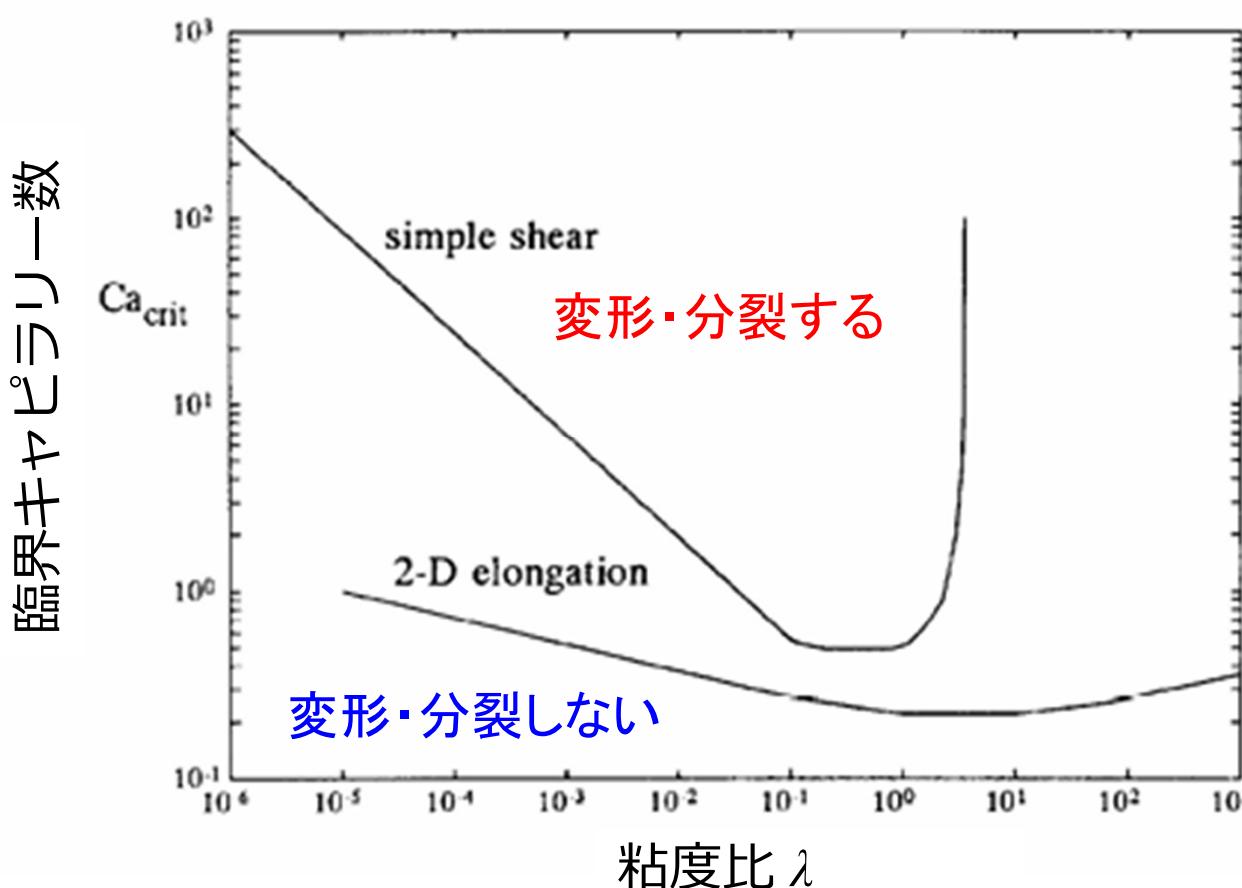


B-201

2.5D FEM 熱流動解析に基づく二軸押出機 における非相溶系高分子ブレンド の分散挙動評価

よりふじ
(株)HASL ○依藤 大輔, 谷藤 眞一郎
金沢大学 潑 健太郎

背景: Graceカーブによる液滴の変形・分裂判定 (1/2)



粘度比 液滴粘度
(分散相)

$$\lambda = \frac{\eta_d}{\eta_m}$$

マトリクス粘度
(連続相)

キャピラリー数

応力

$$Ca = \frac{\eta_m \dot{\gamma}}{\sigma / R_d}$$

表面張力

$\dot{\gamma}$: ひずみ速度 [s^{-1}]

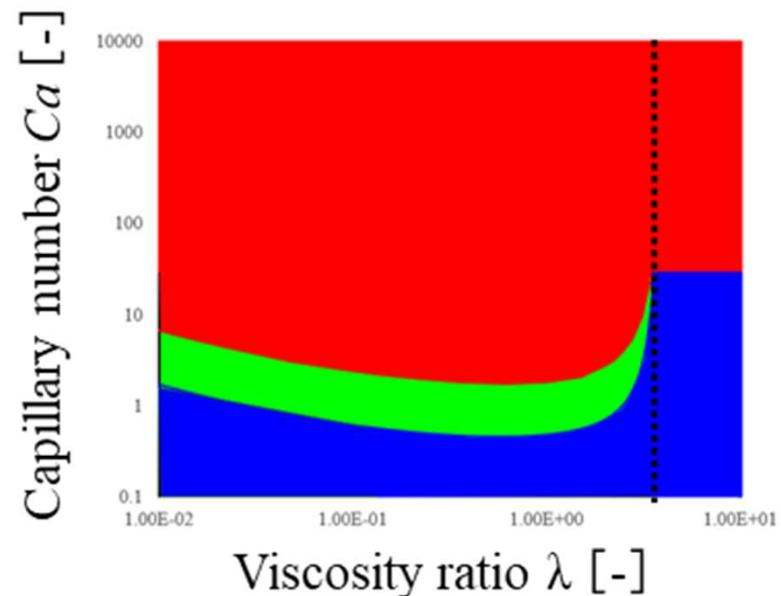
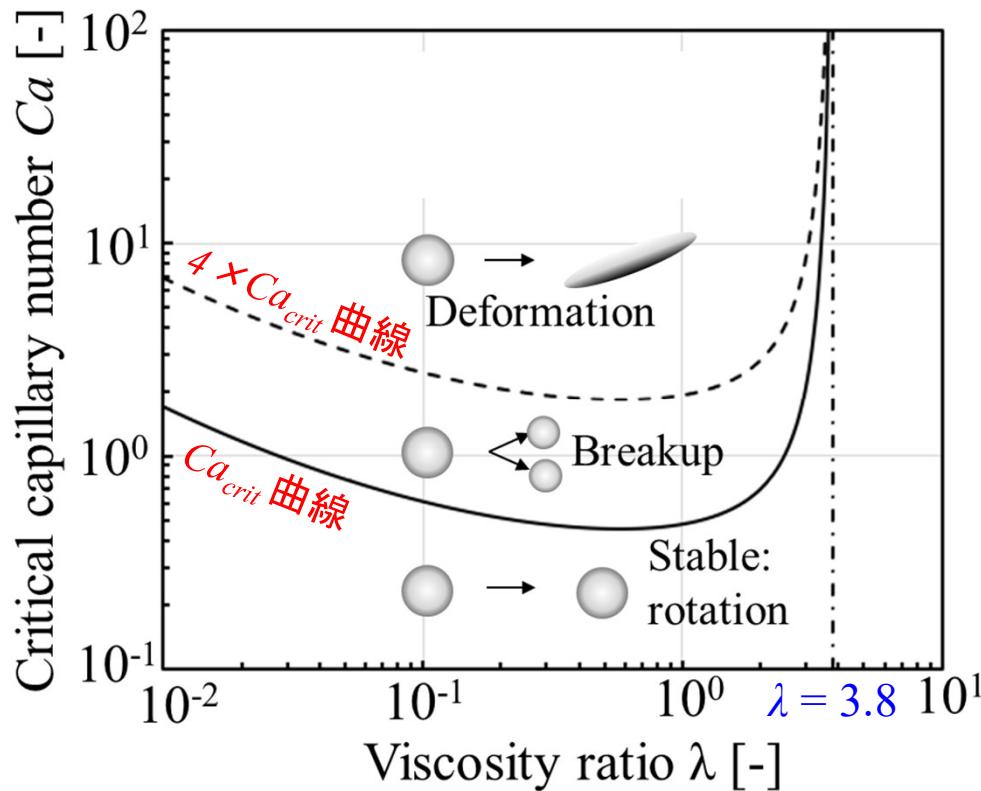
R_d : 液滴半径 [m]

