

マイクロフローリアクタ試験装置の開発

松井 邦雄^{*1} 鈴木 優平^{*2} 佐瀬 昭^{*3}
Matsui Kunio Suzuki Yuhei Sase Akira

さまざまな燃料に対する自己着火過程の研究はエンジン開発や燃焼の物理的・化学的特性を理解するうえで重要である。本稿では水素ガスバーナを利用した温度分布制御型マイクロフローリアクタ試験装置を開発し、各種燃料の自己着火過程における火炎発生を調べた。まず、リアクタへ供給する燃料ガスの混合気を生成する方法を検討した。次にリアクタ加熱用水素ガスバーナの炎の形状やリアクタ内の温度分布を調べ、混合気の最適流量とリアクタの最適位置を見出した。さらに、リアクタ内に燃料ガスを流した際の火炎発生状況を観察した。

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、i-オクタン、HCCI

1. 概要

予混合圧縮自己着火燃焼（Homogeneous-Charge Compression-Ignition combustion、HCCI 燃焼）を用いた HCCI エンジンの開発をはじめとして、内燃機関の高効率化を進める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。

IHI 技術開発本部と共同研究を行っている東北大学 丸田教授の研究グループは温度分布制御型のマイクロフローリアクタに着目し、この方式を用いて各種燃料の着火・燃焼特性を調べている⁽¹⁾。

マイクロフローリアクタでは消炎距離以下の内径で、流れ方向に上昇する温度勾配を有し、着火に至る混合気温度の上昇が壁面温度分布に沿って行われるため、この方式では熱損失や乱流などの

外乱をできる限り少なくし、燃焼特性を評価しやすくする試験方式である。自己着火過程の試験に適用した例としては、n-ヘプタンを燃料とした試験において冷炎と熱炎による二段階着火を観察したことが報告されている⁽¹⁾。

当社では、水素ガスバーナを利用した温度分布制御型マイクロフローリアクタ試験装置を製作し、各種燃料の自己着火が安定して生じることを確認し、装置主要部の特性を確認した。

*1：ジャプス事業部 事業部長

*2：計測事業部 計測技術部

*3：ジャプス事業部 技術部 部長

2. 計測法の原理

(1) 計測原理 (図1参照)

燃料の混合気を生成し、マイクロフローリアクタ (石英ガラス管 $\phi 2\text{mm}$) 内を一定流量で通過させる。マイクロフローリアクタは水素バーナなどにより加熱されており、予め、内部の温度 (温度勾配) を測定しておく。燃料の混合気はマイクロフローリアクタ内で自己着火・発光するので、これを高感度カメラで観察し、着火位置を計測する。マイクロフローリアクタ内部温度と着火位置の関係から燃料物性を評価する。

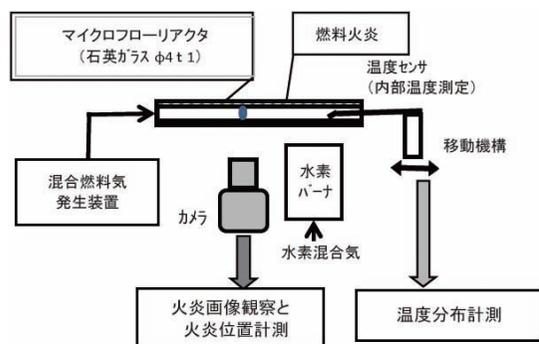


図1 マイクロフローリアクタ 計測原理

(2) 加熱方式

自己着火を生じる温度まで加熱可能な2種類の方式を比較、検討した。

一つ目は水素バーナで加熱する方法である。燃料の燃焼・発光観察を妨げず、比較的安定して長期間使用できる利点があるが、水素バーナが失火した時の水素漏れを防止するため、安全対策として失火を検出し水素ガスを遮断させる対策が必要になる。

