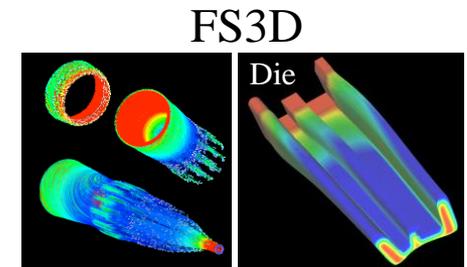
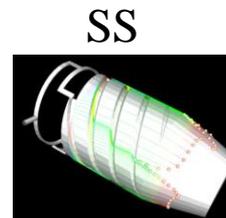
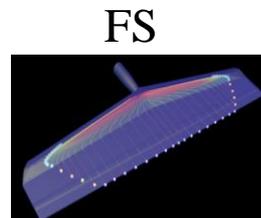
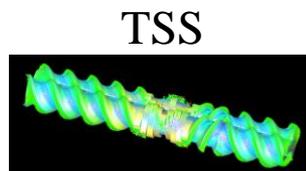
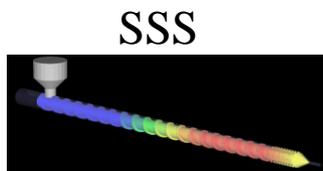


# HASL社製品改良成果資料 (I)

## (発表用ダイジェスト版)

Single Screw Simulator (SSS) / Ver.13.0.0 / 2.5D単軸スクリュ解析  
Twin Screw Simulator (TSS) / Ver.10.0.0 / 2.5D二軸スクリュ解析  
Flat Simulator (FS) / Ver. 9.0.0 / 2.5Dフラットダイ解析  
Spiral Simulator (SS) / Ver.10.0.0 / 2.5Dスパイラルダイ解析  
Flow Simulator 3D (FS3D) / Ver.11.0.0 / 3D押出成形熱流動解析



Flow analysis of downstream sections of the screw.

Flow and deformation analysis during profile extrusion process.

2023/11/17  
株式会社HASL

# 改良成果資料(I)：目次

## ① 定常移流拡散方程式へのFVM(有限体積法)の適用

1. 温度解析機能: 移流拡散方程式 / FS3D
2. 滞留時間計算機能: 移流方程式 / FS3D, SS, FS

## ② 肉厚方向を考慮した新規可視化および解析機能

1. 肉厚断面の可視化機能 / SSS, TSS
2. 滞留時間計算の新機能 / SSS, TSS
3. 3D FVM 温度解析機能 / SSS, TSS

## ③ 汎用定常移流拡散方程式の解析機能

1. ユーザプログラム機能 / SSS, TSS, SS, FS, FS3D

## ④ その他の新規/改良機能トピックス

1. 対称モデル解析 / FS3D
2. 脱揮解析(高濃度揮発成分) / SSS, TSS
3. 1D FDM / 2.5D FEM温度解析 / TSS
4. エレメント単位の肉厚変更機能(STLファイル) / TSS

# ① 定常移流拡散方程式へのFVM(有限体積法)の適用

## FEM(有限要素法)/HASL標準解法

- ・積分形の定式化
- ・非構造格子への適用性高い
- ・拡散(粘性)支配の方程式向き

○運動量方程式: 拡散方程式  
(定常状態, 非圧縮粘性流れ)

$$\eta \Delta \mathbf{u} = \nabla P$$

拡散項

## FVM(有限体積法)/新規採用

- ・積分形の定式化
- ・構造格子/非構造格子に適用可能
- ・移流(対流)支配の方程式向き

○エネルギー方程式: 移流拡散方程式  
(温度解析)

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

移流項 拡散項

$\mathbf{u}$  : 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

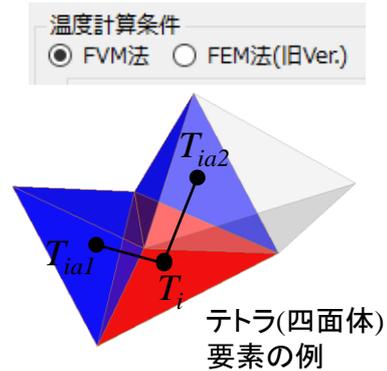
# 1. 温度解析へのFVM適用 / FS3D (Flow Tetra, 3次元熱流動解析)

FEM & SUPG定常解析(現行) → FVM定常解析(新規)

SUPG: 解の数値振動を抑制する安定化処理

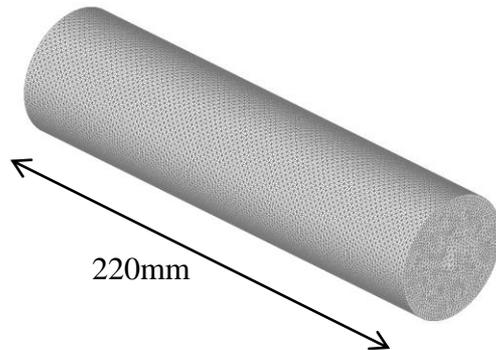
拡散項を, 隣接するセル(要素)重心間の法線方向距離を算出して定義

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



## ○解析例

・テストモデル (Φ56.3円管)



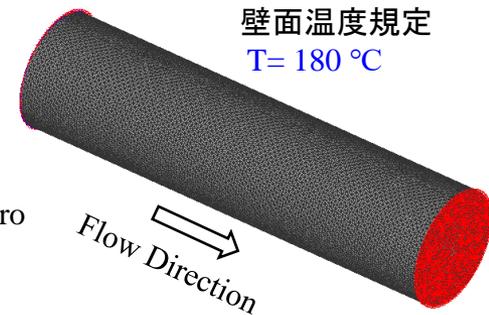
流路体積: 547.7 cm<sup>3</sup>  
メッシュサイズ: 1.5mm  
355,548 要素

・解析条件

流入口

流量 Q= 50 cm<sup>3</sup>/sec  
or  
200 cm<sup>3</sup>/sec  
温度 T= 200 °C

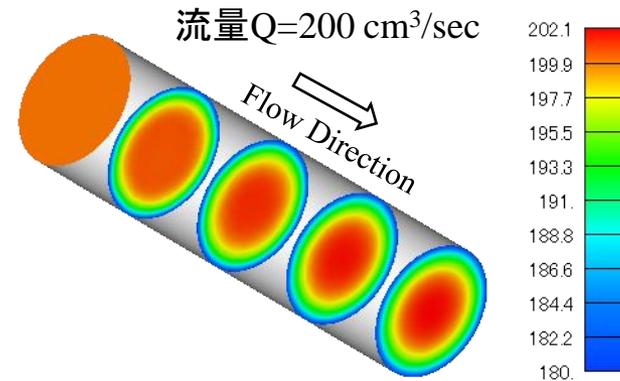
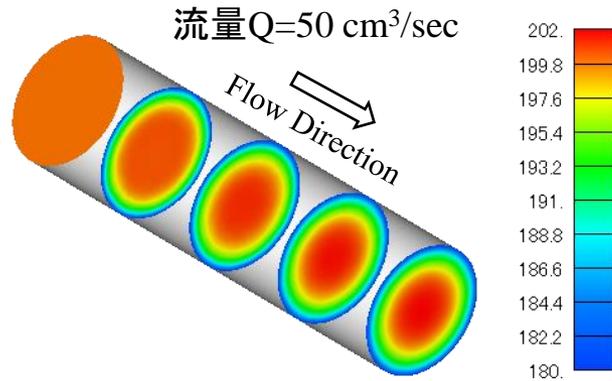
樹脂データ: PP\_D3.pro  
(Materialfit DB)



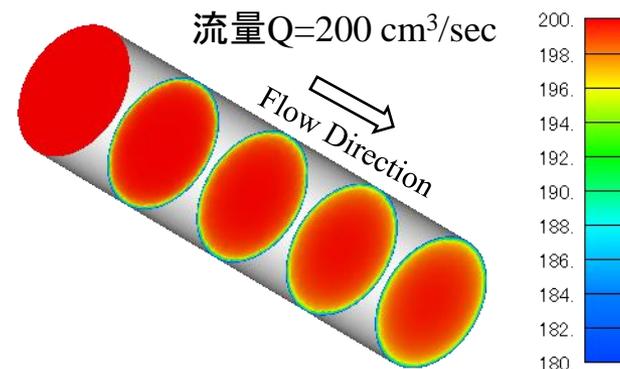
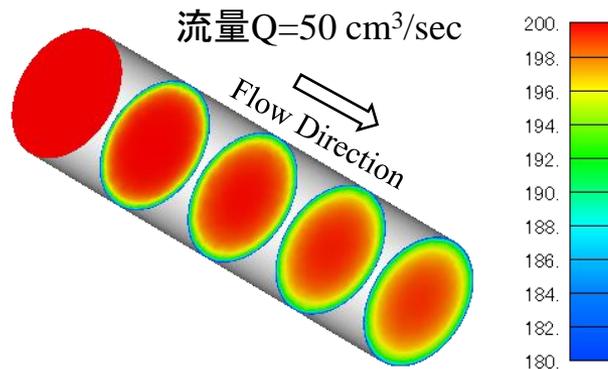
\* 本検討では粘性発熱項を省略して解析しました。

- 解析結果／温度分布 (°C)

FEM & SUPG定常解析(現行)



**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.



## 2. 滞留時間計算へのFVM適用 / FS3D (Flow Tetra, 3次元熱流動解析)

### VOF法非定常解析(現行)

- 計算サイクル数 ( $n \times \Delta t$ ) の設定
- 界面の平均化(不鮮明化)



→

### FVM定常解析(新規)

移流方程式

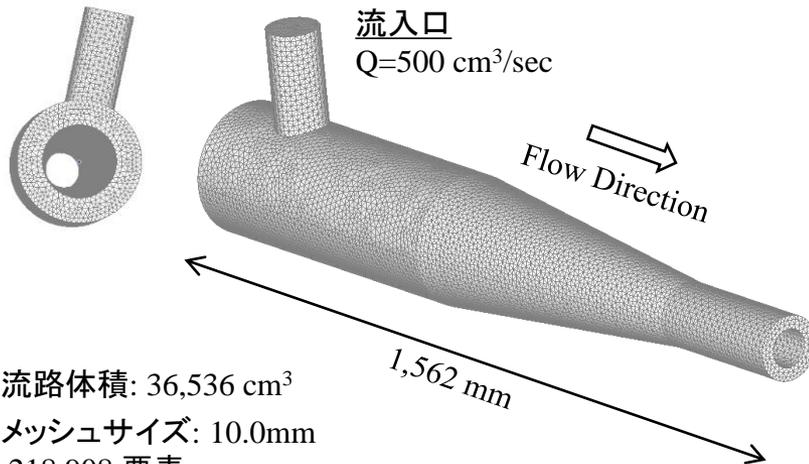
$$u \nabla \tau_{res} = 1$$

$\tau_{res}$ : 滞留時間(sec)



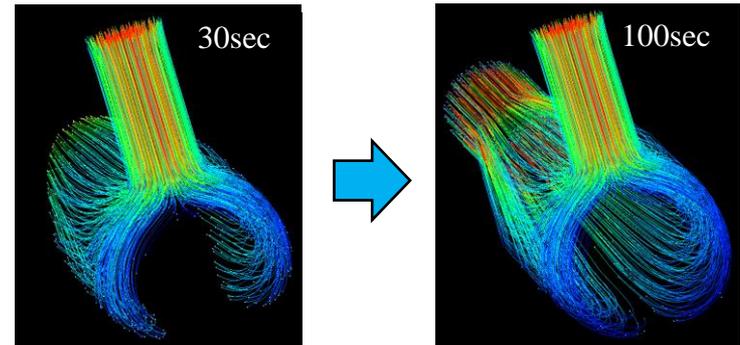
### ○解析例

・テストモデルおよび解析条件



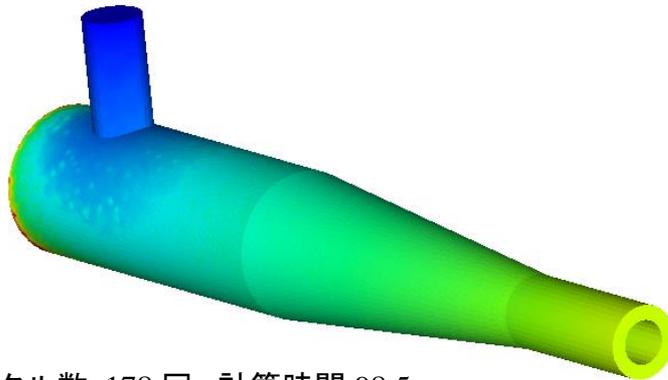
流路体積: 36,536 cm<sup>3</sup>  
メッシュサイズ: 10.0mm  
218,908 要素

