

ダルメージ型スクリュの形状と分配混合性能の相関評価

Evaluation of Correlation Between Configuration and Distributive Mixing Performance for Dulmage Type of Single Screw Extruder

木村 公一*
Koichi Kimura博士(情報学) 名嘉山 祥也**
Dr. Yasuya Nakayama博士(工学) 梶原 稔尚**
Dr. Toshihisa Kajiwara

要 旨

形状の異なる4種のダルメージ型スクリュ(DS)を用いた顔料分散試験を実施し、溶融樹脂内での温度分布及び吐出樹脂断面内での顔料の分散度合の観点からDSの形状因子が分配混合性能に及ぼす影響を多面的に調査した。各DSで混練された溶融樹脂内では、流路中心から流路壁面にかけて樹脂温度が低下する温度分布が形成された。これらの温度分布は最高値と最低値の差が約1℃であり、いずれのDSも溶融樹脂の温度分布の均質化に必要な分配混合性能を備えていると判断される。DSの形状は溶融樹脂の平均樹脂温度に影響しており、リング部が長いDSでは平均樹脂温度が低下した。吐出樹脂の断面上での顔料の分散度合を表す情報エントロピー(U)は、DSの形状に依らず、スクリュ回転数の増加に伴って減少する傾向が見られた。ただし、DSの形状はスクリュ回転数に対する U の変動の大きさに影響していた。フィン部溝数の多い形状やリング部の長い形状では U の変動が小さくなった。 U の変動には、フィン部溝内での顔料含有マスターバッチ(MB)の旋回流動の程度とフィン部溝内でMBが旋回する軌道が影響する。前記の形状では、フィン部流入面でMBが分流される可能性が高く、この分流の発生によって直前のフィン部溝内とは異なる旋回軌道にMBが進入していると推測される。

— Synopsis —

The influence of the configurations on the distributive mixing performance of Dulmage type screw (DS) was investigated by the extrusion test to distribute pigments into polymer by using four types of DS. The performance was evaluated in terms of the temperature profiles in the polymer melt and the degree of uniformity of pigments on the cross-section of the extrudates. The temperature profiles which the temperature decreased from the center to the wall of the flow path were generated in the polymer melt mixed by each DS. The differences between the maximum and the minimum of the temperature profiles were about 1 degree C. Thus, it was revealed that each DS has the enough distributive mixing performance to uniform the temperature profiles inside the polymer melt. The average temperature of the polymer melt was dependent on the configuration. The longer the length of each ring section was, the lower the average temperature of the polymer melt became. The information entropy (U) which was calculated from the cross-sectional images of the extrudates prepared by each DS trended to decrease with proportional to the screw rotation speed regardless of the configuration. However, the magnitude of the fluctuation of U with the screw rotation speed was dependent on the configuration. The fluctuation of U is related to the degree of the circulation of the master-batch included color pigments inside the grooves of fin section and the circulation orbit. In case of the above configuration, the possibility to split MB flow at the inlet of each fin section was higher. Thus, it is guessed that the fluctuation was influenced by the entry of MB to the circulation orbit which was different from the one at the previous fin section due to this split.

