       | 63     |
| 1       | 5       | 315    |
| 1       | 10      | 630    |
| 10      | 1       | 630    |
| 10      | 5       | 3150   |
| 10      | 10      | 6300   |

例えば、スリット幅 5mm のヒートシンクに1m/sの流速を与えた場合、レイノルズ数315であり、粘性によって分布が決まる。

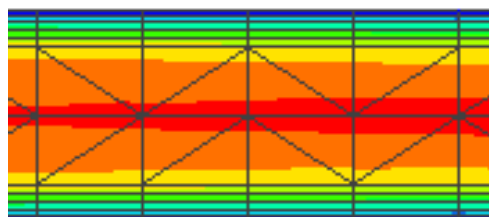
粘性によって分布が決まる場合、流路幅に対して、放物線状の分布を再現できるメッシュ状態になっている必要がある。

(積層メッシュ、通常メッシュ含めて、均等に3~4メッシュ程度)

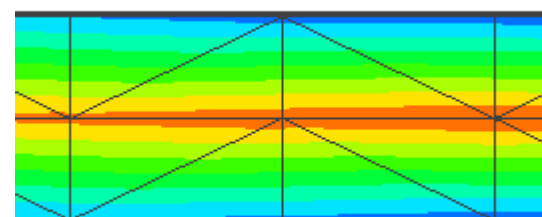
メッシュサイズ小



メッシュサイズ大

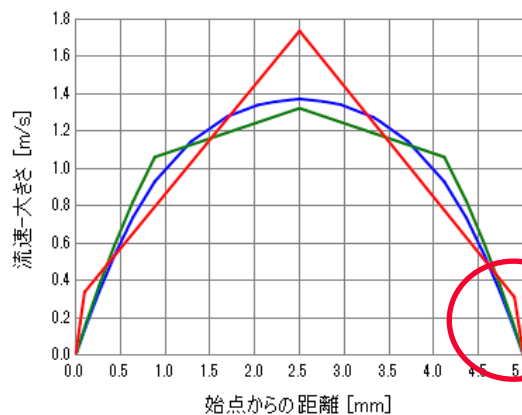


メッシュサイズ大  
積層メッシュ薄い



— メッシュサイズ小  
— メッシュサイズ大  
— メッシュサイズ大、積層メッシュ薄い

流速-大きさ



積層メッシュで流路内が均等に近い状態で分割されていると、精度を保つことができるが、積層メッシュが薄すぎると精度が落ちる。

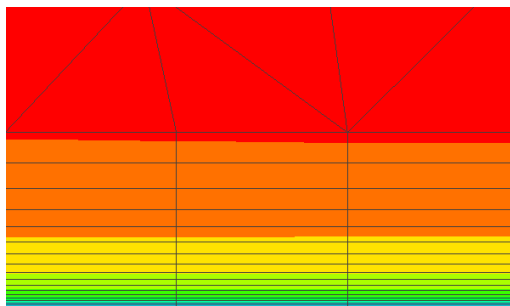
壁面付近の傾きが正しく計算できていることが重要

## 6. 3 壁関数対数領域に基づく最適なメッシュ

# 最適な積層メッシュの二つの考え方

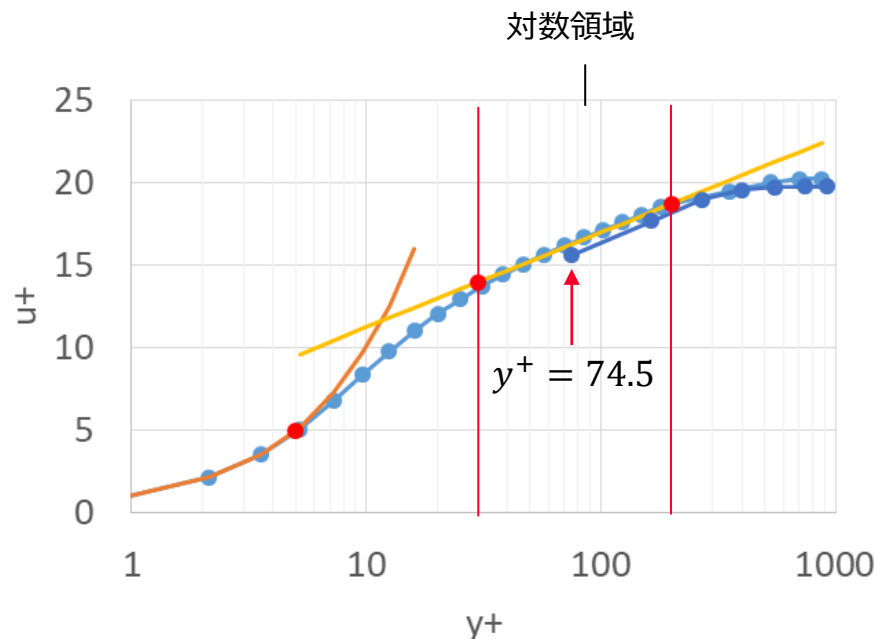
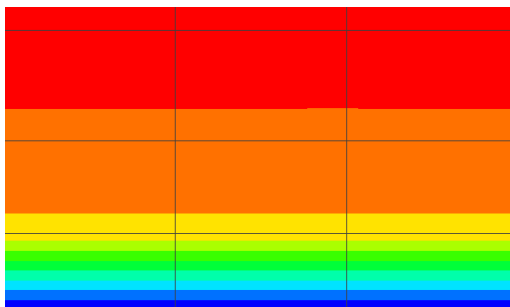
① 壁面近傍の流速分布がなめらかになるように、十分に細かくなっていること

➡ 壁面近傍を正確に計算する




② 第1層を壁関数の対数領域に配置すること(乱流解析のみ)

➡ 壁関数を使った近似処理が行われる



①壁面近傍の流速分布がなめらかになるように、十分に細かくなっていること

- ・第1層目が $y^+ = 1 \sim 5$ 程度
- ・変化の大きい $y^+ = 200$ 程度まで、積層メッシュ領域になっていることを推奨します。目安を以下に示します。

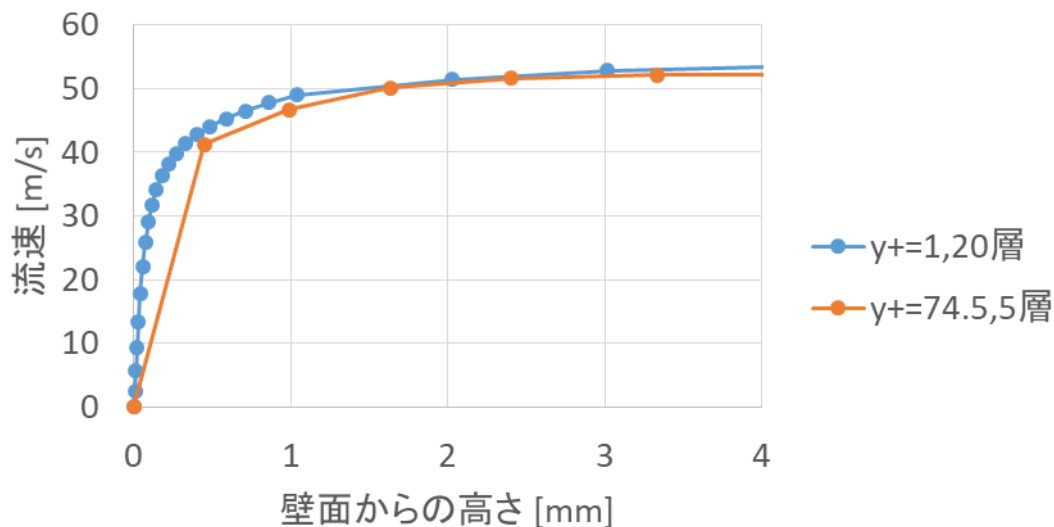
$$y_n^+ = \frac{r^n - 1}{r - 1} y_1^+$$


| 第1層設定目標   | 設定例                              | 解説   |
|-----------|----------------------------------|--|
| $y^+ = 1$ | 第1層メッシュ高さ指定<br>成長率：1.2<br>積層数：20 | 1層目が $y^+ = 1$ のとき、 $y^+ = 186$ まで積層メッシュ領域 |
| $y^+ = 5$ | 第1層メッシュ高さ指定<br>成長率：1.2<br>積層数：12 | 1層目が $y^+ = 5$ のとき、 $y^+ = 197$ まで積層メッシュ領域 |

②第1層を壁関数の対数領域に配置すること(乱流解析のみ)

- ・第1層目の $y^+$ が対数領域( $30 < y^+ < 200$ )の範囲に入っていること

| 第1層設定目標     | 設定例                             | 解説   |
|-------------|---------------------------------|--|
| $y^+ = 100$ | 第1層メッシュ高さ指定<br>成長率：1.2<br>積層数：5 | 1層目が $y^+ = 100$ のとき、 $y^+ = 744$ まで積層メッシュ領域 |



