

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420156

研究課題名(和文) 脈動噴流に衝突する希薄予混合火炎片の局所消炎とその回復機構の実験的解明

研究課題名(英文) Experimental study of local quenching and recovery mechanisms for lean premixed flamelet impinging with a pulsating jet

研究代表者

矢作 裕司 (Yahagi, Yuji)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：60265973

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：希薄乱流燃焼場では、乱れにより局所消炎が頻発し燃焼効率や排出物特性を悪化させる。本研究では、不規則に発生する局所消炎に二次元性、再現性を持たせるため、円板状の希薄予混合火炎に脈動噴流を衝突させ局所消炎を発生させる実験場を用い、その局所消炎の発生と回復機構について検討を行った。その結果、局所消炎の発生は伸張が誘因であること、回復には火炎端部に形成される渦が重要な役割を果たすことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In a lean turbulent combustion field, local quenching occurs and it will lead to reduce burning rate and will make worse exhaust gas characteristics. In the present study, a disk shaped premixed flame is formed and a pulsating jet impinges against premixed flame. Then local quenching occurs that has two dimensional and reproducible. Using this experimental field, extinction and recovery mechanisms of that local quenching have been studied experimentally. As the result, flame strain rate is the trigger of local quenching and the vortex that is formed at flame edge plays important role for recovering from local quenching.

研究分野：燃焼工学

キーワード：燃焼工学 予混合燃焼 局所消炎 乱流燃焼

1. 研究開始当初の背景

超高压噴霧燃焼のディーゼル機関や筒内直噴ガソリン機関などを代表とする近年の実用燃焼器のトレンドは、バルク的に超希薄となる非均質予混合燃焼である。部分負荷条件での運転がほとんどである。それらの機関では、さらなるエクセルギー損失を減らすために希薄化の推進が望まれている。強い乱れにより急な速度および温度勾配を受ける乱流燃焼場では、局所的に火炎片が消失し、その局所消失が燃焼の安定性と効率の低下さらには排出物特性を悪化させる原因となる。直感的には、乱流強度の増加は局所消失の頻度を増加させ、火炎安定性を低下させると考えられるが、近年の研究結果から局所消失が生じても直ちに全体の消失に発展する訳ではなく多くの場合はそこから回復することが報告されている。すなわち、乱れは局所消失を誘発する悪役のみではなく、そこから回復するための重要な役割を果たす可能性を持っている。局所消失現象の解明は主に2つの方法で実施されている。①実機あるいはそれと同様な高压容器内の3次元乱流燃焼場を対象に直接的に全体的な現象を解明する方法。実機に直接適応できる利点がある反面、空間的・時間的に非定常な現象をそのまま取り扱う複雑性のため微細な火炎構造の解明には不利な点もある。②DNS(直接数値計算)など用いた微細構造を明らかにする方法。微細構造の解明に成功しているが計算領域は限定されるなど利点と欠点がある。3次元かつ同時多発的に生じる複雑な局所消失現象を学術的な基盤研究として実験的に定量化するためには、2次元かつ再現性のある時空間微分型実験モデルを用いて実施することが必要とされている。

2. 研究の目的

希薄乱流予混合火炎では、乱れによる局所消失が同時多発的に生じ、最終的には全体的な消失に至る(negative point)。しかしながら、乱れは局所消失から回復を助ける役割を果たす可能性も秘めており、条件によっては乱流火炎が層流火炎より全体消失が生じにくくなる場合がある(positive point)。本研究では、平面状の火炎片に脈動噴流を衝突させた火炎片時空間微分型実験モデルを用いて局所消失

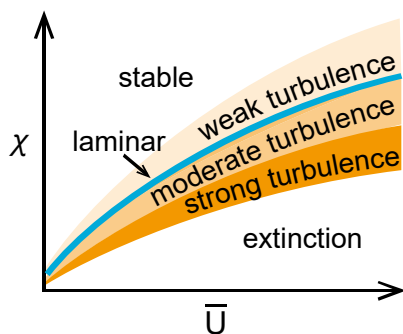


図1 消失限界

とその回復現象を実験的に再現し、それらの機構を火炎端伝播モデルと高温ガス輸送モデルの2つの仮定したモデルとその定量化から解明することにより、乱流燃焼の優位性を利用した希薄乱流燃焼の限界値を高める学術的基盤を構築することを最終目的とする。

