

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：37112

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13892

研究課題名(和文)多孔質内水平気液二相流における気泡立体構造の可視化

研究課題名(英文) Visualization of spatial structure of bubble in two-phase flow through porous media

研究代表者

高津 康幸 (Takatsu, Yasuyuki)

福岡工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00253550

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：従来の透過光による気液二相流の可視化では、定性的な流動パターンは大まかに確認できるものの、原理的に気泡の立体構造の情報が欠落することになる。本研究では、光の波長の違いを利用した気泡断面画像の可視化法を新たに提案した。特に気液界面の判別では、ロンキー・ルーリングを導入し、入射光の縞模様が気液界面では屈折して写り込む現象から、気液界面が容易に判別可能となった。さらに、気液二相流のモデリングの基盤となる局所体積平均の発散定理の誤りを指摘するとともに、レイノルズ輸送方程式を詳細に検討することにより局所体積平均の発散定理を修正した。

研究成果の概要(英文)：As the halation at the gas-liquid interface brings about technical difficulties for the visualization of two phase flow using laser light sheet, only few attempts have ever been made at the experimental examination of the spatial structure of the bubble. In this study, we propose an optical observation method using differences of wavelength between the gas phase and the Rhodamine B dye in the liquid phase which produces fluorescence upon exposure to the green laser sheet. The camera equipped with a sharp cut-off filter is used for fluorescence detection, so that only the fluorescent light is recorded. In other words, the image which corresponds to the bubble is omitted. Furthermore, we examine the Reynolds transport theorem in the microscopic and macroscopic fields, and modify the conventional theorem for the local volume average of a gradient which modelling of the flow through porous media and the two phase flow is based on.

研究分野：伝熱工学

キーワード：多孔質 気液二相流 可視化

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 燃料電池の触媒開発にともない、多孔質内気液二相流に関する関心が集まってきている。燃料電池でよく利用される触媒は、反応面積を大きくするために多孔質構造体が採用されている。燃料電池の性能向上を図る上で、生成された水の水速やかな除去ならびに電解質に対する適切な温度管理が重要となるため、多孔質内気液二相流の流動特性に関する知見が必要になる。多孔質内気液二相流の研究に関しては、理論的な検討がいくつかあるものの、多孔質内幾何形状の複雑さに起因して実験的に検証されていないというのが現状である。

(2) 気液二相流の可視化に関しては、透過光が用いられてきた。しかしながら、透過光による可視化では、定性的な流動パターンは大まかに確認できるものの、原理的に気泡の立体構造の情報が欠落するため、気泡の合体・分裂などの変形メカニズムの素過程の検証あるいは画像解析によるボイド率計測などは困難となる。図1に示すように、気泡の立体構造を把握する手法として、レーザーシート光を照射することにより断面(スライス)画像を取得する方法が考えられる。しかしながら、図2に示すように、気液界面で光のハレーションが生じ、画像処理により気泡幾何形状の輪郭を計測する上で大きな障害となる。レーザーシート光照射による可視化は気泡の立体構造を把握する上で有効な手法であるが、従来においては気液界面でのハレーションの問題が解決できなかったため進展しなかったものと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、気泡の立体構造を把握するための新たな可視化法を構築することによ

