ディスクタイプ押出機に関する基礎的研究

船津和守^{*1}・梶原稔尚^{*1}・美濃田武^{*2}・大賀美範^{*3}

Basic Study on Disk Type Extruders

Kazumori FUNATSU, Toshihisa KAJIWARA, Takeshi MINODA
and Yoshinori OHGA

Although screw extruders have been used for the production of films, pipes, sheets and many other kinds of plastic products, there is still room for improvement. The melting process has an important role in extruders. According to the results of computer simulations on the melting process in a single screw extruder, the melting rate of a polymer solid bed will increase strongly if the heat transfer surface can be enlarged. For ordinary screw extruders, it is very difficult to increase the heat transfer surface using the conventional screw geometry. Therefore, a disk type extruder was assembled as a modification to a single screw extruder. A trial apparatus was examined from various aspects. In this disk type extruder polymeric materials flow by relative motion between a fixed spiral plate where a rectangular channel was cut spirally from the center to the circumference and a moving flat plate. Usage of two surfaces of these plates for heating was very effective in increasing the melting rates. The extruder could extrude materials at rates less than $95 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ and under pressures less than 9.5 MPa. At higher pressures, the extruder developed leaks through the circumference. The leakage could probably be prevented by cooling the first turn of the channel sufficiently to keep the materials from melting. From the residence time distribution measured under steady extrusion, it was clear that there is circulation flow over flights. Mixing may thus be enhanced by longer shear loading by circulatory flow in the extruder.

Key words : Disk type extruder/Melting process/Mixing/Residence time distribution

1. 緒 言

プラスチック成形加工プロセスの中で多数の押出機、とくに最近では二軸押出機が多数用いられているが、単軸押出機でも改良の余地は十分あると思われる。単軸、二軸押出機でも本体の中での材料の溶

融過程はかなり長く、これを短くできれば押出機をもっとコンパクトにできるものと思われる。そこで本報告ではまず、単軸押出機に関する Tadmor のシミュレーション手法¹⁾を参考にし、計算過程の細部に工夫をして溶融過程の計算を行った。これらの計算結果と実験結果を比較してシミュレーションの信頼性を検証するとともに、溶融過程に及ぼす装置条件、操作条件の影響を検討した。その結果、溶融過程を短くする方法の1つとして、伝熱面積の増大が示唆された。ホッパーの近傍は冷却して材料の巻き込みが十分行われる領域を保障し、その領域を離れると材料の加熱を開始できることを考慮した上で、スクリーアの加熱を

*1 九州大学工学部化学機械工学科

福岡市東区箱崎 6-10-1 (〒812)

*2 三井石油化学工業(株)機能材研究所

千葉県君津郡袖ヶ浦町長浦字拓2号 (〒299-02)

*3 マツダ(株)技術開発本部

広島県安芸郡府中町新地 3-1 (〒730-91)

1989. 2. 14 受理

行えば溶融過程を短縮できることが考えられる。しかし、スクリー側から大きな熱量を与えるとホッパー下の温度も上がり、材料の巻き込みが不十分になる。また、ホッパー近傍と計量部の間に断熱材を入れると断熱材の強度がもたない。このようにスクリー押出機では伝熱面積を増大させることが構造上難しい。そこで、加熱・冷却がスクリー押出機よりも行いやすいと予想されるディスクタイプ押出機を検討した。

ディスクタイプ押出機は単軸スクリー押出機の延長線上に位置し、スクリーの代わりに、チャンネルがスパイラル状に彫られた平板（スパイラルプレート）を、バレルの代わりにフラットな平板（フラットプレート）を、これらの相対回転運動によって材料を輸送すると同時に両平板の外表面から加熱を行うことができるものである。これまで、各種のものがディスクタイプ押出機と呼ばれてきた。例えば Maxwell らのスクリーレス押出機²⁾、ディスク状回転円板の表面に各種突起物を設けた装置^{3),4)}、円板の両面に互いに逆向きのスパイラル状に彫られたチャンネルを有する装置⁵⁾、わずかな角度を有する円錐に2条のチャンネルをスパイラル状に彫った装置⁶⁾、考え方は異なるが Tadmor らのディスクパック⁷⁾、などが提案されているが、性能の解明はほとんどなされていない。そこで、3台の試作機を製作し、装置工学的改良を行うとともに、溶融過程、押出特性、滞留時間分布、混練について検討を行った。

