

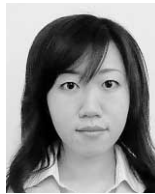
(論文)

二軸押出機におけるVCMTセグメントの混練特性

Mixing Characteristics of VCMT Segment in Co-rotating Twin-screw Extruders



福谷和久* (工博)
Dr. Kazuhisa FUKUTANI



山田紗矢香*
Sayaka YAMADA

A three-dimensional numerical study on flow and mixing characteristics of various clearance mixing technology (VCMT) segment in intermeshing co-rotating twin-screw extruders was carried out. Dispersive and distributive mixing of VCMT and kneading disc (KD) segment were evaluated by a particle tracking method. Probability distributions and characteristic histories of the evaluation indices were compared. As a result, it was found that VCMT segment has more uniform and better dispersive and distributive mixing than KD segment, and distributive mixing of VCMT segment is enhanced by flow through the wide gap between the segment and the barrel.

まえがき＝同方向回転かみ合い二軸押出機は樹脂のコンパウンディングなどに広く用いられている。押出機の内において、溶融した樹脂が混練される部分は溶融混練部と呼ばれている。当社の押出機ではこの部分にVCMT (Various Clearance Mixing Technology) セグメント¹⁾(以下、VCMTという)あるいはKD (Kneading Disc) セグメント (以下、KD という) を用いている。一般に、混練には分散混合 (Dispersive Mixing) と分配混合 (Distributive Mixing) とがあるとされており、前者はフィラの凝集塊などをつぶす混合を、後者は材料を均一化する混合を表すとされている²⁾。VCMTは当社独自のセグメントであり、二条のロータ形状を基本として、複数のチップクリアランスを有することに特徴がある。これによって分散混合と分配混合の両立を意図している。KDは複数のディスクを組合せた形状のセグメントであり、ディスクの厚さ、枚数、あるいはその間の組合せ角度などを形状の変数として、一般的に広く使われている。

これまで二軸押出機の溶融混練部におけるKD周りの溶融樹脂の三次元流動解析と、主に粒子追跡法によりその混練特性に関する研究が行われている^{3)~9)}。混練特性の評価には多数の追跡粒子のセグメント部での滞留時間、ひずみ速度および応力の履歴から求めたそれらの最大値、時間積分値などの確率分布が用いられている。

筆者らは、粒子追跡法による混練評価について、評価指標の無次元化の方法、および混練の均一度と混練性能の評価方法を提案した。これらの方法を用いてVCMTの混練特性をKDのそれと比較し、VCMTはKDと比べて混練の均一性と分散混合に優れることを示した¹⁰⁾。この結果は、三条ロータセグメントとKDの混練特性の比較において、前者は分散混合特性に優れるとの報告¹¹⁾とも整合していると考えられる。このことから、一般的

にロータ系のセグメントはKDに比べて分散混合に優れていると考えられる。

本報告では、VCMTおよびKDについて、文献を参考に選んだ評価指標による分散および分配混合の比較の結果を示す。また評価指標の確率分布から、それぞれについて代表的な粒子を一つずつ抽出し、これらの軌跡と評価指標の履歴を比較して、セグメントの混練機構の差を考察する。

1. 計算方法および計算条件

1.1 基礎式と物性値

溶融樹脂は押出機のセグメントとバレルの間に完全に充満しており、等温度であると仮定した。このとき、流動解析の基礎式は以下に示すような連続の式および運動量の式である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i}$$

ここで u_i は速度、 x_i は座標、 ρ は密度、 t は時間、 σ_{ij} は応力テンソルである。溶融樹脂は非圧縮性の一般化ニュートン流体として扱った。このとき材料の構成則は次のように表せる。

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \sigma'_{ij} = -p\delta_{ij} + \eta\gamma_{ij,t}$$

ここに p は圧力、 δ_{ij} はクロネッカのデルタ、 σ'_{ij} は偏差応力テンソル、 η はせん断粘性、 $\gamma_{ij,t}$ はひずみ速度テンソルである。

