

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：13904

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860002

研究課題名(和文) 流れ場および反応構造を考慮した衝突噴流熱伝達機構の解明

研究課題名(英文) Heat Transfer Mechanism of Solid Combustion by Multiple Impinging Jets Involving both Flow and Reaction Field

研究代表者

松岡 常吉 (Matsuoka, Tsuneyoshi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90633040

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円、(間接経費) 600,000円

研究成果の概要(和文)：噴流間の距離が衝突噴流群による固体燃焼の燃焼速度におよぼす影響を明らかにすることを目的として、スリット間隔の異なるノズルを用いて実験を行い、以下のことを明らかにした。

- ・水平方向の燃焼速度分布はスリット間隔によって大きく変化することを示した。間隔が広い場合には燃焼速度が最大となる位置がスリット直下より外側にずれることを示した。
- ・燃焼速度のレイノルズ数依存性を明らかにした。燃焼速度は、非燃焼の場合のよどみ領域と同様、レイノルズ数の0.5乗に比例して大きくなることを示した。一方、スリット間隔が広いときのスリット直下の燃焼速度はレイノルズ数の0.8乗に比例することを示した。

研究成果の概要(英文)：To investigate the effect of jet-to-jet spacing of multiple impinging oxidizer jets on burning rate of solid combustibles, experiments with different jet-to-jet spacing nozzles were performed. Main achievements are as follows.

1. Lateral profiles of burning rate using double impinging oxidizer jets were entirely different depending on spacing of the nozzle. Typically, the point at which maximum burning rate was obtained was shifted out side for the wider spacing nozzle.
2. The Dependence of burning rate on Reynolds number was also shown. As well as heat transfer dependence in the stagnation region of non-combustion case, the burning rate was proportional to Reynolds number to the power of 0.5. On the other hand, the burning rate just below the slits for the case of wider jet-to-jet spacing was proportional to Reynolds number to the power of 0.8.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学

キーワード：衝突噴流 平面噴流 壁面噴流 よどみ点 熱伝達 燃焼速度 固体燃焼 拡散火炎

1. 研究開始当初の背景

酸化剤を含んだ衝突噴流とガス化した固体燃料との拡散火炎は対向流拡散火炎の一つと考えられ、よどみ領域における流れ場が非常に安定であることから、固体の燃焼特性を調べるために広く用いられてきた。最近では、固体バイオマスを使った火力発電やハイブリッドロケットモータなど燃焼性の良くない固体を燃やすために、衝突噴流の優れた熱伝達特性を利用した燃焼技術も提案されている。これらの燃焼器の設計では、燃料の後退履歴が重要である。しかし、実燃焼器では複数の噴流群を用いることが多いにも関わらず、これまでは単一噴流の場合について得られたデータなどに基づいた得られた経験式を用いて後退量の予測が行われてきた。非燃焼場であっても、衝突噴流群による固体壁への熱伝達は、噴流間の距離によって異なる (N.R. Saad et al., Int. J. Heat and Fluid Flow, 13(1992), 2-14)。ましてや燃焼場の場合は、噴流同士の相互作用によって二次衝突やファウンテン流によって火炎位置や形状は変化し、それにより固体への熱伝達特性、すなわち燃焼速度も変化する可能性がある。そのため、これらの実燃焼器の最適設計を行うためには、単一噴流のデータからの類推だけでは不十分であり、噴流群の場合についてのデータ取得が必要であり、またその噴流間の距離や流速、酸素濃度などが固体の燃焼速度におよぼす影響について一般的な知見を得ることが重要である。

2. 研究の目的

本研究は、上で述べたような複雑な流れ場のうち最も単純な系である平行に並んだ2つの2次元平面噴流による固体の燃焼について、噴流間の距離が燃焼速度におよぼす影響を明らかにすることを目的とする。まず、スリット中心間の距離 (以降では、スリット間隔と呼ぶ) の異なるノズルを製作し、実験を行う。燃焼速度の水平方向分布がスリット間隔によって変化することを確認する。次に各スリット間隔の場合について、酸化剤流量を変えた実験を行う。燃焼速度の代表値をレイノルズ数で整理し、各位置での燃焼速度と流れ場の関係について検討する。なお、当初の計画では酸化剤濃度を変えた実験を行い化学反応の影響についても調べる予定であったが、本研究の採択直後に研究代表者の異動があったため計画通り進めることができず、実施することができなかった。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

