OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Resolved CFD-DEM Simulation of Gas-Liquid-Solid Three-Phase Flows with Controlled Interfaces
Author(s)	Nguyen, Thanh Gian
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/85256
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name （NGUYEN THANH GIANG）	
Title	Resolved CFD-DEM Simulation of Gas-Liquid-Solid Three-Phase Flows with Controlled Interfaces (相界面厚さを制御した固気液三相流の解像型CFD-DEMシミュレーション)

Abstract of Thesis

In this study, a resolved CFD–DEM model for gas-liquid-solid three-phase flows was developed where CFD (Computational Fluid Dynamics) and DEM (Discrete Element Method) were used for simulating fluids and particles behaviours, respectively. In the three-phase flow simulation, it is of paramount importance to properly consider particle-particle, particle-fluids and interfacial interactions (such as surface tension and wetting of particle surface). This study focused on the modelling of the interaction between particles and fluids as well as the interfacial interactions. The unique point of this study is that both particle-fluids and gas-liquid interfaces are represented as smooth transition regions with controllable thickness. Three main models were developed for (i) particle-fluids interaction, (ii) interface capturing and (iii) wetting and capillary force. A summary of model development and key findings in each model is as follows:

(i) The particle-fluids interaction was considered by using the Volume Penalisation (VP) method, which is a family of the continuous forcing Immersed Boundary (IB) method. A smooth mask function has a profile of a hyperbolic tangent and allows to control the interface thickness. Optimal permeability was determined so as to reduce the model error in the momentum exchange between particle and fluid associated with the VP method, which was determined as a function of only the interface thickness and fluid kinematic viscosity. Sensitivity analysis of interface thickness was performed to evaluate the accuracy of the VP method with the smooth mask function and the optimal permeability. Several test cases were solved to check the validity of the VP method for the particle flows in various systems, i.e. from dilute to relatively dense flows, and the results showed good agreement with the exact solution or empirical correlations. It was found that the error of lubrication force on a spherical particle approaching to a wall can be correlated with the ratio between the gap and interface thickness. The resolved CFD–DEM model developed was also applied to predict the relative viscosity of suspensions and the density segregation in fluidised beds.

(ii) The interface capturing method used in the present study was based on a colour function. The thickness of the gas-liquid interface was controlled by using both interface compression and diffuse interface techniques simultaneously whilst the CSF model was used to calculate the surface tension force. It was found from the validation simulations of a static droplet that the accurate evaluation of the surface tension force can be achieved by appropriately controlling the interface thickness. Moreover, the interface compression can be applied in the dynamic case to suppress the significant amount of interface smearing when the gas-liquid interface deforms drastically.

(iii) The wetting of the particle surface was expressed by the Immersed Free Surface (IFS) model, which artificially extends the gas-liquid interface into the interior of the particle. Based on the aforementioned gas-liquid interface capturing method in the IFS framework, the accuracy of two of the major methods in the literature to calculate the capillary force acting on particles was discussed. The wetting model was validated by both static and dynamic cases. Simulations of two colliding particles with a liquid bridge were performed to demonstrate the applicability of the resolved CFD–DEM model developed to a complex three-phase system.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名 （ NGUYEN THANH GIANG ）			
	（職）		氏　　名
論文審査担当者	主 査	教 授	田中 敏嗣
	副 査	教 授	梶島 岳夫
	副 査	教 授	津島 将司

論文審査の結果の要旨

固気液三相流は、流動層などを用いた粉粒体の造粒、コーティング、スラリーの乾燥などの各種工業プロセス、土石流などの自然災害などに関連して重要な混相流の一種である。しかし、その複雑性から、固気液三相流の挙動の数値的な予測を可能にする数理モデルと手法に関しては、いまだ発展途上の状況にあり、その構築が求められている。

本論文では、計算流体力学（CFD）と離散要素法（DEM）を用い、さらに各相間の界面を捕獲し、各相間の相互作用を直接計算することにより流体と粒子の挙動をそれぞれ計算する、固気液三相流の解像型 CFD-DEM モデルの構築を行っている。 固気液三相流の数値シミュレーションでは、粒子-粒子、粒子-流体、および界面相互作用（表面張力および粒子表面の濡れなど）を適切に表現することが最も重要である。 この研究では、粒子-流体間の相互作用、および界面相互作用のモデリングに焦点を当てており、粒子-流体および気液の両界面を、その厚さが制御可能な滑らかな遷移領域として表していることがこの研究の独創的な点である。 本論文では、(i)粒子-流体間の相互作用、(ii)気液界面の捕捉、(iii)濡れと毛管力の 3 つの主要なモデルが検討されている。 それぞれのモデルに対する検討の概要と得られた主な結果を以下に示す。

(i) 粒子-流体間の相互作用は、連続型埋め込み境界（IB）法の一種である Volume Penalisation（VP）法を用いて表現されている。滑らかなマスク関数は、tanh 関数で表され、界面の厚さを制御することができる。最適な浸透率は VP 法に関連する粒子-流体間の運動量交換のモデル誤差を減じるように決定され、界面の厚さと流体の動粘度のみの関数として表されている。また、界面厚さの感度分析を実施し、滑らかなマスク機能と最適な浸透率を備えた VP 法の精度を評価している。粒子濃度について、希薄から比較的高濃度までの粒子-流体混相流に対する VP 法の有効性を確認するため、単一粒子および規則配列をもつ粒子群を過ぎる流れに本手法が適用され、その結果が解析解または経験則とよく一致することが示されている。また、固体壁面に接近する粒子に働く流体力について検討され、その誤差は粒子-壁面間距離と界面の厚さの比と相関することが明らかにされている。また、ここで開発された解像型 CFD-DEM モデルは、懸濁液の相対粘度と流動層の密度偏析の予測にも適用可能であることが示されている。

(ii)気液界面捕捉法は、カラー関数に基づくものが用いられている。 気液界面の厚さは、界面圧縮と拡散界面の両方の手法を同時に使用して制御し、CSF（Continuum Surface Force）モデルを用いて表面張力が計算されている。検証のための静止液滴の数値シミュレーションにより、界面の厚さを適切に制御することにより、表面張力を正確に評価できることが明らかにされている。 さらに、動的な現象に対しては、界面圧縮を適用することにより気液界面が急激に変形したときに出現する大規模な数値拡散を抑制することに成功している。

(iii) 粒子表面の濡れは、気液界面を粒子の内部まで人工的に拡張する Immersed Free Surface（IFS）モデルによって表現されている。 IFS の枠組みにおいて、前述の気液界面捕捉法に基づいて粒子に作用する毛管力を計算するための 2 つの主要な方法について精度が評価されている。 濡れモデルは、静的および動的な条件の両方で検証されている。構築されたモデルは、気中から液中に重力落下する球形粒子の運動に適用され、先行の実験結果との比較により検証されている。さらに、本

モデルは粒子液滴を挟んで正面衝突する 2 つの粒子の問題に適用され、液の濡れ性が粒子の衝突挙動に及ぼす影響が評価され、ここで開発された解像型 CFD-DEM モデルの複雑な固気液三相系への適用可能性を実証している。

以上のように、本論文は固気液三相流の解像型 CFD-DEM 数値シミュレーションを可能にするためのモデリングの基本的な枠組みを構築しており、今後の固気液三相流に関する現象解明と数値予測の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。