

# マイクロフローリアクタ試験装置の開発 (高圧下での燃焼)

尾木 一馬<sup>\*1</sup> 田中 宏一<sup>\*2</sup> 佐瀬 昭<sup>\*3</sup> 松井 邦雄<sup>\*4</sup>  
Ogi Kazuma Tanaka Koichi Sase Akira Matsui Kunio

燃料の自己着火過程を把握することは燃焼特性の基礎研究、さらには、エンジン開発を行ううえで重要と考えられる。当社では、温度分布制御型マイクロフローリアクタを使い、大気圧から高圧環境下での燃焼状態を観察できるよう技術開発を行ってきた。広範囲の温度分布に加えエンジン内を見据えたチャンバ内での高圧下燃焼試験を実施し、大気圧下では自己着火による微弱光を観察できることを確認するとともに、燃料の有無による温度差と自己着火との関係を明らかにした。

キーワード：マイクロフローリアクタ、自己着火、n-ヘプタン

## 1. はじめに

自動車のような内燃機関の高効率化のためには、燃料固有の着火や燃焼といった特性を綿密に調べる必要があるといわれている<sup>(1)</sup>。株式会社IHIと共同研究中の東北大学丸田教授の研究グループでは、温度分布制御型マイクロフローリアクタ（以下リアクタとする）に着目し、この技術を使った各種燃料や環境条件に対する燃焼・着火特性が研究されている<sup>(1)-(3)</sup>。

当社では、この技術を製品化する役割を担っており、燃料の自己着火の観察や、燃焼状況の写真撮影を行ってきた<sup>(3)</sup>。この発展形態として、内燃機関の燃焼状況に近づけるために、高圧環境化でのリアクタを使った燃焼状況の観察を行うことを計画した。計画内容では、実績のある水素バーナ

加熱式から電気ヒータ式へと変更することとし、高圧チャンバ内での水素バーナ使用の危険性を除去するとともに、観察温度範囲の拡大等、最適方式へと改良を加えた。

本稿では、チャンバ内に収納した電気ヒータ式によるリアクタにて燃焼試験を行った状況を報告する。

## 2. 高圧下での実験装置概略

### 2.1 リアクタへのガス供給方法

液体燃料をガス状態でリアクタへ供給するため、あらかじめ加熱し、気化させる。また燃料のキャリアとしてN<sub>2</sub>ガスを使用し、N<sub>2</sub>にて加圧する。このために、混合タンクで、加熱と加圧を行うシステムとした。図1に配管系統概略図を示す。

燃料を混合タンクの加熱ヒータで加熱すること

\*1：ジャプス事業部 技術部  
\*2：ジャプス事業部 技術部 次長  
\*3：ジャプス事業部 技術部 部長  
\*4：ジャプス事業部 事業部長

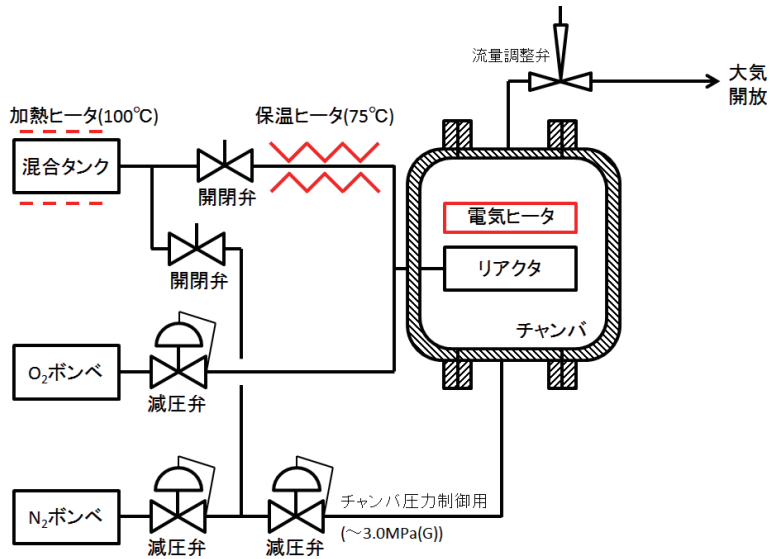


図1 配管系統概略図

で気化させ、 $N_2$  加圧でリアクタへと送気する。

混合タンクで気化された燃料は、チャンバまでの搬送経路にてガス温度が下がり、配管内で液化することが懸念される。そのため搬送配管に保温ヒータを巻き付け、約  $75^\circ\text{C}$  にて保温加熱した。

