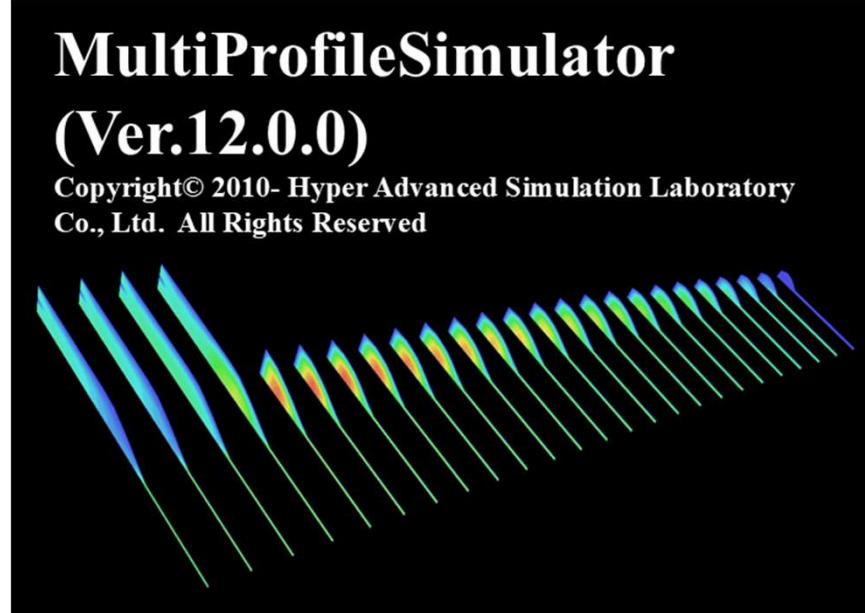
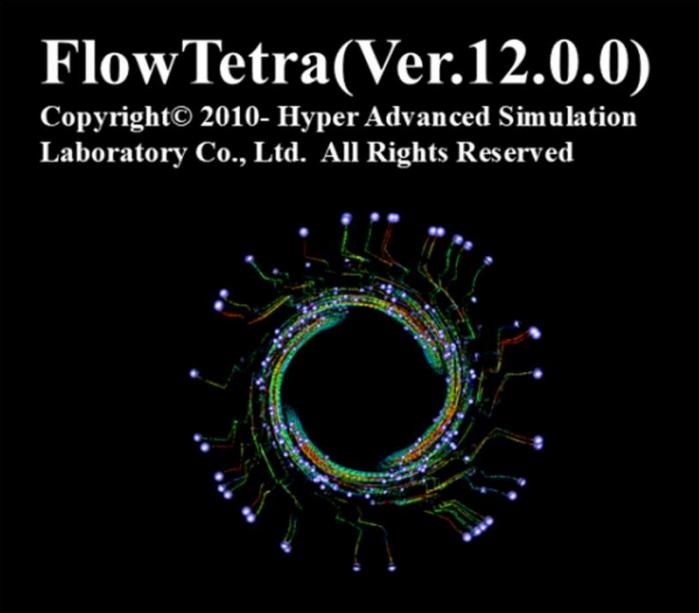


FlowSimulator3D (Ver.12.0.0)

改良成果資料



2025/12/26

株式会社HASL

改良成果一覧/ Flow Simulator 3D (FS3D) Ver.12.0.0

HASL PrePost (HPP) Ver.1.0.0

新規プリポストの起動方法 p. 2

Flow Tetra (FT) Ver.12.0.0

HASL PrePost を用いた流線図描画機能 p. 3

- 流線図のアニメーション動画作成方法 p. 11

- 粒子履歴情報の出力機能 p. 18

Multi Profile Simulator (MPS) Ver.12.0.0

1. 3次元異形押出解析の改良

1.1 HASL PrePost の利用方法 p. 21

1.2 滑り解析の計算時間短縮 p. 32

2. 発泡押出解析の改良

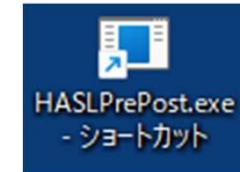
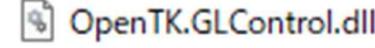
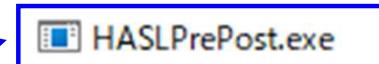
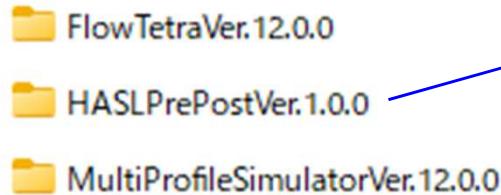
2.1 多層発泡解析の実装 (2D断面) p. 39

2.2 ユーザーニーズ対応 (粘度, 温度, 操作性) p. 55

HASL PrePost Ver.1.0.0 / 新規プリポストの起動方法

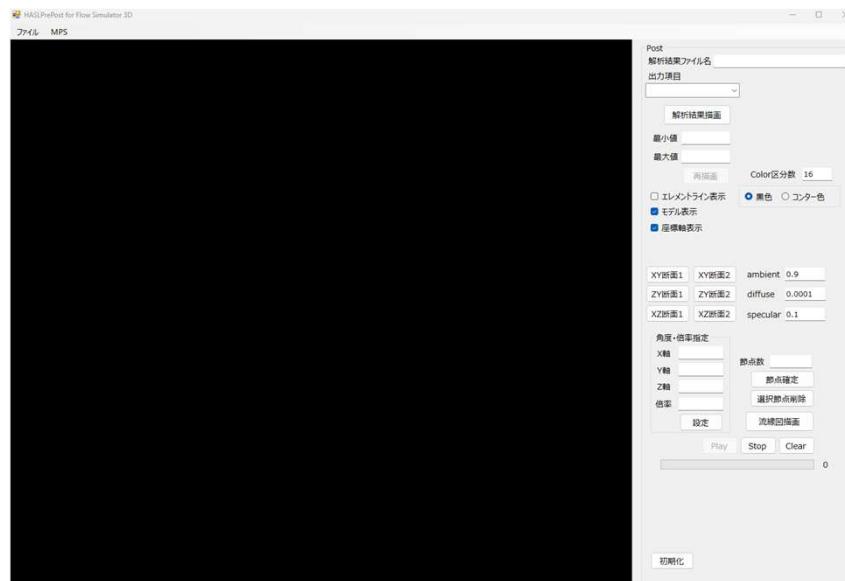
FlowSimulator3DVer.12.0.0 ¥ HASLPrePostVer.1.0.0 フォルダ内に存在する、
HASLPrePost.exe をダブルクリックすると起動します。

FlowSimulator3DVer.12.0.0出荷



デスクトップにショートカットを作成してご利用ください。

HASLPrePost.exe 起動初期画面

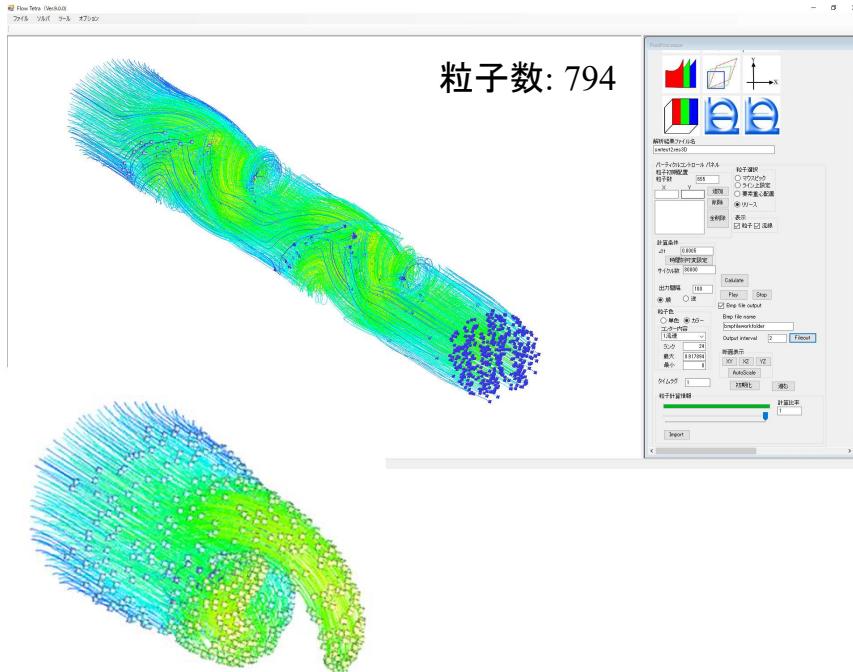


- ・HASLPrePost は、HASLソフトウェアのグラフィック環境として採用しているDirectX 9.0 とは異なる、64ビット対応のOpenGL系環境を採用したプリポストソフトウェアです。
- ・描画に利用できるメモリ容量を拡張したことでの、これまで以上に大規模な要素モデルの作成や可視化が可能になります。
- ・今回リリースするVer.1.0.0では、FlowSimulator3Dの機能の一部を実装していますが、今後は利用可能な機能を順次追加していく予定です。

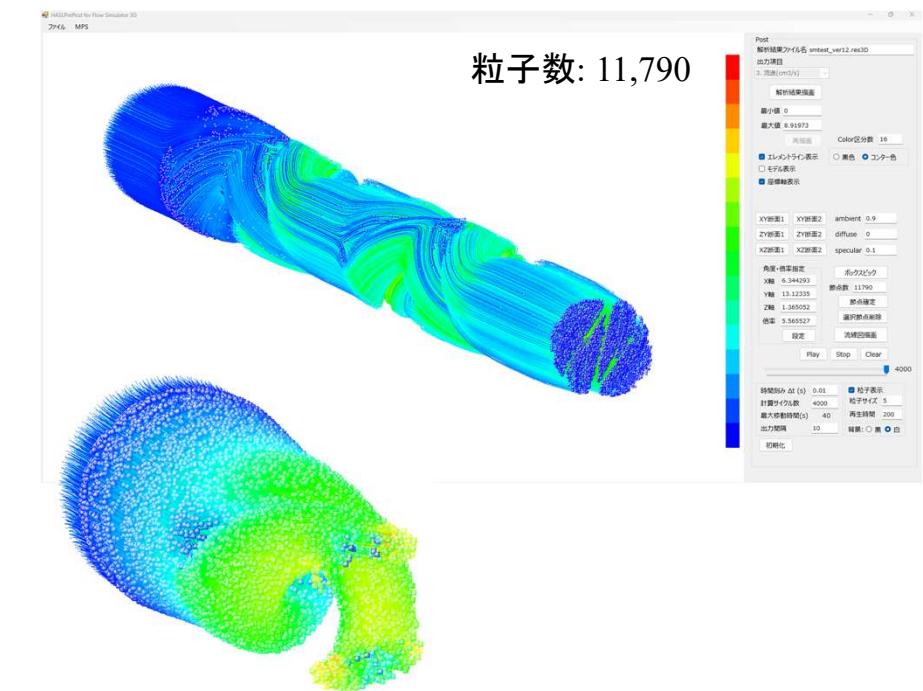
HASL PrePost を用いた流線図描画機能および粒子履歴情報の出力機能

- ・新規プリポスト: [HASL PrePost](#) を用いることで、従来と同じFlow Tetraの解析結果を用いて、従来よりも多くの粒子を配置した流線図の作成が可能になりました。
- ・次ページ以降に操作手順を説明します。

Flow Tetra の流線図描画例
(Ver9 改良成果資料 p.2~)

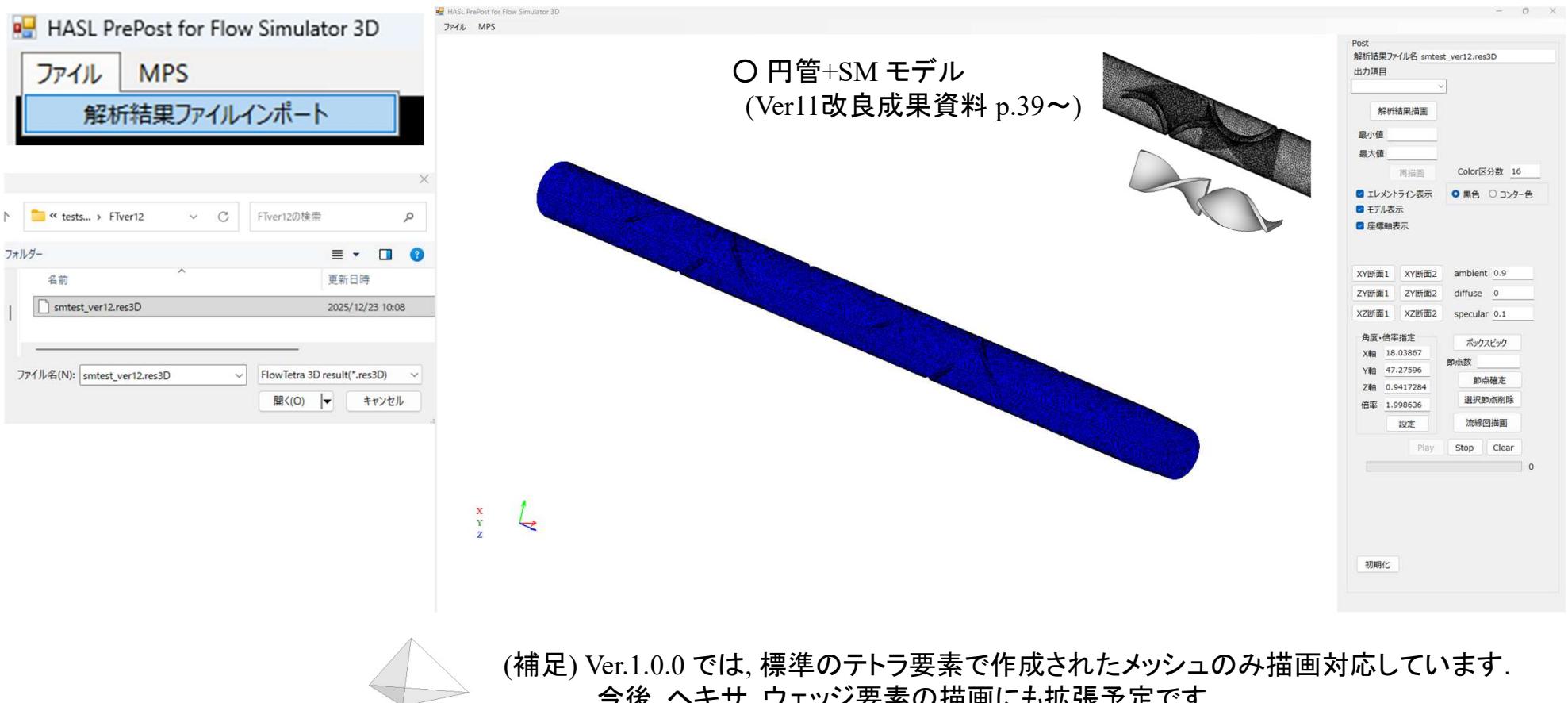


HASL PrePost の流線図描画例
(新機能)



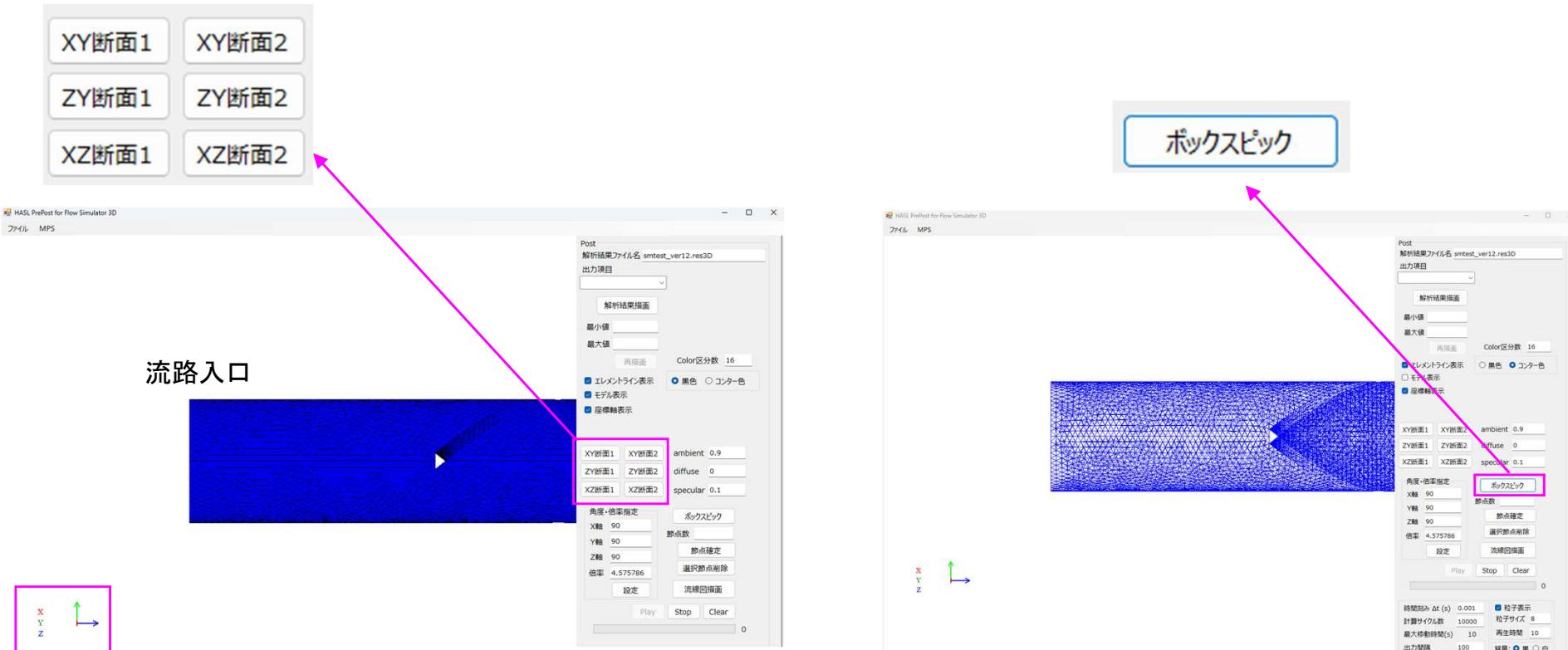
操作手順

- (1) HASL PrePostを起動し、メニューバーからファイル／解析結果ファイルインポートをクリックし、Flow Tetraの解析結果ファイル(.res3D)を読み込みます。
(解析は従来通りに Flow Tetra で解析します。)



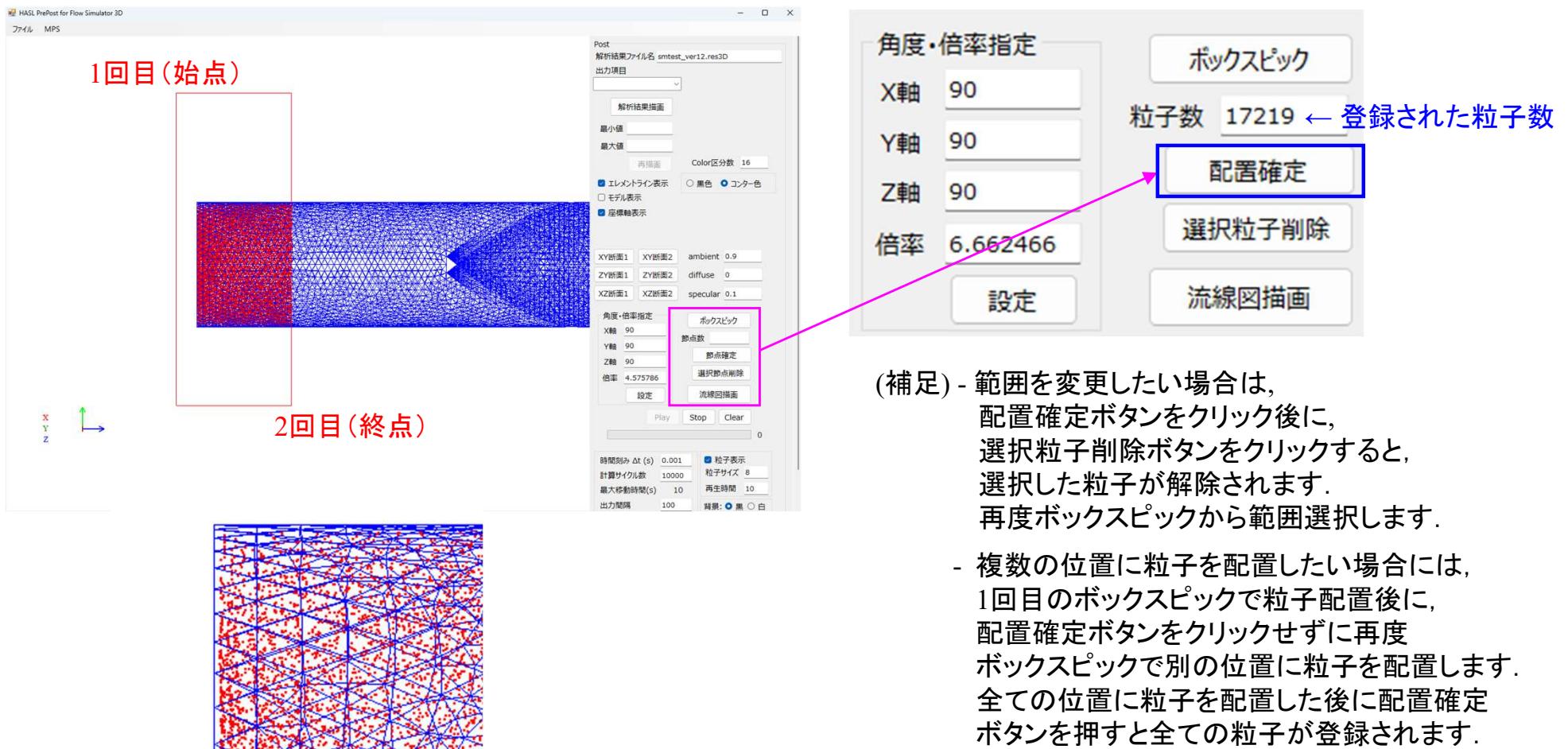
操作手順

- (2) 断面整列ボタンなどを利用して粒子投入位置を選択しやすい位置にモデルを移動させた後、
ボックスピックをクリックすると、モデルがエレメントライン(要素線)で表示されます。



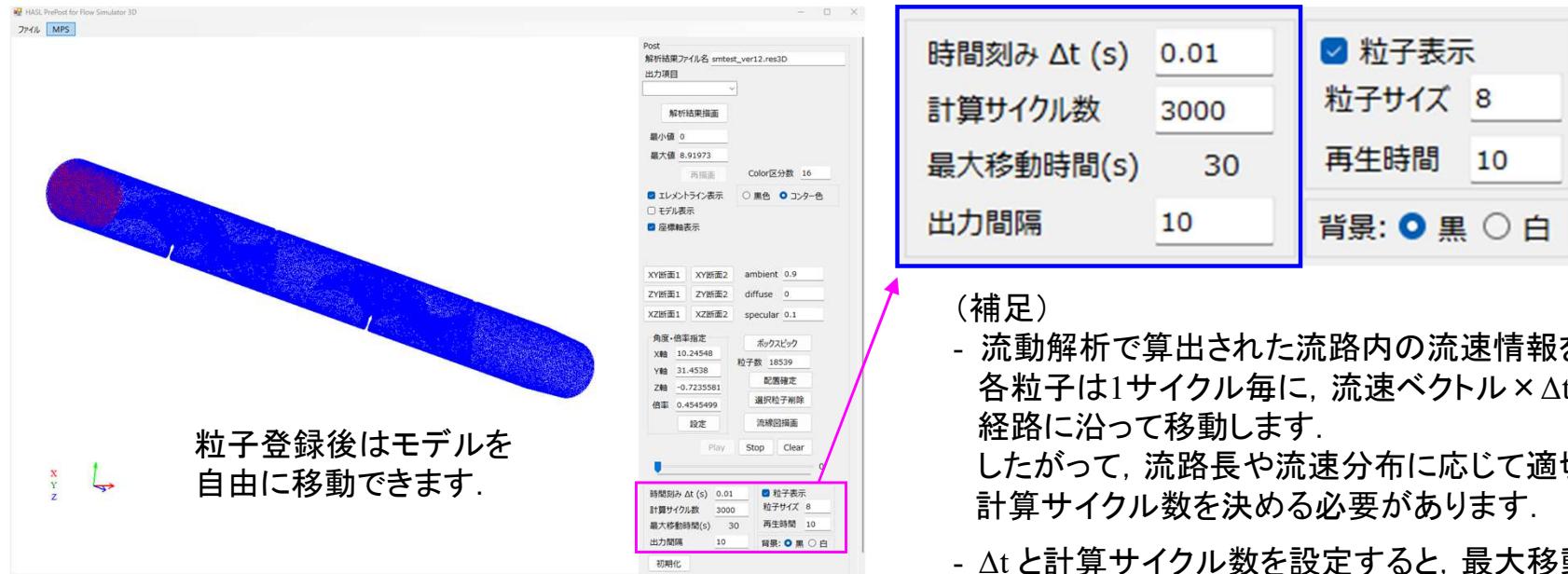
操作手順

- (3) ボックスピックをクリック後に始点と終点の2回で粒子を配置する範囲を指定します。
範囲内の要素の重心に粒子(赤色)が配置されます。
意図通りに配置した後、配置確定ボタンをクリックすると、配置した粒子が登録されます。



