

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19760135

研究課題名（和文） 高温空気燃焼に対する熱損失の影響

研究課題名（英文） The effects of heat loss on characteristics of high temperature air combustion

研究代表者

名田 謙 (NADA YUZURU)

豊橋技術科学大学・工学部・助教

研究者番号：50383485

研究成果の概要（和文）：本研究では、高温空気燃焼に対する熱損失の影響を明らかにするために、高温空気燃焼の窒素酸化物排出特性および可燃限界の解明を行った。ノズル間隔の影響と熱損失を考慮した修正フラームレットモデルを用いることにより、窒素酸化物排出指数の生成速度を良くスケーリングすることができた。さらに、可燃限界に対する熱損失の影響について明らかにするために、可燃限界に対する壁面温度の影響について明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, to clarify the effects of heat loss on characteristics of high temperature air combustion (HiTAC), the emission of nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) and flammability limit in HiTAC furnace are investigated. The overall NO<sub>x</sub> production rate is found to scale with the flame temperature predicted by the modified flamelet model. The effect of heat loss on flammability limits of HiTAC are investigated at the different furnace wall temperature. The modified premixed flame model is introduced and can reproduce the flammability limit qualitatively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	0	1,500,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	540,000	3,840,000

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

### 1. 研究開始当初の背景

近年の地球・都市環境問題への取り組みの一つとして、高温空気燃焼技術の開発が行われている。高温空気燃焼は、排熱を利用した高温空気による熱効率向上、燃料または酸化剤の希釈による窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）排出量低減、および火炎輝度の極端な低下（flameless combustion）などの特徴を有している。高温空気燃焼技術は現在工業炉に適用されつつあり、その燃焼特性を明らかにすることは工学上非常に重要である。

炉内における高温空気燃焼の実験は、通常、高温空気を用いて炉自体を十分に加熱した後に行われる。この炉自体の加熱が不十分な場合、通常火炎が観察され高温空気燃焼特有の flameless combustion は形成されない。これは、炉壁の温度が低く輻射熱流束による熱損失が大きいためと考えられる。このように熱損失により火炎の燃焼状態は大きく変化することから、火炎の可燃限界や NO<sub>x</sub> 排出特性などへの熱損失の影響は極めて大きいと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、火炎の熱損失と燃焼特性の関係を定量的に明らかにすることを目的としている。まず、高温空気燃焼が安定に形成可能な条件と熱損失の関係を明らかにする。また、高温空気燃焼の NO<sub>x</sub> 排出特性に対する熱損失の影響を明らかにするために、熱損失を考慮した NO<sub>x</sub> 排出指数のスケーリング則を提案する。さらに、数値計算により、炉内の排ガス流動特性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究は三つの手法により行った。一つは実験的手法による NO<sub>x</sub> 排出特性の解明、二つ目は、同じく実験的手法による可燃限界の解明、三つ目はラージエディシミュレーションによる炉内流動特性の解明である。

#### (1) NO<sub>x</sub> 排出特性の解明

NO<sub>x</sub> 排出特性の解明に用いた実験装置を図 1 に示す。高温空気燃焼炉は内径 160mm、高さ 800mm のステンレス製円筒炉である。図 2 は炉底部に設置されているバーナーの拡大図を示している。バーナーは中央の酸化剤ノズルと、この周囲の 6 本の燃料ノズルからなる。酸化剤ノズルの内径は 18mm であり、電気炉で予熱された高温酸化剤が供給される。燃料ノズルの内径は 2mm であり、酸化剤ノズルからの距離が等しい 2 本のノズルを対として用いた。酸化剤ノズルからの距離 ΔL は 30mm、50mm および 70mm である。

