

透水モデルにおける代表粒径に関する解析的検討

研究の目的

粒子群の間隙を流れる水の挙動については、古くから実験・理論・解析の様々な研究がなされている。特に地盤工学における透水問題については、Darcy則が最も基礎的なモデルであり、実務レベルでも広く利用されていると同時に、数値解析でも土と水の相互作用項を担う重要な方程式として認知されている。さらに、近年では、透水係数の評価のために粒径や間隙率を考慮できるKozeny Carman 式などのより高度なモデルの導入も進んでいる。一方で、非Darcy流れについては、数値解析の中でこれを扱うための基盤は十分に構築されていない。この主な理由は、非Darcy流れの非線形性を数値解析の中で精度よく表現可能な統一的モデルが存在しないためである。その骨格をなすものとしてはForchheimer式があり、これに含まれる2つの係数が粒径や間隙率を用いてどのように表現されるのかを調べた研究は多く報告されている。それらの成果として得られている2つの係数の推定式は形が類似しているものが多いが、含まれる係数やパラメータの冪数が異なっており、多くの場合、粒径の情報は代表粒径として1種類の粒径サイズに集約される。

本研究では、上述の学術的背景に基づき、粒子群中の非Darcy流れを対象として数値実験を実施し、その結果を分析することでForchheimer式の係数に含まれる代表粒径の物理的意味を探る。具体的には、粒度分布や間隙率を変化させた球形粒子群中の透水をNavier-Stokes方程式に基づく直接的な3次元数値解析で表現し、結果として得られる圧力損失に対する粒度分布や間隙率の関係を整理することで、粒度分布を持つ場合の代表粒径の意味を分析する。また、既往のモデルでは把握することが難しい非球形粒子間隙の3次元流れの特性量を把握する。

研究の計画

本研究は下記に記載する4段階で進める。図1は研究の流れと体制のイメージを示したものである。

1. 透水シミュレーション（以下、本解析と呼ぶ）に必要な解析モデル（粒子配置）を、粒径0.4～1.5mm（砂を想定）の範囲で様々な粒度分布特性を有する10種類（1種類は均等粒径モデル）作成する。
2. 透水シミュレーションのための事前検討のための解析を実施する。透水シミュレーションは3つのグループが異なる3つの数値解析手法（有限要素法、差分法、有限体積法）を用いて実施するが、事前解析についても各手法に対して実施する。具体的には、計算解像度を変化させて圧力損失を算出し、解の収束性を確認することで各手法に対して必要となる計算解像度を把握する。
3. 事前解析に続いて本解析を実施する。ここでは10種類の解析モデルそれぞれに対して10パターンの異なる水頭差を設定し、各水頭差の条件下における圧力損失を計算する。
4. 得られた結果に基づいて、粒度分布と代表粒径の関係を分析する。

