

「技術は人が育てる—高分子フィルム開発を通じた技術者の軌跡」(全4回)

第1回 HDPE フィルム成形の技術開発と挑戦

金 井 俊 孝*

著者略歴

1974年東京工業大学高分子工学科卒業、1976年修士課程修了、1976年出光興産(株)入社、1981~1983年テネシー大学留学、1986年主任研究員、1990年構造物性研究室長、2000年主幹研究員、2003年~2013年金沢大学大学院客員教授兼任、2013年出光興産退社、2013年京都工芸繊維大学特任教授、工学博士(1986年:東京工業大学)、2010~2012年プラスチック成形加工学会会長、2002年~2015年高分子学会フィルム研究会運営委員、2008年~2015年Polymer Processing Society理事、Asian Workshop on Polymer Processing理事、Journal of Polymer Engineering Editor、プラスチック成形加工学会名誉会員、高分子学会フェロー、受賞歴は、1986年繊維学会論文賞、2004年・2009年・2012年プラスチック成形加工学会論文賞、2006年Society of Plastics Engineers Japan Section 優秀貢献賞、2009年金沢大学優秀貢献賞、2011年Polymer Processing Society初代James L. White Innovation Awardなど。

は じ め に

私は、1970年に東京工業大学(現東京科学大学)に入学し高分子工学科に所属して以来、高分子分野の研究・開発に従事しており、約半世紀以上この分野に携わっていることになる。この間、高分子の研究を開始した時には考えられないほど広範囲な用途にプラスチックが応用され、自動車、家電、食品や医薬品などの包装材料、液晶や有機ELディスプレイ、電池、スマホ、農業・建築資材、家具など、プラスチックは日常生活を便利にし、現在では必要不可欠なものになっている。この分野に、多くの方々が研究開発に取り組んだ賜物である。一方で、プラスチックの利用が大量かつ広範囲になるに従い、プラスチックが世の中に溢れ、そのごみ問題が環境問題や海洋汚染にもなりつつあり、これらの対応が重要な課題にもなってきてている。

私の関係する研究・開発テーマとして、プラスチックは

Technology is Developed by People—The Trajectory of an Engineer through the Development of Polymer Films
1. Technological Developments and Challenges in HDPE Blown Film

* Kanai, Toshitaka
KT POLYMER 代表
toshitaka.kanai@ktpolymer.com
2025.7.31受理
<https://doi.org/10.4325/seikeikakou.37.498>

ディスプレイ、5Gなどの通信機材、Li電池用フィルム、自動車の軽量化材料、長期保存できる食品・医薬品包装、加飾フィルムなどに応用され、今後の高速通信やIT技術、長期保存食品、環境対応にも大きな貢献ができる分野もある。私が高分子材料の開発やプラスチック製品を扱い始めた50年以前にはとても想像がつかない分野にまで、応用分野が進んでいる。

今回の与えられたテーマである未来につなぐ成形加工として、主に企業の研究員として過ごしてきたため、個人的に関連した内容が主体になるが、私の経験を通じて、歩んできた主に成形加工関係の開発技術を次の4つのパートに分けて、執筆してみたい。

1.高密度ポリエチレン(HDPE)インフレーションフィルム開発、2.米国留学と成形加工の理論解析、3.解析技術を活用した材料設計と成形加工製品開発、4.大学での共同研究を通じて未解明現象の解析、学会・コンサルタント活動、

1. HDPE インフレーションフィルム開発

1.1 新入社員時代

大学時代は耐熱性高分子合成とその性質について研究していた。大学院を修了する頃はオイルショックの影響を受け、大幅に採用を控える日本企業が多く、また採用が決まっていても取り消されるケースがあったが、幸いにも当初の予定通り出光興産(株)に入社した。会社に入社すると当初考えていた中央研究所での高分子合成とは大きく異なる商品開発研究所で、フィルム成形用材料とフィルム加工開発研究を担当するグループに配属された。

樹脂メーカーとしてその材料を製品化するため、多くの成形機が並んだ商品開発研究所で、最初に成形機の運転の仕方を教えてもらったが、それ以降は新入社員としての専門的な教育はほとんどなかった。

最初に与えられた開発テーマはインフレーション成形(図1)によるHDPE極薄フィルム(現在ではスーパーマーケットのレジの後ろにあるミシン目が入っているロール巻きした約8μmの薄いフィルム)とレジ袋(現在、世界で広く出回っている厚さ15μm~20μmの高強度HDPEフィルム)の研究開発であった。