二つ目は電気ヒータを用いて高温空気を生成してリアクタを加熱する方法である。こちらは安全性の確保が容易であるが、 1000°C 以上で動作する時の寿命が短いため、装置に適用することが困難であった。

開発装置では、加熱の安定性を考慮し、安全装置付きの水素バーナ方式を採用することとした (図2参照)。水素ガス供給にはマスフローコントローラを用いた水素、空気流量制御を採用した。また、バーナ内部にセラミック粒子を充填し、バーナ出口には焼結金属を装着することにより水素/空気混合気が均一に流れ出るようにした。さらに、失火検出方法として紫外線検出器を取り付け、バーナの炎の失火が検知されると水素を遮断するようにした。

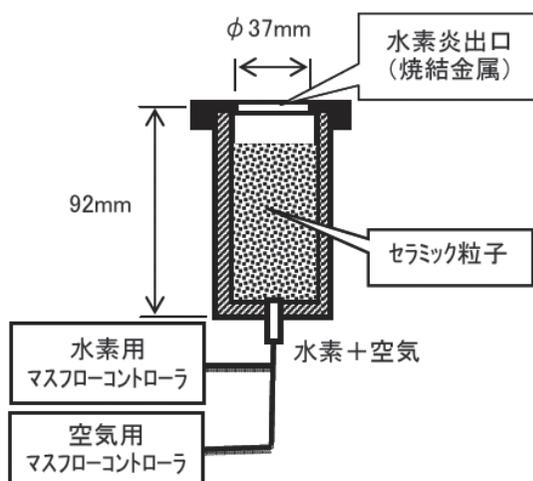


図2 水素バーナの構造

(3) 混合気生成法

燃料の混合気を生成するために3種類の方式を比較、検討した。一つ目は燃料ガス生成タンク内気化方式 (図3参照) である。この方式は窒素を注入したタンク内へ液体燃料を注入し、タンクを加熱・加圧することにより燃料混合ガスを生成し、リアクタ入口で必要な酸素ガスを混合してリアクタに送気する。この方式では混合気作成中は試験を中断する必要がある。

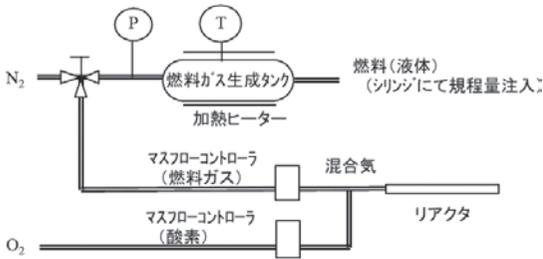


図3 燃料混合気生成装置
(燃料ガス生成タンク内気化方式)

二つ目は気化器を利用する方式(図4参照)である。この方式では気化器に燃料を通過させることにより燃料ガスを生成するが、燃料流量が極微量(数 $\mu\text{l/s}$)のため、流量の安定が得にくいことが難点である。

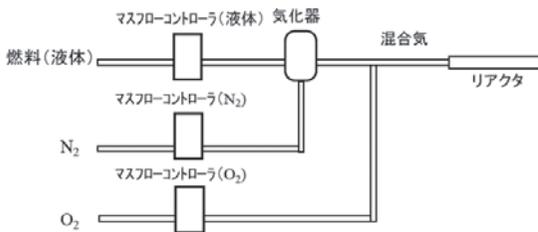


図4 燃料混合気生成装置(気化器方式)

三つ目はマイクロシリンジポンプを用いて直接リアクタ内へ燃料を注入する方式である。極微量の液体燃料注入を制御できるが、連続注入時間が10秒程度に限られる。

開発装置では、比較的長時間安定して混合気を供給できる燃料ガス生成タンク内気化方式を採用した。

3. リアクタ部の特性

燃料の混合気の自己着火過程を評価するためには水素火炎の温度分布を把握し、その結果としてリアクタ内の温度分布がどのような傾向を示すかを把握する必要がある。

(1) 火炎温度

1100K以上のリアクタ内温度を目標として、空気と水素の総流量を100 l/min 、水素濃度を15~20vol%としてリアクタ内の温度を測定した。温度センサはバーナの中心に置き、バーナ上部から30mm上方に設置した。図5に示すように、混合気中の水素濃度を上昇させると、燃焼エネルギーが増加し、それに伴ってリアクタ内の温度も上昇する。リアクタ内最高温度を1100K以上とするため、水素濃度を16vol%以上とすることに決めた。

