



Title	直接数値シミュレーションによる固体粒子が及ぼす乱流変調の研究
Author(s)	瀧口, 智志
Citation	大阪大学, 2000, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/42079
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed 大阪大学の博士論文について

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

氏 名	たき 瀧 口 智 志
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学 位 記 番 号	第 15428 号
学 位 授 与 年 月 日	平成12年3月24日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科機械物理工学専攻
学 位 論 文 名	直接数値シミュレーションによる固体粒子が及ぼす乱流変調の研究
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 三宅 裕
	(副査) 教 授 辻 裕 教 授 片岡 勲 助教授 梶島 岳夫

論 文 内 容 の 要 旨

乱流状態にある連続相に小さな粒子が分散した混相乱流は、広範囲の工学プロセスおよび自然界で観察され、その流動構造の解明は工学的な重要性を持つことから、多くの実験的な研究が行われてきた。最近の研究により浮遊する粒子が流れの乱流特性に大きな影響を与えることが明らかにされつつあり、混相乱流は工学的応用としての壁乱流制御、特に抵抗低減や熱・物質の輸送プロセスにかかわる現象として新たに注目されている。乱れの増減を支配するパラメータの提案や、変調を引き起こすメカニズムの提案がいくつかなされているが、粒子と乱流が相互作用するスケールは多重性を有しているため、統一的な理論は確立されていない。本論文では、乱流渦と粒子との相互作用を精度よく表現する解析手法を提案し、これを混相乱流現象に適用して機構の解明を行っている。

第1章では、本研究の背景と従来の研究を示している。固体粒子に質点モデルを使用する従来の数値解析手法の特徴と、これを乱流場に適用することの問題点を議論し、本研究の意義を明らかにしている。

第2章では、固体粒子を含む流れの効率的な解析法を提案している。流れ解析用の計算格子を用い、乱流中を運動する粒子まわりの流れを直接解析する方法により、物理現象を忠実に反映するとともに、多数の粒子を効率的に扱うことを実現している。その信頼性を検証するため、一様流中に固定した球まわり流れに適用し、物体に働く流体力や高レイノルズ数域での物体背後の非定常渦放出の再現性を確認している。またエネルギー収支の精度検証も行っている。以上により、固体粒子と乱流渦の相互作用を解明する数値解析法を確立している。

第3章では、混相乱流内での素過程として、渦放出を伴う球まわり流れの3次元解析結果を示している。まず、エネルギー収支に及ぼす粒子後流の影響を調べ、粒子後流渦の乱れエネルギーへの寄与とその空間スケールを明らかにしている。次に、相対的な位置関係を固定した粒子群を含ませた乱流の数値シミュレーションを行い、粒子間隔が乱流場の長さスケールを介して散逸率にきわめて大きな影響を与えることを示している。以上の素過程解析により、混相乱流のモデリングに際しての重要な指針を与えていている。

第4章では、既存の実験データの条件に本計算法を適用し、精度の検証とより詳細な現象解明を行っている。平行平板間の鉛直流れにおいて、粒子を低濃度で含む場合の計算結果は実験結果とよく一致し、壁乱流においても本計算法は十分な信頼性を有することを示している。また、本研究では粒子にかかる重力の向きによりレイノルズ応力場が大きな変調を受けるメカニズムを示し、壁乱流の維持機構に及ぼす混相効果という新たな視点の必要性を提示している。

第5章では、粒子後流渦と乱流渦との相互作用を調べる目的で、第4章と同様の流れ場で高い相対レイノルズ数で運動する粒子を含む場合を検討している。乱れエネルギーの生成における質点力の寄与と後流渦からの乱れ放出の寄与を分離して解明し、後者においては粒子から放出される渦輪がせん断流れの中で引き伸ばされて壁乱流の重要な維持機構である縦渦を生成する構造を明らかにしている。

第6章では、得られた結論をまとめ、本研究の成果を総括している。

論文審査の結果の要旨

分散性混相乱流すなわち多数の固体粒子を含む乱流場の研究は、自然界あるいは工業装置における流動現象の解明とともに、熱および物質輸送の高機能化を目的とする乱流制御技術の確立において有意義である。近年の流れの計測ならびに数値シミュレーションの技術は、混相乱流を代表例とする複雑流体の乱流現象の解明を重要な目的のひとつとして急速に進歩している。実験計測においては画像処理流速計、数値計算においては超並列スーパーコンピュータがこの分野の研究の進展に大きく寄与しつつある。分散性混相乱流においても、数値シミュレーションによる現象解明の試みは従来から数多く見受けられる。しかし、その多くは抗力・揚力・非定常力などから構成される質点モデルを使用しており、混相乱流現象を解明する目的のためには、より素過程を重視した数値計算法と物理現象解析が望まれるところである。

本研究は、以上のような背景から、固体粒子を多数含んだ固液混相乱流の数値解法の開発とそれを用いた数値実験を行っている。広範な時空間スケールを有する混相乱流に対して、現状の計算機容量では三次元流れ解析においては2～3桁のスケール幅に絞り込んだ解析に限定されざるを得ない。本研究では、限定されたスケール幅に対してはあるが、数値シミュレーションによる混相乱流の素過程に対する解析手法を新たに提示しており、混相乱流現象の解明においてもいくつかの重要な結果を得ている。本研究の成果は以下のように要約される。

- (1) 固体粒子を含む乱流の効率的な解法を提案し、球まわりの流れに適用して、高レイノルズ数域での渦放出現象、乱流エネルギーの収支も十分な精度で算出されることを実証している。これにより、分散性混相乱流の機構解明と流動予測のために、従来の提案に比べて精度と効率の双方の観点から最も有効と評価される手法を提示している。
- (2) 混相乱流の素過程として渦放出を伴う球まわり流れの3次元解析を行い、粒子後流渦がエネルギー収支に及ぼす影響とその空間スケールを明らかにし、混相乱流のモデリングに考慮すべきことを指摘している。また、一様乱流場に相対的な位置関係を固定した粒子を移動させるなど、数値シミュレーションの特長を活用した実験を行い、後流渦列による乱流渦の分断による空間スケール変化の機構を解明している。
- (3) 平行平板間乱流の直接数値計算においては、まず、既存の実験条件に対応する測定結果と良好な一致を得て、壁乱流における信頼性も実証している。さらに、個々の粒子から非定常渦放出があるような高レイノルズ数領域まで計算範囲を拡張している。これらの計算結果から、壁近傍の縦渦群の形成機構における粒子力および粒子後流渦のそれぞれの寄与を明らかにするとともに、有限体積の粒子に対する質点モデルの精度や質点モデルで再現可能な流れの範囲を示し、工学的に実用性の高い粒子運動モデルの検証も行っている。

以上のように、本論文は、乱流と固体粒子の相互作用を高効率かつ高精度に解析する数値計算法を提示するとともに、種々の混相乱流の素過程を解明した結果をとりまとめたもので、粒子のみならず複雑形状物体または移動物体を含む広範な流れ場を解析する方法への波及効果が大きい。これらの成果は流体力学に新しい知見を与えるものであり、機械工学の発展に大きく寄与している。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。