

液圧ブロー成形のための大変形流体構造接触連成手法に関する検討

2017 年 3 月 人間環境学専攻 47-156708 生野 達大
指導教員 橋本 学 講師

In computation of liquid supported stretch blow molding, it is important to solve Fluid-Structure-Contact Interaction (FSCI) problems of injected liquid and large deformable structures. As the first step, better contact algorithm for wide area contact is considered. As a result of computation, it is confirmed that the interior point method (IPM) with warm-start is better than conventional active set method (ASM) for liquid supported blow molding from the viewpoint of convergence of contact states. Secondly, we propose a new coupling approach based on the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method and the level set method to analyze large-deformation Fluid-Structure Interaction (FSI). The ALE mesh is used to track the liquid-solid interface. The gas-liquid interface is expressed as zero level set. Level set is reinitialized and volume of liquid is corrected at each time step. It is shown that re-initializing level set process should be more sophisticated.

Key words: FEM, Fluid-Structure-Contact Interaction, Two-phase Fluid, Level set, Arbitrary Lagrangian Eulerian, Interior Point Method

1 緒言

ブロー成形は、閉じた金型内に試験管状の被加工物を固定し、その中に空気を吹き込むことで、金型状の中空製品を得る加工法である。近年、吹込みに空気ではなく充填液体を使うことで工程を短縮する液圧ブロー成形が注目されている。液圧ブロー成形では、被加工物の大変形、被加工物と金型の接触、充填液体の自由表面流れを考慮する必要がある。最適成形条件を得るために多くの試行錯誤を要するため、上記現象を考慮した加工シミュレーションは重要である。一方で、液圧ブロー成形のシミュレーション手法は筆者が調査した限り Zimmer らの研究¹⁾以外に研究がなされていない。Zimmer らの研究では気液二相流やロゴなどの複雑形状が考慮されておらず、また流体構造連成手法について検討の余地がある。

以上の背景を踏まえ、本研究では液圧ブロー成形のシミュレーション手法を構築に向けて、二相流と大変形・広域にわたる接触を伴う構造の流体構造連成手法を提案する。また、提案する手法に含まれる要素技術について、それぞれ検討を行う。まず、接触アルゴリズムの検討を行う。有限要素メッシュ上で広域にわたる接触が起こる場合、従来の有効制約法に比べ、内点法接触アルゴリズム²⁾は収束性に優れることが確かめられている。しかし、内点法接触アルゴリズムは線形弾性の範囲でしかその有効性が検証されていない。そこで、ブロー成形を模した解析モデルを用いて、幾何学的非線形と材料非線形を伴う場合における内点法接触アルゴリズムの有効性を検証する。次に、気液二相流の計算手法を検討する。本研究では、気液界面の計算にレベルセット法³⁾を用いる。この手法に含まれる移流ソルバや非圧縮性 Newton 流体のソルバも含めて、種々のベンチマーク問題を解いて精度検証を行う。最後に、流体構造連成について検討する。本研究では、流体構造界面の表現に Laplace 方程式に基づくメッシュ制御法による Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 法を用いる。単相流の流体構造連成問題を解いて、解析が破綻しないかどうかを検討する。

2 接触アルゴリズム

有限要素構造解析における接触問題は、次式(2)の下で式(1)を最小化する非線形最適化問題に帰結する。

$$\underset{\mathbf{u}}{\text{minimize}} \quad \Phi_C^e \quad (1)$$

$$\text{subject to} \quad g_s \geq 0 \quad (s \in SL) \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{u} は変位、 Φ_C^e は離散化された系全体のポテンシャル、 SL は接触を考慮する節点の集合、 g_s は節点 s の貫通量である。従来の接触アルゴリズムでは、有効制約法と Lagrange 乗数法を組み合わせる式(1)、(2)を解く。即ち、接触状態を仮定して次式(3)を解く。

$$\underset{\mathbf{u}, r_s}{\text{minimize}} \quad \Phi_C^e - \sum_{s \in A} r_s g_s \quad (3)$$

ここで、 A は接触している節点の集合であり、 r_s は節点 s での接触反力である。式(3)の計算結果に基づいて解を更新し、接触状態の更新を行う。もし接触状態が変化しなければ、接触状態が収束したものとして計算を終了する。そうでない場合は、更新した接触状態の下で、接触状態が変化しなくなるまで繰り返し式(3)を解く。

