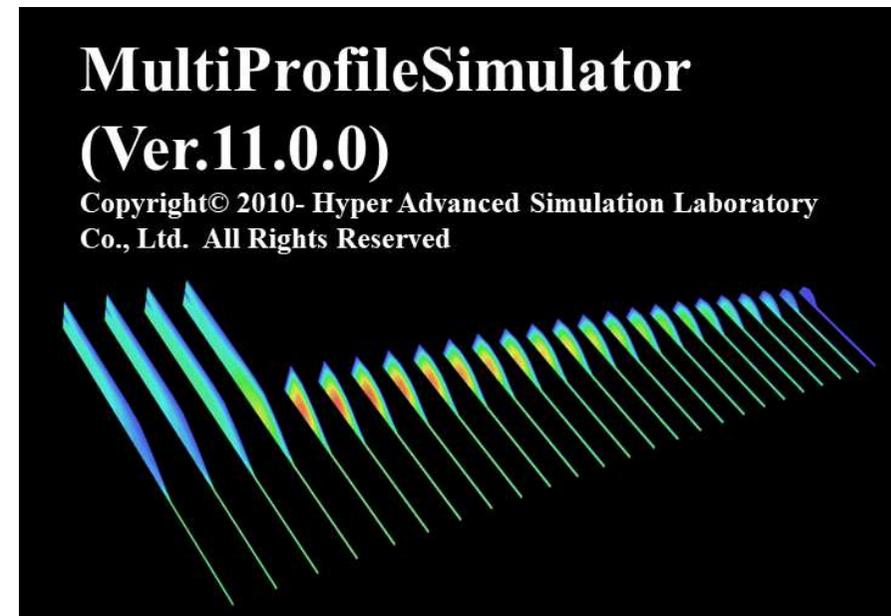
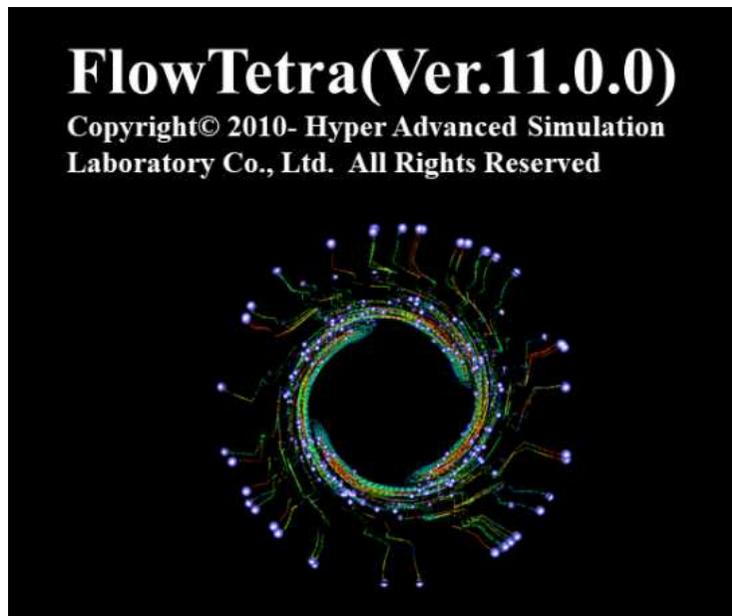


---

# Flow Simulator 3D (Ver.11.0.0)

## 改良成果資料



2024/04/15

株式会社HASL

# ○改良成果一覧/ Flow Simulator 3D (Ver.11.0.0)

## Multi Profile Simulator Ver.11.0.0

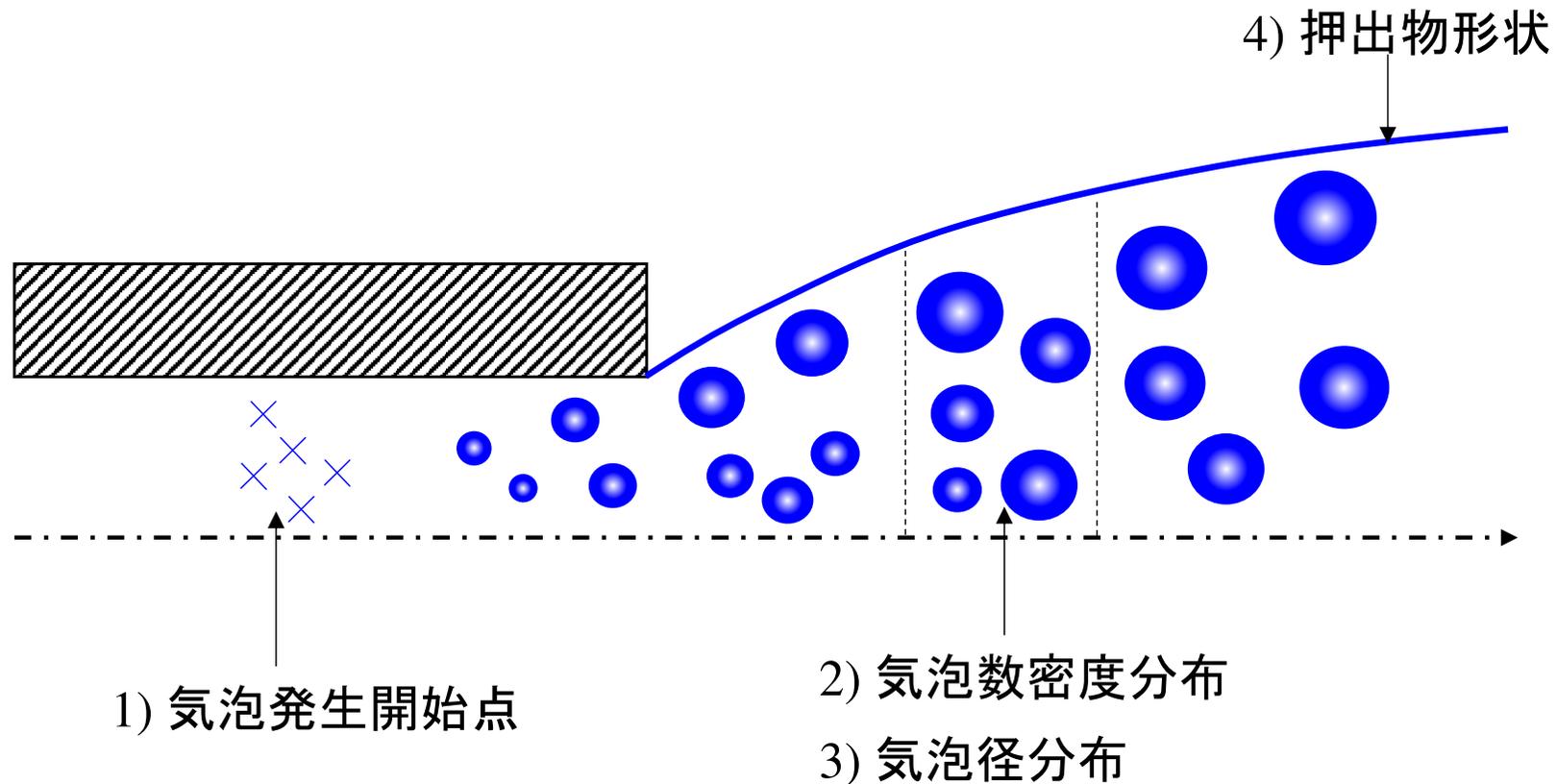
- (1) 発泡押出解析機能(2D, 3D) ..... p. 2
- (2) 粘弾性効果を考慮した自由表面解析(2D) ..... p.19

## Flow Tetra Ver.11.0.0

- (1) FVM(有限体積法)に基づく新規解析機能 ..... p.29
  - 1. 温度解析 ..... p.30
  - 2. 滞留時間解析 ..... p.33
  - 3. ひずみ履歴解析機能 ..... p.37
- (2) 対称モデル解析機能 ..... p.42
- (3) ユーザプログラム解析機能 ..... p.46
- (補足) ユーザプログラムの環境設定方法 ..... p.62

## (1) 発泡押出解析機能(2D, 3D)

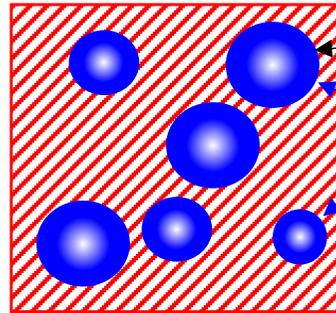
ダイ内の物理発泡過程を解析する新機能が実装されました。  
当機能では、下図に示す 4つの情報を定量化することが可能です。



参考文献: 瀧 健太郎, 博士論文(京都大学(2005))

# 気泡体積分率(CAE出力情報の一つ)

溶融ポリマー体積(不変):  $V_P$



気泡数:  $N$

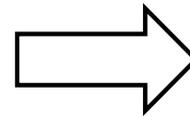
気泡体積の総和:  $V_G$

気泡体積分率:

$$\phi_G \equiv \frac{V_G}{V_P + V_G}$$

溶融ポリマー体積分率:

$$\phi_P \equiv \frac{V_P}{V_P + V_G}$$



$$\begin{aligned} \text{発泡倍率: } F_r &\equiv \frac{V_P + V_G}{V_P} \\ &= \frac{1}{\phi_P} = \frac{1}{1 - \phi_G} \end{aligned}$$

$$\phi_P + \phi_G = 1$$

気泡数密度:  $n = \frac{N}{V_P}$

$$n' = \frac{N}{V_P + V_G}$$

$$n' = \left( \frac{V_P}{V_P + V_G} \right) n = \phi_P n = (1 - \phi_G) n$$

発泡倍率は溶融ポリマー体積分率の逆数。  
一般的な緩衝材は  $F_r = 15 \sim 70$  倍程度

CAEで定量化される情報(気泡体積分率):  $\phi_G$   
& 気泡数密度 :  $n$

※

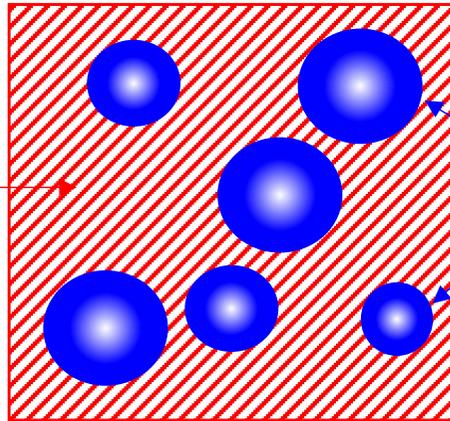
$$\text{気泡体積分率[-]} \phi_G = \frac{V_G}{V_P + V_G} = \frac{\frac{4}{3} \pi N \bar{R}^3}{V_P + \frac{4}{3} \pi N \bar{R}^3} = \frac{\frac{4}{3} \pi n V_P \bar{R}^3}{V_P + \frac{4}{3} \pi n V_P \bar{R}^3} = \frac{\frac{4}{3} \pi n \bar{R}^3}{1 + \frac{4}{3} \pi n \bar{R}^3}$$

$N$ : ポリマー体積  $V_P$  が生成する気泡数[-] =  $nV_P$   
 $n$ : ポリマー体積  $V_P$  に対する気泡数密度 [ $\text{mm}^{-3}$ ]

# 溶融ポリマー/気体混合流体の物性の取り扱い

溶融ポリマー密度:  $\rho_P$

溶融ポリマー粘度:  $\eta_P$



気体密度:  $\rho_G$

気体粘度:  $\eta_G$

気液2相流のオーソドックスな考え方を踏襲すれば,

ポリマー/混合流体密度:

$$\rho_{PG} = \phi_P \rho_P + \phi_G \rho_G \cong \phi_P \rho_P = (1 - \phi_G) \rho_P \rightarrow \text{OK}$$

$$\because \rho_P \gg \rho_G$$

ポリマー/混合流体粘度:

$$\eta_{PG} = \phi_P \eta_P + \phi_G \eta_G \cong \phi_P \eta_P = (1 - \phi_G) \eta_P \rightarrow \text{NG ???}$$

$$\because \eta_P \gg \eta_G$$

溶融ポリマー/混合流体粘度の  
取り扱いは良く分からない。

# 溶融ポリマー/気体混合流体の質量保存方程式

溶融ポリマー(非圧縮性流体)の質量保存則:

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

$\mathbf{v}_P$ : 溶融ポリマーの流速度ベクトル

溶融ポリマー/気体混合流体(圧縮性流体)の質量保存則:

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_{PG} = \frac{1}{1 - \phi_G} \mathbf{v}_{PG} \cdot \nabla \phi_G$$

発泡倍率

$\mathbf{v}_{PG}$ : 溶融ポリマー/気体混合流体の流速度ベクトル

Proof:

$$\frac{\partial \rho_{PG}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}_{PG} \rho_{PG}) = \frac{\partial \rho_{PG}}{\partial t} + \mathbf{v}_{PG} \cdot \nabla \rho_{PG} + \rho_{PG} \nabla \cdot \mathbf{v}_{PG} = 0 \quad \Longrightarrow \quad \nabla \cdot \mathbf{v}_{PG} = \frac{\rho_P}{\rho_{PG}} \frac{D\phi_G}{Dt} = \frac{1}{1 - \phi_G} \mathbf{v}_{PG} \cdot \nabla \phi_G$$

$$\frac{D\rho_{PG}}{Dt} = -\rho_P \frac{D\phi_G}{Dt} \quad \left( \because \rho_{PG} = (1 - \phi_G)\rho_P, \frac{D\rho_P}{Dt} = 0 \right)$$

定常状態

# 発泡流動現象の支配方程式

## 流体支配方程式

運動方程式 (定常ストークス方程式)

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{PG} = \nabla P_{PG}$$

構成方程式 (ニュートン粘性法則)

$$\boldsymbol{\tau}_{PG} = 2\eta_{PG} \mathbf{D}_{PG}$$

連続方程式 (圧縮性)

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_{PG} = \frac{1}{1 - \phi_G} \mathbf{v}_{PG} \cdot \nabla \phi_G$$

エネルギー方程式

$$\rho_{PG} C_{PG} \mathbf{v}_{PG} \cdot \nabla T_{PG} = \nabla (\kappa_{PG} \nabla T_{PG}) + \eta_{PG} \dot{\gamma}_{PG}^2$$

## 発泡現象支配方程式

### 気泡径成長方程式

$$\frac{DR}{Dt} = \mathbf{v}_{PG} \cdot \nabla R = \frac{R}{4\eta_p} \left( P_D - P_{PG} - \frac{2\gamma}{R} \right)$$

### 物質収支式 (Han & Yoo モデル)

$$\frac{D(P_D R^3)}{Dt} = \mathbf{v}_{PG} \cdot \nabla (P_D R^3) = \kappa (P_{D0} - P_D) R + \frac{P_D R^3}{T} \mathbf{v}_{PG} \cdot \nabla T,$$

$$\kappa = \frac{6(R_g T) D k_H}{(-1 + \sqrt{1 + 2B})},$$

$$B = \frac{P_D R^3 - P_{D0} R_0^3}{R^3 R_g T k_H (P_{D0} - P_{PG})}.$$

加熱に伴う気泡の膨張,  
冷却に伴う気泡の縮小を  
表現

### 気泡剤濃度方程式

$$\bar{c}(t) = c(0) - \int_0^t \frac{4\pi}{3} R^3(t, t') \frac{P_D(t, t')}{R_g T} J(t') dt'$$

$$\frac{Dn}{Dt} = \mathbf{v}_{PG} \cdot \nabla n = J$$

### 気泡核生成頻度モデル

$$J = f_0 \left( \frac{2\gamma}{\pi M_w / N_A} \right)^{1/2} \exp \left( - \frac{16\pi F \gamma^3}{3k_B T (c / k_H - P_{PG})^2} \right) c N_A$$

## 発泡現象支配方程式(再掲)

### 気泡径成長方程式

$$\frac{DR}{Dt} = v_{PG} \cdot \nabla R = \frac{R}{4\eta_p} \left( P_D - P_{PG} - \frac{2\gamma}{R} \right)$$

### 物質収支式(Han & Yoo モデル)

$$\frac{D(P_D R^3)}{Dt} = v_{PG} \cdot \nabla (P_D R^3) = \kappa (P_{D0} - P_D) R + \frac{P_D R^3}{T} v_{PG} \cdot \nabla T,$$

$$\kappa = \frac{6(R_g T) D k_H}{(-1 + \sqrt{1 + 2B})}, \quad B = \frac{P_D R^3 - P_{D0} R_0^3}{R^3 R_g T k_H (P_{D0} - P_{PG})}.$$

### 気泡剤濃度方程式

$$c(t) = c(0) - \int_0^t \frac{4\pi}{3} R^3(t-t', t') \frac{P_D(t-t', t')}{R_g T} J(t') dt'$$

$$\frac{Dn}{Dt} = v_{PG} \cdot \nabla n = J$$

### 気泡核生成頻度モデル

$$J = f_0 \left( \frac{2\gamma}{\pi M_w / N_A} \right)^{1/2} \exp \left( - \frac{16\pi\gamma^3 F}{3k_b T (c / k_H - P_{PG})^2} \right) c N_A$$

$R$  : 気泡半径 [m]

$\eta_p$  : 溶融粘度 [Pa·s]

$P_D$  : 気泡内圧力 [Pa]

$P_{PG}$  : 混合流体圧力 [Pa]

$\gamma$  : 表面張力係数 [J/m<sup>2</sup>]

$P_{D0}$  : 気泡内圧力の初期値 [Pa]

$R_g$  : ガス定数(気体定数) [J/mol/K]

$D$  : 発泡剤の拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]

$k_H$  : ヘンリー数 [mol/m<sup>3</sup>/Pa]

$c$  : 発泡剤濃度 [mol/m<sup>3</sup>]

$n$  : 気泡数密度 [1/mm<sup>3</sup>]

$J$  : 気泡核生成速度 [1/(s·mm<sup>3</sup>)]

$M_w$  : 分子量 [g/mol]

$K_b$  : ボルツマン定数 [J/mol/K]

$N_A$  : アボガドロ数 [1/mol]

$f_0, F$  : モデルフィッティングパラメータ [-]

青字: 未知量(CAEで定量化)

# 利用方法

1) 詳細設定ボタンを押して発泡解析条件設定フォームを表示

流れ条件設定  
 発達流れ設定  
 一定流速設定  
流量設定値  
100  
ダイ壁面層分割数  
20  
ペナルティ数  
1.000E+006  
詳細設定

2) 発泡解析では自由条件のみをサポート

異型押出用詳細設定

先端流れ条件  
 自由条件  
 流速規定条件  
 延伸率規定条件(平均流速比)  
 滑り解析: 滑り係数 0

温度条件  
流入温度 200 °C  FlowTetra/ダイ流入温度連成解析  
(順解析のみ流速も連成)

壁面境界条件  
 温度規定 温度規定値 200 °C  
 熱伝達規定

自由表面境界条件  
 温度規定 温度規定値 30 °C  
 熱伝達規定 熱伝達係数 30 W/m2/K

Cancel 設定/閉じる

3) 発泡解析チェックボックスをチェック状態とすると発泡解析機能が有効

発泡解析条件

発泡解析

発泡パラメータ

発泡剤分子量 44.0 g/mol  
ヘンリー定数 1.15e-4 mol/m3/Pa  
拡散係数 8.07e-9 m2/s  
表面張力 12.3 mJ/m2  
気体定数 8.314 J/mol/K  
アボガドロ数 6.022e+23 1/mol  
ボルツマン定数 1.381e-23 m2kg/s2/K  
核生成頻度モデルパラメータ F 0.014085 -  
核生成頻度モデルパラメータ f0 3.0e-25 -  
核生成頻度閾値jsh 9.8e-3 1/(s\*mm3)  
気体初期圧力 10.0 MPa  
発泡モデル反復計算回数 20

4) 発泡解析条件を記述



# テスト解析例／2D解析

テストサンプル: ¥Ver11testsample¥MPS¥foamtest\_6MPa.pcal

CO<sub>2</sub>発泡溶融ポリマーの円管ダイ(直径30mm)からの押出解析モデル(軸対称モデル)

## 【解析条件設定】

MultiProfile Calculationform

計算コントロールデータファイル名: cap6MPasorfm0404test

パス名: [MPS¥FoamTest]

メッシュデータファイル: cap0404

物性データファイル: vis15000

計算コントロールパラメータ

反復計算パラメータ

非線形反復計算回数: 100

ファイル出力間隔: 999

自由表面計算緩和係数: 0.2

ALE勾配限界: 10

粘度計算緩和係数: 1

No-flow 温度: 30

流れ条件設定

発達流れ設定

一定流速設定

流量設定値: 20

ダイ壁面層分割数: 5

ペナルティ数: 1.000E+006

流動解析法

Penalty function method

SUPG/PSPG method

非定常計算パラメータ

非定常計算サイクル数: 1

計算時間刻み: 0.1

流動計算コール間隔: 1

ファイル出力間隔: 999

モデル次元

2D  2.5D  3D

Axisymmetric

解析種別

順解析  逆解析

対流効果

考慮  無視

2.5D要素設定条件

分割数: [ ]

