

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

研究代表者 阿部 豊 国立大学法人筑波大学システム情報系
参画機関 国立大学法人筑波大学、独立行政法人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、物体の構造並びに地震動の周波数や振動モードにより大きく異なる。このため、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、ほとんど明らかとなっていない。加振時の気液二相流の応答特性が、固体構造物に対する応答特性とは異なるものであることから、これまでの固体構造物に対する振動解析の知見を、加振時の気液二相流の応答予測に単純に外挿することには、重大な懸念がある。

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、地震によって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、液相の境界層を介して振動が伝播する。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、図1に示すように筑波大学での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・基盤的な研究開発を JAEA により行われ地震加速度付加時における気液二相流の詳細予測技術を高度化する。

2. 研究開発成果

2.1 実験及び解析手法開発の概要

2.1.1 流体加振実験

実験装置の概要を図2(a)に示す。実験装置は、作動流体としての水をポンプで駆動する単一ループ構造になっている。水単相流にピストンクランク機構を用いた流体加振装置により流量変動を加えた後に、気液混合器にて気体(窒素ガス)を注入する。テスト部は、内径14mmのアク

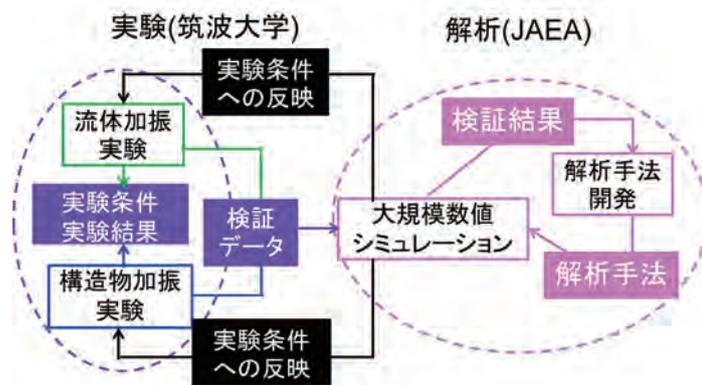
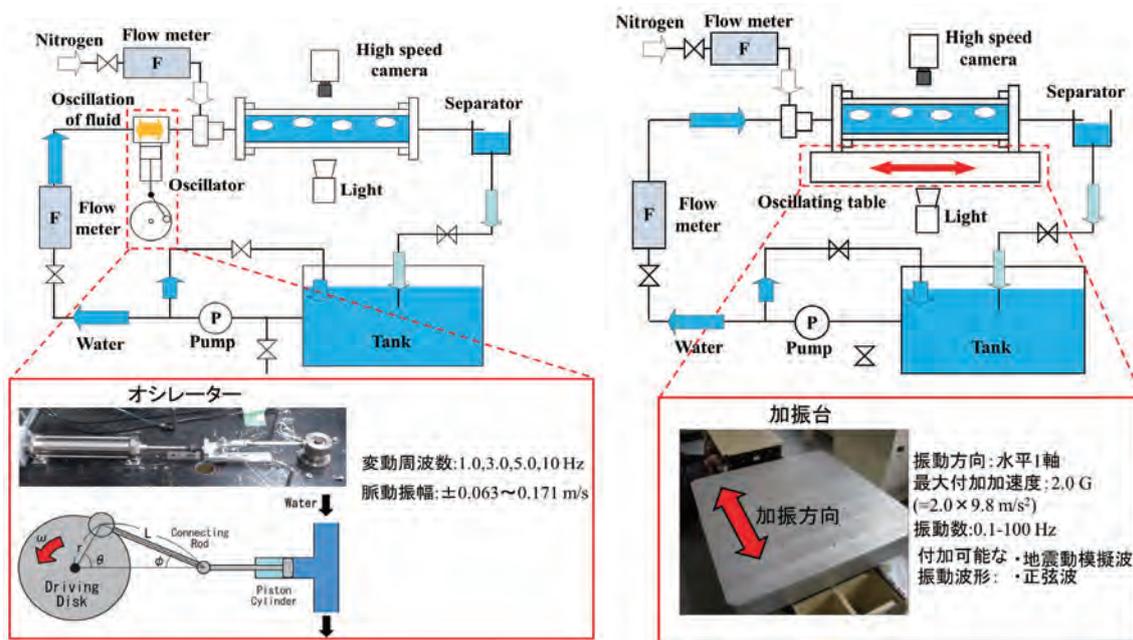


