

気液二相流の水撃

湊 明彦*

Fluid Hammer of Gas-Liquid Two-Phase Flow

Akihiko Minato*

気液二相流の水撃現象はボイド率の違いから場所によって密度と音速が不連続に異なるため数値解析が困難なことが多い。本稿では圧縮性単相流の理論から圧縮性二相流の理論への拡張と弁急閉および蒸気凝縮による水撃に応用した解析例を紹介する。

Key word: 管路系、気液二相流、水撃、ボイド率、音速

1. はじめに

気液二相流はボイド率によって密度や音速が異なり、水撃現象は複雑になる。特に単相と二相が共存した配管系では密度と音速の不連続を扱う必要がある。一般の水撃理論では気液二相流は扱われておらず[1]、二相流研究の分野でも個別現象の分析が中心であり標準的な評価技術は確立していない[2]。ここでは圧縮性二流体モデルによる圧力波計算法の概要を説明し、代表的な二相流の水撃現象である弁急閉および蒸気スラグ凝縮による水撃実験の解析例を紹介する。

2. 気液二相流の圧縮性解析技術

まず単相流の水撃の理論から二相流へ拡張する方法を説明する。単相流の質量と運動量の保存則は次のように表わされる。簡単のため流路面積が一樣な直管を想定した1次元であり、外力は無視できるものとした。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

ここで ρ は密度, u は速度, P は圧力, t は時間, z は距離である。これらを変形して次の式を得る。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial t} \right) + (u \pm c) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

ここで音速は c であり、式の変形には $d\rho = c^2 dP$ の関係を用いた。式(3)は式(1)(2)と等価である。この式は $u \pm c$ の2つの方向への伝播を表わしており、伝播現象であることを強調するため次のように書きなおすことができる。

$$\frac{\partial F_+}{\partial t} + (u + c) \frac{\partial F_+}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial F_-}{\partial t} + (u - c) \frac{\partial F_-}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

伝播する量は $F_{\pm} = u \pm \frac{1}{\rho c} P$ であり Riemann 不変

量と言う。伝播経路を特性曲線という。

異なる2点から伝播する特性曲線が交わる点で、式(4)と(5)は流速と圧力に関する連立方程式を与え、次の解が得られる。

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2} + \frac{1}{2} \frac{(P_1 - P_2)}{\rho c} \quad (6)$$

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} + \frac{\rho c}{2} (u_1 - u_2) \quad (7)$$

添字の1と2は特性曲線の出発点を表わす。これをそれぞれ隣接する計算セルとすると、式(6),(7)の解はタイムステップ $\Delta t = \Delta z / 2c$ 後の計算セル境界の速度と圧力である。セル間ではこの速度による質量輸送があり、セル内の流体は両側境界で与

*アドバンスソフト株式会社 総合企画部

General Planning Division, AdvanceSoft Corporation

える圧力の差によって駆動される。この想定に従って質量保存則と運動量保存則を時間積分する方法は Godunov 法として知られている[3]。理論的に Δt は音速と計算セル幅から決定されるが、実際の数値計算での設定は許容幅があり、やや小さい目にした方が安定した解が得られる。

気液二相流の現在もっとも進化したモデルとされる二流体モデルに上記の圧縮性単相流の Godunov 法を拡張する。二流体モデルは気液速度が異なるので、単純に伝播する量を増やす拡張では特性曲線は煩雑になりプログラミングは容易ではない。計算を簡単にするため、ただ1つの二相流の代表速度として次式で提議する体積速度 j を用いることにする。

$$j = \alpha u_g + (1 - \alpha) u_l \quad (8)$$

添字の g, l は気体と液体を示す。式(6)(7)を二相流に拡張して次式を得る。

$$j = \frac{j_1 + j_2}{2} + \frac{1}{2} \frac{(P_1 - P_2)}{\rho_{2\phi} c_{2\phi}} \quad (9)$$

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} + \frac{\rho_{2\phi} c_{2\phi}}{2} (j_1 - j_2) \quad (10)$$

添字の 2ϕ は二相混合流体を示す。この関係は異なる気液速度をただ変数 j だけで代表させ、自由度を減じているので理論的に厳密さを欠くが、実験解析による検証から必要な信頼性が得られることを確認した[4]。

