

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420143

研究課題名(和文)二つの超音波効果の融合による広範囲混合促進で実現する超希薄燃焼の安定機構解明

研究課題名(英文)Elucidation of the stabilization mechanism of ultra lean combustion by promoting mixing in wide range using fusion of two of ultrasonic wave effect

研究代表者

廣田 光智 (HIROTA, Mitsutomo)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50333860

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)：2系統の同じ周波数で得られる超音波の効果を融合させて、噴流バーナで形成される火炎において通常は燃料濃度が薄く火が消えるという超希薄燃焼条件での安定かつ継続的燃焼を実現することを目的とする。これまでの研究では、1系統の超音波燃焼制御システムでは燃料と空気の混合範囲がより大きいサイズの火炎には十分でないことが示された。本研究では、2系統の超音波燃焼制御システムを同時にかつ最適に用いた。その結果、混合範囲が拡大し、スケールの大きな火炎においてもより希薄な混合気条件で燃焼を安定させることができた。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to burn stably and continuously in ultra lean combustion condition of the jet flame by promoting mixing in wide range using fusion of two of ultrasonic wave effect.

Our previous research showed that range of fuel-air mixing was not enough for bigger size of flame when the only one system of ultrasonic wave was used. In this study, the two systems of ultrasonic wave were used simultaneously and properly. As the result, the range of mixing was expanded, and the bigger size of lifted jet flame was stabilized in more lean mixture condition.

研究分野：燃焼工学

キーワード：熱工学 超音波 希薄燃焼

1. 研究開始当初の背景

2012年6月、経産省は、東日本大震災を契機に現行のエネルギー基本計画をゼロベースで見直す「エネルギーミックスの選択肢の原案について」を示し、その一つが「木質バイオマスの燃料利用」である。木質バイオマスから燃料を得るとき①に問題となるタールは、発生するメタンガスによる950~1000℃の燃焼炉で除去されるが、多量のエネルギーを消費する。近年の新技术②では、600℃付近でのタール熱分解達成が示された。ただしその触媒は耐熱性が低いため、均一に600℃を保つ技術が要求される。つまり、通常は火が消えるほど薄い燃料濃度である「希薄燃焼限界において、安定に継続的に燃焼」させる超希薄燃焼の実現が不可欠である。申請者は、圧力変動による混合促進と保炎効果で希薄燃焼限界においても燃焼を可能とする「超音波を利用した燃焼制御装置」を提案した(特開2008-281314)。現状では、燃焼器が大きくなると広範囲で超音波の効果が得られず、改善が必要である。

申請者はこれまでに、実燃焼器で多く用いられる火炎形態である、バーナリムに付着せず上方へ浮き上がったいわゆる噴流浮き上がり火炎の最上流端に着目し③④、燃料と酸化剤の混合促進と火炎の保炎を両立する非接触制御の必要性を示した。そこで超音波制御装置を製作し(次頁図1)、火炎の安定効果と周囲温度変化に対する対策を実証した。このとき、噴流断面を1mm程度の範囲で三角形に浸食する変形が混合促進につながり火炎を安定にする主要因であることを発見した。ただし、実燃焼器のような大きい噴流火炎ではこの効果が不十分である。もし、「(1)振幅を増幅させる最適なブースタとホーンにより燃料噴流の中心方向への変形を大きくし、(2)装置を2系統用いてずらして並べることで広い面積を変形すれば」、実燃焼器を想定した大きな火炎に本装置を適用できると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、2系統の同じ周波数で得られる超音波の効果を融合させて、希薄燃焼限界(通常は燃料濃度が薄く火が消える)条件での浮き上がり火炎の安定かつ継続的燃焼を目的とする。申請者のこれまでの成果を拡張して、1系統では限定されていた混合促進範囲を2系統並列で用いることで効果的に拡大し、スケールの大きなノズルに対応したシステムを構築、最適な超音波の照射位置を決定する。これにより、木質バイオマスのガス化炉で必要となる継続的な超希薄燃焼の実現を目指す。

