

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656133

研究課題名(和文) 高圧酸素燃焼における純酸素噴流拡散火炎の構造と安定機構

研究課題名(英文) Flame structure and flame stabilization mechanism of oxygen jet diffusion flame in a high-pressure environment

研究代表者

小林 秀昭 (KOBAYASHI, Hideaki)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：30170343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：化学プラント等で用いられる、高圧下の可燃ガス中に純酸素を噴射し混合させる混合器の安全設計と安全な運転技術開発を目指して、高圧下の酸素噴流拡散火炎の特性ならびに安定限界に関する研究を行った。高圧下における主流可燃ガスに対する同軸酸素噴流拡散火炎ならびに垂直酸素噴流拡散火炎の安定限界の計測を行い、同軸噴流場では酸素噴流速が吹き飛びに対して支配的であること、薄いバーナリップ部にも微細な渦が形成されて火炎安定を促進すること、垂直噴流場では対向壁に到達する酸素流が火炎形成に重要な役割を果たすこと、特に高圧下では火炎振動が壁面近くで発生し吹き飛びをもたらすことなどが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：To develop safely operation method and designing mixing apparatuses for chemical plants, which mixes pure oxygen and combustible gases, characteristics of oxygen jet diffusion flames and flame stability limits in a high-pressure environment were performed. Both coaxial jet diffusion flames and transversal jet diffusion flames for pure oxygen jet in a main fuel flow were examined. Methane was used as a fuel. Results showed that, in the case of the coaxial jet flames, oxygen jet velocity is predominant for the flame stabilization and small vortexes formed at the lip of the jet tube enhance the flame stabilization. In the case of the transversal oxygen jet flames, the flow which reaches to the opposite wall plays an important role of flame stabilization, as well as flame oscillation occurs near the injection wall caused by the interaction between heat loss to the wall and high heat release in thin boundary layer at high pressure, leading to the total blow out of the flame.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱工学 燃焼工学 酸素燃焼 高圧燃焼 火炎安定限界

1. 研究開始当初の背景

酸化剤に純酸素を用いる酸素燃焼は、排出ガス量低減、高温生成、輻射伝熱活用、窒素酸化物排出低減などのメリットにより燃焼技術として将来性が高い。特に、高圧環境の純酸素燃焼はCO₂回収の効率向上に最適であるとともに、天然ガス改質プラントの混合部における過程であって、次世代エネルギー技術と安全工学の観点からも重要な技術である。しかし、高圧環境の燃焼現象は多くが未解明であり、高圧酸素燃焼の基盤的研究は進んでいない。

2. 研究の目的

純酸素を燃料流に噴射する噴流拡散燃焼器を高圧連続燃焼容器内に設置し、主流燃料流に対する純酸素平行噴流ならびに垂直噴流に対し、火炎リフト限界および吹き飛び限界の計測、粒子軌跡法による噴射管出口近傍およびせん断混合域の流れ構造と混合過程の観測等による火炎基部構造の解明、特に混合管内に火炎を安定させない条件の解明を行う。これらによって、高圧酸素燃焼の学理構築と燃料改質装置等の要素となるガス混合機器設計と運転に対する安全指針を得る。

3. 研究の方法

本研究の実験には、図1に示す同軸平行噴流バーナおよび図2に示す垂直噴流バーナの2種のバーナを製作した。

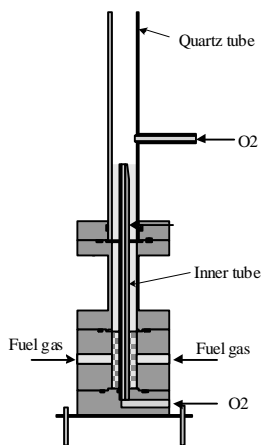


図1 同軸噴流バーナの構造図

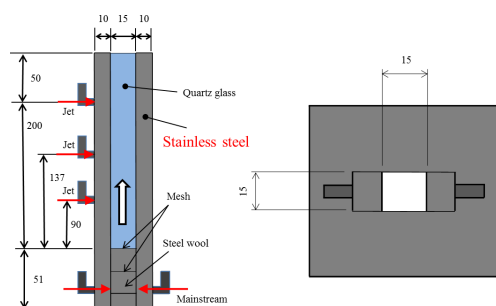


図2 垂直噴流バーナの構造図

同軸噴流バーナ(図1)は燃料改質プラン

トの混合部を想定し、内管と外管からなる二重管である。外管下方から燃料、内管から純酸素を燃料流に平行噴射する。総当量比1を跨いで実験を行う場合の高圧燃焼における最大流量制限から酸素噴流内管の内径は2mm、外管内径は16mmとし、火炎観測を容易にするため、外管は石英ガラス製である。

