プラスチック成形法の進歩*

— 押出機を中心として —

瀬戸 正二**

1. 緒言

プラスチックの成形法は、成形材料の種類により、また目的とする成形品の形状によって異なり、その種類は非常に多い。ここで成形法の分類を試みるつもりはないが、圧縮成形、トランスファー成形、射出成形、押出成形、吹込成形、真空成形、注型などといった各種の方式はプラスチックの成形法の中でも主要なものである。

さて、これらの成形法のうちで、応用分野のもっとも広いものといえば、それは押出成形であるといってもよいであろう。押出成形は、フィルム、シート、波板、パイプ、異形品、モノフィラメント、ネット、被覆電線、被覆紙や被覆金属箔など各種の製品を作ることができ¹⁾、その利用分野は建築材料や包装材料などの大量消費分野に直結している。

それだけではない。そもそも、押出成形とは押出機を使ってダイから熔融材料を押出し、これを冷却しつつ引取って所望の形状にする方法であって、押出機そのものは、熔融作用、混練作用、ポンプ作用などの諸機能を併わせ備えている。したがって他の種々な成形法の予備段階としても重要な役割を果たしているのである。

たとえば、トランスファー成形²⁾や射出成形の予備可塑化装置として押出機は広く利用されている。とくに射出成形では数年前からプランジャー式の射出成形機に代わってスクリーュー式のものが標準機となった。また最近注目を集めている熱硬化性樹脂の射出成形も³⁾スクリーュー式の射出成形機の発展に負うところが大きい。

吹込成形も押出機を利用している。押出機からチューブ状のバリソンを押出し、これを型ではさみ、内部に空気を吹込んでふくらませるのである。チューブ状のバリソンを押出す代わりに、2枚のシートを押出してこれを型で挿み、同様に空気を吹込む方式もある。また、真空成形にしても、素材シートは押出成形で作られるものが非常に多い。注型の分野でも、押出機から押出した熔融体を遠心注型する方法がある。その他、特殊な利用例もいろいろあるが、最近開発された多賀プロセス⁴⁾などは一例として挙げるにふさわしいものであろう。

以上のような成形の分野のほかに、押出機はコンパウンディングにも不可欠のものとなっている。市販のプラスチック成形材料はその大半が押出機の“卒業生”である。

このようにみえてくると、押出機の進歩が現在のプラスチック成形工業を支配しているといっても決して過言ではないであろう。こういった意味で、押出機の進歩と問題点について簡単なレビューを試みたいと思う。

2. 押出機の種類

歴史的にはプラスチック用押出機はまづラム式のものに始まったが、現在ではこの方式は一部の特殊な場合に使用されている程度で、ほとんど大部分はスクリーュー式である（また最近ではスクリーュー以外の押出原理を応用した種々の押出機が開発されつつある）。スクリーュー式押出機には単軸式と多軸式とがある。

3. 単軸押出機の進歩

現在、押出機の主流をなしているものは単軸押出機である。単軸押出機について現状を中心とした最近の傾向を簡単に説明しておこう。

図1 スクリーューデザイン

* 昭和41年2月18日 受理

** Shoji Seto 大阪市立工業研究所

3・1 L/D と圧縮比

単軸押出機の各種のスクリーデザインを図1にモデル的に示した。スクリーの外径と長さとの比を L/D といい、またスクリーの根元の方の1ねじの溝空間と先端部のそれとの比を圧縮比という。

L/D は現在まで増大の一途をたどり、とくに計量部が長くなってきている。この傾向は将来にもまだ続くものと考えられるが現在 L/D は 22/1~24/1 程度が標準である。計量部の長い方が背圧に対する抵抗が大きく、したがって、他の条件を同じとすれば、短かいものよりも押出量が多くなり、また押出しの脈動が少なく、精密な温度調節がしやすいなどの利点があるからである。

圧縮比は通常 2/1~3/1 程度で、成形材料ベレットがバレル内を先端に向かって進むにつれ、この圧縮比に応じて圧縮され、これによって粒子間にあった空気が絞出され、可塑化、混練が促進される。

