

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 18 日現在

機関番号：31103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21760363

研究課題名（和文） 粒子-水連成系のマルチスケール変形解析手法の開発

研究課題名（英文） Development of a multi-scale numerical method for grains-water coupling system

研究代表者

金子 賢治 (KANEKO KENJI)

八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30333834

研究成果の概要（和文）：本研究は、非線形均質化理論に基づく水-粒子連成系のマルチスケール解析手法の開発を目的としている。また、開発した手法を用いて飽和度と全体構造の力学挙動の関係について微視的・巨視的両面から考察を行う。本研究において、飽和状態における問題の定式化、プログラム開発、評価のための実験を行った。その結果、飽和状態の挙動をある程度の精度で解析可能となった。砂のような、固体粒子と液体の連成問題の解析可能となり、種々の力学挙動の解析・検討が可能となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, I developed a multi-scale numerical method for the deformation of grains-water coupling system based on a nonlinear homogenization method. Moreover, we carried out the numerical simulation of the grain-water coupling problems to investigate the strength and deformation characteristics. At first, a governing equation of the grains-water coupling deformation problems in the saturated state was formulated. Next, I developed the original simulation program for the problems. At the same time, I carried out the experiment and visualization of the deformation behavior of grains-liquid coupling systems to grasp micro-mechanical phenomena. As the results in this study, I was able to simulate the mechanical behavior of the saturated grains-water system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：応用力学・粒状体力学・マルチスケール

## 1. 研究開始当初の背景

これまでの、粒状材料の力学に対する研究は、主に巨視的なアプローチと微視的なアプローチに大別される。巨視的なアプローチは、実験などから粒状材料を連続体と捉えて現象論的に構成モデルを構築するものであり、

微視的なアプローチは材料を粒子の集合であると捉えモデル化するものである。本研究課題におけるマルチスケール法は殆ど独立に行われてきたこれら2つの手法の中間に位置しており、両者を繋ぐものであると解釈される。

申請者は、これまで、2次元円粒子を用いたマルチスケール法の開発およびこれらの応用、亀裂性岩盤への応用、球粒子を用いた3次元問題への拡張などを進めてきた。これらは固体粒子のみ、つまり、乾燥状態を想定しているが、3次元問題への拡張は本研究課題である水-粒子連成系を対象とする前段階として行ったものである。3次元化することで全ての空隙が連続しているといった現実に近い状況を実現でき、微視的・直接的な水-粒子連成解析を可能とする。

なお、粒状材料のマルチスケール解析に関しては、ドイツの研究グループが類似のアプローチを試みているのみであるが、微視構造を反映した境界値問題の解析には至っていない。固体粒子と水との連成解析には到底至っていない。なお、マルチスケール法は、FRP等の複合材料や岩盤など他の材料に対しても近年幅広く適用されつつあるが、固液連成系に対しては多孔質体と液体との連成解析が行われているのみである。

## 2. 研究の目的

粒状材料は微視的に見れば粒子集合体で構成され、その離散性や非均質性が巨視的力学挙動を支配する。さらには(1)微視構造のスケールと構造物の巨視スケールとの差が大きいこと、(2)気体-固体-液体の3相混合体であることが問題を複雑化している。申請者はマルチスケール解析手法を中心に、粒状材料の力学に対する研究を進めてきた。大別すると(1)解析手法の高性能・高度化、(2)工学的アプリケーションへの応用、(3)構成則理論の数値実験的考察およびこれらに基づく(4)粒状

本研究課題は、この中の(1)に該当する研究テーマであり、粒状材料の特徴である固液気三相の混合体であることを考慮可能とすることを目的としている。

粒子、水、空気により構成される粒状材料の境界値問題を解く場合には有効応力の原理に基づいて有限要素法により巨視的アプローチにより水-土連成解析を行うことが一般的であるが、本研究では、微視スケールに直接的に粒子と水の力学的相互作用を考慮する。したがって、飽和状態のみでは無く、不飽和状態の解析も可能とすると考えられる。

## 3. 研究の方法

まず、光学ガラス粒子とシリコンオイルを用いて、固体粒子および液体両方の可視化可能な手法を開発し(図-1)、実験を行い、その挙動を把握した。可視化手法の固体部分にはLaser Aided Tomographyを用いて、液体部分にはParticle Image Velocimetryを用いた。これに基づいて浸透破壊現象の可視化、粒子間の流れと物質輸送について検討を行った。

