

## ブローダウン過給と燃料筒内直接噴射によるガソリン HCCI 機関の性能改善

## Improvement in Performance of a Gasoline HCCI Engine Using Blowdown Supercharge with Direct Fuel Injection System

後藤 俊介, 窪山 達也, 森吉 泰生, 山田 敏生  
 (Shunsuke GOTOH) (Tatsuya KUBOYAMA) (Yasuo MORIYOSHI) (Toshio YAMADA)  
 千葉大学 千葉大学 千葉大学 アイディー・アダプコ・ジャパン  
 (Chiba Univ.) (Chiba Univ.) (Chiba Univ.) (ID-adapco JAPAN Co.,Ltd)

畑村 耕一, 鈴木 正剛, 高梨 淳一,  
 (Koichi HATAMURA) (Masatoshi SUZUKI) (Junichi TAKANASHI)  
 畑村エンジン研究事務所 畑村エンジン研究事務所 本田技術研究所  
 (Hatamura Engine Research Office) (Hatamura Engine Research Office) (Honda R&D Co.,Ltd)

The objective of this study is to extend the HCCI operational range by using the blowdown supercharge (BDSC) with a direct fuel injection system. The effect of in-cylinder fuel distribution on HCCI operational range was investigated from both experimental and numerical method. Firstly, a numerical simulation using a multi-zone reaction model was carried out. The results showed that a spatially uniform fuel distribution decreases the pressure rise rate ( $dP/d\theta$ ) with a strong thermal stratification. Based on the simulation results, experiments were carried out using a gasoline engine equipped with the direct fuel injection and BDSC system. The fuel injection timing and the fuel mass ratio between the direct injection and port injection were varied as experimental parameters to investigate the effect of the fuel distribution on both the high and low load HCCI operational limits. The experimental results showed that the HCCI operational robustness at the high load operation was successfully improved by using the direct fuel injection. However, high load HCCI operational limit was hardly extended. To improve ignition stability at low load operation, locally high fuel concentration area was generated using direct injection. COV of IMEP was slightly improved under the condition of low DI mass ratio.

Keywords: HCCI, Compression ignition, Direct injection, Thermal stratification,

## 1. はじめに

内燃機関に対して、環境負荷の低減と熱効率の向上が強く求められている。ガソリン予混合圧縮着火(HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition)エンジンは、ディーゼルエンジンに匹敵する低い燃料消費率とNO<sub>x</sub>, PM排出量の大幅な削減の両立が可能であるため、実用化を目指した研究が広く行われている。

HCCI運転では、火花点火(SI: Spark Ignition)エンジンの低負荷、部分負荷時の熱効率改善が期待できる。常用的に使用されるこの低負荷、部分負荷運転をHCCI運転に切り替えることで、自動車の走行燃料消費量を大幅に改善出来る。実用化に際して重要な課題の一つは、HCCI運転成立負荷範囲を常用負荷程度まで拡大することである。HCCI運転負荷上限は急峻な筒内圧力上昇率及びNO<sub>x</sub>排出量の増大によって制限される。更なる高負荷HCCI運転を実現するには過給が有効な手段である<sup>(1)</sup>。ターボチャージャーにより過給した場合、HCCIのリーン燃焼では排気エネルギーが低いために過給機の効率が低いことや、高負荷高回転SI運転との両立に関して課題がある。そこで本研究では自然吸気エンジンのHCCI負荷

限界拡大を試みる。自然吸気条件において、圧力上昇率の低減には燃焼位相の遅角化と熱発生を緩慢化が有効である。燃焼位相を遅角化することで圧力上昇率を大幅に低減出来るが、許容範囲以上の遅角化はサイクル毎の着火時期ばらつきを増大し燃焼安定性が低下する<sup>(2)</sup>。一方で、燃焼位相を遅角することなく熱発生を緩慢化する手段として、混合気や温度分布の成層化が効果的であることが実証されている<sup>(3)(4)(5)</sup>。

筒内の温度成層化を実現する実用的な手段として、著者らによって”ブローダウン過給(BDSC)”システム及び”EGRガイド”が提案された<sup>(6)</sup>。BDSCシステムでは目標負荷に応じた新気を吸気した後に排気弁を再開し、EGRガスを筒内に再導入する。この時排気管内を伝播する他気筒からの排気ブローダウン圧力波を利用することで高圧なEGRガスを再導入し、新気とEGRガスを含めた作動ガスの総質量を増大させることが出来る。そしてEGRガイドを用いることでEGRガスの再導入方向を規定し、高温のEGRガスと新気の混合を抑制し、筒内の温度成層化を促進することが出来る。既報<sup>(7)</sup>では、提案システムを搭載した実機を用いて、高負荷HCCI運転限界を拡大できることを実証した。

しかし、EGRガスを筒内に偏在させることで温度分布を形成するため、同時に燃料濃度分布も成層化される。燃料濃度分布は、EGRガスが多い高温領域で相対的に希薄化し、新気

の多い低温領域で相対的に濃くなる。従って、筒内に形成される燃料濃度分布が温度成層化による圧力上昇率の低減効果を抑制することが懸念される。

一方、低負荷側の運転限界を拡大するためには、着火時期及び燃焼の変動を抑制する必要がある。負のオーバーラップ期間中に、微小燃料を筒内直接噴射(DI: Direct Injection)することによって、低負荷領域を伸ばす手法などが確認されている<sup>6)</sup>。高温領域に局部的に燃料濃度が高い領域を意図的に形成することによって、着火の安定性を向上出来る可能性がある。

そこで本研究では、ブローダウン過給 HCCI 機関に筒内直接噴射を適用し、燃料濃度分布が HCCI 運転に与える影響について、計算と実験の両方から考察することを目的とする。

## 2. EGR ガイドの効果と筒内燃料濃度分布の数値解析

### 2.1 EGR ガイドによる温度成層化の効果

これまでの研究で、再導入された高温の EGR ガスの流入方向を EGR ガイドによって規定し、筒内温度分布の成層化を図ってきた<sup>6)</sup>。この EGR ガイドにより、同一図示平均有効圧力(NetIMEP)で圧力上昇率(dP/dθ)が最大で約 25%低減され、その結果 HCCI 運転範囲が大きく拡大された。温度成層化によるその他の効果として、HCCI 燃焼のロバスト性向上が挙げられる。図 1 は横軸に燃焼質量割合 50%時のクランク角(CA50)、縦軸に NetIMEP をとった図中に、EGR ガイドの有無による HCCI 運転成立範囲を表わしている。ここで本研究における HCCI 運転成立条件を以下のように定義すると、

- $dP/d\theta \text{ max} \leq 400\text{kPa/deg.}$
- $\text{COV of IMEP} \leq 5\%$
- $\text{ISNO}_x \leq 0.1\text{g/kWh}$

バルブタイミングを固定した場合の HCCI 運転範囲は図のように表わされる。図中の破線が EGR ガイド無しの場合、実線が EGR ガイド有りの場合である。HCCI 運転範囲の左側境界は圧力上昇率限界線( $dP/d\theta=400\text{kPa/deg.}$ )を表わしている。運転負荷を高めるために HCCI 燃焼位相(CA50)を遅角化している。同一 CA50 で見た時に EGR ガイド有りの方が温度成層化による圧力上昇率低減効果によって、より高い負荷での運転が可能になっている。HCCI 運転範囲の右側境界は IMEP の変動(COV of IMEP=5%)及び失火の限界を表わしている。IMEP が比較的高い運転の場合は IMEP の変動率が 5%に達する前に失火によって制限をされる。EGR ガイドによって温度成層化を促進した場合、失火することなく CA50 をより遅角化出来ることが分かる。筒内の温度成層化によるもう一つの利点は、図 1 のマップ上で HCCI 運転範囲が CA50 方向に拡大していることである。HCCI 燃焼特性や運転性能は、筒内

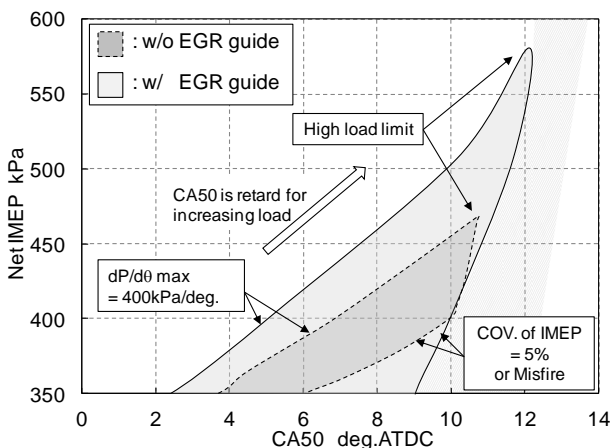
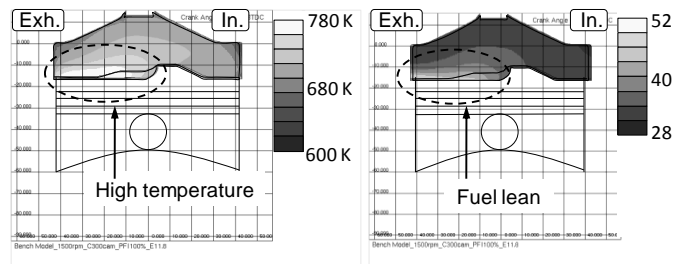


