



第5回HASL/Simulator ユーザー会

プラスチック材料の熔融混練 の基礎と最近の研究例

2015年11月25日

於 中野サンプラザ（東京都中野区）

九州大学大学院 工学研究院 化学工学部門

梶原稔尚

kajiwara@chem-eng.kyushu-u.ac.jp



内容

熔融混練の理論

実験による可視化・計測手法

押出機・混練機と熔融混練理論

計算機シミュレーションによる混練予測

スケールアップ問題



内容

熔融混練の理論

実験による可視化・計測手法

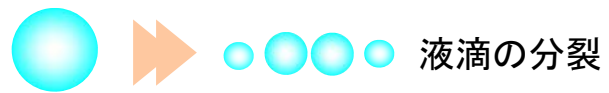
押出機・混練機と熔融混練理論

計算機シミュレーションによる混練予測

スケールアップ問題

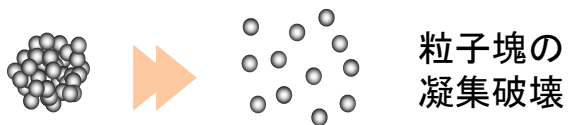


- ★高分子ブレンド(Blend)
 - ・2種類以上の高分子の混合系



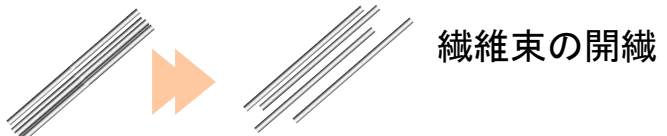
液滴の分裂

- ★高分子コンポジット(Composite)
 - ・高分子と充填剤(フィラー)



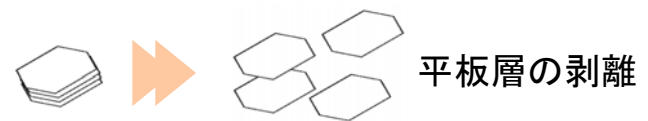
粒子塊の凝集破壊

- ★高分子アロイ(Alloy)
 - ・相溶性(miscible)ブレンド
 - ・相容性(compatible)ブレンド
 - ・多相系共重合体



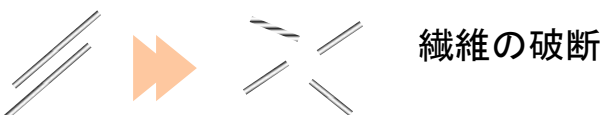
繊維束の開繊

- ★高分子+添加剤



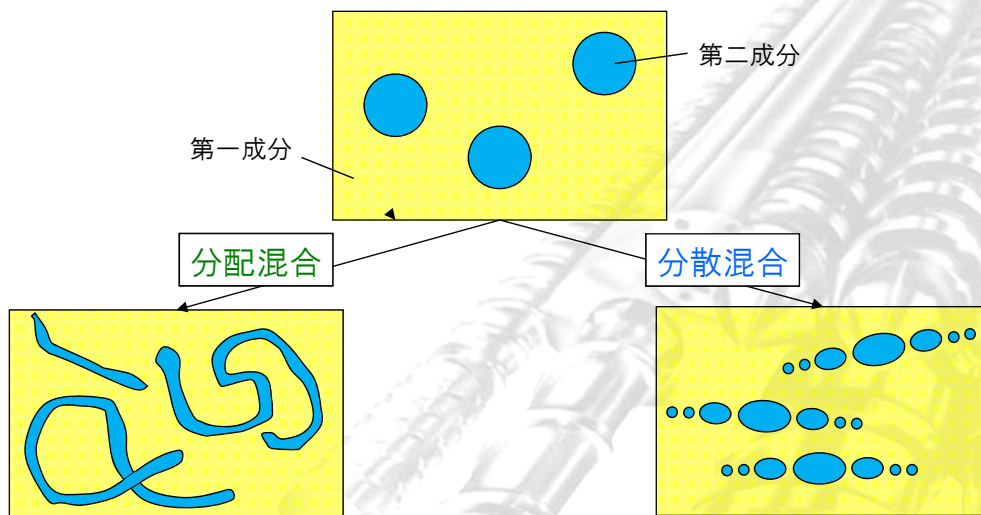
平板層の剥離

- ★流動履歴, 熱履歴の差の解消



繊維の破断

溶融混練部で見られる混合形態の分類



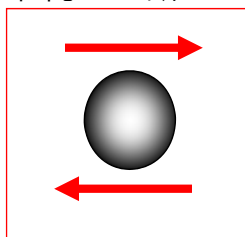
界面に垂直なひずみの作用
 ……第二成分相の折り畳み・引き伸ばしによる混合

応力の作用
 ……第二成分相の分裂・微分散による混合

混練性を向上させるためには……
 ○複雑なひずみを与える ○大きな応力を作用させる

液滴の変形・分裂

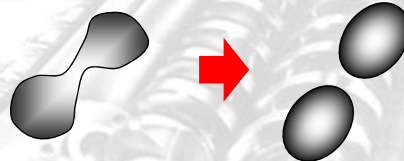
単純せん断



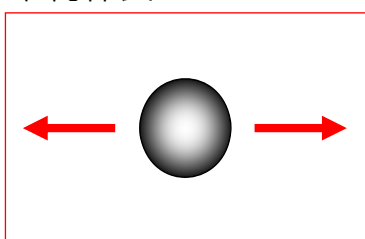
変形



分裂



単純伸長



変形



分裂



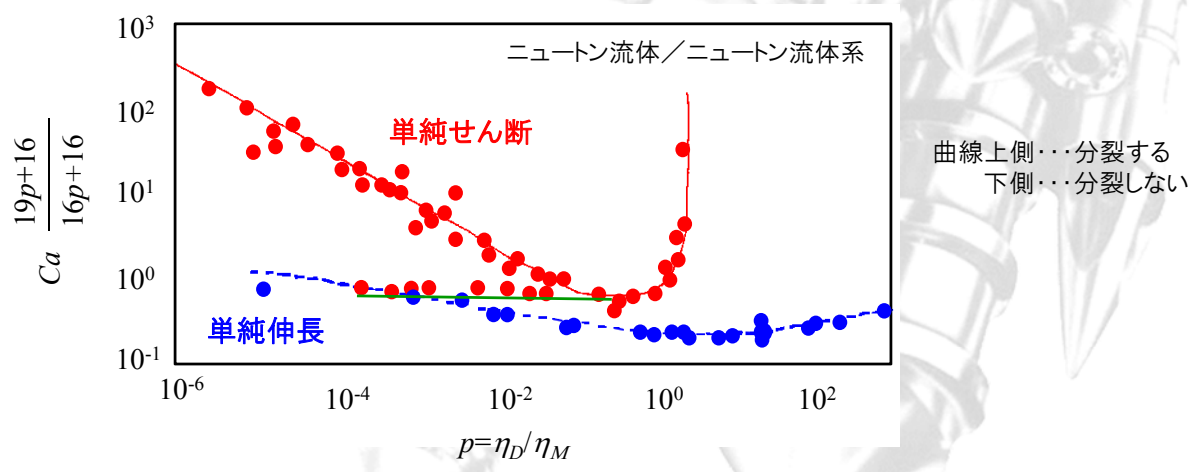
液滴分裂条件 キャピラリー数

キャピラリー数

$$Ca = \frac{\eta_M \dot{\gamma} R}{\sigma} = \frac{\text{流動により液滴を変形させようとする力}}{\text{界面張力により液滴が球形に戻ろうとする力}}$$

粘度比

$$p = \frac{\eta_D}{\eta_M} = \frac{\text{液滴粘度}}{\text{マトリクス粘度}}$$



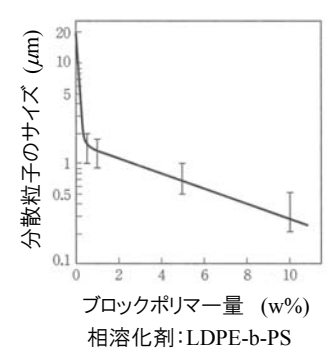
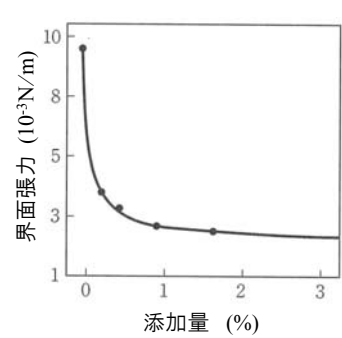
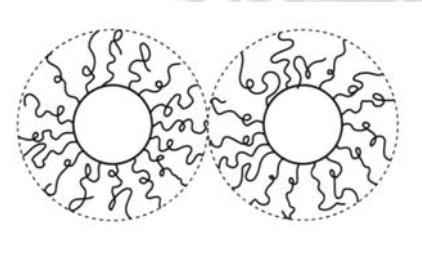
- 単純伸長のほうが単純せん断の場合より臨界キャピラリー数が小さい
- 粘度比の大きいところでは単純せん断では分裂しない

H. P. Grace: *Chem. Eng. Commun.*, **14**, 225 (1982)

相溶化剤

相溶化剤の添加効果の例

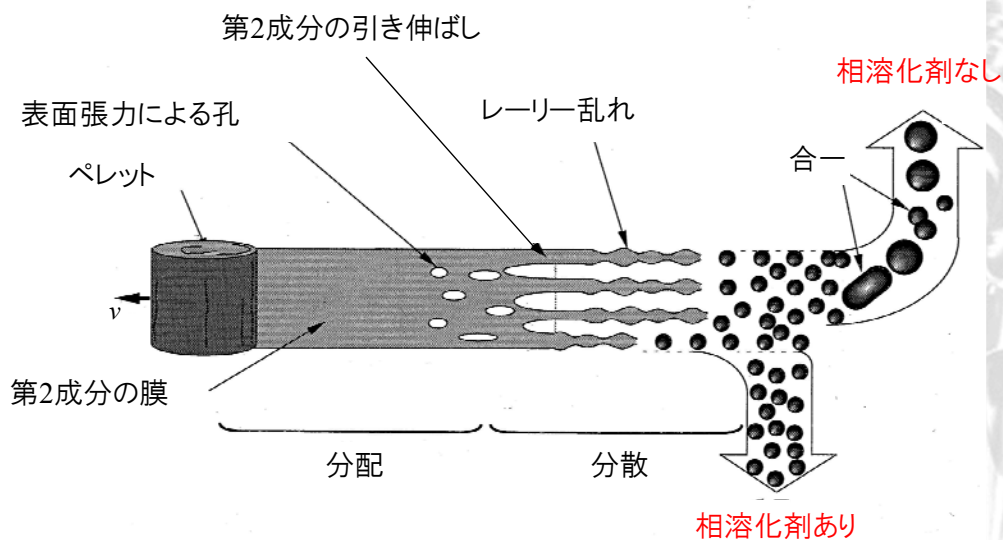
- ① 界面張力の低下
- ② 界面層厚みの低下
- ③ 分散粒子径の減少
- ④ ミクロ相構造の制御
- ⑤ 界面修飾による粒子の合一阻害



ポリジメチルシロキサン(10300cP)とポリエチレンオキサイド(11000cP)のブレンド系の界面張力に及ぼすPDMS-b-EO(60/40)の添加効果

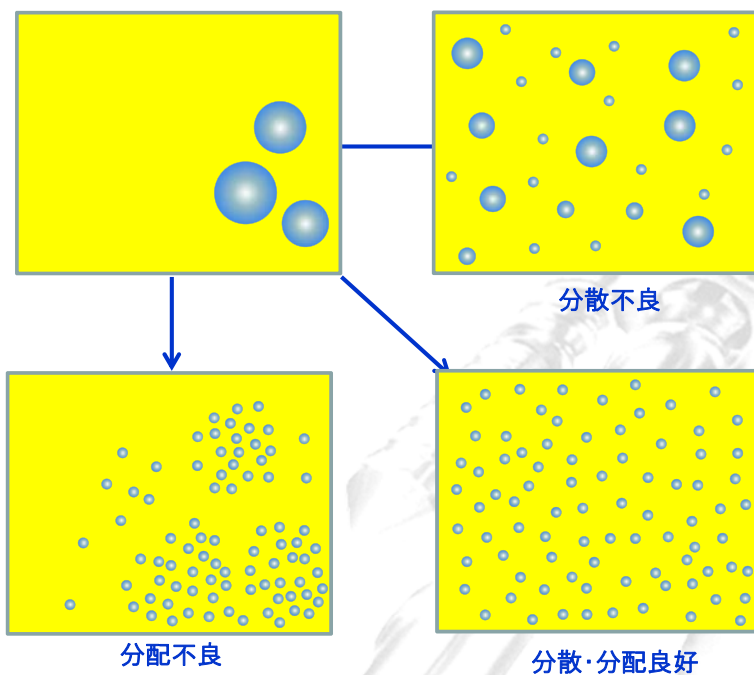
分散粒子径に及ぼす相溶化剤の影響(LDPE(20)/PS(80)系)

ポリマーブレンドの高次構造形成



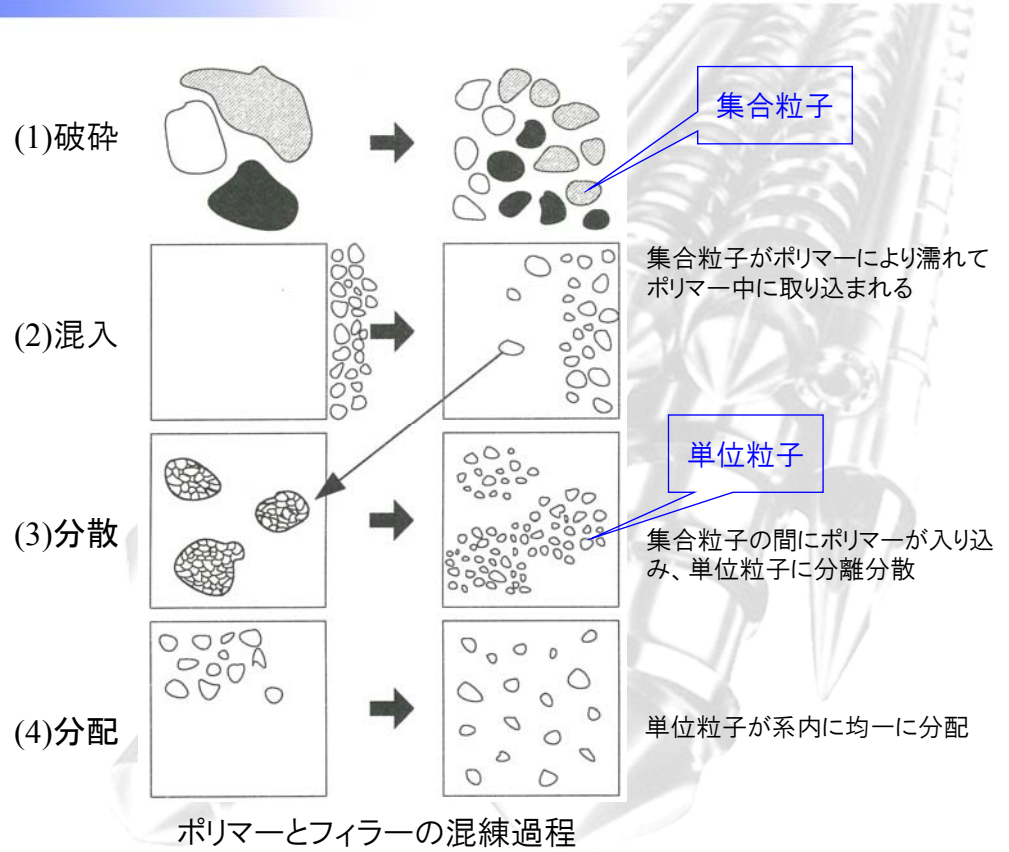
C. E. Scott and C. W. Macosko : *Polymer Bulletin*, 26, 341 (1991)

