

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656150

研究課題名（和文）連続可変型多段燃焼と自己再循環による超低NO_xバーナの実現研究課題名（英文）Realization of a ultra low NO_x burner with using continuously varying multi-step combustion and self-recirculation

研究代表者

石塚 悟 (ISHIZUKA SATORU)

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70129162

研究成果の概要（和文）：

連続可変型の多段燃焼と燃焼ガスの自己再循環を用いて、超低NO_xバーナの実現を目指した。これを達成するため、新しい火炎素である管状火炎を取り入れたバーナを使用し、空気と燃料の速度比を変えることで空間的に燃料濃度の分布のある燃焼場を形成させ、さらにまた、高速で管内に接線方向に吹き込むガスのエジェクター効果を用いて燃焼ガスの自己再循環流を発生させた。その結果、簡単な仕組みのバーナで、メタン燃料に対し、空気比1.4でNO_x排出値を10ppmまで低減できた。

研究成果の概要（英文）：

By using continuously varying multi-step combustion and self recirculation of burned gas, an attempt has been made to realize a ultra, low NO_x burner. To achieve this goal, a burner, which adopts a new element, tubular flame, is used, and a spatially distributed fuel concentration field is made by varying the fuel to air injection velocity ratio, and in addition, a recirculating flow of hot burned gas is induced by using an ejector effect of a gas mixture which is tangentially injected into the tube with a high velocity. As a result, the NO_x emission is reduced to 10 ppm at the air/fuel ratio 1.4 for methane with this simple structure burner.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

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：燃焼，NO_x，管状火炎，自己再循環，燃焼制御

1. 研究開始当初の背景

NO_xを著しく低減する方法として蓄熱体を介して燃焼ガスを循環させる高温空気燃焼があるが、流路切替用バルブや蓄熱体などの設備コストが高いのが難点である。しかし、最近、炉内で燃焼ガスを循環させる“自己再循環型低NO_xバーナ”が開発され、省スペース・低コストでNO_x値を灯油で20ppm程度まで下げることが可能となった。

また、NO_x低減法としてガスタービン燃焼器

などで行われる多段燃焼があるが、装置も大がかりとなり、高コストなのが難点となる。

しかるに、新しい火炎素である“管状火炎”を利用した管状火炎バーナ、なかでも、燃料と空気を別々に吹き出してから急速に混合させる急速混合型管状火炎バーナは、逆火が起きず安全な上、吹き出す燃料と空気の速度比を変えることで局所的に混合比を制御し、連続可変型の多段燃焼が実現できる可能性が出てきた。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、上記、自己再循環と、連続可変型多段燃焼を有機的に結合させ、天然ガスの主成分であるメタンを燃料とした場合のNOx 排出値を数 ppm 以下に抑える超低NOx バーナを実現することを目的とする。

3. 研究の方法

第一に、連続可変型多段燃焼に酷似した燃焼場を創成するため、燃料スリットと空気スリットの断面積を変えて両者の吹き出し速度比を変え、空間的に燃料濃度を、完全混合を仮定した総括的な燃料濃度より希薄にしたり過濃にしたりすることを試みた。

次に、管状火炎バーナの管内壁接線方向に高速で吹き込む空気のエジェクター効果を利用して下流側の燃焼ガスを引き込み、燃焼ガスの自己再循環を発生させ、燃焼用空気を燃焼ガスで希釈することを試みた。

最後に、両者の機構を合体させ、超低NOx 燃焼の実現を図った。

4. 研究成果

(1) 燃料と空気の速度比による燃焼場の制御

急速混合型管状火炎バーナは、円管に取り付けたスリットから燃料と酸化剤を接線方向吹き込み、添加すると、内部に管状の火炎が形成される。

図1に製作したバーナを模式的に示す。内径は30mmで、燃料用に2個、空気用に2個の矩形断面のスリットが取り付けられている。吹き出し速度比を変えるため、スリット幅の異なる4種類のバーナを製作した。