対称  非対称

ニュートン流体  
 $\eta = 15000 Pa \cdot s$

2D軸対称  
流動解析

中心流速 20cm/s  
の放物型流速分布

発泡解析の場合は  
SUPG/PSPG法を  
選択します。

発泡解析条件

発泡解析

発泡パラメータ

発泡剤分子量: 44 g/mol

ヘンリー定数: 0.000115 mol/m<sup>3</sup>/Pa

拡散係数: 8.07E-09 m<sup>2</sup>/s

表面張力: 12.3 mJ/m<sup>2</sup>

気体定数: 8.314 J/mol/K

アボガドロ数: 6.022E+23 1/mol

ボルツマン定数: 1.381E-23 m<sup>2</sup>kg/s<sup>2</sup>/K

核生成頻度モデルパラメータ F: 0.014085

核生成頻度モデルパラメータ f0: 1.8E-24

核生成頻度閾値 jsh: 0.0098

気体初期圧力: 6 1/(s·mm<sup>3</sup>)

発泡モデル反復計算回数: 20 MPa

CO<sub>2</sub>の分子量

$K_H$

CO<sub>2</sub>の初期圧力:  $P_{CO_2}(0)$   
(A) 6MPa, (B) 4.5MPa の解析結果を次ページ以降で示します。

## 気体初期圧力と初期濃度の関係

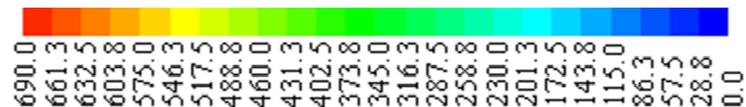
CO<sub>2</sub>初期(境界)圧力[MPa]    CO<sub>2</sub>初期(境界)濃度[mol/m<sup>3</sup>]

6.0	690	} $c(0) = \kappa_H P_{CO_2}(0)$
4.5	517.5	

# テスト解析結果

【発泡剤濃度  $c$ 】 [mol/m<sup>3</sup>]

コンターコントロールパネル  
 Output ID  
 1.  
 内容  
 22.Foam concentration (mol/m<sup>3</sup>)



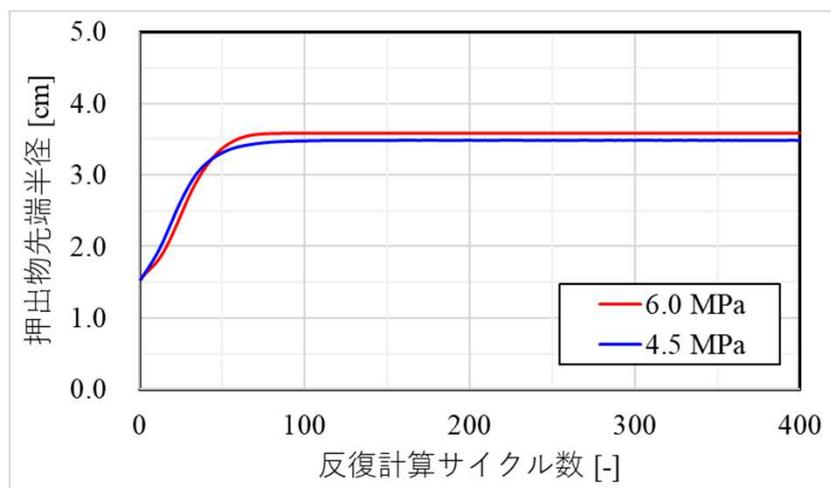
(A)  $P_{CO_2}(0)$ : 6.0 MPa



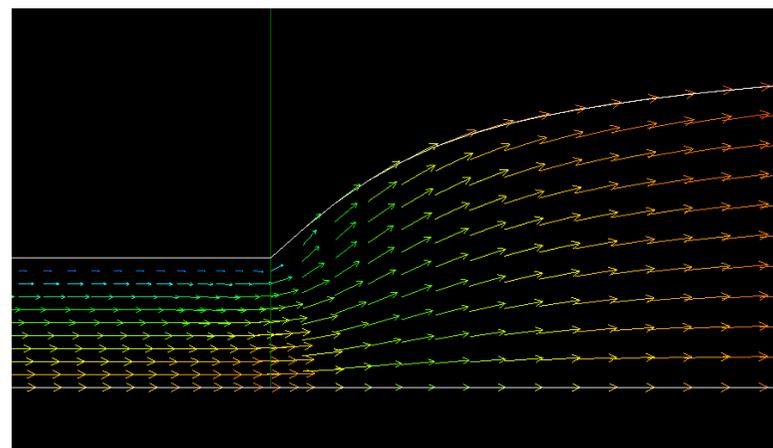
(B)  $P_{CO_2}(0)$ : 4.5 MPa



## 先端半径の収束性 (.convinf)



## ダイ流出口の流速ベクトル (4.5 MPa)



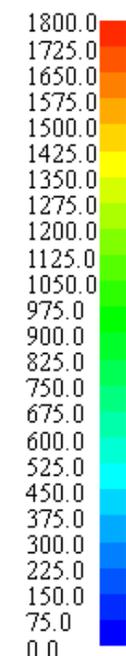
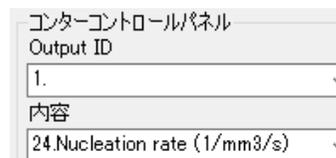
## テスト解析結果

【気泡核生成速度  $J$  (気泡発生開始点)】 [1/(mm<sup>3</sup>·s)]

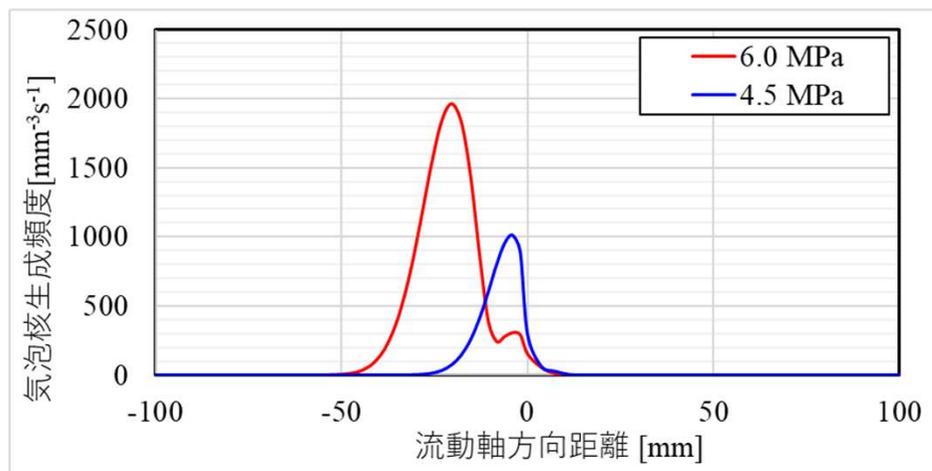
(A)  $P_{CO_2}(0)$ : 6.0 MPa



(B)  $P_{CO_2}(0)$ : 4.5 MPa



### 中心軸上の気泡核生成頻度分布 (グラフプロット出力)



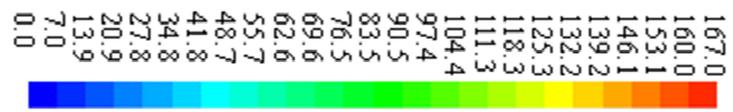
- ・発泡剤(CO<sub>2</sub>)濃度の低下に伴ない, 気泡発生開始点は下流側にシフトする傾向を示しました.
- ・加えて, 発泡剤(CO<sub>2</sub>)濃度の低下に伴ない, 気泡核生成頻度も低下する傾向を示しました.

# テスト解析結果

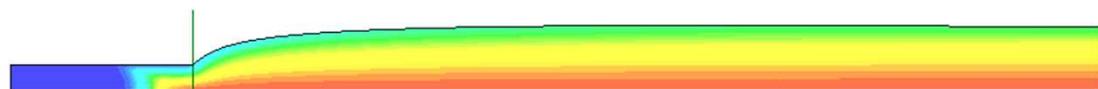
\*当結果の考察詳細は、下記の弊社技術資料を参照ください。  
[https://www.hasl.co.jp/seikashiryoII\\_2023.pdf](https://www.hasl.co.jp/seikashiryoII_2023.pdf)

## 【気泡数密度分布 $n$ 】[1/mm<sup>3</sup>]

コントローパネル  
 Output ID  
 1.  
 内容  
 21.Foam number (1/mm<sup>3</sup>)



(A)  $P_{CO_2}(0)$ : 6.0 MPa



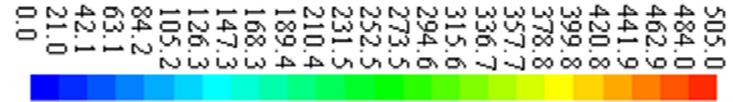
・CO2高濃度条件下では表面（外径）側の気泡数密度が中心部より低い。

(B)  $P_{CO_2}(0)$ : 4.5 MPa

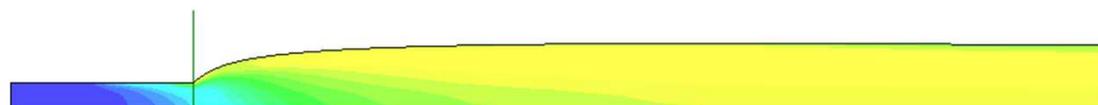


## 【気泡径分布 $R$ 】[ $\mu$ m]

コントローパネル  
 Output ID  
 1.  
 内容  
 20.Foam radius ( $\mu$ m)

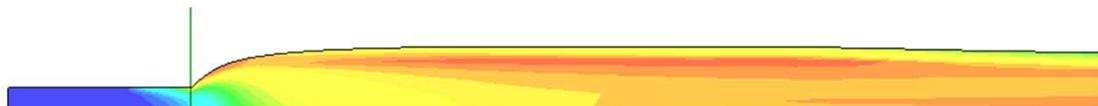


(A)  $P_{CO_2}(0)$ : 6.0 MPa



・発泡剤(CO2)濃度の低下に伴ない気泡径が増加。

(B)  $P_{CO_2}(0)$ : 4.5 MPa

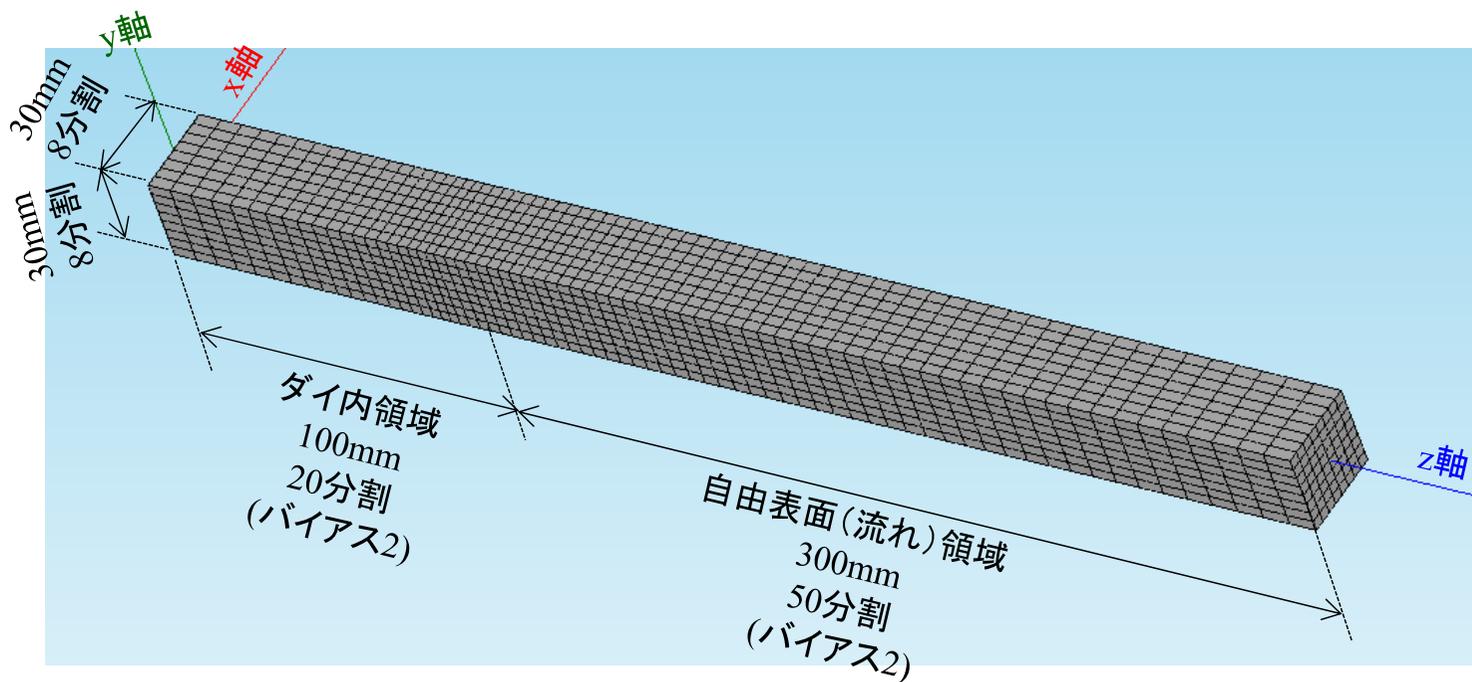


・4.5 MPa条件では、表面側の気泡径が冷却効果を反映して収縮。（射出成形品と同様の傾向）

## テスト解析例／3D解析 (サンプルファイル:)

正方形断面(30mm×30mm)の異形押出ダイからの3D発泡押出解析モデル

### 【3Dメッシュモデル】



# テスト解析例／3D解析

テストサンプル: ¥Ver11testsample¥MPS¥foamtest\_6MPa.pcal

正方形断面(30mm × 30mm)の異形押出ダイからの3D発泡押出解析モデル

## 【解析条件設定】

計算コントロールデータファイル名  
formtest3D\_6MPa 読込

パス名  
I¥MPS引¥継ぎ¥FoamTest

メッシュデータファイル  
rect3d0404 選択

物性データファイル  
vis 15000

新規作成 読込 多層物性設定

計算コントロールパラメータ

反復計算パラメータ  
非線形反復計算回数 200

ファイル出力間隔 999

自由表面計算緩和係数 0.5

ALE勾配限界 10

粘度計算緩和係数 1

No-flow 温度 30

流れ条件設定  
● 発達流れ設定  
○ 一定流速設定  
流量設定値 100

ダイ壁面層分割数 20

パネルティ数 1.000E+006

流動解析法  
○ Penalty function method  
● SUPG/PSPG method

非定常計算パラメータ  
非定常計算サイクル数 1

計算時間刻み 0.1

流動計算コール間隔 0

ファイル出力間隔 999

モデル次元  
○ 2D ○ 2.5D ● 3D 3D流動解析

Axisymmetric

解析種別  
● 順解析 ○ 逆解析

対流効果  
○ 考慮 ● 無視

2.5D要素設定条件  
分割数

● 対称 ○ 非対称

● 定常 ○ 非定常

ニュートン流体  
 $\eta = 15000 Pa \cdot s$

3D流動解析

発泡解析の場合は  
順解析を選択します。

流量100cm<sup>3</sup>/s  
の発達流れ設定

発泡解析の場合は  
SUPG/PSPG法を  
選択します。

異形押出用詳細設定

先端流れ条件  
● 自由条件  
○ 流速規定条件  
○ 延伸率規定条件(平均流速比)

滑り解析: 滑り係数 0

温度境界条件の設定

温度条件  
流入温度 200 °C  FlowTetra/ダイ流入温度連成解析  
(順解析のみ流速も連成)

壁面境界条件  
● 温度規定 温度規定値 180 °C  
○ 熱伝達規定

自由表面境界条件  
○ 温度規定 温度規定値 30 °C  
● 熱伝達規定 熱伝達係数 50 W/m<sup>2</sup>/K

Cancel 設定/開じる

発泡解析条件  
☑ 発泡解析

発泡パラメータ

発泡剤分子量 44 g/mol

ヘンリー定数 0.000115 mol/m<sup>3</sup>/Pa

拡散係数 8.07E-09 m<sup>2</sup>/s

表面張力 12.3 mJ/m<sup>2</sup>

気体定数 8.314 J/mol/K

アボガドロ数 6.022E+23 1/mol

ボルツマン定数 1.381E-23 m<sup>2</sup>kg/s<sup>2</sup>/K

核生成頻度モデル  
パラメータ F 0.014085 -

核生成頻度モデル  
パラメータ f<sub>0</sub> 3E-25 -

核生成頻度閾値jsh 0.0098 1/(s·mm<sup>3</sup>)

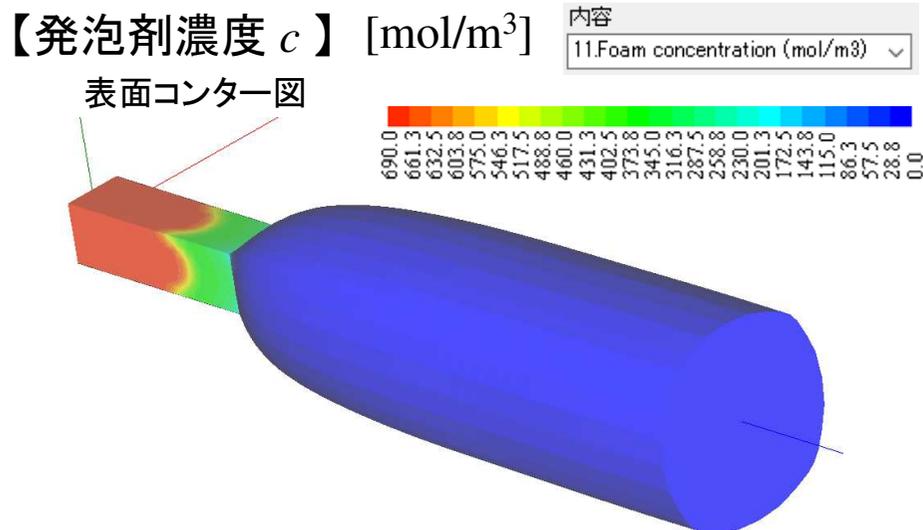
気体初期圧力 6 MPa

発泡モデル反復計算回数 10

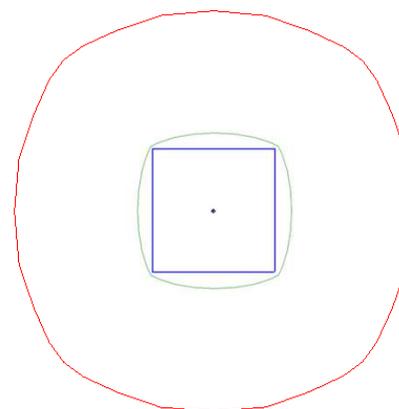
(参考)2Dメッシュモデル(p.9)の  
場合は、メッシュモデルに直接  
温度境界条件を設定します。  
3Dメッシュモデルの場合は  
本項で設定します。

$P_{CO_2}(0)$ : 6.0 MPa  
(初期濃度 690mol·m<sup>-3</sup>)  
の条件で解析を実施しました。

# テスト解析結果

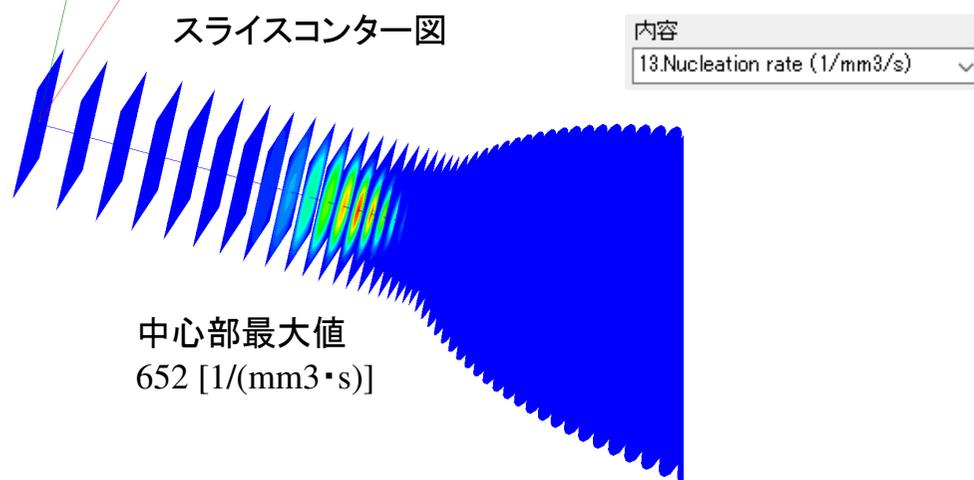


断面形状(.dxf)

