

# ブロー成形の加熱工程最適化技術の研究

## ～ハロゲンヒーターによる熱放射の数値解析～

足立茂寛、西村敬一<sup>\*1)</sup>

### Improvement of the method for searching the best condition of the preform heating process in the blow molding. ～ The Simulation of heat radiation by halogen heaters. ～

ADACHI Shigehiro, NISHIMURA Keiichi<sup>\*1)</sup>

The temperature distribution of the surface of preform that is heated by halogen heaters were simulated by FEM analysis. The result was compared with experimental data. As a result, it was possible to simulate the heating process including heat radiation from heaters, heat transfer inside the preform and heat conduction to the air. But there's some difference in temperature distribution between the result of FEM analysis and the experimental result. The reason is not clear, but the shortage of analysis condition may cause it.

#### 1. 緒言

近年、ペットボトルの使用量は増加を続けており、形状も多様化している。ペットボトルは、まずプリフォームを射出成形により成形し、そのプリフォームをブロー成形で膨張させて製造されるが、形状の多様化・複雑化とともに製造工程の製造条件も複雑化している。

ペットボトルの代表的な製造法の一つである2ステージ法延伸ブロー成形では、成形したプリフォームを冷却した後、ハロゲンヒーターでブロー成形に適した温度まで加熱し、金型内で膨張させてボトルや容器を製造する方法である。複雑な形状に対応するためには、プリフォームの加熱工程において加熱状態を調節し、プリフォームの温度分布を適切な状態にしなければならないが、多くの場合が現場での試行錯誤に頼っているのが現状である。ハロゲンヒーターによる加熱は、ペットボトルの延伸ブロー成形だけでなく、塗装の乾燥工程など広く産業界で実施されているが、それらの工程に数値解析技術を適用した例も少ない。

そこで、本研究では2ステージ法延伸ブロー成形のプリフォーム加熱工程について、熱放射および熱伝導の数値解析を行い、温度分布を予測する方法を検討した。また、実験による実測値と比較することで、解析結果の妥当性を検証

するとともに、数値解析手法の問題点についても検討した。

#### 2. 実験方法

##### 2.1 熱放射および熱伝導の数値解析

プリフォームおよびヒーターの形状を想定し、有限要素解析を行うための解析モデルを作成した。

本研究で対象としたプリフォームを Fig.1 に示す。プリフォームの断面形状をもとにメッシュを作成し、2次元軸対称解析のモデルを作成した。解析モデルを Fig.2 に示す。軸対称モデルでの解析の都合上、解析モデルは90度回転している。要素数は432個（プリフォーム部分が要素数327個、ヒーター部分が要素数105個）である。PETの材料物性は Table1 のとおりに設定した。そのモデルを用いて、ヒーターからの熱放射、プリフォーム内部での熱伝導、周辺空気によるプリフォームの冷却、プリフォームを支持する治具による冷却などを考慮した解析を行った。プリフォームの初期温度は10、治具の温度は17、周辺の空気の温度は30とし、プリフォームから空気への熱伝達係数は $7 \times 10^{-6} \text{W/mm} \cdot \text{mmk}$ として解析した。

Table 1 Material properties of the preform.

Conductivity	0.24W/m・K
Specific heat	1.13J/g・K
Mass density	1.34g/cm <sup>3</sup>

\*1) 繊維・高分子技術チーム



Fig.1 Photograph of the preform.

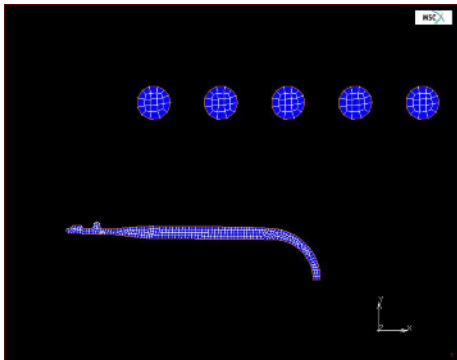


Fig.2 Model of the FEM analysis.

2.2 プリフォーム加熱実験

プリフォームをハロゲンヒーターで加熱し、プリフォーム表面の温度分布を測定した。実験装置の加熱部分の状態を Fig.3 に示す。プリフォームの形状、ヒーターの間隔、プリフォームとヒーターの位置関係は、解析モデルと同様になるようにした。プリフォームの温度測定は放射温度計（NEC製サーモレーサーTH5102）を用いて熱画像を取り込む方法で行った。加熱終了直後の熱画像を撮影し、その温度データからプリフォーム中心線上の温度分布を測定した。

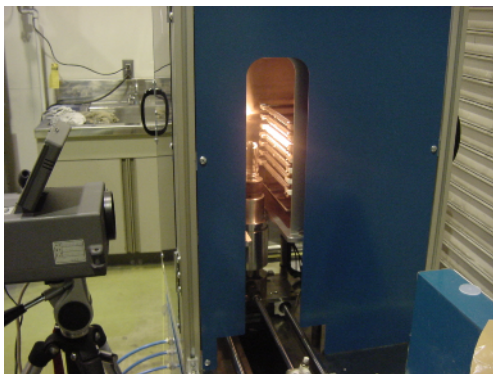


Fig.3 Photograph of the preform heating apparatus.

