塑性材料のスクリー押出について*

森 芳 郎**・乙 竹 直**・五十嵐 啓夫***

要旨： プラスチック工業や窯業などで材料の成型にスクリー押出機を用いることが多い。スクリー押出機については二三の報文²⁾³⁾⁹⁾があるが、いずれも材料を純粘性として扱っている。ところが上に挙げたような工業で扱う材料は純粘性と考えるには余りにも無理なものが多く、実際には単に経験的な考慮のもとに設計並に運転が行われている。筆者らは、これをビンガム材料と見做して理論的解析を行った結果、無次元項 w, z を用いて、流動に関しては (9)′～(18)′ 式、動力に関しては、(23)～(26) 式を導くことができた。これらの式を線図で表せば Fig. 4 のようになる。Fig. 4 の応用として、先端に円孔ダイスを取り付けた場合には、Hedström 氏の円管流動線図 (Fig. 7)¹⁾ と組合せて流量、回転数、先端圧力などの関係を求めることができる。

§1. 理論解析

1・1 基本的考え方および仮定

a) 材料： 実際の化学工業で取扱われる塑性材料がビンガム体であるとは限らないが、窯業材料や石鹼などのごとくビンガム体であることも多く、またビンガム体と考えて大きな間違いのない材料も多い。従つてここでは取り扱う材料がすべてビンガム体であると仮定し、次の式が成立つものとする。

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau - K_B}{\eta_{pl}} g \quad (1)$$

b) 装置並に流れの機構： Fig. 1 に示すような装置を使用した場合、スクリーの溝幅 S が溝の高さに比べて十分大であるときは、溝の中の材料の流れは近似的に二平板間の流れと考えることができる。スクリーの回転については、スクリーを静止させて外筒を逆回転しても材料の流動については同じことであるし、そのように考えた方が簡単でもある。二平板間で流動している材料内の小要素をとつて Fig. 2 に示すような応力状態を考えれば、次のような関係がえられる。

$$\frac{d\tau}{dy} = \frac{dP}{dl} = \xi \quad (2)$$

即ち剪断応力の分布は直線をなし、その傾斜は圧力勾配に等しい。

Fig. 1 Schematic Section through the Screw Extruder Used for this Study.

c) その他の仮定： 材料はスクリーおよび外筒の面で流ることはなく、流路の中で層流をなして流れ、またスクリーの山と外筒との間隙からの漏れも無視できるものとする。

1・2 流路内の流れの状態

流動状態は回転数 N および出口圧力 P によつて次の4段階になることが推測できる。 V を外筒のスクリー方向 (Fig. 1 参照) の速度成分とすれば、次の関係がある。

$$V = (\pi/60)ND_s \cos \alpha \quad (3)$$

Fig. 3 において、(1) は押出機先端を全々絞らずにしたがつて材料は何等の妨げもなく自由に先端から流出し、流出口とフィーダーとの間に圧力差が生じない場合である。(2) 式より $dP/dl=0$ 。したがつて剪断応力は一定になり (1) 式より速度勾配は一定である。(2) 以下は先端を絞つた場合に相当し、流路内に流れと逆方向に圧力勾配を生ずる。(2) は背圧 P が小さい場合で静止面 (スクリー面) に働く τ が材料の降伏点 K_B より大なる場合、(3) は P が大きく、静止面附近で逆方向の応力を生ずるがその絶対値は K_B より小さい場合、(4) は P がかなり大きく静止面で働く逆方向の応力の絶対値が K_B より大となり、材料の逆流が生ずる場合である。先端を閉めきれば動面 (外筒面) に伴う流れ (Drag flow) の流量と上述の逆流 (Pressure flow) の流量とが相等しくなり、また P が極めて大なるときは、Pressure flow が Drag flow を凌駕し、全体として材料は逆流するようにな

Fig. 2 Stress Equilibrium of an Infinitesimal Element of the material.

* 昭和28年11月13日受理

** 東京大学工学部化学工学教室

*** 日本ガス化学工業株式会社

Fig. 3 Stress and Velocity Distributions in Screw Channel.