3. 弁急閉による二相流の水撃

赤川らは二相流と単相流が共存した配管の弁急閉による水撃の実験を行った。図1のように加圧タンクから直径20mm、長さ約20mの亚克力配管に水を流入させ、途中から空気を流入させるノズルがあり、その上流は単相流、下流は二相流となる。出口の弁を急閉したあとの管内圧力挙動が測定されている。

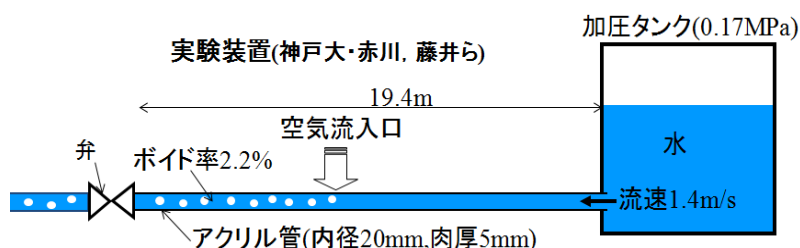


図1 弁急閉による二相流水撃実験の初期条件

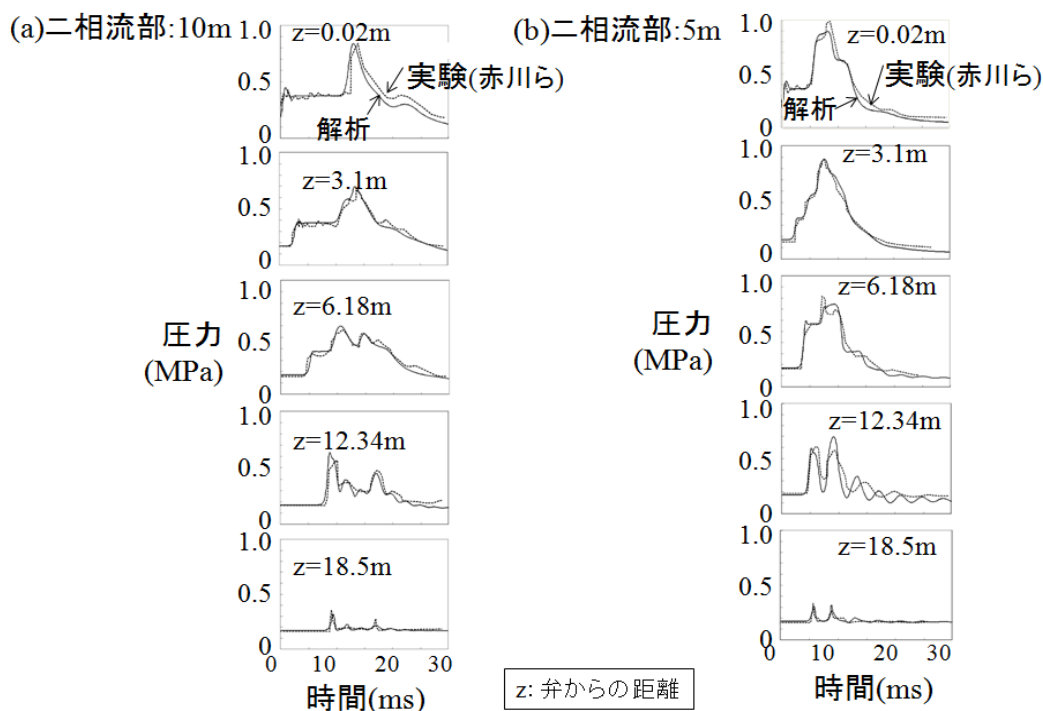


図2 弁急閉による二相流水撃解析結果[4]