平行平板間の流れ（例題 2）

平行平板間の流れ（例題 2 のモデル）で、二つの最適メッシュで計算した結果を比較した。単純な流れではどちらもほぼ同様の流速分布となることが確認できる。

※壁表面で複雑な流れが生じる場合、②の方法で精度が落ちる場合があるので、求める精度によって使い分ける必要がある。



Femtetでは、流入出面の流速条件に基づいて、自動的に設定します。  
単純な流れを仮定した推定値となります。

層流解析の場合、①の考え方に基づいて第1層 $y^+ = 5$ を目標として生成します。

| 第1層設定目標   | 設定                               | 解説  |
|-----------|----------------------------------|---|
| $y^+ = 5$ | 第1層メッシュ高さ指定<br>成長率：1.2<br>積層数：12 | 1層目が $y^+ = 5$ のとき、<br>$y^+ = 197$ まで積層メッシュ領域 |

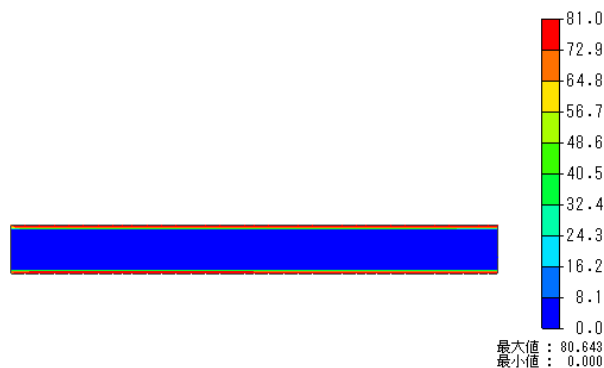
乱流解析の場合、②の考え方に基づいて第1層 $y^+ = 100$ を目標として生成します。

| 第1層設定目標     | 設定                              | 解説  |
|-------------|---------------------------------|---|
| $y^+ = 100$ | 第1層メッシュ高さ指定<br>成長率：1.2<br>積層数：5 | 1層目が $y^+ = 100$ のとき、<br>$y^+ = 744$ まで積層メッシュ領域 |

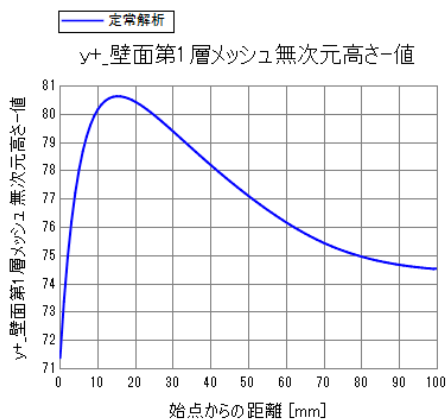
層流解析と乱流解析で目標 $y^+$ が異なるため、異なるメッシュが生成されます。目標 $y^+$ を変更することで、層流と乱流同じメッシュを生成することができます。



適切なメッシュ高さになっているかどうかは、 $y^+$  (壁面第1層メッシュ高さ) の出力を目安にします。  
 コンタ図での表示とテーブル値での境界条件毎の分布に対応しています。



## $y^+$ コンタ図



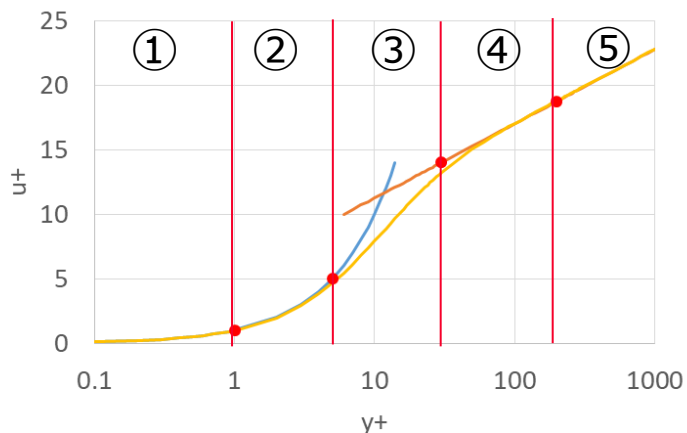
## 辺のグラフ表示

| 収束状況 | 有限要素法情報 | 壁面力[N] | 体積流量[m3/s] | y+値    | y+分布[%] | 第1層メッシュ高さ[mm] | 圧力損失[Pa] |
|------|---------|--------|------------|--------|---------|---------------|----------|
|      |         |        |            | 外部境界条件 | 1.059   |               |          |

## テーブル値 $y^+$ 値

| 収束状況 | 有限要素法情報 | 壁面力[N] | 体積流量[m3/s] | y+値    | y+分布[%] | 第1層メッシュ高さ[mm] |            |        |   |
|------|---------|--------|------------|--------|---------|---------------|------------|--------|---|
|      |         |        |            | y+<1   | 1<=y+<5 | 5<=y+<30      | 30<=y+<200 | 200<y+ |   |
|      |         |        |            | 外部境界条件 | 53      | 46            | 0          | 0      | 0 |

## テーブル値 $y^+$ 分布



- ①  $y^+ < 1$
- ②  $1 \leq y^+ < 5$
- ③  $5 \leq y^+ < 30$
- ④  $30 \leq y^+ < 200$
- ⑤  $200 \leq y^+$

壁面近傍のメッシュを細かくして解析したい場合、ほとんどの $y^+$ が①②の範囲に入っていれば妥当なメッシュ設定と言える。

注) 積層数、成長率が妥当かどうかは分からない

— 粘性領域 — 対数領域 ●  $y^+$ 範囲 — 平滑化

## テーブル値 $y^+$ 分布

境界の全節点の $y^+$ を集計し、5つの領域の存在割合を出力しています。

壁面近傍のメッシュを細かくして解析したい場合、ほとんどの $y^+$ が①②の範囲に入っていれば妥当なメッシュ設定と言える。

注) 積層数、成長率が妥当かどうかは分からない

壁面第1層を対数領域に配置して解析する場合、ほとんどの $y^+$ が④の範囲に入っていれば妥当なメッシュ設定と言える。

# 推奨第1層メッシュ高さ

$y^+ < 1$ 、 $y^+ < 5$ 、 $y^+ < 200$  にするための推奨値がテーブル値として出力されます。一度解析を行った後、推奨値に応じた積層メッシュ設定を行い、再度解析することで精度を向上させることができます。

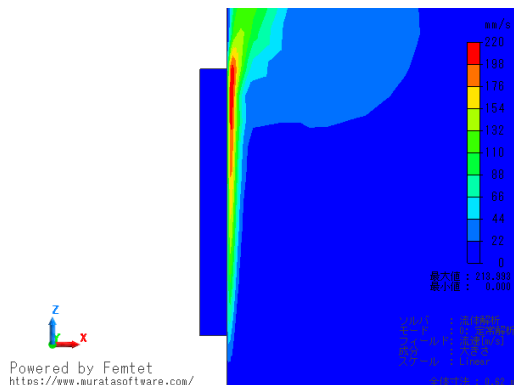
| 収束状況   | 有限要素法情報 | 壁面力[N]           | 体積流量[m3/s]       | $y^+$ 分布[%]        | 第1層メッシュ高さ[mm] |
|--------|---------|------------------|------------------|--------------------|---------------|
|        | 平均値     |                  |                  |                    |               |
| 外部境界条件 | 0.418   | 推奨値( $y^+ < 1$ ) | 推奨値( $y^+ < 5$ ) | 推奨値( $y^+ < 200$ ) |               |
|        |         | 5.555e-3         | 2.777e-2         | 1.111              |               |

壁面近傍のメッシュを細かくして解析したい場合、 $y^+ < 1$ 、 $y^+ < 5$ の推奨値を使用して、第1層メッシュ高さを設定します。  
成長率や積層数も意識して設定する必要があります。

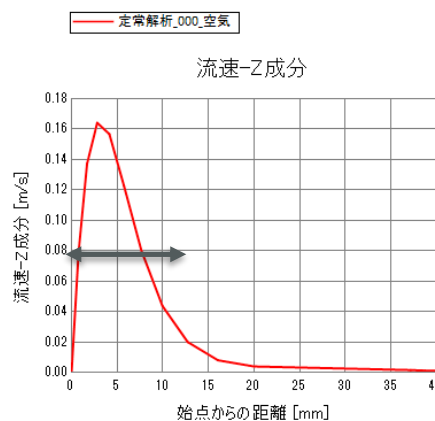
壁面第1層を対数領域に配置して解析する場合、 $y^+ < 200$ の推奨値を使用して、第1層メッシュ高さを設定します。

