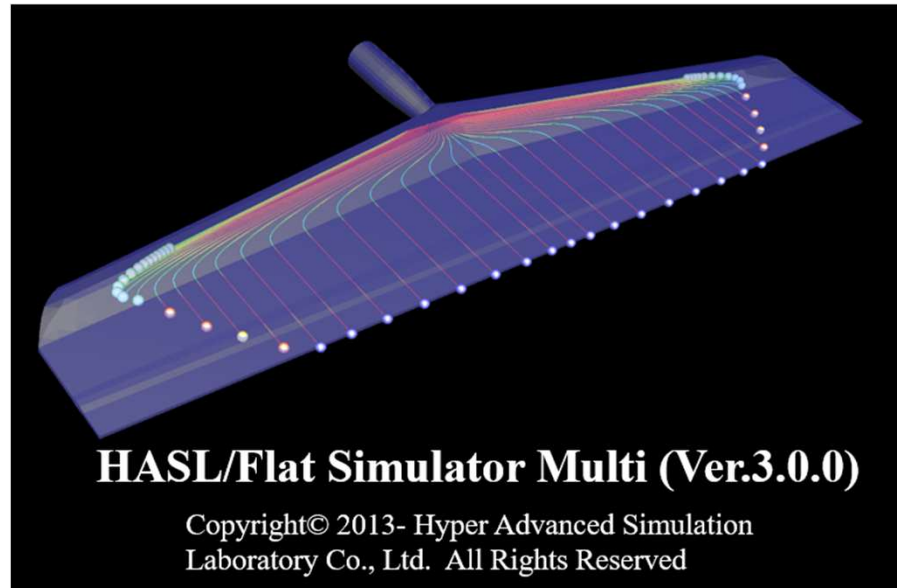


---

# Flat Simulator Multi (Ver.3.0.0)

## 改良成果資料



2024/5

株式会社HASL

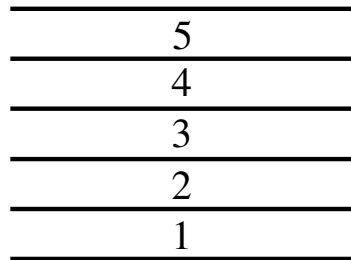
## はじめに

Flat Simulator Multi (Ver.3.0.0) では、解析プログラムとプリポスト機能の改良開発に取り組みました。以下に各改良成果とその運用方法について解説します。

- 1) 逐次合流形式への発達多層解析機能(Developing solver)改良
- 2) 完全発達多層解析機能(Fully developed solver)改良
- 3) プリポスト機能改良
  - 3-1) 2.5Dメッシュ追加機能の改良
  - 3-2) 層流束分布のグラフ作画機能

# 1) 逐次合流形式への完全多層解析機能 (Developing solver) 改良

多層流体の合流域を含む発達多層流動解析は、層数の増加に伴って収束解を得ることが難しくなります。5層発達多層流動を想定した場合、従来の発達多層解析法では、図1(a)に示す様に層番号に対して昇順(1→2→3→4→5の順序)に多層流動状態と界面の形成状態を評価していました。この計算手順は自然ですが、計算の過程では各層の流動状態や界面形成状態は正解とは乖離しており、計算誤差が蓄積されて層番号の大きな層に影響を及ぼし、最終的に計算が発散して解が得られない状況になります。特に対称性が崩れ、数値的な破綻を招くことが多いため、Ver.3.0.0に実装した発達多層解析法では、図1(b)に示す様に対称性を考慮し、表層側から中間層に向けて交互に解析を進める計算順序を採用しました。



