
2024/02/08 第17回 NANO/SPE 合同講演会

2.5D FEM 押出成形シミュレーションの 特徴と実用例

株式会社HASL

依藤(よりふじ) 大輔

〒177-0041 東京都練馬区石神井町3-30-23 石神井ウエスト201

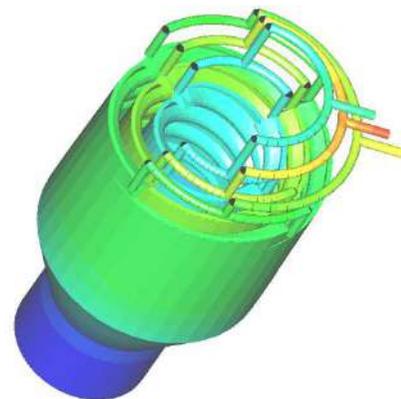
E-mail: yorifuji@hasl.co.jp

URL: <https://www.hasl.co.jp>

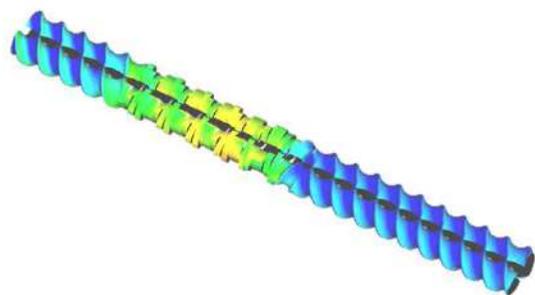
プラスチック押出成形に特化した 実用的 2.5D FEM CAEシステムの開発



単軸スクリュ

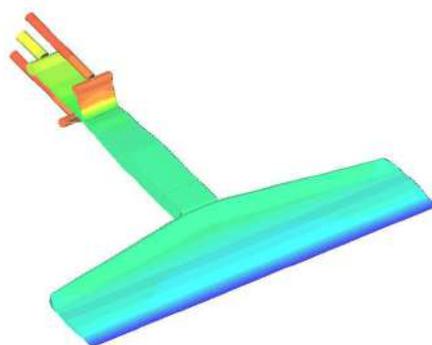


多層スパイラルダイ

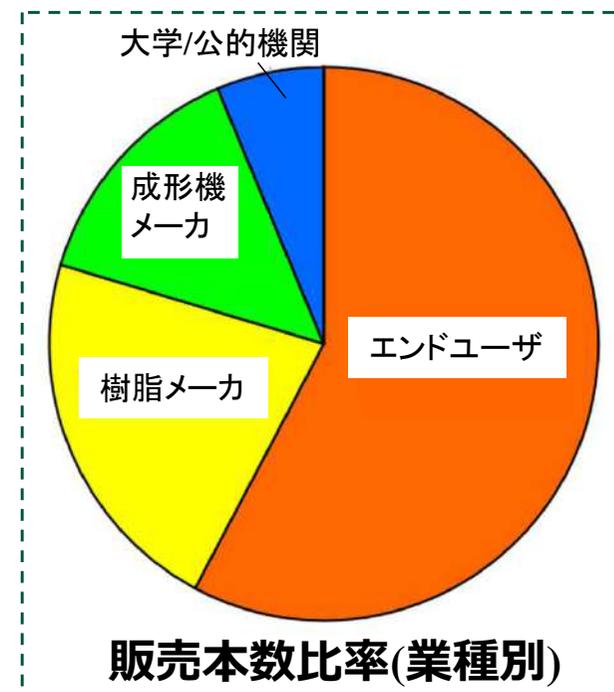
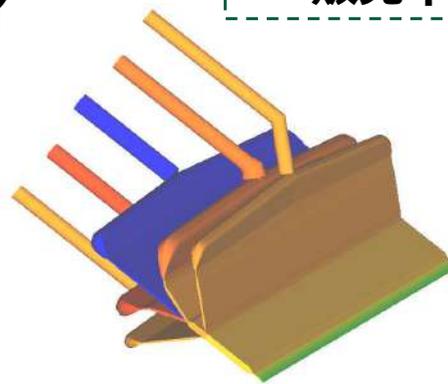


二軸スクリュ

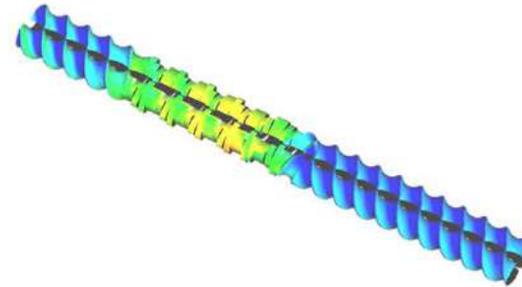
スクリュ押出機



フィードブロックタイプ多層Tダイ マルチマニフォールドTダイ
多層押出ダイ

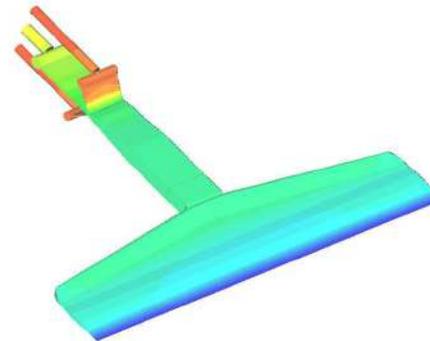


1. 二軸スクリュ押出機内の熱流動解析
 - 2.5D FEMの基本理論
 - 二軸スクリュ解析への適用
 - 実験検証事例



二軸スクリュ

2. 多層フィルム押出機内の熱流動解析
 - 多層フィルム解析への適用と実験検証事例



フィードブロックタイプ多層Tダイ

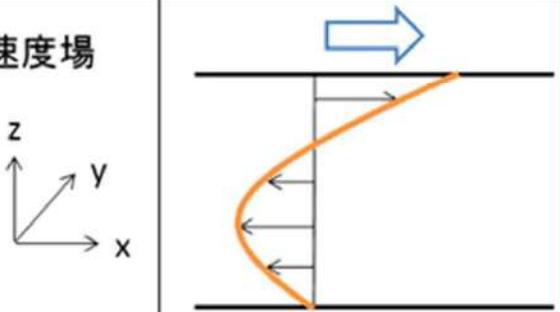
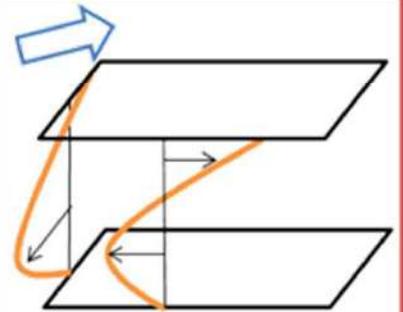
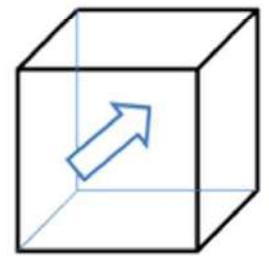
1. 二軸スクリュ押出機内の熱流動解析

FAN: Flow Analysis Network
FEM: Finite Element Method
FVM: Finite Volume Method

二軸スクリュに関する商用解析ソフトウェア

Software	Developer/Vendor	Numerical Method	Reference (URL)
Akro-Co-Twin Screw®	University of Akron, USA	FAN (2D)	http://www.temarex.com/extrus.htm
WinTXS™	Poly Tech, Polymer Processing Institute, USA	FAN (2D)	http://www.b4uextrude.com/wintxssimulation.html
Ludovic®	Sciences Computers Consultants, France	FAN (2D)	https://www.sccconsultants.com/en/ludovic-twin-screw-simulation-software.html
Sigma	University of Paderborn, Germany	FAN (2D)	https://ktp.uni-paderborn.de/en/foerderverein/software/sigma
TEX-FAN	The Japan Steel, Works, Ltd., Japan	FAN (2D)	https://www.jsw.co.jp/ja/product/plastics_machinery/news/COPY-news6883460791915119466.html
Polyflow	Ansys Inc., USA	FEM (3D)	https://www.ansys.com/ja-jp/products/fluids/ansys-polyflow
SCREWFLOW-MULTI	R-flow Corporation, Ltd., Japan	FVM (3D)	http://www.rflow.co.jp/screwflow-multi.html
Twin Screw Simulator	HASL Co., Ltd., Japan	FEM (2.5D)	https://www.hasl.co.jp/indexn.html

数値解析技術の特徴

	2D	2.5D	3D
計算手法	FAN法	2.5D FEM法 (Hele-Shaw流れ)	直接数値計算 粒子法など
計算負荷	軽い	中程度	重い
解析対象	押出機全体	押出機全体	一部のエレメント
速度場			
ブランド	Akro-co, Ludvic, TEX-FAN etc.	HASL TSS	Polyflow particle works etc.

2.5D FEM の開発方針

- Short computational time: 数分～数時間以内 (2D FANメリット踏襲)
- Integrated simulation: 全域解析 (2D FANメリット踏襲)
- Detailed & User customized analysis: (close to 3D FEM, FVM)

(参考) 2D FAN法の解析イメージ

参考文献:

“Flow and Heat Transfer Along the Length of a Co-rotating Twin Screw Extruder”,
C. Teixeira, A. Gaspar-Cunha, and J. A. Covas, Polymer-Plastics Technology and Engineering. 51, 1567-1577 (2012)

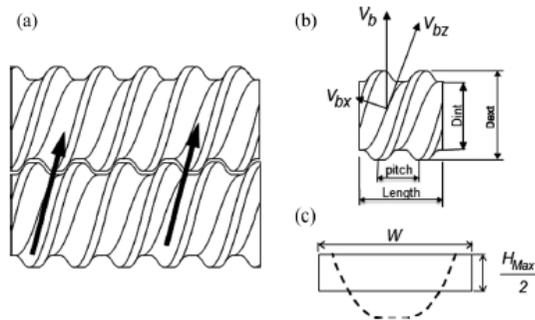


FIG. 1. Geometry and flow kinematics of a right-handed screw element. a) material flow; b) barrel velocity components; c) simplification of channel cross-section.

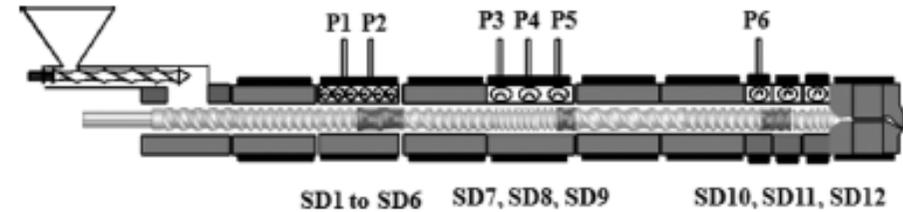


FIG. 7. Layout of the Leistritz LSM 30.34 co-rotating twin screw extruder, with 12 sampling devices (SD1 to SD12) and 6 melt pressure transducers (P1 to P6).

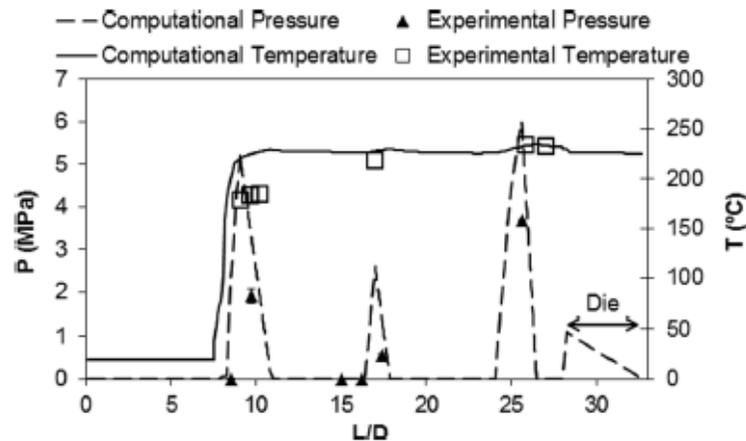


FIG. 8. Layout of the Leistritz LSM 30.34 co-rotating twin screw extruder, with 12 sampling devices (SD1 to SD12) and 6 melt pressure transducers (P1 to P6).

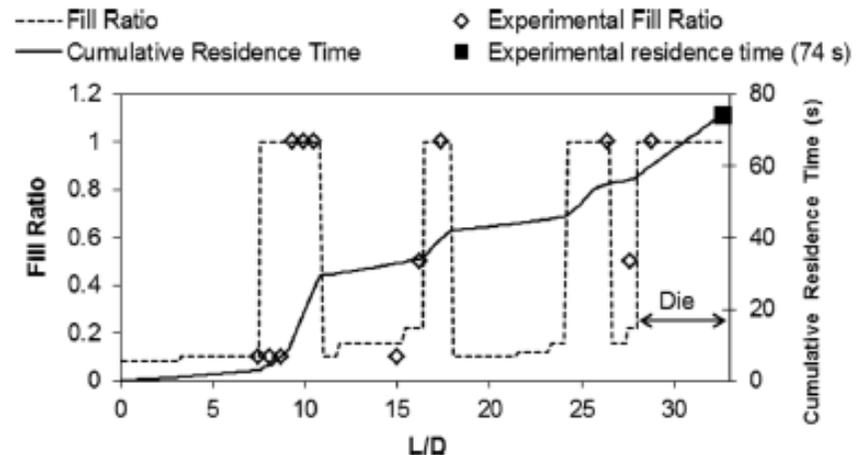
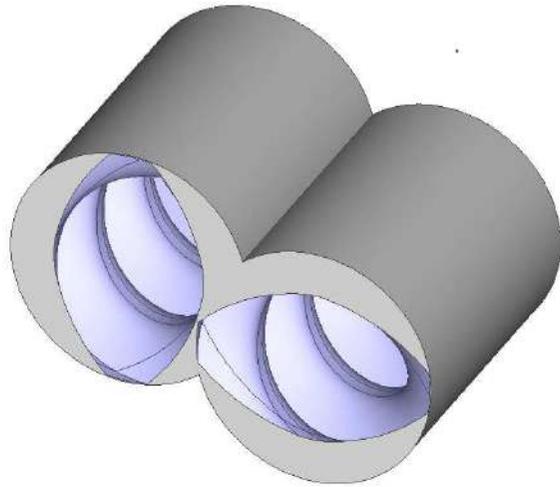


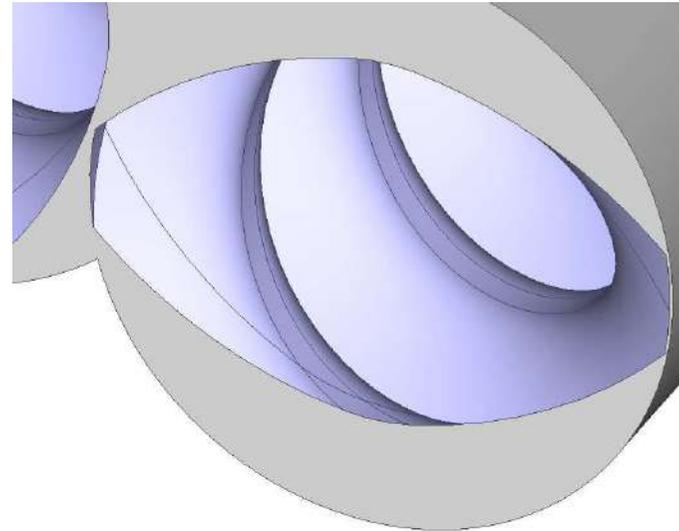
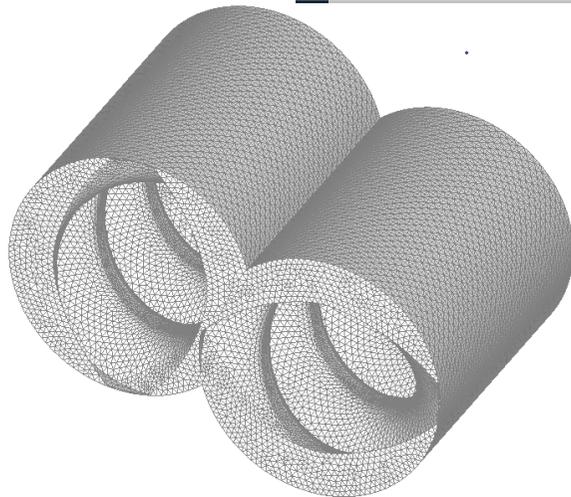
FIG. 9. Pressure and temperature evolution along the screws for run 1.

(参考) 二軸スクリュ流路 3Dメッシュイメージ



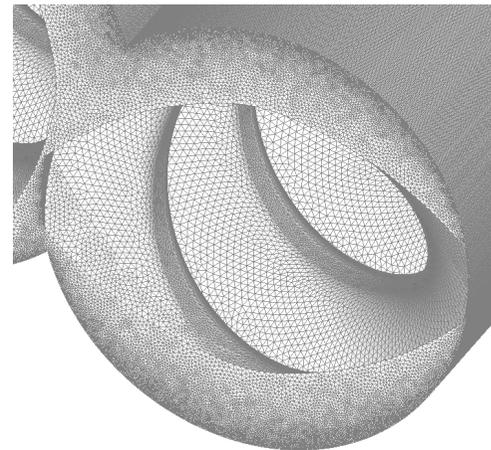
【メッシュサイズ1mm】

ノード: 71386、エレメント: 319845

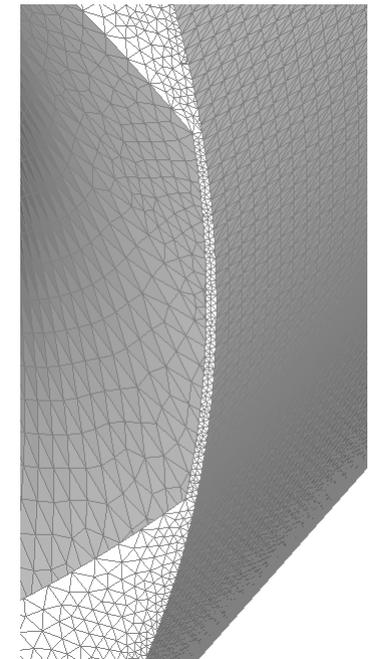


【メッシュサイズ0.6mm】

ノード: 497508、エレメント: 2221292



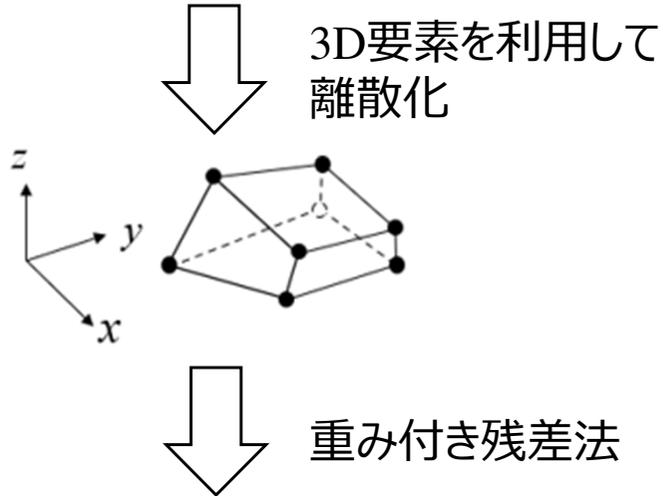
フライトクリアランス
0.2mm



3D FEM と 2.5D FEMの違い

3D FEM

流体運動方程式 (運動量保存則)
連続方程式 (質量保存則)



弱形式

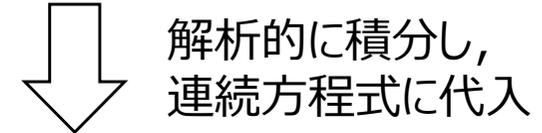
$$\begin{pmatrix} \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & \times & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \\ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \times \\ \times \\ \times \\ \times \end{pmatrix}$$

**1 節点当たり
4 未知量**

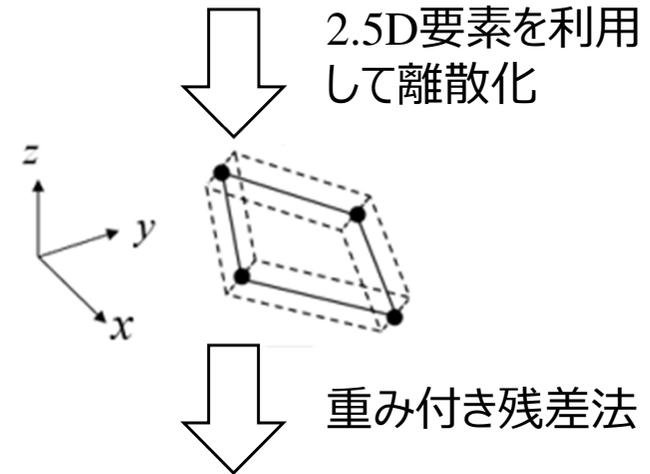
(u, v, w) : 流速ベクトル
 p : 流体圧力

2.5D FEM

流体運動方程式 (運動量保存則)



連続方程式 (質量保存則)



弱形式 $(\times)(p) = (\times)$

**1 節点当たり
1 未知量**

2.5次元解析の基礎理論

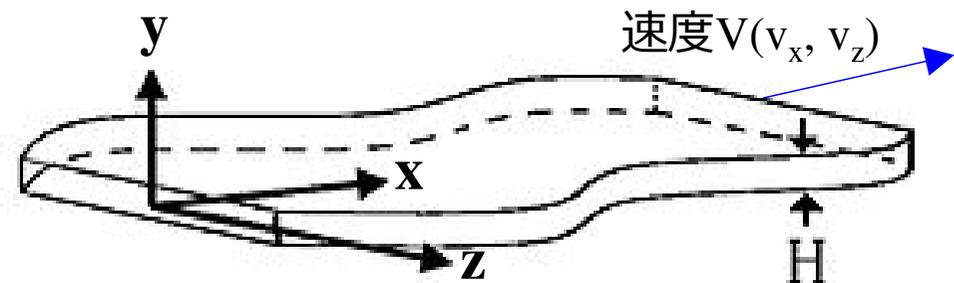
- Reynolds方程式：薄いフィルム層における流体力学的挙動

潤滑近似理論

- 流れは薄い層状である.
- 流体の慣性力は粘性せん断力に比べて無視できる.
- 表面に垂直な方向の流体の運動は表面に平行な運動に比べて無視できる.
- 壁で滑らない.

Reynolds基礎方程式導出のための仮定条件

- 流体はNewton流体である.
- 流体は非圧縮性である.
- 流れは時間的に定常である.
- 流れは等温である.