σ : 表面張力係数 [N/m]

H. P. Grace, *Chem. Eng. Comm.*, **14**, 225-277 (1982)

J. M. H. Janssen and H. E. H. Meijer, *J. Rheol.* **37**(4), 597-608(1993)

背景: Graceカーブによる液滴の変形・分裂判定 (2/2)



粘度比 $\lambda < 3.8$ の領域

$$Ca^* \equiv \frac{Ca}{Ca_{crit}}, \quad \begin{aligned} Ca^* > 4 &\Rightarrow \text{変形(ひずみ) : 分配混合領域} && \text{Red square} \\ 1 \leq Ca^* \leq 4 &\Rightarrow \text{分裂(界面力) : 分散混合領域} && \text{Green square} \\ Ca^* < 1 &\Rightarrow \text{安定領域} && \text{Blue square} \end{aligned}$$

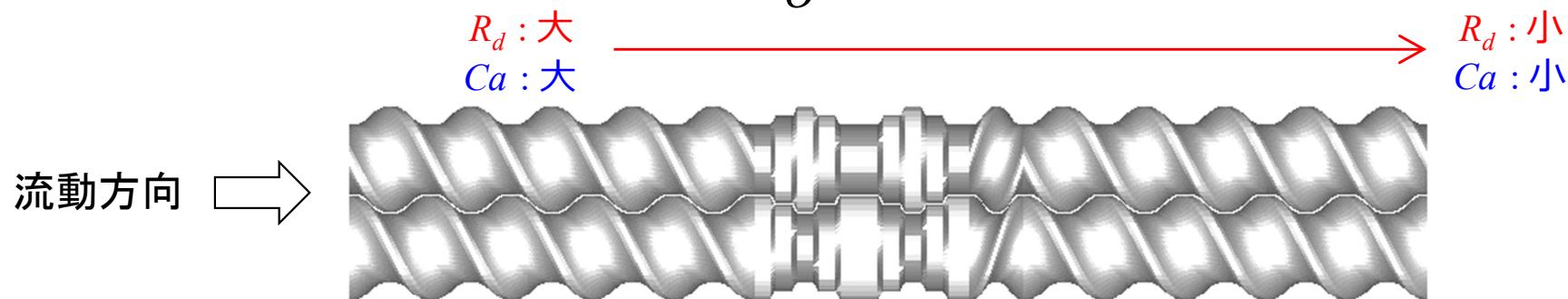
M. A. Huneault, Z. H. Shi, and L. A. Utracki, *Polym. Eng. Sci.*, **35**, 115-127(1995)

背景: 二軸スクリュ内の分散挙動評価 (1/2)

難しさ1: キャピラリー数 Ca が液滴径 R_d の減少により変化する.

(粘度やせん断速度も)

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



流動方向 →

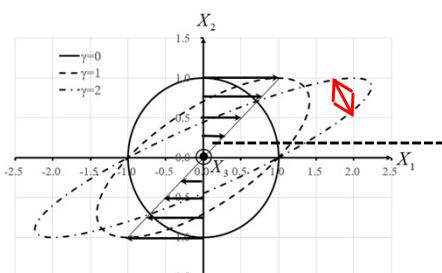
難しさ2: 液滴径の変形評価には、ひずみ $\gamma(t)$ の履歴積分が必要

$Ca^* > 4 \Rightarrow$ 変形(ひずみ):分配混合領域

$1 \leq Ca^* \leq 4 \Rightarrow$ 分裂(界面力):分散混合領域

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

ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の
粒子運動軌跡に
沿った履歴積分

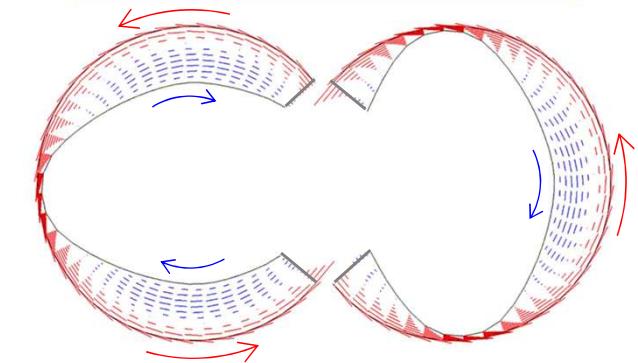
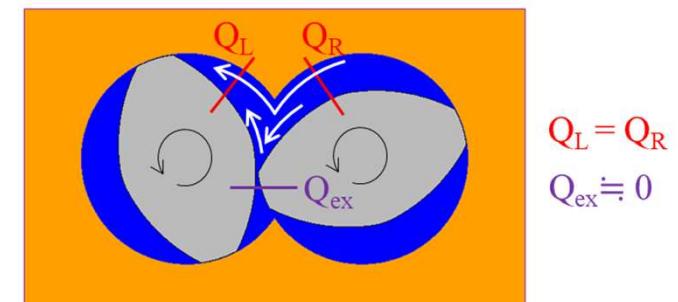
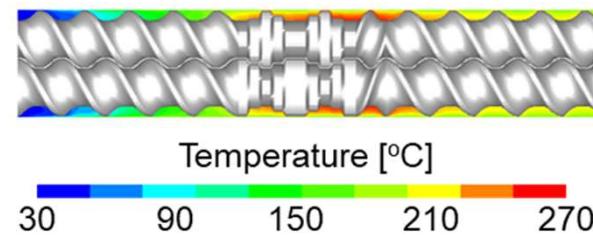
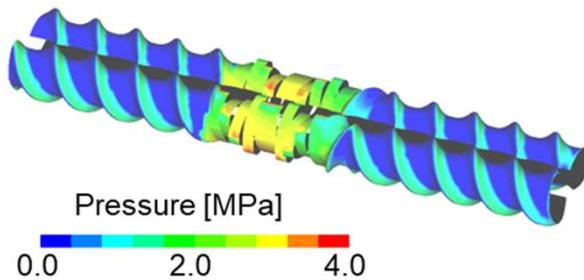


