容器内流れによる自由液面のマノメータ自励振動現象*

岡本孝司^{*1}, 班目春樹^{*1}, 萩原剛^{*1}Self-Induced Manometer Oscillation of Free Surface
Caused by the Circulating Flow

Koji OKAMOTO, Haruki MADARAME and Tsuyoshi HAGIWARA

A self-induced manometer oscillation in a flow channel connecting two large tanks is observed, which is caused by the circulating flow in the upstream tank. Water flows into the thin rectangular tank horizontally and flows out vertically through the outlet duct located at the bottom center. The duct is connected to the large overflow tank directly. At a certain water level and flow rate, the free surface of the test section oscillates upward and downward periodically, causing the oscillation of the outlet flow rate. The period of the oscillation is found to be that of the manometer oscillation without flow. Consequently, the oscillation occurs in the multi-free-surface system, i. e., the test section surface and the overflow tank surface. The oscillation growth model based on the flow pattern transformation is proposed.

Key Words: Self-Induced Oscillation, Manometer Oscillation, Multi Surface, Flow Pattern

1. 緒 言

液体金属冷却高速増殖炉には、炉容器上部プレナムなどに自由液面を持っている。主に経済性の理由から、炉容器を小型化した設計が行われている⁽¹⁾。炉容器が小型化されることに伴い、冷却材の流速を高速化する必要が生ずる。しかしながら、炉容器の小型化、冷却材流速の高速化に伴って、自由液面において波立ちや、気泡巻き込みなどの望ましくない現象が生ずる可能性が高くなる⁽²⁾。ナトリウムは熱伝導が高いため、自由液面の振動によって、構造材に高サイクルの疲労を与える可能性がある。また、高速炉の炉心冷却材への気泡の混入は、反応度付与や熱伝導特性の悪化をもたらす可能性があるため、自由液面における気泡の巻き込みは避けなければならない。さらに、自由液面が大きく振動することによって、流量の変化が起こることは安全性の点からも避ける必要がある。このため、自由液面を持った容器内の流れを把握することが必要となる。

また、ループ形高速増殖炉の一つの形として、トッ

プエントリーシステムが提案されている⁽¹⁾。このシステムは、炉容器、熱交換器、循環ポンプそれぞれに自由液面を持ったタンクを用い、これらを逆U字管で接続している。このような、多液面を持ち、かつ大型のタンクを接続するようなシステムは、経験がない。多液面であることから、マノメータ振動のような振動現象が発生する可能性があるが、このような振動は安全性の点からも避けなければならない。

自由液面を持った流れについては、古くから土木工学の分野で、河川、海洋、ダム、石油タンクなどに関して研究が行われているが、高速炉炉容器のように、高速で、限られた空間を流れる条件のものに関する研究は少ない。特に、多液面の条件の研究はほとんどない。

流れと自由液面の相互作用による液面の揺動現象に関しては、最近いくつかの研究が行われている。岡本ら⁽³⁾は、2次元く形容器内の流れに関して実験的研究を実施し、ある特定の条件下において、自由液面の揺動現象が発生することを見出した。この揺動現象は、1次元モードの振動であり、液面の左右が交互に上下する振動である。また、天野ら⁽⁵⁾も、体系の異なる2次元く形容器内の流れに関する実験を行い、同様な自励振動が起きることを報告している。さらに、江口ら⁽⁶⁾は、円筒体系の容器内流れに関して実験を行い、半径

* 原稿受付 平成3年5月9日。

^{*1} 正員、東京大学工学部附属原子力工学研究施設 (●319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22)。

方向に1次モードの揺動現象が起こることを報告している。これらの揺動は、容器内流体の1次モードの振動であり、液面の両端が180度位相のずれた振動を起こしている。この揺動現象は流れの存在しない場合には起こらないこと、さらに、いずれの実験でも揺動の発生する条件では、容器内に大きな循環流が形成されていることから、循環流が自由液面に、揺動のエネルギーを供給していることによって生じていると考えられる。岡本ら⁽⁴⁾は、この揺動現象に関して、循環流によるフローパターン遷移に基づく振動モデルを立て、揺動現象の発達する機構を説明している。なお、これらの揺動現象は、自由液面が振動するものであり、体系への流体の流入流出量にはほとんど変化は見られなかった。

