(昭和42年3月29日受理)

濃厚溶液の押出しスクルー中での流動について

第2報 Transverse Flow についての実験的考察

東京工業大学 清水 二郎・浜野 久
石川 章一ON FLOW CHARACTERISTICS OF DENSE SOLUTION IN SCREW
EXTRUDERS. (II). EXPERIMENTAL CONSIDERATION OF TRA-
NSVERSE FLOW.

By Jirō Shimizu, Hisashi Hamano and Shōichi Ishikawa

(Tokyo Institute of Technology, Ōokayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan)

The authors have shown the possibility to introduce the Newtonian theory to the polymer flow in extruder.

In this paper the behaviour of polymer in extruders was observed and dealt with some theoretical methods. The transparent acrylic barrel was devised to observe the behaviour in extruder, (shown in Fig. 1, Fig. 2 in the previous report (1)). With the aim of observation of behaviour of polymer flow, small glass balls (diameter about 0.8 mm) were suspended as a fluid element, and the behaviour of the polymer was observed in the case of flat screw and the open out-let as shown in Fig. 3.

Fig. 3 shows the feature of the moving of the element in extruder, and Fig. 3' shows the relative position of the ball in screw channel, (here after the non-dashed number of figure shows the fluid element movement in extruder and dashed number of figure shows the relative position of it in screw channel).

The number in glass ball shows the position of the observed ball in time.

Then the behaviour of a element in the case of closing the out-let of the flat screw was observed under the conditions of screw rotations 10 r. p. m. 25 r. p. m. 40 r. p. m. (the interval of observation is 1/2 sec in 10 r. p. m. 1/3 sec in 25 r. p. m. 40 r. p. m.).

In case of closed out-let of screw, no substantial flow causes in the channel, but the intense transverse flow is observed (see Fig. 5, 5', Fig. 6, 6', Fig. 7, 7').

In order to discuss this flow pattern by the method of velocity vector, the authors introduce the non-dimensional number, a (in z axis), c (in x axis), defined by the viscosity and pressure gradient.

At first in the extreme case of closed out-let and opened out-let by using the flat screw, the velocity vector is shown in Fig. 2(a) and Fig. 4 (a).

Then the authors applied this consideration to the general metering screw having three sections, that is; feed section (flat part), compressing section (transilient part), and the end section. The feature of flow in those three sections are shown in Fig. 9, 9', Fig. 11, 11', Fig. 13, 13'.

The velocity vector in those three sections are shown in Fig. 8, Fig. 10 and Fig. 12.

As the results it was obtained that the transverse flow becomes more violent with the increase in back pressure gradient and in general metering screw, there is the most violent transverse flow at the front of the compression part. (see Fig. 15 of the preceding report (1)).

(Received March 29, 1967)

1. 緒 言

スクリー表面での流れとして、第1報で述べた drag, pressure, leakage flow の実質的な流れの外に、吐出量には直接関係ないが、スクリー中の溶液の混合に極めて関係の深い transverse flow が存在する。本報文ではこの transverse flow を考え合せてスクリー表面での流れの状態が、スクリーの形状、圧力勾配などによって受ける影響を実験に基づいて考察する。

押し出し機として、第1報に用いたアクリル製バレルを用いる(第1報、第1図、第2図)このような押し出し機を用いて流体中の様子を外部から観察した研究には松本、吉川、赤塚らの研究¹⁾があるが筆者らは黒色のガラス球(直径0.8mm程度)を先に用いた高分子溶液中に投入して、その移動の状態を1/2または1/3秒間隔で撮影し追跡することにより、流線の形状の変化、すなわち drag flow に対する pressure flow の影響により生ずる z 方向の成分と transverse flow による x 方向(座標軸は報文1の第5図参照)の成分により定まる流動状態の変化を観察し、スクリー形状と流動の関係を検討するとともに、スクリー形状の変化、すなわち、供給部、圧縮部、計量部によつて drag-flow に対して pressure flow の影響がどのように変化するかを速度ベクトル的に考え、これらの合成により、スクリーチャンネル中に発生する環流がスクリー全長の各部にわたつてどのように異なるかを実験的に追跡したものであつて、従来速度ベクトル的に解析したものはいくつか見受けられるが、筆者らはこれらの速度ベクトル的な取扱いを裏付けるべきスクリー全長にわたる各部の流れの状態を追跡することによつてその速度ベクトルの考え方の関連の上にたつて流動挙動を追究したものである。

