

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6月11日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760171

研究課題名（和文）異なる周波数の超音波効果融合による超希薄燃焼の安定機構解明と設定周波数の最適化

研究課題名（英文）The stable mechanism elucidation of a super-lean combustion by ultrasonic wave effect fusion of different frequency, and optimization of setting frequency

研究代表者

廣田 光智（HIROTA MITSUTOMO）

室蘭工業大学・工学研究科・講師

研究者番号：50333860

研究成果の概要（和文）：様々な気流温度の下で、希薄燃焼限界（炎が通常消えるほど低い燃料濃度）において安定にかつ連続的に燃やすために、2つの異なる周波数による超音波効果を、火炎に照射した。

この結果、制御装置を2系統同時に作用させると1系統では得られない火炎の安定限界拡大効果を得た。ただし、2つの音の干渉などの要因で超音波の効果が減衰しているため、音圧レベル（振動の振幅）を増幅させる工夫が必要であることがわかった。

研究成果の概要（英文）：In order to burn stably and continuously in a lean combustion limit (such low fuel concentration that a flame usually disappears) under various air current temperature, the ultrasonic wave effects by two different frequencies were utilized to the flame.

As a result, when two systems were applied simultaneously, the stability limit expands which is not obtained in one system. However, since the ultrasound effect was decreased by factors, such as interference of the sound of two systems, it is required that the sound pressure level (the amplitude of vibration) is increased.

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	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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，超音波，予混合燃焼，

1. 研究開始当初の背景

国家戦略プロジェクトに関わる「木質バイオマスの燃料利用」が抱える問題点である、タールの除去技術において、ニッケル系、鉄系触媒の利用が有望視されている。ただし、これらの触媒は耐熱性が低いため、ガス化炉において低温（600℃～1000℃付近）を維持する技術が必要である。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技術が必要である。

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。申請当初は燃焼場の温度変化により超音波の効果が変動する欠点により安定かつ継続的に燃焼できず、改善が

必要であった。

2. 研究の目的

二つの周波数の超音波効果の融合による、希薄燃焼限界（通常は燃料濃度が薄く火が消える）条件での安定かつ継続的燃焼を目的とする。この融合した超音波効果による火炎の安定機構を解明して単一超音波では得られなかった周囲温度変化に対応した幅広い有効条件を持つシステムを構築し、二つの設定周波数の最適値を決定する。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。

3. 研究の方法

2年間の研究期間中、1年目は2系統の超音波燃焼制御装置の構築を行っ

った。また、1系統の装置を使用したことによる火炎の安定限界，アセトンOH同時PLIFを用いた希薄燃焼の火炎構造の測定を行った。2年目は，周囲温度を変化させて，2系統の超音波燃焼制御装置の同時稼働による有効範囲拡大の測定と定在波音圧分布の測定の比較結果から，照射位置，照射条件の最適化および問題点の抽出を行った。これらの実験結果を下記の順に考察した。

- (1) 超音波燃焼制御装置を使用しない場合，気流を加熱したことによる火炎への影響
- (2) 常温で最適化された周波数の超音波効果1系統の，気流加熱された火炎への影響
- (3) 加熱条件での最適な周波数に近づけた超音波効果1系統の，気流加熱された火炎への影響
- (4) 反射面位置の変化による超音波効果1系統の，気流加熱された火炎への影響
- (5) 超音波効果2系統の，気流加熱された火炎への影響と問題点

4. 研究成果

(1) 超音波燃焼制御装置を使用しない場合，気流を加熱したことによる火炎への影響
 まず超音波燃焼制御装置を使用せず気流を加熱した場合の，火炎の安定限界を測定した。図1は，常温(293K)および339Kまで気流を加熱した場合の吹き飛び限界 (blow-out limit)，浮き上がり限界 (lift-off limit)，再付着限界 (reattached limit) について示したものである。気流を加熱すると吹き飛び限界値は下がり，浮き上がり限界は上がり，再付着限界は $\rho_f v_f = 1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ を境に増加から減少に転じた。概ね加熱により安定に浮き上がる範囲が狭まっていることがわかる。

