

GTL 燃料を用いた低圧対向多段噴射による噴霧，混合気形成と* 予混合圧縮着火燃焼の制御

孝田 秀一¹⁾ 若井 謙介¹⁾

A Study of PCCI Combustion Control Method
using Low-Pressure Impingement Spray of DISI Swirl Injectors and GTL Fuel

Hidekazu Kodai Kensuke Wakai

In the research carried out for this paper, an injection strategy for predictably PCCI combustion with Alternative fuel of GTL, a series of experiments using a single-cylinder diesel engine and a spray observation vessel. The Injection system was revised by several injection timing, rate of injection quantities, and second injection ratio to optimize for spray-to-spray collision and spatial and temporal distribution of the mixture. The results show that switching injection pattern improve IMEP, and the spray-to-spray collide two-stage injection, reduces NO without increasing CO and THC emissions.

KEY WORDS: Heat engine, Homogeneous charge compression ignition, Fuel injection, GTL, PCCI (A1)

1. 緒言

日本政府の「2050年カーボンニュートラル宣言」という高い目標へ向け、既存の燃料インフラを活用できる内燃機関において、合成燃料の積極的活用により高いエネルギー密度を維持する多様な燃料の利用が求められる⁽¹⁾。CO₂からの合成ガス生成も見込まれるGTL燃料は、セタン価が高く、PMの排出の原因となる芳香族成分が非常に少ないという特徴があり、圧縮着火機関に適した燃料であると言える。

また、内燃機関の活用においてNO_xやPMを大幅に低減し得る予混合圧縮着火(PCCI)燃焼はノック限界により、運転領域の制限や排気特性の悪化などの制約を受ける。超高压燃料噴射(350MPa)を用いた噴霧の微粒化、混合気形成速度の向上と多段噴射による混合気の時間的、空間的配置の制御を併用することでPCCI燃焼での運転領域の拡大が可能であると報告されている⁽²⁾。本研究では比較的低压噴射(12MPa)でありながら、様々な混合気形成を実現可能な直噴ガソリン用スワールノズルを燃焼室に対向配置し、様々な噴射パターンにより噴霧同士の衝突と空気導入、混合気形成過程に変化を与えGTL燃料を用いた幅広い運転領域でのPCCI燃焼制御を目指す。まず燃料噴霧撮影を行い、噴霧の挙動および巨視的な特性を把握する。そしてディーゼル機関へ対向噴射システムを適用し、燃焼状態、排気特性を測定することで、対向するノズルの噴射パターンによる混合気形成過程の変化が燃焼に与える影響を調査した。

*2021年11月18日受理。

2021年12月9日第32回内燃機関シンポジウムにおいて発表。

1) 琉球大学(903-0213 沖縄県西原町字千原1番地)

2. 実験装置および手法

2.1. 供試燃料

表1にGTL燃料および軽油の燃料性状を示す。GTL燃料は天然ガスから合成ガスを生成後、Fischer tropsch法により精製された合成燃料である。硫黄分を含まず、パラフィン分に富み、芳香族成分が非常に少ないという特徴から燃焼時にはSO_xとPMの発生低減に寄与する。さらに高セタン価に起因する着火遅れ期間の短縮から、予混合燃焼が緩慢化することで幅広い領域での燃焼制御性が見込まれる⁽³⁾。

Table 1 Comparison of the fuel properties ⁽⁴⁾

Test fuel	GTL fuel	Diesel fuel
Cetane index [-]	82	56
Density of liquid [kg/m ³]	0.78	0.83
Kinematic viscosity [mm ² /s]	1.32	1.48
Auto ignition temperature [K]	478	523
Lower heating value [MJ/kg]	44	43
Stoichiometric A/F [-]	14.96	14.37

2.2. 対向噴射の可視化実験装置及び手法

図1に実験装置の概略を示す。高压容器中に延長シリンダを模した壁面(内径75mm,長さ30mm)を設置し、ディーゼル機関の代表的な圧縮上死点温度、圧力(T_a=773K, P_a=3.1MPa)の雰囲気密度を模擬するため、雰囲気温度をT_a=303K, 圧力をP_a=1.3MPaとした。アキュムレータに窒素ガスを充填し燃料を加圧、シリンダ模擬壁面のポートから直噴ガソリン用スワールノズルを用い、燃料噴射圧力をP_{inj}=12.1MPaとし噴射を行う。各ノズルの噴射時期、期間を噴射段数で制御することで噴射パターンを構築する。

噴射された噴霧は、半導体レーザー（波長:532 mm）を使用したシュリーレン光学系を用い高速度ビデオカメラ（128×128 pixel, 10,000 fps）により可視化観察を行った。撮影した画像に対し噴霧の巨視的特性として噴霧先端到達距離や噴霧幅、噴霧面積を求め、画像相関法による PIV 解析も行うことで噴霧挙動の解析を行った。

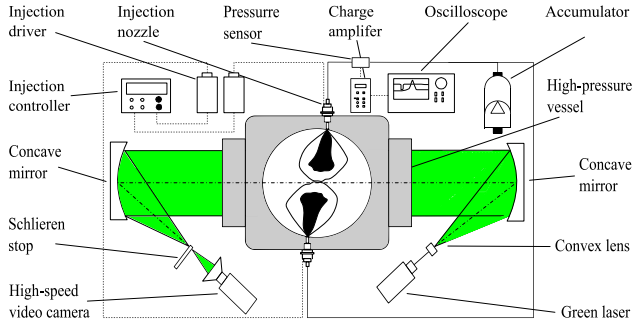


Fig. 1 Schematic of spray visualization system

2.3. 対向噴射のエンジン実験装置及び手法

供試機関は単気筒 4 サイクル水冷横置きディーゼル機関 (YANMAR: NS50C-G) を用いた。供試機関の諸元と実験条件を表 2 に、実験装置の概略を図 2 に示す。対向噴射を実現するため延長シリンダ、延長ピストンを取り付け、ベース圧縮比 $\epsilon=16.5$ から $\epsilon=12.5$ に変更した。また噴霧の可視化に用いたものと同様に直噴ガソリン用スワールノズルを対向に配置し $P_{inj}=12.1$ MPa とした。燃焼室吸気バルブ側、排気バルブ側、各ノズルからの噴射を制御しそれぞれの噴射時期、期間、割合など噴射段数で複数の噴射パターンを構築した。機関回転速度 $n=1000 \pm 10$ rpm とし、筒内圧力履歴はシリンダヘッドに取り付けたピエゾ式圧力センサ (KISTLER: 6061B) で得た圧力を 128 サイクル平均し、熱発生率を求めた。排気ガス中の CO および THC 各濃度は NDIR 法、NO 濃度は電気化学セル法を用いた自動車排気ガス測定器 (HORIBA: MEXA-584L) にて計測した。