当時、高強度なHDPEのレジ袋を見かけることはなく、茶色の厚い紙袋が使われていた。入社した昭和51年頃はまだオイルショックの影響を受けており、省資源・省エネルギー化の気運が高まっていた。当時は低密度ポリエチ

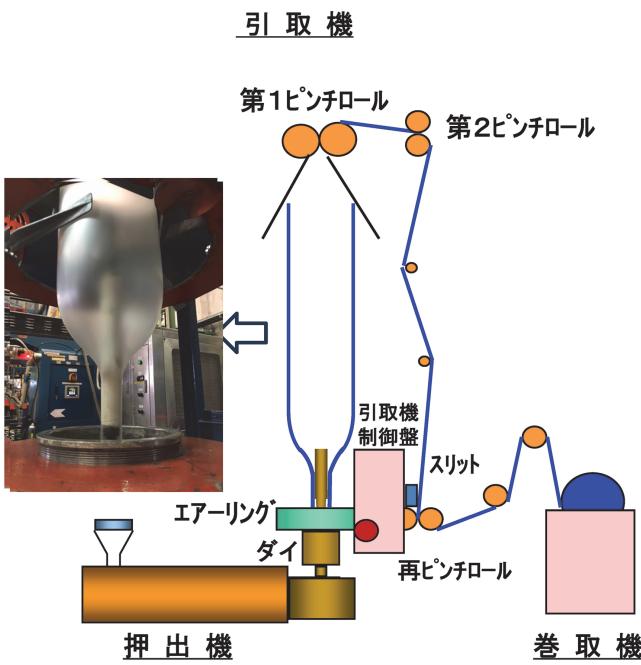


図1 HDPE インフレーション成形機

ン (LDPE) のフィルムがごみ袋や包装用の袋として使用されていたが、伸びやすく、引張破断強度が不足しているため、多くの食品を入れて持ち歩くと、フィルムが伸び、フィルムが破断し、また透明であるためスーパーで買い物したものの中身が見えやすい等の問題があった。

そのため、省資源化のため薄くても十分な強度が得られ、伸びを抑制するための高弾性化、半透明化が要望されていた頃であった。そこで、密度が高く、高分子量の HDPE が注目され始めた時期でもあった。当時用いられていた LDPE の MFR は 1~2 だったが、当時、最も分子量が大きく、MFR 0.05 の HDPE の樹脂を用いてインフレーション成形を行うというものであった。

1.2 HDPE のレジ袋の開発

高分子量の HDPE を LDPE 用のフィルム成形機で成形した結果、LDPE の押出機は L/D が 24 であったため、十分な溶融可塑化ができない問題点が発生し、さらに分子量が大きいことから剪断発熱が異常に大きくなり、樹脂温度が設定温度よりも 30 ℃ 以上も上がってしまい温度が制御できない状態になる問題点が発生した。LDPE と比較すると融点が 30 ℃ ほど高く、結晶化度が大きく結晶化潜熱が大きい HDPE を十分に溶融するために、供給部や圧縮部を長くし、L/D を 28 にし、メタリング部の溝深さを深くして剪断速度を抑えることで剪断発熱を抑え、圧縮比は LDPE では 3.0~3.5 のところ高分子量 HDPE 用には 1.5~2.0 に大幅に下げたスクリューにした。それに伴い、顔料分散性が悪化する傾向にあったため、メタリング部にミキシングゾーンを設けることにより、分散性を向上させた。

しかし、スクリュー形状の改良だけでは、アダプターヘッドの樹脂圧力が 50 MPa を大きく超える結果となり、樹脂圧力が高過ぎて、アダプターヘッドが押出機から飛び出す問題が発生した。そのため、樹脂面では樹脂圧力に大きく影響する高剪断領域での剪断粘度を大幅に下げるために、

多段重合（3段重合）により分子量分布を広げることにより、樹脂圧力損失の大きなリップ部の圧力を低下させることができたが、中剪断領域のスパイラル部の圧力損失が依然として下がらなかった。そのため、スパイラルダイのスパイラル部の圧力損失を低下させるために、スパイラル部のマンドレル径をダイス先端の径よりも大きくするコンバージングタイプのダイ形状にして剪断速度を下げ、かつスパイラルの溝深さを深くし、またスパイラルから漏れ流れ出る領域のクリアランスを広げて圧力を下げることで、樹脂圧力を 40 MPa 以下にすることが可能になった。

この頃はプラコー、モダンマシナリー、トミー機械工業の3社がこの分野の成形機開発を手掛けており、この機械メーカー3社の工場があるそれぞれ埼玉の岩槻と横浜の綱島に訪問して成形試作を行うことが多かったが、どちらかと言えば、当時はプラコーとの結びつきが強かった。プラコーの社長、会長を務めた秦氏とは、当時押出機やダイス設計で技術的な討論をする機会が多く、インフレーション成形機に関して、いろいろ学ぶことも多かった。50年近い前のことになる。