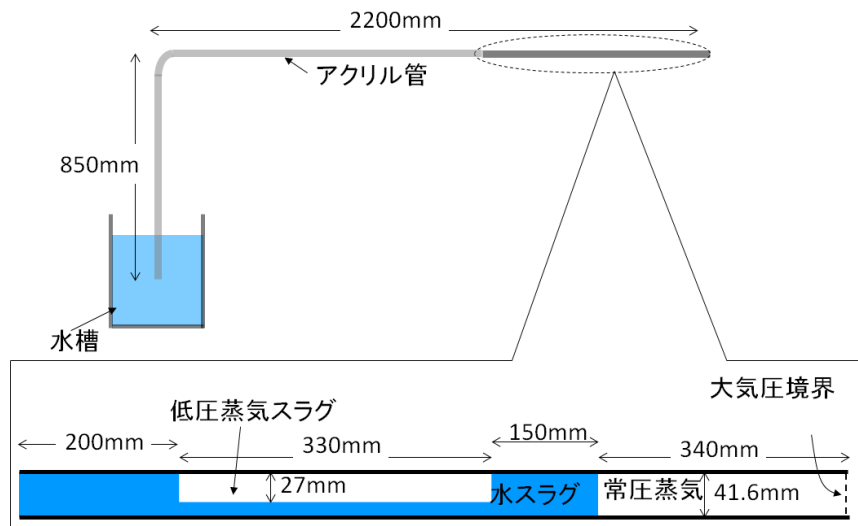


図3 蒸気凝縮起因水撃実験の初期条件

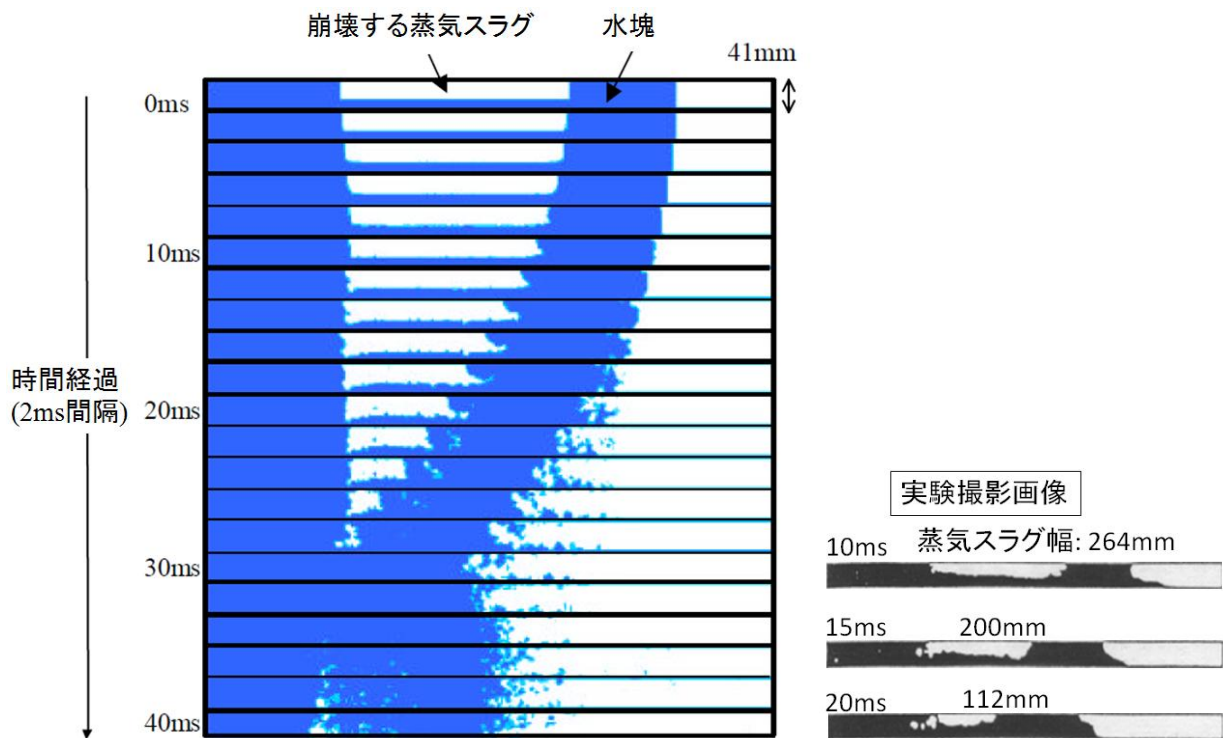


図4 蒸気スラグ崩壊の過渡解析結果[5]

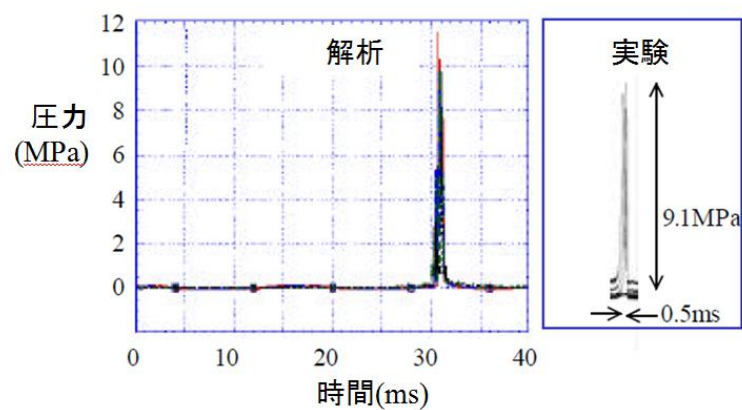


図5 圧力パルスの解析結果と実験データの比較[5]

