

# 地震加速度付加時の気液二相流の詳細予測技術高度化に関する研究

(受託者) 国立大学法人筑波大学

(研究代表者) 阿部豊 大学院システム情報工学研究科

(再委託先) 日本原子力研究開発機構、

(研究開発期間) 平成 22 年度～24 年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

大規模地震の発生時には、様々な振動モードや振動数の地震波が発生する。地震波による物体の動的な挙動は、地震加速度だけでなく、物体の種類ならびに地震動の周波数や振動モードにより大きく異なり、同程度の震度であっても構造物に対する被害が大きく異なることが明らかとなっている。

このような加振特性による「流体」の動的な応答特性は、「固体構造物」に対するものとは大きく異なる。特に、原子炉施設内の炉心や配管など重要機器を流動する「気液二相流」は、炉心のボイド率やその分布を支配する主要因であることから、緊急時の炉心動特性を予測する出発点となるものである。しかしながら、加振時の気液二相流挙動に対する、地震動からの加振モードや振動数による動的な応答特性については、現在殆ど明らかとなっていない。

気液二相流が流れる原子炉施設内の炉心、配管や蒸気発生器などの重要機器が地震によって加振された場合、まず、炉心構造物や配管などの固体構造物が振動する。この固体構造物の内面に接する流体には、液相境界層を介して振動が伝播する。更に、液相境界層を介してバルクの液相に伝播した振動が、気相の運動に影響を及ぼす。気液二相流の挙動は、液単相流の場合と異なり、気相の圧縮性によるバネマスの振動挙動ならびに気泡の界面変形に伴う体積変化や合体・分裂が加わる複雑流動となる。このような、振動する構造物中の気液二相流の複雑流動を予測するためには、様々なモードや振動数の加振による気液二相流の挙動についての実験的知見を収集するとともに、その実験結果に基づく計算科学的手法を高度化するための基礎・基盤的な研究開発が必要不可欠である。

上記のように、加振時の原子炉燃料集合体内気液二相流の挙動は、流体を内在する構造物の振動に対する液相ならびに気相への動的応答を如何に予測するかが求められている。更に、気液界面の変形や合体や分裂により気泡体積や平均気泡径や気泡径分布が変化するが、その際の動的な挙動を予測することも求められている。

本研究においては、地震時に想定される10Hz域における加振に対して、①構造物を振動台により加振した場合と②流体に所定の脈動流を加えた場合の異なる二つの加振条件下における気液二相流の流動特性について、高速度詳細可視化観測を行う。得られた可視化情報を画像処理解析することによって、解析技術の高度化に必要な定量的なデータベースを構築する。従来このようなデータベースはなく、地震発生時の原子力施設における加振時の気液二相流挙動に関する貴重な情報を収集整備することができる。

その上で、本研究によって構築したデータベースを用いて、地震時の加振特性に追従する詳細二相流解析手法を、界面追跡法に基づいて開発するとともに、その機能を用いて性能を評価し、更に改良を加えることによって、地震加速度付加時の気液二相流の詳細予測技術高度化のための基礎基盤技術を構築する。

## 2. 研究開発成果

### 2. 1 流体加振実験

流体加振実験では、液相に直接、流動変動を加えた場合の構造物中の気液二相流挙動を調べる。平成22年度においては、当該実験に必要な流体加振実験装置を設計、製作し、作動確認実験を行った。更に、高速度詳細可視化観測システムによる可視化観測のための予備実験を行った。

流体加振実験で使用した実験装置の概略を図1に示す。実験装置は主に、水タンク、ポンプ、流体加振部、気液混合器、試験部及び窒素ガス供給系よりなる。流体加振部は主流にT字管を設け、枝管にピストンを設置し、ピストン運動により主流に流量変動を与える。試験部には水平亚克力管(内径14mm)に屈折による像の歪を抑えるためのウォータージャケットを設置した。試験部出口は水タンクへの戻り管と接続されており、水タンクには大気開放状態で二相流が排水される。

