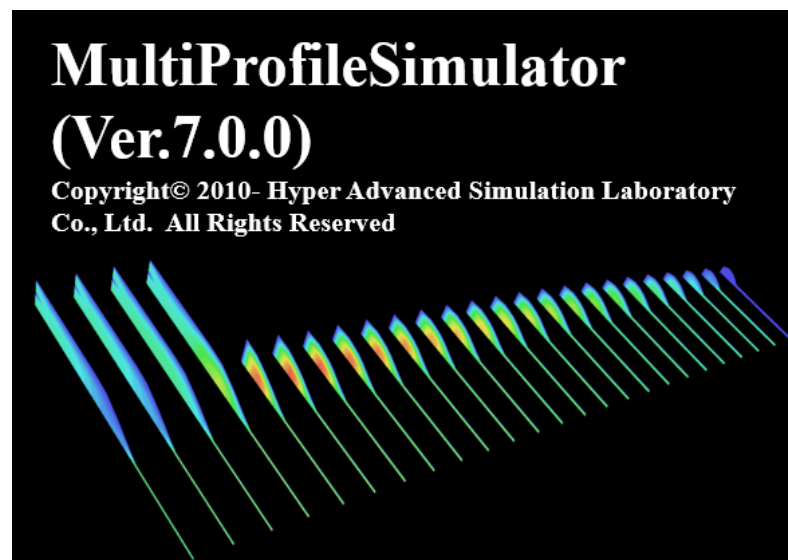
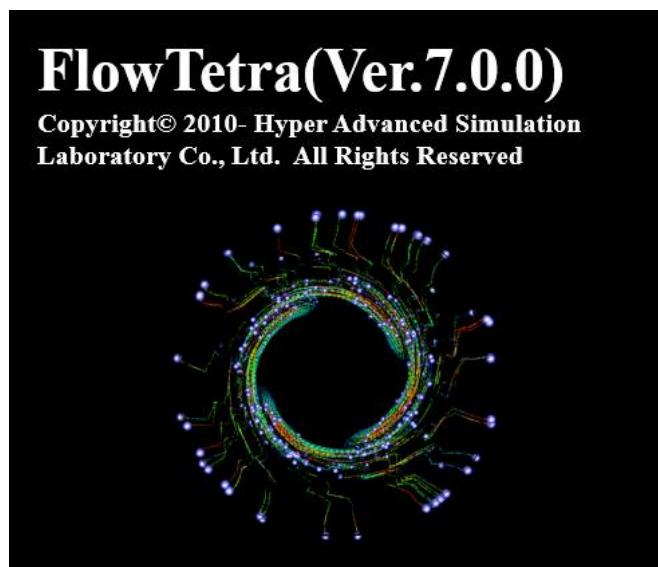


# Flow Simulator 3D (Ver. 7.0.0) 改良成果資料 (発表用ダイジェスト版)



2018/11/15  
株式会社HASL

- ① 安定化有限要素法に基づく流体解析機能  
SUPG(Streamline Upwind Petrov/Galerkin)  
PSPG(Pressure Stabilizing Petrov/Galerkin)  
for Multi profile simulator
- ② 2.5D モデリング機能の改良  
for Flow Tetra
- ③ 2.5D 多層熱流動解析機能  
for Flow Tetra

# ① 安定化有限要素法に基づく流体解析機能

表. 流体支配方程式解析法の比較

	解析法	圧力変数の 取り扱い	長所	短所
既往	Penalty関数法	消去  $p = -\lambda \nabla \cdot \mathbf{V},$ $\lambda \rightarrow \infty$	圧力変数を消去するため計算負荷が小さい。	疑似圧縮性を有するため流入出収支に誤差が生じやすい(圧力が正確に評価し難)。
新規	SUPG/PSPG法	解の数値振動を抑制する安定化処理	計算精度が相対的に高い。	圧力変数が未知量になるため、相対的に計算負荷が大きい。

# SUPG/PSPG安定化有限要素法\*)

## 流体支配方程式

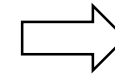
$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \nabla p,$$

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

## 有限要素



$\psi_\alpha$ : 流速/圧力節点 $\alpha$ の双一次補間関数



標準的重み付き  
残差法を適用す  
ると圧力に数値  
振動が発生

## 有限要素離散化方程式

$$\int_{\Omega} \hat{\psi}_\alpha \left( \rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \nabla p \right) d\Omega = 0$$

$$\int_{\Omega} \psi_\alpha (\nabla \cdot \mathbf{v}) d\Omega + \int_{\Omega} \tau_{PSPG} \nabla \psi_\alpha \cdot \left( \rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \nabla p \right) d\Omega = 0$$

## 重み関数

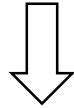
$$\hat{\psi}_\alpha = \psi_\alpha + \tau_{SUPG} \left( u \frac{\partial \psi_\alpha}{\partial x} + v \frac{\partial \psi_\alpha}{\partial y} + w \frac{\partial \psi_\alpha}{\partial z} \right)$$

$$\tau_{SUPG} = \tau_{PSPG} = \left( \left( \frac{2}{\Delta t} \right)^2 + \left( \frac{2\|\mathbf{V}\|}{h_e} \right)^2 + \left( \frac{4\eta}{\rho h_e^2} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}},$$

$$\|\mathbf{V}\| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}, \quad h_e = 2 \left( \frac{1}{\|\mathbf{V}\|} \sum_{\alpha=1}^{n_m} \left| u \frac{\partial \psi_\alpha}{\partial x} + v \frac{\partial \psi_\alpha}{\partial y} + w \frac{\partial \psi_\alpha}{\partial z} \right| \right)^{-1}$$

\*) 参考文献 T. Tezduyar, *Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations*, Advances in Applied Mechanics, 28, (1991), 1-44.

高粘性流体の場合  $\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} \ll \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}, \nabla p,$



$$\int_{\Gamma} \psi_{\alpha} (\tau_{ij} n_j - p n_i) d\Gamma - \int_{\Omega} \left( \eta (\psi_{\alpha,j} \psi_{\beta,j} u_{\beta i} + \psi_{\alpha,j} \psi_{\beta,i} u_{\beta j}) - \psi_{\alpha,i} \psi_{\beta} p_{\beta} \right) d\Omega = 0$$

$$\int_{\Omega} \psi_{\alpha} \psi_{\beta,i} u_{\beta i} d\Omega + \int_{\Omega} \tau_{PSPG} \psi_{\alpha,i} \psi_{\beta,i} p_{\beta} d\Omega = 0$$

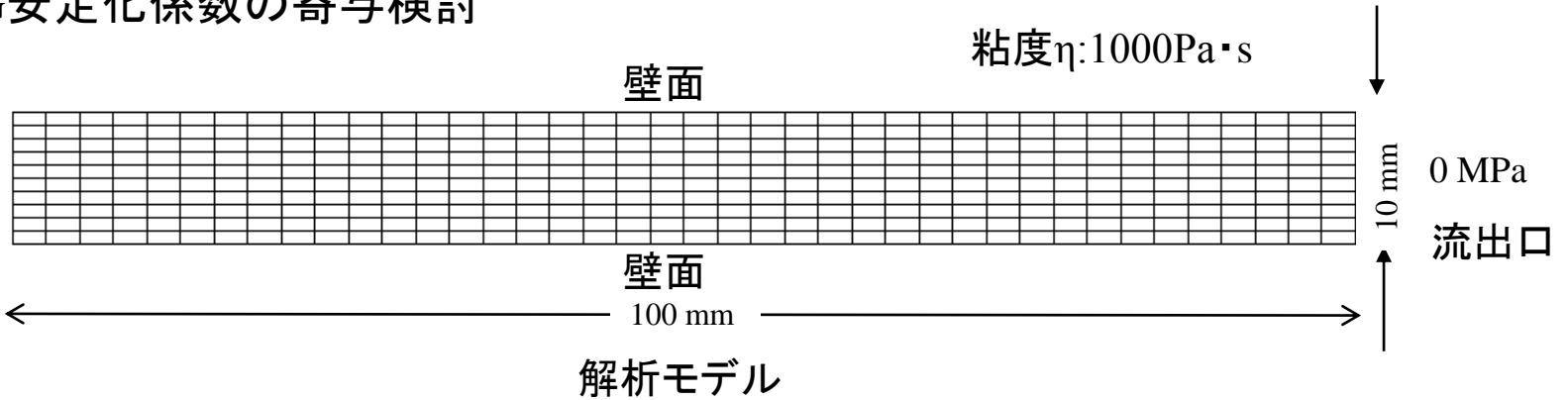
$$\tau_{SUPG} = \tau_{PSPG} = \left( \left( \frac{2\|\mathbf{V}\|}{h_e} \right)^2 + \left( \frac{4\eta}{\rho h_e^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\|\mathbf{V}\| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}, \quad h_e = 2 \left( \frac{1}{\|\mathbf{V}\|} \sum_{\alpha=1}^{n_{en}} \left| u \frac{\partial \psi_{\alpha}}{\partial x} + v \frac{\partial \psi_{\alpha}}{\partial y} + w \frac{\partial \psi_{\alpha}}{\partial z} \right| \right)^{-1}$$

