

マイクロフローリアクタ試験装置の開発

田中 宏一^{*1} 佐瀬 昭^{*2} 松井 邦雄^{*3}
Tanaka Koichi Sase Akira Matsui Kunio

燃料の自己着火過程の把握は燃焼特性の基礎研究、さらには、エンジン開発を行う上で重要である。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、加熱方式を水素バーナ式として、リアクタ内の火災発生状況を観察できる装置を開発してきた。一方、エンジン開発を見据えたリアクタ内の高圧化要請もあり、水素バーナ式から電気ヒータ式へと装置構成を変更することによって、その可能性を模索してきた。

本稿では電気ヒータ式とした温度分布制御型マイクロフローリアクタ試験装置による燃焼試験によって、微弱光 (Weak flame) を観察できることを確認した状況を紹介する。また、燃焼中のリアクタ内温度変化量の計測という、画像観察以外の燃焼過程計測方法を提案する。

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、i-オクタン

1. 緒言

予混合圧縮自己着火燃焼 (Homogeneous-Charge Compression-Ignition combustion、HCCI 燃焼) を用いた HCCI エンジンをはじめとして、内燃機関の高効率化のためには、燃料固有の着火・燃焼特性、およびその化学反応状況を調べる必要がある。従来の試験方法ではさまざまな外乱や可変パラメータが存在することから着火過程の予測を困難にさせている⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾。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に着目し、この技術を使った、各種の燃料や環境条件に対する燃焼・着火特性を調べている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

当社では、そのマイクロフローリアクタを使った試験装置を構成し、燃料の自己着火観察や、燃焼状況の写真撮影を行ってきた⁽⁴⁾。その発展形態

として、内燃機関の燃焼状況に近づけるために、3MPa までの高圧条件化でのマイクロフローリアクタを使った燃焼状況の観察を行うことを計画し、まず、実績のある水素バーナ式から電気ヒータ式へと変更することとした。

本稿では、この電気ヒータ式によるマイクロフローリアクタにて燃焼試験を行った状況、さらには、試作した高圧化のためのチャンバを使った大気圧条件下での燃焼・発光を観察した状況について、報告する。

2. 計測原理

図 1 を使って、今回試作したマイクロフローリアクタ試験装置での計測原理を説明する。

燃料ガス生成タンク内気化方式により、燃料/空気の混合気を作り、マイクロフローリアクタへ供給する⁽⁴⁾。

*1：ジャプス事業部 技術部 次長

*2：ジャプス事業部 技術部 部長

*3：ジャプス事業部 事業部長

このとき、マイクロフローリアクタ内温度が燃料ガスの流れ方向に対して昇温するような温度勾配を持つように、マイクロフローリアクタをその外部から加熱しておく⁽⁴⁾。次に、マイクロフローリアクタの下流側から温度センサを挿入し、燃料ガス流れ方向のマイクロフローリアクタ内温度分布を計測する。最後に、マイクロフローリアクタへ燃料混合気を供給し、前述の温度勾配部を進行していく過程で、自己着火・発光した様子を電気ヒータよりも外側に配置したデジタルカメラにて撮影し、着火位置を求める。

一方、高圧化のためのチャンバを用いる場合には、チャンバ（図示無し）内部にカメラ以外を収納する。温度計測については同様であるが、自己着火・発光した様子についてはチャンバに備えた観察窓を通して観察し、カメラ撮影する。

3. 電気ヒータ式加熱

3.1 電気ヒータの選定

マイクロフローリアクタをその外周部から加熱し、長時間連続して 1000℃ 以上の発熱状態を維持できる炭化ケイ素製電気ヒータを選定した。

図 2 に電気ヒータの構成を示す。電気ヒータの外観は円筒形であり、その内部に配置されるマイクロフローリアクタは半径方向外側から加熱される。また、周囲を断熱材で覆い、安全性に配慮した。電気ヒータ部の軸方向中央付近が発熱部（前述の 1000℃ 以上となる部位）となっている。それよりも左側（マイクロフローリアクタ上流側）には燃焼状況の撮影のためのスリット加工が施された非発熱部を持つ。今回、この非加熱部をマイクロフローリアクタに温度勾配を与える区間と想定した。さらに、発熱部温度を計測するための熱電対を備えており、外部制御器（図示無し）によって、目標温度（可変）を維持することができる。

