

平成21年 5月30日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760122
 研究課題名（和文） 混相流における複雑界面現象のメゾスコピックシミュレーション
 研究課題名（英文） Mesoscopic Simulation of complex interfacial phenomena
 in multiphase flow
 研究代表者
 山本 恭史（YAMAMOTO YASUFUMI）
 関西大学・システム理工学部・専任講師
 研究者番号：90330175

研究成果の概要：

気体・液体が混ざった流れが固体に接している状況は、さまざまな工業装置内で見られるが、固体壁と液滴や気泡の接触する時、固体面の「濡れ性」は、それにより伝熱特性が劇的に変化するなど、さまざまな装置の性能を左右する非常に重要な問題である。本研究は、このような3つの相が含まれる流れをコンピュータによって解析する手法を開発し、複雑な流体の物理現象を解明しようとするものである。濡れが進む場合と乾きが進む場合で、接触部分の液体の角度が異なることは、一般に知られることであるが、コンピュータシミュレーションで、これまでにそれを自然に表現できるモデルはなかった。本研究では、実験式などを用いずに、界面の力学的バランスを丁寧に表現することで、その傾向が表せるようになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,000,000	0	3,000,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	150,000	3,650,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流, 数値シミュレーション, 界面, 濡れ性

1. 研究開始当初の背景

界面を含む流れは身の周りから工業装置内まで幅広く見られる。例えば、気泡流ならば、発電装置や二酸化炭素処理システムなどのさまざまな工業装置内で見られ、液滴ならば、インクジェットプリンタや直噴エンジンなど、身近なところでも見られる。それらの流れを含むシステムでは、界面での物質輸送およびそれを促進する運動量と熱の輸送の

問題はシステムの処理能力に直接結びつく非常に重要な問題である。また、工業的な問題だけでなく、二つの流体の界面における物質・運動量・熱の輸送は物理的にも非常に興味深い現象であるため、これまでもさまざまな実験的・数値的研究が行われてきた。また、界面がその特徴を大きく支配する「ソフトマター」や「複雑流体」といった物理は最近盛んに研究されている。

不混和な2種類の成層液体中に気泡を吹き込むことは、例えば、鉄鋼精錬などの分野では不純物の除去などに使用されるプロセスで工業的にも重要であるが、1種類の界面しか持たない2相流とは異なり、3種類の界面を持つ3種類の流体が混在する流れは物理的にも興味深いものである。3相流に関して、実験では気泡や液滴周りのおおまかな流れ場の計測は出来ても、界面間の瞬時の運動量バランスまで把握することは難しい。数値シミュレーション手法を確立することが出来れば、そのような情報が詳細に得られると期待される。

3流体を扱った数値解析手法の研究としては、ZhaoらによるLevel Set法を用いたもの(J. Comp. Phys. Vol.127(1996)およびVol.143(1998))があるが、界面張力の取り扱いが作為的であり、マクロな視点の計算となっている。液膜の不安定に関する研究は非常に活発になされているが、数値解析的研究としては、例えば、SongとTryggvasonらのFront-tracking法によるもの(Phys. Fluids Vol.11(1999))があるが、3流体について行われた計算はない。

2. 研究の目的

本研究は、混相流における界面追跡アルゴリズムによる直接数値解析手法を開発し、3流体混相流のような複雑な界面を有する流れ現象を再現し、“界面のダイナミクス”を解明するものである。

3. 研究の方法

まず、本研究の基本となるFront-tracking法について簡単に説明する。

相界面をマーカー点列により表現する。それにより、固定矩形格子に依存せずに界面位置を陽に知ることができる。マーカーは矩形格子で得られる速度より補間された速度でラグランジュ的に移動される。マーカー位置の情報を元にどの格子点がどちらの流体中の点であるかを表す識別関数を計算し、密度・粘度を識別関数に応じて与える。界面張力は各マーカー要素における接線ベクトルより精度よく求めることができる。マーカーと計算格子との間の情報のやり取りは滑らかな重み関数を使っておこなう。マーカーの情報を補助的に使うことにより、混相の系全体を、密度・粘度が空間的に一様でなく、界面張力がデルタ関数的に体積力として働く一つの流体として矩形格子上で解くのがFront-tracking法である。

