

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

単軸押出機のフィン型混練スクリュのひとつであるダルメージスクリュ(DS)の分配混合性能を実験と数値解析の両面から評価し、その分配混合メカニズムについて検討した。DSの分配混合性能は基本的にはスクリュ回転数に比例して向上したが、一部の押出条件ではその分配混合性能が低下した。フィン部内では、溝内で発生した循環流によって顔料の分布状態が周期的に変化しており、その度合は押出条件に依存した。一方、トーピード部では、バレル表面に牽引される流れの影響のため、円周方向流速が半径方向に分布を有しており、フィン部出口での粒子の分布状態によって顔料の移動距離に差が生じた。そしてこの差によって次段のフィン部入口での顔料の分布状態の分割の有無が変化した。特に、フィン部出口でフライト表面に顔料が多く分布した場合、DSの分配混合性能が向上する傾向が見られた。以上の結果より、フィン部出口で半径方向へ分布する顔料の多寡がDSの分配混合性能の変動に寄与していることが判明した。

— Synopsis —

In this study, the distributive mixing performance of Dulmage screw (DS), which is a type of fin mixing screw for a single screw extruder, was evaluated experimentally and numerically and the distributive mixing mechanism was investigated. The performance of DS increased basically with increase of the screw rotation speed, but the performance decreased under the certain extrusion conditions. In the fin section, the positions of pigment changed by the circulation flow inside the fin groove and the degree of the change depended on the screw rotation speed. On the other hand, in the torpedo section, the flow velocity of pigment in the circumferential direction showed distribution in the radial direction. Thus, the distances moved by each pigment in the torpedo section were different. Moreover, the size of these differences determined whether or not splits occurred in the distribution of pigment on the fin inflow surface in the next stage. Especially, the DS distributive mixing performance tended to increase when a lot of pigment was distributed on the flight surface. From these results, it became clear that the performance depends on the amount of pigment that is distributed in the radial direction on the fin outlet surface.

1. 緒 言

押出機は樹脂の搬送、溶融、計量、混練の4つの機能を1台で担う、樹脂の連続加工プロセスに必要不可欠な産業機械である。特に、これらの基本機能に加え、昇圧能力・計量安定性に優れた単軸押出機は、狭小クリアランスのTダイから溶融樹脂をシート状に押し出すフィル

ム・シート成形には最適な装置であり、これまでに多くの採用実績を有している。単軸押出機の一般的なスクリュは、固体樹脂を搬送する供給部、固体樹脂を溶融させる圧縮部、溶融樹脂を計量する計量部から構成されるが、計量部内では溶融樹脂の流速に分布が生じており、特にスクリュ表面付近を流動する溶融樹脂の流速は極めて低い。この影響のため、スクリュ表面付近では樹脂が滞留

*: 広島製作所 技術開発部
Technical Development Department, Hiroshima Plant**: 九州大学
Kyushu University

しやすく、バレルから熱エネルギーを長時間にわたって受け続けるため、分子鎖の切断や架橋反応によって樹脂が変質する可能性がある。変質樹脂が熔融樹脂中に混入すると、フィルム・シート成形時に外観不良や物性低下の原因となり得る。そのため、単軸押出機では計量部内に混練スクリュを配置し、熔融樹脂を均質化する分配混合を促進することでスクリュ表面上での樹脂の滞留を抑制している。

単軸押出機の分配混合性能を強化するため、これまでにピン型スクリュ、パイナップル型スクリュ、フィン型スクリュなどの混練スクリュが開発されてきた(図1)^{(1) - (3)}。これらの混練スクリュはいずれもピンもしくはフライトによって円周方向内で熔融樹脂を分流・合流することを狙ったものであり、ピン型スクリュ、パイナップル型スクリュに関してはスクリュ形状とその性能の相関を調査する研究が多数報告されている^{(4) - (7)}。その中でも、W.G.Yao^{(8), (9)}はピン型スクリュの半径方向の樹脂の移動に注目し、ピン内に半径方向に貫通孔を設けることでピン型スクリュの分配混合性能を改善したと報告している。このように、単軸押出機の分配混合性能において、円周方向の分流・合流だけでなく、半径方向の樹脂の移動促進が重要であることが判明している。

一方、フィン型スクリュは、その分配混合性能を系統的に調査した研究報告^{(10), (11)}が少ないが、当社はフィン型スクリュが樹脂の滞留に対して高い抑制効果を有することを確認しており、フィルム・シート用単軸押出機に多用している。本研究では、フィン型スクリュの分配混合性能の調査を通じて、混練スクリュ全般に共通する分配混合メカニズムを解明することを目的とした。フィン型スクリュの一種であるダルメージスクリュ(DS)^{(12), (13)}の分配混合性能の評価およびDS内で発生する流動様式を考察した。