## 6. 4 自然対流境界層に基づく最適なメッシュ

浮力を考慮する場合、壁面近傍に速度/温度境界層が生成されます。

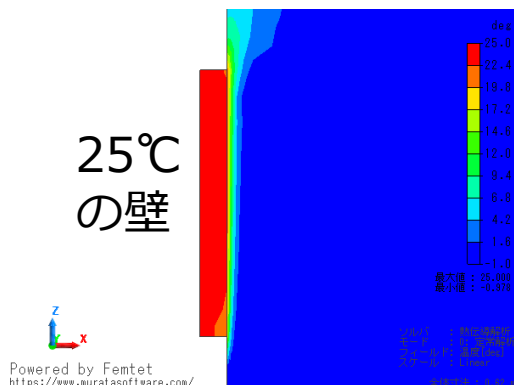


流速分布

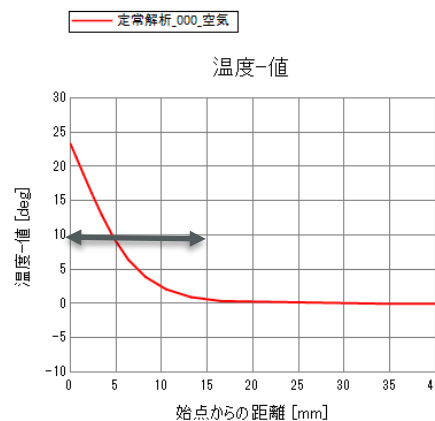


速度境界層

境界層内に流速のピークを持つ



温度分布



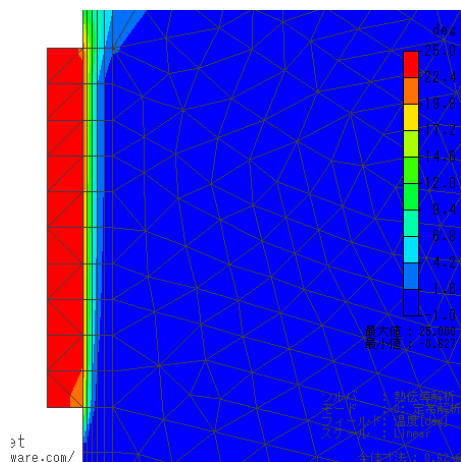
温度境界層

境界層内で急激な温度差が生じる

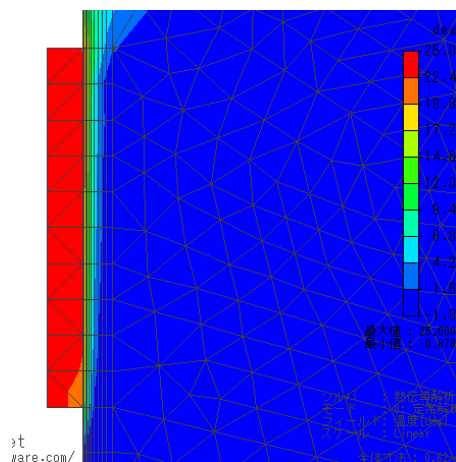
# 積層メッシュ設定例

境界層厚みが分かっている場合、トータルメッシュ高さ指定で境界層厚みを指定し、積層数で分割数を指定します。  
境界層を何分割して解析するかで精度が決まります。

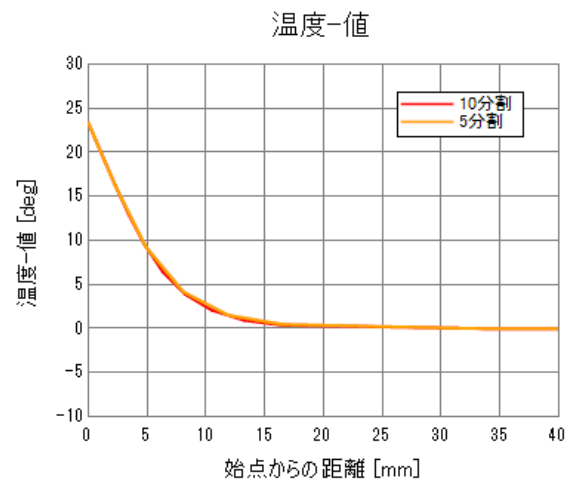
| 設定例  | 解説                |
|--|-------------------|
| トータル高さ指定<br>トータル高さ：境界層厚み<br>成長率：1.2<br>積層数：5 | 境界層を5分割以上になるように設定 |



5分割



10分割

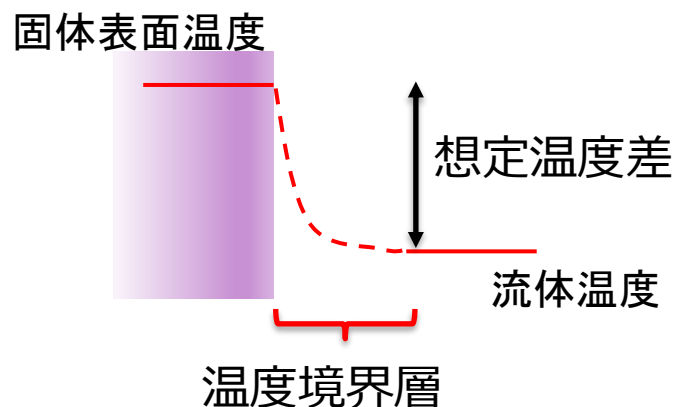


分割数比較

積層メッシュ指定方法「自動」の場合で、強制的に流入、流出させる境界条件がない場合、浮力境界層を想定した積層メッシュを生成します。



固体部の形状と入力した「想定温度差」に基づいて、境界層厚みを予測し、自動的にトータル高さを設定します。



境界層に生じる温度差の予想値を入力してください。


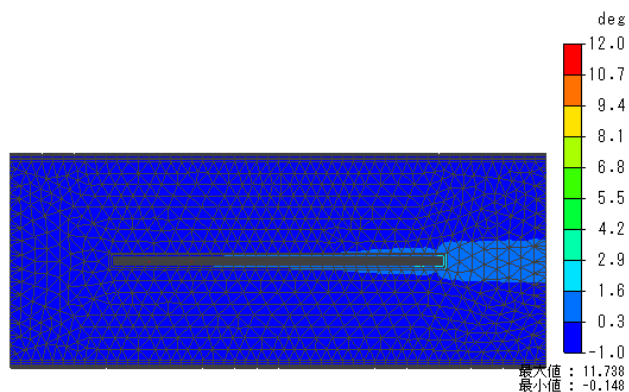
分からなければ一度適当な値を入力して解析し、結果を見て再度設定することで精度を向上させることができます。



## 6. 5積層メッシュの効果


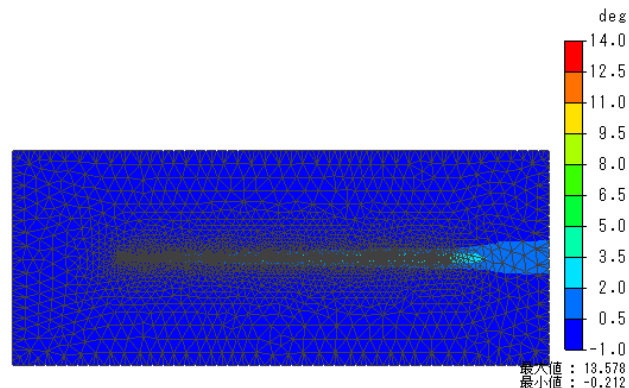
## 熱流体解析例題 2

- ・ 積層メッシュ使用 / 積層メッシュなし で比較



Powered by Femtet  
<https://www.muratasoftware.com/>

### 積層メッシュ使用



Powered by Femtet  
<https://www.muratasoftware.com/>

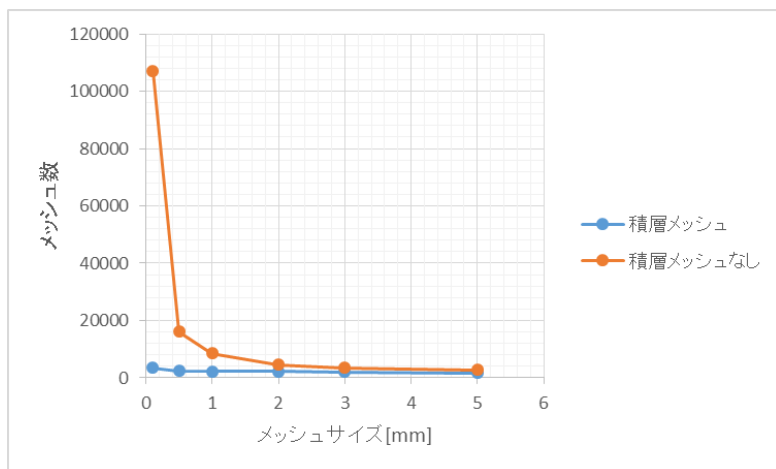
### 積層メッシュなし

積層メッシュ使用 : 第1層メッシュ高さ設定によりメッシュサイズ制御

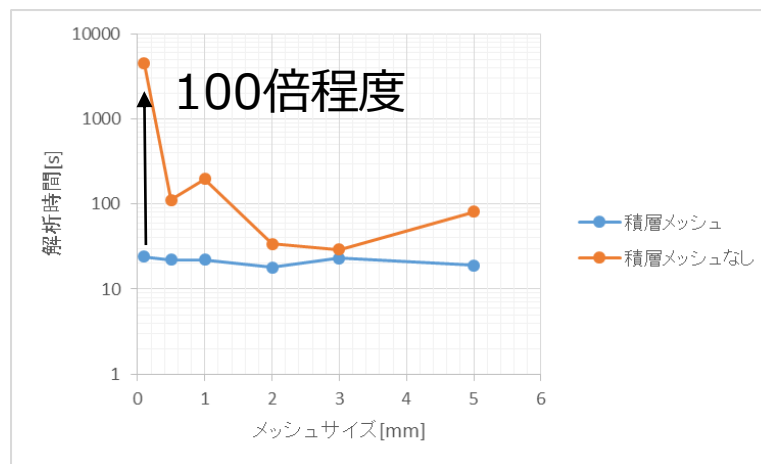
第1層メッシュ高さ : 0.1~5[mm]