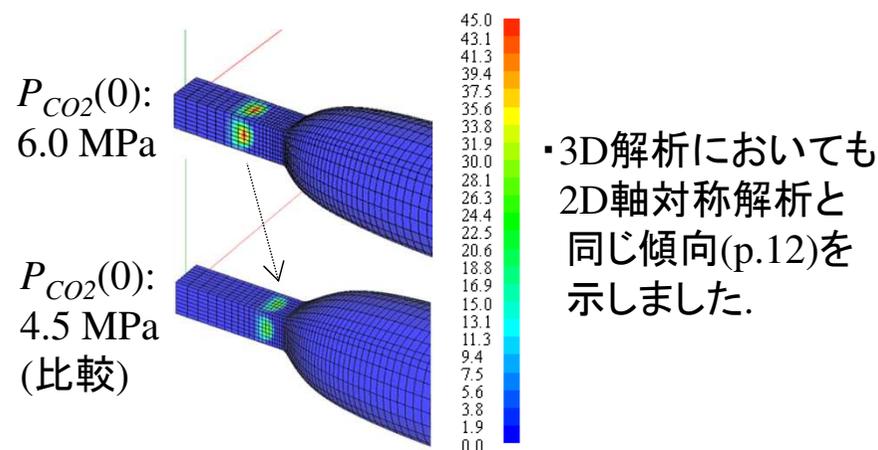


- 青: ダイ流出断面形状 (30×30)
- 緑: 非発泡(発泡解析OFF)の場合の押出先端断面形状(参考)
- 赤: 発泡押出物先端断面 (断面積比: 9.1倍)

【気泡核生成速度  $J$  (気泡発生開始点)】 [1/(mm<sup>3</sup>·s)]

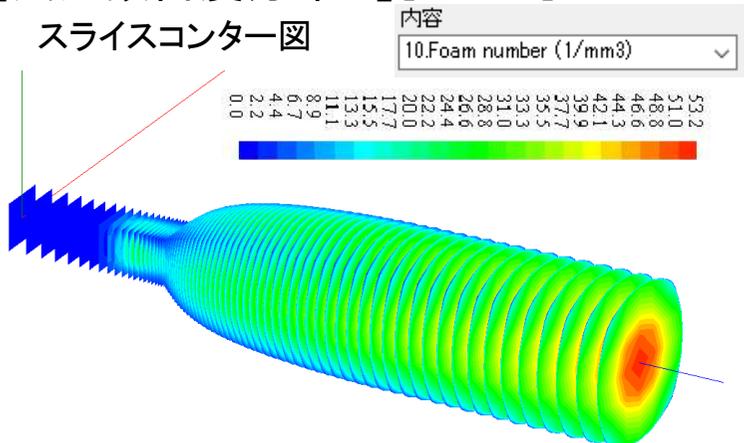


(参考) 初期濃度の影響確認

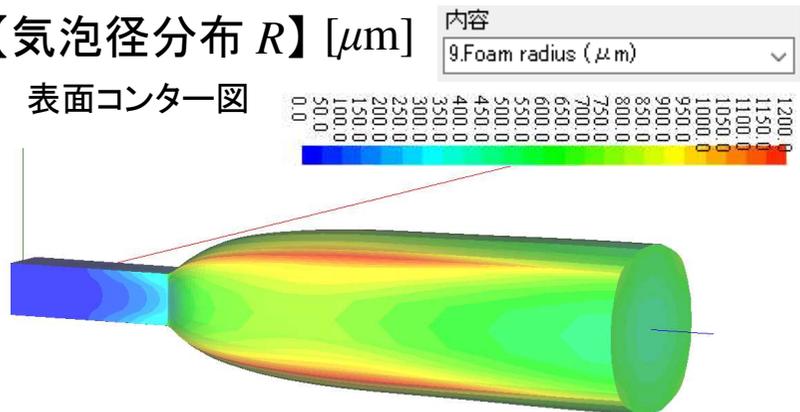


# テスト解析結果

## 【気泡数密度分布 $n$ 】[1/mm<sup>3</sup>]

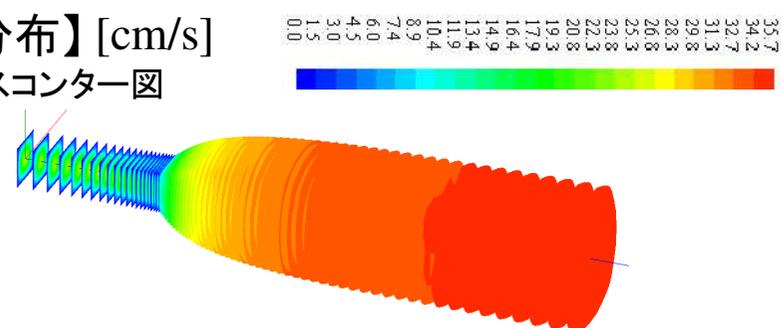


## 【気泡径分布 $R$ 】[ $\mu\text{m}$ ]



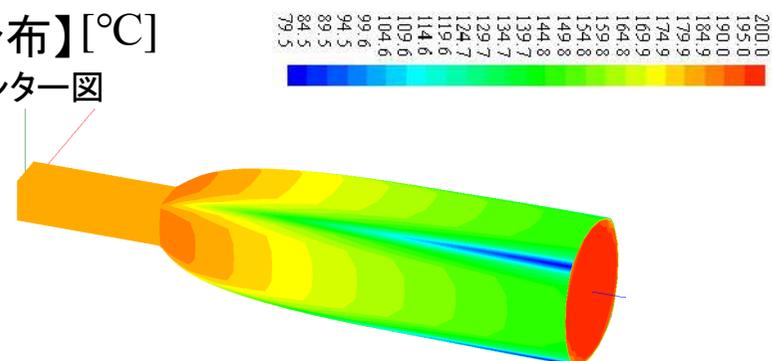
## 【流速分布】[cm/s]

スライスコンター図



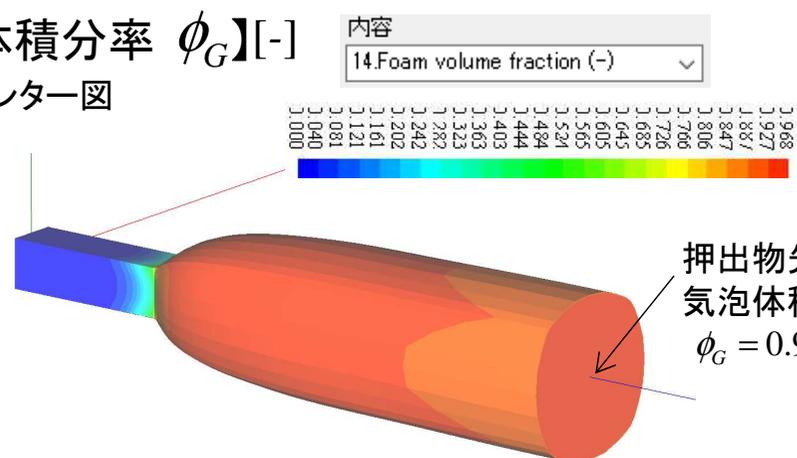
## 【温度分布】[ $^{\circ}\text{C}$ ]

表面コンター図



## 【気泡体積分率 $\phi_G$ 】[-]

表面コンター図



## (参考) 発泡倍率の机上検証

ヘンリー則

$$\text{発泡剤濃度} : 6 \text{ MPa} \times 1.15 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1} = \underline{690} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} = C_0$$

理想気体状態方程式

$$PV_G = n\tilde{R}_g T$$

$\tilde{R}_g$  : 気体定数 ( $8.314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ )

$$PV_G = C_0 V_P \tilde{R}_g T$$

$$\because n = C_0 V_P$$

発泡倍率 (Foaming ratio)

$$F_r \equiv \frac{V_P + V_G}{V_P} = \frac{V_P + \frac{C_0 V_P \tilde{R}_g T}{P}}{V_P} = 1 + \frac{C_0 \tilde{R}_g T}{P}$$

概算値:

$$F_r = 1 + \frac{690 \times 8.314 \times (200 + 273.15)}{1013 \times 10^2} = \underline{27.8}$$

シミュレーション予測結果:  $\phi_G = 0.965$

$$F_r = \frac{1}{\phi_p} = \frac{1}{1 - \phi_G} = \frac{1}{1 - 0.965} = \underline{28.6}$$

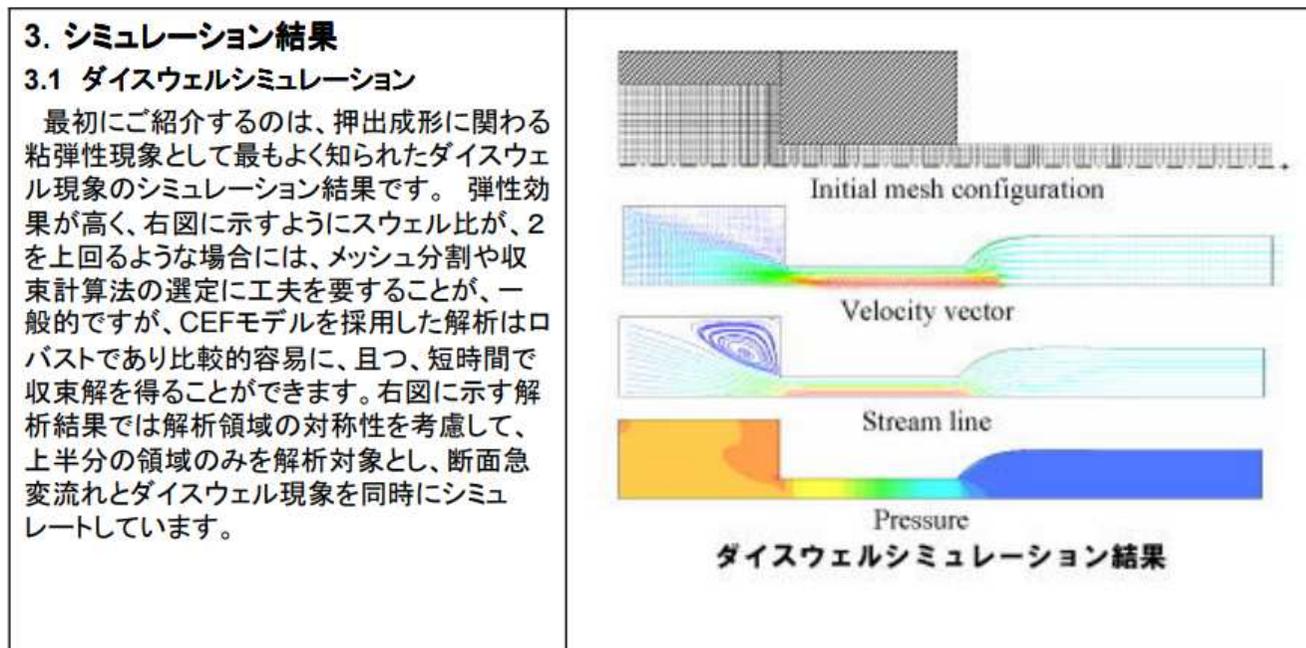
$$\text{相対誤差} : (28.6 - 27.8) / 27.8 \times 100 = \underline{2.89\%}$$

工学的許容誤差範囲内

## (2) 粘弾性効果を考慮した自由表面解析(2D)

本節では, CEF粘弾性モデルを用いて粘弾性現象を定量化する解析方法について(参考文献), Multi Profile Simulator 2D解析機能を用いた具体的な運用方法およびダイスウェルシミュレーションの解析事例をご紹介します。

図: 当社技術資料より抜粋 (<https://www.hasl.co.jp/Flowsimulator2.pdf>)



参考文献: 動的粘弾性測定とそのデータ解釈事例, 第3章1節,  
“高分子の粘性、粘弾性モデリングと成形加工プロセスの流動解析”, 谷藤眞一郎, 技術情報協会(2021)

## CEF粘弾性モデル

1) Criminale, Jr. W. O., Ericksen, J. L. and Filbey, Jr. G. L. : Arch. Rat. Mech. Anal., 1, 410 (1985)

$$\tau = 2\eta D - \psi_1 \overset{\nabla}{D} + 4\psi_2 D \cdot D$$

$\tau$  : 粘弾性余剰応力テンソル (Pa)  
 $\eta$  : 溶融粘度 (Pa·s)  
 $\psi_1$  : 第1法線応力差係数 (Pa·s<sup>2</sup>)  
 $\psi_2$  : 第2法線応力差係数 (Pa·s<sup>2</sup>)  
 $U$  : 流速ベクトル( $u, v, w$ )  
 $L$  : 速度勾配テンソル  
 $D$  : 変形速度テンソル  
 $\overset{\nabla}{D}$  :  $D$  の Upper-convected 時間微分

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}, \quad \overset{\nabla}{D} = \frac{\partial D}{\partial t} + U \cdot \nabla D - L \cdot D - D \cdot L^T$$

\*当粘弾性モデルを用いたダイ内の3D熱流動解析機能については、Flow Tetra に実装済みです。  
 (Flow Simulator 3D Ver 10.0.0 (2022) 改良成果資料.pptx, p.35-)

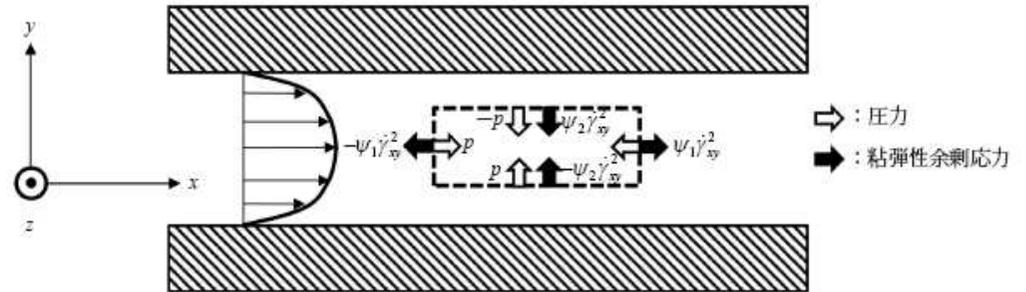
## 2次元定常粘性流動への適用

$$\tau = 2\eta D - \psi_1 \nabla D + 4\psi_2 D \cdot D$$

平行平板 (xy断面) の x 方向への定常流動

第1法線応力差(Pa)  $N_1 = \tau_{xx} - \tau_{yy} = \psi_1 \dot{\gamma}_{xy}^2$

第2法線応力差(Pa)  $N_2 = \tau_{yy} - \tau_{zz} = \psi_2 \dot{\gamma}_{xy}^2$



(導出例)

$$N_1 = \tau_{xx} - \tau_{yy}$$

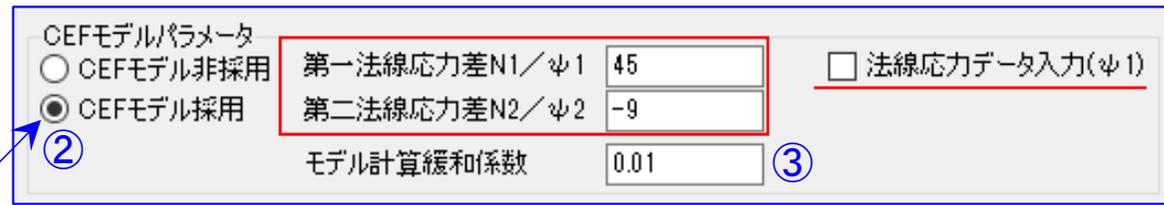
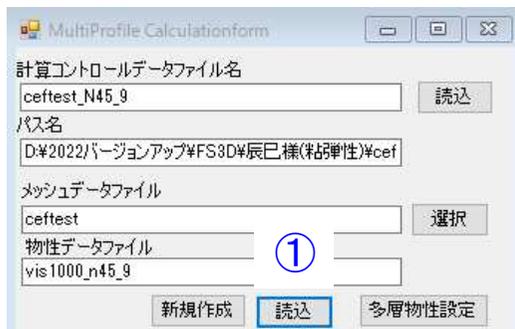
$$= \left( 2\eta \frac{\partial u}{\partial x} + \psi_1 \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) - \psi_1 \left( u \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) + 4\psi_2 \left( \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)^2 \right) \right)$$

$$- \left( 2\eta \frac{\partial v}{\partial y} + \psi_1 \left( \frac{\partial v}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \psi_1 \left( u \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) + v \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) \right) + 4\psi_2 \left( \left( \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right)$$

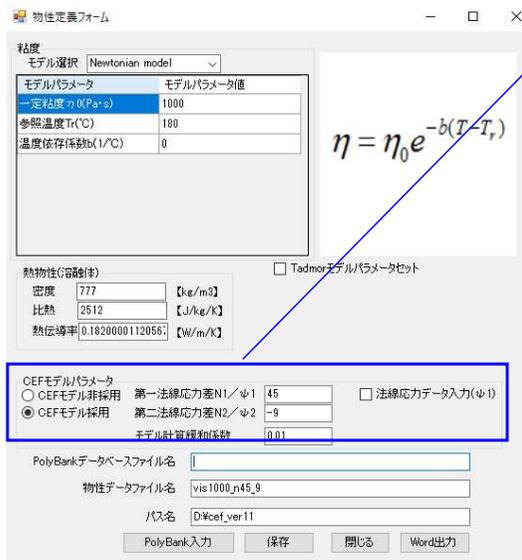
$$= \left( \psi_1 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + 4\psi_2 \left( \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right)^2 - 4\psi_2 \left( \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right)^2 \right) = \psi_1 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$$

# 利用方法

1. 解析条件設定フォーム上段の、樹脂物性選択欄において、読みボタンをクリックして使用する樹脂データを読み込むと(①)、物性定義フォームが出現します。
2. 物性定義フォーム下段のCEFモデルパラメータ欄において、CEFモデル採用ラジオボタンをチェックして保存します(②)。本項がチェックされている場合、解析実行時に自動的にCEFモデルを考慮した熱流動解析が実施されます。



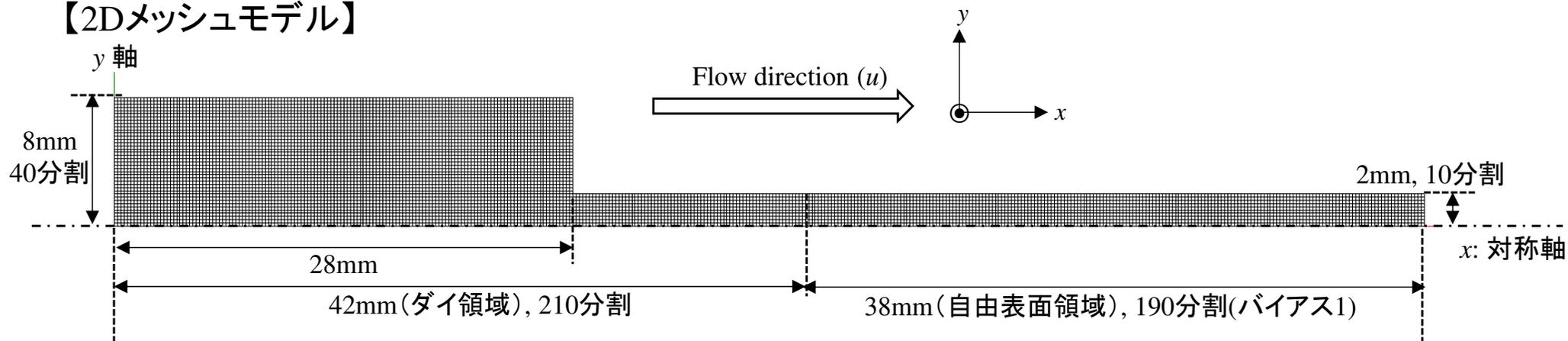
- ・ 第一および第二法線応力差係数 ( $\psi_1$  および  $\psi_2$ ) は、定数入力および変数(実験値のフィッティングカーブ)入力が可能です。詳細は、FlowSimulator3DVer10.0.0(2022)改良成果資料.pptx, p.38-を参照ください。
- ・ FlowTetraに実装済みの3Dダイ内の熱流動解析では、熱流動解析とCEFモデルに基づく余剰応力解析を独立して解析しますが、当2D解析では、熱流動解析と余剰応力解析を連成して解析します。そのため、CEFモデル計算緩和係数(③)を設定し、解の収束性を調整する必要があります。(緩和係数が小さいほど緩やかに収束する。その分、非線形反復計算回数を大きくする。)