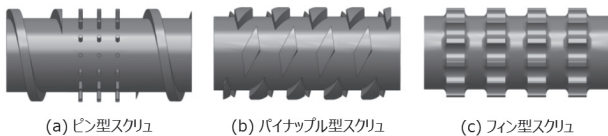


図1 単軸押出機用混練スクリュ

2. ダルメージスクリュ(DS)

図2および表1に本研究で対象としたDSの外観および代表的な寸法諸元を示す。DSの形状には、スクリュ軸に平行なフライトを有する多条フィン部(断面A)とトーピード部(断面B)を交互に4段配置した形状を採用した。

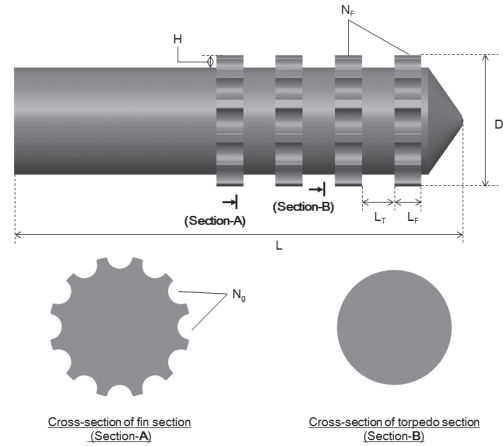


図2 ダルメージスクリュ

表1 ダルメージスクリュの寸法諸元

Dimension	Symbol	Value
Diameter	D	50 mm
Length	L	150 mm
Channel depth	H	4.5 mm
Number of fin section	N_F	4 parts
Number of grooves in fin section	N_G	12 grooves
Length of fin section	L_F	10 mm
Length of torpedo section	L_T	12 mm

3. ダルメージスクリュ(DS)の分配混合メカニズムの解明

3.1 顔料分散実験

DSの分配混合性能を定量的に把握するため、樹脂と顔料含有マスターバッチ(MB)をDSによって混練し、押出物断面内での顔料の分布状態を評価した。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には前記LDPEと2.5wt%の赤色顔料(Dainichiseika Color & Chemicals Mfg Co., Ltd., Chromofine Red 6830)のコンパウンド材を利用した。図3に実験装置を示す。DSの分配混合性能を厳密に評価するためには、LDPEおよび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することが重要である^{(14), (15)}。そのため、LDPEの可塑化用押出機である二軸押出機(The Japan Steel Works, Ltd., TEX30 $L/D=59.5$)と、MBの可塑化用押出機である $\phi 35$ mm単軸押出機(Tahara Machinery Ltd., TSE35 $L/D=26$)とを、DSを挿入した $\phi 50$ mm単軸押出機(The Japan Steel Works, Ltd., P50 $L/D=15$)の上流に連結した。図4に $\phi 50$ mm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およびMBの供給口を設け、スクリュ表面に

MB を、その外表面に LDPE を配置した二層構造を形成した (断面 C)。その後、DS によってこの二層構造を混練し、押出機先端のダイから押出物を 10 個採取した。押出条件を表 2 に示す。

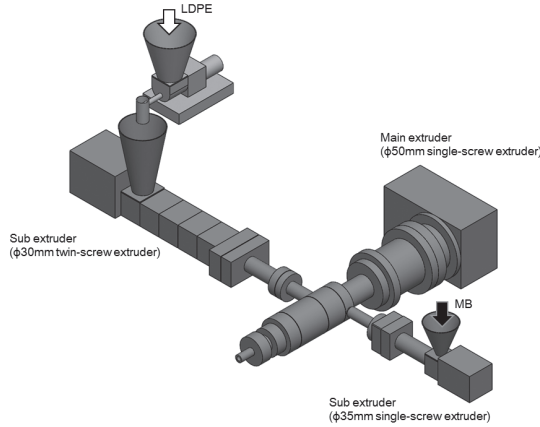


図 3 顔料分散実験に用いた実験装置

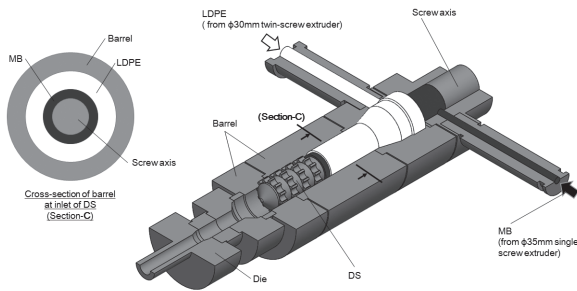


図 4 φ 50mm 単軸押出機の内部構造

表 2 顔料分散実験の押出条件

Condition	Value
Throughput (LDPE) (MB)	30.7 kg/h (30 kg/h) (0.7 kg/h)
Screw rotation speed	40~100 rpm (by 10 rpm)
Barrel temperature	200 °C

