

（第11回）2015年度・研究助成報告

研究題名	流体中を自由運動する非球形粒子挙動の解明とモデル化に関する実験的研究
研究期間	2015年4月1日～2016（2017）年3月31日
研究機関・所属 研究者名	九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門 渡邊 裕章

1. 2015（2016）年度研究成果の概要

本研究では、質点近似を施した大規模希薄固気混相流解析を行う際に、非球形形状効果を考慮可能な粒子運動モデルの開発に向けて、球形形状と非球形形状のサンプル粒子による希薄固気混相流れの実験を実施し、粒子形状や粒径分布が流体中の粒子分散挙動に及ぼす影響について明らかにするとともに、粒子運動モデルの比較検証データとしてのデータベースを構築することを目的とした。実験は、微粉炭の噴流バーナ（約0.5 kg/h）を用いて、真球樹脂粒子と微粉炭粒子をコールドフリー条件において噴射し、その気流中の分散挙動をPIV計測、およびMie散乱計測により明らかにした。その結果、粒子形状および粒径分布により、粒子の分散挙動は大きな影響を受けること、また、同時に実施した数値解析により、これらの挙動を定性的に捉えられることを確認した。

2. 助成期間内での研究成果の概要

1. はじめに

近年の計算機性能の向上により、希薄固気混相流の数値解析についても、その適用範囲は飛躍的な拡大を遂げている。特に近年では、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）といった高精度な非定常解析法が、従来の定常解析法に比べて格段の精度向上が図れることから、盛んに研究が行われており、例えば筆者らの分野では、微粉炭燃焼ボイラや石炭ガス化炉の数値解析への適用性検討が進められている¹⁻³。しかしながら、こうした高精度な非定常解析法であっても、粒子の運動方程式には球形粒子を仮定したモデルが用いられており、微粉炭のように極めて多様な非球形粒子が乱流中を分散していく過程において、粒子形状がどのような影響を及ぼすか、詳細な検討が為された事例はない。

そこで筆者らは、Arbitrary Lagrangian Eulerian（ALE）法⁴と呼ばれる解析格子をLagrange的に取り扱う手法とEuler的に取り扱う手法とのカップリング法を採用することで、単一粒子の6自由度運動の解析が可能なコードを開発するとともに、微粉炭粒子をX線CTでスキャンすることで三次元形状を抽出したものと、球形粒子、および微粉炭粒子をモデル化した回転楕円体粒子の気流中運動の数値解析

を実施した。その結果、非球形粒子の特徴である回転や振動による運動特性への影響を明らかにするとともに、この非球形効果を運動方程式中に表現するためのモデルについて検討を行った^{5,7}。この結果、一様等方性乱流場中において計算された非球形粒子の分散挙動は、ストークス数が1のオーダーを境にして、球形粒子のそれと逆転すること等の詳細が明らかになってきた。しかしながら、より現実的な混相流場、例えば噴流中において、本モデルがどのように粒子の分散挙動に影響を与えるか、実験との比較による妥当性の検証は行われていない。

こうした背景を踏まえ、本研究では、希薄固気混相噴流を対象に、球形粒子と非球形粒子の分散実験を行い、レーザー計測による観察を通じて、その挙動を明らかにするとともに、併せて実施する上述の運動モデルを導入した数値解析の比較検証を行った。

2. 実験方法

2. 1 対象系

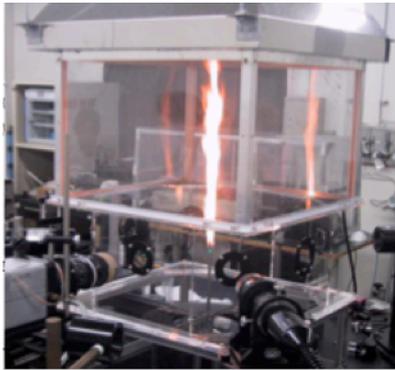
対象系は、図1に示す電力中央研究所が所有する小型の微粉炭噴流バーナ⁸とし、コールドフロー条件にて実験を行った。バーナは内径6.0 mm、外形7.0 mmの円管構造をしており、空気はコンプレッサからインジェクタへと導かれる。粒子は、スクリーフィーダによって定量供給され、インジェクタにおいて吸引・混合されて、空気との固気混相流として円管から鉛直上向きに噴出される。