Keywords: Distributive Mixing, Dulmage Screw, Single Screw Extruder

*: 広島製作所 技術開発部
Technical Development Department, Hiroshima Plant

**：九州大学 大学院工学研究院
Faculty of Engineering, Kyushu University

1. 緒 言

高い厚み精度が要求されるフィルム・シート成形プロセスでは、シート吐出時の圧力変動(流動方向のシート厚み変動)や同一シート断面内の温度分布(幅方向の厚みムラ)が小さいことが重要である。フィルム・シート成形プロセスでは、単軸押出機の採用実績が二軸押出機に比べて圧倒的に多いが、これは単軸押出機のフルフライトスクリュが安定した可塑化性能を有し、さらに押出安定性に優れるためである。ただ、単軸押出機のフルフライトスクリュは分配混合性能が十分とは言えず、吐出樹脂内に温度分布が生じやすいという課題を有する。そのため、多くの場合で、単軸押出機のスクリュ先端には分配混合型スクリュが設けられており、吐出樹脂内の温度分布を低減し、吐出樹脂の均質化が図られている^{(1) - (3)}。分配混合型スクリュの混練性能は、対象とする樹脂の種類や押出条件(押出量、スクリュ回転数、シリンダ温度、背圧など)によって変化する可能性があり、高い混練性能を常に安定的に発揮可能なスクリュは未だ開発されていない。そのため、分配混合型スクリュの設置の場合、実験と数値解析の双方のアプローチにてその性能を評価し、形状最適化が図られている。これまでに報告された単軸押出機のフルフライトスクリュや分配混合型スクリュの実験的評価では、単軸押出機内外における熔融樹脂(吐出樹脂)内での流動トレーサー(顔料等)の濃度変化を検出する手法や^{(4) - (7)}、吐出樹脂断面内での流動トレーサーの濃度分布を評価する手法^{(8) - (12)}などが利用されてきた。前者は主に流動方向の分配混合性能に対する評価であり、断面方向内の評価には不適である。また、後者は吐出樹脂内での流動トレーサーの濃度分布から標準偏差を計算し、流動トレーサーの濃度分布の裾野の広さを評価しているが、標準偏差は平均値周りのばらつきを表す統計指標であり、流動トレーサーの濃度分布の形態によってはその裾野の広さを正確に表現できていない可能性がある。これらの課題解決のため、Alemaskinらは、流動トレーサーの濃度分布の形態に依存せず、吐出樹脂断面内での流動トレーサーの濃度分布関数から情報エントロピーを計算し、分配混合性能を定量化する手法を提案している^{(13), (14)}。この手法では、標準偏差等の統計指標を経ないため、吐出物断面内での流動トレーサーの濃度分布の形態の影響を受けることなく、吐出物断面内での流動トレーサーの分布の一樣性を高精度に把握することが可能である。

筆者らは、分配混合型スクリュの一種であるダルメージ型スクリュ(DS)^{(15), (16)}の分配混合性能を実験及び数値解析の双方から評価してきた。これまでにDSの分配混合性能は押出条件に対して非単調かつ振動的に変動す

る可能性があり、その変動はフィン部溝内での熔融樹脂の旋回流動の程度に依存していることを報告している⁽¹⁷⁾。ただ、この研究では評価対象としたDSの形状は1種のみであり、DSの形状因子が分配混合性能に及ぼす影響は明確になっていなかった。そこで、本研究では形状の異なる4種のDSについて顔料分散試験を実施し、熔融樹脂内の温度分布及び吐出樹脂断面の情報エントロピーを評価し、DSの形状因子と分配混合性能の相関関係を多面的に調査した。

2. 顔料分散試験

2.1 ダルメージスクリュ(DS)

図1及び表1に本研究で評価対象とした4種のDSを示す。本研究では、バレル内径が50mmの単軸押出機を利用し、いずれのDSもスクリュ径は49.5mm、スクリュ長は150mmとした。STD-typeは過去の研究で採用したDSと同一形状である。この形状を基本として、溝深さ(CD-type)やフィン部溝数(NG-type)、リング部長さ(LR-type)をそれぞれ変更したDSを製作した。

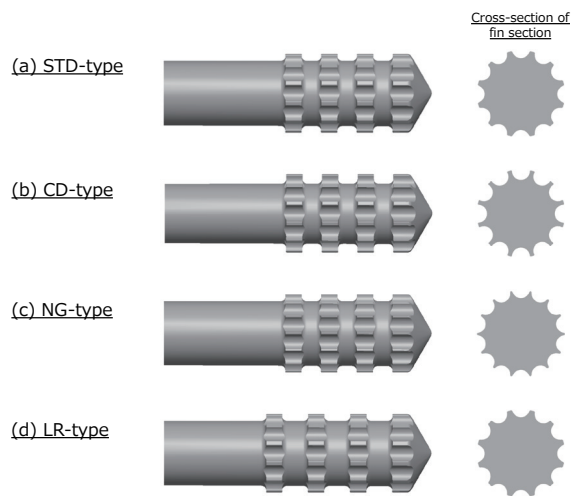


Fig.1 Screw configurations

Table1 Dimensions of Dulmage screws

Dimension	(a) STD-type	(b) CD-type	(c) NG-type	(d) LR-type
Diameter of screw	49.5 mm	49.5 mm	49.5 mm	49.5 mm
Length of screw	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm
Channel depth	4.5 mm	6.0 mm	4.5 mm	4.5 mm
Number of fin section	4 parts	4 parts	4 parts	4 parts
Number of grooves in fin section	12 grooves	12 grooves	14 grooves	12 grooves
Length of fin section	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm
Length of ring section	12 mm	12 mm	12 mm	14 mm

