プール水中の蒸気凝縮による管内流動と圧力振動*

賞 雅 寛 而^{*1}, 三 好 直 巳^{*1}
村 井 智 則^{*2}, 綾 威 雄^{*3}Pipe Flow and Pressure Oscillation due to Vapor Condensation
in Pool WaterTomoji TAKAMASA, Naomi MIYOSHI,
Tomonori MURAI and Izuo AYA

An experimental study of pressure oscillation in a single vent tube due to vapor condensation into pool water was performed. The objectives of the work are to establish the character of the dominant frequency and the progression of the pressure wave in the condensation oscillation (CO)-chugging transition region, and to confirm the relationship between vapor velocity and pressure oscillation in chugging. In CO region, most of the pressure wave component had progressive character, and some, a stationary character of resonance in vent tube. In the CO-chugging transition region, the dominant frequency of the progressive wave component increased with vapor mass flow rate and water subcooling temperature. The effects of these parameters on the dominant frequency was explained well by a cylindrical bubble model. In chugging, the maximum vapor velocity was lower than that expected from a simulation model, and the pressure wave had no progressive component.

Key Words: Pressure Wave, Pipe Flow, Oscillatory Flow, Condensation, Pressure Propagation, Oscillation Frequency, Chugging

1. は じ め に

沸騰水形原子炉(BWRs)の圧力抑制系では, 冷却材喪失時に圧力容器内の余剰高圧蒸気をベント管を通しプール水中で凝縮させることにより系内の圧力, 温度上昇を防ぐ。事故時のある条件下ではこの凝縮によって系内に大きな圧力振動が生じ, 構造に悪影響を与える場合がある。また一体形船舶原子炉においても余剰蒸気を凝縮させる際に振動が生じる。これらの凝縮の形態は, 図1⁽¹⁾に示されるように気泡界面が常にベント管外の水中にあり膨張と収縮を繰り返す凝縮振動(CO: Condensation Oscillation), プール水が間欠的にベント管内への逆流を繰り返すチャギング, 輪郭のくっきりとした気泡界面がベント管出口を大きく包みゆっくりとした膨張と収縮を繰り返すバブリングとそれぞれ呼ばれる様式に分類されている⁽²⁾⁽³⁾。

このような蒸気凝縮に起因した振動現象は, スケールの影響を受ける可能性が高いと考えられたため, 内径0.6 m程度のベント管を用いた実規模試験⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾が

行われ, そのデータが安全審査時等に活用されている。一方, 詳細なメカニズムの解明を目指した小規模実験⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁶⁾が大学を中心に行われた。当然のことながら, 大規模装置と小規模装置とでは, チャギングやCOの周波数に大きな違いがある。しかし, CO時の圧力振動については両者とも進行波であることが, 実規模試験では2点間の位相差⁽⁷⁾から, 小規模装置ではベント管長さを大幅に変えた実験⁽⁸⁾から明らかにされている。そして, 小規模装置におけるCO周波数はベント管出口に形成される蒸気泡の線形不安定振動数に

図1 振動様式マップ

* 原稿受付 平成4年10月15日。

^{*1} 正員, 東京商船大学商船学部 (〒183 東京都江東区越中島2-1-6)。^{*2} 東京商船大学大学院 [現: 東芝機械(株)]。^{*3} 正員, 船舶技術研究所 (〒181 三鷹市新川6-38-1)。

一致する⁽¹⁾⁽⁸⁾ことが示され、実規模装置の周波数も線形不安定振動数として説明できる⁽⁶⁾ことが示されている。チャギング時の圧力振動については、実規模試験では定在波であることを示すデータが多い⁽⁵⁾⁽⁷⁾が、小規模装置についてはこれに関するデータはない。また、蒸気凝縮に起因した振動現象は、凝縮と蒸気供給系とが互いに影響し合う連成系を構成しているが、蒸気流速が小さいほど広い範囲の蒸気空間が振動現象を支配し、蒸気流速が大きくなるに従って、支配蒸気空間が小さくなる。つまり、チャギングのコントロール容積はヘッダを含む全蒸気空間であり、COのコントロール容積はベント管出口の蒸気泡のみとなる。なお、連成の程度はホジソン数 N_H で表現でき⁽⁹⁾、上流蒸気空間との連成がなくなるCO発生限界は、 $N_H = \text{一定}$ の線として表される⁽¹⁾。

