

◆Single Screw Simulator:単軸スクリュ押出機解析

単軸スクリュ押出機解析用決定版ソフトウェア

Single Screw Simulatorは、ホッパーから固体輸送、熔融可塑化、溶融体輸送、先端ダイに至るまでの一貫解析機能を踏襲しつつ、従来、考慮の簡略ソフトではできなかった隣接スクリュチャンネル間の流量交換（漏洩流れ）やフライトの切欠、複雑形状のミキシングエレメントなどの影響を定量化可能なソルバーが新たに開発されています。また、システムには複雑3次元形状のスクリュを効率的にモデリングするための斬新なプリ/ポストプロセッサが実装されています。以下に本ソフトウェアの特長や理論背景、運用方法、適用事例などについて順にご紹介させていただきます。

1. Single Screw Simulatorの特長

従来の簡易ソフトでは、スクリュチャンネルの螺旋経路に沿った1次元的な圧力分布と、螺旋経路及びチャンネル肉厚方向の2次元的な温度分布を定量化する簡略的な計算法を採用することにより、単軸スクリュ押出機のユーザフレンドリーでロバストな解析ツールを実現していました。このような簡略化は、標準的な解析モデルに対する計算コストの大幅な低減と解析ツールの操作性を向上させる上で有効ですが、反面、実際の成形現場で直面する様々な形状を有するスクリュエレメントの分析や成形条件の微妙な変化の影響評価などに際し、解析ツールの実用性を損なう大きな制限条件・ノもなっています。

一方、低コストで潤沢なコンピュータ資源が誰にも享受された今日、スクリュ押出機の解析は3次元解析が主流になりつつあり、市販汎用流体解析プログラムを利用した多くの解析事例が報告されています。しかしながら、現在、スクリュ押出機を解析対象とする多くの3次元解析では、以下に示す問題点が指摘されます。

スクリュ押出機3次元解析の問題点

★ 3次元解析の多くは、溶融体輸送領域のみを解析対象としており、固体輸送や特に重要視されている溶融可塑化領域が近似的な取り扱い、あるいは解析対象外とされている。

★ 3次元スクリュ形状を表現するCADデータが存在すれば、容易にメッシュ生成は可能ではあるが、解析の計算精度を損なわないように手操作でメッシュの補正/切り直しに時間を費やすことが多い。特に、漏洩流れの分析に考慮を要するバレル/フライト間のクリアランスは狭く、3次元モデリングに無理がある。また、スクリュチャネルも基本的に薄肉流路であり、物理量の変化が激しい肉厚方向に適切な要素分割を配置すると、肉厚方向と面方向の分割長の比がアンバランスになる。所謂、アスペクト比の悪いメッシュが生成される。計算精度の低下を避けるためにアスペクト比を改善しようとする、面方向の分割数を増やす必要があり、結果としてメッシュ分割数が膨大になる。

★ 膨大なメッシュ分割を採用した解析には、当然、時間的にも費用面でも多くのコストを要する。ターンアラウンドを短縮するために、並列計算が有効とされているが、簡易解析に比べて計算コストと計算時間が大幅に増加することは否めない。

Single Screw Simulatorの開発の狙いは、従来の簡易解析ツールの適応限界の緩和と汎用流体解析プログラムを利用した3次元解析の諸問題の解消にあります。この目的を達成するために、解析対象を単軸スクリュ押出機に限定した上で、スクリュチャネルの薄肉流路形状の特徴を前提とした効率的な解析ソルバーと複雑なスクリュ形状を容易にモデリングするプリプロセッサの開発に力点が置かれています。以下に、本ソフトウェアの特長について要約します。

Single Screw Simulatorの特長

★ Integrated Simulation

ホッパー⇒固体輸送⇒熔融可塑化⇒熔融体輸送⇒先端ダイに至るまでの一貫解析に対応しています。

★ User friendly & Robust to use

専用プリ/ポストプロセッサ、GUIが実装されており、複雑なスクリー形状のモデリングと解析システムの運用、ポスト処理が極めて容易です

★ Problem Oriented High Accuracy/High Performance Computation

スクリー押出機内で重視される圧力勾配流れ/推進(牽引)流れ/漏洩流れの全てを考慮可能なGeneralized Hele-Shaw FormulationとMulti-Block Methodの採用により、大規模2.5モデルの高精度/高速演算を実現しています。

2. Single Screw Simulatorの理論背景

2.1 ホッパー内圧力分布の評価式

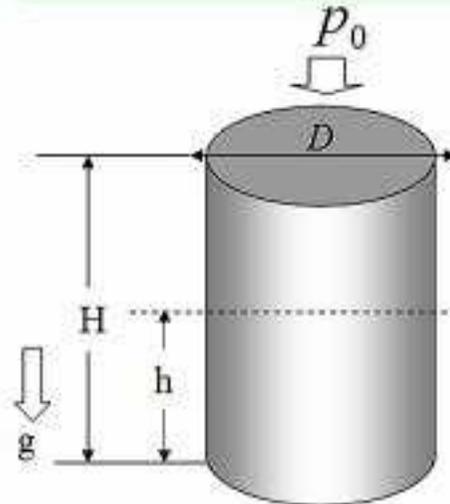
ホッパー内の圧力分布は以下に示す評価式¹⁾を利用して算出します。ホッパー形状はストレートタイプとテーパタイプを前提とし、それぞれ、異なる評価式を用いて内部の圧力分布が計算されます。これらの評価式は、ホッパー内のペレットに作用する摩擦力と重力の釣り合い式を用いて導かれます。水圧は水深の増加に伴って際限無く増加しますが、これらの評価式によれば、ペレットを詰めたストレートタイプのシリンダーの底部に作用する圧力は、ペレットの充填高さの増加に伴って上昇しながら、 $\frac{1}{2} \rho g H$ に漸近します。また、テーパタイプでは、条件によっては縮小方向に向かって圧力が低下することになり、粘性流体とは異なる挙動を示すことが解ります。

■ホッパー内圧力分布の評価式 (ストレートタイプ)

高さhの圧力評価式

$$P(h) = p_0 \exp\left[\frac{4BD^*(h-H)}{D}\right] + \frac{\rho_b g D}{4BD^*} \left\{ 1 - \exp\left[\frac{4BD^*(h-H)}{D}\right] \right\}$$

$$B = \frac{\sin \delta \sin \kappa_0}{1 - \sin \delta \cos \kappa_0}, \kappa_0 = \beta_w + \arcsin\left(\frac{\sin \beta_w}{\sin \delta}\right), \arcsin > \frac{\pi}{2}, \beta_w = \arctan(f'_w)$$



$P(h)$: 高さhでの圧力

ρ_b : 密度(Bulk density)

g : 重力加速度(Gravity)

D : ホッパー直径(Hopper diameter)

f'_w : 摩擦係数 (Static coefficient of friction)

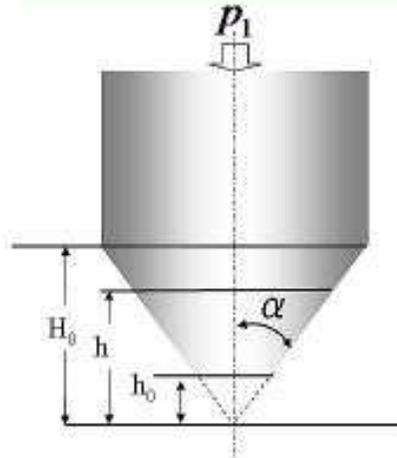
D^* : 平均垂直応力を壁面近くの垂直応力に関連付ける分布係数 (第一近似で=1)

δ : 平均摩擦角 (Effective angle of friction)

■ホッパー内圧力分布の評価式(テーパタイプ)

高さhの圧力評価式

$$P(h) = p_1 \left(\frac{h}{H_0} \right)^\psi + \frac{\rho_b g h}{\psi - 1} \left[1 - \left(\frac{h}{H_0} \right)^{\psi - 1} \right]$$



$$\psi = \frac{2B'D'}{\tan \alpha},$$

$$B' = \frac{\sin \delta \sin(2\alpha + \kappa_0)}{1 - \sin \delta \cos(2\alpha + \kappa_0)},$$

$$\kappa_0 = \beta_w + \arcsin \left(\frac{\sin \beta_w}{\sin \delta} \right), \arcsin < \frac{\pi}{2},$$

$$\beta_w = \arctan(f_w')$$

2.2 固体輸送領域内圧力分布の評価式

固体輸送領域のペレットの挙動は、DarnellとMollによって最初に提案され、その後、Tadmorによって改良されたモデル³⁾に従って評価します。このモデルでは、スクリュウ押出機内の固体輸送は、スクリュウの牽引によって生じるチャンネルに沿った一次元の等温プラグフロー(栓流)として取り扱われます。以下に示すように、ソリッドベッドの素片に作用するバレルとスクリュウからの動摩擦力の釣り合い式から、チャンネルに経路に沿って一定速度で運動するソリッドベッド内の圧力分布の評価式が得られます。ソリッドベッド内の圧力分布は、質量流束の他、スクリュウやバレルとペレット間の動摩擦係数に敏感に依存して変化します。

