

ブロー成形工程の実用的解析技術

谷藤眞一郎*

はじめに

ブロー成形は、圧力を作用させることで成形素材を金型に転写させて製品を製造する成形加工法であり、成形素材の形状や加工条件の差に応じて押出ブロー成形、射出ブロー成形、及び真空熱成形などと呼ばれている。

ブロー成形では、理想的な肉厚分布の製品を製造することを目的として成形条件や金型形状の最適化を支援するコンピュータシミュレーションが有効活用されている。

本稿では、各種ブロー成形工程のシミュレーション技術とその適用例について紹介する。

1. ブロー成形シミュレーションの入出力情報と材料モデル

1.1 入出力情報

シミュレーションで必要とされる入力情報は、成形素材や金型の形状、材料物性、及び成形条件である。一般的にブロー成形品は、複雑形状の薄肉構造体であるため、その成形工程の解析に膜要素を利用した有限要素法が多用されている。膜要素は、3D空間内に任意配置された3角形や4角形で表現

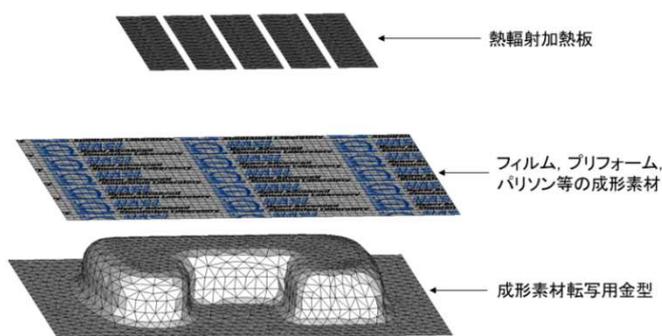


図1 ブロー成形シミュレーションの解析モデル

され、肉厚は要素に付帯した数値情報として管理される。図1に示すように成形素材の初期形状は、平面状や円筒状の単純形状の膜要素モデル表現される。一方、金型は、3D CADで作成されたSTLファイルを利用してモデル化する。実際の成形工程に対応し、これらの情報を適切に初期配置する。

本稿で紹介する解析では、成形素材を粘塑性体とみなし、伸長試験で得ら

れる応力・ひずみ曲線をモデルフィットし、モデルパラメータを入力情報として物性を解析結果に反映させる。

成形条件としては、ブロー圧力の時間依存性や金型の温度制御、及び移動制御条件などを入力する。

粘塑性体の大変形解析を通じて、成形素材の形状、肉厚、及び温度などの時間変化が詳細に定量化され、解析結果として出力される。

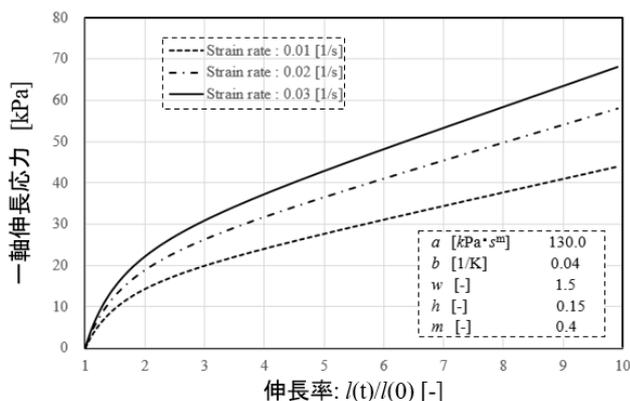


図2 一軸伸長応力の伸長率／伸長速度依存性(HDPE,200°C)

1.2 材料モデル

以下に示す G'sell Jonas モデル¹⁾は、ブロー成形解析で良く採用される材料モデルである。

$$\sigma = a(T)[1 - \exp(-w\varepsilon)] \exp(h\varepsilon^2) \dot{\varepsilon}^m \quad (1)$$

モデルパラメータ a, w, h, m は、成形素材の引張試験で得られる伸長応力 σ の温度 T 、ひずみ ε 、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ 依存性の実測値を最適フィットするように決定される。図2は、当モデルで表現した高密度ポリエチレンの一軸伸長応力特性を表す。当モデルで表現可能なひずみ硬化性は、ブロー成形品の成形性の良否を判定する上で重要視されている特性である。