ポリマーブレンドの分配・分散混合



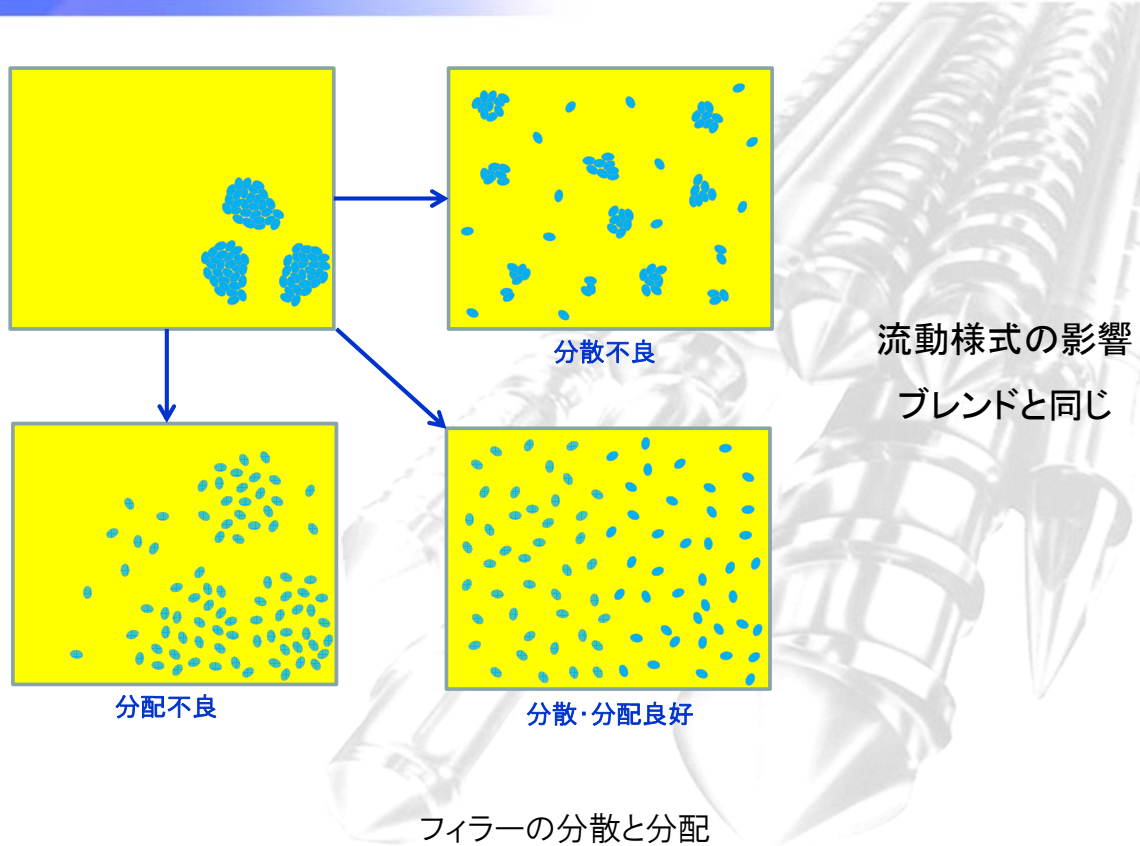
非相溶性ポリマーブレンドの分散と分配

ポリマーコンポジットの混練過程



H. Palumgren, *Rubber Chem. Technol.*, **48**, 462 (1975)

フィラーの分配・分散混合





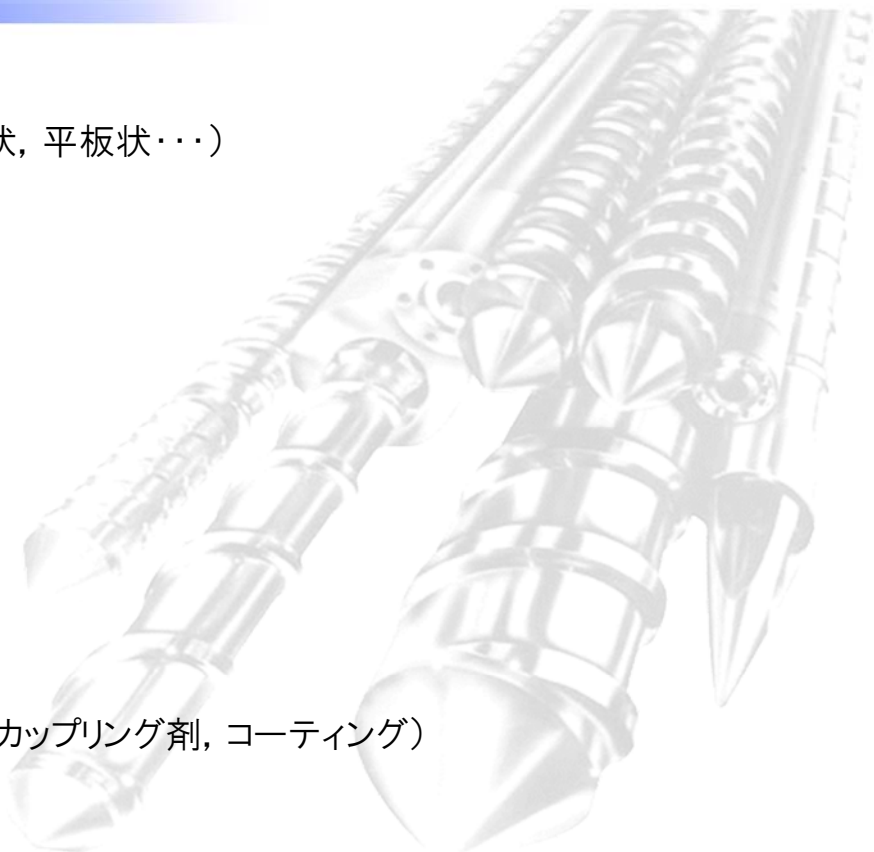
フィラー凝集力に影響する因子と化学処理

- 形状(球状, 繊維状, 平板状...)
- 大きさ
- 粒子間距離
- 空隙率
- 表面特性
- 水分



フィラー表面処理(カップリング剤, コーティング)

ポリマーの改質



押出機・混練機内の可視化・計測

モデル機

透明バレルによる流れの観察

常温・模擬流体, トレーサ観察・速度場測定

実機

滞留時間分布測定

投入トレーサ流出量の時間変化

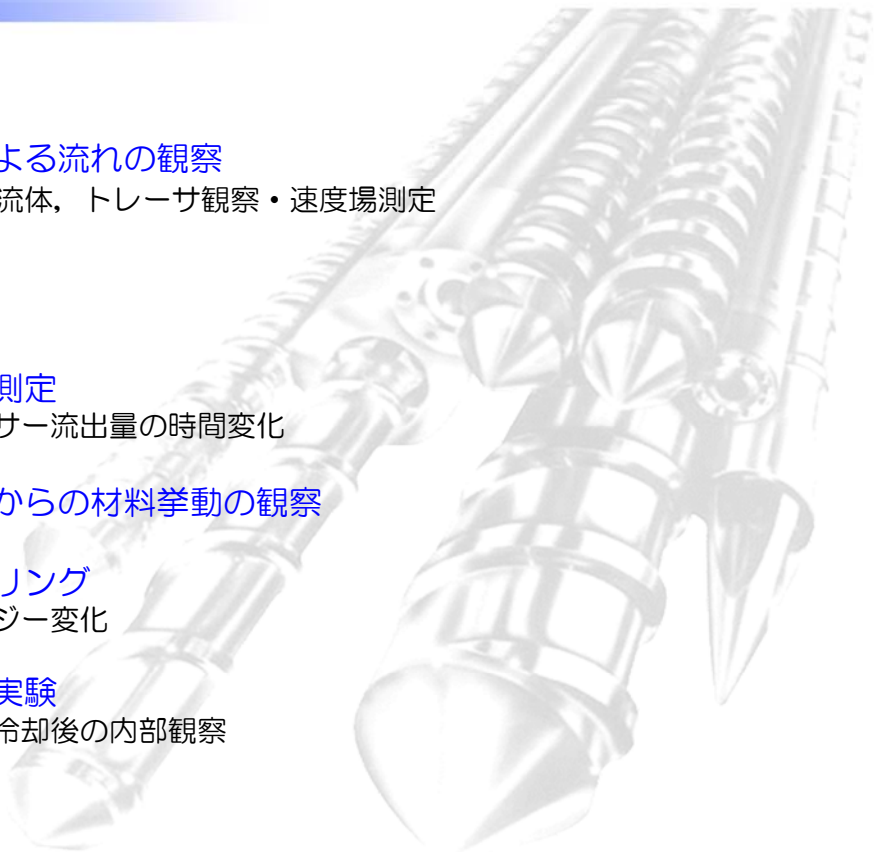
透明可視化窓からの材料挙動の観察

抜き出しサンプリング

モルフォロジー変化

冷却引き抜き実験

運転停止・冷却後の内部観察





内容

熔融混練の理論

実験による可視化・計測手法

押出機・混練機と熔融混練理論

計算機シミュレーションによる混練予測

スケールアップ問題

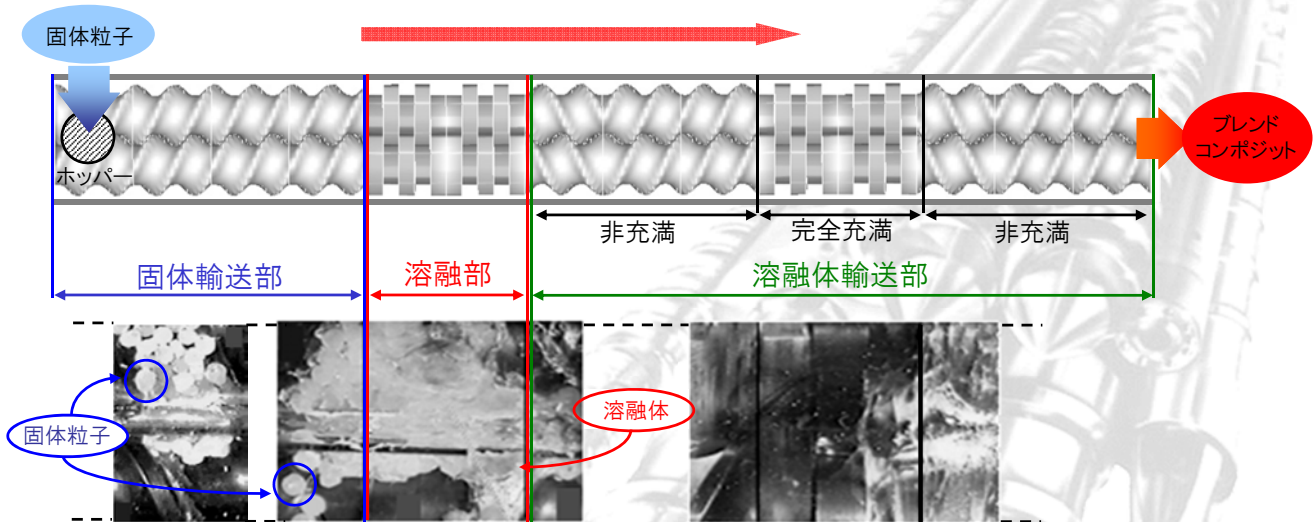


- ・模擬流体
シリコンオイル etc.
 - ・トレーサー観察
 - ・常温
- ⇕
現実の状態との対応

動画提供:(株)日本製鋼所

LDVやPIVによる速度分布の測定
かみ合い部は測定困難

透明可視化窓からの材料挙動の観察

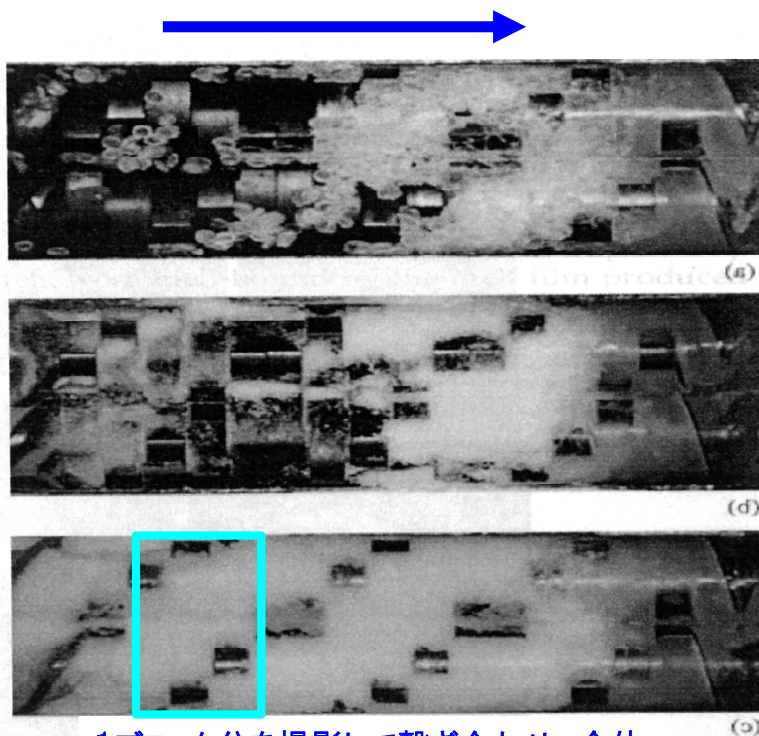


Linjie Zhu, Xiaozheng Geng : *Advances in Polymer Technology*, Vol.21, No.3, 188-200 (2002)

