

CNG 燃料の混合気分布計測による 高効率燃焼の探索*

Feasibility Study on Achieving High Thermal Efficiency by Means of CNG-Distribution Measurements

河野 正顕
Masaaki KONNO

飯塚 基正
Motomasa IIZUKA

竹村 優一
Yuichi TAKEMURA

To clarify the fuel injection parameters required to create homogeneous in-cylinder mixtures in MPI (Multi-Point Injection) CNG engines, both the CNG-jet mixture formation process and in-cylinder local equivalence ratio were investigated, using a visualization technique based on non-dispersive infrared (NDIR) and in-cylinder timed-gas-sampling measurements. It was seen that low fuel injection rates enabled the formation of a highly diffused CNG-jet in steady-state air-flow, which is assumed to be the type of air-flow in the intake-port. In addition, the indicated thermal efficiency was improved by creating homogeneous in-cylinder mixture distribution. It was seen that the highly dispersed mixture in the intake-port realized by lowering the fuel injection rate could achieve high thermal efficiency by improving both the unburned fuel loss and the degree of constant volume.

Key words :

SI Engine, Thermal Efficiency, Mixture Formation, NDIR, Timed Gas-sampling

内
燃
機
関

1. 緒言

世界規模の環境問題とエネルギー問題に対応するため、内燃機関は熱効率改善が求められている。新興国では、CNG（圧縮天然ガス）の安定した価格を背景に、ガソリンエンジンの吸気ポートを改造し、CNG用インジェクタを後付けするバイフューエル車の普及が増加している^{1) 2)}。このようなバイフューエル車は、CNG用インジェクタをガソリン用インジェクタとの干渉を避けて吸気ポートの上流に取り付ける。そのため、空気とCNGの混合器（ミキサー）を吸気ポートの上流に備えるミキサー方式³⁾と同様、過渡運転時の混合気形成不良に伴う燃焼効率の悪化が懸念される。

一方、先進国においても、CNGはCO₂削減規制の対応策として注目されている⁴⁾。一般にCNGはガソリンよりもオクタン価が高いため、最適点火時期による高効率燃焼を期待できるが、ガソリンよりもエネルギー密度が低いため、エンジン出力が低いという問題がある。CNGを筒内に直接噴射するCNG直噴式火花点火エンジンでは、圧縮行程中にCNGを噴射することで充填効率を高めることができるため、高出力・高熱効率を両立し得る⁵⁾。しかし、筒内圧を上回る圧力でCNGを噴射しなければならないため、燃料タンク内の燃料残存量が増加してしまい、車両の航続可能距離が短くなるという背反がある。

竹村ら⁶⁾は、燃料タンク内の残存燃料の点で利点を

*（一社）日本燃焼学会の了解を得て、「2013年 第51回燃焼シンポジウム講演論文集」No.E122 より一部加筆して転載

持つポート噴射 CNG エンジンにおいて、高熱効率を実現するためには、吸気ポート内に広範囲に燃料を分散させて、筒内混合気の均質性向上を図ることが重要であることを、3次元CFD解析に基づき示した。本報では新たに、CNG用インジェクタを吸気ポートの上流に備えたポート噴射 CNG エンジンについて、吸気ポート内に広範囲に燃料を分散させるための燃料噴射要件を、混合気分布の実測に基づき調査したので報告する。

2. 実験装置および条件

本報では、定容容器中に形成した定常空気流動場に噴射された CNG 噴流の分散挙動と、熱発生開始直前の CNG エンジン筒内の混合気分布を実測し、これらをエンジン熱効率と関連付けることで、CNG エンジンにおいて熱効率を高めるための燃料供給要件を調査した。