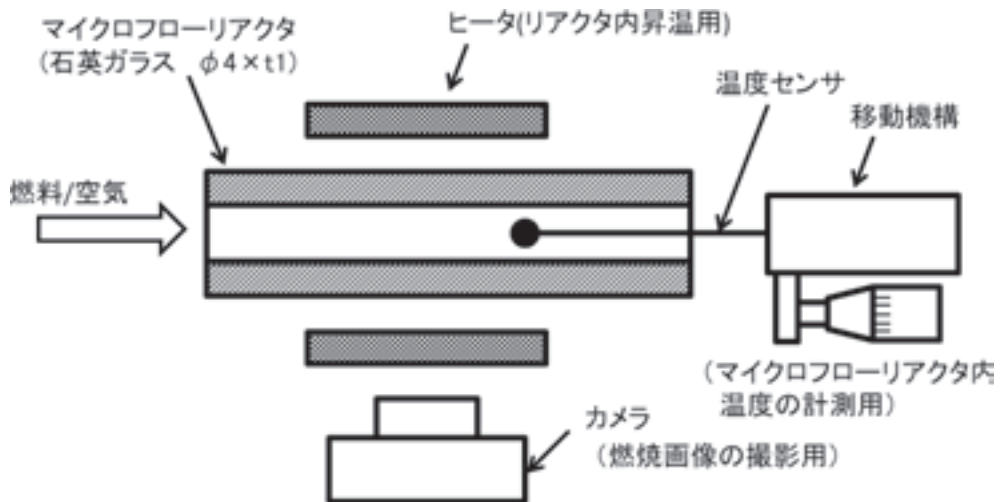


図 1 マイクロフローリアクタ 計測原理（大気圧条件）

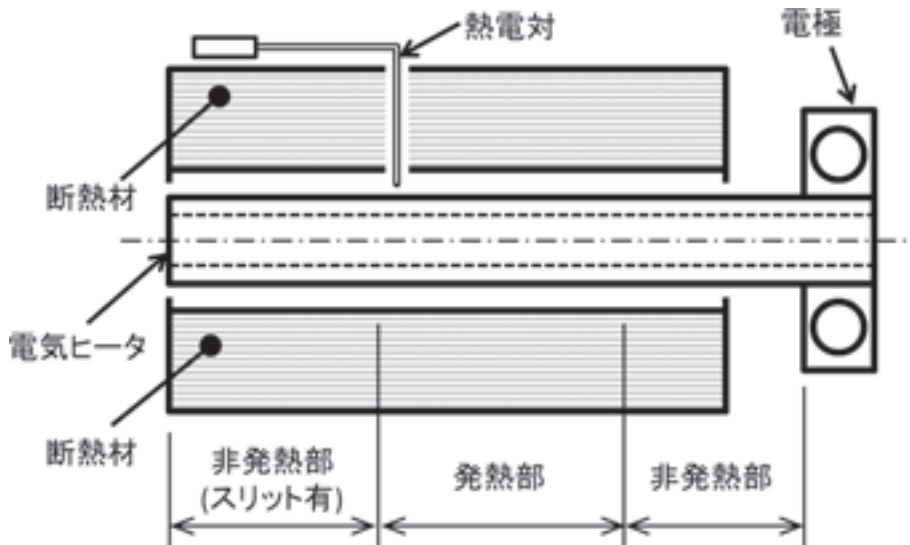


図2 電気ヒータの形状

3.2 マイクロフローリアクタ内温度分布の計測

電気ヒータ構成のうち、非発熱部長さを40mmとし、生成された温度分布を計測した。

図3に電気ヒータ目標温度を900℃、1000℃、1100℃と変化させた際の計測結果を示す。比較と

して、従来ヒータ（水素バーナ式）に関する当社実績を合わせて示す。図中、「発熱部端面」と示した位置から左側に上述の非発熱部（スリット有り）がある（電気ヒータに限る）。

