

デュアルインジェクション (Dual MPI) システムの新噴霧コンセプトの開発*

New Spray Concept Development for Dual Injection System (Dual MPI)

柴田 仁
Hitoshi SHIBATA

岩室 誠
Makoto IWAMURO

川戸 晃一
Kouichi KAWATO

鮫島 徹
Toru SAMESHIMA

田口 靖英
Yasuhide TAGUCHI

戸田 翔大
Shota TODA

Global environment protection and energy security are urgent issues, recently in response the automotive sector has focused on the development of gasoline direct injector (GDI) systems, electrification and the use of alternative fuels. Concurrently with consideration for emerging markets and wide range of fuel properties, it is also important to further develop multi-point injection (MPI) systems for a simpler and more compact configuration.

DENSO developed Dual MPI System in 2010 which was superior for spray targeting and atomization in comparison with conventional Single MPI. This system enhances direct injection of spray into the combustion chamber to gain part of GDI spray benefit, with the homogeneity advantage of a MPI system. The purpose of this study is to further develop Dual MPI system which can manage increasing cold conditions due to electrification and global fuel evaporation characteristics in emerging markets considering;

1. Construction of New Dual MPI system concept to achieve open valve injection with less PM/PN.
2. New nozzle development to enhance air entrainment considering atomization and stability against intake flow.

Key words :

Multi-point injection, Nozzle, Spray, Air entrainment, Atomization

1. はじめに

グローバル規模での急速なモータリゼーション拡大から、地球環境保護やエネルギーセキュリティ問題への対応が急務であり、近年の自動車用パワートレイン開発では電動化や代替燃料エンジンの開発が着目されている。エネルギー密度、充電インフラ等の課題もあり、液体燃料を用いる内燃機関を存続するものと考えられており、その技術革新として筒内直接噴射システムを

基軸とした過給ダウンサイジング¹⁾ やリーン燃焼²⁾ システムなどが提案されている。

電動化や新興国市場に配慮する場合、小型でシンプルな構成で幅広い燃料性状に配慮した燃焼システムが必要であり、吸気管噴射：MPI(Multi Point Injection) システムにおいても更なる技術進化が必要である。DENSO では 2010 年に従来の Single MPI に比較して噴霧の微粒化向上と噴霧のターゲット性に優れる Dual MPI System³⁾ を開発してきた (Dual MPI System：吸

* (公社)自動車技術会の了解を得て「2016 秋季大会学術講演予稿集」「2017 春季大会学術講演予稿集」より一部加筆して転載

気弁ごとに独立したインジェクタで燃料を噴射 = 1 気筒あたり吸気 2 弁の場合に 2 本のインジェクタを搭載する MPI システム)。このシステムは MPI システムの均質混合気形成の強みを生かしつつ、筒内直噴システムの嬉しさである高い筒内直入率と吸気ポート内の燃料付着抑制を擬似的に実現する。

本研究では、電動化に伴う冷間運転の増加や新興国燃料の幅広い蒸発特性に対応できる Dual MPI System の進化に向けて、① MPI システムの混合気形成における課題の明確化、② 将来の PM/PN 排出問題に配慮をしながら吸気開弁噴射（擬似直噴化）を実現するための新たな Dual MPI System コンセプトの構築、③ 噴霧の微粒化と吸気流による偏流に配慮した噴霧パターン設計を両立する独自のノズル開発を行なった。

2. MPI システムの混合気形成における課題の明確化

2.1 MPI エンジンの排気特性

Table 1 に車両諸元を示したように今後のエンジンシステム動向を踏まえ、①ベースシステムに加えて、②過給ダウンサイジング、③電動化（Idle Start-Stop）システムについて排気特性の比較評価をおこなった。排気評価は今後の地球環境保護の観点から従来の HC, CO, NO_x, CO₂ 排出低減に加えて、PM（Particulate Matter）排出低減に着目した評価を実施した。この PM 計測に用いた分析装置は CAMBUSTION 社製

