

土粒子-間隙流体の高精度かつ高効率な連成のための間隙ネットワークモデル (PNM) の開発

Development of Pore Network Model (PNM) for Accurate and Efficient Coupled Numerical Simulation of Soil Particles and Pore Fluids

森本時生 (Tokio Morimoto)

東京大学 工学系研究科 社会基盤学専攻 助教

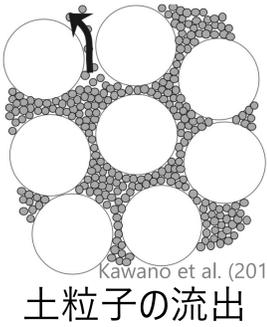
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo [morimoto@civil.t.u-tokyo.ac.jp]

2024年度萌芽型共同
研究採択課題
EX24305

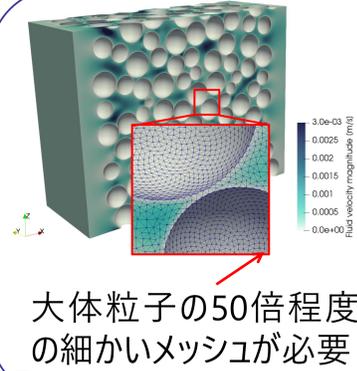


研究の目的

防災

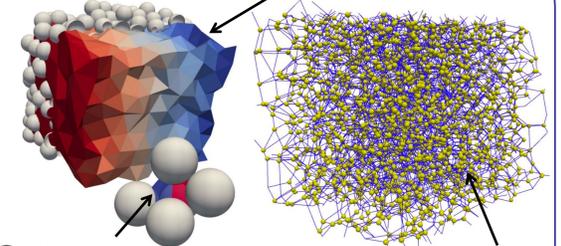


解像メッシュを用いた流体解析



間隙ネットワークモデル(PNM)

①ドローネー分割により"間隙"を定義

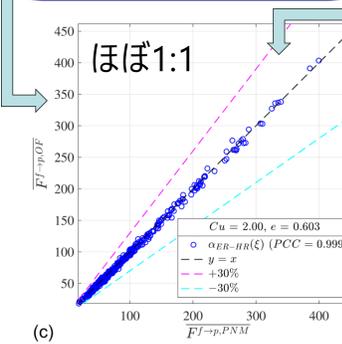
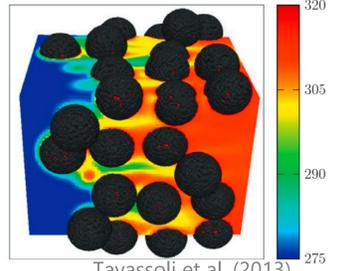
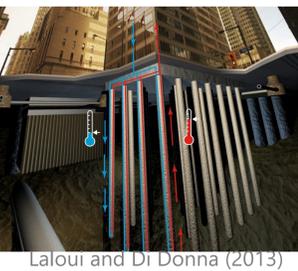


②単位"間隙" → 間隙間の流れをモデル化

③間隙間の流れを連立して解く

解像メッシュに対して要素数1000分の1, 計算時間は100万分の1

エネルギー



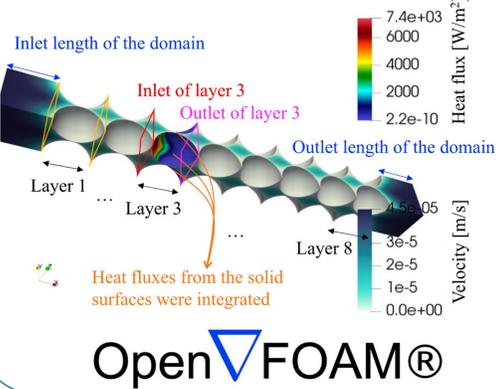
超低レイノルズ数域 $Re \ll 1$ については全ての粒子に対して高精度に流体力・伝熱を計算できた (Morimoto et al., 2023; 2024)

→もう少し高いレイノルズ数について拡張したい

土木分野においても粒子と流体の力学的・熱的相互作用に関する基礎的検討が必要

研究の流れ

①解像メッシュCFDのバリデーション



既往実験・解析結果と比較
・ Friction Factor (f)
・ Nusselt number (Nu)

目的:
メッシュ生成方法・解像度の選定

研究の進捗

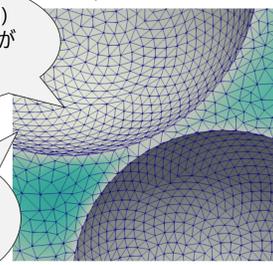
流体解析難しい...