具体的にはまず、(1)振幅を増幅させるためにインピーダンスマッチングを行って伝達ロス进行を減らし、(2)1系統の超音波効果による浮き上がり限界・再付着限界・吹き飛び限界などの噴流火炎の安定限界の変化を、火

炎が小さい場合と大きい場合のそれぞれの条件で測定した。これにより超音波効果の増幅と最適化を行った。また、(3)同じ高さで2系統の超音波装置の照射角度を変えて、噴流火炎の安定限界の変化を測定した。これにより2系統の超音波装置の最適な照射角度を調査した。さらに(4)レーザ計測により、超音波による未燃混合気の変形の様子を測定するとともに、超音波の音圧レベル分布を測定して、簡易なCFD結果とあわせて、本研究により効果が拡大した理由を考察した。

3. 研究の方法

図1に本研究で使用した超音波振動励起システムとバーナを示す。振動子にボルト締めランジュバン型振動子(Bolt-clamped Langevin-type Transducer “BLT” : 本多電子製, HEC-3020P2B)を用い、伝達部に単純段付ホーンを連結した。本研究では、超音波の効果をこれまで⁽¹⁰⁾よりも増幅させるため、振動子とホーン間の信号伝達ロスを減らす目的で、駆動電源(バイポーラ電源: 松定プレジジョン製, HJPZ-0.3p)とファンクションジェネレータ(NF Corporation 製, WF1974)の間にマッチングトランス(Impedance Matching Circuit)(本多電子製, 特注)を接続し、振動子の各電極間に20.4kHz付近の正弦波電圧を印加した。振動面から超音波振動が発生し、反射面でこれを反射させ定在波を形成した。本研究では振動面と反射面の距離は38mmとした。これらのシステムを2系統用意し、同じ高さで照射した。このとき照射角度を変更することでその効果が増幅する組み合わせを調査した。バーナは同軸二重円形ノズルバーナで、内径2mmあるいは内径10mmのメタン噴流と内径20mmの環状空気流を噴出させた。

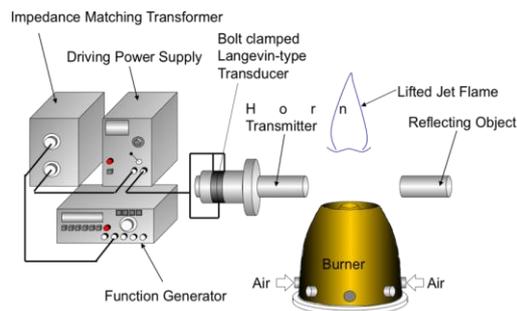


図1 実験装置の概略図

超音波振動子による音波の特性を調査するために、小型マイクロフォンを用いて音圧レベル分布を測定した。コンデンサマイクロフォン(RION製, UC-29, 直径1/4 inch, 20~100,000 Hz)により検知された音圧は電気信号に変換され、音圧レベル測定アンプ(RION製, NA-42)によって処理し、音圧レベルとして表示する。計測では、超音波進行方向に対し、マイクロフォンを垂直に向けた。そして、マイクロフォンを固定し、超音波装