# テスト解析

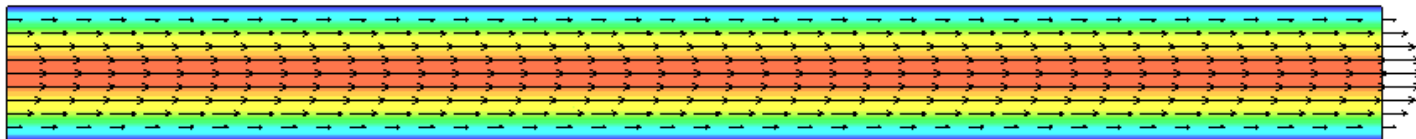
## PSPG安定化係数の寄与検討

0.1 MPa  
or  
10 mm/s  
流入口



12.5 mm/s

0.0



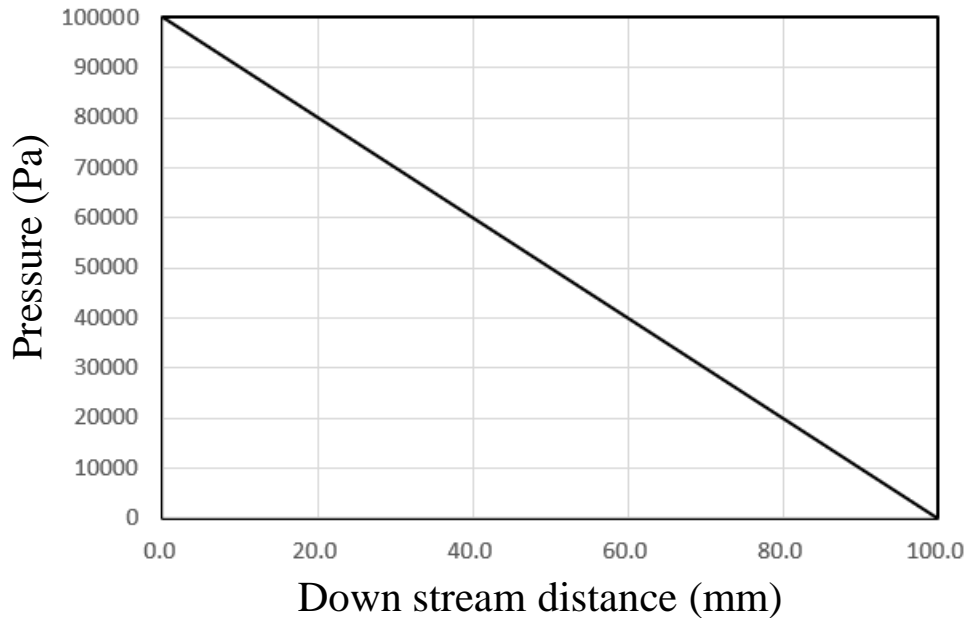
流速分布解析結果(流入口圧力規定)

0.1 MPa

0.0

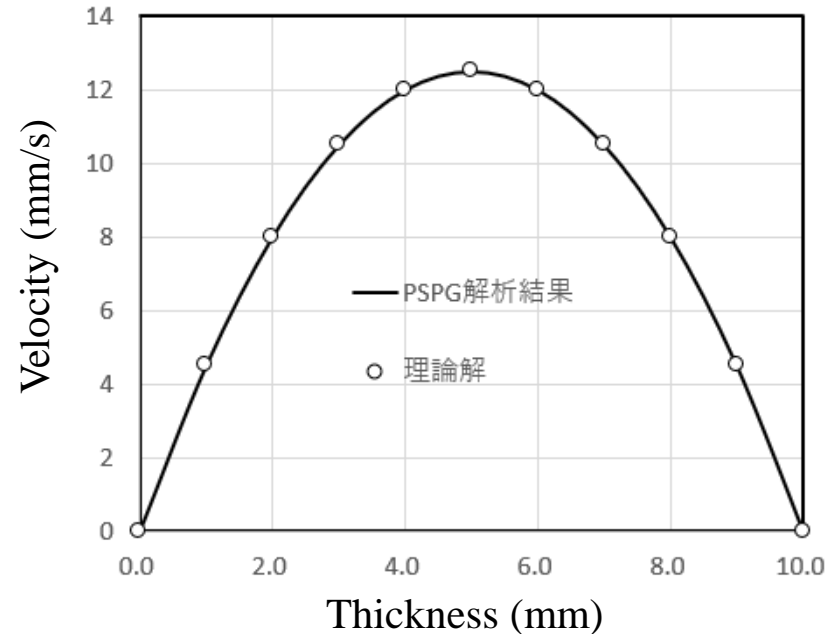


圧力分布解析結果(流入口圧力規定)



圧力分布グラフ図(流入口圧力規定)

当解析ケース(流入口圧力規定)では、PSPG安定化係数を0としても結果に有意な差は観られない。

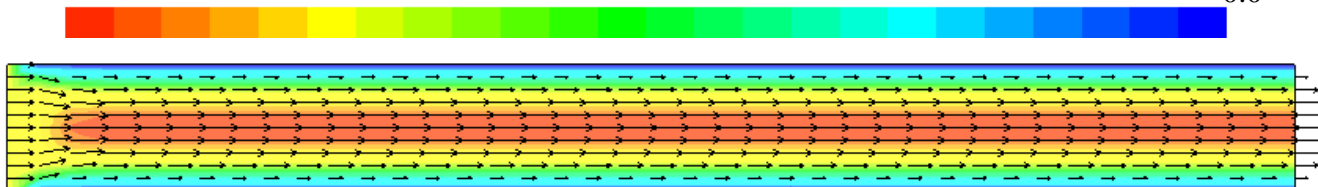


流速分布グラフ図(流入口圧力規定)

$$\text{理論解: } u(y) = \frac{1}{2\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x} y(y - H)$$

14.32 mm/s

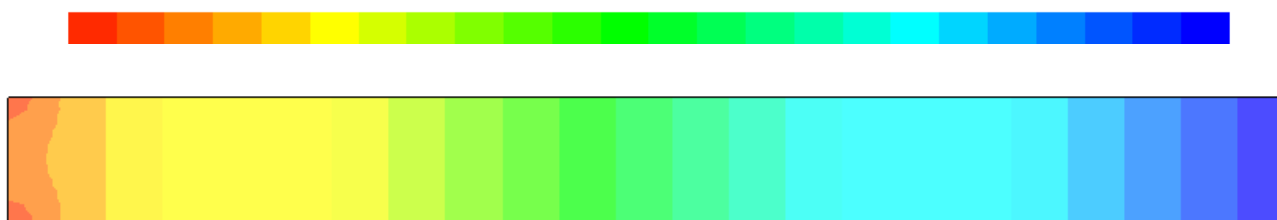
0.0



流速分布解析結果(流入口流速規定)

