

上昇球形気泡群の多重スケールモデル

○ 杉山 和靖, 東大 IML, 〒 113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16, E-mail: sugiyama@fel.t.u-tokyo.ac.jp

高木 周, 東大・機械工, 〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail: takagi@mech.t.u-tokyo.ac.jp

松本 洋一郎, 東大・機械工, 〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail: ymats@mech.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

気泡流は多くの工業装置で観測される流れであり、その現象解明は非常に重要である。気泡流では多様な長さスケールが存在しており、大小スケール間の相互作用によって、変動性の強い複雑な流れ場が形成されている。しかしながら、現象に関わる要因が多岐にわたり、複雑であるため、気泡流におけるスケールの多重性についての理解は乏しいのが現状である。そこで、本研究では、特に、気泡間距離に代表される気泡流のメソスケールの現象を明らかにすることを目的とし、多数の上昇気泡群の動的挙動を直接数値シミュレーションによって解析する。特に、気泡の並進運動に伴い、周囲流体を排除することによって作り出される「疑似乱れ」に対する知見を得る。また、現実的な気泡流の数値予測を考えると、気泡流には多様なスケールが存在するため、全てのスケールの影響を考慮して直接計算を行うことは計算資源が莫大となる。従って、単相乱流の LES と同様に、二相の保存方程式をフィルタ操作することによって導き出される「平均化方程式」を用いて、粗視化された場を解く方法が有効である。平均化操作により幾つかの構成方程式が必要となるが、従来の気泡流解析では、疑似乱れに対して重要と考えられる SGS (Sub-Grid Scale) 応力や気液界面での境界条件に対する構成方程式が無視されている。本研究では、それらの影響をモデル化し、計算負荷が小さく、信頼性が高い、新たな気泡流予測手法を構築する。

2. 直接数値シミュレーション (DNS)

気泡流の疑似乱れに対する詳細な知見を得るために、周期的な立方体中で上昇する多数の球形気泡運動を、DNS によって解析する。計算方法は文献 (1) と同様である。矩形格子を用いて離散化し、気液界面での境界条件は滑りなし条件としている。気泡運動は、ニュートンの運動則に基づき、界面上での応力の表面積分と慣性運動との釣り合いによって書き表されている。計算領域の一边の長さは 8mm であり、128 分割されている。また、気泡径は 0.5mm、重力加速度は 10m/s^2 である。パラメータは、ボイド率 (f_G) である。

本研究では、気泡運動によって誘起される乱れの空間的構造を定量的に評価するために、1次元縦エネルギースペクトルを指標として、DNS と平均化方程式によって計算される結果との比較を行う。

3. 平均化方程式

DNS と同じ条件によって平均化方程式を用いたシミュレーションを行う。支配方程式や計算手順は、Euler-Lagrange 法 (2) に準じている。気泡の並進運動は、質点として扱ったモデル式を用いている。本研究では、二相の混合体としての圧力のポアソン方程式と過度の輸送方程式を考慮し、これまでの平均化方程式を用いた気泡流解析で考慮されていなかった、気液界面での境界条件に対する構成方程式を新たに導出した。また、SGS (Sub-Grid Scale) 応力のモデル化に対するアブリオリスタディ (1) を基に、球形粒子近傍の速度場を SGS 応力モデルに反映させる方法を構築した。本研究によって提案された構成方程式の完結問題を満たすため、並進運動する球形粒子近傍の圧力場、速度場を球面調和関数と多項式で展開することによって、レイノルズ数の関数としてデータベース化し、そのデータベースを利用して、平均化方程式を用いた計算手法では、気泡径よりも小さなグリッドを用いて解析することができないため、気泡径よりも大きなグリッドを用いてシミュレーションを行う。計算領域

の立方体中の一边の長さは 16mm であり、16 分割されている。

4. 計算結果

図 1 にはボイド率 (f_G) が 0.833 (%) における、1次元縦エネルギースペクトルが示されている。実線は DNS の生データ、点線は DNS の結果にグリッドフィルタ操作を施した結果 (Grid filtered) である。図 1 中の記号 Δ , $\circ$ は、それぞれ、気泡界面での境界条件の影響や気泡流の SGS 応力が反映されていない従来の平均化方程式を用いた結果 (Conventional)、本計算モデルを平均化方程式に導入して得られた結果 (Present) である。

図 1 にはボイド率 (f_G) が 0.833% における、1次元縦エネルギースペクトルの鉛直方向成分が示されている。実線は DNS の生データ、波線は DNS の結果にグリッドフィルタ操作を施した結果である。平均化方程式は NS 方程式にグリッドフィルタ操作を施すことによって導出されるため、平均化方程式を用いた計算結果は波線に一致することが望ましい。図 1 中の記号 Δ , $\circ$ は、それぞれ、界面での境界条件の影響や気泡流の SGS 応力が反映されていない従来の計算手法を用いた結果 (Conventional)、本計算手法を導入して得られた結果 (Present) である。Conventional では DNS に比べて非常に過小評価であり、大きくオーダーが異なっているのに対し、Present では DNS の結果に近く、改善されていることから、本モデルの有効性が示される。

以上より、気泡流の疑似乱れのモデル化には、気泡界面での境界条件の影響を導入することが重要である。

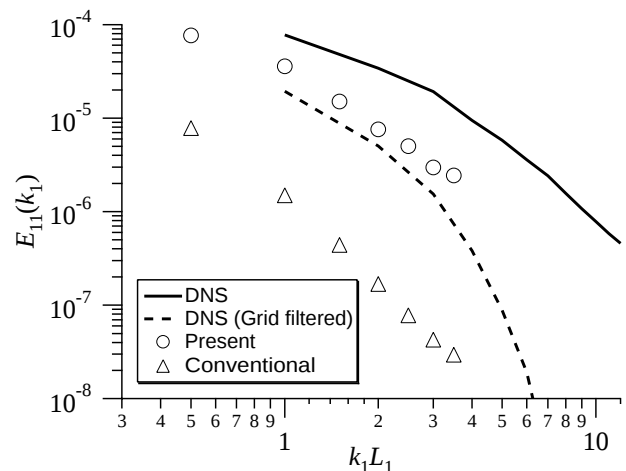


Fig. 1: 1D. vertical energy spectrum versus wave number (Vertical component, $f_G = 0.833(\%)$)

参考文献

1. Sugiyama, K., Takagi, S. Matsumoto, Y., "Direct Numerical Simulation of Rising Bubbles," Proc. of ASME FEDSM2000, (2000), FEDSM00-11141(CDROM).
2. 村井 祐一, 松本 洋一郎, "気泡プルームの微細流動構造の数値解析," 日本機械学会論文集 (B 編), 63-611, (1997), pp. 2277-2282.