

令和元年6月6日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05821

研究課題名(和文) 消化ガスの酸素富化燃焼：排熱再循環利用のマイクロ火炎と国際安全規格による安全制御

研究課題名(英文) Oxygen enrichment combustion of digestion gases: micro flames due to exhaust heat recirculation and safety control based on international safety standards

研究代表者

門脇 敏 (Kadowaki, Satoshi)

長岡技術科学大学・技術経営研究科・教授

研究者番号：20185888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ対向流バーナーにおける消化ガスの酸素富化燃焼を調べた。バーナーのギャップ内の拡散火炎を取り扱い、バーナー間隔、バーナーチューブの内径、ガス流量及び消化ガスの成分に依存する火炎厚みを計測した。ギャップ距離が低下すると共に火炎厚みは単調に減少し、消化ガス中のメタン濃度が低下すると共に拡散火炎は薄くなることが示された。ガス流量の増大と共に火炎厚みが増加することが観測され、大きな内径の場合は狭いバーナー間隔でも火炎が観察された。火炎伸長が強くなると共に火炎厚みは減少した、つまり厚みは火炎伸長率の平方根に反比例した。加えて、標準化した火炎厚みは火炎伸長率のみに依存した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球環境に配慮した低炭素社会を構築し、持続可能な社会を実現する上で、未利用となっている多量の消化ガスに注目が集まっている。低カロリーである消化ガスの利用では、酸化剤に酸素を富化して燃焼させる酸素富化燃焼が有効である。これに加えて、排熱再循環を利用するエクセルギー保持燃焼を適用することにより、消化ガスのエネルギーを高効率で取り出すことができる。本研究では、消化ガスの酸素富化燃焼を取り扱い、現象のメカニズムを精査し、多くの知見を得ている。これらの知見は、消化ガスの有効利用に直接繋がるものであり、低炭素社会の構築に貢献する。そして、持続可能な社会を実現する手法の一つとなっている。

研究成果の概要(英文)：Oxygen enrichment combustion of digestion gases in micro counterflow burners was investigated. Diffusion flames in the gap of burners were treated, and the flame thickness which depended on the distance between burners, inner diameter of burner tubes, flow rate of gases and digestion gas component was measured. It was shown that the flame thickness decreased monotonically as the gap distance decreased and that diffusion flames became thinner when the methane concentration in digestion gas became lower. Increased flame thickness was observed at large gas flow rate, and diffusion flames were found in smaller burner distance at larger inner diameter. The flame thickness decreased as the flame stretch became stronger, i.e. the thickness varied inversely with the square root of stretch rate. In addition, the normalized flame thickness depended only on the flame stretch rate.

研究分野：機械工学・熱工学

キーワード：熱工学 マイクロ火炎 消化ガス 酸素富化 国際安全規格

1. 研究開始当初の背景

地球環境に配慮した低炭素社会を構築する上で、未利用となっているバイオマスの有効利用が重要である。この観点から、近年、廃棄されているバイオメタンガスなどの消化ガスに注目が集まっている。消化ガスの大口の発生源は有機廃棄物処理場であり、その主成分はメタンと二酸化炭素である。そして、発生するガスの約半分は利用されずに廃棄されている。消化ガスの多くが廃棄されている主な理由は、燃料として低カロリーであるためエネルギー源として利用するのが困難であること、並びに通常の燃焼手法では安定した燃焼状態を維持するのが難しいことである。したがって、これらの問題を解決することにより、未利用消化ガスの有効利用を図ることが可能となる。

低カロリーである消化ガスの利用では、酸化剤に酸素を富化して燃焼させる酸素富化燃焼が有効である。酸素富化燃焼では、火炎温度の上昇や酸素濃度の増大により化学反応が促進されるので、低カロリーである消化ガスを安定に燃焼させることができる。また、酸化剤の窒素成分濃度を低くできるので、窒素酸化物の排出量の低減が可能となる。さらに、消化ガスの酸素富化燃焼では、排ガス中の二酸化炭素濃度が高くなるので、二酸化炭素の分離回収・貯蔵 (CCS) が容易となる。酸素富化燃焼に加えて、排熱再循環を利用するエクセルギー保持燃焼を適用することにより、燃焼プロセスにおけるエクセルギー損失を減少させて、有効エネルギーを高効率で取り出すことができる。そして、可燃範囲を広くすることが可能となる。この様に、消化ガスの酸素富化燃焼は、エクセルギー保持燃焼と組み合わせることにより、低炭素社会の構築に直結する手法となる。

