

インフレーション成形の理論と実際 (その2)

商品開発研究所 金井俊孝

<要 旨>

前報では、樹脂のレオロジー特性とインフレーション成形中における熔融樹脂の変形挙動の関係について、基礎的な面から述べた。本報では、工業的に重要であるスケールアップの考え方、高生産性を得る上でポイントとなる冷却の問題および成形条件とフィルム物性の関係について記述する。

4 スケールアップ則^{13, 19, 20)}

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。

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、前報²¹⁾の3章の理論式で用いた各変数を無次元数に変換すると以下のようなになる。

$$r = \frac{R}{R_0}, \quad w = \frac{H}{R_0}, \quad \ell = \frac{Z}{R_0}, \quad s = \frac{T}{T_0} \quad \dots\dots(12)$$

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(1)と(2)は、おのおの次式のようなになる。

$$\frac{w'}{w} = -\frac{r'}{2r} - \frac{\eta_0(A+r^2B)\sec^2\theta}{2\eta} \quad \dots\dots(13)$$

$$2r^2(A+r^2B)r'' = \frac{3\eta r'}{\eta_0} + r\sec^2\theta(A-3r^2B) \quad \dots\dots(14)$$

ここで、

$$A = \frac{R_0 F_L}{Q \eta_0} - B \left(\frac{R_L}{R_0} \right)^2 \quad \dots\dots(15)$$

$$B = \frac{\pi R_0^3 \Delta P}{Q \eta_0} \quad \dots\dots(16)$$

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前報で述べたが、インフレーション成形のスケールアップを考える上で、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計する。フロストライン付近のMDの応力 $\sigma_{11 \max}$ およびTDの応力 $\sigma_{22 \max}$ はバブル径がバブル最終径と等しくなることから、

$$R_1 = \infty, \quad R_2 = R_L, \quad R = R_L, \quad H = H_L \\ \cos\theta = 1 \quad \text{at} \quad z = L \quad \dots\dots(17)$$

ただし、Lはフロストライン高さの位置を示す。式(17)を、式(1)および式(2)に代入すると、

$$\sigma_{11} = \frac{F_L}{2 \pi R_L H_L} \quad \dots\dots(18)$$

$$\sigma_{22} = \frac{\Delta P \cdot R_L}{H_L} \quad \dots\dots(19)$$

無次元項の式(15)および式(16)を用いて書きなおすと、

$$\sigma_{11} = G_1 \frac{Q \eta_0}{R_0 R_L H_L} \quad \dots\dots(20)$$

$$\sigma_{22} = G_2 \frac{Q \eta_0 R_L}{R_0^3 H_L} \quad \dots\dots(21)$$

ただし、

$$G_1 = \frac{A + B(R_L/R_0)^2}{2 \pi} \quad \dots\dots(22)$$

$$G_2 = \frac{B}{\pi} \quad \dots\dots(23)$$

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(20)および式(21)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} 共に $1/k^2$ 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。

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} 共に $1/\ell$ 倍になる。ダイ径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} 共に $1/k^2 \ell$ 倍になる。

但し、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。図27は19mm ϕ 押出機で成形したフィルム

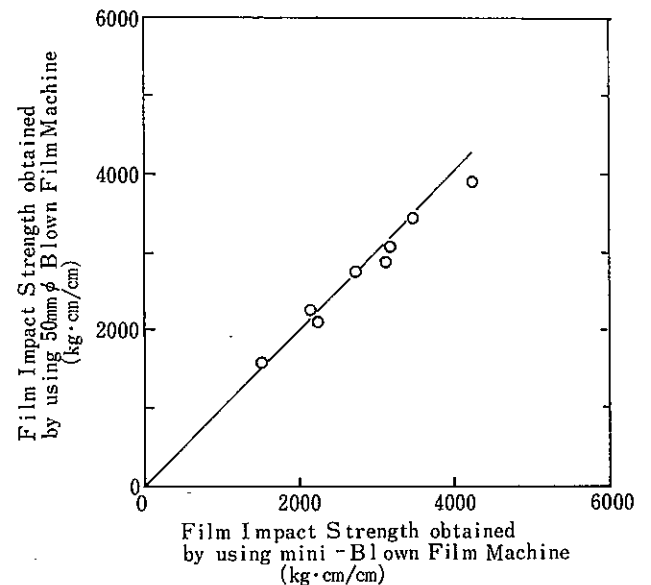


図27 50mm ϕ インフレーション成形機と19mm ϕ 小型試験機で得られたフィルム衝撃強度の比較

とスケールアップ条件に基づいて50mm ϕ 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²⁰⁾。

次に、小型19mm ϕ 試験機で行ったバブルの速度パターンと50mm ϕ 成形機を用いて行ったバブルの速度パターンについて比較したのが図28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50mm ϕ 成形機と対応関係がないように見えるが、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) の曲線は互いに類似した曲線になる。