樹脂にはポリプロピレンを想定した。溶融密度 ρ は 735kg/m^3 とした。溶融粘性 η のせん断速度依存性は Carreau モデル

$$\eta = \frac{\eta_0}{[1 + (\lambda\dot{\gamma}_i)^2]^{\frac{1-n}{2}}}$$

*技術開発本部 機械研究所

により表した。モデル定数は Ishikawa et al.¹²⁾ を参考に、503K に相当する値、

$$\eta_0=14527, \lambda=1.18, n=0.38$$

に定めた。

1.2 解析条件

バレル直径 D は 40 mm とし、セグメント形状は Funatsu et al.⁵⁾ を参考に定めた。KD は厚さ 10 mm の 5 枚のディスクからなり、それらの組合せ角度は送り方向に 45° である。VCMT は KD と同一の長さで最大外径をもつとし、ねじれ角度は約 90° とした。セグメント長さ L は 50.4 mm である。セグメント構成は、樹脂の輸送と混練の最小構成を考え、送りスクリュ、評価セグメント (VCMT または KD)、戻しスクリュの構成とした。樹脂の質量流量 Q は 350 kg/h、回転数 N は 500 rpm とした。

解析には有限要素法による汎用流動解析ソフト POLYFLOW のバージョン 3.11 を用いた。このソフトは MST (Mesh Superimpose Technique) と呼ばれる手法により、別に作成されたバレルとセグメントのメッシュを重ねて解析することができる¹³⁾。図 1 に解析対象の VCMT と KD のセグメント形状、セグメント構成およびメッシュ図を示す。座標の原点は評価セグメント上流端の二軸間の中央にとり、軸間、鉛直および押出方向をそれぞれ x , y および z 方向とした。バレルのメッシュ数は約 61,000 である。境界条件は、上流側境界で一様速度、下流側境界で一様圧力とした。バレルおよびセグメントの表面はすべりなし条件とした。回転の位相刻みは 6° とした。計算時間は、Intel 社のクロック周波数 3 GHz の Xeon CPU を搭載した計算機を用いて、いずれも約 190 時間であった。

1.3 粒子追跡法

粒子追跡による混練評価では、時間 $t=0$ で評価セグメントの上流端の断面内に 1,000 個の粒子の初期位置をランダムに決め、解析により求めた速度場に伴う移動を追跡して、各粒子の座標と、その位置のひずみ速度 $\gamma_{ij,t}$ お

よび応力 σ'_{ij} の履歴を記録して、混練の評価指標を求めた。ただし、追跡の途中でセグメントあるいはバレル表面へ付着した粒子は評価から除き、それぞれ 900 個前後の粒子により評価を行った。

粒子追跡法による分散および分配混合の評価には既存研究^{3)~9)} において種々の方法が用いられている。しかしながら、数値計算による混練評価の結果とそれに対応する実験結果との比較により、有効性が確認された評価方法はこれまで公表されていない。そこで本報告では、文献調査の結果から、筆者らが評価に適していると考えた指標を用いて評価することにした。分散混合の指標には、応力の履歴の最大値に着目した文献^{4), 6), 9)} を参考に、セグメント部での第 1 主応力の最大値 $\sigma'_{1,max}$ を、分配混合の指標には、カオス混合理論に基づいた仮想的な線の伸び¹⁴⁾ の対数 $\ln(l/l_0)$ を用いた。ここに l は線長さ、 l_0 はその初期長さである。

セグメント部の滞留時間 t_p と主応力の最大値 $\sigma'_{1,max}$ は先の報告¹⁰⁾ と同様の方法により無次元化して示す。滞留時間 t_p を無次元化するセグメント部の平均滞留時間 T は、セグメント長さ L とこの部分の平均流速 U から $T=L/U$ と求めた。この時間 T を用いると回転数 N に相当する周期は $0.324T$ であった。また主応力 σ'_1 の無次元化には、セグメント断面形状と回転数 N から計算した断面平均の見かけせん断速度に対応するせん断応力 Σ を用いた。この応力 Σ を用いると KD のチップ先端とバレルの隙間における見かけのせん断応力 σ_{tip} は 3.5Σ に相当した。