図1に示した各種のデザインのうち、a~c はピッチが一定であり、溝深さをかえることによって圧縮比が与えられている。b は二重ねじであるが一般には使われていない。d, e のようにピッチを変える方式もあるが、定ピッチ形に比べて製作上の難点があり、現在ではほとんど使用されていない。a および c が最も普通であって、ピッチと外径とがほぼ等しく、らせん角は、供給部における固体輸送理論から求めた最適らせん角の値に近い。a のデザインは PVC やポリスチレンなど非結晶性の材料を押出すのに適しており、c のデザインはナイロンや高密度ポリエチレンなどの結晶性材料の押出しに適している。結晶性ポリマーは、固体から熔融体にシャープに移行するため、圧縮比のとり方もこれに対応させて急圧縮形にしてある。f のデザインは混練用のヘッドをつけたもので、ヘッドに多数の細かい溝をつけたものもある。

3・2 内部摩擦

単位時間あたりの押出量はスクリーの回転数を大きくするほど増大するが、押出されてくる材料の品質が所望の標準以下になっては実用上価値がない。スクリー回転数の増大も近年の顕著な傾向の一つであるが、これを裏がえせば、押出されてくる熔融材料の品質を保証する手段の進歩があったわけである。

品質面で一般的に不良と考えられるケースは、混練の不十分と、もう一つは過度の混練によって発生する内部摩擦のための熱劣化である。材料の熱劣化を防ぎつつ十分に混練できなければならない。

この線に沿って、バレル冷却機構の改良とスクリー駆動馬力数の増大とが最近の押出機の動向として目立っている。別な表現をすれば、押出機は断熱運転に近づきつつあるともいえる。断熱運転とはバレルの外部加熱を行わずに、内部摩擦熱のみによって材料を可塑化するような運転状態のことである。

バレルの冷却機構としては

- (i) 空冷式 (ブローワーによる送風)
- (ii) 水冷式 (冷却水循環またはスプレー)
- (iii) ジャケット式 (加熱・冷却兼用)

などがある。(iii) の特殊なものにウィラート方式がある。この方式では加圧ジャケット内に適当な沸点の媒体を入れ気相と液相の両者を平衡状態に保っておく。バレルを冷却する際には送風冷却によって気相の一部を凝縮させ、これによってジャケット内の圧力を下げて媒体を沸騰させる。この気化潜熱によってバレルが冷却されるのである。

3・3 バルブ機構

最近のバルブ機構の発展も、混練効果を高めるためのアプローチの一つである。バルブがなければバレル内の圧力は主としてダイ抵抗によって支配されるが、バルブを設ければ、ダイ抵抗とは無関係に、しかも連続的にバレル内圧をコントロールすることができる。ブレーカプレートやスクリーンバックも内圧調節の役割を果たすものではあるが、これでは作業中に連続的に内圧を変えることは不可能である。

図2は単なるスタティックバルブを示したものであるが、図3~図5のようにスクリーを軸方向に移動させるようにしたダイナミックバルブは、バルブ部において材料を薄いフィルム状に導き、材料に強大な剪断力をかけるとともに、材料が滞留するような死角を与えない特徴がある。

そしてバルブ機構はベント押出機の発展へとつながってゆくのである。

3・4 ベント押出機

バレル先端から押出される材料の品質的な面でもう一つ大切な要素は、水分や空気やモノマーなどの揮発性成分が含まれていないということである。ベント押出機はバレルの途中でいったん圧力を開放して、これらの揮発成分をバレル外に駆逐する機構を備えたもので、2台の押出機を直列に配することによってもこの目的は一応達成できるが、通常は図6のように二段になったスクリーを使用する。

しかし、単なる二段スクリーでは、第一段と第二段との押出量のバランスがとれないと、ベント孔から材料があふれて、孔を塞いでしまう恐れがある。前項に述べたバルブ機構がこれを解決してくれる。図5はダイナミックバルブによる例であり、図7はスタティックバルブによる例である。図7の方式では、スクリーに逆ねじ部分を設け、これによって材料の直進をはばんでバイパスに導き、バイパスにバルブを設けて流量をコントロールするのである。

揮発分の除去に対するもう一つのアプローチはフィード側を真空にする方式、すなわち真空ホッパ方式であ

図2 スタティックバルブ

図3 ダイナミックバルブ

図4 ダイナミックバルブ

図5 ダイナミックバルブ

図6 ベント式押出機

図7 バイパスベント方式

る。近年、粉末状のドライブレンドからの直接押出成形が盛んに行なわれるようになってきたが、真空ホッパーはドライブレンドからの成形に非常に有効であるといわれる。

4. 多軸押出機

多軸式の押出機は、特殊な例外を除けば一般には2本以上のスクリーを互いにかみ合わせたもので、このかみ合いによって生ずる積極的なポンプ作用の活用がこの機種開発の眼目であったわけである。