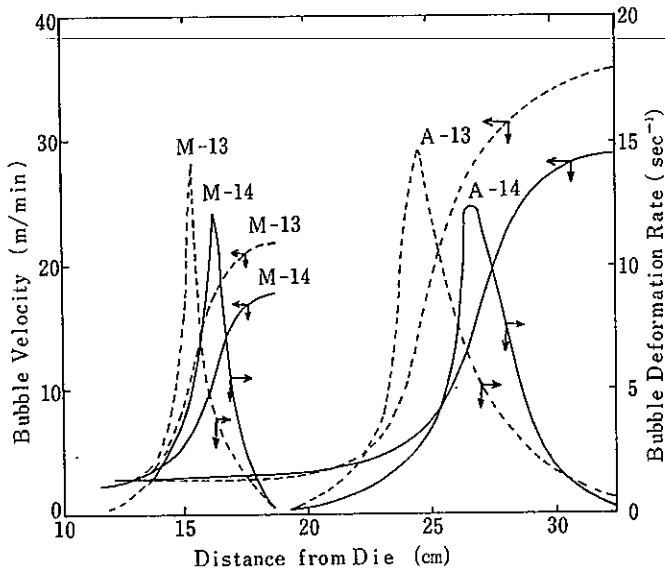


図28 50mm ϕ インフレーション成形機と19mm ϕ 小型インフレーション成形機の溶融樹脂の変形挙動の比較Aは50mm ϕ 押出機, Mは19mm ϕ 試験機を示し, 同一番号はスケールアップの対応条件を示す。

以上の結果をまとめると, スケールアップ条件下において折径および厚みを変化させた結果, フィルムのサイズによらずほぼ同一のフィルム物性が得られた。これらの関係を図示すると, 図29のようになる。また, 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) を共に変化させた場合, 種々な外的要因 (例えば樹脂の発熱) が付随するが, 概略的に物性を同じにするには, 吐出量 k^2l 倍, 引速 k 倍, リップ開度 l 倍で行い, 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^2l 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必要がある。

なお, 今回のスケールアップの解析には簡略化のため, 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, Nylon などの粘度の低い樹脂 (1,000poise 以下) では, 変形張力に対する自重の割合が無

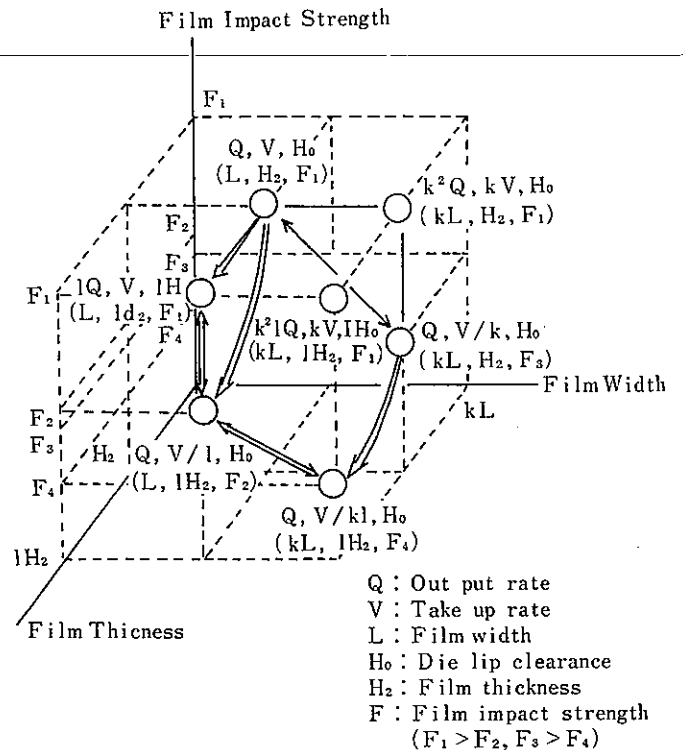


図29 フィルムの厚み, 幅とフィルム衝撃強度の関係

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¹⁸⁾

5.1 成形条件

LDPE, L-LDPE, HDPEの一般的なインフレーション成形条件を表6に示す。

表6 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			

ここでは、L-LDPEとHMWHDPE（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 成形因子と物性・光学特性

インフレーションフィルム、特に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、押出量、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（図30、図31）

HMWHDPEでは、成形温度の上昇に伴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の伸び率の増加が見られる。前報²³⁾で述べたように成形温度が高くなると延伸効果が十分きかない傾向にあり、成形温度の上昇に伴い弾性率や破断強度、フィルムインパクトは低下し、伸び率は高くなる。

