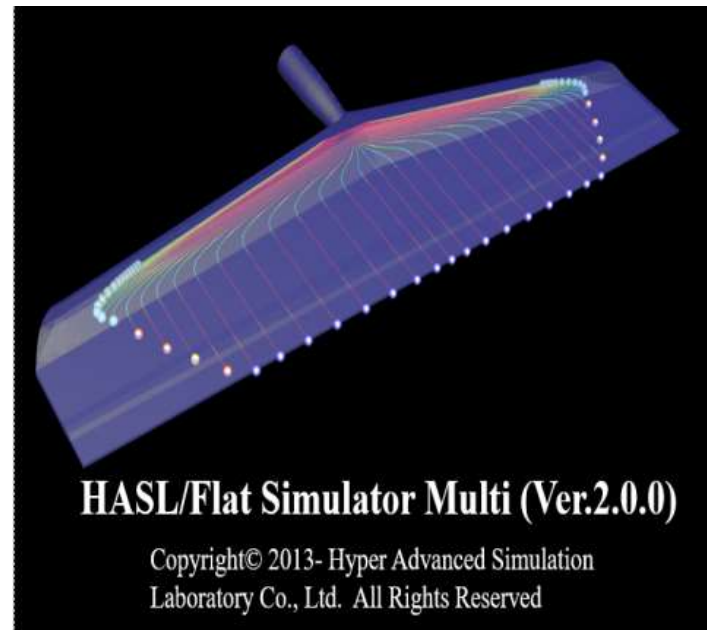


---

# Flat Simulator Multi (Ver.2.0.0)

## 改良成果資料



2021/6

株式会社HASL

---

## はじめに

Flat Simulator Multi (Ver.2.0.0) では、多層流動に対する解析機能の計算安定性と用途拡大を目的として、2.5D FEM 定式化の改良/拡張に取り組みました。従来の多層流動に対する主な改良点は、以下に示す通りです。

- 1) 多層流体を対象とした発達流れの定式化と完全発達流れの定式化を総合することで、計算安定性及び収束性の向上させるとともに計算負荷を低減させました。
- 2) 発達流れの定式化に、従来、解析対象外とされていた多層流体の界面包み込み現象を疑似的に表現可能な計算モデルを実装しました。

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. 発達多層流れ<sup>1),2)</sup>と完全発達多層流れ<sup>3)</sup>の統合化解法

発達流れとは、流動方向に対して変化する流動状態、完全発達流れとは、変化しない流動状態をそれぞれ意味します。多層流動において界面形状が空間的に変化する状態は発達流れとして取り扱うのが妥当です。一方、従来の2.5D FEMは、完全発達流れを前提とした定式化を採用しています。Flat Simulator Multi (Ver.1.0.0)では、多層界面の空間的な変化を定量化するために2.5D FEMの定式化を改良し、発達流れの解析へ適用範囲を拡張しています。発達流れと完全発達流れの定式化の差は、表1に示す様に、多層流体が形成する界面の法線方向に対する応力の釣り合い式の表現の差に表されます。これらの定式化の詳細については、文献1)を参照して下さい。

表1 多層流体の界面上境界条件

	既往 2.5D FEM	新規 2.5D FEM
熱流動状態	Fully developed state 完全発達流れ	Developing state 発達流れ
流速 連続性条件	$\mathbf{V}^I = \mathbf{V}^{II}$	
せん断応力 連続性条件	$\eta^I \dot{\gamma}^I = \eta^{II} \dot{\gamma}^{II}$	
法線応力 連続性条件	$p^I = p^{II}$	$-p^I + 2\eta^I \frac{1}{h^I} \frac{Dh^I}{Dt} = -p^{II} + 2\eta^{II} \frac{1}{h^{II}} \frac{Dh^{II}}{Dt}$

(I, II: 層番号,  $\mathbf{V}$ : 流速ベクトルの界面上の接線成分,  
 $\eta$ : 粘度,  $\dot{\gamma}$ : せん断ひずみ速度,  $p$ : 圧力,  $h$ : 層厚)

1) 谷藤眞一郎, 依藤大輔, 鬼防崇, 辰巳昌典: 成形加工, ‘定常非ニュートン粘性多層流動に対する一般化2.5次元有限要素法による定式化第1報: 定式化と理論検証’ 33(2),60(2021)

2) 株式会社HASL, 谷藤眞一郎, 多層流体解析プログラム, 多層流体解析システム, 及び多層流体解析方法, 特許第6547157号, 2019-07-24

3) Puissant, S., Demay, Y., Vergnes, B. and Agassant, J.F. : *Polym. Eng. Sci.*, 34(3),201(1994)

Flat Simulator Multi (Ver.1.0.0)には、発達流れの2.5D FEM 定式化に基づいて、多層流体の全流動領域を解析可能とする解析機能を実装しました。しかしながら、実用性を向上させるために、定式化を更に改良し、計算安定性や収束性を改善させる課題が残されていました。

一般的に、多層流動は、上流側で発達流れ状態であっても下流側で完全発達状態に漸近する傾向を示します。Flat Simulator Multi (Ver.2.0.0)では、多層流動のこのような特徴に着目し、全流動領域に対する解析モデルを発達流れの定式化を適用する上流側モデルと完全発達流れの定式化を適用する下流側モデルに分離して解析する機能を実装しています。すなわち、完全発達流れの2.5D FEM 定式化に基づく解析機能、及び上流側モデルと下流側モデルを連結するインターフェイス機能が新規に実装されました。モデル分割に伴い、計算規模が縮小します。また、発達流れの定式化を適用する解析領域を限定することで計算収束性の向上が期待できます。

発達流れと完全発達流れの定式化では、多層流体が形成する界面の計算方法が異なります。発達流れの定式化では、前述したように、界面上法線方向の応力の釣り合い式：

$$-p_l + 2\eta_l \frac{1}{h_l} \frac{Dh_l}{Dt} = -p_{l+1} + 2\eta_{l+1} \frac{1}{h_{l+1}} \frac{Dh_{l+1}}{Dt} \quad (1)$$

を利用して界面を計算します。

一方、完全発達流れでは、多層流体の圧力は共通と見なされ、層  $l$  の流束  $i$  成分  $q_{li}$  は、粘度や流路形状を利用して計算される流動コンダクタンス  $S_i$  を利用して次式で表されます。

$$q_{li} = -S_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

圧力  $p$  は、層毎に肉厚方向に平均化した連続方程式に(2)式を代入して得られる方程式を利用して求めます。すなわち、

$$-\sum_{i=1}^3 \frac{\partial q_{li}}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( S_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (3)$$

多層流動において、最も流量の多い層  $m$  を基準層とします。(3)式は、基準層  $m$  を利用して以下に示す様に書き直されます。

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( S_l \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{S_l}{S_m} S_m \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) = \sum_{i=1}^3 S_m \frac{\partial p}{\partial x_i} \frac{\partial \chi_{qlm}}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\chi_{qlm}$  は、層  $l$  と  $m$  の流量比であり、

$$\chi_{qlm} = \frac{S_l}{S_m} \quad (5)$$

と定義します。

(4)式は、基準層  $m$  の平均流速ベクトルと流量比の等値面の法線ベクトルが、互いに直交することを意味します。すなわち、基準層の平均流速ベクトルから求められる流線に沿って、流量比は一定となります。

流動コンダクタンスは、層厚に依存する関数であり、(4)式から求められる流量比  $\hat{\chi}_{qlm}$  を満足するように以下に示すニュートンラフソン法を利用して層厚  $h_l$  を計算します。

$$h_l^k = h_l^{k-1} + \frac{\hat{\chi}_{qlm} - \chi_{qlm}(h_l^{k-1})}{\partial \chi_{qlm} / \partial h \Big|_{h=h_l^{k-1}}} \quad \text{for } l = 1 \sim n, (l \neq m) \quad (6)$$

ここで、上付き添え字  $k$  は反復計算回数を表します。

## 2. 疑似界面包み込みモデル<sup>4),5)</sup>

界面包み込み現象は、図1に示す様に低粘性流体が高粘性流体を包み込む現象として知られています。この現象は、矩形断面形状の流路を上流側に配置するフィードブロックタイプ多層コートハンガーダイ内の多層流動状態を予測する上で重視されています。

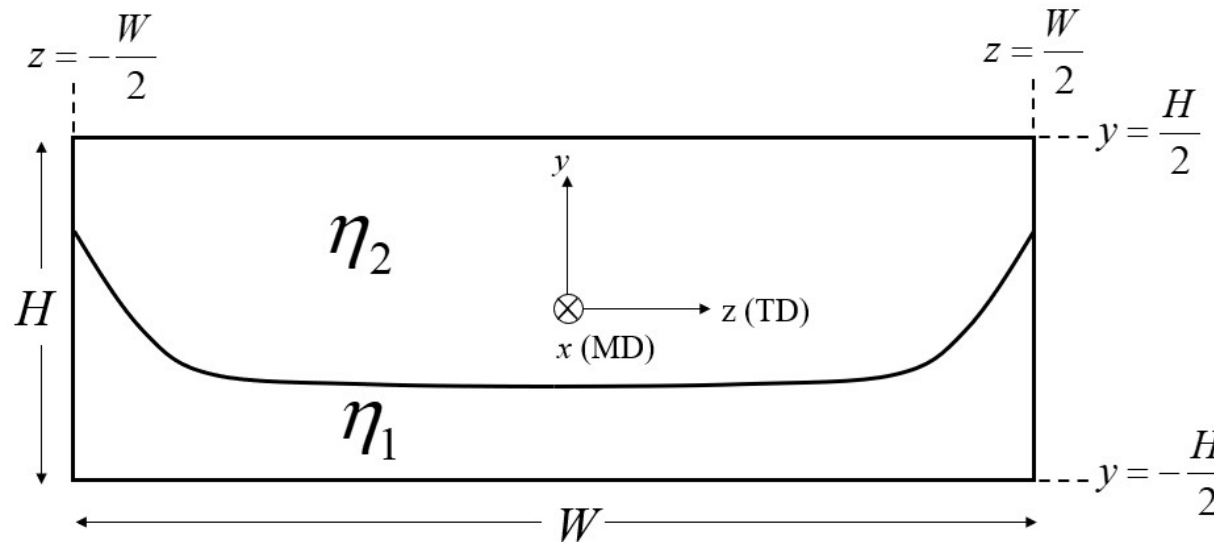


図1 界面包み込み現象と座標系の定義( $\eta_1/\eta_2 < 1$ )

4) 谷藤眞一郎, 依藤大輔, 鬼防崇, 辰巳昌典: 成形加工, ‘定常非ニュートン粘性多層流動に対する一般化2.5次元有限要素法による定式化第2報: 疑似界面包み込みモデルの実装と実験検証’, プラスチック成形加工学会誌投稿済み(査読終了アクセプト, 2021/12月号掲載予定)

5) 株式会社HASL, 谷藤眞一郎, 多層流体解析プログラム, 多層流体解析システム, 及び多層流体解析方法, 特許出願済(2021/2/10) (審査中)

---

粘性流動解析の範疇では、この界面包み込み現象を正確に表現する難しく、その定量化に際して粘弾性解析が必要とされています。また、この現象は、流動方向に対して界面形状が変化する発達流れの状態で見現します。一般的に、粘弾性解析は粘性解析と比較して計算負荷が増加し、解析の難度も高くなります。また、現状では、3D粘弾性流体解析法が進歩していますが、その適用範囲は基礎的な解析モデルに限定され、実用の多層押出ダイを対象とした解析事例は、数少ない状況です。運用が難しく、計算時間が長くなる粘弾性流体解析は、原理的に可能であっても工学支援ツールとして手軽に活用することは難しいと考えます。Flat Simulator Multi (Ver.2.0.0)では、界面包み込み現象を解析対象とし、且つ計算負荷の増加を避け、運用が容易な解析技術を構築することを目的として、疑似的に当現象を表現可能な計算モデルを開発しました。以下に疑似界面包み込みモデルの理論背景について解説します。

粘弾性効果を近似的に考慮するために、解析的な取り扱いが容易であるCEF(Criminale Ericksen Filbey)モデル<sup>6)</sup>を採用します。CEFモデルでは、速度勾配テンソル $L$ や変形速度テンソル $D$ を利用した単純な表式で粘弾性余剰応力テンソル $\tau$ が次式に示す様に表されます。

$$\tau = 2\eta D - \psi_1 \overset{\nabla}{D} + 4\psi_2 D \cdot D \quad (7)$$

ここで、変形速度テンソル $D$ の upper convective time derivative は、次式で与えられます。

$$\overset{\nabla}{D} = \frac{\partial D}{\partial t} + u \cdot \nabla D - L \cdot D - D \cdot L^T \quad (8)$$

図1内に示すように座標系を定義し、矩形断面に垂直な $x$ 方向(Machine Direction:MD)の流速成分 $u$ が、MDに一様になる一定粘度 $\eta$ の定常流動を想定します。 $y$ 方向(肉厚方向)の流速成分 $v$ や $z$ 方向(TD: Transverse Direction)の流速成分 $w$ の絶対値は、 $u$ の絶対値と比較して十分小さいとして無視します。

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



このような条件下では, (7)式より, 以下に示すように余剰応力成分を求めることができます.

$$\begin{cases} \tau_{xx} = (\psi_1 + \psi_2)(\dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{xz}^2) \\ \tau_{xy} = \eta\dot{\gamma}_{xy} \\ \tau_{xz} = \eta\dot{\gamma}_{xz} \\ \tau_{yy} = \psi_2\dot{\gamma}_{xy}^2 \\ \tau_{yz} = \psi_2\dot{\gamma}_{xy}\dot{\gamma}_{xz} \\ \tau_{zz} = \psi_2\dot{\gamma}_{xz}^2 \end{cases} \quad (9)$$

ここで,

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} \\ \dot{\gamma}_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} \end{cases} \quad (10)$$

としました.

2.5D FEMで採用する潤滑近似では, TDに垂直な側壁(図1内の $z=\pm W/2$ の壁面)の影響が無視され,  
 $\dot{\gamma}_{xz} = 0$  と見なされます. この場合, (9)式より, 各種法線応力差係数の定義式

$$\begin{cases} N_1 = \tau_{xx} - \tau_{yy} = \psi_1\dot{\gamma}_{xy}^2 \\ N_2 = \tau_{yy} - \tau_{zz} = \psi_2\dot{\gamma}_{xy}^2 \end{cases} \quad (11)$$

が導かれます.

第2法線応力差は、第1法線応力差と比較して小さく<sup>5)</sup>、第2応力差係数を第1法線応力差係数を用いて実験的に、

$$\frac{\psi_2}{\psi_1} = -0.15 \sim -0.10 \quad (12)$$

と表現されます。

(9)式を利用して、運動方程式は、次式で表されます。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y}(\eta \dot{\gamma}_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\eta \dot{\gamma}_{xz}) \quad (13)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y}(\psi_2 \dot{\gamma}_{xy}^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\psi_2 \dot{\gamma}_{xy} \dot{\gamma}_{xz}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y}(\psi_2 \dot{\gamma}_{xy} \dot{\gamma}_{xz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\psi_2 \dot{\gamma}_{xz}^2) \quad (15)$$

(13)式のMDの運動方程式は、粘性流体の運動方程式と一致します。一方、(14)式と(15)式の運動方程式に着目すると、第2法線応力差係数を含む速度勾配項が、矩形断面内の圧力勾配に寄与することが分かります。完全発達状態にある粘性流動では、MDのみに圧力勾配が発生し、断面内の圧力は一定です。第2法線応力差を考慮することで、MDの流速成分の速度勾配が、MDと垂直な断面内に圧力勾配を発生させる効果を示すのは、粘性流体と異なる特性と言えます。これらの圧力勾配は、近似的に無視した断面内の二次流れを発現させる要因になります。

2.5D FEM では、層厚が薄いことを理由として各層内の肉厚方向に対する圧力勾配を無視する近似が採用されています。一方、TDに対する圧力勾配を表現する(15)式は、肉厚方向に対して平均化することで、2.5D FEMによる発達流れの定式化の拡張に利用可能です。第2法線応力差係数と流路肉厚が、TDに対して一定であることを前提とし、(15)式から、以下に示すように肉厚方向に平均化された圧力勾配の評価式が得られます。

$$\left\langle \frac{\partial p}{\partial z} \right\rangle = \frac{1}{H} \int_{-H/2}^{H/2} \frac{\partial p}{\partial z} dy = \frac{\psi_2}{H} \frac{\partial}{\partial z} \left( \int_{-H/2}^{H/2} \dot{\gamma}_{xz} dy \right) \quad (16)$$

定常単層粘性流動に対しては、(16)式を解析的に積分することが可能です。図1に示すような矩形断面内定常単層流動の(13)式の理論解は、次式で表されます。

$$u(y, z) = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \left[ \frac{1}{2} \left( y^2 - \left( \frac{H}{2} \right)^2 \right) - \frac{4H^2}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n-1)^3} \frac{\cosh\left(\frac{(2n-1)\pi z}{H}\right)}{\cosh\left(\frac{(2n-1)\pi W}{2H}\right)} \cos\left(\frac{(2n-1)\pi y}{H}\right) \right] \quad (17)$$

(17)式よりひずみ速度は、次式で与えられます。

$$\dot{\gamma}_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{4H}{\pi^2} \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n-1)^2} \frac{\sinh\left(\frac{(2n-1)\pi z}{H}\right)}{\cosh\left(\frac{(2n-1)\pi W}{2H}\right)} \cos\left(\frac{(2n-1)\pi y}{H}\right) \right] \quad (18)$$

(16)式に含まれるひずみ速度の2乗の肉厚平均値は, (18)式を利用し,

$$\langle \dot{\gamma}_{xz}^2 \rangle = \frac{1}{H} \int_{-H/2}^{H/2} \dot{\gamma}_{xz}^2 dy = \dot{\gamma}_w^2 g_f(z) \quad (19)$$

と表されます. ここで,

$$\dot{\gamma}_w = \left| \frac{W}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right| \quad (20)$$

は,  $H \rightarrow \infty$  とした際に側壁上( $z = \pm W/2$ )で計算されるひずみ速度の絶対値です. また, 形状因子  $g_f$  は次式で表されます.

$$g_f(z) = \frac{32}{\pi^4} \left( \frac{H}{W} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4} \left( \frac{\sinh\left(\frac{(2n-1)\pi z}{H}\right)}{\cosh\left(\frac{(2n-1)\pi W}{2H}\right)} \right)^2 \quad (21)$$

(16)式をTD(z方向)に積分すると,

$$\langle p(z) \rangle - \langle p(0) \rangle = \psi_2 \langle \dot{\gamma}_{xz}^2 \rangle = \psi_2 \dot{\gamma}_w^2 g_f(z) \quad (22)$$

が得られ, 第2法線応力差係数が負であることに留意すると, 圧力の肉厚平均値は, TDに対して低下することが分かります.

第2法線応力差係数を0として扱う従来の2.5D FEM では, (22)式に示す様に断面内の圧力は, 中心部圧力の肉厚平均値に一致するとされています. 第2法線応力差係数を考慮することで表現されるTDに対する圧力勾配を定式化に反映させるために, (22)式が多層流体の各層のTDに対する圧力勾配を表現すると仮定し, (1)式に示した界面法線方向の応力の釣り合い式を以下に示すように補正します.

$$-p_l + 2\eta_l \frac{1}{h_l} \frac{Dh_l}{Dt} + \psi_2 \langle \dot{\gamma}_l^2 \rangle = -p_{l+1} + 2\eta_{l+1} \frac{1}{h_{l+1}} \frac{Dh_{l+1}}{Dt} + \psi_2 \langle \dot{\gamma}_{l+1}^2 \rangle \quad (23)$$

ここで, 各層のひずみ速度の肉厚平均値は, 次式で与えられます.

$$\langle \dot{\gamma}_l^2 \rangle = \left( \frac{W}{2\eta_l} \frac{\partial p_l}{\partial x} \right)^2 g_f(z) \quad (24)$$

形状因子 $g_f$ は、図2に示す様にアスペクト比 $H/W$ に依存して変化します。アスペクト比が1以下の条件下では、 $H/W=1$ 、すなわち正方断面流路の場合が最大値となり、第2法線応力差の影響が顕著になります。このように、従来無視されていた第2法線応力差係数と形状因子で表現される側壁効果を考慮することで、多層流体が形成する界面の包み込み現象を疑似的に表現することが可能になります。

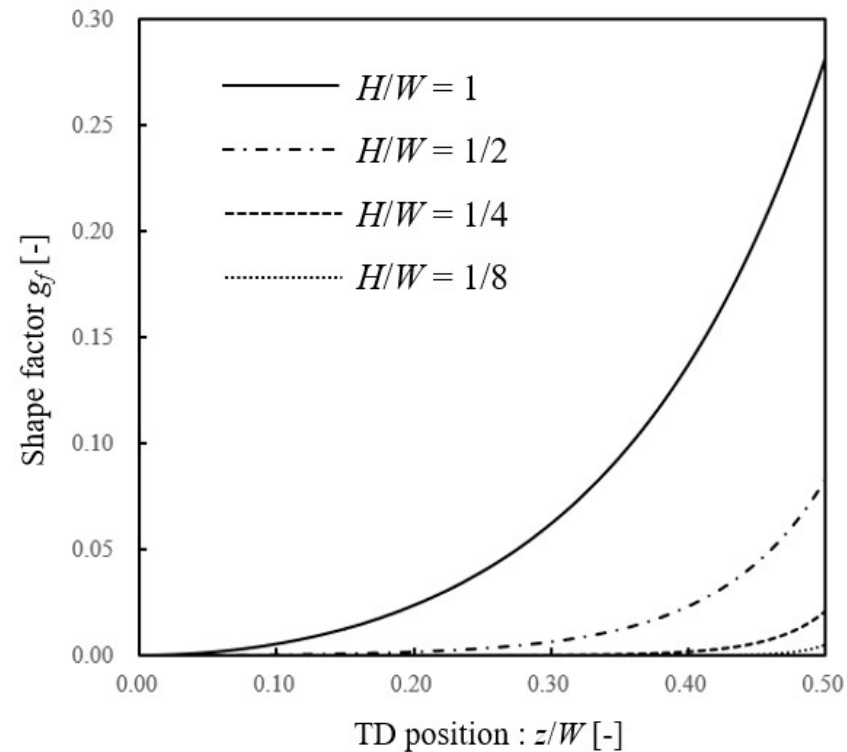


図2 形状因子 $g_f$ のTD座標( $z/W$ )及びアスペクト比( $H/W$ )依存性

### 3. Flat Simulator Multi (Ver.2.0.0)の運用方法

図3に示す様にFlat Simulator Multi (Ver.2.0.0)は、発達流れの定式化に基づく解析プログラム (DevelopingSolver.exe) と完全発達流れに基づく解析プログラム(FullyDevelopedSolver.exe)から構成されます。前述した疑似界面包み込みモデル(PEM : Pseudo Encapsulation Model)は、DevelopingSolverに実装されており、解析モデルに予め適用領域を規定して運用します。各解析モデルは、単独での運用あるいは連携した運用が可能です。図3に示す様に単独で運用する場合、多層合流部を含む上流側の領域の解析には、DevelopingSolverを適用します。一方、下流側の多層完全発達流れ領域の解析にはFullyDevelopedSolverを適用します。一方、多層押出ダイの全域を対象とする場合、図4に示す様に解析モデルを上流側と下流側に分離し、各領域にそれぞれDevelopingSolverとFullyDevelopedSolverを適用することが合理的です。この場合、図5に示す様に上流側の発達多層流動解析を先行して実施し、その結果を継続して実施する下流側の完全発達多層流動解析の流入境界条件として考慮します。

