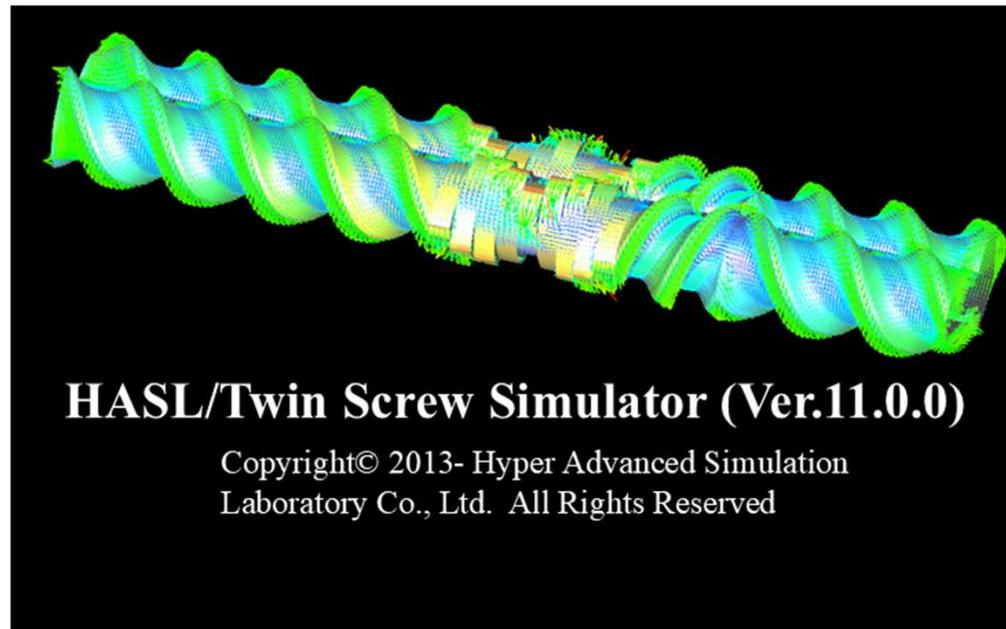


---

# Twin Screw Simulator (TSS)

## Ver.11.0.0

### 改良成果資料



2025/07/28

株式会社HASL

## 解析機能の改良

1. スクリュ内の液滴分散/凝集状態の解析機能 p. 2
  - 1.1. 基礎理論 p. 3
  - 1.2. テスト解析 p.21
  - 1.3. 運用方法 p.43
2. 繊維破断解析機能の改良
  - 2.1. 有限体積法 (FVM) の解法実装 p.52
  - 2.2. サイドフィードからの繊維投入 p.60
3. 履歴解析機能の改良／FVM法 p.66

## ユーザビリティの向上

4. スクリュモデリングの改良／エレメント登録機能 p.71
5. Excel を利用した結果表示および比較機能 p.84
6. 解析結果の簡易抽出機能 (.twinres2d, .crosscont) p.95
7. スクリュ軸方向のトルク出力機能 p.102

# 1. スクリュ内の液滴分散/凝集状態の解析機能

既往液滴分散/凝集状態のMEM (Morphology Evolution Model)<sup>1)</sup>解析機能について下記機能を追加しました.

- ① 層毎のひずみ履歴と滞留時間分布の3D FVM解析機能
- ② せん断流動場内のアフィン変形を利用した分配混合解析機能
- ③ 分配/分散性能を評価する上で重要視される粘度比, 分裂所要時間, ザウター平均粒径, Reduced capillary number 等の可視化機能

以下に各追加機能の内容や運用方法について解説します.

## 1.1 基礎理論

液滴の分散性を議論する上で図1に示すGrace カーブ<sup>2)</sup>が、よく引用されます。グラフの横軸は、液滴粘度(分散相)  $\eta_d$  とマトリクス(連続相)  $\eta_m$  の粘度比  $\lambda$  を表します。

$$\lambda = \frac{\eta_d}{\eta_m} \quad (1)$$

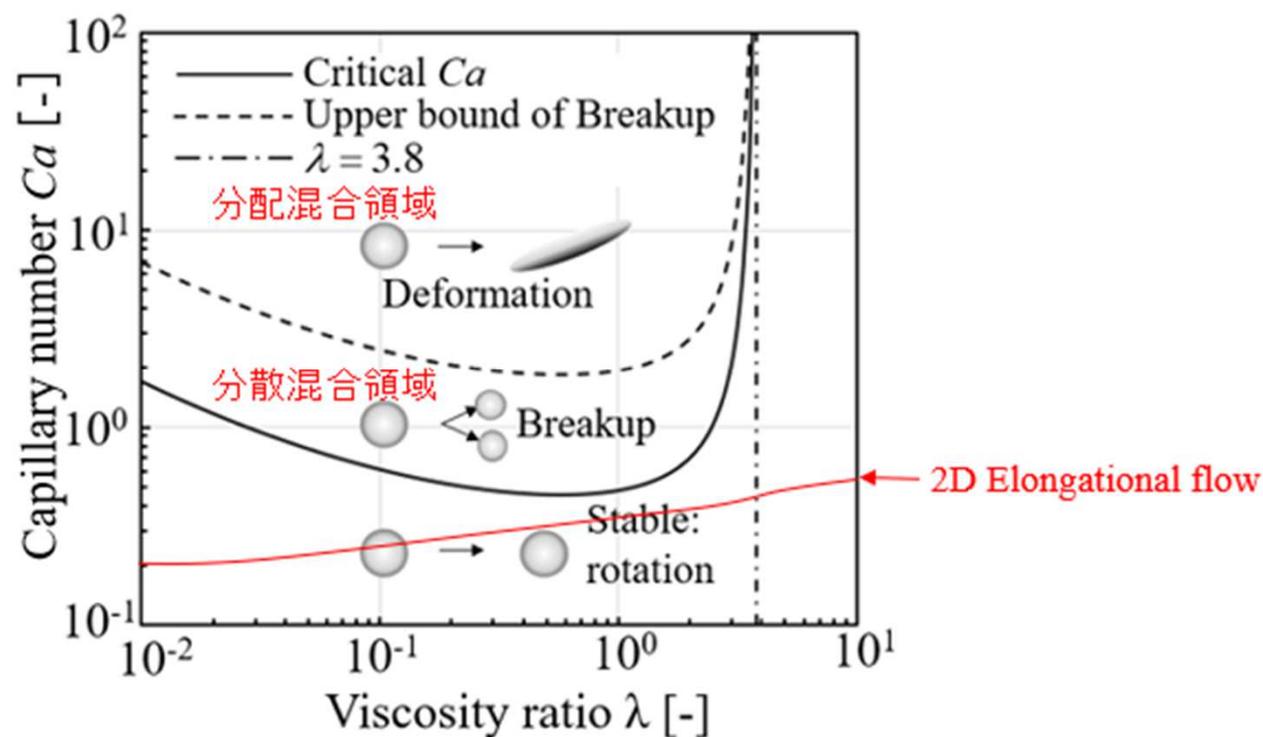


図1 Graceカーブ

Graceの実験では、液滴とマトリクスとして何れもニュートン流体が採用されていますが、その実験観測結果は非ニュートン流体でも成立すると拡大解釈します。非ニュートン流体の粘度は、温度とひずみ速度に依存して変化するため、スクリュ押出機内において領域毎に粘度比が異なることに留意する必要があります。

一方、Graceカーブの縦軸は、せん断応力と表面張力の比で定義されるキャピラリー数  $Ca$  です。

$$Ca = \frac{\eta_m \dot{\gamma} R_d}{\sigma} \quad (2)$$

$\eta_m$ : マトリックス粘度 [Pa·s]  
 $\dot{\gamma}$ : せん断ひずみ速度 [s<sup>-1</sup>]  
 $R_d$ : 液滴半径 [m]  
 $\sigma$ : 表面張力係数 [N/m]

スクリュ押出機内において、粘度とせん断ひずみ速度は局所的に評価されますが、液滴半径は履歴情報として評価する必要があります。凝集を無視した場合、スクリュ押出機内では、混練の促進に伴って液滴半径が下流側に向けて単調に減少すると考えるのが自然です。

Janssen と Meijer らは、キャピラリー数が大きな条件下においては分散は起こらず、分配混合が支配的であるとしています<sup>3)</sup>。また、Huneault, Shi, 及びUtracki らは、次式で定義される臨界キャピラリー数  $Ca_{crit}$  からその4倍の範囲内でのみ分散が起こるとしています<sup>1)</sup>。

$$\begin{aligned} \log(Ca_{crit}) = & -0.5060 - 0.0994 \log \lambda \\ & + 0.1240(\log \lambda)^2 - \frac{0.1150}{\log \lambda - 0.6110} \end{aligned} \quad (3)$$

これらの情報は図1内に示されています。Grace カーブは、キャピラリー数と粘度比に応じて4つの領域に区分されます。図内実線は臨界キャピラリー数、破線は臨界キャピラリー数の4倍を表します。実線と破線で囲まれた領域が分散混合領域(1)、破線以上の領域は分配混合領域(2)です。せん断流動条件下において、臨界キャピラリー数未満の領域(3)では、分散は起こらず、液滴は安定な変形/回転状態を継続します。また、せん断流動には分散性能に限界があり、図1内の一点鎖線の右側に示されている粘度比がおおよそ3.8以上の領域(4)では、キャピラリー数が如何なる条件でも分散は起こらないとされています。後述するようにせん断流動による液滴半径は、表面張力効果を見捨ると、ひずみ速度の履歴積分で評価されるひずみの $-1/2$ 乗に比例して緩やかに減少しますが、実際には微細なスケールで支配的になる表面張力効果によって液滴半径の減少が抑制され、分散が促進されないと考えられます。一方、伸長流動による液滴半径はひずみに対して指数関数的に減少するため、表面張力効果による抑制を振り切り、粘度比が高い条件でも分散が可能と考えられます。平面伸長流動に対する臨界キャピラリー数を図内赤色実線で示します。

Graceカーブは、液滴の分配/分散混合を議論する際に有効な基礎情報ですが、以下に述べる理由によって、当情報のみでは、分散混合の定量化は適いません。スクリュ押出機内の流動状態に着目した際、直ちに予測できることは、粘度比3.8以上の領域では、分散が起こらないということのみです。当領域は、履歴情報に依存するキャピラリー数とは無関係に区分できるため、このように容易に状態を予測可能です。一方、粘度比3.8未満の領域は、前述の(1),(2),(3)の何れかに分類されます。これらの領域はキャピラリー数を用いて区分されますが、キャピラリー数が履歴情報として評価されるため、すなわち、時間に依存して変化するため、スクリュ押出機内の状態は、Graceカーブに示される各領域を時間的に遷移します。

ある評価点での液滴半径, マトリクス粘度, 粘度比, 及びひずみ速度を利用し, 表面張力係数を指定すれば, キャピラリー数が計算され, 当評価点の状態が何れの領域に属するか特定することは可能です. しかし, 液滴はスクリュ押出機内を時間的に移動するため, このように特定された領域は時間を固定した状態の情報に過ぎません. 仮に特定された領域が分散混合領域(1)であったとしても次の瞬間には液滴が別の領域に遷移する可能性があります. 従って, Graceカーブは, 分配/分散混合の可能性を判断するための基礎情報として利用すべきです. 仮にある評価点の状態が, Graceカーブ上で分散混合領域に特定されたとしても, 分散には有限の時間を要するため, この有限時間内に別の領域に遷移してしまうと実際には分散は起こらないということです.

Grace<sup>1)</sup>により分裂に要する時間  $t_b$  も実測されています. 実測値は次式を用いてモデルフィット可能です.

$$t_b = 91.46 \frac{Ca_{crit} \lambda^{0.34}}{\dot{\gamma}} \quad (4)$$

分裂所要時間は、臨界キャピラリー数、粘度比、及びせん断ひずみ速度に依存して変化します。図2にせん断ひずみ速度:  $100 \text{ s}^{-1}$  条件で予測される分裂所要時間の粘度比依存性を示します。分裂所要時間は、粘度比0.075付近が極小となる下に凸の分布で表されます。粘度比3.49の条件下で分散を実現するには、Graceカーブ上で分散混合領域に区分される条件を分裂所要時間 20 s 以上にわたって保持する必要があると予測されます。

このように粘度比と分裂所要時間は、スクリュウ押出機の分散性能を議論する際に有効な基礎情報であるため、TSS(Ver.11)解析結果の可視化情報に追加しています。

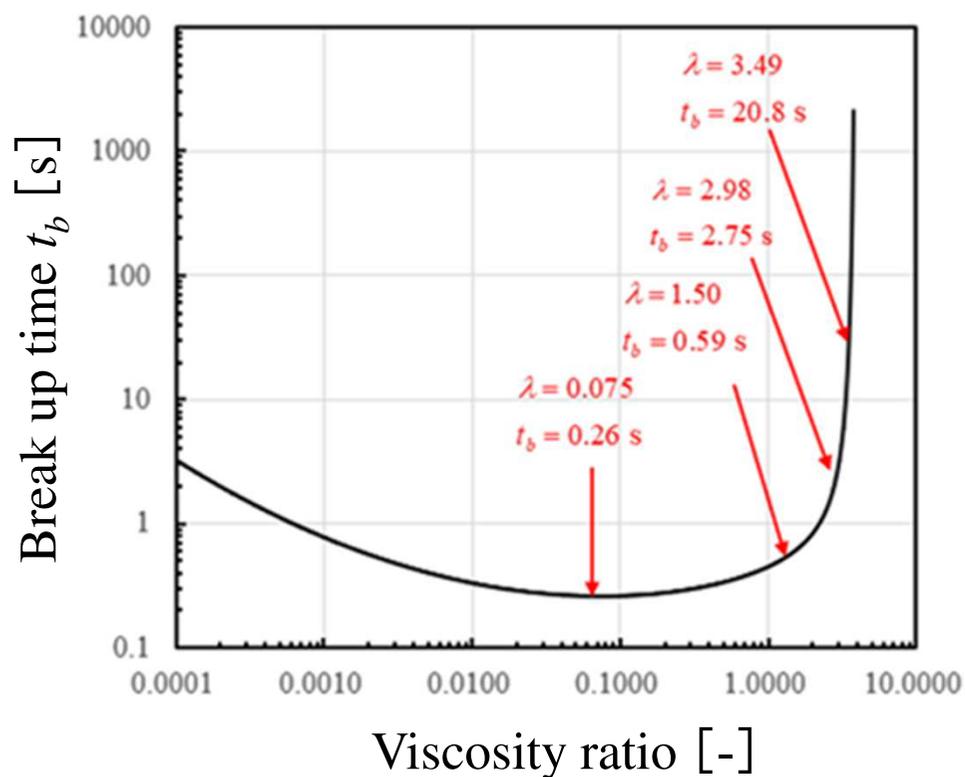


図2 分裂所要時間の粘度比依存性

スクリュウ押出機の上流側に注入される液材のスケールは大きく、キャピラリー数は臨界キャピラリー数よりも十分大きな条件を満足すると考えられます。このような条件下においては分配混合が支配的です。分配混合は、流動状態から評価される界面の時間発展情報を用いて評価するのが一般的です<sup>4)</sup>。せん断流動下に配置された初期半径 $R(0)$ の球状液滴は、図3に示すように回転楕円体に変形し、フィラメント化します。回転楕円体の長半径 $A(t)$ と短半径 $B(t)$ は、ひずみ $\gamma(t)$ を利用してそれぞれ以下に示すように評価可能です。

$$\left(\frac{X_1(t)}{A(t)}\right)^2 + \left(\frac{X_2(t)}{B(t)}\right)^2 + \left(\frac{X_3(t)}{B(t)}\right)^2 = 1,$$

$$A(t) = R(0) \left( \frac{2 + \gamma^2(t) + \gamma(t)\sqrt{\gamma^2(t) + 4}}{2} \right)^{1/2},$$

$$B(t) = R(0) \left( \frac{2 + \gamma^2(t) + \gamma(t)\sqrt{\gamma^2(t) + 4}}{2} \right)^{-1/4},$$

$$\gamma(t) = \int_0^t \dot{\gamma}(t) dt$$

(5)

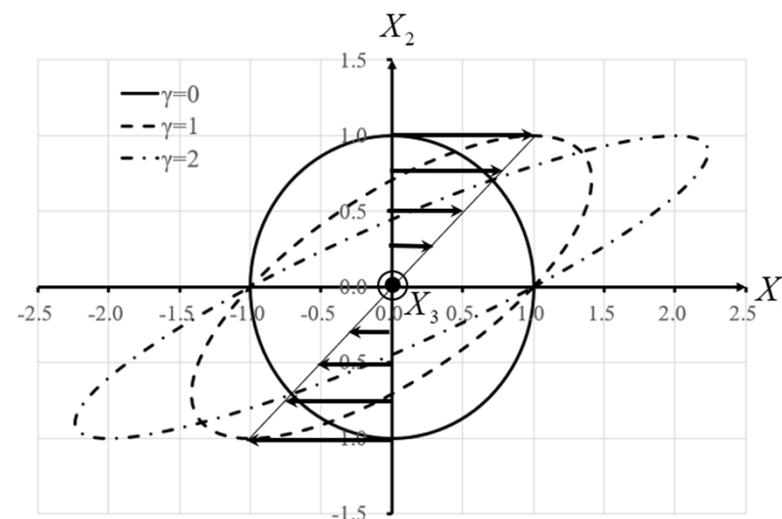


図3 せん断流動下に配置された非相溶流体の変形状態

当変形過程において回転楕円体の長半径 $A(t)$ と短半径 $B(t)$ は時間と共に変化しますが、体積 $V$ は初期状態より変化しません。すなわち以下に示す非圧縮性条件が満足されることは(5)式より明らかです。

$$V = \frac{4}{3} \pi A(t) B^2(t) = \frac{4}{3} \pi R^3(0) \quad (6)$$

一方、回転楕円体の表面積 $S(t)$ は時間経過と共に単調に増加します。表面積 $S(t)$ を評価するには楕円積分の数値解析を要します。計算効率を高めるために、最大誤差が1.061%未満に抑えられる下記近似式<sup>5)</sup>を利用します。

$$S(t) \cong 4\pi \left( \frac{2A^p(t)B^p(t) + B^{2p}(t)}{3} \right)^{1/p}, \quad (7)$$

$p = 1.6075$

キャピラリー数を評価するには、液滴の半径が必要です。球形状から変形し、フィラメント化した液滴の半径を評価するためにザウター平均粒径 (SMD : Sauter Mean Diameter)<sup>6)</sup>を採用します。SMDは、燃焼、蒸発工学分野において液滴の平均径を評価するために多用されています。SMDの基本的なアイデアは、下図に示すようにフィラメントを体積と表面積の総計が元のフィラメントと等しくなるように複数の球状粒子の集合体として捉え、体積と表面積の比率で液滴平均半径を表す方法に立脚しています。

$$\begin{aligned}
 V &= N \frac{4}{3} \pi R^3, \\
 S &= N 4 \pi R^2
 \end{aligned}
 \quad \Rightarrow \quad
 R = \frac{3V}{S} \quad (8)$$

$N$ : 離散化粒子数

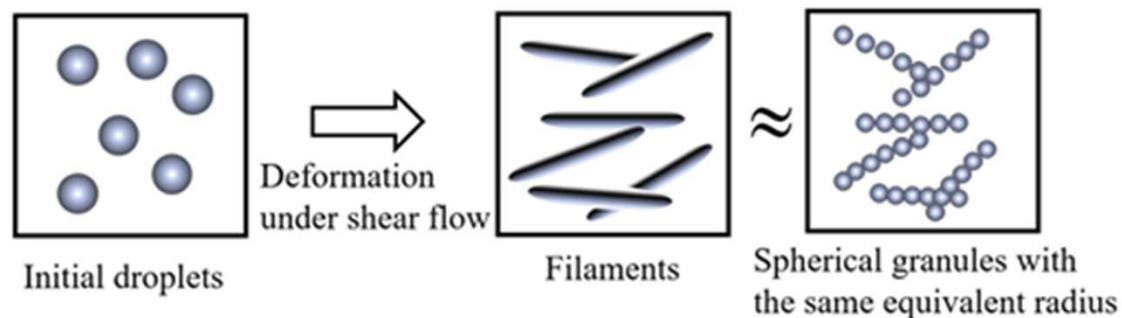


図4 ザウター平均粒径

キャピラリー数を評価するための液滴の半径は, (5)~(8)式を用いて次のように評価されます.

$$R_d = \frac{3V}{S} = R(0) \left( \frac{2 \left( \frac{2 + \gamma^2 + \gamma\sqrt{\gamma^2 + 4}}{2} \right)^{p/4} + \left( \frac{2 + \gamma^2 + \gamma\sqrt{\gamma^2 + 4}}{2} \right)^{-p/2}}{3} \right)^{-1/p} \quad (9)$$

$$\cong R(0) \left( \frac{2}{3} \right)^{-1/p} \gamma^{-1/2} \text{ for } \gamma \gg 1$$

ひずみは, 次式に示す輸送方程式を3D FVMで解析することにより定量化します.

$$\frac{D\gamma}{Dt} = \dot{\gamma} \quad (10)$$

ここで,  $D/Dt$ は物質導関数(ラグランジェ微分)を意味します.

前述の通り, 液滴の分配混合は, キャピラリー数が大きい条件下で支配的です. また, 分配混合性能はマトリクスの流動情報のみを利用して定量化可能です. 実際(9)式ではマトリクスの流動状態から決定されるひずみ速度の時間履歴積分値:ひずみを用いて液滴径の評価が可能です. キャピラリー数が大きいということは, 液滴径が大きく, 表面張力の影響が小さいことを意味します. (9)式は, 液滴半径が際限なく減少することを表現していますが, 液滴の微細化に伴って表面張力効果が高まり, その影響を無視した前提条件が破綻します. (9)式に示すように高ひずみ条件においては, 液滴径はひずみの-1/2乗に比例し緩やかに減少するため, 表面張力効果によって変形が抑制され, 分散が促進されない状況になります. 従って, 表面張力効果が無視できない分散混合領域においては, 別途MEM (Morphological Evolution Model)<sup>1)</sup>を利用して液滴の分散半径を計算します. 分散混合性能を評価するために, マトリクスの流動情報に加えて, マトリクスが液滴に与えるせん断応力や液滴の表面張力効果の影響を考慮します.

実際の液滴の分裂挙動は多様性に富み複雑ですが、以下に示す簡略化を採用し、液滴の分散過程を記述する運動学的方程式を導出します。

- ① 特定の時間刻み $\delta$ 毎に1個の液滴が体積の等しい2個の液滴に連鎖的に分裂する。
- ② 着目する領域内の液材の体積分率 $\phi$ は不変とする。

液滴の実測分裂パターンは粘度比に応じて変化します。粘度比が1に近い条件では、液滴は複数個の均一な液滴に分裂することが観察されています。粘度比が1から大きくずれると分裂は不均一になりますが、そのモデル化は困難です。①は、計算モデル構築を目的とした簡略化です。液滴とマトリクスを非相溶の非圧縮流体とすれば、②は自然に成立します。

①は分散過程が図5に示すように進展することを意味しています。

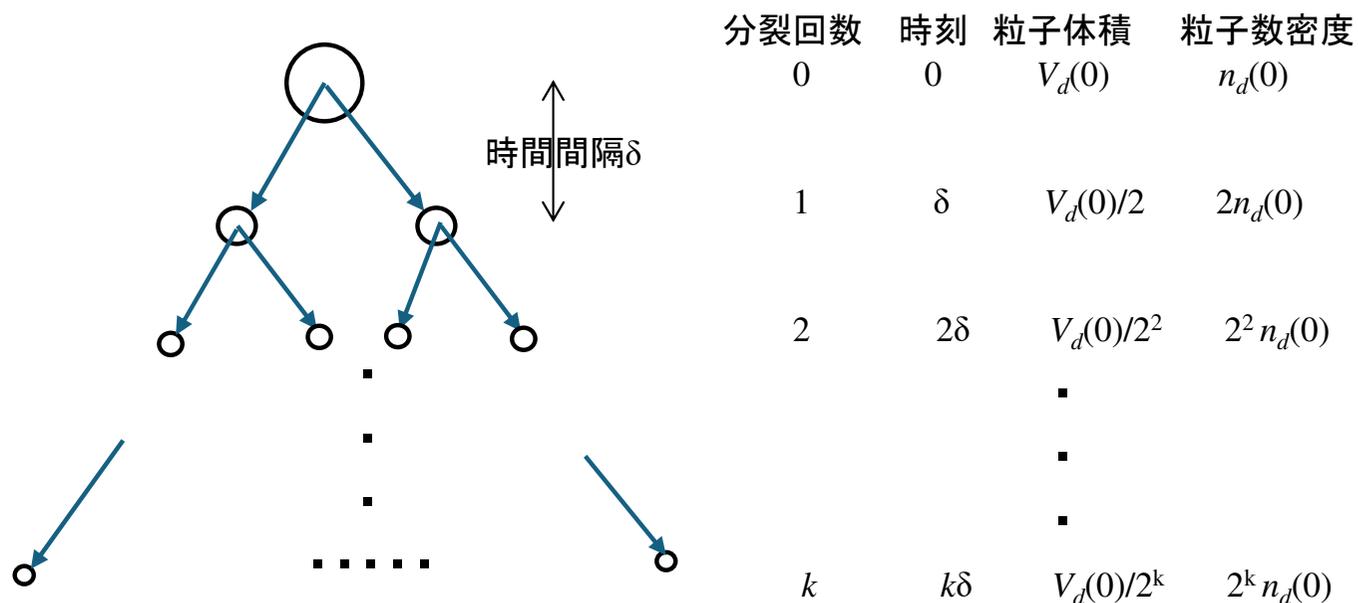


図5 均一分散過程

図5に示した均一分散過程において、 $k$ 回目の分裂終了時刻  $t$  は、

$$t = k\delta \quad (11)$$

です。また $k$ 回目の分裂終了時刻における液滴の体積と数密度は、それぞれの初期値を $V_d(0)$ と $n_d(0)$ とすると次式で与えられます。

$$V_d(k\delta) = \left(\frac{1}{2}\right)^k V_d(0) \quad (12)$$

$$n_d(k\delta) = (2)^k n_d(0) \quad (13)$$

ここで、(11)式の関係を利用して離散変数  $k$  を消去すると(12)式は、次式に示すように連続関数の表式に書き直されます。(13)式についても同様に書き直されます。

$$V_d(t) = 2^{-t/\delta} V_d(0) \quad (14)$$

$$n_d(t) = 2^{t/\delta} n_d(0) \quad (15)$$

連続関数表示された (14)式から, 液滴体積の時間変化は以下に示す微分方程式で記述されることが示されます.

$$\begin{aligned} \ln V_d(t) &= \ln(2^{-t/\delta} V_d(0)) \\ &= -\frac{t}{\delta} \ln 2 + \ln V_d(0) \end{aligned} \quad \Longrightarrow \quad \frac{1}{V_d(t)} \frac{dV_d(t)}{dt} = -\frac{\ln 2}{\delta} \quad \Longrightarrow \quad \therefore \frac{dV_d(t)}{dt} = -\frac{\ln 2}{\delta} V_d(t) \quad (16)$$

同様に液滴数密度は以下に示す微分方程式を満足することが示されます.

$$\frac{dn_d(t)}{dt} = \frac{\ln 2}{\delta} n_d(t) \quad (17)$$

次に液滴を球形状に簡略化し,

$$V_d(t) = \frac{4}{3} \pi R_d^3(t) \quad (18)$$

の関係を利用すると(16)式から, 液滴半径の方程式

$$\frac{dV_d(t)}{dt} = -\frac{\ln 2}{\delta} V_d(t) = -\frac{\ln 2}{\delta} \frac{4\pi}{3} R_d^3(t) = 4\pi R_d^2(t) \frac{dR_d(t)}{dt} \Rightarrow \frac{dR_d(t)}{dt} = -\frac{\ln 2}{3\delta} R_d(t) \quad (19)$$

の関係が導かれます.

(4)式に示した分裂に要する時間 $t_b$ は特定の液材に対して観察された結果を利用して求められています。材料に依存する無次元関数を $t_b^*$ とすると, (4)式は,

$$t_b = \frac{Ca_{crit} t_b^*}{\dot{\gamma}} \quad (20)$$

と表されます。図6に参考文献1)に記載されているGraceとElemansの実測値を利用した無次元時間 $t_b^*$ の回帰解析結果を示します。文献1)には回帰解析結果の数値情報が未記載のため、図7に示すように図6に示すグラフをトレースして回帰解析結果

$$t_b^* = 91.46\lambda^{0.34} \quad (21)$$

を推定しています。当回帰パラメータ(91.46,0.34等の数値)は入力情報として任意設定可能です。

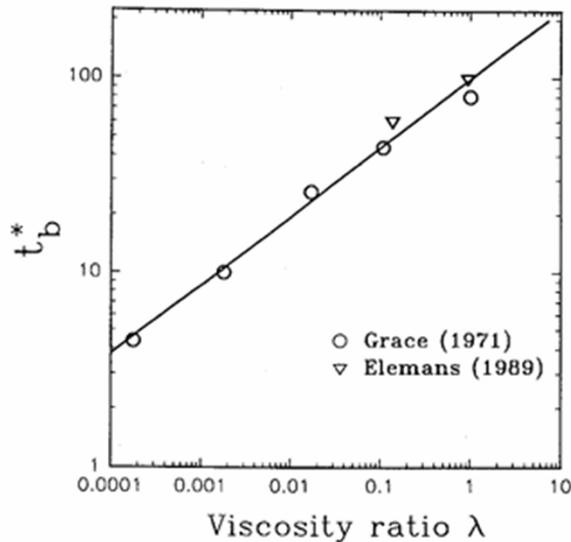


図6 無次元時間の粘度比依存性<sup>1)</sup>

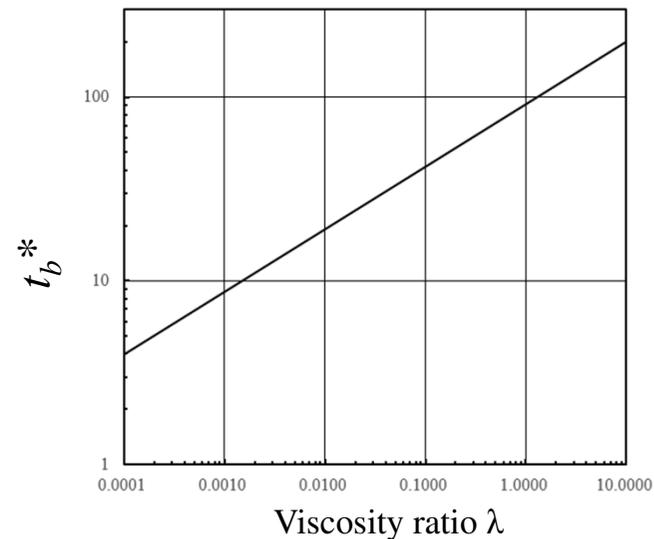


図7 無次元時間の粘度比依存性  
再現推定情報

文献1)では, 液滴の数密度に対する微分方程式が次式で表されています.

$$\frac{dn_d(t)}{dt} = \frac{1}{t_b} n_d(t) = \frac{\dot{\gamma}}{Ca_{crit} t_b^*} n_d(t) \quad (22)$$

分裂時間を一定と見做すと(22)式は容易に積分可能で解は

$$n_d(t) = n_d(0) e^{\frac{t}{t_b}} \quad (23)$$

です. 一方(17)式の解は,

$$n_d(t) = n_d(0) e^{\frac{\ln 2}{\delta} t} \quad (24)$$

です. (23)式と(24)式より, それぞれ以下に示す関係が導かれます.

$$\frac{n_d(t_b)}{n_d(0)} = e = 2.718 \quad (25)$$

$$\frac{n_d(\delta)}{n_d(0)} = e^{\ln 2} = 2 \quad (26)$$

時刻 $\delta$ には粒子が2個に分裂すると考えているので, (26)式の関係は自明です. 一方, (25)式は分裂時間 $t_b$ が $\delta$ とは異なり, 液滴が分裂して体積が $e^{-1}$ 倍されるまでの時間として $t_b$ を定義していることが分かります.