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。

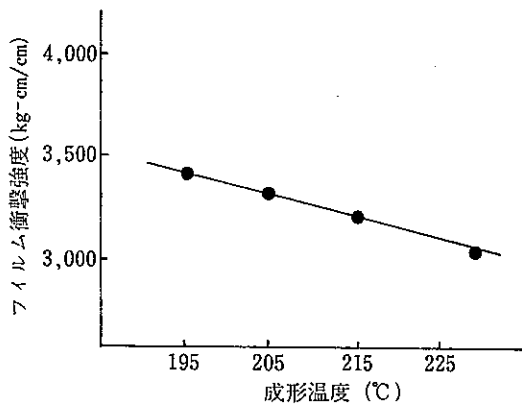


図30 HMW-HDPEの成形温度とフィルム物性の関係

(2) ブロー比（図32、図33）

HMWHDPEでは、ブロー比の増加に伴い、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。

L-LDPEでは、ブロー比の影響がほとんどない。

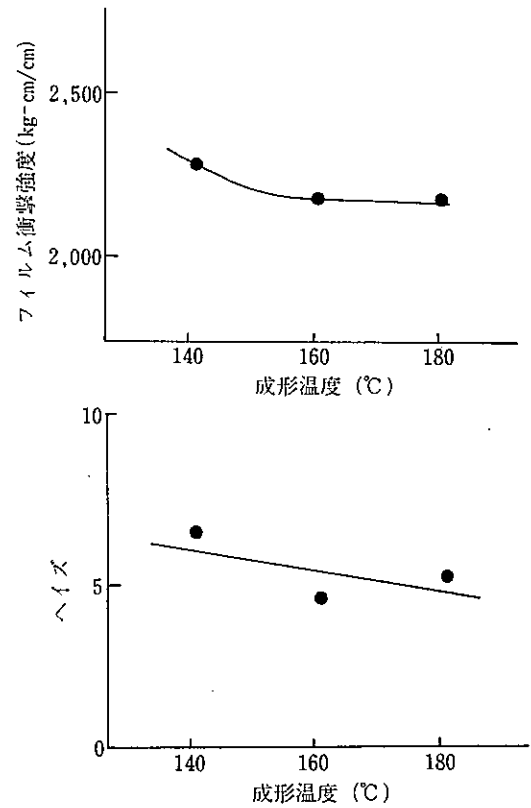


図31 L-LDPEの成形温度とフィルム物性の関係

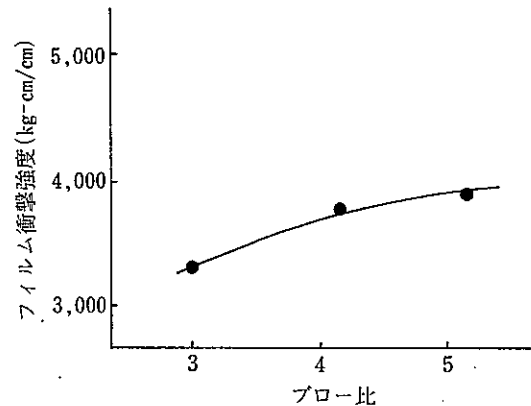
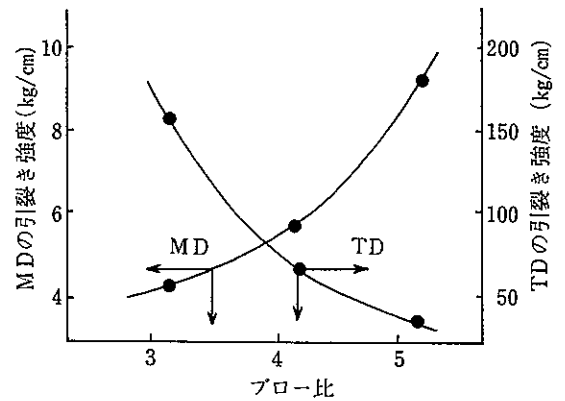


図32 HMW-HDPEのブロー比とフィルム物性の関係

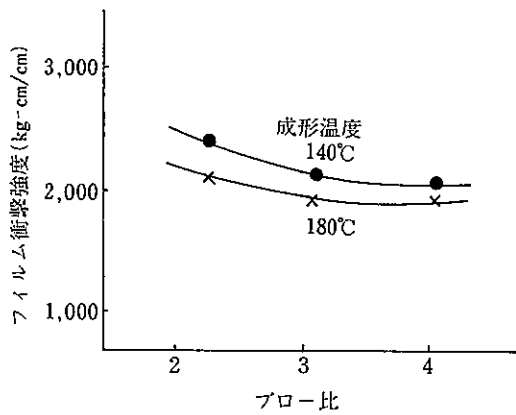


図33 L-LDPEのブロー比とフィルム物性の関係

(3) 押出量 (図34, 図35)

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HMWHDPEでは、フィルムインパクトの向上が見られる。

L-LDPEでは、フィルムインパクトに多少向上が見られる。

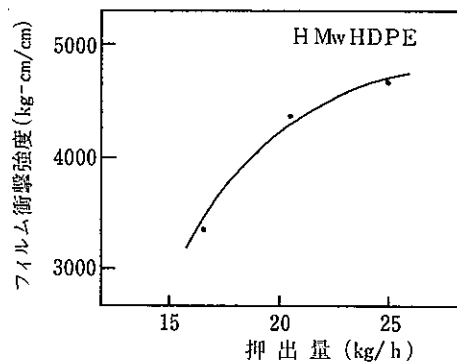


図34 HMW-HDPEの押出量とフィルム物性の関係

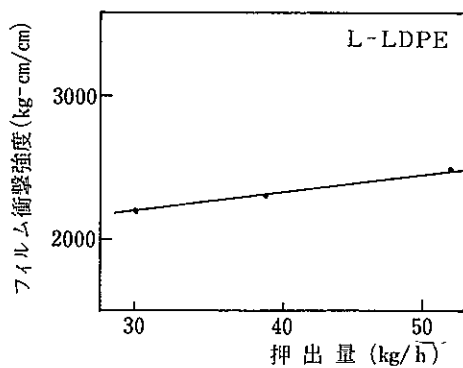


図35 L-LDPEの押出量とフィルム物性の関係

(4) フロストライン高さ (図36, 図37)

