

## 気体燃料の包括的燃焼限界理論構築のための低速対向流火炎法 (H26 年度 WG 報告)

丸田薫（東北大；極東連邦大），中村寿（東北大），手塚卓也（東北大），小林友哉（東北大），長谷川進（東北大），高瀬光一（東北大），菊池政雄（JAXA），勝田真登（JAXA），Roman Fursenko（ロシア科学アカデミー；極東連邦大），Sergey Minaev（極東連邦大）

### Low speed counterflow flame method for constructing comprehensive combustion limit theory of gaseous fuels (FY2014 WG report)

Kaoru Maruta<sup>\*,†</sup>, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Tomoya Kobayashi, Susumu Hasegawa, Koichi Takase, Masao Kikuchi, Masumi Katsuta, Roman Fursenko, Sergey Minaev

\* Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku Sendai 980-8577, Japan  
† ICE Lab., Far Eastern Federal University, 8, Sukhanova Str, Vladivostok 690950, Russia  
E-Mail: maruta@ifs.tohoku.ac.jp

Abstract: The goal of the research is construction of the comprehensive combustion limit theory of conventional flames and that of flame ball. For this, a low-speed counterflow flame method was employed under microgravity environment. Fuels and conditions used in high-temperature oxygen combustion in addition to the baseline conditions of methane + Xe or Kr were used. Besides transitions from twin premixed flames to ball-like flame, several other peculiar flames, e.g., counterflow cellular and sporadic flames, in which each flame fraction corresponds to flame ball, have been observed and it was reproduced by 3-D computation by diffusive-thermal model.

Key words: Combustion limit, Lewis number, Counterflow flames, Gaseous flames, Flame ball

#### 1. はじめに

本研究では、気体燃料（メタン）の希薄予混合火炎を対象とし、極低速対向流火炎により、いわゆる通常の伝播火炎であるデフラグレーションの可燃限界と、これとは独立して研究が進められてきた伝播性のない火炎 Flame ball[1,2]の可燃限界を統一的に記述できる燃焼限界理論の構築を目標としている。また、宇宙環境利用による燃焼科学と実用燃焼技術、両者の発展に資するため、応用研究として取り組んでいる高温酸素燃焼技術[3]を想定した混合気組成を選定した。高温酸素燃焼は、純酸素と既燃ガスとの混合気を酸化剤として利用し系内には窒素がない構成とすることで、排気中の窒素が持ち去る顕熱の低減、排気流量の低減による燃焼器小型化、NO<sub>x</sub>の原理的無排出、排気からの容易なCO<sub>2</sub>回収等が可能という特徴があり、高効率・低エミッションの燃焼技術として研究開発を進めている。

以上の理由によりCH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>予混合気を用いている。また、窒素と比較して分子量が大きくかつ放射線性ガスであるCO<sub>2</sub>が希釈ガスとなることから、レイス数(Le)と放射再吸収効果が消炎限界特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。そこで、CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>予混合気(Le≈0.7)に加えて、よりレイス数が小さい条件としてキセノンを希釈ガスに用いるCH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Xe予混合気(Le≈0.5)を、さらにもう一種類、CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>予混合気とほぼ同じレイス数を有するが放射線性ガスではないクリプトンを用いる

CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Kr予混合気(Le≈0.7)についても検討を実施している。

これまでに航空機を用いた短時間微小重力実験により、極低流速条件におけるデフラグレーションの消炎時に、平面火炎が球状火炎に遷移してから消炎する様子が観察され(図1)[4]、本研究の基本コンセプトの妥当性が確認されている。このほかに、様々な火炎動態が消炎限界近傍で観察されている。ここでは特にCH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Xe予混合気で観察された消炎限界近傍の火炎動態について紹介する。

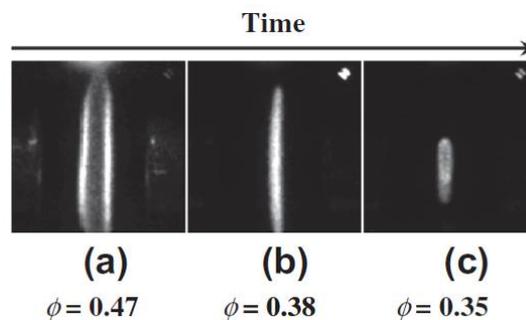


図1 消炎時の火炎画像  
(CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Xe, 伸長率 3.2 s<sup>-1</sup>, O<sub>2</sub>/Xe = 0.141) [4]

#### 2. 実験および数値計算方法

図2に実験装置の概略図を示す。各ガスの流量をマスフローコントローラで制御し、混合後に対向流

バーナーに供給する。バーナー間距離とバーナーの内径は共に 3.0 cm とした。微小重力開始前にイグナイタを動作させ、予混合気を供給して火炎を形成する。微小重力開始後に火炎が安定したところでイグナイタを停止し、イグナイタは対向流場から退避させる。その後、予混合気の当量比を漸減させながら火炎を撮影し、消炎限界近傍の火炎動態を撮影した。なお G 変動の影響は無視し得る程度であった。

