

論文・解説

17

火炎核を利用した圧縮自着火制御方法の検討

Study of Compression Auto-Ignition Control Method Using Flame Kernel

大野 諒平 *¹ 大澤 駿 *² 葛 晰遥 *³
Ryohei Ono Shun Osawa Sekiyou Katsu
沖濱 圭佑 *⁴ 原田 雄司 *⁵ 藤本 英史 *⁶
Keisuke Okihama Yuji Harada Hidefumi Fujimoto

要 約

内燃機関の効率改善には希薄燃焼を可能にする圧縮自着火燃焼が有効であるが、着火時期、燃焼期間制御が課題である。今回、従来の火花放電システムで生成される火炎核を利用した燃焼制御について検討した。低圧場において希薄混合気中に放電すると、形成された火炎核はその周囲の未燃混合気を昇温し、その後消炎する様子が可視化実験にて観察された。また、単気筒エンジンにて、吸気行程中に希薄混合気中に放電すると、放電から圧縮自着火までの時間が長いにもかかわらず、着火時期が進角した。この現象について、実験を模擬した詳細化学反応計算を用いて分析した。その結果、火炎核によって昇温された未燃混合気中の燃料が一部開裂することにより生成された化学種が圧縮着火前まで生存し、圧縮着火を誘発することが示唆された。また、開裂によって生じる化学種の中でもとりわけ HO_2 が、進角効果の大小に大きく影響を与えることが示唆された。

Summary

While compression auto-ignition enabling lean burn combustion is effective for improving the efficiency of the internal combustion engine, controlling ignition timing and combustion duration are major challenges. In this study, we considered enhancing the combustion control by using an electric discharge which forms a flame kernel. When an electric discharge occurred in lean air-fuel mixture under a low pressure condition, we observed a flame kernel formed, unburned gas near the kernel heated, and then the flame going out. And when an electric discharge occurred during an intake stroke in a single-cylinder engine, we observed the auto-ignition timing advanced despite a longer time passes from electric discharge to compression auto-ignition. Then we performed a detailed chemical reaction analysis simulating an experiment to analyze the factors of this phenomenon. The result of analysis suggested that part of the fuel in unburned gas, which had been heated up by the kernel, was cleaved and generated chemical species, which survived until the latter half of engine cycle and induced compression auto-ignition. It also indicated that among the chemical species generated by the cleavage, HO_2 , in particular, greatly affected the effect of advancing of ignition timing.

Key words : Heat engine, Compression ignition engine, Numerical calculation, Combustion analysis

1. はじめに

地球温暖化やエネルギーセキュリティ等の地球規模の課題に対応するため、内燃機関の熱効率向上が求められている。パワートレイン別長期見通し⁽¹⁾では、内燃機関搭載車のシェアは2030年に約90%、2040年においても約75%となっており、短・長期的に見ても高い。内燃機関の熱効率向上には、オットーサイクルの理論熱効率式から、希薄燃焼化と高圧縮比化が有効である。前者の

燃焼形態として均質予混合圧縮自着火 (Homogeneous Charge Compression Ignition, 以下HCCI) 燃焼が挙げられるが、着火時期と燃焼期間の制御が難しく、実用化に向けて制御性を高める必要がある。

近年、炭化水素燃料混合気に対して、誘電体バリア放電プラズマを照射することにより着火を促進させた研究事例⁽²⁻⁴⁾や、炭化水素の原子間結合 (C-C及びC-H結合) を均等に開裂させた分解生成物を圧縮前混合気を与えること、自着火時期が変化することを計算解析により確認し

*1,2,5,6 技術研究所
Technical Research Center

*3,4 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

た研究事例⁽⁵⁾が報告されている。本研究では、通常の火花点火システムにより生成される火炎核を利用し、炭化水素燃料を開裂させることを模擬した計算実験により、希薄予混合気の自着火燃焼促進に関する検討を行った。