Fig.1 Comparison of HCCI operational area  
Dash line area: without EGR guide  
Solid line area: with EGR guide

温度に高い感度を持つ燃焼位相に強く影響される。つまり運転成立条件を得る為に要求される筒内混合気温度の許容範囲を拡大することで、燃焼位相に対してよりロバスト性のある HCCI 燃焼を得ることが出来ている。以上より温度成層化の強化が望まれる。

### 2.2 筒内燃料濃度分布の数値解析

ポート噴射を用いた BDSC システムでは、温度分布の形成と同時に燃料濃度分布も形成される。図 2 に、従来の BDSC システムにおける筒内温度分布、G/F 分布(G:新気と EGR ガスの質量の合計、F:燃料の質量)の計算結果をそれぞれ示す。EGR ガイドによって混合が抑制された EGR ガスが、排気バルブ周辺に偏在し高温となっている。しかし G/F 分布はこの高温領域で燃料希薄となるため、温度成層化による圧力上昇率低減の効果が弱められると推測される。



(a) Temperature (b)G/F  
Fig.2 Spatial distributions of in-cylinder temperature and G/F with the BDSC system (at -11deg.ATDC,IMEP=450kPa)

そこで化学反応計算により、燃料濃度分布が HCCI 運転時の圧力上昇率に与える影響を調べた。Sjöberg ら<sup>4)</sup>は、シリンダ内の混合気を高温から低温まで等質量で 5 分割し、その各領域の平均温度を用いて化学反応計算することによって、圧力上昇率が実験値とほぼ合うとしている。本研究では、燃料濃度分布が筒内圧力上昇率に与える影響を定性的に検証することを主眼に、Sjöberg らの手法にならない、筒内の混合気を等質量の複数領域に分けて各領域内の化学反応計算を行う多領域燃焼モデルを用いた。分割された各領域は温度と化学種濃度が均一とした 0 次元モデルである。各領域の圧力は等しいが、領域間の熱と物質の移動は考慮していない。計算方法の詳細は既報<sup>6)</sup>を参照されたい。

解析ではポート噴射により形成された均一な予混合気を充填した後に BDSC システムにより EGR ガスを再導入し温度成層化を促進した場合(Case1)と、BDSC システムにより形成された筒内温度分布を維持しながら Case1 の平均 G/F になるよう理想的に燃料濃度分布を均一化した場合(Case2) について

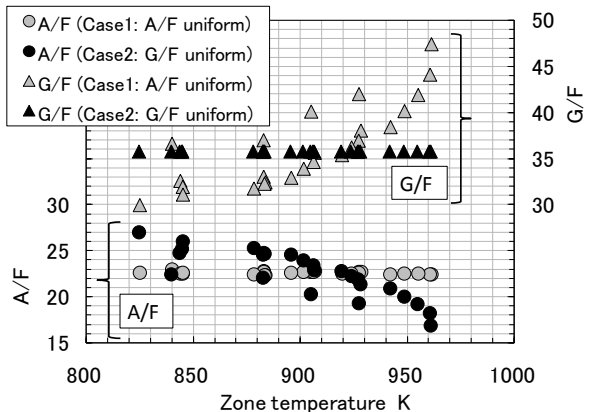


Fig.3 Effect of fuel distribution on A/F and G/F at each temperature zone

て解析を行った。ここでは、シリンダ内の混合気を温度と燃料濃度に準じて等質量の 25 領域に分割した。温度と燃料濃度は実測した吸・排気ポートにおける圧力脈動を境界条件として計算した 3 次元筒内流動解析結果から与えた。これにより求められた上死点前 20deg.時の温度に対する A/F と G/F の関係を図 3 に示す。Case1 では各領域における A/F はほぼ一定であるが、G/F は EGR ガスが少ない低温領域ほど小さく(燃料が多く)、EGR ガスが多い高温領域ほど大きい(燃料が少ない)。これに対し Case2 では、A/F は低温領域で相対的に薄い分布を持つが G/F 分布は均一である。

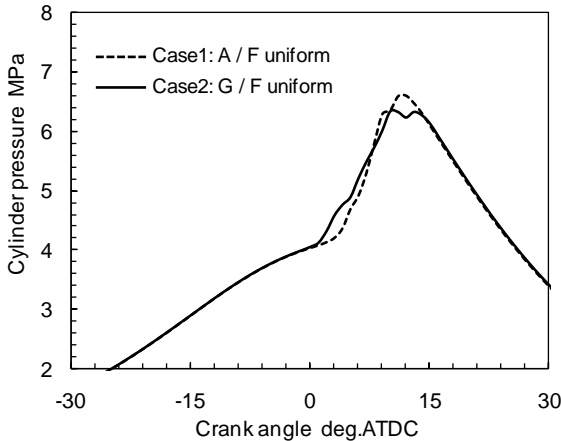


Fig.4 Effect of fuel distribution on in-cylinder pressure rise rate of BDSC-HCCI engine

図 4 に、多領域燃焼モデルにより解析した筒内圧力を示す。A/F 均一である Case1 に比べ、G/F 均一とした Case2 の方が初期の圧力上昇が大きく、平均的な圧力上昇率が低減している。圧力上昇率最大値で比較すると、Case1 が 468kPa/deg. であるのに対し Case2 では 342kPa/deg. となり、27%低減されている。Case2 では高温領域における燃料濃度が Case1 に比べ相対的に濃くなり着火が早期化する。一方で低温領域では着火が遅くなる。以上の検討結果から、BDSC システムを用いた HCCI 機関において、EGR ガスの偏在化による筒内温度成層化に併せて、燃料濃度(G/F)分布を均一化することで圧力上昇率を低減し、高負荷運転限界をさらに拡大できる可能性がある。以上を踏まえて、燃料濃度分布が HCCI 運転領域に与える影響について実機を用いて調査する。

### 3. 実験装置及び実験方法

実験には直列 4 気筒ガソリン機関を用いた。表 1 に機関の諸元と実験条件をまとめる。試験機関回転数は 1500r/min 一定とした。燃料の供給はポート噴射と筒内直接噴射を併用し、筒内直噴とポート噴射の噴射質量比及び、筒内直接噴射時期を変化させて筒内の燃料濃度分布を変化させた。直噴インジェクタは、噴孔径  $\phi 0.115\text{mm}$  の 3 噴孔で、吸気ポート下部にシリンダ水平断面から 35 度の角度で設置した。直噴インジェクタの噴霧特性については次節で詳述する。筒内直噴の噴射時期は、吸気、圧縮行程及び排気行程に渡って変化させた。吸気ポート噴射の噴射終了時期は上死点前-370deg.ATDC で一定とした。ブローダウン過給システムと EGR ガイドの詳細については既報を参照されたい<sup>(6)(8)</sup>。

図 5 に実験装置の概要を示す。本研究では、1 番、4 番の 2 気筒のみを使用して実験を行った。2 番、3 番気筒についてはバルブ駆動を停止してある。筒内の圧力はピエゾ式圧力変換器(Kistler6052c, 6117)により計測した。実験結果で示す指圧データは 4 番気筒の結果である。4 番気筒の吸気ポート入口と排気ポート出口部にピエゾレジスティブ絶対圧力変換器(Kistler4005A)を取り付け、吸排気の圧力脈動を測定した。また、排気管にスロットルバルブを設置し、スロットル開度によって排気の平均圧力を制御した。筒内ガス温度については、1 次元吸排気シミュレーション(GT-POWER) を用いて求めた。

Table 1 Engine specifications and test conditions

Base engine	Honda, K20A
Engine type	Inline 4 cylinder
Bore x Stroke	86mm x 86mm
Connecting rod length	139mm
Displacement	499.6cc/cyl.
Compression ratio	11.7
Intake air temperature	298K $\pm$ 1K
Intake air humidity	50% $\pm$ 2%
Coolant water temperature	85, 105 deg.C
Engine speed	1500rpm
Fuel	Gasoline (RON 90)
Fuel supply	Port / Direct injection
Fuel injection pressure (gauge)	Port inj. : 350kPa Direct inj. : 10MPa
PFI injection timing	-370 deg.ATDC

