

びんガラスの成形シミュレーション

東洋ガラス株式会社 生産本部 技術部 生産技術グループ

齋藤 伸二

Forming Simulation of Glass Containers

Shinji Saitoh

Production Technologies Group Technical Department

Production Division, Toyo Glass Co., Ltd.

1. はじめに

ガラスびんは約4500年前の時代から、容器として永く人々に愛用され続けてきている。しかし最近では容器に対し簡便性が優先されていることから、PETなど他素材容器の進出が著しく、図1に示すように1990年をピークにガラスびんの出荷が年々縮小していき、厳しい状況が続いている。一方ガラスびんは再使用や再利用が最も進んでいる容器であり、また軽量化技術の確立によって従来より大幅に軽い製品の生産が可能となった。更に消費者の環境に対する配慮から、出荷の減少傾向に歯止めがかかりつつある。他素材容器に対抗するためびんの軽量化が推進され、ガラスびん一本あたりの平均単重は20年前に比較して20%以上軽くなり、更にこの傾向は続いている。

びんが軽く薄くなることで、強度が低下するため、設計段階で強度や生産性を評価するためのコンピュータシミュレーションの重要度が増

している。特に限界まで軽量化する場合、強度を保証する肉厚分布を得るために多くのトライアルが行われることがある。そこでできるだけ開発コストをかけず、適正な生産条件を見いだすため、成形時の肉厚分布を予測するシミュレーションを用いている。弊社で使用している成形シミュレーションの概要と特徴について紹介する。

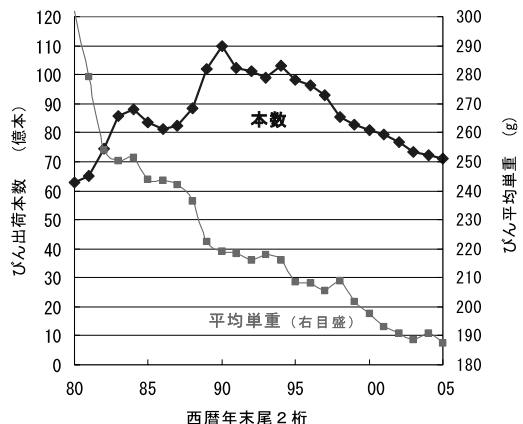


図1 ガラスびん出荷本数とびん平均単重の推移

〒210-0863 川崎市川崎区夜光3-2-3

TEL 044-276-3975

FAX 044-277-2259

Email: shinji_saitoh@toyo-glass.co.jp

2. 超軽量びん

2.1 超軽量びんの定義

日本ガラスびん協会はガラスびんの軽量化を推進させるため、図2に示すように軽量度のレベルを設定した。びんの軽量度を表す指標としてL値を用い、L値が0.7未満のものを最も軽量度の高いレベルⅣとし、超軽量びんと定義した。レベルⅣの超軽量製品には図3に示すシンボルマークとエコマークを付けられるようにした。2005年末まで超軽量びんは54製品が出荷されている。その内、弊社では32製品(約60%)を製造している。

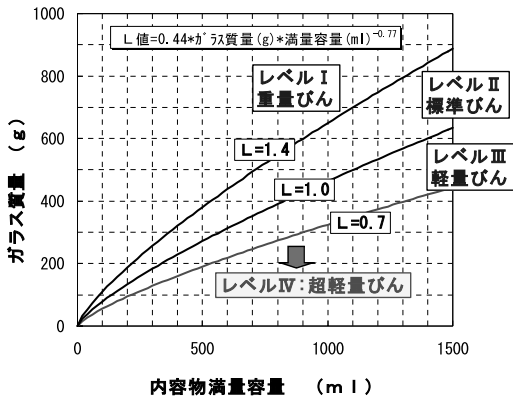


図2 ガラスびん軽量度レベル

2.2 超軽量びんの例

図4に超軽量びんの製品例を示す。この牛乳900mlびんはリターナブル製品として繰り返し使用されるものである。従来の460g(L値=1.063)から280g(L値=0.648)に40%軽量化され、製品胴部のガラス平均肉厚は約3.0mmから1.8mmに薄くなった。超軽量牛乳びんは胴中央部を凹ませ、高齢者や子供でも持ちやすいようなユニバーサルデザインになっている。