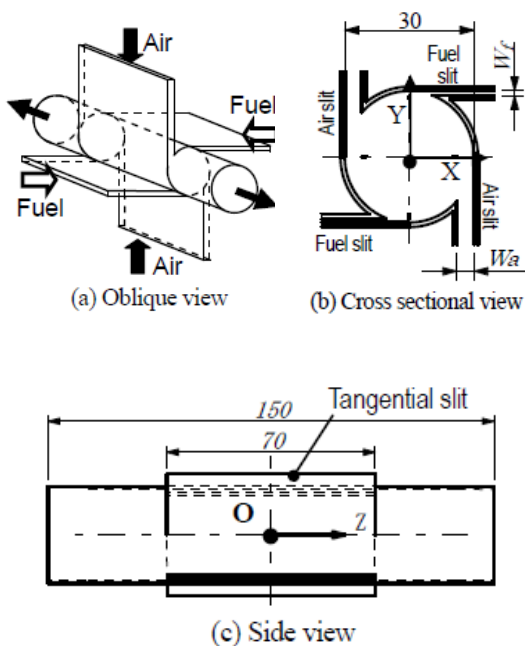


図1 急速混合型管状火炎バーナ

なお、速度比としては、次式で定義される理論混合比で吹き出したときの空気速度と燃料速度との比 α_{st} を用いた。

$$\alpha_{st} = [V_a / V_f]_{st}$$

バーナ内に形成される火炎の外観を図2-4に示す。 $\alpha_{st} = 1$ 、すなわち、空気と燃料を等速で引き出される場合(図2)、吹き出す燃料と空気の量が当量比 $\phi = 1$ の理論混合気の場合が火炎直径が最も大きく、当量比が1より小さい希薄側、当量比が1より大きい過濃側になるほど火炎直径は減少している。しかるに、 α_{st} が1より大きなバーナの場合(図3)、当量比が1でも火炎直径が小さく、 $\phi = 0.8$ では、かなり発光が弱くなっている。一方、 α_{st} が1より小さなバーナの場合(図4)、むしろ $\phi = 0.8$ の希薄側で、火炎直径が大きくなっていく。したがって、空気をより高速で吹き出すと希薄側、燃料をより高速で吹き出すと、過濃側にシフトする傾向がある。

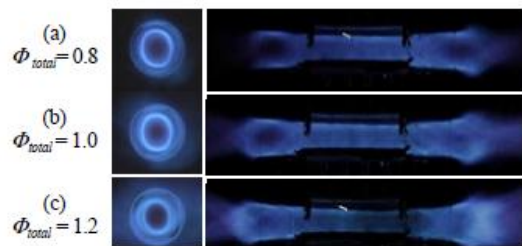


図2 火炎外観($\alpha_{st} = 1$)

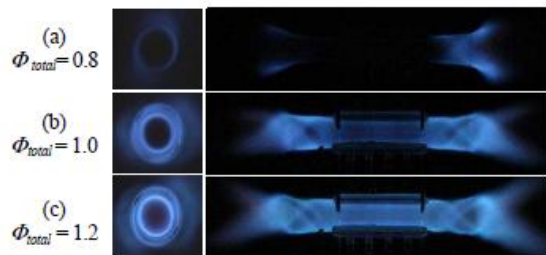


図3 火炎外観($\alpha_{st} = 4.8$)

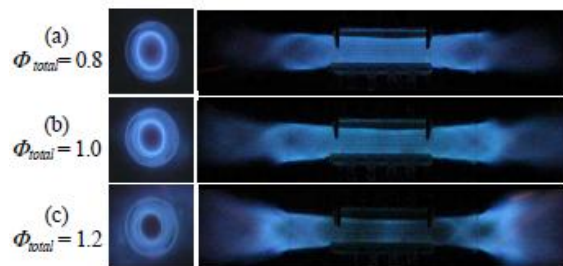


図4 火炎外観($\alpha_{st} = 0.5$)

図5は、速度比の異なるバーナにおける火炎の消炎限界を測定した結果である。 $\alpha_{st} = 1$ のバーナでは、希薄限界、過濃限界での当量比は、それぞれ、0.5, 1.3 となっているが、速度比が1より大きくなると、希薄限界、過濃限界での当量比は大きくなり、一方、速度比が小さくなると、両限界での当量比は減少する傾向があり、すなわち、バーナ内に形成される濃度場が、速度比によって局所的に変化することが裏付けられた。

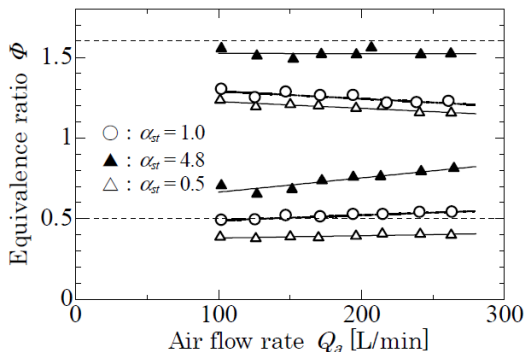


図5 消炎限界

(2) エジェクター効果による自己再循環流の発生

次に、エジェクター効果を用いて燃焼ガスを三循環させるバーナを製作した。その概略を図6に示す。内径は31.5mmで、メタンと空気の子混合気は、8カ所の対称位置に設けられた内径2mmのノズルより内径4mmの噴孔を目指して吹き出され、このときの負圧を利用して、これとは垂直方向にあけられた内径10mmの穴より燃焼ガスが吸い込まれる仕組みになっている。