2. ブロー成形シミュレーション例

2.1 押出ブロー成形

押出ブロー成形工程は、容器やタンク、チューブなどの中空成形品の製造に利用されている成形法である。この工程は、パリソンと呼ばれる中空円筒状の成形素材を二重円管ダイから押し出して形成するパリソン形成工程と、その後、金型内でブロー圧力を作用させて製品を賦形するパリソン膨張工程から構成される。パリソン形成工程に

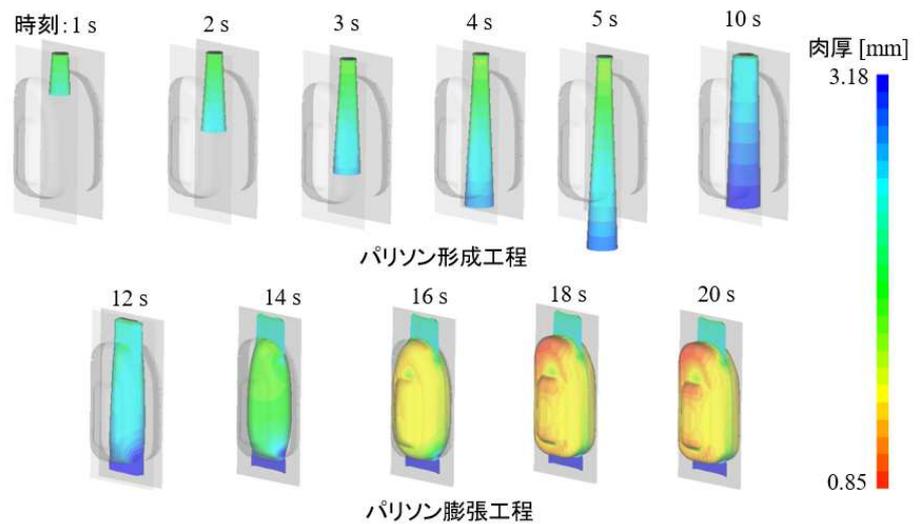
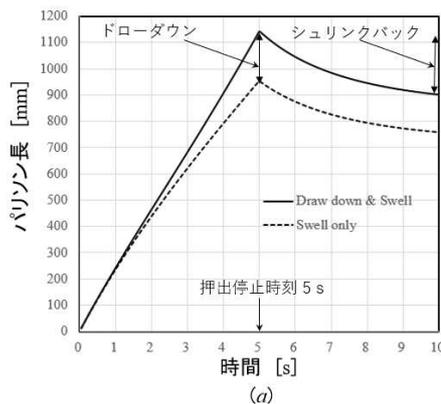


図4 押出ブロー成形工程におけるパリソン形状と肉厚の時間変化

において、成形素材の口径と肉厚は、弾性回復に起因するスウェルと重力によるドローダウンの双方の影響を受けて変形する。スウェルとドローダウンによる競合的な効果を簡易的に予測する解析法²⁾が提案されている。押出ブロー成形では、パリソン形成状態の精度良い予測が基本的に重要である。図3にパリソン長と口径の時間変化の簡易解析法を利用した予測結果を示す。スウェルは、口径や肉厚の増加に寄与し、パリソン長を減少させる。一方、ドローダウンは重力による伸長を反映し、パリソン長の増加に寄与する。図3(a)の実線と破線で示される予測結果の差は、ドローダウンによる伸長量を表現している。パリソン形成工程では押出停止後に弾性回復に起因してパリソン

長が減少する場合がある。この現象はシュリンクバックと呼ばれ、弾性の強い溶融樹脂に対して顕著になる。パリソン口径は、図3(b)に示す様に時間的に変化する。パリソン先端は、ドローダウンの影響を受けず、その口径は、入力情報として設定する径スウェルの時間依存性に従う。先端以外の口径は、ドローダウンの影響を受けて縮小する。簡易解析法と大変形解析法を併用することで図4に示す様に押出ブロー成形工程の一貫解析が実現されている。

2.2 射出ブロー成形

射出ブロー成形は、PETボトルの成形法として良く知られている。この工程は、プリフォームと呼ばれる試験管状の成形素材を射出成形で作成し、溶融状態のまま連続的にブロー成形するホットパリソン法と冷却固化後、熱輻射で再加熱してブロー成形するコールドパリソン法に大別される。

図5にコールドパリソン法における熱輻射によるプリフォームの加熱状態やその後のストレッジロッドによる軸方向への延伸変形、及びブロー圧力作用時の膨張挙動のシミュレーション例