る。以上のそれぞれの場合について応力および流動の状態を図示すれば、Fig. 3 のようになるものと考えられる。

1.3 理論解析 (流動)²⁾

Fig. 3 (4) の場合が一番複雑であるが、最も興味もあるので、(4) より始めて次に (3), (2), (1) におよぶものとする。Fig. 3, (4) の図に示した記号を用いる。 $\tau = 0$ の面に $y=0$ の軸をとれば、(2) 式より

$$\tau = \xi y \quad (4)$$

となる。(4) 式と (1) 式と組合せて解くわけであるが、Fig. 3, (4) にしたがって

$$y \geq y_0 \text{ で } \tau > K_B, \quad \frac{du_1}{dy} = \frac{\tau - K_B}{\eta_{pl}} g \quad (5.1)$$

$$y_0 \geq y \geq -y_0, \quad |\tau| \leq K_B, \quad \frac{du}{dy} = 0 \quad (5.2)$$

$$y \leq -y_0, \quad \tau < -K_B, \quad \frac{du_2}{dy} = \frac{\tau + K_B}{\eta_{pl}} g \quad (5.3)$$

(4) 式と (5.1) 式を組合せてとくと、

$$u_1 = \left(\frac{\xi g}{2\eta_{pl}} \right) (y^2 - a^2) - \left(\frac{K_B g}{\eta_{pl}} \right) (y - a) + V \quad (6.1)$$

(4) 式と (5.3) 式を組合せてとくと、

$$u_2 = \left(\frac{\xi g}{2\eta_{pl}} \right) (y^2 - b^2) + \left(\frac{K_B g}{\eta_{pl}} \right) (y + b) \quad (6.3)$$

ここに、 a, b は、 $\tau=0$ すなわち $y=0$ の軸から外筒面およびスクリュー面までの距離を表わす。 $a+b=h$ (6.1), (6.3) のそれぞれの式で、 u_1 および u_2 は $y=y_0$, および $y=-y_0$ (Fig. 3 参照) で共に栓流速度 u_0 に等しくなるから、

$$(u_1)_{y=y_0} = (u_2)_{y=-y_0} = u_0 \quad (7)$$

この関係を用いると、 a, b は次のようになる。

$$a = \frac{h}{2} + \frac{\eta_{pl} \cdot V}{(\xi h - 2K_B)g} \quad (8.1)$$

$$b = \frac{h}{2} - \frac{\eta_{pl} \cdot V}{(\xi h - 2K_B)g} \quad (8.2)$$

$$\text{また } y_0 \geq y \geq -y_0 \text{ (栓流) } u = u_0 \quad (6.2)$$

以上の式より、Fig. 3, (4) の場合の流量 Q_4 は、

$$\begin{aligned} Q_4 &= \left\{ \int_{y_0}^a u_1 dy + 2u_0 y_0 + \int_{-b}^{-y_0} u_2 dy \right\} \cdot S \\ &= \left\{ \left(\frac{\xi g}{3\eta_{pl}} \right) (2y_0^3 - a^3 - b^3) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{K_B g}{2\eta_{pl}} \right) (a^2 + b^2 - 2y_0^2) + aV \right\} \cdot S \quad (9) \end{aligned}$$

なお、(9) 式の成立する範囲は、 $b \geq y_0$ である。(3) の場合も (4) の場合と同様にとくわけであるが、(5.3) の部分が消失して、

$$u = \left(\frac{\xi g}{2\eta_{pl}} \right) (y^2 - a^2) - \left(\frac{K_B g}{\eta_{pl}} \right) (y - a) + V \quad (10)$$

$$a = y_0 + \sqrt{\frac{2\eta_{pl}V}{\xi g}} \quad (11)$$

$$Q_3 = \frac{1}{3} V S \sqrt{\frac{2\eta_{pl}V}{\xi \cdot g}} \quad (12)$$

(12) 式の成立範囲、

$$b \leq y_0, \quad a - y_0 \leq h \quad (13)$$

(2) の場合をとけば、(5.2), (5.3) 式の部分が消失して、

$$u = \left(\frac{\xi g}{2\eta_{pl}} \right) (y^2 - a^2) - \left(\frac{K_B g}{\eta_{pl}} \right) (y - a) + V \quad (14)$$

$$a = \left(\frac{K_B}{\xi} + \frac{\eta_{pl}V}{\xi h g} \right) + \frac{h}{2},$$

$$b = \left(\frac{K_B}{\xi} + \frac{\eta_{pl}V}{\xi h g} \right) - \frac{h}{2} \quad (15)$$

$$Q_2 = \frac{hS}{2} \left(V - \frac{\xi h^2}{6\eta_{pl}} \cdot g \right) \quad (16)$$

