過濃 SI 燃焼による改質燃料模擬ガスがメタン HCCI 燃焼に及ぼす影響

三好 正城^{*1}, 山崎 由大^{*2}, 上道 茜^{*2}, 金子 成彦^{*3}Influence of mock reformed gas by over-rich SI combustion
on HCCI combustion fuelled by methaneMasaki MIYOSHI^{*1}, Yudai YAMASAKI^{*2}, Akane UEMICHI^{*2} and Shigehiko KANEKO^{*3}^{*1, *2, *3}Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Received: 30 August 2016; Revised: 22 December 2016; Accepted: 21 February 2017

Abstract

HCCI combustion is effective for improving thermal efficiency of a gas engine, but it has problems such as control of the ignition and combustion. To solve the problem, availabilities of dedicated EGR technique are considered to control its ignition and combustion. Dedicated EGR involves reforming fuel into H₂ or CO by running a single or more cylinder with rich mixture and supplying the exhaust gas directly into other cylinders. In this study, the effect of dedicated EGR on methane HCCI combustion was investigated by experiments. As a result, when equivalence ratio of rich SI combustion or EGR ratios increase, the ignition timing of HCCI advances and combustion becomes steep. The advanced ignition timing is caused by an increase of H₂ mole fraction in the intake gas. In addition, the possibility of controlling the ignition timing, which is strongly concerned with the thermal efficiency of a HCCI engine, by dedicated EGR was discussed. It was shown that the ignition timing linearly depends on H₂ mole fraction in the intake gas.

Key words : Internal combustion engine, Methane, Fuel reformation, HCCI, Dedicated EGR

1. 緒 言

化石資源の枯渇問題や地球環境問題の深刻化によって、エネルギーの有効利用は急務となっている。加えて、2011 年 3 月の東日本大震災の発生に伴い、災害時の非常用電源としても利用可能な分散型電源に対する需要が高まっている。このような背景のもと、将来の日本の電源構成において、コジェネレーションシステムが大きな役割を果たすことが予想される。コジェネレーションシステムは熱電の併給によって高い総合効率を示す分散型電源であり、発電機を駆動する燃料には主に都市ガスが用いられる。しかしながら、システムが供給するエネルギーのうち、熱エネルギーはその用途が給湯、冷暖房などに限定される。一方で、電気エネルギーは用途の広さ、使い勝手が良いことで知られている。したがって、コジェネレーションシステムを更に普及させるには、システム中の発電機の発電効率向上が望まれる。

コジェネレーションシステムの発電機としては主にガスエンジンが用いられている。ガスエンジンの熱効率向上のための手段のひとつとして、HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) 燃焼による運転が検討されている (Kobayashi et al., 2011)。HCCI 燃焼は、燃料希薄な予混合気を高い圧縮比での圧縮のみで自着火させることにより、従来の SI (Spark Ignition) 燃焼よりも高い熱効率を示す燃焼方式であるが、反応依存性が強く着火燃焼制御が困難であるという問題を併せ持つ。この着火燃焼制御の手法として、本研究では Dedicated EGR (以下、DEGR) を取り上げる。DEGR は、多気筒エンジンの特定の筒内で燃料過濃の SI 燃焼による燃料改質により

No.16-00391 [DOI: 10.1299/transjsme.16-00391], J-STAGE Advance Publication date : 1 March, 2017

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)^{*2} 正員, 東京大学大学院工学系研究科^{*3} 正員, フェロー, 東京大学大学院工学系研究科