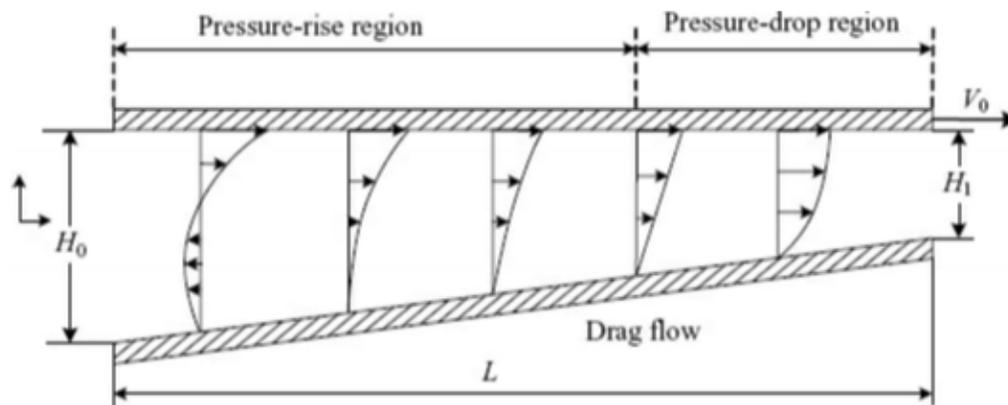
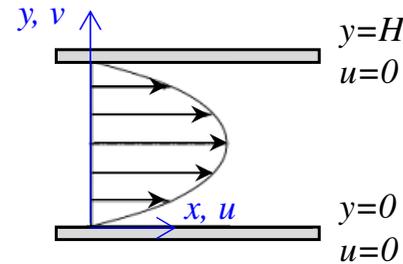
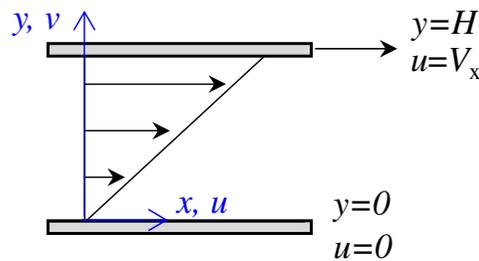


2.5次元解析の基礎理論

- 運動量保存則から導出される肉厚方向の流速分布

$$v_x(y) = \frac{V_x}{H} y + \frac{y}{2\eta} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) (y - H)$$

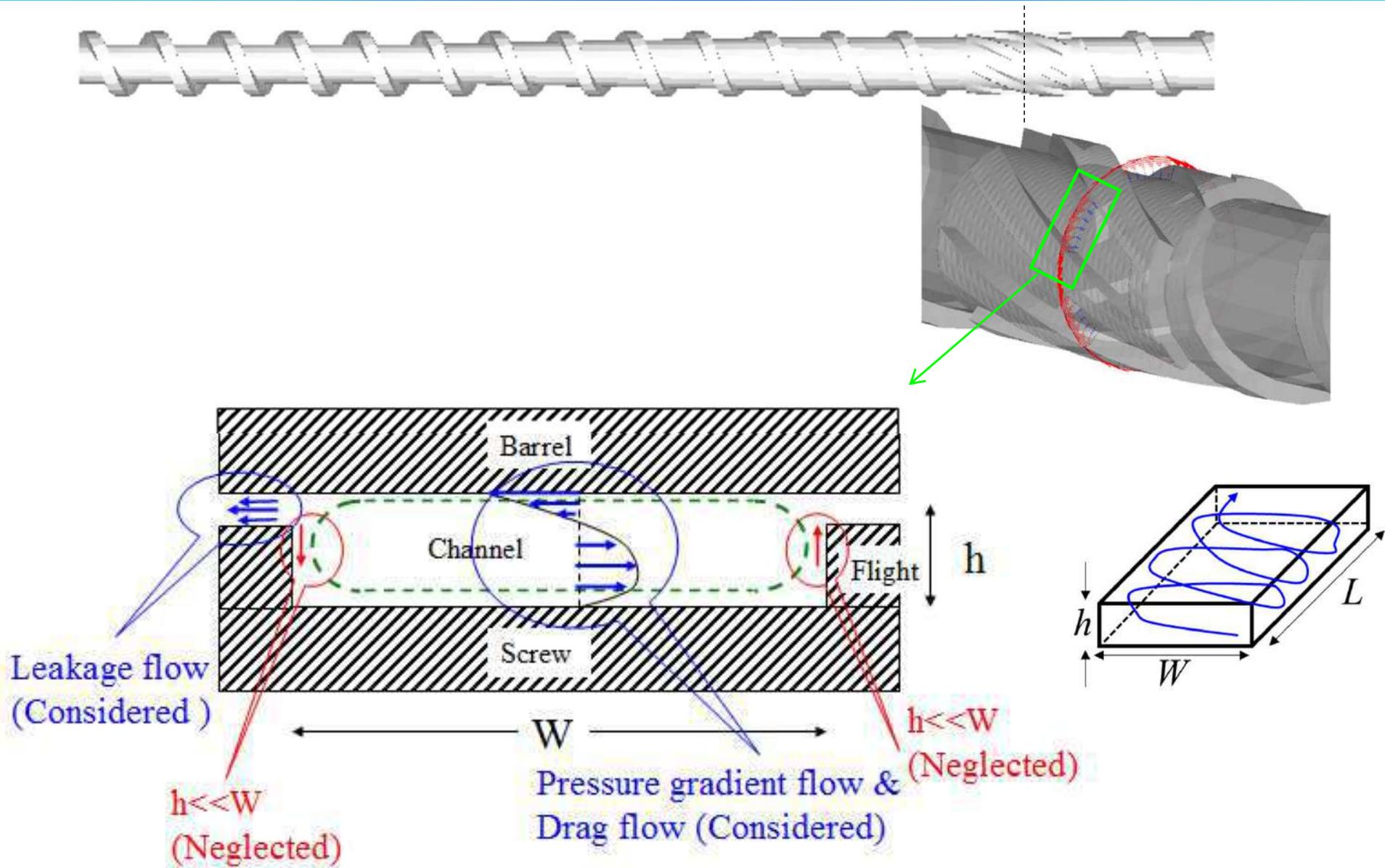
流速
クエット流れ (牽引流れ)
ハーゲンポアズイユ流れ (圧力流れ)



非平行平板間の合成流れイメージ

参考文献: “Principles of Polymer Processing”
second edition,
Zehev Tadmor, Costas G. Gogos,
Wiley-Interscience (2013), Fig.2.8.

スクリュ解析への適用



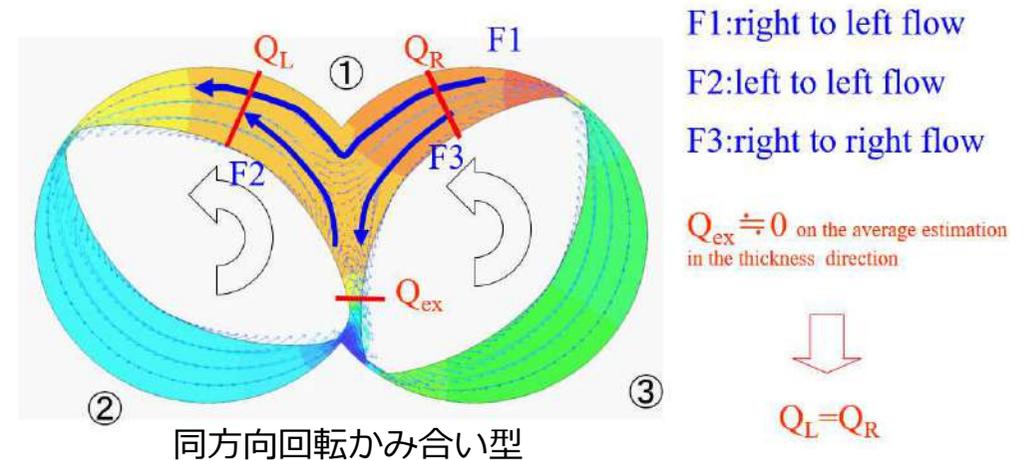
Hele-Shaw薄肉流れの定式化に立脚した2.5D FEM 解析技術

Hele-Shaw薄肉流れ（潤滑近似理論）

- 流れは薄い層状である.
- 流体の慣性力は粘性せん断力に比べて無視できる.
- 表面に垂直な方向の流体の運動は表面に平行な運動に比べて無視できる.
- 壁で滑らない.

当定式化の仮定条件

- 流体は非圧縮性である.
- 流体は非Newton粘性流体である.
- 流れは時間的に定常である.
- 流れは非等温である.



Hele-Shaw 薄肉流れの定式化に立脚した2.5D FEM 解析技術

- 運動量保存則

流速分布

$$\mathbf{u} = S_p \nabla P + D_\Omega$$

- 質量保存則 (連続の式)

$$\nabla \mathbf{u} = 0$$

$$\nabla (S_p \nabla P + D_\Omega) = 0$$

\mathbf{u} : 流速ベクトル

∇ : ナブラ演算子

S_p : 流動コンダクタンス

D_Ω : 牽引流れ成分

境界条件

$$v_\theta = 0 \text{ at } r = R_s$$

$$v_z = 0 \text{ at } r = R_s$$

$$v_\theta = R_b \Omega \text{ at } r = R_b$$

$$v_z = 0 \text{ at } r = R_b$$

- エネルギー保存則

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

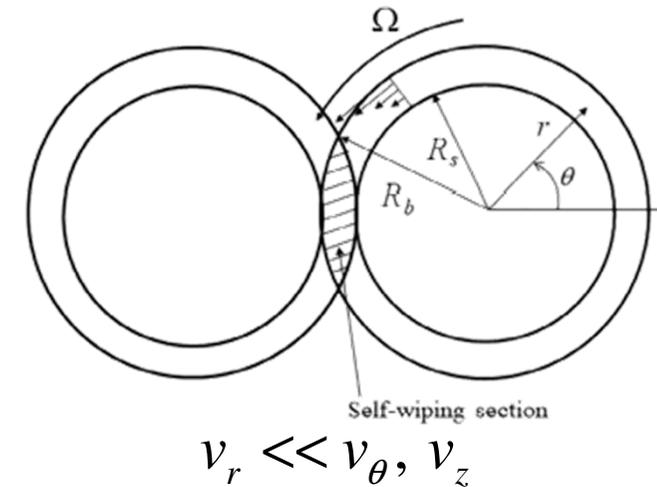
Δ : ラプラス演算子

ρ : 密度

C_p : 比熱

κ : 熱伝導率

$\dot{\gamma}$: ひずみ速度

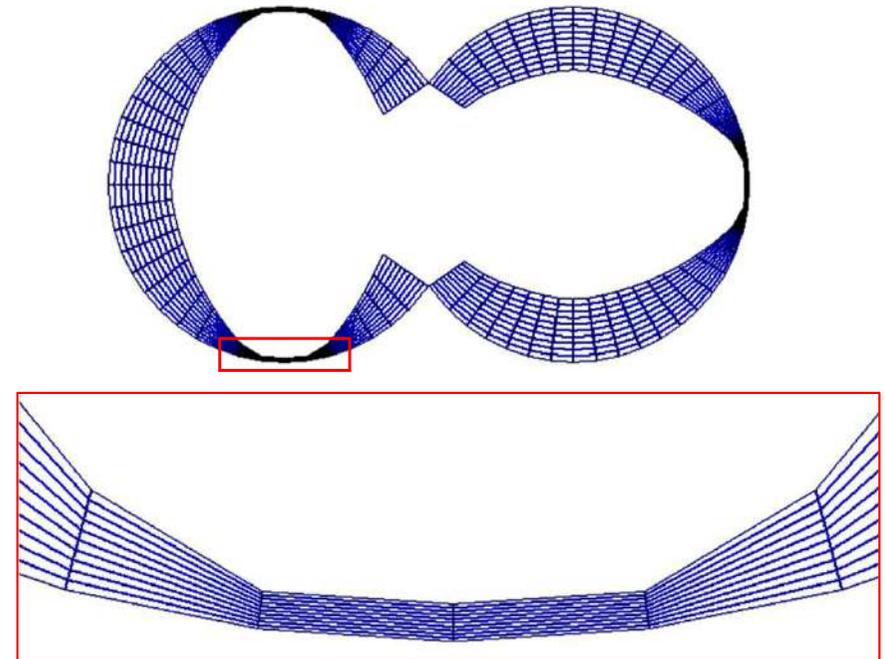
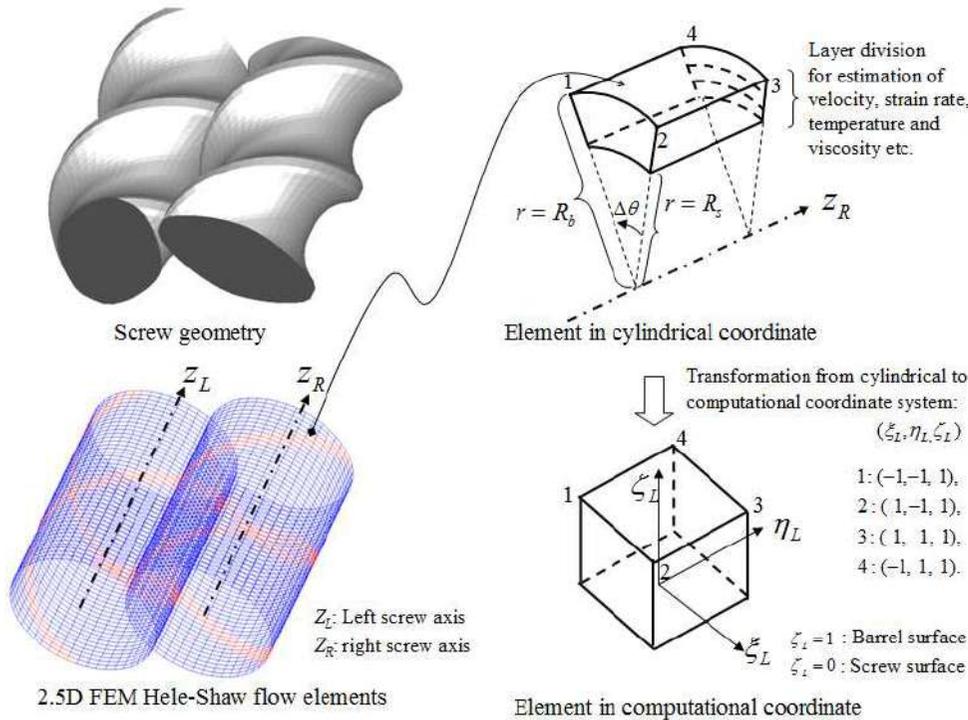


有限要素法(FEM)による離散化

圧力変数/座標要素内補間

$$p = \sum_{\alpha=1}^4 \phi_{\alpha} P_{\alpha},$$

$$\theta = \sum_{\alpha=1}^4 \phi_{\alpha} \theta_{\alpha}, \quad z = \sum_{\alpha=1}^4 \phi_{\alpha} z_{\alpha}, \quad r = (R_b - R_s) \zeta_L + R_s$$



2.5D FEM Hele-Shaw flow element for the twin screw extruder

スクリー内流動解析の2.5D一般化表式

$$Q_{\alpha}^e = - \left(S_{\alpha\beta}^{e\theta} + S_{\alpha\beta}^{ez} \right) p_{\beta}^e + D_{\alpha}^e$$

節点を通過
する流量

圧力勾配流れの
流量寄与

牽引流れの
流量寄与

$$Q_{\alpha}^e = \int_{\Gamma_e} \phi_{\alpha} (n_{\theta} q_{\theta} + n_z q_z) d\Gamma,$$

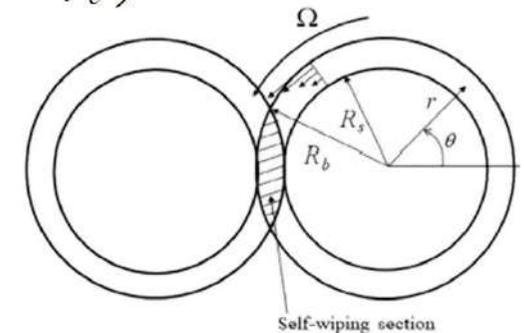
$$S^{\theta} = \frac{1}{4} \left(\alpha_c - \frac{\beta_c^2}{\gamma_c} \right), \quad S^z = \frac{1}{4} \left(\delta_c - \frac{\alpha_c^2}{\beta_c} \right),$$

$$S_{\alpha\beta}^{e\theta} = S^{\theta} \int_{S_e} \frac{\partial \phi_{\alpha}}{\partial \theta} \frac{\partial \phi_{\beta}}{\partial \theta} dS, \quad S_{\alpha\beta}^{ez} = S^z \int_{S_e} \frac{\partial \phi_{\alpha}}{\partial z} \frac{\partial \phi_{\beta}}{\partial z} dS,$$

$$D^{\theta} = \frac{\Omega}{2} \left(R_b^2 - \frac{\beta_c}{\gamma_c} \right)$$

$$D_{\alpha}^e = D^{\theta} \int_{S_e} \frac{\partial \phi_{\alpha}}{\partial \theta} dS$$

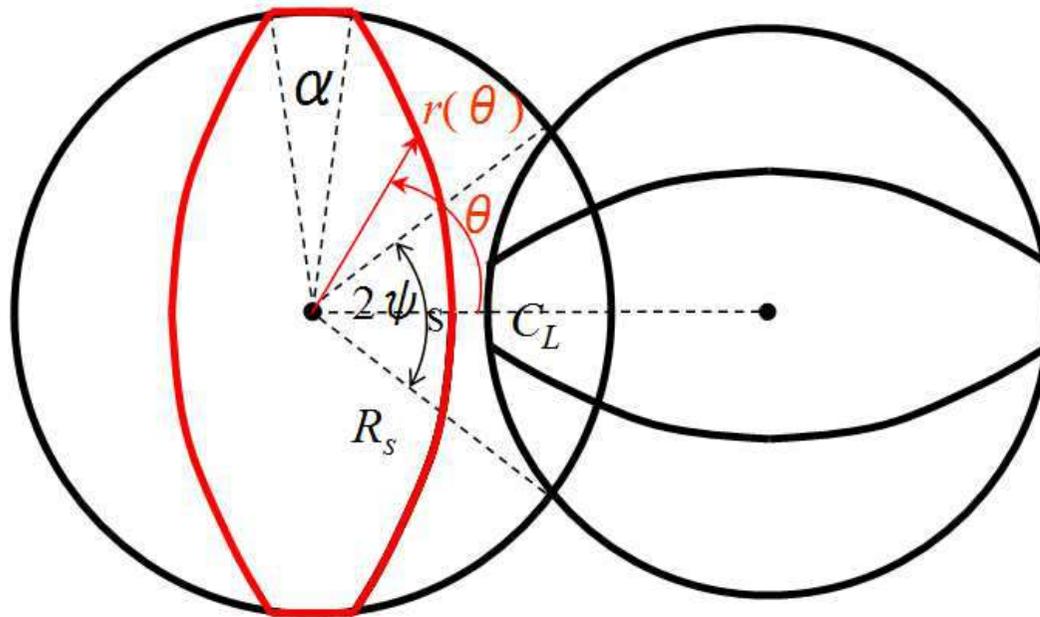
$$\alpha_c = \int_{R_s}^{R_b} \frac{r}{\eta} dr, \quad \beta_c = \int_{R_s}^{R_b} \frac{1}{\eta r} dr, \quad \gamma_c = \int_{R_s}^{R_b} \frac{1}{\eta r^3} dr, \quad \delta_c = \int_{R_s}^{R_b} \frac{r^3}{\eta} dr$$



参考文献: “Resin distribution along axial and circumferential directions of self-wiping co-rotating parallel twin-screw extruder”,
M. Ohara, S. Tanifuji, Y. Sasai, T. Sugiyama, S. Umemoto, J. Murata, I. Tsujimura, S. Kihara, K. Taki, *AICHE J.* **66**, 11, e17018 (2020)

二軸スクリュモデリング技術

Self Wiping Twin Screw & Kneading disk^{*)}



*)参考文献:

M. L. Booy, *Polym. Eng. Sci.*, **18**,973(1978)

$$\psi_s = \cos^{-1} \left(\frac{C_L}{2R_s} \right)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{n_t} - 2\psi_s$$

$$r(\theta) = \sqrt{C_L^2 - R_s^2 \sin^2 \theta} - R_s \cos \theta$$

$$z = \frac{L_p \theta}{2\pi}$$

C_L : 軸間距離

$2\psi_s$: 啮合角

R_s : スクリュ半径

n_t : 条数

α : チップ角

L_p : スクリュピッチ

z : スクリュ長

Screw Modeling Template of 2.5D Hele-Shaw FEM Mesh

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 溶融可塑化/液滴分散 SF/履歴/繊維破断

二軸スクリュタイプ
同方向噛合い型二軸押出機

Blk.No. 5
スクリュ全長(mm) 400
L/D 10

バレル半径(mm) 20
軸間距離(mm) 32.85
クリアランス(mm) 0.5

スクリュ構成

Blk.No.	Type	Rev. or Nor.	Radius Screw	Tips	Disk Angle	Pitch or Disk Thick.	Turns or Disk No.	Length	Division Number	
									Top	Flank
1.	SW	Nor.	19.5	2	0	30	5	150	2	10
2.	KD	Nor.	19.5	2	45	8.0	5.0	40	2	10
3.	KD	Rev.	19.5	2	45	8.0	5.0	40	2	10
4.	SW	Rev.	19.5	2	0	20	1	20	2	10
5.	SW	Nor.	19.5	2	0	30	5	150	2	10

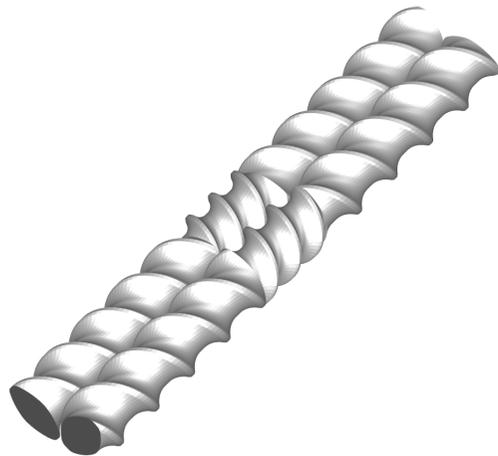
スクリュ形状パラメータの数値入力による容易なモデリング

スクリュ幾何形状パラメータ入力
Element Type: Kneading disc
Screw radius(mm): 19.5
Tip number: 2
Disk tickness(mm): 8.0
Disk number: 5.0
Phase angle: 45
Phase connection:
周方向/軸方向分割数
Top: 2, Flank: 10, Axis: 20

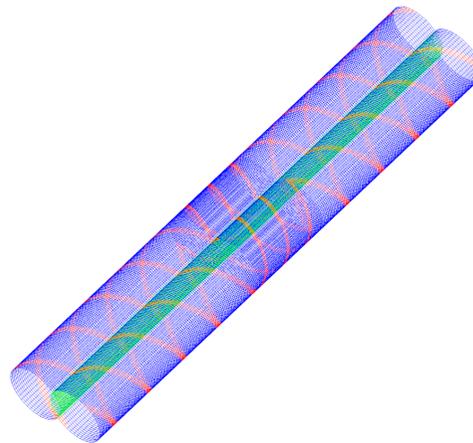
スクリュ構成情報ファイル(.tsmodel)
normal2
メッシュタイプ
 2.5D 解析モデル 2.5D解析用モデル
 2D 展開モデル 3D確認用モデル

