

VOF 法を用いた気泡振動の数値シミュレーション Numerical Simulation of Bubble Oscillations using Volume of Fluid Method

清水泉介, 東北大学流体研, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1, E-mail: shimizu@ifs.tohoku.ac.jp
 寺坂晴夫, 東北大学流体研, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1, E-mail: terasaka@ifs.tohoku.ac.jp
 Sensuke SHIMIZU, Institute of Fluid Science, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Sendai 980-8577, Japan
 Haruo TERASAKA, Institute of Fluid Science, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Sendai 980-8577, Japan

This paper describes a numerical analysis of bubble oscillations using the volume of fluid (VOF) method. This phenomenon occurs when high-pressure gas is injected into a water pool through a submerged pipe and causes large pressure oscillation which may affect the integrity of the pool. To understand this phenomenon, various parameters effect on floor pressure history is studied.

1. 緒言

配管を通じて高圧ガスを水中に吹き込む場合、ガスが配管内に存在する水を排除する間に圧縮され、その後ガスは水中で過膨張し、さらに水中で気泡となり膨張、収縮を繰り返す。このとき容器内に圧力場の振動が伝わり、水槽内構造物に様々な荷重を与える。

この現象は沸騰水型原子炉 (Boiling Water Reactor) における主蒸気逃し安全弁作動時に、圧力抑制プールでおこる現象であり、容器の健全性評価のため多くの実験⁽³⁾、数値シミュレーション⁽⁴⁾等が行われている。

筆者らは気泡振動現象についての研究を行ってきた^{(1),(2)}。前回⁽¹⁾の研究では気泡振動現象に対して自由液面流れの計算手法の 1 つである VOF (Volume Of Fluid) 法を用いて、Anderson⁽³⁾らの実験結果と比較し、この現象において VOF 法を適用することの妥当性を示すことができた。また気液界面に LEVEL-SET 法を用いた気液相数値シミュレーションにより、VOF 法では得られない配管内気体の振る舞いを定性的に得ることができた⁽²⁾。そこで本研究では前回の研究結果を受けて、配管出口深さ、配管出口抵抗等を支配因子としたときの、水槽底の圧力変化の依存性を評価した。

2. 支配因子の導出

Anderson らは図 1 の体系図から、次のような気泡内圧力におけるスケールリング則を導いた。

最初に以下の仮定をしている。

1. 配管 (ダウンカマ) 内の圧力減少は主にオリフィスで起こる。
2. 領域を 3 つに分け、ダウンカマ内部気相、密封容器 (ウェットウェル) 気相は非凝縮、理想気体とし、ウェットウェル液相は非圧縮、非粘性流体とする。
3. 気液相間、また気相と構造物の熱移送は無視する。
4. 表面張力は無視する。

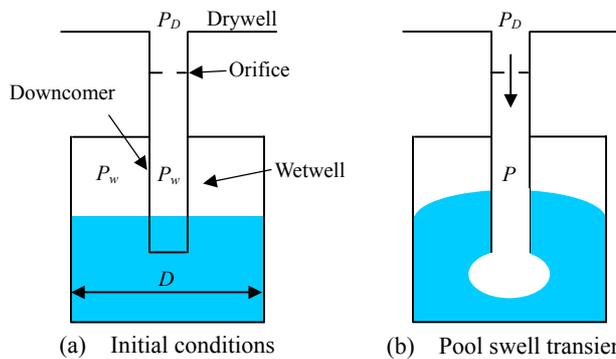


Fig.1 Modeling of pool swell for scaling laws

これらの仮定のもとに、気泡内圧力 P は以下の関数で示される。

$$P = P(P_w, \rho, g, D, \gamma, h_D G, t) \quad (1)$$

ここで P_w, γ はウェットウェル初期圧力、比熱比であり、 h_D, G はそれぞれドライウェルでのエンタルピ、オリフィスを流れる質量流量密度である。また ρ, g, D, t はそれぞれ液相密度、重力加速度、プ - ル直径及び時刻である。次元解析より、式 (1) を

$$\frac{P - P_w}{P_w} = f\left(\frac{P_w}{\rho g D}, \gamma, \frac{h_D G}{\rho g^{3/2} D^{3/2}}, t(g/D)^{1/2}\right) \quad (2)$$

