

平成7年度入学 大学院博士後期課程 物質生産工学専攻 材料物理工学講座

氏 名 谷藤 眞一郎 ( Shinichiro TANIFUJI )

論文題目 ブロー成形プロセスにおける粘弾性成形現象の数値解析的研究

英訳題目 Numerical study of viscoelastic phenomena in blow molding process

- **Abstract**

The Blow molding has become one of the most prominent polymer processing methods for the manufacture of hollow articles due to a number of technical and economical advantages concerning the low pressure characteristic of the process and the facility to produce complex shaped parts with very thin walls. In the field of blow molding, the needs of the extrusion blow molding and the injection blow molding are rapidly increasing. The extrusion blow molding can be divided into two sub-processes. Firstly, a molten polymer known as parison is extruded through an annular die (parison formation process), and subsequently blown into a cold mold to obtain the final product (parison inflation process). On the other hand, the injection blow molding process is a three step process: firstly, a molten polymer known as preform is produced by using the injection molding, then this preform is heated and transferred inside a mold. Finally, the preform is inflated with a stretch rod assist to produce the desired bottle shape. The quantitative understanding of the large deformation behavior of viscoelastic materials becomes a serious problem in these molding processes.

Now, in the injection molding fields, the usage of CAE (Computer Aided Engineering) system is recognized as a matter of course. CAE system has been becoming a necessary analysis tool to optimize the molding conditions and assist the rational mold design. On the other hand, in the blow molding field, for the reason of the difficulty of modeling for the

viscoelastic phenomena, CAE system has not been more popular than that in the injection molding fields. The present study has attempted to develop the numerical analysis techniques concerning the next two themes:

1. Viscoelastic numerical technique, which can be applied to analyze the competing phenomena of swell and drawdown under the condition of the parison controller in the extrusion blow molding process.
2. Efficient numerical technique in order to simulate the confined inflation behavior of a molten polymer in a mold cavity. Concerning theme 1, firstly, we have developed a simplified analysis method based on the assumptions that swell and drawdown contributions can be separately considered and simply added to predict an extrudate parison shape. The swell phenomenon was estimated by a steady state viscoelastic flow analysis using a streamline analysis method. The drawdown was modeled in terms of the uniaxial extension of a molten polymer. Secondary, a detail analysis method based on the Eulerian-Lagrangian formulation with automatic remeshing technique has been devised to solve the fluid conservative equation and the K-BKZ viscoelastic constitutive equation. With the detail analysis technique, the swell and drawdown were simultaneously quantified in the unsteady viscoelastic flow analysis. Through the numerical simulation using these analysis methods, the influence of the swell, the drawdown, molding conditions, and rheology

characteristic of a molten polymer on the extrudate parison shape has been investigated under practical conditions considering the parison controller.

Concerning theme 2, a three-dimensional FEM (Finite Element Method) has been developed based on the K-BKZ model. Three-dimensional computation is very elaborate, so it was assumed that the deformation could be modeled in terms of uniaxial or biaxial extension. The fluid mechanics approach, which is very stable for large deformation, was employed to solve governing equations. The viscoelastic FEM was applied to simulate the injection blowmolding and the extrusion blow molding process. The influence of molding conditions and rheological characteristic of a molten polymer on the deformation behavior during the confined inflation in a mold cavity has been investigated through numerical simulations. The integrated technique of detailed analysis and viscoelastic FEM enhanced the accuracy of the model prediction for the extrusion blow molding process.

### (和訳)

ブロー成形法は容器製造に適するプラスチック成形加工法の一つである。広範に普及している射出成形法と比較して低圧条件下において複雑形状の薄肉中空成形品の成形が可能であることより、ブロー成形法の技術的ならびに経済的メリットに対する期待が大きい。現在、ブロー成形分野においては、押出ブロー成形法と射出ブロー成形の需要が高まっている。押出ブロー成形法は、熔融樹脂を二重管より押出すことによりパリソンと呼ばれる成形中間体を形成するパリソン形成プロセスと、その後、パリソンを指定形状の金型内で拘束膨張させて製品を成形する型締・吹込プロセスの二つのサブプロセスから構成される。一方、射出ブロー成形では、予め射出成形法を利用して成形されたプリフォームと呼ばれる成形中間体を金型内で拘束膨張させて製品を成形する。これらの成形プロセスでは、粘弾性体の大変形挙動の定量化が工学的に重視されるテーマになっている。

今日、射出成形分野では CAE (Computer Aided Engineering) システムの利用が当然のことと認識され、実際、成形条件の最適化や金型設計を支援することを目的として CAE システムは必要不可欠な解析ツールとなっている。一方、ブロー成形分野においては、粘弾性成形現象の解析の難易度が高いことを理由に、CAE システムが射出成形分野ほど一般に普及していない状況である。

本研究の目的は、ブロー成形プロセスに関わる数値解析技術を進展させ、その成果を工学分野において有効利用される CAE システムの実用化に結実させることにある。既往数値解析技術の分析結果を踏まえ、研究の具体的な目的として、

- ① 押出ブロー成形において重視されるスウェルとドロウダウンの競合現象やパリソンコントローラがパリソン押出形状に及ぼす影響を解析するための粘弾性数値解析法の構築
- ② 金型内拘束膨張プロセスにおける熔融樹脂の大変形挙動を効率的にしかも安定に解析するための粘弾性数値解析法の構築という二つのテーマを掲げた。

テーマ①に関連して、まず、従来の解析法の計算アルゴリズムを踏襲した簡易解析法を構築した。この簡易解析法では、スウェルとドロウダウンを個別に解析し、各解析結果を重ね合わせてパリソン押出形状を予測した。スウェルとドロウダウンは、K-BKZ 粘弾性モデルを利用した定常ダイスウェルシミュレーションと過渡一軸伸長変形解析を通じて、それぞれ定量化した。次に、これらの競合現象を同時に評価する詳細解析法を構築した。この詳細解析法では、流体保存方程式と K-BKZ 粘弾性モデルを連成解析するために、Lagrangian-Eulerian 法と呼ばれる特殊な FEM (Finite Element Method) をベースに独自の改良 (自動リメッシング機能) を組み入れた計算アルゴリズムを採用した。各解析法を利用した数値シミュレーションを通じて、

スウェル・ドロワーダウン競合現象, 成形条件, 溶融樹脂のレオロジー特性などがパリソン押出形状に及ぼす影響についてパリソンコントローラの制御を考慮した実用的な条件下において検討した.

テーマ②については, K-BKZ 粘弾性モデルを利用した三次元粘弾性 FEM を構築した. 本解析法では, 計算負荷を低減させるために, 溶融樹脂の変形を一軸あるいは二軸伸長変形に理想化した. また, 大変形挙動を安定に解析するために, 流体力学に立脚した解析法を採用した. 本解析法を射出ブロー成形プロセスや押出ブロー成形プロセスの一貫シミュレーションに適用し, 成形条件, 溶融樹脂のレオロジー特性などが金型内拘束膨張時における成形素材の変形挙動に及ぼす影響を検討した. 押出ブロー成形プロセスのシミュレーションでは, 詳細解析法と粘弾性 FEM を併用した一貫解析技術が製品肉厚分布の予測精度を向上させる上で有効なことを明らかにした.