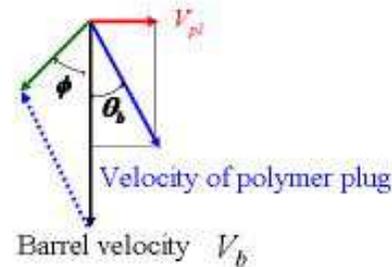
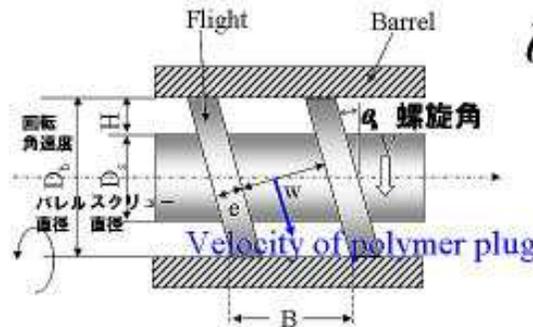
スクリー軸垂直断面を横切る質量流束:

$$G = \pi^2 N H D_b (D_b - H) \rho_b \frac{\tan \phi \tan \theta_b}{\tan \phi + \tan \theta_b} \left[1 - \frac{e}{\pi (D_b - H) \sin \bar{\theta}} \right]$$

$$V_b = \pi N D_b,$$

N : Frequency of screw rotation

$\bar{\theta}$: Average helix angle



ソリッドベット内圧力分布の評価式:

$$p(z) = p_0 \exp(-\lambda z)$$

$$\lambda = \frac{A_1 K_s - B_1}{A_2 K_s + B_2},$$

z はチャネルに沿って測った距離、
 p_0 は $z=0$ の圧力=ホッパー底部の圧力

$$A_1 = W_s f_b \sin \phi + 2 H f_s \sin \theta_b + W_s f_s \sin \theta_s,$$

$$B_1 = W_s f_b \cos \phi - 2 H f_s \sin \theta_b \frac{\bar{D}}{D_b} \cot \bar{\theta} - W_s f_s \sin \theta_s \frac{D_s}{D_b} \cot \theta_s,$$

$$A_2 = \bar{W} H \sin \bar{\theta},$$

$$B_2 = \bar{W} H \frac{\bar{D}}{D_b} \cos \bar{\theta},$$

$$K_s = \frac{\bar{D} \sin \bar{\theta} + f_s \cos \bar{\theta}}{D_b \cos \bar{\theta} - f_s \sin \bar{\theta}}$$

f_b : ソリッドバレル間動摩擦係数

f_s : ソリッドスクリー間動摩擦係数

θ_b : バレルhelix angle

θ_s : スクリューhelix angle

上付き-: バレル/スクリー平均値

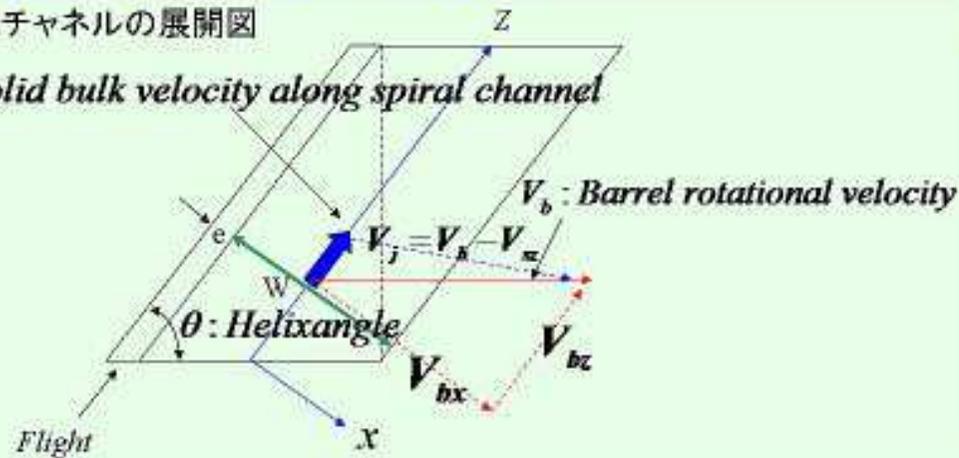
2.3 溶融可塑化領域のモデル化(Tadmorモデル)

スクリュウ押出機内の溶融可塑化プロセスは、溶融体をニュートン流体に簡略化した条件においてTadmorによって最初にモデル化⁴⁾され、今日に至るまで、多くの研究者によって様々な改良が施されています。Single Screw Simulatorでは、溶融樹脂を非ニュートン純粘性流体に精密化したTadmorモデル⁵⁾を採用しています。Tadmorモデルは、下図に示すようにスクリュウチャンネルの展開図に垂直な断面内でソリッドベットと溶融樹脂の間に明確な界面が存在することを前提とし、融点温度に等しい界面上の熱収支と質量収支のバランス式を用いることによって、スクリュウチャンネルの経路に沿って変化するソリッドベットの幅と溶融フィルム層の肉厚を定量化します。

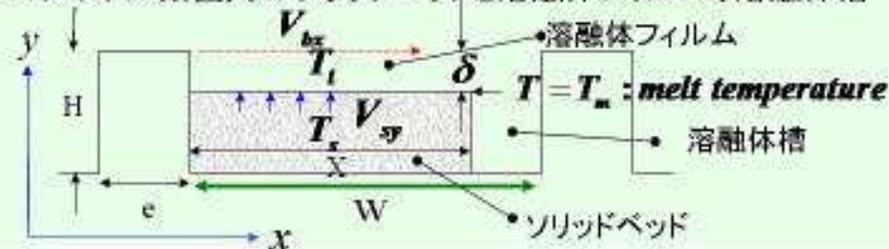
■溶融化領域のモデル化(Tadmorモデル)

スクリュウチャンネルの展開図

V_{sz} : Solid bulk velocity along spiral channel



スクリュウチャンネル断面内のソリッドベットと溶融体フィルム、溶融体槽



Tadmorモデルでは、回転するスクリュ上に観測系が設けられています。この回転座標系では、スクリュの回転に応じて、バレルがスクリュ回転とは逆方向に V_b で運動するように観測されます。

熔融フィルムとソリッドベットの接触界面上で成立する質量収支と熱収支関係より、以下に示すソリッドベットの幅 X と厚さ H_s 、熔融フィルムの厚さ δ に対する微分方程式が得られます。この微分方程式をチャンネル方向 z について積分することで、熔融可塑化状態が定量化されます。

チャンネル z 方向に対するソリッドベットの質量保存則（非圧縮条件）

$$\frac{d}{dz}(XH_s) = -\frac{\omega}{V_{xz}\rho_s}, \quad H_s = H - \delta, \quad \omega = V_{zy}X\rho_s = \frac{V_{bx}}{2}\delta\rho_m$$

X :ソリッドベットの幅 V_{xz} :ソリッドの z 方向移動速度 V_{zy} :ソリッドの溶解に伴う肉厚 y 方向移動速度
 H_s :ソリッドベットの高さ H :チャンネル深さ
 δ :熔融フィルム厚さ ρ_s :ソリッド密度 ρ_m :熔融体密度
 ω :単位長さ当たりのソリッドの熔融質量生成率 V_{bx} :バレルの x 方向分速度

ソリッドベット・熔融体フィルムの界面に対する熱収支式

(エネルギー保存則)

$$\delta = \Phi\sqrt{X}, \quad \Phi = \sqrt{\frac{2\kappa_m(T_b - T_m) + \eta V_j^2}{V_{bx}\rho_m[C_s(T_m - T_s) + \lambda]}}$$

κ_m :熔融体の熱伝導率 T_m :熔融体の熔融温度(融点) $V_j = V_b - V_{xz}$
 C_s :ソリッドの熱伝導率 T_b :バレルの規定温度 V_j :ソリッドベットから観測したバレルの相対速度
 λ :ソリッドの溶解潜熱 T_s :界面から十分離れた位置でのソリッドの規定温度 η :熔融体粘度

2.4 溶融体輸送領域のモデル化

溶融体輸送領域の解析は、流体解析技術を直接反映できることを理由に、多くの適用実績が蓄積されています。しかしながら、効率性を重視する簡易解析や計算精度を追求する3次元解析には、それぞれ、解消すべき多くの問題点が残されています。そして、多くの問題点は、複雑な螺旋状薄肉流路内の熱流動情報を、効率的に、且つ、高精度で評価するというトレードオフの関係にある技術目標を追求することに起因しています。

従来のスクリュウ押出機の簡易解析では、スクリュウチャンネルが薄肉流路であることやスクリュウチャンネルに沿った圧力変化と温度変化、肉厚方向の温度変化が激しいという現象の特徴を生かし、効率的な解析を実現しています。しかし、漏洩流れのドライビングフォースになるフライトのpushing sideとtrailing sideの圧力差や複雑なミキシングエレメントを採用した際に重要になる隣接チャンネル間の流量交換が評価できないという適応限界がネックになっています。一方、原理的には万能と言える3次元解析でも、流路が薄肉であることが、前述した通り、解析の効率性と計算精度を阻害する様々な要因になっています。

Single Screw Simulatorでは、これらの問題点を解消するために、薄肉流路の特徴を生かしつつ、以下に示すアイデアに従って解析モデルの精密化を図っています。

★流動場のモデル化:

スクリュウチャンネルが薄肉形状であることを考慮し、肉厚方向の流れを無視し、肉厚方向に垂直な面内の流速成分のみを解析対象とする。

★温度場のモデル化:

スクリュウチャンネルが薄肉形状であることと、溶融樹脂の熱伝導率が小さく、熱対流効果が支配的に温度分布を決定することを考慮し、肉厚方向の熱伝導と面内の熱対流を解析対象とする。

