

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03981

研究課題名（和文）平行噴流噴霧バーナー上に形成される希釈火炎のNOx排出量スケーリング則の導出

研究課題名（英文）Scaling law of NOx emissions from diluted flames on parallel jet spray burners

研究代表者

名田 譲（NADA, Yuzuru）

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部（理工学域）・准教授

研究者番号：50383485

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大型加熱炉に多く用いられる平行噴流バーナーの構造が窒素酸化物（NOx）排出量に与える影響を明らかにし、その予測モデルを提案することを目的としている。燃料には液体燃料である灯油およびデカンを用いた。予熱温度が高い場合、ノズル間隔を広げると希釈効果によりNOx排出量は低下する。一方で、予熱温度が低い場合では、希釈効果が弱いため液体燃料の蒸発促進効果が優位となり、NOx排出量は増加する。これらの挙動を予測可能な、火炎体積と最高温度を用いた予測モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた知見を用いることで、液体燃料と平行噴流バーナーを用いた燃焼炉の設計が容易となり、窒素酸化物などの大気汚染物質の削減に寄与できる。また、液体燃料として植物油を用いることで、本燃焼はカーボンニュートラルとなり、地球温暖化の原因となる二酸化炭素の排出量削減にも貢献できる。基本的に平行噴流バーナーは廃熱回収技術と組み合わせ使用されるため、植物油を用いる際のコスト削減も可能であり、その普及促進にも繋がる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to model the amount of nitrogen oxide (NOx) emission from combustion furnaces incorporating parallel jet burner, which is frequently used in large heating furnaces, and to investigate the effects of the burner structure on the emission. During our study, liquid oils including kerosene and decane were used as fuel for our experimental furnace. Under conditions of higher preheating temperature in the oxidizer, the dilution effect by a large distance between fuel and oxidizer nozzles reduced the NOx emission. On the other hand, NOx emission increased when the preheating temperature was lower because the effect of fuel evaporation was superior to the dilution effect. Our model based on the flame volume and maximum temperature successfully predicted the NOx emission.

研究分野：燃焼工学

キーワード：希釈燃焼 平行噴流バーナー 窒素酸化物 スケーリング則 総括反応機構

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、環境負荷低減を目的として平行噴流バーナーが多く用いられている。平行噴流バーナーでは、離れた二つのノズルから、燃料と酸化剤(空気)が供給される。燃料と酸化剤が混合するまでの領域では、燃料および酸化剤は既燃ガスの主成分である  $\text{CO}_2$  と  $\text{H}_2\text{O}$  により希釈される。この結果、反応物(燃料および  $\text{O}_2$ )の濃度は低下する。希釈された反応物は、ノズルから離れた地点で混合し、その後、火炎が形成される。その際、反応物の濃度は低下しているため、燃焼は緩慢となり、火炎温度は低下する。この結果、窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )排出量は低減される。

気体燃料を用いた場合、燃料ノズルと酸化剤ノズルの間隔を広くすると、希釈された反応物が混合するまでの距離が長くなるため、希釈効果が促進され  $\text{NO}_x$  排出量は低減する[1][2]。名田ら[2]は、希釈された火炎の温度と滞留時間からなる  $\text{NO}_x$  反応速度を用いて、平行噴流バーナーを用いたガス燃焼炉から排出される  $\text{NO}_x$  排出量をスケールリングし、良い相関を得た。一方で、液体燃料を用いた場合の  $\text{NO}_x$  排出特性が、気体燃料とは異なる傾向を示すことが明らかにされている[3]。すなわち、予熱温度が低い場合、ノズル間隔が広がると  $\text{NO}_x$  排出量が増加する傾向を示す。これは、従来のノズル間隔拡大による  $\text{NO}_x$  抑制方法が機能しないことを示している。このため、液体燃料を用いた場合の  $\text{NO}_x$  排出量増大メカニズムを解明し、排出量予測方法の確立が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、液体燃料を用いた場合において、ノズル間隔の拡大により  $\text{NO}_x$  排出量が増加する原因を明らかにする。さらに、 $\text{NO}_x$  排出量に關与するパラメータを抽出することで、新たなスケールリング則を提案する。この際、ノズル間隔と酸化剤予熱温度を変更した場合の、火炎体積、流速分布、および液滴到達距離の変化に着目し、スケールリングを行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 燃焼炉を用いた実験的研究