Table 2 General specifications of test engine

Engine type	DI 4 stroke-single cylinder
Bore × Stroke [mm]	75 × 75
Compression ratio ϵ [-]	12.5
Engin speed n [rpm]	1000 ± 10
Injection pressure P_{inj} [MPa]	12.1

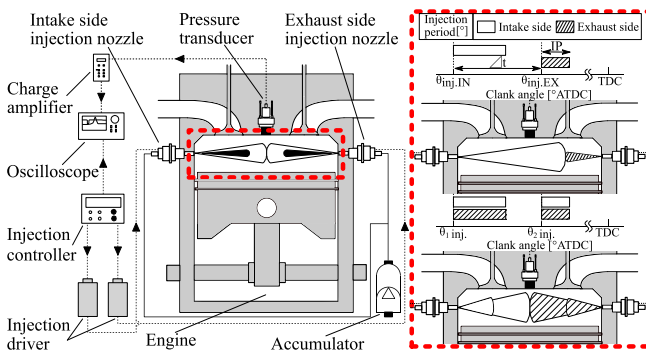


Fig. 2 Schematic of engine system

3. 実験結果および考察

3.1. 片側噴射と対向噴射における噴霧の巨視的特性

図 3 に噴射開始から同一時刻における片側噴射と対向噴射された噴霧の比較を示す。シュリーレン法による噴霧の可視化法において、平行光入射による噴霧内での液滴による散乱や、蒸気相での屈折により画像濃度の変化が取得されることが報告されている⁶⁾。本研究では常温高圧場での噴霧観察実験であり、噴霧の蒸気相は比較的少ないと考えられる。スワールノズルでは中心部の円錐状に形成された液膜による屈折と噴霧外縁部で微粒化した液滴による散乱による画像濃度の変化が取得できると想定した。噴霧画像において高い輝度を示す白い領域は微小な粒子が多数存在する領域 (Plume 領域)、低い輝度を示す黒い領域は液膜による屈折で見かけの密度が増加した場合か、比較的大きな粒子が高い密度で存在する場合だと考えられる領域 (高密度領域) と定義し、噴霧を液浸法にて測定したザウター平均粒径と粒度分布から $D_{32}=5.0 \times 10^2 \mu\text{m}$ 以上を高密度領域、それ以下を Plume 領域とし、噴霧画像の輝度に閾値を設けることで各領域の面積を測定した。噴射開始から同一時刻における噴霧画像を比較すると片側噴射と対向噴射による噴霧は時間経過と共に液滴の拡散が進行、噴霧中に Plume 領域が形成されていく様子が確認できる。対向噴射では噴霧同士の衝突により噴霧の拡散過程が変化し噴射開始からの時期が同一の場合でも高密度領域に拡大がみられた。

図 4 (a) に噴射開始からの片側噴射と対向噴射の噴霧先端到達距離と噴霧幅の時間履歴を示す。スワール噴霧での噴霧先端到達距離に着目するとほぼ一定の傾きを保ったまま増加し、噴射終了後も高い貫徹力を維持することがわかる。噴霧幅に着目すると対向噴射は片側噴射に比べ噴霧衝突時 $T=1.4$ ms 以降、増加傾向を維持している。河原ら⁶⁾は、直噴ガソリン用スワールノズルのノズル近傍に形成される液膜の分裂構造を調査し、噴霧のコーン角が拡大する様子から旋回方向速度の発生を示唆した。また山川ら⁷⁾は、スワール噴霧を三次元 PIV にて測定することで噴霧の旋回流動を明らかにしている。このことから非蒸発噴霧においても、噴霧は旋回性を保ったまま衝突することにより衝突面に沿う形で噴霧が成長し、噴霧周方向速度の増大がもたらされた結果、噴霧幅が維持されたと考えられる。

図 4 (b) に示す Plume、高密度の各噴霧面積を見ると、対向噴射は片側噴射に比べ Plume 領域がすべての時期で増大し、噴射開始後 $T=10.0$ ms における最大値は約 11 % 増加した。高密度領域も衝突後から全ての時期で増大が見られ最大値が 22 % 増加し、高い値を維持している。これはスワール噴霧の旋回流同士が衝突し、周方向に噴霧が広がることで噴霧外縁部の拡散が促進し Plume 領域が増加する一方、中空円錐状の液膜から形成される噴霧が衝突し、貫徹力により押し潰され重なり合うことにより高密度領域が増加し

たとえられる。

次に、実機吸気バルブ直下を噴霧が進行する側に配置したノズルを吸気側ノズル、排気バルブ直下を噴霧が進行する側に配置したノズルを排気側ノズルと定義し、各々の噴射時期や、噴射期間に変化を設けることで燃焼室における混合気の時間的、空間的生成過程の制御を目指す。

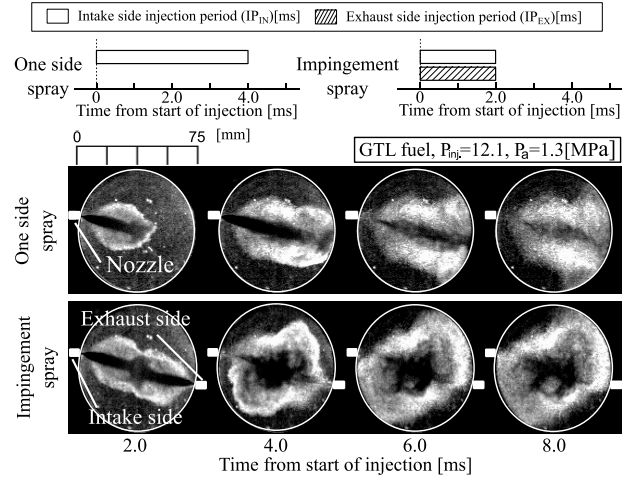


Fig. 3 Schlieren photographs of one side and impingement spray

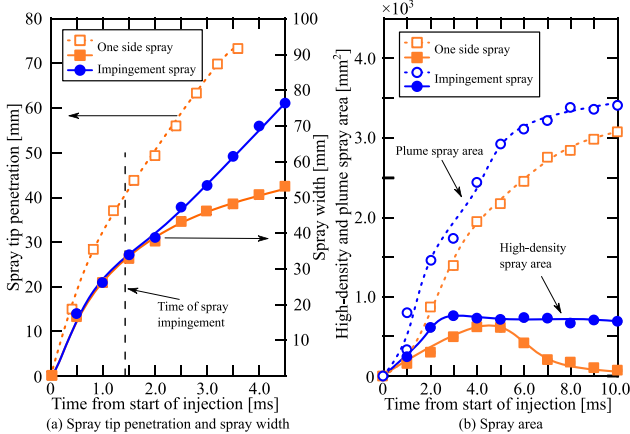


Fig. 4 Spray characteristics of GTL one side and impingement spray

3.1.1. 対向噴射での噴射割合、噴射間隔の影響

次に対向に配置されたノズル相互に噴射割合と噴射間隔を設けることで衝突噴霧の時間的、空間的生成過程の制御を目指す。まず総噴射期間 $IP_{total}=4.0\text{ ms}$ とし、各ノズルの噴射割合を分割、吸気側ノズルの噴射期間 IP_{IN} 、排気側ノズルの噴射期間 IP_{EX} とし、 $IP_{IN}:IP_{EX}=3.0:1.0$ で吸気側、排気側ノズルの噴射時期を $0\sim 3.0\text{ ms}$ と遅延、噴射間隔 Δt を設けた。

