

## 5. 乗用車のCO<sub>2</sub>削減に有効なLPG液体噴射システムの開発

環境研究領域      ※水嶋 教文      佐藤 進      小川 恭弘      山本 敏朗  
株式会社ニッキ      小長井 源策

### 1. はじめに

液化石油ガス(以下 LPG)は、プロパン(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)およびブタン(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)が主成分であることから、H/C比が2.67~2.5と高いため(ガソリン:約1.85)、ライフサイクルを通してCO<sub>2</sub>排出量は石油系燃料と比べて約11%少ない。また、油田や天然ガス田の随伴ガスとしての生産量が世界生産量の約6割を占めていることから、石油代替性の高い燃料ともいえる。日本国内では自動車用を含め、家庭用、工業用、化学原料用といった用途にも利用されていることから、供給面においてもインフラが既に整備されている。したがって、LPGの乗用車への利用拡大はCO<sub>2</sub>削減に対して即効性が高くかつ効果的であるといえる。

我が国におけるLPG自動車はタクシーを中心に約30万台普及しているが、1970年代からその台数に大きな変化はない。その原因の一つに、LPG自動車の燃料供給システムが挙げられる。現在国内で主流になっているLPG自動車の燃料供給システムはミキサシステムであるため、燃費・排出ガス性能や出力性能が同排気量のガソリンエンジンと比べて劣るという欠点を有する。そこで、LPG乗用車の更なる普及拡大を狙い、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託業務「エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー使用合理化技術実用化開発/低燃費LPGエンジンシステムの研究開発」において、燃料供給の緻密な制御が可能な改造用LPG液体噴射システムを開発した<sup>①</sup>。この結果、本システム搭載車両およびエンジンの燃費・排出ガス・出力性能<sup>②</sup>をガソリン乗用車と同等以上にすることができた。本稿では、システムの特徴と上記結果について報告する。

### 2. プロジェクトの目標および評価方法

本プロジェクトを実施するにあたり、次の目標設定を行った。

- (1)燃費性能：従来型LPG乗用車比10%以上の向上
- (2)排出ガス性能：ベースガソリン乗用車(4つ星レベル)と同等以上
- (3)出力性能：ベースガソリン乗用車と同等以上

ガソリン乗用車からLPG乗用車への改造には、①既存ガソリン乗用車からの後付改造方式、②特装車と同様の少量生産方式、が挙げられる。①では改造コストの観点から燃料供給系およびエンジンの吸排気バルブ・バルブシートのみを改造、②では①での改造箇所に加えてエンジン本体系・制御系の改造が想定される。このため、(1)燃費および(2)排出ガス性能に関しては①後付改造方式を想定して、開発したLPG液体噴射システムを排気量1.997Lの最新式ガソリン乗用車(レギュラー仕様)の燃料供給系に替えて搭載することで試作車両を構築し(図1)、シャシーダイナモメー