Table 1 Engine specification evaluation

	Base (N.A.)	with charging	With electricity
Vehicle Weight (kg)	1000	1200	1800
Engine Displacement (cm ³ /cylinder)	333	300	450
Number of Cylinder	3	4	4
Compression Ratio	11.0	9.8	10.5
Fuel Supply	MPI		

DMS500 で、その特徴は PM 粒子径と排出数分布を時系列で解析できることである。これまでの多くの研究者により、①壁面に付着した燃料の過濃環境における連続的な燃焼により微粒子が凝集で大径化、②空間での過濃燃焼における広域かつ継続しない燃焼により凝集を伴わない小粒径の PM として排出されることが解析されている。すなわち PM 粒子径分布から定性的な PM 発生メカニズムの考察が可能である^{4) 5)}。

Fig. 1 にベースシステムにおけるモード走行時の PM 排出粒子数分布の時間履歴を示した。なお運転モードは実走行を視野に入れて WLTC とした。ベースシステムでは最初に冷間始動・加速において比較的大粒径の PM 粒子が含まれており、従来から確認されている壁面付着に起因した PM 生成と推測される。その後の温間加速条件ごとに小粒径側の PM の排出が見られる。これは回転数が低いために蒸発や拡散時間は確保できていることから、過渡制御精度に起因もしくは筒内流

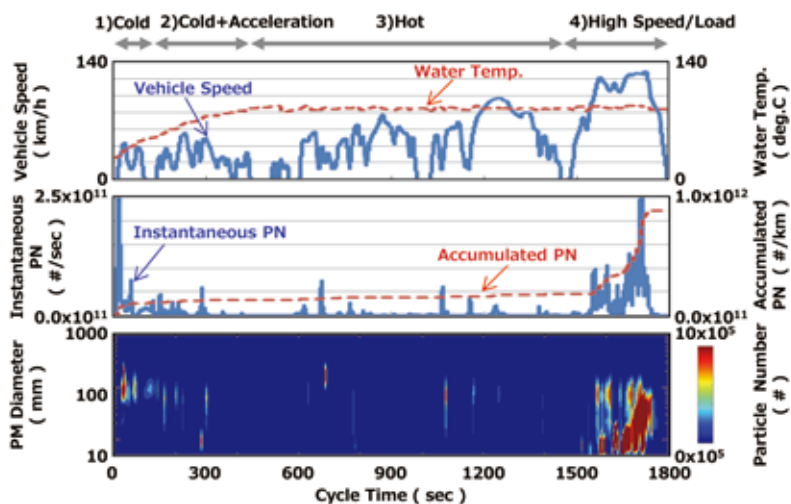


Fig. 1 PM emission behavior (Vehicle : Base)

入遅れに起因したリッチ燃焼で生成されたPM排出が想定される。最後に高速高負荷条件で比較的小径側に寄ったPM排出が見られる。ノック回避や排気系の熱負荷に配慮するリッチ増量が考えられるが、制御ロジック調査の結果からリッチ制御はしていないことがわかった。他の条件と異なる点は噴射期間が長く、噴射燃料の一部が吸気行程にかかって筒内に直入する点であり、このことが不均質起因の空間リッチ燃焼を引き起こしていることが推測される。

Fig. 2では各システムの運転領域ごとのPM排出数を示してある。ダウンサイジングシステムは幾何学的に壁面付着に不利であり、その結果、低温条件でのPM排出が多い。ただし、高速高負荷時はベースシステム（自然吸気）に比べて筒内気流が強化されるために混合気の均質性が向上してPM排出は少なくなる。さらに電動化を想定してIdle Start-Stopを追加すると、壁面温度の低下と過渡運転の増加に伴うPM排出が増加する。