このことにより、スクリー各部の流動がエクストルーダーにおいて重なる混合に如何に影響するかを明らかにすることを目的とした。

試料は第1報において使用したものを用いた。さらに実際のプロセスにおいては、相変化を伴う熔融押し出しが行なわれるわけであるが本実験においては熔融された物質の流動挙動を主に論じたために比較的高粘度の溶液を使用した。

2. 理論的考察

各スクリー中の流体の挙動は非常に複雑でちょうど線状のスクリー溝中を、らせ線を描いて進んでいく状態である。そこでスクリー溝中での各速度成分を簡略化した形で求め、スクリー中の流動を求めるための足がかりとする。すなわち h/w がはなはだ小さいという条

件の下で Mckelvey²⁾ が示したように、流体の速度ベクトルをスクリーの溝方向を z 、スクリーの巾方向を x として分けて考える。 x 方向の成分に関しては、第1報では吐出量に無関係なものとして考慮しなかつた。第1報、第9図、第15図で示すように、各スクリーの幅方向での圧力分布が存在する。すなわち第15図は圧縮型スクリーのスクリー溝の断面に投影した圧力分布を示すものである。この分布のスクリー壁に対する相対的な位置は必ずしも正確には示されないが、スクリー溝の断面方向に山と谷をもつた圧力変動があり、圧縮部において溝の巾方向の圧力分布が極大になることが図で示される。このような圧力分布は、スクリー回転により生ずるスクリー直径方向の drag 流と、それがスクリー溝の壁面にはばまれて溝中での背流となつて生ずる、スクリー溝断面内での複雑なうず巻流れによつて誘起されたものである。

そこで z 、 x 方向二つの流動の成分を考えて、定性的な推定をスクリー表面の流動に行なう。

第1報の場合と同様にバレルが回転したと考えた場合、 z 方向の成分は無次元数 a を使用することにより次のように示される⁴⁾。

$$\frac{v_z}{V_z} = (1-3a)y/h + 3a(y/h)^2 \quad (1)$$

のように与えられる。

ここに a は drag flow と pressure flow の比で無次元数である。 a は 0 と 1 の間の値を取り、 $a=1$ は drag flow と pressure flow が等しく吐出量は零となり、 $a=0$ では pressure flow が 0 となり drag flow のみとなる。

x 方向の速度成分に関しても全く同様にして考えられる。

$$\frac{v_x}{V_x} = (1-3c)y/h + 3c(y/h)^2 \quad (2)$$

c も上の場合と全く同様に、図15(第1報)からわかるように溝中の幅方向の圧力勾配によつて形式的に求められるものであるがその場合と全く同様にして

$$c = \frac{h^2}{6V_x\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) \quad (3)$$

ここに V_x はバレルとスクリー間の相対的な速度の x 方向の分速度であるから

$$V_x = \pi DN \sin \varphi \quad (4)$$

($\therefore$ スクリー回転速度 $= N\pi D$)

となる。

さきに述べたように c は a と全く同じ内容のものと考えたが、 x 成分での drag flow と pressure flow との関係は現在の状態では測定値として求めることは全く不可能である。それゆえ以後の議論にしてもこの方向の流

Fig. 1. Flow appearance of small black glass balls in extruder channel filled by comparative high viscosity fluid.