垂直噴流バーナ(図2)は噴流の観測に適した矩形断面とし、主流ダクト部(同軸噴流バーナの外管に相当)は15mm×15mmの断面積225mm²、噴流管は内径d=2mmおよび4mmとして同軸噴流バーナと共通性を持たせている。また、噴流管を3ヶ所に設置することが可能となっており、主流ダクト下部から噴流管までの長さである助走距離の影響をみるため200mm, 137mm, 90mmで可変となっている。

大量の燃料流中に酸素を噴射するため、実験条件によっては未燃の燃料流が排出され特に高圧容器上部の過熱が懸念されることから、実験最大圧力を0.5MPaに制限し、燃料流は窒素で希釈したが、次節で述べるように雰囲気圧力の影響が顕著に観測された。

4. 研究成果

(1) 同軸酸素噴流拡散火炎の安定安定特性
火炎安定限界に対する噴流速と雰囲気圧力の影響

図3に0.1MPaおよび0.5MPaにおける酸素噴流拡散火炎の安定限界の変化を示す。図中黒塗マークはリフト限界、白抜きマークは吹き飛び限界である。またX_{c,CH4}は周囲流におけるメタンのもル分率である。燃料改質炉は燃料過濃条件で運用されるので重要なのは当量比>1の領域である。図3からわかるように、火炎安定限界は圧力が高いほど広く、純酸素の限界噴流速は0.5MPaでは0.1MPaの2倍程度である。また火炎安定限界曲線は横軸に概ね平行であり噴流速支配であることがわかる。高圧下の純酸素平行噴流場では、噴流管に火炎を安定させないために、より大きな噴流速を必要とすることが明らかとなった。

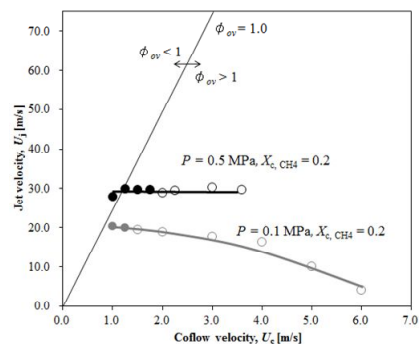


図3 酸素噴流管径2mmの同軸噴流拡散火炎における火炎安定限界と圧力の影響

噴流管リップ近傍の微小渦生成
高圧下におけるこの様な高い火炎安定性

が何に起因するかを流体力学的観点から調べるため、微粒子を混入した非燃焼流れにレーザーシート光を導入し、バーナリップ部の流跡線観測を行った。図4にそのリップ部の拡大可視化画像を示す。リップ部厚みは0.1 mmと非常に薄いため、大気圧下では流線に屈曲が見られる程度であったリップ極近傍において、0.5 MPaでは直径0.1 mmのオーダーの微細な再循環渦が安定的に形成されることがわかった。再循環渦は混合特性時間を増大させるので、分子拡散係数が低下する高圧下にあってもリップ近傍での混合が促進され、火炎基部が安定化され吹き飛び限界流速が増大するといえる。高圧環境における流体力学的効果が火炎安定に及ぼす影響として重要である。

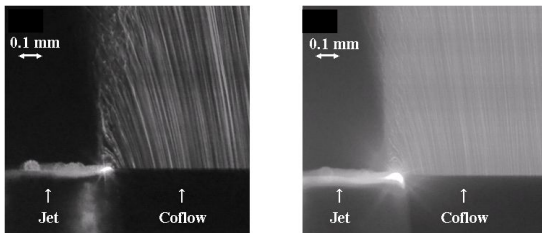


図4 P=0.5 MPaにおける酸素噴流管リップ近傍の流跡線観測結果(噴流速:12.0 m/s, 左図:周囲流速1.0 m/s, 右図:周囲流速2.0 m/s)