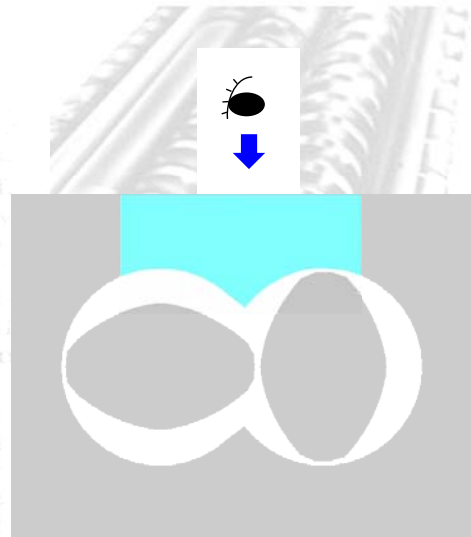
- ・現実の状態観察
- ・パレル近傍のみ観察



透明可視化窓からの材料挙動の観察



1ブロック分を撮影して繋ぎ合わせ、全体像をとる

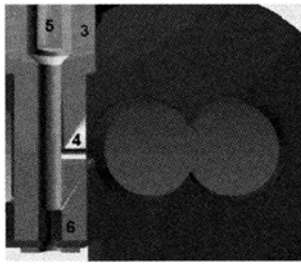


- ・かみ合い部が観察できる
- ・広い範囲を観察
- ・ガラス面の曲率でやや見づらい

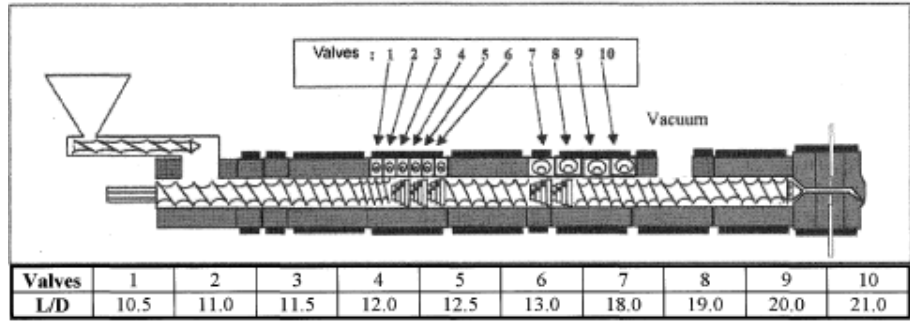
C. G. Gogos, Z. Tadmor and M. H. Kim : *Adv. Polym. Technol.*, 17, 285 (1998)



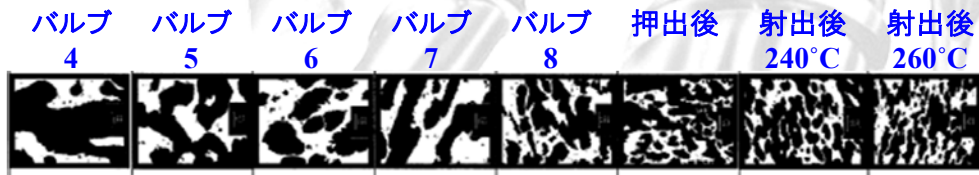
PBT/ABS ブレンドのモルフォロジー形成過程の観察



サンプリングバルブ



押出機とサンプリング位置

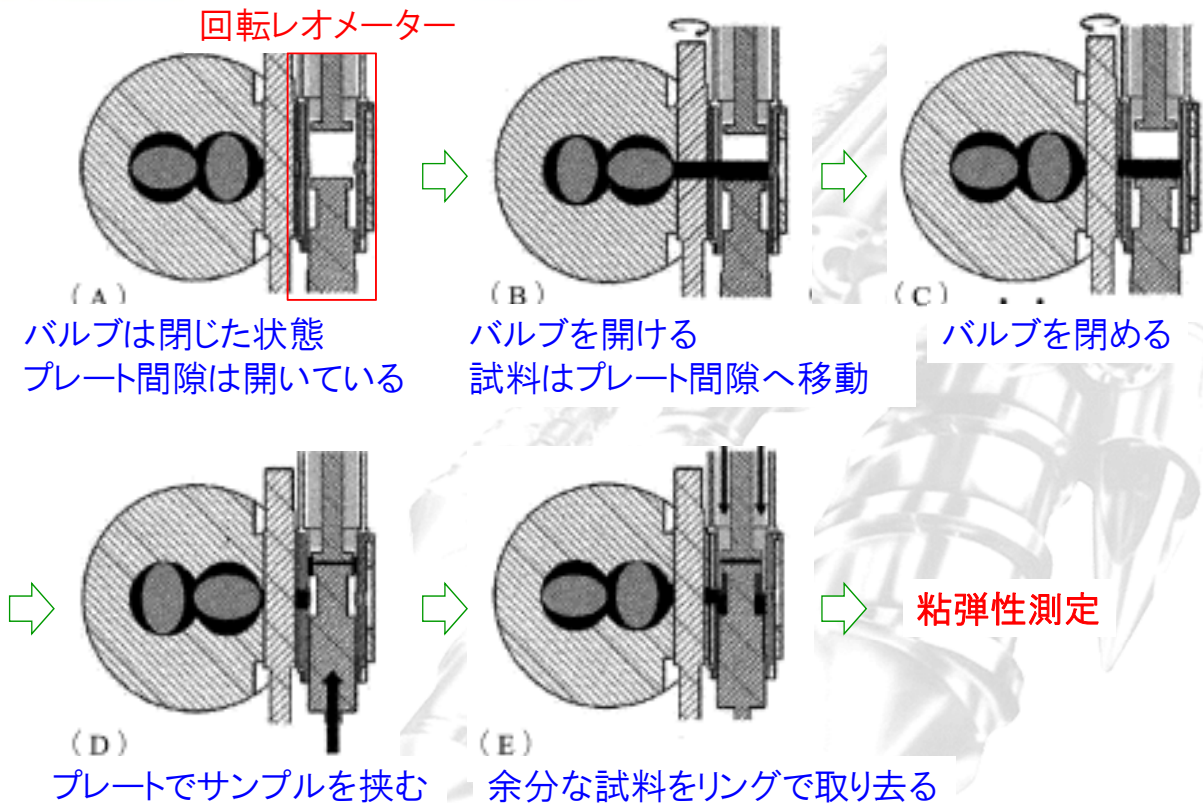


モルフォロジーの顕微鏡写真 PBT/ABS/MMA-GMA=55/40/5

E.N. Ito, L.A. Pessan, J.A. Covas, E. Hage Jr. : *Intern. Polym. Processing*, **18**, 376 (2003)

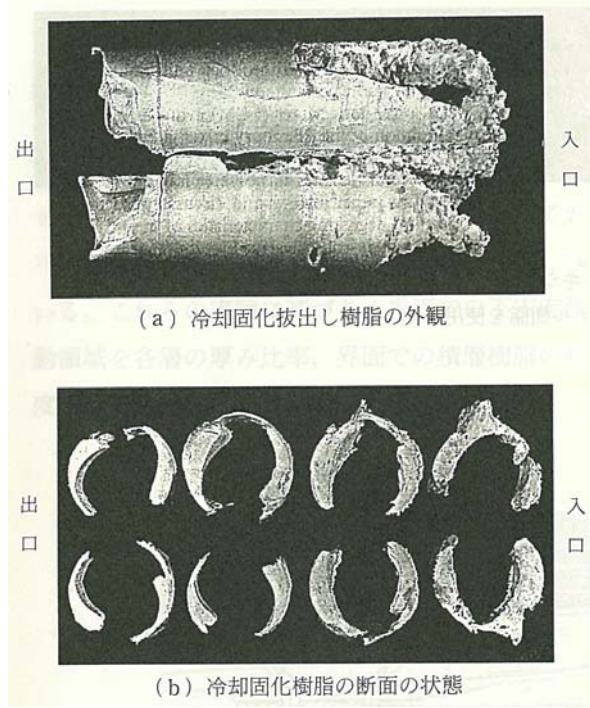


回転レオメーター



S.T. Mould, et al. : *Intern. Polym. Processing*, **27**, 527 (2012)

冷却引き抜き実験



- ・ 拔出し困難
- ・ 状態保持困難
- 非充満
- 時間進行

異方向回転二軸混練機のFCMでのLDPE/PSブレンドの熔融混練観察

P. Hold : *Adv. Polym. Technol.*, 4, 281 (1984)

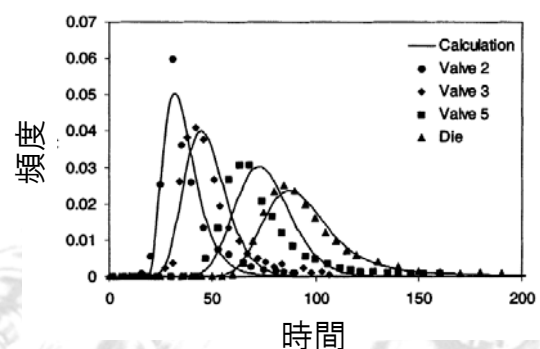
滞留時間分布のOff-line および In-line 計測とシミュレーション

トレーサー: UV蛍光体 押出機: 50mm径

Off-line 計測

押出物中のトレーサー量を測定

- 焼成, 光学顕微鏡, 電気伝導度,
- X線検出, UV蛍光, 熱量測定,
- ラマン分光, 赤外線分光,
- X線蛍光 etc

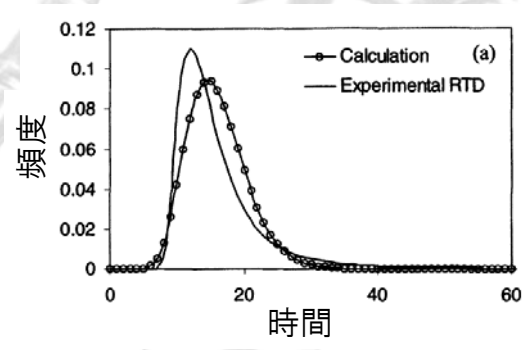


Off-line 計測例 (150rpm, 6kg/h)

In-line 計測

押出機に取り付けたプローブで通過のトレーサーを測定

- X線検出, 磁力感知,
- 光透過, 光反射, 超音波減衰
- 電気容量, 電気伝導度, 誘電率
- 赤外線分光, 蛍光

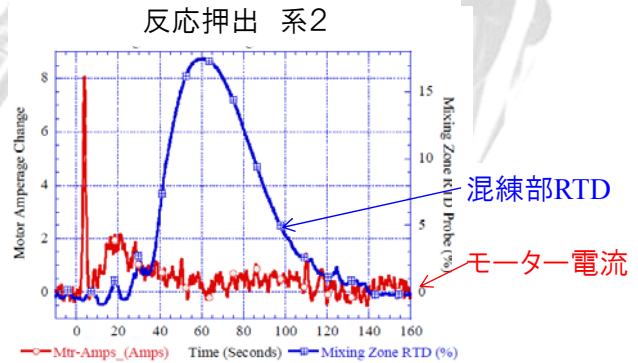
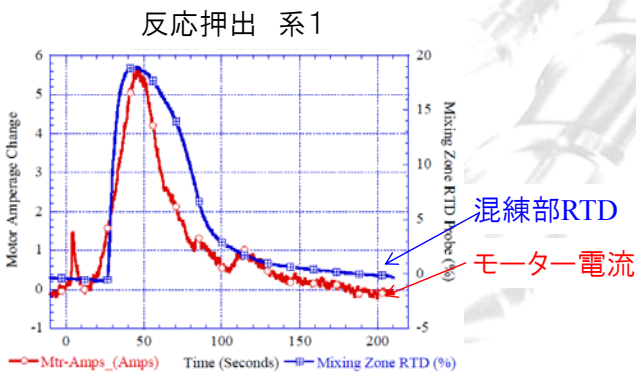
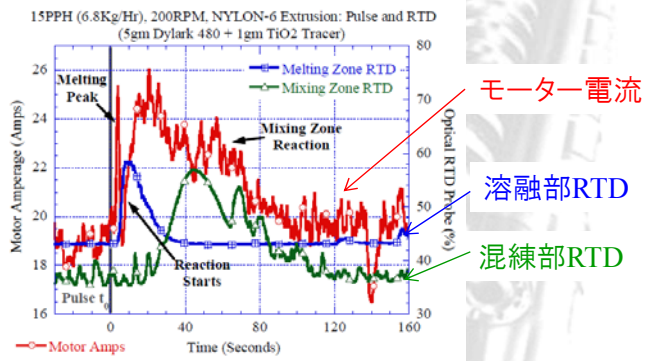
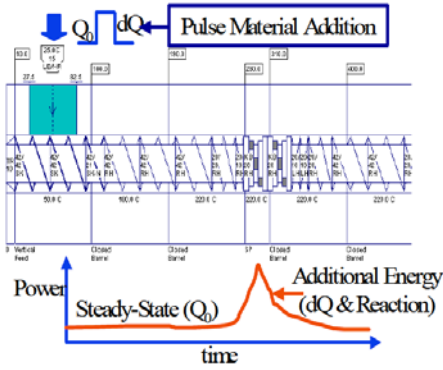


In-line 計測例 (200rpm, 10kg/h)

A. Poulesquen, B.Vergnes et al.: *Polym. Eng. Sci.*, 43, 1849 (2003)

摂動法 (Perturbation Method)

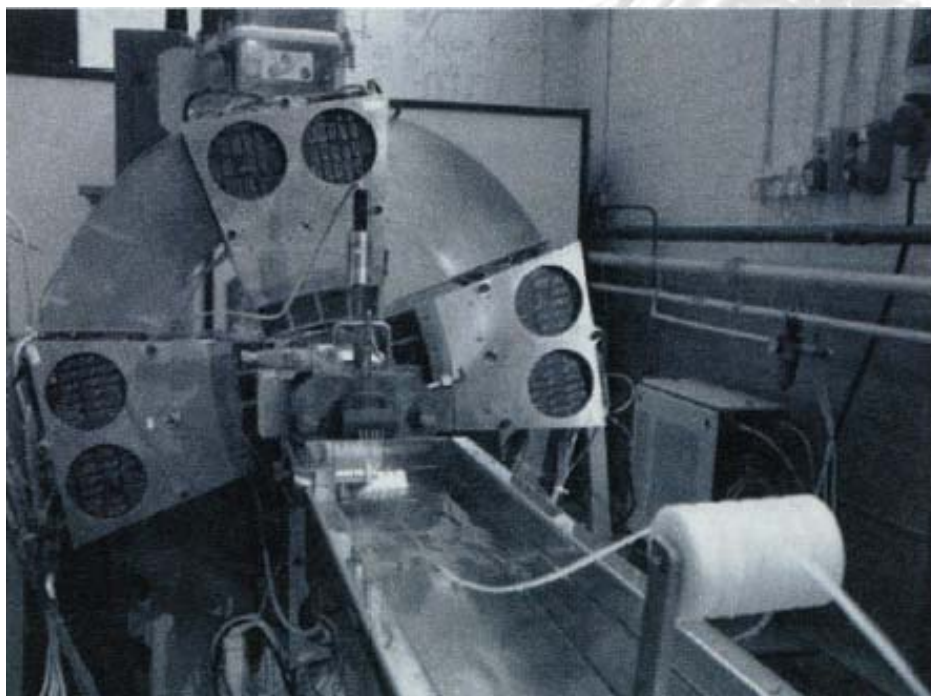
EPAS・・・Extrusion Pulse Analysis System(投入流量をパルス的に増加させる)



M.D.Wezel et al. : ANTEC 2003, 3791 (2003)

ポジトロン断層法による押出機内の可視化

PEPT・・・Positron Emission Particle Tracking

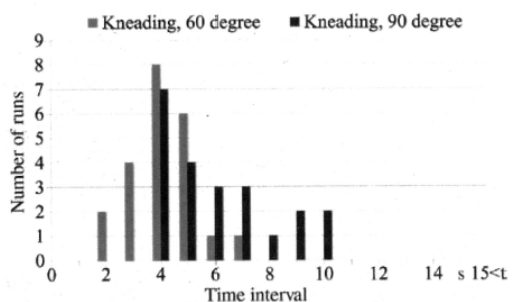


J. Diemer et. al : Int. Polym. Processing, XXVI, 5 (2011)

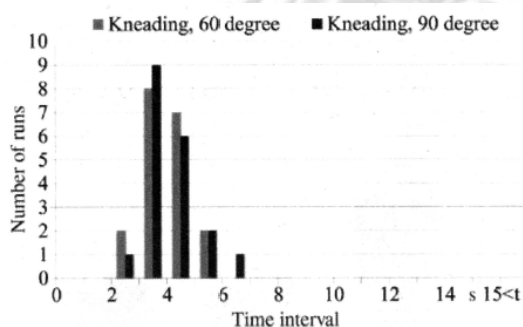


ポジットロン断層法による押出機内の可視化 (続)

