

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：82641

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03941

研究課題名（和文）非球形固体燃料粒子のクラスタリング挙動と群燃焼挙動の解明

研究課題名（英文）Clustering and combustion behavior of non-spherical solid fuel particles

研究代表者

丹野 賢二（Tanno, Kenji）

一般財団法人電力中央研究所・エネルギー変換・エネルギー変換研究本部・上席研究員

研究者番号：60462884

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：球形粒子および非球形粒子を伴う噴流乱流場の実験を行い、粒子の存在位置および流速を計測する実験を行った。その結果、球形粒子の場合には、従来知られている通り、渦との相互作用によりクラスタリングと呼ばれる粒子の偏在が確認されたが、非球形粒子の場合には、球形粒子の場合と比較して一様な分布となることがわかった。

次に、球形粒子、および非球形粒子用の抗力係数のモデルを用いて、等方性乱流場を対象にした数値計算を実施した。その結果、非球形粒子の場合には、球形粒子の場合と比較して一様な分布となるという実験と同様の結果が得られるものの、燃焼・ガス化挙動に及ぼす影響は軽微であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、球形粒子では生じるクラスタリングと呼ばれる粒子の偏在が、非球形粒子の場合には緩和されることが明らかとなった。そのため本研究は、粒子の分散が重要となる反応装置や粉体機器においては、粒子の形状も考慮した上で設計・運用することが重要であることを示した。また、微小粉碎燃料を含む燃焼・ガス化分野のシミュレーションでは、球を対象にした運動モデルが用いられてきたが、その場合、燃焼・ガス化特性には大きな影響はないものの、燃料粒子の拡散にはある程度影響には影響を及ぼすことから、シミュレーション結果の解釈する上で重要な指針を提示することができた。

研究成果の概要（英文）：Experiments were performed on turbulent jets with spherical and non-spherical particles to measure the location and velocity of particles. Results showed that in the case of spherical particles, as is conventionally known, an uneven distribution of particles, called clustering, was observed due to the interaction with vortices, while in the case of non-spherical particles, the distribution was more uniform than in the case of spherical particles. Numerical simulations were then performed for isotropic turbulence using models of drag coefficients for spherical and non-spherical particles. Results showed that the same tendency as in the experiment were obtained, i.e., a uniform distribution compared to that of spherical particles. However, the effect of particle shape on combustion and gasification behavior was found to be minor.

研究分野：固気混相燃焼

キーワード：固気混相流 粒子 クラスタリング 直接数値計算 等方性乱流 燃焼

1. 研究開始当初の背景

我が国の石炭火力発電所では、石炭を粉砕し、粒子径 40 μm 程度の微粒子として利用している。その際、微粒子は球形であることはほとんど無く、表面に多くの凸凹を有する非球形な状態である。この場合、境界層の発達や離れの位置が真球と同じとは考えにくく、非対称、非一様な流体力が粒子に作用することによって、その運動が真球の場合と大きく異なることが推察される。実際、既往研究において、非球形粒子が自由落下する軌跡を観察したところ、非球形粒子の配向性や回転運動により、その運動軌跡が真球粒子と大きく異なることが示されている。

一方、乱流中の粒子挙動の特性の一つにクラスタリングと呼ばれる現象が挙げられる。これは乱流中において、Stokes 数が 1 程度の粒子が選択的に低渦度領域に集中して存在する現象であり、固気混相乱流の分野で、これまで精力的に研究が進められてきた。しかし、従来の研究のほとんどが球形粒子を対象に行われており、「非球形粒子は乱流中でクラスタリングを生じるのか」、「生じるのであれば、その Stokes 数の範囲は球形粒子と同じなのか」という点については、未だ十分に明らかとなっていない。

2. 研究の目的

本研究では、噴流乱流場における非球形粒子のクラスタリング挙動、およびクラスタリングが揮発分(熱分解により固体粒子より放出される可燃性ガス)の燃焼挙動に及ぼす影響を実験および数値解析により明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、実験的アプローチと数値解析的アプローチの両面から研究を行う。

実験では、粒子を供給可能な噴流バーナおよび光学計測設備を用いて、球形粒子と非球形粒子によってクラスタリングの状態に違いがあるかを調べる。非球形粒子としては石炭を中位計 40 μm 程度に粉砕した微粉炭を用いるとともに、球形粒子としては粒子径や密度が微粉炭と同程度の高分子ポリマーを用いる。乱流中の微粒子を可視化するためには、拡大顕微鏡と高速度カメラを用いたシャドウ法を用いる。これは、測定空間に強い光を照射し、粒子の影を捉えることにより、粒子の存在位置を特定するものである。また、ハーフミラーを用いてシャドウ法と同時に PIV による粒子速度の計測を行う。

