

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 20 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 京都大学大学院工学研究科

氏 名 : 田崎 拓海

研究課題名 : 水理実験と数値移動床の協働による掃流砂の流体力モデルの修正

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

水理実験と数値移動床の協働による掃流砂の流体力モデルの修正

Correction of hydrodynamic force model for bed load sediment transport
by collaboration of experiment and resolved fluid-particle simulation

京都大学大学院工学研究科 助教 田崎 拓海

（研究計画ないし研究手法の概略）

【研究計画】

本研究の目的は、水理実験と数値移動床解析の協働により、空隙率や流速が急変する移動床表面へ適用可能な流体力モデルを提案することである。

河川や海岸の土砂輸送の数値解析で使用されるモデルは、土砂の捉え方によっていくつかに分類できる。個々の砂粒を離散的に扱い砂粒周囲の流れ場を高い液相解像度で捉える **resolved simulation** は極めて詳細かつ忠実に土砂を捉えるモデルであり、一方で、土砂の運動方程式を解かず流砂・漂砂量式と連続式を用いる土砂輸送解析は計算の実行性を優先したモデルである。これらのモデルを除けば、多くの数値解析モデルでは実験・経験的に決定された流体力モデルによる流体－土砂相互作用力の計算が必要である。流体抗力モデルを対象に考えると、一般的に使用される確立されたモデルは、均質な土砂の空隙率や平均的な流速場(図-1(b))を前提とし、流体抗力は平均的な空隙率や流速の関数として記述される。移動床あるいは固定床の表面では空隙率や流速が鉛直方向に急変する(図-1(a))が、均質場と同じ平均空隙率・流速が得られる場合は、全く異なる条件下においても流体力モデルによって同じ流体力が計算されてしまう。そのため、河川や海岸における土砂の輸送や堆積過程を再現・予測可能な数値解析モデルを構築するために、既存の流体力モデルの修正が必要であると考えられる。

本研究では、掃流砂に適した流体力モデルを目指し、粒子流 LES (large eddy simulation) による解析結果から、移動床表面における空隙率や流速の変化を考慮した流体力モデルの提案を試みた(図-2)。

【研究手法の概略】

本研究では、有限差分法に基づく LES に埋め込み境界法(immersed boundary method: IBM)¹⁾を組み込んだ非圧縮性流体－粒子連成解析モデル^{発表論文1}を用いた粒子流 LES と、矩形断面管路内に定常流を発生させる水理実験装置を用いた PIV (particle image velocimetry) の協働により、既存の流体抗力モデルを修正した。助成期間中には当初計画し

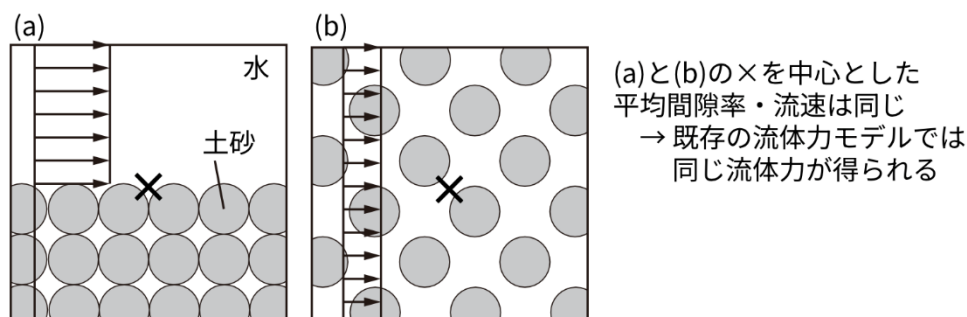


図-1 移動床表面における流体力モデルの適用

ていたうち、(1)非圧縮性流体－粒子連成解析モデルの検証、および(2)流体抗力モデルの提案(a priori test)を完了した．今後、(3)提案した流体抗力モデルの検証 (a posteriori test)に関する成果をまとめる予定である．