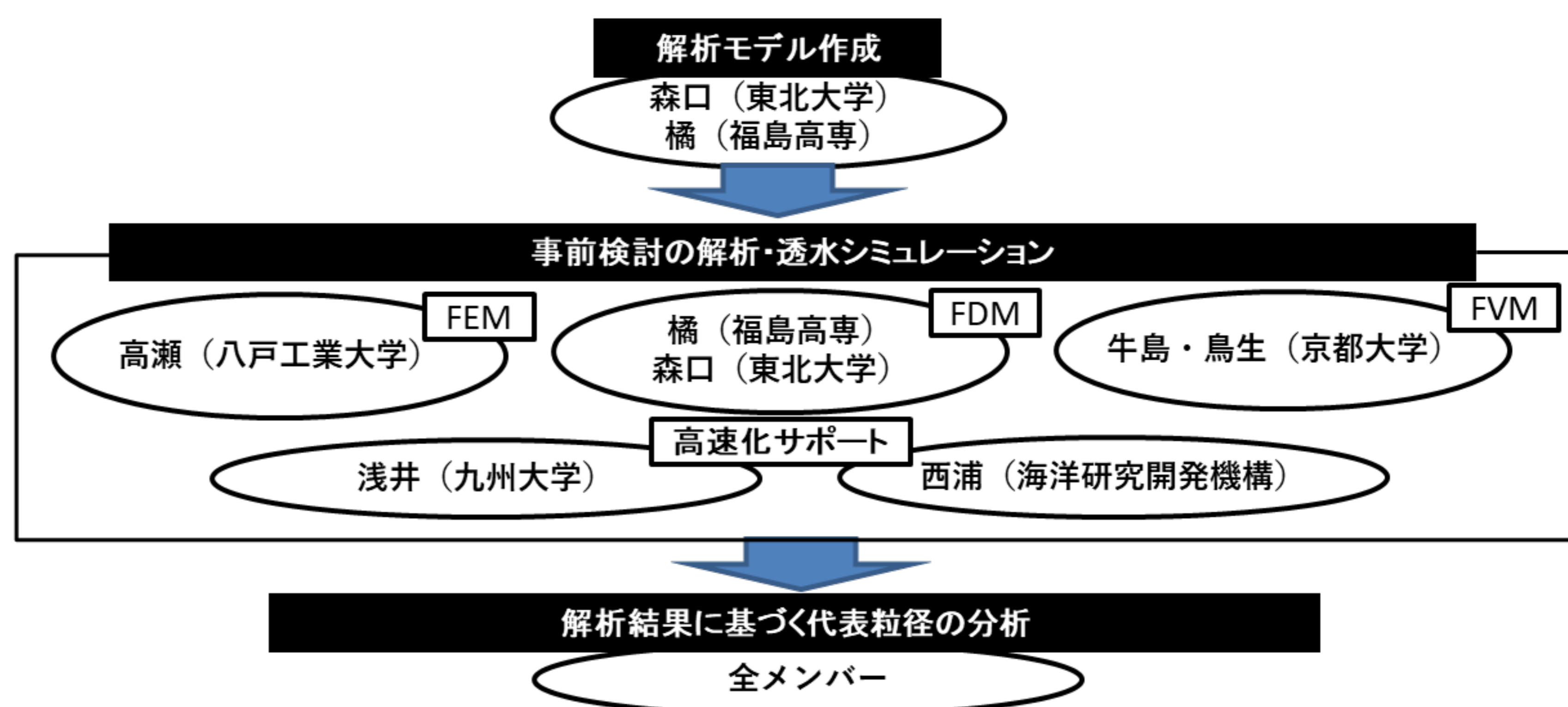


図1 研究の流れと各メンバーの役割

これまでの研究成果

参画メンバーのこれまでの研究成果の中で、本研究の内容と関連するものを紹介する。図2は均等粒径の粒子を規則的に配置した粒子群中の透水シミュレーションであり、差分法を用いた計算の解析モデルと解析結果のイメージである。解析モデルとしてはシンプルなものではあるが、異なる水頭差に対する透水量を評価しており、粒子レイノルズ数を用いて透水係数の非線形性を統一的に表現可能であることを解析的に示し、ミクロな流れ場の情報から透水係数の低下のメカニズムを分析した。図3は有限体積法による解析結果であり、粒径の異なる粒子群中の水の流れを解析によって再現したものである。