積層メッシュなし : 平板部メッシュサイズ設定によりメッシュサイズ制御

平板部メッシュサイズ : 0.1~5[mm]

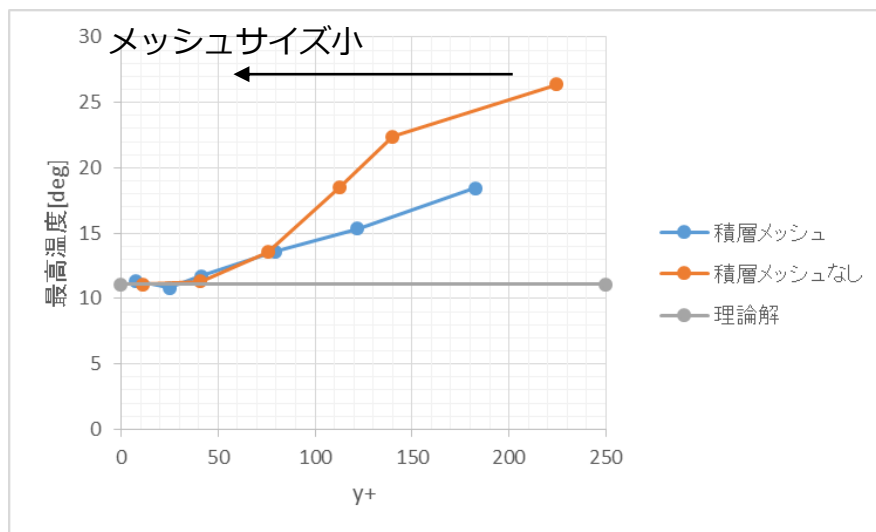


メッシュ数



解析時間

積層メッシュを使用した場合、メッシュサイズを小さくしてもメッシュ数の増加、解析時間の増加を抑制できるが、積層メッシュなしの場合、メッシュサイズを小さくするほどメッシュ数、解析時間が大きくなる。



y+を横軸にして最高温度

y+ < 30以下では理論解付近に収束する。  
 30 < y+ < 200 の壁関数を使用した領域では理論値とのズレが生じる。  
 特に積層メッシュなしでのズレは大きくなる。

## 7. 参考資料

## 7. 1 機能一覧

| 項目      | 機能   |
|---------|--|
| 解析機能    | 定常解析、過渡解析、拡散解析、自由表面解析(VOF法)  |
| 対象とする流れ | 非圧縮性流れ、単相流、気液混相流(表面張力)、強制対流、自然対流*、拡散物質の拡散  |
| 材料      | 密度、粘度、温度依存性(*)   |
| 境界条件    | 固体壁(静止、並進、回転)、スリップ壁、強制流入/強制流出(速度指定、流量指定、圧力指定、ファン、方向指定、任意分布流速、旋回流)、自然流入/自然流出、流入流出ペア、接触角 |
| ボディ属性   | 流体内部流れ指定、多孔質   |
| 主な出力項目  | 流速、圧力、乱流エネルギーK、エネルギー散逸率 $\epsilon$ 、 $y^+$ 、壁面力、体積流量、圧力損失、ファン動作点                       |
| 層流/乱流   | 層流、乱流 (Realizable K- $\epsilon$ モデル)   |
| 解析空間    | 2次元,3次元、軸対称  |
| 解析手法    | 有限体積法<br>定常解析：SIMPLE法<br>過渡解析：PISO法 / SIMPLE法  |
| 移流項計算手法 | 1次精度風上差分/2次精度風上差分  |
| メッシュ    | 1次要素<br>壁表面：積層メッシュ(四角形、三角柱要素)  |

\*温度依存性を使用する場合(自然対流を計算する場合)、熱流体解析となります

| 項目      | 機能   |
|---------|--|
| 解析機能    | 定常解析<br>過渡解析<br>流体定常解析⇒熱伝導過渡解析                                 |
| 対象とする流れ | 非圧縮性流れ、単相流、強制対流、自然対流（浮力考慮）                                     |
| 材料      | 密度、粘度、熱伝導率、密度、比熱、温度依存性   |
| 境界条件    | 固体部：温度、熱流束、熱伝達・対流、輻射、熱抵抗<br>流体部：壁面熱流束、壁面温度、壁面熱伝達・対流、流入流体温度     |
| ボディ属性   | 固体部：発熱源  |
| 主な出力項目  | 温度、熱流束、壁面熱流束、熱収支、熱流量、熱伝達係数                                     |
| 層流/乱流   | 層流、乱流 (Realizable K-εモデル)                                      |
| 解析空間    | 2次元、3次元、軸対称  |
| 解析手法    | 固体部：有限要素法<br>流体部：有限体積法<br>定常解析：SIMPLE法<br>過渡解析：PISO法 / SIMPLE法 |
| 移流項計算手法 | 1次精度風上差分/2次精度風上差分  |
| メッシュ    | 1次要素<br>壁表面：積層メッシュ(四角形、三角柱要素)                                  |



## 7. 2層流解析

変数の定義等、詳細は、ヘルプを参照してください。

[ホーム](#) / [テクニカルノート](#) / [流体解析](#)/[熱流体解析](#) / [流体解析](#)/[熱流体解析](#)で求解している微分方程式

## ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)(\rho\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu\mathbf{s}) + \mathbf{f}$$

加速度項 移流項 粘性拡散項 圧力勾配項 外力項

## 連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

## 熱エネルギー輸送方程式

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)(\rho h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla \theta) + Q$$

蓄熱項 移流項 発熱項 熱伝導拡散項

## スカラー輸送方程式(拡散解析)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)(\phi) = \nabla \cdot (D \nabla \phi) + Q_\phi$$

時間変化項 移流項 拡散項 ソース項

### ・加速度項

流速の時間変化  
定常解析ではゼロ

### ・移流項

流体の流れによって、持っている性質（運動量、熱エネルギー）も移動する

### ・圧力勾配項

不釣り合い力を受けて流体が加速/減速する

### ・粘性拡散項/熱伝導拡散項

速度差、温度差をなくす（均一にする）働きをする

### ・外力項

浮力、重力、表面張力等の外力

### ・連続の式

流量の収支はゼロ  
（入ってきた分は必ず出ていく）

### ・蓄熱項

温度（熱エネルギー）の時間変化  
定常解析ではゼロ

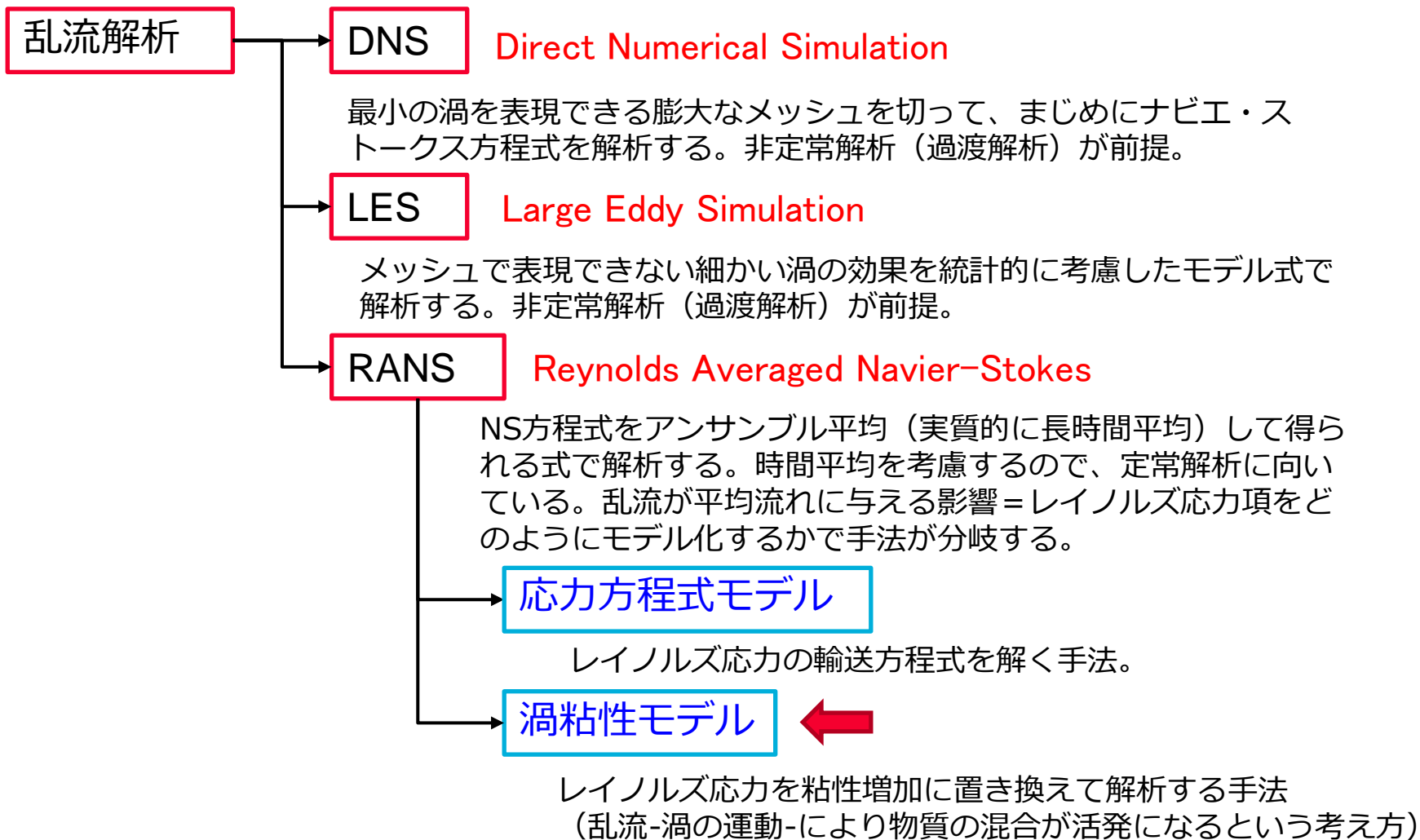
### ・発熱項

なんらかの原因で発熱する（固体部のみ）

## 7. 3 乱流解析

変数の定義等、詳細は、ヘルプを参照してください。

[ホーム](#) / [テクニカルノート](#) / [流体解析](#)/[熱流体解析](#) / [流体解析](#)/[熱流体解析](#)で求解している微分方程式



