

K2-43

## 非平衡プラズマ放電が HCCI 時の冷炎に与える影響

## Influence of Non-Equilibrium Plasma Discharge on Cool Flame under HCCI Condition

○高橋克仁<sup>1</sup>, 中村和史<sup>1</sup>, 宮内佑輔<sup>2</sup>, 飯島晃良<sup>3</sup>, 田辺光昭<sup>4</sup>\*Takahashi Katsuhito<sup>1</sup>, Nakamura Kazushi<sup>1</sup>, Miyauchi Yusuke<sup>2</sup>, Iijima Akira<sup>3</sup>, Tanabe Mitsuaki<sup>4</sup>,

Abstract: In order to obtain the knowledge on the behavior of cool flame with and without non-equilibrium plasma discharge for *n*-heptane / oxygen / nitrogen premixed gas in each case was spontaneously ignited by using super rapid compression machine(SRCM). As a result, it is thought that highly reactive radicals generated by non-equilibrium plasma discharge on the top of combustion chamber assisted the growth of radical pool. First introduction time( $\tau_1$ ) was shorter in combustion chamber from the bottom to top. The enriched radicals might have influenced the generation of the cool flame in combustion chamber at each space.

## 1. 序言

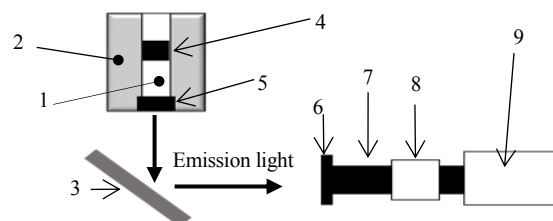
環境負荷低減のため、内燃機関には燃料消費率と有害排気物質の同時低減が求められている。これらを実現する内燃機関として均質予混合圧縮自発点火(HCCI:Homogeneous Charge Compression Ignition)エンジンが注目されている。HCCI エンジンでは予混合気の物理的着火起因がなく自発点火のタイミングが化学反応に依存するため、着火タイミング制御が困難である。この問題を解決する手段の一つとして、非平衡プラズマ放電を用いた自発点火促進技術が注目されている。反応性の高いラジカル類を生成する非平衡プラズマを与えることによって、低温酸化反応が促進される<sup>[1]</sup>。冷炎は低温酸化反応と呼ばれる反応機構によって成立する。このため、非平衡プラズマを与えることで冷炎の発生の仕方に違いが生ずると考えられる。

本研究は冷炎の発熱量が大きく、冷炎が観察しやすい *n*-heptane、窒素、酸素を用いた混合気に対して誘電体バリア放電によって非平衡プラズマを生成し、超急速圧縮装置(SRCM:Super Rapid Compression Machine)<sup>[2]</sup>を用いて燃焼させた際、非平衡プラズマ放電の有無が冷炎に与える影響について知見を得た。

## 2. 実験装置及び実験条件

シリンダのボアが 56 mm, 最大ストロークが 124 mm の実機における 1 回の圧縮・燃焼行程を模擬する超急速圧縮装置(SRCM)を用いた。SRCM は圧縮時間が約 5 ms と短いため圧縮過程での予混合気の化学反応が少なく、より詳細な自発点火過程を観察することが可能である。これに、圧縮中の巻き上げ渦を抑制できるクレビスピストンを用いた<sup>[3]</sup>。燃焼室の壁面上部に非平衡プラズマ生成用の放電プラグを設置し、非平衡プラ

ズマの生成を行い、それに対向する位置に圧力の変換素子を設置して燃焼室内の圧力の時間履歴を取得した。圧縮終了後から冷炎開始(発熱 20 %相当)までの期間を第 1 誘導期間  $\tau_1$ , 冷炎による発熱開始(発熱 20 %相当)から主の燃焼開始(発熱 20 %相当)までの期間を第 2 誘導期間  $\tau_2$  とした<sup>[4]</sup>。自発点火の挙動を観察するために、シリンダヘッドにサファイア製の窓を取り付け、冷炎発生時の中間生成物である HCHO の発光を可視化するために中心波長 390 nm, 半値幅 10 nm, 透過率 45 % 以上, 阻止域 0.01 % 以下のバンドパスフィルター, イメージインテンシファイアを通して高速度カメラで撮影した。実験条件は初期圧力 0.1 MPa, 初期温度 293 ± 3 K, 圧縮時間は 4.8 ± 0.1 ms, 圧縮比  $\epsilon = 12 \pm 0.5$ , 非平衡プラズマ放電は圧縮開始 5 s 前の大気圧条件下か HCCI 燃焼が終了するまでとした。高速度カメラのフレームレートは 62640 fps とした。*n*-heptane, 窒素, 酸素混合気の当量比は 0.5 とした。



1. Combustion chamber 2. Cylinder 3. Mirror  
4. Compression piston head 5. Sapphire window  
6. Filter 7. UV lens 8. Image intensifier  
9. High speed camera