### ○解析結果/流線図

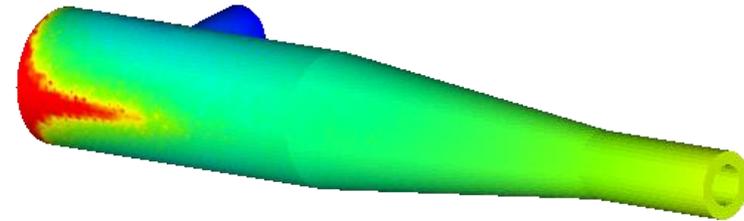


- 解析結果／滞留時間分布 (sec)

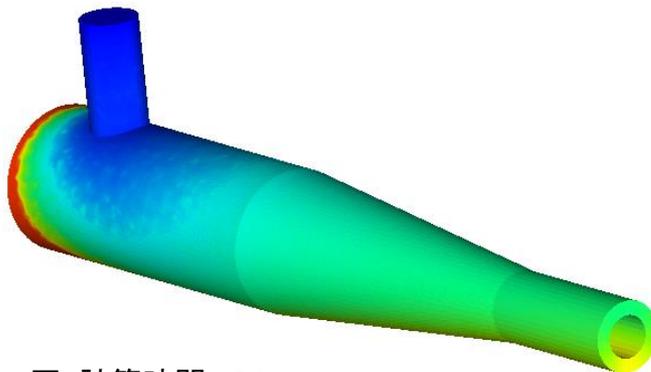
VOF法非定常解析(現行)



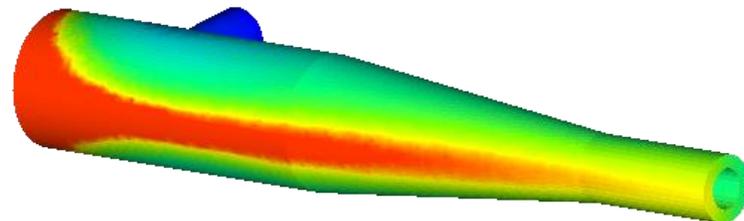
計算サイクル数 178 回, 計算時間 98.5 sec



FVM定常解析(新規): ウェルドラインを鮮明に可視化.



定常計算 1 回, 計算時間 15.3 sec

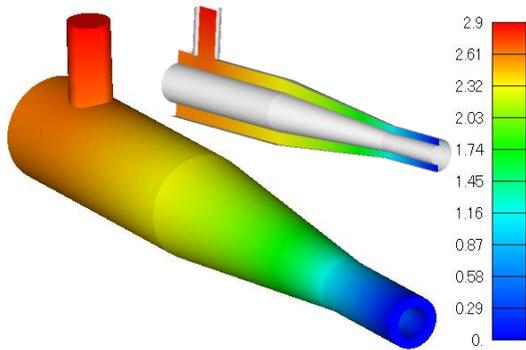


- FVM適用結果 / FS3D (Flow Tetra, 3次元熱流動解析)

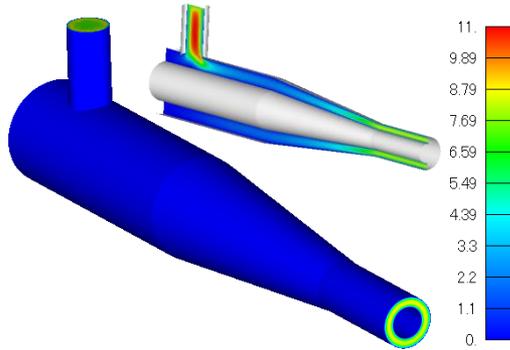
⇒ 解析対象の方程式に応じた適切な解法選択 **FEM(拡散支配)** / **FVM(移流支配)**  
により解析精度が向上.

**FEM(拡散支配)**

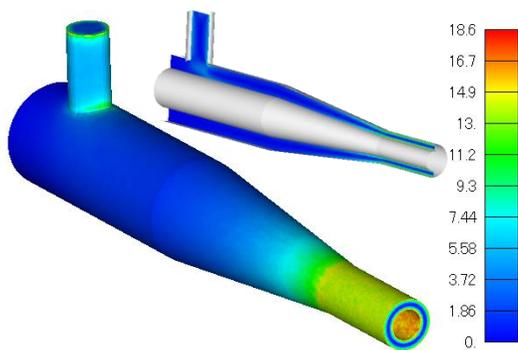
○圧力分布 (MPa)



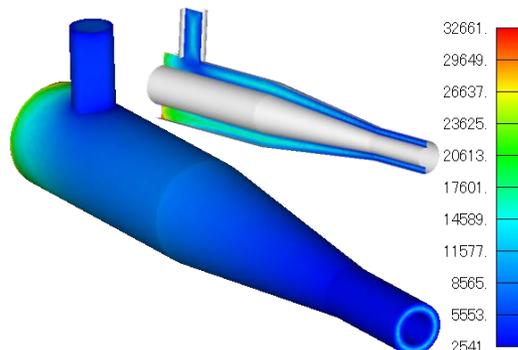
○流速分布 (cm/sec)



○ひずみ速度分布 (1/sec)

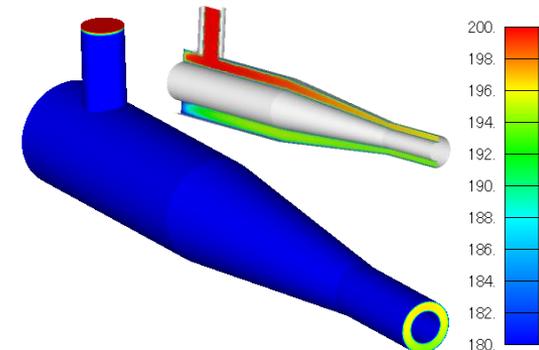


○粘度分布 (Pa·sec)

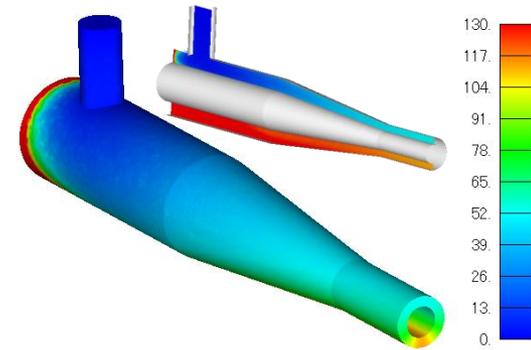


**FVM(移流支配)**

○温度分布 (°C)



○滞留時間分布 (sec)



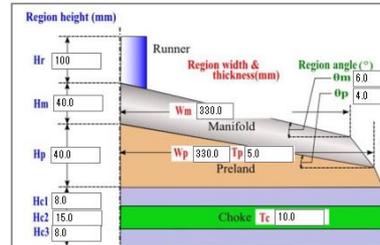
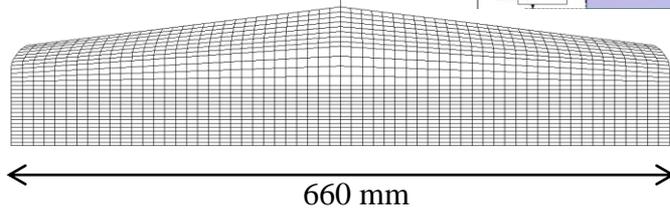
## - 2.5D FEM 解析ソフトへのFVM適用

滞留時間計算機能: 移流方程式 / FS(フラットダイ)

### ○解析例

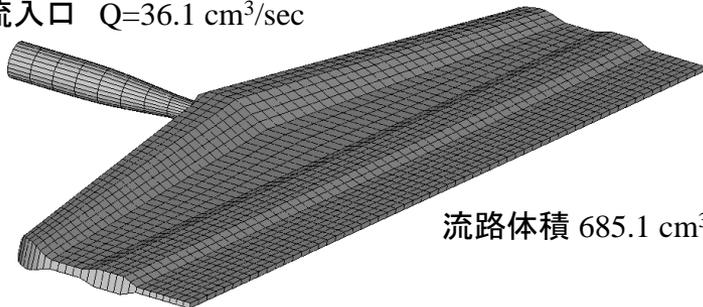
・2.5Dモデル

ダイ流出口肉厚 3mm  
(肉厚方向分割数 10)

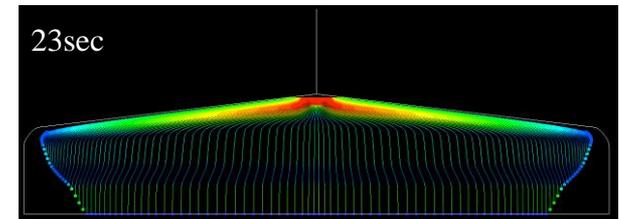
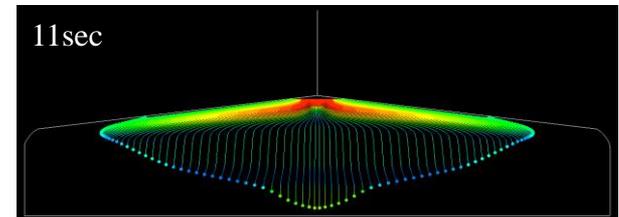


・3D表示モデルおよび解析条件

流入口  $Q=36.1 \text{ cm}^3/\text{sec}$



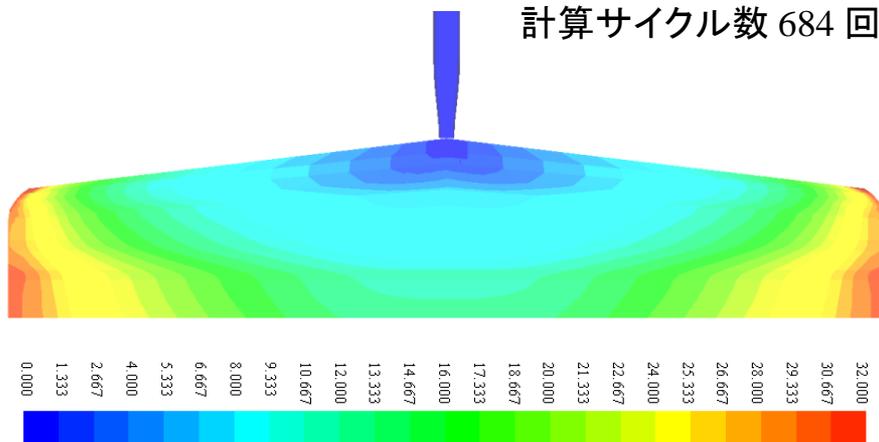
### ○解析結果/流線図



- FS解析結果／滞留時間分布 (sec)

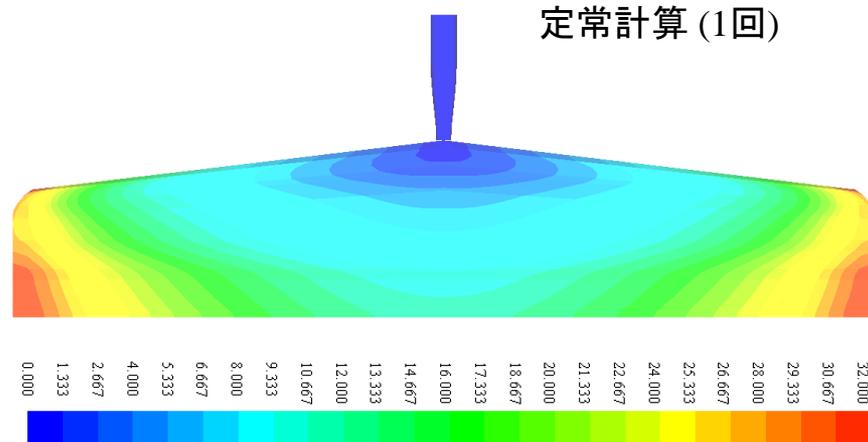
VOF法非定常解析(現行)