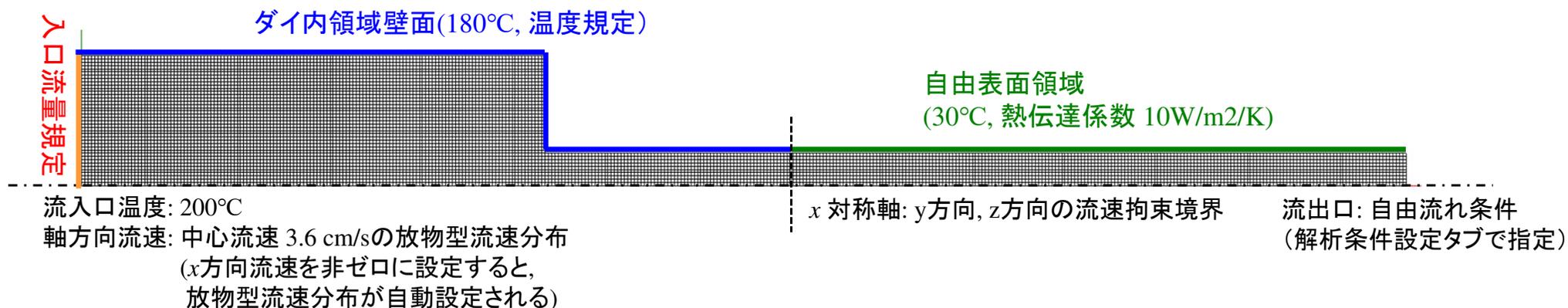
## テスト解析例

断面急変部および自由表面領域を有する  $x$  軸対称2Dモデル

### 【2Dメッシュモデル】



### 【境界条件設定】



# テスト解析例 テストサンプル: ¥Ver11testsample¥MPS¥ceftest\_n50.pcal

## 【解析条件設定】

$$\eta = \eta_0 e^{-b(T-T_r)}$$

ニュートン流体  
 $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

2D流動解析

中心流速 3.6 cm/s  
の放物型流速分布

CEFモデルを利用する  
場合はSUPG/PSPG法  
を選択します。

### 解析条件 (3水準)

Case	第1法線応力差係数 $\psi_1$ (Pa·s <sup>2</sup> )	第2法線応力差係数 $\psi_2$ (Pa·s <sup>2</sup> )
(A)	0	0
(B)	25	-5
(C)	50	-10

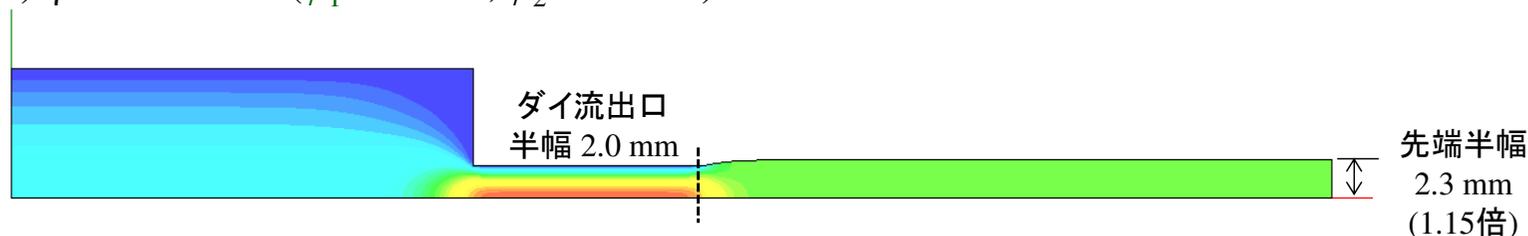
$\psi_2$  には  $\psi_1$  の-0.2倍を設定。

# テスト解析結果

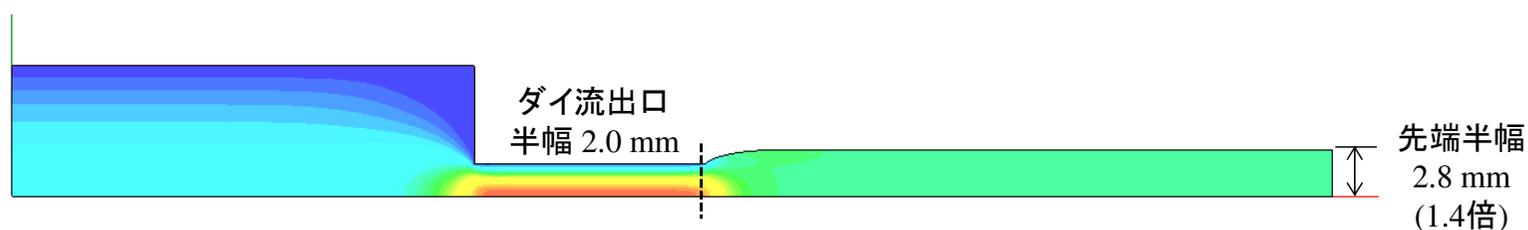
【流速分布】 [cm/s]



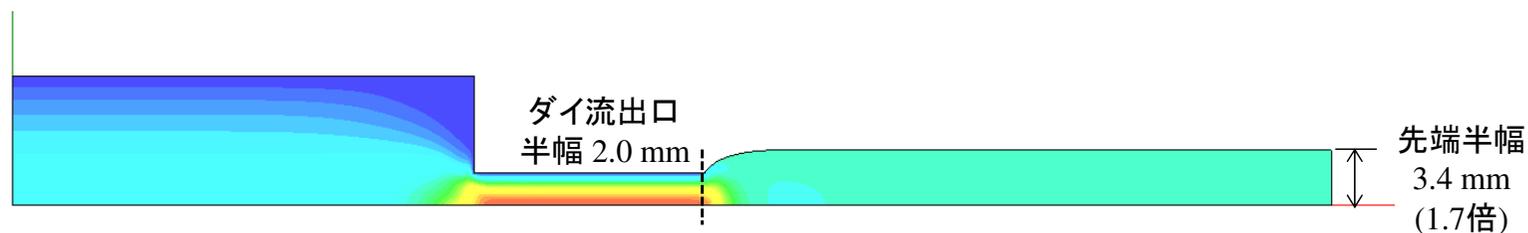
(A)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  ( $\psi_1=0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ )



(B)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\psi_1=25 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=-5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$



(C)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\psi_1=50 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=-10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$

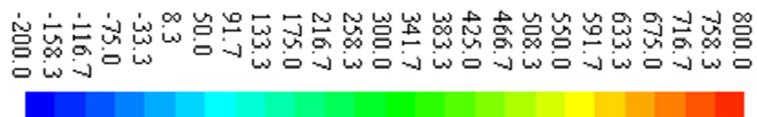


CEFモデルの適用により法線応力差を考慮することで、ダイスウェルの効果が確認できました。  
(特に第1法線応力の影響が大きい, 次ページ),

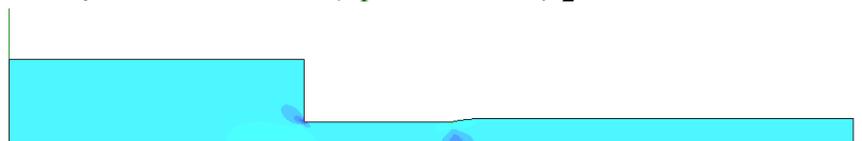
# テスト解析結果

内容  
16.N1( $\tau_{xx} - \tau_{yy}$ )

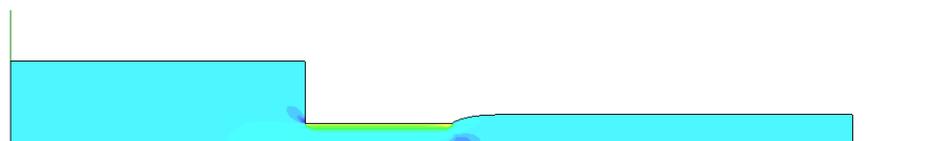
【第1法線応力差】[Pa]  $N_1 = \tau_{xx} - \tau_{yy} = \psi_1 \dot{\gamma}_{xy}^2$



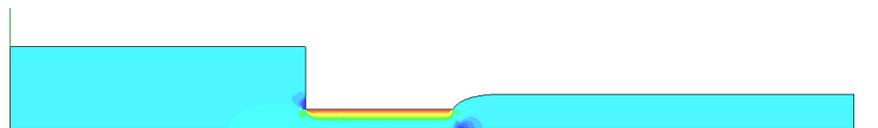
(A)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  ( $\psi_1=0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ )



(B)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\psi_1=25 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=-5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$

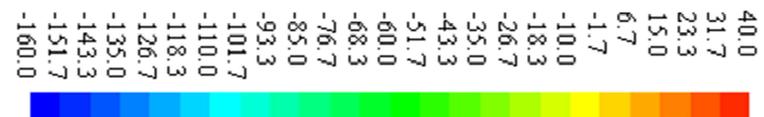


(C)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\psi_1=50 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=-10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$

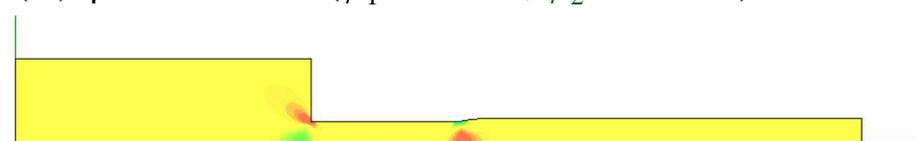


内容  
17.N2( $\tau_{yy} - \tau_{zz}$ )

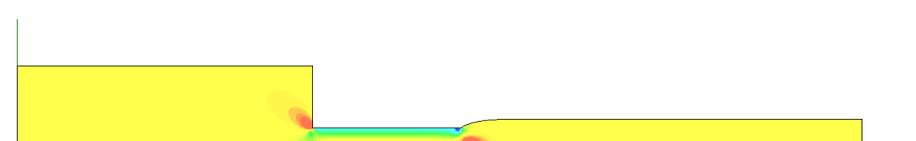
【第2法線応力差】[Pa]  $N_2 = \tau_{yy} - \tau_{zz} = \psi_2 \dot{\gamma}_{xy}^2$



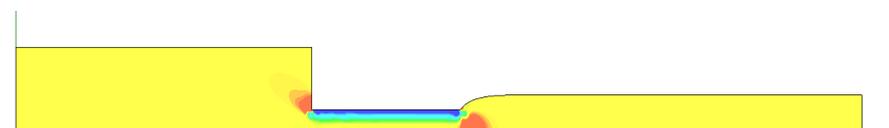
(A)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  ( $\psi_1=0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ )



(B)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\psi_1=25 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=-5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$

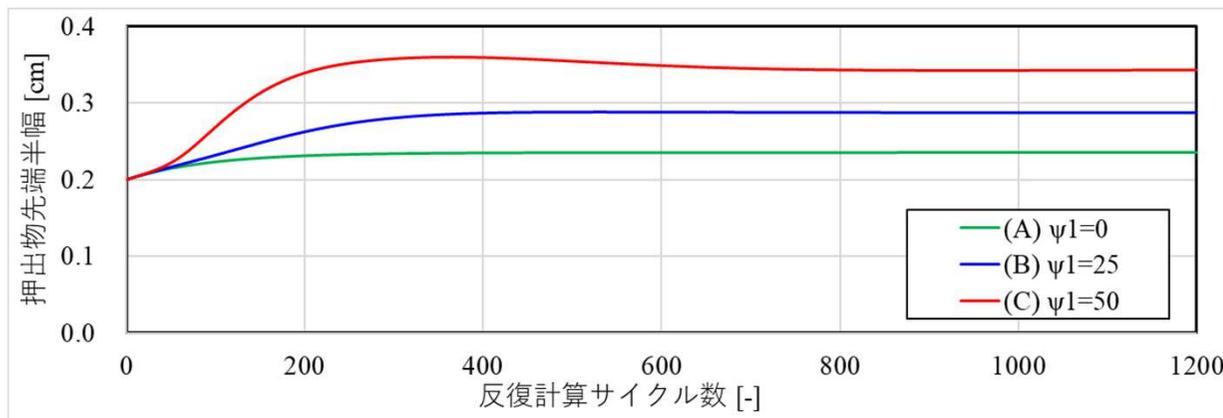


(C)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\psi_1=50 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=-10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$



# テスト解析結果

## ○ 先端半幅の収束性 (.convinf)



計算コントロールパラメータ  
 反復計算パラメータ  
 非線形反復計算回数  
  
 ファイル出力間隔

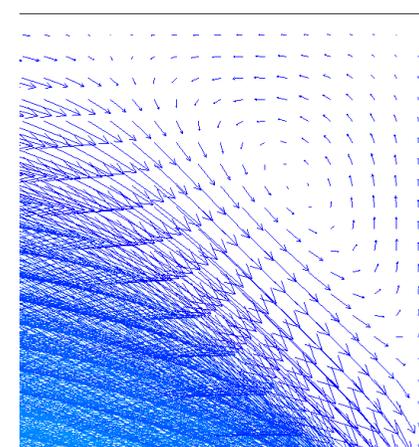
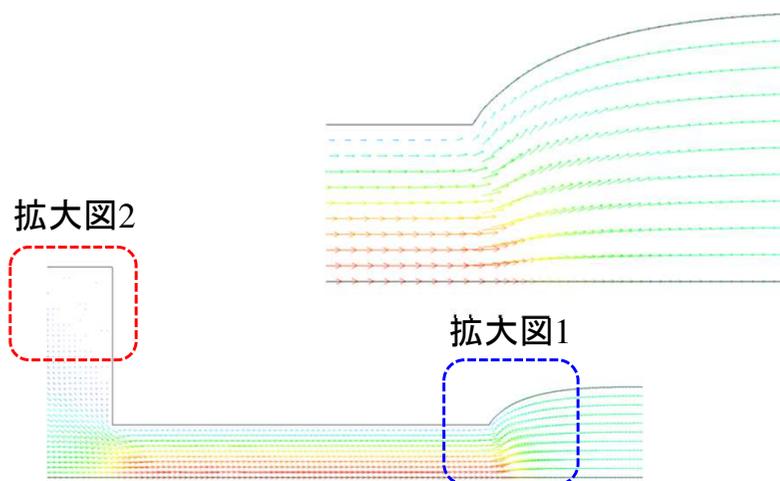
ファイル出力間隔の設定により, 途中経過の解析結果出力が可能です.

- ceftest\_n50\_cycle1000.2drst
- ceftest\_n50\_cycle800.2drst
- ceftest\_n50\_cycle600.2drst
- ceftest\_n50\_cycle400.2drst
- ceftest\_n50\_cycle200.2drst

## ○ 流速ベクトル (C) $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , $\psi_1=50 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ , $\psi_2=-10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$

ダイ流出口 (拡大図1)

ダイ断面急変部 (拡大図2)



流速の絶対値としては小さいものの, 断面急変部での渦流れの形成が確認できました.

ベクトル色  
 単色  カラー  
 カラーパラメータ  
 ランク   
 最大   
 最小   
 長さ

# テスト解析結果

## 【圧力分布】 [MPa]

1.40  
1.34  
1.28  
1.23  
1.17  
1.11  
1.05  
0.99  
0.93  
0.88  
0.82  
0.76  
0.70  
0.64  
0.58  
0.53  
0.47  
0.41  
0.35  
0.29  
0.23  
0.18  
0.12  
0.06  
0.00



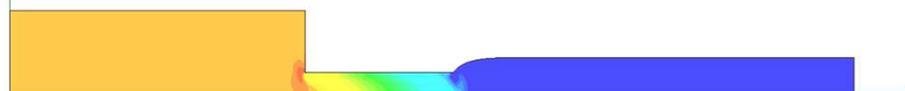
(A)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  ( $\psi_1=0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ )



(B)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\psi_1=25 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=-5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$



(C)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\psi_1=50 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=-10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$



## 【温度分布】 [°C]

200.0  
194.2  
188.3  
182.5  
176.7  
170.8  
165.0  
159.2  
153.3  
147.5  
141.7  
135.8  
130.0  
124.2  
118.3  
112.5  
106.7  
100.8  
95.0  
89.2  
83.3  
77.5  
71.7  
65.8  
60.0



(A)  $\eta = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  ( $\psi_1=0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ ,  $\psi_2=0 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ )



## (1) FVM(有限体積法)に基づく新規解析機能

本機能では、下記の3つの方程式の解析時に、Flow Tetraの標準解法であるFEM(有限要素法)に加えて、移流支配の方程式の解析精度に優れるFVM(有限体積法)を選択できるようになりました。

### 1. 温度解析／エネルギー方程式 (p.31)

$$\rho C_p \mathbf{u} \nabla T = \kappa \Delta T + \eta \dot{\gamma}^2$$

移流項                  拡散項          ソース項

### 2. 滞留時間解析／定常移流方程式 (p.34)

$$\mathbf{u} \nabla \tau_{res} = 1$$

移流項          ソース項

### 3. ひずみ履歴解析(新機能)／定常移流方程式 (p.38)

$$\mathbf{u} \nabla \gamma = \dot{\gamma}$$

移流項          ソース項

$\mathbf{u}$  : 流速ベクトル(3次元)  
 $\eta$  : 粘度  
 $p$  : 圧力  
 $\rho$  : 密度  
 $C_p$  : 比熱  
 $\kappa$  : 熱伝導率  
 $\dot{\gamma}$  : ひずみ速度  
 $\tau_{res}$  : 滞留時間(sec)  
 $\gamma$  : ひずみ(-)

# (1) FVM(有限体積法)に基づく新規解析機能

## 1. 温度解析／エネルギー方程式

$$\rho C_p \mathbf{u} \nabla T = \kappa \Delta T + \eta \dot{\gamma}^2$$

移流項                      拡散項      ソース項

### 利用方法

解析条件タブ内の温度計算条件欄で、FVM法(新規)またはFEM法(旧Ver.)を選択します。



どちらの解法でも  
壁面温度規定、壁面熱伝達規定  
を選択できます。

### FVM法: FVM定常解析(新規)

拡散項を、隣接するセル(要素)重心間の法線方向距離を算出して定義

$$\sum_{ia=1}^{ia \max} \mathbf{n} \cdot \nabla T = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_{i \rightarrow ia}}{|\mathbf{r}_{i \rightarrow ia}|^2} (T_{ia} - T_i)$$

テトラ(四面体)要素の例

### FEM法: FEM & SUPG定常解析

SUPG: 解の数値振動を抑制する安定化処理

# テスト解析例／温度解析

## ○条件設定例

解析条件設定

解析コントロールデータファイル名  
cylinder\_fvm\_200 [読み]

樹脂物性選択  
PP\_D3.pro [選択] [読み] [新規]

モデル選択  
cylinder.3msh [選択] [読み]

FEMAP neutral file  
 FEMAPポストファイル出力 cylinder.neu [選択]

解析条件設定

解析モデル  
 3D  
 2.5D  
 2.5D Multi  
 壁面滑り考慮  
 牽引流考慮

計算条件  
イタレーション最大値 10

温度計算条件  
 FVM法  FEM法(旧Ver.)  
 壁面温度規定  壁面熱伝達規定  
 境界温度 180 °C  
 熱伝達係数 600 W/m2/°C  
 粘性発熱係数 0 温度分布設定

流入出口境界条件 (位置はメッシュモデルに準拠)  
 単層解析  多層解析  
 流入口流量 200.00 cm3/sec  
 流入口温度 200.00 °C  
 流出口圧力 0.00 MPa

テストサンプル: ¥Ver11testsample¥FT¥cylinder\_fvm\_200.prj

## ○解析モデル

### ・Φ56.3mm 円管モデル

流路体積: 547.7 cm<sup>3</sup>

メッシュサイズ: 1.5mm  
355,548 要素

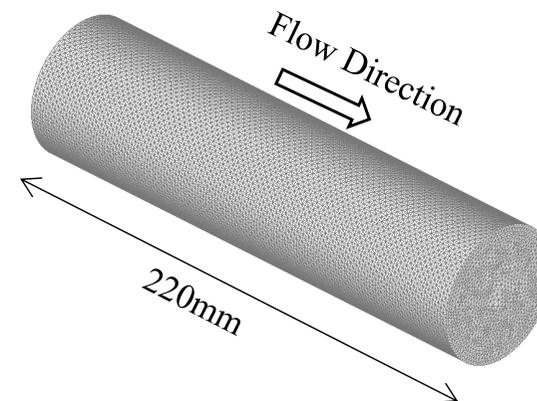
樹脂データ: PP\_D3.pro  
(Materialfit DB)

壁面温度規定

$T_{bc} = 180\text{ °C}$

流入口温度

$T_{in} = 200\text{ °C}$



## ○解析条件: 解法と流入口流量を変えた4水準

Case	解法	流入口流量
(A)	FEM法	50 cm <sup>3</sup> /sec
(B)	FEM法	200 cm <sup>3</sup> /sec
-----		
(C)	FVM法	50 cm <sup>3</sup> /sec
(D)	FVM法	200 cm <sup>3</sup> /sec

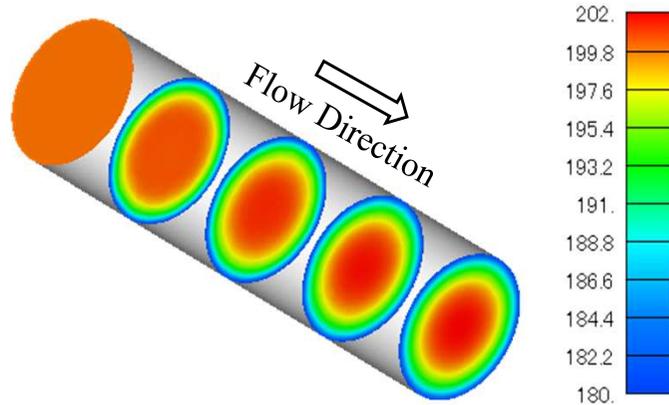
FEM法(旧Ver.)