$$R_d(t) \approx 2\sqrt{2/3} R_d(0) \gamma(t)^{-1/2}$$

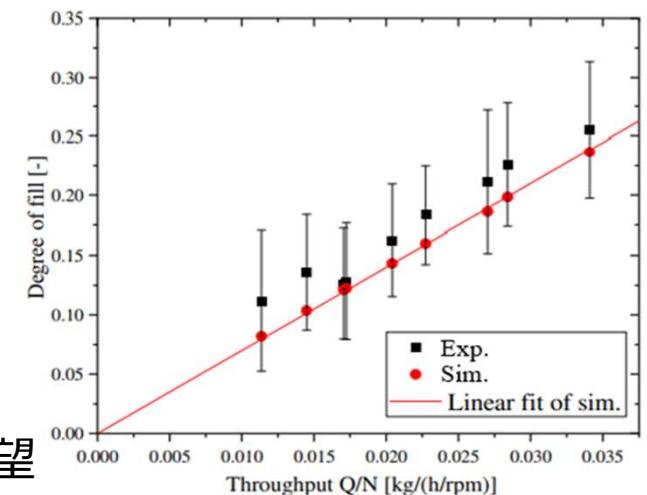
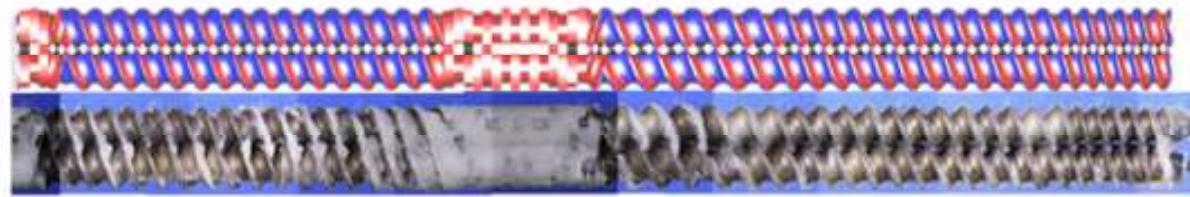
背景: 二軸スクリュ内の分散挙動評価 (2/2)

2.5D FEM (2.5次元有限要素法) 热流動解析技術

- スクリュ全域の熱流動解析 (軸, 周, 流路肉厚方向)



- 充満率の予測解析



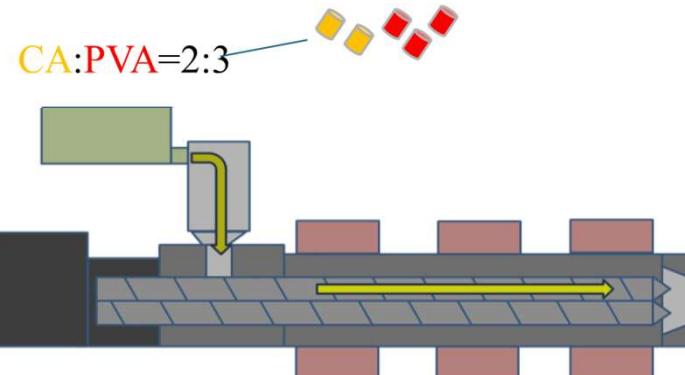
押出成形CAEにおける新規2.5D FEM解析技術の活用と今後の展望
谷藤, 依藤, 尾原, 鬼防, 辰巳, 瀧: 成形加工'22, B-105

研究目的

- 二軸スクリュ内における非相溶系高分子ブレンドの複雑な分散挙動を予測するため, 2.5D FEM熱流動解析を用いて, せん断流動下のひずみによる分配混合を定量化する.
- 地球環境を考慮し,
水溶性高分子のポリビニルアルコール (PVA: PolyVinyl Alcohol) を連続相,
生分解性プラスチックの酢酸セルロース (CA: Cellulose Acetate) を分散相,
とする非相溶高分子ブレンドを用いた評価実験を行なった.

実験方法

○ 押出機: 完全噛合型同方向回転平行二軸押出機 ($\varphi 26\text{ mm}$, L/D=64, 芝浦機械製)



スクリュを引き抜き、各位置で樹脂を採取



温水に溶解
⇒CAマイクロ微粒子
のみ取り出す



スクリュ管瓶 50cc
(温水: 50-80°C)