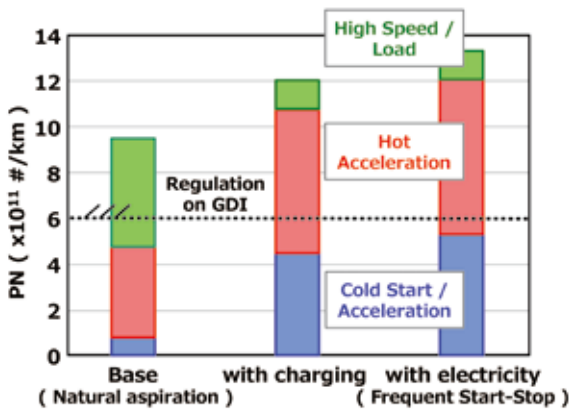


Fig. 2 PM emission characteristics of MPI engines

2.2 筒内可視化によるリッチ燃焼の確認

前記2.1での排気特性調査で推測したPM発生メカニズムを検証するため、ボアスコープによるMPIエンジン（ベースシステム）の燃焼可視化を実施した。ここでは代表条件として①冷間（吸気弁閉弁噴射）と、②温間（吸気弁開弁噴射）を選択して、クランク角度ごとの筒内可視化結果をFig. 3に比較した。

冷間（吸気弁閉弁噴射）条件では、吸気弁周辺から大量の輝炎発生を確認した。これは吸気弁傘部に付着した燃料が、吸気弁開弁と同時に液膜もしくは粗大粒

で筒内に流入して壁面付着したことが推測される。一方の温間（吸気弁開弁噴射）条件では、筒内に直入する燃料粒が吸気流により排気側に誘導されて吸気弁近傍からの強い輝炎は見られない。ただし、燃焼中は燃焼室の広範囲が薄いオレンジ色に覆われることから不均質混合気になっていることがうかがえる。

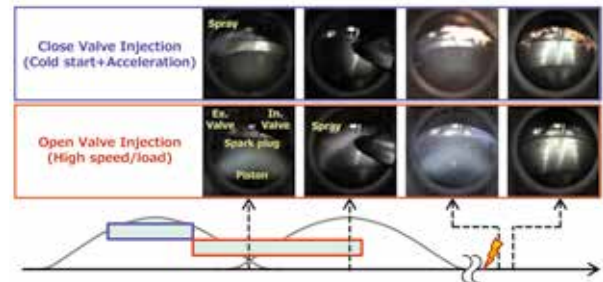


Fig. 3 Spray and combustion behavior of MPI engine

2.3 CFDによる噴霧・混合気挙動の検証

以上までのエンジン実機のPM排出特性から考察した混合気形成挙動について、CFD解析で検証した結果をFig. 4に示す。使用した解析ソフトはConvergent Science社製CONVERGEである。筒内混合気のCFD解析では噴霧モデルの精度が重要であり、特に我々が提案しているノズルは独自の微粒化機構のため、解析ソフトに用意されている噴霧モデルでは精度不足を懸念している⁶⁾。そこで本解析では噴霧特性の物理量（粒径・初速・分布・噴出方向など）を実際に測定して、初期値として噴霧モデルに与えることで噴霧の再現性を確保した。

解析条件は筒内可視化で輝炎の発生とPM排出の多かった低温の①吸気弁閉弁噴射と、不均質起因による輝炎発生が想定された高速運転条件の特徴である②吸気弁開弁噴射の比較をおこなった。

吸気弁閉弁噴射では、設計通りに噴霧を吸気ポート全体に拡散させることができていたが、吸気弁が開弁するまでに噴霧先端は吸気バルブやポート壁面まで到達して付着している。吸気弁が開弁すると液膜化した燃料は吸気流によって筒内に持ち込まれる。特に吸気初期の気流はエンジンヘッド燃焼室壁面に沿うため、吸気弁シート付近の燃焼室壁に付着する様子を確認した。この壁面付着を抑制するためには噴霧の微粒化促進、噴霧ブレイク距離の短縮、もしくは噴霧プレ

