

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 6 日現在

機関番号：32621

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630055

研究課題名(和文) 燃焼場に発生した旋回上昇流による粗大粒子巻き上げメカニズムに関する研究

研究課題名(英文) A study of a coarse particle dispersion mechanism in a swirl flame

研究代表者

渡邊 摩理子 (Watanabe, Mariko)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：80452473

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)：旋回火炎による粒子の巻き上がり機構を明らかにするため、ラボスケールの旋回火炎を対象とした実験及び数値解析を行った。結果として、火炎近傍では空気の旋回速度成分が大きくなり、火炎内部では中心に近づくにつれて旋回速度成分が小さくなることが分かった。また、旋回方向に供給する空気の流速がスワール数や火炎長、ガス濃度分布へ与える影響を明らかにした。次に、加熱された固体燃料粒子の運動を実験的に観察し、熱分解反応により発生した揮発分の噴出しの影響とみられる粒子の軌道変化を捉えた。さらに、数値解析によって、粒子からの局所的なガスの噴出しや粒子の温度変化が粒子に作用する抗力・揚力に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Studies of laboratory-scale swirl flames and motion of a heated solid fuel particle were performed both experimentally and via numerical simulation to clarify a dispersion mechanism of particles in a swirl flame. The swirl velocity of the gas increased as the measuring point approached the flame surface but decreased as the point approached the center of the flame. When the air was supplied in the swirled direction, the magnitude of the air's velocity affected both the length of the swirl flame and the gas concentration distribution. A change in the trajectory of the particle by a jet of pyrolysis gas was experimentally observed. It was numerically clarified that a local gas jet from the particle surface and a change in particle temperature affected the drag and lift forces acting on the particle.

研究分野：流体力学

キーワード：混相流 燃焼

1. 研究開始当初の背景

燃焼反応場における粗大粒子の輸送が問題になる例として、火災時における火の粉の飛散が挙げられる。火の粉は火炎プルームあるいは火災旋風により地表から大気中へ高く巻き上げられる。火の粉の輸送モデルとして、気流の上昇速度と火の粉に働く抗力及び重力を考慮することにより火の粉の運動を求めることが行われているが、火の粉が巻き上がるメカニズムを考える際には、火の粉となる粒子と気流あるいは粒子同士の干渉に起因する粒子の回転や気流の速度勾配によって発生する揚力の効果を考慮しなければならない。また、地表の構造物による乱流の促進・抑制や、燃焼に伴うガス温度の上昇によって発生する上昇気流、回旋しながら中心へ向かう流れといった複雑な3次元流れの構造も火の粉の浮上メカニズムに関わると考えられる。火の粉発生モデル構築のために、火の粉の飛散に関わるこれらの物理的要因の影響を明らかにすることが求められる。

2. 研究の目的

過去には非反応性流体の一方向流れを対象とした、壁面近傍の乱流構造や壁面からの粒子飛散メカニズムに関する研究が行われているが、本研究では将来的に火災旋風による火の粉の飛散モデルにつなげることを前提に、旋回火炎内の流動構造及び燃焼する固体粒子からのガスの噴出しあるいは燃焼する固体粒子周りのガス温度(ガス密度)変化が粒子の運動に及ぼす効果を解明することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は当初 火災旋風基部の流動構造解明、実験風洞の製作、旋回上昇流による粒子飛散メカニズムの解明、燃焼粒子周りの流動構造解明、燃焼粒子の運動計測手法の確立、燃焼粒子の運動計測の6項目を3年間に渡って実施する予定であった。しかし、火炎内部の流動構造の計測や3次元的に運動する粒子の拡大撮影及び追跡撮影が困難で

