

圧縮性二流体モデルによる気泡崩壊の数値解析

Numerical Analysis of Bubble Collapse by Compressible Two-Fluid Model

湊 明彦, 日立・電開研, 日立市大みか町 7-2-1, E-mail: akihiko_minato@pis.hitachi.co.jp
 高森和英, 日立・電開研, 日立市大みか町 7-2-1, E-mail: kazuhide_takamori@pis.hitachi.co.jp
 永吉拓至, 日立・電開研, 日立市大みか町 7-2-1, E-mail: takuji_nagayoshi@pis.hitachi.co.jp
 Akihiko Minato, Hitachi Ltd., 7-2-1 Omika, Hitachi, Ibaraki 319-1221
 Kazuhide Takamori, Hitachi Ltd., 7-2-1 Omika, Hitachi, Ibaraki 319-1221
 Takuji Nagayoshi, Hitachi Ltd., 7-2-1 Omika, Hitachi, Ibaraki 319-1221

Study of highly compressible gas-liquid two-phase flow is important for structural integrity of industrial systems. Introduction of Riemann problem to two-fluid model is required for numerical analysis of highly compressible flow. Godunov method, one of the most reliable solution methods of compressible single-phase flow, is modified by replacing velocity and sound speed as mixture volumetric velocity and sound speed in two-phase flow. The calculated sound speed in two-dimensional uniform air-water two-phase flow agreed well with theoretical results. Prediction of spherical bubble pressure during collapse by relatively high pressure surrounding water agrees well with the solution of Rayleigh-Plesset equation. The method was applied to the analysis to examine effects of bubble shape and wall on transient bubble pressure.

気液二相流(以下、「二相流」と略称)は、密度が大きく圧縮性の小さい液体と、密度が小さく圧縮性の大きい気体が混在するので複雑な圧縮性流動を示す。このような圧縮性挙動は気泡を含む閉水路のウォーターハンマ及び流体機械のキャビテーションに大きく影響する。

単相流解析では圧縮性流体解析技術と非圧縮性流体解析技術は大きく異なり、圧縮性流体を対象とするときはRiemann問題とよばれる圧力の不連続と速度の不連続の関係を充たす輸送計算に重点がある。単相流と同様に二相流の場合も音速より十分早い流動を扱うときはRiemann問題を考慮する必要がある。現在最も実績がありかつ機能の高い二相流の数学モデルは二流体モデルである。代表的な圧縮性単相流解析手法であるGodunov法を、非スタガード有限体積法による二流体モデル解析プログラムに適用した。

Godunov法を二流体モデル解析に適用する場合、二流体モデルにおいて定義される複数の速度や音速のいずれをRiemann問題に用いるのが妥当であるか明確ではない。圧力の不連続は速度の不連続による流体の衝突に起因すると考えると、二相流を代表する速度として体積速度を用いるのが妥当である。また気液が混合した体積速度と対応した音速として二相媒質の音速を用いる必要がある。

低圧の球形気泡の崩壊を解析する。流路は半径5mm高さ10mmの円筒とし、側面と底面は固体壁、上面は0.1MPaの圧力境界である。円筒には20°C、0.1MPaの水が満たされ、対称軸上の底面から5mmの位置に半径1mmの球形の気泡があり、気泡の圧力は0.01MPaである。流路を50×100の軸対称2次元有限体積に等分割する。タイムステップはCFL条件の制約を満たす 10^{-4} sと設定した。

ポイド率分布の過渡変化の解析結果をFig.1に示す。数値計算は対称軸の片側のみ実施したが、理解しやすいよう対称の領域も反転して示した。気泡領域はピーク圧力を示す 10^{-4} sにおいて最も顕著に圧縮され、その後は反跳して膨張する。気泡中心高さにおける圧力分布をFig.2にしめす。気泡中央部は周囲と比較して著しい圧力振動が見られる。

気泡中心位置の圧力変化の解析結果とRayleigh-Plesset方程式のRunge-Kutta法による数値解の比較をFig.3に示す。二流体モデルによる計算結果はピーク圧力とバルス幅がやや大きいが、ピーク圧力の発生時間(1.02×10^{-4} s)がよく一致し、本解析手法は圧縮性二相流及び気泡力学の基本的な流動現象に適用できることが分かった。

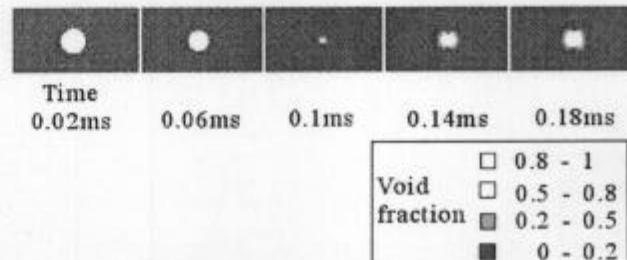


Fig.1 Calculated transient void fraction distribution near bubble

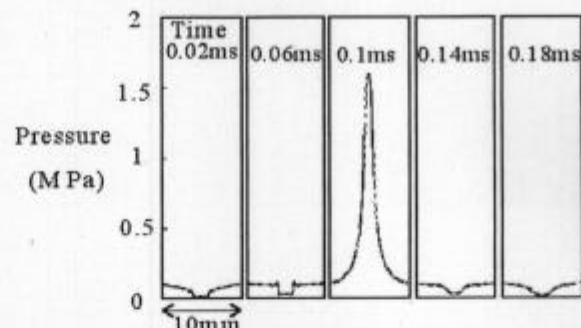


Fig.2 Calculated pressure profile on the elevation of bubble center

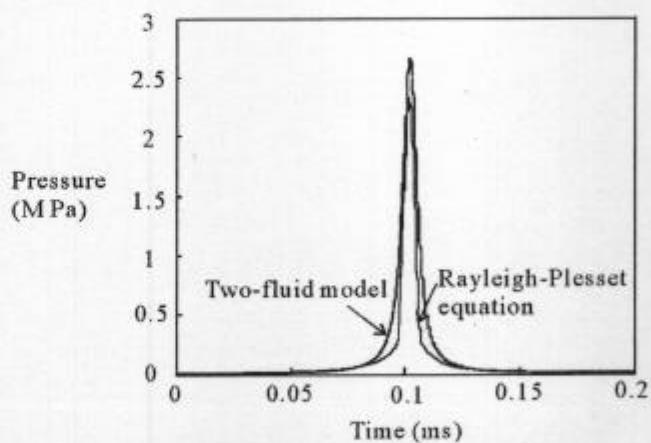


Fig.3 Calculated bubble pressure and result of Rayleigh-Plesset equation