

(技術資料)

二軸混練押出機HYPERKTX[®]の混練技術

Mixing Performance of Twin-screw Extruder: HYPERKTX[®]



笠井重宏*
Shigehiro KASAI



三宅綱一*
Koichi MIYAKE

Twin-screw extruder "HYPERKTX" has not only conventional kneading disks but also special rotors such as 3-tips rotor and various clearance mixing technology (VMCT) rotor which have features to solve problems of heat generation and mixing performance for polymer and elastomer. Applications of those special rotors for continuing user demands such as higher productivity and better mixture quality are reported in this paper. Developments to improve the reliability of machines are also introduced.

まえがき = 最近の二軸混練押出機は高速化が進み、生産性が著しく向上した。これに伴って、低温・高分散型の混練セグメントのニーズが高まっている。一般的に、低温混練にはロータセグメントが適しているが、当社では最近、ロータの混練機構に VCMT (Various Clearance Mixing Technology) と称する新しいメカニズムを開発し、生産性と混練品質の向上を図っている^{1)~4)}。また、生産性の向上とともに、押出機には高い信頼性が求められるようになった。当社は、高速運転下の機械信頼性を一層向上させるために、ハード面の最適設計にも取り組んでいる。

1. 二軸混練押出機 HYPERKTX の特徴

当社は、98年に高速・高トルク化した二軸混練押出

機 HYPERKTX - MX シリーズを上市し、生産性を向上させた。例えば、ポリプロピレンに無機フィラを混合したコンパウンドなどでは、HYPERKTX46MX (スクリュ径が 46mm の小型機) でも、スクリュ回転数を 1,000rpm 以上の高速回転とし、1 時間あたりの生産量を 1 トン以上にすることが可能である。従来機に比べ、生産能力は 2 ~ 3 倍に増加している。HYPERKTX (図 1) はつぎのような特徴をもつ。

- ・高いかみあい率 (深溝スクリュ)
- ・広い操作範囲 (高速回転数と高トルク)
- ・様々な用途に対応した耐蝕 / 耐磨耗材料 (HIP 他)
- ・低発熱で分散性能に優れたロータセグメント⁵⁾

HYPERKTX の軸間あたりの最大許容トルク値は、業界でも最高レベルにある。

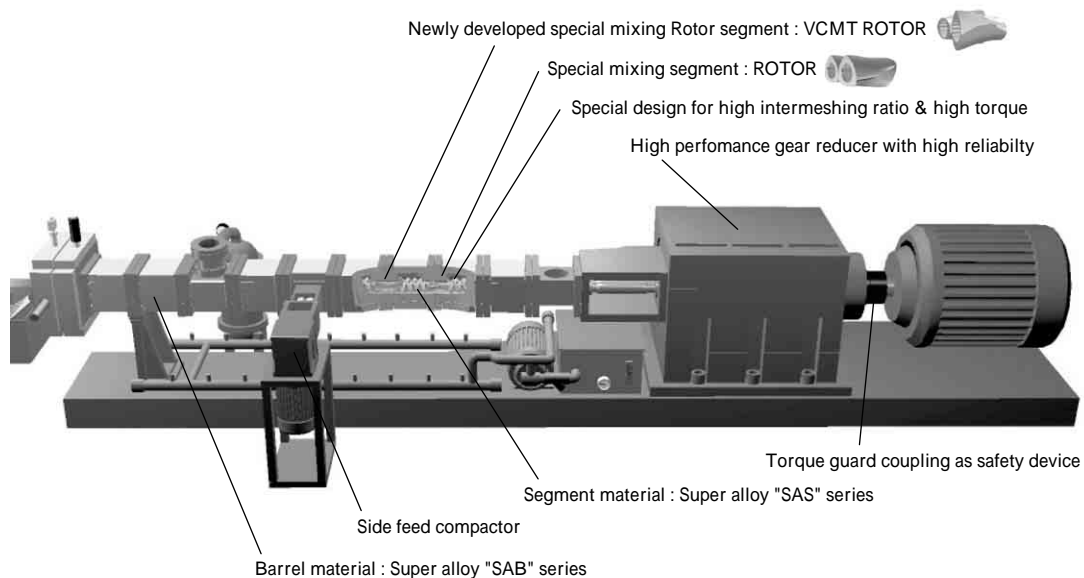


図 1 二軸混練押出機 HYPERKTX の特徴
Fig. 1 Feature of twin screw extruder: HYPERKTX

*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

2. ロータセグメントの混練機構

HYPERKTX の混練セグメントには多数の種類があり、各種材料の混練用途に適したセグメントのタイプとそれらの組み合わせ方を選択する。混練セグメントの中で、図2(a)に示すロータセグメント⁵⁾は、ゴム用パッチ式混練機で培ってきた混練機構を応用して独自に開発し、改良を加えてきたもので、パッチ式混練機並に、混練物に高いせん断応力を均一に付与できる特徴がある。

