

## 単軸混練スクリュの分配混合性能の評価

## Evaluation of the distributive mixing performance of the mixing screw element for single-screw extruder

木村 公一\*  
Koichi Kimura博士(工学) 富山 秀樹\*  
Dr. Hideki Tomiyama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

本研究で対象としたダルメージスクリュ (DS) は、フィルム・シート成形で広く利用される単軸押出機の混練スクリュのひとつである。この DS に関して実験と数値解析の両面からその分配混合性能を評価し、その混練メカニズムについて検討した。DS は、フルフライトスクリュ (FS) に比べてスクリュ内でのマスターバッチ (M/B) の位置交換が促進されており、分配混合性能に優れることが判明した。ただし、DS の分配混合性能は押出条件 (押出量・スクリュ回転数) によって変動する傾向が見られた。高い分配混合性能が得られた押出条件では、フィン部内での巡回流動によって M/B が位置交換され、フィン部流出面で M/B が複数個所に分かれて分布した。この影響によって、M/B はそれぞれ異なる流速を有することになり、トーピード部内での移動距離に差が生じ、分流・合流の発生頻度が増加した。その結果として、DS 内での M/B の流跡線の多様化が進み、DS の分配混合性能が向上したものと推測される。

## — Synopsis —

In this study, the distributive mixing performance of Dulmage screw was evaluated experimentally and numerically. Dulmage screw is the mixing screw for single-screw extruder which is composed of fin section and torpedo section. The position change of masterbatch in Dulmage screw was promoted in comparison with Full Flight screw which is the conventional screw of single-screw extruder. The distributive mixing performance of Dulmage screw was superior to that of Full Flight screw. However, the performance of Dulmage screw was changed by the extrusion conditions such as throughput and screw rotation speed. In case of the highest distributive mixing performance, the position of masterbatch was changed by the circulation in fin section and masterbatch distributed separately at outlet of fin section. Because of the masterbatch distribution, the velocity profile occurred inside masterbatch, and the distances which masterbatch moved inside torpedo section had differences. As the result, the distributive mixing performance was improved because the streamlines of masterbatch were diversified in Dulmage screw.

## 1. 緒 言

単軸押出機は、原料樹脂の可塑性装置としてフィルム・シート成形、中空成形、紡糸押出や異形押出などの成形加工プロセスに採用され、広く普及している。これらは、単軸押出機が有する押出能力や押出安定性が活かせるプロセスであることが大きな要因である。近年ではこれらに加え、例えばフィルム・シートの場合、製品の広幅化・多層化が進む中で全幅方向の物性の均一化の要求が高

まっている。これらを満たすためには、押出機内で発生する混練履歴を制御し、フィルム・シートの搬送方向および幅方向の双方における温度分布や配向分布の均一化が必要である。しかしながら、単軸押出機で樹脂の可塑性・搬送に利用されるフルフライトスクリュ (FS) では、スクリュ溝断面の中心付近を流動する樹脂はスクリュ溝断面内を巡回せずにスクリュ溝平行方向に流動するため、その他の樹脂との間には物性に差が生じやすいことが知られている<sup>(1)</sup>。そのため、フィルム・シートをはじめとする押