図2(a)(b)に2ケースの解析結果と実験結果との比較を示す。それぞれ二相流部分が10mと5mのケースである。二相流と单相流の接続部は、圧力波は一部反射し残りは透過するが、二相流側からみれば閉止端に近く单相流側からみれば開放端に近い二面性を持っている。タンクにつながる境界は圧力一定の開放端である。弁が閉じる時間は数十秒を要したが、解析では完全閉塞時に瞬時閉止したと仮定した。

弁急閉により二相流が閉じた弁体と衝突して圧力が上昇する。圧力波は管内の音速の異なる領域で透過と反射を繰り返し、圧力波形は複雑であるが実験結果と解析結果はよく一致している。

4. 蒸気凝縮による水撃

サブクール水中に閉じ込められた蒸気スラグは凝縮して崩壊し、両側から侵入した水は中央で衝突して水撃を生じる。この蒸気凝縮水撃による衝撃荷重が構造物を破損することがある。次のような場合に発生する可能性があると考えられる。

- (1)原子炉事故時に蒸気で満たされた配管への冷却水注水
- (2)原子炉反応度事故によるサブクール水プールの部分的な急加熱
- (3)パイプラインの弁急閉やポンプトリップによるキャビテーション
- (4)水中放電による急速な気泡成長

綾らは原子力安全性評価の目的で上記(1)を想定した実験を実施した。図3に示すような蒸気を満たした内径41.6mmの亚克力管にサブクール水を急注入し約330mmの蒸気スラグを発生させることができた。計算では蒸気スラグ内の蒸気は周囲のサブクール水に接して瞬時に凝縮し、計算可能な低圧の限界である200Paまで減圧していると仮定した。解析領域は試験体系より短くとり、蒸気スラグから左側に続く水塊を200mmのみ考慮しそこで閉止端とした。

低圧の蒸気スラグに接続する水塊の一方は大気圧雰囲気にあるので、圧力差により水塊は加速される。管内縦断面のボイド率分布の解析結果と蒸気スラグ形成後10,15,20msの実験装置で得た

写真を図4に比較した。計算結果は実験の画像とよく対応している。

0.1m 間隔で5個設置された圧力計による管内過渡圧力の実験結果と解析結果を図5に示す。短時間のパルスなので圧力グラフはほとんど重なって見える。圧力の立ち上がりは解析ではほぼ瞬時であるが、実験結果はやや緩やかである。データ収録の記憶容量が不足し、実験データは5msしか採取されていない。

330mmの蒸気スラグが約30msで崩壊しているので、衝突するまでの平均速度は約11m/sである。配管弾性を考慮した水中音速は1250m/sと実測されているので、水密度1000kg/m³として最大衝撃圧は約14MPa($=11 \times 1250 \times 1000$)に達する可能性がある。解析ではピーク圧力は約11MPa、実験では約9MPaであった。これは界面が乱れて衝突時間が場所により分散されたことが原因であると考えられる。

5. おわりに

二相流水撃の定性的な解析評価が可能になったが、圧縮性が顕著な気液二相流の数値解析は安定性と精度の点でまだ多くの課題が残されている。今後の研究開発と手法の標準化が期待される。

参考文献

- [1] たとえばパーマキン著、小堀・横山訳、水撃解析法、コロナ社(1969)
- [2] 藤井、他2名、気液二相流の動的配管計画、日本工業新聞社(1999)
- [3] 山口、他1名、数値解析の基礎、共立出版(1969)
- [4] 湊、圧縮性二流体モデルによる気液二相流の数値解析、機械学会論文集B編68-673, pp.2489-2495(2004)
- [5] Minato, A., et al., Numerical Analysis of Water Hammer Induced by Injection of Subcooled Water into Steam Flow in a Horizontal Pipe, NUTHOS6, Nara(2004)

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社ホームページのシミュレーション図書館から、【カラー版】がダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンスシミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)