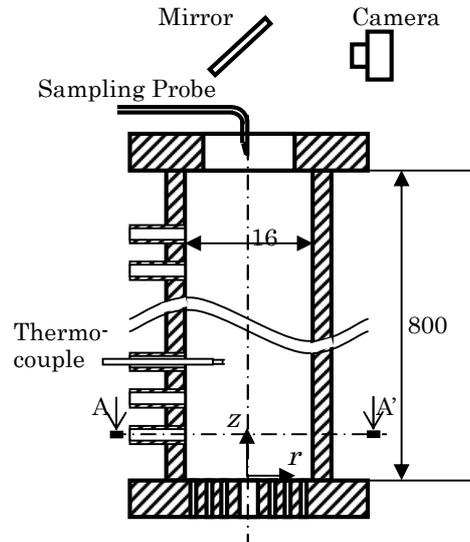


図 1 燃焼炉模式図。

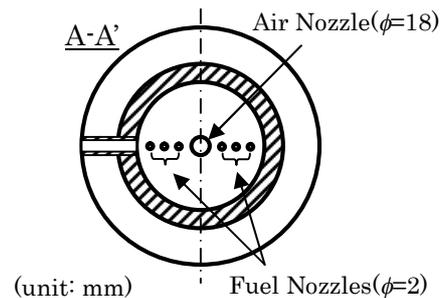


図 2 バーナー模式図。

燃料はプロパンとし、酸化剤には窒素で希釈された空気を用いた。これにより、酸化剤の酸素濃度を任意に設定することができる。

本研究では、炉出口からの火炎の直接撮影、炉出口における NO<sub>x</sub>、酸素、一酸化炭素の濃度測定、および炉内の温度測定を行った。火炎の直接写真は、炉頂部に鏡を設置することで、デジタルカメラにより撮影した。濃度測定は炉出口からサンプリングプローブを挿入することにより行った。NO<sub>x</sub> と酸素の濃度測定には燃焼排ガス用 NO<sub>x</sub>-O<sub>2</sub> 測定装置（島津製作所 NOA-7000）を、一酸化炭素の測定には燃焼排ガス用濃度測定装置（島津製作所 CGT-7000）を用いた。炉内の温度測定は、側壁の測定孔から炉内に熱電対を挿入することにより行った。

#### (2) 可燃限界の解明

可燃限界の解明には、(1) NO<sub>x</sub> 排出特性の解明と同じ燃焼炉を用いた。ただし、バーナーは同軸状に変更している。図 3 に変更を施

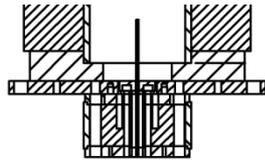


図3 バーナー模式図.

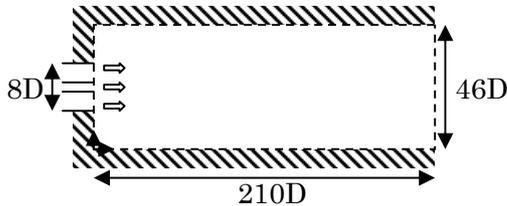


図4 計算対象の燃焼場.

したバーナーの模式図を示す. バーナー中央のノズルから燃料が, その周囲の円形スリット状のノズルから酸化剤が供給される. 燃料ノズルの内径は2mmであり, 炉内に70mm突き出ている. これは, 炉内循環流による希釈効果を促進させるためである. 酸化剤ノズルの外径は65mmであり, スリット幅は2.5mmである. また, 可燃限界に対する熱損失の影響を明らかにするために, 燃焼炉側壁にヒーターを設置し, さらに側壁に熱電対を埋め込むことにより, 炉壁面を一定温度で制御した. これにより, 火炎から炉壁面への熱損失を任意に設定することができる. 燃料と酸化剤は(1)NO<sub>x</sub>排出特性の解明と同じものを用いた. また, 測定方法に関しても同様である.

### (3) 炉内流動特性の解明

燃焼炉内の流動特性の解明を行うために, 二次元急拡大流路を対象としたラージエディシミュレーションを行った. 基礎方程式は, 非圧縮性を仮定した, 運動量と化学種の輸送方程式である. 反応には, 燃料と酸化剤が反応し生成物が生成される一段階反応を仮定した. 図4に対象とした燃焼場を示す. ここで, Dは燃料ノズルの直径である. 領域は壁で囲まれており, 右側境界から燃料と酸化剤が流入する. 左側境界には対流流出境界条件を課しており, 生成物が排出される.

## 4. 研究成果

### (1) NO<sub>x</sub> 排出特性の解明

図5はNO<sub>x</sub>排出指数(EINO<sub>x</sub>)と, 酸化剤酸素濃度, 予熱温度およびノズル間距離の関係を示している. ノズル間距離 $\Delta L=30\text{mm}$ の場合(図5(a)), 酸素濃度および予熱温度の低下とともにEINO<sub>x</sub>は急激に減少し,  $X_{O_2}=9\%$ の条件においてEINO<sub>x</sub>はほぼゼロを示す. これは, 予熱温度と酸素濃度の低下に伴い, 燃焼反応が抑制され, NO<sub>x</sub>の生成速度が低下したと考えられる. 図5(b)に示すように $\Delta L=70$