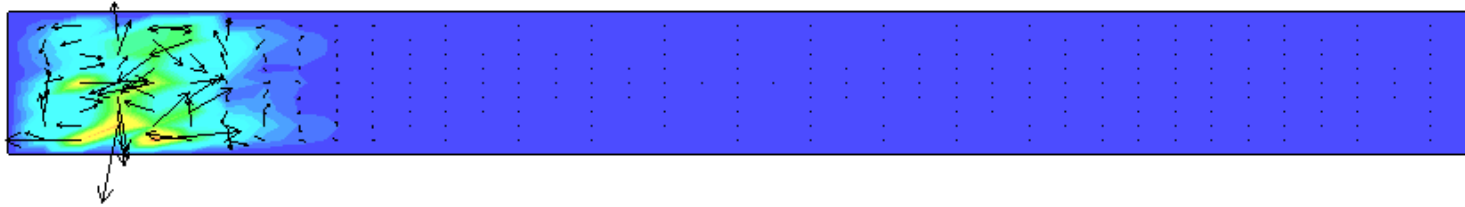
0.121 MPa

0.0



压力分布解析結果(流入口流速規定)



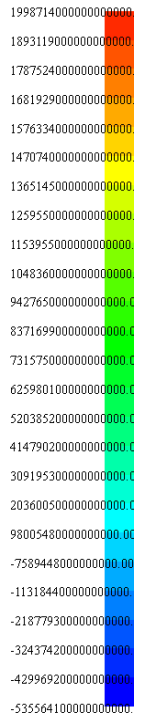


流速分布解析結果(流入口流速規定、 $\tau_{PSPG}=0$ )



圧力分布解析結果(流入口流速規定、 $\tau_{PSPG}=0$ )

当解析ケース(流入口流速規定)では、  
PSPG安定化係数を0とすると数値的に破綻  
した解析結果が得られる。



## SUPG安定化係数の寄与検討

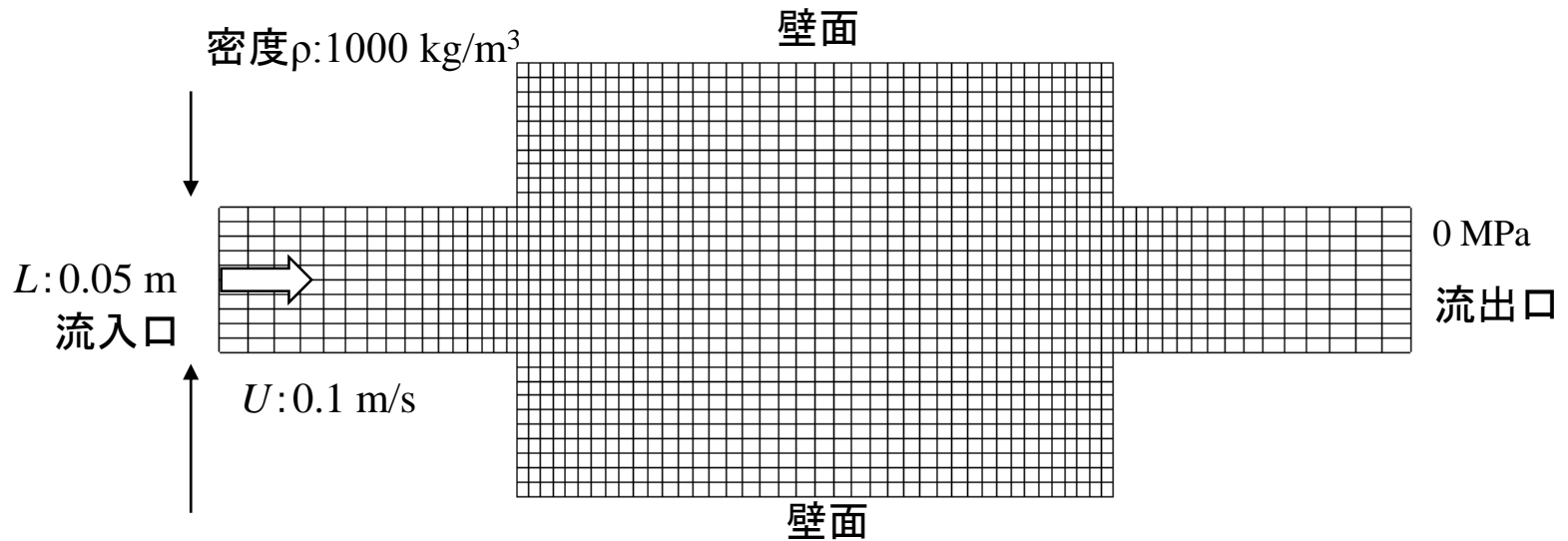
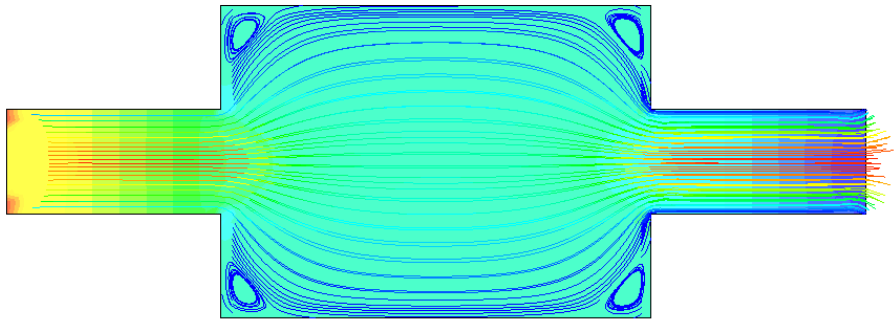


表. ケーススタディー一覧

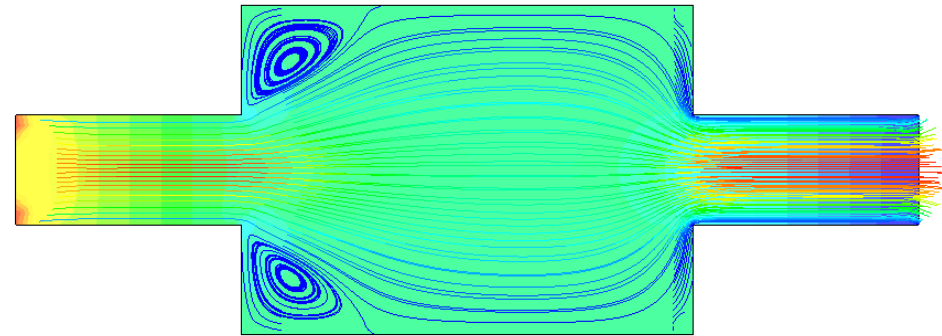
Case	粘度 $\eta$ (Pa·s)	Re数
1	1000	0.005
2	5	1
3	0.5	10
4	0.05	100

レイノルズ数:  
Re=慣性力/粘性力

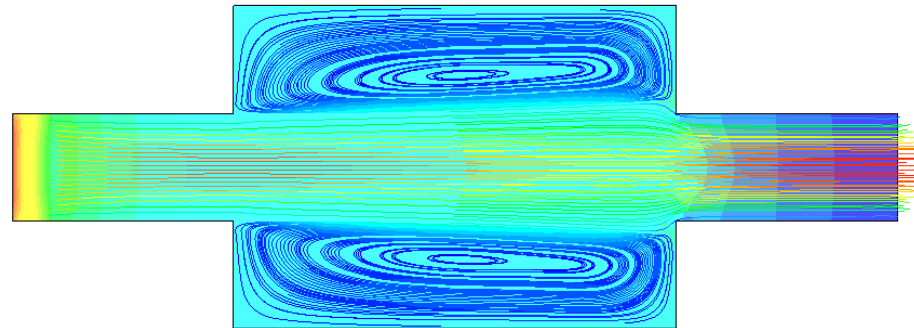
$$Re = \frac{\rho UL}{\eta}$$



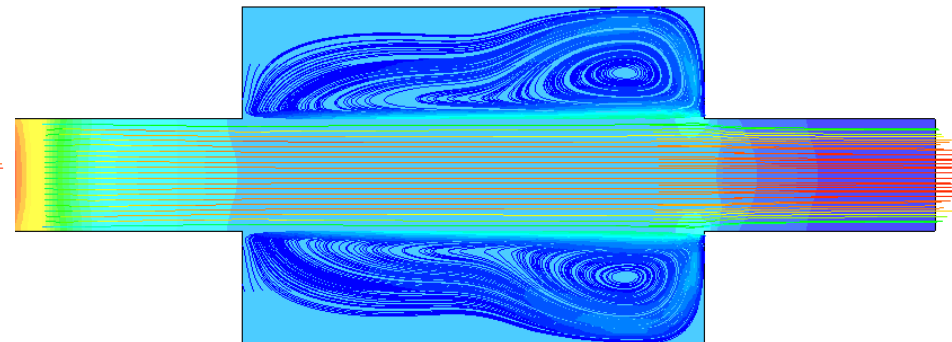
Case1(Re=0.005)



