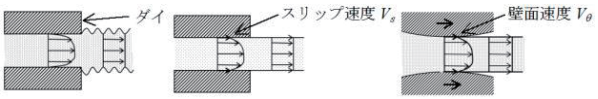
樹脂押出成形を高速化する円形ダイの研究

首都大学東京　理工学研究科 機械工学専攻　　水沼　　博

1. はじめに

熱可塑性樹脂を溶融状態でスリットや円形などの金属ダイから押し出し、シートやフィラメント状の樹脂製品を成形する押出成形が広く利用されている。生産性を高めるためは押出速度を高くする必要があるのに対し、高い押出速度では押出物の表面が粗面または波状となる溶融損傷(Melt Fracture)が発生する。この問題は1900年代中頃より 70 年以上にわたり研究されてきたにもかかわらず有効な抑制方法が見いだされていない[(1)]。ある種の添加剤を樹脂に添加すると溶融損傷が抑制されることが偶然見出され、商品化も行われている。しかし、樹脂の色や物性が変化するため一般的な抑制手法にはなっていない。添加剤は図 1a に示すダイ出口の樹脂の流れに図 1b のような壁面スリップを発生させる。この壁面スリップが溶融損傷抑制の原因とされている[(2)]。筆者はこの壁面スリップと同等の効果を図 1c に示すローラーダイを用いた移動壁面により達成することを発案した。シートやフィルムを成形する図 2a の平面ダイ出口に図 2b のように回転ローラーを取り付け、樹脂と接するローラー表面の速度を最適化することにより溶融損傷を抑制し、押出速度を 10 倍程度まで高速化できることをみいだし、その原理と条件について報告した[(3) (4)]。微細スケールの溶融損傷は sharkskin と呼ばれ、この sharkskin はダイ出口端で樹脂に発生する高い伸張変形により発生する。この出口端における伸張変形が、考案したローラー機構により抑制され、押出流れが安定化されると仮定し、その安定化に要するローラーの回転速度を予測し、実験結果とのよい一致を得た。



(a)通常ダイの sharkskin　(b)添加剤による sharkskin 抑制　(c)ローラーダイの sharkskin 抑制

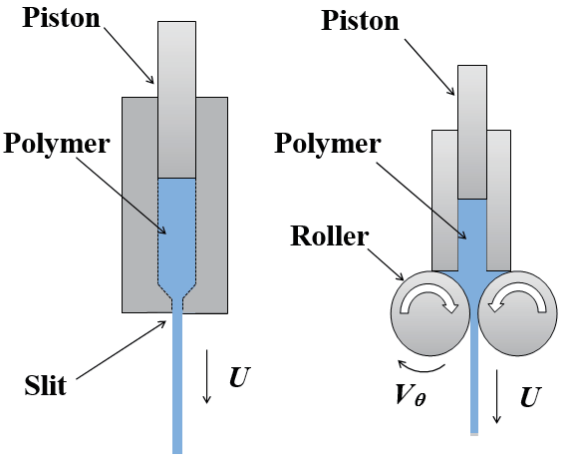
図 1 添加剤とローラーダイによる sharkskin 抑制

2. 目　的

本研究は前節で述べた押出加工への平面ローラーダイの応用を丸棒やフィラメントの製造に利用される円形ダイへ応用し、円形ダイからの押出速度を高速化するとともに、押出圧を低減し、押出成形動力を低減させることを目的としている。

3. 実用的な価値、実用化の見込など

円形断面の樹脂製品の押出成形加工は、丸棒やフィラメントのような素材以外に電線の被覆などにも広く利用されている。その高速化が可能になれば実用的価値は高い。溶融損傷に関する研究は広範に行われているものの、いまだ完全な解明には到っていない。ローラーダイはローラー回転速度を変化させることにより、ダイ出口端の樹脂流動条件を種々に変化させることができ、最適成型条件を調べるうえでも有用である。増え続ける各種高機能樹脂は加工性が難しいものが多く、ローラーダイはそれらに対しても有用と考えている。申請者は押出加工機の製造企業と情報交換を行いながら研究を進めており、実用化の見込みは高いと考えている。本助成による研究では成型速度の高速化以外にも実用的価値の高い成型加工技術が可能になることを新たに見出すことができた。実用化の上で新規技術の特許化は重要であり、成果の一部は特許出願後に改めて報告させて頂きます。