2.1 HYPERKTX のロータセグメントの特徴

図2(a)に示すように、ロータセグメントは、ねじり角の小さい連続した3条の混練翼をもち、混練翼の先端とパレル内面の間にチップクリアランス(以下、TCという)と呼ばれる広い隙間が設けられている。図3に示すように、混練物はロータセグメントのTCを通過する際に最大のせん断応力を受ける。一般に、混練物の混練度合いは、TC通過時に混練物に付与されるせん断応力(またはせん断ひずみ)の大きさと、混練物がTCを通過する割合との相互作用で決まる。例えば、TCを狭くするとTC通過時のせん断応力は大きくなるがTCを通過する混練物の割合が低下し、TCを広くするとTCを通過する混練物の通過割合は増加するがTC通過時のせん断応力が小さくなる。したがって、材料の種類や運転条件などに応じて、最適なTCを選択することが必要である⁶⁾。HYPERKTX のロータセグメントを用いると、混練物はショートパス^{※)}することなく一様に反復してTCを通過するため、分散混合が均一に進む。

2.2 HYPERKTX のロータセグメントの適用例

一般に、ポリエチレンテレフタレート(以下、PETという)のように熔融粘度の低い樹脂に、酸化チタン(TiO₂)のような凝集性の強いフィラを分散させることは難しい。そこでHYPERKTX46MXで、PETにTiO₂を混合したコンパウンドについて、混練セグメントの形状

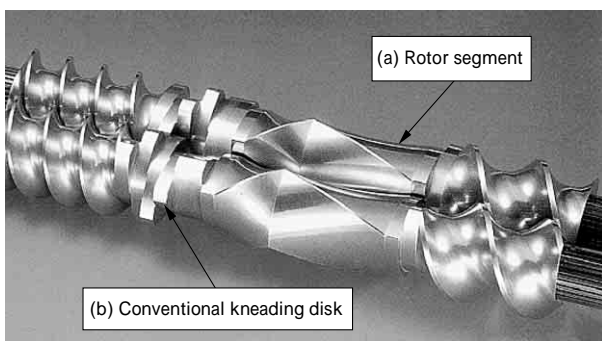


図2 HYPERKTX のロータセグメントの外観
Fig. 2 View of 3-Tips rotor segment for HYPERKTX

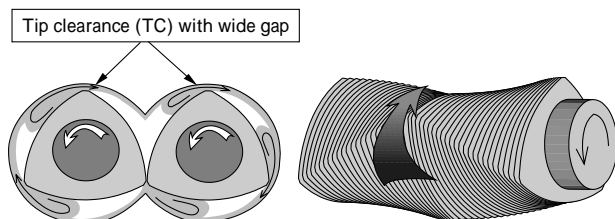


図3 HYPERKTX のロータセグメントのTCでの混練作用
Fig. 3 Mixing mechanism of 3-Tips Rotor segment for HYPERKTX

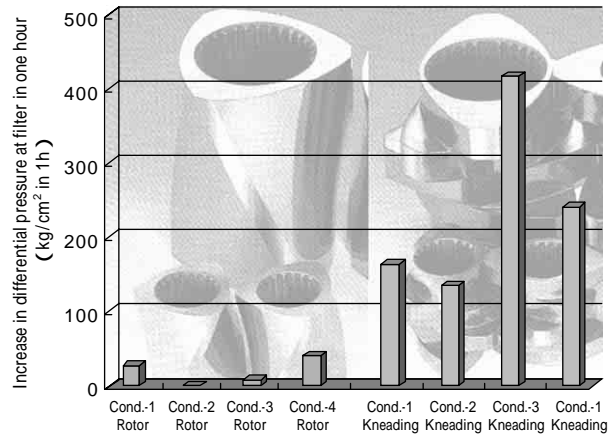


図4 PET/TiO₂コンパウンドにおけるロータセグメントとニーディングディスクの分散性能比較
Fig. 4 Comparison of mixing performance for PET/TiO₂ compounding between 3-Tips Rotor segment and kneading disks