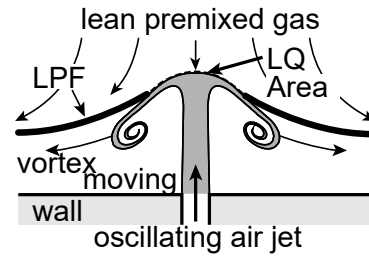


図2 実験モデル

(LPF: Lean Premixed Flame,  
LQ: Local Quenching)

3. 研究の方法

上述の問題を克服する実験モデルとして、申請者は倒立バーナーから噴出させた希薄予混合ガスを固体壁面に衝突させ平面状火炎を形成させ、その同軸上に対向設置した脈動噴流を衝突させることにより、火炎片を局所的に消失させる燃焼モデルを提案した。このモデルを用いればその定量化に成功すると着想した。この実験モデルの優位性は、次の3点である。①乱流強度に相当する脈動噴流速度を個別設定できる点。②乱れのスケールに相当する脈動周期を単一から合成まで可変可能な点。③3次元同時多発的に生じる現象を2次元で時間と場所を設定できる再現性の点である。

4. 研究成果

(1) 局所消失発生と全体消失発生境界

図3に脈動噴流強度( $u'$ )を変化させた際の局所消失(LQ)と全体消失(WE)が発生する当量比( $\phi$ )の変化を示す。予混合気の断面平均流速( $U_0$ )は、 $U_0=2.4\text{m/s}$ 、 $2.0\text{m/s}$ 、 $1.6\text{m/s}$ の3つの条件とした。図中のno local quenching(noLQ)領域では、局所消失の伴わない火炎が形成される。local quenching recovery(LQ)領域は、LQとそれからの回復が脈動噴流の周

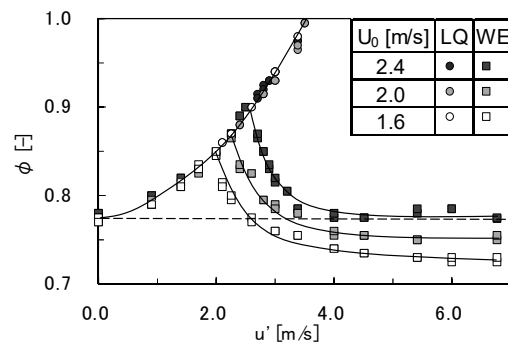


図3 局所消失と全体消失の発生境界

期と同期して現れる． whole flame extinction (WE) 領域では，火炎全体が消炎する． noLQ-WE 境界では，LQ が直ちに WE へと発展する． 主流流速の効果は，noLQ 領域の大きさに顕著に影響を及ぼしている． 例えば， $U_0$  が増加するに従い LQ 領域が減少する． 最も着目すべき点は，LQ-WE 境界の  $\phi$  が  $u'$  の増加に急激に減少し， $\bar{U}_0=1.6\text{m/s}$  および  $\bar{U}_0=2.0\text{m/s}$  の場合では，脈動がない平面火炎の消炎限界より  $\phi$  が低くなることである． さらに，その時の  $\phi$  の値は， $u'$  の増加に伴い一定値に漸近する傾向が見て取れることである．  $U_0$  を変化させることで，層流時よりも低い当量比で火炎を存在させることが可能であり燃焼限界が向上するといえる． 本実験器においては  $\bar{U}_0=2.0\text{m/s}$  以下で可能となる．