非圧縮性流体－粒子連成解析モデルでは、staggered 格子を用いた有限差分法により連続式と Navier-Stokes 式を離散化して解いた．微分演算子の離散化には 2 次精度の中心差分を基本とし、移流項は QUICK スキームで離散化した．移流項と SGS 応力項の時間差分スキームに 2 次精度の Adams-Bashforth 法を、粘性項には Crank-Nicolson 法を用いた SMAC 法を採用した．また、埋め込み境界法¹⁾を用いて粒子と液相を連成し、解析では固体粒子の粒径 D_p の 1/20 の液相解像度を採用した(図-3)．計算の実行には京都大学学術メディアセンターのスーパーコンピュータシステムを利用した．

水理実験では、一定の水頭差が保たれた 2 つのタンクを 0.10 m 四方の矩形断面を持つ管路(長さ 0.50 m)で接続し、定常流を発生させた．矩形断面管路に奥行 0.05 m のブロックを挿入し、底面には粒径 0.01 m、比重 3.6 のアルミナ粒子をランダムに配置し、高さ 0.04 m 奥行 0.05 m の堆積層を作成した．水に 50 μm のトレーサー粒子を混入した後、上方から

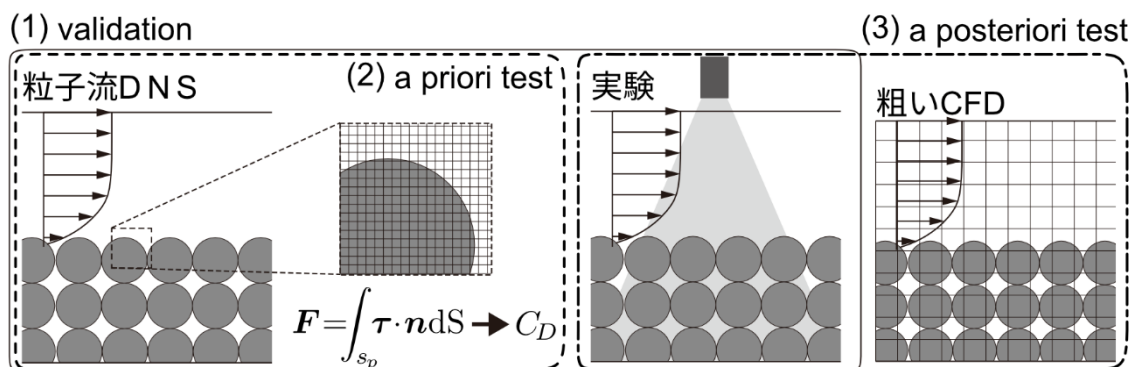


図-2 研究計画の概要

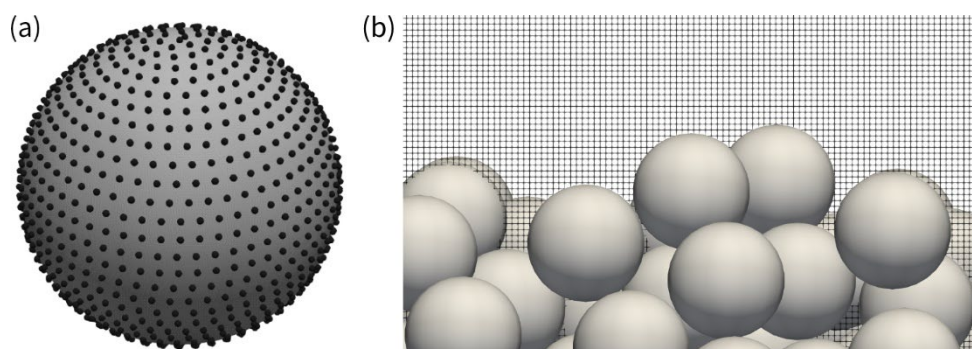


図-3 (a) IBM¹⁾で使用した Lagrange point, (b) 粒子配置と計算格子の例

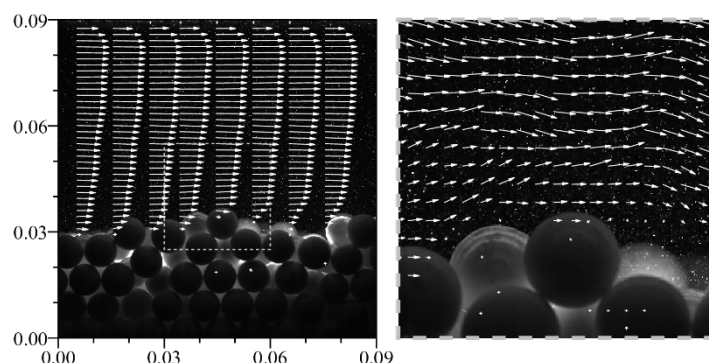


図-4 (左) PIV で計測したアンサンブル平均流速場, (右) 瞬時流速場の例

Nd:YAG レーザーシートを照射し、鉛直断面におけるトレーサー粒子の散乱光を高速度カメラ(FASTCAM Mini AX50, フォトロン)で撮影した。撮影された 8 bit のモノクロ粒子画像を用いて PIV 計測を行った(図-4)。取得した流速場を同条件で実施した流体-粒子連成解析モデルによる結果と比較することで、モデルの妥当性を検証した。

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 非圧縮性流体-粒子連成モデルの検証(validation)

