

## 微小重力環境を利用した火炎振動現象の研究

北海道大学 藤田修、槌本真和、伊東弘行、中村祐二

### Research on flame oscillation phenomena by utilizing microgravity environment

Osamu Fujita, Masakazu Tsuchimoto, Hiroyuki Ito, and Yuji Nakamura  
Hokkaido University, Kita13 Nishi8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, Japan  
E-Mail: ofujita@eng.hokudai.ac.jp

Abstract: Effect of external radiation on flame propagation phenomena of ethylene premixed gas was investigated. The mixture is charged in the combustion tube of 50mm in diameter at 0.1MPa and CO<sub>2</sub> laser was irradiated along the centerline of the tube. With this configuration it was found that oscillatory flame propagation appeared in some gas mixture conditions. The flame oscillation pattern was influenced by the component of gas mixture and gravitational condition. It was suggested that this phenomena is caused by the transformation of flame front curvature by locally increased flame speed, which closely relates with thermal-diffusive flame instability in combination with flame stretch effect.

Key words; Premixed Combustion, Flame Instability, External Radiation

#### 1. 緒言

著者らはこれまでに、エチレン予混合気に CO<sub>2</sub> レーザーによる外部ふく射加熱を加えながら着火させることで、火炎振動伝播現象が発生することを発見した[1-2]。これは、メタンやプロパンを燃料とした場合には観察されず、CO<sub>2</sub> レーザーの波長域のエネルギーを非常に強く吸収する化学種であるエチレン[3]を燃料とした場合に初めて観察された現象である。この現象は、外部から非接触な方法で火炎の振動現象を制御可能であるということから、火炎不安定現象を実験的に研究する新たな手法となり得るものである。火炎の不安定性に関してはこれまでも多くの研究が行われてきた。しかし、その多くは数値計算によるものである[4-5]。また、実験的に行われた例もあるが、その多くは流れ場にあらかじめ速度勾配を与えたもの[6]や、流れ場に物体を挿入したもの[7]、壁面との相互作用によるもの[8]などの様に、外的な要因で流れ場を変化させたものがほとんどであり、本研究のように外部から非接触な方法で発生させた不安定現象を観察した例は見られない。

火炎の不安定性を引き起こす要因としては、火炎先端が曲率を持つことによる本質的な不安定性が考えられるが、これと併せて、重力に起因する不安定性(Taylor 不安定性)も重要な要因となり得る。これは、燃焼ガスと未燃ガスとの密度差より生じる、浮力に起因する不安定性である。本研究で観察された振動現象も、重力に起因する不安定性に支配されたものである可能性も考えられる。

そこで、本研究では外部からの CO<sub>2</sub> レーザーの照射によって生じる火炎振動伝播現象に与える浮力の影響を調べるために、微小重力環境を利用した

実験を行った。微小重力環境を得る手段として、(株)日本無重量総合研究所の落下施設を使用した。

#### 2. 実験装置および実験方法

本研究では、予混合気を封入した伝播管に直径 5mm のレーザービームを照射した状態で火炎伝播させ、その際に生じる火炎の不安定伝播を高速度カメラにより観察した。

図 1 に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。実験装置は主に CO<sub>2</sub> レーザー・レーザーシャッター・光学系・伝播管・高速度カメラから構成される。CO<sub>2</sub> レーザーとしては、SYNRAD firestar v20 (波長 10.6 $\mu$ m) を、高速度カメラとしては、nac HSV-500C<sup>3</sup> (500fps)を用いた。

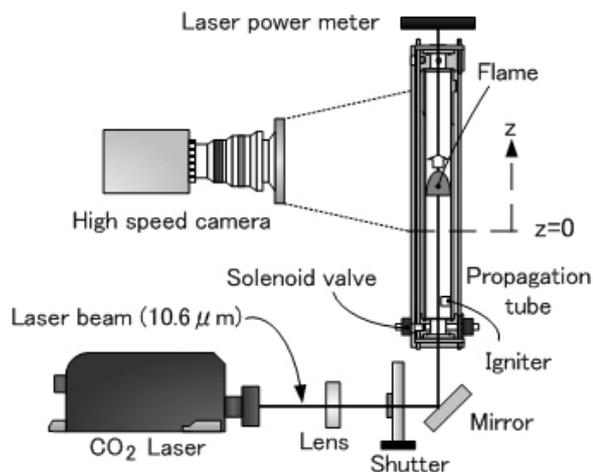


Fig.1 Experimental setup

CO<sub>2</sub> レーザーから発振されたレーザー光は、レンズ(ZnSe 製)とミラー(金蒸着平面ミラー)とからなる光学系で平行光にされる。今回、全ての実験条件においてレーザー光の直径は 5mm に固定して実験を行った。レンズ後方にレーザー光を遮るシャッターがあり、点火と同時にこれを開くことで伝播管内にレーザー光を入射させた。伝播管は内径 50mm、長さ 450mm の円管であり、中心軸が鉛直となるように設置した。伝播管に試料ガスを 0.1MPa となるように封入し、これを下端の点火電極により着火することで上方伝播火炎を発生させた。下端には四つの排気口が取り付けられ、点火と同時に排気口に接続された電磁弁を開くことで燃焼室内圧力が一定に保たれるようにした。これらの機器の作動タイミングはシーケンサ(三菱 FX-20MR)によって制御されており、微小重力実験においては、 $\mu\text{G}$  信号の入力により実験を開始させた。