Case 2 (Re=1)

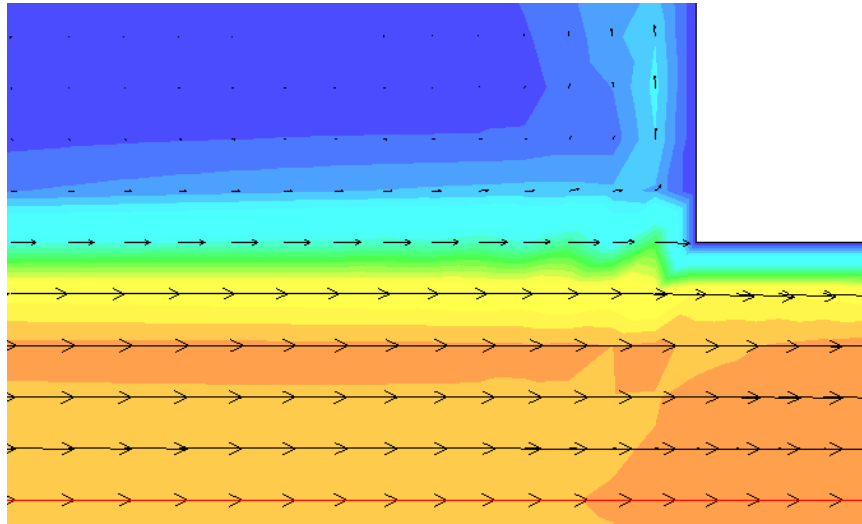


Case 3 (Re=10)

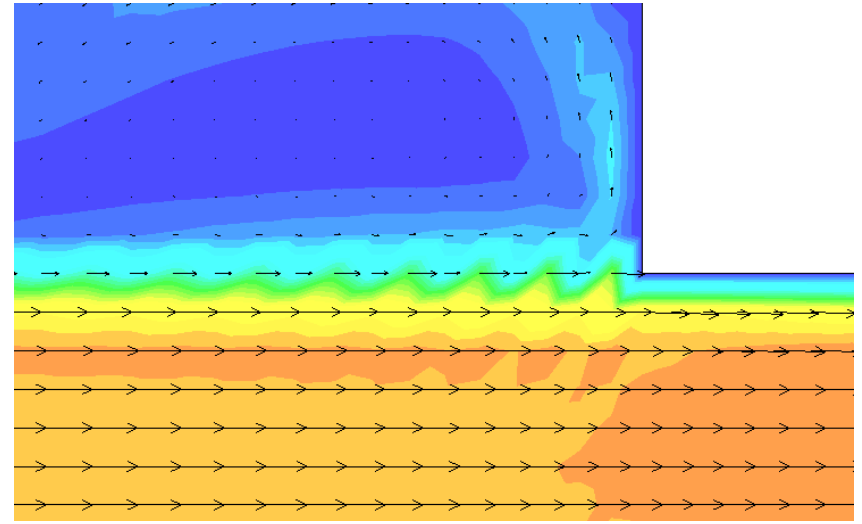


Case 4 (Re=100)

### 圧力分布/流線分布解析結果の比較



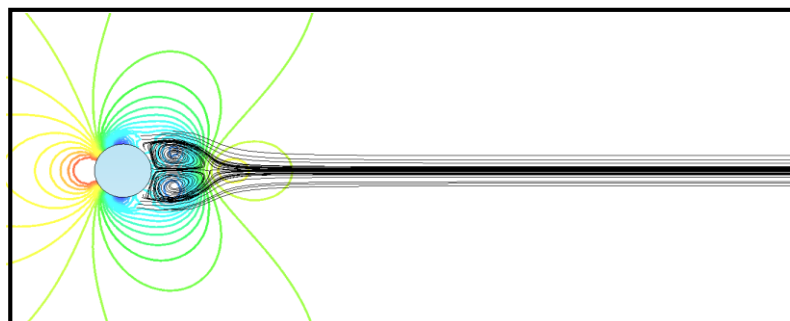
$$\tau_{SUPG} \neq 0$$



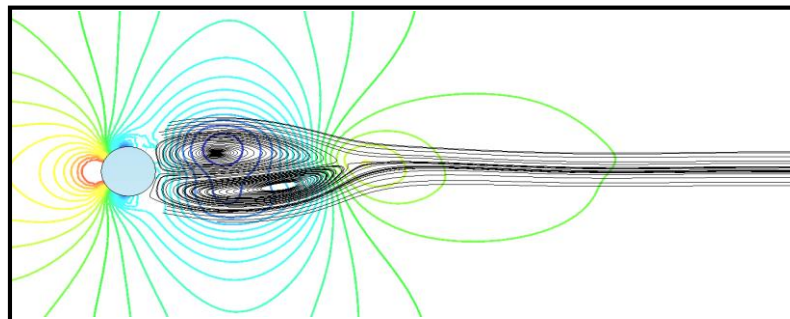
$$\tau_{SUPG} = 0$$

流速ベクトル分布図(Re=100,コーナー部拡大)

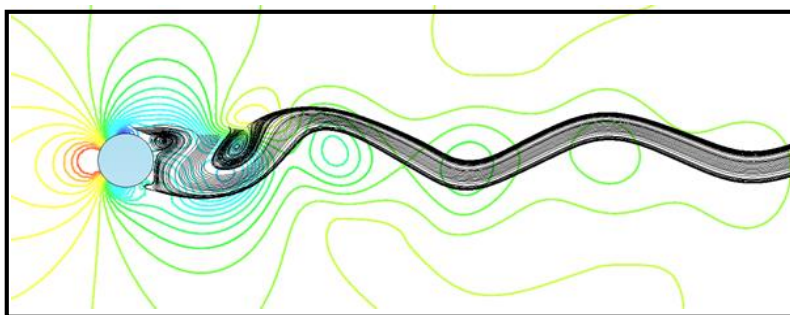
高Re条件下において、  
SUPG安定化係数は、流速分布解析結果の  
数値振動を抑制する効果を有する。



