

インフレーション成形の理論とその応用

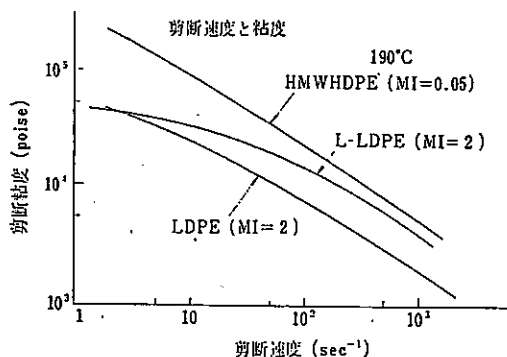
金井 俊孝*

はじめに

インフレーション成形は、プラスチックフィルムの成形加工法の1つとして重要な役割を果たしている。近年、押出機、ダイおよび冷却装置などの成形加工機械の改良により、高吐出化が可能となり、生産性が向上してきているが、一方では成形において、経験的あるいは職人的な技術を通じて成形が行なわれているのが現状である。一般にインフレーション成形において、フィルム物性や成形性は樹脂や成形条件により大きく変化するので、良好な物性を得かつ安定した製品を得るためには、樹脂のレオロジー的性質—成形条件—成形時の樹脂変形挙動—製品物性の関係を知ることが非常に大切である。

そこで、本稿ではインフレーション成形を考えるうえで重要となる樹脂のレオロジー特性について述べ、これらの性質と理論式からフィルム物性に大きな影響を与える成形中の歪み速度、引張応力などの溶融変形挙動についての解析結果を示し、樹脂、成形条件と製品の品質についての関係について説明する。また、試

* Toshitaka KANAI, 出光石油化学㈱ 商品開発研究所



第1図 剪断速度と剪断粘度の関係

験段階から工業的生産へ移行する場合に重要となる小型機から大型機へのスケールアップの考え方および高速成形時に問題となる延伸切れや成形安定性について述べてみたい。

1. 樹脂のレオロジー特性

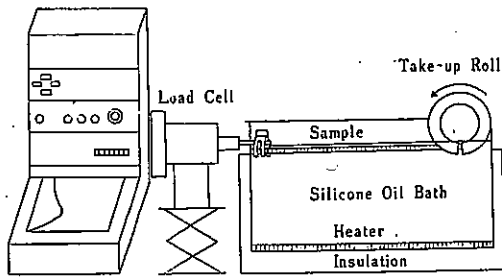
1-1. 剪断流動

押出機やダイス内での流動性を評価するため、剪断粘度が広く利用されている。一般に、インフレーション成形に使用される樹脂としてポリエチレンがもっとも広く使用されており、剪断速度と粘度の関係を第1図に示す¹⁾。HDPEの場合、用途では強化フィルム用のグロサリーバックとして広く利用されている。フィルム物性および押出機内の成形性の面から高分子量でかつ分子量分布を広げており、高剪断速度下で剪断粘度は低下する。一方、L-LDPEは高活性の触媒で製造されるため分子量分布が狭くなり、ニュートン流体的で粘度の剪断速度依存性は小さい。LDPEは一般にL-LDPEより分子量分布が広く、また長鎖分岐をもっていることから、非ニュートン性がL-LDPEより強い。

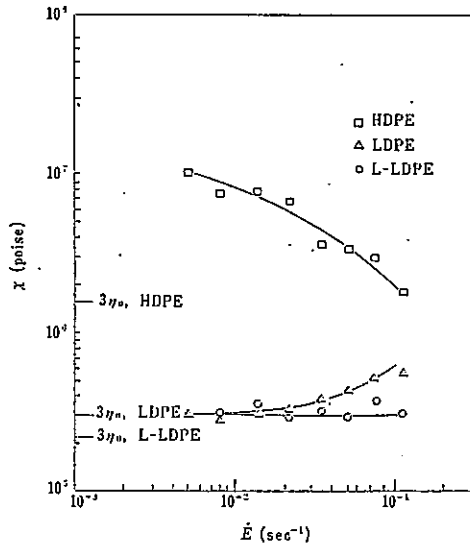
1-2. 伸長粘度

インフレーション成形、Tダイ成形および溶融紡糸などのダイを出て変形が終了するまでの過程においては、伸長変形であるため、剪断粘度が押出機およびダイ内の流動性を評価するうえで重要なように、伸長粘度はダイ以降の流動性を評価するうえで基本データとなる。

一般に伸長粘度の測定は第2図に示すような装置を用いて行ない、一定温度に保たれたシリコンバス中に張力検出器と引取装置があり、測定されるフィラメントの一方は張力計に、他方はギヤ間に挟み、モーター速度を変えることにより、伸長速度を変化させる。



第2図 伸長粘度測定装置



第4図 定常伸長粘度の歪み速度依存性

この装置を用いることにより、一定歪み速度が得られ、伸長粘度はつぎの手段で算出される。歪み速度 \dot{E} 、伸長応力 σ_{11} 、1軸伸長粘度 X は、つぎの式から得られる。

$$\dot{E} = \frac{1}{\ell} \frac{d\ell}{dt} = \frac{V_L}{\ell} \quad (1)$$

$$\sigma_{11} = \frac{F(t)}{A(t)} = \frac{F(t)}{A_0} \text{Exp}\left(\frac{V_L}{\ell} t\right) \quad (2)$$

$$X(t) = \frac{\sigma_{11}(t)}{\dot{E}} \quad (3)$$

ただし、 ℓ は変形される試料長さ (一定)

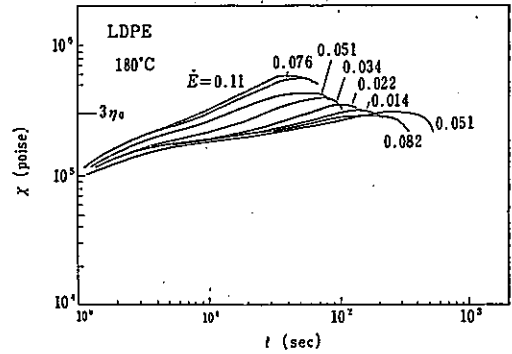
V_L はモーター回転によるサンプルの引取速度

$F(t)$ は時間 t における引張力

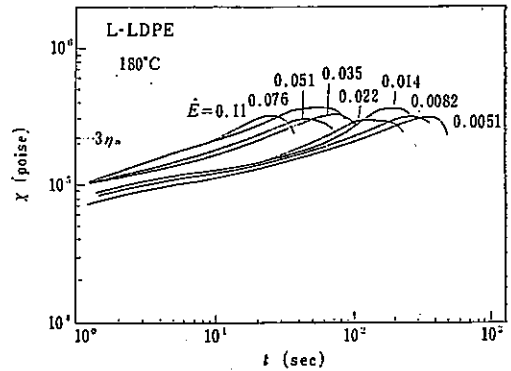
A_0 は引張開始前の初期サンプルの溶融断面積

$A(t)$ は時間 t における試料断面積 $A(t) = A_0 e^{-E t}$
 $= A_0 e^{-V_L t / \ell}$

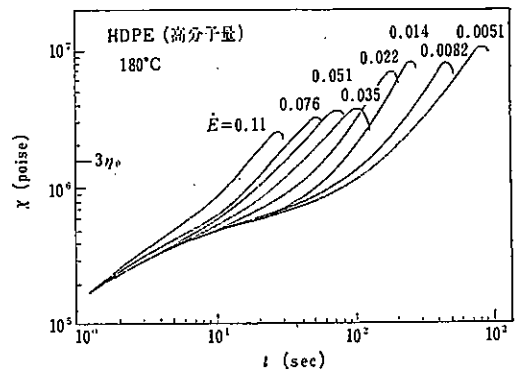
伸長粘度の値が大きいほど、伸長変形に対する抵抗が大きい。代表的なインフレーション成形用ポリエ



第3図(a) LDPE に関する伸長粘度の時間依存性

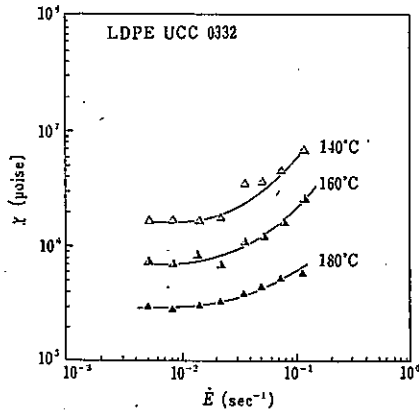


第3図(b) L-LDPE に関する伸長粘度の時間依存性

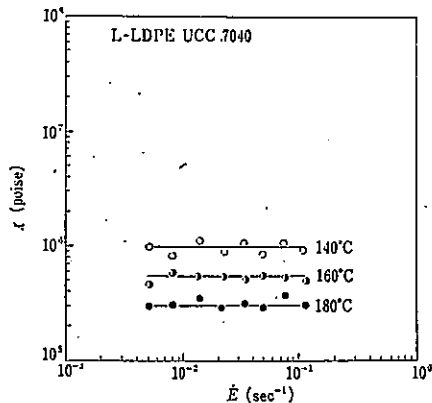


第3図(c) HDPE に関する伸長粘度の時間依存性

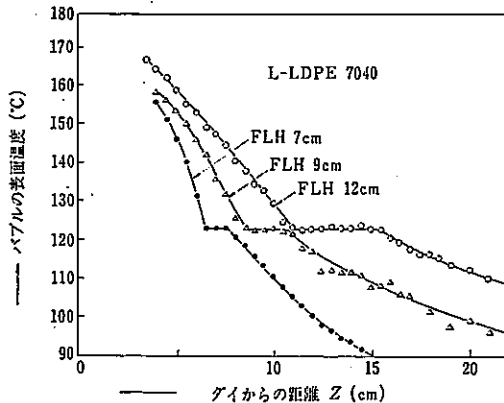
レンについて、伸長粘度を測定した結果を第3～6図に示す¹⁾。第3図は、フィラメントの過渡的な伸長粘度で時間の関数としてプロットしたものであるが、LDPE および L-LDPE は定常状態を示す。しかし、HDPE の場合、分子量分布の狭いポリマーは定常状態を示すが、分子量が大きく分子量分布が広いポリマーは弾性効果が強く、伸長粘度の定常値を示さず、低伸長領域で延性的なネッキング現象が発生し、その後フィラメントの破断が生じる。そこで、最大伸長粘度 X_{max} を代表値とすると、歪み速度 E が増加するに従