酸素富化燃焼では、火炎のサイズを小さくすること、つまりマイクロ火炎を形成することが容易である。低環境負荷のエネルギー源である消化ガスは、酸素富化燃焼により、超小型マシンのパワー源や機器の熱源としても用いることができる。つまり、分散型のエネルギー源としても有望である。地震などの災害時には、分散型のエネルギー源の確保が重要であるので、マイクロ火炎は有効なエネルギー源となる。マイクロ火炎の取り扱いで問題となるのが周囲への熱損失である。通常の火炎と比較すると、火炎の表面積と体積の比が大きいため、熱損失が燃焼現象に強く影響を及ぼすことになる。そして、結果的に安定燃焼の維持が困難になる。この解決策として考えられるのが、排熱再循環の利用である。この手法は、エクセルギー損失を減少させるのみならず、マイクロ火炎の安定燃焼に寄与するものである。

2. 研究の目的

消化ガスを酸素富化燃焼させ、微小火炎を形成させる手法として、安全性の観点 (逆火など) から拡散火炎が有力であり、対向流火炎を用いることにより酸素富化燃焼を比較的容易に成し遂げることができる。この火炎の形状は比較的シンプルであるため、本質的なポイントに着目しやすく、現象の解明に繋がるのが期待される。対向流拡散火炎については、古くから幾多の研究が為されており、その本質的なメカニズムは良く知られている。しかし、消化ガスと酸素によるマイクロ対向流拡散火炎の研究は為されておらず、その特性は未知のままである。この火炎のメカニズムの解明は、消化ガスのみならず他の気体燃料における解明にも繋がり、学術的に興味深いものである。さらに、従来の対向流拡散火炎と比較することにより、マイクロフレームの特性を把握することに繋がるものと期待される。マイクロ対向流拡散火炎の特性解明は、消化ガスの酸素富化燃焼による小型エネルギー変換器の実用化に繋がり、学術的のみならず工業的にも興味深いものである。

そこで本研究では、消化ガス・酸素マイクロ対向流拡散火炎を取り扱い、火炎の厚みやその径に及ぼすバーナー内径やバーナー間距離、並びにガス流量の影響を調べ、火炎厚みに与える火炎伸長率の効果を精査する。本研究の目的は、消化ガスの酸素富化燃焼における対向流拡散マイクロフレームの特性を明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究における実験装置の概要を示したのが図1である。対向流バーナーとして、内径 ϕ が 0.3 - 0.6 mm、外径が 1.59 mm、長さが 80 mm のステンレス管 (SUS316BA) を用いる。左方から燃料が噴出され、右方から酸化剤が噴出され、バーナー間には拡散火炎が形成される。ここで、バーナー間隔 d は 1 mm 以下とする。

燃料としては消化ガス (メタン + 二酸化炭素) を用い、酸化剤としては酸素を用いる。燃料と酸化剤の流量は、デジタルマスフローコントローラー (アズビル, MQV9020, MQV9200) で制御し、消化ガスと酸素の流量比は見かけの当量比が 1 になるように設定する。本実験における消化ガスと酸素の流量 Q は、10, 12, 14 mL/min とする。