置を左右に移動させることで、振動面と反射面の間に形成される音圧レベル分布を計測した。

また、超音波による未燃混合気の混合度合いを調査するために、図2のようにアセトン平面レーザ誘起蛍光法（アセトン PLIF 法）を用いて任意の高さでの燃料噴流の輪切り断面を測定した。これは燃料噴流にあらかじめアセトンを混入してレーザ光で励起し、その蛍光発光を画像として測定するものである。光源として Nd:YAG レーザ (Lotis TII 製, LS-2137; 10 Hz Pulse) を用いた。光源から第 4 高調波 (266 nm) を発振させ、凸面 UV レンズ (シグマ光機製, CLSQ-2030-1000P, $f=1000$ mm) を通過させる。レーザ光は凹面 UV レンズ (シグマ光機製, CLSQ-1020-15N, $f=-15$ mm) と凸面 UV レンズ (シグマ光機製, CLSQ-30100-150P, $f=150$ mm) を通過し、バーナ軸と垂直方向のシート状に形成させる。なお、レーザシート光の厚さは 0.5 mm 程度とした。レーザシート光によって励起されたアセトンの蛍光発光は、バンドパスフィルタ (ASAHI SPECTRA 製, DP) によって選択的に透過させ、CCD カメラ (浜松ホトニクス製, Model C8484-05C, 1024×1024) によって撮影した。このとき、蛍光発光の輝度は微弱であるため、イメージンテンスファイア (浜松ホトニクス製, Model M7971-51, MCP: 2 枚) を用いて発光輝度を増幅させた後、CCD カメラに入射させた。また、画像のピントや絞り値の調節は UV レンズ (浜松ホトニクス製, A4869, $f=50$ mm, F3.5) を用いて行った。レーザ発振、Q スイッチ、CCD カメラ、イメージンテンスファイアおよび画像取得用 PC の同期は、デジタルディレイ/パルスジェネレータ (Stanford Research Systems 製, DG535) で生成した信号によって行った。イメージンテンスファイアの制御はゲート I. I. コントローラ (浜松ホトニクス製, C7970-01) で行った。

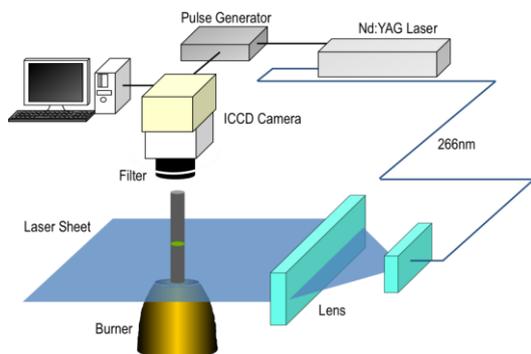


図2 アセトン PLIF 法用装置の概略図

4. 研究成果

(1) 超音波振動励起システムの振幅増幅のためのインピーダンスマッチングとその最適化

本研究の従来の結果では、超音波の効果は確かめられたものの、その強度が限定的で、

より大きい火炎には強度を上げる工夫が必要である。本研究では、マッチングトランス（インピーダンスマッチングサーキット）を接続することで振動子のインピーダンス整合を行った。装置の最適化のため、マイクロフォンによる音圧レベルの計測を行った。計測は、マイクロフォンの位置を振動面から 17 mm の位置に固定し、駆動電源の印加電圧を上昇させた。図3はその計測結果である。マッチングトランスを接続した場合（黒プロット）と、接続しない場合（白プロット）を比較したものである。横軸は印加電圧 Power supply [V_{in}] で、縦軸は音圧レベル SPL [dB] を示している。図より、マッチングトランスを接続した方が、どの印加電圧においても音圧レベルが高いことがわかった。またマッチングトランス接続の有無にかかわらず、印加電圧が 160V 付近で、音圧レベルが最大になることがわかった。これにより、以降はマッチングトランスを接続し、印加電圧を 160V に設定して実験を行った。

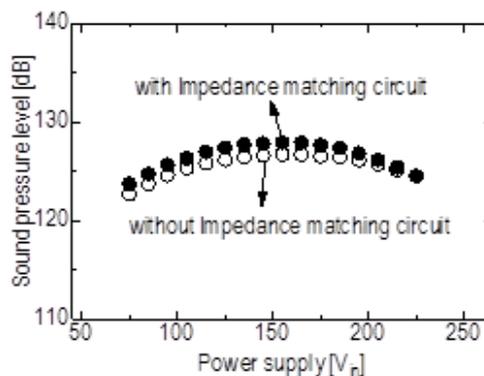


図3 印加電圧と音圧レベルの関係

(2) 超音波振動励起システム1系統での安定限界の変化

安定した浮き上がり火炎が形成される条件および超音波振動励起が燃焼特性に与える影響を調査するため、燃料噴流出口直径 2 mm, 10 mm の 2 ケースでの浮き上がり火炎の安定性を測定した。燃料出口流速 (中心流) を一定にし、空気出口流速 (周囲流) を増加あるいは減少させる。火炎がバーナリムから浮き上がり、あるいはリムへの再付着、あるいは吹き飛び時の空気流速を各安定限界値とした。