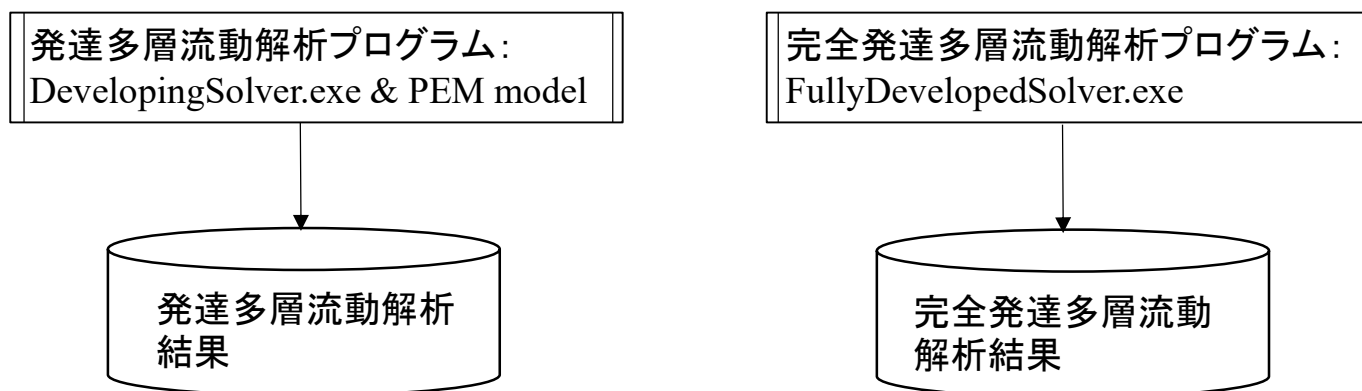


図3 Flat Simulator Multi (Ver.2.0.0) 構成解析プログラムの単独運用

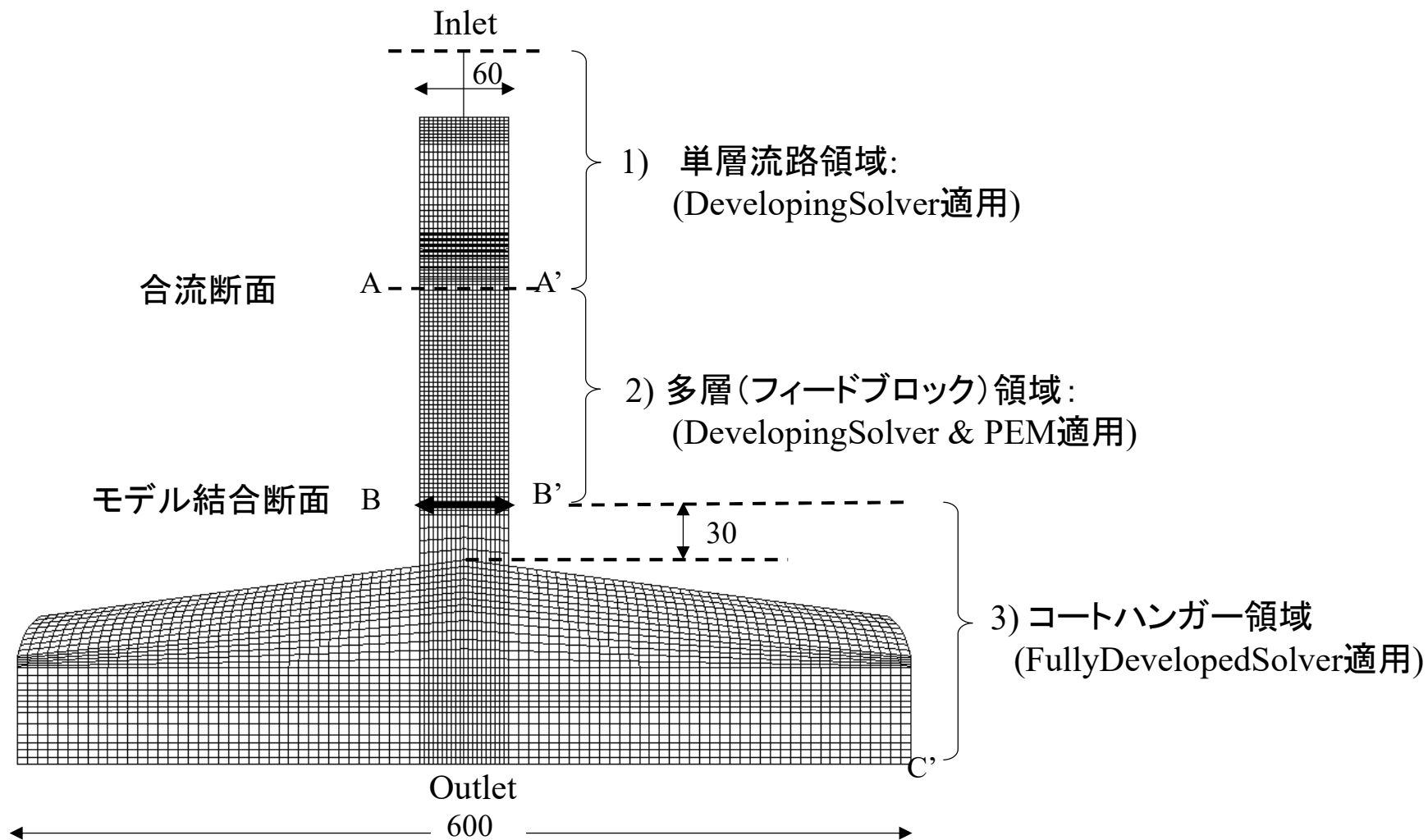


図4 Flat Simulator Multi (Ver.2.0.0) 構成解析プログラムの解析対象領域  
(モデルをB-B'断面で分離し, 上流側にDevelopingSolver, 下流側にFullyDevelopedSolverを適用)



1<sup>st</sup> step : 上流側発達多層流動領域の解析

発達多層流動解析プログラム:  
DevelopingSolver.exe & PEM model

発達多層流動解析  
結果: xxx.fluxoutlet

2<sup>nd</sup> step : 下流側完全発達多層流動領域の解析

完全発達多層流動解析プログラム:  
FullyDevelopedSolver.exe

上流側発達多層流動解析  
結果を反映した下流側完全  
発達多層流動解析結果

図5 Flat Simulator Multi (Ver.2.0.0) 構成解析プログラムの連携運用

---

### 3.1 発達多層流動解析プログラム(Developing Solver) の運用方法

発達多層流動解析プログラムの運用方法は、Ver.1.0.0システムと同様ですが、幾つかの改良を施しています。以下に関心が高いフィードブロックタイプコートハンガーダイを解析対象とする運用例について解説します。

#### 1) フィードブロック流路モデル作成

発達多層流動解析プログラムは、上流側の単層流動領域及び合流直後のフィードブロック流路内の発達多層流動領域を解析対象とします。一方、下流側コートハンガーダイ内の多層流動は、後述する完全多層流動解析プログラムが解析対象とします。ここでは、発達多層流動解析プログラムが解析対象とする三層フィードブロック流路モデルの作成方法について解説します。

最初にテンプレートを利用して中間層(層番号2)のフィードブロック単層流路モデルを作成します。本生成例では、マニフォルド断面形状を円形状としてモデル化していますが、他形状も自由に作成可能です。

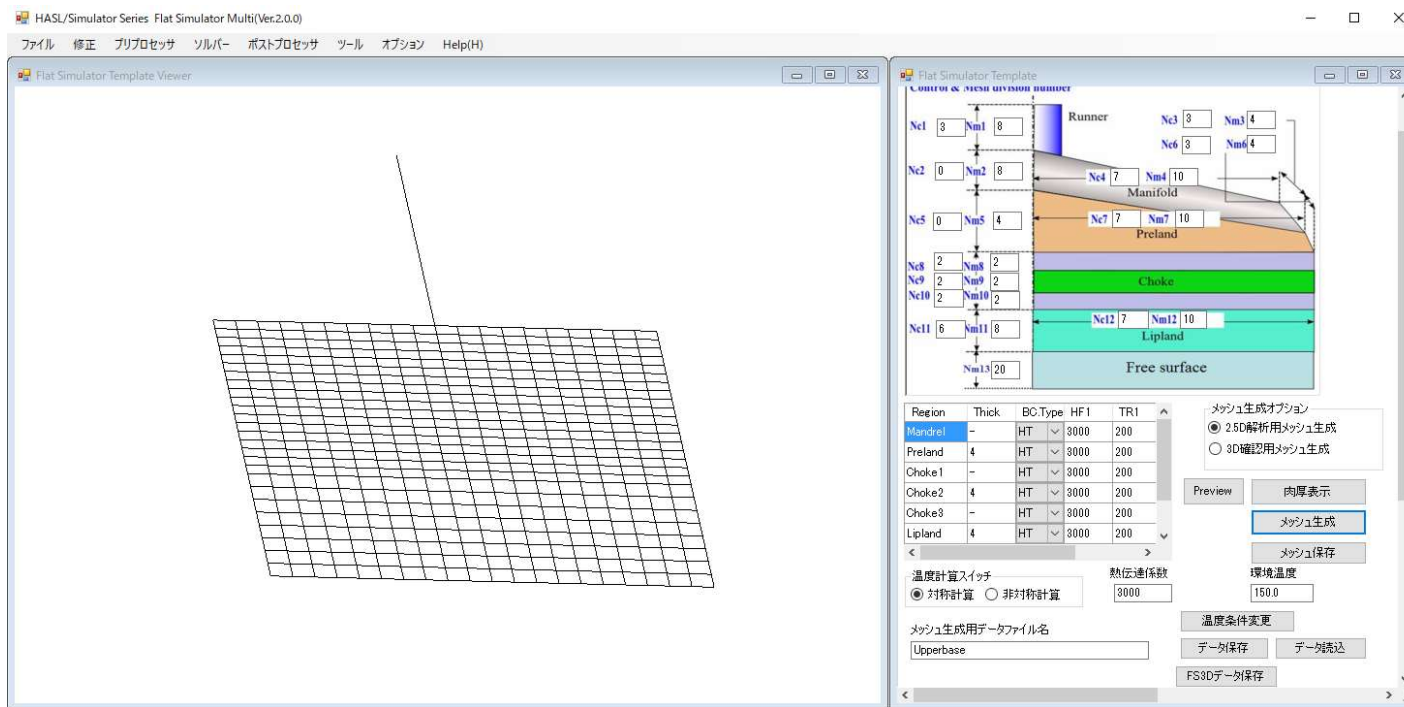


図6 中間層(層2)のフィードブロック単層流路モデル

最初にテンプレートを利用して中間層(層番号2)のフィードブロック単層流路モデルを作成します。

モデル保存ボタンを押してメッシュ情報を保存します。モデルは、流入口を起点( $y=0$ )として、MD(-y)方向に作成されます。メッシュセーブフォームのMD最小座標は、流出位置、最大座標は、流入位置を意味します。下流側コートハンガーダイモデルが、 $y=0$ を起点として-y方向に作成されていることと合流後の多層流路の長さを考慮し、並進移動量を設定してメッシュ情報を保存します。本作成例では、 $y=-125\sim 0$ で作成された元モデルを $dy=250$ の並進移動した位置に保存します。すなわち、保存後のモデルは、 $y=125\sim 250$ の範囲に定義されます。

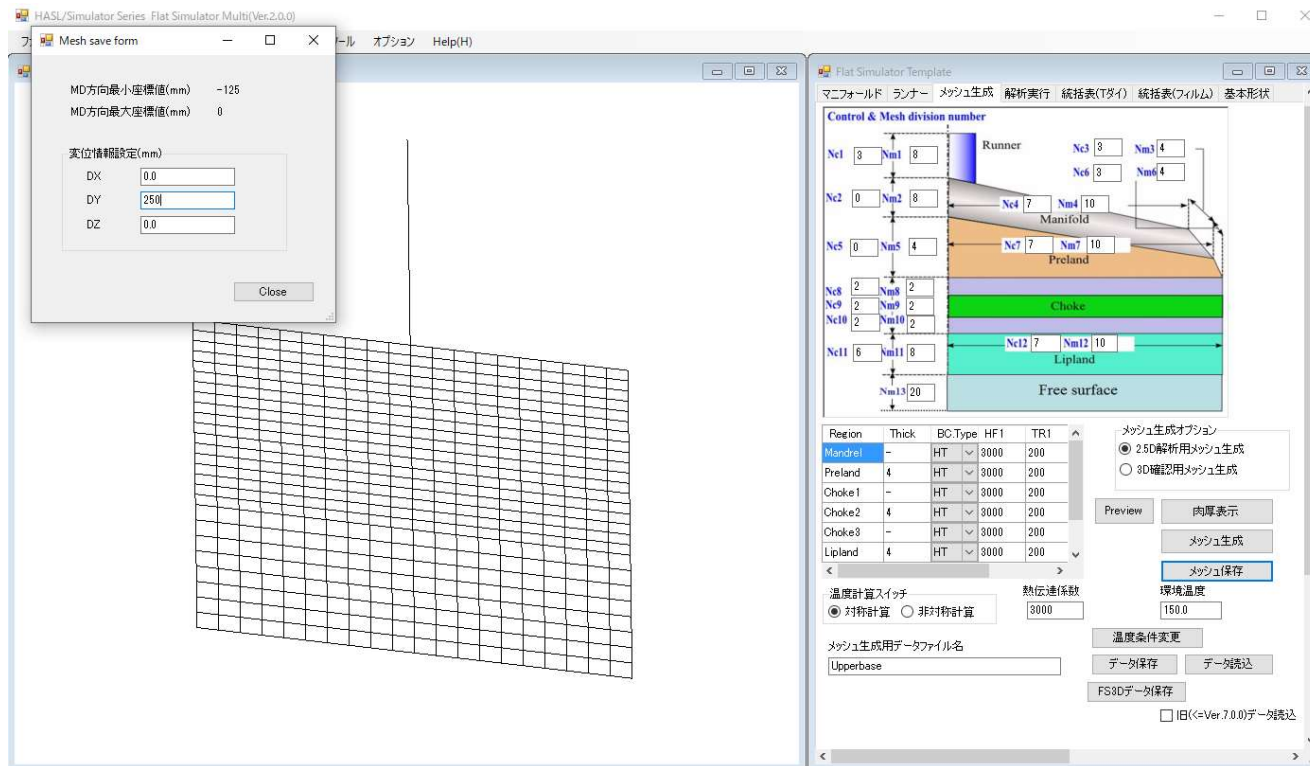


図7 メッシュ情報の並進移動保存(中間層)

表層(層番号1,2)の単層流路形状が中間層と等しい場合、紙面と垂直方向に並進移動した位置にメッシュ情報を保存します。本生成例では、下表層(層番号1)のメッシュ情報は、 $(dx,dy,dz) : (0,250,-80)$ 、上表層(層番号2)のメッシュ情報は、 $(dx,dy,dz) : (0,250,80)$ の位置に並進移動して保存します。従来のVer.1.0.0システムでは、各メッシュ情報を保存後、メッシュ生成を再度行って、情報を保存していましたが、Ver.2.0.0システムでは、流路形状が等しい場合、メッシュの再生成は不要であり、メッシュ保存ボタンを連続的に押すことで異なる並進位置に複数のメッシュ情報の保存が可能です。各情報を保存後、システムを一旦終了します。

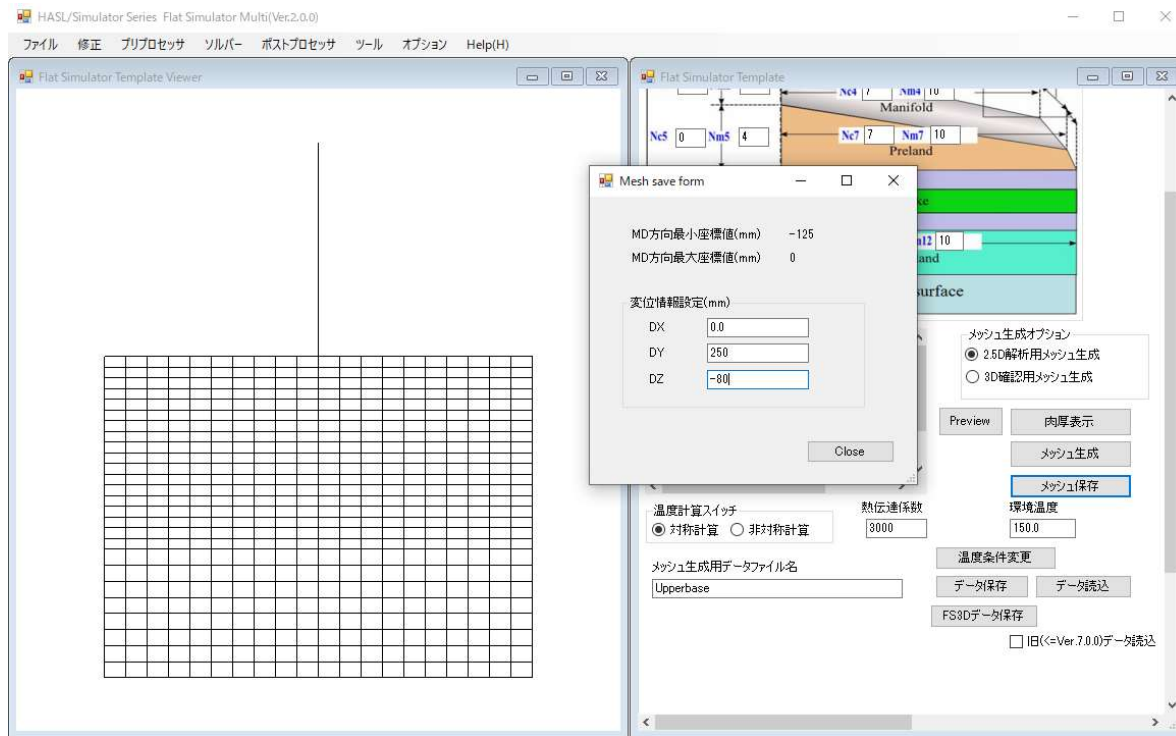


図8 メッシュ情報の並進移動保存(下表層)

システムを再起動し、中間層(層番号2)のメッシュ情報をインポートした後、修正/2.5Dメッシュ追加をプルダウン選択します。表示されるフォームにおいてAppend import チェックボックスをチェック状態とし、下表層(層番号1)と上表層(層番号3)のメッシュ情報を順にインポートします。

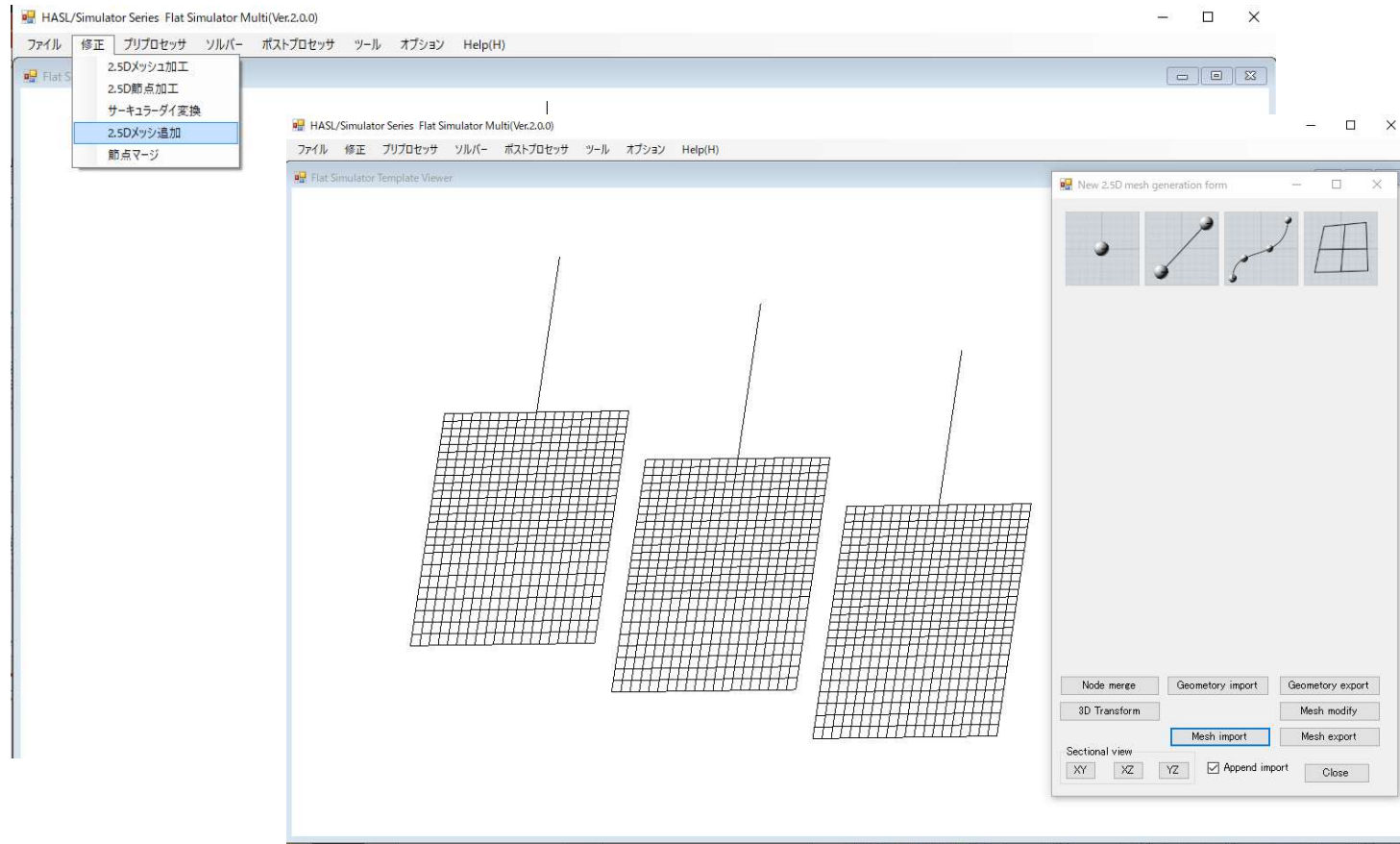


図9 メッシュ情報のAppend import

フォーム内のMesh modify ボタンを押し、Rotation ラジオボタンをONとし、Box pick チェックボックスをチェック状態として、下図に示す様に下表層のランナーを除く計算要素をボックスピック選択します。次にNode focus ボタンを押し、選択領域の上左単の節点を一回目のマウスクリック選択、上右単の節点を二回目のマウスクリックで選択します。この操作により、選択要素の上端片が回転軸として選択されます。軸方向は、一回目クリック位置(左)から二回目クリック位置(右)方向に設定されています。右ねじの法則に従って回転角度を指定します。回転軸に対して時計回りを正、半時計回りを負とします。本回転例では、下表層は、反時計回り、すなわち $-45^\circ$ 、上表層は、時計回り $45^\circ$ に回転させます。回転角度を設定以後、Modifyボタンを押すことで、選択領域の計算要素が指定回転軸周りに回転します。

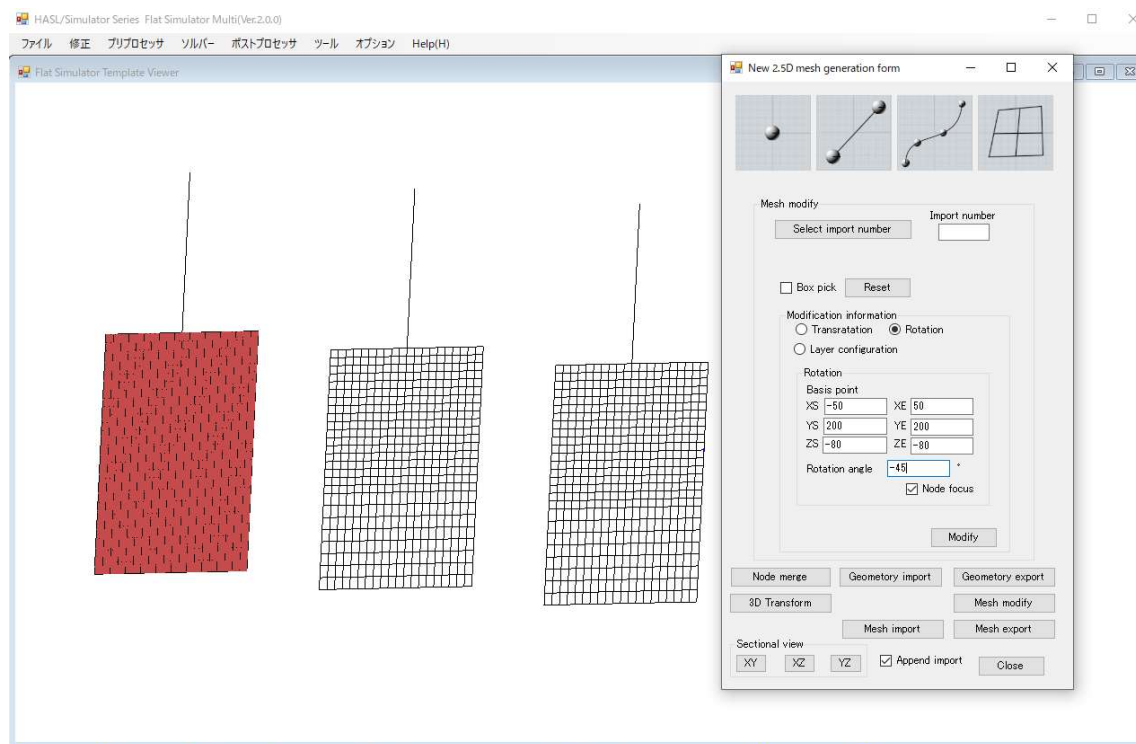


図10 選択要素の回転移動



各表層の計算要素を下図に示す様に軸周りに回転した後、Mesh export ボタンを押してメッシュを保存します。作業を継続する際にシステムを再起動する必要があるため、メッシュ情報は、この段階において適切な名称を付け必ず保存して下さい。

