経済産業省資源エネルギー庁

平成 26 年石油ガス事業者構造改善支援補助事業

# 最新ディーゼルトラックへ
# LP ガス添加し燃料費節減を
# トラック事業者等にPRする事業
# 報　告　書

平成27年2月

だるまエナジー株式会社

株式会社城東自動車工場

# 最新ディーゼルトラックへ LP ガス添加し、燃料費節減をトラック事業者等に PRする事業

## 報告書　目次

はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
実施者・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7
事業内容
　(1)事業の目的
　(2)実施方法

第一章　混合燃料としての可能性と位置付け・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・11
　1. はじめに
　2. エネルギーの需給の見通し
　3. ディーゼルデュアルフューエル
　4. LP ガスの用途、生産量
　5. グローバル市場の動向
　6. グローバルのディーゼルデュアルフューエル動向のまとめ

第二章　ディーゼル LPG 混合トラックの準備・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・59
　1. 準備の視点
　2. 車輌の準備
　(1)対象車両の選定　(2)LPG 混合システムについて　(3)ECU の調整　(4)出力調整
　(5)混合比率と混合状況について　(6)排出ガス試験　(7)公式車検終了
　3. ディーゼルと LPG 混合の状況についての考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・69

第三章　ディーゼル LPG 混合トラックの PR について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・74
1. 実施方法
　(1)ホームページでの告知
　(2)中小運送事業者への意向アンケート調査
　(3)展示・試乗会

2. PR　結果から得られた効果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・88
3. 事業結果の今後の活用、結果を踏まえた今後の取り組み

## はじめに

我が国から LP ガス自動車が消える日に向かってカウントダウンが既に始まっています。一般国民の知らない間に誰も警鐘を鳴らすことも無く。阪神大震災や東日本大震災で大活躍したタクシーは災害に強い LP ガス自動車でした。

シェールガス革命の先取りで既に天然ガス、LP ガスの国際市況は下落しており、LP ガス価格は一年前の半値に暴落しています。

世界に稀にみる多大なる自然災害のリスクを抱えた我が国の国土における交通・物流の危機対応の観点及び供給過剰により経済性が更に見込まれる LP ガスを自動車燃料として活用することは大変重要です。

自然災害のリスクが比較的小さい欧米諸国ですら危機管理の一環としてモビリティーの燃料多様化はしっかりと図られています。

私どもだるまエナジー株式会社と株式会社城東自動車工場は、自動車メーカーや LP ガス業界が自ら諦めかけている LP ガス自動車の復活に向けて立ち上がりました。
注目した分野は大量に燃料を消費する商用トラック向けに「ディーゼルと LP ガスを混ぜて走行するデュアルフューエルシステム」の開発でした。燃料高に苦しむ中小トラック事業者の燃料費対策に少しでもお役に立てるのではと考えました。また、LP ガスの新規需要開拓の観点から LP ガス事業者の構造改善に資する事業として LP ガス業界団体及び経済産業省資源エネルギー庁に補助事業申請を行った所、平成26年度経産省補助事業の採択を受けることができました。

デュアルフューエルシステムは海外では既に確立された技術であり、安心して導入できるシステムとの認識で2トン積み三菱キャンターをベース車両としてシステム開発を行いました。このたび実車を完成させ広くユーザー及びメディアに対して PR することができたことは LP ガス自動車の復活を目指した第一歩と位置付けています。

まずはこの小型トラックのフィールドテストを LP ガス業界の協力を得て行い、実用化に向けた諸課題を抽出し、トラックユーザーへの販売に繋げて行きたいと考えています。また同時に大型トラックでのデュアルフューエルシステムの開発や LP ガス混合に加えて「ディーゼルと天然ガス混合システム」にもチャレンジできればと思案中です。

現在、政府が真剣に推進している「国土強靭化政策」の牽引役であるレジリエンスジャパン推進協議会とも緊密な連携を取りながら、LP ガス自動車の普及促進とその普及を阻害する規制の緩和に向けて努力する所存です。

末尾ではありますが、本プロジェクト推進にご協力頂いた検討委員会メンバーの皆様や各方面の多くの関係者の皆様に感謝申し上げます。

平成27年1月

**だるまエナジー株式会社　代表取締役　古田洋二**
**株式会社城東自動車工場　代表取締役　鈴木啓一**

## 1. 実施者

だるまエナジー株式会社及び株式会社城東自動車工場を事務局として検討委員会「LPG車におけるDME混合利用可能性調査検討会」を設置し、実車を用意し周知方法を検討した。

株式会社城東自動車工場は、代表取締役社長の鈴木啓一を本事業の責任者とし、共同申請者のだるまエナジー株式会社は、プロジェクト・マネージャー古田智恵子を本事業の責任者として石油ガス販売事業者の構造改善に資する「最新ディーゼルトラックへLPガス添加し燃料費節減をトラック事業者等にPRする事業」を共同で実施した。

検討委員会　委員

委員長：　金谷年展

東京工業大学 ソリューション研究機構 特任教授
慶應義塾大学　SFC研究所上席所員(visit)
内閣府「行政刷新会議 規制・制度改革に関する分科会エネルギーWG」委員
国土強靭化担当大臣私的諮問委員会『ナショナル・レジリエンス懇談会』委員
一般社団法人レジリエンスジャパン推進協議会　事務局長

副委員長：牧野重雄

日本大学芸術学部卒業。日刊自動車新聞社に約12年間勤務ののち、三栄書房編集顧問、自動車雑誌(スクープ誌)『ニューモデルマガジンX』(同)編集長を経て、フリーランスのジャーナリストとなった。2006年(平成18年)より「モーターファン・イラストレイテッド」の技術アドバイザーとして実質的な取りまとめを行っている。

委員：

（ユーザー）

平野雅生 （平野運送株式会社　代表取締役社長）
戸塚隆之 （ビューテックローリー株式会社　営業推進室長）

（業界団体）

遠藤啓二 （東京都トラック協会　環境部長）

オブザーバー：大野達廣 （株式会社東日本宇佐美　代表取締役専務）

## 2. 事業内容

（1）概　要

株式会社城東自動車工場およびだるまエナジー株式会社は、事業推進にあたり系列を超えた波及効果を目指し、「最新ディーゼルトラックへLPガス添加し燃料費節減をトラック事業者等にPRする事業」を目的として、トラック事業者（LPガス配送業を含む）に「燃料費削減」というユーザーの要望レベルに直接PRを通じ体験させ、なおかつ過去の技術ではなく「現在の最新技術」を実証しPRする事業を行った。これにより新たなLPガス利用を拡大しスタンド事業者の構造改善に資するものとし、石油ガス販売事業者の構造改善を行った。

（2）具体的内容

株式会社城東自動車工場およびだるまエナジー株式会社は、最新ディーゼルエンジンに、LPガスを混合供給するシステムを装備したトラックを用意し、技術可能性と経済効果をトラック事業者・LPガス事業者にPRし、新たなLPガス需要を創出する。

この事業を行うことにより、ディーゼル混合LPガスの経済性をPRし、新たな需要開拓を推進し、トラック事業者への周知PRと普及を図り、LPガス利用の新規需要の創出と技術普及を目指した。

（3）その他

①共同事業体制

本申請は、LPガス関係企業としてのだるまエナジーと、商用車開発とガスエネルギー自動車に長け尚且つPRに最も必要なシャシダイナモを保有する城東自動車工場との共同申請とした。

②検討会設置

本申請では、公正かつPRに最適な方法として検討会を設置し推進した。

委員は、学識経験者・トラックユーザー・技術協力者などを委員とした。

検討会は期間中2～3回程度の開催を予定しており、ここではプロジェクトの進捗状況を報告すると共に検討会メンバーからトラックユーザーへの宣伝・売り込みを想定して効果的なアドバイスをいただくことを主眼に置き、効果を上げた。

但し、このプロジェクトの方向性に関する方針決定は推進責任者の城東自動車工場とだるまエナジーが行った。

## (2)実施方法

計画推進者株式会社城東自動車工場およびだるまエナジー株式会社は、最新ディーゼルエンジンに、LPガスを混合供給するシステムを装備したトラックを用意し、技術可能性と経済効果をトラック事業者・LP ガス事業者に PR し新たな LP ガス需要を創出することを目的とした「最新ディーゼルトラックへ LP ガス添加し燃料費節減をトラック事業者等にPRする事業」を推進した。

この事業を推進するに当たり、以下の周知活動及び準備活動を行った。

①PR用検証自動車の準備(2～4トン積ディーゼルトラックベース)
②実際に検証用トラックでシャシダイナモでの PR 用データ収集(燃費・排ガス性能など)
③技術対応力のPR(最新技術＋重量車トラック対応)資料制作
④ユーザーへのヒアリング(経済性・運行条件などのヒアリング)
⑤検討会での検討

これらを取りまとめ、
①トラック業界向けの試乗会・説明会・イベントを通じて経済性や実用性の PR
②LP ガス業界向けに技術取組・需要開拓の PR
③この車両や技術に関してユーザーの受け取り方や、反応を取りまとめ PR

これらの周知活動を行い、「最新ディーゼルトラックへ LP ガス添加し燃料費節減をトラック事業者等にPRする事業」を、東京地区と東海地区で実施した。この事業を行うことにより、ディーゼル混合 LP ガスの経済性を PR し、新たな需要開拓を推進し、トラック事業者への周知 PR と普及を図り LP ガス利用の新規需要の創出と技術普及を目指すものとした。又、これにより新たな LP ガス利用を拡大しスタンド事業者の構造改善に資するものとし、石油ガス販売事業者の構造改善を目指すものとした。

(3)最終結果

1)PR 用車両は、LPG 混合率が最大50%程度混合して稼働できることとなった。

2)最新ディーゼル車に LP ガス混合は十分な実用性があることが判明した。

3)ユーザーへのヒアリングやアンケートでは、燃料費用削減に大きな関心があり、2 種燃料を使うことで経費が削減できるなら、導入意欲があることが分かった。

4)展示・試乗会では、実際に運転し体感してもらうことで、理解を得た。
①LPG 混合時の出力特性
②ディーゼルだけでの運転との対比

# 第一章　混合燃料としての可能性と位置付け

ここでは、実際にディーゼル機関にLPGを混合する場合の基本的な考え方とグローバルでの評価について検討を行った。

## 1. はじめに

現在の物流の主流はトラックで、日本の経済活動の物流面で主役を担っていることは誰もが認めるところである。日本の国土は南北に細長く形成されているため、大型トラックの場合には一日に1000km 以上も走行することも珍しくはない。

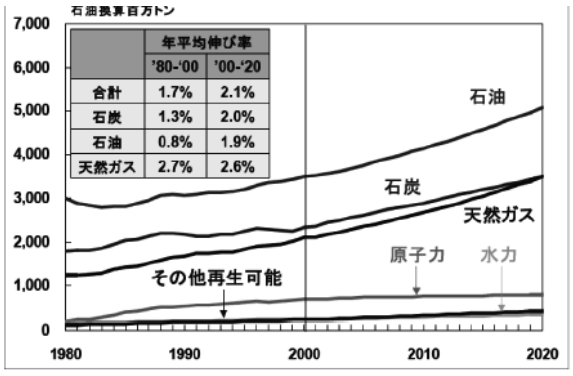
そのような使用環境においては、低公害車のCNG自動車は一充填走行距離が短く，日本全国にCNGスタンドの整備が十分になされていないことから，都市間走行の大型トラックには燃料供給を考えながら運用しなくてはならず、また、同じく低公害車のハイブリッド自動車は、低速走行やアイドリングの場合や頻繁な停止時の制動エネルギーの回生によって燃費が改善され，排出ガスの低減に効果が発揮できるが、高速道路を連続走行する時にはこれらの燃費および排出ガスの低減効果が十分に得られない。そのため、都市間の連続高速走行が多い大型トラックにハイブリッド技術を採用しても、本来の機能が発揮できない。

また、電気自動車では一回のバッテリー充電での走行距離が短いことに加え、トラックではバッテリーの重量増による貨物積載量の削減を招くため，今後ともディーゼル大型トラックが電気自動車に変わる可能性はバッテリーの大幅な進歩なくして実現は困難である。このように、現在の乗用車・小型トラックで既に実用化され、若しくは実用化されようとしている低公害車技術は、都市間走行の大型トラックに適するにはまだ暫くの時間がかかる。そのため、トラックの動力源には今後ともディーゼルエンジンに頼らざるを得ないことは周知の事実として認識されている。

こうしたことを踏まえると、物流の中心にあるトラックは、今後もディーゼルエンジンが主流として使われることがうかがえるが、燃料費の高騰により軽油価格は上昇を続け、現在は投機的な市場動向により、燃料価格は低下し一息ついているが、石油の需要動向にあっては、今後も再び価格上昇に転じることが想定され、この場合には再び、物流の中心にある運輸運送事業者は、燃料価格高騰に悩まされることになる。

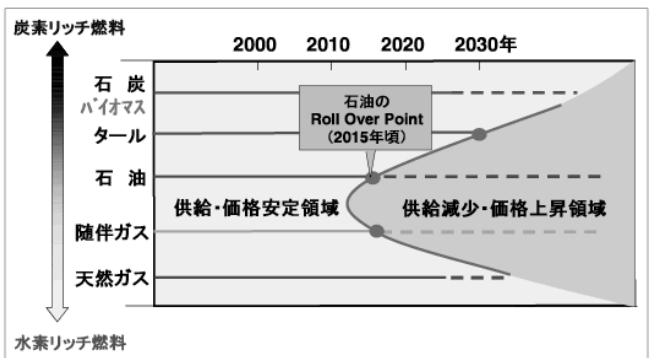
## 2. エネルギーの需給の見通し

現在、国内のエネルギーは石油に大きく依存しており、今後世界的にエネルギー需要は増加し供給が不足していく。石油エネルギーに代わる代替エネルギーの普及は必要不可欠である。世界の燃料需要の動向を図1、燃料の需給逆転曲線を図2に示す。




文献[1]より

（出所：（財）日本エネルギー経済研究所／科学技術政策研究所）




（出所：三菱重工技報、電気新聞／科学技術政策研究所）

図1によると、石炭、石油、天然ガスとも 2000 年～2020 年にかけて 2%程度で増加すると見込まれており、図2によると、2015 年頃から石油の需要が供給を上回ると見込まれている。

これより、石油をはじめエネルギー代替技術が必要不可欠であり、中長期的にエネルギーの多様化が求められる。特に石油の供給不足が最も深刻な問題であるため、天然ガス、バイオマス、石炭などを原料として生成できる燃料がより望ましい。科学技術政策研究所の報告書では、現在石油代替の有望な合成液体燃料として 5 種類、DME（ジメチルエーテル）、GTL（合成灯軽油）、メタノール、バイオエタノール、BDF（バイオディーゼル）があげられている。

しかしながら、燃料の使用を変えることによりガスエンジン化するには、ディーゼルエンジンを火花点火のガソリンエンジンに改造するような、大きな改造を伴い現実的にはコストや耐久性の面から問題があり、軽油代替に使用するGTL、BDF も燃料としてはBDF が少量使われているだけで、これらは運輸運送事業者が望む「燃料費削減」には寄与することが困難である。

### 3. ディーゼルデュアルフューエル

一方、近年の中国やインドが急激な経済発展や石油ピークの時代に突入したことから、近い将来、我が国では石油燃料が不足する事態が否定できない状況になりつつある。その場合の軽油不足から生じるトラック貨物輸送の支障による経済的な混乱を回避できるようにするため、経済産業省は 2006 年 5 月に「新・国家エネルギー戦略」 を発表した。この戦略では「ほぼ 100%を石油系燃料に依存する運輸部門はエネルギー需給構造の中で最も脆弱性が高いために石油依存からの脱却を図るべき」とし，「今後、2030 年までに、運輸部門の石油依存度を 80%程度とすることを目指す」とする方針としている。大型トラックについても早急に脱石油化を図る必要があることは 当然である。したがって、現在の都市間走行の大型トラックに求められている技術的に改善すべき重要な課題は、「CO2削減」と「脱石油」である。この課題を解決するためには、将来型の大型トラック用として「CO2削減」と「脱石油」を同時に満足できる新しいエンジンを早急に開発する必要があることは明らかである。

欧米の天然ガスが容易に入手できる地域では、安価な天然ガスを併用して経済的にトラックを運行させるため、軽油着火型の天然ガスエンジンであるDDFエンジンを搭載したトラックが一般に使われている例があるが、我が国ではDDFエンジンを搭載したトラックが市販された例は見当たらない。

日本では日本エコス㈱がカナダの Alternative Fuel Systems Inc.と共同でいすゞフォワード（積載量4トンクラス）のディーゼルエンジンをベースに吸気ポート噴射式DDFエンジンを開発し、この吸気ポート噴射式DDFエンジンを搭載したいすゞフォワード のDDFトラックの試験走行を実施した例がある。これは各シリンダーの吸気弁の開弁中に吸気ポートからシリンダーに向かって天然ガスを噴射する方式のエンジンである。

一方、日本では過去に LP ガスを利用してディーゼルエンジンに混合燃焼する方式も研究され、これは、平成2年に環境省の事業として東京都営バスで実証されたが、燃料費削減の目的はなく黒煙・PM の削減を目的としたものであった。

写真：環境省が実験した LPG 併用ディーゼルバス

LP ガスは近年、シェールガスの普及から湿性ガスとして採掘され、プロパン・ブタン等の LP ガスとして流通し始めており、LP ガスの日本語訳である「液化石油ガス」という言葉は、正確な意味をなしていない。

出典：日本 LP ガス協会「2014 年 12 月人・未来・環境をつなぐ「やさしいエネルギーLP ガス」

LP ガスはクリーンな燃料であり、多様な用途で用いることが可能であり、多くの燃料から生成可能等の特徴があり、以下に LP ガスの特徴（長所と短所）を示す。

（長所）

・天然ガス随伴、石油随伴、石油精製など様々な原料から精製が可能。
・常温では無色の気体である。
・低圧で液化するため、保存輸送は天然ガスより容易である。
・火花点火機関（ディーゼル燃料など）として利用可能。
・性質が低圧（2 気圧）で液化するため、可搬性があり取扱が容易である。
・環境（オゾン層など）と人体に対する危険性は非常に少ない。
・無煙燃焼である。

（短所）

・潤滑性が良くない。
・発熱量が軽油の約70%。

次に、現在主に用いられている主要エネルギーと LP ガスのプロパンとの特性比較を表1に示す。LPG（プロパン）の沸点が-42℃と軽油（180～370℃）よりも低く、自着火温度（発火点）は 504℃で軽油（250℃）よりも高い。これは現在ディーゼル燃料として主に用いられている軽油より特性は劣るものの扱いやすい燃料であることになる。

表1. LP ガスと主要エネルギーとの比較

| | 単位 | DME | 原油 | 天然ガス | 軽油 | プロパン | メタノール |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 低発熱量 | kcal/kg | 6,880 | 9,850 | 12,180 | 10,150 | 11,040 | 4,750 |
| | kcal/L | 4,600 | 8,370 | 5,180 | 8,530 | 5,450 | 3,770 |
| | kcal/$Nm^3$ | 14,200 | - | 8,700 | - | 21,800 | - |
| 液比重 | kg/L | 0.668 | 0.85～ | 0.425 | 0.840 | 0.490 | 0.796 |
| セタン価 | | 55～60 | - | - | 38～53 | 5 | 3 |
| 沸点 | ℃ | -25 | - | -162 | 180～360 | -42 | 65 |
| 引火点 | ℃ | - | ～35 | - | 50～70 | - | 11 |
| 発火点 | ℃ | 235 | - | 537 | 約 250 | 504 | 464 |
| 空燃費 | kg/kg | 9.0 | - | 16.0 | 14.7 | 15.6 | 6.5 |
| 爆発限界 | vol % | 3.4～18 | 1～16 | 5～15 | 0.5～7.5 | 2.1～9.4 | 6.7～36 |

（出所：DME 自動車構造取扱基準より作成）

次に、先に述べた 5 種類の合成液体燃料（DME、GTL、メタノール、バイオエタノール、BDF）について比較する。長所と短所を表2に示す。DME は他の合成液体燃料と比べ、環境特性が良い、石油価格に連動の可能性が小さい、輸送・貯蔵等の操作性が良いなどの特徴があり、優位性はあると考える。DME の製造技術には間接合成法と直接合成法の2つがあり、間接合成法は実用化段階にあり、直接合成法は JFE ホールディングス㈱が中心となり研究開発段階である。現在、日本では噴射剤等として 1 万トン／年使用されており、世界では 15 万トン程度使用されている。

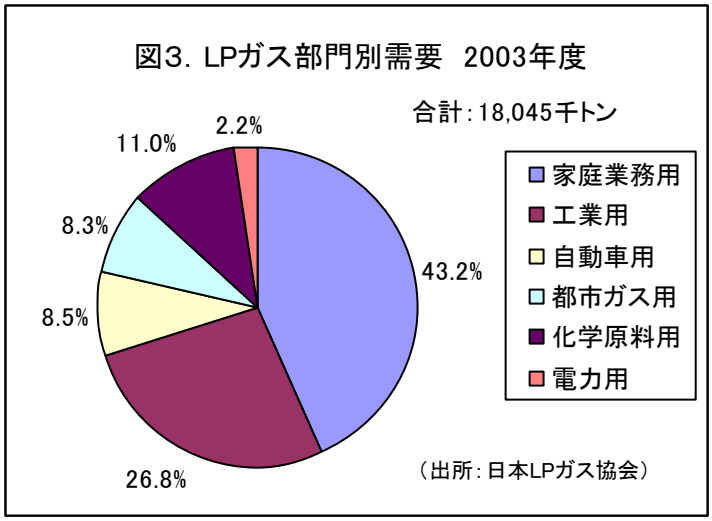
表２．合成液体燃料の概要と比較

| 合成液体燃料 | 長所 | 短所 | 操作性 |
|---|---|---|---|
| ジメチルエーテル（DME） | 着火・燃焼特性が良い<br>環境特性が良い | 利用機器の改造が必要<br>低潤滑性 | 加圧液化し輸送・貯蔵 |
| 合成灯軽油（GTL 燃料） | 着火・燃焼特性が良い<br>既存インフラが使用可能 | 石油価格に連動の可能性有り<br>低潤滑性 | 灯油・軽油と同等の扱い |
| メタノール | 常温・常圧で液体 | 毒性、低カロリー | 灯油・軽油と同等の扱い |
| バイオエタノール | カーボンニュートラル<br>再生可能エネルギー<br>環境特性が良い | 食料との競合<br>吸水性、腐食、劣化<br>低カロリー | 防水対策が必要 |
| バイオディーゼル（BDF） | カーボンニュートラル<br>再生可能エネルギー<br>既存インフラが使用可能 | 食料との競合<br>成分の不安定化<br>低カロリー | 従来ディーゼル燃料と同等の扱い |

（出所：科学技術政策研究所）

## 4. LP ガスの用途、生産量

LP ガスの部門別需要の割合を図3に示す。




## 5. グローバル市場の動向

ここでは、世界各国のディーゼルデュアルフューエルの動向を調べ、技術的見地の可能性について検証した。

### *1）ベルギーで開催された「Clean Fuels Consulting」での見解*

平成 22 年 3 月 30～31 日にベルギーで作成された「Clean Fuels Consulting」は、ディーゼルとガス体燃料のデュアル・フューエル車の課題、機会、市場を構築する戦略をテーマにしたワークショップの報告書である。システムデザイナーとサプライヤー、OEM 社、欧州委員会、国の政府代表、排出量の専門家、等の 75 社が集まり、ディーゼル・ガス体エンジンの技術、経済性、マーケティングと規制に関して議論した。主な目的は、これらのエンジンシステムを世界に普及させるための課題と機会を明らかにさせ、OEM としても後改造としても規制の枠組みの開発を促進し、デュアルフューエルエンジンシステムの認証システムの構築である。

ワークショップの結論は以下のようにまとまった：
1.デュアル・フューエルと HPDI(high pressure direct injection)の技術は、初期費用が高いことと新たに教育(新技術、ガス、充填方法、等)が必要なのが弱点である。

2.デュアル・フューエルと HPDI の技術の経済効果が一番大きい市場が大量の燃料を消費する大型車である。

3.デュアル・フューエルと HPDI の技術の普及は、以下の要因にかかっている。
a) 車両の資本コストが下がる
b) 車両とエンジンの品質改善
c) 充填所の普及(充填所の併設等)

4.お客様から得る当製品のディーゼルシステムより低い評価は、主に以下の不安に基づいている
a) エンジンの耐久性、b)メンテコスト、c)新エンジンシステムの運用面、d)慣れていない充填作業

5.排出の削減量は異なるが、OEM が参入することによって、改善されるが、システムサプライヤーが排出性能を立証する必要がある。

6.OEM と後改造に関する国内の認証システムと国家資格は、国連の認定規制を元に作る事を進める。

7.ディーゼルとガス体燃料のエンジンシステムを主流にするには、国連が加盟国に認定規制(UN-ECE 基準・協定規則)のためのサポートをするべき。

8.今後のデュアル・フューエル市場は、OEM でも後改造でも、規制アプローチに依存する。

### *2)IJMER(International Journal of Modern Engineering Research)に提出されたインドの研究*

**デュアルフューエルシステムに LPG の仕様を追加した研究**

報告者：A. Kumaraswamy, (Mechatronics Engineering Dept., Bharath University, India)
Dr. B. Durga Prasad (Mechanical Engineering Dept, JNTU College of Engineering, India)

**要約書**

この試験では、電子制御を使用し、ディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムとディーゼル・エンジン・システムの特徴を比べた。試験の結果としては、ディーゼル・エンジン・システムに比べてデュアルフューエルシステムの1)パワーは衰えてなかった、2)発煙の量ははるかに減った、3)NOxの排出量はほぼ変わりは無かった、4)炭化水素(HC)と一酸化炭素(CO)の排出量が増えた、5)燃料消費量は減った。

## 1. はじめに

現在、自動車の排出量の削減と代替燃料の仕様に関する実験が業界の中で注目を浴びている。高速道路の建設が進み、ディーゼルエンジンの量産技術の効率化、物流の需要の拡大によってディーゼル車は増え続けている。ディーゼル車は、発煙量が多く音もうるさく環境にとても悪いと考えられているのでインドの都会ではディーゼル車の走行は禁じられている。特に中古ディーゼルトラックの発煙量の削減技術が直ちに必要だ。ディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムを導入し、LPG を使用することによって一番効率よく発煙量を減らすことができる。

## 2. ECU と電子制御

LPG とディーゼルの混焼の特徴としては、高負荷での混焼の場合、発煙量は減るが、低負荷での混焼の場合、燃料消費量が増え、HC と CO の排出量も増える。その結果、低負荷と中程度の負荷での燃料消費量と排出量の削減技術が直ちに必要だ。実験したシステムは、「Stopping -cylinder technique」というディーゼルと天然ガスのデュアルフューエルシステムでよく使われるものである。電子制御装置(ECU)によって安定的にディーゼルを燃焼室に供給するが、適切なタイミングで天然ガスの供給をシリンダー止まりにする方式だ。これによって最適な燃料空気比が可能になる。気体噴射式で、事前に燃料の混合濃度を高めるために intake-throttling 法を使用した。ECU 制御式は、ガソリン車が中程度の負荷で走行する時と同様だ。過去には、手動でディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムの実証試験を行ったが、電子制御を使っての実証試験はまだ行われてない。
この実験では、低負荷の時にはディーゼルを燃焼し、定められた負荷になるとディーゼルと LPG デュアル・フューエルに切り替わるように ECU を設定した。こうすると低負荷では、HC と CO の排出量の削減が可能になり、高負荷では発煙量の削減が可能になる。電子制御されたディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムが**図 1** に示されている。ECU は、冷却水温度、エンジン速度、とアクセル・ペダル・ストロークセンサーからの信号によってディーゼルのバルブ、LPG のバルブ、エンジン速度、温度等を制御する。エンジンは、ディーゼルのみで作動するので ECU が LPG のバルブを閉め、エンジンへの LPG の供給を止める。開発した ECU の内容は**図 2** に示されている。

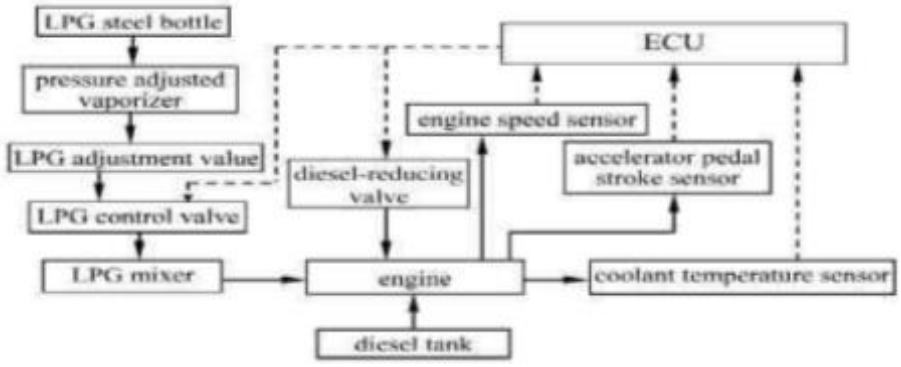



図 1. ディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムと ECU

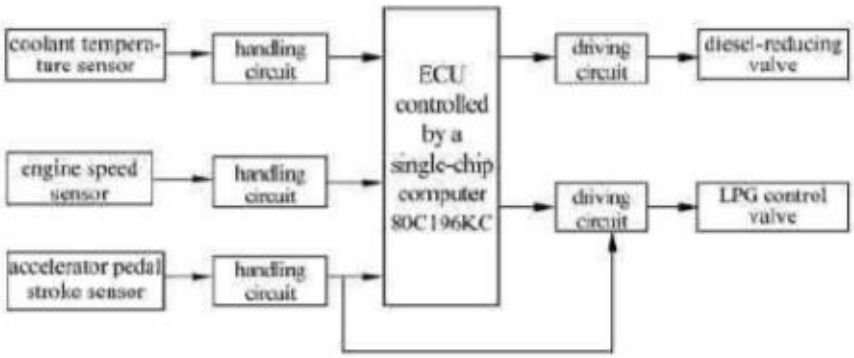



図 2. ECU の内容

## 3. 結果と分析

今回は、ECU を 4 気筒のスーパーチャージ直噴ディーゼルエンジンと連携させて実験を行った。燃焼比率(CCR)は以下の方程式によって計算された。$m_{LPG}$は LPG 消費量、$Hu_{LPG}$は LPG の発熱量(45.31 MJ/kg)、$m_{diesel}$はディーゼルの消費量、$Hu_{diesel}$はディーゼルの発熱量(42.50 MJ/kg)。

$$CCR = m_{LPG}H_{uLPG}x100 /(m_{LPG}H_{uLPG}+m_{diesel}H_{diesel})$$

### 3. 1 トルク

ディーゼル・エンジン・システムとディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムの高負荷でのトルクの比較が**図 3** に示されている。ディーゼルのみに比べてデュアルフューエルシステムのトルクがやや低いが、その差は非常に微細なので実際にトラックを走行しても感じられない程度だ。ノッキング現象を防ぐために燃焼比率を 29.7%～33.8%に抑えた。LPG を加えることでディーゼルのみに比べてデュアルフューエルシステムの燃料空気比が若干低くなるが、燃焼効率が高まる。その結果、燃焼室内の燃焼温度も高まるので、ディーゼルのみよりデュアル・フューエルの燃焼効率のほうが良い。

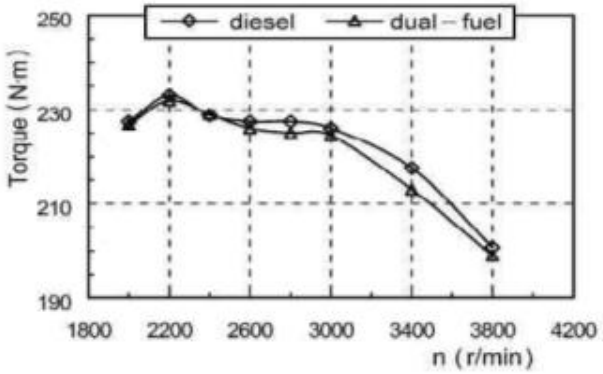



図 3. 高負荷でのトルクの比較

### 3. 2 燃料消費量

ディーゼル・エンジン・システムとディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムの高負荷での燃料消費量の比較が**図 4** に示されている。デュアル・フューエルの方がディーゼルのみより燃料消費量が少ない。なぜなら混合燃料は高品質で燃焼効率が非常に高いからだ。

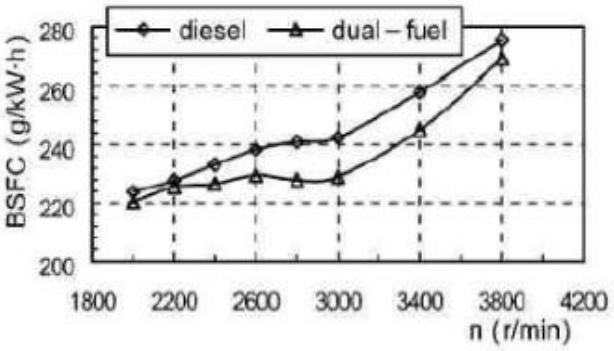



図 4. 高負荷での燃料消費量の比較

### 3. 3 発煙量

ディーゼル・エンジン・システムとディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムの高負荷での発煙量の比較が**図 5** に示されている。ディーゼルのみに比べてデュアルフューエルシステムの発煙量は平均して 59%削減された。デュアル・フューエルの場合、ディーゼル消費量が減り、燃焼後に余った空気量が少ないことから発煙量が減ったと考えられる。また、燃焼速度が速くなることで、燃焼時間が短くなり発煙量が減る。

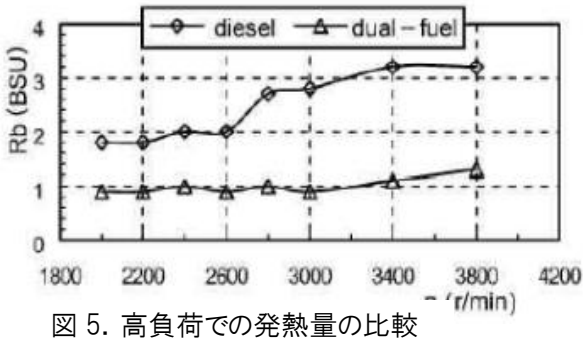



図 5. 高負荷での発熱量の比較

### 3. 4 窒素酸化物(NOx)の排出量

ディーゼル・エンジン・システムとディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムの高負荷での窒素酸化物(NOx)の排出量の比較が**図 6** に示されている。ディーゼルのみに比べてデュアルフューエルシステムの NOxの排出量はほぼ変わらなかった。NOxは燃料混合濃度と燃焼温度によって変わってくるが、いずれも変わっていないので NOxの排出量には影響がない。

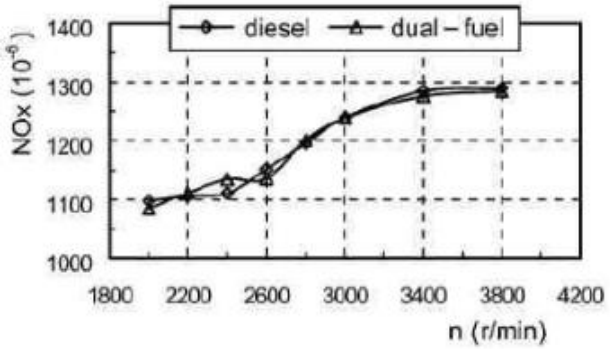



図6. 高負荷での窒素酸化物(NOx)排出量の比較

### 3. 5 炭化水素(HC)の排出量

ディーゼル・エンジン・システムとディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムの高負荷での発煙量(Rb)の比較が**図 7** に示されている。ディーゼルのみに比べてデュアルフューエルシステムの方が HC 排出量が多いという事には 2 つの理由が考えられる。1つは、LPG 燃料が軽油とオーバーラップして噴射時点で二重に供給されることで加濃され増加する。2つ目の理由は、燃料が圧縮される際、部品の隙間に入って燃焼されなかった物が出ていると考える。