2. 実験装置及び実験条件

本研究では、火炎核形成挙動を観察するための可視化実験と、エンジン環境下での着火時期変化を確認するための性能実験を実施した。前者の可視化実験には、1回のみでの圧縮が可能な急速圧縮装置 (Rapid Compression Machine, 以下 RCM) を用い、後者の性能実験には、単気筒エンジンを用いた。以下に用いた実験装置及び計測手法について述べる。

2.1 RCM

Fig. 1 に RCM 燃焼室形状を示す。本 RCM では、混合気はピストン上昇により圧縮されるとともに、連通路を通して燃焼室内に流入する。燃焼室形状は、直径約 35mm、厚さ 17mm の円筒状である。燃焼室両側面に設置した厚さ 20mm のサファイアガラス製観測窓により、燃焼室内部の観察を可能としている。ボア及びストロークは、それぞれ 89mm、95mm である。圧縮比は、2.3 における単気筒エンジンの有効圧縮比と同じ 12.4:1 とした。

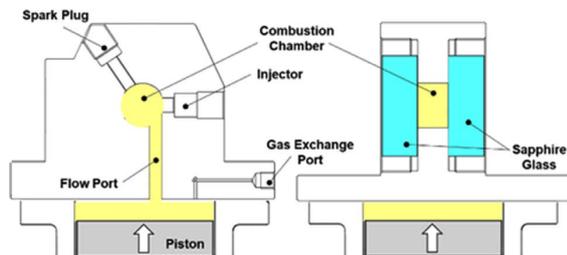


Fig. 1 Schematics of Combustion Chamber of RCM

Table 1 に実験条件を示す。燃料はイソオクタンとし、燃焼室に取り付けたインジェクタにより燃焼室内に供給される。燃料混合時間を十分に確保するため、RCM 作動 10 分前に燃料を噴射した。空燃比は 30:1 である。圧縮速度は、単気筒エンジン換算で約 750rpm 相当の圧縮速度とした。初期ガス温度及び壁面温度は 298K、初期ガス圧力は 101.3kPa である。火花点火の一次エネルギーは、100mj に設定し、圧縮開始から 25msec. 後に放電を行った。

Table 1 Experimental Conditions of RCM

Fuel	iso-Octane
Compression time (msec.)	40
Air-fuel ratio	30:1
Initial gas temperature (K)	298
Initial wall temperature (K)	298
Initial gas pressure (kPa)	101.3
Ignition energy (mj)	100

2.2 可視化計測手法

高速度カメラを用いて化学発光を撮影することにより、初期火炎核形成過程を観察した。また、シュリーレン撮影法を使用し、初期火炎核により形成される高温部の空間分布を定性的に可視化した。

2.3 単気筒エンジン

単気筒エンジンは 4 ストローク機関であり、行程容積は 622cm³、幾何学的圧縮比は 20:1、吸気弁閉弁時期における有効圧縮比は 12.4:1 である。点火プラグはシリンダーボア中心に設置した。Table 2 に単気筒エンジン諸元と実験条件をまとめる。

Table 2 Engine Specifications and Experimental Conditions

Engine type	4-stroke, Single cylinder
Bore (mm)	89
Stroke (mm)	100
Displacement volume (cm ³)	622
Geometric Compression ratio	20:1
Engine speed (rpm)	1000
Coolant temperature (deg. C)	90
Lubricant temperature (deg. C)	90
Inlet valve opening timing (deg. BTDC)	-47
Inlet valve closing timing (deg. ABDC)	87
Fuel supply	Direct Injection
Start of injection (deg. BTDC)	320 (single)
Fuel	Gasoline (91RON)
Air-fuel ratio	30:1
Ignition energy (mj/cycle)	100

3. 実験結果

3.1 RCM 可視化実験結果

Fig. 2 に RCM 燃焼室の圧力時間履歴を示す。比較のため、非放電時の結果も併せて示す。Fig. 2 より、放電の有無による圧力履歴の差異が小さいことがわかる。