FVM法

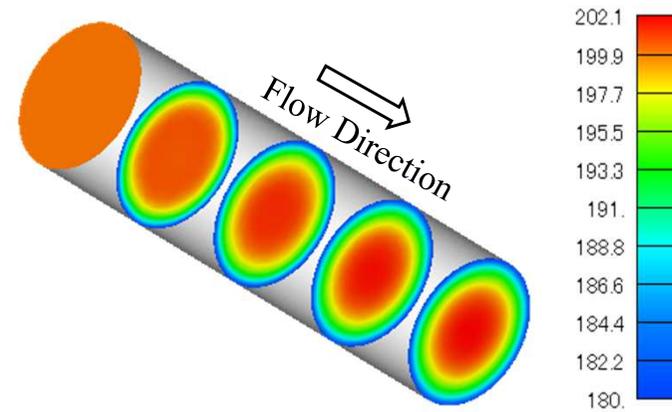
## テスト解析結果／温度分布(°C)

### FEM法: FEM & SUPG定常解析

(A)  $Q=50 \text{ cm}^3/\text{sec}$

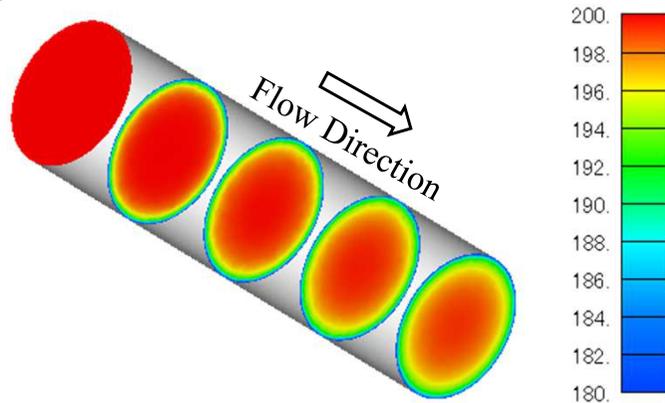


(B)  $Q=200 \text{ cm}^3/\text{sec}$

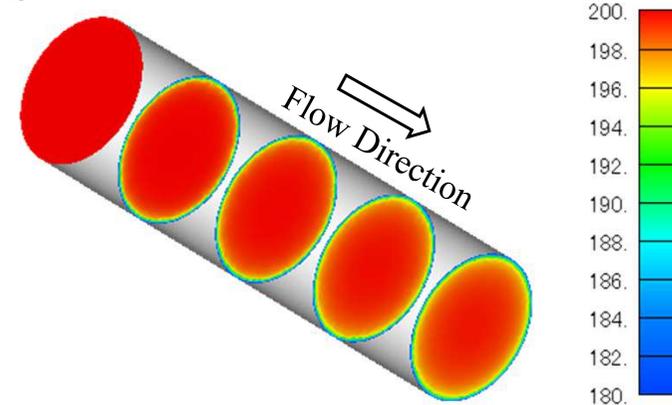


**FVM法: FVM定常解析(新規)** 移流項(流速)の変化に対する解の感度が高く, 精度も良好.

(C)  $Q=50 \text{ cm}^3/\text{sec}$



(D)  $Q=200 \text{ cm}^3/\text{sec}$



# (1) FVM(有限体積法)に基づく新規解析機能

## 2. 滞留時間解析／定常移流方程式

$$\mathbf{u} \nabla \tau_{res} = 1$$

$\tau_{res}$ : 滞留時間(sec)

\* 流入位置を0 sec とした場合の、各流路位置への到達時間を定量化します。

### 利用方法

解析条件タブ内の滞留時間計算欄において、“滞留時間を計算” にチェックした後、FVM法(新規解法)またはVOF法(従来解法)を選択します。

滞留時間計算	
<input checked="" type="checkbox"/> 滞留時間を計算	<input checked="" type="radio"/> FVM法 <input type="radio"/> VOF法(旧Ver.)
滞留時間計算パラメータ	
モデル分割刻み	1
計算サイクル数	1
最大計算時間	120.0 %

滞留時間計算	
<input checked="" type="checkbox"/> 滞留時間を計算	<input type="radio"/> FVM法 <input checked="" type="radio"/> VOF法(旧Ver.)
滞留時間計算パラメータ	
モデル分割刻み	100
計算サイクル数	2000
最大充填率	99.0 %

- FVM法では、定常方程式を1回で解析するため、モデル分割刻み、計算サイクル数は使用されません。
- 最大計算時間には、流出口への最大到達時間を100%としたときの最大の計算時間を設定します。

- VOF法(非定常解析)では、モデル分割刻み、計算サイクル数、最大充填率を設定します。(通常はデフォルト条件でOK)

(例) 流出口到達時間が100sec のとき、最大計算時間に120%を設定すると、到達時間が120秒以上の要素の滞留時間を120秒として結果出力されます。

# テスト解析例／滞留時間解析

## ○条件設定例

解析条件設定

解析コントロールデータファイル名  
2tube\_rtd\_fvm

樹脂物性選択  
PP\_D3.pro

モデル選択  
2tube.3msh

FEMAP neutral file  
 FEMAPポストファイル出力 2tube.neu

解析条件設定

解析モデル  
 3D  
 2.5D  
 2.5D Multi  
 壁面滑り考慮  
 牽引流考慮

計算条件  
イタレーション最大値

温度計算条件  
 FVM法  FEM法(旧Ver.)  
 壁面温度規定  壁面熱伝達規定  
 境界温度  °C  
 熱伝達係数  W/m2/°C  
 粘性発熱係数

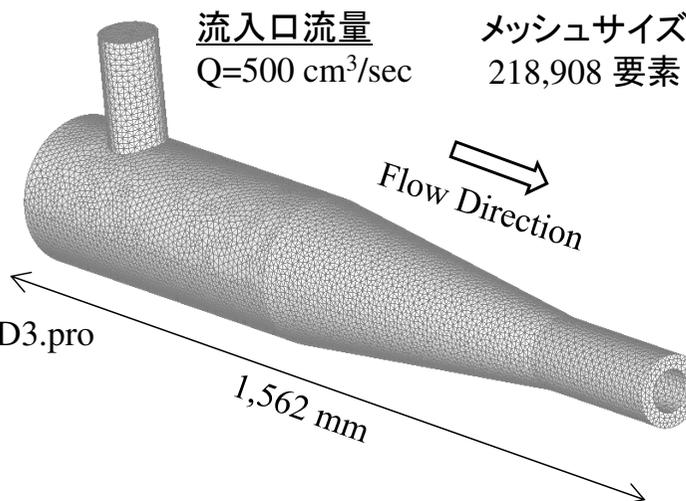
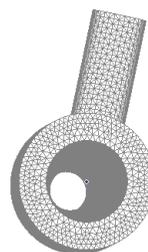
流入出口境界条件 (位置はメッシュモデルに準拠)  
 単層解析  多層解析  
 流入口流量  cm3/sec  
 流入口温度  °C  
 流出口圧力  MPa

滞留時間計算  
 滞留時間を計算  FVM法  VOF法(旧Ver.)  
 滞留時間計算パラメータ  
 モデル分割刻み   
 計算サイクル数   
 最大計算時間  %

テストサンプル: ¥Ver11testsample¥FT¥2tube\_rtd\_fvm.prj

## ○解析モデル

・クロスヘッドダイモデル



流路体積: 36,536 cm<sup>3</sup>  
メッシュサイズ: 10.0mm  
218,908 要素

流入口流量  
Q=500 cm<sup>3</sup>/sec

樹脂データ: PP\_D3.pro  
(Materialfit DB)

壁面温度規定

$T_{bc} = 180 \text{ } ^\circ\text{C}$

流入口温度

$T_{in} = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$

## ○解析条件: 解法を変えた2水準

### (A) VOF法

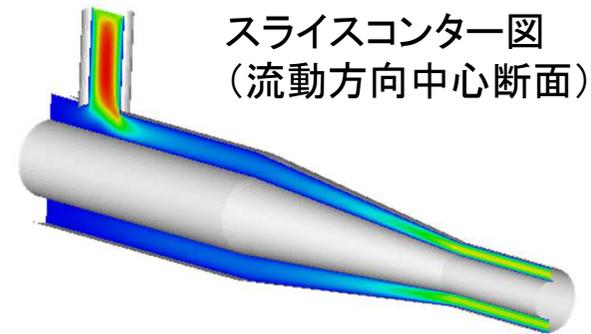
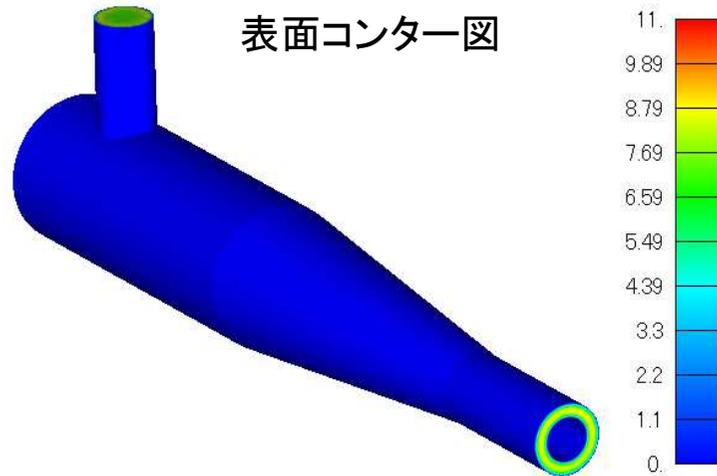
滞留時間計算  
 滞留時間を計算  FVM法  VOF法(旧Ver.)  
 滞留時間計算パラメータ  
 モデル分割刻み   
 計算サイクル数   
 最大充填率  %

### (B) FVM法

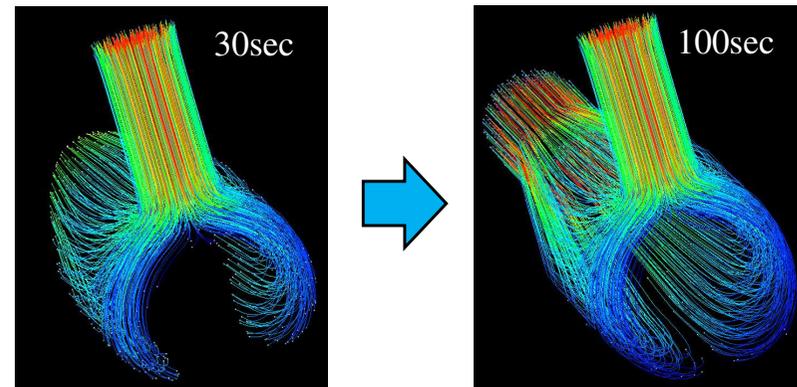
滞留時間計算  
 滞留時間を計算  FVM法  VOF法(旧Ver.)  
 滞留時間計算パラメータ  
 モデル分割刻み   
 計算サイクル数   
 最大計算時間  %

## テスト解析結果

【流速分布】[cm/s]



○流線図(粒子トレースライン)

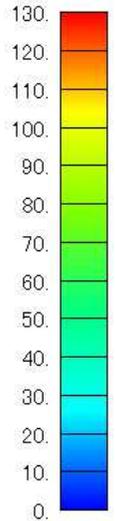
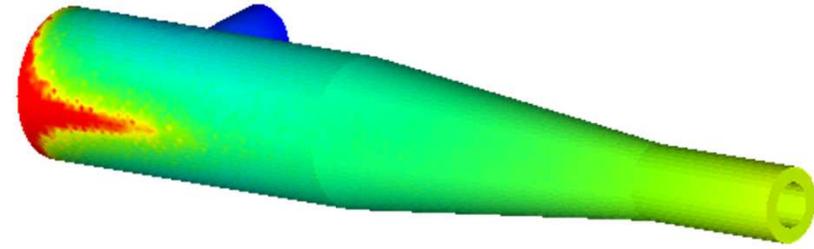
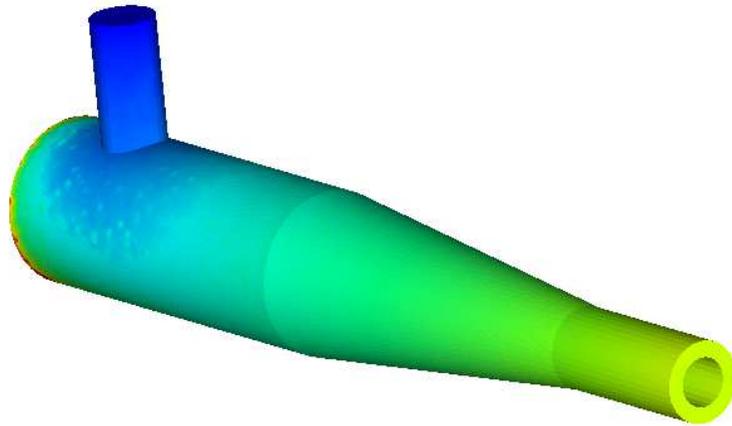


流入口の反対(裏)側への流動が遅れる傾向を確認。  
(界面でウェルドライン形成の可能性高い)

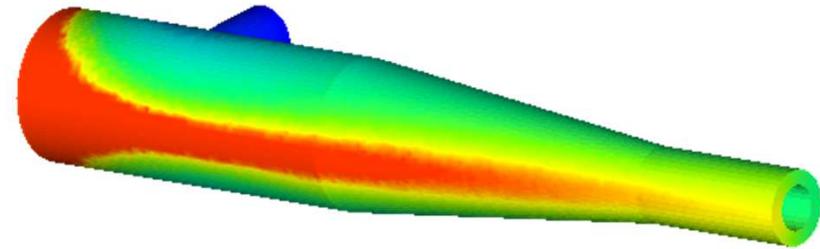
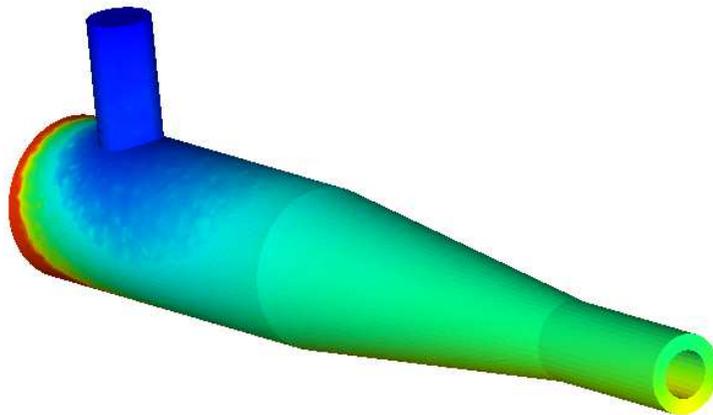
(A)(B)共通: 滞留時間計算は、熱流動解析の反復計算終了後の流動場(流速ベクトル $u$ )  
を利用するため、同じ条件であれば流速や圧力などの物理量は同じ結果になります。

## テスト解析結果／滞留時間分布(sec)

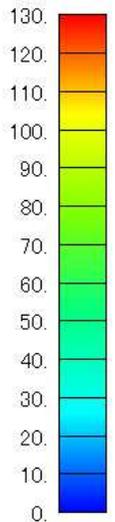
(A) VOF法 非定常計算サイクル数 311 回, 計算時間 202 sec



(B) FVM法 定常計算 1 回, 計算時間 44 sec



ウェルドラインを鮮明に可視化.



## (1) FVM(有限体積法)に基づく新規解析機能

### 3. ひずみ履歴解析(新機能)／定常移流(輸送)方程式

$$u \nabla \gamma = \dot{\gamma}$$

(参考)ひずみの積分形式

$$\gamma = \int \dot{\gamma} dt$$

粒子運動軌跡に沿った履歴積分

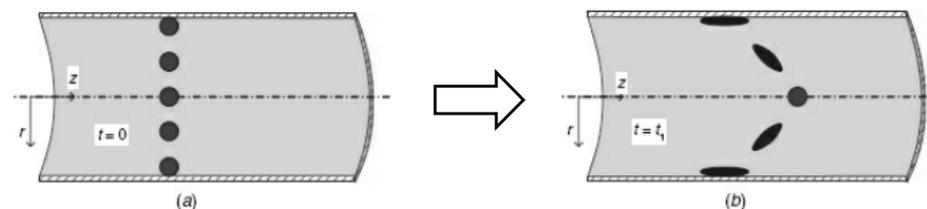
“ひずみ( $\gamma$ )”は、流路内の粒子移動経路に沿った、ひずみ速度の履歴積分値として定義され、流路内の混練性の指標として利用されます。

本機能では、履歴積分評価式と等価な定常輸送方程式を解析することでひずみを定量化します。

#### Laminar mixing by shear flow

Dark areas are occupied by a tracer consisting of the bulk liquid and a small amount of a dye.

参考文献: “Principles of Polymer Processing” second edition,  
Zehev Tadmor, Costas G. Gogos, Wiley-Interscience (2013), Fig.7.3.



### 3. ひずみ履歴解析(新機能)／定常移流(輸送)方程式

#### 利用方法

解析条件タブ内の滞留時間計算欄の下部に設置された, 履歴解析／ユーザ定義欄の“ひずみ履歴解析／ユーザ定義”のチェックボックスをチェックして, 条件保存および解析実行すると, 熱流動解析後にひずみ履歴解析が実施されます。

解析条件設定

解析コントロールデータファイル名  
scbp\_0411 読込

樹脂物性選択  
hdpe\_b3.pro 選択 読込 新規

モデル選択  
scbp\_full.3msh 選択 読込

FEMAP neutral file  
 FEMAPポストファイル出力 scbp\_full.neu 選択

解析条件設定

解析モデル  
 3D  
 2.5D  
 2.5D Multi  
 壁面滑り考慮  
 牽引流考慮 保存 解析実行

計算条件  
イタレーション最大値 10

温度計算条件  
 FVM法  FEM法(旧Ver)  
 壁面温度規定  壁面熱伝達規定  
境界温度 180 °C  
熱伝達係数 600 W/m2/°C  
粘性発熱係数 1 温度分布設定

流入出口境界条件 (位置はメッシュモデルに準拠)  
 単層解析 流入口流量 200.00 cm2/sec  
 多層解析 流入口温度 200.00 °C  
流出口圧力 0.00 MPa

滞留時間計算  
 滞留時間を計算  FVM法  VOF法(旧Ver)  
滞留時間計算パラメータ  
モデル分割数 1  
計算サイクル数 1  
最大計算時間 120 %

履歴解析／ユーザ定義  
 ひずみ履歴解析／ユーザ定義 ユーザプログラム設定

履歴解析／ユーザ定義  
 ひずみ履歴解析／ユーザ定義 ユーザプログラム設定

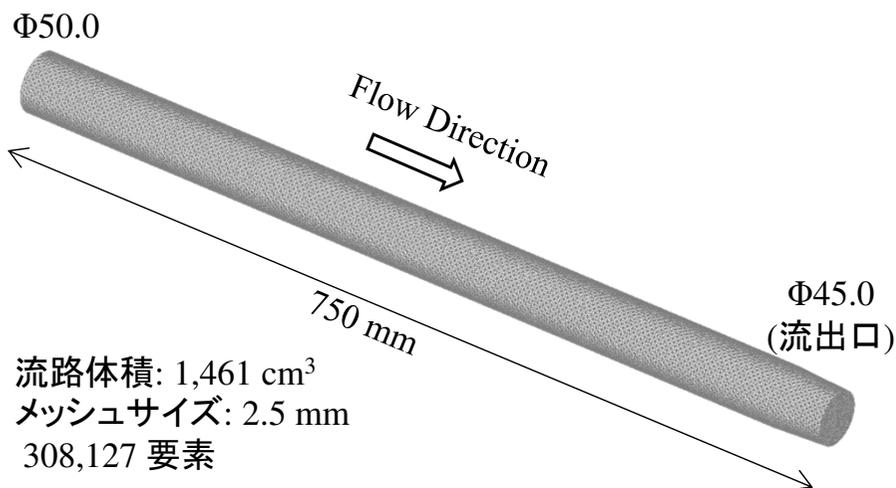
- ・ 当設定欄では, 後述の (3) ユーザプログラム解析機能を利用して, ユーザ自身が求めたい方程式を定義して解析することも可能です. 詳細はp.46- を参照ください.