図1に本研究で用いる小型燃焼炉の概略図を示す。燃焼炉は高さ1000 mmであり、一辺200 mmの矩形断面を有する。燃焼炉の壁面と底面には、断熱材を取り付けている。底面には燃料ノズルと酸化剤ノズルからなる平行噴流バーナーが設置されている。燃料ノズルには噴孔径が1.6 mmの二流体噴霧ノズル(いけうち、BIMJ2004S303)を用い、圧搾空気によって燃料噴霧が炉内に噴射される。酸化剤ノズルの内径は8 mmである。酸化剤ノズルの直下には、排熱回収を模擬したヒーターが取り付けられており、酸化剤を1023 Kまで予熱することができる。燃料ノズルと酸化剤ノズルの間隔 $\Delta L$ は30 mm、75 mmおよび120 mmとした。燃料と酸化剤には、それぞれデカンまたは灯油と空気をを用いる。燃料流量は5 g/minであり、総括当量比 $\phi = 0.79$ に相当する。圧搾空気の流量は10.6  $\text{NL}/\text{min}$ であり、圧搾空気単独での当量比は5.7である。また、燃焼炉出口と炉底部(高さ50 mm、図1参照)にサンプリングプローブと熱電対を設置し、温度、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$ 、および $\text{NO}_x$ 濃度を測定した。また、燃焼炉側壁から熱電対を挿入することにより、炉内の温度分布を測定した。

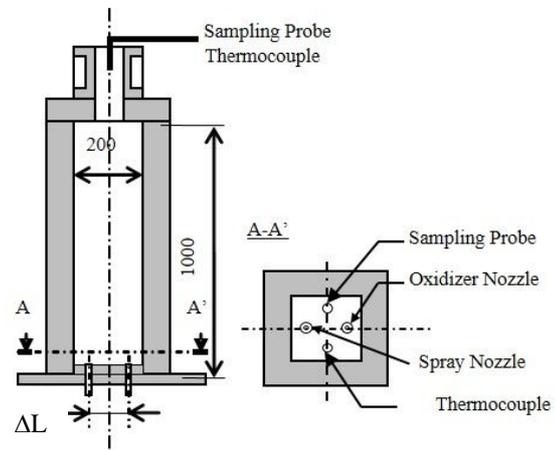


図1 燃焼炉模式図。

燃焼炉内の燃料液滴の挙動を明らかにするために、図1に示す燃焼炉の側壁に幅17 mmの観察窓を設置し、シャドウグラフ法にて炉内の液滴を可視化した。カメラ、噴霧、集光レンズおよびナノ秒スパーク光源を直線上に配置し、光源から30 nsの間発光される白色光を集光レンズによって平行光としたのち、噴霧に照射してカメラレンズを通過させた。シャドウグラフ法により得られた噴霧写真は輝度勾配に基づき画像処理され、液滴個数および液滴直径を算出した[4]。

#### (2) 数値シミュレーションによる炉内流動現象の解明

燃焼炉内の流動現象と  $\text{NO}_x$  排出量の関係を明らかにするために、RANSに基づく数値シミュレーションを行った。燃焼現象のシミュレーションには、高精度かつ低計算負荷の反応機構が必要となる。そこで、ゼロ次元の反応動力学計算を行い、4段総括反応機構を開発した。計算にはCHMKIN II PSRコードを用い、反応機構には詳細化学反応機構であるAachen surrogate [5]とメタンからヘプタン燃焼までに対応するJones and Lindstedt [6]の4段総括化学反応機構を用いた。燃料はAachen surrogate [5]を参考に  $\text{C}_{10}\text{H}_{20}$  とした。この際、 $\text{C}_{10}\text{H}_{20}$ の比熱と標準生成エンタルピーをAachen surrogateと等しく設定した。さらに、構築された反応機構と汎用流体解析ソフトウェアであるFluentを用いて図1に示す燃焼炉内の数値シミュレーションを行った。基礎方程式には、レイノルズ平均された運動量、化学種およびエネルギーの輸送方程式を用いた。乱流モデルは標準  $k-\epsilon$  モデルであり、化学種の輸送方程式に現れる乱流シュミット数および乱流プラントル数はそれぞれ0.4とした。輻射モデルにはDOモデルを使用しており、灰色輻射の仮定の下、