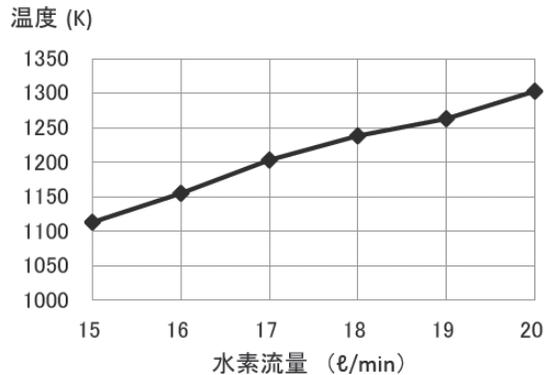


図5 水素火炎によるリアクタ内温度

(2) 水素火炎内の温度分布

水素火炎内各部の温度を測定し、火炎発生位置を把握するとともに、その温度分布からリアクタを設置する適切な位置(リアクタと水素バーナの距離)を定めることを目的とする。測定高さとは温度センサ先端と水素バーナ上部面の距離であり、0mm~50mmの範囲で変化させる。測定位置とは温度センサと水素バーナ中心の距離であり、左右 $\pm 15\text{mm}$ の範囲で変化させる。温度測定においては温度センサのシース部の加熱・放熱の影響を避けるため、温度

センサを垂直方向に設置して計測した。(図6参照)

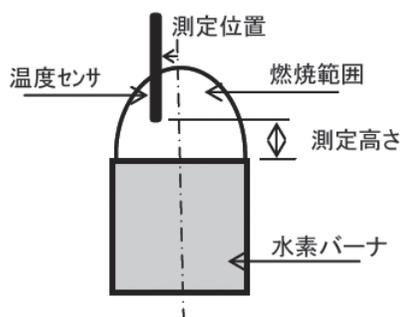


図6 水素火炎内温度測定

測定例として、水素バーナを総流量 90 l/min (空気流量 74 l/min、水素流量 16 l/min、水素濃度が 18%) の条件で動作させたとき、水素火炎内の温度測定結果を図7に示す。測定結果のグラフでは同じ温度で線を結び炎の形が視覚的にわかりやすくしている。

温度分布に非対称性がみられるが。これはバーナ出口に設けた焼結金属の不均一によるものと考えられる。リアクタの位置はこの影響が少ない高さに設定する必要がある。また、総流量 100 l/min (空気流量 80 l/min、水素流量 20 l/min および空気流量 84 l/min、水素流量 16 l/min) においても測定した結果、上記の影響が離れた位置まで及んでいた。このため、水素火炎内部は温度勾配が付きにくく、燃焼範囲を外れると急速に温度が低下すると予測される。

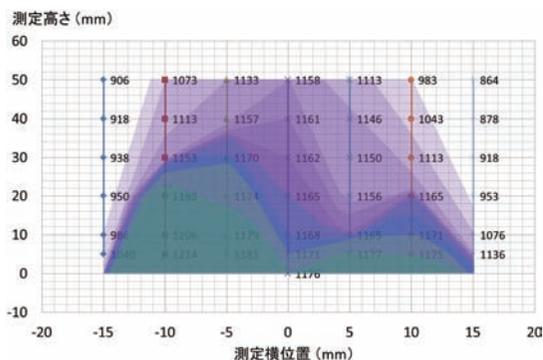


図7 水素火炎内温度測定結果

(3) リアクタ内温度と温度勾配

水素火炎を生成して加熱した時のリアクタ内温度分布を測定する。流量条件は総流量 90 l/min (空気流量 74 l/min、水素流量 16 l/min、水素濃度が 18%) である。リアクタの高さは 30mm と 40mm の 2 種類である。測定結果を図8、図9に示す。