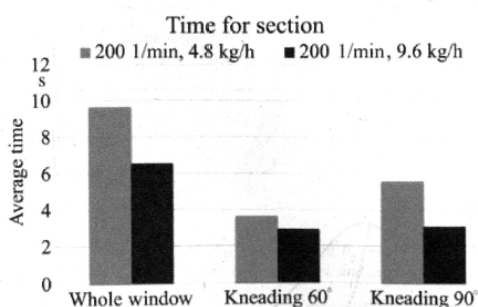
27mm径押出機, 200rpm



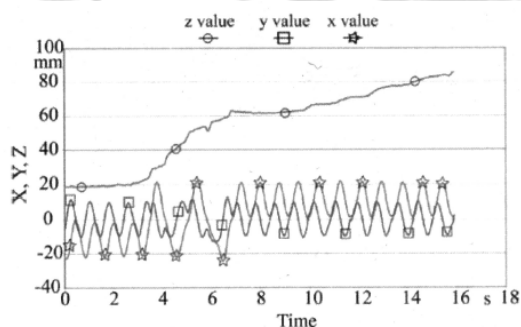
滞留時間分布(4.6kg/h)



滞留時間分布(9.6kg/h)



平均滞留時間



着目粒子の位置の変化

J. Diemer et. al : *Int. Polym. Processing*, XXVI, 5 (2011)



講演内容

内容

熔融混練の理論

実験による可視化・計測手法

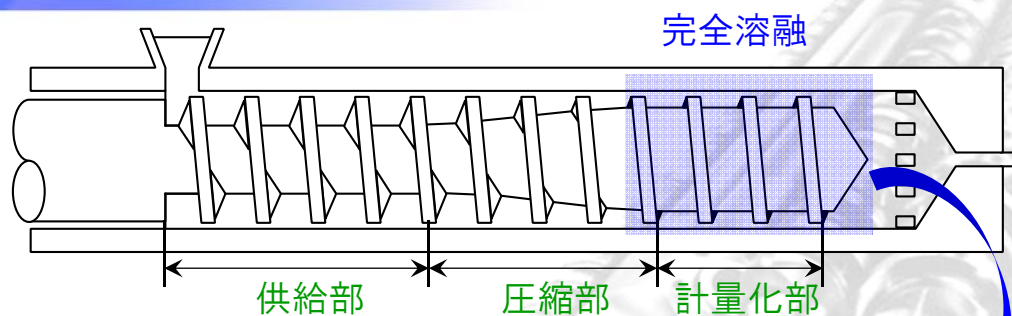
押出機・混練機と熔融混練理論

計算機シミュレーションによる混練予測

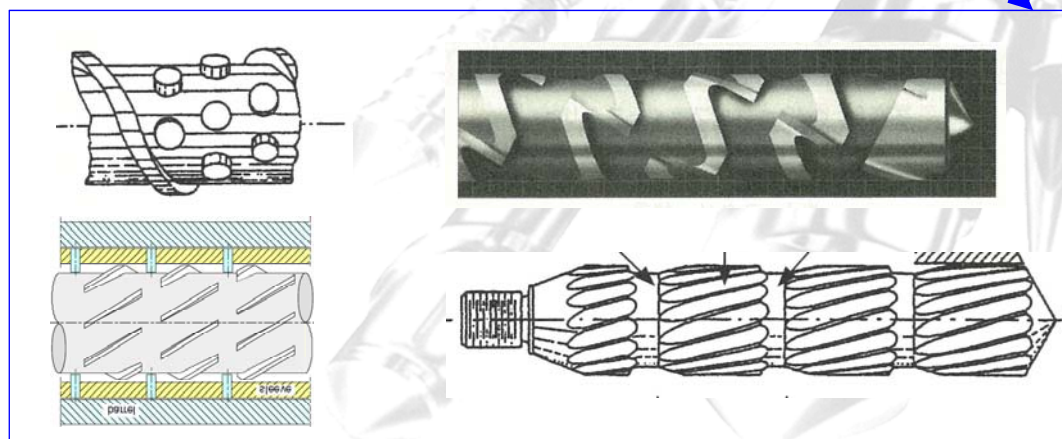
スケールアップ問題



単軸スクリュ押出機と混練エレメント



単軸スクリュ押出機の模式図



辰巳昌典: ポリマー混練・分散技術および具体的な不良要因とその対策, 第4章, 技術情報協会, pp.77-126 (2003)



単軸スクリュ押出機 ミキシングスクリュ

1) 位置交換方式

流動場を複雑にすることで, 材料の位置交換を促進し, **分配混合**を促進
ダルメージ型, DIS型, ピン型など

2) バリア・スリット方式

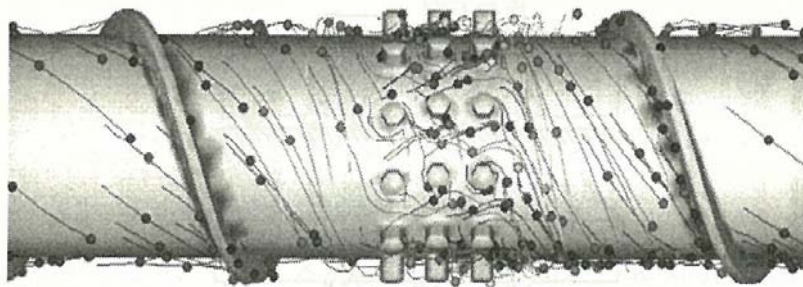
せん断応力を強く作用させることによって**分散混合**を促進
リング型, マドック型, ユニメルト型, ダブルフライト型など

3) 伸長変形方式

伸長流を利用して**分散混合**を促進
ウェーブ型, CTM型, バレルピン型, HM型, スパイレックス型など

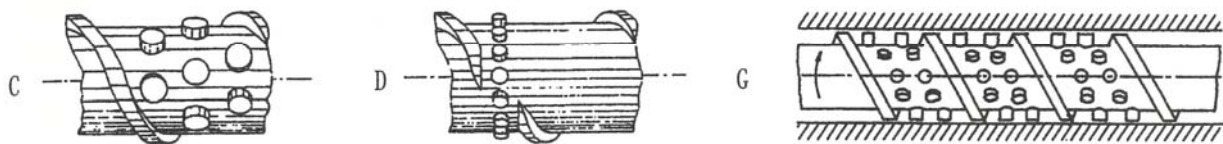
辰巳昌典: ポリマー混練・分散技術および具体的な不良要因とその対策, 第4章, 技術情報協会, pp.77-126 (2003)

単軸スクリュ押出機 ピン型ミキシング



ピン付きスクリュの流動解析

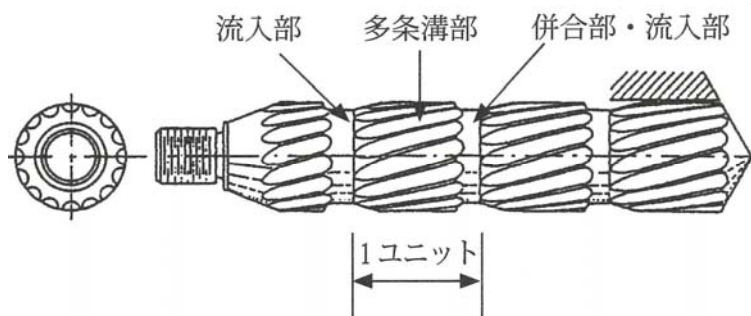
W. G. Yao, S. Tanifuji, K. Takahashi and K. Koyama: *Polym. Eng. Sci.*, **41**, 908 (2001)



各種ピン型ミキシングの構造

辰巳昌典: ポリマー混練・分散技術および具体的な不良要因とその対策, 第4章, 技術情報協会, pp.77-126 (2003)

単軸スクリュ押出機 ダルメージ型ミキシング



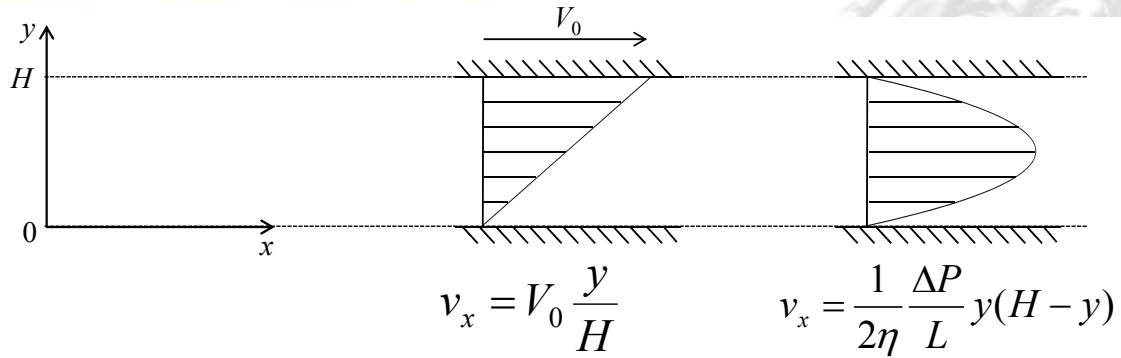
ダルメージ型ミキシングの構造

辰巳昌典: ポリマー混練・分散技術および具体的な不良要因とその対策, 第4章, 技術情報協会, pp.77-126 (2003)



射出成形スクリュ

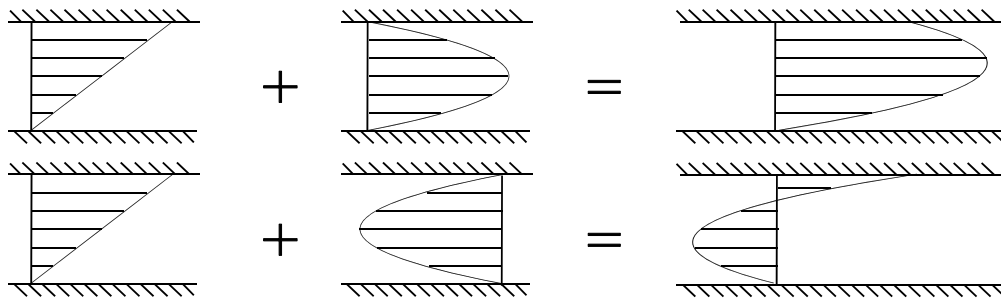
牽引流れと圧力流れ



牽引流れ(スクリュ回転)
流体粘度に依存しない

圧力流れ(圧力勾配)
流体粘度に依存

押出機内の流れ・・・牽引流れ+圧力流れ



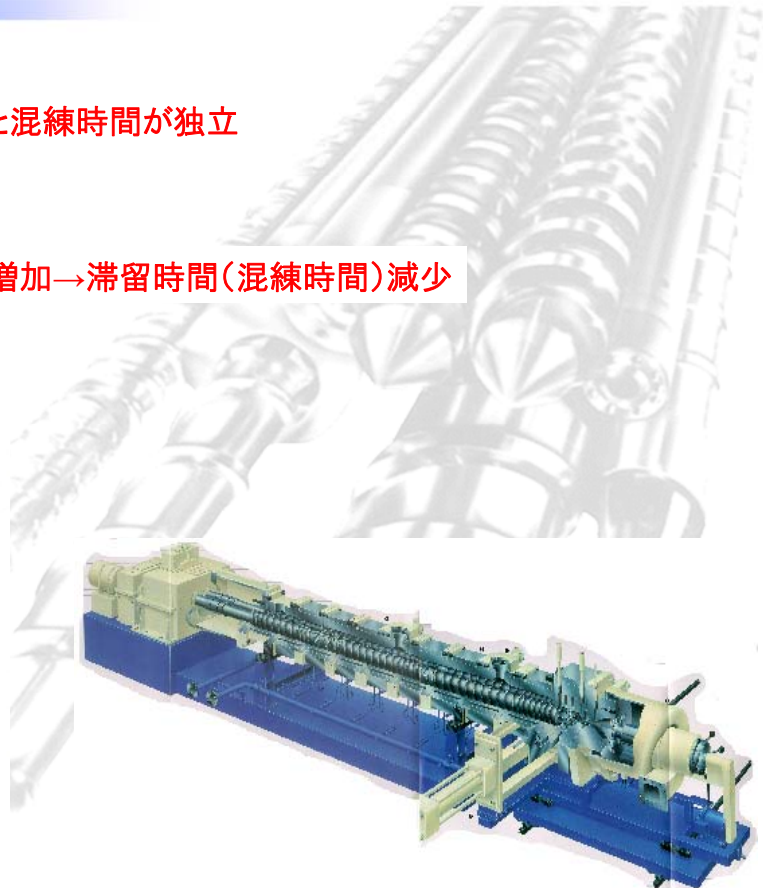
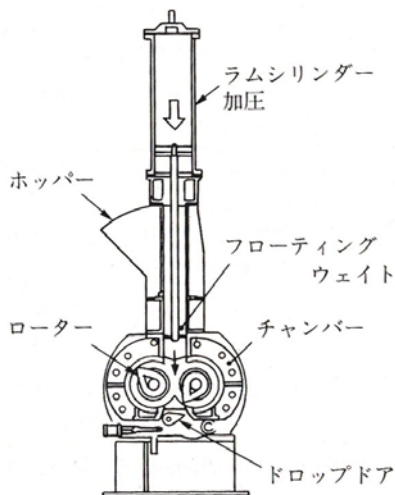
バッチ式と連続式混練機

バッチ式混練機

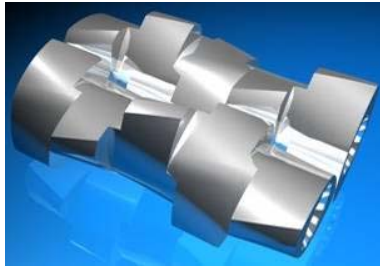
回転数と混練時間が独立

連続式混練機

回転数増加→滞留時間(混練時間)減少



特殊形状の二軸スクリュ押出機



ツイストニーディングディスク



ギアニーディング



切り欠き



溝付きバレル

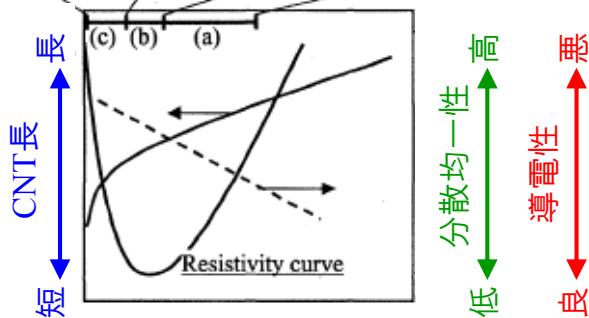
混練性能を向上させる
・・・特殊スクリュ・バレルの利用

➤ 流路をより複雑化

混練強度の適正化

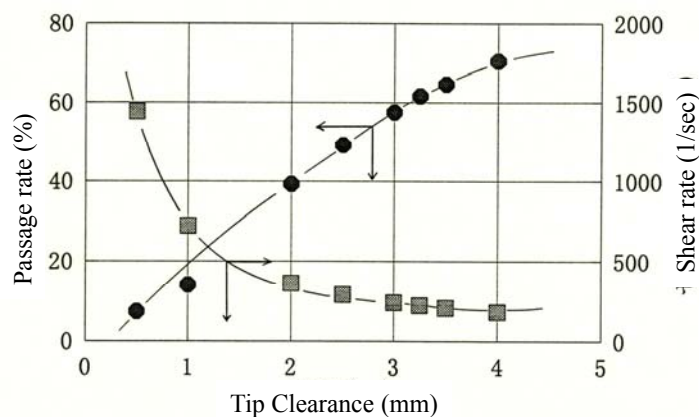
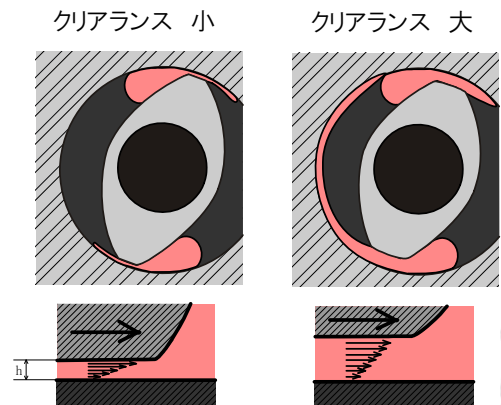
カーボンナノチューブ(CNT)の分散

