

(論文内容の要旨)

本論文は、格子ボルツマン法と個別要素法を用いて、固液混相流システムの汎用的な数値シミュレータを構築し、水中沈降問題と海底地滑り問題への適用を行い、その有効性を示したもので、8章からなる。

第1章は序論であり、固液混相流に関する既存の研究の問題点を整理し、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、格子ボルツマン法の理論について詳細に論述されている。また格子ボルツマン方程式から、ナビエ・ストークス方程式の導出を丁寧に行うことで、流体の巨視的変数である、密度、粘性等の定義を明確に示している。

第3章では、多孔質岩石のモデル化において、真の孔隙率を精度よく満足するモデルを構築するには、平均粒子直径に対して20格子以上取ることが必要であることを示した。これは、モデルの作成方法によらずほぼ一定であった。また格子ボルツマン法の並列計算によって、矩形ダクトモデルでは8並列程度までは比較的高い計算効率を保つことを示した。分割の方向が単一方向であるために、矩形ダクトモデルにおいてのみ、並列化による速度向上が発揮された。あるCPU数を用いて計算する場合、スレッド並列を行わずに全てMPIによる並列化(プロセス並列)を行う方が、効率的に時間短縮できることがわかった。これは、LBMが領域分割によるプロセス並列に適したアルゴリズムであることを示している。しかしながら、同一プロセス数においてはスレッド数の増加によって計算効率は上昇するため、分割面が単一の場合など、領域分割に制約がある場合などではスレッド並列を併用したハイブリッド並列が効果的であることを明らかにしている。

第4章では、二次元および三次元格子ボルツマンを用いたフラクチャ内流体流動解析シミュレーションを行い、亀裂特性として以下のことが示された。フラクチャを平行平板と仮定すると、その流量は開口幅の三乗に比例するとされる、いわゆる三乗則が成り立つ。しかしながら、実際にはフラクチャ表面は、凹凸を有しているために、三乗則から乖離してくる。この乖離は開口幅の狭小化に伴って増大する。また、その三乗則からの乖離に寄与するパラメータは、亀裂開口幅のばらつきを表す開口幅に対する標準偏差で亀裂開口幅を正規化したものであることを示した。また、3次元フラクチャの流体流動計算においては、Reynoldsの式を用いた2次元解析が一般的であったが、本手法により鉛直方向成分まで含めた解析が可能となり、その有効性を示した。

第5章では、格子ボルツマン法と個別要素法の連成解法の理論について論述し、固体粒子が流体に及ぼす作用と、流体が固体粒子に及ぼす作用力に関して詳細な説明を加えている。

第6章では、開発したシミュレータの妥当性の検証のため、水中の粒子沈降シミュレーションを行っている。単一の粒子沈降シミュレーションにおいては、 $Re=2.0$ 付近を境界として沈降形態が異なることを示している。また、二粒子沈降では、比較的高いレイノルズ数においては、先行粒子に後方粒子が追いついて、衝突し、次いで追い越すという現象(DKT 現象)を繰り返すことを明らかにした。それに対し、低いレイノルズ数においては、二粒子が水平方向に並んで安定して沈降することを示した。これらの境界は、 $Re \approx 3.0$ であることを示した。これらの結果は、既存の実験結果および異なる手法を用いた数値計算結果とよく一致するものであり、本論文で構築した固液混相流解析システムの妥当性を示している。さらに水槽実験も実施し、二粒子沈降に関しては、DKT 現象の確認と、その定量的評価を行い、コンピュータシミュレーションにおけるパラメータ決定のためのリファレンスデータとして有効であることを示している。

第7章では、大規模シミュレーション例として、海底地滑りの流動形態の一つである水中土石流の再現を行っている。この水中土石流は、ヘッド部とボディ部に明確に分かれて流動していることを明らかにした。ヘッド部においては粒子流が周囲の流体を取り込む流動形態が見られ、これは、海底地すべりにおける堆積物重力流の流動形態が、水中土石流から混濁流へと変化することに対応している。また、シミュレーションで得られた堆積物重力流の速度構造は、底部において放物線状になることと、最大速度の時間変化の傾向は、実際の海底地滑りにおける速度プロファイルと定性的に一致していることを示した。さらに、流動後の堆積厚さを見てみると、斜面がないモデルに比べて斜面モデルでは堆積物厚さのピークが流動方向にずれて現れる点と、斜面最下部近傍においてへこみが生じるという点において、既存のアナログ実験結果とよく一致していることを示した。さらに、堆積物重力流の内部において、流動速度勾配が現れることを確認し、流動中の堆積物重力流内のせん断力が働く方向を推定することができる。このせん断力が働く方向は、堆積物重力流のヘッド下部において高角に、それ以外の箇所においては、斜面などの底面に沿った角度で現れることを示した。これらのことから、本論文において構築した固液混相流シミュレータは、堆積物重力流の流動状態をよく再現し、また堆積構造においてもよい結果が得られたため、海底地滑りにおける発生から堆積に至るまでの一連の流れを計算することが可能であることを示した。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、格子ボルツマン法と個別要素法の連成解法による汎用的な固液混相流解析システムの開発と、その地球工学分野への応用を目的としている。得られた結果の概要は、以下の通りである。

- ① 格子ボルツマン法の並列化計算法の提案を行い、多孔質岩石内流体流動に適用し、良好な並列効果が得られることを示した。これによって、高精度かつ大規模な流体流動計算手法としての実用性を示した。
- ② フラクチャ内流体流動計算に対して格子ボルツマン法を用いることで、複雑形状を対象とした流体流動計算手法としての有効性を示した。またその結果として、フラクチャ内を流動する流体の流量は、通常用いられている平行平板を仮定した三乗則から乖離することを示した。この三乗則からの乖離の度合いは、開口幅の標準偏差を用いて平均開口幅を正規化した値が支配していることを示した。
- ③ 格子ボルツマン法と個別要素法を連成的に解くことによる固液混相流解析システムを開発した。開発された手法を粒子沈降シミュレーションに適用して、既存の結果との比較からその妥当性を示した。また、水槽を用いた室内実験も行い、数値シミュレーションにおけるパラメータのキャリブレーションとして有用であることを示した。
- ④ 本論文で開発した固液混相流解析システムを、海底地すべりを模した堆積物重力流の数値シミュレーションに適用し、その流動形態、内部速度情報、および堆積構造に関して既存の観測結果をよく再現出来ることを示した。これにより、本論文で提案した汎用シミュレータが、海底地滑り現象の発生から堆積するまでの全ての過程を検証しうるツールと成り得ることを示した。
- ⑤ 本論文で開発された格子ボルツマン法と個別要素法の連成解法では、流体計算においてはナビエ・ストークス方程式を解き、粒子に関しては個々の粒子にかかる力を逐次計算することから、固液混相流に関する多くの問題に対して汎用的に応用可能である。本論文において、固液混相流解析が、土木工学や石油開発工学など、地球工学分野における様々な問題に対して、今後重要な解析手法となることを、幾つかの適用例を通して示した。

以上、本論文では、格子ボルツマン法の特徴をよく整理しその発展性を示し、また個別要素法との連成解法システムの開発によって、汎用的な固液混相流解析システムを構築した。また開発されたシステムを用いて、海底地すべり問題のシミュレーション解析を行い、その汎用的な有効性を示すことが出来、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 21 年 2 月 24 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。