実験に用いた試料ガスには、燃料にエチレン、酸化剤に酸素、バランスガスに二酸化炭素・窒素・ヘリウムを用い各成分を混合することで作成した。火炎の伝播速度が不安定挙動に影響を与えると予想されるため、燃焼速度を CHEMKIN3.7 により計算し、同一エチレン濃度の条件では、試料ガスの燃焼速度(25.2cm/sec および 23.7cm/sec)が一致するように各成分を混合した。表 1.1, 1.2 に試料ガス組成を示す。 $\phi$ および Le はそれぞれ当量比、レイス数を表す。

Table 1.1 Tested gas compositions  
(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 9% burning velocity 25.2cm/sec)

No.	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	other	$\phi$	Le
Gas1	9%	20%	65.7%	He	1.35	0.68
Gas2	9%	17%	18.8%	N <sub>2</sub>	1.59	0.94

Table 1.2 Tested gas compositions  
(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 7.5% burning velocity 23.7cm/sec)

No.	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	other	$\phi$	Le
Gas3	7.5%	17.5%	59.1%	He	1.29	0.57
Gas4	7.5%	14.4%		N <sub>2</sub>	1.56	1.02

### 3. 実験結果

#### 3.1 微小重力環境下における火炎伝播挙動

通常重力環境下で観察された、外部からの CO<sub>2</sub> レーザーの照射により生じる火炎振動伝播現象が、重力による影響で発生したものかを確認するために、微小重力実験を行った。その結果を以下に示す。

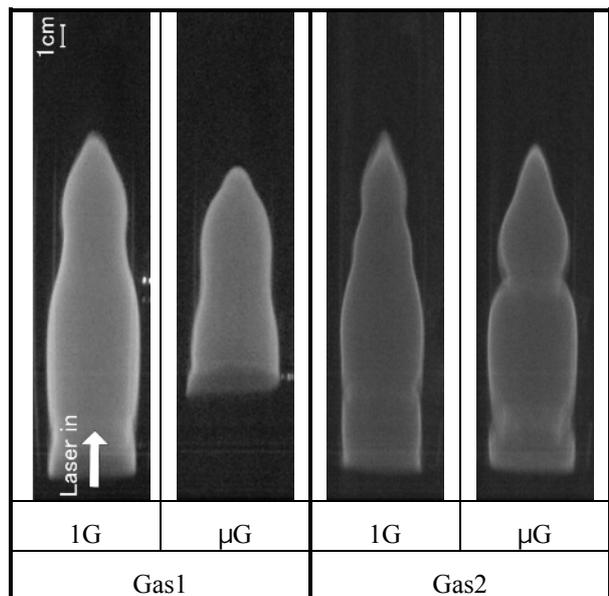


Fig.2 Instantaneous flame shapes with different gravity conditions

図 2 は通常重力環境下および微小重力環境下で得られた火炎伝播の写真である。写真から明らかに重力条件に関わらず、火炎側面にくびれが現れることがわかる。これは、火炎先端の伝播速度が時間的に変動するために生じるものであり、重力条件によらず火炎振動伝播現象が発生することがわかる。このことより、本研究で観察された火炎振動伝播現象は重力が主要因となり引き起こされたものではないということが言える。

しかし、図 2 に示した火炎写真を詳細に観察すると、火炎に生じるくびれの大きさやその間隔、火炎先端に見られる曲率などが重力の有無により異なることがわかる。このことから、重力の影響は火炎振動伝播現象を引き起こす主要因ではないものの、火炎の伝播速度や振動現象のパターンなどの火炎伝播挙動に影響を与えることがわかる。したがって、次節では各重力条件での火炎伝播挙動の比較を行った。

#### 3.2 重力条件での振動伝播現象の比較

図 3 に、エチレンが 9% の条件における火炎先端位置の時間履歴を示す。これは、高速度カメラにより得られた映像から、時間経過に対するその時々火炎先端位置をプロットしたものである。