## (2) 局所消炎の発生と回復現象の可視化

図 4 に局所消炎(LQ)の発生と回復が行われている条件の高速デジタルビデオカメラで撮影した時系列トモグラフィ画像を示す． 中心部  $r=0\text{mm}$  における火炎面位置が最低位置となる瞬間を周期の始点  $t=0.0\text{ms}$  とする． 噴流の脈動周波数は  $f=20\text{Hz}$  に設定した． 従って，1 周期は  $50\text{ms}$  となる． 図 4(a) は予混合気のみアルミナ粒子を添加した際の画像であり，図 4(b) は噴流にのみシリコンオイル液滴を添加した際の画像である． 図 4(a) より予混合気中のアルミナ粒子は火炎帯での体積膨張により数密度が低下する． 従って，それに伴うミー散乱光強度の違いにより，未燃焼ガスと既燃焼ガスを判別した． 白く可視化される領域が予混合気(未燃焼ガス)，グレーに可視化される領域が燃焼ガスである． 噴流には，粒子等を添加していないために噴出する常温の空気は黒い像として可視化される． 図 4(b) の一連の画像は脈動噴流のみに添加されたシリコンオイル液滴群が可視化されている．

図 4(a-1) の平面状の火炎は脈動噴流によって押し上げられ， $t=3.0\text{ms}$  の(a-2)では中心部が湾曲する．  $t=6.0\text{ms}$  の(a-3)では，噴流が火炎面を貫通して未燃焼ガスに衝突している事が見て取れる． (a-3)，(a-4)では局所消炎領域が噴流の上昇に伴い拡大する． ここでは局所消炎端部に既燃焼ガスを巻き込むような渦が形成される． 図 4(a-5)ではアルミナ粒子が添加されていない空気を示す黒い筋が渦に巻き込まれている． この渦は，(a-6)および(a-7)に示すように成長する． 図 4(a-7)では渦の左側に未燃焼ガスと既燃焼ガスの間に噴流の空気を示す黒い領域が消滅している． そのことで火炎が存在し，(a-8)に示すように軸中心に向かい伝播しているように見て取れる． 最終的には，局所消炎した穴に向かいリング状の火炎端が伝播することによって火炎は局所消炎から回復する． この回復機構で重要なことは，(a-7)～(a-8)に示した火炎端が中心軸方向に伝播していくことである． また，脈動噴流の増大は局所消炎端に形成される渦の成長を促し，その渦による燃焼ガスの熱輸送など