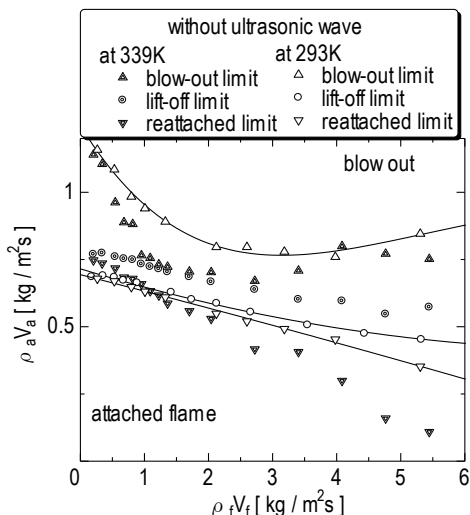


図1 超音波を使用しない場合の気流加熱による火炎安定限界の変化

(2) 常温で最適化された周波数の超音波効果1系統の，気流加熱された火炎への影響

次に常温 (293K) で使用する場合に最適化された周波数に超音波燃焼制御装置を設定し，この効果を1系統のみ使用して，気流加熱した火炎の安定限界を測定した。図2は，その結果を超音波を作用させない場合

の結果と比較したものである。図より，超音波を照射した場合， $\rho_f v_f < 2 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ において吹き飛び限界が若干拡大，再付着限界が若干減少している。超音波により安定な浮き上がり火炎が形成できる範囲が拡大している。ただし， $\rho_f v_f > 2 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ の場合，超音波により乱流に遷移するため，安定限界が低下する。

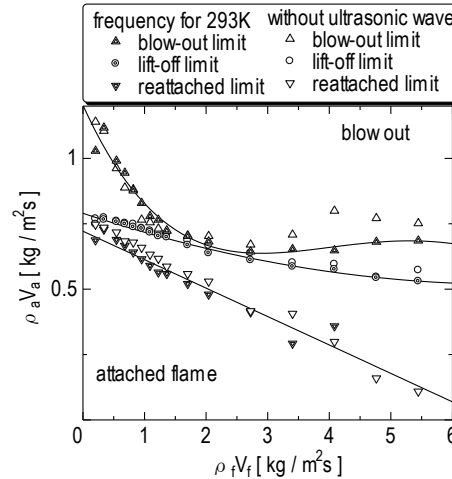


図2 常温で最適化された超音波効果を1系統作用させた場合の火炎の安定限界

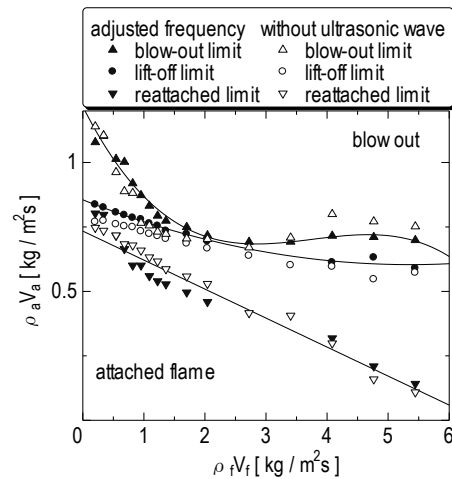


図3 周波数の調整を行った超音波効果を1系統作用させた場合の火炎の安定限界

(3) 加熱条件での最適な周波数に近づけた超音波効果1系統の，気流加熱された火炎への影響

上記の図2では，照射した超音波は常温 (293K) にて最適化されたもので，気流温度が加熱された場合，音速が変化してしまいそのままの設定では定在波がうまく形成されず，超音波の効果を有効に得られない。実際に図2の結果は黒プロットと白プロットの差が小さい。本研究では，気流温度が加熱されて音速が変化した場合も超音波の効果が得られるよう，照射周波数を調整した。

ただし、使用している振動子には最適な駆動設計周波数があるので、これを大きく逸脱するような調整は行わず、周波数の調整で安定限界が改善されるか否かを確認するのみとした。図3は、周波数調整がされた超音波効果を1系統作用させた場合の火炎の安定限界である。図より、図2の場合よりも $\rho_f V_f < 2 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ において黒プロットと白プロットの $\rho_a V_a$ の差が大きい。周波数の調整で超音波効果が改善されたことがわかった。