本研究では、2次元く形容器を用い、自由液面と流れの相互作用に関する実験を行い、上述の揺動現象と異なる振動現象が発生することを見出した。この振動現象は、自由液面全体が上下に振動するものであり、複数の自由液面が存在していることによって生ずるマノメータ振動であると考えられる。本研究で見出した振動現象について、その特徴をまとめ振動の発生機構に関して考察を行う。

記 号

- A : 流路断面積 m^2
 f : 振動周波数 Hz
 g : 重力加速度 m/s^2
 h : 水位 m
 L : 流路長さ m
 V : 流入流速 m/s
 ρ : 密度 kg/m^3
 ω : 角速度 $/\text{s}$
 η : 水位変動量 m
 ΔE : エネルギー変動量 J

2. 実験装置

自由液面をもつ流れの基礎的な特性を調べるため、実験装置は単純な2次元スラブ状のものをを用い、現象を2次元的に捉える。流入量を一定に保つため、図1に示すループを用いた。ヘッドタンクの水位をオーバーフローによって常に一定に保つ。このヘッドタンクとテストセクションとの水頭差およびバルブによって、任意の一定流量をテストセクションに供給する。テストセクションから流出する流れは、テストセクション下部に接続された流出管を通り、テストセクションに直結したオーバーフロータンクに入る。オーバーフロータ

nkでは、水門の高さを調節することによって、任意の水位を設定することができる。オーバーフロータンクは、テストセクションに比して十分大きい断面積をもっている。

図2にテストセクションおよびオーバーフロータンクの概略図を示す。テストセクションは、横幅500 mm、奥行き100 mm、流入口高さ240 mmのスラブ状のく形容器である。流入口断面は20 mm×100 mmの偏平な形状であり、600 mmの助走区間を設けている。この助走区間は、水力等価直径の18倍の長さである。流出口断面は100 mm×100 mmの正方形で、長さ500 mmの流出ダクトとなっている。流出ダクトの先は、断面1000 mm×100 mmの広い空間になる。さらに、テストセクションの下部に高さ300 mm×1000 mmの大きなすきまが空いており、このすきまでオーバ

図1 実験装置系統図

図2 実験装置概略図

ロータンクと直結している。オーバフロータンクは、 $1\,000\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$ の断面で、テストセクションに比べて大きな容量を持っている。オーバフロータンクには、可動の水門が設置されており、この水門の高さを調節することによって、任意の水位を調節できる。

水位の計測は、静電容量式の水位計を用いた。これは、直径 7 mm のガラス管に直径 1 mm の導線を挿入し、水と導線間の静電容量変化によって水位を計測するものである。この水位計を用いて、テストセクションの流入側 50 mm の位置の水位変化を記録した。

テストセクションの前面は可視化のため、厚さ 20 mm の亚克力板であり、流れの状況をCCDカメラによってVTRに記録する。VTRに記録された画像を画像処理することによって自由液面の形状変化を算出できる。また、流れにトレーサパーティクルを混入することによって流速分布を算出することも可能である。

3. 実験結果

3.1 振動現象 実験により得られた振動現象の一例を図3(a)に示す。これは、流入流速 2.0 m/s 最大水位 0.45 m の条件における水位計の指示値を示したものであるが、約4秒ごとに水位の大幅な振動が起きていることがよくわかる。振動波形は、ほぼ正弦波状で、周期的な変動を示している。

なお、このとき、流入流速には変動は見られなかった。これは、流入流速がテストセクションとヘッドタンクとの約 6 m の水頭差によって決定されるため、テ

ストセクションの若干の水位変動は流速にほとんど影響を及ぼさないためと考えられる。また、流出側のオーバフロータンクの水位も、ほとんど変動がなかった。これは、テストセクションに比べて、オーバフロータンクの容積が十分大きいためと考えられる。これらの結果および質量保存の条件によって、テストセクションからオーバフロータンクへの流出流量は、水位変化と同じ変化を示していることがわかる。

図3(a)と同じ条件における振動時のテストセクション水位形状を図4に示す。これは、VTRによる画像データを画像処理したものである。水位が下降するときには、中央のくぼみが右側に押しつけられていき、水位が上昇するときには、右側のもりあがりが大きくなることがわかる。上昇時と下降時で、特に右側のもりあがりの状態が異なっている。この条件では、自由液面からの気泡の巻き込みが生じており、気泡の軌跡によって、流れの状況の概況を知ることができる。気泡の軌跡およびトレーサパーティクルの軌跡を写真に撮影し、得られたフローパターンを図5に示す。これにより、下降時には主流が直接出口の方向に向かっており、右側の循環流も大きい。上昇時には主流が右側の方向に向かい、循環流を上を押上げているようすがよくわかる。この、押上げられた循環流によって、水面がもり上がっていることが観察される。