1 sec



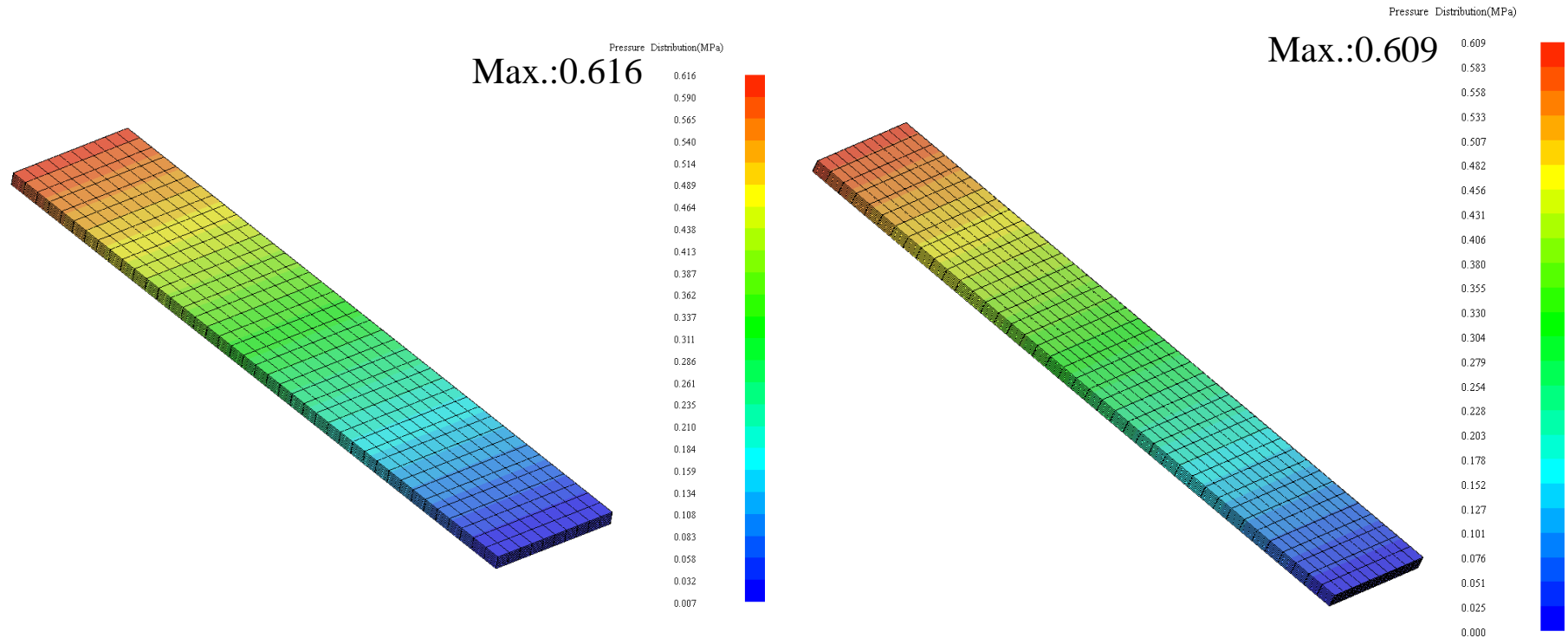
5 sec



50 sec

SUPG/PSPG安定化有限要素法を用いた  
非定常流体解析結果(圧力/流線分布)

# Penalty関数法 v.s. PSPG安定化法



圧力分布解析結果(Penalty 関数法)

圧力分布解析結果(PSPG安定化法)

## 3D平板流路内定常流動解析結果

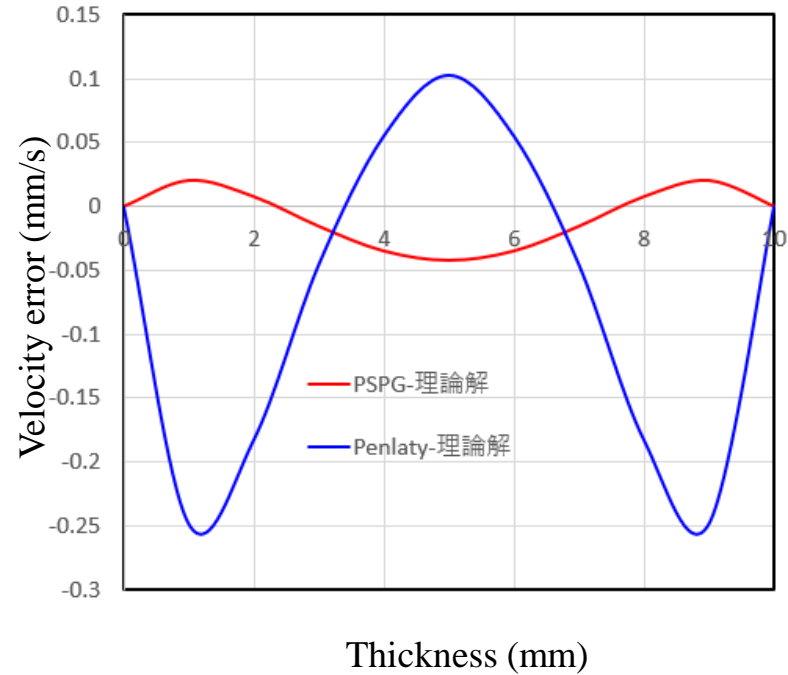
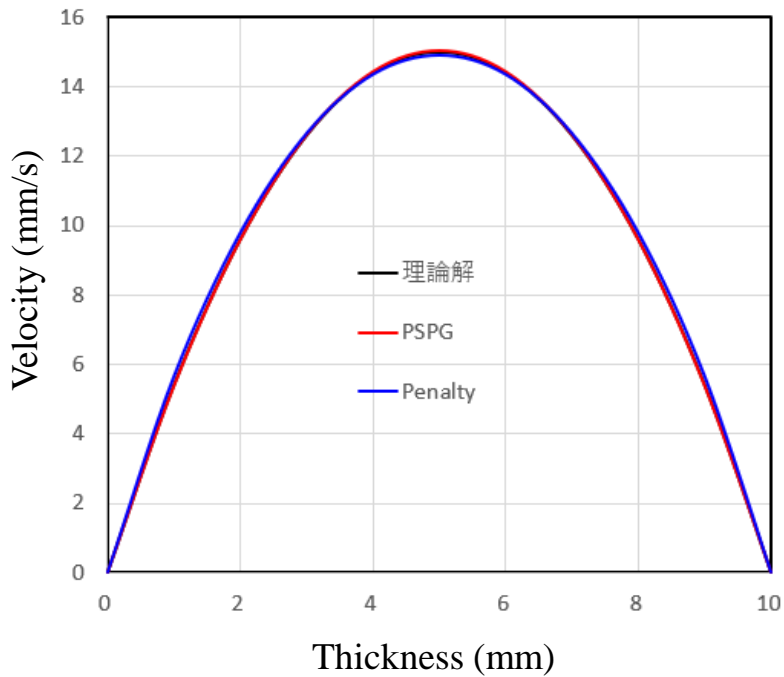