(2)垂直酸素噴流拡散火炎の火炎安定特性
大気圧下におけるメタン噴流火炎の安定限界と火炎形態

純酸素噴射実験に先立って、燃料(メタン)噴射に対する火炎観測を行った。図5に大気圧下における安定限界と火炎写真を示す。噴流速によって図5に示すような多様な形態の火炎が観測された。噴流速が大きい場合、噴流が対向壁に到達し主流前方に押し出す形で対向流型拡散炎が形成されることや、主流速が大きい場合には噴流火炎基部が離脱し、予混合型伝播火炎が形成される様子などが見られた。安定限界点のプロットが噴流速軸に平行であることから、燃料噴流の場合、火炎安定限界は総じて主流速支配であると云える。

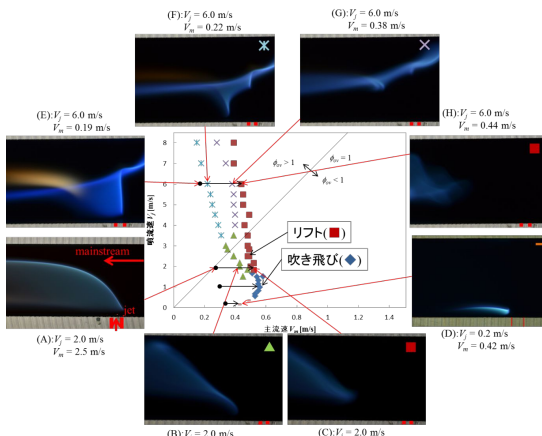


図5 P=0.1 MPaにおける燃料噴流火炎の安

定限界と火炎写真

大気圧下における純酸素噴流火炎の吹き飛び限界と火炎形態

図6に大気圧下(P=0.1 MPa)における垂直酸素噴流拡散火炎の安定限界と火炎写真を示す。燃料噴流の場合と同様に主流速および噴流速によって多様な火炎が形成されるが、吹き飛び限界プロット点は横軸に平行に近づきつつあり主流速の影響を大きく受ける点が燃料噴流の場合と異なる。

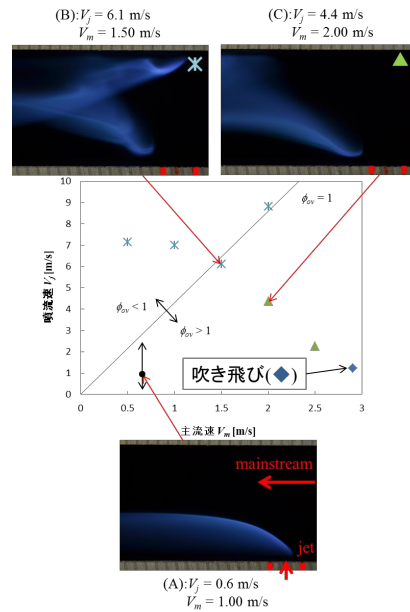


図6 P=0.1 MPaにおける垂直酸素噴流火炎の安定限界と火炎写真

高圧下における純酸素噴流火炎の吹き飛び限界と火炎形態

図7に0.5 MPaにおける垂直酸素噴流拡散火炎の安定限界と火炎写真を示す。高圧下では噴流速が小さい場合に吹き飛び限界が存在し、特に低噴流速安定限界においては火炎振動が生じて吹き飛ぶという顕著な特徴が見られた。また、噴流上流側の主流助走距離の影響も大きく、助走距離が大きいほど火炎安定限界が狭いという結果も得られた。図8に主流ダクト内速度分布と圧力の影響を数値解析とPIV実験により求めた結果を示すが、高圧下では動粘性係数低下によって速度境界層厚さが減少することが良く見て取れる。助走距離が大きいほど速度境界層は発達するが高圧下ではそれが抑制される。すなわち、火炎振動は壁面速度境界層厚さとの関係が強く、高圧環境では境界層が発達するほど壁面への熱損失が増大する一方で、壁面から火炎が離れることによる火炎強度回復とのヒステリシスが生じるためであると考えられ、結果として高圧環境でのみ火炎振動が観測されたと考えられる。