このようなモデル化は、射出成形CAEシステムによる薄肉成形品の充填プロセスのシミュレーションで従来から多用されているHele-Shaw流れの定式化に立脚しています。但し、射出充填プロセスでは、圧力勾配による流れの評価が主目的とされるのに対し、スクリュウ押出機の解析では、推進(牽引)流れを併せて考慮する必要があるため、定式化の一般化を要します。回転座標系におけるバレル面がスクリュウの回転とは逆方向に運動するという境界条件と下図に示すスクリュウ展開図における解析モデルの周期境界条件を解析結果に反映できるようHele-Shaw流れの定式化を一般化します。

推進流れの影響は、流量と圧力の関係を記述する流動方程式の離散化方程式における流量荷重ベクトルとして考慮されます。一方、周期境界条件は、後述するように展開面で表現された解析モデルを3次元化することで自然に満足されます。また、支配方程式の離散化法としては有限要素法を採用しています。通常の有限要素解析では、複雑形状のミキシングエレメントやチャンネルの途中で条数が不連続に変化するようなモデルを扱う場合に不連続面での要素結合の整合性を保つために苦心します。このようなメッシュ生成作業の軽減を目的として、構造格子差分解プログラムで複雑形状を扱う際によく利用されているマルチブロック法を導入しました。マルチブロック法を導入した解析ソルバーの運用では要素結合の整合性を気にすることなく、任意の要素ブロックを自由に組み合わせた解析が許容されます。

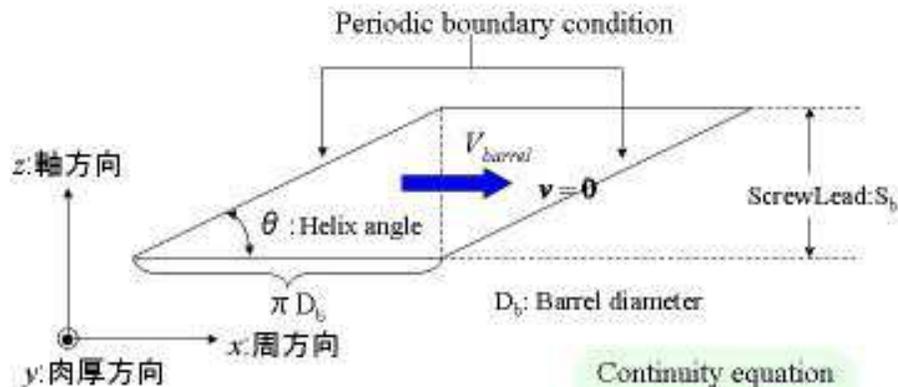
以上のモデル化とマルチブロック法の導入により、従来の簡易解析では捉えられなかった漏洩流れや切り欠き、ミキシングエレメントなどの影響が、短時間でより精密に評価可能になっています。

■溶融体輸送領域のモデル化

(Generalized Hele-Shaw formulation)

前提条件：チャンネル肉厚は、薄く、肉厚方向の流れは無視 $v=0$

解析モデル：ハレル展開面を基準とした2.5Dモデル Lubrication approximation



Momentum equation

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z}$$

Constitutive equation

$$\tau_{xy} = \eta \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$\tau_{xy} = \eta \frac{\partial w}{\partial y}$$

Continuity equation

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Energy equation

$$\rho_m C_m \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_m \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \eta \dot{\gamma}^2$$

3. システムの運用方法

3.1 プリプロセッシング

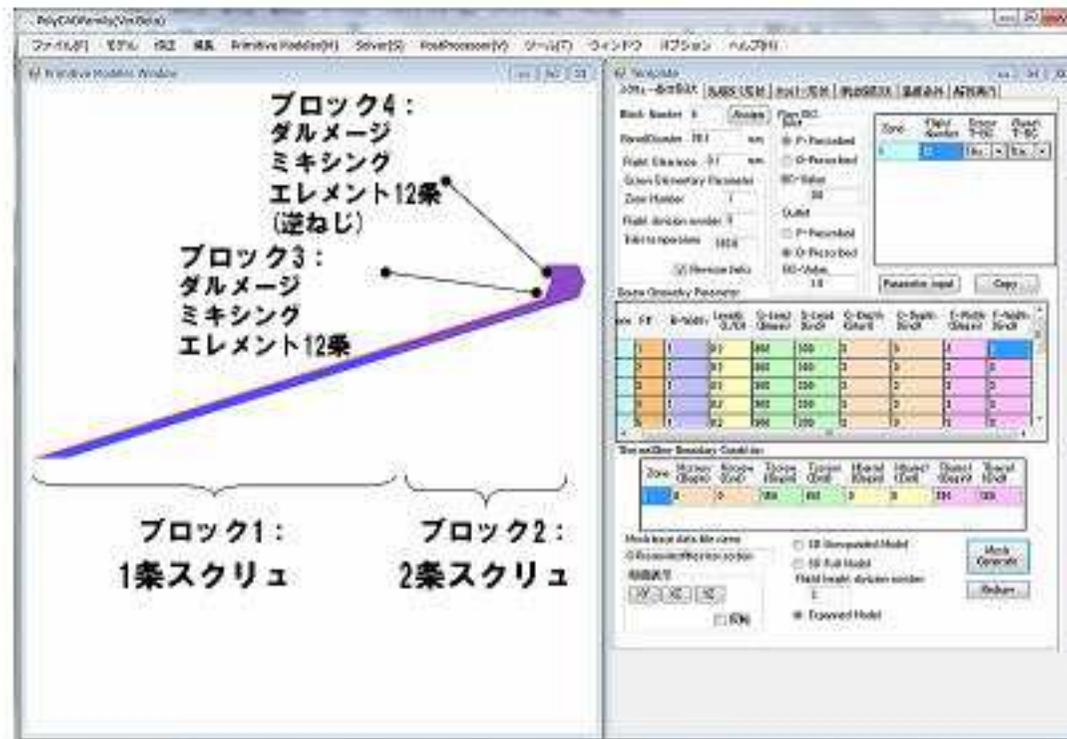
スクリュー設計の現場で活躍する技術者の方々は、スクリューの2次元展開図面を前に様々な分析/検討をされる方が多いように見受けられます。これは3D-CADの導入が立ち遅れているというような単純な理由ではなく、人間が3Dよりも2Dの情報を、より正確に把握し、様々な角度から分析を加え易いことに起因しています。このように2次元図面管理による製品設計が主流の分野では、3D解析システムの効率的な運用は、ハードルの高いテーマになります。このような現場における解析に際して、最も手間が掛かり、ユーザに負担を強いるのがプリプロセッシング作業です。特に3D-CADデータが存在しない場合には、2D-CAD情報を元々改めて解析に適する3D情報を作成する必要があります。仮に3D-CADデータが存在したとしても、その情報がそのまま3D解析システムで利用できる保障はありません。

Single Screw Simulatorには、スクリュー設計に携わる技術者の方々にマッチしたプリプロセッサが実装されています。以下に、当プリプロセッサを利用した解析モデルの作成手順についてご紹介します。

ゾーンとブロックという二つの領域を利用してスクリュ形状が定義されます。ゾーン内では、スクリュ口径やチャンネル深さ、フライト幅、スクリュリードなどの情報を可変的に取り扱うことが可能です。ゾーンで定義されるスクリュは、上流側から下流側に向けて連続的に形状が変化することが前提とされており、一体解析モデルとして取り扱われます。一方、途中で条数が不連続に変化する場合やミキシングエレメントを配置する場合には連続性を前提としたメッシュ生成が難しくなるので、ブロックという概念を導入し、独立なメッシュ生成を許容し、マルチブロック法を利用することで、解析上、連続的に取り扱われます。

すなわち、スクリュ解析モデルは、独立にメッシュ生成されたブロックの集合体として表現され、各ブロック内は各種スクリュ形状パラメータが連続的に変化するゾーンに細分化されています。

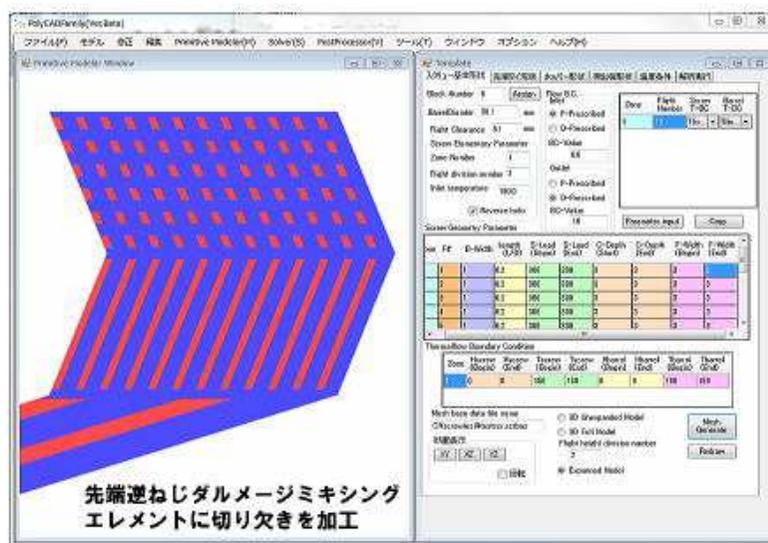
下図に上流側から1条スクリュ、2条スクリュ、ダルメージミキシングエレメント、ダルメージミキシングエレメント(逆ねじ)を連結させたスクリュ解析モデルの展開情報の作成例を示します。