第5図 LDPEに関する定常伸長粘度の温度依存性



第6図 L-LDPEに関する定常伸長粘度の温度依存性



第7図 フロストライン変化に対するバブル表面温度分布

い X_{max} は低下する。LDPE, L-LDPE は伸長粘度の定常値を示すため、これらの値を歪み速度 \dot{E} でプロットすると LDPE は低伸長歪み速度領域では 3% に近い値を示し、伸長速度の増加とともに粘度は上昇する(第4図)。これは長鎖分岐の影響と考えられる。L-LDPE は、線状ポリマーと考えてよく、分子量分布

が狭いため、低歪み速度で 3% に近い値を示しており、一般的にニュートン流体に近い特性を示している。

一般に長鎖分岐をもたないポリオレフィン樹脂 HDPE, L-LDPE, PP, PB-1 は、分子量分布の広いほど剪断粘度同様、伸長粘度も非ニュートン性が強く、歪み速度とともに伸長粘度が低下する^{2),3)}。また、伸長粘度の温度依存性の例として LDPE および L-LDPE についての測定結果を第5図および第6図に示したが、LDPE のように長鎖分岐をもつポリマーは L-LDPE に比較し、伸長粘度の温度依存性が大きい。

また、LDPE は歪み速度の上昇とともに粘度が上昇する傾向を示し、かつ活性化エネルギーが大きいため、伸長変形領域における粘度硬化度合が大きくなり、非等温の伸長変形時の溶融張力は同一 MI で他の樹脂に比較すると大きな値となる。

2. インフレーション成形の冷却¹⁾

インフレーション成形の成形条件で、冷却量をコントロールすることは、物性、成形性の面から重要である。インフレーション成形の熱バランスを考えるうえで、対流、放射による冷却および結晶化の発熱を考える必要がある。フィルムに関するエネルギーバランスの式は次式となる。

$$\rho C_p Q \cos \theta \frac{dT}{dZ} = -2\pi R [U(T - T_{air}) + \epsilon \lambda (T^4 - T_{room}^4)] + Q \Delta H_f \cos \theta \frac{dX}{dZ} \quad (4)$$

ここで、

U : 熱伝達係数, λ : Stefan-Boltzman 定数

ϵ : 放射係数, ΔH_f : 結晶化のエンタルピー

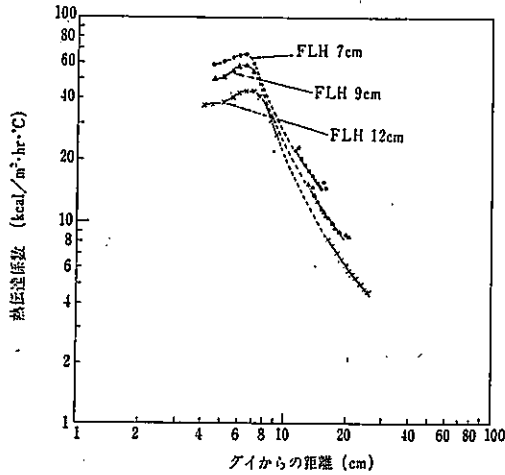
X : 結晶化度, ρ : 溶融密度, C_p : 比熱

Q : 吐出量, T_{room} : 室温, T : バブル温度

T_{air} : 冷却空気温度, θ : 2軸とバブルのなす角

なお、式の左辺は溶融樹脂バブルの熱が奪われる速度であり、右辺の第1項は対流による項、右辺の第2項は放射による項であり、第3項は結晶化による項である。

インフレーション成形における典型的な温度パターンを第7図に示す。ダイを出た溶融樹脂は初期においてエアリングからの強制冷却により急激に冷却され、その後平衡領域を示す。この平衡領域は、外部からの冷却と結晶化による発熱とがバランスしていることを示している。結晶化が終了するとふたたび外部からの冷却により、温度の低下を示す。冷却量を減少させるとフロストラインは高くなるが、それに伴ないバ



第8図 L-LDPE に対する熱伝導係数と位置の関係
($Z_F=7, 9, 12\text{cm}$, $V_L/V_0=4$, $B=3.5$)

ブルの温度低下は遅くなり、温度の平衡領域は長くなる。

これらの温度パターンと熔融樹脂の変形挙動から、式(4)を使用することにより第8図に示すような熱伝達係数を求めることができる。フロストライン高さが低く、冷却風量の多いほうが熱伝達係数が大きい熱伝達係数のパターンは類似している。また、これらの熱伝達係数と第9図に示すようなバブルの表面付近での冷却風のデータのデータをとることにより、各位置での冷却速度を知ることができる。各位置での熱伝達係数 U の値と冷却風速 V_{air} のデータから無次元数であるヌセルト数 N_u とレイノルズ数 R_e に変換して無次元数を組み立てると、インフレーション成形の場合、第10図のように模式的に表わすことができる。これにより、一般的な場合における冷却速度の度合を予測することが可能となる。

バブル表面の風速最大の位置 $L_a=0$ からバブルの膨張開始後のバブル形状の変曲点の位置まで式(5)が成り立つ。

$$\frac{UL_b}{K_{air}} = 0.043 \left(\frac{L_a V_{air} \rho_{air}}{\eta_{air}} \right)^{0.76} \quad (5)$$

ただし、

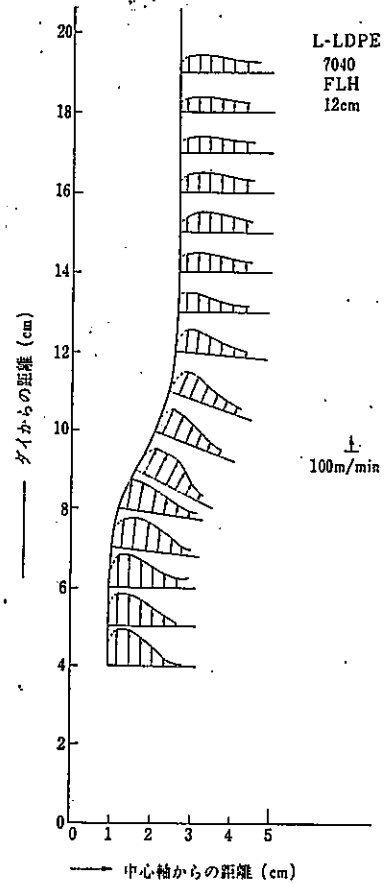
K_{air} : 空気の熱伝導

V_{air} : 各位置での冷却空気の最大風速

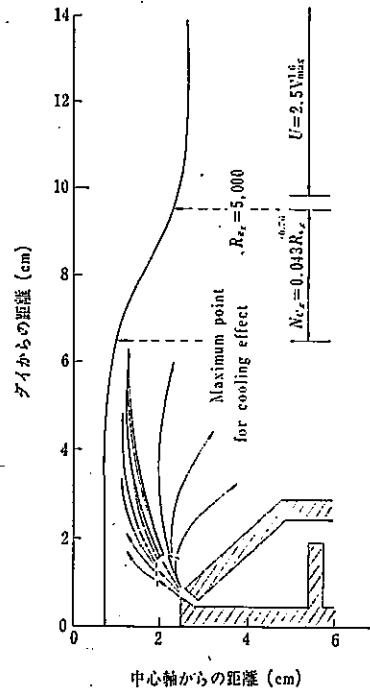
ρ_{air} : 空気密度, η_{air} : 空気粘度

L_a : 代表長さ (バブルに沿った長さ)

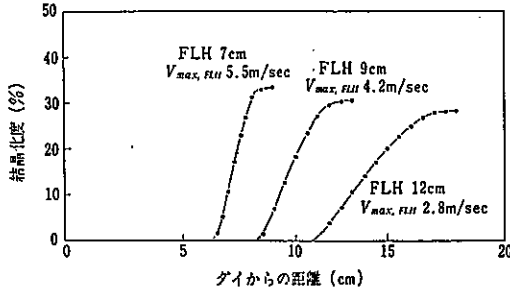
フロストライン以降では風速パターンが均一となる傾向にあり、境界層理論による冷却理論よりも、熱伝達と風速の最大値の関係式のほうがよい相関性が得ら



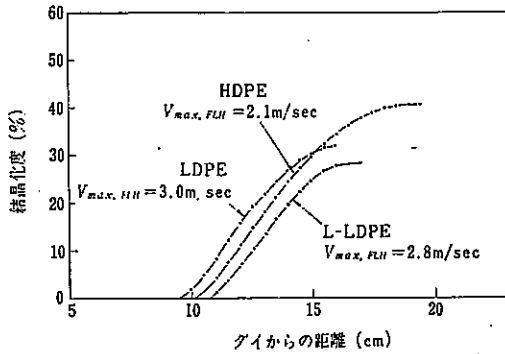
第9図 バブル表面の冷却風パターン



第10図 インフレーション成形におけるバブルと冷却風の熱伝達



第11図 L-LDPE に対する結晶化度と位置の関係
($V_L/V_0=4$, $R_L/R_0=3.5$)