図4は燃料噴流出口直径 2 mm 時の安定限界であり、マッチングトランスを接続しない場合 (a) と、した場合 (b) を比較したものである。横軸は燃料流速 V_f [m/s] で、縦軸は火炎の浮き上がり (Flame Lifting), 再付着 (Reattachment), 吹き飛び (Blow Off) が発生した空気流速 V_a [m/s] を示している。図より、振幅を増幅させた超音波を作用させた場合、再付着限界値 (Limit of Reattachment) が著しく低下したことがわかる。また (b) におい

て、 $V_f > 3$ (m/s)では空気流量 V_a が 0 (m/s)の状態になっても、火炎がバーナリムに付着しない。また、 $V_f < 2.5$ (m/s)のとき、吹き飛び限界値(Limit of Blow Off)が増加した従来の研究⁽¹⁰⁾では、 V_f が増加すると火炎を形成する噴流が乱流に遷移し、流れと垂直方向照射している超音波の効果は顕著に現れにくかったが、振幅を増加させることにより、噴出量の多い条件でも、超音波の効果を得られることがわかった。

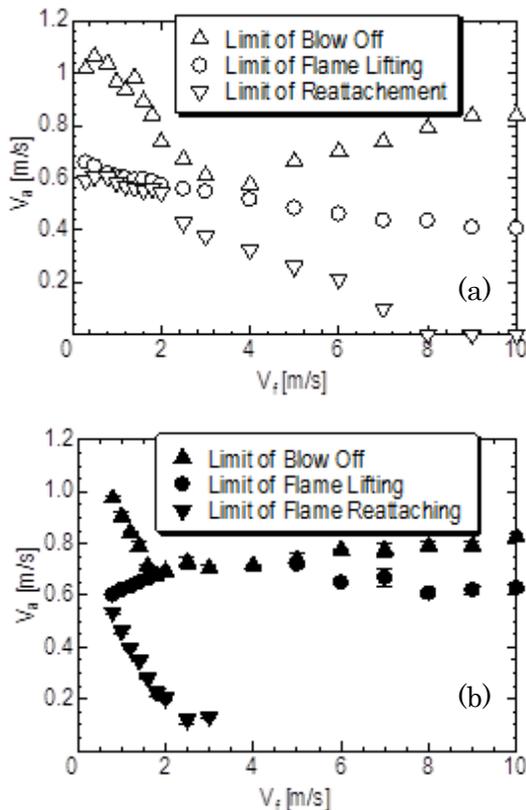


図4 直径 2mm のバーナを用いた場合の噴流火炎の安定限界, (a)マッチングトランスなし, (b)マッチングトランスあり

図5は、図4をもとに吹き上がり火炎として存在する範囲を示したものである。吹き飛び限界値(Limit of Blow Off)から再付着限界値(Limit of Reattachment)の差をとったもの ΔV_a [m/s] を縦軸とし、燃料流速 V_f [m/s] を横軸とした。白プロットはマッチングトランスを用いない場合、黒プロットは用いる場合の結果である。図より、吹き上がり火炎としての安定性は $V_f > 1.5$ (m/s)の領域においてより拡大した。このことから、噴出量がより多くなった条件でも、火炎が安定に存在した。

この装置を直径 10mm のバーナを用いた場合の噴流火炎にも適用して、その安定限界を測定した。図6は、図5と同様に直径 10mm のバーナで形成される火炎の安定限界をもとに吹き上がり火炎として存在する範囲を示したものである。吹き飛び限界値(Limit

of Blow Off)から再付着限界値(Limit of Reattachment)の差をとったもの ΔV_a [m/s] を縦軸とし、燃料流速 V_f [m/s] を横軸とした。白プロットはマッチングトランスを用いない場合、黒プロットは用いる場合の結果である。図より、 $V_f < 0.4$ m/sの領域において安定限界の拡大が見られた。また、燃料流速が小さい範囲では超音波の効果は期待できるが、大きくなるにつれて効果が弱くなることがわかった。