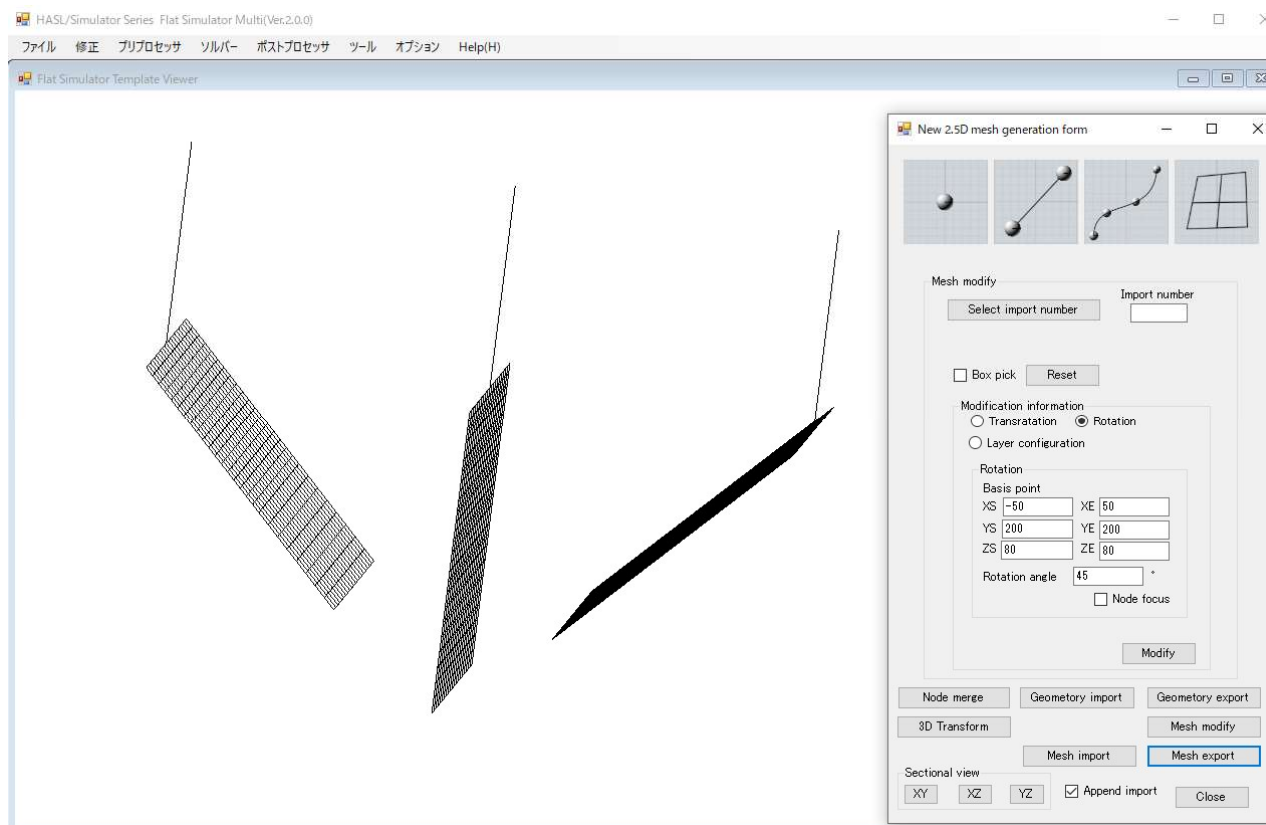


図11 表層要素の回転移動例



下流側に装着されるコートハンガーダイに対するメッシュ情報を予め作成しておき、当メッシュ情報をインポートします。以下に示す操作では、上流側フィード単層流路と下流側コートハンガーダイ多層流動領域を連結するフィード多層流動領域を作成します。

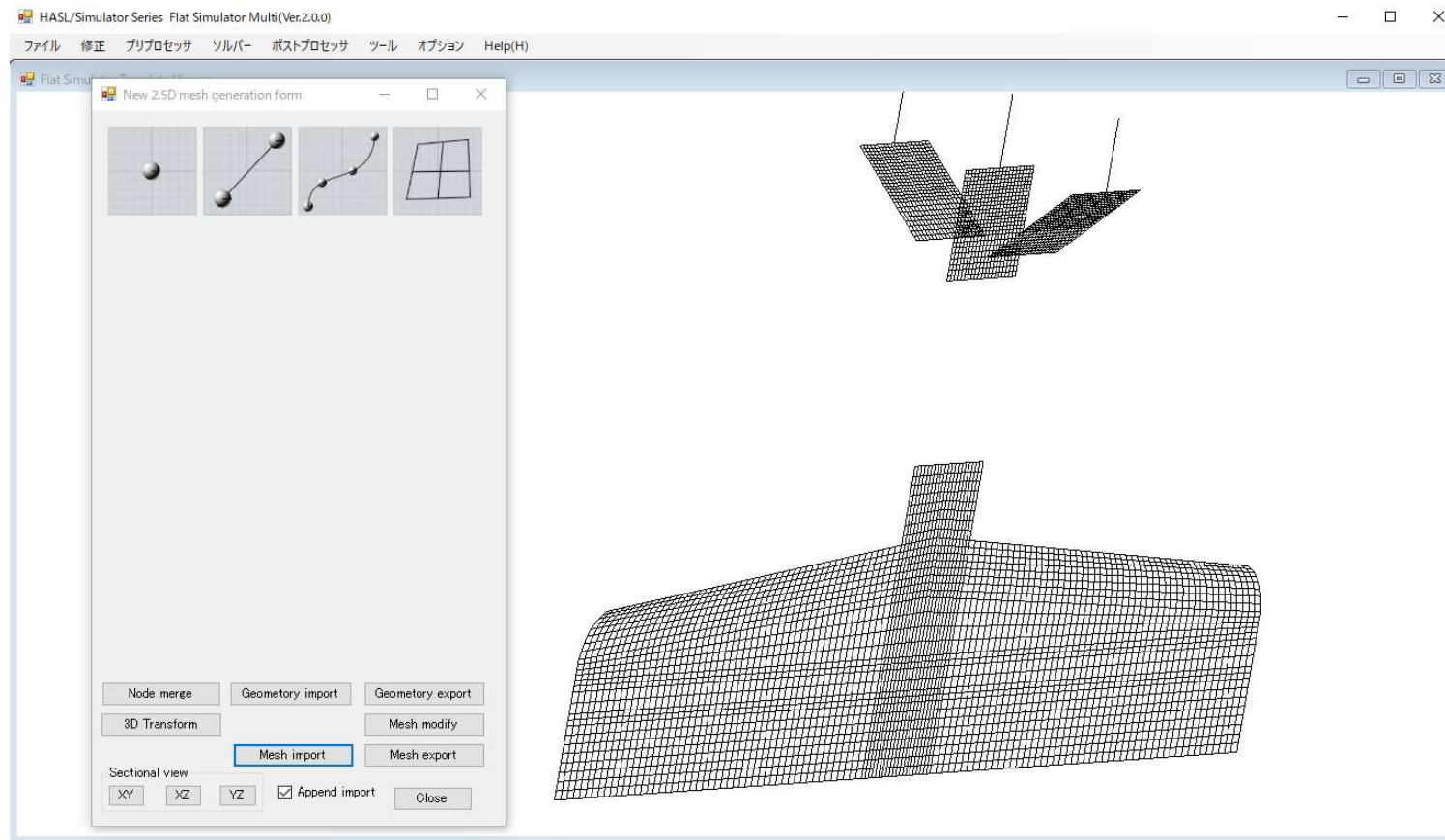


図12 下流側コートハンガーダイメッシュ情報のAppend import

フィード多層流動領域のコーナに下図に示す様にポイントを作成します。ポイントアイコンをマウスクリック選択し、Node Focus Click チェックボックスをチェック状態として下図に示す様にモデルのコーナをマウスクリック選択し、8 ポイントを作成します。作成後のポイント情報は、Geometry exportボタンを押して適当な名称を付け保存します。

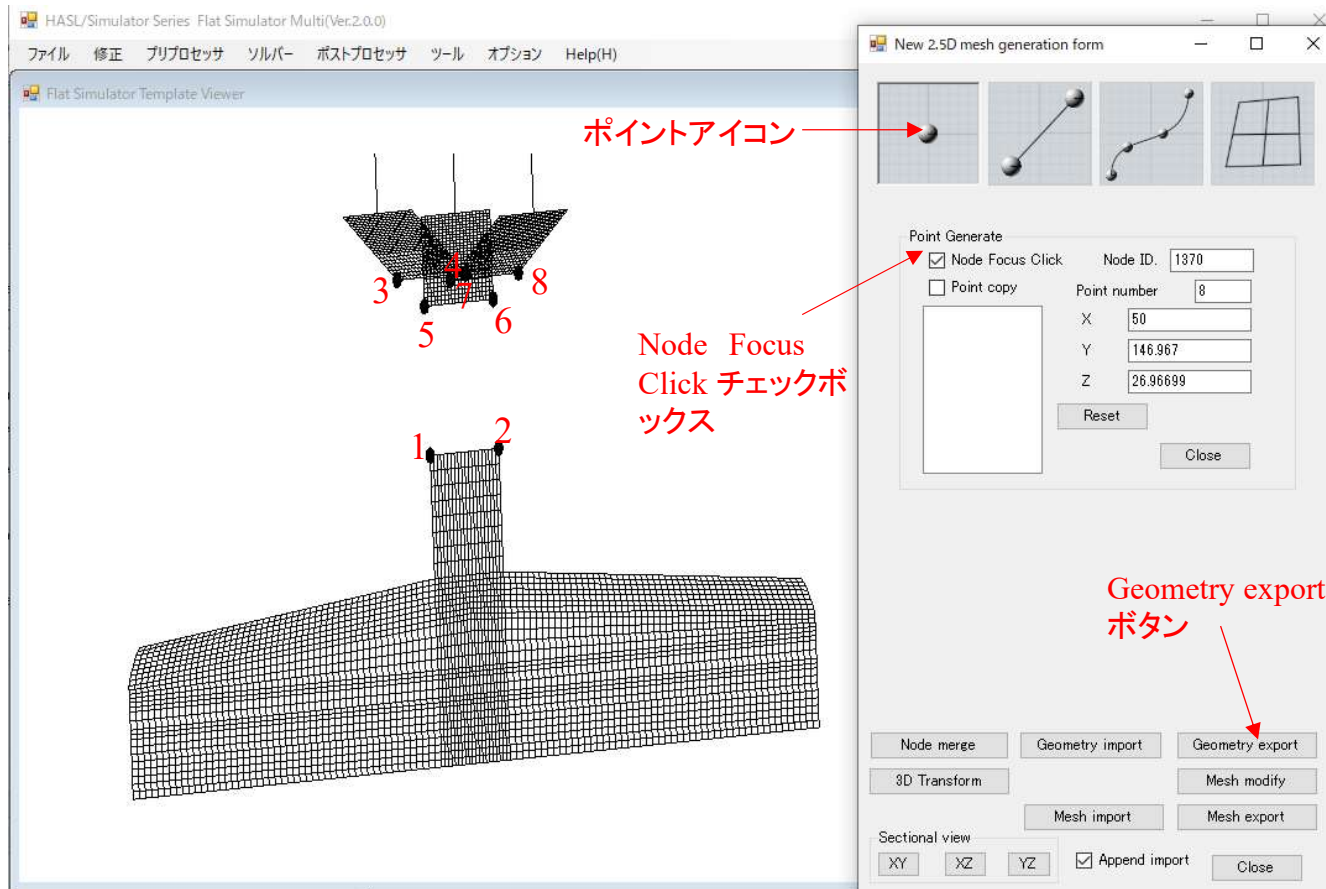


図13 コーナポイントの作成

次にラインアイコンをマウスクリック選択し、2ポイントを結ぶラインを作成します。Point 1,2の順にマウスクリック選択すると point 1, 2を結ぶラインが作成されます。この機能を利用し、下図に示す様に3つの4角形領域を作成します。作成後のライン情報は、Geometry export ボタンを押して適当な名称を付けファイルに保存します。

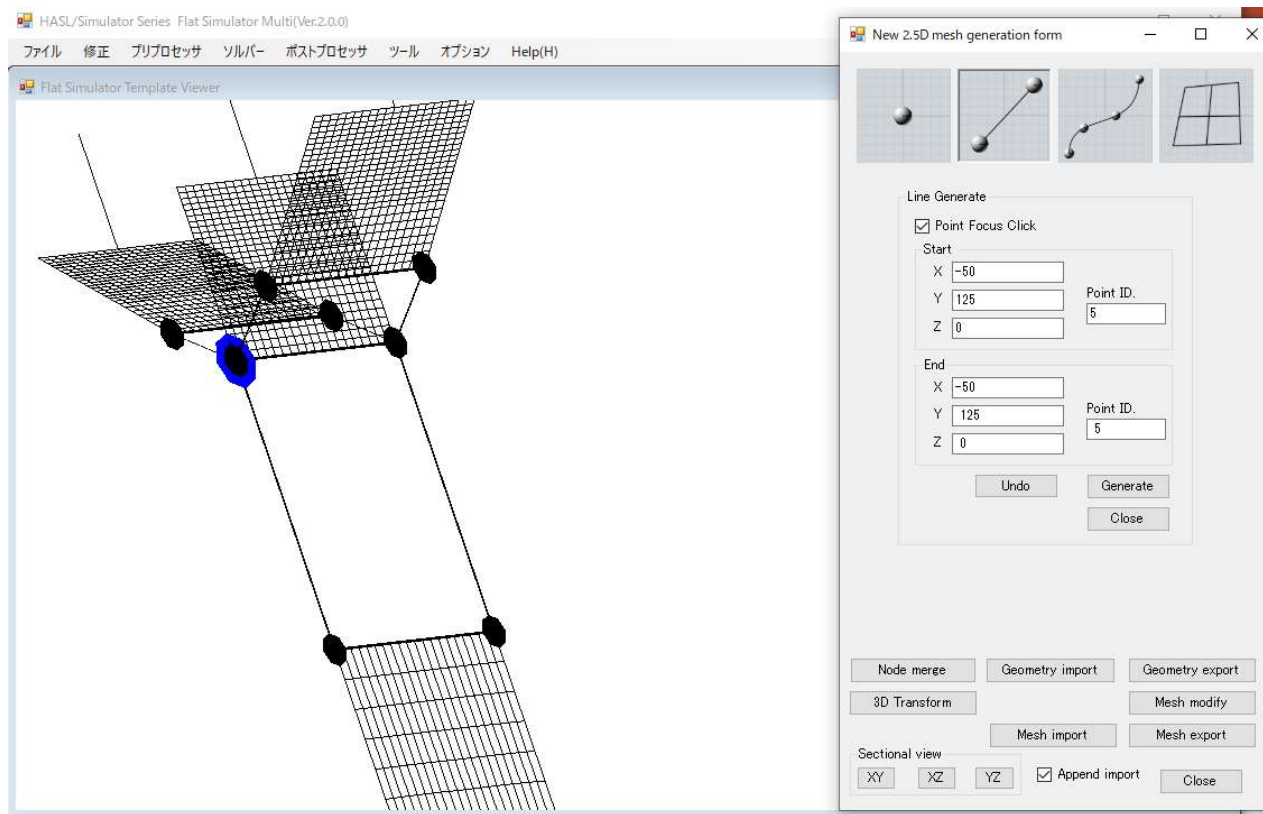


図14 領域の輪郭形状を表現するラインの作成

システムを再起動し，上流側フィード単層流路のメッシュ情報を読み込み，修正/2.5Dメッシュ追加をプルダウン選択して表示されるフォームにおいて，Geometry import ボタンを押し，前述の操作で作成したライン情報を読み込みます。

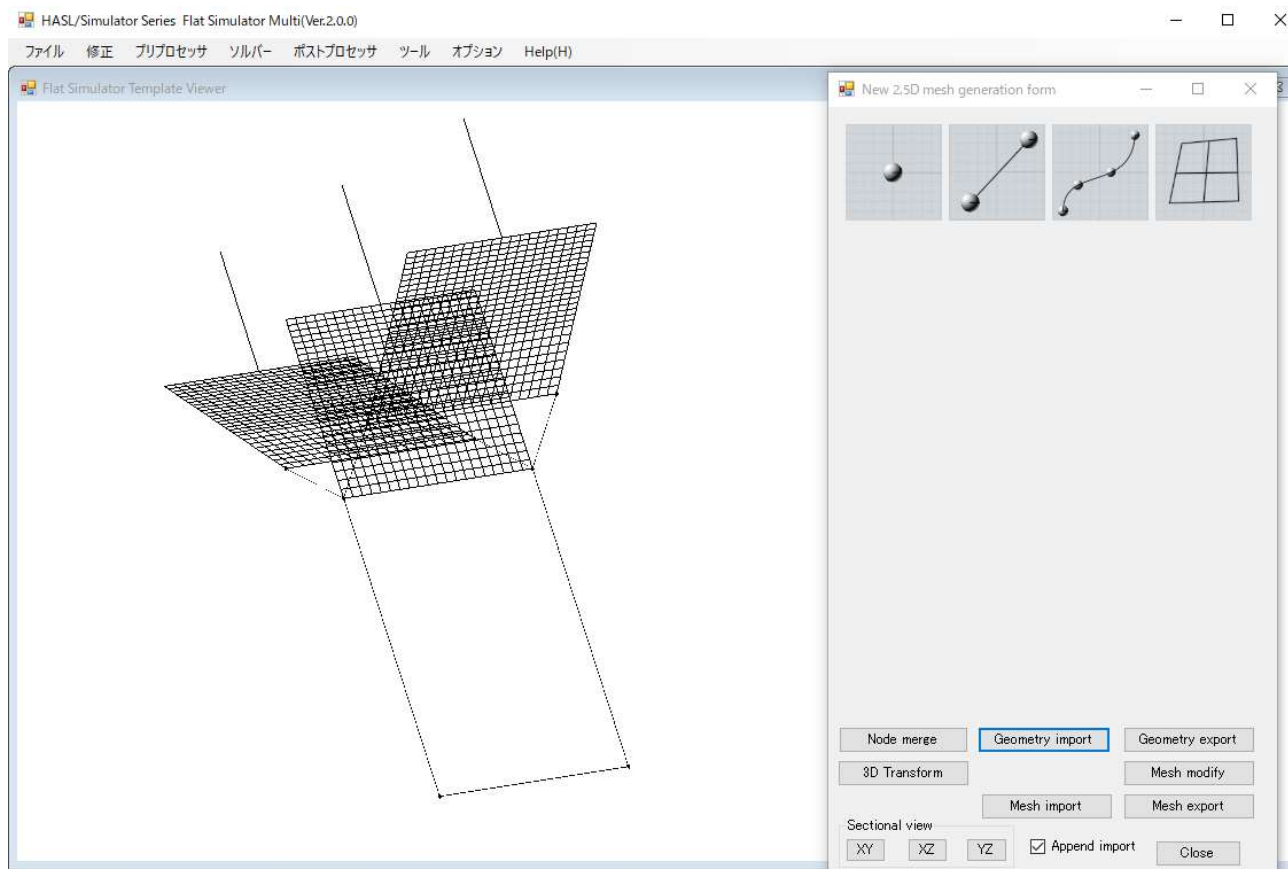


図15 上流側フィード単層流路メッシュ情報とライン情報の読み込み

メッシュ生成アイコンをマウスクリック選択し、要素分割領域の横(幅)方向と縦(高さ)方向の分割数と肉厚を指定します。プロパティ番号は、1以外を設定して下さい(1はマニフォールド部で既にご利用しているため)。Line Focus Click チェックボックスをチェック状態とし、下図に示す様に四角形領域の構成辺を下右上左の順序でマウスクリック選択します。マウスクリック選択時に交換を促すメッセージが表示されたらOKボタンを押します。最後のラインを選択した後、正常にループが形成されたというメッセージが出力されるのでOKボタンを押して下さい。この場合は、Generateボタンを押すことで、正常にメッシュを生成可能です。ループがクローズしていないというメッセージの場合は、メッシュの生成は不可です。この場合は、ポイントやライン情報が連結していないという意味ですので、これらの情報の確認と再生成が必要です。縦(高さ)方向の要素分割数は任意ですが、横(幅)方向の要素分割数は、上流側フィード単層流路と下流側コートハンガーダイのメッシュ情報と等しく設定する必要があります。

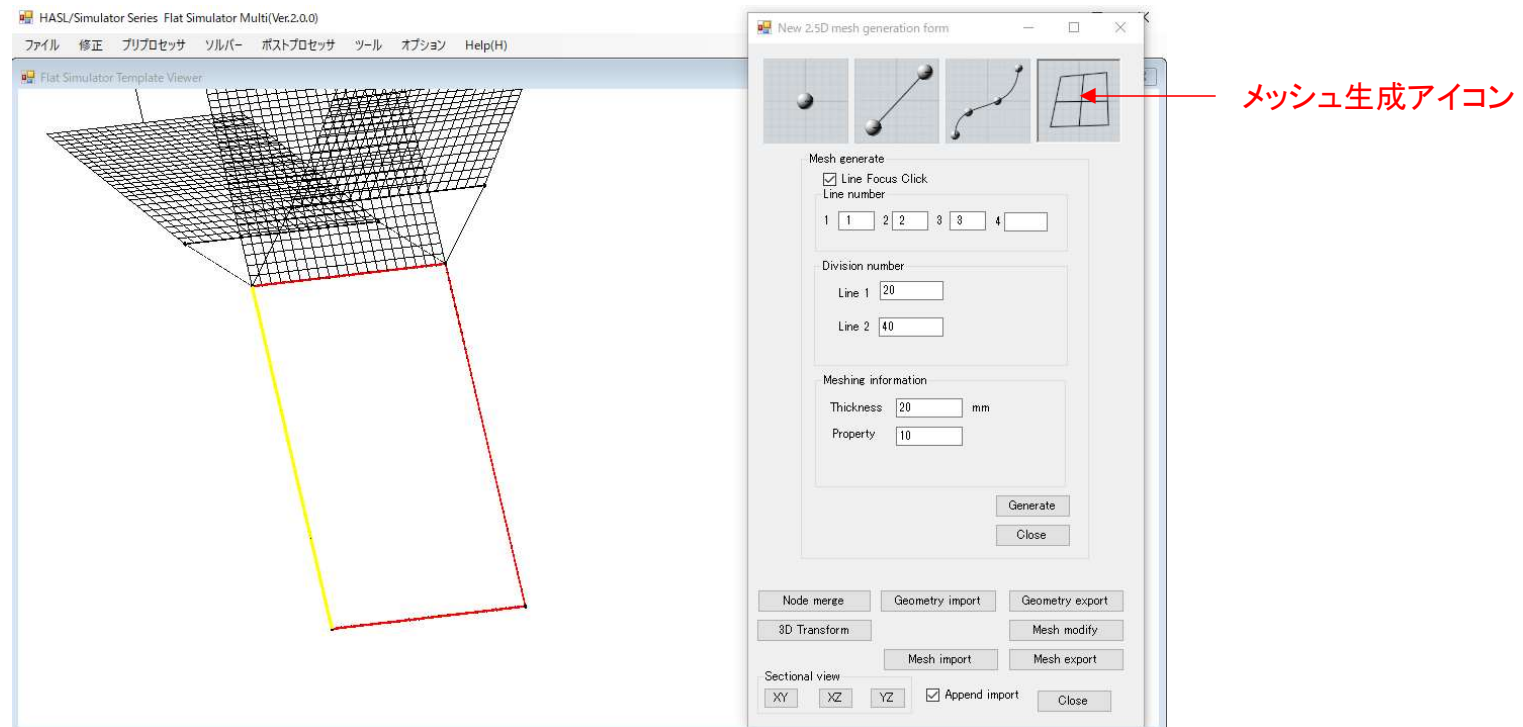


図16 四角形要素分割領域の選択



以上の操作を繰り返し、下図に示す様に連結流路領域の全てをメッシュ分割します。本生成例では、合流領域の肉厚は20mm、要素分割数は $20 \times 40$ 、上流側単層流路の肉厚は1mm、分割数は $20 \times 10$ としています。分割後は、隣接共有辺上に重複して生成されている節点をマージするために、Node mergeボタンを押します。節点マージ後、Mesh export ボタンを押して適当な名称を付けメッシュ情報をファイルに保存します。