(a) 既往計算手順  
1→2→3→4→5

(b) 新規計算手順  
1→5→2→4→3

図1 発達多層流動解析領域の計算順序の変更

多層流動領域の計算順序の変更が解析の収束性と品質に及ぼす影響を検討するため、図2に示す3種5層多層流動解析モデルを採用しました。

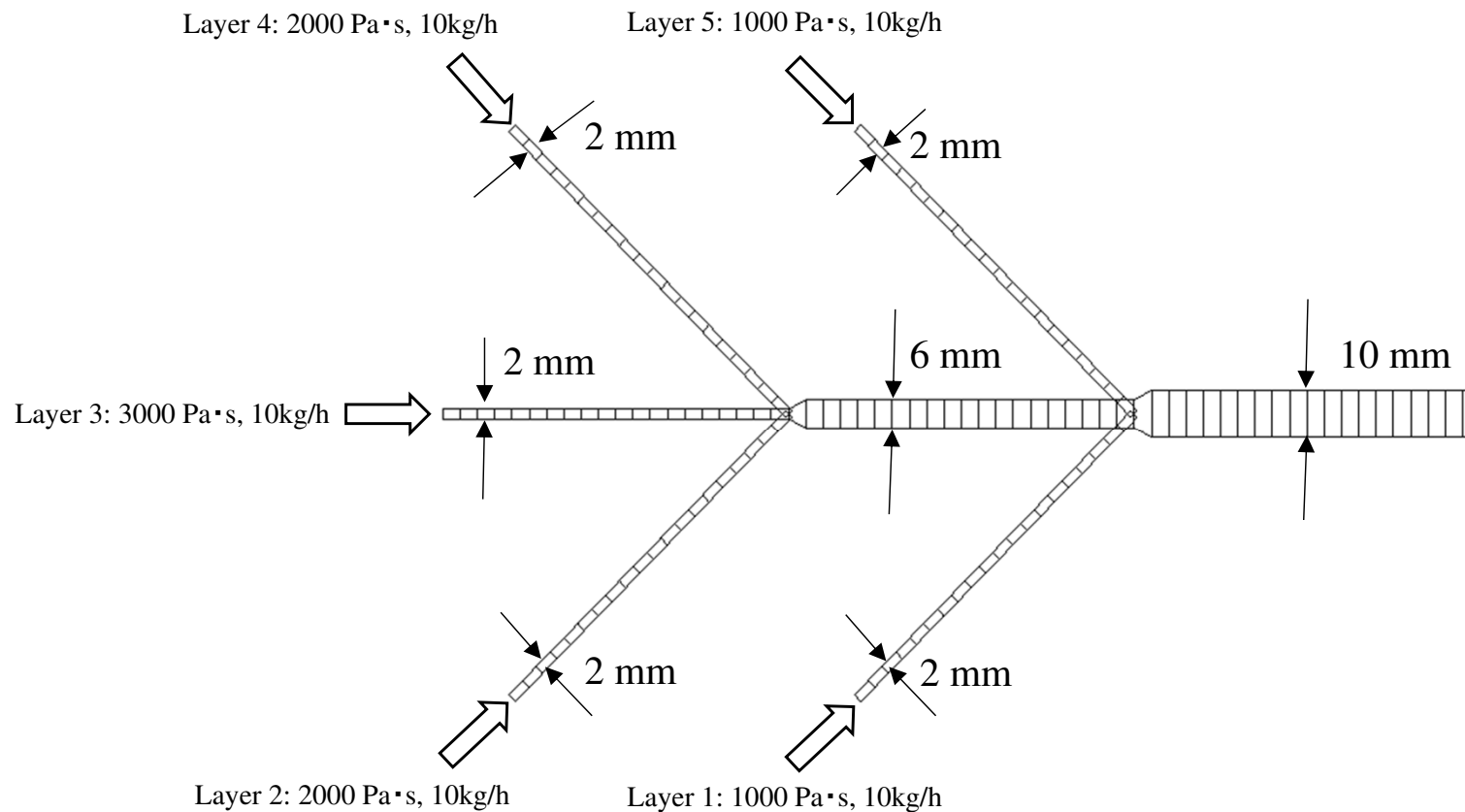


図2 3種5層多層流動解析モデル

テスト解析で採用した計算コントロールデータと多層解析条件は以下に示す通りです。

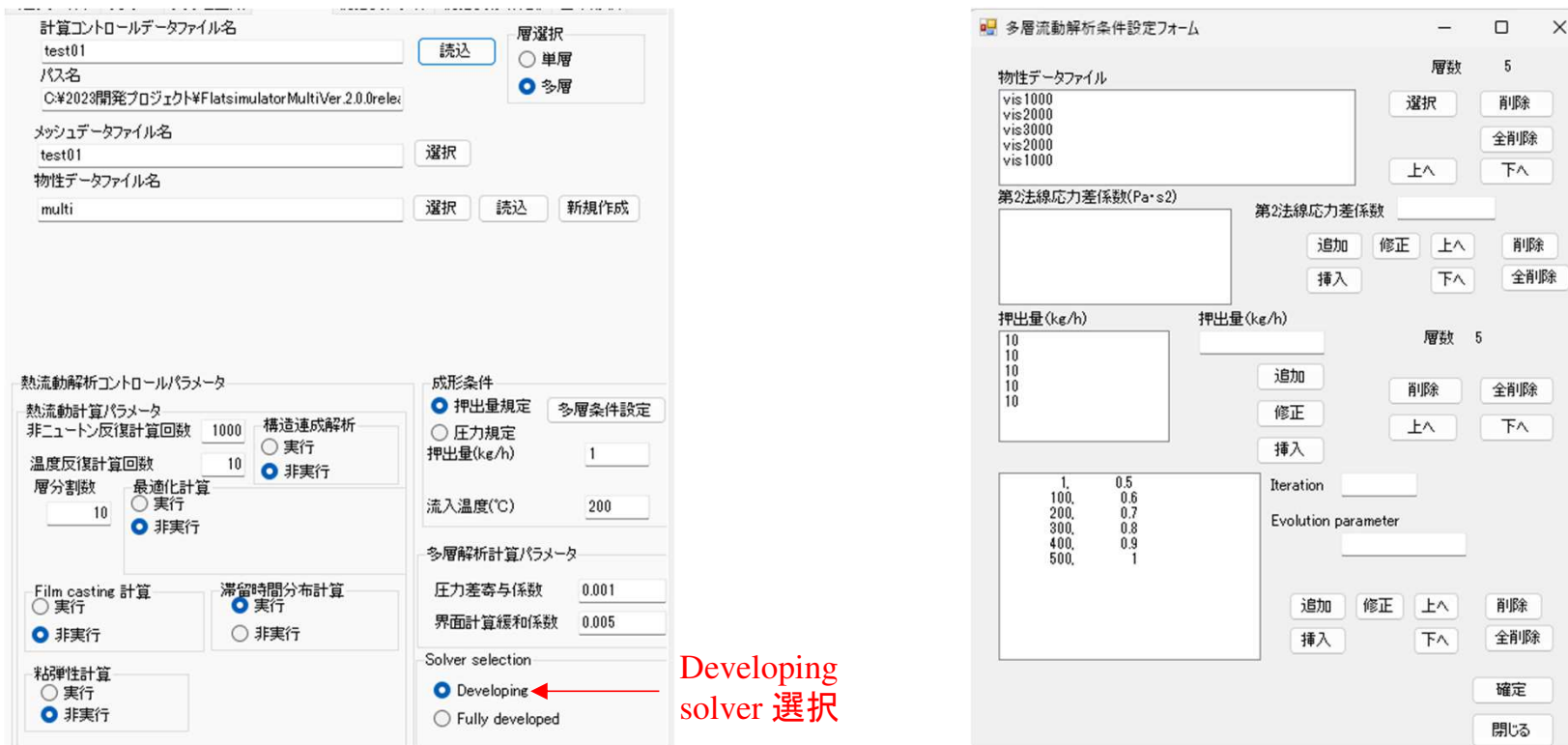


図3 計算コントロールデータと発達多層流動解析条件

Ver.3.0.0の新規多層解析機能(Developing solver)では、図3に示した条件を利用して収束解が得られます。各層の流量計算の相対誤差は図4に示す様に0.01%未満です。

```
Non-Newtonian Thermal Flow Calculation iter.=      1000
pcoefc=  1.000000
l=       1 qfluxsum cal = -3.575245      Relative error :  6.7557418E-03
l=       2 qfluxsum cal = -3.574979      Relative error :  6.9358060E-04
l=       3 qfluxsum cal = -3.575047      Relative error :  1.2271042E-03
l=       4 qfluxsum cal = -3.574979      Relative error :  6.9358060E-04
l=       5 qfluxsum cal = -3.575244      Relative error :  6.7223967E-03
```

図4 3種5層発達多層流動解析結果の流量保存精度(Ver.3.0.0 Developing solver)

一方、旧Ver.2.0.0の既往多層解析機能(Developing solver)では、図3に示した条件を利用すると図5に示す様に反復計算43サイクル時に3層目と4層目が押しつぶされて層厚が負になり計算がエラーストップします。このような場合に解析を続行するには、多層界面計算の緩和係数や相互作用効果を表現するエボルーションパラメータを低減するなどの調整が必要です。

```
pcoefc= 0.5000000
l=      1 qfluxsum cal = -4.013805   Relative error :   12.27415
l=      2 qfluxsum cal = -3.592477   Relative error :    0.4887676
l=      3 qfluxsum cal = -3.576702   Relative error :  4.7496933E-02
l=      4 qfluxsum cal = -3.484227   Relative error :    2.539205
l=      5 qfluxsum cal = -3.864003   Relative error :    8.083882
Non-Newtonian Thermal Flow Calculation iter.=      43
sumh<=0.0 in=      814 sumh= -7.5875968E-02 thicknlocal= 0.6000001
l=      2 thicknlayer(l,in)= 0.1655306
l=      3 thicknlayer(l,in)= -6.9818525E-03
l=      4 thicknlayer(l,in)= -0.2344247
Fortran Pause - Enter command<CR> or <CR> to continue.
```

図5 解析のエラーストップ

Ver.2.0.0を利用した反復計算40サイクル時の圧力分布は、図6(a)に示す様にLayer 2の圧力がLayer 4よりも高く対称性が崩れています。図6(b)は Ver.3.0.0を利用した反復計算1000サイクル時の収束解を表します。明らかにVer.3.0.0はVer.2.0.0と比較して解析の収束性と解析結果の対称性が向上していることが確認されました。また、解析結果の本質とは異なる表示上の問題点につきまして、Ver.2.0.0では逐次合流の下流側合流部の3D化表現流路形状が実形状とずれていたのに対し、Ver.3.0.0ではこの不備が解消されています。

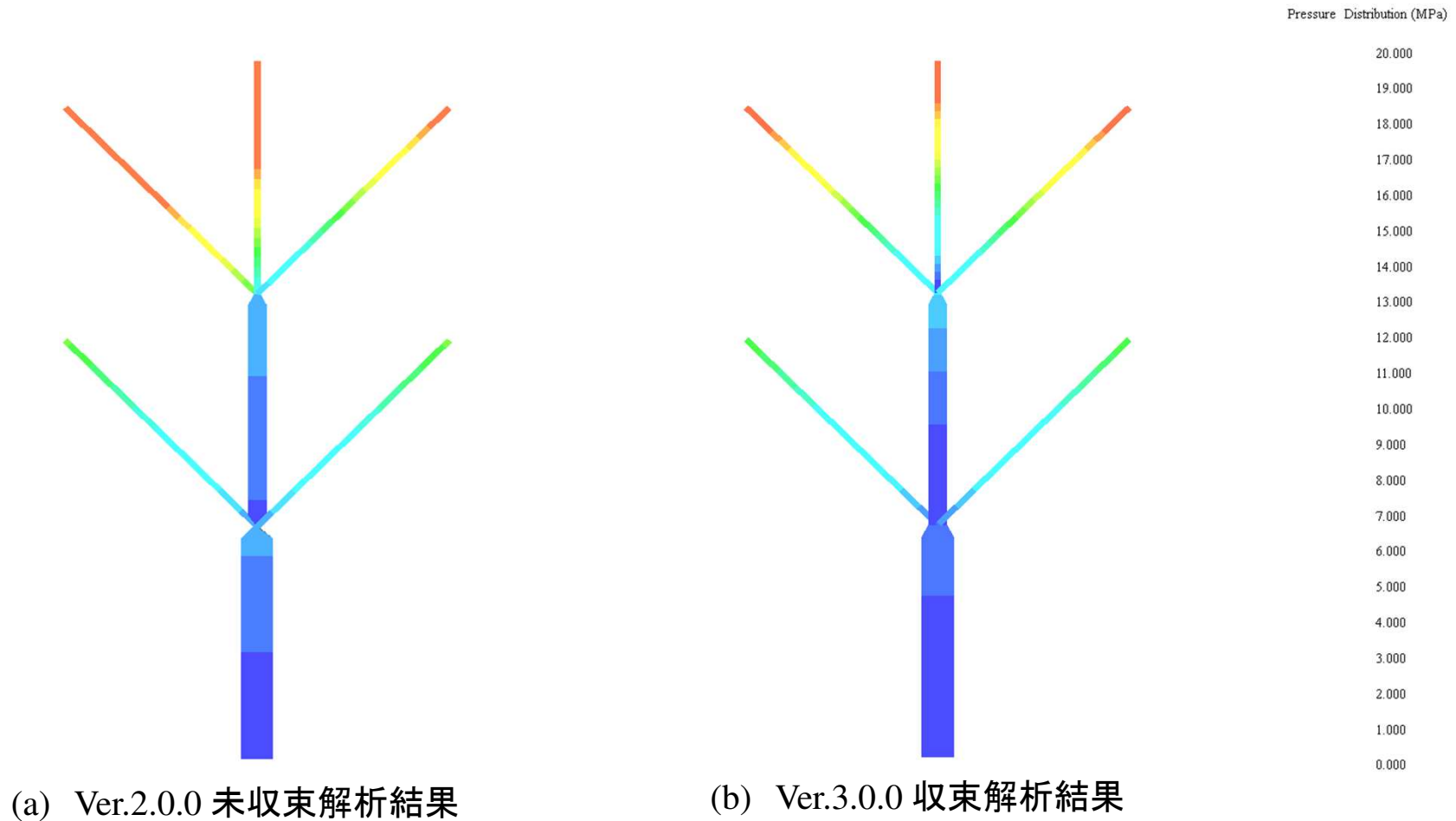


図6 圧力分布解析結果の比較



多層流動解析の難度が高いことは従来と変わりませんが、Ver3.0.0を利用すると、Ver.2.0.0では対応が難しかった図7に示すような大規模モデルに対しても収束解が得られるようになりました。

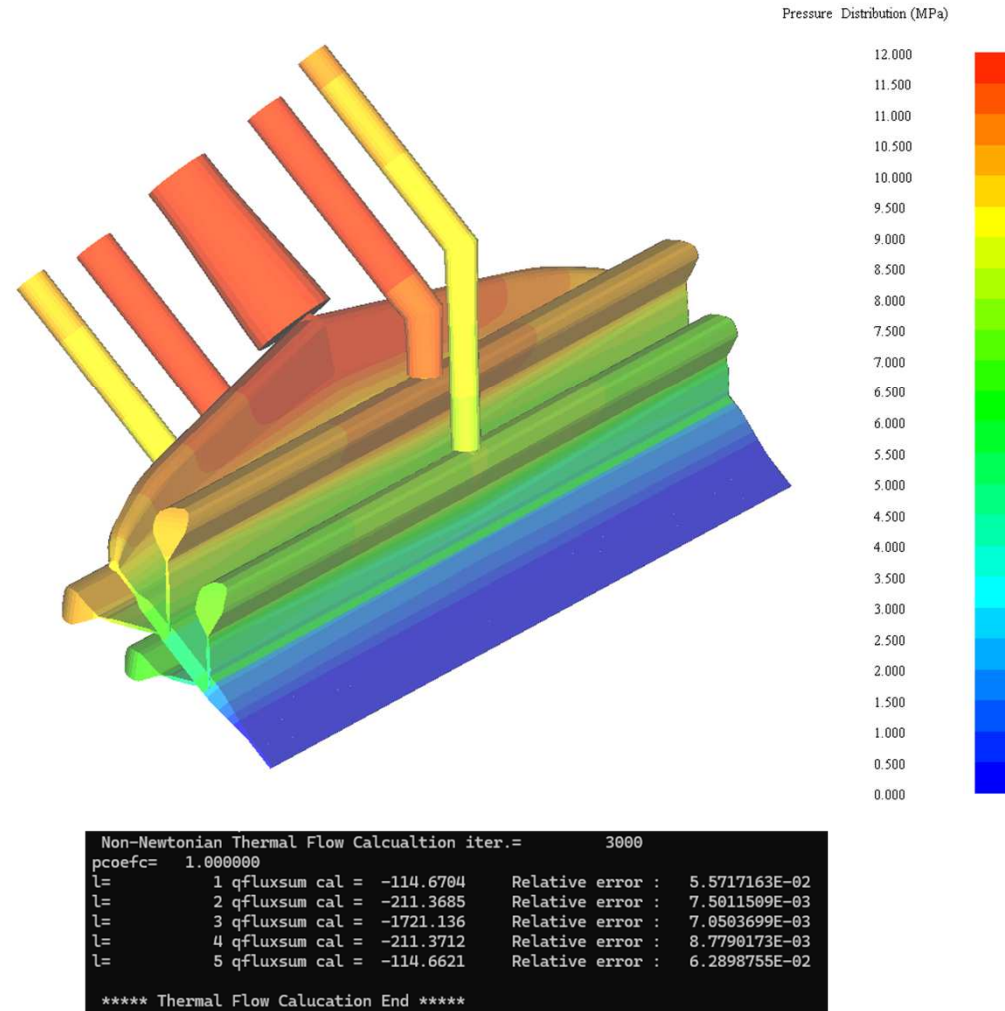


図7 3種5層逐次合流形式マルチマニフォールドダイ内多層熱流動解析  
(圧力分布, JCTIMES : 精誠模具機械有限公司殿ご提供資料)