動に当つては推論の域を出ることはないが、スクリー溝中での流れを論ずる場合には非常に好都合なので、 x および z 成分を考慮する上において(1)式と(2)式のベクトル和を考える。

3. 実 験

アクリル製の透明バレル(第1報, 第1図, 第2図)を用い, かつ第1報で用いた高分子溶液のスクリー押出しを行ない, その際供給口から黒色のガラス小球を挿入した。この小球は溶液に対して極めて軽く, しかも溶液の粘度が高いので自重で沈降する速度は極めて小さい。この小球のスクリー溝中の移動状態を, 1/2 秒, 1/3 秒間隔で撮影し, その小球の移動状態を図上で解析した。第1図は溶液中を浮動する小球を撮影した状態の一例を示す。

実験は, drag flow と pressure flow とが transverse flow を含むスクリー表面流にどう影響するかを考察するために行なわれた。したがって flat screw に対して, スクリー回転数の変化に従う drag flow の変化による小球の移動状態, さらに pressure flow の加わった場合など, から得た知見によつて圧縮型スクリー内での流動状態の検討を行なつた。

Fig. 2(a). Velocity vector in the case of using Flat Screw, opening the out-let, ($\alpha=0$, $c=0$).

(b). Flow appearance of the above conditions.

(c). Real pattern of the above conditions.

3.1 Flat screw 中での流動状態

transverse flow について, 基本的な流動の状態を

Fig. 3. The appearance of the small glass ball movement along the screw against the screw flight.

小球の移動状態によつて実験的に考察するために、第1報で用いた flat screw (第1報, 第4図, A)³⁾を用いて (a), transverse flow, と (b) transverse flow に対して drag flow と pressure flow とが同時に加わつた場合に分けて観察した。

(a) Drag flow との関係

flat screw で吐出口を完全に開放した場合, z 方向, すなわちスクリー溝方向には圧力勾配は誘起されない。そのために定義した無次元数 a は零となる。そしてこの場合は x 方向すなわちスクリー溝の幅方向に対する圧力勾配もまた極めて小さいので, 同様に求めた無次元数 c もまた零となる。スクリー溝中の流動に関する, z, x 方向両成分ベクトルは(1)式と(2)式で $a=0, c=0$ とおくことにより

$$\frac{v_z}{V_z} = y/h \quad (5)$$

$$\frac{v_x}{V_x} = y/h \quad (6)$$

となりスクリー溝中の流れは第2図に示すように(5)(6)両成分ベクトル和から, drag flow のみによつて流れる場合には, スクリュー溝を展開すると第2図(b)に示すような流れとなり全く混練の作用はなく, そのまま吐き出されてしまうことになる。もちろん第2図は解析の都合上第1報³⁾で使用したと同様に, スクリューを固定しバレルが回転するものとして図示してあるから実際のスクリーの流動ではスクリーが回転し, バレル表面で運動は0となるから, このベクトル線図は逆にならなければならないが, 以下理論的考察に対する図形は実際の流動中では全くさかさまの形になる。この状態を小

球で観察したのが第3図である。

第3図は, スクリュー回転数を 10rpm にした場合でしかも 1/2 秒間隔でスクリー溝中の浮動ガラス小球を観察したものである。写真で観察したままを逐次スクリー上に重ね合せてその相対的な移動状態を観察し図示した。それによると, 図中の吐出端開放の場合には, 小球は流体と共に移動しスクリー溝中での溝壁との相対的な位置はあまり変化していない。しかしスクリー溝中では明らかに小球の移動の転移のあることがはつきりする。図中(以下全く同様)各相対的な位置をその移動順に実線で結び, かつスクリーの反対側に位置した場合には破線で示す。第3図では小球の①から⑥位までは壁と小球との相対的位置はほとんど変わらないが, 最少限に近づいた⑥位のところを過ぎると小球と, 壁との相対的な位置は次第に広がっていく, 実際のプロセスでは, スクリュー回転によりスクリーの壁は前進するのに対し, 相対的に小球は静止し, または後退するかのように見える。それは第3'図を見ればその状態がはつきり観察される。第3図でバレル上面にうつた番号はスクリー壁の移動位置を示す(以下同様)。第3'図では, スクリュー壁を固定して, その表面での相対的な位置関係を示したものである。これによると, スクリューが固定されるから小球の位置は時間とともに見かけ上後方に移動するように表現される。しかしながら回転による壁の前進を考慮するならば小球は溝中でスクリー表面を反転した場合に転写するように表現を総て規定した(以下総て同様に規定する。さらに第3図と第3'図は全く同じものを表現方法を変えたもので, 以下他のもの

FLAT SCREW

Fig. 3' The relative position of the glass ball in screw channel.

