K2-11

過給と外部 EGR が HCCI 機関の熱効率に及ぼす影響

Effect of Supercharging and External EGR on Thermal Efficiency in an HCCI Engine

○星野飄太[1]，田中寛人[1]，田邉翔太[1]，樋口裕也[2]，松石宗大[2]，飯島晃良[3]，庄司秀夫[4]
*Hyota Hoshino[1], Hiroto Tanaka[1], Shota Tanabe[1], Yuya Higuchi[2], Munehiro Matsuishi[2], Akira Iijima[3], Hideo Shoji[4]

Abstract: Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) combustion has attracted widespread interest because it achieves high efficiency and can reduce particulate matter (PM) and nitrogen oxides (NOx) emission simultaneously. However, ignition timing control of HCCI combustion is difficult and autoignition occurs simultaneously at multiple points in the HCCI combustion process. Therefore, rapid rise of cylinder pressure makes stable engine operation difficult at high loads. Supercharging and Exhaust Gas Recirculation (EGR) is the effective methods to expand the operation range of HCCI engines. In this study, experiments were conducted to investigate the effects of EGR and supercharging on thermal efficiency of HCCI combustion by using in-cylinder pressure analysis and exhaust gas analysis.

１．はじめに

近年，高効率かつクリーンな燃焼方法として，予混合圧縮着火（以下，HCCI）燃焼が注目されている[1]. HCCI 燃焼は希薄予混合気を吸気し, ピストン圧縮によって自着火させることで火炎伝播限界を超えた希薄燃焼が可能であり, 窒素酸化物（NOx）, 粒子状物質（PM）を同時低減が可能な燃焼方法である．しかし HCCI 燃焼は火花点火, 燃料噴射等の物理的着火手段を持たず, 着火時期の制御が困難である．加えて燃焼が多点での同時着火であるため，高負荷時においては燃焼が急峻になり，機関騒音の増大や，異常燃焼を招く．これまでの研究により，過給や EGR により燃焼の緩慢化が可能であることが報告されているが，その際の熱効率特性に関する詳細な調査は十分に行われていない.

そこで本研究では, 過給と EGR がその HCCI 機関の熱効率特性に与える影響を指圧解析および排ガス分析によって，詳細に調査した.

２．実験装置及び方法

本研究で使用した供試機関の仕様を表 1 に示す. 供試機関は圧縮比 15 の 4 ストローク単気筒エンジン（OHV）である．吸気温度 T_{in} [K] はインタークーラー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．過給圧は外部過給機によって調整を行った. EGR 率（γ_{EGR}）は以下の式によって算出した．ここで F_0 [l/min] は EGR を導入する前の吸入空気量であり，F_A [l/min] は EGR を導入した際の吸入空気量である.

Table 1　Specifications of experimental equipment

4-stroke Air-cooled Single Cylinder Engine	
Bore × Stroke [mm]	76 × 66
Displacement [cm^3]	299
Compression Ratio [-]	15: 1
Engine Speed [rpm]	1400

$$\gamma_{EGR} = \frac{F_0 - F_A}{F_0} \times 100 \quad [\%] \tag{1}$$

HCCI 燃焼の光の吸収の測定を行うため，シリンダに石英観測窓を設け，ボア方向のキセノン光源による透過光を採取した[2]．透過光は光ファイバによって分光器へと導入され，293.1 nm の波長に分光される．この波長は 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.

$$A_{293.1} = \frac{E_0 - E_A}{E_0} \quad [-] \tag{2}$$

未燃損失を一酸化炭素（CO）および炭化水素（HC）の質量排出量から算出し，未燃損失と熱発生率の積算値から冷却損失を算出した.

３．実験結果及び考察

本実験では燃料に PRF（50 RON）を用い，機関回転数 1400 rpm, 吸気温度 T_{in} = 333 K, 投入熱量 Q_{in} = 500 J/cycle 一定に保ち, 過給圧 P_b [kPa]（abs）を 120 kPa,