24時間静置後
ろ過し不純物を取り除く



CAマイクロ微粒子粉末

電子顕微鏡で粒
子の観察を行う

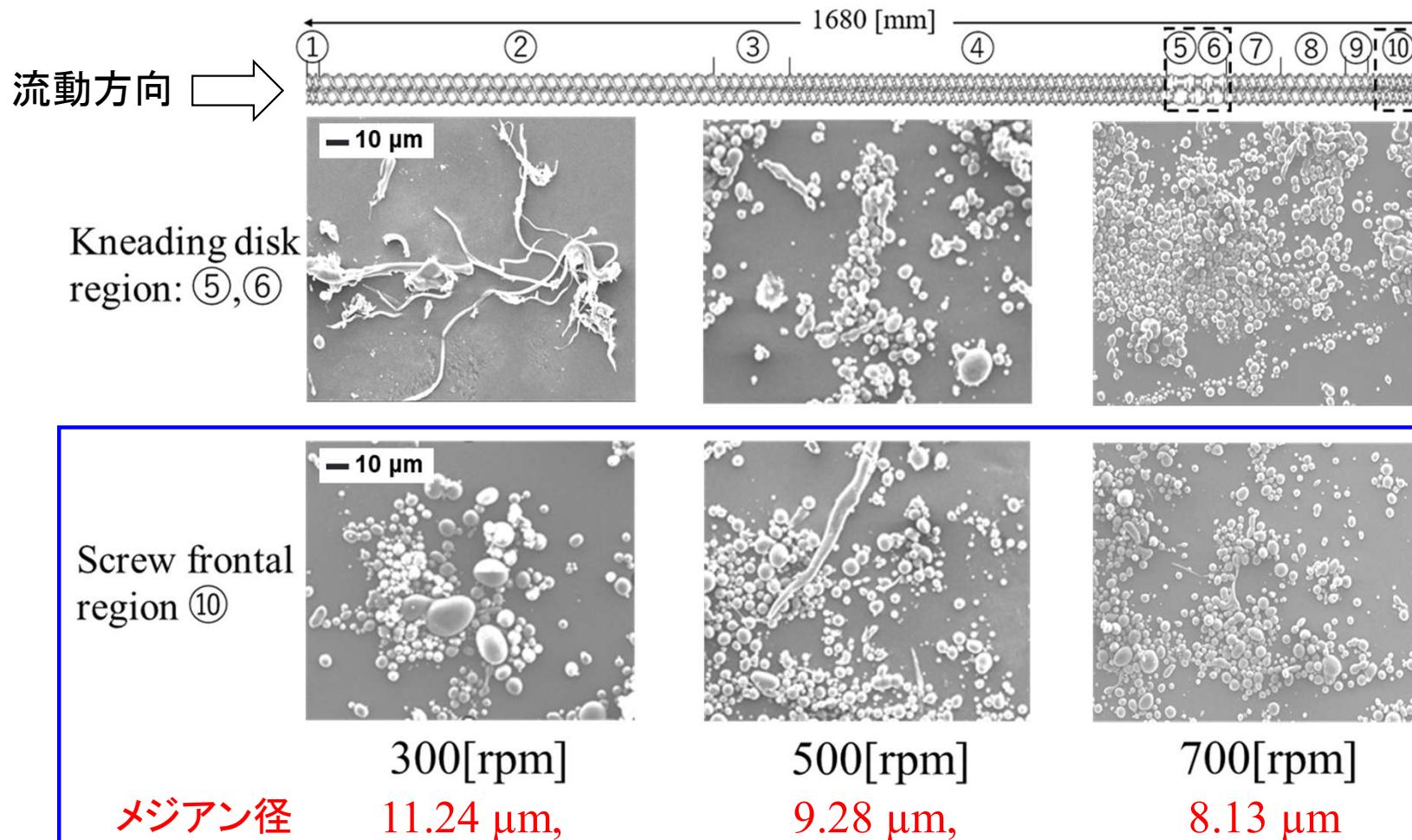


レーザー回折/散乱式粒子
径分布測定装置 LA-960
(堀場製作所製)

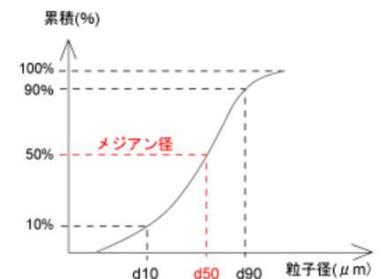
二軸押出機による生分解性マイクロ微粒子の生成過程の解析
長澤, 尾原, 木田, 稲盛, 土田, 瀧: 成形加工'22, B-203

実験条件および実験結果

- ・押出量: 5 kg/h, バレル温度 200°C Max. (共通)
- ・回転数: 300, 500, 700 rpm の3水準



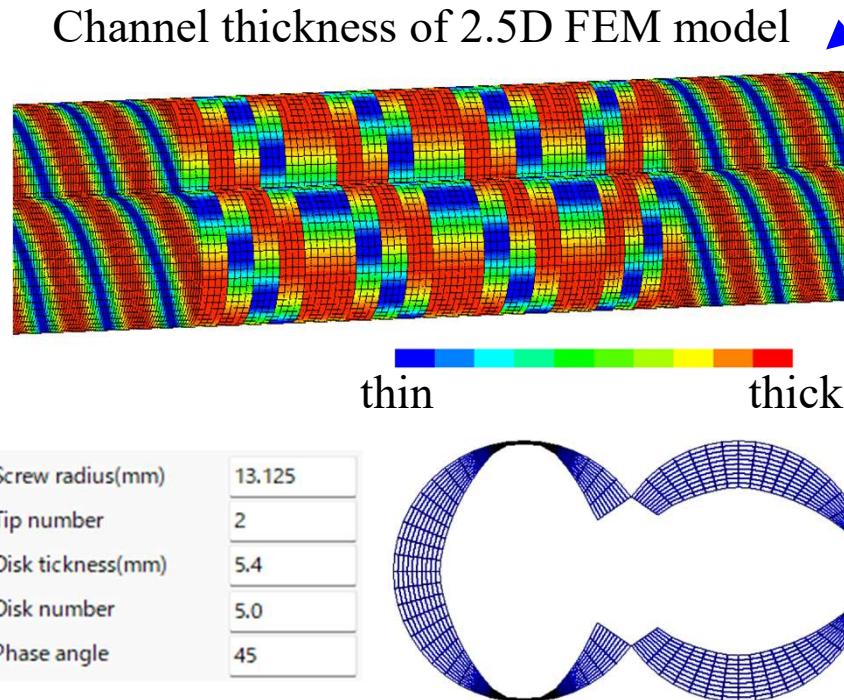
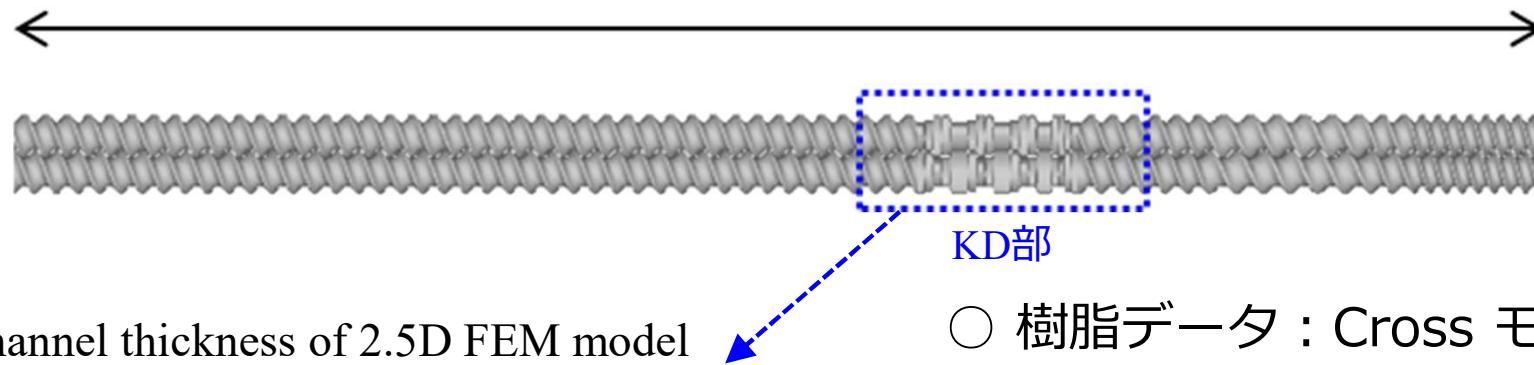
引用: Microtrac社
ウェブサイト



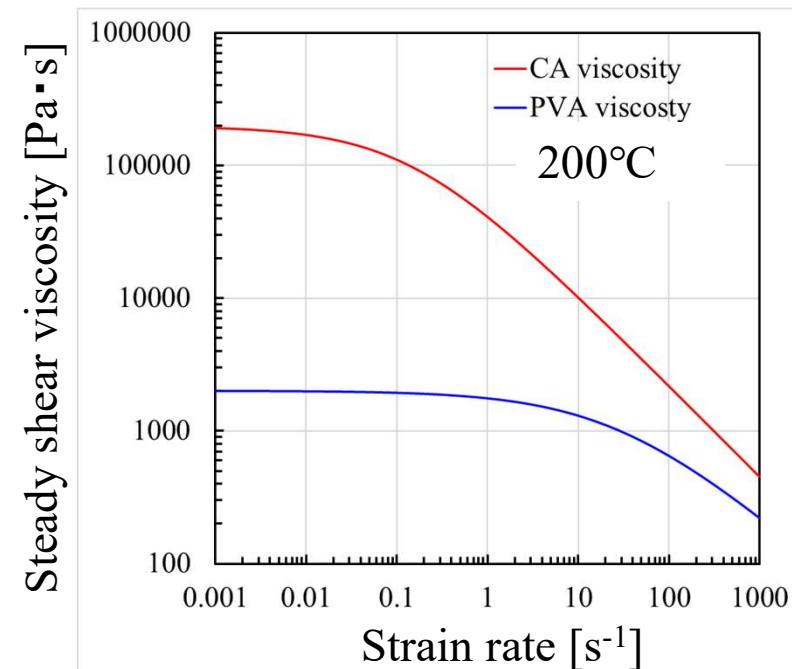
谷藤, 依藤, 滉: 混相流, 38(2), 139, (2024)

