

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820448

研究課題名(和文)環状噴霧流における液滴-液膜相互作用に関する研究

研究課題名(英文)Study on the interaction between liquid film and droplet in annular mist flow

研究代表者

伊藤 大介 (Ito, Daisuke)

京都大学・原子炉実験所・助教

研究者番号：30630024

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：環状噴霧流における液滴付着・離脱などの液滴-液膜相互作用に関して調べることを目的とし、高速電気伝導率計測に基づく液膜厚さ分布計測システムの構築を行った。そして、狭隘矩形流路内気液二相流において電気伝導式液膜センサと中性子ラジオグラフィ法による同時計測を行い、気液界面挙動の詳細計測を可能にした。また、界面追跡法を用いた液膜流解析による液滴・液膜挙動に関するデータベース構築の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：To investigate the interaction between liquid film and droplet in an annular-mist flow, high-speed liquid film sensing method with an electrical conductance measuring system and a multi-electrode sensor was developed. The air-water two-phase flow in a narrow vertical channel was measured by the liquid film sensor and high frame rate neutron radiography simultaneously, and the two-phase flow structure could be measured. In addition, a liquid film flow simulation with volume-of-fluid method was performed and the possibility of the database construction for liquid film and droplet behaviors was shown.

研究分野：原子力学

キーワード：気液二相流 液膜厚さ 電気伝導式液膜センサ 中性子ラジオグラフィ法 界面追跡法

1. 研究開始当初の背景

原子炉の安全性の向上や蒸気発生器などの機器の高効率化に対して、従来から二相流現象の解明が必要とされてきている。特に、高ボイド率条件での環状噴霧流における液滴・液膜挙動は、それらの性能に大きな影響を与えるため、詳細な現象解明が求められている。近年ではコンピューター技術の発展に伴い、環状液膜流などの気液界面構造を詳細に解析可能な数値計算手法が考案されてきており、液滴挙動などの微視的な二相流動機構の解明に対する研究が多く行われるようになってきた。しかしながら、従来の実験データは時間・空間的に平均化されたものが多く、高度な計算結果から得られる多次元情報の確からしさを評価するためには不十分であった。そのため、時間・空間的な流動情報を取得可能な計測手法が必要となってきた。

本研究では、時空間二相流動特性の計測手法として気液相の電気伝導率の差に基づく手法に着目した。液膜厚さ分布の計測のための電気伝導式センサ(Liquid Film Sensor; LFS)を用いて、2次元液膜厚さ分布の高速計測が可能になった。その一方で、これまでもLFSを用いた液膜流れへの液滴付着に関して研究を行っているものの、小さな液滴の検出に対しては、さらなる高分解能計測の必要性を示している。そのため、液滴・液膜挙動の詳細計測のためには、センサおよび計測システムの高時空間分解能化が必要となる。

一方で、中性子イメージングは金属管内における熱流動を非接触で可視化することができるため、沸騰二相流のような高温・高圧流れの計測を可能にすることから、非常に強力な手法として認識されている。世界的にも中性子イメージングの流動計測への適用が進められてきているものの、単一手法のみでの計測に留まっており、中性子ラジオグラフィと他の手法との併用により、多方面からの流動評価を可能にし、さらなる二相流現象の解明が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、電気伝導に基づく高分解能液膜厚さ分布計測法を確立し、中性子ラジオグラフィ法との同時計測により液膜流れにおける気液界面挙動の詳細計測を可能にする。さらに、界面追跡法による多次元液膜流解析を実現することで、環状噴霧流における液滴付着・離脱などの液滴-液膜相互作用に関して調べることを目的とする。

3. 研究の方法

電気伝導率計測に基づく液膜厚さ分布の高分解能計測および界面追跡法による液膜流数値計算によって、環状噴霧流における液膜付着が液膜挙動に与える影響およびその微視的な流動機構に関して調べる。

(1) 空気-水系二相流における高精度気液界面測定法の確立

電気伝導率に基づく液膜厚さの時空間分布計測のために、新たな高分解能センサの開発を行う。まず電磁場解析を行うことで、電極のサイズや配置に関して最適化を行い、多層プリント基板技術によるセンサを製作する。また、レーザー変位計を用いた校正試験を行うことで、高精度な液膜厚さ計測を実現する。