しかし、薄物フィルム成形では、9 μm, 3000 m巻きの極薄フィルム成形ではグレード内のロットばらつきより成形破断の問題が、またレジ袋では縦裂け問題が依然として発生していた。ロットを調べて整理した結果、①低剪断側での剪断応力の値と、②リップ部の高剪断速度での剪断応力と低剪断側の剪断応力の各剪断速度での傾き、つまり剪断応力／剪断速度の傾きの2因子をプロットすると綺麗にバブルの破断発生の有無を選別できることがわかった。そのため、分子量と分子量分布を厳密に制御して、ロット毎の樹脂性状とインフレーション成形性を確認して出荷した。

1.3 バブル安定体の開発

レジ袋に関してはフィルム成形中のバブルを安定化させてシワのないフィルムを安定して成形を行うために、バブル安定体をいろいろ考案した。バブルとバブル安定体の密着性や摩擦力がバブル安定性とバブル張力に大きな影響を与えていているのではないかと考え、成形中のバブル張力を測定できる装置（図2）を特注して測定した。また、成形中のバブルの移動速度、歪み速度、表面温度、長手方向（MD）

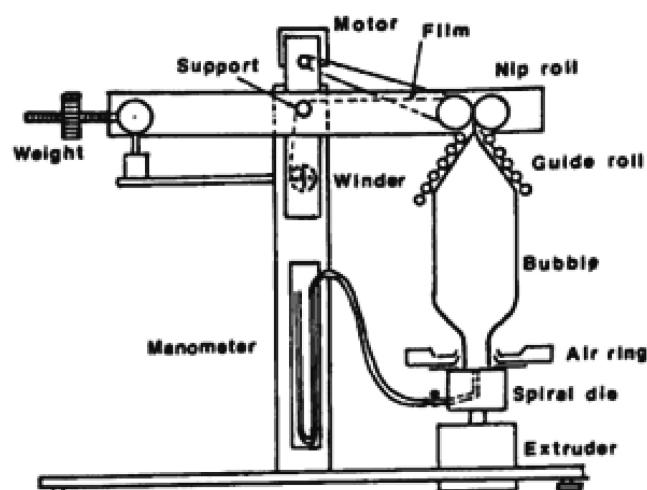


図2 張力と内圧が測定できるインフレーション成形機

および幅方向 (TD) の引張応力を高速 8 mm カメラ、赤外温度計、バブル張力やバブル内圧を用いて計測した。

その結果、バブル張力や最大歪み速度が成形中の破断に関係することが判明し、アルミの鋳物でバブル安定体を作り、かつバブルとバブル安定体の摩擦抵抗を小さくするために、バブル形状に合ったバブル安定体の形状にした。さらに、バブル安定体の表面の粗さを粗くして、空気の流れをスムーズにすることや表面粗さを小さなスパイラル溝をつけるだけでなく、さらにもうひとつ深いスパイラル溝も彫ってダブルスパイラルにして空気の流れを向上することで、9 μm、100 m/min の薄物高速成形でもバブル破断頻度は激減した。

1.4 縦裂け問題の解決への挑戦

一方で、レジ袋での縦裂け問題が発生し、この問題はバブル張力とバブル内圧から算出される成形中の MD と TD にかかる応力が関係していることが判明した。特に、各フィルムメーカーでの成形方法とフィルム物性の関係を確認し、研究所で多くの成形条件を変化させて物性を測定した結果、同じ成形条件でブロー比とドローダウン比が同じでも、使用しているバブル安定体の形状が異なることで、大きく物性が変化することが判明した。それはバブルがバブル安定体から離れる位置から結晶化が終了する位置の間で、配向結晶化が進行し、物性を決定していることが原因とわかつてきた。つまり、バブルがバブル安定体を離れる位置からバブルが一定形状になる位置（フロストライン上部）までの間で物性が決定していることが判明し、ダイス出口ではなく、この地点を開始点とした実ブロー比（横延伸倍率）と実ドローダウン比（縦延伸倍率）として定義を変えて（図 3），物性を評価する（図 4）ことに変更した^{1), 2)}。

この頃からバブル安定体形状の重要性を認識するようになり、昭和 51 年から 53 年にかけて、いろいろな特許を出願することになる。高速薄膜成形用、厚物成形用やブロック式のバブル安定体にして多くの成形条件に対応できるタイプなどを考案した（図 5）。樹脂設計に加え、バブル安定体の特許をこの頃、多く出願した。特許出願は、権利確保のためには非常に重要であり、今までの大学の研究とは大きく異なることを実感した。