FemtetはRANS/渦粘性モデルを使用（計算負荷は最も低い）

# レイノルズ平均と渦粘性モデル

## 層流の場合

### ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)(\rho \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \mathbf{s}) + \mathbf{f}_b$$

### 連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

### 熱エネルギー輸送方程式

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)(\rho h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla \theta) + Q$$

### スカラー輸送方程式(拡散解析)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)(\phi) = \nabla \cdot (D \nabla \phi) + Q_\phi$$

### <レイノルズ平均>

流速や圧力、温度といった変数を平均成分と変動成分に分離し、平均量に関する支配方程式に変換する。

### <渦粘性モデル>

乱流の変動成分の効果を粘性、熱伝導率、拡散係数の増加に置き換える。  
(乱流-渦の運動-により物質の混合が活発になる)

- ・ 支配方程式の形は層流の場合とほとんど変わらない
- ・ 乱流粘性係数(渦粘性係数) $\mu_t$ 、乱流熱伝導率 $\lambda_t$ 、乱流拡散係数 $D_t$ を求める必要がある

## 乱流の場合

### レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla)(\rho \mathbf{U}) = -\nabla P + \nabla \cdot (2(\mu + \mu_t) \mathbf{S}) + \mathbf{F}$$

渦粘性モデル  
乱流の状態に応じて  
粘度が増加

### レイノルズ平均連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

### レイノルズ平均熱エネルギー輸送方程式

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla)(\rho H) = \nabla \cdot ((\lambda + \lambda_t) \nabla T) + Q$$

渦粘性モデル  
乱流の状態に応じて  
熱伝導率が増加

### レイノルズ平均スカラー輸送方程式(拡散解析)

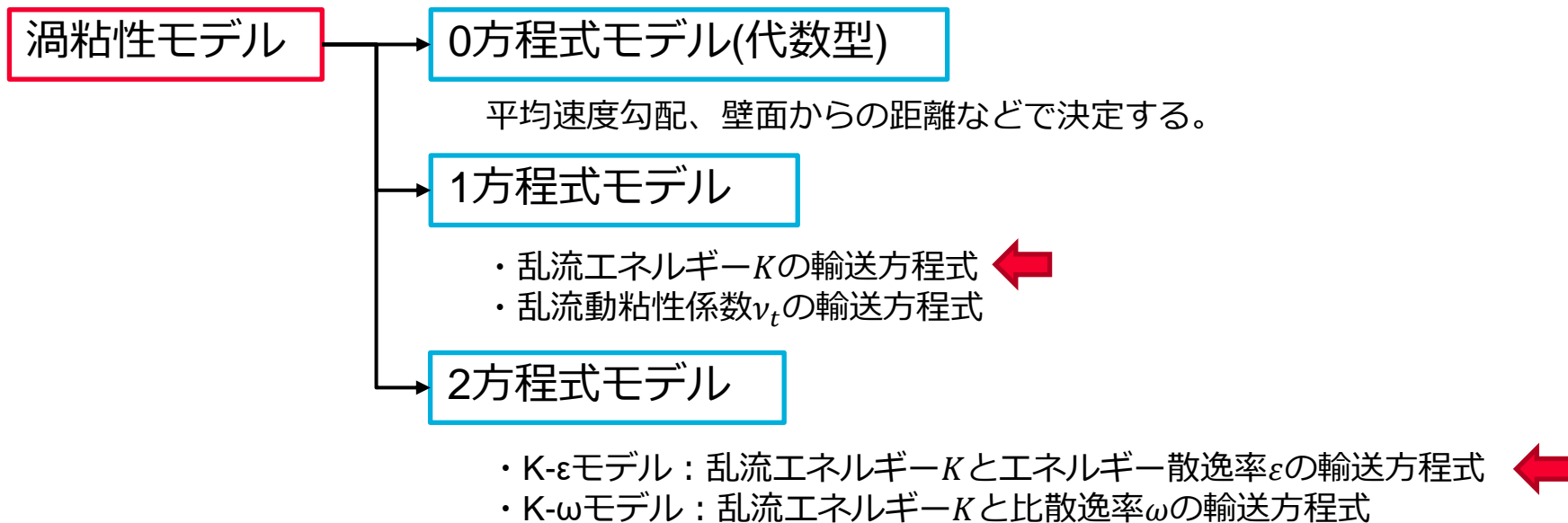
$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla)(\Phi) = \nabla \cdot ((D + D_t) \nabla \Phi) + Q_\phi$$

渦粘性モデル  
乱流の状態に応じて  
拡散係数が増加

レイノルズ平均



乱流動粘性係数（渦動粘性係数） $\nu_t$ の求め方でさらにいくつかのモデルが存在する。新たに追加する方程式の数で分類される。



Femtetは1方程式モデルと2方程式モデルのハイブリッド

解析領域を二層に分離 { 壁面近傍領域⇒1方程式モデル (Wolfshteinの1方程式モデル)  
完全乱流領域⇒2方程式モデル (Realizable  $K$ - $\epsilon$ モデル)

- ・ 壁面近傍のメッシュ高さを小さく設定することで、壁面近傍の流れを詳細に解くことができる。
- ・ 乱流モデルを切り替える必要がない。
- ・ 壁面近傍のメッシュ高さによる結果変動が最小限に抑えられる。

# 乱流粘性係数の計算（完全乱流領域） Murata Software

K-εモデルの中でも、様々なモデルが存在するが、Femtetでは「Realizable K-εモデル」を採用している。

Realizable K-εモデル：

Kやεが負にならない等の実現性(realizability)の制約を課したモデル。  
複雑な流れに対しても精度が良い。

乱流エネルギー輸送方程式

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla)(\rho K) = \rho G + \rho G_b - \rho \varepsilon + \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \nabla K \right)$$

エネルギー散逸率輸送方程式

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla)(\rho \varepsilon) = C_{\varepsilon 1} \rho S \varepsilon - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{K + \sqrt{\nu \varepsilon}} + \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right)$$

モデル変数

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* \frac{K}{\varepsilon}}$$

乱流動粘性係数

$$\nu_t = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} [m^2/s]$$

乱流熱伝導率  
(乱流動粘性係数に比例)

$$\lambda_t = \frac{\rho C_p \nu_t}{Pr_t} [W/m/deg]$$

乱流拡散率  
(乱流動粘性係数に比例)

$$D_t = \frac{\nu_t}{Sc_t} [m^2/s]$$

乱流エネルギーK、エネルギー散逸率ε、エネルギー生成率G、乱流粘性係数(ρν<sub>t</sub>)、乱流粘性比ν<sub>t</sub>/ν、乱流熱伝導率λ<sub>t</sub>、乱流拡散係数D<sub>t</sub>は結果表示可能

# 乱流粘性係数の計算 (壁面近傍領域) Murata Software

## 『Wolfshteinの1方程式モデル』

壁面近傍の乱流粘性係数を求めるために、乱流エネルギー $K$ の輸送方程式を解く。

乱流動粘性係数 $\nu_{t_{near\_wall}}$ とエネルギー散逸率 $\varepsilon_{near\_wall}$ は $K$ と壁面からの高さ $y$ に応じた式を用いる。

壁面近傍かどうかの判定は、壁面レイノルズ数 $Re_y$ を使用する。 $(Re_y < 200)$

壁面レイノルズ数

$$Re_y = \frac{\sqrt{K}y}{\nu}$$

壁面からの高さ

$y[m]$

乱流エネルギー輸送方程式

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla)(\rho K) = \rho G + \rho G_b - \rho \varepsilon + \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \nabla K \right)$$

乱流動粘性係数

$$\nu_{t_{near\_wall}} = C_{\mu}^{1/4} \sqrt{K} l_{\nu} [m^2/s]$$

乱流熱伝導率

(乱流動粘性係数に比例)

$$\lambda_{t_{near\_wall}} = \frac{\rho C_p \nu_{t_{near\_wall}}}{Pr_t} [W/m/deg]$$

乱流拡散係数

(乱流動粘性係数に比例)

$$D_{t_{near\_wall}} = \frac{\nu_{t_{near\_wall}}}{Sc_t} [W/m/deg]$$

エネルギー散逸率

$$\varepsilon_{near\_wall} = C_{\mu}^{3/4} \frac{K^{3/2}}{l_{\varepsilon}} [m^2/s^3]$$