E-mail of corresponding author: mmiyoshi@fiv.t.u-tokyo.ac.jp

炭化水素系の燃料を水素 H_2 、一酸化炭素 CO に改質し、これら改質された成分を含んだ排気を他の気筒へ供給し、希薄 SI 燃焼時の燃焼速度の低下を抑えるというコンセプトのもと開発された技術である (Alger and Mangold, 2009). $DEGR$ 中の H_2 , CO 濃度は、燃料過濃燃焼の当量比を操作することにより制御が可能であり、ガスエンジンで使用される都市ガスの主成分であり自着火しにくいメタン CH_4 と、 $DEGR$ から供給される H_2 , CO との吸気中の比率によって、予混合気の自己着火燃焼特性を変化させ、 $HCCI$ 燃焼の着火および燃焼を制御できる可能性がある。これまでに、 H_2 や CO が $HCCI$ 燃焼の自己着火燃焼に及ぼす影響については、 CH_4 やジメチルエーテル C_2H_6O をエンジン外部に設けた改質器により改質し、その改質燃料の供給量を操作することにより、着火時期の制御や運転可能負荷範囲の拡大を可能にした報告がある(首藤, 高橋, 2004, Yap et al., 2004, Sato et al., 2005, Yap et al., 2006). これらの研究は $HCCI$ 燃焼の着火燃焼制御に対する燃料改質の有効性を示すものではあるが、筒内で燃料改質を行う $DEGR$ では、改質後の燃料の組成は外部改質器を用いた場合とは大きく異なる。例えばメタンを燃料とし、外部改質器での改質を行った Yap らの研究では、改質後の燃料ガス中の H_2 割合が 15% であり、 H_2/CO 比が 2.0 程度である(Yap et al., 2006)のに対し、後述するように過濃 SI 燃焼の当量比を 1.3~1.65 の範囲で操作した場合の $DEGR$ の組成を本研究で推定した結果、 H_2 割合と H_2/CO 比はより小さな値をとった。このような $DEGR$ 導入を想定した H_2 や CO 濃度条件での $HCCI$ 燃焼を取り扱った研究は実験、計算ともに例がない。

そこで、本研究では、多気筒エンジンにおいて、特定の気筒で過濃 SI 燃焼を生じさせ改質された燃料を $DEGR$ として、 $HCCI$ 燃焼を生じさせる他の気筒に供給した場合を想定し、 SI 燃焼の当量比や $DEGR$ 率を考慮した模擬ガスを用い、模擬ガスの条件が $HCCI$ 燃焼の着火燃焼へ及ぼす影響を実機により調査した。さらに、調査結果に基づき、 $DEGR$ を用いた $HCCI$ 燃焼の着火時期制御手法を検討した。

2. 実験装置および実験手法

2・1 実験装置

供試機関として市販のガスコージェネパッケージに搭載されている 3 気筒ガスエンジンの 1 気筒のみを用い、燃料は都市ガスの主成分であるメタンとした。供試機関の諸元を表 1 に、実験システムの概要を図 1 にそれぞれ示す。実験に用いた気筒のピストンは、 $HCCI$ 燃焼が可能のようにピストンを改造し圧縮比を 24.6 と純正からは変更している。

$DEGR$ については、種々の過濃条件で生成された既燃ガスの組成を模擬したガスを供給し、 $HCCI$ 燃焼の実験を行った。新規の燃料、 $DEGR$ 、空気が混合したガスをエンジンに供給するために、 H_2 , CO , CH_4 , N_2 , CO_2 の各高圧ボンベからマスフローコントローラにより流量を調整、スロットルは全開とした。供給したガス組成の決定方法は、次節に記す。

また、吸気ポートに設けたヒーターにより空気を加熱することで、エンジンに吸入する直前の予混合気の温度を 413 K の一定値に制御した。エンジン回転数については、ダイナモコントローラの定回転数制御によって、1500 rpm で一定とした。エンジンの冷却水温度は全実験点で 363 ± 3 K の範囲に収まるようラジエーターファンにより制御した。筒内には、ピエゾ素子を用いた筒内圧力センサ (Kistler 6041A) を設置し、筒内圧力を測定した。さらに、クランク軸に設置したロータリーエンコーダによるクランク角計測結果と組み合わせ、クランク角に対する筒内の圧力履歴としてデータを収集した。また、吸入空気流量は層流形空気流量計で測定した。

Table 1 Engine specification.

Cooling System	Water Cooling
Number of Cylinders	1
Bore/Stroke	88mm/90mm
Displacement	547cc
Compression Ratio	24.6
Intake Valve Open/Close	-20degATDC/-135degATDC
Exhaust Valve Open/Close	135degATDC/20degATDC

Fig. 1 Experimental apparatus.

2・2 吸気組成

本研究においては、燃料過濃 SI 燃焼の当量比と DEGR 率を変化させて HCCI 燃焼実験を行う。DEGR に模擬ガスを用いるために、事前にこれらの値が変化した場合の組成を推定して、マスフローコントローラの設定を行う必要がある。そのため、まず過濃 SI 燃焼の当量比毎の排気組成を推定した。具体的には、詳細反応数値計算を行える市販のシミュレーションソフトウェア CHEMKIN PRO の、反応器モデル Equilibrium を用いて、SI 燃焼をメタン空気予混合気で行った場合を想定して 2000 K での平衡組成を求めることで DEGR の組成を推定した。計算用の反応機構には、炭化水素の燃焼反応を扱う際に一般的な GRI-Mech3.0 (化学種数 53, 反応数 325) を用いた。当量比毎の DEGR の組成の計算結果を図 2 に示す。推定した組成中には、図 2 に示した N_2 , CO_2 , CO , H_2O , O_2 , H_2 以外の分子も 10^{-6} 以下のオーダーのモル分率で含まれている。しかしながら、これらの分子は存在する割合が極めて小さいため、着火燃焼へ及ぼす影響は無視できるほど小さいことを、別に行った素反応数値計算で確認した。したがって、本研究では N_2 , CO_2 , CO , H_2O , O_2 , H_2 以外の分子については無視することとした。当量比を 1.3~1.65 の範囲で変化させたとき、化学種の割合は、 H_2 と CO が 5~10%, N_2 が 60~70%, CO_2 が 3~5%, H_2O が 15~18% の範囲で変化する。なかでも、 H_2 と CO は、当量比の増加に伴って割合が増加する。この計算結果を用い、過濃 SI 燃焼の当量比を ϕ_{SI} 、この時の DEGR とともに HCCI 燃焼気筒へと供給される新気の CH_4 空気予混合気の当量比を ϕ_{Fresh} とし、DEGR 率を γ_{EGR} として、HCCI 燃焼気筒の吸気組成を決定した。 γ_{EGR} は、1 サイクル当たりの DEGR 以外の吸気物質質量 (n_{Fresh}) に対する DEGR の物質質量 (n_{DEGR}) の割合とし、式 (1) のように定義した。なお、 ϕ_{Fresh} に関しては、 ϕ_{SI} , γ_{EGR} の値に応じて、1 サイクル当たりの投入熱量が全実験条件において 420 J/cycle で一

Fig. 2 Mole fractions in the exhaust from rich SI combustion for various equivalence ratios. Mole fractions of H_2 and CO increase with the increasing equivalence ratio are shown.

定となるように HCCI 燃焼気筒に供給する新気燃料である CH_4 の流量を変化させた。なお、 H_2O については、当研究の実験設備ではエンジンに供給することができなかったため、 N_2 により代替した。 N_2 を H_2O の代わりとすることで、吸気の比熱が低下するため、筒内温度が H_2O の場合よりも上昇することが考えられる。また、筒内温度が着火温度に達する時期が早まるため、 H_2O の場合よりも着火時期が進角していると考えられる。

$$\gamma_{\text{EGR}} = \frac{n_{\text{DEGR}}}{n_{\text{DEGR}} + n_{\text{Fresh}}} \quad (1)$$

3. 実験結果

3・1 着火燃焼特性調査

3・1・1 過濃 SI 当量比の影響

はじめに、 γ_{EGR} を 0.35 で一定とし、 ϕ_{SI} を 1.45 から 1.65 の範囲で変化させて実験を行った。その際の筒内圧力履歴、筒内圧力履歴から求めた筒内温度履歴、熱発生率履歴を図 3 に示す。筒内圧力、温度における急激な上昇や熱発生から、DEGR 導入下において HCCI 燃焼が起きていることが確認できる。

ϕ_{SI} の着火燃焼への影響について述べる。筒内圧力履歴を見ると、 ϕ_{SI} が増加するにしたがって燃焼により筒内圧力が急上昇するタイミングが進角していることから、 ϕ_{SI} の増加に伴い着火時期が進角すると言える。また、筒

Fig. 3 Histories of in-cylinder pressure (top), in-cylinder temperature (middle), and heat release rate (bottom) for various equivalence ratios of rich SI combustion. The ignition timing is advanced and the combustion duration is shortened with the increasing equivalence ratio.

内圧力のピーク値が上昇している。筒内温度履歴より、 $\phi_{SI} = 1.45$ 以上の条件では、筒内温度のピーク値に大きな差はないものの、 ϕ_{SI} の増加に伴いピーク時期は進角している。 $\phi_{SI} = 1.45$ 以下において筒内最高温度が低くなった原因として、燃焼効率が低いことに加え、燃焼が膨張行程で進行しており、燃焼による筒内ガス温度の上昇と同時に膨張による低下が進行したためと考えられる。また熱発生履歴から、 ϕ_{SI} が増加すると、熱発生率のピーク値が上昇している。さらに、熱発生率が正の値を示すようなクランク角の期間が小さくなることから、燃焼期間は短くなって、燃焼が急峻になっている。

以下では、 ϕ_{SI} の増加に伴う着火時期の進角の原因について考察する。図2より、 ϕ_{SI} の増加に伴ってSI燃焼気筒の排気における H_2 、 CO のモル分率は増加する。したがって、 ϕ_{SI} 増加時には、HCCI気筒の吸気組成においても、 H_2 と CO のモル分率は増加する。Satoらは、メタンを燃料としたHCCI燃焼において、吸気中の H_2 モル分率を増加させると着火時期が進角することを報告している。また、 CO モル分率を増加させると、 H_2 が存在しない条件では着火時期は遅角するが、 H_2 存在下では着火時期が進角することを報告している (Sato et al., 2005)。Satoらの研究においては、吸気中の H_2 および CO 量のみを変化させ、他の化学種の割合は固定して影響を調査した一方、本研究では、 ϕ_{SI} や γ_{EGR} の操作によって H_2 の吸気中の量が増加した場合、その他の化学種の割合も変動する。このような条件のもとでも、Satoらの研究と同様に、 H_2 、 CO による着火時期進角効果が現れたと考える。 ϕ_{SI} を1.45から1.65まで操作することによる吸気中の H_2 モル分率、 CO モル分率の変化はそれぞれ2.5~3.6%、2.8~3.3%程度であり、僅かな H_2 割合と CO 割合の変化がHCCIの着火燃焼に大きな影響を及ぼしたといえる。また、 H_2 、 CO のモル分率の変化以外の着火時期への影響因子として、 CO_2 、 N_2 等の不活性ガスのモル分率の変化が挙げられる。これらの化学種の割合が変化することでHCCI気筒の吸気の比熱が変化し、着火時期に影響することが考えられる。

以下では、 H_2 、 CO の化学種が着火時期に及ぼす影響について、CHEMKIN PROを用いた計算によって、個別に調査した結果を記す。反応器モデルとしてエンジンの着火燃焼を扱えるIC engine simulatorを用い、反応機構にGRI-Mech3.0を用いた。モデルに入力する吸気組成は、実験における $\phi_{SI} = 1.55$ 、 $\gamma_{EGR} = 0.35$ での吸気組成を基

Table 2 Calculation condition.

Engine Speed	1500 rpm
Bore/Stroke	88 mm /90 mm
Compression Ratio	24.6
Starting Crank Angle	-135 degATDC
Initial Temperature	413 K
Initial Pressure	1 atm

Fig. 4 Calculation results of in-cylinder pressure in the case of increasing H_2 mole fraction(left) and CO mole fraction(right). Ignition timing is advanced with the increasing H_2 mole fraction and CO mole fraction.

準とし、そこから H_2 、 CO いずれか一方の割合のみを増加させた。その際の筒内圧力の計算結果を比較することで、各化学種の着火時期への影響を確かめた。組成以外の条件は、実験での設定をもとに表 2 のようにした。 H_2 のモル分率は、 $\phi_{SI} = 1.55$ 、 $\gamma_{EGR} = 0.35$ における 0.0384 から、0.005 ずつ 0.0534 まで変化させた。 CO のモル分率は、 $\phi_{SI}=1.55$ 、 $\gamma_{EGR}=0.35$ における 0.0371 から、0.005 ずつ 0.0521 まで変化させた。筒内圧力履歴の計算結果を、図 4 に示す。図 4 より、 H_2 、 CO いずれのモル分率が増加した場合も、燃焼により筒内圧力が上昇する時期が早まることから、着火時期が進角するといえる。モル分率が 0.005 増加することによる圧力履歴の位相のずれは、 H_2 と CO とで同程度であり、本研究の吸気条件において、 H_2 と CO は、同じだけモル分率が変化した場合に、着火時期に同程度影響すると思われる。

3・1・2 DEGR 率の影響

続いて、 $\phi_{SI} = 1.50$ で一定とし、 γ_{EGR} を 0.30 から 0.40 まで 0.025 刻みで操作する条件で、実験を行った。その際の筒内圧力履歴、筒内温度履歴、熱発生率履歴を図 5 に示す。DEGR 率 γ_{EGR} を増加させると、 ϕ_{SI} を増加させたときと同様の变化を示している。着火時期が進角し、燃焼期間が短くなり、筒内圧力と熱発生率のピーク値が上昇する。図 2 より、 $\phi_{SI} = 1.50$ の条件下では過濃 SI 燃焼の排気中に H_2 と CO がそれぞれ 10% 程度含まれているため、 ϕ_{SI} を固定し γ_{EGR} を増加させた条件においても、HCCI 気筒の吸気中の H_2 および CO 割合は増加する。 γ_{EGR} を操作した場合では、吸気中の H_2 モル分率は約 2.5~3.3% の範囲で変化した。さらに CO モル分率に関しては、約 2.5~3.4% の範囲で変化した。したがって、 ϕ_{SI} を変化させた場合と γ_{EGR} を変化させた場合との両方で、同程度の

Fig. 5 Histories of in-cylinder pressure (top), in-cylinder temperature (middle), and heat release rate (bottom) for various EGR ratios. The ignition timing is advanced and the combustion duration is shortened with the increasing EGR ratio as with varying the equivalence ratio.

H_2 および CO のモル分率変化が起きたことになる。ゆえに、着火時期の進角の原因は、 ϕ_{SI} 操作時と同様に H_2 , CO 割合が増加したことだと考えられる。

さらに、図3と図5とを比べると、 ϕ_{SI} を操作した場合のほうが着火時期の変動が大きい。この原因として考えられるのは、 γ_{EGR} を操作した際には、吸気中の H_2 , CO 割合の増加と同時に、 CO_2 , H_2O という既燃ガスの割合も同時に増加していることである。 CO_2 , H_2O 等の3原子分子は、 H_2 , CO , N_2 等の2原子分子よりも一般に比熱が大きい。これらの3原子分子の吸気中の割合が増加することによって、吸気の比熱が上昇し、着火温度に到達するクランク角が遅れると考えられる。 H_2 , CO 割合に関して近い条件を持つ、 $\phi_{SI} = 1.55$, $\gamma_{EGR} = 0.325$ と、 $\phi_{SI} = 1.50$, $\gamma_{EGR} = 0.350$ との2条件で、着火時期付近の筒内温度を比較したものを図6に示す。DEGR率の大きな条件のほうが、温度の上昇が遅れていることがわかる。また、 ϕ_{SI} 操作時の $\phi_{SI} = 1.40$ ($\gamma_{EGR} = 0.35$) の実験点では、吸気中の H_2 割合は2.5%、 CO 割合は2.8%であり、一方 γ_{EGR} 操作時の $\gamma_{EGR} = 0.30$ ($\phi_{SI} = 1.55$) の実験点では、 H_2 割合、 CO 割合ともに2.5%であった。また、図3と図5とを比べると、両者の H_2 , CO 割合に大きな差がないにもかかわらず、 $\phi_{SI} = 1.40$ の実験点では着火時期が大きく遅角し、ほとんど失火に至っているのに対して、 $\gamma_{EGR} = 0.30$ の実験点では正常な燃焼が生じている。これは、 $\gamma_{EGR} = 0.30$ の場合の方が、DEGR率が小さいためにシリンダ内のガスの比熱が小さくなり、ピストン圧縮による温度上昇がより早くなったことで着火時期がより早くなったためだと考えられる。

Fig. 6 Comparison of in-cylinder temperature under two experimental conditions. Temperature rise is more delayed under higher DEGR ratios.