2.2 試験方法

4種のDSの分配混合性能の評価及び比較のため、各DSを用いて赤色顔料含有マスターバッチ(MB)を樹脂で希釈した吐出樹脂を作製し、その吐出樹脂断面内での赤色顔料の分散度合を評価した。この実験では、樹脂には低密度ポリエチレン(LDPE: Sumitomo Chemical Co., Ltd. F200, MFR=2.0g/10min)を、MBには2.5wt%の赤色顔料(Dainichiseika Color & Chemicals Mfg. Co., Ltd., Chromofine Red 6830)を含む前記LDPEを用いた。図2に試験装置を示す。各DSの分配混合性能を厳密に評価するためには、LDPE及びMBの可塑化工程がLDPEとMBの混練工程に及ぼす影響を排除しなければならない^{(14), (15)}。そのため、LDPEの可塑化用押出機であるφ30mm二軸押出機(The Japan Steel Works, Ltd., TEX30 a L/D=59.5)と、MBの可塑化用押出機であるφ35mm単軸押出機(Tahara Machinery Ltd., TSE35 L/D=26)とを、DSを挿入したφ50mm単軸押出機(The Japan Steel Works, Ltd., P50 L/D=15)に接続した。図3にφ50mm単軸押出機の内部構造を示す。DSの上流に相当するバレルの側面にLDPE及びMBの供給口を設け、スクリュ表面にMBを、その外表面にLDPEを配置した二層樹脂流体を形成した。その後、DSによってこの二層樹脂流体を混練し、押出機先端のダイから吐出される円柱状樹脂を100mm長で10個採取した。表2に押出条件を示す。

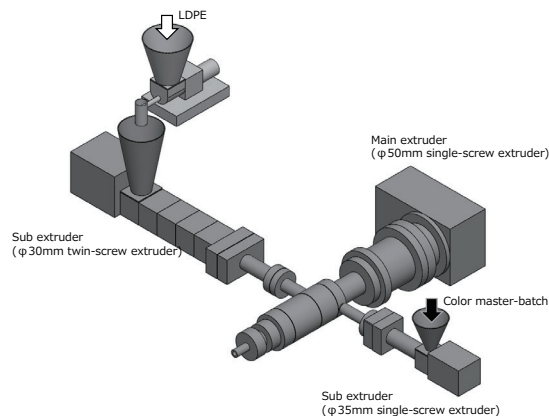


Fig.2 Experimental apparatus

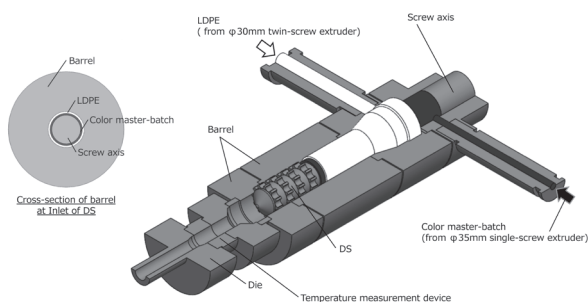


Fig.3 Inner structure of main extruder

Table2 Conditions of extrusion test

Condition	Value
Throughput (LDPE) (Color Master Batch)	30.7 kg/h (30 kg/h) (0.7 kg/h)
Screw Rotation Speed	40~100 rpm (by 10 rpm)
Barrel Temperature	200 °C

採取した円柱状樹脂の断面を厚さ2mmに切断し、画像処理用照明CA-DSW7 (Keyence Co., Ltd.)及びデジタルカメラD3200 (Nikon Co., Ltd.)を用いて観察写真を撮影した。その後、画像処理ソフトウェアAdobe Photoshop (Adobe Systems Inc.)を用いて断面観察写真をモノクロ化し、輝度分布を取得した。輝度値*i*を示すピクセルの分布関数*P_i*をそれぞれ式(1)から求め、式(2)によって情報エントロピー*U*を算出した。

$$P_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^M N_i} \quad (1)$$

$$U = \frac{\sum_{i=1}^M -P_i \ln P_i}{\ln M} \quad (2)$$

ここで、*M*は輝度値の階層数内、*N_i*は輝度値*i*を示すピクセル数である。吐出樹脂断面でMBが均一分散した場合、理想的には単一色が形成され、輝度分布が狭くなる。*U*は大きくなるほど吐出樹脂断面内での輝度分布が広いと解釈されるため、*U*が小さくなるほど吐出樹脂断面内でMBが良好に分散したと判断できる。

