

## 1. はじめに

都市部においてトンネルを構築する際には、多くの場合シールド工法が採用されている。シールド工法ではカッターチャンバー内の泥土を適切な流動状態に管理することは非常に必要である。しかし、実際のシールドにおいて、リアルタイムにカッターチャンバー内全体の泥土の流動状態を直接観察することが困難であった。チャンバー内全体の流動状態を評価するため、粒状体解析を行う必要がある。そこで本研究では、屈折率マッチング手法を用いて、石英ガラスと流動パラフィン (P40 と P55 の混合した流動パラフィン) を用いた攪拌実験を行った。攪拌実験の複数の条件下における粒状体の内部を観察した。

## 2. 実験の概要

**2.1 実験手法**：屈折率マッチング手法 (RIMS) とは、対象物の屈折率と対象物と混合した液体の屈折率を近づけることで、内部を可視化させる方法である。この手法に適した石英ガラスと流動パラフィンの組み合わせを用いて実験を行った。透明土粒子には石英ガラス (粒径 0.5-1.0mm、土粒子比重 2.21、屈折率 1.4585) を、整合液には 2 種類のミネラルオイル (流動パラフィン P-45:P-55 の質量比=3.44:1 を混合して、液温 20°C で石英ガラスの屈折率に合わせたもの) を用いた。

実験装置は、**図 1** のように、コントロール装置、攪拌機、PIV レーザー、高速度カメラ、光学フィルターである。コントロール装置には石英ガラスと流動パラフィンの適当な量を入れる。コントロール装置と攪拌機のブレードを組み立て、攪拌できるようにする。

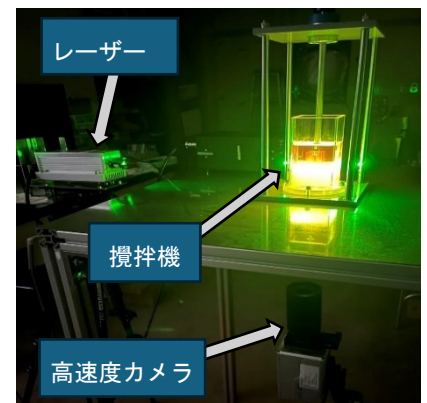


図 1 実験装置

**2.2 実験方法**：石英ガラスを土粒子と仮定し、石英ガラスと蛍光粒子を浮遊させた流動パラフィンの組み合わせで、レーザー断面での固体と流体の動きを観察した。手の動きによる適当な速度で実験を実施した。PIV レーザーをコントロール装置の横・縦から照射し、高速度カメラを用いて固体と流体の観察を行った。その後、取得した撮影画像に対して PIV (Particle image Velocimetry) 解析と PTV (Particle tracking Velocimetry) 解析を用いて、固体の速度ベクトルを取得した。

## 3. 実験結果

横軸断面と縦軸断面について観察した結果を示す。取得した画像を基に、攪拌機のブレードの横断面と縦軸断面を撮影し、PIV と PTV 解析を行った。今回の実験で得られた横断面画像を**図 2**に、縦断面画像を**図 3**に示した。



図 2 水平断面の画像

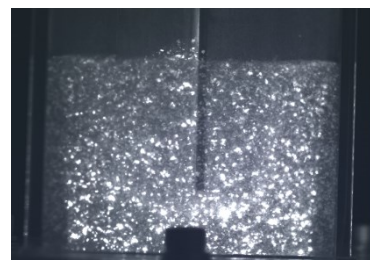


図 3 鉛直断面の画像

図4は水平断面におけるPIV解析した速度ベクトルを表している。ブレードの中心に近づくほど固体の速度ベクトルが遅くなる。ブレードの先端部に近づくほど速度ベクトルが早くなる。ブレードの先端部のところから外に離れるほど速度ベクトルは遅くなる。ブレードの先端部の極座標には、いくつかの速度ベクトルは外に向かう傾向がある。それは土粒子が外側に押し出されることが分かった。

図5は水平断面におけるPTV解析した速度ベクトルを表している。ブレードの中心に近づくほど速度ベクトルが遅くなる。ブレードの中心から離れるほど速度ベクトルが早くなる。ブレードの中心から離れるほど速度ベクトルが早くなる。PTV解析においては、外縁部に近づくほど速度ベクトルの方向がばらばらになり、外側方向に向かっている速度ベクトルの方が多かった。それは土粒子が外側に押し出されることが分かった。