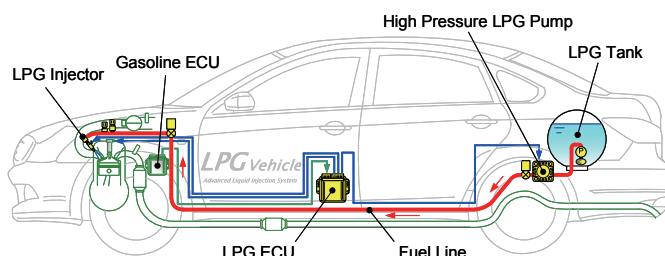


Fig. 1 Prototype vehicle with a LPG liquid fuel injection system

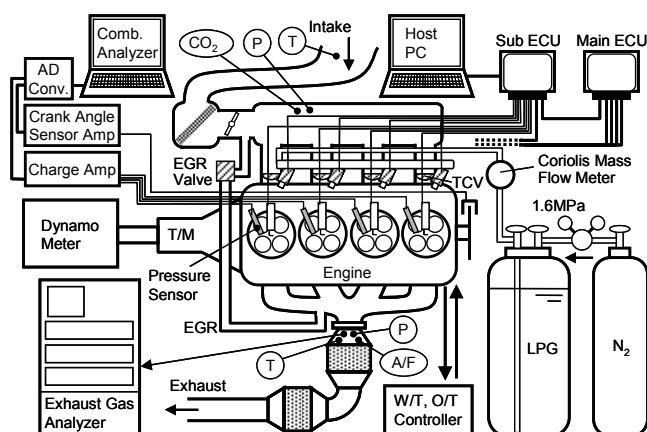


Fig. 2 Schematic of engine test bench

タを用いた各種排出ガス試験モードによる評価を行った。また、②少量生産方式を想定し、エンジン台上試験(図 2)にて燃料供給系および点火制御系を改造することで、(3)出力性能および燃費性能の評価を行った。評価に使用した LPG はプロパン含有率 25%(25P、 $C_3H_8 : C_4H_{10} = 25:75$ )とした。

### 3. LPG液体噴射システムの概要

#### 3. 1. システムに対する主な要求課題

##### (1)様々なプロパン含有率への対応

自動車用 LPG における  $C_3H_8$  および  $C_4H_{10}$  の混合比率は地域や季節により様々である。特に寒冷地では、プロパン含有率 100%の LPG(100P)が用いられる場合もある。したがって、本システムでは 0P~100P 全てのプロパン含有率の LPG に対応する必要がある。

##### (2)燃料気化の抑制

LPG は極めて沸点が低く常温常圧で気体であるため、僅かな温度上昇や圧力降下により気化してしまう。燃料気化はエンストや燃料噴射制御および再始動性の悪化を引き起こすため、気化抑制が必要となる。

##### (3)システムの省電力化

(1)および(2)の対応には燃料供給圧力の昇圧が必要となるが、システムの消費電力量増大に繋がるため、燃費悪化を引き起こす。したがって、消費電力量を抑えつつ、(1)および(2)に対応しなければならない。

#### 3. 2. LPG液体噴射システムの特徴

上述した要求課題に対応できるよう開発した LPG 液体噴射システムの概略を図 3 に示す。本システムでは、燃料タンク内の LPG をフィードポンプによりプランジャー型の高圧 LPG ポンプへ送り、約 3 MPa の高圧に昇圧することで吸気ポートに設置したインジェクタからの液体噴射を可能とした。燃料噴射制御に関しては、ベースガソリン乗用車の ECU から LPG 用