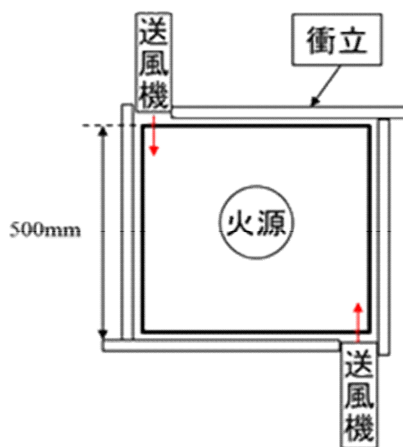


図1 旋回火炎発生装置

あったため、数値シミュレーションの併用や実験装置の構造変更等を行った。以下に研究方法の詳細を示す。

(1) 火源(アルコールバーナ) 火源を中心として設置される4枚の衝立及び送風装置から構成される、縦×横×高さ = 0.5 m×0.5 m×1.0 mの実験装置を製作した(図1)。送風装置は2カ所の衝立間の隙間に1個ずつ設置した。燃料にはエタノールを使用した。粒径範囲が0.25 ~ 60 ミクロンのスモークを流入させ、PIV (Particle image velocimetry) レーザ(カトウ光研株式会社 PIV Laser G1000)を照射した平面を高速度カメラ(株式会社ディテクト HAS-D71)で撮影し、PIVソフト(株式会社ディテクト Flownizer2D)により速度ベクトル分布を算出した。また、高温用シーチップ熱電対 K 型(株式会社チノール 1SCHS1-0 K 0500 64 XL WXJ 003 AY)により中心軸上の気相温度を計測した。

(2) 前項の実験と対応させた数値シミュレーションを実施した。シミュレーションには、市販のソフトウェアであるANSYS社のFLUENTを使用した。乱流はRANSにより解き、乱流燃焼モデルには、平均反応進行変数、平均混合分率および混合分率分散の輸送方程式を解く、FLUENTにおいて部分予混合燃焼モデルと呼ばれるものを使用した。底面中心にバーナを配置し、対角線上向かい合う2箇所から旋回流が発生し易いよう空気を流入させた。実験結果と比較することで、計算結果の妥当性の検証を行った。

(3) 燃焼粒子周りの流動構造を調べるための実験装置の製作を行った。実験装置は、固体燃料粒子(石炭)を台上に設置し、スポットヒーターで燃料を加熱して点火する構造とした。レーザーシートを垂直方向に照射して、燃焼粒子周りの流れを高速度カメラで撮影し、PIVにより速度分布を算出した。さらに燃焼粒子の運動を調べるため、固体燃料粒子(石炭)を落下させ、ハロゲンラインヒーターで粒子を加熱する構造の装置を製作した。高速度カメラにて粒子の運動を撮影し、ディテクト社の動画計測・解析ソフト(株式会社ディテクト DIPP-Motion V)で粒子の軌道及び速度を求めた。

(4) 燃焼粒子からのガスの噴出しあるいは燃焼粒子の温度変化が粒子の抗力・揚力に及ぼす影響を調べるため、粒子周りの流れの直接数値シミュレーションを実施した。シミュレーションにはOpenFOAMを使用した。流れは層流であり、粒子の表面に非一様な噴出しを与えた場合及び粒子温度を変化させた場合の抗力・揚力の算出を行った。

4. 研究成果

(1) アルコールバーナに点火すると高さ

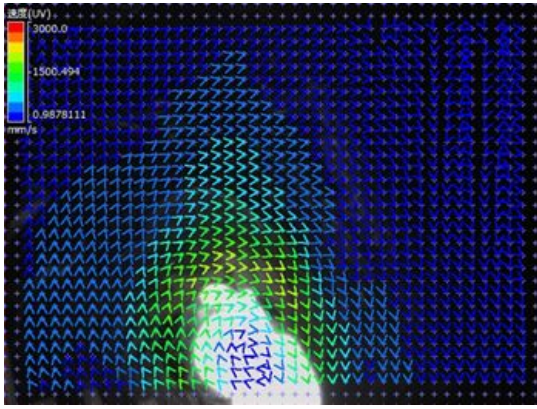


図 2 PIV 法により求めた火炎中心付近の水平平面内の速度ベクトル分布の例 (バーナからの高さ 0.080 m)

0.1~0.2 m の火炎が形成され、送風装置により空気を送り込むことで高さ約 0.6 m の旋回火炎を発生させることができた。図 2 にバーナからの高さ 0.08 m における水平断面の速度ベクトル分布の一例を示す。水平断面の速度ベクトル分布から、旋回流が発生していること、火炎近傍では速度が大きくなることが確認できた。また、熱電対による温度計測においては、バーナからの高さ 0.2 m の位置で最高温度 891 K を示した。