図4と図5を比較すると、中央の付近では、PIVとPTVの速度ベクトル分布がほぼ同じと観察することができた。しかし、外縁部の付近では、PTV解析の方が乱雑な速度ベクトル分布となり、PIV解析より速度ベクトルが小さかったという結果が得られた。それはPIV解析が高密度速度データであり、PTV解析が高精度速度データであるという特徴だと考えられる。

図6はPIV解析で鉛直断面の解析した速度ベクトルを表している。4つブレードを持っている攪拌機を利用した。回転方向に直面するブレード表面の前の付近においては、速度ベクトルが上向きに曲がる傾向が得られた。これは土粒子が上向きに曲がって行くことが分かる。回転方向に反対するブレードの表面の付近においては、解析した速度ベクトルが徐々に下向きに曲がって行くことが得られた。これは土粒子が下向きに動いて行くことが分かる。

#### 4. まとめ

本実験では透明地盤実験により、粒状態内を可視化し、固体と流体の挙動を観察することができた。攪拌羽根の回転に伴い、中心から離れるほど土粒子の流速が大きくなる。また、攪拌羽根の先端部では、土粒子が少し外側に押し出されることを確認できた。今度の研究では材料の条件を変えて試す予定である。

#### 参考文献

1. 陳 劍, 福元 豊, 渡邊尚幸, Laolue Cherxiong, 杉山博一, 西 琢郎, 吉河秀郎: 透明土を用いた攪拌羽根の回転による流動状態の可視化計測実験, 土木学会全国大会, 2024.
2. Laolue Cherxiong, 渡邊 尚幸, 山本七輝, 福元 豊, 大塚 悟: 浸透流の直接計測における屈折率マッチング材の組み合わせの検討, 第3回JGS北陸支部ユースネットワーク研究発表会, オンライン開催, 2023.

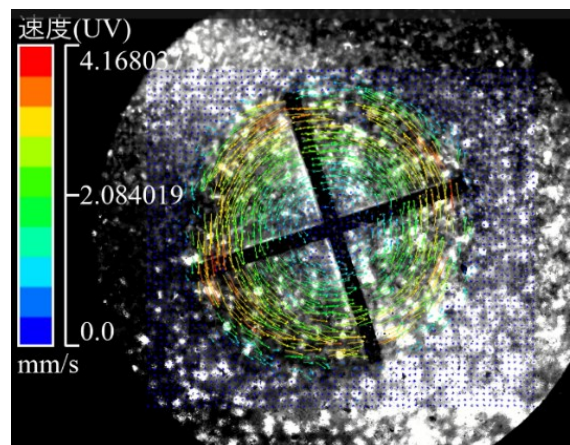


図4 水平断面のPIV解析

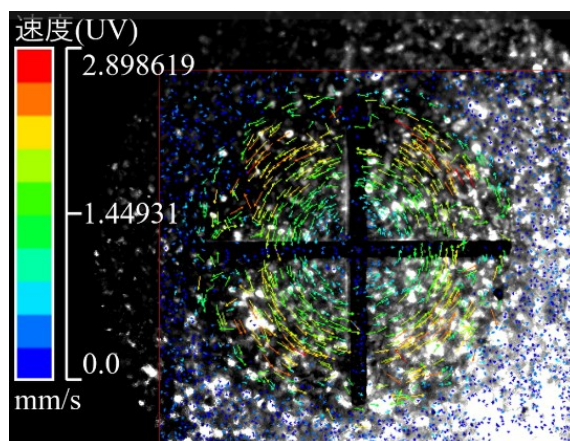


図5 水平断面のPTV解析

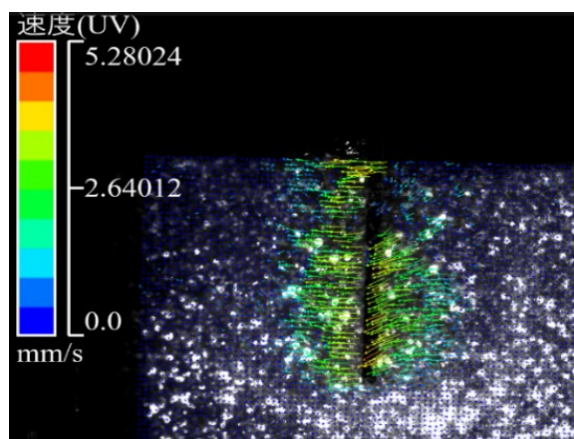


図6 鉛直断面の速度ベクトル