本研究ではチャギング領域からCOへ振動現象および振動周波数成分、圧力波の進行の変化およびチャギング領域の瞬時の蒸気速度を調べる実験を行った。この実験の目的は第1に各領域における管内の振動の圧力波の進行性と定在性に関して詳しく調べることである。チャギング領域で生じる気柱振動は定在波であるので、管内で圧力波は進行せず、また管内の圧力分布に位相差はない。一方CO領域の振動周波数は、前述のように進行波となると考えられているが、蒸気凝縮による管内の圧力波の進行と定在に関して詳しく調べた研究は少ない。第2にチャギング-CO遷移領域の振動ピークを調べることである。各領域において発生する圧力波には、卓越する一つの振動ピークだけではなく、同時にいくつかの振動ピークが含まれる⁽¹⁰⁾。チャギングからCOに移行する際には、進行波と定在波のピークの成長により、卓越振動数が変化すると考えられるが、遷移領域における振動現象および進行波の振動周波数について詳しく調べた研究はほとんどない。最後にチャギング領域における蒸気速度を調べることである。CO領域やチャギング領域におけるモデル計算については多くの研究例があり、チャギング領域のモデル計算では、凝縮の際に瞬間的に大きな管内蒸気速度が計算されている。このような大きな蒸気速度と発生するチャギング時の振動の関係について調べる。

記号

- $C_1 - C_5$: 定数
 d_v : ベント管径 m
 G_s : 蒸気流束 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 h : 熱伝達率 W/m^2
 L : 潜熱 J/kg

- l_M : 仮想液柱長さ m
 l_v : ベント管長さ m
 P : 圧力 Pa
 P : 周囲圧力 Pa
 T_s : 蒸気温度 K
 T_L : 水槽水温 $^{\circ}\text{C}$
 ΔT : サブクール度 K
 t : 時間 s
 u_c : 音速 m/s
 u_s : 蒸気速度 m/s
 V_s : 気泡体積 m^3
 Z : 気泡界面位置 m
 Z_0 : 界面振動中心位置 m
 ΔZ : 2点間距離 m
 ν : 振動数 /s
 $\nu(A1, A3, A5)$: 1/4, 3/4, 5/4 波長の管内定在波振動数
 $\nu(BA20, BF20)$: 水温 20°C の綾および福田の実験式による振動数
 ρ_s : 蒸気密度 kg/m^3
 ω : 位相差 $^{\circ}$
 添字
 d : ヘッダ
 s : 蒸気
 v : ベント管
 $'$: 容器底までの長さ 0.3 m を管長に加えたときの気柱振動数

2. 遷移領域進行波の振動周波数

チャギング-CO遷移領域に現れる進行波の振動周波数を、CO領域の円柱状気泡解析モデル⁽¹⁾(図2)と

図2 円柱状気泡解析モデル

減圧弁と蒸気の流れが臨界になるように選ばれたオリフィスを用いて蒸気流量を一定に保つ。ベント管は内径 14, 22, 28 mm の 3 種類の単管とし、ヘッダから下 280 mm がスチール製、先端の 850 mm がポリカーボネイト製である。水槽は上部大気開放の内径 406 mm・高さ 800 mm の軟鉄製容器であり、側面 2 面の一部はアクリル製になっている。凝縮界面の挙動はこのアクリル窓よりビデオカメラ撮影される。蒸気ヘッダとベント管(2 箇所)の圧力および管内蒸気速度がそれぞれ圧力変換器とレーザドップラー流速計(LDV)によって測定され、FFT アナライザによって解析される。蒸気ヘッダとベント管の温度は、CA 熱電対とペンレスレコーダによって測定記録される。またこれらの圧力・温度信号およびビデオ映像は、同期信号によって同期されている。実験は、蒸气流束 $[2.19 \sim 89.30 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ およびプール水温度(20, 30, 40, 50°C)をパラメータとして行った。