DS によって混練した押出物は流動方向に厚さ 2mm の薄片に加工し、画像処理用照明 (Keyence Co., Ltd., CADSW7) およびデジタルカメラ (Nikon Co., Ltd., D3200) を用いて断面観察写真を撮影した。その後、画像処理ソフトウェア (Adobe Systems Inc., Photoshop CS5 Extended) 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。輝度値およびその平均値を利用して式 (1) から変動係数 (Coefficient of Variation: CoV) を計算し、DS によって混練した押出物断面内での濃淡分布を評価した。

$$CoV = \frac{\sigma}{C_{mean}} \quad \dots (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{pixel}} (C_i - C_{mean})^2}{N_{pixel}}} \quad \dots (2)$$

(36)

ここで、 N_{pixel} は断面観察写真の総ピクセル数、 C_i は i 番目ピクセルの輝度値であり、 C_{mean} および σ はそれぞれ押出物断面全体での輝度値の平均値および標準偏差である。式 (1) の分子である標準偏差は、顔料と LDPE が分離した場合に最大値となり、顔料が LDPE 中に完全に均一分散した場合に 0 となる。これは、顔料が LDPE 中に完全に均一分散した場合、押出物は単一色になると想定されるためである。そのため、 CoV は値が小さいほど顔料が均一分散することを意味している。

採取した 10 個の押出物は式 (1) から CoV を算出した後、 CoV が最小値および最大値を示した押出物を除外し、残りの 8 個の押出物について CoV を平均化した。

3.2 三次元流動解析

DS 内で発生する分配混合メカニズムを解明するため、有限体積法流動解析ソフトウェア (R-Flow Co., Ltd., SCREWFLOW-Multi) を用いた三次元流動解析を実施した。図 5 は三次元流動解析に用いた DS の形状であり、顔料分散実験と同じ LDPE の物性値を利用し、純粘性非ニュートン流体の非圧縮性流れと仮定した。また LDPE は高粘性流体のため慣性力を無視したストークス近似とした。そのため、連続の式および運動方程式、エネルギー方程式には式 (3) および式 (4)、式 (5) をそれぞれ利用した。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad \dots (3)$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad \dots (4)$$

$$\rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v} \quad \dots (5)$$

\mathbf{v} は速度ベクトル、 p は等方性圧力、 $\boldsymbol{\tau}$ は異方性応力テンソル、 T は温度であり、 ρ および C_p 、 k はそれぞれ熔融状態の LDPE の密度および定圧比熱、熱伝導率である。

また、LDPE の熔融粘度は Cross モデルを用いて表現した。構成方程式には式 (6) および式 (7) を利用し、熔融粘度の温度依存性には式 (8) で記述される Arrhenius 式を利用した⁽¹⁶⁾。

$$\boldsymbol{\tau} = 2\eta \mathbf{D} \quad \dots (6)$$

$$\eta = \frac{\eta_0 \alpha_T}{1 + (\lambda_c \dot{\gamma} \alpha_T)^{1-n}} \quad \dots (7)$$

$$\alpha_T = \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \quad \dots (8)$$

ここで、 \mathbf{D} は変形速度テンソル、 η_0 はゼロせん断粘度、 T_r は参照温度であり、 λ_c および n は Cross モデルパラメータ、 β は Arrhenius 式パラメータである。計算時に設定した LDPE の物性値を表 3 に、境界条件を表 4 に示す。

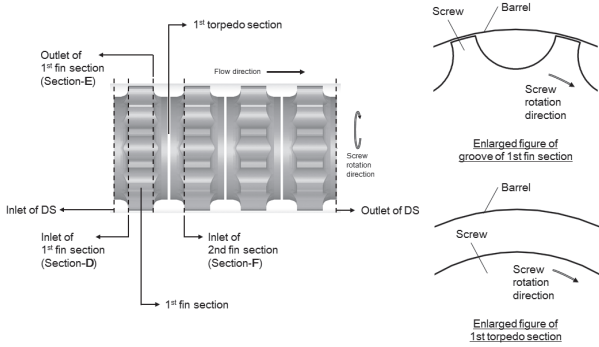


図5 三次元流動解析に用いたDSの形状

表3 三次元流動解析で用いたLDPEの物性値

Condition	Symbol	Value
Density	ρ	750 kg/m ³
Thermal conductivity	k	0.335 J/m.sec.°C
Specific heat	C_p	2800 J/kg.°C
Cross model parameter	λ_c	2.01
Cross model parameter	n	0.33
Zero shear rate viscosity	η_0	37819.5 Pa.sec
Arrhenius's law parameter	β	0.33 1/°C
Reference temperature	T_r	150 °C

