Original Paper

A Study of HCCI Combustion Using FT-IR Gas Analysis and Spectroscopic Measurements

Go EMORI^{*1}, Yasuhide ABE^{*1}, Yuma ISHIZAWA^{*1}, Akira IIJIMA^{*2}, Koji YOSHIDA^{*2}, Hideo SHOJI^{*2}

(Received September 17, 2013)

FT-IR ガス分析及び分光測定を用いた HCCI 燃焼の解析

江森 剛^{*1}, 阿部泰英^{*1}, 石澤雄馬^{*1}, 飯島晃良^{*2}, 吉田幸司^{*2}, 庄司秀夫^{*2}

In the present study, in-cylinder spectroscopic measurements and Fourier-transform infrared analysis of the exhaust gas were used to investigate combustion characteristics under a condition where supercharging was applied to moderate rapid combustion in a test HCCI engine until misfiring occurred. A chemical kinetic simulation was also performed to analyze the combustion reactions at the elementary reaction level. The results showed that rapid combustion was moderated by the leaner mixture that resulted from supercharging. Formaldehyde (HCHO) produced during the cool flame was subsequently consumed during the main combustion period and carbon monoxide was produced, which was then oxidized to form carbon monoxide. It was observed that a larger quantity of HCHO was produced when misfiring occurred. The experimental results obtained thus made it possible to analyze the HCCI combustion process from the occurrence of low-temperature oxidation reactions to the main combustion period.

Key Words

HCCI, Supercharger, Combustion Analysis, Spectroscopic Analysis, FT-IR

本研究では、HCCI 機関の急峻な燃焼を過給により緩和化させ、さらに失火に至るまで運転を行い、筒内分光測定及び排ガス分析によってその燃焼特性を調査した。またこれら燃焼反応を素反応レベルで解明するため、素反応数値計算を行った。その結果、過給によるリーン化により、燃焼が緩和化していく様子を捉えられた。冷炎で HCHO が生成され、主燃焼において HCHO が消費され CO が生成し、その後、CO が CO₂ に酸化される。また失火に至ると HCHO は増大する。以上のように、HCCI 燃焼における低温酸化反応から主燃焼に至るまでのプロセスを実験的に解析することができた。

キーワード

予混合圧縮着火燃焼, 過給, 燃焼解析, 分光解析, フーリエ変換赤外分光法

1. 緒言

高効率かつクリーンな内燃機関として予混合圧縮着火 (HCCI) 機関が注目されている^{1)~9)}。HCCI 機関は燃焼がシリンダ内の多点において自着火により同時に行われるため、火炎伝播限界を超えた希薄な燃焼が可能となり、ガソリン機関では困難なディーゼル機関並みの高効率化が可能である。また、均質な希薄予混合気の燃焼のため、煤 (PM) が

発生しにくく、更に燃焼温度が低いいため窒素酸化物 (NO_x) の抑制が可能であることから、クリーンな燃焼方式である。しかし、HCCI 機関は、スパークプラグや燃料噴射のような物理的な着火手段を持たず、予混合気を圧縮自着火させるため、着火時期の制御が困難である。また、多点同時着火による急峻な圧力上昇により、高負荷領域での運転が制限されるという課題がある。これら HCCI 機関の課題克服へ向

*1 Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Science and Technology, Nihon University
1-8-14, Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8308 Japan

*2 Department of Mechanical Engineering, College of Science and Technology, Nihon University
1-8-14, Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8308 Japan

*1 日本大学大学院理工学研究科機械工学専攻
〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

*2 日本大学理工学部機械工学科
〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

け、過去の研究において吸入空気の過給によるリーン化で燃焼の緩和化を推し進める方法が報告されている^{10)~15)}。しかし、過度の過給は失火に至ってしまう。そこで本研究では、HCCI 機関の急峻な燃焼を過給により緩和化させ、さらに失火に至るまで運転を行い、筒内分光測定及び排ガス分析によってその燃焼特性を調査した。またこれら燃焼反応を素反応レベルで解明するため、素反応数値計算を行った。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1 及び Table 1 に本実験で用いた供試機関の概略図及び仕様を示す。吸气温度 T_{in} [K] はインタークーラを用いて調節を行い、K 型シース熱電対によって測定を行った。筒内圧力 P [MPa] は、シリンダーヘッド上部に設置した水晶圧力変換器を用い測定を行い、測定した圧力から熱発生率 HRR [J/deg.] を算出した。過給圧は外部過給器によって調節を行った。過給による新気の吹き抜けを最小限に抑えるため、タペット隙間を調節し、バルブオーバーラップをゼロとした。

HCCI 燃焼の火炎光及び光の吸収の計測を行うため、シリンダーに石英観測窓を設け、ボア方向の筒内火炎光及びキセノン光源による透過光を採取した¹⁶⁾ (Fig. 2)。火炎光及び透過光は光ファイバによって分光器へと導入され、火炎光は 395.2 nm、透過光は 293.1 nm の波長に分光される。前者は、CO と O の再結合反応による強い連続スペクトル発光 (CO-O 放射)^{17) 18)} の波長の一部であり、主に熱炎発生時期

Fig. 1 Specification of test equipment

Table 1 Specifications of test equipment

4-Stroke Air Cooled Single Cylinder Engine	
Bore × Stroke [mm]	76 × 66
Displacement [cm ³]	299
Engine Speed [rpm]	1400
Compression Ratio [-]	17 : 1
Valve Arrangement	OHV
Valve Overlap [deg.]	0

Fig. 2 Configuration of spectroscopy system

に放射されるため熱炎の挙動を調べるのに有効である。後者は HCCI 機関にて特徴的な中間生成物であるホルムアルデヒド (HCHO) の挙動を捉えるのに有効な波長である。光電子増倍管で検出した透過光の強度 E_A [A.U.] を用いて、次式によって吸光度 $A_{293.1}$ [-] と定義した。ここで、 E_0 [A.U.] は下死点付近の透過光強度の平均である。

$$A_{293.1} = \frac{E_0 - E_A}{E_0} \quad [-]$$

2.2 供試燃料

供試燃料には、オクタン価標準燃料でありオクタン価 (RON) 0 で自着火しやすい燃料である n-heptane 及びオクタン価標準燃料でありオクタン価 100 で自着火しにくい燃料である iso-octane を混合し 60 RON に設定した PRF (Primary Reference Fuels) を用いた。

2.3 素反応数値計算

実験条件を模した素反応数値計算を行った。計算ツールには、CHEMKIN-PRO の IC-Engine モデルを使用し、空間 0 次元及び完全断熱の条件の下、実機と同一の容積変化を与えた。反応機構には、Primary Reference Fuels (PRF) モデル (化学種数 1024, 素反応数 4236) を使用した¹⁹⁾。

Table 2 Test fuel

	Unit	n - heptane	iso - octane
Chemical Structure	-	C ₇ H ₁₆	C ₈ H ₁₈
Molecular Weight	g / mole	100.21	114.2
Boiling Point	K	371.4	372.2
Octane Number	-	0	100
Autoignition Temperature	K	558	803
Stoichiometric A/F	kg / kg	15.2	15.14
Relative Gas Density	Air = 1	3.46	3.94
Lower Heating Value	kJ / kg	44900	44400
Low-temperature Reaction Domain	-	○	×

3. 実験結果及び考察

Table 3 に実験条件を示す。投入熱量及び吸気温度一定の下、過給圧を自然吸気(100 kPa)から 200 kPa まで変化させ、運転を行った。

3.1 実機を用いた筒内分光測定による燃焼解析

Fig. 3 に筒内圧力 P [MPa]、熱発生率 HRR [J/deg.], 筒内平均ガス温度 T [K], 発光強度 $E_{395.2}$ [A.U.], 吸光度 $A_{293.1}$ [-] を示す。Fig. 4 に熱発生率における冷炎部の拡大図を示す。また投入熱量は基本的には 350 J/cycle 一定であるが、最も吸気圧力を高めた 4 番の条件においても失火にいた

Table 3 Experimental conditions

Test Fuel	PRF 60
Compression Ratio [-]	17 : 1
Engine Speed [rpm]	1400
Injected Heat Value Q_{in} [J/cycle]	350
Intake Pressure P_b (abs) [kPa]	100 ~ 200
Intake Air Temperature [K]	330