と変形する。さらにオリフィス前後を流れる気体に次式を適用する。

$$P_D - P = C_{d,o} \rho_D u_o^2 / 2 \quad (3)$$

ここで P_D, ρ_D はドライウェルの圧力、密度で、 $u_o, C_{d,o}$ はオリフィスでの流速及び抵抗係数である。式 (3) を用いて式 (2) の右辺第 3 番目の変数を変形すると、

$$\begin{aligned} & h_D G / (\rho g^{3/2} D^{3/2}) \\ &= \sqrt{2} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_D}{P_w} \frac{P_w}{\rho g D} \left[1 - \frac{P_w}{P_D} - \frac{P_w}{P_D} \left(\frac{P - P_w}{P_w} \right) \right]^{1/2} C_m \left(\frac{RT_D}{gD} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここでドライウェルでの状態方程式を用いている。また $C_m (= 1/C_{d,o}^2)$ は質量流量係数である。従って気泡内圧力 P の支配因子は

$$\pi_1 = \gamma, \quad \pi_2 = \frac{P_w}{\rho g D}, \quad \pi_3 = \frac{P_D}{P_w}, \quad \pi_4 = C_m \left(\frac{RT_D}{gD} \right)^{1/2} \quad (5)$$

の 4 つとなる。

以上が Anderson らが提案した支配因子であり、これらの因子を実機モデルと、スモールサイズの実験で一致させれば、無次元時刻において無次元圧力が一致する。

しかし実機モデルと比較した場合、この支配因子以外に、気泡内圧力に影響を及ぼすものとして新たに 2 つ考えられる。一つは流体の慣性 L/A (A はダウンカマ断面積) であり、もう一つがダウンカマ出口抵抗 C_d である。ダウンカマ出口が深くなると、排除する水が多くなるため、気泡振動に影響を及ぼすと考えられる。また BWR などの実機モデルには、蒸気排出口にクエンチャと呼ばれる装置がある。これは圧力変

動がプ - ル内構造物に大きな荷重を与えることを軽減させるために設置している。従ってダウンカマ出口の流動抵抗も支配因子として採用しなければならない。

3. 数値解析法

数値解析法として、自由液面解析の代表的な手法であるVOF法を用いた。VOF法では液相領域のみを流体計算として扱い、気相領域は計算しない。本研究では前回⁽¹⁾と同様にオリフィス以下のダウンカマ気相領域を、エネルギー - 保存式を用いたモデルを採用した。これを圧力の式で表すと

$$\frac{dP}{dt} = -\gamma \frac{P}{V} \frac{dV}{dt} + (\gamma - 1) \frac{hGA}{V} \quad (6)$$

$$\text{ただし } G = C_m \rho_D [2(P_D - P) / \rho_D]^{1/2}$$

である。スケ - リング則を導く際に用いた仮定をここでも用いている。オリフィス抵抗を考慮し、ドライウェル圧力 P_D と気泡内圧力 P の圧力差から流速を決定する。

4. 計算体系

図2に標準体系図を示す。本研究では2次元円筒座標系を用いた。プ - ル直径を $D(=0.05\text{m})$ とした。気相初期圧力はそれぞれ $P_D(=33900\text{Pa})$, $P_W(=11300\text{Pa})$, 比熱比は $(=1.4)$ とした。このときの各 の値は

$$\pi_1 = 1.4, \quad \pi_2 = 4.15, \quad \pi_3 = 3.0$$

である。

また液相の初期圧力は静水圧分布とした。メッシュ数は $r \times z = 28 \times 28$ である。

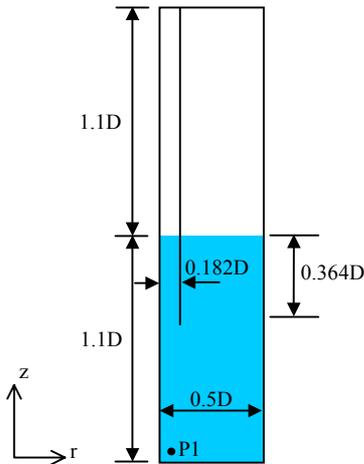


Fig.2 Computational model

5. 計算結果

はじめに位置 P1 における圧力変動の、 π_4 の依存性を図3に示す。図の左から $\pi_4=33.0, 17.0, 1.0$ である。 π_4 はその定義からドライウェルからダウンカマを通じて流れ込むエネルギー - の影響を表すものである。本計算では D などのパラメータを固定していることから、オリフィスの質量流量係数と比例関係にある。

