

# チューブラーフィルム予熱工程の理論解析

## Theoretical Analysis for Preheating Process of Double Bubble Tubular Film

(金沢大工)(正)山田敏郎\*、(出光石油化学)(正)金井俊孝、  
(金沢大工) (学)福田達夫、河野吉紀、(大倉工業)上原英幹、阪内邦夫

A theoretical model taking into account crystallization in a preheating process of double bubble tubular film was developed. In this study, linear low density polyethylene (LLDPE) / very low density polyethylene (VLDPE) blends are used. The authors predicted values of temperature and crystallinity and compared the experimental values with predicted ones. The predicted results showed the same tendency as experimental results. However, good results could not be obtained depending on conditions. It is necessary to establish a model taking into account melting of crystals.

*Key Words* : Double bubble tubular film/Crystallization/LLDPE

### 1. 緒言

チューブラーフィルムは、縦・横方向に同時に延伸されるため、機械的強度のバランスが良く、また熱収縮性に優れているため、食品・雑貨包装等、家庭に密着した場面で数多く利用されている。このような需要に伴い、品質要求は年々厳しくなり、特に生産性・偏肉精度の要求が顕著である。品質の向上を目的とする研究として、原料となるポリマーの分子設計に関する研究は盛んに行われてきた。しかしフィルムの特性を最大限に発現させ、最終的な品質を決定する製膜技術に関する研究は、ほとんど行われていない。特にチューブラー法の研究は、非常に複雑な要因のバランスが必要であるため、実際の製膜工程に適用できる研究は、ほとんど行われていないのが現状である。これらの要求に応えるためには、製膜時におけるフィルムの物性や変形挙動等を予測するための解析モデルを確立し、最適な製造条件を予測する必要がある。そこで本研究では、チューブラー法の予熱工程での結晶化を考慮した解析モデルを導出した。一例として、2種類の直鎖状低密度ポリエチレン(以下 LLDPE)と超低密度ポリエチレン(以下 VLDPE)の3元ブレンドを用いた。予熱工程でのフィルムの温度と結晶化度の変化を理論的に予測し、その結果を報告する。

Toshiro Yamada: Faculty of Engineering, Kanazawa University  
Toshitaka Kanai: Idemitsu Petrochemical Co.,Ltd  
Tatsuo Fukuda and Yoshinori Kouno: Faculty of Engineering, Kanazawa University  
Hideki Uehara and Kunio Sakauchi: Okura Industrial Co.,Ltd.  
2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa, 920-8667, Japan  
Tel. 076-234-4802, Fax. 076-234-4829,  
\*E-mail: [tyamada@t.kanazawa-u.ac.jp](mailto:tyamada@t.kanazawa-u.ac.jp)

### 2. 理論

#### 2.1 解析モデル

Fig.1 に予熱工程図を示す。円筒状のフィルムが速度  $V$  で移動し、赤外線 (IR) ヒータにより加熱され、次の延伸工程で延伸が開始される。予熱工程では、フィルムの延伸がほとんどないという実験結果から、延伸の影響はないものと仮定し、フィルム微小区間  $dz$  での熱収支式、結晶化式を導出した。

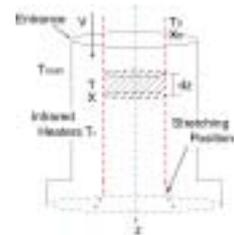


Fig.1 Schematic Diagram of Preheating Process

次に、樹脂の物性を Table.1 に示す。2種類の LLDPE と VLDPE の3元ブレンドを用いた。

Table1. Resins Data

Properties	LLDPE1	LLDPE2	VLDPE
Density $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0.920	0.935	0.902
Melting Temp. $T_m$ [K]	395	397	372
Blending Ratio [%]	70	15	15

#### 2.2 状態方程式の導出

熱収支式：

熱収支式を導出するにあたり、金井ら<sup>1)</sup>が提案したインフレーション法解析モデル、山田ら<sup>2),3)</sup>が提案し

$$\rho C_p Q dT = 2\pi R_r \sigma \varepsilon_r T_r^4 F \kappa \gamma_p \alpha_{pc} dz - 2\pi R dz \sigma \varepsilon T^4 + \rho Q \Delta H dX - 2\pi R dz h_a (T - T_{room})$$

たフラット法縦延伸解析モデルを引用した。

$\rho$  : 密度  $C_p$  : 比熱  $Q$  : 吐出量  $R_r$  : IRヒータ半径  
 $\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数  $\varepsilon_r$  : IRヒータ放射率  
 $T_r$  : IR温度  $F$  : 形態係数  $\kappa$  : 補正係数  $\gamma_p$  : 熱到達率  
 $\alpha_{pc}$  : 熱吸収率  $R$  : フィルム半径  $\varepsilon$  : フィルム放射率  
 $\Delta H$  : 結晶化潜熱  $h_a$  : 熱伝達率  $T_{room}$  : 雰囲気温度