(4) 反射面位置の変化による超音波効果1系統の、気流加熱された火炎への影響

上記に示したように、気流加熱により音速が変化し、超音波燃焼制御装置の振動面と反射面に挟まれた空間中で良好な定在波が形成されていない可能性がある。この問題点を解消する方法としては、前項に示した周波数を最適化する方法に加え、反射面位置を最適化する方法が考えられる。図3では周波数の調整により超音波の効果が増幅する傾向を得たが、調整が最適であるか否かは判別出来ない。そこで騒音計を用いて超音波の音圧レベルを測定し、空間中で良好な定在波の形成を検証した。図4は、騒音計によって測定された339Kに気流加熱された状態における振動面と反射面間の音圧レベルである。図中上部は、振動面と反射面の間隔が気流温度が293Kにおいて初期に設定されたもの、下部は気流温度が339Kにおいて最適化されたものである。図より、気流加熱後に最適化された振動面反射面間隔では、音圧レベルの分布が正弦波状に得られているが、この間隔が最適化されていない場合、音圧レベルの分布が通常の正弦波状には得られていない。最適化されていない間隔では良好な定在波ができていないことを示している。

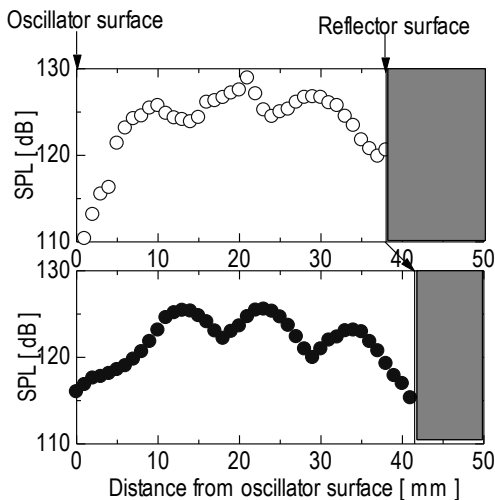


図4 振動面と反射面の間隔を最適化した場合の超音波燃焼制御装置の音圧レベル

このように振動面と反射面の間隔も最適化した状態で安定限界を測定した。図5は、燃料流速を一定として周囲流（空気流）流速を変化させたときに得られる火炎の安定限界の結果を示している。縦軸 $\Delta \rho_a V_a$ は、

吹き飛び限界値と再付着限界値の差、つまり浮き上がり火炎として安定に形成できる範囲を示している。図より、振動面と反射面の間隔を最適化した反射面位置41.5mmの結果の方が安定範囲が広いことがわかる。

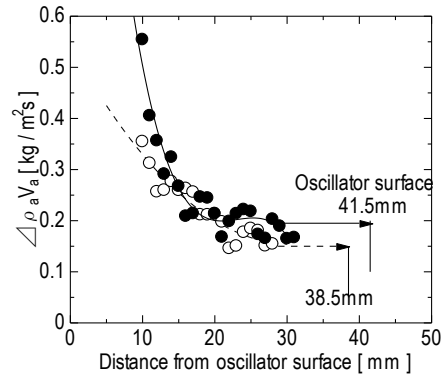


図5 振動面と反射面の距離を変化させたときの、気流加熱された火炎への超音波効果1系統の影響

(5) 超音波効果2系統の、気流加熱された火炎への影響と問題点

上記(1)~(4)の結果を考慮して、気流を399Kまで加熱し、超音波燃焼制御装置を2系統同時に使用して、火炎の安定限界を測定した。このとき2系統の装置は、振動伝播方向軸が90度に交差し、高さ方向に重ならないようにずらして設置した。図6は、この条件で測定したバーナ設置位置の変化に対する吹き飛び限界値である。黒プロットが超音波を2系統作用させたとき、白プロットが1系統作用させたときの結果である。参考までに超音波を作用させないときの吹き飛び限界値を点線で示した。図より超音波を2系統作用させたとき安定限界が向上している。周波数の調整、振動面と反射面の距離、照射位置のそれぞれが最適化されたとき、気流温度が変化しても超音波を火炎に有効に作用させることができ、結果的に安定限界を向上させることができる。ただし、この条件は非常に限定されたものであった。

