

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る。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、炉心で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。

特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。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、直接液相に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23年度においては、平成22年度に整備した流体加振実験装置(図1)を用いて、高速度詳細可視化観測ならびに可視化情報の画像処理解析を行い、詳細な気液二相流挙動を得た。

図1に示す実験装置を用いて、混合器上流にT字管を設け枝管に設置したピストンの運動により主流に流量変動を与えた際の気泡挙動を高速度カメラシステムを用いた可視化観測を行った。図2に実験結果の一例を示す。実験では液相(水)の流量を9.23 L/min. (見かけ速度: 1 m/s、レイノルズ数: 約14,000)、ガス流量を0.2 L/min. とし、混合器で内径0.58mmのノズル

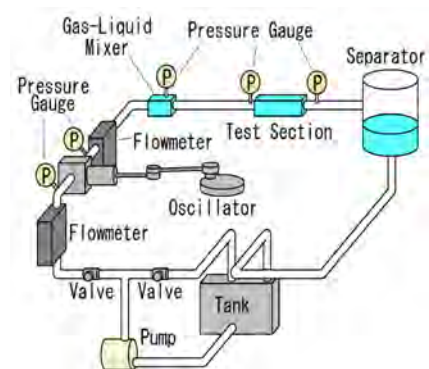


図1 装置概要図

を介して液相内に気泡を生成した。図2には、流量変動周波数3 Hz、流速変動 $\pm 0.171\text{m/s}$ の条件下において観察された気泡の形状の変化を示す。流量変動を与えた場合、図2に示すように、減速するにつれて丸みを帯びた形状から徐々に下部が尖っていき、加速中において尖った気泡が丸みを帯びていく様子が観察された。

図3は流量へ変動を与えた場合の速度場を示す。図3(a)は気泡が尖り始める流速が減速する場合の速度場を示すが、気泡下部を斜め下にこのような特徴的な流れが観測された。加速中では図3(b)に示すように、そのような流れは消え気泡形状が丸みを帯びる結果となった。これらは変動する液相速度場によってせん断応力が働いて、気泡変形が引き起こされた可能性を示す。

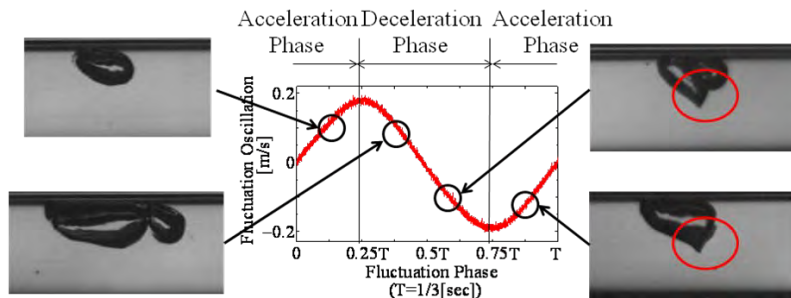
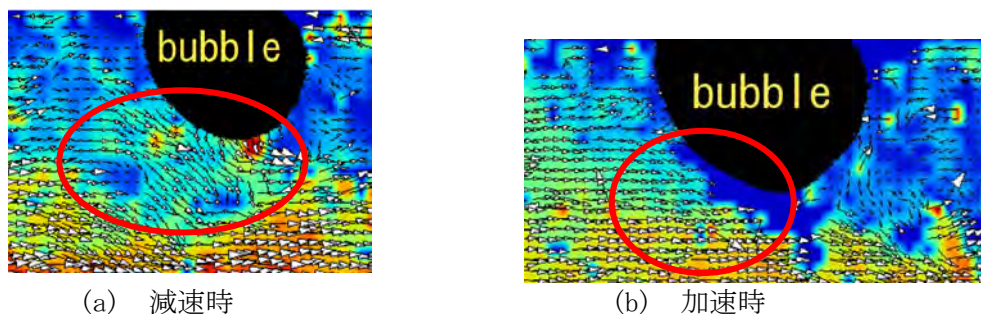