## 2.2 ガス供給

リアクタへと供給するガスは、等量比（燃料/空気の割合）を1として、演算から求めた酸素量と、

2.1 節で準備した混合ガスとを混ぜ合わせリアクタへと送気される。燃料/空気ガス中のガス化している燃料はリアクタに入り、順次下流側へと供給される。

## 2.3 予備試験

### (1) 実験装置

図2に実験装置の概略を示す。実験装置は、チャンバ内にリアクタ、電気ヒータ等が設置されてい

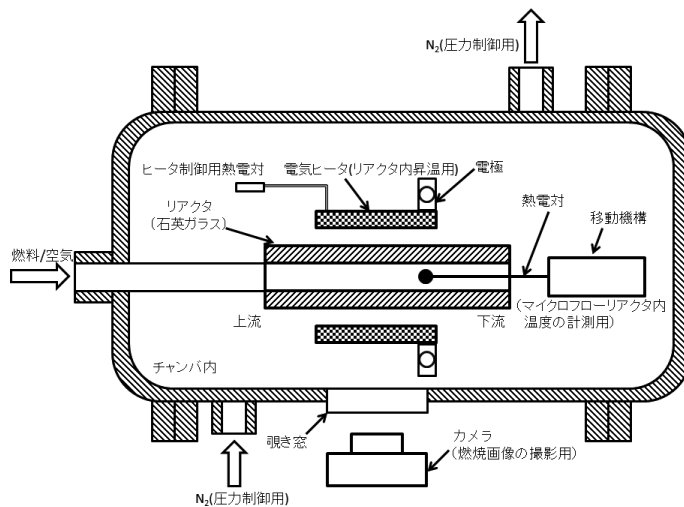


図2 実験装置概略図

る。リアクタは、このヒータで温度勾配が作られるように設計されている。電気ヒータは、1000℃で安定的、かつ連続的に使用できる円筒形を用いた。

また円筒形電気ヒータ中央部に熱電対を設置することで、外部制御器で目標温度を維持することが可能である。この熱電対は、リアクタ内の温度分布が燃料/空気の上流から下流にかけて昇温するように温度制御し、リアクタの温度分布は、リアクタ内の計測用熱電対を用いて計測される。リアクタ内の熱電対は移動機構を持ち、任意の位置に移動することができる。本稿内で示す位置(mm)は、移動機構による熱電対の移動量である。

### (2) 大気中でのリアクタ内温度計測

リアクタ、ヒータ等をチャンバ内に収納し、大気圧中でリアクタ内の温度分布を計測した。チャンバの外観を図3に示す。

目標温度を1000℃とし、N<sub>2</sub>ガス（燃料無し）による低速流速と高速流速の場合で温度分布を計測した。その結果を図4に示す。下流側に行くに従い温度が上昇するようにリアクタの温度勾配を制御した。

流速による温度の差は、低温側で数℃見られるが、高温側へ行くにつれ小さくなる。これは、低温側は外気からの影響を顕著に受け、高温側はヒータ加熱の影響が支配的であるためと考えられる。