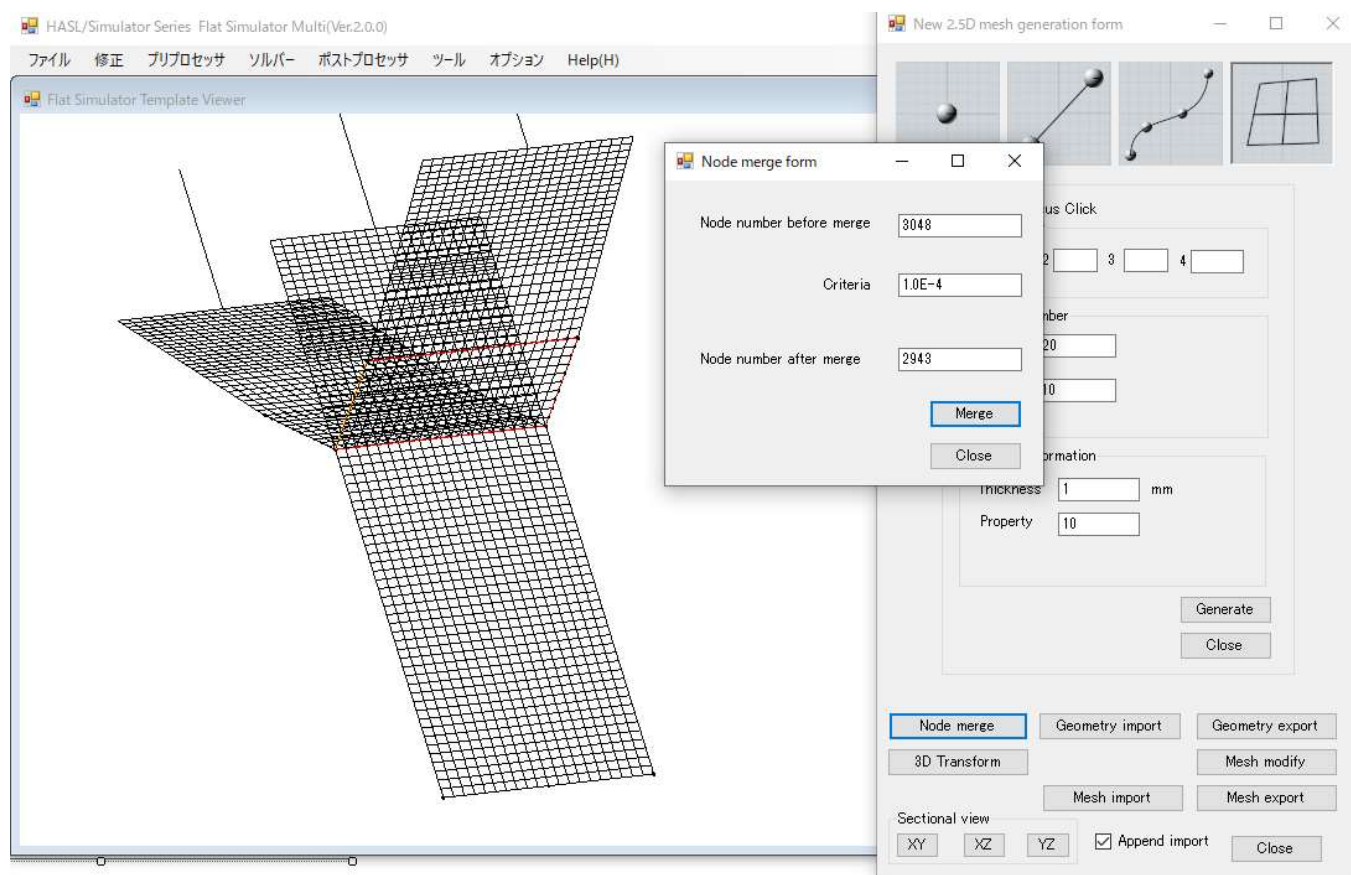


図17 要素分割と節点のマージ

次にMesh modify ボタンを押し、Layer configuration ラジオボタンをONとして層構成情報を設定します。本作成例では、Maximum layer number : 最大層数は3と入力します。YZボタンを押してモデルを側面から観察し、Box pick チェックボックスをチェック状態とし、層構成を設定する要素を選択します。選択後、Layer configuration : 層構成を設定し、Modify ボタンを押すことで層構成情報が設定されます。本作成例では、下図に示す様に4つの領域に層構成を設定しています。層構成情報の設定後、Mesh export ボタンを押して適切な名称を付けメッシュ情報を保存します。多層解析用メッシュファイルの拡張子は、multimshに自動的に変更されます。

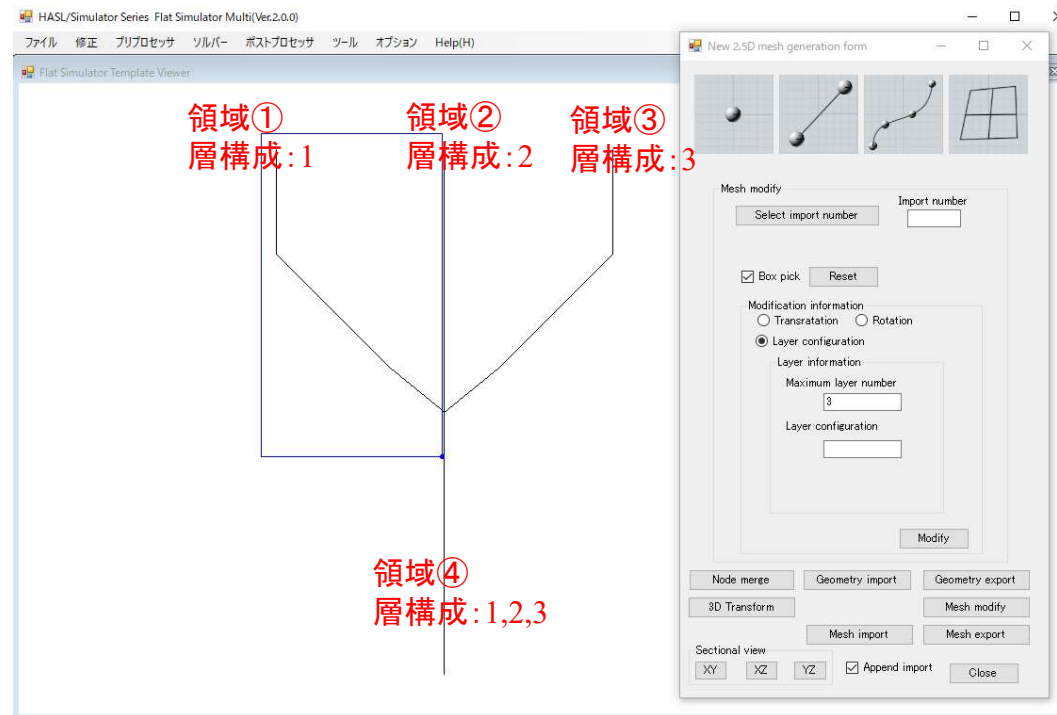


図18 層構成情報の設定

次に修正/2.5D メッシュ加工をプルダウン選択し、表示されるフォームでフレーム固定チェックボックスをチェック状態とし、ボックスピックラジオボタンをONとして要素全体をボックスピック選択します。温度境界条件変更ラジオボタンを押し、熱伝達係数と環境温度を設定して更新ボタンを押します。

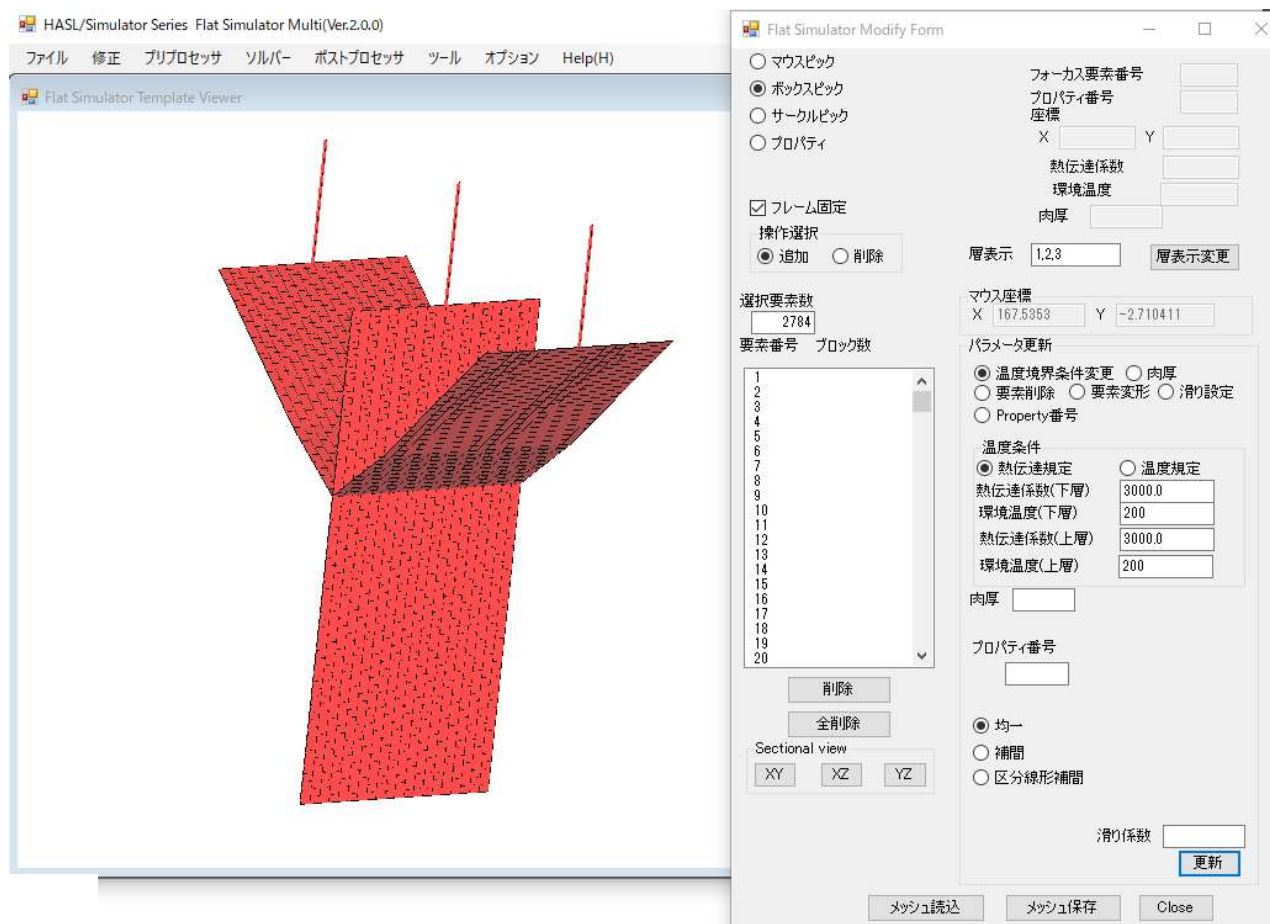


図19 温度境界条件の設定



必要に応じて要素肉厚情報を変更します。肉厚を変更する要素を選択します。肉厚ラジオボタンをONとし、区分線形補間ラジオボタンをONとして表示されるフォームで、MD補間ラジオボタンをONとするとMD(高さ方向)の肉厚分布を区分線形補間で設定可能です。高さ比率と肉厚の関係を設定し、追加ボタンを押します。ここで高さ比率0は、選択要素の下端(最下流側)、1は上端(最上流側)を意味します。更新ボタンを押すことで、下図に示す選択要素の肉厚のMD(高さ方向)の分布が更新されます。

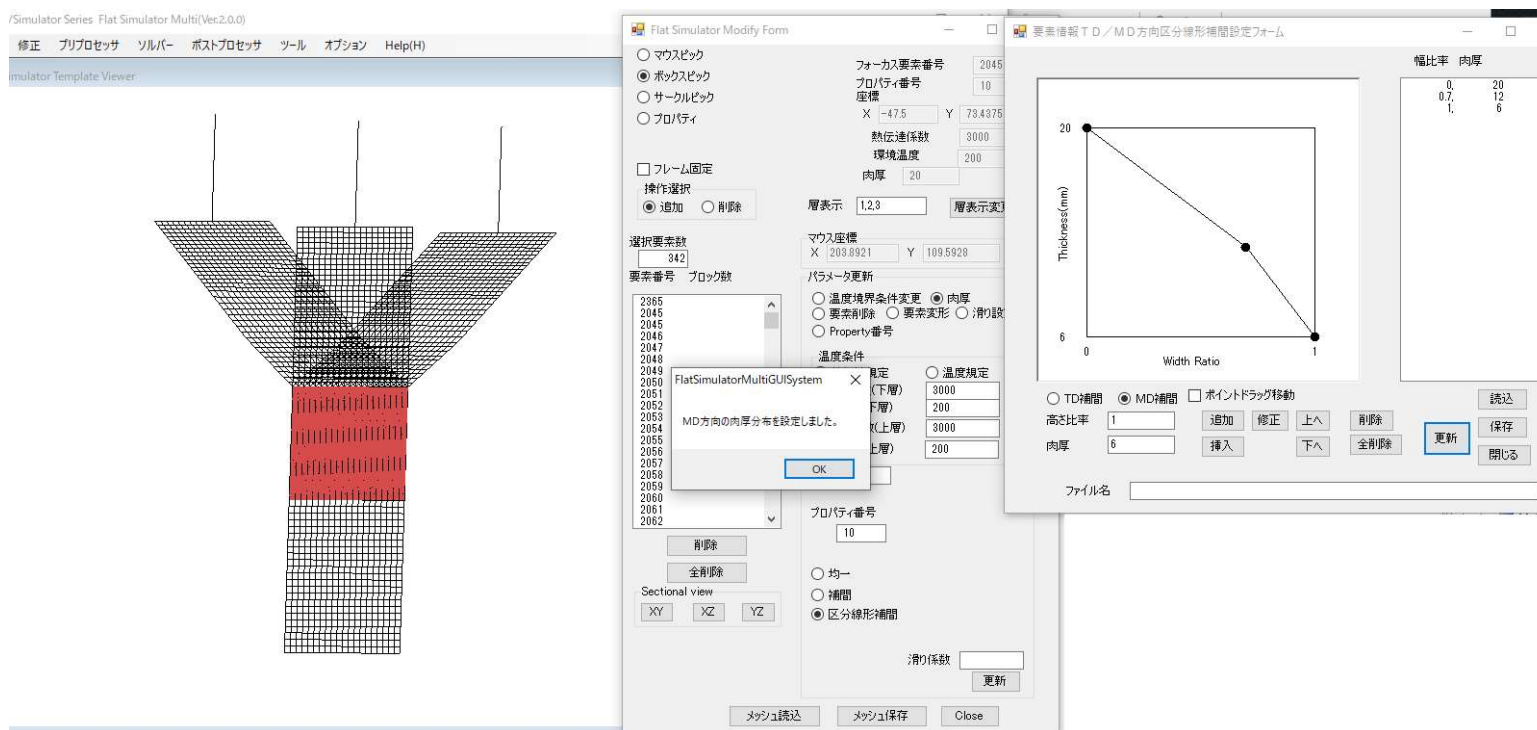


図20 MD方向肉厚分布の変更

Ver.2.0.0に新しく実装された疑似界面包み込みモデル(PEM : Pseudo Encapsulation Model)を適用する領域には、プロパティ番号を999に変更します。すなわち、プロパティ番号999の流路では、第2法線応力差がもたらす界面包み込み現象が疑似的に表現されます。PEMを適用する領域は、矩形断面を特徴とする流路に限定されます。合流直後の領域は、流動状態の変化が激しく、流路アスペクト比(流路肉厚H/流路幅W)が小さため、PEMの適用領域から除外します。ケースバイケースですが、合流位置より数メッシュ(本設定例では5メッシュ)より下流側の矩形断面流路を表現する計算要素にプロパティ番号999を設定します。PEMを適用する要素選択後、Property 番号ラジオボタンをONとし、プロパティ番号のテキストボックスに999を入力し、更新ボタンを押します。

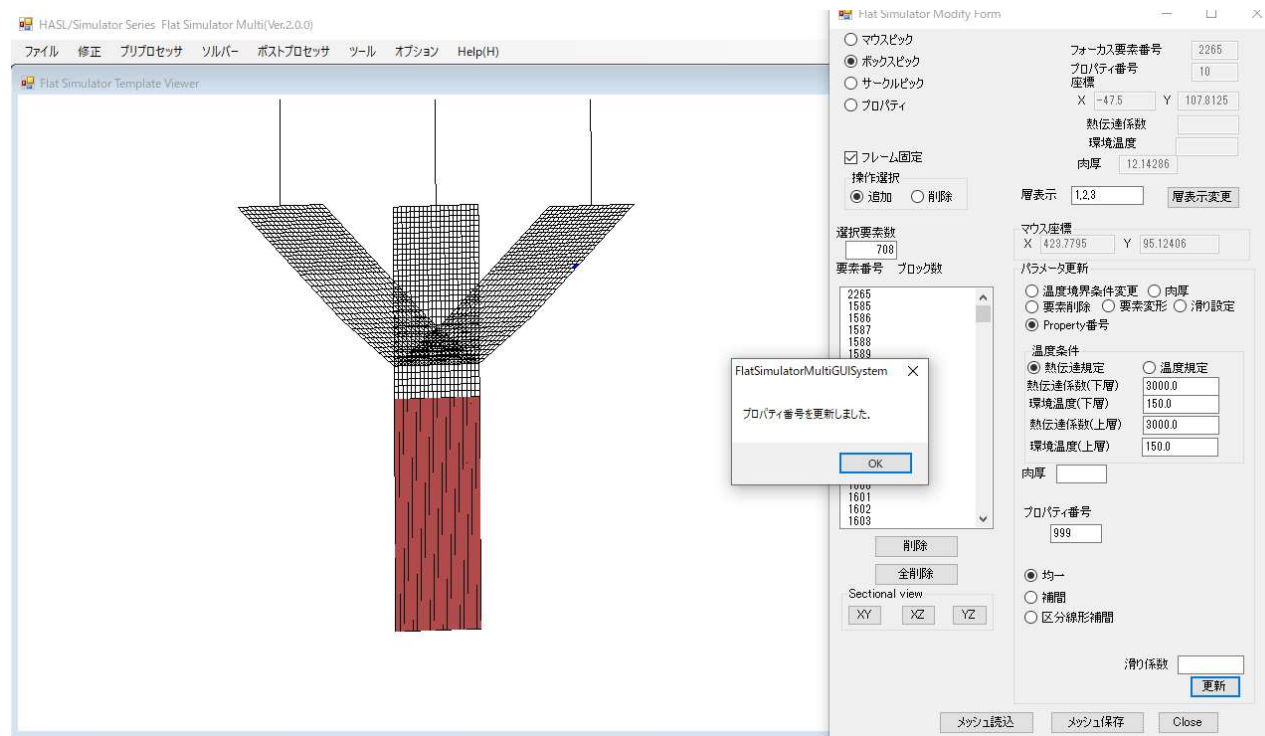


図21 疑似界面包み込みモデル適用領域(プロパティ番号999)の設定

ツール/Boundary condition set をプルダウン選択し, Qアイコンをマウスクリック選択します. 3か所の流入口をマウスクリック選択して, 決定ボタンを押し, 流量にダミーパラメータ1, 温度拘束条件同時設定パネルの設定チェックボックスをチェック状態として, 設定ボタンを押します.

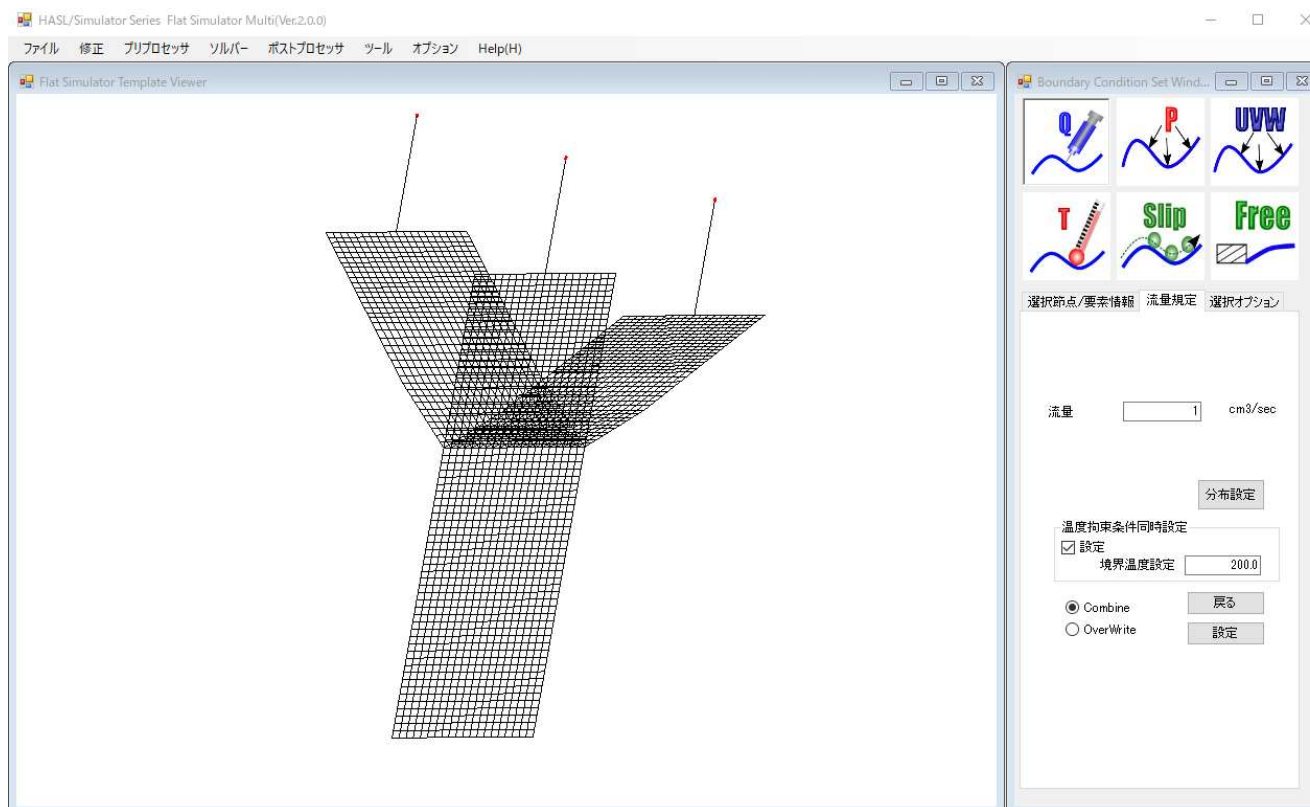


図22 流入口境界条件の設定

P アイコンをマウスクリック選択します。流出口をボックスピック選択して、決定ボタンを押し、圧力を0、温度拘束条件同時設定パネルの設定チェックボックスを非チェック状態として、設定ボタンを押します。以上の操作で解析モデルの作成作業は終了です。ファイル/メッシュファイルエクスポートをプルダウン選択し、適当な名称を付けてメッシュ情報をファイルに保存します。発達多層流動解析では、当ファイルをメッシュファイルとして利用します。

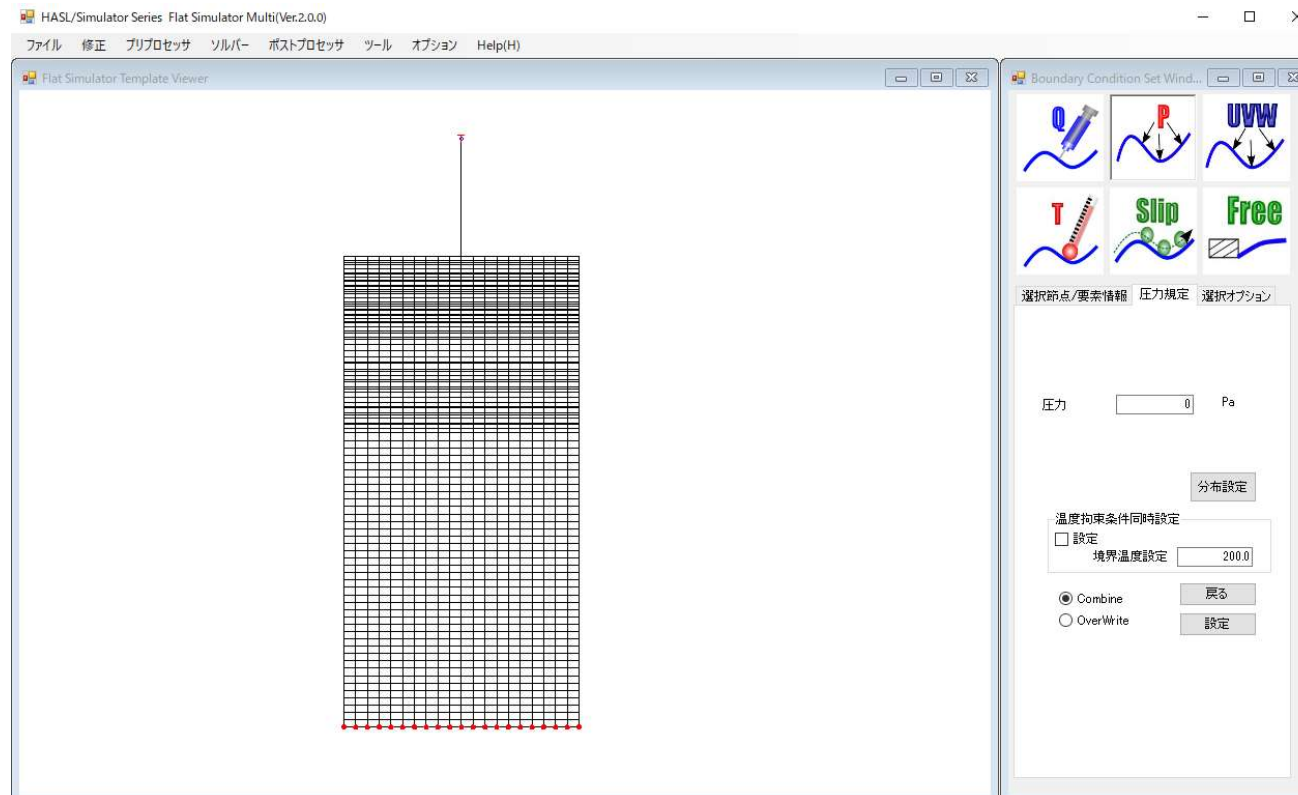


図23 流出口境界条件の設定

多層フィードブロックタイプコートハンガーダイの解析では、合流部断面形状(フィードブロックプロファイル)の変化が界面形成状況に及ぼす影響の分析が重視されます。2.5D 解析では、前述の手順で作成したFEMモデルを再生成し直す必要は無く、共用可能なメリットがあります。前述した操作で作成した解析モデルのメッシュファイルをインポートし、修正/2.5D メッシュ加工をプルダウン選択します。以下に示す操作では、合流位置から上流側3メッシュ分の流路肉厚をTD(幅方向)に対して指定した分布に変更する方法について解説します。各層のみを単独表示すると合流位置が不明になるため、下図に示す様にフレームチェックボックスをチェック状態とし、合流位置の目印となる要素をマウスクリック選択します。