図2 気泡形状の周期的な変化



(a) 減速時

(b) 加速時

図3 気泡周りの速度場

2. 2 構造物加振実験

加振台により気液二相流が流動する構造物に振動を付加し、加振時の構造物中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および液相が振動から受ける影響について調べる。平成23年度においては整備した加振台および構造物加振実験を用いて可視化実験を行い、解析技術の高度化に必要な振動付加による気泡周囲の詳細速度場計測を行った。

次に図4に構造物加振実験における実

験装置の概略を示す。装置に関しては別に行う構造物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ることとした。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気泡流挙動をハイスピードカメラにより撮影する。

図5に液相流速 0.5m/s 、気液流量比 0.06 の気泡流に加速度振幅 $a=1.0\text{G}$ 、振動数 $f=10.0\text{Hz}$ の

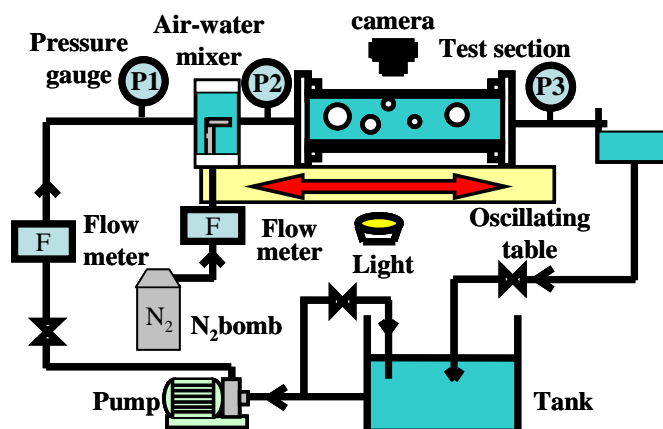


図4 構造物加振実験装置概略図

振動を付加した場合の、振動台の速度が流れ方向に対し最大および最小付近における気泡流の撮影画像と、画像処理により算出した気泡周囲の液相の相対速度場を示す。振動台速度が最小付近では、気泡形状が下方方向に引き伸ばされるとともに気泡後部に気泡界面に沿う液相流れ場が示される一方で、振動台速度が最大付近では相対速度場が小さくなる傾向が示された。これは流体加振実験と定性的には同一の結果であるが、壁面速度変動に気泡が追従したことから、下方方向に引き伸ばされる際の気泡の変形挙動において流体加振実験と差異が生じることが示された。