表. 未知数の比較

解析法	未知数(自由度)
Penalty 関数法	11160
PSPG 安定化法	16000

## ② 2.5D モデリング機能の改良

解析モデルSTLファイルインポート後、ツール/2.5D Element modification/Information modifyをプルダウン選択

(1) Target stl fileのAppend import

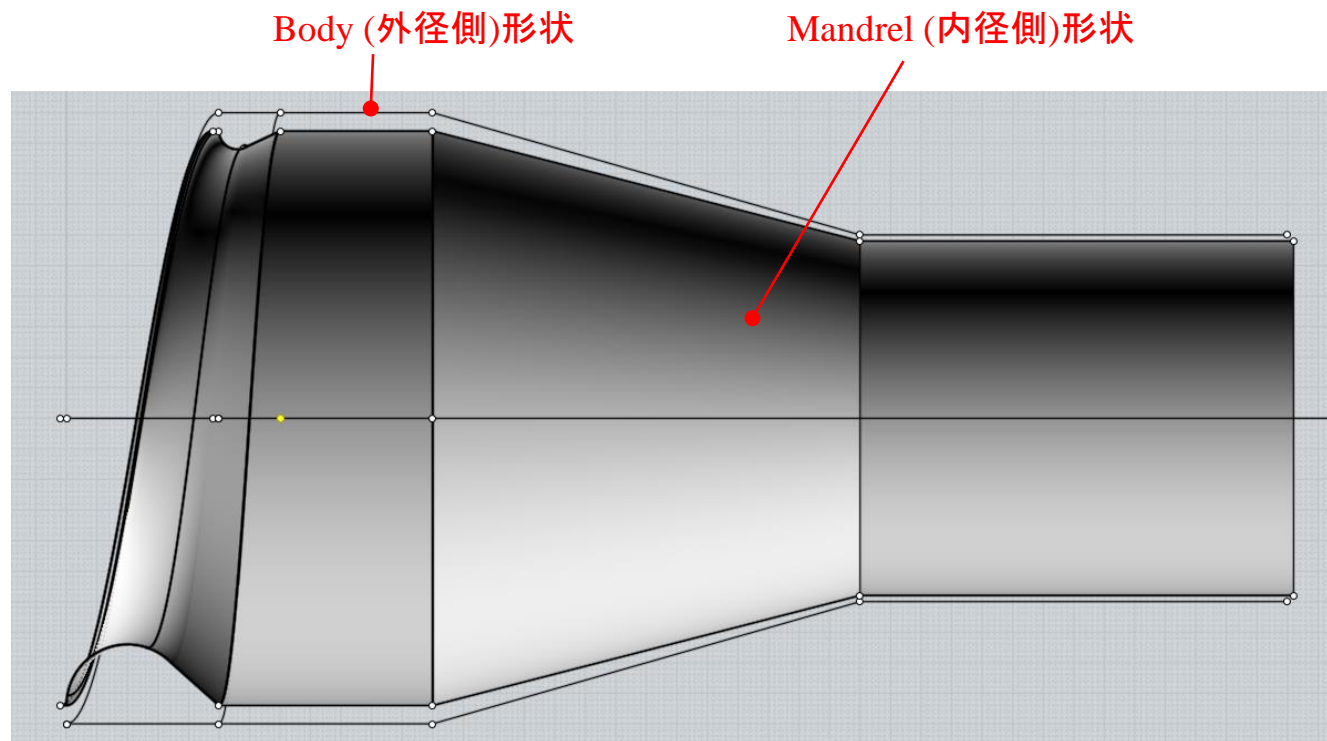
(2) 肉厚転写計算の進行状況をプログレスバー表示

(3) 肉厚転写結果の情報出力

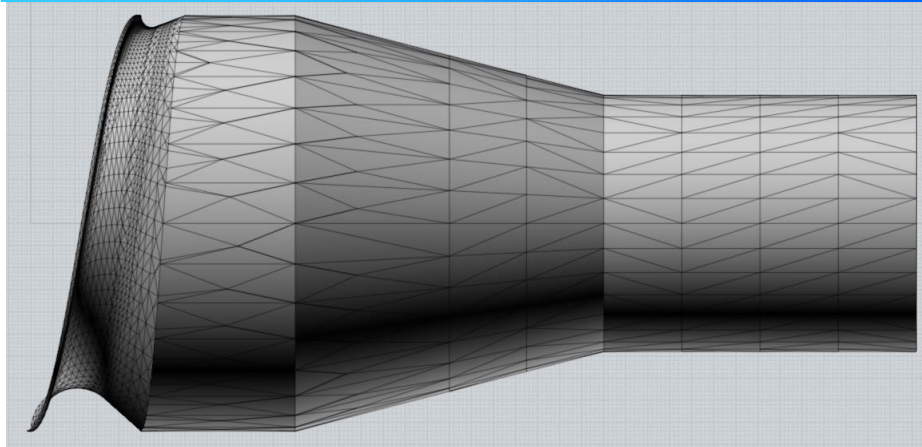
(4) 肉厚転写情報のポスト出力



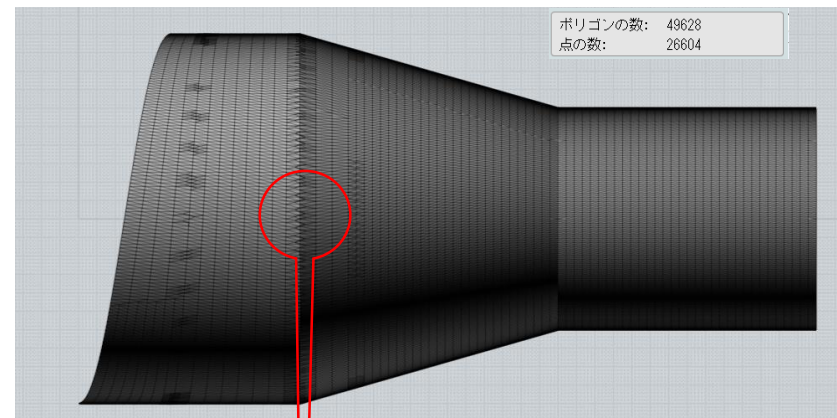
## 2.5D モデリング運用例



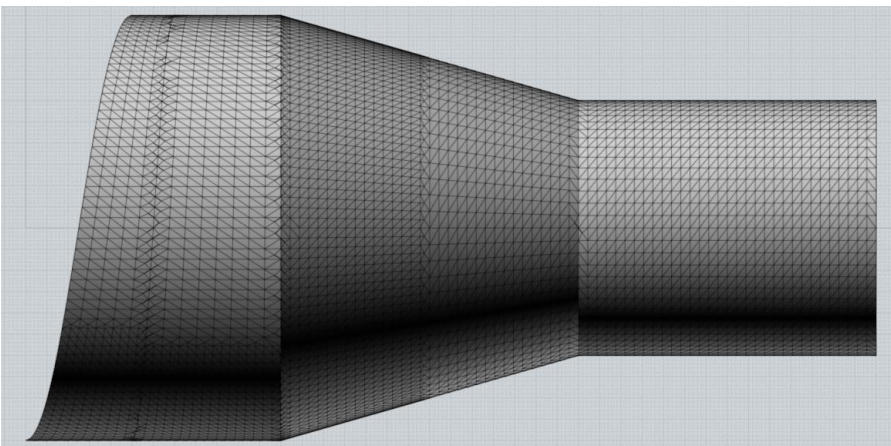
Cross head die の2.5D FEM モデリング



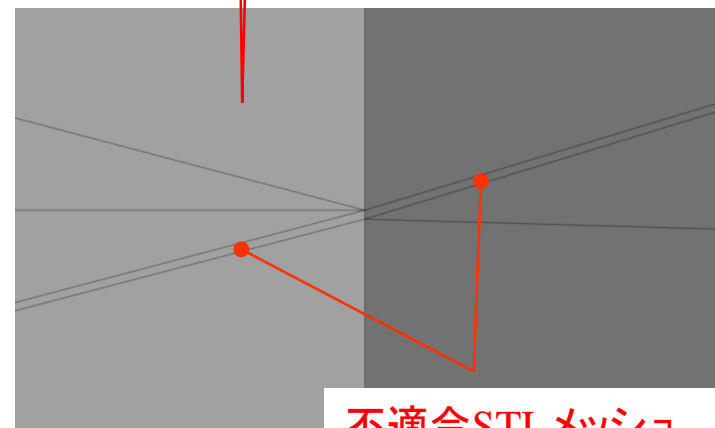
Mandrel(内径側)STL情報



Body(外径側)STL情報の  
分割密度が高いほど精度  
が向上するとは限らない。



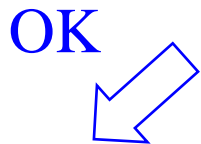
Body(外径側)STL情報



# 不適合STLメッシュの検出方法

① ファイル/モデルインポートをプルダウン、  
ファイルフィルターをstl (binary)に切り替え  
STLファイル情報をインポート

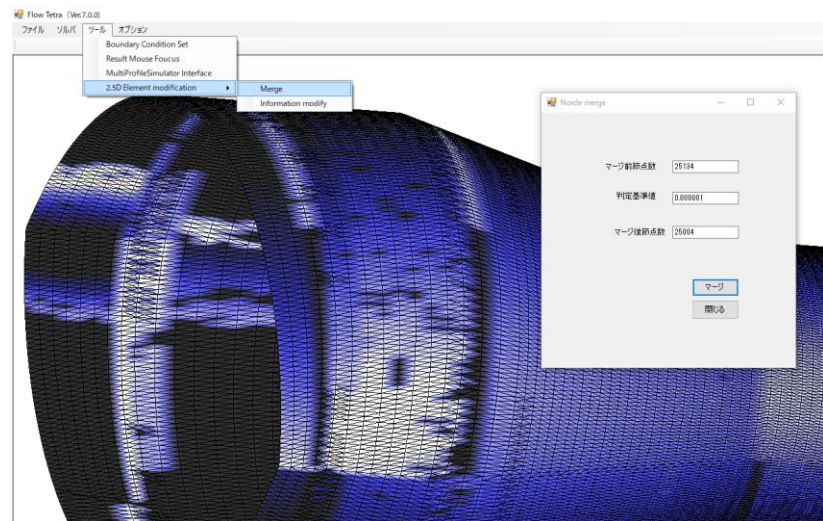
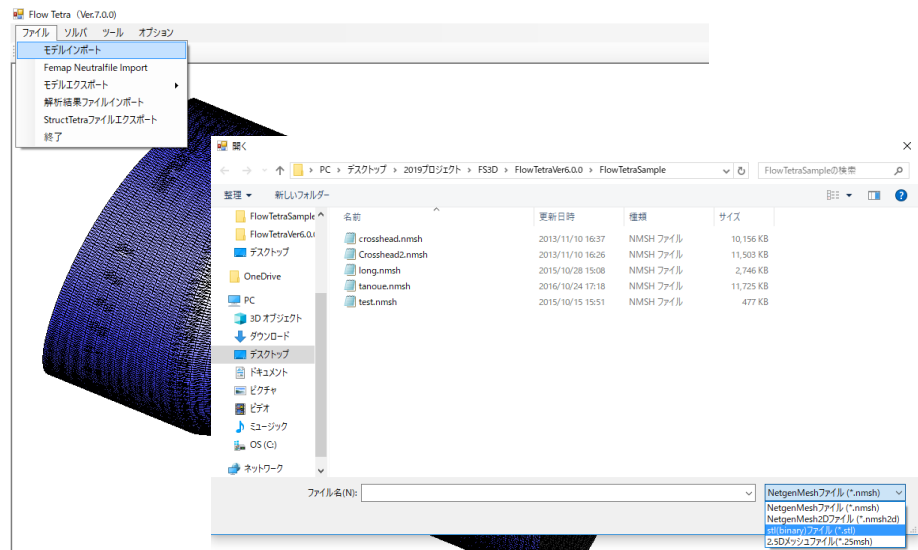
② ツール/2.5D Element modification/Merge  
を選択し、判定基準値をデフォルト値のまま  
マージボタンを押す。



