
Flat Simulator(Ver.9.0.0)
改良開発成果資料

2024/05/20

(株)HASL

はじめに

本資料では、下記Flat Simulator(Ver.9.0.0)の改良機能の開発成果と運用方法についてご報告します。

1) 慣性効果の解析機能

スロットコーティングプロセスで扱われる低粘性流体の挙動を解析する上で重視される慣性効果の考慮が可能になりました。

2) コントロールボリューム法を利用した滞留時間解析機能

従来のVOF法を利用した滞留時間解析機能に加え、FVM(Finite Volume Method)を利用した滞留時間解析機能が追加されました。当追加機能では、定常輸送方程式を陰的に解析することで滞留時間情報が定量化されます。従来のVOF法よりも運用が容易で短時間で滞留時間が定量化されます。

3) ユーザーニーズ対応改良機能

FlatSimulator ユーザー様のご要望にお応えし、下記の機能を新規実装しました。

3-1) 最適化情報の解析用メッシュ情報へのマッピング機能

2.5Dメッシュ加工機能に温度制御あるいはダイリップ肉厚最適化解析で推定された最適化条件を指定された解析用メッシュ情報にマップする機能が追加されました。最適化条件を付帯させたメッシュ情報は、通常の解析で利用可能です。

3-2) 編集情報ファイルを利用した計算節点位置の一括更新機能

2.5D節点加工機能に予め節点番号と更新値座標を設定したテキストファイルを準備し、当ファイルを読み込んで節点位置を一括更新する機能が追加されました。

3-3) ダイ流出口における流束(単位幅方向の流量)分布グラフ作画項目追加

フィルム/シート幅方向の流量配分状態を評価する際に有効な情報になる流束分布のグラフ作画項目が追加されました。

1) 慣性効果の解析機能

1-1) 理論背景

スロットコーティングダイでは、流路断面積が広いマニフォールドダイ内での慣性効果が重視されています。以下に文献1)を参考としたマニフォールド内の慣性効果のモデル化について解説します。

従来のFlatSimulatorは、力の釣り合い式を利用して高粘性流体である溶融樹脂の挙動を定量化し、慣性効果を無視する近似を採用していました。この近似は、一般的な溶融樹脂解析では許容されます。一方、スロットコーティングにおけるコーティング液剤の粘度は1Pa・s未満のものが多く、成形条件によっては慣性力が粘性力よりも支配的になる場合があります。このような低粘性流体の挙動を解析する場合に今回実装した慣性効果の解析機能が有効になります。

マニフォールド内のコーティング液剤の流動状態を x 方向の一次元流れに簡略化し、慣性効果の影響を考慮します。一次元流れの運動方程式は次式で表されます。

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

(u, v, w) :	流速ベクトル
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}$:	余剰応力テンソル成分
p :	圧力
ρ :	密度

- 参考文献** 1) 非ニュートン流体における押し出し金型内部流れの高効率・高精度解析手法の開発と実用化
津田武明, 長島正幸, 穴澤朝彦, 長谷川富市
Nihon Reoroji Gakkai, 39,5,189(2011)

一方、非圧縮流体の連続方程式は、次式で表されます。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

(2)式を利用し、(1)式の左辺の慣性項は、次式のように書き直されます。

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho \left(\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (3)$$

ここでは、せん断応力が支配的と考え、伸長応力を無視する近似を採用しています。

(3)式を流動方向 x 軸と垂直な流路断面 A に対して面積分を行うと、

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_A \rho u^2 dA + A \frac{\partial p}{\partial x} = \int_A \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) dA \quad (4)$$

が得られます。

(4)式の左辺第一項は、近似的に以下のように評価します。

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_A \rho u^2 dA = \frac{\partial}{\partial x} (\rho \kappa A u_m^2) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \kappa \frac{Q^2}{A} \right) \quad (5)$$

ここで、 u_m は断面A内の平均流速、 Q は断面Aを通過する流量を表します。また、 κ は運動量補正係数であり、指数 n の指数則粘度モデルの場合、

$$\kappa = \left(\frac{3n+1}{n+1} \right)^2 \left(1 - \frac{4n}{1+3n} + \frac{n}{1+2n} \right) \quad (6)$$

と表されます。

(4)式の左辺第一項の慣性項を無視した場合、従来の定式化に一致します。言い換えれば、形式的に圧力を以下に示す様書き換えることによって、従来と同様の定式化に従って慣性項を近似的に考慮可能です。

$$p^* = p + \rho \kappa \frac{Q^2}{A^2} \quad (7)$$

すなわち、2.5D FEMで解析対象とするスロットダイのマニフォールド流路内の圧力方程式は、次式で表されます。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial}{\partial x} \left(p + \rho \kappa \frac{Q^2}{A^2} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (8)$$

1-2) 慣性効果評価機能の運用方法

慣性効果評価機能の有効にするには、熱流動解析コントロールパラメータパネルに追加された慣性効果考慮チェックボックスをチェック状態とします。Power law index のテキスト欄には、(6)式内に示される指数則モデルの指数 n を指定します。ニュートン流体の場合は $n=1$ です。非ニュートン粘度モデルの場合は、Materialfit で粘度データをフィットした際に評価される指数 c を指定します。

The image shows two windows from the HASL Materialfit software. The left window is titled '熱流動解析コントロールパラメータ' (Thermal Flow Analysis Control Parameters). It contains various settings for simulation parameters, including '非ニュートン反復計算回数' (Non-Newtonian iteration count) set to 100, '温度反復計算回数' (Temperature iteration count) set to 10, and '層分割数' (Layer division count) set to 10. A red arrow points to the '慣性効果考慮' (Inertial effect consideration) checkbox, which is checked. Next to it is the 'Power law index' field, which contains the value '1'. Other options include '構造連成解析' (Structural coupling analysis) with '非実行' (Not executed) selected, and '粘弾性計算' (Viscoelastic calculation) with '非実行' (Not executed) selected.

The right window is titled '非ニュートン純粘性モデルフィット' (Non-Newtonian pure viscosity model fit). It displays the power law model equation: $\eta = a \exp(-b(T - T_r)) \dot{\gamma}^{c-1}$, $\eta_0 = \eta_{0,T_r} \exp(-b(T - T_r))$. Below the equation, the 'モデルパラメータ' (Model parameters) are listed: '粘度a' (Viscosity a) = 15371.92 Pa, '温度係数b' (Temperature coefficient b) = 0.01016441 /°C, '指数c' (Index c) = 0.5447686, '基準温度Tr' (Reference temperature Tr) = 150 °C, and 'ゼロせん断粘度 η_{0,T_r} ' (Zero shear rate viscosity η_{0,T_r}) = 1000000.0 Pa. A red box highlights the '指数c' field. The window also shows a 'モデル特性グラフ' (Model characteristic graph) plotting Log(Viscosity) (Pa·s) on the y-axis against Log(Strain rate) (1/s) on the x-axis. The graph shows several data series with different symbols and colors, representing different simulation conditions. The bottom right of the window contains 'グラフプロットコントロール' (Graph plot control) and '粘度フィッティングパラメータ設定' (Viscosity fitting parameter settings).

