高過給・広域多量 EGR の予混合圧縮着火燃焼の圧力上昇率の低減*

山口 卓也^{*1}, 青柳 友三^{*2}, 長田 英朗^{*1}

Decrease of Pressure Rise Rate of Premixed Charge Compression Ignition Combustion Using High Boosted and Wide Range EGR in a Single Cylinder Engine

Takuya YAMAGUCHI^{*3}, Yuzo AOYAGI and Hideaki OSADA^{*3} Research Department, NEW A. C. E Institute Co., Ltd.,
2530 Karima, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0822 Japan

The premixed charge compression ignition combustion (PCCI) can reduce NO_x and Smoke simultaneously. And it is one of the strategies to improve exhaust emissions at light load in a diesel engine. In this study, the effect of the injection pressure and the swirl ratio on exhaust gas emissions of PCCI was investigated. And also the effect of ignition timing on pressure rise rate of PCCI was investigated. The experimental results show that the combination of high injection pressure and low swirl ratio is effective to improve exhaust emissions of PCCI. Also, the pressure rise rate of PCCI can be decreased by ignition timing retard without the remarkable deterioration of fuel consumption.

Key Words: Diesel Engine, Common Rail, Fuel Injection, Internal Combustion Engine

1. はじめに

ディーゼル機関は、CO₂の排出量が少なく、地球温暖化の防止に効果大きい。著者らは、ディーゼル機関の軽負荷で、NO_xとSmokeの同時低減が可能な予混合圧縮着火燃焼 (PCCI)⁽¹⁾を適用し、中負荷から高負荷まで高過給・広域多量EGRのディーゼル燃焼を用いる燃焼コンセプトで研究を行ってきた⁽²⁾。PCCIは、同時多点着火であることから筒内で燃焼が急激に進行する。そのため、筒内圧力上昇率の最大値 $(dp/d\theta)_{max}$ が、1000kPa/deg以上になり、騒音や耐久性の点から好ましくない。本報は、PCCIの燃焼を緩慢にするために燃焼に強い影響のある燃料噴射圧力 P_{inj} 、スワール比SRおよび着火時期を変えて、PCCIの $(dp/d\theta)_{max}$ および排出ガスを調べた。また、PCCIを低速から高速の軽負荷に適用したときの、排出ガスと $(dp/d\theta)_{max}$ をあわせて調べた。

2. 実験装置および実験条件

2・1 実験装置 実験は4サイクル直噴単気筒ディーゼル機関を使用した。仕様を表1に示す。本実験エンジンは、高過給を前提に考えているためシリンダ内最高圧力 $P_{max}=30\text{MPa}$ に耐えうる仕様になっている。また、実験エンジンはデジタル可変バルブを装着しており、吸排気バルブの開閉時期および最大リフト量を任意に設定できる。スワール比は、可変スワールヘッ

ドを採用し、SR=1.4~7.4に変化することができる。

2・2 供試燃料 燃料は、市販軽油 (S分は実測で3ppm)を使用した。セタン価は、59.7である。また、潤滑油は低サルファオイル (SAE 10W30)を使用した。

2・3 実験条件 実験は、 $N_e=1200\text{rpm}$ 、 $BMEP=0.4\text{MPa}$ で P_{inj} とSRが排出ガスに及ぼす影響と着火時期が $(dp/d\theta)_{max}$ に及ぼす影響を調べた。試験条件を表2に示す。 P_{inj} とSRが排出ガスおよび $(dp/d\theta)_{max}$ に及ぼす影響を表2の試験No.1で調べた。また、着火時期が排出ガスおよび $(dp/d\theta)_{max}$ に及ぼす影響を表2の試験No.2で調べた。吸気弁閉時期IVCは、 $IVC=625\text{deg}$ (有効圧縮比： $\varepsilon_{eff}=10.2$)である。

Table 1 Engine specifications

Item	Specifications
Engine Type	DI single cyl. 4 valve
Displacement L	2.004
Bore × Stroke mm	135×140
Max Engine Speed rpm	2000
Injector	Common Rail System (Max $P_{inj}=200\text{MPa}$)
Nozzle	Minisac 0.177×8-150°
Piston Type	Steel (Monotherm)
Comb. Chamber	Shallow Dish (φ 98)
Compression Ratio	16.0
Swirl Ratio	1.4 ~ 7.4
Air Charging System	External super charger