表4 三次元流動解析で設定した境界条件

Condition	Flow analysis	Heat analysis
Inlet	Constant flow rate (30.7 kg/h)	Constant temperature (200 °C)
Barrel surface	No slip wall	Constant temperature (200 °C)
Screw surface	Tangential velocity (5~100 rpm by 5 rpm)	Adiabatic
Outlet	Out flow	Adiabatic

定常解析によってDS内の速度場を利用した後、DS流入面のスクリュ最表面（φ41.0mm～φ41.2mmの領域）に顔料を模擬した1800個の粒子を円周方向および半径方向にそれぞれ360個および5個等配し、これらの粒子がDS流出面に到達するまで非定常解析（3.0度回転/ステップ）を実施した。

顔料分散実験の検証には、粒子がDS流出面を通過した際の粒子座標から算出した均質度（Color Uniformity: U ）を利用した。DS流出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、両軸をそれぞれ15分割および72分割して1080個のセルを設定した。その後、DS流出面で各セル内を通過した粒子数から式(9)を用いてセル毎の粒子通過確率 p_i を算出し、式(10)を用いて U を算出した^{(17)~(19)}。

$$p_i = \frac{N_i}{N_{particle}} \quad \dots (9)$$

$$U = -\frac{\sum_{i=1}^M p_i \ln p_i}{\ln M} \quad \dots (10)$$

ここで、 i 、 M 、 N_i 、 $N_{particle}$ はそれぞれDS流出面内に設定したセルのセル番号、総セル数、 i 番目のセル内を通過した粒子数、DS流入面に配置した粒子数である。式(10)中の分子および分母は情報エントロピーであり、DS流出面内での粒子の分布状態の一様性の尺度と解釈される。情報エントロピーは、1つのセルに粒子が集中した場合は0を、全てのセルに粒子が同じ確率で分布した場合は最大値を示す。式(10)の分母は後者を意味するため、 U は正規化され、1に近づくほど粒子が均一分布することを意味している。

DS内での粒子の流動様式の調査では、1段目フィン部内および1段目トーピード部内の任意断面を粒子が通過した際の粒子座標から粒子の分布状態を作成し、利用した。本研究で用いたDSは4段存在するフィン部およびトーピード部がそれぞれ同形状であり、各フィン部内および各トーピード部内で発生する速度場は同様であることが予想される。ただし、2段目以降のフィン部入口では粒子の分布状態がスクリュ回転数によって大きく異なるため、そのフィン部内での粒子の分布状態の変化や流動様式をスクリュ回転数毎に比較することが困難であった。そのため、本研究ではフィン部入口での粒子の分布状態の差が比較的小さい1段目フィン部を、またその直後に位置する1段目トーピード部をDSのフィン部およびトーピード部の代表として取り扱った。

フィン部溝内での粒子の位置変化の度合の評価では、フィン部溝内で粒子が円周方向へ移動する距離から式(11)を用いてフィン部溝内での粒子の循環回数 N_c を計算した。

$$N_c = \frac{L_{particle}}{L_{fin}} \quad \dots (11)$$

ここで、 $L_{particle}$ はフィン部溝内で粒子が円周方向へ移動する距離、 L_{fin} はフィン部溝の周長である。 $L_{particle}$ はフィン部溝内での粒子の滞留時間とスクリュ回転数に依存した値である。また N_c が整数倍のときはフィン部流入面とフィン部流出面で同じ領域に粒子が分布していることを意味するため、粒子の分布状態の変化の度合は0であると解釈される。

顔料分散実験の検証やDS内での粒子の流動様式の調査ではスクリュ軸方向流速の影響は基本的に無視している。これは、顔料分散実験では、顔料を定量供給したため、任意のスクリュ断面内や押出物断面内での顔料濃度は時間に依らず、一定であり、特に任意のスクリュ断面内での顔料の分布状態はスクリュ軸方向流速（滞留時間）よりも任意スクリュ断面内で顔料がどの領域を通過しているか、つまり断面内で発生する流動様式の方が大きな影響を及ぼしていると判断したためである。