操作手順

(4) 粒子登録後、粒子の移動条件を時間刻み Δt と計算サイクル数で設定します。



(補足)

- 流動解析で算出された流路内の流速情報を利用して、各粒子は1サイクル毎に、流速ベクトル $\times \Delta t$ で決まる経路に沿って移動します。
したがって、流路長や流速分布に応じて適切な Δt と計算サイクル数を決める必要があります。
- Δt と計算サイクル数を設定すると、最大移動時間(s)が両者の積として自動表示されます。最初は最大移動時間が解析結果の滞留時間と同程度になることを目安に設定し、描画結果を見ながら適切な条件を探索することを推奨します。
- 粒子数や計算サイクル数が多く描画に時間がかかる場合には出力間隔を調整します。出力間隔が10の場合、経路計算は1サイクル毎に実施されますが、描画を10サイクル毎に実施するため、描画に費やす時間を削減することができます。

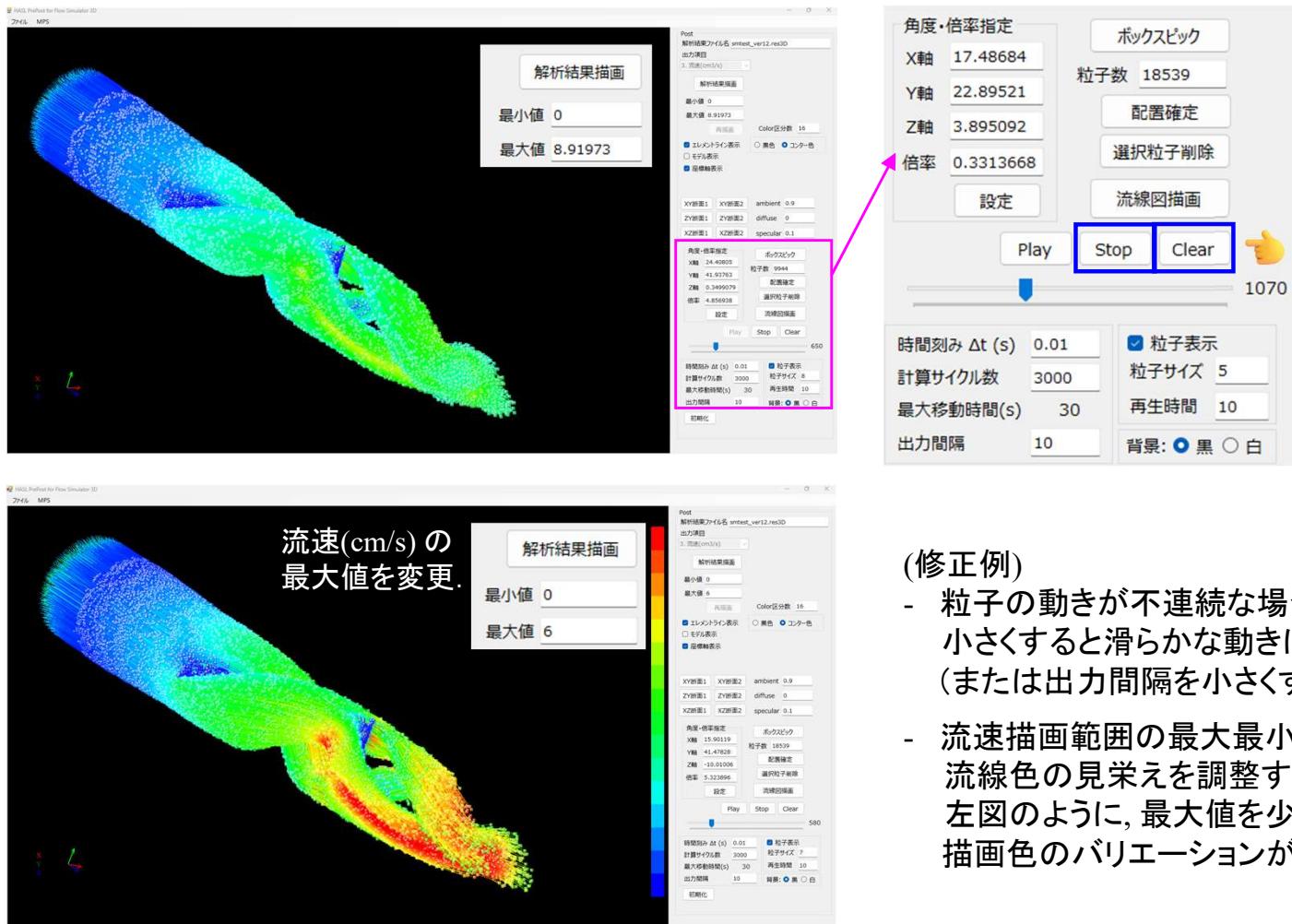
操作手順

(5) 移動条件を設定後に流線図描画ボタンをクリックすると、各粒子の経路計算および流線描画が実施されます。HASL PrePost は描画の安定性に優れるため、描画中にモデルの位置や粒子サイズを自由に変更して、意図する描画結果になっているかを確認することができます。



(補足)

- 流線経路計算および描画中に、修正したい条件が見つかった場合には、Stop をクリックして計算を中断し、Clear をクリックすると描画結果が削除されます。その後に条件を変更してから流線図描画ボタンを再度クリックすると、変更した条件で新たに計算が開始されます。

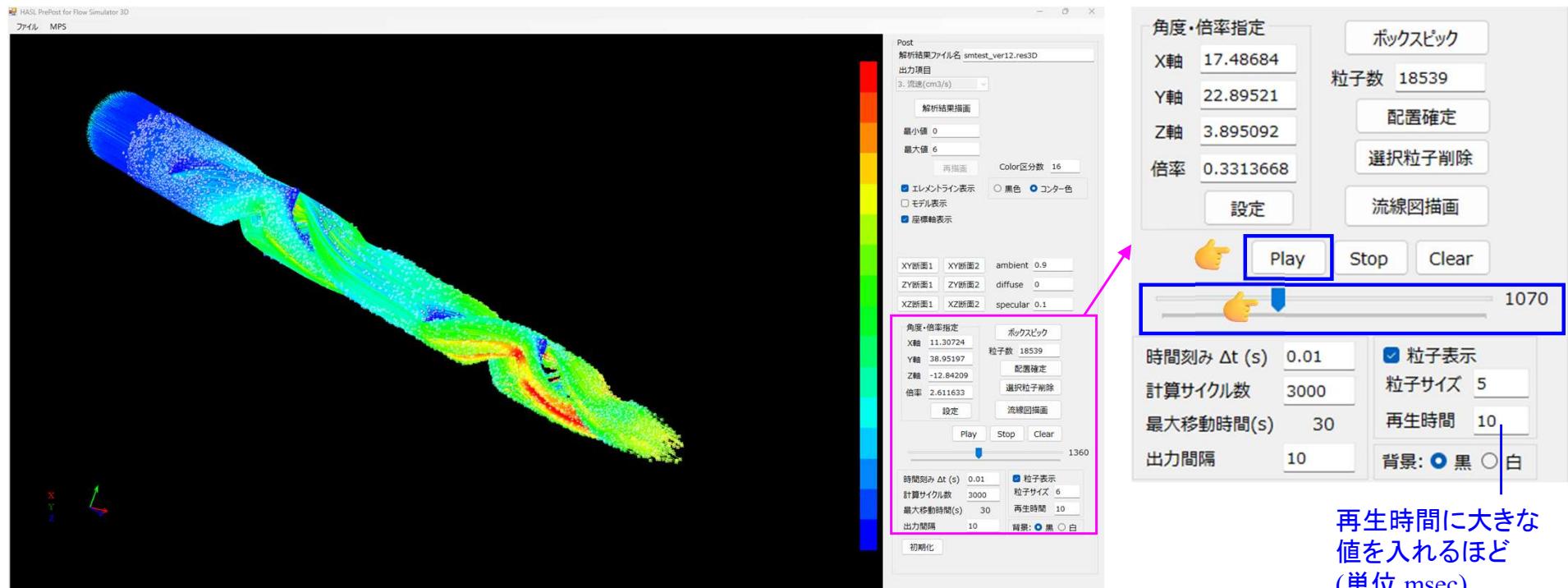


(修正例)

- 粒子の動きが不連続な場合には、時間刻みを小さくすると滑らかな動きになります。
(または出力間隔を小さくする)
- 流速描画範囲の最大最小値を手動で変更すると、流線色の見栄えを調整することができます。
左図のように、最大値を少し小さくすると、描画色のバリエーションが広くなります。

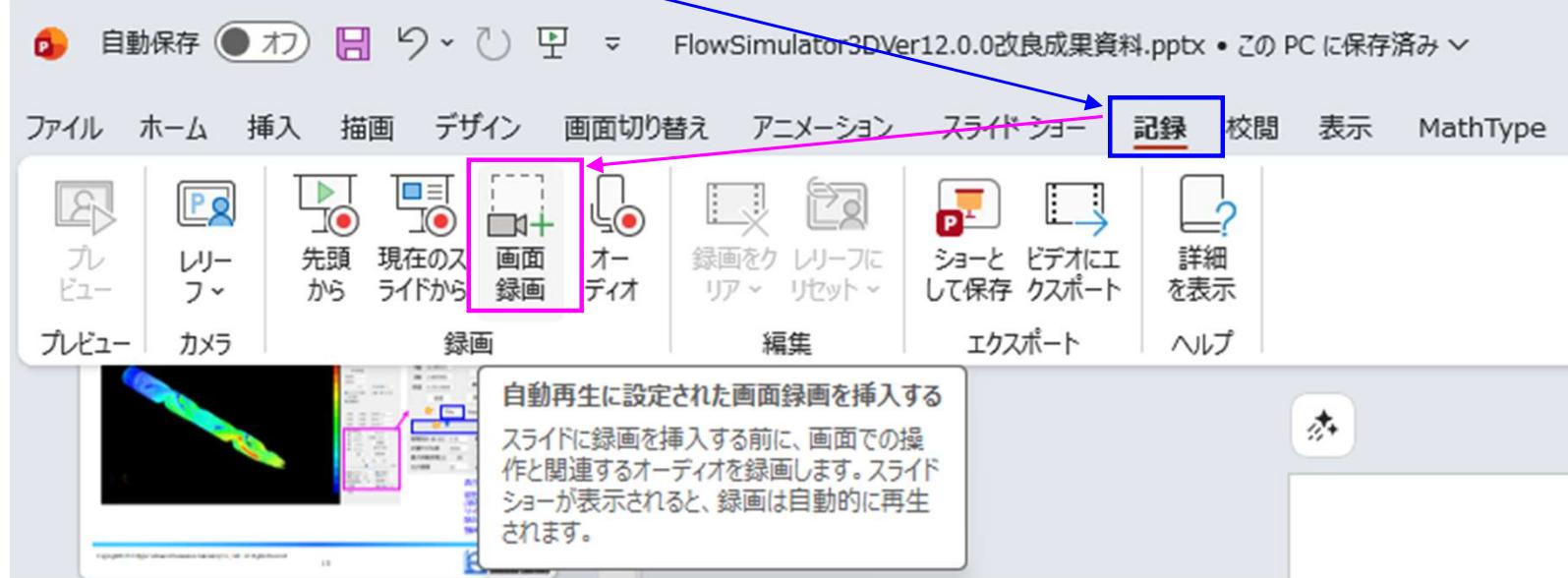
操作手順

- (6) 各粒子の経路計算および流線図描画が最後まで終了すると、その情報を利用して、描画再生(Playボタン)および、手動で見たいサイクル位置に移動(トラックバーの移動)することができます。この後にアニメーション動画を作成することを考えて、モデルの向きや配置、再生時間、粒子サイズを最適化します。



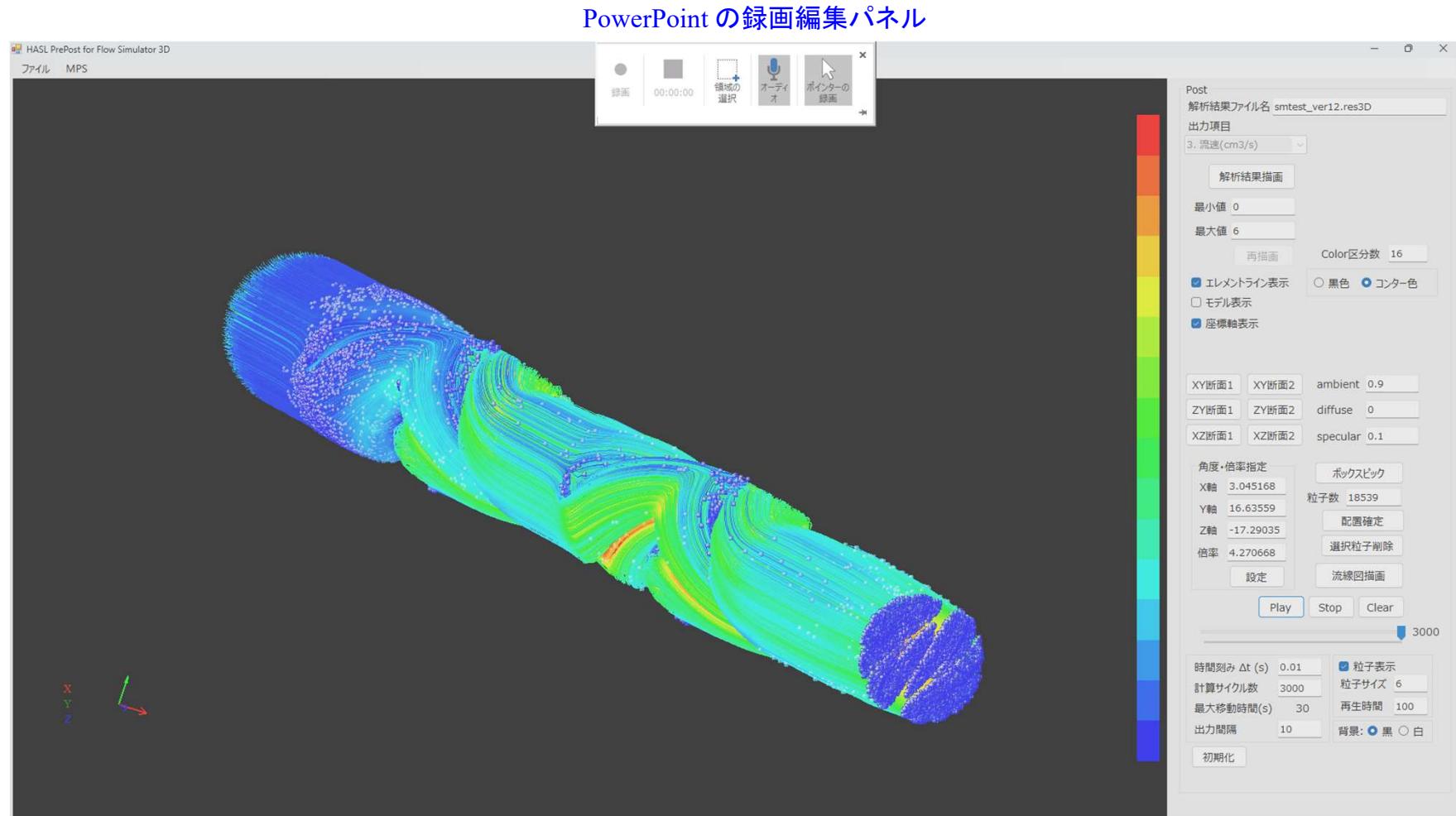
流線図のアニメーション動画作成方法

HASL PrePost には動画作成機能が実装されていないため、流線図のアニメーション動画は別の動画作成ソフトウェアを利用する必要があります。ここでは例として、Microsoft PowerPoint の画面録画機能を利用した作成例をご紹介します。

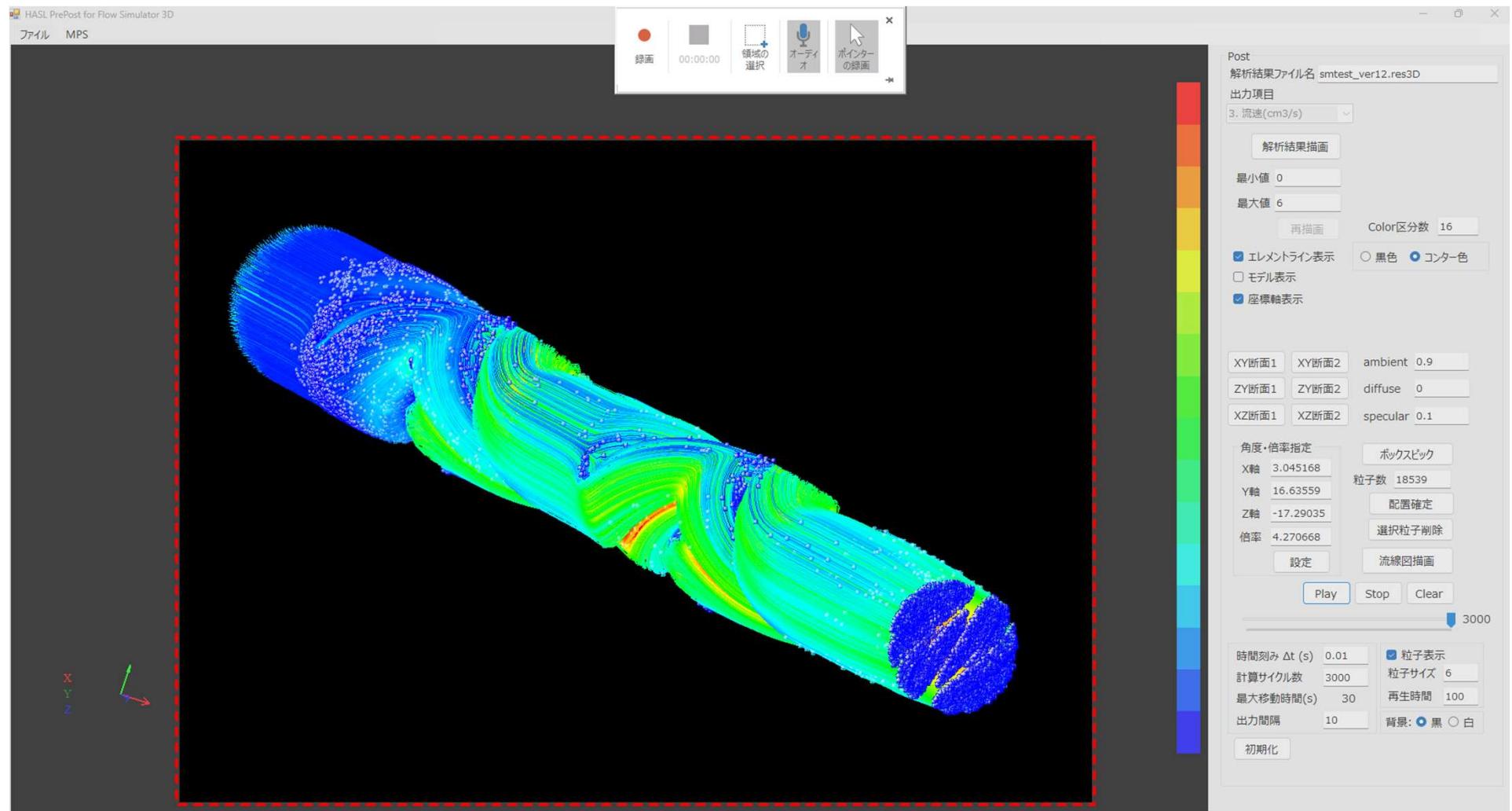


* 使用したPowerPointのバージョン: Microsoft® PowerPoint® for Microsoft 365 MSO 64 ビット

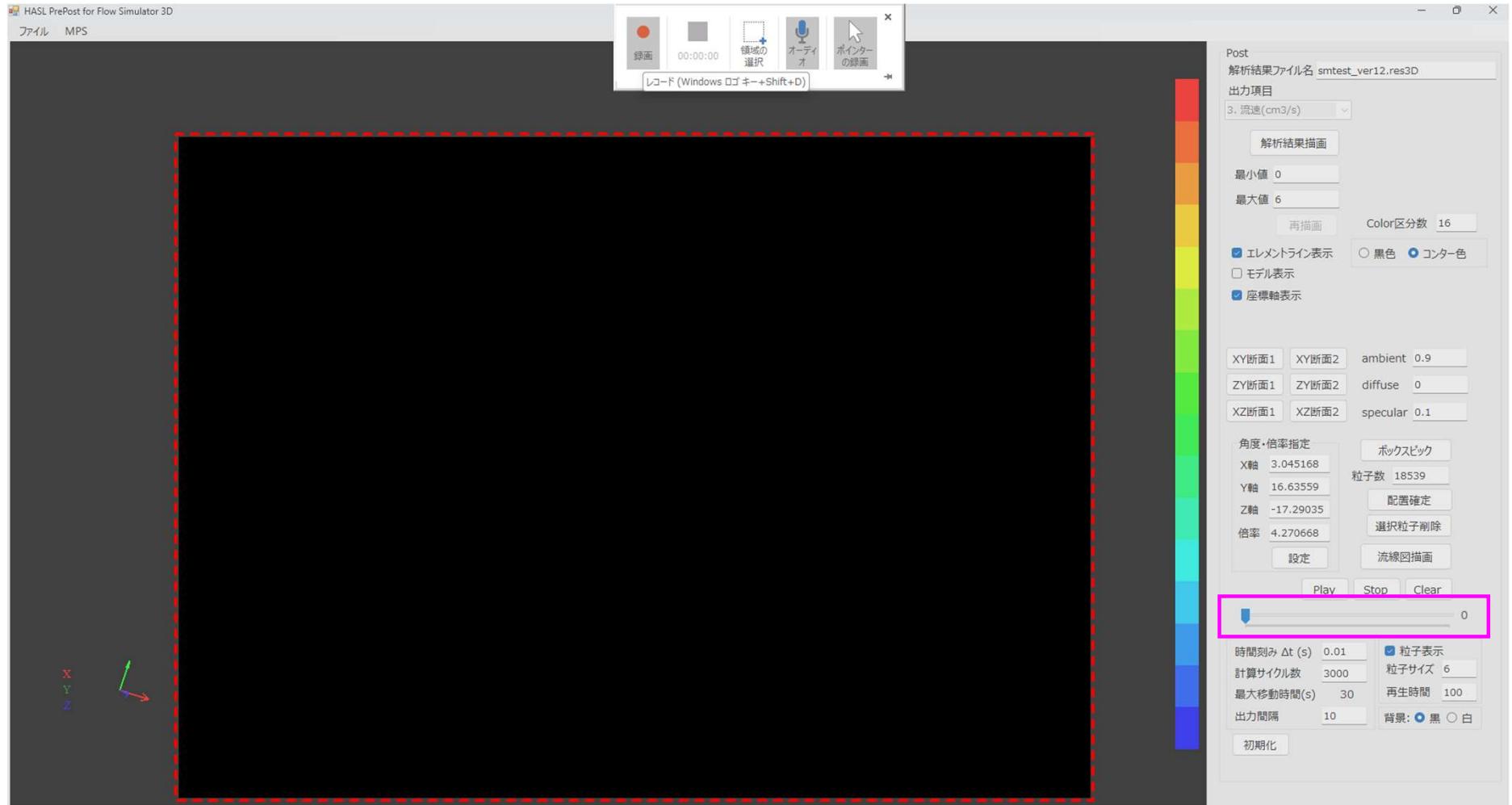
PCのディスプレイに、HASL Prepost で再生したいモデルの流線図を最大画面で表示後、Microsoft PowerPoint で任意の .pptx ファイルを開いて、メニューバーから記録／画面録画をクリックすると、以下のように HASL Prepost と PowerPoint の録画編集パネルが表示されます。