Table 2 Experimental condition

Test No.	N_e rpm	BMEP MPa	P_b kPa	EGR %	P_{inj} MPa	IVO deg	IVC deg	EVO deg	EVC deg	SR	Ignition timing deg ATDC
1	1200	0.4	151.3	41~59	120~200	359	625	160	369	1.4~7.4	TDC
2				58	200					1.4	0~8

* 原稿受付 2009年9月9日。

^{*1} 正員, (株)新エイシーイー (☎ 305-0822 つくば市荻間 2530 (財)日本自動車研究所内)。^{*2} 正員, フェロー, (株)新エイシーイー。

E-mail: yamaguchi@nace.jp

3. 実験結果

3・1 噴射圧力とスワール比が排出ガスに及ぼす影響

図1, 図2および図3は, 横軸にスワール比 SR, 縦軸に燃料噴射圧力 P_{inj} で整理した $N_e=1200\text{rpm}$, $BMEP=0.4\text{MPa}$ の $BSNO_x$, EGR 率および $(dP/d\theta)_{max}$ である。図2は, P_{inj} と SR を変えた各条件で Smoke の排出が十分に低い $Smoke=0.35\text{FSN}$ になるときの EGR 率を示している。 $BSNO_x$ は, $P_{inj}=180\sim 200\text{MPa}$, $SR=5.6$ よりも低い領域で排出が少ない。また, $(dP/d\theta)_{max}$ もこの領域で低い。これらは, この領域で EGR 率を高め吸気 O_2 濃度を低下させている効果である。一方, $P_{inj}=120\sim 160\text{MPa}$, $SR=1.4$ の低スワール領域と $SR=5.6$ 以上の高スワールの領域で, $BSNO_x$ は排出が多い。これは, この領域で Smoke の排出を抑制しつつ EGR 率を高めることができないためである。図4に $P_{inj}=200\text{MPa}$, $SR=1.4$ と $P_{inj}=120\text{MPa}$, $SR=7.4$ の熱発生率を示す。 $P_{inj}=200\text{MPa}$, $SR=1.4$ の条件は, 燃料噴射終了後に低温酸化反応と主燃焼が起こる PCCI の熱発生率である。このため, 燃料と空気の前混合化が十分に促進されているので, Smoke の発生を抑えつつ EGR 率を高めて $BSNO_x$ を低減できている。 $P_{inj}=$

Fig. 1 Effect of P_{inj} and SR on $BSNO_x$

Fig. 2 EGR rate map at $Smoke=0.35\text{FSN}$

Fig. 3 Effect of P_{inj} and SR on $(dP/d\theta)_{max}$

120MPa , $SR=7.4$ の条件は, 着火後も燃料噴射が続き拡散燃焼を伴う熱発生率である。このため, 燃料と空気を十分に予混合化できず Smoke が増加するため EGR 率を高められない。高スワールの条件は, 着火を早め, 燃料噴霧のペネトレーションを低下させることから空気と燃料の予混合化を促進させにくいと考えられる。以上の結果から, TDC 近傍の PCCI の排出ガス低減に効果のある P_{inj} と SR の組み合わせは, 高圧燃料噴射の $P_{inj}=200\text{MPa}$, 低スワールの $SR=1.4$ である。