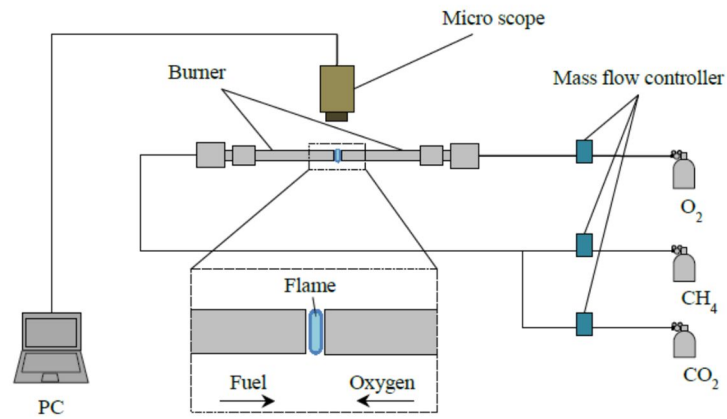


図1 実験装置の概要

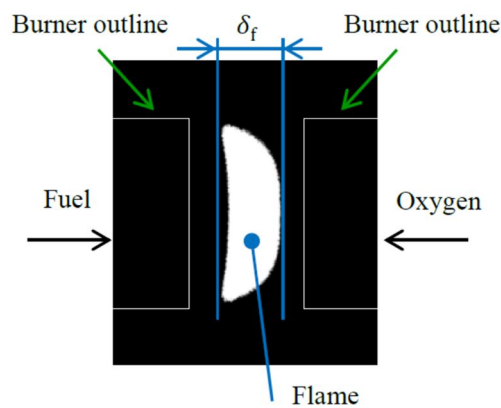


図2 火炎厚み δ_f の定義

バーナー間に形成される拡散火炎は、マイクロSCOPE(サンコー ,Dino-Lite Premier 500M)を用いて撮影する。得られる火炎画像を二値化して、火炎厚み δ_f を求める(図2)。なお、二値化する際に用いる閾値を変化させて画像を取得しても、火炎厚みや火炎径に及ぼすバーナー間距離やガス流量の影響に関する定性的な傾向は不変である。

4. 研究成果

図3は、火炎の画像を示したものである。バーナー間には、微小の火炎が形成されている。そして、火炎厚みと火炎径が共に1mm未満であり、いわゆるマイクロフレームとなっている。このような微小拡散火炎は、酸化剤として酸素を用いる場合に得られるものである。空気を酸化剤とした場合、マイクロフレームを得ることは困難となる。

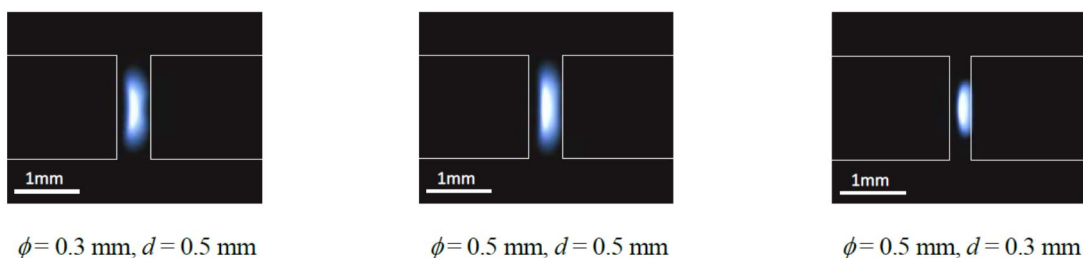


図3 マイクロフレームの画像

図4は、火炎厚み δ_f と火炎径 D_f の関係を示したものである。バーナー間隔が狭くなると共に、火炎厚みと火炎径は単調に小さくなる。また、流量が増大すると共に、それらは大きくなる。さらに、 $\phi = 0.5$ mm における火炎厚みと火炎径は、同じガス流量・同じバーナー間隔において、 $\phi = 0.3$ mm におけるそれらより大きくなっている。そして、バーナー間隔が狭い場合でも火炎は形成され、より薄い火炎が観察されている。このことは、火炎伸長が火炎特性に影響を及ぼしていることを示唆している。

対向流バーナーをガラス管で覆い、排熱再循環が火炎特性に及ぼす影響を調べる。ガラス管の内径を小さくすると、拡散火炎を維持することが困難になる。しかし、適当な内径のガラス管を用いるとき、可燃領域は広くなり、火炎スケールは大きくなる。つまり、エクセルギー損失の減少に繋がる排熱再循環の利用は、本マイクロ対向流拡散火炎にも有効であることが示されている。