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

2.5D Hele-Shaw FEM Mesh



3D Visualized model



2.5D Hele-Shaw FEM meshes



Thickness information mapped on 2.5D Hele-Shaw FEM meshes

Analysis Time of 2.5D FEM

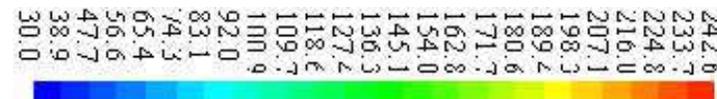
○L/D=60 のスクリュモデル作成時間 約30分, 解析時間 約40分/条件

⇒ Flow direction



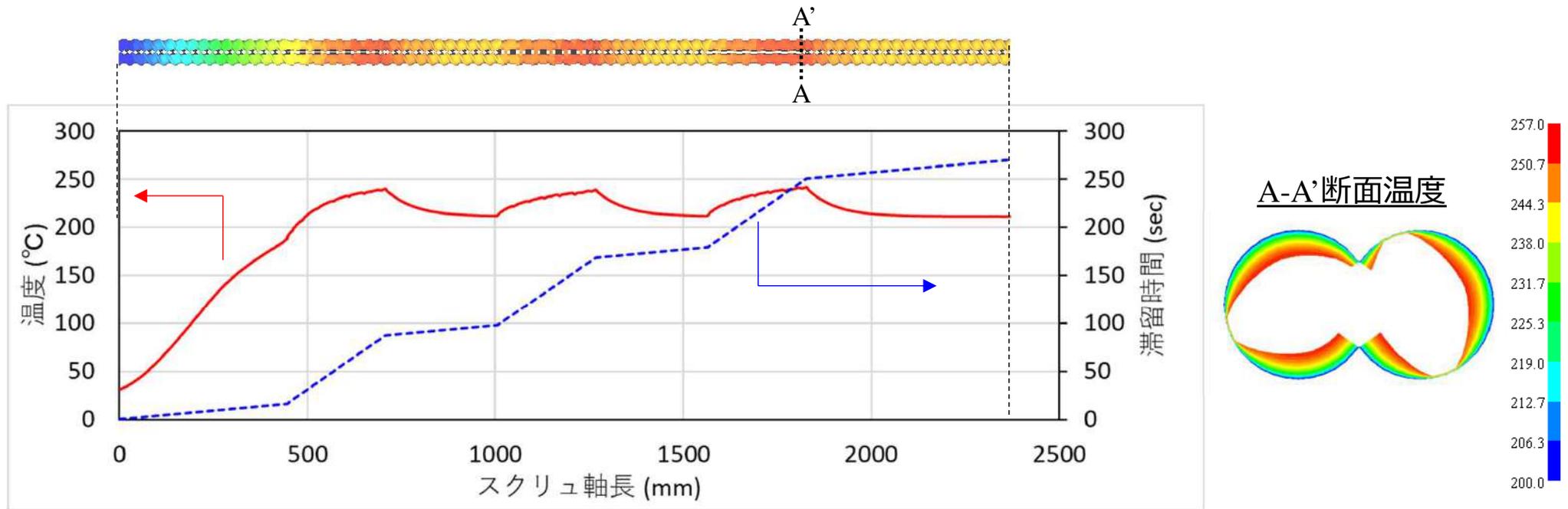
解析結果例 / 温度分布(°C)

Input: 押出量, スクリュ回転数, バレル設定温度



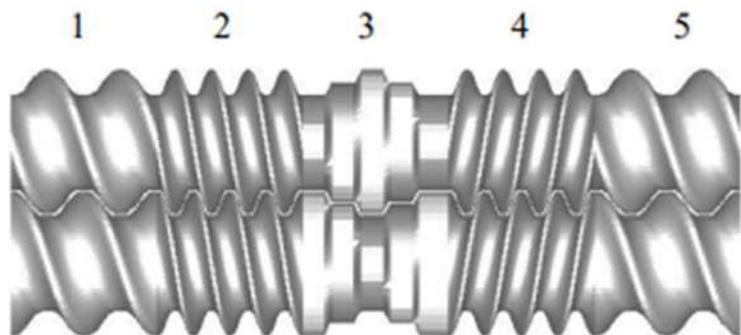
2.5D FEM解析の利点

- ・プリプロセッサ : 専用テンプレートを利用した簡便なスクリュモデリング。
- ・解析ソルバ : スクリュ全域の軸, 周, 肉厚方向の物理量 (圧力, 温度, 流速, 滞留時間, etc.) を1時間以内で解析。
- ・ポストプロセッサ: コンター図, ベクトル図, グラフ図, アニメーション等の豊富な可視化機能。

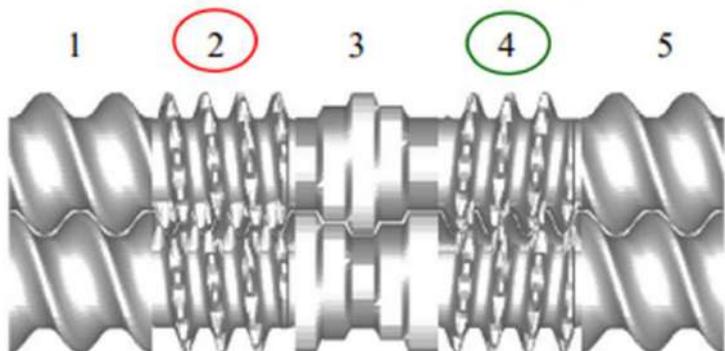
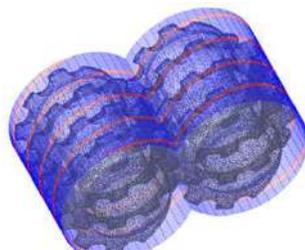
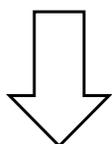


2.5D FEM解析の利点

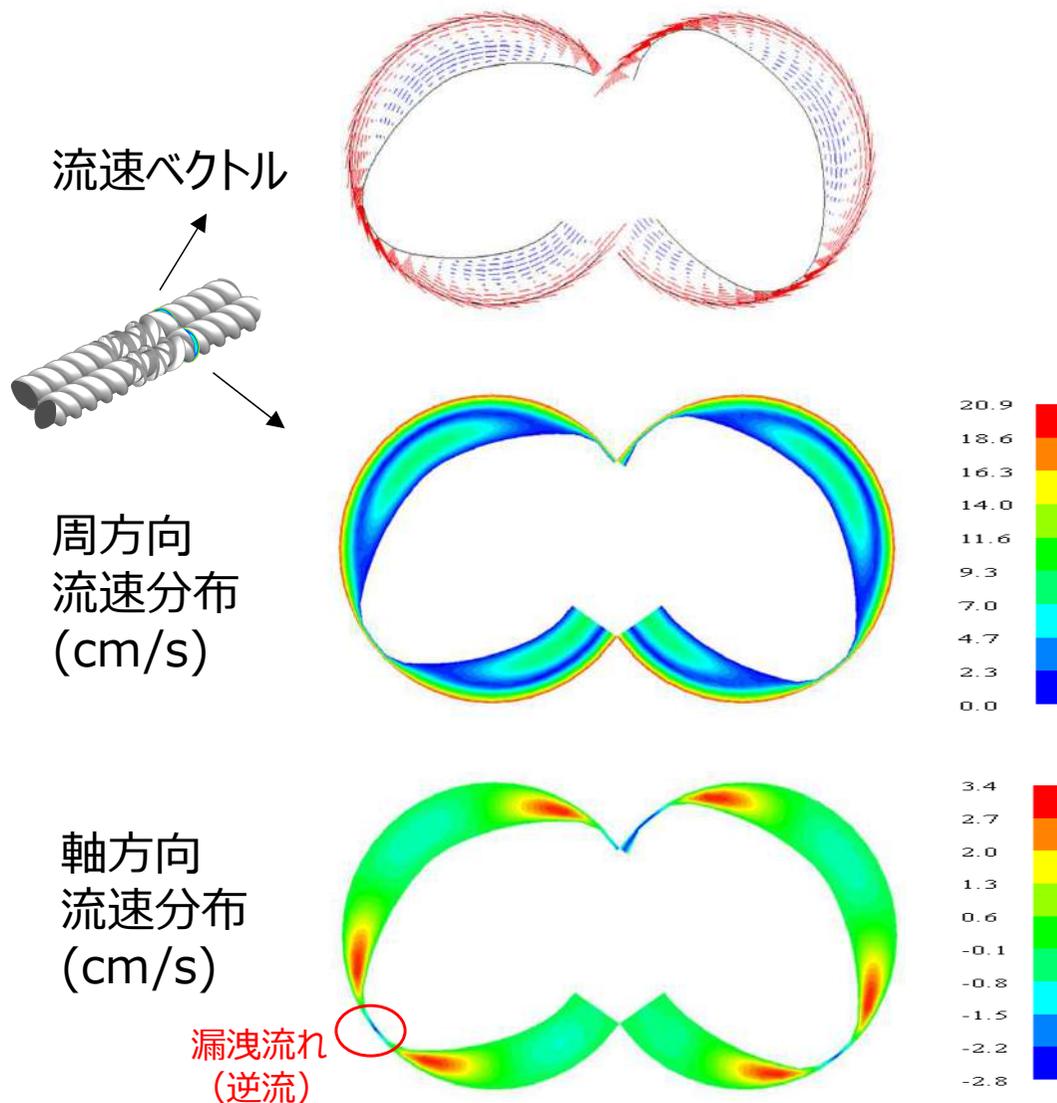
- プリプロセッサ
肉厚情報の加工によるモデル変更
(リメッシュ不要)



3D CAD 情報
を利用し肉厚変更



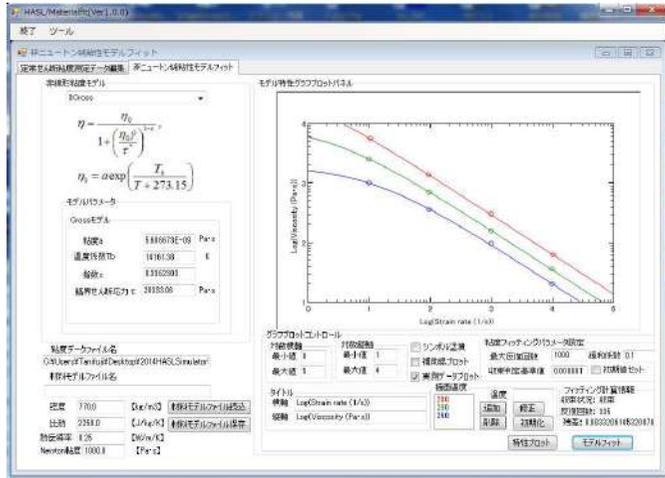
- ソルバー & ポストプロセッサ
肉厚断面の物理量を高精度で解析&可視化



熱可塑性樹脂の溶融粘度フローカーブ

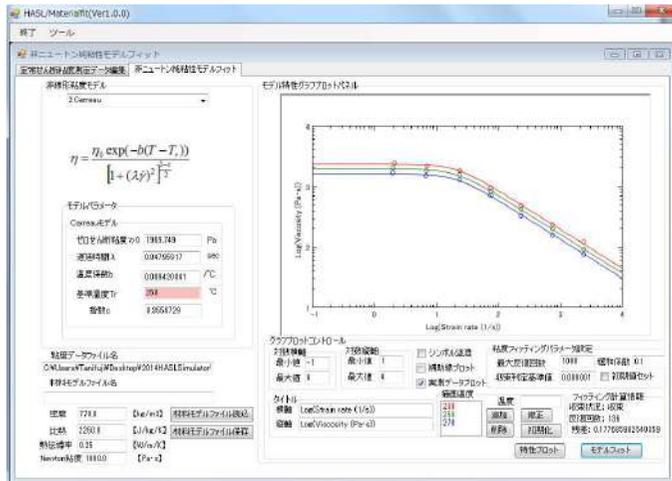
Cross model:

フローカーブの曲率を表現可能。

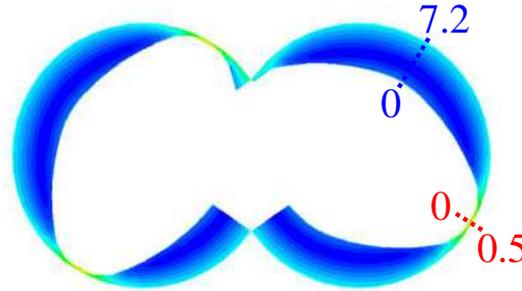


Carreau model:

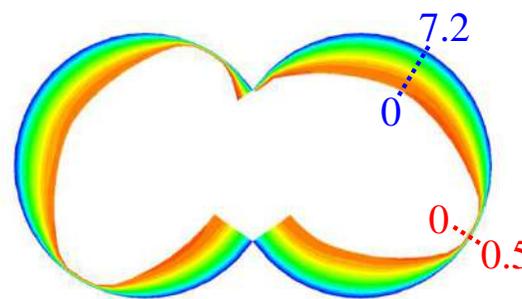
フローカーブのゼロせん断領域と
ずり流動領域の両特性を表現可能。



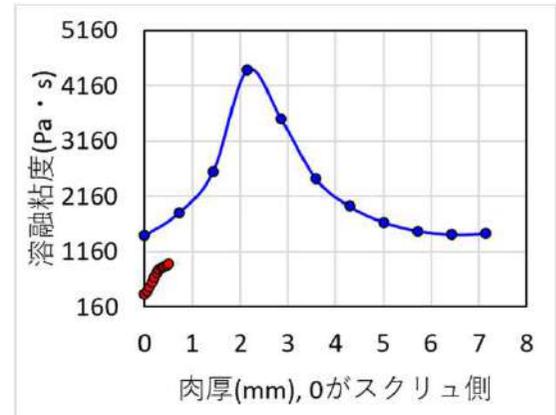
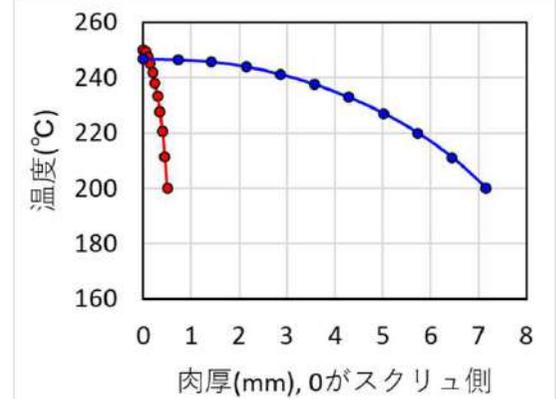
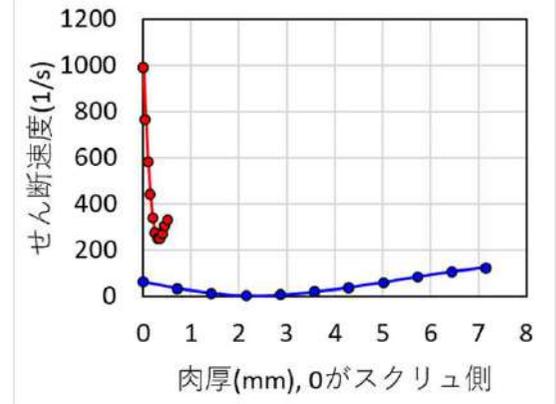
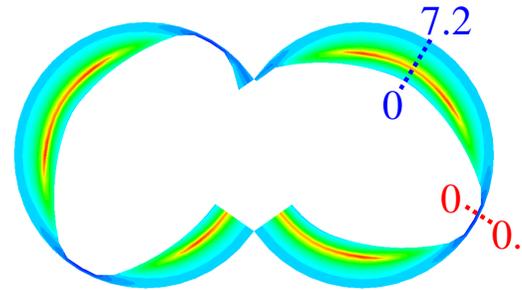
せん断速度分布(1/s)



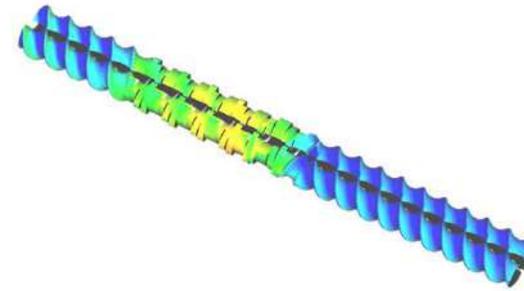
温度分布(°C)



溶融粘度分布(Pa·s)

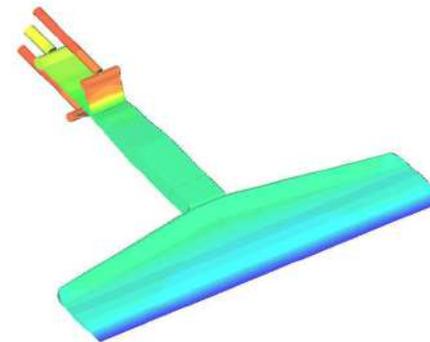


1. 二軸スクリュ押出機内の熱流動解析
 - 2.5D FEMの基本理論
 - 二軸スクリュ解析への適用
 - 実験検証事例



二軸スクリュ

2. 多層フィルム押出機内の熱流動解析
 - 多層フィルム解析への適用と実験検証事例

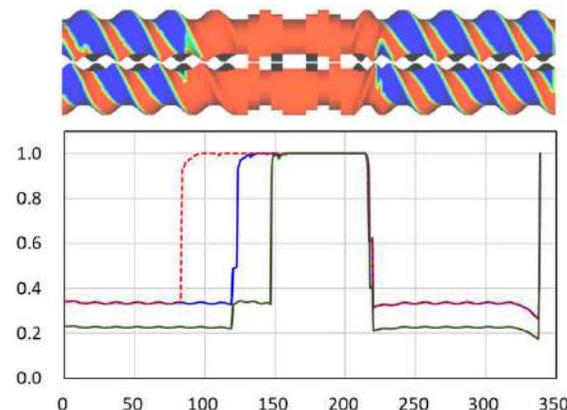


フィードブロックタイプ多層Tダイ

実験検証への取組み

2.5D FEM 標準解析

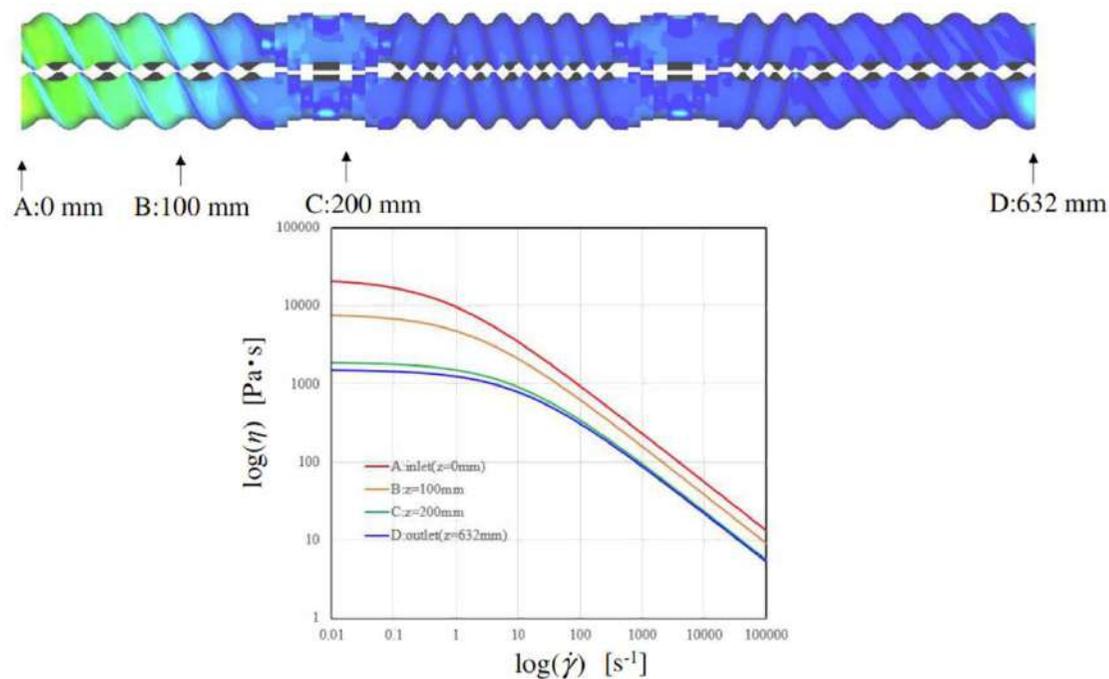
- ・二軸スクリュ内熱流動解析
- ・未充満（充満率）解析



赤: 基準
青: 混練部減らす
緑: 回転数1.5倍

目的に応じた解析機能

- ・脱揮解析
- ・ひずみ履歴解析
- ・繊維破断解析
- ・サイドフィード解析
- ・溶融可塑化解析(ペレット径減少)
- ・液滴分裂/合体解析（非相溶系）
- ・反応押出解析

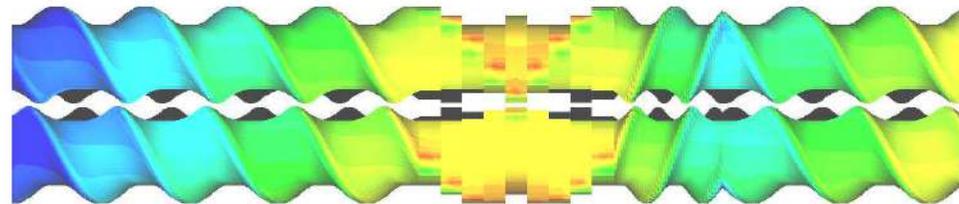


反応押出解析例: Peroxide によるPP分解反応解析結果

樹脂充満状態の定量化法

充満解析

大気圧
0MPa (指定)

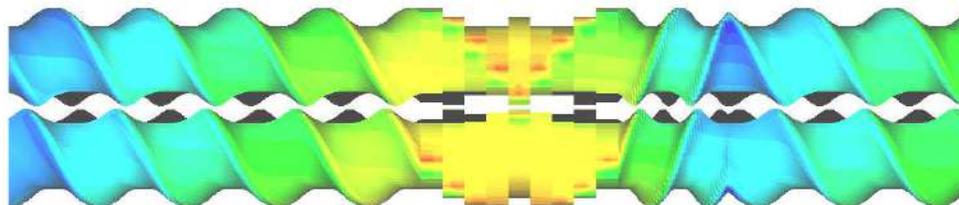


出口圧力
10MPa (指定)



押出量20kg/h(計算値)

大気圧
0MPa (指定)