図3を見ると、 $\pi_4=33.0$ では40msで圧力ピーク値18kPaに達し、その後約85msまで減少する。その後再び上昇に転じ、約140msでダウンカマから解放された気泡がウェットウェル気相部に到達する。 $\pi_4=17.0$ の場合、 $\pi_4=33.0$ の場合と比較してピークが減少し、その後緩やかに上昇して約200msで気相部に到達する。 $\pi_4=33.0, 17.0$ の場合、気泡はダウンカマを出て、解放された後は振動することなく成長している。

オリフィスから流れ出る流量が大きいため、ダウンカマから解放された気泡は、一気に過膨張して上部気相へ到達している。次に $\pi_4=1.0$ の場合、最初のピークはその他と比較して大幅に減少し、85msで圧力ピーク値3.5kPaをとる。その後120msでボトム値-1.5kPaをとり、170msで再び3.3kPaのピーク値をとる。このケースでは気泡がダウンカマから解放された後、過膨張し、その後収縮している。

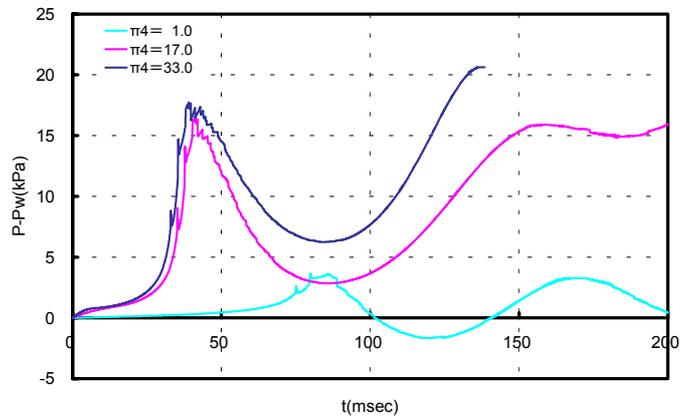


Fig.3 Pressure histories of P1 versus π_4

そこで以後、これら2つの異なる過程について、支配因子の影響を評価する。すなわち

- $\pi_4=33.0$
気泡がダウンカマから解放された後、収縮することなくウェットウェル気相部に到達する場合。
- $\pi_4=1.0$
気泡がダウンカマから解放された後、収縮を起こす場合。これらの場合についてダウンカマ出口抵抗 C_d 、出口深さ L の影響を調べた。

a. $\pi_4=33.0$ の場合

位置 P1 における圧力変動の、ダウンカマ出口抵抗 C_d の依存性を図4に示す。図の左から順に $C_d=0.0, 10.0, 20.0$ の場合を示した。 $C_d=10.0$ では、位置 P1 の圧力ピーク値は70msのとき16kPaとなり、抵抗なしの場合と比べて若干低くなる。一方 $C_d=20.0$ では、圧力ピーク値は10.0のときとほぼ変わらず、ピークとなる時刻が90msとなる。抵抗によってダウンカマ外に放出される液相流量が抑えられ、ピークが生じる時刻が遅れる。また気泡が一部分離したときに生じる不連続な変化が、出口抵抗が存在する場合に生じている。

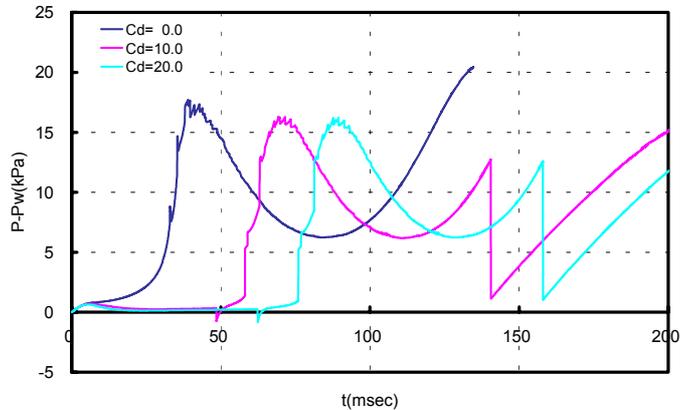


Fig.4 Pressure histories of P1 versus C_d ($\pi_4=33.0$)