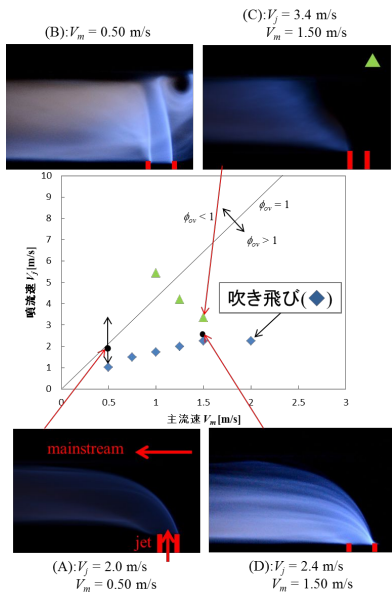


図7 P=0.5 MPaにおける垂直酸素噴流火炎の安定限界と火炎写真

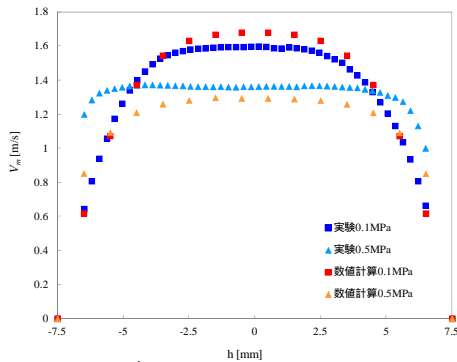


図8 主流ダクト内速度分布の圧力による変化(実験と数値解析の比較)

図9にP=0.5 MPにおける垂直酸素噴流火炎の数値解析結果を示す。流速条件は図7の条件Dに対応している。反応モデルはJones and Lindstedtの総括4段反応モデル[Combust. Flame 73: 233 (1988)]を用いた。条件Dは実験では振動火炎が形成された点である。本数値解析は定常計算であるから振動火炎ではないが、噴流は対向壁に到達せずダクト上方、下方の2つの主発熱帯が存在する。特に下方の火炎は壁に非常に接近しており熱損失が大きいことから火炎安定機構に影響を及ぼすことが予想される。

以上、大気圧から高圧環境において多様な火炎形態を見出すと共に、数値解析でも火炎の形状を再現する事ができた。同時に流線が雰囲気圧力や噴流速ならびに助走区間の影響を受ける様子から、可燃性ガスに対する高圧環境における混合装置の燃焼予測に関する多くの情報を得ることができた。

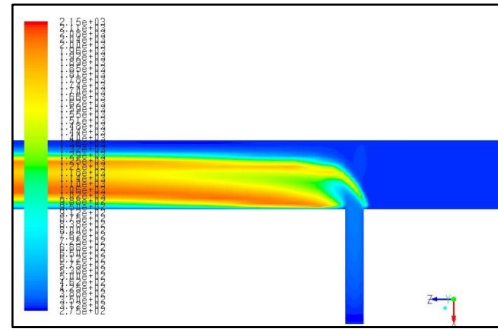


図9 P=0.5 MPaにおける燃焼数値解析による温度分布の例(流速条件は図7のD点に対応)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

熊上学, 加藤裕之, 白川駿, 奥山昌紀, 鈴木拓朗, 大上泰寛, 小林秀昭,

乱流強化が高圧環境同軸酸素噴流拡散火炎の安定性に及ぼす影響, 査読有, 日本燃焼学会誌 55 巻 172 号 2013 年,

pp.190-201

熊上学, 加藤裕之, 白川駿, 奥山昌紀, 鈴木拓朗, 大上泰寛, 小林秀昭,

高圧環境における同軸酸素噴流拡散火炎の安定性に関する研究, 査読有, 日本燃焼学会誌54巻170号2012年, pp.269-278

〔学会発表〕(計 2 件)

熊上学, 加藤裕之, 白川駿, 奥山昌紀,

鈴木拓朗, 大上泰寛, 小林秀昭,

高圧環境における同軸酸素噴流拡散火炎の安定性に及ぼす乱流強化の影響, 第50回燃焼シンポジウム, 2012年12月05日, 名古屋市

白川駿, 熊上学, 工藤琢, 小林秀昭,

高圧環境における同軸酸素噴流拡散火炎の安定化機構, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2012, 2012 年 11 月 17 日, 熊本市

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 秀昭 (KOBAYASHI, Hideaki)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号：30170343

(2)研究分担者

早川 晃弘 (HAYAKAWA, Akihiro)
東北大学・流体科学研究所・助教
研究者番号：90709156