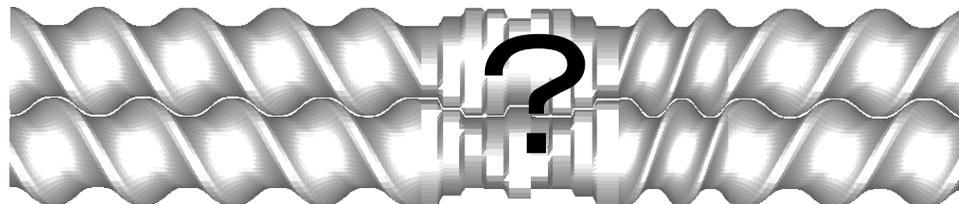
出口圧力
5MPa (指定)



押出量40kg/h(計算値)

未充満解析

大気圧
0MPa (指定)

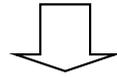


出口圧力
5MPa (指定)

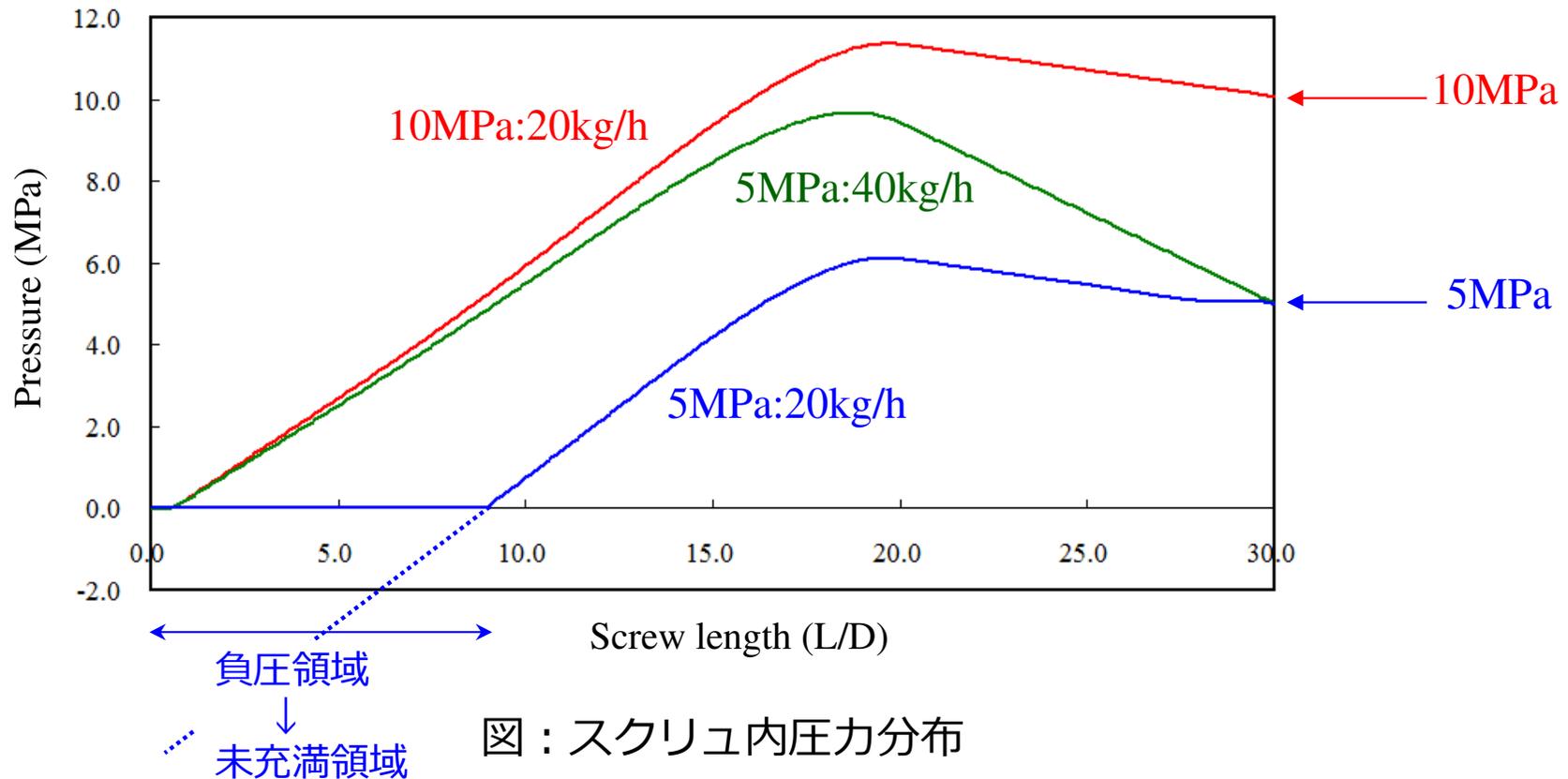


押出量20kg/h(指定)

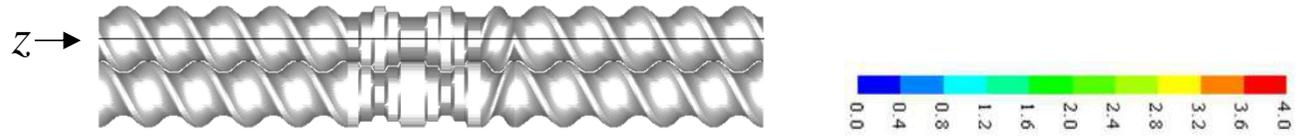
- スクリュ形状、回転数、流量、材料物性に変化が無ければ、当バランス方程式は、 $p \rightarrow p + \Delta p$ (一定値) の変換に対して不変。



10MPa: 20kg/hの特性は、 $\Delta p = -5\text{MPa}$ とすることで5MPa : 20kg/hの特性と一致



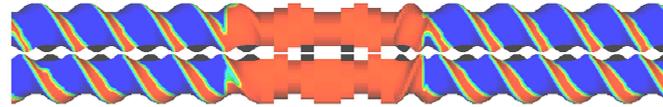
○ 压力分布(MPa)



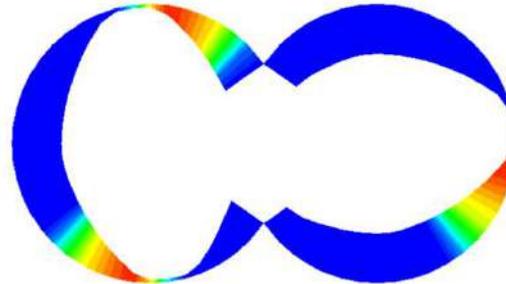
○ 充满率(-) 赤色: 树脂充满领域, 青色: 树脂未充满领域



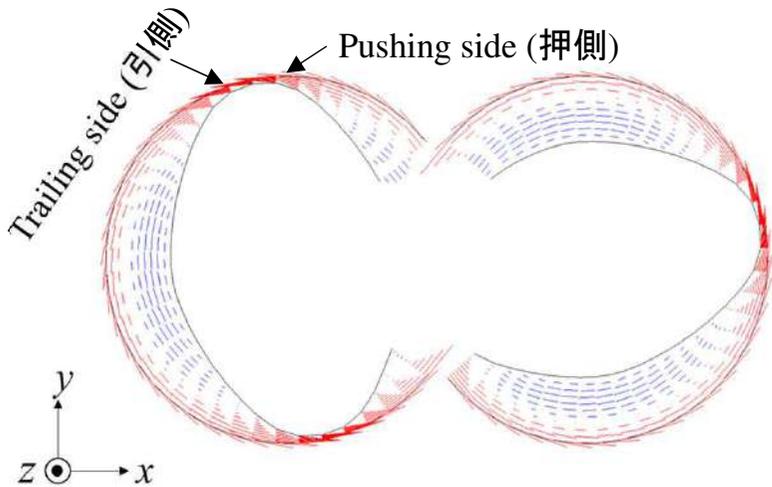
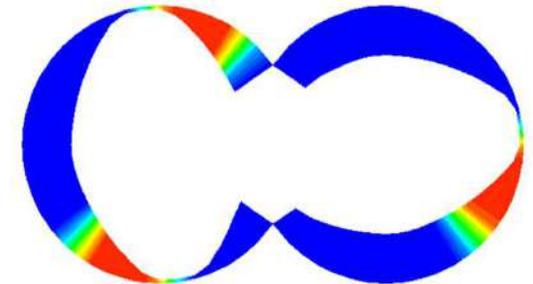
xy断面



xy断面压力分布(MPa)

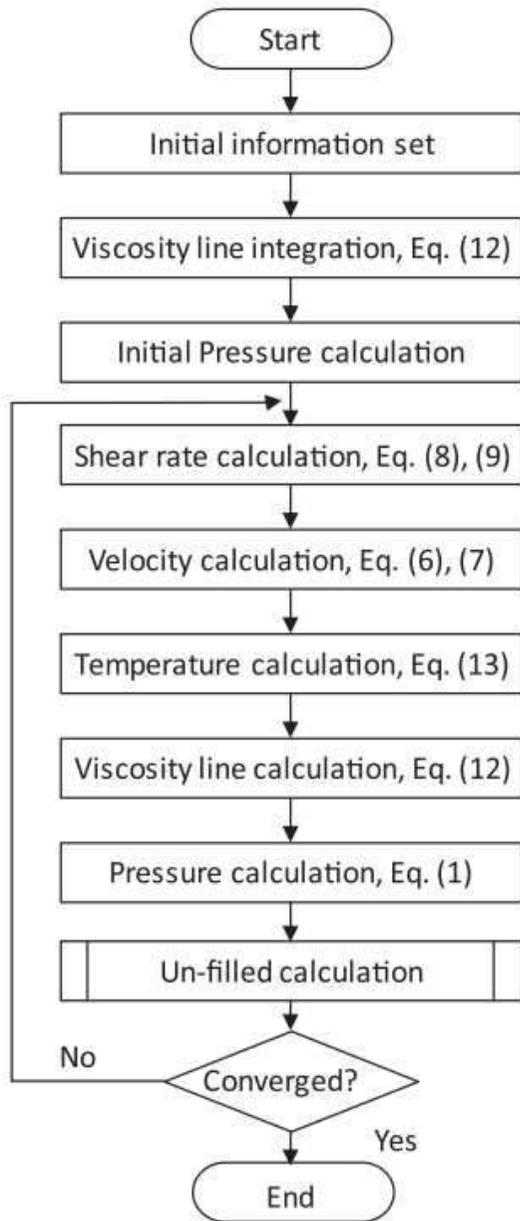


xy断面充满率分布(-)

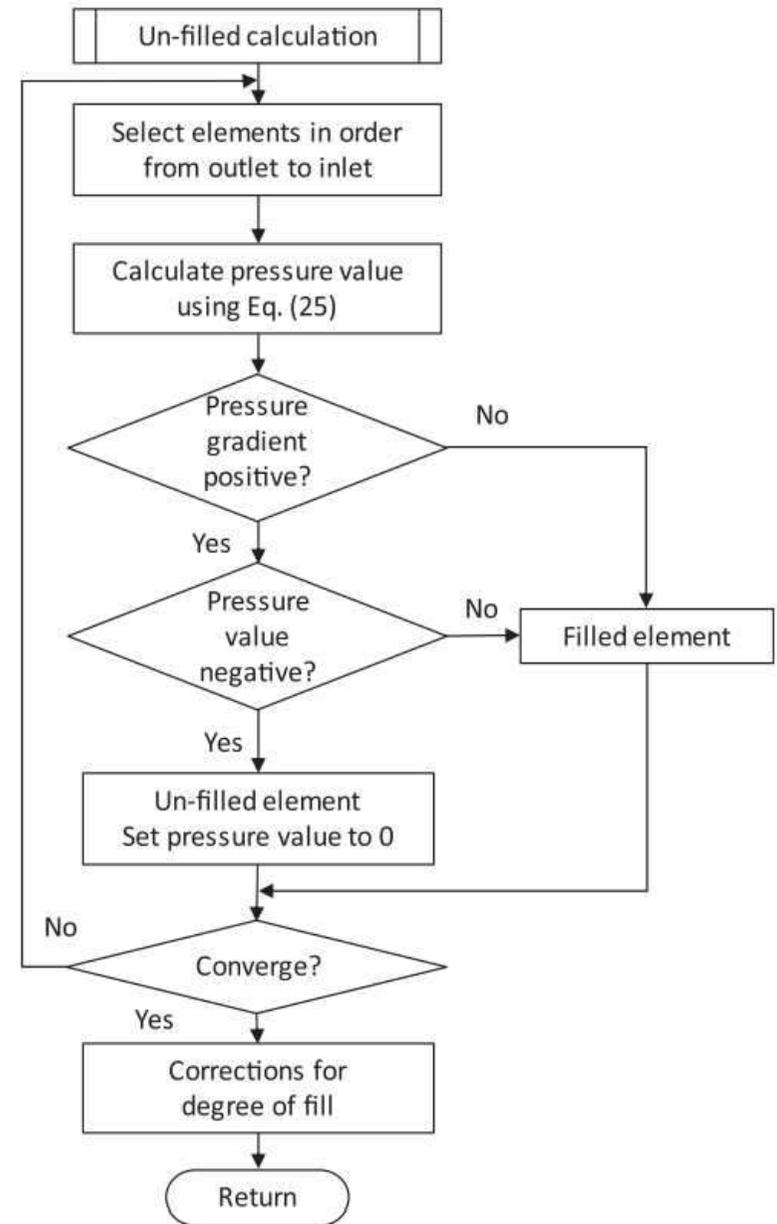


2.5D FEM 解析のフローチャート

2.5D FEM 熱流動解析



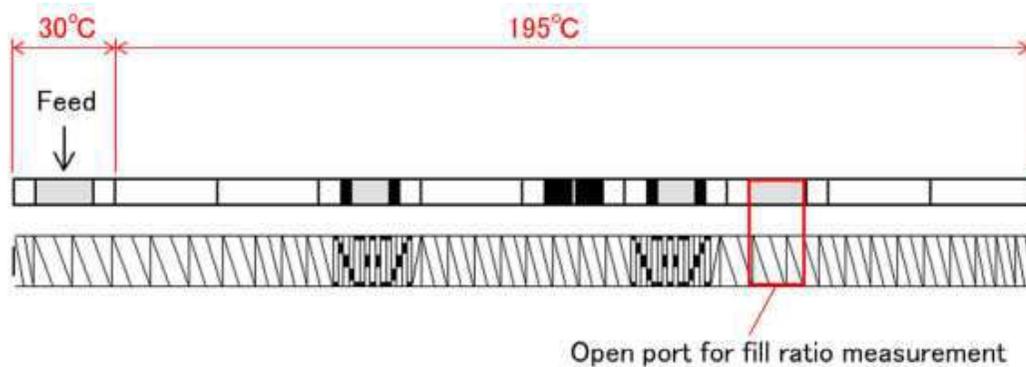
未充填解析



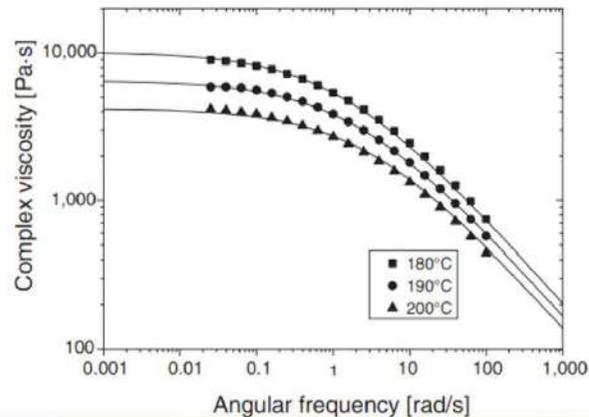
【検証事例1】 未充満検証解析

参考文献: “Resin distribution along axial and circumferential directions of self-wiping co-rotating parallel twin-screw extruder”,
M. Ohara, S. Tanifuji, Y. Sasai, T. Sugiyama, S. Umemoto, J. Murata, I. Tsujimura, S. Kihara, K. Taki,
AIChE J. **66**, 11, e17018 (2020)

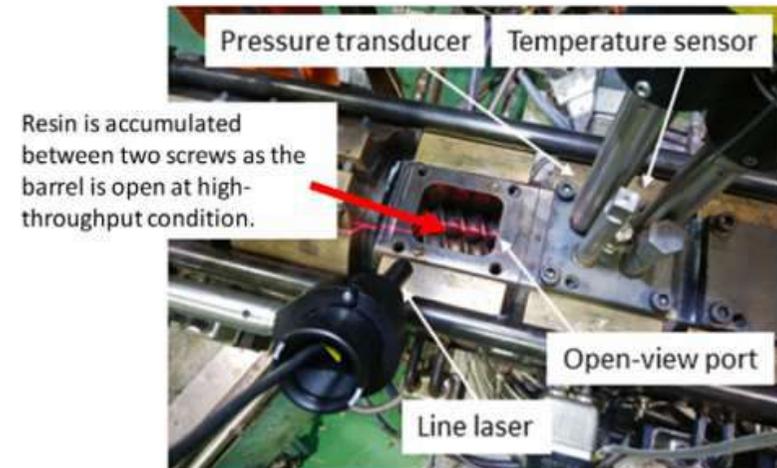
○スクリュレイアウト(Φ26, L/D=40.4)



○成形樹脂：ホモポリプロピレン
(F-704NP, プライムポリマー製)

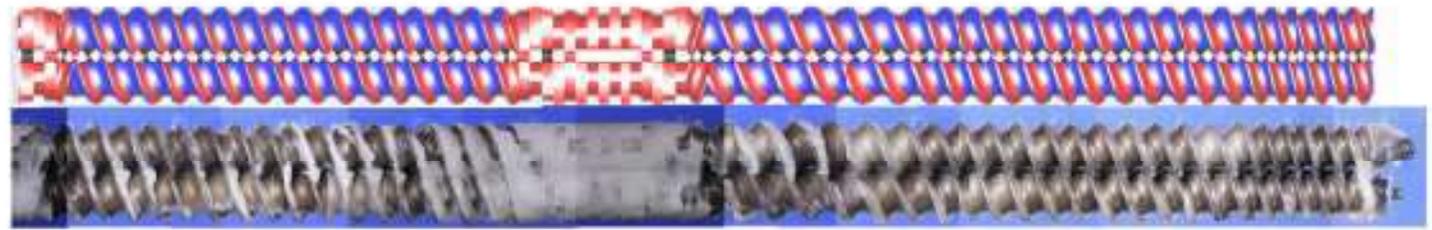


○ラインレーザを利用した
充満率測定装置

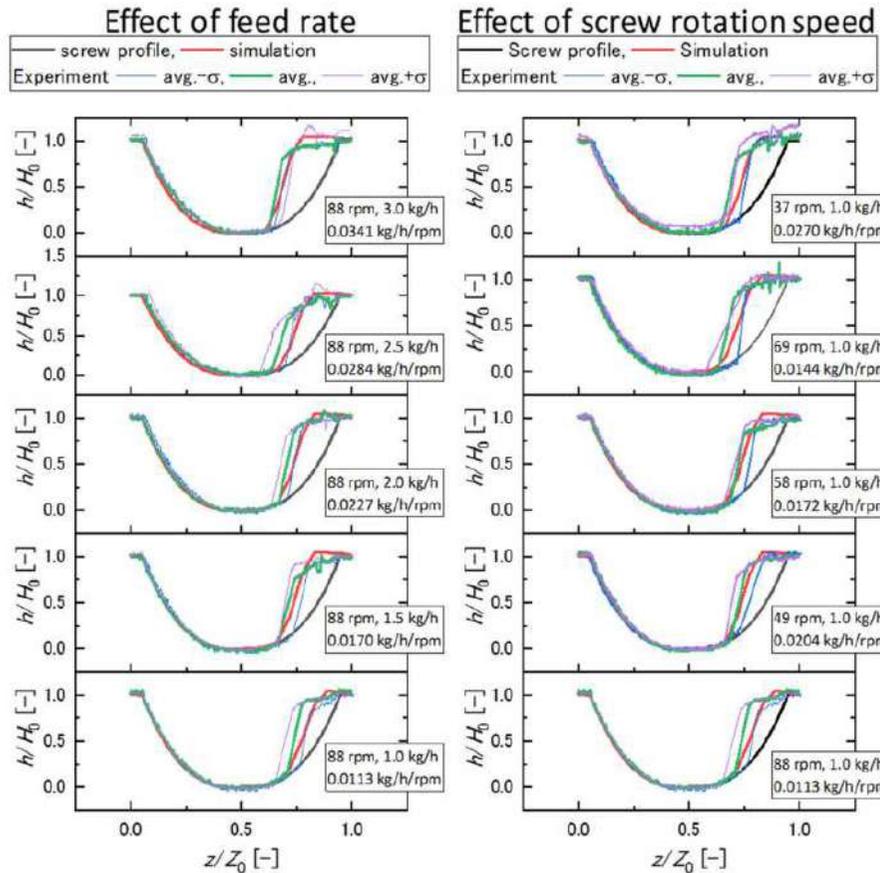


○ 充満率の精度検証結果

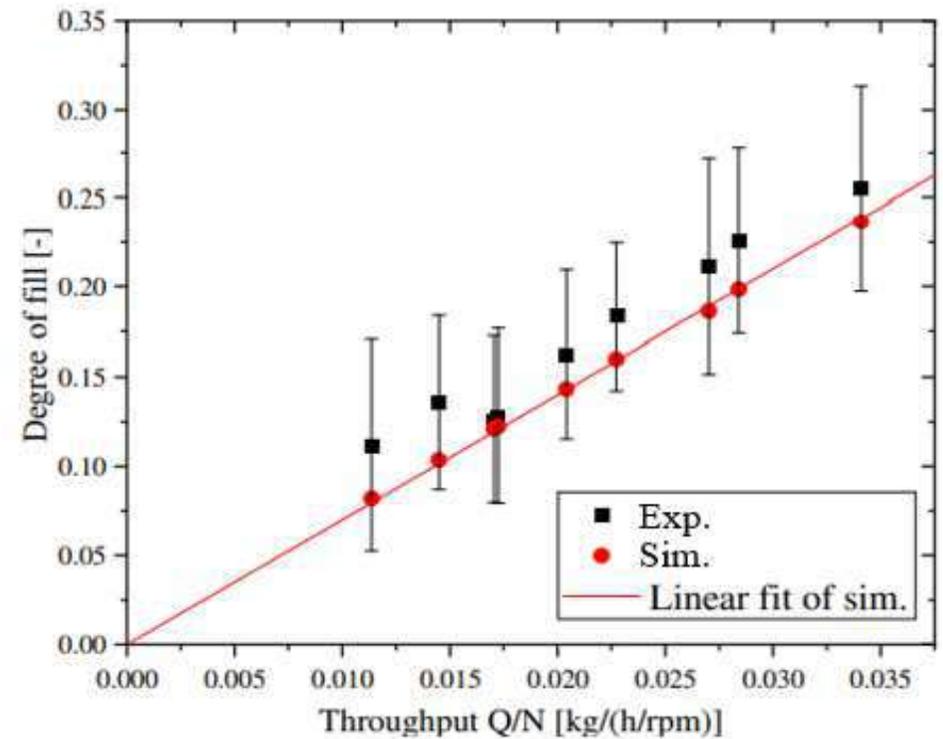
- 充満率の比較
(1kg/h, 88rpm)