についても全く同様である)。図 3' 中①から⑥までは溝中スクリー表面に近い位置に小球があるので、その速度はスクリー表速に近い速度で移動し、単位時間(1/2

秒間隔)の移動距離は大きく⑥から⑩までは、小球はスクリー表面をはなれ、パネル内壁に近く、溶液中浮き上ってくるので、その速度も遅くなる。そして⑩において壁につき当り、パネル表面からスクリー表面、すなわち溝の底に引き込まれて反転して、図上では次の溝中で相対的に②の位置に現われてきている。小球が溝の底面に引き込まれるにつれて、小球の間隔は大きくなり、すなわち速度が早くなっていることが知られる。

このような観察により溝中にわずかばかりの渦巻き流れが生じていることが示される。したがって吐出端が開放の場合にも正確には第 2 図 c のように流れていることがわかりわずかな環流が存在することを示す。

(b) Pressure flow との関係

flat screw の吐出出口を完全に閉じた場合、には先きにも述べたように、drag flow と pressure flow がバランスした状態であるので、 $a=1$, $c=1$ となる。よつて(1)(2)両式は次のように書き表わされる。

$$\frac{v_z}{V_z} = 3(y/h)^2 - 2(y/h) \quad (7)$$

$$\frac{v_x}{V_x} = 3(y/h)^2 - 2(y/h) \quad (8)$$

この場合の速度は(7), (8)両式を合成するから a の場

Fig. 4. (a). Velocity vector in the case of using Flat Screw and closing the out-let.
(b). Flow pattern in above conditions.

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7.

The appearance of the small glass ball movement along the screw against the screw flight in the case of using the Flat Screw and closing the out-let (condition of the screw rotation; 10 rpm, 25 rpm, 40 rpm.)

FLAT SCREW

25 rpm
3 frames/sec

Exit end closed

Exit end open

 $P = 350 \text{ g/cm}^2$

40 rpm
3 frames/sec

Exit end closed

Exit end open

FLAT SCREW
 $P = 500 \text{ g/cm}^2$

$$P = 500 \text{ g/cm}^2$$

Fig. 5', Fig. 6', Fig. 7'.

The relative position of the glass ball in screw channel under the above condition.

合に比較してかなり複雑な流れになることが予想される。すなわち第4図aに示すように溝の深さ方向で実際のスクリー回転に対して、パレル内壁付近では速度が遅く、逆にスクリー溝の底面では速度が急速に速く移動するようになることが察せられ、またその方向も逆になる。すなわち第4図aのように溶液は溝の中で、スクリー表面ではひきづられるように急速に移動し、壁面で反転して、パレル内壁の方向に浮き上り、ゆつくり移動して、再び壁面で溝の底面に引き込まれるように移動することになる(第4図aの速度ベクトル表示はパレルが回転しているとして描いてあるので、実際には逆になる)。第5図は10 rpmでスクリーを回転した場合小球の移動を観察したものである(1/2秒間隔)。初め吐出口を開放にし、次に吐出口を閉じることによって、どのような挙動を示すかを観察したものである。この場合にもその基本的な挙動はさきの場合と同じであるが、そのくり返し速度ははるかに速くなる。小球は左側にある壁にぶつかった後、溝の上部をゆつくりと左側の壁をはなれ、右側の壁に徐々に近づく、ここでスクリー表面に押しつけられ、スクリーの回転速度に近い速度で回転しはじめながら左側の壁に近づく、ここで壁に沿って浮き上り、またこの挙動をくり返す。吐出口が閉じているために、実質的な吐出量は0である。これは図5をみてわかるように、小球は、スクリーの外の座標系に対しては静止しているのがわかる。溝中には完全な環流が存在する(4図b)。

