

## 可塑化押出の基礎

### 1. 熔融の理論モデル

この記事では、熔融ゾーンの長さを計算するために必要な方程式を提供するモデルを提案します。この長さは、ポリマーの物理的特性と押出条件によって異なります。

計量ゾーンのよく知られた簡略化された図が採用されています (1, 2)。ここでは、スクリュ溝ををスクリュから巻きほども、直交座標系に沿って配置されています。z 座標はスクリュ溝に平行方向、x はスクリュ溝に直角方向、y はスクリュ溝深さ方向。図 1 は、巻きほどこれたスクリュ溝の理想的な断面を示しています。バレル内面は上部にあり、一定速度  $V_b$  で移動し、それぞれスクリュ溝に直角方向とスクリュ溝に平行方向の速度成分  $V_{bx}$  と  $V_{bz}$  を伴います。スクリュ表面が底部にあり、スクリュフライトが両側にあります。

実験的研究の後、Maddock (3) は融解プロセスの定性的メカニズムを提案しました。彼の観察によると、高温の表面と接触した固体粒子が部分的に溶け、バレル内壁に溶けたプラスチックの膜が形成されます。

この膜とおそらく一部の粒子はバレル内面に引きずられ、前進するスクリュ押側フライトにより、以前に溶けていた物質と混合されます。熔融した材料はチャンネルの後部の領域に集まりますが、チャンネルの前部は固体粒子で満たされます。ソリッドベッドの幅  $X$  は、スクリュの出口端に向かって徐々に減少します。融解プロセスは、ソリッドベッドが消失すると終了します。提案されたモデルはこれらの観察に基づいています。

### モデルの説明と仮定の簡略化

モデルの基本的な仮定は、時間の経過に伴う温度と速度の定常状態の存在です。これは、スクリュ溝のどの断面でも、固体と熔融物の界面は時間的に同じ位置に留まるということを意味します。さらに、固体と融解物の境界は鋭い境界であり、これはプラスチックが徐々に軟化するのではなく鋭い融点を持っていることを意味します。ソリッドベッドは均一かつ連続的なものであると考えられます。スクリュ溝とソリッドベッドの断面は両方とも長方形です。提案されている理想的な融解メカニズムは次のとおりです。図 1 および 2 を参照

すると、熱はバレル内壁から移動する融解フィルムを通して固体と熔融物の界面に伝達されます。融解フィルム内での剪断発熱（粘性散逸）によって追加の熱が発生します。熔融プロセスのほとんどを通じてソリッドベッドの高さはその幅よりもはるかに小さいため、スクリュ溝後部のメルトプールからソリッドベッドへの熱伝達は無視します。固体粒子の融解はメルトフィルムとソリッドベッドとの界面でのみ起こります。ソリッドベッドが一定の速度  $V_{sy}$  で界面に移動する間、熔融材料はバレル内壁によってスクリュ溝の後方に引きずられるため、定常状態が維持されます。スクリュ溝に平行な  $z$  方向の熱伝導および対流熱伝達は無視します。熱伝達の計算では、ソリッドベッドの深さは無限であると想定します。この仮定は、固体プラスチックの熱伝達係数が非常に低いため、界面温度から界面から遠い固体の温度まで急速に低下するという事実に基づいて部分的に正当化されます。どの断面においても、界面での熔融速度は、メルトフィルムから界面への熱伝達率と界面からソリッドベッドへの熱伝達率に依存します。フィルムの厚さは実験的にも理論的にも非常に薄い(0.02cm程度)(0.2mm程度)ことが判明し、一方でバレル速度は通常は高い(20cm/秒程度)(200mm/秒程度)。これは、熔融フィルム中には2枚の無限に長い平行なプレート間で起こると考えられる純粋な牽引流が存在するという仮定を正当化します。上部のプレートはバレル内壁です。一定の速度  $V_b$  と温度  $T_b$  を持ちます。実際には界面である下部プレートは、一定の温度  $T_m$  (プラスチックの融点) と一定のスクリュ溝に平行な速度  $V_{sz}$  を持ちます。メルトフィルム内のせん断速度が高く、かなりの発熱を引き起こすため、流体はニュートン流体であると仮定します。すべての物理的特性は一定であると仮定されます。最後に、所定の断面で事前に取得した熔融速度を利用して、スクリュ溝に平行な  $z$  方向の質量バランスにより、ソリッドベッドの幅とスクリュ溝に平行な距離の関係が得られます。