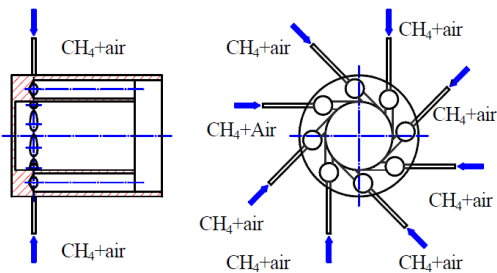


図6 自己循環型管状火炎バーナ

図7は、循環路の4個をあけた状態で撮影された火炎の外観を示す。塞がれた穴では、高温の燃焼ガスのため赤熱しているが、開口された4つの穴は暗く、燃焼ガスの循環を微粒子の混入により確かめた。

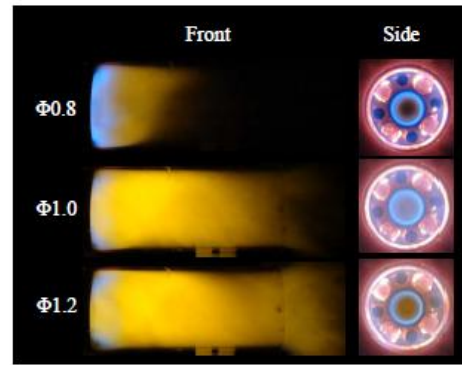


図7 火炎外観 (循環路4個開放)

図8は、循環路をすべて閉じた場合、4個開いた場合、8個すべて開いた場合の火炎外観を示す。循環路を開くと、バーナ内部での火炎発光がより明瞭となっている。

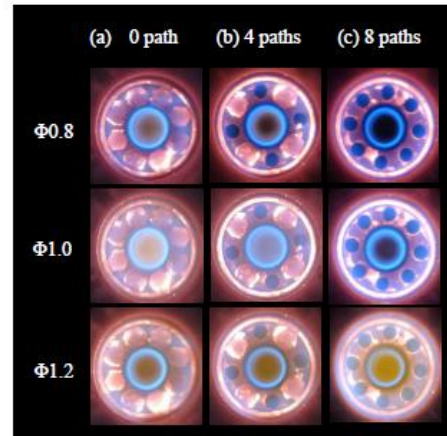


図8 循環路数による火炎外観の変化

図9は、出口で測定されたNOx値とCO値である。例えば、当量比1.0の場合、NOx値は循環無しの場合86ppmであるが、循環路の個数を増やしていくと減少し、8個全開では44ppmに半減する。また、当量比0.7(空気比1.4)では、全開にするとNOx値は10ppmまで減少した。

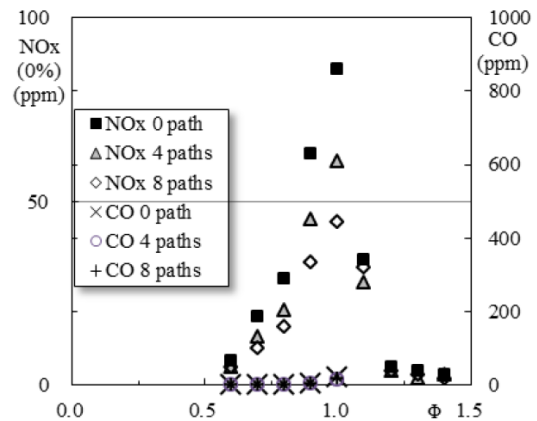


図9 NOx, CO 値

(3) 両者を合体させた場合の NOx 値

最後に、両者をドッキングさせ、実験を行った。図10に製作したバーナの概略を示す。一次燃焼用のバーナは、内径35.5mm、長さ40mmのステンレス製で、空気用として幅2.5mm、長さ24mm、燃料用として幅1mm、長さ12mmの矩形スリットがそれぞれ対称位置に計4つ配置されている。二次燃焼用には図6のバーナを用いた。