## 2) 完全発達多層解析機能(Fully developed solver)改良

完全発達多層解析機能は、発達多層解析機能と連携して多層流動の全域を解析対象としますが、合流後の下流側領域での発達流れを解析対象とする場合、完全発達多層解析機能の単独利用が可能です。Ver.3.0.0では、完全発達多層解析機能の収束性も向上しました。完全発達多層解析機能の単独利用では、上流側に矩形断面流路を設けたコートハンガーダイをテンプレートで作成し利用可能なため、単層流体解析と同様、運用が容易です。3種5層完全発達多層流動を想定した運用方法について解説します。

完全発達多層流動解析モデルの作成では、基本形状タブメニューのMulti layer runner set チェックボックスをチェック状態とし、上流側矩形断面流路の半幅:Wrと流路深さ:Trをmm単位で指定します。その後のモデリングやメッシュ生成作業は、単層流体解析と共通です(但し、単層解析モデル作成時に必要になるランナー情報の設定は不要です)。

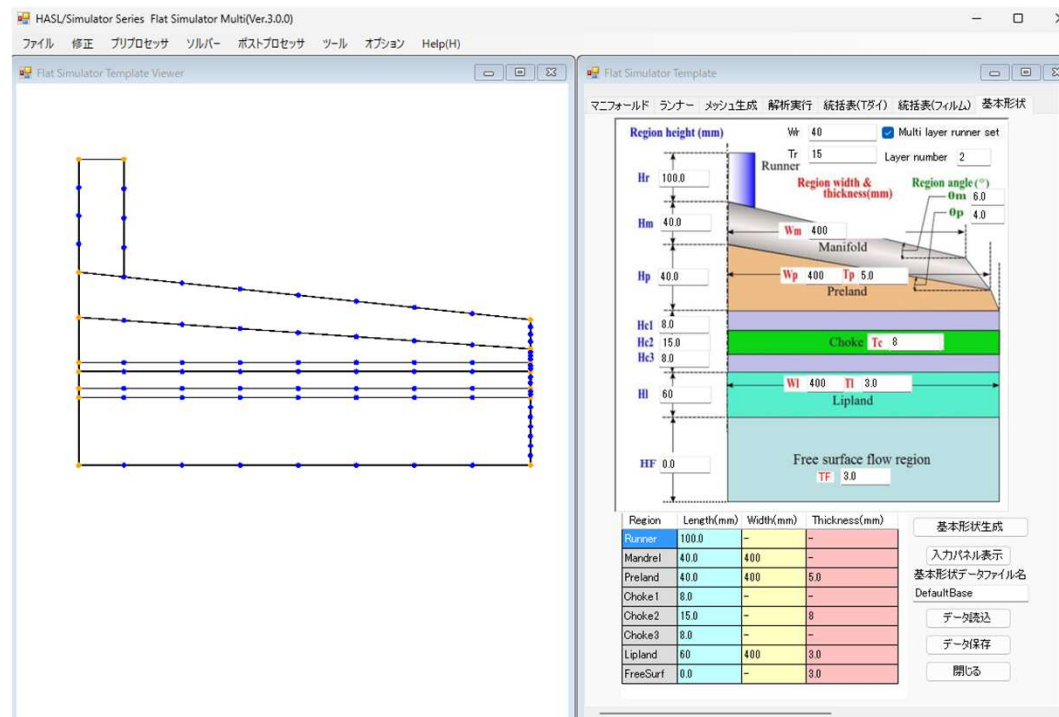


図7 完全発達多層流動解析モデル

単層流体モデル作成時と異なるのは、メッシュ生成後に修正/2.5Dメッシュ追加プルダウンメニュー選択時にポップアップ表示されるフォーム内でMesh modify ボタンを押し、Modification information パネル内でLayer configuration ラジオボタンをONとして最大層数と層構成を指定する操作です。層構成を設定する要素は、Box pick チェックボックスをチェック状態とし、全要素をボックス選択します。引き続き、流入口に流量規定(仮の非ゼロ値)と温度を設定します(テンプレートで作成したモデルには、流出口の圧力0条件が自動設定されています)。基本的な境界条件の設定では、流入口での各層の流量は幅方向に均一とされています。分布設定ボタンを押すと不均一な流量分布を設定することが可能になりますが、その操作方法については後に解説します。

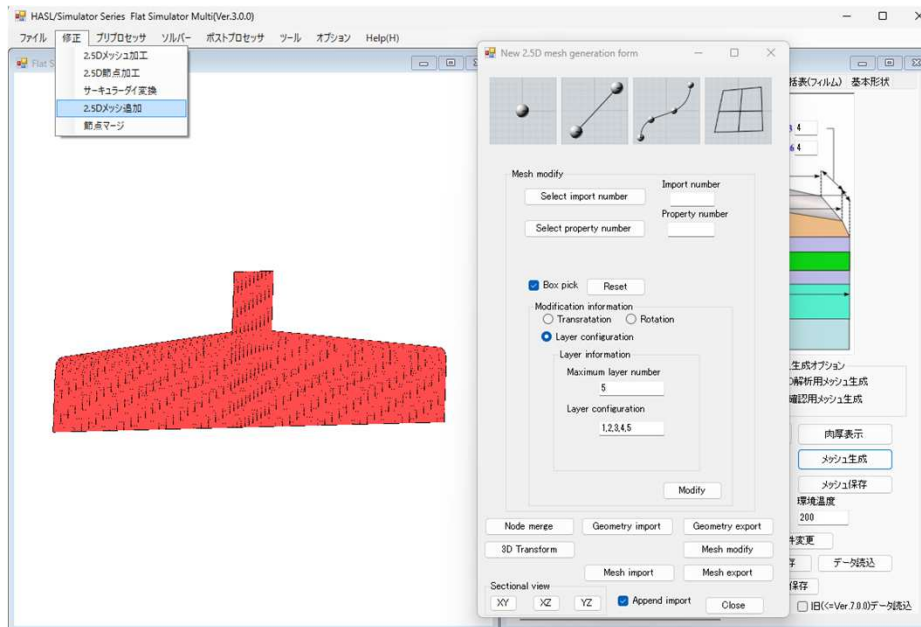


図8 層構成情報の設定

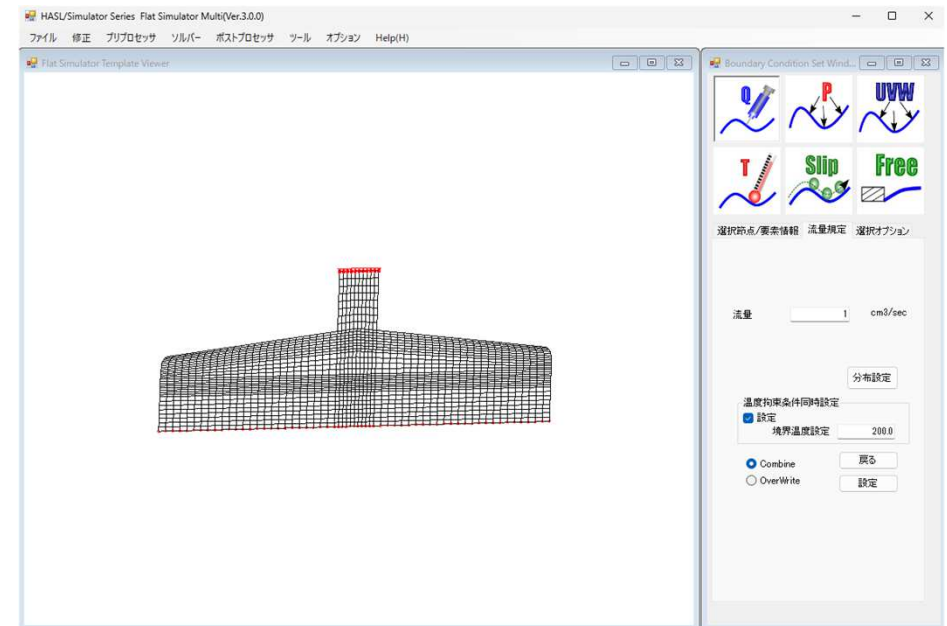


図9 流入口流量・温度規定条件の設定

完全発達多層流動解析機能の単独利用では、Fully developed ラジオボタンをONとし、Interface チェックボックスを非チェック状態とします。多層合流域を含む上流側を発達多層流動解析機能を利用して解析し、その結果を下流側に反映する場合には、Interface チェックボックスをチェック状態とし、表示されるインターフェイスファイル名に上流側解析結果ファイルを指定します。解析の際に調整が必要なのは界面計算緩和係数です。デフォルト値は0.3としていますが、層数が多い場合、粘度比や流量比が極端な設定で解析が正常終了しない場合、当緩和係数を低減することで問題が解消できる可能性があります。完全多層流動解析で設定する必要がある情報は、各層の材料物性ファイル(拡張子pro)と押出量条件です。エボリューションパラメータの設定は不要です。また、発達多層流動解析の場合、非ニュートン反復計算回数を数百～数千に設定しますが、完全多層流動解析の収束性は良く、数十回の設定で十分です。