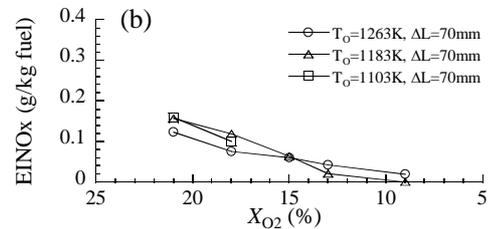
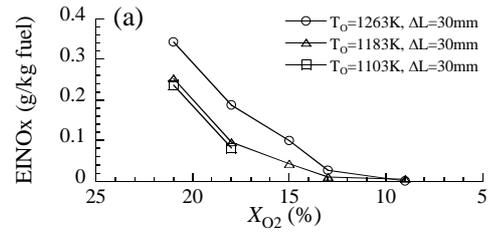


図5 EINO<sub>x</sub>に対する酸化剤予熱温度, 酸素濃度およびノズル間距離の影響((a) $\Delta L=30\text{mm}$ , (b) $\Delta L=70\text{mm}$ ).

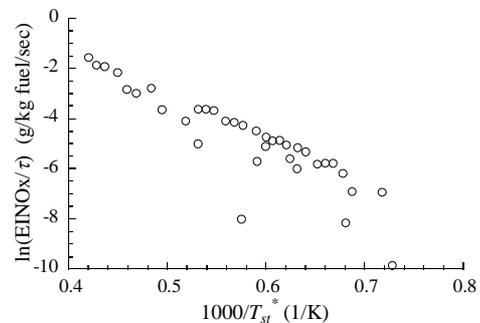


図6 修正フレームレットモデルを用いたスケーリング結果.

mmの場合では, EINO<sub>x</sub>は $\Delta L=30\text{mm}$ の場合より減少する. これは, 炉内ガスによる希釈の促進に起因する. また, 酸素濃度の低下とともにEINO<sub>x</sub>は減少する. ただし, 予熱温度の異なる条件においても, EINO<sub>x</sub>は同程度の値を示す.  $\Delta L=70\text{mm}$ の場合, 炉内ガスによる希釈, すなわち高温ガスとの混合が促進されるため, EINO<sub>x</sub>に対する予熱温度の影響は小さくなる.

本研究で行ったNO<sub>x</sub>排出特性のスケーリングはフレームレットモデルに基づく. ここで, 希釈率を考慮する修正フレームレットモデルを提案する. 炉内ガスによる酸化剤および燃料の希釈により, 酸化剤の酸素濃度, 温度および燃料濃度は決定される. また, 炉内ガスの温度は熱損失の影響を強く受ける. 本研究では, 壁面への熱損失を熱バランスモデルにより定量化することで, 炉内ガスの温度を再現した. これにより, 熱損失の影響を修正フレームレットモデルに含めることができる.

図6はスケーリング結果を示している. 横軸は修正フレームレットモデルから算出された火炎温度に基づく指標を示している. ま

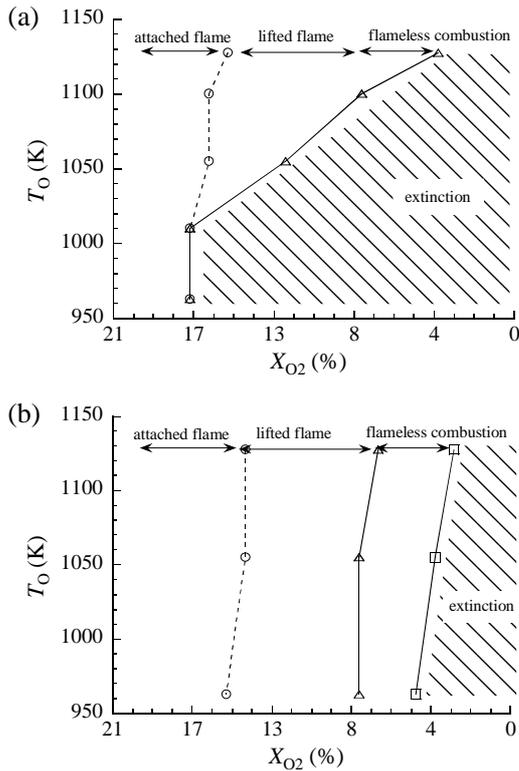


図7 高温空気燃焼の可燃限界 ((a) $T_w=923\text{K}$ , (b) $T_w=973\text{K}$ ) .