極薄フィルムは成形中の成形不安定性と破断トラブルがあり、HDPE の樹脂デザインの変更、バブルとバブル安定体間の抵抗を減らすため、バブル安定体の形状変更や表

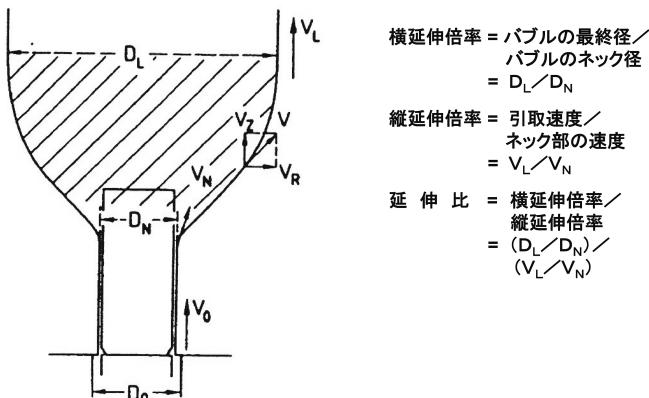


図 3 HDPE バブル概略図と実ブロー比、実ドローダウン比

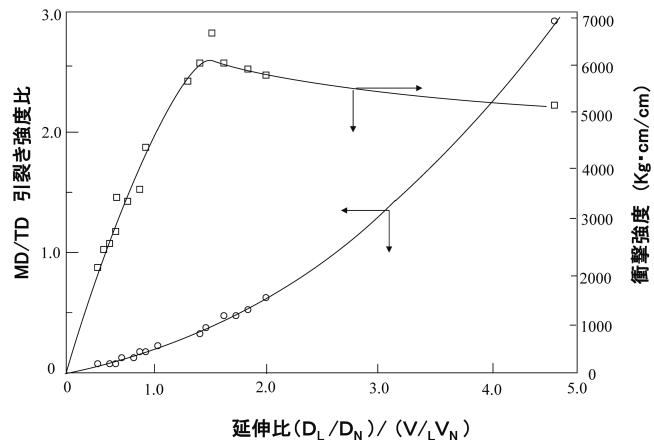


図 4 溶融延伸比とフィルム物性の関係

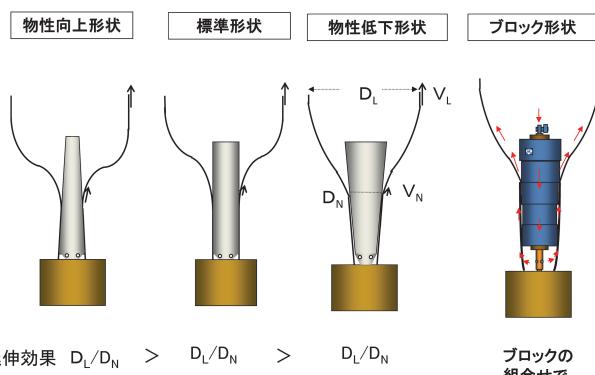


図 5 HDPE インフレーション成形のバブル形状とバブル安定体

面粗さの変更を行った。また、レジ袋の成形はバブルを安定させてシワがなく、厚み精度を向上させて、かつ縦と横の配向バランスをさせて縦裂けしないフィルム開発に注力した。

その後、高生産性が要求されるようになり、樹脂圧力低減のための樹脂設計と品質管理、押出機の改良開発とバブル安定体の表面加工と形状による衝撃強度や引裂強度などの物性改良を行った。

1.5 開発技術の教育指導と問題解決

さらに、本業は樹脂メーカーであるため、高強度 HDPE フィルム用樹脂を大量に販売するには、多くのフィルム加工メーカーにフィルムを大量に生産してもらう必要があった。本社の営業マンが活発に営業活動をし、開発した HDPE フィルムを宣伝したこともあり、研究所で開発した技術を使って、新規に成形機を設置したばかりの加工メーカーの成形技術者に、教育指導も行っていた。今まで、成形経験がまったくない新しいタイプの成形方法のため、多くの問題点を抱えての船出だった。中には刑務所から 1 週間前に出所してきたばかりの成形担当者に成形技術だけでなく、電卓の使い方まで指導する必要があり、成形条件からフィルム厚さの計算をする方法まで教えることになり、当時 24 歳～26 歳の年齢だったが日本全国飛び回った。