第12図 各樹脂に対する結晶化度と位置の関係
($V_L/V_0=4.0$, $R_L/R_0=3.5$, $Z_L=12cm$)

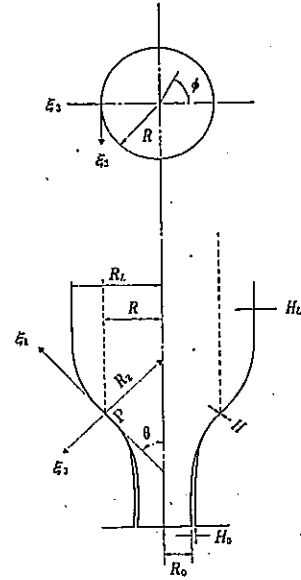
れ、式(6)が成り立つ。

$$U = 2.5V_{atr}^{1.6} \quad (6)$$

インフレーション成形で、成形性や物性にとくに重要なのは式(5)が成り立っている領域であり、ここにおいて冷却効率を上げることは高生産性を得るうえで大きなポイントである。

一方、こういった熱伝達の情報、変形中の流動パターンおよび結晶化過程における温度のパターンからインフレーション成形中の結晶化度が算出できる。第11図には結晶化度に対するフロストライン高さ Z_L の影響、換言すると冷却風量の影響を示したものである。

冷却風量を増加させることは、結晶化速度をかなり速めることがわかる。また、同一フロストライン高さに保ち、同一成形条件下でのポリエチレン3種類の結晶化度の比較を第12図に示したが、この条件下ではポリエチレン間で、結晶化速度に大きな差はないが、結晶化度は HDPE がもっとも大きいことがわかる。しかし、同一フロストライン高さでは HDPE は、結晶化温度がもっとも高いため冷却風量が少なく、同一冷却量で比較した場合、HDPE の結晶化速度は他のポリエチレンより速いことになる。



1: 流れ方向 (MD), 2: 流れと垂直方向 (TD), 3: 厚み方向, L: 引取位置, O: ダイ出口, R: 任意な位置でのバブル半径, θ : バブルと軸とのなす角, R_L/R_0 : フローアップ比, H: フィルムの厚み, R, θ , Z は円筒座標系で, ξ_1, ξ_2, ξ_3 は直交座標を表わし, ξ_2 は流れ方向 (MD), ξ_3 は流れと垂直方向 (TD), ξ_1 は厚み方向を示す。

第13図 インフレーション成形の座標系

3. インフレーション成形の理論^{4), 5), 6)}

樹脂のレオロジーデータ、熱伝達と冷却風の関係および結晶化の情報が得られると、インフレーション成形中の理論式を用いることにより、成形中の溶融樹脂の変形挙動を検討することができ、成形性や得られるフィルム物性を知るうえで重要な知見が得られる。

そこで、ここではインフレーション成形の理論について簡単に述べ、その解析結果について説明を加えてみたい。

3-1. 歪み速度と応力

インフレーション成形のバブルの形状を第13図に示す。 ξ_1, ξ_2 および ξ_3 は、任意な点Pでフィルム表面における直交座標系を示し、1は流れ方向、2は円周方向および3は厚み方向を示す。R, R_0 および R_L は、それぞれ点Pにおけるバブル半径、ダイの半径およびバブルの最終径を示し、H, H_0 および H_L は点Pにおけるバブルの厚み、ダイリップ幅および製品のフィルム厚みが示している。また、 θ はバブルと中心軸とのなす角であり、 R_2 はバブルの曲率半径である。このように座標系をとると、バブルの任意の点Pにお

る歪み速度テンソル d は、次式で示される。

$$\|d\| = \begin{vmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{vmatrix} \quad (7)$$

TDの歪み速度 d_{22}

$$d_{22} = \frac{\partial V_2}{\partial \xi_2} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{Q \cos \theta}{2\pi RH} \frac{1}{R} \frac{dR}{dZ} \quad (8)$$

厚み方向の歪み速度 d_{33}

$$d_{33} = \frac{\partial V_3}{\partial \xi_3} = \frac{1}{H} \frac{dH}{dt} = \frac{Q \cos \theta}{2\pi RH} \frac{1}{H} \frac{dH}{dZ} \quad (9)$$

非圧縮性流体においては、次式が成り立つ。

$$d_{11} + d_{22} + d_{33} = 0 \quad (10)$$

式(8)~(10)より、流れ方向の歪み速度 d_{11} は次式となる。

$$d_{11} = -(d_{22} + d_{33}) = -\frac{Q \cos \theta}{2\pi RH} \left(\frac{1}{R} \frac{dR}{dZ} + \frac{1}{H} \frac{dH}{dZ} \right) \quad (11)$$

以上の関係式から、歪み速度テンソルはつぎのようになる。

$$\|d\| = \frac{Q \cos \theta}{2\pi RH} \begin{vmatrix} -\left(\frac{1}{H} \frac{dH}{dZ} + \frac{1}{R} \frac{dR}{dZ} \right) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \frac{dR}{dZ} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{H} \frac{dH}{dZ} \end{vmatrix} \quad (12)$$

ただし、

Q : 押出量, R : バブル半径

θ : 2軸とバブルのなす角, H : バブルの厚み,

V_1, V_2, V_3 : ξ_1, ξ_2, ξ_3 方向のバブル速度成分

一方、バブルに作用する応力について考える。応力は、ニュートン流体と仮定すると次式が成り立つ。

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + P_{ij} \quad (13)$$

$$P_{ij} = 2\eta_0 \cdot d_{ij} \quad (14)$$

ただし、

σ_{ij} : 応力テンソル, p : 等方性圧力

P_{ij} : 変形応力テンソル, η_0 : ゼロ剪断粘度

d_{ij} : 歪み速度

バブルの厚み方向でバブルの表面は大気に接しているため、応力テンソル σ_{33} は 0 となる。

$$\sigma_{33} = -p + P_{33} = 0 \quad p = P_{33} \quad (15)$$

流れ方向 (MD) の応力 σ_{11}

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= -p + P_{11} = P_{11} - P_{33} = 2\eta_0(d_{11} - d_{33}) \\ &= \frac{\eta_0 Q \cos \theta}{\pi RH} \left(-\frac{1}{R} \frac{dR}{dZ} - \frac{2}{H} \frac{dH}{dZ} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

流れと直角方向 (TD) の応力 σ_{22}

$$\begin{aligned} \sigma_{22} &= -p + P_{22} = P_{22} - P_{33} = 2\eta_0(d_{22} - d_{33}) \\ &= \frac{\eta_0 Q \cos \theta}{\pi RH} \left(\frac{1}{R} \frac{dR}{dZ} - \frac{1}{H} \frac{dH}{dZ} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

3-2. 力のバランスおよびエネルギーバランス

第13図に示されたインフレーションバブルにおいて力のバランスは、つぎのようになる。

$$F_L = 2\pi RH \sigma_{11} \cos \theta + \pi(R_2^2 - R^2) \cdot \Delta P \quad (18)$$

膜の理論より、応力 σ_{11} と σ_{22} は、バブル内部圧力とつぎの関係が成立する。

$$\frac{H \sigma_{11}}{R_1} + \frac{H \sigma_{22}}{R_2} = \Delta P \quad (19)$$

ただし、自重の影響は無視した。

F_L : バブル張力, R_L : バブルの最終半径

ΔP : バブル内部圧力

また、 R_1 および R_2 は、バブルの曲率半径を示す。

$$R_1 = -\frac{(1 + dR/dZ)^2}{d^2R/dZ^2} \quad (20)$$

$$R_2 = \frac{R}{\cos \theta} \quad (21)$$

エネルギーバランスは前述の式(4)で表現され、熱伝達係数と風速の関係は式(5)で示される。

第13図のバブル形状において、つぎの幾何学式が成り立つ。

$$\frac{dR}{dZ} = \tan \theta \quad (22)$$

3-3. 粘度式

ポリエチレンの熔融変形時の引張粘度は、アレニウス式に従うとし、また、Power law 流体と仮定するとつぎのように表わされる。

$$\eta(\Pi_d, T) = A \exp(E/RT) \cdot \Pi_d^{(n-1)/2} \quad (23)$$

ここで、 E : 活性化エネルギー, n : Power law 流体の n 値, R : 気体定数, $\Pi_d = d_{11}^2 + d_{22}^2 + d_{33}^2$ (歪み速度) である。定数 A は、 T_0 を基準温度, η_0 を基準温度における粘度の値とすると、次式で与えられる。

$$A = \eta_0 \exp(-E/RT_0) \quad (24)$$

一方、結晶化が起こる場合粘度が上昇するが、この場合の粘度は次式で表わされると仮定した⁷⁾。

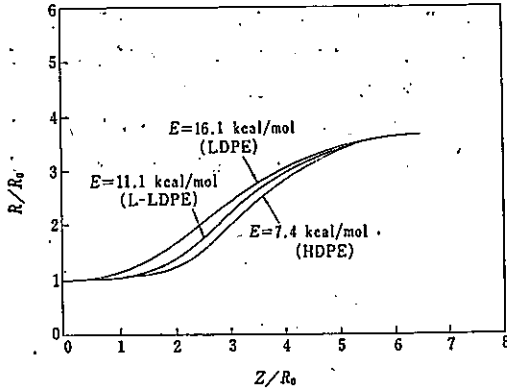
$$\eta(\Pi_d, T, X) = A \exp(E/RT + GX) \cdot \Pi_d^{(n-1)/2} \quad (25)$$