- ラインレーザ評価方法の有効性検証



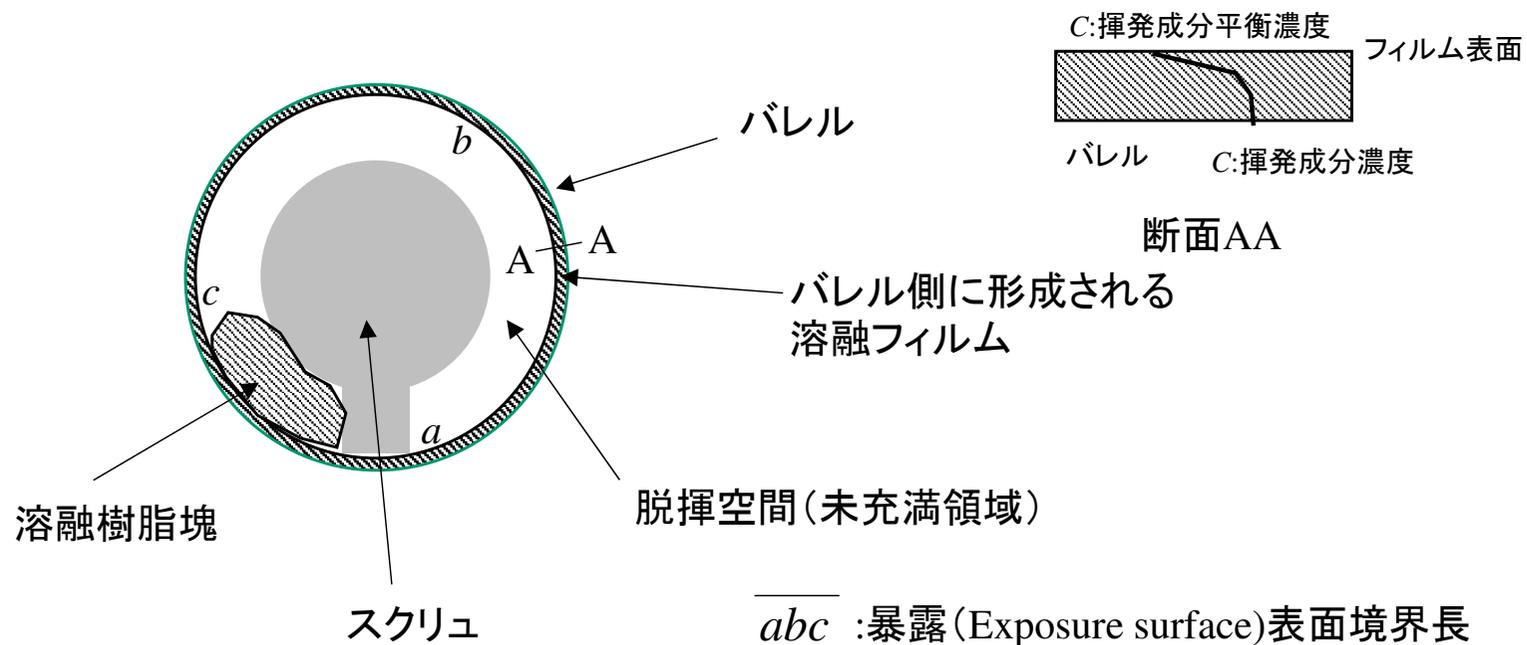
- Q/N の影響確認



脱揮シミュレーション

表面更新型脱揮解析モデル(Surface renewal model)

溶融樹脂の自由表面を介した拡散支配の脱揮プロセスを定量化するモデル



図： 未充満領域のスクリュ軸垂直断面内の状態

*) 参考文献: George A. Latinen, "Devolatilization of viscous polymer systems",
Advances in Chemistry, American Chemical society, 19,235-246(1962)

脱揮モデル拡散係数関数化

$$D = a_T D_r \exp\left(\beta \frac{\phi}{\phi_m}\right),$$

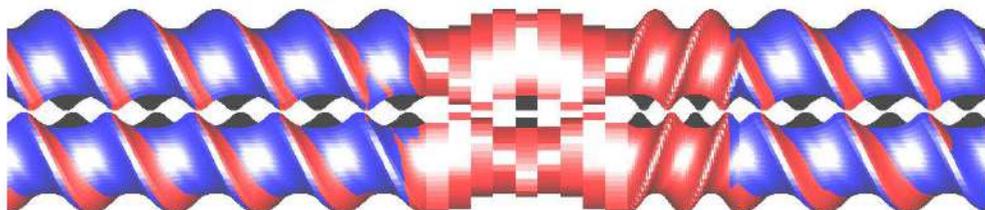
$$a_T = \exp(\alpha(T - T_r))$$

- α : モデルパラメータ
- β : モデルパラメータ
- T_r : 基準温度
- D_r : 基準温度における拡散係数
- ϕ : 揮発成分濃度
- ϕ_m : 揮発成分濃度最大(初期)値

解析結果例

Flow direction

充満率分布



揮発成分濃度分布/ Volatile concentration (ppm)

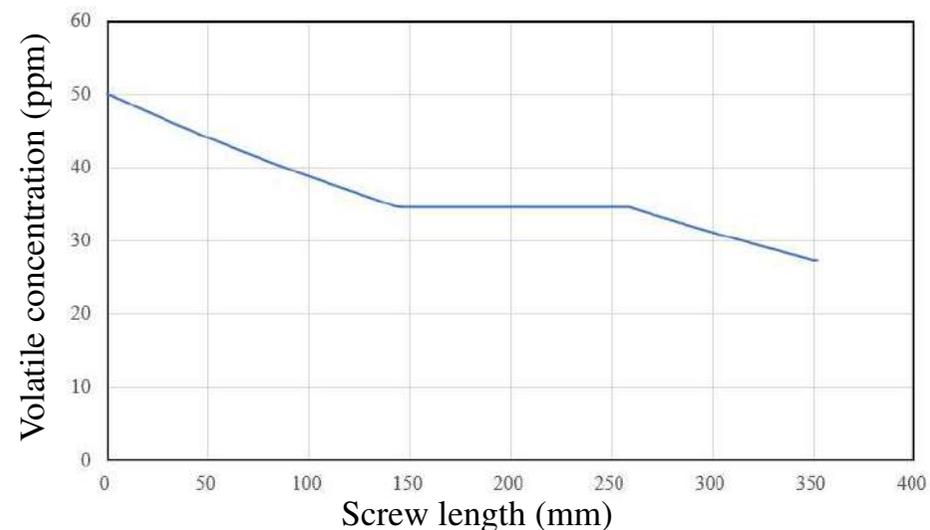
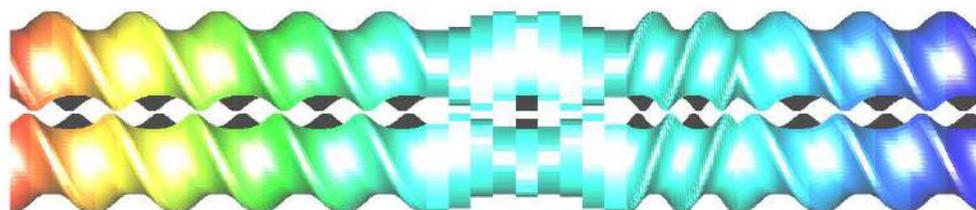


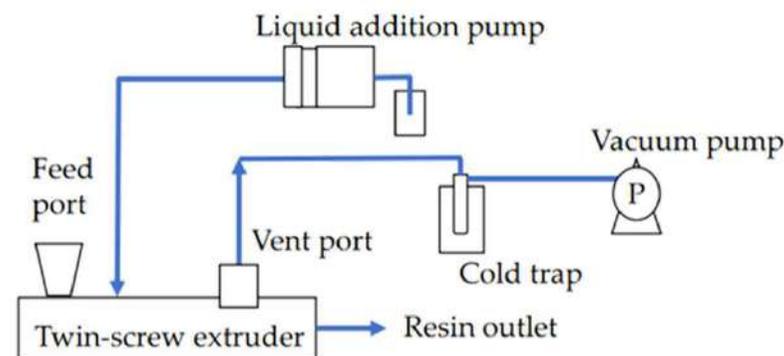
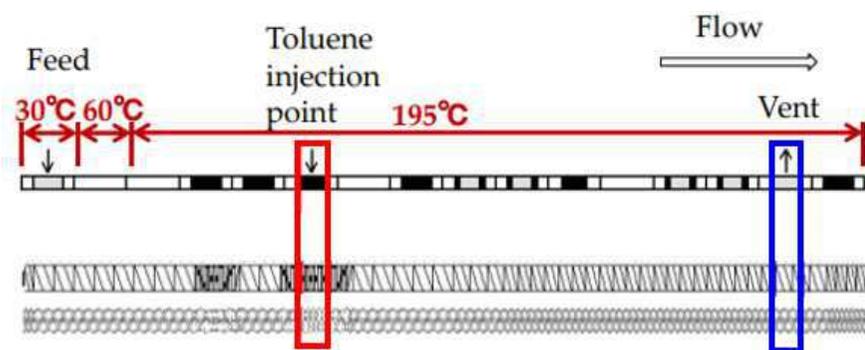
図:揮発成分濃度のスクリュ長依存性

【検証事例2】 脱揮検証解析

参考文献:

“Experimental and Numerical Simulation Study of Devolatilization in a Self-Wiping Corotating Parallel Twin-Screw Extruder”,
M. Ohara, Y. Sasai, S. Umemoto, Y. Obata, T. Sugiyama, S. Tanifuji, S. Kihara, K. Taki, Polymers. 12, 11, 2728 (2020)

○スクレイアウト (Φ26二軸スクリュ, L/D=64.6)



○成形樹脂：ホモポリプロピレン (F-704NP, プライムポリマー製)

○揮発成分：トルエン (special-grade reagent, purity 99.5%, FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation)

Table 1. Diffusion coefficient of polypropylene-toluene.

Temperature (°C)	Diffusion Coefficient (m ² /s)
25	4.58×10^{-13}
50	3.44×10^{-12}
80	1.16×10^{-11}

Table 2. Parameters used to calculate the diffusion coefficient.

Initial Volatile Concentration of Experiment (ppm)	Equilibrium Volatile Concentration, C* (ppm)	α	β	D_r (m ² /s)	T_r (°C)
30,000	4000	0.04	1	4.58×10^{-13}	25

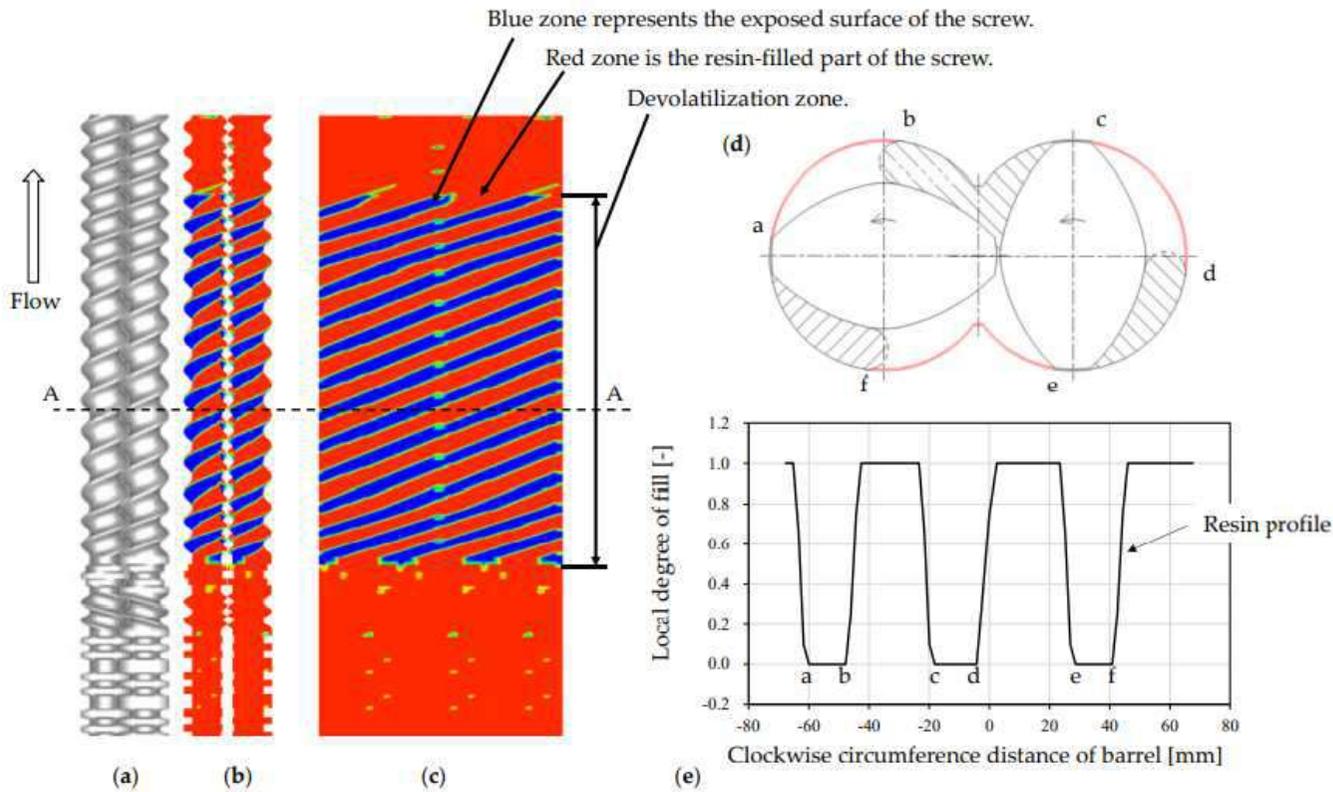


Figure 2. Devolatilization calculation section ($z_e - z_s$) and the exposed surface boundary length in a twin-screw extruder. (a) Screw configuration. (b) Resin distribution: red and blue indicate the local degree of fill 1 and zero, respectively. (c) Resin distribution on unwrapped screw geometry. (d) Cross-sectional view of screw, barrel, and resin in the starved zone. (e) Local degree of fill distribution as a function of clockwise circumference distance of the barrel.

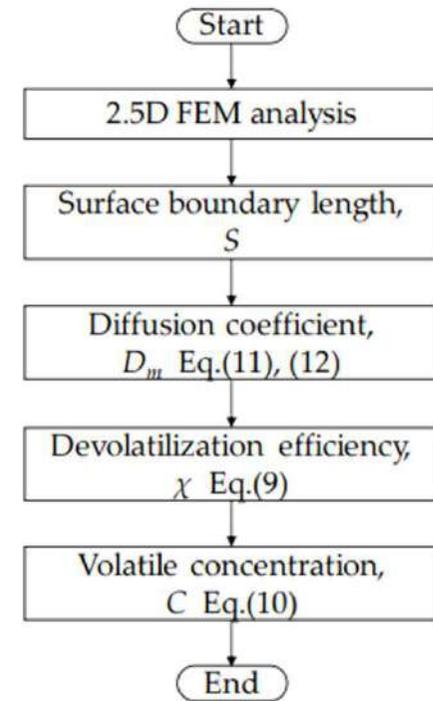


Figure 3. Flow chart for calculating the volatile concentration.

○解析結果

Figure 7. Simulation results of toluene concentration along the machine direction of twin-screw extruder.

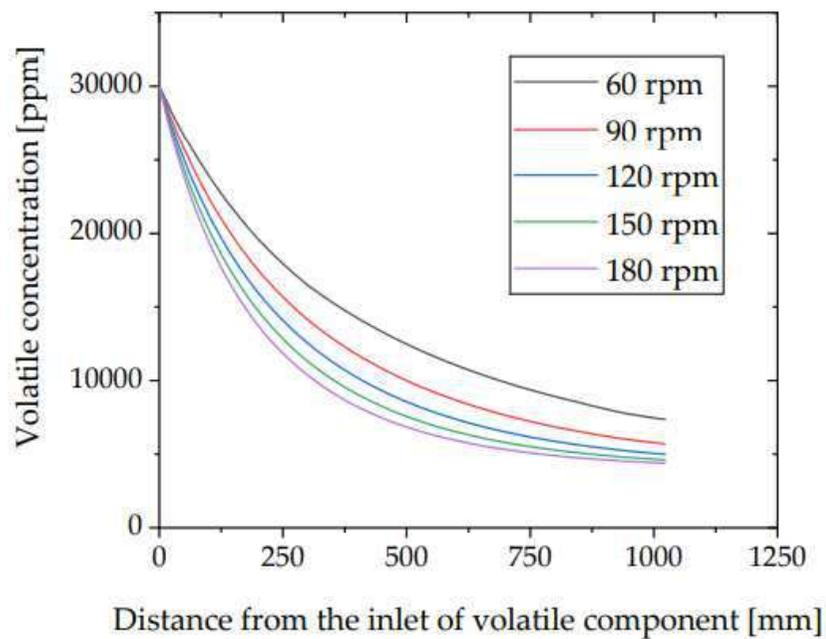
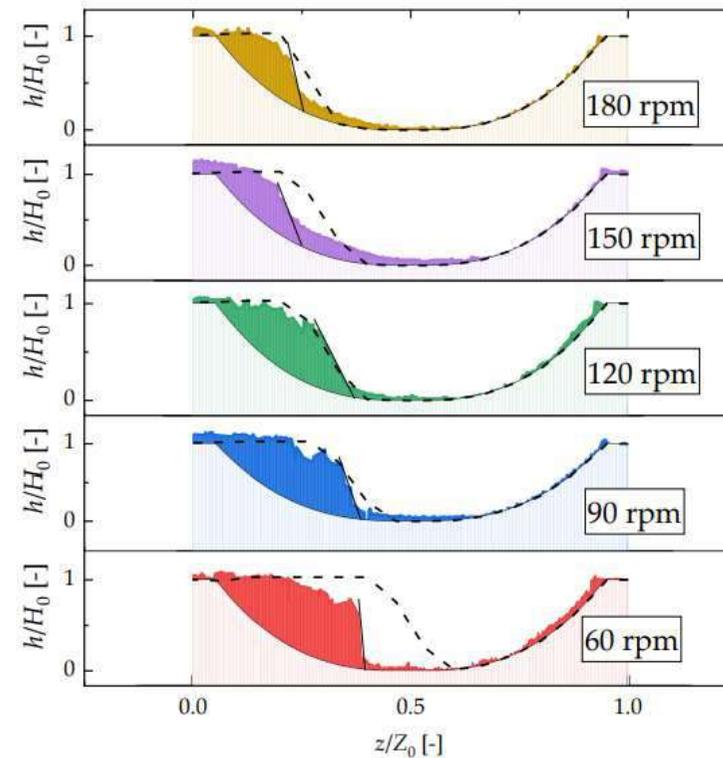


Figure 9. Effect of screw rotation speed on the resin distribution of the experimental and simulation results. The dotted lines show the simulation results and the experimental results are filled with colors.



混練性評価シミュレーション

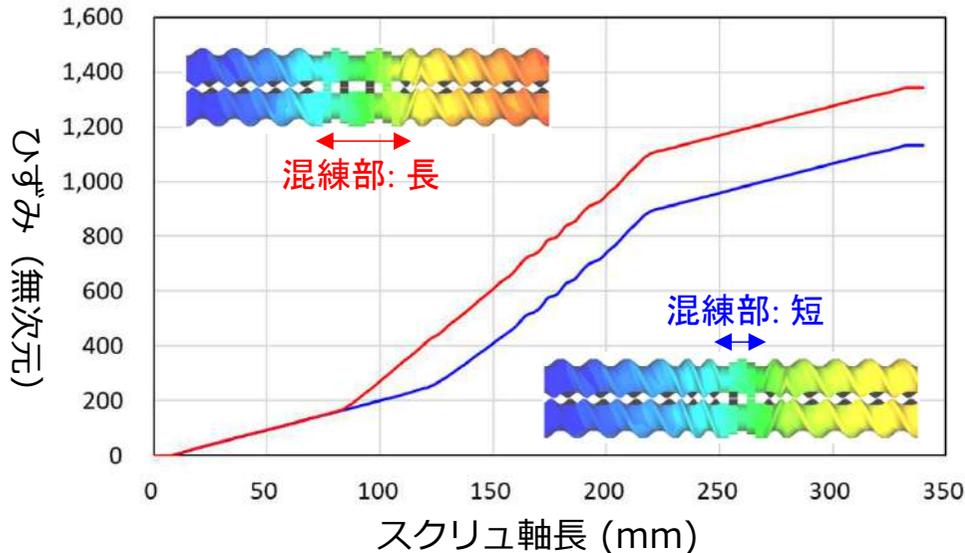
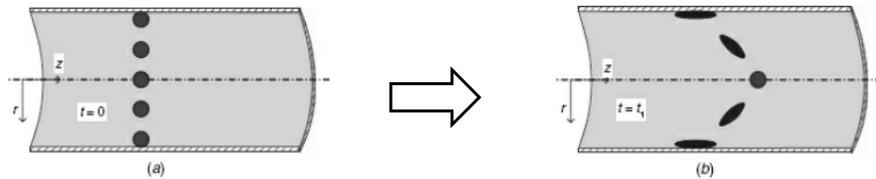
ひずみ履歴解析

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

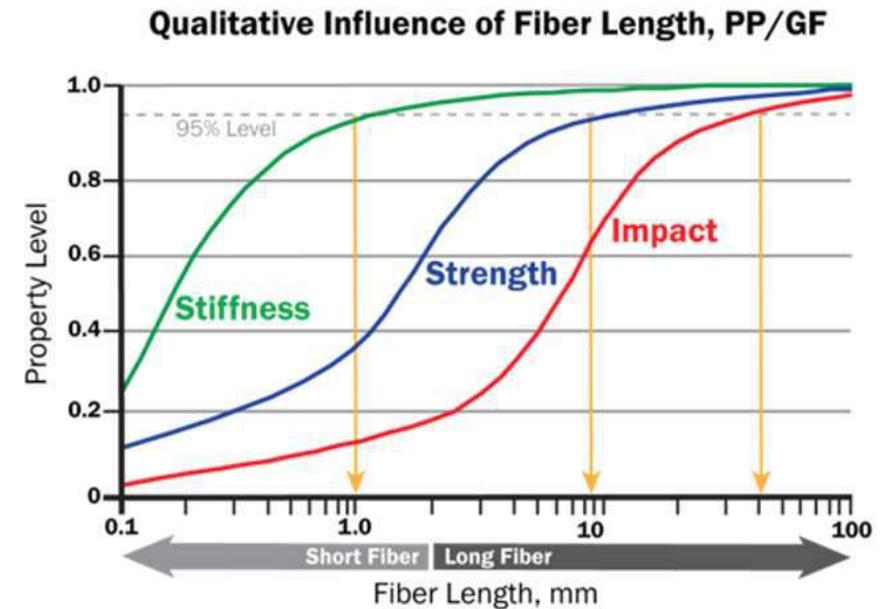
粒子運動軌跡に沿った履歴積分

Laminar mixing by shear flow

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



繊維破断シミュレーション (樹脂/フィラー複合材)



Composite properties are shown to increase with fiber-length

出典: J.L. Thomason & M.A. Vluc, Composites, A27 (1996)

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： $N_i (i = 1 \sim i \max)$

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

繊維長 l_i の
繊維数の変化率

繊維長 l_i の
破断に伴う減少率

繊維

別の繊維長 ($k > i$) の破断に
伴う繊維長 l_i の繊維の増加率

*) 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.