計算サイクル数 684 回

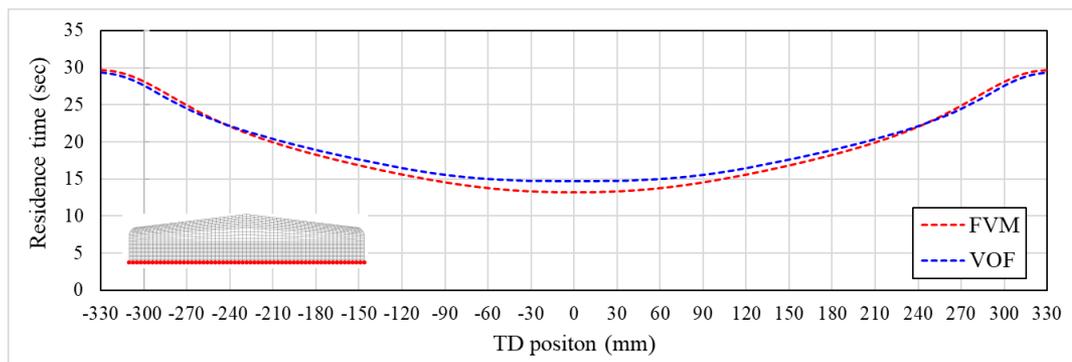


FVM定常解析(新規)

定常計算(1回)



ダイ流出口の滞留時間分布 (sec)



## - 2.5D FEM解析ソフトへのFVM適用

滞留時間計算機能: 移流方程式 / SS(スパイラルダイ)

### ○解析例

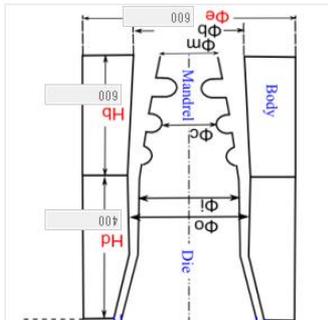
- ・ 3D表示モデルおよび解析条件

スパイラルマンドレル基本情報

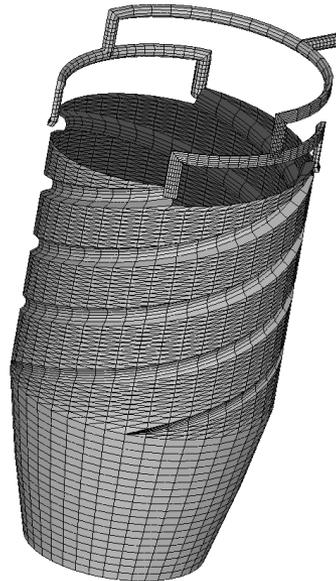
展開モデル直径 $\Phi_e$ (mm)	600
ボディ高さ $H_b$ (mm)	600
ポート数	4
チャンネルピッチ(mm)	600

ダイ基本情報

ダイ高さ $H_d$ (mm)	400
-----------------	-----

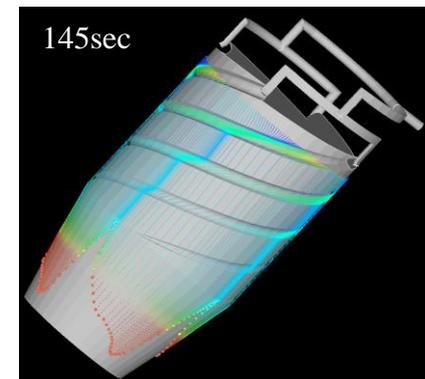
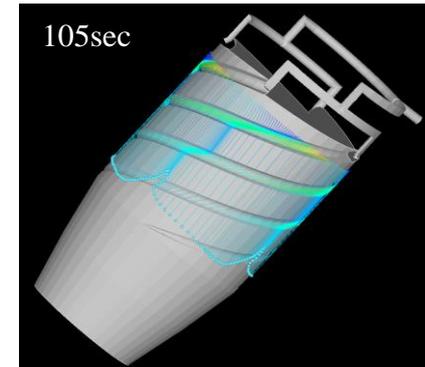


流入口  $Q=100.0 \text{ cm}^3/\text{sec}$



流路体積  $20,273 \text{ cm}^3$

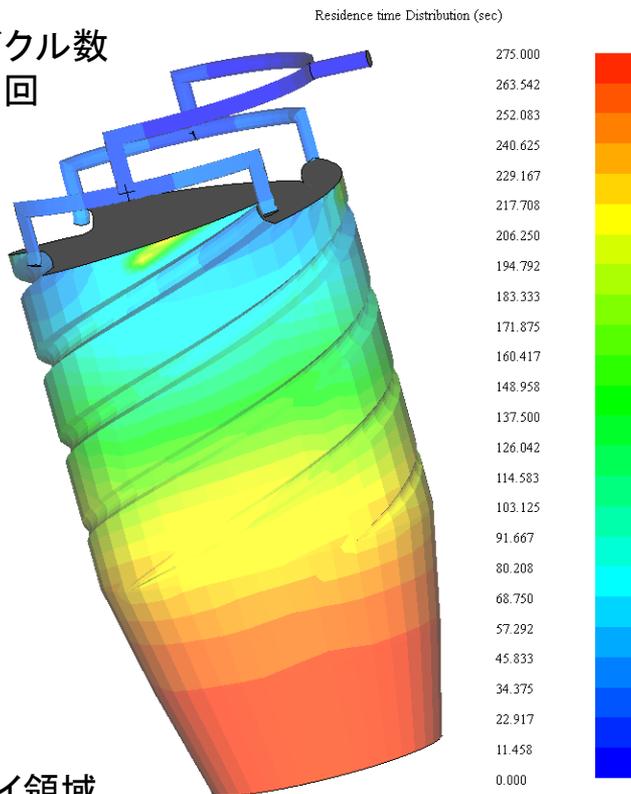
### ○解析結果/流線図



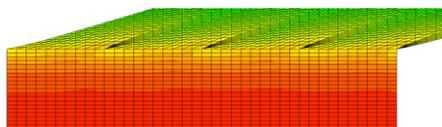
- SS解析結果／滞留時間分布 (sec)

VOF法非定常解析(現行)

計算サイクル数  
650 回

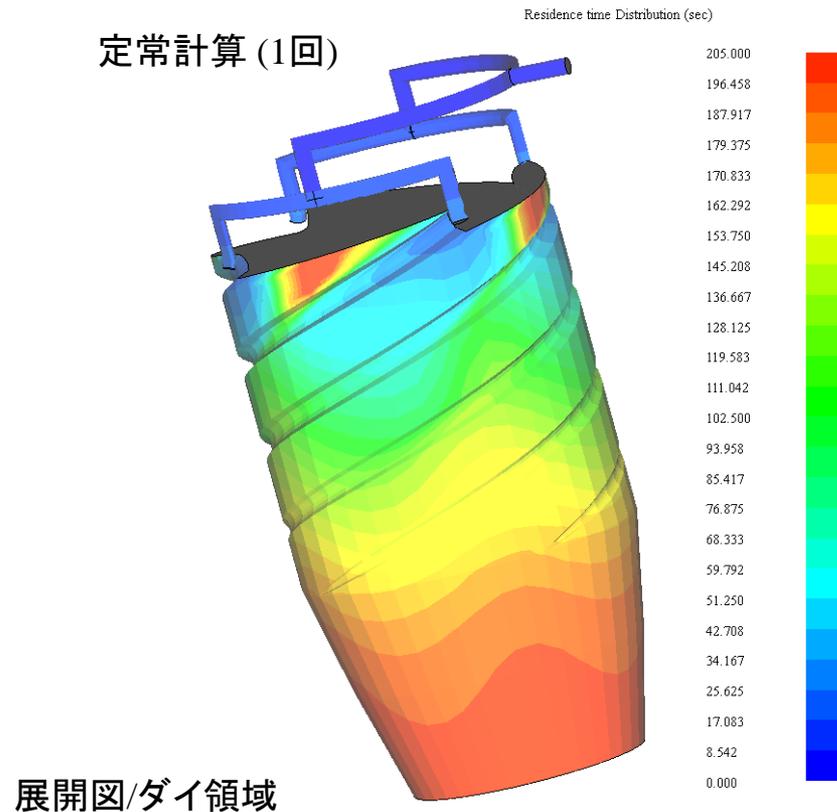


展開図/ダイ領域

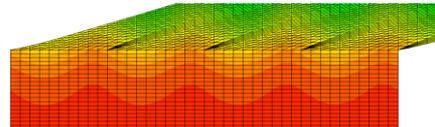


FVM定常解析(新規)

定常計算(1回)

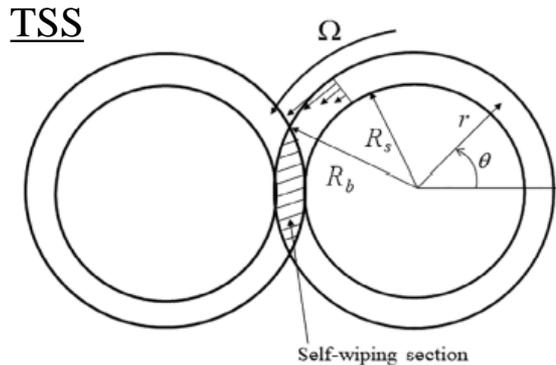
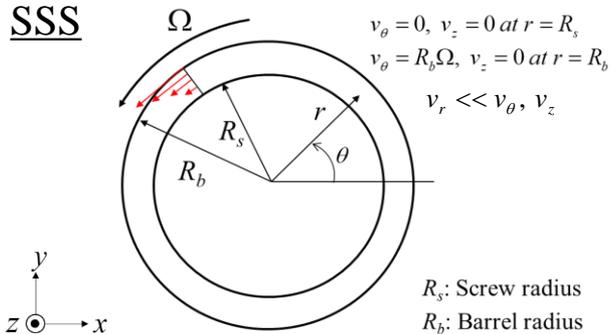


展開図/ダイ領域



## ② 肉厚方向を考慮した新規可視化および解析機能 / SSS, TSS

### Schematic of 2.5D Hele-Shaw flow



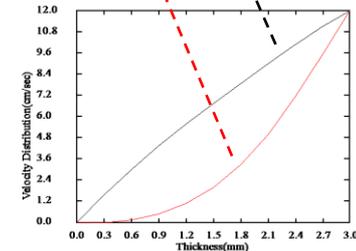
参考文献: M. Ohara, S. Tanifuji, Y. Sasai, T. Sugiyama, S. Umemoto, J. Murata, I. Tsujimura, S. Kihara, K. Taki, *AIChE J.* **66**, 11, e17018 (2020)