Fig. 3 Influence of intake pressure on HCCI combustion

Fig. 4 Enlarged HRR of cool flame reaction

らなかったため、失火時の挙動を調べるために、200 kPa の状態のまま投入熱量を下げる実験も行った (Fig. 3 中線 5)。まず熱発生率に着目すると、吸気圧力の増加により、着火時期は概ね一定であるが、最大熱発生率は減少し燃焼期間も長期化していることから、燃焼が抑制されることがわかる。これは過給によって筒内ガスの熱容量が増加することにより燃焼温度が低下したためであると考えられる。しかし冷炎においては吸気圧力増加に伴い、最大熱発生率が増加し、活性化した。これは吸気圧力が増加したことで筒内の酸素量が増加し、低温酸化反応が促進されたためであると考えられる。次に発光強度に着目すると、熱発生率と同様に吸気圧力が増加するにつれ最大発光強度は減少し、発光期間も長期化していることから、緩和化していることがわかる。吸光度に着目すると、冷炎による熱発生と同時に吸光度は増加し、主燃焼による熱発生及び発光強度の立ち上がりと同時に減少し、主燃焼ピーク時にはほとんど 0 になっている。これは冷炎による HCHO の生成と、主燃焼による HCHO の消費を捉えたものと考えられる。またこれは安東らによる H_2O_2 ループの以下の式に示す反応が起きているものと考えられる²⁰⁾。

これより、前半部での発光は HCHO の消費から CO の生成による発光であり、後半部での発光は CO_2 が生成される過程によるものであると考えられる。また、冷炎のみの発生で失火した 5 においては、冷炎において吸光度は増加したが、膨張行程においてもほとんど減少していない。これは熱炎がほとんど生じずに失火したため、HCHO がほとんど消費されなかったためであると考えられる。

Fig. 5 に当量比 ϕ [-], 圧力上昇率 $dP/d\theta_{max}$ [MPa/deg.] を縦軸に、過給圧を横軸にとったグラフを示す。同一投入熱量で過給圧の増加により空気量が増加したことで当量比は低下し希薄化が進み、最大圧力上昇率は低下し燃焼の緩和

Fig. 5 $dP/d\theta_{max}$, Equivalence ratio vs. intake pressure

化が確認できた。

3.2 実機を用いた排ガス分析 (FT-IR) による燃焼解析

Fig. 6 に状態方程式より算出した各吸気圧での筒内平均ガス温度最大値 $T_{\max}$ [K] を横軸にとり、吸気圧力 P_b [kPa]、各化学種の生成割合 HCHO [ppm]、CO [ppm]、CO₂ [ppm] を縦軸にプロットした図を示す。まず HCHO に着目すると、吸気圧力が増加し最高ガス温度が低くなるにつれ増加傾向にあり、失火した場合においては急増している。これは、Fig. 3 の失火した場合 (Fig. 3 中線 5) において、熱炎がほとんど発生しなかったため HCHO がほとんど消費されず、多くの HCHO が排ガスとして排出されたため、FT-IR の測定において HCHO が急増した事と対応している。次に CO に着目すると、筒内平均ガス温度最大値の低下に伴い増加傾向にある。約 1200 K 以下になると CO の生成量はより増大する。しかし 1000 K 以下になると減少に転じている。これは T が低すぎる事で CO の生成反応 (式 (1), (2)) 自体が起こりにくくなるためと考えられる。CO₂ に着目すると、筒内平均ガス温度最大値の低下に伴い減少傾向にある。また 1500 K 以下になるとより顕著に減少するため、1500 K を境にそれ以上は CO から CO₂ への酸化が十分行われ、それ以下になると燃焼効率が急激に悪化するものと考えられる。このため 1500 K 以下では、CO が CO₂ に酸化されにくく、CO₂ の生成量が減少したため Fig. 3 の発光強度である CO-O 放射の発

光強度が減少したものと考えられる。

3.3 素反応数値計算による燃焼解析

実験で得られた燃焼特性について、より詳細に理解するために、素反応レベルでの解析を行った。Table 4 に計算条件を示す。計算条件は実機での実験とはほぼ同様の条件で行った。