非定常・三次元の複雑な火炎挙動の数値計算には膨大な計算負荷が必要であるため、本研究では thermo-diffusive model を用いた。流れ場は対向流場であると仮定し、一段の総括反応モデルを用いることで、燃料とエネルギー（温度）の保存式を解いた。それぞれの保存式について、非定常項、対流項、拡散項、反応項を考慮した。また、エネルギー保存式には輻射熱損失項を考慮した。

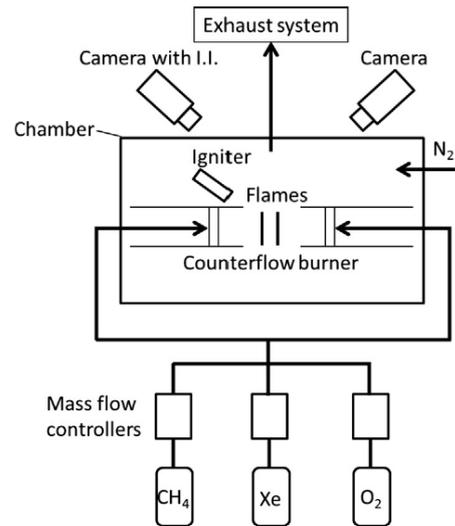


図2 実験装置概略図

### 3. 実験および数値計算結果

図3に実験で得られた火炎画像 (E1-E4) と数値計算で得られた温度分布 (S1-S4) を示す[5]。E1は高伸長率条件で観察される通常の対向流予混合平面双子火炎である。低伸長・高当量比条件において、E2に示すセル状火炎が観察された。伸長率と当量比の低下に伴い、E4に示すように、セル間の接続が不明瞭になった。消炎限界近傍の低伸長・低当量比条件においては、E3に示すように、セル片が独立した火炎が観察された。それぞれの火炎動態に対応した伸長率・当量比条件において、S1-S4に示す火炎が数値計算で得られた。数値計算で得られた温度分布は実験で観察された火炎形状の特徴を適切に捉えている。

### 4. まとめ

本研究テーマの背景および最近の予備試験・数値計算の状況について述べた。特に、消炎限界近傍の火炎挙動に関する実験・数値計算結果を紹介した。

### 参考文献

- [1] Zel'dovich, Y. B., "Theory of Combustion and Detonation of Gases" Academy of Sciences (USSR) (1944).
- [2] Ronney, P. D., Whaling, K. N., Abbud-Madrid, A., Gatto, J. L., and Pisowicz, V. L., AIAA J. 32: 569-577 (1994).
- [3] NEDO 成果報告書, 高温酸素燃焼技術の研究開発 (2014), 管理番号: 2014000000253.
- [4] Takase, K., Li, X., Nakamura, H., Tezuka, T., Hasegawa, S., Katsuta, M., Kikuchi, M. and Maruta, K., Combust. Flame 160: 1235-1241 (2013).
- [5] Fursenko, R., Minaev, S., Nakamura, H., Tezuka, T., Hasegawa, S., Kobayashi, T., Takase, T., Katsuta, M., Kikuchi, M. and Maruta, K., Combust. Flame, in press, doi:10.1016/j.combustflame.2014.11.032.

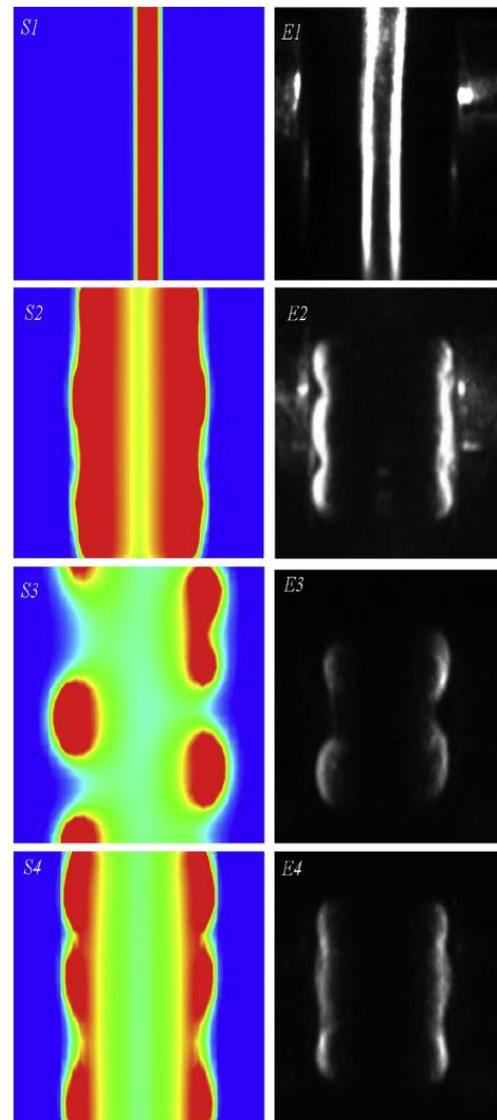


図3 実験および数値計算で得られた火炎動態