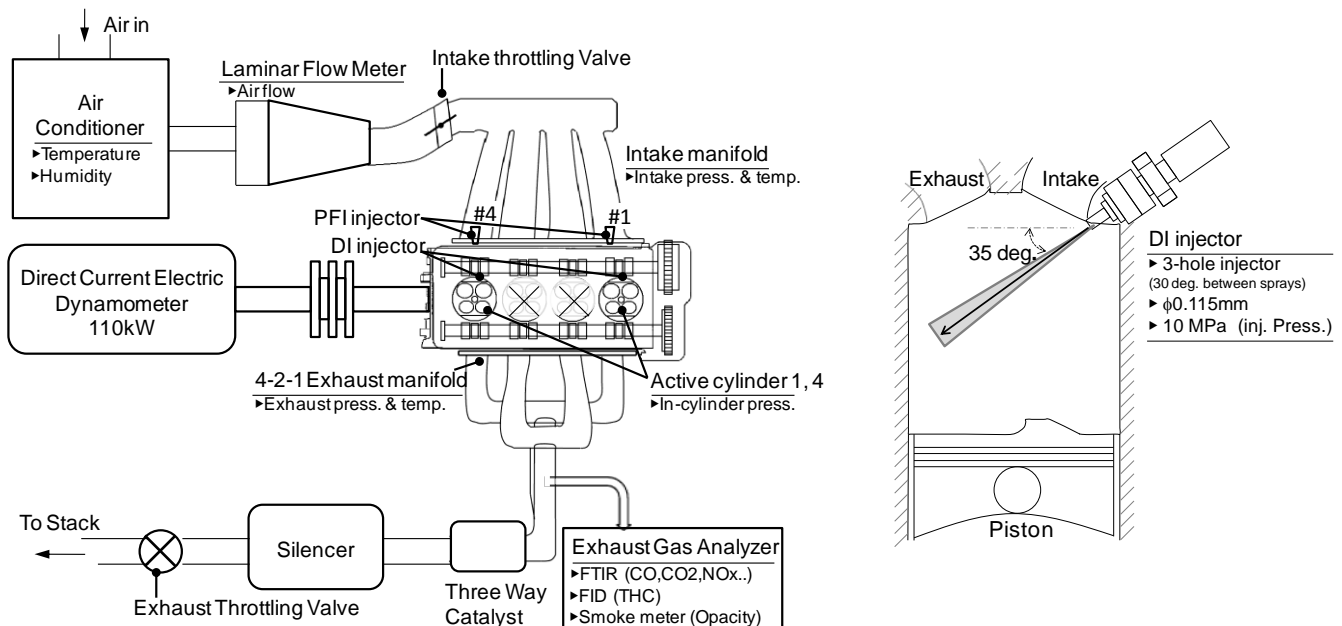


Fig.5 Experimental setup and measurement system

境界条件には実測した吸気と排気圧力、及びガス温度を使用した。

排気成分の計測に関しては、フーリエ変換赤外分光(FTIR)装置(HORIBA MEXA-600FT)と加熱型水素炎イオン化検出(HFID)装置(HORIBA MEXA-1170HFID)により計測した。

図6に実験で使用したバルブタイミングを示す。本研究では、吸気リフト量が異なる2種類の固定のカムシャフトを用意した。EGR再吸入用の排気バルブ開閉(EGR)はON/OFF制御出来る。本論文におけるクランク角度は圧縮上死点を基準0 deg.として、圧縮上死点後(遅角側)を“+”として表現した。

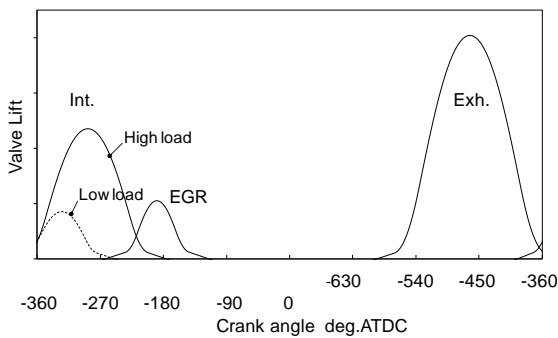


Fig.6 Valve timing for BDSC-HCCI engine (Solid line: For high load, Dash line: For low load)

#### 4. 直噴インジェクタの噴霧特性

本研究で使用する直噴インジェクタの噴霧特性を明らかにするために、光学計測を行った。図7は本実験で使用するインジェクタの自由噴霧の散乱光画像(左)と、ノズル噴孔から噴射方向(z方向)へ50mm及び80mmにおけるxy平面での粒径分布及び累積分布(右)を示している。粒径計測には改良型レーザー干渉画像法(ILIDS: Interferometric Laser Imaging for Droplet Sizing)を用いた<sup>(10)(11)</sup>。撮影領域は10mm×10mmとした。この時の燃料噴射圧は10MPa、使用燃料はn-heptane、また雰囲気圧力は大気圧とした。噴孔から50mmの計測領域におけるザウター平均粒径は20.8μm、80mmでは18.2μmであった。

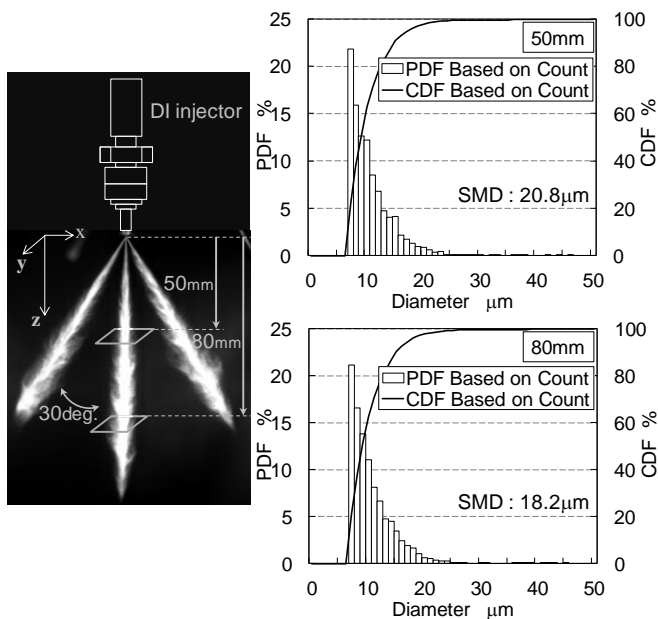


Fig.7 Image of free spray and measurement regions (two x-y regions) (left), And drop-size distributions at 50mm and 80mm from nozzle (right).

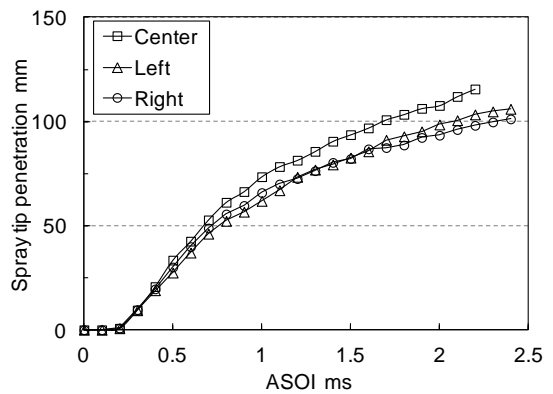


Fig.8 Spray tip penetration of free jet spray

図8は、自由噴霧の先端到達距離の推移を示している。図より左右の噴霧は同様な値を示し、中央の噴霧が他の噴霧に比べ僅かに大きな値を示した。また各噴霧の噴霧角はおおよそ10deg.であった。

#### 5. 燃料濃度分布が高負荷HCCI運転に与える影響

##### 5.1 DI噴射時期とDI割合の影響

圧力上昇率を低減するために、燃料直接噴射の噴射時期を変化させ筒内のG/F分布均一化を図った。図9に、DI噴射時期及びDIの占める割合が高負荷HCCI運転時の燃焼特性に及ぼす影響を示す。横軸にDI噴射終了時期(EOI)をとり、縦軸にはそれぞれ最大圧力上昇率(dP/dθmax)、CA50、未燃炭化水素排出量(ISHC)、NOx排出量(ISNOx)、上死点前20°CAにおける混合気平均温度(Temp. 20)、図示熱効率を示す。燃料総噴射量(=PI+DI)を15.3 mg/cycle(500 kPa相当)一定とし、燃料総噴射量に占める筒内直接噴射質量の割合が20、50、80%のそれぞれにおいて、燃料の筒内直接噴射時期を変化させた。排気管の平均圧力はスロットルを使い、135 kPa一定とした。