文献1)に記載されている分裂時間との整合性を重視し, (17)式と(22)式の対応関係から,

$$t_b = \frac{\delta}{\ln 2} \quad (27)$$

とします. 結果として, (19)式は次のように書き直されます.

$$\frac{dR_d(t)}{dt} = -\frac{\ln 2}{3\delta} R_d(t) = -\frac{1}{3t_b} R_d(t) = -\frac{\dot{\gamma}}{3Ca_{crit} t_b^*} R_d(t) \quad (28)$$

今までの議論は分裂のみを考慮しましたが, 以下の議論では凝集も併せて考慮します. 分裂が数密度の増加に寄与するのに対し, 凝集は液滴の合体に伴い数密度の減少に寄与します. 参考文献1)に従って, 凝集の数密度の時間変化は次式で表されると考えます.

$$\left( \frac{dn_d}{dt} \right)_{coalescence} = -C_n n_d R_d^{-2} \phi^{8/3} \dot{\gamma} \quad (29)$$

凝集に対しても以下に示すように質量保存則と(29)式を用いて、凝集に伴う液滴の時間変化を表現する微分方程式が求められます。

$$\begin{aligned} \left(\frac{d(n_d V_d)}{dt}\right)_{\text{coalescence}} &= \left(\frac{dn_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} V_d + n_d \left(\frac{dV_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} = 0 \Rightarrow \frac{1}{V_d} \left(\frac{dV_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} = -\frac{1}{n_d} \left(\frac{dn_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} \\ \left(\frac{dV_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} &= \frac{4}{3} \pi \left(\frac{dR_d^3}{dt}\right)_{\text{coalescence}} = 4\pi R_d^2 \left(\frac{dR_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} = V_d \frac{3}{R_d} \left(\frac{dR_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} \Rightarrow \left(\frac{dR_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} = \frac{R_d}{3} \frac{1}{V_d} \left(\frac{dV_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} \end{aligned}$$



$$\left(\frac{dR_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} = \frac{R_d}{3} \frac{1}{V_d} \left(\frac{dV_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} = -\frac{R_d}{3} \frac{1}{n_d} \left(\frac{dn_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} \stackrel{(29)}{=} \frac{C_n}{3} R_d^{-1} \phi^{8/3} \dot{\gamma} \quad (30)$$

※参考文献1)では、(29)式に相当する方程式が液滴径 $D$ を用いて

$$\left(\frac{dn_d}{dt}\right)_{\text{coalescence}} = -C_n n_d D^{-5} \phi^{8/3} \dot{\gamma}$$

と表されていますが、指数-5は誤植で(30)式を導くためには-2が正解と考えられます。

(30)式は直径を半径に置き換えたことを除き参考文献の表式と一致します。尚 $C_n$ は比例定数です。直径を半径に置き換えたため比例定数は文献の定義の1/4倍になっています。

ここで、自明ではありませんが、③分裂現象と凝集現象について相加性が成立する  
と仮定します。この仮定の下、液滴の数密度と半径の時間発展はそれぞれ次式で表さ  
れます。

$$\frac{dn_d(t)}{dt} = \left( \frac{dn_d(t)}{dt} \right)_{breakup} + \left( \frac{dn_d(t)}{dt} \right)_{coalescence} = \frac{\dot{\gamma}}{Ca_{crit} t_b^*} n_d(t) - C_n \frac{n_d(t)}{R_d^2(t)} \phi^{8/3} \dot{\gamma} \quad (31)$$

$$\frac{dR_d(t)}{dt} = \left( \frac{dR_d(t)}{dt} \right)_{breakup} + \left( \frac{dR_d(t)}{dt} \right)_{coalescence} = -\frac{\dot{\gamma}}{3Ca_{crit} t_b^*} R_d(t) + \frac{C_n}{3R_d(t)} \phi^{8/3} \dot{\gamma} \quad (32)$$

(31)式と(32)式は、キャピラリー数が次式の関係を満たす場合にのみ解析対象とさ  
れます。

$$Ca_{crit} \leq \frac{\eta_m \dot{\gamma} R_d(t)}{\sigma} \leq 4Ca_{crit} \quad (33)$$

## 参考文献

- 1) Huneault M. A. , Shi Z. H. , and Utracki L. A. ,  
Development of Polymer Blend Morphology During Compounding in a Twin-Screw Extruder.  
Part IV: A New Computational Model with Coalescence,  
*Polym. Eng. Sci.*, **35**,115-127(1995)
- 2) Grace, H. P., Dispersion Phenomena in High Viscosity Immiscible Fluid Systems and  
Application of Static Mixers as Dispersion Devices in Such Systems., *Chem. Eng. Comm.*, **14**,  
225-277 (1982)
- 3) Janssen J. M. H. and Meijer H. E. H. ,Droplet breakup mechanisms: Stepwise equilibrium  
versus transient dispersion, *J. Rheol.* **37**(4),597-608(1993)
- 4) Ottino, J. M., The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport, Cambridge  
University Press (1989)
- 5) Patial, J. S., A Study on Mensuration with Special Reference to Ellipse and Ellipsoid, *J. Res.*  
*Appl. Math.*, **9**(3),1-13 (2023)
- 6) [https://en.wikipedia.org/wiki/Sauter\\_mean\\_diameter](https://en.wikipedia.org/wiki/Sauter_mean_diameter)

## 1.2 テスト解析

公開資料<sup>\*)</sup>に基づくテスト解析モデルを採用しました。解析対象とした成形材料は、酢酸セルロース(CA: Cellulose Acetate)を分散相, ポリビニールアルコール(PVA: Poly Vinyl Alcohol)を連続相とする非相溶高分子ブレンドです。CAは、木綿や綿花などの天然由来の素材から製造され、廃棄後、自然に戻るため、地球環境に優しい材料です。また、PVAは、コンタクトレンズ装着薬の結合剤として利用されていることから生体にも無害の材料とされています。成形材料の溶融可塑化混練装置として、混練性能に優れ、大量生産で利点を発揮する同方向回転型二軸スクリュ押出機が採用されました。

当テスト解析で採用したデータファイル一式は、成果物として提供されるver11testsample¥MEMフォルダ内(計算コントロールファイル: testf.tscal, testcoalescence.tscal, 物性データファイル: PVA\_CA\_200°C\_500rpm\_5kgh.pro, CA1.pro, スクリュメッシュファイル: test.twinmsh)に保存されています。

<sup>\*)</sup> 二軸スクリュ押出機内における非相溶高分子ブレンドの  
モルフォロジー形成に対する実験的及び理論的研究

Experimental and Theoretical Studies for Morphology Evolution of  
Immiscible Polymer Blend in a Twin Screw Extruder

谷藤 眞一郎<sup>\*\*</sup>    依藤 大輔<sup>\*\*</sup>    瀧 健太郎<sup>\*\*\*</sup>  
TANIFUJI Shinichiro    YORIFUJI Daisuke    TAKI Kentaro

混相流体学会誌特集号, 混相流, 38(2) 139-146(2024)

図8にCA(実線)とPVA(破線), 及び粘度比: CA/PVA(一点鎖線)のひずみ速度依存性を示します。各材料の粘度はCrossモデルを用いてフィットしています。非相溶高分子ブレンドを解析対象とする場合, 予め想定成形温度でのフローカーブに加えて粘度比について分析することが重要です。各材料のフローカーブのフィッティング情報はMaterial fitを用いて収集し, ファイル出力可能です。この出力ファイルをエクセルに読み込み粘度比情報を推定します。低ひずみ速度域ではCAの粘度はPVAよりも著しく高いため分散は起こらないと予想されます。一方, 高ひずみ速度域では各材料のずり流動性の差を反映して粘度比が低下し, せん断流動により分散可能条件(粘度比<3.8)を満たすせん断ひずみ速度域の存在が予想されています。

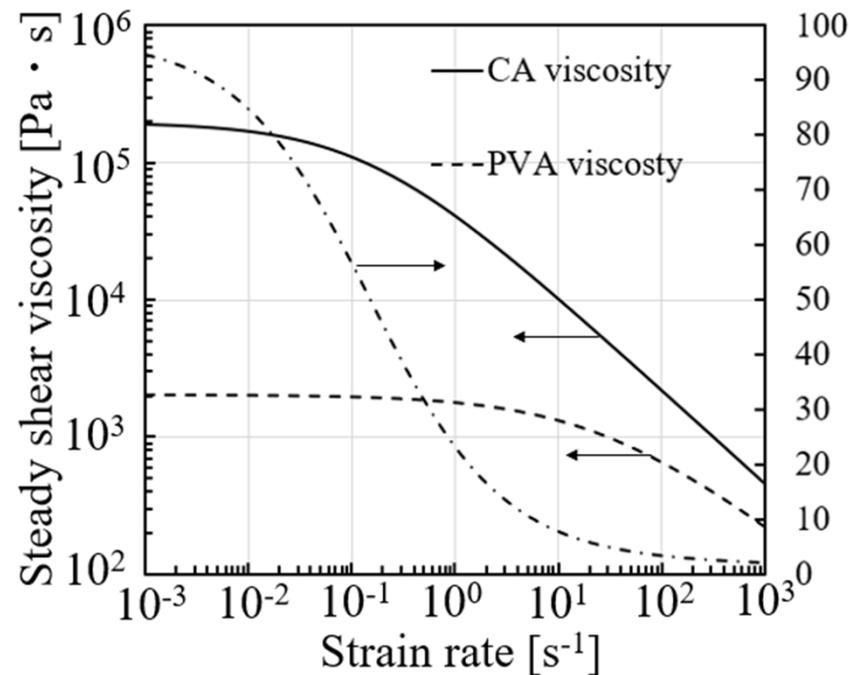


図8 CA/PVAのフローカーブと粘度比ひずみ速度依存性(200°C)

図9に解析で採用した二軸スクリュ解析モデル(test.twinmsh)を示します。実際のスクリュ構成の中で分散が発生する可能性のあるニーディングディスク近傍を解析対象とします。

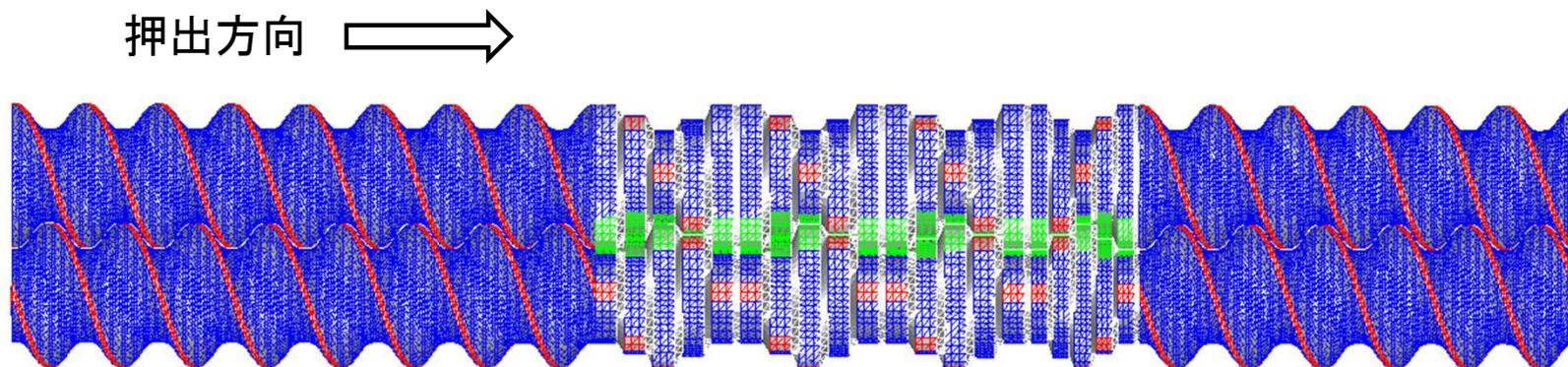


図9 二軸スクリュ解析モデル

図10に解析条件を示します。スクリュ回転数500 rpm, 押出量5kg/h, 先端背圧1 MPaとし, バレル壁面と樹脂間の最大せん断応力(Stress cutoff)は0.3 MPaとしました。一般的な溶融樹脂では, 壁面との臨界すべりせん断応力が0.2~0.3 MPa程度であることが報告されています。最大せん断応力以上では樹脂の滑りが発生し, 同設定値よりも高いせん断応力の発生を抑制しています。

液滴の初期半径は100 μm, 体積分率は40 %, 表面張力係数は50 mN/m としました。また, バレル壁面温度と流入温度は200°Cとしました。

計算コントロールファイル(.tscal)  
testf [入力]

物性データファイル(.pro)  
PVA\_CA\_200℃\_500rpm\_5kgh [入力] [選択] [新規]

スクリュメッシュアップファイル(.twinmsh)  
test [選択]  肉厚変更ファイル設定  Use both information

解析条件設定

熱流動計算パラメータ

非ニュートン反復計算回数: 10  Static  Dynamic

層(肉厚)方向分割数: 10

温度反復計算回数: 0  2.5D FEM  1D FDM  3D FVM

オプション設定項

許容最大せん断速度  許容最大せん断応力

Stress cutoff(KPa): 300 No-flow 温度(℃): 180

No-flow 粘度(Pa · s): 1000 粘性発熱係数: 1

流入口境界条件

流入口圧力(MPa): 0

流入口温度(℃): 200

未充填解析/解析条件

SOR反復計算回数: 1000

未充填領域のコンター非表示

解析結果ファイル名: testf

流出口境界条件

圧力規定  流量規定

未充填解析  Old version algorithm  New version algorithm

流出口圧力(MPa): 1

押出量(kg/h): 5  噛合い部流量補正

成形条件

スクリュ回転数(RPM): 500

液滴分裂解析(Morphological Evolution Model)/Chemical Reaction Model

Morphology Evolution Model calculation

液滴初期半径(μm): 100

表面張力係数(N/m): 0.05

液滴体積分率: 0.4

液滴凝集係数(-): 0 ← 液滴凝集係数

無次元時定数モデルパラメータ a: 91.41

無次元時定数モデルパラメータ b: 0.3397 } 無次元分裂時間パラメータ  $t_b^* = a\lambda^b$  (20)式, (21)式参照

計算開始Z(スクリュ)軸位置(mm): 0

ひずみ計算最低肉厚(mm): 0

液滴物性ファイル(.pro)  
CA1 [入力] [選択]

粘性発熱係数

図10 解析条件 (testf.tscal)

熱流動解析結果より求められるCA/PVAの粘度比の予測結果を図11に示します。Crosscontファイルを読み込み、新規追加された作画項目:14.Viscosity ratio を選択することで当作画情報が得られます。粘度比の最大値を3.5とすることで、粘度比が3.5以上の領域は赤色表示され非分散領域に特定されることが可視化されています。ひずみ速度が高いことを反映して、フライト頂近傍領域では、粘度比が低く、分散が促進される可能性が高いと予想されます。

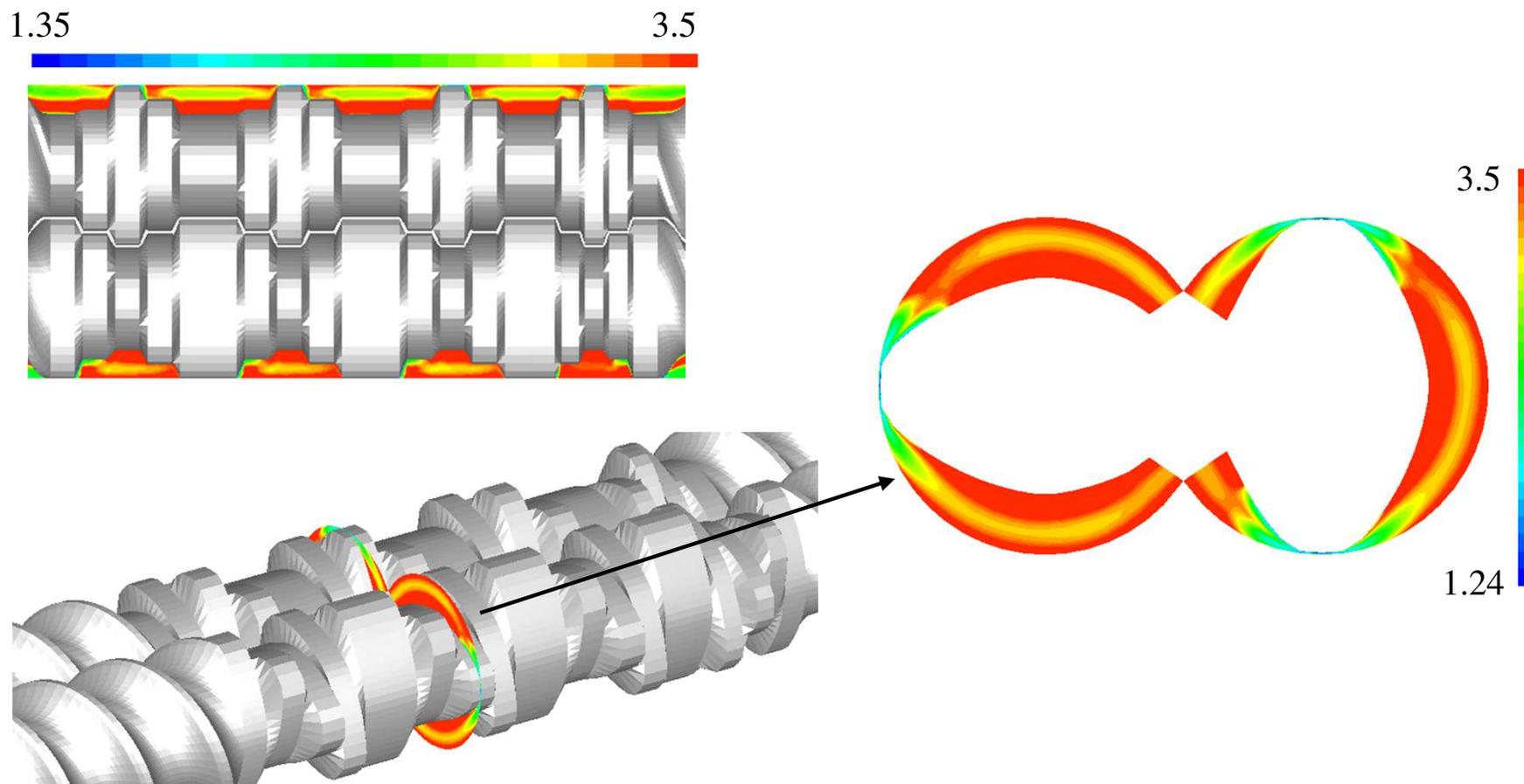


図11 CA/PVA粘度比分布予測結果

一般的には、スクリュ軸垂直断面内で発生する循環流れの影響を反映してスクリュ側よりもバレル側がせん断速度が高くなりますが、非等温効果を考慮すると、この認識と異なる傾向が示される場合があります。本テスト解析条件では、粘性発熱に伴うニーディングディスク周りのスクリュ側の温度上昇が顕著であり、図11に示した軸垂直断面内での温度は図12に示すように256°Cまで上昇します。この温度上昇が断面内の流速分布を変化させ、図13に示すようにフライト近傍を除く流路内では中央部のせん断速度が高くなる傾向が示されます。このせん断速度分布が、図11に示した粘度比分布に反映され、流路内中央部の粘度比が局所的に低く評価されています。せん断ひずみ速度が高い領域は粘度比が低下し、分散混合の可能性が高まりますが、流路中央部は、滞留時間がバレル側やスクリュ側よりも短いため、分散混合の時間発展は抑制されます。温度上昇に伴ってせん断応力が減少し、分散混合効率が低下することは容易に予想されます。本テスト解析の結果は、このような定性的な予想と一致した傾向を示しています。

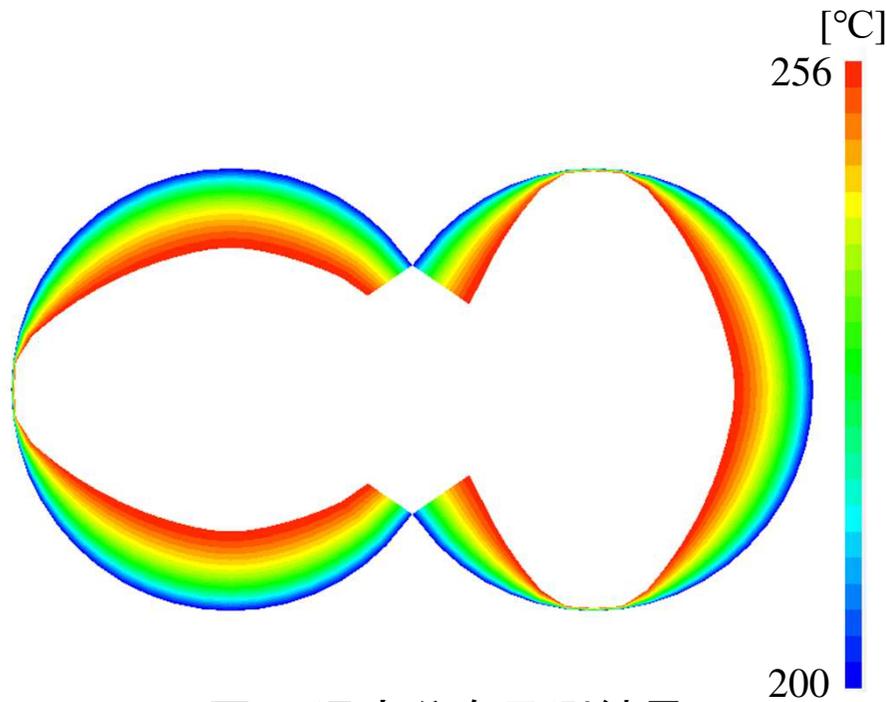


図12 温度分布予測結果

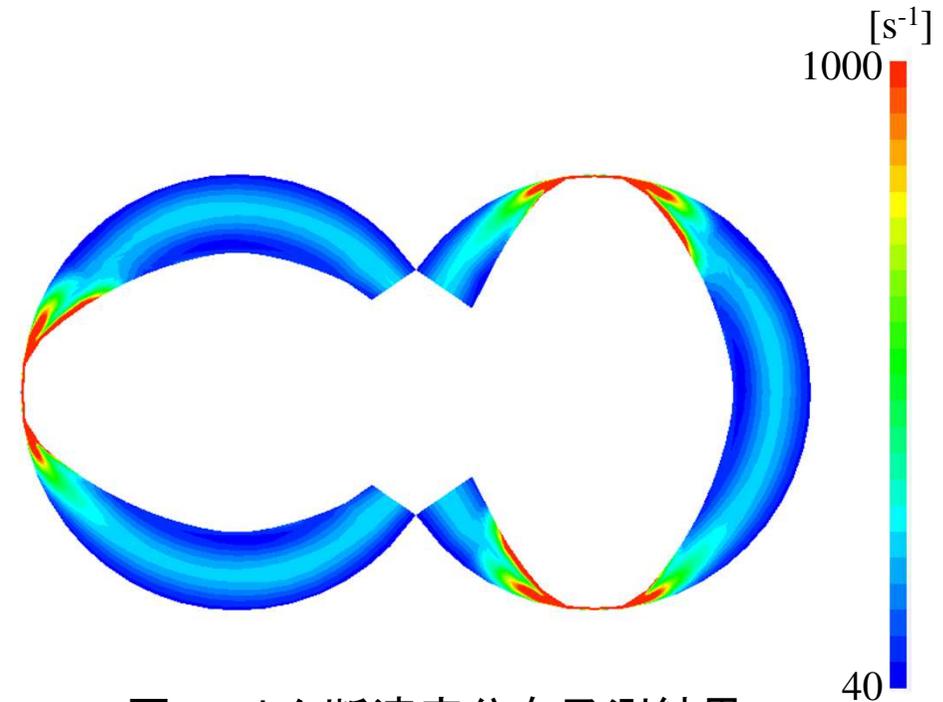


図13 せん断速度分布予測結果

非等温効果の影響を明確化するために、粘性発熱係数(図10参照)を0.1に設定した比較ケースで解析したせん断ひずみ速度と粘度比の予測結果を図14と図15に示します。当ケースでは、同断面内におけるスクリュ側(右側)の温度上昇は212°C程度に抑えられます。非等温効果が顕著な図13とは異なり、図14に示すせん断速度分布はバレル側がスクリュ側よりも高くなる一般的な認識と一致した結果になっています。また粘度比は、このせん断ひずみ速度分布を反映し、スクリュ側よりもバレル側が低下する傾向が示されています。粘度比の低下に伴って分散の可能性が高まり、且つバレル側は滞留時間が長くなるため分散混合が、より促進されることが期待されます。このように、温度上昇は、分散混合効率を抑制する向きに作用することが確認できます。

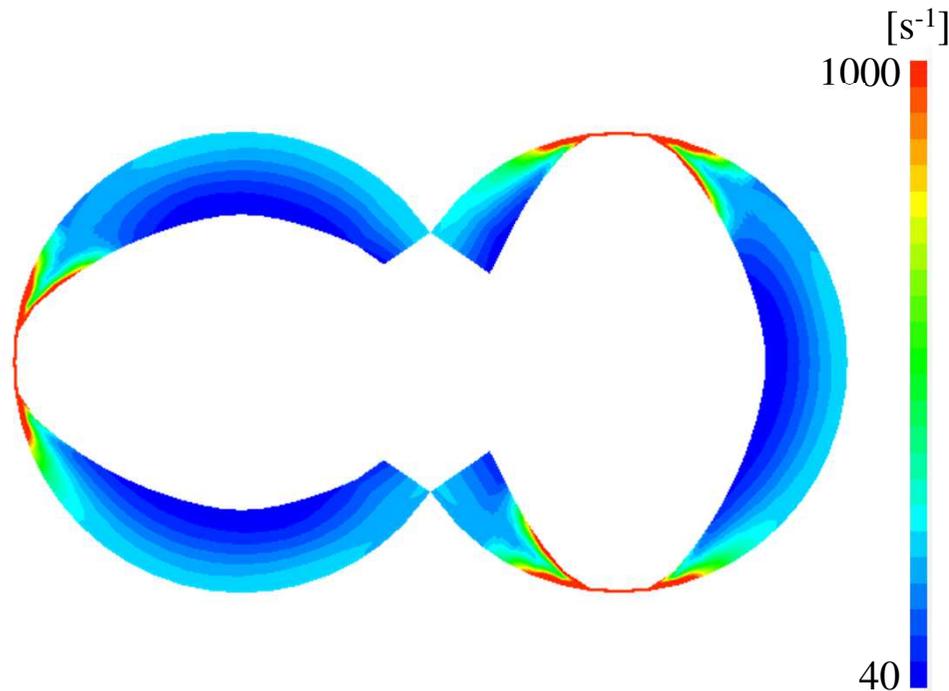


図14 せん断速度分布予測結果  
(粘性発熱係数0.1)

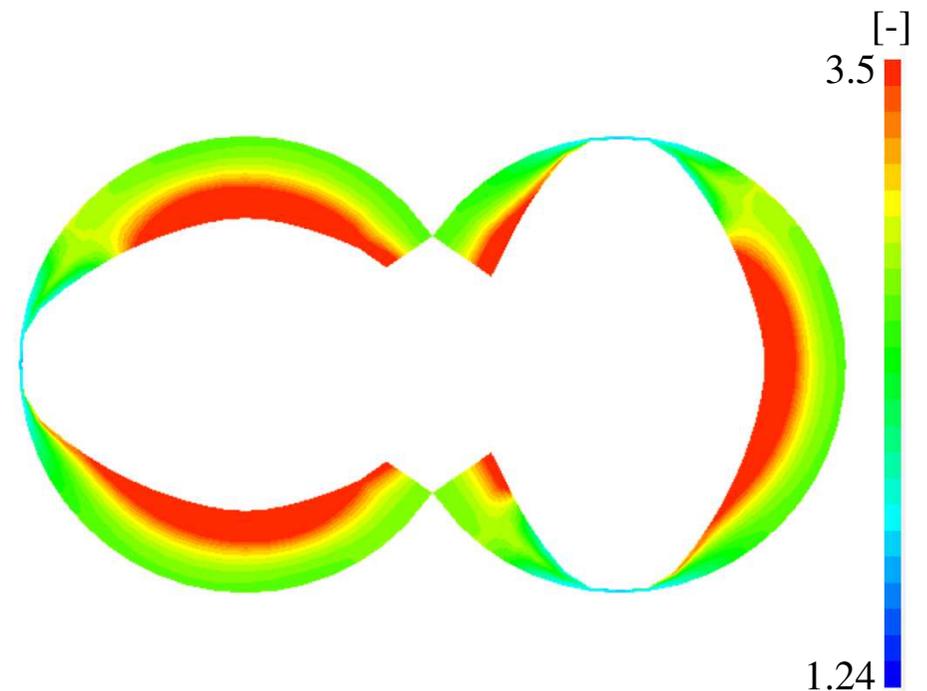


図15 CA/PVA粘度比分布予測結果  
(粘性発熱係数0.1)

温度、滞留時間、及びひずみ等の情報は、3D FVM を利用して解析します。スクリュ回転により、計算情報は周方向に平均化されると考えられ、また、情報処理の負荷を低減することを目的として、これらの3D解析結果を周方向に平均化した情報をテキストファイルに出力します。これらの情報は肉厚方向には平均化されず、層毎に出力されます。一例として新規追加された周方向平均化滞留時間(avrtdファイル)を利用して作成した滞留時間のスクリュ長依存性のグラフプロットを図16に示します。グラフ内の黒色カーブは、従来のSUMINF情報です。当情報は、軸垂直断面で平均化された充填率を用いて表される有効体積を流量で除した時間刻みの積算値として評価されています。他の情報は3D FVM 解析結果の周方向平均値です。青色カーブで示される5層目(中間層)は、他の層と比較して軸方向の流速が速いため、滞留時間は最も短くなります。壁面に隣接するスクリュ側やバレル側は、軸方向流速が遅くなるため、滞留時間は長くなります。スクリュ側の滞留時間がバレル側よりも長くなる傾向は、軸垂直断面内に発生する循環流れの影響を表しています。この循環流れの流速は、バレル側よりもスクリュ側が遅くなります。従って、循環流れに沿って局所的な螺旋軌道を描きながら下流側に搬送される流体粒子は、時間的にスクリュ側に滞在する確率が高くなります。言い換えれば、スクリュ側の方が、軸方向の見かけの移動速度が低下するため、結果としてスクリュ側の滞留時間がバレル側よりも長くなります。

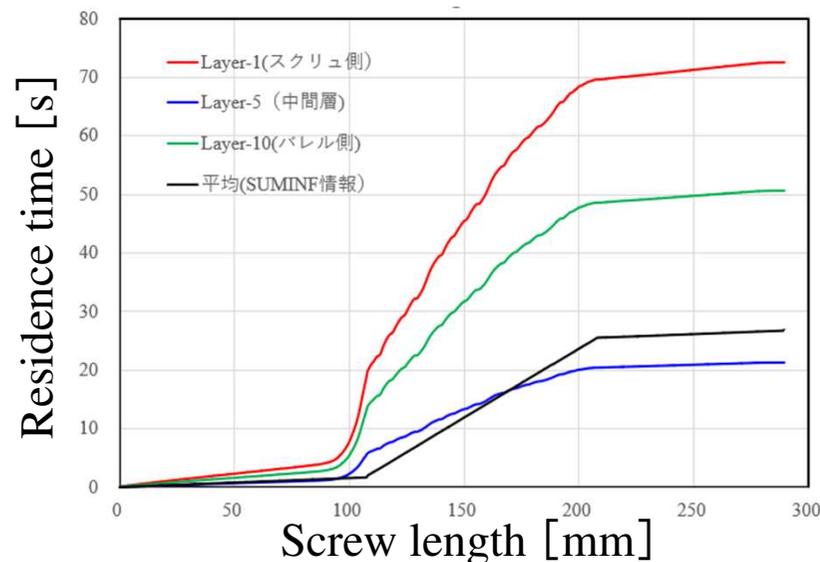


図16 滞留時間のスクリュ長依存性

分配混合性能の評価に関連するザウター平均半径：SMR(Sauter Mean Radius)や分散混合性能の評価に関連する液滴の分散半径は、このように周方向に平均化された情報を利用した2D（軸径断面）解析を通じて評価されます。また、各計算結果は、新規追加ファイルのavsmrファイル(SMR計算結果)とdispradファイル(液滴分散計算結果)に出力されます。図17にバレル壁面隣接層で予測されたザウター平均半径と液滴分散半径の計算例を示します。当解析結果では液滴凝集係数(図10参照)を0とし、液滴の凝集効果を見捨てています。赤色カーブで示すSMRは、(5),(7),(8)式で示したようにひずみの履歴情報のみで評価されます。一方、液滴分散半径は、(32),(33)式で表されるMEMの解析結果です。スクリュ長100 mm 位置の下流側に配置されるニーディングディスクの影響により、各計算半径に差がみられます。ニーディングディスクの開始点近傍では、局所的に分散半径が急激に減少しますが、その下流側では、フラットの領域が見られ、更にニーディングディスク下流側の逆ねじ部で再び液滴分散径が減少し、安定領域に漸近する傾向が示されています。バレル側の粒子は、Graceカーブ上の区分として、分配混合領域→分散混合領域→安定領域の順序で状態が遷移したと考えられます。

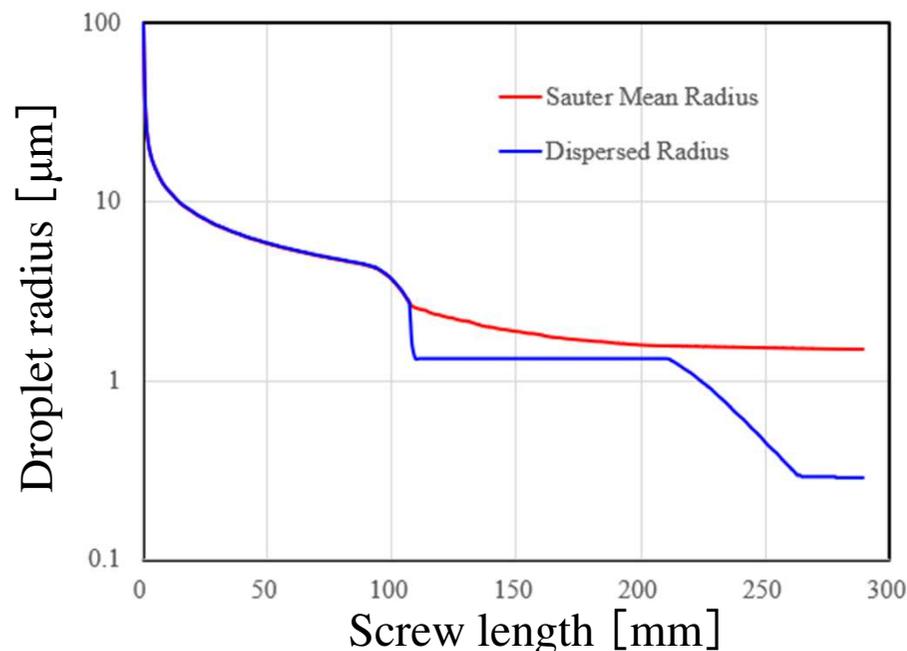


図17 ザウター平均半径と液滴半径のスクリュ長依存性(凝集無視)

(33)式に示した分散混合領域の区分条件は、次のように書き直すことが可能です。

$$\begin{aligned} R_{DER} &\leq R_d(t) \leq R_{DSR}, \\ R_{DSR} &= 4 \frac{Ca_{crit} \sigma}{\eta_m \dot{\gamma}}, \\ R_{DER} &= \frac{1}{4} R_{DSR} \end{aligned} \quad (34)$$

分配混合によって液滴半径は減少し、分散開始半径 $R_{DSR}$ 以下になります。以降、分散終了半径 $R_{DER}$ に至るまで液滴半径は分散混合によって減少します。分散開始半径 $R_{DSR}$ と分散終了半径 $R_{DER}$ は共に局所的に評価可能な臨界キャピラリー数、マトリクス粘度、マトリクスひずみ速度、及び表面張力係数を利用して評価可能です。これらの情報を可視化情報に追加しました。当可視化情報を利用し、スクリュの特定の場所において液滴の分散が開始される半径と分散可能な最小半径を見積もることが可能です。また、各情報の周方向平均値はそれぞれavdsr (分散開始半径)とavder (分散終了半径)の拡張子を持つテキストファイルに出力されます。改良MEMの解析では、これら周方向平均値の2D情報が利用されます。

図18に分散開始半径(赤色カーブ)と分散終了半径(青色カーブ)のスクリュ長依存性の予測結果を示します。また、図17に示したバレル壁面隣接層で予測された液滴半径(黒色カーブ)を重ね書きしています。液滴半径が分散開始半径(赤色カーブ)よりも大きいスクリュ長110 mmの上流側では分配混合により半径が減少します。

分散開始半径(赤色カーブ)と分散終了半径(青色カーブ)に挟まれたスクリュ長110~120 mm 区間と210~260 mm 区間では分散混合によって半径が減少しています。ニーディングディスクが配置されたスクリュ長 120~210 mm区間では、120 mm 位置で評価された分散半径が当該領域で評価される分散終了半径よりも小さいため、分散は促進されず、半径一定の安定領域になっています。下流側210 mm の位置には逆ねじが配置されており、210 mm 位置で評価された液滴半径が、再び分散開始半径(赤色カーブ)と分散終了半径(青色カーブ)に挟まれる条件を満足するため、分散が促進され、下流側で分散終了半径まで液滴半径が減少します。

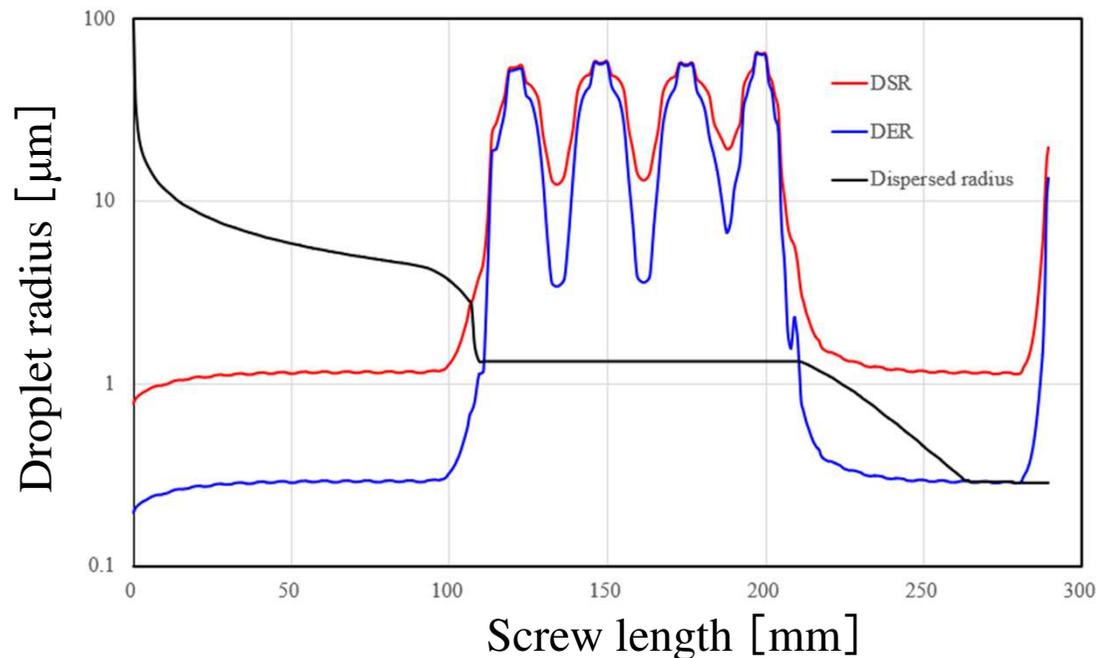


図18 分散開始/終了半径と液滴半径のスクリュ長依存性(凝集無視)

図19に層1(スクリュ壁面隣接層, 緑色カーブ), 層5(中間層, 赤色カーブ), 及び層10(バレル壁面隣接層, 青色カーブ)で予測された液滴半径のスクリュ長依存性を示します. 図11に示したように中間層の粘度比が低く, 分散の可能性が高くなります. 実際, 層5(中間層, 赤色カーブ)の予測結果には, ニーディングディスクが配置されたスクリュ長100~200 mm の区間で分散による液滴径の減少が観られますが, 他の層と比較して下流側の液滴径は最も大きくなります. 滞留時間の差が, このような予測結果の要因と考えられます. すなわち, 当ケースでは, 中間層が局所的に分散性能が高い領域として評価されていますが, 液滴が該当領域を通過する時間が短かったため, 分散が時間的に促進されなかったと考えられます. 層1(スクリュ壁面隣接層, 緑色カーブ)や層10(バレル壁面隣接層, 青色カーブ)の予測結果には, 広範にわたって液滴径が変化しない安定領域が予想されています. これらの領域では粘度比が高く分散性能が低いことがその理由です. バレル側はスクリュ側と比較して滞留時間が長いため, 混合が促進され, 液滴径が小さく評価されたと考えられます. このように局所的に評価される分散性能の高低関係は, 直接的に分散径の大小関係とは結び付かないことに注意する必要があります. 局所的に評価される分散性能の高低関係に加えて, 液滴の滞留時間の長短関係を併せて考慮することが重要です.