次に、本実験装置の動作確認を兼ねて高速度カメラシステムを用いた可視化観測のための予備実験を行った。側面及び上方からテスト部内の流れの像を取得し、画像処理計測できることを確認した。実験では液相(水)の流量を9.2 L/min. (見かけ速度: 1 m/s、レイノルズ数: 約14,000)、ガス流量を0.6 L/min.とし、混合器で焼結合金により気泡流を生成した。また、流体加振部は混合器の下流に設置し、10Hzで $\pm 0.1$  m/sの速度変動に対応する流量変動を与えた。

図2は試験部側面から撮影した流れの様子で、クラスター化した気泡が流れており、流量変動周期と同じ10Hzで気泡が変形するのが観察された。また、試験部を2方向から撮影した画像を基に、管断面ボイド率を算出し、その時間変動を得ることができた。

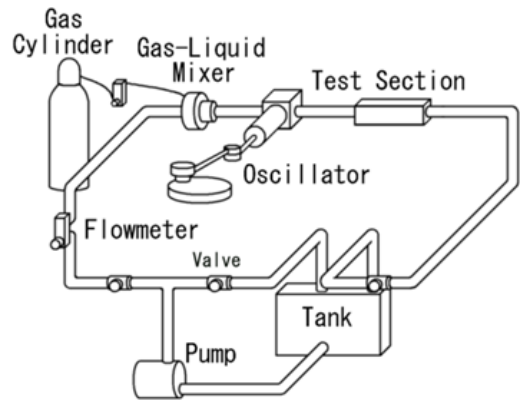


図1 流体加振実験装置概略図



(a)  $t/T=0.00$  (見やすさのため一部明度補正)



(b)  $t/T=0.50$

図2 10Hzの流量変動を与え場合の流れの様子 (t:時間、変動周期:T=0.1 s)

### 2. 2 構造物加振実験

気液二相流が流動する構造物に対し、加振台により振動を付加した場合の流動について可視化観測実験を行い、二相流中の気泡挙動及び液相が振動から受ける影響について調べる。平成22年度は、実験に用いる加振台及び、テスト部を含む構造物加振実験装置を設計・製作した。更に製作した実験装置を用いて、振動を付加しない条件での作動確認を行うとともに、実際に振動台

にテスト部を載せて振動付加時の流れ場の可視化観測実験を予備的に行った。

図3に、構造物加振実験における実験装置の概略を示す。流体加振実験と対比できるように、装置形状や機構を可能な限り両実験で一致させた。ポンプ及びポンベから送られてきた水と空気を気液混合部において混合し、テスト部で気泡流を観察する。テスト部は、内径が流体加振実験装置と同様の14mm、長さ400mmの亚克力円管であり、周囲を円管の曲率による屈折を防ぐためウォータージャケットで覆っている。実験では混合部とテスト部を加振台に設置し、振動が付加された際の流動場を高速度カメラにより撮影する。出口圧力を大気圧として一定にするため、流路出口部を大気開放にした。また、圧力センサーにより、テスト部の出入り口部の圧力を測定する。

振動を付加した場合の可視化観測実験の結果の一例として、 $j_i=0.5\text{m/s}$ 、流量比 $\beta=0.06$ の二相流に、加速度振幅 $a=1.0g$ 、振動数 $f=10.0\text{Hz}$ の振動を付加した場合の0.02sごとの流れ場の撮影画像を図4に示す。画像より、アスペクト比を含む気泡形状が、振動加速度の周期と一致して変動する様子が観測された。

### 2.3 加速度付加時詳細二相流解析手法の開発

地震加速度の影響は、流量変動、流体に働く加速度、壁面振動として二相流に付加される(図5)。これらの影響を経験に依らず表現するには、気液界面の移動や変形を直接取り扱う必要がある。本研究では、気液界面挙動を詳細に評価できるTPFITコードを基に解析手法を開発する。平成22年度は、地震加速度の影響を表現するため、(1)非定常入口条件付加機能、(2)非定常体積力付加機能、及び、(3)非定常壁面速度付加機能を追加した。

