ブロー成形

山 田 俊 樹*・菊 池 淳*

1. はじめに

近年、ブロー成形に関する報告は少なく、そのほとんどは、SPE ANTEC (Society of Plastics Engineers, Annual Technical Conference) に集中している。そこで、本稿では、2004年にSPE ANTECに報告された文献を主に紹介し、その動向をレビューする。大別すると、主にオレフィン系樹脂を対象とする押出ブロー成形（ダイレクトブロー成形）と、ポリエステル系樹脂を対象とする延伸ブロー成形の2分野に分けて報告する。

2. 押出ブロー成形

Oliveira ら¹⁾は、多層ダイレクトブローボトルの品質向上に関し、4種6層の多層ポリプロピレン (PP) ボトルの成形を例にとった実験的研究を行っている。材料のレオロジー特性と押出温度、スクリュースピード、型締速度などの成形条件を変え、ボトルの層間界面特性、肉厚、ピンチオフ部の力学的特性、バリアー性といった、容器として重要となる特性との相関を明らかにしている。特に、ピンチオフ部の特性は、型温、型保持時間への依存性は弱く、型締速度が最も影響力を持つファクターであることを見いだしている。すなわち、型締速度が遅い場合、バリソンでの層順列がピンチオフ部に保持され、バリアー層が外面に露出する (図1左)。バリアー層に用いているエチレンビニルアルコールは、吸湿によるバリアー性の低下が顕著であり、このような外面への露出はバリアー性の低下の大きな要因となる。これに対し、型締速度が速い場合、バリアー層および接着層がボトル内面に近い領域で接合保持され、ピンチオフ部の大部分が溶着したPPによって占められている (図1右)。このような断面構造を有していれば、機械的な強度低下とバリアー性の低下を抑制できると説明している。

Pressly ら²⁾は、新規押出ブロー成形用PPの系統的かつ基礎的研究の一環として、ダイレクトブロー成形した直後にボトルに局所応力が負荷した場合に生じる白化現象の解明と対策について報告している。ここで用いている材料は耐衝撃性グレードのPPであり、PPがマトリックス、エチレンプロピレンラバー (EPR) がドメインである相構造

図1 異なる型締速度設定によるピンチオフ部断面の変化¹⁾ (左 6 m/s 右 10 m/s)

を有する。衝撃が加わるときの製品温度を決定する因子 (成形温度、金型温度、冷却時間) を変化させたときの、白化部の大きさの変化を射出成形品とブロー成形品について示している。白化部のモルフォロジーの観察により、衝撃が低温領域で加わる場合には、結晶化度の高いPPマトリックスにクレーズが発生し、高温領域で衝撃が加わる場合には、EPRの弾性率の低下に起因してドメイン内に空隙が発生するとしている。これらの2現象は不可逆的な構造変化であり、特に後者が白化に大きく寄与し、成形後に生じる白化を抑制するためには、製品の取り出し温度を低くすることが有効としている。ただし、ブロー成形品では、肉厚が厚くなる部分の内面側において、取り出し温度が高温となる傾向があるため、肉厚を薄く設定することも重要と述べている。

Huang ら³⁾は、プラスチックの成形において生産性に最も影響を与える冷却固化過程に着目した研究を行っている。有限要素法を用いて、ブロー金型による製品冷却時の厚み方向の温度分布の推移をシミュレートし、得られた温度分布の推移とDSCで測定されたPPの結晶化速度の温度依存性の値をもとに、厚み方向の相対的な結晶化度の上昇の推移をシミュレートしている。また、押出温度や樹脂—金型間の熱伝導係数を変化させたときの冷却挙動の変化についても示している。計算結果から、全層厚みが3 mmの製品を冷却すると、内面から1 mm程度の部分に冷却速度が最も遅い部分が現れるとしている。また、結晶化度の分布について、金型に接する外面側は条件によらず急冷されるため結晶化度の低い領域が形成され、ブローエアーに接する内面側近傍の結晶化度は、押出温度の影響を受けるとしている (図2)。

Grald ら⁴⁾は、自動車用ガソリントankを対象として多

* Yamada, Toshiki/Kikuchi, Atsushi
東洋製罐グループ総合研究所
横浜市保土ヶ谷区岡沢町 22-4 (〒240-0062)
2005.5.30 受理