2. 計算結果および考察

2.1 粒子の分散状況と滞留時間

はじめに粒子の分散の様子を確認する。図 2 に追跡開始から 1 回転後 ($t=0.324T$) の粒子の分布を示す。この時点で VCMT ではほとんど粒子がセグメントの中央付近までにとどまっているのに対して、KD では一部の粒子がセグメント下流端に差掛っている。KD ではディスクの間に前方への樹脂の流れが生じ、比較的短い時間で前方に送られる樹脂があるためである。図 3 にセグメント内の粒子滞留時間 t_p の確率分布を示す。図中のシンボルは隣接するシンボルとの中央より内側となる確率を表しており、これらを直線により結んで示した。後の図 4 および図 5 においても同様である。図 2 の粒子の分散状況と対応して KD は時間 T よりも短い $0.5T$ 付近の滞留時間の確率が高いのに対して、VCMT は滞留時間 T 付近の確率が高い。粒子の滞留時間の $0.5T$ から $1.5T$ の間の確率を比較すると、VCMT の方が 31% 高かった。このことから VCMT の方が滞留時間の均一性が高いといえる。

2.2 分散および分配混合特性

まず分散混合の評価指標である第 1 主応力の最大値 $\sigma'_{1,max}$ の確率分布を図 4 に示す。二つの確率分布を比較すると、VCMT の方が確率の最大位置が高く、平均的にも最大応力が高い。このことから VCMT の方が分散混合に優れると考えられる。また、この応力がチップ先端とバレルの隙間の見かけせん断応力 σ_{tip} 以上となる粒子

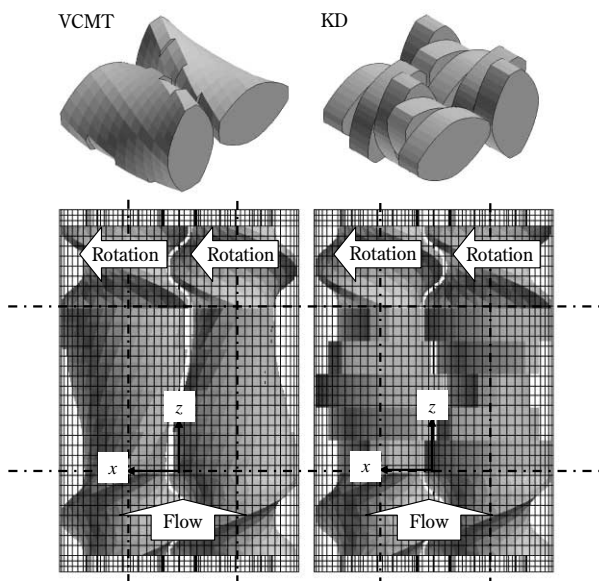


図 1 セグメント形状とメッシュ
Fig. 1 Segment shapes and mesh arrangements

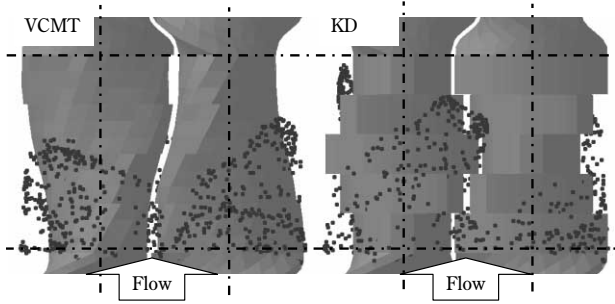


図2 1回転後の粒子の分散状況 ($t = 0.324T$)
Fig. 2 Particle distributions after one rotation ($t = 0.324T$)