解析方法1: 熱流動解析

- ソフトウェア: HASL Twin Screw Simulator Ver.11 (2025)
- 解析モデル: 樹脂溶融後の下流側 958 mmの区間 (全長 1680mm)

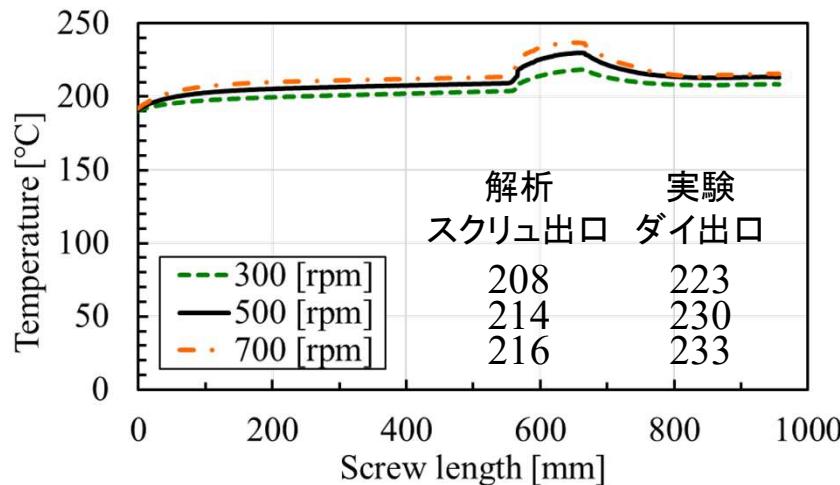


- 樹脂データ: Cross モデル

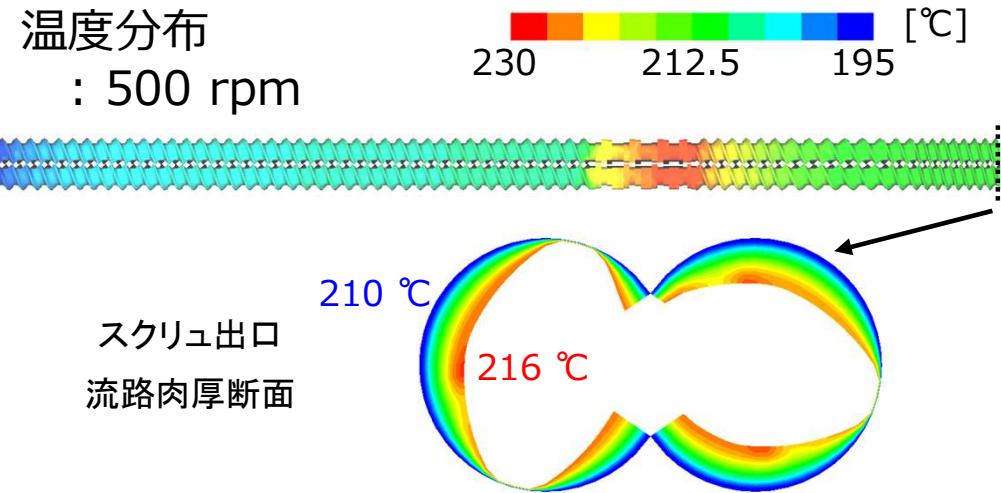


解析結果1：熱流動解析 (1/2)

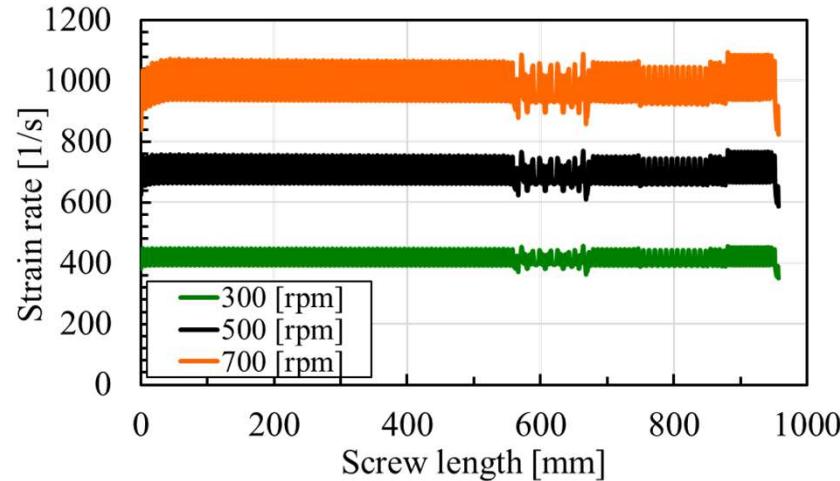
○ 温度 [°C]



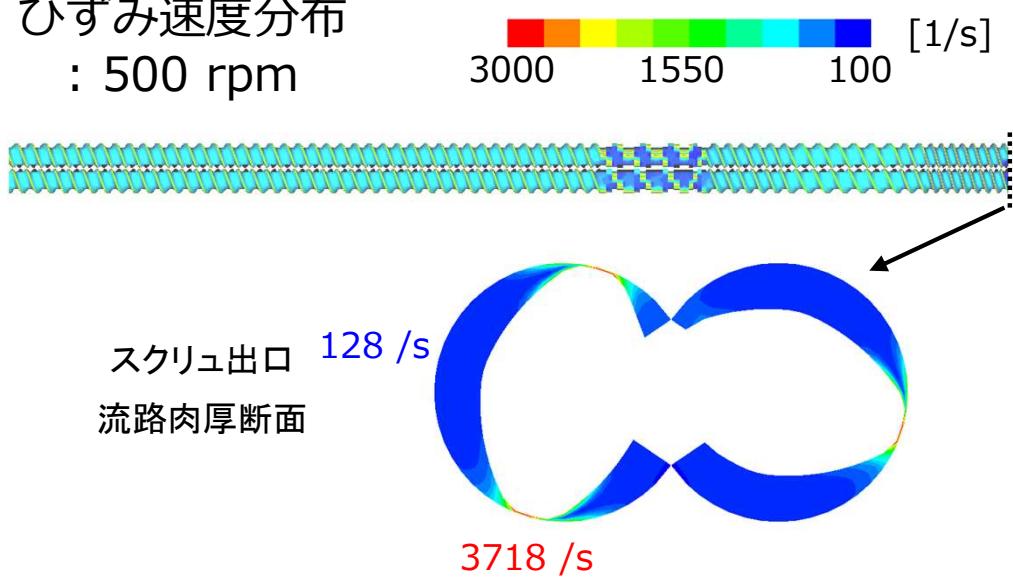
温度分布
: 500 rpm



○ ひずみ速度 [1/s]