2.1 CNG 噴流による混合気分布計測

CNG 噴流による混合気分布は、供試エンジンの吸気ポートを想定した矩形断面の可視化容器を用いて計測した。可視化システムの概要を Fig. 1 に示す。CNG は、エンジン吸気相当の圧力と質量流量の定常空気流を形成した容器内に、市販のソレノイド駆動式 CNG 用インジェクタを用いて噴射した。CNG 噴流による混合気分布は、非分散赤外線吸収 (NDIR) 法に基づき、赤外線ランプ (INFLIDGE:HSH-1) によりピーク波長 $3.5\ \mu\text{m}$ の赤外線を照射し計測した。CNG 噴流による混合気の透過光強度分布 I は、光学フィルタ (透過波長帯: $3.475 \sim 3.575\ \mu\text{m}$) を介し、赤外線カメラ (Indigo:Phenix-Mid) で撮影した。併せて、CNG を噴射しない場合の入射光強度分布 I_0 を撮影し、2枚の撮影画像から、画素毎に式 (1) で定義される吸光度 A_λ を算出し、予め検定した吸光度と CNG 混合気濃度の関係を参照することで、混合気分布を算出した。

$$A_\lambda = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1)$$

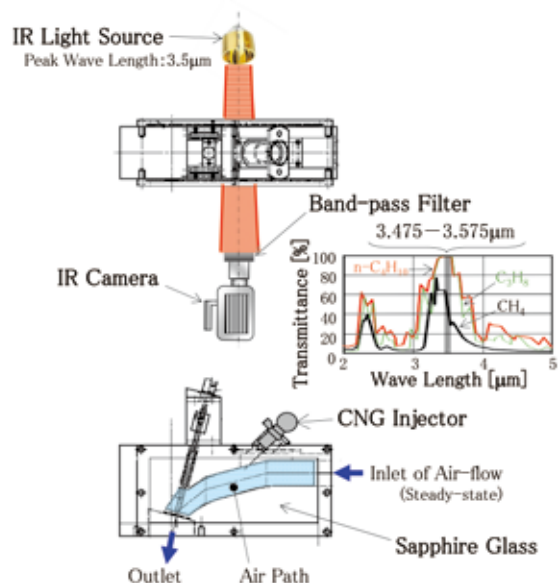


Fig. 1 Schematic of Experiment Apparatus for NDIR Measurements

以降は、吸光度と CNG 混合気濃度の関係の検定方法について述べる。濃度既知の CNG 混合気は、校正ガス生成器 (堀場製作所: GDC-03) を用いて作成し、作成した校正ガスを可視化容器の空気流路に充填することで、吸光度と CNG 混合気濃度の関係を検定した。得られた CNG 混合気濃度と吸光度の関係を Fig. 2 に示す。ここで得た検定結果から、CNG 混合気濃度と雰囲気圧力に対する吸光度のマップを作成した。作成した吸光度マップを用いて算出される CNG 混合気濃度と、校正ガス生成器を用いて作成した CNG 混合気濃度の関係を Fig. 3 に示す。両者には高い相関があり、計測精度は $\pm 3\%$ 以内であった。

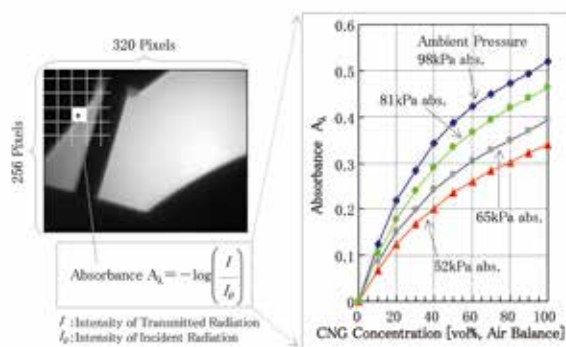


Fig. 2 Calibration Results of CNG Concentration Using NDIR Measurements

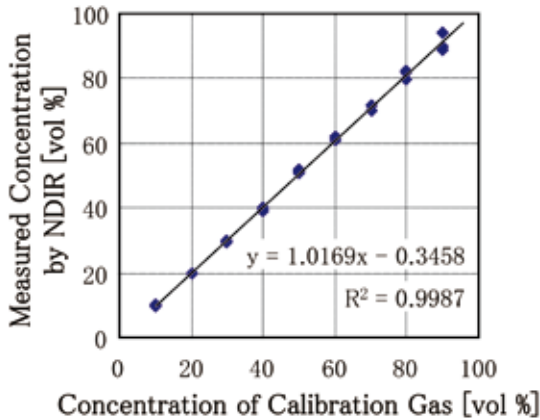


Fig.3 Validation Results of NDIR Measurements

一方、Lambert-Beer の法則より、吸光度は混合気 のモル濃度と、赤外線が通過する混合気の距離に比例 することがわかっている。そのため、容器内における CNG 噴流の拡散が不十分な時刻では、正しい混合気 濃度が得られない点に留意する必要がある。

