

(解説)

## 樹脂用連続混練機

### Continuous Mixers for Resin



宝谷 晋\*  
Shin HOTANI



黒田好則\*  
Yoshinori KURODA

Our continuous mixer, developed for resin, has a unique characteristic. Its rotors apply high shear-stress for melt-mixing, thoroughly homogenizing and efficiently dispersing the polymer. The continuous mixers are employed in polyolefin plants all over the world and enjoy an excellent reputation. This paper describes the design and features of the continuous mixer and illustrates its mixing capability. Also explained is the dispersion performance in terms of associated shear stress numbers. In the near future, continuous mixers are expected to have features, such as larger extrusion capacity and wide processing range for a variety of polymer processes.

まえがき = 2008 年後半からの世界経済の急速な悪化により、自動車産業を始めとするプラスチックの需要先は生産調整に入り、原油価格の不安定さも影響してプラスチック産業は先の予測が難しい状況である。汎用ポリオレフィン系樹脂であるポリエチレン（以下、PE という）およびポリプロピレン（以下、PP という）は、近年の中近東や中国での製造プラントの大規模な新增設により短期的には供給過多になるとみられるが、長期的にはさらなる成長が見込まれており、ポリオレフィン業界では製造プロセス、触媒、製品開発の努力が続けられている<sup>1)</sup>。

当社が製造、販売する混練造粒装置は、PE、PP プラントの最終工程である造粒工程に設置され、樹脂製品の多様化やプラントの高能力化に伴い、その役割はますます重要となっている。混練造粒装置は混練押出機と造粒機で構成されるが、なかでも混練押出機は、その性能がプラントの最終製品であるペレットの品質に大きく影響を与える重要装置である。当社の混練造粒装置 LCM シリーズは、1981 年にギヤポンプと組合せた装置を販売して以来、ポリオレフィン用途に多数の販売実績を有しており<sup>2)</sup>、とくに PE プラント用途での混練押出機の性能が高く評価され、世界の PE プラントの半分以上のシェアを獲得している。

本稿では、混練押出機のタイプの一つで当社がオンリーワンの地位を築いている二軸連続式混練機（continuous mixer、以下連続混練機という）について、機能をハード面とソフト面から解説し、最後に本装置の展望について触れたい。

#### 1. ポリオレフィン用混練造粒装置の概要

PE、PP 製造プラントでは、反応器（リアクタ）での重合反応により得られた粉体状の PE、PP に滑剤や酸化

防止剤などの添加剤や充填剤を混ぜ、最終的にハンドリングしやすい一次加工品であるペレットにするため、混練造粒装置が設置される。混練造粒装置は、粉体状の樹脂を溶融させ混練する混練押出機と、溶融した樹脂を下流へ押出すためのギヤポンプ、樹脂中の不純物をろ過するスクリーンチェンジャ、および溶融樹脂を水中でペレットにカットする造粒機（ペレタイザ）で構成される。造粒機で作られたペレットは乾燥機へ運ばれ、ふるい分け機を通して製品ペレットとして袋詰される。

混練押出機は、供給機から投入された樹脂を溶融させると同時に、添加剤、充填剤を樹脂に練込み混練する機能があり、構造および混練メカニズムの違いにより、連続混練機と二軸押出機に大別できる。

#### 2. 連続混練機の特徴

##### 2.1 構造

連続混練機は、その名のとおりバッチ式混練機を連続化したところから発展した装置で、回転体である 2 軸のロータと外側のチャンバ、駆動装置で構成される。供給口から投入された樹脂は、互いに異なる方向に回転する 2 軸のロータによって溶融、混練され、下流へ排出される。スクリュ軸が片側のみ軸受で支持されている二軸押出機とは異なり、ロータの両軸端が軸受で支持されている（図 1）。ロータとチャンバの間には適切な隙間があり、ロータはチャンバに接触することなく高速で回転させることができる。

##### 2.2 混練メカニズム

連続混練機のロータは、楕円形状（2 翼構造）もしくは図 2 に示すような特殊な三角形状（3 翼構造）をしており、前方のスクリュ、後方のスクリュと排出翼とを合せ、連続したロータ翼を形成している<sup>3)</sup>。ロータ外周と