バリデーション解析条件

Calis et al. (2001), Romkes et al. (2003)の実験データでバリデーション

- ・ 層流 or RANS ($k-\omega$ SST model)
- ・ $Re = 10, 100, 1000$
- ・ $Pr = 2.28$ (ナフタレンを用いた実験との相似)
- ・ 二次精度、Scalable wall function
- ・ Tetrahedra メッシュ or Snappy Hex Mesh (SHM)

直径の1/30(図)と1/60を試したが、1/30だと $Re=1000$ で発散

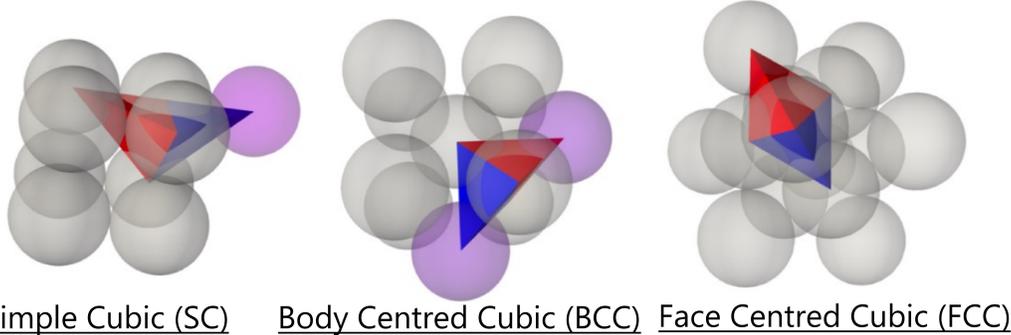


パラメータが多くて何が最適かわからない

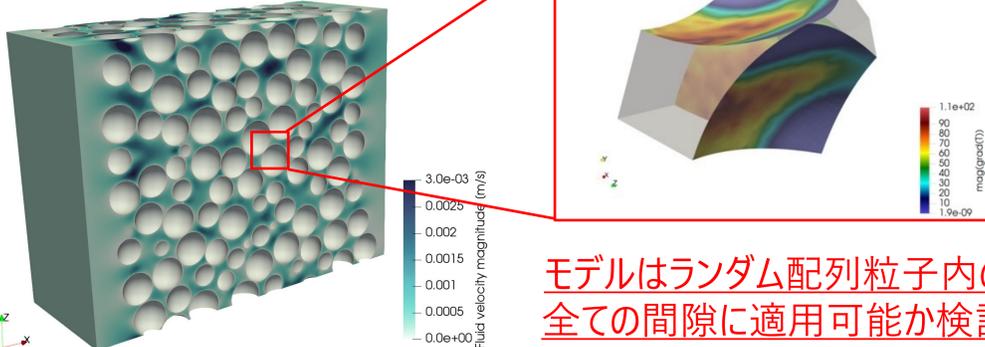
お手製のため並列化・メモリ最適化できていない

レイヤがうまく入らないのでなしでやっている

②規則配列粒子内の流れの数値解析 → 間隙の流れをモデル化



③ランダム配列粒子内の数値解析



メッシュ	Re	乱流モデル	f (本研究)	f (Calis 2001)	Nu (本研究)	Nu (Romkes 2003)
Tetra (1/60)	10	層流	15.8	約16.5	6.17	約5.5
	100	層流	2.35	約2.1	17.7	約17.3
	1000	RANS	1.0	約0.55	134	約71.0
SHM (1/20→1/320 at contact region)	10	層流	14.8	約16.5	5.57	約5.5
	100	層流	2.1	約2.1	18.8	約17.3
	1000	層流	0.54	約0.55	59.9	約71.0
	1000	RANS	0.48	約0.55	69.5	約71.0

log-log プロット

- ・ 一応は同等な結果を得ることができた
- ・ ただpressureのresidualがなかなか落ちきらず(0.08程度)、メッシュにまだ問題がある可能性が高い (けど何をやっていいかわからない)
- ・ 機械工学や航空工学などの解析と比べてかなり簡単なことをやっているはず... アドバイスなどいただけると幸いです。

参考文献

Calis, H. P. A., Nijenhuis, J. P. B. C., Paikert, B. C., Dautzenberg, F. M., & Van Den Bleek, C. M. (2001). CFD modelling and experimental validation of pressure drop and flow profile in a novel structured catalytic reactor packing. *Chemical Engineering Science*, 56(4), 1713-1720.

Kawano, K., Shire, T., & O'Sullivan, C. (2018). Coupled particle-fluid simulations of the initiation of suffusion. *Soils and foundations*, 58(4), 972-985.

Laloui, L., & Di Donna, A. (Eds.). (2013). *Energy geostructures: innovation in underground engineering*. John Wiley & Sons.

Morimoto, T., Zhao, B., Taborda, D. M., & O'Sullivan, C. (2022). Critical appraisal of pore network models to simulate fluid flow through assemblies of spherical particles. *Computers and Geotechnics*, 150, 104900.

Morimoto, T., O'Sullivan, C., & Taborda, D. M. (2023). Capturing particle-fluid heat transfer in thermo-hydro-mechanical analyses using DEM coupled with a pore network model. *Powder Technology*, 429, 118944.

Morimoto, T., O'Sullivan, C., & Taborda, D. M. (2024). Applying Network Modeling to Determine Seepage-Induced Forces on Soil Particles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 150(5), 04024029.

Romkes, S. J. P., Dautzenberg, F. M., Van den Bleek, C. M., & Calis, H. P. A. (2003). CFD modelling and experimental validation of particle-to-fluid mass and heat transfer in a packed bed at very low channel to particle diameter ratio. *Chemical Engineering Journal*, 96(1-3), 3-13.

Tavassoli, H., Kriebitzsch, S. H. L., Van der Hoef, M. A., Peters, E. A. J. F., & Kuipers, J. A. M. (2013). Direct numerical simulation of particulate flow with heat transfer. *International Journal of Multiphase Flow*, 57, 29-37.