他方、本研究で検証する warm-start 付内点法接触アルゴリズムでは、次式(4)を解く。

$$\underset{\mathbf{u}, r}{\text{minimize}} \quad \Phi_C^e + \sum_{s \in SL} c_s \xi_s - \sum_{s \in SL} \mu \log(g_s + \xi_s) - \mu \sum_{s \in SL} \log(b_s - g_s) - \mu \sum_{s \in SL} \log(\xi_s) \quad (4)$$

ここで、 μ 、 c_s 、 b_s 、 ξ_s は内点法に関するパラメータである。式(4)より得られる非線形方程式を Newton-Raphson (NR) 法で解く。NR 法の反復の中で、 μ を 0 へと減少させることで、式(1)、(2)で表される非線形最適化問題を解くことができる。

3 提案する一体型流体構造連成手法

本研究で提案する手法の流れを Fig. 1 に示す。構造同士の接触は内点法接触アルゴリズムで、流体構造界面は ALE 法で、気液界面はレベルセット法で計算する。流体と構造のメッシュを一致させ、流体速度場を Newmark- β 法により離散化し流体変位場に変換することで、流体構造一体型連成のための有限要素方程式が導かれる。この方程式は、構造の支配方程式が非線形になるため、NR 法で解

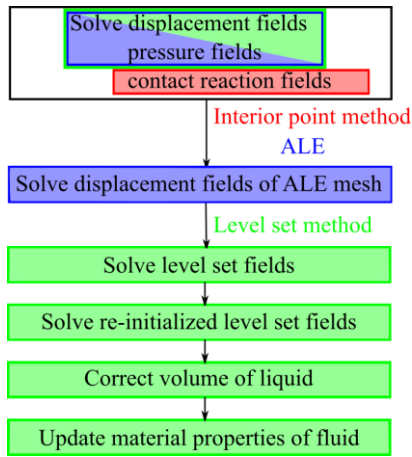


Fig. 1 Procedure of the proposed fluid-structure coupling method.

を求める。構造変位場、接触力場、流体速度場、圧力場の求解後、ALE メッシュ変位場を解く。ALE メッシュは Laplace 方程式に基づき制御する。その後、レベルセットの移流を解く。レベルセット関数の性質を維持するため、再初期化と体積補正を行い、最後にレベルセットに基づいて流体の材料物性値を更新する。

支配方程式の離散化手法として、構造と ALE メッシュの移動を表す Laplace 方程式については Bubnov-Galerkin 法を、非圧縮性 Newton 流体については Streamline Upwind Petrov-Galerkin / Pressure Stabilizing Petrov-Galerkin (SUPG/PSPG) 法を、レベルセットの移流と再初期化については SUPG 法を採用した。

提案した手法は、オープンソースの構造解析ソフトウェア FrontISTR⁴⁾ に実装した。FrontISTR はモジュール構造が適切に構造化されており、提案手法の並列化を容易に達成できる。

4 計算結果とその検討

4.1 PET ボトル成形を模したシミュレーション

提案する流体構造連成手法の構造ソルバ部分である内点法接触アルゴリズムの性能を検証する。有効制約法と内点法接触アルゴリズムの性能差を比較するため、ブロー成形による PET ボトル成形を模したシミュレーションを実施する。Fig. 2 に、本解析で使ったメッシュとその寸法を示す。金型の全節点で変位を拘束し、被加工物は上部の z 方向変位を拘束し、内側に 500 kPa の圧力を負荷する。この圧力を 50 回の荷重ステップに分割して非線形静解析を実施する。有効制約法における接触状態の探索回数は 50 回とし、50 回以内に接触状態が収束しない場合、接触状態の探索を打ち切り次の荷重ステップに進むものとする。

被加工物のモデルは材料非線形性を考慮して超弾性体とし、次式 (5) で与える。

$$W = c_1(\tilde{I}_1 - 3) + c_2(\tilde{I}_2 - 3)^2 + \frac{1}{d_1}(J - 1)^2 \quad (5)$$

ここで、 W は弾性ポテンシャル、 \tilde{I}_1 、 \tilde{I}_2 はそれぞれ右 Cauchy-Green 変形テンソルの低減 1 次・2 次不変量、 J は体積変化率である。 c_1 、 c_2 、 d_1 はパラメータで、それ