4. 結果および考察

4.1 顔料分散実験結果

表5にDSによって混練した押出物の断面観察写真を示す。スクリュ静止状態では顔料は押出物中心付近に密集したが、スクリュ静止状態からスクリュ回転状態への移行過程で顔料の分布状態が大きく変化し、スクリュ回転状態では顔料は押出物全体へ分散した。ただし、この断面観察のみの評価では、顔料の分散状態とスクリュ回転数の間に明確な相関関係を見出すことはできなかった。

表5に示した押出物の断面観察写真をもとに式(1)から求めた $1 - CoV$ を図6に示す。図6~8では、いずれもプロットは実験値もしくは計算値を、実線は最小二乗法によって求めた直線もしくは多項式曲線を表す。 $1 - CoV$ は、全体的にはスクリュ回転数に比例して単調増加する傾向が見られた。本研究では押出量を一定としたため、全ての押出条件でDS内での滞留時間はほぼ同等である。そのため、この結果はスクリュ回転数が増加したことで溶融樹脂に加わる歪み量が増加したことに起因していると推測される。一方、60rpmなどの一部のスクリュ回転数ではスクリュ回転数に対する $1 - CoV$ の増加率が変動した。この変動の原因としては、LDPEの供給に利用した重量式フィーダの供給不安定性に基づく押出量変動などの実験的誤差が予想されるが、この結果のみではその原因を明確にすることはできなかった。

4.2 三次元流動解析結果

顔料分散実験の検証のため、DS流出面での粒子座標をもとに式(10)から求めた U を図7に示す。 U はスクリュ回転数の増加に伴い、非単調に振動的に増加する傾向が見られた。三次元流動解析では押出量変動などの実験的誤差が発生し得ないため、DSの分配混合性能はスクリュ回転数によって変動する特性を有しており、この特性のために図6の $1 - CoV$ の増加率が一部のスクリュ回転数で変動していたことが判明した。

DSの分配混合性能の変動の原因を調査するため、フィン部内での流動様式を評価した。ここでは図7で25rpmと65rpmを例に挙げ、1段目フィン部内および1段目トービード部内での各粒子の分布状態を調査した。

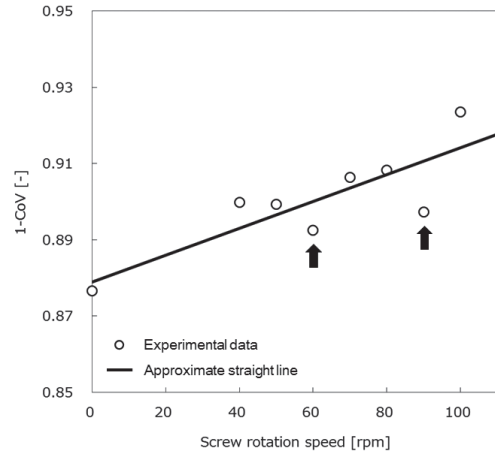


図6 スクリュ回転数と $1 - CoV$ の相関

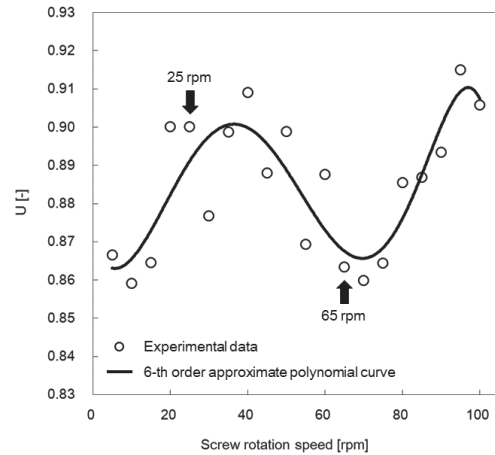


図7 スクリュ回転数と U の相関

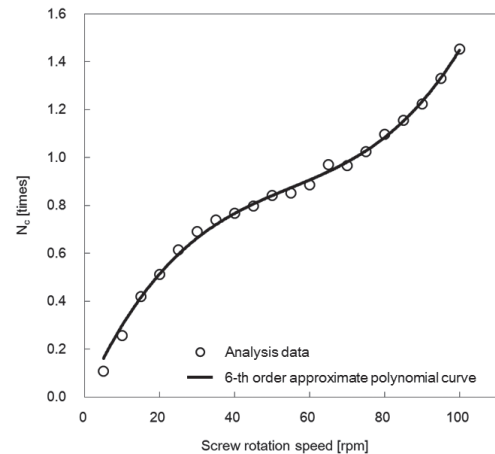


図8 1段目フィン部内での粒子の循環回数とスクリュ回転数の相関

表5 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

表6に1段目フィン部内での各粒子の分布状態の推移を示す。25rpm および 65rpm ともに、1段目フィン部入口(断面D)でスクリュ表面に存在した粒子がフィン部溝の内壁およびバレル表面上に沿って循環する挙動が確認された。この循環流の影響のため、図8に示すように、スクリュ回転数の増加につれて N_c が増加しており、フィン部溝内では粒子が分布する領域が絶えず変化していることが確認された。