上記の矩形断面管路流における PIV 計測に基づくモデルの検証に加え、(1)単一球に作用する流体抗力係数の既往提案式との比較、(2)開水路流における流速分布の比較を実施した。

$7.5D_p \times 7.5D_p$ の正方形断面を持つ長さ $20D_p$ の領域の一端に一定の流下方向流速を与えた流入境界条件を課し、奥行きおよび高さ方向の境界には free-slip 条件を課した。流入境界から $7.5D_p$ の断面中心に配置した球を対象に、粒子 Reynolds 数 $Re_p = 5 \sim 5000$ の範囲で、埋め込み境界法により計算される球に作用する流体力から抗力係数 C_D を求め、一般的に使用される単一球の抗力係数の提案式と比較した(図-5(左))。抗力係数式と良好な一致が確認でき、構築した非圧縮性流体-粒子連成解析プログラムによって流体-粒子間の相互作用力が精度よく計算されることが示された。

開水路中の透過性固定床上の流速分布の再現性を Manes et al.²⁾ の PIV による計測結果との比較を通じて検証した。 $7.5D_p \times 7.5D_p$ の水平断面($D_p = 0.012$ m)を持つ直線水路を模した計算領域の底面に格子状に球を 5 層配列した透過固定床を設置した。高さ $8.5D_p$ の上端に free-slip 条件を課し水面を無視した計算領域において重力の作用方向により実験の水路勾配 (1/400) を再現し、十分発達した流れに対して時間平均流速を PIV 計測結果と比較した(図-5(右))。概ね良好な再現性が示され、水理実験結果(図-4)との比較と併せて、計算モデルが固定床上の流速場を適切に再現可能であることが確認された。

2. 既往の流体抗力モデルの検証(a posteriori test)

Ergun³⁾ や Di Felice⁴⁾ の多孔質体の圧力損失に関する経験則は広く受け入れられ、これらの経験則に基づく流体抗力モデルが多く of 流体-土砂連成解析で用いられている。はじめに、経験則の前提となっている均質な多孔質体流を対象に流体抗力モデルの精度を検証し、次に、間隙率と流速が急変する透過性固定床表層を対象に流体抗力モデルを検証した。