図中の破線はポート噴射のみ(PFI: 100% = DI: 0%)の場合の結果を表わしている。吸気行程噴射では、新気との混合時間が十分ありA/Fが均一の効果を検証出来る。圧縮行程噴射では、新気と再導入EGRガスが混在しており、噴射時期によって燃料濃度分布が変化すると予測される。よって燃料濃度成層化の効果を検証出来る。排気行程中の筒内直噴は、排気ポートで既燃ガスと燃料が混合し、次サイクルでBDSCシステムによりこれら混合気を再導入することで燃料の均一化が促進され、G/Fが均一化する。

まず噴射時期に着目する。上死点付近の噴射時期を除くと、最大圧力上昇率がPFI: 100%の場合より低減されている。DI: 20%、噴射時期-100 deg. ATDCにおいて、圧力上昇率がPFI: 100%に比べ45%低減されている。これには二つの要因が考えられる。一つは直噴燃料による吸熱効果によって混合気温度が低下し、燃焼位相が遅角化したこと、二つ目は燃料濃度分布が変化したことである。GT-POWERによる数値計算結果では、Temp. 20がPFI: 100%に比べ80 K程度低下している。噴射時期を上死点に近づけると最大圧力上昇率が増加している。上死点付近で直噴した場合、直噴燃料がピストンに衝突し、燃料濃度が局所的に濃い領域が形成され燃焼温度が高まり、その結果としてNOx排出量が増加したと考えられる。次に排気行程噴射時の結果について着目する。噴射時期を進角させるにつれて、排気行程中に噴射した燃料が再導入されずに排気される量が増え、その結果として図示熱効率が低下していると考えられる。DI: 20%とし噴射時期を-400 deg. ATDCよりも遅角側とした条件では、HC排出量を増加させることなく最大圧力上昇率を低減することが出来ている。吸気一圧縮行程噴射時と同様に混合気ガス温度(Temp. 20)は80 K程度低下す

るが、排気行程噴射時のCA50が圧縮行程噴射時ほど遅角しない。一方、各噴射時期条件での燃焼変動 (COV of IMEP)は、ポート噴射 : 1.35 % , 吸気行程噴射 (DI: 20 % , -100deg.ATDC) : 3.9 % , 排気行程噴射 (DI: 20 % , -400deg.ATDC) : 1.48 %

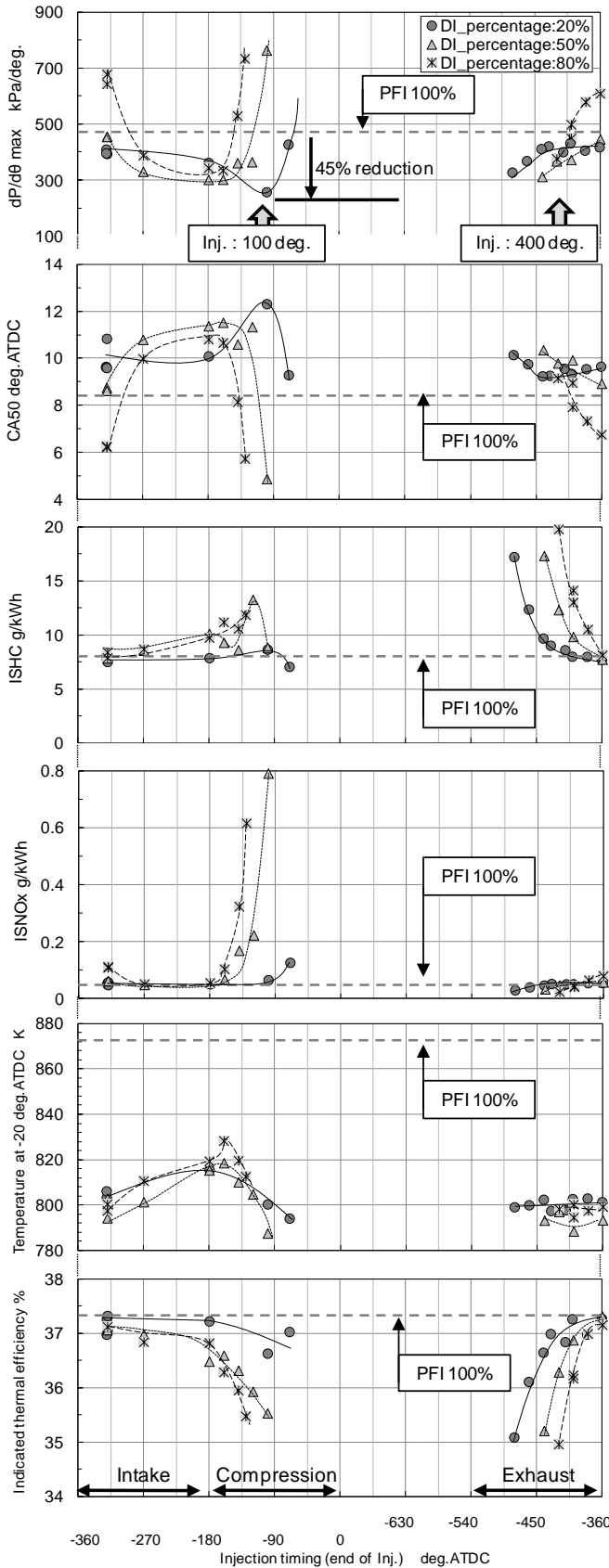


Fig.9 Effect of injection timing on dP/dθmax, CA50, ISHC, ISNOx, and Temperature at -20deg. ATDC (at IMEP=500kPa)

となり、結果に差異が生じた。

次に直噴割合に着目する。噴射時期が上死点付近では、直噴割合の増加に伴い圧力上昇率が増加している。また排気行程噴射では直噴割合の増加に伴いHC排出量が増加している。それ以外の噴射時期では、直噴割合による影響は小さい。

圧力上昇率が低減した圧縮行程噴射 (-100 deg. ATDC)と排気行程噴射 (-400 deg. ATDC)について、より詳細に調査した。図10に、各噴射時期におけるDI割合がHCCI運転性能に与える影響について示す。まず圧縮行程噴射に着目する。直噴割合を増加するに伴い、CA50が進角し、圧力上昇率が増加している。直噴割合が高いほど局所的に燃料濃度が高い領域が形成されることが一因として推測される。

一方排気行程噴射に着目すると、DI割合を変化させても、dP/dθmax, CA50, COV of IMEPに有意な差が見られない。しかし、DI割合を増加するに伴い未燃炭化水素排出量が増加している。噴射終了時期を固定し、DI割合を増加するに伴い噴射開始時期を早期化したため、噴射開始初期に噴射された燃料が筒内に再導入されることなく排出されたことが原因として考えられる。図9で示したPFI: 100%は、混合気平均のA/Fが27、またG/Fが42である。理想的に直噴燃料を再導入EGRガスに全て投入出来たとすると、混合気全体で燃料濃度が均

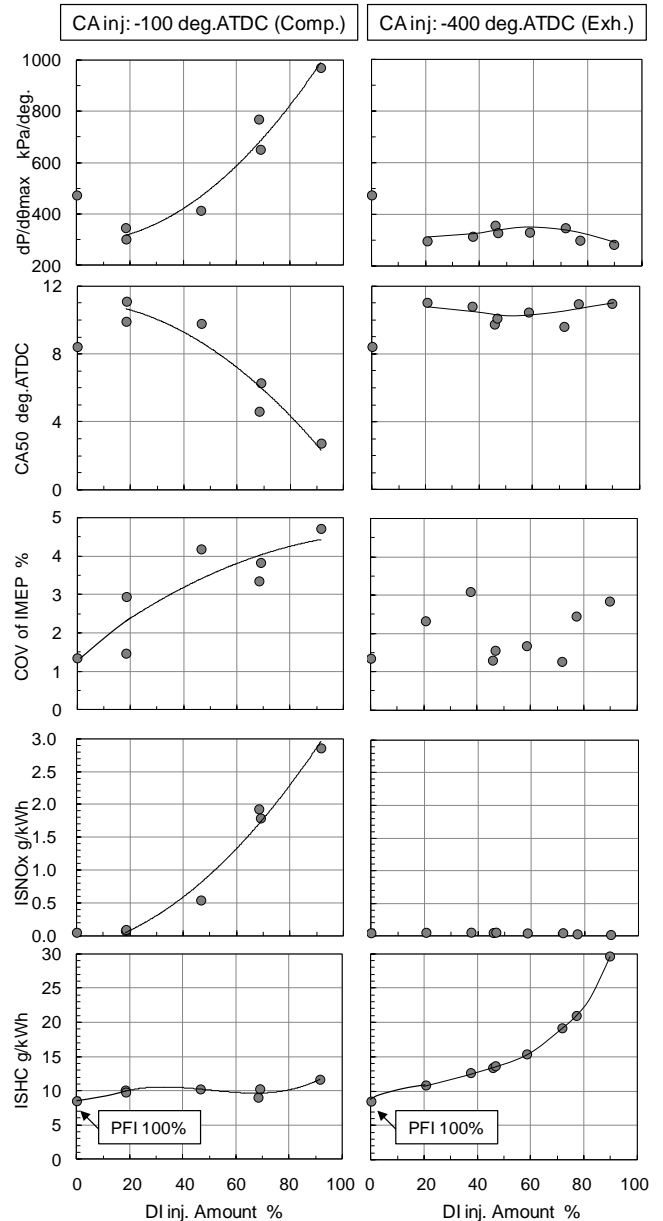
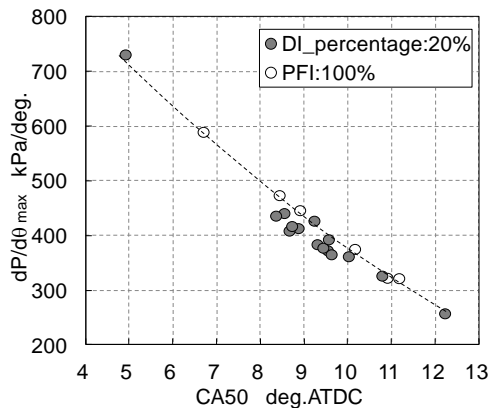