図3 超軽量びんのシンボルマークと製品例



従来びん < 460g >
L値 = 1.063

超軽量びん < 280g >
L値 = 0.648

図4 従来の牛乳900mlびんと超軽量牛乳900mlびん

2.3 軽量びんの強度

生産ライン上などでこの超軽量牛乳びん同士が衝突した場合、胴中央部が凹んでいるため肩部と裾部が当たる。強度を維持させるには衝突する部分の肉厚が薄くならないようにする必要がある。

図5は解析や実験結果より求めた衝撃部の肉厚とびん内表面に発生する応力値の関係を示す。肉厚が1.5mm以下になると発生応力が急激に大きくなる。したがってびんを軽量化する場合には僅かな肉厚の違いで強度が大きく異なるため、強度保証のために必要な肉厚のバランスを確保することが重要となる。図5中の0.2Jは規格下限の衝撃値であるが、理論的にはガラス厚みが1mm以上あれば必要強度をクリアできることになる。しかし実際にはびん形状の影響や、肉厚のばらつき、またライン上での衝撃力が各製品毎に異なるため、それぞれの製品に応じた最低肉厚を求めなければならない。

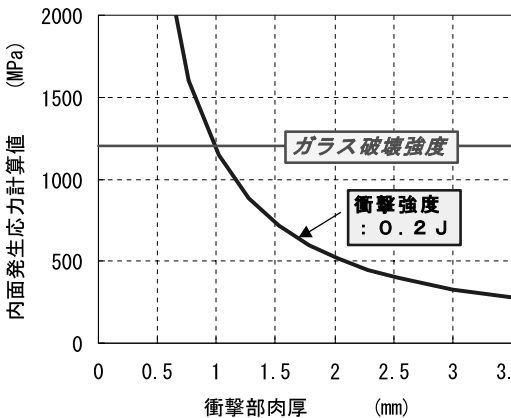


図5 衝撃部の肉厚と発生応力の関係

3. 肉厚分布予測シミュレーション

3.1 ガラスびんの成形工程

図6にガラスびんの成形工程図を示す。規定の質量と温度にコントロールされた円柱状のガラスの塊（ゴブ）は粗型（あらがた）に落下する①②。プランジャ（PL）によりガラスがプレスされ、びんの原形となるパリソンが作られる③。そのパリソンを180° 旋回させ④、仕

上型に移動する⑤。ガラスの自重によりパリソンを底型まで伸ばす⑥。口部より高压空気をブローして、びんの形状に成形する⑦。約数秒でガラスの塊がびんとして成形され、一台のマシンで最大600本/分以上の製品が作られる。

