

平成 21年 5月 20日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006-2008

課題番号：18360095

研究課題名（和文）レーザー加熱法を用いた火炎面曲率制御による火炎不安定現象の研究

研究課題名（英文）Research on the relationship between flame curvature and its instability by using laser irradiation method

研究代表者

藤田 修（FUJITA OSAMU）

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10183930

研究成果の概要：エチレン空気予混合火炎に CO₂ レーザーを照射すると、未燃混合気レーザーが吸収され、局所的に任意の変形を与えることができる。この手法を用いて、予混合火炎面の火炎曲率と伝播火炎面に現れる不安定現象の相互関係を調べた。火炎に径の小さなレーザーを照射し一定値(5~6cm⁻¹)を超える曲率を与えると、火炎先端の伝播速度が時間的に変動する不安定現象が現れることを見出した。また、この要因が先端で生じる熱物質拡散不安定性と伸張消炎と類似の物理的意味をもつ曲率消炎により引き起こされるとする物理モデルを提示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2007年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2008年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

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、予混合火炎、火炎振動伝播、不安定現象、レーザー、赤外吸収、火炎曲率、乱流燃焼

1. 研究開始当初の背景

大規模な乱流予混合火炎の数値シミュレーションにおいては、乱れの流体力学的スケールが火炎面厚さに比べ十分大きいと考え、流れ場の火炎伝播の問題は流体力学的特性と切り離して議論される場合が多い。このような扱いを行うと、乱流火炎の燃焼強度は流体的な構造により火炎面積が増大することで増加するという扱いにとどまることになる。

一方で、燃焼現象そのものが流体力学的な構造、すなわち火炎スケールや曲率に影響を受けることはこれまで多くの燃焼研究者によ

り指摘されている。たとえば、燃焼速度が曲率により変化し、条件によっては燃焼波に振動などの不安定挙動が現れる。これらの現象に対する物理的理解の不足が、LES などによる乱流燃焼シミュレーションの適用範囲を限定する要因になっている（例えば、希薄限界付近の火炎構造、噴流火炎基部の安定性、着火・消炎挙動、など）。

火炎曲率が燃焼現象に影響を与える物理的機構は様々である。たとえば、流体力学的不安定性（Landau-Darrier 不安定性：L-D 不安定性）、熱-物質拡散不安定性（Le[ルイス数]効

果)、重力等の加速度場に生じるレーリーテラー不安定性、輻射損失による消炎や再吸収による加速、などが考えられ、これらの要因が複合して火炎の不安定性や燃焼速度の曲率依存性を引き起こす。これまで、この火炎曲率やスケールと燃焼現象の関連性に関しては、燃焼科学の重要な研究対象として、多くの理論的研究や数値計算による検討が行われているが、一方で、その理論や計算に基づく物理的理解は必ずしも実験により検証されてはならず、例えば平面火炎に結果として現れるセル状火炎構造と理論の対応などが議論の根拠となっていた。この最大の要因は、実際の燃焼現象において、火炎の曲率やスケールを任意に制御することが難しく、これを変数とした実験を行うことが難しかったことが挙げられる。例えば、流れ場を変化させることで火炎曲率を変化させる実験は可能であるが、この場合燃焼状態の変化が、流れ場の変化によるものなのか、火炎形状の変化によるものかを判別することが難しくなるのである。

2. 研究の目的

当該研究グループでは、上述のような背景のもとに、流れ場を変化させることなく、火炎形状を制御する手法について検討を行ってきた。その中で、CO₂ レーザー光がエチレン(C₂H₄)に選択的に強く吸収され、これが局所的な火炎曲率の制御の手段になりうることを見出した(具体的な概念は次節に記述する)。この手段により、従来難しかった火炎曲率およびスケールの任意の制御が可能となることがわかった。本研究は、この手段を用いて、従来実験的に検証の難しかった火炎曲率と燃焼挙動(燃焼速度、不安定性、振動現象)の関連を明らかにすることを目的とする。とくに、以下の項目について検討を行った。