次に、飽和状態を仮定してマルチスケール問題の定式化および解析プログラムを確立した。実験結果に基づいて数値解析結果を検証し、解析プログラムの修正・高度化を図った。

## 4. 研究成果

まず、LAT-PIV手法を用いた粒子-流体連成系のマルチスケール計測システムを開発した。粒子-流体の連成系について、その力学・

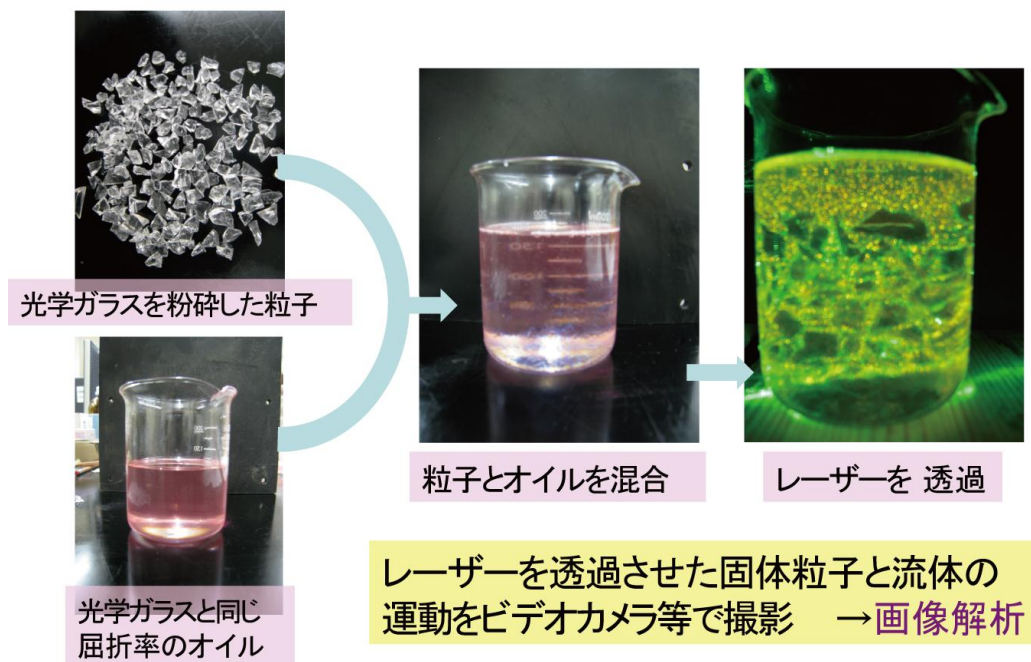
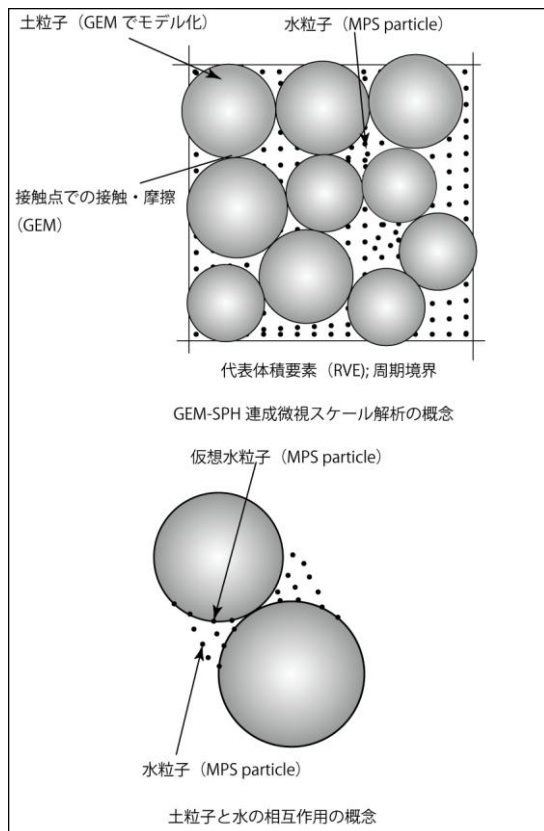