### 3. 高圧下での実験方法

高圧化の実験ではリアクタ等を容器 (=チャンバ) 内に収納し、最大圧力2.8MPa (G) 状態で自己着火現象を画像と温度差で確認した。

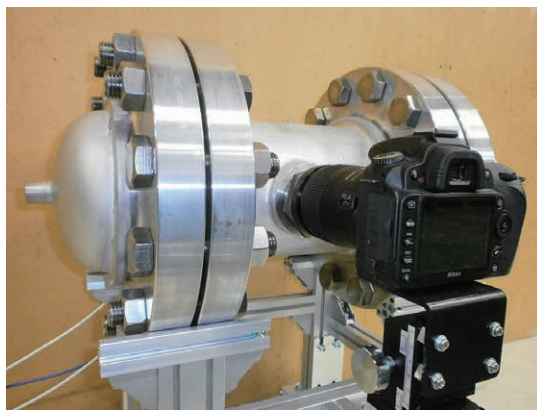


図3 チャンバ外観図

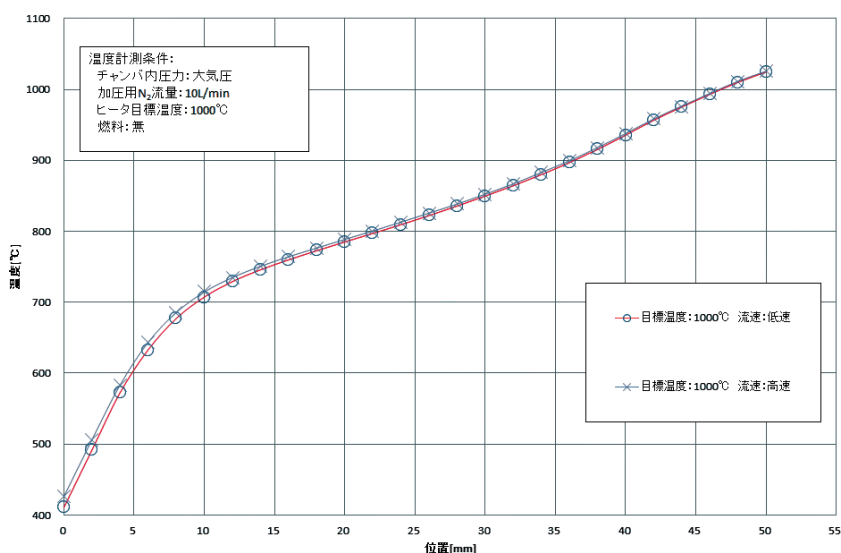


図4 無燃料、大気圧におけるリアクタ内温度分布

リアクタの温度分布を、**図2**に示す移動機構にて熱電対を移動させて、計測した。この移動機構は、チャンバ外からの遠隔操作で、熱電対の位置を変えることができる。

またチャンバ内の圧力を**図1**で示すようにリアクタへの燃料/空気供給とは別系統で制御した。

最後にリアクタに加熱した燃料/空気を供給し、温度勾配のあるリアクタ内をガスが進行する中で、自己着火・発光するようすをヒータとチャンバに設けた覗き窓<sup>のぞ</sup>を通し、チャンバ外に設置したデジタルカメラにて撮影し、発光位置を求めた。

#### 4. リアクタ内の圧力条件を変更した際の温度分布の結果

リアクタには燃料を供給せず、目標温度 1000℃ の条件でチャンバ内圧力を 0.0 ~ 1.5MPa (G) の範囲で変化させて、リアクタ内の温度分布を計測した。

温度分布の計測結果を**図5**に示す。またこの時、画像の撮影も実施した。これは、自己着火現象の発光を画像処理するための撮影であり、**5章**にて記述する。

チャンバ圧に依らず位置 0 ~ 20mm まではやや急峻な傾きを持った温度勾配であり、その後（位置 20 ~ 50mm）はそれより鈍化した傾きの温度上昇となる。従来型の水素バーナ加熱式の温度勾配は、位置 35 ~ 40mm の範囲で 313℃ /cm であり（**図5**参照）、円筒形電気ヒータでは、位置 18 ~ 50mm の範囲で 68℃ /cm であった<sup>(4)</sup>。従来型と比較すると、円筒形電気ヒータの温度分解能は、4倍（円筒形電気ヒータ：位置 18 ~ 50mm 区間、従来型水素バーナ加熱式：35 ~ 45mm 区間）程度となった。これより、自己着火による燃料有/無の違いを高い温度分解能により評価することが可能であると考ええる。

また**図6**に示すとおり、チャンバの圧力を高くするに従い、大気圧の場合との温度差は大きくなる傾向にある。これは、高压になるほど、圧力制御ガスである N<sub>2</sub> の密度が増加し、交換熱量が増加するためであり、論理的物理現象と合致する。

このチャンバ圧による温度差が明らかになれば、これを基に大気圧条件でのみ無燃料温度分布を取るにより、加圧状態に換算でき、実験手順の省略化が可能となる。

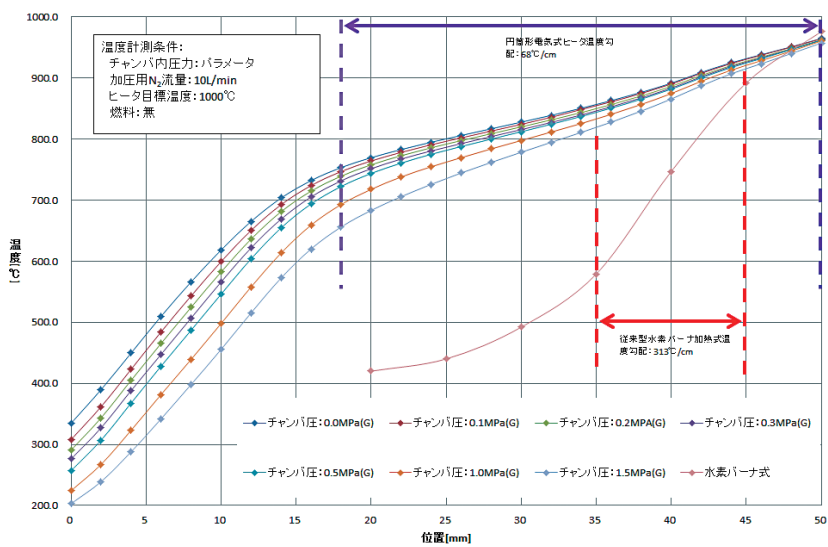


図5 無燃料におけるマイクロフローリアクタ内温度分布

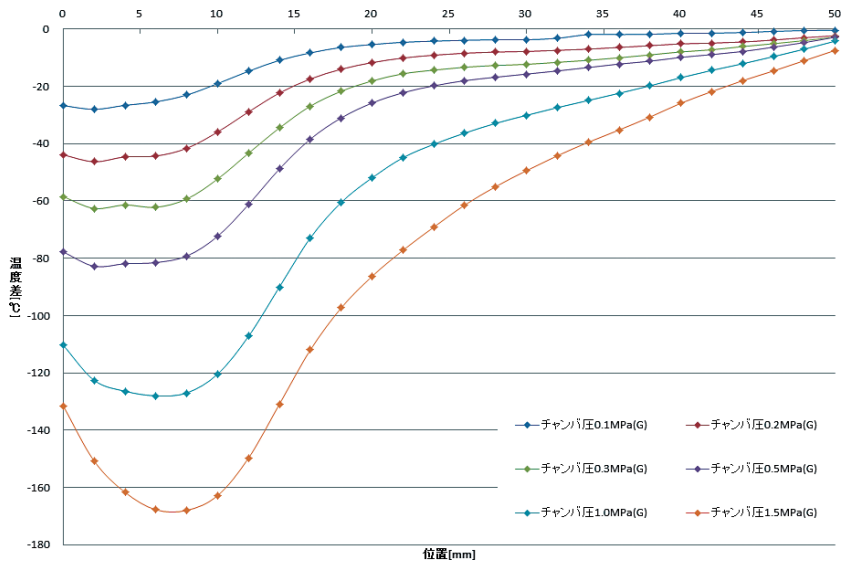


図6 大気圧を基準にした温度差分布

## 5. 燃焼試験結果

燃料を添加したガス（以下燃料ガスとする）をリアクタへと供給した画像を撮影し、かつこの画像と4章で述べた燃料を添加しないガス（以下燃料無しガスとする）の画像とを画像処理ソフトであるImageJを利用して比較し、自己着火による発光を確認した<sup>(4)</sup>。同時に燃料ガスと燃料無しガスとの温度差も記録した。