Short	Medium	Long	CNT length
Good	Medium	Bad	Uniform dispersibility
Bad	Good	Bad	Conductivity



総せん断ひずみ量

チップクリアランスの重要性

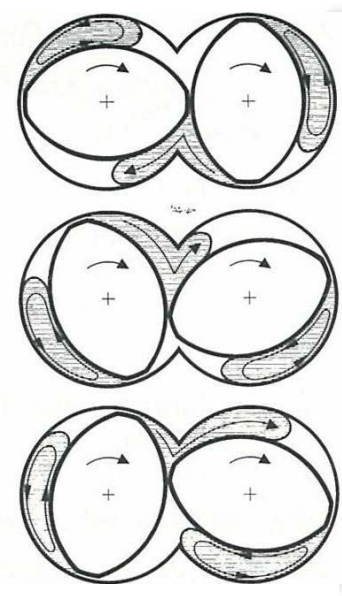
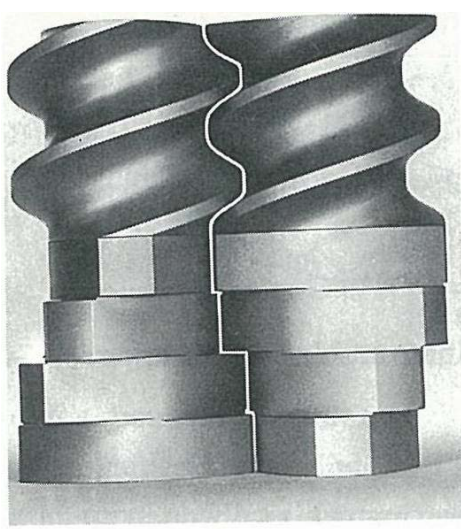


チップ部の挙動

クリアランス	小	⇔	大
応力	大	⇔	小
通過流量	小	⇔	大
粘性発熱	大	⇔	小
セルフクリーニング	良	⇔	悪

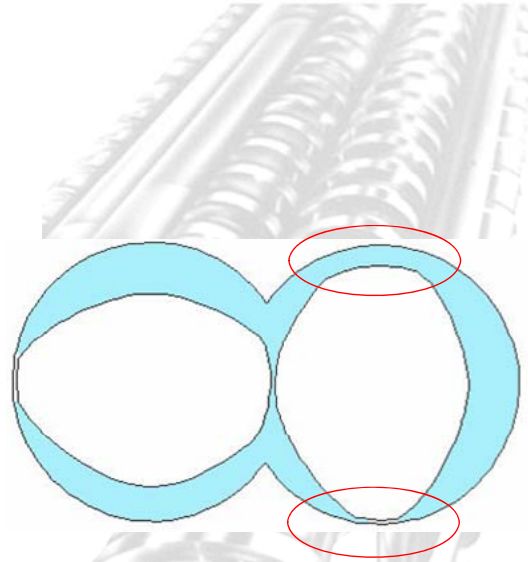
→ クリアランスの最適化が重要

セルフクリーニング



付着樹脂の熱劣化
バレルからの伝熱阻害

セルフクリーニングタイプのスクリュと混練エレメント



広いチップクリアランス:材料の通過

狭いチップクリアランス:バレル表面のクリーニング

Coperion Werner and Pfleidererカタログより



内容

溶融混練の理論

実験による可視化・計測手法

押出機・混練機と溶融混練理論

計算機シミュレーションによる混練予測

スケールアップ問題

均相系から多相系へのアプローチ

本研究の解析 実際に行われているスクリュ・バレル形状での三次元解析
多相系・・・界面等が非常に複雑で扱えない



均相系で解析を行い、その結果を多相系の混合評価へと繋げる

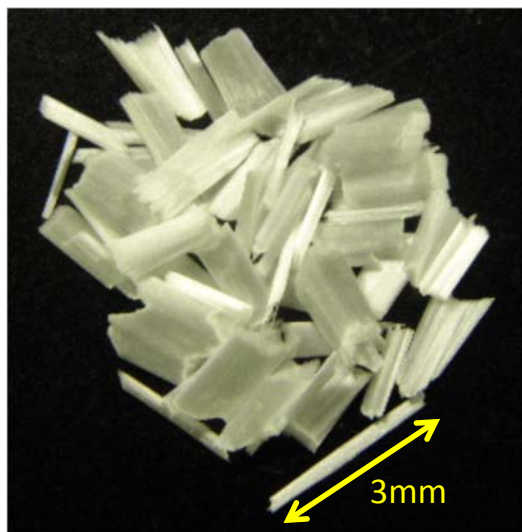
条件の差による混練メカニズムの差, 性能の優劣の評価

混練を支配する物理現象を評価することで, 間接的に混練を評価する

- ◎混合形態
 - ひずみの作用による分配混合
 - 応力の作用による分散混合

ガラス繊維強化樹脂コンパウンド

樹脂コンパウンドの代表である**ガラス繊維強化プラスチック**に着目



ガラス繊維束(原料)

数mmのガラス繊維が押出機への供給性確保のため収束剤により数千本に束ねられている



(求められる分散技術)

- ①ガラス繊維を目的の長さに破断する
- ②ガラス繊維束を個々の繊維にバラバラにする(⇒開繊)

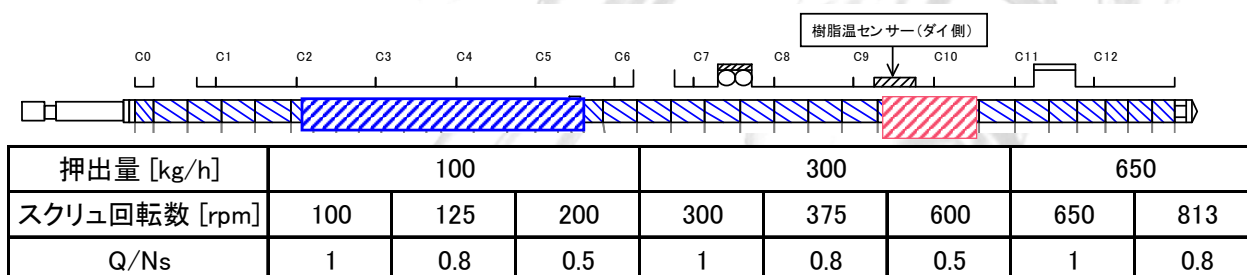
混練実験条件

Material	discription
Polybutylene telephthaete (PBT)	67.5wt% Mw=4.9×10 ⁴
PBT including carbon black	2.5wt% (PBT 80wt% / CB 20wt%)
Glass fiber bunches	30.0wt% (Diameter 13μm, Length 3mm)

逆ねじ1条切欠き
BMS
(L/D=1, 2, 2.5)

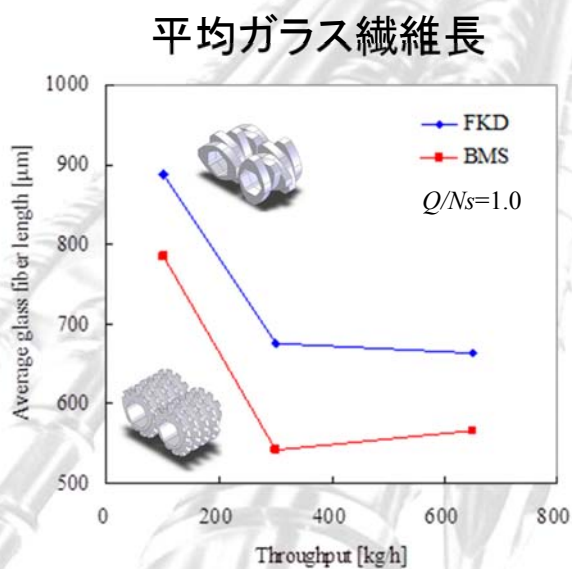
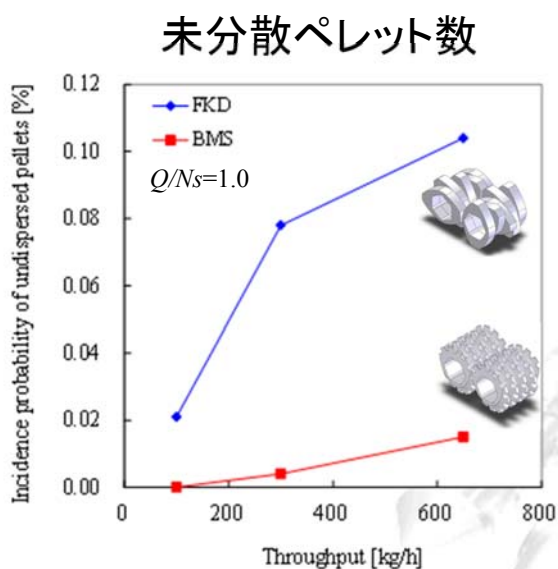


順送りKD
FKD
(L/D=1, 2)



K. Hirata, H. Ishida, M. Hiragohri, Y. Nakayama, T. Kajiwara: *Int. Polym. Processing*, **28**, 368 (2013)

各分散現象の比較

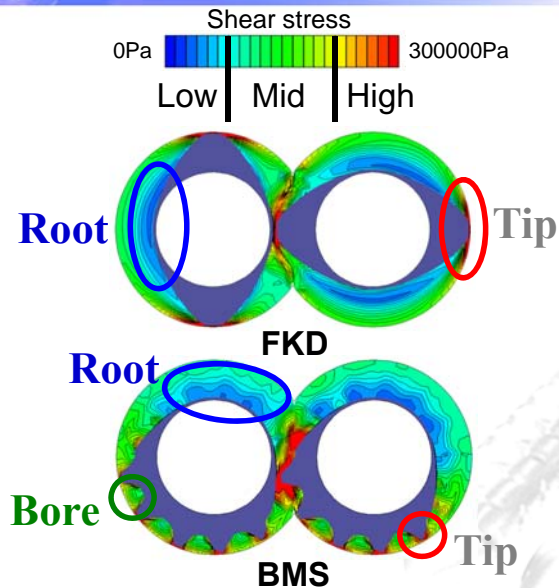


押出量の増加 → 未分散ペレット数: 増加 (分散悪化)
 ガラス繊維長: 短くなる (分散向上)

未分散ペレット: 混練時間の低下が強く影響
 ガラス繊維破断: 応力が支配的

K. Hirata, H. Ishida, M. Hiragohri, Y. Nakayama, T. Kajiwara: *Int. Polym. Processing*, **28**, 368 (2013)

1回転中に受けた最大応力

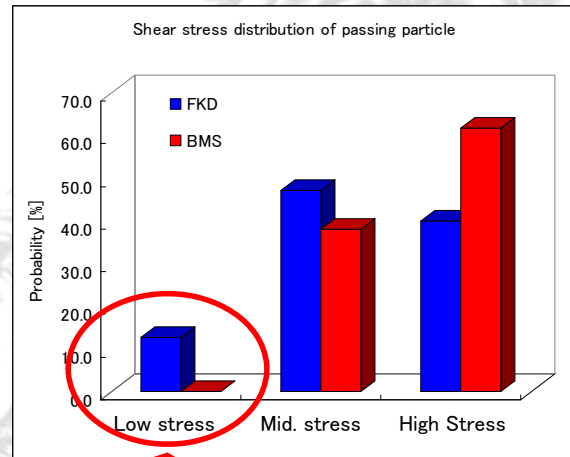


低応力領域 (Root部)
0~100kPa

中応力領域 (Bore部)
100~200kPa

高応力領域 (Tip部)
≥200kPa

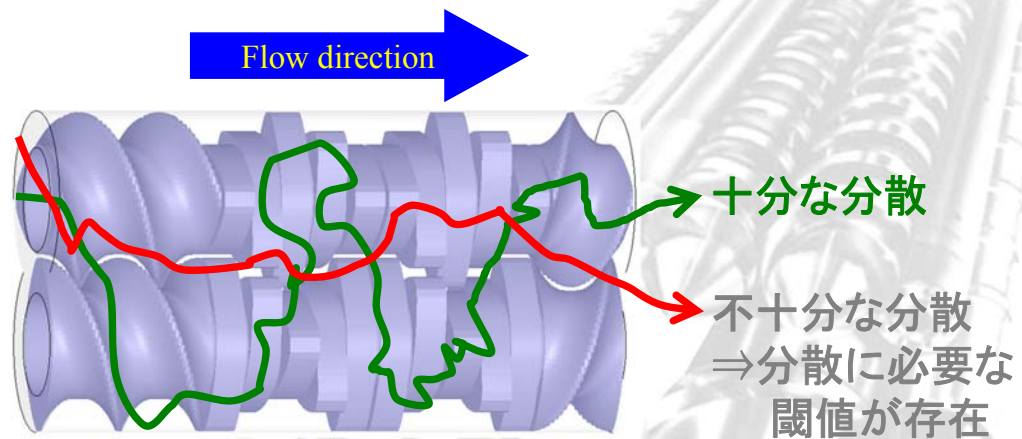
1回転する間に印加された最大応力の確率



低応力領域のみを通過した粒子数
FKD : 約13% BMS : 0%

K. Hirata, H. Ishida, M. Hiragohri, Y. Nakayama, T. Kajiwara : *Polym. Eng. Sci.*, DOI 10.1002/pen.23752 (2013)

未分散発生メカニズムの推定



ガラス繊維束分散 ⇒
応力履歴値

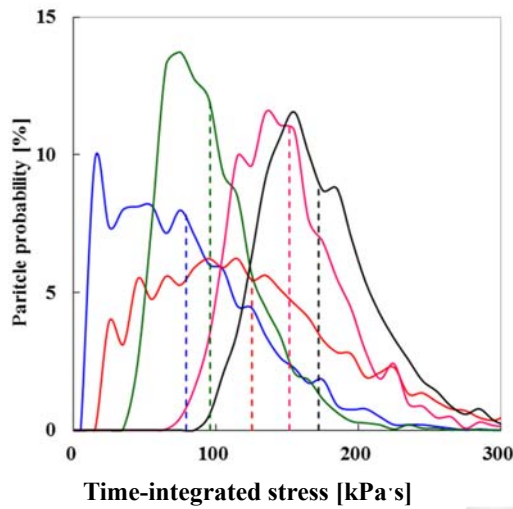
$$\sum_i = \int_0^{T_i} dt \int dx \delta(x - X_i(t)) \tau(x, t)$$