# テスト解析例／ひずみ履歴解析

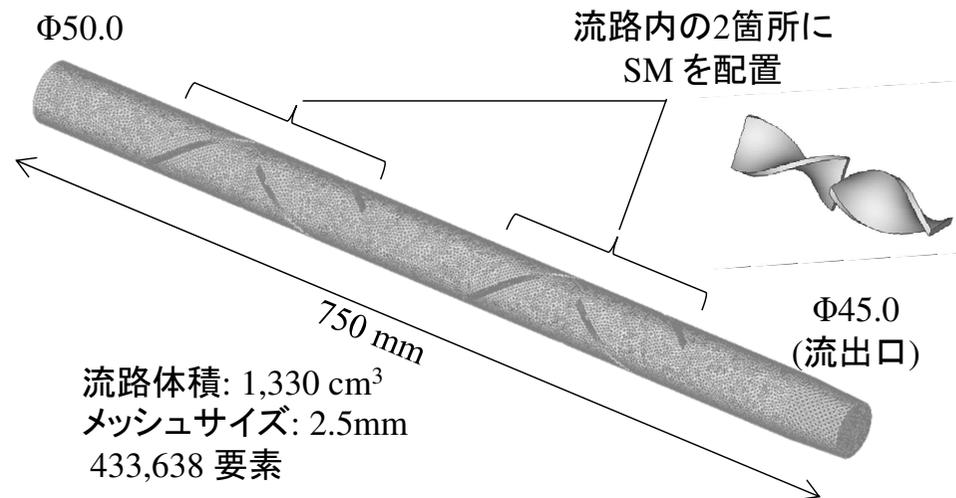
テストサンプル: ¥Ver11testsample¥FT¥smtest2024.prj

○解析モデル:  $\Phi 50\text{mm}$  円管モデル+スタティックミキサ(SM)有り／無しの2水準

(A) 円管モデル



(B) 円管+SM モデル



○解析条件: 共通

流入口流量:  $Q=50\text{ cm}^3/\text{sec}$

流入口温度  
 $T_{in} = 220\text{ }^\circ\text{C}$

壁面温度規定  
 $T_{bc} = 200\text{ }^\circ\text{C}$

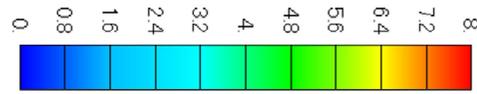
樹脂データ: HDPE\_B3.pro  
(Materialfit DB)

滞留時間計算	
<input checked="" type="checkbox"/> 滞留時間を計算	<input checked="" type="radio"/> FVM法 <input type="radio"/> VOF法(旧Ver.)
滞留時間計算パラメータ	
モデル分割刻み	100
計算サイクル数	2000
最大計算時間	120 %
履歴解析/ユーザ定義	
<input checked="" type="checkbox"/> ひずみ履歴解析/ユーザ定義	ユーザプログラム設定

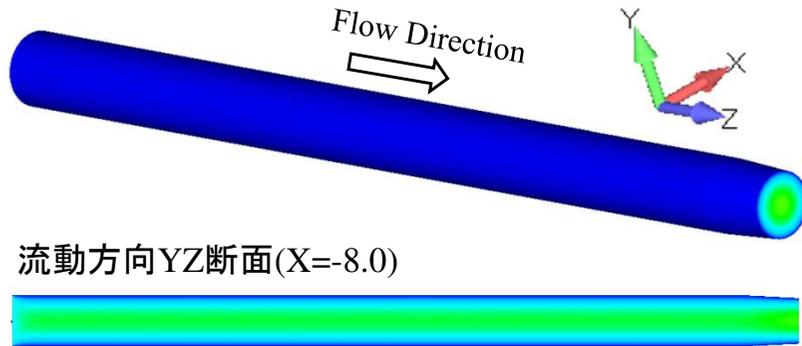
流路形状の違いによる滞留時間およびひずみ履歴の変化を確認しました。

## テスト解析結果(カラーバー統一)

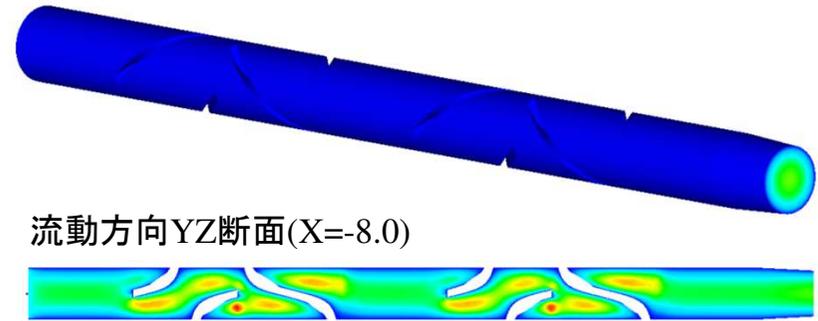
【流速分布】[cm/sec]



(A) 円管モデル



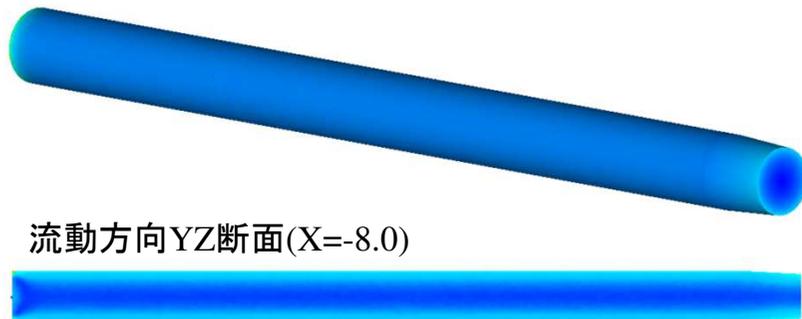
(B) 円管+SM モデル



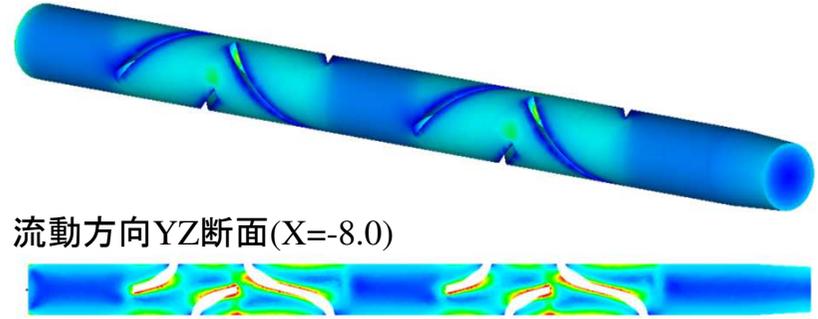
【ひずみ速度】[1/sec]



(A) 円管モデル

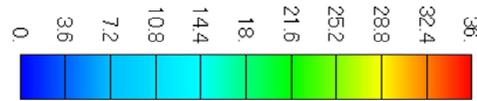


(B) 円管+SM モデル

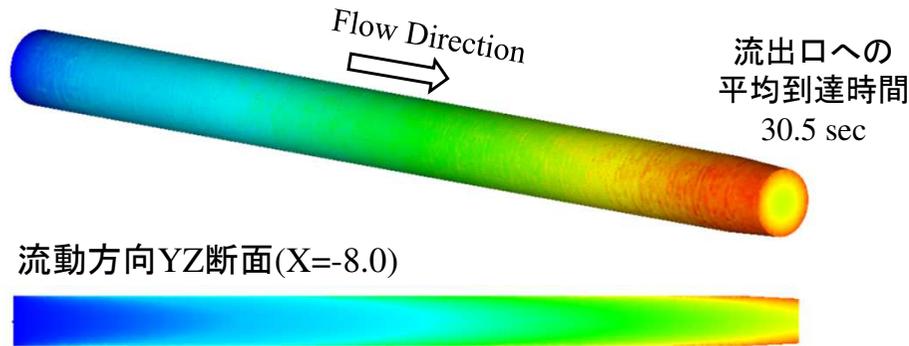


# テスト解析結果(カラーバー統一)

【滞留時間】 [sec]

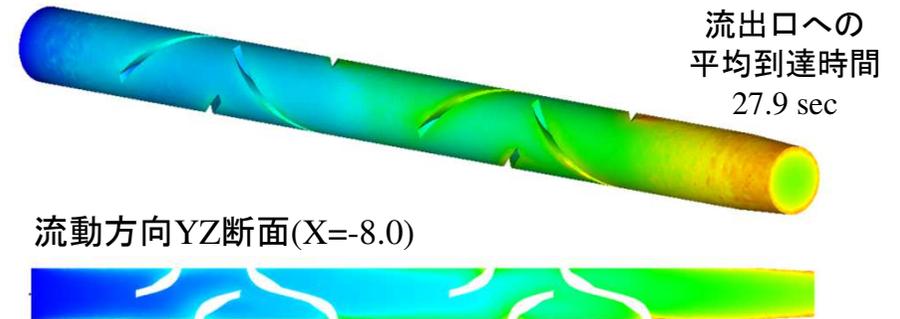


(A) 円管モデル

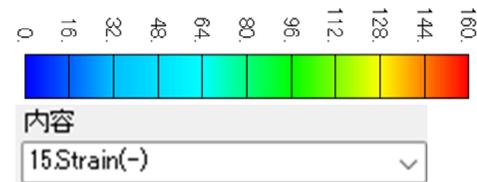


(A)(B)ともに、流速の小さい壁面近傍の滞留時間が大きくなります。流出口への平均到達時間は、流路体積の大きい(A)が約2.6 sec 大きな値を示しました。

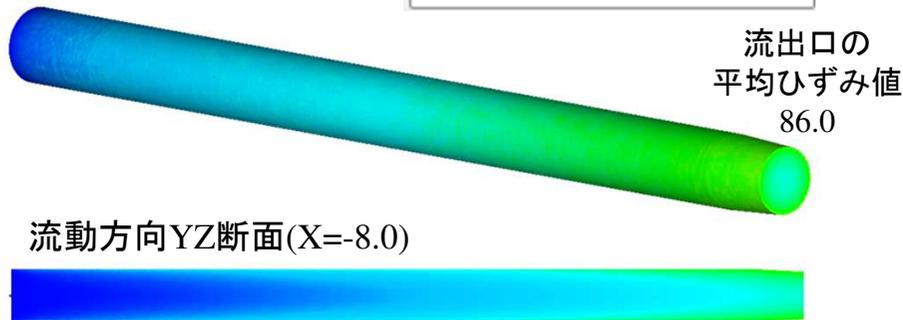
(B) 円管+SM モデル



【ひずみ】 [-]

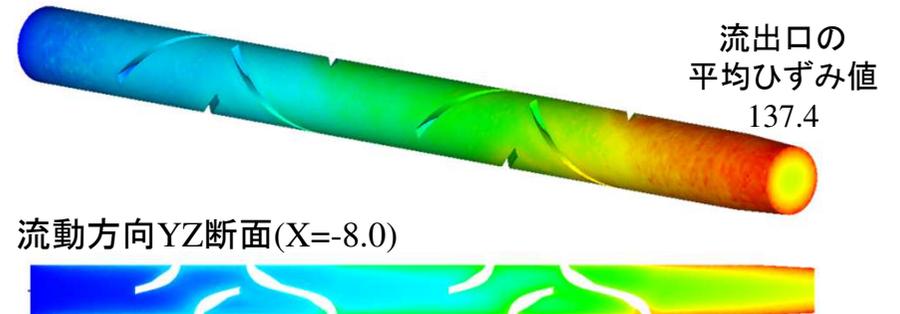


(A) 円管モデル



流路内SM部に大きなひずみ速度領域を有する(B)では、滞留時間が(A)よりも小さいにもかかわらず有意に大きなひずみ値を示しました。したがって、SM設置による混練性向上効果が予想されました。

(B) 円管+SM モデル



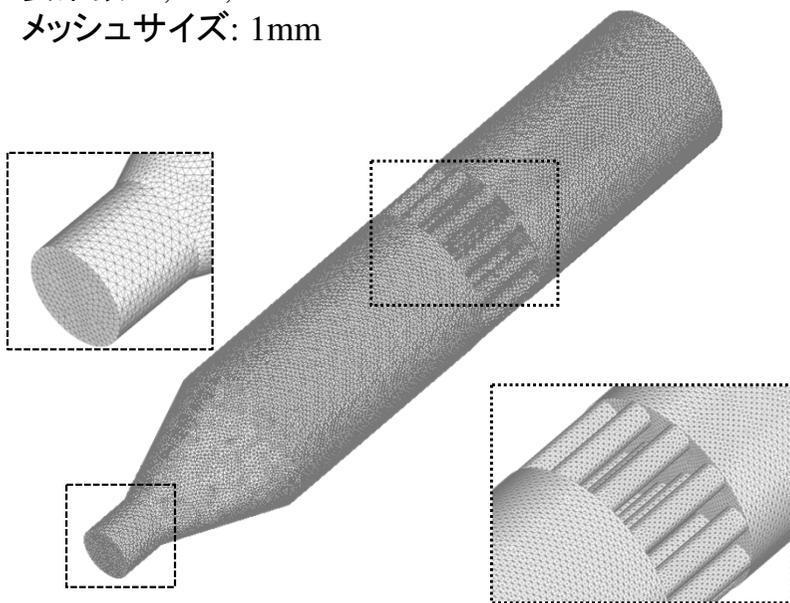
## (2) 対称モデル解析機能

3Dモデルのメッシュ要素数削減、および計算時間の短縮を目的に、対称モデル(1/2モデル)を用いた解析機能を実装しました。(Multi Profile Simulator にはVer.9.0.0で実装済み)

以降では、下図に示す形状を例題に、操作手順について説明します。

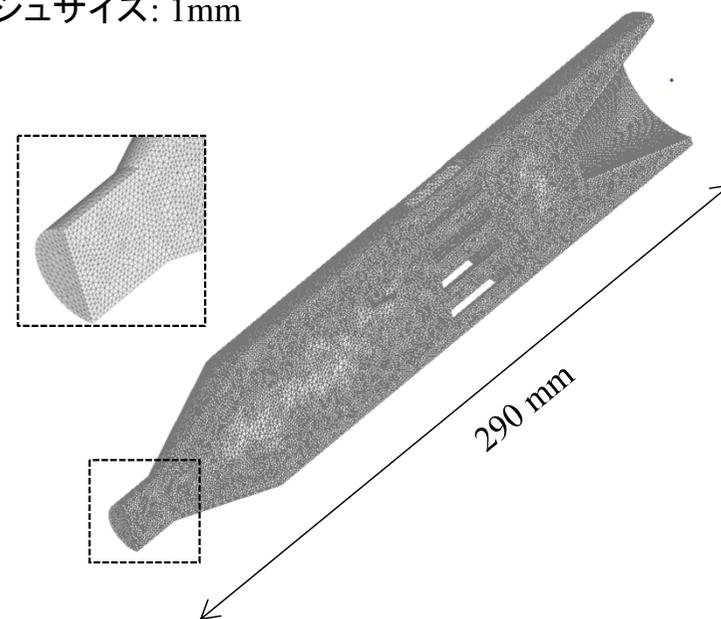
### フルモデル

要素数: 1,430,544  
メッシュサイズ: 1mm



### 1/2モデル

要素数 715,272  
メッシュサイズ: 1mm

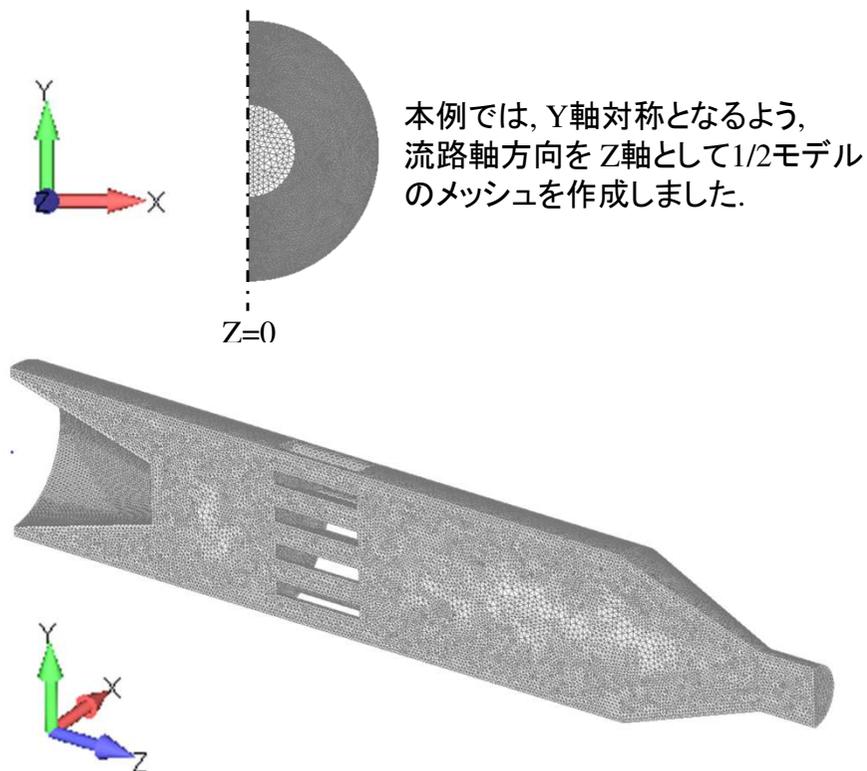


テストサンプル: ¥Ver11testsample¥FT¥sclover\_half\_y.prj

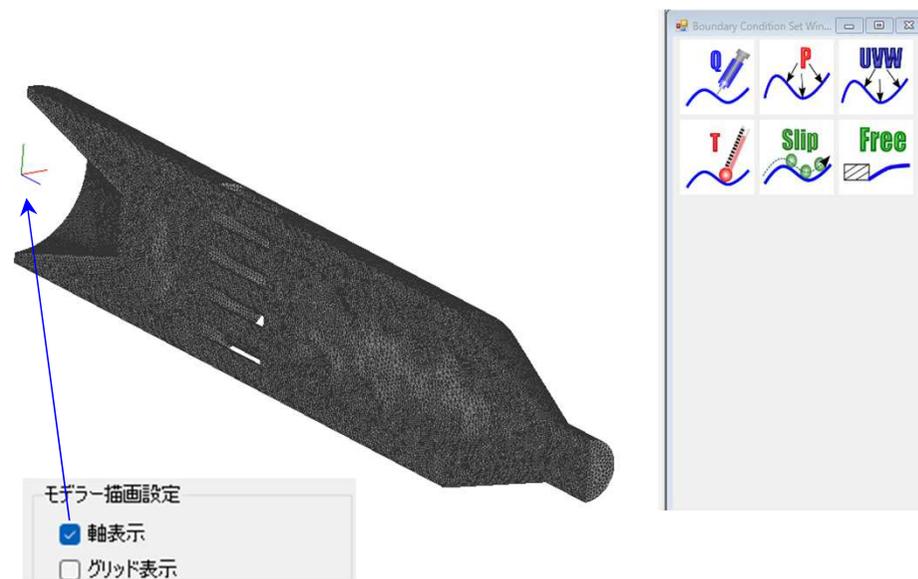
## (2) 対称モデル解析機能

### 利用方法

1: 対称モデル解析では、X 軸対称または Y 軸対称をサポートしています。対象となる1/2モデルの座標を考慮して、メッシュ作成および保存を実施します。



2: Flow Tetraを起動し、1で作成したメッシュファイルを従来通りの方法でインポートし、ツール/boundary condition set をクリックして境界条件設定フォームに進みます。