2.2 筒内の混合気分布計測

エンジン筒内の混合気分布は、Fig. 4 に示す供試エ ンジンのシリンダヘッドの4番気筒に、サンプル管 (内 径0.4mm) を取り付け、ガスサンプリングすることで 計測した。ガスサンプリングの位置を Fig. 5 に示す。 サンプリングガスの濃度は、クランク角と同期して開 閉駆動するサンプリング弁 (内製：オリフィス内径 0.7mm) を介し、サンプル管に接続された超高速 HC 計 (堀場製作所 :MEXA-1110FRF) を用いて計測した。 サンプル管の入口はシリンダヘッドの壁面に合わせて ある。サンプリング時期は、熱発生開始直前の 45deg. BTDC から 20deg.BTDC までとした。筒内 HC 濃度 から筒内の局所当量比への換算の際、前サイクルか らの筒内残留ガスを無視、かつ CNG の平均分子式を $C_{1.17}H_{4.33}$ (平均分子量：18.3) と仮定した。

$$\phi = \frac{10.7C}{100 - C} \tag{2}$$

ここで、 ϕ は筒内の局所当量比、 C は筒内 HC 濃度 [vol% C₁] である。式 (2) は、前サイクルからの筒内残 留ガスを無視し、その分、空気が充填されたと仮定し ているため、当量比は実際よりも希薄な値として算出 される。

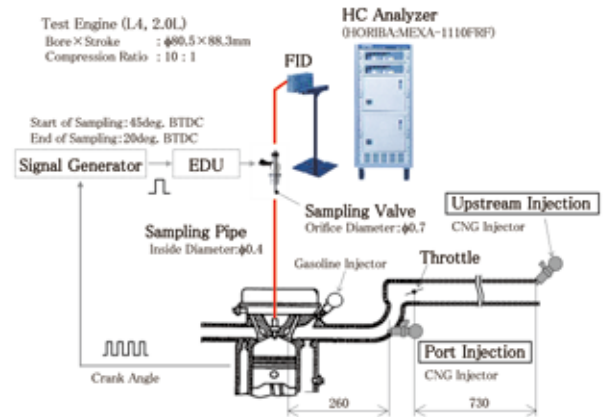


Fig.4 Schematic of Experiment Engine System with In-cylinder Timed Gas-sampling Measurements

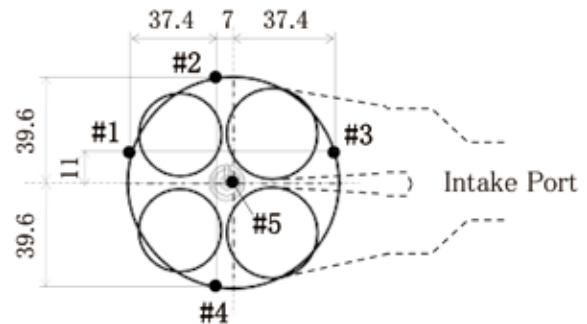


Fig.5 Locations of In-cylinder Gas-sampling Measurements (Bottom View of #4 Cylinder)

2.3 実験条件

Fig. 4 に示す供試エンジンは、吸気ポートを延長 して CNG 用インジェクタを取り付けた市販の乗用 車用火花点火エンジン (ボア 80.5mm, ストローク 88.3mm, 気筒数 4, 総排気量 1797cm³, 圧縮比 10:1) である。インジェクタの取り付け位置は、スロットル から 730mm 上流において完全均質混合を図る場合 (以 降、スロットル上流噴射、インジェクタ数 1) と、吸 気弁孔から 260mm 上流において MPI 噴射を行う場合 (以降、ポート噴射、インジェクタ数 4) の 2 箇所である。