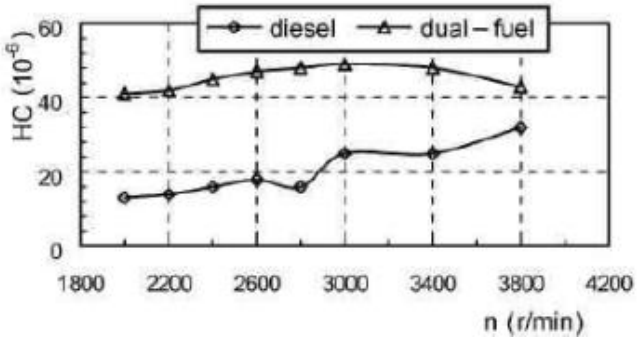



図 7. 高負荷での発煙量(Rb)の比較

3．6　一酸化炭素(CO)の排出量

ディーゼル・エンジン・システムとディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムの高負荷での一酸化炭素(CO)の排出量の比較が**図 8** に示されている。ディーゼルのみに比べてデュアルフューエルシステムの CO の排出量はほぼ変わらなかった。燃料の濃度と組成によって CO の発生に影響が出るので排出量の差はこの 2 つの要因による。

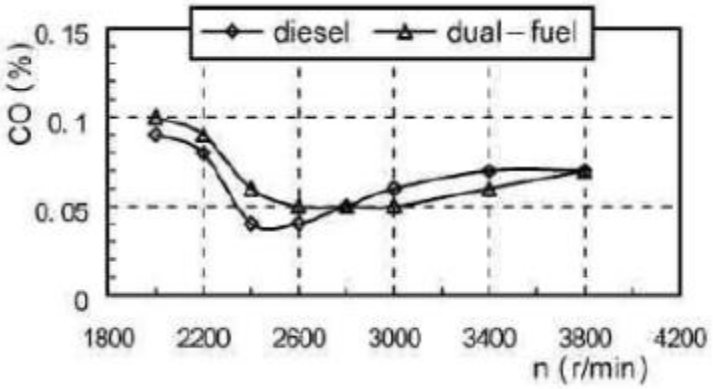



図8. 高負荷での一酸化炭素(CO)の排出量の比較

## 4.　結論

1. デュアルフューエルシステムを導入すると発煙量は減るが、低負荷と中程度の負荷での燃料消費量とHCとCOの排出量の問題は解決されていない。これは早急に解決法を探すべきだ。今回開発した ECU は、低負荷の時にはディーゼルを燃焼し、定められた負荷になるとディーゼルと LPG デュアル・フューエルに切り替わるように設定された。この方式だと燃費も上がるし、HC、CO と煙の排出量が抑えられる。

2. ECU が冷却水温度、エンジン速度、とアクセル・ペダル・ストロークセンサーからの信号によって制御した結果、エンジンのパワーには影響なかった。却って、燃費も上がり、HC、CO と煙の排出量が抑えられた。手動よりECUを活用すると低負荷でのHC、COと煙の排出量がより抑えられたが LPG の消費量は手動より少ない。混合燃焼によって HC と CO 排出量が若干増えたがガソリンエンジンより排出量が少ない。

3. 今後、ディーゼル・LPG デュアルフューエルシステム用の ECU を調整すれば同じ方式でディーゼル・CNG デュアルフューエルシステムにも活用できる可能性がある。

### *3)タイでの実例*

***日野デュアルフューエルトライアルで 80%ディーゼル代替を実現***

June 16, 2011 年 6 月 16 日　　ニュージーランドとタイ

タイで最大 50トンの総重量を運ぶ日野 J08C 191kWトラックの実験が行われた。ディーゼルと天然ガスのデュアルフューエルシステムでトラック 5 台が用意された。通常業務運転しながら平均して80%のディーゼル置換を示しており、約 50%の燃料費削減を実現している。このシステムは、ニュージーランドDieselGasインターナショナル㈱の製品の一つである。置換率に関しては、機械的なディ

ーゼル燃料噴射システムを持っている日野エンジンを考えると特に顕著であると DieselGas は言う。「この非常に高い置換率は、理想な標的である。ドライビングサイクルの全体燃料効率を最適化するために日野噴射システムの電子ディーゼルタイミング制御を使用することによって達成されている」と DieselGas マネージングディレクターのハーベイ・リード氏が述べた。

DieselGasリリースによると、タイの所有者が軽油の価格に比べて燃料費が50%も節約されていると報告している。

エンジンが通常の動作温度になると CNG デュアルフューエルモードに変わり、CNG が無くなった場合は、簡単にディーゼルのみでの運行に切り替わるようになっている。

エンジンの性能と出力をディーゼルエンジン製造業者の仕様と一致させることによって、最大のコスト削減に繋がり、6～8 ヶ月で改造費を回収することが可能になる。

この 5 台のトラックは、DieselGas のエンジニア達がニュージーランドから遠隔監視できるようになっており、タイのエンジニアもデータにアクセスし、各車両のパフォーマンスを監視することができる。統計ログ、診断ログおよび障害ログからのデータは、詳細な統計およびパフォーマンス関連の解析のためにリモートでダウンロードすることもできます。

日野 J08C 191kW エンジンは、タイで間もなくリリースされる。タイの所有者は、一般販売されたら DieselGas のデュアルフューエルキットを数台導入する予定だ。

### *4)UAE での実例 International Journal of Basic & Applied Science (June 2011, UAE)*

**デュアルフューエルシステムのエンジン性能とノイズレベルの検証**

Emad Elnajjar, Mohamed Y. E. Selim, Farag Omar
Mechanical Engineering Department, UAE University

要約書

デュアルフューエルエンジンのノイズレベルに関する報告書は、今回が初めてである。この試験では、デュアルフューエルエンジンシステムのノイズレベルを検証するため、エンジン回転数、噴射タイミング、負荷、と圧縮比の作動条件を変動させた。ノイズは、音圧レベルを測定し、エンジンクランク角に対する最大シリンダー圧力と最大圧力上昇率を比較した。今回は、3 種類のエンジンシステムを検証した：ディーゼルのみ、ディーゼル・LPG デュアル・フューエルとディーゼル・CNG デュアル・フューエル。結論、ディーゼルのみよりデュアルフューエルシステムの方の SPL (Sound Pressure Level) が圧倒的に高かった。

はじめに

エンジンノイズの研究は、エンジン開発の初期段階から実施されている。1931 年に Ricardo が初めて燃焼圧力上昇と騒音との間に記述的な関係を発見した。その後、ノイズの原因を決定するために、シリンダー圧力の1次微分と2次微分など様々な作動条件で検証されてきた。これらの試験は、エンジンの燃焼とノイズとの関係を明らかにし、今でもエンジン騒音の発生源を特定する上で重要な

役割を果たしている。

エンジンノイズの原因は沢山あるが、最も基本的なのは燃焼に起因する音である。圧縮行程の後半から次の圧縮行程の間でノイズが発生する。燃焼による急激な圧力変化によってエンジンの構造内で空気伝搬騒音が発生する。さらに、この急激な圧力変化によってシリンダーヘッド、ピストン、コネクティングロッド及びエンジン本体などのエンジン部品を振動させる。燃焼に起因するノイズが主要な原因だ。燃焼ノイズは、エンジンの作動条件によって異なる。例えば、安定したディーゼル・水の乳剤、デュアルフューエルエンジンの吸気口に水を添加したり、アルゴンや他の希釈剤ガスを吸気中に添加したり。また、デュアルフューエルシステムの排気ガスを再循環させたり、燃料の種類を変えたりしても燃焼ノイズに影響を与える。天然ガスやメタンガスなどの気体燃料はエンジンの圧力率が異なるので燃焼ノイズに大きく影響する。

Jun Hong et al.（2005）は、音響度を計ってノイズ源の寄与を測定した。ノイズ測定は、国際規格 ISO / DIS9614-1 および SAE 勧告に準拠して行った。マイクロフォンは、エンジンの左右、前後、と最上部に配置した。実験設備は雑音を遮断するために防音室に設置した。彼らの研究で明らかになったのは、エンジンの前方の位置で測定されたノイズレベルが一番高かったことである。

ディーゼルエンジンのノイズ問題に関する対処法を検証する実験は他にも多く行われて来たが、デュアルフューエルエンジンのノイズレベルに関する実験はほとんど無い。ディーゼルエンジンがデュアルフューエルエンジンに改造され、主燃料がガスで、パイロット燃料がディーゼルでエンジンを作動した場合、デュアルフューエルシステムのノイズレベルの方が高い。今回の実験の目的は、エンジンノイズの追跡と分類ではない。Jun Hong et al.の研究で一番うるさい場所と報告されたエンジンの前方で測定された全体的な音圧レベルの平均を報告し、デュアルフューエルエンジンとディーゼルエンジンのノイズレベルを比較することである。背景の雑音レベルを保ちながら、ディーゼルのみ、ディーゼル・LPG デュアル・フューエルとディーゼル・CNG デュアルフューエルエンジンシステムのノイズレベルを比較してみた。

## 実験装置

今回は、Ricardo E6 の単気筒、可変圧縮、間接噴射ディーゼルエンジンを使用した。このエンジンをデュアルフューエルシステムに改造し、LPG 若しくは CNG を主燃料にし、ディーゼルをパイロット燃料にした。空気は自動的にエンジンに入り込むようにした。エンジンの仕様は**表1**に示されている。エンジンの模式図は、**図 1** に示されている。

| **Model** | Ricardo E6 |
|---|---|
| **Type** | IDI with the pre-combustion chamber |
| **Number of cylinders** | 1 |
| **Bore** | 76.2 mm |
| **Torque Capacity** | Max16 N.m |
| **Stroke** | 111.1 mm |
| **Swept Volume** | 0.507 liters |
| **Max. Speed** | 50 rev/sec (3000 rpm) |
| **Max. Power, Diesel (CR = 20.93)** | 9.0 kW, Naturally Aspirated |
| **Compression Ratio (CR)** | Max. CR 22 |
| **Injection Timing** | Variable, 20°- 45° BTDC |

表 1. エンジンの仕様

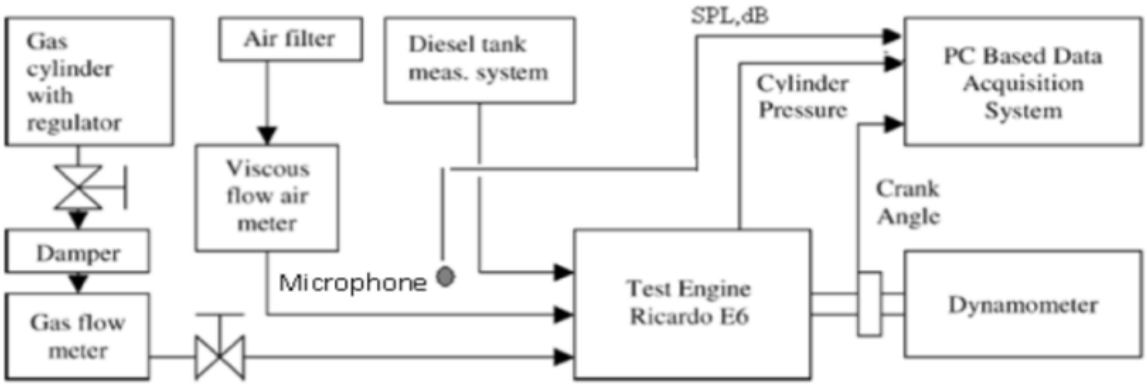



図1. エンジンの模式図

エンジンは、すべての作動条件および燃焼ノイズのデータ測定のために装備され、高負荷と低負荷でのデータを取った。高速と低速データ収集システムを使って必要なデータを収集した。シリンダー圧力、クランク角とノイズ信号の測定は、高速データ収集システムが行った。完全なサイクル分析を行うためにスマート・コンピューター・コードが開発された。今回は、RPM、トルク、シリンダー圧力、SPL 及びクランク角を測定し、様々なパワーサイクルで計った。

油温が 48℃ ±3 と冷却水温度が 70℃ ±3 になるまでエンジンを少しの間作動してから実験を開始した。エンジンノイズは、シリンダーヘッドの近くに配置したエクステックインスツルメンツのデジタル音圧計で測定した。この装置は、周囲のノイズを 0.1 dB の分解能と±0.5 dB の精度で測定することが可能である。直径 6mm のエレクトレット・コンデンサー・マイクを使用して 8 kHz から 31.5 Hz のノイズを検出した。

実験手順

今回は、3 種類のエンジンシステムを検証した：ディーゼルのみ、ディーゼル・LPG デュアル・フューエルとディーゼル・CNG デュアル・フューエル。LPG 若しくは CNG を主燃料にし、ディーゼルをパイロット燃料にした。各燃料に対して、以下の作動条件でノイズが計られた：

- エンジン回転数を 20 回転/秒に回転させ、28 回転/秒まで 2 回転/秒ずつ増加した
- パイロット燃料（ディーゼル）の質量分を 0.14 kg/hr から 0.72 kg/hr へ増やした
- パイロット燃料（ディーゼル）をエンジンに噴射するタイミングを 20° BTDC から 45° BTDC まで 20° ずつ増やした
- エンジンの圧縮比は 16 から 22 まで2ずつ増やした
- 燃料を 1kg/hr から 4.5kg/hr まで増やした（実際は強い圧力波やノッキング現象が発生するまで）

結果と考察

20 回転/秒での動作条件で測定したノイズレベルが図 2 に示されている。図 2a は、エレクトレット・コンデンサー・マイクを使用して 1 エンジンサイクルの音圧レベル（SPL）の平均が示されている。作動中のエンジン、燃焼室と背景の雑音の SPL が報告されている。エンジンと背景の雑音が一定してい

るので実験は同じ安定した環境で行われたことがわかる。同じ作動条件で測定したシリンダー圧力と同じサイクル内のクランク角律動が図 2b に示されている。図 2c は、通常の燃焼が起きている時のシリンダー圧力と図 2d では、ノッキング現象が発生している時のシリンダー圧力が示されている。また、N=20 回転/秒、 IT=35° BTDC、 T= 9 ±1 N/m と CR= 22 の条件で作動しているエンジンのエンジンノイズは点線で図に示されている。どれも同じ数値なので基線としている。

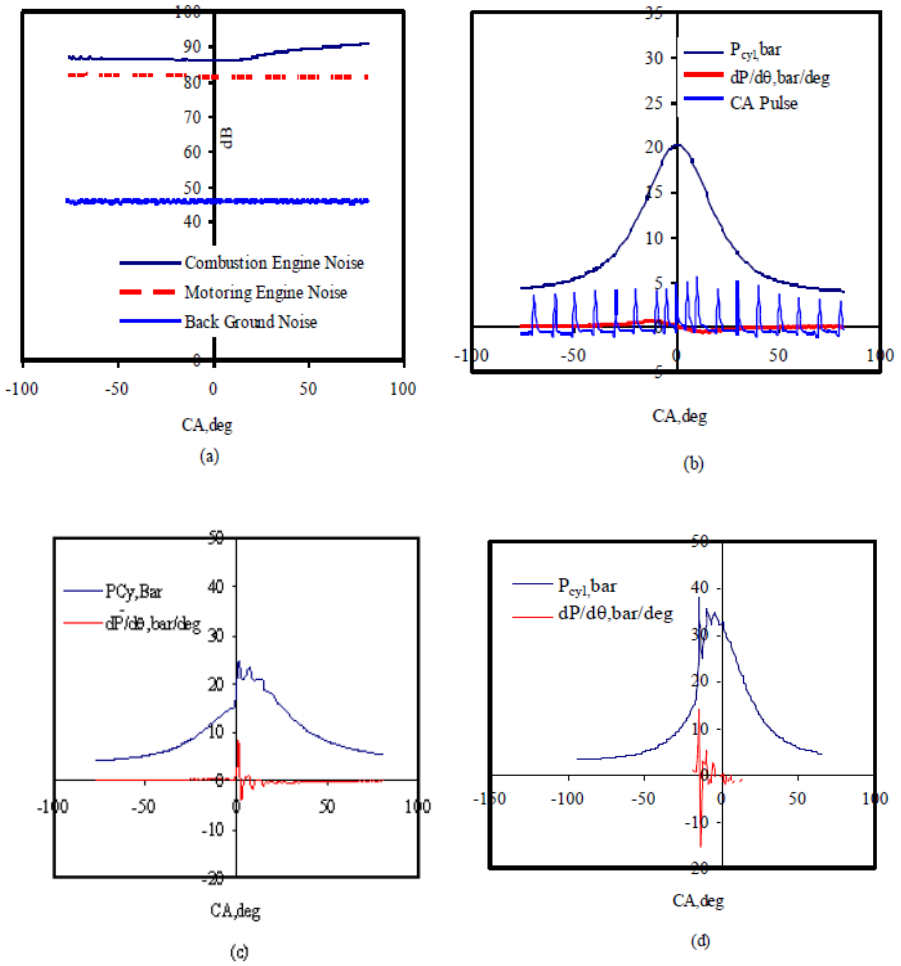



Fig. 2. Typical (a) SPL diagram for background, motoring and combustion noise levels, (b) motoring cylinder pressure and pressure rise rate diagram, (c) cylinder pressure and pressure rise rate diagram, and (d) cylinder pressure and pressure rise rate diagram with knocking.

図2. 20 回転/秒で測定したノイズレベル

A. エンジン回転数の影響

エンジン回転数を 20 回転/秒に回転させ、28回転/秒まで 2 回転/秒ずつ増加した結果を図3にまとめた。エンジンの作動条件は、一定に維持した:CR=22、 IT= 35° BTDC 、T= 9 ±1 N/m。

図 3a では、エンジン回転数を増加しながらの圧力上昇率が示されている。エンジン回転数が高いと圧力上昇率が低い為、燃焼ノイズレベルが低い。燃焼ノイズの減少は、空気と気体燃料の混合が改善され、スムーズな燃焼が可能になったからだ。

図 3b では、エンジン回転数を増加しながらの機械的および吸気/排気流のノイズレベルが示されている。エンジン速度の増加に伴ってエンジンの全体のノイズレベルが多少増加している。原因はいくつか考えられる。吸排気の流れの乱れと高速で作動するとノイズを発生する噴射ポンプ、インジェクターバルブおよびギアに原因があると考えられる。エンジン回転数が上がれば機械的および吸気/

排気流のノイズの組み合わせは、燃焼ノイズよりうるさい事が表から理解できる。エンジンスピードを上げるためには、燃料と空気の量を増やす必要があるのでそれによる混合や振動のノイズレベルも上がると考える。

ここで一つわかることは、LPG 使用のエンジンシステムは他に比べて燃焼ノイズが高い事である。エンジン回転数が28回転/秒の時点で、LPG は平均して90dB であったが、ディーゼルと CNG は平均して89dB であった。エンジン回転数が20回転/秒の時点では、ディーゼルエンジンシステムは85dB で最も静かであった。

**図 3c** では、エンジン回転数を増加しながらのピストンがクランク軸から一番遠い(TDC)時に対する最大圧力上昇率(dP/dθ)を示している。**図 3d** では、エンジン回転数を増加しながらのピストンがクランク軸から一番遠い(TDC)時に対する最大シリンダー圧力(Pmax)を示している。この 2 つの図によると、エンジン速度はこれら2つの要因に正比例する傾向が明確にわかる。**図 3a** でも見られるように、回転数が増えると圧力上昇率が下がるため、最大圧力上昇率と最大シリンダー圧力が上がることになる。また、**図 3c** と**図 3d** のディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムの線が一番低い位置にあるので燃焼率が一番良い事が明らかである。理由としては、**図 3a** でも見られるように、圧力上昇率が下がるため、天然ガスとディーゼルに比べてLPGは、簡単に自着火する。LPGの燃焼率が上がると最大圧力上昇率と最大シリンダー圧力のクランク角は、ピストンがクランク軸から一番遠い(TDC)時ではなくなる。**図 3d** では、TDC の前に最大圧力上昇率と最大シリンダー圧力が起きている事がわかる。すなわちピストンが作動している間に起きている。これは、低エンジン速度に特に当てはまる傾向で、一番効率のよい圧力の数値を下げることになる。その為、低負荷の場合と低速度の場合、出力が下がり、効率が悪くなる。エンジンのスピードを上げれば、一番効率のよい圧力の数値を上げることになるので、ピストンがクランク軸から一番遠い(TDC)時に最大シリンダー圧力が起きる。ディーゼル・CNG デュアルフューエルシステムの場合、エンジン回転数が低い時でも出力の低下は無いが、ディーゼル・LPG デュアル・フューエルの場合は出力と効率が必ず低下する。

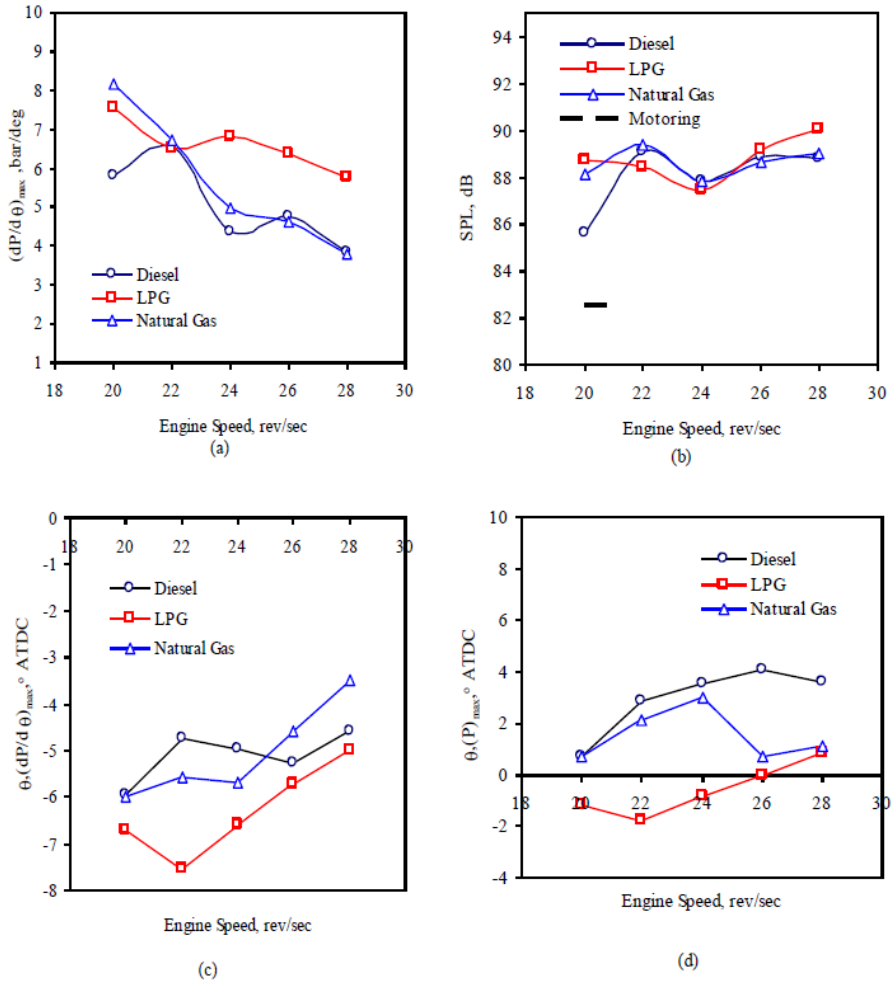



Fig. 3. The effect of engine speed on the (a) the engine pressure rise rate with respect to engine crank angle, (b) generated over all averaged sound pressure level, (c) the optimum crank angle corresponding to maximum pressure rise rate, and (d) the optimum crank angle corresponding to maximum cylinder pressure. For CR= 22, IT= 35° BTDC and T= 9±1 N.m.

図3. 20回転/秒から28回転/秒の影響

B. エンジンのノイズに対する噴射タイミングの影響

**図 4** では、TDC 前(BTDC)の噴射タイミング角度を 20° から 45° まで 5° ずつ増やしていった影響を示している。エンジンの作動条件は、一定に維持した:N=20 回転/秒、CR=22、 T= 9 ±1 N/m。

**図 4a** では、噴射タイミング角度を増加しながらの最大圧力上昇率(dP/dθ)を示している。図によると、燃料問わず、噴射タイミング角度が高いと圧力上昇率も高いので、燃焼ノイズのレベルが高かった。TDC 前に燃料が噴射されると、圧縮温度が多少低くなるのでディーゼル燃料が点火するのに少々時間がかかる。この点火遅れが噴射燃料の燃焼圧力上昇率を高め、燃焼ノイズに繋がる。上記にも記載したように噴射タイミング問わず、ディーゼル・天然ガスとディーゼルのみの場合に比べて、ディーゼル・LPG の方の圧力上昇率が高い。

**図 4b** では、噴射タイミング角度を増加しながらの機械的および吸気/排気流の平均ノイズレベルを示している。**図 4a** と **4b** によると、全体のエンジンのノイズより燃焼ノイズの方が大きい。エンジンの速度は一定に維持しているので機械的および吸気/排気流のノイズレベルは一定である。その為、燃焼ノイズレベルの増加は、噴射タイミングの影響によって発生していることが確認できる。

前例と同じく、LPG を使用したエンジンシステムが一番うるさい。噴射タイミング角度が 40° の場合、

LPG は 92dB であったが、CNG とディーゼルのみのシステムは90dB 以下である。

**図 4c** では、噴射タイミング角度を増加しながらのピストンがクランク軸から一番遠い(TDC)時に対する最大圧力上昇率(dP/dθ)を示している。**図 4d** では、噴射タイミング角度を増加しながらのピストンがクランク軸から一番遠い(TDC)時に対する最大シリンダー圧力(Pmax)を示している。これらの図からわかることは、ディーゼル燃料の噴射タイミング角度を増加していくと、最大圧力上昇率と最大シリンダー圧力が早い段階で実現することだ。原因は、**図 4a** で見られるように最大圧力上昇率(dP/dθ)の増加によるものだ。最大シリンダー圧力が TDC 後(噴射タイミング角度が 20° から 40° BTDC)に発生すると、エンジン作動によって正の仕事が発生する。しかし、TDC 前に起こると負の仕事が発生する。

天然ガスや LPG をデュアルフューエルシステムで使用した場合、噴射タイミング角度が 40° BTDC 以下であれば仕事と効率に減衰はない。しかし、噴射タイミング角度が 40° BTDC 以上であれば低負荷での仕事と効率に減衰が発生する。その結果、デュアルフューエルシステムの噴射タイミング角度を 35° BTDC 以下に設定するのが望ましい。

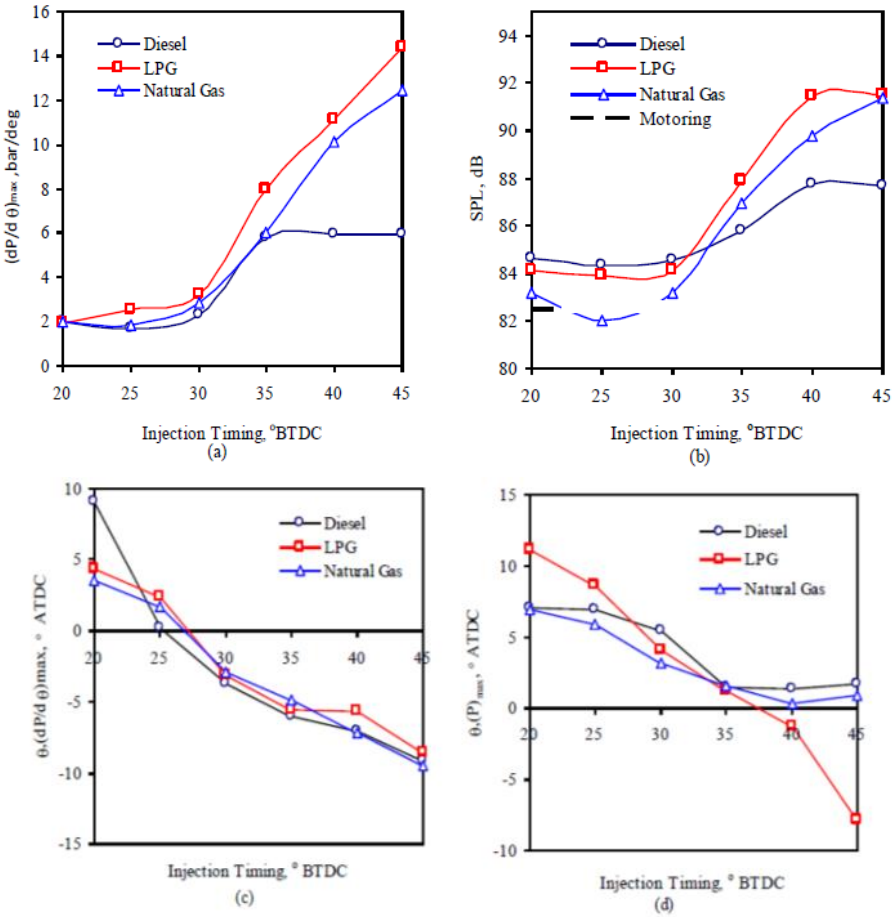



Fig. 4. The effect of Injection Timing on the (a) the engine pressure rise rate with respect to engine crank angle, (b) the generated over all averaged sound pressure level, (c) the optimum crank angle corresponding to maximum pressure rise rate, and (d) the optimum crank angle corresponding to maximum cylinder pressure. For CR= 22, N= 20 rev/sec and T= 9±1 N.m.

図 4. 噴射タイミング角度 20° から 45° までの影響

C. エンジンノイズに対する圧縮比の影響

**図 5** では、エンジンの圧縮比を 16 から 22 まで 2 ずつ増やしていった影響を示している。エンジンの作動条件は、一定に維持した:N=20 回転/秒、IT= 35° BTDC 、T= 9 ±1 N/m。

**図 5a** では、圧縮比を増加しながらの最大圧力上昇率(dP/dθ)を示している。図によると、天然ガス・ディーゼルデュアルフューエルシステムの場合、圧縮比を徐々に増加していくと最大圧力上昇率も増えるが、ディーゼルのみとディーゼル LPG デュアルフューエルシステムの場合、最大圧力上昇率が多少変動している。低い圧縮比の場合、天然ガス・ディーゼルデュアルフューエルシステムの燃焼ノイズが一番静かだったが、高い圧縮比(22)になるとディーゼルシステムよりうるさくなった。一方、ディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムの場合、点火温度が天然ガスシステムより低い為、最大圧力上昇率が常に高い。また、LPG は簡単に自着火するので最大圧力上昇率が高い。

**図 5b** では、圧縮比を増加しながらの機械的および吸気/排気流の平均ノイズレベルを示している。燃料問わず、圧縮率が上がればノイズレベルも上がったが、ディーゼル LPG デュアルフューエルシステムが一番うるさかった。圧縮比を増加すると圧縮圧力も上がることによってノイズを発生していると考えられる。

**図 5c** では、圧縮比を増加しながらのピストンがクランク軸から一番遠い(TDC)時に対する最大圧力上昇率(dP/dθ)を示している。**図 5d** では、噴射タイミング角度を増加しながらのピストンがクランク軸から一番遠い(TDC)時に対する最大シリンダー圧力(Pmax)を示している。予想通り、圧縮比を増加していくと、最大圧力上昇率と最大シリンダー圧力が早い段階で実現した。**図 5d** では、最大シリンダー圧力がほぼ全てゼロより高い。これは、デュアルフューエルシステムの出力及び効率を向上させる上で有益である。**図 5b** によると圧縮比を下げればノイズレベルも下がり、最大圧力上昇率が膨張行程で起きるので出力及び効率を向上される。

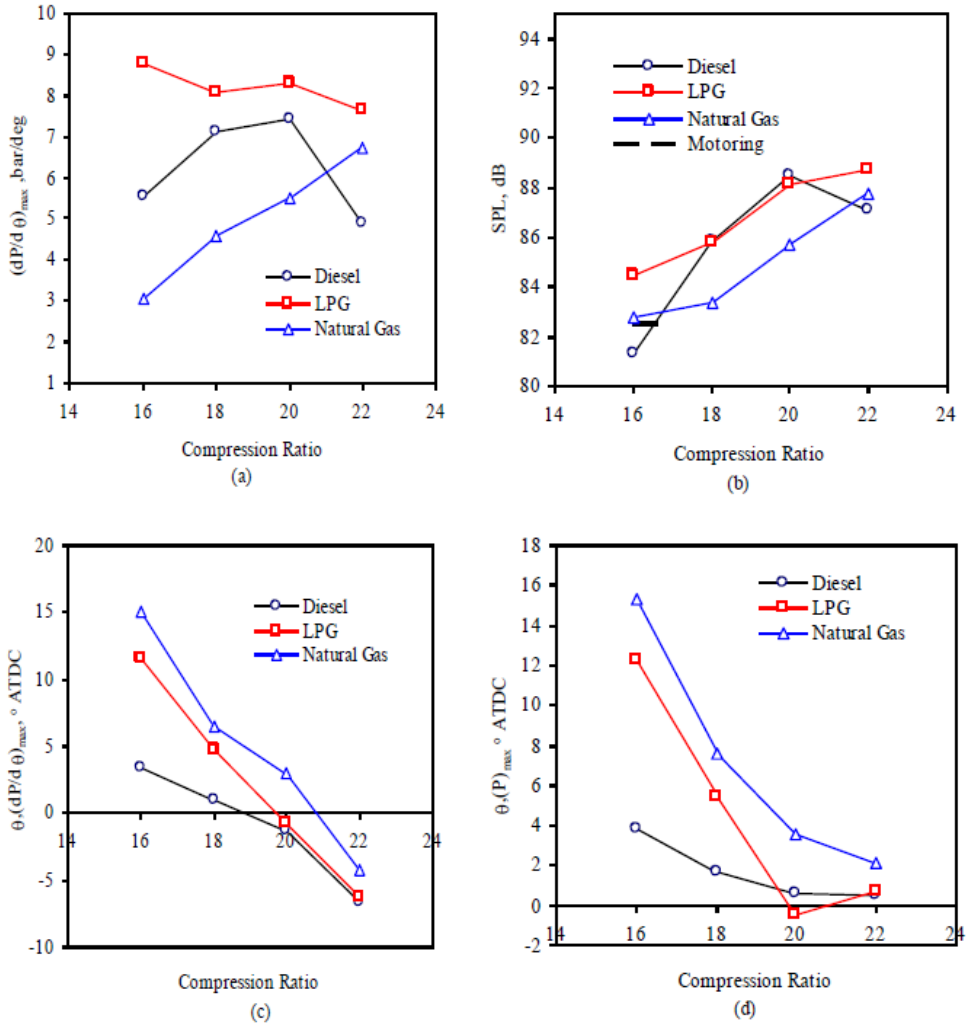



Fig. 5. The effect of Engine Compression Ratio on the (a) the engine pressure rise rate with respect to engine crank angle, (b) the generated over all averaged sound pressure level, (c) the optimum crank angle corresponding to maximum pressure rise rate, and (d) the optimum crank angle corresponding to maximum cylinder pressure. For N= 20 rev/sec, IT= 35° BTDC and T= 9±1 N.m.

図 5. 圧縮比 16 から 22 までの影響

D. エンジンノイズに対する負荷の影響

**図 6** では、エンジンの負荷を 2 N/m から 14 N/m まで増やしていった影響を示している。エンジンの作動条件は、一定に維持した:N=20 回転/秒、CR=22、 IT= 35° BTDC。

**図 6a** では、負荷を上げながらの最大圧力上昇率(dP/dθ)を示している。**図 6b** では、負荷を増加しながらの機械的および吸気/排気流の平均ノイズレベルを示している。これらの図によると、負荷を増やしても最大圧力上昇率と平均ノイズレベルの数値は安定しており、あまり変わりないことがわかる。ディーゼル燃料の量を一定に保ち、気体燃料の量を増やしながら負荷を上げた。エンジンの回転数、噴射タイミングと圧縮比も一定に保ったので燃料量を増やしてもノイズレベルに影響はなかった。エンジンの作動条件を一定に保ったのでディーゼル燃料が点火するタイミングも変わらず、同じ条件で気体燃料が燃焼された。燃料の量を増やしてもノイズレベルに影響がない事は、デュアルフューエルシステムにとって有益である。

**図 6c** では、負荷を上げながらのピストンがクランク軸から一番遠い(TDC)時に対する最大圧力上昇率(dP/dθ)を示している。**図 6d** では、負荷を上げながらのピストンがクランク軸から一番遠い

(TDC)時に対する最大シリンダー圧力(Pmax)を示している。**図 6d** によると、最大シリンダー圧力は必ず TDC 時に起きている。これらの図によると、負荷を増やしても最大圧力上昇率と最大シリンダー圧力の数値は安定しており、あまり変わりないことがわかる。理由としては、エンジンの作動条件を一定に保ったことである。

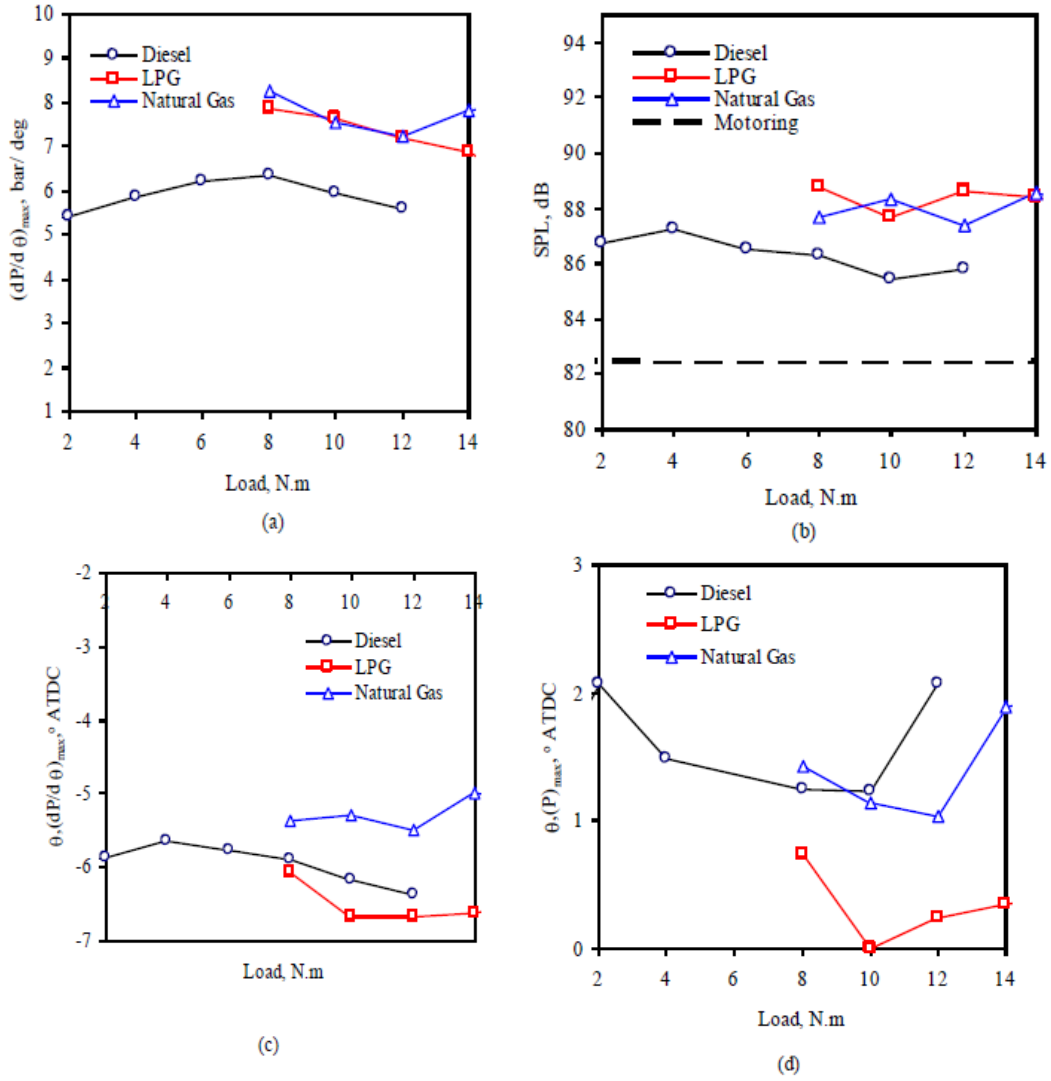



Fig. 6. The effect of different loads on (a) the engine pressure rise rate with respect to engine crank angle, (b) the generated over all averaged sound pressure level, (c) the optimum crank angle corresponding to maximum pressure rise rate, and (d) the optimum crank angle corresponding to maximum cylinder pressure. For N= 20 rev/sec, IT= 35° BTDC and CR= 22.

図 6. エンジンの負荷を 2 N/m から 14 N/m までの影響

E. エンジンノイズに対するディーゼル燃料の流量の影響

**図 7** では、燃料比率を 0 m'gas /m'pilot から 24 m'gas /m'pilot まで 2 m'gas /m'pilot ずつ増やしていった影響を示している。気体燃料の量を一定に保ち、ディーゼル(パイロット)燃料の量を変えた。エンジンの作動条件は、一定に維持した:N=20 回転/秒、CR=22、 IT= 35° BTDC。

**図 7a** では、燃料比率を上げながらの最大圧力上昇率(dP/dθ)を示している。気体燃料の量が一定に保たれたので、燃料比率を 0 m'gas /m'pilot から 24 m'gas /m'pilot まで増やす場合、ディーゼル燃料の量を減らすしかない。図 7a によると、ディーゼル燃料を減らしていくと最大圧力上昇率も減っていく。理由としては、ディーゼル燃料による点火が小さくなり、気体燃料を燃焼しにくくしているからだ。しかし、ディーゼル・天然ガスデュアルフューエルシステムよりディーゼル・LPG デュアル

フューエルシステムの最大圧力上昇率の方が高かった。

**図 7b** では、燃料比率を増加しながらの機械的および吸気/排気流の平均ノイズレベルを示している。エンジン作動条件を一定に維持したのでここで見られる変化は燃焼ノイズのものとする。

**図 7c** では、燃料比率を上げながらのピストンがクランク軸から一番遠い(TDC)時に対する最大圧力上昇率(dP/dθ)を示している。**図 7d** では、燃料比率を上げながらのピストンがクランク軸から一番遠い(TDC)時に対する最大シリンダー圧力(Pmax)を示している。これらの図によると、ディーゼル燃料量が減ると最大圧力が TDC 時に近づくことである。理由としては、圧力上昇率の増加である。

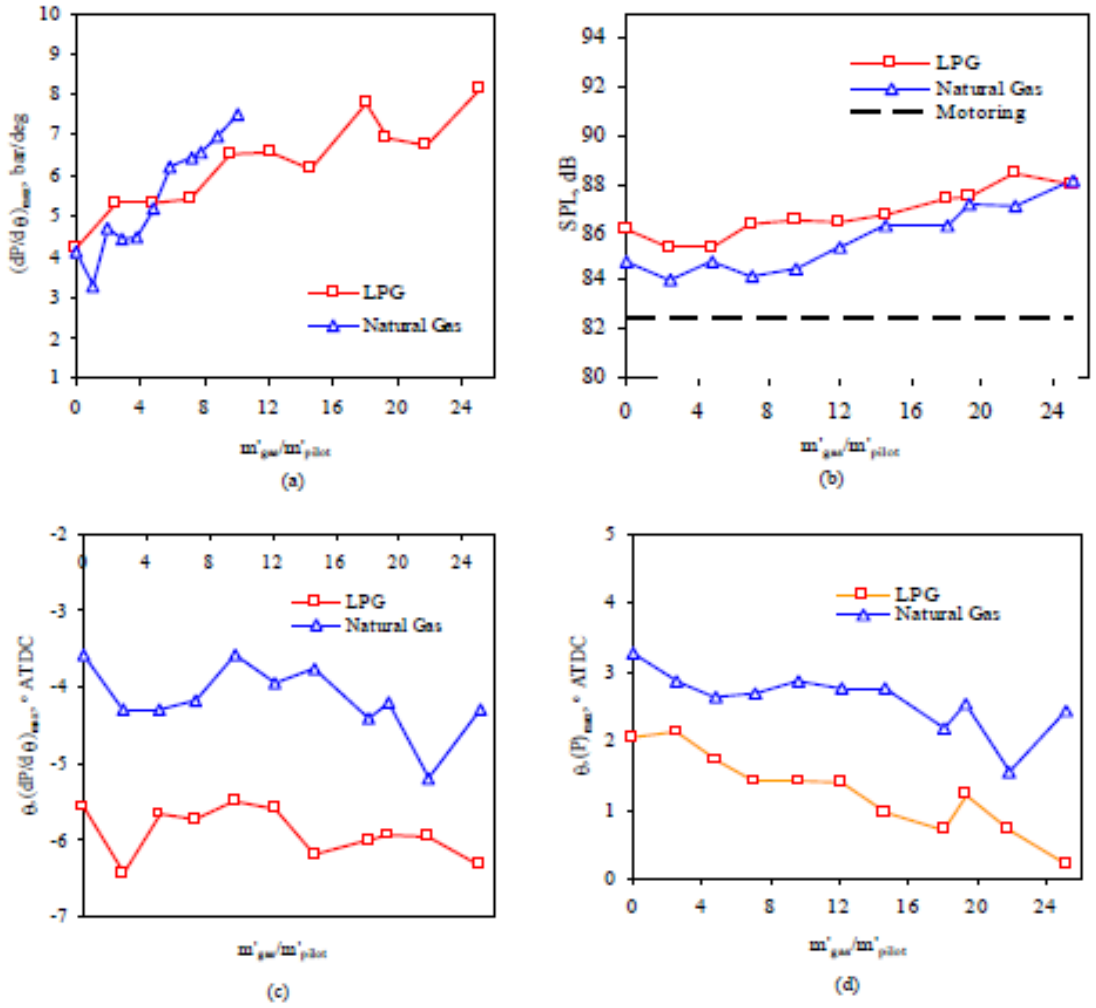



Fig. 7. The effect of different gas fuel mass flow rate on the (a) the engine pressure rise rate with respect to engine crank angle, (b) the generated over all averaged sound pressure level, (c) the optimum crank angle corresponding to maximum pressure rise rate, and (d) the optimum crank angle corresponding to maximum cylinder pressure. For N= 20 rev/sec, IT= 35° BTDC and CR= 22.

図 7. 燃料比率を 0 m'gas /m'pilot から 24 m'gas /m'pilot までの影響

結果の再現性の検証

この試験の結果を**表 2**にまとめた。エンジンの作動条件は、一定に維持した:N=20 回転/秒、CR=22、 IT= 35° BTDC、 T= 9 ±1 N/m。結果の再現性はとても高いと判断する。データの差は、データ誤差レベルの範囲内とする。実際、エンジンを作動した環境によって±1 N/m の差が発生している。また、ここで報告した最大圧力上昇率(dP/dθ)に関するノイズレベルのデータは平均であり、

実際の数値は図 8 に示されている。

TABLE II
Results at common variables (N=20 rev/sec, IT= 35° ,
T=9±1 N.m and CR=22) for all the test

| Fuel Type | Case | $(dP/d\theta)_{max}$ Bar/deg. | SPL dB | $\theta_{(dP/d\theta)max}$ deg. | $\theta_{max}$ deg. |
|---|---|---|---|---|---|
| Diesel | Variable N | 6 | 85 | -7 | 1 |
| | Variable IT | 6 | 85 | -7 | 2 |
| | Variable CR | 6 | 86 | -7 | 2 |
| | Variable Load | 6 | 85 | -7 | 2 |
| LPG | Variable N | 7 | 88 | -6 | 1 |
| | Variable IT | 8 | 88 | -6 | 1 |
| | Variable CR | 8 | 88 | -6 | 1 |
| | Variable Load | 7.5 | 88 | -6 | 1 |
| NG | Variable N | 8 | 87 | -6 | 1 |
| | Variable IT | 6 | 85 | -6 | 1 |
| | Variable CR | 7 | 86 | -6 | 1 |
| | Variable Load | 8 | 86 | -5.5 | 1 |

表 2. 結果のまとめ

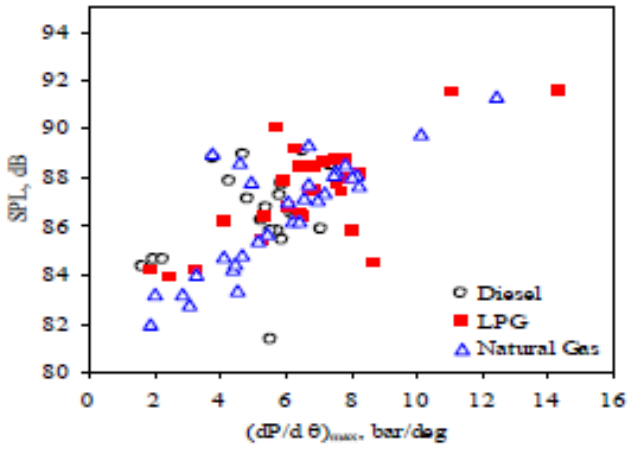



Fig. 8. The engine maximum pressure rise rate with respect to engine crank angle vs. the generated overall averaged sound pressure level. For all operating and design conditions tested.

図 8. 実際のノイズレベルの数値

結論

今回は、ディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムとディーゼル・天然ガスデュアルフューエルシステムをディーゼルのみのエンジンシステムとノイズレベルで比較した。その結果、以下の結論が得られた。

1. エンジン速度を速めると、エンジン全体のノイズレベルが増大するが、燃焼ノイズのレベルは下がる。3 システムの中で、LPG のシステムの燃焼ノイズが一番うるさかった。28 回転/秒の場合、LPG が 90dB、天然ガスが 88dB、ディーゼルが 88dB であった。
2. 燃料問わず、最大圧力上昇率と最大シリンダー圧力は、エンジン速度、噴射タイミング、圧縮比率やディーゼル燃料の流量の要因に影響される。
3. 燃料問わず、噴射タイミングを早めるとエンジン全体のノイズと燃焼ノイズレベルが上がる。ディーゼルシステムよりデュアルフューエルシステムのノイズレベルの方が高い。噴射タイミングが 45° BTDC の場合、LPG が 93dB、天然ガスが 93dB、ディーゼルが 86dB であった。
4. 燃料問わず、最大圧力上昇率と最大シリンダー圧力の位置は、噴射タイミングに反比例する。
5. 燃料問わず、圧縮率を上げるとエンジン全体のノイズと燃焼ノイズレベルが上がる。天然ガスとディーゼルシステムに比べて LPG システムが一番うるさい。圧縮率が 22 の場合、LPG が 88dB、天然ガスが 87dB、ディーゼルが 87dB であった。
6. 燃料問わず、負荷を上げるとノイズレベルも上がるが、ディーゼルシステムよりデュアルフューエルシステムの方がうるさい。負荷が8N/m の場合、LPG が 83dB、天然ガスが 83dB、ディーゼルが 86dB であった。
7. ディーゼル燃料の流量を増やすとデュアルフューエルシステムのノイズレベルが下がる。
8. エンジン全体のノイズと燃焼ノイズレベルは、エンジンの構造と以下の要因が影響する：エンジン回転数、噴射タイミング、圧縮率、とディーゼル燃料の流量。

### *5)イギリスの大型 LNG トラックの雑誌記事*

**思考の交換**

（Commercial Motor　Oct. 30, 2008）

LPG は、利用者の期待とは異なる方向で、長年にわたって試行錯誤が繰り返されてきた。今、CM 社の最新技術試験結果が運送事業者の考えを変えようとしている。

道路運送は保守的な産業である。運営に関しては、「問題がなければ余計な事はするな」という代々受け継がれてきた伝統的な方針で行われている。

だが、変更が産業に強制されると（たとえば排出レベルやデジタルタコグラフ）運送業界は対応する。道路運送業界を作り直している新世代の物流会社が存在する。彼らは、経済学・・・遠慮なしに言うと、会計士が主導である。

このアプローチは、企業が所有しているものを削減し、そのリスクを拡散する。また、いつも帳簿で大きなマイナス影響を与えている燃料代の取り扱い方を再検討させられる。

燃費を向上させるためのエコドライブ研修や自動変速機への変更、積み方を効率化するなどの努力は、ディーゼルの燃料費が下がればすべて解決する事である。だが、最近の傾向から判断すると、安価な化石燃料はすぐに来そうにない。他の選択肢は何ですか？

長年 CM 社は、代替燃料に注目してきた。実証実験によると、トラックドライバーの経費削減は実現できるが、設備投資の高値が業界の意欲を減退させてきた。野心的なマーケティング・キャンペーンや急に出現する代替燃料エンジン工学の発展発表など行われてきたが、様々な理由で（入手可能性、信頼性、残存価額、保証、車両の性能、手間、等）代替燃料の分野はなかなか進展していない。

**代替パッケージ**

液化石油ガス（LPG）はこの代替パッケージの一環である。Future Fuel Technology 社 Adrian Meakin 常務によると、以前のシステムと現在のものを比較すると、おそらく技術の進歩が主な違いである。

これは、幾つかのオーナー社長と有名な道路運送社が証言している。彼らは、代替燃料の混合技術に期待を置き、結果に満足しているようだ。

Meakin 常務によると現在 400 台程のデュアル・フューエル技術を使用しているトラックが運営されており、かなりの燃料削減を実現している。「この数は急速に増加している。顧客には Aldi 社、Silentnight 社、Veka 社、Corby Chilled 社、Fowler Welch 社などが含まれている。Mi Technology 社によると、レイランド市にあるシャシダイナモメーターを使用して2モデルのトラックを検査した結果、大体 12%―14%の燃料費削減が実現できた。しかし、顧客が実際に所有しているトラックを改造して運営した結果、フリート毎に改造し始めている事実がユーザーにとって最も説得力があると思う。

これを大々的に行っているのが Aldi 社だ。過去 6 ヶ月の間に、私たちは、いくつかのパイロットプログラムを実施してきた。5つの識別されたフリートで多くの車両が改造された。類似の車両の数を含む対象群と並行に監査された。こうすることで、両方のグループに影響を与える要素（気候、ドライバーの影響など）を取り除くことができる。すべての事例において、データは完全に独立した Fleetstat of Columbia 社で分析された。結果、1 割以上の燃料削減を実現した。」

主な受益者は、長距離を一定の速度で巡航し、毎日本部に戻ってくる道路運送社である。Meakin 常務の説明によると「走行距離が多い事が重要だ。なぜなら、ストップアンドゴーより一定の速度で巡航している時にディーゼル置換が起こるからだ。走行距離が多い方が、燃費が高いので回収期間が短い。また、燃料費削減を最大化するには、道路沿いにある充填スタンドではなく、燃料が安い大型用のスタンドで充填することが重要である。毎日、若しくは2日毎に本部に戻る車両だとこの低額の燃料のみで運航できるが、なかなか戻ってこない車両は普通料金の燃料を使う事になるので回収期間が長引く。」

**我々の結論**

ここで重要なのは、LPG に対する自信と、切り替えが出来る才能である。長年、どこへでもどんな荷物でも直ぐに届けることが出来る道路運送社が成功するとされてきた。この基準は、充填スタンドの全国ネットワークがしっかりとディーゼルを安定供給してきたことによって可能にしてきた。

ディーゼル・エンジン・システムは、長期にわたって実証済で業界から高く評価されているが、最近ではディーゼル価格が非常に不安定だ。また、政府は、ディーゼルの消費量の高い運送業者たちに関税の面で優遇措置を与える可能性は低い。その結果、突発的な輸送方式からシステム化された運送方式に変わってきた。パレット・デリバリー・システムが典型的な例である。（説明:運送業者が独自のルートにいる客から荷物を引き取って、総合収集所へ届けて、独自のルートに住む客に荷物を

届ける。荷物を引き取る業者と届ける業者が異なるシステム。）

物流会社は現在、限定されている小売･流通店舗に集中している。輸送マネージャーは、トラックがどこを走行していて、大体何時頃に本部へ戻ってくるかを随時把握している。このような運送業者がデュアル･フューエル技術の受益者である。彼らは、実質的で、高燃費で、一貫性のある運営環境を持っているので、運送に行く前に本部で燃料を充填して、燃料が切れる時には本部に戻ってこられる。

実証実験を通して、運送方式毎にどのくらい燃料費削減が可能か明確になってきた。Meakin 常務によると、LPGを多く使う運送方式が一番燃費を下げることが出来ると報告した。CM社の試験（一定の速度で60マイル走行した）の結果によると14.6%の経費削減を実現し、トラックの性能には悪影響が無かった上に、保証付きである。運送業者がディーゼルを信用するように LPG も信用できるはずだ。しかもLPGの方が、経済的効果が大きいのだから。

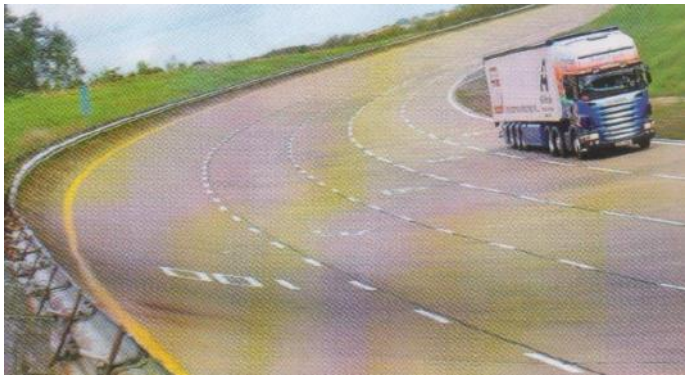
## THE TRUCK

CM社が実験に使った大型トラックは、Alliance & Leicester Contract Hire 社所有の SCANIA Topline 6x2 R420 Euro-4 である。この実験の為に GSPK Multifuel Technology 社と BP LPG 社に数台のトラックを提供し改造した。改造車にはちゃんと保証も付けてもらった。A&L Contract Hire の Ian Padley プロジェクトマネージャーは「この実証試験に参加した。バイオ燃料システムとディーゼル･LPG のデュアル･フューエルシステムの利点を比べて、お客様には LPG トラックのラインアップを提供することにした。LPG の場合、部品の保証がいつも問題になっていたが LPG デュアル･フューエルシステムに改造された弊社のトラック全てに保証を付ける事にした」と答えた。

## 試験の手順と結果

Milbrook Proving Grounds にて 44トン車は、2 マイルほど高速で走行させ、エンジンを温めてから一定の速度で 60 マイル走行させた。速度は 40mph、50mph、と 56mph。3 ブロックを 10 周したものが1コースとした。最初の 5 周はディーゼル燃料のみで走行させ、残りの 5 周はディーゼルと LPG の混合燃料で走行した。

| RUN ONE – DIESEL | RUN TWO – DIESEL/LPG | |
|---|---|---|
| Speed/fuel used | Diesel | Diesel/LPG |
| 40mph, litres | 4.18 | 3.04 1.77 |
| 50mph, litres | 4.62 | 2.84 2.60 |
| 56mph, litres | 4.93 | 3.09 2.86 |
| Net use, litres | 13.73 | 8.97 7.23 |
| Net cost at pumps, £ | **14.42** | **9.42 2.89** |
| Total cost, £ | **14.42** | **12.31** |
| Total saving | | **14.6%** |



ディーゼルのみの場合、13.73L 消費した。LPG と混合させた場合、LPG の消費量が 7.23L でディーゼルが 4.76L であった。デュアル・フューエルシステムの場合、ディーゼル消費量が 53%も減ったが、総合燃料消費量はディーゼルのみより多い。LPG は、ディーゼルより少ないエネルギーを生成させるのでディーゼルのみのパワーと一致させる場合は、LPG を多く消費する必要がある。速度を上げればLPGの使用量も増えた。ディーゼル価格は£1.05/L、LPG 価格は 40 ペンス/L で計算された。

## LPG の関税

コスト削減の主な要因は、燃料の関税にある。Meakin 常務によると「よくある誤解は、政府が突然、節約額が消えてしまうくらい LPG の関税額を上げることができるということです。これは全く不可能である。実際の LPG、ガソリンとディーゼルの関税額は一年しか前もって把握できないが、それらの差額分はわかっている。2004 年に政府はLPGとディーゼル/ガソリンの関税額の差を 3 年間維持すると約束した。この比率の差は代替燃料の枠組みに沿って、2008-2011 年度は年間 0.33 ペンス/L 削減され、最終的には 1 ペンス/L 減少される予定だ。我々のデュアル・フューエル技術による節約額には全く影響がない。この制度は 2012 年度まで反映されるようだ。現在、超低硫黄ディーゼルと無鉛ガソリンの関税は 50.35 ペンス/L で、LPG の関税は 42.1 ペンス/L である。差額は 42.1 ペンス/L。2008 年 10 月には 52.35 ペンス/L と 10.36 ペンス/L になる。2008 年度の差額は 41.99 ペンス/L。 2009 年 4 月には 54.19 ペンス/L と 12.41 ペンス/L になる。2009 年度の差額は 41.78 ペンス/L になる。

## LPG の技術

GSPK デュアル・フューエルシステムは、6 年かけて Knaresborough, North Yorks で GSPK Multifuel Technology 社が開発した。特注のソフトウェアを使用した電子制御装置(ECU)がトラックエンジンを制御する。エンジンはディーゼル燃料のみで動き始め、必要に応じて気化された LPG が燃焼室に噴射される。混合率はすべて ECU が制御する。

Meakin 常務曰く「燃料変換は、トラックが一定の速度で走行しているときに起きる。LPG が一部のエネルギーを発生させるので一定の速度を保つには、ディーゼルの噴射量を減らすしかない。部品の耐久性の範囲を超えないようにエンジンがフル稼働している時、LPG は使わない。」

タンクのサイズに関しては、運営方式によって異なる。LPG よりディーゼルの量を多く必要とする運営方式もあれば、その逆の場合もあるのでシステムの正確なコストは明言できない。**だが、1 台改造するに大体£7,000(約 120 万円)が目安**であり回収期間は各社の燃料代による。タンク'サイズは、要件に合うように適合させることができる。1 台改造するのに大体 3 日間かかる。

GSPK デュアル・フューエルシステムの主な代理店は、Lancashire 市の Future Fuel Technology と Devon 市の Ecoblend の 2 社である。

## *6)イラクのディーゼル･LPG デュアル･フューエルの研究資料*

### 単一気筒ディーゼルエンジンのデュアル･フューエル上の性能と排気分析

Miqdam Tariq Chaichan

### 解題

一般に、化石系燃料がエネルギー源として内燃機関で使用されている。化石系燃料の過度の使用は、現在の資源を減少させ、都市部の大気汚染問題を増加させている。限られている資源の有効活動と環境に優しい代替燃料の開発の重要性が高まっている。「代替気体燃料」は、気体状態にある燃料、他の燃料と混合しても、その燃料のみでも使用可能な燃料である。

今回は、IDI ディーゼルエンジンをデュアルフューエルシステムに改造し、エンジンの性能、排出量、と燃焼特徴を検証した。LPG を主燃料とし、ディーゼルが点火の為に少量使われた。この試験の結果によると、デュアルフューエルシステムの正味熱効率が低負荷の場合3%改善され、HC,CO と CO2 の排出量が減少した。

### はじめに

交通による地球汚染は、主に製造･運用･廃棄時に発生する輸送システムからの排出ガスによるものだ。これらのガスは、温室効果ガス発生に間接的に影響する二酸化炭素、メタン、炭化水素及び窒素酸化物などがあげられる。交通による地球汚染の問題は、輸送のために化石燃料を使用している事が主な原因である。道路輸送にはガソリンとディーゼル、航空輸送には灯油、鉄道輸送や産業にはディーゼル燃料が主に使われている（Selim, 2005 、Lakshmanan, 2009)。

気体燃料が高圧縮エンジンに適している理由は、従来の液体燃料よりもノッキング現象が起こりにくく、排出ガスの量が少なく、燃焼に優れているからだ(Yousufuddin, 2008)。その為、ディーゼルとのデュアルフューエルシステムの場合、ガス燃料は経済的にも環境的にも利点がある。デュアルフューエルシステム用の気体燃料に関する研究論文は多く出版されている。天然ガスの仕様は、燃焼期間と着火遅れの視点から研究され(Stanislav, 2001）、エンジン性能と排出ガスの視点からも研究されている（Abd Alla, 2002)。デュアルフューエルシステムの燃焼温度と熱負荷の研究(Karim, 1991)、メタンを使用した場合の火炎伝播の研究、(Papagiannakis, 2003)、エンジン性能と排出量の研究(Selim, 2004)なども行われてきた。

ディーゼルエンジンで LPG を使用することの利点は、経済面および環境面である。従来のディーゼルエンジンと同じように、気体燃料と空気が一緒に吸入され、この混合物を圧縮する。圧縮行程の最後の方に、パイロットと呼ばれる少量のディーゼル燃料を噴射し、燃焼を開始する(Vijayabalan, 2009)。デュアルフューエルシステムは、少ない燃料量の消費で、煙濃度と窒素酸化物の排出量が大幅に減少、およびブレーキ熱効率が改善される。このパイロット燃料が火炎伝播及び気体燃料の燃焼を引き起こす。簡単にデュアルフューエルシステムに改造は出来るが、正味熱効率の低下と低負荷での高い HC と CO の排出量に関連付けられている。

低負荷では、パイロット燃料の噴射量を増やせば正味熱効率は改善できるが、高負荷では急激な燃焼によって効率が下がる。また、低負荷での効率と排出量の問題は、パイロット燃料の噴射時期を調整する事によって改善することができる。燃焼下限界と火炎伝播を調整することでエンジン性能があがる(Heng, 2008)。

LPG 燃料の特徴は**表1**にまとまっている。この燃料を使用するエンジンには以下の特徴があげられる:

- 高い発火温度と安全:常温では、1.6Mpa～2MPa で液化するので簡単に使用できる。
- 気体のため、空気と簡単に混合するので燃焼しやすい。また、高オクタン価によってノッキング現象が起きにくい(Saleh, 2008)。
- LPG はディーゼルに比べて炭素数が少ないため、簡単にすすを低減することができる。また、燃焼室内に蓄積するすす層を低減することができる(Benea, 2007)
- ガス燃料は、エンジン潤滑油を希釈しない、且つ潤滑油の交換頻度が少ない(Qi, 2007)。
- LPGは、セタン数が少ないため、着火遅れが発生する。また、ディーゼルと比べてパワーが低い分、同じパワーを作る為にたくさんの燃料を消費する。

| Property | Diesel | LPG |
|---|---|---|
| Calorific value , kJ/kg | 44500 | 50000 |
| Self ignition temperature, °C | 725 | 525 |
| Boiling point range , °C | 260-320 | -34 |
| Ignition delay period, s | 0.002 | - |
| Flame propagation rate, cm/s | 10.5 | 83.7 |
| Flame temperature, °C | 1715 | 1985 |
| Surface tension, dynes | 32 | - |
| Viscosity at 39 °C, centistokes | 2.7 | - |
| Specific gravity at 32 °C | 0.83 | 0.43 |
| Sulpher content by weight, % | 0.8 | 0.0112 |

表 1. LPG 燃料の特徴

このようなLPGの利点を最大限利用できるようにエンジンのパラメーターを微調整する必要がある。今回の研究の主な目的は、排出量を減らすことである。その為、このために単気筒、間接噴射ディーゼルエンジンをデュアルフューエルシステムに改造した。燃料の比率は LPG 30%ーディーゼル 70%若しくは、LPG 60%ーディーゼル 40%に設定し、エンジン性能と排出量を計った。

## 実験の手順

今回は、Ricardo E6 の単気筒、間接噴射ディーゼルエンジンエンジンを改造した。エンジンの詳細は**表 2** にまとめた。このエンジンのシリンダーヘッドには、Ricardo Comet Mk V compression swirl の燃焼室が設置されており、この燃焼システムには 2 つの部分がある。第 1 部は、Swirl chamber である。上半分は球形で、下半分は短い円錐台の狭い通路を通じてシリンダーと通信する。第 2 部はピストンヘッドに特別な空洞が彫られている。改造されたエンジンは、ディーゼルのみでもディーゼル・LPG デュアル・フューエルでも作動する。デュアルフューエルシステムの場合、LPG 燃料はガスアダプターによってインテイクマニホールドに集まり、大気圧より僅かに高い圧力で噴射される。

| Model | Ricardo E6 |
|---|---|
| Type | IDI with the pre-combustion chamber |
| Number of cylinders | 1 |
| Bore × Stroke (mm) | 76.2×111.1 |
| Cycle | 4-stroke |
| Compression ratio | From 5 to 22 |
| Maximum power (kW) | 9 naturally aspirated |
| Maximum speed (rpm) | 3000 |
| Injection timing | Variable |

表 2. エンジンの仕様

実験の構成図は**図 1**に示されている。エンジンは、22 kW 、420 V の電気動力計に接続された。2 つのタンク(9L メインタンク、1L 二次タンク)にバルブが設置されていて、燃料の筒で繋がれている。バルブが作動して燃料の筒を空けたり閉めたりして、流量計を使ってディーゼルの流量が測定される。LPG の方は、デジタル圧力計に接続された電子分圧変換器に接続されたオリフィス流量計を用いて測定される。

窒素酸化物の濃度(NOx)、未燃焼全炭化水素(HC)、CO2 と CO の排出量を計るためにマルチガスモード 4880 の排出量アナライザが使用された。この装置は、バグダッド にある Central Organization for Standardization and Quality Control で調整された。

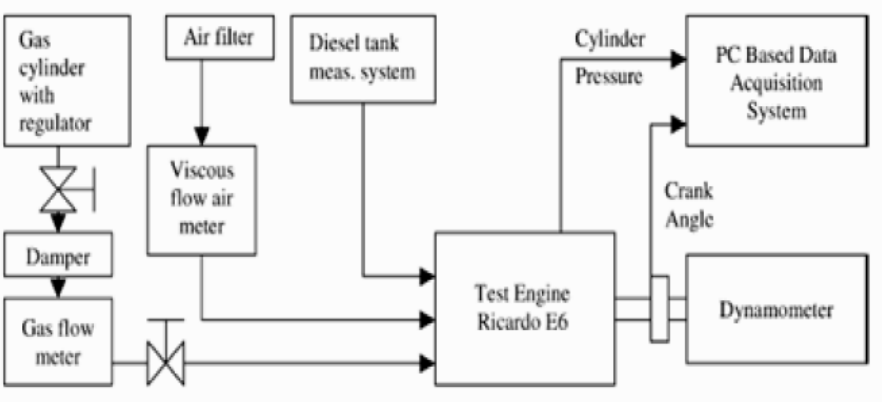



図 1. 実験の構成図

エンジンを起動し、エンジンの温度が 60℃±5℃及び、冷却水温度が 70℃±5℃になった時点で実験を開始した。以下のパラメーターで測定した:

1. 燃料の種類:ディーゼルのみとディーゼル・LPG デュアル・フューエル
2. エンジンの負荷は、負荷無しからフルロードまで
3. パイロット燃料(ディーゼル)の噴射タイミングを BTDC 20° ～ 45° を 5° ずつ増やした
4. エンジン回転数は 1000 rpm から 2100 rpm まで増やした