4.1 多軸押出機の特徴

いま、ボルトとナットとの関係を考えると、ナットを手でおさえてボルトを回せばナットはボルトにそって移動するが、手を放せばナットはボルトとともに回転して移動しない。これと同様に、単軸スクリーの供給部では、バレル内面と成形材料との間にスリップが起こり材料の輸送効率が損なわれることがあるのに対し、多軸スクリーではかみ合い部が“ナットを手でおさえた”

のと同様な効果をもたらし、材料は確実に送られてゆく。また熔融材料について考えても、バレル先端部の背圧がスクリーのかみ合いによってくいとめられるので単位時間あたりの押出量は背圧（ダイ抵抗）の影響をほとんど受けない。これらが多軸押出機の基本的特色である。

このように確実な押出力があるのでスクリーは短かくてよく、 L/D はたいてい10以下である。一方、バレルが短いので、十分な可塑化を達成するためにはスク

図 8 同方向回転式二軸スクルーのかみ合い効果

図 11 二軸押出機の減速装置 (Bone Bros. 社)

図 9 三軸スクルー押出機 (川崎航空機)

図 10 二軸押出機 (Kestermann 社)

図 12 二軸コンパウンダー ZSK (Werner & Pfleiderer 社) と混練板の作動状態

表 1 コンパウンダーの能力

	成 形	コンパウンディング									低分子化
		難流動性 材料のペ レット化	混 練 ・ 分 散			乾 燥 ・ 揮 発 分 の 除 去					
			駆動入力, kWh/kg			揮発分, %					
			<0.2	0.2~0.4	>0.4	<2~0.2	<50~0.2	>50~10% いし0.5	→0.05		
単 軸 押 出 機	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	
同 上 ベ ン ト 式	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	
多 軸 押 出 機	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	
コ ニ ー ダ ー	-	+	+	+	(+)	+	-	-	-	(+)	
混 練 板 / ス ク リ ー 式 二 軸 コ ン パ ウ ン ダ ー ZSK	(+)	+	+	+	+	+	+	-	+	+	
混 練 板 / ス ク リ ー 式 四 軸 コ ン パ ウ ン ダ ー VDS	-	-	+	+	-	+	+	+	+	(+)	

* 矢印の左側の数値は処理前、右側の数値は処理後を示す。

図 13 四軸コンパウンダー VDS (Werner & Pfleiderer 社)

図 14 Two-Channel Screw (Maillefer 社)

図 15 Rotomeltor 押出機

リューの回転数は小さくしてバレル内での滞留時間をそれだけ長くする必要がある。

しかし、このように回転数を小さくしても、かみ合い部での特異な効果により、混練度は単軸式よりもまざっている。たとえば図 8 は同方向回転式の二軸スクリーのかみ合いを示したものであるが、A の部分はひきうすのような作用をしている。

4・2 多軸押出機の動向

多軸押出機の弱点の一つはスクリー軸が互いに近接していることである。せまいスペース内で、いかにしてスクリーに大きな回転力を伝え、かつ強いスラストを受けとめるかが問題である。

この難点を解決すべく、つぎつぎと新しいアイデアが生み出されている。図 9 のようなコニカルスクリー⁴⁾は軸受けに与えるスペースが拡大されるほか、圧縮比がとりやすいので、かさばり係数の高い粉末状ドライブレンドから大口径パイプなどを強大な圧力をかけて成形するのに好適である。図 10⁵⁾ はスクリーを途中から三重ねじにし、そのねじ山の高さを次第に増してゆくことによって圧縮比を与えたものである。三重ねじにすることによって、スラスト応力の変動が“さざなみ化”されるので成形機の保守に好影響が与えられる。また図 11⁶⁾ はスクリーの駆動トルクを分割伝達する方式である。

多軸押出機の動向としてもう一つ注目される点は多能なコンパウンディングマシンとしての期待である。

4・3 コンパウンディングマシンとしての多軸押出機

通常の単軸押出機および多軸押出機では“形態加工”すなわち成形（ペレット化も含めて）を行なうことはで

図 16 モノフィラメント用押出機 (Automatik 社)