図4に圧力計と四点式樹脂温度計の設置位置を示す。本研究では、2本の圧力計(P1及びP2)をDSの流入面及びDSの流入面から130mmの位置にそれぞれ設置した。そして、P2からP1を減算した圧力差を算出し、DS内の樹脂圧力分布を評価した。

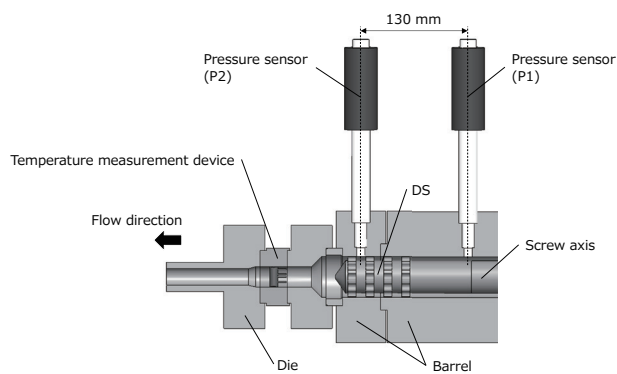


Fig.4 Position of pressure sensors and temperature measurement device

図5に示す四点式樹脂温度計をDS先端とダイス吐出口との間の流路(内径φ 25mm)に設置し、DSによって混練された溶融樹脂の樹脂温度を計測した。この樹脂温度計には、流路中心及び流路中心から $R/4$ 、 $R/2$ 、 $3R/4$ (R : 流路半径)の位置に樹脂温度を検出する熱電対が設置されている。本研究では、これを利用することで四点式樹脂温度計の流路内を流動する溶融樹脂内の樹脂温度分布を計測した。

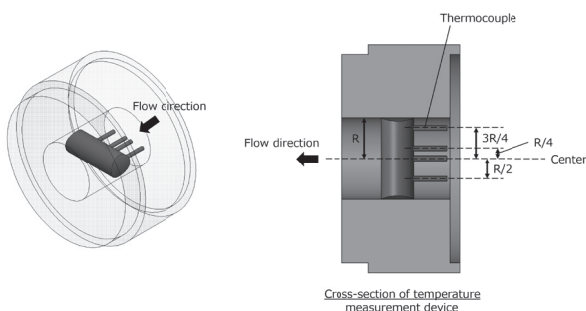


Fig.5 Temperature measurement device

3. 結果および考察

3.1 各DS内での圧力分布評価

図6に各スクリュ回転数でDS内に生じた圧力差を示す。本研究で採用したDSは、いずれもフィン部溝が螺旋角を有さない、スクリュ軸と平行な形状であり、スクリュ回転による推進流が発生しないため、溶融樹脂の流動は圧力流に依存する。そのため、すべてのDS内で負の圧力差(P2がP1よりも低下する傾向)が確認された。また、すべてのDSで、スクリュ回転数の増加によって圧力差が減少する傾向が見られたが、これはスクリュ回転とともに増加するせん断発熱量によってDS内を流動する溶融樹脂の樹脂温度が上昇し、溶融粘度が低下したためである。