1-3) テスト解析

図1に示すテスト解析モデルを採用し、慣性効果評価機能の動作確認を行いました。

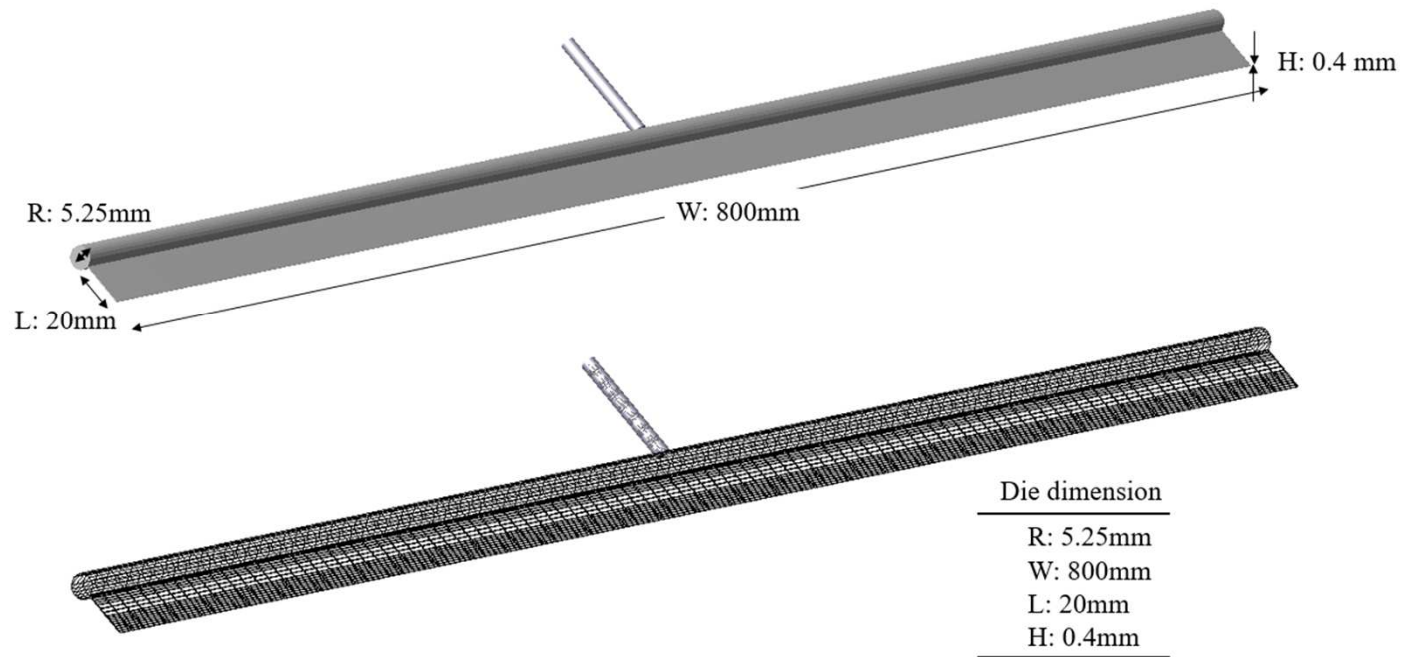


図1 テスト解析モデル

表1にケーススタディーで採用した解析条件の一覧を示します。粘度が1000Pa・s 程度の標準的な熔融樹脂の流動状態を評価する際には、従来通り慣性効果を見ても差し支えありません。慣性効果は1mPa・s (0.001Pa・s)程度の低粘度材料の流動状態を評価する際に重要です。

表1 ケーススタディー一覧

Case	Viscosity [Pa · s]	Inertia effect
1	1	Neglected
2	0.001	Neglected
3	0.001	Considered

Extrusion flow rate : 200 kg/h

図2に圧力分布の解析結果を示します。Case1とCase2の解析結果に示す様にニュートン流体の場合、慣性効果を見落とすと圧力の分布傾向は変化せず、圧力の絶対値が粘度に比例する結果が得られます。粘度と流量を共通に設定し、慣性効果を考慮するとCase2とCase3の解析結果が示す様に圧力の分布傾向と絶対値が共に変化します。慣性効果を見落したCase2では、マニフォールド流路の中心部の圧力が端部よりも高く評価されているのに対し、解析効果を考慮したCase3では、逆に端部の圧力が高くなる傾向が示されています。

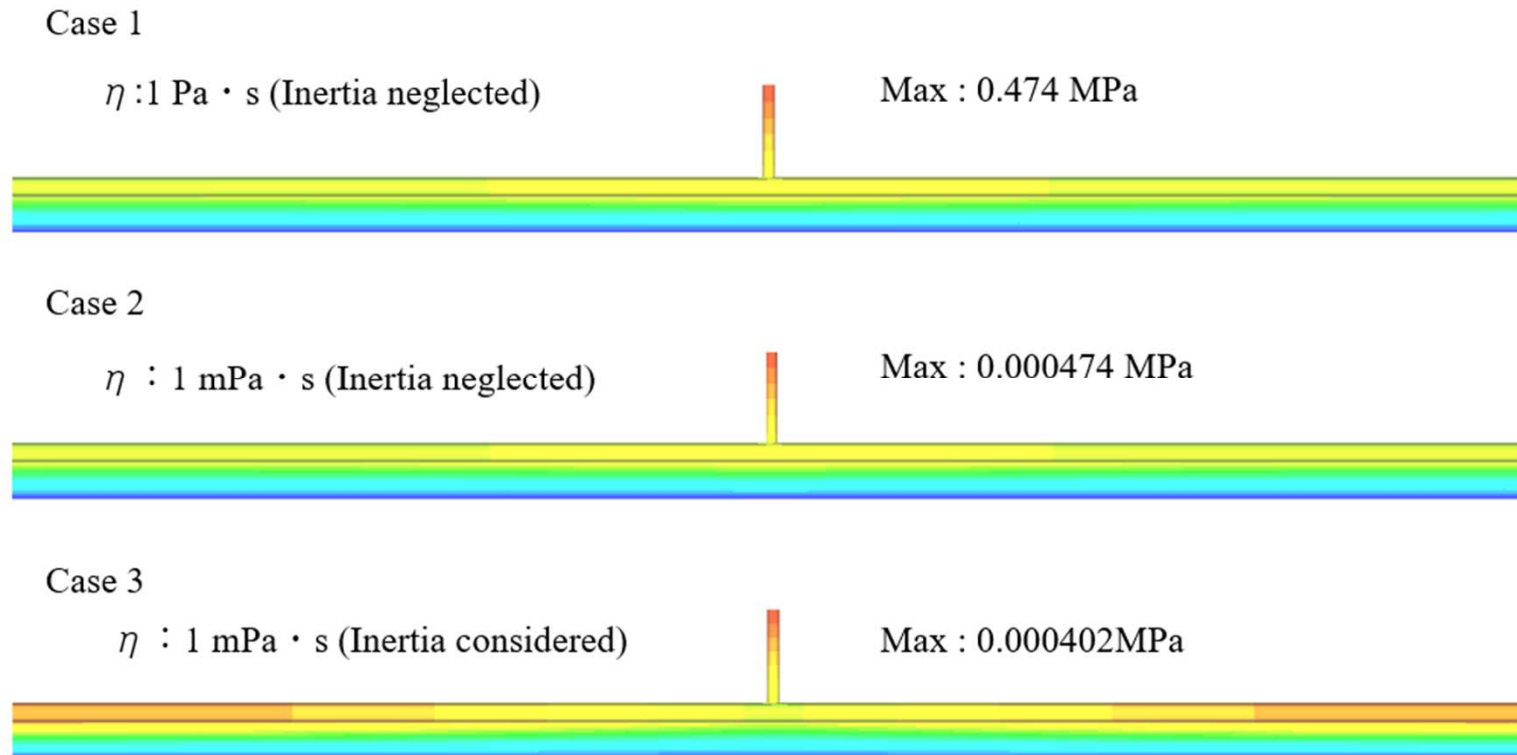


図2 圧力分布解析結果

図3にダイ流出口で予測された流束(単位幅方向の流量)分布の比較を示します。各ケースで採用した流量条件は共通のため、流量に相当する流束分布の幅方向の積分値は等しくなります。ニュートン流体の場合、Case 1とCase 2の解析結果に示す様に、慣性効果を見捨てて粘度を変化させても流束分布は変わりません。流束は流動長が短く、圧力勾配が最も大きくなる中心部が端部よりも多くなります。一方、Case 2とCase 3の解析結果に示す様に、慣性効果を考慮すると粘度を一定としても流束分布が変化します。慣性効果を無視したCase 1とCase 2とは逆に、慣性効果を考慮したCase 3では、端部への流量配分が中心部よりも増加しています。慣性効果がマニフォールド流路内で端部方向に偏向した流れを直進させる効果を示すことが、このような流束分布傾向の差に表れると考えられます。圧力分布や流束分布に観られる慣性効果の影響は、定性的に妥当に評価されており、慣性効果機能の正常動作が確認されました。