先ず、ディーゼルのみで試験をした。次に LPG(30%)、最後に LPG(60%)のデュアルフューエルモードで測定した。ディーゼル燃料を少なめにして、燃焼を効率化するために空気を多めに取り込んだ。まず、エンジン回転数を 1500 rpm ± 20 rpmに保ち、負荷無しでエンジン性能と排出量を計った。エンジン回転数を一定に保ち、徐々に負荷をフルロードまで増やした。各レベルで 3 分間エンジンを走らせ、3 セット行った。簡単で低コストな混合装置(**図 2**)を使って吸入行程時に LPG と空気を混合させた。

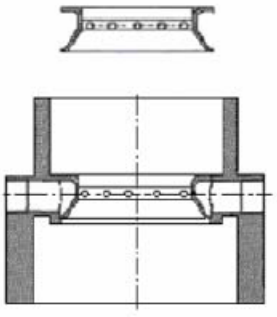


図
図 2. ミキサーの断面図

## 結果と議論

LPG は、空気と混合された状態で燃焼室に噴射されるので、ディーゼルのみに比べて体積効率が低下した。(**図 3**)また、回転数 1500rpm を一定に保って計った BSFC(Brake specific fuel consumption)が**図 4** に示されている。負荷率が 35%以下の場合、両方のエンジンの BSFC はほぼ均等だが 35%以上の場合、デュアル・フューエルの BSFC の方が多少低くなる。その為、負荷 35%以下の場合はディーゼルのみの運行で、35%以上になるとデュアルフューエルモードで走るように電子的に制御するのが一番快適である。

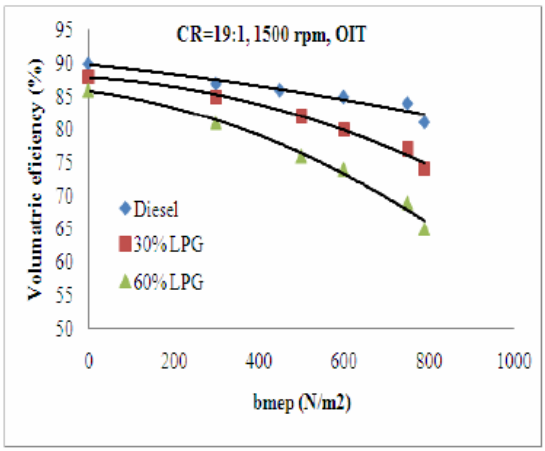



図 3. 体積効率

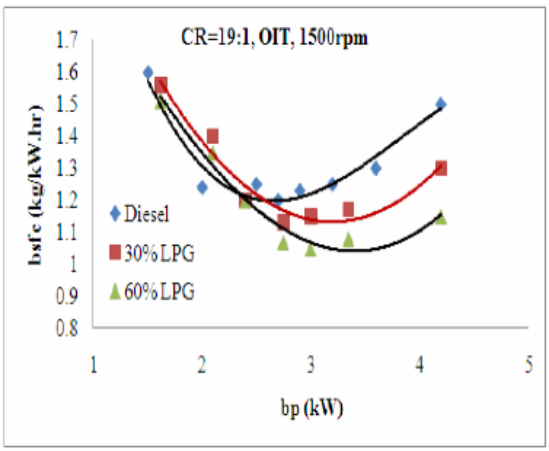



図 4. 正味燃料消費率

2 つの燃料システム用のブレーキ熱効率と制動力の関係が**図 5** に示されている。ディーゼルに比べて LPG の高発熱量と低い質量によって、LPG の量を 60%に増やすとブレーキ熱効率があがった。また、排気ガス温度とブレーキ力の関係が**図 6** に示されている。負荷を上げると排気ガス温度も上がり、LPG の量を増やすと排気ガス温度が下がった。最適なタイミングで噴射されれば LPG のデュアル・フューエルの方が燃焼スピードと効率が上がった。ピストンの下り行程の時、すべての燃料が燃焼されるので排気弁が開く前に既燃ガスが冷えるので排気ガス温度が高くならない。

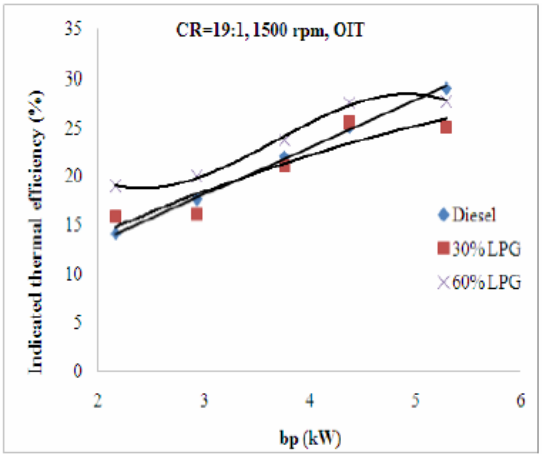



図 5. ブレーキ熱効率

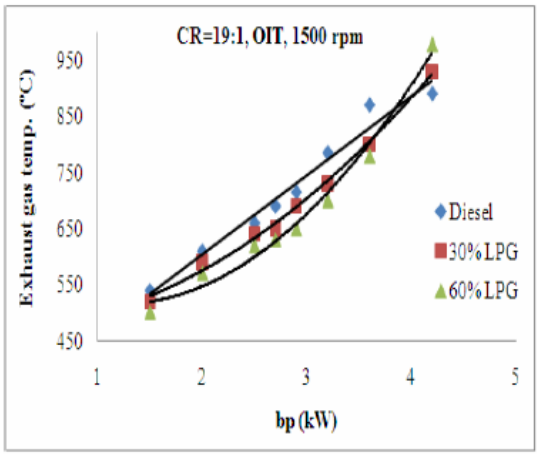



図 6. 排気ガス温度

ディーゼル・LPG デュアル・フューエルの外部特性の BMEP(brake mean effective pressure)との比較が**図7**に示されている。低速度では、ディーゼルのみよりデュアル・フューエルの BMEP の方が多少少ないけどトルクに関してはディーゼルのみの時と変わりない。また、両システムの BSFC(Brake specific fuel consumption)が**図 8** に示されている。デュアル・フューエルの BSFC の方がディーゼル

に比べて低い。LPG が加わることで燃焼効率が改善されるので、フルロードでの BSFC は低い。

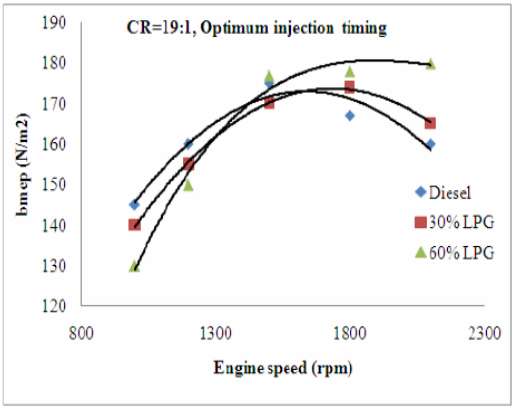



図 7. BMEP

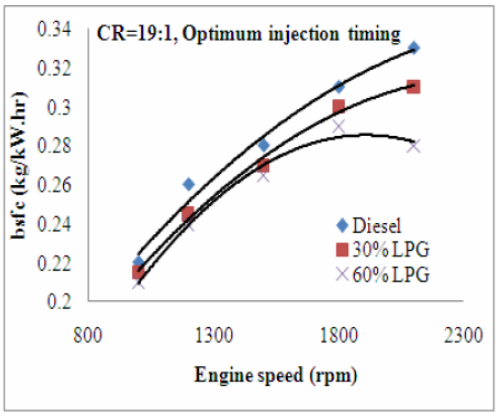



図 8. BSFC

噴射タイミング、BTDC でクランク角度を 5° 毎に変更した。(**図 9**)結果によると、デュアル・フューエルで運動すると BSFC が減少することが明らかである。BSFC の最小値は、噴射タイミングが 27° BTDC(60%LPG)の時と、噴射タイミングが 30° BTDC(30%LPG)の時である。噴射タイミングを遅らせるとBSFC が一気に増えるので何回も続けてこの実験は行われなかった。BSFC は、LPG の量を増やすとともに減った。また、BMEP と噴射タイミングが**図 10** に示されている。噴射タイミングを遅らせるとシリンダー内の温度が上がってしまうので LPG が噴射された瞬間気化されてしまう。気化されてしまうと点火が遅れてしまう。タイミングを早めると、点火が早く起こり、燃焼効率が上がるので BMEP も高まる。

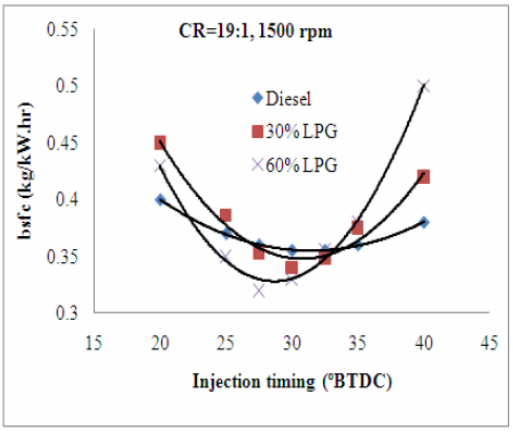



図 9. BSFC と BTDC の比較

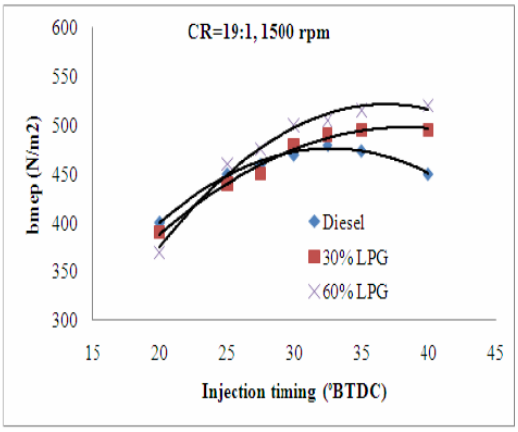



図 10. BMEP と BTDC の比較

排気ガスの温度と BTDC の比較が**図 11** に示されている。噴射タイミングを遅らせると点火時が遅れ、ピストンが TDC 以外の場所で燃焼が起きてしまう。その結果、排気ガスの温度が上がってしまう。LPGと空気の混合物は、燃焼効率を高めるので燃焼温度も高くなる。その結果、燃焼時のピークシリンダー圧力と温度がとても高い。また、**図 12** では、CO の排出量が示されている。CO の低い放出の理由は、増加した燃焼温度によって、局所的な乱流が発生させ、火炎速度を速めたことにある。

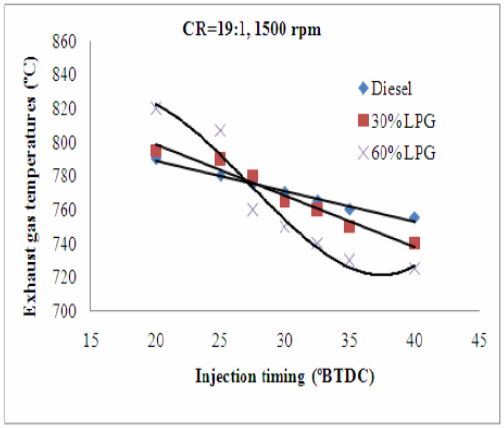



図 11. 排気ガスの温度と BTDC の比較

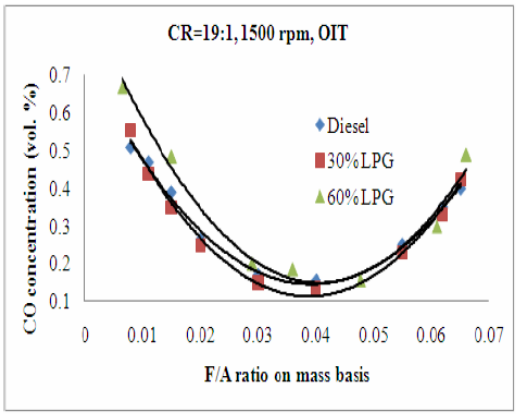



図 12. CO の排出量

CO 排出量とエンジン回転数の比較が図 13 に示されている。エンジン回転数が低いフルロードの場合、CO の排出量は、ディーゼルのみの時より高い。しかし、回転数が高い場合、ディーゼルのみの場合より低かった。CO の排出量は、燃料の混合物濃度と燃料組成によって異なる。また、CO 排出量と噴射タイミングの比較が図 14に示されている。噴射タイミングを遅らせると CO 排出量が増えたが、LPG の量を増やすと減った。噴射タイミングを遅らせると燃焼される燃料量が減るので燃焼量が増えるがその次の燃焼に影響を与え、不完全燃焼が起きやすくなる。そうすると CO が発生する。LPG を増やすことによって、炭素数を減らすことが出来るので CO の排出量が減る。

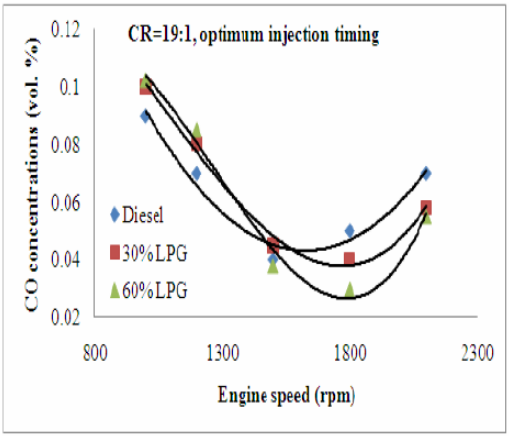



図 13. CO 排出量とエンジン回転数の比較

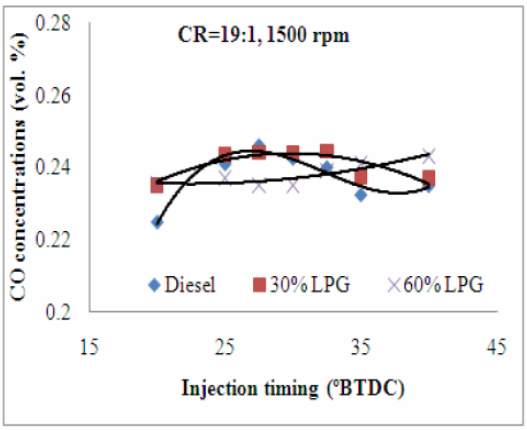



図 14. CO 排出量と噴射タイミングの比較

CO2 の排出量が図 15 に示されている。LPG が加わることによって炭素と水素の比率を上げるので燃焼を効率化し、CO2 の排出量を減らす。また、CO2 排出量と噴射タイミングの比較が図 16 に示されている。タイミングを遅らせると CO2の排出量が増えたが、LPG を加えることによって減った。ディーゼルより LPG の分子構造が単純なので、より簡単に酸化される。その為、炭素数を減らし、CO2 排出量も減らす。

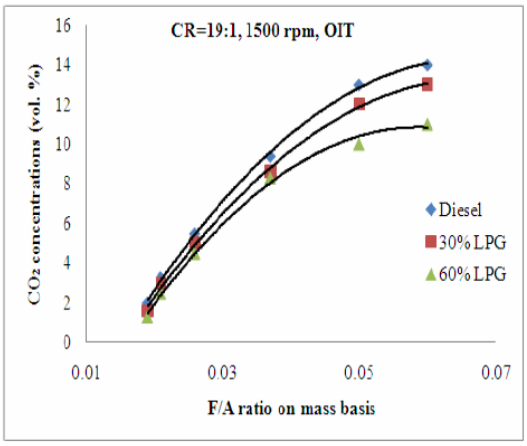



図 15. CO2 の排出量

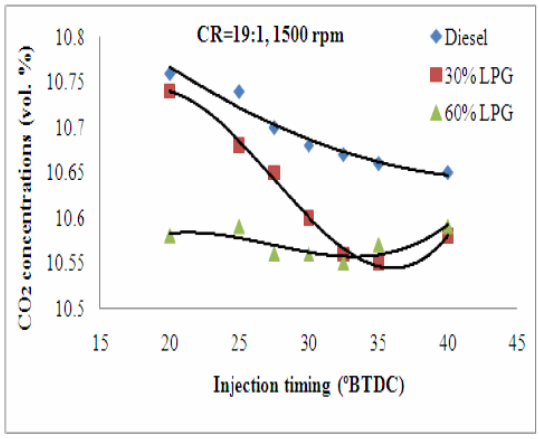



図 16. CO2 排出量と噴射タイミングの比較

NOxの排出量が図 17 に示されている。ディーゼルのみの場合でもデュアル・フューエルの場合でも、負荷を上げる毎に NOxの排出量が増えた。しかし、ディーゼルのみよりもデュアル・フューエルの方が少なかった。LPG は、空気とうまく混合するので完全燃焼が起こり、エンジン内は高熱になる。高熱は、NOx の形成の可能性を秘めて増加させるがそれは高い解離速度ももたらすので冷却効果が発生する。その結果、ピストンの下り行程の時、冷却水によって燃焼室が冷却されるので乱気流も燃焼率も改善される。噴射タイミングを微調整することによって、NOxを形成する時間を減らすことが出来る。また、NOxの排出量とエンジン回転数の比較が図 18 に示されている。NOxの排出量は、デュアル・フューエルの方がエンジン回転数によって少ない場合が多かった。NOx の生成は、混合物の濃度と燃焼温度などの要因によって異なるので排出量も異なってくる。

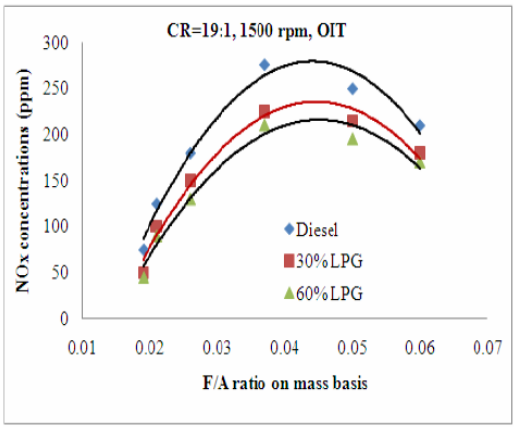



図 17. NOxの排出量

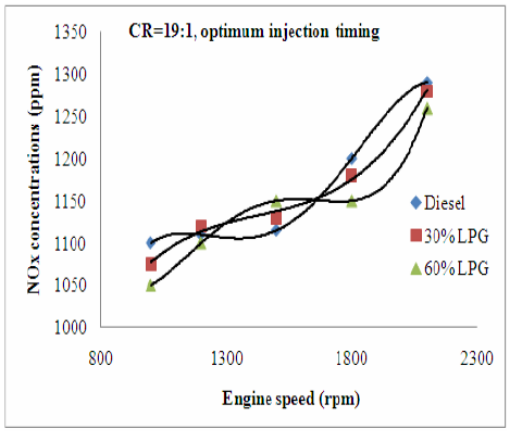



図 18. NOxの排出量とエンジン回転数の比較

NOx の排出量と噴射タイミングの比較が図 19 に示されている。試験結果によると、LPG の混合比率と噴射タイミングによって NOxの排出量が大きく影響される。噴射タイミングを遅らせると NOxの排出量が減ったが、LPG の量を増やすと NOxも増えた。噴射タイミングを遅らせると点火遅れが発生しにくくなるので、シリンダー内のガス温度、放熱量と NOxの削減に繋がった。一方、LPG を増やすことによって点火遅れが発生しやすくなるので、シリンダー内のガス温度、放熱量と NOxの増加に繋がった。その為、LPG の量を増やす場合には、混合比率と噴射タイミングを微調整しないといけない。

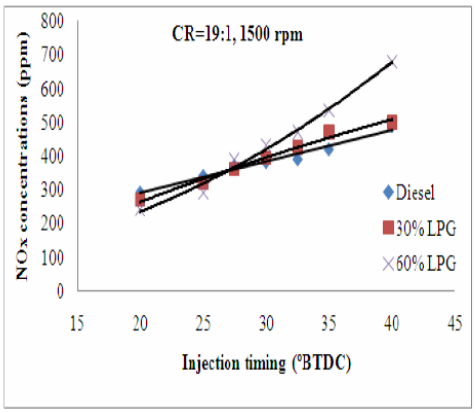



図 19. NOx の排出量と噴射タイミングの比較

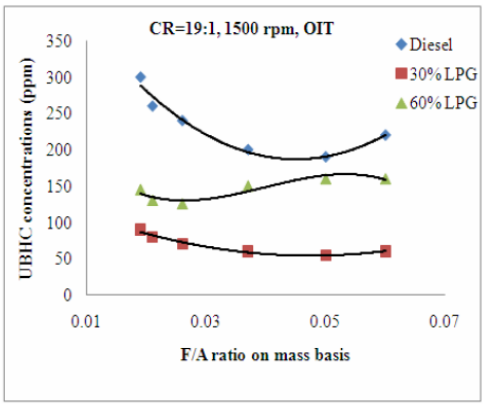



図 20. 未燃焼炭化水素

図 20 には未燃焼炭化水素(UBHC)が示されている。デュアルフューエルシステムの方が UBHC が全般的に低かった。Gunea, 1998 では、UBHC が増えたと報告されているが、最適な噴射タイミングで行われていなかったと判断する。UBHC とエンジン回転数の比較が図 21 に示されている。フルロードの場合、デュアル・フューエルの HC 排出量の方がディーゼルのみより高かった。これは、2 つの原因がある。一つ目は、LPG の混合物がバルブのオーバーラップ期間中にシリンダーから外部に掃気されることである。二つ目は、圧縮行程の間に冷却隙間に圧入される LPG を燃焼させることが難しいことである。また、UBHC と噴射タイミングの比較が図 22 に示されている。噴射タイミングを遅らせると UBHC が増えて、タイミングを早めると UBHC が減る。ガス燃料の組成によって HC の排出量が増える。

また、不完全燃焼で発生した HC がシリンダー内の高熱によって酸化される。ディーゼルより LPG の分子構造が単純で、より簡単に酸化されるので LPG を増やすと UBHC の数が減る。今回の実験でわかったことは、噴射タイミングを調整するより LPG の量を増やす方が UBHC の量が減らせることである。その結果、ディーゼル・LPG のデュアルフューエルシステムは有利であると結論付ける。

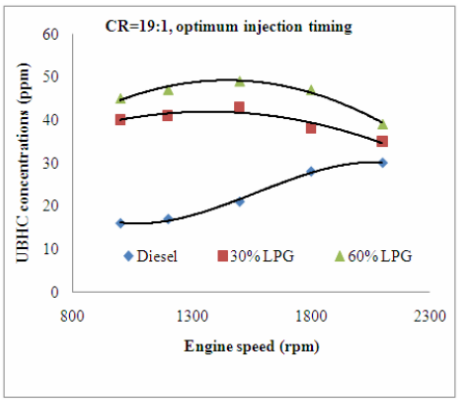



図 21. UBHC とエンジン回転数の比較

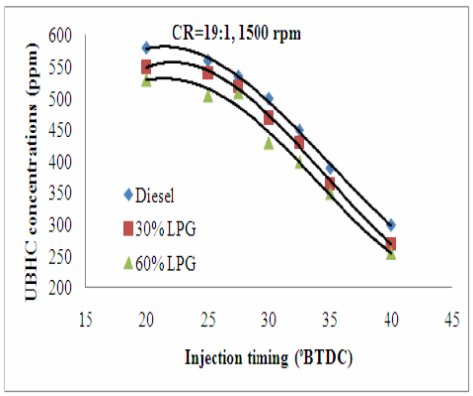



図 22. UBHC と噴射タイミングの比較

## 結論

今回は、IDI ディーゼルエンジンをデュアルフューエルシステムに改造し、エンジンの性能と排出量を検証した。負荷を変動しながら LPG を主燃料とし、ディーゼルが点火の為に少量使われた。この試験の結果は以下のとおりである。

1. 排気ガスの温度は、デュアルフューエルシステムの方が低かった。
2. HC、CO、CO2 の排出量は、デュアルフューエルシステムの方が圧倒的に少なかった。
3. 最適な噴射タイミングで作動した場合、ブレーキの燃料消費量は、デュアルフューエルシステムの方が少なかった。
4. ディーゼルシステムでエンジン速度とブレーキ圧力を一定に保ちながら噴射タイミングを遅くすると HC、CO と CO2 の排出量が増えて NOxの排出量が減った。
5. デュアルフューエルシステムでエンジン速度とブレーキ圧力を一定に保ちながら噴射タイミングを遅くすると HC、CO と CO2 の排出量が減って NOxの排出量が増えた。

デュアルフューエルシステムの仕様によってNOxとUBHCの排出量が減った。燃料性質は排出ガスに関して重要な要因である事がわかる。ディーゼルシステムは、ディーゼル・LPG デュアルフューエルシステムへと改造することができる。このシステムの方が環境に優しい。LPG はインテイクマニホールドを通じて燃焼室で必要な分量を明確に噴射される。噴射量を増やすと排出量を改善することができる。

### *7)インドのディーゼル・LPG デュアル・フューエル研究資料(Feb. 2014)*

### ディーゼルとLPGのデュアル・フューエルエンジンの性能と排出量

Deo Raj Tiwari and Gopal P. Sinha,
Department of Mechanical & Automobile Engineering, Sharda University, Greater Noida, India

### 要約書

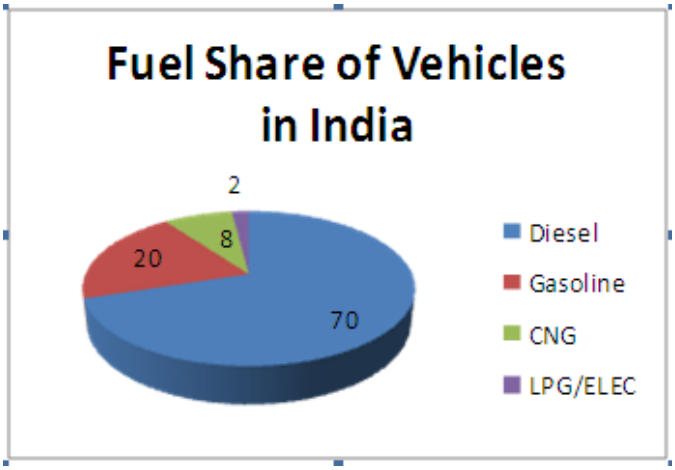
本論文では、混合燃料を使った圧縮着火型エンジン(Compression Ignition [CI])の性能と排出量に関する観測結果とその分析を行う。ディーゼルの噴射量は一定に保ちながら LPG の噴射量を変動させた。実験は、負荷を変えながら行った。研究の目的は、汚染物質の排出を最小化することであった。性能に関しては、熱効率とパワーを観察した。結果は、LPG 使用の好影響を示している。結果、分析と勧告は、私たちの以下の論文で報告されます。

### 1. はじめに

今回は、CI エンジンを使用して実験した。CI エンジンは、NOx、SOx、CO2、CO、粒子状物質、すす粒子のような汚染物質等を各種発生する。汚染物質の排出は、エンジン、燃焼、燃料等によって異なるのでバイオディーゼルおよびガス状の燃料添加剤を使用して、これらの排出量を大幅に低減することができる。

排出量を制御するための二つの方法がある。一つ目の方法は、触媒コンバータや熱変換器を使用して、燃焼後の排出を制御することである。二つ目の方法は、燃焼時の排出量を制御することである。やり方は2方法： 1） 燃料噴射時期を変更するか、2） 外部から添加剤(LPG、水素、または蒸気)を加えて燃焼室内でクリーンな燃焼を起こす。

LPG は、空気と吸気マニホールドを介して吸入行程中に燃焼室内に噴射される。LPG は、空気と吸気マニホールドを介して燃焼室内に噴射される。しかし LPG は、高い自己点火温度まで燃焼しない為、ディーゼルの様な自己点火温度が低い燃料と混合させると簡単に燃焼する。均質燃焼のため、未燃焼炭化水素、すす粒子、等の排気中の汚染物質を低減される。**図 1** によると、インドではディーゼル車が最も多いのがわかる。そのうち、CI エンジンを搭載しているのが輸送車である。



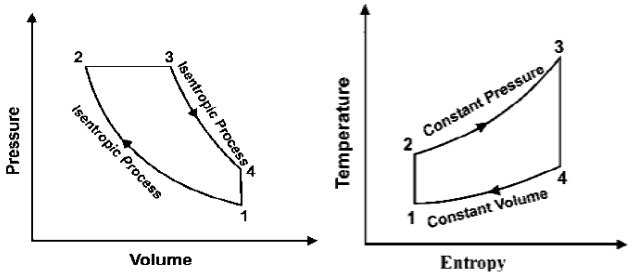

## 1.1 燃焼機関に関して

内燃機関(Internal Combustion Engine)は 2 種類に分かれている：

a. SI エンジン： 火花点火エンジン(Spark Ignition)
b. CI エンジン： 圧縮着火エンジン(Compression Ignition )

## 1.2 内燃機関の基本作動

内燃機関のピストンは、一定の燃料量若しくは、一定の圧力によって作動する。SI エンジンに最も多いオットーサイクルの場合、燃料量が一定の水準に到達するすると熱が加えられて熱機関の理論サイクルで作動する。ディーゼルサイクルの場合、圧力が一定の水準に到達すると低圧・熱添加によって作動する。(**図 2**)




1-2: Adiabatic compression （断熱圧縮）
2-3: Const. pressure heat addition （低圧・熱添加）
3-4: Adiabatic expansion （断熱圧縮）
4-1: Const. volume heat rejection（低圧・熱遮断）

図 2. ディーゼルサイクル

| Properties | Diesel | LPG |
|---|---|---|
| Normal State | Liquid | Gaseous |
| Formulae | $C_3H_8$ | $C_{12}H_{26}$ |
| Calorific value (kJ/kg) | 44800 | 50350 |
| Specific gravity | 0.8 | 0.587(liquid) |
| Auto ignition temperature (℃) | 225 | 540 |
| Flash point ( ℃) | 62 | -104 |
| Cetane no. | 5-10 | 40-60 |
| Stoichiometric A/F ratio (mass) | 14.5 | 15.7 |
| Peak flame temperature (℃) | 2054 | 1990 |

表 1. ディーゼルと LPG の比較

## 2. 文献展望

さまざまな方法で汚染物質の排出を最小化する研究が多く行われてきた。Vijaybalan と Nagarajan 氏[1]は、汚染物質排出を最小化しようと燃焼室内にグロープラグを用いた。通常にインジェクターでディーゼルを噴射し、LPG も加えた。煙と NOx は削減したが、グロープラグ無しでの低負荷では、炭化水素と CO の排出量が増えた。グロープラグを使えばブレーキ熱効率が 3%改善した。Rao, et.al は、ディーゼルと LPG を燃料としたディーゼルエンジンの性能を研究した。エンジンの吸気側に LPG 気化器を使用した。1500 rpm の一定速度を保ちながら負荷に合わせて LPG 燃料量を調節した。負荷 35%までは、ディーゼル燃料のみの使用が最適なエンジン作動に繋がった。高負荷では、ディーゼルのみの場合と LPG とディーゼルの二重燃料の場合でもエンジン作動率と汚染物質排出量に変わりがなかった。彼らの勧告では、二重燃料を使用する条件としては、35%を超える負荷での運転である。

Punia、et.al は LPG ディーゼルデュアル燃料エンジンにおけるエンジン作動と汚染物質排出量を調べた。排気ガス再循環、吸気絞り、及び注入速度の影響も調べた。LPG を主燃料とし、ディーゼル燃料をパイロット燃料として使用した。低負荷の吸気絞りは、エンジン効率と高いカーボン排出の両方を向上させることができることが分かった。負荷が 20%の時が最適であった。噴射率が低いと、不適切な混合気形成のため、ブレーキ熱効率が悪い。噴射時期を早めることで燃焼時間の縮小がなく、燃焼プロセスが改善された。CO および未燃焼炭化水素の減少も観察された。

Elnajjar, et.al による最近の研究では、パイロット燃料とガス燃料との混合比率の影響（スピード、噴射時期、不可、圧縮比率、等）を調べた。3 種類の燃料で実験を行った：1）ディーゼル、2）ディーゼル・LPG のデュアル・フューエル、3）ディーゼル・天然ガスのデュアル・フューエル。最大シリンダー圧力と最大圧力上昇率に対応する位置（クランク角）が報告された。また、エンジン速度、噴射時期、および圧縮比を一定に保った状況で、気体燃料の増加量と関連なく、ノイズレベルは同じであったことを報告している。これは、デュアル・フューエルシステムに関する重要な観察である。エンジンのために重要である。なぜなら、ディーゼルのみの時よりデュアル・フューエルにした方が、パワーがあるのにノイズレベルが同じだからである。

## 3. 実験のレイアウト構造

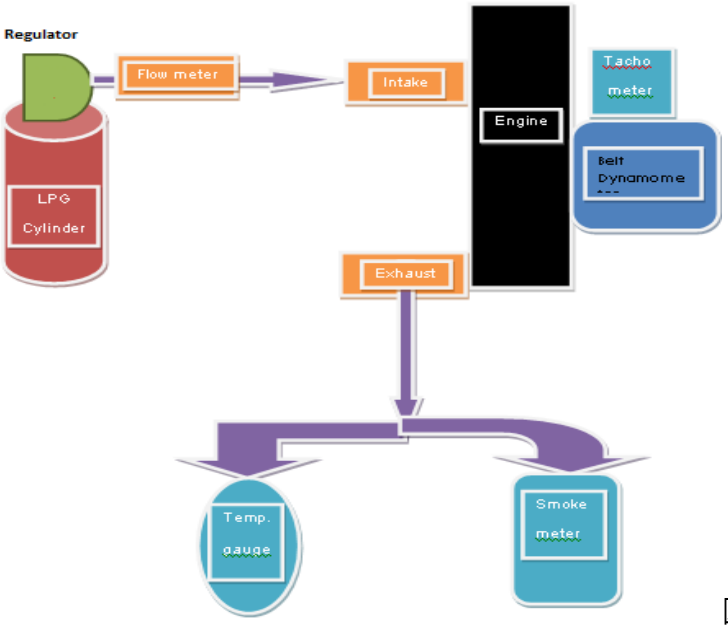
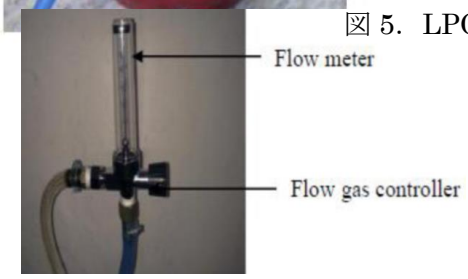



図4. 実験のレイアウト構造

図 5. LPG 燃料タンク




### 3.1 レイアウト構造の説明

#### 3.1.1 LPG 燃料タンク、ガス管とガスレギュレーター

LPG 燃料タンクは、5リットルの鋼製のものである。シリンダーは、重量は 4.5 キロで、 水容量は 5.6 リットルである。シリンダー内の圧力は大気圧より少し高い。タンク内の LPG は、ガスレギュレーターを通り、PVC ガス管を通じてエンジンのインテイクマニホールドに送り込まれる。銅製の LPG バルブとレギュレーターは、全開の場合、大気圧で 0.5 $m^3$/hr の速度で燃料をエンジンに提供する。

#### 3.1.2 ガス流量計

ガス流量計は、特定の時間帯にどのくらいの量の LPG が燃焼シリンダーに入るかを測定するもので、この実験の最も重要な部品である。単位は L / min である。LPG がこのガス流量計を通ると、ガラス管の中にある鉄球が上がり、どのくらいの LPG がエンジンに送り込まれているか正確に読み取ることが出来る。