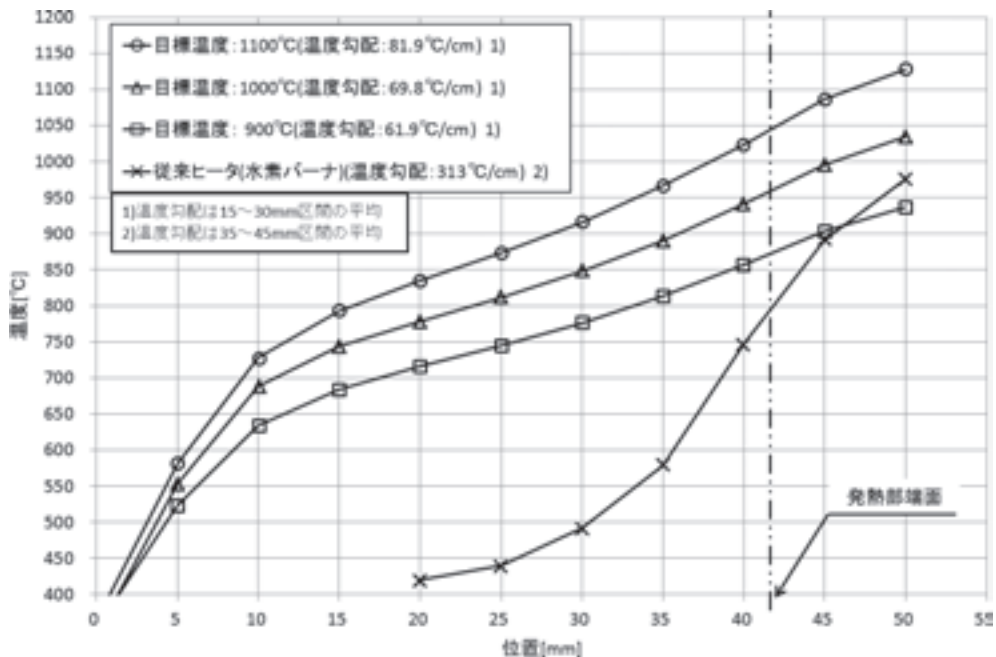


図3 マイクロフローリアクタ内温度分布（非発熱部長さ 40mm）

図3について、燃料ガスの自己着火をカメラ観察できる区間（0～40mm）に着目する。

電気ヒータの目標温度を変化させることで、最高到達温度を変化させることができた。従来ヒータでの水素バーナとマイクロフローリアクタ間の距離を変化させていた方式と比較すると、より簡便な方法によって、最高到達温度を変化させることができるものとする。

目標温度を変更しても最高温度に達するまでの変化傾向は、ほぼ一致している。これにより、評価したい燃料ガスに応じて、区間内で必要な最高温度を選択もしくは調整できると考えられる。

燃料ガス流れ方向に対して、マイクロフローリアクタ内温度が上昇するような温度勾配を生成でき（全目標温度条件ともに）、その勾配は従来ヒータと比較して1/5倍程度となった（15～40mm付近の区間、目標温度900℃にて）。これにより、温度分解能が約5倍となり、燃料ガスの自己着火・発光した様子を従来よりも高い分解能で温度評価

ができるものと考えている。

次に、温度勾配や最低温度の選択可能性について、電気ヒータの形状寸法を一部変更し、試験によって確認した。今回、非発熱部長さを60mmとした電気ヒータを構成し、同様の試験によって、マイクロフローリアクタ内温度分布を計測した。