縦型の対向流バーナーを用いて対向流拡散火炎の基本特性を実験的に調べ、可燃領域や火炎スケールに及ぼす種々のパラメーターを精査している。ガス流量と消化ガス中のメタン濃度は可燃領域に影響を与えており、それらの減少と共に可燃領域は単調に狭くなる。また、ガス流量とメタン濃度が低くなると共に、火炎スケールは小さくなる。加えて、火炎厚みと火炎径は、バーナー間隔が狭くなると共に減少する。燃料が上方から（酸素が下方から）供給されるとき、火炎が形成される最小のバーナー間隔は、燃料が下方から供給されるときと比較すると若干狭くなる。また、火炎スケールは若干大きくなる。これは、バーナー壁面の温度の違いによるものである。

次に、火炎伸長率が火炎厚みに及ぼす影響を調べる。対向流拡散火炎において、火炎伸長率 κ は以下の様に定義される。

$$\kappa = \frac{V_F + V_O}{d}$$

ここで、 V_F と V_O は、バーナー噴出口における燃料（消化ガス）と酸化剤（酸素）の平均流速である。

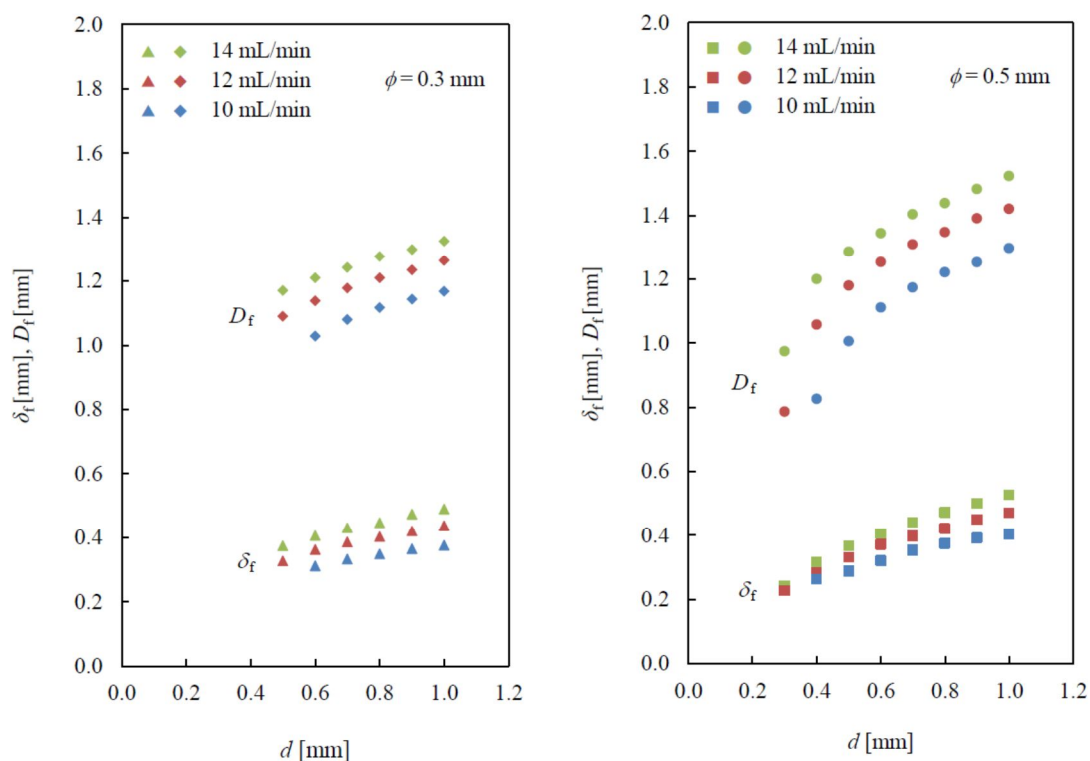


図4 火炎厚み δ_f と火炎径 D_f の関係

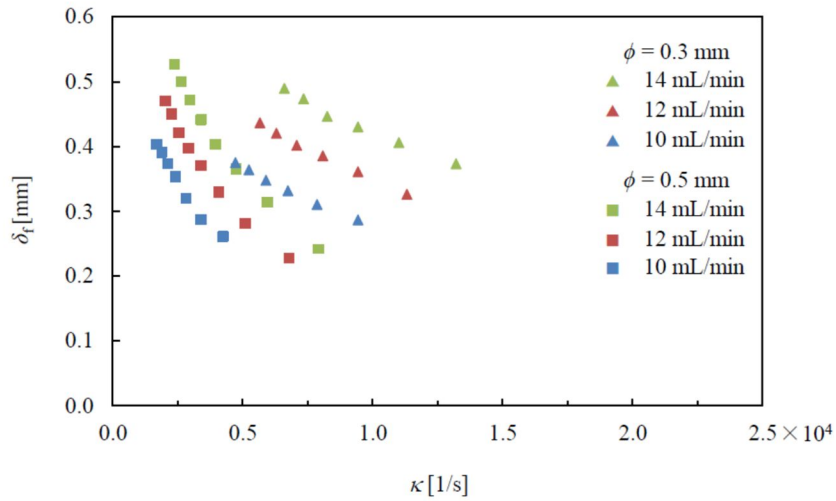


図5 火炎厚み δ_f と火炎伸長率 κ の関係