(a) 通常ダイ　　(b)ローラーダイ

図 2 平面ダイ

4. 研究内容の詳細

4.1 方法

図2の平面ダイの構造は単純に一対の円筒ローラーであり、上流の容器出口に直結して配置される。一方、円形ダイは一対のプーリー溝をもつローラーにより構成されるため、ダイ上流の加圧容器からプーリー溝への溶融樹脂の流れをどのようにすべきか、複数の構造を検討した。試作円形ローラーダイは樹脂が(A)二次元的矩形容器からダイへ押し出されるタイプ(図 3、4)と、(B)軸対称の円筒状容器からダイへ押し出されるタイプ(図 5)の二つのタイプとした。主として、(A)は円形ダイにおけるローラーダイの効果の検証を目的とし用いられ、(B)はローラーにいたるノズルの流路構造の影響とローラーと樹脂が接する長さ ℓ の影響を調べるために用いられた。長さ ℓ (= 2.0, 4.1, 6.4, 9.3 mm) は図 6 の h (= 2, 4, 6, 8 mm)に対応し、これら 4 つの ℓ に対するノズルを試作した。その一例を図 7 に示す。円形ダイ直径は(A)(B)どちらも 2mm とした。

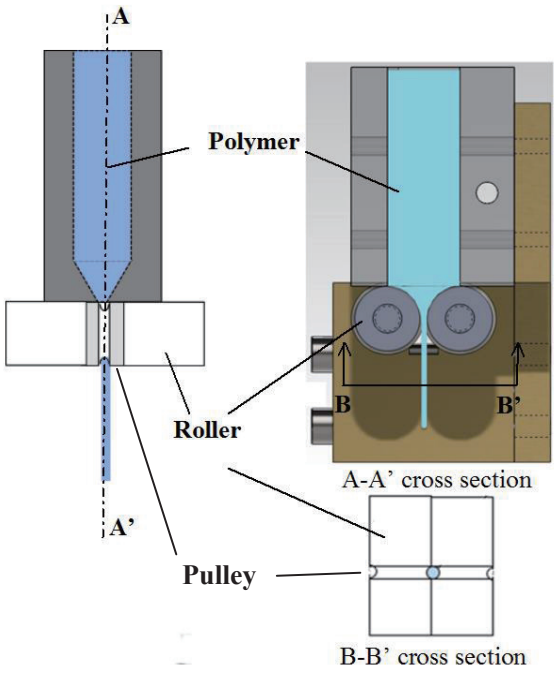


図 3 矩形容器と円形ローラーダイ

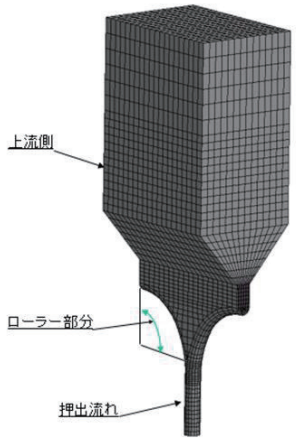


図 4 矩形容器とローラーダイ内の樹脂

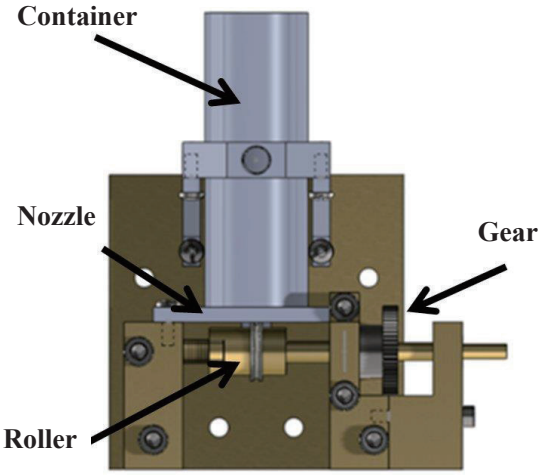


図 5 円筒容器とローラーダイ

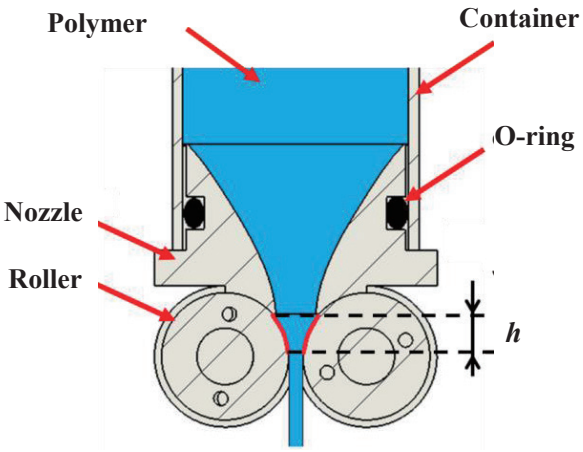
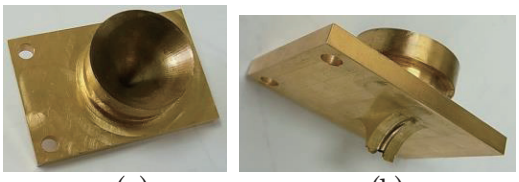


図 6 ダイ入り口ノズル



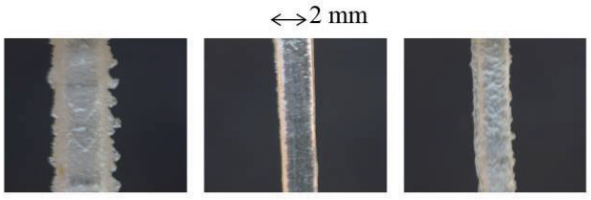
(a) (b)

図 7 ノズル（ℓ = 9.3 mm）