機能追加したTPFITを用いて、上記三つの機能を個別に用いた解析を実施した。

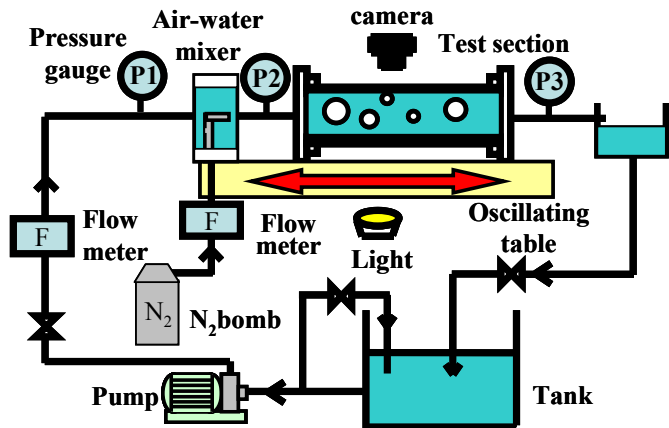


図3 構造物加振実験装置概略図

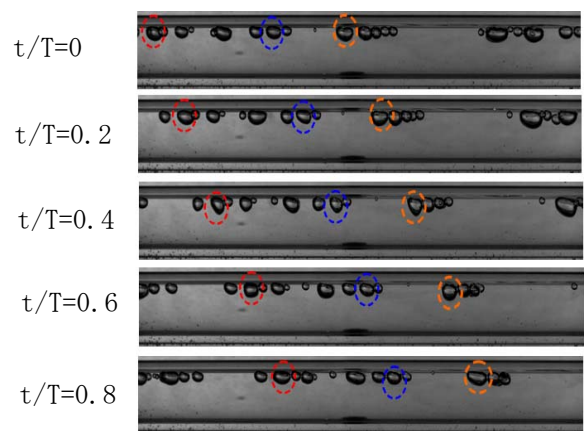


図4 流れの様子の一例(t:時間、変動周期:T=0.1s)