１：日大理工・機械　２：日大理工・院（前）　３：日大理工・教員・機械　４：日大名誉教授

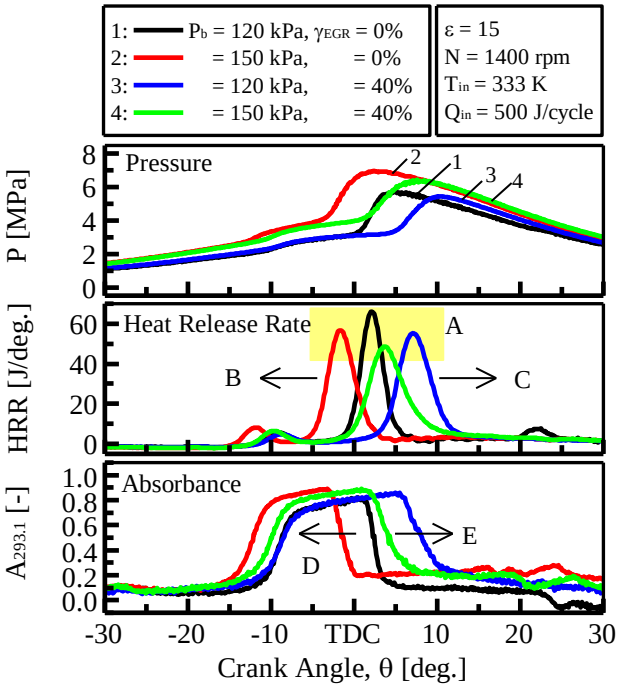

Fig.1　Experimental result

150 kPa，EGR 率を，0%，40% にそれぞれ変化させ実験を行った．

測定波形を図 1 に示す．波形はクランク角 θ [deg.] に対する，筒内圧力 P [MPa]，熱発生率 HRR [J/deg.]，筒内平均ガス温度 T [K]，293.1 nm の吸光度 $A_{293.1}$ [-] を示している．

図 1 の熱発生率に着目すると，熱発生率の最大値は過給圧と EGR 率を増加させた場合において減少している（領域 A）．着火時期は，過給圧を上げた場合は進角し（矢印 B），EGR 率を上げた場合は遅角する（矢印 C）．これは過給による筒内圧力の増加によって冷炎等が活性化したことと，EGR による比熱比の低下によるものだと思われる．また，吸光度のグラフからも，過給することで着火時期が進角し（矢印 D），EGR によって遅角することが読み取れる（矢印 E）．また，吸光度が冷炎発生時に急峻に立ち上がり，熱炎発生と共に減少しているのがわかる．これは，冷炎により HCHO が生成され，熱炎によって HCHO が消費されたためである．

図 2 に各条件における図示熱効率，冷却損失割合 ϕ_w [%]，未燃損失割合 $\eta_{unburned}$ [%] を示す．冷却損失に着目すると，過給圧や外部 EGR 率の増加によって冷却損失が減少していることがわかる．これは，過給圧の増加によって筒内ガスの熱容量が増加することや，外部 EGR に含まれる不活性な三原子分子等が筒内に入り燃焼温度が低下したためであると考えられる．

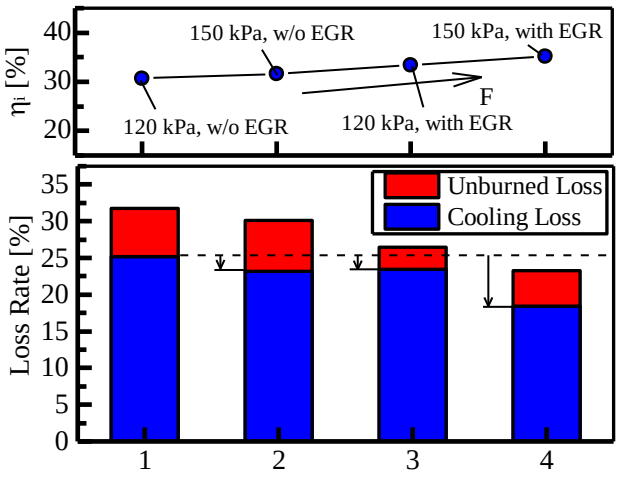

Fig.2　Details of thermal efficiency and loss rate of HCCI

次に未燃損失に着目すると，過給圧や外部 EGR 率の増加に対して，未燃損失に大きな影響はない．過給や外部 EGR による低温燃焼のため，未燃損失は増大すると考えられるが，本実験の吸気圧が低く EGR を施さない条件では筒内圧力振動に起因すると思われる未燃 HC の増大のため，損失割合としては，大きな変化が無かったと考えられる．図 2 より，本実験では，未燃損失の影響は冷却損失の影響に対して少なかったため、結果として過給と外部 EGR を用いることで，熱効率は向上したと考えられる（矢印 F）．

4．結論

HCCI 燃焼は高負荷域での利用が困難であるが，過給をすることで投入熱量を増やすことが可能である．その際，筒内圧力の増加による冷炎等の活性化によって燃焼が進角し，燃焼緩慢化の効果が現れにくくなってしまう場合があるが，外部 EGR を組み合わせることで燃焼を遅角させ緩慢化することができる．低温燃焼に起因する未燃損失の増大が考えられるが，冷却損失の改善によって同等あるいは同等以上の熱効率を見込めると考えられる．

5．参考文献

[1] Thring, R. H.: Homogenous – charge –Compression – Ignition (HCCI) Engines, SAE Paper 892068 (1989)

[2] Iijima, A., Abe, Y., Ishizawa, Y., Emori, G., Shoji, H., Misawa, K., Yamamoto, K., Kojima, H. and Nakama, K.: A study of Autoignition and Combustion Behavior in a Supercharged HCCI Engine by using In-cylinder Spectroscopic Measurements, Proceedings of the 35th FISITA World Automotive Congress (2014)