マージ前後で節点数  
が変化しない。

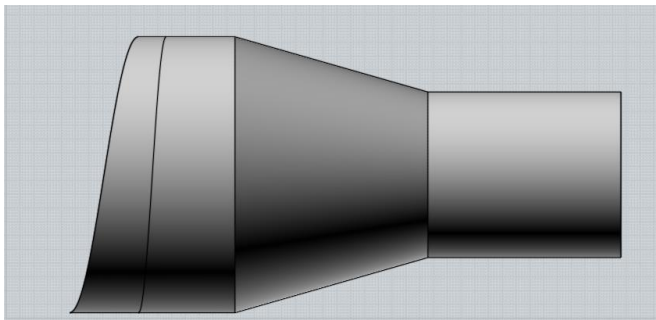


・マージ後、節点数が  
減少する。  
・モデル表面の色調が  
変化する(要素法線方  
向が正常に計算され  
ない)。



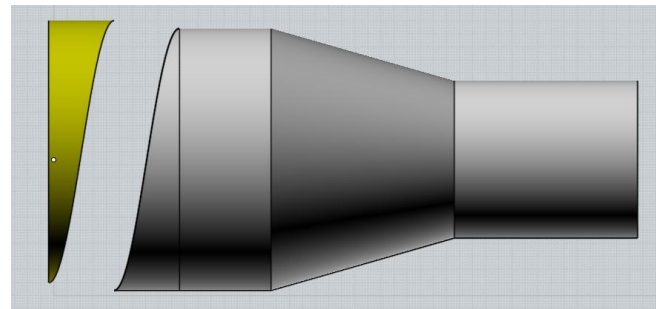
## NG時の対応策

- ① STLメッシュの分割密度を低くすることにより、不適合STLメッシュの検出頻度は低下する。
- ② CAD情報の単純化(出来るだけ単純な手順で情報を作成する)。

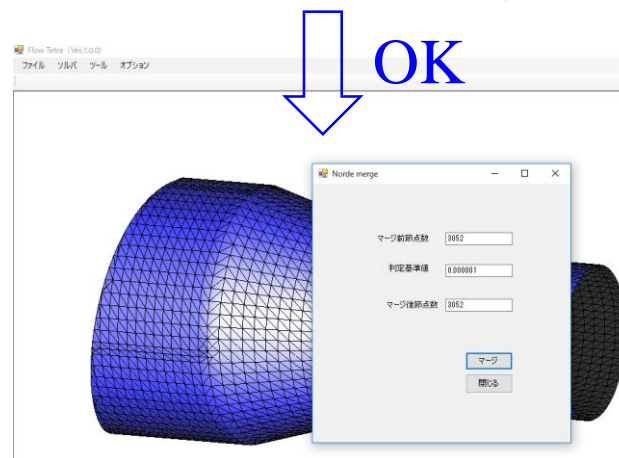


マンドレル部をスイープ曲線で定義

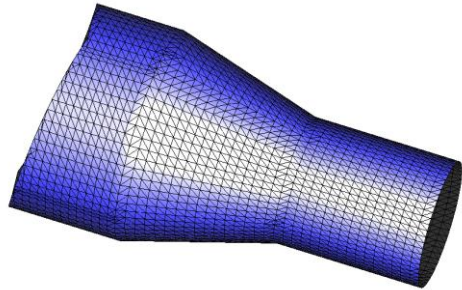
↓  
NG



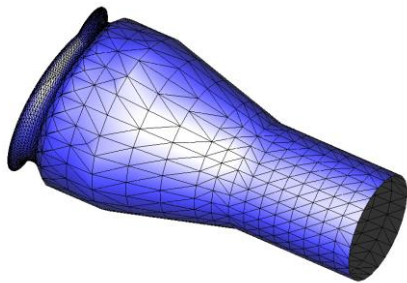
単純なテーパ円筒を作成し、マンドレル部を螺旋曲線でトリム表現



# 肉厚情報転写時の留意点



2.5D 解析モデル=Body STLファイル情報

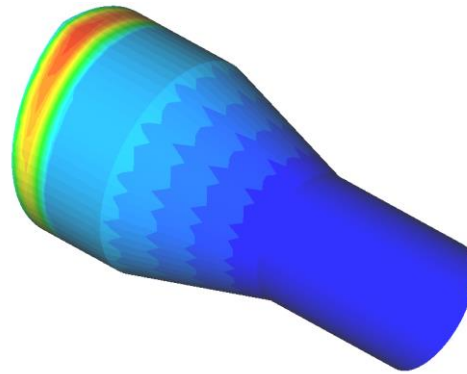


Mandrel モデル ①

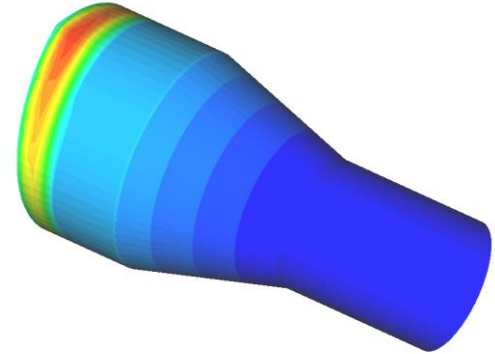


Mandrel モデル ②

肉厚転写用 Target file

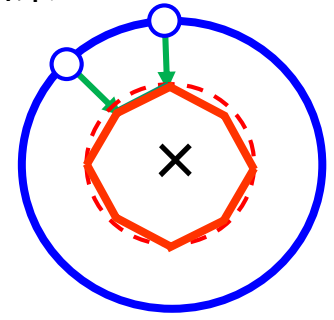
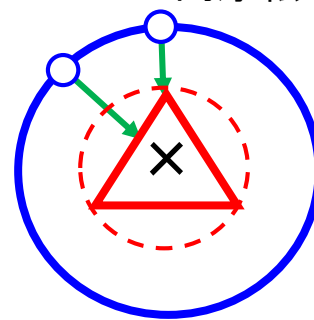