\*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 産業機械技術部

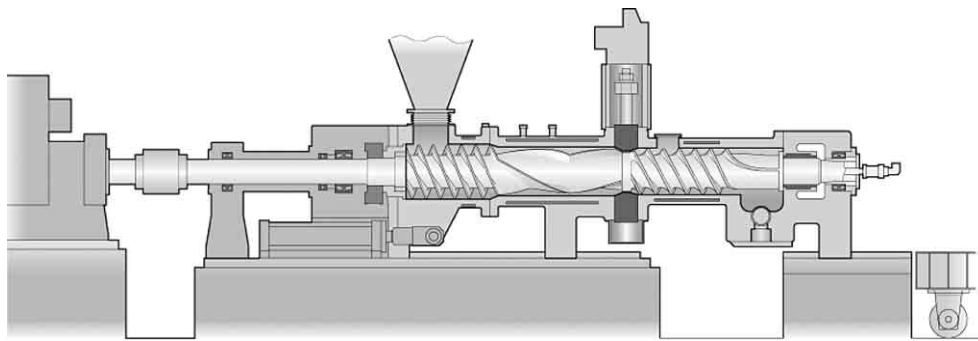


図1 連続混練機 LCM  
Fig. 1 Continuous mixer LCM

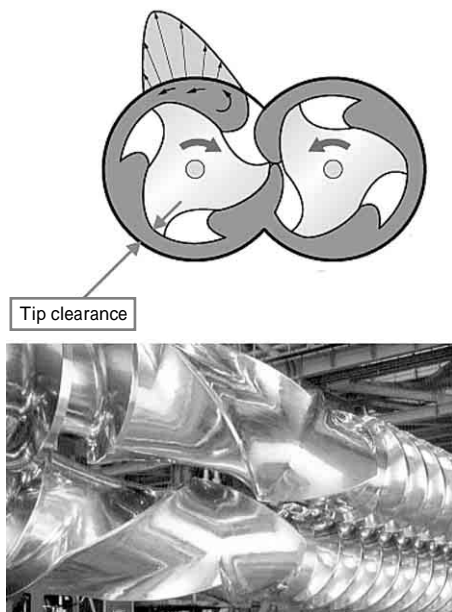


図2 連続混練機のロータ形状  
Fig. 2 Rotor configuration for a continuous mixer

チャンバ内壁面間の隙間はチップクリアランスと呼ばれ、混練する樹脂に応じて最適な隙間が選定され、これが連続混練機の大きな特徴となっている。樹脂はチップクリアランスで均一な強いせん断を受け、短時間に樹脂の可塑化、溶融が行われる。樹脂は反復してチップクリアランスを通過するため、充填材の凝集体が分散したり樹脂中のゲルが除去される、いわゆる分散混合性能に優れている<sup>4)</sup>。またロータは軸方向にねじれ方向が異なっており、前後方向の樹脂の移動と左右ロータ間の樹脂の受渡し作用により、樹脂の流れの攪拌と分配混合も行われる<sup>5)</sup>。

一般に連続混練機は強いせん断の繰返しによる短時間の混練が特徴であり、例えば、強いせん断での混練を必要とする高粘度のPEには二軸押出機よりも連続混練機が適している。また、混練物に応じて最適な形状のロータを用いることが重要であり、混練技術上のノウハウとなっている<sup>6)</sup>。

### 2.3 吐出能力

連続混練機の吐出能力は、ロータの輸送能力と機械自体の持つ最大許容トルクにより決まる。輸送能力は、機械サイズ(口径)とロータ回転速度により決まり、ロータ回転速度が高いほど輸送能力が高いが、混練品質の観

点から回転速度には限界がある。一方、機械の最大許容トルクは、ロータの軸強度や二軸間に配置される軸受の容量、減速機の歯車強度などから決まり、その最大許容トルクを超えない容量のモータを搭載しなければならない。混練押出を行うために必要なエネルギー消費量は、樹脂を可塑化させ所要の温度まで上げるエンタルピー増加分に該当する熱エネルギーと、機械の熱損失である<sup>7)</sup>。この必要エネルギーと生産量から、連続混練機に搭載すべきモータの容量(動力)が決まる。搭載するモータ動力が機械の最大許容トルクを超える場合は、さらに大きいサイズの連続混練機を使用することになる。