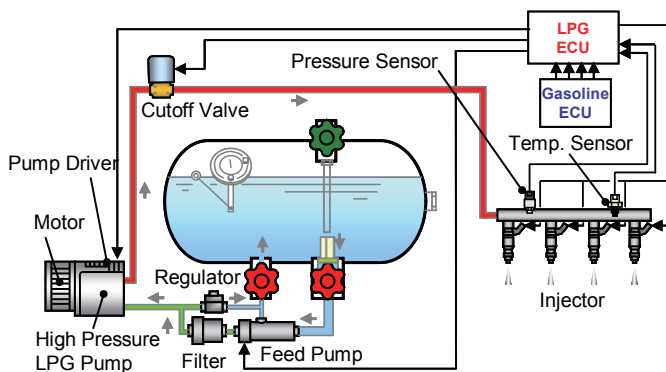


Fig. 3 Schematic of LPG liquid fuel injection system

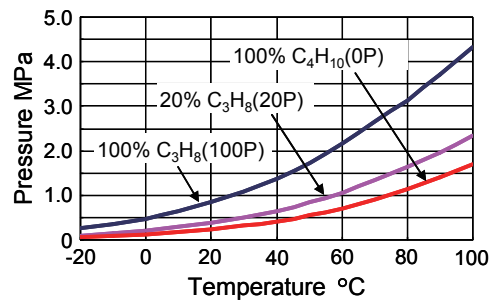


Fig. 4 Vapor pressure curve of LPG

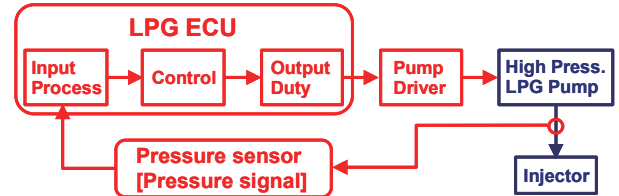


Fig. 5 Fuel injection pressure feed back system

ECU に取り込んだ噴射信号を、燃料レールに設置した圧力および温度センサからの信号に応じて LPG 用の噴射信号に変換し、インジェクタに通電する方法とした。

LPG 液体噴射システムにおいては、ガソリン MPI システムと同様のフィードポンプを用い、リターン配管により燃料を積極的に循環させ、インジェクタ内部の燃料温度上昇を抑制する方法がある。しかしながら、この方法ではエンジンで暖まったリターン燃料によって燃料タンク内の温度および圧力が上昇し、燃料の再充填が困難になることが懸念される。この現象は、プロパン含有率の高い LPG を使用しているときほど蒸気圧が高くなるため顕著に表れる。したがって、本プロジェクトでは各種プロパン含有率の LPG に対応することを目的としているため、リターンレス燃料配管システムを採用した。このシステムでは、燃料レールおよびインジェクタ付近における LPG はエンジンからの熱により温度が上昇する。このため、高圧 LPG ポンプにより燃料供給圧力を高くすることで燃料気化を抑制しなければならない。図 4 に LPG の蒸気圧線図を示す。例えば 100P 使用時においてインジェクタ近傍における LPG 温度が  $70^{\circ}C$  の場合、燃料圧力を約 2.6 MPa 以上に昇圧する必要がある。本システムではこのような高燃料圧力時においても高圧 LPG ポンプの消費電力量を抑制するため、図 5 に示す目標燃料圧力フィードバック制御を用いた。具体的には、目標圧力に対してインジェクタからの燃料噴射により降下した燃料圧力を補完するよう、LPG 用 ECU にて、高圧 LPG ポンプ駆動の Duty を高速演算し、そ

の結果を高圧LPGポンプのモータドライバへ出力し、動作させる。これにより、アイドル等の燃料噴射量が少ない条件では高圧LPGポンプは低速で動作し、加速時等の燃料噴射量が多い条件では高速で動作する。また、燃料カット時には動作を停止する。フィードポンプに対しても要求される燃料流量に応じ駆動電圧を変化させ、省電力化を図った。

### 3. 3. 燃料ポンプの省電力効果

走行中におけるポンプ電流変化の概念を図6に示す。ガソリンエンジンの場合、インジェクタからの燃料噴射量が変わっても一定負荷で駆動するのに対して、前述した制御手法を用いたLPG液体噴射システムでは、フィードポンプおよび高圧LPGポンプとも燃料噴射量に応じて負荷制御される。図7に10-15モード走行におけるLPG燃料ポンプシステムの消費電力量のガソリンシステムとの比較結果を示す。本試作車両では、フィードポンプはタンク内圧力に対して0.35MPaで、高圧LPGポンプは目標圧力3MPaで昇圧している。ベースガソリンシステムの燃料圧力は大気圧に対して0.35MPa加圧している。この結果、LPG燃料ポンプシステムは、ガソリンシステム以下の消費電力で運転できることが確認された。また、高圧LPGポンプは目標圧力が高いにもかかわらず、大幅に消費電力量を低減できた。