Fig. 4 Rate of heat release

3・2 着火時期の $(dP/d\theta)_{max}$ への効果

図5に着火時期に対する PCCI の排出ガス, $(dP/d\theta)_{max}$ および燃費の変化を示す。図中の赤の破線は, 同 機関速度, 負荷におけるディーゼル燃焼の $(dP/d\theta)_{max}$ を示している。 $(dP/d\theta)_{max}$ は, 着火時期の遅延に従い低減し, 着火時期 5deg ATDC ではほぼディーゼル燃焼と同等の $(dP/d\theta)_{max}$ にまで低減できる。着火時期 5deg ATDC の熱発生率を図4に併記する。着火時期 5deg ATDC の条件は, 燃料噴射終了後に低温酸化反応と主燃焼が起こる PCCI の熱発生率である。 $BSNO_x$ は, TDC 着火から着火時期の遅延に伴いわずからず低減する。Smoke は, 着火時期の遅延による悪化はなく低いレベルである。BSHC は, 着火時期の遅延に伴い排出量が増加する。BSFC は, 着火時期 5deg ATDC までは TDC 着火時の BSFC と同等のレベルである。着火時期が 5deg ATDC から更に遅延すると BSFC の悪化が顕著になる。以上から, $N_e=1200\text{rpm}$, $BMEP=0.4\text{MPa}$ で, $(dP/d\theta)_{max}$ をディーゼル燃焼と同等のレベルに低減し, BSFC の悪化を伴わず $BSNO_x$, Smoke を低減できる着火時期は, 5deg ATDC である。

Fig. 5 Ignition timing effects on exhaust emissions and $(dP/d\theta)_{\max}$

3・3 PCCI の領域マップ 着火時期を遅延し $(dP/d\theta)_{\max}$ を低減した PCCI を $N_e=800\sim 2000\text{rpm}$ の軽負荷に適用したときの BSNOx, Smoke および $(dP/d\theta)_{\max}$ の結果を図6にマップで示す. PCCI を適用した領域は、図中の黄色の実線で囲まれた部分である. PCCI 以外の領域は高過給・多量 EGR のディーゼル燃焼を適用している. 図6(a)に BSNOx の結果を示す. PCCI を適用した領域の BSNOx は、 $0.08\sim 0.47\text{g/kWh}$ である. JE05 試験で使用頻度の高い中速・軽負荷 (図6(a)のオレンジ色の破線で示す領域) では、 $\text{BSNOx}=0.08\sim 0.26\text{g/kWh}$ の低いレベルである. 図6(b)に Smoke の結果を示す. PCCI を適用した領域は $\text{Smoke}=0.35\text{FSN}$ 以下の低いレベルであり Smoke の排出は少ない. 図6(c)に $(dP/d\theta)_{\max}$ の結果を示す. PCCI を適用した領域の $(dP/d\theta)_{\max}$ は、着火時期を適正に遅延したので $(dP/d\theta)_{\max}=1000\text{kPa/deg}$ を越えないレベルであり、 $(dP/d\theta)_{\max}=650\sim 875\text{kPa/deg}$ にできた.

4. まとめ

PCCI を緩慢な燃焼にするため、燃焼に強い影響のある Pinj , SR および着火時期を変え、PCCI の $(dP/d\theta)_{\max}$ と排出ガスを調べ以下の結論を得た.

1. $N_e=1200\text{rpm}$, $\text{BMEP}=0.4\text{MPa}$ の PCCI は、燃料高圧噴射 ($\text{Pinj}=200\text{MPa}$) と低スワール ($\text{SR}=1.4$) の条件で、Smoke の排出を抑えつつ EGR 率を高めて BSNOx の低減ができる.

Fig.6 Exhaust emissions and $(dP/d\theta)_{\max}$ map

2. $N_e=1200\text{rpm}$, $\text{BMEP}=0.4\text{MPa}$ の PCCI は、着火時期 5deg ATDC で、ディーゼル燃焼と同等の筒内圧力上昇率の最大値 $(dP/d\theta)_{\max}$ にできる. スワール比, 燃料噴射圧, 着火時期, EGR 率を適正にコントロールすることで、排出ガスと $(dP/d\theta)_{\max}$ を低減することができる.
3. $N_e=800\sim 2000\text{rpm}$ の軽負荷に PCCI を適用した場合、Smoke の排出を抑えつつ $\text{BSNOx}=0.08\sim 0.47\text{g/kWh}$ に低減することができる.

文献

- (1) Shimazaki, N., Nishimura, T., New Combustion Concept of Premixed Compression Ignition with Fuel-injection near Top Dead Center, *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.36, No.3, (2005), pp.31-36
- (2) Yamaguchi, T., Aoyagi, Y., Osada, H., Goto, Y., Suzuki, H., Improvement of Premixed Compression Ignition Combustion using Wide Range and High Rate EGR, *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.38, No.6, (2007), pp.101-106