

LAT-PIV 法によるトレーサー粒子の間隙流速と挙動解析

筑波大学 正会員 羽田野 祐子
筑波大学 学生会員 ○田嶋 脩平

1. 背景と研究目的

これまで日本では、土壤汚染が明らかになることが少なかったが、近年、企業の工場跡地等の再開発に伴い、重金属、揮発性有機化合物等による土壤汚染が顕著化してきている。特に最近における汚染事例の判明件数の増加は著しく、ここ数年で新たに判明した土壤汚染の事例数は、増加してきている。土壤汚染対策法が2002年に制定されるなど、土壤汚染による影響や対策の確率への社会的要請が強まってきており、また、土壤汚染回復のための高額な対策費用により、不動産の再開発が思うように進まず汚染が放置されるなどのブラウンフィールドとなり、社会問題化している。

土壤中の物質予測モデルは、移流拡散方程式(Advection Dispersion Equation:ADE)による解析が主流であるが、土壤汚染の特徴である異常拡散という正規分布に従わない拡散を近年表現できないことがわかってきた。そして移流分散方程式に変わる、連続時間ランダムウォーク(Continuous Time Random Walk:CTRW)が提唱されている。移流分散方程式と連続時間ランダムウォークの本質的な違いは、間隙流速分布を異なる形に仮定していることである。移流分散方程式においては、間隙流速は、正規分布と仮定しており、連続時間ランダムウォークにおいては、正規分布ではなく、分散の値が無大となる特殊な関数を仮定している。本研究の目的は、実際に間隙流速を測定することにより、CTRW で用いた仮定が適切性を確認し、その結果を物質予想モデルの向上につなげることである。

間隙流速の測定方法として、LAT-PIV 手法を用いる。LAT-PIV 手法とは、粒状体の内部を観察するために開発された可視化実験手法の一つであるレーザー光を用いた断 X 線写真法(Laser-Aided Tomography:LAT)と流体力学の分野でよく用いられる可視化手法である粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry:PIV)を組み合わせた手法である。光学的に均質な光学ガラスを粉碎・研磨することにより生成した粒子を用いて模型を作成し、模型を同じ屈折率を有する液体で飽和させて試験体を作成する。そして液体内に無数のトレーサー粒子(大きさ数十ミクロン)を混入し、レーザー光をシート状にして流れに照射することにより、レーザーシート面内のトレーサー粒子が光り、パターンを作り出す。微小時間に対するパターンの移動量をパターンマッチング操作により調べ、流体の速度場を求め、模擬土壌内の間隙流速を測定する。

2. LAT-PIV 実験

図1に本実験で使用した実験装置の概略図を示す実験装置は、アクリルケース、定量ポンプ、レーザー光源、CCDカメラからなる。ケースは幅10cm、奥行10cm、高さ40cmのアクリルボックス内に、直径2mm~5mmのガラス粒子を敷き詰め模擬土壌を作製する。ガラス粒子と屈折率をあわせたシリコンオイルを間隙水として満たしトレーサー粒子を混ぜ、定量ポンプにより流動させる。側面から照射したシート状のレーザー光をアクリルボックスの撮影面に対して水平に照射させる。シリコンオイルとガラス粒子の屈折率を同じにすることによりトレーサー粒子のみが発光する。この画像を正面から一定間隔で約5000枚撮影し、時間経過を追うことによって間隙流速を測定する。

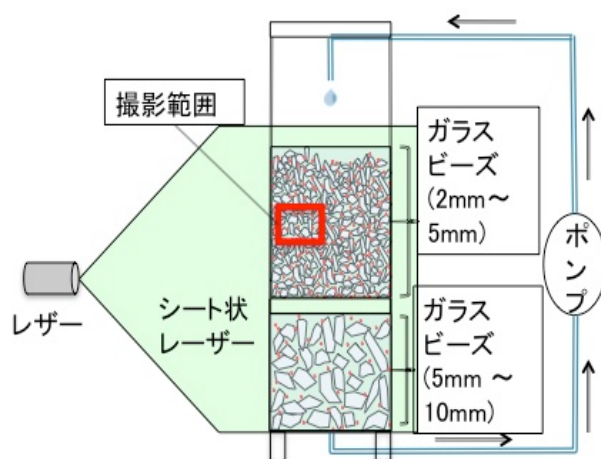


図1 : LAT-PIV 実験概略図

今回は3種類のポンプ流量(227ml/h, 27.7ml/h, 16.5ml/h)で実験を行った。

3. 結果と解析

図3は今回の実験から得られた間隙流速分布(227ml/h)と、正規分布でのフィッティングとべき乗関数でのフィッティングを行った結果である。図より間隙流速分布は正規分布に比べ、平均値より離れた値にも流速成分があり、ロングテールをもっており、正規分布ではフィッティングできていないことがわかる。またべき乗関数の方がよりフィットしている。この結果より、この実験における拡散は、異常拡散であり、土壤汚染拡散を移流分線方程式では表現できないことの証明となっている。