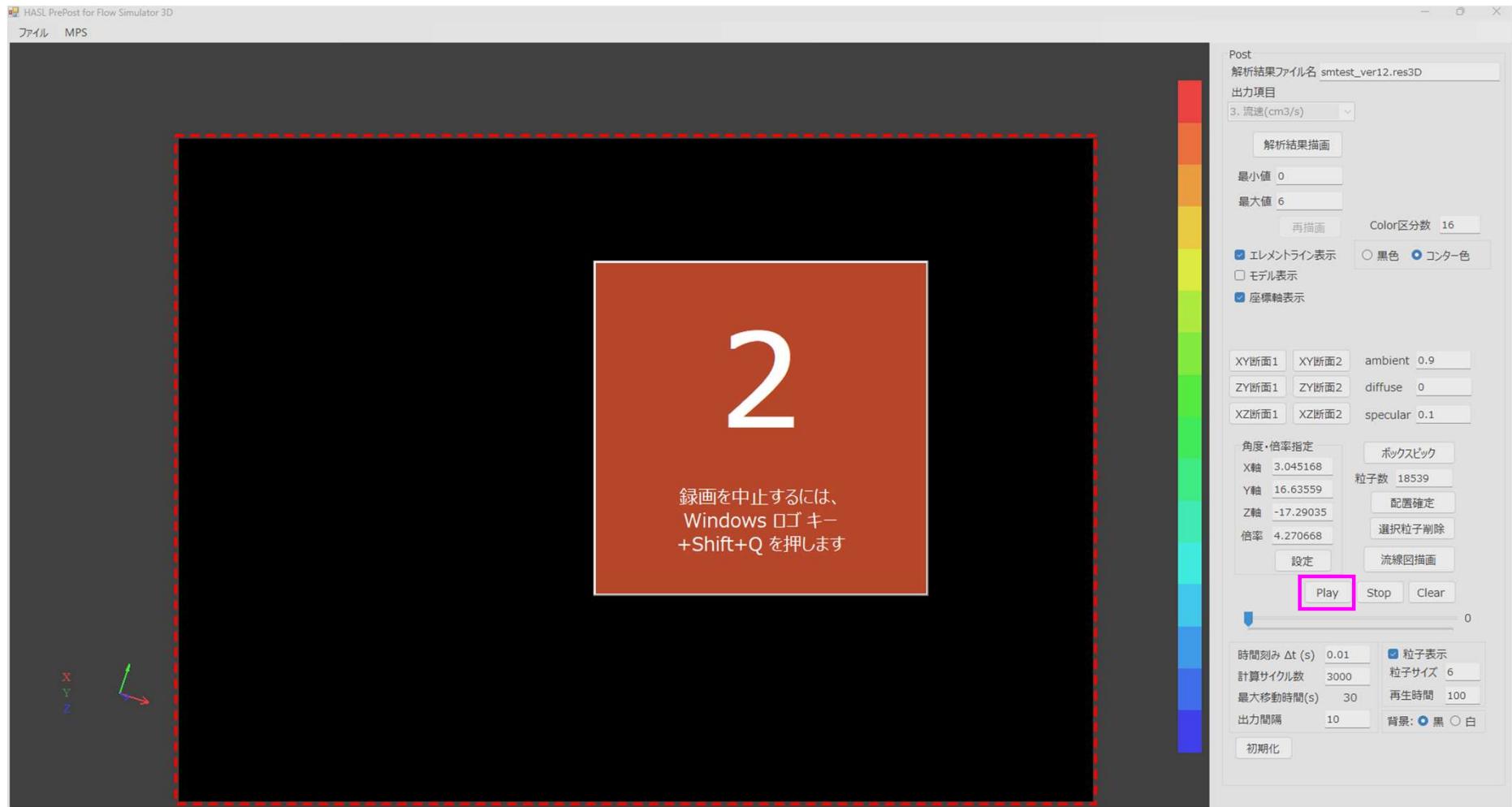
録画編集パネル内の領域の選択をクリックして、ボックスピックの要領で録画範囲を決定します。



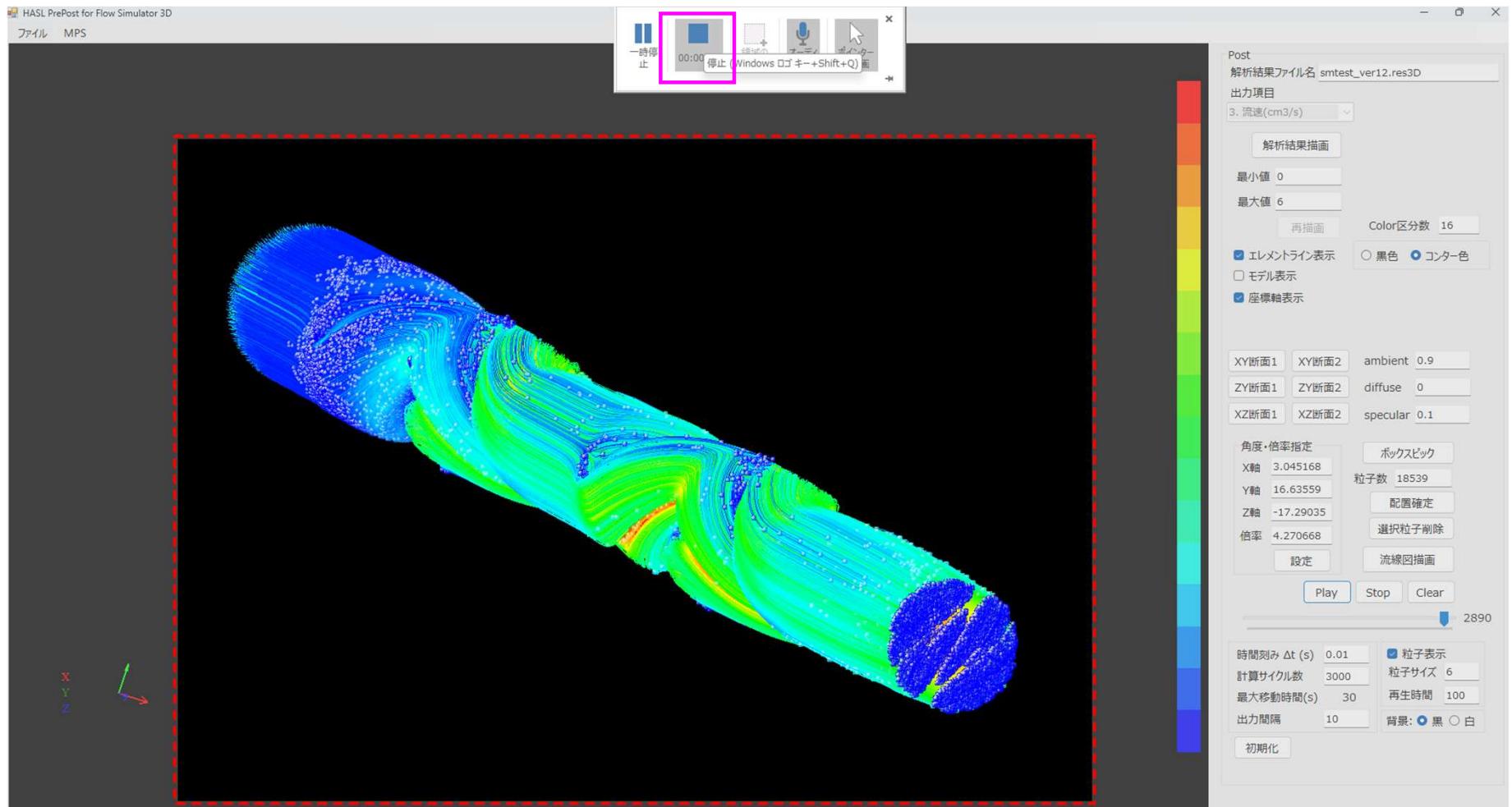
録画範囲を決定後、再生に備えてトラックバーを一番左へ動かして初期位置に移動します。



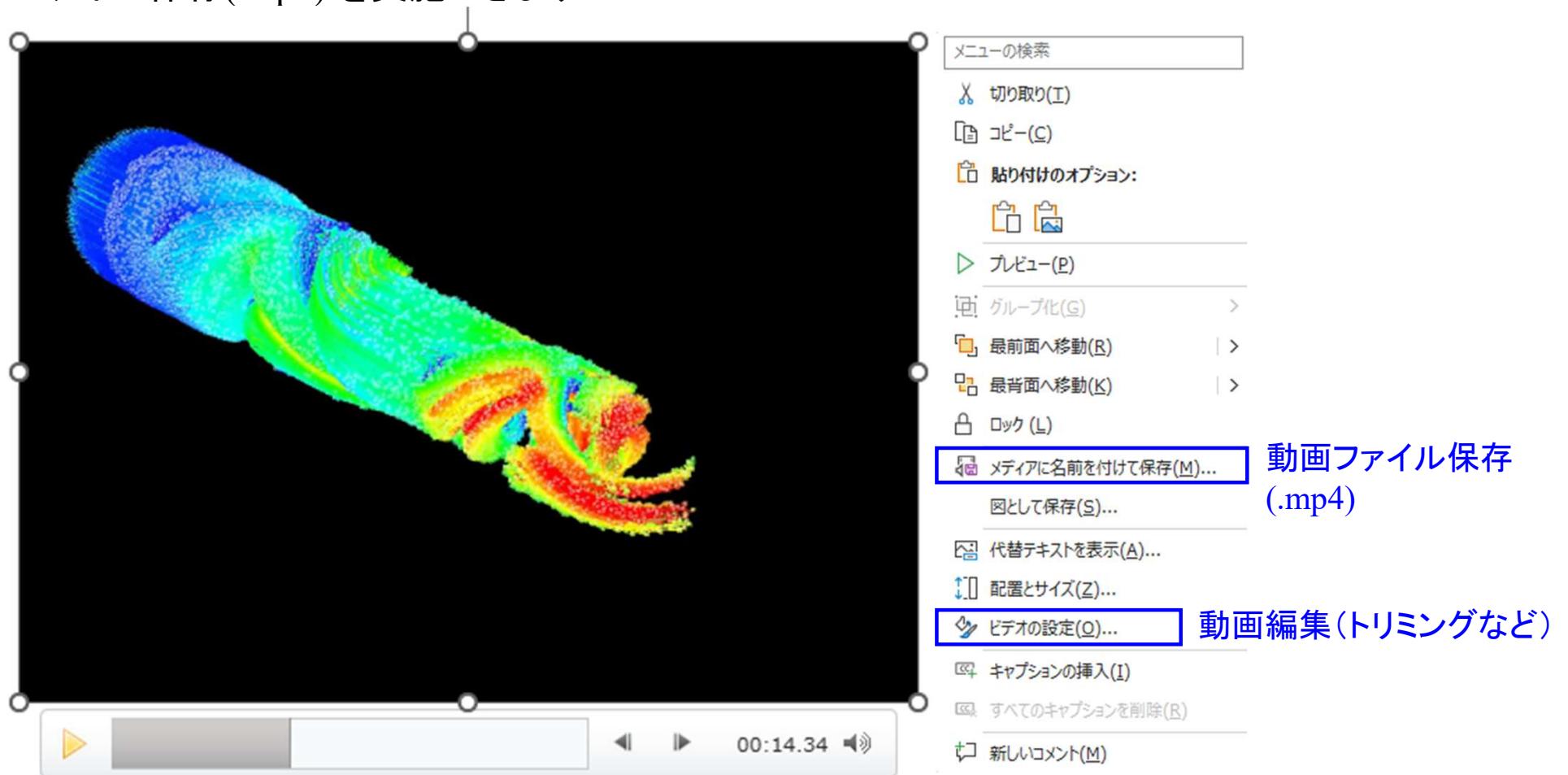
録画ボタンをクリックすると、PowerPointの指示が始まり3秒後に録画が開始されるので、録画が解析されるタイミングで、HASL Prepost の Play ボタンをクリックして流線図を再生します。



録画編集パネル内の停止ボタンをクリックすると録画が終了します。



録画終了後に、PowerPoint内に画面録画ビデオが自動作成されます。
画面録画ビデオ上でマウスの右ボタンをクリックすると、動画編集や
ファイル保存(.mp4)を実施できます。



粒子履歴情報の出力機能

HASL PrePost で流線図の描画作成を実施すると, Flow Tetraで作成した流線図と同様に, サイクル毎の経路計算結果に基づいて, 各粒子の滞留時間や各種履歴量が .csvファイルに自動出力されます.



流線図描画後に自動作成される
partres.csvファイル

partres.csvファイルの出力例

	粒子番号	初期配置位置			移動終了後の位置			滞留時間		ひずみ	応力履歴	流速履歴	移動経路長
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	ip	x0(mm)	y0(mm)	z0(mm)	xstop(mm)	ystop(mm)	zstop(mm)	restime(sec)	strain()	stresshis(kPa·sec)	velohis(mm)	arclen(mm)	
2	2	4.499418	-10.81492	13.37365	3.371501831	8.536827515	750.3897024	19.37035	78.59831421	473.452797	772.753418	772.0701454	
3	3	3.227658	-10.89678	14.03563	1.002616454	-0.579781613	750.1286274	20.12037	85.74810663	491.2417282	769.517122	768.8248057	
4	4	3.675726	-13.50003	13.79313	-0.499840783	8.323051512	750.4741021	21.05039	91.00588211	538.9657756	771.19981	770.5722355	
5	5	7.19389	-11.7124	13.29289	3.745514791	9.081837793	750.0816853	19.01034	73.42680466	458.5950463	772.8487622	772.2224393	

(補足) Flow Tetra の流線図作成により得られる履歴情報ファイル(.ResPartTime) の出力内容については
Ver9 改良成果資料の p.19~をご参照ください。

滞留時間および履歴情報の定義

・滞留時間 (sec):

$$N_{ip, \text{maxcyc}} \times \Delta t$$

・総ひずみ量 (無次元量):

$$\sum_{j=0}^{N_{ip, \text{maxcyc}}} \dot{\gamma}_{ip,j} \times \Delta t$$

・応力履歴値 (kPa·sec):

$$\sum_{j=0}^{N_{ip, \text{maxcyc}}} \eta_{ip,j} \dot{\gamma}_{ip,j} \times \Delta t$$

・流速履歴値 (mm):

$$\sum_{j=0}^{N_{ip, \text{maxcyc}}} \sqrt{\left(u_{ip,j}\right)^2 + \left(v_{ip,j}\right)^2 + \left(w_{ip,j}\right)^2} \times \Delta t$$

$N_{ip, \text{maxcyc}}$: 粒子 ip が、初期配置位置(0サイクル)から流出口に到達するまでの計算サイクル数

Δt : 計算時間刻み(ユーザが設定した共通値)

$\dot{\gamma}_{ip,j}$: 粒子 ip の、 j サイクル時の到達位置に該当するメッシュ要素内のひずみ速度

$\eta_{ip,j}$: 粒子 ip の、 j サイクル時の到達位置に該当するメッシュ要素内の溶融粘度

$u_{ip,j}$: 粒子 ip の、 j サイクル時の到達位置に該当するメッシュ要素内の x 方向流速成分

$v_{ip,j}$: 粒子 ip の、 j サイクル時の到達位置に該当するメッシュ要素内の y 方向流速成分

$w_{ip,j}$: 粒子 ip の、 j サイクル時の到達位置に該当するメッシュ要素内の z 方向流速成分

(補足) Flow Tetra には、FVM(有限体積法)を用いた各種履歴情報の解析機能が実装されています。

(Ver11 改良成果資料 p.37~)

当機能では定常移流方程式に基づく流路全域の滞留時間、ひずみ、応力履歴を高精度、短時間で算出することができます(履歴情報の推奨解法)。

(参考) partres.csvファイルの出力内容について

partres.csv の A～L列には、計算した最大サイクル数までに流路出口に到達した粒子、または、流速0の壁面に接触して移動を停止した粒子の履歴情報が出力されます。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	ip	x0(mm)	y0(mm)	z0(mm)	xstop(mm)	ystop(mm)	zstop(mm)	restime(sec)	strain()	stresshis	velohis(mm)	arcrlen(mm)
2	2	4.499418	-10.8149	13.37365	3.371502	8.536828	750.3897	19.37035	78.59831	473.4528	772.7534	772.0701
3	3	3.227658	-10.8968	14.03563	1.002616	-0.57978	750.1286	20.12037	85.74811	491.2417	769.5171	768.8248
4	4	3.675726	-13.5	13.79313	-0.49984	8.323052	750.4741	21.05039	91.00588	538.9658	771.1998	770.5722
5	5	7.19389	-11.7124	13.29289	3.745515	9.081838	750.0817	19.01034	73.4268	458.595	772.8488	772.2224
6	7	-12.4395	16.29046	1.380489	-0.46856	4.323568	750.4962	21.99041	95.00344	562.3931	784.2464	783.6562
7	8	-14.4137	14.02986	2.503808	-4.61771	-11.0672	750.0645	20.57038	82.81831	516.3736	786.0076	785.4175

流路出口 z=750 mm に 30 sec 以内に到達した粒子

一方、N～Y列には、最大計算サイクル数になっても移動を続けている粒子の履歴情報が出力されます(計算サイクル数を増やす、または分析時に省略することを推奨)。

	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	ip	x0(mm)	y0(mm)	z0(mm)	xfin(mm)	yfin(mm)	zfin(mm)	restime(sec)	strain()	stresshis	velohis(mm)	arcrlen(mm)
2	1	-2.03394	-6.37488	14.37831	-16.5298	-2.25701	400	30.00059	201.8416	783.6372	402.4575	401.8597
3	6	-15.2222	16.51951	5.307361	2.684784	-3.73401	200	30.00059	181.4675	975.0041	205.5635	205.266
4	18	9.370272	4.390513	12.40601	5.323011	-13.9185	204.5271	30.00059	361.3786	1301.643	199.5521	198.9719
5	19	10.35738	3.995068	9.053276	7.766782	-8.49587	214.2878	30.00059	432.949	1403.094	214.4172	213.8667

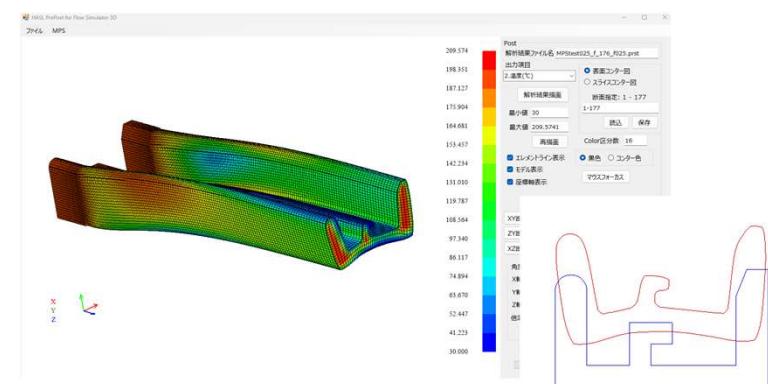
1. 3次元異形押出解析の改良

1.1 新規プリポストの実装

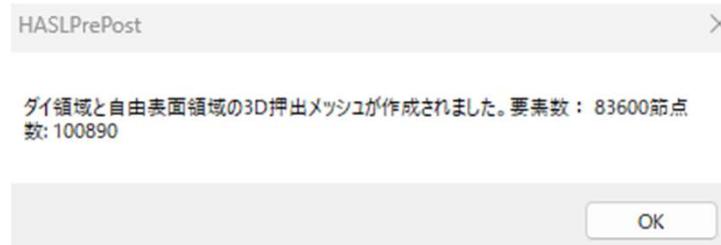
- ・3次元の異形押出解析において、3Dメッシュの作成および解析結果の描画を新規プリポスト: [HASL PrePost](#) を用いて実施できるようになりました。
- ・次ページ以降に操作手順を説明します。

3次元異形押出の解析手順

- (1) 流出口断面の2Dメッシュモデル(X, Y) の作成 : MPS or FEMAP(専用プリポスト)
- (2) Z方向押出による3Dメッシュモデルの作成 : MPS or [HASL PrePost](#) (p.22~)
- (3) 解析条件設定～解析実行 : MPS
- (4) 解析結果の確認 : MPS or [HASL PrePost](#) (p.26~)



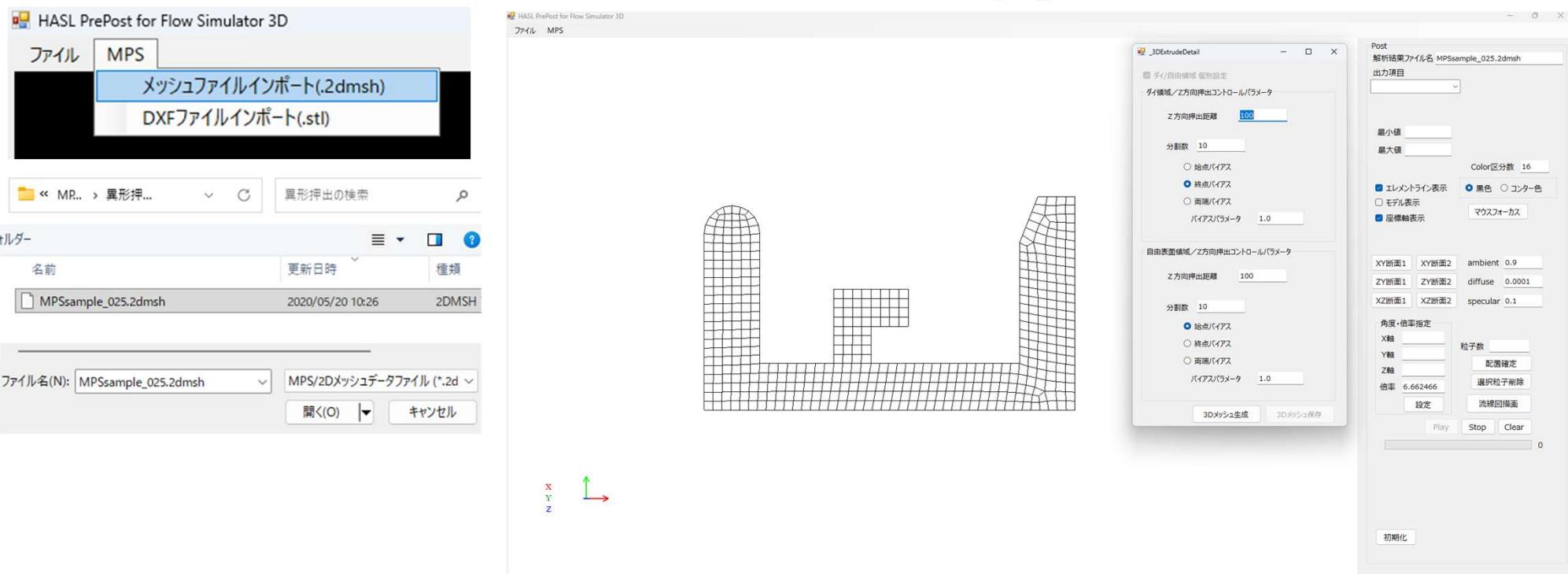
HASL PrePostは、従来よりも要素数の大きな3Dメッシュモデルの作成 および描画に有効です。



操作手順: Z方向押出による3Dメッシュモデルの作成

- (1) HASL PrePostを起動し、メニューバーからMPS／メッシュファイルインポート(.2dmsh)をクリックし、
Multi Profile Simulator の2Dメッシュファイルを読み込みます。
(流路断面の2Dメッシュは従来通りの方法で作成します。)