Fig. 7 にクランク角度に対する筒内圧力 P [MPa]、熱発生率 HRR [J/deg.] 筒内ガス温度 T [K]、主要な各モル分率 (OH, HCHO, C₇H₁₆, C₈H₁₈, CO, CO₂) を示す。Fig. 8 に熱発生率における冷炎の拡大図を示す。Fig. 9 に、熱炎における OH モル分率の拡大図を示す。まず、熱炎の熱発生率に着目すると、熱炎部は吸気圧増加に伴い、最大熱発生率は減少し燃焼期間も長期化していることから燃焼が緩和化したことがわかる。また冷炎においては吸気圧力増加に伴い、熱発生率は増加し活性化した。このことから熱発生率の挙動は実機と同様の傾向が得られた。OH に着目すると、OH は熱発生率と良く対応している。つまり、冷炎においては吸気圧力の高い方が熱発生率および OH モル分率が高く、また熱炎においては吸気圧が低い方が熱発生率および OH モル分率が高くなる。以上のことから、吸気圧が高いほど冷炎は活発化するが、希薄化による最高温度低下により、熱炎は緩和化する。次に HCHO に着目すると、冷炎発生時に HCHO が生成され、熱炎発生時において HCHO は消費される。また失火した条件においては冷炎で生成された HCHO は消費されなかった。このことから HCHO の挙動も実機での実験と同様の傾向が得られた。続いて CO、CO₂ に着目すると、吸気圧力が低い場合には急激に生成されているのに対し、吸気圧力が増加すると、CO、CO₂ は緩やかに生成される。これは燃焼が緩和化したことで、熱炎における酸化反応が緩やかになったためであると考えられる。

燃料や中間生成物、排ガスの消費及び生成の挙動をより分かりやすくするため、吸気圧力 100 kPa 及び 200 kPa の自然吸気と高過給の場合について整理したグラフを Fig. 10 に示す。まず燃料に着目すると、冷炎発生と同時に C₇H₁₆、C₈H₁₈ が急激に消費され始め、その後徐々に消費されていき熱炎においてすべて消費される。HCHO は冷炎において燃料が消費されると生成され、燃料の減少と共に増加し、熱炎が発生すると HCHO は消費される。CO は HCHO が消費されると同時に生成され、その後 CO は CO₂ へと酸化される。このことから、冷炎において iso-octane, n-heptane が消費され HCHO が生成し、熱炎において HCHO が消費され CO が

Fig. 6 FT-IR analysis of intermediate reaction products

Table 4 Calculation conditions

Test Fuel	PRF 60
Compression Ratio [-]	17 : 1
Engine Speed [rpm]	1400
Injected Heat Value Q_{in} [J/cycle]	400
Intake Pressure P_b (abs) [kPa]	100 ~ 200
Intake Air Temperature [K]	350

Fig. 7 Calculated results of PRF60

Fig. 8 Enlarged HRR of cool flame reaction

Fig. 9 Mole fraction of OH radical

Fig. 10 Calculated results of PRF60

Fig. 11 Temperature dependence on HRR and mole fraction

生成し、その後、COがCO₂に酸化されるといった一連の反応であると考えられる。

Fig. 11に筒内平均ガス温度を横軸にとったグラフを示す。まず熱発生率に着目すると、850 K付近においてHCHOが生成されていることやC₇H₁₆が消費されていることから、冷

炎の発生温度は 850 K 付近であると言える。また、1000 K 付近で HCHO のモル分率がピークを迎え、消費に転じていることや、CO が生成され始めていることから、1000 K 程度で自着火が起こることが分かる。また、1400 K 以上において、CO が減少を開始し、CO₂ が増大していることから、CO から CO₂ への酸化が十分に行われたものと考えられる。

4. 結 言

実機により過給 HCCI 燃焼の反応プロセスを明らかにするために、筒内分光計測及び排ガス分析を行った。過給によるリーン化により、燃焼が緩和化していく様子を捉えられた。過給による希薄燃焼でガス温度が低下し、CO が増加し、CO₂ が減少する。つまり燃焼効率が悪化する。冷炎で HCHO が生成され、主燃焼において HCHO が消費されつつ CO が生成し、その後、CO が CO₂ に酸化される。また失火に至ると HCHO は増大する。以上のように、HCCI 燃焼における低温酸化反応から主燃焼に至るまでのプロセスを実験的に解析することができた。また素反応数値計算による燃焼解析を行うことで実機では測定が困難な化学種の生成挙動の解析を行うことが出来た。本研究で用いた解析手法を用いて、今後、負荷、吸気圧、燃料種、混合燃料、排ガス再循環 (EGR) などの影響を調べることで、HCCI 機関の課題克服へ向け、さらなる有用な知見が得られると考えられる。