2. 単軸押出機における溶融過程の解析

2.1 計算機シミュレーションの概要

押出機中の溶融過程、溶融物の流動状態、圧力分布などを把握することは、生産の高速化、機械の大型化・自動化、製品の高品質化を進める上で是非必要なことである。今回取り扱う溶融過程の計算について幾つかの工夫を行ったが、これについては、これまで数多くの紹介がなされているので、計算手法は省略し、得られた結果を提出し検討する。

押出機シミュレーション用モデルは Tadmor & Klein¹⁾、Chung⁸⁾、Donovan⁹⁾、などによって提案されているが、Tadmor の手法を参考にし、プログラムを開発した。また、固体輸送の計算は摩擦係数のデータが不足しているため今回は行わず、押出流量の値は与えた。今回のシミュレーションの目的は材料の溶融に必要な長さを検討することであるが、単軸押出機中の溶融機構についてはよく紹介されている⁶⁾ので説明は省略する。

計算に用いたポリエチレン (HDPE1) の物性を以

下に示す。固体の密度、比熱は各々 $9.50 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $2.43 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 、溶融物の密度、比熱は各々 $7.60 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $2.97 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 、熱伝導率は $1.04 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 、融解熱は $132.7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、融点は 129°C である。さらに粘度 η (Pa·s) は温度 T ($^\circ\text{C}$)、剪断速度 $\dot{\gamma}$ (s^{-1}) で次式のように表される。

$$\ln \eta = 1.309548 \times 10^{-1} - 2.22893 \times 10^{-1} \ln \dot{\gamma} \\ - 6.316352 \times 10^{-2} (\ln \dot{\gamma})^2 - 1.883408 \times 10^{-2} T \\ + 1.851759 \times 10^{-5} T^2 + 1.242736 \times 10^{-3} (\ln \dot{\gamma}) T$$

2.2 実験結果と計算結果の比較検討

a. 実験装置および方法

押出機のバレル直径は 40 mm で、その先端に直径 4 mm、長さ 40 mm のノズルが取り付けられた。Fig.1 に冷却実験に用いたスクリーのみを示した。直径 40 mm である。テーパ部はホッパーから 9 から 15 ターンである。バレルには熱電対と圧力タップが設置された。実験はバレル温度が約 180°C から約 230°C の範囲で3レベル、スクリー回転数は 30, 50, 70 min^{-1} で行った。冷却実験、固体床幅 X の測定は通常の方法によった。

b. 固体床分布の実験結果と計算結果の比較

Figs.2, 3 に各々、バレル温度 T_b の分布が等しく、流量 G (回転数 N) を変えた場合の比較を示した。溶融開始点は理論的推定がまだ困難であるので実

Fig. 1 Screw geometry in a single screw extruder for cooling experiment

Fig. 2 Comparison between simulated and experimental values of solid bed profile at 30 min^{-1} in screw rotation

Fig. 3 Comparison between simulated and experimental values of solid bed profile at 50 min⁻¹ in screw rotation

験値を与えた。溶融初期の溶融速度の予測はできているが、テーパー部に入って溶融速度の実測値に顕著な変化が現れないのは、計算上仮定されているようにテーパー部に入って固体床が圧縮されてその幅が大きくなるためである。また、溶融完了までの長さが計算値で大きくなるのは、計算上の仮定に反し、スクロール部やメルトプールからの伝熱がかなりあるためである。実際には固体床がある程度小さくなると床の形がばらばらにされるが、この作用は計算に含まれていない。

以上の検討から、今回の計算手法は溶融過程をほぼ予測できることがわかったので、計算条件を拡張して結果を求め、溶融過程をより一般的に考察する。

2.3 広い条件での固体床分布の計算結果とその考察

計算に使用したスクリー形状は Fig.1 のものを

Fig. 4 Simulated solid bed profiles dependent upon variation in flow rate

Fig. 5 Simulated solid bed profiles dependent upon variation in screw rotation

Fig. 6 Simulated solid bed profiles dependent upon change in position of compression zone