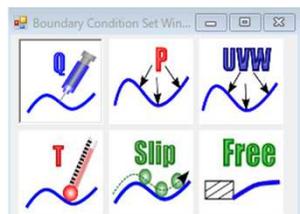
オプションフォームのモデラー描画設定欄で“軸表示”にチェックをすると、X軸(赤)、Y軸(緑)、Z軸(青)の軸方向ベクトルが表示されます。

## (2) 対称モデル解析機能

### 利用方法

#### 3: 対称軸の設定(新規操作)

流量設定アイコンQをクリックし、ボックスピック等で対称面全体を選択します。



選択後、対称条件設定欄で対称軸にチェックし、流量には"999"と入力後、設定ボタンをクリックします。

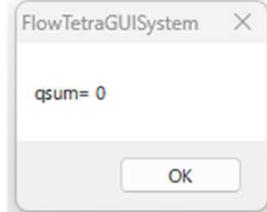
流量  cm3/sec

温度拘束条件同時設定  
 設定  
境界温度設定

多層条件設定  
 設定  
層番号

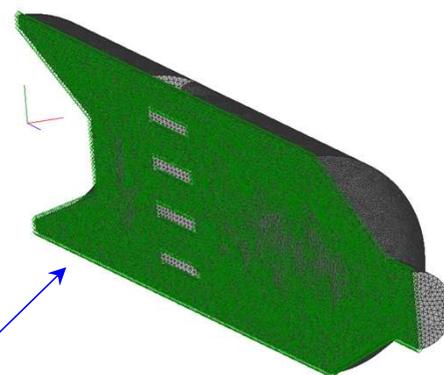
対称条件設定  
 X軸対称(赤)  Y軸対称(緑)

Combine  OverWrite

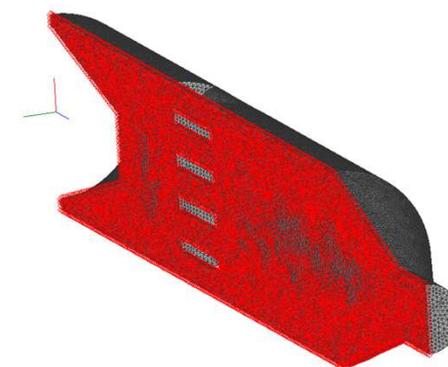


設定後に上記2つのメッセージが表示されるので、OKをクリックします。

#### Y軸対称面設定後のモデル

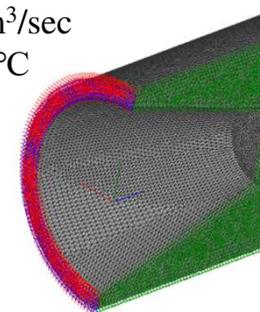


(参考) X軸対称にした場合には、対称面が赤色で表示されます。

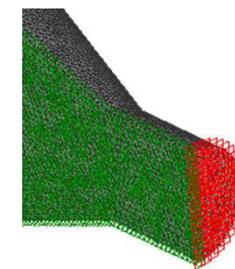


4: 従来通りの方法で、流入口流量と温度、流出口圧力を設定し、ファイル/メッシュエクスポートから3Dメッシュ(.3msh)を保存します。

流入口流量  
 $Q=10 \text{ cm}^3/\text{sec}$   
 $T_{in}=200 \text{ }^\circ\text{C}$



流出口  
 $P_{out}=0 \text{ MPa}$



## (2) 対称モデル解析機能

### 利用方法

5: 従来通りの方法で解析条件を設定し、解析を実行すると、自動的に対称解析が実施されます。

### テスト解析結果(フルモデルとの比較) 樹脂データ(共通): HDPE\_B3.pro (Materialfit DB)

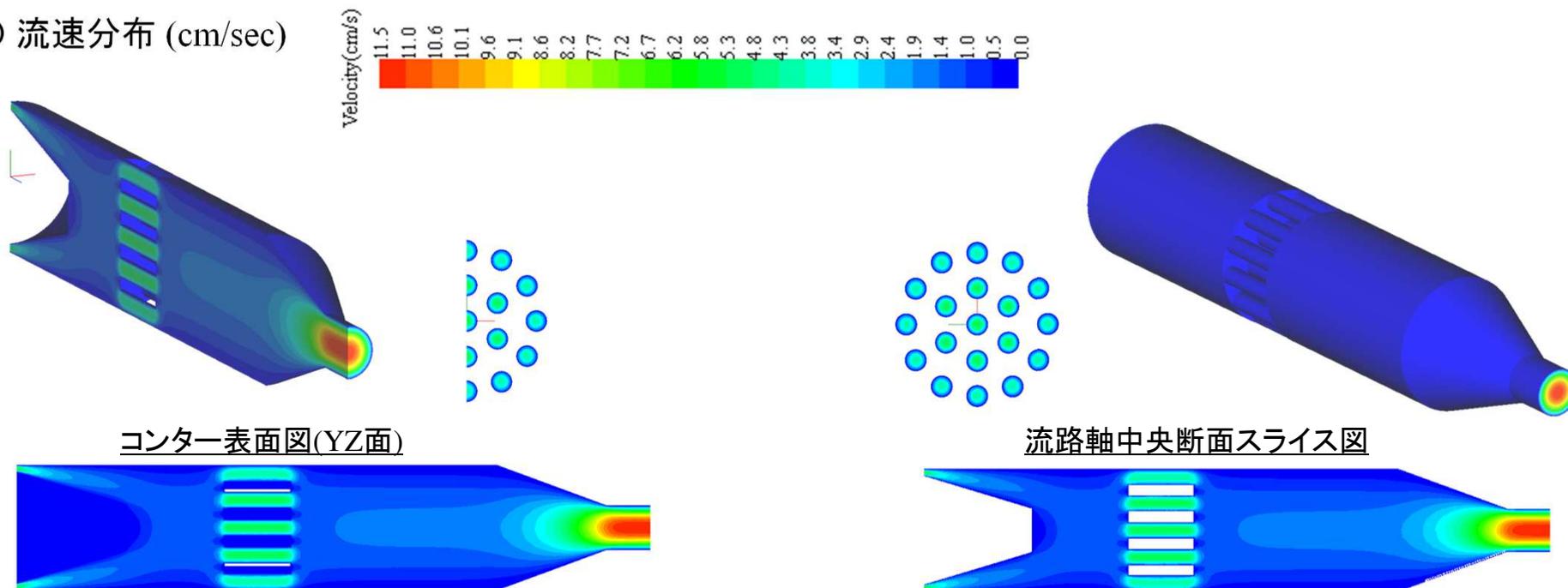
(A) 1/2モデル

流入口流量	10.00	cm <sup>3</sup> /sec
流入口温度	200.00	℃
流出口圧力	0.00	MPa

(B) フルモデル

流入口流量	20.0	cm <sup>3</sup> /sec
流入口温度	200.00	℃
流出口圧力	0.00	MPa

○ 流速分布 (cm/sec)



### (3) ユーザプログラム解析機能

本機能では, (1) FVM(有限体積法)に基づく新規解析機能(p.29) の解析手法を用いて, ユーザ自身が解析対象となる方程式を定義して解析することが可能になりました. 以降では, 本機能の利用方法と使用例について説明します.

- ・ 定義可能な方程式: **汎用定常移流拡散方程式**

$$(A_i + \mathbf{u} \cdot \nabla + C_i \Delta) f_i = B_i$$

$A_i, B_i, C_i$  : ユーザ定義任意関数( $i=1 \sim n$ )  
 $f_i$  : ユーザ定義未知関数( $i=1 \sim n$ )  
 $n$  : 定義する方程式数  
 $\mathbf{u}$  : 流速ベクトル  
 $\nabla$  : ナブラ演算子  
 $\Delta$  : ラプラス演算子

#### ユーザプログラム解析機能

方程式の定義に必要なプログラムを部分公開し, ユーザ自身がプログラムを編集しコンパイルすることで, ユーザ自身が定義した方程式を解析することができる機能.

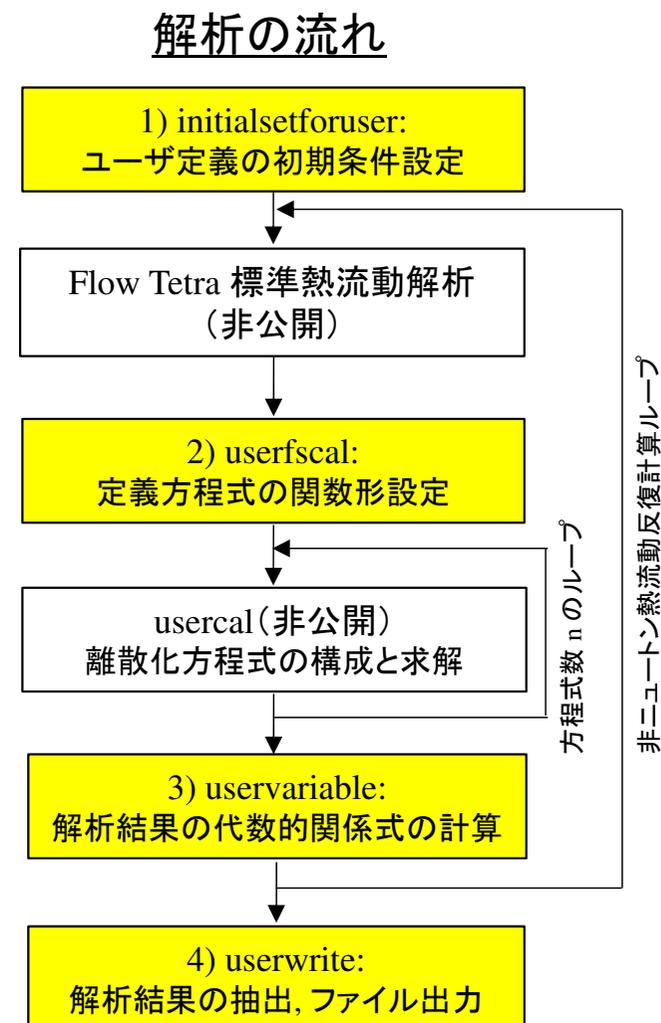
参考資料: Twin Screw Simulator (Ver.9.0.0) 改良成果資料, p.1-5

資料リンク: <https://www.hasl.co.jp/TSSseikashiryō2022.pdf>

## ○公開されるユーザ定義ルーチン(プログラム)

ユーザ定義ルーチン名	機能
1) initialsetforuser	初期設定および境界条件設定
2) userfscal	定義方程式の関数形設定
3) uservariable	解析結果の代数的関係式の計算
4) userwrite	解析結果の抽出およびファイル出力

- ・ユーザは、上記4つの公開プログラムを利用して、解析対象となる方程式の定義および解析を実施します。プログラム言語はFortranで記述、コンパイルします。
- ・1) initialsetforuser では、方程式の初期値や境界条件の設定を行います。解析結果をコンター図で出力する場合の見出しなども設定します。
- ・2) userfscal では、方程式の関数形を定義します。定義された関数は、移流方程式の解析ルーチン usercal (非公開) で離散化方程式としてマトリクス構成され、定義された方程式毎に解析が実施されます。
- ・解析値は標準の解析結果ファイル(.res3D)に出力されますが、3) uservariable を用いて解析値を熱流動反復計算ループ内で利用することも可能です。また 4) userwrite を用いて、必要な情報のみを抽出して、別ファイルに出力させることも可能です。



## ○公開情報／ユーザ定義変数

以下では、プログラムの定義に必要な変数やメッシュ構成の情報を記載します。

変数名	内容
usercnumber	解析対象とする移流方程式の本数.
uservnumber	解析結果の代数的関係式を定義する配列変数の数.
nelem	メッシュモデルの全要素数
userc(i, ie)	方程式で解析した物理量の解析結果を格納する配列要素変数. (i=1~usercnumber, ie=1~nelem)
userf (i, ie)	関数形 $A_i$ の定数値を設定する配列要素変数. (i=1~usercnumber, ie=1~nelem)
users (i, ie)	関数形 $B_i$ の定数値を設定する配列要素変数. (i=1~usercnumber, ie=1~nelem)
userd (i, ie)	関数形 $C_i$ の定数値を設定する配列要素変数. (i=1~usercnumber, ie=1~nelem)

解析対象とする移流拡散方程式



$$(A_i + \mathbf{u} \cdot \nabla + C_i \Delta) f_i = B_i$$

対応するユーザ定義関数の変数

$$(\boxed{userf(i, ie)} + \mathbf{u} \cdot \nabla + \boxed{userd(i, ie)} \Delta) f_{ic} = \boxed{users(i, ie)}$$

↓

$$\boxed{userc(i, ie)}$$

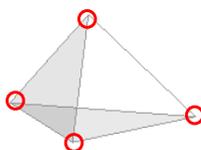
## ○公開情報／ユーザ定義変数

変数名	内容
username(i)	解析した物理量の名称 (i=1~usercnumber), 解析結果の項目名に利用される.
uservname(i)	配列変数の名称 (i=1~uservnumber), 解析結果の項目名に利用される.
commonvnumber	ルーチン間で共用するスカラー変数(定数値)の数.
commonvpar(i)	ルーチン間で共用するスカラー変数 (i=1~commonvnumber).
nnode	メッシュモデルの全節点数
usercn(i, in)	解析した物理量の節点解析値 (i=1~usercnumber, in=1~nnode).
userpar(i, ie)	代数的関係式を定義する配列要素変数(i=1~uservnumber, ie=1~nelem)
userparn(i, in)	代数的関係式を定義する配列節点変数(i=1~uservnumber, in=1~nnode)

### メッシュモデルの要素と節点の関係

FVM(有限体積法)では要素(コントロールボリューム)を計算単位として全体マトリクスを構成して求解しますが, コンター図等の解析結果表示には節点の情報を利用します.

そのため, 要素⇒節点への解析値の変換が必要になることから, 要素だけでなく節点に関する変数情報も使用します.



テトラ要素は, 1要素につき  
4節点を有します.

## ○公開情報／境界条件, 物性変数, 物理量変数

変数名	内容
calctempin	流入温度(°C)
calcpout	流出口圧力(MPa)
qfluxb(in)	節点inの設定流量(cm <sup>3</sup> /s), 流入口で非0
hfluxorg(in)	節点inの壁面熱伝達係数(W/cm <sup>2</sup> /K)
trefb(in)	節点inの壁面境界温度(°C)
ibount(in)	節点inの温度境界条件(0:拘束, 非0:自由)
ibounp(in)	節点inの圧力境界条件(0:拘束, 非0:自由)
ibounds(in)	節点inが壁面 のとき 0, 非壁面のとき非 0

変数名	内容
rho(ie)	要素ieの密度(g/cm <sup>3</sup> )
cph(ie)	要素ieの比熱(J/g/K)
ramd(ie)	要素ieの熱伝導率(W/cm/K)
vise(ie)	要素ieの粘度(Pa・s)
gamme(ie)	要素ieのひずみ速度(s <sup>-1</sup> )
tempe(ie)	要素ieの温度
temp(in)	節点inの温度(°C)
pres(in)	節点inの圧力(Pa)

### (3) ユーザプログラム解析機能

#### 利用方法

1. Flow Simulator 3D(FS3D)を使用されるPCに, 変更したユーザプログラムをコンパイルするための開発環境をインストールします. ⇒ 設定方法は, p.62- の (補足)ユーザプログラムの環境設定方法を参照ください.
2. 任意のエディタを使用し, FS3Dフォルダ内のFlowTetraVer.11.0.0¥bin¥x86¥FlowTetraVer.11.0.0system¥FlowTetraSolver2023oneAPI\_user内に存在するソースコードを用途向きに書き直します.
3. ソースコードを編集後, コマンドプロンプト上で nmake と入力してキーボードのEnterキーを押すと, makefile を利用したコンパイルが実行されます.

```
Intel(r) oneAPI Tools
C:\FlowSimulator3DVer.11.0.0出荷\FlowTetraVer.11.0.0\bin\x86\FlowTetraVer.11.0.0system\FlowTetraSolver2023oneAPI_user>
C:\FlowSimulator3DVer.11.0.0出荷\FlowTetraVer.11.0.0\bin\x86\FlowTetraVer.11.0.0system\FlowTetraSolver2023oneAPI_user>nmake

Microsoft(R) Program Maintenance Utility Version 14.16.27048.0
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

ifort -O3 -C /check:uninit /I:INCFIL.INC /c userfscal.f
Intel(R) Fortran Intel(R) 64 Compiler Classic for applications running on Intel(R) 64, Version 2021.6.0 Build 20220226_00000
Copyright (C) 1985-2022 Intel Corporation. All rights reserved.

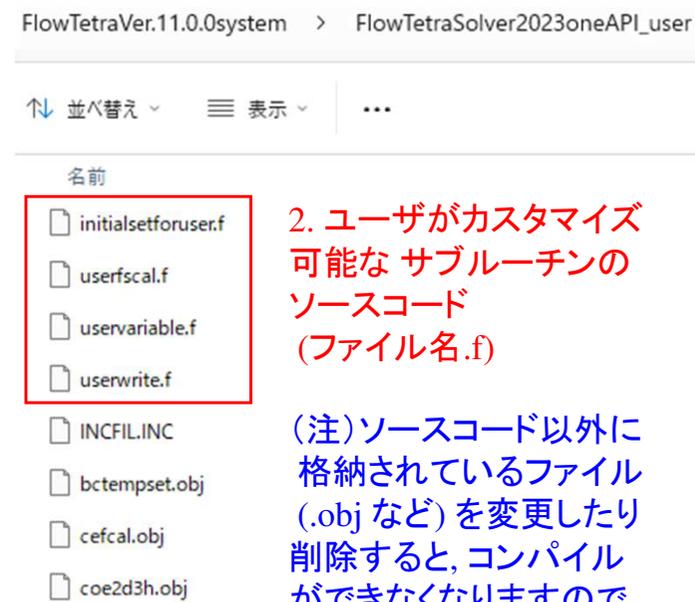
ifort -O3 -C /check:uninit /I:INCFIL.INC *.obj /link smsamgd.lib /out:.\flowsimulator3d.exe
Intel(R) Fortran Intel(R) 64 Compiler Classic for applications running on Intel(R) 64, Version 2021.6.0 Build 20220226_00000
Copyright (C) 1985-2022 Intel Corporation. All rights reserved.

Microsoft (R) Incremental Linker Version 14.16.27048.0
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

-out:bctempset.exe
-subsystem:console
smsamgd.lib
/out:.\flowsimulator3d.exe
```

3. nmakeを入力

コンパイルに成功すると, フォルダ内に  
実行プログラム flowsimulator3d.exeが作成される.



2. ユーザがカスタマイズ可能な サブルーチンのソースコード (ファイル名.f)

(注)ソースコード以外に格納されているファイル (.obj など) を変更したり削除すると, コンパイルができなくなりますので注意して使用ください.

## 利用方法

4. ¥FlowTetraSolver2023oneAPI\_userフォルダ内の flowsimulator3d.exe の更新日時がコンパイルした日時に変更されていることを確認後, FlowTetraVer.11.0.0system フォルダ内に存在する flowsimulator3d.exe を上書き保存して更新します.

11.0.0system > FlowTetraSolver2023oneAPI\_user

名前	更新日時
flowsimulator3d.exe	2024/04/15 9:42
initialsetforuser.obj	2024/04/15 9:42
userfscal.obj	2024/04/15 9:42

4. 上書き保存して更新

FlowTetraVer.11.0.0system

名前	更新日時
flowsimulator3d.exe	2024/04/15 9:42
flowsimulator3dbuk.exe	2024/04/14 23:53

(参考) 更新前のflowsimulator3d.exeを別名でコピーしておく, 更新前の実行プログラムを残しておくことができます.

5.

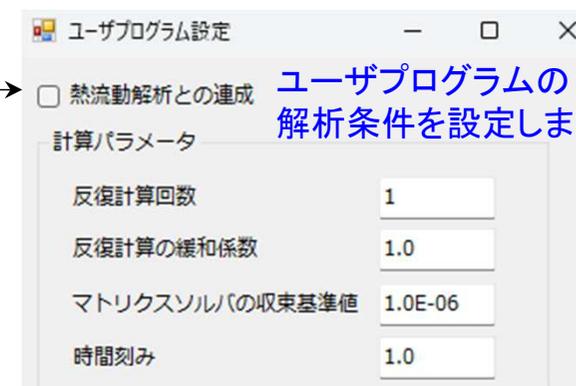


FlowTetra(GUI)から解析実行すると, 11.0.0systemフォルダ内に存在するflowsimulator3d.exeが実行されます.