図-1 LAT-PIV手法を用いた粒子-流体連成系のマルチスケール計測システム

の粒子と液体の力学的相互作用を微視的な視点により観察・説明した。また、このような実験と分子シミュレーションにより微視的な粒子間流れの解析と物質輸送および粒子への吸着についていくつかの有用な知見を得た。

粒子と水から構成された問題の準静的なつり合い式を出発点として、飽和状態における粒子と水の連成マルチスケール境界値問題を変分法により定式化し、支配方程式を導出したが、液体部分の流れは Stokes 流を考慮した。支配方程式を離散化し、まず、微視スケール問題の解析コードを作成・確立した。現在の粒状体マルチスケール解析手法においては、巨視的な全体構造スケールは有限要素法を用いて離散化し、微視スケールは粒状要素法を用いて離散化することで解析コードを作成している。微視スケールにおいて液体部分の支配方程式を離散化する手法として MPS 法を用いた。固体粒子はこれまでと同様に GEM によりモデル化し、空隙に存在する水は MPS 粒子を用いてモデル化される。解析



モデルのイメージを図-2 に示す。

図-2 微視スケールの数値解析手法のイメージ

粒子法・メッシュフリー法の一つである MPS は、偏微分方程式を離散化する方法の一つである。なお、土粒子と水粒子の相互作用は、土粒子表面に配置した仮想的な水粒子を用

いることで反映される。上記で開発した微視スケール問題の解析コードを全体構造の巨視スケール解析に組み込み、マルチスケール解析手法を確立する。なお、マルチスケール解析手法においては、全体構造の有限要素解析における構成式の役割は微視スケール解析が果たすこととなる。したがって、微視スケールにおいて直接的に粒子と水が連成されるため、その相互作用が自動的に考慮される。そして、微視スケールにおける力学情報が平均(均質)化されて構造体に反映される。

なお、複雑な解析により、数値解析時間が当初の想像よりも遙かに掛かることが課題であり、簡単な計算は実施できるものの、工学的に有用な解析結果が得られる所までは至っていない。今後、研究を継続して、種々の工学的問題が解析可能なコードを開発し、粒子-水連成挙動の微視的・巨視的な考察を行いたい。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Y. Satoh, K. Suzuki, K. Kaneko, K. Kumagai: Quadric surface approximation of failure criteria for granular materials in plane problem, Geomechanics and Geotechnics: From Micro to Macro, Jiang, et. al. (eds), 査読有り, pp.101-105, 2010.
- ② 佐藤雄太・金子賢治・鈴木久美子・熊谷浩二: 粒状材料の弾性変形特性に関する数値実験, 応用力学論文集, 査読有り, Vol. 13, pp.477-486, 2010.
- ③ 立花大地, 佐藤雄太, 成田秀星, 金子賢治, 熊谷浩二, 田中昇: 移流分散現象における吸着項に関するパラメータの分子シミュレーションによる推定, 応用力学論文集, 査読有り, Vol. 12, pp.541-548, 2009.
- ④ 立花大地, 佐藤雄太, 成田秀星, 金子賢治, 熊谷浩二, 田中昇: 地盤中の汚染物質の移流分散解析に用いるパラメータの分子シミュレーションによる推定, 第8回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 査読有り, pp.45-50, 2009.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 立花大地・佐藤雄太・鈴木久美子・金子賢治・田中昇・熊谷浩二: 地盤中の汚染物質吸着特性に関する分子シミュレーションに基づく考察, 平成 21 年度土木学会東北支部技術研究発表会, III-45, 2010. 3. 5, 郡山.

② 立花大地・佐藤雄太・苫米地学・金子賢治・熊谷浩二：地盤中の汚染物質輸送に関するパラメータの分子シミュレーションによる推定, 第44回地盤工学研究発表会, 2009. 8, 横浜.

③ 佐藤雄太・立花大地・苫米地学・金子賢治・熊谷浩二：LAT-PIV 手法を用いた矢板の浸透破壊現象の微視的計測と可視化, 第44回地盤工学研究発表会, 2009. 8, 横浜.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金子 賢治 (KANEKO KENJI)

八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30333834

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし