

平成21年 5月29日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19360104
 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） Pattern Dynamics Simulation of Boiling Two-phase Flow Dynamics.
 研究代表者
 小澤 守（OZAWA MAMORU）
 関西大学・システム理工学部・教授
 研究者番号：60112009

研究成果の概要：

ボイド伝播方程式を基礎式とする離散気泡モデルを発展させ、垂直上昇流におけるボイド率の時間変動挙動を定常流ならびに流動脈動下に対して数値的に再現するとともに、同モデルの水平流への拡張を実施した。また、この計算結果を管内径 2.0, 3.0mm の水平ミリチャンネル内の作動圧力 5.0, 6.5 MPa の CO₂ で得られた実験結果と比較し、従来提案させている流動様式線図よりもよく実験結果を表現でき、特に管頂部のドライアウトが問題となる Slug-Annular flow を含む Intermittent 領域の存在を上手く再現できることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2008年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
年度			
総計	11,000,000	3,300,000	14,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱・物質移動，気液二相流，離散気泡モデル，流動様式

1. 研究開始当初の背景

気液二相流は気相と液相が混在した流れであり、そこで形成される気液界面は時間・空間的に変動し、分裂・合体しながら流動している。特にスラグ流は、管径大の大気泡が間欠的に形成され、ボイド率時間変動の確率密度関数における低・高ボイド率側の双峰にそれぞれピークを示すような時空間に断続した流れである。しかし、従来より提案されているドリフトフラックスモデルや二流体モデルに代表されるような時間平均化され

たモデルでは、これを 0.3～0.5 の滑らかなボイド率分布を有する流れと見なしてしまい、これは以下のようなクリティカルな現象を考える際に問題となる。

例えば、低圧・低質量流束条件の高加熱熱流束条件下で作動する沸騰関連機器において、起動時や負荷変動時には、気液密度比が大きいために不安定流動が発生しやすい。そしてこれが流動脈動を伴うような場合、大気泡が過渡的に形成される。このような場合、大気泡が加熱壁面を停滞気味に通過するた

め、大気泡周囲の液膜がドライアウトする低クオリティバーンアウトが発生することが考えられる。この低クオリティバーンアウトでは、通常沸騰関連機器等で想定されているような高クオリティ域の環状流液膜ドライアウトとは異なり、熱流束が高いことに加えて管内流速が非常に低いため、水管の物理的損失を引き起こす。しかし、このように二相流に本質的に内在するダイナミクスに起因する現象は、先にふれた時間平均化されたモデルでは表現できない。そこで、本一連の研究ではパターンダイナミクスに基づく離散気泡モデルを発展させることで、二相流ダイナミクスに起因する限界熱流束を予測・評価することを目的としている。

2. 研究の目的

本一連の研究では、ボイド伝播方程式を基礎式とした離散気泡モデルを構築させ、垂直上昇流におけるボイド率の時間変動挙動を定常流のみならず、流動脈動下において大気泡が過渡的に形成される様子も数値的に再現することが可能となっており、ここでは離散気泡モデルを水平流への拡張する。

3. 研究の方法

本研究では離散気泡モデルの構築とその関連実験として細管内 CO_2 沸騰実験、スラグ気泡のウェーク効果評価実験を実施した。ここでは、本研究の根幹となる離散気泡モデルの拡張について説明する。

本研究では、図1に示すような一次元管内水平流を対象としており、左端より液相を流入し、気液混合部において気相を流入し、そこで形成された気液二相混合物が右端に向かって伝播する系となっている。

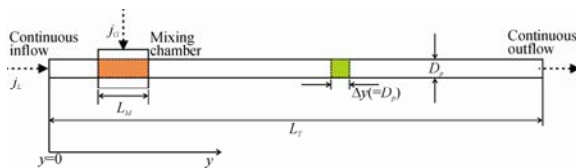


図1 流れ場

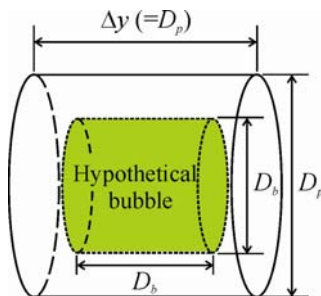


図2 仮想単一気泡

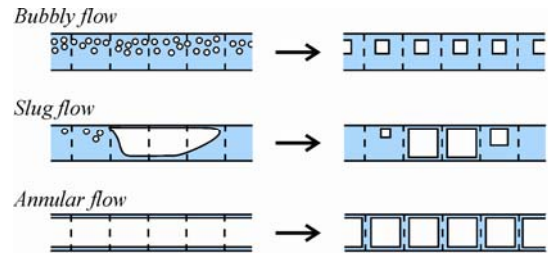


図3 流動様式

離散気泡モデルでは流れ場を管直径のスケールで離散化し、図2に示すようなセルと相似の仮想単一気泡を定義する。これにより流動様式は図3に示すように、それぞれ管径大の単一気泡で離散化され、気相と液相の分布パターンとして表される。