壁面からの高さ、壁面レイノルズ数、壁面近傍層 ( $Re_y < 200$ ) 分布は結果表示可能



## 7. 4 自由表面解析(VOF法)

変数の定義等、詳細は、ヘルプを参照してください。

[ホーム](#) / [テクニカルノート](#) / [流体解析/熱流体解析](#) / [流体解析/熱流体解析](#)で求解している微分方程式

## 体積分率移流方程式

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \alpha_i) = 0$$

時間変化項      移流項

$\alpha_i$ :  $i$ 番目の相の体積分率

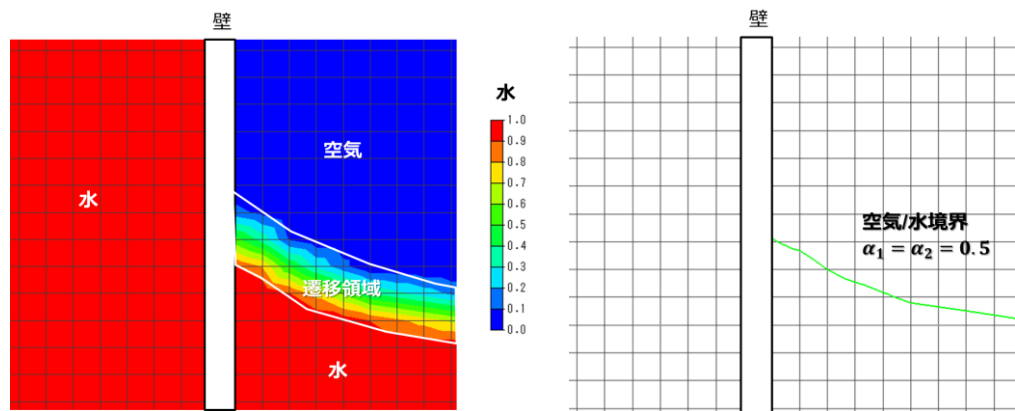
$$\sum_i^n \alpha_i = 1$$

## ・時間変化項

体積分率の時間変化

## ・移流項

流体の流れによって、体積分率（異相界面）が移動する



$0 < \alpha < 1$ の遷移領域に相境界となる

## 平均物性

層流/乱流の流れの解析は以下の平均物性を使用して計算する

$$\bar{\rho} = \sum_i^n \alpha_i \rho_i$$

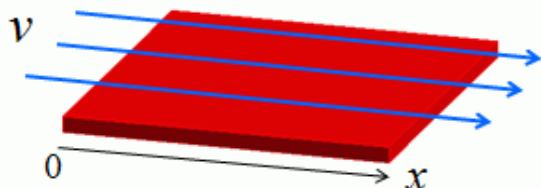
$$\bar{\mu} = \sum_i^n \alpha_i \mu_i$$

$$\bar{\lambda} = \sum_i^n \alpha_i \lambda_i$$

$$\overline{\rho C_P} = \sum_i^n \alpha_i \rho_i C_{P_i}$$

## 7. 5 簡易熱流体解析

平板を仮定した熱伝達係数を計算して固体表面に与えます。



$v$  : 簡易流体解析で求めた、固体表面上の流速  
 $x$  : 簡易流体解析結果から求めた経路長

経路長が大きい（風上側の点から遠い）ほど熱伝達係数が低くなります。

$$h = 1.93\sqrt{v/x}$$

## <特徴>

平板形状に近い場合、かつ平板温度が一定に近い場合に効果を発揮する。  
周囲が広い空間であることが前提。  
流体に粘性がないことが前提。  
層流であることが前提。

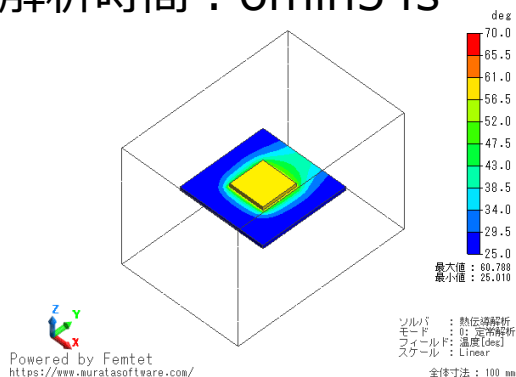
流体部の温度は一定温度と仮定（主流温度として与える）  
熱流体解析と比べて計算が軽い（10倍以上）

## <精度が悪くなる例>

- ・凹凸のある形状の場合
- ・ヒートシンクのような狭い流路が存在するケース
- ・流速が大きい場合

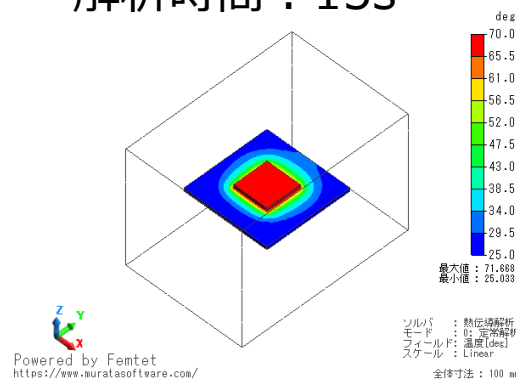
## 熱流体解析 解析時間：6min54s

温度分布



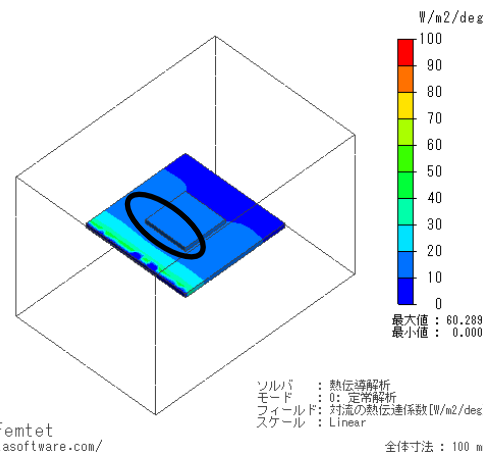
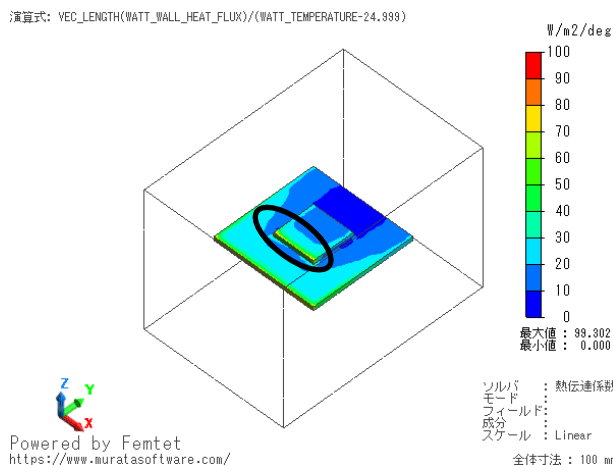
最大温度：60.7℃

## 簡易熱流体解析 解析時間：15s



最大温度：71.6℃

熱伝達係数  
分布

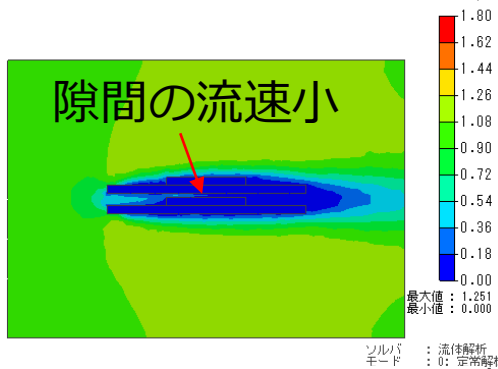


凹凸による熱伝達係数上昇の効果が考慮されないため、温度が高く見積もられる。

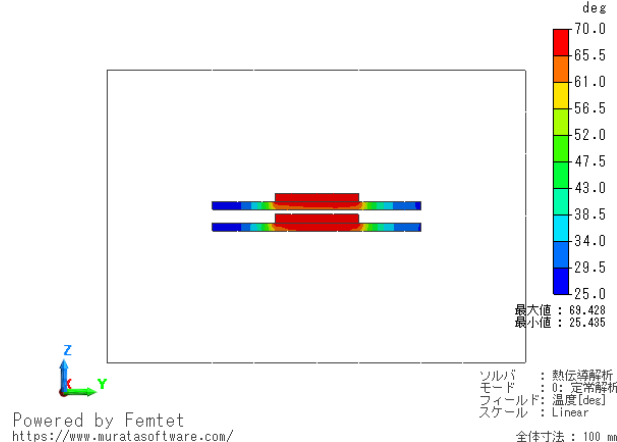
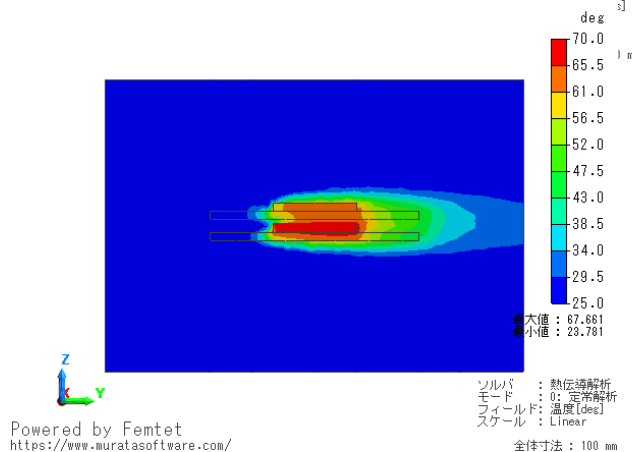
二つの基板が近距離で並んでいる（狭い流路が存在する）ケース  
 熱流体解析  
 解析時間：7min05s