HMWHDPE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。

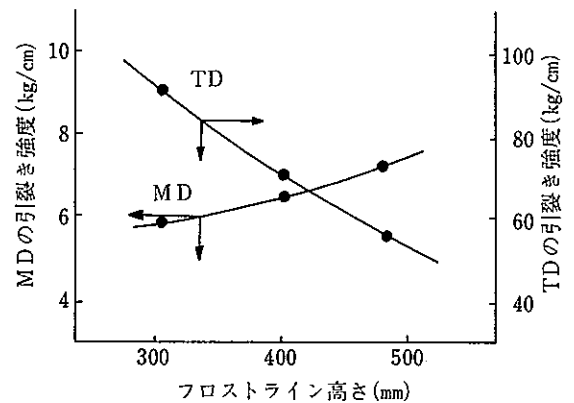


図36 HMW-HDPEのフロストライン高さ and フィルム物性の関係

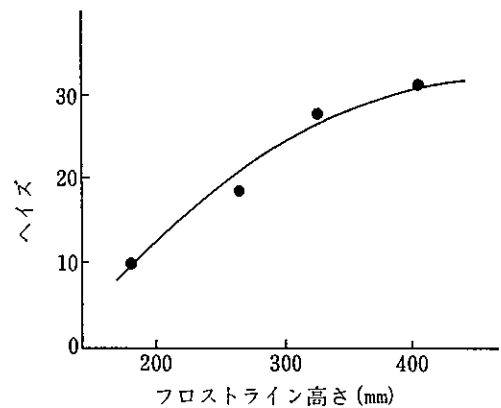


図37 L-LDPEのフロストライン高さ and フィルム物性の関係

一般に、フィルム物性はHMWHDPE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、前報の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

および樹脂の結晶化度に対応しており、溶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冷却

6.1 インフレーション成形の熱伝達²⁾

インフレーション成形中のバブル温度は、対流、放射による冷却および結晶化の発熱に依存する²²⁾。

$$Q_{total} = Q_{convection} + Q_{radiation} + Q_{crystallization}$$

.....(24)

この熱量バランスに対応する式は、式(5)で述べた。

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図38に示す。ダイを出た溶融樹脂バブルは、外

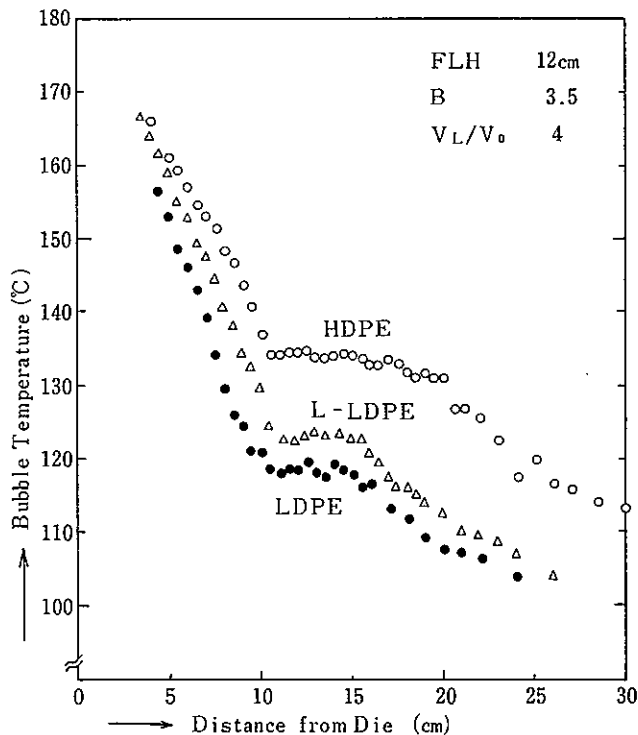


図38 LDPE, L-LDPEおよびHDPEのバブル温度パターン
($V_L/V_0 = 4.0$, $R_L/R_0 = 3.5$, $Z_L = 12\text{cm}$)

部からの冷却により温度が低下し、その後温度の平衡領域を示す。この平衡領域は結晶化による発熱と外部からの冷却がバランスしていることを示している。結晶化がほぼ終了すると再び外部からの冷却により、温度が低下する。こういった温度パターンと溶融樹脂の変形挙動から式(5)を使用することにより、図39に示すような各位置での熱伝達係数を求めるこ