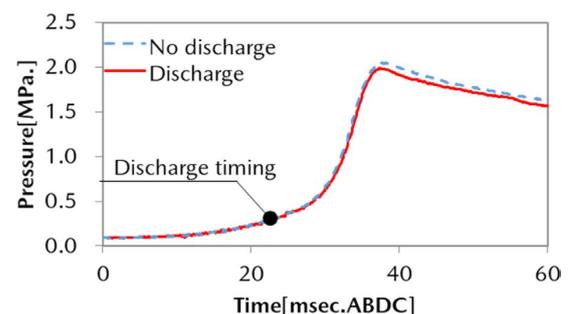


Fig. 2 Pressure of RCM

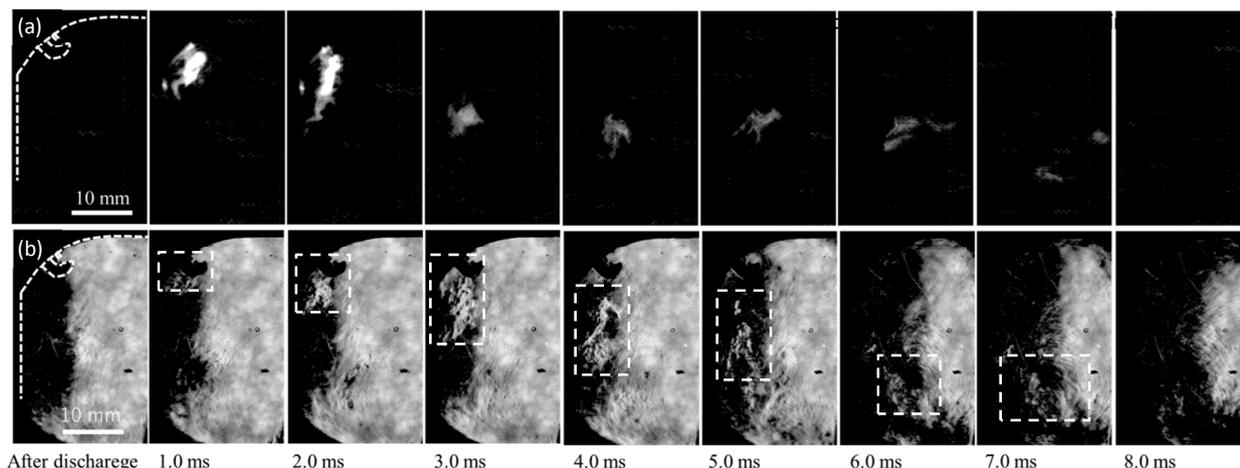


Fig. 3 (a) Chemiluminescence Images, (b) Schlieren Images

次に、本条件での可視化実験結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a)は化学発光撮影結果、(b)はシュリーレン撮影結果である。Fig. 3(a)から放電開始後 2msec. までは、点火プラグ付近で強い発光が見られ、放電後 8msec. で化学発光が見られなくなった。このことから、希薄混合気中の放電によって火炎核が形成され、火炎伝播に至ることなく放電後 8msec. で消滅したと考えられる。更に、気体の密度差をとらえられるシュリーレン撮影結果 Fig. 3(b)において、点線で囲んだ部分のように、ゆらいている領域は周囲の混合気より高温になっていると考えられる。また Fig. 3(a) (b)を比較すると、ゆらいている領域は、化学発光領域の外周部であることがわかる。つまり、火炎核はその周囲の混合気に対し、何らかの熱的影響を与えていることがわかった。

3.2 単気筒エンジン実験結果

前節の RCM を用いた希薄混合気中の火炎核形成過程の可視化実験結果を受け、単気筒エンジンにて、吸気行程中において放電した際の熱着火挙動の変化について調査した。Fig. 4 に熱発生率を示す。放電タイミングは 300deg. BTDC である。放電を施した条件では、吸気行程中放電にもかかわらず、質量燃焼割合 50%位置が 0.5deg. 程度進角した。本結果から、放電によって生成した火炎核が、圧縮上死点近傍における自着火へ影響を与えることがわかった。