図4に非発熱部長さ40mmおよび60mmに関して、電気ヒータ目標温度を900℃とした際の計測結果を示す。先と同様に、図中に「発熱部端面」位置を示している。

非発熱部長さ60mmの電気ヒータについては、非発熱部寸法が拡大したため、その延長範囲を含めた位置-20mm～+40mmまでの区間に着目する。また、温度計測ピッチ寸法を細かくし、非発熱部長さ40mmの電気ヒータについて、温度分布を再度計測した。

非発熱部長さを60mmとしたことにより、非発熱部端面までの区間において最低温度が203℃へと低下した（非発熱部長さ40mm条件では最低温

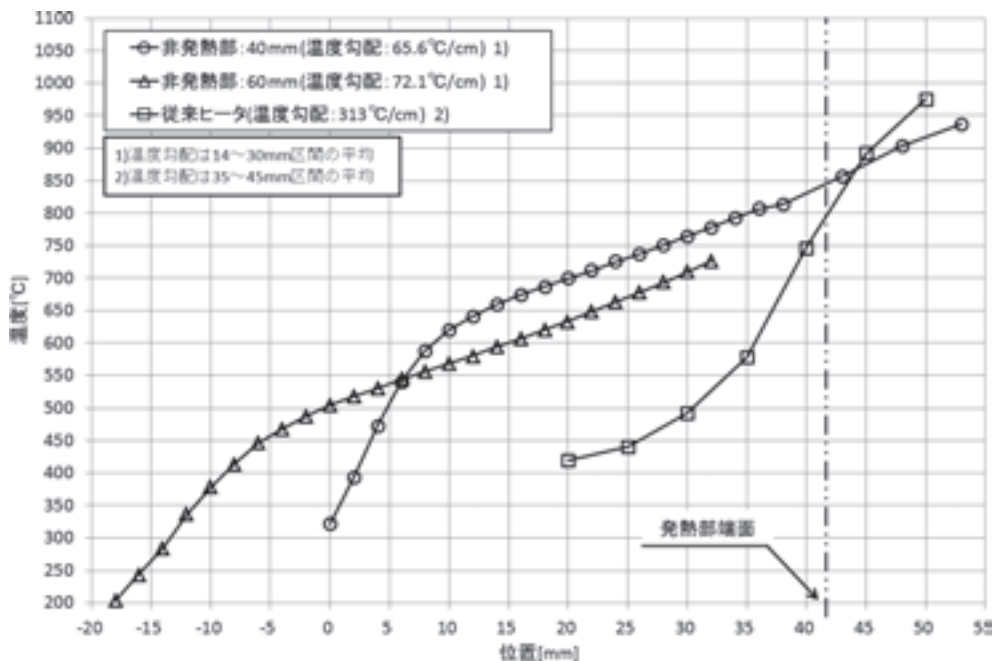


図4 マイクロフローリアクタ内温度分布（非発熱部長さ40mm/60mm）

度 321℃)。また、その温度勾配は、非発熱部長さ 40mm 条件と比較し、10%程度大きくなっている。ここで、温度センサの位置計測器材により、非発熱部長さ 60mm 品に関する位置 32mm よりも右側の温度データを取得できていない。同 40mm 品での計測実績から、同 60mm 品においても同様な直線状の温度分布を示すものと推測している。

これらから、より広い温度範囲にてマイクロフローリアクタを使った実験観察ができる可能性があるものと考えられた。

しかしながら、カメラでの画像撮影の範囲に制約があるため、今後の装置化する際の課題とする。

4. 燃焼試験

燃料ガス生成タンク内気化方式にて、燃料ガス/空気の混合気を作り、マイクロフローリアクタへ供給した⁽⁴⁾。

マイクロフローリアクタによる火炎観察技術の特長は、燃料の着火・発光という燃焼過程を、温度尺度で空間的に分離し、継続的に観察できることである⁽²⁾⁽³⁾。

4.1 画像による燃焼観察結果

電気ヒータにて加熱したマイクロフローリアクタに対し、燃料ガスを供給し、マイクロフローリアクタ内での自己着火・発光状態を、そのレンズに CH フィルタを装着したデジタルカメラでの写真撮影にて観察した⁽¹⁾。