リアクタ高さ 40mm に対してリアクタ高さ 30mm ではバーナ中心付近に温度勾配の少ない部分が生じている。また、最高温度と最低温度に違いは見られなかった。この測定結果から、着火温度と想定される 1100 ~ 1200K の間で、温度勾配を得ている条件 [空気 74 l/min、水素 16 l/min、リアクタ高さ 40mm] を最適条件 (図9) として、火炎観察を実施した。図において横軸は水素バーナ中心に対応する位置を 0mm とした位置を示す。燃料混合気は上流(-側)から下流(+側)に流れる。

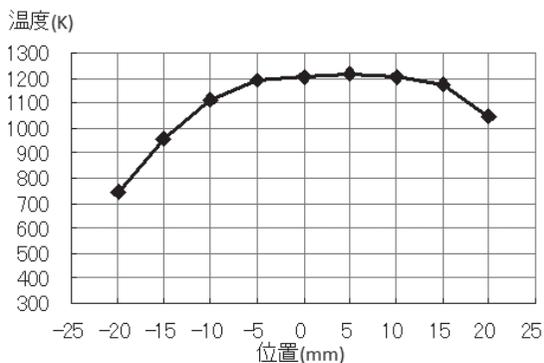


図8 リアクタ内温度分布 (リアクタ高さ 30mm)

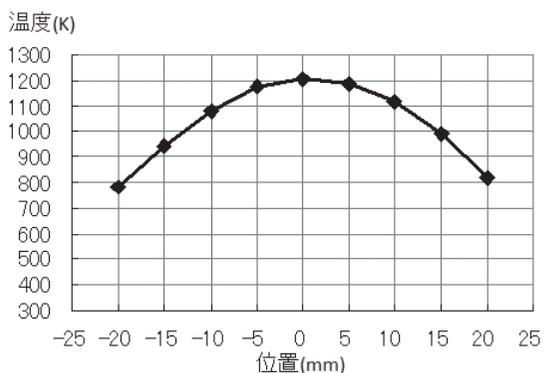


図9 リアクタ内温度分布 (リアクタ高さ 40mm)

4. 火炎観察結果

(1) 火炎観察装置

マイクロフローリアクタ内で発生する火炎を特殊フィルタ付き高感度デジタルカメラを用いて観察し、火炎画像を収集した。

(2) リアクタ内流速による火炎発生

燃料としてn-ヘプタン (C_7H_{16}) とi-オクタン (C_8H_{18}) を使い、当量比 1.0 の燃料/空気混合気を生成して流したとき、リアクタ内で発生する火炎反応を観察した。その結果を図 10 と図 11 に示す。

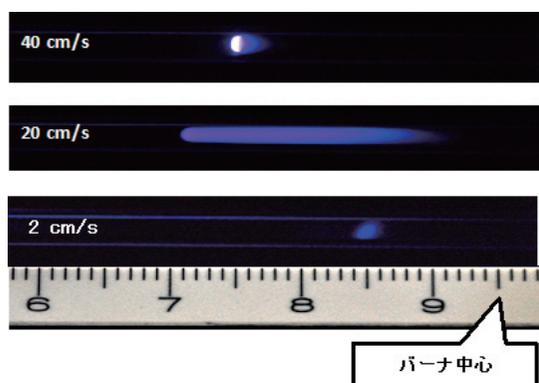


図 10 火炎観察結果 (n-ヘプタン)

