

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：34416

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860069

研究課題名（和文）

離散気泡モデルによる沸騰二相流の熱流動ダイナミクスモデルの構築

研究課題名（英文）

Thermal-fluid dynamics approach for boiling two-phase flow using discrete bubble model

研究代表者

網 健行 (AMI TAKEYUKI)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号：00581654

研究成果の概要（和文）：

本研究は沸騰関連機器内における沸騰二相流の動的特性，あるいはこれに関連するような限界熱流束に代表される諸問題の高精度予測を行うために，離散気泡モデルを構築することが目的である．本研究では，運動量効果を与える非常に重要な機構である，先行スラグ気泡のウェーク機構に関して，傾斜上昇流に対する知見を得ることができた．また，離散気泡モデルは液液二相流のような密度比が非常に小さい条件に対しても適用可能であるという知見を得た．

研究成果の概要（英文）：

In this study, in order to improvement of discrete bubble model for highly accuracy prediction of boiling two-phase flow, the experimental investigation was conducted. In the discrete bubble model, the wake of slug flow was very important factor as momentum effect. The knowledge of the wake effect under inclined tube was obtained. And, this model was able to be applicable to liquid-liquid two-phase flow which has very small density ratio.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011年度	1,160,000	348,000	1,508,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：気液二相流，液液二相流，離散気泡モデル，スラグ流，パターンダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

気液二相流は様々な分野で活用されており，特に相変化を伴うような気液二相流は，ボイラなどの沸騰関連機器の水管の設計に際し，安全基準の一つとなる限界熱流束に密接に関わる重要な流れである．限界熱流束は流動様式，すなわち蒸発管内を流動する気液二相流の気相と液相の幾何学的な配置パターンの影響を受けることが知られている．そ

のため従来は，環状流域における液膜流モデルのように各流動様式に特化したモデル，もしくは流動様式ごとに構成方程式を切り替える二流体モデルやドリフトフラックスモデルが提案されてきた．沸騰二相流はエンタルピーの増加と伴に気相が増加するため，等温系の場合よりも気泡の合体・分離が頻繁に発生し，流動様式が管軸方向に大きく発達する加速流れである．しかし従来の研究の多くは，

空気-水系の等温二相流、もしくは蒸気-水系の沸騰二相流においてもその加熱部の出口部に設置した断熱区間で管内流動を観察したものが多い。そして準定常モデルである二流体モデルやドリフトフラックスモデルでは、等温系で決定した流動様式を順次切り替えて沸騰系に適用するため、沸騰二相流の加速流れや、気液二相流に内在するような気液界面の変動特性や過渡現象を本質的に表現できず、動的特性を取り扱うことができるダイナミクスモデルが必要となる。そこで、著者らはパターンダイナミクスによる流動解析が可能な分散気泡モデルを構築した。本研究ではこの分散気泡モデルをさらに発展させ、様々な系に適用するものである。

2. 研究の目的

気液二相流は気相と液相が混在した複雑な流れであり、そこで形成される気液界面は常に合体、変形、分離を繰り返しながら移流する時空間的に不連続な場を表現するために、分散気泡モデルを構築した。これは流れ場を把握する上で最も基本となる質量保存則であるボイド伝播方程式のみを基礎式とし、気泡の挙動を取り扱う上で重要と考えられる基本的な運動量効果である、気泡のウェーク効果、気相の圧縮性、管路との整合性に基づく相再配分機構のみを組み込むモデルである。本モデルは基礎式に質量保存則のみを用いていることから、様々な系に容易に拡張可能であり、最も典型的な垂直上昇流の空気-水二相流に対しては、適用可能であることを確認している。そこで、次の段階として、本分散気泡モデルによる二相流挙動の高精度予測を行うために、これまで経験則によるところが大きかった運動量効果の構成式を、各種実験を行いその結果をフィードバックすることで分散気泡モデルの最適化を行う。そのために、気泡の合体ひいては流動様式の遷移を決定づけるスラグ気泡のウェーク効果について詳細な知見を得る必要がある。また、液液二相流のような密度比が非常に小さい流動系に対しても本モデルの適用が可能かどうかを検討する。

3. 研究の方法

本研究では、まず、先行気泡のウェーク効果が後続気泡に与える影響を実験的に検討するために、ポンプ、気泡注入部、テストセクション、セパレータから構成される強制流動系で構成された実験装置（図1）を作成した。作動流体には水道水を用い、気泡注入部において、任意の大きさ、任意の個数が連続するスラグ気泡列を生成することができる。テストセクション部はFEP管を用いた観察部、定電流法によるボイド率測定部およびそれらをつなぐアクリル管から構成されている。

水はテストセクション下部から供給され、空気を下部の気泡注入部から供給する。そして、テストセクション部において、ハイスピードカメラによる気泡の観察および定電流法によるボイド率変動測定より後続機構の上昇速度を測定する。また、テストセクションに管傾斜を付加させることで、傾斜角がスラグ気泡のウェークに及ぼす影響を実験的に検討した。

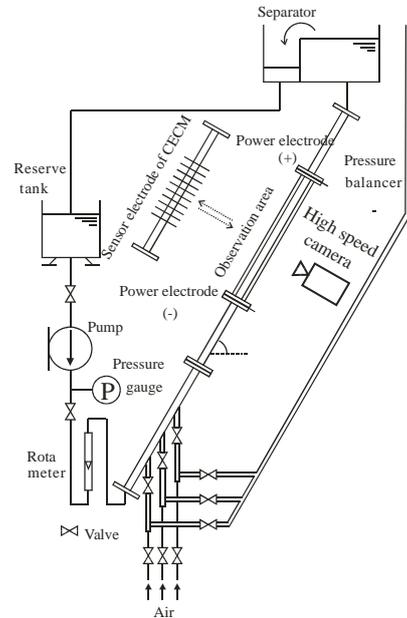


図1 実験装置概略図

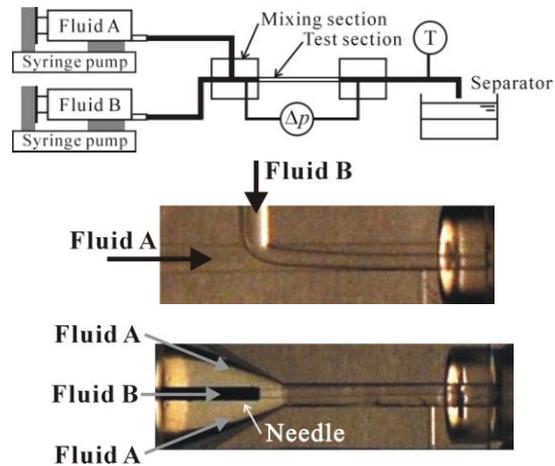


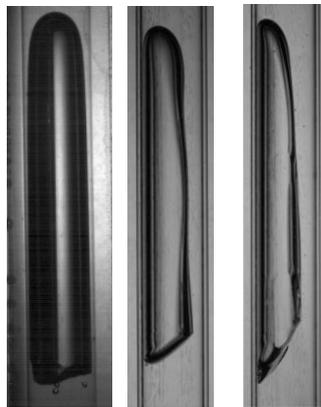
図2 実験装置外略図および混合部

また、気液二相流の高圧条件下に相当する、密度比が非常に小さい液液二相流の細管内の流動挙動を把握すると共に、このような流動現象に分散気泡モデルが適用可能かどうかを実験的に検討する。そのために、作動流体にクロシンと水を用い、シリンジポンプ、混合器、テストセクション、セパレータから構成される液液二相流の強制流動系の実験装置（図2）を作成し、ハイスピードカメラ

による流動観察およびテストセクション差圧の測定による流動特性実験を行った。また、混合部にはT字型と環状流路型の2種類の形状を用い、流動様式に及ぼす影響を検討した。

4. 研究成果

まず、先行気泡のウェーク効果が後続気泡に与える影響を検討した結果について示す。実験結果の代表例として、図3に傾斜角 $\phi = 90, 60, 30 \text{ deg.}$ におけるスラグ気泡の写真を示す。また、先行気泡が $\lambda_1 = 1.8$ 、後続気泡が $\lambda_2 = 1.4$ の場合について示す。なお、 λ は球体積等価直径を管内径 ($D = 20 \text{ mm}$) で除した値である。図4は後続気泡速度を単一気泡速度で除した無次元速度を気泡間距離を管内径で除した無次元距離に対して示し、そのときの最大値をプロットで示す。