図2 結晶化度分布の冷却工程中の推移 (シミュレーション結果)³⁾

図3 3次元有限要素法によるブロー成形物の肉厚分布シミュレーション結果⁴⁾

層ダイレクトブロー成形のシミュレーションを行っている。3次元および2次元の有限要素モデルを用い、各部のバリアー層の厚みを求めている。ガソリタンクからの燃料の揮散を防ぐためには、成形品全体にバリアー層が十分な厚みで分布する必要がある。そこで始めに3次元計算により、多層パリソンのブロー変形に伴う成形品全体のバリアー層の厚み分布をシミュレートし、これによりブロー変形後にバリアー層が薄肉化する部分を把握できるとしている(図3)。さらに、燃料揮散の大きな原因となるウェルド部に対しては、樹脂の粘性流動を考慮した2次元計算により、バリアー層の厚み減少をシミュレートしている。これらの計算結果をもとに、パリソンコントロールを行うことにより、製品の全領域において十分な厚みのバリアー層を確保できると述べている。

Huang ら⁵⁾は押出ブロー成形時のパリソン形状をニューラルネットワークモデルによりシミュレートする方法を提案している。高密度ポリエチレンの押出試験において、パリソン長、ダイ温度、吐出量を変え、それに伴うスウェル径、厚みの経時変化を画像解析によって実測し、これらの実験データをもとに、ニューラルネットワークモデルの構築を行っている。得られた計算結果(図4)は重力の影響や空冷に伴う粘度上昇を反映し、実測値と良好な一致を示

(a)

(b)

Predicted parison Diameter swell(a) and thickness swell(b) from network model at four different die temperatures (°C): (1) 230; (2) 210; (3) 190; (4) 170. $Q = 13 \text{ kg/h}$.

図4 ニューラルネットワークモデルを用いたパリソンのスウェル径・厚みのシミュレーション結果⁵⁾

している。このモデルを用いることの利点として、構成方程式や単純化した仮定を用いないことを挙げている。

3. 延伸ブロー成形

Maja ら⁶⁾はポリエチレンテレフタレート (PET) からなる延伸ブローボトルについて、延伸後の収縮挙動に対する各成形条件の影響を報告している。成形条件と成形容器の変形との関係には、分子鎖の歪みの生成が密接に関わっており、ここで取り上げられている保管時の収縮挙動に限らず、内容品の高温充填時の耐熱性にも通じるものである。充填量の検出手段として、入れ目線高さをを用いている場合、容器内容積の経時変化は、表示内容量との差異を生み出すため問題となる。ここでは、延伸温度、ブロー圧力、金型温度といった延伸ブロー条件を変化させたボトルを成形し、所定の環境下に保管した後の容器内容積を評価している。その結果、延伸温度および成形後の保管温度が大きく影響を与えるとしている(図5)。保管時の収縮挙動を抑制するためには、100℃以上の高温延伸成形を行うことと、なるべく低温環境下で保管することが重要であると述べている。

プリフォーム加熱工程における温度分布は、成形安定性の確保、およびボトル強度やバリアー性といった製品品質にまで影響を与える重要な因子の一つである。Walter ら⁷⁾は、PET 延伸ブロー成形のプリフォーム加熱工程において、その表面だけではなく厚み方向をも含めた3次元の温

図5 延伸ブローボトルの内容積量のブロー温度，保管温度依存性⁶⁾

図6 延伸ブローボトルの肉厚分布（実測値とシミュレーション結果の比較）⁷⁾

度分布を有限要素法により求め，さらに継続して行われる延伸ブロー成形のシミュレーションへ反映させている．このようにプリフォーム加熱からボトル成形までの一貫した解析を通して，現象の理解を試みている．延伸ブローボトルの肉厚分布の実測値とシミュレーション結果の比較を図6に示す．この手法は，赤外線オープンデザインの決定の一助や，ブロー成形過程およびボトル品質と各成形条件の関係を理解する上で有効であると述べている．また，コスト削減および環境負荷低減のため，容器の重量削減が求められている中で，これまで主に経験則をもとに行われてきた成形条件の最適化において，有力な手段となると述べている．

PETボトルにおいて，十分な強度，あるいは耐熱性を得るためには，使用する樹脂の選択，延伸倍率，プリフォーム加熱温度やストレッチロッドとブロータイミングなどの成形条件が重要であり，これらは材料の歪み硬化現象を通して密接に関連している．Phamら⁸⁾は，PETの二軸延伸挙動について，Mooney-RivlinモデルやOgdenモデルでは表せなかった，歪み硬化と歪み速度依存性を考慮したChristensen-Yangモデルを用いてシミュレーションを行っている．PETシートによる二軸延伸の基礎実験データをもとに，非線形カーブフィッティングにより得られた