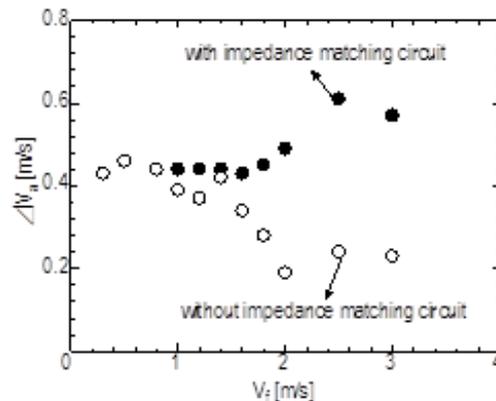


図5 直径 2mm のバーナを用いた場合の噴流吹き上がり火炎の存在範囲

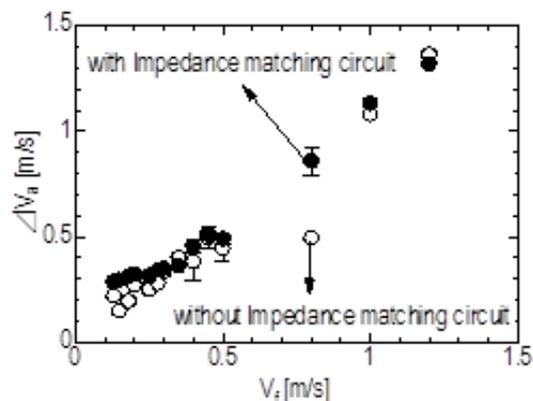


図6 直径 10mm のバーナを用いた場合の噴流吹き上がり火炎の存在範囲

(3) 超音波振動励起システム2系統の照射角度の違いによる安定限界の変化

前述のように、マッチングトランスを用いてインピーダンス整合を施したとしても、1系統の超音波による火炎の安定化は、小さい火炎では顕著な効果があるものの大きい火炎ではその効果が限定的である。そこで本研究では、同じシステムを2系統用いて適切に照射することで、その効果を増幅させることを行った。

図7は、2系統の超音波振動励起システムを同じ高さで照射した場合に測定した、直径 10mm のバーナ上に形成された噴流火炎の吹き飛び限界値(空気流速) V_a を示している。図中の○プロットは、2系統の超音波を用い火炎を挟んで 180 度対向させて照射したとき ($\theta=180^\circ$), ●プロットは2系統の超音波

を60度の角度で照射したとき ($\theta=60^\circ$), \square プロットは2系統の超音波を90度の角度で照射したとき ($\theta=90^\circ$), \blacksquare プロットは1系統の超音波を照射したとき, \triangle プロットは超音波を用いない通常のときの吹き飛び限界をそれぞれ示している. 図より, 特に $\theta=180^\circ$ の条件の時に吹き飛び限界値が改善されていることがわかった. この効果は, 図6で効果があまり得られなかった $V_f > 0.4$ m/s の領域でも優位さを確認できた.