噴流同士の相互作用による影響を調べるために、非燃焼場で行われた過去のデータを参考に (社河内敏彦, 噴流工学 - 基礎と応用 - , 第1版 (2009), p.101, 森北出版), スリット間隔 P の異なる2種類のノズル ($P = 4 \text{ mm}$, 18 mm) を製作した。製作した2次元平

面ノズルの断面図を図1に示す。ノズル内部には整流用に厚み 10 mm , セル数が 100 cm^2 あたり 100 個のアルミマイクロハニカムがはめ込まれている。ノズル下端には幅 3 mm , 奥行き 30 mm の長方形スリットが2つ設けられており、2次元平面噴流を供給することができる。上パーツと下パーツの間には、ガイドとしてステンレス枠をはめ込んである。なお、 $P = 4 \text{ mm}$ では、ノズル中心はそれぞれの噴流のよどみ領域となっており、一方 $P = 18 \text{ mm}$ では、壁面噴流領域となっていると考えられる。

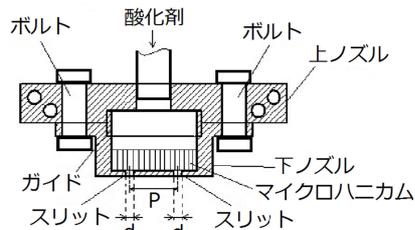


図1 製作した2次元平面ノズルの断面図

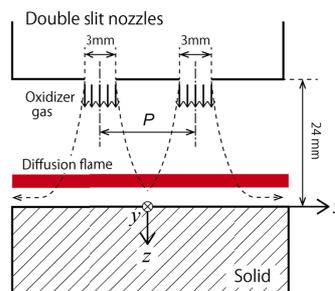
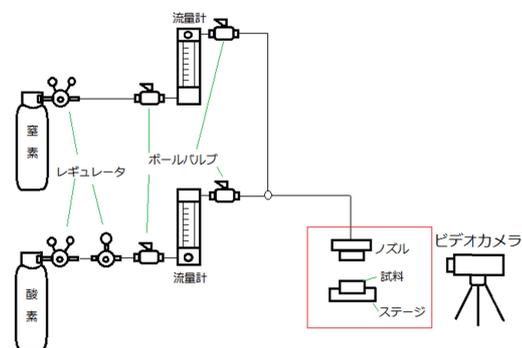


図2 上は実験装置全体図, 下はノズル出口から燃料試料近傍の拡大図 (座標原点は燃料試料の中央)

燃焼装置の概略を図2に示す。酸化剤ガスには純度 99.5% 以上の工業用酸素を用い、 $1/2$ インチまたは $1/4$ インチの銅パイプを用いてノズルと接続した。図中の窒素ラインは実験後の消炎用と流路のパーズ用のためのものである。酸化剤ガスを一定の圧力でノズル上流に供給するために、複数のレギュレータを使用した。酸化剤流量は面積式流量計を用いて 40 L/min から 200 L/min の範囲で調整した。一定流量でノズルから噴射させ、ステージ上

に固定した燃料試料上面に衝突させた。燃料試料には、その燃焼特性についてよく知られているPMMA(縦34mm×横60mm)を用い、試料とノズル出口の初期衝突距離は24mmとした。ただし、試料の厚みは20mmまたは30mmのものを用いた。