当社の連続混練機 LCM シリーズの公称能力表を表1に示す。

### 2.4 混練度調整機構

様々なグレードの樹脂を生産したり連続混練機への供給量(生産量)を変える場合の対応として、混練度、すなわち樹脂温度の調整が必要となる場合がある。連続混練機のロータ形状を変えずに、運転条件を変えることによって混練度を調整、操作するには次の方法がある。

- 1) 樹脂に与えるせん断速度を変化させる
- 2) 連続混練機内の樹脂の充填率を変化させて滞留時間を変え、樹脂に与えるせん断回数を変化させる
- 3) 外部から樹脂に与える熱量、樹脂から奪う熱量を変化させる

1) は、ロータの回転速度を変化させることにより達成できる。2) は、連続混練機の中央や先端排出部に絞り装置を付け、流路面積を変化させることにより可能となる。3) は、チャンバに設けたジャケットへの冷却水や蒸気の供給により行われる。

大型の生産機では、装置コストの観点からロータ回転速度を変える可変速装置ではなく、固定速の駆動装置が採用される場合が多いことから2)のような混練度調整機構が備えられる。図3は当社が連続混練機に採用しているゲートと呼ぶ絞り装置で、ゲートの開度を変えてゲート上流の混練部での樹脂の充填率を変化させ、混練度を調整する装置である<sup>8)</sup>。グラフは、ゲート装置の操作により消費エネルギーを広範囲で調整でき、低生産量から高生産量までロータ回転速度を変えることなく混練度を調整できることを示している。

また、下流のギャポンプの吸込圧力を変化させることによっても連続混練機内の樹脂の充填率を変化させるこ

表1 連続混練機 LCM シリーズの能力表  
Table 1 Main specification of LCM series

Capacity (t/h) (L-LDPE)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Model	LCM250	LCM280	LCM320	LCM360	LCM400	LCM450	LCM450	LCM500	LCM500	LCM560	LCM560	LCM560	LCM560	LCM560	LCM560	LCM560	LCM560	LCM560	LCM560
Motor power (kW)	2,600	4,200	6,000	8,000	10,000	12,500	12,500	15,000	15,000	21,000	21,000	21,000	21,000	21,000	21,000	21,000	21,000	21,000	21,000
Rotor speed (rpm)	670	660	600	550	500	440	440	400	400	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360

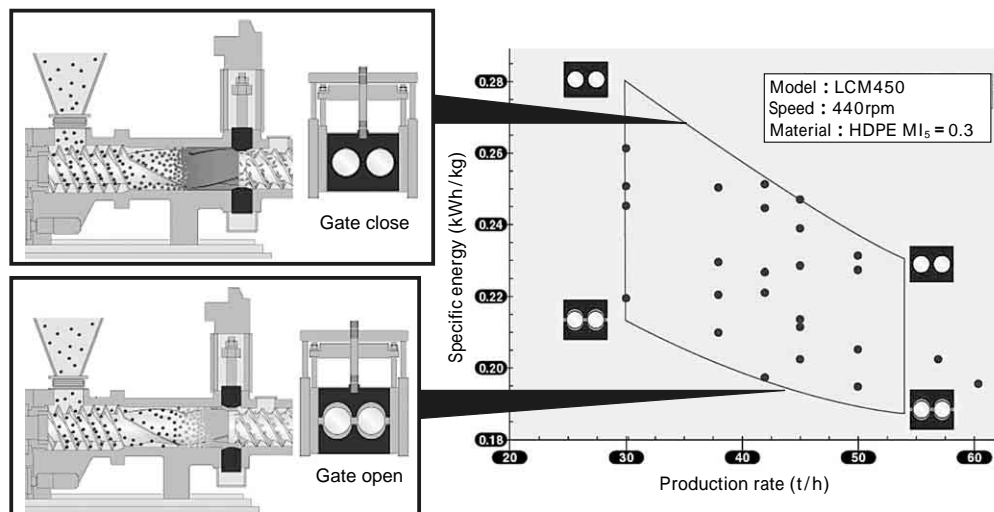


図3 連続混練機のゲート装置  
Fig. 3 Gate of a continuous mixer

とができ、混練度を調整できる。

### 2.5 駆動装置

連続混練機はモータを駆動源とし、減速機を介してロータの出力トルクを増加させている。2.4節で述べたように、ロータの回転速度を変えることにより混練度調整を行う場合は、可変速の駆動装置が必要となる。最も単純なものは、誘導モータの一次周波数制御による可変速運転方式（VVVF制御）であり、ロータの回転速度が任意に変えられる。しかしながらVVVF制御方式は高価であるため、通常は減速機に高速歯車、低速歯車の2段を備え、手動クラッチにより切替える2速切替方式が使用される。