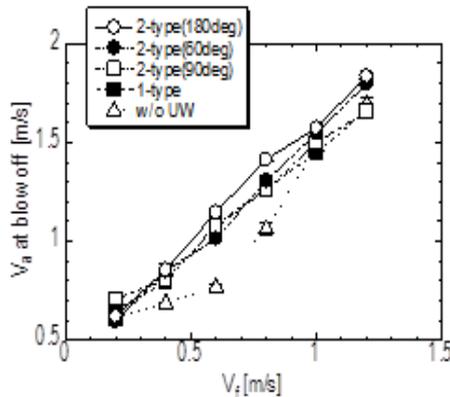


図7 2系統超音波振動励起システムを用いたときの噴流火炎の吹き飛び限界

(4) 超音波により噴流火炎の安定限界を改善できる理由

本研究では, 超音波によって変形された噴流断面をアセトン PLIF 法により測定し, 次のような定義で変形度合いを算出した. 図8は, LIF 法によって撮影した, 超音波を照射した場合のバーナ出口から 20mm 下流での未燃噴流断面の画像の例である. 図のように, 噴流断面が画像下方から押し曲げられたように変形している. この変形の度合いを評価するために, まず円形度を次のように定義し算出した. (円形度) = $4\pi \times (\text{断面積}) / (\text{断面の周囲長})^2$ である. このとき, 断面積は図中の点線で囲んだ面積, 周囲長は図中の点線の長さとした. 次に円形度1 (真円) からどれだけ変形したかを変形度として, (変形度) = $1 - (\text{各条件の円形度})$ と定義し, 算出した. 図中の矢印は超音波の照射方向を示す.

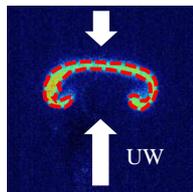
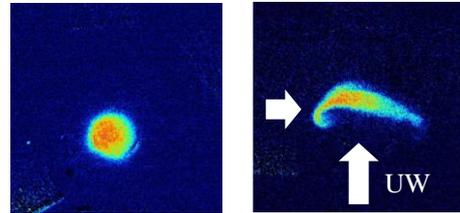


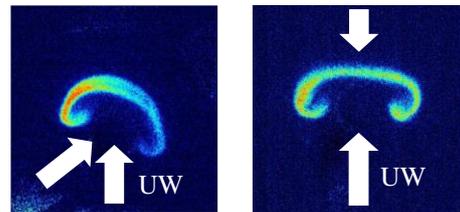
図8 アセトン PLIF 法による噴流断面の可視化

図9は, 各超音波の照射条件のときの PLIF 法によって撮影した未燃噴流断面の画像である. [A]は超音波を用いないとき, [B]は2

系統の超音波を90度の角度で照射したとき ($\theta=90^\circ$), [C]は2系統の超音波を60度の角度で照射したとき ($\theta=60^\circ$), [D]は2系統の超音波を用い火炎を挟んで180度対向させて照射したとき ($\theta=180^\circ$) の噴流断面である. 各条件での変形度は, [A]=0, [B]=0.65, [C]=0.72, [D]=0.79であった.



[A]超音波なし : 0 [B] 2系統 90° : 0.65



[C] 2系統 60° : 0.72 [D] 2系統 180° : 0.79

図9 超音波の照射方向の違いによる噴流断面の変形の様子

2系統の超音波振動励起システムによって火炎安定化の効果が増幅した理由を調査するために, 振動子間の音圧レベル分布を測定した. 図10は, 2系統の振動子を180度対向させて照射したとき ($\theta=180^\circ$) の, 振動子間の音圧レベル分布を黒プロットで示したものである. 比較のために1系統の振動子のみを使用した場合の測定結果を白プロットで示した. 図より, 2系統の振動システムを用いた方が, 定在波の腹側の音圧レベルが135dBで測定されているのに対し, 1系統の場合は振動子側から離れるにつれて音圧レベルが全体的に減衰していることがわかった. また, 定在波の節から腹にかけての音圧レベルの勾配が2系統の振動システムを用いた方が大きく, 音響放射力が強いことがわかった.

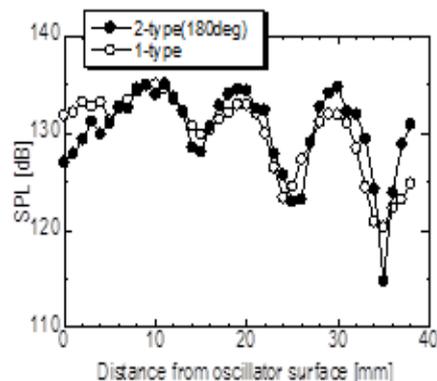


図10 振動子間の音圧レベル分布

超音波振動は噴流の混合を促進していると考えられる。本研究では汎用ソフトFluentを用いて噴流の空気流側に時系列速度変動を与えることで燃料流の空気流への混合の様子を確かめた。この結果、周波数が10Hzから50Hz, 100Hzと増加するほど、噴流の可燃範囲幅が広がる傾向を得た。本研究期間内ではより高周波の結果を得るまでには至らなかったが、高周波数ほど混合が促進することがわかった。