ここで、 X : 結晶化分率, G : 実験から得られる粘度指数である⁶⁾。

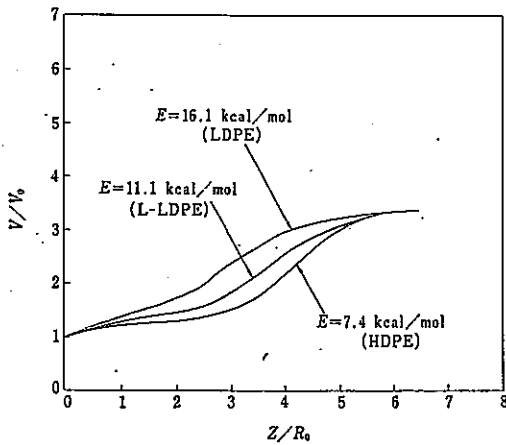
3-4. 理論と実際

樹脂性状の一例として、粘度の温度依存性のパラメータである活性化エネルギーを変化させた場合の変形挙動についての理論結果を示した。

一例としてブロー比、ドロウダウン比、フロストライン高さ一定の条件で、活性化エネルギーを変えてバブルの形状を計算した結果を第14図に示す。LDPE はもっとも脹らみが大きく、HDPE は脹らみが小さい。L-LDPE は両者の中間の形状を示す。この形状は、



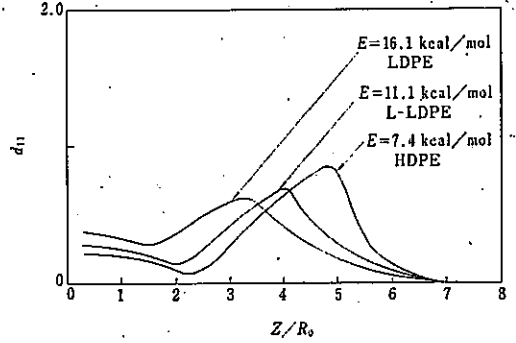
第14図 バブル形状と活性化エネルギーの関係
($R_L/R_0=3.7$, $V_L/V_0=3.4$, $Z_L/R_0=6.5$)



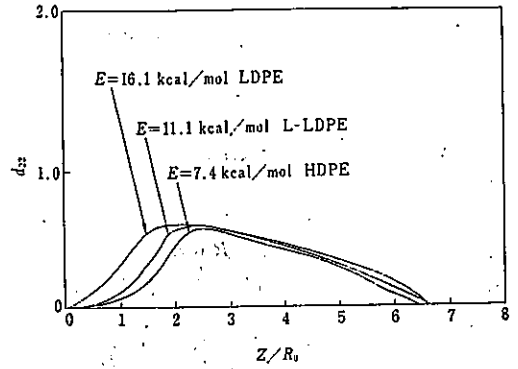
第15図 バブル移動速度と活性化エネルギーの関係
($R_L/R_0=3.7$, $V_L/V_0=3.4$, $Z_L/R_0=6.5$)

実験でよく観察される傾向と同じであり、この結果よりバブルの形状は樹脂の活性化エネルギーに大きく影響されることがわかる。移動速度パターンでは、活性化エネルギーの大きいポリマーほど初期に変形が起こりやすいことを示している(第15図)。

つぎに歪み速度のパターンをみると(第16図)、活性化エネルギーの小さい樹脂においては、MDの歪み速度 d_{11} が結晶化開始前でシャープなピークでかつ大きな最大値をもつことから、効果的な延伸が起こっていることがわかる。LDPEはなだらかな d_{11} のパターンを示しており、ゆっくりした延伸が行なわれているものと思われる。TDの歪み速度 d_{22} は d_{11} に比較してシャープな曲線を示さず、活性化エネルギーの値を変化させても大きな差はみられない(第16図(b))。これらの結果からHDPEは延伸領域で大きな d_{11} を示すが、LDPEは d_{11} と d_{22} ともにバランスした値を示した。結晶化寸前におけるHDPEの延伸挙動は、



第16図(a) MDの歪み速度 d_{11} と活性化エネルギーの関係
($R_L/R_0=3.7$, $V_L/V_0=3.4$, $Z_L/R_0=6.5$)



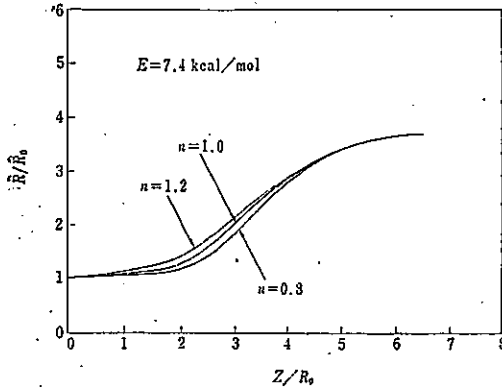
第16図(b) TDの歪み速度 d_{22} と活性化エネルギーの関係
($R_L/R_0=3.7$, $V_L/V_0=3.4$, $Z_L/R_0=6.5$)

成形条件の影響を受けやすく、とくに高速成形時におけるインフレーション成形では、結晶化寸前において急激な歪み速度上昇に伴ない、その後結晶核の急激な発生と生長が起こるものと考えられ、得られるフィルムの異方性にも大きな影響を与えるものと思われる。

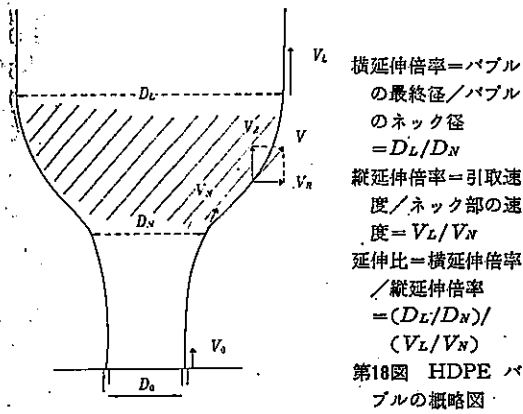
さらに興味あることは、粘度の歪み速度依存性を表わす n 値(式(2)参照)を変化させると、バブルの形状、変形パターンに大きく影響を与える(第17図)。長鎖分岐をもつLDPEのように $n > 1$ の場合、バブル形状は第15図の $E=16.1$ kcal/moleの曲線よりさらに脹らんだ風船形状となり、典型的なLDPEのパターンを示し、またバブルの変形はさらにダイ出口付近で起こりやすくなる。

一方、HMW-HDPEの場合、第4図に示したような伸張粘度パターン($n < 1$)をとると仮定すると、バブル形状のネッキング現象はさらに顕著となり、また移動速度は初期にあまり速くならず、バブルが膨張開始後、シャープな歪み速度のピークを示す⁷⁾。

つまり、HMW-HDPEのように分子量が大きく分子重量分布も広いポリマーほど一般に伸張粘度の n 値は



第17図 バブル形状と指数則 n 値の関係
 $(R_L/R_0=3.7, V_L/V_0=3.4, Z_L/R_0=6.5)$

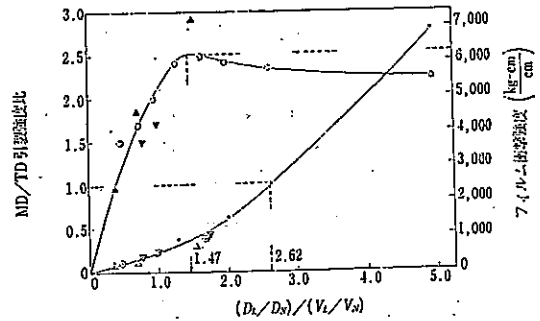


小さくなるため、バブルが膨張してから変形と冷却が急速に行なわれることになり、第18図に示す斜線領域における変形パターンとフィルム物性に相関が得られるのが一般的である。

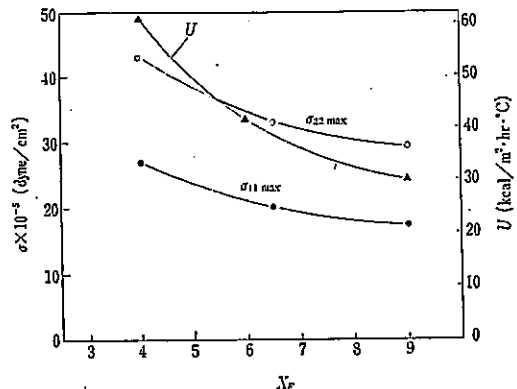
たとえば、ダイ径や吐出量が大きく変化しない系でダイ出口での樹脂温度を一定に保った場合では、バブル安定体の形状やフロストライン高さなどの成形条件によらず、第18図および第19図中に定義される延伸比とフィルムインパクトやMD/TDの引裂強度比は比較的よい相関性がみられており、斜線部の領域を評価することは重要である。

吐出量やダイ径の変化も含めて、多くの成形条件下でフィルム物性を正確に評価するには、成形中の歪み速度パターンおよびバブルの温度パターンを含めた応力解析が必要となる。

つまり、PEのインフレーション成形において、とくにフィルム物性が延伸効果の影響を受けやすいHDPEで高強度フィルムを得るには、MD、TDの引張応力 σ_{11} 、 σ_{22} の値がともに大きく、またバランスした条件、つまり吐出量、引取速度を高めるようにして



第19図 フィルムインパクトおよびMD/TD引裂強度比と延伸比 $(D_L/D_N)/(V_L/V_N)$ の関係

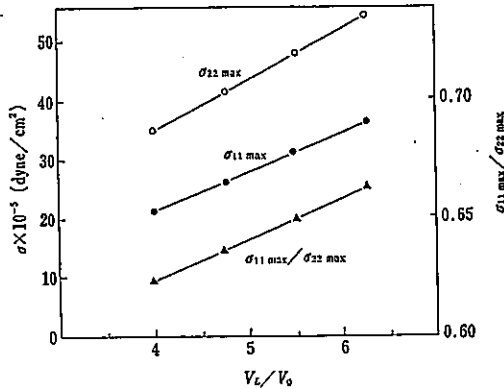


第20図 MD および TD の最大応力 σ_{11max} および σ_{22max} 、熱伝達係数 U とフロストライン高さの関係 $(R_L/R_0=3.5, V_L/V_0=3.8)$