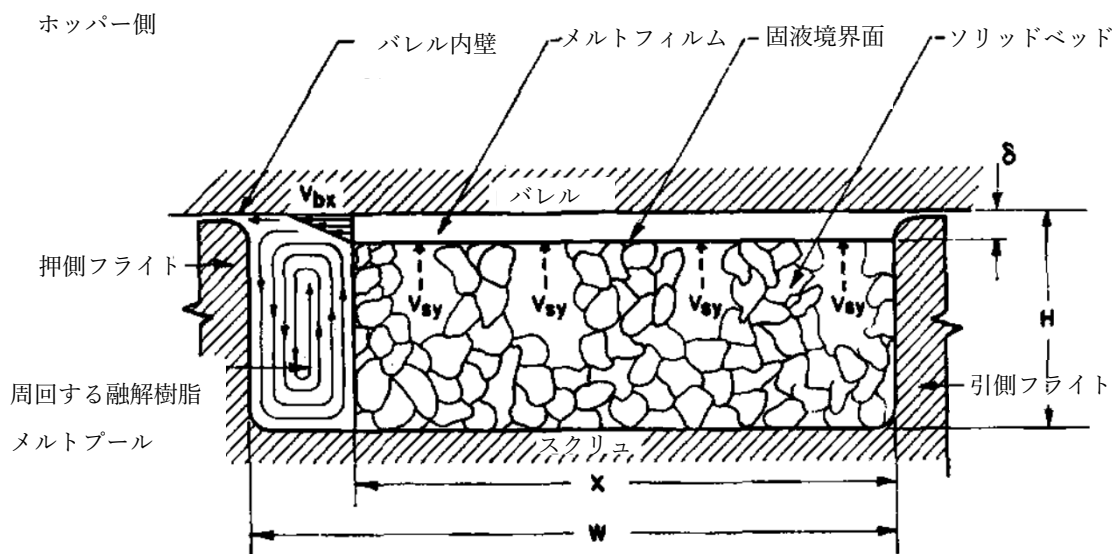


図1. スクリュ溝断面図 (注意：樹脂の進行方向が反オペレータ側から見た図である。)

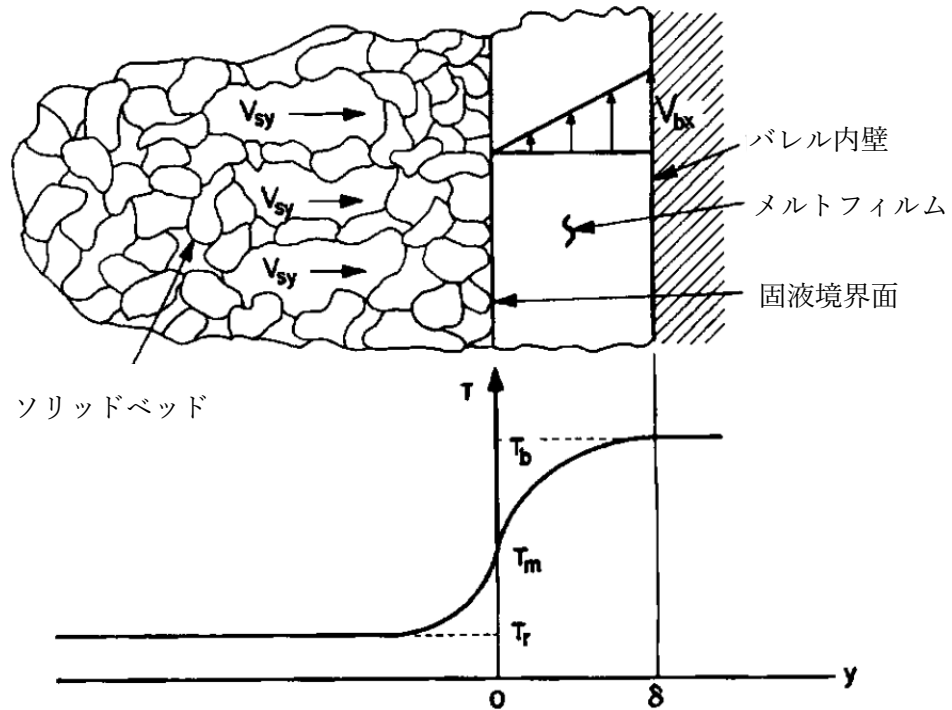


図2. メルトフィルム内部及びソリッドベッド内部の温度分布

### メルトフィルム膜厚と溶解速度

異なる速度と温度での二つの平行なプレート間のニュートン流体の温度プロファイルは、粘性散逸によって生成される熱（剪断発熱）を考慮して、(4)より前に導出されています。境界条件  $T = T_m; y = 0; T = T_b, y = \delta$  (図2)による解は次のとおりです。

$$\frac{T - T_m}{T_b - T_m} = \frac{\mu(\Delta V_b)^2}{2k_m(T_b - T_m)} \frac{y}{\delta} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right) + \frac{y}{\delta} \quad (1)$$

ここで、 $y$  は固体と溶融界面からの距離、 $\delta$  はスクリュ溝距離  $z$  の関数である膜厚、 $\Delta V_b = V_b - V_{sz}$  (ベクトル減算) はバレル内壁とソリッドベッドの間の速度差です。メルトフィルムから界面への熱流束は次のようになります。

$$-[q_y]_{y=0} = k_m \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = \frac{k_m}{\delta} (T_b - T_m) + \frac{\mu(\Delta V_b)^2}{2\delta} \quad (2)$$

ソリッドベッドでは、一定の上向き速度により、時間に依存しない温度プロファイルが形成され、界面融解温度からソリッドベッドの初期温度まで指数関数的に低下します。温度の低下速度はプラスチックの物理的特性にも依存しますが、未知のソリッドベッド速度  $V_{sy}$  にも影響されます。