図5は、火炎厚み δ_f と火炎伸長率 κ との関係を示したものである。火炎伸長率が大きくなると共に、火炎は単調に薄くなっている。また、バーナー内径が大きい場合 ($\phi = 0.5 \text{ mm}$)、火炎厚みの減少に及ぼす火炎伸長の影響はより強くなっている。従来の対向流拡散火炎では、火炎厚みは火炎伸長率の平方根に反比例することが知られている。一方、本実験の場合では、両者の関係がバーナー内径やガス流量に強く依存している。その要因として、火炎からバーナーへの熱移動や淀み点近傍での反応流れ場の違い等が考えられる。

図6は、標準化した火炎厚みと火炎伸長率の関係を示したものである。全ての条件下において、標準化した火炎厚みは火炎伸長率の平方根に反比例している。この結果から、拡散対向流マイクロフレームの特性を理解することが可能となる。

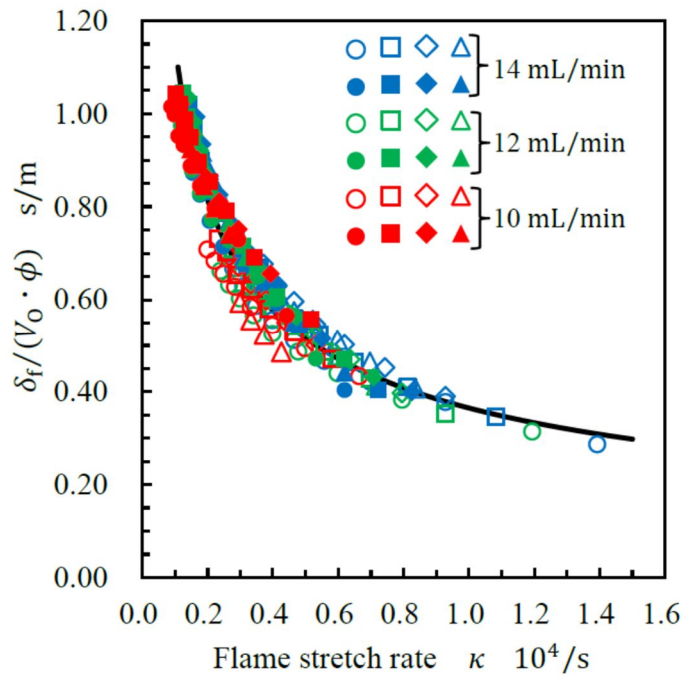


図6 標準化した火炎厚みと火炎伸長率の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

〔学会発表〕(計 2件)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~kadowaki/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：勝身俊之

ローマ字氏名：KATSUMI Toshiyuki

所属研究機関名：長岡技術科学大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁)：60601416

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。