次に位置 P1 における圧力変動の、ダウンカマ出口深さ L の依存性を図5に示す。標準深さからダウンカマを更に

+0.44D, +0.87D, +1.31D 深くとった。ピ - クを取る時刻は順に 40ms, 73ms, 109ms 及び 147ms で、深くなるほどピーク値をとる時刻が遅くなる。この理由は、ダウンカマ出口が深い場合ドライウェルからの十分なエネルギー - 流入が必要で、解放されるまで時間が掛かるためである。また+1.31D の場合、147ms で気泡が出口から解放された後、そのままプ - ル水面に到達せず 262ms で 2 度目の圧力ピークが現れている。この時刻以後、気泡が収縮をはじめている。

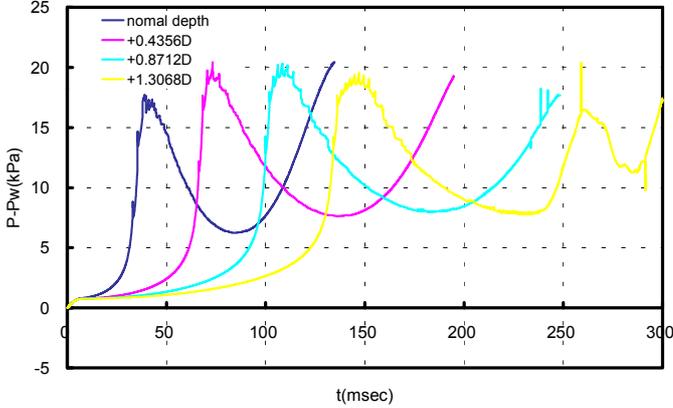


Fig.5 Pressure histories of P1 versus L($\alpha=33.0$)

b. $\alpha=1.0$ の場合

気泡がダウンカマから解放された後振動を起こす場合の、位置 P1 における圧力変動の出口抵抗 C_d の依存性を図 6 に示す。この場合時刻 125ms, 147ms で圧力ピーク値 5.3kPa, 6.4kPa をとる。a の場合と異なり、抵抗値の増大と共に、ピーク値も増大する。初期ピーク発生時から、第 2 ピーク発生までの時間は、約 85ms とほぼ一致している。 $\alpha=1.0$ の場合、ダウンカマ出口付近で流体が行き来するため、 C_d は、その値が大きいくほど圧力振動の振幅を増大させる。

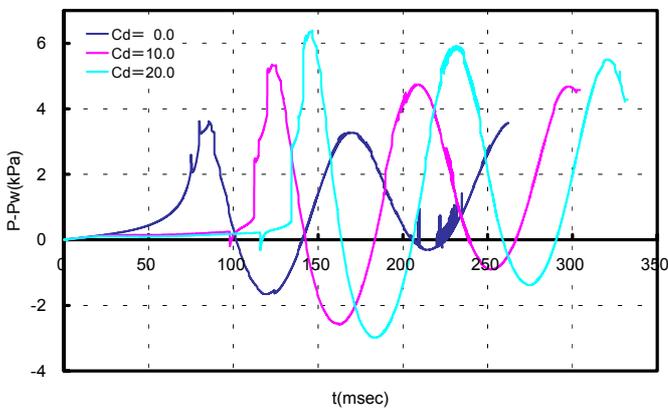


Fig.6 Pressure histories of P1 versus C_d ($\alpha=1.0$)

最後に位置 P1 における圧力変動の、出口深さ L の依存性を図 7 に示す。図 7-1 の左から順に標準深さ ,+0.44D,+0.58D, また図 7-2 の左から+0.73D,+0.87D, +1.02 D である。まず初期の圧力ピ - クを各ヶ - スごとに見ていくと、時刻を遅らせながら、+0.58D から徐々に減少している。これはダウンカマ出口付近に気相が到達する時刻に、気相圧力がドライウェル圧力 P_D に近づき、オリフィスからの流出が減少したためと考えられる。また+0.58D 以上出口が深くなると、第 2 ピーク値が初期ピ - ク値を上回る。+0.58D, +0.73D を例にとると、初期圧力がそれぞれ 4.0, 3.4kPa に対して、第 2 ピークがそれぞれ 4.8, 10kPa となる。気泡の出口解放時の圧力が、過膨張時の圧力を上回るとは、支配因子を L としたときに現れる