簡易熱流体解析  
 解析時間：15s

流速分布



温度分布



## 7. 7 材料定数(補足)

## 密度の温度依存性指定方法

### ・体膨張係数指定

密度は、環境温度との温度差と、体膨張係数に比例して変化します。

$$\rho = \rho_{ref} (1 - \beta(T - T_{ref}))$$

$$f_b = (\rho - \rho_{ref})g = -\rho_{ref}\beta(T - T_{ref})g$$

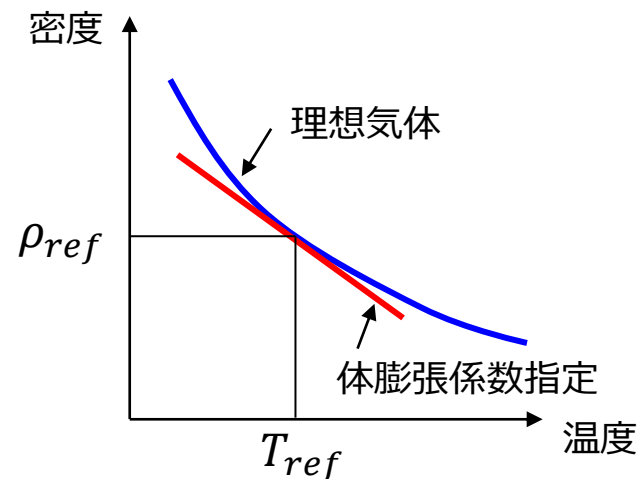
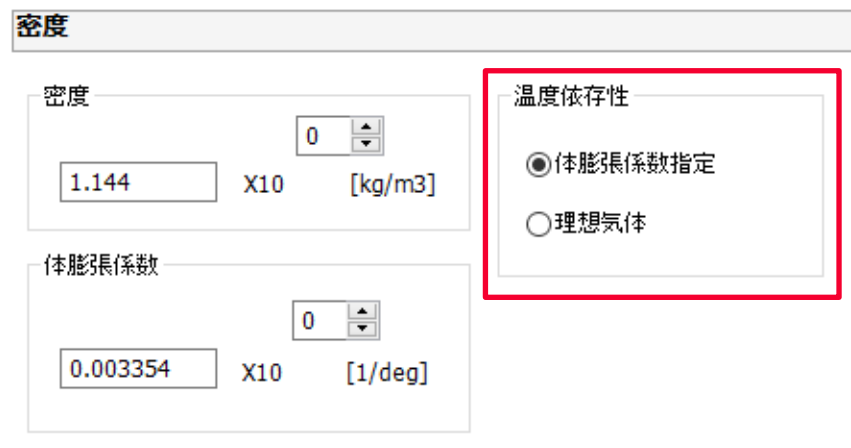
### ・理想気体

圧力一定を仮定した状態方程式により、密度を計算します。

$$\rho = \rho_{ref} T_{ref} \frac{1}{T}$$

$$f_b = (\rho - \rho_{ref})g = -\rho_{ref} \frac{1}{T} (T - T_{ref})g$$

- ・密度の温度依存性は、浮力の計算のみに反映されます。
- ・密度値は解析条件で設定した環境温度における値を設定してください。
- ・気体材料で温度差が大きい場合、理想気体を推奨します。



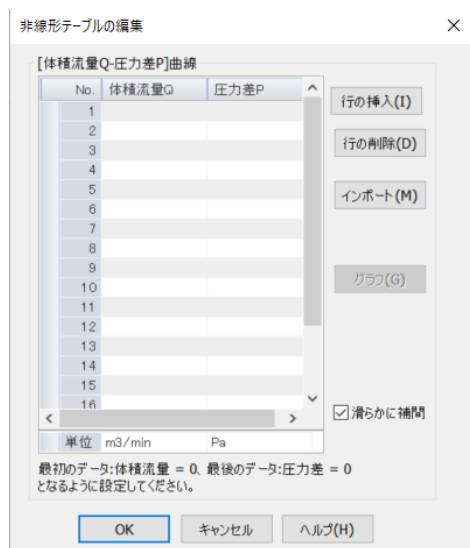
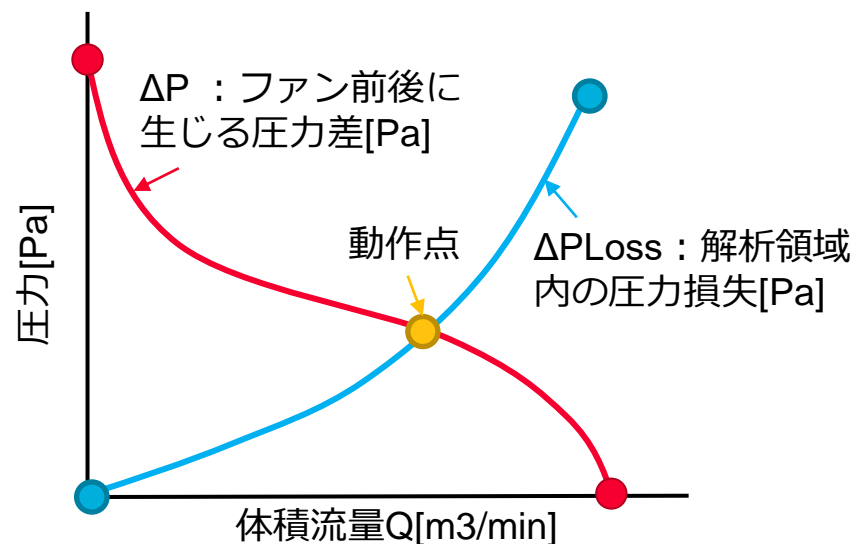


## 7. 8 境界条件(補足)

## ファン条件 (P-Q特性)

解析領域の圧力損失（流体の流れにくさ）に応じて、流量Qとファン前後に生じる圧力差P（動作点）が変動する。

ファンのカタログなどに記載されているファンの特性を示すP-Q特性を入力して、解析を行う。



## 旋回成分を加える場合

ファンの回転数とスリップファクターを入力します。回転数の一部を流速の旋回成分として与えます。

軸流ファンの旋回考慮

回転数  [RPM]

スリップファクター  [%]

$$V_{\theta}(r) = \left\{ \frac{2\pi r}{60} \times RPM \right\} \times SlipFactor$$

## 流入流出ペア

**熱流体**

境界条件の種類

固体壁     流入     流入流出ペア

スリップ壁     流出     設定なし

流入/流出

流入面/流出面

流入

流出

流速

0 [m/s]     時間依存

0.1 X10 [m/s]    重み関数

流入流出ペアの種類

流速指定

流量指定

ファン

流入する流体の状態

流入する流体の乱流エネルギー、エネルギー散逸率、温度は流出面から流出した流体の状態が反映されます。



流入 / 流出に設定した箇所の流量、温度が一致するように解析します。  
循環を想定した解析を行うことができます。  
流入、流出の境界条件に加えて、流入流出ペア設定が必要です。