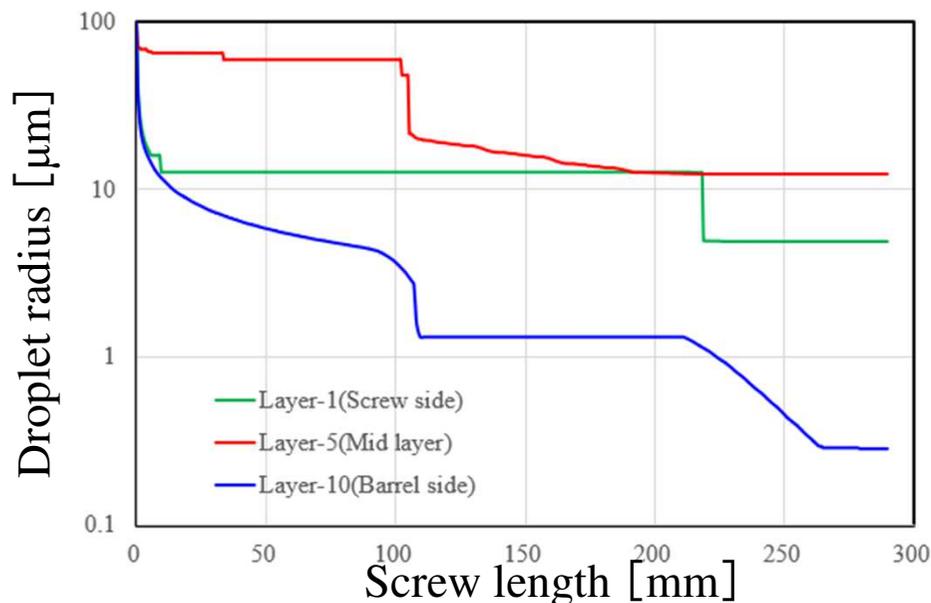


図19 代表層内の液滴半径のスクリュ長依存性(凝集無視)

予想に反して、当ケースでは、ニーディングディスク領域においてバレル壁面隣接層で分散が促進されない結果になりました。図11に示したように粘性発熱による温度上昇が、バレル壁面隣接層の粘度比を上昇させたことが、分散混合性能を低下させた要因と考えられます。この考察の妥当性を検証するため、粘性発熱係数を0.1に設定し、温度上昇を抑制した条件で得られた分散開始/終了半径とバレル壁面隣接層の液滴半径のスクリュ長依存性(黒色実線カーブ)の予測結果を図20に示します。図18に示した粘性発熱が顕著なケースの液滴半径(黒色破線カーブ)と比較して、分配混合が支配的な上流側では、液滴半径は若干大きく計算されますが、ニーディングディスク領域では、予想通り、分散性能が向上し、液滴半径が0.284 $\mu\text{m}$ から0.201 $\mu\text{m}$ に減少しています。

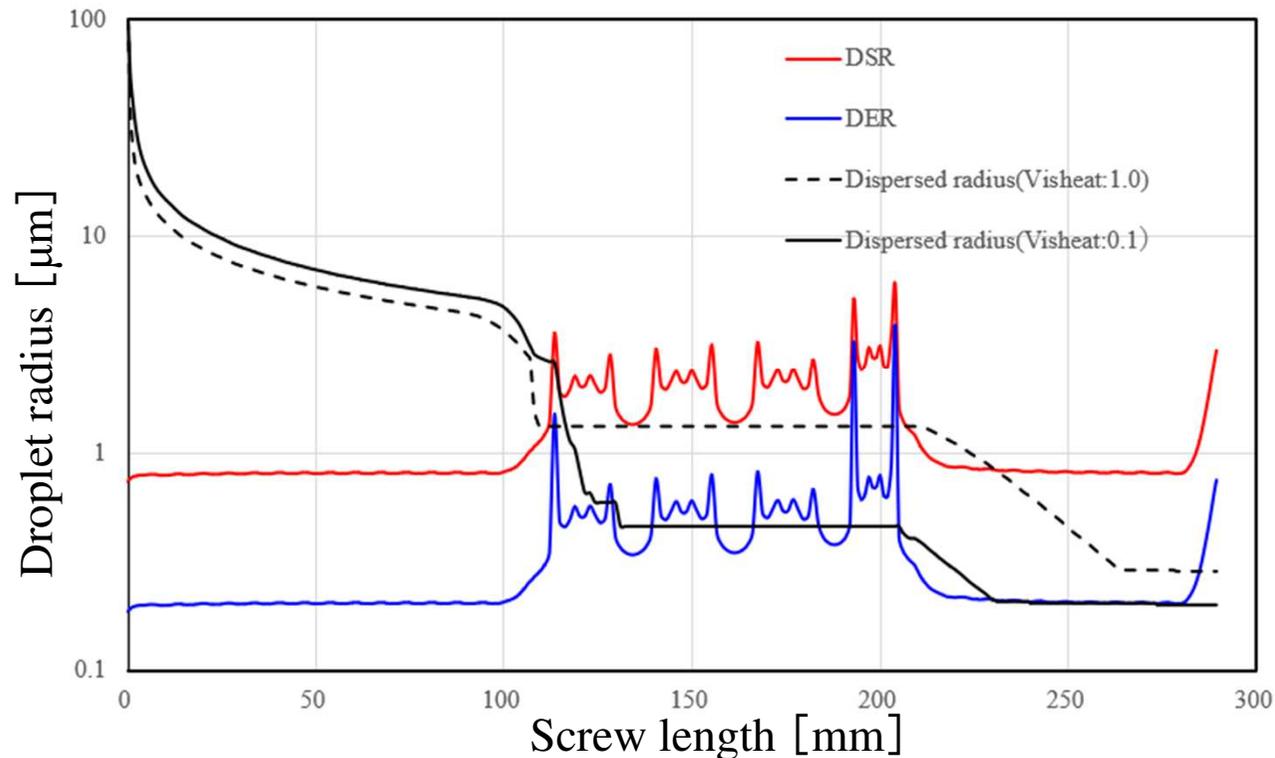


図20 分散開始/終了半径と液滴半径のスクリュ長依存性(粘性発熱係数:0.1, 凝集無視)

図21に層1(スクリュ壁面隣接層, 緑色カーブ), 層5(中間層, 赤色カーブ), 及び層10(バレル壁面隣接層, 青色カーブ)で予測された液滴半径のスクリュ長依存性を示します. 図19と比較すると, 温度上昇の抑制に伴ってニーディングディスク部における分散領域が拡大していることが分かります. 但し, 当ケースでも分散はニーディングディスクの上流側で発現し, 下流側は安定領域と予測されています. 興味深いのは, 層1(スクリュ壁面隣接層, 緑色カーブ)と層5(中間層, 赤色カーブ)で予測される液滴径の大小関係が, 図19に示した結果と反転していることです. 中間層は, スクリュ壁面隣接層よりも滞留時間が短いですが, 温度上昇の抑制によって, ニーディングディスク部の上流側の分散性能が向上し, 該当領域で急減に分散が進行し, 液滴が減少したことが, このような結果の要因と考えられます.

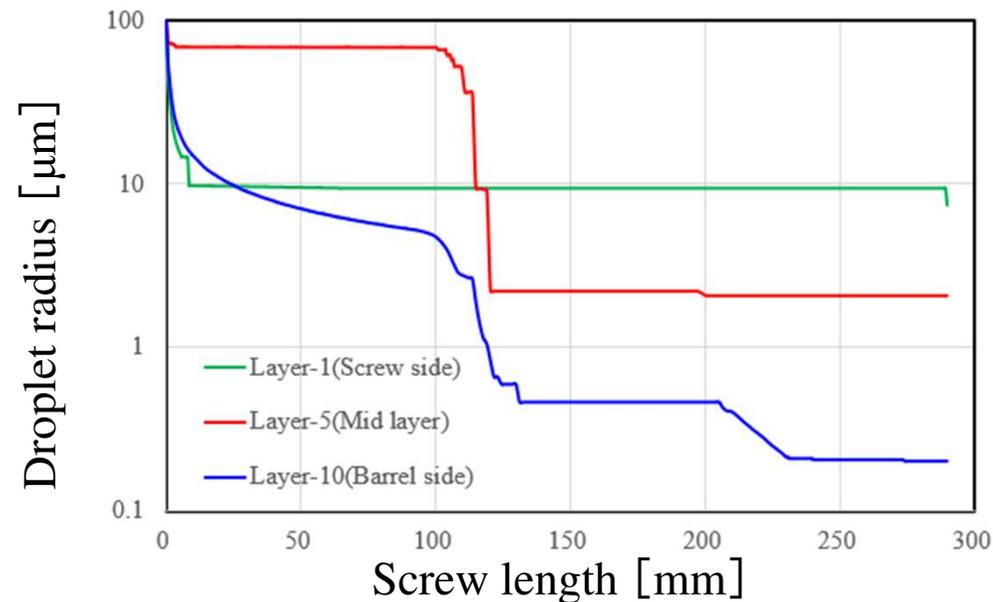


図21 代表層内の液滴半径のスクリュ長依存性(粘性発熱係数0.1, 凝集無視)

図22に凝縮を考慮した場合の液滴半径のスクリュ長依存性の予測結果(黒色実線カーブ)を示します。凝集は、液滴凝集係数(図10参照)を非ゼロとすることで考慮可能です。当ケースでは、液滴凝集係数を5に設定しました。凝集効果は、分散混合領域における液滴半径の増加に寄与します。グラフ内に示す液滴凝集係数を0とし、凝集を無視した予測結果(黒色破線カーブ)と比較すると凝集を考慮した予測結果(黒色実線カーブ)は大きく評価されています。凝集効果により下流側の液滴半径は、0.284  $\mu\text{m}$ から0.685  $\mu\text{m}$ に増加しています。

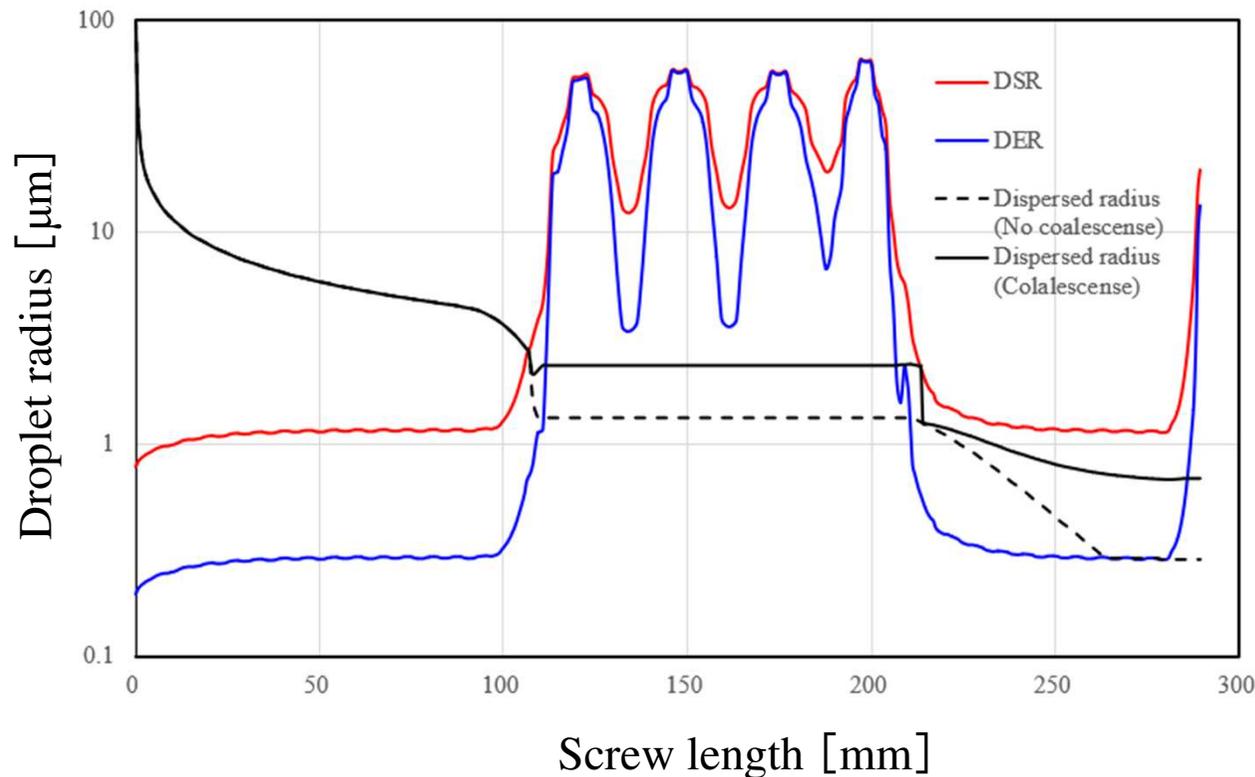


図22 分散開始/終了半径と液滴半径のスクリュ長依存性(凝集考慮)

図23に凝集を考慮した条件において層1(スクリュ壁面隣接層, 緑色カーブ), 層5(中間層, 赤色カーブ), 及び層10(バレル壁面隣接層, 青色カーブ)で予測された液滴半径のスクリュ長依存性を示します. 凝集を無視した図19に示した予測結果と比較すると, 分散領域が広い層5(中間層, 赤色カーブ)の予測結果に凝集効果が強く現れています. 図19の予測結果では, ニーディングディスクを配置したスクリュ長200~300 mmの区間で液滴半径が分散により単調に減少するのに対し, 当ケースでは, 分散による液滴半径の減少と凝集による液滴半径の増加が相殺し, 液滴径がほぼ一定となる傾向が示されています.

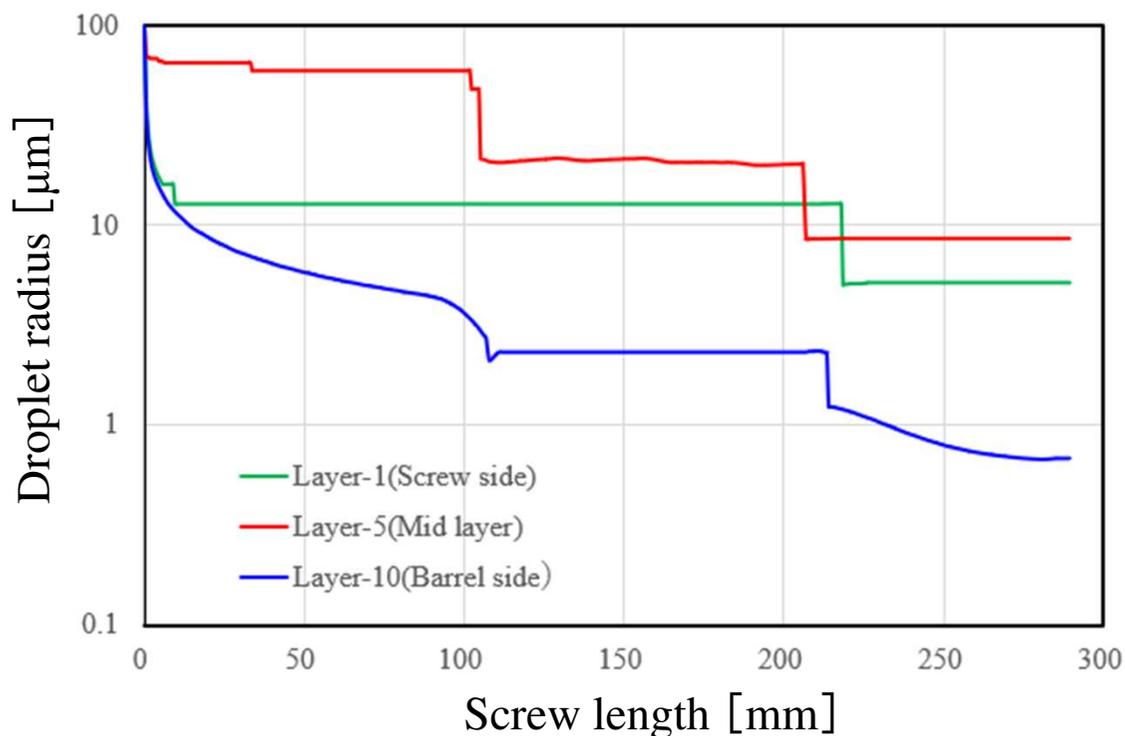


図23 代表層内の液滴半径のスクリュ長依存性(凝集考慮)

前述した通り、粘性発熱による温度上昇に伴って、バレル壁面隣接層の分散性能は低下し、ニーディングディスクの広範囲で安定領域となりました。粘性発熱係数を0.1として温度上昇を抑制し、凝集効果を考慮した条件で予測されたバレル壁面隣接層内における液滴半径のスクリュ長依存性の予測結果(黒色実線カーブ)を図24に示します。図22に示した温度上昇が顕著な場合の予測結果では、ニーディングディスク部流入後、急激に液滴半径が減少し、その後、一定となるのに対し、温度上昇を抑制した予測結果(黒色実線カーブ)では、分散効果と凝集効果がせめぎ合い、液滴半径の振動傾向が観られます。ニーディングディスク下流側での液滴半径は、分散開始半径と終了半径に挟まれた条件になるため、分散領域と判定されていますが、分散効果と凝集効果が相殺し、液滴半径は、ほぼ一定となります。凝集効果により、液滴半径は、 $0.201\ \mu\text{m}$  から $0.473\ \mu\text{m}$ に増加しています。

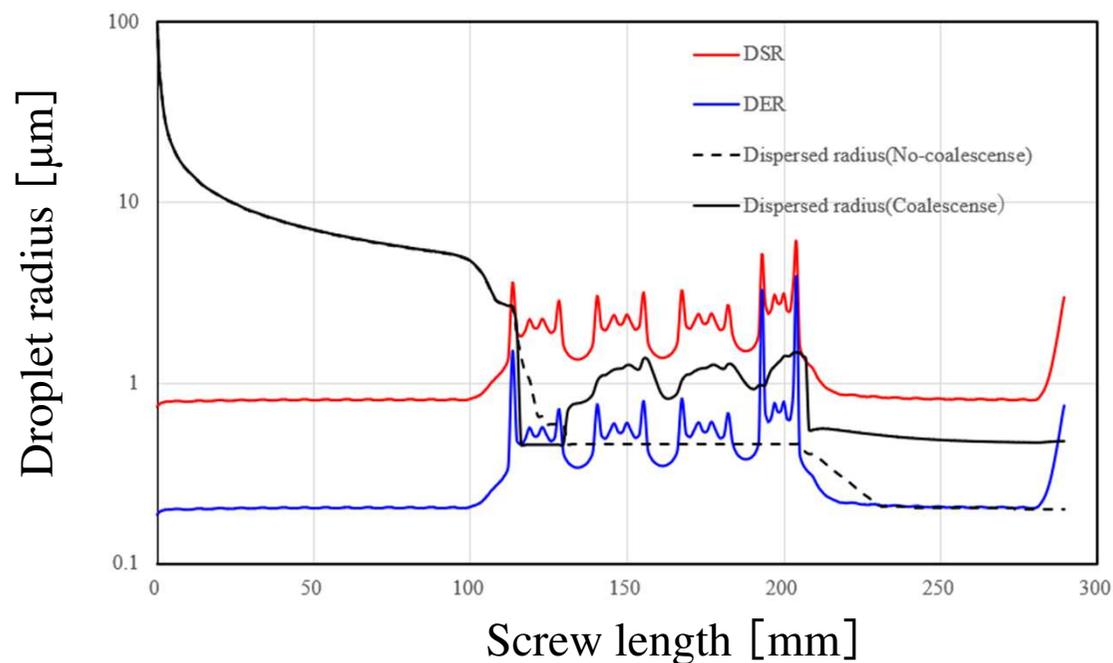


図24 分散開始/終了半径と液滴半径のスクリュ長依存性(粘性発熱係数0.1,凝集考慮)

図25に凝集を考慮した条件において層1(スクリュ壁面隣接層, 緑色カーブ), 層5(中間層, 赤色カーブ), 及び層10(バレル壁面隣接層, 青色カーブ)で予測された液滴半径のスクリュ長依存性を示します. 凝集を無視した図19に示す予測結果と比較すると, スクリュ壁面隣接層内の液滴半径は, ほとんど変化していません. スクリュ壁面隣接層は粘度比が高く, 分散性能が低いため, ほとんどの領域が安定領域として評価されるため, 分散や凝集の影響が少ないと考えられます. 一方, 中間層とバレル壁面隣接層内の液滴半径は, 凝集効果を反映し, 大きく評価されています.

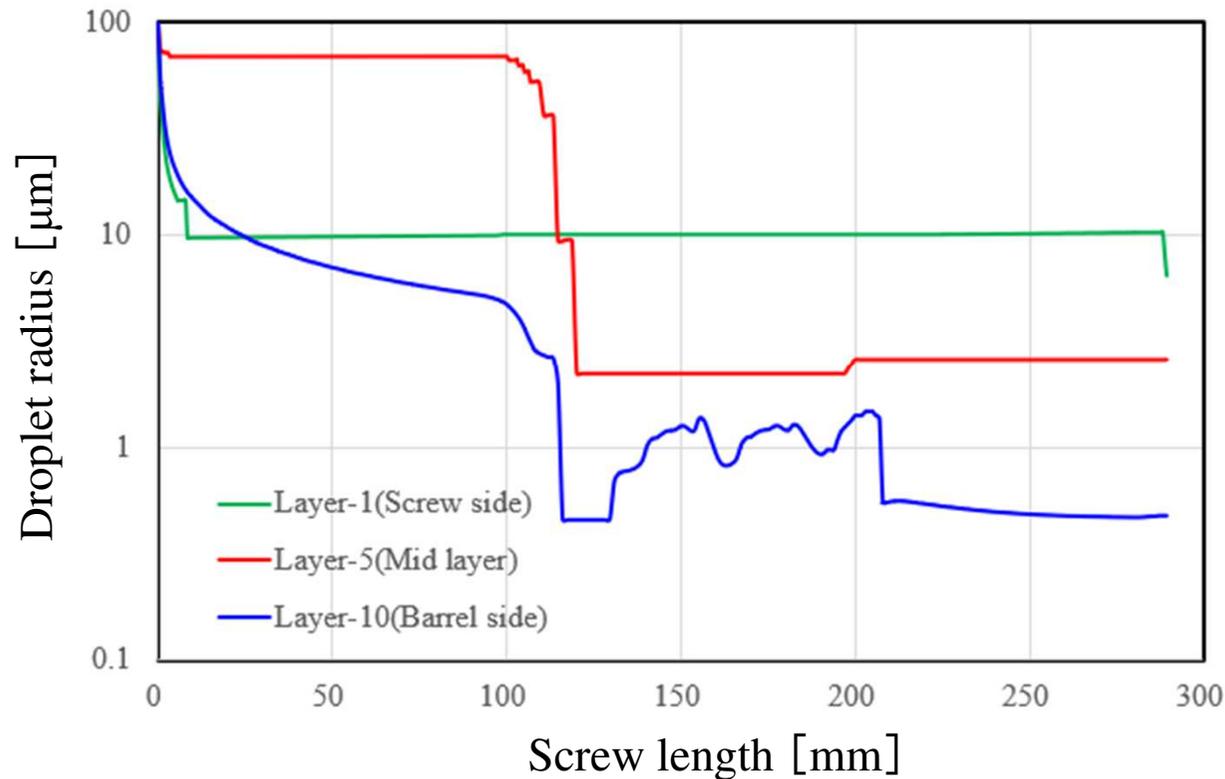


図25 代表層内の液滴半径のスクリュ長依存性(粘性発熱係数0.1,凝集考慮)

図26に分配, 分散, 凝集などの効果を考慮した条件において, スクリュ流出口近傍の軸垂直断面内で予測された液滴半径分布を示します. 当情報は, crosscontファイルに新規追加された作画項目(16:Dispersed radius)を選択して描画可能です. コンター図の最小/最大値は0/10に規格化しています. バレル側の方がスクリュ側よりも分配/分散が促進され, 液滴半径が小さくなる傾向が示されています. また, 凝集効果を考慮することで液滴半径が大きくなります.

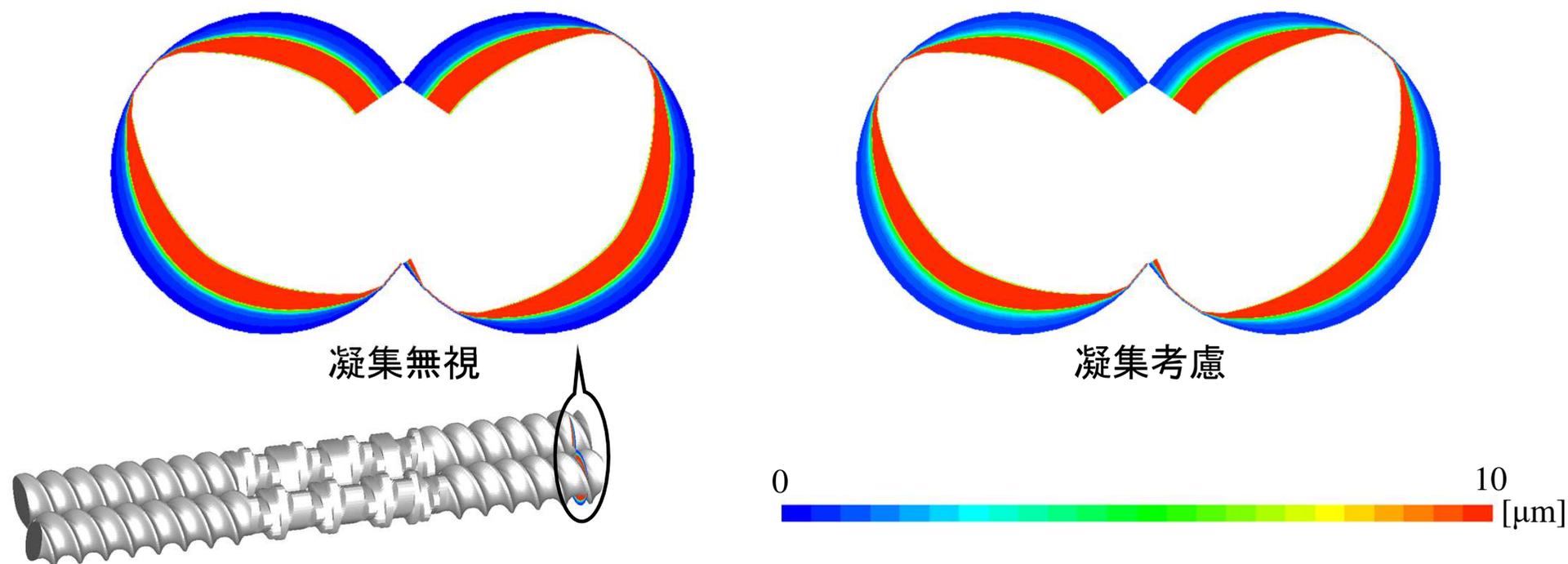


図26 分配/分散/凝集を考慮した液滴半径分布の予測結果  
(解析用コントロールファイル名: testcoalescence.tscal)

局所的に評価される情報に加えて、履歴情報として評価される液滴半径の予測結果を利用し、スクリュ内の任意位置がGraceカーブ上のどの領域に含まれているか判定できます。文献1)に従って、Reduced capillary number :  $Ca^*$  をキャピラリー数 :  $Ca$  を臨界キャピラリー数 :  $Ca_{crit}$  で除した次式で定義します。

$$Ca^* \equiv \frac{Ca}{Ca_{crit}} \quad (35)$$

この無次元パラメータを利用し、Graceカーブ上の粘度比 $\lambda < 3.5$ の条件を満足する領域は以下に示すように区分されます。

$$\begin{aligned} Ca^* > 4 & \Rightarrow \text{分配混合領域} \\ \text{粘度比 } \lambda < 3.5 \text{ の領域} \quad 1 \leq Ca^* \leq 4 & \Rightarrow \text{分散混合領域} \\ Ca^* < 1 & \Rightarrow \text{安定領域} \end{aligned} \quad (36)$$

文献1)では、粘度比が高い領域の液滴の挙動については、分散混合不可とのみ表現されていますが、分配混合によるフィラメント化は促進されると考えられます。粘度比 $\lambda > 3.5$ 以上の非分散領域は、粘度比 $\lambda = 3.5$ で評価される臨界キャピラリー数を利用し、以下の条件に従って分配混合領域と安定領域に区分されるとします。

$$\begin{aligned} \text{粘度比 } \lambda \geq 3.5 \text{ の領域} \quad Ca^* = \frac{Ca}{Ca_{crit}(3.5)} \geq 1 & \Rightarrow \text{分配混合領域} \\ Ca^* = \frac{Ca}{Ca_{crit}(3.5)} < 1 & \Rightarrow \text{安定領域} \end{aligned} \quad (37)$$

このような領域区分は図27内に示すようにGraceカーブ上で色分け表示可能です。

図27に示すように、Graceカーブ上の色分け区分領域は、crosscontファイルに新規追加された作画項目 (17:Reduced capillary number) を選択し、最小/最大を1.0/4.0に規格化することで可視化されます。当情報を利用することで、スクリュウ内の任意位置がどのような混練状態にあるか判定可能です。