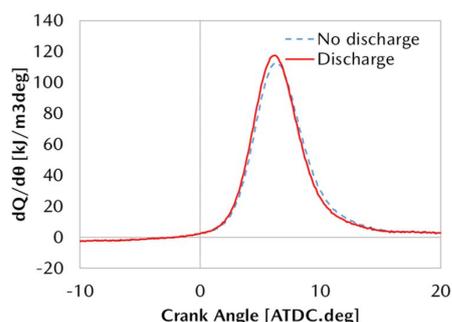


Fig. 4 Heat Release Rate of Single Cylinder

4. 計算手法

4.1 火炎核が未燃混合気に及ぼす影響の計算手法

詳細化学反応計算には、Chemkin Pro⁽⁶⁾を用いた。反応機構として、ガソリンサロゲート反応機構 SIP-Gd1.0⁽⁷⁾に NO_x の反応機構を付加したものをを用いた。NO_x の反応機構には GRI-3.0⁽⁸⁾ に含まれる高温 NO_x 反応、及び典型的な低温の NO_x 反応を用いた。燃料成分として、S5R (レギュラーガソリン相当)⁽⁷⁾を用いて検討を行った。

4.2 計算フロー及び条件

RCM 可視化実験結果、単気筒エンジン実験結果から、放電を行った条件でのエンジン筒内では Fig 5 に示す現象が起こっているものと考えられる。

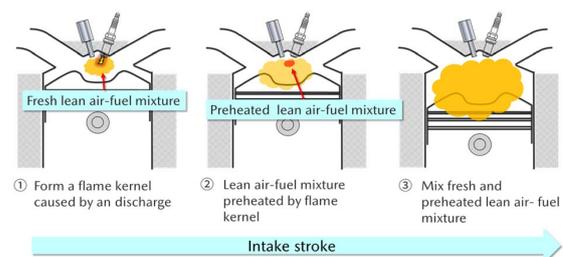


Fig. 5 Estimation Results of Phenomenon in Engine

- ① 点火により希薄混合気中において火炎核が形成される。
- ② 火炎核の周囲混合気が予熱される (以下、予熱混合気)。
- ③ 火炎伝播に至ることなく、火炎核が消滅し予熱混合気は燃焼室内に拡散する。

これらの現象を計算解析により模擬するため、計算フローを以下のとおりとした。

- (1) 混合気を定容容器内に比較的高温条件で 2msec. 間保持し、燃料開裂状態を計算 (Fig. 6 の①)。
- (2) 上記予熱混合気を 6msec. 間中に 400K まで線形に降温し、予熱混合気の拡散に伴う冷却過程を計算 (Fig. 6 の②)。

- (3) 予熱混合気と、火炎核の影響を受けていない混合気（以下、新規混合気）を攪拌し、次計算行程の HCCI Engine Simulator 用初期混合気を計算。
- (4) (3)の混合気を初期条件とした HCCI Engine Simulator（以降エンジンモデル）を用いた圧縮着火計算。

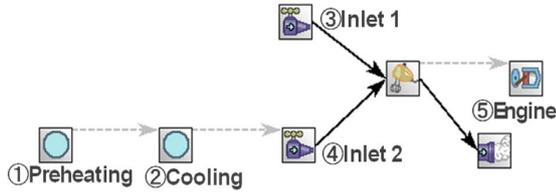


Fig. 6 Network Diagram View

Table 3 に計算条件を示す。なお、最大予熱温度は予熱期間中に着火しない 1140K とした。

Table 3 Calculation Conditions

① Preheating	
Problem type	Constrain volume and solve energy equation
Temperature (K)	700-1140
Pressure (bar)	2
Holding time (msec.)	2
Air-fuel ratio	30:1
② Cooling	
Problem type	Constrain volume and temperature
Temperature (K)	From 700-1140 to 400
Cooling time (msec.)	6
③ Inlet1	
Air-fuel ratio	30:1
Mass flow rate (kg/sec.)	Parameter (95.0, 97.5, or 99.5)
④ Inlet2	
Mass flow rate (kg/sec.)	Parameter (5.0, 2.5, or 0.5)
⑤ Engine	
Bore (mm)	89
Stroke (mm)	100
Compression ratio	20
Engine speed (rpm)	1000

