

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18318

研究課題名(和文)狭隘流路内沸騰伝熱流動へ及ぼす表面濡れ性の影響

研究課題名(英文)Effect of surface wettability on boiling two-phase flow in a narrow channel

研究代表者

伊藤 大介 (Ito, Daisuke)

京都大学・複合原子力科学研究所・助教

研究者番号：30630024

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：平行平板間狭隘流路における沸騰二相流の伝熱・流動特性を明らかにするため、静電容量式液膜厚さ分布計測システムの構築を行い、従来の電気伝導式システムと同レベルでの計測を可能にした。また、中性子ラジオグラフィ法の高度化により、従来手法に比べて格段に時間分解能を向上させた。さらに、片面加熱矩形流路を用いた沸騰熱伝達実験において、狭間隙内流動構造の詳細計測の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：To investigate the heat transfer and two-phase flow characteristics in a narrow rectangular channel, liquid film measurement system based on an electrical capacitance measurement was developed, and the measurement with sampling frequency of 10kHz which is similar to that of a conventional electrical conductance system could be conducted. In addition, neutron radiography system was also improved to enhance the temporal resolution. Finally, boiling heat transfer experiments with one-side heated narrow channel were performed and the possibility of the detailed measurement of two-phase flow structure in the narrow gap was shown.

研究分野：原子炉熱流動

キーワード：沸騰二相流 狭隘流路 中性子ラジオグラフィ 液膜センサ

## 1. 研究開始当初の背景

加速器駆動システム (Accelerator Driven System: ADS) は、次世代の核エネルギーシステムとして注目されており、京都大学や日本原子力研究開発機構、ベルギー原子力研究センターなどで研究開発が進められている。ADS の核破砕ターゲットとしては液体金属や固体金属が考えられるが、基礎研究または中性子源としての利用を考えた際には、固体ターゲットが用いられる可能性が大きい。ADS 固体ターゲットは複数の重金属平板から成り、板に対して垂直方向から陽子線が照射されることで、ターゲット表面において高密度の熱と高エネルギー粒子が発生する。このような固体ターゲットの冷却においては、通常は水単相流での冷却を想定しているが、ポンプトリップや加速器暴走といったシビアアクシデント時には、想定以上の熱負荷がかかり、沸騰が起こる可能性がある。そのため、ターゲット平板間における狭間沸騰二相流挙動を明らかにする必要がある。これまでに、片面加熱の狭間矩形流路内における限界熱流束に関して、円管や矩形管に対する既存の相関式の適用性について調べられており、伝熱特性に関する系統的な実験結果が得られている。しかしながら、沸騰挙動を詳細に理解するためには伝熱面上の液膜挙動や隙間方向の分布特性の評価が必要である。

一方で、ADS ターゲットのような強放射線に曝される場においては、固体金属の表面濡れ性が変化する可能性がある。従来、ガンマ線による表面濡れ性の改善効果は報告されているものの、高エネルギー粒子線の影響については不明であった。そこで研究代表者は、陽子線照射が表面濡れ性へ及ぼす影響について調べ、陽子線による表面濡れ性の向上を初めて発見した。このような表面濡れ性は、沸騰現象において最も重要なパラメータの一つであることが知られており、固体ターゲット冷却においても、考慮しなければならない。したがって、ADS 固体ターゲット冷却技術の確立のためにも濡れ性による影響を明らかにする必要がある。

また、中性子ラジオグラフィは、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・高圧流れの計測が可能である。しかしながら、狭間内沸騰流のような非常に高速に変動する流れ場への適用を考えた場合、従来手法では撮影速度の制限から詳細な観察は困難であった。そのため、中性子ラジオグラフィにおける時間分解能の向上は、沸騰二相流の詳細な流動評価を可能にし、さらなる二相流現象の解明につながる。

## 2. 研究の目的

本研究では、ADS 核破砕固体ターゲット体系において形成される平行平板間の狭間流路における沸騰二相流の伝熱・流動特性を明らかにするため、中性子ラジオグラフィ法と静電容量式液膜センサを用いた二相流特性の計測によって、狭間流路内における沸騰二相流動特性を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 静電容量に基づく液膜厚さ分布計測手法の確立