Fig. 7 Indicated thermal efficiency against the ignition timing for various EGR rate and rich-SI equivalence ratios. Solid line shows the quadratic curve approximation. It is clearly shown that the ignition timing largely determines the indicated efficiency.

3・2 着火時期制御手法の検討

ここでは、これまでの実験結果を踏まえ、DEGRの導入によるHCCI燃焼の着火時期の制御手法を検討する。まず、3.1では別々に操作した ϕ_{SI} および γ_{EGR} について、同時に1.45~1.65の範囲で0.05ずつ、0.30~0.40の範囲で0.025ずつそれぞれ変化させ、全ての組み合わせで実験を行った。全ての実験点について着火時期に対する図示熱効率の関係を図7にまとめる。実験点は ϕ_{SI} が5通り、 γ_{EGR} が5通りの全25通りだが、失火が生じてエンジン回転数が1500 rpmに至らなかった実験点は除いてある。図中のオープンシンボルは、ノッキングが生じた実験点の結果である。なお、本研究では、筒内圧力履歴にカットオフ周波数5 kHzのハイパスフィルタによって抽出した圧力振動の成分からノックの有無を判断した。具体的には連続10サイクルの圧力履歴の計測結果の中で、0.15 MPaを超える振幅の圧力振動が発生していた場合、その実験条件点をノッキングが生じたと判定した。なお、着火時期は、吸気バルブが閉じてから熱発生率が初めて2 J/deg.を上回ったときのクランク角と定義した。DEGR率が等しく同一色でプロットされた各点の間では、SI燃焼当量比が異なっており、その差によって異なる着火時期、図示熱効率となっている。また図中には、各点から最小二乗法により求めた、2次多項式による近似曲線を示している。図示熱効率の着火時期に対する変化が、DEGR率、SI燃焼当量比の値によらず、大まかな傾向をもつことが示唆されている。また、2次の近似曲線において、図示熱効率がピークを示す着火時期はおおよそ0.0 deg. ATDCであり、すなわち、着火時期を0.0 deg. ATDC近傍に制御することによって、本供試機関の高効率運転が果たされることが考えられる。以上から、着火時期は図示熱効率を決定し得る重要な制御量であり、DEGRを導入した際にSI燃焼当量比やDEGR率による着火時期の制御性を検討した。

着火時期が吸気中の H_2 およびCOのモル分率に影響されることは、前に述べた通りである。そこで、 H_2 モル

Fig. 8 Ignition timing against the mole fraction of H_2 (top) and CO (bottom) in intake gas. The ignition timing changes almost linearly to H_2 and CO mole fraction.

分率および CO モル分率に対する着火時期の関係を調査した。その結果を図 8 に示す。図中のオープンシンボルは、ノッキングが生じた実験点の結果である。また、失火のために回転数が 1500 rpm に至らなかった点は除いてある。以下では着火時期制御の議論を行うが、ノッキングが発生した実験点は除いて考えることとした。これは、図 7 よりノッキングが生じる実験点は総じて着火時期が早期で図示熱効率が低いため、このような条件に着火時期を制御することはないと考えられるためである。図 8 から、 γ_{EGR} が同じ場合であれば、着火時期は H_2 , CO のモル分率の変化に対しおおむね線形に変化している。さらに、 γ_{EGR} が異なる条件の間でも、 H_2 , CO モル分率に対する着火時期の変化の勾配は大きくは変わらず、切片のみが変化する傾向にある。

