# 超低NOxディーゼル燃焼の圧力上昇率低減に関する研究<sup>\*1</sup>

Reduction of Pressure-Rise Rate in Ultra-Low NOx Diesel Combustion

北村 高明 $^{*2}$	伊藤 貴之 <sup>*2</sup>	杉山 元 <sup>*3</sup>
Takaaki KITAMURA	Takayuki ITO	Gen SUGIYAMA

## Abstract

The effect of  $\phi$  (equivalence ratio) distribution on combustion noise in ultra-low NOx diesel combustion under highly EGR conditions was investigated by a single-cylinder engine test and a 3D-CFD simulation (KIVA/CHEMKIN code). It was found that  $\phi$  distribution varies greatly with injection pressure, which significantly changes the maximum pressure-rise rate. However, a large amount of soot is formed when the pressure-rise rate is reduced excessively just by lowering injection pressure.

# 1. はじめに

PCCI燃焼等の予混合圧縮着火燃焼は、燃費の悪 化なく、NOxとスートを画期的に低減できるポテ ンシャルを持つため、次世代の燃焼方式として期 待されている.しかし一方で、燃焼時に急峻な圧 力上昇を引き起こすことから、実用化へ向けては 燃焼騒音の低減が必要である.

本研究では、大量EGRによって超低NOx化を達成し、さらに混合気濃度分布の時・空間制御によって低スートレベルかつ緩慢な圧力上昇を実現し得る新たなディーゼル燃焼方式の研究・開発を進めている。エンジンアウトでのエミッションおよび最大圧力上昇率の目標値を以下に示す。

### $\cdot$ NOx<0.2g/kWh

- ・Soot<0.1g/kWh (DPFの装着を想定)
- $\cdot (dp/d\theta)_{max} < 0.5 MPa/°CA$

本報では,燃料噴射圧力によって混合気濃度分 布を変化させた際の燃焼過程について研究用単気 筒エンジンおよび3D-CFDを用いて解析した結果 について紹介する.

# 2. 単気筒エンジンの緒元

供試エンジンは、ボア径108mm、ストローク長 115mmの4ストローク単気筒直接噴射式ディーゼ

\*1 原稿受理 2008年3月11日
\*2 (財日本自動車研究所 エネルギ・環境研究部 博士 (工学)

ル機関である.幾何圧縮比は16.5 (リエントラン ト型燃焼室),スワール比は2.2とし,燃料噴射装 置はコモンレール方式(S16ノズル: \$0.16mm×5 穴,ミニサック)を使用した.

運転条件は,機関回転速度1,280rpm, 無過給と し,吸気温度は40℃一定とした.また,NOx排出 率が目標レベル(<0.2g/kWh)を達成するよう, 大量EGRによって吸気酸素濃度を14%に設定した.

3. 3D-CFDコード

数値流体コードKIVA3Vに化学反応計算コード CHEMKIN-IIを組み込み,比較的詳細な素反応過 程を考慮した3D-CFD解析を行なった.使用した 計算格子をFig.1に示す.



Fig. 1 Example of computational grid

気相反応モデルは,軽油相当のセタン価を有す るn-ヘプタンの酸化・熱分解反応とNOx生成反応 が記述されたPatelら<sup>11</sup>のモデル(化学種数34,反 応式数74)を用いた.またスート反応計算にはモ

<sup>\*3 (</sup>財日本自動車研究所 エネルギ・環境研究部 工学博士

ーメント法を適用し,気相反応計算から算出される $C_2H_2$ ,OH,O<sub>2</sub>濃度を使用して粒子化プロセス(核生成,凝集,表面反応)を記述した.また,各計算格子内において,化学反応が乱流混合により影響を受けることを表現するKongら<sup>2)</sup>の燃焼モデルを組み込んだ.

#### 4. 結果および考察

# 4.1 単気筒エンジン試験

Fig. 2に, 燃料噴射量を35mm<sup>3</sup>/stとし, 噴射圧力 を45MPaから180MPaまで変化させた際の筒内圧 力, 熱発生率およびノズル針弁リフトの時間履歴 を示す. 燃料噴射時期は熱炎発現時期が圧縮上死 点になるよう決定しており, 噴射終了後に十分な 予混合期間を経る間もなく熱炎反応が開始する.



Fig. 2 Effect of injection pressure on cylinder pressure and heat release rate

その場合,噴射圧力が熱発生率履歴に及ぼす影響は極めて大きく,噴射圧力の低下に伴ない最大 熱発生率の低い緩慢な燃焼が実現される.この原 因として,O<sub>2</sub> addition反応が重要な役割を果たす低 温酸化反応プロセスにおいても熱発生量が噴射圧 力の低圧化とともに減少しており,噴射圧力の違 いによって熱発生過程での混合気濃度分布に顕著 な差異が生じていることが推察される.

Fig. 3に,各噴射圧力において,燃料噴射量を20 ~40mm<sup>3</sup>/stの範囲で変化させた際の最大圧力上昇 率を示す.横軸は図示平均有効圧力である.噴射 圧力の高圧化によって乱流混合速度を高めていく と最大圧力上昇率は大となり,噴射量の増大とと もにより一層急峻な圧力上昇を引き起こす.一方, 低圧噴射の場合には,噴射量の増減に関係なく最 大圧力上昇率は一定の低い値を示す.本結果では, 噴射量によらず噴射圧力を45MPa以下に設定すれ ば,  $(dp/d\theta)_{max} < 0.5MPa/CAが可能になる.$ 



Fig. 3 Effect of injection pressure on maximum pressure-rise rate

Fig. 4に, 噴射圧力がエンジン排気性能に及ぼす 影響を示す. ここではスート排出量の評価にボッ シュ式スモークメータを使用した. 緩慢な圧力上 昇を実現し得る低圧噴射では, 大量EGRによって 吸気酸素濃度を14%に低減することでNOx < 0.2g/kWhが達成できる. さらに, 低負荷側の燃焼 効率の悪化(HC, COの増大)を少なく抑えられ る利点を持つが, 負荷の増大に伴ない多量のスモ ークが排出される結果となる.



Fig. 4 Effect of injection pressure on engine performances and emissions

以上,噴射圧力が圧力上昇率や排気性能に及ぼ す影響を示したが,噴射圧力の制御だけでは圧力 上昇率とスートを同時低減することは難しい.次 に,3D-CFDによりその要因解析を行なった.

#### 4.2 3D-CFD解析

単気筒エンジン試験で燃焼特性が大きく違った 低圧噴射 ( $P_{inj}$ =45MPa) と高圧噴射 ( $P_{inj}$ =180MPa) を対象に3D-CFD解析を行なった.燃料噴射量は 35mm<sup>3</sup>/stであり,  $P_m$ =0.56MPaの負荷条件である.

Fig. 5およびFig. 6の上2段には、実験および計算 から得られた筒内圧力および熱発生率の時間履歴 を比較している.これから、KIVA/CHEMKINコー ドを用いた3D-CFDシミュレーションによって実 験結果を良く再現できることが分かる.



Fig. 5 Effect of injection pressure on soot and NOx formation process (Pinj=45MPa)



Fig. 6 Effect of injection pressure on soot and NOx formation process  $(P_{\mbox{\tiny Inj}}{=}180MPa)$ 

同図の下3段にはNOxおよびスートの生成挙動に 関する計算結果を示す.ここで、N<sub>sor</sub>は筒内に存 在するスートの全粒子数, *D*<sub>sout</sub>は平均粒径を示す. スートは熱炎反応時に急速に生成された後, 燃焼 過程後半には酸化反応によって減少に転じる. 高 圧噴射 (Fig. 6) では, 燃焼過程後半で粒子数およ び平均粒径の双方が減少し, 60°CA ATDCの時点 でスート質量は数μgまで低減する. それに対し, 低圧噴射 (Fig. 5) では高圧噴射よりも熱炎反応時 のスート生成量が一桁多く, 燃焼過程後半でもス ート平均粒径が増加する. その結果, 60°CA ATDCでは100μg程度のスートが酸化されずに残 存する.

NOx生成については、熱炎反応時にNOが生成され、一部が膨張行程でNO<sub>2</sub>へと変換される.NOx 生成量は急峻な圧力上昇を伴なう高圧噴射のほう が多くなる.

Fig. 7に,双方の噴射圧力条件での粒子化速度を 比較した.上から,核生成速度,凝集速度,表面 成長速度,表面酸化速度を示す.凝集速度と表面 酸化速度は粒子数およびカーボン数を減じる方向 に働くため,負の速度を持つ.多量のスート排出 を伴なう低圧噴射では,O<sub>2</sub>による表面酸化速度に 対してC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>による表面成長速度が断然大きく,燃 焼過程後半でもスートが成長する結果になる.



Fig. 7 Comparison of soot formation rates between  $$P_{\rm inj}$=45MPa$  and  $$P_{\rm inj}$=180MPa$ 



Fig. 8 Effect of injection pressure on mixture distribution

$$\phi = \frac{2\sum_{i=1}^{Nspecies} C_i^{\#} + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{Nspecies} H_i^{\#}}{\sum_{i=1}^{Nspecies} O_i^{\#}}$$
(1)

噴射圧力を45MPaとし圧力上昇が緩慢となる条件では、 $0 < \phi < 4$ と広い当量比範囲に分散した混合気濃度分布で熱炎反応が生じており、急峻な圧力上昇を引き起こす量論混合比近傍の混合気頻度が低い.その一方で、多くの混合気が $\phi > 2$ のスート生成領域を横切っており、多量のスート生成をもたらす(Fig. 5参照).さらに、燃焼過程後半においてもリッチ混合気が滞留し、Fig. 9に示すようにスートが残存する.



Fig. 9 Soot distribution

一方,噴射圧力を180MPaまで高めた場合には, 0< ∮ <3の濃度分布をもつ混合気が着火・燃焼し ており,低圧噴射と比べると量論混合比付近の混 合気頻度が明らかに増している.また,混合気の 一部がスート生成領域を通過するが,燃焼過程の 進行とともに混合気の均質化・希薄化(混合気濃 度分布がナローバンド化)が進むことから,生成 されたスートの大半は酸化し,消滅する.

### 5. まとめ

- 十分な予混合期間を設けずに着火・燃焼を行 なった場合,噴射圧力によって熱発生過程で の混合気濃度分布に顕著な差異が生じ,噴射 圧力の低下によって緩慢な燃焼が実現できる.
- 2)ただし、低圧噴射では燃焼過程後半までリッチ 混合気が滞留するため、噴射圧力の制御だけで は圧力上昇率とスートの同時低減は難しい。

#### 参考文献

- Patel, A., et. al. : Development and Validation of a Reduced Reaction Mechanism for HCCI Engine Simulations, SAE Paper 2004-01-0558 (2004)
- Kong, S.-C., et. al. : Modeling and Experiments of HCCI Engine Combustion Using Detailed Chemical Kinetics with Multidimensional CFD, SAE Paper 2001-01-1026 (2001)