図 5 (a) に吸気側ノズルの噴射時期を $0\sim 3.0\text{ ms}$ 遅延した場合における Plume、高密度各領域の面積を示す。同時噴射に比べ噴射間隔 $\Delta t=1.0\text{ ms}$ の場合、噴霧面積中の Plume 領域は噴射開始後 $T=6.0\text{ ms}$ から増加する。先行して噴射された噴射期間の短い中空円錐状の噴霧が噴射時期の遅延によりさらに拡散されつつある領域を、後から噴射された噴射期間が長く貫徹力の高い噴霧が内側から押し広げながら進行し、Plume 領域が増加したと考えられる。高密度領域に着目すると噴射間隔の変化に関わらず最大値はほぼ同一であるが Δt

の増加に伴い最大値の発生時期が遅延化する傾向をとる。噴射間隔を設けることで噴霧同士の衝突時期が遅延し、先に噴射された側の噴霧では拡散が進行、拡散の進行した噴霧同士が重なり合う時期も遅延したことで高密度領域の増加傾向が緩やかになったと考えられる。

図 5 (b) に排気側ノズルの噴射時期を $0\sim 3.0\text{ ms}$ 遅延することで噴射間隔 Δt を設けた場合における各領域の時間履歴を示す。同時噴射に比べ噴射間隔を設けると噴射開始からほぼ全ての期間で Plume 領域、高密度領域共に減少する。先行して噴射された噴射期間が比較的長く、貫徹力が高い噴霧に対し、後から噴射された噴射期間の短く貫徹力が低い、拡散の進んでいない噴霧が円錐部に入り込み重なり合うことで、衝突面に沿う拡散が抑制され、Plume 領域の増加率は減少し高密度領域は減衰傾向をとったと考えられる。次に PIV 解析結果を用い速度分布を確認する。

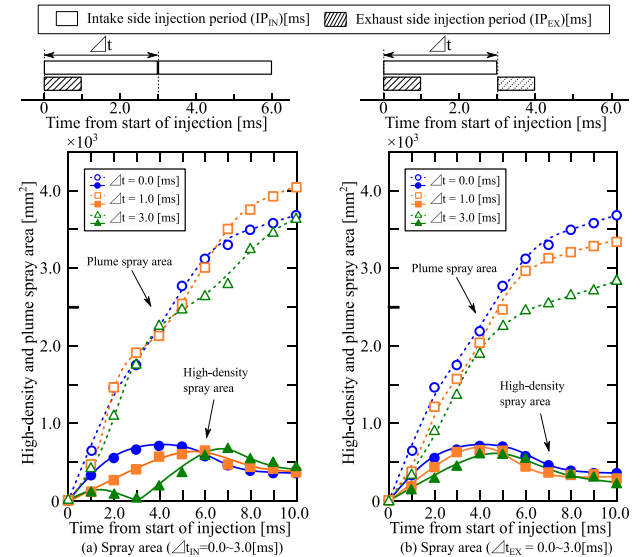


Fig. 5 Effect of change rate of injection quantity and injection timing on spray area

3.1.2. 可視化観察画像の PIV 解析と噴霧の挙動

噴霧挙動と周囲空気の流動に対する影響を調査するため、PIV 解析結果から速度コンター図を製作し噴霧画像と重ねることで噴射パターンの変化に対し噴霧挙動の観察、比較を行った。噴射割合、噴射間隔を設けない条件 (Case 1)、 $IP_{IN}:IP_{EX}=3.0:1.0$ と噴射割合のみを設けた条件 (Case 2)、噴射割合を設け、さらに吸気側ノズルの噴射時期を 1.0 ms 遅延することで噴射間隔 Δt を設けた条件 (Case 3) の比較を行う。

図 6 に噴射開始後 $T=2.0\sim 6.0\text{ ms}$ での各条件での同一時刻における噴霧と速度コンター図を示す。Case 1 は噴射開始後 $T=4.0\text{ ms}$ において噴霧外縁に沿って比較的速度の高い緑から赤の領域が広く分布する。噴霧同士の貫徹力が拮抗し、周方向へ拡散、高い速度が維持されたためだと考えられる。しかし、 $T=6.0\text{ ms}$ では急激に減衰し、速度が高い領域は少ない。次に噴射割合を設けた Case 2 では、 $T=4.0\text{ ms}$ で吸気側から噴射された噴霧の先端部に速度の高い領域が集中し、

T=6.0 ms においても速度の高い領域が排気側に分布している。噴霧同士の貫徹力の差が大きくなることで衝突後も吸気側から噴射された噴霧が高い貫徹力を維持し、排気側に進むため減衰が抑えられ比較的速度の高い領域が維持されたと考えられる。Case2に比べさらに噴射間隔を設けたCase3では、T=4.0msで吸気側から噴射された噴霧の先端を中心に赤の非常に速度の高い領域が存在し、T=6.0 msでも排気側壁面近傍に緑の比較的速度の高い領域が広く分布している。先行して噴射された噴射期間の短い噴霧を、後から噴射された噴射期間が長く貫徹力の高い噴霧が内側から押し広げながら進行し速度の減衰が抑えられ、高い速度領域が長期間形成されたと考えられる。対向噴射において噴射割合や噴射間隔を設けることで混合気の時間的、空間的配置に影響を及ぼす噴霧の速度分布が変化することが分かった。