- ①不安定性理論であるL-D不安定性および熱-物質拡散不安定性から予測される不安定性が増大する曲率と不安定性増大が停止する限界曲率の存在を明らかにする。
- ②上記の不安定性が増大する曲率が重力条件により受ける影響を明らかにする。このために微小重力実験と通常重力実験の比較を行う。
- ③火炎先端形状の詳細な観察を行い、曲率のある火炎の不安定現象を含む物理モデルを構築する。また、数値計算に基づく物理現象の基本的な理解を試みる。

3. 研究の方法

(1) 基本的概念と方法

図1は、本研究で導入したレーザー加熱法概念図である。エチレン空気予混合気の平面火炎に左手からCO₂ レーザー(波長: 10.6

μm)を照射する。エチレンは、この波長に強い吸収を持っており、局所的に加熱が行われる。この結果、局所的な燃焼速度が変化し初期の平面火炎に対し任意の変形を与えることができる。この火炎の変形が、外部から投入するレーザー光により与えられることから、レーザーのビーム径や強度を変化させることで、任意形状の変形(波長幅λおよび振幅A)を与えることができる。

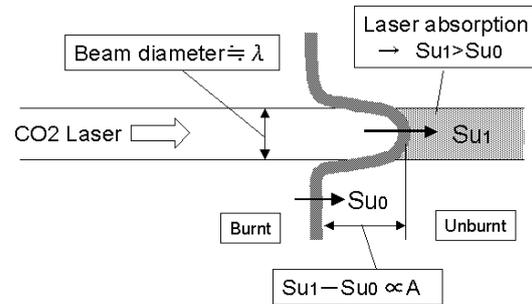


図1 レーザー加熱法概念

この概念を実現するために装置系統図が図2である。内径50mm、長さ450mmの伝播管の両端に任意の組成のエチレン予混合ガスを封入し、その一端に着火したのち、火炎が下方から上方へ伝播する様子を高速カメラで記録する。伝播管の両端は、CO₂ レーザーが透過できるようにZnSe窓を設置しており、下側からレーザーを投入し上側では透過後のレーザー強度を測定する。また、着火直後に下方端に取り付けられた電磁バルブを開放し、

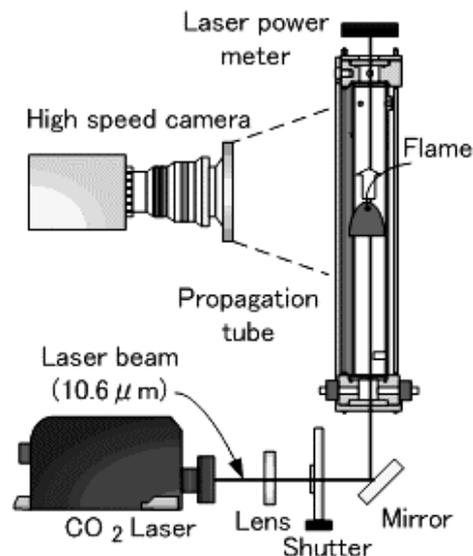


図2 実験系統図

燃焼進行中でも管内を大気圧に保持できるようにした。図3は、実験装置の外観写真である。写真中右側に伝播管、下側にレーザーの光学系統が固定されている。また、装置は、

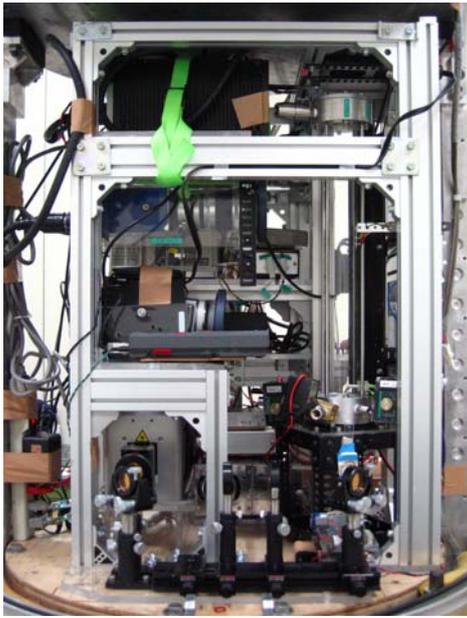


図3 実験装置外観写真

全体を微小重力実験施設に搭載できるように、強度の高いアングル構造に組み込まれている。微小重力実験は、北海道大学が(株)植松電機と共同で北海道赤平市に設置した50m落下塔を用いて行った。