\*: 広島研究所  
Hiroshima Research Laboratory\*\*: 九州大学  
Kyusyu University

出物の物性を均一化するには、分流、合流や攪拌によってスクリュ内で物性の異なる樹脂を位置交換すること、つまり分配混合を施すことが必要である。この目的のため、図1に示すピン型スクリュおよびフィン型スクリュ<sup>(2)</sup>が分配混合型スクリュの代表として多く利用されており、また研究対象とされてきた。W.Yaoらは、ピン型スクリュ内で樹脂に作用する歪み速度から Local Mixing Efficiency や Integral Mixing Efficiency を算出し、軸方向の配置間隔が異なる数種類のピン型スクリュの分配混合性能の評価を行っている<sup>(3)</sup>。また W.R.Hwang らは、ピン型スクリュのピン数・ピン高さ・ピン配列やピン構成を変更した際の効果を数値解析によって求め、Dynamical system theory を用いて説明している<sup>(4)</sup>。しかしながら、これまでの報告の多くはピン型スクリュを対象としたものであり、フィン型スクリュに関する報告は少なく、その混練性能や混練メカニズムは不明確な部分が多く残されているのが現状である。そこで、本研究では、フィン型スクリュのひとつであるダルメージスクリュ<sup>(5)</sup>(DS)を対象とし、実験と解析の両面からその混練性能および混練メカニズムを調査・把握することを目的とした。

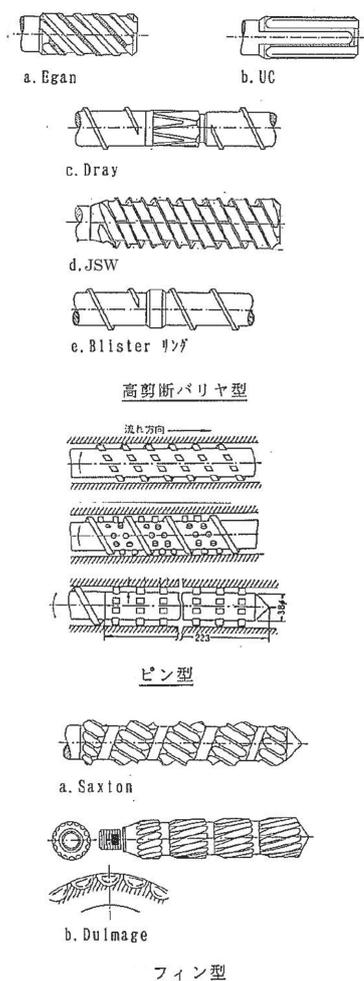


図1 単軸押出機に用いられる混練スクリュ

## 2. 押出機を用いた性能検証実験

図2に本研究の評価対象スクリュを、表1に評価対象スクリュの代表的な寸法諸元を示す。DSには、スクリュ軸に平行な多条フライトから構成されるフィン部を複数段配置した形状を採用した。一方、FSには、DSと同じスクリュ長および溝深さの形状を採用した。

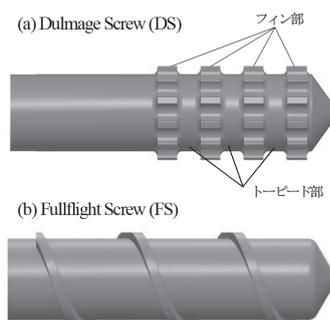


図2 評価対象スクリュ

表1 評価対象スクリュの代表的な寸法諸元

(a) DS		(b) FS	
スクリュ径	50 mm	スクリュ径	50 mm
スクリュ長	150 mm	スクリュ長	150 mm
溝深さ	4.5 mm	溝深さ	4.5 mm
フィン段数	4 段	リード長	50 mm
フィン条数	12 条	フライト刃幅	5 mm
フィン長さ	10 mm		
トービード長さ	12 mm		

本研究では、マトリックス樹脂には低密度ポリエチレン (LDPE: Sumitomo Chemical Co., Ltd., F200 MFR=2g/10min) を用いた。ドメイン樹脂には、事前に前記 LDPE に 2.5wt% の赤色顔料 (Dainichiseika Color & Chemicals Mfg Co., Ltd., Chromofine Red 6830) を複合化したマスターバッチ (M/B) を利用した。