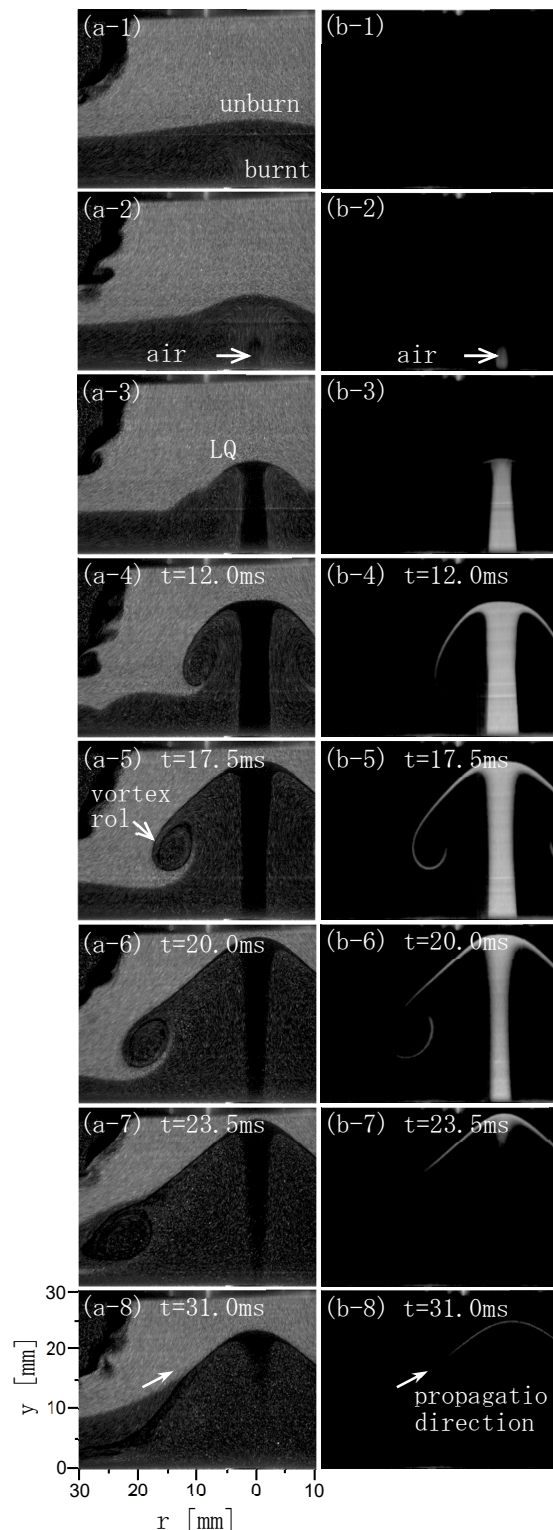


図 4 時系列トモグラフィ画像

が局所消炎した火炎端の伝播を助ける役割を果たすと考えられる．

図 4(b-1)～(b-5)において噴流が上昇するにつれ，その端部に渦が発達することが確認できる． 図 4(b-5)で白く可視化された薄層は，図 4(a-5)の未燃焼ガスと燃焼ガスを分割している黒く可視化された薄層に対応している． その薄層は，脈動流の空気であることからその界面は明らかに局所消炎しており低温流体であると判断できる． (a-5)から(a-7)へ進む



過程で、薄層は存在していることが確認できるが、(b-5)から(b-7)ではその一部が徐々に消失している。薄層は連続体であり、添加されたシリコンオイルの蒸発点は 300℃であることから、その部分は局所的に燃焼ガスにより加熱されていると判断できる。恐らく、この領域で未燃焼ガスが再着火あるいは火炎端部がその領域に伝播することにより回復過程が始まると考えられる。局所消炎から回復過程へと遷移する現象は、本研究の条件下では数 ms の現象であった。また、スイスロール状な反時計回りの渦が形成されることも局所消炎からの回復に重要である。

### (3) 渦周辺部の流れ構造

渦部の流れ場に関して、Particle Image Velocimetry (PIV) 計測結果から燃焼ガスの熱輸送過程を議論する。図 5(a)は  $t=19.0\text{ms}$  における二次元速度ベクトルを示す。検査部の全ての速度を得るために、ここではトレーサ粒子としてアルミナを用い、予混合気と脈動噴流の双方にそれらを添加した。図 5(b)は(a)と同一の PIV 計測結果から得られた流速の絶対値を色分布として示す。流速は白色で示される  $0\text{m/s}$  から、色が濃くなるに従い増加する。本図中には、トモグラフィ画像から判定した火炎面位置と空気噴流を示す。実線と矢印は、流線および速度ベクトルから求めた代表的な火炎背後の燃焼ガスの軌跡を示す。図 4(a)の速度ベクトルより、渦中心に向かい反時計回りの旋回流が形成されていることが見て取れる。図 5(b)からは、火炎面に対応する境界面で火炎背後における体積膨張による速度増加が明確に示されている。また、渦の中心部の対応する箇所では、速度がほぼ  $0\text{m/s}$  になっている。白の矢印で示した高温の燃焼ガスの軌跡は、渦中に巻き込まれるように流入し、その先端は図 4(b-5)～(b-7)で示したシリコンオイル液滴群が局所的に消失する箇所に向かって示している。以上のことから、残存している火炎背後の高温燃焼ガスが噴流による渦により未反応の予混合気に衝突するように輸送される。その位置が再反応に十分な温度まで上昇した時に、新たな火炎が形成され、局所消炎部全体に伝播することにより、火炎は局所消炎現象から回復する。