### 5.1 画像による自己着火観察

円筒形電気ヒータで加熱したリアクタに対し、燃料ガスを供給し、リアクタ内の自己着火による発光状態をデジタルカメラで撮影観察した。デジタルカメラのレンズにCHフィルタを使用し、限定的な可視光のみを撮影した<sup>(3)</sup>。

本稿にて報告する結果の燃料はn-ヘプタンである。混合タンク（燃料ガス）の温度は100℃、等量比は1.0（燃料/空気の割合）、リアクタ用ヒータのコントロール温度は1000℃とした。

表1にチャンバ圧：大気圧、加圧用N<sub>2</sub>流量：

10L/minで混合タンク圧を、0.6、0.8、1.0、1.5MPa（G）に変化させたときの結果を示す。


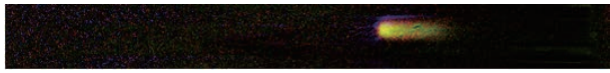
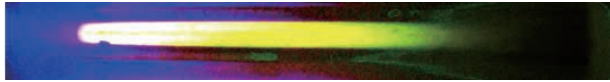
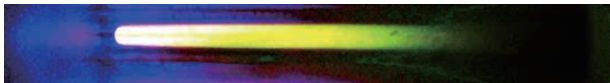
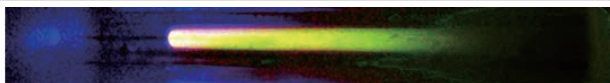
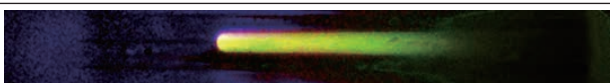
試験番号1（燃料無しガスの場合）での画像は右端が白く発光している。これは電気ヒータの輻射光と考えられる。燃料ガス時の各圧力での画像を試験番号2～6に示す。

試験番号2の画像では、画像中央やや右寄りが黄色の発光となっている。これが自己着火現象における発光と考えられる。

次に試験番号3の画像を見ると、画像幅の約60%程度が黄色の帯状発光となっている。試験番号2と3の試験における条件の差異は、燃料ガスの送気途中における保温ヒータの有無である。これより、保温ヒータが無い試験番号2では、燃料が送気途中に液化することで、ガスの燃料成分が減少し、自己着火温度が高温側（右側）へと移動したと推測できる。

また試験番号3～6（保温ヒータ有）の画像では、左端の発光が徐々に右方向へと移動している。混合タンクを高圧にすると飽和蒸気圧が下がり、燃料は送気中に液化し、自己着火温度は高温側へと

表 1 大気圧における n-ヘプタン試料による発光画像

番号	混合タンク圧	配管保温	条件
			・チャンバ圧：0.0MPa (G) ・加圧用 N <sub>2</sub> 流量：10L/min
1	無燃料 0.6MPa (G)	有	
2	0.6MPa (G)	無	
3	0.6MPa (G)	有	
4	0.8MPa (G)	有	
5	1.0MPa (G)	有	
6	1.5MPa (G)	有	

移動したと考えられる。これは、配管保温ヒータを 90℃ 以上の高温（100℃ 程度）にすることで、改善できる。

次に、チャンバ圧を高圧化させ、同様に撮影画像の画像処理を行った。

チャンバ圧を 0.0MPa (G) から 1.5MPa (G)、さらに 2.8MPa (G) へと加圧して試験を実施した。

表 2 に試験結果を示す。試験番号 7 (1.5MPa (G))、試験番号 8 (2.8MPa (G)) のようにチャンバの圧力を上げると、発光を確認することができなくなった。これはチャンバ内の N<sub>2</sub> 分子が混在し、光としてカメラまで届くことができなかつ