境界条件  $T = T_m, y = 0$  ;  $T \rightarrow T_r, y \rightarrow -\infty$  でのソリッドベッドの温度プロファイル (図 2) は次のとおりです。

$$\frac{T - T_r}{T_m - T_r} = \exp\left(\frac{V_{sy}y}{\alpha_s}\right) \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_s = k_s / \rho_s c_s$ 。界面からソリッドベッドへの熱流束は次のとおりです。

$$-[q_y]_{y=0} = k_s \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = \rho_s c_s (T_m - T_r) V_{sy} \quad (4)$$

図 2 は、メルトフィルムとソリッドベッドの温度プロファイルを示しています。界面への熱流量と界面からの熱流量の差が、プラスチックを溶かすのに必要な熱量です。

$$\left[ \begin{array}{c} \text{界面における単位面積} \\ \text{当たりの融解速度} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{界面への単位面積} \\ \text{当たりの伝導熱量} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{界面からの単位面積} \\ \text{当たりの伝導熱量} \end{array} \right]$$

$$V_{sy} \rho_s \lambda = \left[ \frac{k_m}{\delta} (T_b - T_m) + \frac{\mu(\Delta V_b)^2}{2\delta} \right] - [\rho_s c_s (T_m - T_r) V_{sy}] \quad (5)$$

ここで、 $\lambda$  はプラスチックの融解熱です。熱バランスのこの式は、膜厚  $\delta$  とソリッドベッド速度  $V_{sy}$  との関係を示します。

所定の断面でのソリッドベッドの幅を考慮すると、定常状態で界面に流入するスクリュ溝に平行な距離ごとの単位時間あたりの材料の量は、溶融膜内の牽引流によって運び去られる材料の量に等しくなければならず、両方とも、スクリュ溝に平行な方向の単位長さあたりの溶融速度として定義される  $\omega$  に一致します。ここで、 $A$  はプラスチックの融解熱です。熱バランスのこの式は、膜厚  $\delta$  とソリッドベッド速度  $V_{sy}$  との関係を示します。

所定の断面でのソリッドベッドの幅を考慮すると、定常状態で界面に流入するスクリュ溝に平行な距離ごとの単位時間あたりの材料の量は、溶融膜内の牽引流によって運び去られる材料の量に等しくなければならず、両方ともスクリュ溝に平行な方向の単位長さあたりの溶融速度として定義される  $W$  に一致します。

$$\left[ \begin{array}{c} \text{単位長さあたり} \\ \text{の融解速度} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{単位長さあたり} \\ \text{のソリッドベッドから} \\ \text{界面への質量流速} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{単位長さあたり} \\ \text{のメルトプールへの} \\ \text{質量流速} \end{array} \right]$$

$$\omega = V_{sy} X \rho_s = \frac{V_{bx}}{2} \delta \rho_m \quad (6)$$

ここで、 $X$  はソリッドベッドの幅、 $\rho_m$  は溶融物の密度です。この質量バランスは、新しい未知の  $X$  を導入しますが、膜厚とソリッドベッド速度の間の 2 番目の関係を示します。方程式 5 と 6 から、 $\delta$  と  $\omega$  は、 $X$ 、物理的特性、および操作条件に関して表すことができます。

$$\delta = \left\{ \frac{[2k_m(T_b - T_m) + \mu(\Delta V_b)^2]}{V_{bx}\rho_m[C_s(T_m - T_r) + \lambda]} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

$$\omega = \left\{ \frac{V_{bx}\rho_m \left[ k_m(T_b - T_m) + \frac{\mu}{2}(\Delta V_b)^2 \right] X}{2[C_s(T_m - T_r) + \lambda]} \right\}^{1/2} \equiv \Phi X^{1/2} \quad (8)$$

$$\text{where } \Phi = \left\{ \frac{V_{bx}\rho_m \left[ k_m(T_b - T_m) + \frac{\mu}{2}(\Delta V_b)^2 \right]}{2[C_s(T_m - T_r) + \lambda]} \right\}^{1/2} \quad (9)$$

ソリッドベッドの幅が減少すると、 $\delta$  と  $\omega$  の両方が減少します。それらはこの幅の平方根に比例し、融解の開始時に最大値を示し、 $X = 0$  の終了時にゼロに減少します。

### ソリッドベッド・プロファイル

ソリッドベッドの幅  $X$  は、スクリュ溝に平行な距離  $z$  の関数です。それらの間のこの関

係は、スクリュ溝に平行な方向のソリッドベッドの差分質量バランスから得ることができます。膜厚の変化は無視され、ソリッドベッドには一定のスクリュ溝に平行な速度が割り当てられます。動作中の押出機の溶融ゾーンに高温の材料のプラグを注入し、スクリュ内にある熱電対でその前進速度を測定することにより、一定速度の仮定が適切であることが実験的に確認されました (5)。

$$XH\rho_s V_{sz}|_z - XH\rho_s V_{sz}|_{z+\Delta z} = \omega\Delta z \quad (10)$$