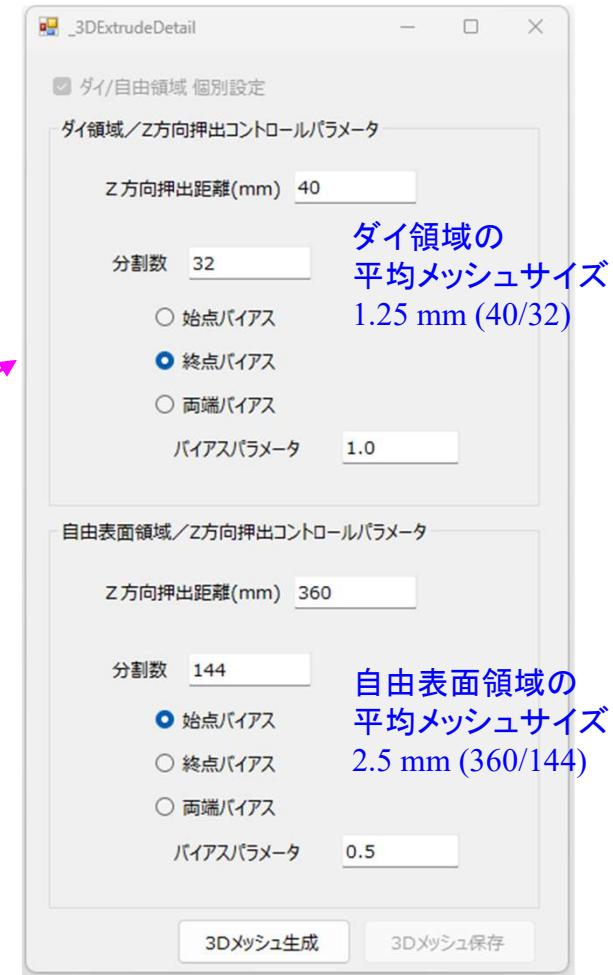
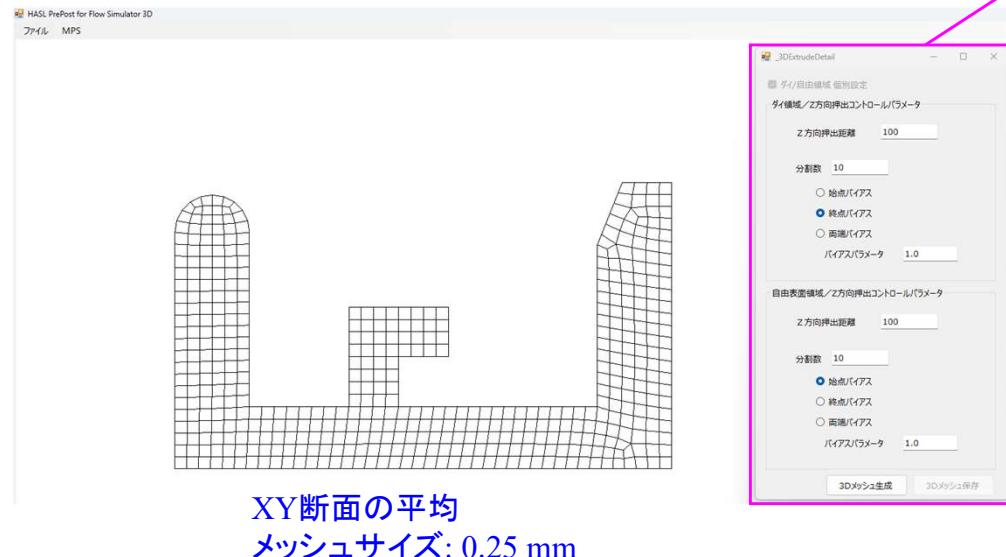
サンプルフォルダ: ¥testsample_FFS3Dver12¥MPSver12¥異形押出



操作手順:

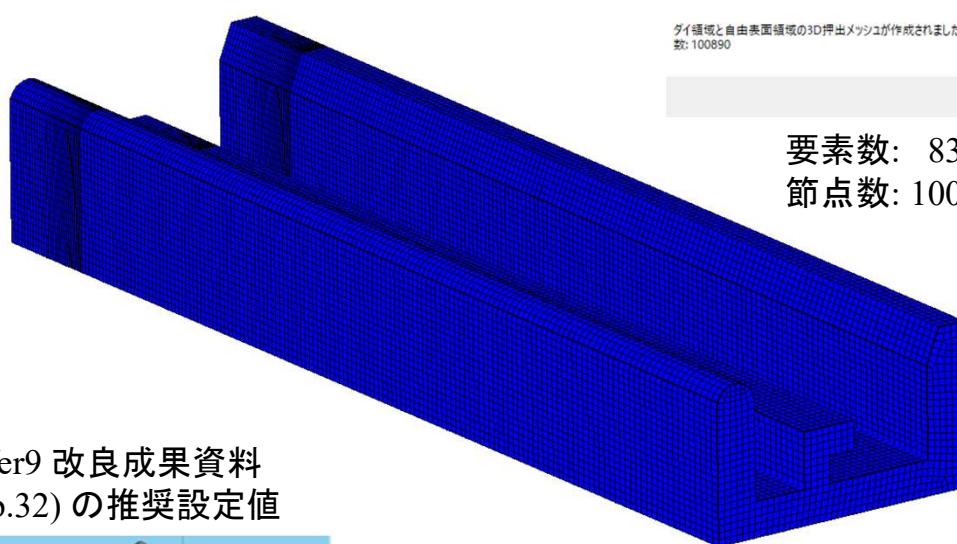
- (2) 2Dメッシュファイルを読み込むと、ダイと自由表面の個別設定3Dモデル作成フォームが表示されます。(Multi Profile Simulatorと同じ機能です)
フォーム内の押出(Z)方向の分割数に関する設定を入力します。

当フォームの詳細は、
Ver9 改良成果資料の
p.32～をご参照ください。

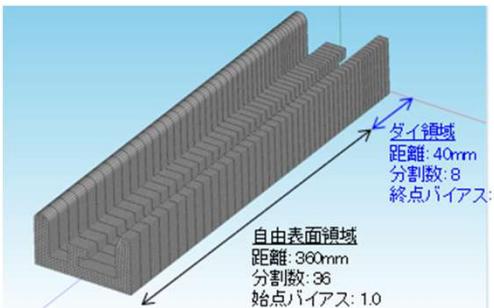


操作手順:

- (3) フォーム内の情報設定後に、3Dモデル生成ボタンをクリックすると、要素数と節点数のメッセージが表示されます。OKボタンをクリックして生成された3Dメッシュが意図通りに作成されているか確認します。変更したい場合は数値を変更後に3Dモデル生成ボタンを再クリックします。

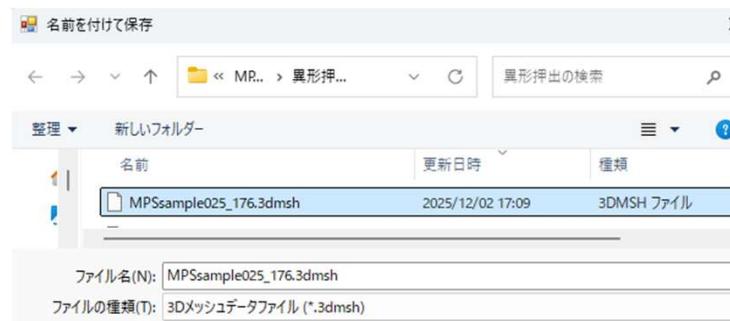


(参考) Ver9 改良成果資料
(p.32) の推奨設定値

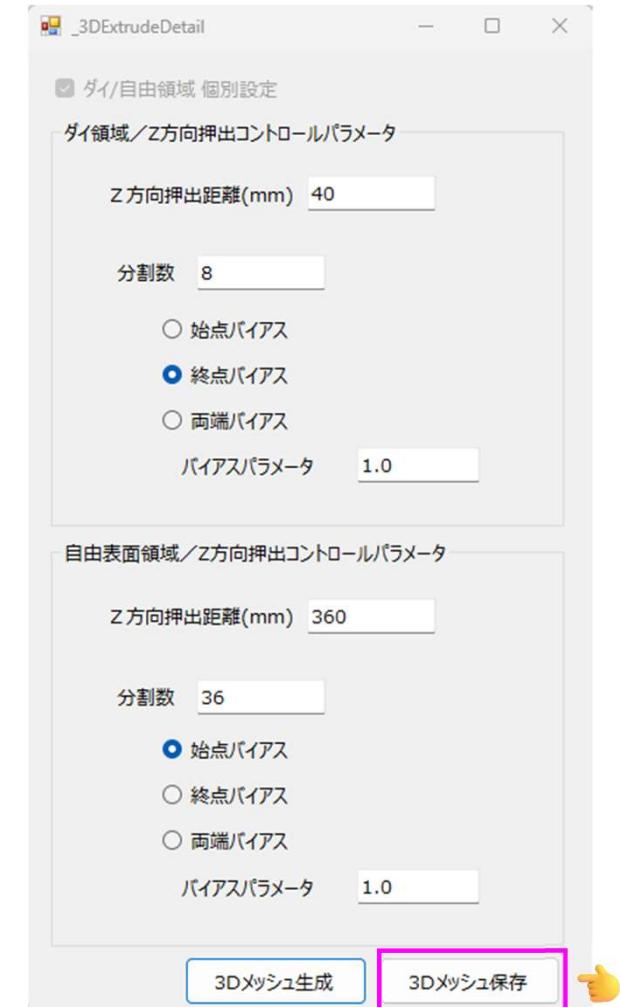
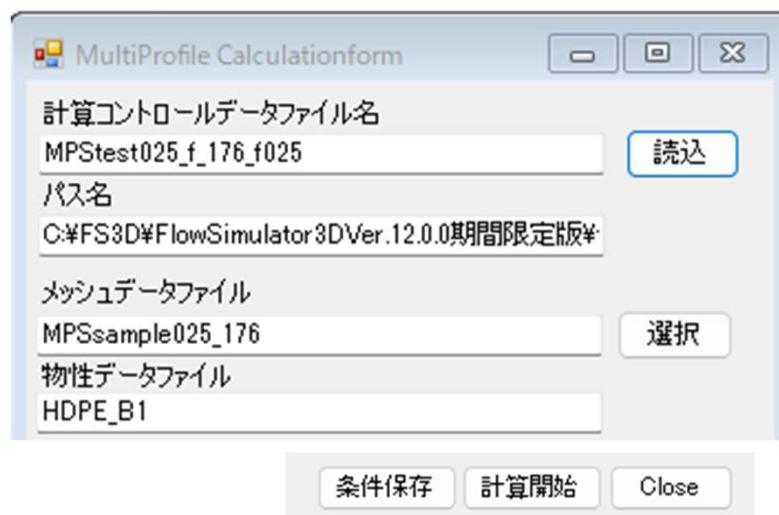


操作手順:

- (4) メッシュ作成後に、3Dメッシュ保存ボタンをクリックし、従来と同様に3Dメッシュファイル(.3dmsh)を保存します。保存した .3dmsh を用いて、従来と同様に Multi Profile Simulator で条件設定および保存(条件保存)、解析を実行(計算開始)してください。

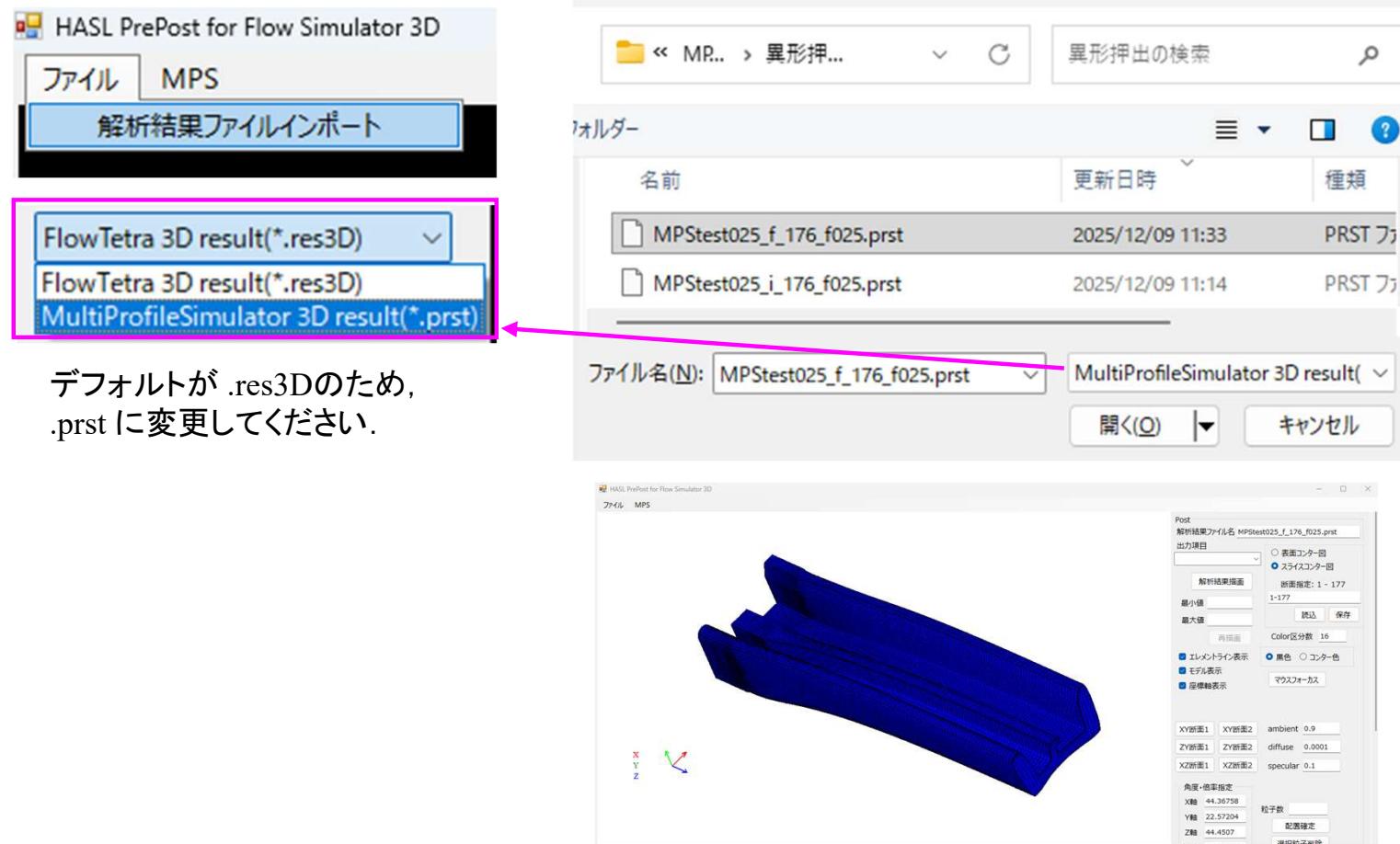


(参考) Multi Profile Simulator の条件設定画面



操作手順: 解析結果の確認

- (1) HASL PrePostを起動し、メニューバーからファイル／解析結果ファイルインポートをクリックします。ファイルを開くフォーム内の右下で拡張子を MultiProfileSimulator 3D result(*.prst)に変更後に、確認したい解析結果ファイル名.prstを選択して読み込みます。

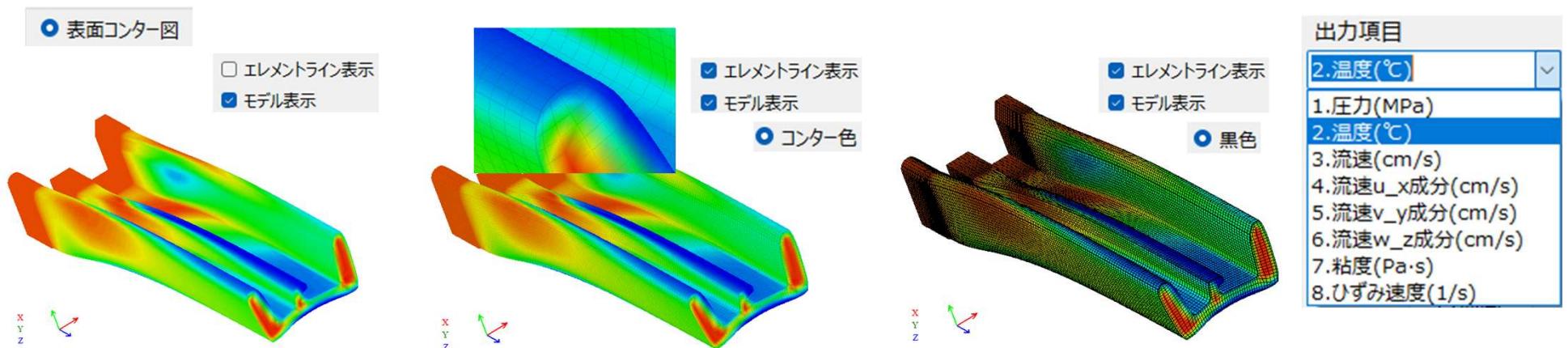


操作手順:

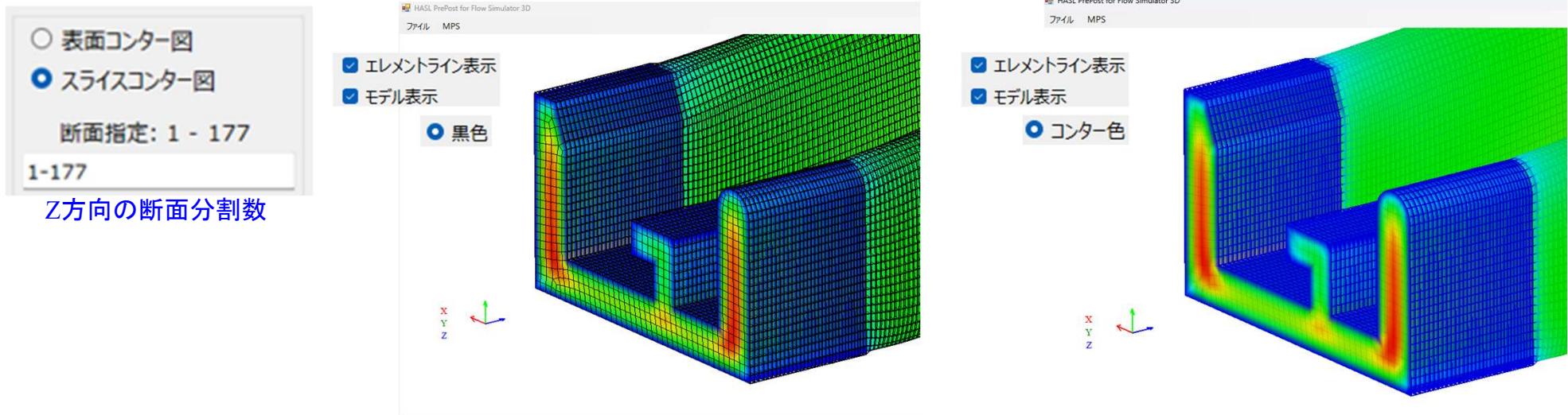
(2) 右側のフォームを利用して、Multi Profile Simulator と同様の操作で解析結果を描画します。



表面コンター描画例: 温度分布



スライスセンター描画例: 流速分布

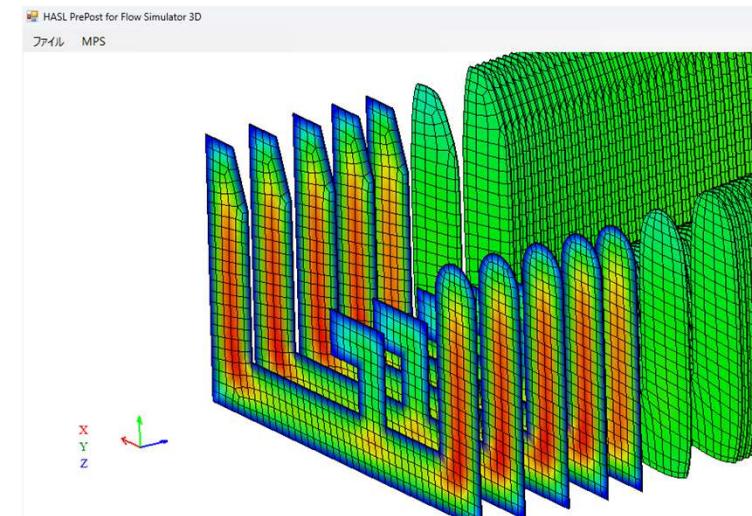


・Z方向の分割数が多く内部状態が分かりにくい場合は、断面指定欄を変更してから描画してください。

指定方法は
テキストファイル(.txt)
に保存、読込可能

○ 表面センター図
● スライスセンター図
断面指定: 1 - 177
1,8,16,24,32,40,48-177
読込 保存

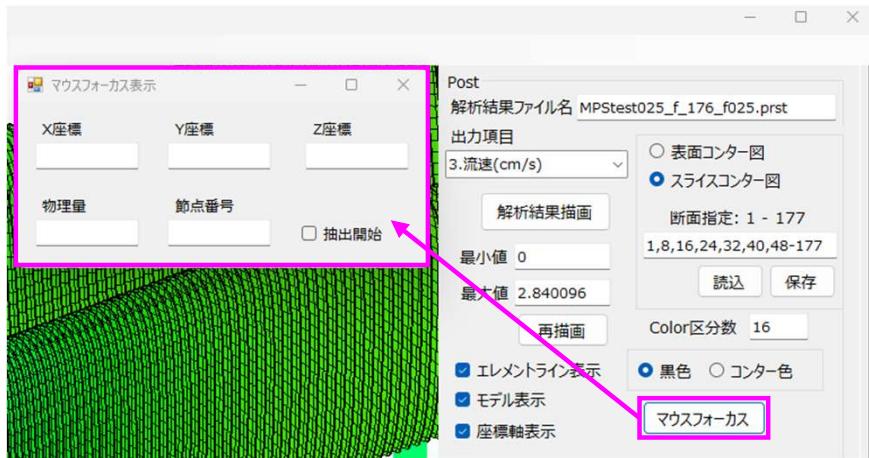
カンマ区切り(,)で断面を飛ばして
ダイ領域の内部を確認する場合
(48-177は省略可能)



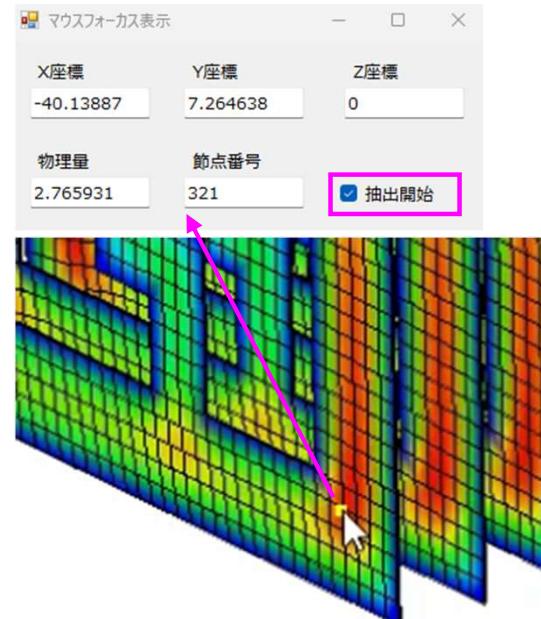
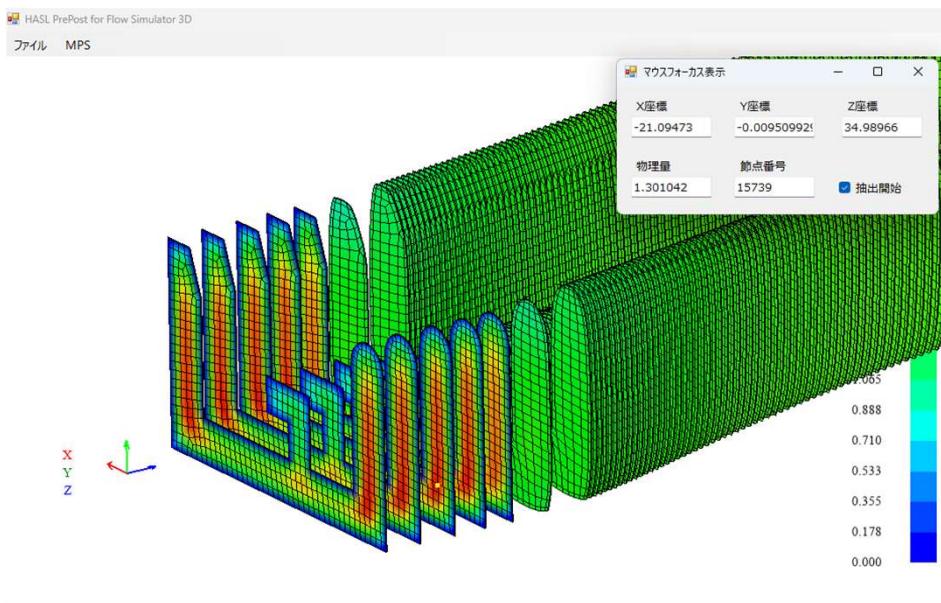
角度・倍率指定
X軸 147
Y軸 52
Z軸 154
倍率 4.4
設定

モデルの角度や
大きさを指定する
ことも可能です。

マウスフォーカスによる断面結果確認例

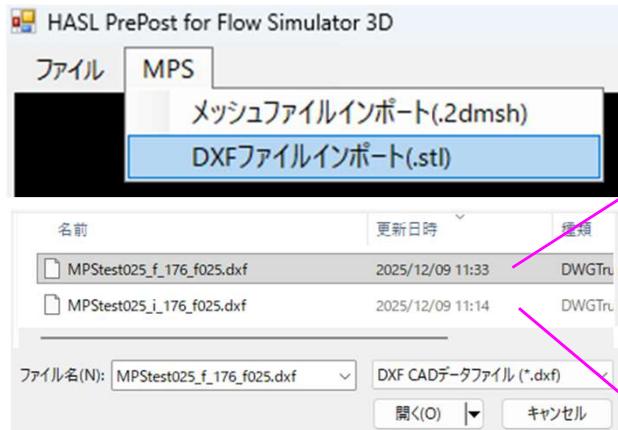


抽出開始にチェック後(座標位置確定),
マウスを確認した位置に移動させると
該当する節点の座標と描画している
物理量が表示されます.