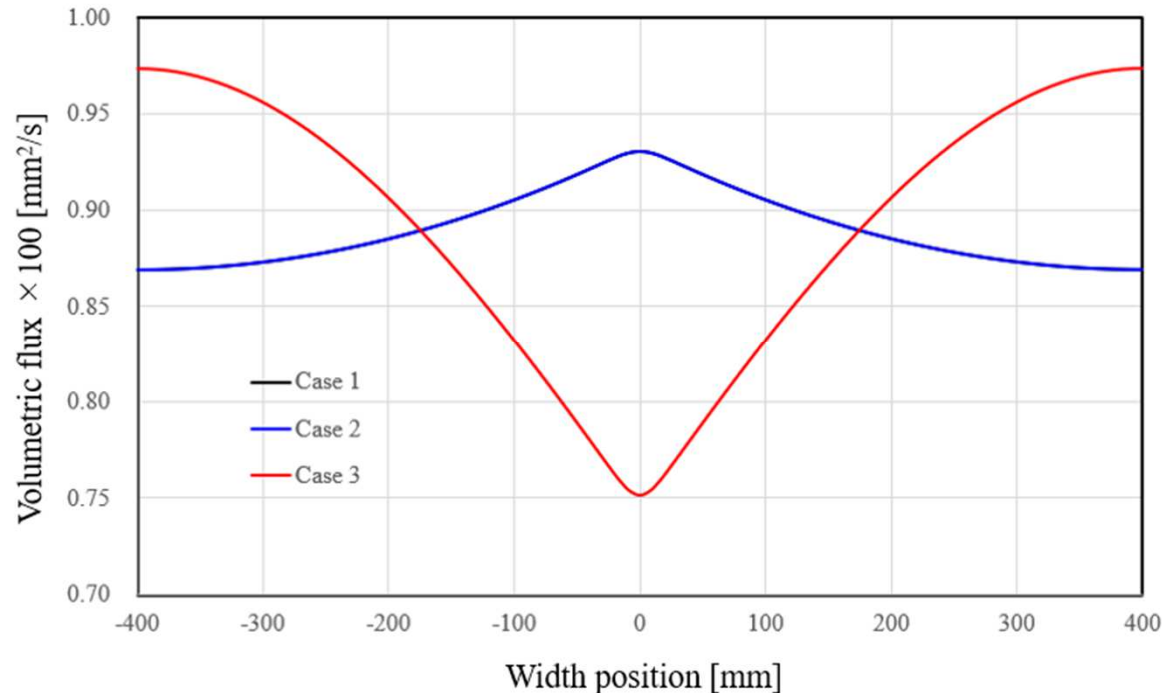


図3 ダイ流出口における流束分布解析結果

2) コントロールボリューム法を利用した滞留時間解析機能

従来、滞留時間の計算ではVOF法を採用していました。VOF法では、体積分率 F に対する輸送方程式

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla F = 0 \quad (1)$$

を非定常的に解析し、着目する要素の体積分率 F が閾値0.5以上になった時刻を、その要素に到達するために要した滞留時間としていました。当解法では、非定常解析の計算時間刻みを適切に設定する必要があります。計算時間刻みを適正值よりも長く設定すると計算精度が低下し、予想外の結果が得られます。また、解析モデルの要素分割を密にすると計算時間刻みを短くする必要があり、非定常解析の計算サイクル数の増加に伴って、結果を得るまでに要する時間も増大するという問題点がありました。新しく実装した滞留時間の解析機能では、滞留時間 t_{res} の物質導関数が1になるという基本的な性質を表現する定常輸送方程式

$$\frac{Dt_{res}}{Dt} = \mathbf{v} \cdot \nabla t_{res} = 1 \quad (2)$$

のコントロールボリューム法を利用した定常解析を通じて、滞留時間が評価されます。従来のVOF法を利用した非定常解析と比較して、計算時間刻みの調整や体積分率 F が不要であり、定常方程式を一度解析すれば滞留時間が評価可能なため、計算時間も大幅に短縮されます。

滞留時間の解析法は、熱流動解析コントロールパネル内のラジオボタンを切り替えて選択します。FVM法ラジオボタンをONとすると新規実装したコントロールボリューム法が選択されます。VOF法(旧Ver)ラジオボタンをONとすると従来のVOF法が選択されます。

熱流動解析コントロールパラメータ

熱流動計算パラメータ

非ニュートン反復計算回数 構造連成解析
 実行
 非実行

温度反復計算回数

層分割数 最適化計算
 実行
 非実行

慣性効果考慮 Power law index

Film casting 計算
 実行
 非実行

滞留時間分布計算
 FVM法
 VOF法(旧Ver)

粘弾性計算
 実行
 非実行

← 滞留時間解析法選択
ラジオボタン

図4に各解析法を利用した滞留時間解析結果の比較を示します。滞留時間の分布傾向は類似していますが、両者間で定量的に有意な差が観られます。VOF法を利用する際、解析結果の厳密性を追求すると計算時間刻みや要素分割密度が解析結果に及ぼす影響を吟味する必要があります。一方、コントロールボリューム法では計算用の調整パラメータが不要なため、解析結果の品質は要素分割密度のみに依存します。運用が容易で一度の定常解析で滞留時間分布が評価可能であることを理由として、今後の運用ではコントロールボリューム法の利用を推奨します。

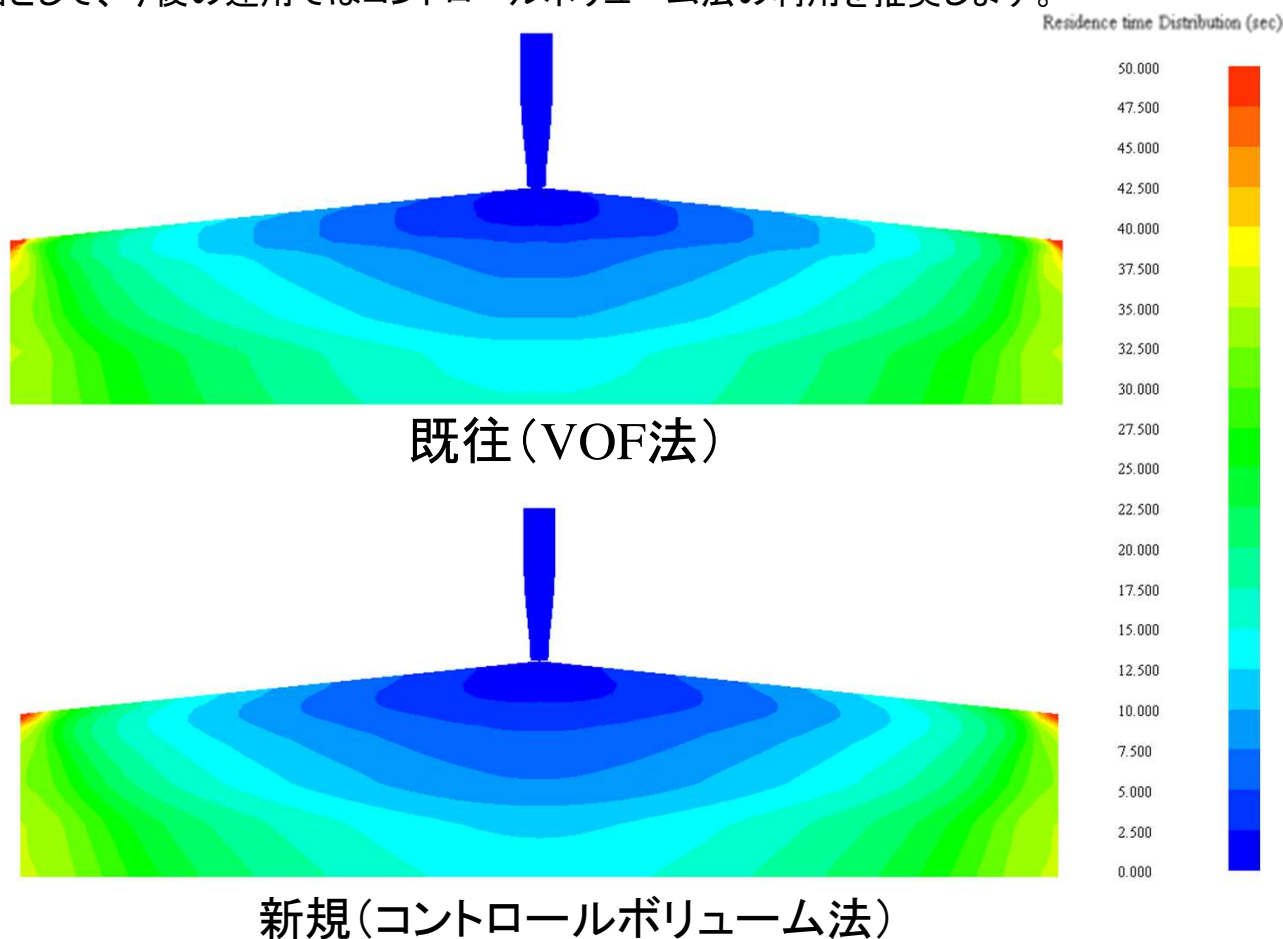


図4 滞留時間解析結果の比較

3) ユーザニーズ対応改良機能

3-1-1) 最適化情報の解析用メッシュ情報へのマッピング機能

最適化解析を実行するとダイ流出口での流束分布を均一化するためのリップクリアランスや温調条件の最適化条件の予測が可能です。しかしながら、最適化解析で利用した元の解析用メッシュ情報は変更を受けません。図5に示す様に最適化解析で予測された最適リップクリアランスや最適温調条件を元の解析用メッシュ情報に簡便に転写する機能を実装しました。