(a) 90deg. (b) 60 deg. (c) 30 deg.
図3 スラグ気泡の観察画像

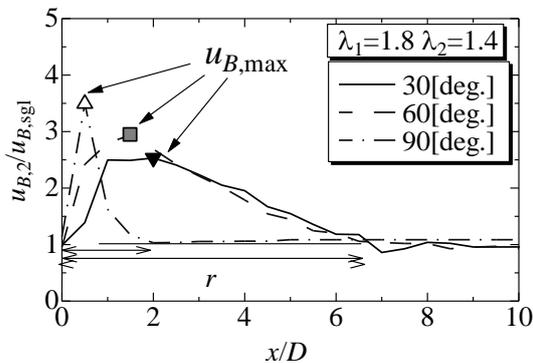


図4 無次元速度と無次元距離の関係

図より、気泡間隔が十分に大きい場合、後続気泡速度は単一気泡の上昇速度と等しいが、ウェークの影響範囲に入ると、気泡間隔が小さくなるにつれて気泡速度は大きく上昇する。そしてあるピーク値を取った後に大きく減少し、気泡が合体する傾向を示す。すべての傾斜角に対して同様な結果が得られており、管傾斜を与えた場合、スラグ気泡は浮力の影響により管頂部に偏るため、気泡の移動に伴い下流側に排除される液膜は主に管底

部からのみ排出される構造となる。そのため垂直上昇流の場合は、スラグ後端ですぐに液膜ジェットが拡散するためその影響範囲としては小さくなるが、傾斜管の場合は、片側の液膜ジェットのみがウェークに影響するため、その影響範囲は広がるものと考えられる。さらに、傾斜角の増加に伴い、垂直に近づくほど、管底部の液膜厚さは薄くなるため液膜ジェットの流速は増加する。その結果としてウェークの影響範囲およびその強度は増加するものと考えられる。このように垂直上昇流と傾斜上昇流とではウェーク構造そのものが異なることが本実験により、確認できた。

次に、分散気泡モデルを液液二相流のような密度比が非常に小さい条件に適用可能かどうかを実験的に検討した結果について示す。実験結果として、本実験で観察された管内径 $D = 0.53 \text{ mm}$ における流動様式の一列を図5示す。

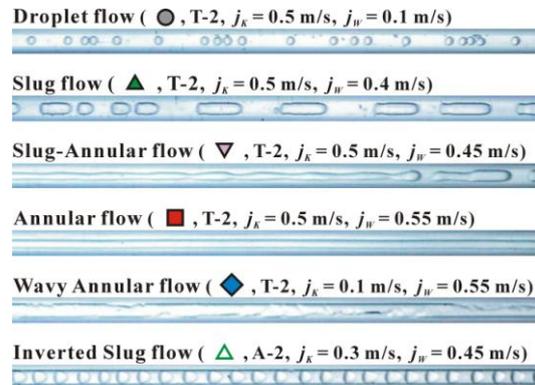
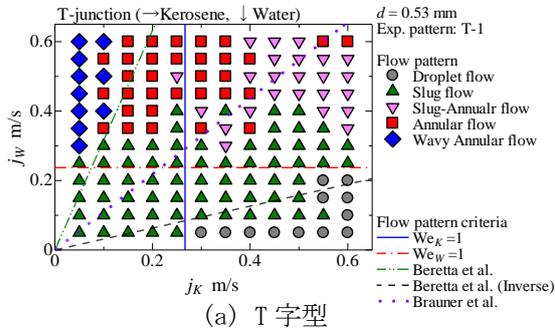


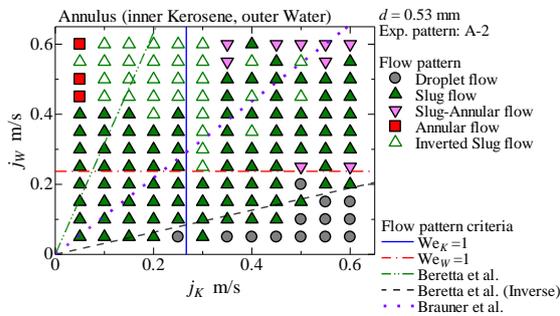
図5 流動様式 ($D = 0.53 \text{ mm}$)

図5より、ケロシンの体積流束 $j_k = 0.5 \text{ m/s}$ 、水の体積流束 $j_w = 0.1 \text{ m/s}$ の場合、管内径 $1D$ 以下の水液滴が管内に分散する、ケロシンが連続相として存在する液滴流が形成される。水の体積流束を増加させると ($j_w = 0.4 \text{ m/s}$)、管内の液滴が合体し、長さが $1D$ 以上のスラグ流へと遷移する。そして最も水の体積流束を増加させた場合 ($j_w = 0.55 \text{ m/s}$)、管内周囲をケロシンの液膜が覆いそのコア部を水が移流し、ともに連続相として存在する環状流が形成される。また、ケロシンの体積流束が極端に小さい場合 ($j_k = 0.1 \text{ m/s}$)、両相は伴に連続相として存在するものの、その界面を複雑に入れ替えながら流れる環状は上流が観察された。また、混合部に環状流路型を用いた場合のみ、水とケロシンが相反転する逆スラグ流が形成された。以上のような得られた流動様式を j_w - j_k 線図上にプロットしたものが図6であり、流動様式の遷移を考える上で重要となる慣性力と表面張力の

比であるウェーバー数 $We = 1$ の条件を示す。図 6 より、ウェーバー数が 1 以上の場合、慣性力が支配的であるため、対応する相が連続相となりやすく、ウェーバー数が 1 以下では分散相となりやすいという知見を得た。また、これらの流動様式は混合器形状において、せん断力を与えにくい環状流路型では液滴流が表れにくいことが分かった。



(a) T 字型



(b) 環状流路型

図 6 流動様式線図 ($D = 0.53 \text{ mm}$)

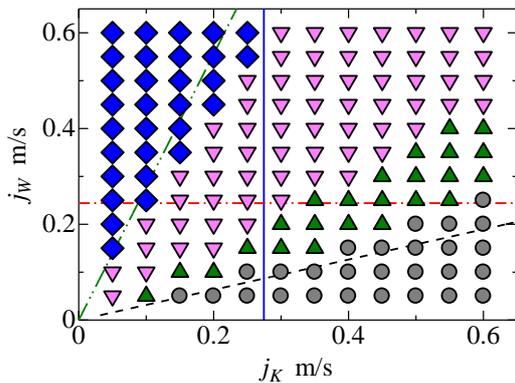


図 7 分散気泡モデルによる計算結果

このような液液二相流を対象として分散気泡モデルを適用したところ、混合器形状の違いは本モデルでは表現できないものの、代表的な流動様式のパターンとなるボイド変動を得ることができた。また、その変動特性に基づく流動様式線図 (図 7) は実験結果を上手く表現でき、分散気泡モデルは液液二相流のような密度比が非常に小さいような条

件に対しても適用可能であるという知見を得た。

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 1 件)

- ① 網健行, 梅川尚嗣, 小澤守, 大川富雄, 流動障害物設置による沸騰二相流への影響, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, Vol. 78, No.788, 2012, pp.894-904.

[学会発表] (計 6 件)

- ① 寺前拓也, 山科剛是, 広瀬由宗, 中村典子, 網健行, 梅川尚嗣, 小澤守, 傾斜管における連続するスラグ気泡の相互干渉, 日本機械学会関西学生会平成 23 年度卒業研究発表講演会 前刷集, 2012 年 3 月 15 日, 関西大学, 1122.
- ② Mamoru Ozwa, Takeyuki Ami, Kohei Awata, Hisashi Umekawa and Ryosuke Matsumoto, Oil-water mixture in horizontal mini-channel, 22nd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-22), Delft University of Technology, The Netherlands, 2011/11/10.
- ③ Takeyuki Ami, Noriko Nakamura, Takayuki Tsuruno, Hisashi Umekawa and Mamoru Ozawa, Boiling heat transfer and flow characteristics of liquid nitrogen in helically coiled tube, 22nd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-22), Delft University of Technology, The Netherlands, 2011/11/9.
- ④ 栗田浩平, 網健行, 梅川尚嗣, 小澤守, 水平細管内液液二相流の流動特性, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011 講演論文集, 2011 年 10 月 29 日, 静岡大学, 183-184.
- ⑤ 阪倉一成, 廣瀬拓哉, 網健行, 梅川尚嗣, 小澤守, 周方向非均一加熱管の限界熱流束 (熱流束レベルの影響), 日本機械学会関西学生会平成 22 年度卒業研究発表講演会 前刷集, 2011 年 3 月 18 日, 京都工芸繊維大学, 511.
- ⑥ 広瀬由宗, 中村典子, 網健行, 梅川尚嗣, 小澤守, 連続するスラグ気泡の相互干渉, 日本機械学会関西学生会平成 22 年度卒業研究発表講演会 前刷集, 2011 年 3 月 18 日, 京都工芸繊維大学, 417.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

網 健 行 (AMI TAKEYUKI)
 関西大学・システム理工学部・助教
 研究者番号: 00581654