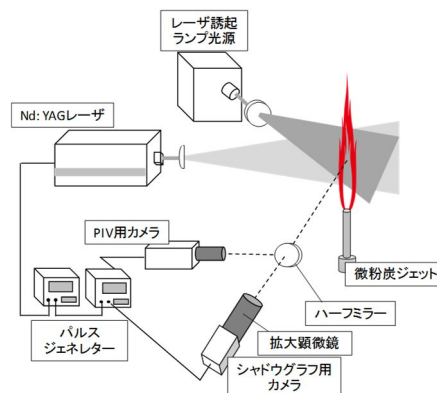


図 1 実験装置の概略図

数値解析では、既開発の数値解析コードに非球形粒子向けに構築された抗力係数のモデルを導入した上で、球形粒子および非球形粒子ごとに固気二相流の等方性乱流場を対象にした DNS(Direct Numerical Simulation)を行い、乱流場中における粒子分散やクラスタリングに及ぼす粒子形状の影響を明らかにする。また、燃焼場に近い条件において解析を行い、粒子から発生する可燃の揮発分の燃焼を考慮した数値解析を実施し、粒子形状が揮発分燃焼に及ぼす影響についても検討する。

また、燃焼場に近い条件において解析を行い、粒子から発生する可燃の揮発分の燃焼を考慮した数値解析を実施し、粒子形状が揮発分燃焼に及ぼす影響についても検討する。

4. 研究成果

(1) 図 2 にシャドウ法によって計測した、噴流場中における粒子画像を示す。球形粒子については、従来の知見通り、渦との相互作用により粒子が局所的に偏在しており、クラスタリングが生じていることがわかる。それに対して、非球形粒子の場合には、乱流場中に比較的一様に存在しており、明確なクラスタリングが生じていない。Re 数を変えて実験を行ったが、本研究で実験を行った範囲では、非球形粒子を用いた場合に明確なクラスタリングを確認することができなかった。これは非球形粒子では、流れに対する向きによって受ける抗力が変化するため、同一粒径であっても受ける抗力の振れ幅が大きいため、結果としてランダムな分布が形成されるのではないかと考えられる。図 3 にバーナ先端位置から 20mm、100mm、200mm 下流の位置における、球形粒子および非球形粒子の主流方向流速のバーナ径方向分布を示す。なお、それぞれの流速分布はバーナ中心位置における値で無次元化されている。図より、バーナ先端位置から 20mm 下流の位置においては、どちらの粒子の場合も分布に大きな差異は見られないが、バー

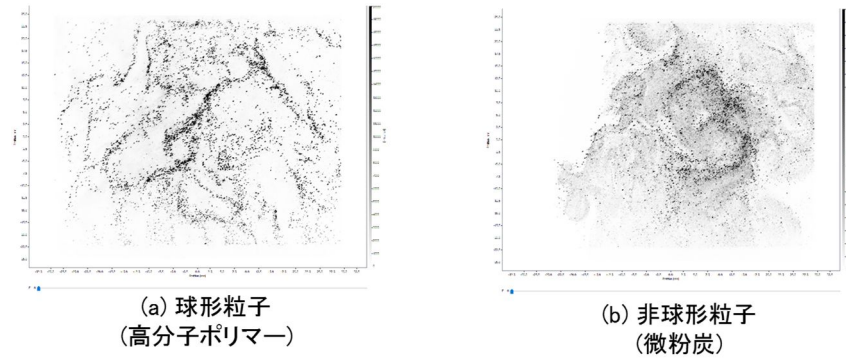


図 2 噴流場中における粒子の存在位置

ナ先端位置から 100mm、200mm 下流の位置においては、バーナ中心より離れた位置において、非球形粒子の方が球形粒子の場合に比べて、流速が大きいことがわかる。この点について直接的な原因は不明であるが、クラスタリングを形成し、位置が偏在する球形粒子に対し、存在位置がランダムとなる非球形粒子では、バーナ半径方向の広がりが増進される可能性を示唆する結果である。このように、非球形粒子ではクラスタリングが生じにくいこと、および球形粒子と非球形粒子では、下流における噴流中心からの拡散挙動が異なることが明らかとなった。