繊維破断確率の評価式

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

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

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

C_b : 無次元破断頻度係数

ζ : 無次元抗力係数

η_m : 流体粘度

E_f : 繊維ヤング率

d_f : 繊維断面直径

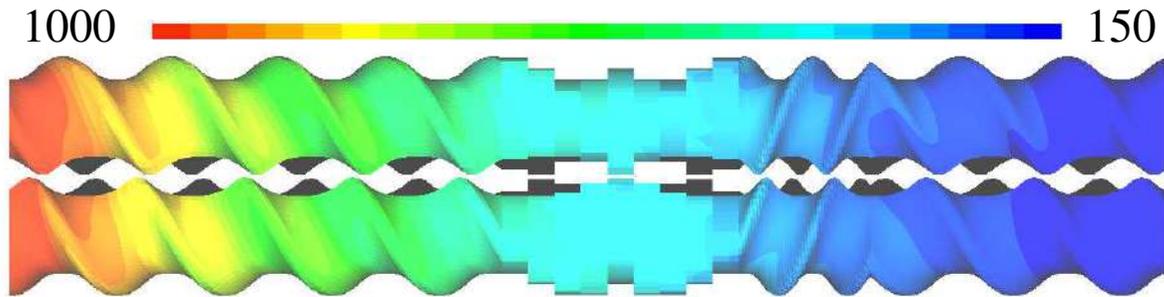
$$R_{ij} = C \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$x = l_i, \mu = \frac{l_j}{2}, \sigma = Sl_j$$

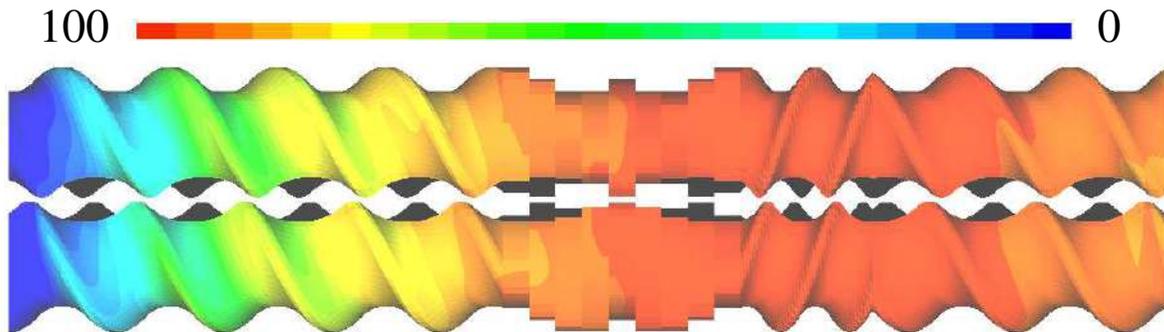
S : 繊維長分布の調整パラメータ

C : 規格化パラメータ

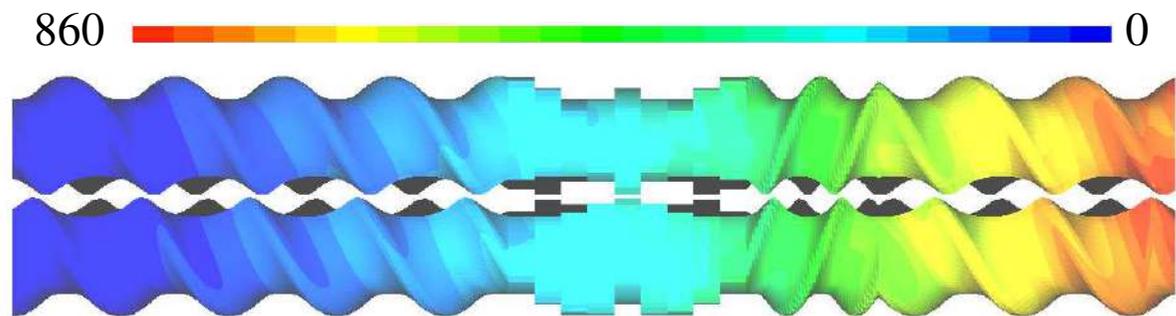
繊維破断解析例 / 区分毎の繊維長分布



Segment 10 (Fiber length:5400~6000 μ m)

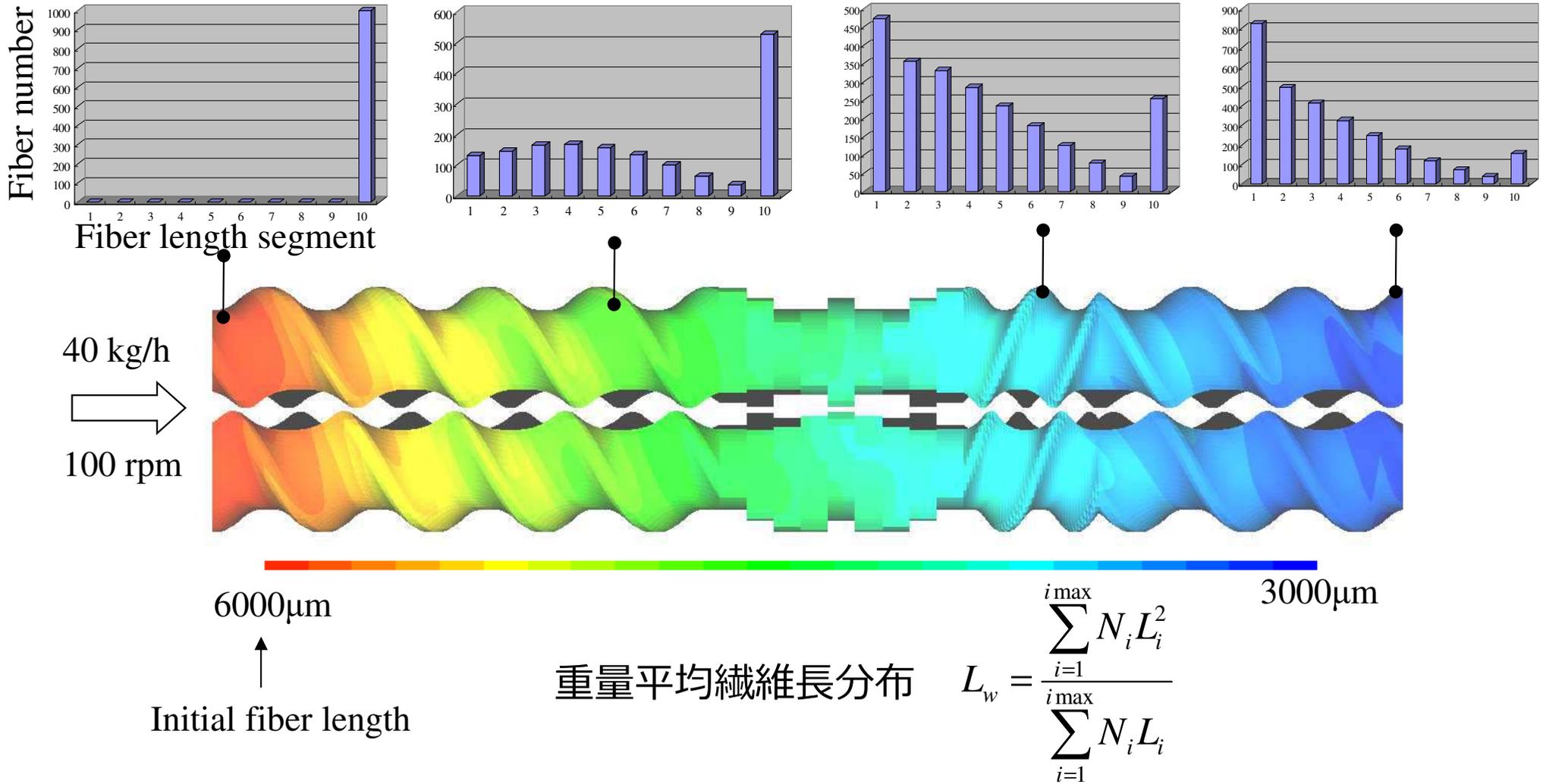


Segment 8 (Fiber length:4200~4800 μ m)



Segment 1 (Fiber length:0~600 μ m)

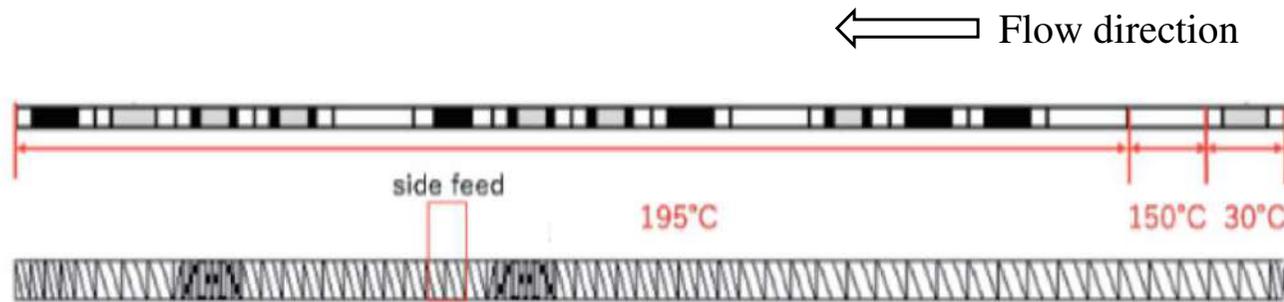
繊維破断解析例 / 繊維破断の進行状況評価



【検証事例3】 繊維破断検証解析

参考文献: 二軸押出機内における繊維破断挙動の実験的評価とHele-Shawシミュレーションに基づく予測
小幡祐也, 尾原正俊, 梅本翔, 谷藤眞一郎, 瀧健太郎, 成形加工シンポジウム'18 (C209,2018)

○スクレイアウト(Φ26, L/D=64)



○成形樹脂：ホモポリプロピレン(F-704NP, プライムポリマー製)

○ガラス繊維：チョップドストランド, 繊維長 3 mm, 繊維径 13 μm, 日本電気硝子製)

○繊維長測定：マイクロスコープ (VHX-6000, キーエンス製)
各条件につき200本のガラス繊維の長さを測定し、数平均繊維長を算出

○解析の繊維破断パラメータ： $(C_b, \zeta, S) = (0.002, 0.1, 0.05)$, 繊維濃度 3.0 wt.%

○解析結果

- ・ 実験結果と解析結果の比較
(押出量 10kg/h, スクリュ回転数 200rpm)

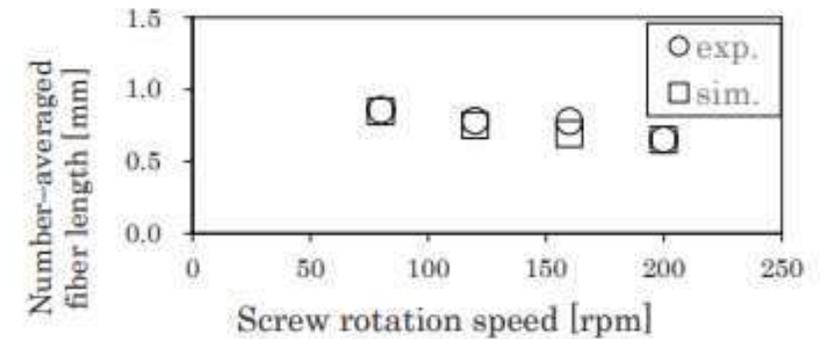
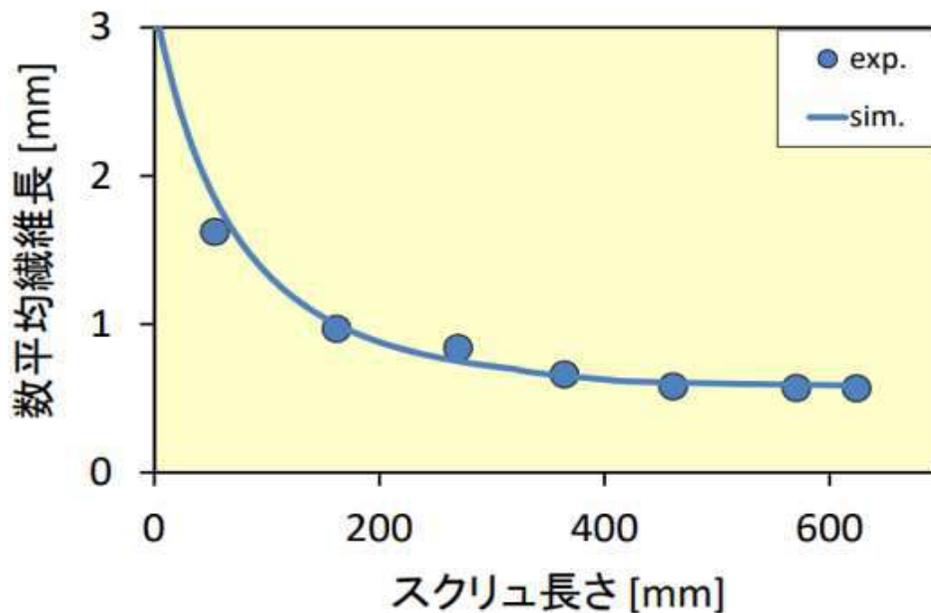


Fig. 2 Effect of screw rotation speed on number-averaged fiber length at feed rate of 10 kg/h.

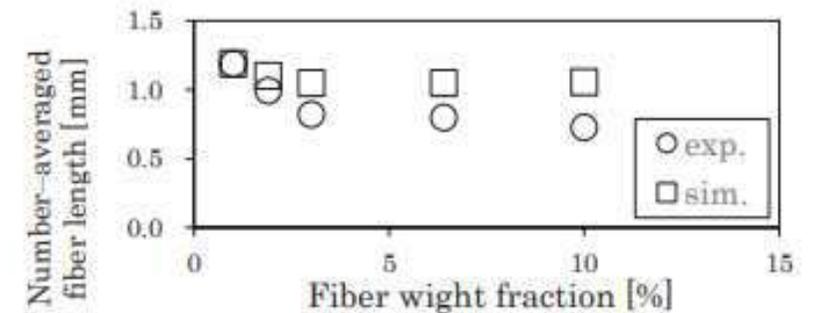


Fig.3 Effect of fiber weight fraction on number-averaged fiber length in screw rotation speed of 40 rpm.

(参考) ユーザ様との共同検討

当社Webサイト (<https://www.hasl.co.jp/sub92.html>) より抜粋

開催概要	
日時	2023年11月17日(金) 13:00～17:50 懇親会(18:00～20:00)
会場	ステーションコンファレンス池袋 Room 1 (12階)
主催	株式会社H A S L
定員	100名 (先着申込み順)
費用	無償 (事前申込み制)

タイムスケジュール		
13:00～13:20	受付	
13:20～13:25	開会のご挨拶	HASL社代表 谷藤 眞一郎
13:25～14:10	◆基調講演 『押出成形とレオロジー、そして少しの経営論』	山形大学前学長 山形大学名誉教授 小山 清人 様
14:10～14:40	◆話題提供 『二軸混練押出プロセスのセンシングとシミュレーション、データ解析技術のDXに向けた取り組み』	金沢大学 理工研究域 フロンティア工学系 教授 瀧 健太郎 様
14:40～14:50	休憩	
14:50～15:10	◆Twin Screw Simulator ユーザ事例① 『高分子水溶液における脱揮押出の基礎検討とTwin Screw Simulatorを用いた含水量および分子劣化の予測』	積水化学工業株式会社 高機能プラスチックカンパニー 設備・生産技術部 生産技術G 首席技術員 千葉 高充 様
15:10～15:30	◆Twin Screw Simulator ユーザ事例② 『二軸押出機による脱揮プロセス解析』	三菱ケミカル株式会社 生産技術部 三重生産技術開発室 垣内 麻美 様

HASLユーザ会 情報 (2011年～2023年) ～毎年秋に開催しています～

【第10回HASLユーザ会】2023年11月17日(金) ステーションコンファレンス池袋

【第9回HASLユーザ会】2019年11月14日(木) 中野サンブラザ

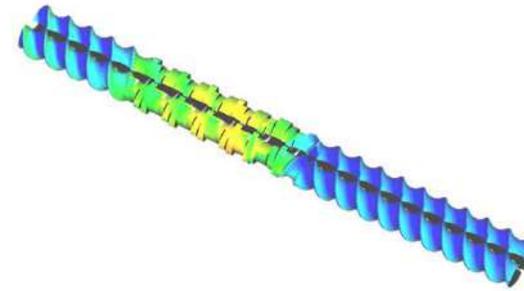
【第8回HASLユーザ会】2018年11月15日(木) 中野サンブラザ

【第7回HASLユーザ会】2017年11月14日(火) 中野サンブラザ

【第6回HASLユーザ会】2016年11月25日(金) 中野サンブラザ

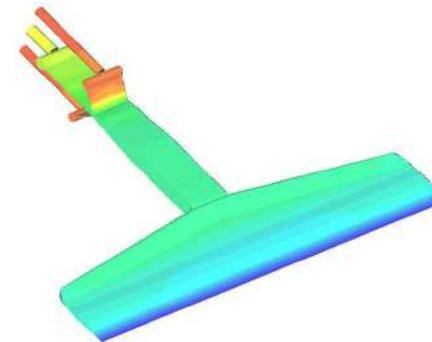
15:30～15:50	◆Twin Screw Simulator ユーザ事例③ 『スクリュモ耗が及ぼす混練への影響調査』	三井化学株式会社 生産技術研究所 先端解析グループ 別段 碧 様
15:50～16:10	◆Twin Screw Simulator ユーザ事例④ 『二軸押出における分解反応の感度解析』	東洋紡株式会社 コーポレート研究所 シミュレーションセンター 石原 暹一 様
16:10～16:30	◆Single Screw Simulator ユーザ事例⑤ 『Single Screw Simulatorを用いた長繊維強化樹脂の繊維破断解析』	ポリプラスチックス株式会社 研究開発本部 テクニカルソリューションセンター 村松 優哉 様
16:30～16:40	休憩	
16:40～17:45	HASL 製品改良成果報告 HASL社製品改良成果資料 I (2023) 配布資料(PDF) HASL社製品改良成果資料 II(2023) 配布資料(PDF)	株式会社H A S L 執行役員 依藤 大輔 代表取締役 谷藤 眞一郎

1. 二軸スクリュ押出機内の熱流動解析
 - 2.5D FEMの基本理論
 - 二軸スクリュ解析への適用
 - 実験検証事例



二軸スクリュ

2. 多層フィルム押出機内の熱流動解析
 - 多層フィルム解析への適用と実験検証事例

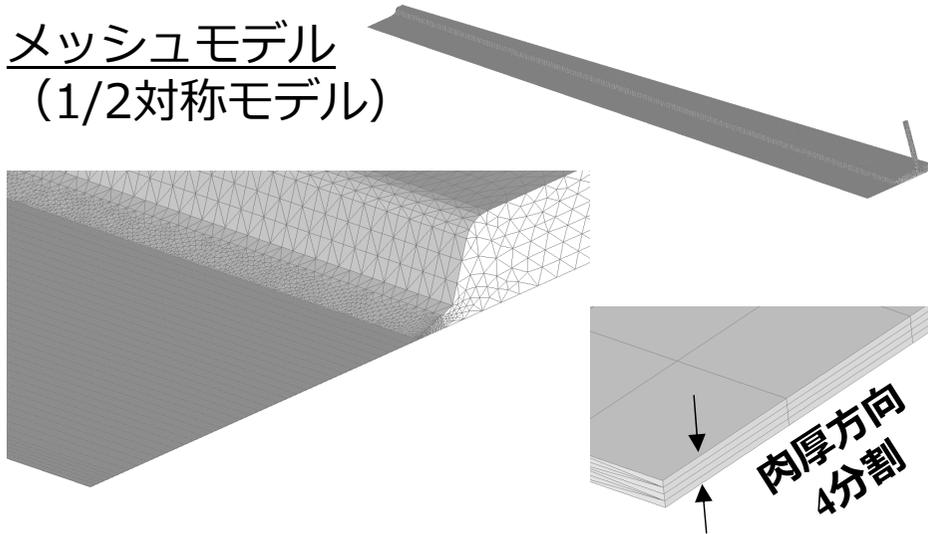


フィードブロックタイプ多層Tダイ

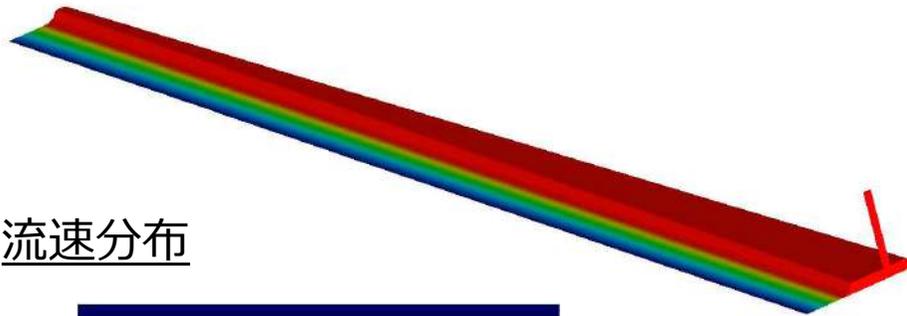
2. 多層フィルム押出機内の熱流動解析

3D解析例 (単層)

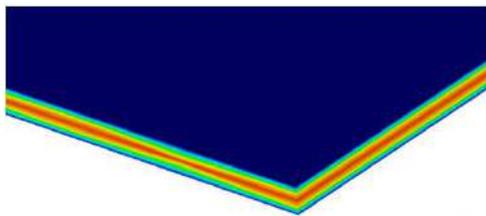
メッシュモデル
(1/2対称モデル)