図3に本研究で利用した実験装置を示す。この実験装置では3台の押出機を利用しており、評価対象スクリュを挿入したφ50mm単軸押出機 (P50-15P) の上流に、LDPEの可塑化用押出機である二軸押出機 (TEX30 α-59.5PW) を、M/Bの可塑化用押出機であるφ35mm単軸押出機 (Tahara Machinery Ltd., TSE35 L/D=26) をそれぞれ連結した。評価対象スクリュの上流に相当するφ50mm単軸押出機バレルの側面にLDPEおよびM/Bの供給口を設け、評価対象スクリュの流入面でせん断作用の低いスクリュ表面側にM/B、せん断作用の高いバレル表面側にLDPEをそれぞれ配置した二層構造を形成した(図4)。その後、評価対象スクリュを用いてこの二層構造を混練し、押出機先端のダイスから押出物を得た。押出条件を表2に示す。

### 3. 数値解析

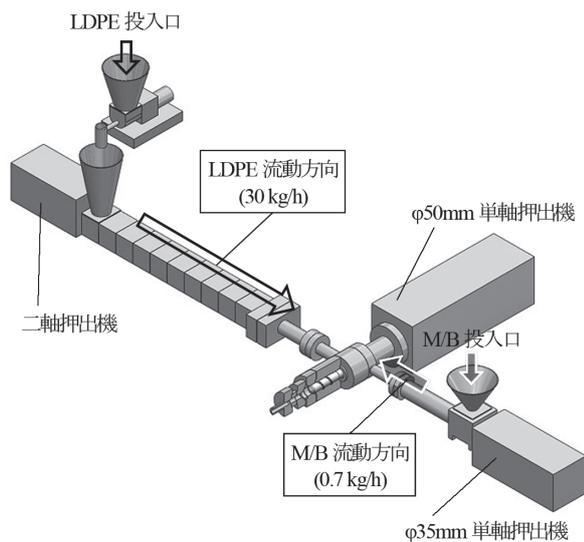


図3 実験装置

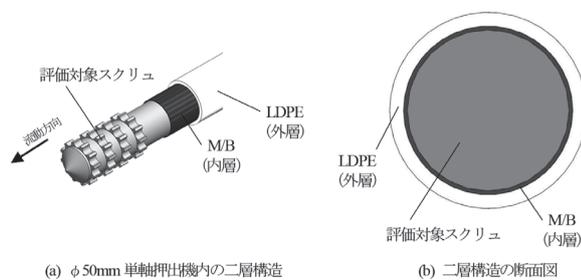


図4 φ 50mm 単軸押出機内で形成される二層構造の構成

表2 性能検証実験の押出条件

押出量	30.7 kg/h
(LDPE)	30 kg/h
(M/B)	0.7 kg/h
スクリュ回転数	40~100 rpm
バレル設定温度	200 °C

DS および FS を用いて混練した後の押出物は流動方向に厚さ 2 mm の薄片に加工し、画像処理用照明 CA-DSW7 (Keyence Co., Ltd.) およびデジタルカメラ D3200 (Nikon Co., Ltd.) を用いて断面観察写真を撮影した。その後、画像解析ソフトウェア PhotoshopCS5 Extended (Adobe Systems Inc.) を用いて断面観察写真をモノクロ化し、各ピクセルの輝度値を計測した。この輝度値の分布幅を利用して、式 (1) から均質度 ( $U$ ) を定義し、DS および FS の分配混合性能を定量評価した<sup>(6)</sup>。

$$U = 1 - \frac{W}{255} \quad (1)$$

ここで、 $W$  は各スクリュ回転数における輝度値の分布幅である。均質度は正規化されており、値が 1 に近づくほど M/B の分布状態が均一であることを意味する。

DS の混練メカニズムを理論評価するため、有限体積法ソフトウェア SCREWFLOW-Multi (R-Flow Co., Ltd.) を用いた数値解析を実施した。DS のスクリュ形状および解析条件は表 3 および表 4 に示す前項の実験と同様のスクリュ形状および押出条件を採用した。M/B を想定した質点粒子を DS の流入面に約 1300 個配置し、各粒子が DS の流出面に到達するまでの流動軌跡を計算した。スクリュ軸方向の任意位置での断面内の座標系を直交座標系から無次元溝深さおよび円周角を両軸とする座標系に変換した。この断面の無次元溝深さおよび円周角をそれぞれ 15、60 分割し、情報エントロピー算出用セルを 900 個設定した (図 5)。その後、これらのセルに粒子が存在する確率を求め、式 (2) を用いて情報エントロピー ( $E$ ) を算出した<sup>(7)</sup>。