2. 2 計測装置

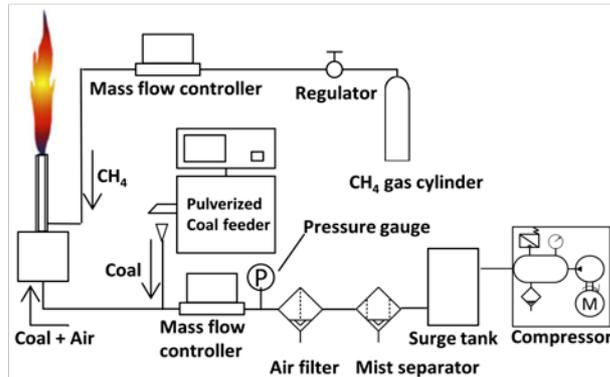
本研究では、Mie 散乱光画像計測およびその画像に対してPIV計測を行うことで、固体粒子の分布および固体粒子群の速度を計測した。Mie 散乱光画像計測は、レーザーシートを照射し固体粒子からのMie 散乱光を撮影することによって、レーザーシート断面での固体粒子の分散を計測する方法である。PIV計測は、レーザーシートを照射し、時間差をつけて撮影した固体粒子のMie 散乱光画像の相関から固体粒子の移動量を判断することで、流速分布を計測する方法である。光源には、Nd: YAGレーザー (Litron Lasers 社製, DPIV-L135) の第2高調波 (波長: 532 nm) を用いた。レーザーパワーは、6.5 mJ/pulse とした。発振されたレーザーは、シリンドリカルレンズ群によって高さ46.5 mmのシート光に成形され、円管先端から高さ20mm、高さ30 mm から210 mm までを30mm 間隔で入射した。Mie 散乱光画像の取得には、sCMOSカメラ (LaVision 社製, Imager sCMOS) を使用し、1,000組取得した。Mie 散乱光のみを撮影するために、バンドパスフィルタ (中心波長532 nm、半値幅3 nm) をカメラ先端部に取り付けた。PIV計測に用いる1回目と2回目のレーザー照射の間隔は15 μ s とした。PIV計測の速度解析には、Adaptive PIV法を適用した⁹。

2. 3 実験条件

表 1 に実験条件を示す。粒子には、非球形で多分散である微粉炭、および真球形で単分散である高分子ポリマーを用いた 2 条件を設定した。供給空気は温度 293 K、供給量 12.0 LN/min で一定とした。粒子の供給量は、固気比が 0.5 kg/kg となるように設定した。



微粉炭噴流バーナ



装置の概略

図 1 実験装置の概略

表 1 実験条件

Case	Case A	Case B
粒子	微粉炭	高分子ポリマー
形状	非球形	真球形
分散	多分散	単分散
空気流量 [LN/min]	12.0	
固気比	0.5	
レイノルズ数	3,008	

3. 結果と考察

図 2 に、実験で得られた微粉炭粒子 (Case A) とポリマー (Case B) の Mie 散乱強度の瞬間分布を示す。図は、高さごとに計測した画像をつなぎ合わせたものを示している。加えて、比較のため、数値解析で得られた粒子の分布に数密度に基づき色づけしたものの比較を示す。ただし、数値解析は、Case A を想定した楕円体粒子運動モデルを用いた多分散条件 (Case C)、Case C の単分散条件 (Case D)、Case B を想定した球形単分散条件 (Case E)、Case E の多分散条件 (Case F) を検討した。図より、微粉炭粒子の Case A では、Mie 散乱強度の高い領域はバーナ近傍に存在し、下流に進むに従って強度は低くなっていくこと、一方、ポリマーの