実験条件を Table 1 に示す。エンジン運転条件 は Fig. 6 に示すモード運転頻度に基づき、代表 2 条件とした。燃料に用いた CNG は、都市ガス 13A (CH₄:89.6vol%, C₂H₆:5.6vol%, C₃H₈:3.4vol%, n-C₄H₁₀:1.4vol%, 低位発熱量：41.3MJ/m³N) であ る。混合気分布と関連付ける図示熱効率は、筒内の混

内 燃 機 関

合気分布計測と同一である4番気筒に、指圧センサ (Kistler:6053CG) を取り付けて、500 サイクルの積算平均値として計測した。

Table 1 Experiment Conditions

	Case A	Case B
Engine Speed [r/min]	1600	2000
Brake Torque [Nm]	55	85
SI Timing [deg. BTDC]	MBT	↑
End of Injection [deg. ABDC]	55	↑
Intake Pressure [kPa abs.]	60	75
Mass Flow Rate of Intake [g/s]	10.3	17.4
I/O [deg. BTDC]	1	↑
IVC [deg. ABDC]	65	↑
Equivalence Ratio (A/F)	1.0 (16.8)	
Fuel	CNG 13A	

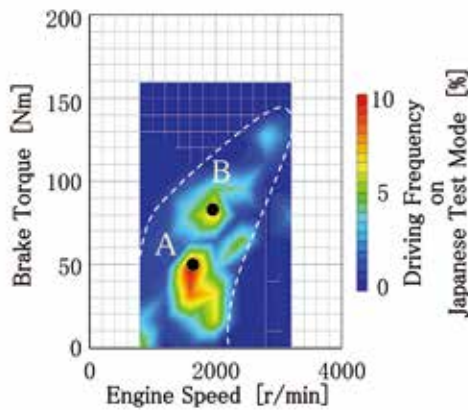


Fig.6 Experiment Conditions

3. 結果および考察

3.1 空気流動場における CNG 噴流による混合気分布

一般に CNG の予混合気は、ガソリンの予混合気よりも完全燃焼が得られやすく、また断熱火炎温度が低い⁷⁾。そのため、CNG エンジンは、未燃分損失と冷却損失低減の点で、高効率燃焼のポテンシャルを有する。しかし、混合気形成が不十分であると、不完全燃焼による未燃分損失増加や、燃焼速度の低下による等容度低下を招く恐れがある。よって、CNG エンジンで高効率燃焼を実現するためには、混合気の均質性向上が必要である。

Fig. 7 は、噴射信号の立ち上がりからの時間に対する、空気流動場に噴射された CNG 噴流による混合気分布である。視野範囲の都合上、異なる実験で得られた 2 枚の可視化画像を繋げて示してある。噴射圧

0.5MPa では、燃料噴流と壁面の衝突位置よりも下流側に過濃な領域が見られた。これは、短い噴射期間中に、時々刻々と CNG 噴流が壁面近傍に輸送されるため、燃料と空気の混合が進まないためであると考えられる。一方、噴射圧を 0.25MPa に下げ、噴射期間を長くした条件では、噴射圧 0.5MPa で壁面近傍に見られた過濃領域が空気流動により分散し、均質性が向上する様子が見られた。よって、吸気ポート内において混合気の均質性向上を図る手段のひとつに、噴射期間を最適化し、空気流動により CNG 噴流の分散を促進することが有効と考える。

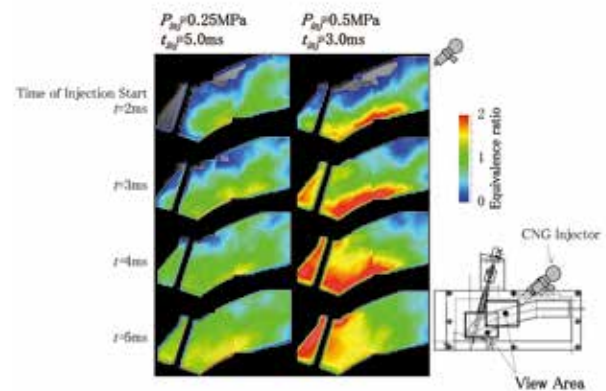


Fig.7 CNG Mixture Distribution in Steady-state Air-flow ($P_{air} = 60\text{kPa abs.}$, $G_{air} = 2.6\text{g/s}$)