### 従来の結果表示

分布図: 肉厚方向の平均値 (例) 流速分布

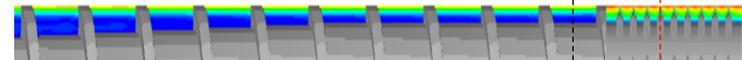


グラフ図: 選択した位置の肉厚方向分布 (例) 周方向流速分布

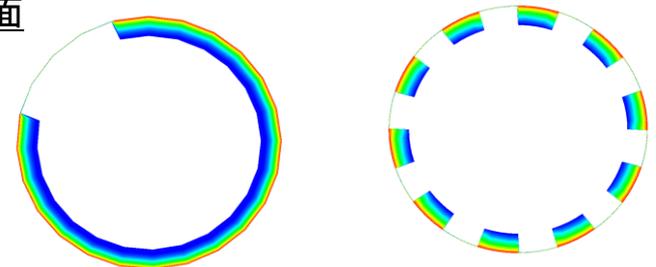


### 新規の結果表示

z-r 断面 (例) 周方向流速分布



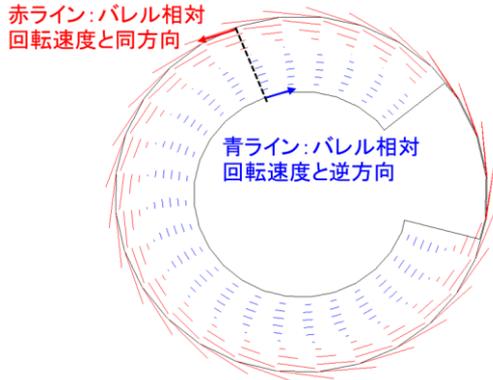
x-y 断面



# 1. 新規可視化機能: スライスベクトル & スライスコンター

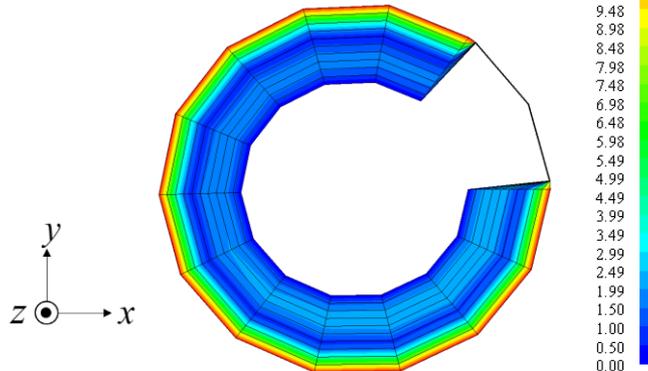
スライスベクトル/xy断面

周方向流速ベクトル



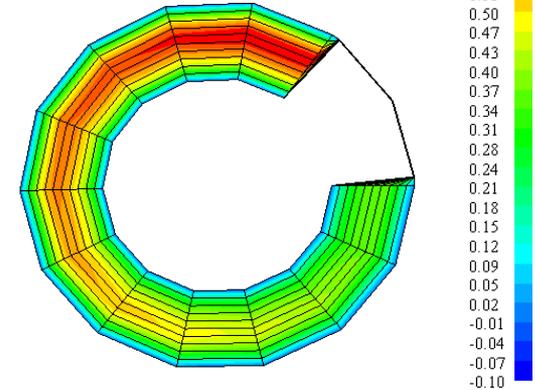
スライスコンター/xy断面

周方向流速(cm/s)



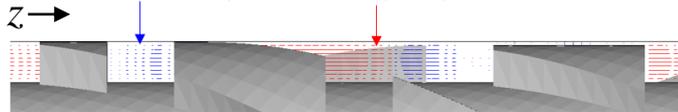
スライスコンター/xy断面

軸方向流速(cm/s)



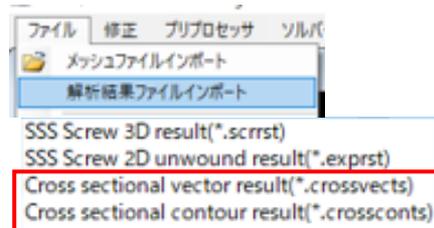
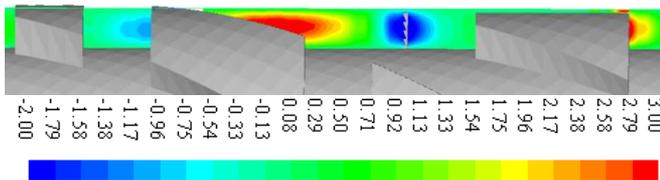
スライスベクトル/z-r断面

逆方向の流れ(漏洩流) 順(押出)方向の流れ

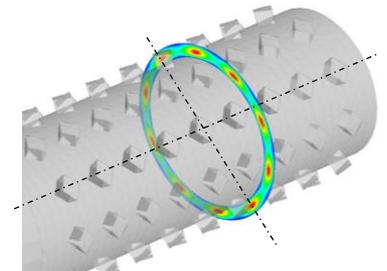


スライスコンター/z-r断面

軸方向流速(cm/s)

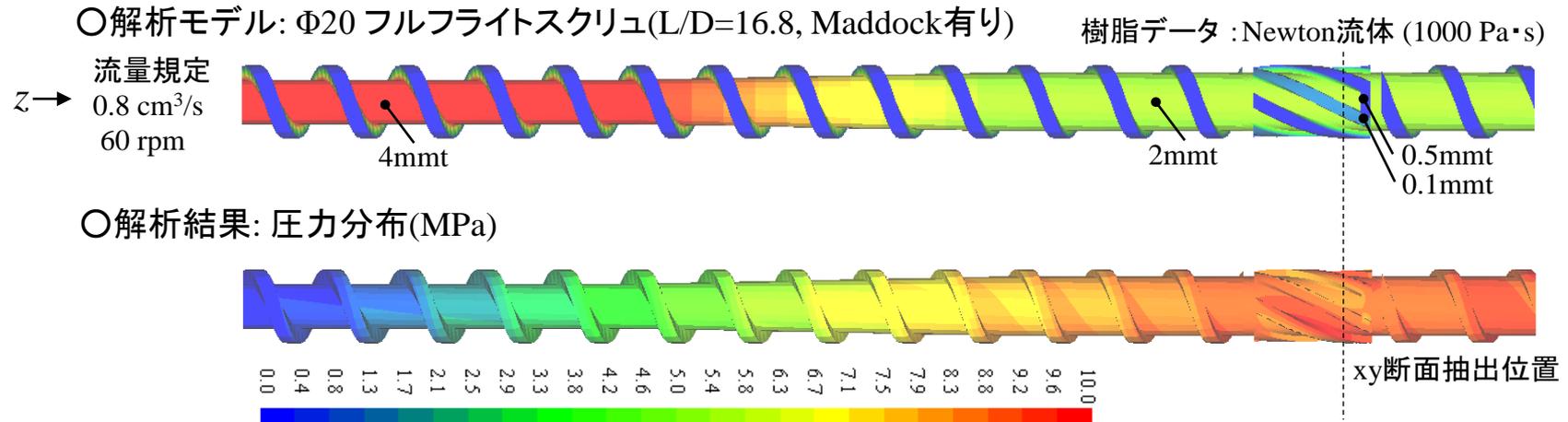


任意のxy断面, z-r断面を指定して描画, グラフ作成, 動画作成が可能.

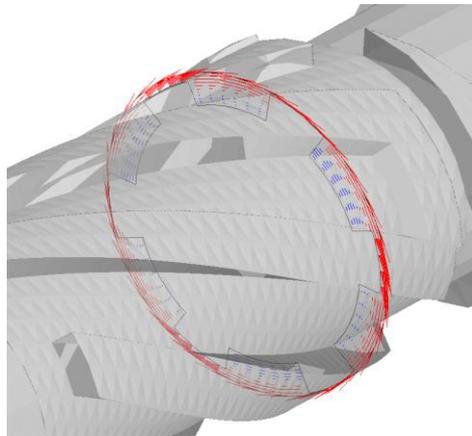


肉厚方向の解析結果を抽出した新規出力ファイルが解析終了後に自動作成.

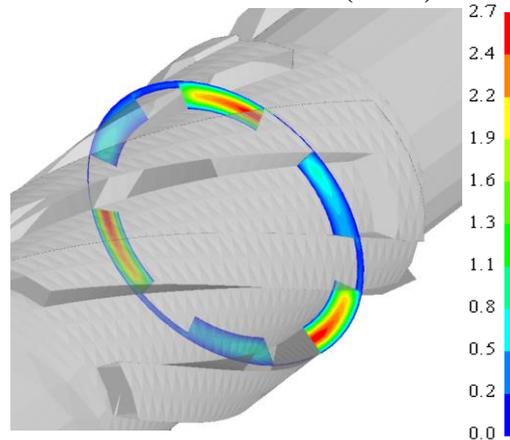
- SSS肉厚断面の可視化例



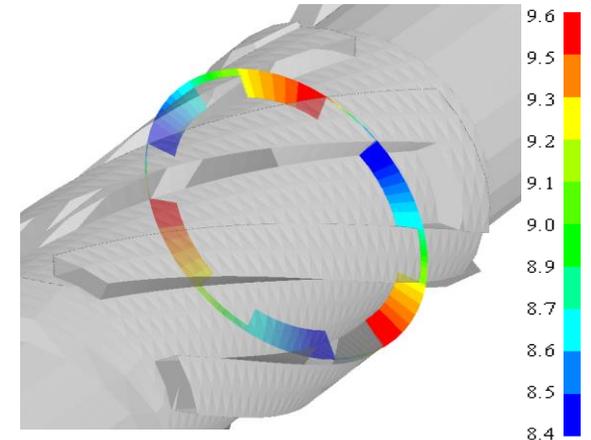
周方向流速ベクトル



軸方向流速分布(cm/s)

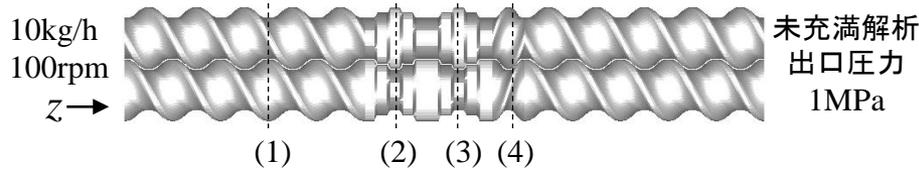


圧力分布(MPa)

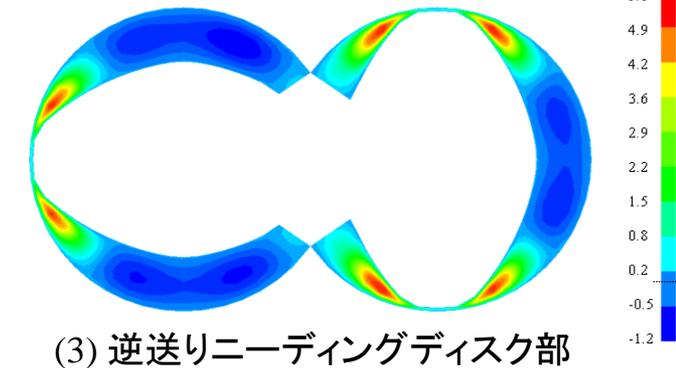
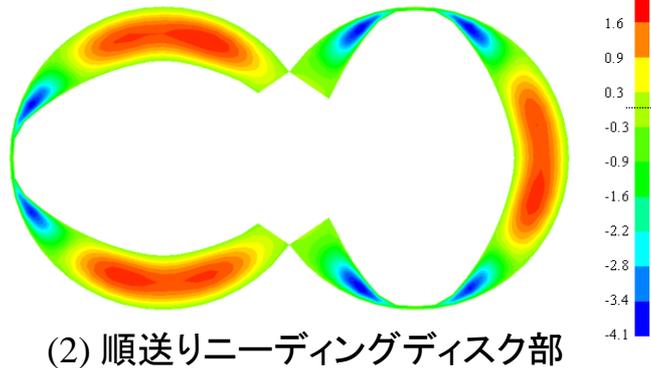
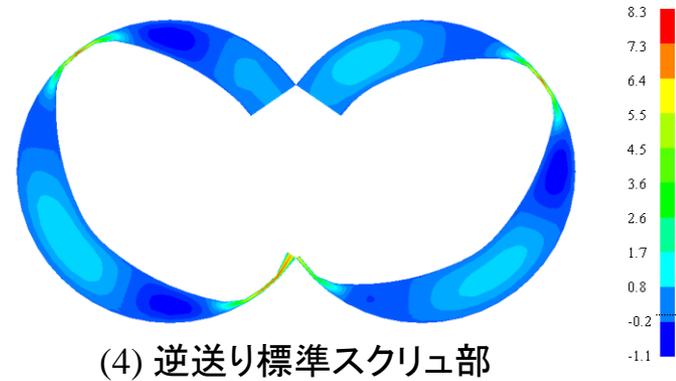
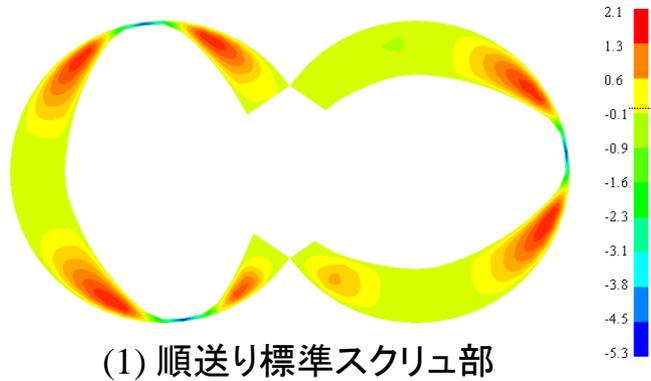
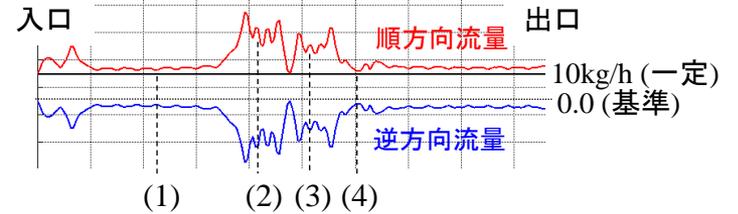