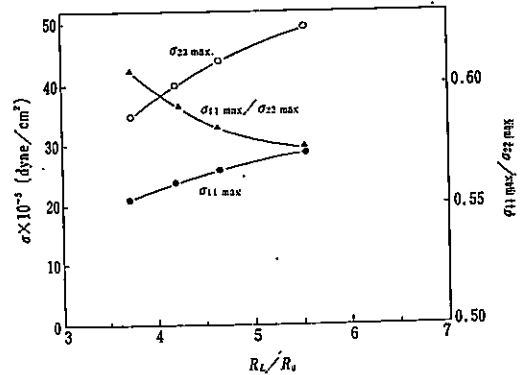
歪み速度を速め、かつ剪断発熱をできるだけ抑えて、低温で変形させることが望ましい。

インフレーション成形でもっとも重要な3つの成形条件において、フィルム物性に大きな影響を与えるフロストライン付近の最大引張応力を理論予測すると第20図に示すように、フロストライン高さ X_F (Z_L/R_0) の高いほどMDの最大応力 σ_{11max} 、TDの最大応力 σ_{22max} は低下するが、 $\sigma_{11max}/\sigma_{22max}$ の比は小さくなるため、高速成形時にはMD、TDの引張応力バランスはよくなる。また、熱伝達係数もフロストライン高さ X_F ($=Z_L/R_0$) が、4から9になることにより減少し、値は約1/2に低下している。

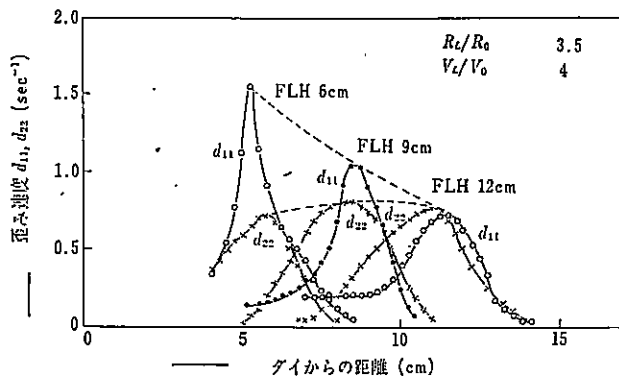
ブロー比、フロストライン高さ、吐出量が一定条件下でドローダウン比を大きくすると、MDの最大応力 σ_{11max} および σ_{22max} とともに増加し、 $\sigma_{11max}/\sigma_{22max}$ も増大する。つまり、MDおよびTDの延伸効果は増大するが、とくにMDの延伸効果の増大が大きい(第21図)。



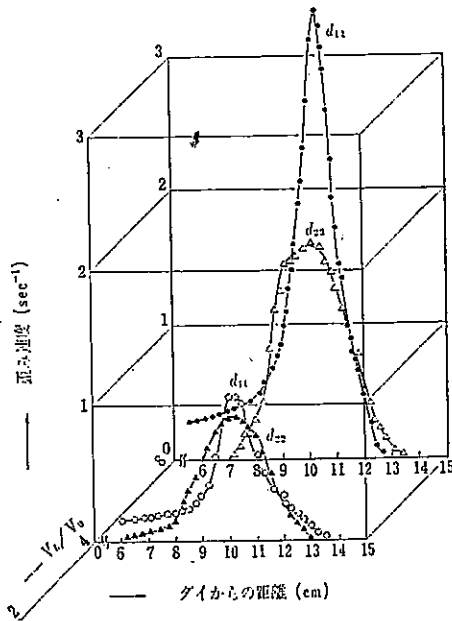
第21図 MDおよびTDの最大応力 σ_{11max} および σ_{22max} とドロウダウン比の関係 ($R_L/R_0=3.5$, $Z_L/R=6.0$)



第22図 MDおよびTDの最大応力 σ_{11max} および σ_{22max} とブロー比の関係



第23図 種々なフロストライン高さに対する歪み速度 d_{11} , d_{22} とダイからの距離の関係 (L -LDPE, $V_L/V_0=4$, $R_L/R_0=3.5$)

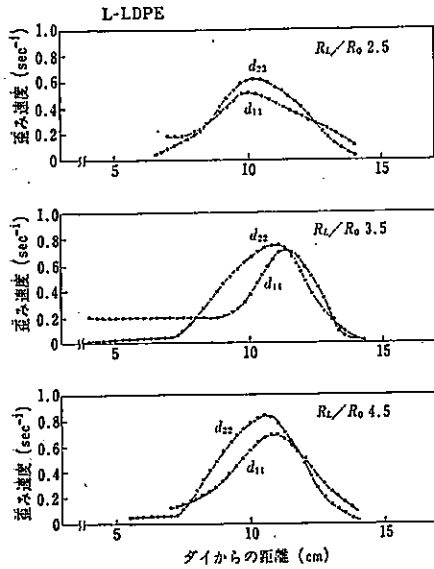


第24図 種々なドロウダウン比に対する歪み速度 d_{11} , d_{22} とダイからの距離の関係 (HDPE, $R_L/R_0=3.5$, $Z_F=12$ cm)

ブロー比を大きくすることは、一般にTDの延伸効果を強くすることが知られているが、第22図をみてもわかるように、 σ_{22max} の増加が大きく、また σ_{11max} の値も多少大きくなっている。 $\sigma_{11max}/\sigma_{22max}$ の値はブロー比の増加とともに小さくなり、TDの延伸効果の増大がより大きいことを示唆している。

こういった成形条件と最大応力値の関係は、実験においても張力およびバブル内部圧から算出した応力値の傾向と一致しており¹⁾、MD, TDの物性バランスや、衝撃、引張強度、さらに非晶性ポリマーに対しては製品の収縮応力値⁹⁾を予測するうえで重要な役割を果たす。

また、成形条件を変化させることは、成形中における歪み速度パターンにも大きな影響を与える。たとえば、フロストライン高さを変化させた場合について、歪み速度パターンをダイからの距離に対してプロットした実験結果を第23図に示したが、フロストライン高さが低い場合におけるMDの歪み速度(d_{11})の最大値は大きくなり、急激な変形が生じており、MDの延伸効果に強い影響を与えることを示唆している。さらに、ドロウダウン比について第24図に示したが、ドロウダウン比を大きくすることにより、MDおよびTDの歪み速度(d_{11} および d_{22})は大きくなるが、MDの歪み速度上昇により強い効果のあることがわかる。ブロー比については、この値が大きいほどTDの歪み速度 d_{22} を大きくする効果のある結果を示しており(第25図)、変形パターンを知ることは最大応力値同様、フィルム成形中の延伸性を知るうえで重要な意味をもっている^{1), 4)}。

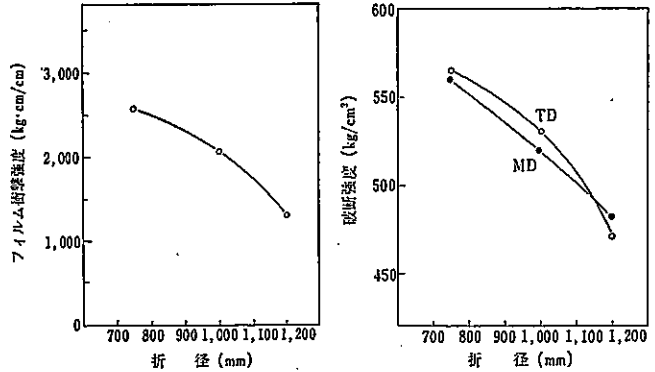


第25図 種々なブロー比に対する取み速度 d_{11} , d_{22} とダイからの距離の関係 (L-LDPE, $V_L/V_0=4$, $Z_F=12\text{cm}$)

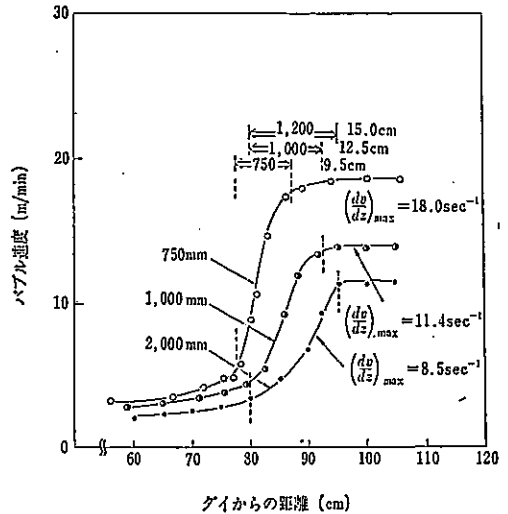
4. インフレーション成形の大型化

同一押出機を用いてダイスの大きさを変更させて広幅フィルムを成形したり、あるいは同一押出機で引取速度を遅くして厚物フィルムを成形すると厚み当りのフィルム強度が大きく低下する結果となり、実際に使用する場合に大きな問題となる。たとえば同一吐出量で、同一厚みの製品を製造する場合にダイス径を変更して、折径を大きくする場合、ブロー比が一定条件では第26図に示したように衝撃強度や引張強度の大きな低下がみられる⁹⁾。この原因は第27図に示したように同一吐出量、同一厚みで折径を大きくすると、バブルの膨張開始から終了までの延伸間距離が長くなり、引張速度が遅くなることから、延伸時の取み速度が大きく低下するためであり、延伸応力も低下していることが予想される。このように広幅化した場合にも、物性低下を起こさず成形する方法を考えることは重要である。