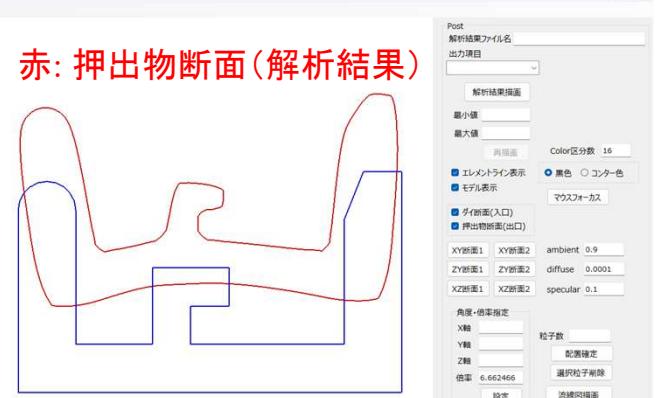


操作手順:

(3) HASL PrePostを起動し、メニューバーからMPS／DXFファイルインポート(.stl)をクリックし、流路入口と出口の断面形状ファイルを確認することも可能です。



順解析



青: ダイ入口断面(入力形状)

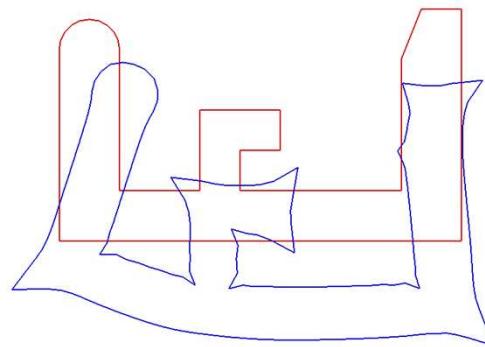
逆解析



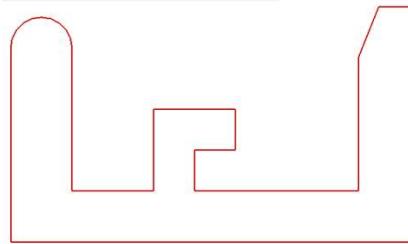
青: ダイ入口断面(解析結果)

逆解析の描画例

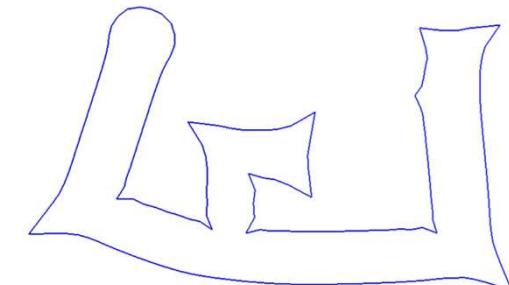
ダイ断面(入口)
 押出物断面(出口)



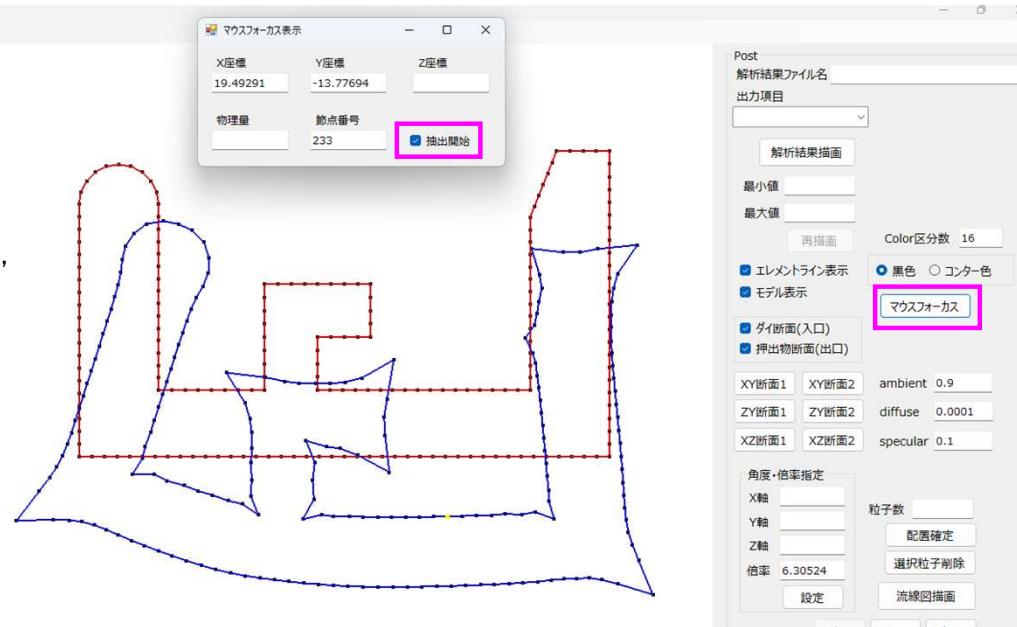
ダイ断面(入口)
 押出物断面(出口)



ダイ断面(入口)
 押出物断面(出口)



センター図の解析結果(p.29)と同様に、マウスフォーカスによる指定節点の座標確認が可能です。



1.2 滑り解析の計算時間短縮

- ・3次元異形押出解析では、ダイ金型表面での樹脂の滑りを考慮した解析が可能です。
(詳細は、Ver.4 改良成果資料 p.2～ の滑り解析機能を参照ください)

Navier Slip Model

$$V_t = \beta \tau_t$$

V_t : 境界面の接線方向に沿った滑り速度,
 β : 滑り速度係数,
 τ_t : 応力の接線方向成分

- ・滑り解析機能では、ダイ領域の表面節点に、Navier Slip Model に基づく適切な滑り速度を設定するため、境界接線方向を考慮した回転行列を構築して有限要素行列に組込む必要があることから、メッシュの要素数(節点数)が大きいほど解析時間が顕著に増加します。
- ・そこで本バージョンでは、解析ソルバーを改良することで、滑り解析の計算時間短縮に取組みました。結果として Ver.12で滑り解析を実施すると、下表に示すように既往バージョンに比べて有意な計算時間の短縮を図ることが可能になりました。

MPSバージョン	節点数	滑り解析	解析時間 (sec)
Ver.11 (2024)	100,890	なし	975
Ver.11 (2024)	100,890	あり	11,092
Ver.12 (2025)	100,890	あり	1,084

* 同一の解析条件で実行した場合、
Ver.11とVer.12の解析結果は同一
になります。

操作手順: 滑り解析

従来通りに解析条件を設定します。下図に滑り解析の条件設定の要点を記載します。

解析条件設定フォーム

The screenshot shows the 'MultiProfile Calculationform' window with several tabs and configuration panels.

計算コントロールデータファイル名: MPStest025_fslip_176_f025_new (highlighted)

パス名: C:\YFS3D\FlowSimulator3DVer.12.0.0期間限定版\

メッシュデータファイル: MPSsample025_176 (highlighted)

物性データファイル: HDPE_B1

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: 20 (highlighted)
 - 非定常計算サイクル数: 1
- 収束性を考慮して緩やかに求解します。

自由表面計算緩和係数: 0.25 (highlighted)

ALE勾配限界: 10

粘度計算緩和係数: 1

No-flow 温度: 30

流动計算コール間隔: 0

ファイル出力間隔: 999

モデル次元: 2D (radio button), 2.5D (radio button), 3D (radio button) (highlighted)

解法の選択 (Analysis Selection):

- 流れ条件設定:** 発達流れ設定 (radio button) (highlighted)
- 解析種別:** 順解析 (radio button) (highlighted)
- 対流効果:** 考慮 (radio button) (highlighted)
- 2.5D要素設定条件:** 分割数: 32, 対称 (radio button) (highlighted)
- 流动解析法:** Penalty function method (radio button) (highlighted)
- 温度解析条件:** 実行 (radio button) (highlighted)
- 解析結果ファイル名:** MPStest025_fslip_176_f025_new

条件保存 (Save Conditions) / 計算開始 (Start Calculation) / Close (Close) buttons

右側の詳細設定パネル (Advanced Setting Panel):

- 異型押出用詳細設定 (Advanced Setting for Non-uniform Extrusion):**
 - 先端流れ条件:
 - 自由条件 (radio button)
 - 流速規定条件 (radio button)
 - 延伸率規定条件(平均流速比): 設定値 1.2 (radio button) (highlighted)
 - 滑り解析: 滑り係数 1E-05 (checkbox) (highlighted)
 - ダリップの断面形状維持(逆解析) (checkbox)

滑り係数 β を設定します。

- 温度条件 (Temperature Conditions):** 流入温度 205 °C (radio button)
- 壁面境界条件 (Wall Boundary Conditions):** 温度規定 (radio button)
- 自由表面境界条件 (Free Surface Boundary Conditions):** 熱伝達規定 (radio button)

メッセージ: Ver12では、解析結果ファイル名には計算コントロールデータファイル名が自動設定されます。

Red Text: Ver12の滑り解析改良プログラムが実行されます。

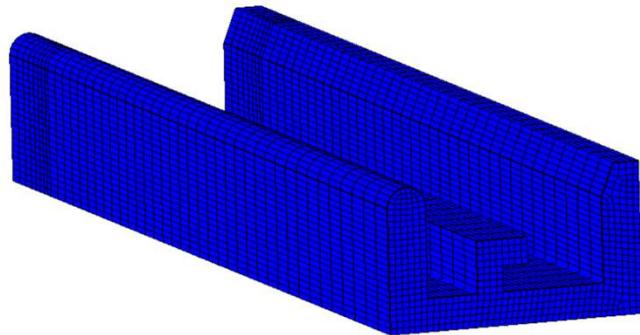
テスト解析: 滑り解析

サンプルフォルダ: ¥testsample_FFS3Dver12¥MPSver12¥異形押出

同じ流路形状(断面)の3Dモデルにおいて、Z方向分割数を変えた3水準で解析しました。

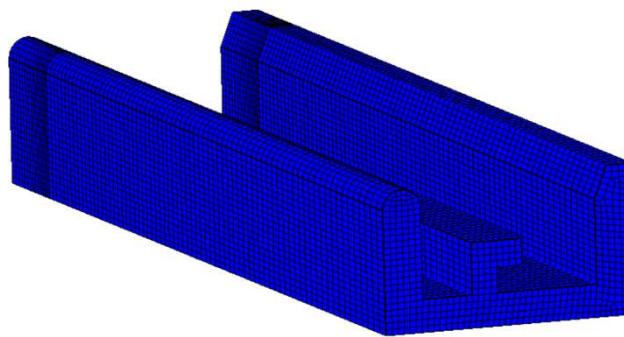
1. Z方向分割数: 44

総節点数: 25,650



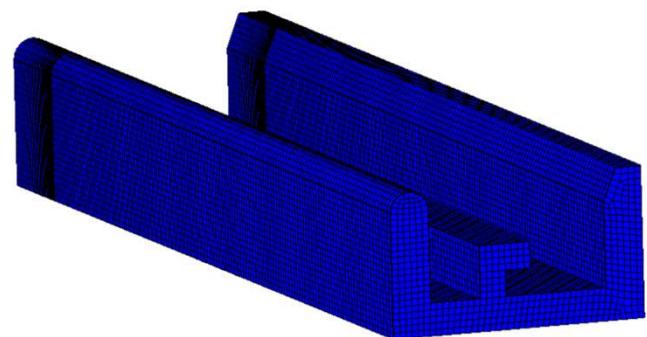
2. Z方向分割数: 88

総節点数: 50,730



3. Z方向分割数: 176

総節点数: 100,890 (p.24)



各モデルについて、以下の解析条件で順解析と逆解析を実施しました。

押出量: 40 cm³/s

樹脂データ: HDPE_B1 (Materialfit DB)

流入温度: 205°C

ダイ表面温度: 200°C

自由表面温度: 30°C, 30 W/m²/K

押出物先端出口の延伸比: 1.2

非線形反復計算回数: 20

自由表面緩和係数: 0.25

滑り解析: あり / なし

滑り係数: 1.0×10^{-5} / 1.0×10^{-4}

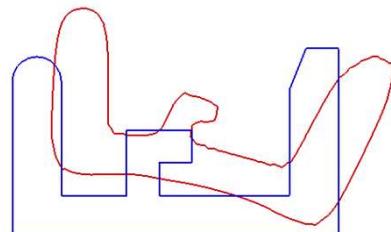
テスト解析: 滑り解析(順解析)

○ 解析結果／断面形状(.dx)

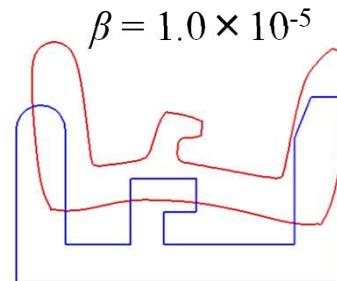
順解析_Z 44分割

青: ダイ入口断面(入力形状)
赤: 押出物断面(解析結果)

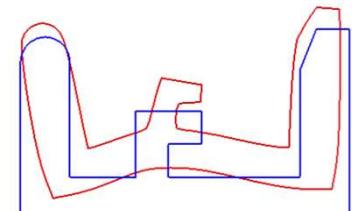
滑り解析なし



滑り解析あり

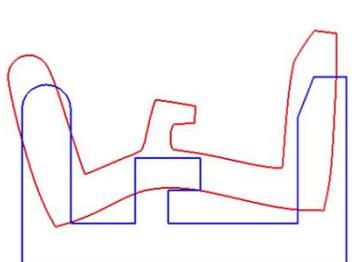
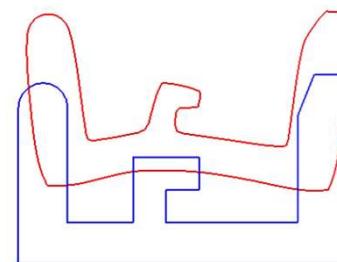
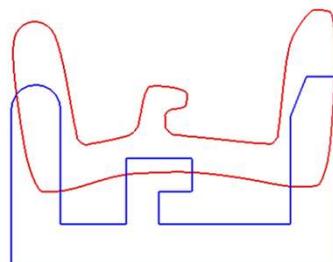


$\beta = 1.0 \times 10^{-4}$

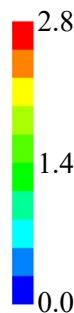


順解析_Z 176分割

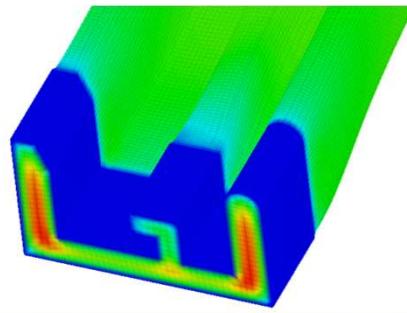
* Z_88 分割は、Z_176分割とほぼ同等の結果のため割愛しました。



流速分布 [cm/s]

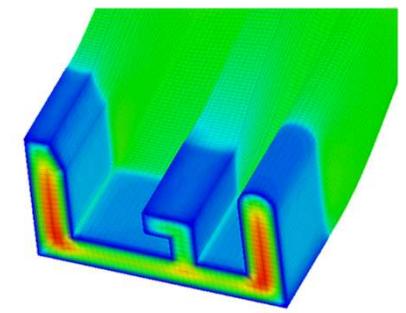
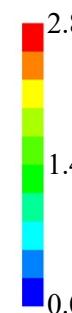


* ダイ表面の流速 0



滑り係数を大きくするほど、
ダイ内とダイ外(自由表面)
の流速分布の差が小さく
なるため、押出物断面の
変形が抑制されます。

[cm/s] * ダイ表面に非零の流速(滑り)

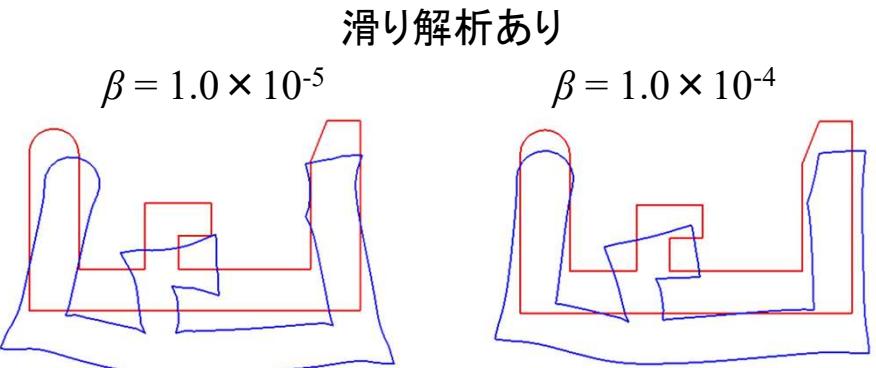
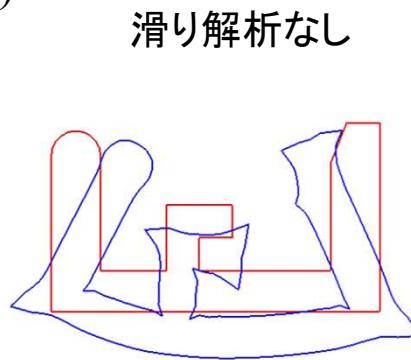


テスト解析: 滑り解析(逆解析)

○ 解析結果／断面形状(.dx)

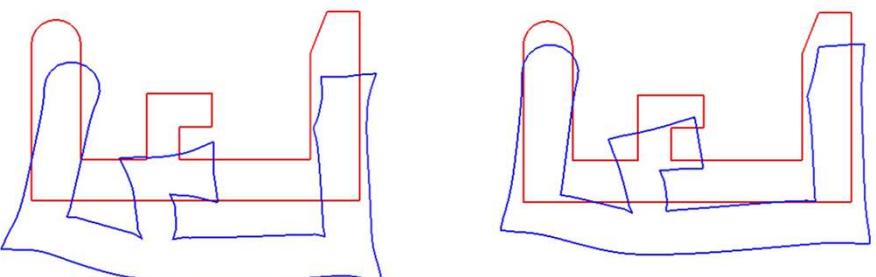
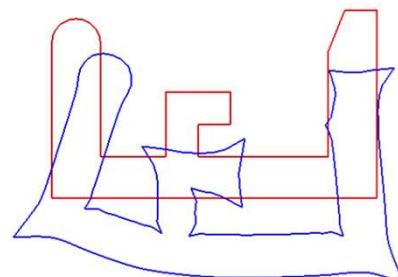
逆解析_Z 44分割

赤: 押出物断面(入力形状)
青: ダイ入口断面(解析結果)

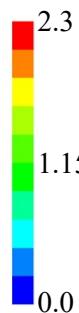


逆解析_Z 176分割

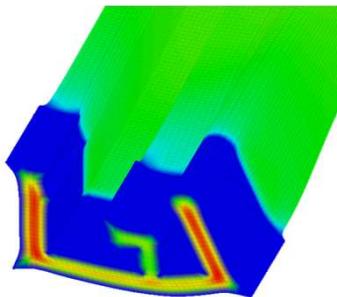
* Z_88 分割は、Z_176分割とほぼ同等の結果のため割愛しました。



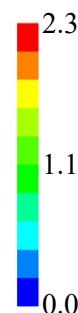
流速分布 [cm/s]



* ダイ表面の流速 0



[cm/s] * ダイ表面に非零の流速(滑り)



逆解析においても
滑り係数を大きくするほど、
ダイ内とダイ外(自由表面)
の流速分布の差が小さく
なるため、押出物断面の
変形が抑制されます。

テスト解析: 滑り解析

○解析時間一覧: Ver12では、滑り解析の計算時間が大幅に短縮されました。

モデル / 節点数	滑り解析 1.0×10^{-5}	解法	断面積比 (入口／出口) 延伸比 1.2	解析時間 (sec)	
				Ver11(2024)	Ver12(2025)
Z_44 / 25,650	なし	順解析	1.106	192	192
		逆解析	1.184	193	193
	あり	順解析	1.176	782	222
		逆解析	1.197	781	206
Z_88 / 50,730	なし	順解析	1.172	437	437
		逆解析	1.196	438	438
	あり	順解析	1.181	2,989	558
		逆解析	1.198	2,905	466
Z_176 / 100,890	なし	順解析	1.178	975	975
		逆解析	1.196	975	975
	あり	順解析	1.183	11,092	1,084
		逆解析	1.199	10,949	1,057