#### 3.1.3 エンジン仕様

実験用のエンジンは、単気筒のディーゼルエンジンである。エンジン動力は、5 HP(3.73 キロワット)で、エンジン回転数が 1500rpm である。負荷は、ベルト式のダイナモを使って負荷を変化させた。

図 7. **エンジンと**ベルト式のダイナモ

3.1.4 水力摩擦ダイナモ

これは、エンジンの負荷を変化させるために使用される。水の量は、回転小型バルブによって調整される。負荷変動は、針·インジケータ(kg)で表示される。負荷を N に変換する場合は、重力定数を掛ける。

3.1.5 燃料測定装置

燃料量は、mL の計りが掘り込んであるビュレットを使った。燃料消費量は、ブレットを使って燃料消費量を計算し、時間帯はストップウォッチを使用した。

3.1.6 デジタルタコメータ

デジタルタコメータは、LPG の燃料量と負荷の変動により、エンジンの回転数を決定するために使用される。RPM がわかれば簡単にブレークパワーとブレーキ熱効率を計算することができる。

3.1.7 煙濃度計

煙濃度計は、ディーゼルエンジンによって放出された煙のサンプルを基に、どのくらいの光を遮断しているか煙濃度を計る。煙濃度は、燃焼の効率を表すのでメンテナンス作業で役立つ装置である。ディーゼル煙には、ディーゼルエンジンの排気中に懸濁された煙霧質.が含まれている。煙の不透明度は、% HSU (Hartridge Smoke Unit) の単位で表している。また、煙濃度は、ガス体積当たりの煙の粒子数の関数、煙粒子の分布状態及び、物体の光吸収度·光散乱度を計ることができる。

3.2 実験の手順

1. ディーゼル燃料をエンジンに提供する
2. エンジンをかける
3. LPG 燃料をタンクからエンジンに提供する
4. レギュレーターを使って LPG の容量を調整する
5. LPG の容量に対してダイナモを使って負荷を変動させる
6. 煙濃度計を使って各負荷の%HSU を計算する
7. デジタルタコメータを使って各負荷での rpm を測定する
8. 各負荷での燃料流量を計る

9. 各負荷での排気の温度も計る

上記手順を負荷と燃料量を変動させる毎に繰り返します。この手順を行う時は必ずストップウォッチで特定の時間にわたって行われた。

## 4. 結果と分析

| LOAD (KG) | RPM | DIESEL FUEL CONSUMPTION (ml/s) | BRAKE POWER (KW) | BRAKE THERMAL EFFICIENCY (%) | EXHAUST GAS TEMP ( □C) | SMOKE DENSITY (%HSU) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1440 | 0.220 | 0 | 0 | 140 | 82 |
| 1 | 1404 | 0.230 | 0.2307 | 2.79 | 155 | 87 |
| 2 | 1382 | 0.250 | 0.4543 | 5.07 | 165 | 89 |
| 3 | 1365 | 0.310 | 0.6730 | 6.05 | 180 | 90 |

表 2. ディーゼル燃料のみの場合（10 秒毎）

| LOAD (KG) | RPM | DIESEL FUEL CONSUMPTION (ml/s) | BRAKE POWER (KW) | BRAKE THERMAL EFFICIENCY (%) | EXHAUST GAS TEMP ($^0$C) | SMOKE DENSITY (%HSU) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1720 | 0.170 | 0 | 0 | 125 | 67 |
| 1 | 1703 | 0.200 | 0.2790 | 2.881 | 145 | 71 |
| 2 | 1685 | 0.230 | 0.5532 | 5.152 | 160 | 76 |
| 3 | 1662 | 0.275 | 0.8190 | 6.638 | 174 | 80 |

表 3. ディーゼル燃料と LPG の場合（10 秒毎に 0.5L/min の LPG を加えた）

| LOAD (KG) | RPM | DIESEL FUEL CONSUMPTION (ml/s) | BRAKE POWER (KW) | BRAKE THERMAL EFFICIENCY (%) | EXHAUST GAS TEMP ( □C) | SMOKE DENSITY (%HSU) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1742 | 0.130 | 0 | 0 | 168 | 64.6 |
| 1 | 1732 | 0.155 | 0.2846 | 2.92 | 172 | 68 |
| 2 | 1701 | 0.180 | 0.5591 | 5.25 | 180 | 71 |
| 3 | 1672 | 0.210 | 0.8244 | 7.04 | 191 | 75 |

表 4. ディーゼル燃料と LPG の場合（10 秒毎に 0.9L/min の LPG を加えた）

| LOAD (KG) | RPM | DIESEL FUEL CONSUMPTION (ml/s) | BRAKE POWER (KW) | BRAKE THERMAL EFFICIENCY (%) | EXHAUST GAS TEMP (°C) | SMOKE DENSITY (%HSU) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1784 | 0.100 | 0 | 0 | 180 | 60 |
| 1 | 1771 | 0.120 | 0.2912 | 2.86 | 189 | 62 |
| 2 | 1750 | 0.140 | 0.5752 | 5.30 | 199 | 67 |
| 3 | 1739 | 0.160 | 0.8575 | 7.41 | 210 | 72.1 |

表 5. ディーゼル燃料と LPG の場合（10 秒毎に 1.4L/min の LPG を加えた）

| LOAD (KG) | RPM | DIESEL FUEL CONSUMPTION (ml/s) | BRAKE POWER (KW) | BRAKE THERMAL EFFICIENCY (%) | EXHAUST GAS TEMP (°C) | SMOKE DENSITY (%HSU) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1795 | 0.095 | 0 | 0 | 191 | 59.9 |
| 1 | 1775 | 0.115 | 0.2917 | 2.33 | 209 | 61.3 |
| 2 | 1762 | 0.132 | 0.5795 | 4.22 | 220 | 65.2 |
| 3 | 1744 | 0.155 | 0.8599 | 6.18 | 232 | 69.9 |

表 6. ディーゼル燃料と LPG の場合（10 秒毎に 1.9L/min の LPG を加えた）

## 4.1 汚染物質の排出量の分析

### 4.1.1 %HSU （smoke density / % capacity）

| Load (kg) | %HSU | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Without LPG addition | With 0.5L/min LPG addition | With 0.9L/min LPG addition | With 1.4L/min LPG addition | With 1.9L/min LPG addition |
| 0 | 82 | 67 | 64.6 | 60 | 59.9 |
| 1 | 87 | 71 | 68 | 62 | 61.3 |
| 2 | 89 | 76 | 71 | 67 | 65.2 |
| 3 | 90 | 80 | 75 | 72.1 | 69.9 |

表 7. %HSU

この表によると、ディーゼル燃料のみを使用した場合、負荷を上げるごとにすす粒子が増えているのがわかる。なぜなら、負荷を上げるごとに、燃料量を増やしていくが、空気量は変わっていない。酸素が燃焼室内で足りないので、すす分子の量が増える。

ディーゼルと LPG のデュアル・フューエルの場合、LPG 燃料用を増やす毎に%HSU 数値が下がるのがわかる。負荷が下がるごとにも数値が減っていくのがわかる。なぜなら、負荷が低い時、ディーゼルの燃焼時間が減るからである。それで燃焼室内の低温と低圧に繋がり、適切な LPG の点火と燃焼が起きにくい。でも負荷が上がればディーゼルの燃焼率が上がり、燃焼室内の温度も上がり、適切な LPG の点火と燃焼が起きやすくなる。その結果、%HSU 数値が下がる。

### 4.1.2 ディーゼル流量

| Load(kg) | Fuel diesel flow rate (ml/sec) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Without LPG addition | With 0.5L/min LPG addition | With 0.9L/min LPG addition | With 1.4L/min LPG addition | With 1.9L/min LPG addition |
| 0 | 0.220 | 0.170 | 0.130 | 0.100 | 0.095 |
| 1 | 0.230 | 0.200 | 0.155 | 0.120 | 0.115 |
| 2 | 0.250 | 0.230 | 0.180 | 0.140 | 0.132 |
| 3 | 0.310 | 0.275 | 0.210 | 0.160 | 0.155 |

表 8. ディーゼルの燃費

負荷を上げる毎にディーゼル流量があがることがわかる。しかし、LPG 燃料量を増やす毎にディーゼル流量が下がる。明らかに LPG 燃料が消費されているだからだ。

### 4.1.3 排気温度

| Load (kg) | Exhaust temperature ($^0$C) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Without LPG addition | With 0.5L/min LPG addition | With 0.9L/min LPG addition | With 1.4L/min LPG addition | With 1.9L/min LPG addition |
| 0 | 140 | 125 | 168 | 180 | 191 |
| 1 | 155 | 145 | 172 | 189 | 209 |
| 2 | 165 | 160 | 180 | 199 | 220 |
| 3 | 180 | 174 | 191 | 210 | 232 |

表 9. 排気温度(℃)

負荷が上がれば排気温度も上がることがわかる。また、LPG 燃料量が増えれば排気温度も上がるのがわかる。なぜなら、燃焼室内の温度が高いため、LPG の燃焼時間が遅くなるからだ。
燃焼温度は、排気中の NOx の形成と密接に関係している。燃焼温度が上がれば NOxの排出量も増えた。でも燃焼室に LPG を加えればその分空気の容量が減るので、窒素及び酸素の量が同時に減るので NOxの排出量が減る。

### 4.1.4 制動馬力

| Load (kg) | Brake power(KW) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Without LPG addition | With 0.5L/min LPG addition | With 0.9L/min LPG addition | With 1.4L/min LPG addition | With 1.9L/min LPG addition |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.2307 | 0.2790 | 0.2846 | 0.2912 | 0.2917 |
| 2 | 0.4543 | 0.5532 | 0.5591 | 0.5752 | 0.5792 |
| 3 | 0.6730 | 0.8190 | 0.8244 | 0.8575 | 0.8599 |

表 10. 制動馬力(kW)

### 4.1.5 ブレーキ熱効率

| Load (Kg) | Brake thermal efficiency (% increase) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Without LPG addition | With 0.5L/min LPG addition | With 0.9L/min LPG addition | With 1.4L/min LPG addition | With 1.9L/min LPG addition |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2.79 | 2.88 | 2.92 | 2.86 | 2.33 |
| 2 | 5.07 | 5.15 | 5.25 | 5.30 | 4.22 |
| 3 | 6.07 | 6.63 | 7.04 | 7.41 | 6.18 |

表 11. ブレーキ熱効率

負荷が増えればブレーキ熱効率もあがるのがわかる。ディーゼルに LPG を加えると、負荷が増える毎にブレーキ熱効率が改善される。なぜなら、LPG が燃焼室内でしっかりとディーゼルと混合し、適切に燃焼されるようになるからだ。その結果、温度が高くなり、燃焼率が上がり、エンジン作動効率が向上される。

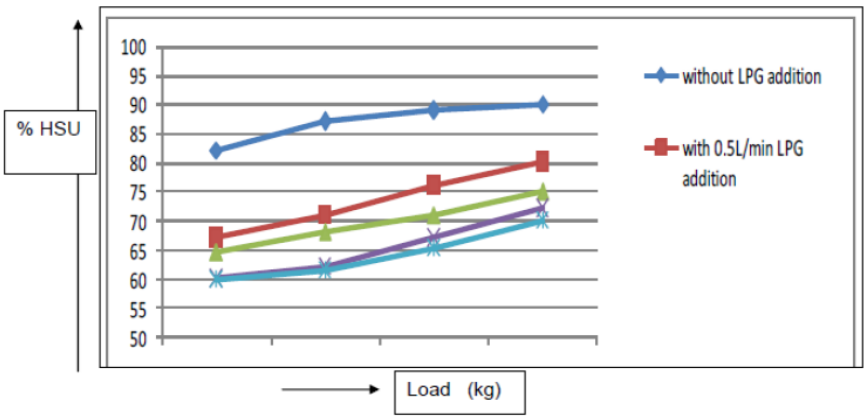
| Load (Kg) | Brake specific fuel (diesel) consumption (kg/kWh) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Without LPG addition | With 0.5L/min LPG addition | With 0.9L/min LPG addition | With 1.4L/min LPG addition | With 1.9L/min LPG addition |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2.87 | 2.70 | 2.62 | 2.61 | 3.18 |
| 2 | 1.58 | 1.52 | 1.46 | 1.42 | 1.55 |
| 3 | 1.32 | 1.18 | 1.09 | 1.02 | 1.20 |

表 12.　ブレーキの特定燃費(ディーゼル)

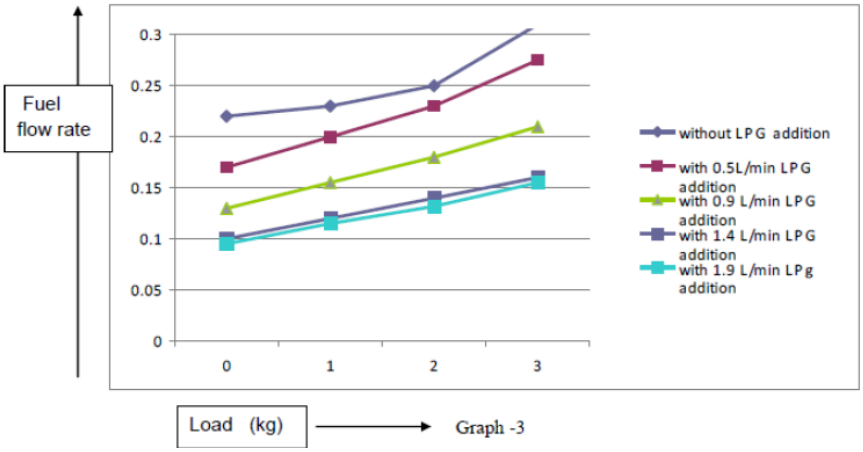
表 12. によると、負荷が上がればブレーキの特定燃費(ディーゼル)の消費量が下がるのがわかる(-1.55)。でもディーゼルに LPG を加えた場合、負荷が上がるごとに燃費消費量がさらに下がるのがわかる(-1.52, -1.53, -1.59, -1.98 )。なぜなら LPG が燃焼後、熱を放つからだ。

## 4.2 グラフ表示により分析

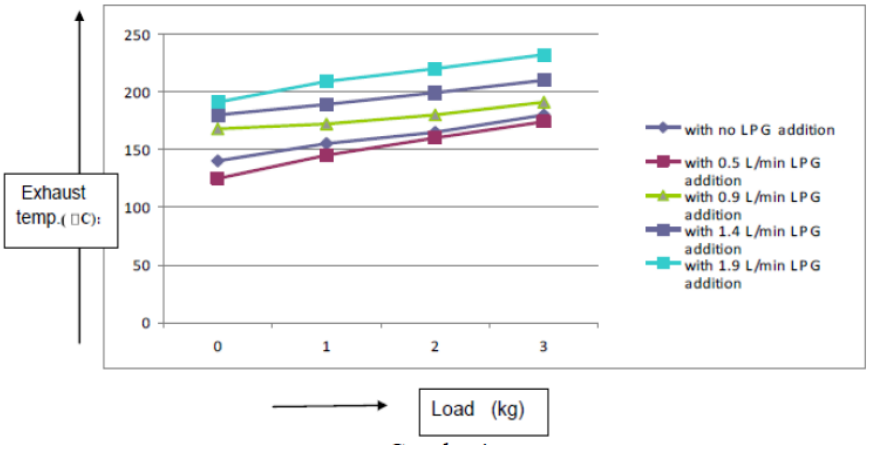
### 4.2.1 % HSU



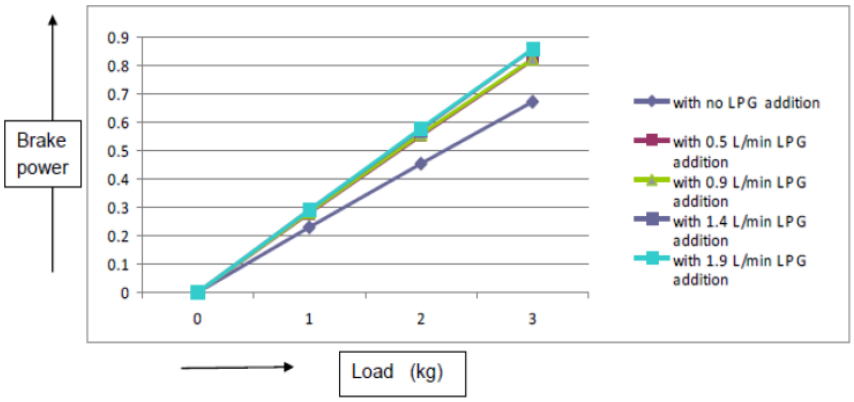

グラフ 2. %HSU



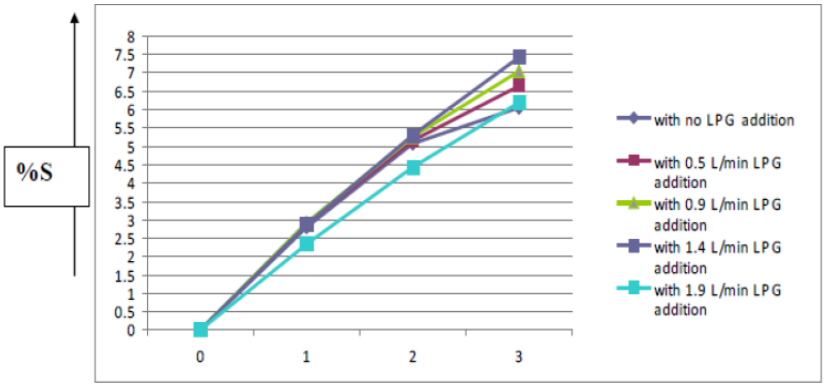

グラフ 3.　燃費(mL / 秒)



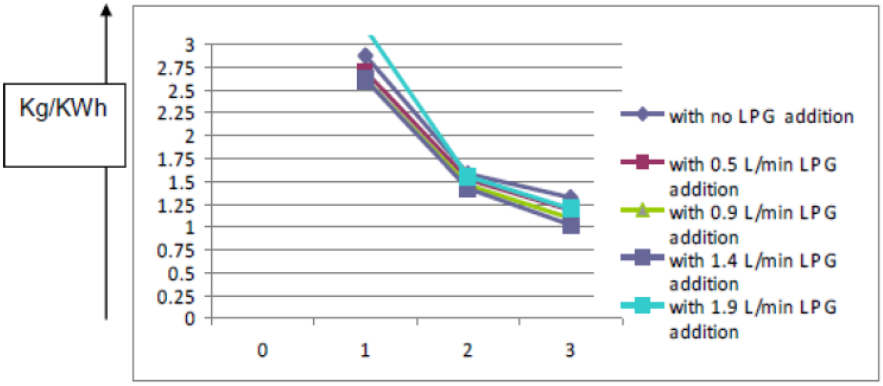

グラフ 4.　排気温度(℃)




グラフ 5.　制動馬力(KW)




グラフ 6. ブレーキ熱効率(%)




グラフ 7. ブレーキの特定燃費(kg / KWh)

## 5. 実行可能性についての計算

エンジンが最高負荷で年間 1 万キロ走るとした場合、以下の数字が得られる。

- 年間走行距離: 10,000 km/year
- 平均速度 : 50 km/hr
- エンジンの作動時間: 200 hr/year
- ディーゼル消費量(LPG 無し):232.2 L/year
- ディーゼル消費量 (LPG を 0.5L/min 加えた場合):ディーゼル 198 L/year、LPG :36 kg/year
- ディーゼル消費量 (LPG を 0.9L/min 加えた場合):ディーゼル 151.2 L/year、LPG :60 kg/year
- ディーゼル消費量 (LPG を 1.4L/min 加えた場合):ディーゼル 115.2 L/year、LPG :84 kg/year
- ディーゼル消費量 (LPG を 1.9L/min 加えた場合):ディーゼル 111.6 L/year、LPG : 119.5 kg/year

また、ディーゼル価格を Rs 54/ L とLPG 価格を Rs 400/ 14.2 kg cylinder と設定した場合、以下のようになる。

| Amount of fuel | Without LPG | LPG @ 0.5L/min | LPG @ 0.9 L/min | LPG @ 1.4 L/min | LPG @ 1.9 L/min |
|---|---|---|---|---|---|
| Cost (Rs) | 12052 | 11706 | 9854 | 8586 | 9393 |

表 13. ディーゼルと LPG の燃料費(ランニングコスト)

## 6. 観察と推論

ディーゼルのみの場合、各負荷(0 kg、1 kg、2 kg、3 kg)を 5 回ずつテストし、合計 20 試験を実施した。ディーゼルと LPG のデュアル・フューエルの場合、各負荷で LPG を 5 段階に分けて試験を実施した。各条件での試験結果を記録し、表やグラフにして結果発表した。これらを分析すると以下の推論が引き出せる。

A. 汚染物質排出量への影響:
   a. 負荷が高くなれば汚染物質排出量が増える。
   b. LPG を混合させるに事によって各負荷レベルで約 3 割の煙濃度の減少を達成した。
B. 燃料消費量への影響:
   a. 各負荷で LPG 燃料量を増やせば燃焼は高くなる。だが、表 13 の通り、ディーゼルのみより経済的である。
C. 排気中の排気温度と NOx の影響:
   a. 排気中の最低排気温度を得るためには、LPG を 0.5 L/min 以下での噴射が必要。この温度を下げることによって NOx 排出量が減少する。
D. パワーへの影響(ブレーキホイールでの測定):
   a. LPG を加えることによってエンジンパワーが増え、エンジン稼働が向上する。
E. ブレーキ熱効率(%)への影響:

a. LPG を加えることによって熱効率が上がる。

F. 燃料消費量への影響(Kg/KWh):

a. LPG を加えることによって燃料消費量が下がる。

## 7. 結論

この試験では、ディーゼルと LPG を混合させた燃料がディーゼルエンジンにどのような影響を及ぼすか検査を行った。LPG を加えることによって、排出、燃費、パワー、及び熱効率に好ましい影響を与えることがわかった。だが、LPG の最適な噴射時条件を保つ必要がある。デュアル・フューエルは経済的だと証明、排気温度の低下にも良い。この試験で使ったエンジンでの場合、最適の LPG 噴射率は 0.9 L/min である。

この試験の主要な調査結果は、以下の通りだ。LPG を加えることで:

1. 高い負荷時には、すす粒子量が減少したが低い負荷の場合、すす粒子量に影響はなかった。
2. 温度と%HSU が減少した。
3. 経済性が向上した。
4. ブレーキの特定燃費が下がった。
5. エンジンの稼働が改善された。
6. 高い負荷時のノイズレベルが下がった。

8. 今後の課題

- 電子インジェクターを使用して適切な LPG 燃料量を直接燃焼室に吹き込む。
- 様々な電子機器を使ってこの試験で試した LPG 燃料量以外の混焼率を計る。
- 燃焼室にグロープラグを組み込んで汚染への影響を検討する。

## 6. グローバルのディーゼルデュアルフューエル動向のまとめ

さまざまな文献を調査したところ、以下の結論が得られ、委員会にて報告し、PR 車輌の準備のために活用することとなった。

(1)燃料費削減に効果のあること。
(2)ディーゼル機関に LP ガスを混ぜて燃焼させる技術的なハードルは低いこと。
(3)しかし、混合比率については、最大30%程度であること。

こうした面を考慮し、車両の準備を行うこととなった。

# 第二章　ディーゼル LPG 混合トラックの準備

## 1. 準備の視点

### (1)日本の輸送事業者の視点から

トラック輸送に使われるディーゼル価格が高止まり。全コストの 17% - 38%が燃料代なので経営を圧迫、消費税アップでさらにコスト上昇。

### (2)LP ガス業界の視点から:

トヨタ、日産が LPG タクシーの製造を止めるため、LP ガススタンド経営が立ち行かなくなる。
低価格の米シェール LP ガスが既に日本に来ている。LP ガス需要減少が続いており新規需要開拓が不可欠。

## 2. 車両の準備

過去にディーゼルと LP ガスの混合実験は実証されているが最新ディーゼルエンジン「クリーン・ディーゼル・エンジン」との混合燃焼は、トラックではまだ日本で行われていないため、最新のクリーンディーゼルとLPGの混合した場合に、燃料費削減にどのくらい繋がるのか？　満タンでの走行距離はどうなのか？　トラックのパワーはどうなるのか？　排ガスはどうなのかを実際に Dual Fuel Diesel-LPGトラックを用意して PR 用のデータを集めた。

これらを元に、トラックユーザーに PR を実施した。

### (1)対象車両の選定

PR 用実証車：三菱ふそう・キャンター

キャンター（CANTER ）は、三菱ふそうトラック・バスが製造・販売しているキャブオーバー型小型トラックである（1963 年から 1970 年までは三菱重工業、1970 年から 2002 年までは三菱自動車工業が製造・販売）。また、三菱ふそうブランドで、唯一欧州で販売されている車種でもある。

このうち、8 代目 FBA/FEA・B・C 系（2010 年 -）2010 年 11 月 11 日発表の新型キャンターをベースとした。ポスト新長期排気ガス規制と平成 27 年重量車燃費基準に適合。コンセプトは「ソリッド&タフ」。通称ブルーテックキャンター。

トランスミッションは小型トラックとして世界初の採用となる 6 速デュアルクラッチトランスミッションの DUONIC（デュオニック）と 5 速 MT があるが、今回は 5 速 MT を使用し、車載車とした。

# PR用ベース車両

## 三菱ふそう・キャンター（2トンクラス）車載専用車架装

### PR 用ベース車両の選定について

**1）最新型ディーゼルエンジンを搭載**

（コモンレール燃料供給方式、DPF、VGT 等装備）

**2）量販車種であること**

2トンクラスマーケット

①総保有　約800，000台、年間代替約8万台

②シェアが高いメーカーであること

③技術解析がしやすいこと

**3）展開**

小型トラックで検証し、最終的には大型へ展開したい

（後改造部分を最小で）

①搭載エンジン

搭載されるユニットはフィアットグループの FPT 社とダイムラー、そして三菱ふそうが共同開発した 2,998cc 直列 4 気筒・DOHC16 バルブ・直噴コモンレールインタークーラーディーゼルターボエンジンの 4P10 系で、最高出力・最大トルクが異なる 4 種類のエンジンがあり(1.5 トンクラス用:4P10(T1)型 81kW(110PS)、2トンクラス用:4P10(T2)型 96kW(130PS)、2 - 4トンクラス用:4P10(T4)型 110kW(150PS)、3.5トンクラス以上用:4P10(T6)型 129kW(175PS))本車輌では 2 - 4トンクラス用:4P10(T4)型 110kW(150PS)を使用した。これらのエンジンには、再生制御式 DPF と、小型トラッククラス初の尿素 SCR システム BlueTec(ブルーテック)システムが採用されている。

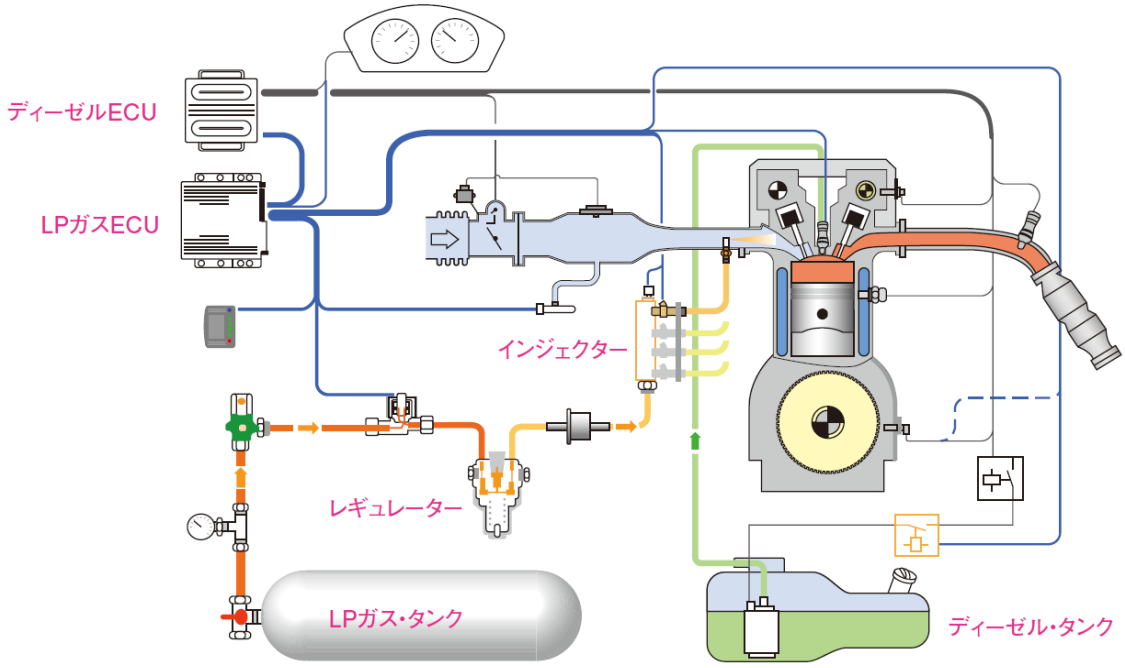
②その他装備

ブレーキは全車種に、ハイパフォーマンスカー(乗用車)への装着で有名なブレンボ社製総輪ディスクブレーキを採用、アクセルペダルを踏んだままブレーキペダルを踏んだ際、ブレーキ側を優先させるブレーキオーバーライドを搭載している。フロント・ディスクブレーキはシングルキャリパータイプのベンチレーテッド・ディスクブレーキ。

キャブは 7 代目のものをキャリーオーバーし、内外装デザインを変更したもので、グレードは従来の SA・DX・CUSTOM の 3 グレード構成から、スタンダード(標準グレード、従来の DX に相当)と CUSTOM(オプション設定)の 2 グレード構成に。フォグランプは全車種オプション装備となった。2010 年度グッドデザイン賞を受賞した。採用車型は、ワイドキャブ・超ロングボディー車の車載専用車仕様とした。これは、汎用性が高く、装置全体を見せることが可能なためである。

## (2)LPG 混合システムについて

LPG 混合システムは、既存のディーゼルエンジンに、新たに LPG 混合システムを追加する形で改造した。追加した部品は LPG 燃料タンクからインジェクターまでの燃料ラインと LP ガス制御用の ECU を追加している。




図：デュアル・フューエル構造図

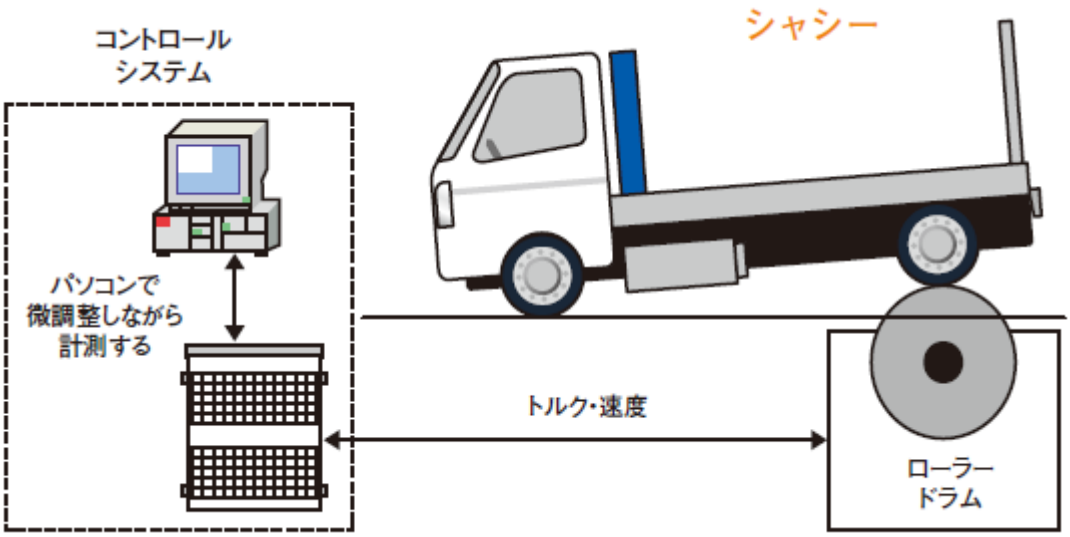
写真：車両外観と追加部品

【車両諸元】

| | |
|---|---|
| 1)三菱キャンター | TKG-FEB50 |
| 2)エンジン型式 | 4P10 排気量2990CC ターボエンジン 最高出力110KW/3500rpm 最大トルク370N･m/1350～2840rpm |
| 3)LPG噴射系部品 | ニッキ製インジェクター |
| 4)車両取付センサー | アクセルペタルポジションセンサー、クランク角センサー、回転センサーブーストプレッシャーセンサー、LPG燃圧センサー、空燃比センサー(各気筒毎)、ノックセンサー、温度センサー4本(吸気、排気、水温、LPガス) |
| 5)装着 設定 | ①各気筒毎に噴射弁を用意しそれぞれにＬＰＧガイドパイプを挿入及びターボ前に4本の噴射弁を用意しLPGガイドパイプを装着<br>②LPG噴射のタイミング同期は1番シリンダーの圧縮上死点で取る。<br>③軽油の燃料消費量は、満タン法にて測定<br>④LPGの燃料消費量は、ボンベASSYの重量差にて計測　比重0.56で換算 |
| 6)試験方法 | a)時速100km/h　5速 (各気筒毎に噴射弁を装着)<br>①車両総重量5785Kg (乗車定員1名65kg含む)<br>②暖気運転後、軽油のみでシャシダイナモ上を10km走行し燃料消費量を計測<br>③引き続き、軽油とLPGのデュアルフェールにて10km走行し燃料消費量を計測<br>b)時速80km/h　4速 (ターボ前に4本の噴射弁を装着)<br>試験方法はa)と同じ |

### (3)ECU の調整

LP ガスの混合を制御する ECU は、既製品がないため、自動車開発用の特殊 ECU を使用し、城東自動車工場の保有するシャシダイナモメーターを使用し、実走行条件を再現して速度･負荷の状況により、ECU の LP ガス燃料噴射量を可変させ、適切な噴射量となるように調整している。



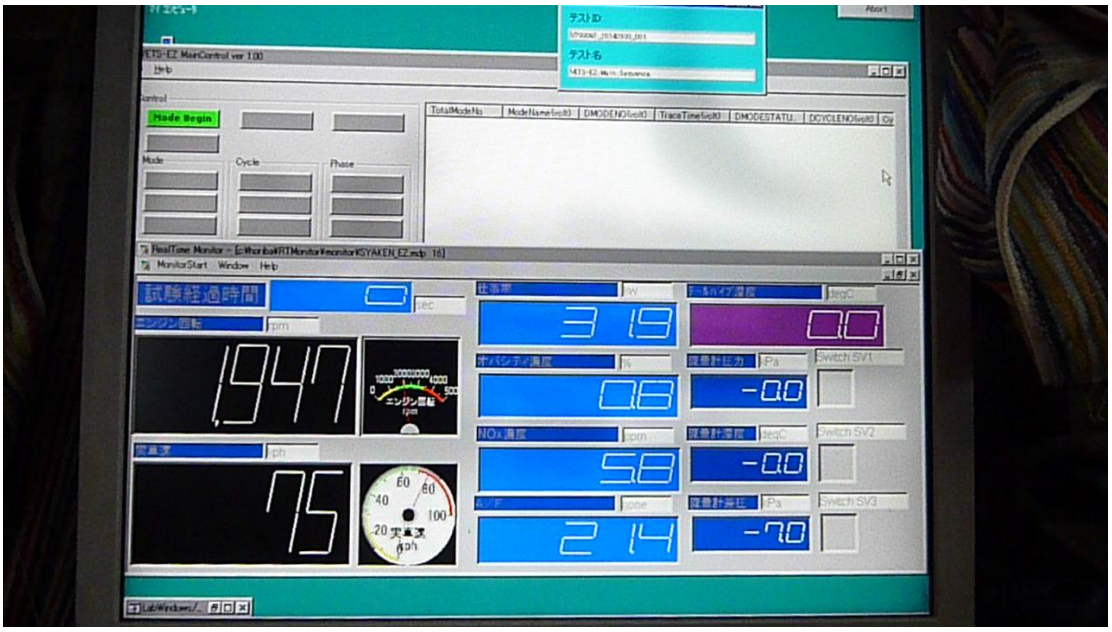

図：シャシダイナモメーターの概要

写真：実際のシャシダイナモ上での計測及び噴射量テスト

写真：実際にシャシダイナモ上で走行条件を再現

写真：シャシダイナモ操作盤

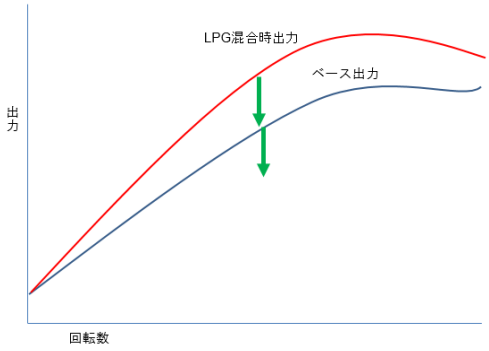
写真：気温・気圧設定条件




写真：負荷条件設定や排出ガスを測定しつつチューニング

## (4)出力調整

ディーゼル側の噴射量制御は行っていないため、そのまま噴射するとベースエンジンの出力を大幅に超えるために、負荷と回転数を考慮 LP ガス噴射量を制御し、ベースエンジン並みの出力としている。