図3(b)に、水位 0.55 m 流速 2.5 m/s の条件の水位変化を示す。この条件においては、振動が連続して起こったり、安定になったりの二つの状態が観測されていることがわかる。この領域は振動が発生する境界の条件であると思われる、何かの外乱によって振動が成

図3 自励振動による水位変化

図4 自励振動による表面形状変化

図 5 自励振動によるフローパターン変化

図 6 振動周波数

図 7 振動領域

長したり抑制したりすることがあるものと考えられる。

3・2 振動周波数 実験から求められた振動周波数と、流入流速、液位との関係を図 6 に示す。振動周波数は、水位計による水位データを FFT にかけることによって卓越する周波数を求めた。水位データは 100 Hz でサンプリングされており、また、FFT は 8192 のデータを用いたので、周波数の分解能は 0.024 Hz である。これによれば、卓越する周波数は、水位、流入流速によらず、約 0.2～0.25 Hz に存在することがわかる。

3・3 振動範囲 水位と流入流速をパラメータとして、振動の発生する条件を求め、図 7 にまとめる。振動の発生の有無は、水位計の指示値から、判定を行った。なお、前述のような、振動が起きたり起きなかったりする条件も振動領域として分類している。

流入流速が 1.0 m/s を超えると、水位が約 0.55 m 以下となった条件で振動が観測されている。流入流速が小さくなると振動が観測されなくなるが、これは、振動に供給されるエネルギーが減少するので、ダンピングが相対的に大きくなり振動がおさえられているものと考えられる。

4. 考 察

4・1 振動周波数 テストセクションの水位振動に伴い、テストセクションとオーバフロータンク間の流量が振動している。このことから、振動自体は、液面が二つ存在していることによるマノメータ振動ではないかと予想される。すなわち、テストセクションとオーバフロータンクの液面間のマノメータ振動と考えられる。本実験では二液面間に定常的な流れが存在しているが、二液面間に定常的な流れが存在しない場合の振動周波数を算出する。流路断面が同一である場合、二液面を接続する配管の長さを L とすると、マノメータ振動の周波数は一般に次式で表される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L}} \dots\dots\dots (1)$$

本実験においては、図 2 に示すように、テストセクション-オーバフロータンク液面間の配管形状が複雑であるとともに、流路断面積も変化しているので、式 (1) を用いることが困難である。このため、マノメータ振動に伴う水位変化による位置エネルギーの変化量が、マノメータ振動に伴う体系内の流れの運動エネルギーの変化量と等しいとにおいて、マノメータ振動周波

数を算出する。ここで、テストセクション-オーバーフロータンク間の配管を図8に示すようにモデル化する。また、簡単のため、流向が変化することに伴う回転運動エネルギーの変化は無視する。マノメータ振動による、水位の変動を次式で表す。

$$\eta = \eta_0 \cos(\omega t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)において、 $\omega t = 0$ のとき、運動エネルギーは零となり、位置エネルギーは最大値をとる。この位置エネルギーの増加分 ΔE_p は、

$$\begin{aligned} \Delta E_p &= \int_0^{\eta_0} \rho A_1 x g dx + \int_0^{\eta_0 A_1/A_4} \rho A_4 x g dx \\ &= \frac{1}{2} \rho A_1 g \eta_0^2 \left(1 + \frac{A_1}{A_4}\right) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

となる。同様にして、 $\omega t = \pi/2$ のとき運動エネルギーが最大になり、位置エネルギーは零となる。この運動エネルギー増加分を ΔE_k とすると、

$$\Delta E_k = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{2} \rho L_i A_i \left(\omega \eta_0 \frac{A_i}{A_i}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで、 $\Delta E_p = \Delta E_k$ とおくと、周波数 f が以下のように求まる。

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g(1 + A_1/A_4) / \sum_{i=1}^4 L_i \frac{A_i}{A_i}} \quad \dots\dots (5)$$

水位 h をパラメータとして、周波数 f を求めると、 $h = 0.3 \text{ m}$ のとき $f = 0.29 \text{ Hz}$ 、 $h = 0.5 \text{ m}$ のとき $f = 0.28 \text{ Hz}$ となり、周波数に対する水位依存性はほとんどないことがわかる。