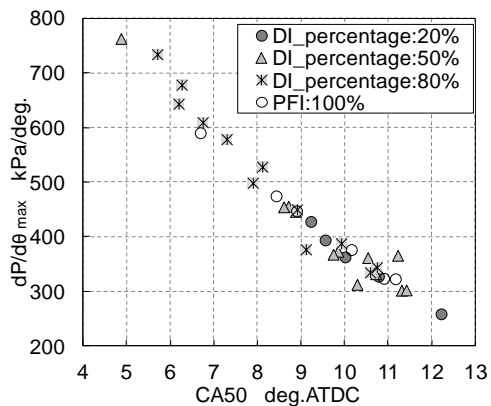
Fig.10 Effect of DI injection amount

一となる DI 割合は約 36 % に相当する。しかし図 10 より、どちらの噴射時期に関してもおおよそ DI: 20% が最適であることが分かる。

筒内に直接噴射した燃料の加熱と蒸発により、筒内の混合気温度が低下する。この結果、燃料濃度分布とともに燃焼位相 (CA50) が変化し、圧力上昇率に影響を与えているものと考えられる。ここで、筒内直接噴射化による圧力上昇率低減効果を明らかにするため、CA50 と最大圧力上昇率の関係を調べた。図 11(a) には DI 割合を 20 % 一定、筒内直接噴射時期を変化させた場合、図 11(b) に燃料噴射量一定のもと、DI 割合を 20, 50, 80 % とし、噴射時期を吸気行程、圧縮行程、排気行程で変化させた場合を示す。図 11 には比較のため、PFI: 100% の場合の結果も示している。図 11 より、最大圧力上昇率は CA50 に強く影響を受け、筒内噴射時期や割合に殆ど依らないことが分かる。



(a) Comparison of the case with or without DI



(b) Comparison of the DI percentage

Fig. 11 dP/dθmax versus CA 50

## 5. 2 筒内直接噴射が高負荷運転限界に与える影響

本節では、噴射燃料の一部を筒内直接噴射化することによる HCCI 運転の高負荷限界拡大効果について検証する。以下では直噴割合を 20 % とし、dP/dθmax の低減効果が得られた圧縮行程噴射 (-100 deg.ATDC) と排気行程噴射 (-400 deg.ATDC) の 2 通りの噴射時期に着目した。

まず圧縮行程噴射時の結果を図 12 に示す。燃料量と排気管内の平均圧力を調整することで HCCI 運転領域及び高負荷限界を得た。BDSF システムでは、排気管内の平均圧力を増加すると再導入 EGR ガス量が増加し、筒内の混合気温度が上昇する。燃料噴射量を一定とした場合、排気圧力が高いほど着火が早期化し、それに伴い圧力上昇率が增大する。一方、排気圧力を低下すると着火が遅角化し、IMEP の変動率増大や失火に至る。この操作を、燃料量をパラメータに繰り返すことで HCCI 運転成立範囲を得た。図 12 は縦軸を Net IMEP、

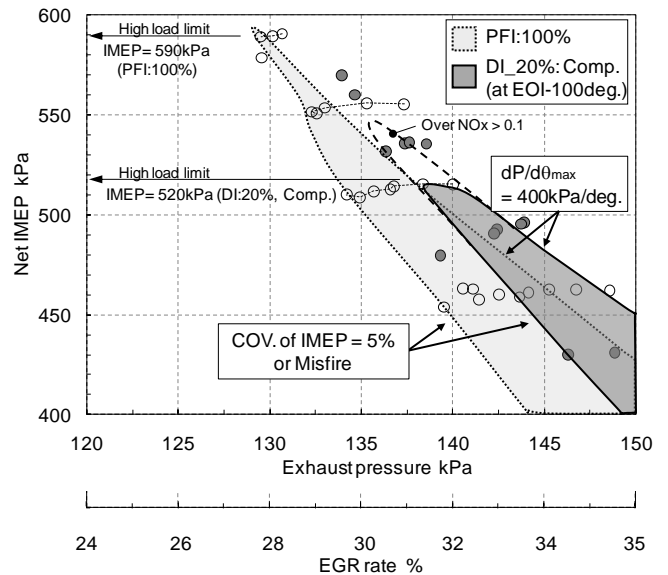


Fig. 12 Comparison of HCCI operational area (EOI - 100 deg.ATDC, Tw=85 deg.C)

横軸を排気管内の平均圧力  $P_{ex}$ 、または EGR 率をとったマップ上に、DI: 20% 圧縮行程噴射 (-100deg. ATDC) とポート噴射のみ (PFI: 100 %) それぞれの HCCI 運転成立範囲を示している。高負荷限界は、ポート噴射のみの場合で IMEP=590 kPa であるのに対し、DI: 20% 圧縮行程噴射では IMEP=520 kPa と 70 kPa 低くなった。これは NOx 排出量の増加と燃焼変動増大に起因している。NOx 排出量制限を考慮しない場合、IMEP=550 kPa (図 12, 点線領域) となる。それよりも高い負荷では燃焼変動の制限を超える運転となった (COV of IMEP > 5 %)。HCCI 燃焼の着火時期は化学反応に依存することから、混合気形成のサイクル変動が燃焼変動に与える影響が大きい。また燃料が十分に混合していない場合、HCCI 運転の利点の一つである低 NOx 排出特性が失われる。この場合、高温の EGR ガス中を目標けて噴射した直噴燃料が十分に混合されなかったことが、NOx 排出量と燃焼変動増加の原因であると予測出来る。運転領域については、図 9 の筒内温度 (Temp.20) から分かるように、直噴燃料の吸熱によって低下した混合気温度を補うために、より高い EGR 率が必要となった結果、排気圧力が高い領域に移動したと考えられる。直噴の併用によって、運転領域が変化することから、着火時期のサイクル毎の制御が可能となり、これにより HCCI 運転の排気圧力に対するロバスト性を向上することが出来る。

しかし、排気管内圧力の上昇はポンプ損失が増大することから、効率悪化を招く。そこで混合気温度を高めることを目的として、エンジン冷却水の温度をこれまでの 85 °C から 105 °C に上げて実験を行った。結果を図 13 に示す。図 13 中の PFI: 100 % 及び DI: 20% 圧縮行程噴射の運転領域は、どちらも冷却水温 105 °C での結果である。高負荷限界は、ポート噴射のみの場合で IMEP=565 kPa、DI: 20% 圧縮行程噴射では冷却水温 85 °C 時と同様に IMEP=520 kPa であった。PFI: 100 % では NOx 排出量が基準値以上の条件があったために、冷却水温 85 °C 時よりも高負荷限界が下がった。DI: 20% 圧縮行程噴射の高負荷限界は冷却水温を変えても同様の値であったが、運転領域が排気圧力の低い領域へ移動したためポンプ損失が低減し、図示熱効率は 38.0% から 38.8% へ向上している。

次に排気行程噴射時について着目する。PFI: 100 % と DI: 20 % 排気行程噴射時 (-400 deg.ATDC) の運転領域を図 14 に示す。両者はどちらも冷却水温 105 °C での実験結果である。DI: 20 % 排気行程噴射での高負荷限界は IMEP=560 kPa で