ここで、H はチャンネルの深さであり、このバランスではソリッドベッドの高さに等しいと想定できます。式 10 を  $\Delta z$  で割り、後者をゼロに近づけると、次のようになります。

$$\frac{d}{dz}(XH) = -\frac{\omega}{V_{sz}\rho_s} \quad (11)$$

溶解プロセスが行われるセクションは通常、テーパ状 (圧縮域) になっています。テーパが始まった後の任意の距離  $z$  でのチャンネル深さは、次のように表すことができます。

$$H = H_1 - A_z \quad (12)$$

ここで A は定数です。式 12 と 8 を式 11 に代入すると、次の微分方程式が得られます。

$$(H_1 - A_z) \frac{dX}{dz} - XA = \frac{\Phi X^{\frac{1}{2}}}{V_{sz}\rho_s} \quad (13)$$

境界条件  $z=0$ 、 $X=X_1$ 、および  $z=z$   $X=X$  を使用した式 13 の解は、テーパ部分の前で溶融が始まることを意味します。

$$\frac{X}{W} = \frac{X_1}{W} \left[ \frac{\Psi}{A} - \left( \frac{\Psi}{A} - 1 \right) \left( \frac{H_1}{H_1 - A_z} \right)^{1/2} \right]^2 \quad (14)$$

$$\text{Where } \psi \equiv \frac{\Phi W^{\frac{1}{2}}}{\left( \frac{X_1}{W} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{G}{H_1}} \quad (15)$$

G はソリッドベッドの速度で表すことができる質量流量です。

$$G = V_{sz}WH_1\rho_s \quad (16)$$

テーパ部分の溶融の全長  $z=Z_f$  は、式 14 から計算できます。この場合、 $X=0$  及び

$$Z_f = \frac{H_1}{\psi} \left( 2 - \frac{A}{\psi} \right) \quad (17)$$

式 17 を式 14 に代入すると、次のようになります。

$$\frac{X}{W} = \frac{X_1}{W} \left\{ \frac{\psi}{A} - \frac{\frac{\psi}{A} - 1}{\left[ 1 - \frac{Z}{Z_f} \left( 2 - \frac{A}{\psi} \right) \frac{A}{\psi} \right]^{1/2}} \right\}^2 \quad (18)$$

単位長さあたりの平均溶解速度は次のとおりです。

$$\bar{\omega} = \frac{1}{Z_f} \int_0^{Z_f} \omega dz \quad (19)$$

式 8 と 14 を 19 に代入すると、次のようになります。

$$\bar{\omega} = \frac{\Phi X_1^{1/2}}{Z_f} \int_0^{Z_f} \left\{ \frac{\psi}{A} - \frac{\frac{\psi}{A} - 1}{\left[ 1 - \frac{Z}{Z_f} \left( 2 - \frac{A}{\psi} \right) \frac{A}{\psi} \right]^{1/2}} \right\} dz = \frac{\Phi X_1^{1/2}}{2 - A/\psi} \quad (20)$$

$\psi$  は式 15 で定義されました。これは無次元であり、その物理的意味は、テーパ部分の開始時の単位深さあたりの固体質量流量に対する単位長さあたりの溶融速度の比です。テーパ部分の始まりで溶融が始まる場合は、式 14、15、18、20 の  $X_1$  を  $W$  に置き換える必要があります。

テーパ部分のどこかで溶融が始まる場合にも、同様の一連の方程式を導出できます。その場合、方程式 13 の境界条件は異なります。これらの方程式は存在しません。

興味深い特殊なケースは、平行溝深さでの融解です。導出は提示されたものと同様です。  $A = 0$  および境界条件  $z = 0, X = W$  を使用した式 13 の解は次のようになります。

$$\frac{X}{W} = \left(1 - \frac{z}{Z_f}\right)^2 \quad (21)$$

そして溶ける長さは

$$Z_f = \frac{2H_1}{\psi} \quad (22)$$

## 議論

テーパの開始時に融解が始まるテーパ付きスクリュ溝のソリッドベッド・プロファイル ( $X_1 = W$ ) 式 18、 $A/\psi$  のさまざまな値、および平行溝のソリッドベッド・プロファイル (式 21) を図 3 に示します。テーパ付きスクリュ溝の場合、減少したソリッドベッド幅  $X/W$  は減少した長さ  $z/Z_f$  と一つの無次元群  $A/\psi$  のみの関数であることがわかります。

ただし、式 17 に示すように、テーパ付きスクリュ溝でポリマーを溶融するのに必要なスクリュ溝に平行な全長は、 $A$  と  $\psi$  に個別に依存します。熱伝達率を増加させるか、スループットを減少させると、予想通り、 $\psi$  が増加し、溶融長が減少します。一方、 $A$  を大きくすると、つまりテーパが大きくなると、ポリマーが溶融するまでの長さも減少しますが、これはおそらくあまり明らかではありません。一定の  $\psi$  で  $A$  が増加すると、 $X$  が増加し、それによって  $\omega$  が増加し、 $Z_f$  が減少します。 $A/\psi = 1$  の限界では、スクリュ溝はソリッドベッドで完全に満たされます。溶融速度は溶融ゾーン全体で最大値となり、溶融に必要な合計の長さは平行溝の値の半分になります。もちろん、この状況は物理的に不可能です。したがって、モデルは  $A/\psi$  の値が 1 未満の場合にのみ使用できます。調査された実験ケースでは  $A/\psi < 0.6$  です。モデルにはいくつかの仮定が含まれているため、結果は厳密な答えではなく推定値として考慮される必要があります。