### 3. 連続混練機の混練特性

連続混練機に期待される最も重要な性能は、製品の混練品質が良いこと、すなわち混練物中の充填材や添加材がよく分散、分配され混練物が均質化（ホモジナイジング）されていることである。そのためには最適なロータの形状と運転条件を見出すことが肝要である。当社の連続混練機 LCM シリーズは、独特のロータ形状とゲート装置を組合せることで得られる高い混練性能が評価されており、とくにパイモダルとよばれる2成分系高密度ポリエチレンの均質化に適しているため、多数のユーザで使用されている。

本章では、ロータが混練物に与えるせん断回数と分散性能の面から連続混練機の混練特性を述べる。

粘度の異なる2成分系の樹脂の混合（ポリマブレンド）を例にとる。マトリックス相ポリマにドメイン相（分散

相）ポリマを分散させるためには、ドメイン相ポリマの凝集力以上のせん断応力を反復して加えることによってドメイン相ポリマの粒子径を目標値以下とする必要がある<sup>9)</sup>。

ロータの回転により混練物に加えられるせん断速度およびせん断応力は以下のように表される。

$$= DN/h \dots\dots\dots (1)$$

$$= \mu \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $D$  : ロータ外径

$N$  : ロータ回転数

$h$  : チップクリアランス

$\mu$  : せん断速度における粘度

チップクリアランスを流れる混練物の流量 $q$ は、図4に示すようにチップ部のせん断ひずみとロータの混練部長さ $L$ から形成される三角柱の容積を求めればよいことから、

$$q = \mathfrak{X}(\text{tips}) \times \mathfrak{X}(\text{rotors}) \times (1/2 \times hL \cdot DN) \dots\dots\dots (3)$$

チップ部のせん断速度容積を全混練物の流量 $Q$ で除した値が平均チップ通過回数 $N$ となるため、

$$N = q/Q \dots\dots\dots (4)$$

連続混練機内ではせん断回数分布や滞留時間分布が存在し、せん断回数分布はポアソン分布であると仮定して<sup>10)</sup>次式で表される（図5）。

$$f_n = \left( \frac{n^N}{N!} \right) \cdot \exp(-n) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $f_n$  : 体積分率

$n$  : チップ通過回数

$N$  : 平均チップ通過回数

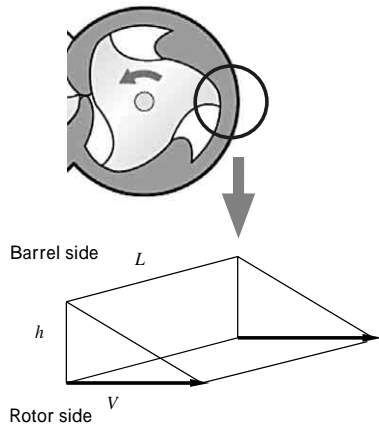


図4 チップ通過量の計算

Fig. 4 Calculation for number of passage through rotor tip

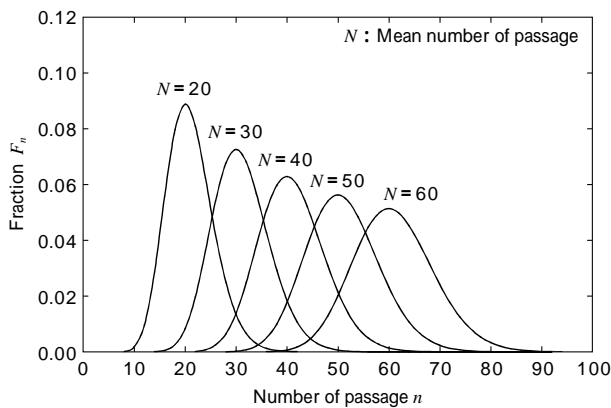


図5 平均せん断回数と実際のせん断回数分布

Fig. 5 Distribution of mean number of passage and actual number of passage

ロータの回転によるせん断ひずみによって混練物が微細化していく過程には様々なモデルが提唱されているが、ここでは、1回の臨界せん断ひずみによってドメイン相は1/2の容積に分裂すると仮定する。 $n$ 回の臨界せん断ひずみによってドメイン相の直径 $d_n$ は次式で表される。

$$d_n = d_0 \cdot \left(\frac{1}{2^n}\right)^{1/3} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 $d_0$ ：当初のドメイン相直径