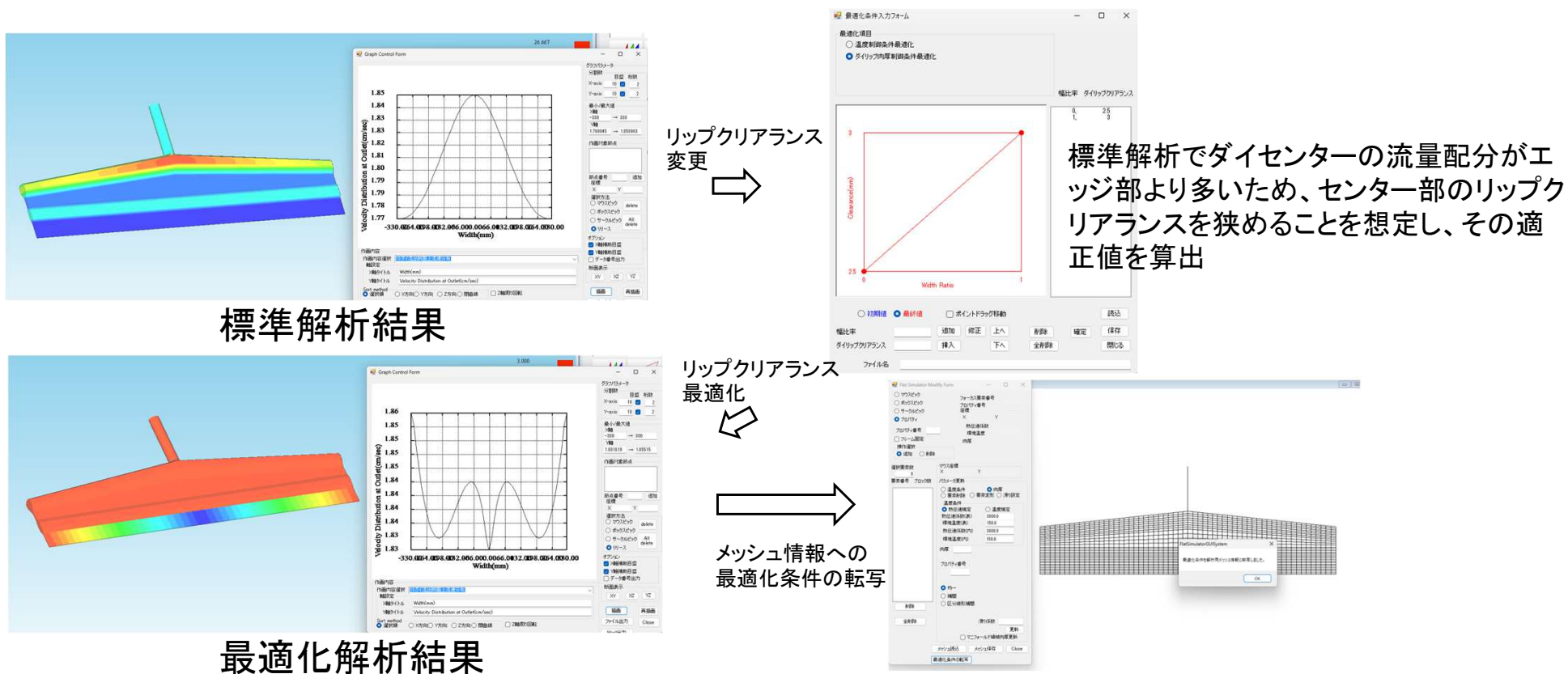


図5 最適化条件マッピング機能

3-1-2) 最適化情報マッピング機能の運用方法

① 従来通りの運用方法に従って、最適化解析を実施

従来は、最適化の各レベルで解析結果が解析結果ファイル名+最適化レベル数+拡張子:rstの名称のファイルに出力されていました。今回の改良では、各レベルで考慮されている要素肉厚と温調条件を解析結果ファイル名+最適化レベル数+拡張子:optminfのファイルに出力することとしました。

testopt0001.rst	2024/01/17 10:56	RST ファイル	3,793 KB	testopt0001.optminf	2024/01/17 10:56	OPTMINF ファイル	133 KB
testopt0002.rst	2024/01/17 10:56	RST ファイル	3,793 KB	testopt0002.optminf	2024/01/17 10:56	OPTMINF ファイル	133 KB
testopt0003.rst	2024/01/17 10:56	RST ファイル	3,793 KB	testopt0003.optminf	2024/01/17 10:56	OPTMINF ファイル	133 KB
testopt0004.rst	2024/01/17 10:56	RST ファイル	3,793 KB	testopt0004.optminf	2024/01/17 10:56	OPTMINF ファイル	133 KB
testopt0005.rst	2024/01/17 10:56	RST ファイル	3,793 KB	testopt0005.optminf	2024/01/17 10:56	OPTMINF ファイル	133 KB
testopt0006.rst	2024/01/17 10:56	RST ファイル	3,793 KB	testopt0006.optminf	2024/01/17 10:56	OPTMINF ファイル	133 KB
testopt0007.rst	2024/01/17 10:56	RST ファイル	3,793 KB	testopt0007.optminf	2024/01/17 10:56	OPTMINF ファイル	133 KB
testopt0008.rst	2024/01/17 10:57	RST ファイル	3,793 KB	testopt0008.optminf	2024/01/17 10:57	OPTMINF ファイル	133 KB
testopt0009.rst	2024/01/17 10:57	RST ファイル	3,793 KB	testopt0009.optminf	2024/01/17 10:57	OPTMINF ファイル	133 KB
testopt0010.rst	2024/01/17 10:57	RST ファイル	3,793 KB	testopt0010.optminf	2024/01/17 10:57	OPTMINF ファイル	133 KB

各最適化レベルでの解析結果ファイル(既往)

各最適化レベルでの最適条件ファイル(新規追加)

図6 最適化条件マッピング用出力ファイル(拡張子optminf)

② 2.5Dメッシュ加工をプルダウン選択

プリプロセッサでFlat Simulator Templateを選択した後、修正/2.5D メッシュ加工をプルダウン選択します。表示されるフォーム内のメッシュ読込ボタンを押し、元の解析用メッシュファイル情報をインポートします。



図7 2.5Dメッシュ加工フォーム

③ 最適化条件のマッピング

新規実装された最適化条件の転写ボタンを押すと、下図に示す様に最適化条件ファイル(拡張子optminf)の一覧が表示されます。採用したい最適化レベルのファイルを選択し、開くボタンを押すと当最適条件の情報が解析用メッシュに転写されます。