あり、PFI: 100 %時と同程度であった。これは圧縮行程噴射時よりも高負荷限界が高い結果であった。高負荷運転限界における図示熱効率は 38.2%であり、PFI100%に比べ 0.6 ポイント低下した。運転範囲は圧縮行程噴射時と同様に、PFI: 100%に比べ排気圧力が高い領域へ移動した。

同一であり、DI 割合及びDI 噴射時期のみ異なっている。

まず G/F に着目すると、PFI: 100 %での燃料濃度分布範囲に比べ、圧縮行程噴射では G/F が濃い側に広がり、排気行程噴射では G/F が均一化している。つまり、排気行程噴射は燃料濃度分布 G/F を均一化させることが出来るといえる。しかし初めに予測した圧力上昇率低減効果が表れておらず、その

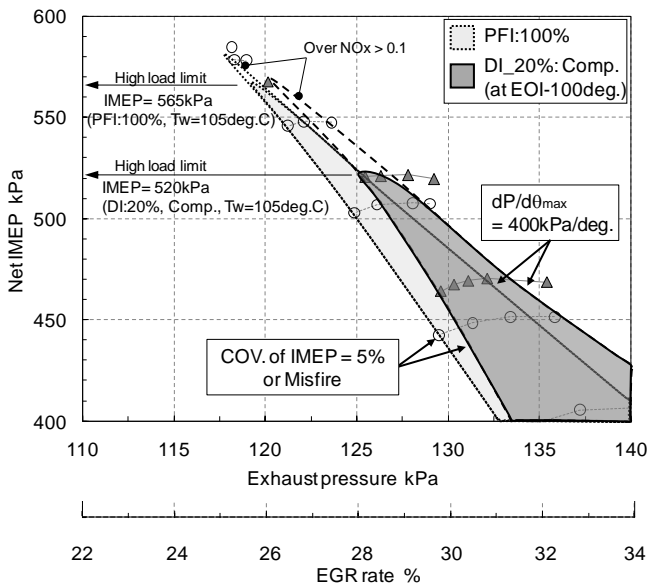


Fig.13 Comparison of HCCI operational area (EOI -100 deg.ATDC, Tw=105deg.C)

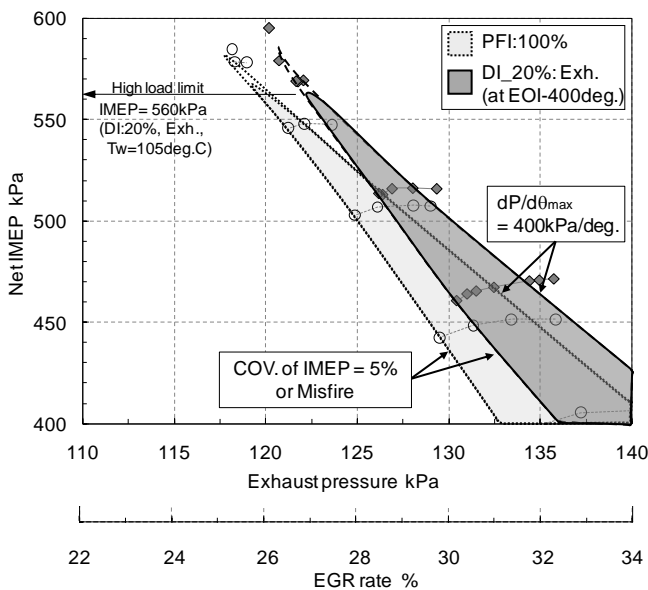
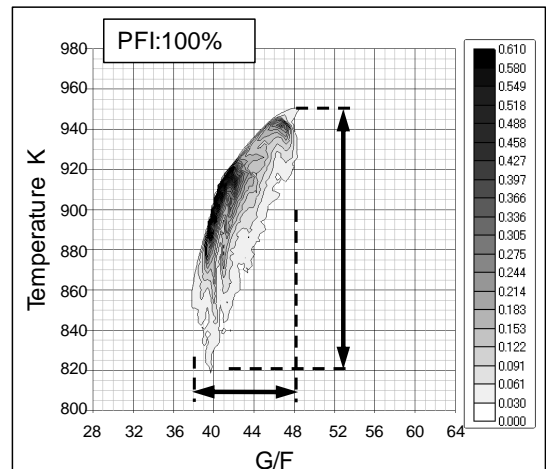
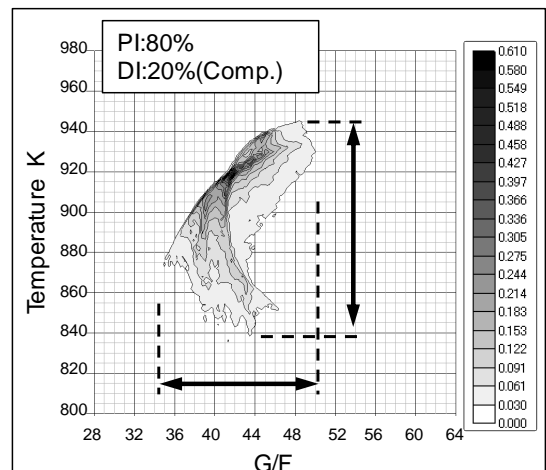


Fig.14 Comparison of HCCI operational area (EOI -400 deg.ATDC, Tw=105deg.C)

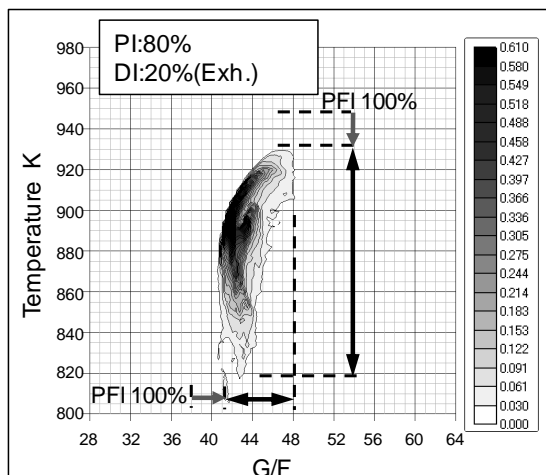
以上で示した図 13、図 14 の結果をより詳細に理解するため、3次元流動解析を行った。計算には格子数約 1,300,000 のエンジンモデルと、STAR-CD(v3.26)を使用して行った。吸排気ポートの流入、流出に関しては、吸排気ポート端面に圧力境界を設定し、圧力は実験値を使用した。ガス温度は GT-Power により予測した。実験の運転条件は IMEP=520kPa, EGR 率 34.8%, 平均 G/F=43 である。図 15 は横軸に燃料濃度分布 (G/F)、縦軸に混合気温度をとり、ポート噴射(a)と圧縮行程噴射 (DI: 20 %, -100 deg.ATDC)(b)、排気行程噴射(DI: 20 %, -400 deg. ATDC)(c)のそれぞれの場合について圧縮上死点前 20 deg.時における筒内ガスの燃料質量分率分布を表わしている。3条件の計算に使用した境界条件及び燃料投入総量は



(a) PFI:100%



(b) DI:20%, DI timing: -100deg.ATDC



(c) DI:20%, DI timing: -400deg.ATDC

Fig.15 Distribution of fuel mass fraction for each case at -20 deg. ATDC

理由として、直噴に伴う温度分布の変化が推測される。縦軸の温度分布に着目すると、排気行程噴射は PFI: 100 % に比べ高温領域が減少している。EGR ガス中に燃料を投入することにより再導入される EGR ガス温度が低下し、これまで PFI: 100 % 時に形成されていた温度成層の温度差が減少したため、期待された効果が無かったと考えられる。

### 5. 3 多段筒内直接噴射が運転範囲に与える影響

前節で、排気行程噴射によって燃料濃度分布を均一化出来ることが分かった。本節では、排気行程噴射についてさらに検討する。燃料の約 20 % を排気行程中に直噴することで燃料濃度分布を均一化させるが、同時に混合気の温度差が減少すると予測される。そこで、直噴燃料を新気にも噴射して温度を低下させ、温度差を拡げることが出来るのではないかと考えた。図 16 は、これまで燃料を排気行程中に直噴で 20 %、残り 80 % をポート噴射で投入していたのに対し、ポート噴射の代わりに吸気行程直噴に置き換えた場合の燃料濃度分布を表わしている (吸気行程: -220 deg. ATDC, 排気行程: -400 deg. ATDC)。図 16 では、直噴の多段化による低温領域の増加は確認出来ず、また燃料濃度分布が拡大している。