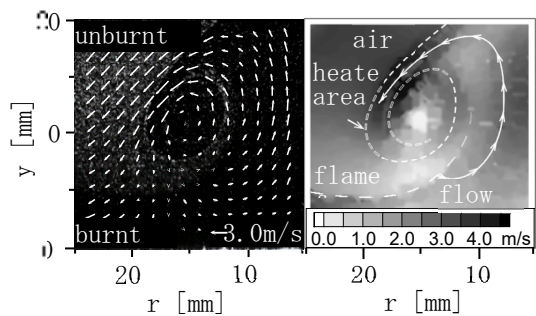


図 5 渦部周辺の流速分布  
(a) 流れ構造 (b) 速度分布と流線

### (4) 局所消炎回復モデル

現象の時系列的な流れ構造と温度分布の解析より、局所消炎の発生と回復モデルを立案した。図 6 にそのモデルを示す。この現象は高い再現性を持ち繰り返され、4 つの過程に分けることができる。

- ①: 噴流が上昇し、火炎が湾曲し始めたのち LQ するまでの過程。(図 6(1)～(3))
- ②: LQ が発生し噴流による渦が火炎を外方向に押し広げ、局所消炎部が拡大する過程。(図 6(3)～(6))
- ③: 局所消炎部が収縮し始め、火炎が回復するまでの過程。(図 6(7)～(8))
- ④: 火炎が LQ から回復し初期段階に戻るまでの過程。(図 6(8)～(1))

LQ の発生は火炎伸張率が決め手であり、LQ からの回復に対しては LQ の拡大が止まり LQ 領域が縮まる転換期の火炎を含む流れ構造が重要である。局所消炎が発達する過程で形成されるスイスロール状の渦が重要な役割を果たす。局所消炎部では、未燃焼ガスと燃焼ガスがその渦の薄層により分断されているが、残存している火炎片からの高温の燃焼ガスが局所消炎端部に形成された渦により輸送されることにより、その位置での未燃焼ガスを再反応させる。その後火炎端が消炎部全体に伝播することにより局所消炎現象から回復する

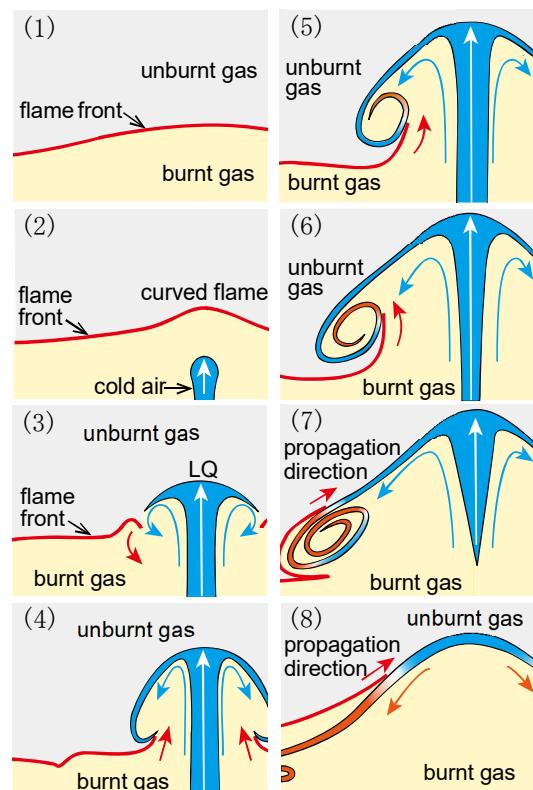


図 6 局所消炎発生回復モデル

- 5) 脈動燃料噴流が局所消炎に及ぼす影響  
①消炎限界

図2における脈動噴流を窒素希釈した燃料噴流とすることで希薄予混合拡散複合火炎を形成し、その場での脈動噴流強度( $u'$ )を変化させた際の局所消炎(LQ)と全体消炎(WE)が発生する当量比( $\phi$ )の変化を示す。黒色のプロットは図3と同様に予混合火炎単体の結果を示し、白色のプロットは脈動噴流に窒素希釈燃料流を使用した複合火炎の結果を示している。消炎の発生境界である noLQ-WE 境界および noLQ-LQ 境界は予混合火炎に比べ複合火炎の方が低い当量比を示している。このことから複合火炎を形成することで消炎の発生を抑制していることがわかる。次に局所消炎の回復限界である LQ-WE 境界に着目すると複合火炎の方が低い当量比を示しており、局所消炎の回復限界が向上していることがわかる。