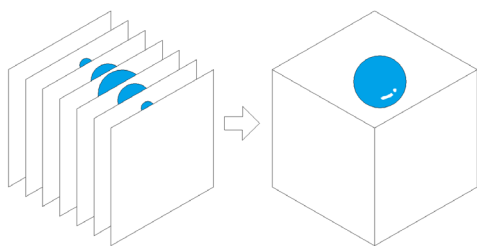


図1 シート光による気泡立体構造の取得

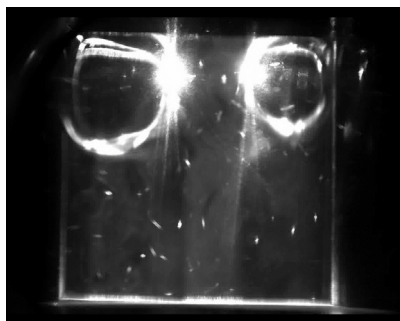


図2 ハレーション

り、多孔質構造体内部における気泡の微視的挙動を明らかにすることを目的とする。主として、次のようなことを明らかにする。

(1) 画像処理により気泡形状の時系列変化を詳細に検討するとともにボイド率を計測し、多孔質内水平気液二相流の流動様式について明らかにする。

(2) 多孔質構造体は広い隙間の領域と狭い隙間の領域が組み合わさっており、多孔質固有の気泡の合体・分裂が生じるものと考えられる。特に、狭い隙間の領域における **Liquid Bridge** 生成による **Plug** 効果、気泡が通過する際に分裂する条件など表面張力の寄与について知見を得るとともに、多孔質内部固体の役割について明らかにしていく。

多孔質内部の微視的流れ場に関する実験的知見が皆無という状況の下、気泡の立体構造を可視化し内部流動状況を明らかにするとともに、気泡の合体・分裂に対する多孔質内部固体の役割を明確にすることは、多孔質内気液二相流のレオロジー解明に資するものであり、学術的に極めて重要である。

### 3. 研究の方法

本研究で提案する光の波長の違いを利用した気泡断面画像の可視化法の原理は、次のようなものである。

- (1) 蛍光色素であるローダミン B を注入し、液相を蛍光できる状態にする。
- (2) レーザーシート光(波長 532 nm) を照射した場合、気液界面でハレーションは生じるものの、液相のみオレンジ色(波長は約 590 nm) に蛍光することになる。
- (3) シャープカットフィルター(例えば、560 nm 以下) を用いて、気泡部分の波長の光を遮光すれば、気泡幾何形状が抽出されることになる。

提案する手法により、気液界面でのハレーションの影響は除去できると考えられるが、気泡の立体構造の高精度な画像解析を実施するにあたり、界面での光の屈折・反射などについて把握しておかなければならない。気液界面での反射・屈折などの光の基本挙動を検証するためには、半径が大きく真球度の高い気泡を生成する必要がある。水中で気泡を生成した場合には、気泡が上昇するにつれ気泡形状が変形し、真球度が保たれなかった。そこで本研究では、ローダミン B を混入した高粘性のオリゴ糖溶液中で単一気泡を生成した(図3参照)。

単一気泡の可視化実験から得られる知見を基に、多孔質内水平二相流の可視化を実施し、気泡の変形あるいは合体・分裂などの現象について検討していく。図4に示すように、狭い隙間内に円柱群を千鳥配列した Hele-Shaw 円柱群を多孔質構造体に模擬することにより、多孔質内水平気液二相流におけるマイクロな内部流動状況を可視化する。気液混合装置はテストセクション入口直前に設置し、テストセクション内に空気-水系の二

相流を流入させる。また、テストセクション中央部には可視化のために中空アクリル円柱を設置している。図5にレーザーシートを用いた光学系を示す。レーザーには DPSS レーザー（波長 532 nm）からのビーム光をパウエルレンズと平凸シリンドリカルレンズによってシート光に変換し、二円柱間に照射する。撮影にはハイスピードカメラ（画素数：1280×1024、フレームレート：2000 fps）を用い、中空アクリル円柱内に配置したミラーを介して、気泡のスライス画像を撮影する。また、画像の歪みを極力避けるため、ハイスピードカメラには両側テレセントリックレンズを装着している。

本研究は、主として、多孔質内部のマイクロな流動状況を実験的に明らかにするものであるが、マイクロな挙動がマクロな挙動（局所体積された支配方程式）にどのように反映されるかなど理論的に検討していく。