全ての条件において、火炎先端が速度変化を起こしながら伝播をするという結果が得られた。しかし、グラフの傾きから微小重力環境下の方が通常重力環境下と比べ、火炎の伝播速度は遅くなるという結果が得られた。また、火炎が速度変動を起こす周期

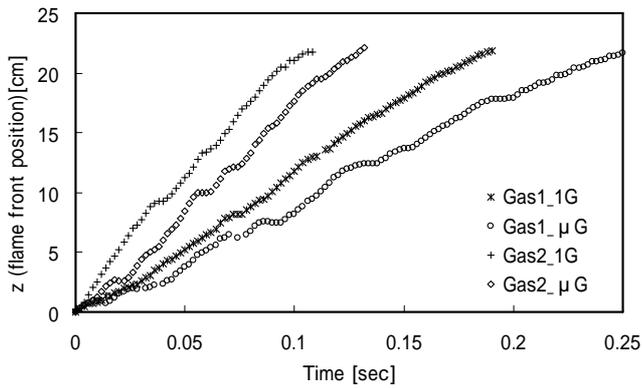


Fig.3 Flame front position vs. time  
(ethylene 9% conditions)

は、微小重力環境の方が短いという傾向も得られた。

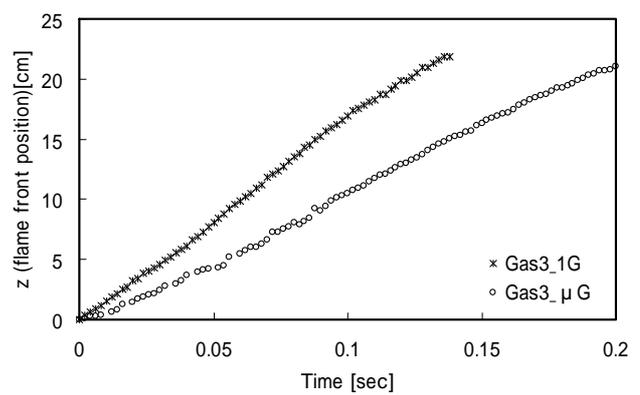
図4にエチレンが7.5%の条件における火炎先端位置の時間履歴を示す。微小重力環境下と通常重力環境下での結果を比較すると、伝播速度が通常重力環境下の方が大きいのは図3の場合と同様であるが、速度の時間変動は微小重力環境下の方が明確に観察できることがわかった。この結果からも、重力の存在が火炎振動伝播現象に与える影響は無視できず、振動伝播現象の議論を行う際に考慮する必要があることが理解できる。

#### 4. 火炎振動伝播現象の発生機構の考察

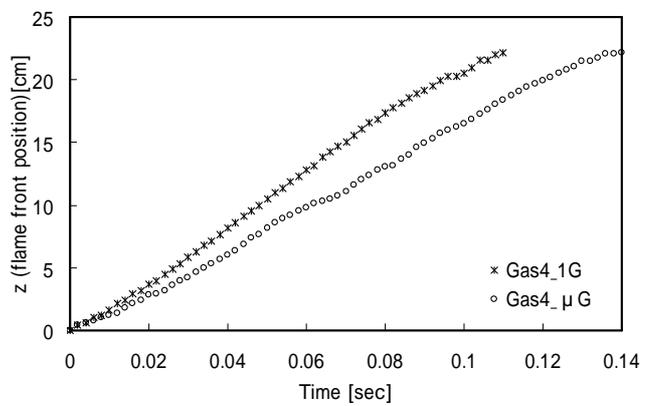
微小重力実験の結果から、今回観察された火炎振動伝播現象は重力の影響により引き起こされたものではないことがわかった。そのため、この振動現象を引き起こす他の要因が存在する。

図3および図4より、各ガス条件によってその周期や伝播速度など振動のパターンが異なることから、ガス組成が振動現象に関連すると言える。一般に、火炎に凹凸面が生じると、レイス数 ( $Le = \text{温度伝導率} / \text{不足成分拡散係数}$ ) の効果により火炎に不安定性の現れる[9]ことが知られる。ガス組成が変化するとレイス数も変化することから、ここで見られる不安定挙動はレイス数に起因する不安定性と深く関連する可能性が考えられる。そこで、レイス数効果を考慮した、不安定挙動の発生機構についての仮説を図5に提案する。

まず、 $\text{CO}_2$  レーザーの照射による予熱の効果により、レーザーの通過領域付近の伝播速度が局所的に上昇し、火炎先端が飛び出すという局所的な変形が生じる(a)。この局所的な変形はレーザー照射と



(a) Gas 3 in 1G and  $\mu\text{G}$



(b) Gas 4 in 1G and  $\mu\text{G}$

Fig.4 Flame front position vs. time  
(ethylene 7.5% conditions)