基本とした。まず、図には示していないがバレル温度が 180°C では溶融完了まで 25 ターン以上必要になる場合もあり、問題である。Fig.4 に示した、バレル温度、回転数を一定にし、押出流量を変化させた場合の固体床分布では、流量が大きくなると未溶融材料が流出する可能性を表している。Fig.5 に示した、バレル温度、押出し流量を一定にし、回転数を変化させた固体床分布は高い回転数で早く溶融することを表している。これは高回転数による溶融フィルム中に発生する大きな粘性発熱量が原因である。このように粘性発熱量も溶融に大きな影響を与える。Fig.6 に示すテーパー部（圧縮部）の位置の相違の影響では、テーパー部がホッパーに近い程初期の溶融速度は遅く、溶融完了は遅れるが、この程度の条件ではその差は小さい。Fig.7 によると固体供給部長さは一定で、テーパー部と計量部の長さを短縮すると、前述したようにテーパー部に入

Fig. 7 Simulated solid bed profiles dependent upon change in length of compression and metering zones

った固体床は圧縮され、その幅が再び広げられるため、これが計算上熔融速度を小さくする。

以上の計算結果をみると、単軸押出機の操作条件、装置条件を幅広く変えても熔融過程をかなり短くすることは難しいといえる。これを実現するためには、別の付加的な因子を考慮することが考えられる。実験の熔融速度が計算値に比べて大きくなる場合はスクリュールとメルトプールからの伝熱が効いていることから考えて、熔融過程を短くする1つの方策として伝熱面積の増大が有効であることが示唆される。緒言で述べたように、スクリュール押出機でこれを実施するのは困難であると思われるので、前述したディスクタイプ押出機を検討することにした。

3. ディスクタイプ押出し機

3.1 装置の特徴

ディスクタイプ押出機の特徴は、①構造が簡単で製作が比較的容易である、②プレート両面を伝熱面に使える、③ディスク半径が小さくても、チャンネル長さを比較的長くできる、などである。欠点は、①2板のプレートのクリアランスからの漏れ防止に工夫を要する、②押出圧力を高くできない、③架台、押出機本体の剛性を十分高くする必要がある、などである。

3.2 実験装置

装置全体図を Fig. 8 に示す。ホッパー①から入った材料は固定したスパイラルプレート②の外周に供給され、フラットプレート③の回転によって中心方向に輸送される。さらに、両プレートに取り付けたヒーターで加熱・熔融され、ノズル⑩を通して押し出

Fig. 8 Experimental apparatus of disk type extruder

される。本装置の機構では両プレート間に発生する大きな圧力に耐えるために架台、押出機本体は十分な剛性と強度を持ち、また十分大きなスラストベアリングが必要である。⑨のストッパーは内部の圧力が低下した場合に両プレートの接触を防止する。

次に、両プレートを Fig. 9 に示す。No. 3 スパイラルプレートは外径 280 mm で、Fig. 10 に示す形状のチャンネルを持つ。チャンネル深さ h は、背圧があまり負荷されず、出口に向かって熔融物をスムーズに流動させるため、 $rh = \text{一定}$ (r : 中心からの距離) に保つ値とした。また、フラットプレートの外周部には材料を未熔融状態に保つため断熱材を挿入し、かつ材料の送りをよくするために表面に溝を切った。Fig. 10 にはまた、供給部、圧縮部、計量部の大体の区分を示した。チャンネルの全長は 1480 mm である。直径 40 mm の単軸押出機用スクリュールのそれは約 1800 mm で、両者はほぼ等しい。

温度は Fig. 9 に示す測定点で、①: 90~105°C, ②: 118~128°C, ③: 129~138°C, ④: 142~162°C, ⑤: 145~152°C, ⑥: 162~170°C, ⑦: 160~170°C, ノズル: 182~184°C に制御された。この際、スパイラルプレートの外周部は冷却された。

3.3 実験方法

試料は前と同様に HDPE 1 を用いた。冷却ジャケ

Fig. 9 Geometry of spiral plate and flat plate

Fig. 10 Variation of channel depth h and channel width W along channel length s

ットにはクリアランスからの漏れが止まる最低流量の水を流した。2個のダイヤルゲージにより、設定されたクリアランスの値には架台、プレートなどの製作精度や剛性が不十分なための変形によってかなりの誤差が入っているものと思われる。