本研究は沸騰現象の基礎研究であり、流体としては不純物の少ない純水もしくはイオン交換水を用いる必要がある。研究代表者がこれまで行ってきた電気伝導式液膜センサでは、十分な精度で計測することが困難である。そのため、静電容量式液膜厚さ分布計測システムの構築を行う。信号入力部に用いる I/V 変換および増幅回路の最適化を行い、従来の電気伝導式システムと同程度のノイズレベルでの計測を実現する。

### (2) 中性子ラジオグラフィ法の高度化

高速に変動する沸騰二相流動の可視化のために、中性子イメージングシステムの改良を行う。高速度カメラ、光学レンズ、蛍光コンバータの最適化を行い、時間分解能を改善する。

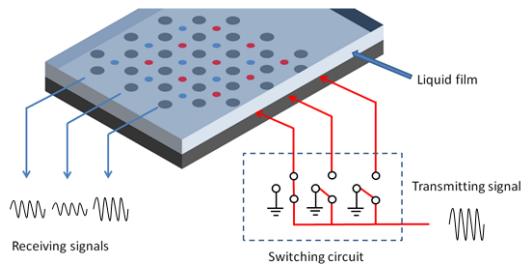
### (3) 狭間沸騰装置を用いた伝熱流動実験

片面加熱矩形試験部を用いた強制対流沸騰実験のため、沸騰二相流装置の整備を行い、通電加熱実験を実施する。試験部は矩形狭間流路とし、非加熱面にガラス窓および液膜センサを設置できるようにする。本装置を用いた加熱実験において、限界熱流束特性および熱伝達特性について調べる。

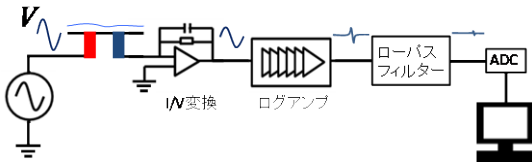
## 4. 研究成果

### (1) 静電容量式液膜厚さ分布計測システムの開発

静電容量式計測システムでは、周波数が MHz オーダーの正弦波電圧信号を各電極へ印加し、センサ部での液膜厚さに応じた電流信号を受信回路で電圧に変換し測定する。図 1 に静電容量式計測システムの概略図を示す。図 1(a)に示すようにスイッチング回路により、送信信号を各電極列へ送り、液膜を經由した信号が受信部へと流れる。受信回路では I/V 変換アンプおよびログアンプから成る回路を用いた(図 1(b))。また、信号ノイズの低減を図るためローパスフィルターを組み込んだ。本システムの動作確認の結果、従来の電気伝導式手法と同様に 10 kHz での液膜厚さ分布計測が可能になった。



(a) 多点液膜厚さ計測



(b) 静電容量式計測回路

図1 静電容量式液膜計測システム

(2) 液膜分布計測センサの開発

液膜センサ設計においては、電極配置の最適化のための3次元電場解析を行い、多様な電極配置条件に関して検討を行うとともに、静電容量計測においては高周波信号を扱うため、インピーダンス特性やクロストークの影響を考慮したセンサ設計を行った。そして、計測点間距離は2 mm、送受信電極径0.5 mm、グラウンド電極径0.9 mm、計測点数16×32点を有するセンサの製作を行った(図2)。また、液膜センサは事前に校正する必要がある。従来、静的な校正法を用いていたが、より精度の高い校正を行うため、液膜流を用いた動的な校正法を適用した。その際、高い分解能(0.2 μm)を有するレーザー変位計を利用し、より高精度な校正曲線の作成を行った。

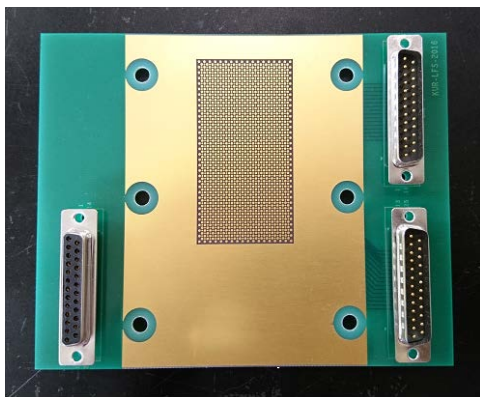
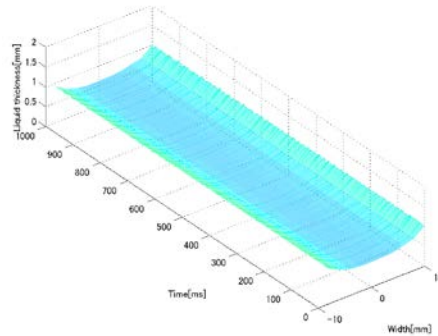