きるが、高度の“性質加工”を行なうには多軸式の特別なコンパウンダーによらなければならない。という意味は、表 1⁷⁾ をみて頂けば容易に納得して頂けると思う。表 1 中の二軸コンパウンダーおよび四軸コンパウンダーはそれぞれ図 12⁷⁾ および図 13⁷⁾ に示した。これらの多軸コンパウンダーは、強力な混練や分散、揮発分の除去、分子量の引下げなど、原材料の性質を大幅に改変する能力があるのに対し、通常の押出成形機では、押出された製品とホッパーにチャージされた原料とは形は異なるだけで、材質的にはほとんど変化がないのである。

図 12 に示した二軸コンパウンダーはスクリー軸にスクリー素子および混練板をはめこむようにしてあるので、目的に応じてそれらの適当な組合わせを選択することができる。そしてスクリーも混練板も、ともにセルフクリーニング性であることも大きな特色となっている。このタイプのコンパウンダーを使えば、ゴム変成の

図 17 コニ - ダ -

図 18 Elastic Melt Extruder

図 19 ロール押出機

耐衝撃用フェノール樹脂成形材料なども一工程でコンパウンディングができる。従来法ならば、ゴム成分の素練り、ゴム成分とノボラック樹脂との混練、硬化剤の練りこみと3段階のロール作業が必要であるのと比べると、このコンパウンダーの威力がよくわかる。

5. 特殊押出機

5・1 単軸スクリー式特殊押出機

単軸スクリー式とみられる押出機の中にも特殊なデザインのものがある。数例をピックアップして簡単に説明を加えておこう。

図 14⁸⁾ はスクリー溝を、固体材料の送られるねじ溝 (I) と熔融材料の送られるねじ溝 (II) とに分割したものである。溝 (I) は次第に幅がせまくなってゆくので、熔融した材料は溝 (II) に移り、完全溶融体のみが押出されることになる。

図 15 は回転加熱板上に成形材料を広げて溶融し、これをドクターナイフでかきとってスクリーに供給する方式で、発泡体の成形にも適している⁹⁾。

図 16⁶⁾ はモノフィラメント製造用に設計された押出機で、スクリーの先端にはギアポンプが組込んである。そして、パレルは先端部が固定されており、逆にホッパー側は固定されていない。パレルはねじり応力を受けているので、成形材料が供給過剰になると接点が作動して、自動的に供給を制御し、これによって押出速度と材料圧力が常に一定に保たれるようにしたものである。

図 17 はコニーダーと呼ばれるコンパウンダーで、パレル内面には突起があり、スクリーにはこの突起に対応した切欠き部がある。そしてスクリーは回転しつつ前後にオシレートするようになっている。コニーダーの性能の評価は表 1 中に示してある。

5・2 スクリー以外の原理による押出機

スクリー以外の原理に基づく押出機としてもいろいろあるが、実用可能に近い開発段階にあって注目されているものに Elastic melt extruder とロール式押出機がある。

Elastic melt extruder¹⁰⁾ は、プラスチック溶融体に回転力を加えると、回転中心に向かって溶融体が集まろうとする力が発生すること (ワイゼンベルグ効果) を利用したもので、図 18 はこの方式の押出機のモデル図である。

ロール押出機¹¹⁾ は図 19 に示すようにロール式の回転子をパレル内で回転させる方式で、図のような方向に押出せばシート状の押出機が得られるが、また軸方向に押出してパイプなどを作ることもできる。後者の場合には構造的にも原理的にも Elastic melt extruder に近いものとなるわけである。

結 言

はじめにも述べたように、プラスチックの成形加工の面で押出機の占める地位はますますその重要度を加えている。この分野の間口の広さと奥行きからみればこの小文は大鉱脈の露頭の一部を紹介したにすぎないかも知れないが、何かの参考にもなれば望外の幸せである。