酸化剤流量が一定となったことを確認し、試料上方に配置したカンタル線(直径0.5mm)に一定電圧をかけて加熱し燃料に着火させた。燃焼実験の様子を側面からデジタルビデオカメラで撮影し、動画から着火から消炎までの時間を測定した。これを燃焼時間とした。ただし、火炎の輝度が強くビデオカメラによる直接観察では燃焼状態を判定することが難しかったため、中心波長が430nmの干渉フィルタをビデオカメラ前方に取り付けて撮影した。そのため本実験で観察した火炎は、主に燃焼反応により生成されたCH*ラジカルの自発光である。ビデオカメラの露光条件は、絞りがF/2.8, シャッタースピードを1/30秒とし、またビデオカメラのゲインを0dBと設定した。

(2) 燃料後退量および燃焼速度の測定

燃焼実験後の燃料後退量の測定には、レーザ式変位センサを用いた。レーザ式変位センサの出力値は、 ± 20 mmを ± 5 Vに変換して出力させるように校正した。図3に示すように燃焼後の試料をレーザ式変位センサの真下となるようスライダ上に置き、スライダをレール上で移動させながら試料横方向の後退量を測定した。試料の横方向位置の検出にはレーザ式変位センサと同期させた光スケールセンサを用いた。光スケールセンサは、試料とともにスライダ上に置かれたスケールの目盛り(1mm間隔で白黒模様)を読み取り、 -1.5×10^{-5} Vから 1.5×10^5 Vの範囲の電圧を出力する。それぞれの出力値はロガーに記録され、試料横方向に1mmごとの後退量を得た。得られた後退量を(1)で測定した燃焼時間で除して燃焼速度を計算した。この方法で求めた燃焼速度は実験中の平均の燃焼速度であることに注意されたい。

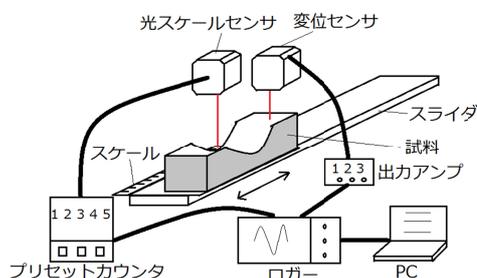


図3 燃料後退量の測定装置

4. 研究成果

(1) 燃焼後試料の観察

燃焼後の試料の代表例として、酸化剤流量が40 L/minのときの燃焼後の試料の写真を図

4に示す。試料の厚みは20mmと30mmのものを用いたが、今回の実験条件の範囲では、試料厚みによる影響はほとんどなかったことは予備実験において確認している。燃焼後の後退量は $P = 4$ mmのときは奥行き方向にほぼ一様となったが、 $P = 18$ mmでは非一様となった。今回実験した条件では、 $P = 18$ mmの場合ではいずれの流量条件でも同様の傾向が見られた。この原因についてはまだよくわかっていないが、本研究ではこの非一様性による燃焼速度への影響を排除するために、スリット間隔によって燃料後退量の測定位置を変えた(図4に示した点線を参照)。つまり、 $P = 4$ mmでは x 軸上および $y = \pm 8.5$ で測定した3点の値の平均を各位置での後退量として扱い、一方 $P = 18$ mmでは $y = \pm 7.5, \pm 8.5, \pm 9.5$ mmの6点から求めた平均値を後退量とした。

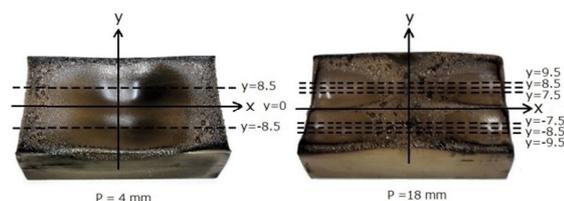


図4 燃料後退量の測定位置

(2) スリット間隔の影響

図5に燃焼速度の水平方向分布を示す。ただし、横軸はスリット間隔の半分 $S = P/2$ で無次元化してある。 $x/S = 1$ はスリット直下を、 $x/S = 0$ は中心軸を表す。図5から、スリット間隔によって燃焼速度の最大値はあまり変わらないものの、燃焼速度の分布は明らかに異なることがわかった。