Mandrel モデル ①

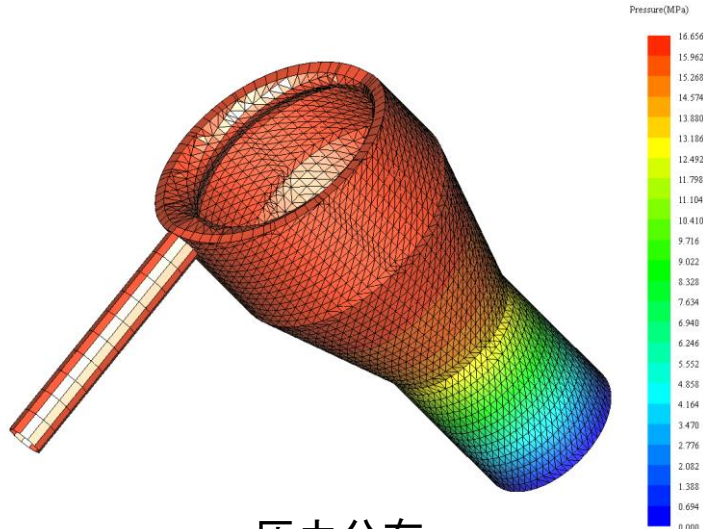


Mandrel モデル ②

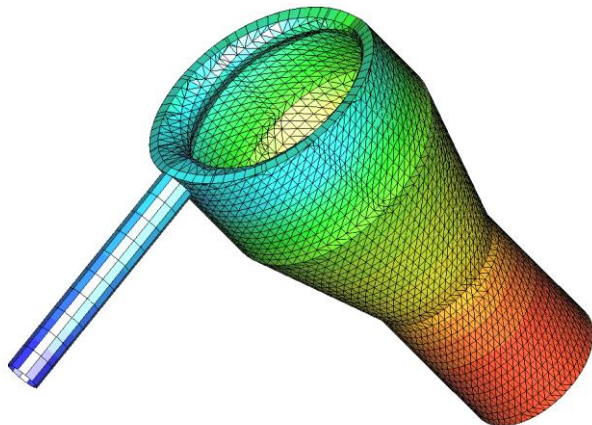
肉厚転写結果



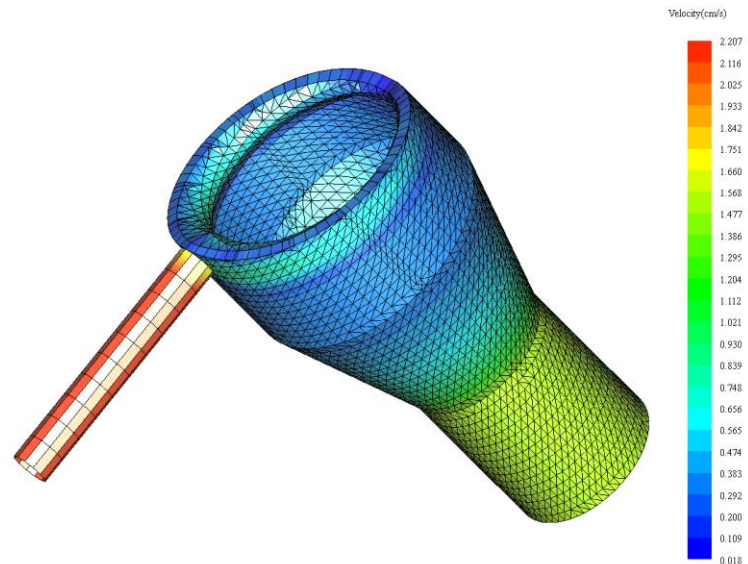
- ・モデル①は円周方向の分割数が粗く、円の多角形近似の誤差の影響を受け易い。
- ・円筒モデルのTarget fileでは、円周方向の分割数を密にする(アスペクト比の悪化の影響は少ない)。



圧力分布



温度分布

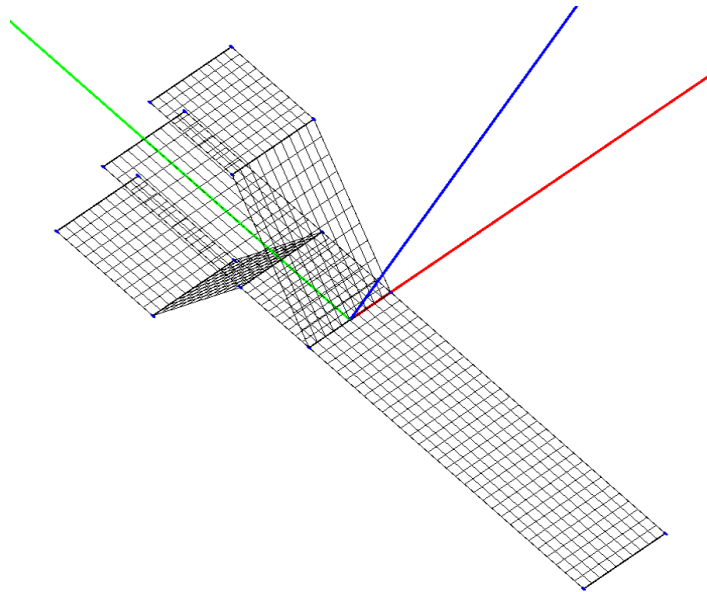


流速分布

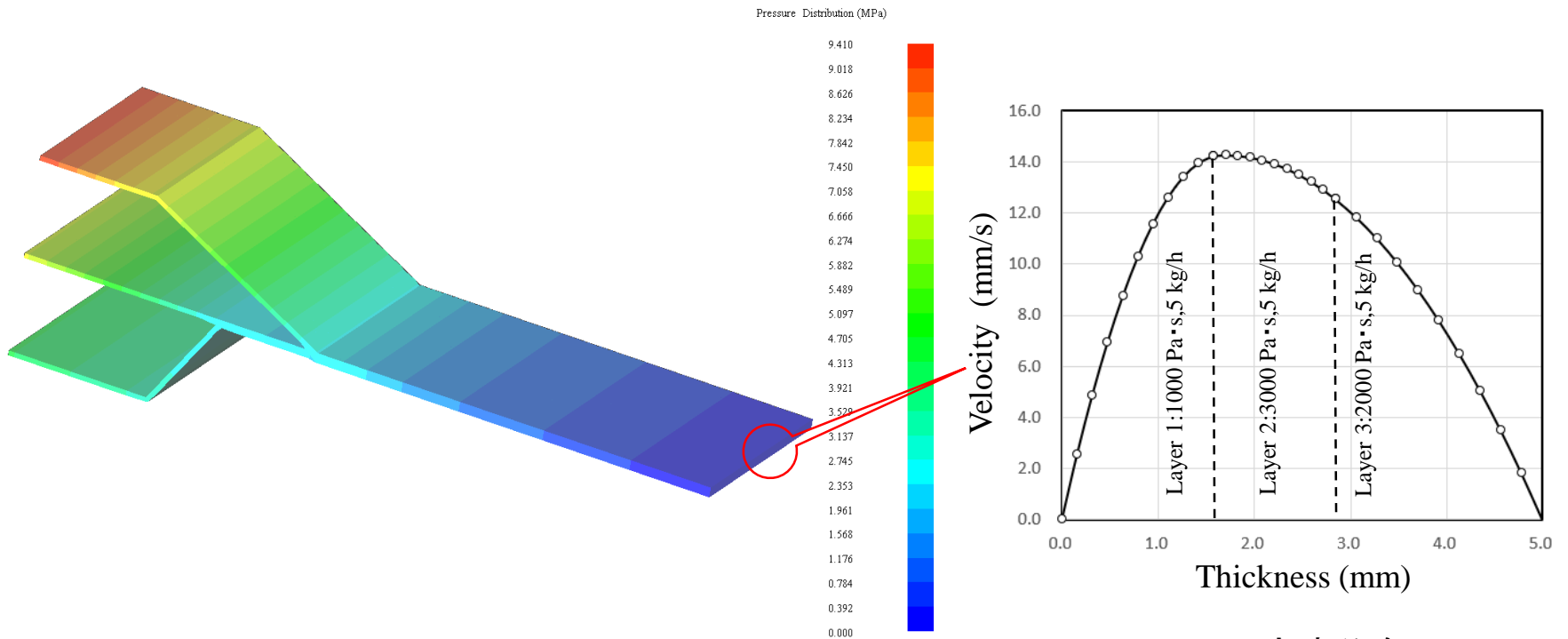
CAD STL ファイル情報を利用した  
2.5D FEM 熱流動解析結果  
(ランナー部はMulti profile simulatorの  
Modeler & Mesherで生成)

### ③ 2.5D 多層熱流動解析機能

- 1) 2.5D FEM 多層熱流動解析モデルをMulti profile simulatorのModler & Mehserで作成。
- 2) Flow Tetraに2.5D FEM 多層熱流動解析モデルをインポートし、熱流動解析を実施。



Multi profile simulatorのModler & Mehserで作成した多層熱流動解析モデル



圧力分布

流速分布

Flow Tetra による多層流動解析結果