加圧容器内の樹脂はリニアモーター(DRS60SA4G-05NKA、オリエンタルモーター)により駆動されるピストンにより加圧され、ローラーダイへ送られる。一対のローラーは回転モーター(BLM230HP-20S、オリエンタルモーター)により駆動され、歯車を介して互いに樹脂を押し出す方向に回転する。実験は樹脂押出速度を一定に保ち、ローラーの回転速度を低速から高速まで変化させて行われた。押出された樹脂はカメラ(SLT-A65V, SONY)により撮影された。試料としてポリジメチルシロキサン(PDMS)とリニア低密度ポリエチレン(LLDPE)を用いた。

4.2 結果と考察

結果の一部を特許出願するため、報告はタイプAのダイに対するPDMSの結果のみについてのみとし、タイプBに対する結果は改めて報告する。タイプAのダイの場合、ローラーを停止した状態では押出速度 V_f = 7 mm/s を超えると押出物表面に sharkskin が発生する。図 8 に押出速度をこれより高い V_f = 20 mm/s とし、ローラー壁面速度 V_w を 0 から 39 mm/s と変化させたときの押出物の変化を示す。図 8a の V_w = 0 mm/s のときには sharkskin が発生しているが、ローラーの回転速度を高め、図 8b のローラー壁面速度 V_w = 7.4 mm/s としたときには押出物表面が平滑となり、背面の黒い背景が透けて見える。ローラーの回転速度をさらに高め、図 8c のローラー壁面速度 V_w = 39.0 mm/s としたときには再び押出物表面は sharkskin と同様な粗面となる。このようにローラー回転数を適切に調整することにより、ローラーのない通常のダイよりも高い押出速度 V_f で樹脂を押し出すことが可能であり、ローラーダイが平面ダイだけでなく円形ダイに対しても有効であることを明らかにすることができた。