屈折率は1とし、散乱係数はゼロとした。乱流燃焼モデルには、化学反応の時間スケールが乱流運動により決定される EDC モデルを使用した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 燃焼実験による NO<sub>x</sub> スケーリング則の導出

図2はデカンおよび灯油を燃料とした場合のノズル間隔に対する EINO<sub>x</sub> の変化を示している。予熱温度  $T_a = 1023$  K の場合、ノズル間隔の増加に伴い EINO<sub>x</sub> は低下する傾向を示す。この傾向は、以前の研究[1][2]と同様である。一方、 $T_a = 423$  K の場合、灯油では増加する傾向を示す。デカンでは EINO<sub>x</sub> は増加し、その後減少する。ただし、減少後の  $\Delta L = 120$  mm の EINO<sub>x</sub> は  $\Delta L = 30$  mm より高い値となる。

この現象を説明するために、滞留時間と火炎温度を用いたスケーリングを行った。滞留時間  $\tau$  は火炎体積  $V_f$  を燃料流量で除した値である。火炎体積には測定された温度分布から求めた火炎の断面積を  $3/2$  乗した値を用いた。図3は  $T_a = 1023$  K における火炎体積とノズル間隔の関係を示している。火炎体積はノズル間隔の拡大に伴い、増加する傾向を示す。そこで、火炎体積はノズル間隔の3乗に比例すると仮定した。これにより、滞留時間はノズル間隔の関数となる。

図4はスケーリングの結果を示している。横軸は火炎温度の逆数とし、火炎温度には温度測定結果から得られた炉内最高温度  $T_{max}$  を用いた。また、縦軸は EINO<sub>x</sub> の生成速度 (= EINO<sub>x</sub> /  $\tau$ ) の自然対数である。EINO<sub>x</sub> の生成速度の対数値は火炎温度の逆数と線形関係にあり、その傾きはゼルドビッチ機構の活性化温度とほぼ一致する。このことから、図2に示す EINO<sub>x</sub> の変化はゼルドビッチ機構により生成されるサーマル NO<sub>x</sub> の変化を表していると言える。火炎温度  $T_{max}$  とノズル間隔  $\Delta L$  の関係は酸化剤予熱温度  $T_a$  により異なる。 $T_a = 1023$  K の場合、ノズル間隔の拡大により火炎温度は低下する。一方、 $T_a = 423$  K の場合、火炎温度は上昇する。この結果、図2に示すように、 $T_a = 423$  K の場合、EINO<sub>x</sub> は上昇すると考えられる。

上記火炎温度の挙動の原因を明らかにするために、燃焼炉内の液滴挙動を調査した。図5は噴霧ノズル近傍で撮影された液滴の可視化写真である。左の非燃焼場における噴霧写真において、噴霧ノズルから大量の燃料液滴が噴射されていることがわかる。これに対して、燃焼場における右の4枚の写真には、少数の液滴のみが撮影された。これは、高温の炉内において燃料液滴は噴射後速やかに蒸発することを示している。図6は画像処理から検知された液滴の個数とその直