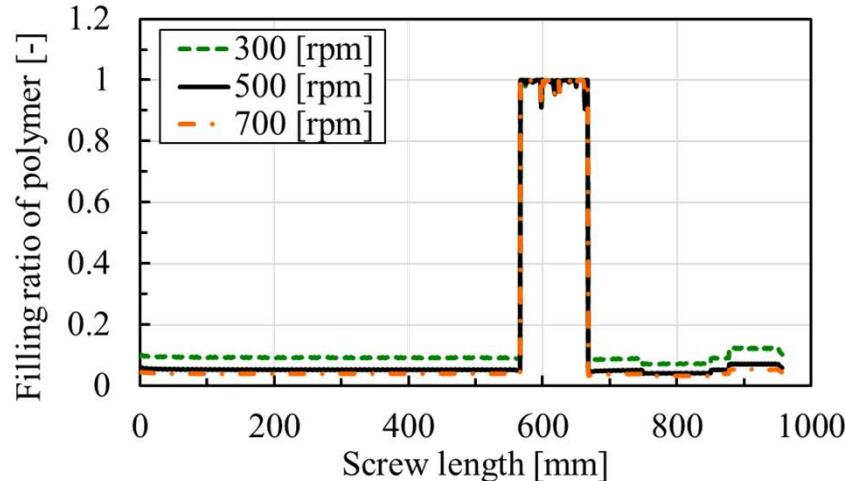
ひずみ速度分布
: 500 rpm



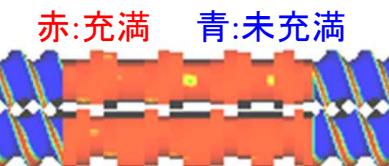
解析結果1：熱流動解析 (2/2)

○ 充満率 [-]

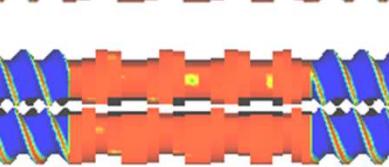
5 kg/h 共通



充満率分布: KD部周辺



300 rpm



500 rpm



700 rpm

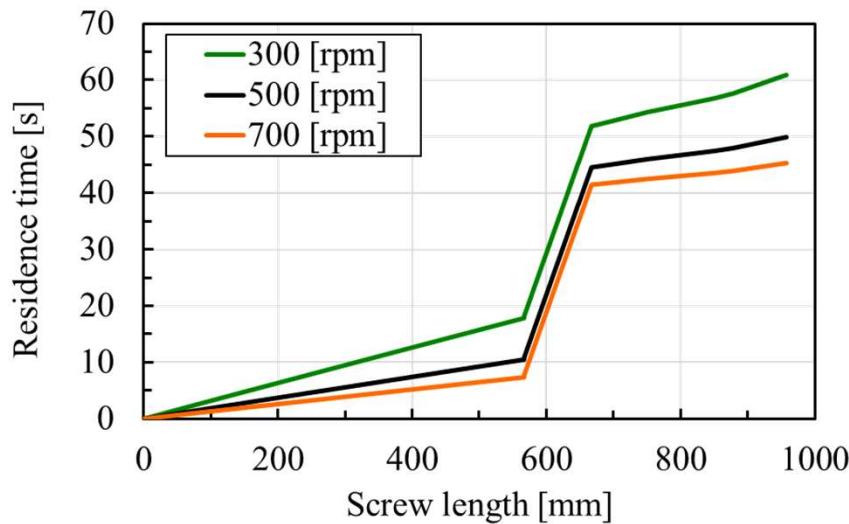
スクリュ部
平均充満率

0.12

0.07

0.05

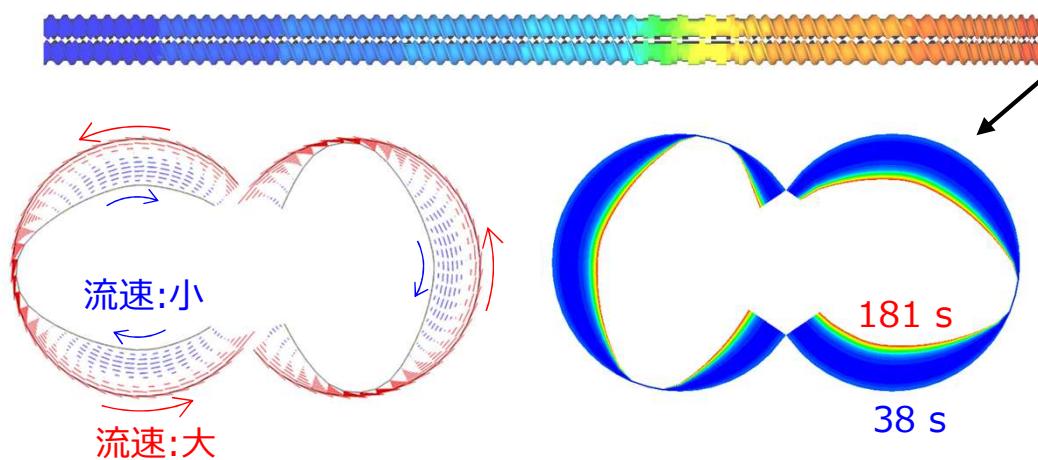
○ 滞留時間 (通過時間) [s]



滞留時間分布:

500 rpm

50 25 0.0 [s]



流速:小

流速:大

181 s

38 s

解析方法2: 分散径予測モデル

○ ひずみの解析: 定常輸送方程式

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

\mathbf{u} : 流速ベクトル [m/s]

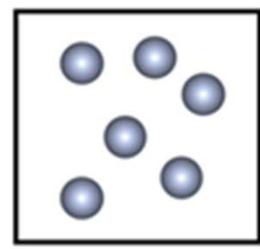
γ : ひずみ [-]

$\dot{\gamma}$: ひずみ速度 [1/s]

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

ひずみ速度の
粒子運動軌跡に
沿った履歴積分

○ 液滴径の解析: ザウター平均粒径 (SMD : Sauter Mean Diameter, d_{32})

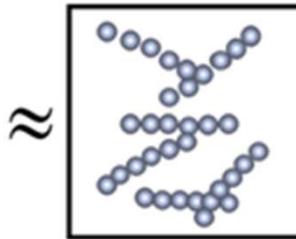


Initial droplets

Deformation
under shear flow



Filaments



Spherical granules with
the same equivalent radius

$$V = N \frac{4}{3} \pi R^3, \quad \Rightarrow \quad R = \frac{3V}{S}$$

$$S = N 4 \pi R^2$$

N : 離散化粒子数

$$\approx R(0) \left(\frac{2}{3} \right)^{-1/p} \gamma^{-1/2}$$

$$R = R(0) \left(\left(2\kappa^{p/4} + \kappa^{-p/2} \right) / 3 \right)^{-1/p},$$