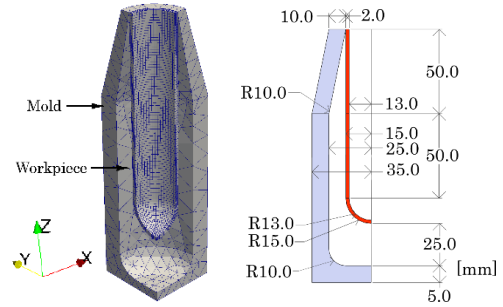


Fig. 2 Analysis meshes of the workpiece and mold

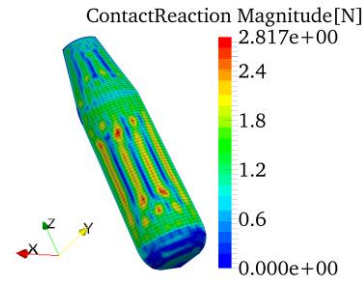


Fig. 3 Deformation diagram and contact reaction magnitude of the bottle by the interior point method

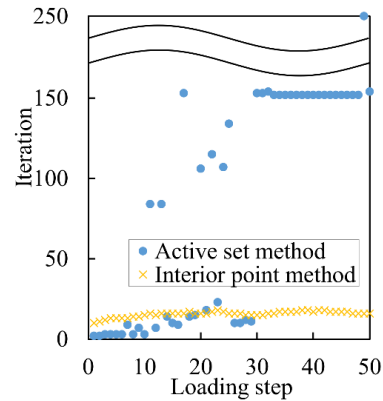


Fig. 4 Histories of iteration by the active set method (ASM) and the interior point method (IPM)

ぞれ 1.43 MPa, 0.222 Pa, $1.0 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$ とした。Fig. 3 に、内点法接触アルゴリズムで計算した被加工物の変形図に、接触反力のカラーコンター図を表示した図を示す。Fig. 3 より、ブロー成形を模したモデルで被加工物が金型の形に成形される工程を、内点法接触アルゴリズムで解析できることが確認できる。他方、有効制約法では、最終的な容器形状は内点法と同様に得られたものの、荷重ステップ 11 から接触状態の収束解が得られず、接触状態の探索が 50 回で打ち切られたことを確認している。

次に、Fig. 4 に荷重ステップごとの線形方程式ソルバの求解回数を比較した結果を示す。Fig. 4 より、荷重ステップが小さい場合、有効制約法の方が内点法接触アルゴリズムよりも早く収束することがわかる。一方で、荷重ステップ 11 より、有効制約法では接触状態が 50 回の探索で収束しなくなる。

各探索において NR 法により線形ソルバが複数回呼び出されるため、例えば 1 回の NR 法で平均約 3 回線形

ソルバの求解を要する荷重ステップ 35 では、線形ソルバの求解は約 150 回行われる。他方、内点法接触アルゴリズムは、有効制約法で接触状態が収束しない場合でも、約 16 回の求解で収束解が得られる。これにより、解析終了時までの求解回数は、有効制約法が 4,270 回なのに対し、内点法接触アルゴリズムは 785 回程度と少なくなる。

以上より、液圧ブロー成形の問題では、内点法接触アルゴリズムの方が接触状態の収束性という観点から有利であることが確認できる。

4.2 回転円錐

提案する流体構造連成手法の流体ソルバ部分の移流の計算に使用する SUPG 法の精度検証を行うため、Fig. 5 に示す回転円錐問題を逐次計算で解く。Fig. 6 に、円錐が一周した時点における移流量の分布を Fig. 7 に示す。鉛直方向中心線上における移流量の分布を理論解と比較した物をそれぞれ示す。これらの図より、物理量の移流を高精度に計算できることが確認できる。

4.3 キャビティ内強制対流

提案する流体構造連成手法の流体ソルバ部分である SUPG/PSPG 法の精度検証を行うため、Fig. 8 に示すキャビティ内強制対流問題を並列数 64 で解く。Fig. 9 に準定