図9に25rpmの場合の断面Dでの円周方向流速ベクトルを示す。フィン部溝内では、スクリュ表面やバレル表面に循環流に寄与する流線が見られたが、この他にも循環流に寄与する流線がフィン部溝中心の周囲に同心円状に複数見られた。ここで見られた流速ベクトルや流線は1段目フィン

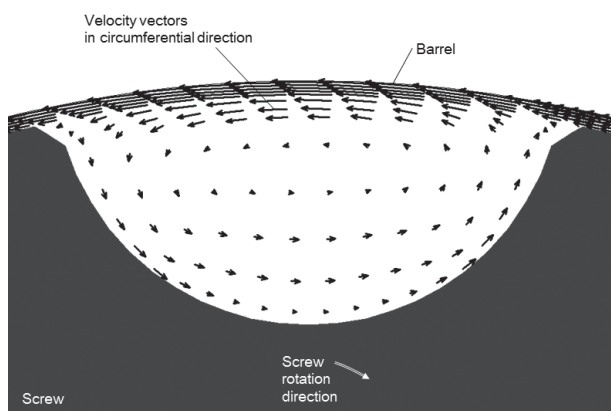


図9 1段目フィン部内における流速ベクトルの分布

部内のいずれのスクリュ断面でも同様であった。表6の結果では、粒子が1段目フィン部内のいずれのスクリュ断面でも、粒子はスクリュ表面やバレル表面を循環する流線上に存在しており、内側を循環する流線上に移動することはなかった。このように、フィン部内では、粒子がスクリュ軸方向へ移動する前後で、異なる領域を循環する流線上に粒子を位置変更するような流動様式は発生しない。スクリュ回転数を変更してもこの状態は変化しないため、フィン部毎に異なる領域を循環する流線上に粒子を位置変更することが、DSの分配混合性能向上にとって重要であると推測される。

表7に1段目トーピード部入口での各粒子の分布状態の推移を示す。65rpmの場合、断面Eではスクリュ表面に分布した粒子が、密集したままトーピード部内を移動し、断面Fでもスクリュ表面に分布した。一方、25rpmの場合、断面Eでは反スクリュ回転側のフライト表面に粒子が多く分布したが、これらの粒子がトーピード部内を移動する距離に差が発生し、断面Fでは複数の領域に分かれて粒子が分布した。トーピード部内では図10に示すように、バレル表面に牽引される流れが支配的であり、各粒子の円周方向流速は溝深さに依存した。この影響のため、半径方向に粒子が分布した25rpmでは、各粒子が異なる流速を有し、トーピード部内での粒子の移動距離に差が生じたものと推測される。

表6 1段目フィン部内での粒子の分布状態の推移

	0 mm (Section-D)	2.5 mm	5 mm	7.5 mm	10 mm (Section-E)
25 rpm					
65 rpm					

表7 1段目トーピード部内での粒子の分布状態の推移

	0 mm (Section-E)	3 mm	6 mm	9 mm	12 mm (Section-F)
25 rpm					
65 rpm					

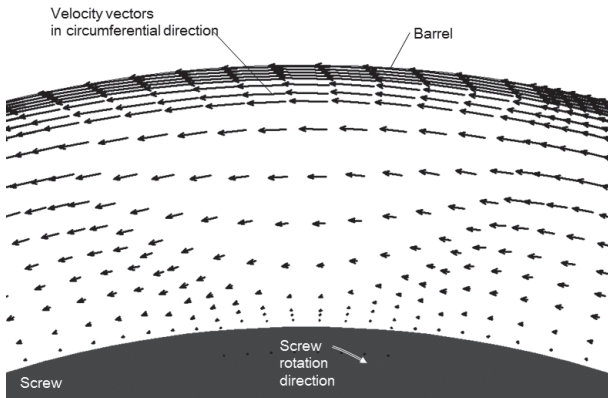


図10 1段目トーピード部内における流速ベクトルの分布

フィン部出口での粒子の分布状態と粒子の流動様式の相関を調査するため、断面Eでスクリュ表面・バレル表面・フライト表面に粒子をそれぞれ配置し、DS内での流跡線を調査した。その結果を表8に示す。