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

ここで、 $i$ 、 $M$ 、 $p_i$  はそれぞれスクリュ軸方向の任意の位置における断面内のセル番号、総セル数、 $i$  番目のセルに粒子が存在する確率である。情報エントロピーは正規化されており、最大値 1 はすべてのセルに同じ確率で粒子が存在する、つまり、粒子がセル全体に均一分散する状態を意味する (表 5)。

表3 数値解析に利用した DS の寸法諸元

スクリュ径	50 mm
スクリュ長	150 mm
溝深さ	4.5 mm
フィン段数	4 段
フィン条数	12 条
フィン長さ	10 mm
トーピード長さ	12 mm

表4 解析条件

押出量	30.7 kg/h
スクリュ回転数	40~100 rpm
バレル設定温度	200 °C
流体密度	750 kg/m <sup>3</sup>
流体熱伝導率	0.335 J/m.sec.°C
流体比熱	2800 J/kg.°C

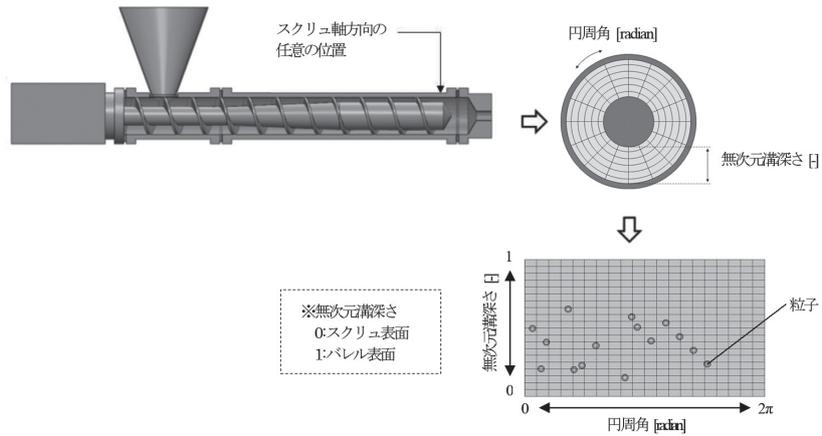


図5 スクリュ軸方向の任意位置での粒子の存在確率の計算方法

表5 粒子分布と情報エントロピーの相関例

	粒子分布	断面展開図
LDPEとM/Bが分離した状態 ( $E=0.69$ ) ※DS 流入面		
LDPE中にM/Bが分散した状態 ( $E=0.93$ )		

#### 4. 結果と考察

表6にDSおよびFSを用いた場合の押出物の断面観察写真を示す。混練スクリュの種類に応じてM/Bの分散度合に差が見られた。本研究ではM/Bはスクリュ表面にのみ配置したが、FS内ではそのM/Bはスクリュ表面からほとんど位置交換されず、押出物の中心付近を流動し

た。一方、DS内ではM/Bの一部がスクリュ表面から位置交換されており、押出物全体にM/Bが分散した。このように、DSはFSに比較して樹脂を位置交換する性能に優れていることが判明した。

表6 DSおよびFSを用いた場合の押出物の断面観察写真

	0 rpm	40 rpm	50 rpm	60 rpm	70 rpm	80 rpm	90 rpm	100 rpm
DS								
FS								

表6に示した押出物の断面観察写真から求めた均質度を図6に示す。FSを用いた場合、均質度はスクリュ回転数に依存せずにはほぼ一定の値を示したのに対し、DSを用いた場合、均質度はスクリュ回転数によって変動する傾向が見られた。そのため、DSの分配混合性能はFSの分配混合性能の1.2～1.6倍と分布を有していることが判明した。