た、縦軸は  $\text{EINO}_x$  を滞留時間で除したものを示しており、 $\text{EINO}_x$  の生成速度を示している。図6の結果から、修正フレームレットモデルに基づく火炎温度により、高温空気燃焼における  $\text{EINO}_x$  をスケールリングできることがわかる。

### (2) 可燃限界の解明

図7は実験から得られた可燃限界を示している。図7(a)は壁面温度  $T_w$  が  $923\text{K}$  の場合、図7(b)は  $T_w=973\text{K}$  の場合の可燃限界を示している。本研究では、可燃限界を  $\text{CO}$  濃度により決定した。予熱温度を一定とし、酸素濃度を1%ずつ下げ、 $\text{CO}$  濃度が  $300\text{ppm}$  を超えた条件を可燃限界とした。横軸はノズル出口における酸化剤酸素濃度  $X_{\text{O}_2}$  を、縦軸は予熱温度  $T_0$  を示している。また、図中の実線は可燃限界を表わしており、実線より下の条件(図中、斜線の領域)において、火炎は消炎に至る。破線は付着火炎と浮き上がり火炎の境界である。

$T_w=923\text{K}$ ,  $T_0=1100\text{K}$  の場合、酸素濃度の低下とともに、火炎は付着火炎から浮き上がり火炎となり、消炎する。これに対して  $T_0=1130\text{K}$  の場合では、浮き上がり火炎からフレームレス燃焼に遷移した後に消炎する。これらの結果から、高温空気燃焼は浮き上がり火炎である可能性が高いことがわかる。一方、 $T_w=973\text{K}$  の場合、可燃限界は低酸素・低温側に移動し、燃焼を維持できる範囲が広く

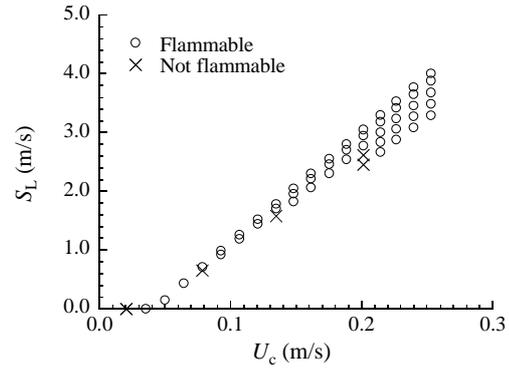


図8 予混合火炎モデルに基づく高温空気燃焼の可燃限界の評価。

なることがわかる。また、高温空気燃焼の範囲も明らかに広がる。このことから、壁面への熱損失は、高温空気燃焼の可燃限界に強い影響を及ぼすことがわかる。

本研究では、予混合モデルの概念に基づき高温空気燃焼の可燃限界のモデル化を行った。予混合火炎モデルは、従来、浮き上がり火炎の吹き飛び限界を表現するモデルである。浮き上がり火炎の場合、火炎基部には予混合火炎が形成される。予混合モデルでは、予混合火炎の燃焼速度と流速が釣り合う場合に浮き上がり火炎が維持できると考える。

図8は、本研究で提案したモデルから得られた燃焼速度と流速の関係を示している。対象とした火炎は、 $T_w=923\text{K}$  の火炎である。流速は流れ関数を用いた解析解から評価し、燃焼速度は  $\text{CHEMKIN}$  を用いて計算した。燃焼速度の計算の際に、熱損失による温度低下を考慮した。図中の○は火炎が維持される条件における燃焼速度と流速の釣り合いを示している。×は火炎が吹き飛ばす、すなわち可燃限界における燃焼速度と流速の釣り合いを示している。×で表わされた条件では、○で表わされた条件より、燃焼速度は小さくなっており、定性的には、実験結果を再現できていると考えられる。ただし、定量的には、すべての条件において燃焼速度は燃料流速より高い値を示している。このことから、高温空気燃焼の可燃限界は、燃焼速度と燃料流速の釣り合いのみでは、説明できないことがわかる。高温空気燃焼を浮き上がり火炎と考えた場合、着火による火炎維持が考えられる。本研究で対象とした高温空気燃焼においても、着火による火炎維持が有力な火炎維持機構である可能性がある。

### (3) 炉内の流動特性の解明

本研究では、炉内燃焼場における希釈効果を明らかにするために、図4に示す急拡大流路内の反応性流体のラージエディシミュレーションを行った。また、比較のために、壁面の存在しない自由噴流における計算も併せて行った。図9に、計算結果を示す。図

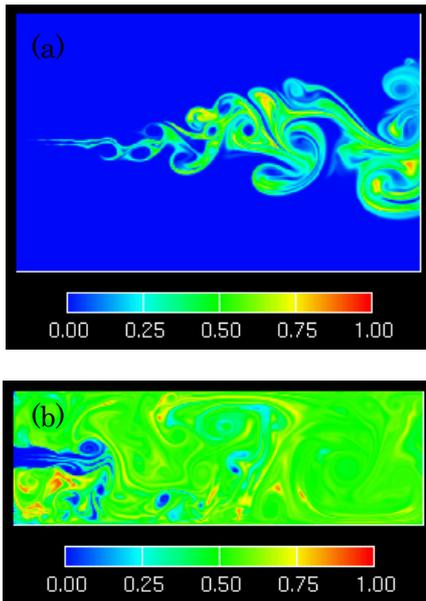


図 9 反応物の質量分率分布 ((a)自由噴流, (b)急拡大流路内噴流).