4. 研究成果

(1) 火炎曲率と不安定伝播現象の関係

火炎曲率を変化させたときの火炎不安定挙動を実験的に観察した。対象としたガスは、表1の通りである。 $Le < 1$ で層流燃焼速度 (CHEMKIN GRI Mech3.0 による) は、25.2cm/s 相当の予混合気である。この混合気に異なる

表1 対象とした混合気組成 (ϕ : 当量比)

C ₂ H ₄	O ₂	CO ₂	ϕ	Le
9%	21%	70%	1.28	0.84

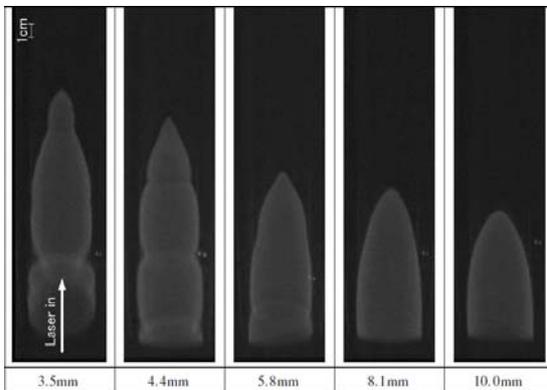


図4 ビーム径が火炎伝播挙動に及ぼす影響 (レーザー強度 6.5W, 火炎先端が視野に入ってから0.1秒後の映像)

ビーム直径のレーザー光を照射した際の挙動を観察した結果を図4に示す。なお、ビーム径の定義は、強度分布の最大値の $1/e^2$ となる直径である。この結果からわかるように、レーザー径が小さくなると、火炎先端の伝播速度に時間的な変動が現れる。この振動挙動は、ビーム径が 5.8mm 以下では明確に観察され、ビーム径が 10.0mm の場合は観察されなくなる。図5は、この時の火炎先端位置の時間変化をプロットしたものであるが、この結果からもビーム径が小さいときは、火炎先端位置が時間的に変動しながら伝播している様子がわかる。

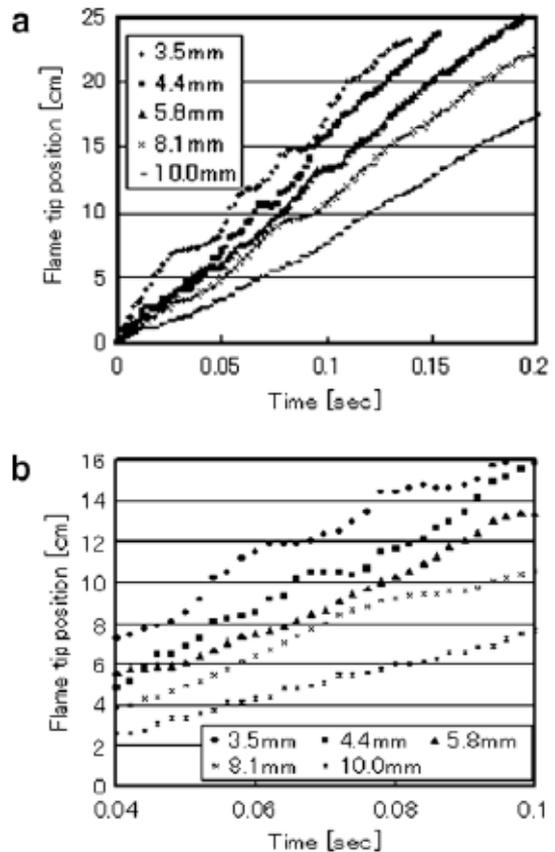


図5 各ビーム径に対する火炎先端位置変化 (a: 全体の経過、b: 拡大図)

図4からわかるように、レーザー強度を固定した場合、不安定振動現象が発生する上限のビーム径が存在していることがわかった。これと同様に、ビーム径を固定した場合には、不安定振動現象が発生する下限のレーザー強度が存在している。図6は、各レーザー径に対し、振動伝播現象が観察されるレーザー強度の下限値をプロットしたものである。レーザー径が小さくなると小さなレーザー強度でも振動伝播が生じるが、ビーム径が大きくなるとレーザー強度を大きくすると振動伝播現象が現れることがわかる。

ここで、火炎形状の時間的な変化に関して詳しく観察する。図7にビーム径 4.4mm,

5.8mm, 10mm, レーザー出力 6.5W の条件における、火炎のトレース画像を示す。これは、得られた実験映像から 0.002 秒間隔で画像を切り出し、その輪郭部をトレースし重ね合わせたものである。

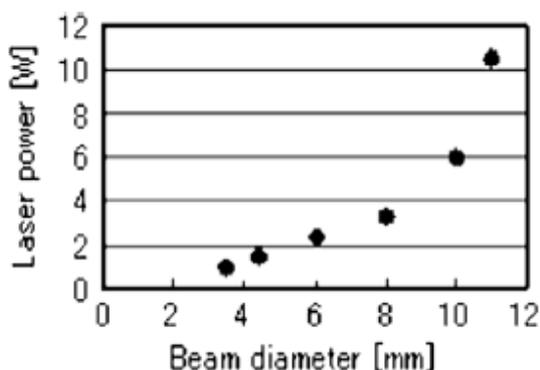


図 6 各ビーム径において振動伝播が生じる下限のレーザー強度

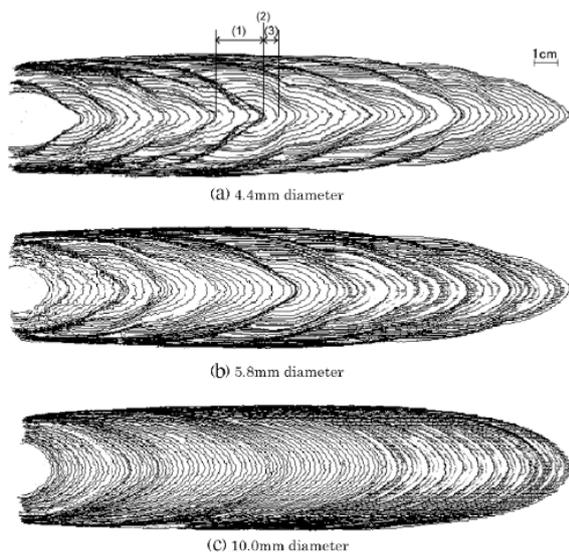


図 7 火炎伝播面のトレース画像 (6.5W, 上から順にビーム径 4.4, 5.8, 10.0mm)

火炎画像は等しい時間間隔で切り取られているため、線の間隔が広い部分は速い速度で伝播している様子を、線が密集した部分は火炎伝播が停滞する様子を表す。ビーム径 4.4mm, 5.8mm の場合は線の間隔が広い部分、密集した部分を繰り返しており、速度が変化しながら伝播する様子が分かる。一方、ビーム径が 10.0mm の場合は線がほぼ等間隔であり、速度変化を起こしてはいない事が分かる。

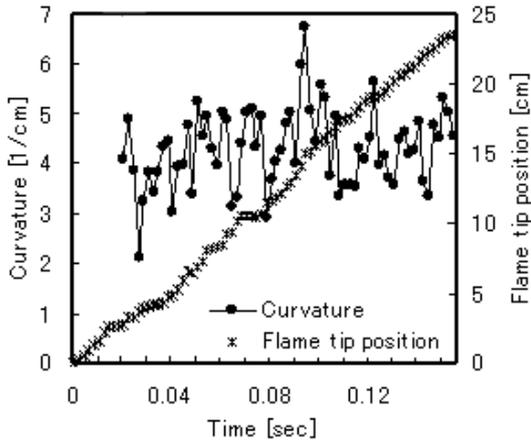
ビーム径 4.4mm のトレース画像について観察すると、火炎形状を著しく変化させながら伝播の様子が確認される。この火炎の形状変化と伝播速度との関係性についてみると、以下のような傾向を持つ事が分かる。すなわち、線の間隔が狭まっている部分(火炎が減

