

砂浜におけるマイクロプラスチックの動態予測を目的とした固液連成解析

東京都立大学 古畑岳, 新谷哲也

1. 背景と目的

マイクロプラスチック（以下 MP）は直径が 5mm 以下のプラスチック粒子を指し、生物の体内や水中、海岸など至る所で発見されている¹⁾。海洋でのプラスチックゴミ輸送過程において、海岸は堆積場所であると考えられていたが、近年海岸侵食に伴う再流出が指摘されている²⁾。しかしながら海岸における波による MP の輸送、MP と砂の混合・分級過程に関する研究はほとんど進んでいない。そこで本研究では、砂と MP のような、物性（密度・粒径）の違った固体粒子が相互作用する状態を解析することを目的として、個別要素法に基づく固体ソルバーと流体ソルバーの連成を行った。最終的な目標が海岸域への適用であり、時間・空間的に大規模な計算となるため、計算負荷を考慮した上で流体は格子法による解析とし、世界的に広く用いられるオープンソースの流体ソルバーである OpenFOAM を使用した弱連成モデルを構築した。

2. 解析手法

2.1 固体ソルバー

固体の数値解析には、個別要素法（DEM）を使用する。粒子接触時に仮想のバネとダンパーを用いて計算した接触力を F_c とすると、流体中での粒子の運動は式(1)を用いて、

$$\rho_s V_s \frac{dv_s}{dt} = F_c + F_d - (\rho_s - \rho_f) V_s g \quad (1)$$

と表される。ここで V_s, v_s, ρ_s, ρ_f はそれぞれ粒子体積、粒子の速度、粒子密度、流体密度である。 F_d は粒子が流体から受ける抗力であり、後述する。速度・変位の時間更新にはエネルギー保存に優れるシンプレクティックオイラースキームを用いた。

2.2 流体ソルバー

流れ場は OpenFOAM により計算する。OpenFOAM とは、オープンソースの数値流体解析用のライブラリであり、プログラミング言語 C++ を用いてオブジェクト指向に基づいて記述されている。OpenFOAM には豊富なソルバーがある上に、ユーザーによるカスタマイズが容易であるという特徴がある。双方向連成にあたっては、流速計算の式の生成項として粒子からの反力を取り込んだ。

2.3 連成解析

OpenFOAM と DEM ソルバーの間でのデータ交換にはオープンソースのカップリングライブラリである preCICE を使用し、図-1 に示すように流速と反力をそれぞれに与えた。preCICE を使用することで、メッシュの分割やタイムステップ幅の異なるソルバー間でスカラー、ベクトルデータを受け渡すことができる。本研究では、preCICE 内のモジュールである FF, FSI を参考にし、Fluid-DEM 連成が可能な新たなモジュールを作成した。DEM ソルバーでは OpenFOAM から得た流速 u_f を用い、抗力 F_d を以下の式(2)に従って求める。

$$F_d = -\frac{\beta}{1-\varepsilon} (u_f - v_s) V_s \quad (2)$$

ここで、 ε は流体の体積占有率、 β は運動量交換係数である。 β は Ergun³⁾ と Wen-Yu⁴⁾ を組み合わせたものを使用した。流体が受ける反力はメッシュ体積 V_f と、メッシュ内の粒子が受ける抗力の合計値 $\sum F_d$ を用いて以下の式(3)で表される。

$$f = -\frac{\sum F_d}{V_f} \quad (3)$$

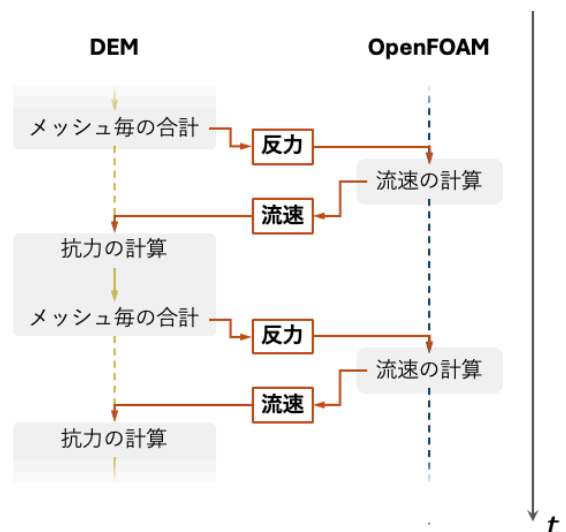


図-1 ソルバー間でのデータ交換

3. 解析結果

3.1 一方向連成による異密度粒子混合状態の解析

接触力および流体力計算の妥当性を確認するために、四方を壁に囲まれた縦 1m×横 2m の鉛直 2 次元領域で、一方向連成解析を行った。プラスチック素材を想定した密度 1010kg/m^3 と 1500kg/m^3 の 2 種の粒子を交互に配置した初期状態（一様混合状態）からの粒子位置の変化を観測した。粒子の粒径は 0.02m である。OpenFOAM における流体の初期条件として、波長の長い波を想定して、静止状態において水面に傾き $1/4$ を与え、領域の両端を腹とする振動（周期 1.9 秒）を発生させた。図-2 に、計算開始時と、15 秒経過時、50 秒経過時の状態をそれぞれ示した。