(16) 式の成立する範囲、

$$(\tau)_{y=b} \geq K_B \quad (17)$$

(1) の場合は、

$$Q_1 = \frac{hSV}{2}, \quad \text{範囲, } P=0 \quad (18)$$

1.4 式の無次元化および流動線図

ここに、

$$w = \frac{\eta_{pl}V}{K_B h g}, \quad z = \frac{2K_B}{\xi h}, \quad U = \frac{u}{V} \quad (19)$$

のような無次元項を用いて、(9), (12), (16), (18) の諸式および範囲に代入すれば、次に示すように簡単な形

Fig. 5 Power Curves for Screw Extruder

Fig. 4 Flow Rate Curves for Screw Extruder

に表わすことができる。 $\bar{u}$ は流路内の平均流動速度を表わすものとすれば、

$$\text{成立範囲} \quad \text{使用式} \\ (1-z^2) \geq wz \quad U_4 = \frac{1}{2} - \frac{1-z}{6wz} + \frac{1-z^2}{12w} - \frac{wz^2}{4(1-z)^2} \quad (9')$$

$$(1-z^2) = wz \quad (\text{連続点}) \quad U_4 = U_3 = (1-z)/3$$

$$(1-z^2) \leq wz \leq 1 \quad U_3 = \frac{1}{3} \sqrt{wz} \quad (12)'$$

$$wz = 1 \quad (\text{連続点}) \quad U_3 = U_2 = 1/3$$

$$wz \geq 1 \quad U_2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{6wz} \quad (16)'$$

$$wz \rightarrow \infty \quad U_1 = \frac{1}{2} \quad (18)'$$

(9') 式に範囲の極限である $(1-z^2) = wz$ を代入すると、 $U_4 = (1-z)/3$ 、となるが、(12) 式に代入しても同様の値をうる。また dU/dwz の値も相等しい。また (12') 式と (16') 式も同様 $wz = 1$ で、 $U = 1/3$ 、となる。また (16') 式において wz を無限大にすれば、当然 (18') 式がえられる。すなわち (9') と (12') および (12') と (16') はそれぞれ、 $U = (1-z)/3$ および $U = 1/3$ で滑らかに連続し、(18') 式は (16') 式の漸近線であることが

* w 及び z について。流路内の塑性流動は一般に w, z のような無次元項でまとめられる。後述する Hedström の方法における c, s も全く同じ形の無次元項で、代表長の取り方が h, l に対し D, L が取られているにすぎない。著者らの先に発表した二重円管 (7) の場合にも同様である。今 c, s について考えて見ると

$$c = \frac{(\text{流動の始まる最小圧力差})}{(\text{流動操作に必要な圧力差})} \\ s = 8 \cdot \frac{(\text{流動の始まる最小圧力差})}{(\text{塑性粘着だけ考えたときの操作条件に必要な圧力差})}$$

であって、 c/s は $w \cdot z$ に相当するが、これは

$$\frac{c}{s} = \left(\frac{\eta p l}{D \bar{u} \rho} \right) \left(\frac{2L \bar{u}^2 \rho}{D P_0} \right) = \frac{2}{K \sigma \cdot f}$$

と書きえられレイノルズ数とファンニングの摩擦係数の積の逆数になる。Fig. 4, 5 の横軸はこのような意味をもっている。何れにせよ、このような形の無次元項で流れの状態を表わすことができることは、解析困難な流路について実験的にまとめる際に大いに役立つものと思われる。

わかる。 z をパラメーターにとり、 U と wz の関係線図を画けば、Fig. 4 に示すようになり、この線図を使用すれば、 wz を知つて U すなわち流量を、 U および z を知つて、 w すなわち回転数を直ちに知ることができる。