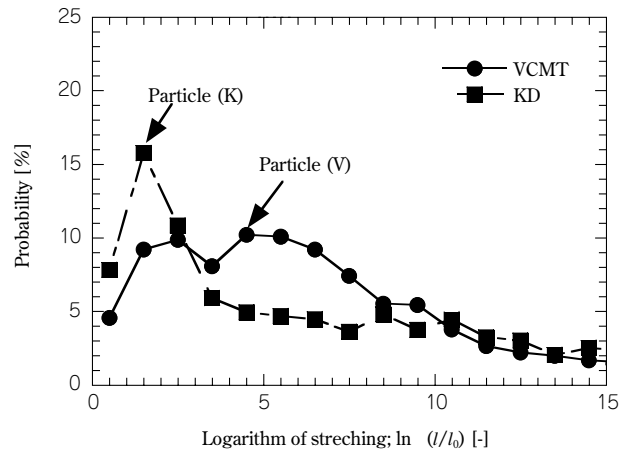


図5 対数伸びの確率分布
Fig. 5 Probability distributions of logarithm of stretching of particles

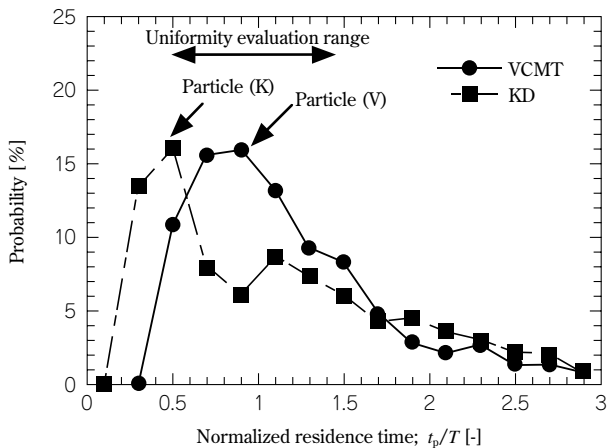


図3 粒子の滞留時間の確率分布
Fig. 3 Probability distributions of particle residence time

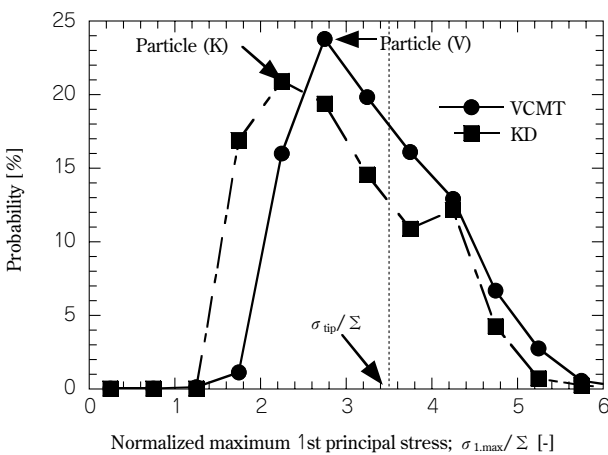


図4 第1主応力の最大値の確率分布
Fig. 4 Probability distributions of maximum 1st principal stress of particles

の確率は、KD および VCMT でそれぞれ 28% および 40% であり、いずれの形状についても 50% 以下であった。粒子がバレルとチップ先端の隙間を通過すると最大応力はこの応力 σ_{tip} 以上となると考えられることから、大半の粒子はこれ以外のところで最大応力を受けていると推察される。この点については後に代表的な粒子の軌跡と履歴を用いて考察する。

つぎに分配混合の評価指標である対数伸び $\ln(l/l_0)$ の確率分布を図5に示す。二つの確率分布を比較すると、KD は比較的低い領域に急峻なピークが一つあるのに対して、VCMT は KD よりも分布がなだらかであり、高い

領域にピークをもっている。これらのことから VCMT は KD よりも分配混合にも優れると考えられる。VCMT の分配混合の機構については次節で代表粒子の軌跡と対数伸びの履歴により考察する。

2.3 代表粒子の軌跡と履歴

VCMT と KD について代表的な粒子を抽出し、その軌跡と評価指標の履歴を比較して混練機構の差を考察する。代表粒子には、先の滞留時間、分散および分配の評価指標の確率分布 (図3～図5) において、これらの評価指標がすべて最も高い範囲に属している粒子を、それぞれについて一個ずつ選び Particle (V) および (K) とした。これらの粒子の滞留時間 t_p 、第1主応力の最大値 $\sigma_{1,max}$ および対数伸び $\ln(l/l_0)$ を表1に示す。