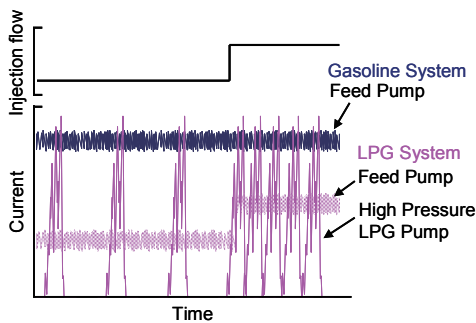


Fig. 6 Schematic diagram of fuel pump power saving

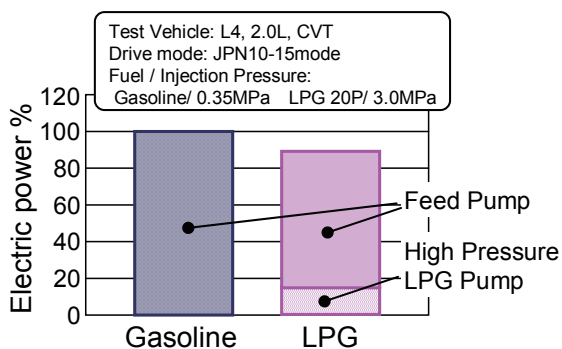


Fig. 7 Comparison of electric power of the both pump systems

## 4. 車両の環境性能

### 4. 1. 排出ガス性能

#### 4. 1. 1. 冷機始動時のHC排出特性

試作車両を用いて各種排出ガス試験モードによる排出ガス性能試験を行った。図8にJC08冷機始動モードにおいて、HC排出量をベースのガソリン乗用車と比較した結果を示す。試験は複数の車両で実施したが、いずれの車両においてもベースのガソリン乗用車に対してHC排出量が約半減した。JC08冷機始動モードにおけるHCは、主に三元触媒が活性化する以前のエンジン始動直後に排出される。図9にファーストアイドル時のテールパイプHC排出濃度(希釈)および空気過剰率を示すが、同図からも試作車両のベースガソリン乗用車に対するHC排出量の低減効果が確認できる。この要因を以下に述べる。

#### (1) 空気過剰率の影響

ガソリン乗用車の場合、冷機始動時には燃料が蒸発し難いため、空気過剰率を濃くすることで確実かつ安定した始動性となる。一方LPGは噴射後すぐに気化するため、理論空燃比近傍での運転が可能である(図9 空気過剰率参照)。これにより無駄な燃料を削減でき、未燃HCを低減することが可能となる。