これらの結果から、(1)振幅を増幅させるためにはマッチングトランスによりインピーダンス整合を行って伝達ロスがなくすることで超音波効果を増加させることができ、(2)2系統の装置を180°対向させて照射させることでさらに超音波効果を増幅させられることがわかった。これにより、噴流断面が大きい場合でも燃料噴流を中心方向へ80%近く変形させることができ、噴流コアを短い距離で周囲空気と混合させることができた。従来の研究⑤から、この噴流断面の変形は、主流と周囲流の密度差がある領域に作用する音響放射力が強いことで起こることが予測された。この効果に追加して、流れの振動による混合促進効果も同時に得られることで、火炎の安定限界が大幅に改善させることができた。

<引用文献>

- ①小林真, 環境技術, 36-12, p.14, 2007,
- ②「バイオマスの低温流動層ガス化技術の開発」, NEDO2003 中間報告, JST2005
- ③M. Hirota, T. Yokomori, K. Yasuda, Y. Nagai, M. Mizomoto and G. Masuya, Proceedings of Combustion Institute 31, pp. 893-899, 2007,
- ④廣田光智, 溝本雅彦, 升谷五郎, 日本機械学会論文集 (B編), 70-691, pp. 789-795, 2004
- ⑤田辺光昭, 桑原卓雄, 藤森俊郎, 河野通方, 日本機械学会論文集 (B編), 69-688, pp. 2686-2691, 2003

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計6件)

- ①小山真琴, 廣田光智, 中村祐二, 齋藤務, 二方向からの超音波による浮き上がり火炎の安定化, 第53回燃焼シンポジウム, 2015年11月16日~18日, 筑波国際会議場, つくば市, 茨城県
- ②小山真琴, 三嶋晃輔, 廣田光智, 中村祐二, 齋藤務, 超音波の強さと浮き上がり火炎の安定性向上の関係, 第52回燃焼シンポジウム, 2014年12月3日~5日, 岡山コンベンションセンター, 岡山市, 岡山県
- ③Amirah Jamal, 鈴木雄太, 廣田光智, 中村祐二, 齋藤務, 加熱環境における超音波制御の最適化による燃焼限界の改善, 第51回燃焼シンポジウム, 2013年12月4日~6日, 大田区産業プラザPio, 大田区, 東京都

④鈴木雄太, Amirah Jamal, 廣田光智, 中村祐二, 齋藤務, 超音波の振幅増加による燃焼限界の改善, 第51回燃焼シンポジウム, 2013年12月4日~6日, 大田区産業プラザPio, 大田区, 東京都

⑤M. Hirota, T. Tsuji, Y. Nakamura, T. Saito, "Influence of Ultrasonic Waves on Lift-off Height Considering the Extended Premixed Flame Model", Seventh International Symposium on Scale Modeling, (2013, Aug. 6-9, Hirosaki University; Hirosaki, Aomori, JAPAN)

⑥M. Hirota, K. Seshadri, "Characteristics of nonpremixed dimethyl ether flame stabilized in a co-flowing configuration", The 8th US National Combustion Meeting, (2013, May 19-22, Canyons resort, Park City; USA)

[その他]

ホームページ等

・室蘭工業大学共同研究開発センター seeds 集

<http://www.muroran-it.ac.jp/crd/seeds/6/hirota.pdf>

・推進工学研究室 室蘭工業大学

<http://pelmit2015.wix.com/pelmit>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣田 光智 (HIROTA, Mitsutomo)
室蘭工業大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 50333860

(2) 連携研究者

中村 祐二 (NAKAMURA, Yuji)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 50303657