(1) 3流体の扱い

まず、Front-tracking法による2次元計算によって、3流体における界面の適切な扱い方について検討を行った。研究室で開発した

2次元2流体のFront-tracking法によるコードを3流体に対応できるように改造し、各流体間の界面張力バランスを正確に表現する計算方法を検討した。

(2) Adaptive Mesh Refinement

計算負荷を抑えたまま、界面近傍のみの解像度を上げるために、局所的格子細分化手法(Adaptive Mesh Refinement)を組み込んだFront-tracking法を開発した。さらに、コードの3次元化を試みた。

(3) 3次元Front-trackingの開発

Front-tracking法における界面の表現は、2次元の場合は線分要素で、3次元の場合は3角形要素で行われ、3次元の場合の計算の複雑さおよび計算負荷は2次元の場合に比べて飛躍的に増大する。3角形要素の連結情報の扱いが非常に厄介であるので、要素の連結情報を使用しない新手法の開発を行った。

(4) 他手法への応用

開発した界面張力評価手法はFront-tracking法のみでなく、他のポピュラーな混相流解析手法にも適用できると考え、CIP法とのカップリング手法も開発した。

(5) 濡れの動特性の表現

3流体が接触する点における界面張力の影響を丁寧に評価することが可能となったため、1つの流体成分を固体に置き換え、固体表面における濡れ特性(静的接触角、動的接触角、接触角のヒステリシス)の表現の検証をおこなった。

4. 研究成果

(1) 3流体の扱い

2次元において、3つの相の会合点(Triple Junction)における適切な張力計算法について考察した。Triple Junction近傍における接線ベクトルの計算には、外挿を用いない3点差分近似を用いれば、高精度に界面張力を表現でき、張力のつりあい状態を表現することが可能であり、Front-tracking法で安定に3流体混相流計算が可能であることが確認できた。

界面張力のみが形状を決定する簡単なテストケースで、その手法が有効であることを確認した。

成果は混相流学会講演会および、実験力学会の国際会議で発表し、英文論文誌に掲載された。

(2) Adaptive Mesh Refinement

コンタミネーション効果を組み込んだFront-tracking法に四分木構造による格子細分化(AMR)手法を適用した。

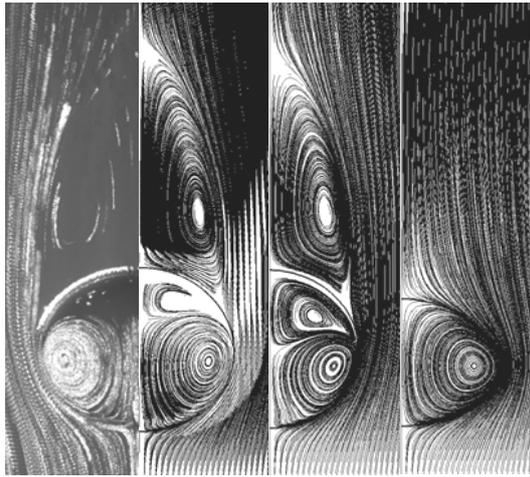


図 1. Adaptive Mesh Refinement に界面活性剤入り液滴流動の計算結果. (a)実験結果, (b) AMR あり, (c) AMR なし, (d) 活性剤なし (活性剤を加えることで界面にブレーキがかかり実験に近づくが, AMR なしではブレーキがかかりすぎる. AMR によって界面近傍のみの解像度を上げることにより, 実験に非常によく一致する流れが再現できた)

レベルが異なるセル境界における差分について考察し, 粘性項の差分近似に注意が必要であること, 3 点を用いる 2 次精度差分と長方形に延長したコントロールボリュームの使用により, 精度が良く安定な計算が可能になることを確認した.