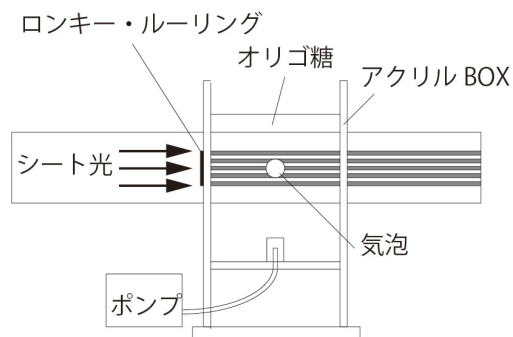


図3 単一気泡の可視化

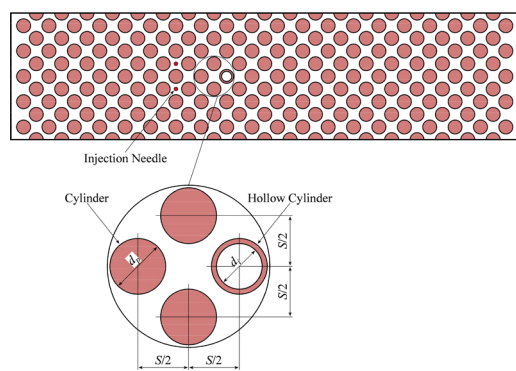


図4 テストセクション

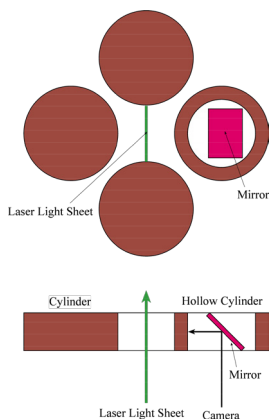
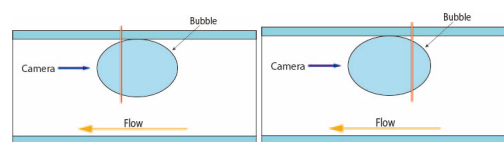


図5 シート光を用いた光学系

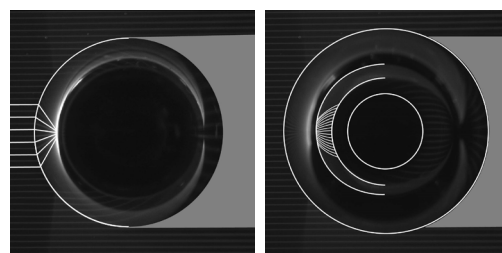
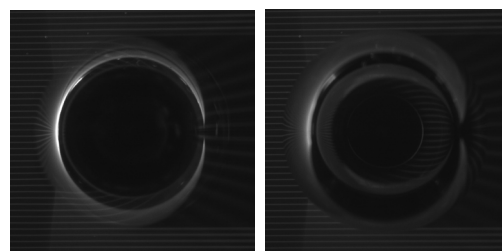
#### 4. 研究成果

多孔質構造体内部の気泡の立体構造を可視化するにあたり、図6に示すようにシート光照射位置に依存して気液界面位置の判別が異なることになる。ここで、図6(a)の気泡前半とは、レーザー照射によって得られる気泡断面の直径が気泡最大径に到達するまでの区間を意味し、図6(b)の気泡後半とは、気泡最大径到達後の区間を意味する。そこで、図4の単一気泡の可視化実験から、気液界面の判別を試みた。図7の可視化画像は、真球の単一気泡へシート光を照射し、カメラ2台を用いて両側から撮影することにより、図6の撮影状況を同時に再現したものである。図7(a) (上段:オリジナル可視化画像、下段:オリジナル画像の入射光・写り込みなどを明瞭化した画像) に関しては、気液界面では、ロンキー・ルーリングによってもたらされる入射光の縞模様が屈折して写り込むため、気液界面の判別は容易である。また、判別した気液界面の直径は、遮光領域の幅に一致することも確認できる。一方、図7(b)に関しては、縞模様ならびに円形の薄い筋が認められる。シート光照射位置での気液界面としては、縞模様の外径・内径もしくは円形の薄い筋が候補に挙がり、気液界面の判別を困難としている。また、いずれの場合にも、界面直径は、遮光領域の幅と一致せず、小さくなっている。この理由として、前半の気泡自体がレンズの役割を果たすため、シート光照射位置での気液界面は縮小して写ることが考えられる。本研究では、スポット光を用いた実験から、シ



