220201 分光学的手法を用いた HCCI 機関の燃焼に関する研究

Research on Combustion in an HCCI Engine by using Spectroscopic Technique

○ 学 高橋 勇介 (日大院) 学 小田切 康博 (日大院) 学 齋藤 健児 (日大院)

正 飯島 晃良 (日大) 正 吉田 幸司 (日大) 正 庄司 秀夫 (日大)

Yusuke TAKAHASHI, Yasuhiro OTAGIRI, Kenji SAITOU,

Akira IJIMA, Kouji YOSHIDA, Hideo SHOJI,

Nihon University, 1-8-14, Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo

Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) combustion offers the advantages of high efficiency and low emissions of pollutants. However, the characteristics of HCCI combustion can prevent suitable engine operation owing to the rapid combustion process that occurs accompanied by a steep pressure rise when the amount of fuel injected is increased. In this study, we analyzed effects of engine speed on combustion characteristics in an HCCI engine based on experimentation with actual engine. In addition, we analyzed the details of combustion characteristics by using numerical analysis of elementary reactions. As a result, cool flame reaction was moderated by increasing the engine speed.

Key Word : Internal Combustion Engine, Gasoline Engine, HCCI, Spectroscopic Measurement, Numerical Analysis.

1. はじめに

近年、高効率かつ低公害な燃焼方式として予混合圧縮着火 (Homogeneous Charge Compression Ignition 以下 HCCI) が注目されている。HCCI は、希薄な予混合気を圧縮自着火させる燃焼方式で、高効率化と NOx と PM の同時低減が期待できる。しかし、HCCI には物理的な着火起因が存在せず、予混合気の圧縮自着火によって燃焼が開始するため、着火時期の制御は困難である。また、圧縮自着火過程には、HCCI に特徴的な低温酸化反応と呼ばれる、着火前の反応が影響を及ぼすため、化学反応論を含めた理解が重要であると考えられる。本研究では、機関回転数変化が自着火挙動に与える影響を詳細に調べるため、分光学的手法による実機を用いた実験を行うと共に、素反応数値計算によって、解析を行った。

2. 実験装置及び方法

供試機関には、シュニーレ掃気方式の二ストローク空冷単気筒ガソリン機関を使用し、供試燃料には n-heptane (0 RON) を用いた。なお、燃料投入量は $B = 390 \text{ J/cycle}$ (当量比 $\phi = 0.6$ 相当) とした。また、機関回転数は、実機を用いた実験については、 $N_e = 800, 1000, 1200 \text{ rpm}$ とし、素反応数値計算については、 $N_e = 1000, 1500, 2000 \text{ rpm}$ とした。掃気温度は $T_{sc} = 348 \text{ K}$ 一定である。供試機関仕様及び実験条件を表 1 に示す。代表的な測定項目はシリンダ内圧力 (P [MPa]), 吸気温度 (T_{in} [K]), 掃気温度 (T_{sc} [K]), 排気温度 (T_{ex} [K]), 低温酸化反応に特徴的な中間生成物であるホルムアルデヒド (Formaldehyde 以下 HCHO) に相当する吸収波長 293.1 nm の透過光強度 ($E_{293.1}$ [V]) である⁽¹⁾。シリンダ内圧力はシリンダヘッド上部に取り付けた水晶圧力変換器を用いることで測定した。また、透過光強度はシリンダヘッド側部に取り付けた一方の石英観測窓 (図 1, “In”) から、キセノンランプによって平行光を照射し、もう一方の観測窓 (図 1, “Out”) より透過光を採取した。採取した光はコア径 1 mm の光ファイバを用いて、分光器に導き、測定波長に分光した。測定波長は光電子増倍管により電気信号に変換され、その出力電圧を透過光強度とした。そして、圧縮開始時から低温酸化反応直前までの透過光強度の平均値を $E_{293.1(Avg)}$ [V], 任意のクランク角における透過光強度を $E_{293.1(\theta)}$ [V] とし、(1) 式を用いて吸光度に変換した。分光器の波長分解能は半値幅 $\lambda = 4.0 \text{ nm}$ である。

Table 1 Specifications of test engine and test condition

2 Stroke Air Cooled Single Cylinder Gasoline Engine	
Bore × Stroke	72 × 60 mm
Displacement	244 cm ³
Exhaust Port Closing Timing	106 deg. BTDC
Effective Compression Ratio	$\varepsilon = 10 : 1$
Engine Speed	Experiment $N_e = 800, 1000, 1200 \text{ rpm}$
	Numerical Analysis $N_e = 1000, 1500, 2000 \text{ rpm}$
Throttle	WOT
Test Fuel	n-heptane (0 RON)
Injected Heat Value	$B = 390 \text{ J/cycle}$
Scavenging Temperature	$T_{sc} = 348 \text{ K}$