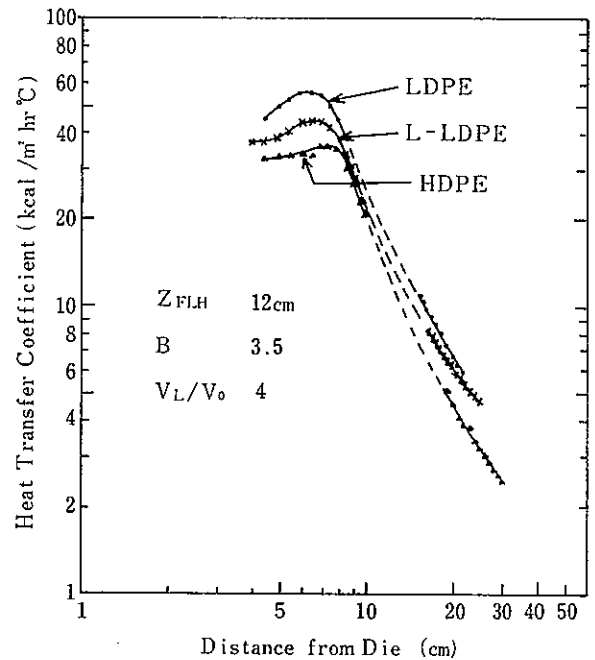


図39 各樹脂に対する位置と熱伝達係数の関係

とができる。また、結晶化の発熱度合から、インフレーション成形中の結晶化速度のデータも得られる(図40)。一方、図41に示すようなバブル付近での

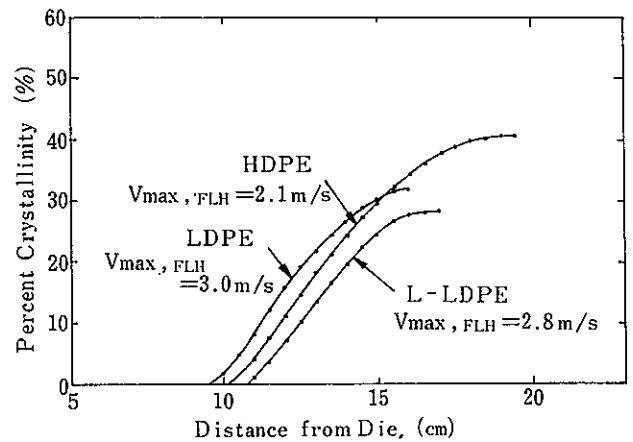


図40 各樹脂に対する位置と結晶化度の関係
 $V_L/V_0 = 4.0$, $R_L/R_0 = 3.5$, $Z_L = 12\text{cm}$

風速パターン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ッセルト数 Nu とレイノルズ数 Re に変換して無次元式を組み立てると、インフレーション成

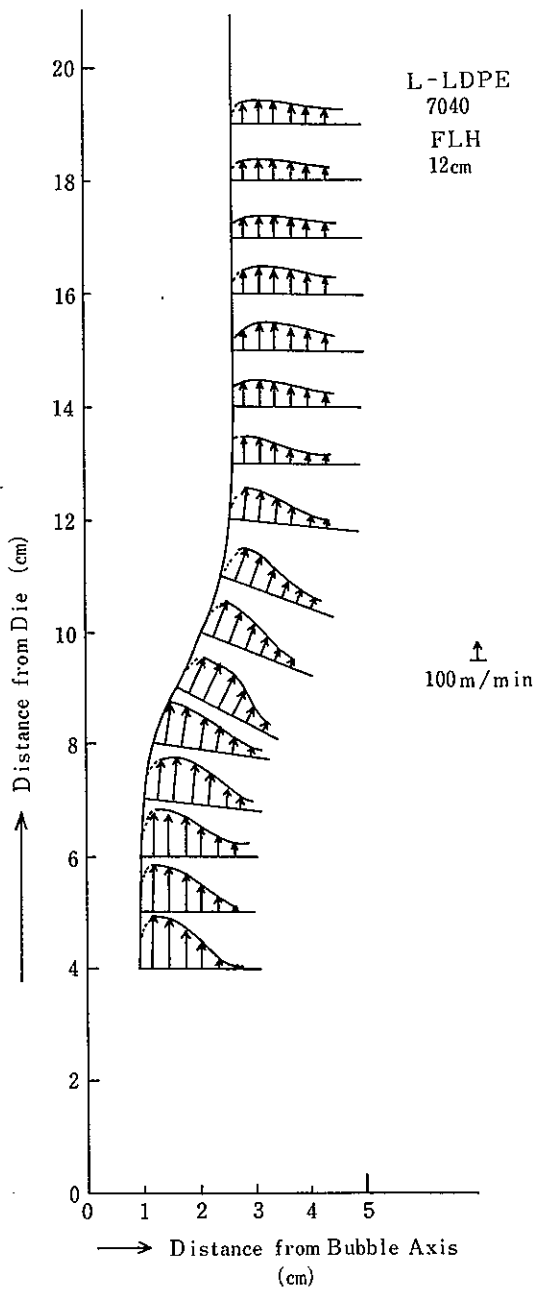


図41 バブル表面の冷却風パターン

形の場合について、図42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(25)が成り立つ。

$$\frac{UL_a}{K_{air}} = 0.043 \left(\frac{L_a v_{air} \rho_{air}}{\eta_{air}} \right)^{0.76} \dots\dots\dots(25)$$