速・停滞する部分)では、火炎先端の曲率が大きくなる事が分かる。まず、火炎はその曲率を増大させながら高速で伝播する。しかし、火炎先端の曲率が大きくなると、伝播速度が減速・停滞する。その後、火炎はその曲率が小さくなるように再伝播する。そして火炎先端の曲率が小さくなると、また曲率を増大させながら前方へ伝播する、というサイクルを繰り返しながら伝播しているように観察される。ビーム径が 5.8mm の場合も、伝播速度の変化と火炎形状の変化に同様の傾向が確認される。

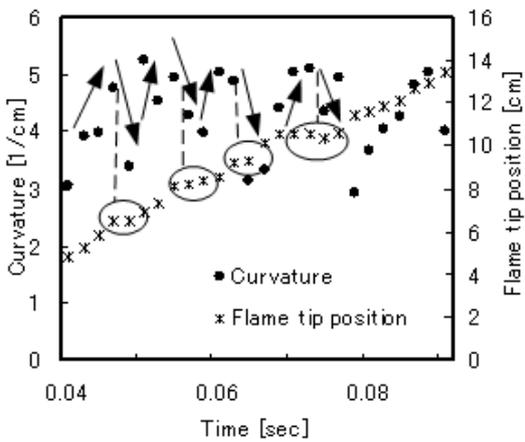
次に、火炎先端の位置とその時々火炎先端の曲率をプロットしたものを図 8,9,10 に示す。図 7 で見られた結果と同様、ビーム径が 4.4mm, 5.8mm(図 8,9)の時は、先端の曲率を時間的に変動させながら伝播するという様子が確認された。一方、ビーム径 10.0mm の条件(図 10)でも、やはり図 7 で見られた結果と同様に曲率はほぼ一定のまま伝播の様子が確認された。

図 8(a)はビーム径 4.4mm の時の火炎曲率の時間変化を、図 8(b)はその中から 0.04 秒から 0.09 秒の範囲で切り出したものである。一度曲率が最高点に達すると、そこから曲率が急激に減少し、再び増大し始めるという周期を取る事が分かる。また、この曲率の時間変化と伝播速度の時間変化の関係性を見ると、伝播速度が減速・停滞している領域で曲率の大きな変化が生じる事が分かる。これは、図 7 の火炎トレース画像で見られた結果と対応している。すなわち、火炎曲率が大きくなった時点で伝播速度が減速・停滞し、その後生じる再伝播で曲率が低下する。その後、再び前方へ火炎が伝播するというサイクルに対応した結果であると考えられる。図 9 に示すビーム径 5.8mm の結果でも同様の傾向が確認される。しかし、ビーム径 4.4mm の結果と比べ、変動の周期は緩やかである事が分かる。

以上のように、図 8, 図 9 においては曲率が増大・減少というサイクルを繰り返し伝播する。この時、各サイクルの曲率の最大値について観察するとどちらの条件でもほぼ一定値を取るという結果が得られた。ビーム径 4.4mm の時はおよそ 6cm^{-1} 、ビーム径 5.8mm の時はおよそ 5cm^{-1} でほぼ最大値を取る結果が確認できる。前述の通り、曲率の絶対値に関しては多少のずれがある可能性はあるが、ビーム径とレーザー出力の条件が定まると、それに対応する一定の最大曲率が存在するという傾向は正しいものと考えられる。火炎曲率の最大値は火炎伝播の減速・停滞時に生じるという事とをあわせて考えると、この結果は火炎が伝播できなくなる限界の先端曲率が存在するという可能性を示す物と考えられる。



(a) 観察視野全体の挙動



(b) 時刻 0.04s から 0.09s の詳細観察

図 8 先端曲率の時間変化 (ビーム径 4.4mm)

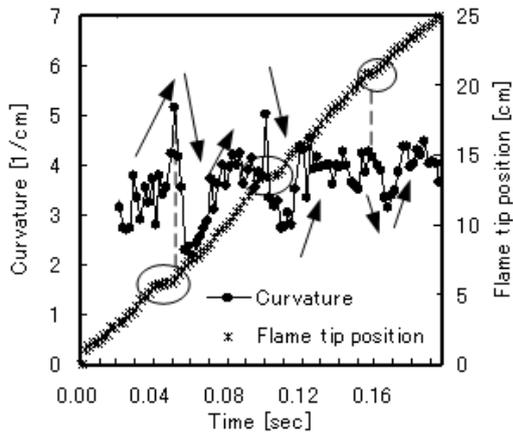


図 9 先端曲率の時間変化 (ビーム径 5.8mm)