1-5 運転動力

運転動力は材料と動面との摩擦にのみ使用されるものとし、微小長さ dl の部分に必要な力を dF 、運転に要する動力を dW とすれば、

$$dF = \tau \cdot S dl \quad (20)$$

$$dW = V \cdot dF \quad (21)$$

(2) 式より、 $(\tau)_{y=a} = \xi a$

故に $(dW)_{y=a} = V \xi a S dl$ 、全長 l に対して、

$$W = V S \xi a l \quad (22)$$

流れの機構にしたがつて、それぞれの a の値を代入し、無次元項を用いれば次の諸式をうる。サフィックスを流動の場合と同様にとれば、

$$\text{成立範囲} \quad \text{使用式} \\ (1-z)^2 \geq wz \quad \frac{W_4}{k_1} \left(\frac{1-w}{w} \right) z = (1+z) + \frac{wz}{1-z} \quad (23)$$

$$(1-z)^2 = wz \quad \frac{W_4}{k_1} = \frac{W_3}{k_1} = w \frac{2-z}{z} \quad (\text{連続点})$$

$$(1-z)^2 \leq wz \leq 1 \quad \frac{W_3}{k_1} \left(\frac{1-w}{w} \right) z = 2\sqrt{wz} \quad (24)$$

$$wz = 1 \quad \frac{W_3}{k_1} = \frac{W_2}{k_1} = w \left(1 + \frac{2}{z} \right)$$

$$wz \geq 1, \quad \frac{W_2}{k_1} \left(\frac{1-w}{w} \right) z = wz + 1 \quad (25)$$

$$z \rightarrow \infty \quad \frac{W_1}{k_1} \left(\frac{1-w}{w} \right) z = wz \quad (26)$$

$$\text{ここに、} \quad k_1 = l S h K_B^2 / \eta_{pl} \cdot g$$

流量関係線図と同様に左辺を wz の関数として線図に画けば、Fig. 5 のようになる。(スクリュウの山と外筒の面の摩擦は考えていない。)

Fig. 6
Front End of Extruder

Fig. 8
Graphical Method of determining Flow Rate of the Screw Extruder with a Circular Hole Die.

§2. 流動線図の応用

2.1 回転数と先端圧力の関係

以上述べてきた解析は、スクリューの回転速度 V と先端圧力 P を各々独立に変化するものと考えているが、実際の操作の場合は、押出機の先端にある装置、例えば成形用のダイスをつけることとなり、このダイスの特性によつて P は V の函数となる。すなわちダイスの特性が圧力と流量の関係として、 $P=f(Q)$ 、とすれば、

$$P=f_1(UV) \quad (27)$$

で表わされるから、 w, z はともに V だけの函数となり結局 U は V だけの函数で、回転数と流量の直接の関係が求められる。(実験の項参照)

2.2 先端に円孔ダイスを取り付けた場合

例えば、長さが直径の10倍以上の円孔を有するダイスを取り付けた場合を例にとる。Fig. 6において、 H が D に比して小さく、流速が小であれば、縮流その他の圧力降下は小さいから、 $P \approx P'$ 、と考えられる。さてビンガム体の円管流動は管内平均速度を $\bar{v}$ 、管径 D 、管長を L とすれば、次式⁶⁾で表わすことができる。

$$\frac{PgD^2}{L\eta_{pl}\bar{v}} \cdot \left\{ 1 - \frac{4}{3} \frac{p}{P} + \frac{1}{3} \left(\frac{p}{P} \right)^4 \right\} = 32 \quad (28)$$

B. A Hedström 氏によれば、¹¹⁾ この式は無次元項

$$\frac{p}{P} = \frac{4LK_B}{DP} = c, \quad \frac{DK_B g}{\eta_{pl}\bar{v}} = s \quad (29)$$

を用いて書き直すと、次のようになる。

$$c^4 - 4(1+6/s)c + 3 = 0 \quad (30)$$

(30) 式より、 c は s の函数であるから、(28) 式より

$$\left(\frac{Pg}{L} \right) \left(\frac{D^2}{\eta_{pl}\bar{v}} \right) = \varphi(s) \quad (31)$$

Fig. 7 Hedström's Diagram for Pipe Flow

の形に表わすことができる。 s と $\varphi(s)$ の関係を線図にすれば、Fig. 7 のようになる。Fig. 7 と Fig. 4 とを組合せて設計並びに運転条件を定めることができる。なお円管でない場合は相当直径を計算して近以させるのがよいと思われる。

a) 流量が与えられたとき回転数を求める方法：流量が与えられれば、ノズル内の平均速度 $\bar{v}$ が定まるからまずこれより s を計算し Fig. 7 を用いて $\varphi(s)$ の値を定める。 $\varphi(s)$ からノズル圧力すなわち押出機先端圧力 P を (31) 式によつて計算し、 ξ を求め、これより z の値を決定する。一方 U の定義から、

