

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15093

研究課題名（和文）地盤内の非水溶性流体に移動機構に関する新たな理論の構築

研究課題名（英文）Development of a new theory on the mechanism of movement of non aqueous phase liquids in the ground

研究代表者

中村 圭太（Nakamura, Keita）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・研究官

研究者番号：00827347

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、連続体（流体を含む）と剛体（土粒子を想定）の接触問題を精緻に解く解析手法を開発することで、土粒子間隙中におけるNAPLの移動機構を数値解析により明らかにすることを目的としている。本研究で用いた数値解析手法はMPMという粒子法の一つで、流体をMPM、土粒子を剛体で模擬することで、両者の相互作用をシミュレート可能な数値解析術を開発した。具体的には、particle-to-surface接触に基づいたMPMによる新しい摩擦接触アルゴリズムを提案した。本アルゴリズムは、流体と固体との接触で通常用いられるno-slip conditionにも適用可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した数値解析技術は、連続体と剛体との摩擦接触解析手法であるため、流体だけでなく、あらゆる材料に適用することができ、今後更なる発展性が見込まれる。具体的に地盤工学分野に関する諸問題としては、地盤内に杭などの基礎を貫入させた際の地盤内の変形や、土砂に流される物体の挙動など多岐にわたり、社会的意義は非常に高い。本研究の主目的である地盤内の土粒子間隙内の流体の移動機構についても、今後開発した数値解析技術を用いてパラメトリックスタディを行っていくことで、メカニズム解明に寄与できる成果が得られる可能性が高い。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop an analytical method to precisely solve the contact problem between a continuum (including fluids) and a rigid body (assuming soil particles), and to clarify the movement mechanism of NAPLs in void space in the ground by numerical analysis. The numerical method used in this study is one of the mesh-free methods called MPM. We develop the numerical algorithms which can simulate the interaction between the fluid and soil particles by using MPM and a rigid body. Specifically, we proposed a new frictional contact algorithm using MPM based on particle-to-surface contact. The proposed algorithm is applicable to the no-slip condition, which is usually used in the contact between fluid and solid.

研究分野：数値力学，地盤工学，土質力学

キーワード：土壌汚染 MPM 剛体 摩擦接触 連続体

## 1. 研究開始当初の背景

石油や揮発性有機化合物などの非水溶性液体(NAPL)は、地中で複雑な多相の流れを形成して土壤汚染を引き起こす。このような NAPL による土壤汚染問題では、土壤の汚染形態を正確に把握し、適切な対策方法を選定する必要があるが、原位置調査や過去の経験に基づいた対策だけでは不十分なため、水-NAPL-空気 3 相の浸透解析手法の援用が必須となる。土壤汚染を水-NAPL-空気 3 相の浸透解析で検討する際は、土粒子間隙における 3 相の圧力-飽和度関係のモデル化が計算の信頼性を左右する。圧力-飽和度のモデル化には Leverett の理論が広く用いられてきたが、NAPL の種類などの条件によっては適用出来ず、地盤内の NAPL の残留量を過小評価する問題が指摘されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、Leverett の理論の適用限界を克服した新たな理論を提案し、それに立脚した精緻な土壤汚染解析技術の開発を目的とする。本研究では、当初「土粒子間隙において NAPL が孤立するメカニズム」と「NAPL の界面張力の違いが及ぼす影響」について実験的に明らかにするために、X 線 CT スキャンを用いて実際の多孔質体を 3D プリントしたクローン多孔質体を供試体として用いることを予定していたが、より理論的なアプローチを行うために、数値解析により検証を行うよう計画を変更した。具体的には、連続体(流体を含む)と剛体(土粒子を想定)の接触問題を精緻に解く解析手法を開発することで、土粒子間隙中における NAPL の移動機構を数値解析により明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、連続体(流体を含む)と剛体(土粒子を想定)の接触問題を精緻に解く解析手法を開発することで、土粒子間隙中における NAPL の移動機構を数値解析により明らかにすることを目的としている。本研究で用いた数値解析手法は MPM という粒子法の一つで、流体を MPM、土粒子を剛体で模擬することで、両者の相互作用をシミュレート可能な数値解析術を開発した。具体的には、particle-to-surface 接触に基づいた MPM による新しい摩擦接触アルゴリズムを提案した。本アルゴリズムは、流体と固体との接触で通常用いられる no-slip condition にも適用可能である。