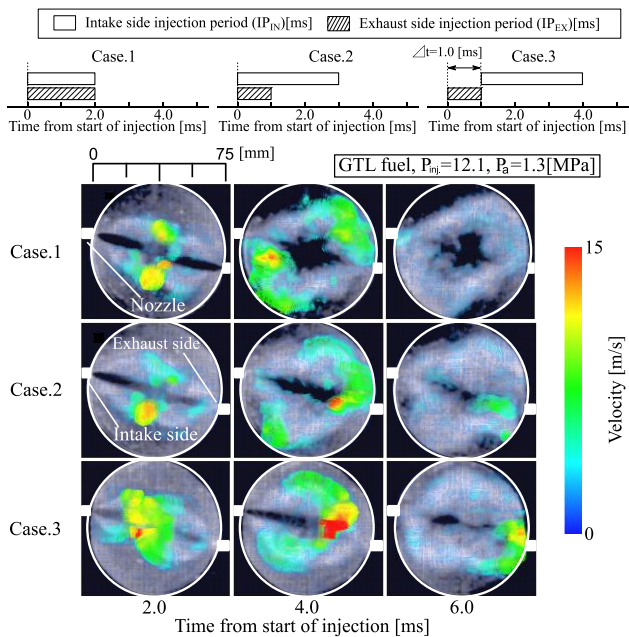


Fig. 6 Velocity distribution of impinging spray at PIV

3.2. 実機への対向噴射の適用と片側噴射との比較

噴霧の挙動および巨視的な特性を把握した上で実機を用いた様々な噴射パターンにより混合気形成過程の変化が燃焼に与える影響を調査する。まず対向噴射の燃焼と機関、排気特性を把握する為、片側噴射との比較を行う。

図7(a)に噴射時期 $\theta_{inj} = -90^\circ \text{ATDC}$ における筒内圧力履歴および熱発生率の変化を示す。低温酸化反応のピークは排気側からの片側噴射 $IP_{EX} = 4.0^\circ$ が早期化している。これは噴射初期の噴霧が加熱された排気バルブ直下を通過する際に噴霧の拡散、蒸発が促進し、予混合気の形成が比較的早期に開始され相対的に増加したためと考えられる。高温酸化反応の発現時期は対向噴射のほうが早期化し、片側噴射よりも高い熱発生率となり、燃焼期間の短い急峻な燃焼となる。対向噴射では噴霧同士の衝突と噴霧外縁部における拡散と空気導入の促進により予混合気量が増加したためだと考えられる。

図7(b)に各条件における機関、排気特性を示す。COには大きな変化はないものの、THCは吸気側からの片側噴射 $IP_{IN} = 4.0^\circ$ が減少する。噴霧が時間経過と共に比較的高温な排気側に移動、加熱による拡散と蒸発が促進することで燃焼完結性が向上したと考えられる。対してNOを比較すると対向噴射では約300 ppm増加、IMEPには大きい差がない。噴射率が単純計算で倍増する対向噴射では噴射初期の噴霧、混合気の空気導入が進みにくいと考えられるが衝突による噴霧の拡散と急速な空気導入により予混合気の形成が促進され、比較的早期の急峻な熱発生からIMEPは増加せずNOが増加したと考えられる。

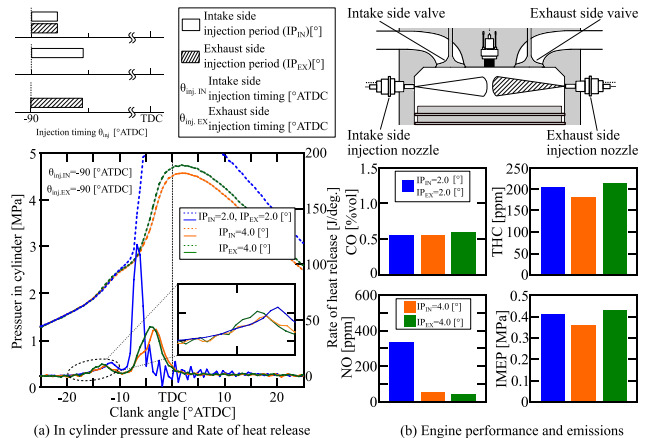


Fig. 7 Effect of change spatial distribution of the spray on engine

performance and emissions ($\theta_{inj} = -90^\circ \text{ATDC}$, $IP_{total} = 4.0^\circ$)

3.2.1. 噴射時期、噴射期間の変化が燃焼に与える影響

同一の噴射時期、期間で対向噴射を適用することで緩やかな低温酸化反応と急峻な高温酸化反応との特徴的な燃焼状態の変化が確認された。噴霧の衝突、拡散過程の燃焼に与える影響をより詳しく把握するため、噴射時期をTDCから進角し燃焼領域を確認、総噴射期間による機関排気特性の比較を行った。

図8(a)に噴射期間 $IP_{IN} = 2.0^\circ$, $IP_{EX} = 2.0^\circ$ において、各噴射時期における筒内圧力履歴および熱発生率の変化を示す。最大圧力上昇率 ($dp/d\theta$) が 0.7 MPa° 以上に達した時点からノッキング領域と定義した。低温酸化反応は噴射時期 $\theta_{inj} = -30^\circ \text{ATDC}$ では発現せず、ノッキング領域を過ぎた $\theta_{inj} = -90^\circ \text{ATDC}$ 以降明確に発現している。これは衝突による拡散と空気導入の促進による予混合気量の増大からだと考えられる。高温酸化反応は噴射時期の進角化により発現時期が遅延化し、燃焼が緩慢化する。混合気形成期間が確保され、筒内は比較的低温、低圧な状態となり希薄な予混合気量が増大する。そのため発現時期が遅延化し、TDC以降も燃焼が続く緩慢な低温燃焼になったと考えられる。

図8(b)に噴射期間 IP_{IN} , $IP_{EX} = 2.0^\circ$, IP_{IN} , $IP_{EX} = 1.5^\circ$ において、各噴射時期の機関、排気特性を示す。 IP_{IN} , $IP_{EX} = 2.0^\circ$ の場合、噴霧同士の衝突による急速な予混合気の形成とそれに伴う急峻な燃焼により、 $\theta_{inj} = -30 \sim -90^\circ \text{ATDC}$ 付近までノ

ッキングが発生した。 $\theta_{inj} = -90 \sim -150^\circ \text{ATDC}$ では $dp/d\theta$ が減少し高温酸化反応は緩やかに変化していく。そしてこの領域で CO や THC の変化は比較的少ない。予混合圧縮着火において CO や THC はトップランドやリングクレビスなどのクエンチング領域に侵入した燃料や混合気が、火炎の進行を抑える燃焼完結性悪化による増大が報告されている^{(8),(9)}。図 3 より、対向噴射は燃焼室中心で噴霧が衝突するため、噴霧外縁部が模擬燃焼室側面に衝突する時期が遅延化している。よって噴霧がシリンダ壁面近傍のクエンチング領域に入るまでに燃焼し、燃焼完結性の悪化が抑えられたためだと考えられる。噴射期間を削減した $IP_{IN}, IP_{EX} = 1.5^\circ$ の場合、 $IP_{IN}, IP_{EX} = 2.0^\circ$ でノッキング領域と定義した噴射時期において、低温酸化反応の発現が見られない噴射時期から明確に低温酸化反応が発現する領域まで運転可能であることがわかる。噴射時期の過度な進角化は可燃限界を超えた希薄化や燃焼完結性の悪化、潤滑油の粘度低下を誘発する⁽¹⁰⁾。そこでこれ以降は、総噴射期間を $IP_{total} = 3.0^\circ$ へ削減し、対向噴射に噴射割合、噴射間隔を設けることで混合気形成の時間的、空間的配置を変化し燃焼、排気特性の改善を検討した。