ーク距離を考慮したインジェクタ搭載位置の決定が必要である。

吸気弁開弁噴射では噴霧先端が到達する直前に吸気弁が開くタイミングでのCFD解析を実施した。噴射初期の噴霧を設計通りに吸気ポート全体に拡散させることができているが、吸気流速の増加に伴い、偏流した状態で筒内に流入することがわかった。特にSingle MPIでは顕著であり、これは吸気ポート外側に向かう噴霧は気流を横切って拡散する必要があるためである。このことから強流速場での混合気形成では、①噴霧の気流に対するロバスト性向上（貫徹力の確保）、②気流を考慮した噴霧パターンの設定、もしくは③気流を横切らない噴射位置の選定が必要であることがわかった。また筒内挙動に着目すると、吸気弁開弁噴射で直入した噴霧は吸気流によって加速するために排気側シリンダ壁に直撃することが観察された。この点については微粒化の促進、均質流入による分散で壁面付着燃料の薄膜化促進が必要である。

以上の「エンジン実機PM評価」「筒内可視化」「混合気CFD解析」から、従来のMPIシステムの開発方針である壁面付着に起因する輸送遅れを低減するための「噴霧微粒化」「低ペネトレーション化」「噴霧ターゲット最適化」に加えて、「筒内への噴霧均等流入」とその際の「強吸気流に対する噴霧の偏流抑制」が重要になることがわかった。

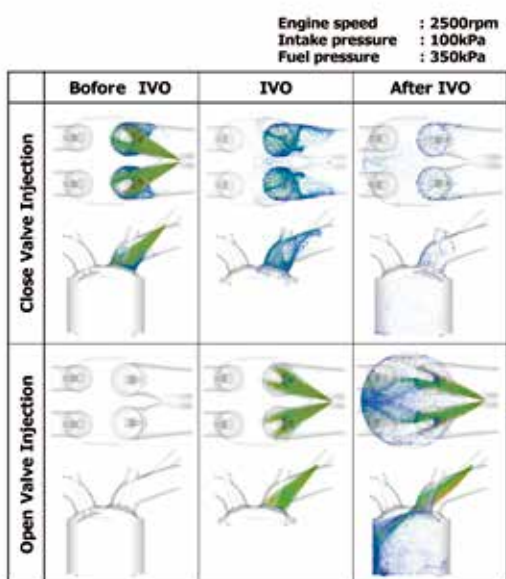


Fig. 4 Mixture formation analysis by CFD

3. MPIエンジンの新コンセプト構築

3.1 デュアルインジェクション (Dual MPI) コンセプト

DENSOは擬似的な直噴システムを目指した高機能MPIシステムとして、2010年に「デュアルインジェクション (Dual MPI) システム」を提案した。このシステムはそれぞれの吸気ポートにインジェクタを配置することで、

- ① 噴霧起点をポート内気流の中心に設定でき、噴霧が気流を横切ることを減らせるため、均等流入の設計が可能
- ② ノズルの多孔・小径化で噴霧の微粒化促進が可能
- ③ 気筒あたりの噴射率を上げる（噴射期間短縮）ことができるため、混合・蒸発期間の確保が可能である。

Dual MPIシステムの筒内混合気形成のうれしさをCFD解析結果で説明する。筒内の噴霧挙動をFig. 5に、バルブ通過時の燃料分布（片ポート分）をFig. 6に示す。ここでは吸気流に対する噴霧形成のロバスト性を確認するため、吸気弁開／閉弁噴射での比較をおこなった。なおDual MPIシステムには噴霧設計の自由度を活用して、正円形状の断面を持つ噴霧とポート断面形状に配慮した楕円形状の断面をもつ噴霧を適用した。

従来のシングル方式のMPIシステムでは吸気流強さの変化によって噴霧に偏流が生じ、排気側シリンダ壁へ集中的に到達している。Dual MPIシステム（正円形状噴霧）は水平方向の偏流は抑制されて均等流入はできており排気側シリンダへも分散した状態で到達している。ただし、ポート上面から噴射しているため垂直方向については噴霧の偏流抑制が必要であり、Dual MPIシステムに楕円形状の断面をもつ噴霧を適用することで垂直方向の偏流による壁面付着のロバスト性は向上できる。