$$U = \bar{v}/V = (Q/Sh)/V,$$

$$\therefore wzU = \frac{2\eta_{pl}Q}{\xi g Sh^3} \quad (32)$$

(32) 式の右辺は計算できるから、Fig. 4 の $w \cdot z \cdot U = k_2$ が定まる。前述の z の定めた曲線と、 $wzU = k_2$ の線の交点で U の値が定まり、この U から回転速度 V が与えられる。(3) 式を用いて N を定める。

b) 回転数が与えられたときに流量を求める方法：与えられた回転数の際のノズル圧力をかりに P_1, P_2, P_3 と定め (19) 式を使用して、これに相当する s_1, s_2, s_3 を計算する。材料、回転数が与えられれば、 w は定まるから、(19式)、上の各々の z と組合せ Fig. 4 よりこれに対応する U_1, U_2, U_3 を定め、これらより Q_1, Q_2, Q_3 を算出する。一方仮定した P_1, P_2, P_3 を使つて、(29) 式によつて c_1, c_2, c_3 を定め、ついで (30) 式を使用し $s = (24c)/(c^4 - 4c + 3)$ 、からそれぞれに対応する s_1, s_2, s_3 を計算し、(29) 式から、 $\bar{v}_1, \bar{v}_2, \bar{v}_3$ を定め、断面積を掛けて Q_1', Q_2', Q_3' を定める。Fig. 8 に示すよう

に、 Q_1 , Q_2 , Q_3 を結ぶ滑らかな曲線と、 Q_1' , Q_2' , Q_3' を結ぶ滑らかな曲線の交点が求める流量を与えることになる。

先端に二重管を付けた際も α - D 関係図を用いればほぼ同様に求めることができる。

§3. 実験および実験装置

3.1 実験装置

a) 装置： 大体 Fig. 1 に示すような装置を用いた。使用スクリーおよびダイスは Table 1 に示すとおり。

b) 材料： 製紙用カオリン（ $2 \sim 20 \mu$ 径，密度 2.6 gr/cm^3 ）60%，工業用ヒマシ油（密度 0.93 gr/cm^3 ）40% 重量の混合物。ただし混合の際相当量の空気が混入するので見掛け密度は理論値と合わない。この場合、ヒマシ油を使用したのは、粘度が大きいから混合物は単一材料と考えてよく、且つ鉄と粘着力が極めて大きいため表面で定着することがないことなどを考慮した結果である。

c) 塑性粘度，降伏点測定装置： Fig. 9 に示すごとく，圧力釜素で塑性材料を円孔ノズルより押出し，圧力と流量の関係を測定した。（Fig. 10 点線参照）

3.2 実験および測定値

a) 材料特性： McMillen 氏の方法⁵⁾によつて計算した結果は次のとおりである。

材料 I： $K_B = 28.5 \text{ Gr/cm}^2$, $\eta_{pl} = 390 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$

材料 II： $K_B = 9.5 \text{ Gr/cm}^2$, $\eta_{pl} = 800 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$

密度は何れも 1.41 g/cm^3 であった。

b) ダイスの検定（圧力-流量）： 例えば，材料 I を使用した場合の No. 3, 4, 5, のダイスの特性曲線は Fig. 10 に示すとおりである。

c) 実験値： 実際に測定した流量と，ダイスの特性

より求めた押出機先端圧力を用いて算出した理論流量を Table 2, Table 3 に示す。

Fig. 9
Apparatus for Measuring η_{pl} and K_B .

- ① Plastometer
- ② Reducing valve
- ③ Pressure gauge (Vessel)
- ④ Pressure gauge (Bomb)

Fig. 10
Examination of Flow Rate Characteristics of Dies.

Table 1
Dimensions of Screw and Die Used (in cm).

Screw	S	h	D_s	l	α	e
A	1.95	0.3	2.54	56.0	$17^\circ 40'$	0.2
B	3.0	0.3	2.54	39.9	$25^\circ 32'$	0.2
Die	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	
L	2.24	2.2	2.2	2.25	2.25	
D	0.95	0.5	0.29	0.23	0.09	

Table 2 Theoretical and Experimental Data (Material II).