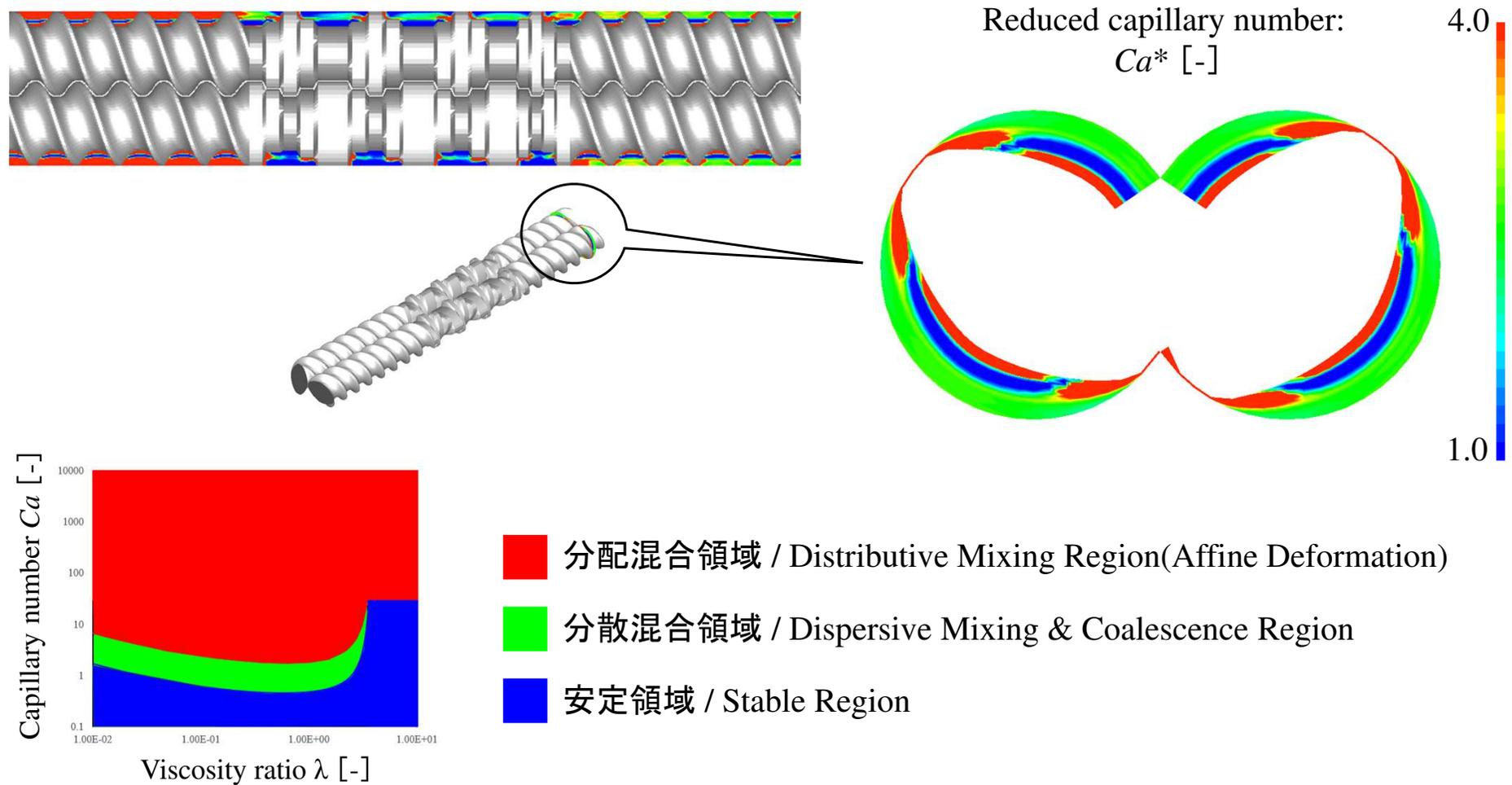


図27 Graceカーブの領域区分と Reduced capillary number の予測結果

## まとめ

本技術開発の成果について以下に要約します。

- ・定性的に温度上昇に伴って液滴に作用するマトリクスのせん断応力が減少し、分散性能が低下すると予想されます。本テストでは、このような定性的予想と一致する解析結果が得られました。温度変化は、スクリュ内の粘度、流速、ひずみ速度分布の変化に影響を与えます。解析を通じて定性的にはスクリュ内で容易に予想できないこれらの状態変化が、どのように混練性能の差に反映されるか詳細に検討可能です。
- ・液材がスクリュ内を搬送される過程において、どのように分配混合領域、分散混合領域、及び安定領域を遷移しながら混練が促進されるか予測可能です。
- ・混練性能の基本的な検討で重視されているGraceカーブ上の領域区分をスクリュモデルの任意断面に写像し、断面内の混練状態が分配領域、分散領域、及び安定領域の何れの区分に属するか把握可能です。

## 1.3 運用方法

連続相と分散相の非相溶高分子ブレンドの混練状態の分析に本改良MEM(Morphology Evolution Model)を適用する際、最初に重要なことは、Material fit を利用し、想定される温度とせん断ひずみ域における粘度比の振舞について検討することです。もし、粘度比が3.5よりも大きくなる場合には、分散混合は期待できず、分配混合のみが解析対象になります。このような場合には従来から定量化可能であったひずみの履歴情報を利用し、ザウター平均半径:(9)式を利用して分配混合性能を定量化する分析法が有効です。粘度比が3.5未満に予想される場合には、本改良解析機能を利用し、分散混合効率が定量化可能です。

本解析機能を利用するには、溶融可塑化/液滴分散タブメニュー内の液滴分裂解析パネルのMorphology Evolution Model Calculation チェックボックスをチェック状態とします。

液滴分裂解析(Morphological Evolution Model)/Chemical Reaction Model

Morphology Evolution Model calculation

液滴初期半径(μm)	100
表面張力係数(N/m)	0.05
液滴体積分率	0.4
液滴凝集係数(-)	0
無次元時定数モデルパラメータ a	91.41
無次元時定数モデルパラメータ b	0.3397
計算開始Z(スクリュ)軸位置(mm)	0
ひずみ計算最低肉厚(mm)	0

液滴物性ファイル(.pro)

CA1      入力      選択

図28 MEM計算パラメータの設定メニュー

MEM計算パラメータの設定メニューにおいて旧MEM (ver.10まで) で採用していた計算開始Z(スクリュ)軸位置(mm)とひずみ計算最低肉厚(mm)はダミーデータになっています。その理由については後述します。また、従来、平衡半径(μm)としていた入力欄を液滴凝集係数(-)に変更し、(32)式に示した凝集の表現項に含まれる係数C<sub>n</sub>/3の値を直接設定するように変更しました。他の入力情報は旧MEMの運用と同様です。

液滴分裂解析(Morphological Evolution Model)/Chemical Reaction Model

Morphology Evolution Model calculation

液滴初期半径(μm)	100
表面張力係数(N/m)	0.05
液滴体積分率	0.4
液滴凝集係数(-)	0
無次元時定数モデルパラメータ a	91.41
無次元時定数モデルパラメータ b	0.3397
計算開始Z(スクリュ)軸位置(mm)	0
ひずみ計算最低肉厚(mm)	0

液滴物性ファイル(.pro)

CA1      入力      選択

$$\frac{dR_d(t)}{dt} = -\frac{\dot{\gamma}}{3Ca_{crit}t_b^*} R_d(t) + \frac{C_n}{3} \frac{\phi^{8/3} \dot{\gamma}}{R_d(t)}$$

液滴凝集係数(-)にはC<sub>n</sub>/3に相当する値を設定

ダミーパラメータ

図29 MEM計算パラメータの変更点

MEM計算パラメータの設定で特に重要な項目は、Droplet initial radius ( $\mu\text{m}$ ): 初期液滴半径です。前述のテスト解析では、 $100\ \mu\text{m}$ の初期液滴半径を採用しましたが、当然、その設定値に応じて混練性能の解析結果は変化します。分配混合のみを解析対象とする場合、(9)式に示されるように解析結果は、初期半径に比例して変化します。しかし、分散性能を含めて解析する場合は、混合領域とその領域に侵入する液滴半径の兼ね合いによって分散性能が評価されることになり、話が大変複雑です。例えば、前述のテスト解析で液滴初期半径 $100\ \mu\text{m}$ を $1000\ \mu\text{m}$ に設定すると、分配性能に関わるザウター平均半径は、(9)式に従って単純に10倍されます。一方、分散混合性能は、(34)式で導入した分散開始半径と分散終了半径、及び液滴半径の大小関係で決定されます。仮に着目する混合領域を液滴半径が分散開始半径よりも大きい状態のまま通過すると、当混合領域では、分配混合のみが促進され、分散混合は発現しないという結果になります。このように分散混合性能の解析結果は、初期液滴半径の設定に応じて複雑に変化します。この事情を実用の二軸スクリュ押出機に当て嵌めると、分散性能の向上を期待して装備したミキシングエレメントは、間違いなく分配混合の促進には寄与しますが、分散混合に寄与するかどうかは、当ミキシングエレメントに侵入する液滴半径に依存して変化するという事です。言い換えれば、ミキシングエレメントを期待通り、分散混合の向上に寄与させるには、当ミキシングエレメントを適材適所に配置するスクリュ構成に対する戦略が重要になるということです。

旧MEMの解析では、肉厚方向の平均化情報を利用した2.5D解析を採用しています。前提条件として分散混合領域、分配混合領域、安定混合領域の順序で状態が遷移するとしています。一方、改良MEMの解析では、大きな勾配を持つ肉厚方向の情報には平均化操作を施さず、スクリュ回転に伴って周方向の情報が平均化されるというアイデアを採用しています。また、旧MEMで採用した状態の遷移についての前提条件は採用せず、液滴半径に応じて、各領域を自由に遷移可能としています。更に、混練性能の評価で重要になる滞留時間やひずみなどの情報は、従来の2.5D FEM解析に代え、3D FVMを利用し、精度向上を計っています。

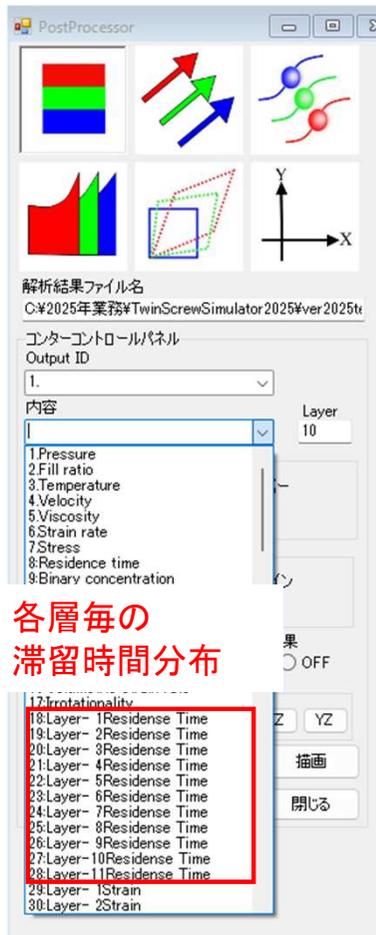
改良MEMは旧MEMと比較して精度向上が期待されますが、計算負荷と出力情報が大幅に増加するため、その合理的な運用に工夫を要します。実用的にスクリュ上流側は、分配混合領域に属し、分散が発現する領域では、分散開始半径未満に液滴半径が減少している状態です。従って、解析モデルを図30に示すように用途に分けて準備するのが合理的です。全域解析モデルは、実験で採用されたスクリュ構成です。テスト解析では、分散が促進される可能性の高いニーディングディスク近傍を抽出してモデル化した分散混合性能解析モデルを採用しています。全域解析モデルは、従来の計算負荷で解析可能であり、ひずみの履歴情報が定量化されます。液材の投入位置での液滴初期半径を決定すれば、分散混合性能解析モデルの入口位置での液滴半径を(30)式とひずみの履歴情報を利用して予測できます。また、全域解析モデルで予測された温度状態を分散混合性能解析モデルの流入口境界条件に反映させます。全域解析モデルで従来の計算開始Z(スクリュ)軸位置(mm)パラメータを採用すると余分な出力情報とメモリーが増加するため、当パラメータを廃止し、代わりに図30に示すようなモデル化を推奨しています。また、周方向の平均化操作により、ひずみ計算最低肉厚(mm)パラメータが解析結果に与える影響が少なくなったため、当パラメータも廃止しています。

### 全域解析モデル



図30 全域解析モデルと分散混合性能解析モデル

解析結果のポスト処理は、従来と同様の操作で可能です。以下に新規追加されたポスト処理項目の内容について解説します。



各層毎の  
滞留時間分布

各層毎の  
ひずみ分布

29:Layer- 1Strain  
30:Layer- 2Strain  
31:Layer- 3Strain  
32:Layer- 4Strain  
33:Layer- 5Strain  
34:Layer- 6Strain  
35:Layer- 7Strain  
36:Layer- 8Strain  
37:Layer- 9Strain  
38:Layer-10Strain  
39:Layer-11Strain

各層毎の  
分裂所要時間分布

51:Layer- 1Break up time  
52:Layer- 2Break up time  
53:Layer- 3Break up time  
54:Layer- 4Break up time  
55:Layer- 5Break up time  
56:Layer- 6Break up time  
57:Layer- 7Break up time  
58:Layer- 8Break up time  
59:Layer- 9Break up time  
60:Layer-10Break up time  
61:Layer-11Break up time

各層毎の  
粘度比分布

40:Layer- 1Viscosity ratio  
41:Layer- 2Viscosity ratio  
42:Layer- 3Viscosity ratio  
43:Layer- 4Viscosity ratio  
44:Layer- 5Viscosity ratio  
45:Layer- 6Viscosity ratio  
46:Layer- 7Viscosity ratio  
47:Layer- 8Viscosity ratio  
48:Layer- 9Viscosity ratio  
49:Layer-10Viscosity ratio  
50:Layer-11Viscosity ratio

各層毎の  
ザウター平均半径分布

62:Layer- 1SMR  
63:Layer- 2SMR  
64:Layer- 3SMR  
65:Layer- 4SMR  
66:Layer- 5SMR  
67:Layer- 6SMR  
68:Layer- 7SMR  
69:Layer- 8SMR  
70:Layer- 9SMR  
71:Layer-10SMR  
72:Layer-11SMR

図31 改良MEM運用時に追加されたコンター図作画項目①(twinres解析結果ファイル)

各層毎の  
Reduced capillary number分布

73:Layer- 1RCN  
74:Layer- 2RCN  
75:Layer- 3RCN  
76:Layer- 4RCN  
77:Layer- 5RCN  
78:Layer- 6RCN  
79:Layer- 7RCN  
30:Layer- 8RCN  
31:Layer- 9RCN  
32:Layer- 10RCN  
33:Layer- 11RCN

各層毎の  
周方向平均滞留時間

105:Layer- 1Average RTD  
106:Layer- 2Average RTD  
107:Layer- 3Average RTD  
108:Layer- 4Average RTD  
109:Layer- 5Average RTD  
110:Layer- 6Average RTD  
111:Layer- 7Average RTD  
112:Layer- 8Average RTD  
113:Layer- 9Average RTD  
114:Layer- 10Average RTD

各層毎の  
周方向平均分散終了半径

135:Layer- 1Average DER  
136:Layer- 2Average DER  
137:Layer- 3Average DER  
138:Layer- 4Average DER  
139:Layer- 5Average DER  
140:Layer- 6Average DER  
141:Layer- 7Average DER  
142:Layer- 8Average DER  
143:Layer- 9Average DER  
144:Layer- 10Average DER

各層毎の  
分散開始半径分布

84:Layer- 1DSR  
85:Layer- 2DSR  
86:Layer- 3DSR  
87:Layer- 4DSR  
88:Layer- 5DSR  
89:Layer- 6DSR  
90:Layer- 7DSR  
91:Layer- 8DSR  
92:Layer- 9DSR  
93:Layer- 10DSR  
94:Layer- 11DSR

各層毎の  
周方向平均ひずみ速度

115:Layer- 1Average strain rate  
116:Layer- 2Average strain rate  
117:Layer- 3Average strain rate  
118:Layer- 4Average strain rate  
119:Layer- 5Average strain rate  
120:Layer- 6Average strain rate  
121:Layer- 7Average strain rate  
122:Layer- 8Average strain rate  
123:Layer- 9Average strain rate  
124:Layer- 10Average strain rate

各層毎の  
周方向平均分裂所要時間

145:Layer- 1Average Break up tii  
146:Layer- 2Average Break up tii  
147:Layer- 3Average Break up tii  
148:Layer- 4Average Break up tii  
149:Layer- 5Average Break up tii  
150:Layer- 6Average Break up tii  
151:Layer- 7Average Break up tii  
152:Layer- 8Average Break up tii  
153:Layer- 9Average Break up tii  
154:Layer- 10Average Break up tii

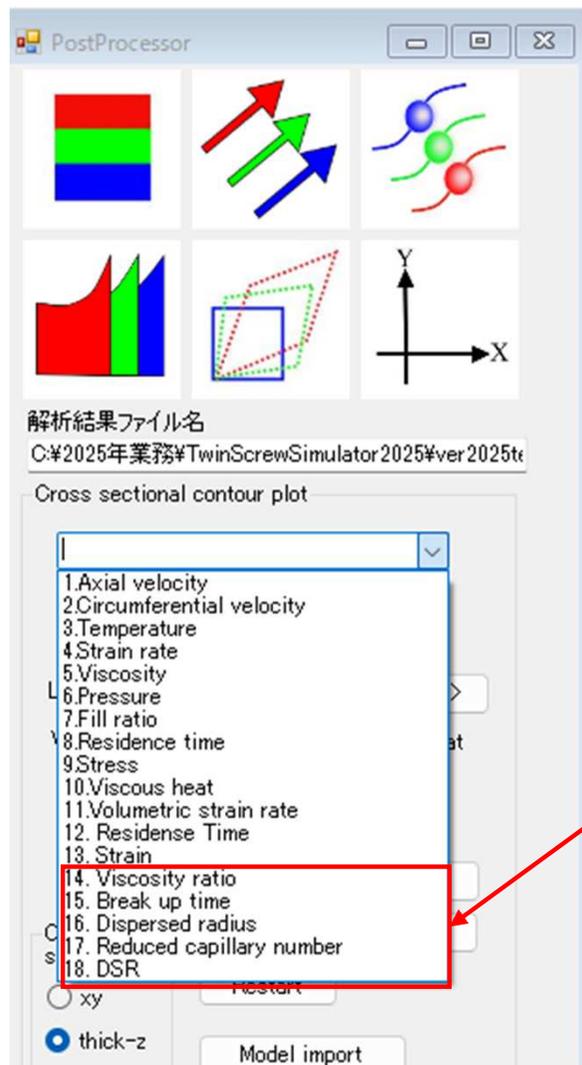
各層毎の  
周方向平均ザウター半径

95:Layer- 1Average SMR  
96:Layer- 2Average SMR  
97:Layer- 3Average SMR  
98:Layer- 4Average SMR  
99:Layer- 5Average SMR  
100:Layer- 6Average SMR  
101:Layer- 7Average SMR  
102:Layer- 8Average SMR  
103:Layer- 9Average SMR  
104:Layer- 10Average SMR

各層毎の  
周方向平均分散開始半径

125:Layer- 1Average DSR  
126:Layer- 2Average DSR  
127:Layer- 3Average DSR  
128:Layer- 4Average DSR  
129:Layer- 5Average DSR  
130:Layer- 6Average DSR  
131:Layer- 7Average DSR  
132:Layer- 8Average DSR  
133:Layer- 9Average DSR  
134:Layer- 10Average DSR

図32 改良MEM運用時に追加されたカウンター図作画項目② (twinres解析結果ファイル)



- 14.粘度比
- 15.分裂所要時間
- 16.分配/分散液滴半径
- 17.Reduced capillary number
- 18.分裂開始半径

図33 改良MEM運用時に追加されたコンター図作画項目③(crosscont解析結果ファイル)

テスト解析結果に記載した各種グラフ図は、下記の新規追加されたテキスト出力ファイルをエクセルに読み込み作成しました。

表1 新規追加テキスト出力ファイル

ファイル拡張子*)	内容**)
AVSMR	周方向平均ザウター半径( $\mu\text{m}$ )
AVRTD	周方向平均滞留時間(s)
AVDSR	周方向平均分散開始半径( $\mu\text{m}$ )
AVDER	周方向平均分散終了半径( $\mu\text{m}$ )
AVBTIME	周方向平均分散所要時間(s)
DISPRAD	分配/分散液滴半径( $\mu\text{m}$ )

\*)テキスト出力ファイルの名称は、ユーザ設定の任意解析結果ファイル名+拡張子で表されます。

\*\*\*)各層毎の計算情報が出力されます。出力フォーマットは、以下に示す通りです。

スクリュ座標, 層1の計算情報, 層2の計算情報, ..., 層nの情報

n:解析者が設定する層分割数(デフォルト10)

以下、同形式の情報が、軸方向の分割数分シーケンシャル出力されます。

## 2. 繊維破断解析機能の改良／FVM法, サイドフィード考慮

【新機能1】 繊維破断方程式の解法に, 有限体積法(FVM) が追加されました。  
従来の安定化有限要素法(SUPG法に基づくFEM)と選択して利用可能です。

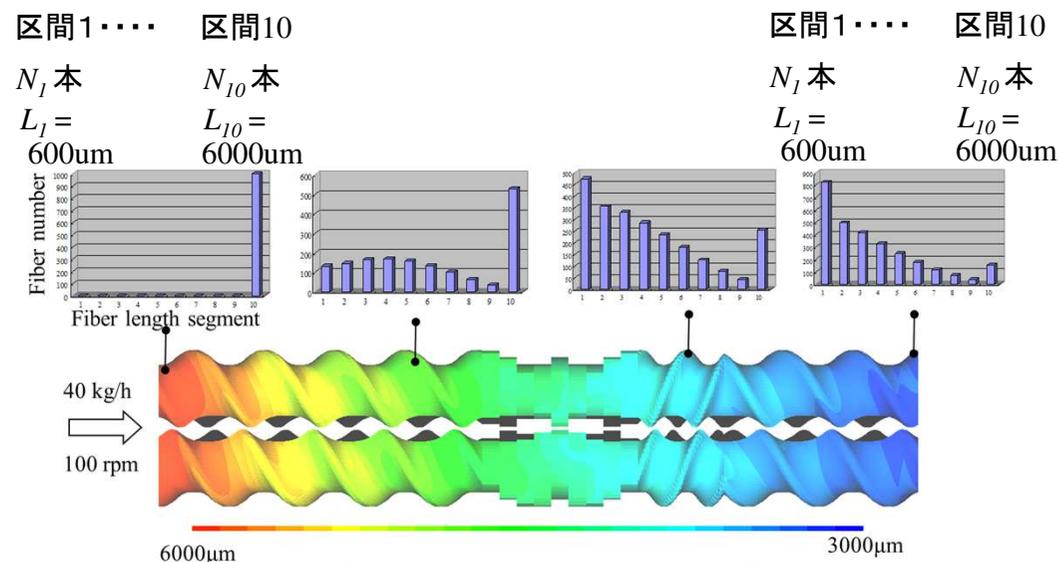
繊維破断方程式 (Fiber Attrition Model \*)

$$\frac{dN_i}{dt} = -P_i N_i + \sum_{k=i+1}^{i \max} R_{ik} N_k$$

繊維長 $l_i$ の  
繊維数の  
変化率

繊維長 $l_i$ の  
破断に伴う  
繊維数の  
減少率

繊維長 $l_i$ より  
長い区分の  
破断に伴う繊維数  
の増加率



【数平均繊維長の解析結果】

Fiber attrition model\*)

繊維長を離散化モデルで表現:  $l_i = i\Delta l (i = 1 \sim i \max, \Delta l: \text{繊維長刻み幅})$

単位体積あたりに含まれる繊維長 $l_i$ の繊維数:  $N_i (i = 1 \sim i \max)$

\*) 参考文献: J.H. Phelps (2009). "Processing-Microstructural Models for Short- and Long-Fiber Thermoplastic Composites," PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801.

## (補足) FEM法とFVM法の特徴

### FEM(有限要素法)/HASL標準解法

- ・積分形の定式化
- ・非構造格子への適用性高い
- ・**拡散(粘性)支配の方程式向き**

○運動量方程式: 拡散方程式  
(定常状態, 非圧縮粘性流れ)

$$\eta \Delta u = \nabla P$$

拡散項

### FVM(有限体積法)/適用範囲を拡大

- ・積分形の定式化
- ・構造格子/非構造格子に適用可能
- ・**移流(対流)支配の方程式向き**

○エネルギー方程式: 移流拡散方程式  
(温度解析)

$$\rho C_p u \nabla T = \kappa \Delta T + \eta \dot{\gamma}^2$$

移流項      拡散項

○繊維破断方程式: 移流方程式  
(Fiber Attrition Model)

$$u \nabla N_i = -P_i N_i + \sum_{k=i+1}^{i \max} R_{ik} N_k$$

移流項

$u$ : 流速ベクトル(3次元),  $\eta$ : 粘度,  $p$ : 圧力,  $\rho$ : 密度,  $C_p$ : 比熱,  $\kappa$ : 熱伝導率,  $\dot{\gamma}$ : ひずみ速度  
 $\nabla$ : ナブラ演算子,  $\Delta$ : ラプラス演算子

## 利用方法

繊維破断解析の設定欄に追加された, FVM法のラジオボタンをチェックします.

(英) Binary System Condition Set

温度境界条件 解析実行プログラム ユーザ定義解析 溶融可塑化/液滴分散 SF/履歴/繊維破断 脱揮解析 突 ▶

滞留時間解析/履歴積分解析 計算パラメータ

滞留時間解析  履歴積分解析

FVM  VOF  FVM  Implicit

VOF閾値 0.5  Explicit

計算サイクル数 2000  ひずみ速度(ひずみ履歴)

最大計算サイクル数 4000  応力

File output number 10  粘性発熱

サイドフィード解析/計算パラメータ

サイドフィード解析  新規解法(多成分)

副材の物性データ(.pro) サイドフィード条件設定

副材比率 1.0  Explicit  Implicit

Un-steady  Steady

繊維破断解析(Fiber attrition model)/計算パラメータ

繊維破断解析  FEM / Implicit

FVM  FEM / Implicit

繊維情報

初期繊維長 6000  $\mu\text{m}$

繊維断面直径 17  $\mu\text{m}$

繊維ヤング率 73 GPa

初期繊維本数 1000

破断解析無次元パラメータ

Cb 0.002

$\zeta$  0.10

S 0.25

計算パラメータ

緩和係数 0.2

最大計算回数 30

繊維長区分数 10

Fiber optional information

破断計算開始位置 Z 0 mm Z mm 以降の物性ファイル Import

初期繊維長分布ファイル Import

繊維投入量 (kg/h)

繊維密度 (kg/m<sup>3</sup>)

繊維破断解析(Fiber attrition model)/計算パラメータ

繊維破断解析(A)

FVM(B)新規  FEM / Implicit(C)

繊維破断解析を実施するためには,  
(A) 繊維破断解析のチェックボックスをONにします。  
このとき,  
(B) FVMを選択すると新規の有限体積法(FVM),  
(C) FEM / Implicitを選択すると,従来の安定化有限要素法(SUPG法に基づくFEM / 陰解法)が,  
解法として設定されます。

(補足)繊維破断解析の入力項目の説明については,  
TwinScrew Simulator(利用手引き)書Ver.4.0.pdfの  
p.105~も合わせてご参照ください。

(参考) 繊維破断解析の無次元パラメータについて

Cb	0.002
ζ	0.10
S	0.25

$$u \nabla N_i = -P_i N_i + \sum_{k=i+1}^{i \max} R_{ik} N_k$$

繊維長区分  $i$  の破断頻度  $P_i$

$$P_i = C_b \dot{\gamma}_m \left[ 1 - \exp(1 - \hat{\gamma}) \right] \quad \text{for } \hat{\gamma} \geq 1,$$

$$P_i = 0 \quad \text{for } \hat{\gamma} < 1,$$

$$\hat{\gamma} = \frac{4 \zeta \eta_m \dot{\gamma}_m l_i^4}{\pi^3 E_f d_f^4}$$

$C_b$  : 無次元破断頻度係数

$\zeta$  : 無次元抗力係数

$\eta_m$  : 流体粘度

$\dot{\gamma}_m$  : 流体せん断速度

$E_f$  : 繊維ヤング率

$d_f$  : 繊維断面直径

繊維長区分  $k$  から 区分  $i$  に取り込まれる  
破断頻度  $R_{ik}$

$$R_{ik} = C \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

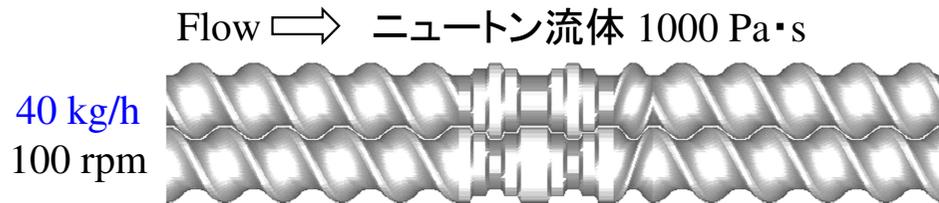
$$x = l_i, \mu = \frac{l_k}{2}, \sigma = S l_k$$

$S$  : 繊維長分布の調整パラメータ

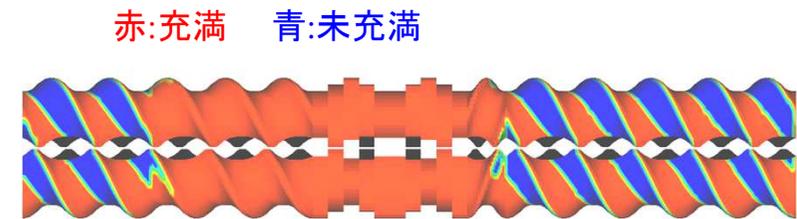
$C$  : 規格化パラメータ

# テスト解析例1: 充填率が大きい場合 (40kg/h)

## 【解析条件】



## 【流動解析結果／充填率 (-)】

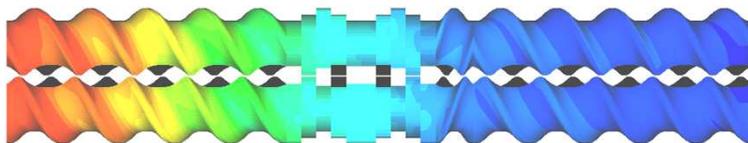


スクリュ内の平均充填率: 73.4 %

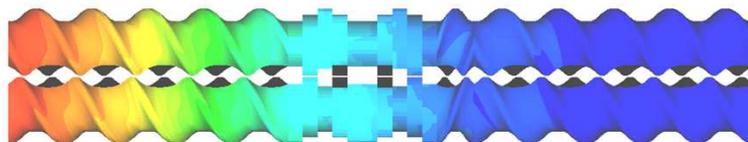
## 【繊維破断解析結果／数平均繊維長 (um)】



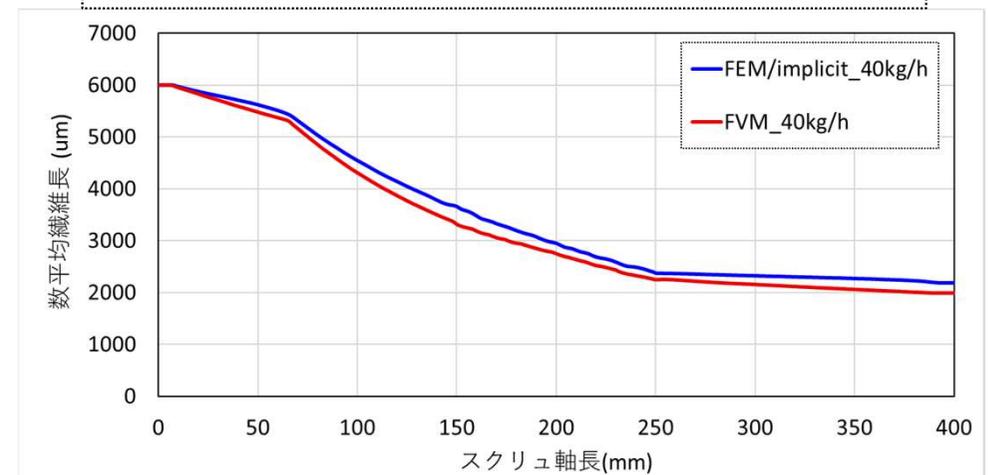
### ・FEM / Implicit



### ・FVM (新規解法)

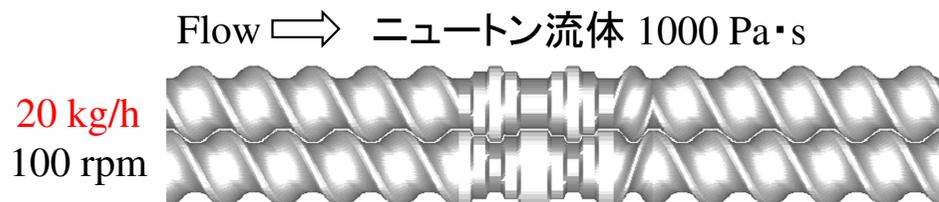


スクリュ内の充填率が大きい場合(スクリュ部でも破断が進行する場合), FVM法の方が数平均繊維長が約100um短くなりましたが, スクリュ全体の破断傾向はほぼ同等の結果が得られました.