2.1 均質な多孔質体流における検証

4 つの粒子配置(図-6)における多孔質体流れを対象に、流下方向に圧力勾配に対応する外

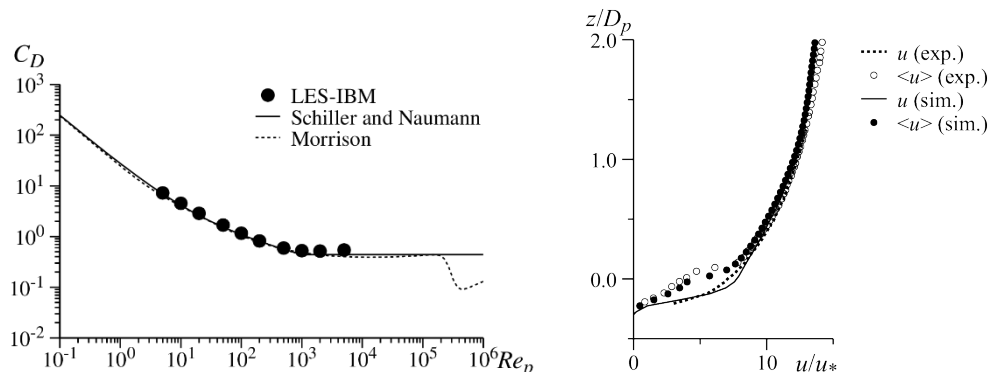


図-5 (左) 単一球の抗力係数, (右) 時間平均流速 u と時空間平均流速 $\langle u \rangle$ 分布の比較

力により形成された定常流において，粒子に作用する流体力から抗力係数を計算した．粒子配置は格子状配置(case-C)，最密配置(case-H)，2次元格子配列を互い違いに配置した配列(case-S)，ランダム配置(case-R)の4つであり，球同士の距離を調整することで，間隙率 ε を0.4, 0.5, 0.6, 0.7で変化させた．6つの粒子 Reynolds 数 $Re_p = 10, 30, 100, 300, 1000, 3000$ を目安に外力を決定した．計算で得られた流体抗力や粒子 Reynolds 数の計算には，対象とした粒子周囲の間隙空間で平均化した流速を用いた．

図-7 に各間隙率において高解像度の解析により得られた抗力係数 C_D の計算結果を示す．間隙率が実在の堆積層と同等の0.4のとき，Ergun³⁾と Di Felice⁴⁾どちらの経験則も適切に流体抗力を計算できる一方で，間隙率が大きくなると高粒子 Reynolds 数域において Ergun の式³⁾は流体抗力を過大評価することが示された．つまり，広範囲の粒子 Reynolds や間隙率を対象とする場合，Di Felice の式⁴⁾を用いるべきであることが明らかとなった．

2.2 開水路中の透過性固定床表層における検証

領域底部に高さ $4.5D_p$ ($D_p = 0.01$ m)，間隙率0.40あるいは0.48の透過性固定床を持つ水深 $5.5D_p$ の開水路を模した領域で計算を行い，複数の水路勾配下で固定床表層の粒子の流体抗力係数を推定した．球の比重を2.65と仮定した場合に摩擦速度が限界摩擦速度を超過しない範囲で，水路勾配を0.001, 0.002, 0.005, 0.010の4ケースで変化させた．上のcase-C，