今回適用した燃料は n-ヘプタンである。当量比を 1.0 (燃料/空気の割合) とし、低流速域 (2.5cm/s、3.0cm/s) での微弱火炎の発生状況を観察した。また、電気ヒータについては、非発熱部長さ 40mm とし、目標温度を 1000℃ および 1100℃ とした。なお、後述する画像処理のために、無燃料状態においても写真撮影を行っている。

表 1 n-ヘプタン燃料による燃焼画像

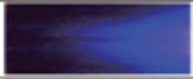




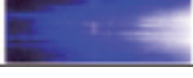
流速	電気ヒータ目標温度	
	1000℃	1100℃
無燃料		
3.0cm/s		
2.5cm/s		

表 1 に各条件にて写真撮影した画像を示す。各写真の左側がマイクロフローリアクタ上流側 (マイクロフローリアクタ内温度が低い側) である。

画像からは、燃料の有無やガス流速、電気ヒータ目標温度によらず、画像の右側付近において、白い発光状態を観察できる。これは電気ヒータからの輻射光と考えている。

次に、目標温度 1000℃ の場合に、燃料ガスを供給すると、画像中央からやや右側において、点状の発光箇所を確認できる。同目標温度 1100℃ / 流速 2.5cm/s の場合には、画像のほぼ中央付近に、同様の点状の発光箇所を確認できる。この発光は、三段目の Weak Flame と呼ばれる現象によるものと考えている⁽¹⁾。その Weak Flame の上流側 (画像の左側) に、左右方向に伸びた青い帯状の発光部位と推測できる範囲を確認できる。ただし、画像右側からの白い発光状態の延長の可能性もあり、その判別は困難である。

そこで、画像処理ソフト「ImageJ」⁽⁵⁾ を利用し、無燃料ガス画像を基準として、燃料ガスが燃焼している際の画像との差分を演算にて求めることとした。ただし、その演算にあたっては、電気ヒータの目標温度条件を一致させている。

表2 n-ヘプタン燃料による演算後画像 (1000℃)

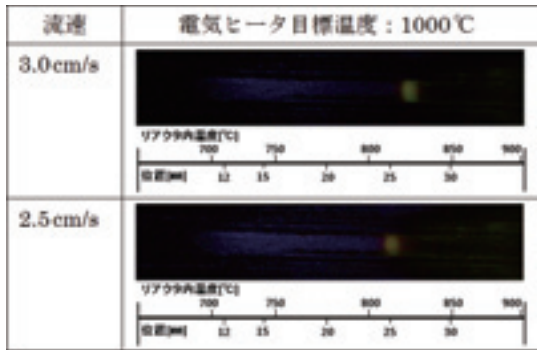


表3 n-ヘプタン燃料による演算後画像 (1100℃)

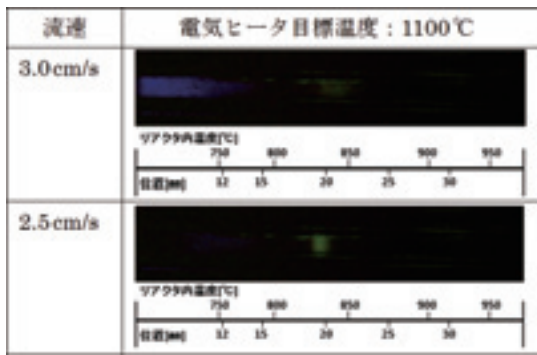


表2および表3に演算処理後の画像を示す。各画像には、基準位置からの距離とリアクタ内温度とを、前項を基に作成した指標として合わせて示している。この演算により、各画像右側の白い発光部位が無くなったことを確認することができる。次に、810～840℃付近における Weak Flame 発光を演算前と比較して、明瞭に確認することができる。

また、700～800℃付近にかけての帯状青色発光部位についても、同様に、演算前と比較して、明瞭に確認することができる。この温度帯での発光現象については、燃料ガスが温度上昇した環境に流入し、CHラジカルによる発光現象を捉えたものと考えている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