今回の実験条件では H_2 および CO のモル分率が連動して変化し、それぞれの変化が着火時期の変動に寄与している。したがって、本来は H_2 と CO の両方のモル分率を考慮して着火時期の制御を行うべきであるが、両方のモル分率が連動し変化する今回の実験から、それぞれの変化が着火時期にどの程度影響するかを特定することは困難である。そこで、吸気中の H_2 モル分率にのみ注目し、最小二乗法を用いて、着火時期に対して式 (2) の実験式を構築した。式中の θ_{ign} は着火時期、 x_{H_2} は吸気中水素モル分率、 α は EGR 条件に応じた切片を表す。 α を今回の EGR 条件のデータを用いて 2 次式で近似すると式 (3) のようになる。構築した式は H_2 モル分率の 1 次式であるが、その係数の決定には CO の存在が影響している。DEGR の場合、吸気中の H_2 モル分率増加時には、CO モル分率も同程度増加し、また、CO と H_2 は、素反応数値計算で確認したように同程度の着火時期進角効果を持つ。したがって、 x_{H_2} を用いて着火時期を表しても問題ないとする。

$$\theta_{\text{ign}} = -282.7x_{\text{H}_2} + \alpha \quad (2)$$

$$\alpha = -104\gamma_{\text{EGR}}^2 + 79.9\gamma_{\text{EGR}} - 4.86 \quad (3)$$

実験式での着火時期の計算結果と着火時期の実験値とを比較すると、全ての実験点において誤差は 0.44 deg. 以下となった。代表として、 $\gamma_{\text{EGR}} = 0.300, 0.375$ において比較した結果を図 9 に示す。図 7 の着火時期と図示熱効率の 2 次近似式において、着火時期が図示熱効率をピークにする 0.0 deg. ATDC から 0.44 deg. ずれた場合、図示熱効率の低下は、0.00066 と極めて小さいため無視できる。したがって、高効率運転を目指した着火時期制御のための実験式としては、十分な精度で着火時期を計算できていると考える。

このように、吸気中の H_2 のモル分率のみを考慮した実験式によって、 H_2 と CO の両方のモル分率が変動する条件での着火時期の実験値を十分に予測することができた。この理由は、今回の実験条件では ϕ_{SI} や γ_{EGR} が変化して吸気中の H_2 モル分率が変化した場合、必ず ϕ_{SI} や γ_{EGR} の制約のもとで一意に CO モル分率も決まるため、 H_2 モル分率のみを指標として予測する式中には、CO モル分率の増減の影響も内包されており、着火時期をある程度

Fig. 9 Comparison of measured and calculated ignition timing. (a) $\gamma_{\text{EGR}} = 0.300$ (b) $\gamma_{\text{EGR}} = 0.375$.

予測することが可能になったためだと考えられる。

以上より、着火時期に関する実験式が構築できたことから、吸気中の H_2 モル分率に注目することによって、DEGR 導入時に HCCI 燃焼の着火時期を制御できる可能性がある。本研究で構築した実験式は、本研究の供試機関を回転数 1500 rpm、投入熱量 420 J/cycle で運転したデータを元に構築したものである。本報では、エンジン諸元や運転条件が異なる場合についてまで実験式の有効性を確認できていないが、本研究で実施した手順によって同様の関係式を構築することで、着火時期制御に活用できると考える。ここまで、DEGR 率に対する燃焼特性の変化を調査するために DEGR 率を操作量のひとつとして取り扱ってきたが、実際には DEGR においては過濃燃焼の排気の全量を DEGR ガスとして用いるため、DEGR 率はエンジンの気筒数および、過濃燃焼を担当する気筒数によって一意に定まる値である。したがって具体的には、SI 燃焼当量比を操作して、吸気中の H_2 モル分率を変化させ、着火時期を制御することとなり、設定すべき SI 燃焼当量比の値は、エンジンの気筒数、過濃 SI 燃焼担当気筒数による DEGR 率に応じて変わるることとなる。

4. 結 言

本研究では、DEGR を導入した際の HCCI 燃焼気筒への吸気を模擬して実験を行い、過濃 SI 燃焼の当量比および DEGR 率の変化に対する着火燃焼の挙動を調査した。その結果、過濃 SI 燃焼当量比および DEGR 率の増加に伴って着火時期が進角し、燃焼は急峻となり燃焼期間は短くなることが確認された。着火時期については、着火時期の進角効果をもつ H_2 と CO の吸気中のモル分率が増加したことによって進角したと考えられる。