(a) 気泡前半 (b) 気泡後半

図6 シート光照射位置



(a) 気泡前半 (b) 気泡後半

図7 単一気泡へのシート光照射

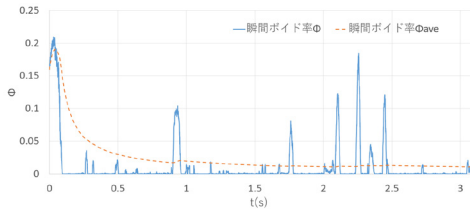


図8 多孔質内気液二相流におけるボイド率変化

一ト光照射位置での気液界面は、縞模様の内径に相当することを確認している。

単一気泡における気液界面の判別に関する知見を基に、多孔質内気液二相流の気泡流領域での気泡の挙動を検討した。図8は、可視化画像の画像解析より求めたボイド率の時系列を示したものである。なお、可視化に際しては、2000 fps で撮影し、13,055 枚の取得画像に対して画像解析を行っている。瞬間ボイド率 $\Phi$ が上昇・下降する事象は、シート光への気泡の通過に対応する。図8の流動領域では、基本的に小径の気泡が頻繁に通過し、散発的に大気泡が通過していく様相が確認される。また、大気泡の通過の際には、固体の存在により、一旦停滞し一気に加速して通過するというような挙動が認められる。

本研究で提案する“光の波長の違いを利用した気泡断面画像の可視化法”が単一気泡の立体構造を抽出する上で原理的に有効であることを明らかにしたことは、気液二相流の可視化のブレークスルーになったと考えている。今後は、本可視化法の気泡群への応用などを検証し、多孔質内気液二相流における気泡の合体・分裂などの変形メカニズムの素過程についてさらに検討していく。

本研究において、当初は、気泡に作用する抗力などを局所体積平均の発散定理から導出することを考えていた。しかしながら、この発散定理に関してはいくつかの疑問（微分可能、圧力補正）が投げかけられている。そこで本研究では、レイノルズ輸送方程式を詳細に検討することにより、局所体積平均の発散定理を修正した。Slattery によって提案された局所体積平均に関する勾配定理 (J. C. Slattery, Flow of viscoelastic fluids through porous media, AIChE J. 13 (6) (1967) 1067-1071) は、次のようにあらわされる。

$$\langle \nabla B \rangle^{(f)} = \nabla_0 \langle B \rangle^{(f)} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{fs}} B n dA \quad \text{where} \quad \langle B \rangle^{(f)} = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} B dV$$

多孔質内の勾配拡散（せん断力・熱流束など）に関して、ミクロな挙動とマクロな挙動の関係を示すものであり、多孔質固有の流動抵抗は  $A_{fs}$ （多孔質構造体流体相の検査体積  $V_f$  上の流体—固体相界面面積）まわりの積分項から導かれる。局所体積平均の概念は多孔質内熱流動のモデリングのみならず、二相流のモデリングなどに応用されるとともに、近年ではナノ流体の熱物性値の評価にも用いら

れている。本研究では、“従来の局所体積平均に関する勾配定理では、多孔質内流路は直管として取り扱われており、一般に流路断面積が変化する内部幾何形状を有する多孔質構造体のマクロな流れ場では流量・圧力損失の不連続をもたらす”ことを指摘するとともに、ミクロスケールおよびマクロスケールでのレイノルズ輸送定理から新たな局所体積平均に関する勾配定理を次のように導いている。

$$\langle \nabla B \rangle^{(f)} = \nabla_0 \langle B \rangle^{(f)} - \frac{1}{V_f} \int_{A_{ff}} c_0 B n dA + \frac{1}{V_f} \int_{A_{fs}} B n dA$$

ここで、 $c_0$ は  $A_{ff}$  ( $V_f$ 上の流体が流入・流出する面積) での速度分布に関連する。本報は、局所体積平均に関する勾配定理を根幹とした膨大な研究成果の再検討を余儀なくさせるものであり、学術的重要性が極めて高いと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Yasuyuki Takatsu, Modification of the fundamental theorem for transport phenomena in porous media, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有、Vol. 115, Part B, 2017, pp. 1109–1120,  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.067>

② Yasuyuki Takatsu, Takashi Masuoka, Takahiro Nomura, Yuji Yamada, Modeling of Effective Stagnant Thermal Conductivity of Porous Media, Journal of Heat Transfer (ASME)、査読有、Vol. 138, Issue 1, 2016, pp. 012601-1–7,  
<http://heattransfer.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2422381>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高津 康幸 (TAKATSU, Yasuyuki)

福岡工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00253550