3.4 実験結果

まずクリアランス δ_f が押出流量に及ぼす影響を

Fig. 11 Dependence of extrusion rate upon clearance

	D (mm)	L (mm)	N (min ⁻¹)	Sample
□	Free discharge	6	25	HDPE 1
■			30	
○	6	15	10	HDPE 2
●			30	
△	6	30	10	HDPE 2
▲			20	
▼			25

	D (mm)	L (mm)	G (g·min ⁻¹)
△	2	60	1.5
○	6	60	24
□	6	15	31

Fig. 12 Pressure distributions along channel

Fig. 11 に示す。この程度の回転数では δ_f を大きくすると流量はわずかに低下する。しかし、ノズルを付けない場合 (free discharge) に δ_f を大きくすると大幅に流量が増加する。これは溶融物を出口に送るのに

Key	Nozzle	
	L (mm)	D (mm)
○	60	4
△	60	6
□	30	6
▽	15	6
◇	Free discharge	

$\delta_f = 0.4$ mm

Fig. 13 Relation between extrusion rates and the maximum pressures

Fig. 14 Schematic cross sections (HDPE1) obtained from cooling experiment
 $N=10$ min⁻¹, $G=29.0$ g·min⁻¹, $L=60$ mm, $D=6$ mm, $P=4.86 \times 10^6$ Pa

HDPE1, $\delta_f = 0.4$

	Nozzle		N (min ⁻¹)	$\bar{t}$ (s)	G (g·min ⁻¹)
	L (mm)	D (mm)			
○	60	4	10	767	10.9
△	60	6	10	315	28.2
□	60	6	20	217	49.2
▽	60	6	30	182	67.7
◇	30	6	20	184	61.2
○	15	6	20	170	73.0

Fig. 15 Residence time distribution function $F(t)$ versus reduced time $t/\bar{t}$ under various extrusion conditions ($\bar{t}$: Mean residence time)

抵抗が弱まるためである。ノズルによる流動抵抗がある場合に流量を増加するためには逆流を減少させるため、 δ_f はできるだけ小さくする。次に、チャンネルに沿って測定した圧力分布 (Fig. 12) によると、チャンネル出口付近で最大圧力が発生するが、単軸押出機の場合最大圧力が圧縮部終端から計量部初期に発生するのは異なっている。Fig. 13 に回転数とノズルをパラメータにして最大圧力と流量の関係を示す。圧力が低い領域では流量の変動が大きく不安定であったが、ある値以上になると安定した押し出状態であった。この原因は、流動が持つ特性でなく形状とくにクリアランスの安定性なども関係すると思われるので、現在のところ不明である。また、同一ノズルで高い回転数では、圧力の低い範囲では圧力によらず流量は一定となるが、高い圧力では発生する逆流のため流量は減少することがわかる。さらに、圧力が 9.5 MPa 程度までは安定して押し出せるが、これ以上の性能を得るためには駆動力、架台などについて大幅な改造が必要である。同一ノズルで大流量になると材料の非ニュートン性のため右上がりの曲線となることもわかる。Fig. 14 に冷却実験で得られたチャンネル断面の熔融経過の一例を示す。角度 $\theta(^{\circ})$ は Fig. 9 のホッパ

一出口断面を基点としたものである。図中黒く塗りつぶした所は溶融してトレーサー色素が混入している。外周から第 1 ターンでは冷却を効かせて材料を未溶融状態に保とうと試みているが、フラットプレート側には冷却ジャケットを付けてないので溶融が進んでいる。第 2 ターン以降は、両面伝熱の効果が現れていることが流線パターンの形からわかる。しかし、第 4 ターンになると深いチャンネルで循環が悪いことがわかるので、チャンネルの幅と深さは今後の課題である。ここでは、一例を示したが、ディスクタイプ押出機の両面加熱の有効性は他の例でも十分証明された。しかし、フラットプレートでも第 1 ターン付近は冷却を行うべきである。このためにはディスク (プレート) 形状を工夫し、かつ断熱を効果的に用いる工夫が必要である。次に材料の混練の目安となる可能性を持つ滞留時間分布を Fig. 15 に示す。滞留時間分布は、ホッパーにトレーサーとして砂粒を所定量だけパルス状に投入し、出口で測定された砂粒の質量の時間経過のデータから計算された。まず、装置内で滞留がないと仮定した場合の平均滞留時間は、装置体積を体積流量で割って得られる。質量流量が 49.2 g·min⁻¹、73.0 g·min⁻¹ について各々 178 s、120 s となったが、これら