第6図、第6'図、第7図、第7'図はさきに述べた方法によつて描いた図で、それぞれスクリー回転数が25 rpm, 40 rpmの場合である。

これらの場合にも原則的には、小球はスクリー外の座標系に対して、一方向に静止していなければならないのであるが、スクリー回転数の増加にともなつて、誘起される圧力勾配が大となり、そのために漏洩を起し、多少、小球は一方向に移動してしまつている。さらに、この2つの場合には撮影時間を1/3秒にしてあるためによる小球の速度は一段とその速さを増し、著しい環流がスクリー溝中に生じていることが知られる。すなわちここにいう transverse flow がよけいに行なわれていることがわかる。さらに背圧が高いほど、いいかえれば drag flow に対する pressure flow が多いほど、すなわち、 a や c が1に近いほど環流は著しくなると考えられ、終局的には混練の効果を増大するものと思われる。

3.2 圧縮型スクリーの溝中の流れ

3.1の観察から、drag flow のみの場合と pressure flow と drag flow とが平衡状態にあるような場合の両極端の場合のスクリー溝中の流動挙動が把握できた。

本節では以上の極端な状態から、drag flow と pressure flow とが共に存在する場合の一般的に熔融糸糸に使用する、圧縮部を持つたスクリーについてそのスクリー溝中の挙動を検討してみる。

第1報、第11図⁹⁾などに示したように、圧縮型スクリーに対する本研究の実験でのスクリー全長にわた

Fig. 8. Velocity vector in the case of the Flat part of the general metering screw.

Fig. 9. The appearance of the small glass ball movement along the screw against the screw flight in flat part of the general metering screw.

Fig. 9'. The relative position of the glass ball in screw channel at the flat part of the metering screw.

る圧力分布では、圧縮部を境にして、勾配が供給側と吐出側で異ってくる。その影響をうけて流動の挙動も異なってくる。そこで圧縮型スクリーを供給部、圧縮部、計量部に分けて実験的に検討する。

a. 供給部における挙動

供給部における挙動は、そのスクリー形状からみてほぼ flat screw の場合と同様と考えられる。しかし圧縮型のスクリー形状からみて、この供給部においても drag flow と pressure flow が共存する（流動の基本的な挙動は flat screw の場合と全く同じである）。しかし圧力勾配が次第に急になり、pressure flow が drag flow に対してその比率を大にするに従い、ガラス小球の移動は次第におそくなり、溝中の環流がよりはげしくなることがわかる。

この場合の z, x 方向の速度ベクトルは、 a, c の値は 0 と 1 の間の値をとり、圧縮部に近づくにしたがつてその値は 1 に近づいていく。そのために z, x 方向の速度成分から考えて、ほぼ 8 図のようになると考えられる。これは第 9 図、第 9' 図からもその挙動が観察される。

b. 圧縮部における挙動

ここでは供給部では平坦であつたスクリー軸面が次第に傾斜を持ち、スクリー溝の深さは次第に浅くなり、その結果、スクリー溝中に圧力勾配が発生する。さらにこの圧縮部を過ぎると、第 1 報からもわかるよう

に、その圧力勾配は逆に drag flow と pressure flow はその流れの方向を共にするようになる。

この部分では、2つの部分に分けて考える必要がある。すなわち圧力勾配が最大のところを境にして、それ以前と、それ以後の流動の状態が全く変わる。図 10 a) のようにその z, x 方向の速度ベクトルが考えられ、圧

Fig. 10. Velocity vector in the case of the transient part of the general metering screw.

(a). The front part of the maximum pressure point.

(b). The rear part of the maximum pressure point.

PROGRESSIVE CUT SCREW (TRANSILIENT SCREW)

Fig. 11. The appearance of the small glass ball movement along the screw against the screw flight in transient part of the general metering screw.

PROGRESSIVE CUT SCREW (TRANSILIENT SCREW)

Fig. 11'. The relative position of the glass ball in screw channel at the transient part of the metering screw.