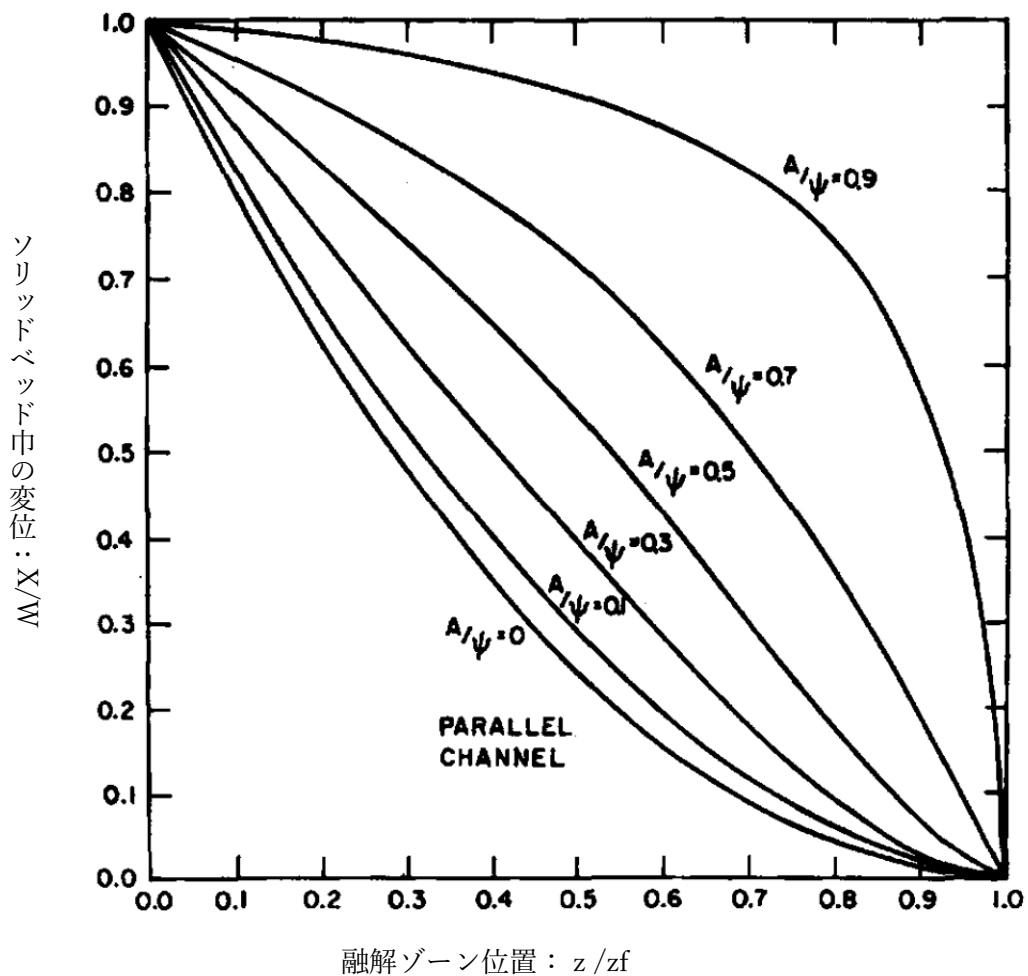


図 3. テーパー（圧縮部）開始部から完全融解までのソリッドベッドの変化

### 実験による検証

計算されたソリッドベッドのプロファイルと溶融の長さが、B. H. Maddock によって行われた 6 つの異なる実験の測定値と比較されました。実験には、異なる速度、バレル温度、圧力下で押し出されたポリエチレンとポリ塩化ビニルが含まれていました。1 台は直径 2 インチ、もう 1 台は 2.5 インチの直径を持つ 2 台の押出機を使用しました。スクリュは時々冷却し、時々中立にしました。表 1 は、スクリュの形状と実験の操作条件を示しています。粘度は一定で、平均せん断速度とフィルムの温度に対応する平均値を持つと仮定され、後者は最大値の 2 分の 1 です。実験 1 の数値計算と、他の実験の表にまとめた結果を示します。付録の図 4 は、ソリッドベッドの実験値と計算された幅のプロファイルを示して