4. 実験結果

チャギング領域の気柱振動は、ベント管の気液界面側を固定端、ヘッダ側を自由端とするものと考えられている。つまり管内では $1/4$, $3/4$, $5/4$ (それぞれ第一次モード、第二次モード、第三次モード)の定在波という⁽²⁾…波長のいずれかの波形が形成される。ベント管内に 1 波長を形成する管内気柱の振動数は、ベント管長さを l_v 、大気圧飽和蒸気中での音速を u_c とすると

$$\nu = \frac{u_c}{l_v} \dots\dots\dots (18)$$

で表され、 $1/4$, $3/4$, $5/4$ の気柱振動 A は実験装置においてそれぞれ $\nu(A1)=105.9$, $\nu(A3)=317.8$, $\nu(A5)=529.6/\text{s}$ になる。また、進行波である場合の周波数 ν と 2 点間の位相差 ω には次の関係⁽¹⁰⁾ が成り立つ。

$$\omega = \nu \frac{\Delta Z}{(u_c - u_s)} \dots\dots\dots (19)$$

図 4(1)～(3)に、チャギング、遷移および CO の各領域の管内圧力の位相差と振動解析との測定例(22 mm 管)を示す。位相差のグラフでは、ベント管の上部変換器に対する下部変換器の信号の遅れを+としている。したがって位相差が+になると圧力波はベント管出口の蒸気界面から上部のヘッダへ進行するいわゆる進行波になり、零であると圧力波の進行がない管内気柱振動である定在波になる。チャギング領域の圧力波は、気液界面の上下変動に対応する 5/s 程度の振動⁽¹¹⁾が卓越しているが、もう一つのピーク [図 4(1)のピーク A1]がある。このピークに対応する位相差はほとんど零であるので、このピークは定在波であるこ

図 4 管内圧力振動の位相差と振動解析
($d_v=22 \text{ mm}$, $T_L=30^\circ\text{C}$)

とがわかる。またこのピークは、 $1/4$ 波長の気柱振動数(A1)と一致していることが図 4(1)の振動解析図からわかる。蒸气流束が大きくなると、気泡界面は管外に出る時間が多くなり、また振動の中心はほぼ管出口に固定されるようになる。凝縮様式はチャギング領域から遷移領域 [図 4(2)] になり、圧力波成分には、進行波(ピーク B)が現れる。また $1/4$ 定在波のほかに $3/4$ 定在波(A3)の振動数に合う振動が現れる。この $3/4$ 定在波(A3)の振動数に合う振動は、位相差のグラフからわかるように、完全には位相差が零になっていない。したがって、定在波であると明言することはできないが、それぞれのモードに対する振動周波数によく合っている。さらに蒸气流束が大きくなると完全な CO 領域 [図 4(3)] に入り、気液界面は完全に管外に出るようになる。進行波の振動数成分はより発達し、定在波成分もしくは定在波の振動に合う振動に比較して卓越する(ピーク B)ようになる。この進行波の振動数は、綾の実験式 $[\nu(BA)]$ や福田の実験式 $[\nu(BF)]$ とよく合っている。また蒸气流束が大きくなると、気液界面は水底にまで達してしまう場合がある。ベント管出口から容器底までの長さは約 0.3 m であるので、式(18)の気柱振動数は管長に水底までの長さを加えて

算出しなければならない。図4(3)のピーク(A3')は、このようにして算出された3/4波長の気柱振動の振動数 $\nu(A3')$ によく合っている。図4(4)に蒸气流束が非常に大きい場合の測定例を示す。気液界面はほとんど常に水底に達しているようになり、管長に水底までの長さを加えて算出された5/4波長の気柱振動の振動数 $\nu(A5')$ ピークが大きくなる。したがって、蒸气流束の非常に大きいCO領域では、進行波成分のほかに5/4波長の気柱振動数のあたるピークが大きくなり、1/4, 3/4波長の気柱振動にあたる振動数はほとんど消滅するということができる。