図：出力調整イメージ

## (5)混合比率と混合状況について

軽油に LPG を混合する割合を積車状態の負荷に合せて試験を行った。

### Dual Fuelシステム テストデーター

【走行条件】距離:10Km 速度:80Km/h(4速) 負荷:1500N
【開始時のデータ環境】気圧:100.5 dry:10℃ 湿度:40% 天気:晴れ

| データ取得 | 回転数 (RPM) | 速度 (Km/h) | 仕事率 (Kw) | Bst (kpa) | インマニ (℃) | 排気 (℃) | 水温 (℃) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 軽　油 | | | | | | | |
| 初め | 2698 | 75.7 | 32.9 | 180 | 59 | 470 | 79 |
| 5キロ | 2700 | 75.7 | 32.7 | 179 | 55 | 496 | 84 |
| 8キロ | 2700 | 75.8 | 32.7 | 178 | 52 | 494 | 84 |
| 軽油燃費(cc):1990　5.03km/l | | | | | | | |
| 軽 油 + L P G | | | | | | | |
| 初め | 2710 | 75.9 | 32.9 | 148 | 50 | 487 | 80 |
| 5キロ | 2700 | 76.8 | 33.1 | 145 | 44 | 491 | 82 |
| 8キロ | 2700 | 75.8 | 32.8 | 144 | 45 | 485 | 82 |
| 軽油燃費(cc):1012　9.88km/l　伸び率:1.97 | | | | | | | |
| LPG燃費(cc):1019.6　9.81km/l | | | | | | | |
| LPG重さ:571÷0.56=1019.6429 | | | | | | | |
| Dual軽油÷軽油のみ:0.509　軽油からLPGに置換された割合:49.1% | | | | | | | |

試験条件:

1)燃料使用量に関しては、軽油は流量を測定して使用量を測定。

2)LP ガスに関しては、小型の自動車容器を使用し、測定前重量・周辺温度を測定し、測定後に再度重量・周辺温度を測定し補正している。

3)負荷設定条件は、2トン積載条件に合せた。

**収集データによる分析:**

**1)時速80km／hでの定速走行では、最大49．1%の置換率となった。**

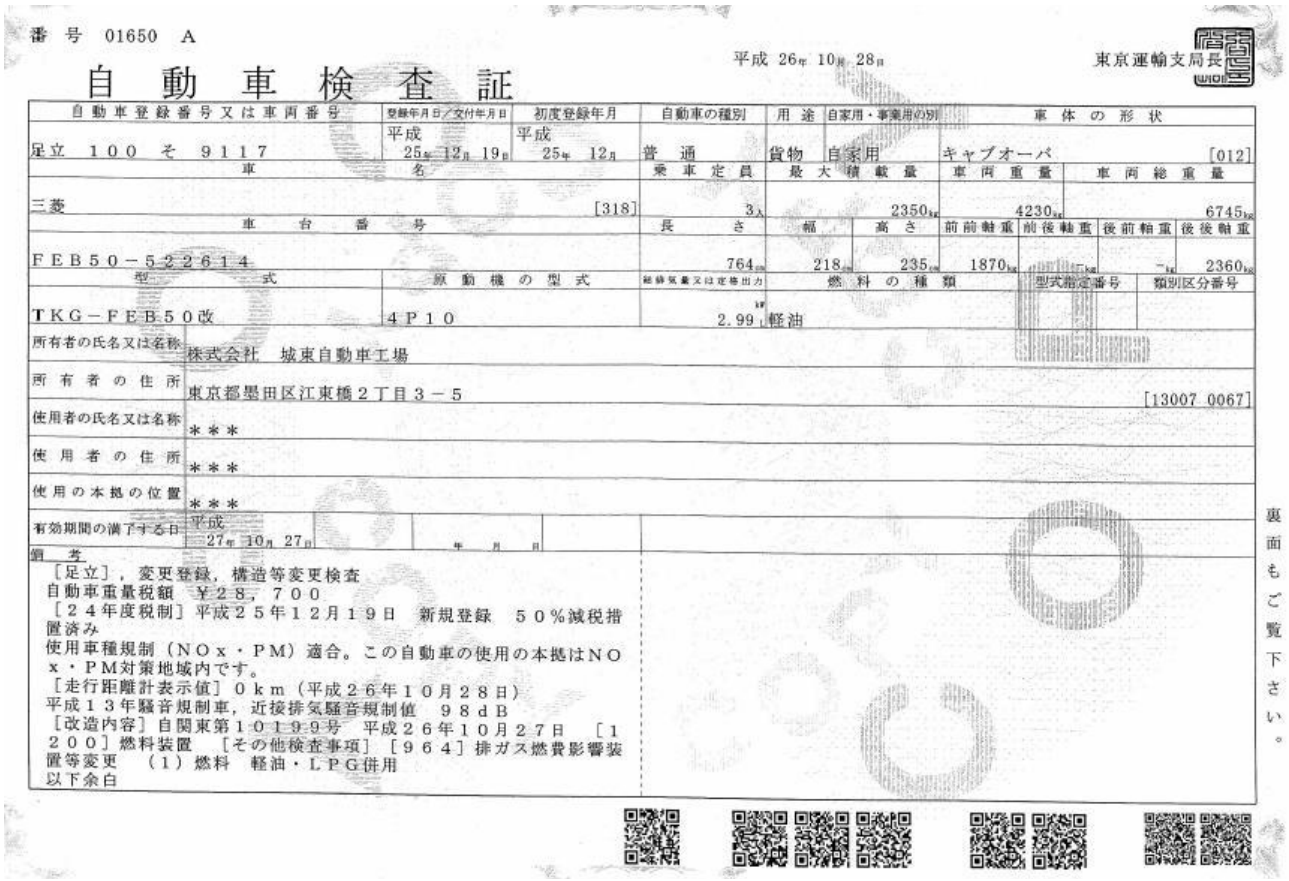
**2)コスト対比で計算すると、約15%の燃料費節減効果がある。**

## (6)排出ガス試験

排出ガス試験として、初回に国の認定された排出ガス試験を受験し、燃料装置の変更車検を受験すると共に、中間で2回目として公的機関での調整値の確認試験を行い、さらに完全に調整が終了した時点での環境性能と燃費特性を集約し、後日再度、構造変更車検を受験することとした。

(7)公式車検終了

燃料比率には関係なく、併用式として車検証が交付され、公道走行が可能となった。



番号 01650 A

平成 26年 10月 28日　東京運輸支局長

# 自動車検査証

| 自動車登録番号又は車両番号 | 登録年月日/交付年月日 | 初度登録年月 | 自動車の種別 | 用途 | 自家用・事業用の別 | 車体の形状 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 足立 100 そ 9117 | 平成 25年 12月 19日 | 平成 25年 12月 | 普通 | 貨物 | 自家用 | キャブオーバ [012] |

| 車名 | 乗車定員 | 最大積載量 | 車両重量 | 車両総重量 |
|---|---|---|---|---|
| 三菱 [318] | 3人 | 2350kg | 4230kg | 6745kg |

| 車台番号 | 長さ | 幅 | 高さ | 前前軸重 | 前後軸重 | 後前軸重 | 後後軸重 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FEB50-522614 | 764cm | 218cm | 235cm | 1870kg | -kg | -kg | 2360kg |

| 型式 | 原動機の型式 | 総排気量又は定格出力 | 燃料の種類 | 型式指定番号 | 類別区分番号 |
|---|---|---|---|---|---|
| TKG-FEB50改 | 4P10 | 2.99L | 軽油 | | |

| | |
|---|---|
| 所有者の氏名又は名称 | 株式会社　城東自動車工場 |
| 所有者の住所 | 東京都墨田区江東橋2丁目3－5 [13007 0067] |
| 使用者の氏名又は名称 | ＊＊＊ |
| 使用者の住所 | ＊＊＊ |
| 使用の本拠の位置 | ＊＊＊ |
| 有効期間の満了する日 | 平成 27年 10月 27日　年 月 日 |

備考

［足立］，変更登録，構造等変更検査
自動車重量税額　￥２８，７００
［２４年度税制］平成２５年１２月１９日　新規登録　５０％減税措置済み
使用車種規制（ＮＯｘ・ＰＭ）適合。この自動車の使用の本拠はＮＯｘ・ＰＭ対策地域内です。
［走行距離計表示値］０ｋｍ（平成２６年１０月２８日）
平成１３年騒音規制車，近接排気騒音規制値　９８ｄＢ
［改造内容］自関東第１０１９９号　平成２６年１０月２７日　［１２００］燃料装置　［その他検査事項］［９６４］排ガス燃費影響装置等変更　（１）燃料　軽油・ＬＰＧ併用
以下余白

裏面もご覧下さい。

## 3. ディーゼルとLPG 混合の状況についての考察

現状としては、ディーゼルに LPG を混合させて燃焼することは実現しているが、今回の成果の見識を外部専門家に依頼して、考察をまとめた。

### (1)依頼先

村瀬 英一

九州大学・機械工学部門・燃焼科学講座・エンジンシステム 教授

. 主にエンジンシリンダ内のガス流動と燃焼の関係を研究。

・プラズマジェット点火とパルスジェット点火による希薄混合気の燃焼促進
・急速圧縮装置による乱流希薄混合気の点火と燃焼
・高温・高圧場におけるパルスジェットの点火特性
・ラジカル発光・蛍光計測によるパルスジェットの点火機構
・急速圧縮膨張装置によるエンジン燃焼の研究
・予混合圧縮着火機関の着火時期制御に関する基礎研究
・ロータリエンジンの燃焼改善に関する研究
・バイオ燃料の利用技術に関する研究を始めた。

最近は、燃焼過程に重要な影響を与えるOH、CH、C2などのラジカルの発光、蛍光計測を行っている。平面レーザ誘起蛍光法によるOHラジカルの計測結果より、パルスジェットの点火機構に対して重要な知見が得られている。

所属学会は、日本機械学会、日本燃焼学会、自動車技術会で、主な授業科目は、内燃機関、燃焼工学、エンジンシステムなどである。

### (2)村瀬教授への提供資料

■車両諸元

1)三菱キャンター TKG-FEB50

2)エンジン型式 4P10 排気量 2990CC ターボエンジン
最高出力 110KW/3500rpm 最大トルク 370N・m/1350～2840rpm

3)LPG 噴射系部品
ニッキ製インジェクター

4)車両取付センサー
アクセルペダルポジションセンサー
クランク角センサー
回転センサー
ブーストプレッシャーセンサー
LPG 燃圧センサー
空燃比センサー(気筒毎)
ノックセンサー
温度センサー4 本(吸気、排気、水温、LP ガス)

5) 装着 設定
①気筒毎に噴射弁を用意しそれぞれにLPGガイドパイプを挿入及びターボ前に4本の噴射弁を用意しLPGガイドパイプを装着

②LPG 噴射のタイミング同期は1番シリンダーの圧縮上死点で取る。
③軽油の燃料消費量は、満タン法にて測定
④LPG の燃料消費量は、ボンベ ASSY の重量差にて計測　比重 0.56 で換算

6)試験方法
a)時速 100km/h　5 速　(気筒毎に噴射弁を装着)
①車両総重量 5785Kg (乗車定員 1 名 65kg 含む)
②暖気運転後、軽油のみでシャシダイナモ上を 10km 走行し燃料消費量を計測
③引き続き、軽油と LPG のデュアルフェールにて 10km 走行し燃料消費量を計測

b)時速 80km/h　4 速　(ターボ前に 4 本の噴射弁を装着)
試験方法は　a　と同じ

## (3)村瀬教授の工学的に見たディーゼルデュアルフューエル

### (3)．1　デュアル･フューエルの必要性

現在稼働している往復動内燃機関は、火花点火機関と圧縮着火機関である。一般に前者をガソリンエンジン、後者をディーゼルエンジンと呼ぶが、火花点火機関の燃料は必ずしもガソリンではなく、アルコール、石油ガス(主に LPG)、天然ガス(LNG, CNG)、水素などがある。一方圧縮着火機関の燃料は、小さいエンジンでは軽油、(バイオディーゼル)、大きい舶用では重油である。

火花点火機関と圧縮着火機関は、その燃焼方式が基本的に異なる。あらかじめ燃料と空気を混ぜた混合気に外部から火をつける(点火：一般的にはスパークプラグによる電気火花放電)のが火花点火機関である(予混合燃焼)。

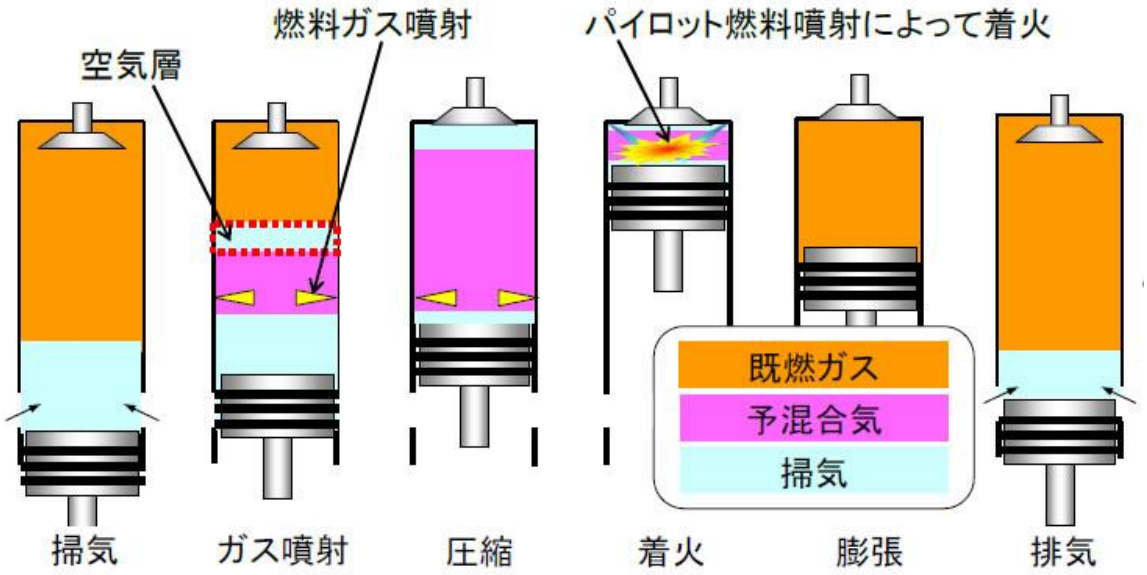
一方、高温高圧の空気に燃料を噴射して、燃料の自己着火により燃焼が開始して、その後高温の空気に噴射された燃料が空気中に拡散しながら燃焼する(拡散燃焼)のが、圧縮着火機関である。すなわち、火花点火機関は「火花点火＋予混合燃焼」、圧縮着火機関は「自己着火＋拡散燃焼」となる。

これらの燃焼形態の違いにより、おのずから使用できる燃料の特性が決まる。すなわち、火花点火機関の場合は、気化性が良く混合気が作りやすく、かつノッキングという異常燃焼が起こりにくい燃料が最適の燃料となる(自己着火しづらいオクタン価が高い燃料)。一方、圧縮着火機関は、自己着火しやすい燃料(セタン価が高い燃料)が最適の燃料となる。

その結果、前述のような燃料が各エンジンで使用されている。すなわち、2種類の燃料を用いる必要は一般的にないのである。

それでは、どのような場合に2種類の燃料が必要であろうか？現在実用として稼働しているデュアルフューエルエンジンは、コジェネ用定置型と舶用の大型ガスエンジンである。

図：船舶用低圧ガス予混合燃焼方式・低速2ストローク デュアルフューエルエンジン動作例




出典：株式会社ディーゼルユナイテッド資料より事務局が参考として掲載

これらは基本的には火花点火機関であり、燃料である天然ガスの混合気を燃焼させるものである。その点火源が火花点火ではなく、軽油または重油をシリンダー内に噴射して、それらが自己着火することにより得られる火炎により点火を行うものである。

すなわち、天然ガスと軽油または重油のデュアル・フューエルである。火花点火を用いなかった理由は、これらのエンジンは高過給で使用するため、点火時の圧力が高く、スパークプラグによる火花放電ができないか、高電圧の火花放電となり、スパークプラグの寿命が短いためである。この場合は燃料の燃焼特性を生かしたデュアル・フューエルと考えられる。また、デュアル・フューエルは燃料を2種類用意するために、燃料タンクが2種類必要となるが、これらの定置型や大型の船の場合は問題ないが、小型自動車になると難しいと思われる。

小型の火花点火機関用燃料として、ガソリンとアルコール（エタノール）の混合燃料がある。その混合率から E10（エタノール10%混合）など様々あり、これらは主として燃料セキュリティのためであるが、アルコールによるオクタン価向上も副産物としてある。ただ、これは初めから混合したものを供給するので、デュアル・フューエルとは少々違うようにも感じる。

以上、現在稼働しているエンジンのデュアル・フューエルは、以下の場合と考えられる。

①それぞれの燃料の燃焼特性を利用
②燃料セキュリティ

### (3)．2　今回の軽油＋LPG のディーゼルデュアルフューエルの場合

今回のプロジェクトは、中型～大型のディーゼルエンジントラックに対して、軽油＋LPG のデュアル・フューエルを対象にした調査である。ディーゼル燃焼そのものに、デュアル・フューエルの必然性はないと考えられる。よって、今回の採用は軽油＋LPG のデュアル・フューエルを用いることによる燃料セキュリティと燃料経済に対するメリットを考えたものと考えられる。

この観点からテストデータを見ると、80km/h で 10km 走行した時、軽油のみの走行では軽油の消費量が 1.99 である。一方軽油＋LPG のデュアル・フューエルの場合、軽油の消費量が 1.01 と 51%の消費量となり、LPG を 1.02 消費している。一方 100km/h で 10km 走行した時は、軽油のみの走行で軽油 1.83 の消費量であるが、デュアル・フューエルの場合 1.06 と 58%の軽油消費量と 0.934 の LPG 消費量となっている。**それぞれの燃料の低位発熱量を軽油：36.1MJ/ 、LPG：25.8MJ/ とすると（日本自動車研究所資料）、80km/h 走行時の場合、軽油のみの走行では投入エネルギーは 71.8MJ となる。一方、デュアル・フューエルの場合、軽油が 36.5MJ、LPG が 26.3MJ で合計投入エネルギーは 62.8MJ となる。すなわち、同じ仕事をするのに、少ない投入エネルギーで済んでいることになり、デュアル・フューエルの方が高い熱効率を示したことになる。**

さらにこれを燃料代から考えると（燃料経済）、軽油 125 円/ 、LPG 65 円/ とすると、軽油のみの場合、10km 走行するのに 249 円かかるのに対して、軽油と LPG のデュアル・フューエルの場合は 193 円で済むことになる。この差は、長距離になると大きなものとなる。

同様に、100km/h 走行時の場合、軽油のみの走行では投入エネルギーは 66.0MJ、デュアル・フューエルの場合、軽油が 38.3MJ、LPG が 24.1MJ で合計投入エネルギーは 62.4MJ となる。燃料代から考えると、軽油のみの場合 229 円かかるのに対して、軽油とLPGのデュアル・フューエルの場合 194 円となり、同様に燃料経済で有利となる。

また、自動車でデュアル・フューエルを用いる場合、燃料タンクが2種類必要となるが、トラックの場合、新たな LPG ボンベの搭載は、ボディ下部に比較的スペースが取れるので、問題ないと思われる。

次に、燃料供給のインフラの問題があるが、現状では、都市部ではタクシー用としての LPG スタンドが整備されており、この点もあまり問題にならないと思われる。もちろん、軽油と LPG のデュアル・フューエルの需要が増せば、現在の石油スタンドに LPG スタンドを併設することは問題ないと考えられる。

またこのシステムを、高速道路を走る長距離大型トラックに適用すると、上記のスタンドを高速道路の要所、要所に設置するか、または出発地と目的地の都市に設置すれば良いことになる。

### （3）. 3 燃焼方式から見た今回のディーゼルデュアルフューエル

さて、今回のデュアル・フューエルに対して、どのような燃焼になっているかを推測する。LPG はガス状態で、石油ガスとして吸気管に噴射される、いわゆるフューミゲーション方式をとっている。

そこで、空気と混合した石油ガスがシリンダー内に吸入されたのち、圧縮される。石油ガスはセタン価が低いので、自己着火することなく、軽油噴射を待つことになる。

噴射された軽油は、通常のディーゼル燃焼と同様に、自己着火して拡散燃焼をする。ここで、前述のようにデュアル・フューエルの方が高い熱効率を示していることを考えると、自己着火した軽油が石油ガスと空気の混合気の着火源となり、予混合燃焼した可能性が考えられる。

**その場合、燃焼の等容度が上がり、燃焼期間が短くなっている可能性がある。等容度が上がることは、エンジンのサイクルが、オットーサイクルに近づき、ディーゼルサイクルに比べて熱効率が高くなることを示唆している。**

## (3). 4 今後の検証

今後の検証として、以下のことが望まれる。

①軽油とLPGの混合比率が最適化されているのか？

②エミッションに関して、はっきりした傾向がないが、NOxが多くなっているデータもあるので、更なるデータが必要と思われる。

③同じくエミッションの問題であるが、LPG を吸入することにより吸入空気量が減っている。その結果は A/F の減少で明らかであるが、これによるスモークや PM の増加が懸念されるので、それらの検証も必要と考えられる。

## (3). 5 まとめ

軽油と LPG のディーゼルデュアルフューエルは、熱効率、燃料経済、燃料供給のインフラ、全てにおいてすぐれており、現在すぐ実現できるものと考えられる。また、両者とも貯蔵時は液体であり、エネルギー密度が高い燃料同士のデュアル・フューエルであることも忘れてはならない長所であると思われる。

# 第三章　ディーゼル LPG 混合トラックの PR について

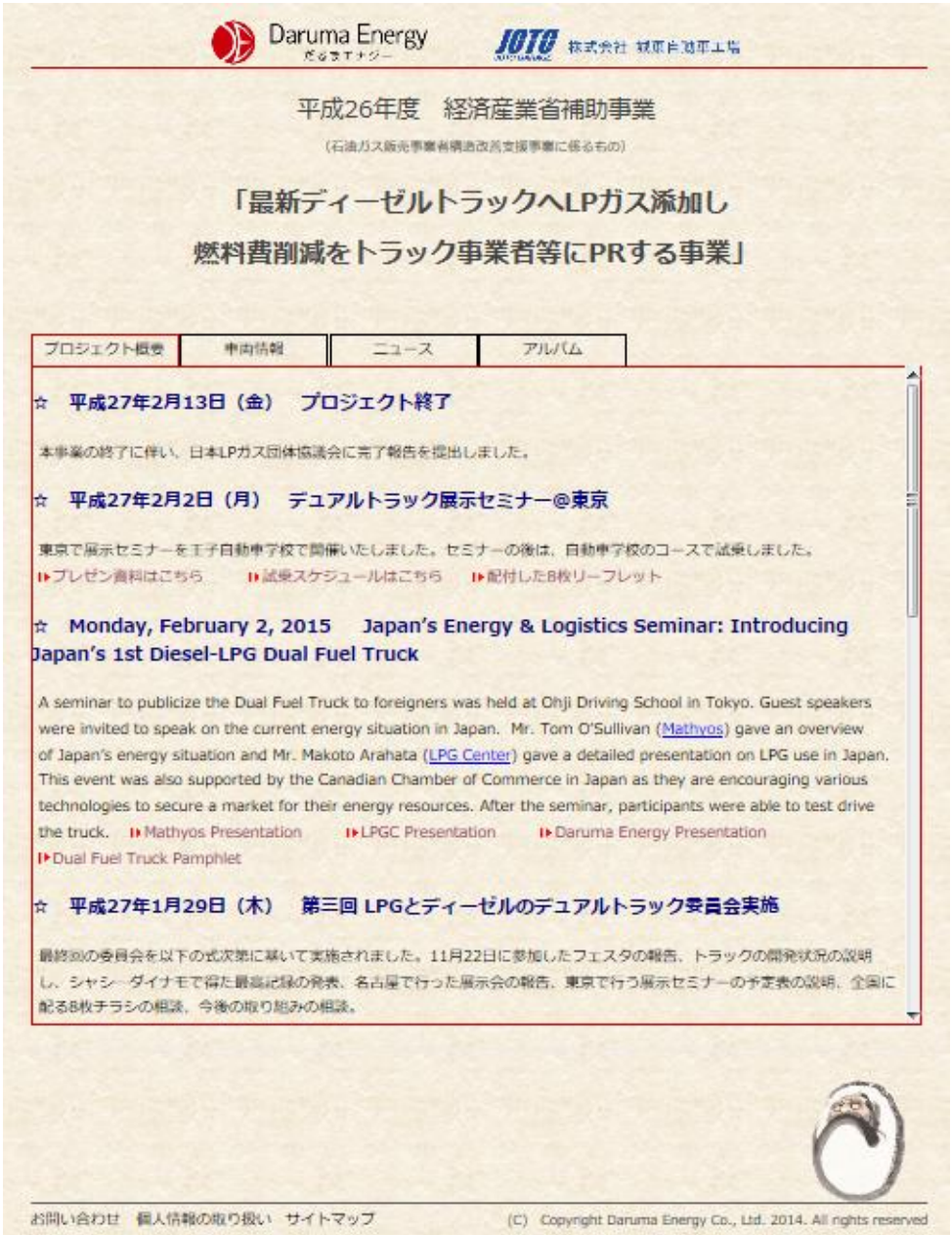
前章の通り、ディーゼル LPG 混合トラックを準備し、トラック事業者及び LP ガス事業者に対して PR を行った。

## 1. 実施方法

PR の実施方法については以下のように行った。

### (1)ホームページでの告知

本事業専用のホームページを用意し、事業過程や資料を告知し、対象者約 200 人に更新のたびにメールにて通知し、ホームページの閲覧を促した。




URL: http://www.darumaenergy.com/補助事業

### (2)中小運送事業者への意向アンケート調査

運送事業者のニーズを探るため、委託作業としてニーズ調査のアンケートを実施した。

1)アンケート方法

①インターネットでの配信によるアンケート　発信数： 500件　回収数： 83名
②全国中小運送会社経営改善セミナー会場： 来場者数： 120社　回収数： 97名
③展示セミナー会場での配布アンケート： 来場者数： 66社　回収数： 51社

2)アンケート結果

別紙報告書参照

### (3)展示・試乗会

実際に車両を体験していただくには、試乗が不可欠であるが、安全に試乗をさせることや、技術的な説明も同時に行う必要がある。このため、次のような要領で会場を選定した。

1)選定要領

①50 名程度を収容できる会議室等があること
②敷地内又は近隣に閉鎖環境の試乗会場があること

東京地区は、LPG 車の試乗・展示等で実績のある王子自動車学校を利用することとした。
名古屋地区は、邦和セミナープラザを会場として選択した。

2)開催地域選定

東京地区で 1 回を実施、その他の地域でもう一回を実施する計画で、前記条件を満たす場所として名古屋地区を選定した。

# デュアルフューエルトラック展示セミナー

## 名古屋

日時　2015年 1月 26日(月)

時間　13:30 受付開始　14:00 ～16:00

会場　邦和セミナープラザ　名古屋市港区港栄 1-8-23 地下鉄名港線 港区役所駅 徒歩 3 分

トラック展示会場：シナネン株式会社中部支店
セミナー会場からバス送迎（5 分）

プログラム
・デュアルフューエルトラックの概要説明及び質疑応答
・デュアルフューエルトラック見学
・特別講演「今年の中日ドラゴンズ」木俣達彦中日ドラゴンズ OB 会長

## 東京

日付　2015年 2月 2日(月)

時間　13:30 受付開始　14:00 ～16:00

会場　王子自動車学校　東京都北区昭和 2 丁目 13-28 JR 王子駅より徒歩 10 分 / 都電荒川線梶原駅より徒歩 4 分

プログラム
・デュアルフューエルトラックの概要説明及び質疑応答
・デュアルフューエルトラック見学
・デュアルフューエルトラック試乗会（12:00～13:30/15:00～16:00）
※試乗ご希望の方は、申込み時に試乗希望にチェックを入れて下さい。

## ◆申込書 FAX03-6435-8920 MAIL info@darumaenergy.com

※本紙を FAX して頂くか、上記 MAIL にてお申し込み下さい。

参加人数　【名古屋会場 1 月 26 日】＿＿＿＿名　【東京会場 2 月 2 日】＿＿＿＿名　□試乗希望

会社名＿＿＿＿＿＿＿＿　申込者氏名＿＿＿＿＿＿＿＿

住所＿＿＿＿＿＿＿＿

連絡先　(電話番号)＿＿＿－＿＿＿－＿＿＿　(FAX 番号)＿＿＿－＿＿＿－＿＿＿

E メール＿＿＿＿＿＿＿＿

業種＿＿＿＿＿＿＿＿

メッセージ

（お問い合わせ先）だるまエナジー株式会社 〒105-0013 東京都港区浜松町1-9-11浜松町55ビル8階　電話:03-6435-8920

平成26年度経済産業省補助事業
（石油ガス販売事業者構造改善事業に係るもの）
「最新ディーゼルトラックへLPガス添加し燃料費削減をトラック事業者等にPRする事業」

# 今あるディーゼルエンジンにLPガスを添加し、パワー維持＋燃料費削減 デュアル・トラック!!

## デュアルフューエルシステムとは？

２つの燃料を混合して燃焼させるシステムです。
このトラックは、LPGと軽油を混合させ、最適な混合比率で運行します。LPGを加えることで軽油の使用量が減り、たとえLPGが無くなっても軽油のみでも走るので、いいとこ取りの先進システムです。

## LPGと軽油のデュアル・トラックが選ばれる理由

選ばれる理由 01

### 経済的 ディーゼルよりも低価格

LPGと軽油を使用するデュアル・トラックでは、
燃料価格の安いLPGを軽油とともに使用する事で、
燃料費の低減を可能にします。

### 安心 ディーゼルのみでも走行可能

選ばれる理由 02

たとえLPGが無くなったとしても、
スイッチひとつで元のディーゼルトラックと同様に使用できます。
燃料の心配なく、いつものルートを安心して運行できます。

選ばれる理由 03

### 安全 世界で既に普及している技術

LPGと軽油を使用するデュアルフューエルシステムは、
20年ほど前から利用され、すでに実証済みのシステムです。
しかも最新の排ガス対策もされた、最新のシステムを搭載します。

LPGとディーゼルのデュアル・トラック委員会

Daruma Energy だるまエナジー　　城東自動車工場

# 東京地区会場：王子自動車学校開催模様

会場の王子自動車学校の全景

案内看板の配置状況

試乗・展示用のディーゼル LPG 混合トラック

デュアル フューエル トラック
91-17

デュアル フューエル トラック
91-17

平成26年度 経済産業省 補助事業
デュアルフューエルトラック
展示セミナー
LPGとディーゼルのデュアルトラック委員会
だるまエナジー株式会社 株式会社城東自動車工場
Japan's Energy
&
Logistics Seminar

デュアルフューエルトラック展示セミナー

質問に答える古田社長（左）と、鈴木社長（右）

同時開催：外国人記者向けにトラックの試乗展示だけでなく、日本のエネルギー情勢も説明した。

発表するMathyosトム・オサリヴァンさん

Dual Fuel Truck
DIESEL + LP GAS

OINJI DRIVING SCHOOL

# 名古屋地区会場：邦和セミナープラザ＋シナネン：開催模様

邦和セミナープラザ会場

シナネン中部支店殿で展示・試乗

デュアル フューエル トラック
91-17

SLIDE CARRIER
S-RIDE

S-RIDE
デュアル フューエル トラック
91-17

## 4. PR 結果から得られた効果

1）ディーゼルエンジンに LPG(オートガス)の自動車用燃料としての混合は最大50%が実用範囲
2）ユーザーの反応は好評で、試験的な導入を求める声も多かった。
3）実用性そのものは証明された。

## 5. 事業結果の今後の活用、結果を踏まえた今後の取り組み

今後は、以下のように事業を推進したい。

（1）小型トラックの小台数での実用化
LPG 業界や、運送業界で同一車を使用する事業者での実用化

（2）中・大型トラックへの展開
長距離性能にすぐれるため、中・大型トラックでの展開

## 参考： LP ガスの自動車燃料としての特性と品質規格

### 1. LP ガスとは

“LP ガス”という言葉は、英語の“Liquefied Petroleum Gas”即ち“液化石油ガス”の頭文字をとったもので、石油中に含まれている比較的液化しやすいガスのことである。

液化とは：常温常圧では（通常の屋外の大気中では）LP ガスは気体であるが、加圧するか冷却すると比較的容易に液体になる。これを LP ガスの液化という。

### 2. LP ガスの主成分

LP ガスの主成分により“プロパン”（“プロピレン”）と“ブタン”（“ブチレン”）等の$C_3$ 及び$C_4$ の炭化水素に大きく分けられる。一般に市販されているLP ガスのうちプロパンを主成分とするものを“プロパン”、ブタンを主成分とするものを“ブタン”と呼んでいる。なお、ブタンはノルマルブタン（以下ブタンと記す）が 70%異性体であるイソブタンが約 30%の混合物である。又“エタン”“エチレン”“ペンタン”及び“ブタヂエン”等がわずか含まれている。

### 3. LP ガスの生産

石油精製工場で、原油の精製過程で生ずる精油所ガス（リファイナリーガス）から分離精製されるLP ガスと油田から回収される油田ガス（フィールドガス）中の湿性ガスから分離精製されるLP ガスに大別される。

石油精製工場で軽油又は重油を分解して生ずる分解ガス（クラッキングガス）から分離精製したLP ガスには“プロピレン”“ブチレン”等の不飽和の炭化水素を含んでおり、これらは反応性に富み、自動車燃料に使用した場合は、ベーパーライザー（気化器）で重合して“タール”を形成し弁座やダイヤフラムに附着してエンジン不調を生じやすいので“タール抜き”が必要である。