これらの粒子の主応力最大値 $\sigma_{1,max}$ および対数伸び $\ln(l/l_0)$ の履歴を図6に、軌跡を図7に示す。図6では横軸に押出方向座標 z/L をとり、図7の軌跡との対応が分かりやすいようにした。また軌跡および履歴において特徴的な点として、第1主応力 σ_1 が最大となる点 (a) および伸び速度が最大となる点 (b) をこれらの図中に示した。図6によると、いずれの粒子も $z/L = 0.6$ 付近に、点 (a) および (b) がある。表1からも分かるように、この点 (a) での主応力 σ_1 は KD よりも VCMT の方が大きかった。また図6の点 (b) 前後の対数伸びの勾配から推察されるように、伸び速度の最大値は VCMT の方が大きかった。

つぎに図7によれば、いずれの軌跡もスクリュの回転と対応して、バレル表面に沿う形状でらせんを描いている。滞留時間の長さに対応して、Particle (K) は全周の半分程度を、Particle (V) ではほぼ全部となっている。この軌跡上で第1主応力 σ_1 が最大となる点 (a) は、いずれのセグメントについても二軸のスクリュのかみ合い領域にあった。この点での応力の大きさは先のように KD よりも VCMT の方が大きいので VCMT は分散混合に優れると考えられる。また、このことと先の最大主応力の確率分布 (図4) から推測すると、いずれのセグメントについても大半の粒子が最大応力を受けるのはかみ合い領域であると推測される。

表 1 代表粒子の評価指標

Table 1 Evaluation indices of characteristic particles

Segment	Particle	Residence time t_p/T	Maximum principal stress $\sigma_{1,max}/\Sigma$	Logarithm of stretching $\ln(l/l_0)$
VCMT	(V)	0.91	2.81	4.12
KD	(K)	0.50	2.19	1.70