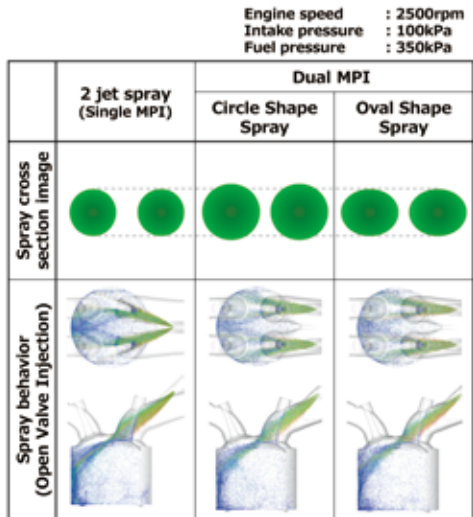


Fig. 5 Mixture formation by Dual injection

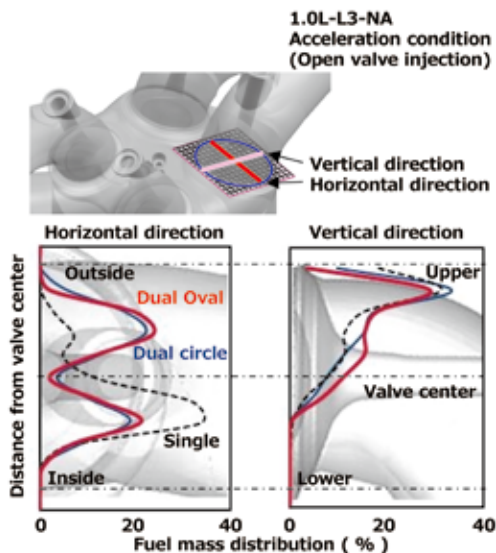


Fig. 6 Improvement of homogeneity by Dual injection

3.2 Dual MPI コンセプト進化のための噴霧要求

第一世代 Dual MPI System は微粒化/低ペネトレーション化と噴霧ターゲット最適化により、壁面付着を大幅に抑制してきた。ただし、噴霧ターゲット設定において気流影響を考慮する場合には均等流入（広角噴霧）と壁面付着抑制（狭角噴霧）のトレードオフ回避の配慮が必要となる。

均等流入と壁面付着抑制を両立する第二世代 Dual MPI System コンセプトの噴霧要求を次のように考えた^{7) 8)}。

均質混合気を形成するために広角噴霧による均等流入を実現し、背反となる壁面付着に対するロバスト性の向上では、

- ① 壁面に付着しにくい噴霧
- ② 壁面付着しても速やかに蒸発・拡散できる薄膜化の実現を考えた (Fig. 7)。

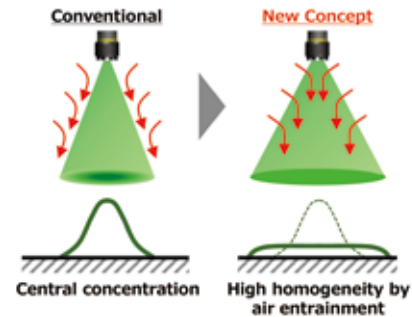


Fig. 7 New Dual MPI spray concept

4. 新コンセプト実現のための噴霧ノズル開発

ここまでにグローバル展開を目指す新たな Dual MPI システムの実現のためには、「壁面付着に対するロバスト性の高い広角噴霧」が必要であることを提案してきた。また気流に配慮した広角化において楕円断面の噴霧パターンが有効である例も示した。本項では楕円断面化に伴い噴霧配置が限定され、噴孔数が制約された条件（噴孔の大径化）下でも、微粒化と壁面付着に対するロバスト性を両立するノズル開発について説明する。