- TSS肉厚断面の可視化例

○ 軸方向流速(cm/s)

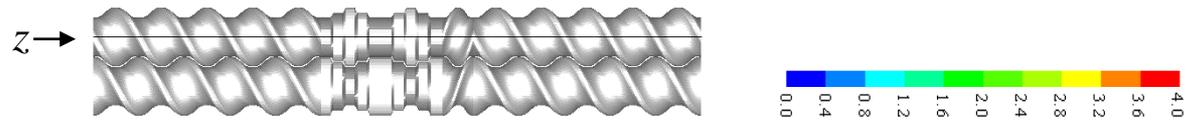


(参考)軸方向断面の通過流量イメージ

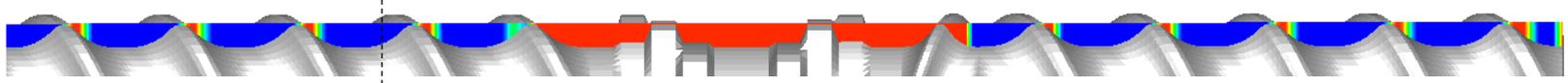


- TSS肉厚断面の可視化例

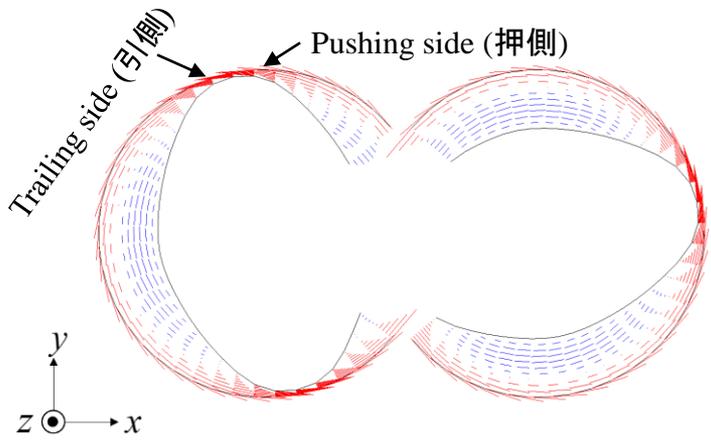
○ 圧力分布(MPa)



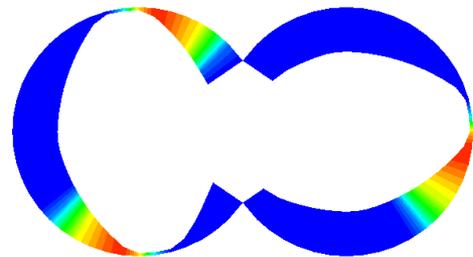
○ 充填率(-) 赤色: 樹脂充填領域, 青色: 樹脂未充填領域



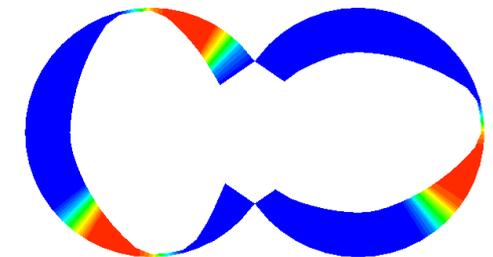
xy断面



xy断面圧力分布(MPa)

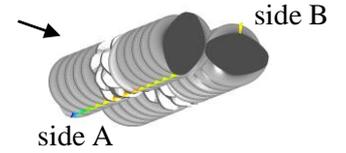


xy断面充填率分布(-)

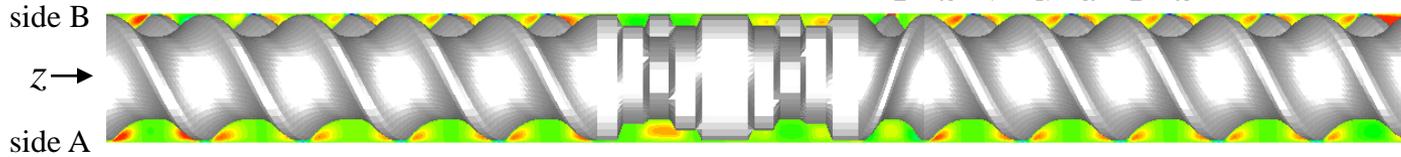


スクルフライト押側は引側と比較して相対的に圧力が高くなり、この圧力差が漏洩流れの駆動力になる。また断面内の圧力勾配情報を利用し、押側に偏在する部分充填領域を表現している。

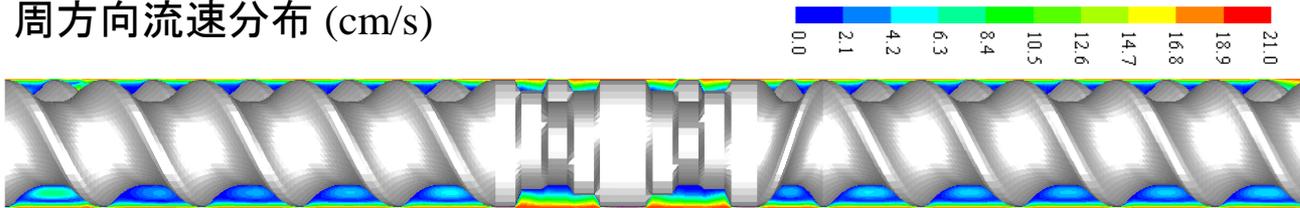
- TSS肉厚断面の可視化例



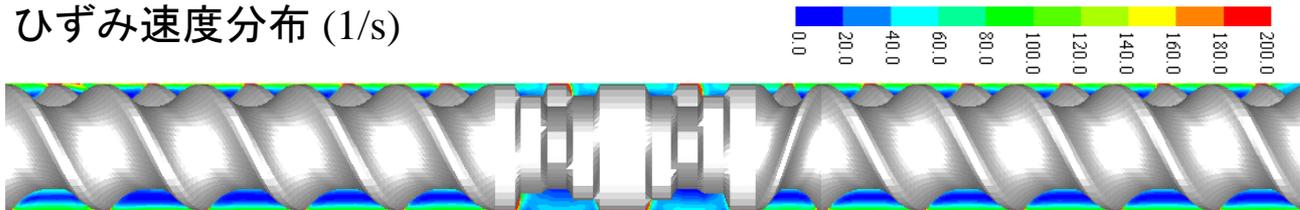
○ 軸方向流速分布 (cm/s)



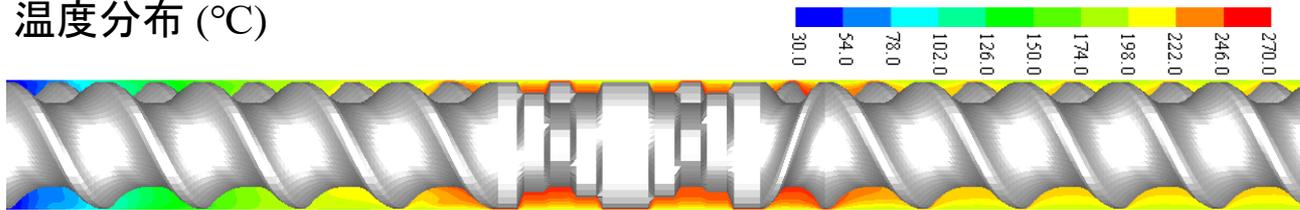
○ 周方向流速分布 (cm/s)



○ ひずみ速度分布 (1/s)



○ 温度分布 (°C)



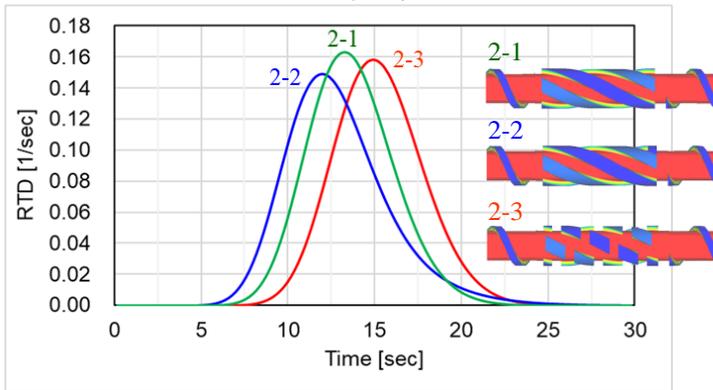
## 2. 滞留時間計算の新機能

- (現行) ・VOF法  
 ・非定常濃度解析(RTD)

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f = 0$$

濃度  $f$  を入口から投入した場合の、出口への到達時間を算出。

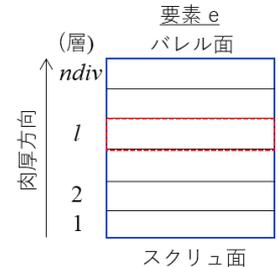
○スクリュウ出口の滞留時間分布(RTD) 予測結果



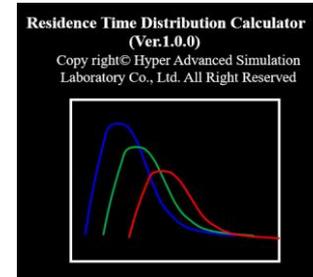
### (新機能1) 肉厚層毎の定常移流解析

$$\mathbf{u}_l \cdot \nabla \tau_{res,l} = 1$$

$\mathbf{u}_l$  :  $l$ 層の流速ベクトル  
 $\tau_{res,l}$  :  $l$ 層の滞留時間(sec)



### (新機能2) 軸方向分散モデル(ADM)に基づく 出口の滞留時間分布(RTD)解析



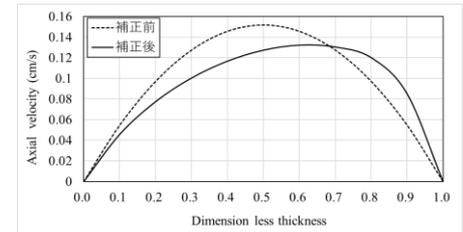
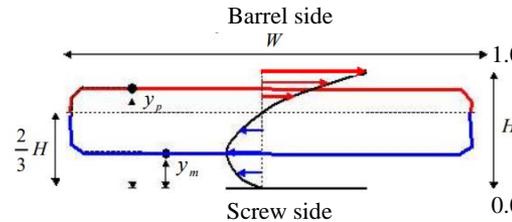
スクリュウ出口のRTDを解析する機能を、別ソフト(RTDcalculator)としてご提供。

