ブロー成形

山 田 俊 樹*・菊 地 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、2005 年に SPE ANTEC に報告された文献を主に紹介する。大別して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

押出ブロー成形において、所望の肉厚分布を有する最終成形物を得るために、パリソンコントロールが用いられている。工業的には、技術者のノウハウと試行錯誤の中で、ダイギャップ変動プログラムが作成され、パリソンの最適な肉厚分布が決定されているケースが多い。この作業にシミュレーションが適用できれば、多くの時間とコストを削減することができる。

Hossam ら¹⁾は、ダイギャップ変動により形成されるパリソンの肉厚分布をシミュレーションによって推測する手法を提案している。パリソン解析において重要とされる因子として、ダイ形状、樹脂特性（分子量、分子量分布、粘度特性 etc.）、スウェル現象、ドローダウン現象が挙げられる。Hossam らは、市販の有限要素法計算ソフト (POLYFLOW) を用いた 2 次元計算を行い、実測値との比較を行っている。いくつかのダイギャップ変動パターンにおいて、パリソンの肉厚分布をシミュレートした結果、肉厚変動の傾向について実測値との一致が見られたと述べている（図 1、図 2）。しかし、実測値で観察されている、押し出されたパリソンが、ダイ近傍ほど肉厚が薄くなる現象が再現できていないことについては、押し出されたパリソンの冷却に伴う粘弾性変化への考慮が無かったことが要因と考察しており、今後の検討項目と述べている。

また、Huang ら²⁾は、均一な肉厚を有する最終成形物を得るために必要なパリソンの肉厚分布をシミュレートする方法として、数値解析データに基づくニューラル・ネットワーク (ANN) モデルと実数値遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) による最適化を組み合わせた手法を

図 1 ダイギャップの変化量 (g) に対してのパリソン肉厚 (t) の計算結果¹⁾

図 2 パリソン厚みの実測値と計算値の比較¹⁾

提案している。この方法では、はじめに市販の有限要素法計算ソフト (POLYFLOW) により、実測した高密度ポリエチレンの緩和スペクトルデータを元に等温解析を行い、種々のパリソン肉厚に対応した最終成形物の肉厚の計算結果を得る。これらの 100 通りの結果を 25 のニューロンを有する ANN モデルに学習させ、モデル構築を行う。更に、ANN モデルから得られる計算結果を GA により、最終製品の全部位の肉厚が目標肉厚である 3 mm に近いことを評価基準として、200 回の反復処理をすることによって最適化を行っている。このような手法によって最適化されたパリソン肉厚分布（図 3）から、均一な肉厚分布を有する最終成形物（図 4）が得られると述べている。この方法は、ブロー成形や射出成形といった、変数が多岐に渡りシミュレーションが困難である分野で有効であるとしている。

* 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)
2006.6.30 受理

図3 最適化されたパリソン肉厚²⁾

図4 最適化の有無による最終製品肉厚の違い²⁾

表1 ボトル圧縮荷重の実測値と計算値の比較³⁾

	Actual (N)	Simulated	
		Linear (N)	Non-Linear (N)
Side Load	182.87	206.48	130.51
Top Load	515.82		

シミュレーションにより、押出ブローボトルの肉厚分布から、力学的特性を推測する報告もなされている。ボトルの肉厚分布設定は、最薄部の力学的特性が支配的となるため、その他の部位においては、大抵の場合過剰な肉厚、即ち材料が使用されており、コストアップに繋がっている。Jason ら³⁾は、実測したボトルの肉厚分布をもとに、その圧縮強度を有限要素法計算ソフト (ANSYS) によりシミュレートして、実荷重値と比較を行っている。計算は、歪みによる弾性率の変化を考慮するため、実際の引っ張り試験によって得られた測定値を適用した非線形モデルと、比較のために線形モデルについても計算を行っている。その結果、側面圧縮の場合、非線形モデルを用いた方が、実測値を超過せずに圧縮強度を見積もることができ、安全であると述べている。また、軸圧縮においては、制限条件として

図5 最適化前 (左) と後 (右) のプリフォームおよびボトルの肉厚分布⁴⁾

加えられた理想的な圧縮が実際には起こらず、計算が不可能であった (表1)。今後は、落下時の変形についてのシミュレーションを行う予定と述べている。

3. 延伸ブロー成形

ポリエチレンテレフタレート (PET) 延伸ブロー容器は、流通量の多い飲料用途を中心として、高速大量生産が主流となっている。成形の高速化が進み、前成形体となるプリフォーム成形には最大 144 キャビティーを有する射出成形機が使用されるケースもあり、金型製作にかかる時間、コストは莫大なものとなっている。また、形状による容器差別化が進む傾向もあり、異形容器への迅速な対応も重要な課題となっている。このような状況において、最終容器形状に対する最適なプリフォーム形状の決定、および延伸ブロー条件の設定といった作業を効率的に行うために、シミュレーションへの要求は高まっている。