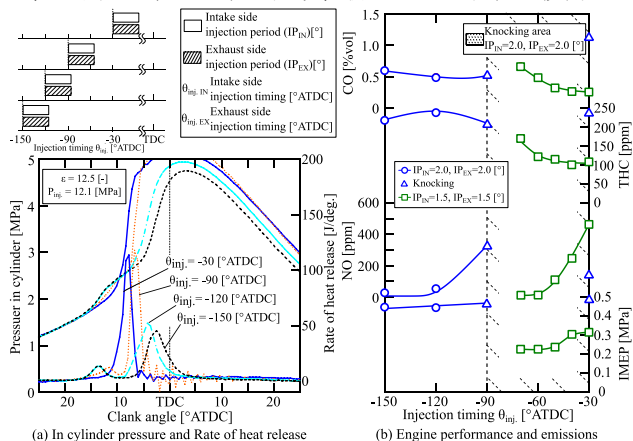


Fig. 8 Effect of injection timing and period on engine performance and emissions ($\theta_{inj} = -30 \sim -150^\circ \text{ATDC}$ $IP_{total} = 3.0 \sim 4.0^\circ$)

3.2.2. 噴射割合、噴射間隔の変化が燃焼に与える影響

次に噴射時期を遅角化し混合気形成過程に変化を与えるため総噴射期間を $IP_{total} = 3.0^\circ$ として対向噴射に噴射割合、噴射間隔を設けることで混合気形成の時間的、空間的配置を変化し燃焼、排気特性について比較を行った。

図 9 (a) に噴射時期 $\theta_{inj} = -50^\circ \text{ATDC}$ 、噴射期間 $IP_{IN} : IP_{EX} = 1.5 : 1.5$ に対し、 $2.0 : 1.0, 1.0 : 2.0$ と噴射割合を設け偏らせた場合での筒内圧力履歴および熱発生率の変化を示す。高温酸化反応の発現時期は吸気側からの噴射割合が多い場合が比較的早期化し、高温酸化反応における熱発生率の変化が二段階で進行している。これは噴射割合が多い吸気側の噴霧が、噴射割合の少ない排気側の噴霧とシリンダの中心付近で衝突、衝突後の噴霧は高い貫徹力を持った吸気側からの噴霧に押され比較的高温な排気側に移動、加熱による噴霧の拡散と蒸発が促進し、噴霧外縁近傍で予混合気形成と同時に

空気導入、希釈化が促進されたためだと考えられる。柴田⁽¹¹⁾はトルエンと n-ヘプタンを混合した NTL 燃料において、高温酸化反応における 2 段目の燃焼発現と、1 段目と 2 段目の着火温度差により急峻な燃焼が抑制されたことを報告している。排気側に噴霧、混合気を配置した場合、反応過程において加熱による混合気の希釈化が促進することでパラフィン系炭化水素における反応性の高い分子とそうでない分子が 2 段階の熱発生をもたらしたと考えられる。

図 9 (b) に各噴射時期における機関、排気特性を示す。全ての場合において噴射時期の進角化に伴い、CO, THC は増加する傾向をとり噴射割合による変化は少ない。一方で NO に着目すると噴射割合の偏りが無い場合では TDC 近傍で一番 NO が多く、噴射時期の進角化とともに減少するのに対し、噴射割合の偏りを設けた場合では TDC 付近では比較的少なく、 $\theta_{inj} = -40^\circ \text{ATDC}$ 付近で最大値をとる。噴射割合の偏りが無い場合は噴霧同士の貫徹力が拮抗した状態で衝突、拡散が発生するためシリンダ中心付近で早期に予混合気量が増加する。一方噴射割合に偏りを設けた場合は噴霧同士の貫徹力に差が生じるため、重なり合いが生じ、衝突直後は拡散が比較的抑制されたと考えられる。しかし片側の噴射期間が終わると予混合気形成が促進し、急峻な燃焼が生じる事で $\theta_{inj} = -40^\circ \text{ATDC}$ 付近で NO が増加したと考えられる。IMEP に着目すると $\theta_{inj} = -50^\circ \text{ATDC}$ 以降、噴射割合に偏りを設けた方が設けない場合に比べ IMEP が増加し排気側からの噴射割合が多い場合が最大値をとる。貫徹力の差により噴霧が偏り形成される場合、排気バルブからの加熱による噴霧の拡散蒸発が促進されず、早期には空気導入が進まないため、比較的予混合気の形成が抑制された事で、着火遅れ期間が伸び、等容度の高い燃焼となったことから IMEP は相対的に増加したと考えられる。

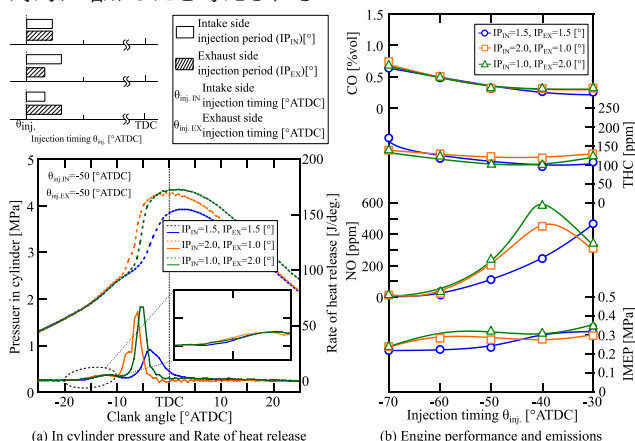


Fig. 9 Effect of change rate of injection quantity on engine performance and emissions ($\theta_{inj} = -30 \sim -70^\circ \text{ATDC}$, $IP_{total} = 3.0^\circ$)

図 10 (a) に噴射時期 $\theta_{inj} = -50^\circ \text{ATDC}$ 、噴射期間 $IP_{IN} : IP_{EX} = 1.5 : 1.5$ と同一にし、吸気、排気側それぞれ 10° 進角することで噴射間隔 Δt を設けた際の筒内圧力履歴および熱発生率の変化を示す。低温酸化反応の発現時期は吸気側を進角し噴