図5は振動解析図に現れた90/s以上の各ピークの周波数と蒸气流束の関係を整理したものである。図5より、本実験の範囲においては、完全なチャギング領域では、1/4波長の気柱振動数しか現れないこと、遷移領域からCO領域にかけて1/4波長に加えて3/4波長の気柱振動数および気泡振動による進行波の振動数が現れること、この気泡振動による振動数は蒸气流束につれて増加し、完全なCO領域では綾や福田の実験式によく合うこと、蒸气流束の非常に大きいCO領域では、1/4, 3/4波長の気柱振動数は消滅し5/4波長の気柱振動数が生じることがわかる。また図6に管径14 mmの場合の各振動ピークの周波数と蒸气流束の関係を示す。図7に、圧力振動周波数解析で最も成分の大きい振動数である卓越振動(チャギング時の界面の上下変動による低周波の振動をここでは除く)と蒸气流束およびプール水温度の関係を示す。チャギング領域では1/4波長の気柱振動数、遷移領域では蒸气流束

につれて増加する気泡界面の振動による進行波の振動数、CO領域では蒸气流束によらず綾や福田の実験式に合う気泡界面の振動による進行波の振動数がそれぞれ卓越振動数になっている。

ここで、遷移領域の進行波成分のピーク周波数を、蒸气流束、サブクール温度および管径の三つのパラメータについて最小二乗法を用いて整理する。その結果、

$$\nu = 4.31 G_s^{0.31} \Delta T^{0.62} \dots\dots\dots (20)$$

となり、図7にも示されるようにプール水温と蒸气流束の影響がはっきりと表れるが、本実験の範囲においては管径 d_v の影響はほとんどないことがわかった。また蒸气流束 G_s とサブクール温度 ΔT の影響については、理論式(17)によって説明することができ

図6 遷移領域における定在波と進行波のピーク周波数 ($d_v=14$ mm, $T_L=40^\circ\text{C}$)

図5 定在波と進行波のピーク周波数 ($d_v=22$ mm, $T_L=30^\circ\text{C}$)

図7 卓越振動周波数 ($d_v=22$ mm)

図 8 チャギング時の界面と圧力変動
[$d_v=22$ mm, $T_L=30^\circ\text{C}$, $G_s=8.0(\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$]

図 9 チャギングモデルによる解析結果
[$d_v=22$ mm, $T_L=30^\circ\text{C}$, $G_s=8.0(\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$]

る。図 5～7 の遷移領域における実線は式(20)を表している。

チャギングや CO の振動周波数のピークは以上のように説明されるが、ピークの回りには似た周波数のピークが生じており [例えば図 4(1)ピーク①②]、特にチャギングの場合にはその傾向が強い。これは気柱振

図 10 チャギング時の蒸気速度
[$d_v=22$ mm, $T_L=30^\circ\text{C}$, $G_s=8.0(\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$]

図 11 速度ピーク時の圧力振動解析
[$d_v=22$ mm, $T_L=30^\circ\text{C}$, $G_s=8.0(\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$]

動周波数を決定する気液界面の位置が常に一定の振幅をしていないことによる。図 8 は、チャギング時の界面およびヘッド・管内圧力の時間変動を示している。凝縮界面の振幅は一定ではなく、界面がベント管出口に達せずに管内で逆流するインターナルチャギングも生じている。またそれに応じて圧力の周波数と振幅が変わっていることがわかる。したがって式(18)における気柱振動周波数を決定するベント管長さを $l_v[\text{m}]$ が見掛け上変わり、ピークの回りに似た周波数のピークが現れると考えられる。図 9 は、綾の提唱したチャギングモデル⁽¹²⁾を用いて、図 8 と同じ条件で計算した結果である。界面とヘッド圧力は、実験とほぼ同様の傾向を見せており、界面の下降ピークとヘッド・管内圧力の負圧ピークには、実験値も計算値もほぼ同じ秒程度の時間遅れがあることがわかる。この計算モデル

