

(続紙 1)

京都大学	博士 (工学)	氏名	大槻 敏
論文題目	格子ボルツマン法と個別要素法を用いた固液二相ハイブリッドシミュレーションの資源工学分野への応用		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、格子ボルツマン法 (Lattice-Boltzmann method; LBM) と個別要素法 (Discrete/Distinct element method; DEM) をカップリングしたハイブリッドシミュレータを構築し、流体中での固体粒子群の沈降、堆積あるいは輸送挙動をマイクロメカニクスの観点から考察した結果をまとめたものであって、10章から成っている。</p> <p>第1章は緒論であり、本論文で対象とした固液二相問題を列挙するとともに、本研究で用いた数値計算手法の特長が記されている。また、各章の概要について述べている。</p> <p>第2章においては、本研究の基礎となる固液二相問題に関する数値計算手法を概説している。特に、Euler-Euler カップリング、Euler-Lagrange カップリングおよび Lagrange-Lagrange カップリングを中心とした連成数値計算手法が、近年の研究事例と併せて述べている。</p> <p>第3章では、流体運動を解く格子ボルツマン法の位置付けや基礎方程式とともに、理論的背景を記述することで、流れ場の支配方程式との整合性が証明されている。また、代表的な境界条件である滑りなし境界条件、圧力境界条件および速度境界条件の具体的な設定方法についての説明がなされている。</p> <p>第4章では、固体粒子群の運動を解く個別要素法について述べている。剛体粒子モデルと個別要素法に代表される軟体粒子モデルそれぞれのコンセプトと計算手法を述べた後、個別要素法の粒子間モデルである線形モデルおよびヘルツの弾性接触理論について記述している。</p> <p>第5章では、格子ボルツマン法と個別要素法の連成計算スキームについて述べている。主に、格子ボルツマン法で用いられる等間隔直交格子系の枠組みの中で、固液界面における相互作用力を求める移動境界条件について説明している。移動境界条件には、Noble and Torczynski モデルが採用されている。これは、コントロール・セルを導入することにより、粒子表面を階段状で捕捉していた従来の移動境界条件より正確な固液界面を捕捉することが可能となる。これにより、固体粒子に作用する流体力および流体トルクのバラツキを少なくし、高い計算精度が保証される。また、共通の無次元係数を用いた空間および時間スケールの統合方法について述べている。</p> <p>第6章では、連成数値計算手法の妥当性の検証を行なっている。はじめに、円環状クエット流れのシミュレーションを行ない、Navier-Stokes 方程式の近似解を得るために必要となる回転円形粒子の直径に対する格子数ζを求めた。本計算手法では、おおよそ$\zeta=9$以上で理論値との誤差が数%以内となることが示されている。次に、単一円形粒子の沈降挙動を計算し、Reynolds 数の大きさに対応する沈降モードの再現を試みた。また、既往の計算結果と比較し、その妥当性を確認した。最後に、2つの円形粒子間におけるDKT (Drafting, Kissing, and Tumbling) 現象の計算が実施した。円形粒子の沈降速度あるいは円形粒子に作用する抗力から、Drafting, Kissing および Tumbling の各ステージで生じる現象を捉えることができた。また、2つの円形粒子の</p>			

直径比 R が 1.15 以上になると、第 2 回目以降の DKT cycle は生じないことを明らかにした。

第 7 章では、傾斜容器内におけるスラリーの固液分離促進現象を再現し、容器傾斜角および対流の形成が沈降速度（分離速度）に与える影響を検討している。これにより、以下の知見を得た。(1) 粒子ベースの数値計算手法を採用したことにより、沈降過程における固体粒子群の運動および上昇する流れ（液相）を明確に捉えることができた。(2) 容器傾斜角の増加に伴う分離速度の向上を再現することができた。傾斜角 20° 以上では、 0° および 10° のケースと比較して、分離時間が約 $2/3$ に短縮されることを示した。(3) 固体粒子群の沈降速度は、単一粒子の終端速度の最大 1.5 倍に達することを示し、容器内に形成される対流が固体粒子の沈降速度の向上に寄与していること明らかにした。

第 8 章では、流体流動に伴う粒子輸送が多孔質体の透水性低下に与える影響の検討を行なっている。微粒子が多孔質体内の孔隙を閉塞するプロセスを再現し、また同時に多孔質体内の流速分布および圧力分布を評価した。これにより、以下の知見を得た。

(1) 多孔質体内へ流入する微粒子の濃度が低い場合、若干の透水率の低下が生じる。しかし、孔隙閉塞には至らず、微粒子が通過した後は、透水率は回復に向かう傾向にある。(2) 微粒子の濃度が増加するに従い、孔隙閉塞が生じやすくなる。このため、多孔質体の透水率が著しく低下し、透水率の回復は望めない。本研究のモデルでは、最大 50% 程度の透水率低下を再現することができた。

第 9 章では、出砂障害を計算対象とし、パーフォレーション孔内に集積した砂粒子がケーシング穿孔部から流出するプロセスについて検討している。その結果、ケーシング穿孔部にて形成されるサンドアーチを再現することができ、またサンドアーチの崩壊が断続的な出砂に繋がることを示している。

第 10 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を用いたハイブリッドシミュレータを構築し、資源工学分野における固液二相現象の内部構造の解明を試みた成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

①複雑な形状を有する固液境界面近傍の流体運動を高解像度で捕捉することを可能にする連成計算手法を構築し、マイクロメカニクスの観点での数値解析評価を可能にした。

②円環状ジェット流れを計算し、粒子周りの流れ場が理論値と整合的であることを示した。また、単一円形粒子および二粒子の沈降モードを再現し、その妥当性を確認した。

③スラリーの固液分離促進現象を再現し、容器傾斜角および対流の形成が分離速度に与える影響を検討した。容器傾斜角が 20° 以上では、分離時間が約 $2/3$ に短縮されることを示した。また、固体粒子群の沈降速度は、容器内に形成される対流により、単一粒子の終端速度の最大 1.5 倍に達することを明らかにした。

④流体流動に伴う粒子輸送が多孔質体の浸透性低下に与える影響を検討した。微粒子が多孔質体内の孔隙を閉塞するプロセスを再現し、また同時に多孔質体内の流速分布および圧力分布を評価した。さらに、微粒子濃度に応じた浸透性の低下率を明らかにした。

⑤出砂障害を計算対象とし、パーフォレーション孔内に集積した砂粒子がケーシング穿孔部から流出するプロセスについて検討した。ケーシング穿孔部近傍におけるサンドアーチの周期的な形成と崩壊のサイクルを再現し、その崩壊が断続的な出砂に繋がることを示した。

以上、本論文は、粒子ベースの連成シミュレータの構築とその妥当性の検証がなされている。さらに、固液二相問題という複雑現象への応用を経て、十分にその有用性が示されており、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22年2月22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。