Series No.	Screw Used A or B	N r. p. m.	Q_w Gr/min	Die Used No.	Pressure From Die Charact. Kg/cm ²	z	wz	U_{th} Theoretical	U_{exp} Experimental
1	A	25	49.5	1	Nearly None	∞	∞	0.5	0.50
2	A	40	124.7	1	"	∞	∞	0.5	0.49
3	A	49	156.0	1	"	∞	∞	0.5	0.50
4	B	24	107.0	1	"	∞	∞	0.5	0.49
5	B	25	113.0	1	"	∞	∞	0.5	0.50
6	B	34	157.0	1	"	∞	∞	0.5	0.49
7	B	35	199.6	1	"	∞	∞	0.5	0.49
8	A	25	46.5	3	4.35	0.815	0.74	0.29	0.30
9	A	40	77.5	3	5.75	0.617	0.895	0.32	0.31
10	B	25	53.0	3	4.15	0.609	0.524	0.25	0.23
11	B	35	72.0	3	5.5	0.460	0.553	0.25	0.23
12	A	25	70.0	2	1.25	2.84	2.58	0.43	0.44
13	A	40	116.5	2	1.7	2.09	3.03	0.45	0.47
14	B	25	82.5	2	1.38	1.83	1.58	0.39	0.36
15	B	35	101.2	2	1.52	1.66	2.00	0.42	0.32

Table 3 Theoretical and Experimental Data (Material I).

Series No.	Screw Used A or B	N r. p. m.	Q_w Gr/min	Die Used No.	Pressure From Die Charact. Kg/cm ²	z	w/z	U_{th} Theoretical	U_{exp} Experimental
16	A	58	3.2	5	24.5	0.43	0.149	0.024	0.009
17	A	28	2.05	5	18.5	0.58	0.095	0.016	0.012
18	A	39	43.9	4	8.6	1.24	0.285	0.178	0.18
19	A	24	26.7	4	5.6	1.90	0.269	0.173	0.18
20	A	17	16.5	4	4.2	2.55	0.256	0.169	0.15
21	A	11	9.3	4	3.0	3.55	0.231	0.160	0.16
22	A	38	52.9	3	4.6	2.32	0.519	0.240	0.22
23	A	28	41.3	3	3.9	2.73	0.451	0.224	0.23
24	A	27	38.0	3	3.65	2.92	0.465	0.228	0.23

§4. 考 察

a) この研究は、塑性材料に関するスクリー押出の基本的解析がないのに鑑み、最も簡単な仮定に基づいて行つたものである。 $h \ll S$ の条件は、考え方を簡単にする目的からでもあるが、一方工業的には、押出過程において同時に捏和の効果を大きくするためにこのような条件を満たすスクリーが用いられている。しかし実際上は流動方向に温度変化のある場合が多いから、式の形はさらに複雑になるであろう。材料のビンガム材料からの“ずれ”は式の上から補正することが可能である。

b) (9)~(16)式、(20)式を組合わせて圧力-流量関係を画いて使用押出機の特性を表わすことは、粘性材料についての報文⁴⁾にも多いが、これを塑性材料の場合にあてはめれば、Fig. 11 のようになる。Fig. 4 は押出機のジメンションその他の特異性にかかわらず、 $h \ll S$ の場合を総合的に表わしている点に特徴がある。

c) スクリューの山と外筒の間に間隙のある場合は今後の問題となる。

d) 動力の式は、スクリー山の山と外筒内壁との摩擦 (Fig. 1 の e) が考慮に入れてない。スクリーの歯幅がかなり大なときは、勿論動力式の内にこの影響を入れなければならない。c)、d) に関する計算は理論的には、大して困難なことではない。

e) ビンガム体にかなり近いと思われる使用材料につ

いては、Table 2, Table 3 が示すように、理論値とかなりよく一致している。このことは、二次元流動と考える仮定が事実に近いことを示していると思われる。

§5. 結 論

Fig. 1 に示すようなスクリー押出機について、簡単な仮定のもとにビンガム材料を用いた場合の理論解析を行い、その結果を Fig. 4 および 5 に線図として表わした。またこの線図の応用例として、先端に円孔ダイスを取り付けた場合について、Hedström 氏の円管流動計算法と組合せて設計並に操作条件の決定の方法を述べた。

理論解析を確認の意味で簡単な実験を行つたが、実験値は理論値に対して大体 1 割程度の誤差域内に入った。この結果は解析に当つて行つた仮定が事実に近いことを意味するものと考えられる。