高速電気伝導率計測のためのシステムの構築を行う。現有システムに対してアナログ信号入出力デバイスを追加することで、計測点数の拡張を行い、さらにサンプリング速度が10kHz程度の高速計測を可能にする。また、それに伴い、アルゴリズムの改良および校正・増幅回路の追加を行う。

狭隘流路内における気液二相流に対して電気伝導による液膜厚さ分布計測と中性子ラジオグラフィ法との同時計測を行う。中性子ラジオグラフィ法においては、高速度カメラを利用した撮影を行い、時系列画像処理方法を適用することで、ノイズを低減し、液膜厚さの計測に適用する。それぞれの手法で液膜厚さ計測の分解能が異なるため、データを組み合わせることで、系統的な実験データを取得する。

(2) 界面追跡法による数値計算法の構築

界面追跡法としてVOF法を用い、2次元液膜流れ解析を行う。オープンソースCFDツールであるOpenFOAMのVOF法ソルバを使用する。流下液膜流れにおける気液界面挙動の数値計算を行う。

4. 研究成果

(1) 電気伝導式ワイヤーメッシュ計測システムの開発

LFSを用いた液膜厚さ分布計測のために高速電気伝導計測システムを構築した。本システムは図1に示すように、アナログ信号出力部、センサ部、受信回路部、アナログ信号入力部から成る。アナログ信号出力部は、複数の出力チャンネルを有し、それぞれがセンサの電極へと接続される。センサ部では送受信電極間の液膜厚さに応じた電流が流れ、受信回路部へと送られたその信号は、I-V変換回路において電圧信号へと変換される。その後、電圧信号として取り込まれ、PCにおいて信号処理を行う。本システムは、NI PXIシステムによって構築することで、高速計測及び各デバイス間での正確な同期を可能にした。また、回路部に対しては、高速オペアンプを使用した回路を自作した。また、現有のワイヤーメッシュセンサを用いた管内空気-水系二相流のボイド率計測において、本システムの動作確認を行った結果、サンプリング速度10kHzにて計測可能であった。

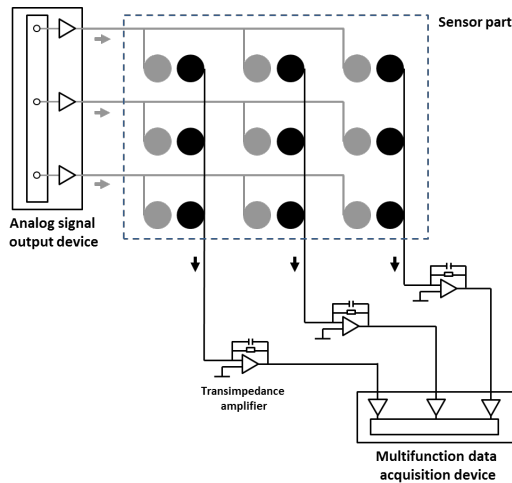


図1 高速電気伝導率計測システム概略図

(2) 液膜計測センサの開発

液膜厚さ分布の計測に用いるセンサの設計製作を行った。様々な電極構成に対して3次元電場解析を適用し、液膜厚さと検出される電気信号との関係性を調べ、高分解能計測のために適したセンサ体系に関して検討を行った。そして、多層プリント基板技術によって計測点間隔 1.5mm、送受信電極サイズ 0.5mm、接地電極サイズ 0.7mm、計測点数 36×80 を有する液膜計測センサ(図 2)の製作を行った。