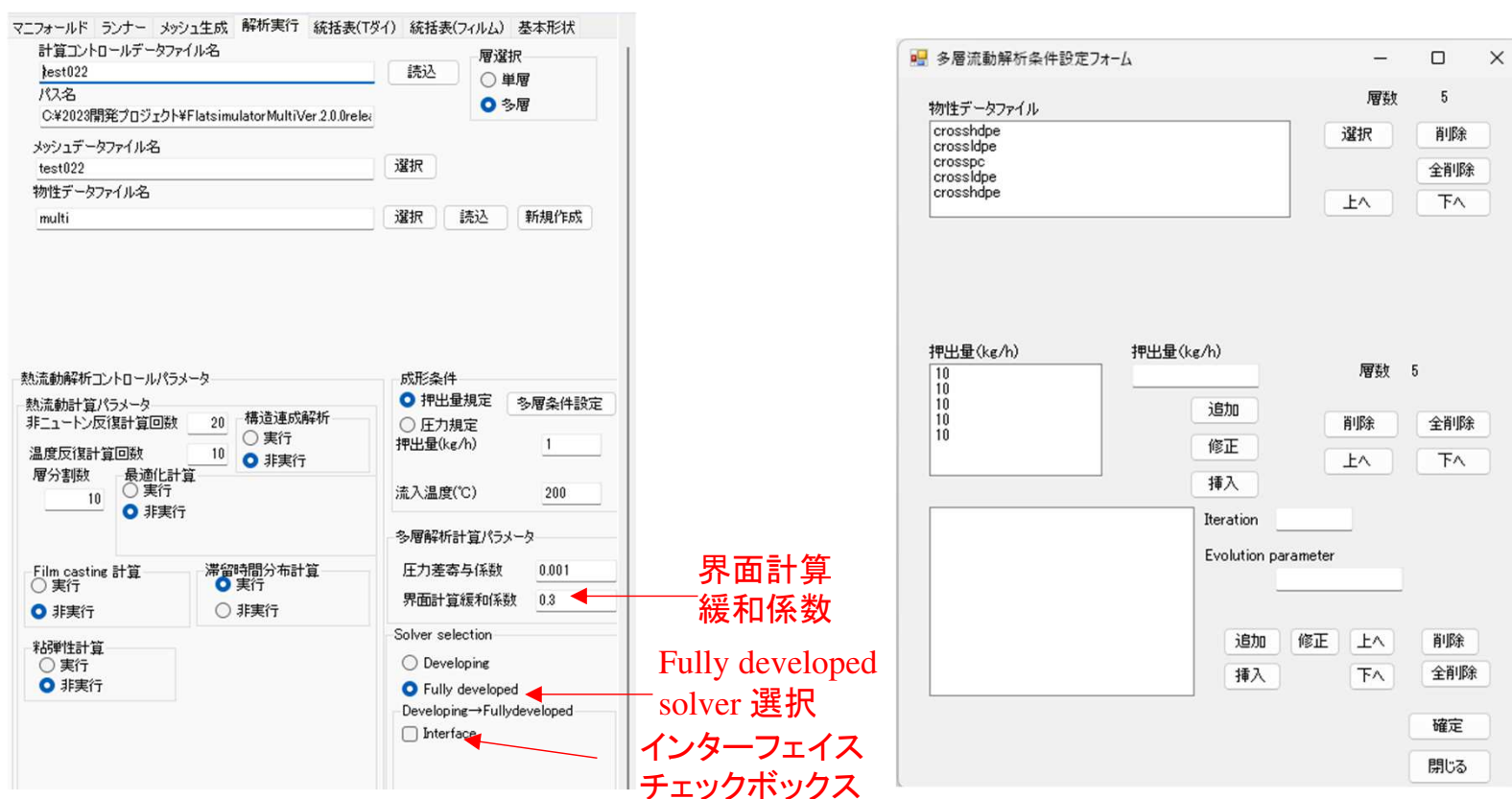


図10 計算コントロールデータと完全発達多層流動解析条件

以下に完全発達多層流動解析機能を利用した非ニュートン3種5層多層流動テストモデルの解析結果を示します。

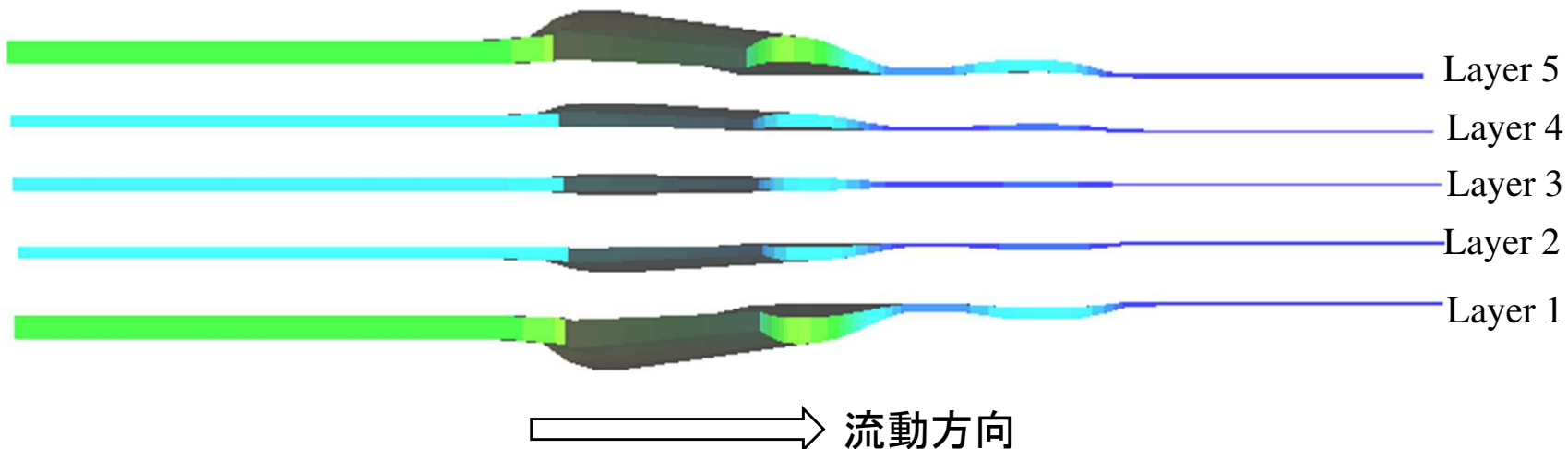


図11 層厚分布解析結果

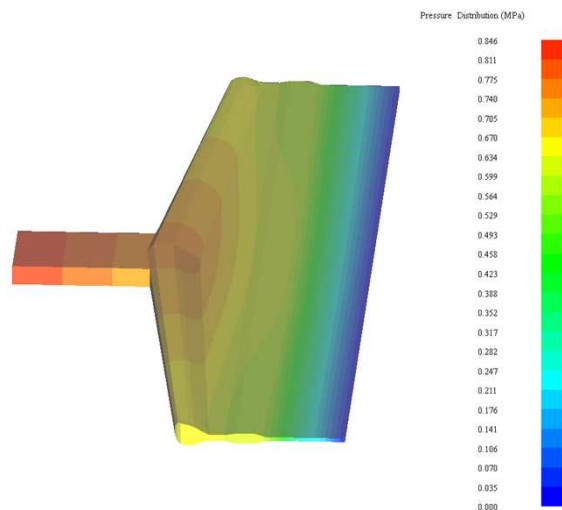
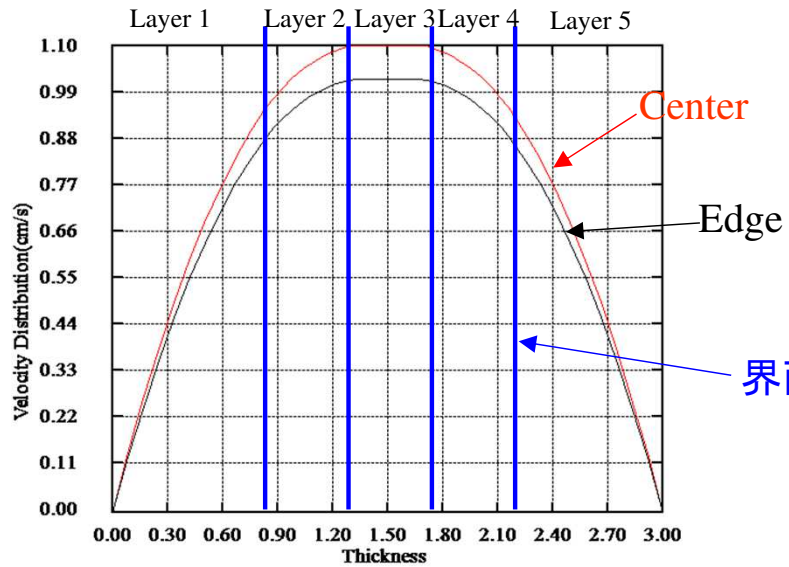
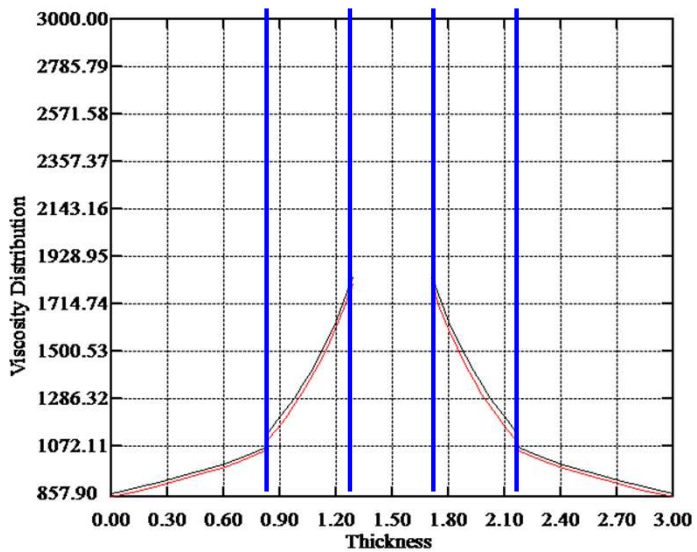