記 号

- a, b : $\tau=0$ よりスクリー面及外筒内面までの距離
 $a+b=h$ [cm]
 c : 無次元項 $= p/P = 4LK_B/DP$ [—]
 D, D_s : ダイス、ノズル及スクリーの径 [cm]
 e : スクリューの歯幅 [cm]
 f : ファニングの摩擦係数又は函数 [—]
 g : 重力加速度 [cm/sec²]
 h : スクリュー溝の深さ [cm]
 K_B : ビンガム降伏点 [Gr/cm²]
 k_1 : 装置及材料による動力係数 $= lShK_B^2g/\eta p_1$
 k_2 : 無次元項 $= U \cdot w \cdot z$ [—]
 L : ノズルの長さ [cm]
 l : スクリュー溝の長さ [cm]
 N : 回転数 r. p. m.
 P : 圧力 [Kg/cm²]
 Q : 容積流量 [cm³/sec]
 Q_w : 重量流量 [Gr/min]

Fig. 11 Graph showing Pressure-Flow Rate Characteristics of Screw and Die.

R_s : レイノルズ数	[—]	ξ : 圧力勾配 $= dP/dl$	[Gr/cm ²]
S : スクリュー溝の幅 (直角方向)	[cm]	ρ : 密度	[g/cm ³]
s : 無次元項 $= DK_B g / \eta_{pl} \bar{v}$	[—]	τ : 剪断応力	[Gr/cm ²]
U : 無次元項 $= \bar{u} / V$	[—]	φ : 函数形 $\varphi(s) = (P/L)(D^2/\eta_{pl}\bar{v})$	
$\bar{u}$: スクリュー内における材料の平均速度	[cm/sec]	文 献	
V : スクリューの回転速度 $= N\pi D_s \cos \alpha / 60$	[cm/sec]		
$\bar{v}$: ノズル内材料の平均速度	[cm/sec]	1) B. Hedström : <i>I. E. C.</i> , 44 , No. 3, 651, (1952)	
W : 所要運転動力	[Gr-cm/sec]	2) H. Rowell : <i>Engineering</i> , 114 , 606, (1922) ; 120 , 249, 385, (1928)	
w : 無次元項 $= \eta_{pl} V / K_B g h$	[—]	3) 五十嵐啓夫 : 卒業論文 (東大, 化工) 昭和28年	
z : 無次元項 $= 2K_B / h\xi \doteq 2K_B l / hP$	[—]	4) J. Carley et al : <i>I. E. C.</i> , 45 , 969 (1953) (Symposium)	
α : スクリューの傾斜角		5) McMillen : <i>Chem. Eng. Prog.</i> , 44 , 539 (1948)	
η_{pl} : 材料の塑性粘度	[g/cm·sec]	6) 森芳郎他 : “最近の化学工学” (1951)	
		7) 森芳郎, 乙竹・直 : 化学工学, 17 , 224 (1953)	
		8) Simonds : “Extrusion of Plastics, Rubber & Metals” Reinhold Pub. Co., New York, (1952)	
		9) W. Pigott : <i>Trans. A. S. M. E.</i> , 37 , 947, (1915)	

On the Screw Extruding Process for Forming Plastic Materials.

Yoshiro Mori,* Naoshi Ototake,* & Hiroo Igarashi**

In the plastic, ceramic and other industries, screw extruders are often used for the purpose of forming materials. On the screw extruding process, many references have been published for viscous materials, but very few deal with plastic materials. And the extruders are designed and operated chiefly according to the experiential information. The object of this research is therefore to get the fundamental theory on the screw extruding process.

The problem was analysed under the assumption that the materials flow strictly according to the Bingham rheological equation. As results of the analysis, theoretical flow equations (9)—(8) were derived. Using the following three non-dimensional terms,

$$w = \frac{\eta_{pl} V}{K_B g h}, \quad z = \frac{2K_B}{\xi h}, \quad U = \frac{\bar{u}}{V}$$

these equations were simplified in very convenient forms as (9)—(18), and in the same way, power equations were derived as (23)—(26),

where η_{pl} : plastic viscosity

K_B : yield point

V : peripheral velocity of the screw

ξ : pressure gradient

$\bar{u}$: mean velocity of the material

h : depth of the screw.

Fig. 4 and 5 show the relations.

For example, by the aid of Fig. 4 and 5, and the B. O. A. Hedström's flow diagram, a definite condition at the exit port, having a small circular hole die was determined.

* The Faculty of Engineering, University of Tokyo.

** Japan Gas Chem. Co., Niigata.