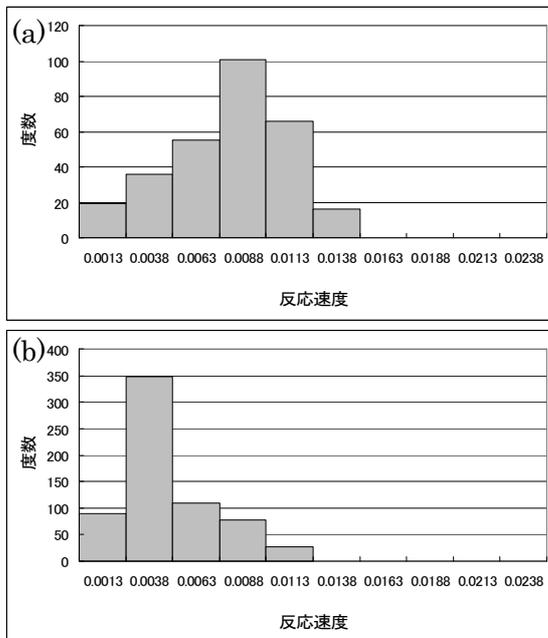


図 10 反応面における反応速度のヒストグラム ((a)自由噴流, (b)急拡大流路内噴流).

9 は自由噴流および急拡大流路における反応生成物の分布を示している。図 9(a)は自由噴流の場合、図 9(b)は流路内の結果を示している。流路内には、循環流が存在するために、下流で生成された生成物が上流側に輸送される。このため、炉内には生成物が充満している。

反応速度がピークを示す位置を反応面と考え、反応面における希釈効果について検討を行った。図 10 は反応面における反応速度のヒストグラムを示している。循環流の存在しない自由噴流の場合(図 10(a))と比較して、

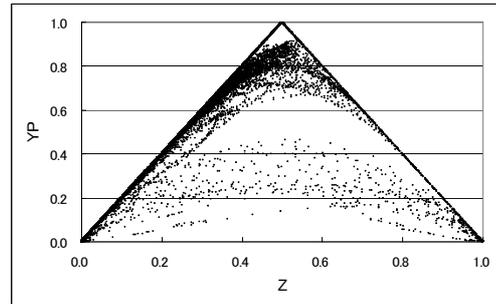


図 11 混合分率と生成物濃度の関係。

急拡大流路内の反応速度(図 10(b))は、比較的低い値を示していることがわかる。これは、燃料と酸化剤は共に炉内ガスによる希釈効果を受けるため、濃度が低下し反応速度が低下していることに起因する。

燃焼の数値計算で多く用いられるフレームレットモデルは反応速度無限大を仮定し、平衡状態における火炎の温度と化学種濃度を用いる。このため、希釈効果は再現できない。図 11 は急拡大流路の条件における、混合分率  $Z$  と生成物濃度  $Y_p$  の関係を示している。フレームレットモデルでは、常に図中の実線で表わされる平衡状態の濃度が参照される。一方、希釈効果が考慮された本計算では、フレームレットモデルによる予測結果より低い生成物濃度を示す。これは、希釈効果により反応速度が低下したことに起因する。このように、炉内ガスによる希釈効果は、炉内燃焼特性に強い影響を与える。

## 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 1 件)

①名田讓, 善万泰朋, 野田進, 高温空気燃焼の  $\text{NO}_x$  排出特性に対するノズル間隔の影響, 日本機械学会論文集 B 編, 75 巻, 第 757 号 (2009), pp. 1870-1878. 査読有り

[学会発表] (計 2 件)

①名田讓, 平岩大宙, 安藤庄平, 伊藤高啓, 野田進, 高温空気燃焼の可燃限界の解明, 日本機械学会東海支部第 59 期総会講演会講演論文集, pp. 125-126.

②善万泰朋, 名田讓, 野田進, 高温空気燃焼における燃焼特性の検討, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, Vol. 3, pp. 355-356.

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.tut.ac.jp/~noda/lab/Lab.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

名田 讓 (NADA YUZURU)

豊橋技術科学大学・工学部・助教

研究者番号：50383485