## テスト解析例2: 充填率が小さい場合 (20kg/h)

### 【解析条件】



### 【流動解析結果／充填率 (-)】

赤: 充填 青: 未充填

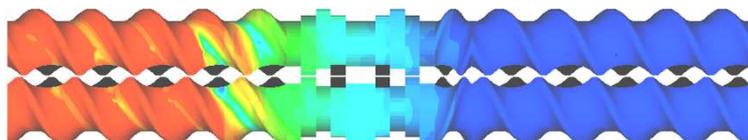


スクリュ内の平均充填率: 51.6 %

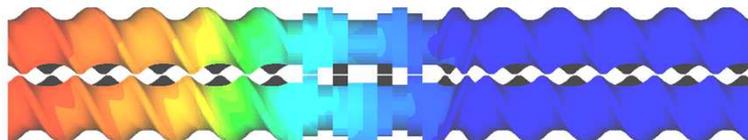
### 【繊維破断解析結果／数平均繊維長 (um)】



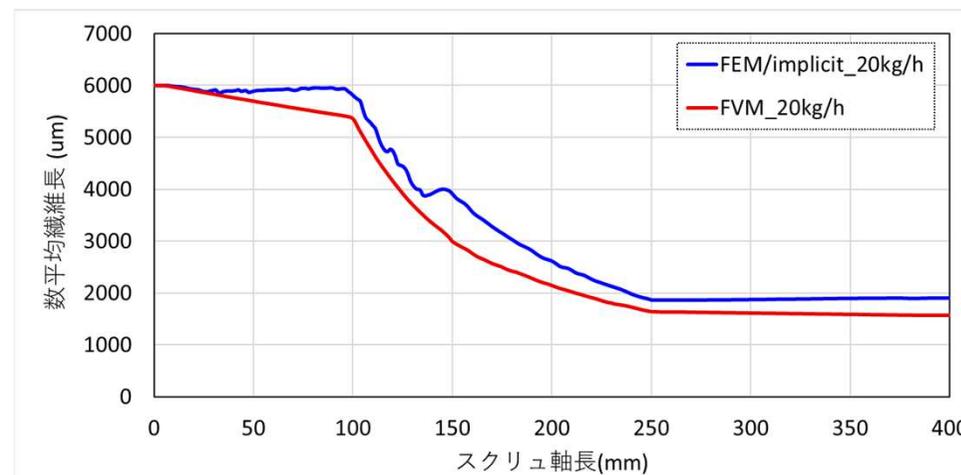
#### ・FEM / Implicit



#### ・FVM (新規解法)

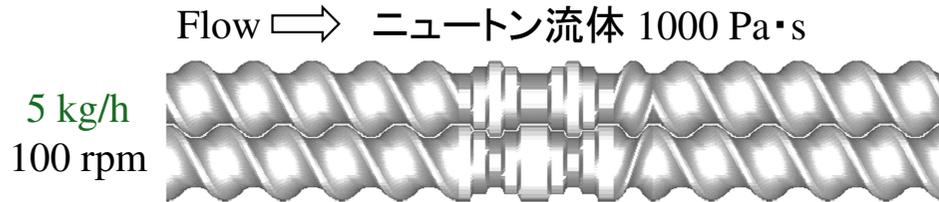


スクリュ内の充填率が小さい場合、スクリュ部の破断頻度は混練(ニーディング)部に比べて顕著に小さくなります。このような破断頻度が急激に変化する条件において、従来のFEM / Implicit法で繊維長が振動する場合があります。一方、FVM法では充填率が小さい場合でも安定した破断傾向が得られました。



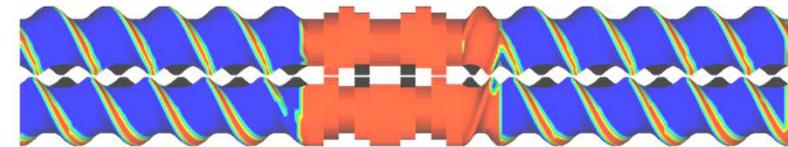
# テスト解析例: FVM法を用いた繊維破断解析のまとめ

## 【解析条件】



## 【流動解析結果／充満率 (-)】

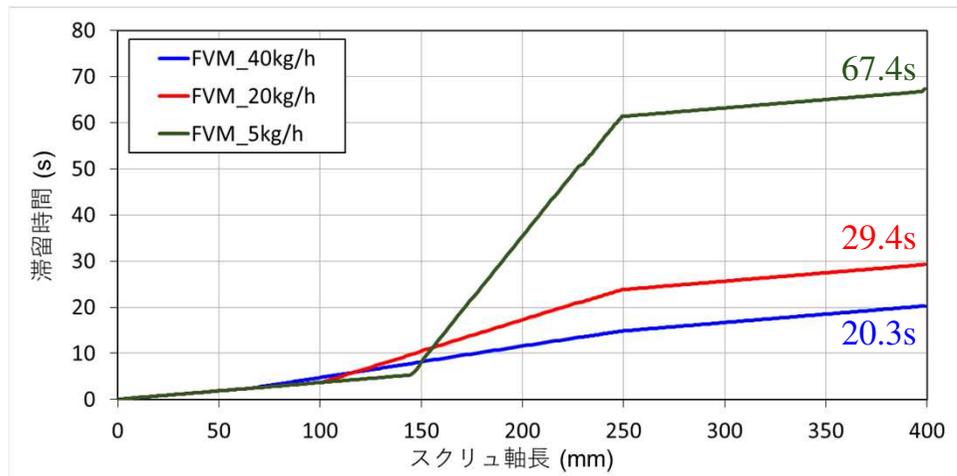
赤:充満 青:未充満



スクリュ内の平均充満率: 27.3 %

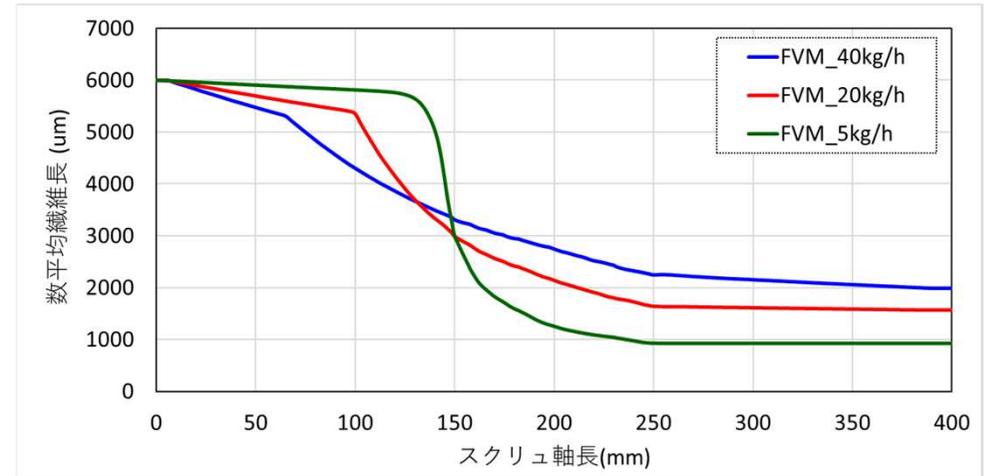
## 【流動解析結果／滞留時間 (s)】

・40 kg/h, 20 kg/h, 5 kg/h の樹脂通過時間



## 【繊維破断解析結果／数平均繊維長 (um)】

・FVM: 押出量が繊維長に与える影響



FVM法では、スクリュ内の平均充満率が27.3%でスクリュ部ではほとんど破断が進行しない状態でも安定した繊維長分布が得られました。また、スクリュ回転数を固定して押出量を変えた場合、押出量が小さいほど、樹脂がスクリュ出口に到達する時間が長くなります。したがって繊維破断の移流方程式を解析した場合、混練(ニーディング)部を通過する時間の長い5 kg/h の条件で最も小さい繊維長を示しました。

## \* 繊維破断解析の結果ファイルについて

繊維破断解析を実施すると、以下の拡張子の出力ファイルが作成されます。

- (1) .fiberlength : スクリュ軸方向の数平均繊維長と重量平均繊維長 (例: p.7 左下のグラフ)
- (2) .fiberhist : スクリュ軸方向の繊維本数の推移 (例: p.3 右のヒストグラム)
- (3) .fiberconv : 計算回数毎のスクリュ出口の数平均繊維長と重量平均繊維長

## \* 繊維破断解析の収束状況の確認方法

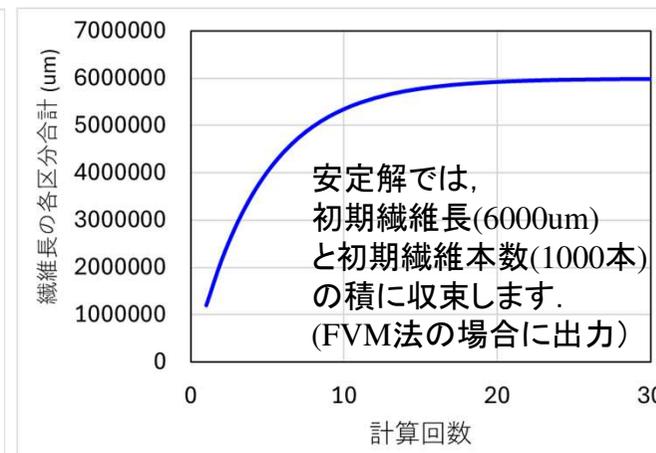
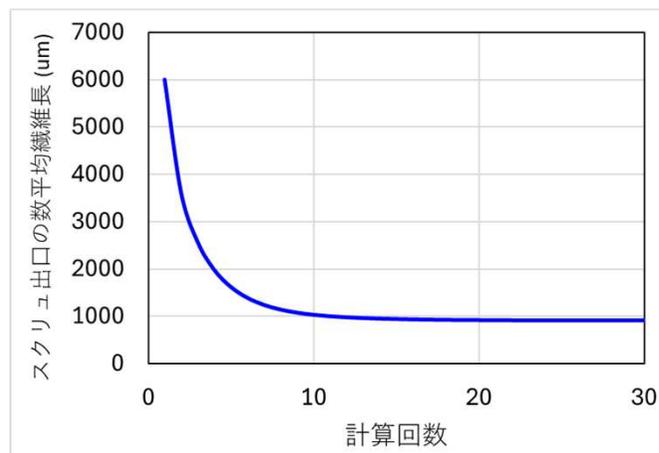
出力ファイル (3) .fiberconv の計算回数とスクリュ出口の繊維長の推移を確認します。

・例: FVM法, 5kg/hの .fiberconv  
(コマ区切り)

計算パラメータ	
緩和係数	0.2
最大計算回数	30
繊維長区分数	10

緩和係数は、小さくするほど計算安定性が向上しますが、収束解に至るまでの反復計算回数が増加します。

計算回数	数平均繊維長 (um)		重量平均繊維長 (um)		繊維長の各区分合計(um)
	A	B	C	D	
1	1	6000.002	6000.003		1199989
2	2	3606.734	4355.189		2159981
3	3	2573.328	3339.254		2927973
4	4	1988.769	2655.314		3542366
5	5	1629.301	2181.806		4033882
6	6	1400.048	1857.969		4427093



## 2. 繊維破断解析機能の改良／FVM法, サイドフィード考慮

【新機能2】 繊維をスクリュの途中から投入する(サイドフィード)場合を想定した解析が簡便に実施できるようになりました。

繊維破断解析(Fiber attrition model)/計算パラメータ

繊維破断解析

FVM     FEM / Implicit

繊維情報

初期繊維長	6000	μm
繊維断面直径	17	μm
繊維ヤング率	73	GPa
初期繊維本数	1000	

破断解析無次元パラメータ

Cb	0.002
ζ	0.1
S	0.25

計算パラメータ

緩和係数	0.2
最大計算回数	30
繊維長区分数	10

Fiber optional information

破断計算開始位置 Z (A)	100	mm	Z mm 以降の物性ファイル	Import
			vis2000 (B)	
初期繊維長分布ファイル (D)	Import		繊維投入量 (kg/h)	10
normal_fam_fvm_20kg			繊維密度 (kg/m <sup>3</sup> ) (C)	2500

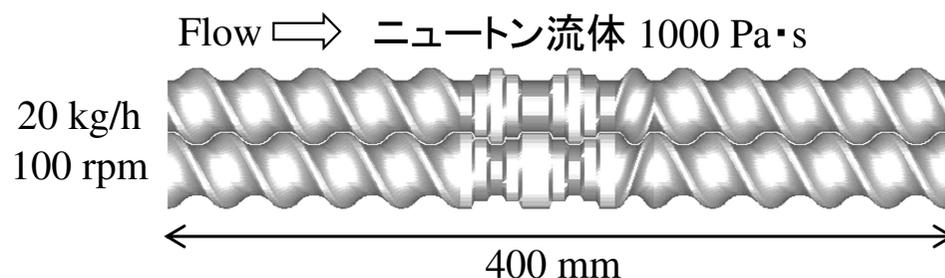
サイドフィード投入を想定した解析の入力フォーム  
(利用方法は p.11 ~を参照ください。)

## 利用方法

### (A) 破断計算開始位置の指定

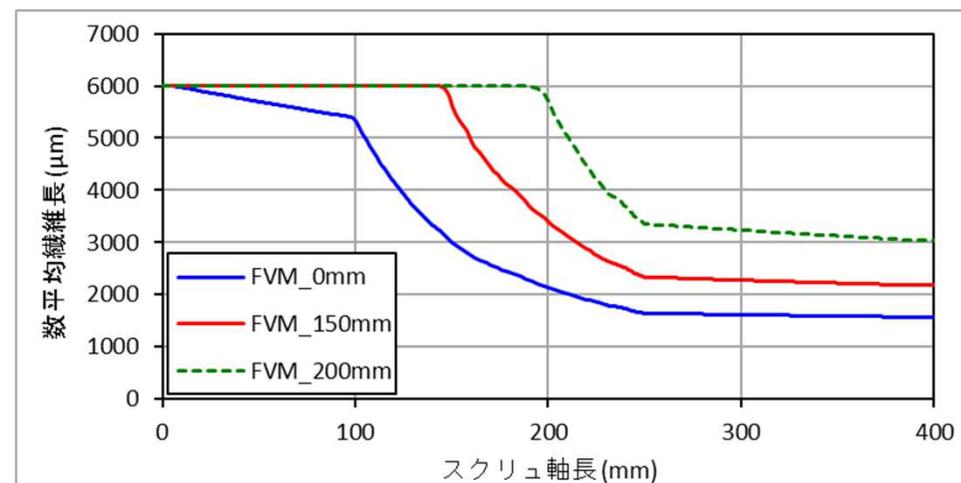
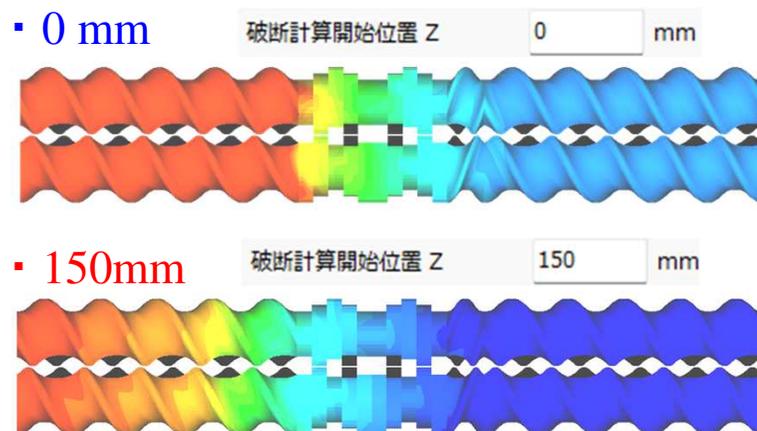
- 0 (mm) の場合は, 従来通りスクリュの入口から破断が進行します.
- 非零の値 (mm) を入力した場合は, 入力した位置から破断が進行します.

**解析例** 次ページ以降の(B) – (D)においても同じスクリュモデルを使用しました.



繊維情報		
初期繊維長	6000	μm
繊維断面直径	17	μm
繊維ヤング率	73	GPa
初期繊維本数	1000	

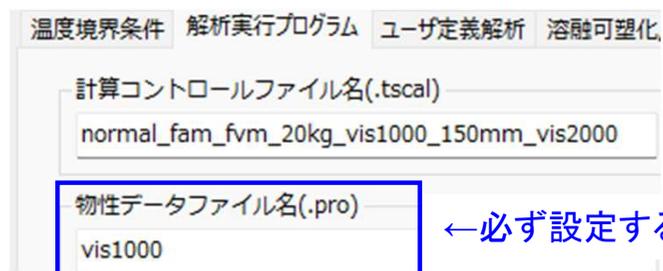
### 【数平均繊維長 (μm)】



# 利用方法

## (B) 破断計算開始位置以降での物性データ指定（繊維投入後の粘度変化を考慮）

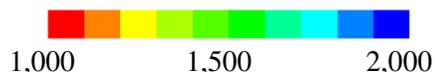
- 物性データを設定しない場合は、解析実行プログラムに設定したデータが全域で利用されます。
- 物性データを設定した場合は、破断開始位置までは解析実行プログラムで指定したデータが利用され、開始位置以降では本項で設定した物性データが利用されます。



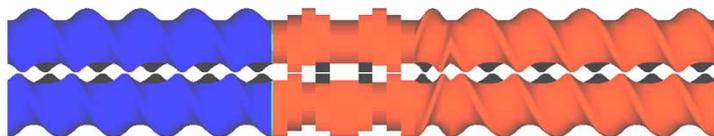
↑ 設定すると、破断開始位置以降では本項のデータが優先されます(任意)。

## 解析例

### 【溶融粘度 (Pa·s)】



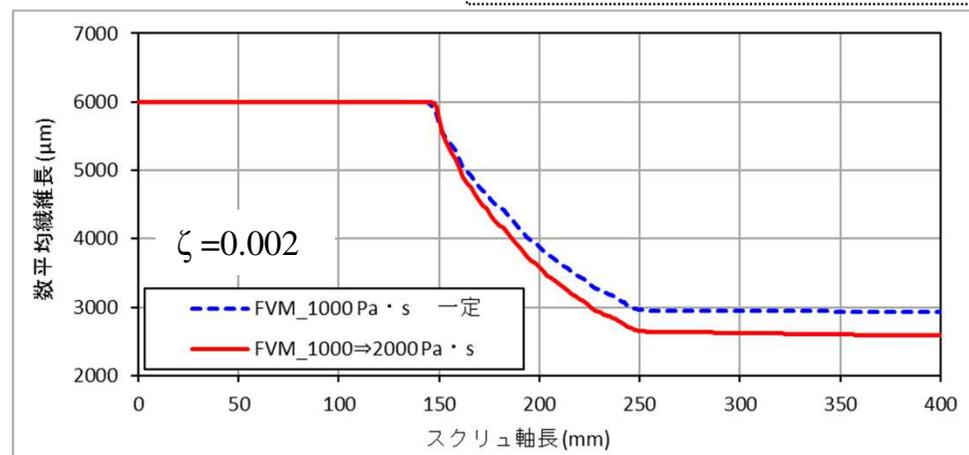
(投入前)ニュートン流体 1000 Pa·s      (投入後)ニュートン流体 2000 Pa·s



(補足)非ニュートン流体にも適用可能です。

### 【数平均繊維長 (um)】

粘性増によるスクリュ内の応力増加のため繊維長は短くなる傾向を示しました。



## 利用方法

### (C) 繊維投入量(kg/h)と繊維密度(kg/m<sup>3</sup>)の指定（繊維投入後の流量変化を考慮）

- 設定しない場合は、解析実行プログラムに設定した押出量に相当する流量 (cm<sup>3</sup>/s) で全域が解析されます。
- 設定した場合は、スクリュ入口に解析実行プログラムに設定した押出量に相当する流量が指定され、破断開始位置で繊維投入量と繊維密度から算出される流量(cm<sup>3</sup>/s) が指定されて解析されます。

流出口境界条件

圧力規定       流量規定  
 未充填解析       New version algorithm

流出口圧力(MPa)      0.1  
 押出量(kg/h)      20

↑ 必ず設定する(従来通り)

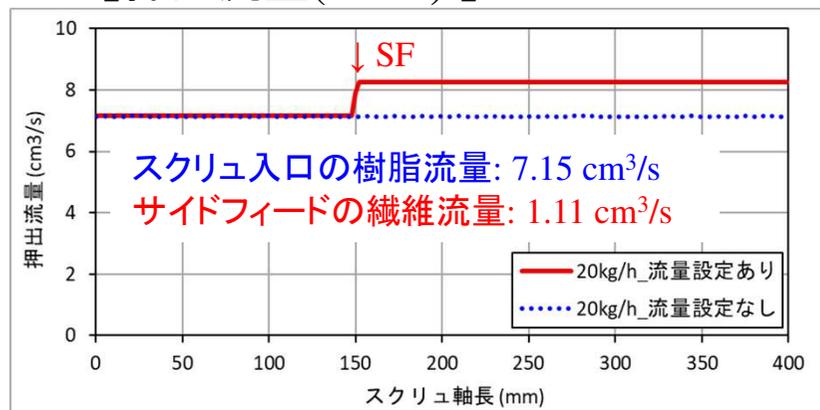
Z mm 以降の物性ファイル      Import

繊維投入量 (kg/h)      10  
 繊維密度 (kg/m<sup>3</sup>)      2500

← 設定すると、破断開始位置に、当情報から算出される流量(cm<sup>3</sup>/s) が設定されます。

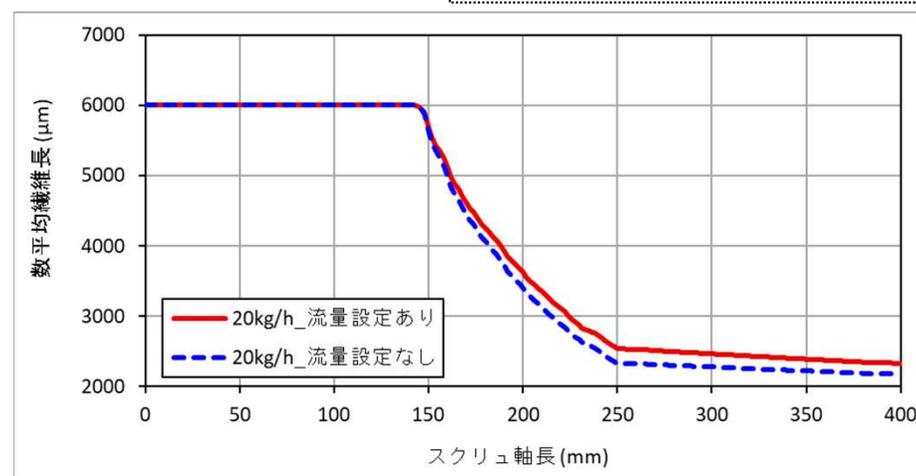
## 解析例

### 【押出流量(cm<sup>3</sup>/s)】.bfcinf



### 【数平均繊維長 (um)】

繊維流量の増加により滞留時間が短くなるため、繊維長は長くなる傾向を示しました。



## 利用方法

### (D) 初期繊維長分布の指定

- 初期繊維長分布ファイルに、事前に解析した繊維破断のヒストグラムファイル(.fiberhist)を設定すると、当ファイルの最終位置での繊維長分布を初期繊維長として解析が実施されます。

Fiber optional information

破断計算開始位置 Z  mm

初期繊維長分布ファイル

normal_fam_fvm_20kg.fiberhist	2025/07/02 11:17	FIBERHIST ファイル
normal_fam_imp_20kg.fiberhist	2025/07/02 11:12	FIBERHIST ファイル
normal_fam_fvm_40kg.fiberhist	2025/07/02 11:05	FIBERHIST ファイル

ファイル名(N):  Fiber distribution (\*.fiberhist)

### ○ 設定した.fiberhist

```
10 , 6000.000 , 85.96861
+++++
+++ zlevel = 400.0000
+++ fiberlength ,fibernumber +++
1 , 600.0000 , 1303.770
2 , 1200.000 , 1082.987
3 , 1800.000 , 640.9966
4 , 2400.000 , 276.6756
5 , 3000.000 , 169.3469
6 , 3600.000 , 115.3323
7 , 4200.000 , 75.60918
8 , 4800.000 , 45.01012
9 , 5400.000 , 23.64483
10 , 6000.000 , 85.96853
+++++
```

最終位置の分布が  
初期値に設定される

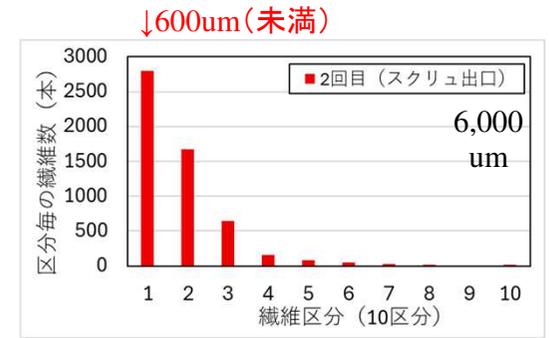
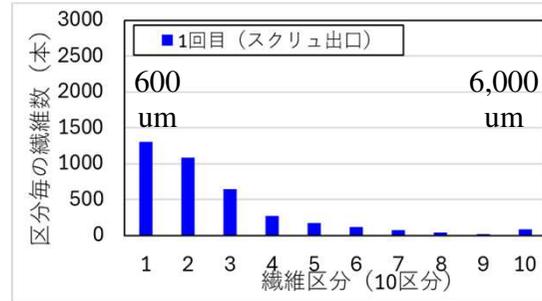
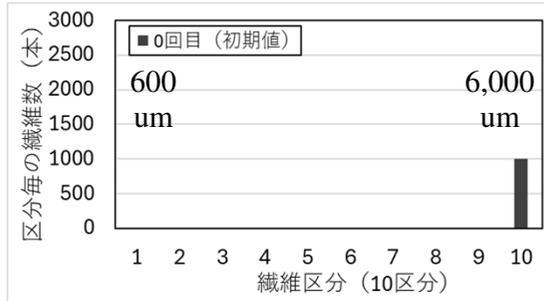
### ○ 解析後の.fiberhist

```
+++ zlevel = 0.0000000E+00
+++ fiberlength ,fibernumber +++
1 , 600.0000 , 1303.771
2 , 1200.000 , 1082.987
3 , 1800.000 , 640.9963
4 , 2400.000 , 276.6757
5 , 3000.000 , 169.3468
6 , 3600.000 , 115.3324
7 , 4200.000 , 75.60921
8 , 4800.000 , 45.01018
9 , 5400.000 , 23.64481
10 , 6000.000 , 85.96861
+++++
+++ zlevel = 1.250000
+++ fiberlength ,fibernumber +++
1 , 600.0000 , 1303.771
```

# 解析例

## 【繊維長分布】

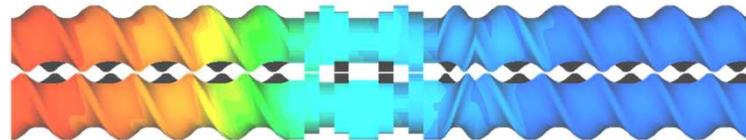
10区分  
初期繊維長  
6000 um  
繊維本数  
1000本



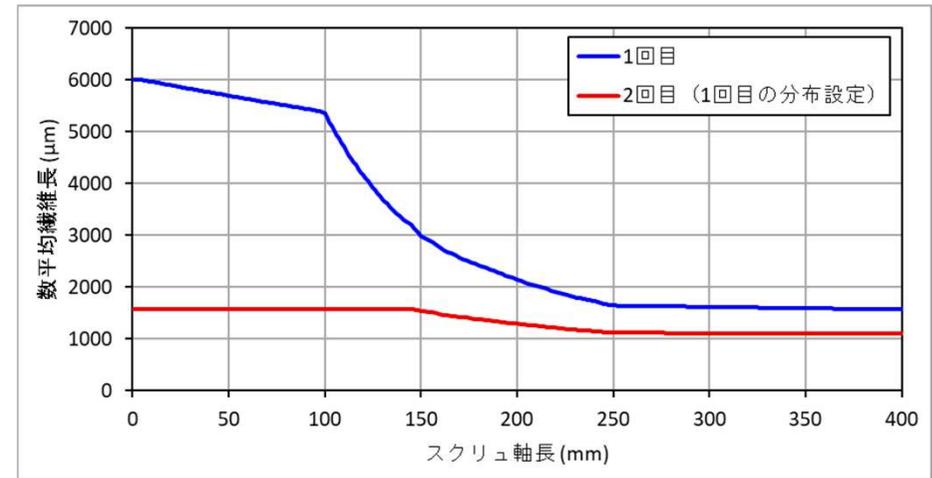
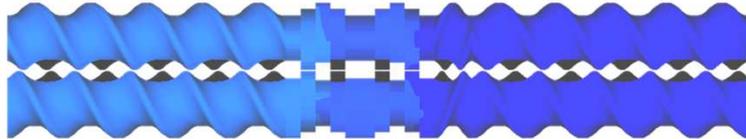
## 【数平均繊維長 (um)】



・1回目(従来通り)



・2回目(1回目の分布を設定)



```
+++ zlevel = 400.0000
+++ fiberlength ,fibernumber +++
1 , 600.0000 , 100
2 , 1200.000 , 100
3 , 1800.000 , 100
4 , 2400.000 , 100
5 , 3000.000 , 100
6 , 3600.000 , 100
7 , 4200.000 , 100
8 , 4800.000 , 100
9 , 5400.000 , 100
10 , 6000.000 , 100
+++++
```

(補足) 設定する .fiberhist の分布情報は、最終位置の情報のみが使用されます(途中位置の情報は無視されます)。したがって、任意の .fiberhist の最終位置の分布情報を手動で変更することで、任意の繊維長分布を初期値として解析することが可能です。

← 各区分の本数を100に手動変更した場合

### 3. 履歴解析機能の改良／FVM法

混練性評価に利用される履歴解析機能に、有限体積法(FVM)が追加されました。

#### ひずみ履歴解析の定常移流(輸送)方程式

$$u \nabla \gamma = \dot{\gamma}$$

$u$  : 流速ベクトル [m/s]

$\gamma$  : ひずみ [-]

$\dot{\gamma}$  : ひずみ速度 [1/s]

(参考)ひずみの積分形式

$$\gamma = \int \dot{\gamma} dt$$

粒子運動軌跡に沿った履歴積分

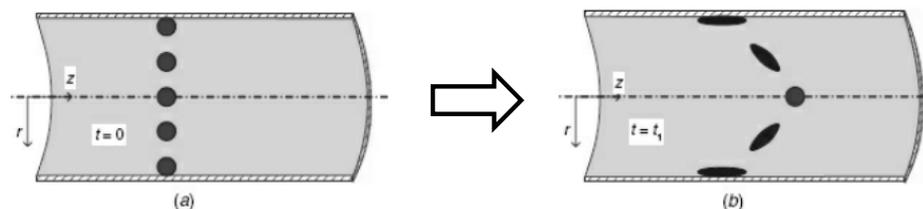
“ひずみ ( $\gamma$ )”は、流速に基づく流路内の移動経路に沿った、ひずみ速度の履歴積分値として定義され、流路内の混練性の指標として利用されます。

本機能では、履歴積分評価式と等価な定常輸送方程式を解析することでひずみを定量化します。

#### Laminar mixing by shear flow

Dark areas are occupied by a tracer consisting of the bulk liquid and a small amount of a dye.

参考文献: “Principles of Polymer Processing” second edition,  
Zehev Tadmor, Costas G. Gogos, Wiley-Interscience (2013), Fig.7.3.



## 利用方法

履歴積分解析にチェック後、下の解法選択欄に追加された FVM法 のラジオボタンを  
チェックします。

(英) Binary System Condition Set

温度境界条件 解析実行プログラム ユーザ定義解析 熔融可塑化/液滴分散 SF/履歴/繊維破断 脱揮解

滞留時間解析/履歴積分解析 計算パラメータ

滞留時間解析

FVM  VOF

VOF閾値 0.5

計算サイクル数 2000

最大計算サイクル数 4000

File output number 10

履歴積分解析

FVM  Implicit

Explicit

ひずみ(ひずみ速度履歴)

応力履歴

粘性発熱履歴

Implicit : FEM / 陰解法

Explicit : FEM / 陽解法

上記の2解法の詳細は、  
TwinScrewSimulatorVer6.0.0(2019)改良  
成果資料.ppt p.16-を参照ください。

履歴積分は以下の3種類が解析可能です。必要な項目にチェックすると、流動解析で得られた  
スクリュー内の流速ベクトル、ひずみ速度、粘度を利用して、以下の方程式が解析されます。

ひずみ  $\gamma$  [-]

$$\mathbf{u} \nabla \gamma = \dot{\gamma}$$

応力履歴  $st_{his}$  [kPa·s]

$$\mathbf{u} \nabla st_{his} = \eta \dot{\gamma}$$

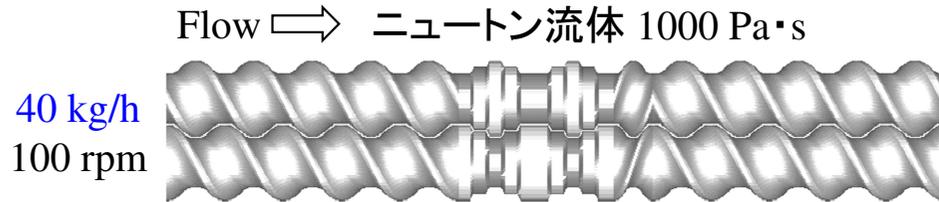
粘性発熱履歴  $vheat_{his}$   
[MW·s/m<sup>3</sup>]

$$\mathbf{u} \nabla vheat_{his} = \eta \dot{\gamma}^2$$

(補足) 従来のImplicit, Explicitでは肉厚方向の平均流速, ひずみ速度, 粘度を利用しますが, FVM法では肉厚層毎に履歴積分を行ない, その平均値を結果として出力します。詳細はp.20を参照ください。

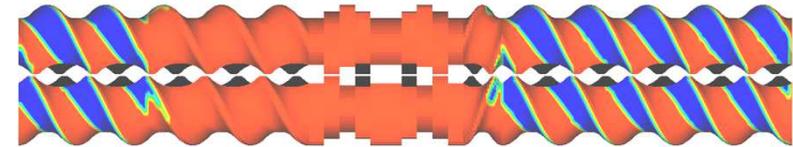
# テスト解析例1: 充填率が大きい場合 (40kg/h)

## 【解析条件】



## 【流動解析結果／充填率 (-)】

赤: 充填 青: 未充填

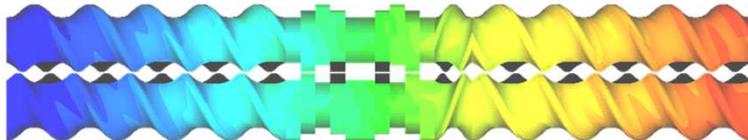


スクリュ内の平均充填率: 73.4 %

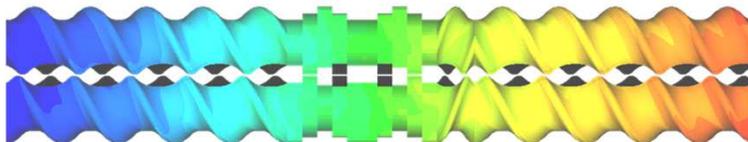
## 【履歴解析結果／ひずみ Strain (-)】



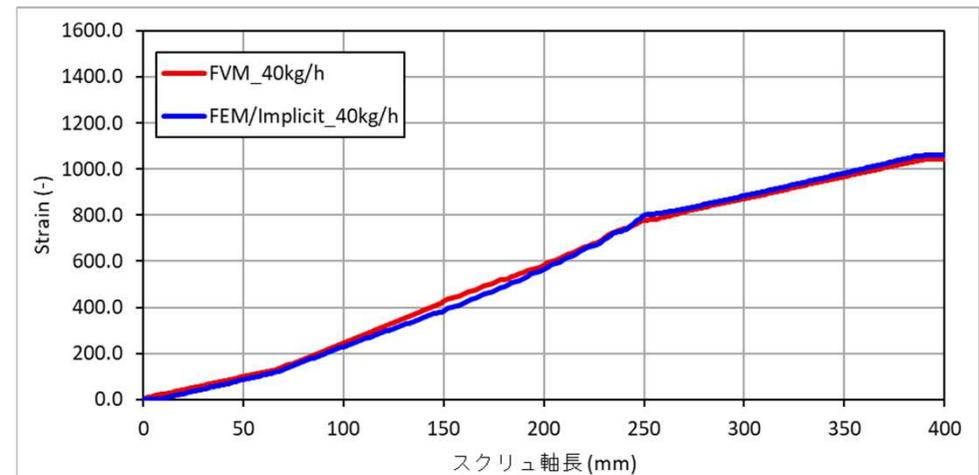
### ・FEM / Implicit



### ・FVM (新規解法)

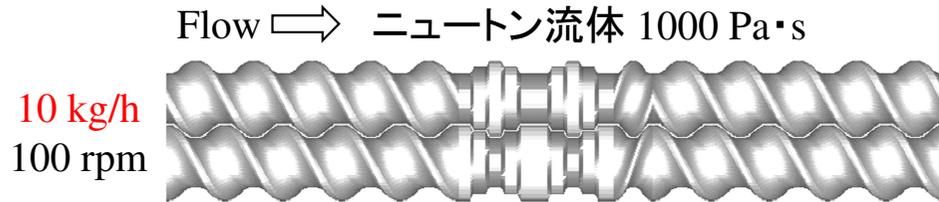


スクリュ内の充填率が大きい場合、FVM法とFEM/Implicit法で同等の結果が得られました。

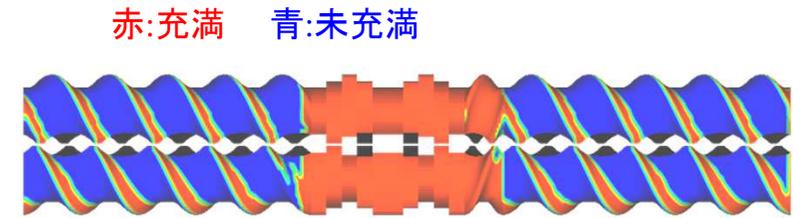


# テスト解析例1: 充填率が小さい場合 (10kg/h)

## 【解析条件】

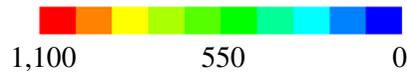


## 【流動解析結果／充填率 (-)】

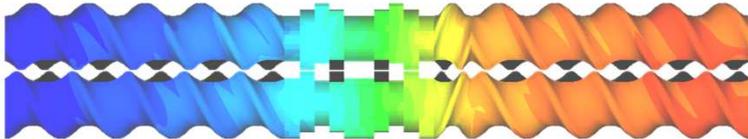


スクリュ内の平均充填率: 32.8 %

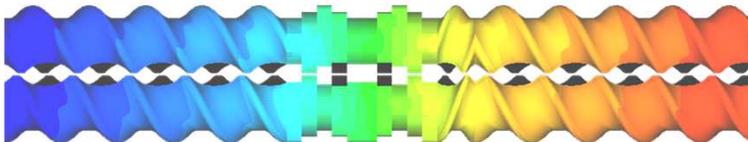
## 【履歴解析結果／ひずみ Strain (-)】



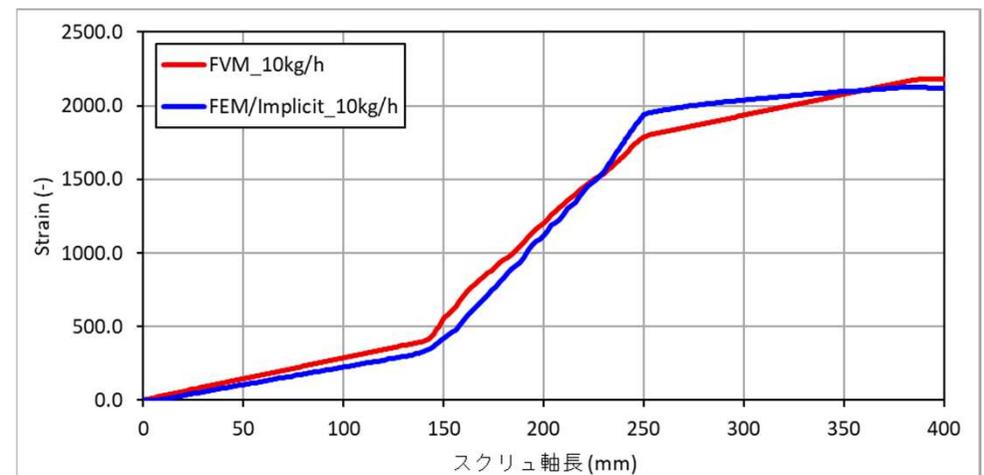
### ・FEM / Implicit



### ・FVM (新規解法)



スクリュ内の充填率が小さい場合でも, FVM法とFEM/Implicit法でほぼ同等の結果が得られました.