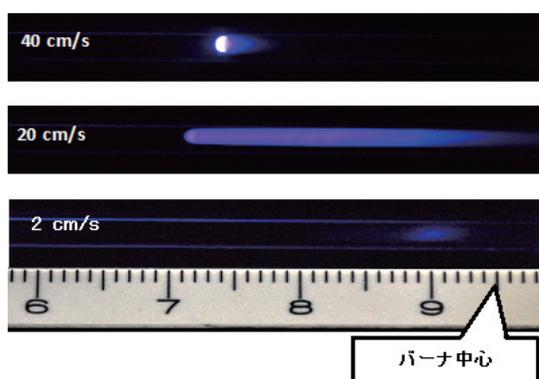


図 11 火炎観察結果 (i-オクタン)

流速が 30cm/s 以上の高流速域では通常の平面火炎 (Normal flame) が観察された。

流速が 5 ~ 30cm/s の中流速域では、下流で着火

して上流へ伝搬して消炎するサイクルを繰り返す非定常火炎 (FREI: Flame with Repetitive Extinction and Ignition) が観察された。

流速が 3cm/s 以下の低流速域では安定した微弱火炎 (Weak flame) が観察された。

(3) 燃料による火炎観察結果

低流速域においては発生火炎による発熱がその影響を無視できるほど少なく、リアクタ壁面温度によって火炎発生が決定されるため、火炎発生位置が安定するといわれている⁽¹⁾。このため、燃料による比較は低流速域での微弱火炎の観察を実施した。

n-ヘプタン (オクタン価 0 相当)、n-ヘプタン+i-オクタン (オクタン価 50 相当) および i-オクタン (オクタン価 100 相当) の燃料を使い、当量比 1.0 の燃料/空気混合気を低流速域 (2cm/s) で流したときの微弱火炎を観察した結果を図 12 に示す。

微弱火炎においては上流側にさらに微弱な発光部分が観察されている。これは、燃料が一部分解されて中間生成物として CH_2O や H_2O_2 が生成され (冷炎)、CO を経て CO_2 が生成される冷炎生成物の酸化反応 (熱炎) が分離されたものといわれている⁽¹⁾。

この結果から、燃料による着火温度の変化が識別できることがわかる。

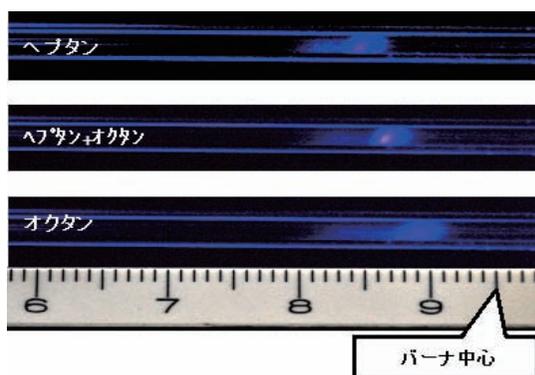


図 12 燃料による微弱火炎観察結果

5. 結言

各種燃料の自着火過程において、着火・燃焼特性を調べるための温度制御型マイクロフローリアクタ試験装置を開発した。図 13 はその装置外観である。

この試験装置により、火炎発生観察を行い、各種火炎観察から、着火・燃焼過程の観察が可能であることを確認した。

燃料の多様化・効率化が求められ、対応するさまざまな研究にこの試験装置が貢献できるよう、今後はさらに以下の改良点を検討している。

- ①リアクタ加熱方式として、加熱温度制御のしやすい電気ヒータ方式の導入の検討
- ②微弱光を観察するための感度とS/N比の向上の検討



図 13 マイクロフローリアクタ試験装置 外観

参考文献

- (1) 山本、押部、中村、長谷川、手塚、丸田、第 47 回燃焼シンポジウム：230-231 (2009)



ジャプス事業部
事業部長
松井 邦雄

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



計測事業部
計測技術部
鈴木 優平

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3542



ジャプス事業部
技術部
部長
佐瀬 昭

TEL. 03-3778-7965
FAX. 03-3778-7968