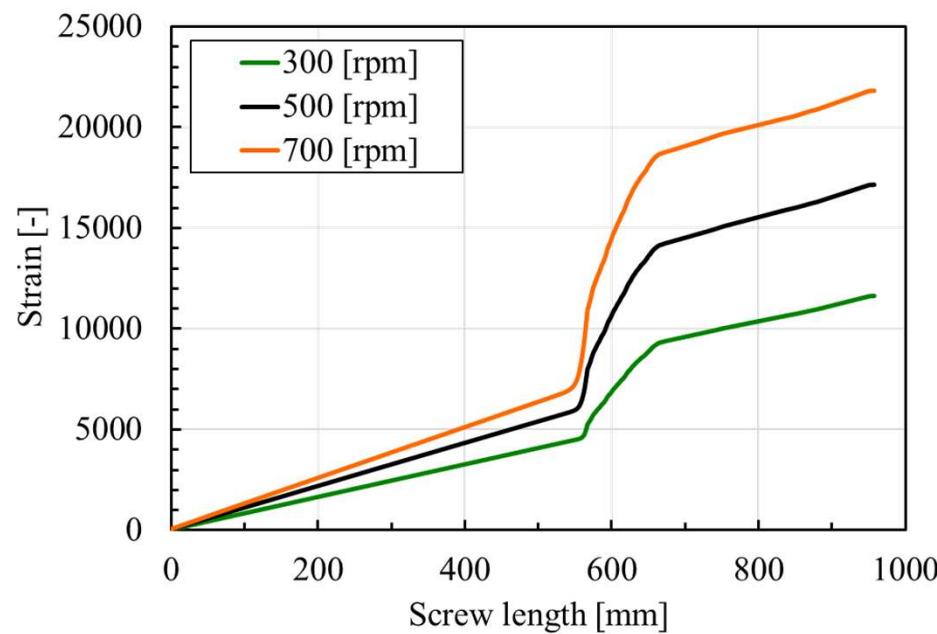
$$\kappa = \left(1 + 0.5\gamma^2 + 0.5\gamma\sqrt{\gamma^2 + 4} \right)$$

$R(0)$: 初期等価半径, $p = 1.6075$

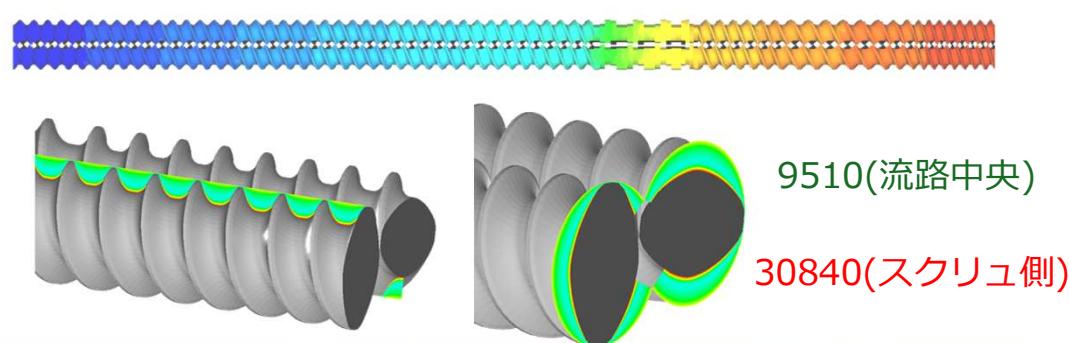
解析結果2: 分散径予測モデル (1/2)

○ひずみ [-]

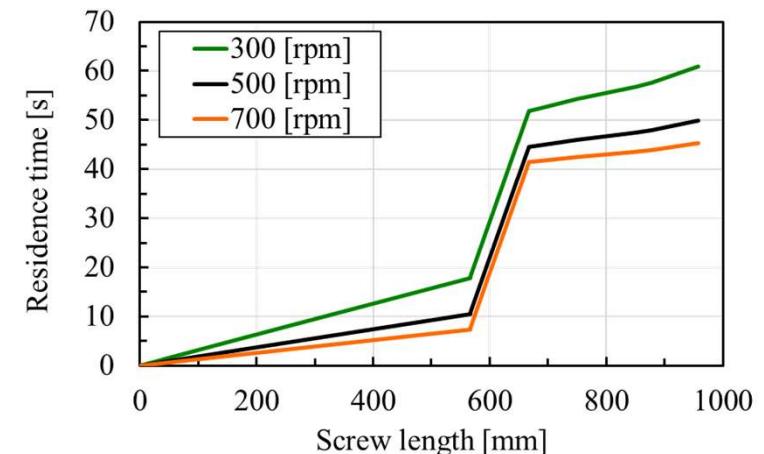
$$\gamma = \int \dot{\gamma} dt$$



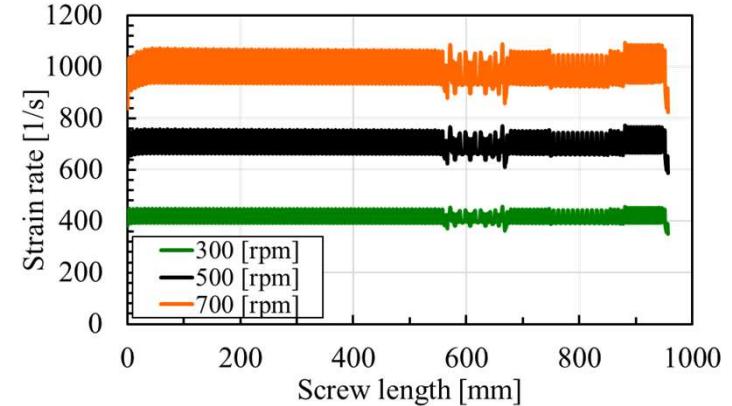
ひずみ分布: 500 rpm



○滞留時間 [s]

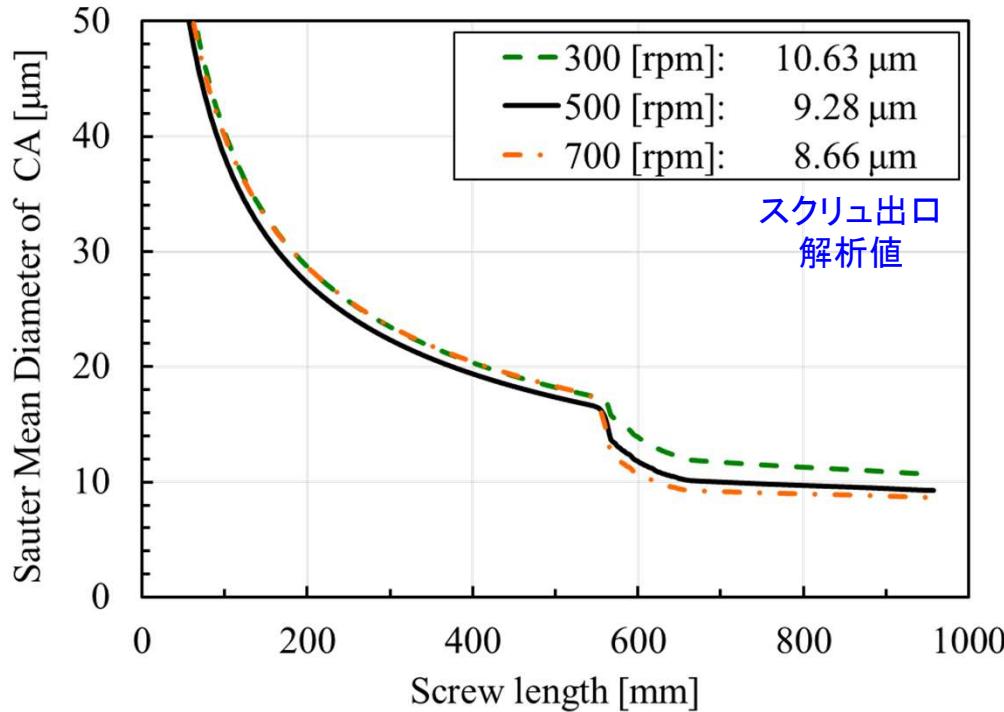


○ひずみ速度分布 [1/s]