スクリュ表面およびバレル表面に粒子をそれぞれ配置した場合、ほとんどの粒子が塊となって1段目トーピード部内を移動し、DS流出面に各粒子が到達してもこれらの流跡線が完全に独立・分離することはなかった。一方、フライト表面に粒子を配置した場合、1段目トーピード部内で各

粒子の流跡線の一部が既に分離しており、DS流出面に各粒子が到達した頃には各粒子の流跡線は多様な経路を示していた。このように、フィン部出口で粒子を半径方向に分布させることは、その後の粒子の流動様式を複雑化することができるため、DSの分配混合性能に寄与していると推測される。

スクリュ回転数とフィン部出口での粒子の分布状態の相関を検証するため、断面Eでの粒子の分布状態を調査した。結果を表9に示す。この表では、フィン部溝内を3つの領域に分割して取り扱っており、無次元溝深さが0.0～0.2の領域をスクリュ表面、0.8～1.0をバレル表面、そしてその他の領域をフライト表面とした。各領域に存在する粒子数はスクリュ回転数に対して周期的に増減しており、押出条件(押出量・スクリュ回転数)を変更することでフィン部溝内での粒子の分布状態を操作可能であることが再確認された。

また、フライト表面に存在する粒子数と図7におけるUの変動傾向が同期していることが確認できたことから、フィン部出口で半径方向に分布する粒子の多寡がDSの分配混合性能の変動に寄与していることが判明した。

表8 1段目フィン部出口(断面E)での粒子の分布状態と流跡線の相関

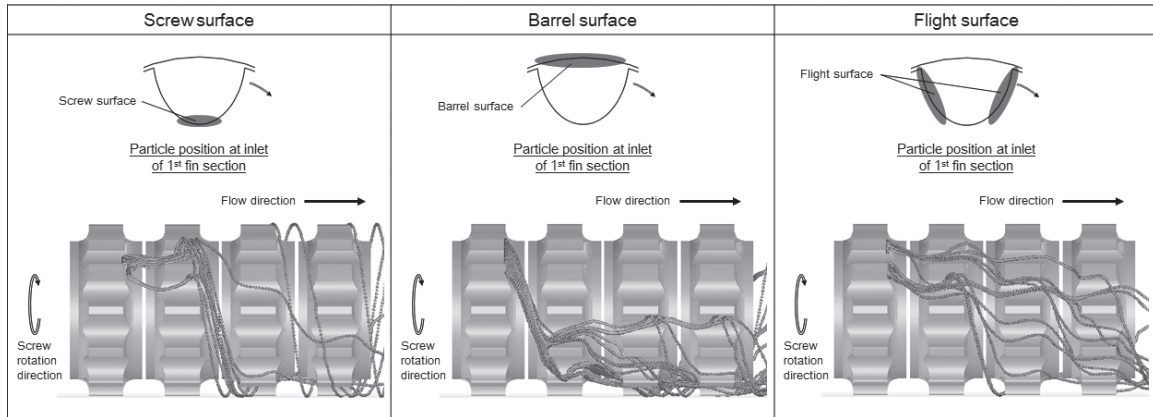
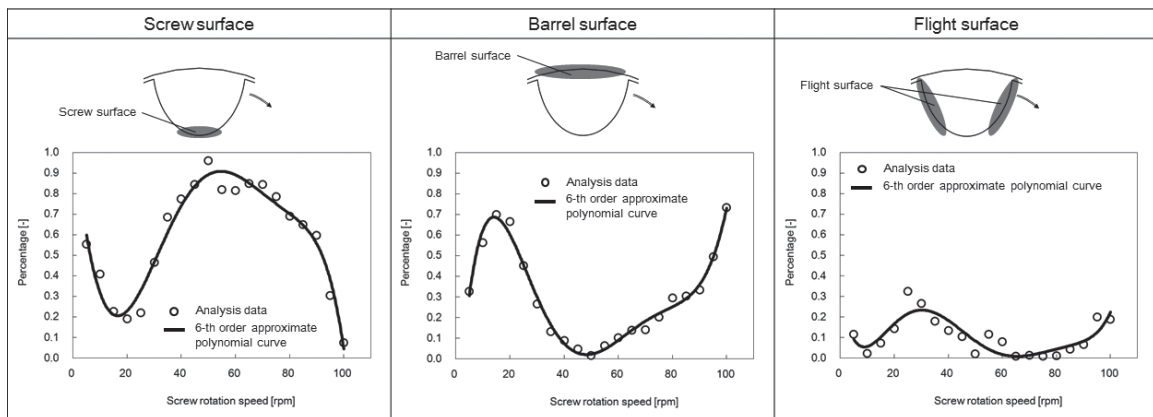