図12 圧力分布解析結果



層流速分布



層粘度分布

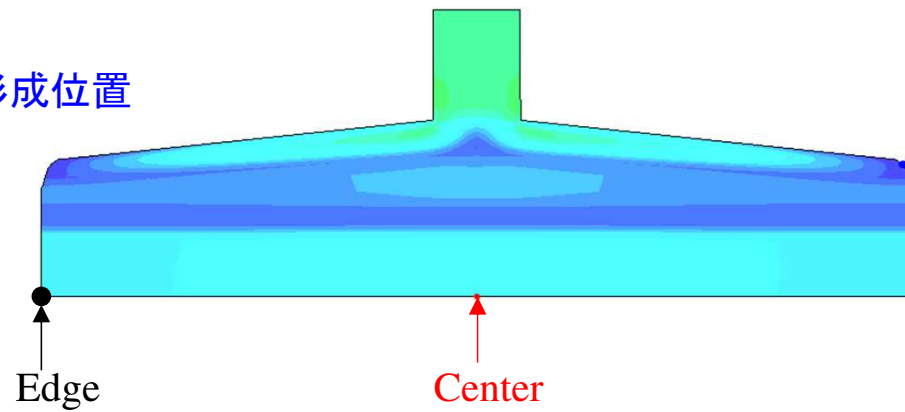


図13 ダイ流出口端部と中央部で予測された層流速分布と層粘度分布

Ver.3.0.0の新規完全発達多層解析機能(Fully developed solver)では、図10に示した条件を利用して収束解が得られます。各層の流量計算の相対誤差は図14に示す様に0.01%未満です。

```
Non-Newtonian Thermal Flow Calculation iter.=          20
λ=          1 qfluxsum cal = -3.607700      Relative error : 5.4259584E-03
λ=          2 qfluxsum cal = -3.607701      Relative error : 5.4590032E-03
λ=          3 qfluxsum cal = -3.607702      Relative error : 5.4788301E-03
λ=          4 qfluxsum cal = -3.607700      Relative error : 5.4391762E-03
λ=          5 qfluxsum cal = -3.607700      Relative error : 5.4391762E-03

***** Thermal Flow Calculation End *****
```

図14 3種5層完全発達多層流動解析結果の流量保存精度(Ver.3.0.0 Fully Developed solver)

流入口の幅方向への不均一な流量分布を設定した解析も可能です。ツール/Boundary Condition Set プルダウンメニューを選択した際に表示される境界条件設定ウインドウでQアイコンをマウスクリックします。流入口上節点をボックスピックで選択し、決定ボタンを押すと流量規定タブメニューに切り替わります。タブメニュー内の分布設定を押して表示される流量設定フォームで各層の流量分布を設定します。

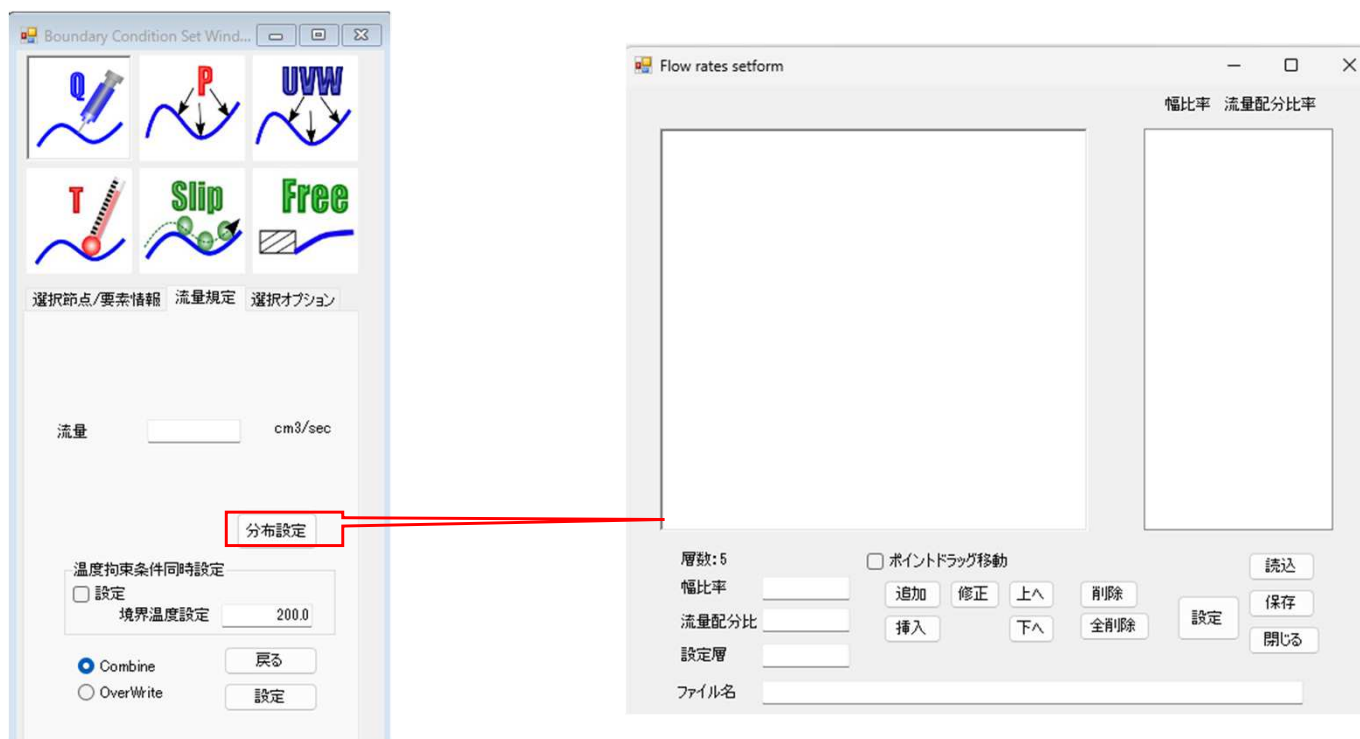
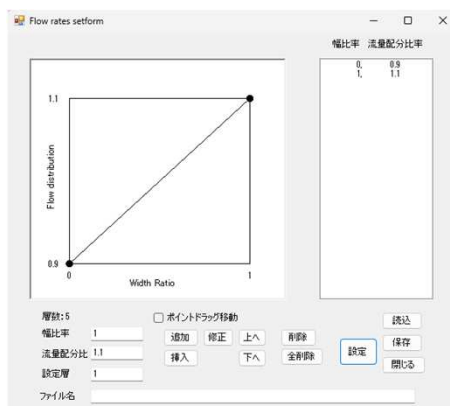


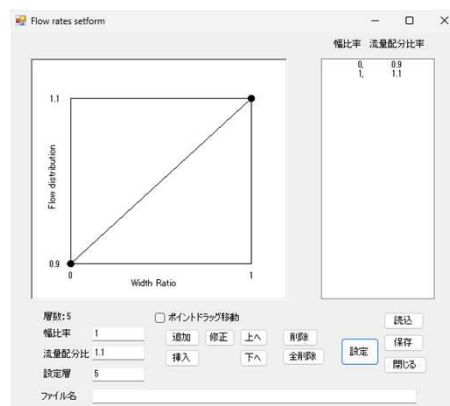
図15 流量分布設定フォーム



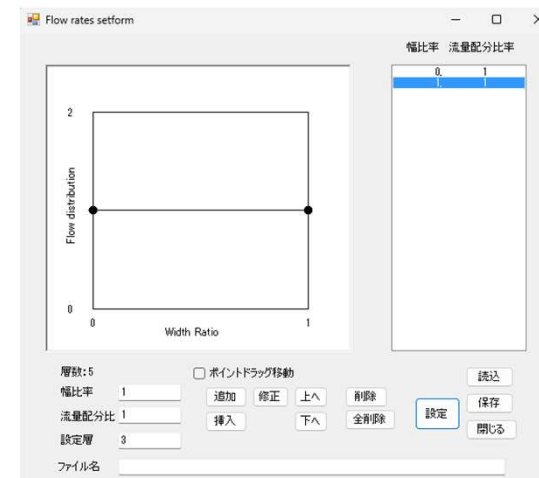
流量分布を設定した解析では、流量の最も大きい層が基準層として選択されます。以下に示す例では、基準層(Layer-3)の流量分布を均一とし、表層(Layer-1,5)では中心部から端部に向けて流量配分を増加、中間層(Layer-2,4)では、逆に流量配分を減少させる設定としています。このように流量分布は、幅比率と配分比を数値指定することで設定します。ここで幅比率とは、0が流入口での幅方向の中心部、1が端部を表します。



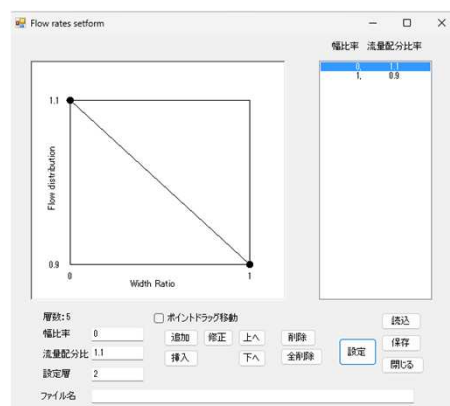
Layer-1



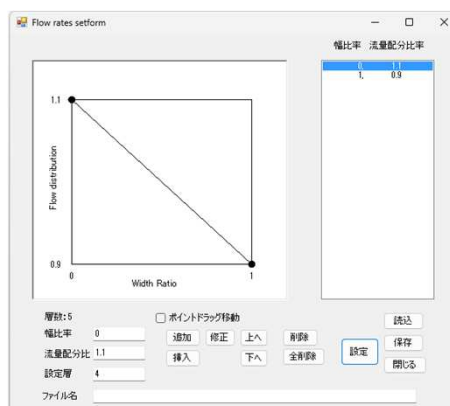
Layer-5



Layer-3



Layer-2



Layer-4

図16 流量分布設定例

流量が最も多い層が基準層として選択されます。流量が等しい場合、どの層が基準層に選択されているかわかりずらいので、下図に示す様に基準層に想定した層の流量を工学的に許容できる範囲内で増加させます。