Case B では、Mie 散乱強度はバーナ近傍よりも少し下流においてピーク値をもつことがわかる。これは、微粉炭粒子は上流から下流に向かって徐々に分散していく一方であるのに対して、ポリマーは、乱流渦との相互作用により、一度、数密度が上昇することを意味している。こうした挙動の差異は、今回の噴流条件において形成される乱流渦の空間スケールと粒子径との関係、さらには粒子形状によって決定されるものと推察することができる。一方、数値解析の結果に注目してみると、真球および楕円体双方において、単分散の条件である Case D と E ではバーナ近傍よりも下流に数密度のピーク値が現れ、多分散の条件である Case C と F ではバーナ近傍から徐々に分散していく挙動を示すことがわかる。これらは、微粉炭とポリマーの実験において観察された挙動と一致する。この数値解析の結果から類推すると、実験で観察された Mie 散乱強度のピーク値出現位置の差異は、単分散と多分散の影響を強く受けていることが考えられる。また、数値解析の結果において、真球と楕円体の比較をすると、楕円体の方がバーナ近傍から下流域にかけてより数密度高い領域が形成されていることがわかる。これは単分散条件と多分散条件の双方で観察されており、粒子形状が影響しているものと考えられる。

図 3 に、PIV 計測によって得られた(a)平均軸方向速度、および(b)半径方向速度分布をそれぞれ示す。ただし、図は、1,000 個のデータを平均し、高さごとに計測した画像をつなぎ合わせたものを示している。なお、図中にある緑の領域は、Mie 散乱光が弱く、速度解析を行うことができなかった領域を示している。軸方向粒子速