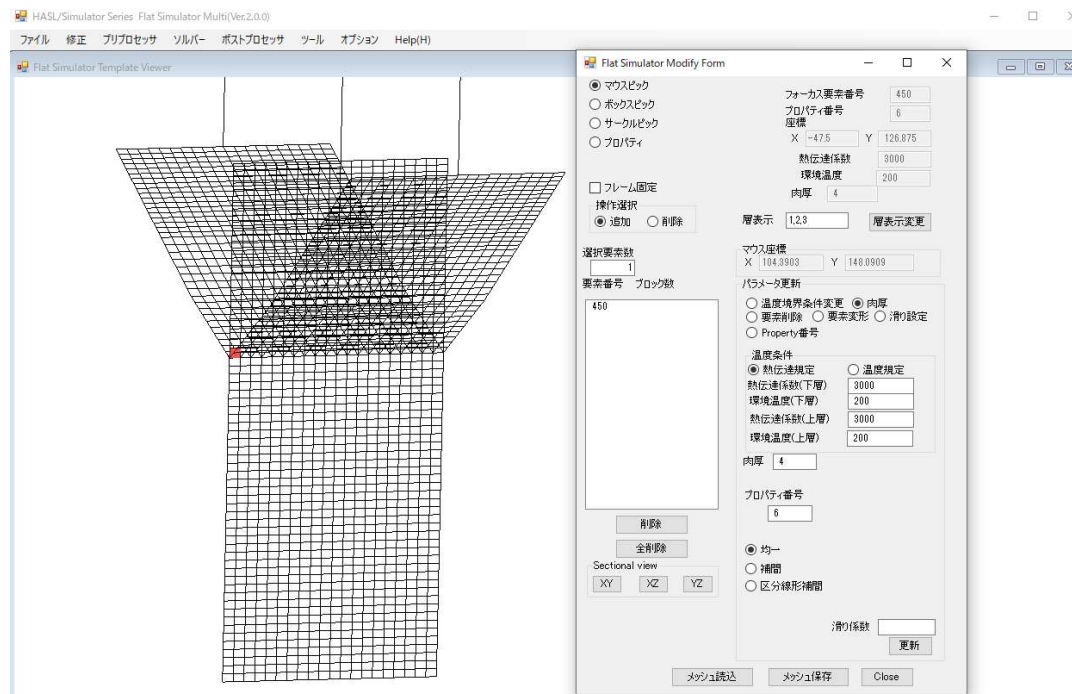


図24 フィードブロックプロファイルの設定方法(合流位置確認用の要素選択)



中間層(層番号2)の肉厚分布を設定するには、層表示番号を2として層表示変更ボタンを押します。当操作により表層(層番号1,3)の情報はマスクされます。先に選択した目印を基準に上流側3メッシュ分の要素をボックスピックで選択します。肉厚ラジオボタンをONとし、区分線形補間ラジオボタンもONとします。表示される区分線形補間設定フォームにおいて、TD補間ラジオボタンをONとし、幅比率と肉厚の関係を追加ボタンを押してリストボックスに登録します。この登録情報は、保存/読み込みボタンを押すことでファイルへの保存、ファイルからの読み込みが可能です。幅比率0はセンター、1はエッジを表し、更新ボタンを押すことでセンターに対して対称に肉厚分布が設定されます。本解析モデルでは、高粘性層である中間層の層厚が界面包み込み現象によって薄肉化するため、その不均一性を相殺するようにエッジ部のクリアランスを0.5mm拡大しています。

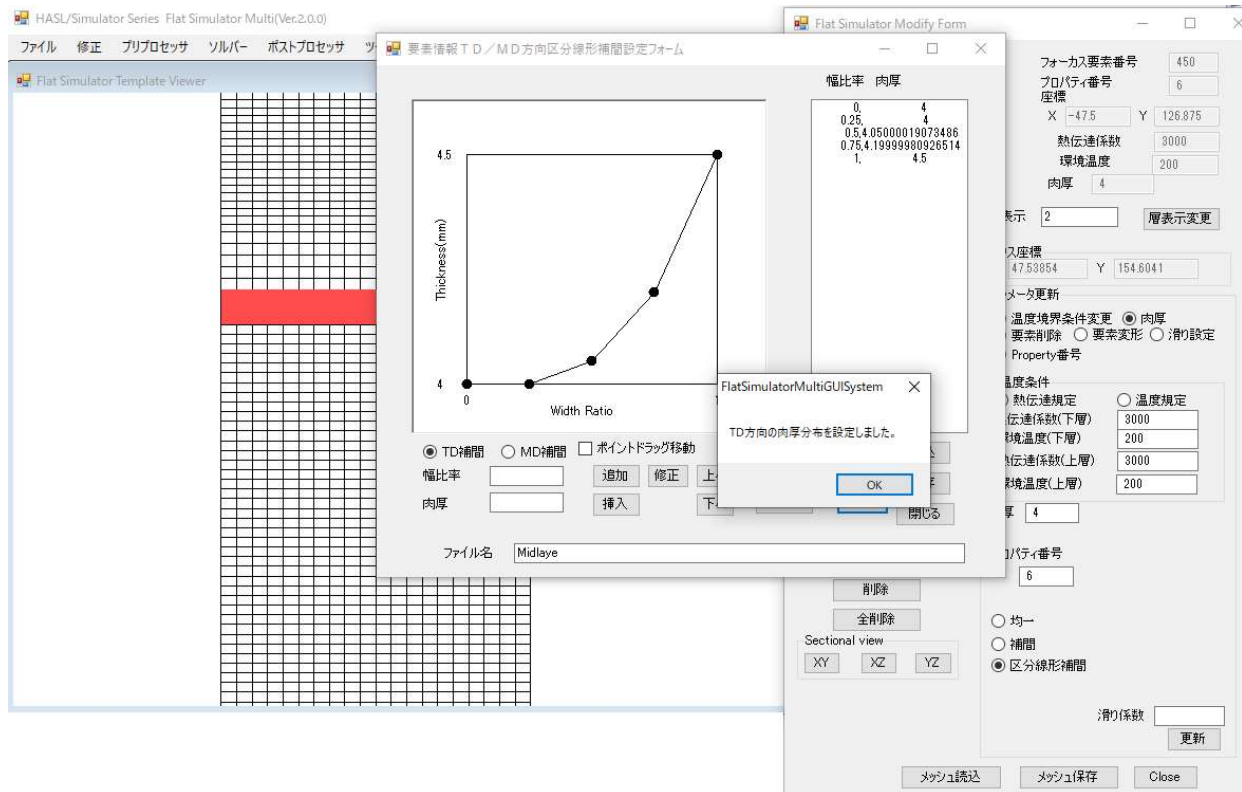


図25 フィードブロックプロファイルの設定方法(中間層フィードブロックプロファイルの変更)

同様の操作に従って、表層(層番号1,3)の肉厚は、界面包み込み現象を相殺させるために中間層とは逆にエッジ部のクリアランスを下図に示す様に小さくさせています。肉厚変更後は、元のファイル名とは別名でメッシュ情報を保存します。2.5D FEMではメッシュの再生成を行うこと無く、TDに対する肉厚分布情報を変更することでフィードブロックプロファイルの変化が多層界面形状に及ぼす影響を分析可能です。

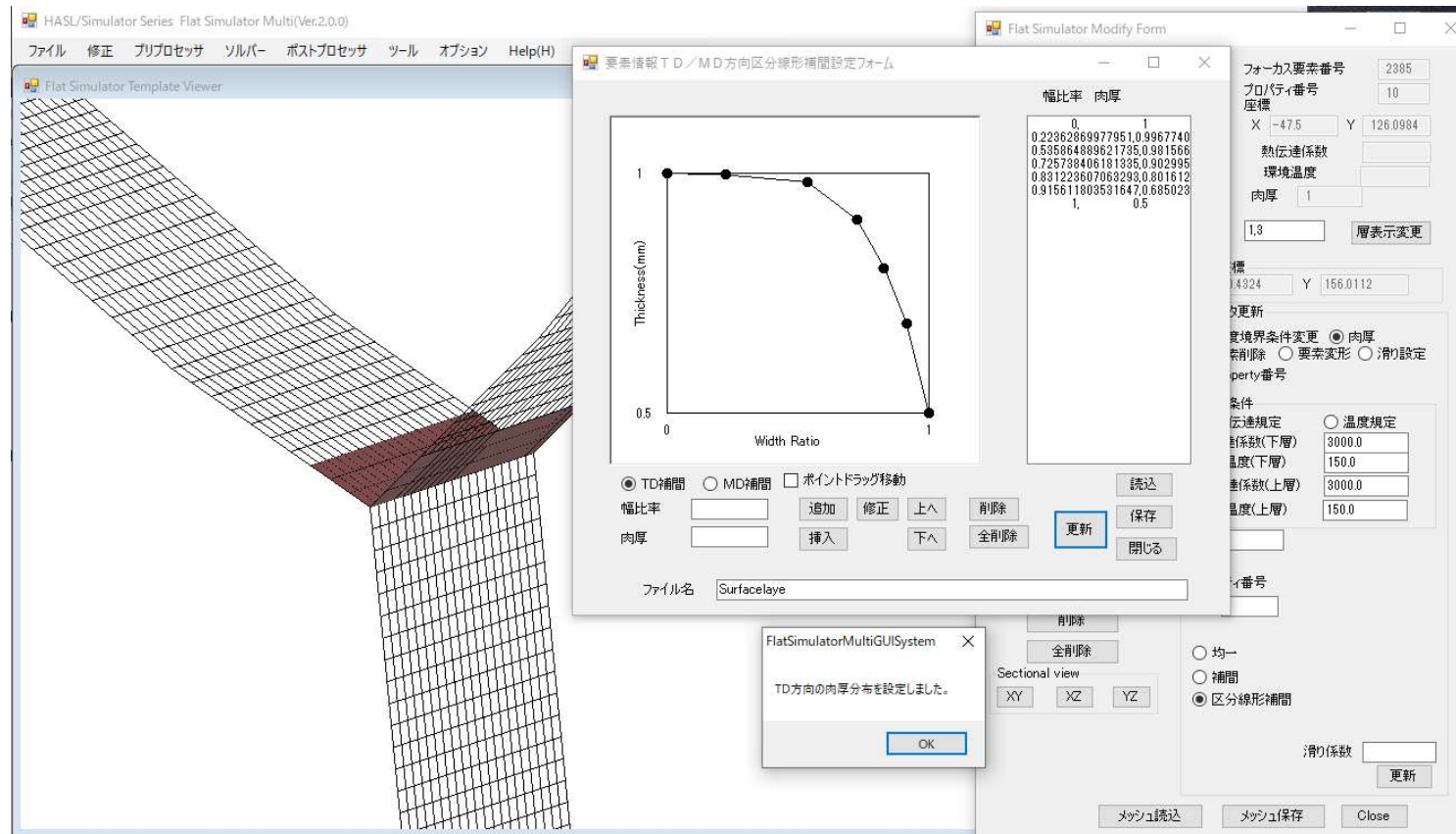


図26 フィードブロックプロファイルの設定方法(表層フードブロックプロファイルの変更)

## 2) 多層押出解析条件の設定

発達多層流動解析プログラムを利用する場合、Solver selection パネルでDeveloping ラジオボタンをONとします。完全発達多層流動解析と比較して収束性が悪く、数百～数千回の非ニュートン反復計算を要します。また、妥当な解析結果を得るために圧力差寄与係数や界面計算緩和係数を調整する必要があります。これらのパラメータは、1以下の正值に設定します。値が小さいほど、計算安定性が向上しますが、収束解を得るまでの反復計算回数が増加します。

**多層解析用メッシュ**

**ダミーファイル名 (存在しないファイル名を指定)**

**非ニュートン反復計算回数は数百～数千回の設定で十分**

**多層条件設定ボタン**

**値が大きいほど、圧力差が形状変化に及ぼす影響大 (最大値1:0.01程度が適正值, 問題によっては更に小さく設定する必要あり)**

**多層界面計算の未緩和係数 (最大値1:0.01程度が適正值, 問題によっては更に小さく設定する必要あり)**

**Developing ラジオボタンをon**

図27 発達多層流動解析の基本的な条件設定(プロジェクト名:Upperfeedback)



多層押出解析で採用する押出量条件や材料物性ファイルは、多層条件設定ボタンを押して表示される下記フォームに設定します。物性データファイルと押出量、及び第2法線応力差係数を層数分設定し、Ver.1.0.0と同様、Evolution parameterを反復計算回数増加に伴って1に漸近するように設定します。粘度比や流量比が大幅に異なるような非線形性の強い問題の場合は、当パラメータの増加を緩やかにするよう調整を要します。Evolution parameterの増加に伴って、多層流体間の相互作用が厳密に考慮されます。Evolution parameterを1とするのが理想的ですが、非線形性の強い問題の場合は、1に到達する前に解析不能になる場合があります。そのような場合には、結果が得られる条件内で解析結果を評価する妥協が必要です。

物性データファイル

HDPE\_B1  
LDPE\_D1  
HDPE\_B1

層数 3

第2法線応力差係数(Pa·s<sup>2</sup>)

-40  
-60  
-40

第2法線応力差係数

追加 修正 上へ 削除  
挿入 下へ 全削除

押出量(kg/h)

4  
16  
4

押出量(kg/h)

層数 3

追加 削除 全削除  
修正 上へ 下へ  
挿入

Evolutionパラメータ

1,	0.6
100,	0.6
200,	0.65
300,	0.7
400,	0.75
500,	0.8
600,	0.85
700,	0.9
800,	0.95
1000,	1

Iteration

Evolution parameter

追加 修正 上へ 削除  
挿入 下へ 全削除

確定  
閉じる

図28 発達多層流動解析の条件設定フォーム

Ver.2.0.0 で新たに入力データとして追加された第2法線応力差に依存して界面形状が変化します。第2法線応力差の精密な測定は難しく、(12)式に示したように、大雑把に第1法線応力差の-10~-15%程度に設定されることが多いです。第1法線応力差や第2法線応力差は、温度とひずみ速度に依存して変化します。一般的に第2法線応力差係数の絶対値は、ひずみ速度や温度の上昇に伴って低下する傾向を示すと言われています。粘度と同様、これらの非線形性を考慮することに技術的な障害はありませんが、第2法線応力差の収集が難しいことと PEM が様々な近似に立脚していることを理由として、Ver.2.0.0では、第2法線応力差係数を層毎に一定のパラメータ(負の値)に簡略化し、実測される層厚のフィッティングパラメータとみなしています。200°Cの温度条件下のLDPEに対して報告されている第1法線応力差は、ひずみ速度 $0.1\sim 10\text{ s}^{-1}$ の範囲において、 $10^3\sim 10^4\text{ Pa}$  の範囲で変化します。仮に界面上のひずみ速度を $10\text{ s}^{-1}$ 、第1法線応力差を $10^4\text{ Pa}$ 、第2法線応力差が第1法線応力差の-15%として、第2法線応力差係数を試算すると $-15\text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ となります。解析例では、中間層の界面上のひずみ速度が、およそ $5\text{ s}^{-1}$ であったため、第2法線応力差係数を $-60\text{ Pa}\cdot\text{s}^2$ と試算しています。このように第2法線応力差係数の絶対値は、 $1\sim 10^2$ のオーダーに設定することを推奨します。一般的に、多層流動では、安定性を確保するために中間層の粘度を高めた層配置が採用されることが多く、低粘性層の表層が、中間層を包み込む現象が問題視されています。粘度の高低と第2法線応力差係数の絶対値の高低は、対応関係にあると考えられますが、極端に高粘性層の第2法線応力差係数の絶対値が、低粘性層のよりも大きい場合には、高粘性層が低粘性層を逆に包み込み、実測とは逆の傾向が示されます。第2法線応力係数の絶対値が大きいほど、界面形状の変化が大きくなりますが、第2法線応力係数の比率も界面形成状態に強く影響します。第2法線応力差を適切に設定しないと、界面が押しつぶされ、解析不能に陥ります。妥当な解析結果を得るには、第2法線応力差を適切に調整するためのケーススタディを要しますが、計算時間は短く、1ケース当たり、数分~数十分の計算時間内に解析結果が得られます。

物性データファイルと第2法線応力差係数、及び押出量を層数分設定し、Evolution parameter を設定した後、確定ボタンを押します。閉じるボタンを押して当ホームを閉じ、解析実行タブメニューで保存ボタンを押して解析条件をファイル保存します。実行ボタンを押すことで発達多層流動解析プログラムが起動し、多層熱流動解析が行われます。

### 3) 多層熱流動解析結果のポスト処理

コンター図の作画方法は従来通り、表示層番号を設定し、作画内容をコンボボックスで選択します。Ver.2.0.0では、各層の肉厚を3D表示する機能が新規実装されました。コンターコントロールパネル内の肉厚を反映チェックボックスをチェック状態として描画ボタンを押すと下図に示す様に各層の肉厚を反映した3D化表示が可能です。

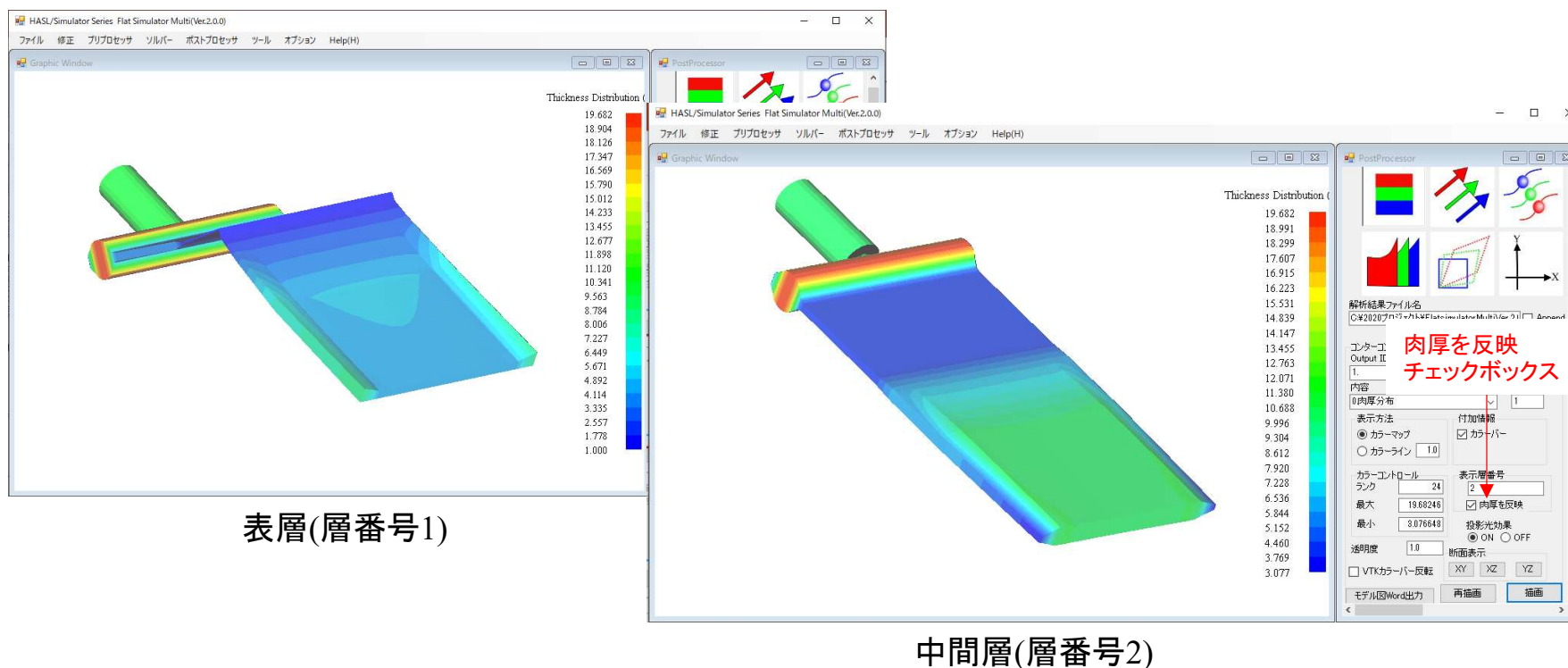


図29 各層の肉厚を反映した3D化表示

### 3.2 完全発達多層流動解析プログラム(Fully Developed Solver) の運用方法

完全発達多層流動解析プログラムは、下流側コートハンガーダイ内の多層流動状況を効率的に定量化可能です。当解析プログラムは、単独運用の他、前述したように上流側発達多層流動解析結果を解析モデルの流入境界条件に反映した連携運用が可能です。以下に、当解析モデルの運用法について解説します。

完全発達多層流動解析プログラムを利用する場合、Solver Selection パネルにおいてFully developed ラジオボタンをONとします。この際、Developing → Fullydeveloped パネルが表示されます。同パネル内のInterface チェックボックスをチェック状態とすると、連携ファイル(拡張子:fluxoutlet)の設定テキストボックスとSelectボタンが表示されます。この場合、連携ファイルを利用した連携運用となります。単独運用の場合、Interfaceチェックボックスを非チェック状態とします。



図30 完全発達流動解析プログラムの選択と  
上流側発達多層流動解析結果連携ファイルの選択

### 3.2.1 完全発達多層流動解析プログラム(Fully Developed Solver) の単独運用

単独運用の場合、以下に示す手順に従って操作を進めます。

#### 1) コートハンガーダイモデル作成

多層コートハンガーダイを作成する場合、Multi layer runner set チェックボックスをチェック状態とし、上流側フィートブロック矩形断面流路の半幅と肉厚をmm単位で指定します。

矩形断面流路半幅

矩形断面流路肉厚

Multi layer runner set チェックボックス

Region	Length(mm)	Width(mm)	Thickness(mm)
Runner	50	-	-
Mandrel	40.0	500	-
Preland	40.0	500	3
Choke1	8.0	-	-
Choke2	15.0	-	5
Choke3	8.0	-	-
Lipland	50	500	2
FreeSurf	0.0	-	3.0

図31 多層コートハンガーダイ基本形状設定フォーム

従来の方法に従って、2.5D 解析用メッシュを作成し、メッシュ情報とデータを保存します。次に、修正/2.5Dメッシュ追加をプルダウン選択し、表示されるフォームでLayer configuration ラジオボタンをonとします。モデル全体をボックスピックで選択し、最大層数と層構成番号を設定し、Modifyボタンを押しで多層解析用メッシュに変更します。変更後、close ボタンを押し、当フォームを閉じます。