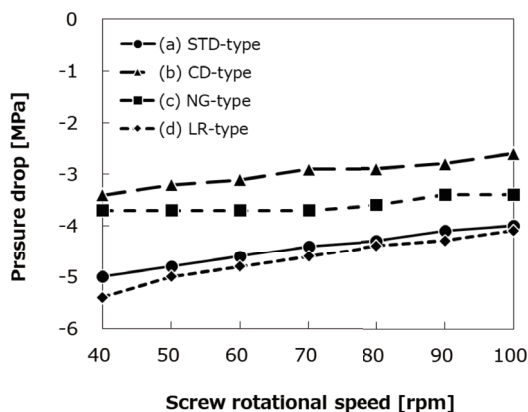


Fig.6 Pressure profiles in each DS under 30.7 kg/h and 40-100 rpm

DS内に生じる圧力差に対して、リング部長さの変更の有無が及ぼす影響は認められず、DS内に生じる圧力差はフィン部で生じる流動抵抗に依存することが確認された。DSの溝深さやフィン部溝数が増加するほど、DS内に生じる圧力差が減少する傾向が見られた。DSの溝深さやフィン部溝数はフィン部溝の断面積に関係する。DS内で生じる圧力差が大きいほど、単軸押出機の押出量は減少するため、最適な分配混合性能を確保した上でフィン部溝の断面積を調整し、DS内で生じる圧力差を可能な限り最小化した形状最適化を図ることが重要である。

3.2 各DSで混練した吐出樹脂内の温度分布評価

図7に、四点式樹脂温度計の流路内を流動する溶融樹脂の温度分布を示す。各図の横軸は、流路半径に対する相対位置を示している。いずれのDSも流路中心付近の樹脂温度が高く、流路中心から流路壁面にかけて樹脂温度が低下する分布が形成された。ただ、これらの温度分布内の最高値と最低値の差はいずれも 1°C 前後であった。そのため、いずれのDSも溶融樹脂内の温度分布を均質化するために必要な分配混合性能を有することが判明した。

図8に、四点式樹脂温度計の間の流路内を流動する溶融樹脂の平均樹脂温度を示す。DS内を流動する溶融樹脂の温度上昇は、フィン部及びリング部内でのせん断発熱がほぼ支配的である。フィン部に関しては、溶融樹脂の平均樹脂温度は、フィン部溝内で発生するせん断発熱量が小さいCD-typeで低下し、せん断発熱量が大きいフライトが多数存在するNg-typeで上昇する傾向が見られた。一方、LR-typeでは、すべてのスクリュ回転数でSTD-typeに比べて溶融樹脂の平均樹脂温度が低下した。LR-typeはSTD-typeよりも溶融樹脂がリング部内を流動する滞留時間が長く、リング部内でのせん断発熱量が大きい。これにより、DSのリング部では、せん断発熱による温度上昇よりもバレルからの放熱による温度低下の影響が大きいといえる。高品質の吐出樹脂を確保するためには、単軸押出機内で溶融樹脂の温度分布の均質化に加えて、温度上昇を抑制することが肝要である。この観点からDSの形状を勘案すると、フライト頂部でのせん断発熱量を低減しつつ、リング部の長さを調整していくことが必要である。