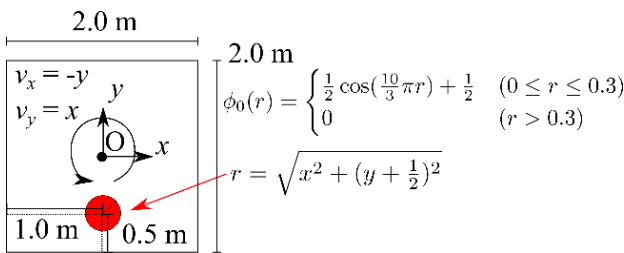


Fig. 5 Rotating cone problem

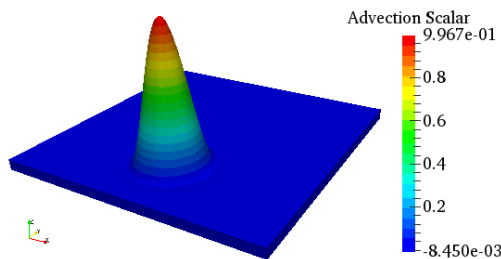


Fig. 6 Position of the rotating cone after one rotation

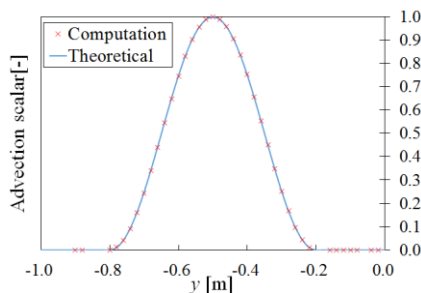


Fig. 7 Rotating cone distribution along a vertical center-line after rotation

常状態における速度分布を、Fig. 10 に有限差分法による Ku らの計算結果⁵⁾と比較した結果を示す。Fig. 10 に示すように、SUPG/PSPG 法による計算結果は Ku らの計算結果と十分に一致することが確認できる。

4.4 ダム崩壊

提案する流体構造連成手法の流体ソルバ部分の二相流の計算に使用するレベルセット法の精度検証を行うため、Fig. 11 に示すダム崩壊問題を並列数 16 で解いた。

Fig. 12 に、再初期化・体積補正がない場合の 0.2 s 経過時のレベルセット関数の分布を示す Fig. 12 に示すように、液柱が崩れる様子が解析できているが、液柱の右先端部について、レベルセット関数のカラーコンター図が均一でなくなっていることがわかる。これは、レベルセット関数の勾配が 1 でなくなったことを意味する。また、液柱右端にて液柱の分離が発生している。

再初期化、体積補正をかけた場合の計算結果を Fig. 13

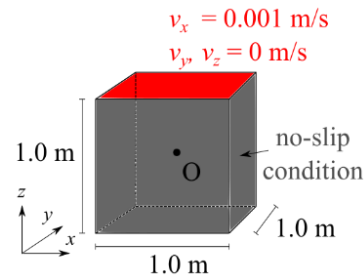


Fig. 8 Lid-driven cavity flow problem

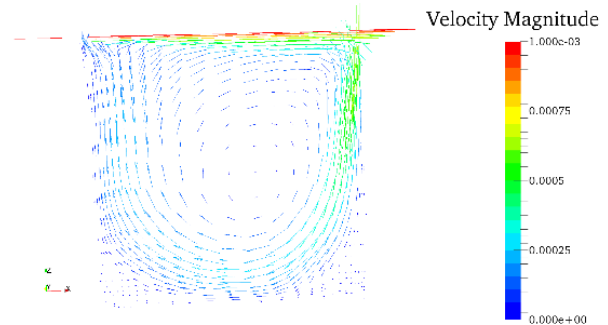


Fig. 9 Velocity distributions of cavity flow problem at steady state.

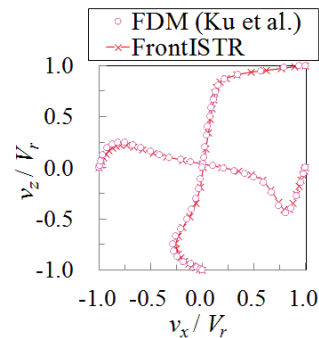


Fig. 10 Velocity distributions of cavity flow problem along vertical and horizontal center-lines at steady state: $V_r = 0.001$ m/s

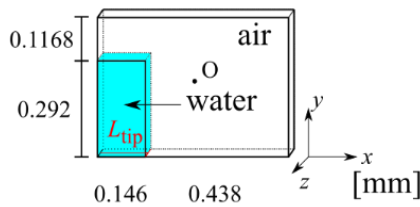
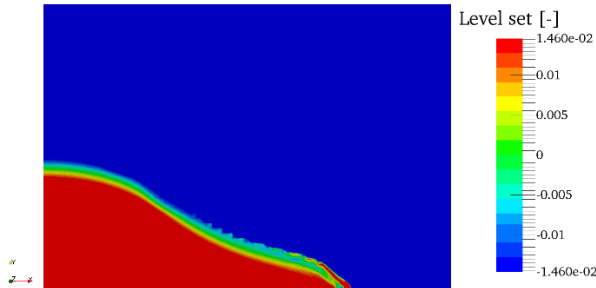
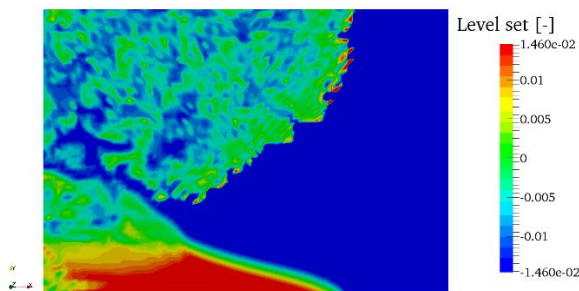