Fig. 1 Light absorbance measurement position

Fig. 2 Measured waveforms (Change N_e , Constant T_{sc})

Fig. 3 Scavenging temperature vs. ignition timing

Fig. 4 Scavenging temperature vs. cool flame timing

$$A_{293.1}[-] = \frac{E_{293.1(Avg)} - E_{293.1(\theta)}}{E_{293.1(Avg)}} \quad (1)$$

素反応数値計算には、CHEMKIN-PRO を用い、反応モデルに PRF の詳細反応機構 (化学種数 1024, 反応式数 4236) ⁽²⁾ を使用して計算を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 機関回転数変化が着火挙動に与える影響

機関回転数の変化が着火挙動に与える影響を調べるため、機関回転数を Ne = 800, 1000, 1200 rpm と変化した実験を行った。結果を図 2 に、掃気温度と着火時期の関係、冷炎発生時期の関係をそれぞれ図 3, 4 に示す。図 2 より、回転数を増加させると着火時期は遅角するものの、冷炎発生時期は大きく変化していないことが見てとれる (矢印 A, 領域 B)。また、図 3, 4 に示す関係からも同様に、回転数の変化は着火時期に強く影響を与えるということが分かる (矢印 C, D)。また、着火時期を遅角させた要因の 1 つとして、回転数の増加による掃気効率の上昇などが考えられる。

しかし一方で、回転数増加によって局所ピストンスピードが増加し、筒内の圧力上昇割合が増加しているのにも関わらず、着火時期の遅角を招いている。これは、回転数増加に伴い、ピストンスピードが増加するとともに、圧縮にかかる時間が短くなり、化学反応により時間を要したのではないかと考えられる。他方、冷炎の活性度合を調べるため HCHO の吸光度波形に着目すると、回転数増加に従って、吸光度 $A_{293.1}$ は低下していることが分かる (矢印 E)。これは、回転数の増加によって、ピストンスピード及び、単位時間当たりの温度上昇が増加し、早期に冷炎が停止する温度域に到達したためだと考えられる。加えて、低温酸化反応域でラジカルを同じように生成できなかったことが着火遅れを招いたとも考えられる。

3.2 機関回転数変化に関する素反応数値計算による解析

詳細な反応を調べるため、回転数を Ne = 1000, 1500, 2000 rpm と変化した解析を素反応数値計算を用いて行った。なお、残留ガス温度は冷炎発生時期が同一となるよう調整を行った。結果を図 5 に示す。熱発生率波形より、回転数が

Fig. 5 Numerical calculated data (Change Ne, Constant Tsc)

増加するに従い、着火時期は遅角、冷炎の熱発生率が低下していることが分かる (矢印 F, G)。冷炎の熱発生率が減少するのは、ピストンスピードの増加によって、冷炎発生に必要な時間を十分に稼ぐことができなかったためと考えられる。また、HCHO のモル分率に着目すると、回転数の増加に従って、その値は低下しており、冷炎が緩慢化しているのが見てとれる (矢印 H)。

一方で、n-heptane のモル分率波形に着目すると、回転数の増加に伴い、冷炎の緩慢化に伴い、低温酸化反応域における n-heptane の消費量は減少している (矢印 I)。その分多く残存した燃料成分が着火まで持ち越され、モル分率の、着火直前における HCHO の上昇をもたらしたと考えられる (矢印 J)。また、冷炎の発熱量は減少し、HCHO の立ち上がりにおけるモル分率が低下していると共に、冷炎終了から着火に至るまでの期間が長期化していることも見てとれる (矢印 K)。これは、低温酸化反応域での HCHO のモル分率の低下の影響から、着火までより時間を要したためだと考えられる。

以上のことから、機関回転数変化を与えた場合、冷炎発生時期が同一だとしても、ピストンスピードの変化によって、化学反応に割かれる時間が変化することで、冷炎の活性度合に影響を与え、結果的に着火時期は同一にはならないと考えられる。

4. 結 論

- (1) 機関回転数及びピストンスピードを増加させた場合、冷炎時期・熱発生に大きな差異は無いが、HCHO の挙動から、冷炎の緩慢化が明らかになった。
- (2) ピストンスピードの変化によって、化学反応に割かれる時間が変化することで、冷炎の活性度合に影響を与え、結果的に着火時期は同一にはならない。

参 考 文 献

- (1) 飯島, 吉田, 庄司 : 予混合圧縮着火機関の着火に関する分光学的研究, 日本機械学会論文集 (B 編) Vol.74, No.742, pp.1433-1442, (2008).
- (2) Curran, Westbrook, Callahan, Dryer : Oxidation of Automotive Primary Reference Fuels at Elevated Pressures, Proc. Combust. Inst., 27, pp.379-387 (1998)