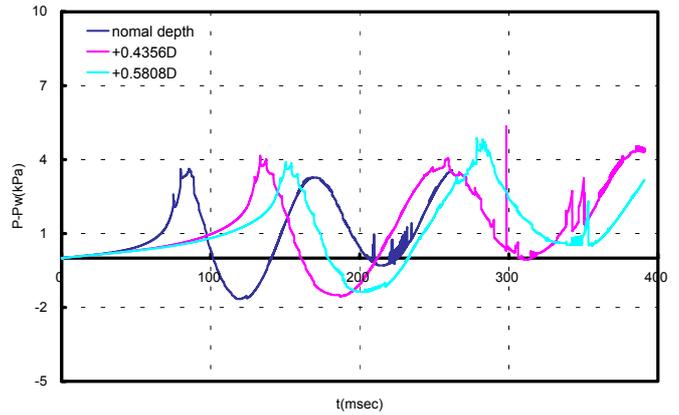


Fig.7-1 Pressure histories of P1 versus L($\alpha=1.0$)

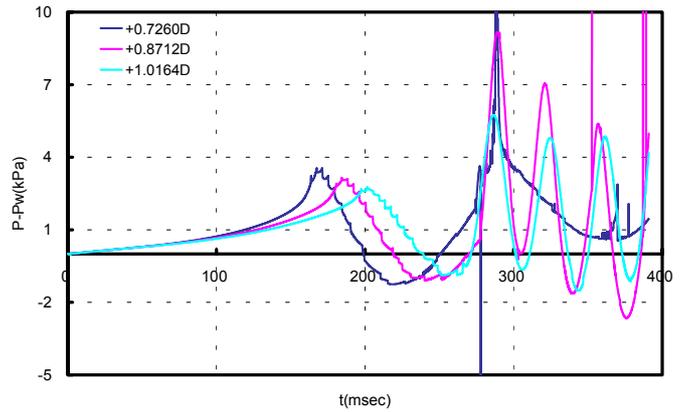


Fig.7-2 Pressure histories of P1 versus L($\alpha=1.0$)

固有の傾向である。さらに+0.87D, +1.02 D では第 2 ピ - ク後、圧力振動周期が大幅に短くなる。+0.87D では 103ms から 31ms とほぼ 1/3 となる。これはボトム時 240ms で気泡が過膨張から収縮へと移行するが、このとき気泡が崩壊し大幅に体積が減少するためである。

6 . 結言

気泡振動現象に対してダウンカマ出口抵抗 C_d 、ダウンカマ深さ L の影響を評価した。

オリフィス抵抗が小さくドライウェルからの流量が多い場合、 C_d 値の増加に伴い P1 の圧力ピ - ク値を保ちながら、発生する時刻を遅らせる。また L の増加に伴い、やはりピ - ク値に達する時刻を遅らせる傾向にある。

オリフィス抵抗が大きくドライウェルからの流量が小さい場合気泡は過膨張、収縮を起こし、 C_d 値の増加に伴い圧力振動の振幅を増幅させる。また L の増加に伴い第 2 ピ - クが卓越し、さらに収縮時に気泡が崩壊し振動周期を小さくする。

今後の課題として各支配因子を実機モデルに適用して、実験値との比較を行いたい。

参考文献

- [1]寺坂,清水, "VOF 法を用いたプール内の気泡振動解析," 第 14 回数値流体力学シンポジウム (2000), F09-4.
- [2]清水,寺坂, "LEVEL-SET 法を用いたプール内の気泡振動解析," (2000), F09-1.
- [3]Anderson,W.G. et.al., "Small scale modeling of hydrodynamic forces in suppresson systems," NUREG/CR-0003, (1978).
- [4]Nichols,B.D. et.al., "Numerical Simulation of Boiling Water Reactor Vent-Clearing Hydrodynamics," NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING: 73, 196-209(1980).