Fig. 11 Dam break problem

Fig. 12 Level set distributions without re-initializing and correcting volume at $t = 0.2$ s: the interface of water and air is described as greenFig. 13 Level set distributions with re-initializing and correcting volume at $t = 0.2$ s: the interface of water and air is described as green

に示す。この場合、液柱右端のレベルセット勾配の値は改善されているが、数値振動により物理的に異常な解が発生している。数値振動の原因として、未知変数の無理関数を含む支配方程式の過度な線形化や、安定化手法として SUPG 法が十分でなかった可能性が示唆される。

4.5 回転油槽

提案する流体構造連成手法の ALE 法の検証を行うため、Fig. 14 に示す回転油槽問題を解く。回転輸送問題は、構造の大変形を伴う流体構造連成問題である。本解析では、Laplace 方程式を用いた ALE メッシュの制御に焦点を当て、空気領域を油領域に変更して、単相流として計算を行う。Fig. 15 に、0.05 s、0.1 s 経過時のラバー板の変形図を示す。0.1 s において最大 1.61 cm の変形が生じても計算を続けることが可能であることがわかる。

5 結言

本論文では、液圧ブロー成形の数値シミュレーションに向けて、二相流と大変形・広域にわたる接触を伴う構造間

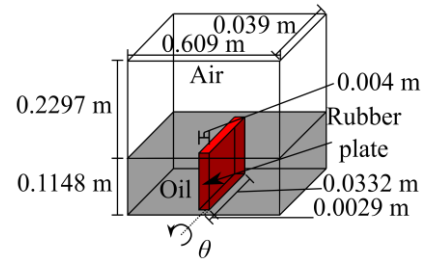


Fig. 14 Rotating oil tank problem

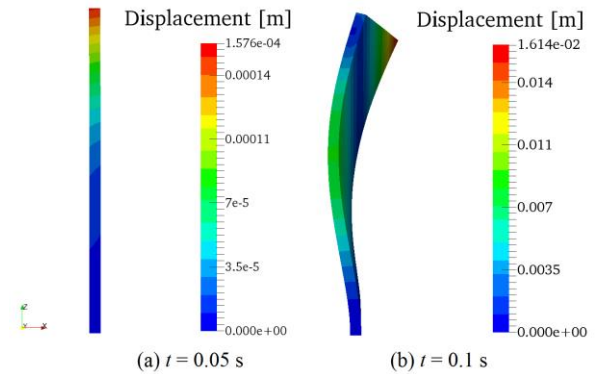


Fig. 15 Deformation and distribution of displacements in the rubber plate: deformation rate is 1.0

の連成手法を提案し、その構成技術である内点法接触アルゴリズム、気液二相流のためのレベルセット法、Laplace 方程式を用いたメッシュ制御法による ALE 法について検討した。まず、内点法による接触アルゴリズムは、大変形と広域にわたる接触を伴う問題についても、従来の有効制約法に比べ接触状態探索の収束性が優れていることが定量的に示された。次に、レベルセット法に含まれる非圧縮性 Newton 流体ソルバ、移流ソルバについては十分な精度が得られていることを定量的に確認し、レベルセット法によりダム崩壊問題で液柱が崩壊する様子を再現できることを定量的に確認した。一方で、レベルセットの再初期化ソルバでは、ダム崩壊問題において数値振動が発生した。また、Laplace 方程式を用いた ALE メッシュの制御法では、構造領域に大きな変形が生じた場合でも、計算が破綻することなく続くことを確認した。

今後は再初期化式の安定な数値解法について更なる検討を加えていく。また、提案した手法について、構成技術を全て考慮した場合の数値シミュレーションとその精度検証にも取り組んでいく。

文献

- 1) J. Zimmer, G. Chauvin, M. Stommel: Polym. Eng. Sci., 55 (4), 933-944 (2015).
- 2) 稲垣和久: 博士論文, 東京大学, (2016).
- 3) M. Sussman, P. Smereka, S. Osher: J. Comput. Phys., 114, 146-159 (1994.).
- 4) FrontISTR Forum: <http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR/>, 2017/1/16 Accessed.
- 5) H. C. Ku, R. S. Hirsh, T. D. Taylor: J. Comput. Phys., 70 (2), 439-462 (1987).