当初の直径が1.0mmであるドメイン相が1.0 $\mu$ mサイズとなるためには、式(6)よりおよそ30回の臨界せん断ひずみを与える必要がある。さらに前述のせん断回数分布の考えを用いると、体積分率90%以上の混練物が30回以上の臨界せん断ひずみを受けるためには、平均チップ通過回数は50回以上であることが必要条件となることが図5より予測できる。

これをもとに、当社の連続混練機 LCM450 におけるチップ通過回数を計算してみると表2のようになる。いずれの条件においても50回以上の平均チップ通過回数確保されていることが分る。

マトリックス相ポリマのせん断応力とドメイン相ポリマの粒子径 $d$ の関係は、Weber数と呼ばれる次式で表される。

$$We = \frac{F_m}{F_d} = \frac{\rho_m \cdot d}{\eta} \dots\dots\dots(7)$$

表2 連続混練機 LCM450 の平均チップ通過回数計算値

Table 2 Calculated mean number of passage on continuous mixer LCM450

Production rate (t/h)	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	Rotor speed (rpm)	$q$ (cm <sup>3</sup> /s)	Mean number of passage $N$
30	1.11E+04	350	1.12E+06	101.0
30	1.11E+04	400	1.28E+06	115.5
35	1.30E+04	350	1.12E+06	86.6
35	1.30E+04	400	1.28E+06	99.0
40	1.48E+04	350	1.12E+06	75.8
40	1.48E+04	400	1.28E+06	86.6
45	1.67E+04	400	1.28E+06	77.0
45	1.67E+04	450	1.44E+06	86.6

表3 連続混練機 LCM450 の We 数計算値

Table 3 Calculated Weber number on continuous mixer LCM450

Rotor speed (rpm)	(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	$d$ ( $\mu$ m)	$We$
400	530.3	2.57E+06	1,000	> 1
400	530.3	2.57E+06	100	> 1
400	530.3	2.57E+06	10	> 1
400	530.3	2.57E+06	1	> 1
400	530.3	2.57E+06	0.1	< 1

ここで、 $F_m$ ：マトリックス相ポリマのせん断応力

$F_d$ ：ドメイン相ポリマの凝集力

$\rho_m$ ：マトリックス相ポリマの粘度

$\eta$ ：2ポリマ間の界面張力

マトリックス相のせん断応力がドメイン相の凝集力を上回れば、すなわち、 $F_m/F_d$ で表される Weber 数が1以上になれば、ドメイン相は壊れてその粒子径は小さくなっていく。ただし、式(7)からも分るように、粒子径 $d$ が小さくなればなるほど Weber 数は大きくなり、分散は難しくなる。

連続混練機 LCM450 における臨界せん断応力の計算を行った結果を表3に示す。ドメイン相直径 $d$ が1.0 $\mu$ mとなっても Weber 数はまだ1以上であることから、この分散相は1.0 $\mu$ m以下にできることが分る。

#### 4. 連続混練機に対するニーズとその対応

ポリオレフィン用混練造粒装置は、PE、PP 製造プラントの市場動向や開発動向を受けて進化が求められる。PE、PP 製造プロセスのライセンスによるプロセスの改良および新しい樹脂の開発に加え、最近プラントの高生産量化による生産性向上の動きが顕著である。これに応じた連続混練機に対する近年の市場の要求を以下に述べる。

##### 4.1 高生産量化

汎用ポリオレフィンのプラントでは、競争力強化のための大量生産による生産コスト低減志向や近年の触媒技術の進展により、この10年のうちに混練造粒装置に要求される能力は著しく増え、今では毎時60~70トンの生産能力を要求されている。

このような高生産量の連続混練機を設計するには、2.3節で述べたように機械トルクやロータ回転速度を高め、連続混練機の吐出量を上げるか、機械サイズ(口径)を上げて大型機を目指すことになる。大サイズの連続混