います。黒い点は、スクリュから剥がされたプラスチック上で測定された実験点であり、滑らかな曲線は、計算されたプロファイルを表しています。この場合、ソリッドベッドの幅を測定するのは、特に溶融の後期段階では困難であることがわかります。一般に、モデルは融解の初期段階で融解速度を過大評価していることが観察できますが、これはおそらくこれら二つの効果が相互に補い合うためであり、Aの任意の増加、つまりテーパの程度が両方の固体のより正確な予測を引き起こすことを指摘するのは興味深いかもしれません。図4の破線の曲線は、Aが40%増加した場合の計算されたソリッドベッド・プロファイルを示しています。後者は実験値と一致しています。さらに、この改善された実験データは、Aのこのような任意の増加が正当化される可能性があることを示しています。

図5は、材料を溶かすのに必要な計算された回転数と六つの実験すべての実験値の比較を示しています。これらすべての場合において、特に短い溶融長さの場合、計算された長さは実験値よりも若干高いことが判明しました。

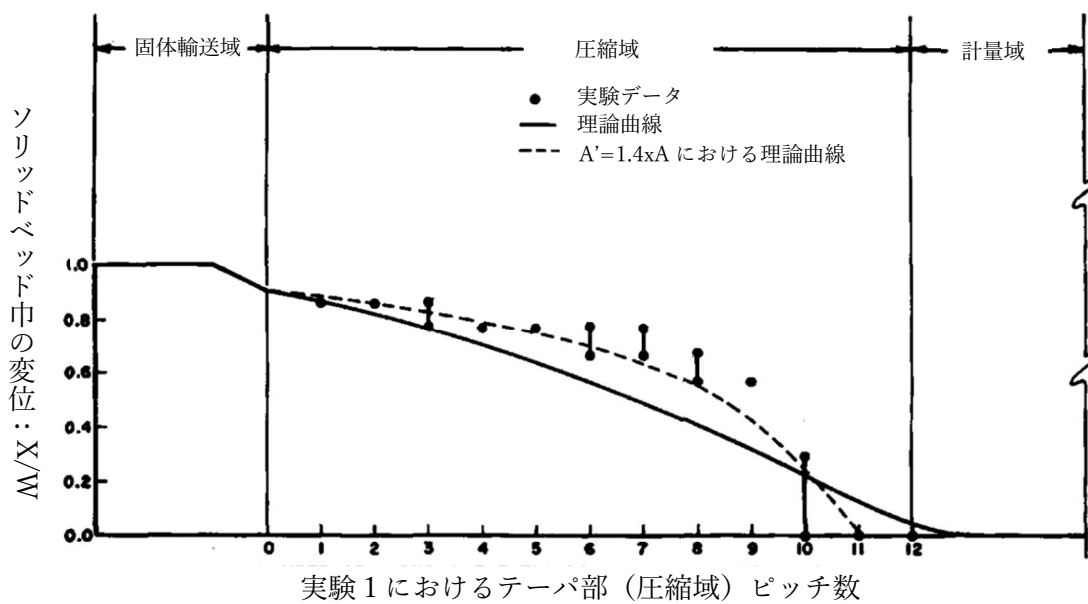


図4. 実験1におけるソリッドベッド中の実験結果と計算結果の比較

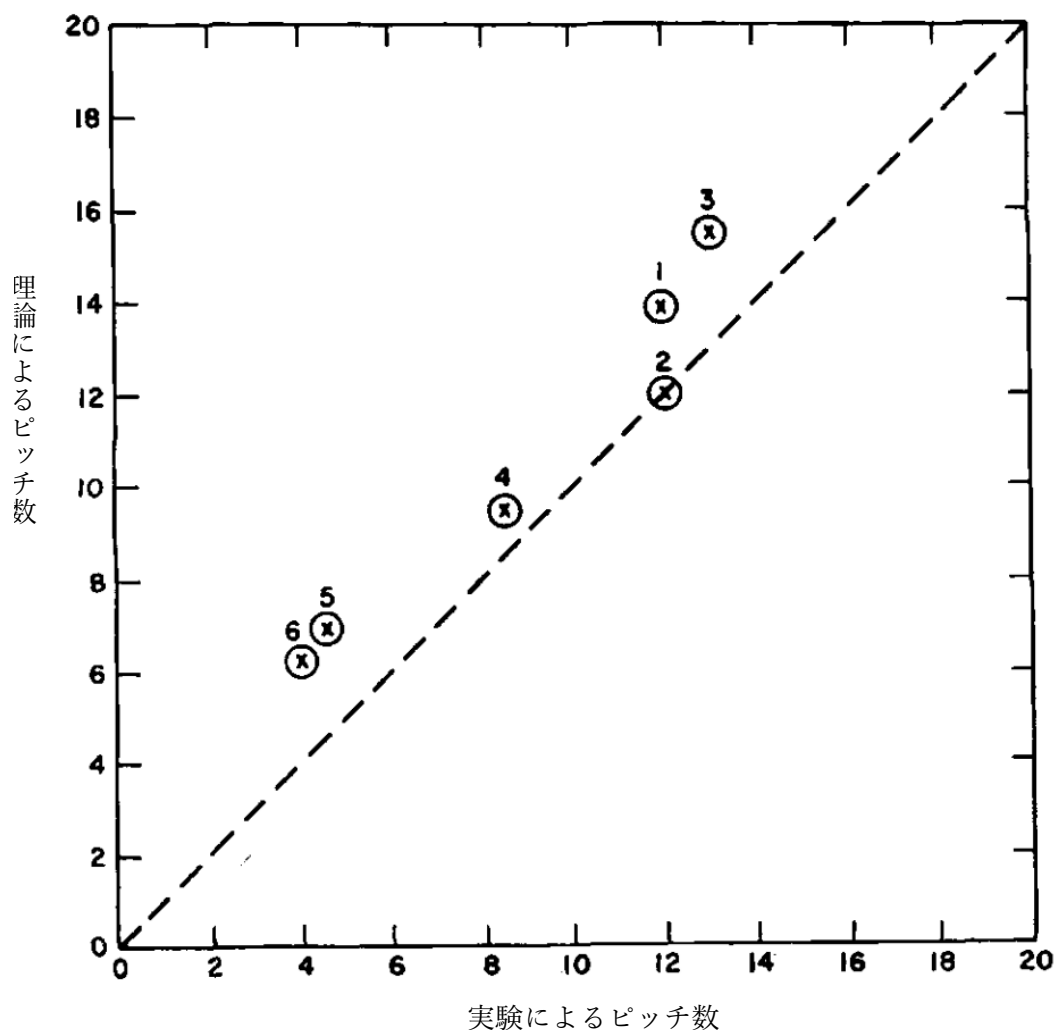


図5. 完全融解までの実験と理論によるピッチ数比較

## 付録

### 実験1に基づく数値例

溶融フィルムの物理的特性は、平均圧力 500 psi および平均温度で評価されます。

$$\bar{T} = \frac{T_b + T_m}{2} + \frac{\mu(\Delta V_b)^2}{12k_m} \quad (23)$$

この式は式 1 から導かれました。見かけの粘度は試行錯誤のプロセスによって評価されます。速度降下  $\Delta V_b = 25\text{cm/秒}$  を、想定される平均膜厚  $\delta_{\text{avg}} = 0.0125\text{cm}$  で割ると、平均せ

ん断速度は 2000 秒<sup>-1</sup> となります。平均温度 134°C を想定したときの見かけ粘度は、(1) 2050 ポアズ、物性は、 $\rho_m = 0.79 \text{ gr. / cm}^3$ 、 $k_m = 0.435 \times 10^{-3} \text{ cal. / sec} \cdot \text{Ccm}$ 。X=W の式 7 から、 $\delta_{\max} = 0.0263 \text{ cm}$ 、つまり  $\delta_{\text{avg}} = \delta_{\max}/2 = 0.0131 \text{ cm}$ 、これは 1900 秒<sup>-1</sup> の平均せん断速度を与えます。式 23 からの新しい平均温度は 135°C です。粘度  $\rho_m$  と  $k_m$  の値は変わりません。ソリッドベッドの性質は  $C_s = 0.6 \text{ cal./}^\circ\text{C.gr}$  です。および  $\lambda = 31 \text{ カロリー/グラム}$   $T_m = 109^\circ\text{C}$  の場合。式 9 より、 $\phi = 0.0375 \text{ gr./sec.cm}^{1.5}$  となります。