## FVM法を用いた履歴解析の特徴

FVM法では、肉厚層毎に以下の定常輸送方程式を解析します(以下はひずみで説明)。

$$\tilde{\mathbf{u}}_l \cdot \nabla \gamma_l = \dot{\gamma}_l$$

$$l = 1 \sim N$$

(N:ユーザ指定肉厚層数, デフォルト10)

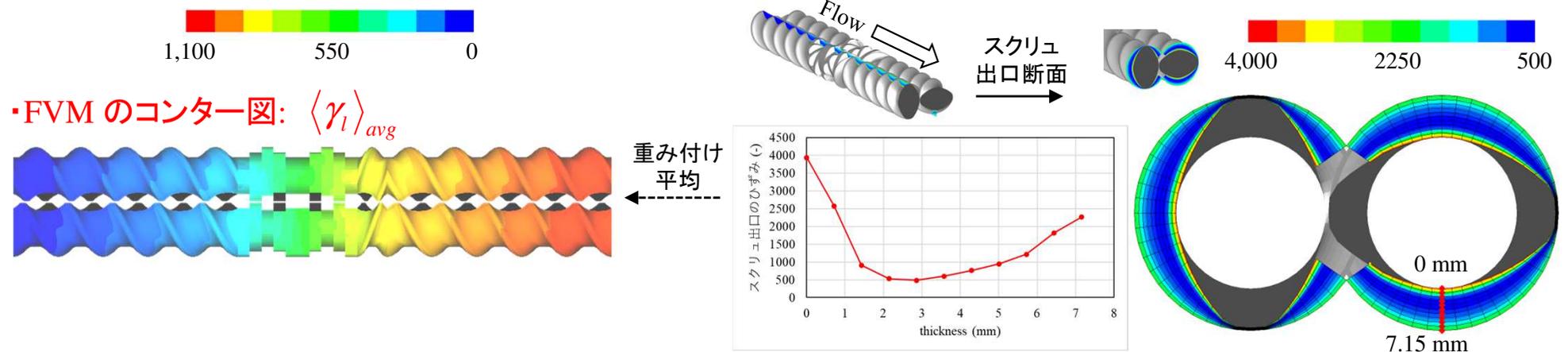
$\tilde{\mathbf{u}}_l$  : l層の流速ベクトル(循環流れ考慮)

$\gamma_l$  : l層のひずみ (-)

$\dot{\gamma}_l$  : l層のひずみ速度 (1/s)

循環流れの考慮については、TwinScrewSimulatorVer10.0.0改良成果資料.pdfのp.11-を参照ください(肉厚層毎の滞留時間計算)。解析結果ファイル.twinres / .strain には、各層で得られた履歴積算値  $\gamma_l$  を層流量で重み付けして算出された平均量  $\langle \gamma_l \rangle_{avg}$  が出力されます。各層毎の履歴積算値は、肉厚断面の解析結果(.crosscont) に出力されます。

### 【履歴解析結果 / ひずみ Strain (-)】



## 4. スクリュモデリングの改良／エレメント登録機能

エレメントの登録リストを事前に作成することにより、従来の数値入力に代わり、アイコンクリックによるエレメントの追加機能が実装されました。利用方法について、次ページ以降に記載します。

The screenshot displays the TwinScrew Simulator interface. On the left, the 'Element Registration Form' window is open, showing a list of element types: SW30\_F, KD5\_F, KD5\_R, SW20\_R, MIX\_F, and MIX\_R. A red box highlights this list, and a red arrow points to the 'Import' button. Below the list, a 3D model of a screw is shown. A red arrow points from the 'Import' button to the 'Import' button in the main window. A red box highlights the 'Import' button in the main window, and a red arrow points to it from the 'Import' button in the registration form. A red box highlights the 'Import' button in the main window, and a red arrow points to it from the 'Import' button in the registration form.

↑ アイコンクリックによるエレメント追加

↑ 登録リスト読み込みボタン

Blk.No.	Type	Rev. or Nor.	Radius Screw	Tips	Disk Angle	Pitch or Disk Thick.	Turns or Disk No.	Length	Division Number Top	Flank	Axis
1.	SW.	Nor..	19.5.	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.
2.	SW.	Nor..	19.5.	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.
3.	KD.	Nor..	19.5.	2.	45.	8.0.	5.0.	40.	2.	10.	20.
4.	KD.	Rev..	19.5.	2.	45.	8.0.	5.0.	40.	2.	10.	20.
5.	SW.	Rev..	19.5.	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.
6.	SW.	Nor..	19.5.	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.
7.	SW.	Nor..	19.5.	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.
8.	SW.	Rev..	19.5.	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.
9.	SW.	Nor..	19.5.	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.

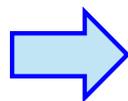
## 利用方法1: エlement登録リストの作成

- (1) TSSフォルダ内の, Systemver.11.0.0¥ElementListフォルダ内に存在する, エlement登録シート.csv (or ELEMENTSHEET.csv) をExcelで開きます. 当シートの共通寸法情報に, 登録するElementの共通寸法情報を記載し, 名前を変更して csvファイルを保存します.



Element登録シート.csv  
(サンプルファイル)

	A	B	C
1	【共通寸法情報】		
2	Barrel radius(mm)		
3	Distance between axis(mm)		
4	Clearance(mm)		
5	【登録Element個別情報】		
6	Element Numbers		
7	【Element No.】		
8	No.1		
9	No.2		
10	No.3		
11	No.4		



例: Element登録シート\_testsample6.csv  
(名前を変更して保存する)

	A	B
1	【共通寸法情報】	
2	Barrel radius(mm)	20
3	Distance between axis(mm)	32.85
4	Clearance(mm)	0.5
5	【登録Element個別情報】	
6	Element Numbers	

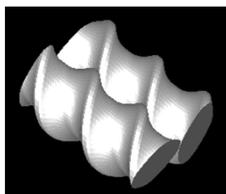
B2: バレル半径  
B3: 軸間距離  
B4: クリアランス

1つのシートには, 同じ共通寸法情報のElementのみ登録できます. (共通寸法情報が異なるElementは, 別ファイルを作成し登録します.)

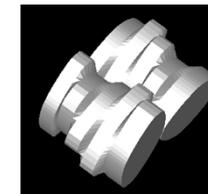
## 利用方法1: エLEMENT登録リストの作成

(2-1) 登録するELEMENTを, 従来の数値入力で個別に設定してメッシュ作成を行い, その情報ファイル(.tsmodel)をELEMENT毎に, ElementListフォルダ内に格納します.

例: Self-wiping screw の場合



例: Kneading disc の場合



スクリ構成表

Blk.No.	Type	Rev. or Nor.	Radius Screw	Tips	Disk Angle	Pitch or Disk Thick.	Turns or Disk No.	Length	Division Number		
									Top	Flank	Axis
1.	SW.	Nor.	19.5	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.

ファイル名(N): SW30\_Ftsmodel  
 ファイルの種類(T): TwinScrew Model Information File (\*.tsmodel)

フォルダの非表示

---

スクリ幾何形状パラメータ入力

Element Type: Self-wiping screw

メッシュタイプ:  順送り  逆送り

Screw radius(mm): 19.5  
 Tip number: 2  
 Screw pitch(mm): 30  
 Turns: 2.5

スクリ構成情報ファイル(.tsmodel): SW30\_F

メッシュタイプ:  2.5D解析モデル  2.5D解析用モデル  
 2D展開モデル  3D確認用モデル

編集:

Element line  Model view

スクリ構成表

Blk.No.	Type	Rev. or Nor.	Radius Screw	Tips	Disk Angle	Pitch or Disk Thick.	Turns or Disk No.	Length	Division Number		
									Top	Flank	Axis
1.	KD.	Nor.	19.5	2.	45.	8.0.	5.0.	40.	2.	10.	20.

ファイル名(N): KD5\_Ftsmodel  
 ファイルの種類(T): TwinScrew Model Information File (\*.tsmodel)

フォルダの非表示

---

スクリ幾何形状パラメータ入力

Element Type: Kneading disc

メッシュタイプ:  順送り  逆送り

Screw radius(mm): 19.5  
 Tip number: 2  
 Disk thickness(mm): 8  
 Disk number: 5  
 Phase angle: 45

スクリ構成情報ファイル(.tsmodel): KD5\_F

メッシュタイプ:  2.5D解析モデル  2.5D解析用モデル  
 2D展開モデル  3D確認用モデル

編集:

Element line  Model view

## 利用方法1: エLEMENT登録リストの作成

(2-2) 登録するELEMENTを, 従来の数値入力で個別に設定してメッシュ作成を行い, その情報ファイル(.tsmodel)をELEMENT毎に, ElementListフォルダ内に格納します.

例: STL肉厚変更を利用するELEMENTの場合 ⇒ .tsmodel と .twinmod3dの2つのファイルが必要です.

スクリユ構成表

Blk.No.	Type	Rev. or Nor.	Radius Screw	Tips	Disk Angle	Pitch or Disk Thick.	Turns or Disk No.	Length	Division Number		
									Top	Flank	Axis
1.	SW.	Nor..	19.5.	2.	0.	10.	4.	40.	2.	10.	20.

ファイル名(N): MIX\_Ftsmodel  
ファイルの種類(T): TwinScrew Model Information File (\*.tsmodel)

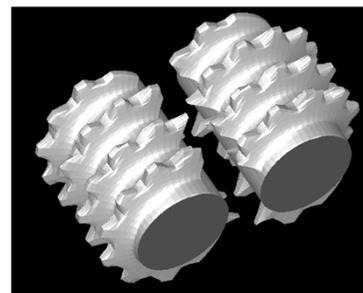
保存(S) キャンセル

スクリユ幾何形状パラメータ入力  
Element Type: Self-wiping screw  
順送り (選択) 逆送り  
Screw radius(mm): 19.5  
Tip number: 2  
Screw pitch(mm): 10  
Turns: 4

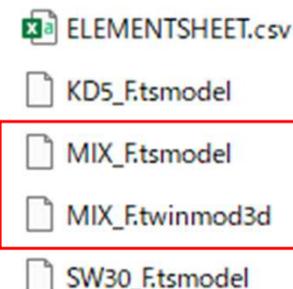
スクリユ構成情報ファイル(.tsmodel): MIX\_F  
メッシュタイプ: 2.5D 解析モデル (選択), 2.5D 解析用モデル, 2D 展開モデル, 3D 確認用モデル (選択)

編集: 上移動, 挿入, 削除, メッシュ生成, 肉厚表示, 下移動, 修正, 全削除, Element list, Model view

STL肉厚変更: MIX\_F (選択), Replaced Block No. 1, Select, Reset



### ElementListフォルダ内



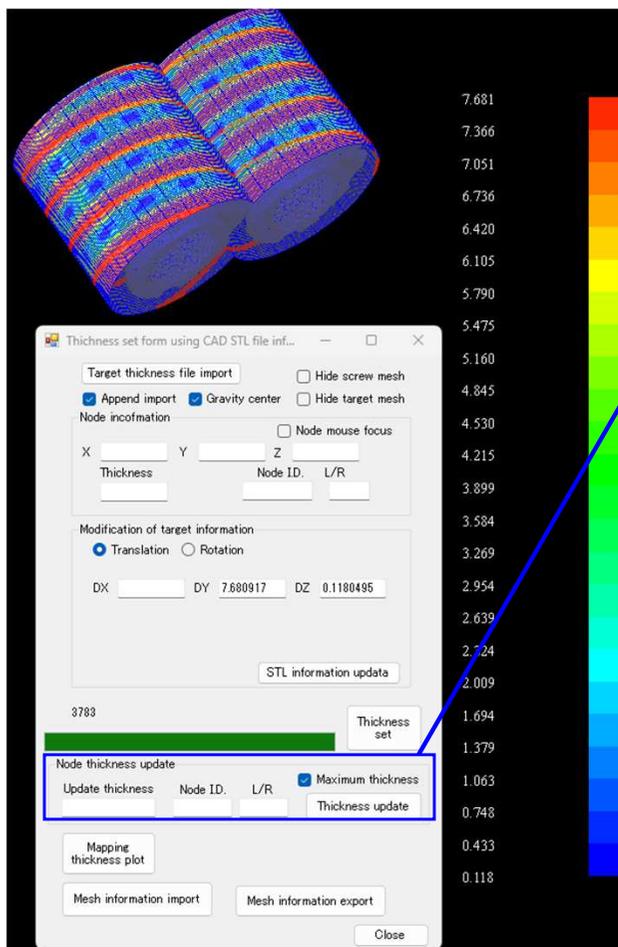
Ver.10で実装されたSTL肉厚変更方法(.twinmod3d)を利用ください. 利用方法は以下資料をご参照ください.

1. TwinScrewSimulatorVer10.0.0改良成果資料.pdf の, p.96- .
2. TSSver11スクリユELEMENTの肉厚変更方法 (STLファイル利用).pdf ← Ver.11のフォルダ内に収録.

## (Ver11 新機能) STL肉厚変更機能の改良

- \* STL肉厚変更後に手動で節点肉厚を修正したい場合に、肉厚の最大値を設定して一括で変更する機能が追加されました。

例: 変更後の肉厚最大値が7.681



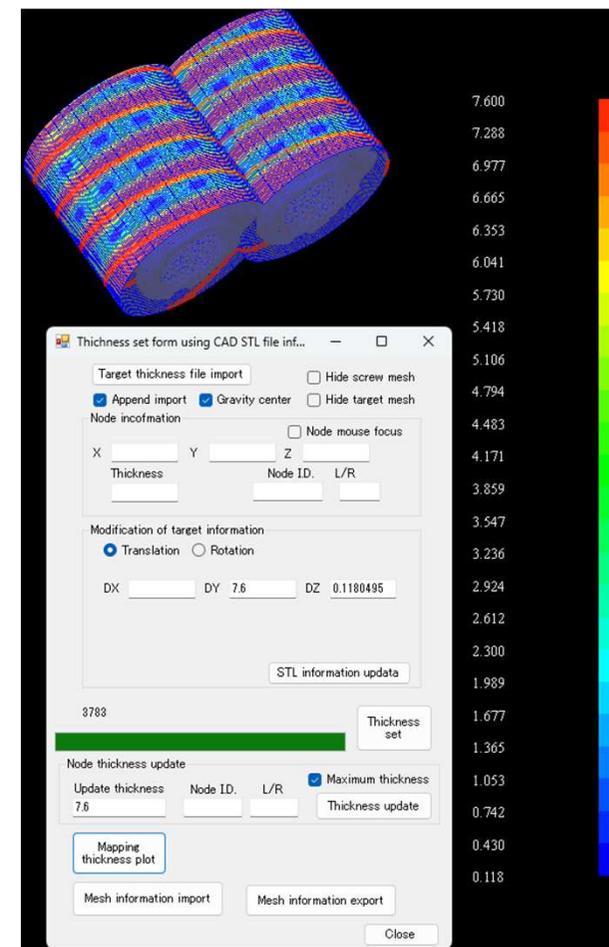
Maximum thickness にチェック後、Update thickness に最大肉厚を入力し、Thickness update ボタンをクリックすると、入力値以上の節点肉厚の場所が、一括で入力値に変更されます。

The dialog box shows the "Node thickness update" section with the following fields and controls:

Update thickness	Node ID.	L/R	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum thickness
7.6			Thickness update

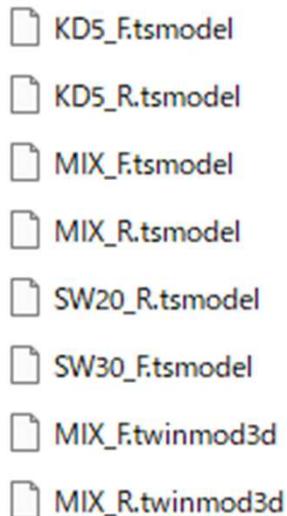
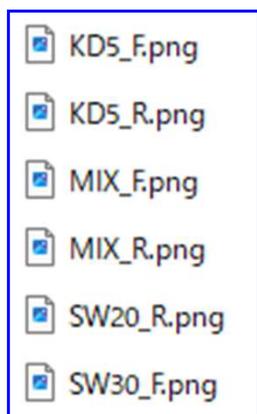


例: 肉厚最大値を一括で7.6に変更



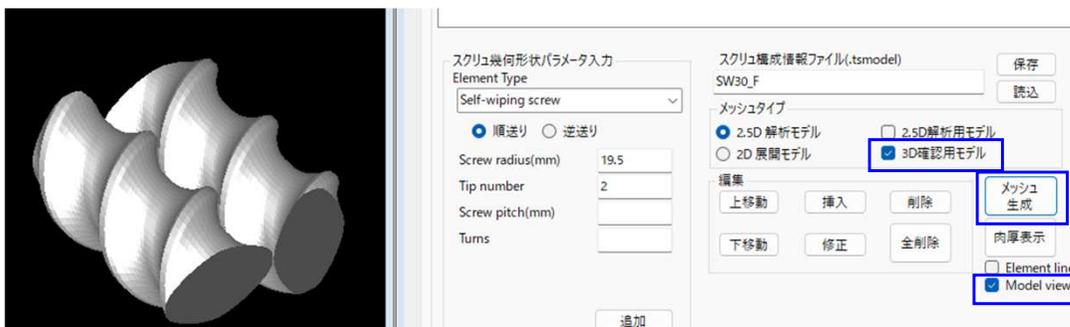
## 利用方法1: エlement登録リストの作成

(3) 登録するエlementの, アイコンに利用する画像ファイル(.png)を, エlement毎に用意して, ElementListフォルダに格納します.

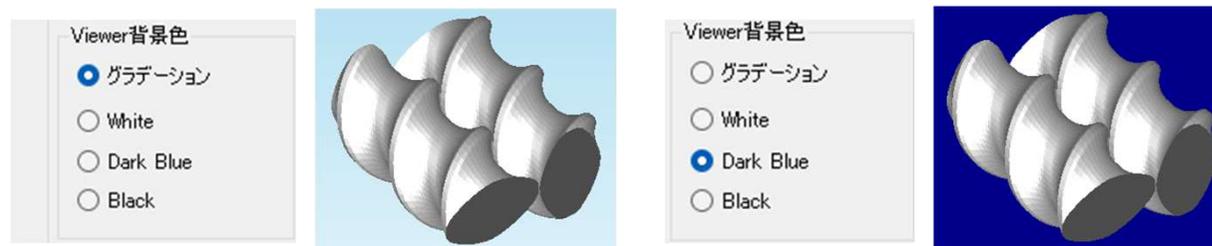


例: TSSの3Dメッシュから画像ファイルを作成する場合

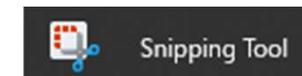
1. 3D確認用モデル, Model viewにチェックしてメッシュ生成.



2. メニュー/オプション内のViewer背景色を変更(任意).



3. スクリユモデルをキャプチャ用アプリ(e.g. windowsアプリのSnipping Tool)で抽出し, 名前を付けて .pngファイルとして保存.



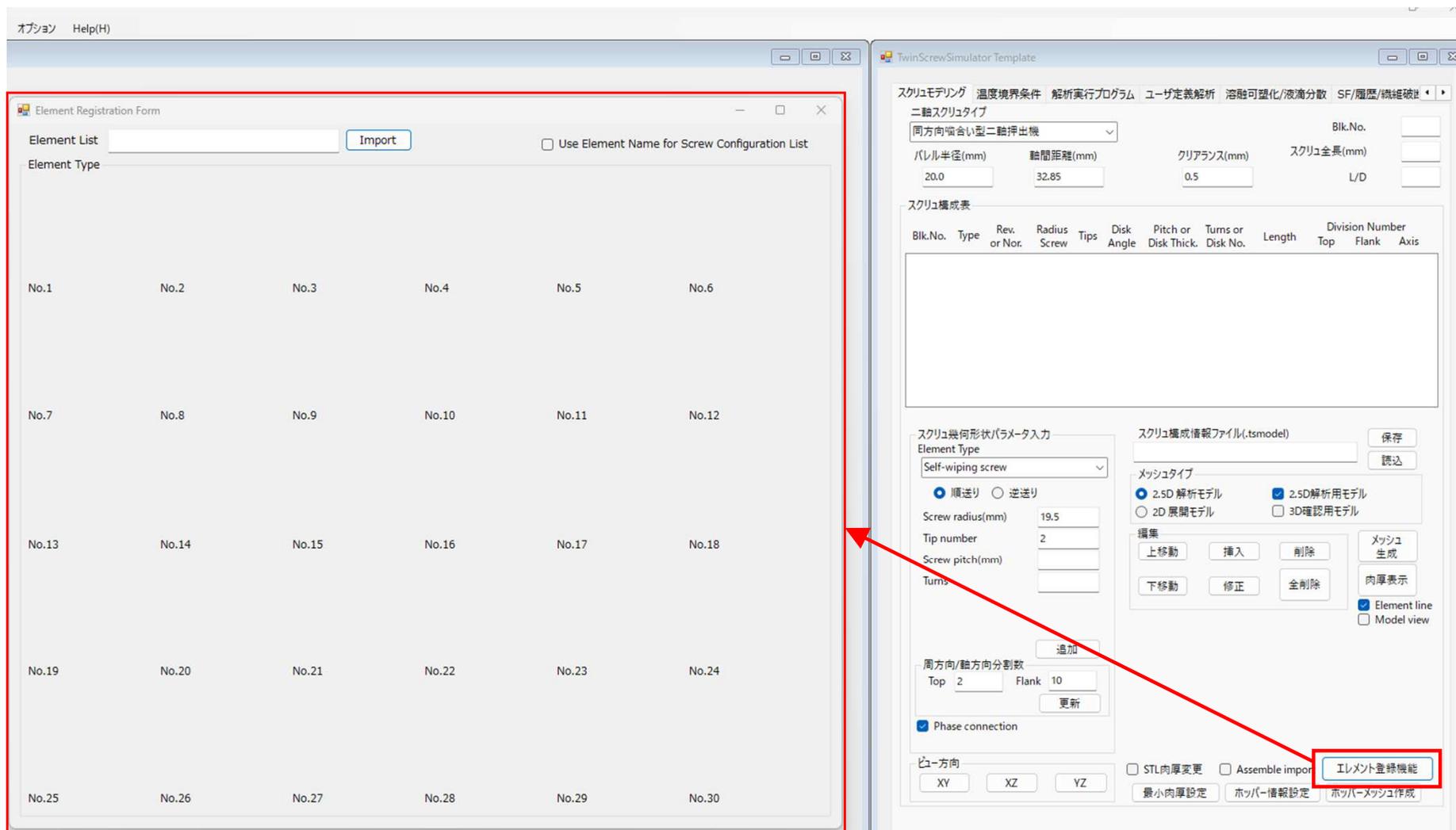
## 利用方法1: エlement登録リストの作成

- (4) 共通寸法情報を入力したシート.csv 内に, 登録Element数と, 各Elementに必要なファイル名を, 以下の所定の欄に記載して, 上書き保存します.

	A	B	C	D	E
1	【共通寸法情報】				
2	Barrel radius(mm)	20			
3	Distance between axis(mm)	32.85			
4	Clearance(mm)	0.5			
5	【登録Element個別情報】				
6	Element Numbers	6	*登録シートを含めた, 利用する全てのファイルを ElementListフォルダ内に格納してください.		
7	【Element No.】	ElementName	Picture / .png	Parameters / .tsmodel	STL information / .twinmod3d
8	No.1	SW30_F	SW30_F.png	SW30_F.tsmodel	
9	No.2	KD5_F	KD5_F.png	KD5_F.tsmodel	STL肉厚変更ファイル を使用しないElement は空欄にします.
10	No.3	KD5_R	KD5_R.png	KD5_R.tsmodel	
11	No.4	SW20_R	SW20_R.png	SW20_R.tsmodel	
12	No.5	MIX_F	MIX_F.png	MIX_F.tsmodel	MIX_F.twinmod3d
13	No.6	MIX_R	MIX_R.png	MIX_R.tsmodel	MIX_R.twinmod3d
14	No.7				
15	No.8	B8~: 登録Elementの 名前	C8~: 登録Elementの 画像ファイル (.png)	D8~: 登録Elementの 寸法情報 (.tsmodel)	E8~: STL肉厚変更ファイル (.twinmod3d)
16	No.9				
17	No.10				

## 利用方法2: エlement登録リストの使用法

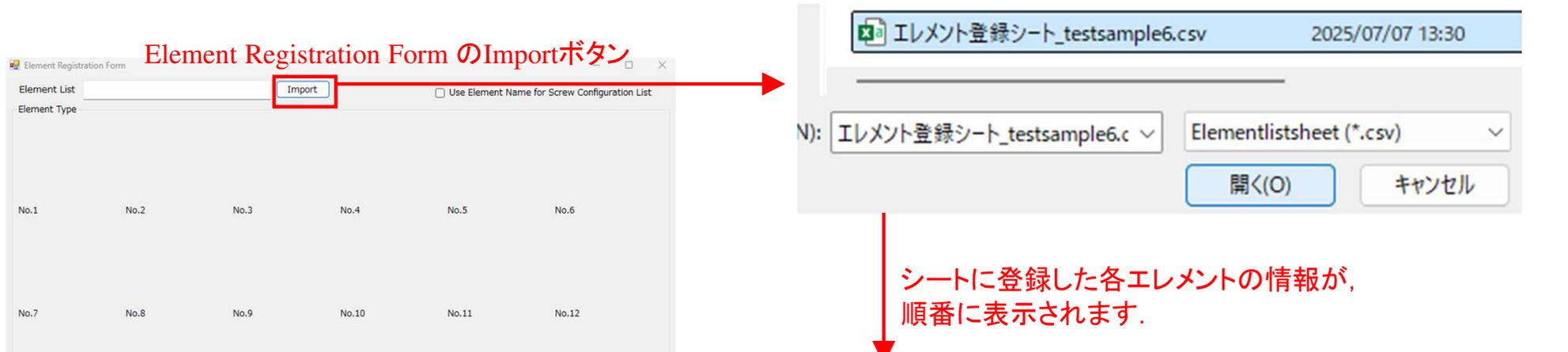
- (1) スクリュモデリング(Screw Modeling) タブ内の下部に追加された, エlement登録機能 (Element Registration) ボタンをクリックすると, エlement登録フォームが出現します.



## 利用方法2: エlement登録リストの使用方法

- (2) エlement登録フォーム (Element Registration Form) 内の Import ボタンをクリックして、利用方法1 で作成した、Element登録シート.csv を読み込みます。

Element Registration Form の Import ボタン



シートに登録した各Elementの情報が、順番に表示されます。



登録Elementの画像ファイル

登録Elementの名前

1番目      2番目      3番目      4番目      5番目      6番目

## 利用方法2: エLEMENT登録リストの使用方式

- (3) エLEMENTのアイコンをクリックすると、各ELEMENTに登録された寸法情報(.tsmodel)が、スクリュ構成表の上から順番に設定されます。本機能を利用すると、アイコンクリックにより任意のスクリュ構成を作成することが可能です。

例: クリック順① ② ③ ④ ⑤ ⑥

Element Registration Form

Element List: エLEMENT登録シート\_testsample6

Use Element Name for Screw Configuration List

Element Type

SW30\_F, KD5\_F, KD5\_R, SW20\_R, MIX\_F, MIX\_R

スクリュモデリング 温度境界条件 解析実行プログラム ユーザ定義解析 溶融可塑性/液滴分散 SF/履歴/繊維破壊

二軸スクリュタイプ  
同方向噛合い型二軸押出機

Blk.No. 1

パレル半径(mm) 20 軸間距離(mm) 32.85 クリアランス(mm) 0.5 スクリュ全長(mm) 255 L/D 6.375

スクリュ構成表

Blk.No.	Type	Rev. or Nor.	Radius Screw	Tips	Disk Angle	Pitch or Disk Thick.	Turns or Disk No.	Length	Division Number		
									Top	Flank	Axis
1.	SW	Nor.	19.5	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.
1.	KD	Nor.	19.5	2.	45.	8.0.	5.0.	40.	2.	10.	20.
1.	KD	Rev.	19.5	2.	45.	8.0.	5.0.	40.	2.	10.	20.
1.	SW	Rev.	19.5	2.	0.	20.	1.	20.	2.	10.	20.
1.	SW	Nor.	19.5	2.	0.	10.	4.	40.	2.	10.	20.
1.	SW	Rev.	19.5	2.	0.	10.	4.	40.	2.	10.	20.