射間隔を広げることで遅延化する。吸気側から燃料を早期に噴射した場合、筒内圧力、温度が低い状態での噴射になり微粒化と拡散、空気導入が促進されない状態で噴霧が排気側へ進む。その後、排気側から噴射された噴霧と排気バルブ側で衝突し拡散と混合が起こると想定されるが、早期に噴射された側の噴霧で空気導入が促進されなかったことで衝突後の拡散が進まず予混合気の形成が抑制されたためだと考えられる。高温酸化反応は吸気側を進角し噴射間隔を設けた場合、発現時期は遅延化し、比較的高い熱発生率をとる。吸気側からの早期噴射が比較的拡散、混合が進まない状態で排気側へ進み、衝突、排気バルブからの加熱により蒸発、空気導入が促進、混合気形成速度は比較的増加し、高温酸化反応発現時期における雰囲気温度と予混合気量が増大したためだと考えられる。排気側を進角し噴射間隔を設けた場合、低温酸化反応、高温酸化反応共に発現時期に変化はなく低い熱発生率をとる。排気側からの早期噴射が排気バルブ直下を進行することにより噴霧の蒸発、拡散速度が増加、空気導入が促進、比較的希釈化された後、吸気側で噴霧同士が衝突する。吸気側はバルブ傘部が加熱されておらず混合気形成は比較的抑制されるため、予混合気量が相対的に減少したためだと考えられる。

図 10(b)に各噴射時期における機関排気特性を示す。噴射間隔を設けることでCO、THCは増加しNOは減少する。片側を早期に噴射することで混合気形成期間が増大し、相対的に空気導入の継続、希釈化と共に予混合気量も増加、燃焼完結性が悪化したため燃焼期間の長期化によりCO、THCが増加し、圧縮上死点をまたいで続くことで燃焼温度が低下しNO生成量が減少したと考えられる。また吸気側を進角し噴射間隔を設けた場合、噴射時期 $\theta_{inj} = -30^\circ \text{ATDC}$ において、排気側を進角した場合に比べNOが増加する。噴霧同士の衝突位置が排気側となるため排気バルブからの加熱により噴霧の蒸発、拡散速度が比較的向上することで着火時期の早期化し拡散燃焼が発生したためと考えられる。

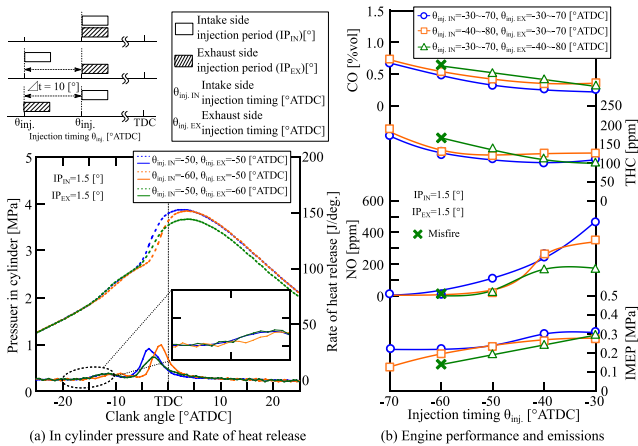


Fig. 10 Effect of change injection timing on engine performance and emissions ($\theta_{inj} = -30 \sim -70^\circ \text{ATDC}$, $IP_{total} = 3.0^\circ$)

図 11 (a)に噴射時期 $\theta_{inj} = -50^\circ \text{ATDC}$ 、噴射期間 $IP_{IN} : IP_{EX} = 2.0 : 1.0$ 、排気側の噴射時期を進角し噴射間隔 $\Delta t = 10^\circ$ 設けた場合の筒内圧力履歴および熱発生率の変化を示す。噴射割合と噴射間隔を同時に設けることで低温酸化反応、高温酸化反応共に発現時期は早期化し、比較的高い熱発生率をとり急峻な燃焼への移行が見られる。噴射期間が短い排気側から先に噴射されるため、排気バルブ直下を進行する噴霧の蒸発、混合速度の向上により早期に予混合気量が増加することで低温酸化反応の発現時期が早期化したと考えられる。吸気側で噴霧同士が衝突、噴射期間の短い排気側の噴霧を噴射期間の長い吸気側の噴霧が押し拡げられるように排気側に向けて噴霧が拡散し、排気バルブからの加熱により蒸発、空気導入が促進されたことで、高温酸化反応発現時期における予混合気量が増大し急峻な燃焼になったと考えられる。

図 11 (b)に各噴射時期における機関排気特性を示す。噴射割合と間隔を設けることで、 $\theta_{inj} = -30 \sim -50^\circ \text{ATDC}$ ではCO、THCが比較的増加するのに対し、 $\theta_{inj} = -50^\circ \text{ATDC}$ 以降に噴射時期を進角してもCOは大きく変化せず、THCは減少する傾向をとる。衝突後の噴霧が排気側へ形成される条件では、噴射時期の進角化に伴い排気バルブからの加熱による影響をより長期間受けることになり、予混合気の形成が促進されたことで燃焼完結性が向上したと考えられる。一方予混合気量の増加により急峻な燃焼が発生したことでNOは相対的に増加したと考えられる。

対向噴射を適用し、噴射割合、噴射間隔を設けることで混合気形成過程に変化を与え、燃焼状態、排気特性の改善を図ることが可能であることが分かったが、更なるNOの削減と同時にIMEPの向上を図る。それぞれのノズルで多段噴射を適用、ノズル毎の噴射期間を分割することで衝突噴霧の時間的な配置、混合気形成の速度を変化すると同時に、噴射パターンに変化を与えることで噴霧、混合気形成における空間的な配置を変化し着火、燃焼時期と期間を最適化することで機関排気特性の改善を図る。

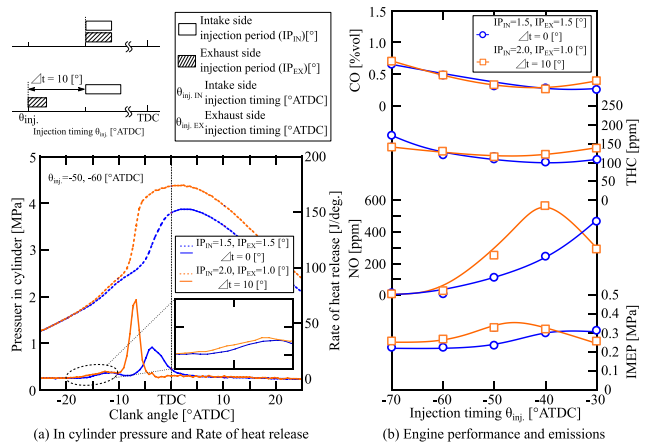


Fig. 11 Effect of change rate of injection quantity and injection timing on engine performance and emissions