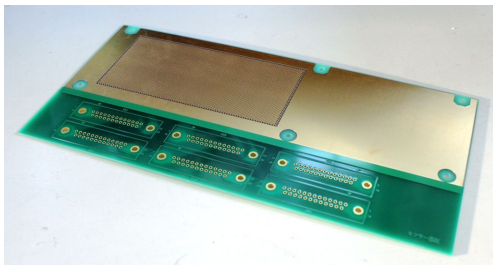


図2 製作した液膜計測センサの写真

(3) 中性子ラジオグラフィ法の高度化

中性子ラジオグラフィ法(NRG)による微小液膜の時空間分布計測の可能性を調べるために、現有のラジオグラフィ装置の高度化を行った。中性子ラジオグラフィ実験は、京都大学原子炉実験所 B-4 中性子導管実験室(中性子束： 5×10^7 n/cm² s)において行った。NRGによる動画撮影には、中性子像を可視光に変換する蛍光コンバータと高速度カメラ、イメージインテンシファイアから成る撮像システム(図 3)を用いた。また、得られた画像データからボイド率への算出には、中性子散乱によるオフセット校の補正に対して液相の巨視的断面積を用いて評価するΣスケールリング法を用いた。さらに、取得画像はコンバータによるボケや光学系におけるノイズなど様々なノイズが重畳しているため、時空間フィルタを適用しノイズの低減を図っ

た。デジタルフィルタとしては、高いノイズ除去およびエッジ保存特性を有する Non-Local Means フィルタを3次元空間へ拡張し、時空間領域におけるフィルタリングを行った。

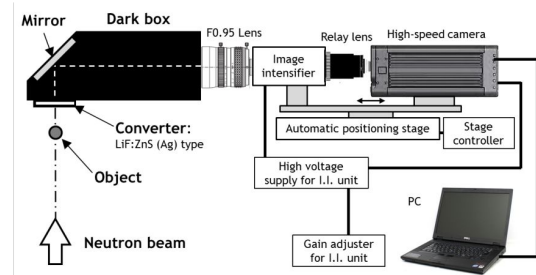


図3 動画撮影のためのNRG撮像システム

図 4 に改良を行ったシステムを利用した NRG によって得られた瞬時ボイド率分布を示す。それぞれの図は時空間フィルタの適用前後の結果である。フィルタ前においては、多くのノイズが確認できるのに対して、フィルタによってそれらの影響を低減することができた。しかしながら、適用したフィルタのノイズ除去特性の最適化に関しては、他の計測手法との比較によって、算出しの誤差評価などを行う必要があると考えられる。

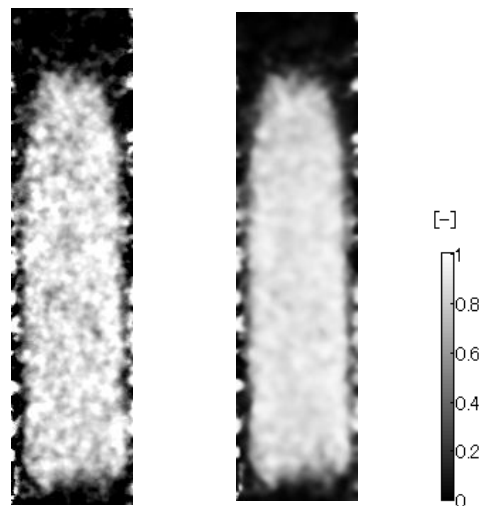


図4 2次元ボイド率分布
(左：フィルタ前、右：フィルタ後)

(4) 液膜センサと中性子ラジオグラフィの同時計測

LFS と NRG の同時計測のために用いたテスト流路は幅 12 mm、隙間 2 mm のアクリル製矩形流路であり、垂直上向きに設置した。LFS は、NRG の撮影領域内の片側壁面に設置し、同一箇所での同時計測を行った。LFS の計測点は 7×32 点、計測点間距離は 1.5 mm である。時間分解能は、NRG は 200 Hz、LFS は 10,000 Hz である。

NRG と LFS の同時計測によって得られた結果を図 5 に示す。本結果はある時刻におけ

る瞬時分布である。NRG によってボイド率の空間分布が得られ、LFS によって気泡と壁面の間の液膜厚さ分布が取得できた。本結果より、NRG では気泡形状を明確にとらえることが可能であるが、デジタルフィルタで除去しきれないノイズのために百 μm 以下の液膜厚さの検出は困難であることが分かった。一方で LFS は、計測点数は少ないものの、壁面と気泡との間における微小液膜厚さを高速に計測することが可能であった。