また、小型機での成形結果を用いて大型機での成形性およびフィルム物性を予測することは、研究開発の加速および効率化の面から有用であり、さらにパイロットプラントで得られた樹脂の少量試験サンプルを評価することにより、生産機への成形予測を行なうことは、原料の改良開発の面から非常に重要である。このような場合、系の大きさによらない解析が必要となる



第26図 フィルムの折径とフィルム物性の関係 (吐出量、ブロー比、ドロウダウン比一定条件)



第27図 各種折径に対する速度と取み速度ダイからの距離の関係

ため、このスケールアップあるいはスケールダウンについて考えてみたい¹⁰⁾。

この解析には、系の大きさに依存しない関係式を取り扱うと便利である。そこで、前述の理論式で用いた各変数を無次元数に変換すると以下ようになる。

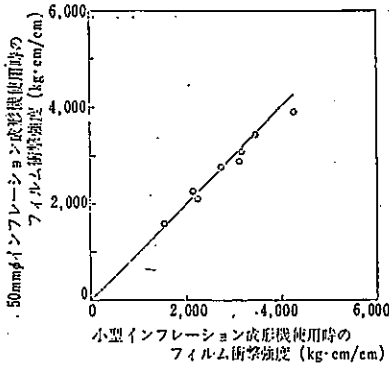
$$r = \frac{R}{R_0}, W = \frac{H}{R_0}, \ell = \frac{Z}{R_0}, S = \frac{T}{T_0} \quad (9)$$

ただし、 r : バブル径の無次元数、 W : バブル厚みの無次元数、 ℓ : ダイからの距離の無次元数、 S : バブル温度の無次元数である。

これらの無次元数を用いると力のバランスの式(8)と(9)は、おのおの次のようになる。

$$\frac{W'}{W} = -\frac{r'}{2r} - \frac{\eta_0(A+r^2B)\sec^2\theta}{2\eta} \quad (10)$$

$$2r^2(A+r^2B)r'' = \frac{3\eta r'}{\eta_0} + r\sec^2\theta(A-3r^2B) \quad (11)$$



第28図 50mm
φインフレーション成形機と19mm
φ小型試験機で得られたフィルム
衝撃強度の比較

ここで、

$$A = \frac{R_0 F_L}{Q \eta_0} - B \left(\frac{R_L}{R_0} \right)^2 \quad (29)$$

$$B = \frac{\pi R_0^3 \Delta P}{Q \eta_0} \quad (30)$$

とした。

フィルム物性は、熔融状態における延伸応力を考えることが重要であることを述べたが、インフレーション成形のスケールアップを考えるうえで、代表値としてフロストライン位置の応力を最大応力と考え、この値を系の大きさによらず一定となる条件を設定する。フロストライン付近のMDの応力 σ_{11max} およびTDの応力 σ_{22max} はバブル径がバブル最終径と等しくなることから、

$$R_1 = \infty, R_2 = R_L, R = R_L, H = H_L \quad (31)$$

$$\cos \theta = 1 \text{ at } Z = L \quad (32)$$

ただし、 L はフロストライン高さの位置を示す。式(30)を、式(29)および式(31)に代入すると

$$\sigma_{11} = \frac{F_L}{2\pi P_L H_L} \quad (33)$$

$$\sigma_{22} = \frac{\Delta P \cdot R_L}{H_L} \quad (34)$$

無次元項の式(33)および式(34)を用いて書きなおすと、

$$\sigma_{11} = G_1 \frac{Q \eta_0}{R_0 R_L H_L} \quad (35)$$

$$\sigma_{22} = G_2 \frac{Q \eta_0 R_L}{R_0^3 H_L} \quad (36)$$

ただし、

$$G_1 = \frac{A + B(R_L + R_0)^2}{2\pi} \quad (37)$$

$$G_2 = \frac{B}{\pi} \quad (38)$$

成形温度、ブロー比、ドローダウン比およびフロストライン高さの無次元数を一定にすると、 G_1 、 G_2 は一定となる。そこで、系の大きさによらず σ_{11} 、 σ_{22} を一定に保つには、式(35)および式(36)に注目すると、ダイ径を K 倍して、折径が K 倍（つまり同一ブロー比）

のフィルムを得るには、厚み一定の場合、吐出量を K^2 倍することによりほぼ同一の σ_{11} 、 σ_{22} が得られる。なお、この場合、樹脂温度を一定に保つ必要がある。また、吐出量を一定に保ったままダイ径および折径を K 倍すると、延伸応力は σ_{11} 、 σ_{22} ともに $1/K^2$ 倍になり、HDPEのような延伸効果の大小でフィルム物性が左右される樹脂では、吐出量一定で広幅フィルムを成形すると、一般にフィルム物性は低下することがわかる。

厚みについては、 ℓ 倍にした場合、吐出量を ℓ 倍することにより同一の σ_{11} 、 σ_{22} が得られ、吐出量を一定のままに保つと延伸応力は σ_{11} 、 σ_{22} ともに $1/\ell$ 倍になる。折径 K 倍、厚み ℓ 倍では、同一のフィルム物性を得るには吐出量は $k^2 \ell$ 倍必要で、吐出量を一定のままに保つと延伸応力は σ_{11} 、 σ_{22} ともに $1/k^2 \ell$ 倍になる。

ただし、この場合、ダイ出口の樹脂温度は一定に保った場合である。

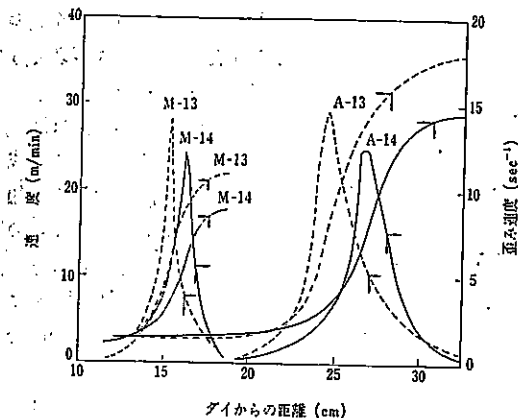
なお、冷却量については、折径を変化させた場合も平均熱伝達係数 U_{ave} を等しくするように条件を設定する。つまり、フロストライン高さをダイ径に比例した高さになるよう冷却量を合わせる必要がある。また、厚みを変化させる場合には厚みを厚くした分だけ平均熱伝達係数 U_{ave} を高める、つまり冷却風量を多くし、フロストライン高さは厚みによらず同一になるよう設定する必要がある。

このように、応力一定条件下で成形すると、系の大きさによらずほぼ対応したフィルム物性を示すようになる。第28図は19mmφ押出機で成形したフィルムとスケールアップ条件に基づいて50mmφ押出機で成形したフィルムの衝撃強度を比較した結果を示したが、ほぼ良好な対応関係が得られている¹⁰⁾。

つぎに、小型19mmφ試験機で行なったバブルの速度パターンと50mmφ成形機を用いて行なったバブルの速度パターンについて比較したのが第29図である。引取速度の値が異なり、バブルの移動速度パターンでは一見小型試験機と50mmφ成形機と対応関係がないようにみえるが、速度変化 (dV_Z/dZ) をプロットすると (dV_Z/dZ)_{max} はほぼ一致している。

また、(dV_Z/dZ) の曲線には横軸にダイからの距離をとっているが、経過時間はダイからの距離を移動速度で除した値 $t = Z/V$ であるので、興味あることに熔融変形に要した時間は互いに近い値を示しており、経過時間 t と (dV_Z/dZ) の曲線はお互いに類似した曲線になる。

折径および厚みを変化させた場合のフィルム物性の



第29図 50mmφ インフレーション成形機と19mmφ 小型インフレーション成形機の溶融樹脂の変形挙動の比較 Aは50mmφ 押出機, Mは19mmφ 試験機を示し, 同一番号はスケールアップの対応条件を示す。

関係を図示すると, 第30図のようになる。ある製品に対して, 吐出量一定で折径および厚みをそれぞれ k 倍, ℓ 倍にすると, フィルムインパクト値は F_1 から F_4 に低下する。

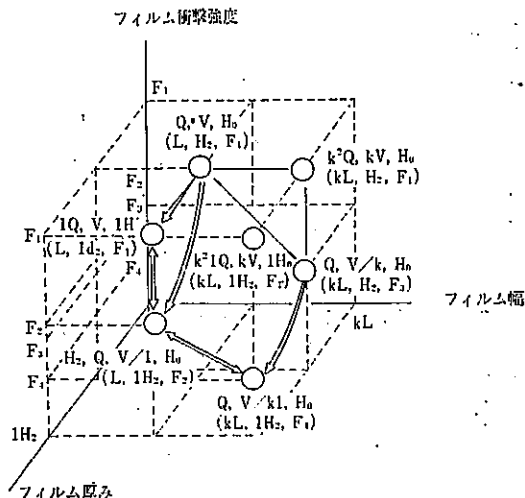
また, 折径 (k 倍), 厚み (ℓ 倍) をともに変化させた場合, 種々な外的要因 (たとえば樹脂の発熱) が付随するが, 概略的に物性を同じにするには, 吐出量 $k^2\ell$ 倍, 引取速度 k 倍, リップ開度 ℓ 倍で行ない, ダイ径は k 倍, また吐出量の増加に対して樹脂の発熱を抑えるために, $k^2\ell$ 倍の吐出量に見合った押出機を用いることが好ましく, また剪断発熱を抑える仕様にすることが必要である。

さらに, 同一製品を得るうえで, 樹脂温度を一定に保った条件で吐出量および引取速度を高めることは MD, TD の延伸応力 σ_{11} , σ_{22} の値が大きくなり, 製品物性を向上させるために大きな役割を果たすことになる。