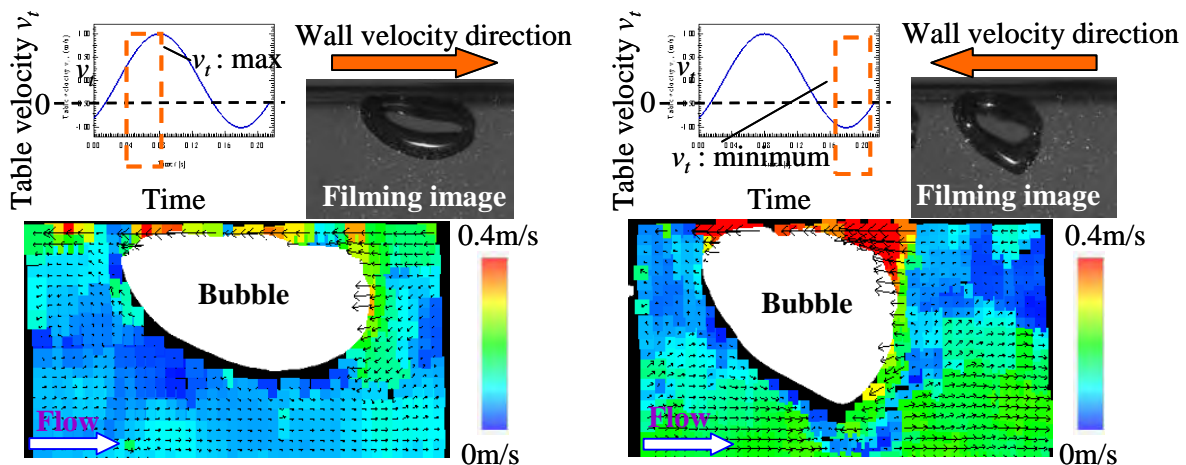


図5 振動台速度が最大・最小付近での気泡流可視化結果および液相の相対速度場算出結果

2. 3 加速度付加時詳細二相流解析手法の開発

流量変動、流体に働く加速度、壁面振動として付加される、二相流に対する地震加速度の影響を経験によらず表現するには、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、気液界面の詳細な挙動を評価できる詳細二相流解析コードTPFITをもとに解析手法を開発する。

平成24年度は、機能追加等を実施したTPFITを用い、2.1及び2で実施した実験を模擬した解析を実施し、気泡周囲速度分布等を実験と比較した。解析体系を図6に示す。流体加振の場合には、平均流速1m/s、振幅0.135m/s、周波数5Hzで流量を変化させ、構造物加振の場合は平均流速0.5m/s、1g、10Hzの振動を加えた。

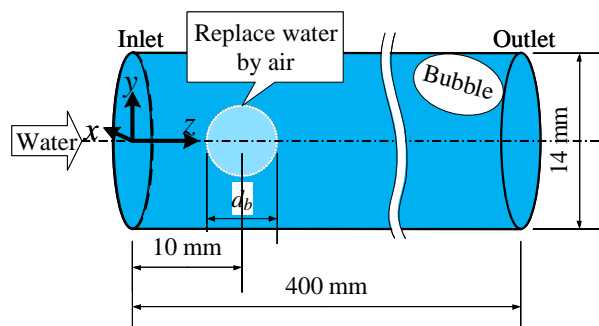


図6 計算体系

図7に流体加振を模擬した場合の気泡形状及び相対速度場を示す。流量減少時では気泡下部に尖った部分を持ち、流量増加時では減少時の特徴的な形状が失われるなど、予測した気泡形状は実験結果と一致している。また、流量減少時には管中心部に流速の大きな部分が形成され、気泡の尖った部分の下部に大きな下向き流れが起こる等、速度分布についても定性的に一致している。

図8に構造物加振を模擬した場合の気泡形状と相対速度場を示す。加振台速度の正負にかかわらず、予測された気泡形状は実験結果と良く一致している。また、流体加振の場合と同様に、気泡周囲の速度分布についても定性的に一致しており、加振台速度が負の場合に形成される特徴的な気泡形状が、気泡下部に発生する大きな剪断力に起因することが解析結果から予想される。こ