文 献

- 1) 押出成形については次のような成書がある。
Mink, W.: "Grundzuege der Extrudertechnik" (R. Zechner Verlag, 1964)
Fisher, E. G.: "Extrusion of Plastics" (Ilfie Books, 1964)
Jacobi, H. R.: "Screw Extrusion of Plastics" (Ilfie Books, 1963)
大島, 瀬戸, 堀内, "プラスチックの押出成形" (プラスチック技術研究会, 1966) (カラーオートスライド)
- 2) トランスファー成形機の予備可塑化装置として使用された例としては
Anon.: "Thermoset Moulding Machines with Screw Pre-plasticizer," *International Plastics Engineering*, 5, 339 (Oct. 1965)
- 3) 多賀: "タガプロセスの理論的背景", *プラスチック*, 15, [8], 58 (Aug. 1964)
- 4) 川崎航空機: "3本スクルー押出機", *プラスチック*, 15, [8], 96 (Aug. 1964)
- 5) Selbach, H.-W.: "Neue Schneckenform fuer Doppelschnecken-Extruder", *Der Plastverarbeiter*, 13, 595 (Nov. 1962)
- 6) Wood, R.: "European Machinery Developments", *International Plastics Engineering*, 5, 373 (Nov. 1965)
- 7) Herrmann, H.: "Das Aufbereiten in Schneckenmaschinen", *Kunststoffe*, 55, 845 (Nov. 1965)
- 8) Maillefer, C.: "A Two-Channel Extruder Screw", *Modern Plastics*, 40, [5], 132 (Jan. 1963)
- 9) Anon: *Modern Plastics*, 42, [12], 92 (Aug. 1965)
- 10) Henry, J. E. and Plymale, C. E.: "Applications of the Elastic Melt Extruder", *SPE Journal*, 21, 391 (Apr. 1965); "The Elastrotor Model 11", *Plastics*, 30, [336], 91 (Oct. 1965)
- 11) 大久保: "プラスチック成形技術の新傾向", *Plastics Age*, 12, [1], 57 (Jan. 1966)

合 成 繊 維 の 紡 糸 技 術*

上 田 重 幸**

緒 言

合成繊維はいずれも紡糸という成形工程を経て繊維状の形態を付与される。紡糸方法は溶剤の使用の有無により溶液紡糸法と熔融紡糸法に区別され、前者はさらに脱溶剤方法の差異により湿式紡糸法、乾式紡糸法に分けられる。湿式紡糸は高分子濃厚溶液を紡糸口金の細孔を通して凝固液中に吐出し、主として溶剤と凝固液との相互拡散によって繊維を形成させる方法で、熱の移動、化学反応を伴うこともあり、紡糸工程の解析は最も複雑である。乾式紡糸は吐出された糸状高分子濃厚溶液を加熱して溶剤を蒸発除去させることにより繊維を形成させる方法で、物質移動と熱移動が問題になる。熔融紡糸は原理的に最も簡単な紡糸法で、高分子融液の冷却固化だけで繊維状に形成する方法である。すべての紡糸法に共通している点は、吐出された糸状液体の断面積が微小で、これが連続的に変化する環境条件下で短時間内に大変形を受けることである。したがって最も単純な熔融紡糸法でも、冷却過程と変形過程を同時に考えねばならず、その理論的解析はかなり複雑になる。近年の測定技術の発達に伴い、熔融紡糸の研究も次第に活発になってきた。本稿では、対象を熔融紡糸に限定して、その技術的進歩、

工学的研究の最近の動向を概観することとしよう。

1. 熔融紡糸技術の進歩

熔融紡糸法による合成繊維の製造は du Pont 社のナイロンの発明に始まり、すでに約 30 年の歴史を持つ。その間、原料の種類、製品の目的に応じて種々の紡糸方法、紡糸装置が開発されてきた。ポリアミド、ポリエステルの紡糸のように、比較的低粘度の融液を取扱う場合の代表的な方法として、du Pont 社の開発した熱格子法¹⁾が知られている。これは原料チップを熱格子面に落して融解させ、融液をギヤーポンプで定量送液して紡糸口金より吐出させる方法である。しかし初期の装置では融解効率がよくないので、これにチップ押込用のスクルーポンプを組合わせて能率の向上を図る方式が多くなった²⁾。

一方、サラランやポリエチレンのように、高粘度融液からモノフィラメントを紡糸する方法として、以前からスクルー押出機が用いられていたが、この方法は融解効率がよいので最近ではマルチ糸の紡糸にも適用されるようになった。この場合、繊度(デニール)の均一性を高めるために押出機の先端にギヤーポンプを付けるのが普通である。ポリアミドモノフィラメントについての測定例³⁾ではギヤーポンプなしの場合に約 7% あった繊度変

* 昭和 41 年 2 月 8 日 受理

** Shigeyuki Ueda 工業技術院 繊維工業試験所