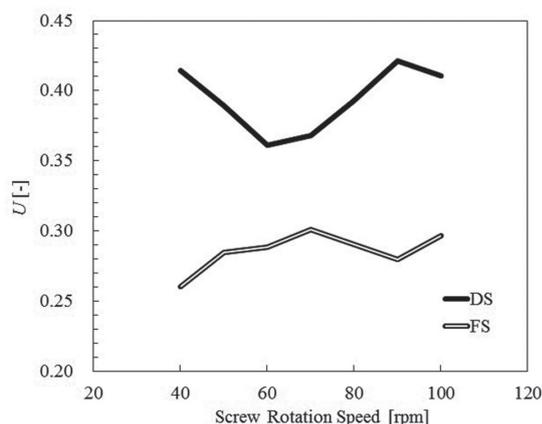


図6 DSおよびFSを用いた場合の均質度の比較

DSの混練メカニズムを詳細に調査するため、DSを対象とした数値解析を実施した。結果を図7に示す。情報エントロピーは、スクリュ回転数の増加に応じて周期的に変動する傾向が見られた。情報エントロピーの変動は、45 rpm以下のスクリュ回転数を除けば、図6で示した均質度の変動と類似している。そのため、数値解析の粒子分布から計算した情報エントロピーを用いることで、押出機を用いた性能検証実験から評価される分配混合性能を予測できるものと判断した。

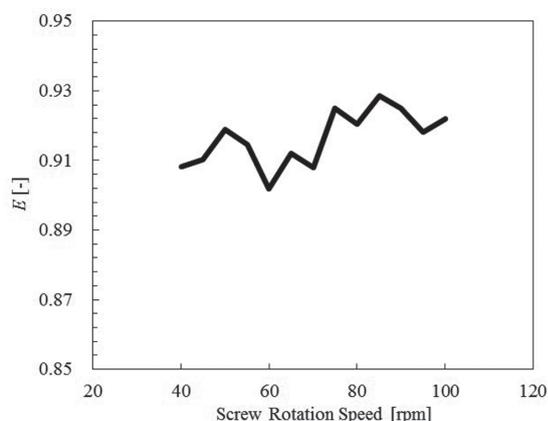


図7 スクリュ回転数を変更した場合のDS流出面における情報エントロピー

図7で極小値を示した60 rpmおよび極大値を示した85 rpmを例に挙げ、スクリュ軸方向における情報エント

ロピーの変動を流動解析した。結果を図8に示す。60 rpmでは、フィン部およびトーピード部を通過するにつれて緩やかに情報エントロピーが増加した。一方、85 rpmでは、1段目フィン部内および1段目トーピード部内で情報エントロピーが急増し、2段目フィン部以降は60 rpmと同様に緩やかに情報エントロピーが増加した。この結果から、60 rpmと85 rpmの間の分配混合性能の差は、1段目フィン部内および1段目トーピード部内でのM/Bの流動様式の違いが影響していると推測される。