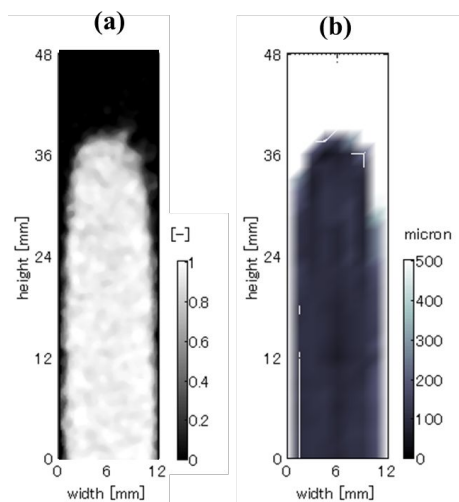


図 5 同時計測結果 (a) NRG, (b) LFS

図 6 は図 5 の分布の $z = 24 \text{ mm}$ の位置におけるそれぞれの手法によって得られた水平方向分布を示す。NRG においてはボイド率から流路隙間における気泡厚さを算出した結果を示す。気泡が流路隙間のほとんどを満たしていることが NRG 結果よりわかる。一方で、LFS では約 $100 \mu\text{m}$ の液膜厚さが計測可能である。さらに、それらの結果から、LFS を設置していない壁面の液膜厚さを推定したところ、ほぼ同じような値となり、LFS と NRG を組み合わせた新たな計測手法の可能性が示された。このように時間・空間的に異なる分解能を有する手法を組み合わせることで、気液二相流の詳細構造の把握が可能と考えられる。

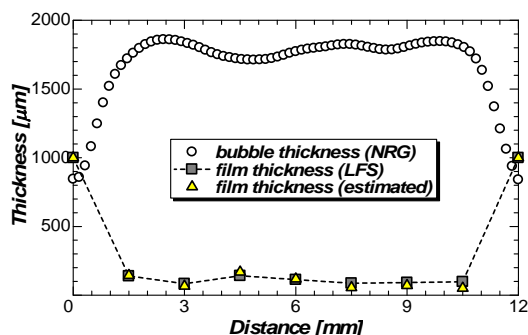


図 6 気泡厚さおよび液膜厚さの水平方向分布

(5) 界面追跡法による液膜挙動の数値計算
液膜流や液滴付着などといった詳細な界面挙動を伴う現象の系統的な理解を深めるためにオープンソース数値解析コード OpenFOAM を用いた解析方法の構築を行った。計算モデルとしては界面追跡法 VOF を適用し、まず 2 次元空間での液膜流れの解析を行った。その際、アダプティブメッシュを適用し、気液界面の挙動の詳細な解析を行った。結果、流下液膜の変動を得ることができたが、LFS との比較を行うには至らず、今後、実験との比較により、解析結果の検証を進める必要がある。また、液滴付着に関する数値解析のためには、メッシュサイズや境界条件などの更なる検討が必要であるということがわかった。そのため、液膜付着に関する数値解析および液膜流との相互作用を考慮したモデルの検討については、引き続き研究を進めていく次第である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- 1) Daisuke Ito, Yasushi Saito and Yuji Kawabata, “Hybrid two-phase flow measurements in a narrow channel using neutron radiography and liquid film sensor”, Physics Procedia (2015) 掲載決定, 査読有
- 2) Yasushi Saito and Daisuke Ito, “Image Enhancement for High frame-rate Neutron Radiography”, Physics Procedia (2015) 掲載決定, 査読有

〔学会発表〕(計 2 件)

- 3) D. Ito, Y. Saito and Y. Kawabata, “Hybrid two-phase flow measurements in a narrow channel using neutron radiography and liquid film sensor”, 10th World Conference on Neutron Radiography (WCNR-10), Grindelwald, Switzerland, 2014 年 10 月 5~10 日
- 4) 伊藤 大介, 齊藤 泰司, 「中性子ラジオグラフィ法による狭隘流路内気液二相流の計測 (液膜厚さ分布計測センサとの同時計測)」日本原子力学会 2014 年秋の大会, 京都市, 京都大学, 2014 年 9 月 8~10 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 大介 (ITO, Daisuke)
京都大学・原子炉実験所・助教
研究者番号: 3 0 6 3 0 0 2 4

(2) 研究協力者

Horst-Michael Prasser
ETH Zurich・教授