および運転条件を変えて分散状態を調べた⁷⁾。混練物は先端にフィルタをつけた単軸押出機で押し出し、押出機先端の圧力上昇によってTiO₂の分散度を評価した。図4に評価結果を示す。フィルタの目詰りによる圧力上昇を見ると、ロータセグメントによる混練物はニーディングディスクによる混練物に比べておよそ1/10倍の圧力上昇を示した。ロータセグメントが優れた分散混合性能をもつことが確認できた。

3. 二軸混練押出機の新混練機構

二軸混練押出機の高速度に伴って、最近、樹脂の発熱を抑制する技術、つまり押出機の高トルク化と低発熱タイプの混練セグメントのニーズが高まっている。

HYPERKTX のロータセグメントは、一般の二軸混練押出機で用いられるニーディングディスクと比べてTCが広く連続的に形成されているため局所発熱が小さく、混練物を一様に低温で混練することができる。また、混練物を低温の状態で練ることができるために分散混合能力が高く、高速・高生産量運転の場合でも品質の低下が少ない特徴がある⁸⁾⁹⁾。

3.1 VCMT の原理

一方、当社は、TCが一定の従来型ロータを発展させ、ロータのTCを周方向および軸方向に変化させる新しい技術を開発した。この技術をVCMTと称し、各種混練機への応用を進めている^{10)~12)}。HYPERKTXについても、ロータセグメントにVCMT技術を応用することにより、低温・高分散の混練性能がさらに改善され、生産性が向上することが確認されている⁴⁾。最近の高速・高生産量化のニーズに適した混練用セグメントとして、実機への採用が増えている。

3.2 HYPERKTX のVCMT ロータセグメントの特徴

図5に示すように、新しく開発したHYPERKTXのVCMTロータセグメント¹³⁾は2翼のロータセグメントで、従来の3翼のロータセグメントと同様に、混練物を反復してTCを通過させてフィラおよびポリマの高度な

脚注) 一部の材料が未混練のまま混練部を通過すること

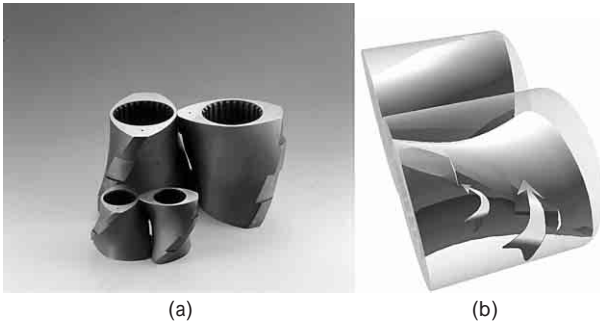


図5 HYPERKTX の VCMT ロータセグメントの外観
Fig. 5 View of VCMT Rotor segment for HYPERKTX (1)

分散混合を行う。VCMT ロータセグメントでは、TC の値（大隙間と小隙間）と翼のねじり角だけでなく、TC の分割数も、混練する材料や混練の目的に応じて選択することができる。VCMT ロータセグメントの特徴を以下に整理した。

- 1) 混練翼数が 2 翼である：高速運転域でも、混練物に過度のせん断応力が加わることを抑制し、低温混練を可能にする。また、空間容積が増加するため、生産性が向上する。
- 2) TC を周方向および軸方向に変化させている：広い TC 部分では、TC を通過する混練物の割合を増加させ、混練物に均一なせん断応力を加えることができる。狭い TC 部分では、混練物に強いせん断応力を加えることができるとともに、パレル内壁面の混練物をかき取り、パレル - 混練物間の伝熱効率を向上させて混練物の冷却を促進し、混練物の滞留劣化を防止する。また、混練翼は連続しているが、TC が軸方向および周方向で変化しているため、混練物の流れが複雑になり、分配混合機能を高められる。さらに、TC の分割数を変化させることで分配混合機能を調整することができる。
- 3) 軸方向に対する混練翼のねじり角度を変化させている：大きいねじり角は混練物を軸方向へ送る能力を高め、混練物の粘度低下を抑えながらマイルドなせん断応力を加える。また、混練物の充填率が低いことから、フィラの練込みなどではガス抜き効果を発揮し、生産性を向上させる効果がある。一方、小さいねじり角は、混練物の充填度を増加させ、セグメントの単位長さあたりに混練物が TC を通過する割合を増加させ、混練物に強いせん断応力を加える。