練機は、設計のみならず高度な製造技術が必要となる。また連続混練機の下流のギヤポンプ、造粒機等の設備の能力も同様に上げなければならない。

#### 4.2 多様化する樹脂、新しい樹脂開発への対応

最近の樹脂製造プロセスでは、幅広い範囲の粘度の樹脂をリアクタで製造できるものがあり、同じプラント内の連続混練機はその混練に対応しなければならない。このような場合、2.4節で紹介した混練度調整機構が有効である。例えば、ゲート装置による混練度調整機構を使うことにより、同一のロータ形状で異なる粘度、成分の樹脂を混練できる。連続混練機の混練度調整範囲が広ければ広いほど様々な樹脂グレードに対応できるというメリットが生かされる。

また汎用ポリオレフィンといえども特殊なグレードが次々と開発されており、それに対応した形状のロータを開発する努力も日々必要であろう。小型の実験機を使用した混練性能実験と同時に、最適なロータ形状の設計を支援するための精度よい混練シミュレーション技術の進展も望まれる。

#### 4.3 生産性の向上

生産効率を上げるためには、生産量を上げるだけでなく、装置の稼働時間を延ばし、停止時間(ダウンタイム)を最小限にすることが効果的である。このため、連続混練機の軸受やシール部品、下流の造粒機のナイフ、ダイプレートなどは常に長寿命化が求められ、プラントの生産量が大きくなるに従って保守、交換時間の短縮による生産性向上が要求されるなど、連続混練機には安定して運転できる高い機械的信頼性が必要となる。

また、連続混練機は10MWを超える動力を消費して連続運転されており、省エネルギーの観点からもその消費動力の低減は重要である。連続混練機の消費エネルギー低減に最も効果的なのが混練樹脂温度を下げる低温混練運転であるが、これを考慮に入れた装置の設計、例えばロータのデザインや混練度調整機構がポイントとなる。今後、環境面からも、省エネルギー連続混練機のニーズはますます高まると思われる。

さらに、プラント稼働の省力化に対しても強い要望が

あり、混練造粒装置の起動、停止、運転操作、運転監視における省力化、自動化が進んでいる。分散制御システム(DCS)による遠隔操作、監視や、自動シーケンスによる起動、停止などは既に多くのユーザで採用されているが、起動時の排出樹脂の処理など人手で行う作業をいかに省力化、自動化していくかは今後の課題である。

むすび=連続混練機が現在のような形となって実用化されてから既に約40年を経ている<sup>11)</sup>。基本的な機械構造は変わっていないが、市場の要求により様々な開発、改良がなされてきた。とくに生産能力は1970年代と比べると6~8倍に増大しており、これは大きな技術進歩といえる。ポリオレフィン業界では今後の見通しが難しい中、製品開発やプラントの合理化、省エネルギーなどに取組んでおり、より高度な技術開発が望まれている。連続混練機に要求される技術の質も確実に高くなっているが、4章で述べたニーズに適合させ、顧客が満足する装置を提供するために、今後も連続混練機の改良、最適化を続けていかなければならない。

#### 参考文献

- 1) 勝浦嗣夫ほか：プラスチック、Vol.60, No.1(2009) pp.18-37.
- 2) 井上公雄ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.32, No.1(1982) p.77.
- 3) 井上公雄：混練・分散の基礎と先端的应用技術,(2003) p.177, テクノシステム.
- 4) 井上公雄：MATERIAL STAGE, Vol.1, No.5(2001) p.79.
- 5) 林田建世：押出機スクリューの混練機能向上と混練理論講座, p.50, p.77, 日本プラスチック加工技術協会.
- 6) 船津和守編：高分子・複合材料の成形加工,(1992) p.202, 信山社サイテック.
- 7) 村上健吉：押出成形,(1985), p.25, p.184, プラスチック・エージ.
- 8) 特許：第002638258号.
- 9) Y. Kuroda: Polyethylene Conference PE2003, Zurich, Switzerland, Session 6a 3-1 (2003).
- 10) Z. Tadmor: Mixing and compounding polymers, Chapter 5, (1993) p.149.
- 11) James L. White: Twin Screw Extrusion, p.84, p.209, (1991) Carl Hanser Publishers.