図1 研究プロジェクト概要

リル円管を水平配置したものである。テスト部出口は大気開放の気液分離タンクに接続されており、大気中に放出された気液二相流の水は水槽に戻り、気体は大気中に放出される。テスト部にて気泡挙動の画像処理計測を行うと共に、PIVにより気泡流の液相速度場計測を行った。

2.1.2 構造物加振実験

構造物加振実験においては、基本的な構造が流体加振実験と同様な水平管内の二相流を対象としたものと、上昇する気泡流に対して水平方向加振を付加したものの二つを実施した。水平管内気泡流に対する加振実験装置の概要を図2(b)に示す。テスト部は加振台(振動方向が水平1軸方向で、付加最大加速度は2.0 G (19.6 m/s^2))上に設置され、所定の加振動を受ける。一方、上昇気泡流の実験では、底面が120 mm×400mmで高さ400mmの亚克力製矩形容器に水を溜め、底部のノズルより窒素を注入し上昇気泡流を形成した。テスト部等とともにハイスピードカメラを加振台上に載せ、気泡挙動の画像処理計測及びPIVによる液相速度場計測を行った。



(a) 流体加振実験

(b) 構造物加振実験

図2 実験装置概要

2.1.3 加速度付加時の詳細二相流解析手法開発

地震加速度が付加された場合、流れの脈動、壁面の振動、地震加速度による体積力の影響が二相流に付加されると考えられる。そこで本研究では、(1)流れの脈動の影響を評価するための入口・出口における各種物理量を時間的に変化させる機能(非定常境界条件付加機能)、(2)非定常な壁面速度を与える機能(非定常壁面速度付加機能)及び、(3)振動加速度を運動方程式中の体積力として付加する機能(非定常加速度付加機能)、の3つの機能を追加した。これらの追加した機能については、簡易な解析により、導入が妥当になされたことなどを確認した。

2. 2 実験及び解析結果の概要

2.2.1 流体加振実験及び流体加振実験解析

図3に、流量変動 $f=5\text{Hz}$ 、液相流速 $j_l=1 \pm 0.078\text{m/s}$ 、気相流速 $j_g=0.0216\text{m/s}$ の流量変動を付加した場合の、実験で取得した気泡形状及び気泡周囲の液相相対速度場と、解析による気泡形状及び速度分布を示す。なお、液相速度場については、気泡の移動速度を差し引くことで求めた気泡に対する相対速度場である。図より、気泡速度が液相見かけ流速より小さくなる位相で特異な気