3.3 HYPERKTX の VCMT ロータセグメントの適用例
HYPERKTX の VCMT ロータセグメントは、フィラ系コンパウンドなどに適用した場合、混練度と生産性を両立させ得ることが確認されている¹⁴⁾。

3.3.1 VCMT ロータセグメントの低温吐出性能の確認事例

熔融粘度が高く、低温混練が難しいとされるエチレンエチルアクリレート（以下、EEA という）と、200 以上で結晶水の解離反応を起こす水酸化アルミニウム（ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ）50% とを混練する材料系で、VCMT ロータセグメントと通常のニーディングディスクの押出性能を比較する実験を行った¹⁴⁾。押出機は、HYPERKTX46MX を

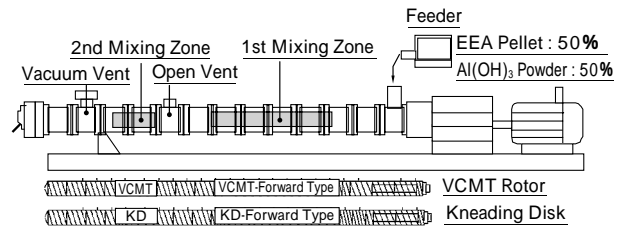


図6 実験機器の構成¹⁴⁾
Fig. 6 Test condition of HYPERKTX-46MX¹⁴⁾

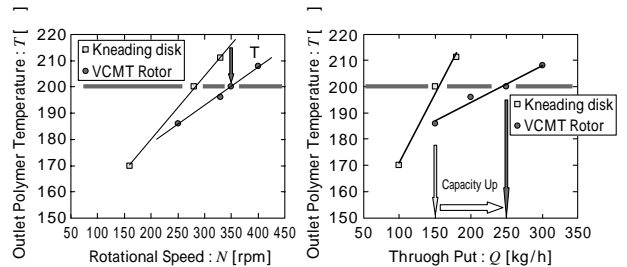


図7 EEA/ $\text{Al}(\text{OH})_3$ コンパウンドにおける VCMT ロータセグメントとニーディングディスクの混練性能比較¹⁴⁾
Fig. 7 Comparison of mixing performance for EEA/ $\text{Al}(\text{OH})_3$ compounding between VCMT Rotor segment and kneading disks¹⁴⁾

用いた。図6に機器構成の概略を、図7に実験結果を示す。

VCMT ロータセグメントは、ニーディングディスクに比べて、1回転あたりの温度上昇率を約 0.65 倍に抑えることができた。また、樹脂温度の上限を 200 以下とすると、吐出量は約 1.6 倍に増加させることができた。VCMT ロータセグメントは広い TC を持つため、樹脂温度の上昇が抑制できる。また、連続した混練翼を持つため、フィラが持込む空気や水分を第 1 混練部後方のベント口からスムーズに排出しやすく、フィードネックが起りにくいために生産性が向上する。

3.3.2 VCMT ロータセグメントの高分散性能の確認事例
つぎに、熔融粘度が低く、混練が難しいとされる PET に、凝集性の強い TiO_2 を混練する材料系で、VCMT ロータセグメントとニーディングディスクの混練性能を比較する実験を行った¹⁴⁾。2.2 節には、従来型ロータセグメントとニーディングディスクの混練性能の比較を示したが、ここでは、種類の異なる TiO_2 をサイドフィード方式で HYPERKTX に供給し、第三混練部の構成のみを変えて比較した。得られた混練物は、先端にフィルタをつけた単軸押出機で押し出し、押出機先端の圧力上昇によって分散度を評価した。図8に概略の機器構成を、図9および表1に実験結果を示す。

混練品質の指標としてフィルタの目詰りによる圧力上昇率 P の値を見ると、VCMT ロータセグメントによる混練物は、ニーディングディスクによる混練物の約 36% となった。