この式の二つの熱源を比較すると、溶解熱の 46% が粘性散逸（剪断発熱）に由来することがわかります。実験による観察から、テーパ部分が始まる前に溶融が始まったことは明らかです。このことから、固体搬送ゾーンの最後のターンで溶融が起こったと考えられます。方程式 21、22、および 15 から、テーパ部分の先頭で縮小固体ベッド幅が計算されます ( $X_1/W = 0.905$ )。テーパ部分の式 15 から、 $\psi = 7.73 \times 10^{-3}$  および  $A/\psi = 0.560$  (ここで、A は式 12 から計算されました。式 17 から、 $Z_t = 236 \text{ cm}$ 。これは、約 13 回転に相当します。したがって、ポリマーを溶融するための総巻き数は 14 ですが、実験的に測定された数は 12 でした。ソリッドベッド・プロファイルはテーパ部分で計算されます) 式 18 から計算され、結果が図 4 にプロットされています。ただし、融解は平行計量ゾーンにまで及びます。ただし、平行溝方程式を使用してこのセクションを再計算すると、わずかな差しか生じません。

表 1 Z には、a、 $\phi$ 、 $A/\psi$ 、およびポリマーを溶融するための全熱のうちの粘性散逸によって発生した熱のパーセントが、6つの実験すべてについて示されています。

12.

### 参考文献

1. Bernhardt, E. C., "Processing of Thermoplastic Materials," Reinhold Publishing Corp., New York, 1959.
2. McKelvey, J. M., "Polymer Processing," John Wiley & Sons Inc., New York, 1962
3. Maddock, B. H., Technical Papers, Volume V, 15<sup>th</sup> Annual Technical Conference, SPE, New York, January 1959.
4. Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N., "Transport Phenomena," John Wiley & Sons Inc., New York, 1963
5. Marshall, D.I., Klein, I., and Uhl, R. H., SPE Journal, 20, 329 (1964).