4.3 計算結果・考察

本計算条件での燃料開裂状態を確認するため、エンジンモデルの初期混合気の成分を分析した。Fig. 7 に radical（不対電子をもつ化学種）、低温酸化反応中に蓄積される代表的な生成物 KetOOH、H₂O₂ chemistry⁽⁹⁾ において主要な役割を担う生成物である H₂O₂ のモル分率と予熱温度の関係を示す。いずれの条件においても、エンジンモ

デルに投入する混合気（Inlet ①と Inlet ②を混合したガス）中に radical, KetOOH, H₂O₂ が存在していることから、Fig. 7 の予熱①と降温②において、燃料が開裂することを確認した。

次に、新気混合気に対する予熱混合気の混合率ごとの予熱混合気を添加しない条件（base）との着火時期の差（以下、進角量）を Fig. 8 に示す。着火時期は燃焼室内温度が 1600K に達した時期と定義し、混合率は下式により求めた。

$$\text{混合率 (wt\%)} = \frac{\text{予熱混合気質量}}{\text{新規混合気質量} + \text{予熱混合気質量}} \times 100$$

Fig. 8 から、予熱温度を 900K 以上とすることにより、混合率によらず着火時期が進角することが確認できる。また、予熱温度 900K 以上では、予熱温度が高くなるほど、進角量は大きくなる。更に、予熱温度と進角量の関係には、予熱温度 1000K 近傍で変曲点が存在する。

混合率により進角量の絶対値には差があるが、予熱温度と進角量の関係の傾向は同一であるため、これ以降 2.5wt% の条件を対象として、これらの要因分析を行う。

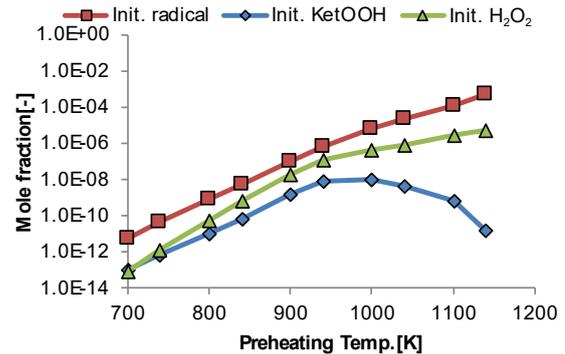


Fig. 7 Mole Fraction of Radical, KetOOH, H₂O₂ of HCCI Engine Simulator Initial Condition

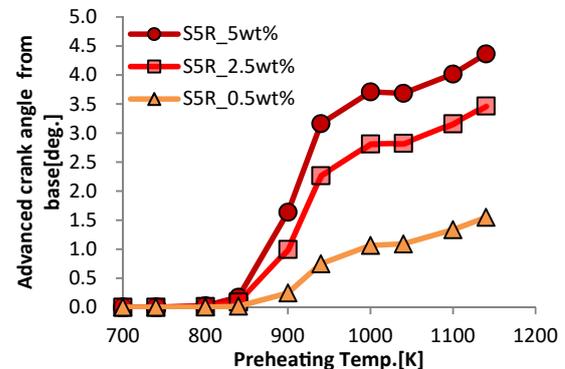


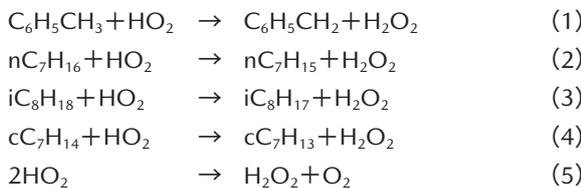
Fig. 8 Preheating Temp. vs Advanced Crank Angle

Fig. 7 にて、radical や H₂O₂ 濃度は、予熱温度上昇に伴い増加しているが、KetOOH は 1000K 近傍にピークをもつ凸の曲線となっている。これは、混合気を 1000K 以上に保持することで、予熱期間中に低温酸化反応よりも燃料の熱分解が支配的に起こることに起因する。この

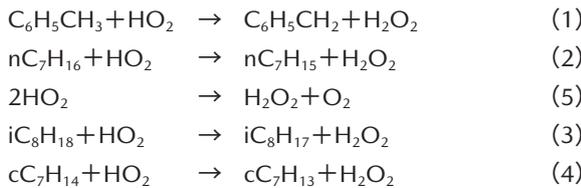
ように予熱された温度環境における主要反応経路の違いが、Fig. 8 の 1000K 近傍における変曲点が存在する要因となっている可能性がある。そこで、予熱温度 700K, 900K, 1100K に関して更に詳細な分析を行うことにより、着火進角メカニズムについて検討する。

Fig. 9 に、エンジンモデルにおける圧縮行程中の燃焼室内温度変化に対する KetOOH 濃度変化を示す。予熱温度 700K の条件では、燃焼室内温度が 800K 以上で、KetOOH 濃度が上昇するが、予熱温度 900K, 1100K の条件では、通常低温酸化反応が活発ではないと考えられる燃焼室内温度 800K 以下においても KetOOH 濃度の上昇が見られる。これから、予熱温度 900K, 1100K の条件では、少量混合した予熱混合気により燃焼室内における低温酸化反応が促進されている可能性がある。

次にこれについて分析を行う。Fig. 10 に燃焼室内温度変化に対する H₂O₂ 濃度の変化を示す。H₂O₂ 濃度が上昇し始める温度は、予熱温度 1100K の条件が最も低く、700K, 900K の条件はほぼ同等になっている。これから、予熱温度 1100K の条件は、他の条件に対し H₂O₂ chemistry に関わる化学種の初期濃度が高いことが示唆される。そこで、燃焼室内温度 900K のタイミングにおいて、H₂O₂ の生成速度が大きい素反応を抽出した。その結果、予熱温度 700K, 900K では



の順で H₂O₂ の生成速度が大きく、1100K では



の順であり、いずれの素反応にも HO₂ が含まれていることがわかった。また、予熱温度 1100K の条件では、その他の条件と素反応の序列が異なり、式(5)の H₂O₂ 生成速度が上位になっている。すなわち、HO₂ は燃料成分と反応するより、それ自身が反応して H₂O₂ を生成する方が優位になるほど、HO₂ 濃度が高いことを示唆しており、更に、この素反応の序列の違いが、Fig. 10 に示すように、予熱温度 1100K がその他の条件に比べ低温で H₂O₂ 濃度が上昇する、つまり H₂O₂ chemistry が早期化する要因と考えられる。

HO₂ は低温酸化反応域では温度に対し指数関数的に生成速度が増加し、H₂O₂ chemistry 領域以降は生成速度が緩やかになることが知られている。エンジンモデルの初期混合気中の HO₂ 濃度を確認しても、予熱温度 1100K > 900K >> 700K の序列どおりになっており (Fig. 11 参照)、HO₂ の温度に対する振る舞いがエンジンモデルの初期混

合気中の HO₂ 濃度の序列に表れている。また、上記素反応式(1)~(4)は初期燃料成分から H を引き抜く反応、すなわち低温酸化反応の起点となる反応である。Fig. 9 において予熱温度 1100K の条件では、最も低温酸化反応が促進されていることを述べたが、これはエンジンモデルの初期 HO₂ 濃度が高いことによるものと考えられる。