(a) V_w = 0　(b) V_w = 7.4　(c) V_w = 39.0 mm/s

図 8 押出物（押出速度 V_f = 20 mm/s）

種々の樹脂押出速度に対し、ローラー回転数をどのように調整すれば sharkskin の無い安定な押出流れが得られるかを調べるため、上記図 8 と同様な実験を種々の押出速度ごとに行った。図 9 は押出速度を一定としてローラー速度を高めたとき、押出物が不安定(粗面)→安定(滑面)→不安定(粗面)と変わる変化の境界を示している。不安定(粗面)→安定(滑面)の条件を低臨界(●)とし、安定(滑面)→不安定(粗面)の条件を高臨界(▲)と定義すると、各臨界条件におけるダイ壁面速度はいずれも押出速度と共に増加する。

通常ダイの溶融損傷発生条件についてはこれまでにも多数の研究がある。Cogswel[5]は sharkskin の発生はダイリップにおける樹脂の伸張速度がある臨界値を越えたときにおきると考えた。一方、Miglerら[6]は添加剤により sharkskin が高い押出速度まで抑制される条件のもとで、ダイリップにおける樹脂の流動を可視化観察した。その結果、reconfiguration rate T (=伸張速度×伸張変形)がある臨界値を越えたときに sharkskin が発生することを見出した。申請者らは平面ダイにローラーダイを用い、図 9 の低臨界に相当する条件について検討した。ダイリップにおける樹脂の流動を近似解析し、apparent reconfiguration rate $\dot{T}_a$ を新たに定義し、低臨界の条件が $\dot{T}_a$ 一定の条件に一致することを明らかにした。本研究では円形ローラーダイに対する低臨界の条件を明らかにするため、低臨界条件におけるローラー壁面速度と押出速度の比 V_w / V_f と $\dot{T}_a$ との関係を調べた(詳細は前報[3])。ダイリップの流れを壁面速度 V_w のポアズユ流れとし、$\dot{T}_a$ を

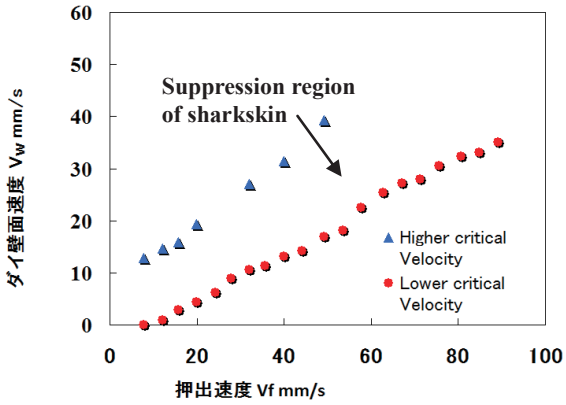


図 9 ローラーダイ壁面速度の安定化有効範囲

$$\dot{T}_a = \frac{V_f - V_w}{R} \cdot \frac{V_f}{V_{\text{ave}}} \tag{1}$$

と定義する。ここで R はダイ半径、V_{ave} は sharkskin 層がダイ内部で持つ平均流速である。V_w / V_f と $\dot{T}_a$ との関係は

$$\frac{V_w}{V_f} = \frac{V_f / R\dot{T}_a}{1 + V_f / R\dot{T}_a} - \frac{h_c}{R}\left(2 + \frac{3}{2}\frac{1-n}{1+n}\right) \Bigg/ \left\{ \frac{V_f}{R\dot{T}_a}\left(1 + \frac{V_f}{R\dot{T}_a}\right)\right\} \tag{2}$$

と得られ、ここで h_c は押出物の sharkskin 層厚さ、n は指数則粘性モデルのべき指数である。ローラーを停止したとき(V_w = 0)の低臨界押出速度を V_{f0}、$\dot{T}_a$ を $\dot{T}_{a\,\text{crit}}$ とすると式(2)より

$$\frac{V_{f0}}{R\dot{T}_{a\,\text{crit}}} = \sqrt{\frac{h_c}{R}\left(2 + \frac{3}{2}\frac{1-n}{1+n}\right)} \tag{3}$$