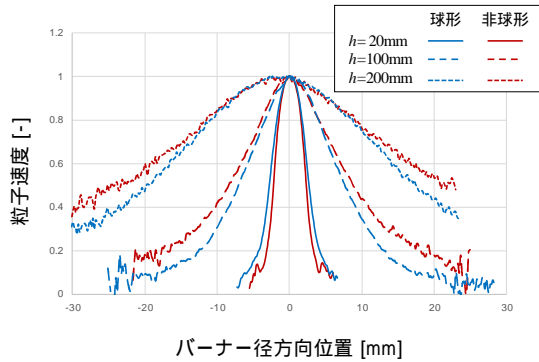


図 3 粒子の主流方向流速バーナ径方向分布

(2) 既存の数値解析コードに、Zhang らによって開発された非球形粒子に対応した抗力モデルを導入した。これは、回転による流れの向きに対する粒子位置の変化についても考慮したモデルであり、非球形粒子の挙動を数値解析で再現するためには、最も精度が高いモデルであると考えられる。この抗力モデルと、従来将球を対象にした抗力モデルを用いた DNS を行い、等方性乱流場中における球形粒子および非球形粒子の挙動を調べた。粒子は実験同様微粉炭を対象とし、乱流場の乱流強度はいずれの場合も Stokes 数が 1 前後となる条件に乱流強度を設定した。粒子の分散状態は、D 値と呼ばれる指標を用いて評価した。この値はポアソン分布からのずれを表す指標であり、完全にランダムな分布であればその値は 0 となり、クラスタリングが生じれば大きな値を取る。それぞれの粒子における D 値を図 4 に示す。図より、球形粒子の方が、D 値が大きくなっており、クラスタリングが顕著であることがわかる。このように、図 2 に見られるような実際の実験で生じる現象を数値解析によって再現することに成功した。続いて、同様の等方性乱流場において、粒子から揮発分と呼ばれる可燃性ガスを放出させ、その燃焼挙動を評価した。図 5 に解析領域全体の酸素の質量分率の平均値の経時変化を示す。反応初期ではそれぞれの粒子の場合の質量分率の変化に差異は無いが、後期では非球形粒子の方が、若干反応が進行していることがわかる。これは、よりランダムに分布している非球形粒子の方が酸素と反応し易いためであると考えられる。ただし、その差は微小であり、反応器や粉体機器の設計等において必ず影響を考慮しなければならないほどのインパクトではないと考えられる。

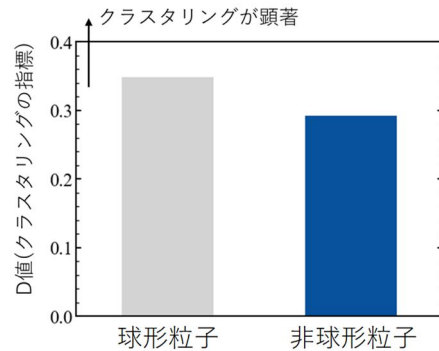


図 4 粒子の主流方向流速バーナ径方向分布

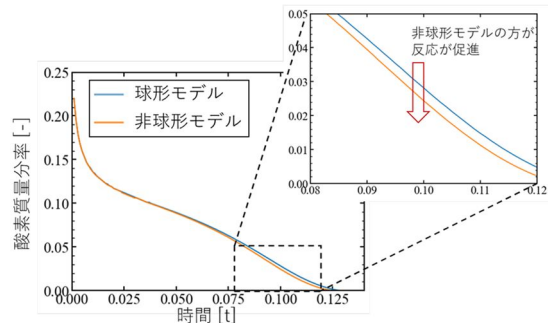


図 5 酸素の質量分率の経時変化

いたためであると考えられる。ただし、その差は微小であり、反応器や粉体機器の設計等において必ず影響を考慮しなければならないほどのインパクトではないと考えられる。

(3)以上の結果から、非球形粒子は球形粒子に比べてクラスタリングを形成しにくいことが明らかとなった。また、非球形粒子用の抗力モデルを用いることにより、この傾向を定性的に再現できることを明らかにした。さらに、形状の変化に伴って生じる粒子の分散状態の差異は揮発分の燃焼挙動に大きな変化をもたらさない可能性が示された。本研究の成果や、それを基にさらなる検討を実施することで、自然現象や工業機器内における粒子拡散や反応挙動の予測精度向上が期待される。

<引用文献>

W. Zhang, H. Watanabe, T. Kitagawa, Numerical investigation of effects of particle shape on dispersion in an isotropic turbulent flow, *Advanced Powder Technology* 29 (2018) 2048-2060.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kenji Tanno, Hiroaki Watanabe, Hisao Makino
2. 発表標題 Effects of Particle Clustering on Powder-Gas Reaction
3. 学会等名 8th Asian Particle Technology Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Tanno, Kazuki Tainaka
2. 発表標題 The effect of particle shape on diffusion behavior of fine particles in turbulent jet
3. 学会等名 ICCCI 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------