解析モデル作成手順 (2)

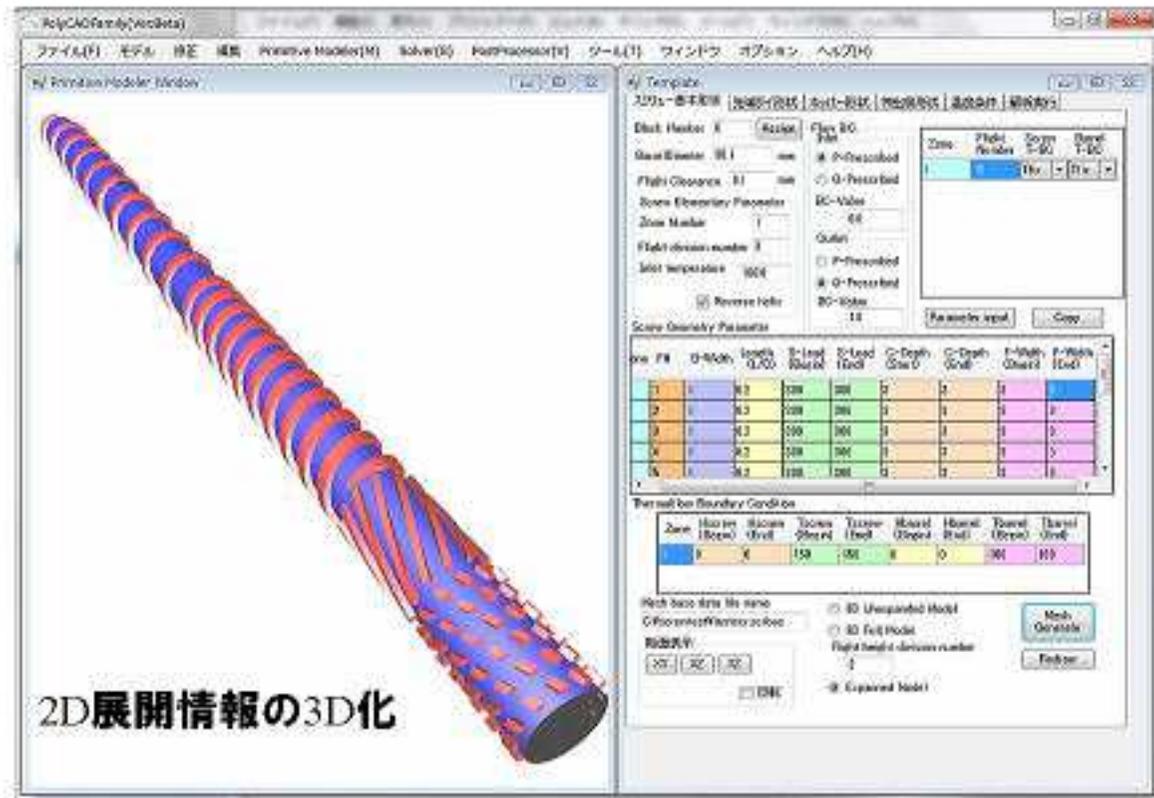
スクリュの基本形状パラメータをテーブル入力することにより、容易に典型的なスクリュ形状の2次元展開情報の作成が可能です。しかし、スクリュは用途毎に多種多用のものが考案されており、基本形状パラメータの入力のみで、全てのスクリュ形状に対応可能な汎用性の高いプリプロセッサを実現することは容易ではありません。モデル毎に異なる幾何形状の設定は、ユーザ自身による柔軟なカスタマイズ機能を実現するという考え方が自然です。

Single Screw Simulatorのプリプロセッサには、2次元展開情報のカスタマイズ機能がサポートされています。この機能を利用することによって、典型的なパターンから外れた解析モデルにも柔軟に対応可能です。作成手順(1)でご紹介した2次元展開情報では、ユーザが定義したブロックが3角形要素に細分化されています。マウス操作により選択される要素毎に、フライト部やチャンネル部を区別するために利用されているプロパティ番号やチャンネル深さを表現する肉厚を変更することにより、様々なスクリュ形状に対応可能です。その一例として先端部に配置されるミキシングエレメントに切り欠きを設定した例を下図に示します。この例では、フライトを表現する一部の要素の属性を、隣接するチャンネル部の要素の属性に変更することで切り欠きを表現しています。基本パラメータで生成された要素情報が全く利用できないような極端なケースでは、フリーメッシュによる再分割機能を利用することも可能です。フリーメッシュ機能を利用する場合には、フライト(ピンなどの流体障害物を含む)やチャンネルの外形形状を直線や曲線を利用して個別に定義する必要がありますが、2次元展開図面内の作業であるため操作は容易です。



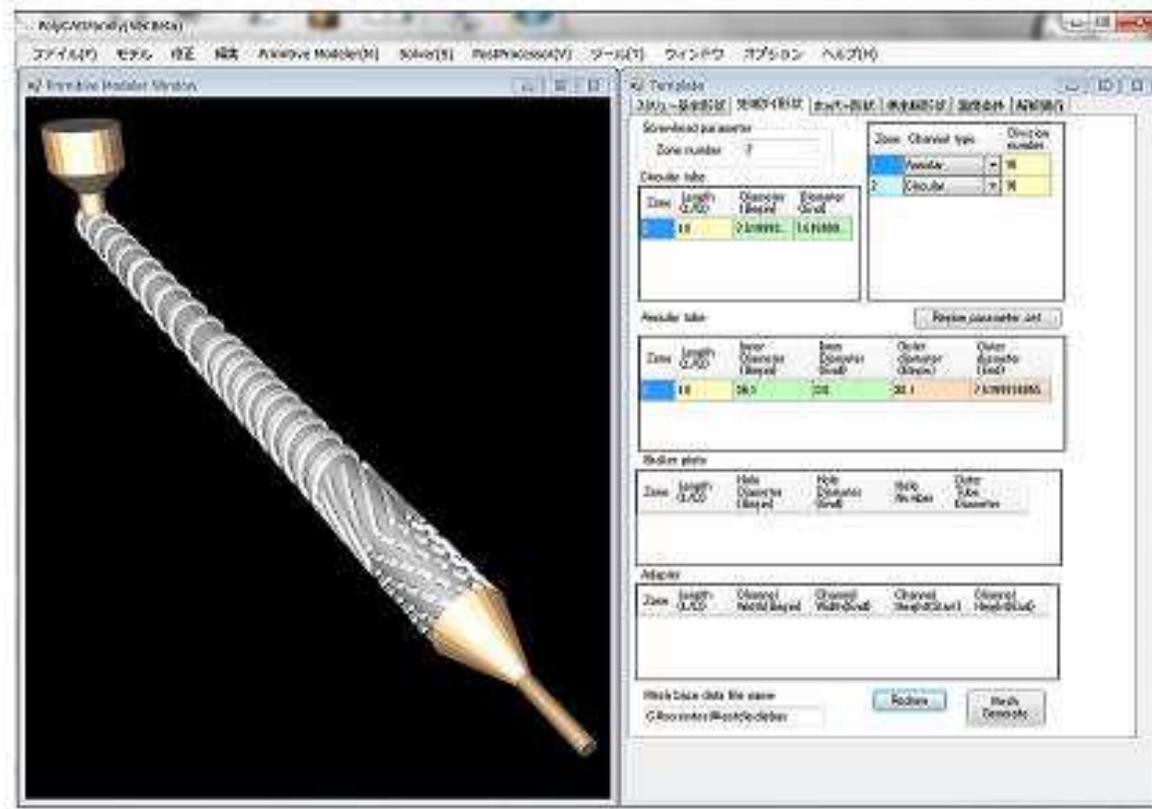
解析モデル作成手順 (3)

2次元展開情報を作成後、情報をファイルにセーブし、2D展開情報加工GUIフォーム内の『3D変換』ボタンを押すことにより、2次元展開情報に含まれるスクリュチャネル肉厚とフライト幅、バレル口径、スクリュリードなどの情報が、下図に示すように自動的に3次元情報に変換されます。この3次元情報では展開図の巻き付けの際に重複する節点が自動的にマージされ、前述した溶融体輸送領域のモデル化で考慮すべき周期境界条件を満足する2. 5D解析モデルが生成されます。



解析モデル作成手順 (4)