又石油化学工場のエチレンプラントから回収される LP ガスもあるが、これにはブタジエンを含んでおり耐油性のゴムをも溶解するので自動車燃料としては不適当である。

## 4. LP ガスの特性表

| 名称 / 項目 | | L P ガス | | | | ガソリン |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | プロパン | ピロピレン | ノルマンブタン | イソブタン | |
| 分子式 | | $C_3H_8$ | $C_3H_6$ | $C_4H_{10}$ | $C_4H_{10}$ | $C_8H_{18}$ |
| 比重 | 液体 水＝1(15℃) | 0.508 | 0.522 | 0.584 | 0.563 | 0.66-0.75 |
| | 気体 空気＝1(15℃) | 1.548 | 1.453 | 2.071 | 2.007 | --- |
| 沸点(℃) | | -42.07 | -47.70 | -0.50 | -11.73 | 25-232 |
| 蒸発潜熱(沸点時 kcal/kg) | | 101.8 | 104.6 | 92.09 | 87.56 | --- |
| 蒸気圧(kg/cm²20℃) | | 8.2 | 9.8 | 2.1 | 3.09 | --- |
| 着火温度(℃) | | 481 | 458 | 441 | 544 | 210-300 |
| 発熱量(kcal/kg) | | 12034 | 11692 | 11832 | 11797 | 11200 |
| 燃焼範囲(空気中質量%) | | 2.37-9.50 | 2.00-11.10 | 1.86-8.41 | 1.80-8.44 | 1.5-7.6 |
| 最高火災速度(m/sec、1インチ管中) | | 0.81 | 1.01 | 0.825 | 0.825 | 0.83 |
| 完全燃焼所要空気量(kg/kg) | | 15.71 | .14.80 | 15.49 | 15.49 | 14.70 |
| オクタン価 | | 125 | 85 | 91 | 99 | 87 |

## 5. 比 重

(1)液比重

15℃でプロパンでは 0.508、ブタンでは 0.584 でガソリンの 0.66～0.75 に比べやや軽く、共に水よりも軽い。

わが国では自動車に使用する LP ガスには、道路特定財源にあてるため、国税として1キログラム当たり 17.50 円が課税され、LP ガススタンドの経営者が納税義務者になっているが、LP ガススタンドでは容量(ℓ)単位で自動車に充填し販売されるので、大蔵省では液比重を 0.56 としリットル当たり 9.80 円で税金を計算してもよいことにしている。(税率は平成 10 年現在)

(2)気体比重

気体比重は 15℃でプロパンで 1.548、ブタンで 2.071 でいずれも空気よりも重い。これは LP ガス特異の性質で、LP ガスがガス容器からもれた場合、一般の空気より軽いガスがすぐに空気中に拡散しているのと異なり、地面によどみながら拡散していくので、思わぬ火災の原因となることがある。

従って、LP ガススタンドで LP ガスを自動車に充填するときには、“クイックカップリング”を必ず使用して漏洩ガスを出来るだけ少なくし、又自動車の整備工場では、通風をよくして、とくに“ピット”の上で点検整備をする場合は、ピット中の漏洩ガスの有無を可燃性ガス測定器で確かめて

から火気を使用するようにしなければならない。

## 6. 沸　点

一定圧力下で液体が気体に変わる温度が沸点であるが、通常は 1 気圧下における温度を沸点と称している。ガソリンの沸点は 25～232℃であるので、常温では液体であるが、プロパンは－42.07℃、ブタンは－0.50℃でいずれも沸点が常温以下であるので常温では気体である。

従って、ガソリンは液状で空気との混合気を形成するのに対し、LP ガスは気体で空気との混合気をつくるので、LP ガスの方が空気と均一に混合し、各シリンダーへの混合気の配分も均等で且つ完全燃焼しやすいので排気ガス中の一酸化炭素の発生量が非常に少ない。

LP ガスは沸点以下に冷却さえしておけば、液状を保っているので、中近東よりオーシャンタンカー（外洋タンカー）でLP ガスを運んで来る場合、或いは輸入基地で貯蔵する場合等、大量に輸送し貯蔵する場合は、高圧タンクを使用するよりは、常圧低温タンクを使用する方が経済的である。

## 7. 蒸発潜熱

LP ガスは気化するときに、気体に変わるために必要な多量の熱を周囲から奪う。
これを蒸発潜熱（気化潜熱）という。沸点ではプロパンは 426kJ／kg、ブタンは 385kJ／kg である。

LP ガス自動車では LP ガスをベーパーライザー（気化器）で気化させるが、その際にこの蒸発潜熱によってベーパーライザーを冷却凍結して破損するので、ラジエータの温水をベーパーライザーの内部を循環させて熱を補い凍結を防止している。

LP ガス自動車が万一火災事故を起した場合、ガス容器が加熱されて内部の LP ガスが気化し、蒸気圧が約 2.3MPa 以上になると自動的に安全弁が作動し、気化した LP ガスを車体外に放出し、その結果ガス容器内の蒸気圧が気密試験圧力以下になると安全弁が自動的に閉じ、ガス容器内の LP ガスが再び気化し始めるが、その気化の際にこの蒸発潜熱によってガス容器は冷却される。このようにガス容器内の自動的な調圧、冷却作用によって、ガス容器は一定の圧力一定の温度以下に保たれガス容器が爆発破裂するようなことは絶対にない。

ガソリンは手にふりかけてもなんの危害も生じないが、LP ガスの場合は、この蒸発潜熱によって凍傷を起すので、LP ガススタンドのような LP ガスを扱う作業所では、作業員は必ず作業手袋を使用しなければならない。

※（注）東京消防庁の自動車火災に関する実験報告（昭 49.3）

LPG自動車は火災の熱を受けるとボンベ内圧が上昇し、22～23kg／$cm^2$ の圧力になると安全弁が作動し、ボンベ内圧力は低下する。自動車が高温にさらされてから安全弁が作動するまでに 5～8 分の時間を要する。（ただし 50%ガス充填の場合）漏洩ガスの燃焼はボンベ付近の温度を 800～900℃に保持するが他のガソリン燃料車と特に異なった燃焼性状は示さない。

従って、自動車に取り付けられたコンテナーに納められたLPGボンベは、一般家庭等に使用されているLPGボンベのようにボンベ本体が直接火災にさらされ、急激加熱を受けることがないから、火災時破裂事例の多い家庭用ボンベのような危険性状は示さないものといえる。

## 8. 蒸気圧

液状の LP ガスを密閉した容器に入れると、液の一部が蒸発して気体となり、圧力が発生するが、ある圧力に達すると蒸発は自然にとまって容器内の圧力は一定となる。そのときの圧力を蒸気圧という。20℃でガソリンではほとんど 0 であるが、プロパンで 0.8MPa／$cm^2$、ブタンでは 0.2MPa／$cm^2$ である。LP ガスは高圧ガスといわれ、高圧ガス取締法の適用をうけるのはこの蒸気圧のためである。

（注）高圧ガス保安法における高圧ガスとは

（1）　圧縮ガス

（イ）　常用の温度において圧力が 1MPa 以上で現にその圧力が 1MPa であるもの。又は温度 35℃において圧力が 1MPa／$cm^2$ 以上となる圧縮ガス。

（ロ）　常用の温度において、圧力が 0.2MPa／$cm^2$ 以上で現にその圧力が 02.MPa／$cm^2$ 以上であるもの。又は 15℃において圧力が 0.2MPa／$cm^2$ 以上となる圧縮アセチレンガス。

（2）　液化ガス

常用の温度において圧力が 0.2MPa／$cm^2$ 以上で現にその圧力が 0.2MPa／$cm^2$ 以上であるもの。又は、圧力が 0.2MPa／$cm^2$ となる場合の温度が 35℃以下である液化ガス。

なお上記に該当するものであっても、他の法律により十分な規制が行われている場合には、高圧ガス取締法の適用は受けない。（例　船舶及び航空機内における高圧ガス　第 3 条）

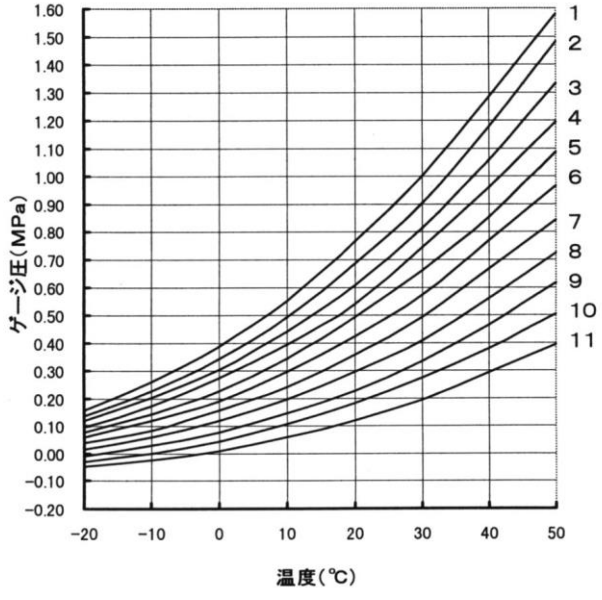
又 LP ガス自動車においては、「高圧ガス保安法」のほかに自動車として「道路運送車両の保安基準」及び「LP ガス自動車構造取扱基準」の適用もうけることは云うまでもない。

この蒸気圧は容器内の液の量の多少に拘らず一定であり、又二種以上の LP ガスが混合している場合、それらのガスの混合比率と温度によっても一定の値を示す。

LP ガス自動車では、燃料タンク（ガス容器）内のこの蒸気圧によって、LP ガスをタンクから押し出し、ベーパーライザーまで圧送するので、ガソリン自動車のように燃料ポンプは不要であるが、日本では自動車燃料は主としてブタンを使っており冬になって 0℃以下に温度が下がると蒸気圧は大気圧近く、またはそれ以下に小さくなるので、20～30％のプロパンを冬期には混入することが必要である。

温度が上昇すると蒸気圧も急激に上昇する。従ってガス容器が火災等により加熱された場合、内圧が 2.32MPa になると作動し気密試験圧力以下になると作動解除する安全弁をガス容器の気相部に設け、容器の破壊を防止していることは前項で詳述した通りである。

温度による蒸気圧の変化




| | プロパン $C_3H_8$ | ブタン $C_4H_{10}$ |
|---|---|---|
| 1 | 100% | |
| 2 | 90 | 10% |
| 3 | 80 | 20 |
| 4 | 70 | 30 |
| 5 | 60 | 40 |
| 6 | 50 | 50 |
| 7 | 40 | 60 |
| 8 | 30 | 70 |
| 9 | 20 | 80 |
| 10 | 10 | 90 |
| 11 | | 100 |

9. 着火温度

着火の原因がなくても自然に燃え始める温度を着火温度という。ガソリンは 210～300℃であるがプロパンでは481℃、ブタンでは441℃でLPガスの方が着火し難い。従って点火装置の点検整備はより確実にしておく必要がある。

10. 発熱量

重量当たりの発熱量はガソリン46,884kJ/kg、プロパン50,375kJ/kg、ブタン49,530kJ/kgでLPガスの方が大きいが、容量当たりに換算するとガソリンで30,935kJ/ℓ、プロパンで25,590kJ/ℓでLPガスの方がガソリンの 80～90%の発熱量しかない。従って同じ気筒容積の自動車では、LP ガス自動車の方が力もおちるし、ℓ当たりの走行キロメートルも劣る。

日本の自動車メーカーは LP ガスに適した専用エンジン及び燃料装置を開発しその欠点を補うことに成功している。

11. 燃焼範囲

可燃性のガスと空気とを混合して点火し燃焼を起させるには、一定の混合比が必要である。(混合気が濃すぎても薄すぎても燃焼しない)この燃焼する混合割合を空気との容積百分比(%)で表したものを燃焼範囲という。この範囲が広い方が燃焼しやすい。ガソリンは 1.5～7.6%であるが、プロパンでは 2.37～9.50%ブタンは 1.86～8.41%でありLP ガスの方が燃焼範囲が広いので、LP ガス自動車の方が空燃比が多少狂ってもエンジンの調子は変わらない即ち空燃比の調整がやりやすいとも云える。

12. 完全燃焼所要空気量

LP ガスが完全燃焼すれば、すべて炭酸ガスと水蒸気になるが、この変化は、つぎの化学方程式のようになる。

プロパン　$C_3H_8+5O_2=3CO_2+4H_2O$

ブタン　$C_4H_{10}+6.5O_2=4CO_2+5H_2O$

この式からわかるように完全に燃焼するために必要な酸素の量は、プロパンの場合で 5 倍、ブタンでは 6.5 倍となり、空気中の酸素量は 21%ぐらいであるので、プロパンを完全に燃焼させるのには、プロパン $1m^3$ に対して空気 $24m^3$、ブタンでは $31m^3$ が必要となる。従ってガソリンに比べて、LP ガスの場合には幾分空気の量を多く必要とする。

13. オクタン価

オクタン価はアンチノック性(ノッキングをしにくい性質)を示すもので、プロパンでは 125、ブタンで91 でいずれもガソリンの 87 に比較して高いので、それだけエンジンの圧縮比を高くしてエンジンの性能を上げることができる。日本の自動車メーカーは、ガソリンの場合は、例えばガソリン自動車の場合8.8 の圧縮比のエンジンであれば 9.3 まで圧縮比をあげた LP ガス専用エンジンを LP ガス自動車には使用している。

14. 液体の温度膨張

液体の LP ガスが温度上昇した場合、膨張する量は非常に大きく、水の膨張する量の約 15～20倍、鉄等の金属の膨張する量の約 100 倍である。

| 温度℃ / 種類 | −15 | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| プロパン | 93 | 96 | 100 | 105 | 111 | 119 |
| ブタン | 96 | 98 | 100 | 103 | 106 | 110 |

（15℃の容器を 100 とする）

従って規定量（ガス容器内容積の約 85%）以上の過充填をすると、液体の温度膨張によりガス容器が破壊する危険があるので、過充填を確実に防止するため液充填バルブを開口部に自動式の過充填防止装置をつけている。

15. 気化した場合の膨張

液体の LP ガスが大気中に放出されると直ちに気化して 250 倍の気体となり空気と混合して可燃性のガスとなる。而も蒸気圧をもっているので LP ガス自動車の燃料装置の高圧部から LP ガスがもれた場合は、自噴して 250 倍の可燃性の気体となるので、燃料の漏れに関してはガソリン自動車よりは危険であり、絶対に LP ガスがもれないようにすること。万一もれることがあっても客室内に漏洩ガスを侵入させないこと。火災になってもガス容器内の LP ガスを安全に燃やすことが LP ガス自動車の安全な対策の基本である。

250ℓの気体の LP ガスを比較的僅かの加圧又は冷却によって 1ℓの液体の LP ガスにしガス容器に入れて運搬し、必要に応じてガス容器より取り出して気化させて燃料に使用することができる利便性もある。

16. 色、臭、毒性

無色無味で純粋のものは無臭である。LP ガスがもれたときに臭によって感知出来るように工業用以外の LP ガスには、ビニール・イソ・アミンエーテルとメルカプタンの混合物で着臭している。（空気中の混合比率が容量 1／200 の場合に於いて感知出来るような臭いがするものを混入すること）然し臭覚には個人差があり体調によって変化もあり、又臭覚は感知した一瞬に麻痺してしまうこともあるので、臭いに頼り切ることはかえって危険であり、ガス漏れを正確に検知するには、ガス漏れ検知器（可燃性ガス測定器）を使用しなければならない。

都市ガスのように一酸化炭素（CO）は含んでいないので中毒性はないが、長時間吸入すると神経が麻痺して眠気を催すことがある。

17. 溶解性

LP ガスは天然ゴムやペイントを溶解するので、LP ガス燃料装置に使用するゴム（ゴムホース、ベーパライザーの弁座、ダイヤフラム等）には耐 LP ガス性ゴム（たとえばニトリルゴム）を使用し、継手のシール材にも耐 LP ガス性ゴムを使用しなければならない。

18. 自動車用 LP ガスの品質規格

日本工業規格(JISK2240－1980)で LP ガスの品質を次のように規定している。

| 項目 種類 | | 組成(モル%) エタン+エチレン | プロパン+プロピレン | ブタン+ブチレン | ブタジエン | 硫黄分(質量%) | 蒸気圧(40℃) Kgf/cm2(Mpa) | 比重(15/4℃) | 主な用途 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1種 | 1号 | 5以下 | 80以上 | 20以下 | 0.5以下 | 0.015以下 | 15.61(1.53)以下 | 0.50～0.63 | 家庭用燃料 業務用燃料 |
| | 2号 | | 60以上30未満 | 40以下 | | | | | |
| | 3号 | | 60未満 | 30以上 | | | | | |
| 2種 | 1号 | -- | 90以上 | 10以下 | —(1) | 0.02以下 | 15.8(1.55)以下 | | 工業用燃料及び原料自動車用燃料 |
| | 2号 | | 50以上90未満 | 50以下 | | | | | |
| | 3号 | | 50未満 | 50以上90未満 | | | 12.7(1.25)以下 | | |
| | 4号 | | 10以下 | 90以上 | | | 5.3(0.52)以下 | | |

注(1)自動車用、工業用(燃料及び原料)、その他に使用する場合には、ブタジエン含有量は、使用目的に対して支障を与えるものであってはならない。

備考 ブタン＋ブチレンとは、イソブタン、nーブタン、イソブチレン 1ーブチレン、トランス 2ーブチレン、シス 2ーブチレンの混合物である。

また、ブタジエンは 1，3ーブタジエンを示す。

自動車用 LP ガスの品質規格としては、これだけでは不十分であり種々のトラブルを生じたので、東京乗用自動車LPG研究会(現・日本 LP ガス自動車研究会)及び社団法人全国 LP ガススタンド協会の要請に基づき、日本 LP ガス協会では自動車用 LP ガス品質規格として次の品質標準を定めている。

昭和 43 年 3 月 1 日制定
昭和 51 年 11 月 1 日改定
日本 LP ガス協会
技術保安委員会

# 自動車用 LP ガス品質標準

1. 適用範囲

この品質標準は自動車用燃料として用いる LP ガスについて規定する。

2. 品質

自動車用 LP ガスは、JISK2240[液化石油ガス(LP ガス)] 及び標準に適合するものであること。

2.1 組成

2.1.1 プロパンを主成分とする$C_3$留分を夏期においては 10 モル%以上、冬期においては 20 モル%以上含有すること。

なお、沖縄地区は、これら規定以下であっても差し支えない。

又、冬期における寒冷地用では気候の状況に応じて$C_3$留分 30 モル%以上含有すること。

2.1.2 ブタジエン

0.5 モル%以下であること。

2.2 蒸気圧(40℃)

3kg／$cm^2$(0.294MPa)をこえ 15kg／$cm^2$(1.47MPa)以下であること。

2.3 硫黄分

0.015 重量%以下であること。

3. 試料採取方法

JISK2240〔液化石油ガス(LP ガス)〕に示す方法による。

4. 試験方法

4.1 組成 JISK2240 〔液化石油ガス(LP ガス)〕に示す方法による。

4.2 蒸気圧 JISK2240 [液化石油ガス(LP ガス)]に示す方法による。

4.3 硫黄分 JISK2240 〔液化石油ガス(LP ガス)〕に示す方法による。

以上

# 参 考 資 料

概要

# 最新デイーゼルトラックへLPガス添加し燃料費節減をトラック事業者等にＰＲする事業

## 背景

●トラック・バス等の輸送に使われる軽油価格が大幅に上昇
●輸送事業者の燃料費構成比率が17～38％まで上昇経営を圧迫
●LP自体は、需要減少に伴う新規需要先の開拓が少ない
●トヨタ、ニッサンがLPGタクシーから撤退
●新たな自動車用途を開拓しないと、LPGスタンドインフラが閉鎖される

●シェールガスが2017年から日本に流入し、LP･天然ガスが変わる
●海外では、新たな自動車燃料としてデイーゼル＋ＬＰを使用する「デュアルフューエル」が開発されつつある。
●過去にもデュアルフューエルは幾つもあるが、最新のデイーゼル車ベースでは日本ではＰＲがされていない。
●乗用車系は比較的技術ハードルが低いが、高負荷な重量車では、シャーシダイナモの使用する必要があり1改造事業者には困難

本事業では、LPガス業界（LPG車やLPガススタンド）の視点ではなく、「燃料費削減」というユーザーの要望レベルに直接PRを通じ体験させ、なおかつ過去の技術ではなく「現在の最新技術」を実証しPRする事業である。これにより、「燃料費用節減策としてのLPガス利用」「過去のLPG混合燃焼ではなく、デイーゼルエンジンもLPガスも最新技術で」「なおかつ、パワーと排気ガス性能の両立を求められる重量車のトラックで」を実証し、トラック事業者を中心に検証PRし、新たなLPガス利用を拡大しスタンド事業者の構造改善に資するものとする。

## 手法

だるまエナジー・城東自動車工場

２社を事務局・実務団体として、トラックユーザー・学識経験者などと共に委員会をつくり事業推進を行なう体制とする。（城東自動車工場は過去に産総研LPG・DME車開発の実務機関）

**ＰＲ用検証自動車の準備**
（三菱ふそう2～4トン積ベース）

**検証自動車の運行プロジェクト**

**技術対応力のＰＲ**
**（最新技術＋重量車トラック対応）**

**ユーザーへのヒアリング**

**実際に検証用トラックでシャーシダイナモでのデータ収集**
1．最大混合量の検証
2．走行性能・経済性検証
（実車を使い、城東自動車保有のシャシーダイナモで検証）

**ユーザーでのＰＲ活動**
実際に検証用自動車をユーザーに活用し、周知と関心を高める

**技術可能性のＰＲ**
**（過去とは技術ベースが変わったことと重量車での可能性周知）**

**輸送事業者団体ユーザーサイドでのＰＲ・実運行**

**展示会・学術発表でのＰＲ**

**輸送事業者へのＰＲ**

**1．輸送事業者・燃料事業者へ資料提供**
**2．Web等で広く社会に周知**

## 効果

●デイーゼルデュアル車は過去にもあるが、技術進歩により進化したＬＰ混合で、燃料経済効果を生み出すことのＰＲ
●新たなＬＰの需要開拓先として、輸送事業者は有望であり、実際に実車でＰＲすることで関心を高め新たなLPG需要の拡大(コスト削減したいトラック輸送･LPガス業界の配送トラック向け)
●ＬＰ業界での、タクシー利用量減少に代わる需要開拓先としてＰＲし、スタンド事業者の構造改善を図る

# LPGとディーゼルのデュアルトラック委員会

## 委員会名簿

| No. | 委員 | 氏名 | 所属先 | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 名称 | 役職 |
| 1 | 委員長 | 金谷　年展 | 東京工業大学 | 特任教授 |
| 2 | 副委員長 | 牧野　茂雄 | ジャーナリスト／<br>フォトグラファー | ― |
| 3 | 委員 | 遠藤　啓二 | 東京都トラック協会 | 環境部長 |
| 4 | 委員 | 戸塚　隆之 | ビューテックローリー（株） | 営業推進室長 |
| 5 | 委員 | 平野　雅生 | 平野運送　（株） | 代表取締役社長 |
| 6 | オブザーバー | 大野　達廣 | （株）東日本宇佐美 | 代表取締役専務 |
| 7 | 事務局 | 古田　洋二 | だるまエナジー　㈱ | 代表取締役社長 |
| 8 | 事務局 | 鈴木　啓一 | ㈱　城東自動車工場 | 代表取締役 |
| 9 | 事務局 | 古田　智恵子 | だるまエナジー　㈱ | プロジェクト・マネージャー |
| 10 | 事務局 | 細井　亮 | だるまエナジー　㈱ | オペレーション・マネージャー |
| 11 | 事務局 | 鈴木　浩明 | ジャパン21　㈱ | ディレクター |

デイーゼル LPG 混合トラック PR

# ユーザー意識ヒアリング調査

2015年１月30日

下記にてアンケート調査を実施

● 全国中小運送会社経営改善フェスタ2014 / 平成26年11月22日（土）
　国際ファッションセンターＫＦＣホール：東京
● 日本LPガス協会　需要開発部会 / 平成27年1月14日（水）
● デュアルフューエルトラック展示セミナー / 平成27年1月26日（月）
● 邦和セミナープラザ：名古屋
● デュアルフューエルトラック展示セミナー / 平成27年2月2日（月）
　王子自動車学校：東京
● インターネットホームページ

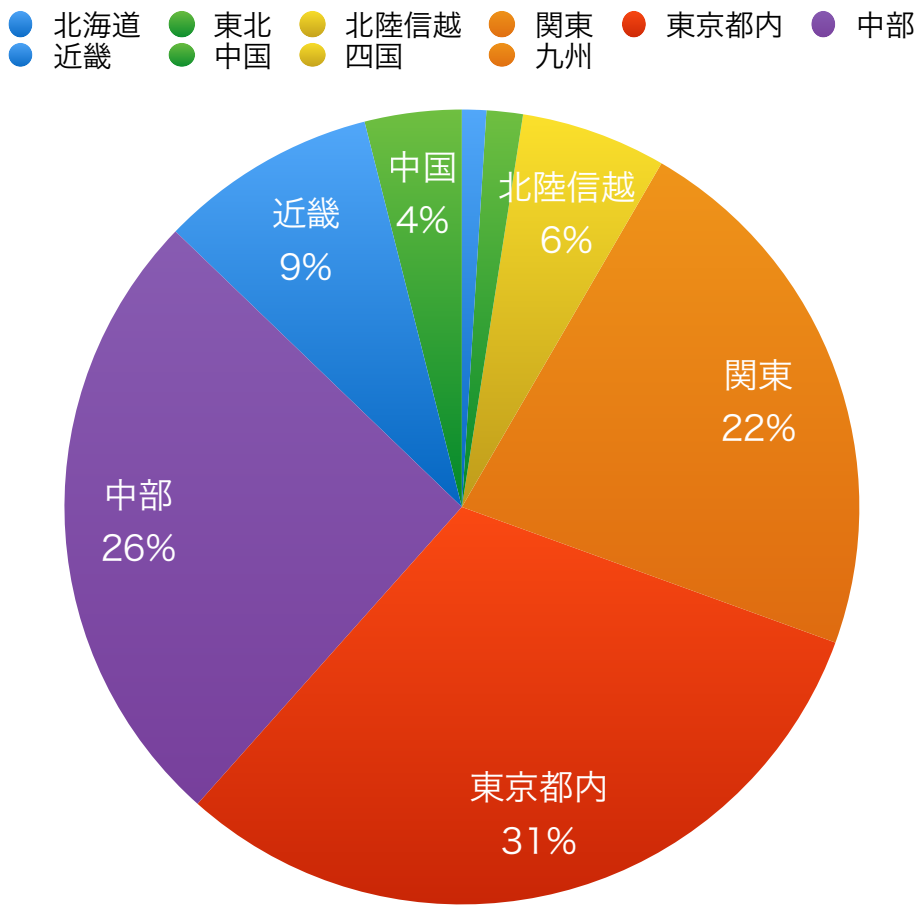
対象として

●トラック事業者
● LPガス事業者

全国中小運送会社
経営改善フェスタ2014

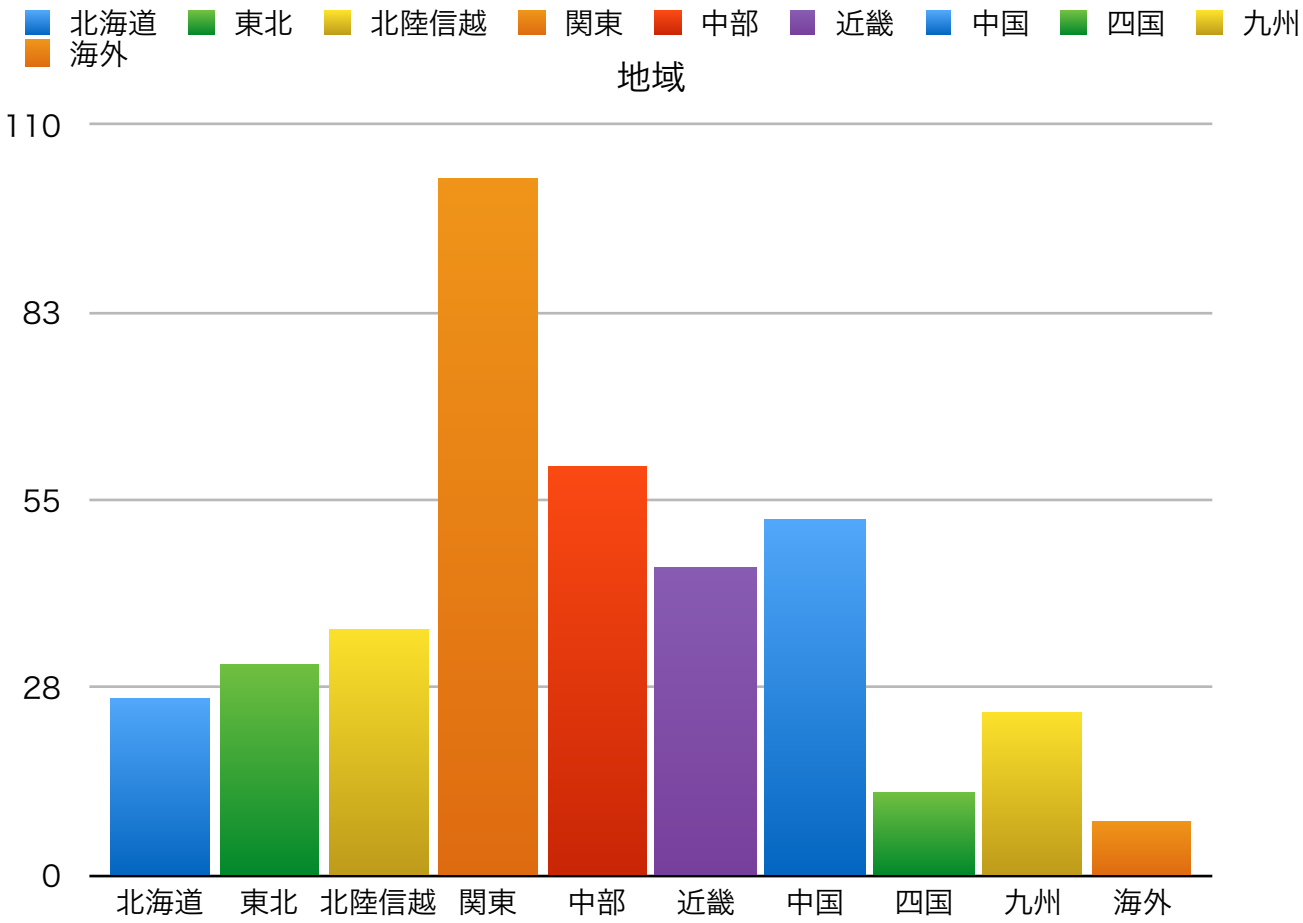
**Q１．本社の所在地を教えてください。**

東京・名古屋での、アンケート実施のため、関東エリア中部エリアで、約7割であった




| 北海道 | 東北 | 北陸信越 | 関東 | 東京都内 |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 3 | 12 | 45 | 63 |
| **中部** | **近畿** | **中国** | **四国** | **九州** |
| 52 | 18 | 8 | 0 | 0 |

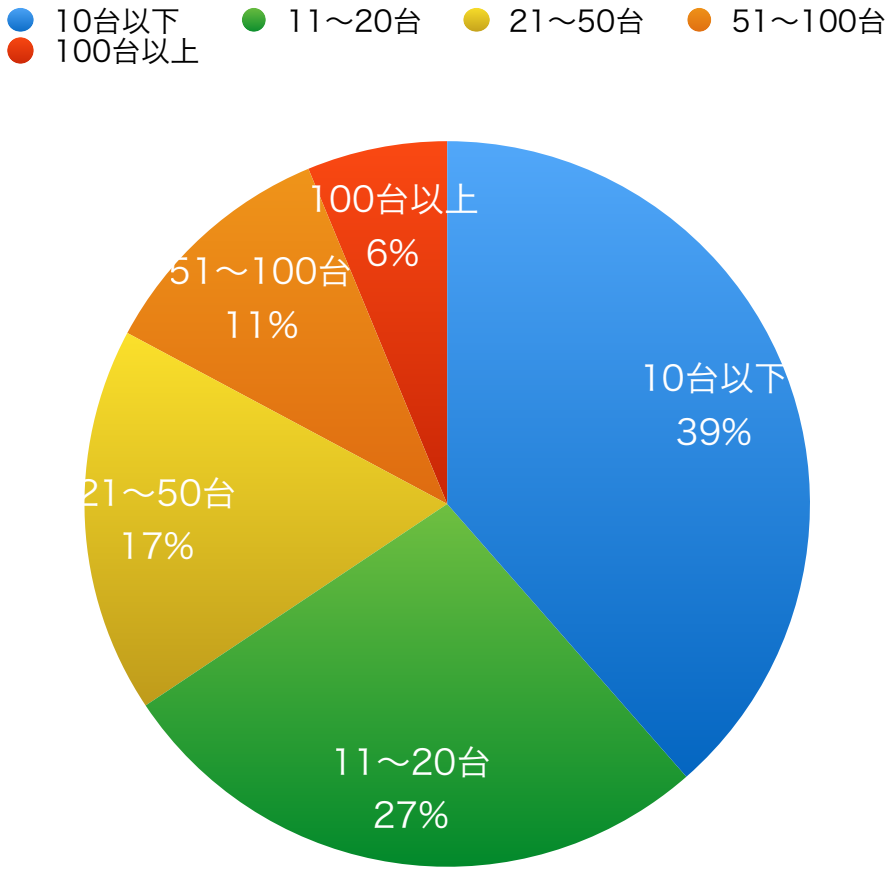
## Q２．営業所の所在地を教えてください。（複数回答可）



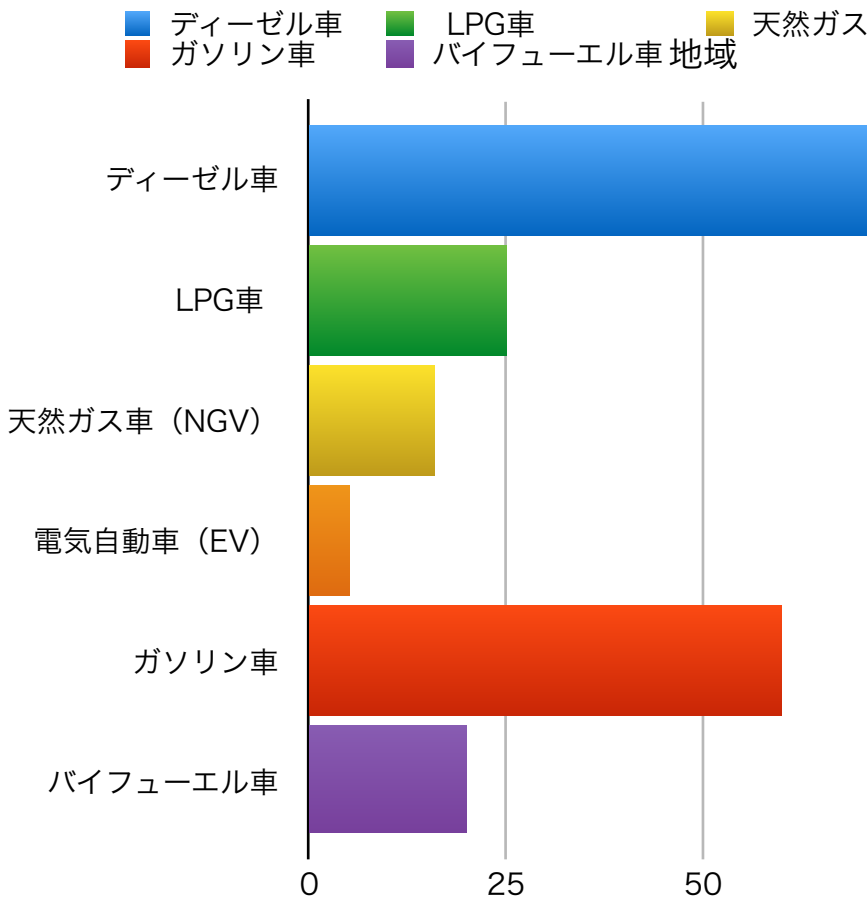

| 北海道 | 東北 | 北陸信越 | 関東 | 中部 |
|---|---|---|---|---|
| 26 | 31 | 36 | 102 | 60 |
| **近畿** | **中国** | **四国** | **九州** | **海外** |
| 45 | 52 | 12 | 24 | 8 |