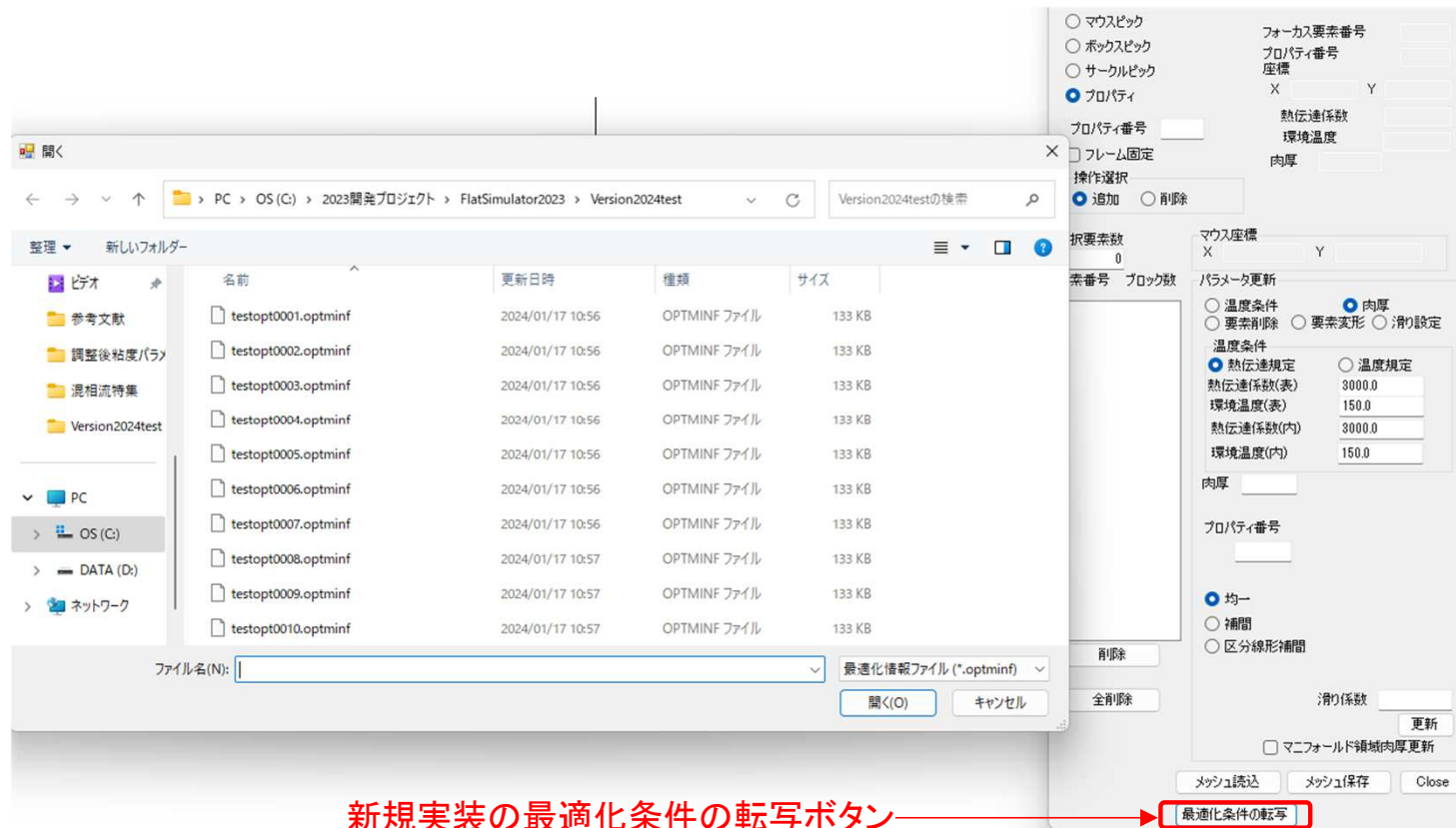


図8 新規実装された最適化条件の転写ボタン

④ 最適化条件転写後の解析用メッシュ情報の保存

最適化情報が転写されると、その旨メッセージボックスが表示されますので、OKボタンを押します。メッシュ保存ボタンを押して適当な名称のファイル名を付けてメッシュ情報を保存します。このメッシュ情報をご利用いただくと選択した最適化レベルの解析結果に相当する標準解析結果を得ることができます。

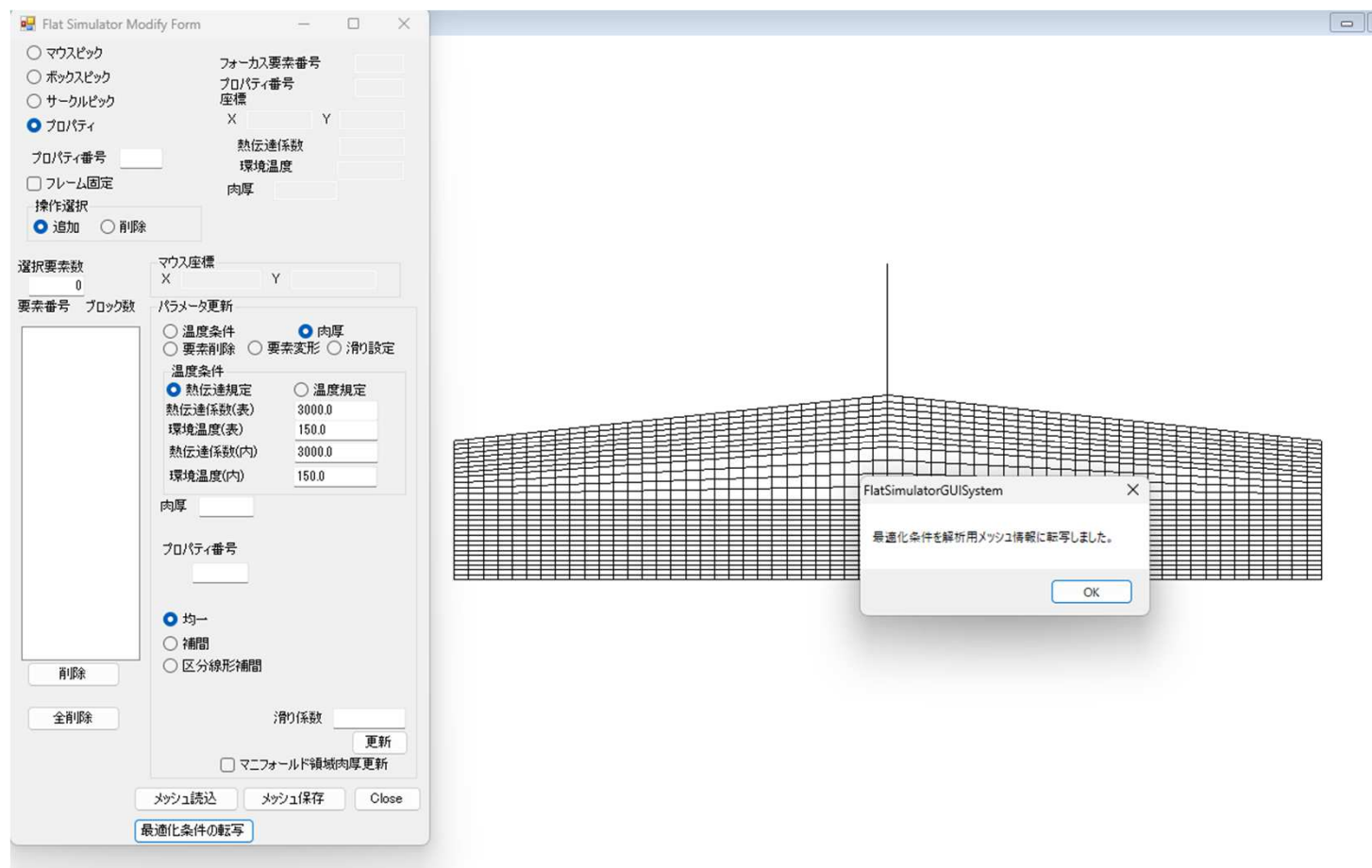
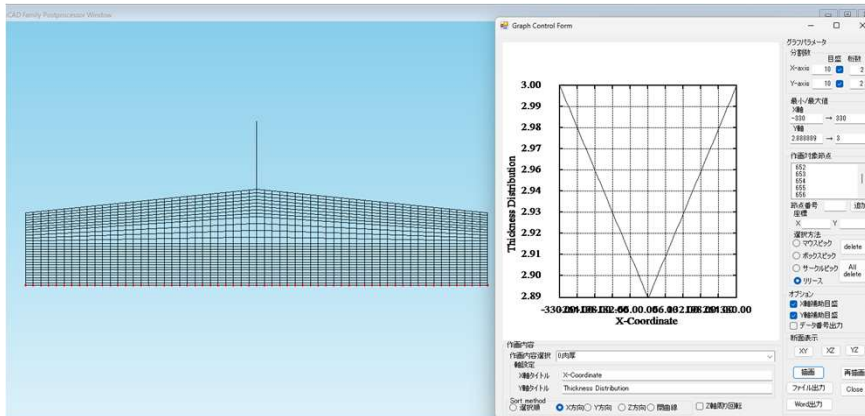


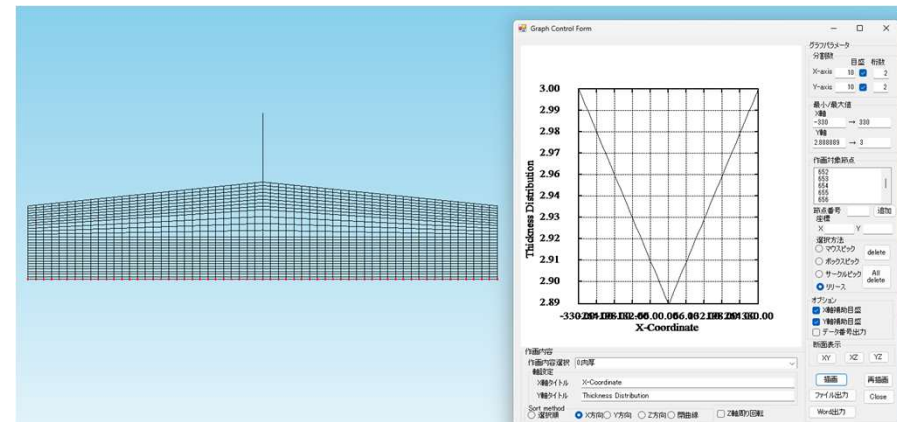
図9 最適化条件転写時に出力されるメッセージボックス

3-1-3) 動作確認

前述のマッピング機能を利用し、最適解(レベル3)の情報を解析用メッシュに転写しました。下図に示す様に最適化解析の結果と最適化条件転写後の標準解析で得られるリップクリアランス分布は等しく設定されていることが分かります。