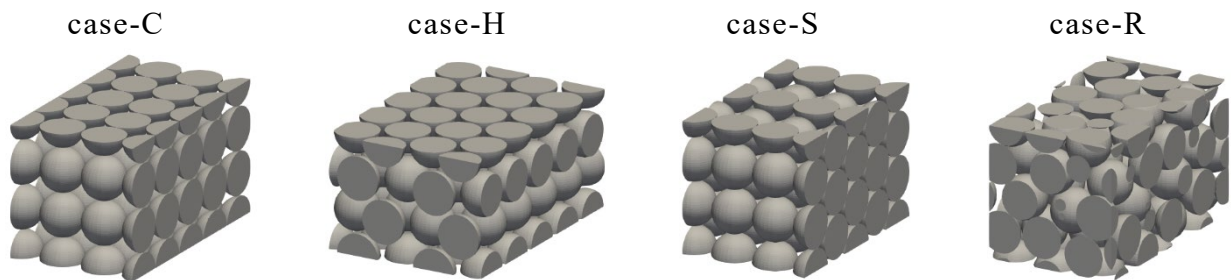


図-6 均質な多孔質体流れの解析における計算領域

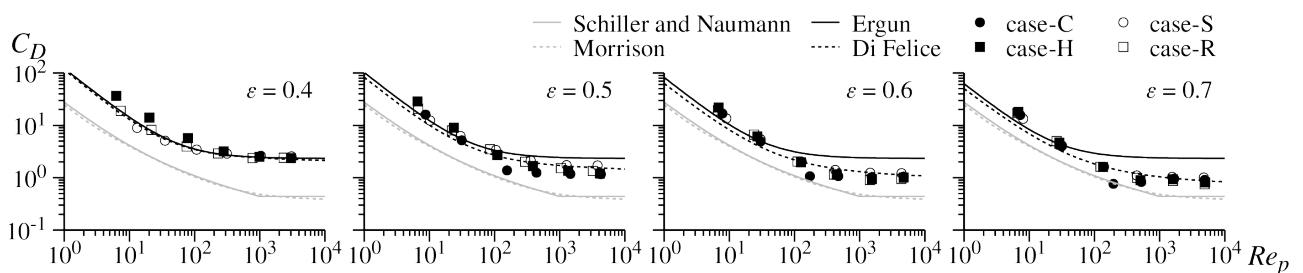


図-7 均質な多孔質体流れで得られた抗力係数

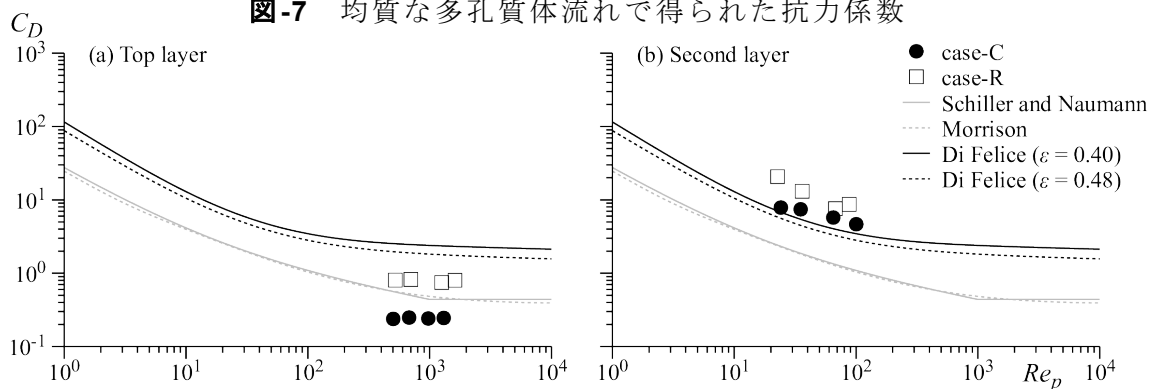


図-8 透過性固定床表層で得られた抗力係数

case-R に対応する配置を使用した(間隙率はそれぞれ 0.48, 0.40). 解析で得られた抗力係数を Di Felice の式⁴⁾と比較し、開水路中の透過性固定床表面における適用性を検討した.

図-8 に固定床表面 1 層目および 2 層目に存在する粒子に対して計測した抗力係数を示す. 2 層目に存在する粒子では Di Felice の式⁴⁾より僅かに大きい抗力係数が得られ, Di Felice の式⁴⁾では流体抗力が過小評価される. 一方で, 固定床表面(1 層目)の粒子に対しては, Di Felice の経験則⁴⁾が流体抗力を過大評価し, 対数軸上で確認される Di Felice の式⁴⁾との差は 2 層目の粒子よりも大きい. 固定床表面において極めて大きな流体力作用することを考えると, 固定床表面において流体抗力モデルの修正が必要であることが明らかになった.