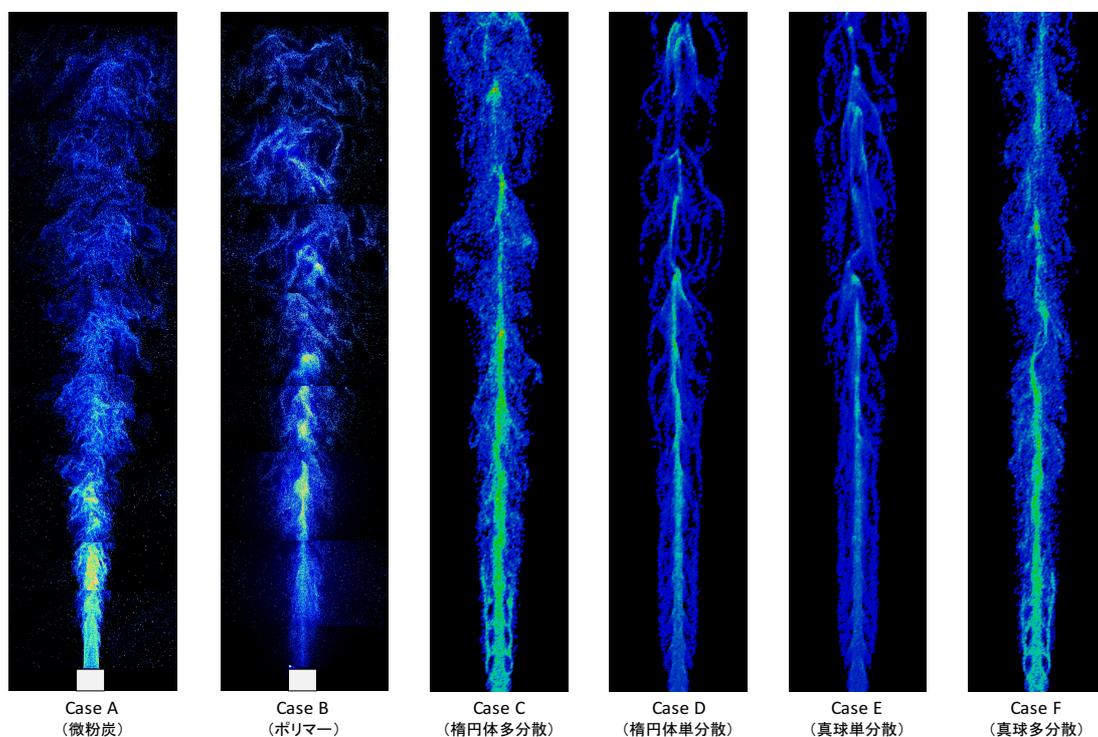
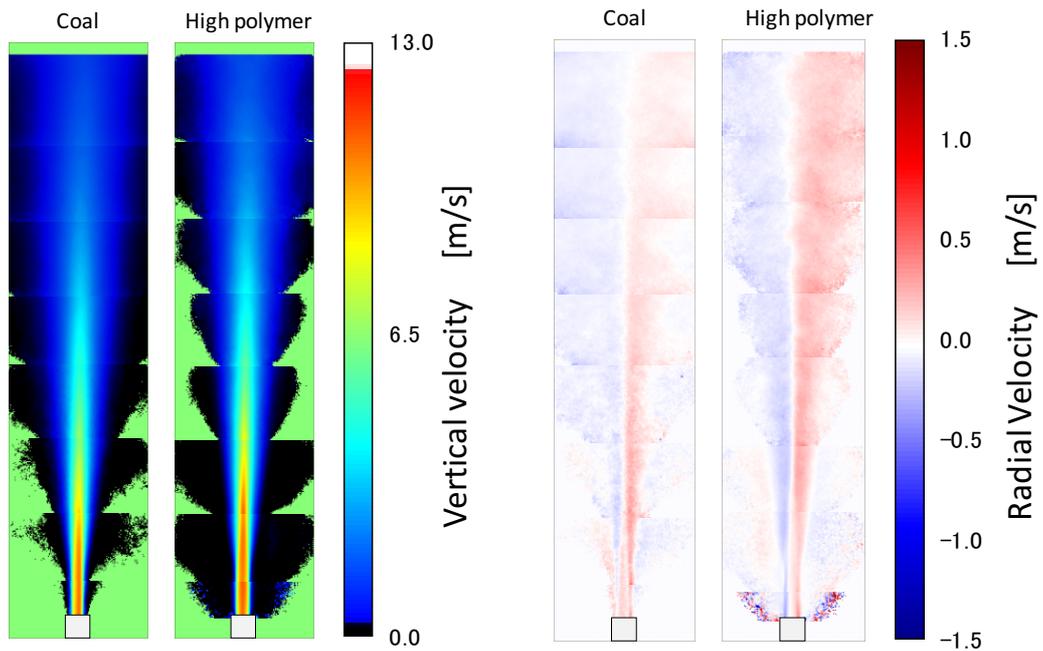


図 2 Mie 散乱強度の分布 (左から、微粉炭 (実験), ポリマー (実験), 楕円体多分散 (解析), 楕円体単分散 (解析), 真球単分散 (解析), 真球多分散 (解析))

度の分布から、微粉炭よりもポリマーの方がバーナ出口から延びる軸方向速度の速い領域がより下流域に達していることがわかる。また、半径方向粒子速度の分布から、半径方向への速度が速い領域は、微粉炭よりもポリマーの方が下流域に存在することがわかる。これらの差異から、微粉炭よりもポリマーの方がより下流まで高い数密度を保ったまま移流し、その後下流域において半径方向へ分散していく傾向にあることを読み取ることができる。