このように、画像間の演算という方法を用いることにより画像観察を阻害する電気ヒータの発光の影響を取り除くことができた。

4.2 リアクタ内温度差計測

画像による燃焼観察とは別に、燃焼時のマイクロフローリアクタ内の温度を計測し、無燃焼時との温度差を抽出した。さらに、その温度差分布と燃焼画像とを比較した。

試験条件は、電気ヒータ非発熱部長さ40mmとし、目標温度1000℃とした。また、燃料ガスについては、n-ヘプタン、i-オクタンとし、流速3.0cm/s、2.5cm/sとした。

図5にn-ヘプタンに対する温度差分布を、図6にi-オクタンに対する温度差分布をそれぞれ示す。図中には相当する燃焼画像(演算処理後)を、リアクタ内位置を一致させて、示している。

いずれの温度差分布についても、画像から確認できる Weak Flame 位置 (n-ヘプタンの場合26mm付近。i-オクタンの場合32mm付近)と温度差ピークの位置とは、よく一致している。また、燃料ガスの中間生成物に対する燃焼現象としての発光位置 (n-ヘプタンの場合10～20mm付近。i-オクタンの場合13～20mm付近)と、なだらかな温度差の盛り上がり区間もまた、よく一致している。一方、発光していない区間についても、前述の温度差の盛り上がり区間の一部として、計測されている。このことから、画像観察だけでは判別しにくい燃焼状況についても、マイクロフローリアクタ内温度を計測することにより、その状況を把握できる可能性があることが示されたものと考えている。

これらの温度差計測は、画像観察と同時に使用することにより、燃料ガスの燃焼状況をより詳しく知るための手立てとなる可能性があると考えられる。

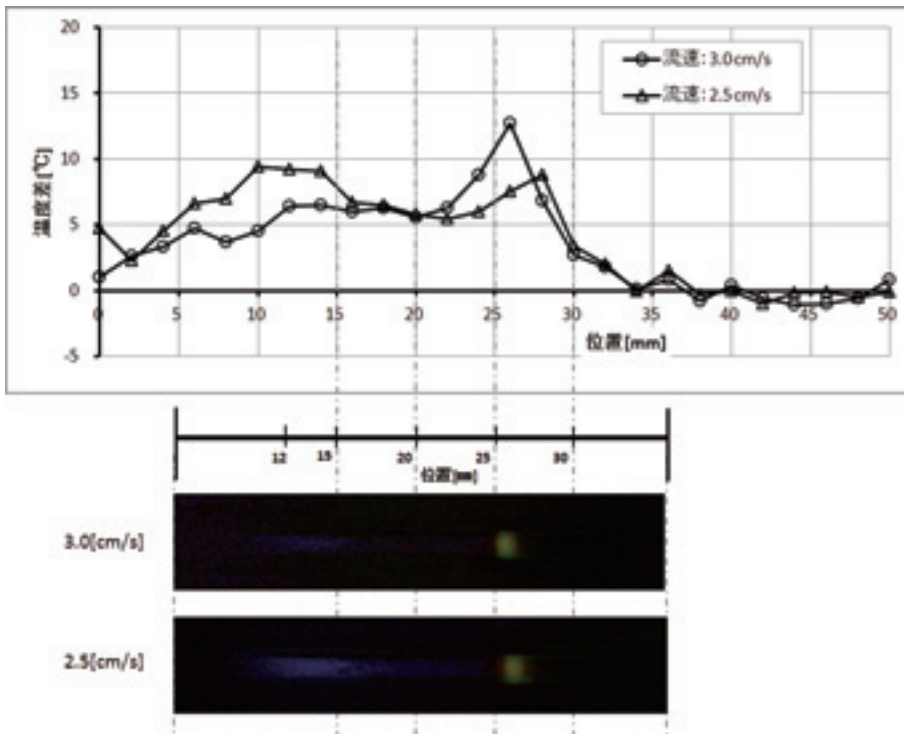


図5 リアクタ内の温度差分布 (n-ヘプタン燃料)