申請者による前段階の研究で, コンタミネーション効果の導入により, 界面にブレーキがかかる効果が表現できることが示されていたが, 界面の解像度が低いとその効果が過大に現れてしまうが, AMR を適用することで, 計算負荷を飛躍的に抑制しつつ, 液滴の内部循環の様子まで詳細に再現できた(図 1 参照).

成果は混相流国際会議で発表した.

(3) 3次元 Front-tracking の開発

3次元 Front-tracking 法では, 界面をマーカーで構成される 3 角形要素の連結として表すことを基本にするが, 流動によって, マーカーに粗密が生じるため, 適宜マーカーの追加削除と繋ぎ変えを行なう必要がある. しかし, 面状に無秩序に並んだマーカーの連結情報を構成しなおすのは非常に煩雑である. 本研究では, マーカー要素から構成された格子点上の識別関数の等値面情報を利用し, 連結情報を更新するのではなく, 全マーカーを破棄し, 新規に作成しなおす等値面再構成法 (Level Contour Reconstruction Method) によるコードを開発した. この手法には, 再構成の度に, 相の体積が変化するという問題があるが, 本研究では, 計算途中で得られる

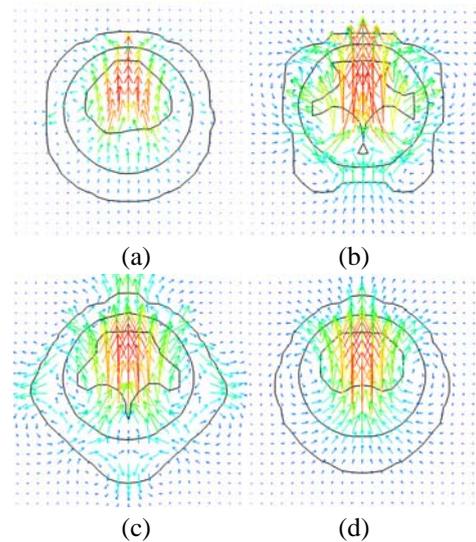


図 2. 等値面再構成法を組み合わせた CIP による気泡流動の計算結果. (a)~(d) は界面張力評価手法が異なる. 3 次元 Front-tracking で採用している手法による (d) が非常に安定で滑らかな解が得られた.

界面の曲率情報を利用することにより, 高精度に体積保存を満たす手法を開発した.

成果は混相流学会講演会で発表した.

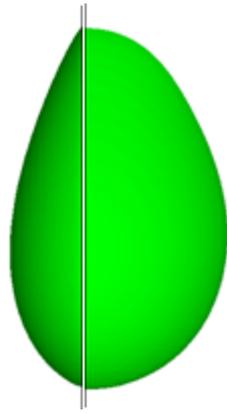
(4) 他手法への応用

3次元 Front-tracking のために開発した等値面再構成法 (LCRM) を CIP 法とカップリングし, 新しい混相流計算手法を提案した. 矩形格子による混相流計算では, 界面張力の評価が格子の向きに依存し, 疑似渦流れが生じることが知られているが, 提案手法は, 他の手法に比べて, 飛躍的に疑似渦流れを抑えられ, 安定な計算が可能となることが確認できた (図 2 参照).

成果は流体力学会の数値流体力学シンポジウムで発表した.