表1の最右欄に、混練物が TC を通過する回数 n の計算結果を示したが、広い TC を持つ VCMT ロータセグメントの TC 通過回数 n は、ニーディングディスクの n と比較して、約 2.6 倍となった。このことは、VCMT ロータセグメントでは、ニーディングディスクに比べて、 TiO_2 の凝集塊が TC を通過する割合が大きく、 TiO_2 の分散が進

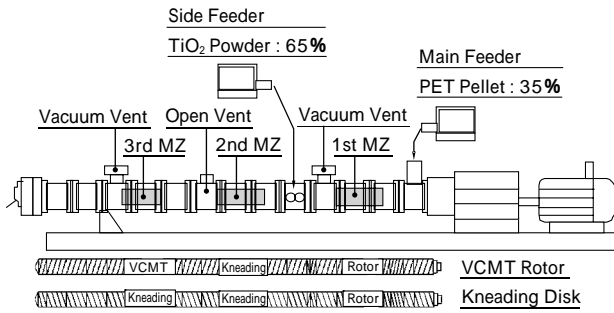


図8 実験機器の構成¹⁴⁾
Fig. 8 Test condition of HYPERKTX-46MX¹⁴⁾

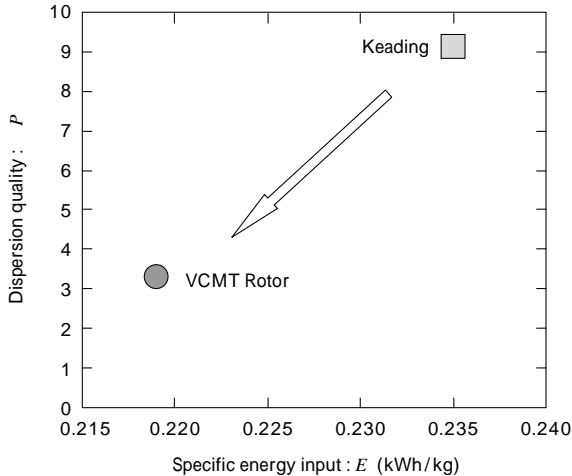


図9 PET/TiO₂ コンパウンドにおける VCMT ロータセグメントとニーディングディスクの分散性能比較
Fig. 9 Comparison of mixing performance for PET/TiO₂ compounding between VCMT Rotor segment and kneading disks

表1 PET/TiO₂ コンパウンドにおける VCMT ロータセグメントとニーディングディスクの分散性能比較¹⁴⁾
Table 1 Comparison of mixing performance for PET/TiO₂ compounding between VCMT Rotor segment and kneading disks¹⁴⁾

Segment Type	Feed Rate Q (kg/h)	Screw Speed N (rpm)	Specific Energy E (kWh/kg)	Resin Temp. T (°C)	Dispersion Quality P	Viscosity Quality IV	Mean Passage Number
VCMT	70	220	0.219	289	3.3	0.50	12.1
Kneading	70	220	0.235	296	9.1	0.51	4.6

むことを意味する。

4. 高速機の機械信頼性

押出機の高速度・高吐出化に伴い、より高い機械信頼性が求められるようになってきている。当社では、機械的な信頼性を向上させるために、ハード面の最適化設計にも取り組んでいる。

4.1 振動解析の事例紹介

スクリュ回転数が1,000rpmを超えるような高速運転域では、パレルやスクリュの振動が増加する傾向となる。構造解析を実施してベースフレームやパレルサポートの最適構造を検討し、改善を図っている。図10に振動解析の実施事例を示す。また、加振源となる混練荷重の軽減やスクリュのねじり振動を軽減させるため、流動解析¹⁵⁾や実験検証を行い、最適なスクリュ構成を見つける取組みも行っている。

4.2 応力解析の事例紹介

深溝化・高速化・高トルク化を実現するためには、減速機の内部構造や出力軸、スクリュシャフト、スクリュセグメントといった主要部品の安全設計が重要である。例えば、スクリュシャフトとスクリュセグメントについては、材質の最適化を行うと同時に、かみあいスプライン部の応力解析を行って局所の最大応力を予測し、最適な形状を導き出している。図11に、スクリュシャフトおよびスクリュセグメントの応力解析例を示す。

さらに、実機と同サイズのモデル試験を実施して、予測応力値の検証や耐久性の確認を行い、機械的な安全性の検証を行っている。図12に、実機サイズでのモデル試験風景を示す。