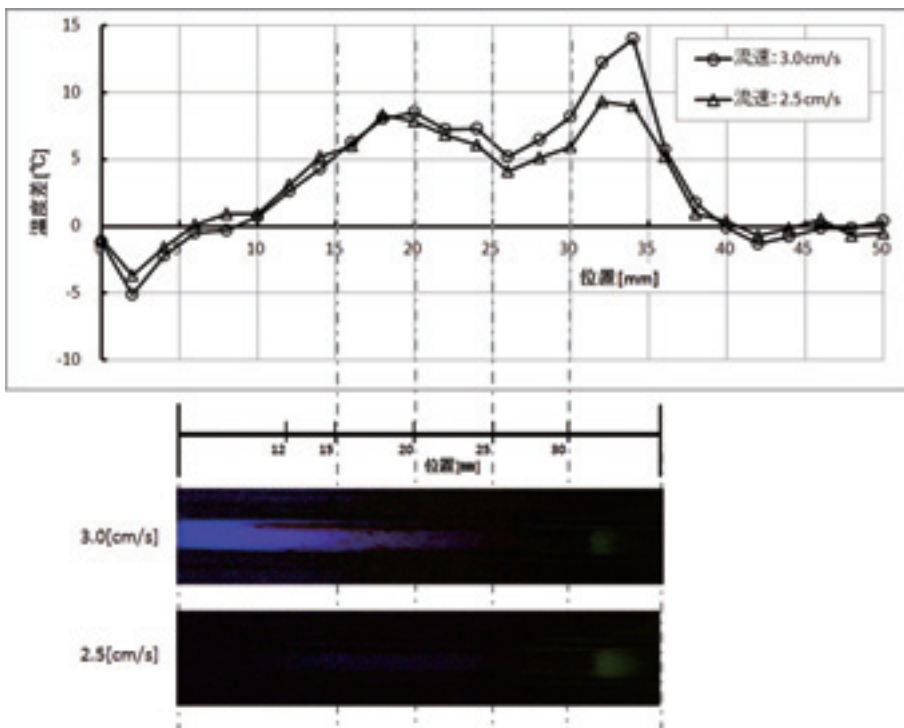


図6 リアクタ内の温度差分布 (i-オクタン燃料)

5. 高圧チャンバを用いた燃焼試験

内圧 3MPa とするための高圧チャンバを製作し、今般、大気圧条件化にて前述の画像観察を再現できた。その内容を以下に示す。

5.1 高圧チャンバの製作

内圧 3MPa まで可能なチャンバ（代表寸法：150A×530mm）を製作した。写真 1 にチャンバ外観を示す。

このチャンバ内部には電気ヒータやマイクロフローリアクタを配置している。また、燃料ガス供給や燃焼ガス排出のためのポート、電気ヒータへの電力供給や熱電対接続のための電気コネクタをチャンバ外周部に設置している。さらに、チャンバ外に設置したカメラにてチャンバ内を撮影するための観察窓も設置している。

5.2 高圧チャンバでの燃焼試験結果

製作したチャンバにて、n-ヘプタンを燃料ガスとする燃焼状態を写真撮影した。条件として、流速を 3.0cm/s、および 2.5cm/s とし、電気ヒータ目

標温度 1000℃ とした。また、チャンバ内は大気圧として、表 2 の再現を行うこととした。

表 4 チャンバ外から撮影した燃焼中のリアクタ内画像（演算処理後）

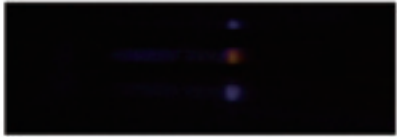
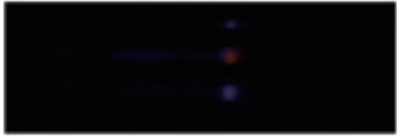
流速	電気ヒータ温度：1000℃
3.0cm/s	
2.5cm/s	