3.3. 多段噴射における噴射割合の変化が燃焼に及ぼす影響

対向噴射に噴射割合と噴射間隔の変化を設けることで噴霧、混合気の形成過程を制御し、低温酸化反応、高温酸化反応の発現時期と規模、そして機関、排気特性の変化が確認された。前節より噴射期間による燃料投入量の増加は、噴霧の貫徹力が向上することで衝突による噴霧の拡散と空気導入の促進による予混合気量の増大から、幅広い噴射時期でのノッキングおよびNO生成量の増加が確認されている。そこで対向多段噴射を適用し、総噴射期間 $IP_{total}=5.0^\circ$ まで燃料投入量を増加することでIMEPの向上を狙う。分割噴射による混合気形成速度の遅延化を加え、さらに噴射時期を $\theta_{inj}=-60 \sim -100^\circ\text{ATDC}$ とさらなる進角化を行い急峻な燃焼の抑制をすることでノッキングとNO生成量の低減を図る。

まず同一噴射時期におけるノズル毎の噴射割合を等しくし、1 段目、2 段目の噴射割合を変化させた場合の影響を確認する。1 段目噴射期間 IP_1 と 2 段目噴射期間 IP_2 をそれぞれ、 $IP_1:IP_2=1.0:1.5, 1.5:1.0$ と噴射割合を逆転することで発生する燃焼の変化を比較した。

図 12 (a) に 1 段目噴射期間 $\theta_{1inj}=-70^\circ\text{ATDC}$ 、2 段目噴射期間 $\theta_{2inj}=-60^\circ\text{ATDC}$ 、噴射間隔 $\Delta t=10^\circ$ における 1 段目と 2 段目の噴射割合を変化させた場合の筒内圧力履歴および熱発生率の変化を示す。対向多段噴射を用いることで、燃料投入量の増加と噴射時期の進角化にも関わらず失火と急峻な燃焼を共に抑制することが出来た。多段噴射による混合気形成速度の遅延化により、噴射時期の進角化にも関わらず高い熱発生率を維持しながら、燃焼期間は増加したと考えられる。 $IP_1:IP_2=1.0:1.5$ の場合は低温酸化反応と高温酸化反応の発現時期が共に比較的早期化している。1 段目噴射期間が $IP_1=1.0^\circ$ と短い場合、噴射率の低下により貫徹力の低い噴霧がまず衝突し中央部に留まり、2 段目の噴射によって 1 段目の噴霧が押し上げられると考えられる。1 段目の噴射期間が長い $IP_1:IP_2=1.5:1.0$ の場合、1 段目の噴霧が比較的高い密度で留まる中央部に、短い噴射間隔で噴射された 2 段目の噴霧が重なり合うことで衝突による拡散が抑制され予混合気量の増加が緩慢になり、低温酸化反応発現時期が遅延化し、総燃焼期間も長期化したと考えられる。

図 12 (b) に各噴射時期における機関、排気特性を示す。 $IP_1:IP_2=1.0:1.5$ の場合は比較的CO, THCが減少し、IMEPの増加と共に燃焼完結性が向上していることが分かる。2 段目噴射によって1段目に衝突した噴霧の拡散が促進することで、噴霧外縁部で空気導入が進む領域へ2段目噴霧の衝突と拡散により、二次的な空気導入も促進することで相対的に良好な予混合気量が増加したためだと考えられる。NOはどの条件においても比較的低い値を示す。噴射時期の進角化と多段化による空気導入量の増加により、局所的な混合気の希釈、希薄化が起こることでNOの生成が抑制されたと考えられる。

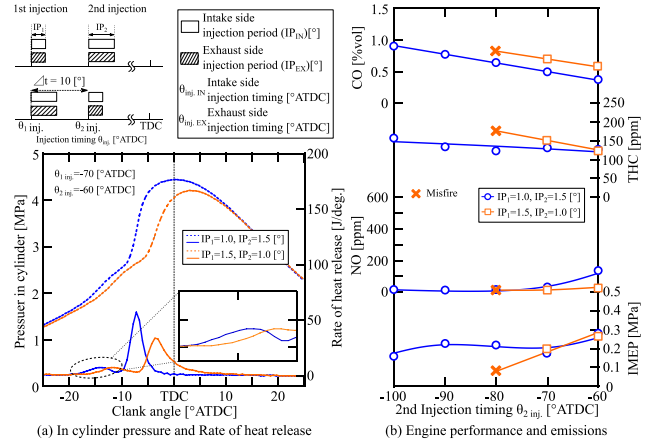


Fig. 12 Effect of 1st and 2nd rate of injection quantity on engine

performance and emissions ($\theta_{inj}=-60 \sim -100^\circ\text{ATDC}, IP_{total}=5.0^\circ$)

3.3.1. 噴射間隔による空間的配置の変化が燃焼に及ぼす影響

$IP_1:IP_2=1.0:1.5$ と 1 段目と 2 段目の噴射割合を変化することで燃焼完結性が向上し、IMEP も比較的高い値を維持することが可能であることが分かった。そこで吸気、排気側に噴射間隔 Δt を設け噴霧、混合気の空間的配置の制御も加えることで、対向多段噴射による抑制された反応と同時に燃焼完結性向上を試みる。 $IP_1:IP_2=1.0:1.5$ 、1 段目 2 段目噴射間隔 $\Delta t=10^\circ$ 一定とした基本条件 (Case 1)、Case 1 から吸気側噴射パターンを 10° 進角し噴射間隔 Δt を設けた条件 (Case 2)、Case 1 から排気側噴射パターンを 10° 進角し噴射間隔 Δt を設けた条件 (Case 3) と定義しそれぞれ比較を行った。

図 13 (a) に各条件における筒内圧力履歴および熱発生率の変化を示す。吸気側を進角し噴射間隔を設けた Case 2 は、Case 1 と比べ高温酸化反応の発現時期は遅延し、低い熱発生率をとる。1 段目、2 段目共に噴霧が排気側で衝突するため加熱による蒸発、空気導入の促進により混合気形成速度は比較的高く、噴射時期の進角化に伴い希薄な予混合気量が相対的に増加し、燃焼期間の増加と共に圧縮上死点を越え低温燃焼へ移行したと考えられる。排気側を進角化し、噴射間隔を設けた Case 3 は、Case 1 と比べ高温酸化反応の発現時期が早期化し、高い熱発生率をとる。吸気側で噴霧の衝突が発生するため、噴射時期の進角化にも関わらず混合気形成速度が緩やかであり、希薄化が進まず相対的に良好な予混合気量が形成されたためだと考えられる。

