

Title	粒子の表面応力分布を考慮した剪断流れ場への作用力のモデリングに関する研究
Author(s)	深田, 利昭
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/55955
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (深 田 利 昭)

論文題名 粒子の表面応力分布を考慮した剪断流れ場への作用力のモデリングに関する研究

論文内容の要旨

流れ場の最小長さスケールと同程度の径をもつ粒子が希薄に混入した場合の乱れの増減は、基本的かつ重要な乱流変調問題として知られており、数値シミュレーションによる解明が期待されている。よく用いられている質点モデルは、粒子からの直接的な影響を受ける流れ場の空間スケールや粒子表面の応力分布が考慮されないため、乱流変調の基礎研究には不十分である。粒子境界層を解像できる計算格子を用いると、過大な計算負荷のため、小さな領域しか解析できなくなる。したがって広範なスケール幅をもつ乱流に対する粒子混入の効果を解析するためには、粒子径と同程度の幅の計算格子を用いて粒子と流体の相互作用を扱うモデルが求められる。そこで本研究では、粒子サイズと同程度の領域内での体積平均に基づいて、粒子表面応力を反映させた流体相への作用力モデルを提案した。代表的な定常および非定常な剪断流の中に置かれた単一球形粒子周りの流れを境界適合格子によって直接計算し、その結果に基づいて流体相への作用力のモデリングを行った。

第 1 章では本研究の背景および目的を述べた。

第 2 章では流れの基礎方程式に体積平均を施した方程式を導出し、流体相への作用力の表式を示した。また、非線形項の体積平均に起因する付加的な応力である Residual stress の表式についても示した。さらに、体積平均した方程式を数値的に解くための離散化方法について述べた。

第 3 章では、基本的な剪断流の中に置かれた単一粒子周りの境界適合格子を用いた数値解析結果を示した。本研究で着目するスケールでの乱流変調実験における観測結果に基づいて、粒子レイノルズ数は 40 以下とした。ここでは粒子と流体の相互作用を予測するうえで重要な抗力、揚力、トルクについてそれらの履歴効果も踏まえた新たなモデルを提案した。特に粒子と流体の相対速度に垂直な剪断成分を持つ流れにおいて、その剪断成分が揚力に支配的な影響を及ぼすことや、揚力の履歴効果が既往のモデルと合わないことを示した。

第 4 章では境界適合格子を用いた数値解析結果に基づいて流体相への作用力のモデリングを行った。まず、一様流および相対速度の無い剪断流に対して、流れの近似解に基づく非等方な作用力モデルを提案した。いくつかの剪断流に対しては、これらのモデルの重ね合わせが作用力の非等方性の再現に有効であることを数値解析の結果から確認した。また、Residual stress については速度勾配に基づくモデリングを行い、モデルが定性的な分布を再現することを確認した。

第 5 章では、剪断流の中に固定された粒子周り流れの解析に本研究で提案した作用力および Residual stress のモデルを適用して、それらの有効性を調べた。作用力モデルの分布の効果は顕著であり、質点モデルに対する本研究の提案の優位性が示された。Residual stress モデルは、特に体積平均領域を粒子径よりもやや大きくとった場合に、結果の改善に貢献した。また、希薄懸濁液の実効粘性のシミュレーションの結果から、提案した作用力モデルによって粒子の影響が大域的に表れることを確認した。

第 6 章では本研究の成果を総括し、今後の展望を述べた。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (深 田 利 昭)	
論文審査担当者	(職) 氏 名
	主 査 教 授 梶 島 岳 夫
	副 査 教 授 田 中 敏 嗣
	副 査 教 授 矢 野 猛
	副 査 教 授 杉 山 和 靖 (基礎工学研究科)
副 査 准教授 竹 内 伸太郎	

論文審査の結果の要旨

固体粒子を含む流れは、工業的にはスラリーや粉粒体の輸送、自然界では河川における流砂など広範に観察され、その多くは乱流状態にある。固体粒子の輸送や混合においては乱流剪断応力の影響が大きく、粒子による乱流の変化（乱流変調）の研究が精力的に行われている。しかし、乱流における粒子と流体の相互作用については普遍的な物理モデルは得られていない。そのため、粒子を含む流動を扱う装置の設計では経験への依存性が高い。乱流変調に関しては、固体を含む場で乱流統計量の計測は困難であるため、数値シミュレーション手法の確立が期待されている。

本論文は、乱流変調の最も基本的な問題のひとつである乱れの最小長さスケールと同程度以上の径をもつ粒子による乱れの増減について、そのメカニズムを解明するために有用となる数値シミュレーションの支配方程式に関する基礎研究に関して、以下のような成果をとりまとめたものである。

1. 流れの基礎方程式に粒子サイズと同程度の空間スケールでの体積平均を施した方程式を導出し、粒子表面応力を反映させた流体相への作用力、非線形項の体積平均に起因する付加的応力を定式化し、体積平均方程式を数値的に解くための離散化方法を示している。
2. 単純剪断流れ場にある単一粒子のまわりの流れに対して境界適合格子による直接数値計算を実施し、粒子と流体の相互作用を予測するために必要な抗力・揚力・トルクについて新たなモデルを提案し、特に剪断速度や履歴効果が揚力に与える影響に関して既往モデルからの修正点を明らかにしている。
3. 個別の単純剪断流れ場にある粒子のまわりの流れの近似解に基づく作用力モデルを提案し、複数の複合剪断流れ場に適用する際にこれらの重ね合わせが有効であることを直接計算の結果から実証している。
4. 剪断流れ場にある粒子のまわり流れの解析において、作用力モデルの分布の非等方性の影響は顕著であること、付加的応力により流れ場の再現性が改善されることを検証し、質点モデルなどの従来モデルに対する本研究で提案するモデルの優位性を示している。

以上のように、本論文で提案された体積平均方程式および粒子作用力・付加的応力のモデルは、粒径スケールの計算格子を用いて粒子を含む乱流をシミュレートできる手法の根幹をなすものであり、混相乱流研究の進展に寄与するものである。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。