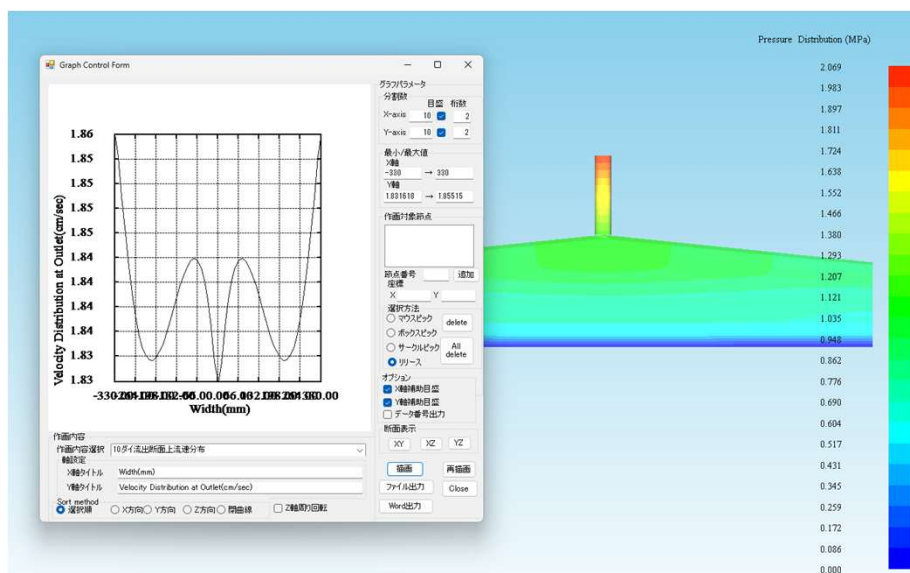
最適解:レベル3の解析結果



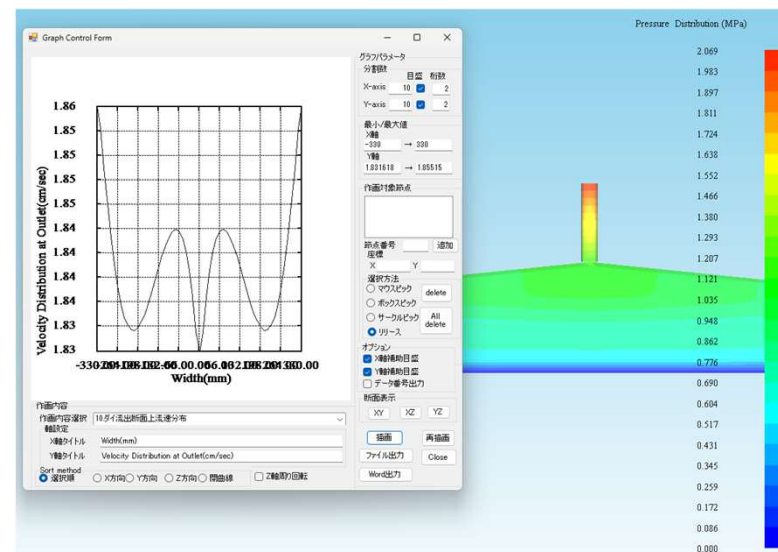
最適化条件転写後のメッシュ情報を利用した標準解析結果

図10 最適化条件とその転写情報の比較

また、両ケースで圧力とダイ流出口での流速分布が等しくなることを確認しました。当テスト解析では、ニュートン流体を採用しています。非ニュートン流体では、未収束の場合、要素肉厚や温調条件を等しくしても粘度が異なるため、解析結果に差が生じる場合があります。そのような場合には、非ニュートン計算反復回数をデフォルト値10より増加させて下さい。



最適解: レベル3の解析結果



最適化条件転写後のメッシュ情報を利用した標準解析結果

図11 最適化解析結果と最適化条件転写後の標準解析結果の比較

3-2-1) 編集情報ファイルを利用した計算節点位置の一括更新機能

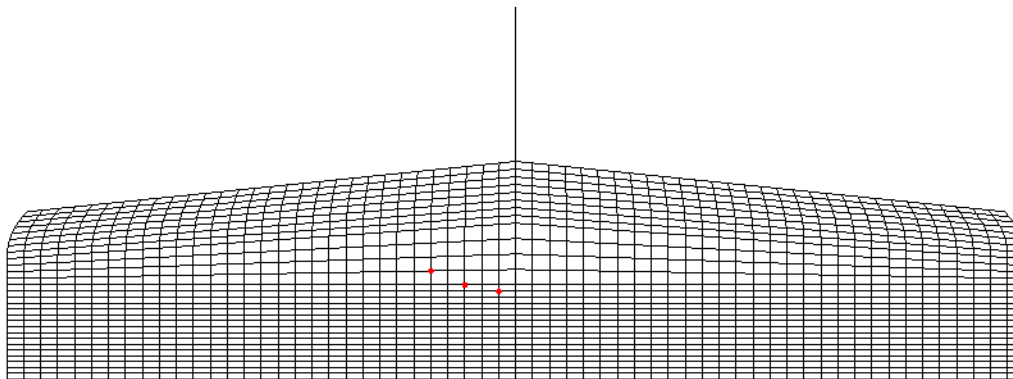
修正/2.5D節点加工フォームにおいてエクセルCSVファイルの保存、読込機能を新規実装しました。

図12 2.5D節点加工フォーム

CSVファイルを読み込、座標を更新するには、予めCSVファイルの内容として、節点番号、移動後の x , y 座標の情報を準備する必要があります。移動節点番号とその座標は、マウスクリック/ボックスピック/サークルピックなどの操作で選択し、リストボックスに登録されます。この登録情報を情報保存ボタンを押して任意名のエクセルCSVファイルに保存します。この保存ファイルをエクセルで編集し、座標を更新し、別名のエクセルCSVファイルに保存します。この保存ファイルを情報読み込みボタンを押して当フォームに読み込みます。読み込み情報を用いて更新ボタンを押すと、座標指定のみが有効です(相対変位指定は無効)。また、対称移動チェックボックスをONとすると左側領域の節点を移動すると右側領域の節点が対称的に移動します。当機能を利用すると左側領域のみの節点情報を選択/編集することで、対称的な節点移動が可能です。Undoボタンを押すと直前の状態に復帰します。