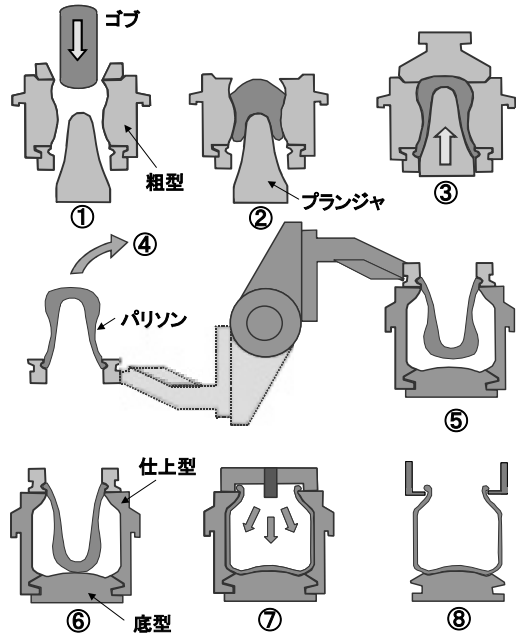


図6 ガラスびん成形工程図

3.2 シミュレーションの開発

ガラスびんは昔から広く世界中で使用されているため、温度や肉厚を求める数値解析の歴史も古い。1950年代頃から McGraw¹⁾や Trier²⁾らによって実験や解析によりガラス温度計算が行われてきた。また1980年代にはガラスのブロー成形で肉厚分布を求める解析を試みた例も報告されている³⁾。現在では非線形解析用の汎用コードを用いてもブロー成形による肉厚分布を求められる。しかし、現実の製品の肉厚分布を精度良く予測するにはまだ多くの課題が残されている。ブローする直前のパリソン温度分布を与えれば、さまざまなソフトウェアでブロー計算しても、ほぼ同様な結果が得られる。肉厚分布を精度良く予測するためには、いかに現実に近いパリソン温度分布を計算できるかである。

3.3 ガラスの温度分布計算

ガラス内部は熱伝導と輻射による伝熱がある。計算を簡易化させるため、輻射の影響を含めた“見かけの熱伝導率”⁴⁾を使用する場合もある。

ガラス温度計算で最も影響が大きいのは、金型とガラス間の伝熱の設定である。両者の伝熱は、一般的には金型への熱伝達係数を与えて熱のやり取りをさせる計算方法が用いられる。しかし、図7に示すように熱伝達係数を用いずに金型とガラス間に空隙層を設け、成形条件の違いをその間隔（ギャップ）に反映させることで、より現実に近い温度が得られる。弊社のシミュレーションではこの空隙層を設ける計算方法を採用している。

3.4 空隙層値の設定

ガラスと金型間には金型加工時の物理的な空間が空気に換算して数μm程度ある⁵⁾。これにカーボン主体の離型剤、ガラスへの圧力、ガラスの冷却収縮、残留空気などの影響があり適正なギャップを推定することが難しい。そこで、成形中の金型の温度を測定し、測定値と計算結果が同一傾向になるギャップを求めた。図8に粗型内表面温度測定値と計算値との比較を示す。プレスしている間のガラスと金型のギャップは物理ギャップの約2倍、その後PLが下がり、粗型とガラスが離れるまでのギャップはそれまでの2倍程度にすることで、実測と計算値が良く一致した。