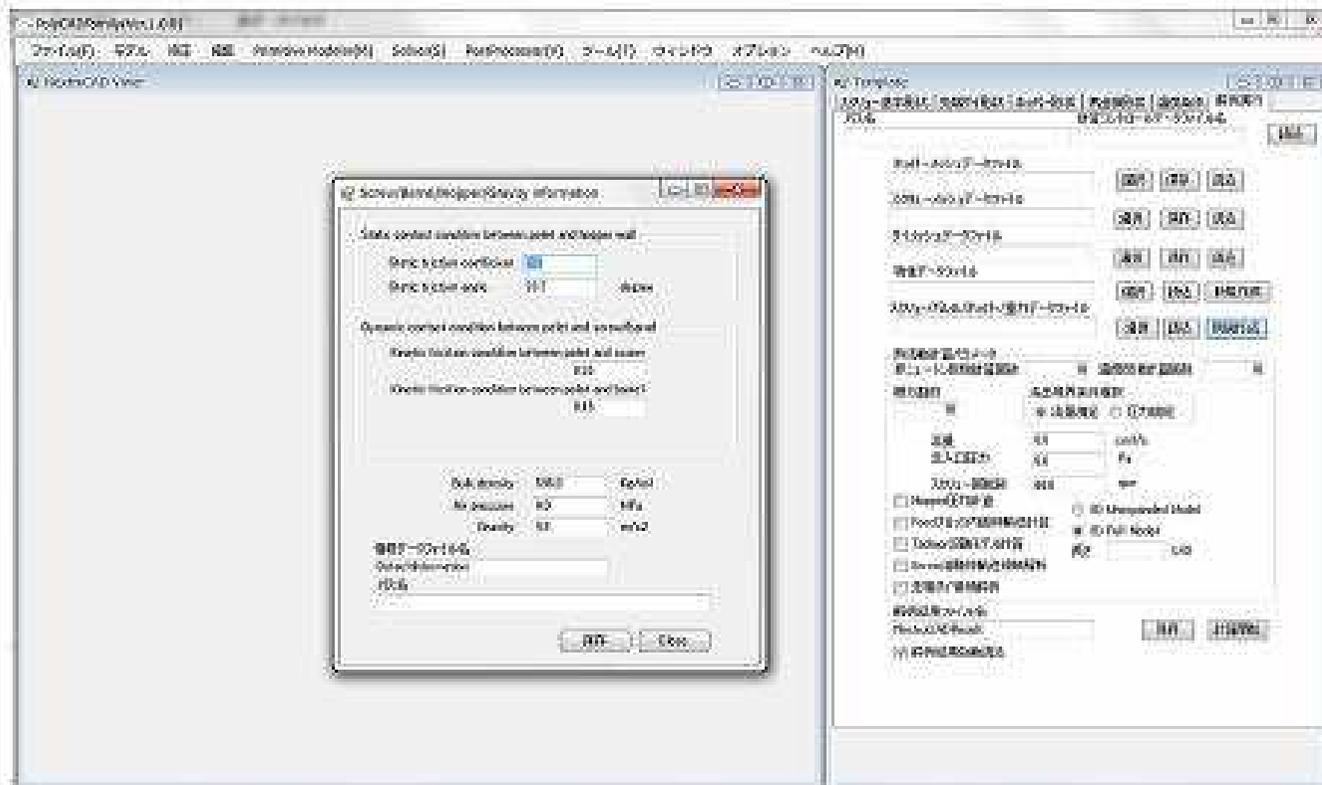
ホッパーや先端ダイを考慮した一貫解析を実施する際には、それぞれのモデルに対して用意されているタブメニューを選択し、形状の基本パラメータをテーブル入力することによって解析モデルを作成します。ホッパーは、ストレートあるいはテーパタイプのシリンダーに想定されています。先端ダイモデルとしては、円管、二重管、ブレーカプレート、アダプターなどを選択し、任意に組み合わせた設定が可能です。下図に、ホッパーと先端ダイ(テーパタイプ二重管と円管を直結)を考慮したスクリー押出機解析モデルの生成例を示します。



ホッパー、先端ダイ解析モデルの追加

3.2 アナリシス

解析プログラムの運用は、GUIにより管理されます。解析の基本条件は下図に示す単一の入力フォーム及び、設定項目毎に表示されるポップアップメニューで設定します。解析に際しては、メッシュデータファイル名、各種計算コントロールデータや成形条件の他、材料物性、ペレットと金型間の摩擦係数情報などが解析プログラムへの入力データとして必要になります。粘度データは HASL社のレオロジーデータ分析ソフトMaterialfitでフィッティングすることが可能です。



解析条件の入力フォーム
(ポップアップメニューによるペレットとスクリュ
/バレル間の摩擦係数の設定例)

3.3 ポストプロセッシング

解析結果は、下図に示すポスト処理フォームで作画内容に対応したアイコンを選択することにより図化処理します。簡単な操作に従って以下に示す解析結果の作画処理が可能です。

★カラーフリンジコンター、カラーラインコンター図

- ・圧力分布
- ・層平均あるいは層毎の温度分布
- ・層平均あるいは層毎の応力分布
- ・層平均あるいは層毎の粘度分布
- ・ソリッドベッド分布
- ・滞留時間分布
- ・局所混合効率

★ベクトル図

- ・流速ベクトル分布

★パーティクルトレース(流線)図

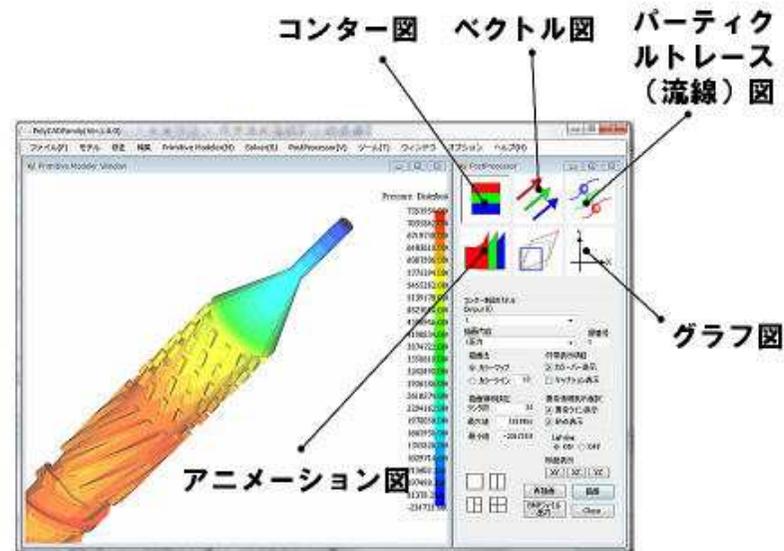
- ・パーティクルトレースアニメーション
- ・流線図

★アニメーション図

- ・連続体トレーサの時間変化
- ・スクリュ回転表示

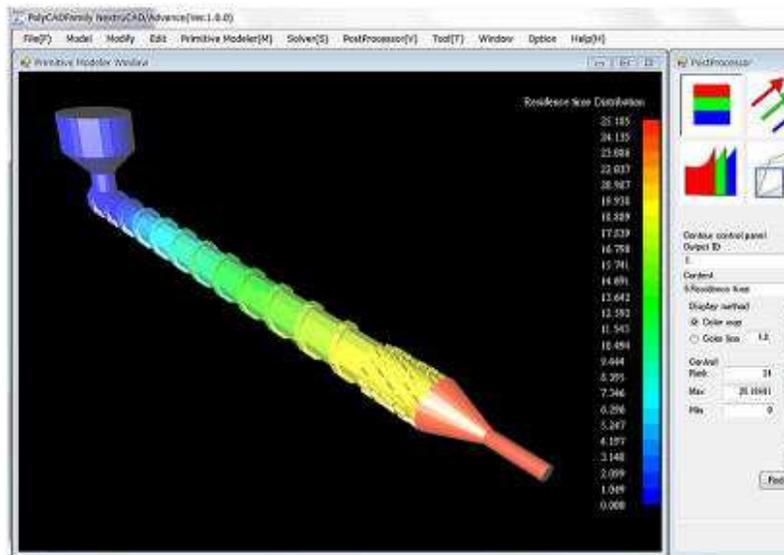
★グラフ図

コンター作画情報と同様

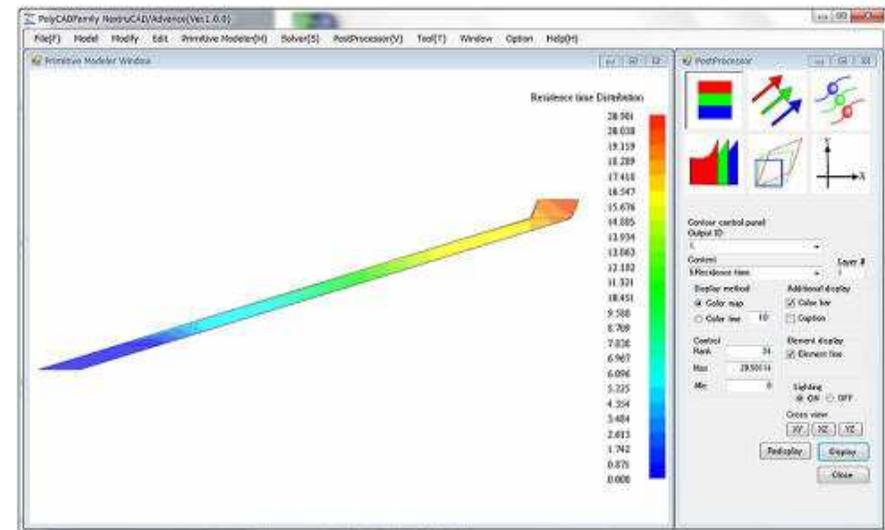


ポスト処理フォーム

下図に示すように3Dモデルと2D展開モデルの双方に対して、ポスト処理用ファイルが出力されます。前者は実際のスクリュ形状を表現した上での各種計算量の検討に適します。一方、後者はスクリュデザインの2D図面に解析結果をマップしたイメージでの出力結果が得られるため、スクリュ設計の検討に解析結果をフィードバックする上で有効です。