3-2-2) 計算節点位置の一括更新機能の運用方法

- ① 移動対象とする節点を選択し、リストボックスに節点番号と座標を登録します。



本運用例では、左側領域に3点を選択しています。



② 情報保存ボタンを押し、リストボックスに登録されている節点番号と座標を任意名称のエクセルCSVファイルに保存します。

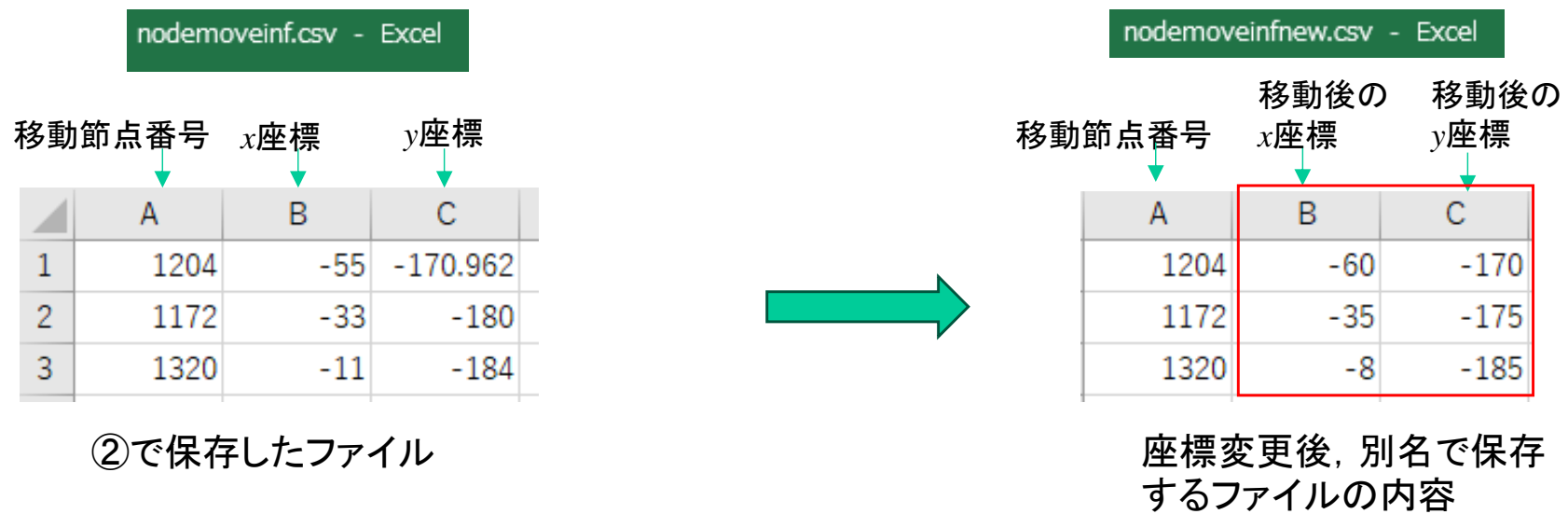
The image shows two overlapping windows. The left window is a 'Save As' dialog box in Windows, showing the file explorer for 'flatdemo' on the desktop. It lists two files: 'nodemoveinf.csv' and 'nodemoveinfnew.csv'. The file name field is set to 'nodemoveinf.csv'. A red arrow points from a text annotation to this field.

The right window is titled '2.5D節点加工' (2.5D Node Processing). It contains various settings for node movement and simulation. A red arrow points from a text annotation to the '情報保存' (Save Information) button at the bottom of the window.

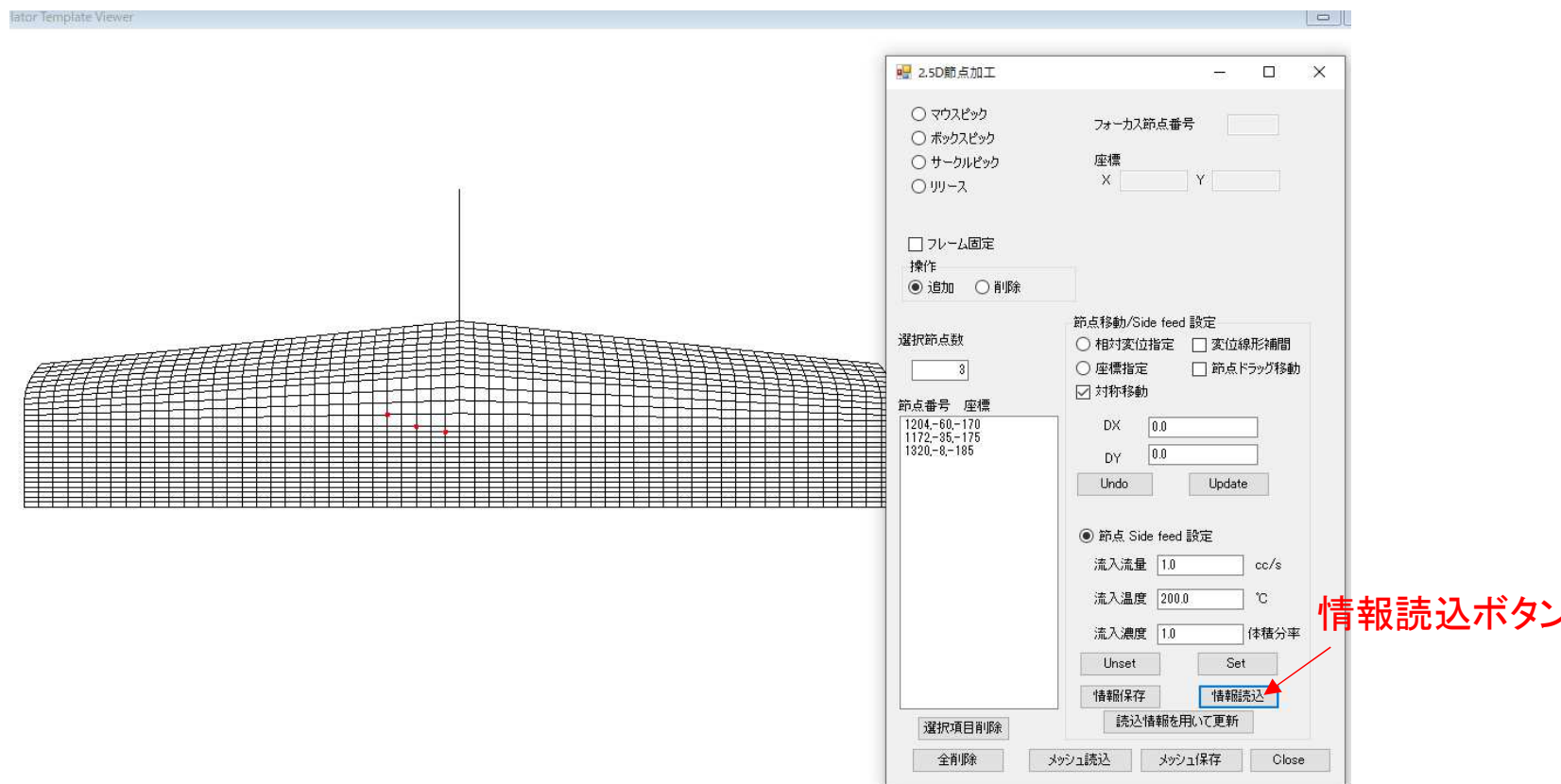
任意名を指定(拡張子csvは自動的に付加されるので不要)

情報保存ボタン

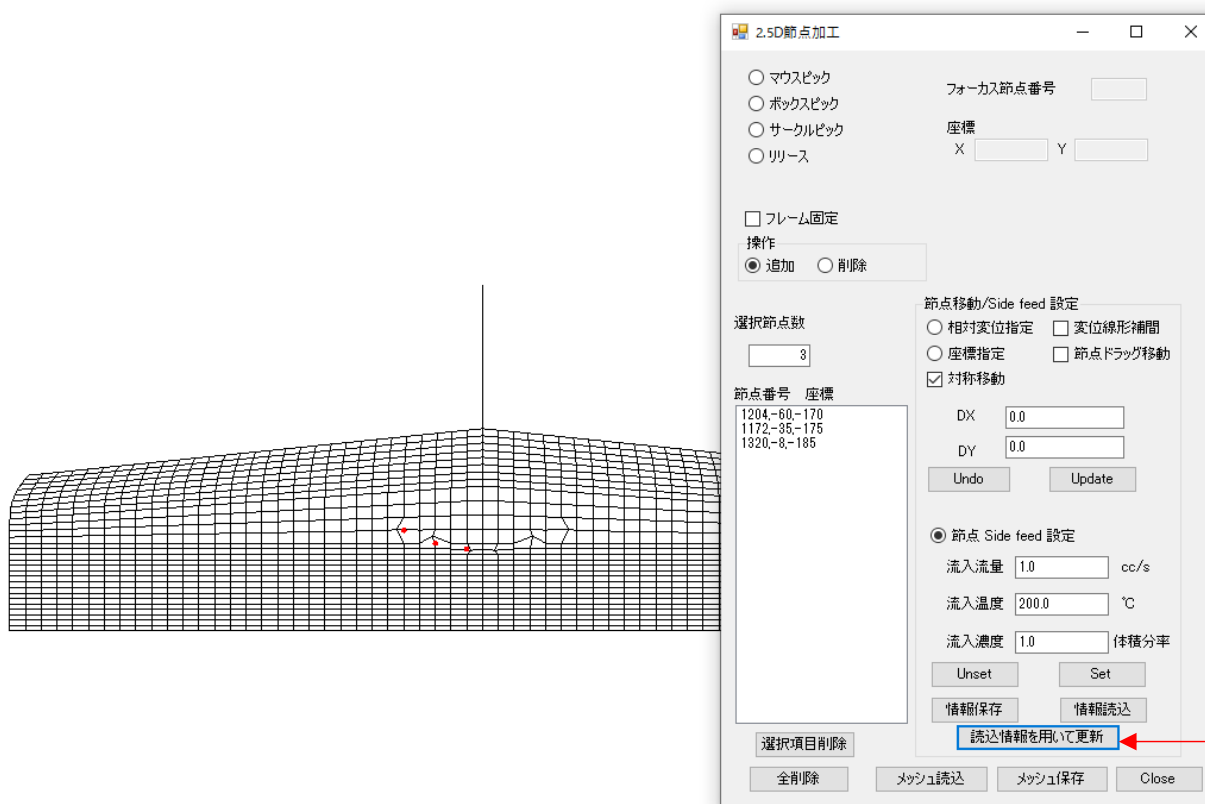
③ エクセルで②で保存したCSVファイルを読み込み、座標値を適切に更新し、別名で保存。