## 4. 研究成果

本研究では、MPM のための particle-to-surface 接触アルゴリズムを提案した。精度の高い接触検出を実現するために、提案手法では、multivelocity field technique (節点での 2 物体の速度をそれぞれ分けて扱う)の代わりに、粒子と剛体表面の間で直接ペナルティ法を用いた。物理量が粒子から剛体内に位置する格子節点に輸送される可能性がある問題点は、重み付き最小二乗法(WLS-MPM)を用いて解決した。この方法では、partition-of-unity を損なうことなく形状関数を構成できる。WLS-MPM は、境界におけるデルタ関数の特性を保持できるため、境界条件はオリジナルの MPM と同様に扱うことができる。

提案したアルゴリズムは 3 つの数値シミュレーションで検証した。その結果、すべてのシミュレーションにおいて、提案したアルゴリズムは解析および FEM による計算結果とよく一致した。しかし、スライドボックスシミュレーション(図-1)では、所定の精度の結果を得るためには、ペナルティ法に基づく他のアルゴリズムと同様に、十分に細かいメッシュを用いるか、感度解析を用いてペナルティ係数の適切な値を選択する必要があることがわかった。法線方向の接触力の計算や、ペナルティ係数については、より適切な手法を今後検討する必要がある。円盤の転がりシミュレーション(図-2)では、本アルゴリズムが粒子と剛体表面の間で直接接触検出を行うため、格子ベースの接触アルゴリズムよりも、粒子の配置やその数が提案アルゴリズムの結果に大きく影響を与える可能性があることがわかった。べた基礎支持力問題のシミュレーション(図-3)では、提案したアルゴリズムが、粗い基礎と滑らかな基礎の支持力の違いや、地盤の破壊メカニズムをうまくシミュレートできることを実証した。