(参考) Use Element Name for Screw Configuration List にチェックすると、スクリュ構成表には寸法情報ではなく、登録ELEMENT名のみが表示されます。

Use Element Name for Screw Configuration List

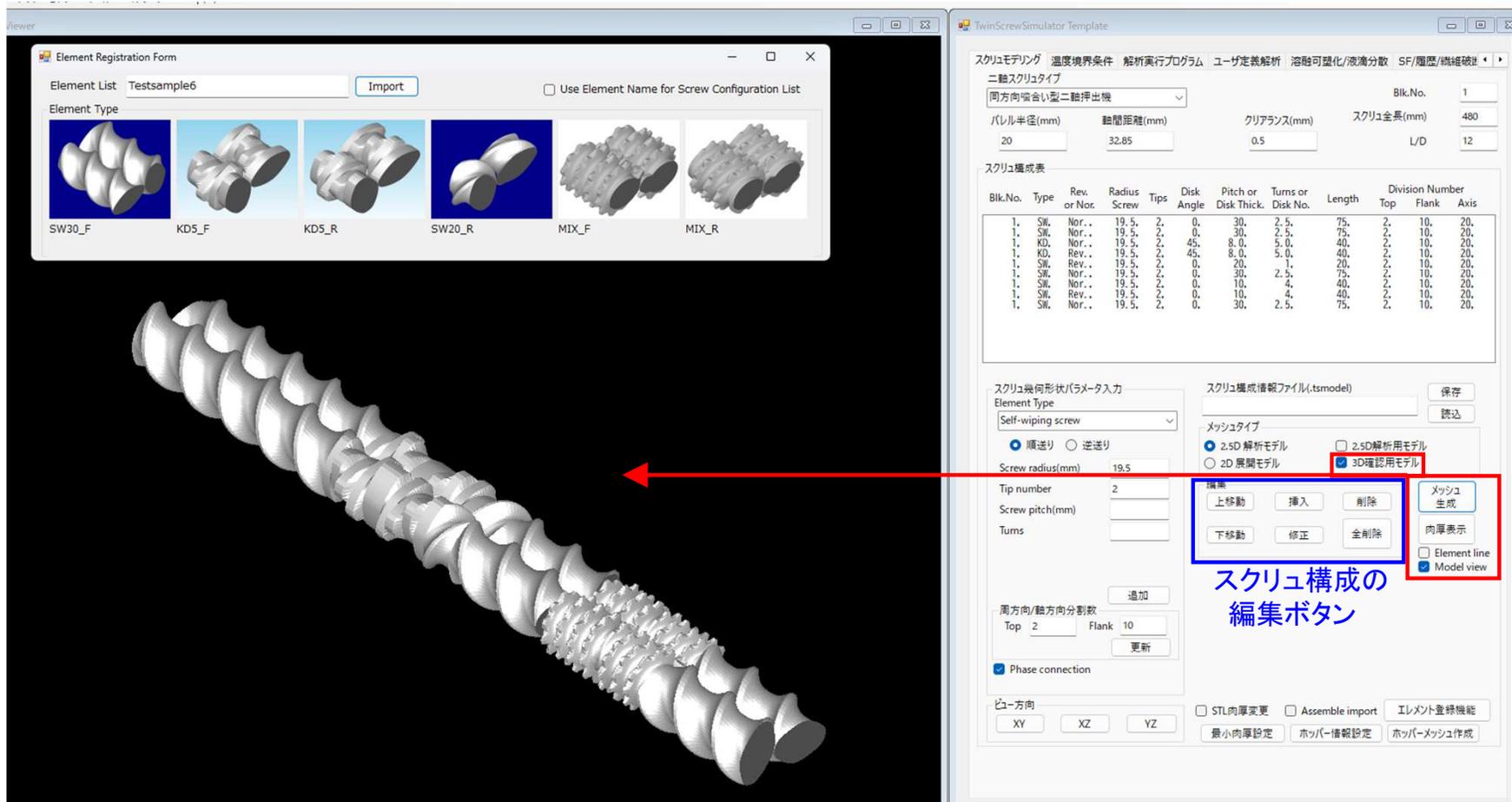
MIX\_F, MIX\_R

スクリュ構成表

Blk.No.	Type	Rev. or Nor.	Radius Screw
1.	SW30 F		
1.	KD5 F		
1.	KD5 R		
1.	SW20 R		
1.	MIX F		
1.	MIX R		

## 利用方法2: エlement登録リストの使用法

- (4) アイコンクリックで任意のスクリュ構成を作成後、メッシュ生成ボタンをクリックして、意図通りのスクリュモデルが作成されていることを確認します(図の赤色)。  
スクリュ構成を変更する場合、従来と同様に編集ボタンを利用します(図の青色)。



## 利用方法2: エLEMENT登録リストの使用方式

- (5) 意図通りのスクリュモデルが作成されていることを確認後、スクリュ構成情報ファイル(.tsmodel) を保存します。このとき、登録ELEMENTシートを作成したSystemver.11.0.0\ElementListフォルダ内ではなくて、解析を実施する作業フォルダ内で保存するようにしてください。

スクリュ構成表

Blk.No.	Type	Rev. or Nor.	Radius Screw	Tips	Disk Angle	Pitch or Disk Thick.	Turns or Disk No.	Length	Division Number		
									Top	Flank	Axis
1.	SW.	Nor..	19.5.	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.
2.	SW.	Nor..	19.5.	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.
3.	KD.	Nor..	19.5.	2.	45.	8.0.	5.0.	40.	2.	10.	20.
4.	KD.	Rev..	19.5.	2.	45.	8.0.	5.0.	40.	2.	10.	20.
5.	SW.	Rev..	19.5.	2.	0.	20.	1.	20.	2.	10.	20.
6.	SW.	Nor..	19.5.	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.
7.	SW.	Nor..	19.5.	2.	0.	10.	4.	40.	2.	10.	20.
8.	SW.	Rev..	19.5.	2.	0.	10.	4.	40.	2.	10.	20.
9.	SW.	Nor..	19.5.	2.	0.	30.	2.5.	75.	2.	10.	20.

スクリュ幾何形状パラメータ入力

Element Type  
Self-wiping screw

順送り  逆送り

Screw radius(mm) 19.5

Tip number 2

Screw pitch(mm)

Turns

スクリュ構成情報ファイル(.tsmodel)  
testsample

保存 読込

メッシュタイプ

2.5D 解析モデル  2.5D解析用モデル

2D 展開モデル  3D確認用モデル

編集

上移動 挿入 削除

下移動 修正 全削除

メッシュ生成

肉厚表示

Element line  Model view

名前を付けて保存

解析を実施する作業フォルダ内に保存する

名前を付けて保存

名前: << ver11testsample出荷 >> element

elementの検索

整理 新しいフォルダー

名前 更新日時 種類

ホーム

ギャラリー

testsample.tsmodel 2025/07/07 15:11 TSMODEL

ファイル名(N): testsample.tsmodel

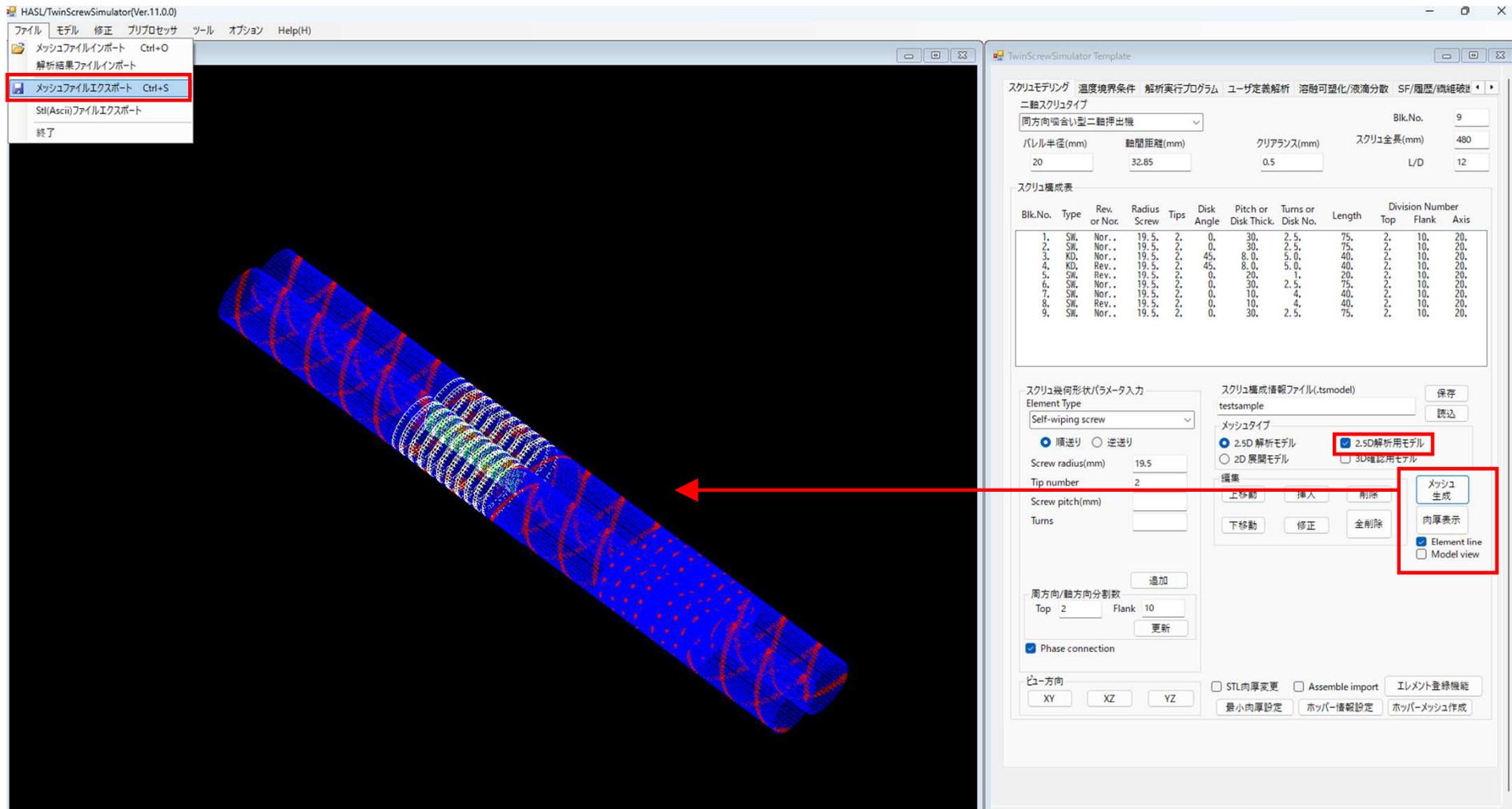
ファイルの種類(T): TwinScrew Model Information File (\*.tsmodel)

フォルダーの非表示

保存(S) キャンセル

## 利用方法2: エLEMENT登録リストの使用法

(6) 最後に, 2.5D解析用モデルでメッシュ作成後, ファイル/メッシュファイルエクスポートをクリックして解析用のメッシュファイル(.twinmsh)を保存します(従来通り). 以上で作業は終了です.

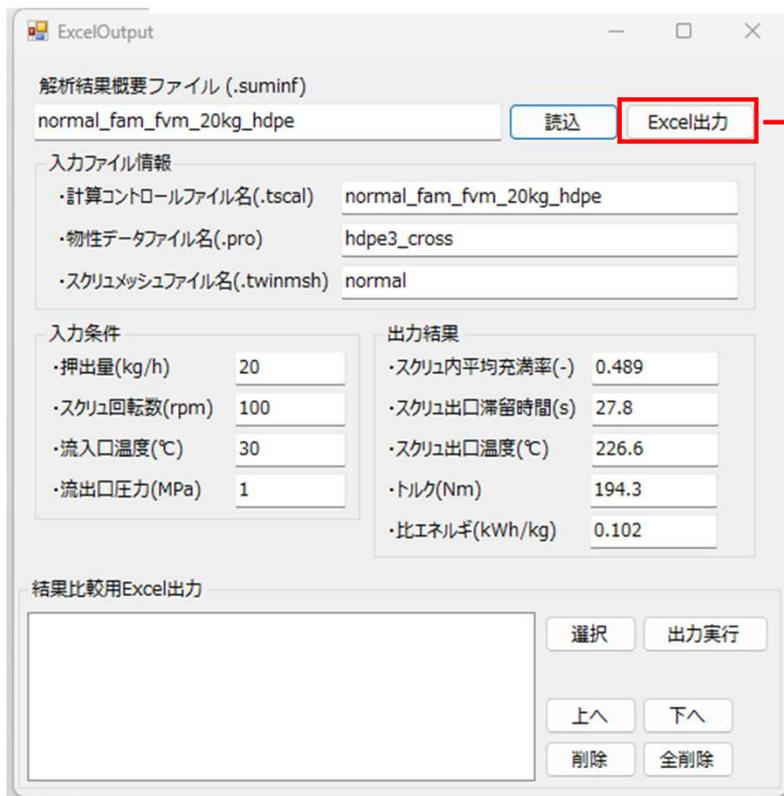


## 5. Excel を利用した結果表示および比較機能

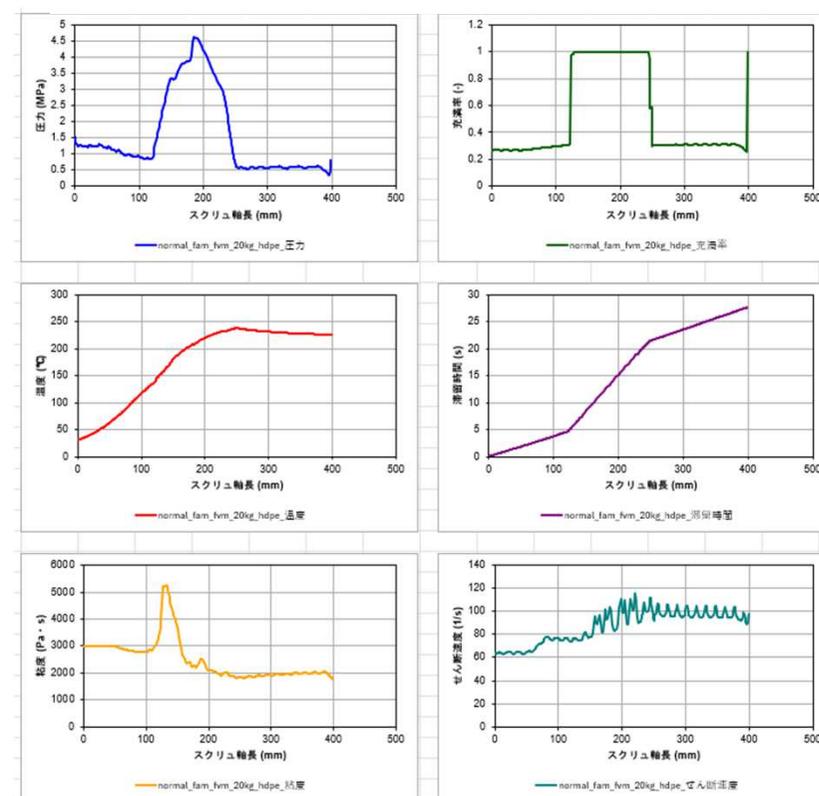
解析結果の分析や、条件間の結果比較について、解析後に自動出力される .suminf ファイルの活用を推奨していますが、グラフ自体は解析者が作成する必要がありました。

そこで本バージョンでは、GUI上のボタンクリックで自動的にExcel上でグラフが作成される機能が実装されました。利用方法について、次ページ以降に記載します。

解析結果後に結果概要を表示



スクリュ軸方向の各種物理量をExcelで自動出力

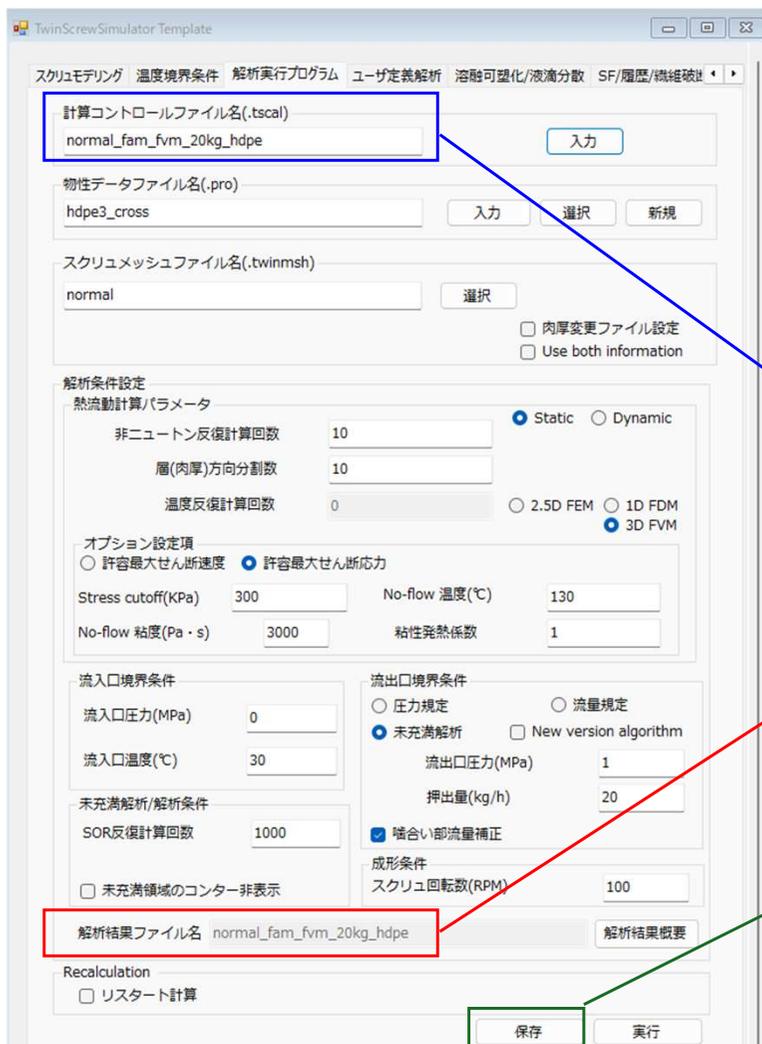


動作確認したExcelのバージョン:

1. Microsoft® Excel® for Microsoft 365 MSO 64ビット
2. Microsoft® Excel® 2016 MSO 32ビット

## 【新機能1】結果概要の確認 利用方法

(1) TSS Ver11.0.0 の解析実行プログラム (Analysis) タブで解析条件を設定し、解析実行します。



(補足) Ver11.0.0では、解析結果ファイル名の入力が不要になりました。計算コントロールファイル名(.tscal)を設定し、解析条件を設定して保存すると、解析結果ファイル名には計算コントロールファイルと同じ名前が自動で設定されます。

○解析条件のファイル名は従来通り入力する。

計算コントロールファイル名(.tscal)  
normal\_fam\_fvm\_20kg\_hdpe 入力

○解析結果のファイル名は入力しない。

解析結果ファイル名 = 計算コントロールファイル名(.tscal)

解析条件を保存すると、解析結果ファイル名には計算コントロールファイルと同じ名前が自動設定される。

解析結果ファイル名 normal\_fam\_fvm\_20kg\_hdpe

解析実行後は従来通りに結果ファイルが自動作成されます。

## 利用方法

(2) 解析後, 解析結果ファイル名の右側に追加された, 解析結果概要ボタンをクリックすると, 新規フォームが出現します.

スクリーンメッシュファイル名(.twinmsh)  
normal

解析条件設定  
熱流動計算パラメータ  
非ニュートン反復計算回数 10  
層(肉厚)方向分割数 10  
温度反復計算回数 0  
オプション設定項  
許容最大せん断速度  許容最大せん断応力  
Stress cutoff(KPa) 300 No-flow 温度(°C) 130  
No-flow 粘度(Pa · s) 3000 粘性発熱係数 1  
流入口境界条件  
流入口圧力(MPa) 0  
流入口温度(°C) 30  
未充填解析/解析条件  
SOR反復計算回数 1000  
未充填領域のコンター非表示   
解析結果ファイル名 normal\_fam\_fvm\_20kg\_hdpe 解析結果概要

解析結果ファイル名 normal\_fam\_fvm\_20kg\_hdpe 解析結果概要

ExcelOutput

解析結果概要ファイル(.suminf)

読み込 Excel出力

入力ファイル情報

- 計算コントロールファイル名(.tscal)
- 物性データファイル名(.pro)
- スクリーンメッシュファイル名(.twinmsh)

入力条件

- 押出量(kg/h)
- スクリーン回転数(rpm)
- 流入口温度(°C)
- 流出口圧力(MPa)

出力結果

- スクリーン内平均充填率(-)
- スクリーン出口滞留時間(s)
- スクリーン出口温度(°C)
- トルク(Nm)
- 比エネルギー(kWh/kg)

結果比較用Excel出力

選択 出力実行

上へ 下へ

削除 全削除

## 利用方法

- (3) 新規フォーム内の上部にある読込ボタンをクリックし、実施した解析結果ファイル名を読込むと、フォーム内に解析結果の概要がテキスト出力されます。

The screenshot shows the 'ExcelOutput' window with the following sections:

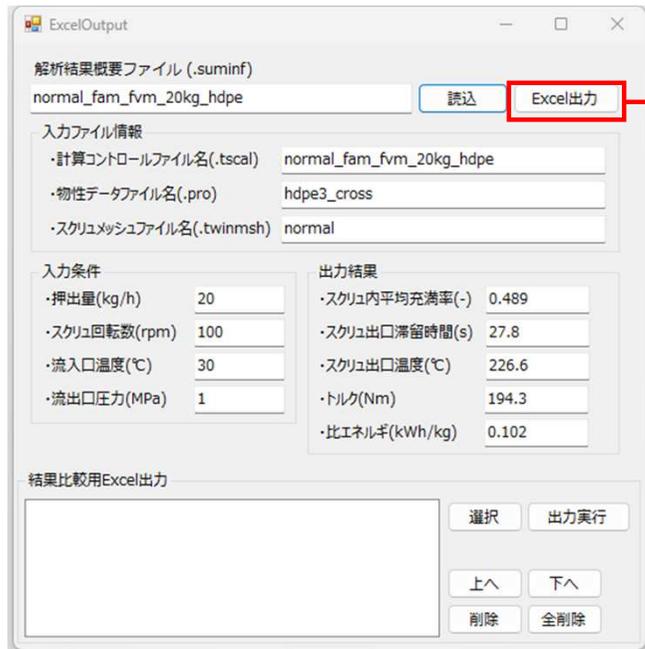
- 解析結果概要ファイル (.suminf):** A text field containing 'normal\_fam\_fvm\_20kg\_hdpe' and a red-bordered '読込' (Load) button next to it.
- Excel出力:** A button to the right of the file name field.
- 入力ファイル情報:** A section containing three input fields:
  - 計算コントロールファイル名(.tscal): normal\_fam\_fvm\_20kg\_hdpe
  - 物性データファイル名(.pro): hdpe3\_cross
  - スクリュメッシュファイル名(.twinmsh): normal
- 入力条件:** A section containing four input fields:
  - 押出量(kg/h): 20
  - スクリュ回転数(rpm): 100
  - 流入口温度(°C): 30
  - 流出口圧力(MPa): 1
- 出力結果:** A section containing five output fields:
  - スクリュ内平均充填率(-): 0.489
  - スクリュ出口滞留時間(s): 27.8
  - スクリュ出口温度(°C): 226.6
  - トルク(Nm): 194.3
  - 比エネルギー(kWh/kg): 0.102
- 結果比較用Excel出力:** A large empty text area at the bottom.
- Buttons:** '選択' (Select), '出力実行' (Execute Output), '上へ' (Up), '下へ' (Down), '削除' (Delete), and '全削除' (Delete All) are located at the bottom right.

Blue annotations on the image identify key areas:

- '読込' button: circled in red.
- '入力ファイル情報' section: bracketed and labeled '入力ファイル一覧 (入力情報)'.
- '入力条件' section: bracketed and labeled '主要な成形条件 (入力情報)'.
- '出力結果' section: bracketed and labeled '解析結果の概要 (出力情報)'.

## 利用方法

(4-1) 読込ボタンの右側のExcel出力をクリックすると、2つのシートから構成されるExcelファイルが作業フォルダ内に保存され(解析結果ファイル名.xlsx), Excelファイルが表示されます。



解析結果統括表シートには、解析結果の概要が出力されます。

Excel spreadsheet showing the 'Summary of Analysis Results' sheet. The sheet contains a table with 14 rows of data, including file names and numerical values.

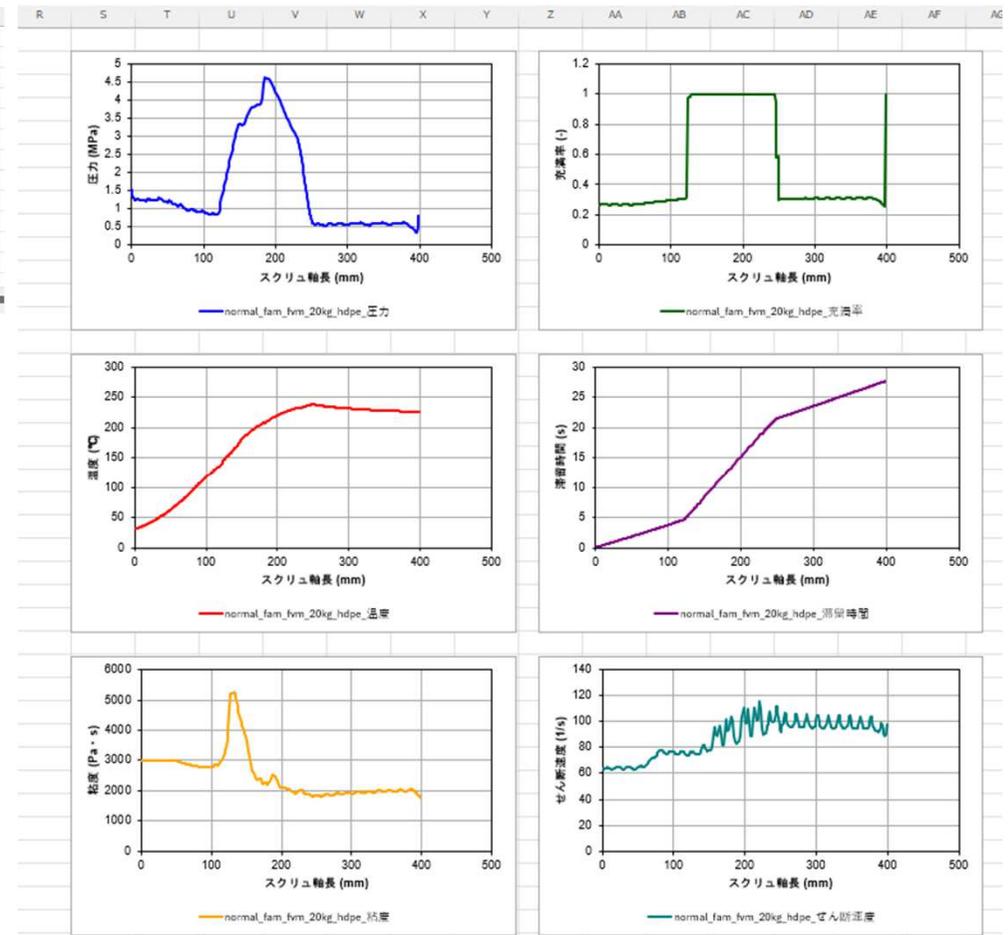
	A	B	C
1	解析結果概要ファイル	normal_fam_fvm_20kg_hdpe.suminf	
2	計算コントロールファイル名	normal_fam_fvm_20kg_hdpe.tscal	
3	物性データファイル名	hdpe3_cross.pro	
4	スクリュファイル名	normal.twinmsh	
5	押出量(kg/h)	20	
6	スクリュ回転数(rpm)	100	
7	入口温度(°C)	30	
8	流出口圧力(MPa)	1	
9	スクリュ内平均充填率(%)	0.489	
10	スクリュ出口滞留時間(s)	27.8	
11	スクリュ出口温度(°C)	226.6	
12	トルク(Nm)	194.3	
13	比エネルギー(kWh/kg)	0.102	
14			

# 利用方法

(4-2) 読込ボタンの右側のExcel出力をクリックすると, 2つのシートから構成されるExcelファイルが作業フォルダ内に保存され(解析結果ファイル名.xlsx), Excelファイルが表示されます.

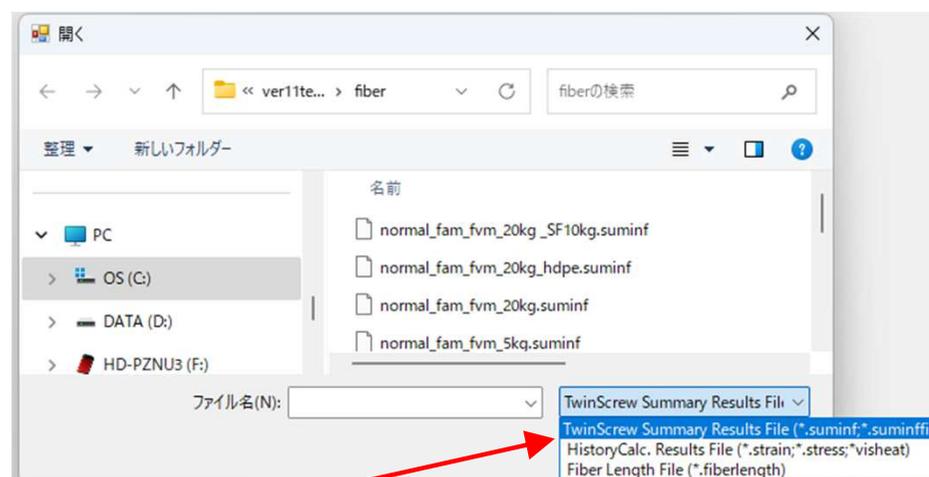
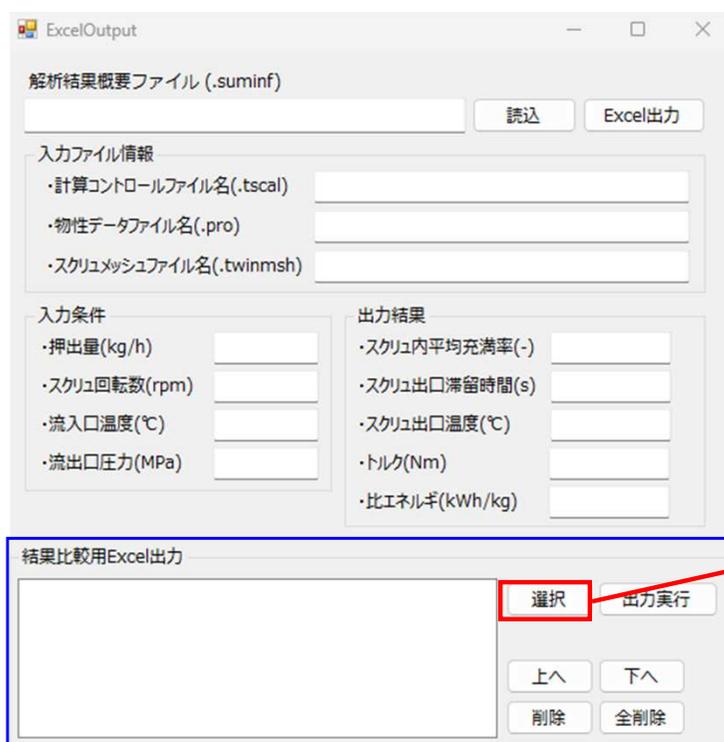
2枚目のシートには, A列からQ列に .suminf の出力結果, S列以降には軸方向の主要物理量のグラフが作成されます.

1	n	length	fillnave	voln	dti	restime	gammin	ogamave	ogammax	cvismin	onvisave	onvismax	ontempave	presave	fluxave	gamave	visave
2		mm	cc	sec	sec	1/sec	1/sec	1/sec	Pa*sec	Pa*sec	Pa*sec	C	MPa	cm3/sec	1/sec	Pa*sec	
3	1	0	0.266961	1.227206	0.045408	0.045408	100	100	100	3000	3000	3000	30.93132	1.522813	7.215008	64.15115	3000
4	2	1.25	0.26766	1.223997	0.045408	0.090815	100	100	100	3000	3000	3000	31.30597	1.384825	7.215008	63.21192	3000
5	3	2.5	0.269086	1.217515	0.045408	0.136223	100	100	100	3000	3000	3000	31.73046	1.301308	7.215008	63.40946	3000
6	4	3.75	0.271072	1.208593	0.045408	0.18163	100	100	100	3000	3000	3000	32.13867	1.266661	7.215008	63.94987	3000
7	5	5	0.27292	1.200409	0.045408	0.227038	100	100	100	3000	3000	3000	32.64039	1.241502	7.215008	64.2487	3000
8	6	6.25	0.273896	1.196131	0.045408	0.272445	100	100	100	3000	3000	3000	33.19869	1.254537	7.215008	64.40268	3000
9	7	7.5	0.273896	1.196131	0.045408	0.317853	100	100	100	3000	3000	3000	33.89612	1.290722	7.215008	64.4511	3000
10	8	8.75	0.27292	1.200409	0.045408	0.36326	100	100	100	3000	3000	3000	34.5368	1.288891	7.215008	64.38345	3000
11	9	10	0.271072	1.208593	0.045408	0.408668	100	100	100	3000	3000	3000	35.11509	1.262637	7.215008	64.15197	3000
12	10	11.25	0.269086	1.217515	0.045408	0.454075	91.96379	99.89426	100	3000	3000	3000	35.63081	1.244962	7.215008	63.6959	3000
13	11	12.5	0.267661	1.223997	0.045408	0.499483	98.01811	99.97392	100	3000	3000	3000	36.16867	1.238008	7.215008	63.32109	3000



## 【新機能2】条件間の結果比較 利用方法

- (1) 新規フォーム下部の、結果比較用Excel出力欄の選択ボタンをクリックして、確認したい条件の出力ファイルを読み込みます。これまでのバージョンの解析結果も選択することが可能です。



拡張子を変更することで、以下の3種類の出カファイルを選択可能です。

1. 解析結果概要ファイル: .suminf, .suminfill
2. 履歴解析結果ファイル: .strain, .stress, .visheat
3. 繊維長結果ファイル : .fiberlength

## 利用方法

- (2) 選択ボタンのクリックとファイル選択を複数回行なうと、リストボックスに選択したファイルが順番に追加されます。このときに複数選択するファイルの種類(拡張子)は同じ必要があります。また、比較するファイルは同じ作業フォルダ内に存在する必要があります。

The screenshot shows the 'ExcelOutput' window with the following sections:

- 解析結果概要ファイル (.suminf)**: A text input field with '読込' and 'Excel出力' buttons.
- 入力ファイル情報**: Three input fields for '計算コントロールファイル名(.tscal)', '物性データファイル名(.pro)', and 'スクリュメッシュファイル名(.twinmsh)'.
- 入力条件**: Four input fields for '押出量(kg/h)', 'スクリュ回転数(rpm)', '流入口温度(°C)', and '流出口圧力(MPa)'.
- 出力結果**: Four input fields for 'スクリュ内平均充填率(-)', 'スクリュ出口滞留時間(s)', 'スクリュ出口温度(°C)', and 'トルク(Nm)'. Below these is a field for '比エネルギー(kWh/kg)'.
- 結果比較用Excel出力**: A list box containing three files: 'normal\_fam\_fvm\_5kg (.suminf)', 'normal\_fam\_fvm\_20kg (.suminf)', and 'normal\_fam\_fvm\_40kg (.suminf)'. To the right are buttons for '選択', '出力実行', '上へ', '下へ', '削除', and '全削除'. Below the list box is the text '.suminf ファイルの選択例'.

This close-up shows the '結果比較用Excel出力' section with a list box containing four files: 'normal\_his\_fvm\_10kg (.strain)', 'normal\_his\_fvm\_40kg (.strain)', 'normal\_his\_imp\_stan\_10kg (.strain)', and 'normal\_his\_imp\_stan\_40kg (.strain)'. The text below the list box is '.strain ファイルの選択例'.

This close-up shows the '結果比較用Excel出力' section with a list box containing three files: 'normal\_fam\_fvm\_5kg (.fiberlength)', 'normal\_fam\_fvm\_20kg (.fiberlength)', and 'normal\_fam\_fvm\_40kg (.fiberlength)'. The text below the list box is '.fiberlength ファイルの選択例'.

## 利用方法

(3-1) 複数ファイルを選択後、出力実行ボタンをクリックすると、選択したファイルの内容をまとめた Excelファイルが作業フォルダ内に保存された後、Excel ファイルがディスプレイに表示されます。

ExcelOutput

解析結果概要ファイル (.suminf)

読み Excel出力

入力ファイル情報

- ・計算コントロールファイル名(.tscal)
- ・物性データファイル名(.pro)
- ・スクリュメッシュファイル名(.twinmsh)

入力条件

- ・押出量(kg/h)
- ・スクリュ回転数(rpm)
- ・流入口温度(°C)
- ・流出口圧力(MPa)

出力結果

- ・スクリュ内平均充填率(-)
- ・スクリュ出口滞留時間(s)
- ・スクリュ出口温度(°C)
- ・トルク(Nm)
- ・比エネルギー(kWh/kg)

結果比較用Excel出力

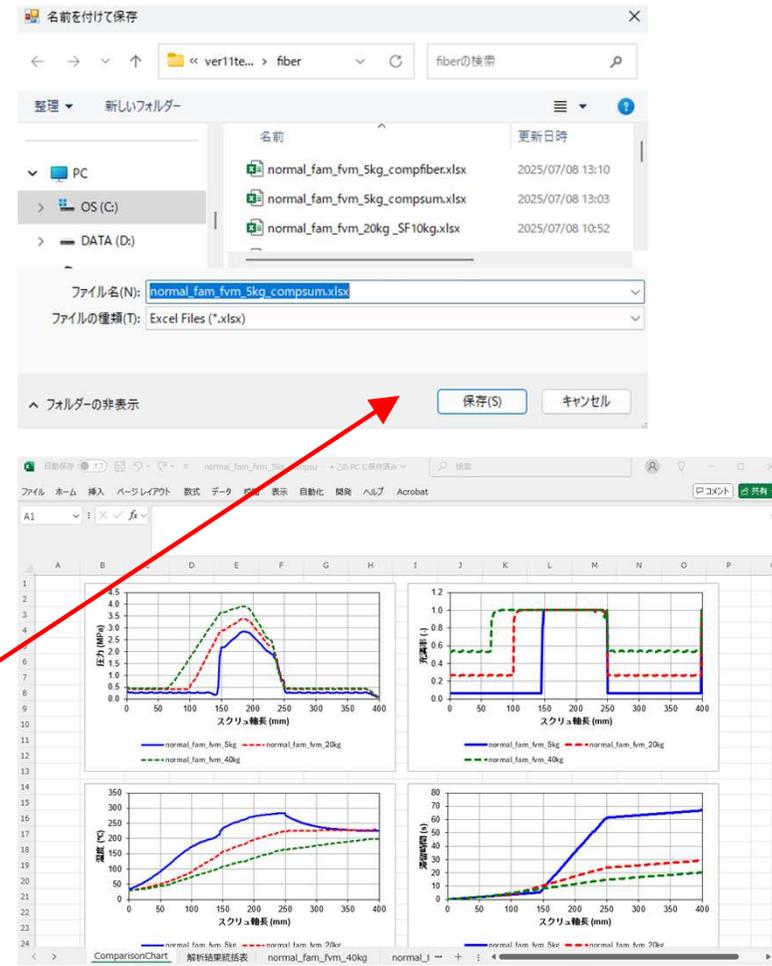
- normal\_fam\_fvm\_5kg (.suminf)
- normal\_fam\_fvm\_20kg (.suminf)
- normal\_fam\_fvm\_40kg (.suminf)

.suminf ファイルの選択例

選択 出力実行

上へ 下へ

削除 全削除



# 利用方法

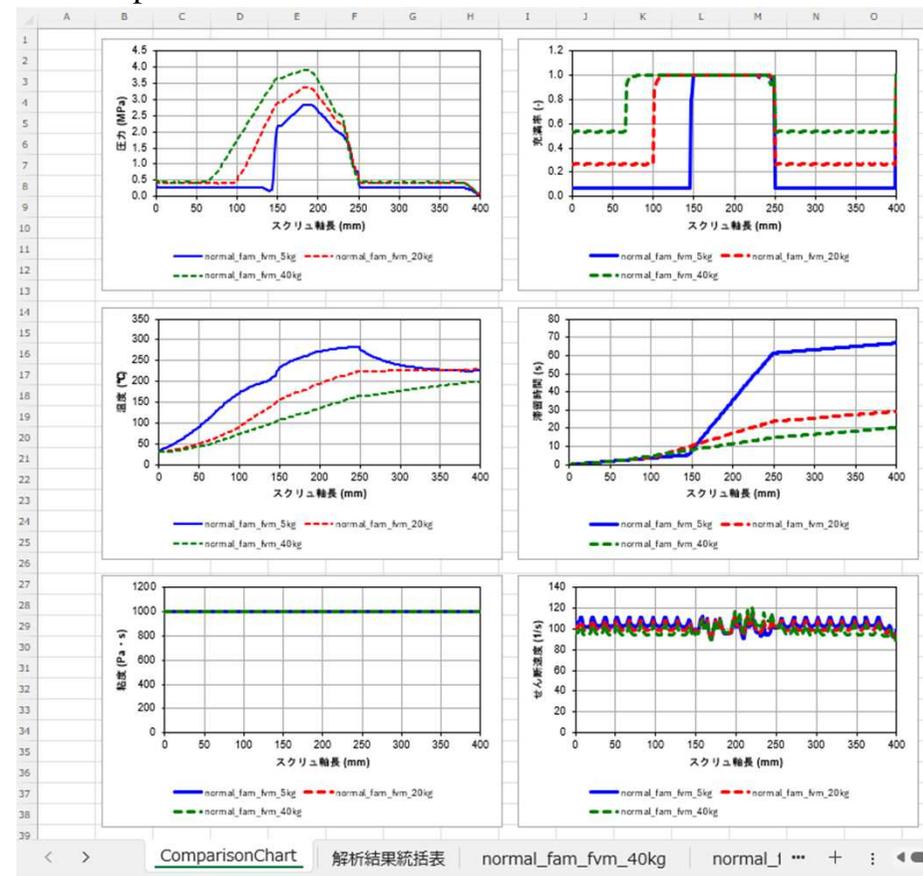
(3-2) 複数ファイルを選択後、出力実行ボタンをクリックすると、選択したファイルの内容をまとめた Excelファイルが作業フォルダ内に保存された後、ファイル内容がディスプレイに表示されます。

## .suminf ファイルの実施例

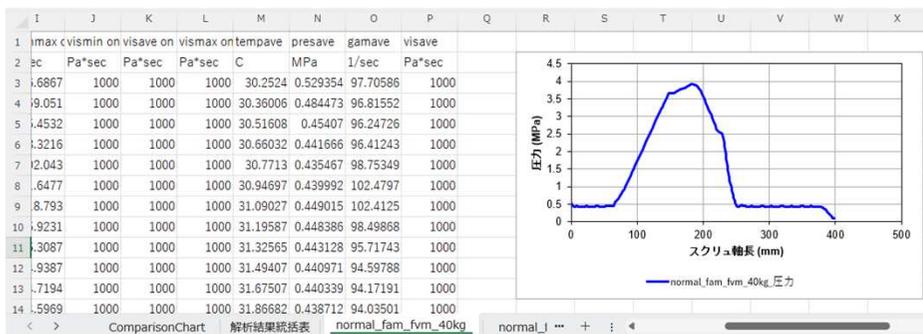
解析結果統括表シート: 各条件の結果概要

	A	B	C	D
1	Excelシート名	normal_fam_fvm_5kg	normal_fam_fvm_20kg	normal_fam_fvm_40kg
2	計算コントロールファイル名	normal_fam_fvm_5kg.tscal	normal_fam_fvm_20kg.tscal	normal_fam_fvm_40kg.tscal
3	物性データファイル名	vis1000.pro	vis1000.pro	vis1000.pro
4	スクリーファイル名	normal.twinmsh	normal.twinmsh	normal.twinmsh
5	押出量(kg/h)	5	20	40
6	スクリー回転数(rpm)	100	100	100
7	入口温度(°C)	30	30	30
8	流出口圧力(MPa)	0.1	0.1	0.1
9	スクリー内平均充填率(%)	0.273	0.516	0.734
10	スクリー出口滞留時間(s)	67.4	29.4	20.3
11	スクリー出口温度(°C)	226.1	228.8	199.5
12	トルク(Nm)	87.7	128.6	164.4
13	比エネルギー(kWh/kg)	0.184	0.067	0.043
14				

ComparisonChartシート: 各条件の主要物性の比較グラフ



各ファイル名のシート: 各条件の.suminf ファイルと主要グラフ



# 利用方法

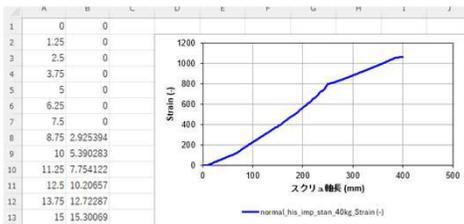
(3-3) 複数ファイルを選択後、出力実行ボタンをクリックすると、選択したファイルの内容をまとめた Excelファイルが作業フォルダ内に保存された後、ファイル内容がディスプレイに表示されます。

## .strain ファイルの実施例

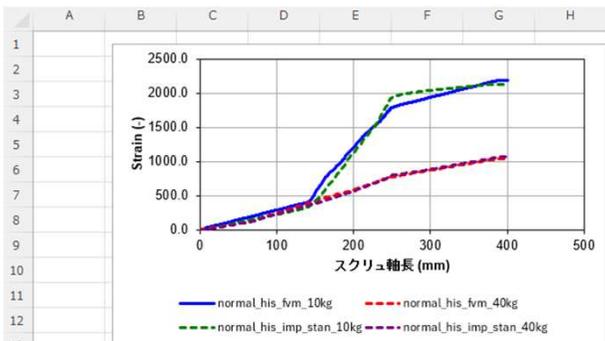
解析結果統括表シート: 各条件の結果概要

	A	B	C	D	E
1	Excelシート名	normal_his_fvm_10kg	normal_his_fvm_40kg	normal_his_imp_stan_10kg	normal_his_imp_stan_40kg
2	履歴構築ファイル名	normal_his_fvm_10kg.strain	normal_his_fvm_40kg.strain	normal_his_imp_stan_10kg.strain	normal_his_imp_stan_40kg.strain
3	物性データファイル名	vis1000.pro	vis1000.pro	vis1000.pro	vis1000.pro
4	スクリーンファイル名	normal.twinmsh	normal.twinmsh	normal.twinmsh	normal.twinmsh
5	押出量(kg/h)	10	40	10	40
6	スクリーン回転数(rpm)	100	100	100	100
7	入口温度(°C)	30	30	30	30
8	流出口圧力(MPa)	0.1	0.1	0.1	0.1
9	スクリーン出口の履歴構築値	2183.6	1043.6	2121.3	1062.0

各ファイル名のシート: 各条件の.strain ファイルとグラフ



ComparisonChartシート: 各条件のひずみの比較グラフ

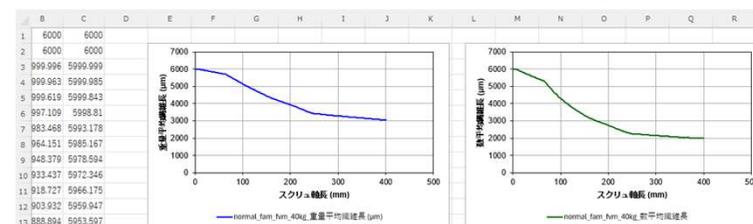


## .fiberlength ファイルの実施例

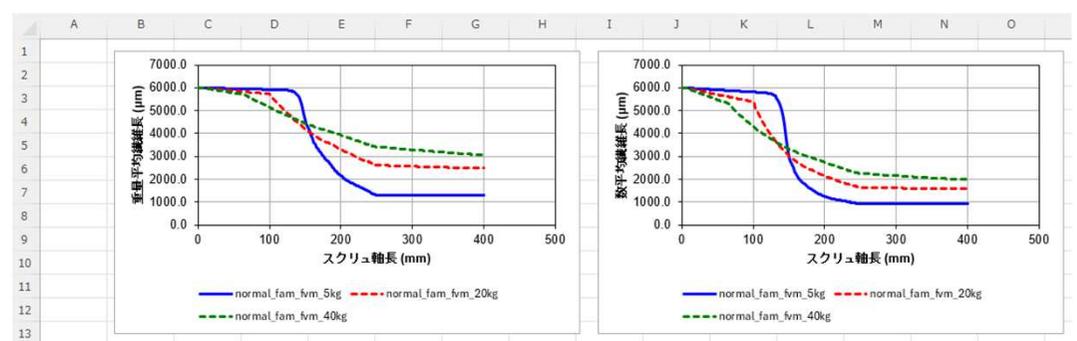
解析結果統括表シート: 各条件の結果概要

	A	B	C	D
1	Excelシート名	normal_fam_fvm_5kg	normal_fam_fvm_20kg	normal_fam_fvm_40kg
2	繊維長ファイル名	normal_fam_fvm_5kg.fiberlength	normal_fam_fvm_20kg.fiberlength	normal_fam_fvm_40kg.fiberlength
3	物性データファイル名	vis1000.pro	vis1000.pro	vis1000.pro
4	スクリーンファイル名	normal.twinmsh	normal.twinmsh	normal.twinmsh
5	押出量(kg/h)	5	20	40
6	スクリーン回転数(rpm)	100	100	100
7	入口温度(°C)	30	30	30
8	流出口圧力(MPa)	0.1	0.1	0.1
9	初期繊維長	6000	6000	6000
10	C <sub>0</sub>	0.002	0.002	0.002
11	C	0.1	0.1	0.1
12	S	0.25	0.25	0.25
13	繊維投入位置(mm)	0	0	0
14	スクリーン出口の数字平均繊維長(μm)	921.2	1571.0	1986.2
15	スクリーン出口の重量平均繊維長(μm)	1301.0	2478.9	3071.0

各ファイル名のシート: 各条件の.fiberlength ファイルとグラフ



ComparisonChartシート: 各条件の繊維長の比較グラフ

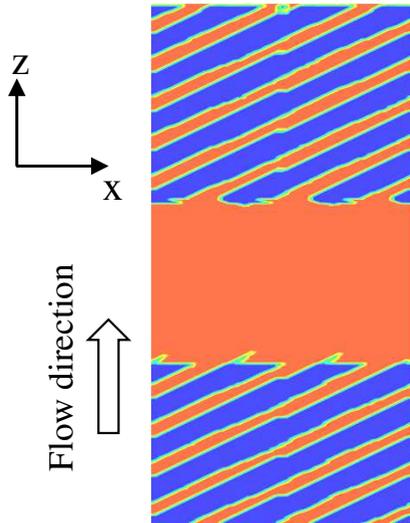


## 6. 解析結果の簡易抽出機能

2D展開図の解析結果 (.twinres2d) および肉厚断面の解析結果 (.crosscont)について、指定した断面内の解析値を簡便に抽出する機能が実装されました。

2D展開図 (.twinres2d)

例: 充填率分布 (-)

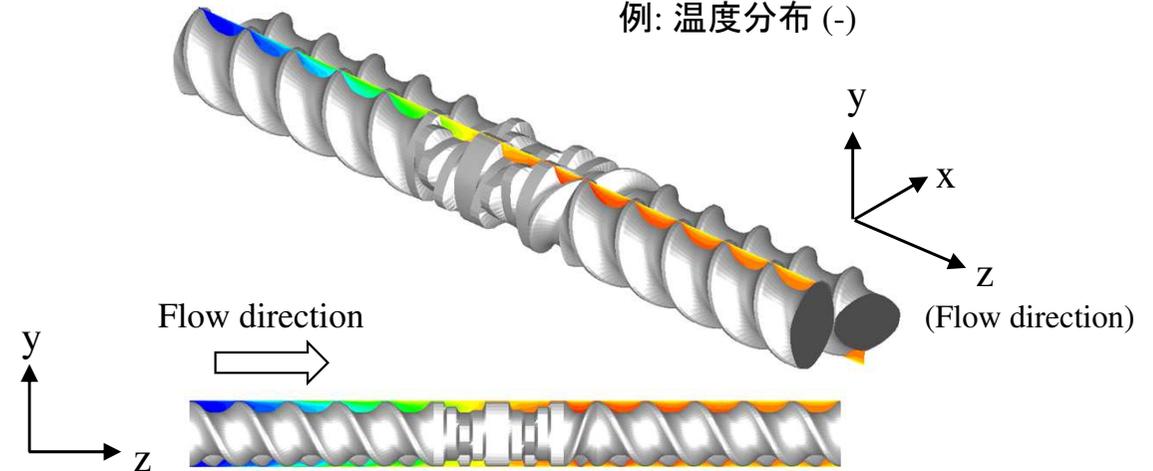


結果抽出

	x座標	z座標	充填率(結果)
	A	B	C
1	0	0	1
2	3.564003	0	1
3	6.181997	0	1
4	8.799984	0	1
5	11.41798	0	1

肉厚断面の解析結果 (.crosscont)

例: 温度分布 (-)



結果抽出

	x座標	y座標	z座標	温度(結果)
	A	B	C	D
1	-16.425	19.5	0	30
2	-16.425	19.5	1.25	34.35104
3	-16.425	18.633	2.5	36.07012
4	-16.425	17.19541	3.75	35.15078
5	-16.425	16.0089	5	35.32004
6	-16.425	15.0476	6.25	36.99086
7	-16.425	14.2865	7.5	39.4537

## 利用方法: 2D展開図 (.twinres2d)

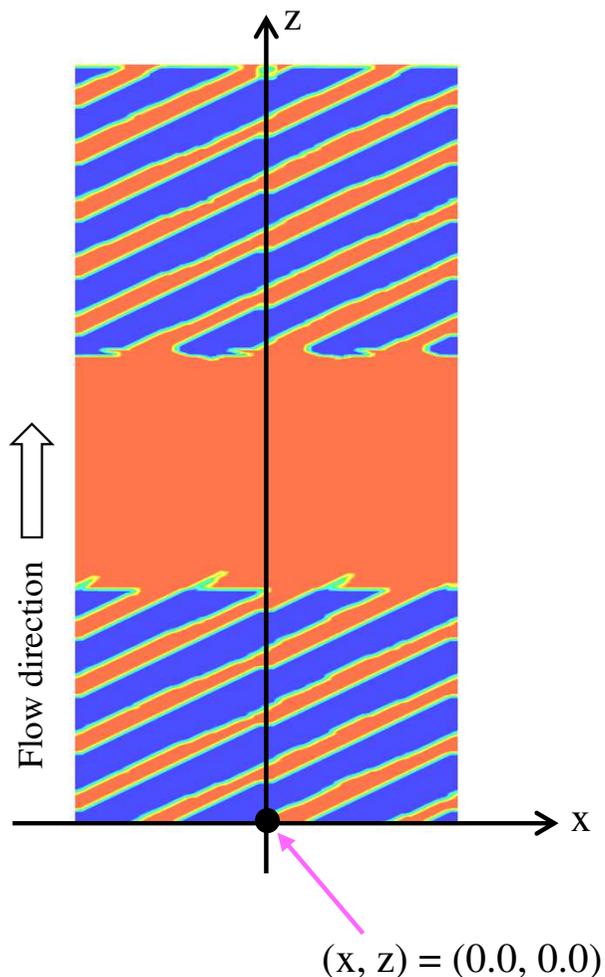
- (1) 従来通りの方法で、解析結果ファイルインポートから .twinres2dファイルを読み込み、出力させたい物理量をコンター図で描画します。

The image shows two screenshots from the HASL/TwinScrewSimulator software. The left screenshot shows the 'File' menu with '解析結果ファイルインポート' (Import Analysis Result File) selected. Below it, a file list shows two files: 'normal\_20kg\_hdpe.twinres2d' and 'normal\_fam\_fvm\_20kg.twinres2d'. The 'File Name' field contains 'normal\_20kg\_hdpe.twinres2d' and the file type is set to '2D result (\*.twinres2d)'. The right screenshot shows the 'PostProcessor' window with a contour plot titled 'コンター図' (Contour Plot). The plot displays a color-coded distribution of 'Fill ratio' across a vertical cross-section. A color scale on the right ranges from 0.000 (blue) to 1.000 (red). The 'PostProcessor' control panel on the right includes options for 'Output ID', 'Content', 'Color Control', 'Reflection Effect', and 'Projection Effect'. The 'Draw' button is highlighted with a red box.



## 利用方法: 2D展開図 (.twinres2d)

- (3) 出力された.2dresinf ファイルをExcelファイル(コンマ区切り)で開くと、各座標に対する物理量を確認できます。



	x座標	z座標	充填率(結果)
	A	B	C
1	0	0	1
2	3.564003	0	1
3	6.181997	0	1
4	8.799984	0	1
5	11.41798	0	1
6	14.03598	0	1
7	16.65398	0	1
8	19.27197	0	1
9	21.88996	0	0.41093
10	24.50795	0	0
11	27.12594	0	0
12	29.74394	0	0
13	32.36194	0	0
14	34.97994	0	0
15	37.59793	0	0
16	40.21593	0	0
17	42.83392	0	0

前半は xが正の領域

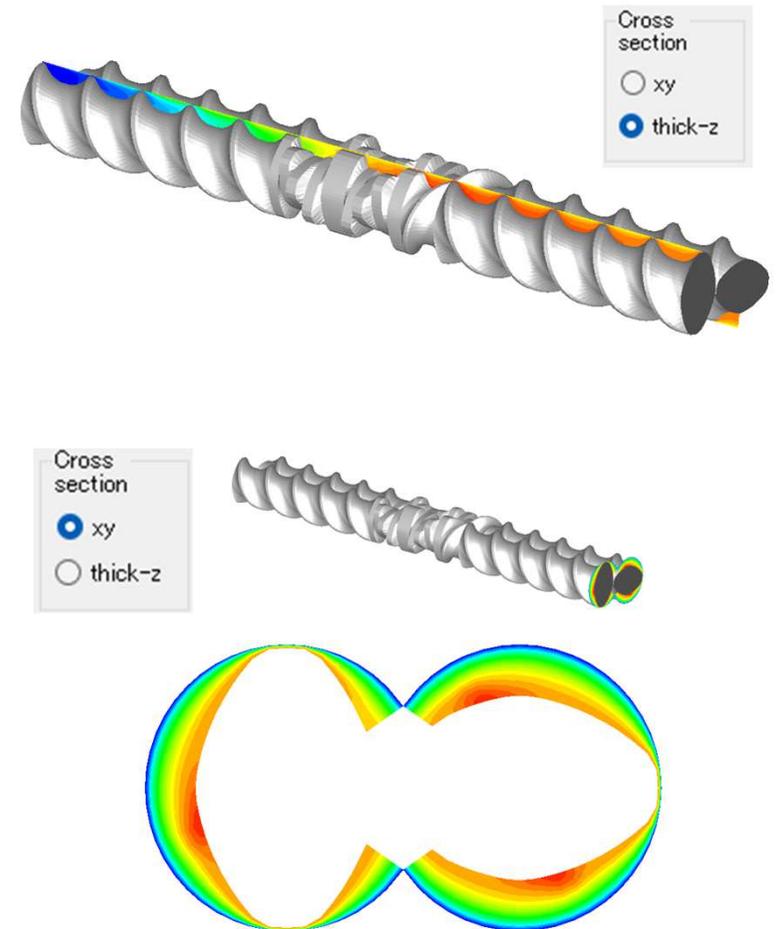
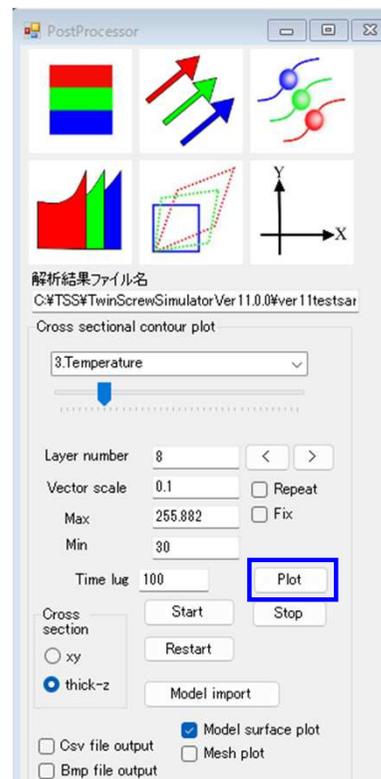
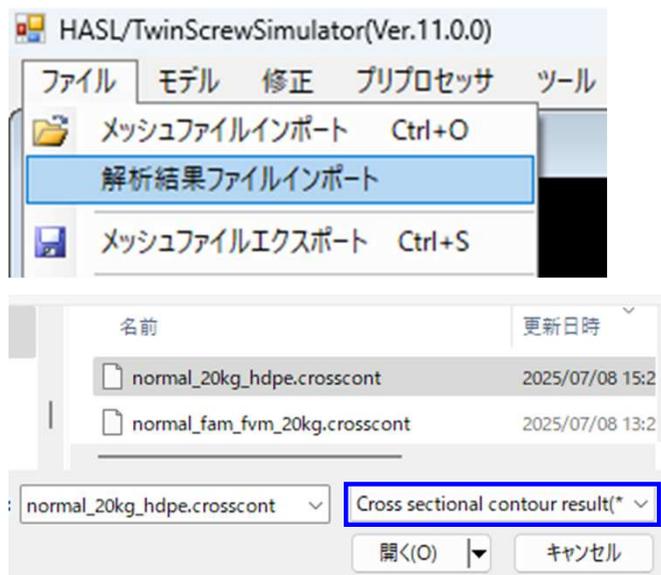
	x座標	z座標	充填率(結果)
	A	B	C
11887	79.48581	400	1
11888	82.10388	400	1
11889	84.72187	400	1
11890	87.3398	400	1
11891	89.95781	400	1
11892	92.5758	400	1
11893	95.19382	400	1
11894	97.81181	400	1
11895	101.3758	400	1
11896	-101.376	0	0
11897	-97.8118	0	0
11898	-95.1938	0	0
11899	-92.5758	0	0
11900	-89.9578	0	0
11901	-87.3398	0	0
11902	-84.7218	0	0
11903	-82.1038	0	0
11904	-79.4858	0	0
11905	-76.8678	0	0
11906	-74.2498	0	0

xが正の  
領域終了

後半は xが負の領域

## 利用方法: 肉厚断面の解析結果 (.crosscont)

(1) 従来通りの方法 (TwinScrewSimulatorVer10.0.0改良成果資料.pdf, p.3-) で、解析結果ファイルインポートから .crosscont ファイルを読み込み、Plotボタンをクリックして出力させたい物理量を描画します。



## 利用方法: 肉厚断面の解析結果 (.crosscont)

- (2) 出力させたい物理量を描画後, Csv file output をチェックします. チェック後にPlotボタンをクリックすると, 作業フォルダ内に結果が抽出された, .crossresinf ファイルが出力されます.

The image shows the PostProcessor software interface. On the left, the 'Cross sectional contour plot' settings are visible, with '3.Temperature' selected. The 'Layer number' is set to 305. The 'Plot' button is highlighted with a red box. Below the settings, the 'Csv file output' checkbox is checked and highlighted with a red box, with the text 'Csv file output' written in red next to it. On the right, a file list shows a file named 'normal\_20kg\_hdpe\_3\_z305.crossresinf' with a date of '2025/07/0...'. The file name is highlighted with a red box. Three arrows point from the file name to the plot area: a green arrow from 'normal\_20kg\_hdpe\_3' to the plot, a pink arrow from 'z305' to the plot, and a blue arrow from 'crossresinf' to the plot. The plot area shows a 3D model of a screw with a cross-section highlighted in a rainbow color scale. To the right of the plot is a vertical color scale legend with numerical values ranging from 216.715 to 231.758. On the far right, another screenshot of the software interface shows the 'Layer number' field set to 305, with a blue box around it and a blue arrow pointing to the 'Plot' button.

解析結果  
ファイル名

描画内容に  
相当するID番号

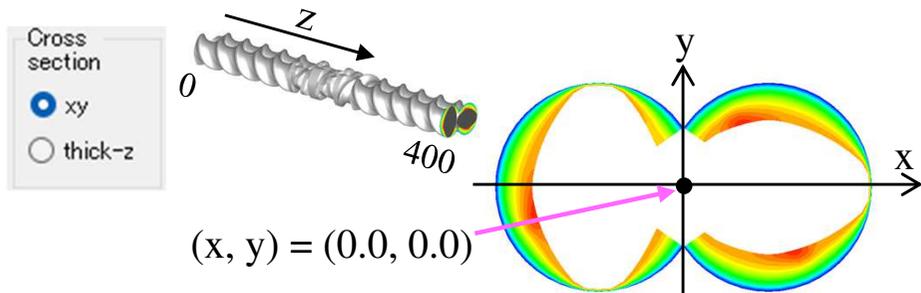
断面位置  
を示す番号

Csv file output

231.758  
230.087  
228.415  
226.744  
225.072  
223.401  
221.729  
220.058  
218.386  
216.715

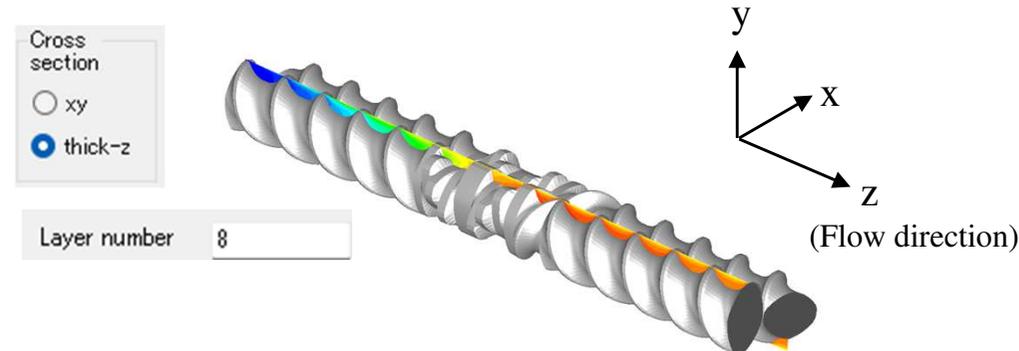
## 利用方法: 肉厚断面の解析結果 (.crosscont)

(3) 出力された .crossresinf ファイルをExcelファイル(コンマ区切り)で開くと, 各座標に対する物理量を確認できます.



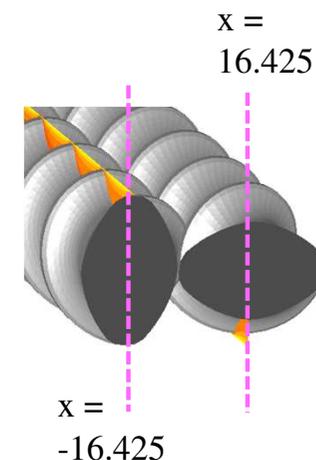
x座標 y座標 物理量 z座標(固定)

	A	B	C	D
1	-5.17088	7.81887	233.5273	400
2	-6.32291	10.10208	232.9194	400
3	-7.26462	11.93807	233.4231	400
4	-8.42059	13.86414	233.9731	400
5	-9.84461	15.8865	234.334	400
6	-11.6024	17.99809	234.5361	400
7	-13.8797	19.33318	234.6306	400
8	-16.425	19.5	234.6374	400
9	-18.9703	19.33318	234.5979	400
10	-21.2476	17.99809	234.5537	400
11	-23.0054	15.8865	234.5152	400
12	-24.4295	13.86411	234.4829	400
13	-25.5854	11.93804	234.4561	400
14	-26.5271	10.10208	234.4342	400
15	-27.2969	8.342235	234.4179	400



x座標 y座標 z座標 物理量

	A	B	C	D
1	-16.425	19.5	0	30
2	-16.425	19.5	1.25	34.35104
3	-16.425	18.633	2.5	36.07012
4	-16.425	17.19541	3.75	35.15078
5	-16.425	16.0089	5	35.32004
6	-16.425	15.0476	6.25	36.99086
7	-16.425	14.2865	7.5	39.4537
8	-16.425	13.70365	8.75	41.58161
9	-16.425	13.28119	10	42.21964
10	-16.425	13.00575	11.25	39.85014
11	-16.425	12.86846	12.5	36.10426
12	-16.425	12.85	13.75	34.80988
13	-16.425	12.85	15	35.41096
14	-16.425	12.85	16.25	36.00746
15	-16.425	12.86846	17.5	36.57721



## 7. スクリュ軸方向のトルク出力機能

従来は解析で算出されたトルク (Nm) およびパワー(W)は、解析結果の最後に出力されていましたが、本バージョンではスクリュ軸方向のトルクおよびパワーが自動出力されます。

解析結果ファイル名.twinlog (従来通り)

解析結果ファイル名.torqueinf (新規, コンマ区切り)

```

**** Thermal Flow Calculation Start ****
*****
**** Static Calculation ****
*****

----- Mesh Information -----
Node Number : 23180
Element Number : 23104

iteration = 1 / 2
flowoutlet= 7.15000784632724 cc/s : Mass flux= 20.0000016756773 kg/h
iteration = 2 / 2
flowoutlet= 7.15000784632724 cc/s : Mass flux= 20.0000016756773 kg/h
**** Fiber Attrition Model FVM calculation start ****
**** Fiber Attribution Model FMV calculation end ****

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

++++ Screw Volume : 388.1114 cc
++++ Volumetric flow : 7.15000784632724 cc/sec
++++ Averaged residence time : 54.2812578698213 sec
++++ Torque : 128.6087 (Nm)
++++ Power : 1346.788 (W)
++++ Averaged outlet pressure : 0.1000000 (MPa)
++++ Averaged outlet temperature : 228.6638 (degree)
##### Program Normal End !!! Press Any Key
total : 223.9616 sec
    
```

スクリュ全体の合計値が出力される。

	軸方向 分割数	軸方向 距離	トルク	パワー
	A	B	C	D
1	n	zlength	torque	power
2		mm	Nm	W
3	1	0.00E+00	0.293698	3.075599
4	2	1.25	0.227603	2.383452
5	3	2.5	0.219881	2.302584
6	4	3.75	0.221687	2.321506
7	5	5	0.222345	2.328395
8	6	6.25	0.223384	2.339269
9	7	7.5	0.28825	3.018544
10	8	8.75	0.266589	2.791717
11	9	10	0.244705	2.562541
12	10	11.25	0.234596	2.456685
	..	..	..	..

$$Torque = \iint_{Barrel\ surface} \tau_{shear} \times r_{barrel} ds,$$

$$Power = \iint_{Barrel\ surface} \tau_{Shear} \bullet V_{barrel} ds,$$

$\tau_{shear}$  : バレル面に採用するせん断応力

$r_{barrel}$  : バレル半径

$V_{barrel}$  : バレル回転速度