表 4 に、チャンバ外から撮影したマイクロフローリアクタ内の燃焼画像を示す。ただし、画像は 4.1 項に示す演算処理を行っている。

画像からは中心よりもやや右側において、Weak Flame による発光を確認できる。また、その左側（マイクロフローリアクタ上流側）において、中間生成物による発光現象を確認できる。Weak Flame の位置関係は、光学系配置の再現性の問題から、表 2

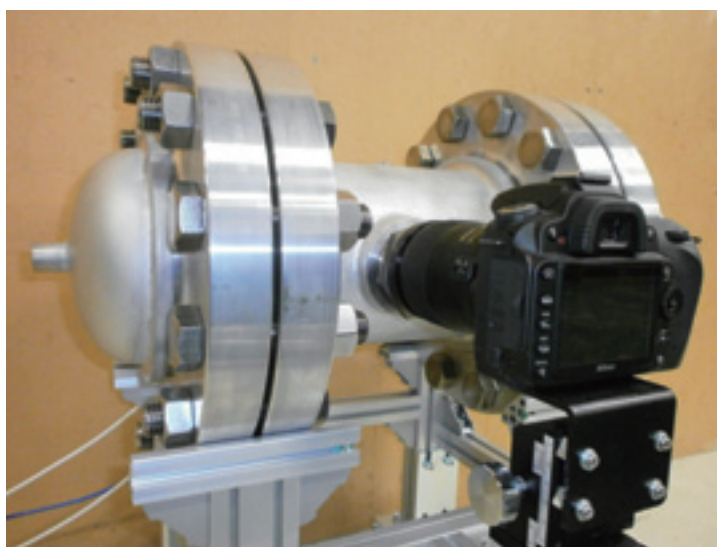


写真 1 チャンバ外観

とは完全には一致していない。これらを基にすると、チャンバ内に設置した電気ヒータによって、表2を再現できていると考える。

6. まとめ

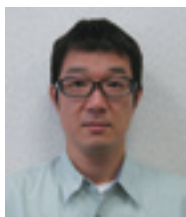
- ・ 電気ヒータによるマイクロフローリアクタの加熱によって、マイクロフローリアクタ内の最高到達温度を制御でき、また、温度勾配を生成することができた。その温度勾配は、水素バーナ式と比較して、約1/5倍となり、位置に対する温度分解能が向上した。
- ・ 燃料ガスを電気ヒータにて加熱されたマイクロフローリアクタに供給し、燃焼状態を写真撮影した。この写真画像と、無燃料時の写真画像との差分抽出（演算処理）によって、Weak Flameの発生温度といった燃焼状態を明瞭に確認することができた。
- ・ 燃焼中のリアクタ内温度差分布と燃焼画像（演算処理）とによって、画像単独よりもマイクロフローリアクタ内の燃焼状況より詳しく把握できる可能性がある。
- ・ 高圧化（3MPa）のためのチャンバを製作し、大気圧条件化にて、燃料ガスの発光現象を写真撮影できた。電気ヒータをチャンバへ収納

設置する前の状況（燃料ガスの燃焼やその観察）を再現することができたと考える。

今後は、燃焼実験条件を拡大させるために、製作したチャンバを用いて、高圧化にも対応した燃焼実験装置とするための検討（ガス圧力制御、マイクロフローリアクタ内温度計測手法）および評価を行っていく計画である。

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) Mikito Hori, Akira Yamamoto, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta : Study on octane number dependence of PRF/air weak flames at 1-5 atm in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, Combustion and Flame, Vol.159, Issue 3, 2012, pp.959-967
- (3) 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
- (4) 松井、鈴木、佐瀬：マイクロフローリアクタ試験装置の開発、IIC REVIEW No.48、2012、pp.76-81
- (5) <http://imagej.nih.gov/ij/>



ジャプス事業部
技術部
次長

田中 宏一

TEL. 0565-28-0581
FAX. 0565-27-9621



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. 0565-28-0581
FAX. 0565-27-9621