予熱温度 900K の条件は、燃焼室内温度の変化に対す

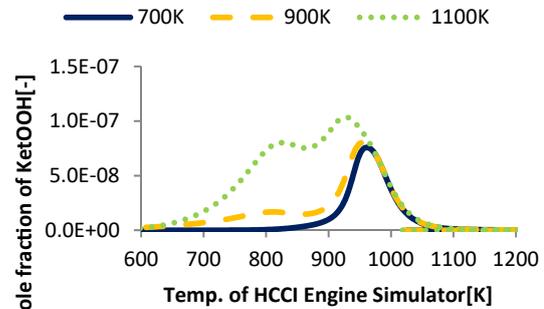


Fig. 9 Mole Fraction of KetOOH vs Temp. of HCCI Engine Simulator

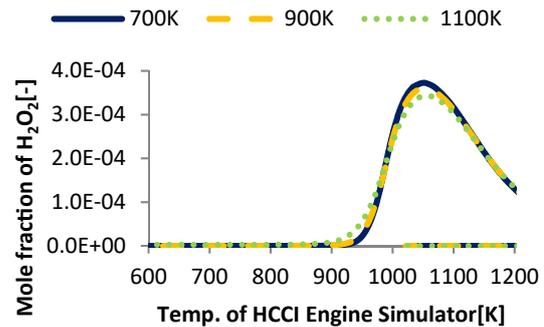


Fig. 10 Mole Fraction of H₂O₂ vs Temp. of HCCI Engine Simulator

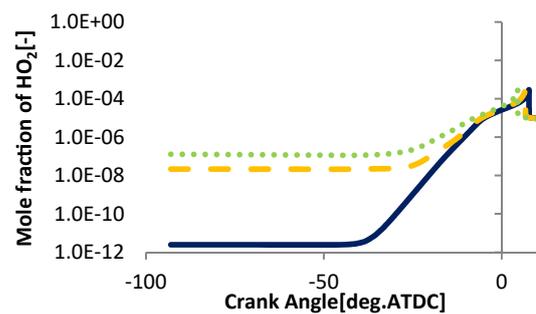


Fig. 11 Mole Fraction of HO₂ vs Crank Angle

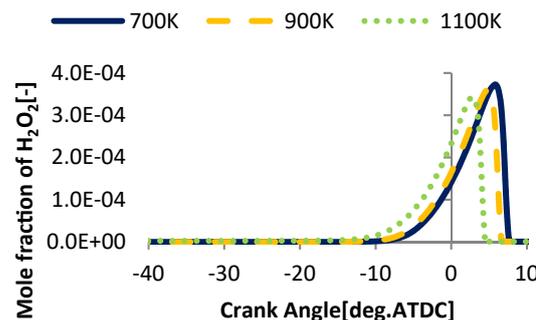


Fig. 12 Mole Fraction of H₂O₂ vs Crank Angle

る H_2O_2 濃度の変化が予熱温度 700K の条件と同等である。一方, Fig. 12 のクランク角に対する H_2O_2 濃度変化をみると, 予熱温度 900K の条件は 700K の条件より早く H_2O_2 濃度が上昇している。つまり, 予熱温度 900K の条件は, 低温酸化反応が促進されたことにより燃焼室内温度が上昇し, H_2O_2 chemistry が早期化したと考えられる。

以上から, Fig. 7 で示した予熱混合気添加による自着火時期の進角効果は, HO_2 濃度を用いて次のように説明できる。

まず, 低温酸化反応領域の温度帯にて予熱された混合気は予熱温度に応じた濃度の HO_2 を生成する。生成された HO_2 が, 予熱されていない混合気の低温酸化反応を活性化し, 自着火時期を早期化する。一方, およそ 1000K 以上に予熱された混合気は予熱温度に応じて HO_2 濃度は高まるものの, HO_2 濃度の温度感度は小さく, 予熱温度に対する進角効果も鈍化する。したがって, 進角効果は予熱温度 1000K 近傍で変曲点をもつ。