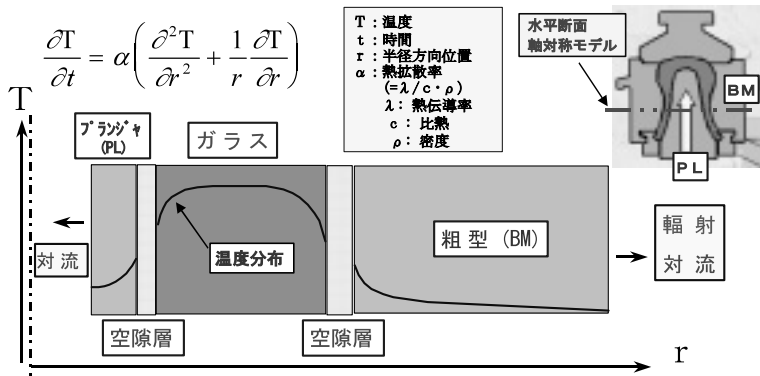


図7 温度計算方法の概要

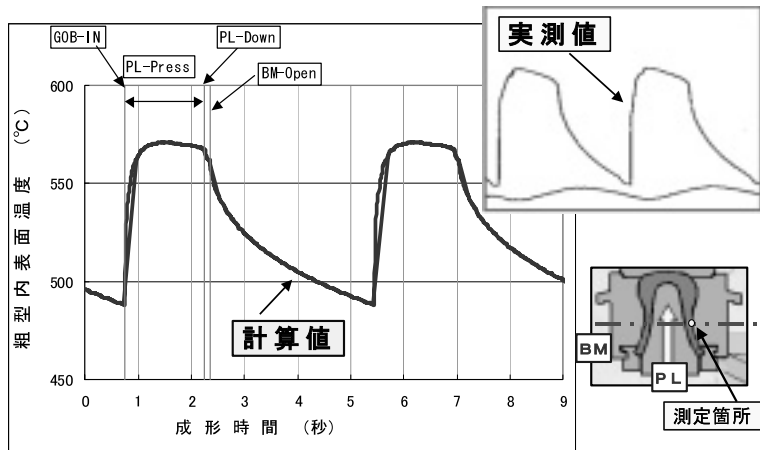


図8 粗型の温度測定値と計算温度との比較

3.5 パリソンの温度計算

一般的に成形シミュレーションは図9に示すゴブイン後のガラス位置を設定し、プレス直前のガラス形状を決めてから温度計算を開始する。しかし、ゴブイン後のガラス位置や形状は、ゴブ形状やプランジャ位置と先端形状、また離型剤の厚みなどで異なるため、適正な条件を設定することが難しい。

プレスを開始すると、ガラスは上下に引き伸ばされるが、パリソン上部は金型で塞がれているために、空気が逃げ難くなっている。粗型などの金型の継ぎ目から空気は逃げてゆくが、空気が残留しガラスと金型との密着が悪い場合にはガラス温度が高くなり、仕上型でブローした際、この部分が引き伸ばされ肉厚が薄くなる。実際のガラス肉厚でもこの部分の肉厚のばらつきが最も大きい。

そこでシミュレーションではさまざまな条件を設定できるよう、ゴブイン高さ位置、ゴブイン後のガラス盛り上がり高さ、密閉空間のギャップを入力できるようにしてある。

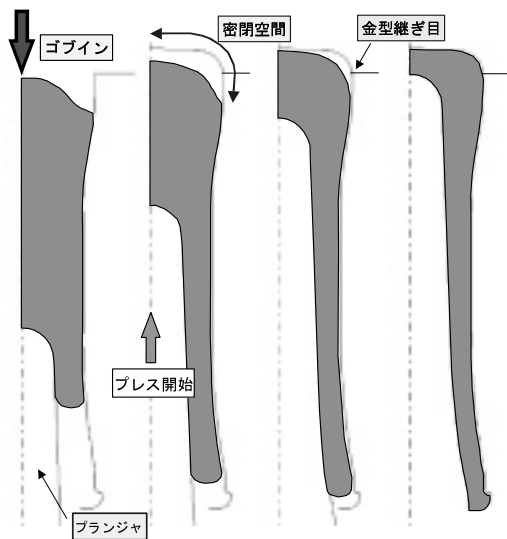


図9 パリソン成形時のガラス挙動

3.6 ブローシミュレーションの解法

計算の手法は剛塑性解析を用い、慣性のない非圧縮性ニュートン流体を適用している。解析

系は二次元軸対称で、ガラスの粘性や熱伝導率は温度依存性を有し、ブロー圧はガラス表面に一様に与えている。

3.7 シミュレーション結果

3.7.1 ゴブイン位置の影響

図10にゴブイン位置が深い場合のシミュレーション結果を示す。ゴブイン位置によりガラスと金型との接触時間が場所により異なるため、ガラス温度が低い肩部肉厚は厚く、ガラス温度が高い裾部肉厚は薄い分布となる。