表9 1段目フィン部出口(断面E)における粒子の存在領域の推移



5. 結 言

顔料分散実験および三次元流動解析の両面から DS の分配混合性能を評価し、また DS 内で発生する流動様式を理論的に考察することで、DS の分配混合メカニズムを検討した。以下にまとめを示す。

- (1) DS の分配混合性能は押出条件 (押出量・スクリュ回転数) によって変化した。
- (2) フィン部内ではフィン部溝の内壁およびバレル表面に沿って顔料が循環しており、顔料の分布状態が絶えず変化していた。また、その変化の度合は、フィン部溝内での滞留時間とスクリュ回転数に依存していた。
- (3) トーピード部内では溝深さによって円周方向流速が異なるため、フィン部出口でフライト表面に存在した顔料はトーピード部内での移動距離に差が生じた。この移動距離の差が次段のフィン部入口で顔料の分布状態の分割の有無が変化した。
- (4) フィン部出口で半径方向へ顔料を再配置し、トーピード部内にて顔料の分布状態を効率的に分割することで DS の分配混合性能を向上させることが可能であった。

参 考 文 献

- (1) Manas-Zloczower, I.: *Mixing and compounding of polymers: theory and practice*, Carl Hanser Verlag, 252-329 (2012)
- (2) Rauwendaal, C.: *Polymer extrusion*, Carl Hanser Verlag, 491-525 (2014)
- (3) Epple, S., Gruenschloss, E. and Bonten, C.: *Kunststoffe International*, 102 (4), 33-36 (2012)
- (4) Yao, W. G., Tanifuji, S., Takahashi, K. and Koyama, K.: *Polym. Eng. Sci.*, 41 (6), 908-916 (2001)
- (5) Rios, A. C., Gramann, P. J., Osswald, T. A., Noriega, M. d. P. and Estrada, O. A.: *SPE Antec Tech. Papers.*, 262-266 (1998)
- (6) Rios, A. C., Gramann, P. J., Stanfield, W. and Osswald, T. A.: *SPE Antec Tech. Papers.*, 222-226 (1998)
- (7) Rios, A. C., Osswald, T. A., Noriega, M. d. P. and Estrada, O. A.: *Intern. Polym. Proc.*, 15 (1), 12-19 (2000)
- (8) Yao, W. G., Takahashi, K., Koyama, K. and Dai, G. C.: *Polym. Eng. Sci.*, 37 (3), 615-622 (1997)
- (9) Yao, W. G., Takahashi, K., Koyama, K. and Yamashita, Y.: *Polym. Eng. Sci.*, 38 (10), 1623-1632 (1998)
- (10) Wang, Y., and Tsay, C. C.: *Polym. Eng. Sci.*, 36 (5), 643-650 (1996)
- (11) Erb, T., Celik, O., and Bonten, C.: *AIP. Conf. Proc.*, 1779 (1), 05001 (2016)
- (12) Dulmage, F. E.: *U.S. Patent*, 2, 453, 088 (1945)
- (13) Dulmage, F. E.: *U.S. Patent*, 2, 607, 077 (1952)
- (14) Gale, M.: *Adv. Polym. Tech.*, 16 (4), 251-262 (1997)
- (15) Essegheir, M., Gogos, C. G., Yu, D. W., Todd, D. B. and David, B.: *Adv. Polym. Tech.*, 17 (1), 1-17 (1998)
- (16) Kajiwara, T., Tomiyama, H., Uotani, A., Inoue, S., and Funatsu, K.: *Seikei-Kakou*, 18 (11), 822-825 (2006)
- (17) Alemaskin, K., Manas-Zloczower, I. and Kaufman, M.: *Intern. Polym. Proc.*, 19 (4), 327-334 (2004)
- (18) Alemaskin, K., Camesasca, M., Manas-Zloczower, I., Kaufman, M., Kim, E. K., Spalding, A., TruMBull, W. A. and Swain, R. D.: *SPE Antec Tech. Papers.*, 167-172 (2004)
- (19) Alemaskin, K., Manas-Zloczower, I. and Kaufman, M.: *Polym. Eng. Sci.*, 45 (7), 1011-1020 (2005)