スリット間隔が広い場合では($P = 18$ mm)、燃焼速度が最大となる位置は $x/S > 1$ 、すなわちスリットよりも外側にあり、またそれぞれ独立した2つのピークが現れた。これは2つのスリットから出た自由噴流が独立して試料表面に衝突していることを示唆している。中心付近では壁面噴流同士の再衝突が起こるが、これらの大部分はよどみ点での燃焼で生成された燃焼ガスであり火炎は形成されないため、燃焼速度は小さくなったと考えられる。衝突噴流ではよどみ領域において高い熱伝達率が得られる。一方、図5に示したように今回の実験では、燃焼速度はスリット直下よりも外側($x/S > 1$)で最大となった。この結果は自由噴流が外側に押し出されてよどみ点の位置が外側にずれた可能性を示唆している。燃焼場の可視化実験を行い、このことを確認していきたい。

スリット間隔が狭い場合には($P = 4$ mm)、スリット直下から試料中心軸付近にかけてなだらかな1つのピークが得られた。この燃焼速度分布は単一噴流の場合とよく似ている。非燃焼場での理論解析から、噴流の幅(半値幅)はスリット出口からの距離に比例し、

この場合では試料より約 6.5 mm 上方で隣接する噴流同士は接触していることが示される。(N・ラジャラトナム原著,野村安正訳,噴流,第1版(1983),pp.12-23,森北出版).したがって,見かけ上混合して1つとなった噴流が試料表面に衝突することになるため,中心軸近傍もよどみ領域のようになる.また試料表面での噴流幅は約 5.4 mm 程度と求まることを考慮すれば, x/S が約 ± 3 程度まで燃焼速度のピークが広がることも理解できる.

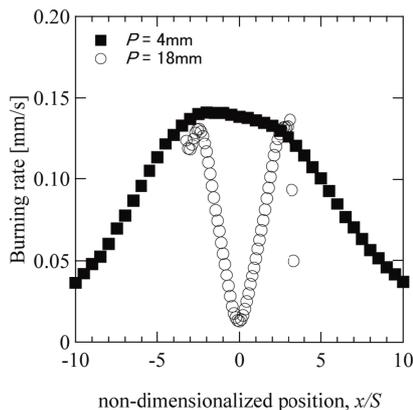


図5 燃料速度の水平方向分布

(2) 燃焼速度のレイノルズ数依存性

酸化剤流量を変えて(1)と同様の実験を行い,各スリット間隔の場合について,燃焼速度におよぼす酸化剤流量の影響を比較した.

スリット間隔が狭い場合 ($P = 4$ mm)

燃焼速度の代表値としてスリット直下 ($x/S = 1$) および中心軸 ($x/S = 0$) での値をとり,酸化剤流量から計算したレイノルズ数に対してプロットした.その結果を図6に示す.図中には最小二乗法により求めた累乗近似曲線を示してある.両者の燃焼速度にはほとんど差がみられず,いずれもレイノルズ数の増加とともに増加した.その指数はおよそ0.5であり,非燃焼の場合のよどみ領域におけるそれとよく一致している(熊田雅弥ら,日本機械学会誌 76(1973), 822-830).このことは(1)で述べたようにスリット直下から中心軸近傍を含む全体がよどみ領域となっていることを支持している.つまり,噴流同士の距離がある程度近づくと中心近傍には1つの広いよどみ領域が形成され,よどみ領域での燃焼速度は,非燃焼の場合と同様,レイノルズ数の0.5乗に比例して増加することがわかった.

スリット間隔が広い場合 ($P = 18$ mm)

と同様,図7に燃焼速度とレイノルズ数の関係を示す.ただし,スリット直下 ($x/S = 1$) および中心軸 ($x/S = 0$) に加えて,燃焼速度のピーク位置 ($x/S = 2.2$) での値を追加した. $P = 4$ mm と同様,いずれの位置における

燃焼速度もレイノルズ数の増加とともに増加したが,その指数の値は位置によって大きく異なった.興味深いのは,スリット直下ではべき指数の値はおよそ0.8となったことである.この値は非燃焼場での壁面噴流領域におけるレイノルズ数のべき指数と一致している(熊田雅弥ら,日本機械学会誌 76(1973), 822-830). $P = 18$ mm の場合のスリット直下は,熱伝達特性を考えればよどみ領域というよりむしろ壁面噴流と考えた方がよいことを示唆している.今後はPIVなどを用いて燃焼場の可視化を行い,よどみ領域の位置と燃焼速度の関係を確認していきたい.