結晶化式：

結晶化度の表現法は中村の式<sup>4)</sup>を用いた。ここで、LLDPEとVLDPEは同じ結晶化挙動を示すものとした。

$$X = 1 - \exp\left[-\int_0^t k(T)^{1/n} dt\right]^n$$

$$k(T) = \exp\left[A - \frac{BT}{(T - T_g + 51.6)^2} - \frac{CT_m}{T(T_m - T)}\right]$$

ここでXは結晶化度、kは結晶化速度、nはアブラミ指数、 $T_g$ はガラス転移温度、 $T_m$ は融点、A,B,Cはポリマーによって決まる定数である。また添字は、1はLLDPE、2はVLDPEを示す。

## 2. 3 解析方法

熱収支式・結晶化式を、ルンゲクッタ法を用いて解き、予熱工程入口から延伸開始点間のフィルム温度と結晶化の挙動を予測した。その際、予熱工程に進入するフィルム速度を、4.8,7.1,9.5[m/min]と変化させ解析を行った。初期温度、初期結晶化度の値はそれぞれ318[K],0.435[-]を用いた。

## 2. 4 解析結果

フィルム温度・結晶化度の解析結果をFig.2,3に示す。フィルムの速度が速くなるにつれ、温度と結晶化度の変化が小さくなるという実際の挙動を示すことができた。しかし速度が $v=4.8$ [m/min]の時、フィルム温度が平衡融点(408K)を超えてしまい、結果を得ることができなかった。次に延伸開始点での各値をTable2.に示す。

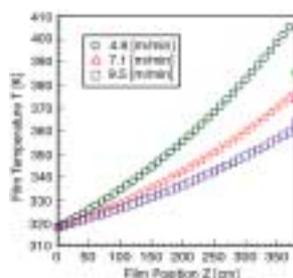


Fig.2 Predicted Film Temperature vs Film Position.

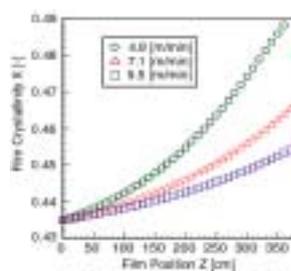


Fig.3 Predicted Film Crystallinity vs Film Position

Table2. Predicted Results at Stretching Position

Predicted Results	Run1	Run2	Run3
Velocity v [m/min]	4.8	7.1	9.5
Temperature T [K]	(408)	377	361
Crystallinity X [-]	(0.491)	0.457	0.455

( )は最終値を示す。

## 3. 実験結果

解析との比較のために、予熱工程に進入する際のフィルム速度を4.8,7.1,9.5[m/min]と変化させ、延伸開始点でのフィルムの温度、結晶化度の値を測定した。結果をFig.2,3に、またTable3.に示す。

Table3. Experimental Results at Stretching Position

Velocity v [m/min]	4.8	7.1	9.5
Temperature T [K]	385	374	364
Crystallinity X [-]	0.480	0.458	0.452

## 4. 考察

予熱工程内のフィルム速度を変化させて解析を行ったところ、速度が速くなるにつれ、温度と結晶化度の変化が小さくなり、実験結果と同じ挙動を示すことが確認できた。しかし結晶化度の値は、解析結果が実験結果より大きな値となった。また、速度が4.8[m/min]の時、フィルムの温度が平衡融点(408K)を超え、解析結果を得ることができなかった。

これらの原因として、フィルム昇温中の結晶の融解が考えられる。つまり、予熱工程に進入する際のフィルム速度、または条件によっては、フィルムの温度がVLDPEの融点(372K)を超え、VLDPEの結晶の融解が発生し、温度や結晶化挙動に影響していると予測される。結晶の融解を考慮することにより、融解の吸熱によりフィルム温度の上昇を抑え、結晶化度の値も現在の解析結果より、実験結果に近づくことが期待できる。

## 5. 結言

チューブラー法予熱工程内の解析モデルを導出し、モデルの妥当性を比較検討した。解析結果は実験結果と同じ傾向を示すが、温度・結晶化度ともに実験結果と差があり、また条件によってはフィルムの温度が融点を超え、解析結果を得ることができなかった。今後、結晶の融解を考慮した解析モデルを確立する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 金井ら：“インフレーション成形における動力学的研究 [I] 結晶性ポリマーの解析”，SEN-I GAKKAISHI Vol.40, No12, P27-41 (1984)
- 2) T.Yamada and T.Matsuo：“Simulation model for roll drawing of film with infrared heaters”，Proceedings of ‘CHISA’98, E.6.5, Praha (1998.8)
- 3) T.Yamada, T.Yoshida, M.Fujii and T.Yoshii：“Simulation of Film Elongation in the Machine Direction”，PPS-16, P203-204, P651-652 (2000.6)
- 4) K.Nakamura, T.Watanabe, K.Katayama, T.Amano：