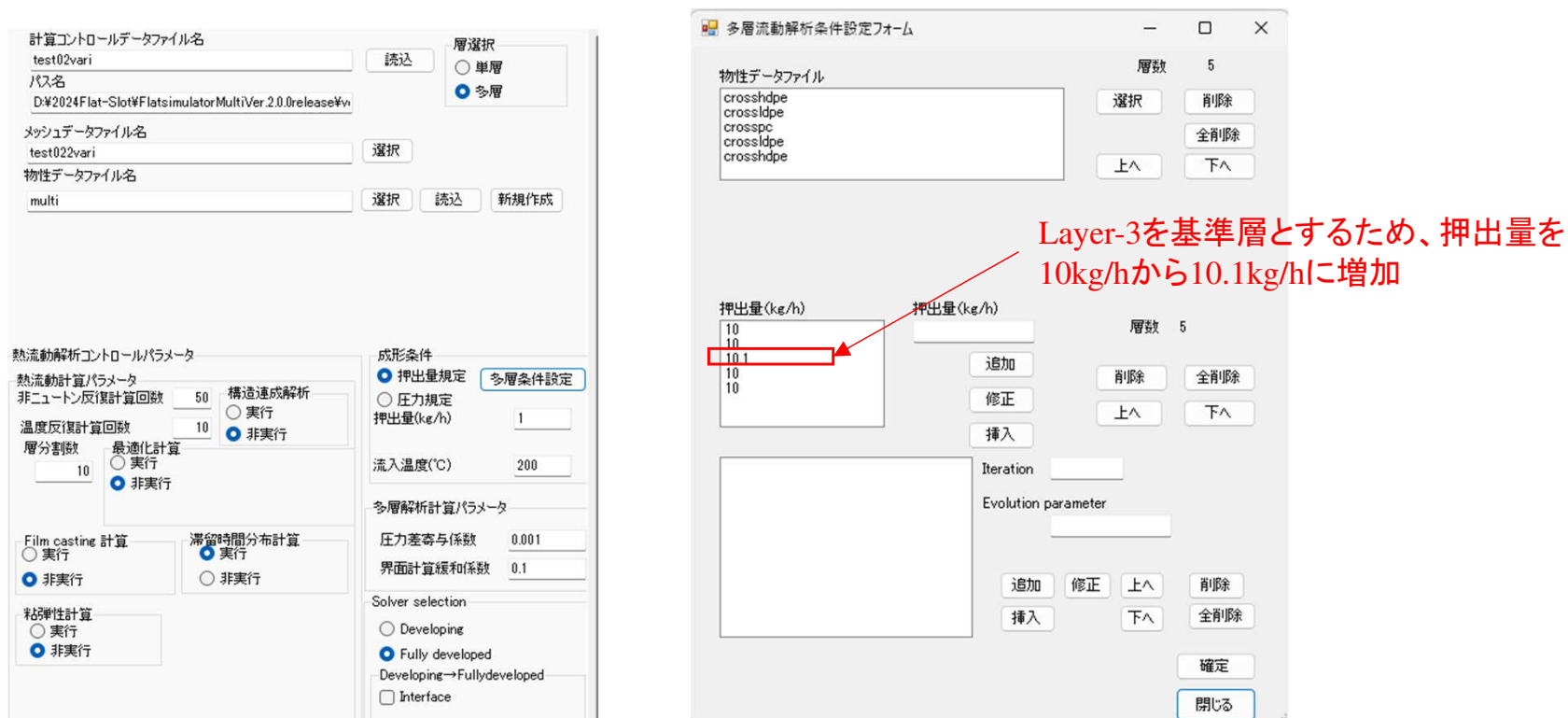


図17 流量分布を考慮した解析で採用した計算コントロールデータと完全発達多層流動解析条件

図18に各層の基準層に対する流量比分布の解析結果を示します(基準層は流量比分布は計算対象外です)。発達多層流動では、各層の基準層に対する流量比が、基準層の流線に沿って移流する特徴を利用して層厚が決定されます。すなわち、流量比の等高線は基準層の流線に一致します。図16に示した流量分布は、完全発達多層流動を表現している保証は無いため、解析プログラムは完全発達状態を表現するために自動的に流量分布を補正します。このため、設定値とは補正量に相当する分ずれが発生しますが、分布傾向は設定情報が反映されています。表層(Layer-1,5)では中心部から端部に向けて流量比が増加、中間層(Layer-2,4)では、逆に流量比が減少する傾向が示されています。

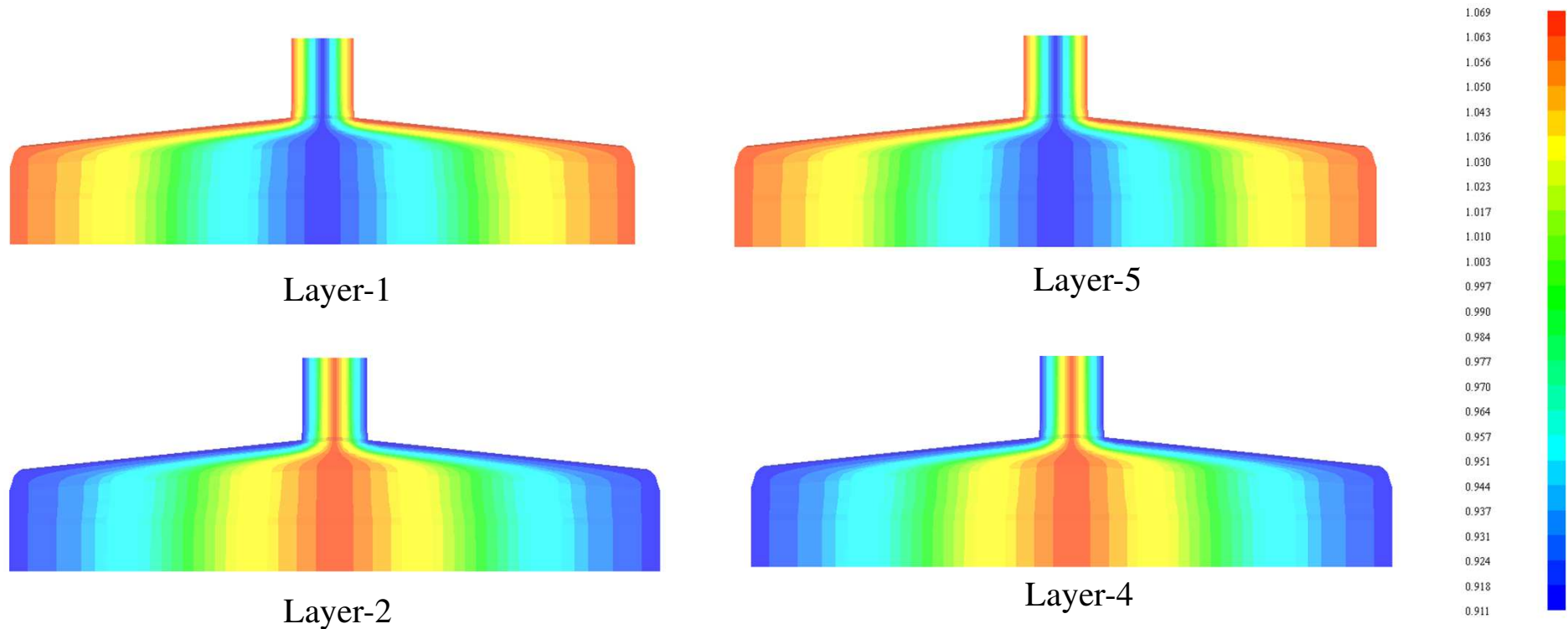
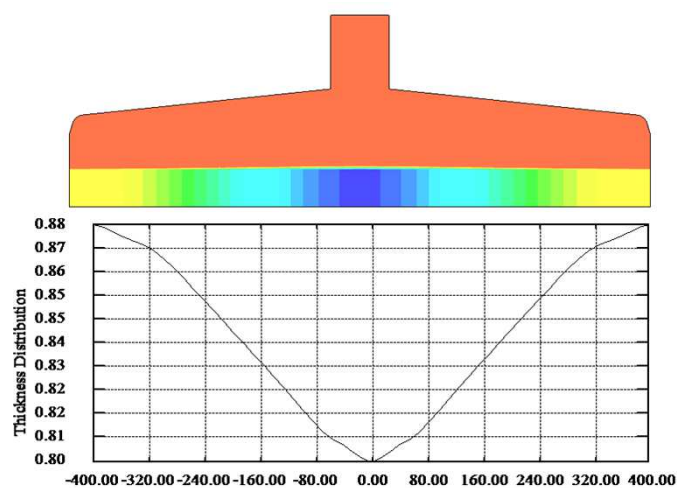
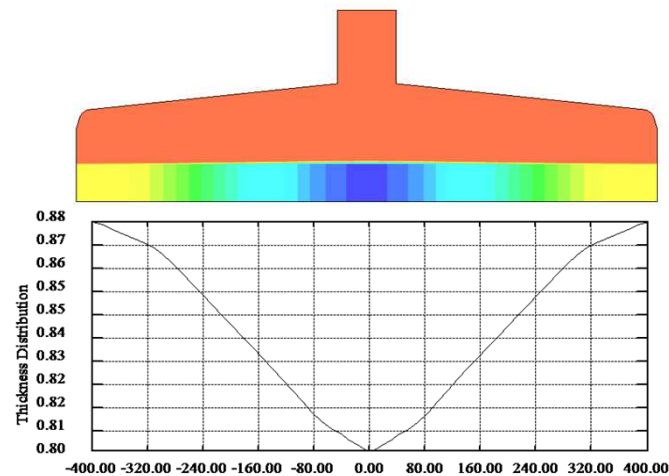


図18 流量比分布解析結果

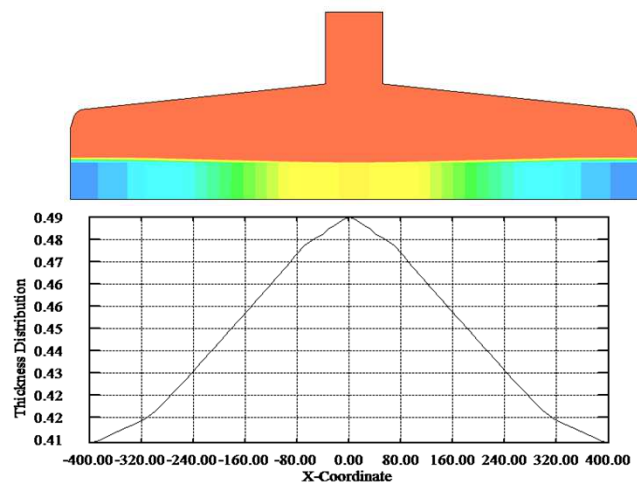
流入口に設定した流量分布の設定に応じて層厚が変化します。中心部の流量を低減した表層(Layer-1,5)では中央部の層厚が薄く、端部の流量を低減した中間層(Layer-2,4)では端部の層厚が薄く評価されています。