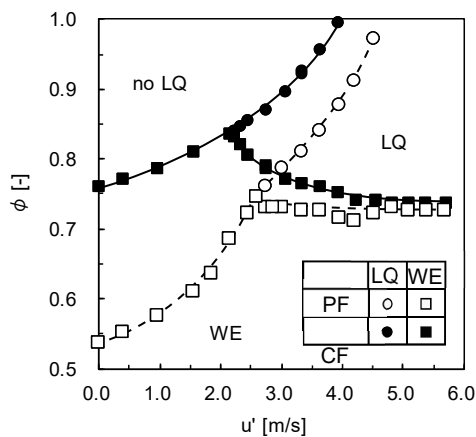


図7 燃料添加噴流を用いた際の消炎限界  
(PF:Premixed Flame, CF:Combined flames)

### ② 消炎の発生と全体火炎伸張率

予混合火炎に向け脈動噴流を衝突させた際、火炎中心部に曲率がかかりその部分の伸張率が一定値を超えた時に消炎は発生する。その時の伸張率は予混合気流速の速度勾配による伸張率( $dU/dy$ )と火炎面の曲率による伸張率( $2S_L/R_F$ )の和である全体火炎伸張率( $KT=dU/dy+2S_L/R_F$ )より求めた。ここで  $S_L$  は曲率が掛かっていない時の層流燃焼速度であり、 $R_F$  は局所消炎直前の中心軸上における火炎の曲率半径である。図8は図7で示した消炎限界における消炎の発生境界を全体火炎伸張率で整理しなおした結果である。グラフの縦軸は予混合火炎側当量比 $\phi$ を示し、横軸は全体火炎伸張率 $KT$ を示している。図中の黒プロットは予混合火炎単体を示し、白プロットは複合火炎を示している。また、丸プロットは予混合気平均断面流速  $U_0$  が 1.4m/s の条件であり、四角プロットは  $U_0$  が 2.0m/s の条件である。このグラフから、当量比の増加に伴い消炎発生時の全体火炎伸張率は線形に上昇し、予混合気流速によらず  $KT$  が一直線上に乗ることから、消炎の発生は全体火炎伸張率で整理

できると判断できる。また、予混合火炎単体と複合火炎で比較すると、同じ当量比でも複合火炎の方が高い  $KT$  でも消炎が発生しないことから、複合火炎が消炎の発生を抑制しているという前項の結果と対応した結果となっている。

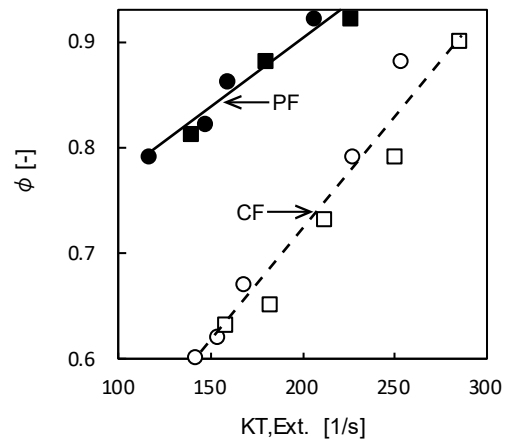


図8 消炎発生時の当量比と全体火炎伸張率

### ③ 局所消炎回復現象の比較

図9に上方の予混合気中にシリコンオイル液滴を添加し、下方の脈動噴流にはアルミナ粒子を添加したトモグラフィ画像を示す。シリコンオイルは約300℃で蒸発するため、シリコンオイル液滴が蒸発し可視化されなくなった面が火炎面であると判断できる。また、上方の予混合気と下方の脈動噴流が衝突している部分が局所消炎部となる。図(a)の複合火炎の条件と図(b)の予混合火炎単体の条件と比較すると、複合火炎の方が渦上部に形成されている火炎面が大きく局所消炎からの回復が早いことがわかる。このことから、図7で示した消炎限界において、予混合火炎単体と複合火炎で局所消炎の回復限界が異なった局所消炎回復の早さの違いによるものだと考えられる。