(5) 濡れの動特性の表現

混相流のシミュレーションによく使用される VOF 法や level-set 法などでは, 界面張力の影響が界面の曲率で評価される. しかし, 気液界面が固体と接触する接触線では, 界面形状は曲面ではないため, 形状を静的接触角もしくは速度との実験相関式などを用いて決定することが多い. 一方, Front-tracking 法では, 曲率ではなく, 接線方向張力の合力を評価するため, 結果 (1) で確認されたように, 3 相の会合点でも張力バランスを適切に自然に表現できる. 本研究では固体面の界面張力を与えることにより, 接触角は運動量のバランスから動的に決まる. スリップ速度を与えるモデルについて検討した結果, 本研究によって提案された計算手法により, 接触角



側面図 上面図

図3. 濡れを考慮した3次元Front-tracking法により計算された、斜面を落下する液滴の形状。図の下方向が流下方向。前進接触角と後退接触角の違いが自然に表現できている。

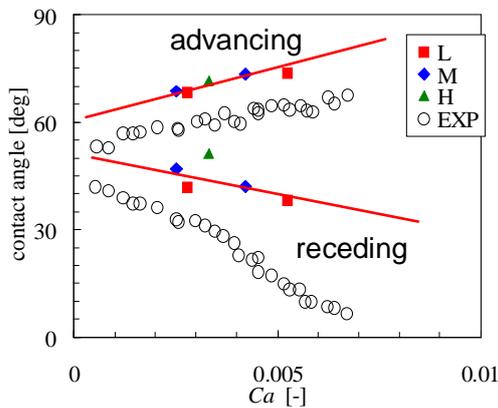


図4. 濡れを考慮した3次元Front-tracking法により計算された、斜面を落下する液滴の落下速度（横軸）と接触角（縦軸）。定量的には未だ実験との一致は得られていないが、角度が落下速度に依存する傾向が定性的に捕らえられている。

がスリップ速度に依存する傾向を、経験式などを用いることなく、表現できることが確認された（図3，4参照）。

日本機械学会の計算力学部門講演会および関西支部講演会で発表した。

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2件）

1. Yamamoto Y., Yamauchi M., Uemura T.,

Numerical Simulation of a Contaminated Water Drop Sinking in a Oil by a Front-tracking Method, Journal of Computational Science and Technology, Vol.2 No.1, (2008), pp.246-257. 査読有

2. Yamamoto Y., Uemura T., Numerical Experiment of Drop Spreading by Front-Tracking Method -Accurate Representation of Interfacial Tension at Contact Line-, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol.8 Special, (2008), pp.43-48. 査読有

〔学会発表〕（計7件）

1. 山本恭史, 植村 知正, Front-tracking法による斜面を落下する液滴の数値シミュレーション—スリップモデルの検討—, 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会講演論文集094-1, 近畿大学, 2009年3月16-17, 1-6.

2. 谷口 智規, 山本 恭史, 植村 知正, CIP法と等値面再構成法を組み合わせた混相流のシミュレーション手法, 第22回数値流体力学シンポジウム, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2008年12月17-19, C3-1.

3. 山本恭史, 植村知正, Front-tracking法による斜面を落下する液滴の数値シミュレーション, 日本機械学会第21回計算力学講演会 CMD2008, 琉球大学, 2008年11月1-3, pp.846-847.

4. 山本恭史, 植村知正, 連結情報を使用しないFront-tracking法の体積保存性について, 日本混相流学会年会講演会2008講演論文集, 会津大学, 2008年8月8-10, pp.44-45.

5. Yasufumi Yamamoto and Tomomasa Uemura, Accurate representation of interfacial tension for numerical simulation of three-component fluid flows by front-tracking method, Proceedings of 2nd International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics (2nd ISEM 07-OSAKA), Osaka, September 23-25 (2007) A1-1-1.

6. Yasufumi Yamamoto and Tomomasa Uemura, Adaptive Mesh Refinement Method for Numerical Simulation of a Contaminated Drop by Front-Tracking, Proceedings of 6th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2007, Leipzig, Germany, July 9 - 13, (2007), Paper No S4_Mon_B_4.

7. 山本 恭史, 植村 知正, ``Front-tracking

法による 3 流体混相流の数値シミュレーション'', 日本混相流学会年会講演会 2007 講演論文集, 札幌コンベンションセンター, 2007 年 6 月 22-24, pp. 186-187.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 恭史 (YASUFUMI YAMAMOTO)

関西大学・システム理工学部・専任講師

研究者番号：90330175