3. 結果及び考察

3.1 熱放射および熱伝導の数値解析

解析モデルの左端のヒーターで加熱したときの解析結果を Fig.4 に示す。ヒーターに近い部分の温度が高くなっていることがわかる。

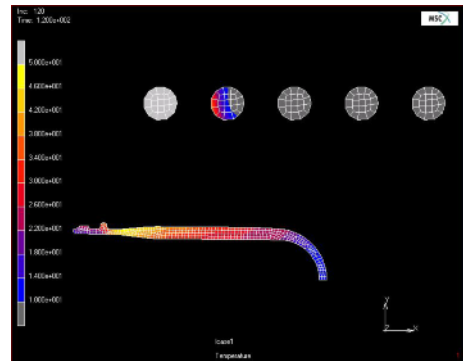
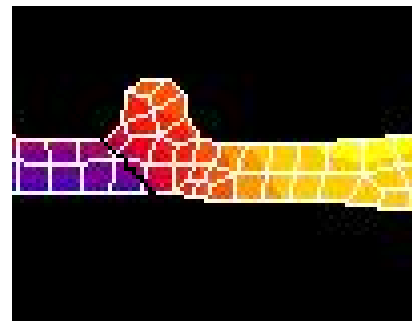
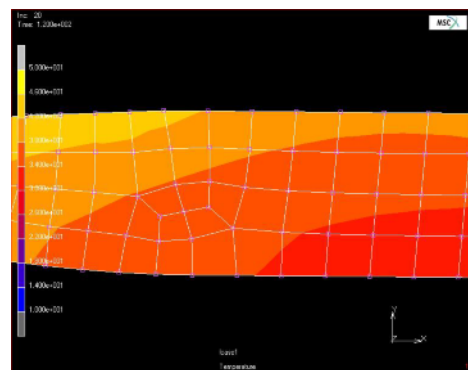


Fig.4 Temperature distribution by FEM analysis.

次に、Fig.4 の一部を拡大したものを Fig.5 に示す。Fig.5(a) はプリフォームの突起部（ボトルのフタが付く部分）、Fig.5(b)はプリフォームの断面を拡大したものである。

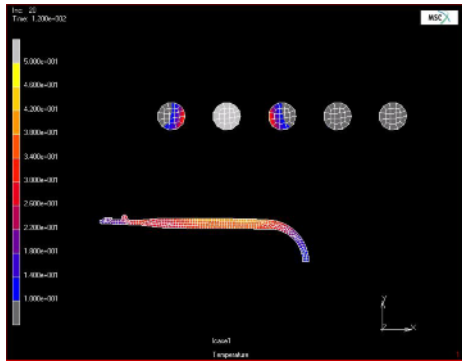


(a)

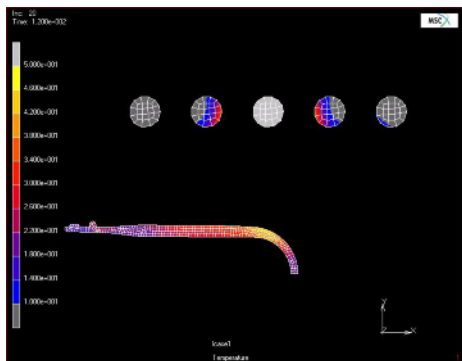


(b)

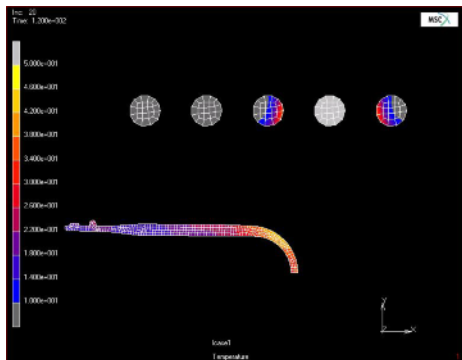
Fig.5 Magnification of FEM analysis result.



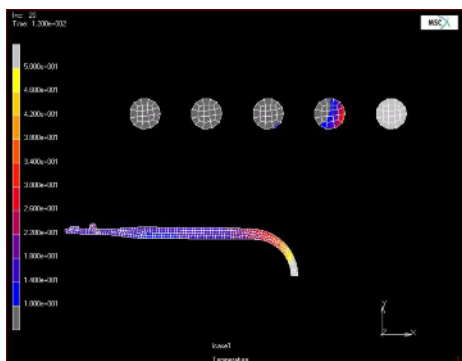
(a) Temperature distribution heated by the 2nd heater.



(b) Temperature distribution heated by the 3rd heater.



(a) Temperature distribution heated by the 4th heater.



(b) Temperature distribution heated by the 5th heater.

Fig.6 Temperature distribution by FEM analysis.

