

論文内容の要旨

論文題目 縮小部を通過する気液二相流の脈動現象

氏名 森元 雄一郎

1. 緒言

将来型の沸騰水型原子炉における安全性、経済性向上のためのコンセプトの一つとして、内蔵 CRD(制御棒駆動装置)の研究が進められている。内蔵 CRD の設計では、ガイドチムニという縮小部を持った流路の内部を沸騰した冷却水が流れるが、縮小部を持つ垂直流路内を流れる気液二相流の現象についてはほとんど知見がない。特にどのような振動が発生するかについては、これまでほとんど調べられていない。縮小流路を含め異型流路を通過する二相流は、気泡の挙動が流動様式や振動に影響し、その挙動の特性や機構を解明することは工学的に非常に興味深く有意である。

本研究は、縮小部を持つ流路内を気液二相流が垂直上昇する場合に発生する現象と、そのメカニズムを明らかにすることを目的とし、実験を中心に調査する。

2. 実スケール実験

ガイドチムニ内で発生する流動現象を調べるため、想定されているガイドチムニのスケールと同程度の大きさの装置、流量を用いて実験を行う。

2. 1. 実験方法

実験装置の概略を図 1 に示す。体系を構成する配管すべて円管であり、テストセクションは流動様式を確認するために透明なアクリル素材から成る。液相として水を、気相として窒素ガスを使用し、常温常圧下で実験を行う。

気液二相流は 2[m]の助走区間を経た後、テストセクションに流入する。テストセクションの形状として、(A)直径が 109 から 44.5[mm]に急縮小するもの、(B)直径が 109 から 44.5[mm]へ縮小する 300[mm]長のレデューサ形状のもの、(C)直径 109[mm]の直管、(D)直径 44.5[mm]の直管、の 4 タイプを使用した。

二相流の流動を調べるため、点電荷ボイドプローブによる局所ボイド率の時間変動測定と、高速ビデオカメラによる撮影を行った。ボイドプローブの測定点とテストセクションとの位置関係を図 2 に示す。高速ビデオカメラのフレームレートは 2000[Hz]、シャッタースピードは 1/10000[s]とし、ハロゲンランプによるバックライト照明で撮影した。

液相体積流量(Q_L)と気相体積流量(Q_G)を、それぞれ 17~670、10~300[l/min]と変化させて実験を行った。なお、これらの直径 44.5[mm]管内での見かけ流速は、0.18~7.2、0.11~3.2[m/s]となる。

2. 2. 実験結果と考察

2. 2. 1. 観察された現象

液相、気相の流量を変化させながら、流動様式の変遷を観察した。図3に、テストセクション(A)を用いた場合の縮小部上流における流動様式マップを示す。

縮小部上流の流動様式が agitated bubbly flow の場合、縮小部下流において縮小部上流には見られない脈動が発生することが高速ビデオカメラ撮影によって明らかとなった。縮小部下流の撮影画像を図4に示す。50~125[ms]にかけて気泡群が通過している様子が観察できる。以下ではこの脈動現象について詳細に調査する。

2. 2. 2. 脈動の周波数

$Q_L=420$ 、 $Q_G=30$ [l/min]とし、テストセクションを(A)~(D)と変化させた場合における、ボイド率 V_6 の時系列変動から求められる PSD(Power Spectrum Density)を図5に示す。図5から明らかのように、縮小部がない直管の流路(C)、(D)では脈動は発生していない。また、縮小部を持つ流路(A)、(B)ではある周波数のピークを持ち、(A)は5[Hz]程度の比較的鋭いピーク、(B)は7~20[Hz]程度のなだらかなピークを持つ。

2. 2. 3. 脈動の発生過程

脈動の発生過程を調べるため、テストセクション(B)を用いた詳細な調査を行う。図6は、 $Q_L=420$ 、 $Q_G=30$ [l/min]とした場合の、 $V_1\sim V_6$ の PSD を示したものである。レデューサ入り口手前の V_1 、入り口直後の V_2 においてはほとんどピークは確認できないが、 V_3 、 V_4 と縮小部を進むにしたがって PSD のピークが大きくなり、脈動が発生、発達している様子が確認できる。