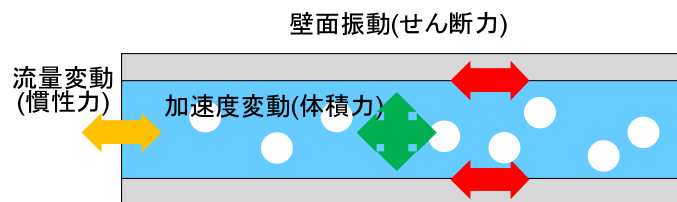


図5 地震加速度の影響により流体に働く力

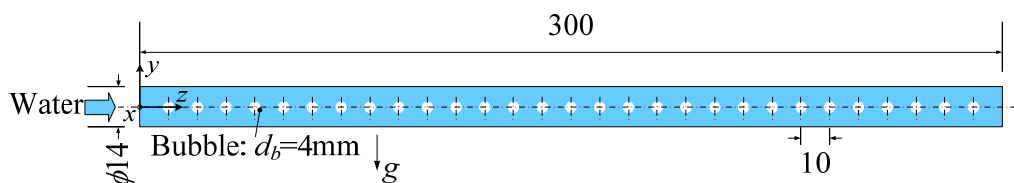


図6 解析体系の概要

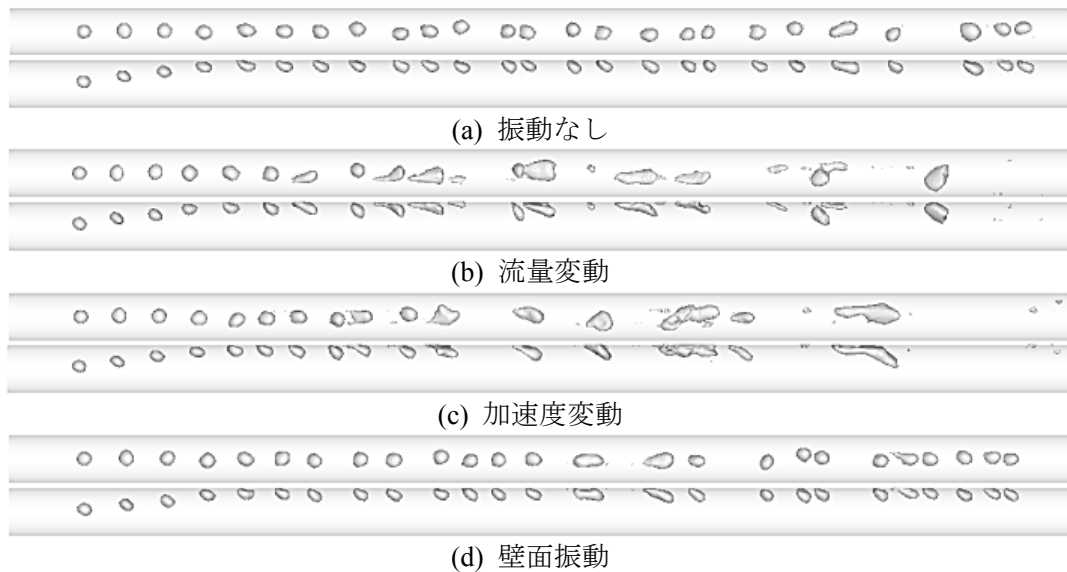


図7 気泡形状の一例

解析体系の概要を図6に示す。管径は14 mm、1gの加速度をy方向下向きに与えた。直径4 mmの気泡を10 mm間隔で管中心に初期配置するとともに、 $z=10$  mmの管中心位置に0.1 s間隔で気泡を配置した。入口平均流速は1 m/s、出口圧力は大気圧、1g、10Hzの正弦波の振動が流れ方向に付加された場合を想定し流量変動などを与えた。解析結果の一例として、 $t=0.5$  sにおける気泡分布を図7に示す。図において、上図が上面、下部が側面からの可視化画像である。振動なしの場合に対し、流量変動や加速度変動を与えた場合、系内に生じる逆圧力勾配により流れ方向の気泡の移動が制限され気泡の合体が頻繁に生じる。このため、気泡形状などが大きく変化している。壁面近傍の流れ方向速度が小さい領域で逆圧力勾配の影響が顕著であり、壁面に沿い気泡が引き延ばされている。壁面振動を付加した場合、顕著な気泡の合体は見られず、振動なしの場合の上面からの可視化画像で見られる、気泡の蛇行も殆ど観察されない。これより壁面振動を付加した場合、振動なしの場合と比較して気泡挙動が安定化する可能性があることが分かる。

### 3. 今後の展望

#### 3. 1 流体加振実験

ここで製作した流体加振実験装置を用い、流量変動周波数や水及びガス流量、流路長さをパラメータとした実験を行い、高速度詳細可視化観測システムによる計測を基に、流動条件を変えた場合の流れの特性に関する知見を蓄積し、解析技術の高度化に必要な定量的なデータベースを構築できる見込みである。

#### 3. 2 構造物加振実験

製作及び改良した構造物加振実験装置を用い、振動条件や気相流量などのパラメータを設定して実験を行う。また詳細な可視化観測を壁面付近の可視化や、気泡及び液相挙動を同時計測することで、構造物加振により気液二相流が受ける影響についてのより詳細な知見を得ることで、解析技術の高度化に必要な定量的なデータベースを構築するものとする。

#### 3. 3 加速度付加時詳細二相流解析手法の開発

開発した解析手法の妥当性を検討するため、流体実験及び構造物加振実験との比較を行う。比較を行うに当たっては、初期気泡配置や、入口・出口条件に対する模擬性を向上させるための改良をTPFITに対して実施する。これらの比較及び改良を行うことにより、本研究開発で目標とする、地震加速度付加時の気液二相流挙動を評価するための解析手法を構築できる見込みである。