4.1 噴霧内への空気導入促進

「壁面付着しても速やかに蒸発・拡散できる薄膜化」を狙った広角噴霧において、噴孔数を変えた際の壁面衝突挙動の比較を Fig. 8 に示した。なお噴霧近傍の圧力挙動は CFD 解析によって求めたものである。

一般に微粒化促進のためには小噴孔径化を進めるが、同一流量を満たすためには噴孔数が増加（パターン C）する。そのため噴霧間隙間の減少により空気の導入ができず、噴霧全体の収縮、噴霧中心の高濃度化が進む。ただし噴霧の運動エネルギーを集中できるため気流の強い条件では噴霧の指向性について優位である。

少噴孔数（パターン A）では空気導入経路が確保できるため噴霧間干渉がなく噴霧形成ができる。壁面衝突後においても、多噴孔数仕様（パターン C）に比べ

て噴霧拡散に優れる。要因としては、壁面衝突後には噴霧内負圧発生を回避しているためと考えられる。なお今回の比較仕様では微粒化と衝突速度差は少ないことから、別要因と抽出される Spray Splash の影響は少ない（噴霧粒径大で速度も速い:Weber 数大）と考えた。

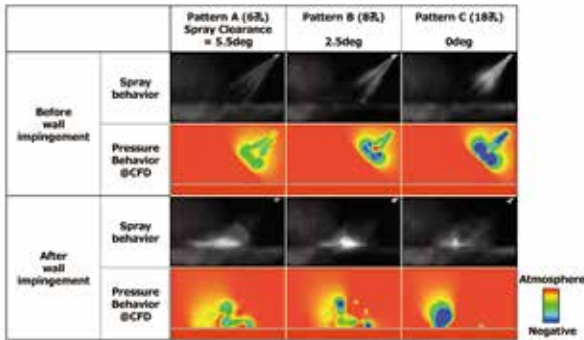


Fig. 8 Effect of air entrainment spray (Wall impingement)

4.2 微粒化技術

MPI システムの噴射速度は低く、噴霧環境としても大気圧近傍以下となるため、空気とのせん断効果による微粒化が期待できない。Fraser モデルに代表される薄膜形成による一次分裂依存（乱れや不安定性）が有効な微粒化手段と言える。そのため、DENSO の MPI インジェクタの噴霧技術⁹⁾としては、噴孔入り口での横流れとテーパ状噴孔による拡大流形成により微粒化を促進している (Fig. 9)。

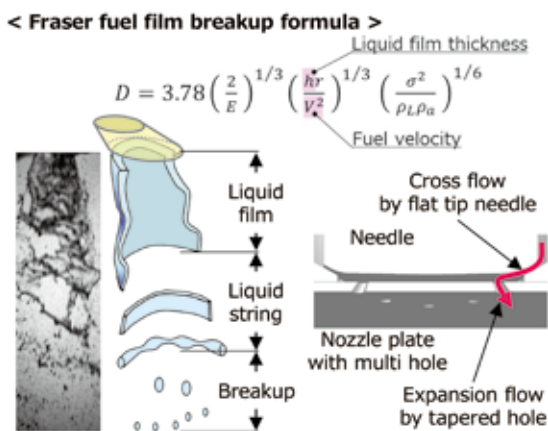


Fig. 9 DENSO MPI spray formation concept

テーパ噴孔を楕円断面の噴霧パターンに適用する際の新たなノズル設計の考え方を以下に記述する

(Fig.10). 限られた噴霧パターン、噴孔径（数）の中で一次分裂の促進による微粒化を実現するためには、「効率的な圧力エネルギーの活用（圧損低減）」と「効率的な分裂エネルギーへの変換」が必要である。

従来の「小径多孔コンセプト」では、幾何学的な噴孔配置の限界から「2重円配置」を採用していた。この場合、噴孔ピッチ径の小さな内側に配置された噴孔では、管摩擦増加や過度な横流れ形成により噴孔出口流速が低下してしまう。代償として噴孔長さを短くするために拡大流が未発達のまま噴射することになる。