Thibault ら⁴⁾は、容器の目標となる肉厚分布を得るために必要なプリフォームの厚み、形状の最適化手法について報告している。最適化される目的関数は、プリフォームの各部位の寸法、およびこのプリフォームに対応した有限要素法によって得られるボトルの各部位の寸法から構成される 6 種の変数を持ち、各々に最終成形物における延伸倍率や形状、肉厚を反映した境界値が設定されている。特に、延伸倍率は重要であり、物性向上を図るために高めに設定される場合が多いが、過延伸現象の発生に留意する必要がある。また、プリフォームを射出成形する際の離型性を考慮したテーパ形状、およびブロー成形時にストレッチロッドと干渉しない十分な内径といった、実際の工程からの制限条件が加えられている。これらの制限条件の導入によって、最適化時間は長くなるが、得られるプリフォームの肉厚分布は、先行して経験的に求められている肉厚分布と良好な一致を示し、実生産に十分適用可能であると述べている (図5、図6)。

オフラインの PET ボトル成形工程では、室温のプリフォームをリヒートして延伸ブローを行う。リヒート時のプリフォームの温度分布は、ボトルの配向や肉厚分布に強い影響を及ぼす。特にプリフォームの内外面はその延伸倍

図6 最適化後および実生産されているプリフォームの肉厚分布の比較¹⁾

図7 プリフォームおよび加熱ヒーターのメッシュ設定⁵⁾

率が異なるために、延伸ブロー時の均一な応力分布を得るためには、プリフォームの高さ方向だけではなく厚み方向の温度分布が重要因子となる。従って、このプリフォームリヒート時の温度分布の予測は延伸ブローそのものの理解やボトル特性の理解のために有益なものといえる。Huangら⁵⁾は、有限要素法モデルの構築とそれから得られた結果の実測値との比較を行っている。リヒート工程は複数の加熱ヒーターと反射板の間でプリフォームが回転し、円周方向の均熱化を図るものである。これを、複数の環状の加熱ゾーンの中心にプリフォームが静止している状態としてとらえ（図7）モデル構築と計算を行っている。また実験では、熱電対をプリフォームに埋め込み、加熱フィラメントの電圧や加熱時間を変数として高さ・厚み方向での温度分布を実測している。モデル構築のための仮定が多数あるということを考慮すれば、計算値と実測値は傾向としてよく一致していると結論づけている（図8）。

工業的なPETボトルのブロー工程の進化は、数多くの変数を抱えながら試行錯誤的に発展してきたといえる。また、このような状況を受けて時間とコストを低減する数値解析が精力的に行われてきた。しかしながらこのブロー工程の実験的検証はわずかな報告しか存在しないのが現状である。Yinら⁶⁾は、ポリメタクリル酸メチル製の透明型を

図8 プリフォーム温度分布の計算値と実測値の比較⁵⁾

用いた、プリフォームの延伸ブロー工程の可視化について検討を行っている。ストレッチロッド始動からブローエア封入までの遅延時間が長くなるとともに、4種の延伸過程があると報告している。ストレッチロッドが底型に到達する前にブローが開始する場合、遅延時間が短すぎると首部が肉厚になる（図9①）が、遅延時間の増加とともに適切な肉厚になる（図9②③）。また、ストレッチロッドが底型に到達した後にブローが開始する場合では、プリフォームの首部近傍と中間部で膨張が始まり（図9④）、その結果としてボトルの首部付近に折り返しが起こる。さらに、有限要素法計算ソフト (POLYFLOW) によるシミュレートの結果と比較し、同等の傾向を確認している。

PETボトルの特性に大きな影響を与える因子として、延伸ブロー成形時のプリフォーム温度や延伸速度を挙げることができる。プリフォーム加熱時の熱移動、冷却ファンによる熱伝導、赤外線ヒーター温度のプリフォーム加熱速度に与える影響、さらには二軸延伸ブロー過程の記述のため、いくつかの仮定のもと様々なモデル計算が行われてきた。Champinら⁷⁾は、PETのプリフォームのリヒートと延伸工程に対し、数値解析モデルの構築を検討している。加熱工程では、赤外線オープンとプリフォーム間の熱移動をレイトレーシングにより、ブロー工程ではポリエステル

図9 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⁶⁾

図10 プリフォーム加熱時の表面温度と反射板とヒーターの数の関係⁷⁾

図11 割型真空チャンバーのコンセプト⁷⁾

の粘弾性挙動に Moony-Rivlin 超弾性体モデルを適用し、市販の有限要素法計算ソフトである Forge 3[®]を用いて計算を行っている。図10は、プリフォーム加熱時の表面温度にあたる反射板とヒーターの数の影響を示したものである。反射板により効率が20%ほど上昇していることが分かる。本報告では、フリーブロー、ロッド無しでの型内ブローの議論にとどまっているが、将来的には、肉厚分布の実測値との比較、そしてストレッチロッドの速度やブロー圧などの因子の肉厚分布への影響について検討を行うとしている。