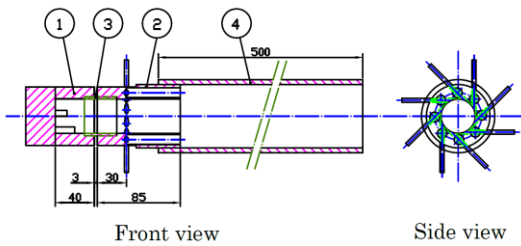


図 10 複合型管状火炎バーナ

図11は、一次、二次全体を通じての当量比を1.0, 0.91, 0.83, 0.77に設定し、一次燃焼での燃焼形態と当量比を変えた場合に測定されたNOx値で、循環路数は4個である。全体の当量比0.77、一次側を急速混合燃焼とし、その総括的な当量比2.0の場合に、NOx値が17ppmとなった。循環路を8個に増やしても15ppmに留まり、自己再循環方式のみの場合の最低値、当量比0.7で10ppm、と比べて、さほどNOx値が低減されないことが分かった。

これから、いたずらにバーナ構造を複雑にするより、自己再循環方式のみで、燃焼ガスの循環量をより増やす方法を考えた方が、NOx 値を低減する上で得策であるものと思われる。

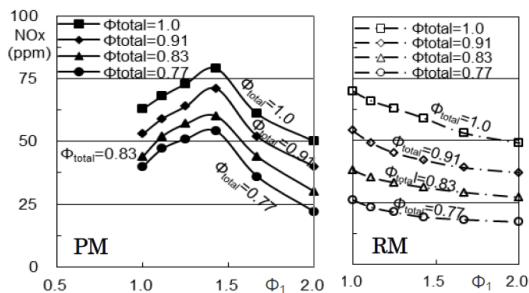


図 11 全体当量比、一次燃焼当量比を変えた場合の NOx 値の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

下栗大右・江藤芳朗・木村公昭・五木田直彦・王艶雷・石塚悟, 急速混合型管状火炎バーナ

ナにおける火炎構造制御に関する実験的研究, 日本機械学会論文集(B編), 第78巻, 第785号, 査読有, pp.185-193, 2012.

〔学会発表〕(計8件)

- 1) Hongwei Peng, Baolu Shi, Daisuke Shimokuri, Satoru Ishizuka, An experimental study on a self-recirculation type low NOx tubular flame burner, Proceedings of the 9th Asia-Pacific Conference on Combustion, Gyeongju-Hilton, Gyeongju, Korea, 2013/5/19-22, 査読有 p.106, 2013.
- 2) 五木田直彦・下栗大右・渡邊大輔・石塚悟, 急速混合型管状火炎の空気力学的構造, 第50回燃焼シンポジウム講演論文集 2012/12/5-7, 名古屋, 査読無, pp.220-221, 2012.
- 3) 王艶雷・五木田直彦・下栗大右・石塚悟, 急速混合型管状火炎の NOx 排出特性成に及ぼす吹き出し流速比の影響, 第50回燃焼シンポジウム講演論文集, 2012/12/5-7, 名古屋, 査読無, pp.510-511, 2012.
- 4) 彭宏偉・胡杰・下栗大右・石塚悟, 自己循環型管状火炎バーナの燃焼特性(第2報), 第50回燃焼シンポジウム講演論文集, 2012/12/5-7, 名古屋, 査読無, pp.578-579, 2012.
- 5) 彭宏偉・下栗大右・石塚悟, 自己再循環型低 NOx 管状火炎バーナの燃焼特性, 日本機械学会中国四国支部第50期総会・講演会, 講演論文集, 2012/3/8, 広島, No.125-1, 査読無, K1401, 2012.
- 6) 王艶雷・五木田直彦・下栗大右・石塚悟, 小型急速混合型管状火炎の NOx 生成に及ぼす吹き出し流速比の影響, 日本機械学会中国四国支部第50期総会・講演会, 講演論文集, 2012/3/8, 広島, No.125-1, 査読無, K1402 2012.
- 7) 五木田直彦・下栗大右・渡邊大輔・石塚悟, 急速混合型管状火炎の構造(第3報), 第49回燃焼シンポジウム講演論文集, 2011/12/5-7, 横浜, 査読無, pp.406-407, 2011.
- 8) 彭宏偉・胡杰・下栗大右・石塚悟, 自己循環型管状火炎バーナの燃焼特性, 第49回燃焼シンポジウム講演論文集 2011/12/5-7, 横浜, 査読無, pp.498-499, 2011.

6. 研究組織

(1)研究代表者

石塚 悟 (ISHIZUKA SATORU)
 広島大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：70129162

(2)研究分担者

下栗大右 (SHIMOKURI DAISUKE)
 広島大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号：40432687

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：