Fig.5(a)を見ると、ヒーターからの熱放射を正面から受けるエレメントの温度が高くなっており、ヒーターとエレメントとの位置関係を考慮した熱放射解析ができていると考えられる。Fig.5(b)を見ると、プリフォーム外側の温度が内側の温度より高く、温度勾配があることがわかる。熱放射を受ける外側から、内側へ向かう熱伝導が起きており、プリフォーム内部の熱伝導も解析できていると考えられる。次に、使用するヒーターを変えたときの温度分布の違いをFig.6に示す。使用するヒーターを変えるとそれぞれヒーターに近い部分の温度が高くなっており、熱源の位置の変化に対応した解析できていると考えられる。

### 3.2 プリフォーム加熱実験

左端のヒーターを使って加熱したときの、加熱直後のプリフォームの熱画像を Fig.7 に示す。数値解析の結果と同様に、ヒーターに近い部分の温度が高くなっており、ジグと接する部分はジグによる冷却で温度が低くなっていることがわかる。

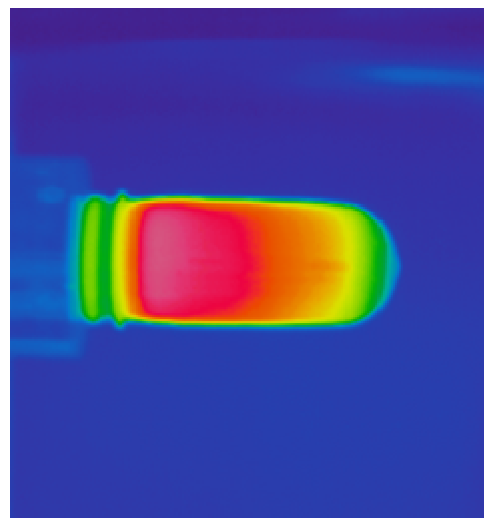


Fig.7 Temperature distribution by the experimental method.

### 3.3 数値解析結果と実測値の比較

3.1 および 3.2 の結果から必要な温度データを抽出し、数値解析結果と加熱実験結果を比較した。まず、数値解析結果のポストファイルから、各ノードの座標値と温度データを収集し、プリフォーム下端（解析モデルでは左端）からの高さによって整理した。さらに、熱画像から画像上の各座標の座標値と温度データを収集し、温度とプリフォーム下端からの距離の関係を調べた。両者を比較したものを Fig.8 に示す。

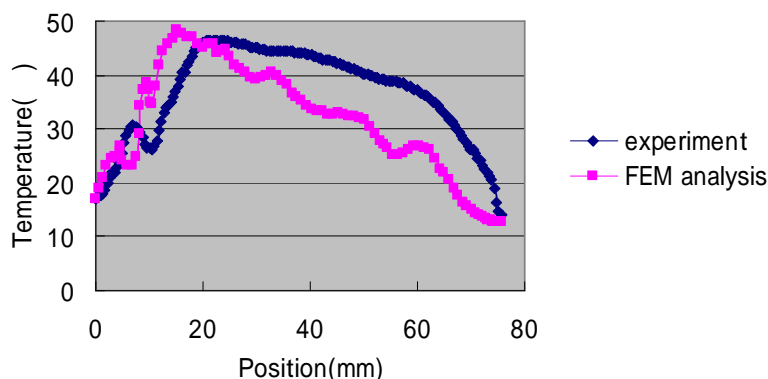


Fig.8 Comparison of the experiment and FEM analysis.

突起の形状による温度分布の特徴などは類似する部分が見られる一方で、温度分布には違いが見られる。この理由としては、数値解析で設定する解析条件の設定が不適切あるいは不足している可能性が考えられる。

今回の解析モデルでは、プリフォームと周辺空気との間の熱伝達については、周辺空気の温度は一定(30℃)として解析している。しかし、実際にはプリフォームのごく近傍の空気は、加熱されたプリフォームによって30℃よりも高い温度になっていることも考えられる。実測値が解析結果に比べて、プリフォーム上部の温度が高くなっている原因は、加熱されたプリフォーム近傍の空気の対流により熱が伝えられることが影響している可能性もある。

#### 4. 結言

ブロー成形のプリフォーム加熱工程を想定し、ハロゲンヒーターの放射熱によるプリフォームの加熱を有限要素解析によりシミュレーションし、プリフォームの温度分布を予測することを試みた。また、実際にプリフォームを加熱し、解析結果との比較を行った。主な結果は次のとおりである。

- (1) ヒーターからの熱放射、プリフォーム内部の熱伝導、周辺空気によるプリフォームの冷却などの要因を盛り込んだ有限要素解析を行うことができた。
- (2) 数値解析により定性的には妥当な結果が得られたが、解析結果と実測値との間には温度分布に違いが見られ、温度分布を予測するには至らなかった。解析時に設定した条件以外にも、プリフォームの温度分布に大きな影響を与える要因があると考えられる。

#### 5. 謝辞

本研究開発にあたっては、三笠産業株式会社の研究員のみなさまにご協力いただきました。また、プリフォーム加熱実験においては、株式会社フロンティアのみなさまのご協力をいただきました。ここでお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) J. P. ホールマン；伝熱工学、ブレイン図書出版(株) (1976)。
- 2) 一色尚次、北山直方；伝熱工学、森北出版(株) (1984)。