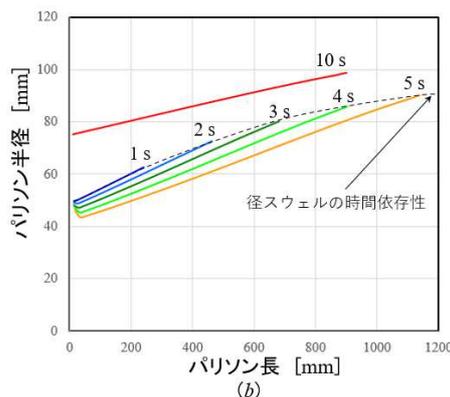


図3 (a)パリソン長と(b)径の押出時間依存性

を示す。プリフォームの外気や金型接触後の熱移動は、熱伝達として考慮される。一方、熱輻射加熱工程では、真空中でも熱移動が生じる電磁波が利用されるため、熱輻射計算モデルを利用してプリフォームの加熱状態を予測する。

熱輻射計算モデルでは、プリフォームを構成する温度 T_i の要素 i に加熱板を構成する温度 T_j の要素 j が与える熱量 Q_{ij} が次式に従って評価される。

$$Q_{ij} = F_{ij} A_i \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (2)$$

ここで、 A_i は要素 i の面積、 σ はステファンボルツマン定数である。形態係数 F_{ij} は、要素間の位置関係に依存する二重積分表式で表される。形態係数の計算は、成形素材と加熱板を構成する全ての要素間で評価する必要があり、計算負荷が増加する。

プリフォームは、射出成形金型を利用して成形されるため、その初期形状を自由に設計できる。均一肉厚の製品を得るための初期形状を予測する場合、

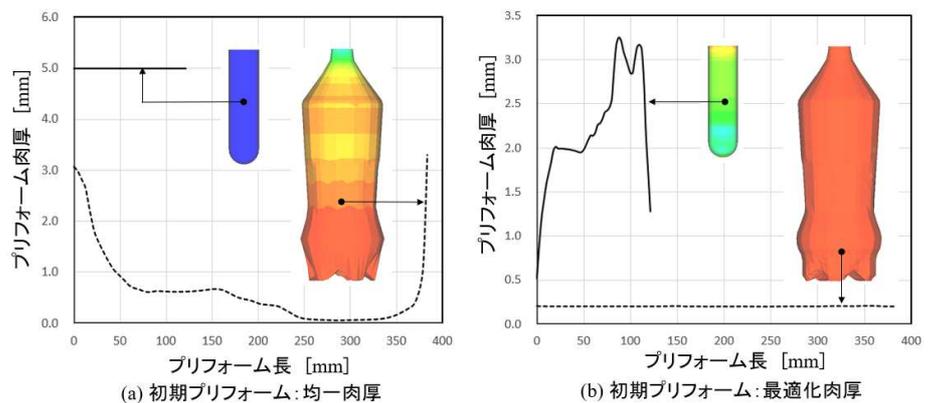


図6 肉厚最適化解析結果(実線:初期肉厚、破線:製品肉厚)

最適化解析が有効である。標準的な解析では、成形素材の初期肉厚を指定し、膨張後、金型と接触した際の肉厚が予測される。最適化解析では、標準的な解析で予測される膨張後の肉厚とその最適値を比較して初期肉厚を更新する。例えば、標準解析で予測される製品の肉厚が、ある部位で最適値の半分であった場合、該当部位に転写される要素の初期肉厚を2倍にして再計算する。

すなわち、最適化解析では、初期肉厚を自動的に更新した反復計算を通じて、最適な初期肉厚分布が予測される。図

6(a)に示すように初期肉厚を一定とした条件では、転写側の金型形状に依存して製品の肉厚は不均一になる。一方、図6(b)は、製品の肉厚を均一0.2 mmとした最適化解析結果である。最適化解析では、このように、製品で最適とされる肉厚を達成するための初期肉厚分布が逆推定される。金型を構成する要素毎に異なる最適肉厚を設定することで、最適肉厚分布を有する製品を製造するための初期プリフォーム肉厚を予測可能である。また、この最適化解析は、押出ブロー成形におけるパリソントローラの最適制御条件の推定にも活用されている。