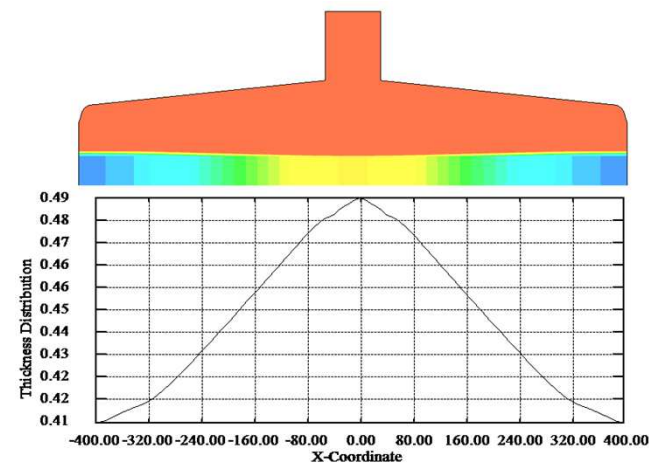
Layer-1



Layer-5



Layer-2



Layer-4

図19 層厚分布解析結果

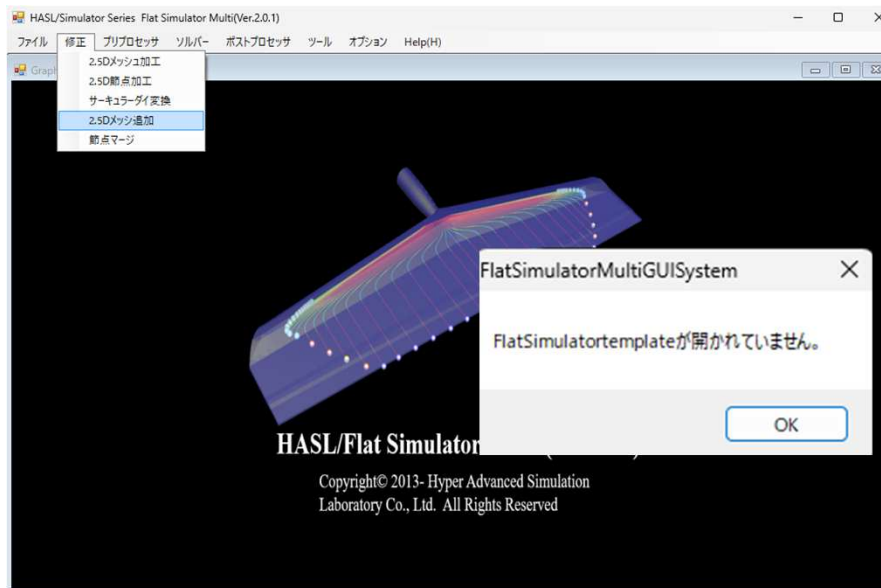
---

完全発達多層流動解析機能の運用は、発達多層解析機能と比較して容易であり、計算時間も短いメリットがあります。発達多層流動解析モデルを利用した上流側解析モデルの解析の難度が高い場合は、完全発達多層流動解析機能の単独利用によって、下流側モデルの流入口での流量分布の設定が界面形成状態に及ぼす影響を検討することを推奨します。

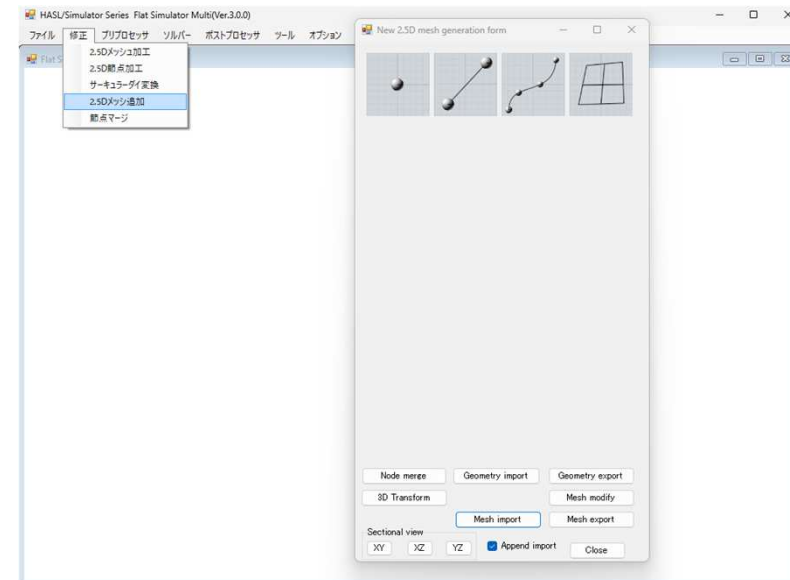
# 3) プリポスト機能改良

## 3-1) 2.5Dメッシュ追加機能の改良

従来、既存メッシュ情報の読み込み後、あるいは、テンプレート起動後のみに起動可能であった2.5Dメッシュ追加機能が、単独起動可能になりました。結果としてメッシュ情報が無い状態でもポイントやラインを定義し、メッシュ情報を新規作成することが可能になりました。



Ver.2.0.0(2.5Dメッシュ追加機能の単独起動不可)



Ver.3.0.0(2.5Dメッシュ追加機能の単独起動可)

図20 2.5Dメッシュ追加機能の単独起動

既往2.5Dメッシュ追加機能では、予め準備されたメッシュ情報やジオメトリ情報を読み込んだ後、新規メッシュ情報や新規ジオメトリ情報を追加する仕様とし、読込情報の座標より、モデルの描画領域が自動的に決定されていました。新規2.5Dメッシュ追加機能(ポイント生成機能)では、初期状態からのモデリングを可能にするために、 $x$ 方向:-100mm~100mm 区間と $y$ 方向: 100mm~100mm 区間の描画領域がデフォルトセットされています。この描画領域は、新規実装されたViewer region パネル内のXmin~XmaxとYmin~Ymaxの範囲を変更後、Region reset ボタンを押すことでリセット可能です。

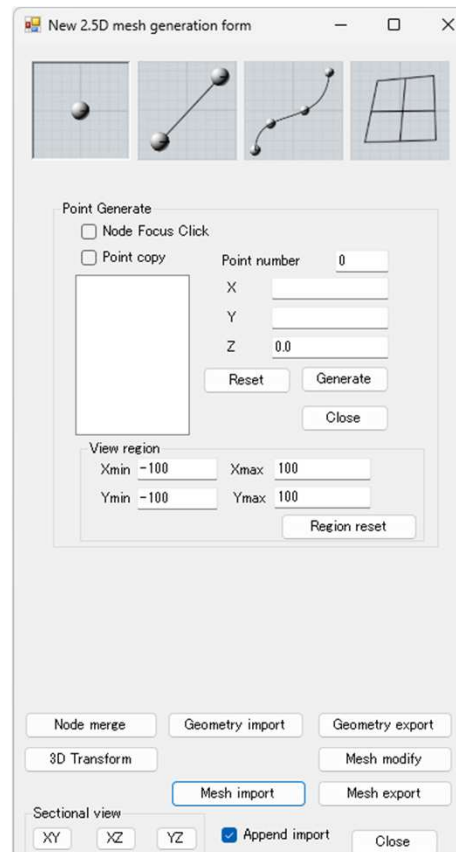


図21 ポイント生成時の描画領域の設定

既往2.5D メッシュ追加機能では、既存メッシュ情報を読み込み、既存節点上にポイントを作成、ポイントを結線、4角形領域をメッシュ分割するという手順で解析モデルを拡張していました。図2に示した多層流動解析モデルは、既存メッシュ情報は利用せずに、新規2.5Dメッシュ追加機能のみを利用して作成しています。初期的なポイント情報は、座標指定後、Generate ボタンを押すことで作成可能になりました。ポイントを結線し、4角形領域内にメッシュを作成する操作は従来と同様です。

4角形領域内にメッシュを作成する際にプロパティ番号を設定してメッシュ情報を作成すると以下の操作が楽になります。プロパティ番号は、メッシュ生成時に自動的に+1加算更新されます。1例として5層多層流動モデルを作成する際に以下に示す様にプロパティ番号を設定します。プロパティ番号1~7はテンプレートで作成されるモデルで既にご利用しているため、新規作成モデルのプロパティ番号は10番以上としています。