#### (2) 冷却水温に対するHC排出特性の影響

図10に、エンジン台上試験においてエンジン冷却水温度を変化させた際のエンジンアウトHCを示す。

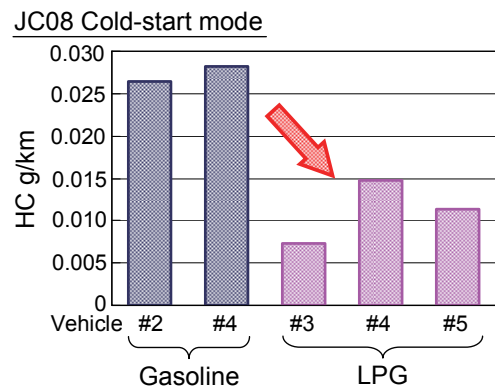


Fig. 8 Comparison of HC emission in the JC08 cold-start mode

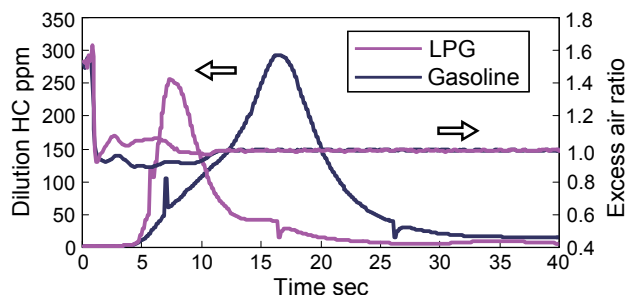


Fig. 9 Comparison of tail pipe dilution HC in the fast idle condition

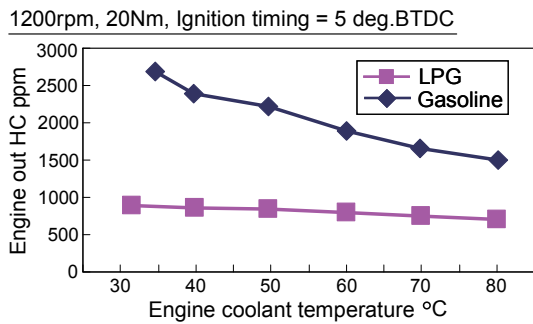


Fig. 10 Effect of coolant temperature on engine-out HC emission

LPG エンジンでは低水温時においてもすぐに燃料が気化するため、未燃 HC 排出量の低減効果が大きい。

以上の要因は、いずれも LPG の気化特性から得られる効果であり、これにより LPG 乗用車の HC 排出量がベースガソリン乗用車に対して低減できた。

#### 4. 1. 2. 排出ガス試験モードによる排出ガス値

図 11 に平成 20 年度国内排出ガス規制試験モード (0.75×10-15 mode + 0.25×JC08 (cold) mode)による各種排出ガス試験結果を示す。本試験では、同等の排気量を有するミキサ式従来型 LPG 乗用車(図中、Vehicle B LPG mixer)に関しても同様に計測した。同図より、試作車両(図中、Vehicle A LPG liquid)は、緻密な空燃比制御が可能となったことから従来型 LPG 乗用車と比較していずれの排出ガス成分とも低減でき、更に、平成 20 年度排出ガス規制値に対して、4 つ☆レベルを達成することができた。

以上より、液体噴射式 LPG 自動車は従来型 LPG 乗用車に対して十分に排出ガスを低減でき、LPG の持つ特性を引き出すことで、最新式のガソリン乗用車と同等以下の排出ガスレベルとなることが確認された。

#### 4. 2. 燃費性能およびCO<sub>2</sub>排出量

LPG は燃料中の炭素含有率が少ないため、CO<sub>2</sub> 排出原単位[g-CO<sub>2</sub>/MJ]がガソリンと比べて約 10~12%低い。したがって、ガソリンエンジンと熱効率が同等の場合、自動車からの CO<sub>2</sub> 排出量を 10~12%低減できる。図 12 に 10-15 モードおよび JC08 モード走行時における燃費および CO<sub>2</sub> 排出量を示す。ガソリンと LPG では単位体積あたりの発熱量が異なるため、ガソリン乗用車の燃費値に関しては LPG 換算を行った。この結果、液体噴射式 LPG 乗用車はベースのガソリン乗用車と同等のエネルギー効率となり、いずれの試験モードにおいても CO<sub>2</sub> 排出量を約 10%低減できた。また、