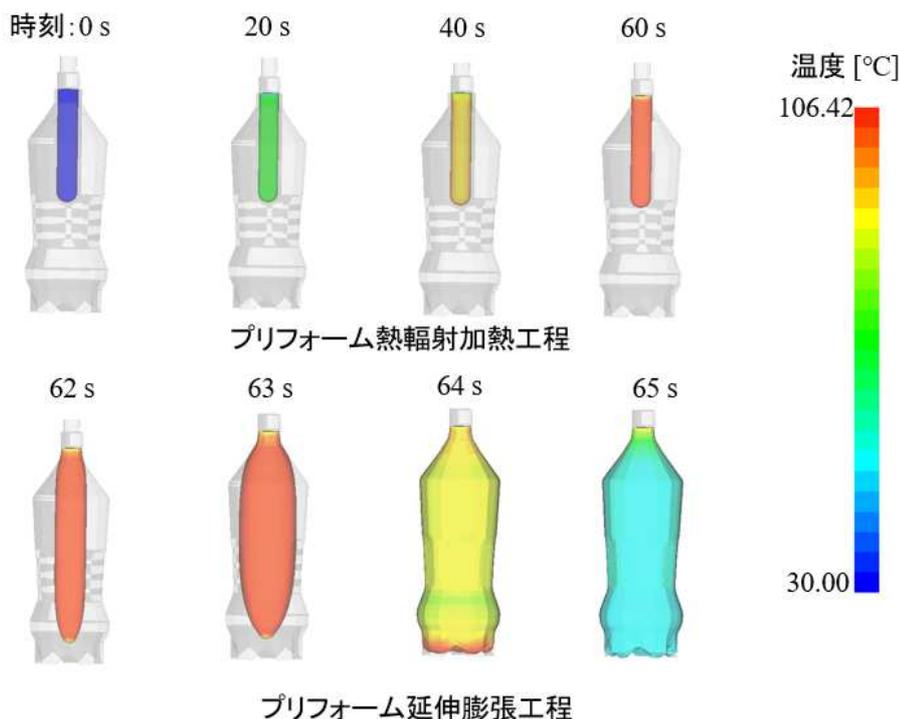


図5 射出ブロー成形工程におけるプリフォーム形状と温度の時間変化

2.3 真空熱成形

真空熱成形は、食品トレイや各種自動車用機能部材の成形法として利用されている。この成形工程では、図7に示す様に、シート状の成形素材を熱輻射で加熱した後、移動制御されたプラグ(金型)に接触させて変形し、最終的に吸引によって金型に転写させる。

加飾フィルムの成形の場合、変形に伴うフィルム上のパターンの変化を精度良く予測することが重視されている。このような要求に対応し、解析では、成形素材に任意の画像(ビットマップ)ファイルを写像し、膨張変形時のパタ

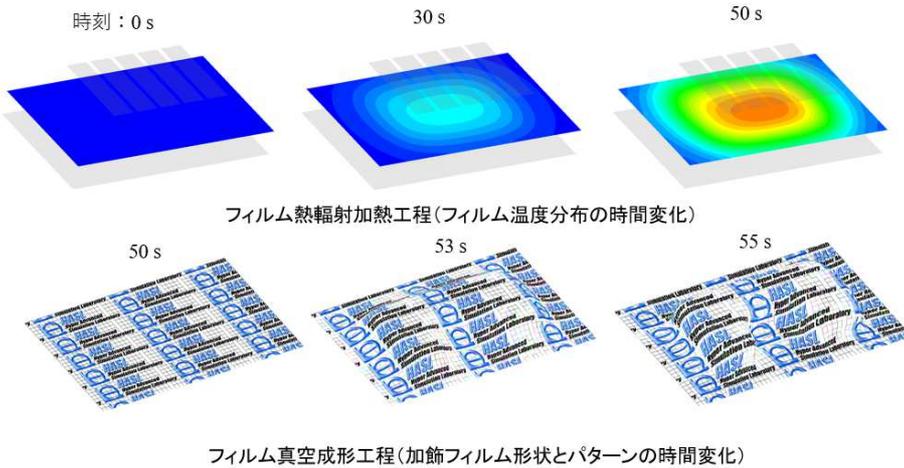


図7 加飾フィルムの真空熱成形工程におけるフィルム温度と加飾パターンの時間変化

の時間変化を可視化可能である。

ブロー成形解析において、成形素材が金型に接触した際に固着する滑り無し条件が採用されることが多い。滑りを考慮する場合には、Navierのスリップモデル⁴⁾：

$$V_{slip} = \beta \tau_t \quad (3)$$

を利用する。ここで、 V_{slip} は滑り速度、 τ_t は、金型に接触した膜要素の節点に作用するせん断応力である。滑り係数 β を増加させるに伴って、滑りが顕著になる。滑り係数は、成形素材と金型の相性や成形条件に依存して変化するため、基本的な検討において肉厚実測値と予測値をフィットし、その適正値を推定するのが実践的な対応である。