(2) 振動伝播現象に対する重力影響

火炎では、伝播面を介して大きな密度変化を生じる。このため、重力を初めとする加速度場が火炎面の不安定現象に影響を及ぼす。前節まで観察してきた振動伝播現象に対し、重

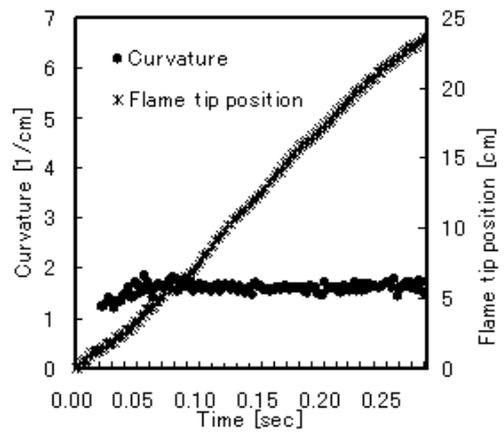
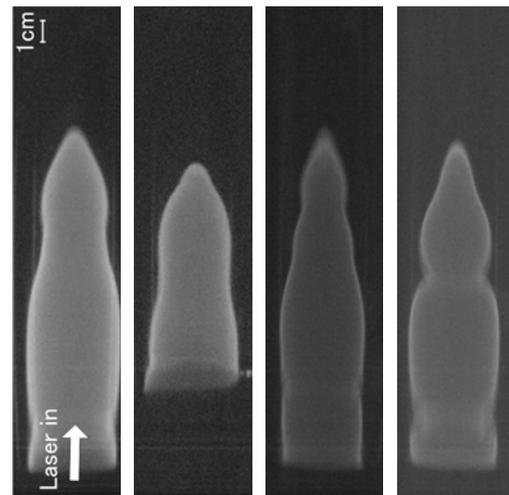


図 9 先端曲率の時間変化 (ビーム径 5.8mm)

力条件が及ぼす影響を観察した結果を図 10 に示す。Le が異なる条件に対し観察したが、重力条件によらず振動伝播現象が生じることがわかった。したがって、これまで観察した現象は、レーリー-テラー不安定により生じたものではないと言える。しかし、図 10 からは振動周波数に違いが見られ、更なる詳細な観察を今後行う必要がある。



1 G μ G 1 G μ G
 $\phi=1.35, Le=0.68$ $\phi=1.59, Le=0.94$

図 10 振動伝播挙動の重力条件による比較

(3) 不安定振動伝播現象の物理的理解

火炎面の時間変化の詳細な観察から、火炎先端は、特定の初期曲率を与えると自立的に曲率が増大し、これが最大値に到達すると伝播が停止し、曲率が低下することがわかった。この状況の物理的理解を図 11 に示す。

まず、レーザーが照射される事により、火炎前方の未燃ガスが局所的に予熱される(図 11(a))。この予熱の効果で火炎前方のレーザー照射領域の燃焼速度が局所的に増加する。

その結果、火炎前縁に変形が生じる事となる(図 11(b))。Le<1 の時、火炎に生じた凸部の変形はより不安定な方向へ進む事となる。その結果、火炎先端部は曲率を増大する方向へ変形しながら伝播する事となる。しかし、曲率がある大きさにまで増大すると、今度は火炎が伝播できなくなるという現象が生じる。これは、曲率効果で熱伝導損失が増大する一方、火炎面に流入する不足成分が増大するが、曲率が極めて大きくなると、反応特性時間が物理特性時間を下回る状況お (Da<1) となりこれにより温度低下が生じ伝播が停滞することになる(図 11(c))。これが再度レーザーの効果により変形が生じ、初期の状態へもどる。以上のようなサイクルを繰り返し、振動伝播現象が生じたものと考えている。この点を検証するため、簡単なモデルに基づく数値計算を行い、実験で観察された最大曲率で、Da<1 となりうることを確認している。