図 13 (b) に各噴射時期における機関排気特性を示す。Case 3 は Case 1, 2 と比べ、噴射時期を進角化すると CO, THC の値は減少する傾向をとり IMEP は比較的高い。対向多段噴射で噴霧の衝突位置、衝突時期を制御し、混合気の時間的、空間的形成過程に変化を与え、排気バルブ傘部による加熱の影響を強く受けにくい吸気側に混合気を配置することで、混合気の希薄化を抑え燃焼完結性の悪化を抑制できることがわかった。さらに NO に着目すると $\theta_{2inj}=-70^\circ\text{ATDC}$ 以降、噴射時期の進角化により空気導入量の増加と混合気の希薄化が起こることで NO 生成量が減少したと考えられる。

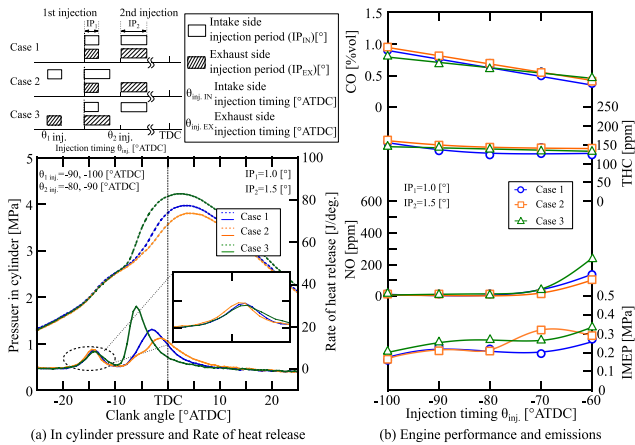


Fig. 13 Effect of two-stage injection and mixture formation on engine performance and emissions

3.4. 混合気形成過程の制御が機関排気特性に与える影響

混合気の時間的・空間的配置を制御するため、様々な噴射時期、期間と多段噴射における噴霧の挙動や巨視的特性を把握し、燃焼に与える影響を調査した。それぞれの混合気形成過程の変化に対する評価手法として図示熱効率を加え機関排気特性の比較を行う。IP_{IN}:IP_{EX} = 1.5:1.5, Δt = 0°一定とした基本条件 (Case 1), IP_{IN}:IP_{EX} = 2.0:1.0, Δt = 10°と噴射割合と噴射間隔を同時に設けた条件 (Case 2), 多段噴射を適用し IP₁:IP₂ = 1.0:1.5, 1 節目 2 節目噴射間隔 Δt = 10°一定とした条件 (Case 3), Case 3 から排気側噴射パターンを 10°進角し噴射間隔 Δt を設けた条件 (Case 4) と定義し、各条件において NO 生成量が 50 ppm 以下となった噴射時期における機関排気特性を比較した。

図 14 に各条件における機関排気特性を示す。Case 1 に比べ、噴射割合と噴射間隔を同時に設けた Case 2 は CO や THC の増加を同程度に抑制し、IMEP と図示熱効率は向上していることがわかる。Case 3 では更に多段噴射を適用することで、混合気形成速度の遅延化を加え、急峻な燃焼の抑制、NO 生成量の低減を図ると共に、空間的配置を制御するため噴射間隔を設けた Case 4 は CO や THC の増加抑制を維持したまま、図示熱効率は最大値をとった。対向噴射において混合気の時間的・空間的配置を制御し、多段噴射によるきめ細やかな制御を用いることで幅広い運転領域での PCCI 燃焼制御が可能であることがわかった。

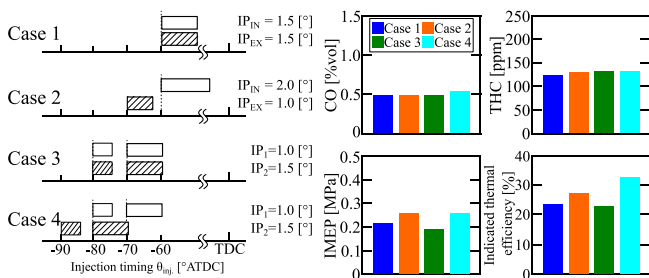


Fig. 14 Effect of various injection strategies on engine performance, emissions and indicated thermal efficiency

4. 結 言

噴霧の可視化実験と実機による機関運転試験によって、GTL を用いた低圧対向噴射、対向多段噴射の噴霧特性および燃焼状態、排気特性に対し以下の知見を得た。

1. 噴霧の可視化実験より、噴射割合、噴射間隔を設けることで Plume 領域、高密度領域に変化を生じさせ様々な混合気形成パターンを構築することができ、PIV 解析から噴霧挙動にも変化が生じることが分かった。
2. 機関運転試験より、対向噴射を適用することで燃焼完結性の悪化が抑えられる一方、噴霧同士の衝突による予混合気量増加により NO も増加する。
3. 対向噴射では噴射割合、噴射間隔を設けることで混合気形成過程の制御、燃焼状態、排気特性が変化する。噴射割合、噴射間隔を同時に設けることで IMEP の向上と同時に NO も増加する。
4. 対向多段噴射を適用し、適切な噴射割合、噴射間隔によって混合気を適切に配置することで CO, THC, NO の増加を抑えつつ IMEP を向上させることが可能である。

参考文献

- (1) 飯田訓正：内燃機関の熱効率向上とゼロエミッション, JSAE ENGINE REVIEW Vol.11, No.4 (2021)
- (2) H. Kosaka, S. Sato : Combustion Characteristic of Offset Orifice Nozzle Under Multi Pulse Ultrahigh Pressure Injection and PCCI Combustion Conditions, SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, Vol.2, No.2, pp.1002-1012 (2020)
- (3) 後藤 新一：ディーゼル新燃料 GTL (Gas to Liquid) の性能と評価, 日本エネルギー学会大会講演要旨集, pp.248-249 (2002)
- (4) 国土交通省：GTL (Gas to Liquid) : 天然ガス由来の軽油代替燃料, 新技術提供システム (NETIS), KT-190065-A (2019)
- (5) 西田恵哉：燃料噴霧の蒸気相・液相濃度分布の分離計測, 日本機械学会講演論文集 (2018)
- (6) 河原伸幸：ガソリンインジェクタのノズル近傍における噴霧形成過程の可視化, 可視化情, Vol.23, No.1 (2003)
- (7) 山川正尚：三次元 PIV による直噴ガソリン噴霧の流動計測, 中国四国講演会講演論文集, pp.233-234 (2000)
- (8) 武田好央：早期噴射による希薄予混合ディーゼル燃焼の排出物特性, 日本機械学会論文集, pp.62-599 (1996)
- (9) T.Amano : Unburned Hydrocarbons Emission Source from Engine, SAE Paper, 2001-01-3528 (2001)
- (10) 石山 拓二：ディーゼルベース PCCI 燃焼の特徴と課題, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.47, NO.6, pp.859-864 (2012)
- (11) 柴田元：ガソリン型 HCCI エンジン用燃料の研究開発, ENGINE TECHNOLOGY REVIEW Vol1, No.5 (2009)