図8に滑り無しと滑り接触条件を採用した解析結果の比較を示す。滑り無しの場合には、プラグと最初に接触するフィルム中央部の肉厚が厚くなり、他の領域では、接触時間の遅延とともに薄肉化が促進される。滑りを考慮すると接触部がせん断応力の作用を受けて伸長変形し、接触後も薄肉化が促進される。結果として、成形品の肉厚やパターン変形は、滑り無しのケースと比較して相対的に均一になる。

おわりに

ブロー成形工程で扱われる複雑形状の薄肉構造体の金型内における変形挙動や温度状態は、膜要素を利用した有限要素法を適用することで効率的且つ安定にシミュレート可能である。本稿で紹介した事例では、廉価版PC環境下において、何れも1時間以内に解析結果が得られる。現在、ブロー成形解析技術は、パリソン形成過程の解析法や肉厚最適化解析法との統合化や、熱輻射計算、及び滑り計算モデルなどの実装が進められており、用途拡大を目的とした改良開発が継続されている。

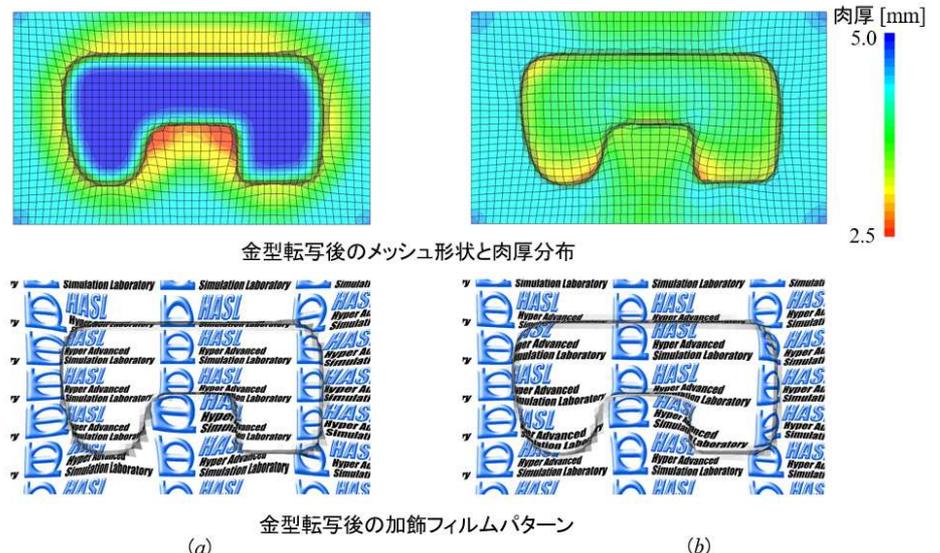


図8 加飾フィルム成形の肉厚分布とパターン変形状態の比較((a)滑り無し, (b)滑り)

参考文献

- 1) G'sell C. and Jonas J., "Determination of the plastic behaviour of solid polymers at constant true strain rate", *J. Mater. Sci.*, **14** (3), 583 (1979)
- 2) 谷藤眞一郎, 滝本淳一, 小山清人, "押出ブロー成形におけるパリソン形成過程の数値解析", 成形加工, **8** (9), 590 (1996)
- 3) 日本機械学会編 "伝熱工学資料", 137, 丸善 (2009)
- 4) Navier C. L. M. H., "Sur les lois du mouvement des fluides", *Mem. Acad. R. Sci. Inst.* **6**, 389 (1827) France

* Shin-ichiro Tanifuji

Hyper Advanced Simulation Laboratory
Co. Ltd.

E-mail: tanifuji@hasl.co.jp

Tel. 03-5923-6988

Fax. 03-5923-6987