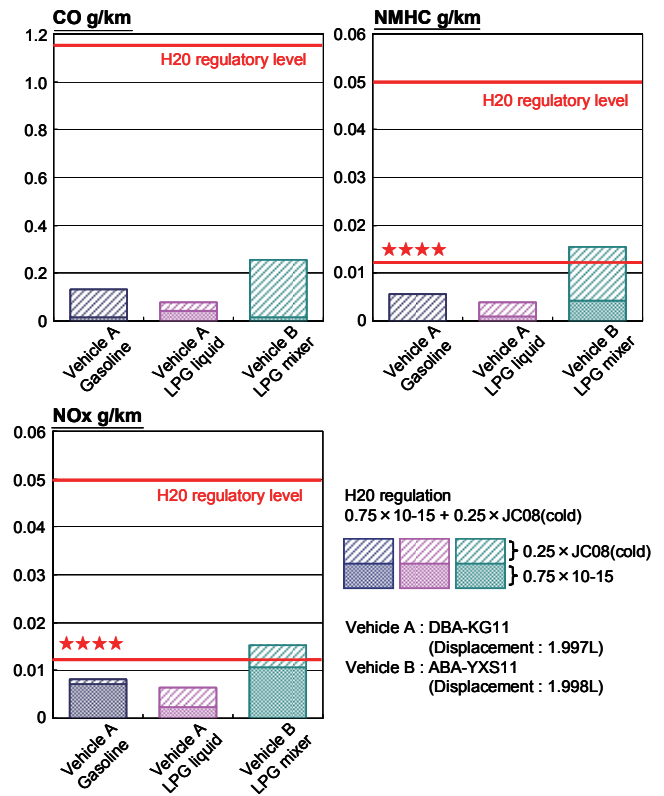


Fig. 11 Comparison of exhaust emissions in combined mode

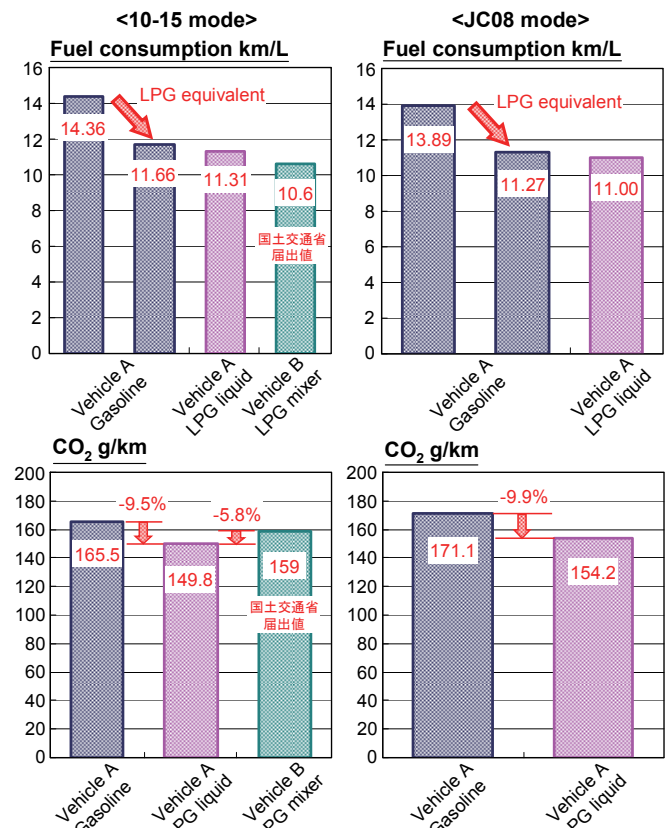


Fig. 12 Comparisons of fuel consumption and CO<sub>2</sub>

従来型 LPG 乗用車に対しては、10-15 モードで約 7% の燃費向上が得られ、CO<sub>2</sub> 排出量を約 6%低減できた。



## 5. エンジン性能の向上

### 5. 1. 出力性能の向上

#### 5. 1. 1. 高出力化に向けた課題

本システムを搭載した LPG 乗用車を普及させるためには、環境性能のみならず、動力性能の向上による車両の魅力向上が欠かせない。このためにはエンジン出力を向上させる必要がある。また、エンジン出力の向上による比出力(出力/排気量)の向上は、エンジンのダウンサイジングや軽量化による更なる環境性能の向上を狙った車両設計に繋げることも可能となる。

以下に、一般的な火花点火エンジンにおいて高出力化を図る際の要求課題を記す。

##### (1) ノッキングの抑制

火花点火エンジンにおけるノッキング(末端ガスの異常燃焼)はエンジン燃焼室内部の焼損を引き起こすため、点火時期の制約を受ける。したがって、ノッキングの抑制は最重要課題である。

##### (2) 排気温度上昇の抑制

三元触媒を備えた火花点火エンジンは、理論空燃比近傍で運転するため排気温度が高くなる。排気温度の過度な上昇は触媒の熱劣化や排気系部品の破損に至るため、排気温度上昇を抑制することは極めて重要である。

##### (3) 体積効率の向上

体積効率はエンジンの吸気能力を示す指標である。出力を向上させるためには、より多くの空気をエンジン燃焼室に導入する必要があるため、体積効率の向上が要求される。

#### 5. 1. 2. 液体噴射式 LPG エンジンの出力特性

図 13 に、開発エンジンの出力・トルク性能を示す。同図より、全ての回転数においてベースのガソリンエンジン以上のトルクを得ることができた。特に 800~2400 rpm の低回転域においてはトルクが約 15~20 Nm 向上した。また、ガソリンエンジンの最大トルクおよび出力が 170 Nm(4000 rpm)、86 kW(6000 rpm)に対して、液体噴射式 LPG エンジンでは 175 Nm(3600 rpm)、88 kW(5200 rpm)を得た。このトルクの向上要因は、主に点火時期の進角と体積効率の向上による効果と推測され、以下で検証した。

##### (1) 点火時期の進角

LPG の主成分である  $C_3H_8$ 、 $n-C_4H_{10}$ 、 $i-C_4H_{10}$  のオクタン価( RON )はそれぞれ 112、94、102 であるため、本