# 乱流流入量の設定

流入、流入/流出を指定した場合、流入してくる流体の状態を設定します。  
乱流エネルギー、エネルギー散逸率の状態を指定します。

流入する流体の状態

K\_乱流エネルギー  
自動計算 ▾

$\epsilon$ \_エネルギー散逸率  
自動計算 ▾

K\_乱流エネルギー

自動計算  
乱流強度  
直接指定

$\epsilon$ \_エネルギー散逸率

自動計算  
混合長  
水力直径  
乱流粘性比  
直接指定

<流入K、 $\epsilon$ の目安>

弱い乱流（外部流れ等）

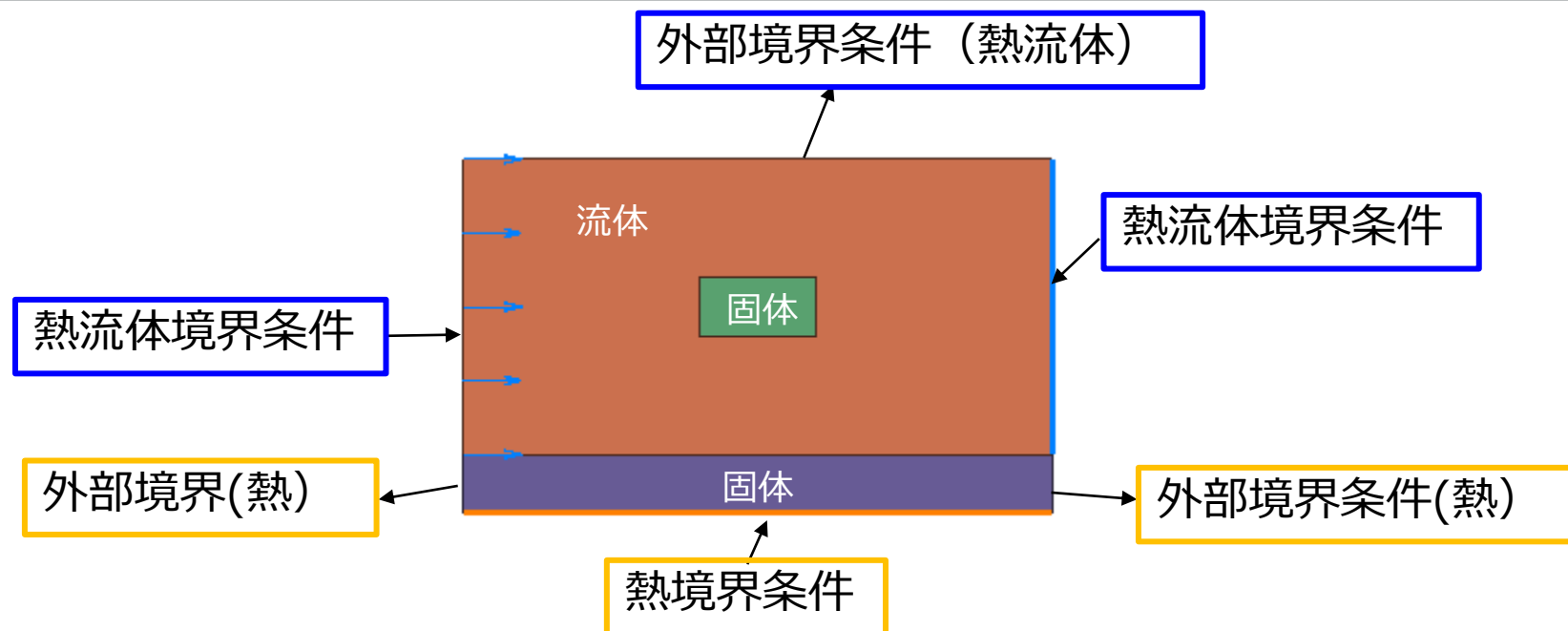
- K 乱流強度 = 1[%]
- $\epsilon$  乱流粘性比 = 1

発達した強い乱流（内部流れ等）

- K 乱流強度 = 5[%]
- $\epsilon$  水力直径(流路断面を円形とみなした時の直径)

自動計算では上記の設定を行います。  
流入境界周囲が固体壁の場合後者の値を使用します。

様々な設定方法が用意されていますが、文献等の知見がない場合、自動計算が良いと思います。



- 流体表面には「熱流体」タブで設定を行う  
(設定されていない流体表面は外部境界条件「熱流体タブ」の設定が反映される)
- 固体表面には「熱」タブで設定を行う  
(設定されていない固体表面は外部境界条件「熱タブ」の設定が反映される)
- 固体-流体の境界部の設定は基本的に不要

レイノルズ数:流速 x 代表長さ / 動粘度

$$Re = \frac{UL}{\nu}$$

流速 :  $U[m/s]$

代表長さ (寸法) :  $L[m]$

動粘度 :  $\nu[m^2/s] = \frac{\mu}{\rho}[m^2/s]$

粘度 :  $\mu[Pa \cdot s]$

密度 :  $\rho[kg/m^3]$

レイノルズ数によって流れの性質が決まる。

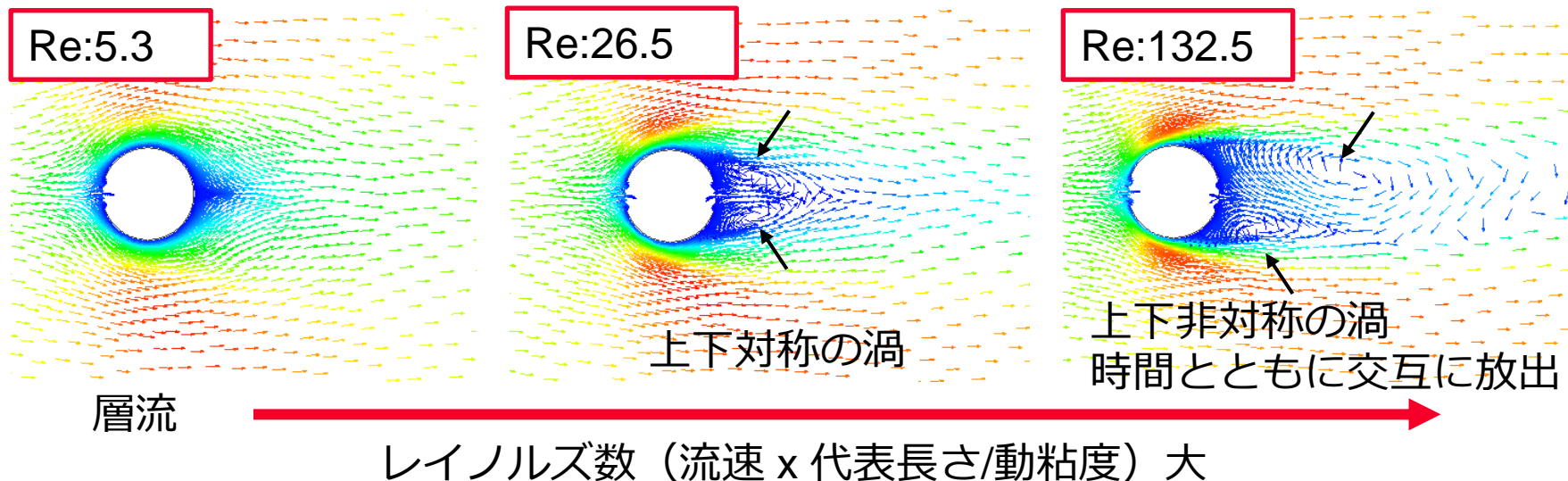
- ・レイノルズ数が等しい流れは、同じ挙動を示す。

例 : 流速を2倍して、代表長さ (寸法) を1/2にした場合同じ流れが生じる。

例 : 動粘度が1/2の材料に変更した場合、流速を1/2にすると同じ流れが生じる。

- ・レイノルズ数は、粘性力と慣性力の比

レイノルズ数が高いほど慣性力が強く、乱流が発生する。



## 乱流の特徴

- ・細かい渦が出来て混ざり合う
- ・時間とともに不規則に変動する

## 乱流状態の計算における問題点

1. 正確に計算するには発生する細かい渦を表現できるだけの細かいメッシュが必要になる
2. 不規則性が強く定常状態がないため、定常解析で解くことができなくなる

問題点を解消するために、乱流<不規則な現象>を時間的or空間的に平均化して計算する。乱流モデルと呼ばれ、様々なモデルが提案されている。

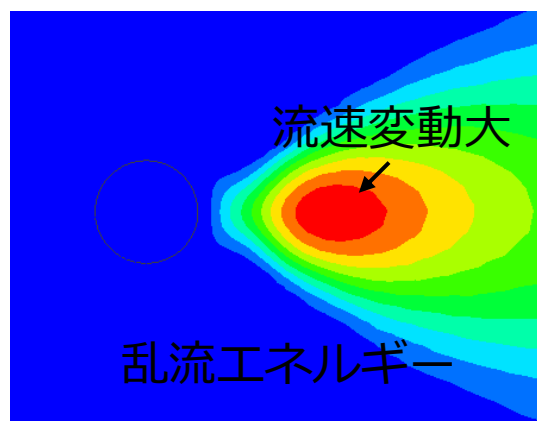
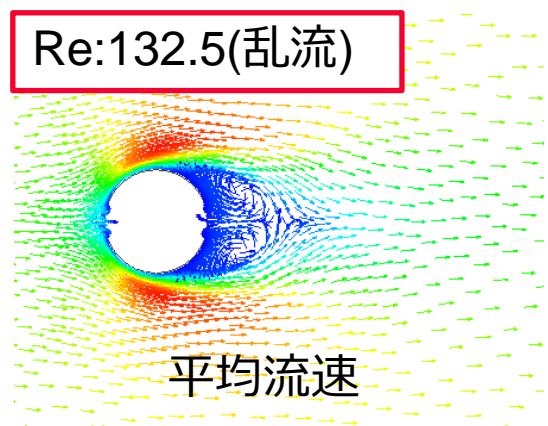
1. 正確に計算するには発生する細かい渦を表現できるだけの細かいメッシュが必要になる

⇒細かい渦の影響をモデルとして組み込むため、比較的粗いメッシュが良い。

2. 不規則性が強く定常状態がないため、定常解析で解くことができなくなる

⇒時間的に平均化しているため、定常解析で解ける場合がある

(不規則性が強い場合、平均化しても定常状態が解けない場合もある)





基本的には乱流を選択すれば良い。

- ・カルマン渦のような非定常の変動を解析したい場合、層流にする必要がある。
- ・明らかに層流の問題と分かる場合は層流モデルを使用すれば計算負荷が少なく済む。

層流解析を選択した場合、以下のデメリットがある。

- ・メッシュサイズを粗くした場合の結果精度が悪くなりやすい
  - メッシュサイズ以下の細かい渦が計算に考慮されない
  - 壁関数の近似処理が行われない
- ・細かい渦による不規則性を正確に計算しようとするため、収束しにくい場合がある