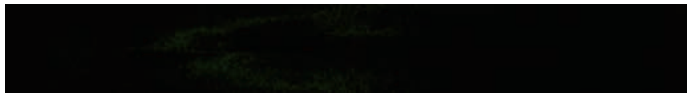

たためと考えられる。

## 5.2 温度差による自己着火観察

5.1 節にて説明した試験条件にて、各位置における燃料ガスと燃料無しガスの温度差を比較する。温度差が大きい箇所について、「なにかがエネルギー的に発生した」と考え、自己着火現象との関係を検討した。

表 1 の試験番号 3～6 のうち、すべてが、図 7～図 10 で示すように位置 5～15mm の間において温度差ピークを確認することができた。また混合タンク圧が高圧になるにつれ、温度差ピークの

表 2 高圧状態における n-ヘプタン試料による発光画像

番号	チャンバ圧	条件
		・混合タンク圧：3.5MPa ・加圧用 N <sub>2</sub> 流量：10L/min ・配管保温：有
7	1.5MPa (G)	
8	2.8MPa (G)	



位置は高温側（右方向）へと移動している。この傾向は、5.1 節の結果と合致している。

個別に温度差ピークと、発光画像とを比較すると、温度差ピークと発光帯の左端とが合致していることがわかる。また、燃料ガスと燃料無しガスとの温度差が大きい箇所を自己着火現象を光として観察できることがわかる。

5.2 節により、チャンバが高圧下にあり光が届かなくとも自己着火発生箇所は温度差をもって、観察することが可能であると考えられる。

## 6. まとめ

マイクロフローリアクタ試験装置の開発において以下のことが明らかになった。

- ①リアクタ、ヒータ、熱電対、および熱電対移動機構をチャンバ内に収納し、その外側から覗き窓を通し、カメラにて自己着火現象の撮影が可能となった。円筒形電気ヒータにより約 300 ~ 1000℃ の温度分布を 50mm の区間で持つことができた。また、水素バーナ加熱式 (313℃ /cm) と比較し、温度分解能 (68℃ /cm)

