鉛直チャネル内固気二相乱流のラージ・エディ・シミュレーション

山 本 恭 史*

Yasufumi YAMAMOTO

1. 研究を始めた動機

最近、計算機能力の急激な進歩にともなって流体工学の分野では、DNS (Direct Numerical Simulation) や、LES (Large Eddy Simulation) といった大規模な直接数値シミュレーションを行い、瞬時の乱れ構造の解析などが盛んに行われるようになってきた。それに伴い混相流の分野でも、そのような直接シミュレーション手法を用いて、流体の乱れと粒子運動の相互干渉を解析しようとする試みがなされるようになってきた。一方、私が在籍していた研究室は固気混相流および粉体流動に関する研究室で、特に粒子間の接触や衝突などの粒子間相互作用を考慮したシミュレーションを活発に行っており、希薄な条件でも粒子間衝突の影響は非常に大きいことなどを指摘する研究が行われてきた。ところが、先に述べた混相乱流のシミュレーションでは、既存のものは粒子間相互作用が全く考慮されていなかったのである。そこで、粒子間衝突を考慮した混相乱流の直接シミュレーションを行い、粒子間衝突の影響を明らかにするとともに、粒子間衝突を考慮した場における気流の乱れと粒子運動の相互干渉について調べることに必要性を感じ、本研究を行うことになった。

2. 研究遂行上感じたこと

シミュレーションの条件として、 $8\text{cm} \times 4\text{cm} \times 3\text{cm}$ といった非常に小さな領域に数十ミクロンの粒子を体積率で 10^{-4} という低濃度で混合した場合を考えた。その様な希薄な条件でも、粒子数は15万個程度となるため、非常に大きなメモリを有し計算速度の大きい

コンピュータが必要となり、大型計算機(ベクトル計算機)を使うことにした。流体計算および粒子の移動に関する部分のプログラムは、いつも決まった繰り返し数のループになるため、コンパイラが自動でベクトル化を行ってくれるが、粒子間衝突に関してはその限りではなく、非常に膨大な計算時間を要する。そこでまず、実用に耐えうる時間で計算が出来るまでにプログラムのチューンアップを図ることが必要となり、研究の本質的な部分ではないがと感じながらも多くの時間を割いてしまった。実験的研究を行っている人たちが装置の作成に多くの時間をさき工夫を凝らすように、シミュレーションを行うにもこのような多くの困難なことがあることを痛感した。

また、本研究の目的の一つである粒子間衝突の影響については、計算結果に非常にはっきりとした傾向が現れたため、研究にやりがいを感じ、また、どういう視点から現象を取り扱うかということの重要性を感じた。一方、乱れの変化に対しては、本研究で扱った条件が平均速度は単相流と変わらないような低濃度であったこともあり、例えば単相乱流のシミュレーションでよく調べられるエネルギー方程式のつりあいの結果を調べてもはっきりとしたことが言えないなど、乱流の研究の難しさを痛感した。

3. 研究の主な成果

本研究では、実験により多少の知見が得られており、さらに単純形状でありかつ乱れが常に供給される平行平板間の鉛直下向き流れに対して、数値シミュレーションを行った。その手法として実験と同じ高レイノルズ数の流れを計算できるLESを適用し、粒子はラグランジュ的に追跡する手法を用いた。また、決定論的に粒子間衝突を判別する手法を用いて粒子間衝突を考慮した。

3.1 混相LESに対する格子解像度の検討

慣性の大きな粒子を取り扱う場合であれば、粒子は大スケール渦の影響のみにより運動し、小スケール渦の影響は無視できると期待される。一方、慣性の小さ

1999年10月12日受付

*立命館大学総合理工学研究機構(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1) TEL 077-566-1111 ext. 8718

<著者紹介>

1994年3月大阪大学工学部産業機械工学科卒業、1999年3月大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了、1999年4月立命館大学総合理工学研究機構ポスドク研究員、工学博士、専門:流体工学、混相乱流の研究。現在、固液二相乱流における乱れ構造と粒子運動の干渉についての研究を行っている。

Fig. 1 Wal-normal fluctuation intensity profile of particle velocity

Fig. 2 Profile of mean streamwise particle velocity

い粒子を取り扱う場合、粒子は小スケール渦の影響を受けると考えられるため、慣性の小さい粒子を取り扱う場合には、粒子が影響を受ける最小スケールの渦を捉えられる計算格子を用いる必要がある。すなわち、単相とは異なる格子解像度の基準が存在するはずである。しかし、これまでの研究で小スケール渦の粒子に対する影響を直接評価した研究はない。そこで、まず解像すべき渦の最小スケールを明らかにする必要がある。本研究では、十分小さいスケールまで捉えた流れ場とそれにフィルタをかけて小スケール渦を取り除いた流れ場の両方で粒子運動を計算し、その軌跡のずれから、粒子運動に影響を与える限界の渦スケールを直接評価した。それにより、混相 LES の格子解像度に対する指針を与えた。

3. 2 統計量に対する粒子間衝突の影響

Fig. 1 に壁からの距離に対する粒子速度変動強度の壁垂直成分の分布の一例を示す。衝突を無視した場合には、実験と比べて非常に小さい値になっているのに対し、衝突を考慮した結果は無視した場合の 2 倍近く大きくなり、実験結果に大きく近づいていることがわかる。この横方向の変動運動（粒子間衝突による拡散）により粒子の平均速度分布（Fig. 2）および平均濃度

Fig. 3 Profile of particle number density

分布（Fig. 3）も衝突を無視した場合に比べて平坦な分布となり、平均速度の勾配も実験に近づいている。ここに示した結果は粒子体積率が $O(10^{-5})$ という低濃度のものであるが、乱流中の粒子運動に対して粒子間衝突が無視できない要因であることを示している。

また、粒子慣性の違いによって影響を受ける渦のスケールが異なり、本研究で用いた LES モデルでは乱れの変化を捉えられる場合と捉えられない場合があることがわかった。

3. 3 瞬時の分布構造の可視化

計算結果を可視化し、瞬時の粒子分布構造や乱れ構造を観察した結果、慣性の小さい粒子は乱れ構造の影響を受け濃度むらを形成すること、粒子間衝突はその構造を拡散させる方向に働くこと等がわかった。これまでに発表されている混相乱流の数値シミュレーションで示されている粒子分布構造は、実験による観測とは形状やスケールに関して異なっていたが、本研究で行った粒子間衝突を考慮した計算によって得られた粒子分布構造の特徴は実験結果とよく一致した。

4. 今後の展開

粒子の条件によっては、粒子群が濃度むらを形成するため、気流の乱れと粒子の相互干渉は、粒径スケールでの干渉だけでなく、粒子クラウドのスケールでの干渉も起こるので、粒子クラウドの運動をさらに詳しく調べる必要がある。また、粒径スケールでの干渉を考慮するには、混相乱流に対する LES モデルを構築する必要がある。

最後に、本研究を遂行するにあたり、終始暖かい激励と示唆に富む討議を通してご指導くださいました大阪大学大学院工学研究科 辻 裕教授、田中敏嗣助教授、川口寿裕助手に深く感謝の意を表します。

（学位取得は 1999 年 3 月、大阪大学）