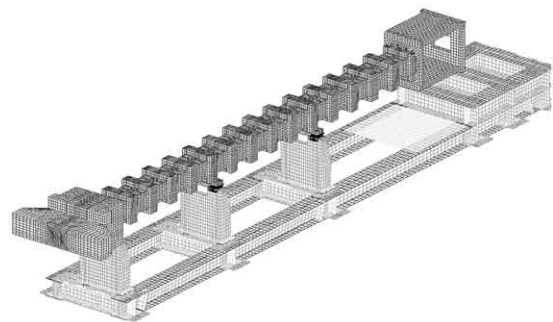


図10 振動解析に用いたFEMメッシュ
Fig.10 Mesh layout for FEM vibration analysis

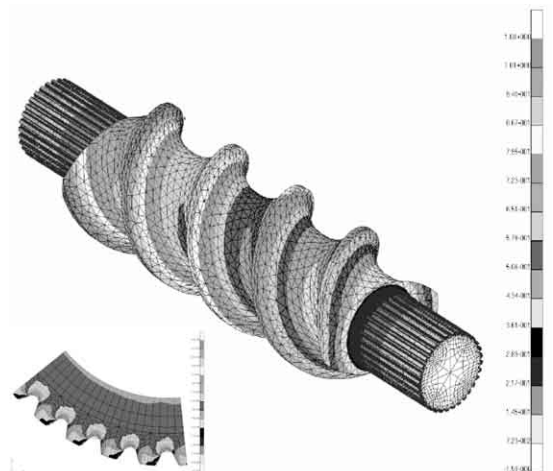


図11 応力解析
Fig.11 Example of FEM stress analysis

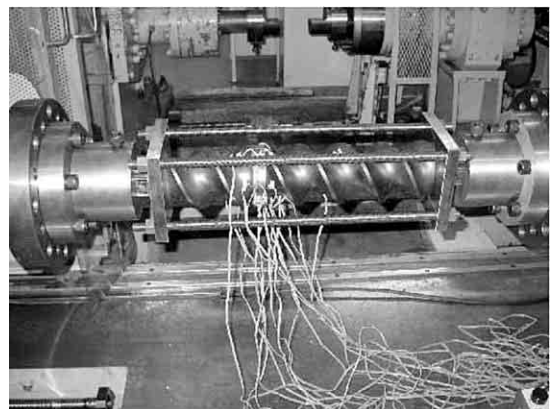


図12 実体モデル試験
Fig.12 Example of bench test using improved actual parts

むすび=高速化した二軸混練押出機では、混練物の発熱を低く抑えるとともに、短い滞留時間内に高度な分散混合および分配混合を達成することが重要である。従来の3翼ロータセグメントの優れた特性をさらに改良した2翼のVCMTロータセグメントは、最近のニーズに合致した混練セグメントと考える。今後、各種のコンパウンド製造から、反応、ポリマアロイなど、幅広い用途にVCMTロータセグメントを活用していきたい。

参 考 文 献

- 1) 井上公雄：MATERIAL STAGE, 1(5)(2001) p.77.
- 2) 井上公雄：プラスチック成形加工学会 第10回秋季大会成形加工シンポジア, 2002年11月.
- 3) Inoue, K, Y. et al. : Int. Conf. Polyolefins(2002), Houston, TX.
- 4) 井上公雄：プラスチック成形加工学会第15回プラスチック成形加工学会年次大会, 2004年6月, p.13.
- 5) 特許：第2724100号
- 6) 特公昭：58-4567
- 7) 永江信一ほか：成型加工シボジア '96, p.217.
- 8) 山根泰明：産業機械, 2000.3, p.17.
- 9) 船橋秀夫：産業機械, 2001.4, p.12.
- 10) 井上公雄：第9回プラスチック成形加工学会年次大会予稿集(1997) p.383.
- 11) K. Inoue et al. : PPS-14 Meeting, Jun. 1998.
- 12) 井上公雄：日本ゴム協会誌, 71(9)(1998) p.534.
- 13) 特許：第3499414号, 特許：第3656957号, 特許：第3798595号
- 14) 井上公雄：プラスチック成形加工学会第15回プラスチック成形加工学会年次大会予稿集(2004) p.255.
- 15) 福谷和久：プラスチック成形加工学 第15回秋季大会(成型加工シンポジア) 2007年11月.