試験燃料は RON 100.3 となる。一方、レギュラーガソリンは RON 90.3 であるため、LPG エンジンにおいては耐ノック性が向上する。この特性を活かすことで、図 13、14 に示すように点火時期を 5~15 deg.CA 進角でき、トルクが最大となる最適な点火時期(MBT)に近づけることができたため、トルクが大幅に向上した。

WOT,  $\theta_{ig}$  = Knock limit ignition timing or MBT

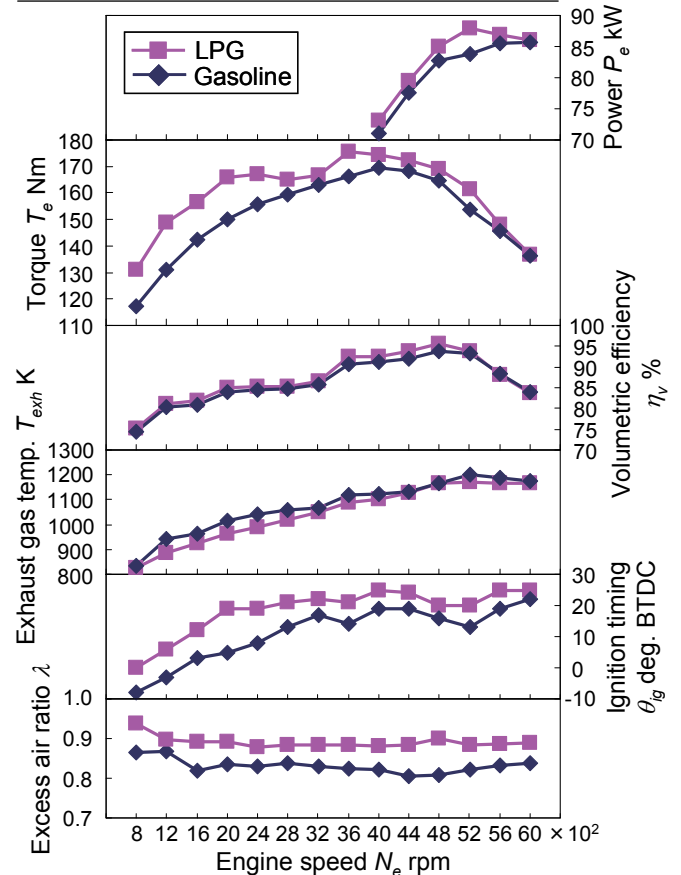


Fig. 13 Engine performance and operating parameters in WOT condition

#### 2000 rpm, WOT

$\theta_{ig}$  = Knock limit ignition timing

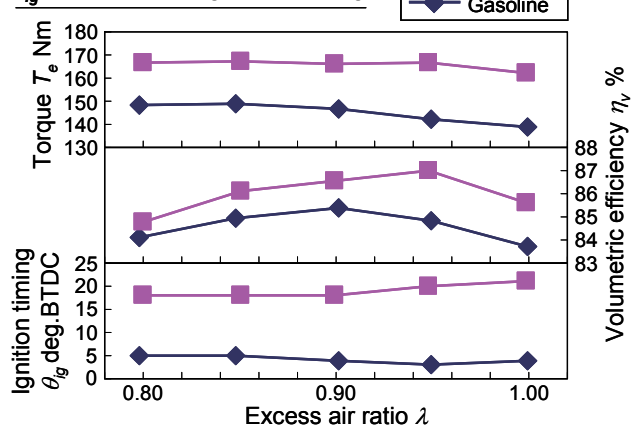


Fig. 14 Comparison of the volumetric efficiency and the knock limit ignition timing under the each excess air ratio

## (2)体積効率の向上

図 13、14 より、LPG エンジンではガソリンエンジンと比べて体積効率が 1~2%向上していることが確認できる。LPG は気化特性に優れるため、吸気ポートにおいて吸入空気を冷却し、空気密度を向上させることが可能となる。これにより体積効率が向上し、トルクの向上に寄与した。

また、LPG エンジンでは十分に点火時期を進角できたため、ガソリンエンジン以下の排気温度を保つことができた。更に、図 14 には各空気過剰率におけるトルクも示したが、LPG エンジンではガソリンエンジンよりも希薄側で十分なトルクを得られるため、燃料・空気混合比の過度なリッチ化を抑制することも可能となる。