ガラス繊維破断 ⇒
最大応力値

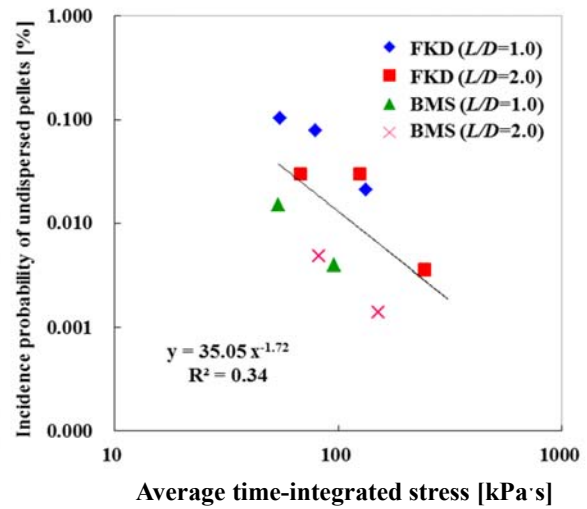
$$\tau_{\max} = \text{Max}(\tau(x, t))$$

平均応力履歴

応力履歴分布



平均応力履歴

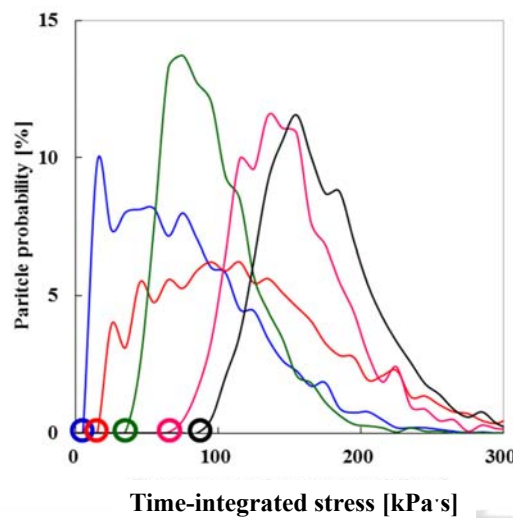


平均応力履歴値と未分散ペレット発生確率は決定係数 R^2 が0.34であり未分散ペレット数と相関性が低い

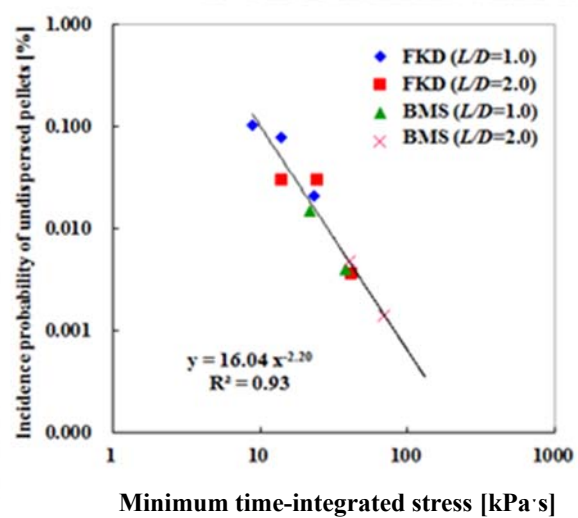
K. Hirata, H. Ishida, M. Hiragohri, Y. Nakayama, T. Kajiwara : *Polym. Eng. Sci.*, DOI 10.1002/pen.23752 (2013)

最小応力履歴

応力履歴分布



最小応力履歴



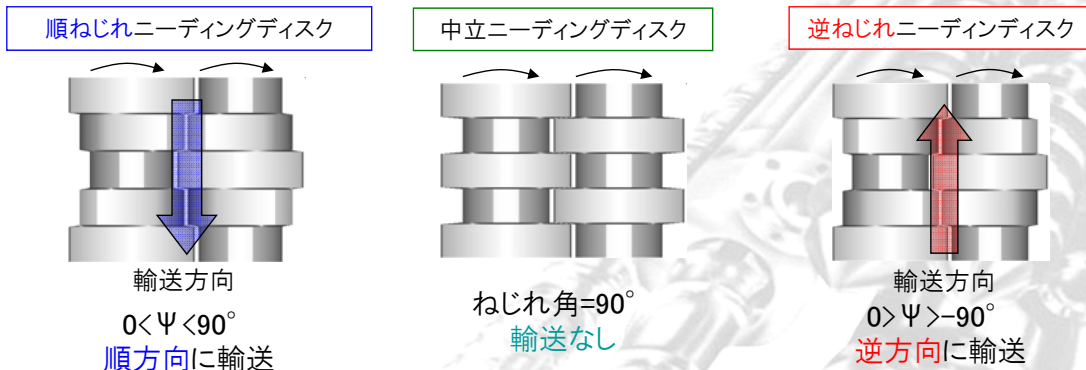
最小応力履歴値とは非常に高い相関性を有している
 ⇒平均的な混練能力ではなく、ショートパス軌道が原因である

最小応力履歴をガラス分散指標とすることができる

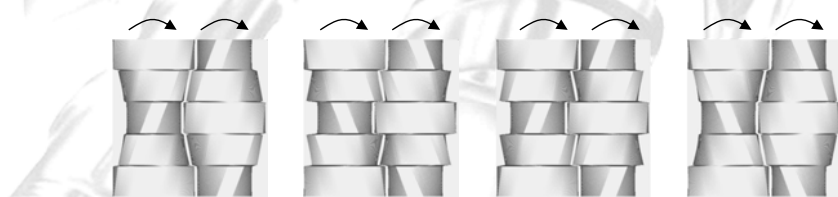
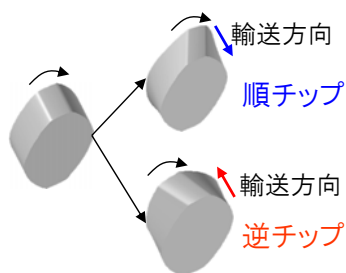
K. Hirata, H. Ishida, M. Hiragohri, Y. Nakayama, T. Kajiwara : *Polym. Eng. Sci.*, DOI 10.1002/pen.23752 (2013)

傾斜チップニーディングディスク

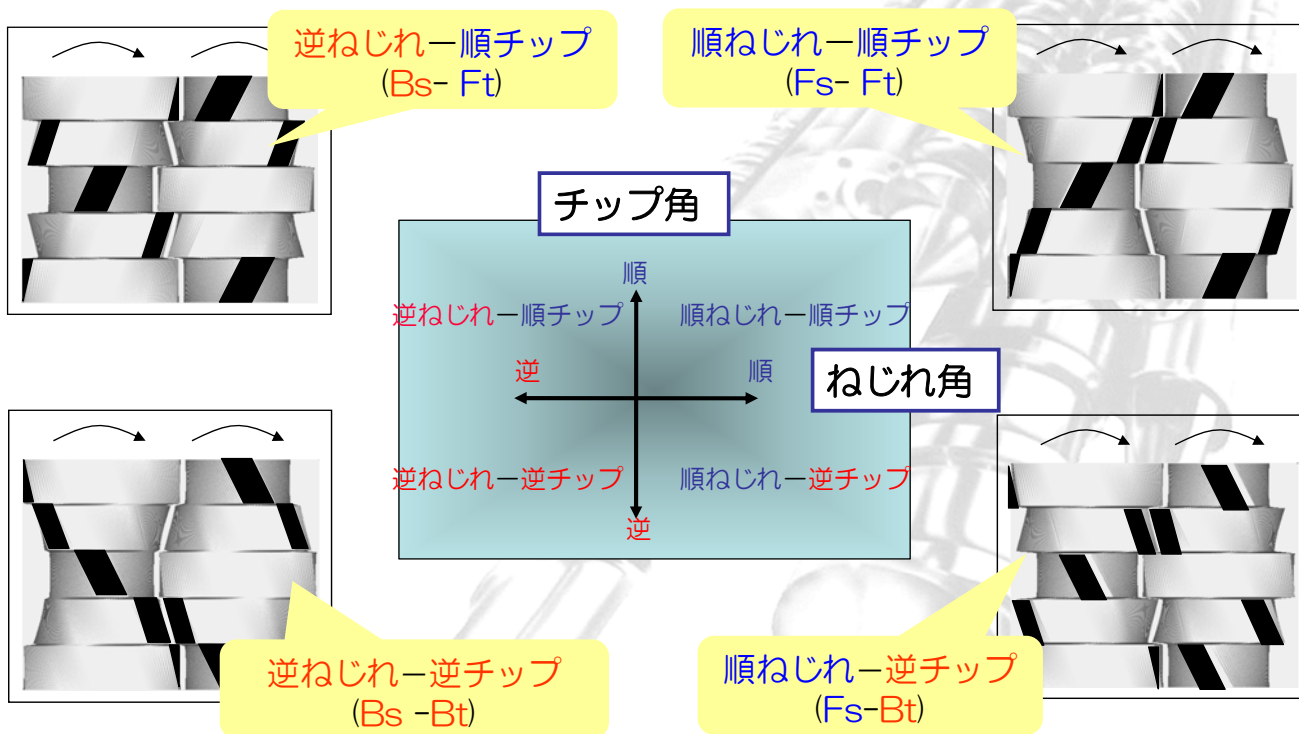
【通常のニーディングディスク】



【傾斜チップニーディングディスク】

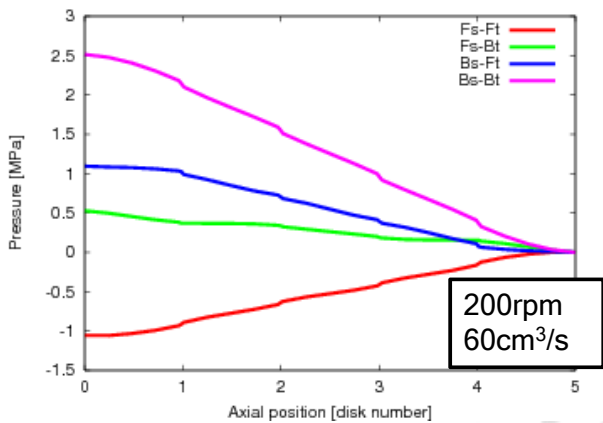


ねじれ角とチップ角の組み合わせ

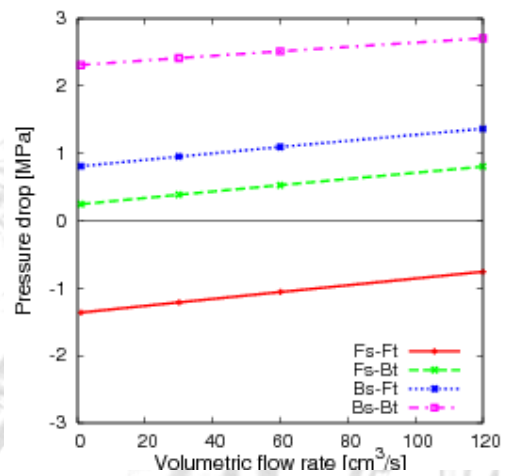


圧力分布

断面平均圧力の軸方向分布



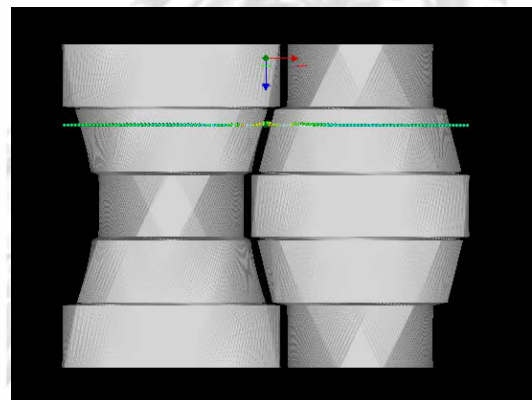
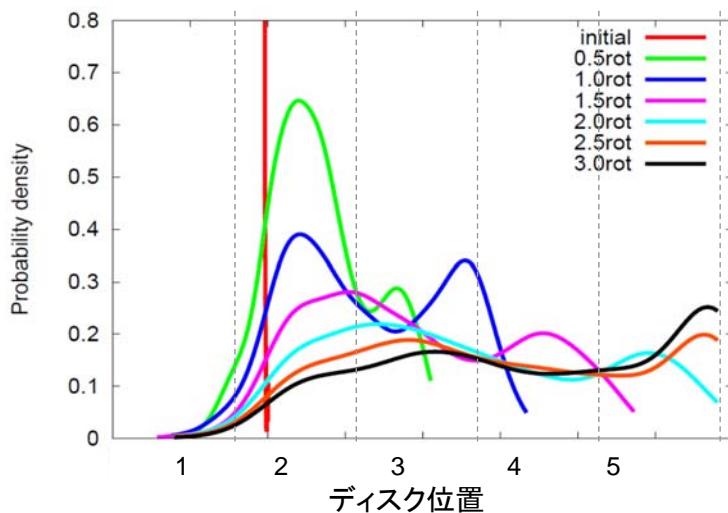
圧力損失と流量



- 圧力分布は、与えられたスクリュ回転数・流量を満たすように、解析の解として決定される
- 輸送能力
 (順ねじれ-順チップ) > (順ねじれ-逆チップ) > (逆ねじれ-順チップ) > (逆ねじれ-逆チップ)
 (Fs-Ft) (Fs-Bt) (Bs-Ft) (Bs-Bt)

Nakayama, Y., Takeda, E., Shigeishi, T., Tomiyama, H. and Kajiwara, T. : *Chem.Eng. Sci.*, **66**, 103 (2011)

軸方向位置の分布と経時変化： 順ねじれ-順チップ



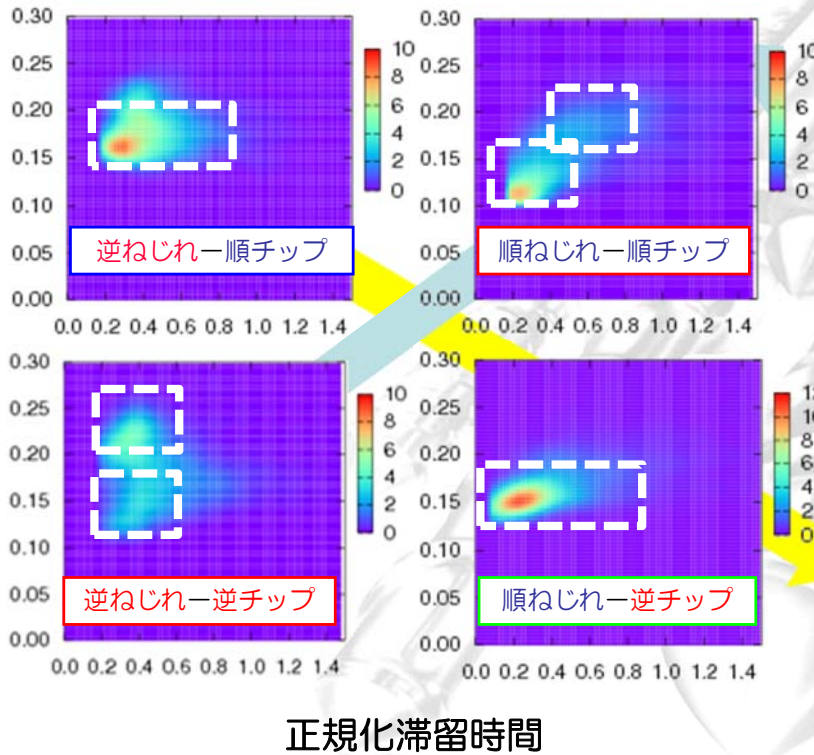
軸方向速度の異なる2つのピークが発生する

可視化により以下の流動形態が確認された
速い集団: スクリュのねじ谷に沿った主流れ
遅い集団: それ以外(チップやディスク間)の流れ

Nakayama, Y., Takeda, E., Shigeishi, T., Tomiyama, H. and Kajiwara, T. : *Chem.Eng. Sci.*, **66**, 103 (2011)