謝 辞

本研究は、日本大学理工学部シンボリックプロジェクトの一環として実施された。

文 献 : References

- 1) Thring, R. H., *SAE Paper*, No. 892068 (1989)
- 2) Aoyama, T.; Hattori, Y.; Mizuta, J.; Sato, Y., *SAE paper* 960081 (1996)
- 3) Morikawa, K.; Kaneko, M.; Itoh, J.; Saishu, Y., *JSAE paper*, 33(2), 11-14 (2002); 森川弘二, 金子誠, 伊藤仁, 最首陽平, 自動車技術会論文集, 33(2), 11-14 (2002)
- 4) Shibata, G.; Urushihara, T., *SAE paper* 2008-01-0007 (2008)
- 5) Kuboyama, T.; Moriyoshi, Y.; Hatamura, K.; Suzuki, M.; Takanashi, J.; Yamada, T.; Gotoh, S., *SAE*, 2010-01-0845 (2010)
- 6) Najt, P. M.; Foster, D. E., *SAE Paper*, No. 830264 (2003)
- 7) Kimura, S.; Aoki, O.; Kitahara, Y.; Aiyoshizawa, E., *SAE Paper*, No. 2001-01-0200 (2001)
- 8) Iijima, A.; Watanabe, T.; Yoshida, K.; Shoji, H., *SAE 2006 Transactions, Journal of Engines*, Section 3, 115, 1031-1042, (2007)
- 9) Tsutsumi, Y.; Hoshina, K.; Iijima, A.; Shoji, H., *SAE paper* 2007-32-0041 (2007)
- 10) Tsutsumi, Y.; Iijima, A.; Shoji, H., *JSAE paper*, 40(4), 1023-1028 (2009); 堤優二郎, 飯島晃良, 庄司秀夫, 自動車技術会論文集, 40(4), 1023-1028 (2009)
- 11) Inaba, S.; Asanuma, M.; Iijima, A.; Shoji, H., *Proceedings of the Forty-Ninth Symposium (Japanese) on Combustion*, pp. 438-439 (2011); 稲葉州亮, 浅沼光雄, 飯島晃良, 庄司秀夫, 第 49 回燃焼シンポジウム講演論文集, p. 438-439 (2011)
- 12) Shimizu, R.; Iijima, A.; Shoji, H., *Proceedings of the Forty-Ninth Symposium (Japanese) on Combustion*, pp. 440-441 (2011); 清水亮介, 飯島晃良, 庄司秀夫, 第 49 回燃焼シンポジウム講演論文集, p. 440-441 (2011)
- 13) Iijima, A.; Yoshida, K.; Shoji, H., *The 21th of Annual Meeting of Japan Institute of Energy*, 5-2-2 (2012); 飯島晃良, 吉田幸司, 庄司秀夫, 日本エネルギー学会大会発表論文集, 5-2-2 (2012)
- 14) Shimizu, R.; Iijima, A.; Yoshida, K.; Shoji, H., *SAE International, Journal*, 5, 1-8 (2012)
- 15) Komatsu, K.; Asanuma, M.; Iijima, A.; Yoshida, K.; Shoji, H., *SAE International, Journal*, 5, 9-16 (2012)
- 16) Iijima, A.; Shoji, H., *JSAE paper*, 38(6), 83-88 (2007); 飯島晃良, 庄司秀夫, 自動車技術会論文集, 38(6), 83-88 (2007)
- 17) Gaydon, A. G., London, Chapman and Hall Ltd (1974)
- 18) Yamasaki, Y.; Takahashi, S.; Iida, N., *JSAE paper*, 34(4), 75-80 (2003); 山崎由大, 高橋晋也, 飯田訓正, 自動車技術会論文集, 34(4), 75-80 (2003)
- 19) Curran, H. J.; Pitz, W. J.; Westbrook, C. K.; Callahan C. V.; Dryer, F. L., *Twenty-Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, p. 379- 387 (1998)
- 20) Ando, H., *The Seventh International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2008)*, pp. 483-490 (2008)
- 21) Emori, G.; Abe, Y.; Ishizawa, Y.; Iijima, A.; Shoji, H., *The 22th of Annual Meeting of Japan Institute of Energy*, 5-2-2 (2012); 江森剛, 阿部泰英, 石澤雄馬, 飯島晃良, 庄司秀夫, 日本エネルギー学会大会発表論文集, 5-2-1 (2013)