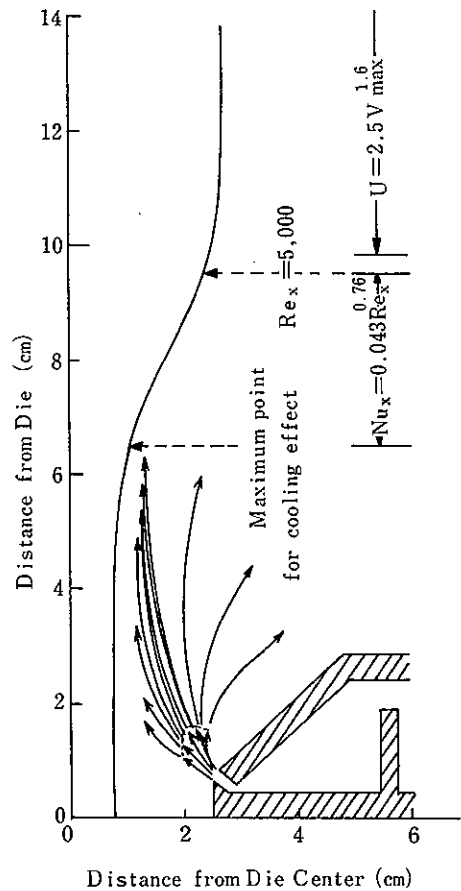


図42 インフレーション成形におけるバブルと冷却風の熱伝達

ただし、

- K_{air} : 空気の熱伝導率
- v_{air} : 各位置での冷却空気の最大風速
- ρ_{air} : 空気密度 η_{air} : 空気の粘度
- 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があり、境界層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良い相関性が得られ、式(26)が成り立つ。

$$U = 2.5 v_{air}^{1.6} \dots\dots\dots(26)$$

インフレーション成形で、成形性や物性に特に重要なのは式(26)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上で大きなポイントである。

6.2 冷却の効率化¹⁸⁾

インフレーション成形中のバブルの熱量を効果的

に奪うには、式(5)より次の方式が考えられる。

- (1) バブルの冷却面積を大きくする。
- (2) 冷却空気の温度を低くする。
- (3) 熱伝達係数を大きくする。

まず、バブルの冷却面積を大きくするには、バブルの径を大きくすることであり、またバブルの外表面だけでなく、内面からも冷却を効率良く行うことである。バブルの内冷は冷却面積を2倍に増やすことができるため、冷却が問題となる重袋用の成形に良く利用されている。HMWHDPEでは、バブル安定体同様、バブルに直接内部水冷マンドレルを接触させて内側から冷却する方式もある。ただし、急冷しすぎるとフィルムの偏肉につながる恐れがある。

冷却空気の温度を低下させることは、冷却効率を上げるのに役立つ。夏場のバブル表面付近の冷却風温は通常40℃を越えることが多く、チラーを使用すると、この温度を15℃以下に下げることができるので、ダイを出てから結晶化するまでの平均バブル温度 \bar{T} と冷却空気の温度 T_{air} 差 $\Delta T = \bar{T} - T_{air}$ は、ポリエチレンで夏場は $\Delta T = 110^\circ\text{C}$ (通常) から $\Delta T = 135^\circ\text{C}$ (チラー使用時) までになり、冷却効率は20%程度上げることが期待できる。

一方、熱伝達係数を大きくするには式(5)より、バブル表面の風速を大きくすることであり、エアリー

ングの吹き出し速度と熱伝達係数との間に式(7)のような関係式が得られており、冷却はエアリーングの吹き出し速度に大きく影響される。

$$U = C' v_0^{0.1} \quad \dots\dots\dots(7)$$

もう一つの方法は、式(5)の代表長さ L_a を小さくすることである。これは熱伝達が起こる境界層の厚みを小さくすることであり、エアリーングから吹き出されたエアがバブルに当り、そのエアがバブルに沿って長い間流れると、境界層が厚くなり冷却効果が低下することを意味している。そこで、バブルの表面積が大きくなり効果的な冷却が起こる位置付近で、境界層の厚みを薄くし冷却効果を大きくする (L_a が小さい) ことは、高生産性を得る上で重要である。さらに、ダイ出口付近でも冷却効果を高め、 L_a を小さくすることは、全体の熱伝達係数を大きくする上で重要であり、このような考えに基づいて、当所の川村ら²³⁻²⁵⁾により設計されたエアリーングの例を図43に示す。この上下吹き出しエアリーングを用いると、バブルが拡がる位置で従来のエアリーングと比較し、熱伝達係数がかなり大きくなり、またダイ近くにおいても熱伝達係数の低下はない。表7には従来のエアリーングと本エアリーングの冷却効果の差を示したが、冷却効率を約20~30%アップできることがわかる。