解析PC環境 (CPUスペック) : Intel(R) Core(TM) Ultra5 135U

1. 3次元異形押出解析の改良

1.1 HASL PrePost の利用方法

1.2 滑り解析の計算時間短縮

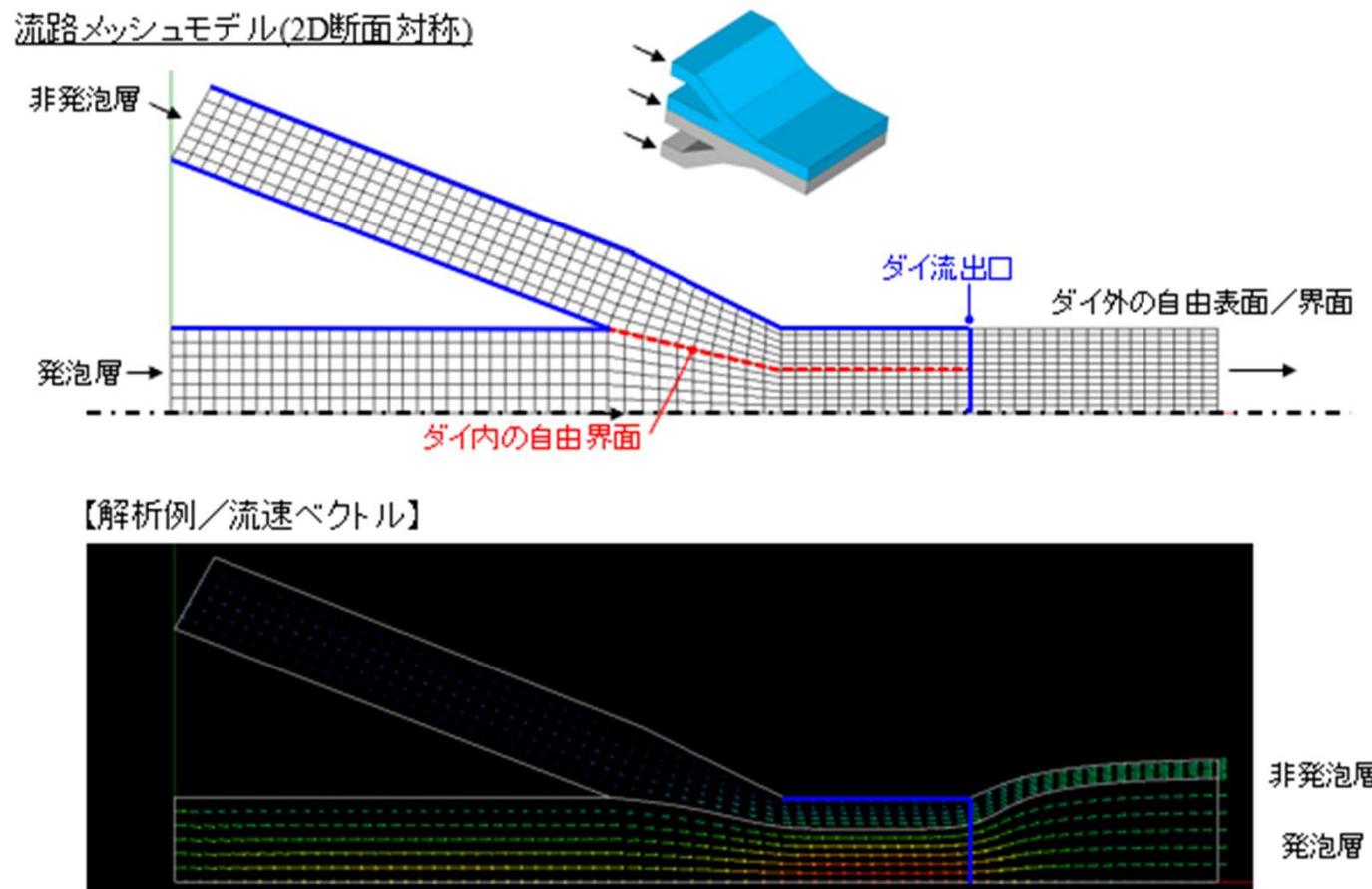
○改良成果まとめ

- ・ 1.1節では、Multi Profile Simulator における 3次元異形押出解析の精度向上および解の収束性改善を目的として、多くの要素数を扱える新規PrePostの開発を行ないました。
- ・ 開発した PrePost により、従来は作成が困難であった節点数10万以上の3Dメッシュを容易に生成できるようになりました。得られた解析結果の描画も快適に実施可能となりました。
- ・ 一方で、メッシュ要素数の増加は解析時間の増大を招くため、良好な収束性を確保できる最小限の要素数を探索することが重要です。今回のモデル形状では、Z_176分割はやや過剰であり、Z_88分割でも十分な解析結果が得られることを確認しました。
- ・ また従来Ver.では、ダイ壁面での樹脂の滑り解析を適用した際に計算時間が大幅に増加する傾向がありました。そこで 1.2節では、滑り解析の時間短縮に取組み、滑り速度設定に必要な回転行列構築ルーチンを改良することで、大規模メッシュに対しても滑り解析を効率良く実行できるようになりました。
- ・ これらの解析ソルバーおよびGUIの両面からの改良により、複雑な断面形状を対象とした異形押出解析の精度向上と実用性の向上が期待されます。

2. 発泡押出解析の改良

2.1 多層発泡解析の実装 (2D断面)

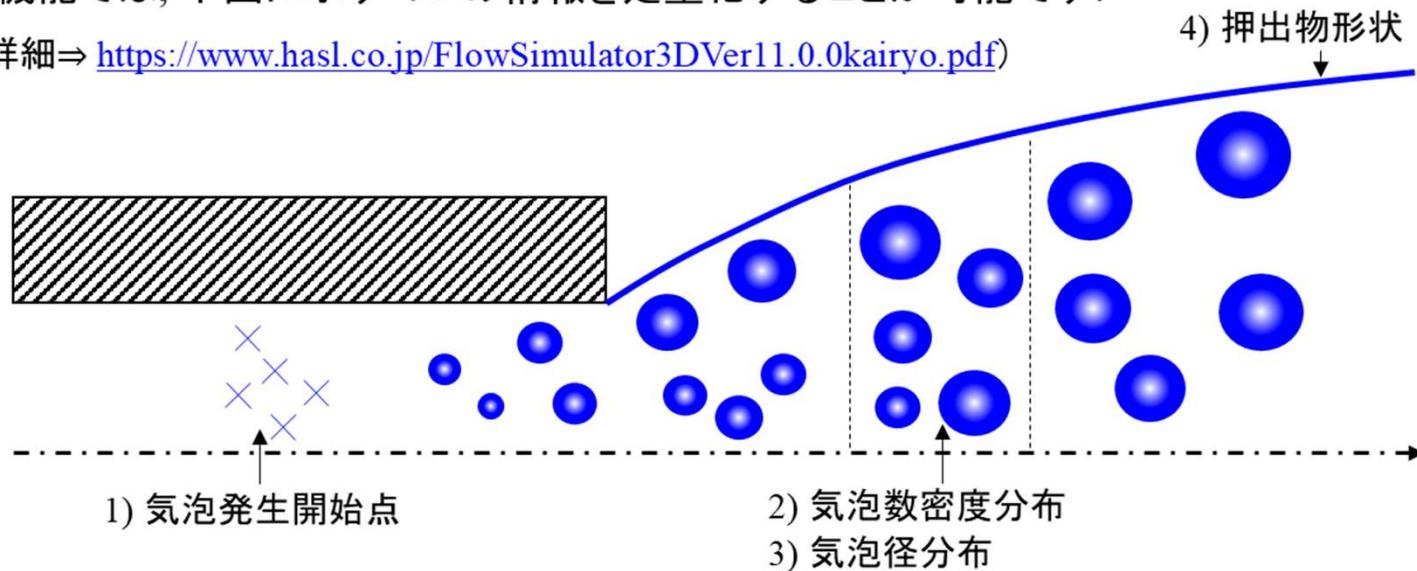
- Ver.11 (2024) に実装された発泡解析機能を拡張し、非発泡層を含めた発泡解析が可能になりました。



(補足) Ver.11 発泡解析機能 詳細はVer.11改良成果資料の p.2～をご参照ください.

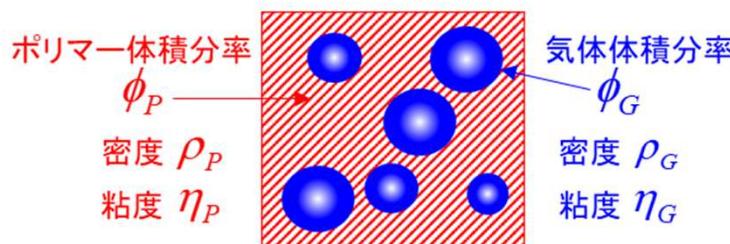
- 当機能では、下図に示す4つの情報を定量化することができます。

(詳細⇒ <https://www.hasl.co.jp/FlowSimulator3DVer11.0.0kairyō.pdf>)



- ポリマー/混合流体密度 ρ_{PG} を以下で定義し、圧縮性流体として解析を行います。

$$\rho_{PG} = \phi_P \rho_P + \phi_G \rho_G \cong \phi_P \rho_P = (1 - \phi_G) \rho_P \quad \because \rho_P \gg \rho_G, \quad \phi_P + \phi_G = 1$$

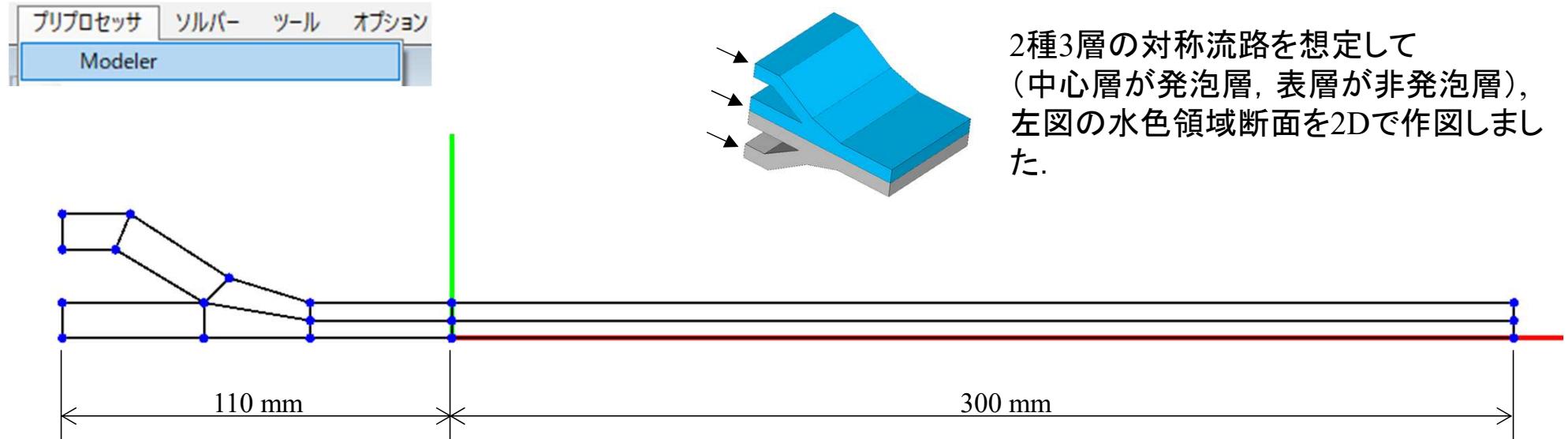


連続方程式(圧縮性)

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_{PG} = \frac{1}{1 - \phi_G} \mathbf{u}_{PG} \cdot \nabla \phi_G \quad \begin{array}{l} \text{発泡が進むほど} \\ \text{流速が大きくなる。} \end{array}$$

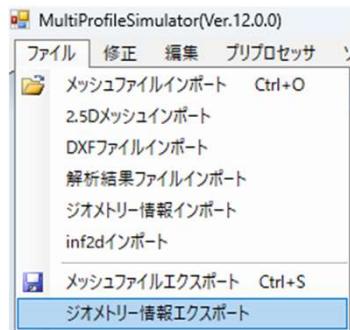
解析手順:

- (1) Multi Profile Simulator のメニューバーからプリプロセッサ／Modeler をクリックして、
解析対称となる流路をポイントとラインで作成します。 (利用手引書 p.13～)



2種3層の対称流路を想定して
(中心層が発泡層, 表層が非発泡層),
左図の水色領域断面を2Dで作図しまし
た。

サンプルフォルダ: ¥testsample_FFS3Dver12¥MPSver12¥発泡解析



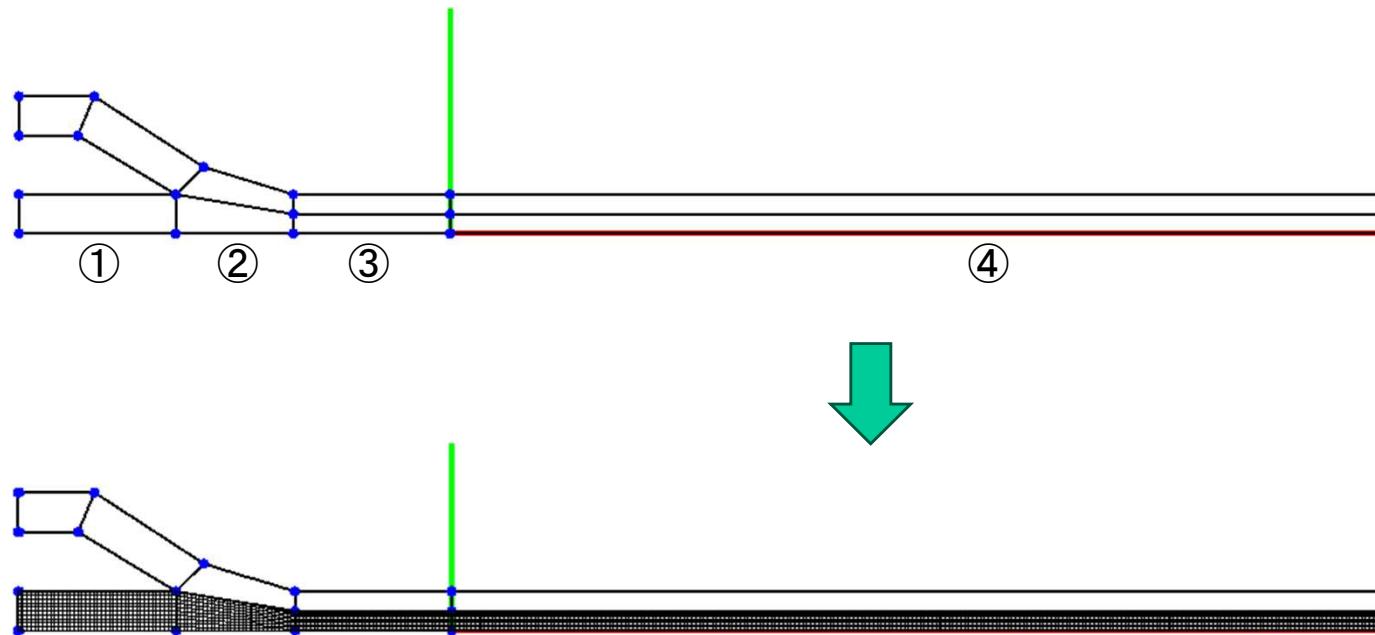
モデル作成後に,
ジオメトリ情報エクスポート
から作図情報を保存します。

解析手順:

- (2) Multi Profile Simulator のメニューバーからプリプロセッサ／2D Mesher をクリックして、解析対称となる流路をポイントとラインで作成します。 (利用手引書 p.38～)



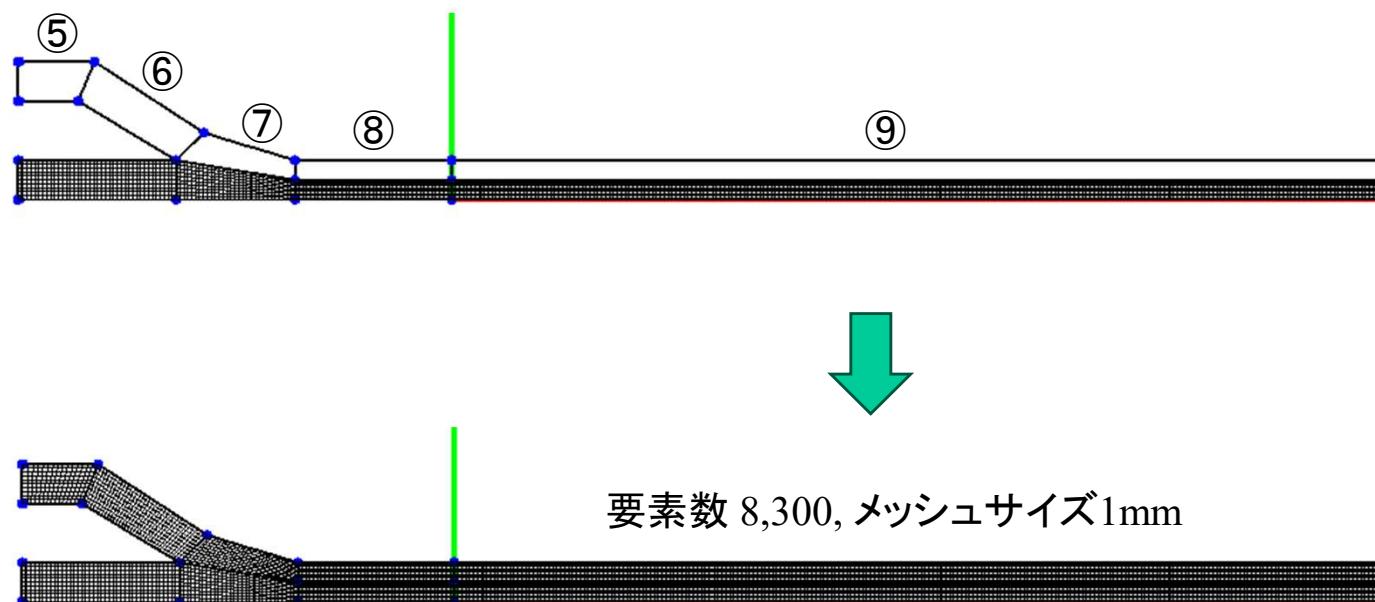
最初に発泡層をプロパティ番号1
に設定して(層1), 矩形ごとに
2Dメッシュを作成します。



解析手順:

- (2) Multi Profile Simulator のメニューバーからプリプロセッサ／2D Mesher をクリックして、
解析対称となる流路をポイントとラインで作成します。 (利用手引書 p.38～)

次に非発泡層をプロパティ番号2
に設定して(層2), 矩形ごとに
2Dメッシュを作成します。

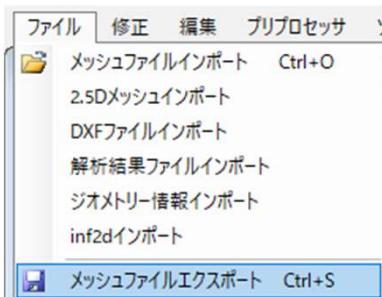


解析手順:

- (3) 2Dメッシュ作成後にメニューバーの修正／マージ／節点をクリックして重複節点を削除します。マージ後にファイル／メッシュファイルエクスポートから2Dメッシュを保存します。



作成した2D
メッシュの保存

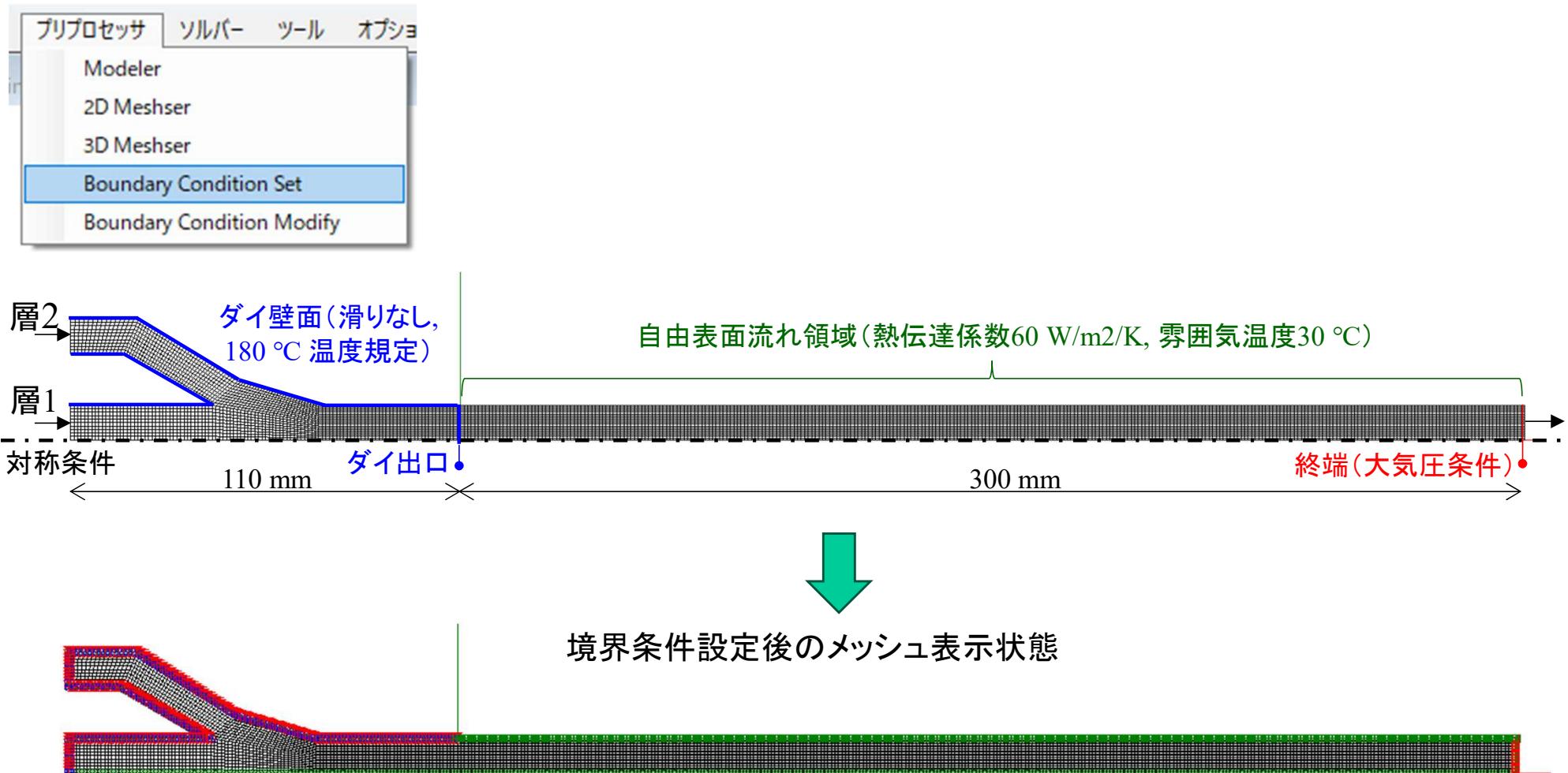


編集／要素情報編集フォームから、プロパティ番号が意図通りに定義できているか確認することができます。



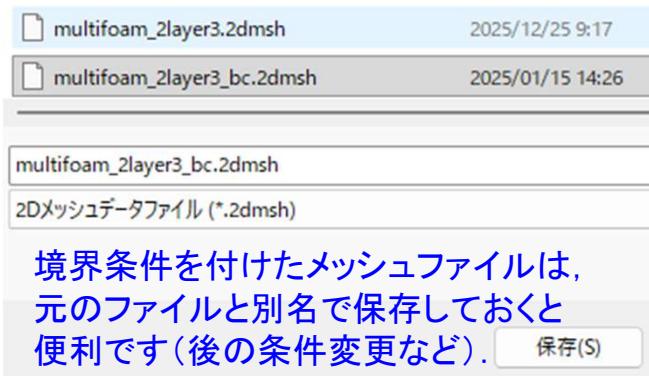
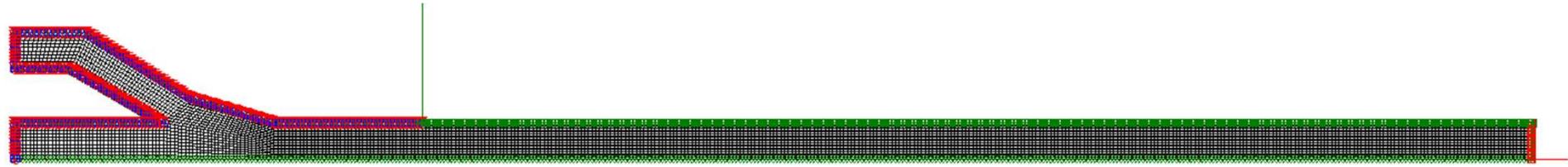
解析手順:

- (4) ファイル／メッシュファイルインポートから保存した2Dメッシュを読み込んだ後に、
プリプロセッサ／Boundary Condition Set をクリックして、境界条件を設定します。

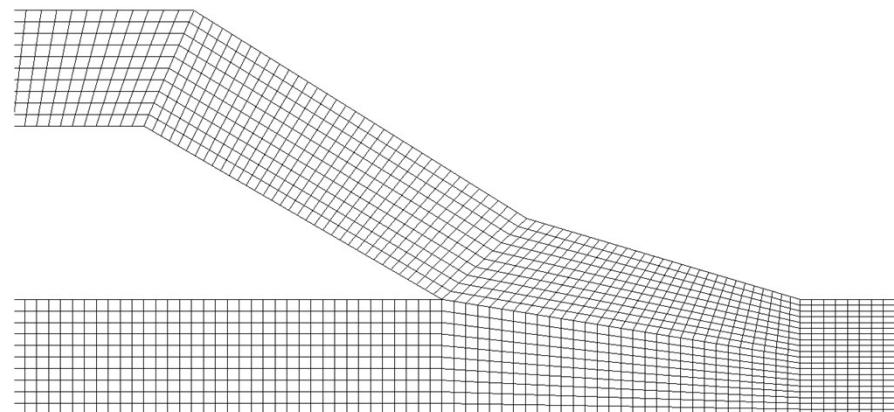


解析手順:

- (5) 境界条件を設定した2Dメッシュを、ファイル／メッシュファイルエクスポートから保存します。本メッシュファイルを用いて多層解析を実施します。

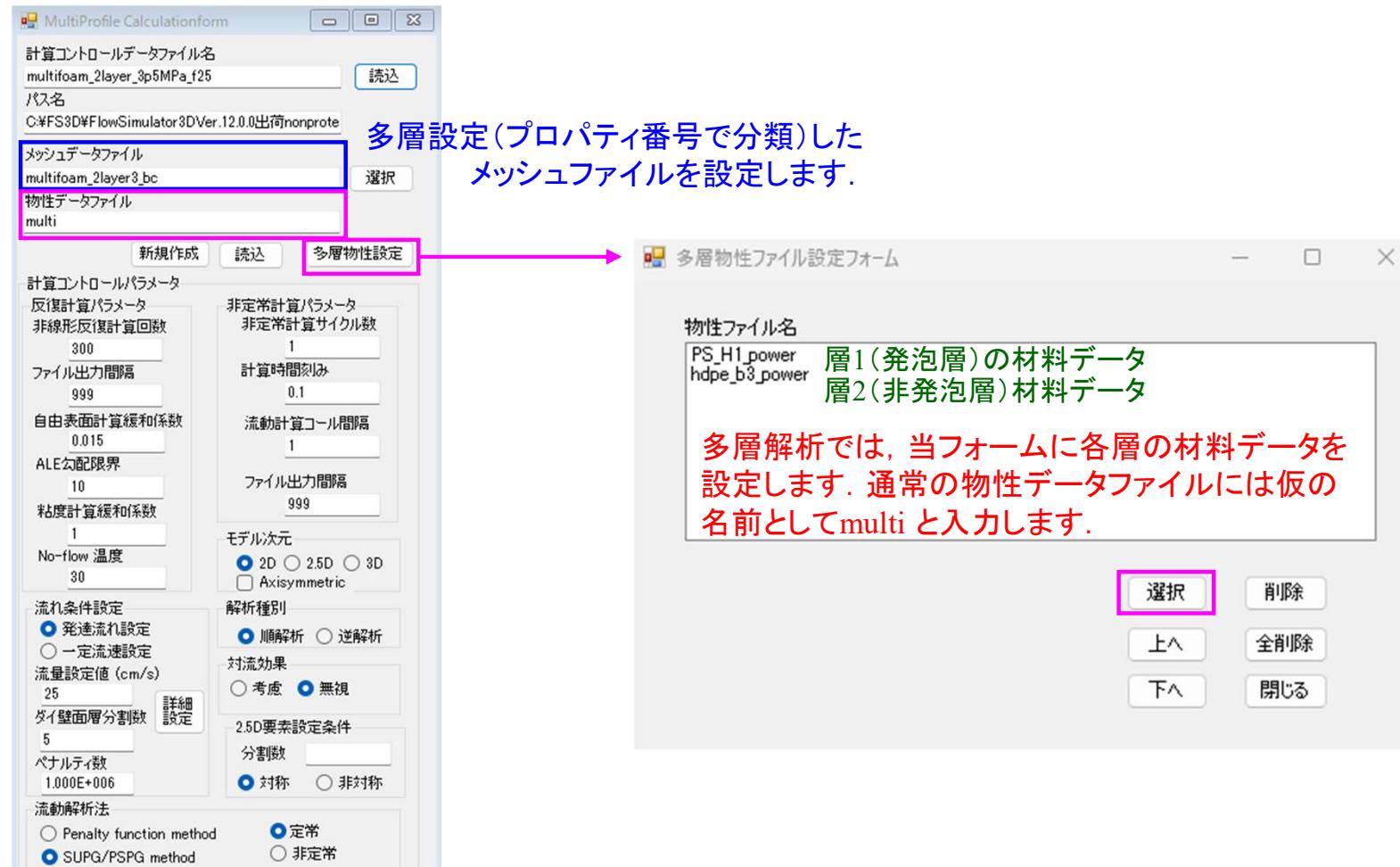


*多層発泡解析では、発泡による変形量が大きいため、流路肉厚方向の分割数を十分に確保することが重要です。本例では、各層ごとに10分割で設定しました。



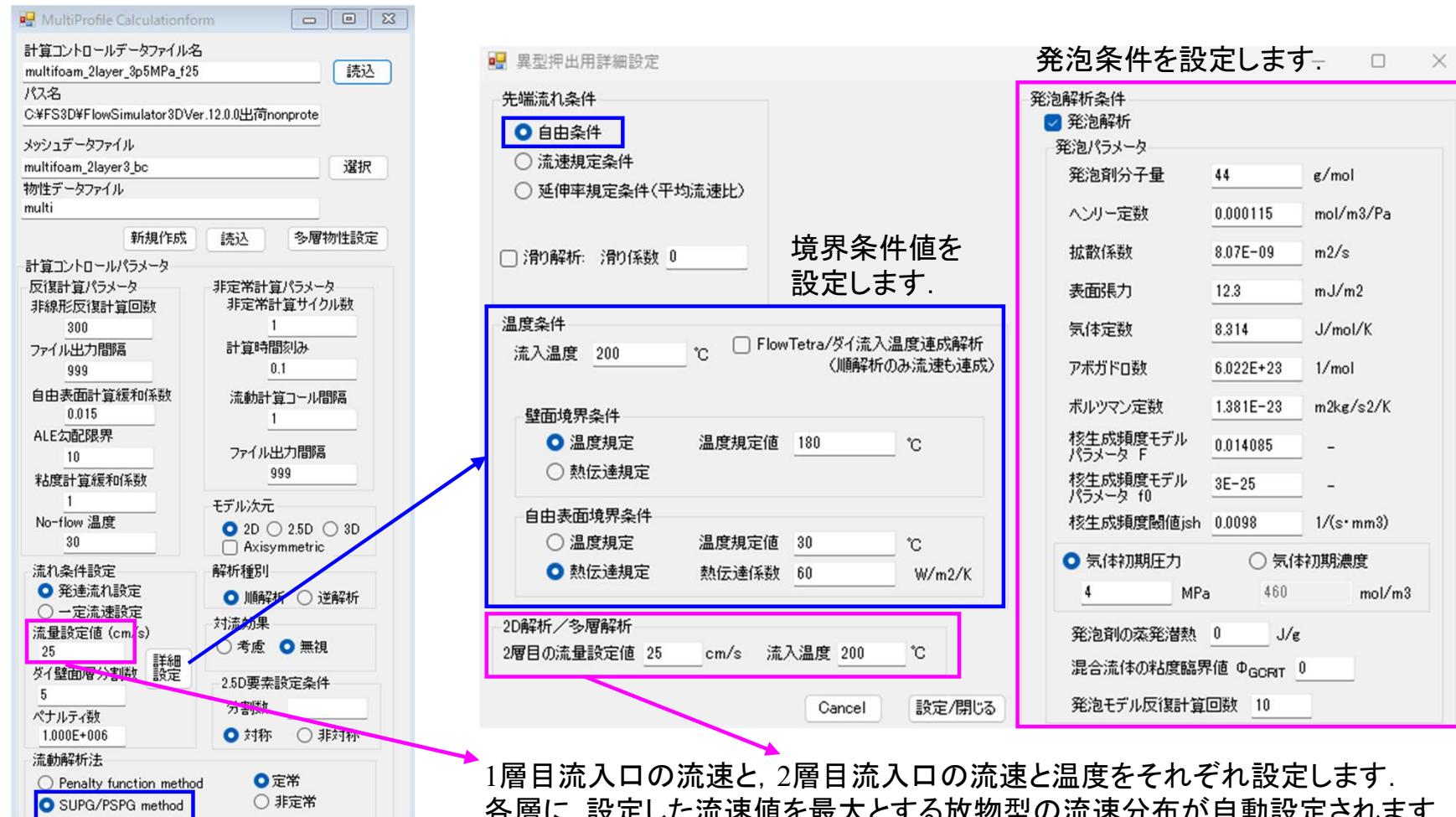
解析手順:

- (6) ソルバー／MultiProfileSimulator をクリックして従来通りに解析条件を設定して解析します。下図に、多層発泡解析を実施する場合の要点を記載します。



解析手順:

- (6) ソルバー／MultiProfileSimulator をクリックして従来通りに解析条件を設定して解析します。下図に、多層発泡解析を実施する場合の要点を記載します。



テスト解析: 多層解析

サンプルフォルダ: testsample_FFS3Dver12 MPSver12 発泡解析

○ 解析条件1: ニュートン流体



温度条件	
流入温度	200 °C
<input type="checkbox"/> 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	
<input checked="" type="radio"/> 温度規定	温度規定値 180 °C
<input type="radio"/> 热伝達規定	
自由表面境界条件	
<input type="radio"/> 温度規定	温度規定値 30 °C
<input checked="" type="radio"/> 热伝達規定	热伝達係数 60 W/m²/K

発泡解析条件	
<input checked="" type="checkbox"/> 発泡解析	↓ CO ₂ を想定
発泡剤分子量	44 g/mol
ヘンリー定数	0.000115 mol/m³/Pa
拡散係数	8.07E-09 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	3E-25 -
核生成頻度閾値 jsh	0.0098 1/(s·mm³)
<input checked="" type="radio"/> 気体初期圧力	3.5 MPa
<input type="radio"/> 気体初期濃度	402.5 mol/m³

初期発泡圧力: 3.0~4.0 MPa
(初期濃度: 345.0~460.0 mol/m³)

テスト解析: ニュートン流体

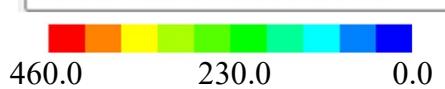
【発泡剤濃度分布】[mol/m³]

(A) 3.5MPa

345.0
mol/m³

ダイ高さ
10.0 mm

22.Foam concentration (mol/m³)



カラー・バーレンジ共通

(B) 4.0MPa

460.0
mol/m³

先端の気泡体積分率 0.703

先端高さ
14.0 mm

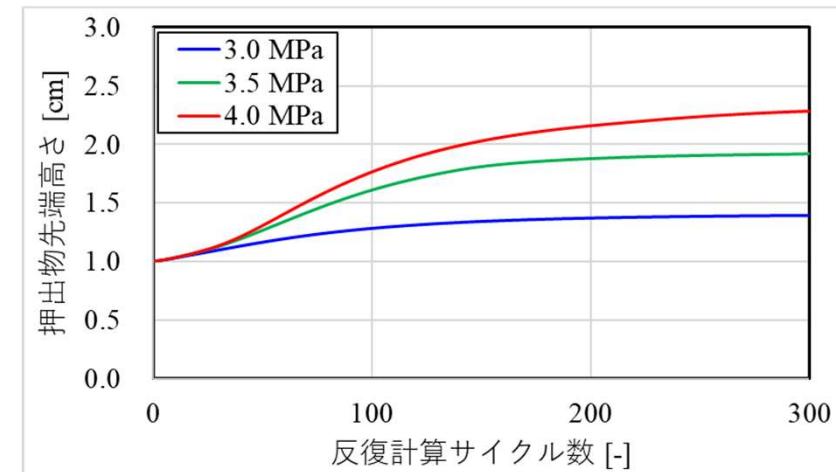
先端の気泡体積分率 0.941

先端高さ
22.9 mm

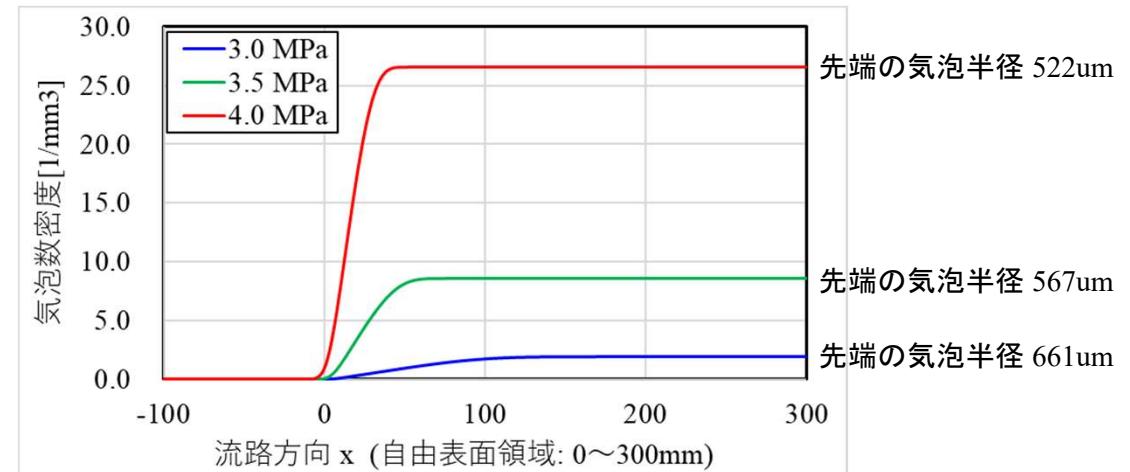
非発泡層
10分割

発泡層
10分割

【解の収束性】.covinf



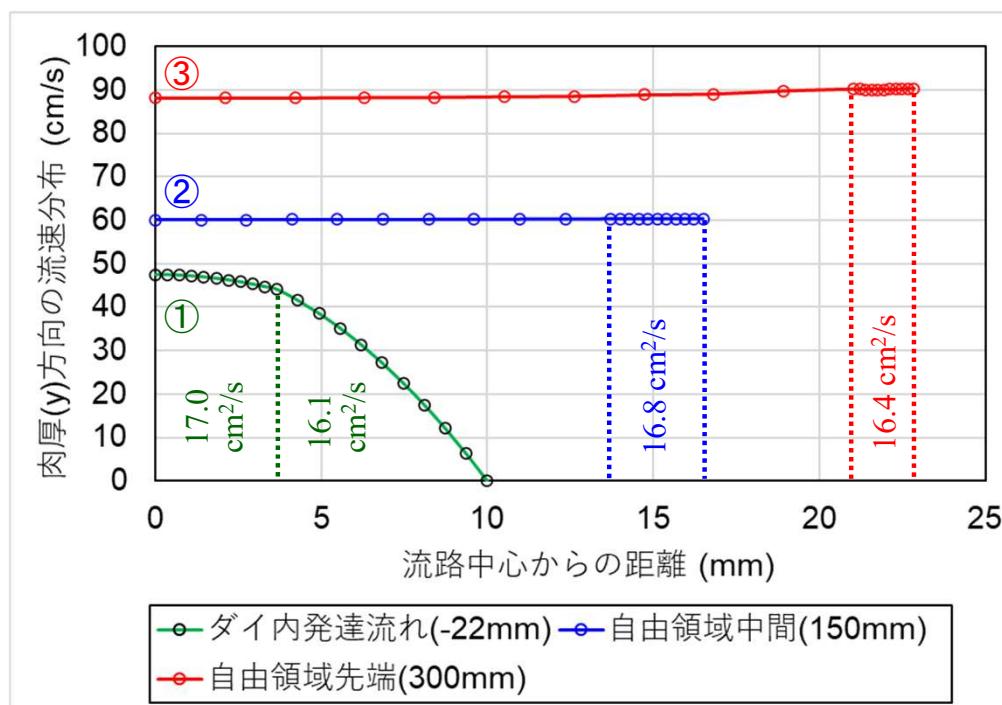
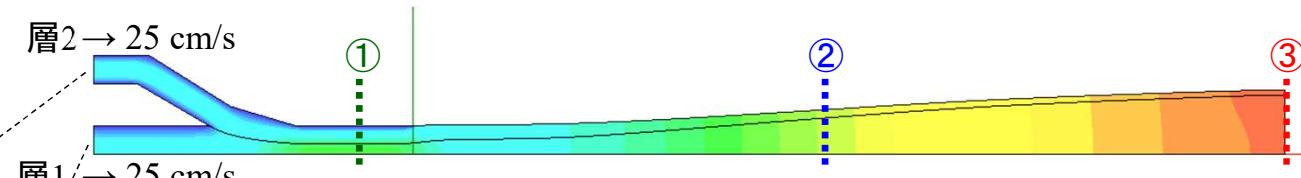
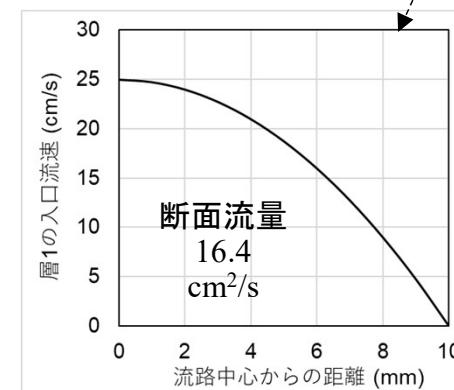
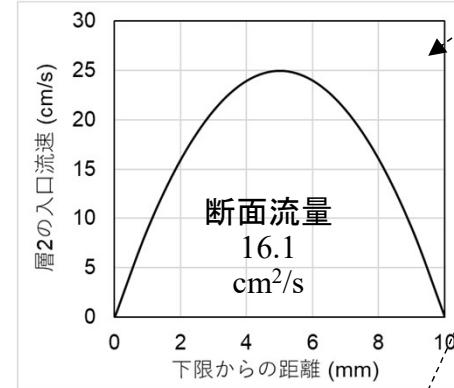
【気泡数密度分布(中心軸上)】グラフプロット



テスト解析: ニュートン流体

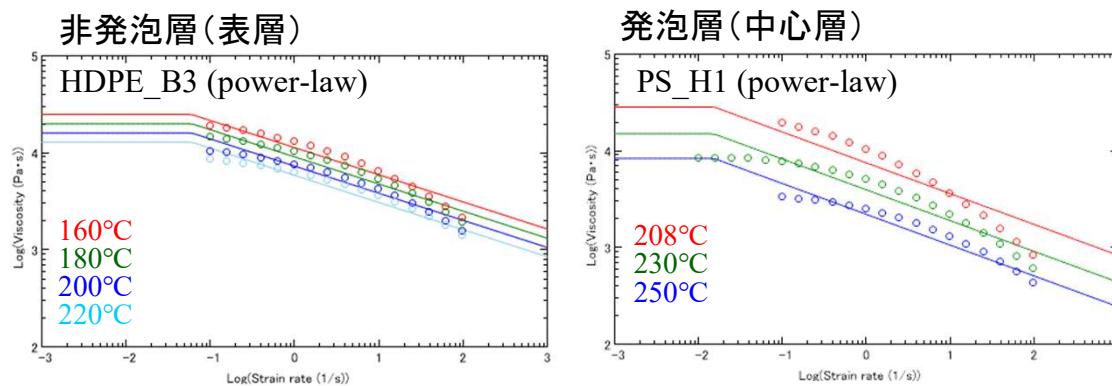
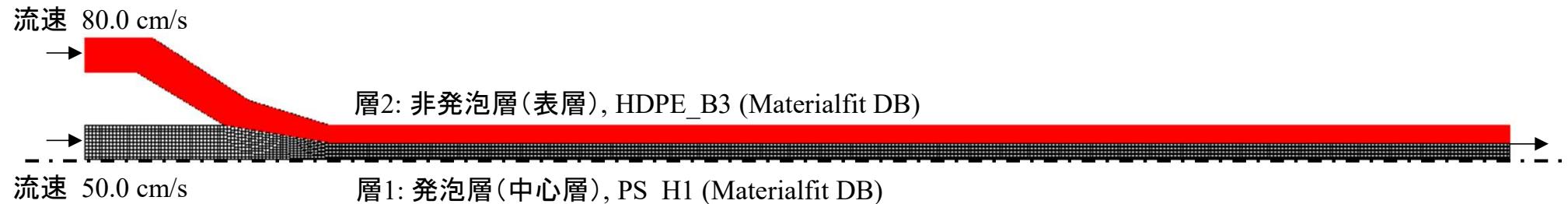
○ 初期発泡圧力 4.0 MPa (460.0 mol/m³)

【流速分布】 [cm/s]



テスト解析: 多層解析

○解析条件2: 非ニュートン流体



発泡解析では、自由表面先端の速度がほぼ一定となる領域で、ひずみ速度が0近傍まで低下する場合があります。そのため、power-law モデルを採用し、ゼロせん断粘度が一定となるように設定しました。

解析条件1からの条件変更点

(p.49, ニュートン流体)

・初期発泡圧力: 2.5~3.0 MPa
(287.5~345.0 mol/m³)

・発泡パラメータ F=0.005634

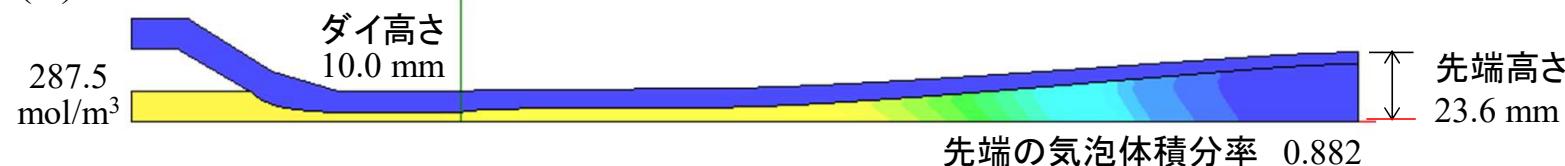
・樹脂-気泡混合流体の粘度低減を考慮。
(詳細は、p.57 を参照ください)

混合流体の粘度臨界値 Φ_{GCRIT} 0.3

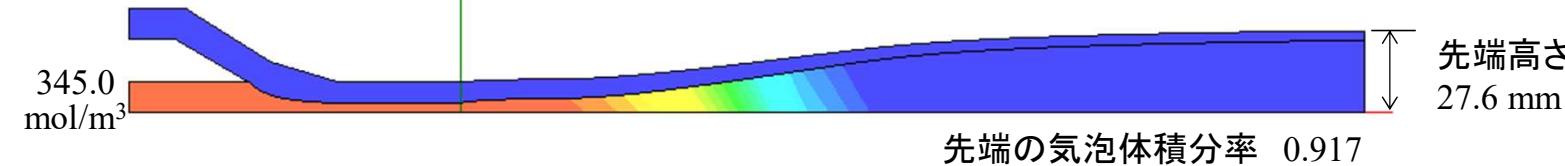
テスト解析: 非ニュートン流体

【発泡剤濃度分布】[mol/m³]

