

先端研究施設共用イノベーション創出事業【産業戦略利用】
『みんなのスパコン』TSUBAMEによるペタスケールへの飛翔
利用報告書 平成19年度新規利用拡大採択課題 i07ne

混相流シミュレーションコードの並列拡張性能の評価
Scalability Tests for Multi-Phase Simulation Code

桑原諸兄
Moroe Kuwahara

株式会社計算流体力学研究所混相流解析グループ
Multi-Phase Simulation Group, Institute of Computational Fluid Dynamics
<http://www.icfd.co.jp/>

無重力場におけるマランゴニ対流場の複数気泡挙動を解析する混相流シミュレーションコードについて、数百以上の並列計算にも効率良く計算可能となる並列仕様に拡張したところ、150並列程度まで並列数にほぼ比例して計算速度が向上することが確認された。さらに、本並列仕様を用いて周方向1/4セクターの円筒形状容器に生じるマランゴニ対流場に2個の気泡を設置した場合の気泡挙動計算を150並列で500時間行ったところ、2個の気泡間に斥力が作用することがわかった。これらの結果から、今後計算を継続することにより、無重力場における気泡挙動が比較的短い時間で解析評価可能となる見通しが得られた。

In order to evaluate the bubble behavior in microgravity condition, we advanced the present parallel calculation method in the multi-phase simulation code. The advanced parallel method accelerated the calculation up to approximately 150 CPUs. The two bubble behaviors with the thermocapillary flow in an open cylindrical container were calculated applying 150 CPUs for 500 hours. The repulsive forces were produced by the bubble motions and the magnitudes became larger as the bubble approached to the hot region. The bubble behaviors can be evaluated by this advanced method if this calculation will be continued in the near future.

Keywords: Multi-Phase Flow, MPI, Microgravity, Thermocapillary flow, Bubble

・背景と目的

本プロジェクトは、ジーゼルエンジン等の燃料噴出特性や無重力場における新材料創出の妨げとなる気泡混入問題のように、密度差が大きな混相流の流動特性が精度良くシミュレーションできる解析手法について、既存のシミュレーションコードを数百以上の並列計算仕様に拡張した場合の性能評価を行うことを目的としている。上記のシミュレーションコードは、これまでに実績のある20並列計算では計算時間が長時間となるため、数百以上の並列計算を行うことが必要であった。しかし、それ以上の並列計算を行った場合、計算効率が向上するかどうかは不明確であった。

以上から、本プロジェクトの最初のステップとして、無重力場においてマランゴニ対流場に空気気泡が複数個混入した場合の気泡挙動を評価する解析手法を240並列程度まで比較的効率良く計算可能と

なるよう仕様拡張し、並列計算効率を評価した。さらに拡張した並列仕様により、上記の気泡挙動解析を実施し、本シミュレーションコードの並列仕様の適応性を確認した。

・概要

本解析では、無重力場において上面が開いた円筒容器にフロンが充填され中心部にヒータが設置された体系を扱う。この体系では上面に生じた温度分布により表面張力分布が生じ、これに起因して対流（マランゴニ対流）が生じる。ここでは図1に示すように、上記円筒形状の1/4領域を解析体系とした。周方向境界の速度及び温度は周期条件を用い、既に計算してあった定常状態のマランゴニ対流場において、同図に示した位置に空気の気泡を2個出現させることにより計算を行った。すなわち、2個の気泡は計算開始前には、図2に示したように、周方向

の周期境界条件を考慮すれば非対称の位置に存在することとした。

従来の並列計算仕様は、上記円筒容器の半径方向のみ領域分割を行い、MPI 手法によりそれぞれの領域について並列計算を行うという仕様であった。このような領域分割方法では、領域分割数に限界があるのみならず、メッシュ数が多くなると領域間のデータ通信量が多くなり、計算効率がかえって悪化する可能性が考えられる。そこで、本プロジェクトでは周方向及び高さ方向にも領域を分割可能となる仕様に拡張した。

最初に、拡張前の手法により 25, 50, 75, および 150 並列の計算をそれぞれ 100 ステップ行った。次に拡張した手法により、50, 100, 150, および 240 並列の計算をそれぞれ同ステップ行い、計算時間を比較し並列計算効率を評価することとした。次に拡張後の分割仕様により、500 時間の気泡挙動計算を行った。