解析結果2: 分散径予測モデル (2/2)

- 分散相 CA のザウター平均径 [μm] $R \approx R(0) \left(\frac{2}{3}\right)^{-1/p} \gamma^{-1/2}$

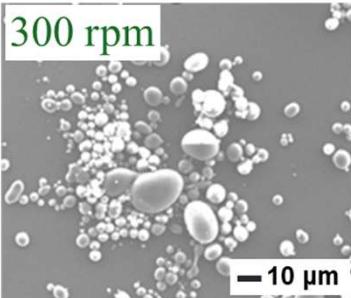


500 rpm のスクリュ出口の実験メジアン径
9.28 μm を解析で再現するよう,
 $R(0) = 402.5 \mu\text{m}$ に設定した.

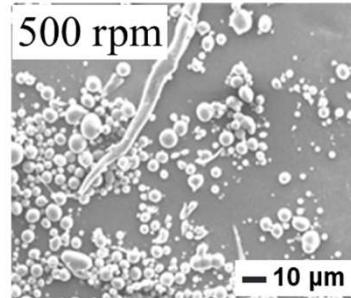
同一条件で 300rpm と 700rpm を解析した
結果は、実験結果の傾向を再現した.

スクリュ出口
メジアン径

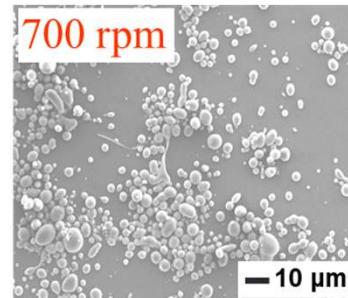
11.24 μm ,



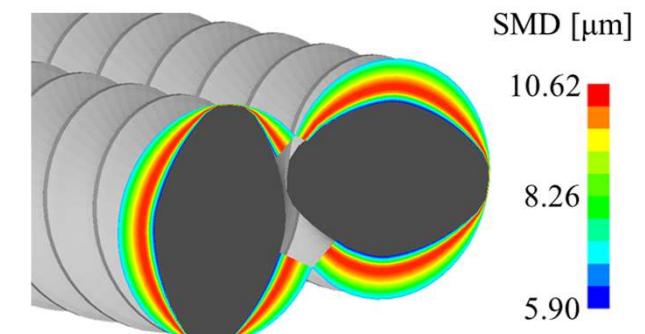
9.28 μm ,



8.13 μm

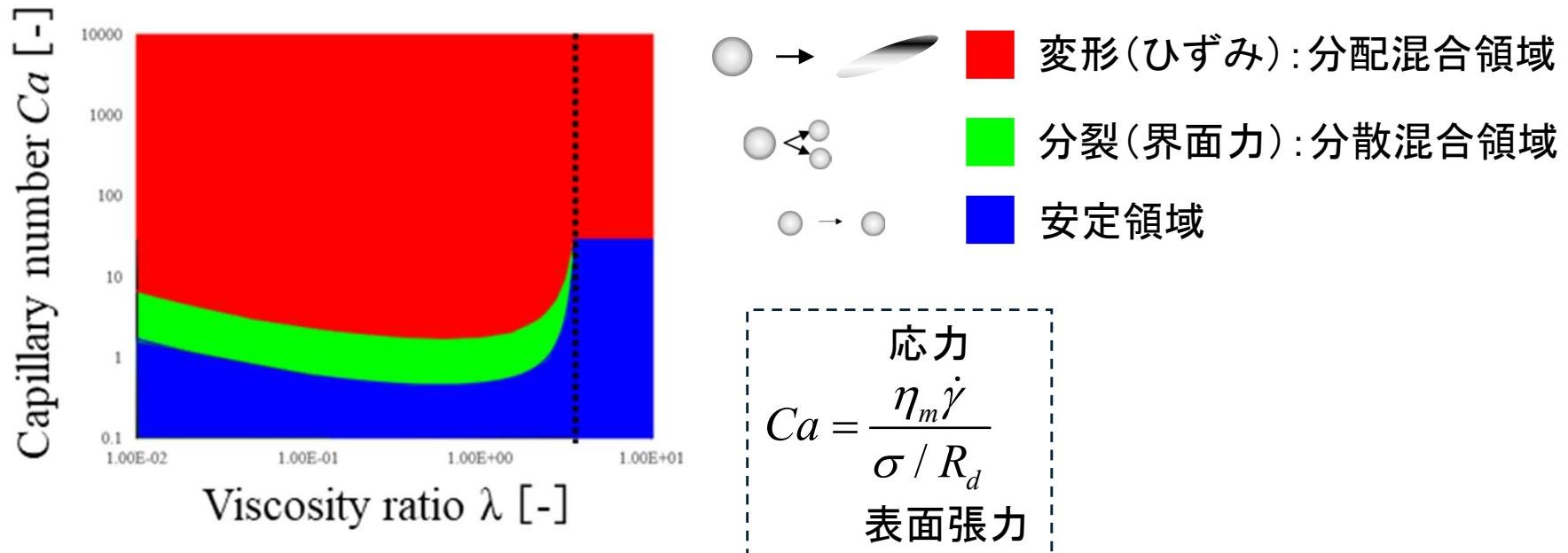


スクリュ出口
流路肉厚断面: 500rpm



まとめと今後の方針 (1/2)

- ・ 非相溶系高分子ブレンドの二軸押出機内における分散径減少挙動に対し、ひずみによる分配混合が支配的と仮定した予測モデルを提案し、2.5D FEM 熱流動解析を実施した。
- ・ 得られた結果は実験で観察された傾向を再現し、モデルの妥当性を示した。
- ・ 今後、応力による分散混合の影響も考慮した定式化へモデルを拡張し、解析精度向上を目指す。



まとめと今後の方針 (2/2)

- 今後、応力による分散混合の影響も考慮した定式化へモデルを拡張し、解析精度向上を目指す。

$$Ca^* \equiv \frac{Ca}{Ca_{crit}}, \quad \begin{array}{l} \text{Red} \quad Ca^* > 4 \\ \text{Green} \quad 1 \leq Ca^* \leq 4 \\ \text{Blue} \quad Ca^* < 1 \end{array} \Rightarrow \frac{dR_d(t)}{dt} = -\frac{\dot{\gamma}}{3Ca_{crit}t_b^*} R_d(t) + \frac{C_n}{3R_d(t)} \phi^{8/3} \dot{\gamma}$$

○ 参考解析結果: スクリュ内での Ca^* 分布