3.2 筒内混合気分布と熱効率の関係

本節では、吸気ポート内混合気の過濃領域を抑制し、ポート内混合気の均質性向上を図った時の、筒内の混合気分布と図示熱効率の関係について述べる。

Fig. 8 はエンジン運転条件が Case A (1600r/min, 55Nm) の時、ポート噴射とスロットル上流噴射において、噴射圧を変更した時の図示熱効率と筒内当量比分布の関係を計測した結果である。ポート噴射では、吸気ポート内の過濃領域の抑制を図り噴射圧を低減することで、図示熱効率が向上に伴い、筒内当量比のばらつきは縮小するという計測結果が得られた。更に、スロットル上流から燃料を噴射し、吸気ポート内に燃料と空気が混合するための空間と時間を確保すると、筒内当量比のばらつきが更に小さくなり、図示熱効率が向上することがわかった。以上の計測結果をまとめて、Fig. 9 に計測した筒内当量比の最大値と最小値の

差と図示熱効率の関係をプロットした。筒内混合気の均質性が改善されるに伴い、図示熱効率が向上することがわかる。以上より、吸気ポート内の混合気の均質性向上を図ることで、筒内混合気の均質性が向上し、熱効率が改善されることが示された。

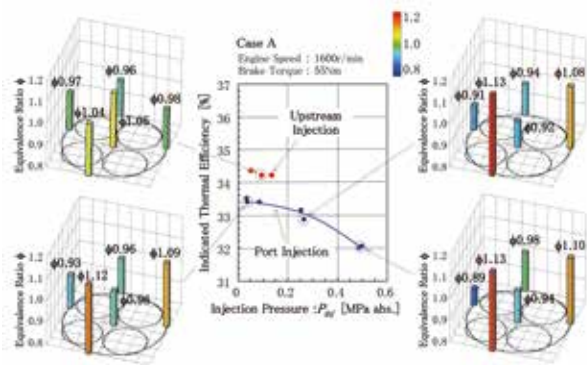


Fig.8 Relationship between In-cylinder Distribution of Local Equivalence Ratio and Thermal Efficiency (Case A)

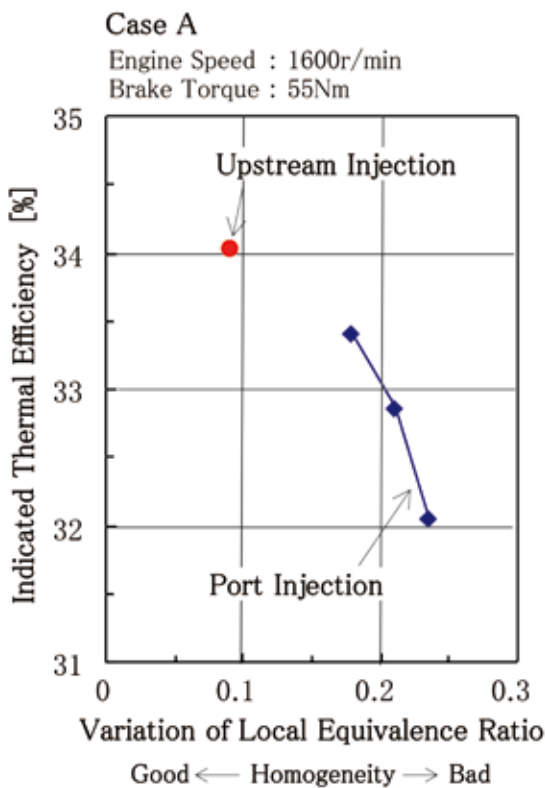


Fig.9 Relationship between Variation of Local Equivalence Ratio and Thermal Efficiency (Case A)