中心軸および燃焼速度が最大となる位置でのべき指数はいずれも約0.5であった.ピーク位置で0.5となったことは,(1)で述べたよどみ領域が外側に移動していることの1つのエビデンスと言える.一方,中心軸における燃焼速度のレイノルズ数依存性が,再衝突によるよどみ領域ではあるものの,(非燃焼の)単一噴流のよどみ領域と同様の依存性を示すことは興味深い.この結果が一般的なものはまだ確認できていないため,スリット間隔および衝突距離を変えて追加実験を行い確認していきたい.

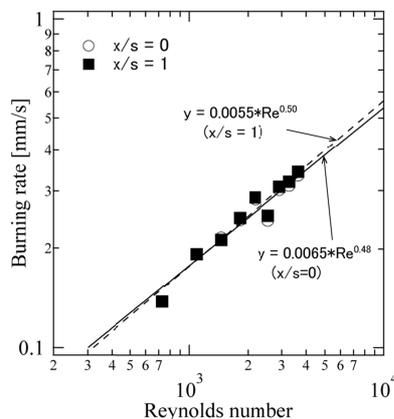


図6 燃焼速度のレイノルズ数依存性 ($P = 4$ mm)

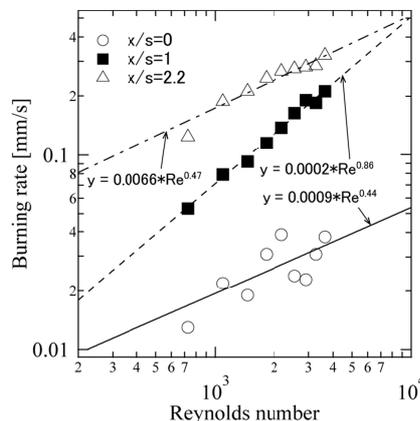


図7 燃焼速度のレイノルズ数依存性 ($P = 18$ mm)

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計4件)

Tsuneyoshi Matsuoka, Kyohei Kamei, Susumu Noda, “Effect of distance between double two-dimensional impinging oxidizer jets on burning rate of solid combustibles”, *Work-In Progress Poster Colloquium at 35th International Symposium on Combustion*, Hyatt Regency Embarcadero, San Francisco, USA (2014.8.3-8), #W4P062. 査読有り

Tsuneyoshi Matsuoka, Yuji Nakamura, Harunori Nagata, Takuya Yamazaki, “Scale Effect on Flame Spread Rate in Narrow Cylindrical Gap”, *Proc. The 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (8th ISEM'13-Sendai)*, Sendai City War Reconstruction Memorial Hall, Sendai, Japan (2013.11.3-6), #069 on CD-ROM. 査読有り

松岡常吉, 中村祐二, 永田晴紀, 山崎拓也, “可燃性固体内部の微小空隙内部を燃え拡がる火災におよぼすスケールの影響”, 日本実験力学会講演論文集, No.13 (2013), 由利本荘市文化交流館カダーレ, 由利本荘, (2013.8.20-22), pp.394-399. 査読なし

Tsuneyoshi Matsuoka, Harunori Nagata, Yuji Nakamura, “Gravity Effect on Flow Field of Flame Spread in Fuel Tube”, *Proc. Seventh International Symposium on Scale Modeling (ISSM-7)*, Hirosaki University, Hirosaki, Japan (2013.8.6-9), #4-06 on USB. 査読有り

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松岡 常吉 (MATSUOKA TSUNEYOSHI)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90633040