力 peak 前では pressure flow が大きく、実質的な流れの量は次第に少なくなっていく。図からもわかるように、もどりの流れが多くなり、実際観察した球の挙動も図 11 からわかるように速度はおそくなり環流がよいに行なわれているものと思われる。

次にこの圧力 peak の地点を過ぎると pressure flow は実質的な吐出量を増すように働く。ここではスクリーンの dimensional な性格も少々変化するのではつきりはいえないがほぼ第 10 図(b)に示すように drag flow と pressure flow の和の形として、その速度分布が示されるものと思われる。

これらによつて、その実験結果を検討すれば、やはり圧力最高の地点を過ぎたところからその速度を一段と早めていることがはつきりする。図 11, 図 11' はその挙動のようすを観察したもので、図 11 では、圧縮部前での小球の移動はおそく、圧縮部を過ぎるころからその速度が非常に速くなっていることが知られる。

c. Metering section における挙動

この部分は他のどの区間よりも、スクリーン溝が浅くなっている。このために x 方向への圧力勾配はほとんど無視すれば、 $c=0$ となってしまう。さらに x 方向には、圧力勾配は、第 1 報に示したようであるので、drag flow と pressure flow はその流れの方向を共にする。そして、pressure flow は nozzle に近くなるほど減少することになる。

この区間における速度ベクトル図を描けば、図 12 のようになる。これからもわかるように、もどりの流れは存在せず、速度を早めて、nozzle 側に向うものと思われる。そして、drag flow の方は変わらずに、圧力勾配がゆるやかになるにつれて、pressure flow の方が減少するものと思われる。

これを観察したのが第 13 図、第 13' 図である。これによれば、nozzle に近づくにつれて、その速度が低下していることがわかる。さらに、圧縮部のような、逆の流れが存在しないために、さきに flat screw の場合に述べたように、スクリーン形状による環流がわずかに存在するだけと思われる。

以上より、圧縮型スクリーンの場合の各区間における流体の挙動が定性的に把握される。

Fig. 12. Velocity vector in the case of the metering part of the general metering screw.

4. 結 論

われわれは第1報から一貫して、flat screw を用いることにより、各シャ-速度に対する粘度を測定することにより、その流体のニュートン流体近似を試み、それを実験的に、実証した。さらに、ニュートン流体近似の妥当性という前提に立つて、われわれは、flat screw 中の流体挙動を直接観察し、それに速度ベクトルの考えを導入することによつて、スクリー-溝中で行なわれる環流についての考察を行なつた。これら flat screw に対する知見から、それを一般の熔融紡糸に使用する圧縮部を有するスクリー-中に適用し、その圧縮型スクリー-の全長にわたつて、供給部、圧縮部、計量部での各々の流体の挙動を観察し、同様に速度のベクトルを考慮して、それらの各部における流動状態を検討した。それによると、供給部では、明らかに drag flow と pressure flow 共存の状態で、圧縮部に近づくにつれて、pressure flow による背流が増し溝内に環流の増加するのがわかる。さらに圧縮部での圧力最高の地点以前では環流は大きく、その点を過ぎると速度が速くなりそれにつれて、環流はあまり生じなくなる。一番 nozzle に近い側では、ほと

んど環流は行なわれず、ただスクリー-溝が深さに対して、幅が大きくなる ((h/w) が小となる) ために、溝内で流体は強制的に拡散させられるような状態になるものと思われる。

このように考えると、流動物質の混合の度合を高めるためには、なるべく圧力勾配が大きく発生するようなスクリー-を設計すべきで、いつたん圧力最高の地点を通過した泡などは決して脱泡できないことがわかる。このためにもなるべく急激に圧力が発生するようなスクリー-、すなわち transient な部分になるべく短かく、かつ溝の変化の大きいものを選ぶべきであることがわかる。さらに環流発生の度合は、第1報、第15図に示すように、圧縮部前で溝中の圧力分布は極めて急激に変化し、実質的な混練の効果を高めるものと思われる。

文 献

- 1) 松本, 吉川, 赤塚; 化学工学, 22, 4号, 208(1958)
- 2) James. M. McKelvey; "Polymer Processing", John Wiley and Sons Inc. New York. London.
- 3) 清水, 浜野, 石川; 織学誌, 23, 466 (1967)
- 4) Plastic Engineering Series "Processing of Thermoplastic Materials" Reinhold publishing Cooperation New York.