なお, 今回のスケールアップの解析に簡略化のため, バブルの自重の項を無視したが, スケールアップ条件下では系が大きいほどあるいはフロストライン高さが高いほど, 自重の影響は大きくなるので, PET, ナイロンなどの粘度の低い樹脂 (1,000 poise 以下) では, 変形張力に対する自重の割合が無視できないので, 成形性, 物性を含めたスケールアップ則は簡略化した式では成り立たないため, 数値解析的に解く必要がある。

5. 成形条件と物性

5-1. 成形条件



第30図 フィルム厚み, 幅とフィルム衝撃強度の関係
Q: 吐出量, V: 引取速度, L: フィルム幅, H_0 :
ダイリップ幅, H_2 : フィルム厚み, F: フィルム衝
撃強度 ($F_1 > F_2, F_3 > F_4$)

第1表 インフレーション成形条件

	LDPE	L-LDPE	HDPE
成形温度(°C)	160~180	160~200	190~200
ブロー比	1~3		3~5
バブル形状			

LDPE, L-LDPE, HDPE の一般的なインフレーション成形条件を第1表に示す。

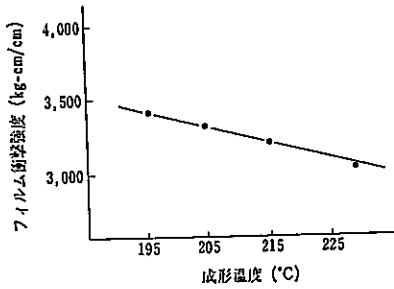
ここでは, L-LDPE と HM-WHDPE (出光ポリエチレン 640UF) について, 成形条件とフィルム物性についての関係を比較しながら述べてみたい。

5-2. 成形因子とフィルム物性

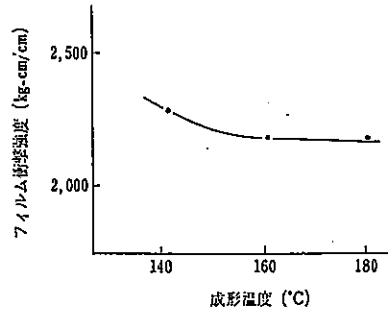
インフレーションフィルム, とくに HDPE フィルムの特性は, 成形条件に大きな影響を受ける。以下に, 成形温度, ブロー比, 吐出量, フロストライン高さの成形因子に対する物性および光学特性の関係を示す。

(1) 成形温度 (第31, 32図)

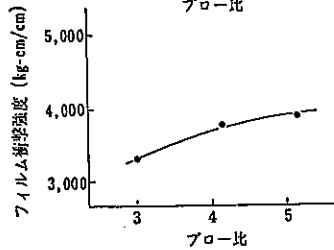
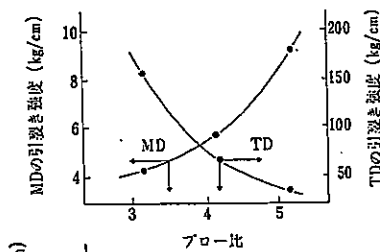
HMW-HDPE では, 成形温度の上昇に伴ないフィルムインパクト, MDの弾性率, MD, TDの破断強度の低下とMDの伸び率の増加がみられる。これは, 式(1)および式(2)からもわかるように, 成形温度が高くなると延伸応力が小さくなる傾向にあるためである。



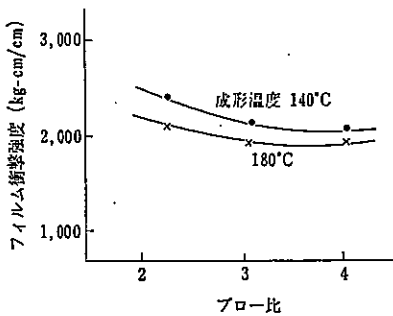
第31図 HMW-HDPE の成形温度とフィルム物性の関係



第32図 L-LDPE の成形温度とフィルム物性の関係



第33図(a) HMW-HDPE のブロー比とフィルム物性の関係



第33図(b) L-LDPE のブロー比とフィルム物性の関係

L-LDPE では、成形温度による影響が HDPE よりも小さい。霞度は成形温度が高くなると低くなり、光学特性は向上する。

(2) ブロー比 (第33図)

HMW-HDPE では、ブロー比の増加に伴ない、MDの引裂強度の増加がみられ、引裂強度のバランスがよくなり、フィルムインパクトが向上するが、これは

MDおよびTDの成形過程での応力バランスがよくなるためである。

(3) 押出量 (第34, 35図)

同一寸法のフィルムを成形する場合、押出量を増加させるとMDおよびTDの延伸応力値がともに大きくなり、HMW-HDPE ではフィルムインパクトの向上がみられる。

L-LDPE では、フィルムインパクトに多少向上がみられる。

(4) フロストライン高さ (第36, 37図)

HMW-HDPE では、フロストライン高さが高くなるほど引裂強度バランスがよくなり、フィルムインパクトが向上する。

L-LDPE では、フロストライン高さが高くなると透明性が急激に悪くなる(霞度が大きくなる)。これはフロストライン高さが高くなったことにより、冷却が遅くなり、結晶化による微結晶サイズが大きくなるためである。

一般に、フィルム物性は HMW-HDPE の場合、成形条件により大きく影響されるが、L-LDPE では透明性を除いて HDPE ほど成形条件に大きな影響は受けない。

以上のフィルム物性の結果は、3章で述べた変形パターン、フロストライン位置での応力値および樹脂の結晶化度に対応しており、熔融樹脂の変形挙動とフィルム物性に密接な関係のあることがわかる。

6. インフレーション成形の成形性

インフレーション成形において、高速化に伴ない成形安定性あるいは延伸切れがしばしば問題となる。

6-1. 成形安定性

ポリエチレン3種類について、成形条件を変化させ

た場合の成形安定性の比較を第38図に示した。成形安定性はブロー比、ドローダウン比およびフロストライン高さなどの成形条件により大きく左右される。

これらの現象を2章で述べた伸長流動挙動と結びつけて考えることは興味深い。伸長粘度挙動からLDPE, L-LDPE および HDPE

のバブル安定性の違いを議論すると、歪み速度の増加とともに粘度が上昇する（歪み速度硬化）ポリマーは安定であるといえる。また、箕島ら¹¹⁾によると、歪みの増加とともに粘度が上昇する（歪み硬化）ポリマーも、安定性に多少よく作用すると報告している。

LDPE > HDPE ≥ L-LDPE

Ide. White¹²⁾による熔融紡糸におけるドローレゾナンスの理論解析の議論からも、“歪み速度硬化”を示す樹脂は初期の変動を防止する方向に働くことを報告している。また、上記の“歪み速度硬化”の考え方を非等温の場合にも拡張し、変形が進行するにつれ粘度が上昇する場合を“変形硬化”と表現すると、粘度の温度依存性の大きいポリマーのほうが、成形中の“変形硬化”は顕著であり、成形安定性が向上する。

LDPE > L-LDPE ≥ HDPE

上記2つの順序は、HDPE と L-LDPE において相反する結果であるが、粘度の温度依存性が大きく影響を与える成形条件つまり冷却量が多く、冷却効率の高い条件下 (Z_L が6 cm以下) では、L-LDPE のほうがHDPE より安定で、等温条件下あるいは冷却量が小さい条件下ではHDPE のほうがL-LDPE より安定である結果が得られている。

冷却条件に対応するフロストライン高さは、“変形硬化”の立場から、冷却量を多くして低く保つほうが、ドローレゾナンス現象を防止でき(第38図(b))、また活性化エネルギーの大きいポリマーのほうが、成形安定性のフロストライン依存性は大きい。

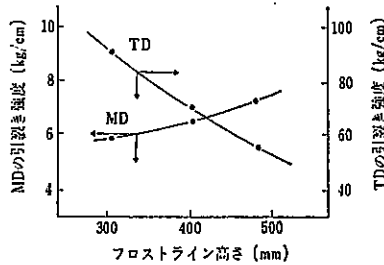
成形安定性に関するフロストライン高さ (Z_L) 依存性

Z_L 低い > Z_L 高い

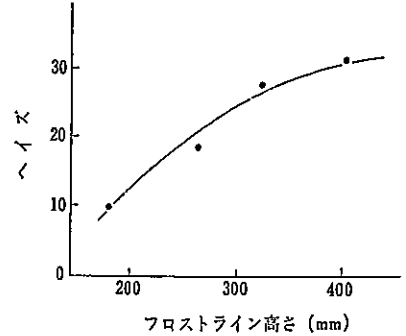
フロストライン高さの成形安定性に与える影響度

LDPE > L-LDPE > HDPE

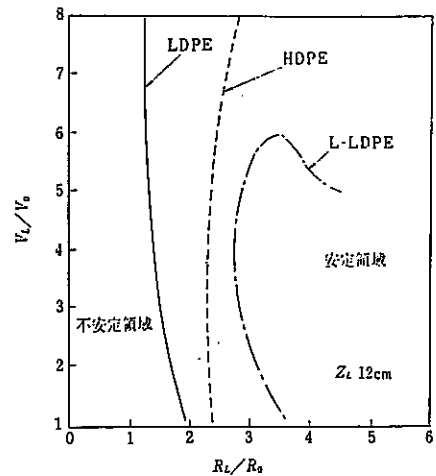
一方、インフレーション成形の場合、熔融張力の大きいほうが一般的に成形安定化しやすいといわれている。こういった樹脂は同一MIでの熔融張力を比較し