(2) 数値解析結果と実験結果を比較したところ、火炎に近づくにつれて火炎周囲の空気の旋回速度成分が大きくなり、火炎内部では火炎中心に近づくにつれて旋回速度成分が小さくなるといった定性的な傾向の一致が確認できた(図 3)。温度の中心軸上主流方向分布においては、実験と数値解析結果で最高温度に差が見られるが、下流に進むにつれて両者の温度差は小さくなった。また、火炎長については、実験と数値解析とで同等の値となった。次に、対角線上にある 2 箇所の流入境界から供給する空気の流速を変化させて火炎構造を調べたところ、スワール数は流速によらずあまり変化が見られないが、火炎長

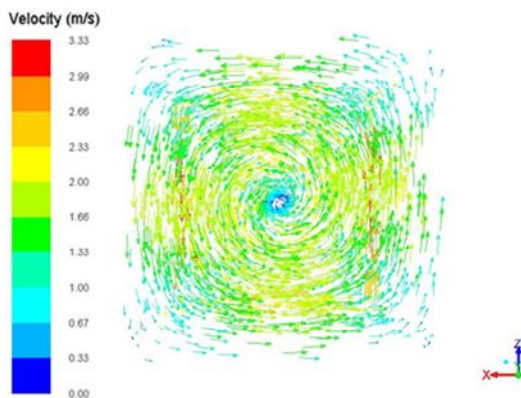


図 3 数値解析により求めた水平面内における速度ベクトル分布(計算開始から 8 秒後、バーナからの高さ 0.080 m)

は流速が大きいほど大きくなる傾向であることが明らかになった。また、流速が大きいほど、火炎下流における未燃ガスの割合が大きくなることが分かった。

(3) 石炭粒子をスポットヒーターで加熱したところ、粒子温度が熱分解反応温度付近に到達すると、粒子表面から流速 1.5 ~ 1.9 m/s でガスが噴出す様子を確認することができた。図 4 に粒子表面からガスが噴出す瞬間の画像を示す。次に、燃焼粒子の運動を観察した結果、熱分解反応により揮発分が噴出した影響と考えられる粒子の軌道の変化を捉えることができた。

(4) 局所的な噴出しを伴う粒子に作用する抗力及び揚力について数値解析的に調べた結果、圧力抗力・摩擦抗力共に主流に逆らう向きに噴出しが起きた際に大きく減少することが分かった。図 5 に主流に逆らう向きに噴出しがある場合の流線を示す。図 5 から分かるように、噴出しによりよどみ点が粒子から離れ、流れが粒子表面に沿わなくなるために抗力が減少したと考えられる。圧力揚力は、噴出し速度が小さいとき、鉛直上向きの噴出しにより減少するが、鉛直下向きの噴出しでは増加した。反対に噴出し速度が大きくなると、鉛直上向きの噴出しにより増加するが、鉛直下向きでは減少した。摩擦揚力については鉛直上向きへの噴出しで大きく増加し、鉛直下向きの噴出しでは減少した。次に、粒子



図 4 石炭粒子表面からのガスの噴出し(赤丸で示した部分)

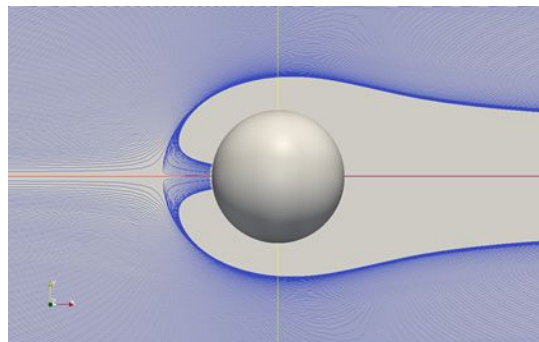


図 5 主流に逆らう向きの噴出しを伴う粒子周りの流線(レイノルズ数 $Re = 10$)

表面の温度を上昇させると抗力・揚力の全てが増加し、特に摩擦揚力が顕著に増大することが分かった。

5．主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

矢作丞史、安嶋大稀、渡邊摩理子、表面噴き出しや発熱を伴う粒子の抗力・揚力に関する数値解析的研究、日本機械学会 2015 年度年次大会、2015、北海道大学(北海道札幌市)、G0501104

6．研究組織

(1)研究代表者

渡邊 摩理子 (WATANABE, Mariko)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：80452473