また, 進角効果への HO_2 の作用はその濃度に依存して異なり, 比較的高濃度 (およそ予熱温度 1000K 以上) では低温酸化反応と H_2O_2 chemistry の両方を促進させるのに対し, 低濃度 (予熱温度 1000K 未満) では低温酸化反応のみ促進させていると考えられる。

5. おわりに

火炎核を利用し, 炭化水素燃料を開裂させることを模擬した計算実験により, 希薄予混合気の自着火燃焼促進に関する検討を行った。その結果, 以下の知見を得た。

- (1) 低温低圧場にて, 通常の火花点火システムを用いて空燃比 30:1 の混合気に放電を行うと, 火炎核が形成されたのち消滅する様子について RCM を用いて確認した。
- (2) 単気筒エンジンにて, 通常の点火システムを用いて吸気行程中に放電を行うと, 火炎伝播せず後の圧縮自着火が促進されることを確認した。
- (3) 詳細化学反応計算より, 予熱混合気の燃料成分は一部開裂しており, 冷却後にも radical 等が存在することが示唆された。
- (4) 予熱混合気の温度が高いほど, 着火時期進角量は大きい。ただし, 進角効果は予熱温度 1000K 近傍で変曲点を持ち, およそ 1000K 以上では鈍化する。
- (5) 進角の要因は, 混合気が予熱されることにより生成される HO_2 である。進角効果が 1000K 近傍で鈍化するの, 炭化水素燃料の温度環境における主反応経路の違いにより, HO_2 生成速度も 1000K 近傍で鈍化するためである。
- (6) HO_2 の進角効果への作用は濃度によって異なり, 比較的高濃度の場合, 低温酸化反応並びに H_2O_2 chemistry を促進し, 低濃度の場合には低温酸化反応のみを促進する。

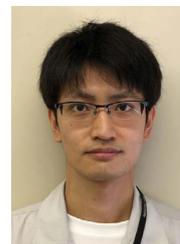
参考文献

- (1) マツダ: アニュアルレポート 2019, https://www.mazda.com/globalassets/ja/assets/investors/library/annual/files/mazdaar19all_j.pdf (2019)
- (2) 高橋 栄一, 小島 宏一, 山口 誠也: 予混合気非平衡プラズマ放電による着火制御, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, p.148, 講演番号 E133 (2013)
- (3) 小野 拓磨, 高橋 栄一, 西岡 牧人: メタン予混合気への誘電体バリア放電プラズマ照射による着火及び燃焼促進機構の検討, 第 52 回燃焼シンポジウム講演論文集, p.534, 講演番号 D341 (2014)
- (4) 小野 拓磨, 高橋 栄一, 西岡 牧人: 液体燃料予混合気への DBD プラズマ照射による圧縮着火特性への影響, 第 52 回燃焼シンポジウム講演論文集, 講演番号 E114 (2015)
- (5) 三好 明: 燃焼の自由度を高めるための基礎検討, 第 28 回内燃シンポジウム講演論文集, 講演番号 99 (2017)
- (6) CHEMKIN-PRO 2019R2, ANSYS, San Diego, 2019
- (7) 三好 明, 酒井 康行: ガソリンサロゲート詳細反応機構の構築, 自動車技術会論文集 48 巻 5 号, p.1021-1026 (2017)
- (8) M. Frenklac, h N. W. Moriarty, y B. Eiteneer, M. Goldenberg, C.T. Bowman, R. K. Hanson, S. Song, W. C. Gardiner Jr., V. V. Lissianski, G. P. Smith, D. M. Golden, and Z. Qin, Gri mech 3.0 <http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/> (参照 2016-03-23)
- (9) 安東 弘光, 酒井 康行, 桑原 一成: プラズマ支援燃焼の化学反応メカニズム: プラズマサポートによる着火遅れ短縮の可能性, プラズマ・核融合学会誌, 89(4), p.220-224 (2013)

■ 著 者 ■



大野 諒平



大澤 駿



葛 晰遥



沖濱 圭佑



原田 雄司



藤本 英史