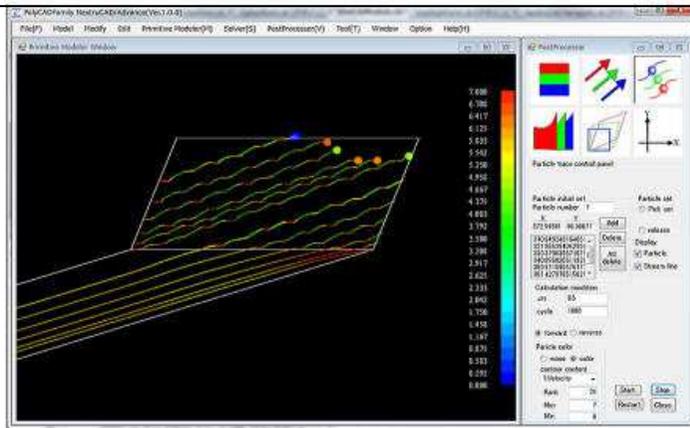


VOFシミュレーションによる滞留時間分布の3D表現

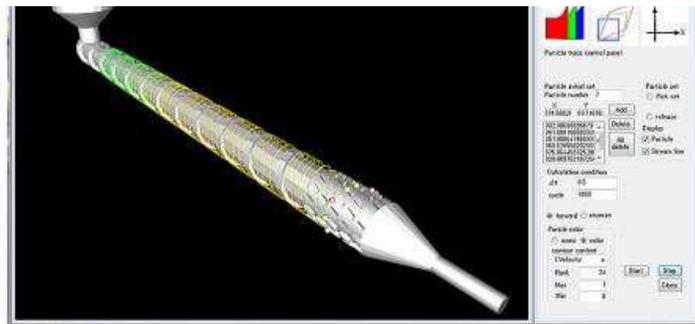


VOFシミュレーションによる滞留時間分布の2D展開図表現

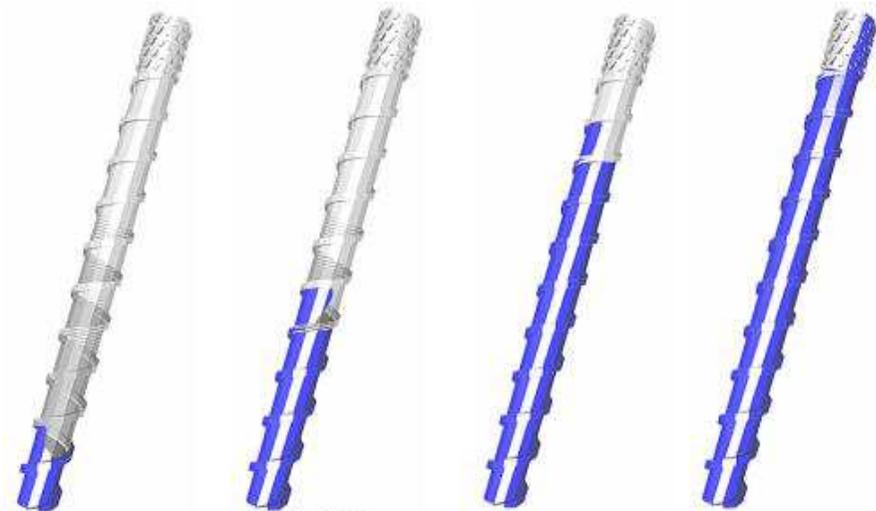
流動状態を把握する際に有効なポスト処理手段となるパーティクルトレース機能や滞留時間分布を評価するためのVOFシミュレータが標準実装されています。何れの手法もマルチブロック法に対応済みです。パーティクルトレース機能は、離散的な粒子をトレーサとした流れの可視化ツールです。一方VOFシミュレータは、連続体をトレーサとした非定常計算を通じて、スクリュ押出機内の滞留時間分布を定量化します。3Dモデル上での粒子の初期設定作業は煩雑で難しいため、2D展開された解析モデル上で粒子の任意位置を初期設定します。下図に示すように最初に2D図面内でパーティクルシミュレーションを実施した後に、3Dモデルをインポートすると粒子軌跡が自動的に3D表現される問題向きのユニークな機能がサポートされています。また、滞留時間を評価するためのVOFシミュレータの解析結果は、スクリュ押出機内の連続体の挙動を表現するアニメーション図として表示可能です。



2D展開モデル上のパーティクルシミュレーション



2D展開モデル上粒子運動情報の3D化

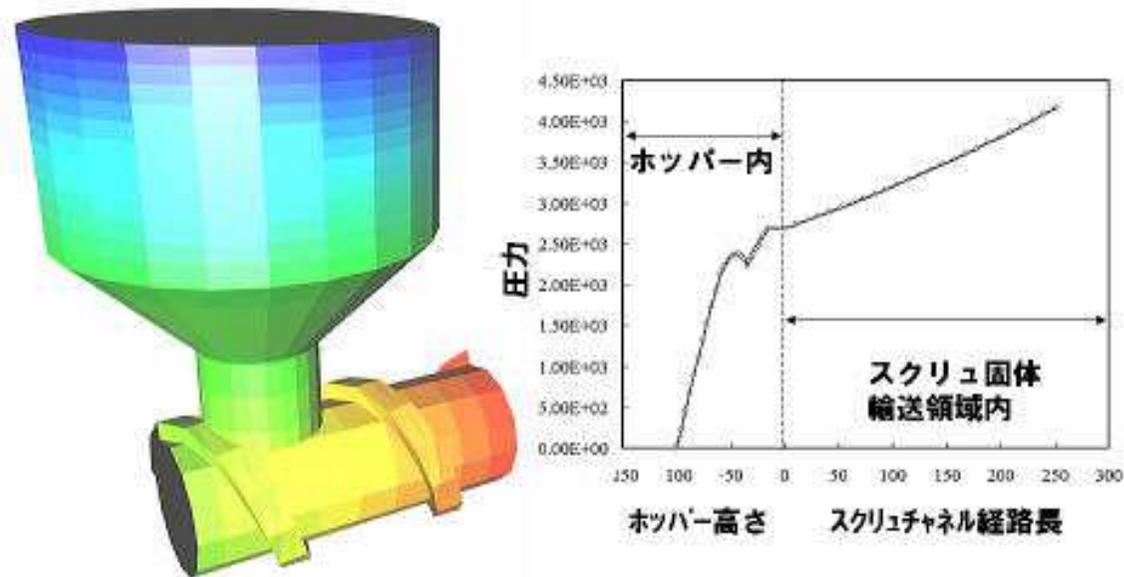


VOFシミュレーションによるスクリュ押出機内連続体トレーサの挙動解析例（アニメーション図）

4. シミュレーション結果

4.1 ホッパーから固体輸送領域 (Feed hopper & Solid conveying region)

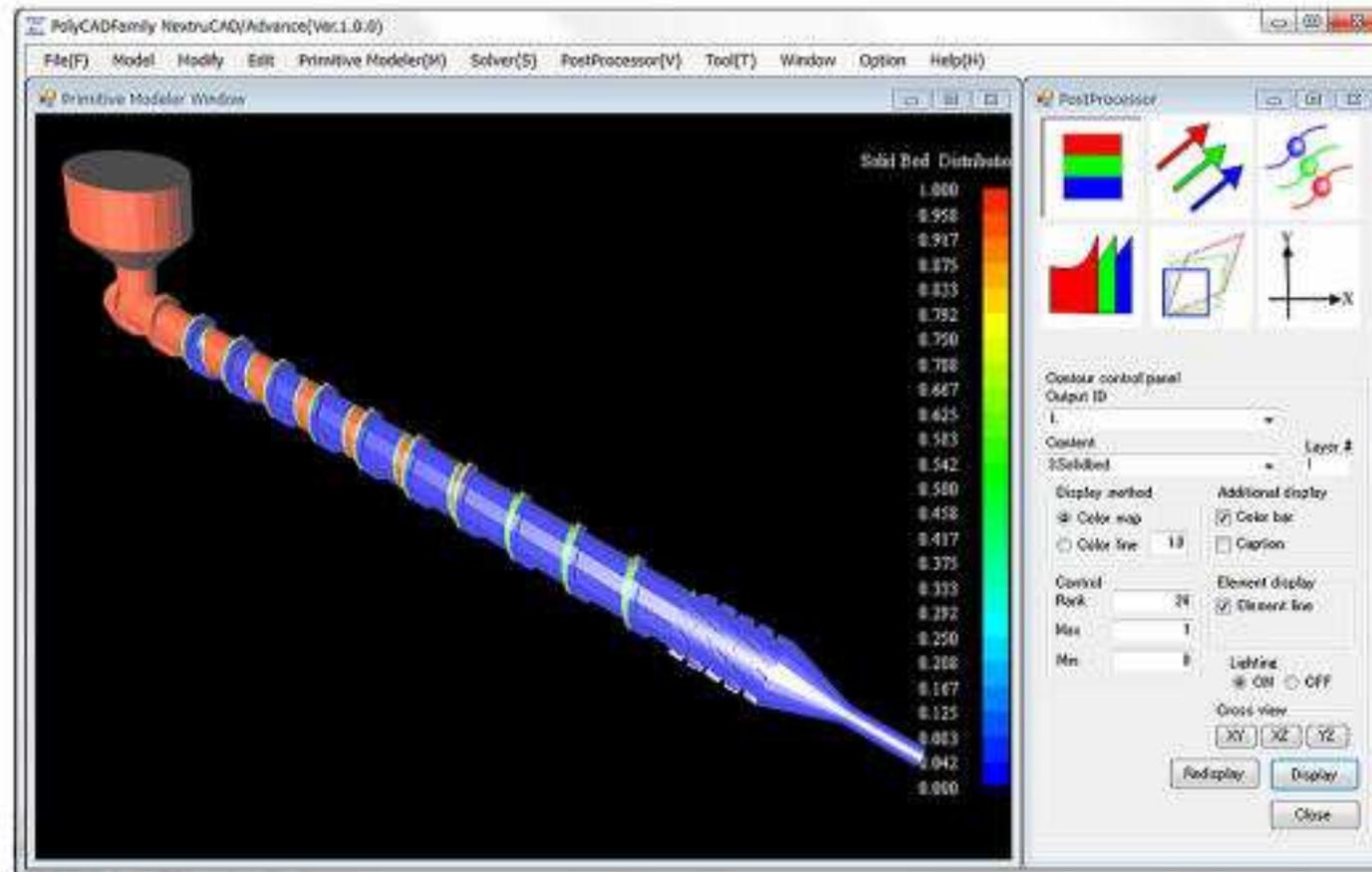
スクリュウ押出機の上流側に配置されるホッパーと固体輸送領域内の圧力分布の計算例を下図に示します。前述した通り、ストレートタイプのシリンダー内では底部に向かい圧力が上昇しますが、テーパ部では縮小方向に向かって圧力が低下します。固体輸送領域内のプラグフローの螺旋流路に沿う最大移動速度は、バレルの移動速度の経路方向の射影成分になります。言い換えれば、固体から観測したバレルの相対速度ベクトルとバレルの移動速度ベクトルの成す角 ϕ は、螺旋角を θ としたとき、 0 から $\pi/2 - \theta$ で変化します。 ϕ が大きくなるほど輸送量が増加します。 $\phi=0$ の場合は、スクリュウ軸方向に輸送されず、固体はスクリュウとともに回転します。定性的に予測される通り、輸送量を増加させるには、ペレットのバレルとの動摩擦係数をスクリュウに対するものよりも大きく設定することが重要です。すなわち、スクリュウ表面を磨き、バレル表面は粗く仕上げるのが輸送量の増加に繋がります。最大輸送量未満の一定値流量に設定した条件では、固体輸送領域内の圧力分布は動摩擦力に依存して敏感に変化します。