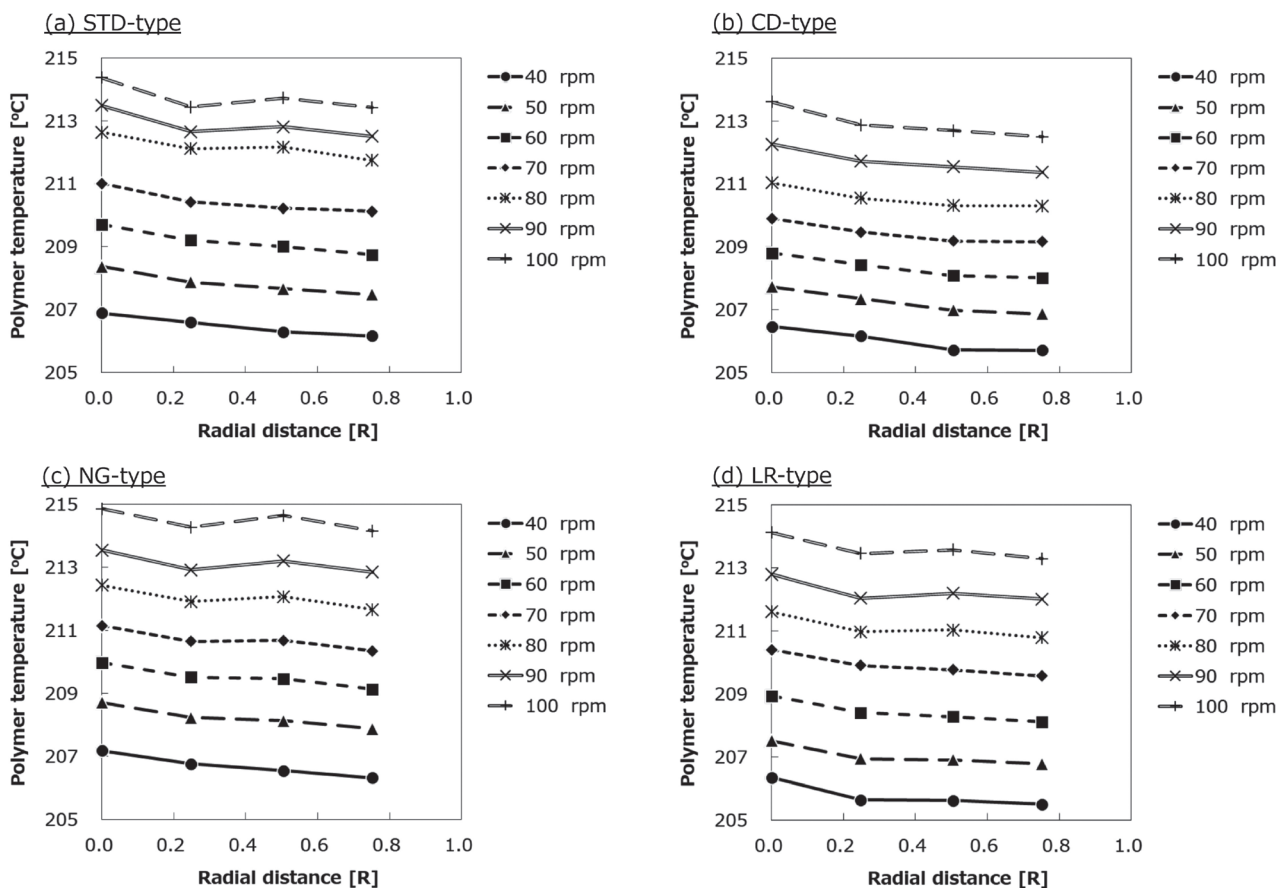


Fig.7 Temperature profiles inside polymer melt mixed by each DS under 30.7 kg/h and 40-100 rpm

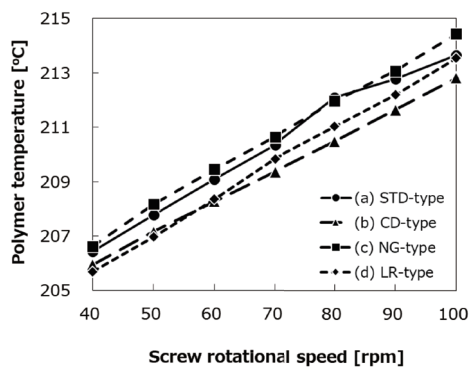


Fig.8 Relationship between average temperature of polymer melt mixed by each DS and screw rotational speed under 30.7 kg/h and 40-100 rpm

3.3 各 DS で混練した吐出樹脂断面内での MB 分散評価

表 3 に吐出樹脂の断面観察写真を示す。いずれの DS もスクリュ回転数が 40rpm の場合、吐出樹脂断面の中心付近に MB が高濃度に分布した。吐出樹脂断面の中心付近を流動する MB は、主に DS 流出面のスクリュ表面を流動する成分である。この結果は、低スクリュ回転数では MB の一部はスクリュ表面(溝底)から位置交換されないことを示している。一方、スクリュ回転数が増加すると吐出樹脂断面全体への MB の分散が進み、吐出樹脂断面の中心付近の MB 濃度が低下した。

	40 rpm	50 rpm	60 rpm	70 rpm	80 rpm	90 rpm	100 rpm
(a) STD-type							
(b) CD-type							
(c) NG-type							
(d) LR-type							

Table3 Cross-sectional images of extrudates prepared by using each DS under 30.7 kg/h and 40-100 rpm

図9に吐出樹脂の断面観察写真から算出した U を示す。全てのDSの傾向として、スクリュ回転数の増加に伴い U が減少した。せん断速度はスクリュ回転数に比例して増加するため、熔融樹脂に加わる歪み量が大きくなり、 U が減少したものと推測される。そこで、スクリュ回転数(N)に対する U の傾向線から傾き α 及び切片 β を算出し、式(3)によってスクリュ回転数が直接的な影響を及ぼす U' の成分(U')を仮定した。