(新機能1) 肉厚層毎の定常移流解析

$$u_l \nabla t_{res,l} = 1$$

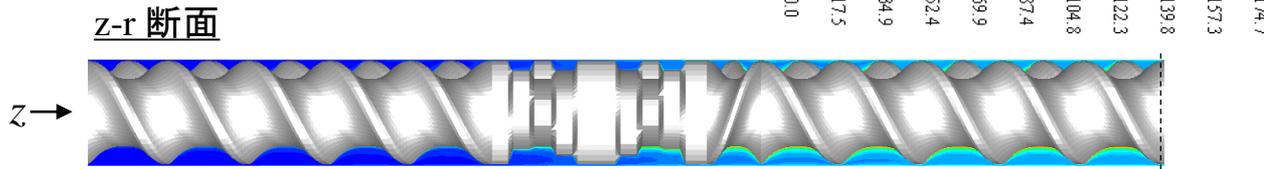
$u_l$  :  $l$ 層の流速ベクトル  
 $t_{res,l}$  :  $l$ 層の滞留時間(sec)

流体粒子の層方向の移動効果を、スクリュ断面内の循環流から算出される流体粒子検出頻度を用いて、スクリュ軸方向の流速分布を補正することにより考慮した。

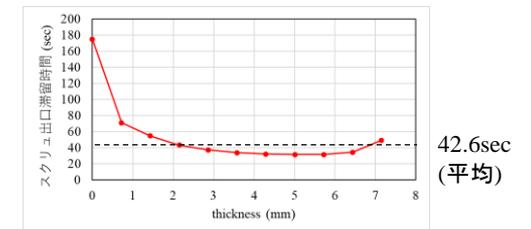
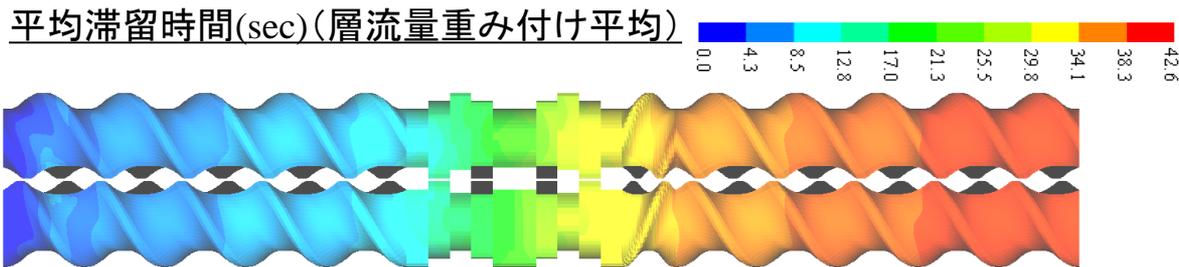
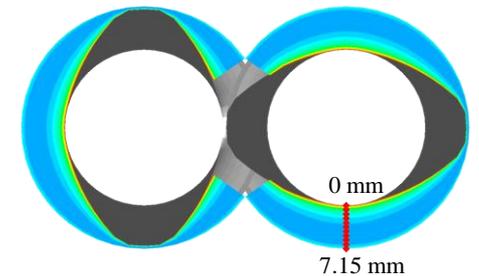


参考文献: 1) 二軸スクリュ押し—その技術と理論, J.L.White 著, 酒井忠基 訳, シグマ出版(1990)  
 2) “Principles of Polymer Processing” second edition, Zehev Tadmor, Costas G. Gogos, Wiley-Interscience (2013)

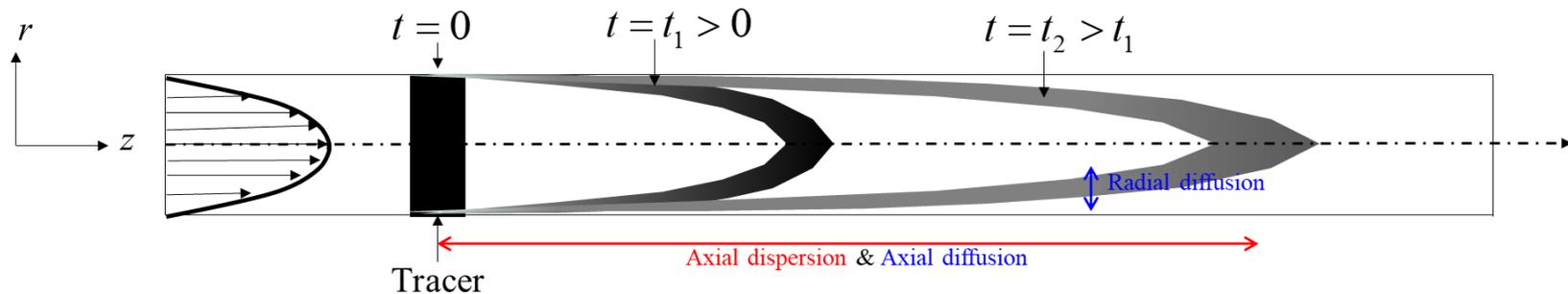
○解析結果例／滞留時間(sec)



xy 断面 (スクリュ出口)



## (新機能2) 軸方向分散モデル(ADM)に基づく出口の滞留時間分布(RTD)解析

ADM : Axial Dispersion Model (Taylor-Aris Dispersion Theory <sup>1),2)</sup>)

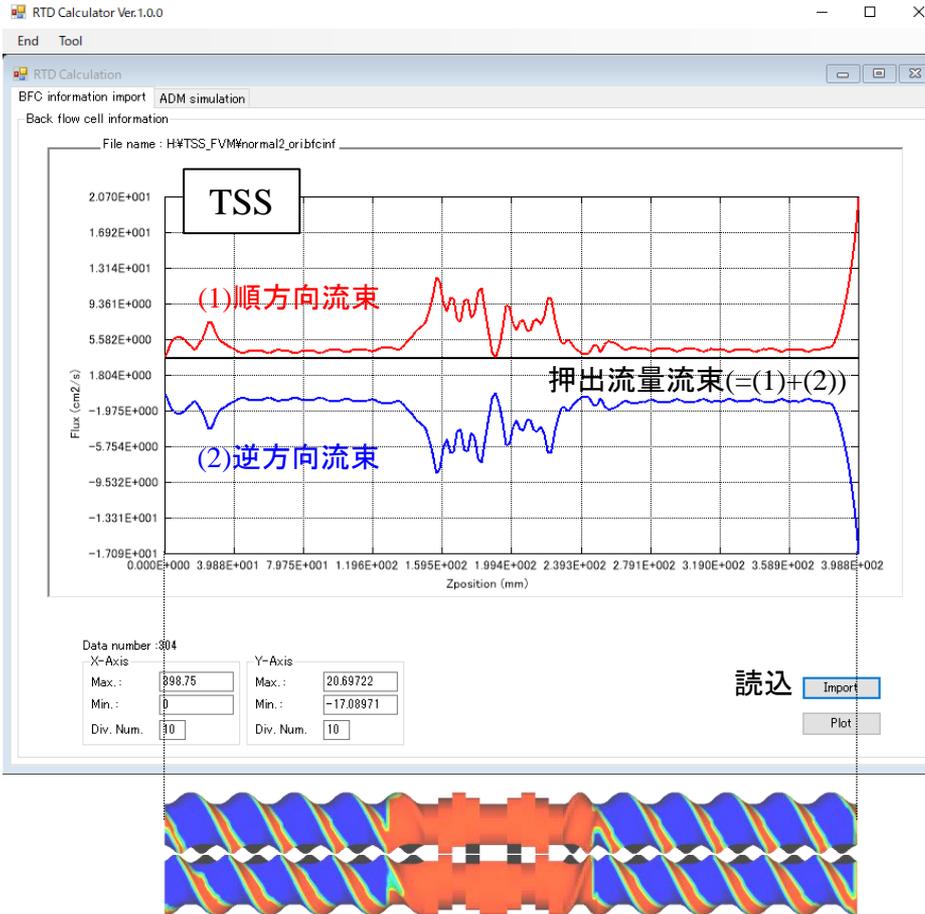
$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = D_{Dispersion} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2},$$

$$D_{Dispersion} = D_{Diffusion} + \frac{(\bar{v}R)^2}{48D_{Diffusion}}$$

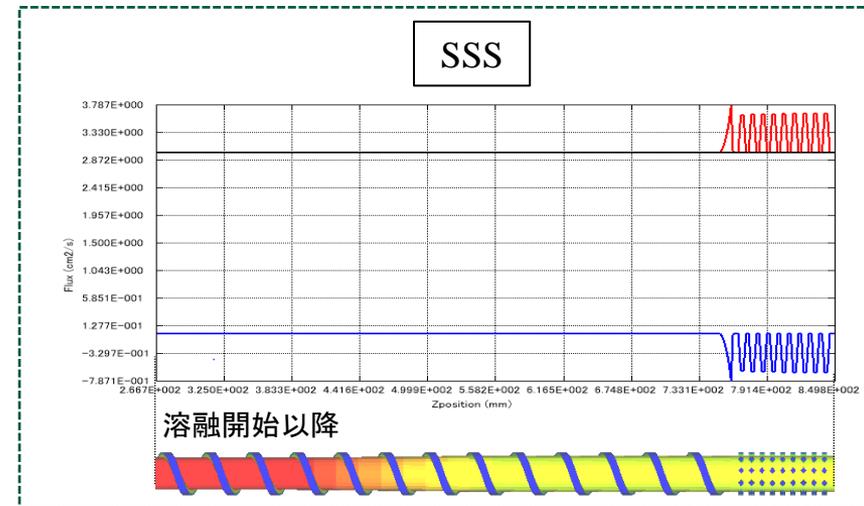
 $\bar{C}$ : Average tracer concentration $\bar{v}$ : Average axial velocity $R$ : Tube radius $D_{diffusion}$ : Molecular Diffusion Coefficient $D_{Dispersion}$ : Axial Dispersion Coefficient (ADC)1) Taylor, G. I. : Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube, *Proc. Roy. Soc. A.*, **219**, 186-203 (1953)2) Aris, R. : On the dispersion of a solute matter in a fluid flowing through a tube, *Proc. Roy. Soc. A.*, **235**, 67-77 (1956)

## (新機能2) 軸方向分散モデル(ADM)に基づく出口の滞留時間分布(RTD)解析

### ○解析手順1 / 軸方向平均流速の抽出

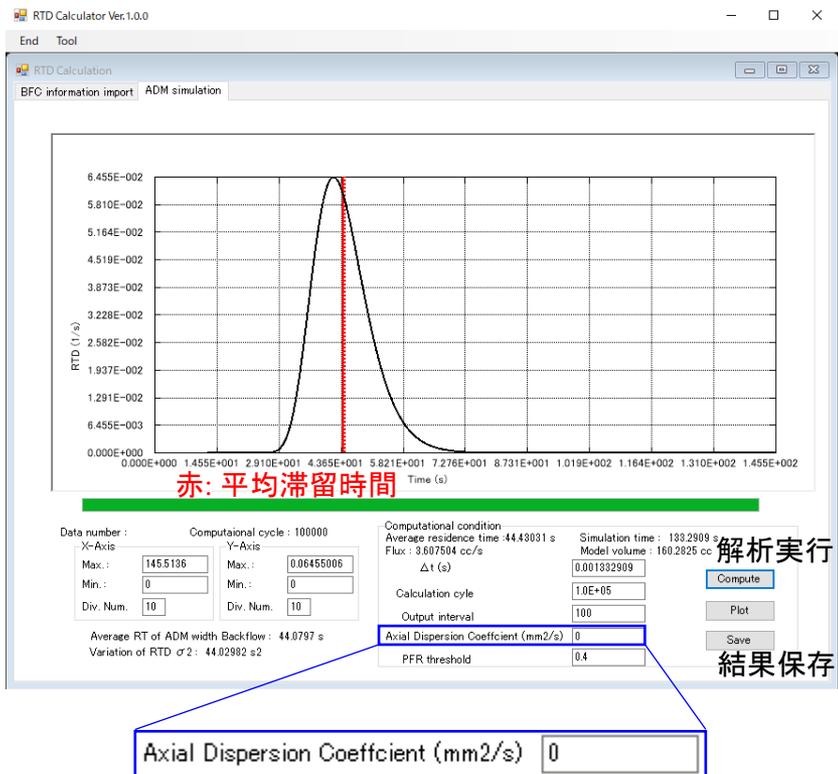


- RTD Calculator を起動し, 流動解析で得られたスクリュ軸方向の流速情報を読み込む。  
(解析後に自動出力, TSSとSSSで共通仕様)

