

吸収分光測定・数値流体解析を用いた過給 SI 機関におけるノッキングの解析

Analysis of Knocking in Supercharged SI Engine

by using In-cylinder Absorption Spectroscopy and CFD Analysis

○高畑 周平¹, 天沼 寛喜¹, 村上 雄大¹清水 堅斗², 三浦 健太², 宮坂 智海², 飯島 晃良³, 庄司 秀夫⁴*Shuhei Takahata¹, Hiroki Amanuma¹, Yudai Murakami¹Kento Shimizu², Kenta Miura², Tomomi Miyasaka², Akira Iijima³, Hideo Shoji⁴

There is the problem which occurrence of knocking in supercharged Spark-ignition engines. This study investigated the effect of external exhaust gas recirculation (EGR) on autoignition. Autoignition and abnormal combustion behavior was investigated by using in-cylinder high speed photography, in-cylinder light absorption spectroscopy and Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. The results showed that autoignition timing was retarded and reaction rate of each elementary reaction in the cool flame reaction period was reduced by using large amount external EGR.

1. 序 論

過給ダウンサイジング技術は、小排気量化による車両の軽量化を可能とし、車両の走行燃費が向上するメリットがある。しかし、低速・高負荷条件では異常燃焼の発生が問題となっている。一方、排ガス再循環 (EGR) を用いることで異常燃焼の発生を抑制できることが報告されている⁽¹⁾。

本研究では外部 EGR を導入することで過給と EGR が、異常燃焼に及ぼす影響を燃焼実験及び数値流体解析コード (FORTÉ) を用いて燃焼解析を行った。

2. 実験装置及び方法

本研究で使用した実験条件を表 1 に示す。本研究では筒内の可視化が容易なサイドバルブ方式の 4 ストローク空冷式単気筒エンジンを用いた。空冷機関のため、供試機関の代表温度を点火栓座金温度 T_{sp} とした。シリンダヘッドの上部及び側面に石英観測窓を設けることで、筒内の可視化と吸収分光測定を行った。側面の石英窓からキセノン光を照射し、その透過光を光ファイバによって分光器に導き、光電子増倍管を用いて電気信号に変換した。このとき、分光された波長は、低温酸化反応で生成されるホルムアルデヒド (HCHO) の吸収波長に相当する 293.1 nm である⁽²⁾。低温酸化反応が起こっていない状態での透過光強度の平均を E_0 [A.U.]、任意のクランク角度での透過光強度を E [A.U.] と定義し、式 (1) を用いて吸光度 A_{HCHO} [-] を算出した。

$$A_{HCHO}[-] = \frac{E_0 - E}{E_0} \quad (1)$$

本実験条件で使用した外部 EGR については、EGR 率

Table 1. Specifications of test engine and test condition

Four-stroke Air-cooled Single-cylinder Engine	
Bore × Stroke	85 × 70 mm
Displacement	397 cm ³
Engine Speed: N	1400 rpm
Boost Pressure: $P_{b(abs)}$	130±3.0 kPa
EGR Ratio	$\gamma_{(EGR)}=0.15 \%$
Compression Ratio: ϵ	8: 1
Test Fuel	PRF 50
Injected Heat Value	1.4 kJ/cycle (constant)

Table 2 Calculation condition

Ignition Timing (I.T.)	5 deg. BTDC
EGR Ratio	$\gamma_{(EGR)}=15 \%$
Initial Pressure 40 deg. BTDC	0.85 MPa($P_b=130$ kPa)
Initial Temperature 40 deg. BTDC	675K

を以下のように定義した。EGR を用いていないときの吸入空気量 G_a [g/s] とし、用いたときの吸入空気量を $G_{a(EGR)}$ [g/s] とすることで EGR 率 $\gamma_{(EGR)}$ [%] を式 (2) で算出した。

$$\gamma_{(EGR)}[\%] = \frac{G_a - G_{a(EGR)}}{G_a} \times 100 \quad (2)$$

数値流体解析には、Reaction Design 社で開発された燃料の反応機構を用いた。178 化学種、1271 反応式を考慮し、低温酸化反応を含むノッキング解析計算に最適化されている⁽³⁾。供試機関のシリンダヘッドを模擬した燃焼室の 3D モデルを作成し、表 2 に示すような計算条件で解析を行った。

3. 実験結果及び解析結果

図 3 に可視化画像と計測波形を示す。測定波形は、横軸がクランク角度 θ [deg.]、縦軸が上から筒内圧力 P

[MPa], 熱発生率 (Heat Release Rate) [J/deg.], 燃焼室末端部における HCHO 吸光度 A_{HCHO} [-] を示している。

吸光度波形に着目すると, EGR を投入することで吸光度の立ち下り時期が遅角していることが確認できる。これは, 不活性ガスを多く含む外部 EGR を導入することで, 冷炎反応による発熱量が減少し, 温度上昇, 筒内圧力上昇を抑制したためだと考えられる。