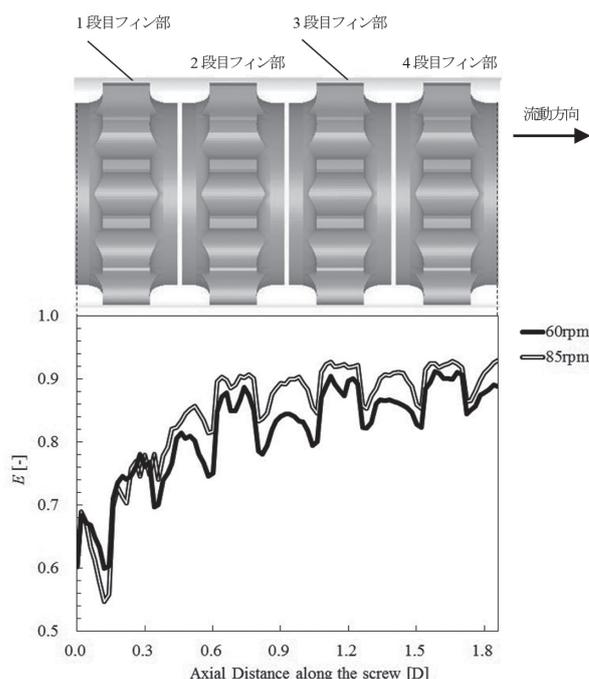


図8 スクリュ軸方向におけるDS内での情報エントロピー (60 rpm および 85 rpm)

図9に流動解析による60 rpmおよび85 rpmに設定した場合のDS内における粒子の流動様式を示す。なお、図9で示す流跡線はDS流入面の同じ位置に同じ数の粒子を配置した際に得られたものである。60 rpmでは、1段目フィン部内をすべての粒子が類似した流跡線で流動し、2段目フィン部でも同じ溝内に進入した。一方、85 rpmでは、1段目フィン部内で粒子がそれぞれ異なる流跡線で流動しており、2段目フィン部では複数の溝に分流されていた。このように、フィン部内でのM/Bの流動様式がそれ以降のM/Bの流跡線に分流・合流の発生頻度に影響していることが判明した。

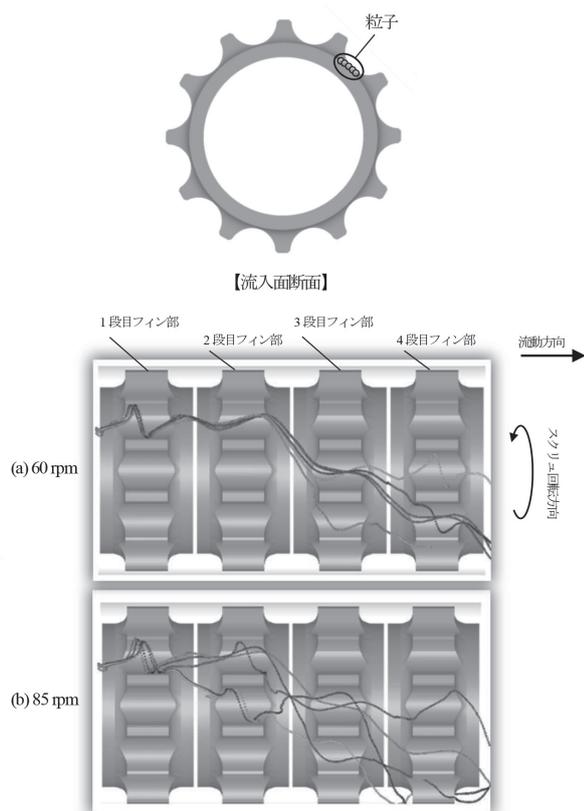


図9 DS内でのM/Bの流動様式 (60 rpm および 85 rpm)

60 rpm および 85 rpm における1段目フィン部内の粒子分布を表7に示す。なお、表中の図は1段目フィン部内の12条の溝の中の1条分の粒子分布を抽出したものである。双方の結果ともにフィン部内で粒子が旋回し、粒子が存在する溝深さが絶えず変化した。また、85 rpm は 60 rpm に比べてフィン部内で粒子が回転する速度が高いため、流出面では 60 rpm に比べて広範囲に粒子が分布した。

1段目フィン部流出面で粒子が存在する無次元溝深さの分布を図10に示す。60 rpm および 85 rpm ともに、バレル表面付近とスクリュ表面付近に粒子が多数分布した。しかしながら、60 rpm では無次元溝深さが0.3の1箇所集中したのに対して、85 rpm では無次元溝深さが0.20 ~ 0.25 および 0.30 ~ 0.35 の2箇所に粒子が分布した。トーピード部内で樹脂が流動する際、円周方向の流速はスクリュ回転による推進流の影響を強く受ける。そのため、フィン部流出面で異なる溝深さにM/Bが分布すると、バレル表面に近いM/Bほど流速が高くなる流速分布が形成される。このような流速分布を有するM/Bが直後のトーピード部内を流動すると、各M/Bの円周方向の移動距離に差が生じ、次のフィン部流入面にて分流および合流が発生しやすくなるものと推測される。