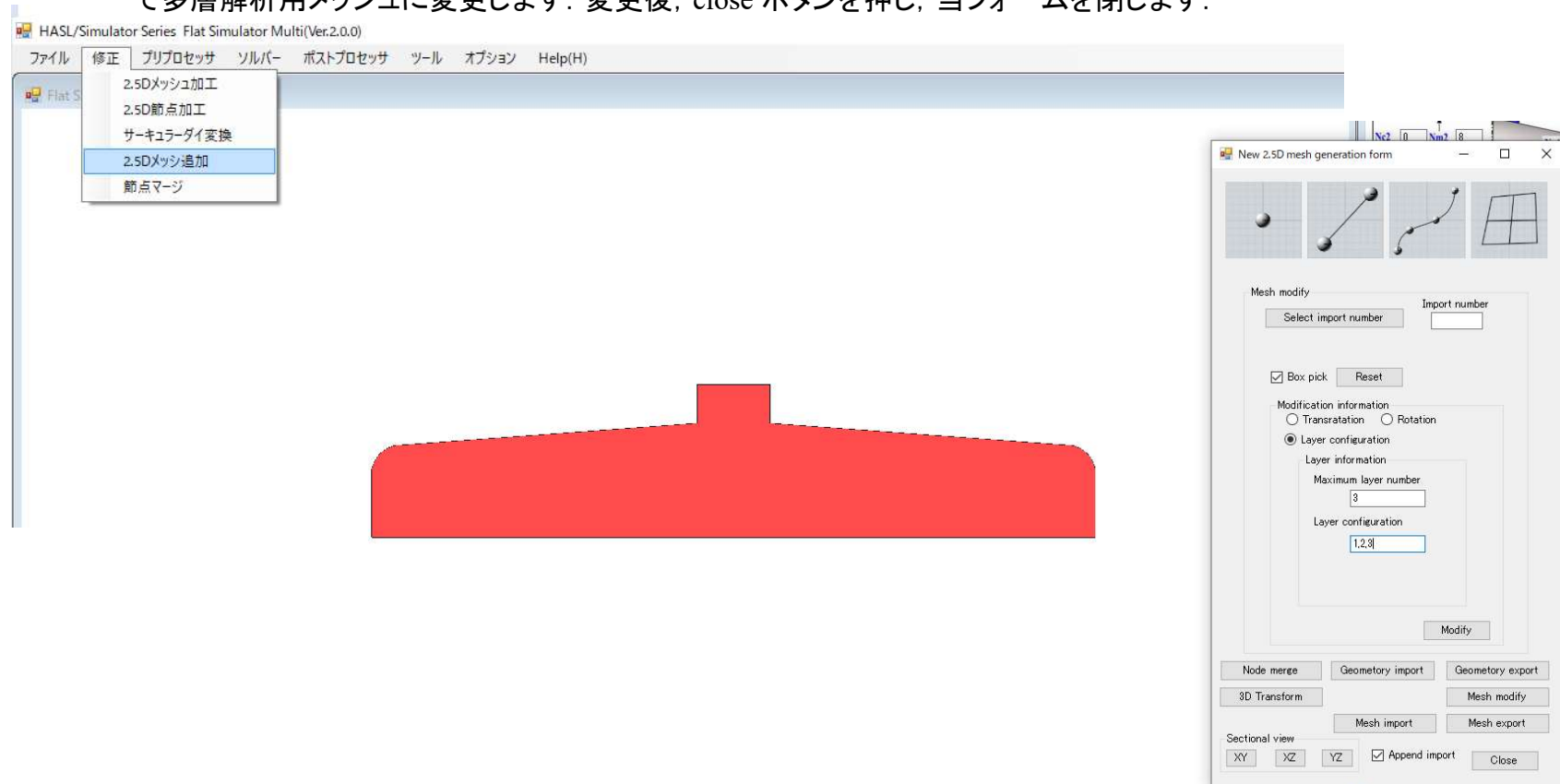


図32 多層コートハンガーダイ解析用メッシュへの変更



多層解析用メッシュには、部分的に温度境界条件が設定されていない領域があるため、修正/2.5Dメッシュ加工をプルダウン選択して表示されるフォームで、温度境界条件を設定します。フレーム固定チェックボックスをチェックし、ボックスピックで全要素を選択します。温度境界条件変更ラジオボタンをONとし、熱伝達係数と環境温度を設定し、更新ボタンを押します。メッセージボックスのOKボタンを押した後、Close ボタンを押して当フォームを閉じます。

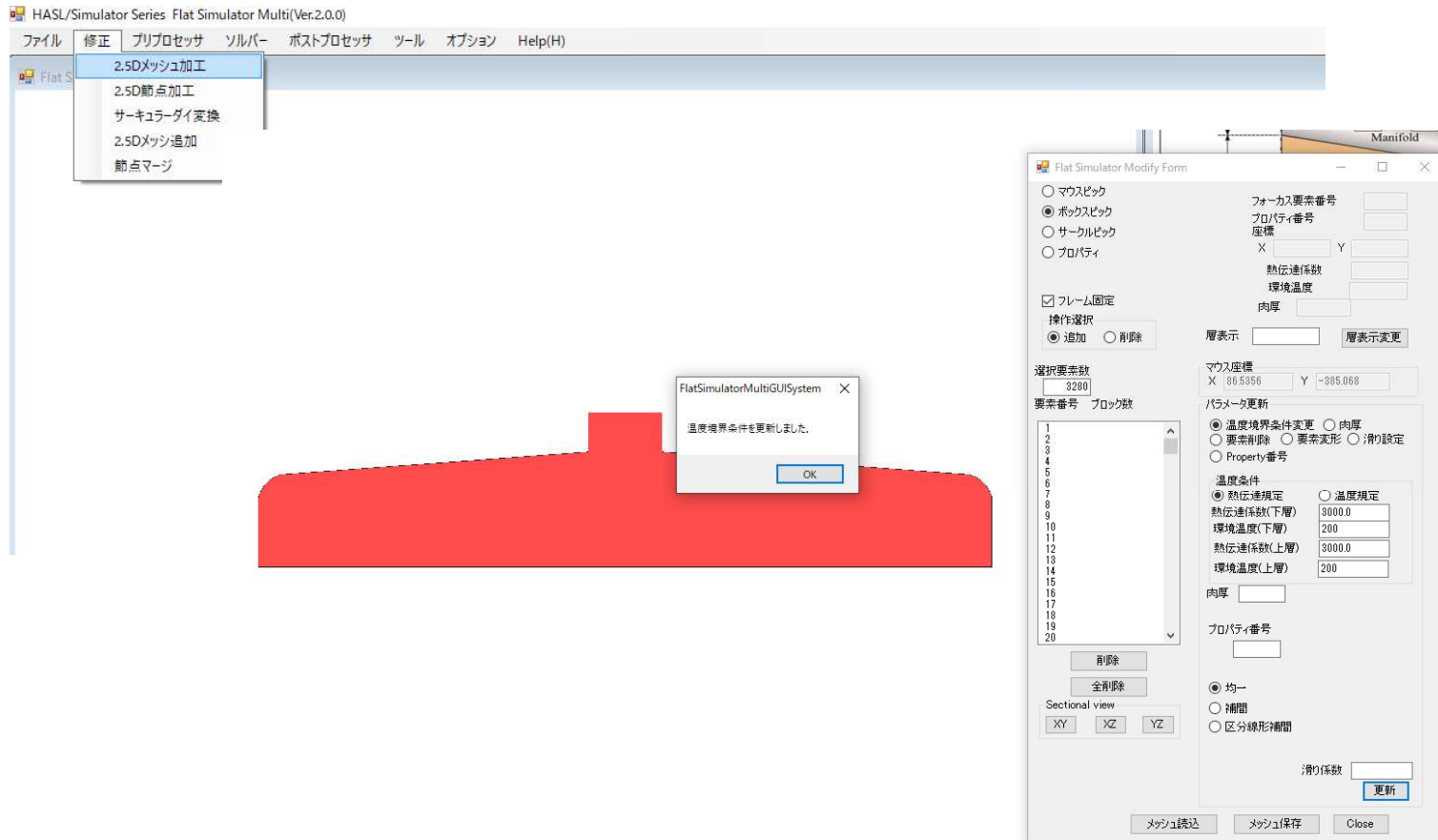


図33 多層コートハンガーダイ解析用メッシュの温度境界条件設定



ツール/Boundary Condition Set をプルダウン選択し、Qアイコンをマウスクリックします。ボックスピククで流入境界に位置する節点を一括選択し、決定ボタンを押します。流量規定タブメニューでは、仮の流量1cm<sup>3</sup>/secを設定し、温度拘束チェックボックスをチェック状態として、境界温度を設定し、設定ボタンを押します。以上の操作で解析上必要になる流入口境界条件が設定されます。流出口には、デフォルト状態で圧力0既定/断熱境界条件が設定されています。

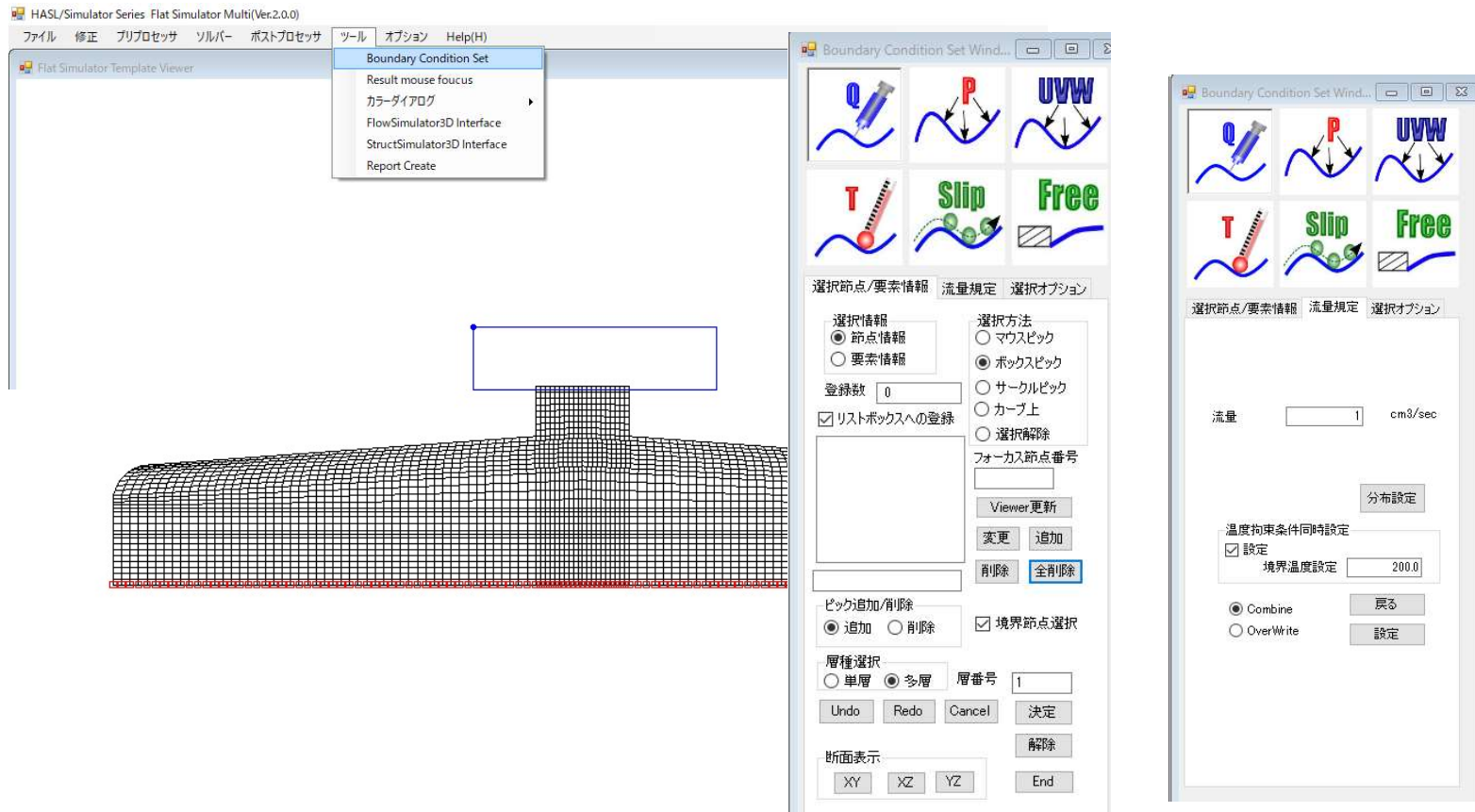


図34 多層コートハンガーダイ解析用メッシュの流入口境界条件設定

仮流量1を設定した節点には、解析条件として設定される押出流量が均一に配分されます。意図的に流量配分を指定することも可能です。流量配分を指定する場合は、流量を設定する節点を選択した後、流量規定タブメニューに新規実装された分布設定ボタンを押します。



図35 流量配分用分布設定ボタン

表示された流量配分設定フォームにおいて、流量配分比の幅比率依存性を区分線形分布で指定します。ここで、幅比率は、0がセンター、1がエッジを表します。流量配分比は、センターに対して左右対称に設定されます。幅比率と流量配分比のテキストボックスに、設定値を入力し、追加ボタンを押すことで、設定値がリストボックスに登録されます。2点以上登録すると分布状態がグラフプロットされます。ポイントドラッグ移動チェックボックスをチェック状態とするとグラフプロットされているポイントをマウสดラッグで移動可能になります。登録情報は、読み込/保存ボタンを押すことで読み込/保存が可能です。設定層に流量配分を設定する層番号を入力し、設定ボタンを押すことで流量配分比が設定されます。流量配分比は、全層に対して設定する必要があります。下記の例では、層数:3とし、表層:1,3には、エッジ部がセンター部より流量配分比が高い設定、中間層:2には、均一な流量配分比を設定しています。

**表層:1,3の不均一流量配分比設定**

幅比率 流量配分比

0	1
0.151898697018623	1.018432
0.345991611480713	1.069128
0.536884949226379	1.211981
0.751054704169301	1.447005

設定ボタン

**中間層:2の均一流量配分比設定**

幅比率 流量配分比

0	1
1	1

流量配分比を設定する層番号を指定

FlatSimulatorMultiGUISystem

TD方向の流量配分比分布を設定しました。層番号: 1

OK

図36 各層毎の流量配分比の設定

層  $l$  の節点  $i$  に配分される流量  $Q_i^l$  は、次式で表されます。

$$Q_i^l = \frac{w_i}{\sum_{k=1}^n w_k} Q_{ex}^l \quad (25)$$

ここで、 $n$  は選択節点数、 $w_i$  は、節点  $i$  の流量配分比、 $Q_{ex}^l$  は、層  $l$  の全押出流量です。

前述した通り、完全発達流れの定式化では、押出流量の最も多い基準層  $m$  に対する相対層  $l$  の流量比は、基準層の流線に沿って一定となります。流量配分比を設定しない場合(均一流量配分比の場合)には、流量比は、解析モデル全体にわたって、解析条件として設定する各層の全流量の比率に等しくなります。従って、流量配分比を設定しない場合には、流量比分布の計算は省略され、解析結果として該当する情報も出力されません。一方、流量配分比を不均一に設定する場合には、(25)式で計算される各層の流量比を流入口境界条件として考慮し、流量比分布の計算が行われ、解析結果として流量比分布解析結果が出力されます。

以上で多層解析用メッシュの生成作業は終了です。最後に、ファイル/メッシュファイルエクスポートをプルダウン選択して表示されるファイルセーブダイアログボックスにおいて適当なファイル名を設定してメッシュ情報を保存します。多層解析用メッシュファイルの拡張子は、multimsh です。

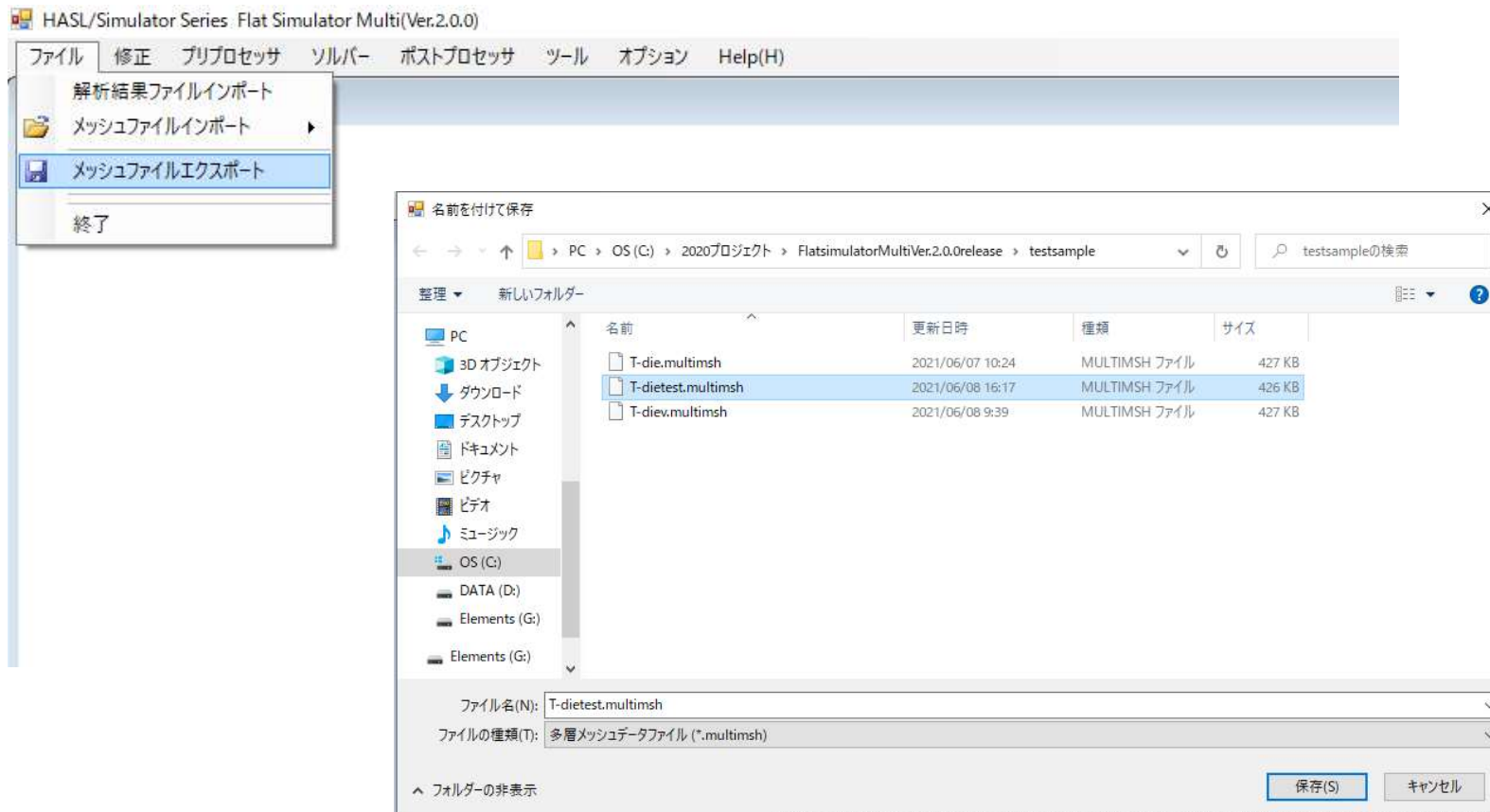


図37 多層コートハンガーダイ解析用メッシュの保存

## 2) 多層押出解析条件の設定

完全発達多層流動解析プログラムを利用する場合、Solver selection パネルでFully developed ラジオボタンをONとします。発達多層流動解析と比較して収束性が良好で、数十回の非ニュートン反復計算で収束解が得られます。また、発達多層流動解析で調整を要する圧力差寄与係数や界面計算緩和係数はダミーパラメータとなり、運用も容易です。

The screenshot shows the 'Flat Simulator Template' window with several panels. Red arrows and text provide the following annotations:

- 多層解析用メッシュ**: Points to the 'メッシュデータファイル名' field containing 'T-die'.
- ダミーファイル名 (存在しないファイル名を指定)**: Points to the '物性データファイル名' field containing 'multi'.
- 非ニュートン反復計算回数は数十回の設定で十分**: Points to the '非ニュートン反復計算回数' field set to '20'.
- 多層条件設定ボタン**: Points to the '多層条件設定' button in the '成形条件' panel.
- ダミーパラメータ(1に設定)**: Points to the '圧力差寄与係数' and '界面計算緩和係数' fields, both set to '1'.
- Fully developed ラジオボタンをon**: Points to the 'Fully developed' radio button in the 'Solver selection' panel.

図38 完全発達多層流動解析の基本的な条件設定

多層押出解析で採用する押出量条件や材料物性ファイルは、多層条件設定ボタンを押して表示される下記フォームに設定します。発達多層流動解析で調整を要するEvolution parameter もダミーパラメータとなります。Iteration 1, Evolution parameter 1と設定し、追加ボタンを押してリストボックスにダミーパラメータを登録して下さい。物性データファイルと押出量を層数分設定した後、確定ボタンを押します。閉じるボタンを押して当ホームを閉じ、解析実行タブメニューで保存ボタンを押して解析条件をファイル保存します。実行ボタンを押すことで完全発達多層流動解析プログラムが起動し、多層熱流動解析が行われます。

図39 完全発達多層流動解析の条件設定フォーム



### 3) 多層熱流動解析結果のポスト処理

コンター図の作画方法は従来通り、表示層番号を設定し、作画内容をコンボボックスで選択します。流入口に流量比分布を設定した完全発達多層熱流動解析では、相対層(基準層を除く層)の流量比分布の図化出力項目が追加されました。基準層や発達多層流動解析では、流量比分布は出力されません。

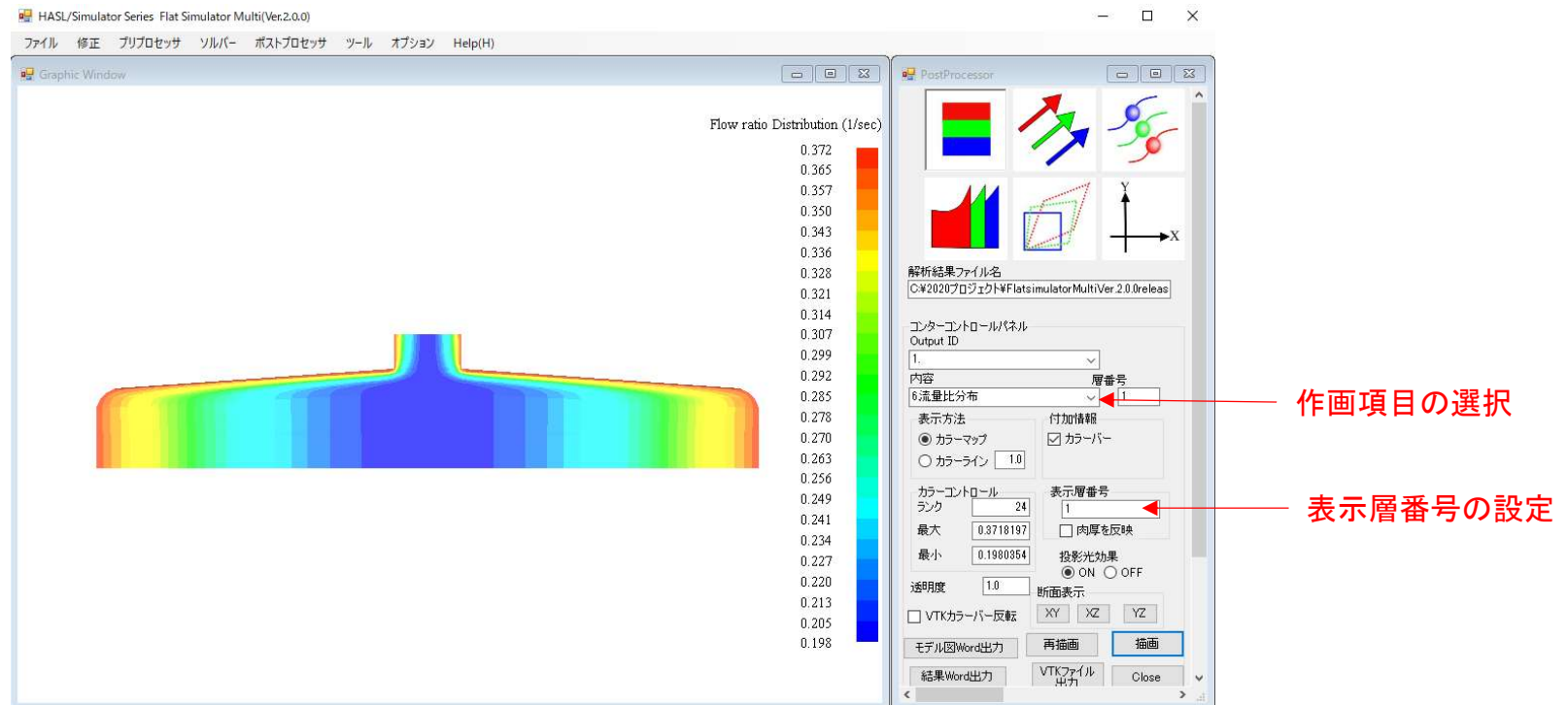


図40 コンター図の作画例(流量比分布コンター図)

グラフ図の作画方法も従来通りです。主要な評価項目である流出口における計算量をグラフプロットするには、2.5D多層流動解析結果(拡張子25dmultirst)ファイルを読み込み、グラフコントロールフォームで、Outlet ラジオボタンをONとして、流出口の節点を一括選択します。出力層番号を設定し、作画項目をコンボボックスで選択します。X方向のラジオボタンをONとした後、描画ボタンを押すことで選択された作画項目がグラフプロットされます。

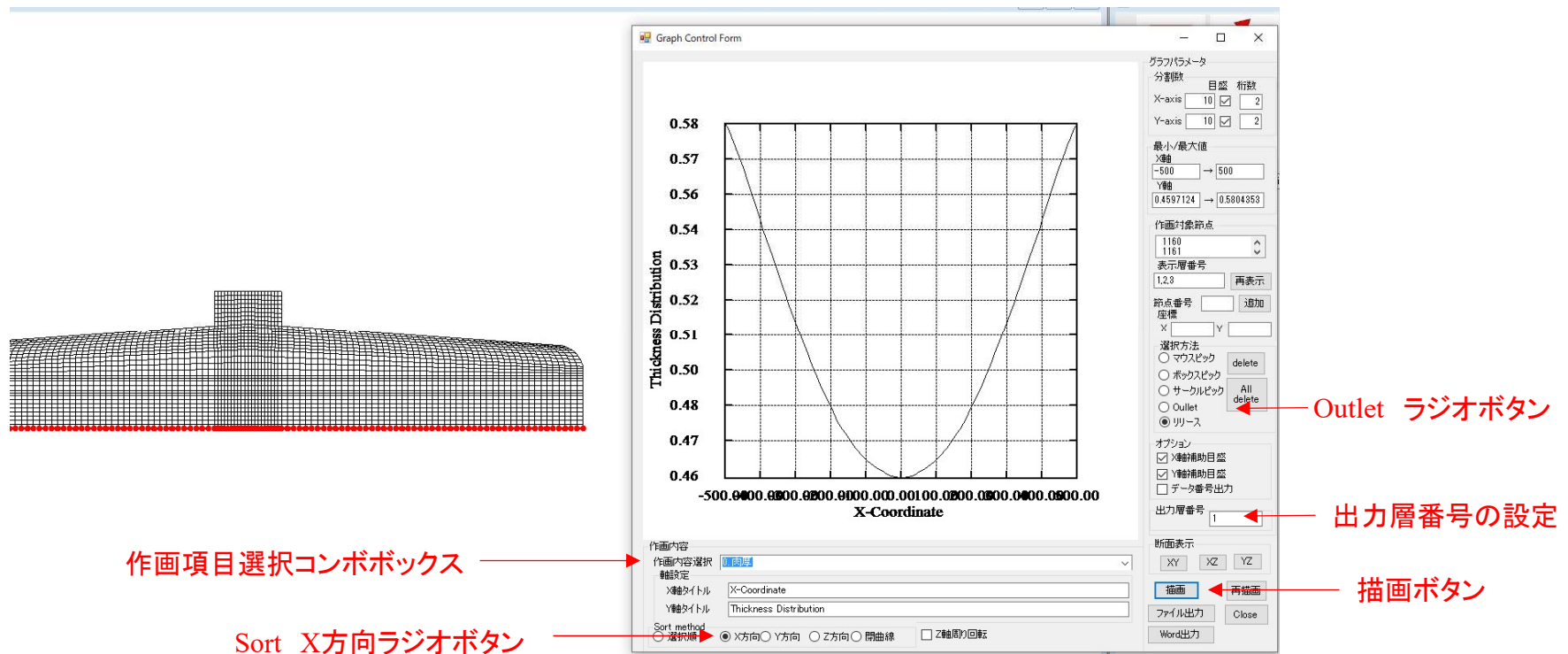


図41グラフ図の作画例(流出口における表層1の層厚分布グラフ図)

計算量の肉厚方向の分布をグラフプロットする場合は、マウスクリックラジオボタンをONとし、作画対象とする節点をマウスクリック選択します。作画項目選択コンボボックスで層~の作画項目を選択し、描画ボタンを押すことで、選択された作画項目の肉厚方向の分布がグラフ出力されます。

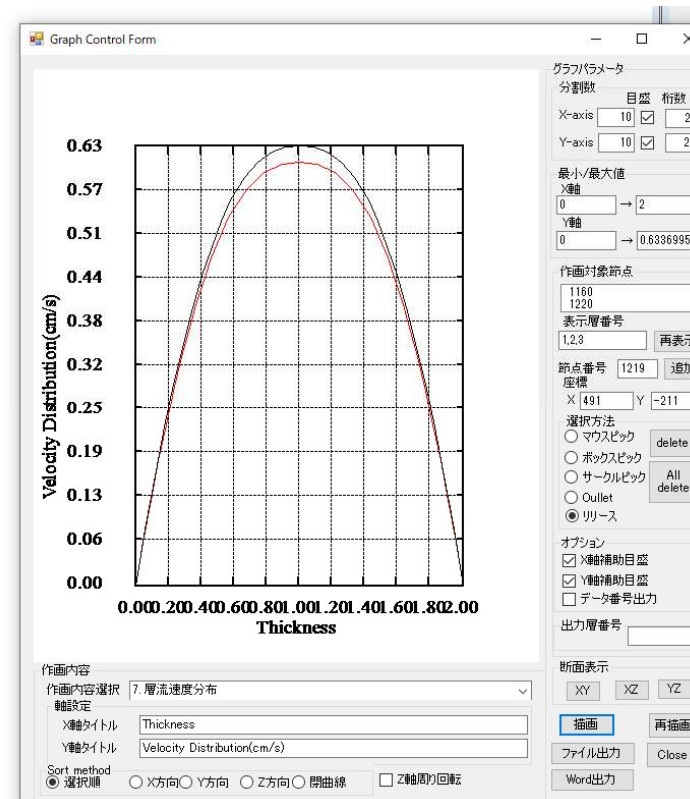
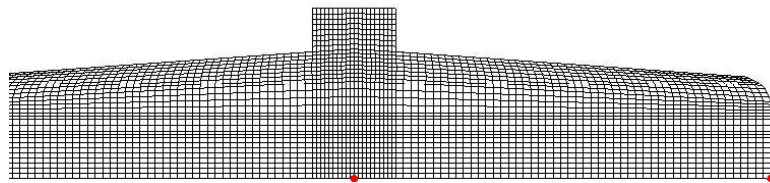


図42 グラフ図の作画例(センター, エッジ部における層流速分布グラフ図)

### 3.2.2 発達多層流動解析プログラム(Developing Solver)と 完全発達多層流動解析プログラム(Fully Developed Solver)の連携運用

本節では、フィードブロックタイプコートハンガーダイをサンプルとして、多層流動解析プログラムの連携運用例を示します。解析対象は、下図に示す2.5D FEM モデルです。

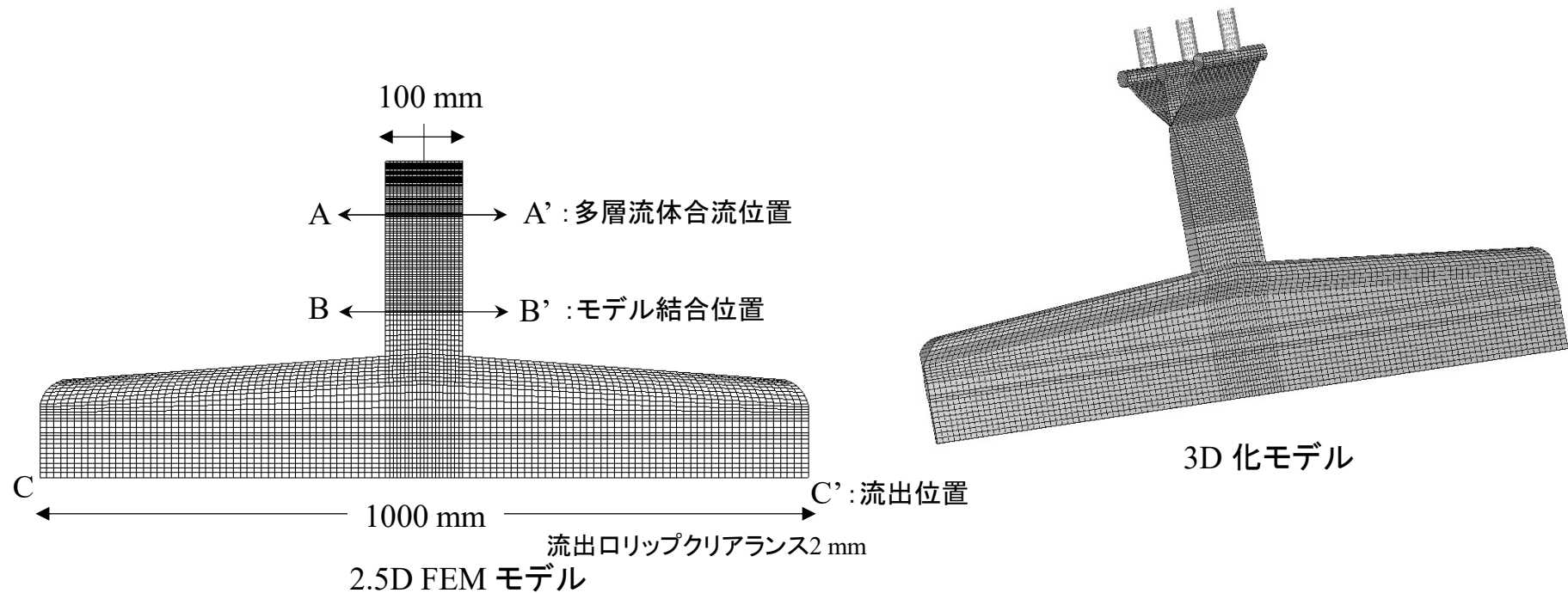


図43 フィードブロックタイプ多層コートハンガーダイ解析モデル

解析モデルは、図43内B-B'で連結されています。上流側モデルの解析に対しては、発達多層流動解析プログラム (Developing Solver)を適用しました。多層押出条件は、以下に示す通りです。第2法線応力差係数を設定し、上流側フィードブロック流路内の界面包み込み現象を疑似的に表現しています。

多層流動解析条件設定フォーム

層数 3

物性データファイル

HDPE\_B1  
LDPE\_D1  
HDPE\_B1

選択 削除  
全削除  
上へ 下へ

第2法線応力差係数(Pa·s<sup>2</sup>)

-40  
-60  
-40

第2法線応力差係数

追加 修正 上へ 削除  
挿入 下へ 全削除

押出量(kg/h)

4  
16  
4

押出量(kg/h)

層数 3

追加 削除 全削除  
修正 上へ 下へ  
挿入

1,	0.6
100,	0.6
200,	0.65
300,	0.7
400,	0.75
500,	0.8
600,	0.85
700,	0.9
800,	0.95
1000,	1

Iteration

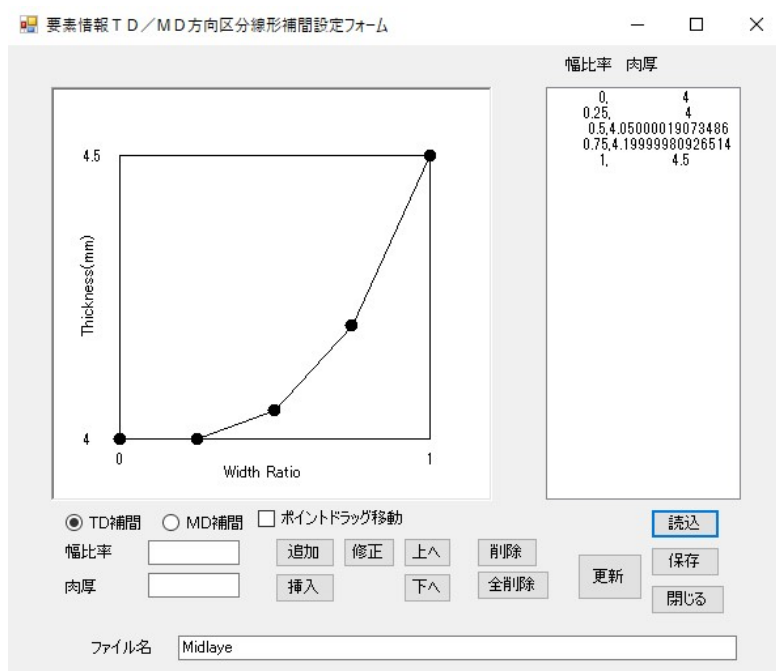
Evolution parameter

追加 修正 上へ 削除  
挿入 下へ 全削除

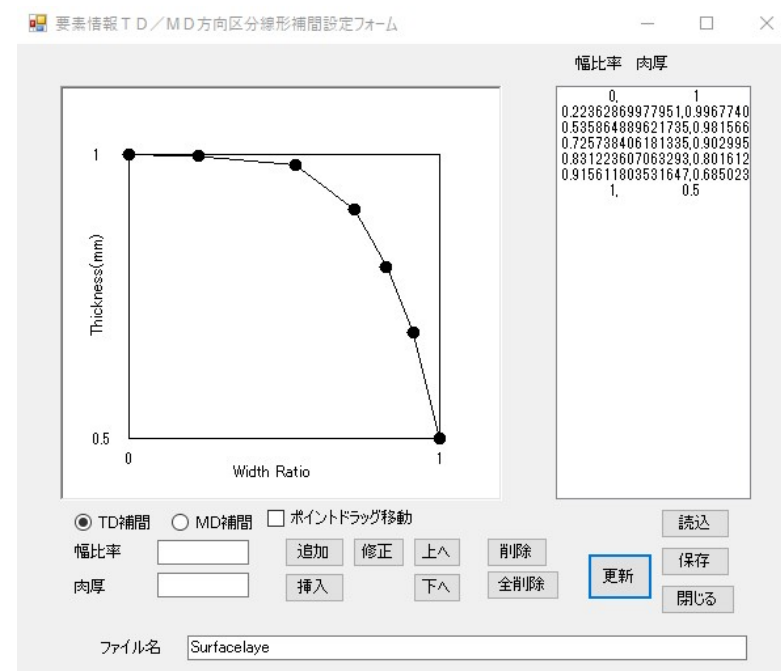
確定  
閉じる

図44 上流側モデル多層流動解析条件

また、上流側モデルでは、合流部断面の流路クリアランスを中間層4mm、表層1mmとしたflat条件(メッシュファイル名:Upperfeedblock.multimsh)と下図に示す肉厚分布を設定したvariated条件(メッシュファイル名:Upperfeedblockvariated.multimsh)の比較解析を行いました。



中間層フィードブロックプロファイル



表層フィードブロックプロファイル

図45 Variated 条件の合流部肉厚分布 (page 37,38参照)



最初に、以下に示す計算コントロールデータを利用し、上流側モデルに対するflat条件とvariated条件の2ケースの解析を行いました。これらの解析用データ一式は、テストサンプルとしてご提供するフォルダー：testsample内に保存されていますので、動作確認や別モデル作成時のご参考資料として下さい。

The image displays two side-by-side screenshots of a simulation control software interface. Both screenshots show the '基本形状' (Basic Shape) tab with various configuration options for a simulation. The left screenshot is for the 'Flat' condition, and the right is for the 'Varianted' condition. Key parameters include:
 

- 計算コントロールデータファイル名:** Upperfeedback (left) / Upperfeedbackvariated (right)
- パス名:** C:\2020プロジェクト\FI\flatsimulator\MultiVer.2.0.0\release\FI\
- メッシュデータファイル名:** Upperfeedback (left) / Upperfeedbackvariated (right)
- 物性データファイル名:** multi
- 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 (2000), 温度反復計算回数 (10), 層分割数 (10)
  - 構造連成解析: 実行 (radio button)
  - 最適化計算: 非実行 (radio button)
- 成形条件:**
  - 多層条件設定: 押出量規定 (radio button selected)
  - 圧力規定 (radio button)
  - 押出量 (kg/h): 1
  - 流入温度 (°C): 200
- 多層解析計算パラメータ:**
  - 圧力差寄与係数: 0.01
  - 界面計算緩和係数: 0.01
- Solver selection:** Developing (radio button selected)
- 粘弾性計算:** 非実行 (radio button selected)
- 滞留時間分布計算パラメータ:**
  - 時間刻み: 自動 (radio button selected)
  - 計算サイクル数: 400
  - 最大計算サイクル数: 2000
- マンデルセル近似的解法:** 矩形断面 (radio button selected)
- 粘性発熱制御:** ランナー内粘性発熱考慮 (checkbox checked)
- 粘性発熱係数:** 1
- 解析結果ファイル名:** Upperfeedback (left) / Upperfeedbackvariated (right)

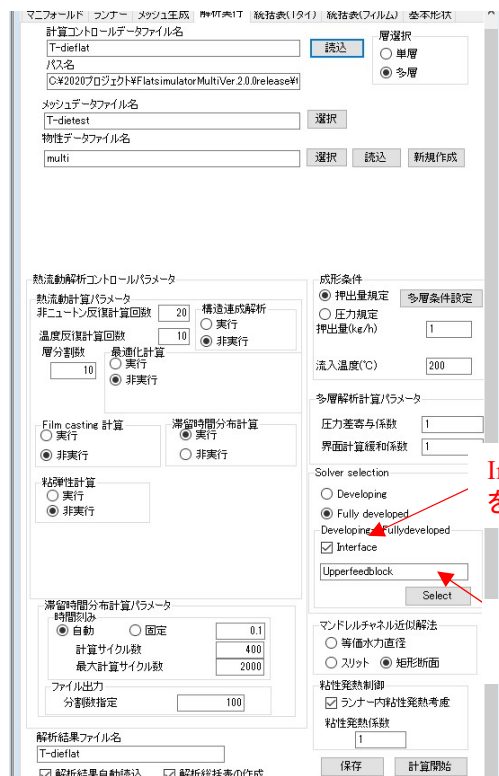
Flat条件 : Upperfeedback.fcal

Varianted条件 : Upperfeedbackvariated.fcal

図46 上流側モデル解析用計算コントロールファイルの内容

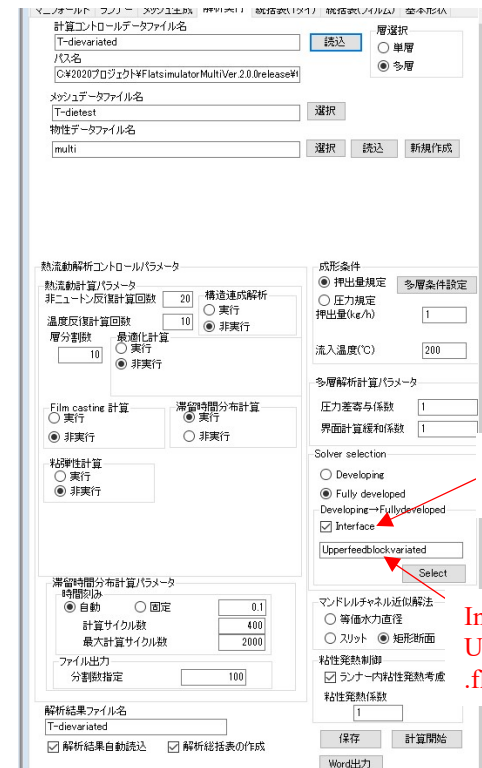


次に、下流側モデルの完全発達多層流動の解析を行いました。Flat条件とvariated条件は、上流側モデルの解析結果として出力されるUpperfeedblock.fluxoutletとUpperfeedblockvariated.fluxoutletをマウスクリック選択するのみで自動的に連携解析が行われます。すなわち、これらのインターフェイスファイルの差を除き、解析条件やコートハンガーダイのメッシュ情報(T-dietest.multimsh)などの情報は両ケース共通です。完全発達多層流動解析プログラムは、上流側モデルで計算されている流出口の流束や温度分布を下流側モデルの流入口の熱流動条件として自動的に設定します。



Interface チェックボックス  
をチェック

Interface ファイル名:  
Upperfeedblock.fluxoutlet



Interface チェックボックス  
をチェック

Interface ファイル名:  
Upperfeedblockvariated  
.fluxoutlet

Flat条件: T-dieflat.fcal

Variated条件: T-dievariated.fcal

図47 下流側モデル解析用計算コントロールファイルの内容

---

図48に示す様に発達多層流れ定式化にPEMを導入することにより、流動(MD)方向に対して界面包み込み現象が促進される傾向や合流断面形状の変化が層厚分布に及ぼす影響が表現可能です。定性的に予測される通り、合流断面形状を変化させたVariatied条件の解析結果では、界面包み込み現象によって表層エッジ部の表層厚が厚くなる傾向がFlat条件と比較して抑制されています。

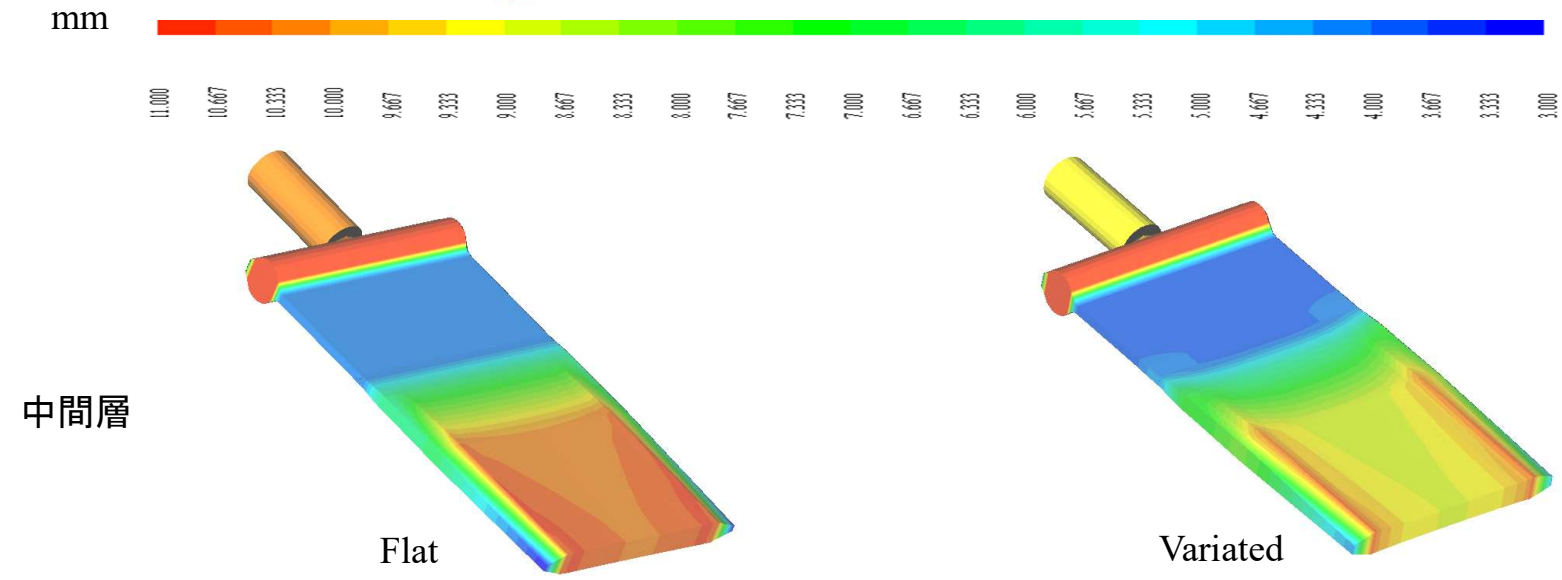
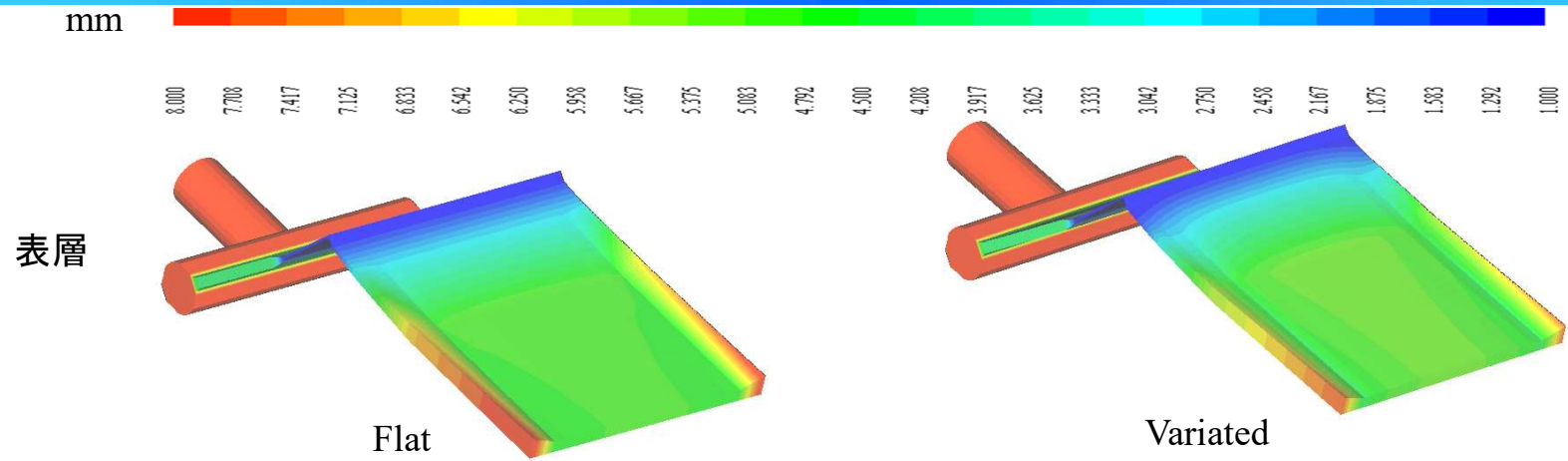
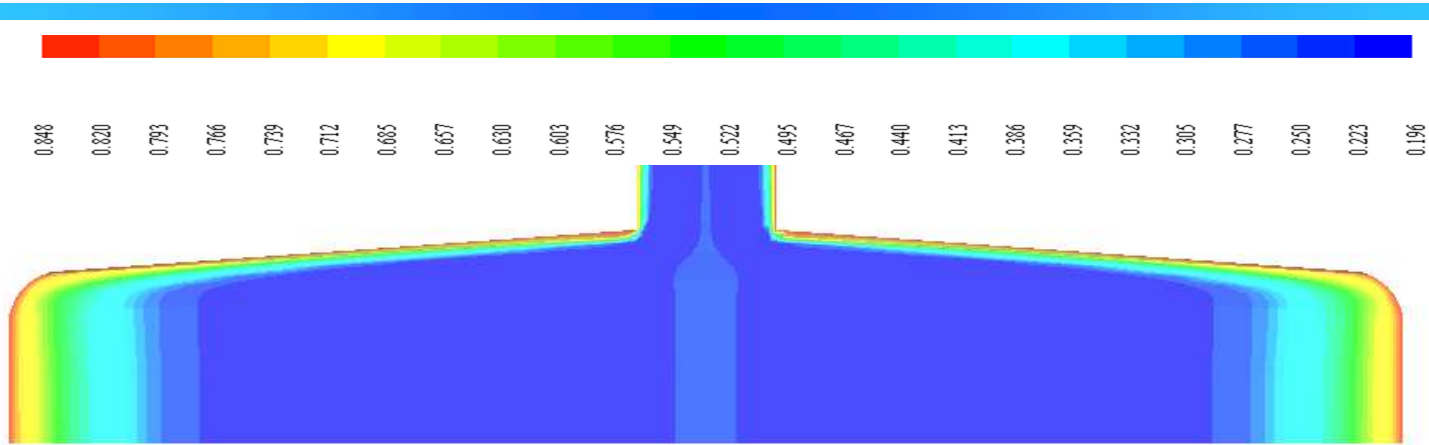


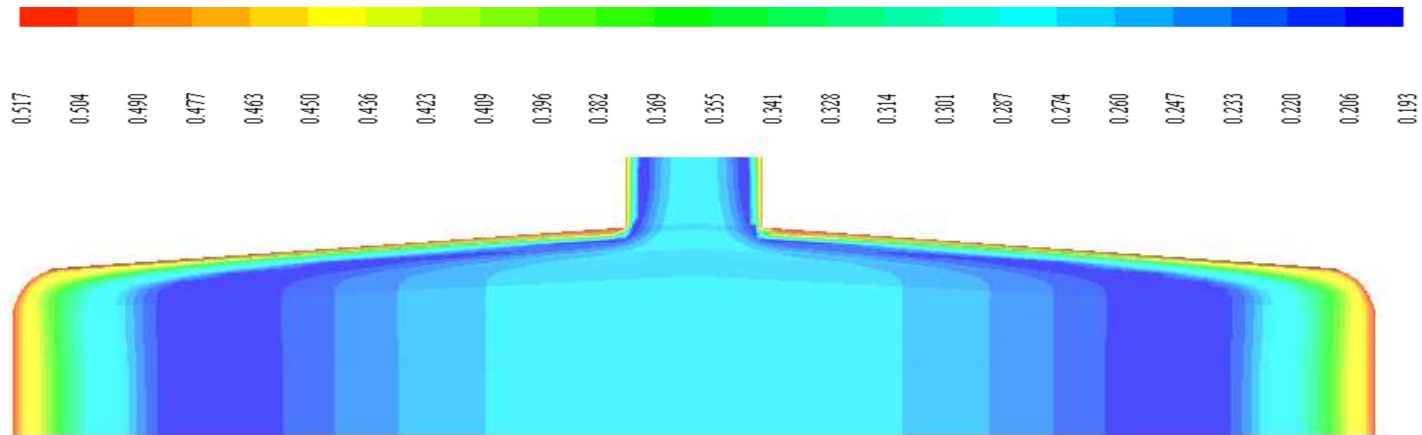
図48 上流側フィードブロックモデル内の層厚分布予測結果の比較

---

図49に完全発達多層流動解析プログラムを利用して計算された下流側コートハンガーダイ内の流量比分布の予測結果を示します。各モデルの流入口には、flat条件とvariated条件を採用した解析結果を利用して熱流動境界条件が設定されています。前述した通り、完全発達多層流動の定式化においては、基準層の流線に沿って流量比が一定になります (page 4,(4)式参照)。また、解析領域内の流量比分布の予測結果を利用して層厚分布の計算が可能です (page 4,(6)式参照)。完全発達多層流動解析プログラムの運用は容易です。また、計算時間も短く、これらの解析結果は、1ケース当たり30sec以内(非ニュートン反復計算回数:20回)に得られます。



Flat



Variated

図49 下流側コートハンガーダイモデル内の流量比分布予測結果の比較

工学的に関心があるのは、流出口の多層フィルムの層厚分布です。シミュレーション結果では、ダイ内で流動状態にある層厚分布が予測されますので、一定速度で巻き取られる多層フィルムの層厚分布とは異なります。フィルム巻き取り時(フィルムキャスト)におけるネックインやエッジビーズによって多層フィルムの層厚分布は、変化しますが、平面伸長変形が支配的なフィルム中央部では、質量保存則を利用してフィルム肉厚を流束(単位幅当たりの流量)に換算した情報が、シミュレーション結果との対比に適する情報と考えられます。流束は、実測位置でのフィルム層厚に巻き取り速度を乗じることで計算されます。

シミュレーションで予測される流束は、下図に示す様にインターフェイスファイルとして利用する拡張子fluxoutletの出力ファイル内に格納されています。

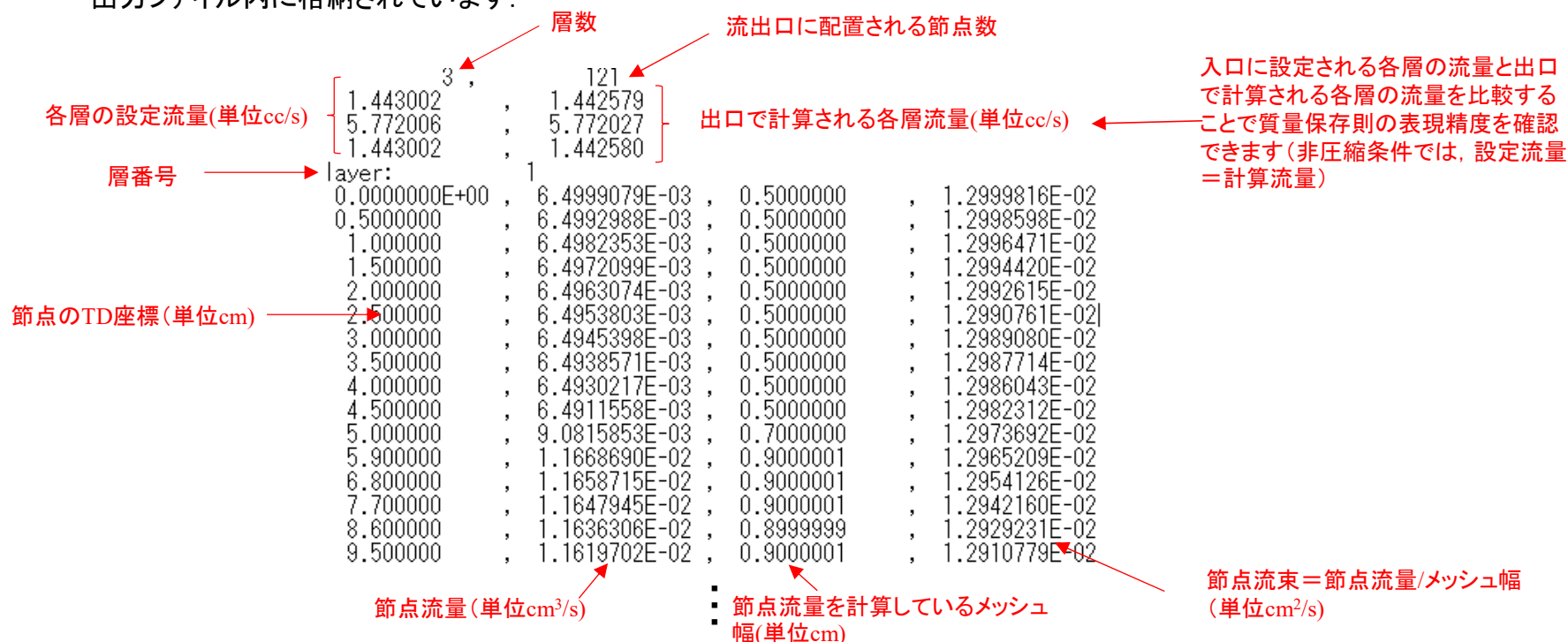
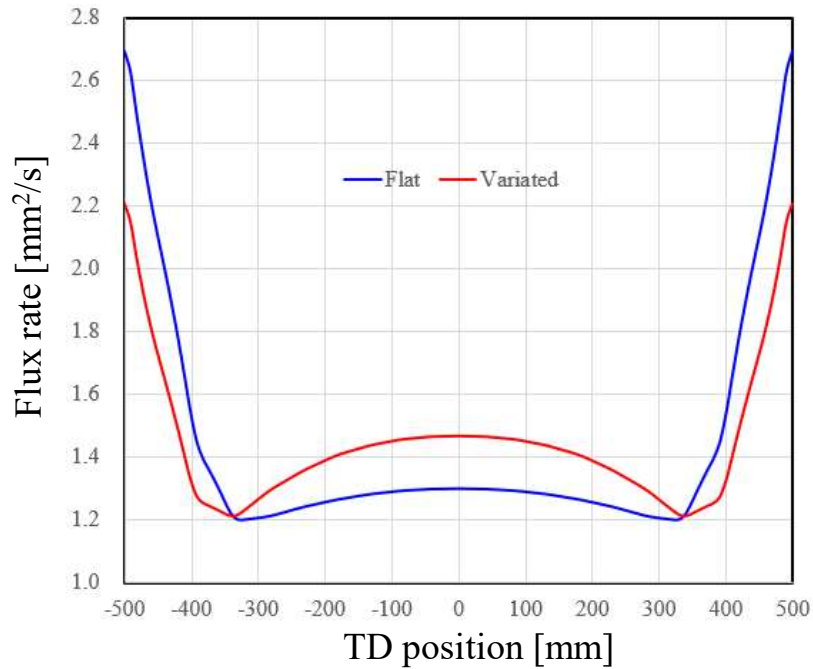


図50 Fluxoutファイルの内容(T-dieflat.fluxoutlet)

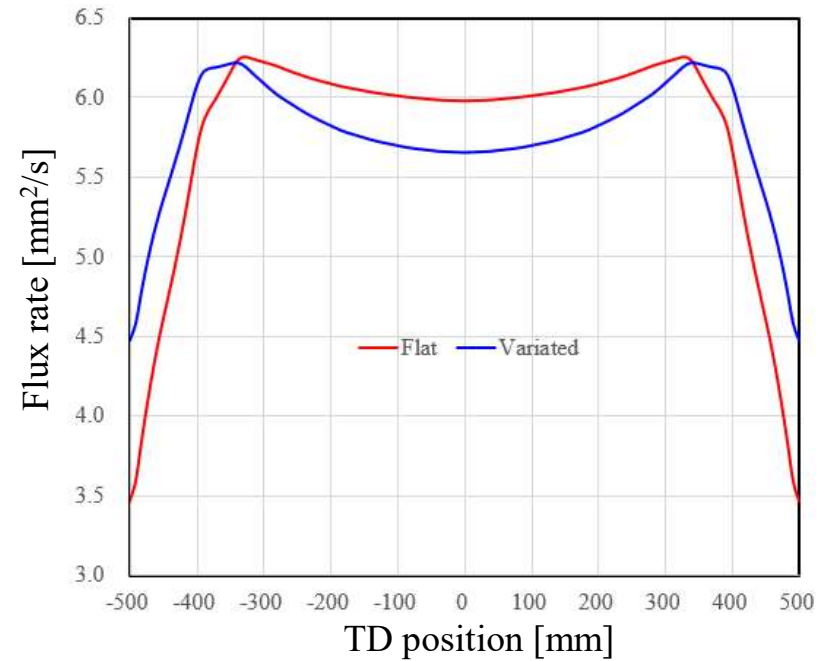
---

拡張子fluxoutletの出力ファイルに出力されている節点のTD座標はcm単位です。モデル情報が直接出力されていますので、グラフ図の作画の際に適当にソートして下さい。また、流束の単位は $\text{cm}^2/\text{s}$ ですので、必要に応じてSI単位に換算して下さい(座標は10倍でmm, 流束は100倍で $\text{mm}^2/\text{s}$ に換算されます)。図50にFluxoutletファイルの情報をエクセルを利用してソート, SI単位換算した情報のグラフプロット図を示します。表層では、流束についても界面包み込み現象によってエッジ部が支配的になる傾向が示されています。Variated条件では、この傾向が抑制され、最大流束と最小流束の差が低減し、多層フィルム層厚の均一性が向上する傾向が示されています。





表層流束



中間層流束

図51 下流側コートハンガーダイモデル流出口における流束分布予測結果の比較

本解析例では、上流側と下流側にモデルを分割し、それぞれのモデルに対して解析結果が出力されていますが、Ver.2.0.0では、各解析結果を統合して表示する機能が実装されました。特に連携解析で得られた下流側の解析結果を先に読み込み、次いで上流側解析結果を読み込むと、上流側圧力解析結果に下流側モデルの流入側で計算されている圧力が加算されます。非圧縮性解析では、一定圧力の加減操作によって、流動状態や界面形成状態は変化しないため、このような圧力更新が可能です。本解析結果の処理では、先に下流側コートハンガーダイモデルの解析結果を読み込みます。解析結果ファイル名の右側に追加されたAppendチェックボックスをONとして、次に上流側フィードブロックモデルの解析結果を読み込むと下図に示す様に両モデルが統合表示されます。

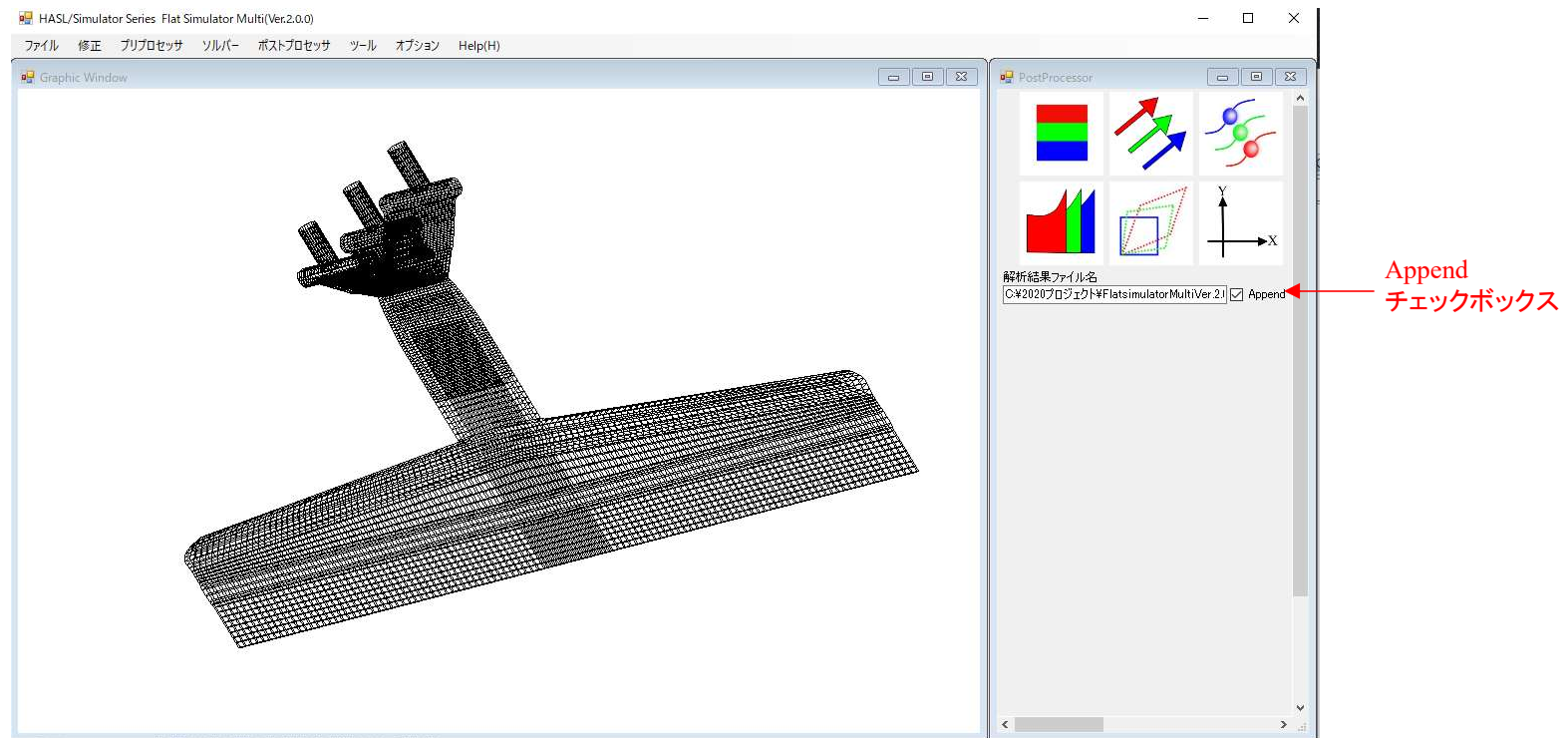


図52 解析結果の統合表示 (Append import)

---

この統合表示機能を利用した温度と圧力の全体解析結果をそれぞれ図53と図54に示します。合流部断面形状の変化は、温度や圧力分布の予測結果にも影響を及ぼすことが示されています。

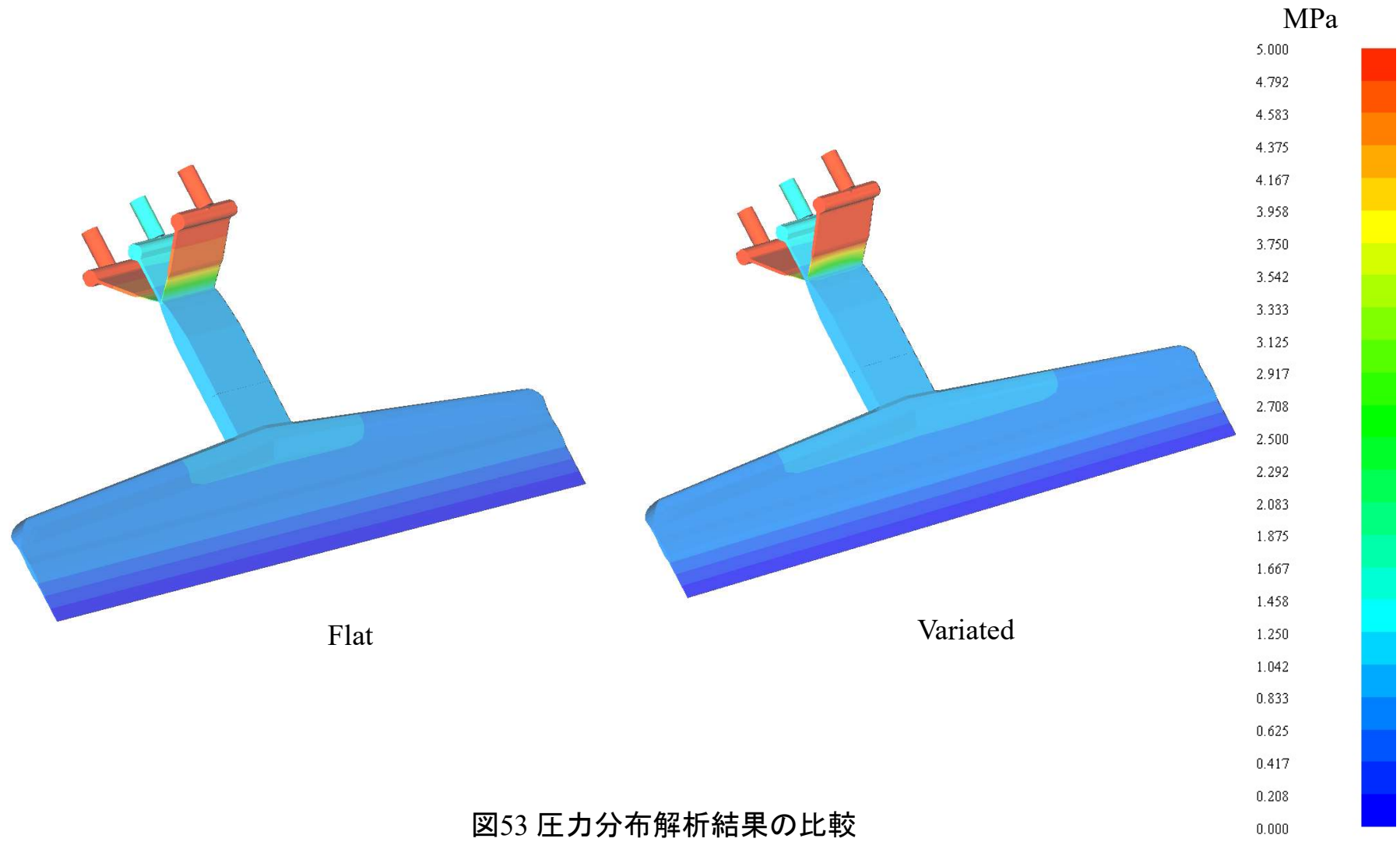


図53 圧力分布解析結果の比較

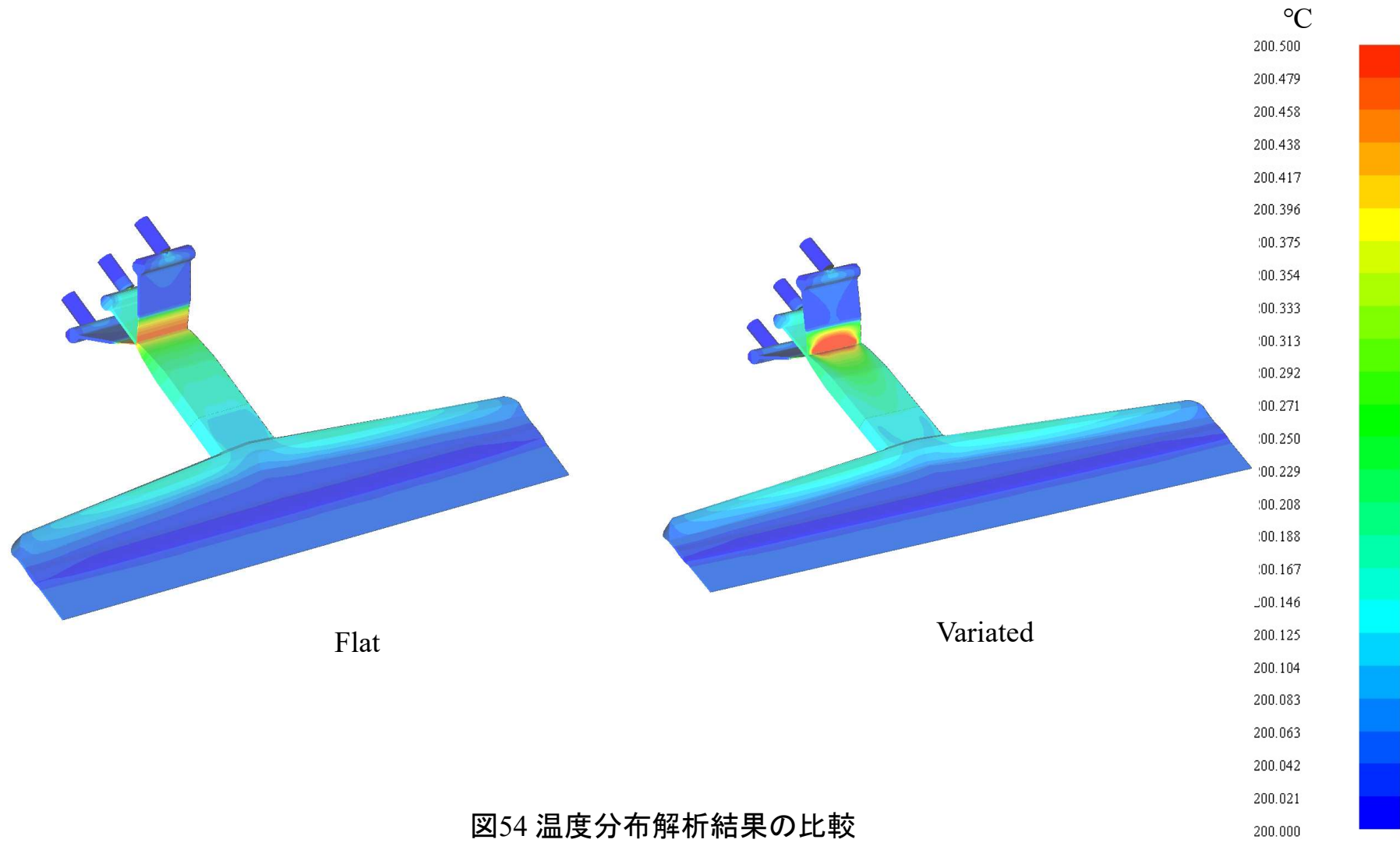


図54 温度分布解析結果の比較