5. FlowTetra のGUIを起動し, 解析条件設定タブ画面にて, ひずみ履歴解析/ユーザ定義をチェック状態にすると, 解析実行時に定義したユーザプログラムが実施されます.



ユーザプログラムの変更をせずにデフォルトの状態 checked した場合には, p.38 の, 3. ひずみ履歴解析(新機能)が実施されます.



ユーザプログラムの解析条件を設定します.

## サンプルプログラムの内容説明

¥FlowTetraSolver2023oneAPI\_user フォルダ内のサンプルフォルダの構成を下図に示します。

名前

-  default ———— 初期出荷状態
-  historyfvm ———— (1) FVM(有限体積法)に基づく新規解析機能の, **3. ひずみ履歴解析**において, 応力や粘性発熱の履歴解析まで拡張した例を示します.
-  tempfvm ———— (1) FVM(有限体積法)に基づく新規解析機能の, **1. 温度解析**において, エネルギー方程式の変更や拡張に利用可能です.

本項では, 汎用定常移流拡散方程式のプログラム利用方法について, 以下2つのサンプルプログラムを例題として説明します.

**【サンプルプログラム1】ひずみ履歴解析: 定常輸送方程式(ひずみ, 応力履歴, 粘性発熱履歴)**  
(historyfvm) pp.54-57

**【サンプルプログラム2】FVM 温度解析: 定常移流拡散方程式(エネルギー方程式)**  
(tempfvm) pp.58-61

## 【サンプルプログラム1】ひずみ履歴解析

### initialsetforuser.f の内容1

```

c+++++
c+   User define variable number
c+++++
c
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c
c   Number of user equation
c
c   usernumber=3   方程式数: 3 (ひずみ履歴, 応力履歴
                   粘性発熱履歴計算)
c   Number of user variable
c
c   uservnumber=0
c
c   Number of common variable
c
c   commonvnumber=0

if(usercnumber.gt.0) then
  allocate(userc(usercnumber,nelem))
  allocate(userco(usercnumber,nelem))
  allocate(usercn(usercnumber,nnode))
  allocate(userf(usercnumber,nelem))
  allocate(users(usercnumber,nelem))
  allocate(userd(usercnumber,nelem))
  allocate(username(usercnumber))
  allocate(ibcusersw(usercnumber))
  allocate(vusersurfdir(usercnumber,nnode))
  allocate(vusersurfneu(usercnumber,nnode))
end if

c+++++
c   User define initial/boundary condition
c+++++
c
c   username(1)='Strain(-)'
c   username(2)='Stress history(kPa sec)'
c   username(3)='Viscouse heat his.(W/cm3 sec)'

```

使用する配列毎に必要なメモリ数を確保します。

解析結果の出力名の設定

### historyfvm

```

cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
  do i=1,usercnumber
    do ie=1,nelem
      userc(i,ie)=0.0
    end do
  end do
c
c   do i=1,usercnumber
c     do in=1,nnode
c       usercn(i,in)=0.0
c     end do
c   end do
c
cccccc メッシュ表面(壁面)の境界条件
  do i=1,usercnumber
    ibcusersw(i)=3   壁面境界条件の種類を設定
  end do
cccccc 基本境界条件の場合は 2,自然境界の場合は 3
c
c   do i=1,usercnumber
c     do in=1,nnode
c       if(ibounds(in).eq.0) then
ccccccc メッシュ表面の節点: ibounds(in)=0
          vusersurfdir(i,in)=0.0   壁面のディリクレ条件
          vusersurfneu(i,in)=0.0   壁面のノイマン条件
        end if
      end do
    end do
c
c   do i=1,usercnumber
c     do in=1,nnode
ccccccc if(ibount(in).eq.0.and.qfluxb(in).ne.0.0) then   流入口設定
          流入口の場合   の初期化
          usercn(i,in)=0.0   (初期履歴値0)
        end if
      end do
    end do

```

解析結果が格納される配列の初期化

壁面のディリクレ条件  
壁面のノイマン条件

流入口設定の初期化  
(初期履歴値0)

# 【サンプルプログラム1】ひずみ履歴解析

historyfvm

userfscal.f の内容

```

do ie=1,nelem
  userf(1,ie)=0.0
  userd(1,ie)=0.0
  users(1,ie)=gamme(ie)
end do

do ie=1,nelem
  userf(2,ie)=0.0
  userd(2,ie)=0.0
  users(2,ie)=gamme(ie)*vise(ie)/1.0e+03
end do
                                     Pa⇒kPaの換算

do ie=1,nelem
  userf(3,ie)=0.0
  userd(3,ie)=0.0
  users(3,ie)=gamme(ie)**2.0*vise(ie)/1.0e+06
end do
                                     /m³⇒cm³の換算
  
```

関数形を比べて  
 $A_i, B_i, C_i$  を  
 設定します。  
 (使用しない項  
 には0.0を設定)

解析対象とする移流拡散方程式:

$$(A_i + \mathbf{u} \cdot \nabla + C_i \Delta) f_i = B_i$$

$i=1$ : ひずみ履歴 [-]

$$\mathbf{u} \cdot \nabla \gamma = \dot{\gamma}$$

$i=2$ : 応力履歴 [kPa·s]

$$\mathbf{u} \cdot \nabla st_{his} = \eta \dot{\gamma}$$

$i=3$ : 粘性発熱履歴 [W/cm³·s]

$$\mathbf{u} \cdot \nabla vheat_{his} = \eta \dot{\gamma}^2$$

$$(userf(i,ie) + \mathbf{u} \cdot \nabla + userd(i,ie) \Delta) f_{ic} = users(i,ie)$$

$$userc(i,ie)$$



# 【サンプルプログラム1】ひずみ履歴解析

historyfvm

## ○解析条件の設定例

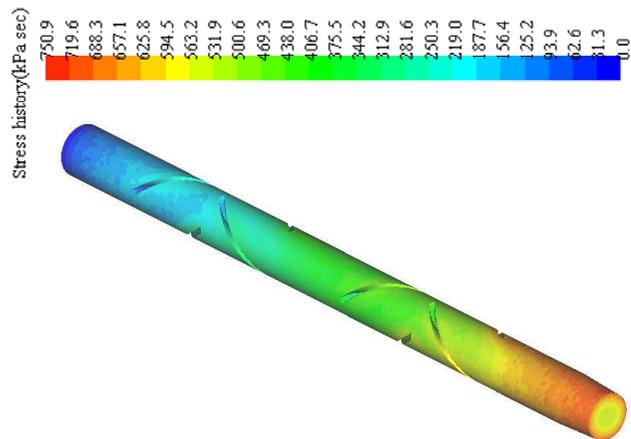
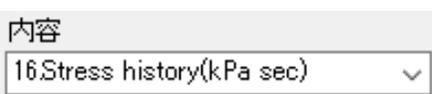


通常の熱流動解析終了後の流動状態を用いて(連成なし), 反復計算回数1回で定常方程式を解く場合の設定

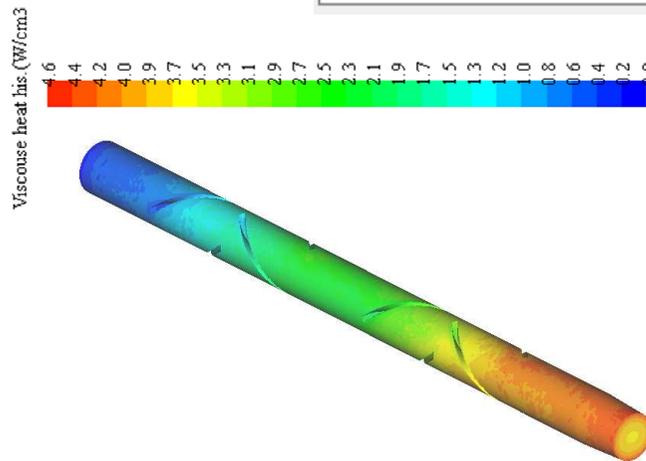
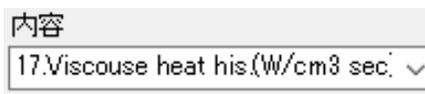


## ○解析結果例(ひずみ履歴はp.41)

### 【応力履歴】



### 【粘性発熱履歴】



### .hisinf の最終項

----- Calculation Information -----	
Outlet node number	: 385
Ave.Strain on Outlet	: 137.4393
Max.Strain on Outlet	: 158.7242
Ave.Stress his. on Outlet	: 620.5749
Max.Stress his. on Outlet	: 726.4705
Ave.Vis.heat his. on Outlet	: 3.984651
Max.Vis.heat his. on Outlet	: 4.549161

## (6) ユーザプログラム機能の拡張

### 【サンプルプログラム2】FVM 温度解析

#### initialsetforuser.f の内容1

```
c+++++
c+   User define variable number
c+++++
c
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c
c   Number of user equation
c   usernumber=1   方程式数: 1(エネルギー方程式)
c
c   Number of user variable
c
c   uservnumber=0
c
c   Number of common variable
c
c   commonvnumber=0
c
c   Equation used
c
cccccc
c
c+++++
c
c   if(usercnumber.gt.0) then
c       allocate(userc(usercnumber,nelem))
c       allocate(userco(usercnumber,nelem))
c       allocate(usercn(usercnumber,nnode))
c       allocate(userf(usercnumber,nelem))
c       allocate(users(usercnumber,nelem))
c       allocate(userd(usercnumber,nelem))
c       allocate(username(usercnumber))
c       allocate(ibcusersw(usercnumber))
c       allocate(vusersurfdiir(usercnumber,nnode))
c       allocate(vusersurfneu(usercnumber,nnode))
c   end if

c+++++
c   User define initial/boundary condition
c+++++
c
c   username(1)='Temp fvm'
c
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
```

使用する配列毎に必要なメモリ数を確保します。

解析結果の出力名の設定。

#### tempfvm

```
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
do i=1,usercnumber
do ie=1,nelem
userc(i,ie)=0.0
end do
end do
c
do i=1,usercnumber
do in=1,nnode
usercn(i,in)=0.0
end do
end do
c
cccccc メッシュ表面(壁面)の境界条件
c
do i=1,usercnumber
ibcusersw(i)=itcalsw   itcalswには、解析条件で指定した
                        温度境界条件が設定されています。
end do
cccccc 温度規定: itcalsw=2,熱伝達規定: itcalsw=3
c
do i=1,usercnumber
do in=1,nnode
if(ibounds(in).eq.0) then
cccccc メッシュ表面の節点: ibounds(in)=0
vusersurfdiir(i,in)=temp(in)   壁面の基準温度(temp(in))
vusersurfneu(i,in)=hfluxorg(in) と熱伝達係数を設定します。
usercn(i,in)=temp(in)
end if
end do
end do
c
do i=1,usercnumber
do in=1,nnode
if(ibount(in).eq.0.and.qfluxb(in).ne.0.0) then
cccccc 流入口の場合
usercn(i,in)=temp(in)   流入口節点に流入口温度を設定。
                        (temp(in)には、事前に壁面温度や
                        流入口温度が設定されています)
end if
end do
end do
```

# 【サンプルプログラム2】FVM 温度解析

tempfvm

## userfscal.for の内容

```

c+++++
c+   User define left hand side coefficient & right hand source
c+++++
c
cccc 熱物性/定数 rheoin
ct    write(*,*) rhoa, cpa, rama
ct    rho(ie):  熔融体密度
ct    cp(ie):   熔融体比熱
ct    ramd(ie):  熔融体熱伝導率
c
c
c      *visheatcoeffvmは粘性発熱係数
c      粘性発熱係数 1.0
c      djc=visheatcoeffvm*1.0e-06
c
c      do i=1, usernumber
c      do ie=1, nelelem
c
c      userf(i, ie)=0.0
c      userd(i, ie)=-ramd(ie)/(rho(ie)*cp(ie))
c      users(i, ie)=djc*gamme(ie)**2.0*visc(ie)/(rho(ie)*cp(ie))
c
c      end do
c      関数形を比べて, Ai, Bi, Ci を
c      設定します(使用しない項には0.0を設定).
c
c      end do
c+++++
return
stop
end
    
```

解析対象とする移流拡散方程式:

$$\left( A_i + \mathbf{u} \cdot \nabla + C_i \Delta \right) f_i = B_i$$

$$\left( \mathbf{u} \cdot \nabla - \frac{\kappa}{\rho C_p} \Delta \right) T = \frac{\eta \dot{\gamma}^2}{\rho C_p}$$

↑

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \kappa \Delta T + \eta \dot{\gamma}^2$$

エネルギー方程式

$$\left( \text{userf}(i, ie) + \mathbf{u} \cdot \nabla + \text{userd}(i, ie) \Delta \right) f_{ic} = \text{users}(i, ie)$$

↓

$$\text{userc}(i, ie)$$



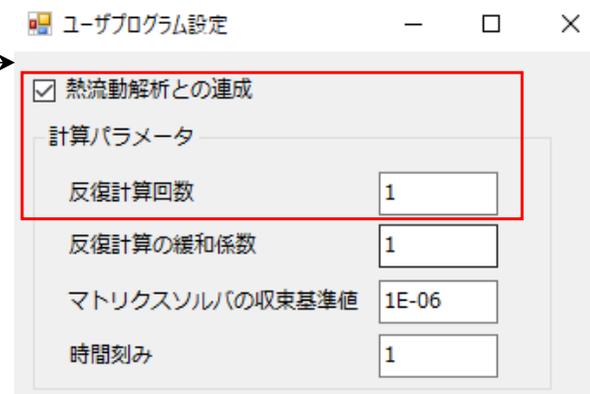
## 【サンプルプログラム2】FVM 温度解析

tempfvm

### ○解析条件の設定例



通常の熱流動解析の非ニュートン  
反復計算回数毎に(連成あり),  
定常方程式を1回で解く場合の設定

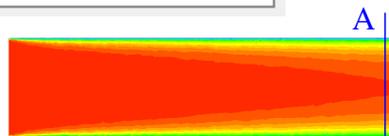
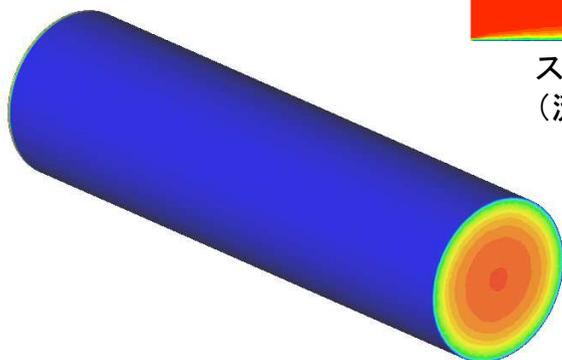


○解析結果例: 標準の温度計算でFVM法を選択した場合(p.31)と同等の結果が得られます。

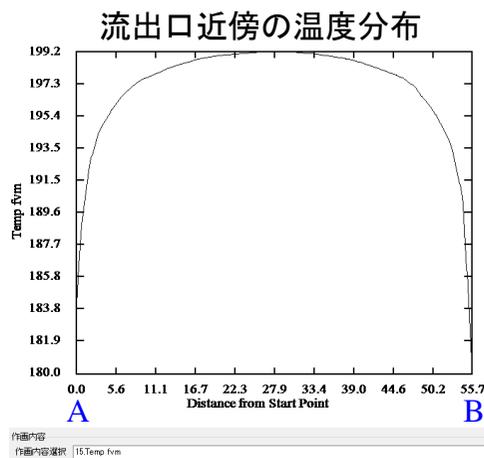
### 【温度分布(°C)】



表面コンター図



スライスコンター図  
(流路軸中心断面)



### .hisinf の最終項

----- Calculation Information -----

Outlet node number	:	1256
Ave.Temp on Outlet	:	194.7519
Max.Temp on Outlet	:	199.2173

-----

# (補足) ユーザプログラムの環境設定方法

## 開発環境の設定例

1) Intel® oneAPI HPC Toolkit をダウンロードする。

入手可能なウェブサイト(下図に抜粋)

<https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/articles/news/free-intel-software-developer-tools.html>

Free Intel® Software Development Tools

Published: 01/12/2021  
Last Updated: 02/01/2021

### Intel® oneAPI Toolkits - Free for All Developers

Intel® oneAPI Toolkits are the next generation of standards-based Intel® Software Development Tools for building applications across diverse architectures. All Intel® oneAPI Toolkits products are available at no cost. The Intel oneAPI Toolkits do not require license files and the terms of use are based on the [End User License Agreement](#). Support is available via [Intel Developer Zone community forums](#).

#### Native Code Toolkits

##### Intel® oneAPI Base Toolkit

Get started with this foundational kit that enables developers of all types to build, test, and deploy performance-driven, data-centric applications across CPUs, GPUs, and FPGAs. For specialized workloads, use the Base Kit with one or more add-on toolkits.

[Get the Base Kit](#) + Add a Domain-Specific Toolkit

##### Add Domain-Specific Toolkits for Specialized Workloads

##### Intel® oneAPI HPC Toolkit

Deliver fast DPC++, C++, Fortran, OpenMP, and MPI applications that scale.

[Get the Base Kit](#) + [Get the HPC Kit](#)

##### Intel® oneAPI IoT Toolkit

Build high-performing, efficient, reliable solutions that run at the network's edge.

[Get the Base Kit](#) + [Get the IoT Kit](#)

##### Intel® oneAPI Rendering Toolkit

Accelerate High-Fidelity Rendering and Visualization Applications with Powerful Libraries.

[Get the Base Kit](#) + [Get the Render Kit](#)

コマンドプロンプト上でコンパイル  
する場合にはHPC Kit のみ  
インストールします(当社実施環境)。

インテル社製品のダウンロードには、  
インテル社のサイトでアカウントを  
作成する必要があります。

## 開発環境の設定例 ① Intel Fortran

2) Microsoft社の Visual Studio をインストールする.

### 【補足情報】

- Intel® oneAPI HPC Toolkit を使用するためには, 先にMicrosoft社の Visual Studio をインストールする必要があります.  
(当社実施環境: Microsoft Visual Studio Community 2019)



インストールする要素を選択する際に,  
C++によるデスクトップ開発をチェックします.

3) Intel® oneAPI HPC Toolkit をインストールする.

Intel® MPI Library

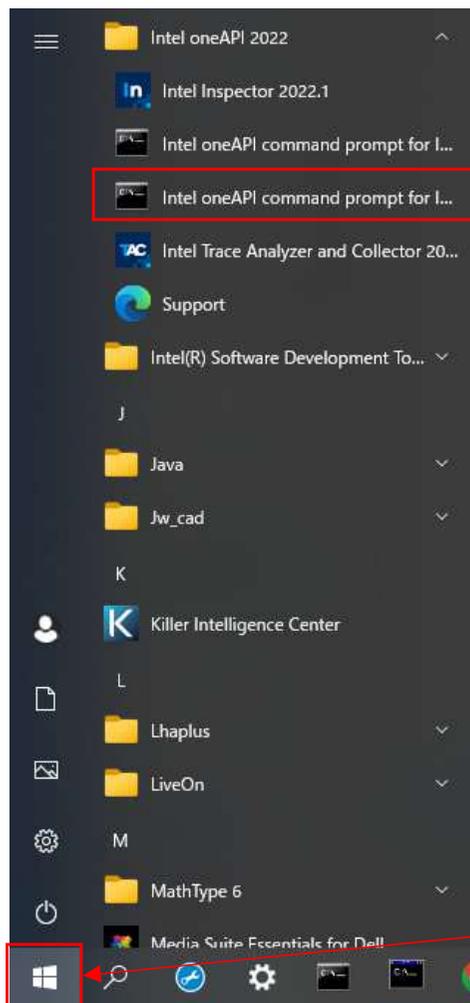
Intel® oneAPI DPC++/C++ Compiler

Intel® Fortran Compiler & Intel® Fortran Compiler Classic

Fortran Compiler を使用します.

## 開発環境の設定例

- 4) Intel® oneAPI HPC Toolkit をインストール後, Windows 画面左下のスタートボタンから Intel oneAPI command prompt for Intel64 をクリックしてコマンドプロンプトを起動します.



2. Intel oneAPI command prompt for Intel64 をクリックする.  
(Intel32 も存在するため注意)

3. コマンドプロンプトが起動する. (x64の表記を確認)

```
Intel(r) oneAPI Tools
:: initializing oneAPI environment...
  Initializing Visual Studio command-line environment...
  Visual Studio version 15.9.22 environment configured.
  "C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio\2017\Community\
  Visual Studio command-line environment initialized for: 'x64'
: compiler -- latest
: debugger -- latest
: dev-utilities -- latest
: inspector -- latest
: itac -- latest
: mpi -- latest
: tbb -- latest
:: oneAPI environment initialized ::
C:\Program Files (x86)\Intel\oneAPI>
```

1. Windowsスタートボタン  
をクリックする.  
(当社実施環境 windows10, 11)