同じ流動条件にて、レデューサ部分の流動を撮影した高速連続画像を図7に示す。縮小部において小さな気泡は扁平に、ある程度大きな気泡は弾丸状となる(0[ms])。この弾丸状の気泡のすぐ上流にある小さな気泡は弾丸状気泡に吸い込まれるように加速し(1~2[ms])、そしてついには合体する(3~4[ms])。より大きくなった弾丸状気泡は縮小流路を通過する過程でさらに広範囲の小気泡を吸い込み、ますます大きくなる。縮小部を通過し直管部に進入した気泡は崩壊し気泡群となって上昇し、図4で観察された脈動となる。

2. 3. まとめ

直管では脈動を示さない流動条件の気液二相流が、縮小部を通過することで脈動現象を起こすことを発見した。またこの脈動が縮小部を通過するにつれて発達する様子を、ボイド率変動の PSD、高速ビデオカメラによる観察によって明らかにした。

3. 可視化実験

縮小部を通過する気液二相流を、Dynamic PIV と投影法を用いた高速同時計測により計測し、その流動を明らかにする。

3. 1. 実験方法

実験装置の一部と可視化計測システムの概略を図8に示す。トレーサとして蛍光粒子を混入した水を上方へ流し、そこへ窒素を注入する。二相流となった流れは縮小部を持ったテストセクションを通過する。そこでの気泡輪郭を投影法を用いて、液相の速度ベクトル場を Dynamic PIV を用いて計測する。投影法には赤外線レーザを、PIV には Nd:YLF レーザを用いた。各レーザとカメラのタイミングを 2000[Hz]で同期させ、フレームストラドリングを用いて 150[μ s]間での変動を高速計測する。テストセクションの形状は奥行き 2[cm]で一定とし、5 から 2[cm]への縮小レデューサ形状のもの(A)と直線で縮小部がないもの(B)を用いた。気相の注入は電磁バルブを用いてパルス的に制御し、液相体積流量(Q_L)を 50、70、120[l/min]と変化させて実験を行った。なお、このとき縮小後の液相見かけ流速はそれぞれ 2.1、2.9、5.0[m/s]である。

3. 2. 実験結果と考察

3. 2. 1. 解析結果

PIV によって得られた速度ベクトル場の解析結果を示す。図9はテストセクション(A)を用い、 $Q_L=70$ [l/min]とした場合での液相速度ベクトル場と気相位置を表したものである。図中の黒実線は流路を、赤い矢印は液相速度ベクトルの大きさと向きを表し、緑の部分が気相存在位置を表す。図9からわかるように大気泡と流路壁面の間の流速は小さく、大気泡上流は流速が大きく向きが乱れている。

3. 2. 2. 規格化速度分布と気泡形状

縮小部がある場合(テストセクション(A))とない場合(同(C))での液相速度ベクトル場を比較する場合、図9のようなベクトル図のままでは議論するのは難しい。なぜならテストセクション(A)の流路内では流路が縮小する事により液相速度が大きくなり、また速度ベクトルの方向も流路中央にかたむいているからである。

そこで気泡周りの液相速度ベクトル場が気泡によってどのように変化するかを調べるために、規格化速度 V_{std} を定義する。

$$V_{std}(t, x, y) = \frac{|\vec{v}(t, x, y)|}{|\vec{v}_{noBubble}(x, y)|}$$

なお、 $\vec{v}(t, x, y)$ は点 (x, y) 、時刻 t における液相速度ベクトル、 $|\vec{v}_{noBubble}(x, y)|$ は気相を注入しない場合における $\vec{v}(t, x, y)$ の大きさの時間平均を示す。 V_{std} を用いることで流路形状の影響を排し気相により受ける液相速度ベクトルの影響のみを議論することが可能となる。

図10は、縮小部あり、なしの場合それぞれについて V_{std} の分布と気泡位置を示したものである。図10からわかるように、縮小部内の気泡上流のほうが直線部の気泡上流よりもより大きな影響を受けている。気泡による液相の加速は大きく、またその影響範