Fig 1. Experimental apparatus

## 3. 実験結果及び考察

図 2, 3 に非平衡プラズマ放電の有無それぞれにお

ける HCHO の発光の様子を示す。圧縮終了後を 0 ms とし主の燃焼開始までの様子である。非平衡プラズマ放電の有無それぞれにおける空間的な発光強度分布の時間履歴を図 4, 5 に示す。発光分析に用いた範囲は燃焼室の中心を通り垂直方向の 56 mm(下端を 0 mm), 幅は 1 mm(黄色い枠で示されている範囲)とした。図中の黒線で囲んだ部分は冷炎発生時の燃え広がりを示す。白色の点線矢印は第 1 誘導期間  $\tau_1$ , 白色の実線矢印は第 2 誘導期間  $\tau_2$  を模式的に表す。非平衡プラズマを与えていない時は図 2, 4 より, 筒内全面で冷炎が発生し, 短期で熱炎へと変化する。図 3, 5 より非平衡プラズマを与えた時は非平衡プラズマを与えていない時より冷炎が早期に開始し, 長期にわたり上部から下部へと移動しながら発生している。

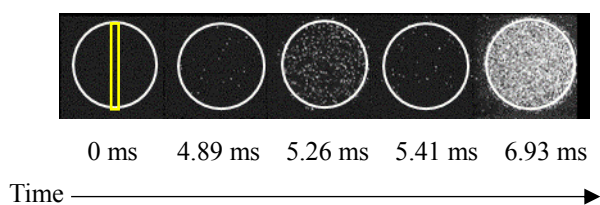


Fig 2. Without non-equilibrium plasma

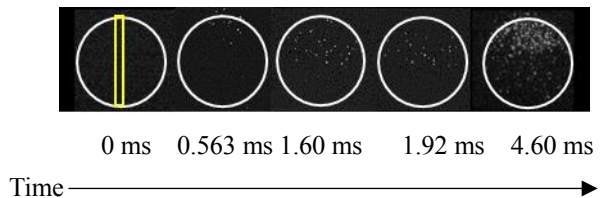


Fig 3. With non-equilibrium plasma

以下の(1)式は一般的なアレニウス型の総括反応速度式である。Wは反応速度, Aは定数, X,Yは反応における化学種濃度,  $i, j$ は反応乗数, Eは活性化エネルギー, Rはガス定数, Tは温度である。

$$W = A[X]^i[Y]^j \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

図 4, 5(白色の点線矢印期間)と式(1)より非平衡プラズマを上部に与えたことで燃焼室上部では下部に比べ反応性の高いラジカル類の初期濃度が高くなり反応速度が増大することで上部と下部の  $\tau_1$  の長さが変化し, 冷炎の空間的な発光強度の分布に違いが出たと考えられる。

$\tau_1$  が長期化すると冷炎による発熱量が大きくなる傾向がある<sup>[5-6]</sup>。冷炎による発熱量が変化することで  $\tau_2$  に影響を及ぼす。図 5(白色の点線矢印の期間)の  $\tau_1$  が燃焼

室の下部にかけて長期化していることから冷炎の発熱量は下部にかけて大きくなり, 図 5(白色の実線矢印の期間)の  $\tau_2$  は燃焼室下部にかけて短期化している可能性がある。

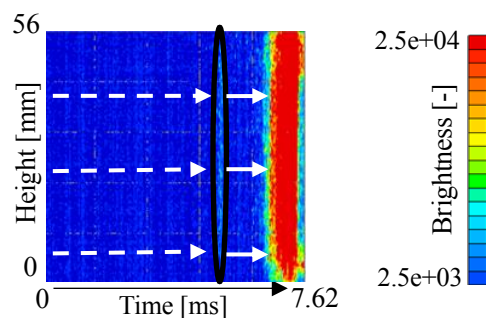


Fig 4. Without non-equilibrium plasma

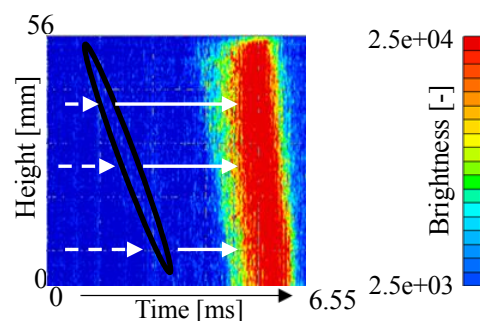


Fig 5. With non-equilibrium plasma

#### 4. 結言

非平衡プラズマを上部に与えたことで高反応性ラジカル類の初期濃度が高くなり反応速度が増大した可能性がある。反応速度の増大により,  $\tau_1$  が上部から下部へ長期化したことで冷炎が上部から下部へと連続して広がったと考えられる。

#### 5. 謝辞

本研究は日本大学理工学部先導研究推進助成金に採択された「プラズマ応用による内燃機関の革新的効率化に関する研究」の支援により実施された。

#### 参考文献

- [1] 中野道上ほか, 自動車技術学会論文集, Vol.43, No.4(2012), pp823-828
- [2] Watanabe, Y. et al., Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol.51, No.1, pp.65-69(2008)
- [3] Hasegawa, T. et al., JSAE20119334, SAE2011-01-1761.
- [4] Tanaka, S. et al., Combustion and Flame, 132, (2003), pp. 219-239.
- [5] 反町 侑貴, 日本大学理工学研究科修士論文, 2014
- [6] 佐藤 考, 日本大学理工学研究科修士論文, 2012