プラスチック容器の弱点として、容器壁を通じてのガス透過が避けられない点が挙げられる。特に、炭酸飲料や酸化劣化しやすい内容品の容器として用いる場合、長期流通ができないといった問題がある。PET ボトルのガスバリア性を向上させる技術については、これまでも、ポリエチレンナフタレート (PEN) の使用や、ガス透過度が低く酸素吸収性を持った材料との積層による多層化、および有機・無機薄膜のコーティングといった技術が報告されている。しかし、どの方法もコストの上昇やリサイクル適性の悪化などの問題を抱えている。これに対し Ernst 氏⁸⁾は、マイクロ波プラズマによる PET ボトルへの化学蒸着技術についての報告を行っている。この方法では、リサイクル

性に影響を与えない程度のごく薄い蒸着膜によりバリア性の向上を図ることができる。また、プラズマ発生に必要な真空状態を形成するためのチャンバーを、ボトルに対して左右割型にすることにより、高サイクル生産に対応できると提案している (図11)。ボトル外面への蒸着試験において、マイクロ波出力、導入ガス流量、組成 (アセチレン、アルゴン) を変化させて膜の均一性を確認した結果、低出力、および適度な導入ガス流量を選ぶことにより、最適な膜形成がなされ、未蒸着ボトルに対して3.3倍の炭酸ガス遮断性が付与される。現在、15秒程度の処理時間を要しているが、将来的には10秒以下とすることを目指し、実際の高速生産機との連結を考えた検討を継続していくと述べている。

4. おわりに

昨年と同様に、ブロー成形に関する発表論文は少なく、その内容はシミュレーションに関するものがほとんどである。ブロー成形メーカーが、製品受注から納品までを迅速に対応することによって顧客満足を図る上で、CAEの利用が有効な手段となりつつある。しかし、実際には緻密な条件を設定できない旧式な設備が存在していることや、各社独自の成形機で生産を行っていることもあり、未だに技

術者の経験や勘に頼っている部分が多く、技術がノウハウとして開示されない傾向が強い。原油価格の高騰や2007年問題など厳しい局面が続くが、ブロー成形業界の活性化を図るためにも、新技術に関する報告が増加することが望まれる。

参 考 文 献

- 1) Hossam M. Metwally, Jonathan Meckley, Thierry Marchal, Eric Grald, and Yeong-Yan Perng : SPE ANTEC 2005, 29 (2005)
- 2) Geng-Qun Huang, Han-Xiong Huang : SPE ANTEC 2005, 25 (2005)
- 3) Jason Giordon and Patrick Spence : SPE ANTEC 2005, 3791 (2005)
- 4) F. Thibault, B. Lanctot, A. Malo and R. DiRaddo : SPE ANTEC 2005, 16 (2005)
- 5) Han-Xiong Huang, Yan-Hong Deng and You-Fa Huang : SPE ANTEC 2005, 12 (2005)
- 6) Zhan-Song Yin, Han-Xiong Huang and Ji-Hu Liu : SPE ANTEC 2005, 36 (2005)
- 7) Cedric Champin, et al. : SPE ANTEC 2005, 7 (2005)
- 8) Ernst Schmachtenberg, Andreas Hegenbart, Sebastian Göbel : SPE ANTEC 2005, 2 (2005)

賛助会員ならびに会員の皆様へ

「知りたい、見たい、訪ねたい—成形加工の元気な仲間—」の 訪問取材を希望される会社を募集中

「成形加工」誌には、「知りたい、見たい、訪ねたい—成形加工の元気な仲間—」を掲載しています。本企画は、プラスチック成形加工に携わり、日本のものづくり産業の基盤を支えている活気ある企業を、本誌編集委員自らが訪問取材して、会社概要および自慢の製品・技術を広く会員に紹介することを目的としたもので、詳細は以下のとおりです。

1. 主として賛助会員あるいは正会員の所属する会社を、本誌編集委員が訪問し、新製品・新技術等を、実際の製品を見て、あるいは現場見学を交えて取材し、記事としてまとめ上げる。会員による原稿執筆は一切不要。
2. 取材は、2時間程度。
3. 原稿は、図表を含めて刷り上がり2～3ページとする。
4. 掲載料は無料。

この「知りたい、見たい、訪ねたい—成形加工の元気な仲間—」の訪問取材を是非ご検討下さい。

本企画は、年間4～5件を掲載する予定です。記事のスタイル、内容等につきましてはすでに掲載されている幾つかの記事をご参照下さい。

「成形加工」編集委員長 鞠谷雄士