図2 製作した液膜計測センサの写真

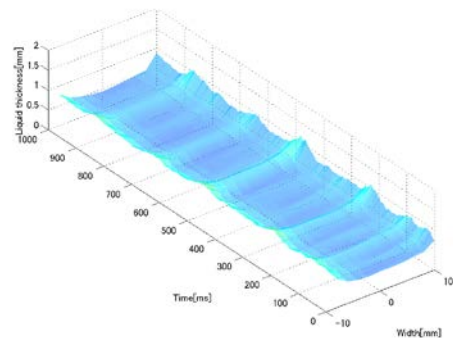
(3) 水平矩形管内における液膜挙動計測

構築した静電容量式液膜厚さ分布計測システムを用いて水平矩形管内液膜挙動の計測を行った。流路試験部は幅30mm、高さ10mmの矩形管であり、流路底面に液膜センサを取り付け、液膜厚さ分布計測を行った。作動流体にはイオン交換水を用い、試験前後に電気伝導率および液体温度を計測した。そ

の際の電気伝導率はおよそ2μS/cmであった。図3に計測された液膜厚さ分布の一例を示す。気液流量の違いによって異なる液膜流が形成されていることがわかる。また、電気伝導率の低いイオン交換水を用いた流動実験においても液膜厚さ及びその変動が計測可能となった。



(a)  $Q_g=50$  L/min  $Q_l=50$  mL/min



(b)  $Q_g=83.3$  L/min  $Q_l=200$  mL/min

図3 水平矩形管内液膜流における液膜厚さ計測結果

(4) 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による二相流の高時間分解能計測の可能性を調べるために、現有のイメージングシステムの高度化を行った。中性子ラジオグラフィによる動画撮影には、中性子透過像を可視光に変換する蛍光コンバータとレンズ、光学イメージインテンシファイア、高速度カメラから成る撮像システム(図4)を用いた。本研究では、高感度高速度カメラ及び超高感度レンズを適用し、取得画像の高輝度化を図った。

本システムを用いて、円管内空気-水系二相流の可視化実験を行った。試験部は内径20mm、厚さ1mmのポリカーボネート製円管である。ポンプによって水を循環させ、試験部上流から空気を注入することで、試験部において二相流を形成した。中性子ラジオグラフィ実験は、京都大学複合原子力科学研究所B-4 スーパーミラー中性子導管実験室(中性子束:  $7.5 \times 10^7$  n/cm<sup>2</sup>s)において行った。

図5に円管内における空気-水系二相流の中性子ラジオグラフィ結果を示す。管内を気

泡が上昇する様子が見てとれる。また、今回のシステム改良により、10,000fpsの撮影速度での可視化が可能となった。B-4ポートでのこれまでの最高撮影速度が500fpsであり、それに比べて格段に速度を上げることが出来た。しかしながら、研究炉での中性子ラジオグラフィ実験は最終年度のみであり、利用時間は僅かであった。そのため、中性子ラジオグラフィ法と静電容量式液膜センサによる加熱面上の液膜厚さ分布の推定のための実験には至らなかった。今後、これらの手法を組み合わせた同時計測による液膜挙動の詳細計測を実施する予定である。