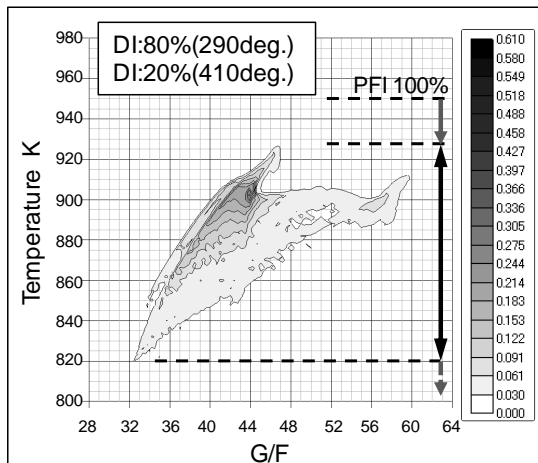


Fig.16 Fuel distribution of DI split injection

図 17 に直接噴射の多段化が HCCI 運転領域に与える影響を表わす。最初の噴射を -400 deg.ATDC とし、次の噴射を -220 deg.ATDC とした。高負荷限界は PFI: 100 % よりも低い結果

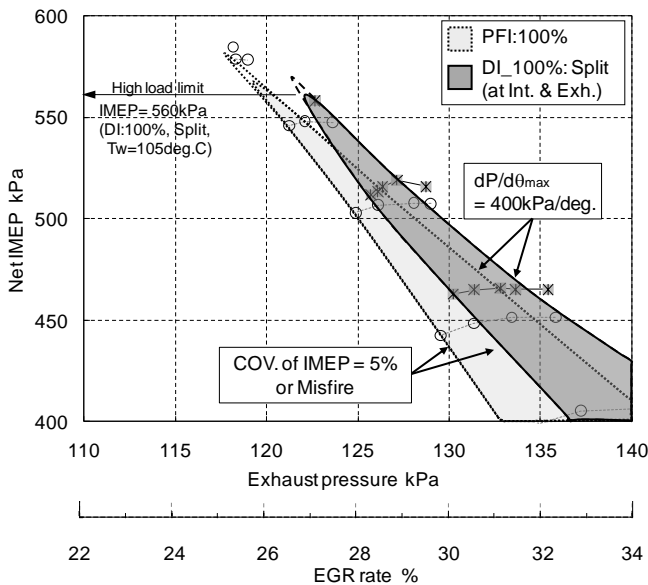


Fig.17 Comparison of HCCI operational area

となった。この原因として本研究で使用した直噴インジェクタが最適化されていない為に、混合気の形成が上手く行われなかったことが考えられる。

## 6. 燃料濃度分布が低負荷 HCCI 運転に与える影響

### 6. 1 DI 噴射時期の影響

HCCI 低負荷領域の拡大及び着火安定性の向上を目的として、燃料濃度分布が HCCI 運転に与える影響について調査した。DI 噴射時期が低負荷 HCCI 運転時の燃焼特性に及ぼす影響を調査した。結果を図 18 に示す。横軸は DI 噴射時期 (EOI) を表わし、縦軸はそれぞれ CA50 と燃焼期間, COV of IMEP, ISNO<sub>x</sub>, ISHC, ISCO を表す。また各図中の破線は PFI100% 時の結果を示している。実験は全投入燃料量 (=PI+DI)6.6 mg

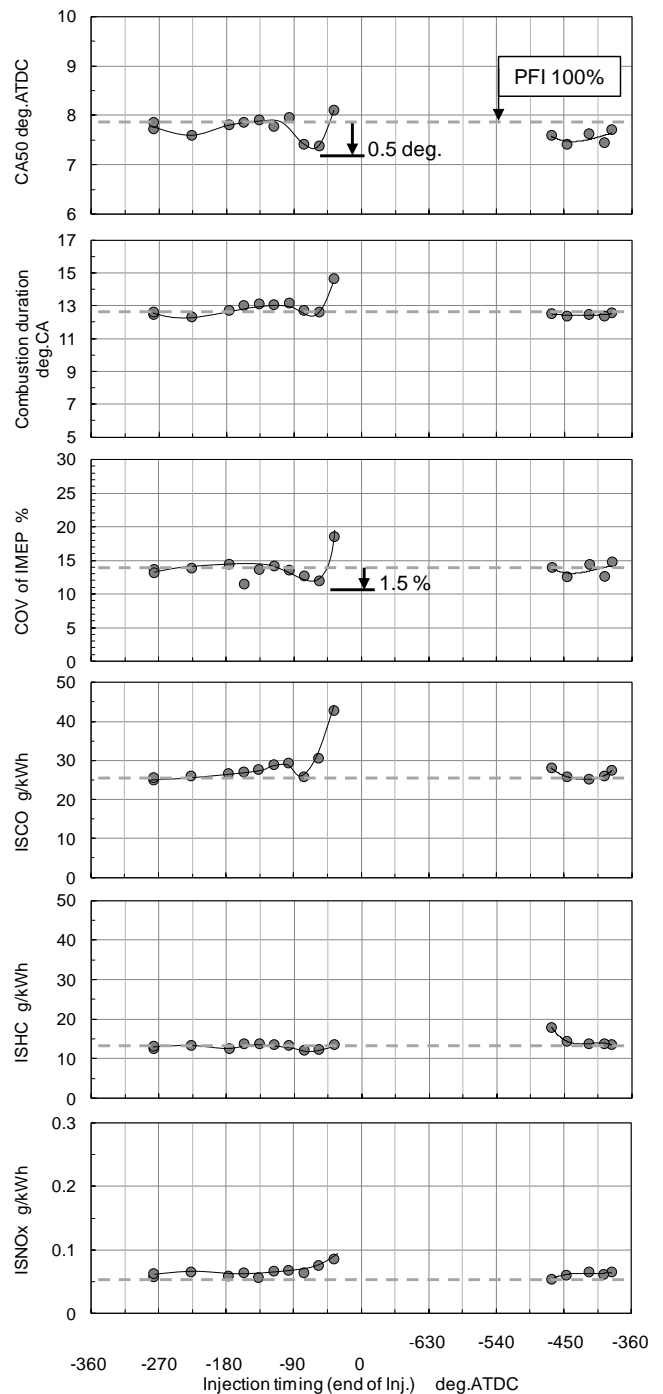


Fig.18 Effect of injection timing on CA50, Combustion duration, ISCO, ISHC and ISNO<sub>x</sub>



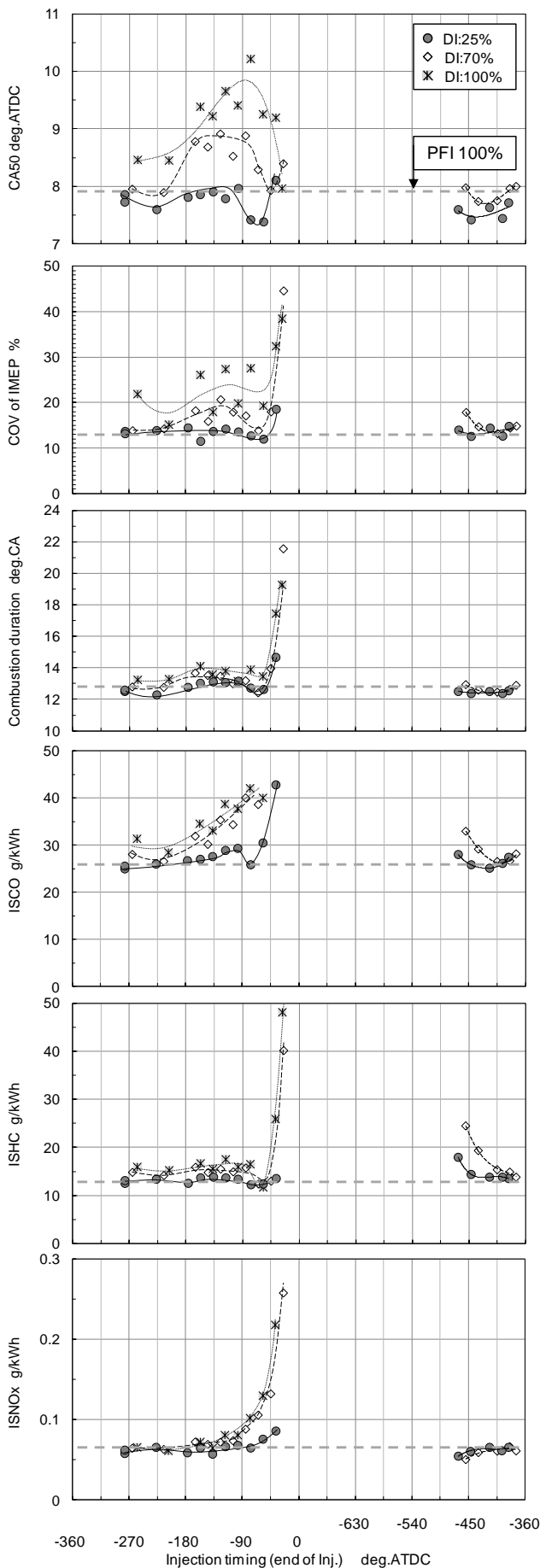


Fig.19 Effect of DI injection percentage on CA50, Combustion duration, ISCO, ISHC and ISNOx (DI percentage: 25, 70, 100%)