図11にゴブイン位置が浅い場合のシミュレーション結果を示す。図10とは逆に、肩部は薄く、裾部は厚い肉厚分布となる。

3.7.2 ガラスと金型の密着度の影響

図12にパリソン成形時の空気逃げが悪く、パリソン底部のガラス温度が高い場合のシミュレーション結果を示す。この場合には肩部も薄く、裾コーナー部も薄くなる。

これらのことから、パリソンの成形条件によって製品の肉厚が大きく影響されることが分かり、現実に肉薄が発生した場合には、要因の解明にシミュレーションが参考になる。

3.7.3 計算精度

図13に実績の肉厚分布とシミュレーション結果の比較例を示す。実績肉厚は数本のびんを測定したもので、各高さ位置毎の肉厚はゴブイン状況や円周方向の金型温度の違いなどによりばらついた値となっている。シミュレーションは実績肉厚に比べ底中央部がやや厚く、首下が薄く計算されているが、全体的には実績肉厚の傾向と近似している。

4. まとめと今後の課題

肉厚シミュレーションの結果に最も影響するのは、ゴブイン時の形状と、金型とガラスとの密着度の設定である。計算精度を上げるため、将来的にはゴブインの変形シミュレーションまで計算を拡張させる必要がある。

また、シミュレーションではパリソンをブローする際、パリソン内部に均等に圧力を与えて

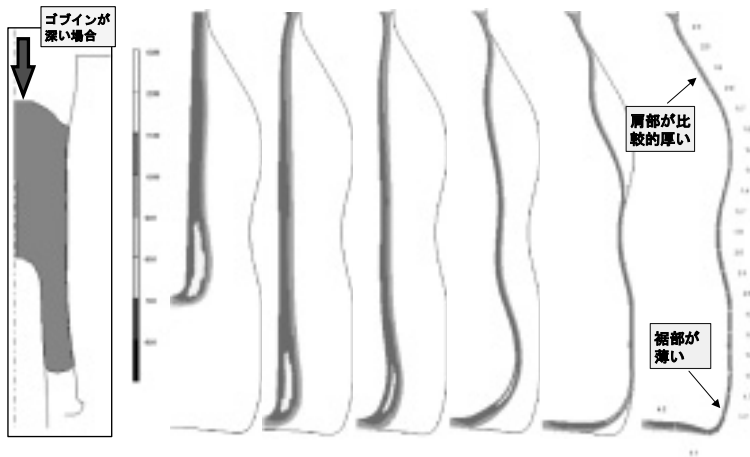


図 10 ゴブインが深い場合の肉厚シミュレーション結果

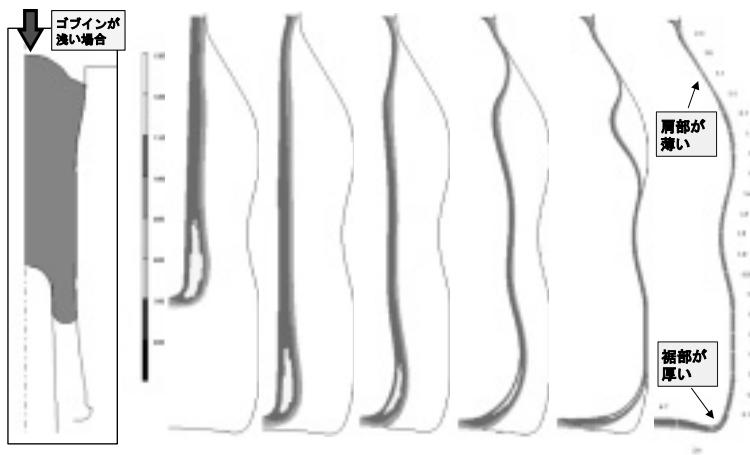


図 11 ゴブインが浅い場合の肉厚シミュレーション結果

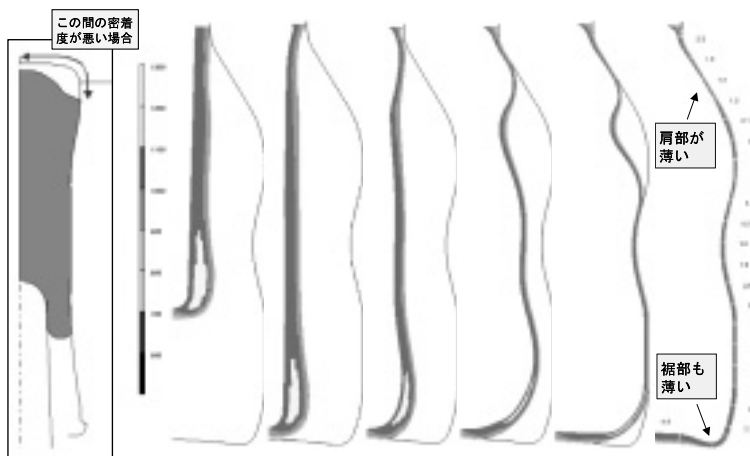


図 12 パリソン底部の温度が高い場合のシミュレーション結果

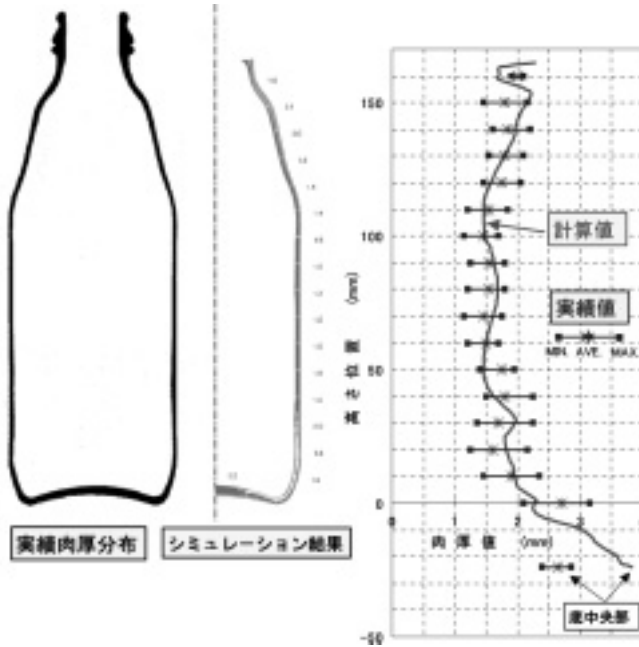


図13 シミュレーションと実績肉厚の比較