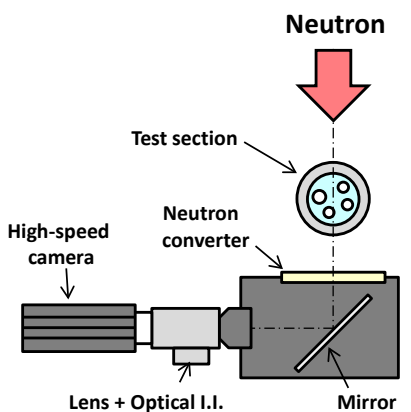


図4 中性子イメージングシステム

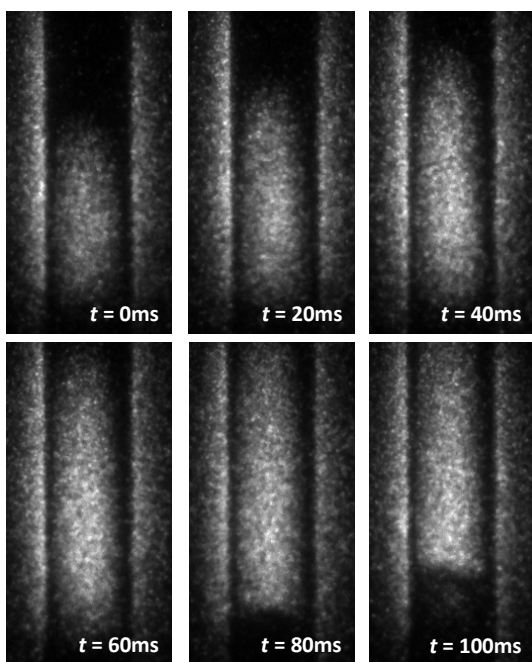


図5 円管内二相流可視化結果

#### (5) 沸騰実験装置と流動実験

狭隘流路実験装置は、隙間1mm幅40mmの流路断面面積を持ち、片側壁面に加熱電極を有し、非加熱面は可視化用ガラス窓を設置している。電極の大きさは30mm×360mmである。図6に沸騰二相流実験装置の概略図を示す。試験部電極へ直流電源装置から通電することで加熱し、流路内に沸騰二相流を形成す

ることができる。直流電源としては、伝熱実験用の20V 5000A電源と中性子イメージング用の20V 1200A電源の2つが利用できる。それぞれを用いた通電加熱による沸騰実験への適用性を確認した。また、入口条件として、サブクール度および質量流束を変化させ、狭隘流路内における沸騰二相流の流動様相および限界熱流束特性について調べた。得られた結果と従来の研究との比較を行い、計測結果の妥当性の確認を行った。一方で、通電加熱試験部における非加熱面への液膜センサ設置にあたっては、静電容量式システムへの絶縁回路の組み込みが困難であったため、沸騰場の液膜計測まで到達することができなかった。今後、加熱部での液膜計測を可能にし、狭隘流路内沸騰二相流における詳細流動構造の把握を進めていく。

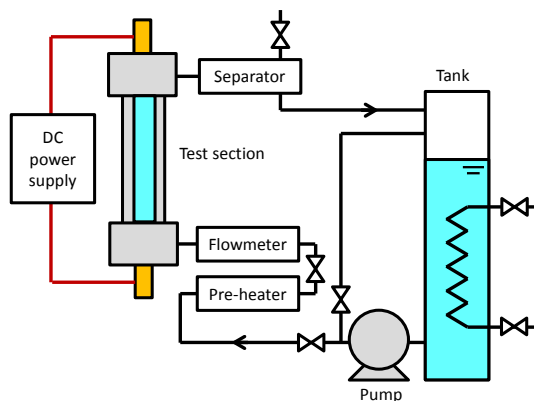


図6 沸騰二相流実験装置

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① 松下貴博、伊藤大介、伊藤啓、齊藤泰司、液膜センサの開発と二相流計測への応用、京都大学原子炉実験所 第52回学術講演会 (2018.1)
- ② 伊藤大介、伊藤啓、齊藤泰司、中性子を利用した混相流高速度可視化手法の高度化、混相流シンポジウム 2018, (2018.8) 発表予定
- ③ Daisuke Ito, Kei Ito, Yasushi Saito, High-frame rate neutron imaging of bubble behavior in air-water two-phase flow, 11th World Conference on Neutron Radiography, (2018.9) to be presented.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

伊藤 大介 (ITO, Daisuke)

京都大学・複合原子力科学研究所・助教  
研究者番号：30630024

##### (2) 研究協力者

Horst-Michael Prasser  
ETH Zurich・教授