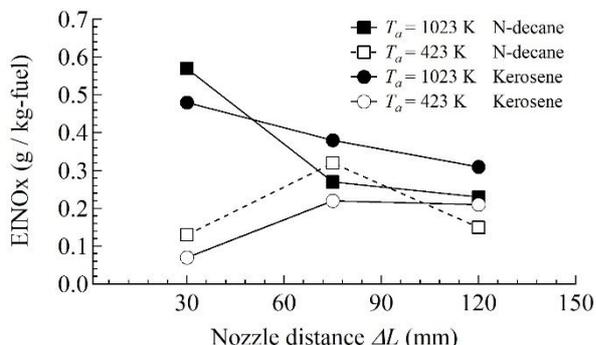


図2 EINO<sub>x</sub> に対するノズル間隔の影響。

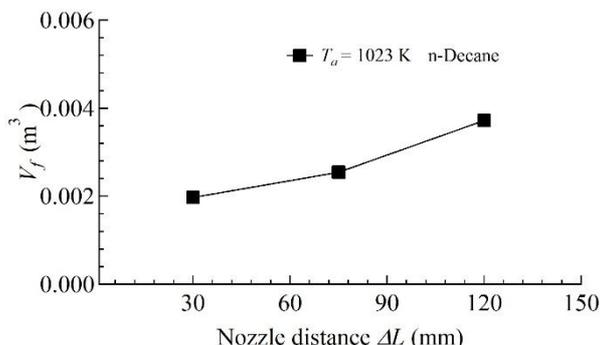


図3 火炎体積とノズル間隔の関係。

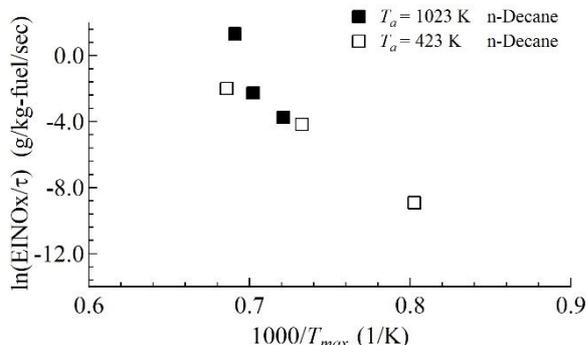


図4 NO<sub>x</sub> 排出量のスケーリング結果。

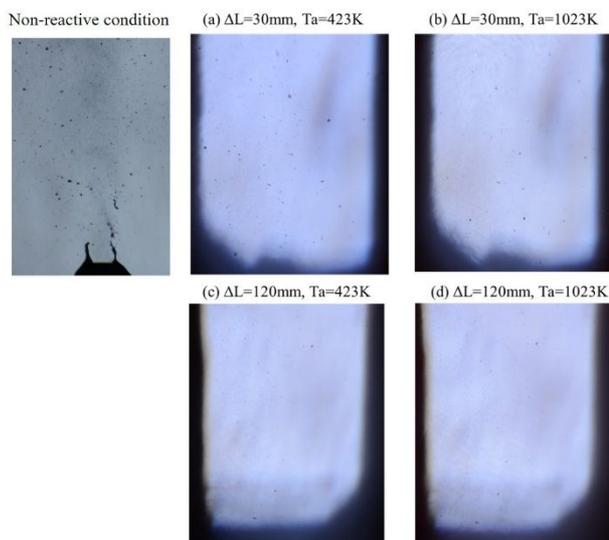


図5 非燃焼場および炉内における燃料液滴のシャドウグラフ写真。

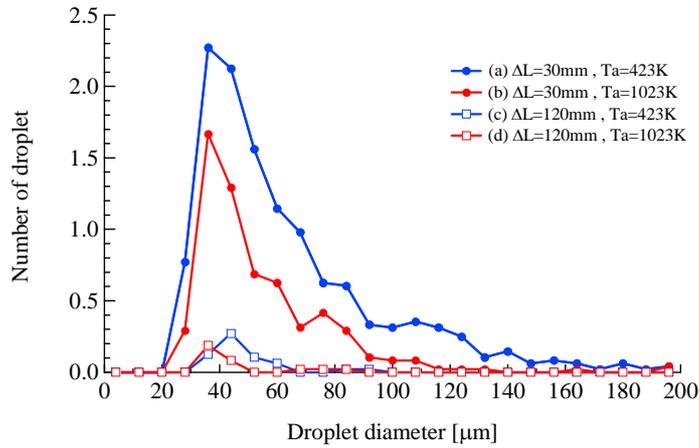


図 6 各直径における燃料液滴の個数分布 .

径を示している . 個数は写真で撮影された範囲で検知された液滴の平均個数である .  $\Delta L = 30$  mm の場合 , 予熱温度が上昇すると液滴の個数は減少する . これは , 予熱温度上昇に伴う液滴蒸発の促進による . また , ノズル間隔を広げると , 予熱温度によらず液滴数は大幅に減少した . これは , ノズル間隔が広い場合 , 燃料噴霧と高温既燃ガスの接触面積が広がるため , 液滴蒸発が促進されたと考えられる . この結果は , ノズル間隔拡大により燃料蒸気の濃度が高くなることを示しており , 図 2 に示す  $T_a = 423$  K における  $EINO_x$  の増加は , この液滴蒸発の促進が一因であると考えられる .