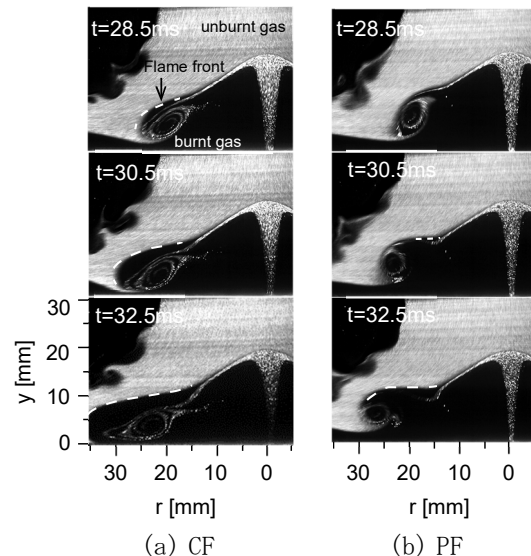


図9 局所消炎回復現象の比較  
( $\phi = 0.76$ ,  $U_0 = 2.0\text{m/s}$ ,  $u' = 3.0\text{m/s}$ )

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)

- ① Yahagi, Y., Fujikawa, Y., Kotake, N. and Makino, I., Visualization for local flame quenching recovery mechanism by vortex interaction, The proceedings of the 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, ID:140, 2015. 6. 15
- ② Yahagi, Y. and Makino, I., Local quenching phenomena of a lean premixed flat flame impinging with a pulsating air jet Journal of Physics Volume 530, 012013, 2014. 6. 16.

[学会発表] (計4件)

- ① 森永 友一郎, 矢作 裕司, オフセット対向流予混合火炎の背後の渦が消炎特性に及ぼす影響, 第54回燃焼シンポジウム講演論文集, A233, 2016. 11. 24.
- ② Yahagi, Y., Morinaga, Y., Hamaishi, K. and Makino, I., Flame structure of nozzles offsetting opposite flows, 7th EURO THERM, in Printing, 2016. 6. 20.
- ③ 高武伸宏, 藤川随守, 川波尊幸, 矢作裕司, 脈動噴流による希薄予混合火炎の消炎と回復に及ぼす燃料添加の影響, 第53回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 204-205, 2015. 11. 17.
- ④ 藤川随守, 高武伸宏, 矢作裕司, 局所消炎端部の渦による希薄予混合火炎の回復機構, 第53回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 208-209, 2015. 11. 17.
- ⑤ 濱石恭宥, 川波尊幸, 矢作裕司, 対向流複合火炎の伝播性に及ぼすノズルオフセットの影響, 第53回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 8-9, 2015. 11. 16.
- ⑥ 宮川恵輔, 牧野育代, 矢作裕司, 脈動流中に置かれた高温加熱円柱後流の渦構造, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2015 講演論文集, 2015. 10. 24.
- ⑦ Kotake, N., Fujikawa, Y., Yahagi, Y. and Makino, I., Quenching and recovering of a lean premixed disk shaped flame by a pulsating nitrogen diluted fuel jet, 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, #322, 2015. 8. 4.

- ⑧ 藤川随守, 高武伸宏, 矢作裕司, 脈動噴流が与える平面状希薄予混合火炎の燃焼限界特性, 第52回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 6-7, 2014. 12. 3.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢作 裕司 (YAHAGI, Yuji)  
芝浦工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 60265973