

Title	Direct Numerical Simulation of Hindered Settling of Particles
Author(s)	Zaidi, Ali Abbas
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/52130">https://doi.org/10.18910/52130</a>
rights	
Note	

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

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

Osaka University

## Abstract of Thesis

Name ( Syed Ali Abbas Zaidi )

Title

Direct Numerical Simulation of Hindered Settling of Particles  
(粒子群干渉沈降の直接数値シミュレーション)

## Abstract of Thesis

In this thesis, particle resolved direct numerical simulations are used to study the hindered settling of monodisperse spheres. The main objective is to study the effects of Reynolds number ( $Re$ ) and solid volume fraction ( $\phi$ ) on settling characteristics. The range of Reynolds number varies from 0.1 to 50 for dense suspension and up to 300 for dilute suspension. The solid volume fraction varied up to 0.4.

Before performing the actual simulations for hindered settling, extensive benchmarking studies are performed with the literature results for fixed spheres. Fixed spheres are relatively easy to study for the selection of parameters like grid resolution, domain size, flow direction and ensemble averaging. In the benchmarking study, particular emphasis is given to the average drag force. The behavior of average drag force with Reynolds number and different solid volume fraction is studied. It is observed that for all the solid volume fractions and non-Stokes regime ( $Re > 1$ ), average drag force has linear relationship with the Reynolds number. However, this linear relationship changes its slope at about Reynolds number equal to 200. It is observed in the contour plot of vortices that this change of slope is due to the early vortex shedding around close particles clusters. A mathematical relationship is proposed for average drag force which can be used in mesoscopic simulations.

After the benchmarking study, simulations are performed for hindered settling for the Reynolds number up to 50. The characteristics which are studied by the present thesis are average settling velocity, velocity fluctuations and particle structure formations during settling. It is observed that the average settling velocity obtained by the present simulations deviates from the well-known power law by Richardson and Zaki for the low solid volume fractions ( $0.002 \leq \phi \leq 0.1$ ) and moderate Reynolds number ( $1 \leq Re \leq 50$ ). By studying the particle structure formation using pair distribution function, radial distribution function and cluster analysis, it is observed that it is due to the two body hydrodynamic interactions or Drafting-Kissing-Tumbling (DKT). For low solid volume fraction ( $0.002 \leq \phi \leq 0.1$ ) and moderate Reynolds number ( $1 \leq Re \leq 50$ ), the strong two body hydrodynamic interactions lead to horizontally separated particles. It is known that that horizontally separated particles experience larger drag force. Thus the average settling velocity decrease.

In the study of moderate Reynolds number ( $1 \leq Re \leq 50$ ), it is observed that dilute regime shows deviation from the power law by Richardson and Zaki. Thus dilute regime ( $0.005 \leq \phi \leq 0.05$ ) is further investigated for higher Reynolds number ( $Re \leq 300$ ). It is observed that in the higher Reynolds number range ( $175 \leq Re \leq 300$ ), particles form elongated column like clusters for about  $\phi \leq 0.01$ . This cluster formation increases the average settling velocity and velocity fluctuations during settling. The increase in the settling velocity is due to the entrapment of particles in the strong wakes where particles experience lower drag thus the average settling velocity increases. It was found that the velocity fluctuations of fluid increase due to vortex shedding from particle clusters which are not present in the case of moderate Reynolds number ( $1 \leq Re \leq 50$ ).

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( Syed Ali Abbas Zaidi )			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	(教 授)	田中 敏嗣
	副 査	(教 授)	梶島 岳夫
	副 査	(教 授)	矢野 猛
	副 査	(准教授)	辻 拓也

論文審査の結果の要旨

本論文は、粒子・流体混相流中での各種輸送現象の理解とモデル化のために重要となる体積力作用下での粒子群の干渉沈降現象に着目し、干渉沈降挙動の固体体積率と粒子レイノルズ数依存性、およびそれに及ぼす粒子群と流体流れ場の流動構造の影響を明らかにすることを目的として直接数値解析を行った結果をまとめたものである。液体中での単分散粒子の干渉沈降挙動が取り扱われており、流体流れ場の計算には体積力型埋め込み境界法、粒子群の運動の計算には離散要素法が用いられている。その主な成果を以下に示す。

- 規則配列およびランダム配置で固定された粒子群を過ぎる定常流の数値解析を行い、粒子レイノルズ数が 1000 までの範囲に対して本研究で用いられた数値解析手法および計算コードの検証を行っている。粒子群に働く流体力の数値解析結果に関する従来の報告例との比較により本計算結果の信頼性を示すとともに、粒子群に対する流体力の相関式を提案している。
- 粒子レイノルズ数が 0.1 から 50、および固体体積率が 0.4 までの条件に対して干渉沈降の数値解析を行い、干渉沈降速度の粒子レイノルズ数および固体体積率依存性を得るとともに相関式を提案している。その結果は、粒子レイノルズ数が 1 以上および比較的低固体体積率の条件において、干渉沈降速度の標準的な相関式である Richardson-Zaki の式が与える干渉沈降速度からの顕著な低下を示した。これに対して、粒子の動径分布関数の分析、粒子挙動の観察を行ない、その原因が流体中での粒子の二体間相互作用である DKT(Drafting-Kissing-Tumbling)現象にあることを示唆している。
- 比較的低濃度域で観測された干渉沈降速度の顕著な変化の粒子レイノルズ数依存性をさらに調べるため、低固体体積率の条件に対して、粒子レイノルズ数が 300 までの計算を行っている。その結果、粒子レイノルズ数が 175 以上の条件では粒子群はクラスターを形成し、粒子レイノルズ数が低い場合とは逆に Richardson-Zaki の相関式が与えるものよりも干渉沈降速度が増加することを明らかにしている。

以上のように、本論文は直接数値解析により単分散系の粒子群の干渉沈降挙動に及ぼす固体体積率と粒子レイノルズ数依存性に関して有用な知見を得ており、その成果の学術的および工学的価値は高い。  
よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。