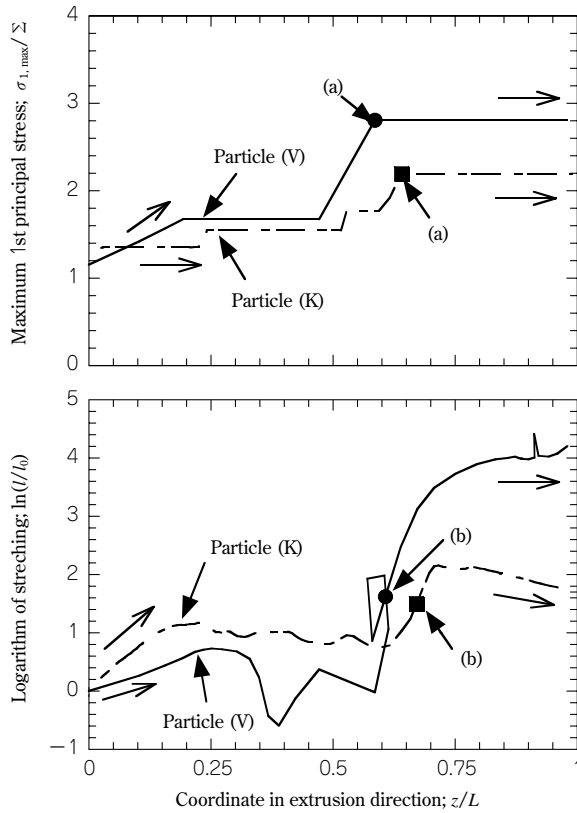


図 6 代表粒子の評価指標の履歴

Fig. 6 Histories of evaluation indices of characteristic particles

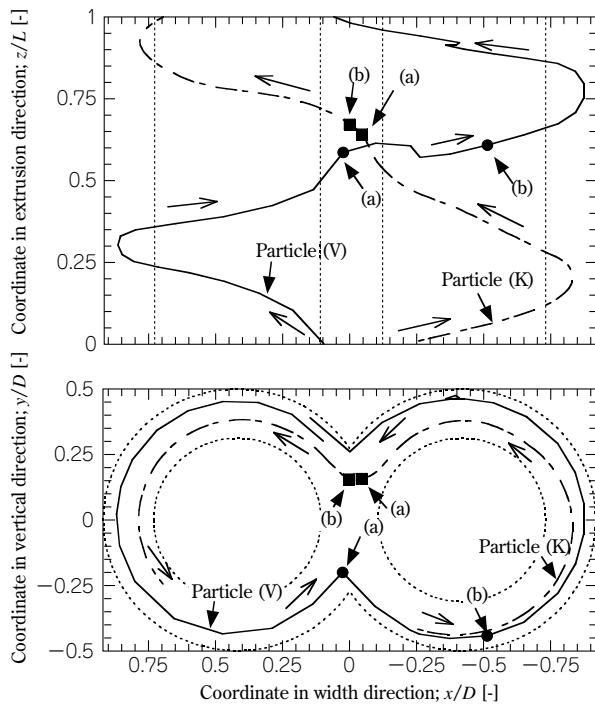


図 7 代表粒子の軌跡 (上: 上側から, 下: 入口側から)

Fig. 7 Trajectories of characteristic particles (upper: from top, lower; from inlet)

つぎに、伸び速度が最大の点 (b) は、KD ではかみ合い領域で点 (a) に近い位置にあった。これに対して VCMT ではこの領域ではなく、片側のバレルに添う軌跡上にあった。点 (b) の時間および位置と VCMT の回転位相との関係を確認すると、点 (b) は VCMT の広いクリアランスが通過した直後であった。このことから VCMT ではその広いクリアランスとバレルの隙間に形成される樹脂流れにより分配混合が促進されていることがわかった。

むすび=本報告では二軸押出機に用いられる VCMT と KD の混練特性を、その回りの樹脂流動解析と粒子追跡法を用いて比較した。粒子の確率分布を比較すると VCMT は KD に比べて混練の均一性が高く、分散および分配混合特性に優れることが示された。従来からロータ系のセグメントは分散混合に優れると考えられてきたが、本研究では VCMT は分配混合にも優れることが示された。

さらに二つのセグメントについて代表的な粒子を一つずつ選び、それらの軌跡と指標の履歴を調べて、混練機構を考察した。その結果、これらの粒子が最大応力を受けるのはいずれのセグメントでも二軸のかみ合い領域であり、このときの主応力は VCMT の方が高いため、分散混合に優れることがわかった。また VCMT では、バレル表面に添う領域において、その広いクリアランスとバレルの隙間を通過する樹脂流れが形成され、これにより分配混合が促進されることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 井上公雄: 成形加工, Vol.16, No.8 (2004), pp.510-514.
- 2) K. Kohlgruber: Co-Rotating Twin-Screw Extruders, (2008), Hanser Publisher.
- 3) A. Lawal et al.: Polym. Eng. Sci., Vol.35, No.17 (1995), pp.1325-1338.
- 4) T. Ishikawa et al.: Polym. Eng. Sci., Vol.41, No.5 (2001), pp.840-849.
- 5) K. Funatsu et al.: Polym. Eng. Sci., Vol.42, No.4 (2002), pp.707-723.
- 6) T. Ishikawa et al.: Polym. Eng. Sci., Vol.42, No.5 (2002), pp.925-939.
- 7) V. L. Bravo et al.: Polym. Eng. Sci., Vol.44, No.4 (2004), pp.779-793.
- 8) B. Alsteens et al.: Intern. Polym. Process., Vol.19, No.3 (2004), pp.207-217.
- 9) T. Ishikawa et al.: Intern. Polym. Process., Vol.21, No.4 (2006), pp.354-360.
- 10) 福谷和久ほか: プラスチック成形加工学会秋季大会 (成形加工シンポジウム'07) 講演予稿集 (2007), pp.109-110.
- 11) 橋爪慎治ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.44, No.3 (1994), pp.46-49.
- 12) T. Ishikawa et al.: Polym. Eng. Sci., Vol.40, No.2 (2000), pp.357-364.
- 13) T. Avalosse et al.: Int. Polym. Process., Vol.15, No.2 (2000), pp.117-123.
- 14) J. M. Ottino: The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport, (1989), Cambridge University Press.