新たな「高分裂コンセプト」では、空気導入経路を確保するため噴孔数減少（噴孔径拡大）による微粒化悪化の配慮として、拡大流の助走期間確保を狙った噴孔長の延長を採用した。噴孔内の管摩擦分で噴出流速は低下傾向にあるが、噴孔ピッチ径が大きな「1重円配置」化による過度な横流れの抑制により噴出流速は全体的に向上できる。

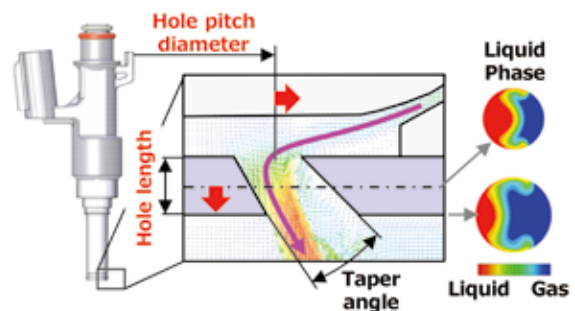


Fig. 10 New nozzle design concept

以上の新たなノズル設計コンセプトを技術検証した結果を Fig. 11 に示す。噴孔内噴流の薄膜化の効果を CFD 解析により検証した結果、最大液膜部の厚さを大幅に低減できることを確認した。実際の噴霧特性の計測においても、空気導入による噴霧収縮の回避や同一噴孔数（噴孔径）での微粒化向上を確認した。なお、現状のノズル先端寸法の制約から、空気導入経路を確保する場合は噴孔数は 10 孔程度まで選択が可能である。

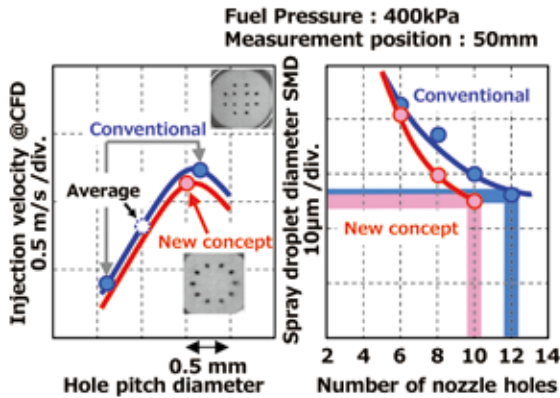


Fig. 11 Comparison of spray performance

5. 新コンセプトのエンジン実機検証

新 Dual MPI コンセプト（楕円・広角噴霧パターン＋微粒化ノズル）による混合気形成の効果を実機エンジンで検証した結果を Fig. 12 に示す。

Dual MPI 化による微粒化促進と噴霧ターゲットニングの最適化で低温時の PM 低減が可能になり、噴霧広角化の均質流入と気流に対する壁面付着ロバスト性の向上により高速・高負荷モードでの PM 粒子の排出量を大幅に低減できることを確認した。

6. むすび

地球環境に配慮した MPI エンジンのグローバル展開に貢献する新 Dual MPI コンセプトの開発を行なった。

- ① 従来開発の「噴霧微粒化」「低ペネトレーション化」「噴霧ターゲット最適化」に加えて、強吸気流の噴射環境を考慮した「噴霧の筒内均等流入」が重要。
- ② 均等流入（広角噴霧）と強吸気流に対する配慮（狭角噴霧）のトレードオフ回避が必要であり、壁面付着しても速やかに蒸発・拡散できる薄膜化に注目。
- ③ 壁面衝突時の拡散を活発にするためには噴霧内への空気導入促進（少噴孔数・大噴孔径）が有効であり、噴流速度の向上と拡大流れ助走期間を確保する新たな微粒化技術が必要。