2.3 提案

固定床表面は流速および間隙率の鉛直方向への急変点として特徴づけられる. 前節で示した計算結果を用いて, Di Felice の式⁴⁾で計算される流体抗力 $F_{D,model}$ と LES-IBM によって得られた流体抗力 F_D の比を間隙率の鉛直方向の変化率 $\partial\epsilon/\partial z$ で整理する(図-9).

規則配置の case-C とランダム充填の case-R で $F_{D,model}/F_D$ の大きさが異なるが, 間隙率が急増する透過性固定床表面において $F_{D,model}/F_D$ が増加する傾向が確認できる. 図では 4 つの Reynolds 数を分けて表示していないが, Reynolds 数毎の傾向の違いは顕著ではなかった. つまり, 透過性固定床表面における $F_{D,model}/F_D$ は流れのパラメータではなく, 幾何パラメータ(間隙率, 間隙率の鉛直勾配, 粒径, など)に依存することが明らかになった.

実在の移動床・固定床のほとんどは粒子が規則的に配置された case-C ではなく, ランダムに充填された case-R に近い粒子配置をとると考えられる. 本研究では, case-R の固定床表面($\partial\epsilon/\partial z > 0$)を対象に, 流体抗力の修正関数 $1/f(\partial\epsilon/\partial z) = F_{D,model}/F_D$ をデータから 2 次関数で近似し, 図-9 に破線で示した. 近似式から Di Felice の式⁴⁾が透過性固定床表面における流体抗力をおよそ 2 倍に過大評価することがわかり, 流砂や漂砂を対象とした既存の CFD-DEM による数値解析では, 過大な流体抗力により移動床表面の流速が過剰に減速されていたと考えられる.

図-9 は間隙率の鉛直勾配という次元を持つパラメータによって整理されている. より汎用的な知見の収集のためには, 複数の粒径 D_p に対するデータを収集し, 移動床・固定床を代表する長さスケールにより無次元化した間隙率勾配を用いて修正関数を定義することが望まれる. その後, 修正関数を適用した CFD-DEM により, 修正関数の妥当性を確認していく必要がある(a posteriori test).

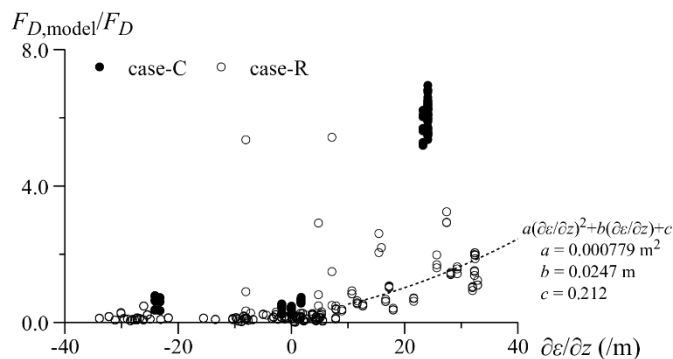


図-9 流体抗力の修正量と間隙率の変化率の関係

【参考文献】

1. Uhlmann, M.: An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows, *Journal of Computational Physics*, Vol. 209, No. 2, pp. 448-476, 2005.
2. Manes, C., Pokrajac, D., McEwan, I. and Nikora, V.: Turbulence structure of open channel flows over permeable and impermeable beds: A comparative study, *Physics of Fluids*, Vol. 21, No. 12, 125109, 2009.
3. Ergun, S.: Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, pp. 89-94, 1952.
4. Di Felice, R.: The voidage function for fluid-particle interaction systems, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 29, No. 1, pp. 153-159, 1994.

(発 表 論 文)

1. 田崎拓海, 原田英治, 後藤仁志: 透過性固定床表層における流体抗力特性の数値解析的検討, 土木学会論文集 特集号(水工学), Vol. 82, No. 16, 25-16034, 2026.
<https://doi.org/10.2208/jscej.25-16034>