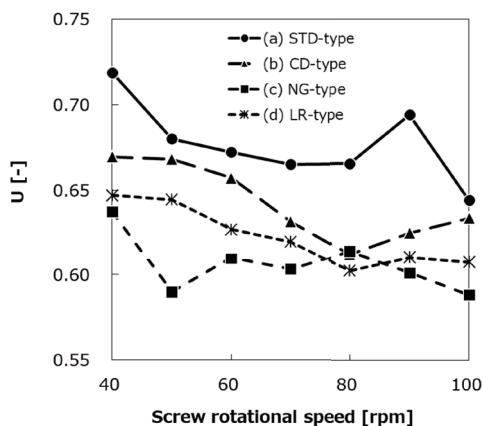


Fig.9 Relationship between U on cross-section of extrudates prepared by each DS and screw rotational speed under 30.7 kg/h and 40-100 rpm

$$U' = \alpha N + \beta \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \delta &= U - U' \tag{4} \\ &= U - (\alpha N + \beta) \end{aligned}$$

式(4)から求められる δ は、スクリュ回転数の影響が小さい U の成分である。 U' はスクリュ回転数に対して比例的に増加するため、 U の変動と δ の間に相関があると考えられる。

図10に、 U から算出した δ を示す。STD-typeやCD-typeではスクリュ回転数に対して δ が大きく変動した。スクリュ回転数に対するDSの分配混合性能の変動は、スクリュ表面に配置されたMBがフィン部溝内で旋回流動し、半径方向へのMBの分散度合が変化することに起因している。これらの結果ではSTD-typeやCD-typeでの半径方向へのMBの分散度合は同水準であるが、フィン部溝内でのMBの旋回軌道の長さが異なるためにMBの旋回流動の程度に差が生じ、 δ が変動するスクリュ回転数が異なっている。一方、NG-typeやLR-typeでは、STD-typeに比べてスクリュ回転数に対する δ の変動が小さかった。スクリュ回転数に対するDSの分配混合性能の変動の原因のひとつとして、フィン部溝内でMBが旋回する軌道の影響が挙げられる。MBが旋回する軌道

が旋回中心点から離れるほど、半径方向へ均一分散する可能性が生じるが、その反面、半径方向への分散度合の変動は激しくなる。NG-type及びLR-typeでは、リング部からフィン部へとMBが流動する際に分流が発生する可能性が高く、この分流の影響によって、MBが直前のフィン部溝内での旋回軌道とは異なる軌道へ進入していると推測される。NG-typeはフィン部溝数が多いために、LR-typeはリング部内でのMBの円周方向への変形量が大きいために、それぞれMBを分流しやすいと考えられる。このように、フィン部流入面でのMBの分流の発生可能性やその頻度が高いDSは、分配混合性能が高いだけでなく、スクリュ回転数に対する分配混合性能の変動も小さく抑制されることが判明した。

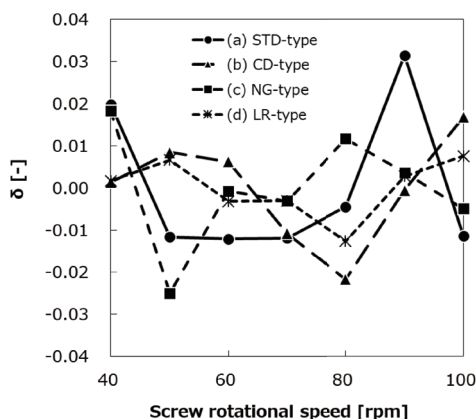


Fig.10 Relationship between δ on cross-section of extrudates prepared by each DS and screw rotational speed under 30.7 kg/h and 40-100 rpm

4. 結 言

4種のDSに関して顔料分散試験を実施して、熔融樹脂内の温度分布、吐出樹脂断面内でのMBの分散度合の観点から分配混合性能を評価した。また、DS内での圧力分布を調査し、DSの圧力分布に対して影響力の大きい因子を特定した。以下にそのまとめを記す。

- (1) DS内では形状に依らず、上流から下流へ向かって低下する圧力差が形成されていた。この圧力差は、リング部の長さの影響を受けず、フィン部の流動抵抗に依存しており、フィン部断面積が減少するほど圧力差が小さくなる傾向が見られた。
- (2) 4種のDSで混練した熔融樹脂内の温度分布は、最高値と最低値の差が約1℃であった。いずれのDSも熔融樹脂内の温度分布を均質化するために必要な分配混合を備えていると判断される。