一方、Fig. 10 にエンジン運転条件が Case B (2000r/min, 85Nm) の時、ポート噴射とスロットル上流噴射において、噴射圧を変更した時の図示熱効率と筒内当量比分布の関係を計測した結果を示す。Case B は Case A と異なり、吸気ポート内の混合気の均質性向上を図り、噴射圧や噴射位置を変更しても、図示熱効率の改善効果は得られなかった。しかし、筒内当量比のばらつきは縮小し、筒内混合気の均質性は高まっている様に見える。筒内混合気の均質性は高まっているのにも関わらず、熱効率向上の効果を得られない要因を考察するため、Fig. 11 にポート噴射における噴射圧と筒内当量比の最大値と最小値の差の関係をプロットした結果を示す。その結果、Case A と Case B は共に、噴射圧を低減することで筒内当量比の均質性は向上しているが、Case B は元々の混合気形成が Case A よりも良いことがわかった。これは、Case B はエンジン回転速度が Case A よりも速いため、強い筒内空気流動で混合気形成を促進できるためであると考えられる。その結果、Case B は、吸気ポート内の混合気の均質性向上に伴う熱効率向上の効果代が、小さくなったと考える。

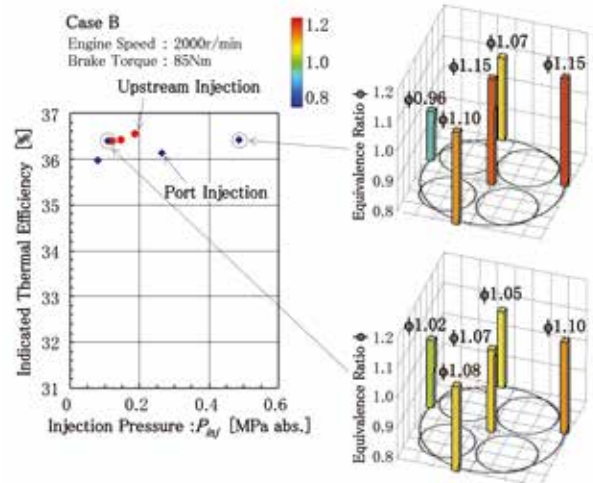


Fig.10 Relationship between In-cylinder Distribution of Local Equivalence Ratio and Thermal Efficiency (Case B)

内
燃
機
関

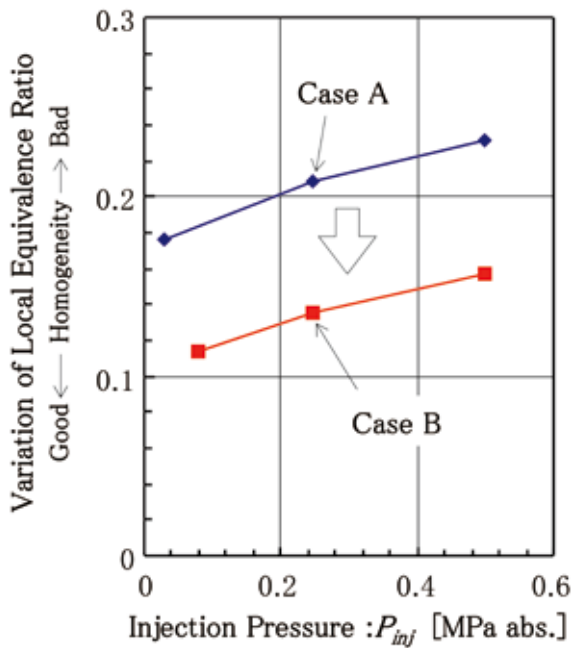


Fig.11 Comparison of Variation of Local Equivalence Ratio

3.3 筒内混合気の均質性向上に伴う熱効率向上メカニズム

最後に本節では、筒内混合気の均質性を向上した時、熱効率が向上するメカニズムを考察する。

Fig. 12 に、エンジン運転条件 Case A においてポート噴射した時の、筒内当量比の最大値と最小値の差に対する図示熱効率、燃焼速度および排気分析結果を示す。筒内混合気の均質性を高めることで排気中の CO と O₂ が低減していることから、熱効率の向上は完全燃焼に伴う未燃損失の低減によると考えられる。