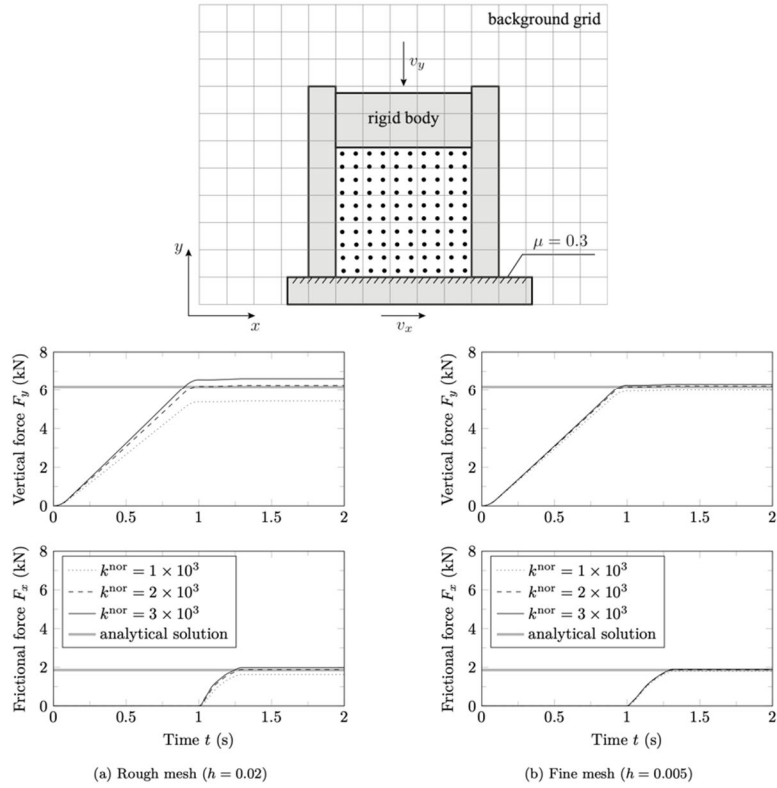


図-1: スライドボックスシミュレーションでのペナルティ係数  $k$  とメッシュ解像度の影響

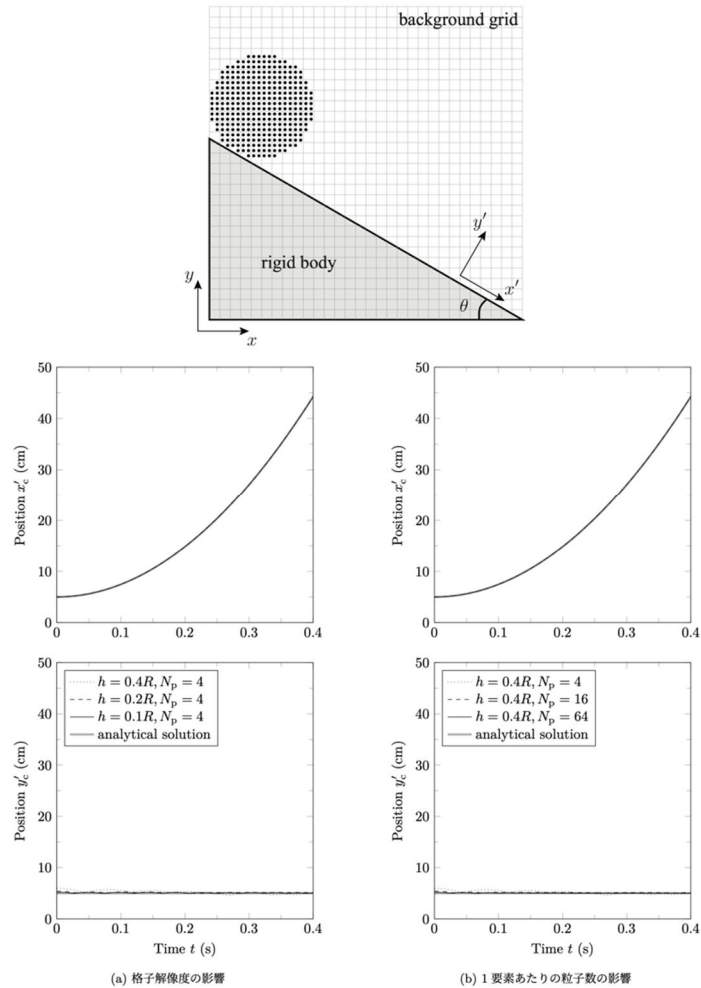


図-2: 円盤の転がりシミュレーションでの解析解との比較

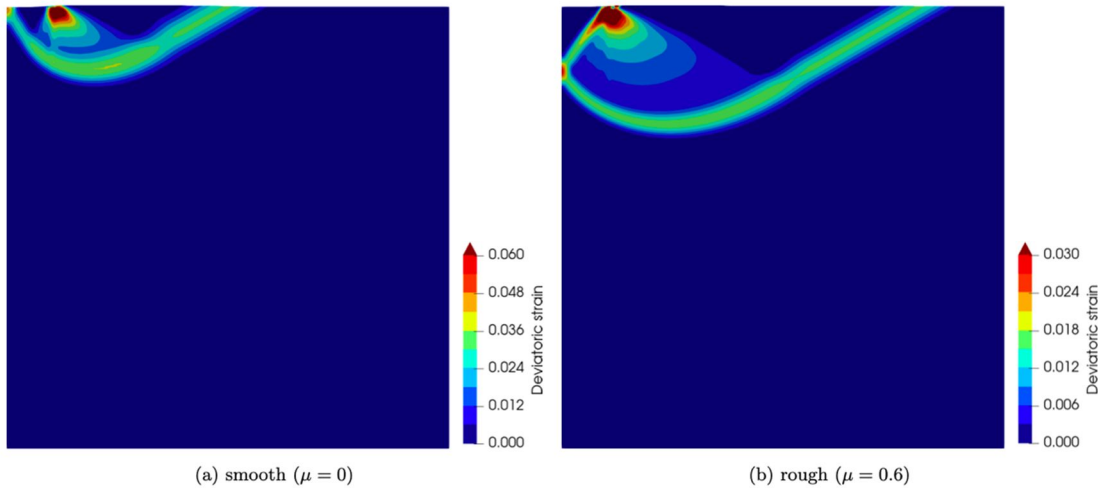


図-3: ベタ基礎のシミュレーションにおける偏差ひずみ分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakamura Keita, Matsumura Satoshi, Mizutani Takaaki	4. 巻 134
2. 論文標題 Particle-to-surface frictional contact algorithm for material point method using weighted least squares	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers and Geotechnics	6. 最初と最後の頁 104069 ~ 104069
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compgeo.2021.104069	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中村圭太
2. 発表標題 MPMを用いた開端杭の貫入シミュレーション
3. 学会等名 地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------