また、離散気泡モデルではボイド伝播方程式を基礎式として用いるが、これのみでは現実的な気泡の合体・分離、そしてこれらに起因する流動様式の遷移を実現できない。そこで、気泡に作用し、流動様式の遷移に関わると想定される本質的な機構のみを運動量効果として組み込む。

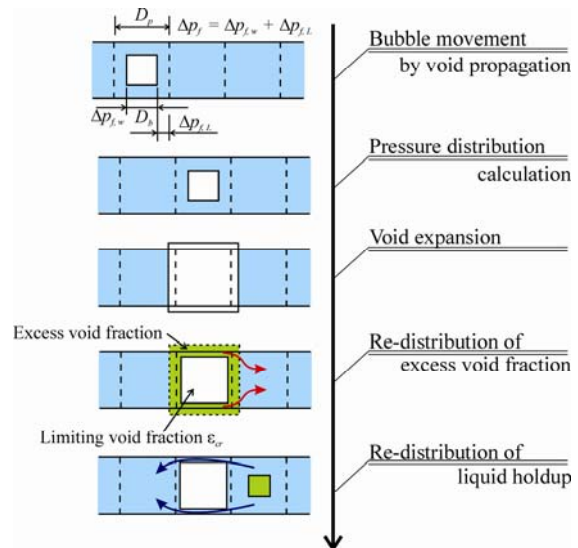


図4 計算手順

図4に本離散気泡モデルにおける計算手順を示す。まず第1ステップとして、仮想単一気泡の速度を算出する。気泡の流速は流れ場全体の流束に気液間の相対速度を考慮したもので得られる。垂直上昇流の場合、気液相対速度は気泡に作用する浮力と抗力のバランスにより算出していたが、水平流の場合は流れ方向と重力の作用する方向が異なるため、本モデルでは、水平ダクト内に進入する大気泡速度を実験的、解析的に得た Weber の式を適用した。また、気泡が並んで移流している場合、先行気泡のウェーク効果によって後続気泡が引き込まれ、追いつき合体し、

大気泡へ成長する現象が観察される。この先行気泡のウェーク効果は気泡の合体・成長を表現する上で非常に重要であり、本分散気泡モデルにおいてもこれを運動量効果として考慮している。そのため、気泡の流速にはウェーク効果を付加する必要があるが、気泡が複数個連続して移流している場合についての取り扱いについては確立されていないのが現状であり、本モデルではウェーク効果が上流に行くに従って指数関数的に減少するものとして考慮している。なお、この効果に関しては本研究範囲内で別途定電流法での評価実験を実施しており、一部学会発表も実施した。なお、詳細については引き続き評価中である。

気泡の伝播には気相の一次元質量保存式であるボイド伝播方程式に基づいて行う。この時、気泡は移流前後の局所静圧力の相違による気相の圧縮性により膨張もしくは収縮するため、局所静圧力を見積もる必要がある。垂直上昇流の場合、圧力損失は重力項がかなり支配的であったが、水平流ではこの要素がなくなるためにさらに詳細な検討が必要になる。そこで本モデルでは、水平管におけるスラグ流に **Regime-based modeling** を用いて静水圧を求め、大気泡前後の運動量欠損、大気泡部と液体スラグ部の摩擦圧力損失そして等価水位差による静水頭圧差の3つの和として見積もる。

上記の手法で、気泡を単純に膨張させた場合、水管の幾何学的限界を超えて仮想単一気泡の直径が管径よりも大きくなる計算が発生する。そこで、気泡が存在する限界ボイド率を環状流の液膜厚さを考慮して定義し、相の再配分を行うことでこれを解決する。このとき、大気泡が下流へ伝播する実現象に基づき、限界ボイド率よりも超過したボイドは下流へ再配分し、そこで押し出された液相部を上流で均一に再配分する。

以上の手順を一つのタイムステップとして取り扱う。数値計算にはボイド伝播方程式を有限差分近似した差分方程式を用いており、時間項は前進差分、対流項は風上差分を使用する。また、各セルはスタガードメッシュを用いており、クーラン条件を十分に満たすようにタイムステップを決定する。

4. 研究成果

本計算では管内径 2.0, 3.0mm の水平ミリチャンネルに作動圧力 5.0, 6.5 MPa の CO₂ を分散気泡モデルの検証データとして用いており、ここでは代表例として、管径 2.0mm, 作動圧力 6.5MPa の場合における計算結果を示す。図 5, 6 にそれぞれ水平流のボイド率の時空間変動波形の計算結果、およびボイド率の時空間変動の確率密度関数を示す。

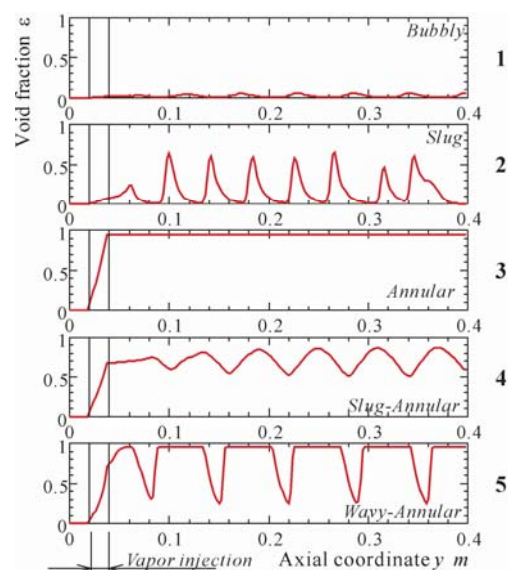


図 5 ボイド率分布

まず、図 5-1 のような低クオリティ条件ではテストセクション軸方向に小さな三角形のボイド波がまばらに伝播しており、図 6-1 では低ボイド率側に単一ピークが確認された。これよりこのような流動様式は **Bubbly flow** と考えられる。

そして、クオリティを増加させた条件 (図 5-2) では、大気泡に相当すると考えられる、比較的大きなボイド波がテストセクション軸方向にまばらに存在しており、図 6-2 では低ボイド率側と高ボイド率側の双峰にピークが確認できる。これよりこのような流動状態を **Slug flow** とする。

そして図 5-3 のように高クオリティ状態では、ボイド率はほぼ一定値を示し、図 6-3 の確率密度関数では高ボイド率側に単一ピークが確認された。これは **Annular flow** においてみられる特性である。

以上は垂直上昇流の場合と同様なボイド率分布であるが、以下の2つは水平流特有のボイド率分布である。図 5-4 ではサイン波状のボイド率分布が形成されており、その振幅は比較的小さい。また、図 6-4 ではスラグ流と同様に双峰ピークが確認できるが、その幅はスラグ流と比較すると小さい。これより、このような流動状態はスラグ流から環状流への遷移流として **Slug-Annular flow** とする。

そして最後の場合、波の頂部ではボイド率が高い一方で、波の谷の部分では低いボイド率を保持しており、環状流に大きな波が重なった流動状態であることからこれを **Wavy-Annular flow** とする。

以上のようにボイド率分布および統計学的特徴から判定した流動様式を質量流束一

クオリティ線図上にプロットしたものが図 7 であり、同計算条件における実験結果を図 8 に示す。また、水平流の典型的な流動様式線図である Weisman の流動様式遷移境界を実線で併記する。これより、計算結果は従来提案させている流動様式線図よりも実験結果を上手く表現でき、特に管頂部のドライアウトが問題となる Slug-Annular flow の Intermittent 領域が Weisman の提案している環状流の領域にまで広がる様子を上手く再現できることを示した。

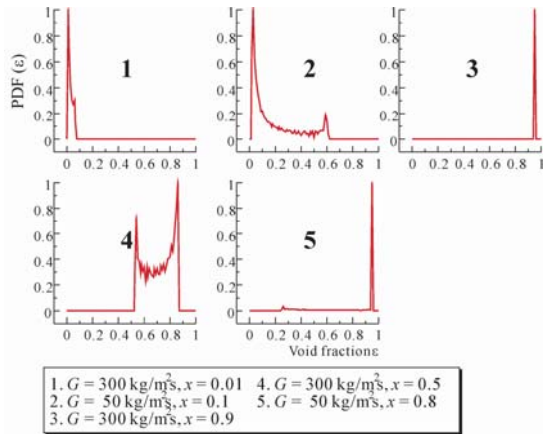


図 6 確率密度関数

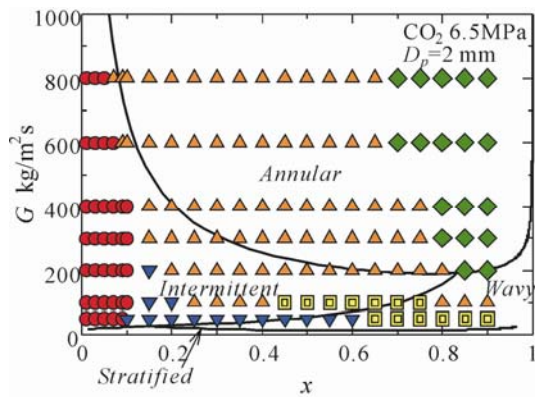


図 7 流動様式線図 (計算結果)

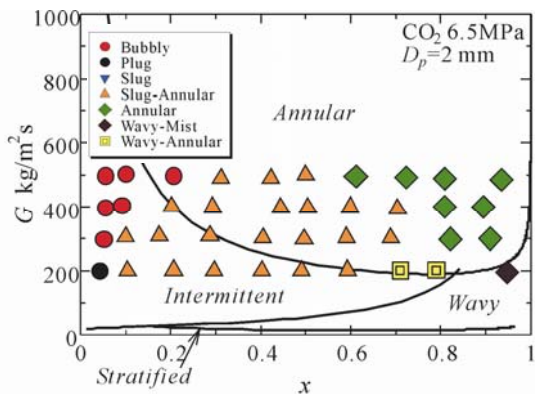


図 8 流動様式線図 (実験結果)

最後に、時間平均特性について示す。まず、図 8 にテストセクション摩擦圧力損失を Lockhart-Martinelli の相関式と比較したものを示す。これより、本分散気泡モデルの計算結果は Chisholm の相関式および均質流モデルと良く一致することが分かる。次にボイド率の時間平均特性をドリフトフラックスモデルに基づいて整理したものが図 9 である。これより、計算結果は Steiner が改良した水平流のドリフトフラックスモデルと良く一致する結果となった。これより本分散気泡モデルはパターンダイナミクスに見られるような抽象的なモデルではなく、流動様式を判別でき、実際の相関式と良く一致するという観点から物理的に意味があり、二相流が本質的に持つダイナミクスを表現できる二相流モデルである。

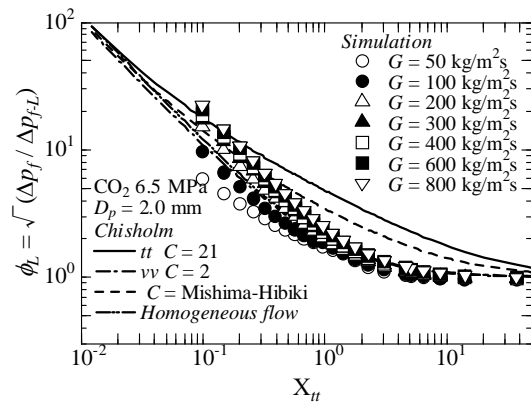


図 9 摩擦圧力損失特性

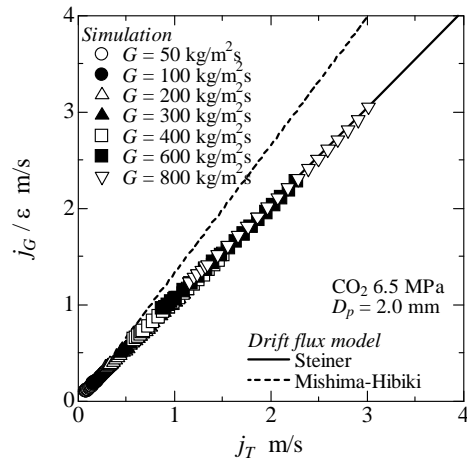


図 10 ボイド率特性

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 M. Ozawa, T. Ami, I. Ishihara, H. Umekawa, R. Matsumoto, Y. Tanaka, T. Yamamoto and Y. Ueda, Flow pattern and boiling heat transfer

of CO₂ in horizontal small-bore tubes, International Journal of Multiphase Flow, 印刷中 (2009), 査読有

[学会発表] (計4件)

- ① 中村典子, 大藪明久, 網健行, 梅川尚嗣, 小澤守, 連続するスラグ気泡の相互干渉, 日本機械学会関西支部 学生員卒業研究発表講演会, 2009.03.15, 近畿大学
- ② T. Ami, H. Umekawa, M. Ozawa and M. Shoji, Application of Discrete Bubble Model to Boiling Two-Phase Flow, 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2008.10.15, Sapporo, Japan.
- ③ T. Ami, H. Umekawa, M. Ozawa, M. Shoji, An Application of Discrete Bubble Model to Horizontal Two-Phase Flow, 2nd International Forum on Heat Transfer (IFHT-2008), 2008.09.17, Tokyo, JAPAN
- ④ M. Ozawa, T. Ami, I. Ishihara, H. Umekawa, R. Matsumoto, Y. Tanaka, T. Yamamoto, Y. Ueda, Flow Pattern and Boiling Heat Transfer of CO₂ in Horizontal Small-Bore Tubes, US-Japan Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, 2008.09.16, Santa Monica, U.S.A.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小澤 守(OZAWA MAMORU)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号: 60112009

(2) 研究分担者

梅川 尚嗣(UMEKAWA HISASHI)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号: 10232894