表7 エアリーングの性能比較

No	成形機仕様		フィルムサイズ	本エアリーング		従来エアリーング	
	押出機	ダイ径		生産性	成形安定性	生産性	成形安定性
1	HDPE用 55mmφ	80mmφ	0.025×550mm	65kg/hr	◎	45kg/hr	○
2	HDPE用 55mmφ	75mmφ	0.015×550mm	41kg/hr	◎	32kg/hr	○
3	HDPE用 60mmφ	60mmφ	0.023×450mm	35kg/hr	◎	26kg/hr	○
4	HDPE用 60mmφ	100mmφ	0.015×650mm	56kg/hr	◎	45kg/hr	○
5	多層 フィルム用	85mmφ	0.050×530mm	53kg/hr	◎	42kg/hr	△

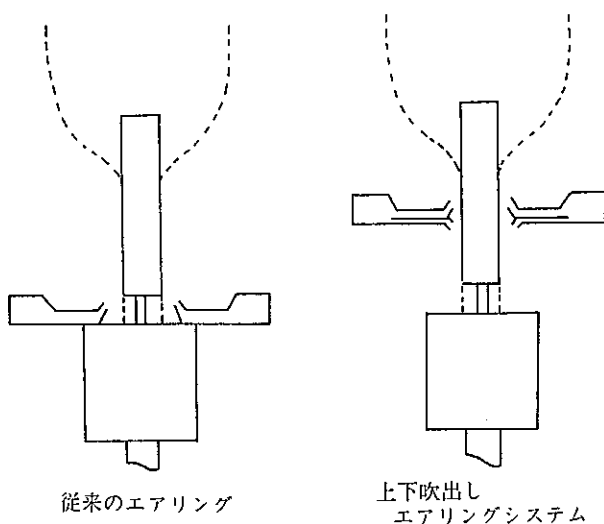


図43 エアーリングの構造比較

7 おわりに

インフレーション成形において、樹脂のレオロジー特性や成形条件と成形中の熔融挙動、得られたフィルム物性の相関性について述べ、さらにスケールアップの考え方やバブルと冷却風の熱伝達について説明を加えた。

HDPEは、変形挙動において、結晶化直前で歪み速度が大きく変化し、ある狭い領域で熔融挙動の変化が起こり、成形条件の変化を受けやすいが、LDPEは変形が徐々に起こる。また、成形条件の変化により、引張応力は大きく変化するが、HDPEで高強度フィルムを得るには、吐出量、引取速度を高めるのと同時に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。

一方、インフレーションの冷却について、効果的な熱伝達が生じるためには、冷却空気とバブルの間の境界層を薄くするような冷却方式が好ましいことを述べた。

こういったインフレーション成形技術の検討は、従来行ってきたHMWHDPEの極薄強化フィルム、強化用スーパーバックフィルムの製品開発およびこれらのフィルムの成形性、物性の改良、大型化する場合の技術に結びついており、さらにチューブラー延伸フィルムや多層化フィルムなどの高機能化製品開発のための基本技術となっている。

インフレーション成形は、今後もフィルム物性の向上や高生産性を得るため、冷却の効率化を含めた成形機の開発が活発に行われ、さらに厚み精度の良いフィルムが高速で成形できることが期待される。今後さらに各種包装材料の多様化、高付加価値化に伴い要求される特性は複雑かつ多様化し、また寸法精度、要求物性、製品外観などの品質も厳しく追求されることが予想され、成形機の高精度化、成形法の改良、さらに多層化技術の開発がより一層重要となるであろう。

なお、本内容は繊維学会誌およびプラスチックエージに投稿した内容を一部追加し、まとめ直したものである。

参考文献

- 1) T. Kanai, J. L. White, SPE ANTEC Technical Papers, 29, 155 (1983)
- 2) T. Kanai, J. L. White, Polym. Eng. Sci., 24, 1185 (1984)
- 3) 岡 叡太郎, 山形 京, ポリエチレン樹脂, 第6版 P57 (日刊工業新聞社, 1975)
- 4) 社内技術資料 L-LDPE
- 5) C. S. Speed, SPE ANTEC Technical Papers, 29, 214 (1983)
- 6) 六代 稔, 藤本省三, 安田陽一, 兼重洋右, 東洋曹達研究報告書, 28, 15 (1984)
- 7) 三石信雄, 山中彰宏共訳, “レオロジーの理論と応用” 工業調査会
- 8) J. L. White, J. Appl. Polym. Sci., 8, 2339 (1964)
- 9) J. L. White, N. Tokita, J. Appl. Polym. Sci., 11, 321 (1967)
- 10) A. B. Metzner, J. L. White, M. M. Denn, AIChE J., 12, 863 (1966)
- 11) A. B. Metzner, J. L. White, M. M. Denn, Chem. Eng. Proc, 62, 81 (1966)
- 12) H. Ashizawa, J. E. Spruiell, J. L. White, Polym. Eng. Sci., 24, 1035 (1984)
- 13) 金井俊孝, 富川昌美, J. L. White, 清水二郎, 繊維学誌., 40, T-465 (1984)