また Fig. 12 より、筒内混合気の均質性を高めることで火炎伝播速度向上に伴い熱発生速度が速くなっていることがわかる。CNG はガソリンと比較してオクタン価が高く、エンジン運転領域全域において最適点火時期 (MBT) での運転が可能な燃料であることを考え併せると、熱効率の向上は等容度の向上にも起因していると考えられる。

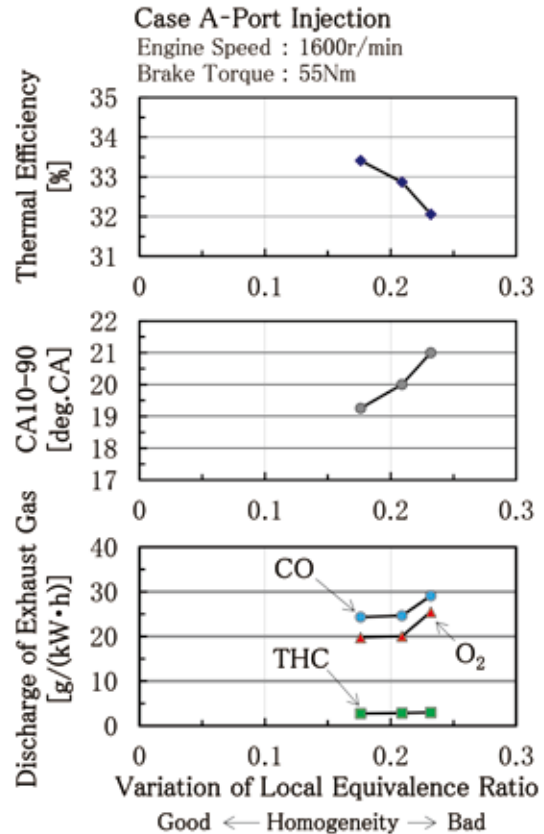


Fig.12 Relationship between Variation of Local Equivalence Ratio and Engine Performance

4. 結言

ポート噴射 CNG エンジンにおいて、混合気の均質性と熱効率の関係を、定容容器内に形成した空気流動場に噴射された CNG 噴流による混合気分布計測と、ガスサンプリングによる筒内の混合気分布計測に基づき調査した。その結果、噴射圧を低減して吸気ポート内に混合気を広く配置することで筒内混合気の均質性が向上し、熱効率が改善されることが示された。熱効率改善の要因は、完全燃焼に伴う未燃損失の低減と燃焼速度の向上によるものと考えられる。

参考文献

- 1) 田中将秀, “インド マルチスズキ CNG/LPG Bifuel 車の開発”, 日本燃焼学会誌 Vol.54 No.168, pp.76-81 (2012)
- 2) 自動車技術会ガス燃料エンジン部門委員会, 技術のロードマップ, <http://www.jsae.or.jp/~dat1/vision/page1.html>
- 3) 徳安昇・山内照夫・馬場昇, “MPI 式天然ガスエンジンの燃料供給方式の検討”, 自動車技術会論文集, Vol.30 No.1, 9930324 (1999)

- 4) Volkmar Denner, "Shaping the Future-Innovations for Efficient Mobility", Proceedings of 34th International Vienna Motor Symposium (2013)
- 5) 谷口聡・塚崎之弘・安田彰男, "直噴 CNG エンジンの研究", 自動車技術会論文集 Vol.36 No.6, pp.31-37 (2005)
- 6) 竹村優一・和田実・溝渕剛史・河野正顕, "CNG 燃料の燃焼効率向上に向けた混合気形成要件の検討", デンソーテクニカルレビュー Vol.19, pp.153-158 (2014)
- 7) 日本機械学会, 燃焼工学ハンドブック, p.12 (1995)

著者



河野 正顕

こうの まさあき

博士 (工学)
 (株) SOKEN 研究 3 部
 次期型製品の研究・開発に従事



飯塚 基正

いづか もとまさ

(株) SOKEN SP-SS 室
 次世代車両システムの研究・開発に従事



竹村 優一

たけむら ゆういち

パワートレインシステム開発部
 エンジンシステム開発を担当後、現在は
 部内の知財業務に従事