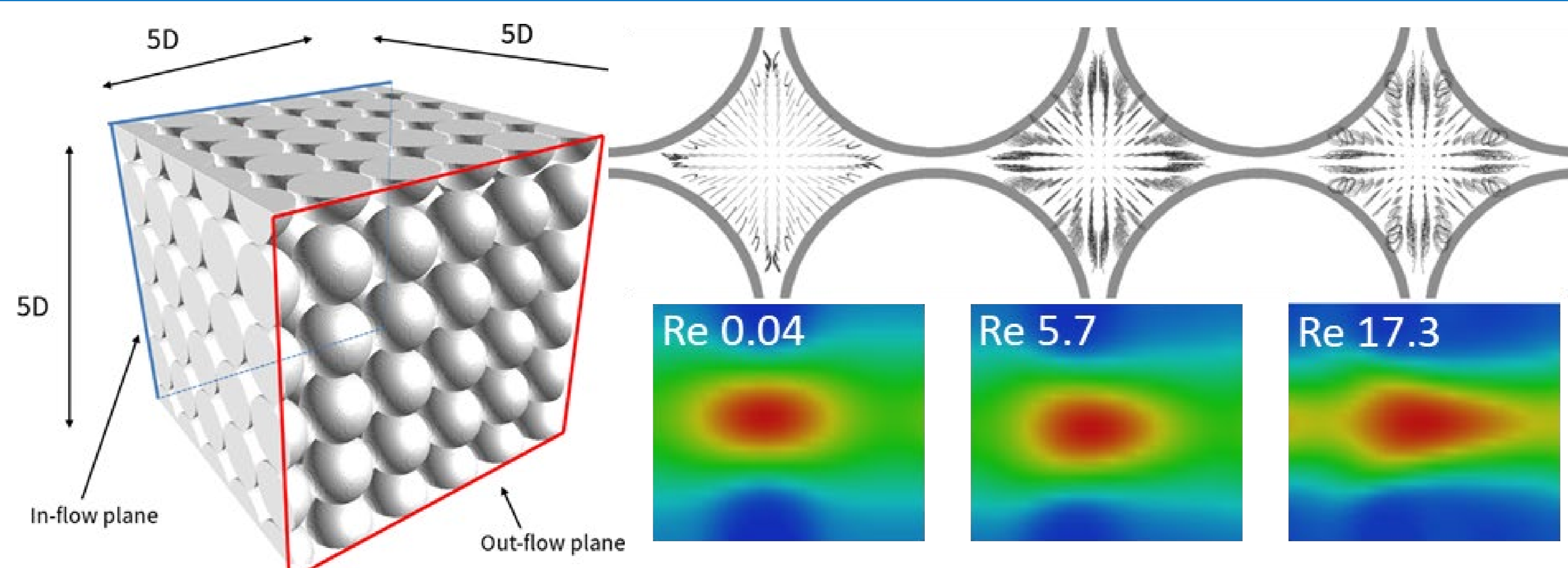


図2 異なるレイノルズ数条件の粒子群中の透水シミュレーション [1]

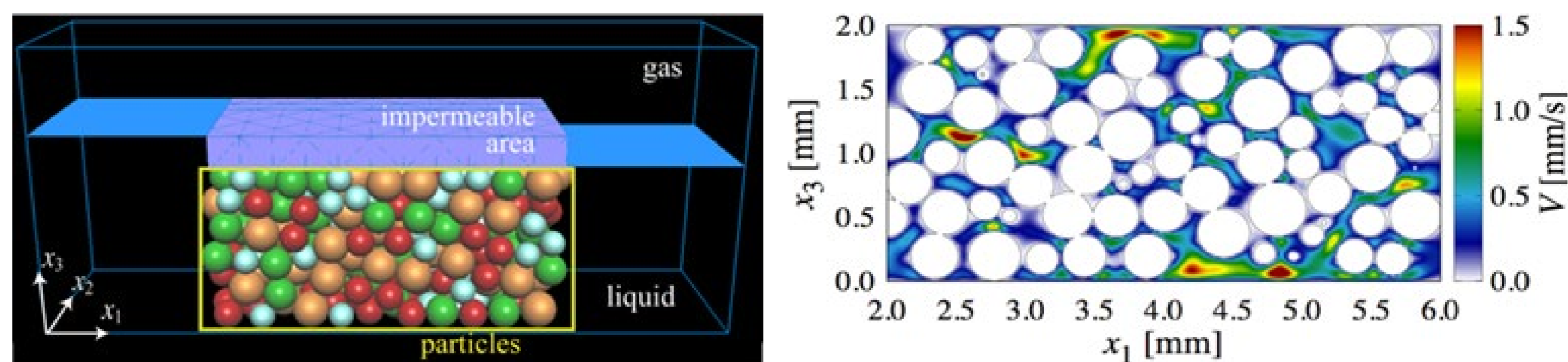


図3 混合粒径粒子の間隙における流速分布 [2]

参考文献

- [1] Ikko Tachibana, Shuji Moriguchi, Shinsuke Takase, Kenjiro Terada, Takayuki Aoki, Kohji Kamiya, Takeshi Kodaka, Characterization of transition from Darcy to non-Darcy flow with 3D pore-level simulations, Soils and foundations, Vol.57, No.5, pp.707 - 719, 2017.
 [2] 田中 寛樹, 鳥生 大祐, 牛島 省, “固体粒子の間隙流体計算における時間・空間分解能の影響”, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 75, No. 2, I_269-I_276, 2019.