ホッパーと固体輸送領域内の圧力計算例

4.2 溶融可塑化解析 (Tadomor melting model)

Single Screw Simulatorは、従来のTadmorモデルによる溶融可塑化解析機能を踏襲しつつ、その解析結果をよりビジュアルに解り易く表現します。下図に一貫解析における固体ソリッドベッド分布の解析結果を示します。Tadmorモデルの利用により、スクリュチャネル形状、固体原料の潜熱、密度、熱物性やバレル設定温度、粘性発熱などが原料の溶融可塑化に与える影響を詳細に検討可能です。当モデルを利用したシミュレーションは、マルチブロック法にも対応しています。

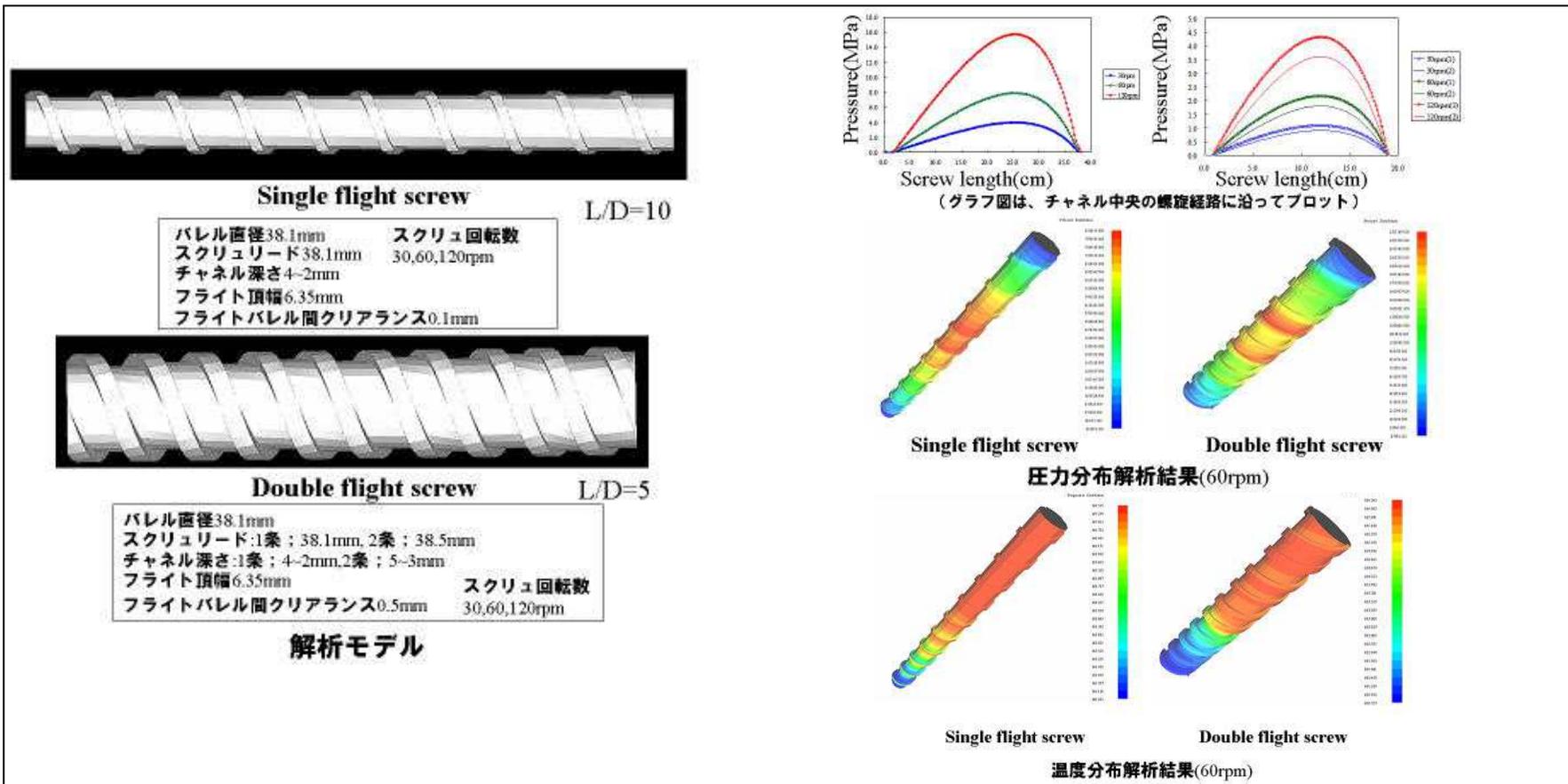


Tadmorモデルを利用したソリッドベッド分布状態の解析
(赤色の領域は固体領域を表す)

4.3 スクリュ内熱流動解析 (Melt conveying region)

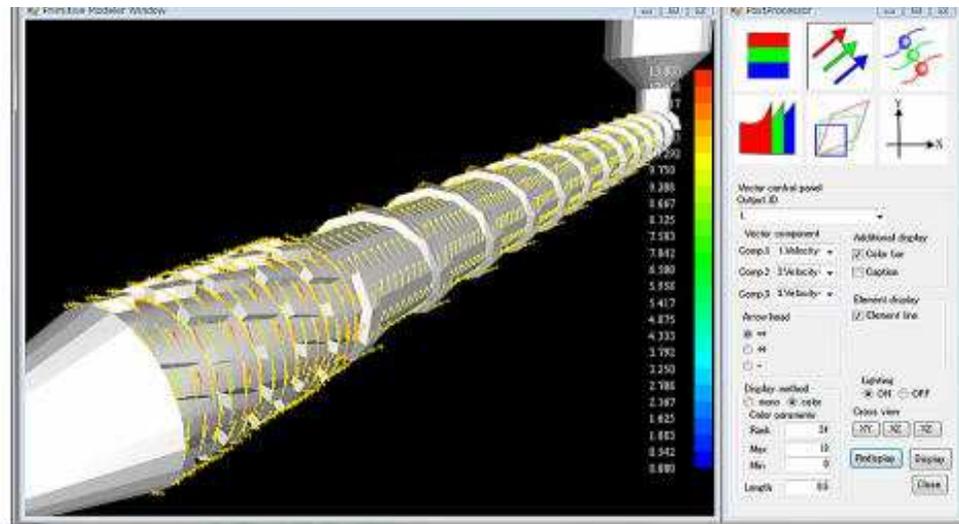
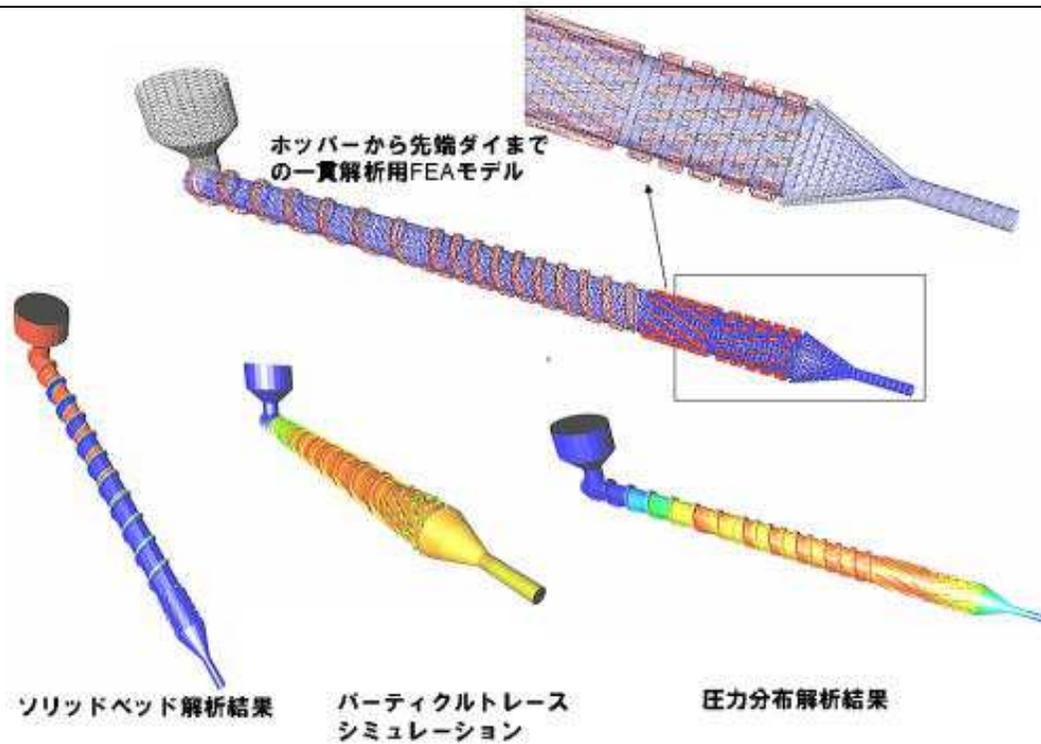
標準スクリュの圧縮部を想定したテスト解析例を下図に示します。マルチブロック法を利用しないスクリュ単体のテストでは、流入境界条件として、圧力規定あるいは流量規定の何れかの設定が可能です。このテスト解析では、流入出口に圧力規定(大気圧)の条件を採用しています。回転速度の変化がスクリュ内圧力分布と吐出量に与える影響について検討しました。この種の単純スクリュについての解析は極めて容易です。解析領域のモデリング、有限要素分割、解析時間(非ニュートン粘度処理の反復計算)を含めて、数分程度で処理可能です。

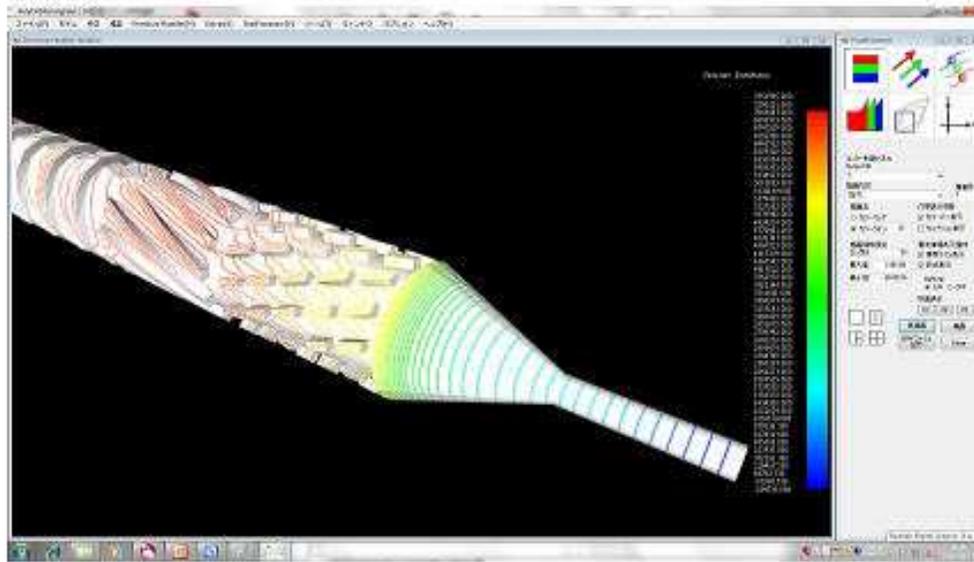
解析結果には、簡易モデルで考慮できないフライトのpushing sideとtrailing sideの圧力差やせん断発熱に伴うフライト近傍の温度上昇が表現されています。定性的に予測される通り、スクリュの回転速度の増加に伴って、スクリュ内の圧力分布はグラフ図に示す通り上昇し、吐出量が増加します。



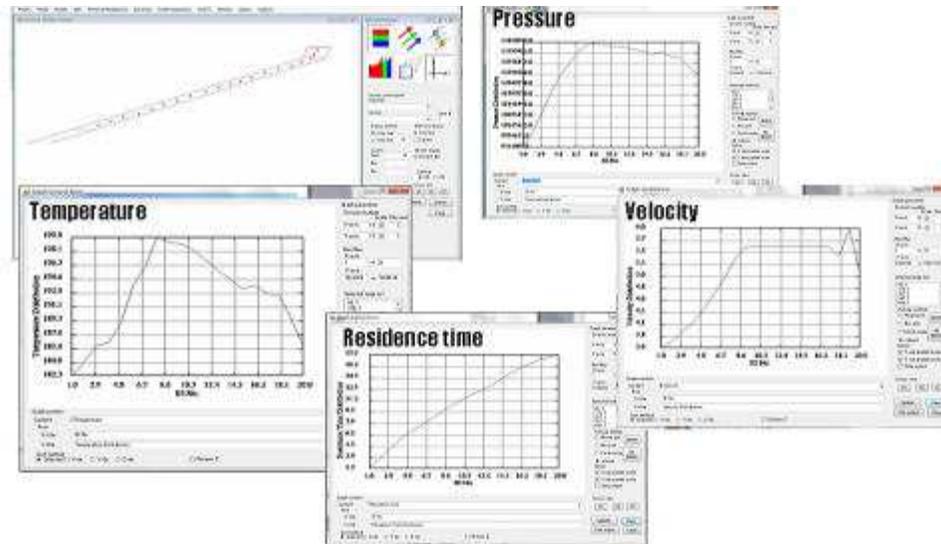
4.4 スクリュ押出機一貫解析例

ホッパーから先端ダイに至るまでの一貫解析例を以下に示します。この解析モデルは、それぞれ独立にメッシュ生成された複数のブロックを組み合わせて表現されています。異なるブロックは、前述したマルチブロック法を利用して、解析上、連結されます。マルチブロック法を利用した解析では、ブロック毎の流量が共通することを前提として圧力分布を連続量として評価します。連結の整合性を持たないブロック間の結合面では、上流側ブロックで評価された圧力分布を補間計算によって下流側ブロックの流入境界条件に反映させます。実際の成形条件に即する流入境界条件は、ホッパー上面とダイ先端流出口を圧力規定(大気圧規定)とすることです。このような圧力規定条件の下に、スクリュの稼動条件、温度設定条件が押出機内部の圧力分布や吐出量に与える影響を定量化することが重要になります。計算と解析モデルの都合により、流入口を圧力規定、流出口を流量規定の境界条件とするマルチブロック法を利用した解析では、流出口の圧力を規定する実用問題に対応するために、流量を増減させる反復計算を通じて、流出口圧力を規定値に一致させます。このため、非ニュートン粘度処理と圧力調整の二重反復計算が必要になりますが、解析モデルの計算負荷が小さいために並列計算などの手法に依存しなくても、解析結果を数分から数十分以内で得ることができます。この一貫解析例では、4ブロック、非ニュートン粘度処理反復計算回数10回、圧力調整反復計算を5回に設定し、解析に要したCPUタイムは5分程度です(CPU: Intel(R) Core(TM) i7 2.80GHzによる計測)。この一貫解析例では、ホッパー上面と先端ダイ出口に圧力規定条件を採用しています。マルチブロック法を利用した反復計算に従って非圧縮条件と流入口圧力規定条件を正確に考慮した解析結果を得ることができます。ミキシングエレメント部では切欠の影響を反映した圧力の分布状態から、チャンネルを横切る流れが生じて混合が促進されていることが予想されます。





圧力分布解析結果（ミキシングエレメント部
&先端ダイ部拡大ラインコンター図）



各種グラフプロット図

5. まとめ

Single Screw Simulatorは、従来の簡易ソフトの長所を生かしつつ、スクリュウ押出機に関わるより広範な問題に対する適応性とプリ/ポスト機能を大幅に強化したソフトウェアです。また、スクリュウチャネルの複雑形状の特徴を妥当に評価し得る潤滑近似(Lubrication approximation)を採用することにより、汎用3次元流体解析で問題になる要素アスペクト比の悪化に留意すること無く、ロバストな運用に耐える実用性の高い解析ツールとして仕上がっています。今後も、現場の声を反映したきめ細かい機能の実装に取り組みます。軽快な運用を実現したSingle Screw Simulatorをスクリュウデザインの設計や最適化に活用いただければ幸いです。

参考文献

- 1) D. M. Walker, *Chem. Eng. Sci.*, 21,975(1966)
- 2) W. H. Darnell and E. A. J. Mol, *SPE J.*, 12,20(April 1956)
- 3) Z. Tadmor and C.G. Gogos, "Principle of polymer processing", Wiley-Interscience, New York(1970)
- 4) Z. Tadmor and I. Klein, "Engineering Principles of Plasticating Extrusion", Reinhold, New York(1970)
- 5) E. E. Agur and J. Vlachopoulos, *Polym. Eng. Sci.*, 22(17),1084(1982)