### 謝辞

著者は、有益な議論と実験結果の使用を許可してくれたユニオン・カーバイド・プラスチック社の B.H.マドック氏、そして援助と批判に対して D.I.マーシャル博士と I.クライン博士に感謝の意を表したいと思います。

表 1. 押出機ジオメトリー、押出条件及び使用樹脂							
実験番号	1	2	3	4	5	6	単位
押出機ジオメトリー							
バレル内径	63.5	63.5	63.5	50.8	50.8	50.8	mm
固体輸送域ピッチ数	3.2	3.2	3	-	-	-	n/a
圧縮域ピッチ数	12	12	16.6	12	12	12	n/a
計量域ピッチ数	12	12	4	3	3	3	n/a
固体域フライト高さ	12.7	12.7	11.43	9.53	9.53	9.53	mm
計量域フライト高さ	3.18	3.18	2.39	3.05	3.05	3.05	mm
フライト巾	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	mm
押出条件							
スクリュ回転数	82	80	40	48	48	48	RPM
バレル温度	150	150	150	177/188**	177/188**	177/188**	°C
押出量	54.4	42.3	36.5	17.4	11.5	10.2	kgf/hr
スクリュ冷却	NO	YES	NO	NO	NO	YES	n/a
使用樹脂							
	PE,DYNH***	PE,DYNH	PVC,VYNW*	PE,DYNH	PE,DYNH	PE,DYNH	n/a
メルトインデックス	2.0	2.0	-	2.0	2.0	2.0	n/a
* 35%可塑剤入りPVC VYNWはユニオンカーバイト社のグレード名							
** 前半177°C、後半188°C							
*** DYNHはユニオンカーバイト社のLDPEのグレード名							

表 2. 中間的数値結果							
実験番号	1	2	3	4	5	6	
$\Phi, gr./sec.cm^{1.5}$	0.0375	0.0370	0.0227	0.0262	0.0202	0.0262	
				0.0280	0.0279	0.0280	
$\psi \times 10^3$	7.73	9.92	5.97	8.77	13.21	14.94	
				12.99	29.64	41.15	
$A/\psi$	0.560	0.436	0.487	0.418	0.278	0.245	
				0.282	0.124	0.089	
剪断発熱率(%)	46	46	46	16	15	16	
				14	13	14	

バレル温度は表 1 を参照。

## 記号・用語一覧

$A \equiv (H_1 - H_2)/L =$  圧縮比

$C_s =$  平均温度・圧力におけるソリッドベッドの比熱、cal./gr.°C

$G =$  押出機の質量流量、gr./sec.

$H =$  スクリュ溝深さ（フライト高さ）、cm.

$H_1 =$  固体輸送域スクリュ溝深さ、cm.

$H_2 =$  計量域スクリュ溝深さ、cm

$k_m =$  平均温度・圧力におけるメルトフィルムの熱伝導率、cal./sec.cm.°C.

$k_s =$  平均温度・圧力におけるソリッドベッドの熱伝導率、cal./sec.cm.°C.

$L =$  圧縮域の螺旋長さ、cm.

$q_y =$  y方向熱流束、cal./cm<sup>2</sup>sec.

$T_b =$  バレル内壁温度、°C

$T_m =$  樹脂の融点、°C

$T_r =$  ソリッドベッドの初期温度、°C

$V_b =$  バレル速度、cm./sec.

$V_{bx} =$  バレル・x方向速度、cm./sec.

$V_{bz} =$  バレル・z方向速度、cm./sec.

$V_{sy} =$  ソリッドベッド・y方向速度、cm./sec.

$V_{sz} =$  ソリッドベッド・z方向速度、cm./sec.

$\Delta V_b = V_b - V_{sz}$  (ベクトル減算)

$W =$  スクリュ溝巾、cm.

$X_1 =$  圧縮域入り口におけるソリッドベッド巾、cm.

$X =$  ソリッドベッド巾、cm.

$x =$  スクリュ溝に直角な直交座標、cm

$y =$  スクリュ溝深さ方向の直交座標、cm

$z =$  スクリュ溝に平行な直交座標、cm

$\alpha_s = k_s/\rho_s C_s$  ソリッドベッドの温度拡散率、cm<sup>2</sup>/sec.

$\delta =$  メルトフィルム厚、cm.

$\lambda =$  融解熱、cal./gr.

$\mu =$  メルトフィルムの平均温度・圧力及び後半の平均厚みにおける剪断率での見かけ粘性

$\rho_m =$  メルトフィルムの平均温度・圧力における密度、gr./cm<sup>3</sup>

$\rho_s =$  ソリッドベッドの平均温度・圧力における密度、gr./cm<sup>3</sup>

$\Phi =$  方程式9で定義された定数の次元グループ、gr./sec.cm<sup>1.5</sup>

$\psi =$  方程式15で定義された定数の次元グループ

$\omega =$  スクリュ溝に平行方向の単位長さあたりの溶解速度、z方向、gr./sec.cm.

$\bar{\omega} =$  スクリュ溝に平行方向の単位長さあたりの平均溶解速度、z方向、gr./sec.cm.