滞留時間分布と平均応力

応力のラグランジュ平均



順ねじれ-順チップ
逆ねじれ-逆チップ

- 2つのピーク
- 応力低-滞留時間短
- 応力高-滞留時間：形状で異なる

順ねじれ-逆チップ
逆ねじれ-順チップ

- 単峰
- 狭い応力分布
- 広い滞留時間分布

Nakayama, Y., Takeda, E., Shigeishi, T., Tomiyama, H. and Kajiwara, T. : *Chem.Eng. Sci.*, **66**, 103 (2011)

ひずみ速度場に基づく混合指標

最大伸長率

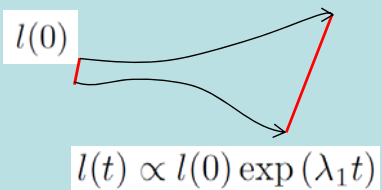
$$\lambda_1 = \max_{\mathbf{n}, |\mathbf{n}|=1} \mathbf{D} : \mathbf{n}\mathbf{n}$$

ひずみ速度場のパターン（流動形態）

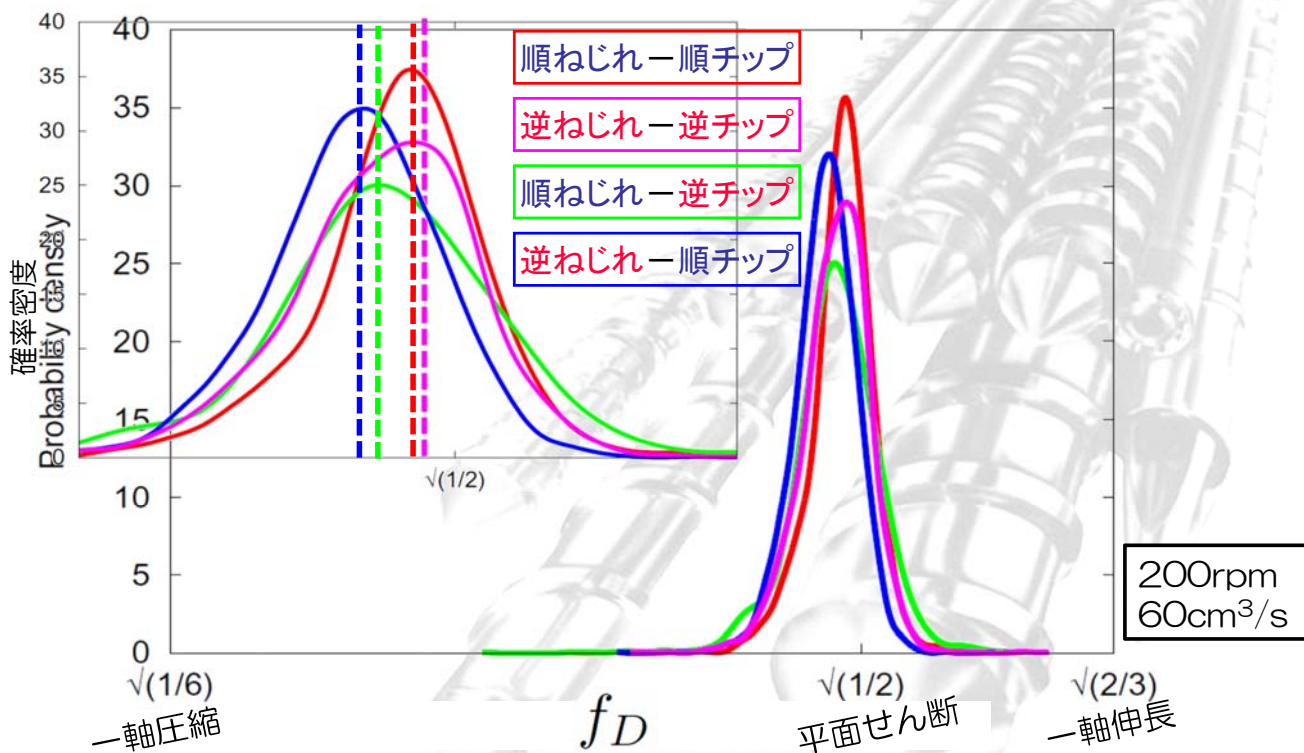
$$f_D(\mathbf{x}, t) = \frac{\max_{\mathbf{n}, |\mathbf{n}|=1} \mathbf{D} : \mathbf{n}\mathbf{n}}{\sqrt{\mathbf{D} : \mathbf{D}}}$$

$$f_D = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3}} & \text{(一軸伸長)} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \text{(平面せん断)} \\ \sqrt{\frac{1}{6}} & \text{(一軸圧縮 (二軸伸長))} \end{cases}$$

stretching rate of nearby two points

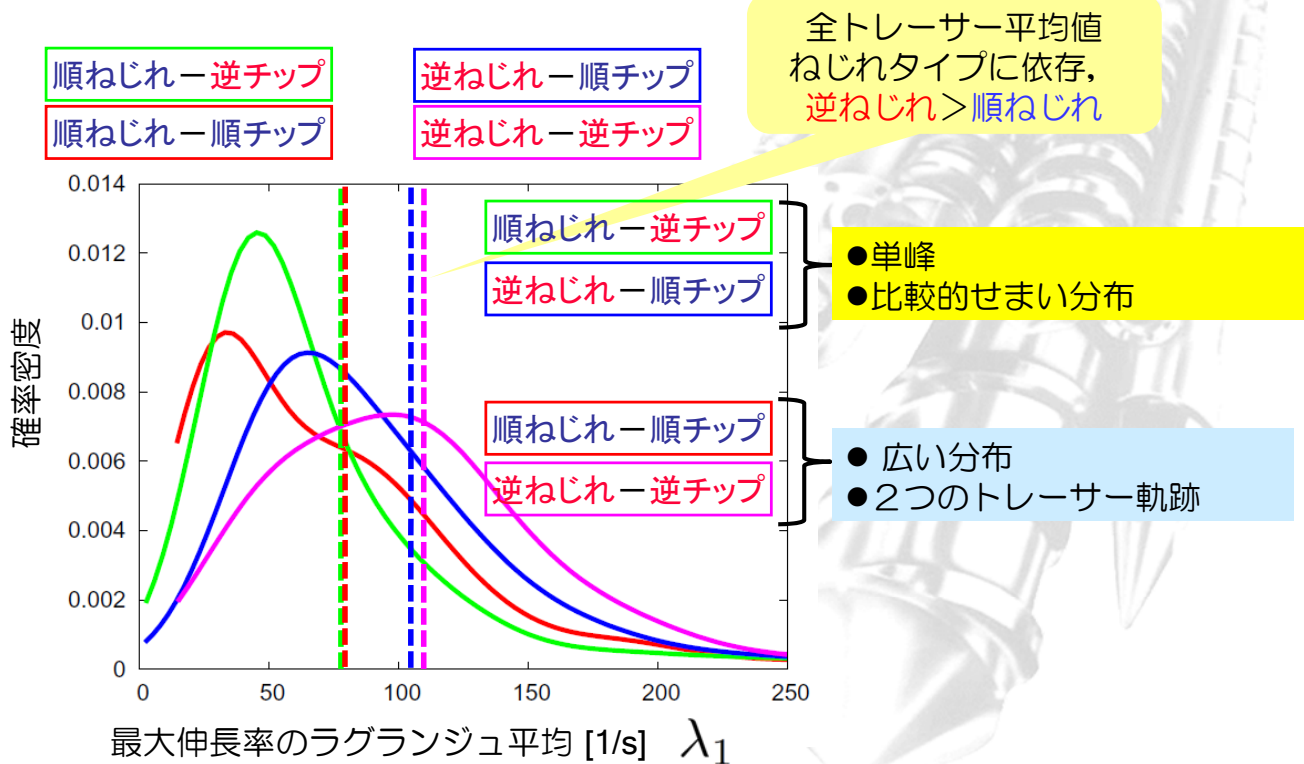


ひずみ速度場のパターン

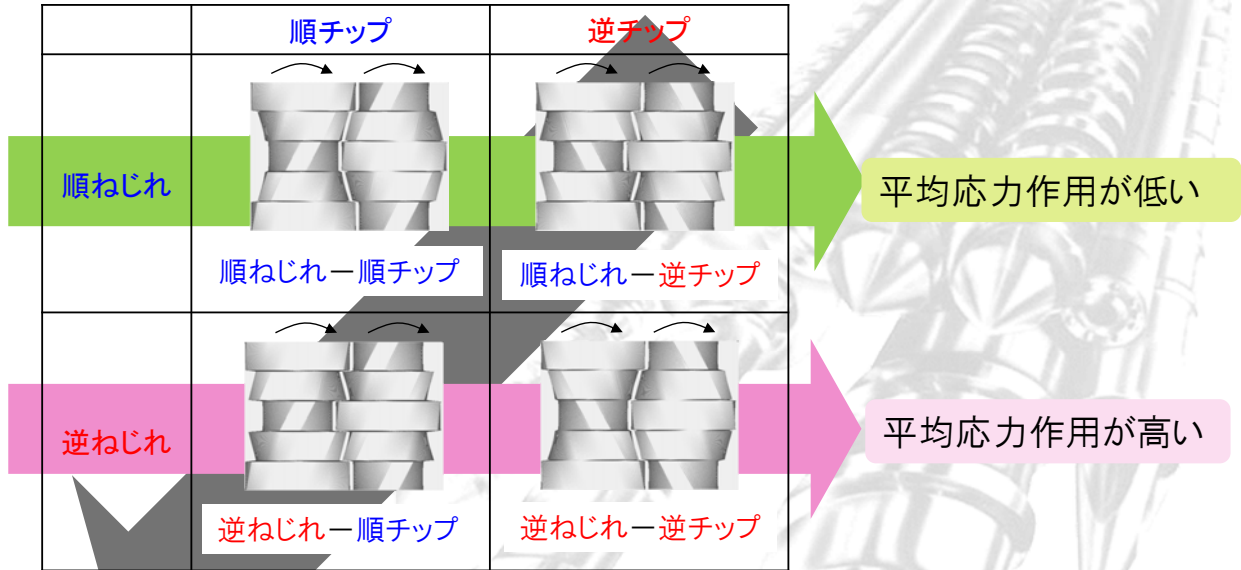


Nakayama, Y., Takeda, E., Shigeishi, T., Tomiyama, H. and Kajiwara, T. : *Chem.Eng. Sci.*, **66**, 103 (2011)

最大伸長率の分布



Nakayama, Y., Takeda, E., Shigeishi, T., Tomiyama, H. and Kajiwara, T. : *Chem.Eng. Sci.*, **66**, 103 (2011)

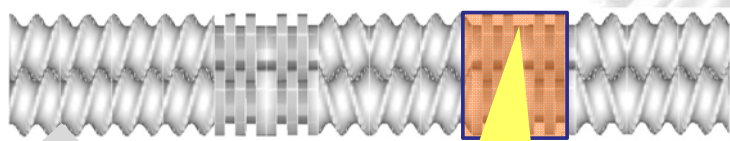


より三次元的な流れ場
(伸長場の作用が高い)

Nakayama, Y., Takeda, E., Shigeishi, T., Tomiyama, H. and Kajiwara, T. : *Chem. Eng. Sci.*, **66**, 103 (2011)



ABS 30wt% / SAN 70wt%
パウダーをドライブレンド



溶融混練部

構造観察

ABS/SAN
ブレンド

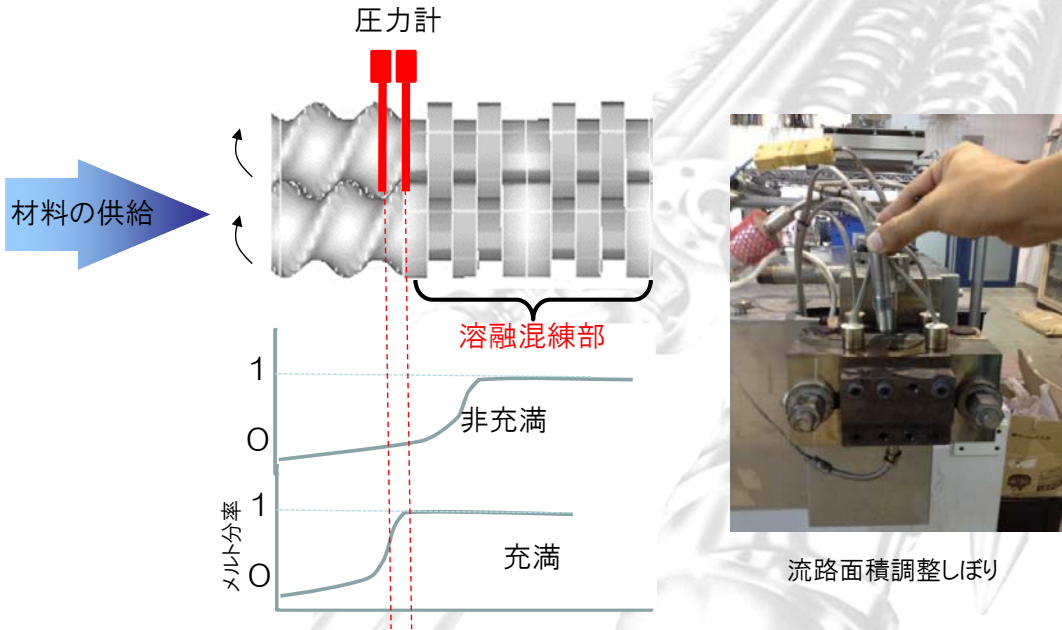
溶融粘弾性測定

二軸スクリュ押出機:
日本製鋼所製 TEX28V

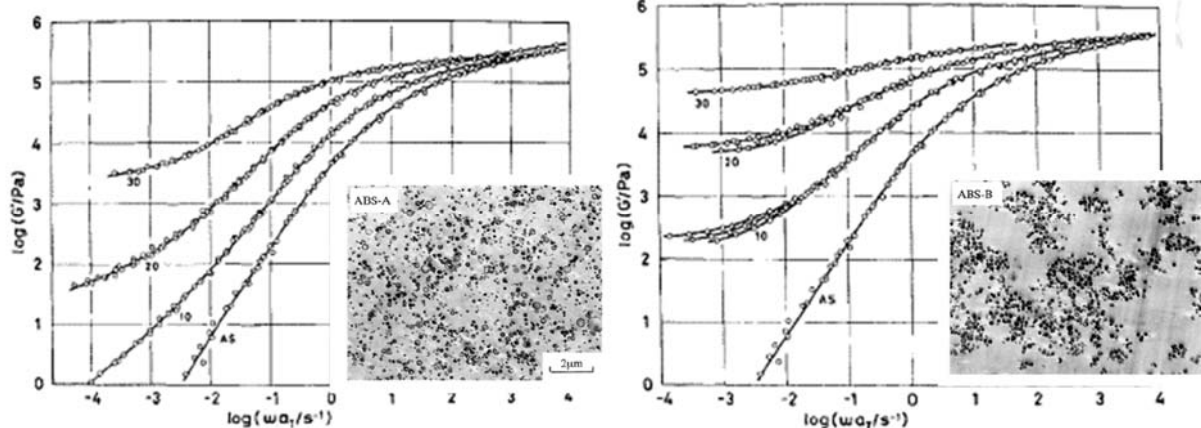
スクリュ回転速度	100 rpm
フィーダ供給量	5-15kg/h

温度	180, 200, 220°C
ひずみ	5%, 10%
周波数	0.1-500rad/s

混練エレメント: L/D=4.5 (ディスク15枚)
 フルフライト (輸送エレメント)
 順ねじれーチップ傾斜なし
 順ねじれー順チップ
 順ねじれー逆チップ
 逆ねじれー順チップ
 逆ねじれー逆チップ