囲も広い。定量評価すると、それぞれおよそ2倍である。

これは気泡の形状と変形による、液相の渦の生成に起因するものと考えられる。直線流路を上昇する気泡形状はほぼ長方形をしているが、縮小流路を上昇する気泡は裾が広がった三角形をしている。液相より気相のほうが上昇速度が相対的に速いため、液相が気泡の後ろ側に回り込むことになる。この際に縮小流路中の気泡の方が大きな渦を形成させる。また直線流路を上昇する気泡は形状変化しないが、縮小部を上昇する気泡は縮小部出入り口で急激に形状変化する。以上の2つの要因により、縮小流路内気泡の方が直線流路内気泡に比べて液相加速の割合が大きく、範囲も広い。

3. 3. まとめ

縮小流路、直線流路を通過する気泡と気泡周りの液相速度ベクトル場を可視化した。その結果、縮小流路を通過する気泡上流の方が直線流路を通過する気泡より、液相流れ場を加速させる影響が大きいことが確認された。

4. 脈動発生モデル

2、3章の結果より、縮小流路を上昇する気液二相流の脈動発生について以下のようなメカニズムが考えられる。

縮小部に進入した気泡は形状を変形させ、その上流の液相がより速くなり、また加速される範囲も広がる。するとそれまで離れた位置に存在していた他の気泡が液相の加速に応じて加速され、下流の気泡に近づき合体する。合体して大きくなった気泡はより広範囲の液相を加速させ、ますます多くの気泡を引き付ける。以上のような過程を経て、縮小部にて気相の多い部分と少ない部分が発生し、脈動現象となる。

5. 結言

縮小部を通過する垂直上昇管内気液二相流の流動について、実験的に調査した。ガイドチューブを模擬したスケールでの実験にて、縮小部を通過することで脈動現象が発生することを発見した。また可視化実験にて、縮小流路を通過する気泡の方が直線流路を上昇する気泡よりも上流の液相をより大きく加速し、その範囲も広いことがわかった。この結果に基づき、脈動現象の発生モデルを提案した。