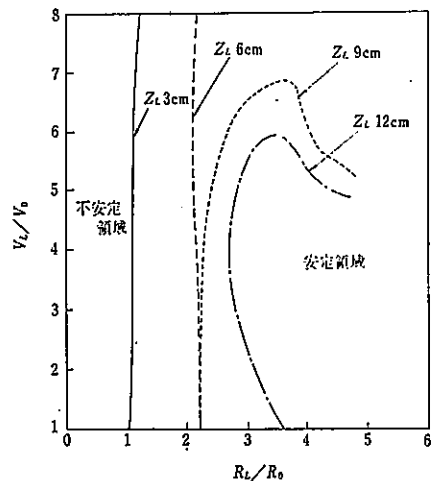
第36図 HMW-HDPE のフロストライン高さおよびフィルム物性の関係



第37図 L-LDPE のフロストライン高さおよびフィルム物性の関係

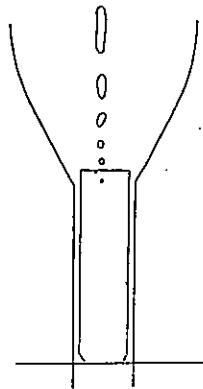


第38図(a) ポリエチレンのインフレーション成形安定性 (フロストライン高さ $Z_L=12$ cm)

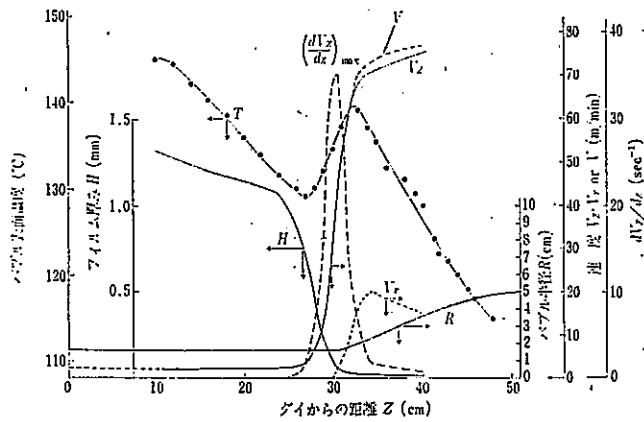


第38図(b) L-LDPE のインフレーション成形安定性

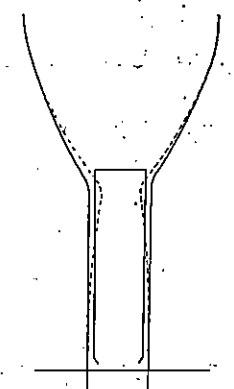
た場合、成形中に“変形硬化”しやすい樹脂は活性化エネルギーが大きく、かつ“歪み速度硬化”を示す樹



第39図 延伸切れ発生位置



第40図 高速成形時のバブルの変形挙動



第41図 バブル安定体の抵抗

脂であるため、溶融張力が大きくなる。樹脂の面では“同一MIで溶融張力が大きい樹脂”と成形中に“変形硬化しやすい樹脂”とは相関性があるといえる。

インフレーション成形の安定性から考えると「変形硬化しやすい条件」つまり樹脂としては、長鎖分岐をもつ活性化エネルギーの大きい、歪み速度硬化を示す樹脂が好ましい。成形条件としては冷却量が多く、ブロー比はバブルの回転運動を起こさない範囲で大きく、また成形不安定現象の原因を引き起こすドローダウン比は小さいほうがよいといえる。

なお、HMW-HDPE の場合には薄物で高ドローダウン比の条件下で成形されるため、MD、TDのバランスを得るために高ブロー比でかつ高フロストライン高さで成形する必要があり、また HDPE は不安定になりやすいため、バブル安定体を使用して成形するのが一般的である。

6-2. 延伸切れ

HMW-HDPE の高速成形のように、フィルムが9 μm ~ 10 μm で薄く、かつ引取速度が 80m/min から 100m/min の範囲にある場合、成形安定性向上を図るだけでなく、連続生産性を得るため延伸切れを防止することが重要である。

まず延伸切れの発生原因を把握するため、高速成形条件下で出光ポリエチレン64OUF (高分子量 HDPE) を用いて、成形途上の変形挙動を高速8mmカメラにより撮影し、また延伸切れの起こる現象を検討した。実験は延伸切れの発生位置ではまずはピンホール程度の発生が原因となっているため、高速8mm撮影で得られた第39図のような各位置での切れ幅をダイからの距離Zに対してプロットした外挿点を延伸切れの位置とした。この延伸切れの位置は第40図において、ほとんどが30.5~31.0cmの範囲に集中しており、延伸切れ発生

の位置は $(dV_z/dZ)_{max}$ の位置付近で発生していることがわかる。

高速成形条件下 ($V_L/V_0=40$, $R_L/R_0=3.2$, $V_L=80\text{m/min}$, $R_0=30\text{mm}\phi$) では、第41図でみられるように、バブルの移動速度はバブルがバブル安定体に接触している位置においては安定体の抵抗が大きく、移動速度の上昇はほとんどみられないが、いったんバブル安定体から離れると、バブルの急激な速度上昇が起きている。つまり、第41図のようなバブル安定体の場合では安定体によりバブルが押し拡げられているため、引張張力が大きくてもバブルが安定体に接触している間は速度が規制される。

ところが、バブルが安定体から離れると安定体を使用しない場合に比較し2倍程度の引張張力がそのままバブルに作用するため、急激な速度上昇が生じる。高速成形条件下の速度変化 (dV_z/dZ) の最大値がいかにか大きいかを第2表に示した。

(dV_z/dZ) の値が非常に大きく、ポリマーが急激な歪み速度に対して均一な流動変形ができなくなるため、高速成形条件下では延伸切れの発生しやすい状態になっていることがわかる。

一方、溶融樹脂の変形挙動の温度パターンは高速成形において特徴的なパターンを示しており、移動速度の上昇が開始された付近での急激な引張応力がかかり、薄肉化するため結晶化が急激に起こり、温度の大きな上昇を示している。

延伸切れの防止対策としては、ポリマーの流動性を向上させ弾性効果を抑え、かつバブル形状を拡げる効果(ニュートン流体的となるため)のある成形温度の上昇、バブル安定体とバブルとの摩擦抵抗を小さくするため接触面積を小さくかつバブル形状に合ったバブル安定体を選定することにより、延伸切れ防止するこ

とができる。

第2表 成形条件と $(dV_z/dZ)_{max}$ の関係

おわりに

インフレーション成形について、樹脂のレオロジー特性や成形条件と成形中の変形挙動、結晶化速度、得られたフィルムの物性の相関性について、理論解析および実験結果を交えて述べ、さらにインフレーション成形性について説明を加えた。

解析技術の面から、今後は粘弾性流体を考慮した理論解析、成形性については振動論の立場から、より厳密な解析により樹脂、成形条件に対する成形安定性を予測することが本質的な立場から必要である。また実際に問題となるフィルムの偏肉がダイ出口の厚み精度とどのように関係づけられるかという点は、偏肉制御という意味から重要である。

一方、インフレーションフィルムの包装材料への開発という面では、包装材料の多様化、高付加価値化に伴ない、偏肉精度、要求物性、製品外観などの品質向上が要求され、押出機では均一吐出量を得、温度および圧力変動を抑え、ダイスでは均一な厚肉精度、エアリングでは風速分布の均一化などの成形機の高精度化が重要となり、さらに機能をもたせた多層化技術の開発がますます重要となるであろう。

	引取速度 V_L (m/min)	バブル安定体	Z_p (cm)	V_L/V_0	B	$(dV_z/dZ)_{max}$ (sec^{-1})
高速成形	80.0	ストレート型	30.0	36	3.2	35.5
	40.0	ストレート型	30.0	25	4.0	11.7
	40.0	リング型	30.0	25	4.0	10.0
	40.0	リング型	45.0	25	4.0	4.0
一般 LDPE	14.0	—	24.0	16	2.0	1.2

＜参考文献＞

- 1) T. Kanai, J. L. White, Polym. Eng. Sci., 24 (15), 1185 (1985)
- 2) W. Minoshima, J. L. White, J. E. Spruiell, Polym. Eng. Sci., 20, 1166 (1980)
- 3) H. Yamane, J. L. White, Polym. Eng. Rev., 2, 167 (1980)
- 4) 金井俊孝, 富川昌英, J. L. White, 清水二郎, 織学誌, 40 (12), T-465 (1984)
- 5) 鈴木俊一, 金井俊孝, 日本レオロジー学会誌, 12 (4), 207 (1984)
- 6) T. Kanai, J. L. White, J. Appl. Polym. Sci., (in Press)
- 7) 金井俊孝, プラスチックスエージ, 31, 113 (1985)
- 8) 金井俊孝, 岩井昭之, 高重真男, 清水二郎, 織学誌, 41, T-272 (1985)
- 9) 金井俊孝, 木村正克, 清水二郎, 織学誌, 41 (4), T-139 (1985)
- 10) 金井俊孝, 清水二郎, 織学誌, 41 (5), T-179 (1985)
- 11) W. Minoshima, Ph. D. Dissertation, Univ. Tennessee (1983)
- 12) Y. Ide, J. L. White, J. Appl. Polym. Sci., 22, 1061 (1978)

＜主要目次＞
 金型製作にあたっての留意点 / C.A.D. / C.A.Mシステムによる金型製作 / プレス金型材料とその選定 / 金型加工用切削工具の選定 / 金型表面硬化処理方法の要点 / 金型加工と仕上げ技術 / マシニングセンターによる金型加工 / 放電加工機による金型加工 / フレキシブル金型自動加工システム / 3次元処理金型加工システム / ほか

「機械と工具」編集部編
 B5・二六四頁 定価二、四〇〇円 千300
 量産技術を支えてきた金型技術に、新しい技術の波が押し寄せている。N.C.とコンピュータの利用による自動化、納期短縮、製造コスト低減、高精度化が求められ新しい技術の導入が不可欠になっている。本書は金型製作に関する最新技術を紹介するもので、設計、加工、計測、仕上げの最新技術のほか、金型製作で中心となる治工具、材料の選定方法や、自動化機器・システムの使い方について具体的に解説してある。