$Le < 1$  における物質拡散の効果によってさらに大きくなり、それに伴い火炎先端の曲率が増大する。しかし、曲率がある大きさまで達すると、火炎表面積の増加に伴う熱損失増大の影響や火炎伸張の効果による反応速度の低下などの影響により、火炎先端付近の伝播速度が低下する(b)。火炎先端付近での前方への火炎伝播が停滞する間に、周囲方向への火炎伝播で曲率が再び小さくなり(c)、再度レーザー照射と物質拡散の効果により、火炎先端に飛び出しが生じる(d)。このような機構の繰り返しによって火炎振動伝播現象が発生するものと推察される。

また、微小重力環境の方が振動現象を観察しやすいという結果が得られた。これは、微小重力環境下では浮力の影響がないために、火炎先端の燃焼反応が停滞すると、火炎先端位置の移動も停止するが、通常重力環境下では、常に上方へ浮力による流れが発生するために、燃焼反応が停止しても見かけ上の火炎位置は連続的に上方へ移動することが要因の一つと考えられる。このことから、微小重力環境の

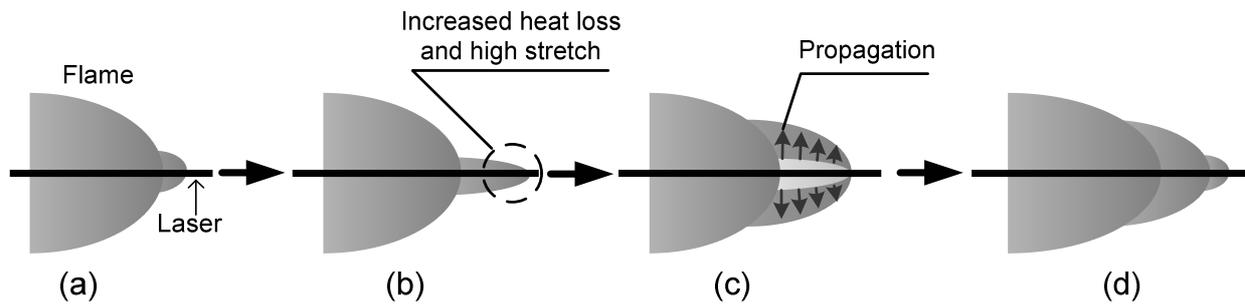


Fig.5 Hypothesis of flame oscillation mechanism

利用は火炎の不安定伝播現象の観察に効果的であると考えられる。

## 5.まとめ

本研究では、外部ふく射加熱によって生じる火炎振動伝播現象を通常重力環境下および微小重力環境下で観察した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 微小重力環境下においても振動伝播現象が観察されたことから、本実験で観察された振動現象の主要な発生要因は重力に起因する不安定性ではないと言える。しかし、重力の有無で振動周期や伝播速度などに明確な違いが生じることから、振動伝播現象に対する重力の影響を無視することはできない。
- (2) レーザーによる加熱や火炎先端の突出部に働く拡散現象および火炎伸張効果などの相互作用によって燃焼速度が時間的に変動し、振動伝播現象が生じるという機構が提案された。

## 謝辞

本研究はJAXAおよび(財)日本宇宙フォーラムの「宇宙環境利用に関する地上研究公募」によって行われたことを記し、感謝の意を表します。

## 参考文献

1. 藤田修・池田純一，第 42 回燃焼シンポジウム講演論文集，pp.185-186(2004)
2. 興津彰宏・中村祐二・藤田修，第 43 回燃焼シンポジウム講演論文集，pp.250-251(2005)
3. The National Institute of Standards and Technology(NIST),  
<http://webbook.nist.gov/chemistry/>

4. Akkerman, V., Bychkov, V., Petchenko, A. and Eriksson, L.E., Flame Oscillations in Tubes with Nonslip at the Walls, *Combustion and Flame*, Vol.145, (2006), pp.675-687
5. Bechtold, J.K., Cui, C., Matalon, M., The Role of Radiative Losses in Self-Extinguishing and Self-Wrinkling Flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.30, (2004), pp.177-184
6. Yoshida, K. and Takagi, T., Transient Local Extinction and Reignition Behavior of Diffusion Flames Affected by Flame Curvature and Preferential Diffusion, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.27, (1998), pp.685-692
7. Clanet, C. and Searby, G., First Experimental Study of the Darrieus-Landau Instability, *Physical Review Letters*, Vol.80, No.17(1998), pp.3867-3870
8. Lee, W., Lee, J.G., Santavicca, D.A., Self Induced-Combustion Instability of Laminar Premixed Flames on a Slot Burner, *JSME International Journal SeriesB* Vol.48, No.2 (2005), pp.305-309
9. Williams, F.A. *Combustion Theory 2<sup>nd</sup> Edition* (1985), pp.349-365, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.