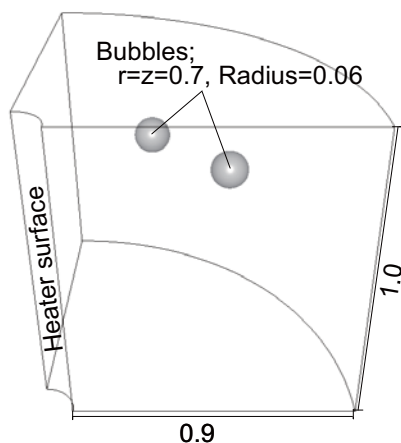


図1 マランゴニ対流場の気泡位置

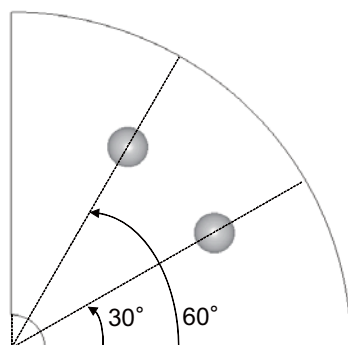


図2 気泡初期位置（周方向）

・結果および考察

図3に拡張前後の分割仕様での 100 ステップ計算に要した計算時間を示す。拡張前では、並列数が 25 及び 50 では計算時間が同程度であり、それ以上の並列数では加速率が減少し、計算時間が多くなるという結果となった。これに対し、拡張後の仕様では並列数が 150 程度まで並列数にほぼ比例して加速率が増大するものの、それ以上では加速率が減少する結果が得られた。これらの結果から、本プロジェクトにより拡張を行った分割仕様の有効性は 150 並列程度までは有効であることが確認できた。

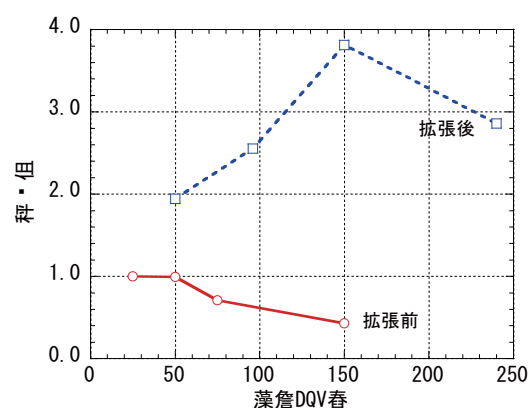


図3 並列数に対する加速率

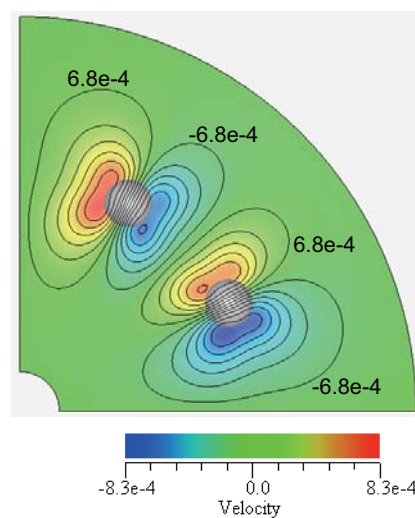


図4 500 時間後の周方向速度と気泡位置

図4に 150 並列で行った気泡挙動計算結果を示す。図には、計算開始後 500 時間における2個の

気泡位置、及び周方向の流速成分を示した。なお本並列数を採用した理由は、最速で計算を行う必要があったため、及びジョブの混雑状況により 240 並列 (15 ノード) まで使用できなかったためである。

500 時間後の結果から、マランゴニ対流とともにヒータ表面方向に移行するにしたがって2個の気泡間の周方向速度が外側よりも大きくなり、2個の気泡間に斥力が働いていることがわかった。したがって、さらに本計算を継続することにより斥力が増加することが予想され、最終的には2個の気泡間の距離が大きくなり周方向に対称な位置に向かって、それぞれ2個の気泡が移動すると考えられる。

・まとめ、今後の課題

本プロジェクトにより、混相流シミュレーションコードの気泡挙動解析手法に対する並列計算仕様を、

比較的効率良い仕様に拡張することが可能となり、150 程度までの並列数により気泡挙動を評価できる見通しが得られた。今後はディーゼルエンジン等の燃料噴出特性の解析手法に対して並列計算の拡張性を評価するとともに、効率良い並列仕様を用いて本プロジェクトで目標としている現象を解析評価する必要がある。