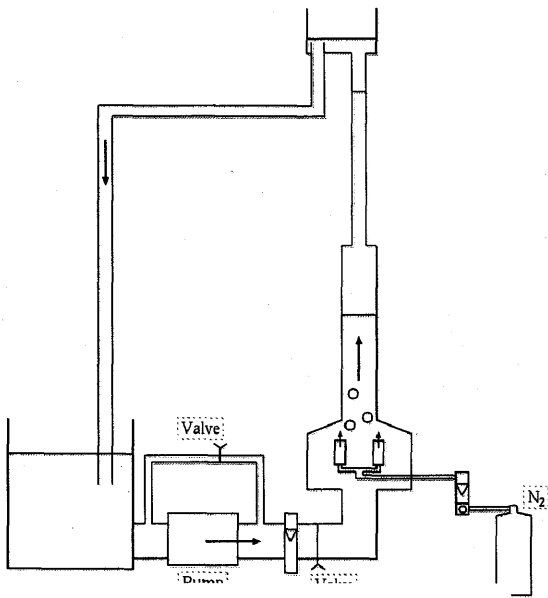


図1 実スケール実験装置

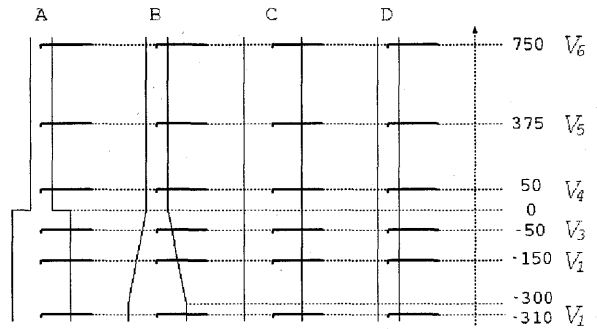


図2 テストセクションとボイド
プローブの位置関係

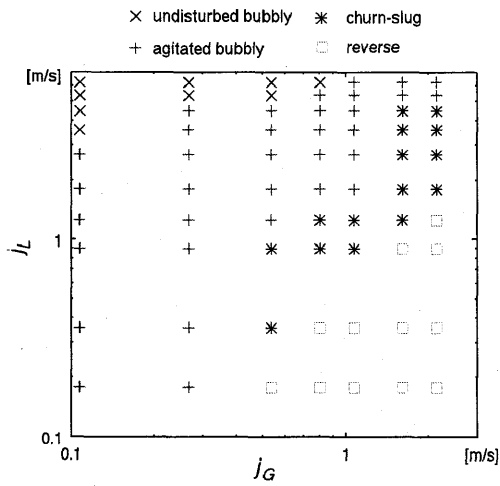


図3 流動様式線図

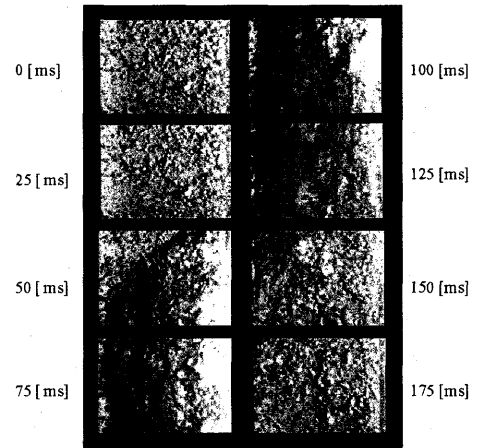


図4 気泡群通過時の連続画像

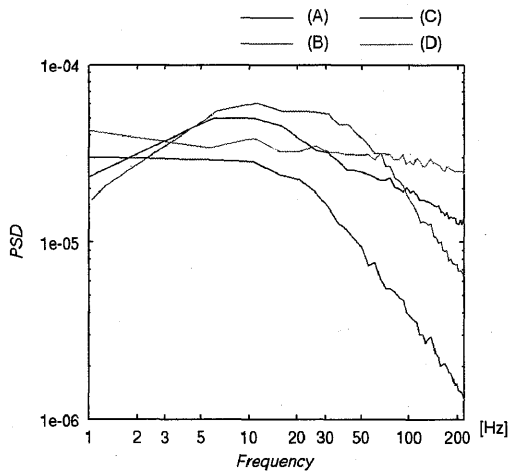