この計算結果と比較するため、流れのない条件で、水位 0.5 m において、実験装置を用い強制的にマノメータ振動を発生させその周波数を観測した。水位計の指示値より、振動周波数 0.24 Hz を得た(図6, ×印)。この実験値は、上記計算値とほぼ一致しているが、計算値と実験値の差異が生じた理由は、計算において、回転運動エネルギー変化を無視したことと、流れが縮流によって流路断面全体を均一に流れないことをモデ

ル化しなかったためと考えられる。

図6より、実験で得られた振動周波数は、水位、流速によらず、 $0.2 \sim 0.25 \text{ Hz}$ であり流れのないマノメータ振動の値とほぼ一致している。さらに、実験で得られた周波数が流速依存性がほとんどないことから、この振動はマノメータ振動であると考えられる。

4.2 振動発生機構に関する考察 図4, 5より、この振動においては、水位変化、すなわち流出流量変化とフローパターン変化の関係が大きいことがわかる。体系内に流れがない場合は、この振動は観測されないことから体系内の流れが、振動にエネルギーを供給している。流出流量は、テストセクションとオーバーフロータンク間の水頭差と連結部の圧力損失との釣合いによって決定される。図2に示すように、この実験体系では、連結部の圧力損失はなるべく小さくなるように設定されており、わずかな損失係数の変化が、無視できない流量変化を呼び起こす可能性が高い。フローパターンの変化により、流出抵抗が変化し、この抵抗変化によって流出量が変化し液位にフィードバックがかかる。この液位変化が、フローパターンの変化を誘導し、流出量変化によって、また液位が変化することを繰り返していると考えることができる。図5で得られたフローパターンをもとにして考察を行う。水位が高い条件では、大きな循環流を生じ、流出部圧力損失係数が小さくなり、水位が減少し始める。水位が減少することに伴って循環流の形成される場所が小さくなるとともに主流の方向が右側にずれ、流出部の流況が変化して、流出部圧力損失係数が増加する。このため流出流量が減少し、水位が上昇する。すなわち、フローパターン遷移にヒステリシスがある。別の表現をすると、マノメータ振動において水位が上昇するときのみ、流出部に圧力損失が立つような流況となり、テストセクション側の水位を平均よりも高く押し上げ、振動にエネルギーが供給される。

水位が上昇するときに、圧力損失が立つようなフローパターンになるためには、水位がある程度以下になって、循環流が押しつぶされたフローパターンになる必要がある。このことは、ある一定の水位以下になると振動が生ずることを説明できる。この圧力損失変化による水位変動によるエネルギー供給量がダンピングによる散逸量を超えたときに振動が生ずるものと考えられる。

なお、本モデルでは振動発生機構を定性的に説明することができたが定量的に扱うために、フローパターン遷移に伴う圧力損失変化や、フローパターン遷移を起こす条件について検討を行う必要がある。

図8 マノメータ振動周期算出モデル

ループ形高速増殖炉の一つの形であるトップエントリシステムは、多液面が、圧力損失の少ない逆U字管によって接続されており、フローパターンの条件によっては本実験で観測されたような流れによるマノメータ振動が発生する可能性があり、検討が必要であると考えられる。

5. 結 論

二液面が配管によって接続されている体系において、流れに起因する液面の自励振動が発生することを見出した。この振動に対し、実験的検討を行い、以下の知見を得た。

(1) 振動は、液面全体が上下する振動であり、流量変化を伴う。

(2) 振動周波数が、マノメータ振動の周波数とほ

ぼ一致すること、ならびに振動周波数の流量依存性がないことから、この振動は二液面間のマノメータ振動と考えられる。

(3) フローパターン遷移を考慮することにより、振動現象発生機構を説明することができた。

文 献

- (1) 中川, 原子力誌, 30-11(1988), 963.
- (2) Laithwaite, J. M., ほか1名, *Proc. IAEA Symp. on Sodium Cooled Fast Reactor Eng.*, Monco, (1970), 75.
- (3) 岡本・班目・萩原, 機論, 57-535, C(1991), 647.
- (4) 岡本・班目・萩原, 機論, 57-535, C(1991), 654.
- (5) 天野・岩野, 機論, 57-538, B(1991), 1947.
- (6) 江口・田中, 日本原子力学会 1990 年秋の大会予稿集, (1990), E 36.