を明らかにした。

最後に第二世代の Dual MPI システムにより、低温時 PM 低減と高速・高負荷モードでの PM 粒子の排出量を大幅に低減できることを確認した。

参考文献

- 1) Lecoite, B. and Monnier, G., "Downsizing a Gasoline Engine Using Turbocharging with Direct Injection," SAE Technical Paper 2003-01-0542 (2003)
- 2) Inoue T, Matsushita S, Nakanishi K, Okano H, "Toyota lean combustion system: the third generation system", SAE paper 93087 (1993)
- 3) 森嶋信人 他：デュアルインジェクタシステムを採用した HR 改良エンジンの開発, 2010 年度 自動車技術会秋季学術講演会, 20105723 (2010)
- 4) 植木毅, 村瀬栄二：ガソリン直噴エンジンにおける PM 生成の空間分布解析, 2014 年度 自動車技術会秋季学術講演会, 20145857 (2014)
- 5) 植木毅, 村瀬栄二：可視化によるガソリン直噴エンジンのすす生成に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.45, No.1, p.63-68 (2014)

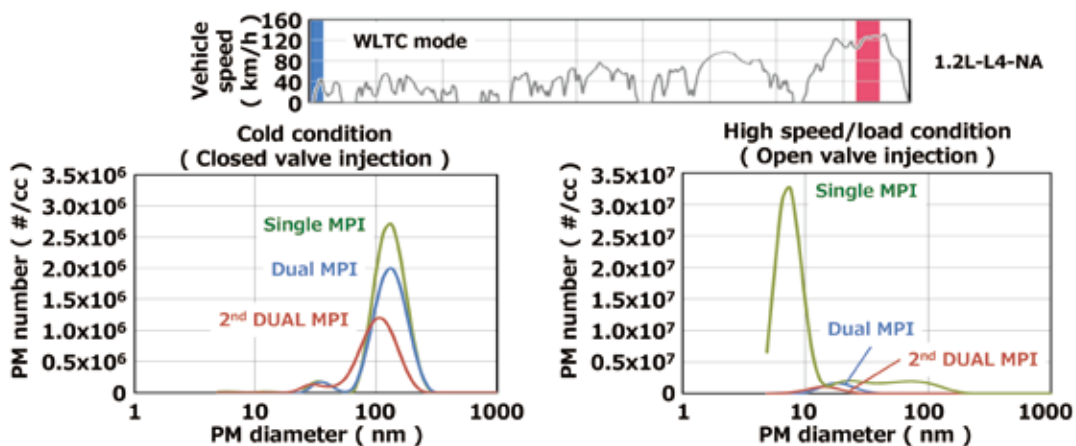


Fig. 12 Improvement of PM emission reduction

- 6) 永岡真：ポート噴射ガソリン機関における燃料挙動の三次元シミュレーション，豊田中央研究所 R&D レビュー，Vol.33, No.2, p.23-35 (1998)
- 7) 高橋幸宏 他：ポート噴射エンジンにおける燃料付着量の定量解析，自動車技術会論文集，Vol.40, No.3, p741-746 (2009)
- 8) 高橋幸宏 他：ポート噴射エンジンにおける筒内燃料付着の分布解析，自動車技術会論文集，Vol.40, No.4, p.1017-1022 (2009)
- 9) 松尾哲治 他：ガソリンエンジン用インジェクタの微粒化開発，デンソーテクニカルレビュー Vol. 11 No.1 (2006/5)

著者



柴田 仁
 しばた ひとし
 パワトレシステム開発部
 ガソリン噴射システムの開発戦略に従事



岩室 誠
 いわむろ まこと
 ガソリンシステム技術部 開発室
 低圧インジェクタ噴霧技術開発に従事



川戸 晃一
 かわと こういち
 ガソリンシステム技術部 開発室
 低圧インジェクタ噴霧技術開発に従事



鮫島 徹
 さめしま とおる
 ガソリンシステム技術部 第3技術室
 エンジン制御システムの開発に従事



田口 靖英
 たぐち やすひで
 ガソリン噴射技術1部第3技術室
 低圧インジェクタ設計業務に従事



戸田 翔大
 とだ しょうた
 (株)SOKEN 研究1部 11研究室
 ガソリンエンジンの要素技術開発に従事