図14 ブローエアの流れ実験結果

いる。しかし実際には図14に示すようにブローエアはノズルによって下方に噴き出されているため、パリソン位置によりブロー圧や向きを変化させる必要があると思われる。今後、実験や流体解析を行うことで適正な圧力のかけ方を求めてゆきたいと思う。

ガラスびんは他容器に比べ重くて割れやすい容器であることは事実であるが、再利用（繰り返し使用する）、再使用（原料にガラス屑を使用）できる唯一の容器であり、自然の原料を使用していることから環境にとっては優等生である。しかし、利便性が優先されている現状では今後も劣勢が予想されるため、より軽く丈夫なびんを開発し続けることは重要な課題である。

そのため、コンピュータシミュレーションによる各種の評価は今後ますます重要になってくると思われ、より計算精度が高く、更に一步進んだシミュレーションの開発を今後とも推進してゆかねばならない。

<参考文献>

- 1) McGraw, Journal of The American Ceramic Society, 44, 353 (1961)
- 2) Trier, W, Journal of The American Ceramic Society, 44, 339 (1961)
- 3) A. Cormeau, I. Cormeau, and J. Roose, " Numerical Simulation of Glass-blowing", Numerical Analysis of Forming Processes, John Wiley & Sons Ltd., (1984)
- 4) F.V. Tooley (ed.), The Handbook of Glass Manufacture, 3rd ed., Ashlee (1984)
- 5) 村上久敬, 窯業協会誌, 95[11], 1073-1078 (1987)