- 14) 鈴木俊一, 金井俊孝, レオロジー学会誌., 12, 207 (1984)
- 15) 金井俊孝, 岩井昭之, 高重真男, 清水二郎, 織学誌., 41, T-271 (1985)
- 16) T. Kanai, J. L. White., J. Appl. Polym. Sci., (in Press)
- 17) C. D. Han, "Rheology in Polymer Processing" (Academic Press N. Y. 1976)
- 18) 金井俊孝, プラスチックエージ., 31, 113 (1985)
- 19) 金井俊孝, 木村正克, 清水二郎, 織学誌., 41, T-139 (1985)
- 20) 金井俊孝, 清水二郎, 織学誌, 41, T-179 (1985)
- 21) 金井俊孝, 出光石油技術誌, 28, 564 (1985)
- 22) G. Menges, W. Predöhl, Plastverarbeiter, 23, 338 (1972)
- 23) 特開昭58-92528, 出光石油化学
- 24) 特開昭58-222819, 出光石油化学
- 25) 特開昭58-222820, 出光石油化学

記号表 (Notations and Units)

- A : バブル張力に依存する無次元項 (-)
- A_E : 粘度の比例定数 (dyne · sec/cm²)
- a : 熱伝達係数と冷却風速の関係式中の定数 (-)
- B : バブル内部圧力に依存する無次元項 (-)
- C : 熱伝達係数に依存する無次元項 (-)
- C_p : 比熱 (cal/g · °C)
- c_1 : 熱伝達係数と冷却風速の関係中の定数
- D : 放射に依存する無次元項 (-)
- D_L : バブル最終径 (cm)
- D_N : バブルのネック径 (cm)
- d_{11} : MDの歪み速度 (sec⁻¹)
- d_{22} : TDの歪み速度 (sec⁻¹)
- d_{33} : 厚み方向の歪み速度 (sec⁻¹)
- E : 活性化エネルギー (cal/mol)
- E_a : 活性化エネルギーの無次元項 (-)
- F_L : フロストライン付近のバブル張力 (dyne)
- G : 結晶化速度指数 (-)
- H : バブルの厚み (cm)
- H_0 : ダイリップ幅 (cm)

- H_L : 製品のフィルム厚み (cm)
- ΔH : 結晶化潜熱 (cal/g)
- K : バブル径の変曲点 (cm)
- k_{air} : 空気の熱伝導率 (cal/cm · sec · °C)
- l : ダイからの距離の無次元数 (-)
- L : 軸方向の代表長さ (cm)
- ΔP : バブル内部圧力 (dyne/cm²)
- Q : 押出量 (g/sec)
- R : バブルの半径 (cm)
- R_0 : ダイの半径 (cm)
- R_L : バブルの最終径 (cm)
- R_1, R_2 : バブルの曲率半径 (cm)
- R_g : ガス定数 (cal/mol · °C)
- r : バブルの半径の無次元数 (-)
- s : バブルの温度の無次元数 (-)
- T : バブルの温度 (°C)
- T_0 : ダイ出口の温度 (°C)
- T_{air} : 冷却風の温度 (°C)
- T_c : 結晶化温度 (°C)
- T_{room} : 室温 (°C)
- t : 時間 (sec)
- U : 熱伝達係数 (cal/cm² · sec · °C)
- V_L : 引取速度 (cm/sec)
- V_N : ネック部の速度 (cm/sec)
- v_1 : MDのバブル移動速度 (cm/sec)
- v_2 : TDのバブル移動速度 (cm/sec)
- v_3 : 厚み方向のバブル移動速度 (cm/sec)
- v_{max} : バブル表面付近の冷却風の最大値 (cm/sec)
- v_0 : エアリングから吹き出される冷却風の速度 (cm/sec)
- w : バブル厚みの無次元数 (-)
- X : 結晶化度 (-)
- X_F : フロストライン高さの無次元数 (-)
- z : 中心軸の座標
- α : 位置と熱伝達係数を関係づける項 (-)
- ϵ : 放射率 (-)
- η_0 : 樹脂のゼロ剪断粘度 (dyne · sec/cm²)
- η_{air} : 空気の粘度 (dyne · sec/cm²)
- θ : バブルと中心軸のなす角 (rad)
- λ : ステファン-ボルツマン定数 (cal/cm² · sec · °C⁴)

ξ_1, ξ_2, ξ_3 : バブル表面における局部直交座標系

ρ : 樹脂の密度 (g/cm^3)

ρ_{air} : 空気の密度 (g/cm^3)

σ_{ij} : 応力テンソル (dyne/cm^2)

$\sigma_{11\text{max}}$: フロストラインにおけるMDの引張応力
(dyne/cm^2)

$\sigma_{22\text{max}}$: フロストラインにおけるMDの引張応力
(dyne/cm^2)

σ : 表面粗さの標準偏差



金井 俊 孝

T. Kanai

昭和51年入社

商品開発研究所

第二研究室

(自己紹介)

出身地: 神奈川県

担当業務: プラスチックの成形加工

趣味: 旅行