図5 テストセクションによる脈動の変化

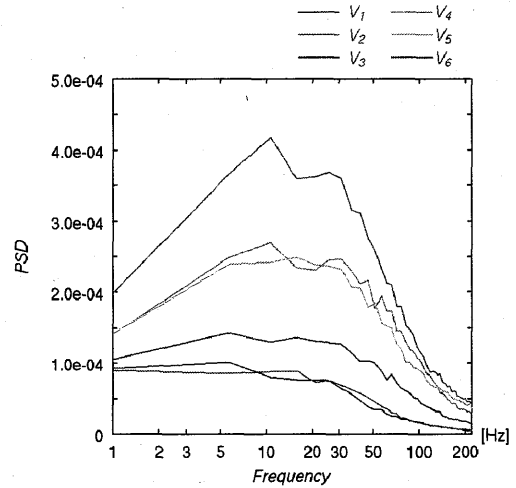


図6 レデューサ内での脈動の発達

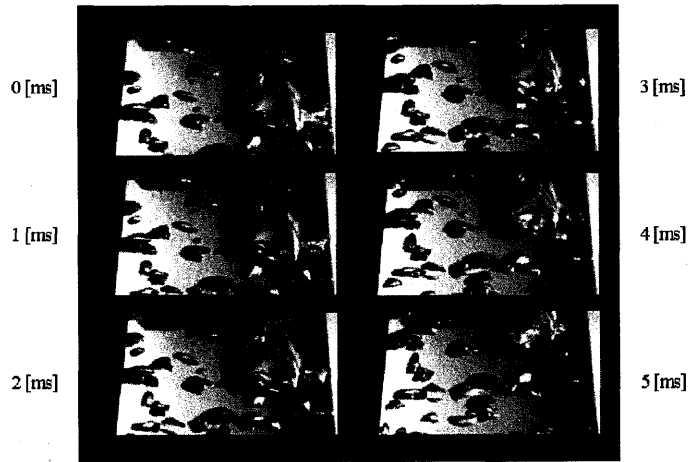


図7 縮小部を通過する過程で気泡が合体する様子

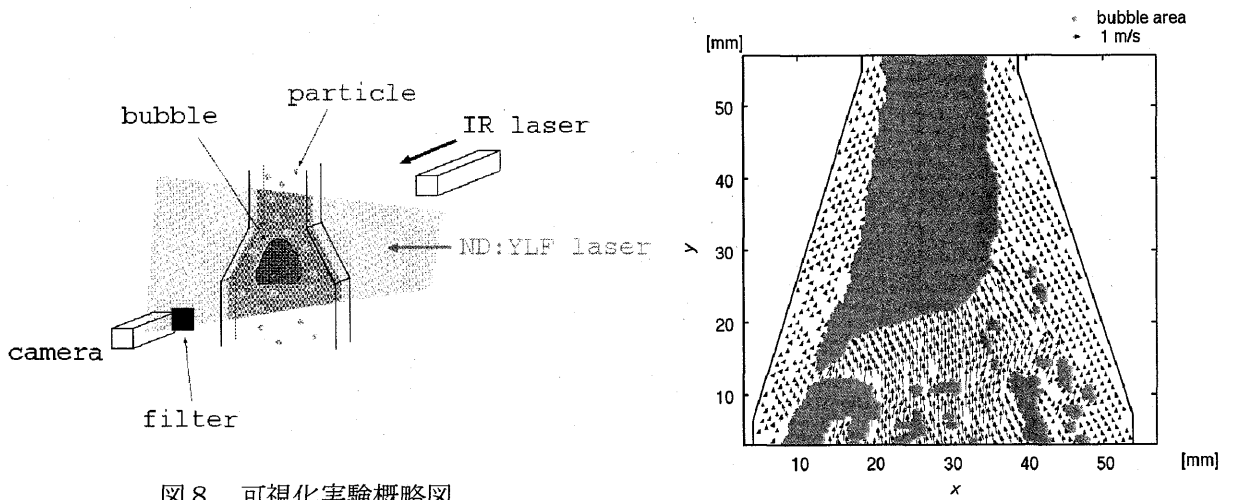


図8 可視化実験概略図

図9 液相速度ベクトル場と気泡

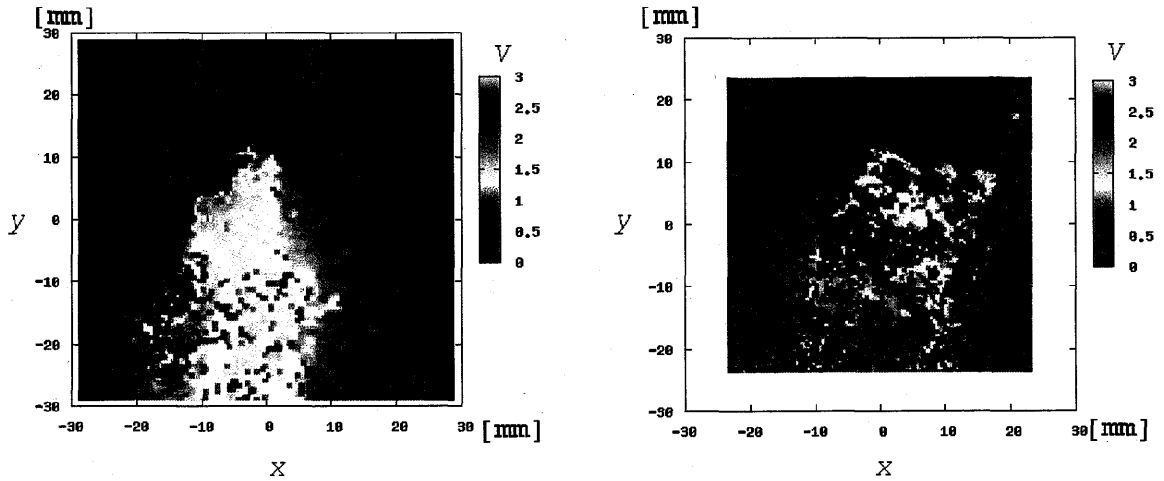


図10 気泡の影響を受ける液相速度ベクトル場