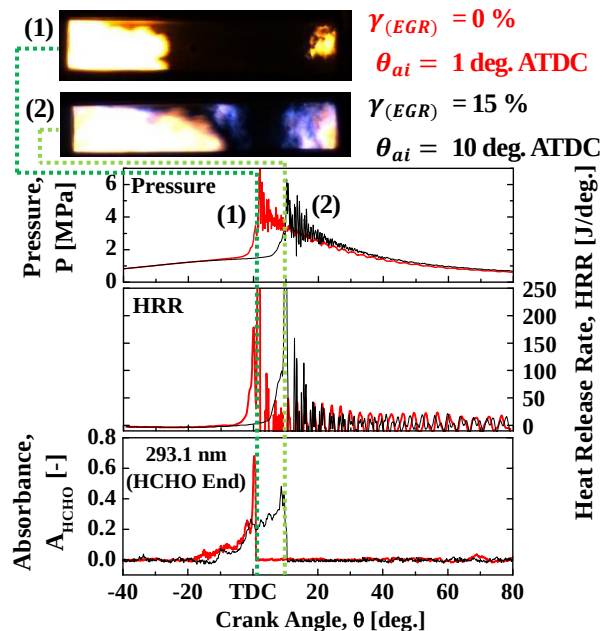


Fig.3 Flame behavior and Measured waveforms ($\gamma_{\text{EGR}}=0,15\%$)

これまでに, 数値流体解析を使用し EGR 率を増加させた条件では自着火時期が遅角し, 実験結果と同様な傾向になることが報告されている。そこで, EGR 率の変化による筒内の化学種履歴を明らかにするため, EGR 15% の条件における詳細解析を行った。

図 4 に EGR 15% の計測波形と数値流体解析の結果を示す。波形は, 横軸がクランク角度 θ [deg.] 及び TDC からの時間 t [msec.], 縦軸は上からシリンダ内圧力 P [MPa], 燃焼室末端部の各化学種反応履歴の Mole Fraction, 燃焼室末端部における各素反応の反応速度の関係を示す。

冷炎反応期間に着目すると, R41 ($\text{HCHO} + \text{OH} = \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$) の反応が起きている事が分かる。低温酸化反応が進行し, HCHO の濃度が高くなると, OH が燃料からの H 引き抜きに代わって R41 の反応により, OH が消費されるようになるため, 低温酸化反応を進行させていた連鎖分岐反応ループが止まり, 冷炎反応期間を終了させていると考えられる。

冷炎反応終了時から自着火時までの期間に着目すると, H_2O_2 ループ反応が発生していると考えられる⁽⁴⁾。 H_2O_2 ループ反応の総括反応式は, 式 (3) のように表せる⁽⁴⁾。

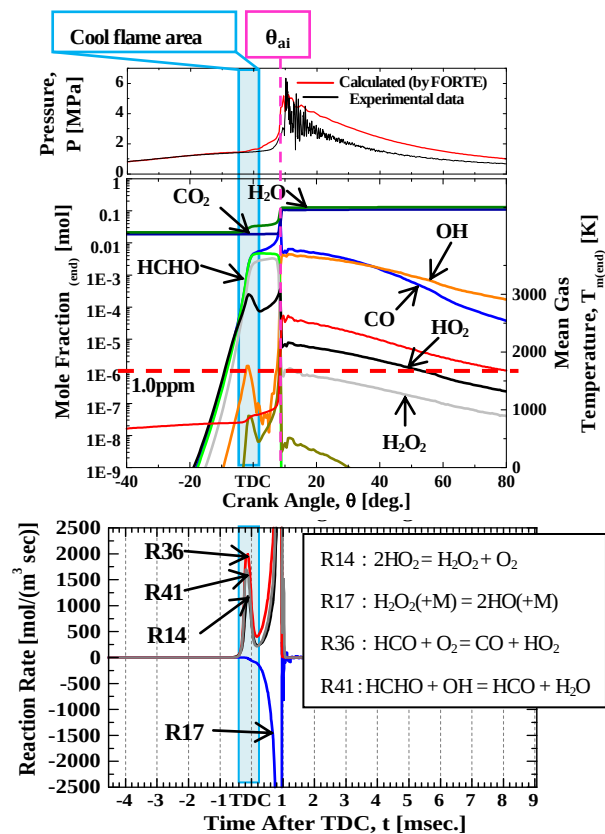
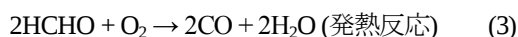


Fig.4 Combustion and autoignition behavior and Reaction rate (FORTE data and experimental data, $\gamma_{\text{EGR}}=15\%$)

この H_2O_2 ループが発生する熱によって, 自着火に至る温度を実現しているものと考えられる。その後, CO が酸化することによって CO_2 が生成され, 燃焼が完結する。

4. 結 論

外部 EGR を用いることで自着火時期が遅角する事ができ, ノッキングは緩慢化される。また, 数値流体解析による化学種履歴より, 低温酸化反応中では, HCHO の濃度が高くなると, 燃料中の H の引き抜きに使用されていた OH が, HCHO との反応で消費されるようになり, 冷炎反応が停止することが確認できる。更に, 冷炎反応終了時から自着火までは HCHO は消費されているが, H_2O_2 は生成されていることから, H_2O_2 ループ反応が起きていると考える。

参考文献

- (1) 吉田慎一郎,他: ダウンサイジング過給ガソリンエンジンへの Low-pressure Cooled EGR システムの適応, 自動車技術 第69巻9号
- (2) Gaydon, A. G.: The Spectroscopy of Flame -2nd Edition, London, Chapman and Hall Ltd (1974)
- (3) FORTE 40141, Reaction Design: San Diego, 2014
- (4) 安東弘光: 熱発生に着目した炭化水素の着火機構の整理, 日本機械学会年次大会 (2006)