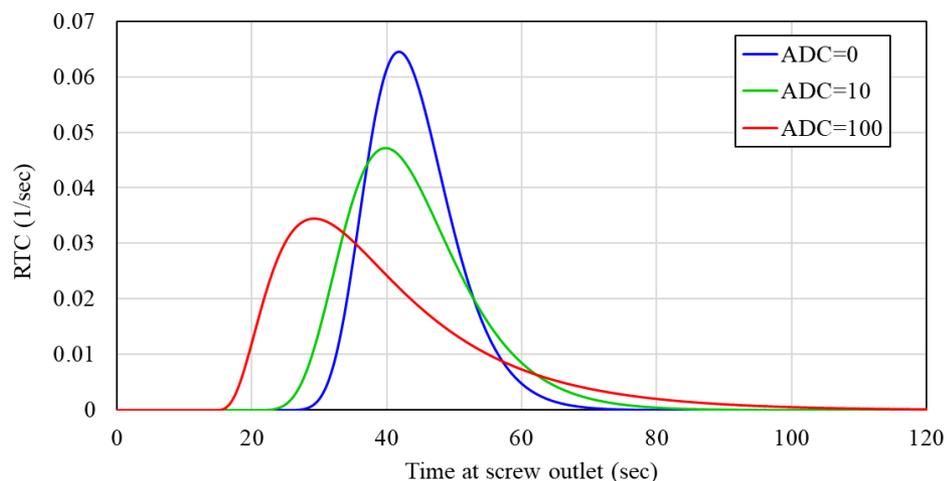


## (新機能2) 軸方向分散モデル(ADM)に基づく出口の滞留時間分布(RTD)解析

### ○解析手順2 / RTDの解析



### 解析結果 / ADC値がRTDに与える影響



- 実験結果と比較し、適切なADC値を設定する。

### 3. 3D FVM温度解析機能(肉厚層毎) / TSS, SSS

#### 2.5D FEM定常解析(現行)

三重対角行列をSOR反復計算

2.5D FEM

Thermal-Flow Calculation Control Parameters	
Non-Newtonian Iteration Number	<input type="text" value="10"/>
Layer Division Number	<input type="text" value="10"/>
Temperature SOR iteration number	<input type="text" value="10"/>

#### 3D FVM定常解析(新規)

全体マトリクスを定常計算(1回)で計算

3D FVM

Thermal-Flow Calculation Control Parameters	
Non-Newtonian Iteration Number	<input type="text" value="10"/>
Layer Division Number	<input type="text" value="10"/>
Temperature SOR iteration number	<input type="text" value="0"/>

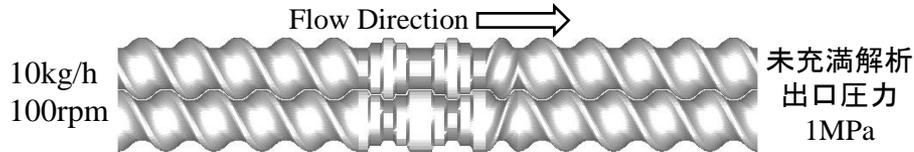
#### 1D FDM 定常解析(現行TSS)

スクリュ軸方向の平均流速を用いて、  
定常計算(1回)で計算

1D FDM

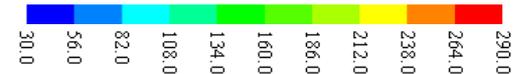
Thermal-Flow Calculation Control Parameters	
Non-Newtonian Iteration Number	<input type="text" value="10"/>
Layer Division Number	<input type="text" value="10"/>
Temperature SOR iteration number	<input type="text" value="0"/>

- TSS解析結果／温度分布 (°C)

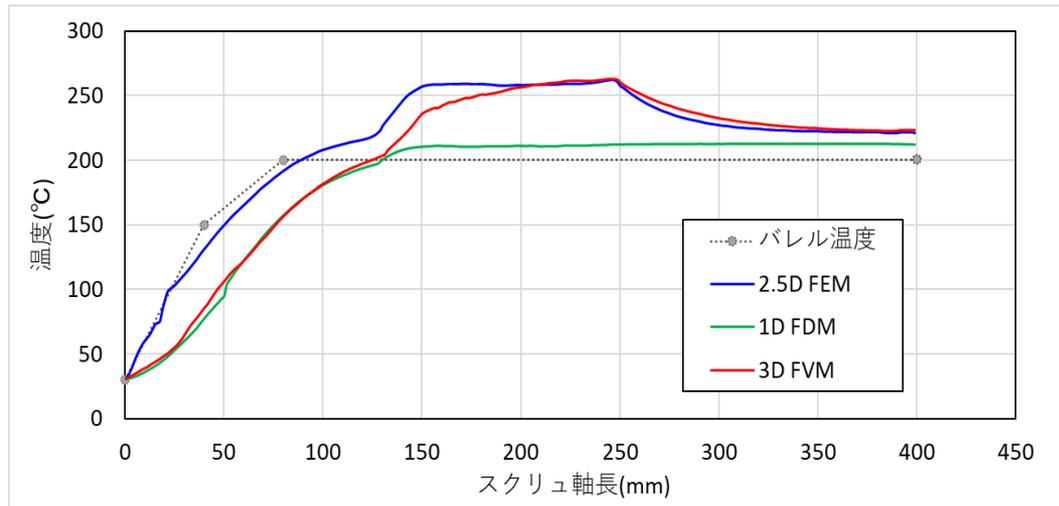


樹脂データ: HDPE\_B3.pro (Materialfit DB)  
 バレル温度境界条件: 熱伝達規定 HTC=3000 W/m2/K

3D FVM (定常計算 1回) / z-r 断面

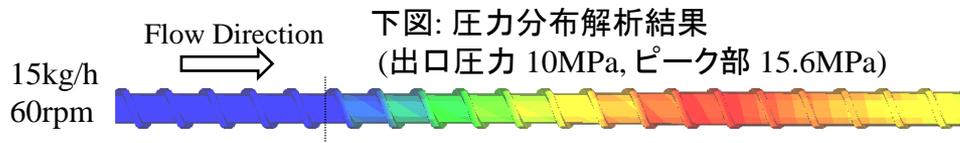


2.5D FEM (SOR反復計算 100回) / z-r 断面



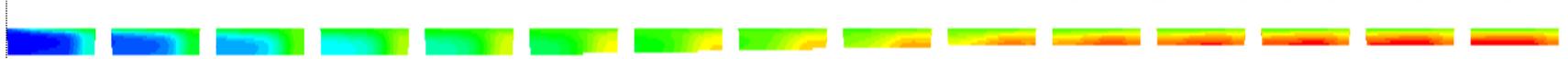
左図: スクリュ軸方向の温度分布 (周方向, 肉厚方向の平均値)

- SSS解析結果 / 温度分布 (°C)



樹脂データ: HDPE\_B3.pro (Materialfit DB)  
 バレル温度境界条件: 熱伝達規定 HTC= 300 W/m<sup>2</sup>/K(溶融前)  
 3,000 W/m<sup>2</sup>/K(溶融後)

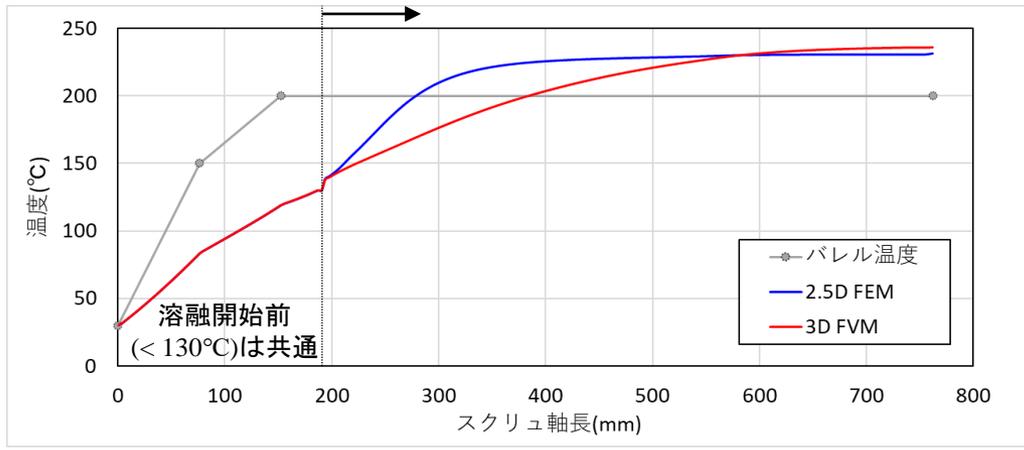
3D FVM (定常計算 1回) / z-r 断面



2.5D FEM (SOR反復計算 100回) / z-r 断面



→  
 溶融開始以降



左図: スクリュ軸方向の温度分布  
 (周方向は溝中央部,  
 肉厚方向は平均値)

### ③ 汎用定常移流拡散方程式の解析機能

- ・ 既往Ver. : SSS, TSS について, 汎用定常移流方程式の解析機能.



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

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

- ・ 新規Ver. : SSS, TSS, SS, FS, FS3D について, 汎用定常移流拡散方程式の解析機能.

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

$C_i$  : ユーザ定義任意関数 ( $i=1\sim n$ )  
 $\Delta$  : ラプラス演算子

#### ○ユーザープログラム機能としてご提供:

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.  
(化学反応モデル計算(反応押出解析), 履歴情報計算 etc.)

## ④ その他の新規/改良機能: トピックス

### 1. 対称モデル解析 / FS3D (FlowTetra)

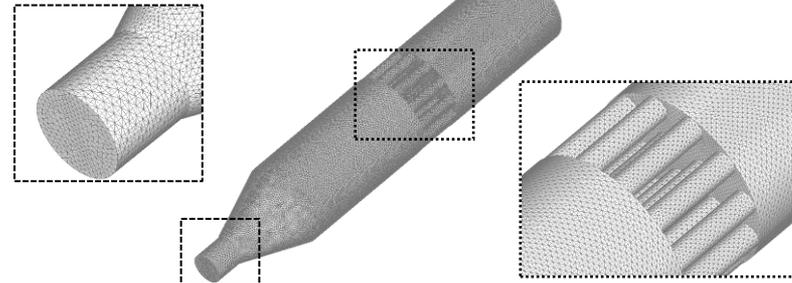
メッシュ要素数の削減を目的に、対称形状の流路について 1/2モデルでの解析が実施可能.