図7 延伸ブロー工程における肉厚変化のシミュレーション結果⁸⁾

図8 延伸ブローボトルにおける肉厚分布の実測値とシミュレーション結果の比較⁸⁾

二次の多項式による近似式は，応力－変形曲線の温度，歪み速度依存性において，実験値と良好な一致を示している．さらに，このモデルをプリフォームの二軸延伸ブロー工程に適用したシミュレーションを行っている（図7，図8）．その結果，他のモデルと比較して，計算値と実験値は良好に一致しており，将来的には，さらに正確な一致を求めるために，プリフォームの厚み方向の温度分布や結晶化挙動についての因子を考慮していくと述べている．

4. おわりに

ブロー成形は実測データの収集が難しく，さらには関連因子が多数あり，かつこれらが複雑に影響し合っていることから，それぞれの現象を体系的に捉えるのは難しい．したがって，こと技術の発展に関しては技術者の経験や勘に頼ってきた部分が多い．また，ブロー製品の汎用化が進み，競争の激化とともに，各現象の追求より生産性の向上に重点が置かれる傾向が強くなり，企業ノウハウとして開示されない傾向もある．これらの理由から，他の分野と比較して発表される文献数が少ないのが現状であろう．しかし，本稿で紹介したように計測，計算技術の進展は確実に進行しており，シミュレーション結果をもとにした製品設計，成形条件の選定が行われ，生産技術の有力な補助手段となっていくことが予想される．また，ブロー製品の機能化および差別化の必要性が増していく中で，より詳細に現象を理解することの重要性が再認識されている．このような状況変化に伴い，今後ブロー成形に関する報告が増加して

いくことを期待したい。

参 考 文 献

- 1) Oliveira, M. J., Carneiro, O. S. and Martins, R. L. : *SPE ANTEC 2004*, 17 (2004)
- 2) Pressly, T., Jivraj, N., Bosnyak, C., Young, G. and Tharp, V. : *SPE ANTEC 2004*, 20 (2004)
- 3) Huang, H.-X., Li, Y.-Z. and Huang, Y.-F. : *SPE ANTEC 2004*, 27 (2004)
- 4) Grald, E., Gomez, C. and Marchal, T. : *SPE ANTEC 2004*, 31 (2004)
- 5) Huang, H.-X., Lu, S. and Huang, Y.-F. : *SPE ANTEC 2004*, 22 (2004)
- 6) Rujnia-Sokele, M., Šercer, M. and Catia, I. : *SPE ANTEC 2004*, 12 (2004)
- 7) Michaeli, E.h. W.. and Papst, W. : *SPE ANTEC 2004*, 7 (2004)
- 8) Pham, X.-T., Thibault, F. and Lim, L.-T. : *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 1460 (2004)

スラグウェル ー不要の小物ー

ファウンテン・フローという言葉どおり、ランナを流れる樹脂は泉のようにわき出しながら流れる。これは、金型内を可視化したことで見えた現実である。

流動先端部における非定常熱流動などの詳細な挙動は徐々に明らかになっているが、昔、金型現場で教えられた、「先端部は冷え固まって流れる」とは異なる真実である。その考えから、多数個取の金型ランナレイアウトにおいて、その先端部にコールドスラグウェル（冷えた樹脂を製品部に入れないために、製品外部に設けた樹脂溜りのこと）を設けることを教わった。

ファウンテン・フローを見て、昔、金型現場で教えられたことが神話であったと悟った。長年の設計の中では、

ランナのレイアウトいかんによって先端にコールドスラグウェルが付けられない金型を幾度も経験する。しかし、ランナ先端の冷え固まったスラグが因子となる不良現象で成形工場からお呼びが掛かったことがない。そこで、数年前からランナ先端のコールドスラグウェルを設けないこととした。その結果、未だクレームの声を聞かない。ただし、スプルー下の樹脂溜りはノズルをバックする際、冷えた樹脂を受け止めるためにあるので、そこは今までどおりである。

ほんの微々たる樹脂の節約ではあるが、参考になれば幸いである。

トーヤ