

論文の内容の要旨

論文題目 LATTICE BOLTZMANN ANALYSIS OF MULTIPHASE FLUID FLOWS

(和訳 多相流の格子ボルツマン解析)

氏名 藤樹龍

多相流に対する物理及び数値計算の研究は、界面の物理とダイナミクスが複雑であるために、一般に困難なことだと言える。一方、流れのソルバーとして、並列化のし易さや計算アルゴリズムの簡単さなどの利点が挙げられる格子ボルツマン法は魅力のある選択になってきている。この方法は、粒子レベルで非局所的な相互作用を導入し、マクロレベルでナビエ・ストークス方程式を導出することにより、多相流をモデリングすることができる。しかし、このまま拡張した格子ボルツマン法においては、幾つの問題点が依然に存在する。具体的には、1) 多相密度比が大きくなると数値計算が極めて不安定になること、2) 物理の単位を持つ現実の気液流れへのはっきりな対応がないこと、3) 非均一の計算格子をシミュレーションに適用できないこと、4) 界面ダイナミクスの詳細が未解明であることと挙げられる。

有限差分法の考え方を参考すれば、従来の格子ボルツマン法を用いても直交座標系で任意の幾何形状を表現することができるし、空間格子の間隔と時間刻みも単位値に固定する必要がなくなる。即ち、クーラン数条件が満たされれば非均一格子の採用も可能である。このような知見から、我々は従来の格子ボルツマン多相モデルとTVD/ACという有限差分スキームに基づき、新しいLBTVD/AC法を提案した。新しい方法を用いれば、上記の問題点をすべて解決することができるだけでなく、エンジニアリングの応用に一步近づいたように格子ボルツマン法を発展した。

第一章の内容は研究背景などの紹介であり、第二章の内容は格子ボルツマン法についてのレビューである。第三章は、LBTVD/ACを提案し、一つの簡単なテスト計算を通してコンタクト・ディスコンチニウティ問題に対する異なる離散化スキームの解析能力を比較するというような内容で構成される。

共存相密度の分布、(均一または非均一格子上で)ラプラス則の測定、界面密度分布の理論曲線との比較などを含む検証問題は第四章で述べられる。従来のシミュレーションでは、平面状の界面を渡る密度比は5を超えると計算が不安定になるに対して、本手法を使う場合密度比が120になっても、精度と安定性を保ったまま計算することができる。非均一格子の使用によって、(界面付近での)局所的な高い解像度が得られる。本章では、界面内の密度分布の理論解を求める二つの方法についても論じられた。

界面の厚さ、密度分布、界面を渡って圧力と界面応力の釣り合い、界面内部に存在する擬似流速、ガリレー不変性の失いなど内容を含む界面ダイナミクスの詳細についての調べは第五章で記述される。

第六章では、格子ボルツマン多相モデルを現実な気液二相流体に対応させる方法が論じられた。LBTVD/AC法により、従来のモデルにとって極めて難しいこと、いわゆる、単位付きの物理量を持つ現実の多相流体流れのシミュレーションが、初めて実現可能になった。重力場を考慮する(2次元)または考慮しない(2、3次元)場合の相分離シミュレーションが行われ、図に示した。非均一の格子上で、せん断流れによる液滴の変形のシミュレーションも行われた。最後に、キャピラリー波の数値計算の結果と理論予測のよく合

うことが示された。

第七章のテーマは重力場にある粘性流体中の単一気泡の上昇に関する研究です。実験またはマクロレベルの数値シミュレーションにとって捕らえにくい気泡挙動の詳細、例えば気泡の自由振動や、気泡内外の流れ場の変動などが本手法によって示された。

最後の章では、研究内容をまとめ、またLBTVD/ACに関する将来の研究テーマを提出した。