## 5. 2. 高負荷領域の燃費低減

LPG とガソリンは、単位質量あたりの発熱量が異なるため、ここでは燃費の評価指標として正味エネルギー消費率(BSEC)を用いた。LPG エンジンでは、上述したとおり点火時期の進角および過度なリッチ化の抑制が可能となるため、図 15 に示すように特にトルクが 100 Nm を超えるような高負荷運転領域において、ガソリンエンジンと比べて BSEC を大幅に低減することができた。したがって、車両開発時にトランスミッションの変速タイミングを見直す等の対策を反映させることで、より低燃費な車両の開発に繋げることが可能となる。

## 6. ま と め

- (1)本プロジェクトにおいて開発した LPG 液体噴射システムは、全ての LPG 組成に対応できるリターンレスシステムとしながら、ガソリンシステム以下の省電力化を図ることができた。
- (2)本システムを最新式のガソリン乗用車に適用した結果、4 つ☆レベルの排出ガス性能を維持しながら、ミキサ式従来型 LPG 乗用車に対して燃費を約 7%改善し、ベースガソリン車に対しても CO<sub>2</sub> 排出量を約 10%低減することができた。
- (3)液体噴射式 LPG エンジンにおいては、LPG の耐ノック特性および気化特性を最大限に活かす事で、ベースガソリンエンジンを上回る出力・トルクおよび高負荷燃費性能を確保できた。

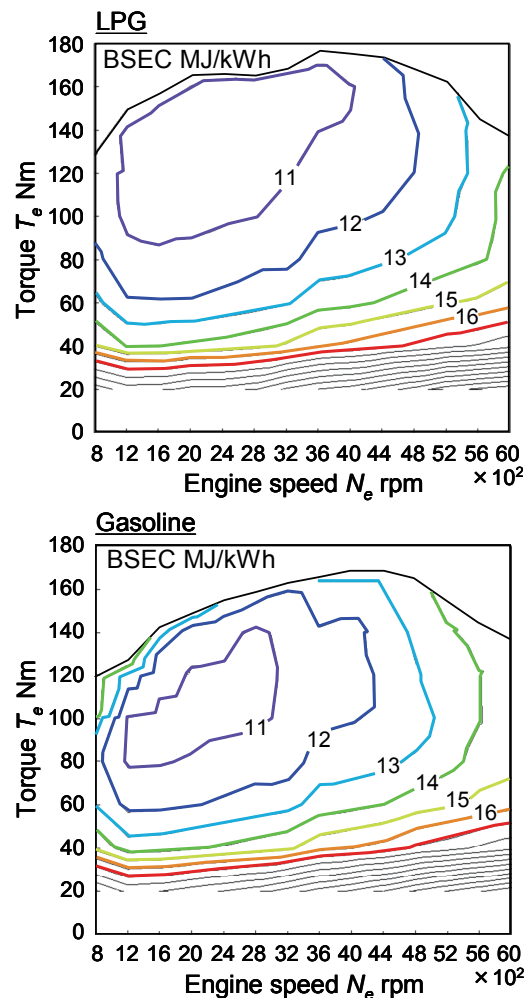


Fig. 15 BSEC (Brake Specific Energy Consumption) contour map

今後は、従来型 LPG 自動車に対して 10%以上の燃費向上を達成するため、エンジンおよび燃料供給システムの最適化等、更なる技術開発を行う予定である。

## 謝 辞

本研究は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託事業により実施した「低燃費 LPG エンジンシステムの研究開発」の成果をまとめたものである。また、実験では当研究所 川寄修男氏、大槻俊也氏にご尽力頂いたことを記し、謝意を表する。

## 参 考 文 献

- (1)山口 真也ほか，“次世代型 LPG 燃料供給システムの研究開発”，自動車技術会学術講演会前刷集，No.129-08，pp.13-16 (2008)
- (2)水嶋 教文ほか，“ガソリンエンジンベース LPG 液体噴射システムの研究開発(第 1 報)”，自動車技術会論文集，Vol.39，No.5，pp.83-88 (2008)