圧力分布

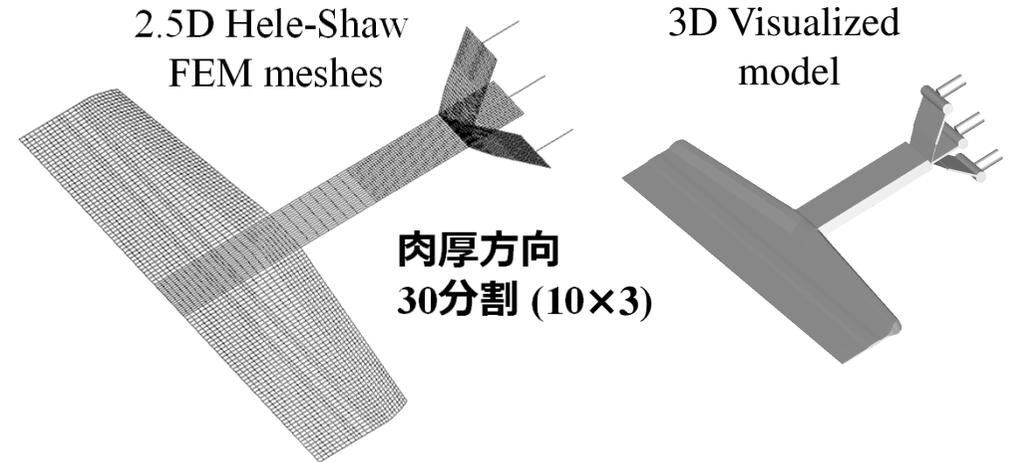


流速分布

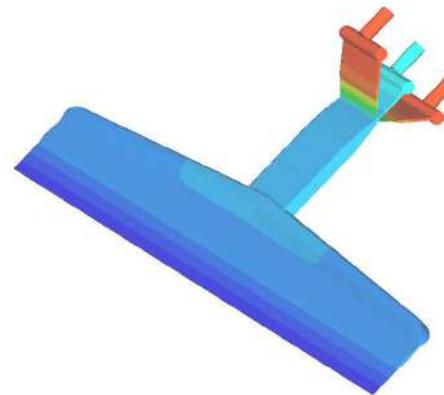


2.5D解析例 (多層)

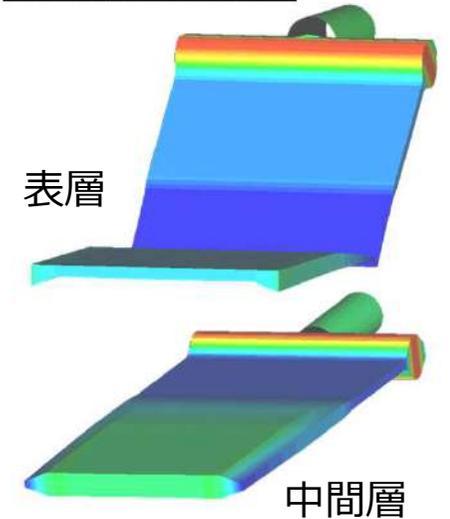
メッシュモデル



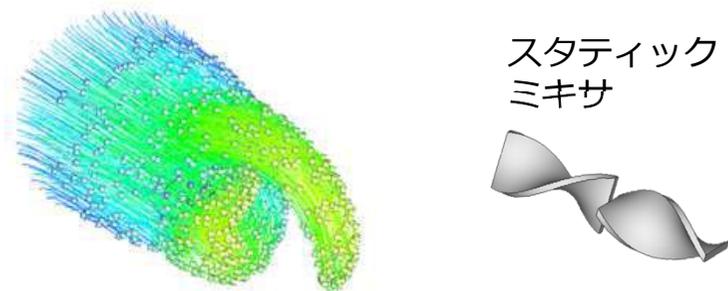
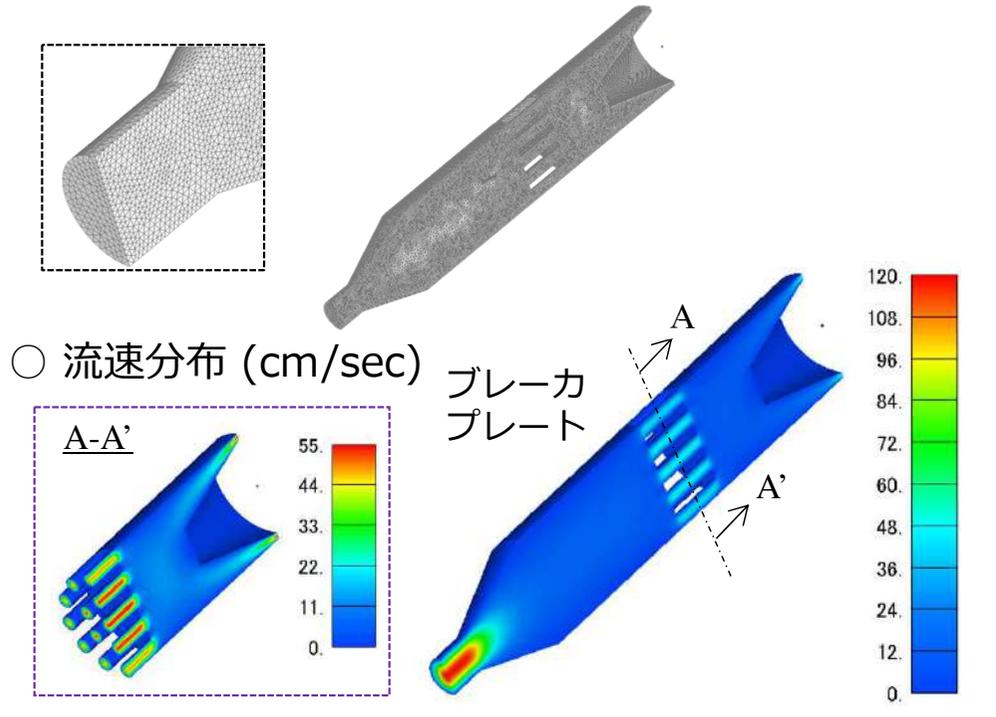
圧力分布



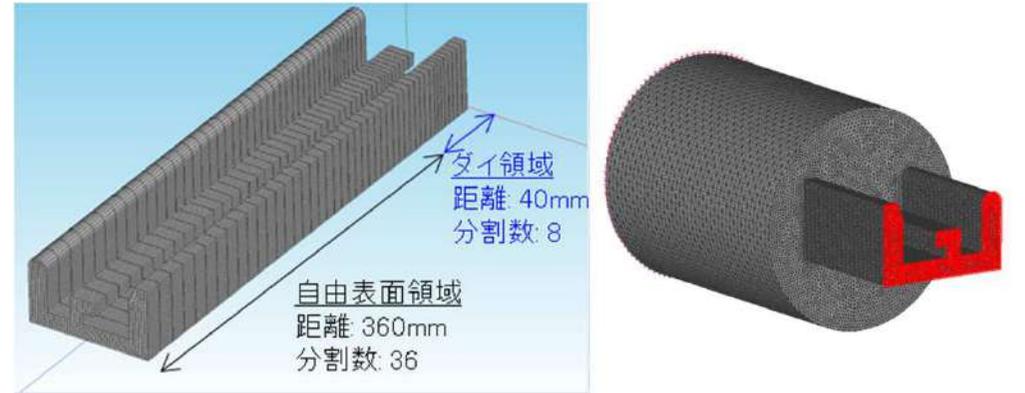
FB部肉厚分布



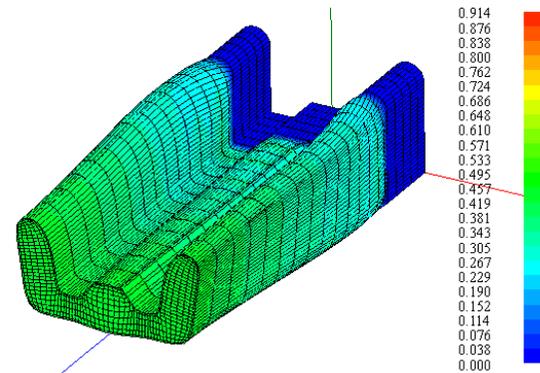
スクリュウ出口以降の流路



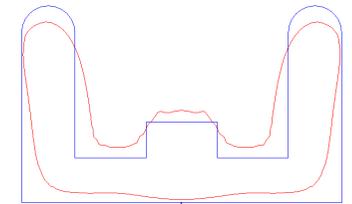
異形押出成形



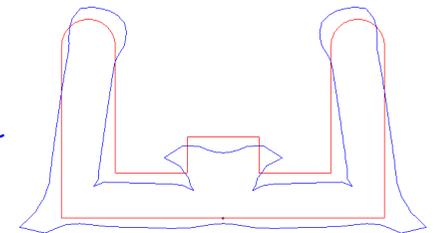
○ 流速分布 (cm/sec)



赤：順解析により予測された流出面の最終形状



青：逆解析により予測されたダイ流入面の最適形状



多層流動解析への2.5D FEM適用

原型表式

射出成形CAEの基幹技術 (since 1970'~)
Cornell University (米国) で発明

$$Q_{\alpha} = S_{\alpha\beta} P_{\beta}$$

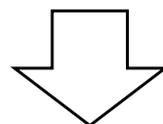
↑
流量

↑
圧力勾配流れの寄与

α, β : 節点番号

$S_{\alpha\beta}$: 流動コンダクタンス

一般化表式



問題の特徴に着目し、
解析的積分手順を一般化

スクリー内の流動解析

$$Q_{\alpha} = S_{\alpha\beta} P_{\beta} + D_{\alpha}$$

↑
牽引流れの寄与

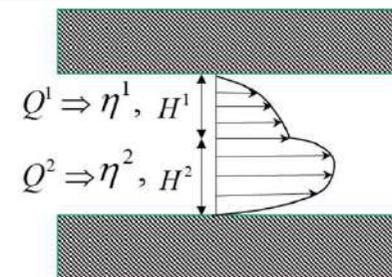
多層流動解析

$$Q_{\alpha}^l = S_{\alpha\beta}^l P_{\beta}^l + F_{\alpha}^l = 0 \text{ for } l = 1 \sim n$$

↑
層間相互作用

n : 層数

D_{α}, F_{α}^l : 一般化付加項



Derivation of PEM (Pseudo Encapsulation Model)

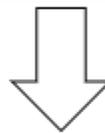
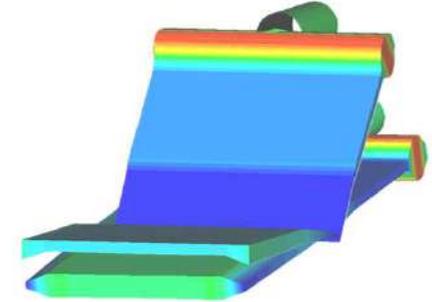
Governing equations

Momentum equation for creep flow

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0$$

CEF (Criminale Ericksen Filbey) model^{*})

$$\boldsymbol{\tau} = 2\eta\mathbf{D} - \psi_1 \overset{\nabla}{\mathbf{D}} + 4\psi_2 \mathbf{D} \cdot \mathbf{D}$$



Steady state

$$u \gg v, w$$

Uniformity in machine direction

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = 0$$

Viscoelastic momentum equations

MD: Machine Direction

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

Equivalent to viscous fluid equation

Thickness Direction

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

TD: Transverse Direction

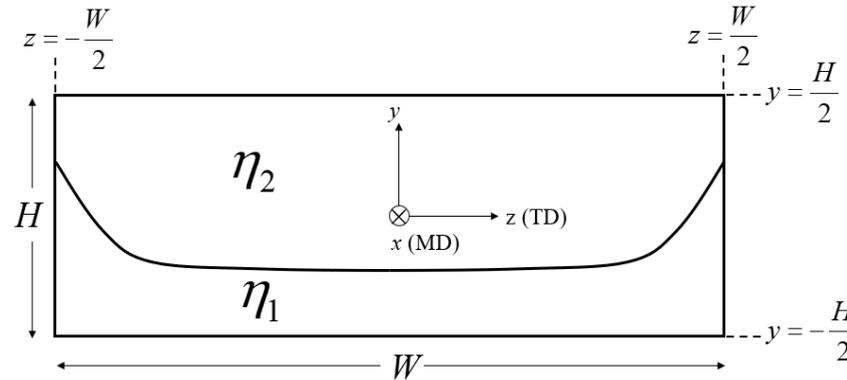
$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y}(\psi_2 \dot{\gamma}_{xy} \dot{\gamma}_{xz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\psi_2 \dot{\gamma}_{xz}^2)$$

Generates pressure gradient in each direction

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

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

Representation of the encapsulation by using PEM



$$2 \left(\frac{\eta_1}{h_1} + \frac{\eta_2}{h_2} \right) u \frac{\partial h_1}{\partial x} = p_1 - p_2 + \left(\psi_{2,2} \langle \dot{\gamma}_{W2}^2 \rangle - \psi_{2,1} \langle \dot{\gamma}_{W1}^2 \rangle \right) g_f(z)$$

$$\begin{cases} p_1 > p_2 \rightarrow \frac{\partial h_1}{\partial x} > 0 \\ p_1 < p_2 \rightarrow \frac{\partial h_1}{\partial x} < 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \psi_{2,2} \left(\frac{1}{\eta_2} \frac{\partial p_2}{\partial x} \right)^2 > \psi_{2,1} \left(\frac{1}{\eta_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} \right)^2 \rightarrow \frac{\partial h_1}{\partial x} > 0 \\ \psi_{2,2} \left(\frac{1}{\eta_2} \frac{\partial p_2}{\partial x} \right)^2 < \psi_{2,1} \left(\frac{1}{\eta_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} \right)^2 \rightarrow \frac{\partial h_1}{\partial x} < 0 \end{cases}$$

Assumption: $p_1 \cong p_2,$

$$\lambda = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\psi_{2,1}}{\psi_{2,2}} < 1 \quad \Rightarrow \quad \lambda^2 < \lambda \rightarrow \frac{\partial h_1}{\partial x}$$

Low-viscosity fluid always encapsulates high-viscosity fluid !!!

【検証事例4】 3層フィードブロックTダイ解析

「A Generalized 2.5D FEM Formulation
for Steady Non-Newtonian Viscous Multi Flow : Part 1 & 2」

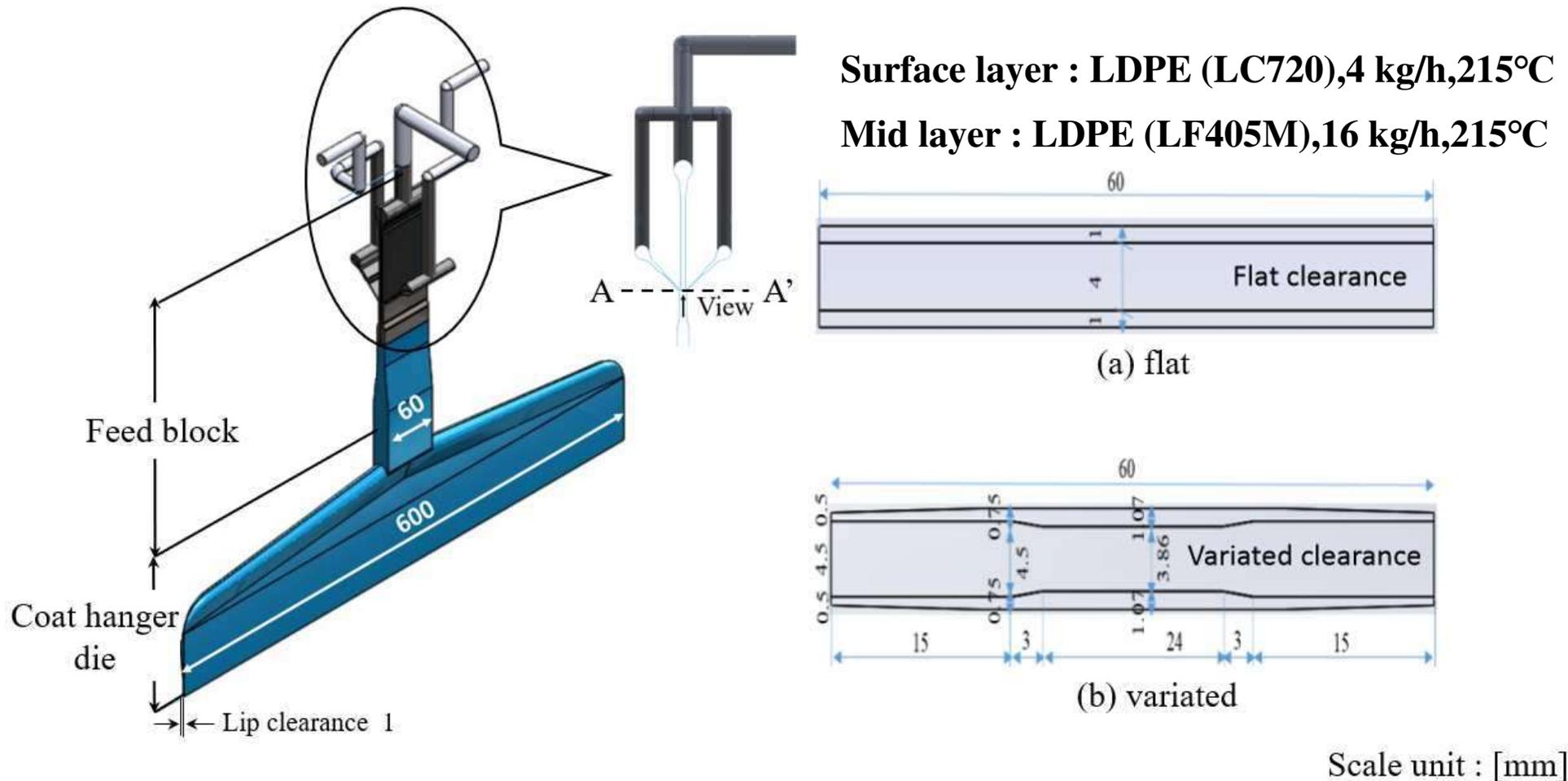
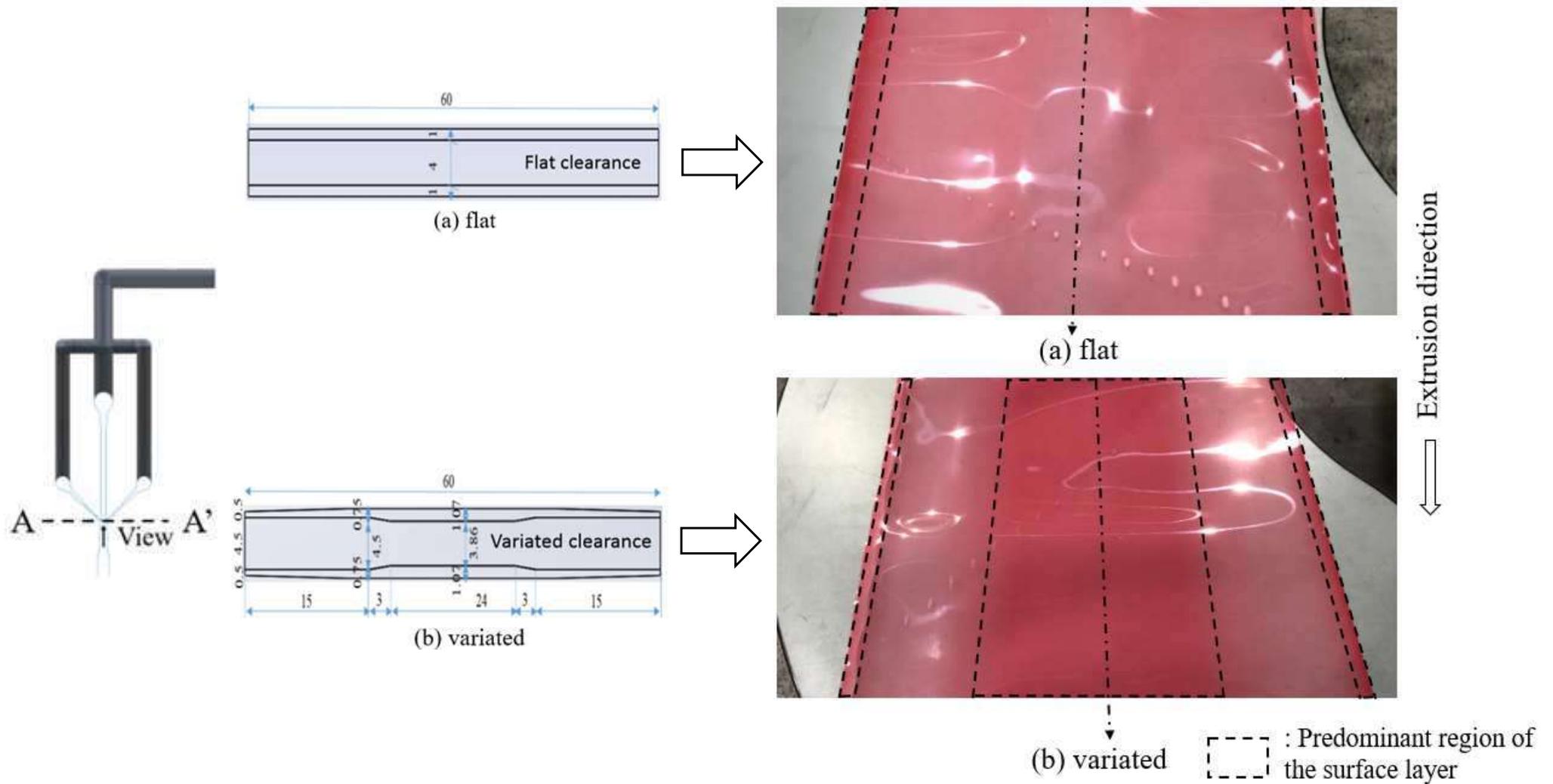