④ 再度、2.5D節点加工フォームでメッシュ情報を読み込みます。更に③で作成したファイルを情報読込ボタンを押してフォーム内に読み込みます（注: エクセルでオープン状態にあるファイルは読み込まません。クローズ状態にした後、当操作を行って下さい。）。



⑤ 読込情報を用いて更新ボタンを押すとリストボックスに登録されている節点が指定座標位置に移動します。メッシュ保存ボタンを押して節点移動後のメッシュ情報を保存し、解析で利用します。



読込情報を用いて更新ボタン

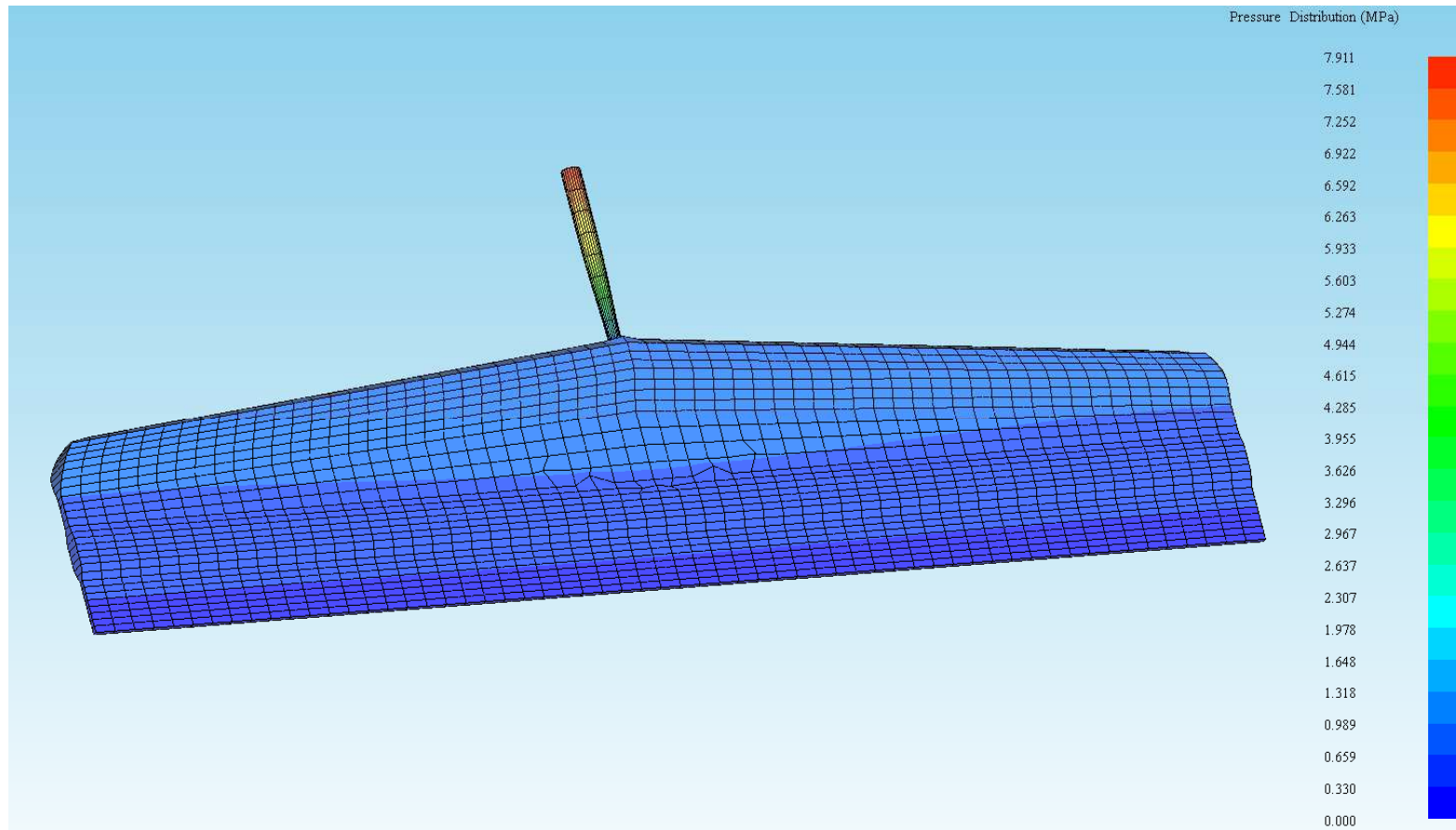


図13 節点座標一括更新機能の動作確認結果

3-3) ダイ流出口における流束(単位幅方向の流量)分布グラフ作画項目追加

グラフの作画項目に17.流出口流束分布が追加されました。当情報は、ダイ流出口の単位当たりの流量を表します。下流側フィルムキャストと領域でのネックインによるフィルム押出形状が変化や固化に伴う密度変化を無視すると、当情報をフィルムの引き取り速度で除した値が層厚に相当します。

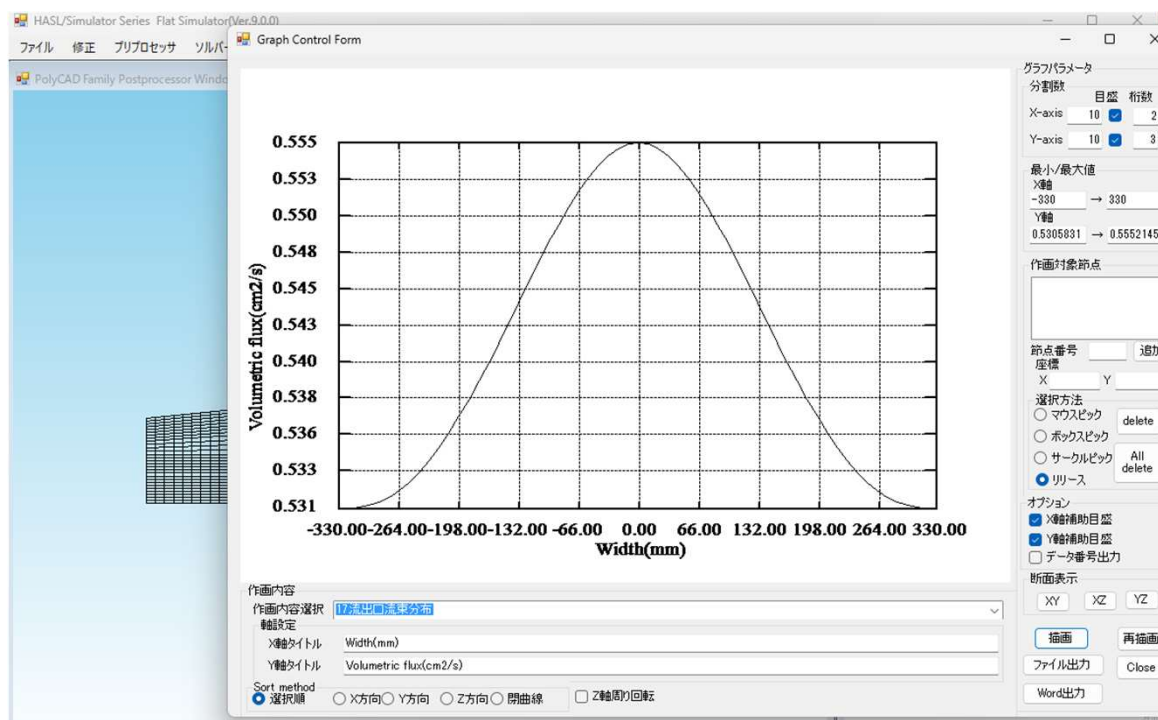


図14 グラフ作画追加項目:流出口流束分布