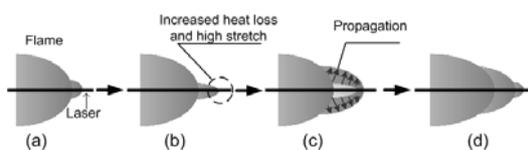


図 11 不安定振動伝播機構の物理モデル

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Tsuchimoto, M., Honko, T., Nakamura, Y., Ito, H. and Fujita, O., Effect of gravity and beam diameter on flame oscillation phenomena induced by external laser irradiation, *Combustion Science and Technology*, 180-101, pp.803-1811, (2008), 査読有
- ② Tsuchimoto, M., Fujita, O., Honko, T., Nakamura, Y., and Ito, H., Research on the Relation of Flame Front Curvature and Oscillatory Flame Propagation by External Laser Irradiation Method, *Proc. Combustion Institute*, Vol.32, pp.1003-1009, (2009), 査読有

[学会発表] (計 9 件)

- ① Park, J.S., Fujita, O., Honko, T., Yamada, Y., Ito, H., and Nakamura, Y., Some Features of Oscillating Downward Propagation Flames Induced by External Laser Irradiation, *22nd International Colloquium on Dynamics of Explosion and Reactive Systems (22nd ICDERS)*, 2009.7.27, Luikov Heat and Mass Transfer Institute, Minsk, Belarus.
- ② Honko, T., Fujita, O., Tsuchimoto, M., Shiote, A., Nakamura, Y., and Ito, H., Effect of Gravity on Flame Oscillation Phenomena, *7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC7)*, 2008.10.14, かでる 2・7, Sapporo, Japan.
- ③ Tsuchimoto, M., Fujita, O., Honko, T.,

Nakamura, Y., and Ito, H., Research on the Relation of Flame Front Curvature and Oscillatory Flame Propagation by External Laser Irradiation Method, *32nd Int. Symp. on Combustion*, 2008.8.4, McGill University, Montreal, Canada.

- ④ Honko, T., Fujita, O., Tsuchimoto, M., Shiote, A., Nakamura, Y., and Ito, H., Effect of Buoyancy on Flame Oscillation Phenomenon induced by External Radiation, *Work-In Progress Poster Colloquium at 32nd Int. Symp. on Comb.*, 2008.8.4, McGill University, Montreal, Canada.
- ⑤ 本小 輝晃, 槌本 真和, 中村 祐二, 伊東 弘行, 藤田 修, レーザー照射に誘起される火炎の不安定現象, *第 46 回燃焼シンポ*, 2008.12.3, 京都テルサ, 京都.
- ⑥ Tsuchimoto, M., Fujita, O., Honko, T., Nakamura, Y., and Ito, H., Effect of gravity and beam diameter on flame oscillation phenomena induced by external laser irradiation, *21st International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (21st ICDERS)*, 2007.7.26, University of Poitiers, Poitiers, France.
- ⑦ 槌本真和, 本小輝晃, 中村祐二, 伊東弘行, 藤田修, レーザー径および重力が外部加熱による火炎振動伝播現象に与える影響, *第 45 回燃焼シンポ*, 2007.12.6, 仙台国際センター, 仙台.
- ⑧ 槌本 真和, 本小 輝晃, 中村 祐二, 伊東 弘行, 藤田 修, 微小重力環境を利用した火炎振動伝播現象の発生メカニズムに関する実験的検討, *第 51 回宇宙科学技術連合講演会*, 2007.10.29, 札幌コンベンションセンター, 札幌.
- ⑨ 藤田 修, 微小重力場における燃焼現象 (招待講演) *第 4 1 回応用物理学会スクール*, 2007.9.5, 北海道工業大学, 札幌.

[その他]

ホームページ等

<http://york-me.eng.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 修 (FUJITA OSAMU)

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10183930

(2) 研究分担者

中村 祐二 (NAKAMURA YUJI)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50303657

伊東 弘行 (ITO HIROYUKI)

北海道大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30372270

大島 伸行 (OSHIMA NOBUYUKI)

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10217135

(3) 連携研究者

なし