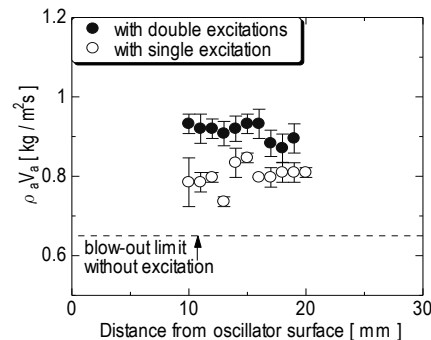


図6 超音波2系統を同時に作用させたときの気流加熱された火炎の安定限界の変化

図7は、アセトンOH同時平面レーザ誘起蛍光法（アセトンOH同時PLIF）を用いたときの吹き飛び限界近傍の火炎構造を示したものである。燃料にアセトンを添加してPLIFを行うと、予熱帯直前までの未燃焼混合気の領域が可視化できる。またOH-PLIFにより既燃領域が可視化できる。これらに挟まれた無蛍光領域は予熱帯として捉えることが出来る。本研究ではこの無蛍光領域の幅を測定した。図8は、アセトンOH同時PLIFで測定した無蛍光領域の幅の変化である。図より超音波を作用させると無蛍光領域の幅が拡大する。超音波の効果により予熱帯幅が拡大された、つまり希薄可燃限界が拡大していることがわかる。ただし、この効果は図4のような音圧レベル分布で定在波が良好に形成されているときのみ観察された。超音波の効果を得られるのは、振幅が大きく、かつ音圧レベル差が大きくなる領域に火炎を形成した時である。図4の上部に示したような音圧レベルが大きいとその差が小さい場合は効果が小さい。図6のように超音波を2系統同時に作用させるとそれぞれの振動子からの音波が干渉し、図4の上部のように音圧レベル差が小さくなりやすい。

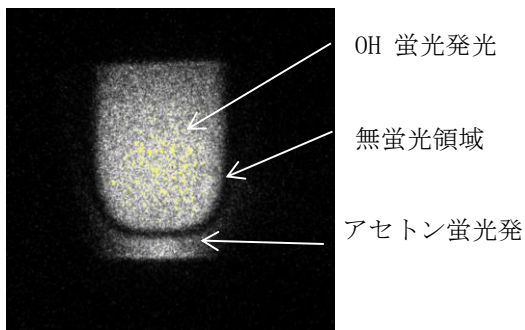


図7 吹き飛び限界付近の火炎に対するアセトンOH同時PLIFの一例

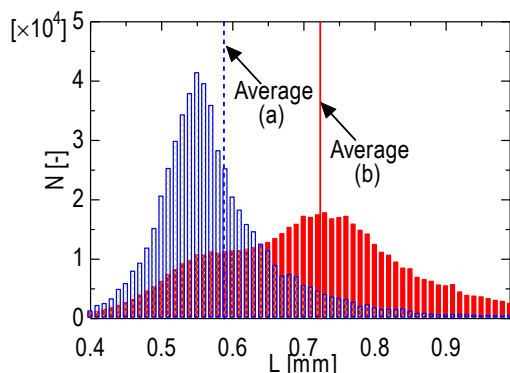


図8 アセトンOH同時PLIFで測定された火炎吹き飛び限界付近の無蛍光領域幅：(a)超音波無し、(b)超音波有り

(6) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクトおよび今後の展望

超音波の効果を利用して希薄燃焼を拡大する本提案は、学会発表、ホームページでの公開を機に燃焼器メーカーから多くの関心を寄せられている。現状の燃焼器はすでに

多くの技術を応用し最適に設計されている。さらに高効率化を目指すためには外力の導入による先進的な取り組みが必要と考えられている。大陽日酸、新日鉄住金などからは、このような背景から本装置の適用と応用に関して技術相談を受けた。外力導入による燃焼改善の方向性は、海外でも同じ傾向があり、本技術に関連する発表に対して同様の問い合わせを受けた。現状では、スケールを大きくした場合の技術課題と、本報で新たに明らかになった振幅増幅の必要性などの課題を解決すべく新規に科研費基盤研究(C)を申請し、採択され、本年度当初から取り組んでいる。特に振幅の増幅は、振動子と増幅ホーンのインピーダンスの最適化とブースターの使用による二つの方法で改善される可能性が高く、実際に設計中である。また音の干渉による影響は、干渉による振幅の局所的な増幅を狙う配置と照射方法で解消できる。この点に関しては、使用する環境とのマッチングが必要であり、問い合わせのあった企業の実燃焼器を利用・検討することで話し合いが進んでいる。