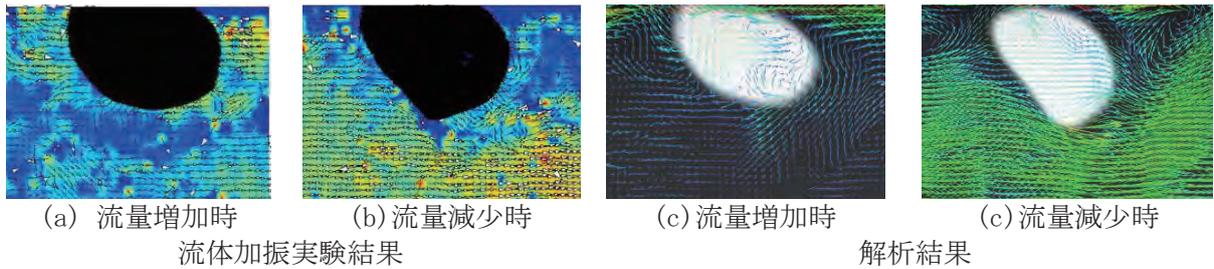


図 3 流体加振条件における実験結果と解析結果

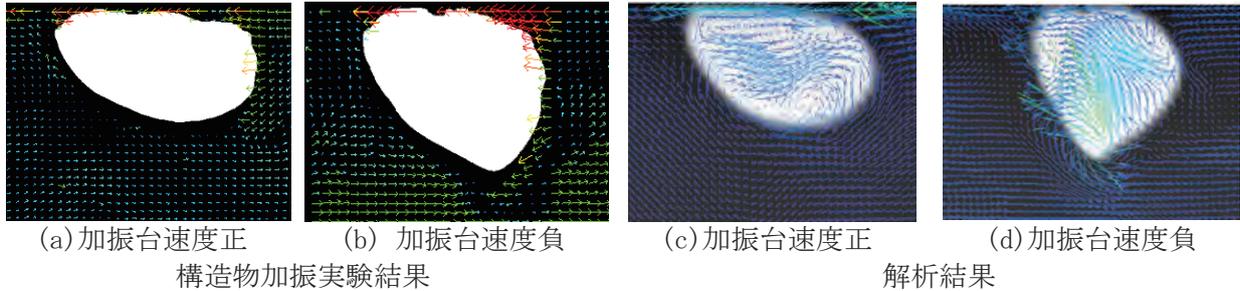


図 4 構造物加振条件における実験結果と解析結果

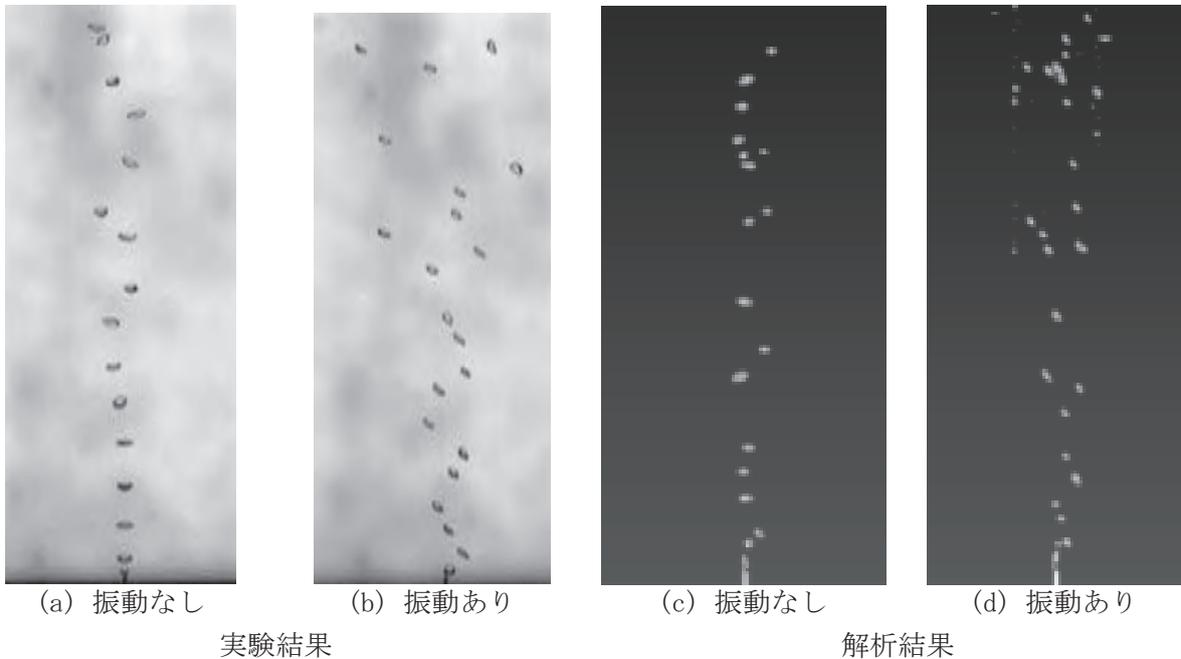


図 5 構造物加振条件における上昇気泡流の可視化観測結果と解析結果

2.3 サブチャンネル内評価解析

開発した解析手法を用いて、燃料集合内サブチャンネル内の気泡流を模擬した解析を実施し、気泡変形が見られる。このとき周囲液体が気泡下部に潜り込む流れを示すことから、これが気泡変形を引き起こしたと考えられる。開発した解析手法による結果も、上述の気泡変形や速度場の変化を含めて実験結果を再現している。これらの結果より、流体加振付加時の気泡周りの速度場についての同時計測を行い、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とともに、流体加振を付加した条件での解析が可能な解析手法を開発した。