(2) 数値シミュレーションに用いる総括反応機構の開発

図 6 にノズル間隔の拡大は液滴蒸発の促進効果を有することを示したが , この効果は予熱温度によらず現れる . このため , 図 2 に示す予熱温度による  $EINO_x$  の挙動の違いには更なる要因が関連していると考えられる . そこで , RANS に基づく数値シミュレーション結果から , 炉内流動について検討した . 本研究では , シミュレーションを行うために , 灯油の 4 段総括反応機構を作成した . 反応機構は Jones and Lindstedt [6] の反応機構を基にし , 頻度係数と活性化温度を調整した . 図 7 に合わせこみの結果の一例を示す . 横軸は PSR 内にガスが滞留する滞留時間を , 縦軸は PSR 内のガス温度を示している . 図中 AS は Aachen surrogate を用いた場合の結果  $E_1=1.2E_{1,0}$  と  $E_1=1.2E_{1,0}$  ,  $A_3=0.3A_{3,0}$  は総括反応機構の結果である . 活性化エネルギーと頻度係数を調整した結果 , Aachen Surrogate の結果と良く一致することがわかる . 以降 , RANS に基づく数値シミュレーションには , この調整された総括反応機構を用いる .

(3) 数値シミュレーションによる炉内流動現象の解明

本研究で行ったシミュレーション結果と燃焼実験にて熱電対により測定された温度分布を比較した結果 , おおむね良い一致を得られた . さらに , ノズル間隔の拡大に伴い  $T_a = 423$  K の場合 , 炉内最高温度は上昇し ,  $T_a = 1023$  K の場合低下する傾向が得られた . この傾向は実験結果と一致し , この最高温度の変化により  $EINO_x$  は変化すると考えられる . ただし ,  $T_a = 1023$  K ,  $\Delta L = 120$  mm の結果のみ , 数値シミュレーションは最高温度を過大に予測した . この条件の場合 ,

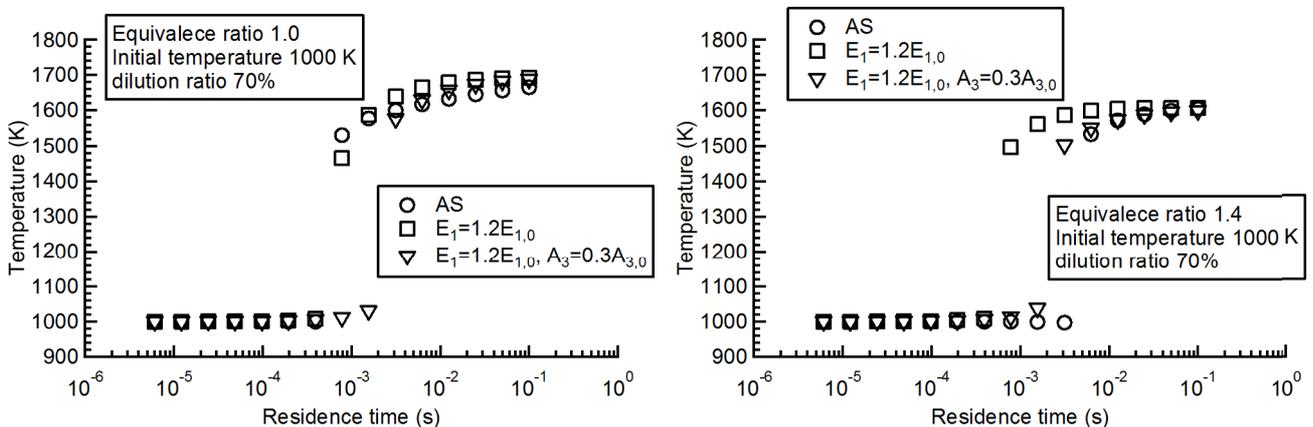


図 7 4 段総括化学反応機構を用いた場合の PSR 内のガス温度 . 左 : 当量比 1.0 , 右 : 当量比 1.4 .

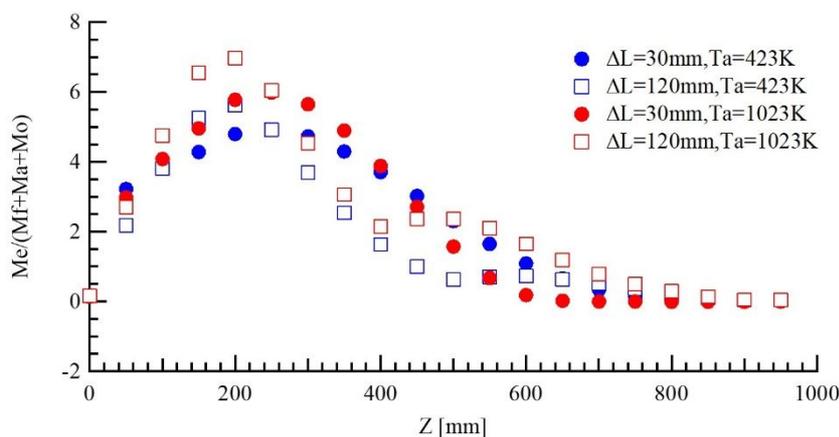


図 8 燃料噴霧および酸化剤噴流に巻き込まれた既燃ガスの質量流量。

噴霧ノズル直上にて火炎は一度消炎し、その後再着火する。4 段の総括反応機構ではこのような消炎・再着火現象までは再現できないため、温度を過大に予測したと考えられる。