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4件)

(1) Y. Nakamura, Y. Yamada, M. Hirota, and T. Saito, Successful imaging of the preheat-zone of a lean ($\Phi < 0.6$) flame: The potential capability of acetone-OH simultaneous PLIF to diagnose flames at the near-extinction limit, *Journal of Visualization*, 15-5, 2012, pp. 281-291, 査読有り, DOI: 10.1007/s12650-012-0134-1

(2) Y. Nakamura, Y. Yamada, M. Hirota, and T. Saito, Strategy to diagnose ultra-lean ($\Phi < 0.6$) premixed flame by acetone-OH simultaneous PLIF with one-laser and one-detector combination, *Journal of Visualization*, 14-1, 2011, pp. 75-84, 査読有り, DOI: 10.1007/s12650-010-0066-6

(3) K. Hatanaka, T. Saito, M. Hirota, Y. Nakamura, Y. Suzuki, T. Koyaguchi, Flow visualization of supersonic free jet utilizing acetone LIF, *Visualization of Mechanical Processes*, 1-4, 2011, on line journal, 査読有り, DOI: 10.1615/VisMechProc.v1.i4.40

(4) 中村祐二, 山田雄一朗, 廣田光智, 齋藤務, アセトンOH同時PLIF法を用いた燃焼診断-超希薄燃焼制御の実現に向けて-, 可視化情報学会誌特集号, 31-120, 2011, pp. 3-8, 査読無し

[学会発表] (計13件)

(1) M. Hirota, and K Seshadri, Characteristics of nonpremixed dimethyl ether flame stabilized in a co-flowing configuration, 8th US National Combustion Meeting, 2013/0519-0522, Park City, USA

(2) Amirah Jamal, 飯塚淳, 福澤優太, 廣田光智, 中村祐二, 齋藤務, 周囲温度の変化に対する超音波燃焼制御の効果, 第50回燃焼シンポジウム, 2012/1205-1207, 愛知県名古屋市

(3) 廣田光智, 超音波を利用した遠方の火炎の安定制御, 日本鉄鋼協会第164回秋季講演大会, 2012/0917-0919, 愛媛県松山市

(4) 廣田光智, 辻拓也, 中村祐二, 齋藤務, 超音波による希薄燃焼の安定化, 日本航空宇宙学会北部支部2012年講演会ならびに第13回再使用型宇宙輸送系シンポジウム, 2012/0315-0316, 北海道室蘭市

(5) 廣田光智, 低温燃焼の実現とその可視化, MUSILO-Colloquium2012「技術科学と生産技術の交流-4」, 2012/0127, 東京都渋谷区, (招待講演)

(6) 辻拓也, Amirah Jamal, 廣田光智, 中村祐二, 齋藤務, 超音波定在波による噴流の偏向効果と火炎の安定化, 第49回燃焼シンポジウム, 2011/1205-1207, 神奈川県横浜市

(7) 廣田光智, 辻拓也, 中村祐二, 齋藤務, アセトンOH同時PLIFによる希薄予混合火炎構造の可視化-乱流火炎の可視化に向けて-, 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム2011, 2011/1201-1203, 熊本県熊本市

(8) M. Hirota, T. Tsuji, Y. Nakamura, and T. Saito, Influence of ultrasonic waves on blow-off limits of lifted jet flames, 23rd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 2011/0724-0729, Irvine USA

(9) Y. Nakamura, Y. Yamada, M. Hirota, and T. Saito, Acetone-OH simultaneous PLIF: A new strategy to diagnose ultra-lean ($\Phi < 0.6$) flames, The 11th Asian Symposium on Visualization, 2011/0605-0609, Niigata JAPAN

[その他]

ホームページ等

[http://www.muroran-](http://www.muroran-it.ac.jp/crd/seeds/6/hirota.pdf)

[it.ac.jp/crd/seeds/6/hirota.pdf](http://www.muroran-it.ac.jp/crd/seeds/6/hirota.pdf)

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・講師
研究者番号: 50333860