2.2.2 構造物加振実験及び構造物加振実験解析

図 4 に、水平配置したテスト部に、液相流速 0.5 (m/s)、気液流量比 0.06 の気泡流に、振幅 $a=1.0$ (G)、振動数 $f=10$ (Hz) の正弦波振動を付加した場合の、実験で取得した気泡形状及び気

泡周囲の液相相対速度場と、解析による気泡形状及び速度分布を示す。振動台が流れと反対向きに移動する場合には、同じ向きに移動する場合に対して、気泡が垂直方向に引き伸びる傾向がある。また、テスト部中心部付近の液相相対速度が増加するとともに、気泡後方では界面に沿う流れ場が示され、上述の流体加振実験と同様に、剪断応力が増加していることが示された。

図5に、上昇する気泡流に対して水平方向加振を付加した場合の、実験で取得した気泡形状と、解析による気泡形状を示す。図より、振動を付加することで気泡の軌跡が広がること、振動を付加した場合に気泡の傾きが全ての気泡で同一になる傾向があることが分かる。また、開発した解析手法による結果も、上述の気泡変形や速度場の変化を含めて実験結果を再現している。これらの結果より、構造物加振付加時の気泡周りの速度場についての同時計測を行い、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とともに、構造物加振を付加した条件での解析が可能な解析手法を開発した。

2.3 サブチャンネル内評価解析

開発した解析手法を用いて、燃料集合内サブチャンネル内の気泡流を模擬した解析を実施した。解析体系を図6に示す。解析においては、サブチャンネル内に蒸気-水の二相流を形成するため、燃料棒を模擬した構造物の下部に、計16箇所のノズル(0.5mm角)を設けた。図7に、流路出口から観察した、断面内の気泡分布を示す。振動を与えない場合、ほぼ均等に気泡径がほぼ一様の気泡が分布しているが、振動を与えた場合、気泡の合体が進むことで、気泡径が大きくなること、また、燃料棒間の狭隘部に気泡が集まる傾向があることが分かる。なお、気泡径が大きくなることで、振動に対する追従性が低下し、加振方向に対する気泡の移動はほとんど見られなくなった。

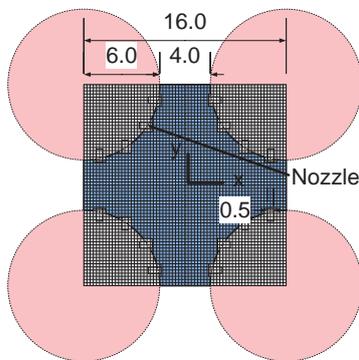
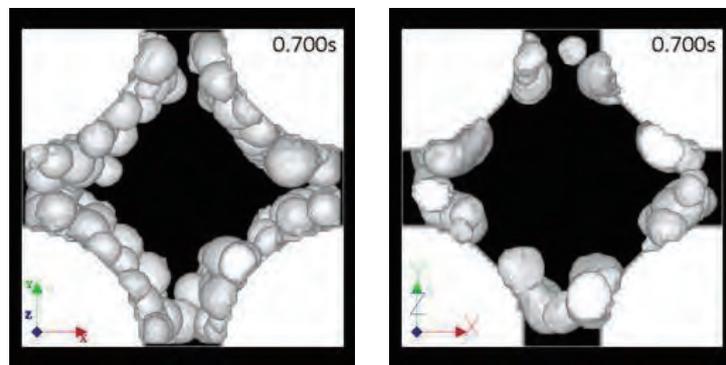


図6 サブチャンネルを模擬した計算体系



(a) 振動なし

(b) 振動あり

図7 サブチャンネル内二相流挙動(t=0.7 [s])

3. 今後の展望

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、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した。さらに、これまで実験では不可能であった、詳細かつ高精度な加速度付加時の二相流挙動評価を可能とする加速度付加時詳細二相流解析手法を開発した。今後は、実地震波を用いるなど、より実現現象に即した実験を実施し、構築したデータベースを拡充する。また、実験データベース及び解析手法を併用し、加速度付加時の二相流挙動のメカニズムの把握など、現在の原子炉の熱設計で用いられる構成方程式の高度化や、実験に依存しない構成方程式評価方法の開発などに繋がる研究を実施する。このような手法開発の成果は、地震時を含む原子炉構造物に対する安全設計指針の高度化や原子炉設計の最適化に役立つものと考えられる。