図 8 にシミュレーションから得られた、燃料および酸化剤に巻き込まれる既燃ガスの質量流量を示す。縦軸は燃料噴霧と酸化剤噴流に巻き込まれたガスの質量を示しており、ゼロの場合は巻き込み無し、2 の場合は 2 倍の質量の既燃ガスが巻き込まれたことを表す。予熱温度の低い  $T_a = 423\text{ K}$  の場合、 $T_a = 1023\text{ K}$  の場合と比較して、巻き込まれた既燃ガスの質量は低いことがわかる。これは、 $T_a = 423\text{ K}$  の場合、ノズル間隔を広げた場合の希釈効果が弱いことを示している。図 6 に示したように、ノズル間隔を広げた場合、燃料の蒸発は促進される。一方、図 8 に示したように、希釈効果は  $T_a = 1023\text{ K}$  と比べて弱い。この結果、 $T_a = 423\text{ K}$  の場合、燃料蒸発の促進効果が希釈効果に勝り、火炎の最高温度が上昇し、 $\text{EINO}_x$  は増加する傾向を示したと考えられる。

#### (4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

平行噴流バーナー上に形成される火炎はいわゆる MILD combustion [7] となり、この火炎構造についてオーストラリア、アメリカ、ヨーロッパを中心に研究が行われている [7][8]。一方で、液体燃料を用いた場合のバーナー構造の影響に関する研究は国内外において行われておらず、独自の視点と言える。

#### (5) 今後の展望

さらなる低環境負荷燃焼技術を確認するために、燃料として植物油を用いた場合の燃焼方法を検討する予定である。この際の課題は燃焼効率の向上と安定燃焼限界の拡大となるであろう。植物油の蒸発速度は遅いため、炉内での完全燃焼が灯油などの石油由来の燃料と比べて困難となる。このため、燃焼効率は低下すると考えられる。さらに、正味の燃料消費速度が低下するため、その火炎の安定燃焼範囲は狭くなる。予熱された高温酸化剤の利用方法を検討することにより、これらの課題を解決する予定である。

#### < 引用文献 >

- [1] Tsuji, H., et al., High Temperature Air Combustion: from Energy Conservation to Pollution Reduction (2002), CRC Press.
- [2] 名田ら, 日本機械学会論文集 B 編, 75 巻, 第 757 号(2009), pp. 1870-1878.
- [3] Nada Y., et al., Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 10, No.1 (2015), JTST0007.
- [4] Aizam Shahroni, M.A., et al., Energy, 167 (2019), pp. 35-46.
- [5] Jones, W.P. and Lindstedt, R.P., Combustion and Flame, 73: 233-249, 1988.
- [6] Honnet, S., et al., Proceedings of Combustion Institute., 32: 485-492, 2009.
- [7] Cavaliere, A. and de Joannon, M., Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30 (2004), pp.329-366.
- [8] Szegő, G. et al., Combustion and Flame, 156 (2009), pp. 429-438.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 萩野 峻, 北庄司 泰, 名田 譲, 木戸口 善行
2. 発表標題 高温空気噴霧燃焼における炉内燃料噴霧挙動とNOx排出特性の関係
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部第59期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 磯田 亮介, 名田 譲, 木戸口 善行
2. 発表標題 液体燃料を用いた高温空気噴霧燃焼の数値計算
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 磯田 亮介, 山崎 和志, 本庄 博人, 名田 譲, 木戸口 善行
2. 発表標題 灯油空気四段総括反応機構の改良による高温空気噴霧燃焼の数値計算の高精度化
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本庄 博人, 日浦 悠, 名田 譲, 木戸口 善行
2. 発表標題 平行噴流バーナーを用いた高温空気噴霧燃焼の数値計算
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------