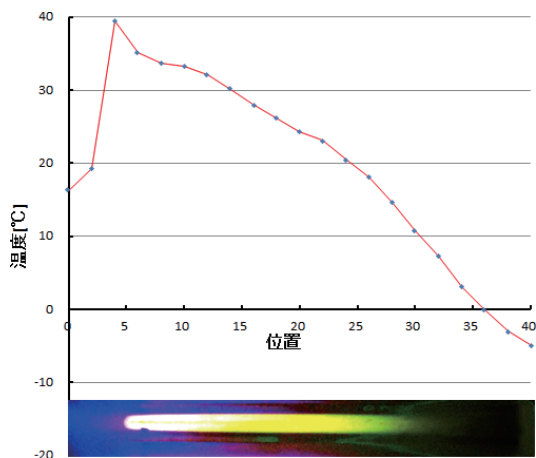


図7 試験番号3 燃料ガス/燃料無しガスの温度差

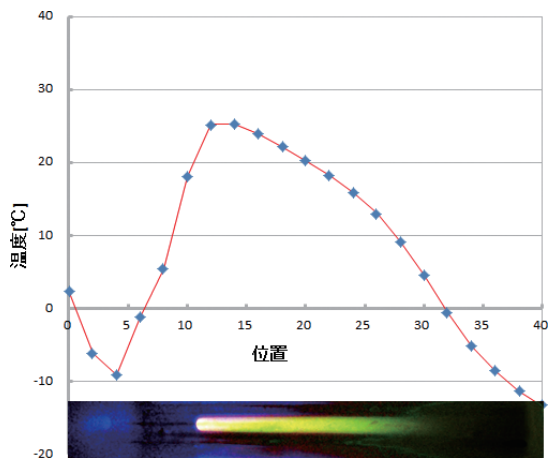


図9 試験番号5 燃料ガス/燃料無しガスの温度差

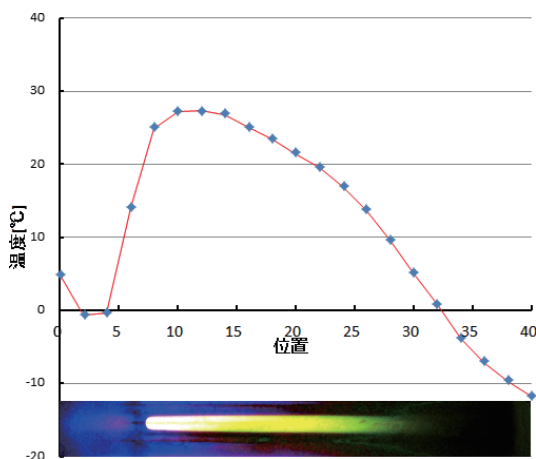


図8 試験番号4 燃料ガス/燃料無しガスの温度差

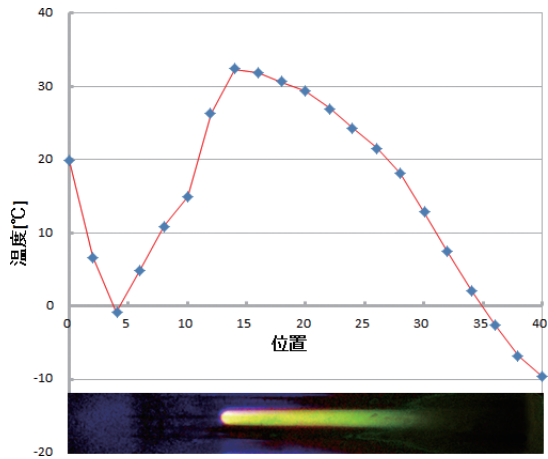


図10 試験番号6 燃料ガス/燃料無しガスの温度差

が向上し、より詳細に温度差による自己着火現象を評価することが可能となった<sup>(4)</sup>。

- ②チャンバ内にリアクタを収納することにより、リアクタに圧力をかけることが可能となり、内燃機関の環境を模擬することができた。燃料送気経路を保温することで、送気中に液化することが少なくなり、発光現象を画像として確認することができた。
- ③チャンバ圧が大気に近いほど発光現象は鮮やかであり、チャンバ圧を高圧にするほど発光はおぼろげとなる。これはチャンバ内の分子数が増加し、光がカメラまで到達しにくいためと考えられる。
- ④燃料を添加したガス（有燃料）と燃料を添加しないガス（無燃料）との各位置による温度差をもって自己着火現象を確認できることがわかった。これより、チャンバ圧に依存せず、自己着火現象を確認することができると考える。

今後、気体燃料（メタン）やガソリンを燃料として自己着火現象を評価することも課題となる。

## 参考文献

- (1) 中村、手塚、長谷川、丸田：日本燃焼学会誌、第55巻、173号、2013、pp.264-271
- (2) 山本、押部、中村、長谷川、手塚、丸田：第47回燃焼シンポジウム、2009、pp.230-231
- (3) Shogo Kikui, Taiki Kamada, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta : Characteristics of n-butane weak flames at elevated pressures in micro flow reactor with a controlled temperature profile ScienceDirect, 2015, pp.3405-3412
- (4) 田中宏一、佐瀬昭、松井邦雄：マイクロフローリアクタ試験装置の開発、IIC REVIEW、No.52、2014/10、pp.73-81



ジャプス事業部  
技術部  
尾木 一馬  
TEL. 0565-86-1501  
FAX. 0565-86-1502



ジャプス事業部  
技術部  
次長  
田中 宏一  
TEL. 0565-86-1501  
FAX. 0565-86-1502



ジャプス事業部  
技術部  
部長  
佐瀬 昭  
TEL. 03-6404-6615  
FAX. 03-6404-6044



ジャプス事業部  
事業部長  
松井 邦雄  
TEL. 0565-86-1501  
FAX. 0565-86-1502