(Net IMEP $\approx$ 130 kPa)一定で、直噴の割合を 25%とした。バルブタイミングは図 6 に示した低負荷用を使用した。実験条件として IMEP の変動率が 5% よりも大きい条件で行ったのは、直噴による燃焼安定性の変化をより分かり易くするためである。HCCI 低負荷運転の拡大には、燃焼安定性の向上が必要である。本研究では、燃焼安定性を COV of IMEP で評価した。COV of IMEP について着目すると、吸気行程から圧縮行程 -60deg. ATDC の間では大きな変化は見られない。CO や HC 排出量も変化はない。噴射時期-60 deg.ATDC 付近で CA50 が、吸気行程噴射に比べ約 0.5 deg.進角し、COV of IMEP を 1.5% 低下することが出来た。これは局所的な燃料高濃度領域の形成が、着火を促進した結果といえる。一方、排気行程噴射では、EGR 率が高負荷運転時に比べ高い為、HC 排出量が増加することなく直噴時期をより進角させることが出来ている。排気行程噴射においても CA50 が吸気行程噴射に比べ僅かに進角した。

### 6. 2 DI 割合の影響

全投入燃料量の直接噴射量が占める割合が低負荷 HCCI 運転性能に与える影響を調べるために、直噴噴射割合をパラメータとし噴射時期を変化させた。結果を図 19 に示す。圧縮行程噴射の場合、DI 割合が高いほど、CA50 が遅角し、COV of IMEP が大きい。筒内に直接噴射される燃料量が多いほど、筒内の混合気温度が低下するためと考えられる。噴射時期を -60 $\sim$ -50 deg. ATDC とすると、DI: 50%, 70% の場合で CA50 が進角する傾向が見られる。同時に NO<sub>x</sub> 排出量が増加しており、DI: 25% 条件と同様に、燃料濃度が高い領域が形成され、燃焼温度が上昇していることが推察できる。排気行程噴射の場合、DI 割合を増加しても着火時期や燃焼期間、排気性能に大差は無かった。

以上より、直噴を併用した低負荷 HCCI 運転で、燃焼安定性の向上を目的に高温ガス中に局所的な燃料高濃度領域を形成した場合、低直噴割合では僅かな燃焼安定性の向上が認められた。しかし過度に直噴割合を増加した場合、ガス温度が低下し燃焼安定性が悪化し、NO<sub>x</sub> 排出量も急増する。

### 7. まとめ

ブローダウン過給システムを用いてガソリン HCCI 機関の運転成立範囲を拡大することを目的とし、投入燃料の一部を筒内直噴化することによって、燃料濃度分布が HCCI 運転性能に与える影響を数値計算と実験の両方から検証した。得られた知見を以下に示す。

1. 筒内直噴インジェクタを装備した直列 4 気筒エンジンを用いて、1 番と 4 番気筒のみ燃焼させて実験をおこなった。筒内の燃料濃度分布が HCCI 運転性能に与える影響を調査するために、ポート噴射と直接噴射の割合及び、直接噴射開始時期を変化させた。筒内直噴により全投入燃料の 20% を圧縮行程 (-100 deg.ATDC) に噴射した時、最大圧力上昇率がポート噴射のみに比べ 45% 低減した。また、排気行程において -400 deg.ATDC よりも遅角側で投入燃料の一部を直接噴射することで、HC 排出を増加させることなく最大圧力上昇率が低減した。
2. 筒内の燃料濃度分布の違いが HCCI 高負荷運転限界及び、運転領域に与える影響を調べた。投入燃料の 20% を排気行程に直接噴射することで、高負荷運転限界が低下することなく、排気圧力が高い領域に運転範囲が移動した。この事は、直噴を併用することで、HCCI 燃焼の排気圧力に対するロバスト性を向上させることを示す。

3. 3次元数値解析により EGR ガスの偏在に伴い成層化された燃料濃度分布 G/F を、排気行程噴射を用いることで均一化できることを示した。
4. 筒内直接噴射された燃料による吸熱の効果に着目し、直噴を吸気行程と排気行程に分割して燃料投入することで温度成層化を強化することを狙い、運転範囲の変化について調べた。しかし直噴インジェクタによる混合気形成が上手く行われなかったために、高負荷限界を拡大するには至らなかった。
5. 低負荷 HCCI 運転で、燃焼安定性の向上を目的に高温ガス中に局所的な燃料高濃度領域を形成した場合、低直噴割合では僅かな燃焼安定性の向上が認められた。直噴割合を増加した場合、直噴燃料の吸熱量が増加し筒内温度が低下する結果燃焼安定性が悪化し、NO<sub>x</sub> 排出量も急増する結果となった。

## 謝 辞

本研究は、「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一つとして実施する NEDO 技術開発機構の委託業務に基づくものである。計算を行うに際し、千葉大学の畠将太氏の協力を得た。また直噴インジェクタの光学計測を行うに際し、千葉大学の飯島政善氏の協力を得た。圧力測定に関しては、日本キスラー株式会社から多大な協力を頂いた。ここに記し、謝意を表す。

## 文 献

- (1) J. Hyvönen, G. Haraldsson and B. Johansson, Super charging HCCI to Extend the Operating Range in a Multi Cylinder VCR-HCCI Engine, SAE Technical paper, (2003), No.2003-01-3214.
- (2) M. Sjöberg, J. E. Dec, Ethanol Autoignition Characteristic and HCCI Performance for wide Range of Engine Speed, Load and Boost, SAE Technical paper, (2010), No.2010-01-0338.
- (3) M. Sjöberg, J. E. Dec, A. Babajimopoulos, D. Assanis, Comparing Enhanced Natural Thermal Stratification against Retarded Combustion Phasing for Smoothing of HCCI Heat-Release Rate, SAE Technical paper, (2004), No.2004-01-2994.
- (4) M. Sjöberg, J. E. Dec, N. P. Cernansky, Potential of Thermal Stratification and Combustion Retard for Reducing Pressure-Rise Rates in HCCI Engines, Based on Multi-Zone Modeling and Experiments, SAE paper, (2005), No.2005-01-0113.
- (5) K. Kumano and N. Iida, Analysis of the Effect of Charge Inhomogeneity on HCCI Combustion by Chemiluminescence Measurement, SAE Technical paper, (2004), No.2004-01-1902.
- (6) K. Hatamura, A Study on HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) Gasoline Engine Supercharged by Exhaust Blow Down Pressure, SAE Technical paper, (2007), No.2007-01-1873.
- (7) T. Kuboyama, An Experimental Study of a Gasoline HCCI Engine Using Blow-Down Super Charge System, SAE Technical paper, (2009), No.2009-01-0496.
- (8) Tomonori Urushihara, Koji Hiraya, Akihiko Kakuhou, Teruyuki Itoh, Expansion of HCCI Operating Region by the Combination of Direct Fuel Injection, Negative Valve Overlap and Internal Fuel Reformation, SAE Technical paper, (2003), No.2003-01-0749.
- (9) A. Morita et. al., A Study on HCCI (Homogeneous

Charge Compression Ignition) Gasoline Engine Supercharged by Exhaust Blow Down Pressure (Third Report), Review of Automotive Engineering, (2008), No.29 61-64.

(10) Hesselbacker k. H. et. al., Experimental investigation of Gaussian beam effects on the accuracy of a droplet sizing method, Appl. Opt., 30, 33, (1991), pp.4930-4935.

(11) T. Kawaguchi et. al., Interferometric Measurement of Size and Velocity Distributions of Spherical Particles in Spray Flow (in Japanese), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. (2002), Series B, Vol. 68 No.01-0376, 141-148.



後藤俊介

千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻 博士後期課程 2年,  
千葉市稲毛区弥生町 1-33,  
Tel:043-290-3183  
Fax:043-290-3039  
略歴:2011年千葉大学大学院工学研究科修士課程修了,  
HCCI ガソリンエンジンの実用化に関する研究に従事