は、管内圧力を空間差分していないので、蒸気速度 u_s のピークは実際よりも大きめに計算され、ほぼ 130 m/s 程度に達してしまう。この場合大気圧飽和蒸気を用いて換算されるピーク時の蒸気流束 $G_s = \rho_s u_s$ は 78 kg/(m²·s) になる。この蒸気流束の値は、完全な CO 領域における大きくなることから、チャギング領域においても、CO 領域と同様に進行波による周波数ピークがあることが予想された。図 10 にはレーザドップラー流速計によって測定された蒸気速度を示す。蒸気速度の実験値は、計算値ほど大きな値を取らず、 u_s は 16 m/s [$G_s = 9.5$ kg/(m²·s)] 程度になることがわかった。この値は実験条件である平均蒸気流束 [8.0 kg/(m²·s)] から換算される蒸気速度 ($u_s = 13.4$ m/s) よりわずかに大きな値ではあるが、CO 領域における蒸気速度ほど大きくない。また測定された圧力を振動解析しても進行波の成分が現れないため、この速度ピーク値に対応する部分のみを圧力振動解析した(図 11)。このようにしても 1/4 定在波振動成分しか現れず、進行波成分による振動周波数成分は表れていないことがわかった。

5. 結 論

チャギング領域から CO へ振動現象および振動周波数成分、圧力波の進行の変化を調べることおよびチャギング領域の蒸気速度を調べる実験を行い、次の結果を得た。

(1) チャギング領域では、界面上下の振動数および 1/4 波長の気柱振動数が卓越振動数となる。

(2) 遷移領域の圧力波成分には、1/4 波長の定在波のほかに 3/4 気柱振動数に合う振動数成分および進

行波成分が現れる。この進行波の振動周波数は、実験式(20)で整理できる。またこの式に現れるパラメータの影響は、円柱状気泡解析モデルを用いて説明できる。

(3) CO 領域では、進行波の振動数成分はより発達し、気柱振動の振動数に比較して卓越する。ベント管出口から容器底までを加えた 3/4 波長と 5/4 波長の気柱振動数に合う振動が生じる。進行波の振動数は、綾や福田の実験式とよく合っている。

(4) 蒸気流束の非常に大きい CO 領域では、1/4, 3/4 波長の気柱振動数は消滅し、5/4 波長の気柱振動数が生じる。

(5) チャギング時の、蒸気速度 u_s のピークは、計算値ほど大きな値を取らず、またこのピーク値に対応する圧力ピークの部分にも、進行波による振動周波数は表れない。

文 献

- (1) 綾, 船舶技術研究所報告書, No. suppl 10(1988).
- (2) 久木田・ほか 5 名, 原研レポート, 26-1(1981).
- (3) 福田・斎藤, 原子力学会誌, 24-5(1982), 372.
- (4) Bird, P. F., ほか 4 名, NEDO-24811(1980).
- (5) Aust, E., ほか 3 名, Atomkernenergie・kerntechnik, 48(1986), 32.
- (6) 横田, 第 16 回伝熱シンポ講演集, (1979), 70.
- (7) Kukita, Y., ほか 3 名, Int. Specialist Mtg. BWR Pressure Suppress. Contain. Technol., (1981), 1-19.
- (8) 福田, 原子力学会誌, 24-6(1982), 466.
- (9) Oppenheim, A. K. and Chilton, E. G., Trans. ASME, 77(1959), 231.
- (10) Takamasa, T., ほか 2 名, Proc. 1st Baltic Heat Transf. Conf. (1991), PS 3.4.
- (11) 賞雅・ほか 2 名, 第 28 回伝熱シンポ講演集, (1991), 892.
- (12) 綾・成合, 機論, 50-458, B(1984), 2427.