これらの結果から、地震加速度付加時の二相流挙動について、詳細二相流解析により評価する見通しが得られた。

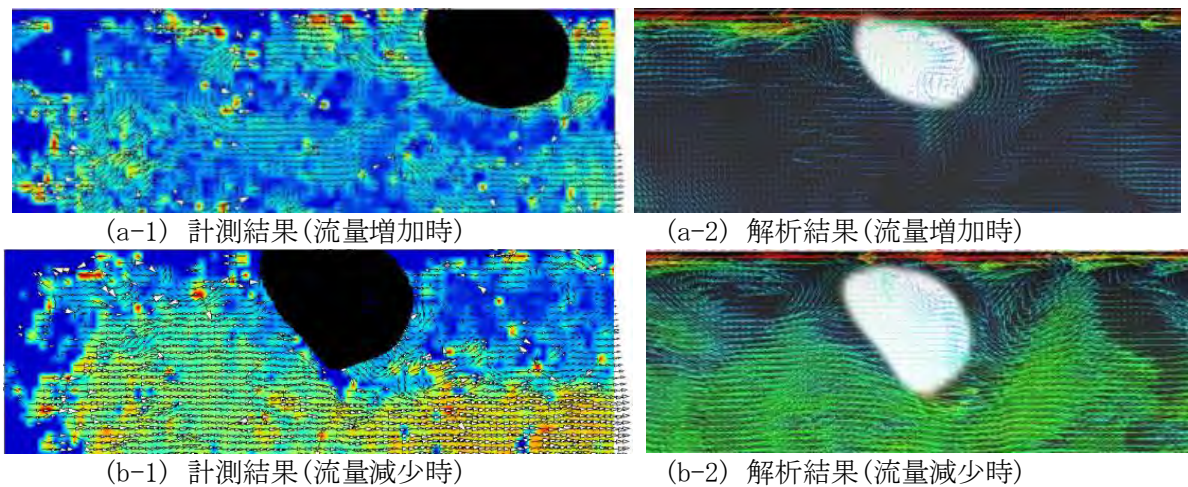


図7 気泡形状と気泡周囲の速度分布の比較(流体加振実験)

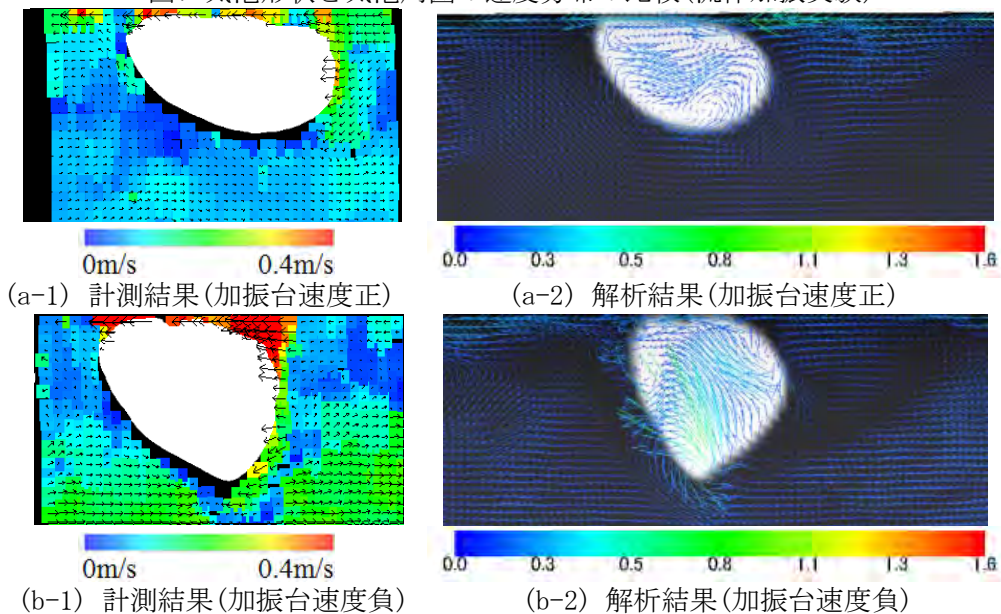


図8 気泡形状と気泡周囲の速度分布の比較(構造物加振実験)

3. 今後の展望

3. 1 流体加振実験

流量の変動量や周期を変え実験を行い、気泡挙動と速度場に着目し、その特徴を明らかにする。また、解析の際の境界条件となる気液流量および圧力を同時に計測し、解析技術の高度化に必要な定量的なデータベースの構築を目指す。

3. 2 構造物加振実験

製作およ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、気泡およ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

2. 3 で二相流挙動評価に対する妥当性を確認した TPFIT を用いて、地震加速度付加時における燃料集合体内二相流に対する適用性を検討するとともに、地震加速度付加時の燃料集合体内二相流挙動に対する総合評価を行う。