表7 1段目フィン部内での粒子の分布状態の推移 (60 rpm および 85 rpm)

	流入面	流入面から4mm	流出面
60 rpm			
85 rpm			

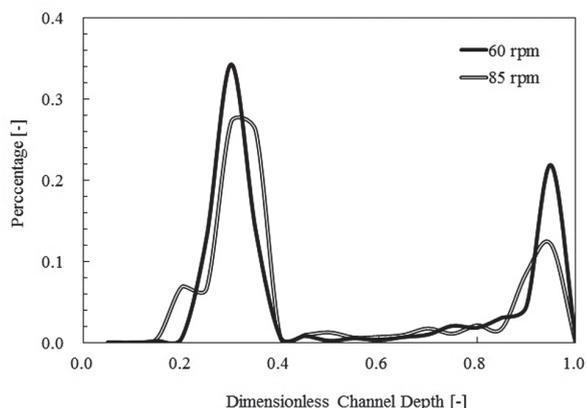


図10 1段目フィン部流出面における粒子分布の比較 (60 rpm および 85 rpm)

以上の結果から、スクリュ回転数に応じたDSの分配混合性能の変動は、スクリュ回転数によってフィン部内での旋回流動が変化し、M/Bの位置交換の程度が異なるために生じていることが明らかになった。フィン部流出面でM/Bを半径方向に分布させることによって分流・合流が発生する頻度が増加し、M/Bの流跡線が多様化・複雑化するために分配混合性能の向上が期待される。特に、高い分配混合性能を示した85 rpmでは、1段目フィン部から上記のような混練作用が発生したため、M/Bの流跡線の多様化・複雑化がより一層進行したものと推測される。

## 5. 結 言

DSの分配混合性能を実験的に評価するとともに、数値解析を用いてDSの混練メカニズムについて調査した。DSはFSに比べて高い分配混合性能を有していたが、その性能はスクリュ回転数によって変動した。この変動は、フィン部内でのM/Bの旋回流動によってM/Bの位置交換の程度が異なり、フィン部流出面でのM/Bの分布形態の変化により生じていた。今後は、フィン部流出面でのM/Bの分布形態を制御するDSの設計指針を構築し、DSの分配混合性能を最大限活用していくことで単軸混練技術の高度化を図っていく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) RAUWENDAAL, Chris. Polymer extrusion. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014.
- (2) 富山秀樹, スクリュ・ダイを中心とした押出成形機のデザインと成形加工事例, 情報機構, p.137-202 (2009)
- (3) YAO, W. G., et al. Mixing efficiency in a pin mixing section for single - screw extruders. Polymer Engineering & Science, 2001, 41.6: 908-917.
- (4) HWANG, W. R.; KANG, K. W.; KWON, T. H. Dynamical systems in pin mixers of single - screw extruders. AIChE journal, 2004, 50.7: 1372-1385.
- (5) DULMAGE, Frederick E. Plastics mixing and extrusion machines. U.S. Patent No 2,753,595, 1956.
- (6) KIMURA, Koichi; ITAMOCHI, Yusuke; TOMIYAMA, Hideki. The Evaluation of Mixing Characteristics of Dulmage Screw. In: Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2013. p. 769-772.
- (7) ALEMASKIN, Kirill; MANAS - ZLOCZOWER, Ica; KAUFMAN, Miron. Color mixing in the metering zone of a single screw extruder: numerical simulations and experimental validation. Polymer Engineering & Science, 2005, 45.7: 1011-1020.