Fig. 16 (a) Change of mixing patterns of agglomerated carbon black in HDPE 1 extruded through the same nozzle under various extrusion rates

Fig. 16 (b) Change of mixing patterns of agglomerated carbon black in HDPE 1 extruded through various nozzles at the same rotational speed

に比べ図中の真の平均滞留時間は各々 217 s, 170 s とかなり長いことから循環流の存在が予想される。これは、チャンネル出口付近で発生する最大圧力によって上流側にフライトを越える逆流の発生が考えられることから納得される。この逆流の存在はチャンネル断面の流線パターンからもうなずける。通常循環流のない

単軸スクリー押出機の場合、図より明らかのように、投入されたトレーサーが出口に最初に現れる時間は平均滞留時間の 3/4 となるが、本装置における平均滞留時間が長いので無次元化したトレーサー流出開始時間は小さくなる傾向にある。このような状況から材料が受ける全剪断量はそれだけ多くなるため混練は

よくなると予想される。混練をカーボンブラックの分散状態で大略評価したのが、Figs. 16 (a), (b)である。(a)には、同一ノズルであれば高回転数の場合が分散がよいこと、(b)には、回転数が一定では、最大圧が高い、つまり循環流が発生する場合に分散がよいことを示す。混練の程度を定量的に評価できる可能性を持つ滞留時間分布関数に関する詳細な検討は今後の重要な課題である。

4. 結 言

まず単軸スクリュウ押出機のシミュレーションの計算結果から熔融過程を短くするためには、伝熱面の増大が有効であるとの示唆が得られた。この方法の1つとして着想されたディスクタイプ押出機に関し実験的検討を行い、以下のことが明らかになった。熔融速度の面からみて、伝熱面としてプレートの両面を使うことは有効であった。今回押出最大圧力 9.5 MPa あるいは押出し流量 $95 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ の範囲で安定な押出しが可能であった。さらに漏れ防止、性能アップには冷却部分と加熱部分を所望の条件で厳格に設定できることが不可欠である。また本装置ではフライトを越えた逆流が存在するので滞留時間が長くなり、混練はよくなると期待される。

以上の検討結果を踏まえて、今後の課題はやはり十分大きな圧力を発生させ、しかも漏れない装置の開発である。具体的には次の案が考えられる。1枚の可動ディスクの両面に、互いに逆方向のスパイラル状のチャンネルを彫り、これを囲む形で密閉型の固定フラットプレートを備える。また、ディスクを輪切りにして2部分に分け、各々を加熱部、冷却部とし、その間に断熱剤を入れて熱の有効利用を行うことなどである。

Nomenclature

D	: nozzle diameter [m]
F	: residence time distribution function [-]
G	: mass flow rate [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
h	: channel depth [m]
L	: nozzle length [m]
N	: rotational speed of extruder [s^{-1}]
P	: extrusion pressure [Pa]
r	: length from center of spiral plate [m]
s	: channel length [m]
t	: time [s]
$\bar{t}$	: mean residence time [s]
T	: temperature [$^{\circ}\text{C}$]
T_b	: barrel temperature [$^{\circ}\text{C}$]
W	: channel width [m]
X	: solid bed width [m]
$\dot{\gamma}$	: shear rate [s^{-1}]
δ_f	: clearance [m]
η	: viscosity [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
θ	: angle [$^{\circ}$]

参 考 文 献

- 1) Tadmor, Z. and Klein, I.: Engineering Principles of Plasticating Extrusion (1970), Van Nostrand
- 2) Maxwell, B. and Scalora, A. I.: *Modern Plastics*, **37**, 107 (1959)
- 3) ルドー・クロード: 特許公報 昭 45-2992
- 4) ルドー・クロード: 特許公報 昭 48-4180
- 5) 新本実美: 特許公報 昭 40-25071
- 6) Krein, H. L. and Plumtree, A.: *Polym. Eng. Sci.*, **25**, 295 (1985)
- 7) Tadmor, Z., Hold, P. and Valsamis, L.: *Plastics Eng.*, **35**, 20 (1979)
- 8) Chung, C. I.: *Modern Plastics*, **9**, 178 (1968)
- 9) Donovan, R. C.: *Polym. Eng. Sci.*, **5**, 247 (1971)