となる。式(3)右辺をξとし、低臨界で $\dot{T}_a = \dot{T}_{a\,\text{crit}}$ (一定)と仮定すると、円形ダイの低臨界条件における V_w / V_f と V_f / V_{f0} の関係は

$$\frac{V_w}{V_f} = \frac{\xi \cdot V_f / V_{f0}}{1 + \xi \cdot V_f / V_{f0}} - \frac{h_c}{R}\left(2 + \frac{3}{2}\frac{1-n}{1+n}\right) \Bigg/ \left\{ \xi \cdot \frac{V_f}{V_{f0}}\left(1 + \xi \cdot \frac{V_f}{V_{f0}}\right)\right\} \tag{4}$$

と得られる。図 9 の縦軸と横軸を V_w / V_f と V_f / V_{f0} とし、式(4)の低臨界条件の予測結果と実験結果との比較を図 10 に示した。低臨界の実験結果はほぼ予測式と一致している。図には添加剤により壁面スリップ V_s を発生させたときに、sharkskin の抑制(●)または発生(＊)を観察した Migler ら[6]の結果も同様に示した。抑制点は低臨界を超えた安定域にあり、発生点は低臨界以下の不安定域にあり、円形ダイに対する Migler らの結果も予測式(4)と一致した。したがって、式(4)は添加剤によるスリップやローラーダイによる sharkskin の抑制を予測する上で有効である。

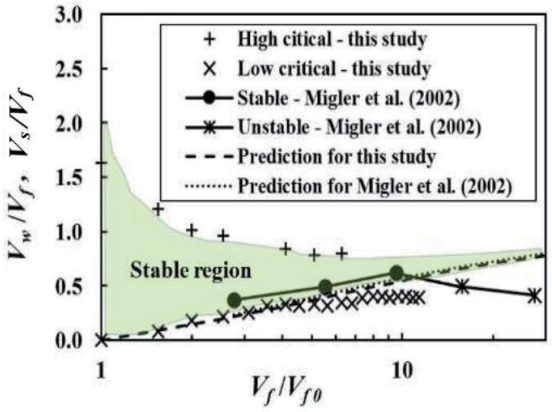


図 10 低臨界条件の実験結果(×)と予測式(4)(---)

5. まとめ

円形ダイにローラーダイを応用し、sharkskin の発生する押出速度を約 10 倍程度まで高くすることができた。棒状またはフィラメント状の成型加工や電線の被覆などの高速化が可能になると考えられる。また、その低臨界条件の予測式を解析的に導いた。ローラーダイは広い押出速度の範囲にわたり樹脂の成形安定性を調べることができ、その安定性を調べる上でも有用と考えられる。

本研究の実施にあたり、助成いただいた公益財団法人金型技術振興財団に深く謝意を表します。

6. 参考文献等

(1) Denn, M. M., “Extrusion instabilities and wall slip,” Annu. Rev. Fluid Mech. **33**, 265-287 (2001).
(2) Migler, K. B., C. Lavallée, M. P. Dillon, S. S. Woods and C. L. Gettinger, “Visualizing the elimination of sharkskin through fluoropolymer additives: Coating and polymer-polymer slippage,” J. Rheol. **45**, 565-581 (2001).
(3)Mizunuma, H. and Y. Ohata, “Influence of wall boundary conditions on sharkskin,” J. Non-Newtonian Fluid Mech. **228**, 55–63 (2016).
(4)水沼、大畑、特願 2015-33428、装置及び成形方法
(5) Cogswell, F. N., “Stretching flow instabilities at the exits of extrusion dies,” J. Non-Newtonian Fluid Mech. **2**, 37-47 (1977).
(6) Migler, K. B., Y. Son, F. Qiau and K. Flynn, “Extensional deformation, cohesive failure, and boundary conditions during sharkskin melt fracture,” J. Rheo. 46, 383-400 (2002).