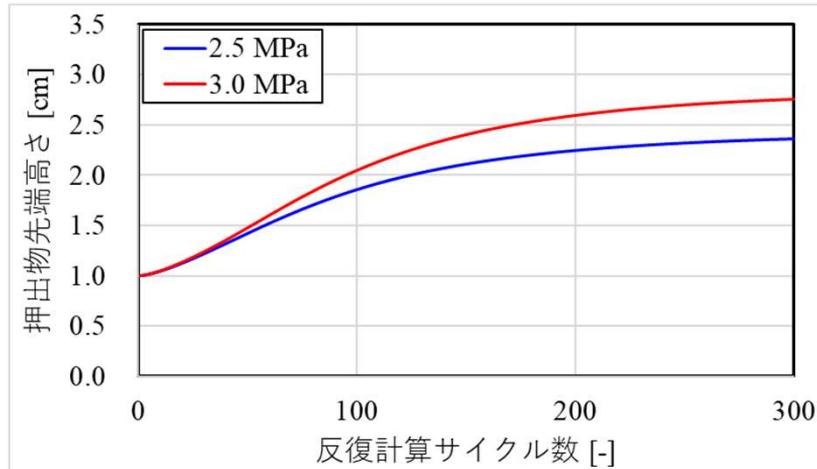
(A) 2.5MPa



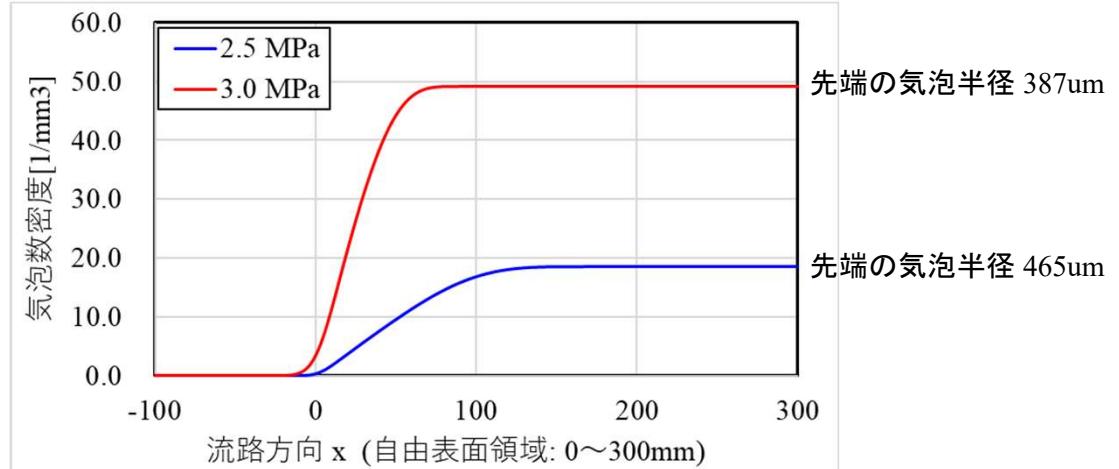
(B) 3.0MPa



【解の収束性】.covinf



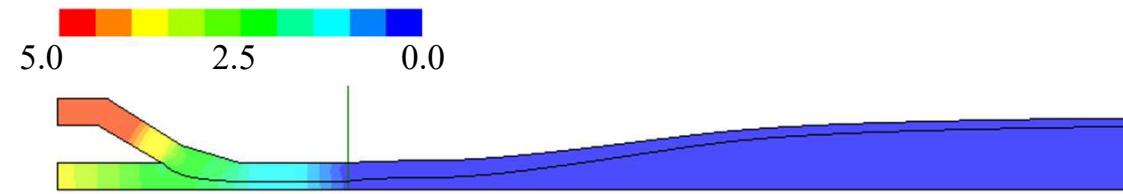
【気泡数密度分布(中心軸上)】グラフプロット



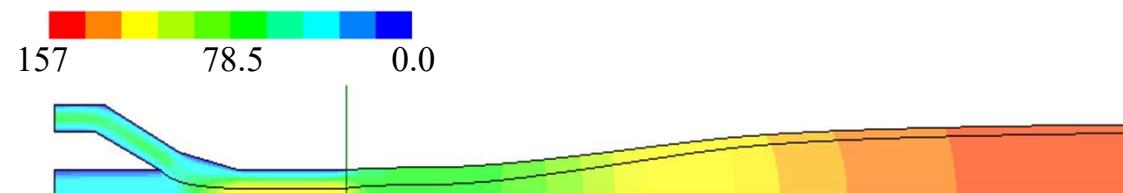
テスト解析: 非ニュートン流体

○ 初期発泡圧力 3.0 MPa (345.0 mol/m³)

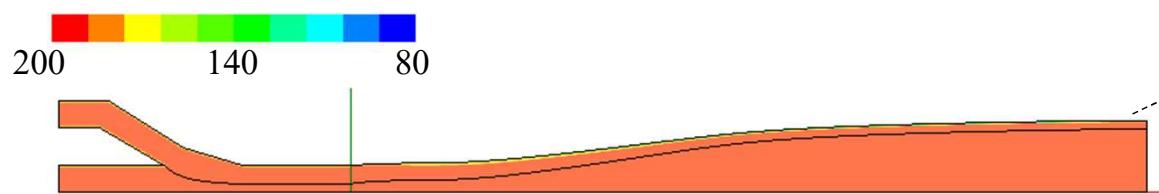
【圧力分布】[MPa]



【流速分布】[cm/s]

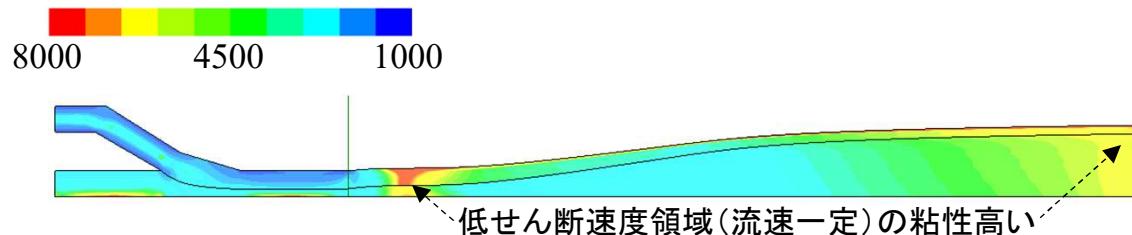


【温度分布】[°C]



発泡層
は等温

【粘度分布】[Pa·s]



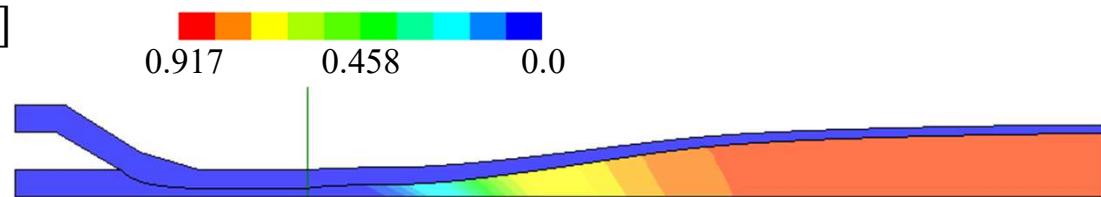
低せん断速度領域(流速一定)の粘性高い

テスト解析: 非ニュートン流体

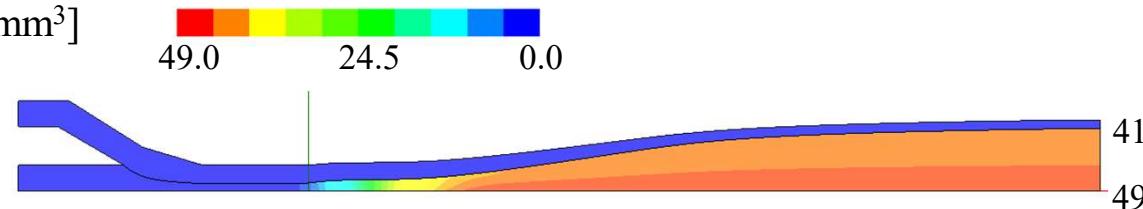
○ 初期発泡圧力 3.0 MPa (345.0 mol/m^3)

適切な条件設定の元で、非発泡層を含めた多層発泡挙動の解析が非ニュートン流体で実施可能になりました。

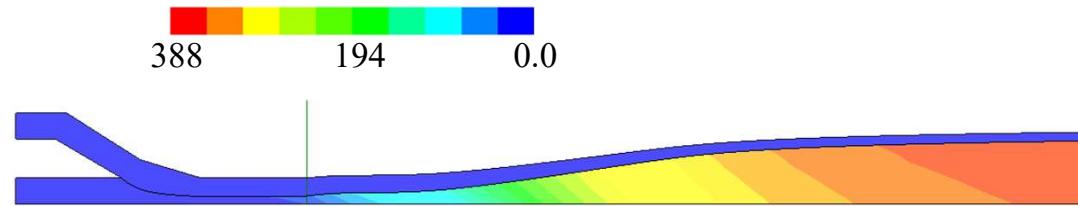
【気泡体積分率 ϕ_G 】[-]



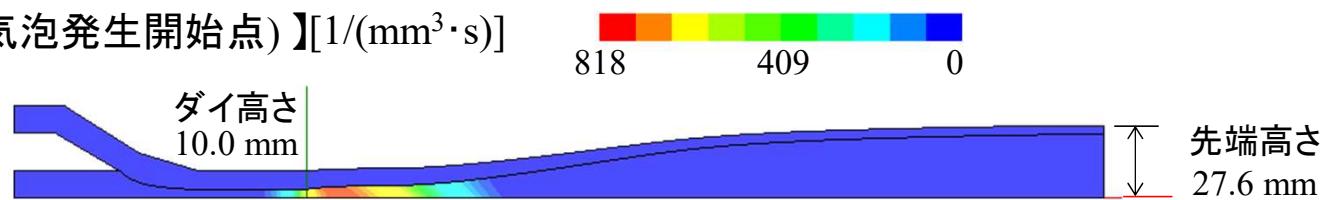
【気泡数密度分布】[$1/\text{mm}^3$]



【気泡半径分布】[μm]



【気泡核生成速度 J (気泡発生開始点)】[$1/(\text{mm}^3 \cdot \text{s})$]



1.2 ユーザニーズ対応(粘度, 温度, 操作性)

本節では、Ver.11の発泡解析機能に取組みいただいたユーザ様からのご要望を受けて実装した、機能改良の内容を説明します。

- (1) 粘度評価の改良／樹脂-気泡混合流体の粘性低下の考慮
- (2) 温度解析の改良／蒸発潜熱を考慮したエネルギー一方程式
- (3) 操作性の改良

(1) 粘度評価の改良／樹脂-気泡混合流体の粘性低下の考慮

樹脂と気泡(発泡气体)の混合流体では、気泡体積分率に応じて粘度が低下する場合があります。この挙動を再現するため、混合流体の粘度に対して臨界体積分率 ϕ_{Gcrit} を導入し、気体体積分率 ϕ_G との関係に基づく以下の式を用いて粘度を定義しました。

樹脂-気泡混合流体粘度：

$$\eta_{PG} = (1 - \phi_G) \eta_P \quad \text{for } \phi_G < \phi_{Gcrit}$$

$$\eta_{PG} = (1 - \phi_{Gcrit}) \eta_P \quad \text{for } \phi_G \geq \phi_{Gcrit}$$

<input type="radio"/> 気体初期圧力	10	MPa	<input type="radio"/> 気体初期濃度	1150	mol/m ³
発泡剤の蒸発潜熱			10.0	J/g	
混合流体の粘度臨界値 Φ_{Gcrit} 0.5					

上式より、 $\phi_{Gcrit} = 0$ の場合には、Ver.11と同様に混合流体の粘度は気泡体積分率に依存せず、樹脂粘度と同じ値を取ります。一方、 ϕ_{Gcrit} が非零の場合には、気泡体積分率が ϕ_{Gcrit} に達するまで粘度が低下する挙動を示します。

(参考) 樹脂-気泡混合流体密度：

$$\rho_{PG} = \phi_P \rho_P + \phi_G \rho_G \cong \phi_P \rho_P = (1 - \phi_G) \rho_P$$
$$\therefore \rho_P \gg \rho_G$$

粘度評価式の影響確認

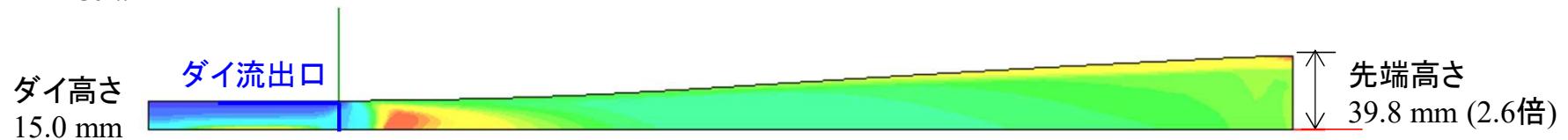
解析モデルは Ver11(2024) のテストサンプル(単層)を使用。初期発泡圧力 4.5 MPa。

【粘度分布】樹脂データ: HDPE_B3 (Materialfit DB)

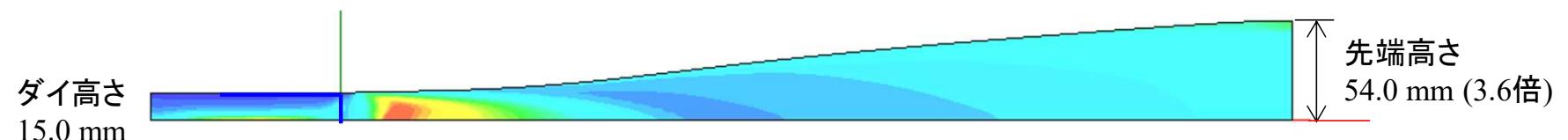


・非ニュートン流体では、低せん断領域における高粘度の影響で
気泡半径の増加が抑制され、発泡が進行しない場合があります。
本解析例では、 ϕ_{Gcrit} を大きくすると混合流体の粘度が低下し、
先端高さが増加する傾向が確認されました。

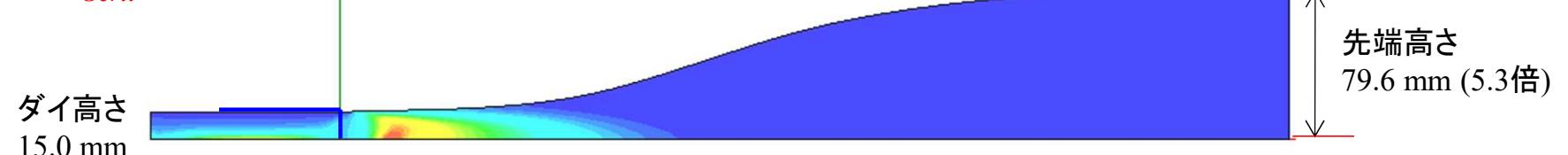
(1) $\phi_{Gcrit} = 0$ (従来通り)



(2) $\phi_{Gcrit} = 0.5$



(3) $\phi_{Gcrit} = 1.0$



(2) 温度解析の改良／蒸発潜熱を考慮したエネルギー方程式

気泡発生時の蒸発潜熱を考慮するため、エネルギー方程式を以下の式に拡張しました。

エネルギー方程式

$$\rho_{PG} C_{PG} \nu_{PG} \cdot \nabla T_{PG} = \nabla (\kappa_{PG} \nabla T_{PG}) + \eta_{PG} \dot{\gamma}_{PG}^2 - L_v M_w \nabla c$$

気泡生成による
蒸発潜熱を考慮

L_v : 蒸発潜熱 [J/g]

M_w : 分子量 [g/mol]

c : 発泡剤濃度 [mol/m³]

*PG: 樹脂と発泡气体の混合流体

気体初期圧力 気体初期濃度

4.5 MPa 517.5 mol/m³

発泡剤の蒸発潜熱 10 J/g

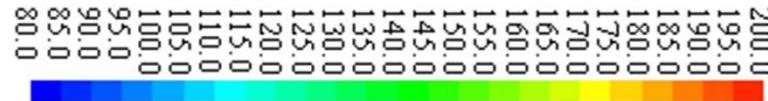
発泡モデル反復計算回数 10

蒸発潜熱の影響確認

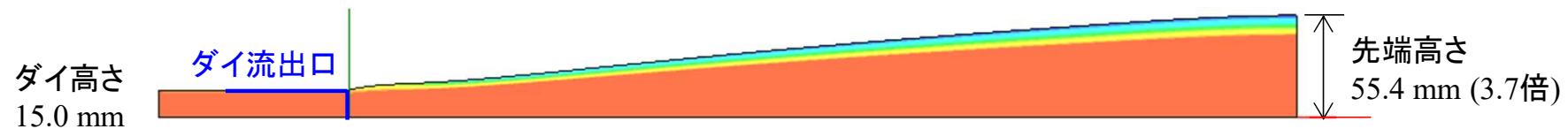
解析モデルは Ver11(2024) のテストサンプル(単層)を使用 . 初期発泡圧力 2.5 MPa.

【温度分布】[°C]

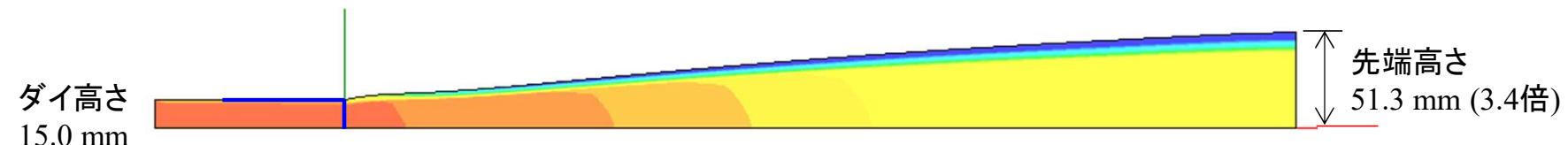
カラーバーレンジ共通



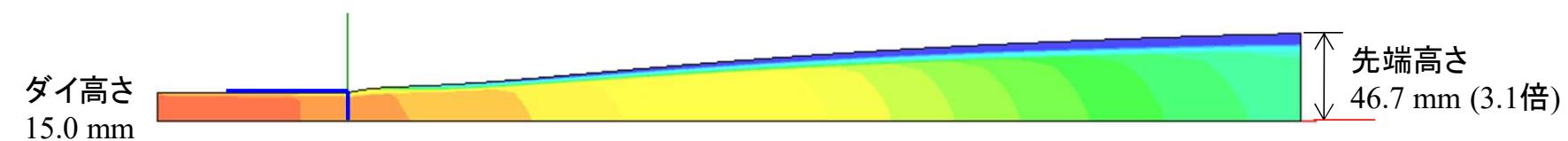
(1) 蒸発潜熱 $L_v=0.0$ (従来通り)



(2) 蒸発潜熱 $L_v=10.0 \text{ J/g}$



(3) 蒸発潜熱 $L_v=20.0 \text{ J/g}$



(3) 操作性の改良

1. 気体初期濃度の設定

発泡解析条件の設定欄から、気体初期濃度を直接設定できるようになりました。

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 ³ /Pa
拡散係数	8.07E-09	m ² /s
表面張力	12.3	mJ/m ²
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 ² kg/s ² /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 ₀	1.8E-24	-
核生成頻度閾値jsh	0.0098	1/(s·mm ³)

気体初期圧力 気体初期濃度

4.5 MPa 517.5 mol/m³

発泡剤の蒸発潜熱 0 J/g

発泡モデル反復計算回数 20

設定方法

- ・気体初期濃度のラジオボタンをチェックして、濃度を入力します。このときの気体初期圧力はヘンリー定数により算出され、値が表示されます。

気体初期圧力 気体初期濃度

4.5 MPa 517.5 mol/m³

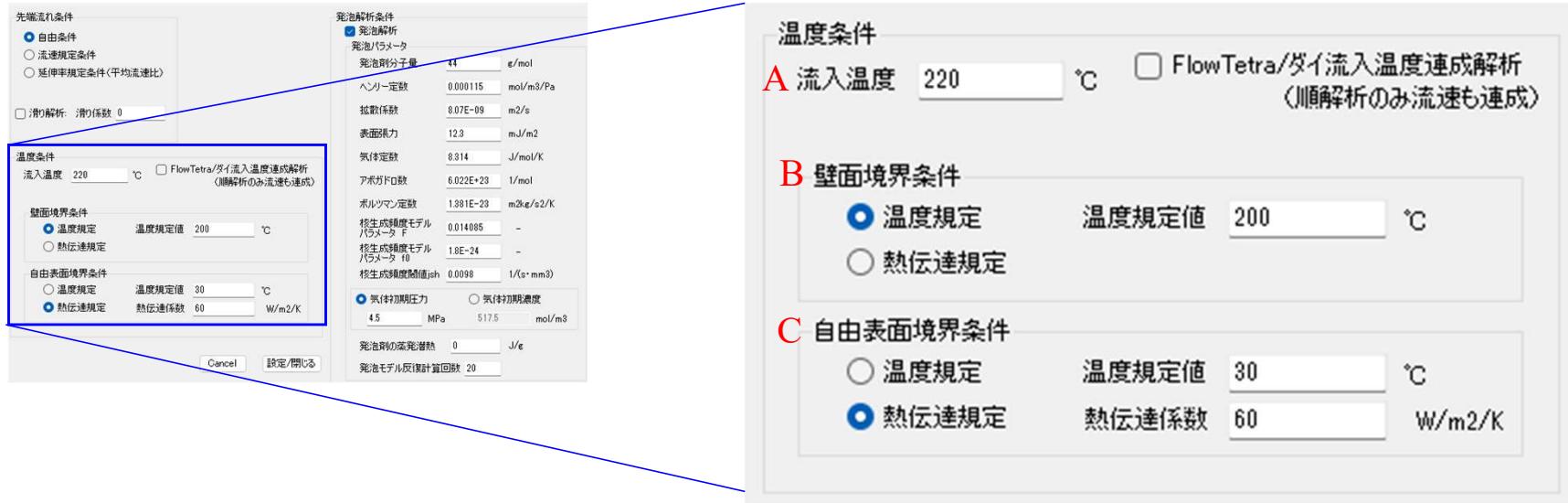
- ・気体初期圧力のラジオボタンをチェックして、圧力を入力した場合には、従来通り圧力が入力条件となり、このときの気体初期濃度がヘンリー定数により算出され、値が表示されます。

気体初期圧力 気体初期濃度

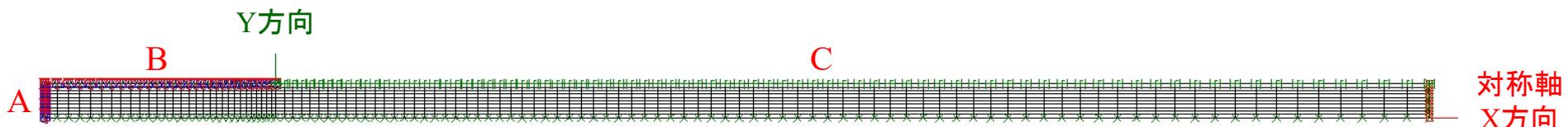
4.5 MPa 517.5 mol/m³

2. 温度境界条件の簡易変更

2D発泡解析においても、温度境界条件をGUIから変更できるようになりました。
改良プログラムで解析条件(.pcal)を保存して解析すると、GUIの設定値が反映されます。



2Dモデル例 (X軸対称)



3. グラフプロットの節点一括選択

グラフプロットフォームにおいて、X方向、Y方向の節点を簡便に選択できるようになりました。



グラフプロットでマウスピック
を選択すると出現

- ・X軸方向のチェックボタンをクリックし、モデル上の任意の1点をクリックすると、X軸方向の関連節点が自動で抽出されます。

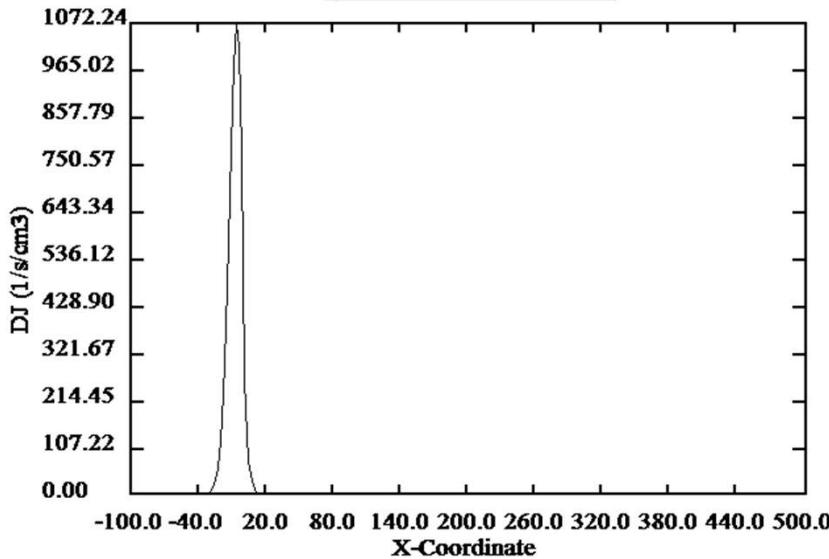
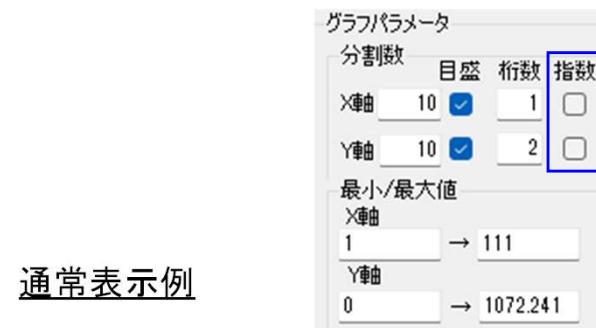


- ・Y軸方向のチェックボタンをクリックし、モデル上の任意の1点をクリックすると、Y軸方向の関連節点が自動で抽出されます。



4. グラフプロットの指数表示

グラフ作成時の軸数値を、指数表示に変更できるようになりました。



指数表示例