#### ○ 3Dメッシュモデル

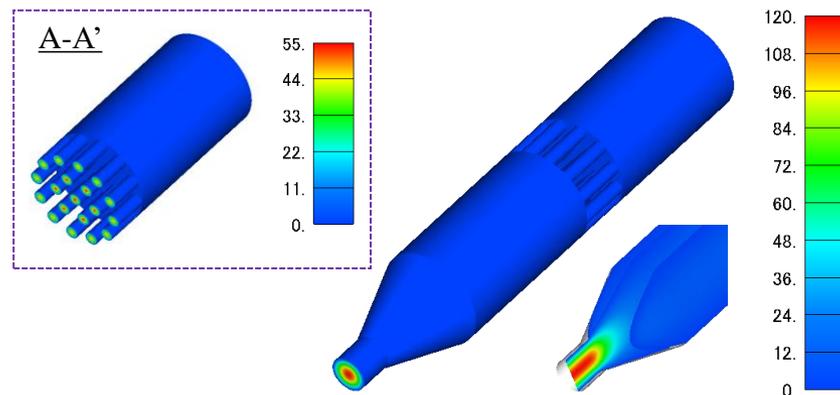
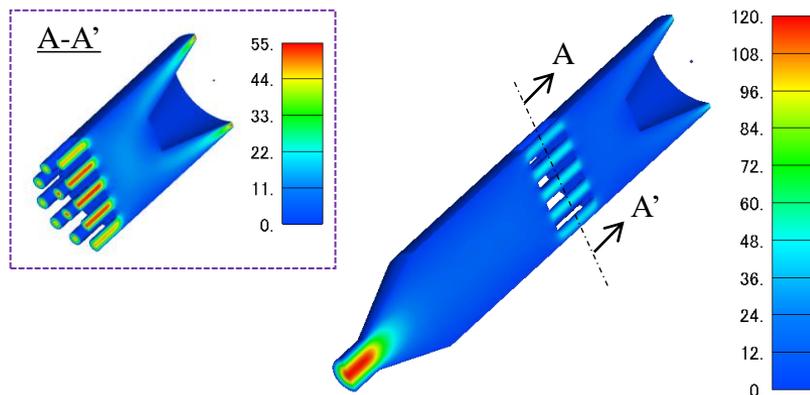
1/2モデル 要素数 715,272



フルモデル 要素数 1,430,544



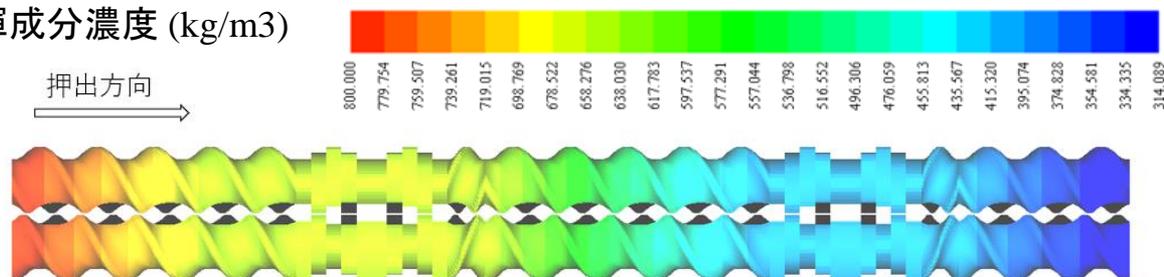
#### ○ 流速分布 (cm/sec)



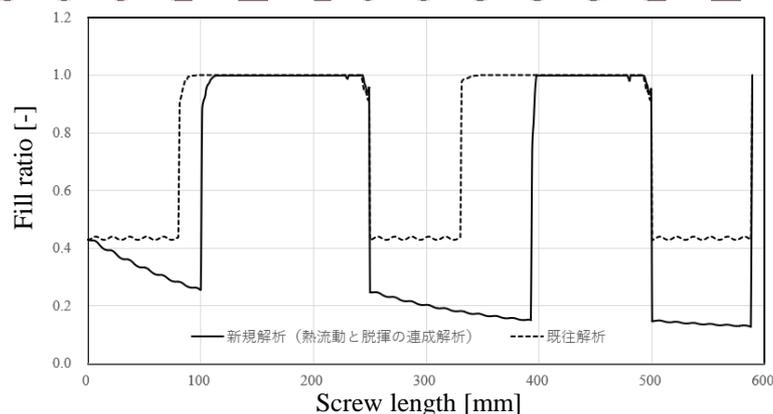
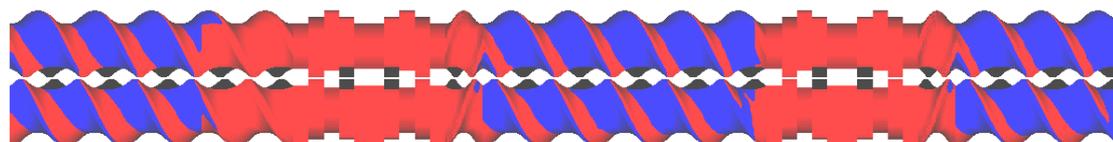
## 2. 新規脱揮解析機能 / SSS, TSS

脱揮成分濃度に依存する粘性, 密度, 平衡濃度, 充填率の変化を考慮した脱揮計算モデルと熱流動場の連成解析機能.

○ 脱揮成分濃度 (kg/m<sup>3</sup>)



○ 充填率分布 (-) 赤色: 樹脂充填領域, 青色: 樹脂未充填領域



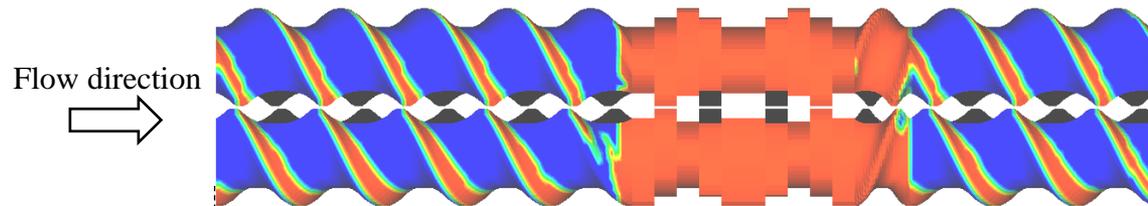
- Surface renewal devolatilization model calculation
- Thermal flow coupling ←

左図: 充填率のスクリュ長依存性  
(既往解析結果との比較)

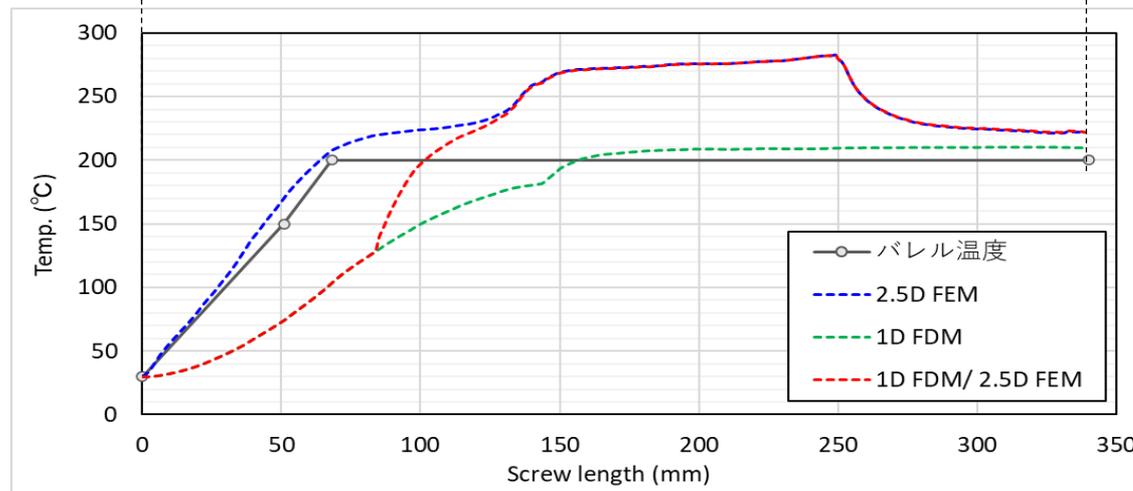
### 3. 1D FDM / 2.5D FEM 温度解析/ TSS

温度分布の実験値再現を目的に、溶融温度前後で温度解析方法を切替える機能。

○ 充填率分布(-) 赤色: 樹脂充填領域, 青色: 樹脂未充填領域



○ スクリュー軸方向の温度分布比較 (赤点線: 1D/2.5D)



#### 温度解法選択

- 2.5D FEM    1D FDM  
 3D FVM

#### オプション項の選択

Consideration of Melting State

- Viscous Heat Cut under Melt Temp. and less than Fill Ratio   
 Viscous heating power ratio under Melt Temp.   
 Heat Transmission Coefficient under Melt Temp. on Barrel Surface (W/m<sup>2</sup>/K)   
 Using 1D FDM under Melt Temp.

## 4. エlement単位の肉厚編集機能(STLファイル) / TSS

寸法入力では定義が難しいElementのSTLファイルを利用して、標準テンプレートから簡便に肉厚編集が実施できる機能。

Barrel radius(mm) Distance between Axis(mm)  
 20 32.85

Screw Configuration

Blk.No.	Type	Rev. or Nor.	Radius Screw	Tips	Disk Angle or
1,	SW,	Nor.,	19.5,	2,	0,
2,	SW,	Nor.,	19.5,	2,	0,
3,	KD,	Nor.,	19.5,	2,	45,
4,	SW,	Rev.,	19.5,	2,	0,
5,	SW,	Nor.,	19.5,	2,	0,

寸法情報を入力して  
SW, KD  
を作成  
(従来通り)

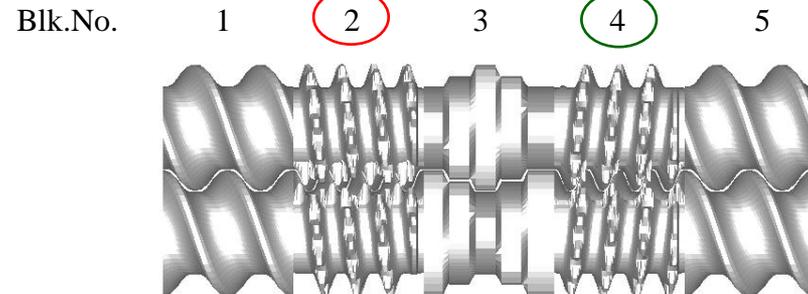
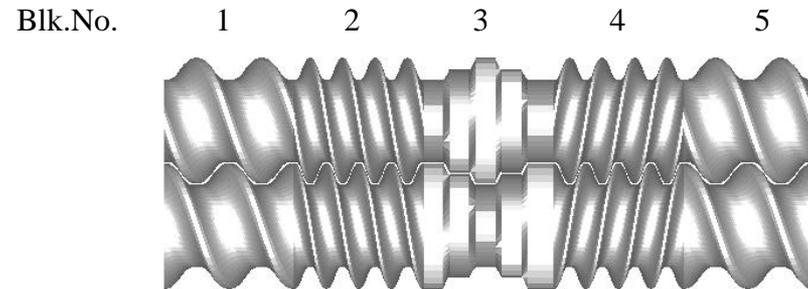
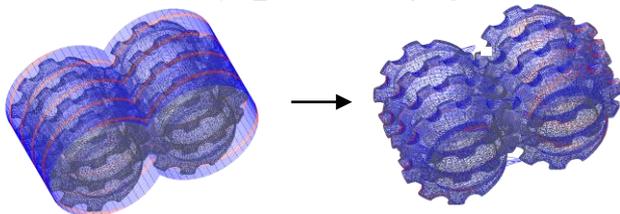
## 新項目

STL element information 事前準備した形状ファイル

stl normal thick / stl reverse thick Select

Replaced Block No. 2 / 4 使用場所 Reset

事前準備: ElementのSTLファイルを読み込み、形状をメッシュに転写。



標準スクリューモデルと同様に保存し(.twinmsh), 解析に利用できます。

# 改良成果資料(I) : まとめ

## ① 定常移流拡散方程式へのFVM(有限体積法)の適用

1. 温度解析機能 / FS3D ⇒ 問題毎に適切な解法採用
2. 滞留時間計算機能 / FS3D, SS, FS ⇒ FEM(拡散支配) & FVM(移流支配)

## ② 肉厚方向を考慮した新規可視化および解析機能

1. 肉厚断面の可視化機能 / SSS, TSS ⇒ 解析結果の詳細分析
2. 滞留時間計算の新機能 / SSS, TSS ⇒ RTD calculator をご提供
3. 3D FVM温度解析機能 / SSS, TSS ⇒ 収束性の改善

## ③ 汎用定常移流拡散方程式の解析機能 ⇒ ユーザ固有の問題

1. ユーザプログラム機能 / SSS, TSS, SS, FS, FS3D を定義して解析可能

## ④ その他の新規/改良機能トピックス

1. 対称モデル解析 / FS3D ⇒ 各ソフト毎の要望に応じて
2. 脱揮解析(高濃度揮発成分) / SSS, TSS ⇒ 機能追加した最新Ver. をご提供
3. 1D FDM/2.5D FEM温度解析 / TSS (今年度中に順次出荷)
4. エlement単位の肉厚変更機能(STLファイル) / TSS