また得られた間隙流速分布から、連続時間ランダムウォークで用いられる待ち時間関数への変換方法を提案する。この変換を行うことにより、連続時間ランダムウォークの特性指数を求めることができる。この特性指数は連続時間ランダムウォークで土壤汚染のフィッティングを行う上で、極めて重要な値であり、間隙流速と土壤媒体内の拡散との関係性を示している。しかしこの待ち時間関数の設定の仕方はマルコフ的ではないという問題点があり、この方法での土壤汚染の拡散結果へのフィッティングは行っていない。

今後の展望として、今回流速を変えて実験を行ったが、流速の変化だけでなく、ガラス粒子の粒度を変えて実験を行い、流速と土壤内の拡散挙動の関係性を明らかにする。

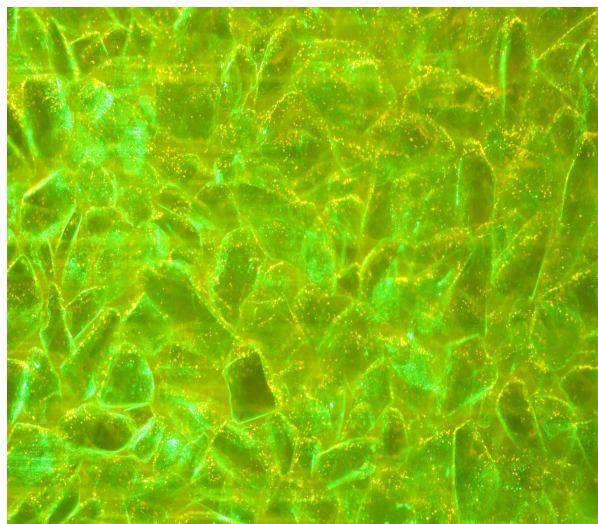


図2：撮影画像

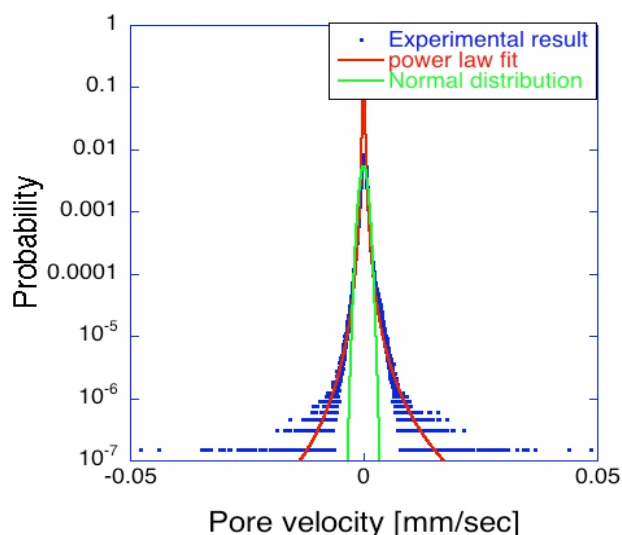


図3：間隙流速分布とのフィッティング(227ml/h)

参考文献

- [1]Hatano, Y. and Hatano, N.: Dispersive transport of ions in column experiments: An expansion of long-tailed profiles., Water Resources Research, 34, 1027-1033, 1998.
- [2]Berkowitz, B. and Scher, H.: Theory of anomalous chemical transport in fracture networks: Physical Review, E57(5), 5858-5869, 1998.
- [3]Berkowitz, B., Cortis, A., Dentz, M. and Scher, H.: Modeling non-fickian transport in geological formations as a continuous time random walk, Reviews of Geophysics, 44, RG2003, doi: 10.1029/2005RG000178, 2006.
- [4]竿本英貴: 粒子-流体系に関する可視化実験と数値解析, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2004.

キーワード PIV, CTRW, 土壤汚染, 拡散予測

連絡先 〒305-5873 茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大学システム情報工学研究科リスク工学専攻

T E L 029-853-5600-8207 E-mail: e0711228@edu.esys.tsukuba.ac.jp