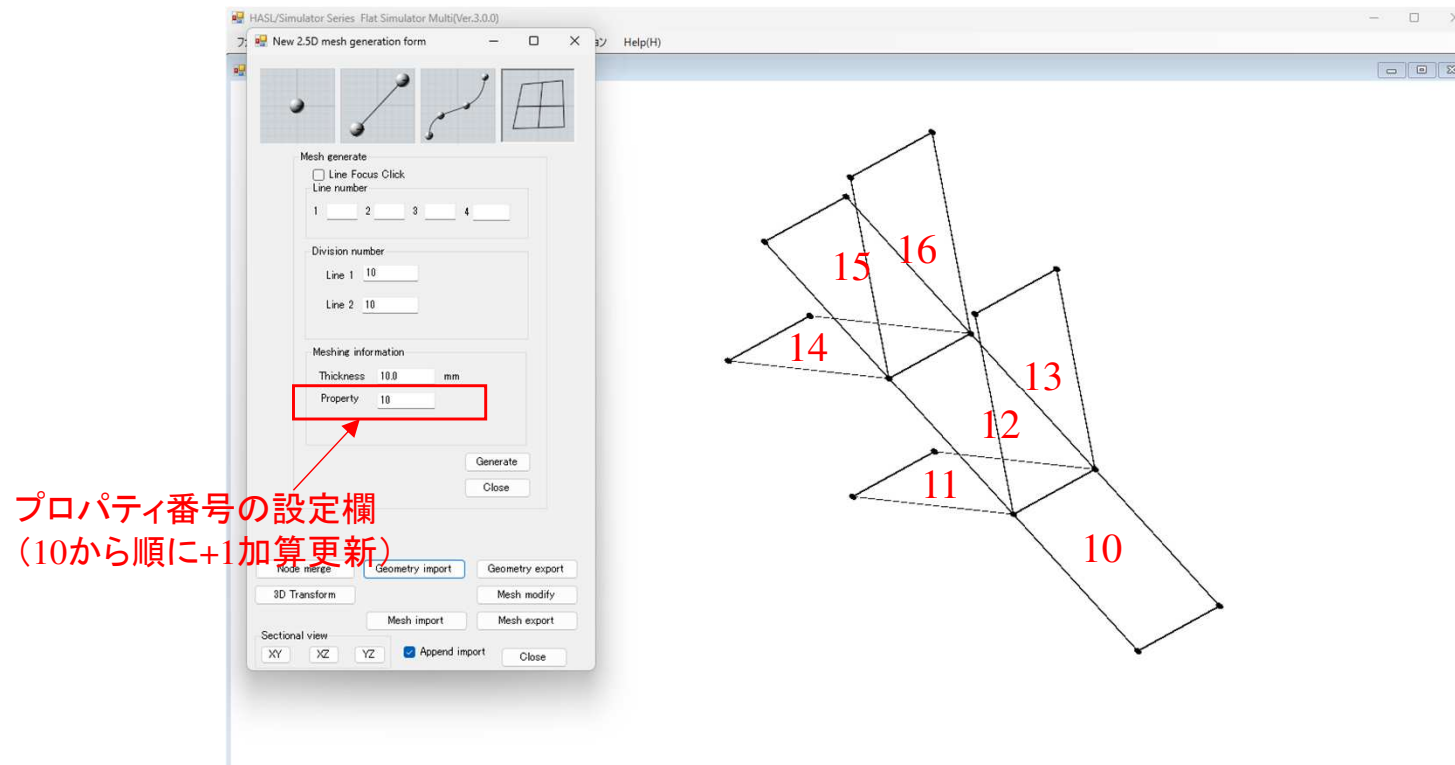


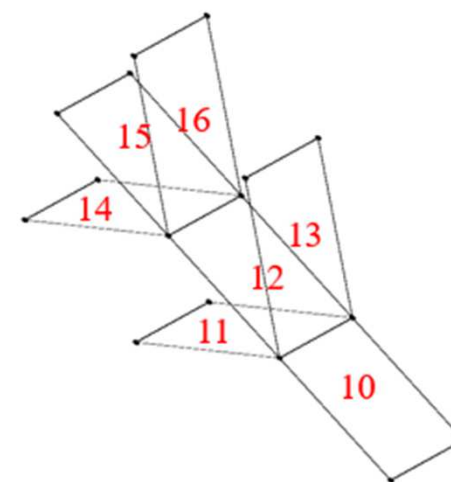
図22 メッシュ生成時のプロパティ番号の設定



多層流動解析モデルは下側表層から上側表層にむけて順に層番号を設定します。図22に示した多層流動モデルは5層であり、メッシュ分割領域のプロパティ番号と層構成は表1に示す通りです。

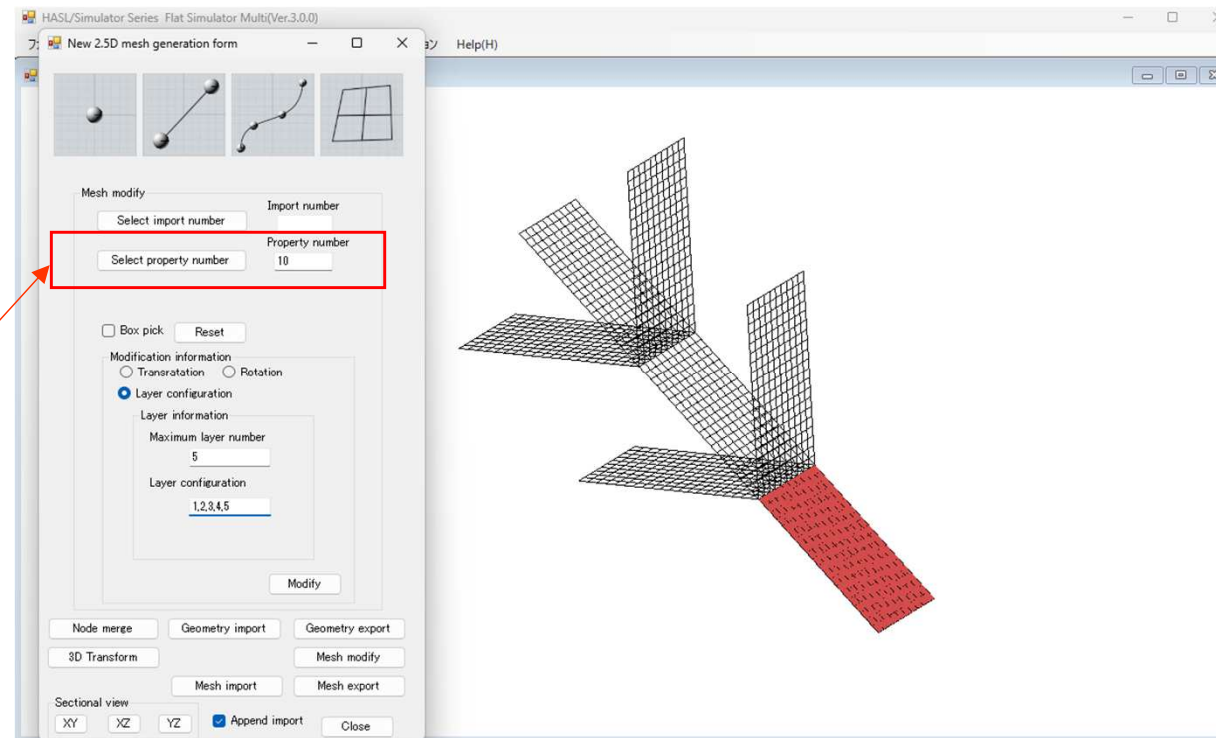
表1 プロパティ番号と層番号及び層構成の関係

プロパティ番号	層番号 or 層構成
10	1,2,3,4,5
11	1
12	2,3,4
13	5
14	2
15	3
16	4



「,」区切り情報は層構成(多層領域)、単独数値は層番号(単層領域)を表す。

Mesh modify パネル内にプロパティ番号による領域指定機能を新規実装しました。従来のボックスピックによる一括選択と比較して、より容易に領域の選択が可能になりました。当新機能を利用して表1に示した層番号と層構成をプロパティ番号領域毎に設定することで5層多層流動解析モデルが作成されます。



Property number のテキストボックスにプロパティ番号を指定し、Select property number ボタンを押すことで指定プロパティ番号の領域が一括選択されます。

図23 プロパティ番号による領域一括選択機能

## 3-2) 層流束分布のグラフ作画機能

グラフ図作画項目に12:流束が新しく追加されました。当情報は、流出口幅方向の単位長さ当たりの流量( $\text{cm}^2/\text{s}$ )を表します。流束の幅方向の積分値は各層に設定した流量に一致します。キャスト工程における形状変化や密度変化を無視すると流束を引き取り速度( $\text{cm}/\text{s}$ )で除した値が層厚に相当します。

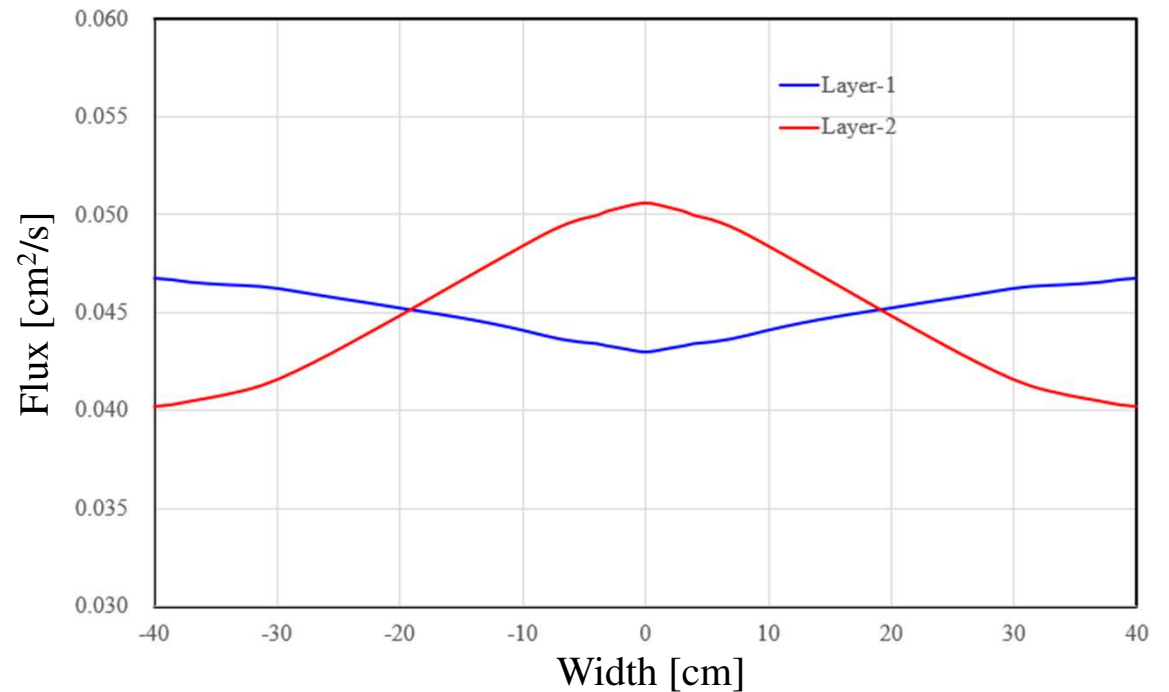
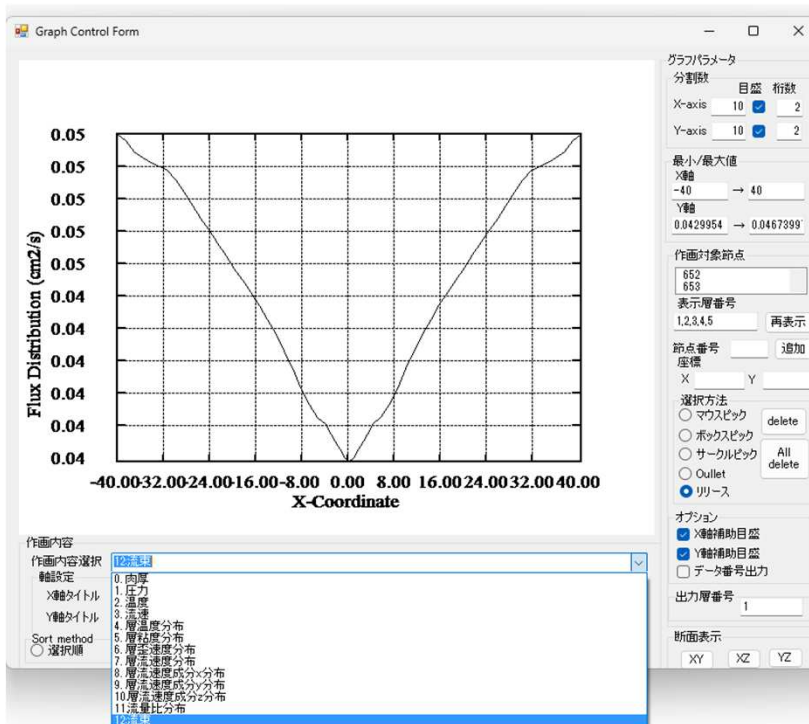


図24 ダイ流出口の流束分布