図4にPIV計測によって得られた各軸方向位置における軸方向平均粒子速度の半



(a) 軸方向粒子速度 (b) 半径方向粒子速度

図3 粒子群の速度分布

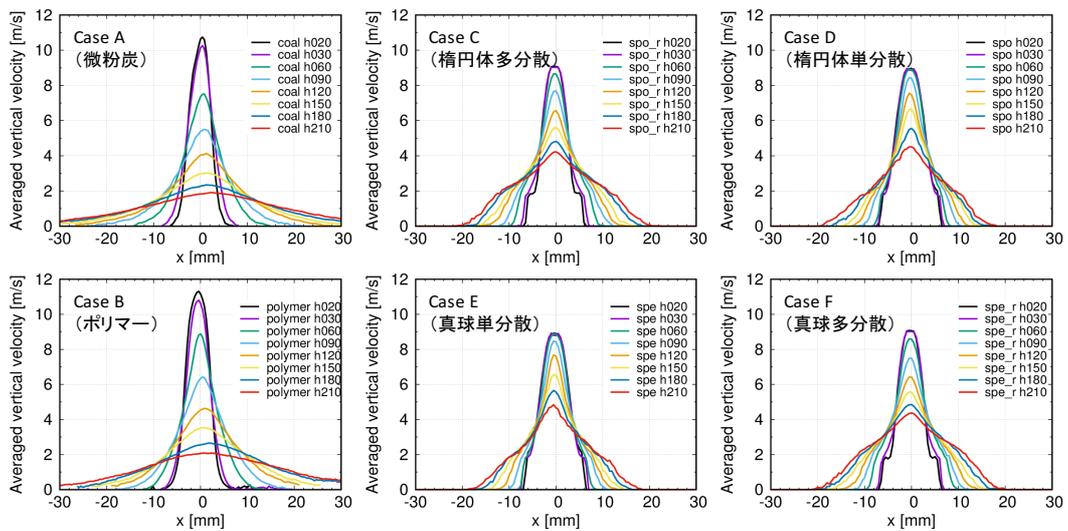


図4 各軸方向位置での軸方向粒子速度の比較

径方向分布の比較を示す。また、比較のため、図2で示したCase CからFの4条件についても併せて示す。図3において観察された分散の傾向を本図からも読み取ることができる。Case CとF、またはCase DとE等の粒子形状の影響に注目すると、僅かながら楕円体粒子の方が軸方向速度が低いことから、非球形形状による回転や振動の影響により、より上流から分散する傾向にあることが推察される。

4. まとめと今後の展望

本研究では、Mie 散乱光画像計測およびその画像に対してPIV計測を行うことで、固体粒子の分布および固体粒子群の速度を計測した。また、併せて数値解析を実施し、粒子形状や粒径分布の影響について実験との比較検証を行った。その結果、粒子形状や粒径分布は、乱流中の粒子分散に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

今後は、燃焼流中での粒子挙動について、実験および数値解析の両面から、現象の解明とモデルの妥当性の検証を進めていく予定である。

参考文献

- 1 Watanabe, H., et al., Turb. Heat Mass Transfer, 6 (2009), 1027-1030.
- 2 Kurose, R., et al., KONA Powd. Part. Technol., 27 (2009), 144-156.
- 3 Muto, M., et al., Fuel, 142 (2015), 152-163.
- 4 Hirt, C.W., et al., J. Comp. Phys., 135 (1997), 203-216.
- 5 チョウイ他, 日本機械学会論文集, 81 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00068.
- 6 Zhang, W., et al., Proc. 5th ICCCI, (2015).
- 7 チョウイ他, 第29回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2015).
- 8 Hwang, S.-M., et al., Energy Fuels, 19 (2005), 382-392.
- 9 Wieneke, B., et al., Proc. 15th Int. Symp. ALTFM, (2010).

3. 研究発表

【学会発表】

渡邊裕章, チョウイ, 泰中一樹, Seongyool Ahn, 北川敏明, 粒子形状が気流中粒子分散挙動に及ぼす影響, 粉体工学会2017年度春期研究発表会, 2017年5月, 早稲田大学.