HDPE の需要は急速に増えてきたことに伴い、クレーム案件も多くなり、当時の最大手のスーパーから HDPE

フィルムの縦裂けにより、入れていた一升瓶が袋から落ちて、中身まで弁償する話に広がったこともあった。さらに、ある加工メーカーでは極薄フィルムが成形中に破断トラブルを起こし、3000 m巻の製品が取れないクレームが発生した。これは、結局夏場に高押出量条件でフロストライン高さを低く抑えるために、指導した方法とは異なるバブル安定体の形状を使ってことによるバブル安定体とバブルの摩擦抵抗が大き過ぎた条件で運転していて、引張応力が大き過ぎたことが問題であることがわかった。

出張は朝早く出かけて、帰りは出張先での成形指導が遅くまでかかったため、夜行列車になることが多く、その場でトラブルが解決できなかったケースも多くあった。寝台列車の中でなぜうまくいかなかったのか、悶々と考えて眠れない日々を送っていた。

これらのトラブルだけに限らず、シワの発生や樹脂ロットによる成形中の破断、厚み精度の問題などを抱えながら一つ一つ問題を解決していく毎日だった。樹脂のロットによっても薄膜フィルムの破断頻度が異なり、バブル安定体の形状や表面粗さの加工でも薄膜フィルムの成形中の破断頻度が変わり、レジ袋ではフィルム物性が大きく変化することがわかつてきた。また、ダイス形状や押出機のスクリュー形状により、樹脂圧力が変わり、押出量や樹脂発熱量が大きく変わることがわかつてきた。この頃は、樹脂とレオロジーの関係の把握、ダイス形状とレオロジーデータによる樹脂圧力計算、また押出機のスクリュー設計ではTadmer理論³⁾の重要性を感じた時期でもあった。

問題解決の努力や営業サイドのマーケティングの努力もあり、HDPEの製造プラントでは、30グレードくらい製造している中で、この1つの高分子量HDPEインフレーショングレードが占める製造比率が57%まで達した。

1.6 レジ袋開発技術の横展開

レジ袋や極薄フィルム開発から始まって、さらにコスト削減を目的としたレジ袋3枚取りが可能な大型機の開発、1.5 m幅の広い農業用マルチフィルム開発も行った。大形化するとフィルムインパクトが大幅に低下する問題も発生したが、理論計算によりその原因が理論的に予測されるMDとTDの成形中の延伸応力で整理できることが後

に分かり、スケールアップ理論も確立できることになった。

HDPEでんぶんを50%以上ブレンドした自然崩壊マルチフィルムの開発、LDPE/HDPEの多層インフレーション成形によりフィルム表面の滑りを抑え、かつ高強度な重袋の開発など、昭和51年から55年までの5年間を行っていたテーマである。研究所での連続成形性能を評価するために、大型機での直運転可能かを判断するため、実機を想定した数日間に渡る直運転の試作を調整し、運転した。今思うと、非常に大変な日々ではあったが、一つ一つが少しづつクリアされながら、市場での販売拡大に繋がっていったため、大変だったが遣り甲斐はあった。

ただし、研究開発を通じて、いろいろな課題、例えば、ロットが変わると成形安定性や成形破断がなぜ起こるのか、バブル安定体の形状を変えただけでなぜフィルムの縦裂け問題が発生するのか、同じ成形条件で、同じPEでも、HDPEとLDPEではバブルの形状がなぜ異なるのか、縦裂け発生の原因、つまりなぜMDやTDの強度がどのようなメカニズムで決定されるのか、夏場や冬場では冷却の違いで発生するクレームが異なるのか、同じ成形機でダイス径やフィルムの幅が変わるとブロー比やドローダウン比が同じでも物性が大きく変わることなど、現象的にわかつていても⁴⁾、その根本的な原因を理論的に説明することができないまままで、実験やユーザーの現場で積み上げた経験に頼って、現場対応をしていた。いろいろな問題解決の検討を進めて行くにしたがって、益々疑問が深くなっていくばかりだった。

そんな折、開発がほぼ1段落した段階で、昭和55年に研究所長から海外留学の話しがあり、1981年(昭和56年)3月からアメリカのテネシー州立大学高分子工学科のJames. L. White教授の研究室で研究することになった。

参考文献

- 1) 金井俊孝: プラスチックエージ, 31(8), 113(1985)
- 2) 金井俊孝: プラスチックス, 37(2), 48(1986)
- 3) Tadmer, Z.: *Polym. Eng. Sci.*, 6, 185(1966)
- 4) 金井俊孝, 木村正克, 清水二郎: 繊維学会誌, 41(4), T-139(1985)