- (3) 4種のDSで混練した熔融樹脂の平均樹脂温度は、せん断発熱量の大きいフライトが多く存在するほど上昇し、またリング部長さが長いほど低下する傾向が見られた。特に、リング部では、せん断発熱による温度上昇よりも、バレルからの放熱による温度低下の影響が大きい可能性がある。
- (4) いずれのDSも低スクリュ回転数では、DS流入面でスクリュ表面に配置されたMBが位置交換されていなかった。
- (5) フィン部流入面でMBの分流が発生する可能性が高いDSでは、分配混合性能が高く、またスクリュ回転数に対する分配混合性能の変動が小さかった。MBの分流によって、MBが直前のフィン部溝内とは異なる巡回軌道に進入したことが影響していると考えられる。

参 考 文 献

- (1) I. Manas-Zloczower: "Mixing and compounding of polymers: theory and practice", pp.252-525, Carl Hanser Verlag (2012)
- (2) C. Rauwendaal: "Polymer extrusion", pp.491-525, Carl Hanser Verlag (2014)
- (3) M. Gale: "Mixing in single screw extrusion", pp.135-166, ISmithers (2009)
- (4) S. P. Rwei: "Distributive mixing in a single - screw extruder—evaluation in the flow direction", Polym. Eng. Sci., Vol.41 (2001) No.10, pp.1665-1673
- (5) A. Y. Wong, Y. Lam and A. C. M. Wong: "Quantification of dynamic mixing performance of single screws of different configurations by visualization and image analysis", Adv. Polym. Tech., Vol.28 (2009) No.1, pp.1-15
- (6) A. C. Y. Wong, J. C. M. Lam, T. Liu and F. Zhu: "Visualization studies on the comparison of mixing characteristics of single - screws having different mixing elements", Adv. Polym. Tech., Vol.19 (2000) No.1, pp.1-13.
- (7) P. Kubick, J. Vlcek, C. Tzoganakis, and L. Miller: "Method of analyzing and quantifying the performance of mixing sections", Polym. Eng. Sci., Vol.52 (2012) No.6, pp.1232-1240
- (8) M. Gale: "Compounding with single - screw extruders", Adv. Polym. Tech., Vol.16 (1997) No.4, pp.251-262
- (9) M. Esseghir, C. G. Gogos, D. W. Yu, D. B. Todd and B. David: "A comparative study on the performance of three single - screw elements in melt—melt mixing of immiscible blends", Adv. Polym. Tech., Vol.17 (1998) No.1, pp.1-17
- (10) A. C. Rios, P. J. Gramann, T. A. Osswald, M. D. P. Noriega and O. A. Estrada: "Experimental and numerical study of rhomboidal mixing sections", SPE Antec Tech. Papers., (1998), pp.262-266
- (11) A. C. Rios, T. A. Osswald, M. D. P. Noriega and O. A. Estrada: "Experimental and numerical study of rhomboidal mixing sections", Intern. Polym. Proc., Vol.15 (2000) No.1, pp.12-19
- (12) W. G. Yao, K. Takahashi, K. Koyama and Y. Yamashita: "The effect of a new type of pin mixing section on the performance of a single - screw extruder", Polym. Eng. Sci., Vol.38 (1998) No.10, pp.1623-1632
- (13) K. Alemaskin, I. Manas-Zloczower and M. Kaufman: "Color mixing in the metering zone of a single screw extruder: numerical simulations and experimental validation", Polym. Eng. Sci., Vol.45 (2005) No.7, pp.1011-1020
- (14) K. Alemaskin, I. Manas-Zloczower and M. Kaufman: "Entropic analysis of color homogeneity", Polym. Eng. Sci., Vol.45 (2005) No.7, pp.1031-1038
- (15) F. E. Dulmage: "Mixing torpedo for plastics extruders", U.S. Patent, 2, 453, 088 (1945)
- (16) F. E. Dulmage: "Mixing torpedo for plastics extruders", U.S. Patent, 2, 607, 077 (1952)
- (17) 木村公一, 富山秀樹, 名嘉山祥也, 梶原稔尚: "単軸押出機のフィン型混練スクリュの分配混合性能評価", Seikei-Kakou, Vol.30 (2018) No.8, pp.445-451