着火燃焼特性の調査の結果を受け、DEGR の導入による HCCI 燃焼の着火時期の制御可能性の検討を行い、着火時期と吸気中 H_2 モル分率との線形の実験式を構築した。これにより、DEGR 率に応じて過濃 SI 燃焼当量比を操作し、吸気中の H_2 モル分率を制御することで、着火時期の制御が可能になることが示唆された。また、着火時期により図示熱効率がおおむね決定されることから、DEGR 導入時に着火時期を適切な値に制御することで、図示熱効率を高い値にできる可能性も示された。

文 献

- Alger, T. and Mangold, B., Dedicated EGR: a new concept in high efficiency engines, Society of Automotive Engineers International Journal of engines, Vol.2, No.1 (2009), pp.620-631.
- Kobayashi, K., Sako, T., Sakaguchi, Y., Morimoto, S., Kanematsu, S., Suzuki, K., Nakazono, T. and Ohtsubo, H., Development of HCCI natural gas engines, Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol.3, No.5 (2011), pp.651-656.
- 尾崎恭平, 佐古孝弘, 李世竣, 飯田訓正, "Dedicated EGR"による高効率天然ガス SI エンジンの可能性, 自動車技術会論文集, Vol.45, No.5 (2014), pp.769-774.
- Sato, S., Yamasaki, Y., Kawamura, H. and Iida, N., Research on the influence of hydrogen and carbon monoxide on methane HCCI combustion, Japan Society of Mechanical Engineers International Journal, Series B, Vol.48, No.4 (2005), pp.725-734.
- 首藤登志夫, 高橋健洋, メタノールのオンボード改質による DME と水素含有ガスを燃料とする排熱回収 HCCI 燃焼機関システムにおける改質ガス組成の影響, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.70, No.698 (2004), pp.2663-2669.
- Yap, D., Megarities, A., Peucheret, S. M., Wyszynski, M. L. and Xu, H., Effect of hydrogen addition on natural gas HCCI combustion, Society of Automotive Engineers Technical Paper, 2004-01-1972, (2004), DOI: 10.4271/2004-01-1972.
- Yap, D., Peucheret, S. M., Megarities, A., Wyszynski, M. L. and Xu, H., Natural gas HCCI engine operation with exhaust gas fuel reforming, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.31, No.5 (2006), pp.587-595.

References

- Alger, T. and Mangold, B., Dedicated EGR: a new concept in high efficiency engines, Society of Automotive Engineers International Journal of engines, Vol.2, No.1 (2009), pp.620-631.

- Kobayashi, K., Sako, T., Sakaguchi, Y., Morimoto, S., Kanematsu, S., Suzuki, K., Nakazono, T. and Ohtsubo, H., Development of HCCI natural gas engines, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol.3, No.5 (2011), pp.651-656.
- Ozaki, K., Sako, T., Lee, S. and Iida, N., Potential for a high efficiency SI engine by “Dedicated EGR”, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol.45, No.5 (2014), pp.769-774 (in Japanese).
- Sato, S., Yamasaki, Y., Kawamura, H. and Iida, N., Research on the influence of hydrogen and carbon monoxide on methane HCCI combustion, *Japan Society of Mechanical Engineers International Journal, Series B*, Vol.48, No.4 (2005), pp.725-734.
- Shudo, T. and Takahashi, T., Influence of reformed gas composition on HCCI combustion engine system fueled with DME and H_2 -CO-CO₂ which are onboard-reformed from methanol utilizing engine exhaust heat, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.698 (2004), pp.2663–2669 (in Japanese).
- Yap, D., Megarities, A., Peucheret, S. M., Wyszynski, M. L. and Xu, H., Effect of hydrogen addition on natural gas HCCI combustion, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, 2004-01-1972,(2004), DOI: 10.4271/2004-01-1972.
- Yap, D., Peucheret, S. M., Megarities, A., Wyszynski, M. L. and Xu, H., Natural gas HCCI engine operation with exhaust gas fuel reforming, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.31, No.5 (2006), pp.587-595.