- ABS樹脂
 - SAN相のマトリクスに PBDゴム粒子が分散した海島構造.
- 融融粘弾性は以下の点で決まる.
 - マトリクスSANの粘弾性
 - PBDゴムの粘弾性
 - PBDゴムの粒子径,含有量(粒子径小, 含有率大→弾性率増)
 - PBDゴムの分散・凝集構造(温度時間換算則)

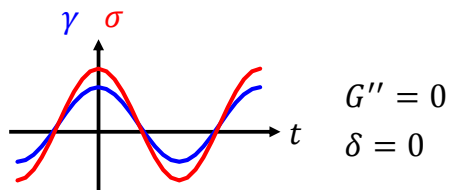


Aoki, Y. : *Journal of the Society of Rheology*, 7, 20-26 (1979)

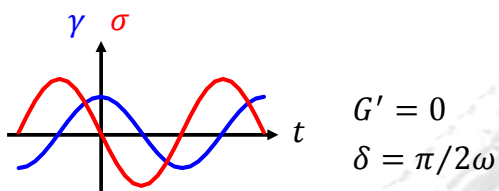
Castellani, L.; Lomellini, P. : *Rheologica Acta*, 33, 446-453 (1994)

粘弾性測定

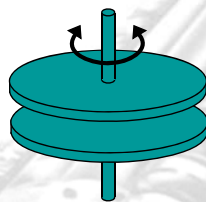
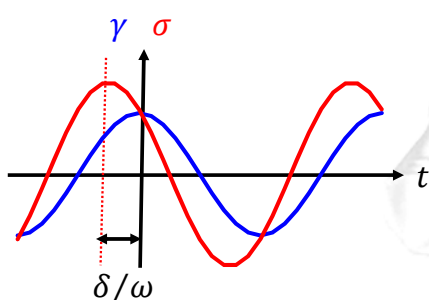
弾性体



粘性体



粘弾性体



$\gamma(\omega) = \gamma_0 \cos(\omega t)$



$\sigma(\omega) = G^*(\omega)\gamma(\omega)$
 $= G'(\omega)\gamma_0 \cos(\omega t) - G''(\omega)\gamma_0 \sin(\omega t)$
 $= |G^*|\gamma_0 \cos(\omega t + \delta)$

$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2}$

$\delta = \tan^{-1} \frac{G''}{G'}$

従来の混合指標

混合指標の定義

$$\lambda = \frac{\sqrt{\mathbf{D} : \mathbf{D}}}{\sqrt{\mathbf{D} : \mathbf{D} + \sqrt{\mathbf{\Omega} : \mathbf{\Omega}^T}}}$$

\mathbf{D} : 変形速度テンソル
 $\mathbf{\Omega}$: 渦度テンソル

● λ レオメトリックフロー

単純回転 $\longrightarrow \lambda = 0$

平面流動 $\longrightarrow \lambda = 0.5$

単純伸長 $\longrightarrow \lambda = 1$

● 逆は保証されない

$\lambda = 0$ ~~\longrightarrow~~ 単純回転

$\lambda = 0.5$ ~~\longrightarrow~~ 平面流動

$\lambda = 1$ ~~\longrightarrow~~ 単純伸長

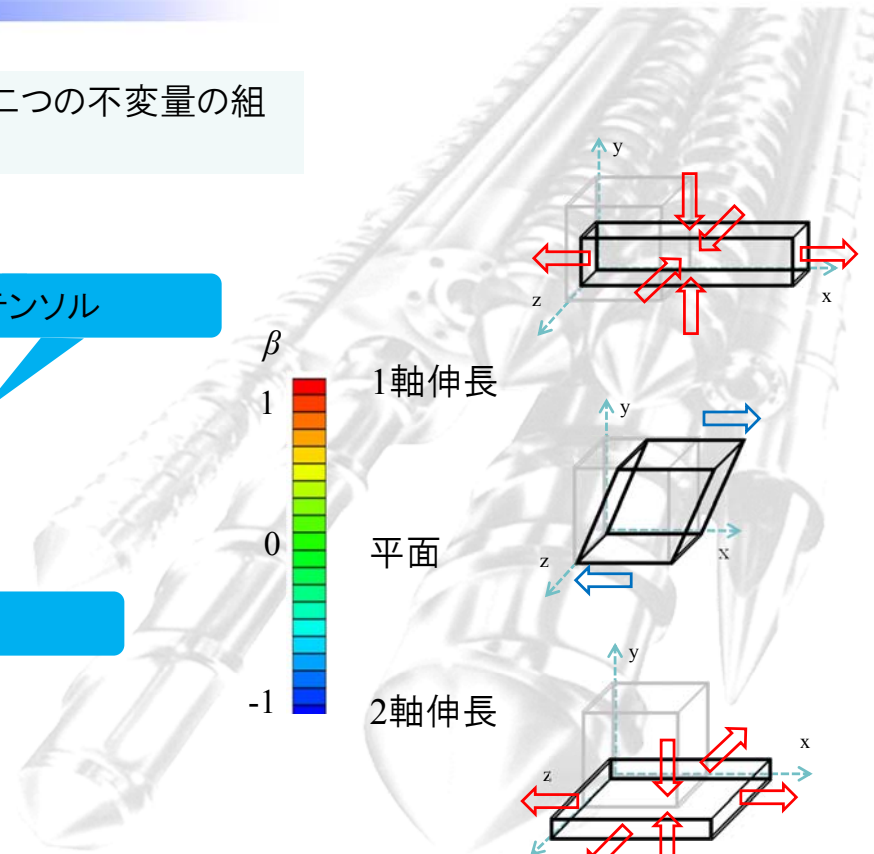
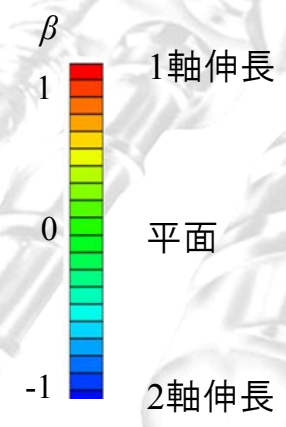
流動様式の新しい評価指標

変形速度テンソル D の二つの不変量の組み合わせ

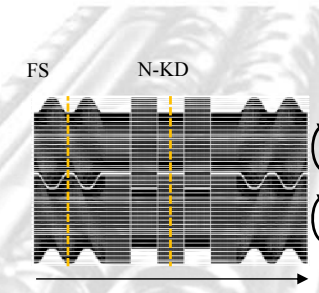
$\det D$: 3階のテンソル

$$\beta = \frac{3\sqrt{6} \det D}{(D:D)^{3/2}}$$

$D:D$: 2階のテンソル



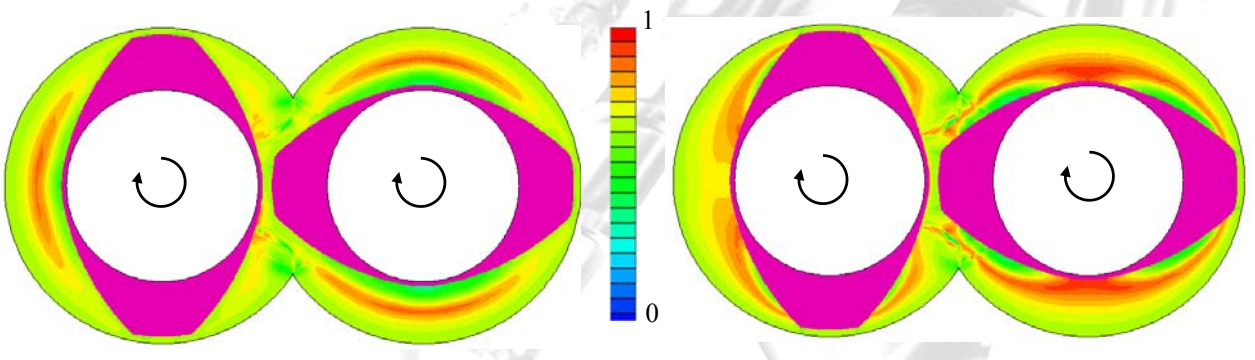
従来の混合指標

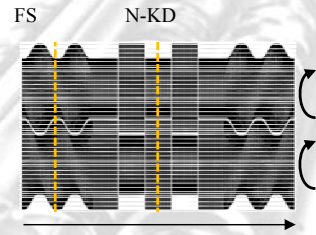


順ねじフライット

λ

中立ニーディングディスク

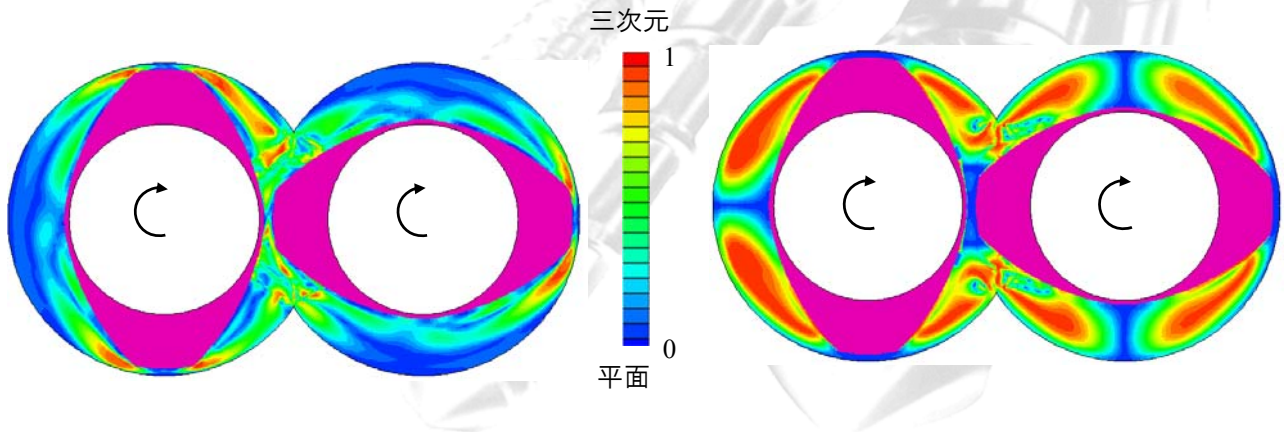




$$|\beta|$$

順ねじフライト

中立ニーディングディスク



内容

熔融混練の理論

実験による可視化・計測手法

押出機・混練機と熔融混練理論

計算機シミュレーションによる混練予測

スケールアップ問題

スケールアップ —スクリュ押出機—

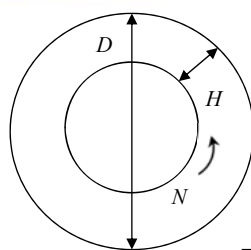
押出機のスケールアップ

1) 幾何的相似

D : シリンダ直径

N : スクリュ回転数

H : 溝深さ



・せん断速度

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi DN}{H}$$

$$\frac{D}{H} = \text{一定にとると} \rightarrow \dot{\gamma} \propto N$$

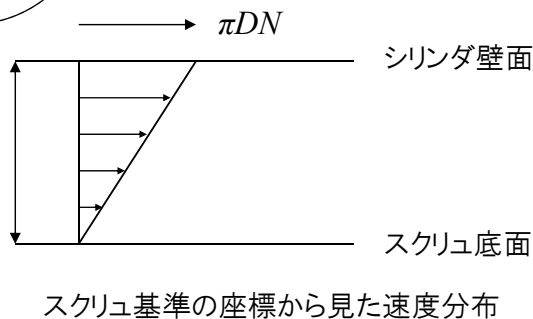
さらに $N = \text{一定} \rightarrow \dot{\gamma} = \text{一定}$

・せん断応力

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

温度一定なら $\tau \propto \dot{\gamma}$

指数則流体を仮定すると $\tau = K \dot{\gamma}^n$ (K, n : 物質定数)



スケールアップ —スクリュ押出機—

・押出量 $Q = VN$ (V : 流路体積)

幾何的相似なら $V \propto D^3$

$$Q \propto D^3 N$$

・滞留時間 $t = \frac{fV}{Q}$ (f : 充填率)

$$f = \text{一定なら} \quad t \propto \frac{V}{Q} \propto \frac{1}{N}$$

・伝熱面積 $S = \pi DL$ (L : スクリュ長さ)

$$\frac{L}{D} = \text{一定なら} \quad S \propto D^2$$

スケールアップ 問題点

実際にはチップクリアランスをくり返し通過する現象が混練や発熱を支配している
 スクリュチャンネル内の流動に基づくスケールアップ則は限界

- 1) せん断速度一定(チップクリアランスも幾何的相似)

$$\delta \propto D$$

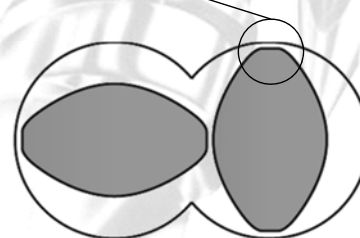
$$\dot{\gamma} = \frac{\pi DN}{\delta} \propto N \rightarrow N_1 = N_2$$

- 2) せん断速度一定(チップクリアランス一定)

$$\delta = \text{一定}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi DN}{\delta} \propto \frac{DN}{\delta} \rightarrow \frac{D_1 N_1}{\delta_1} = \frac{D_2 N_2}{\delta_2}$$

チップクリアランス δ



二軸スクリュ押出機

スケールアップ 問題点

体積ベースの幾何的相似スケールアップ(押出量など): D の 3 乗に比例

面積ベースの幾何的相似スケールアップ(伝熱量など): D の 2 乗に比例

実際には D の 2~3 乗の間をとる

温度場と流動場をすべて満たす相似則は存在しない

例えば、最終製品の品質を同じにしたい場合、品質を決める指標が何かがある必要がある

厳密に言えば、全プロセスが解明されなければ完全なスケールアップ則ができない

現状 — 現象把握と実験に基づく経験的スケールアップ則

将来 — 計算機シミュレーションの利用が望まれる