Fig. 1 Feed block type coat hanger die used in the experimental verification



**Fig. 2 Snapshots of the extruded multilayer film
((a) flat and (b) varied)**

2.5D FEM model

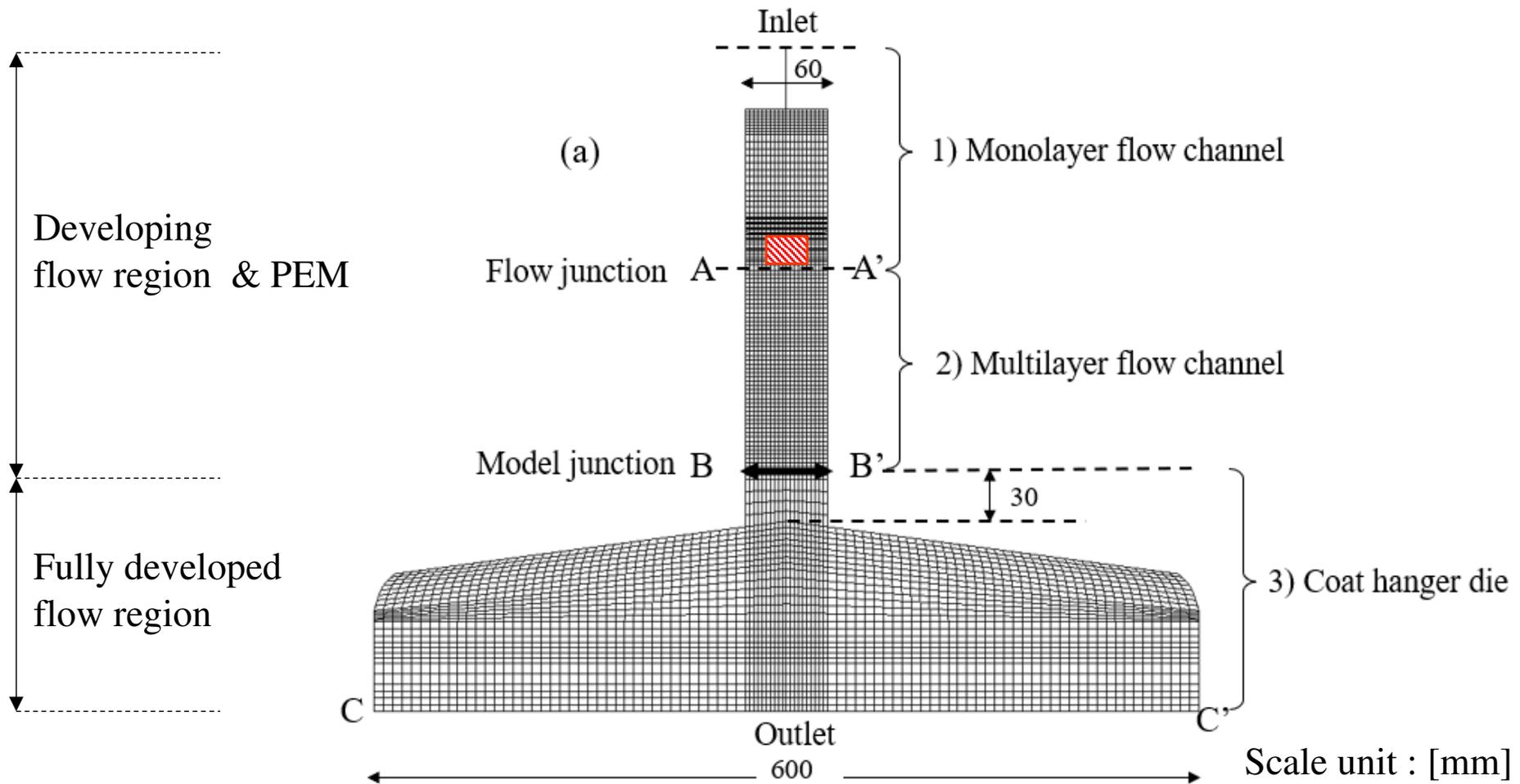
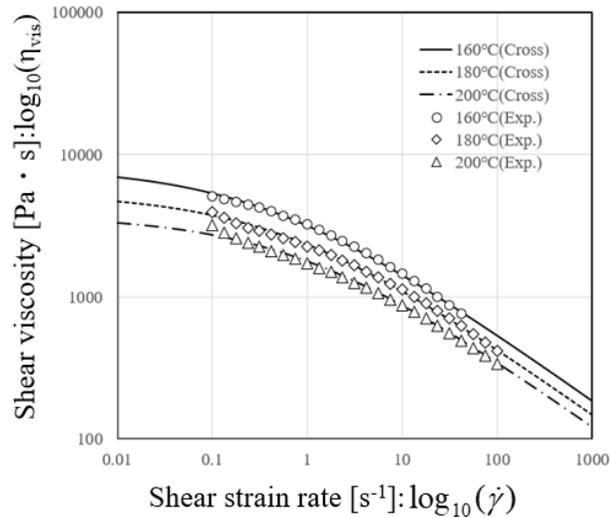


Fig. 3 Multi layer flow analysis model

Material properties

(a) LC720
Surface layer



(b) LF405M
Mid layer

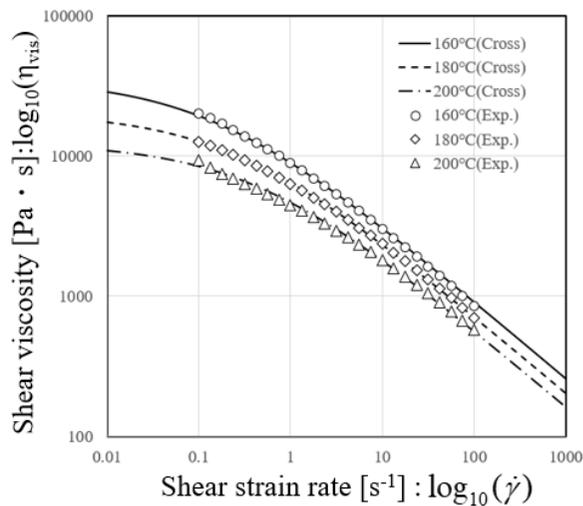


Table 1 Second normal coefficients of PEM

Case	Second normal stress difference coefficient : Ψ_2 [Pa · s ²]		
	Layer 1	Layer 2	Layer 3
0	0	0	0
1	0	-60	0
2	-8	-60	-8
3	-10	-60	-10
4	-18	-60	-18

LDPE (LC720,LF405M)
supplied by Japan Polyethylene Corp.

Fig.4 Flow curve fitted by using the Cross model

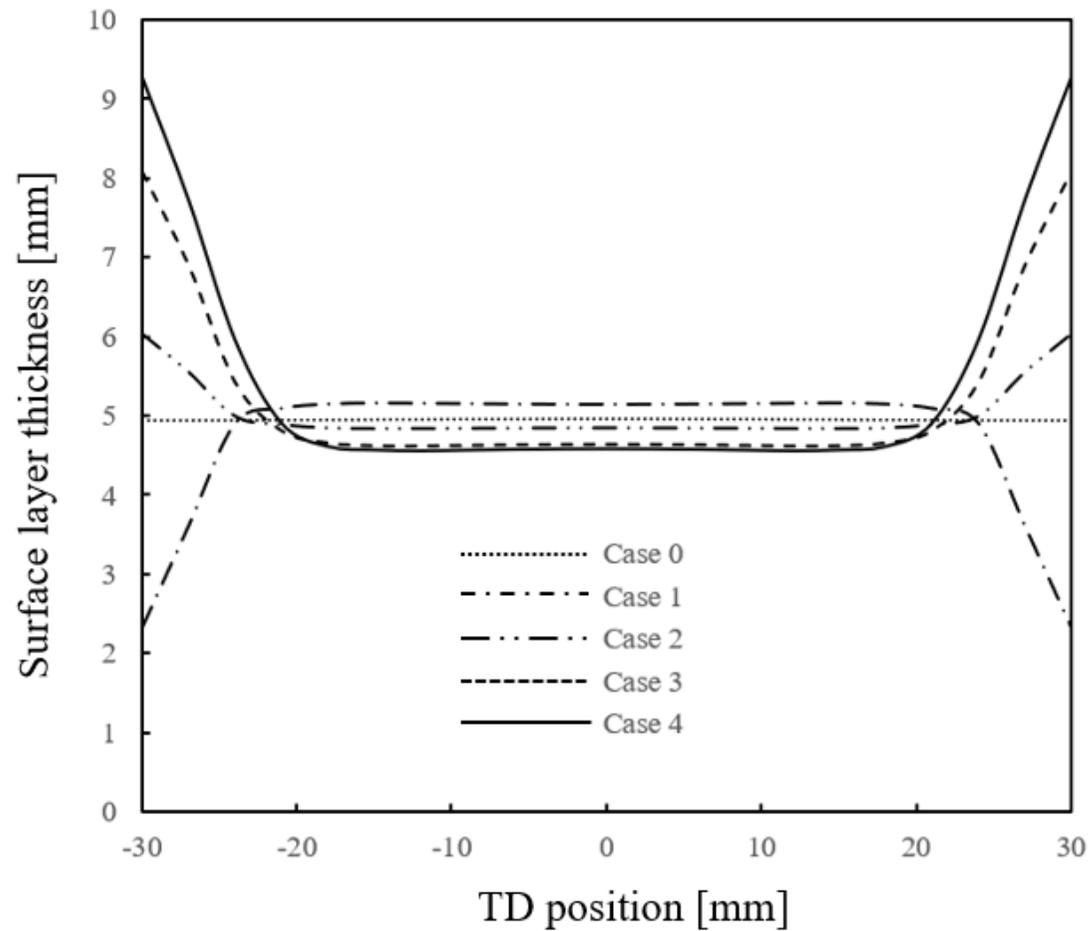
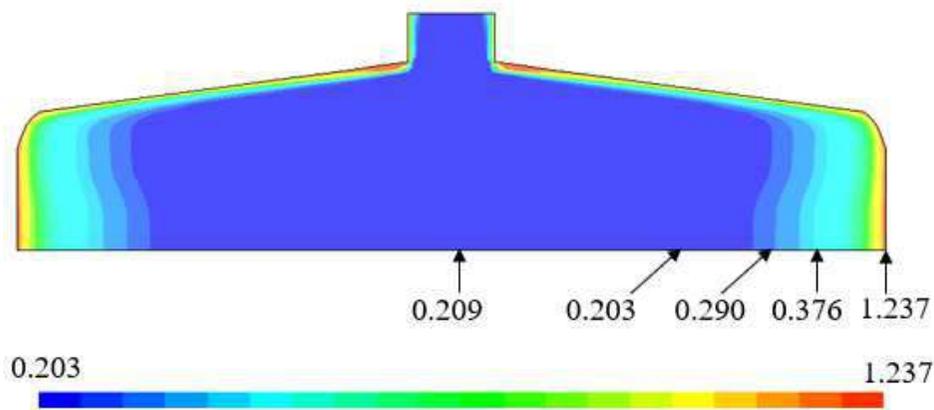
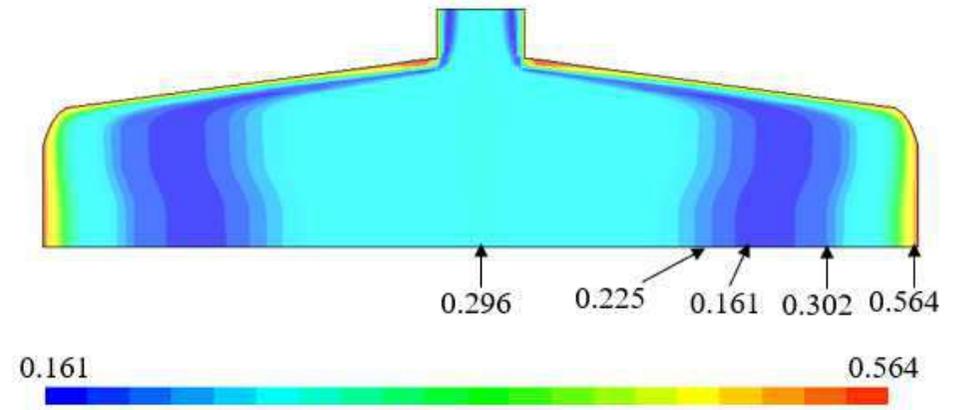


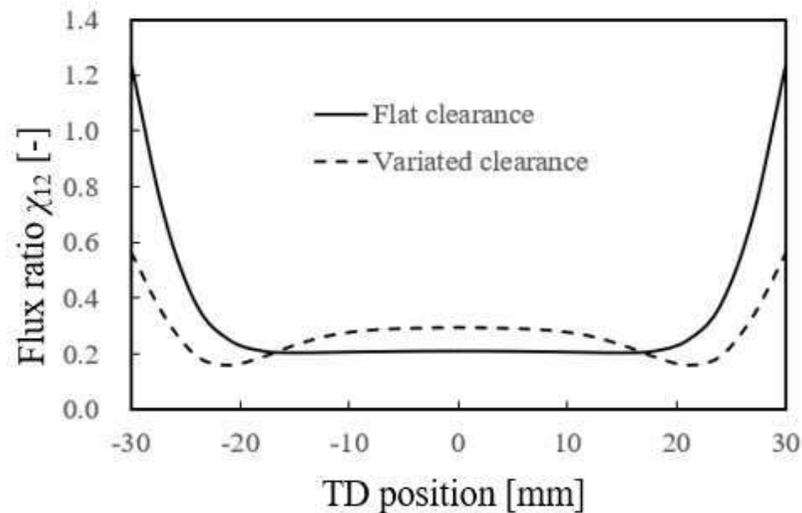
Fig. 5 Predicted surface layer thickness at the outlet position (B-B') of the feed block channel



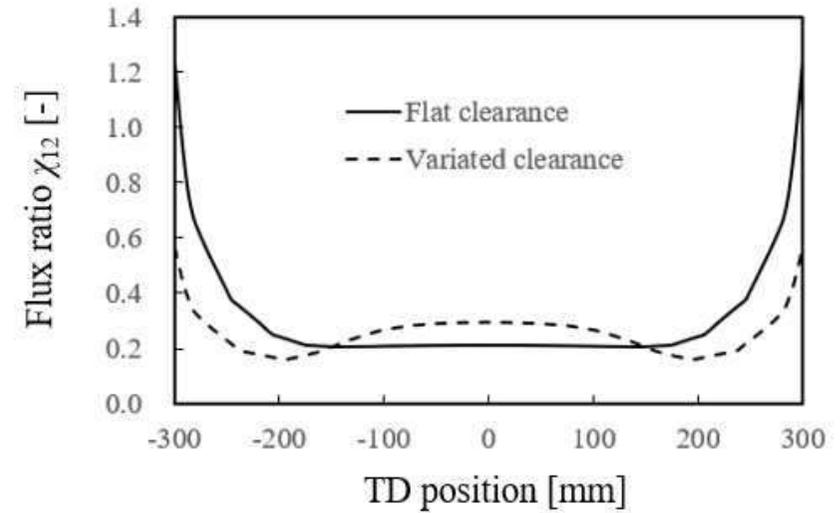
(a) flat



(b) varied



(c) inlet



(d) outlet

Fig. 7 Predicted flux ratio $\chi_{12}(=q_1/q_2=\chi_{32})$: contour plot of (a) flat and (b) varied , graph plot of (c) inlet (B-B') and (d) outlet (C-C')

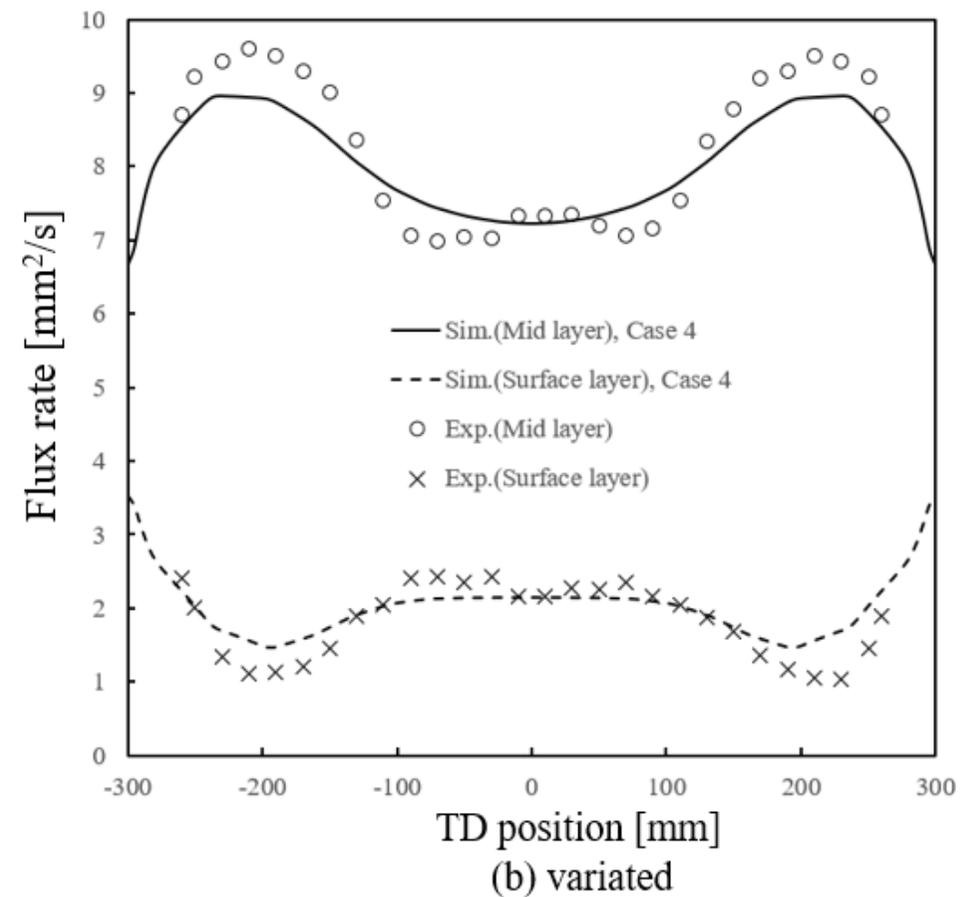
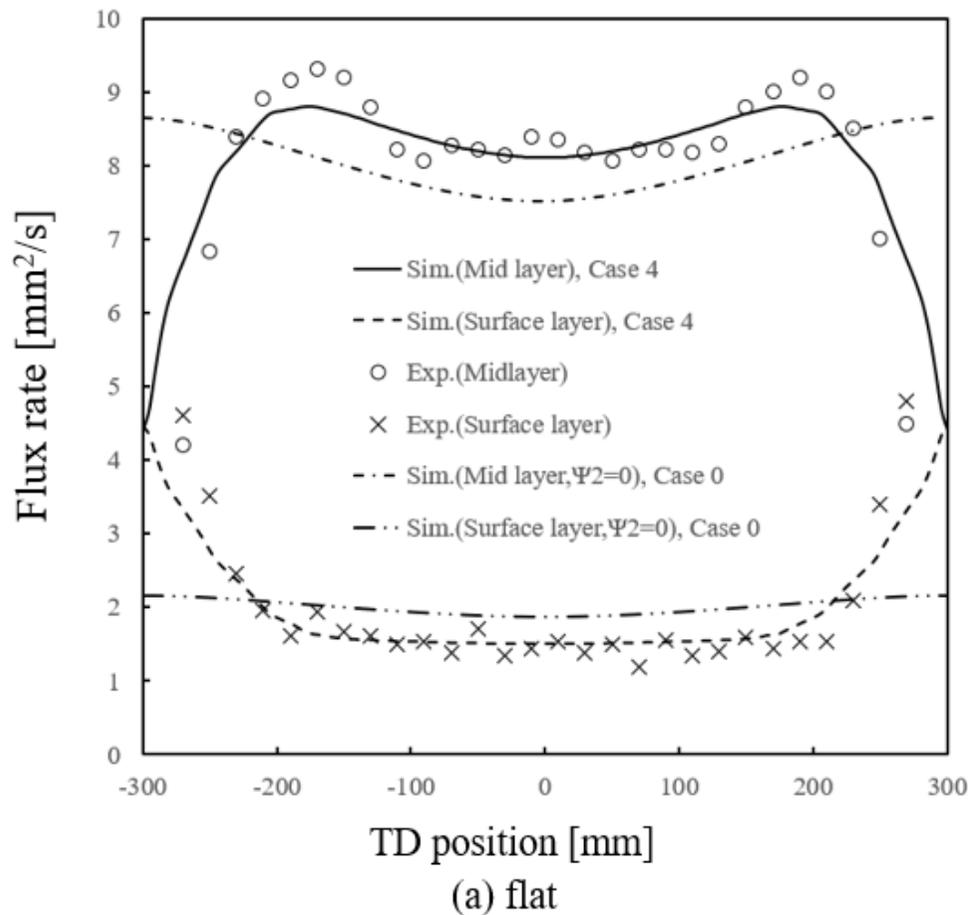


Fig. 8 Comparison of the measured and the predicted flux rate at the die outlet position (C-C'), ((a) flat and (b) varied)

- 1) Ohara, M., Tanifuji, S., Sasai, Y., Sugiyama, T., Umemoto, S., Murata, J., Tsujimura, I., Kihara, S. and Taki, K.
「Resin Distribution along Axial and Circumferential Directions of Self-Wiping Co-Rotating Parallel Twin-Screw Extruder」
AICHE J., **66**,11,e17018(2020) Twin Screw
- 2) Ohara, M., Sasai, Y., Umemoto, S., Tanifuji, S., Kihara, S. and Taki, K.
「Experimental and Numerical Simulation Study of Devolatilization in a Self-Wiping Corotating Parallel Twin-Screw Extruder」
Polymers, **12**,11,2728(2020) Twin Screw
- 3) Tanifuji, S., Yorifuji, D., Kibou, T. and Tatsumi, M.
「A Generalized 2.5D FEM Formulation for Steady Non-Newtonian Viscous Multi Flow Part 1: Formulation and Theoretical Verification」
Seikei-Kakou, **33**,2,60(2021) Multi Layer Die
- 4) Tanifuji, S., Yorifuji, D., Kibou, T. and Tatsumi, M.
「A Generalized 2.5D FEM Formulation for Steady Non-Newtonian Viscous Multi Flow Part 2: Implementation of Pseudo Encapsulation Model and Experimental Verification」
Seikei-Kakou, **33**,12,447(2021) Multi Layer Die
- 5) Liu, C., Mikoshiba, S., Kobayashi, Y., Ishigami, A., Yorifuji, D., Tanifuji, S. and Ito, H.
「Experimental Investigation and Numerical Simulation of a Self-Wiping Corotating Parallel Octa-Screw Extruder」
Polymers, **14**,6,1201(2022) Octa Screw



成果

Hele-Shaw薄肉流れに立脚した 2.5D FEM 定式化により, 要素肉厚方向に対する流速成分は無視されるが, 同方向に生じる速度勾配や温度勾配を考慮するために各要素は肉厚方向にも離散化される. そのため, 解析で得られる流速や温度分布は, 軸方向, 周方向, および肉厚方向の3D情報として定量化される。

スクリュ回転に伴ない発生する牽引力を考慮した二軸スクリュ解析では, 未充填状態の評価が可能であることに加えて, 計算負荷が小さいため押出機全域の解析が可能である. 当技術と輸送方程式で表現される数理モデルを併用することで, 混練性能, 複合材の繊維破断, 脱揮性能, 反応押出など, 実用性の高い評価項目の解析に対応可能である.

多層フィルム解析では, 多層流体間で発生する相互作用力の考慮により, 合流直後の発達状態にある流動挙動について2.5D FEMの定式化を拡張した. 加えて, CEF (Criminale Ericksen Filber) 粘弾性構成方程式を利用することで, フィルム界面の包み込み現象を疑似的に表現する計算モデルを導入し, 実験検証で有効性を示した.

今後の方針

大学や企業との連携を計り, 解析結果の妥当性検討や新規定量化モデルの構築などを目的とした共同研究 (実験検証解析) を推進する.