図-2 より、時間の経過に伴い、波の影響と相互作用の結果、軽い粒子が徐々に上昇し、重い粒子が沈降していることがわかる。また、時刻を経るにつれ粒子が両端に集まっているが、これは主に軽い粒子の移動によるものである。

3.2 単一粒子の沈降による双方向連成の検証

次に、連成モデルを流体に反力を与える双方向連成へと拡張し、縦 10m ×横 3m の水槽中を自由落下する粒径 0.02m の粒子を沈降させた。抗力 F には以下の式(4)を用いた。

$$F = \frac{1}{2} C_d A \rho_f v_s^2 \quad (4)$$

ここで C_d, A はレイノルズ数に依存する抵抗係数と流下方向の投影面積である。連成にあたっては式(4)の粒子速度に流体との相対速度を用いた。図-3 は解析解とメッシュサイズを変更したシミュレーション結果である。連成の結果では反力により流体が粒子と同じ方向に速度を持つため粒子が受ける抗力が減少し、沈降速度の上昇が見られた。またメッシュ高さを減じた場合に振動が緩和されており、粒子がメッシュ境界を超える際の流速のギャップの影響が考えられる。

4. まとめ

本研究は、物性の異なる粒子の混合状態に流体力が作用した際の挙動を DEM と OpenFOAM の連成モデルによって解析することを試みたものである。その結果、流体の運動に伴って固体粒子が相互作用しながら移動・分級する様子を確認できた。また双方向連成により粒子沈降を解析し、メッシュサイズやデータ交換間隔の異なる条件を比較した。

今後はモデルの拡張と同時に、実験や他手法との比較によりモデルの再現性を確認する予定である。

参考文献

- 1) 高田秀重, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.29, No.4, pp261-269, 2018.
- 2) Andrew Turner, Sara L. Amos, Tracey Williams, Marine Pollution Bulletin, Vol.173, Part B, 113133, 2021.
- 3) Sabri Ergun, Fluid flow through packed columns, Chemical Engineering Progress, 48, pp89-94, 1952.
- 4) C. Wen and Y. H. Yu, Chemical Engineering Progress Symposium Series, 62, pp100-111, 1962.

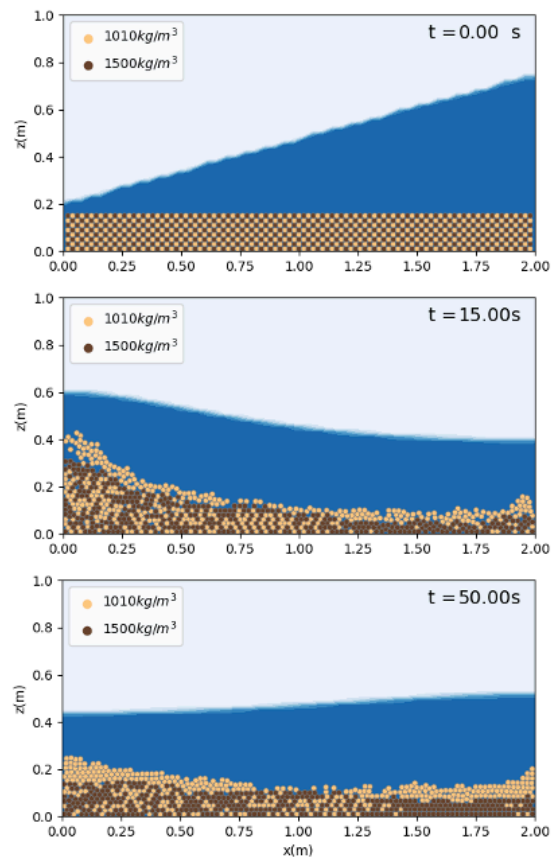


図-2 流体力を受ける粒子群の時間変化

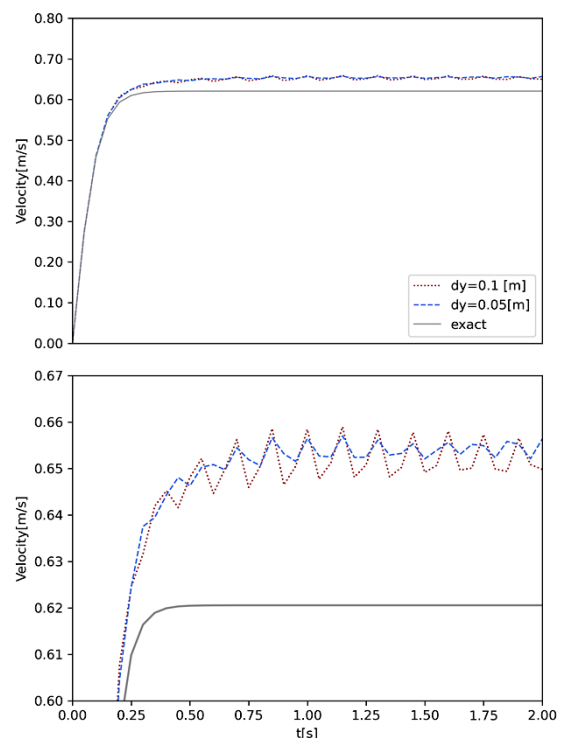


図-3 単一粒子の沈降速度の時間変化