**Q３．御社の所有車両の台数を教えてください。**

| 10台以下 | 11～20台 | 21～50台 | 51～100台 | 100台以上 |
|---|---|---|---|---|
| 74 | 52 | 33 | 21 | 12 |

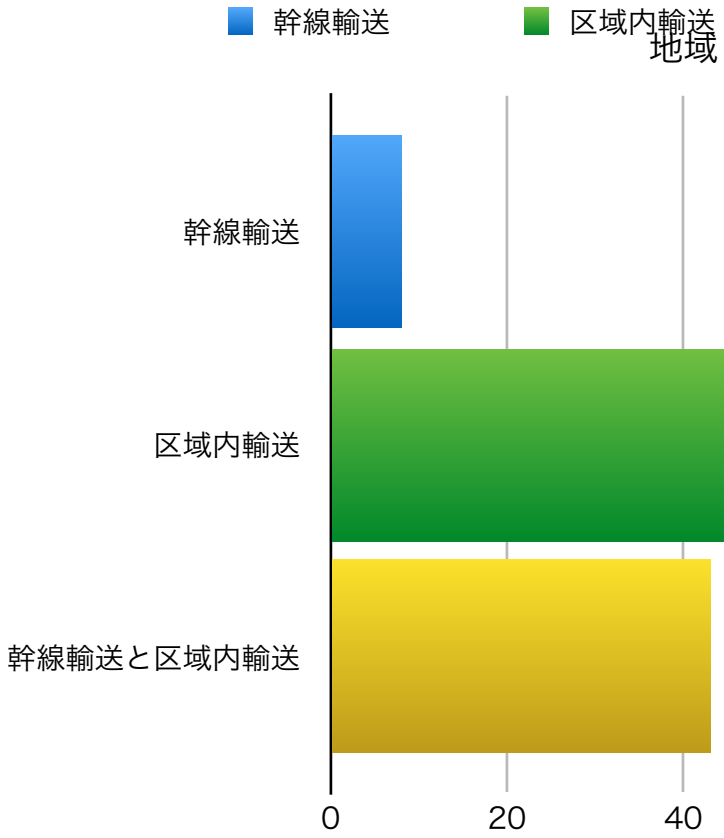


**Q４．御社の所有車両の種類を教えてください。**



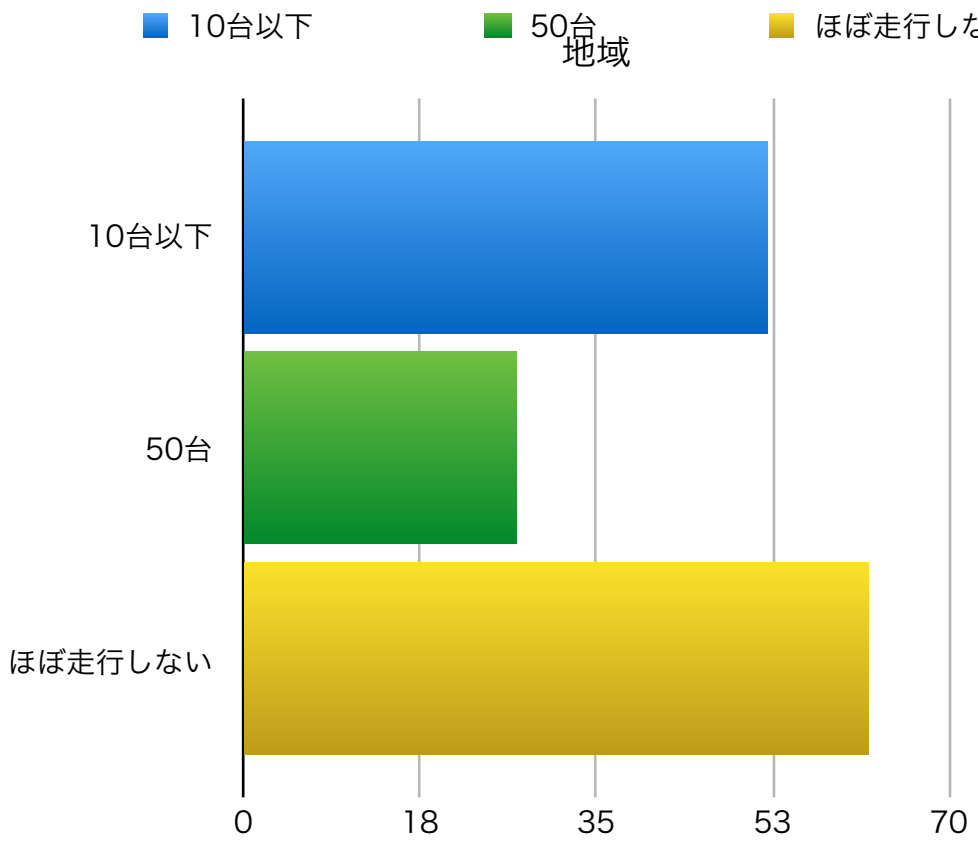

| ディーゼル車 | LPG車 | 天然ガス車（NGV） |
|---|---|---|
| 98 | 25 | 16 |
| **電気自動車（EV）** | **ガソリン車** | **バイフューエル車（2種類以上の燃料を切替て使う車）** |
| 5 | 60 | 20 |

**Q５．配送地域を教えてください。**



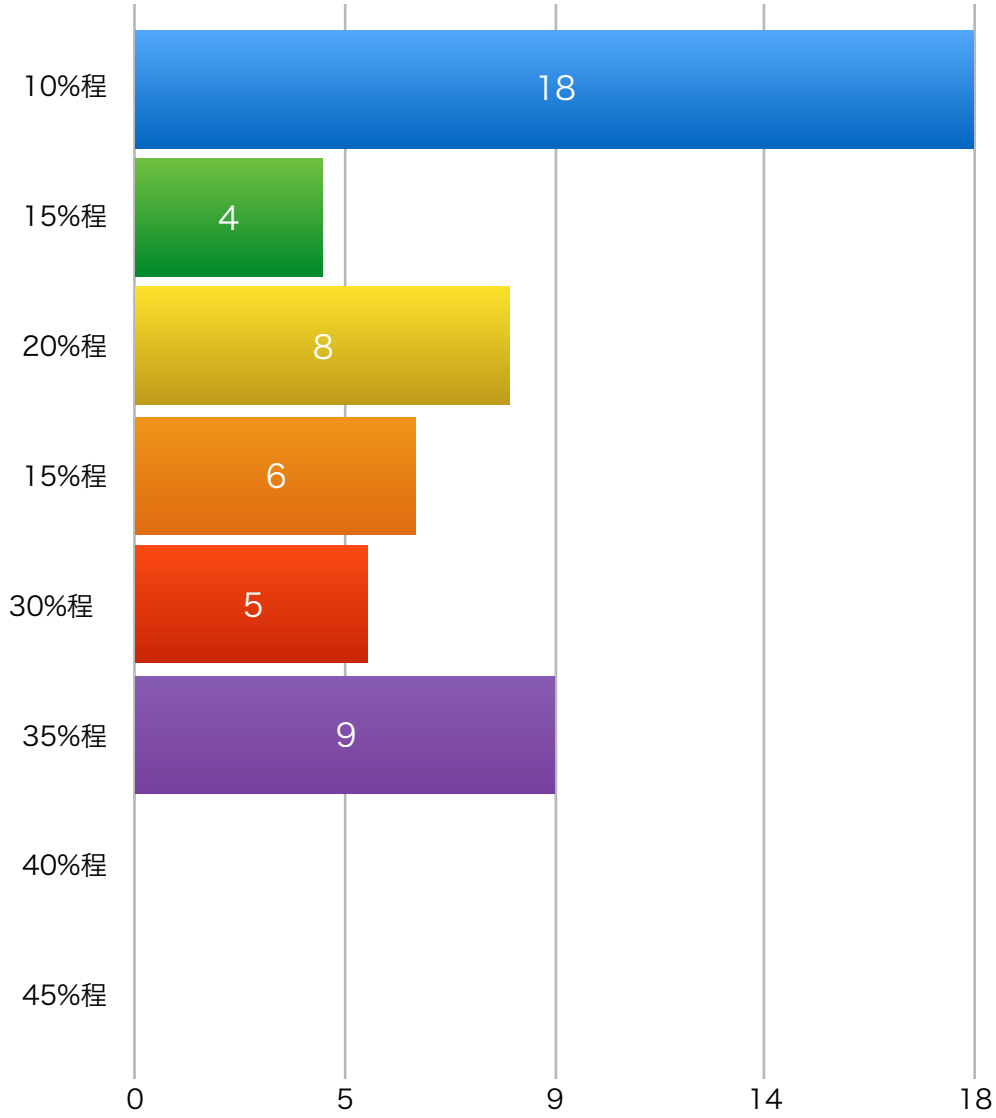

| 幹線輸送 | 区域内輸送 | 幹線輸送と区域内輸送 |
|---|---|---|
| 8 | 72 | 43 |

## Q６．300km以上の長距離輸送の頻繁で走行しますか？



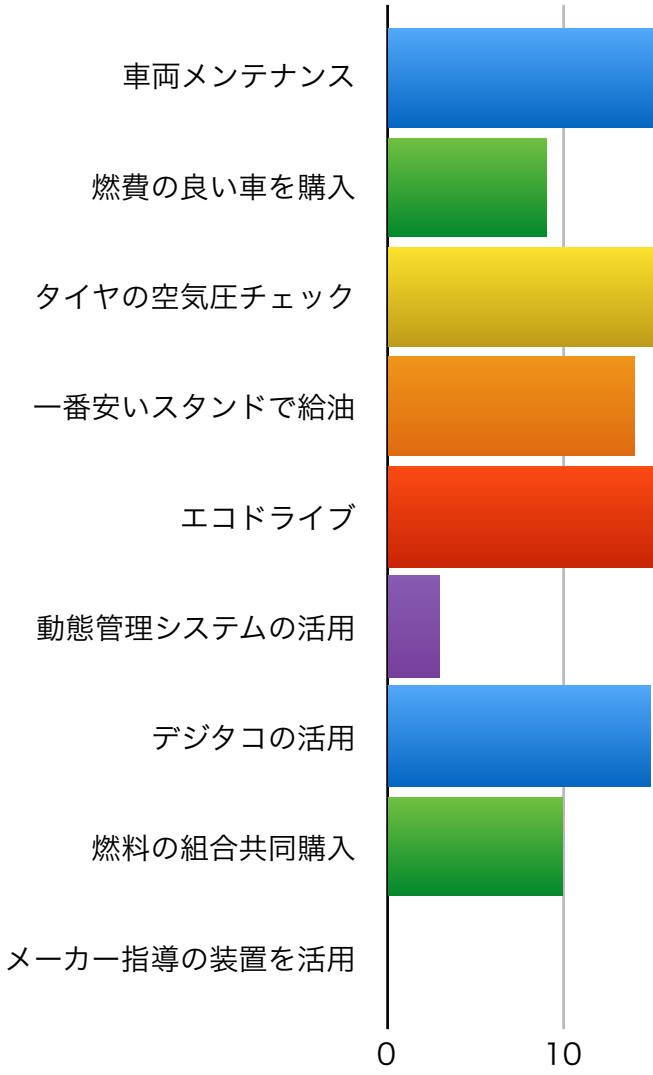

| 10台以下 | 50台 | ほぼ走行しない |
|---|---|---|
| 52 | 27 | 62 |

**Q７．燃料費が営業収益に占める割合は、毎年上昇していて、40%近くになる事業者も存在しています。御社の燃料費の割合を教えてください。**

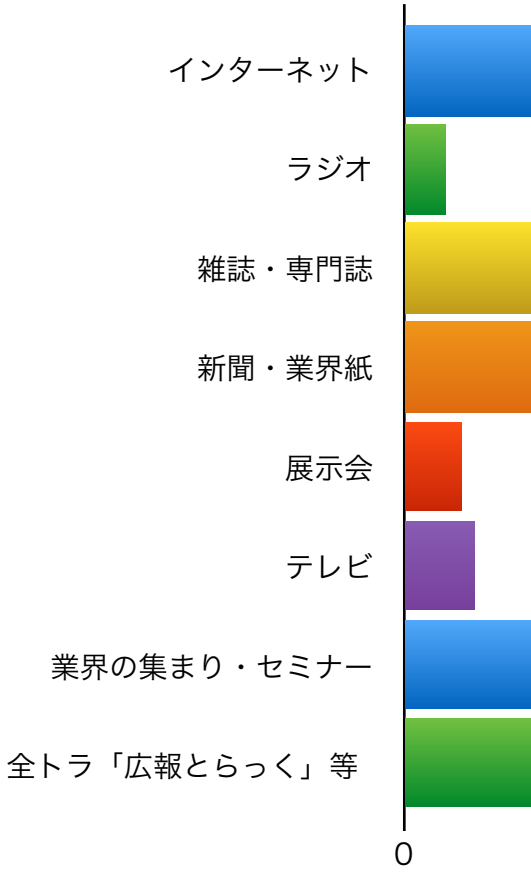



| 10%程 | 15%程 | 20%程 | 15%程 |
|---|---|---|---|
| 18 | 4 | 8 | 6 |
| **30%程** | **35%程** | **40%程** | **45%程** |
| 5 | 9 | 0 | 0 |

| 車両メンテナンス | 燃費の良い車を購入 | タイヤの空気圧チェック |
|---|---|---|
| 28 | 9 | 23 |
| 一番安いスタンドで給油 | エコドライブ | 動態管理システムの活用 |
| 14 | 39 | 3 |
| デジタコの活用 | 燃料の組合共同購入 | メーカー指導の装置を活用 |
| 15 | 10 | 0 |




**Q８．燃料費を削減するために実施している事があれば教えてください。（いくつでも）**

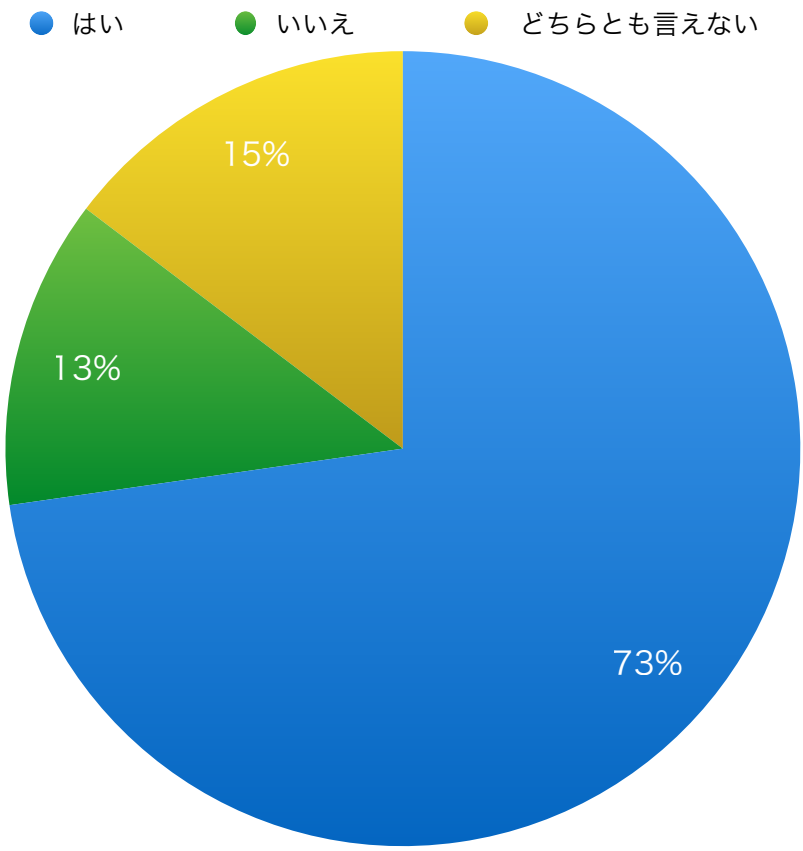



**Q９．現在、下記の中から経営情報を得ていますか？（いくつでも）**

| インターネット | ラジオ | 雑誌・専門誌 | 新聞・業界紙 |
|---|---|---|---|
| 46 | 3 | 9 | 34 |
| **展示会** | **テレビ** | **業界の集まり・セミナー** | **全トラ「広報とらっく」等** |
| 4 | 5 | 30 | 11 |

**Q10. 大震災など災害時の緊急輸送が必要な場合、燃料の軽油不足の懸念があるので所有車両の燃料の多様化はした方がいいと思いますか？**

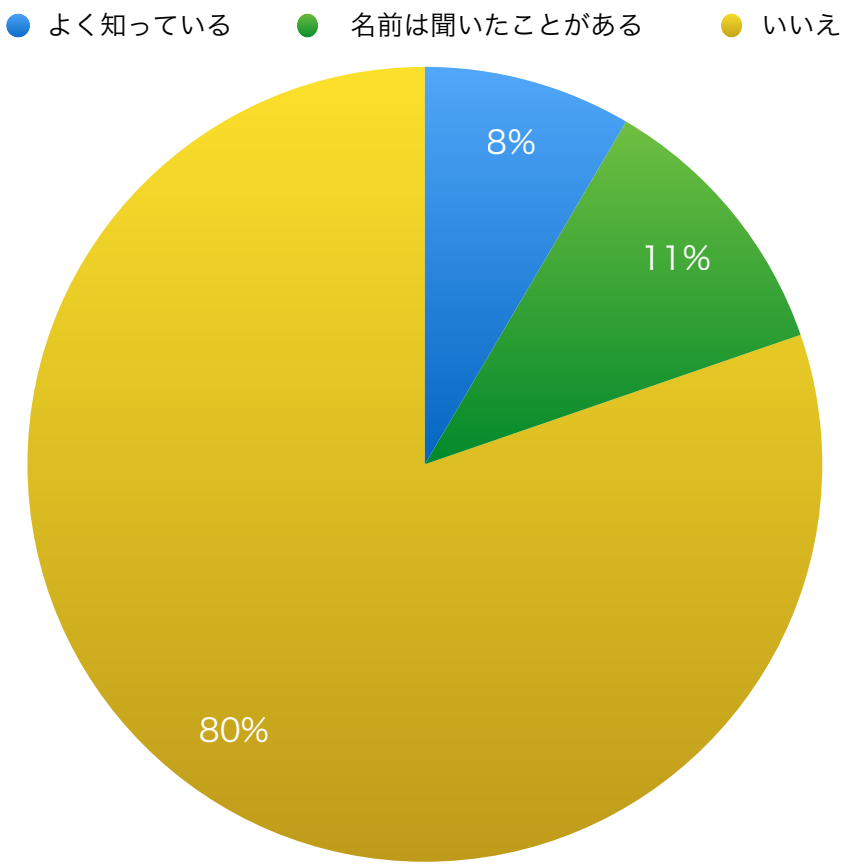
2011年3月11日に発生した東日本大震災の影響で、ガソリンや軽油など不足したため営業活動できない等、経験の影響で約８割の方が必要と回答されました。




| はい | いいえ | どちらとも言えない |
|---|---|---|
| 104 | 18 | 21 |

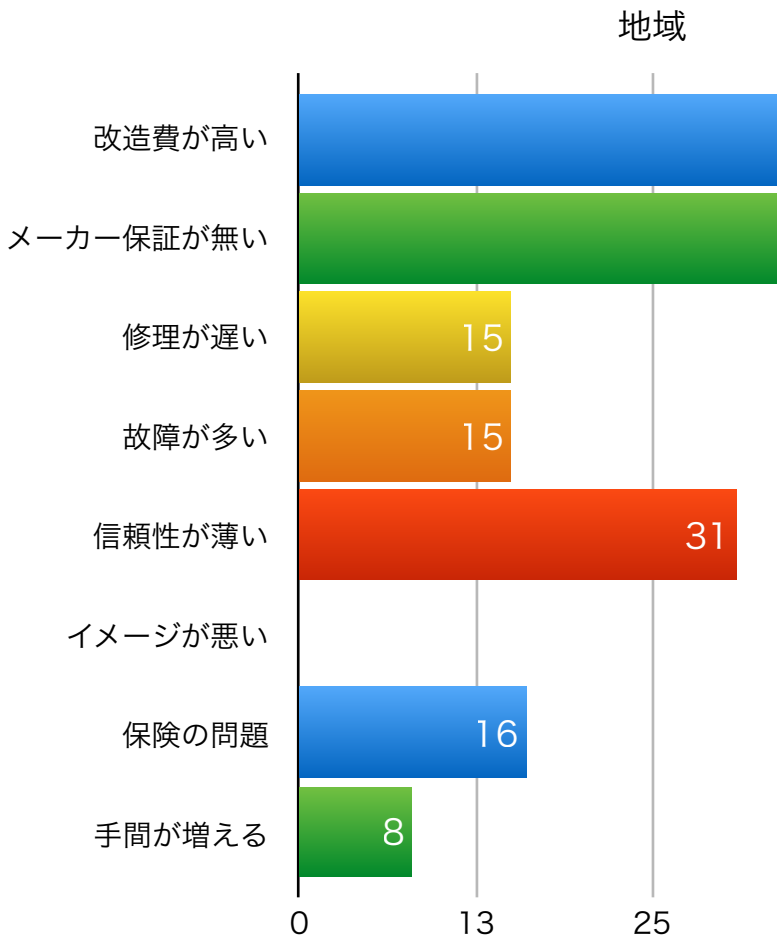
**Q11. ディーゼルトラックにLPガスを添加するデュアルフューエルシステムを既にご存知でしたか？**

8割の方が、知らないと回答。



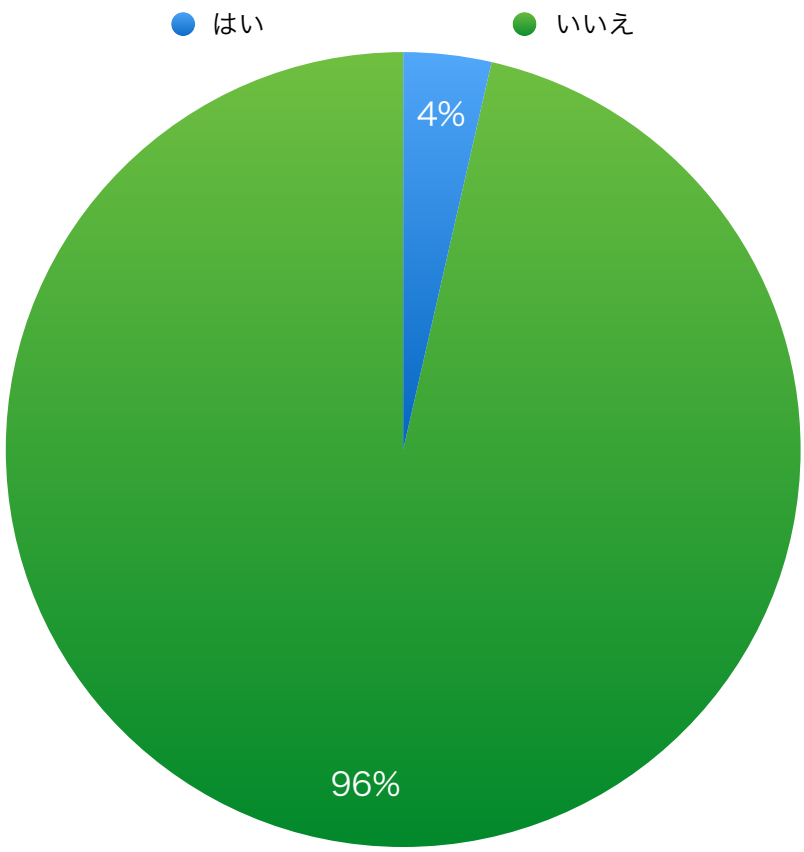

| よく知っている | 名前は聞いたことがある | いいえ |
|---|---|---|
| 6 | 8 | 57 |

## Q12. この車は公認車検の改造車ですが改造車のデメリットは何だと思いますか？



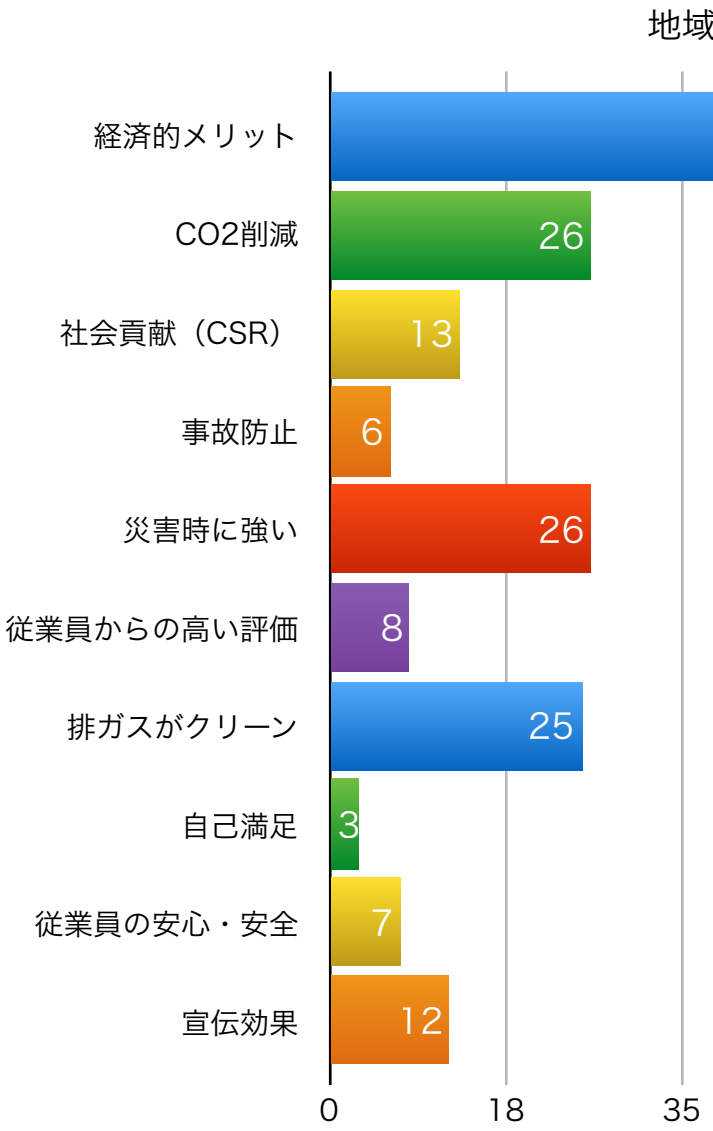

| 改造費が高い | メーカー保証が無い | 修理が遅い | 故障が多い |
|---|---|---|---|
| 46 | 39 | 15 | 15 |
| **信頼性が薄い** | **イメージが悪い** | **保険の問題** | **手間が増える** |
| 31 | 0 | 16 | 8 |

## Q13. 現在、特殊架装を含めた改造車はお待ちでしょうか？



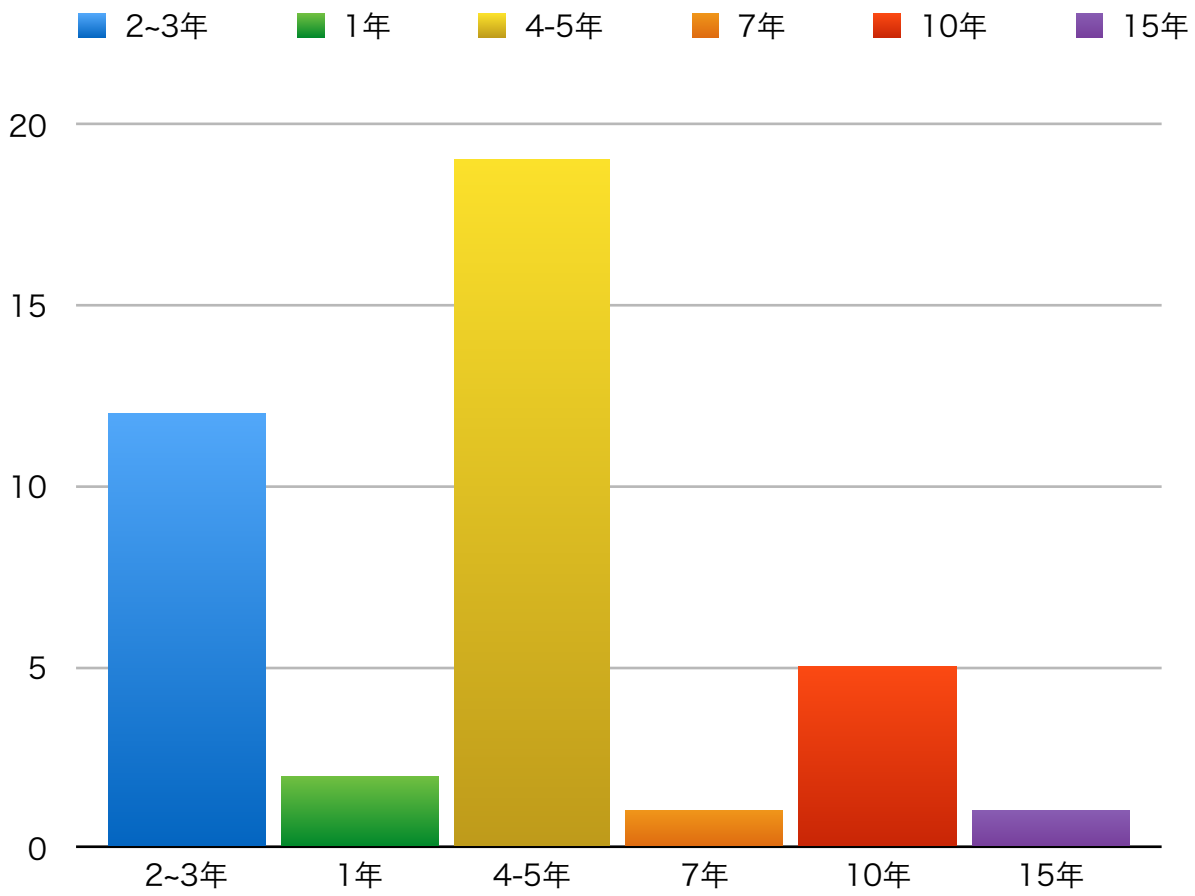

| はい | いいえ |
|---|---|
| 2 | 54 |

**Q14. もし、このトラックを導入する場合、優先順位の高い項目を3つ選択してください。**

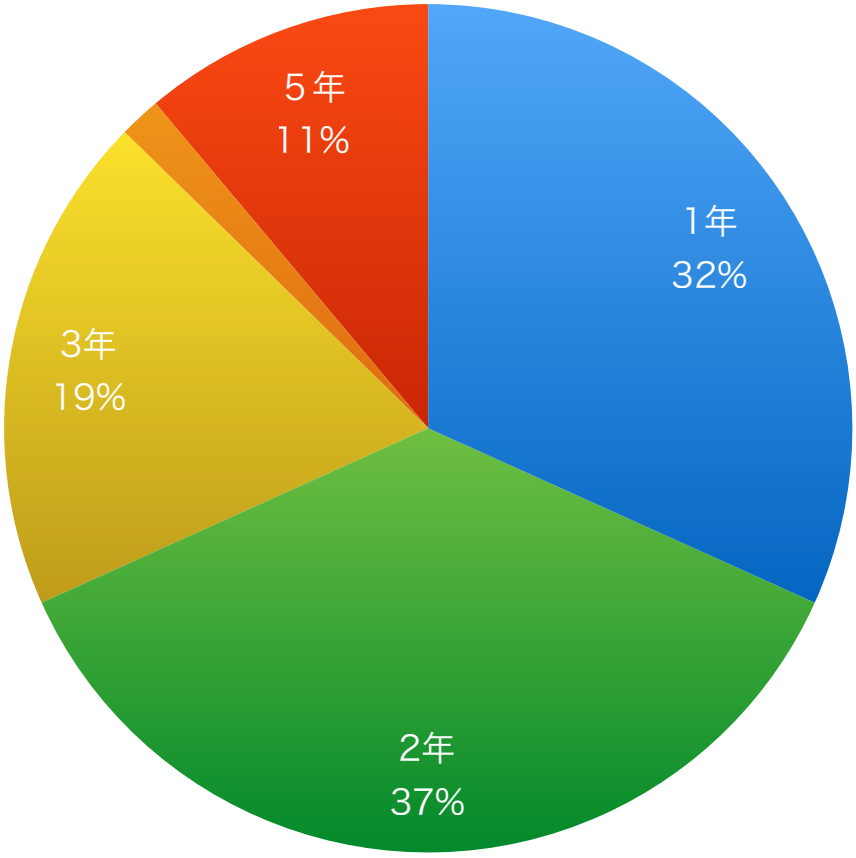



| 経済的メリット | CO2削減 | 社会貢献（CSR） | 事故防止 |
|---|---|---|---|
| 63 | 26 | 13 | 6 |
| **災害時に強い** | **従業員からの高い評価** | **排ガスがクリーン** | **自己満足** |
| 26 | 8 | 25 | 3 |
| **従業員の安心・安全** | **宣伝効果** | | |
| 7 | 12 | | |

**Q15. もし、所有しているキャンター等小型トラックをデュアルフューエルシステムに改造した場合、あと何年乗り続けたいですか？**



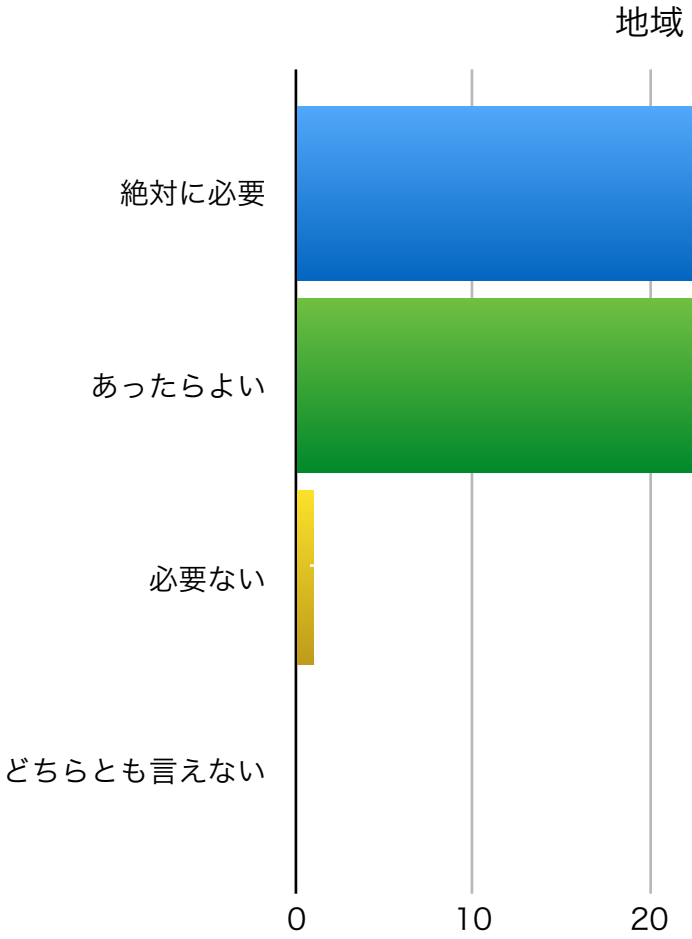

| 改造してから2~3年（海外平均） | 改造してから1年 | 改造してから4-5年 |
|---|---|---|
| 12 | 2 | 19 |
| **改造してから7年** | **改造してから10年** | **改造してから15年** |
| 1 | 5 | 1 |



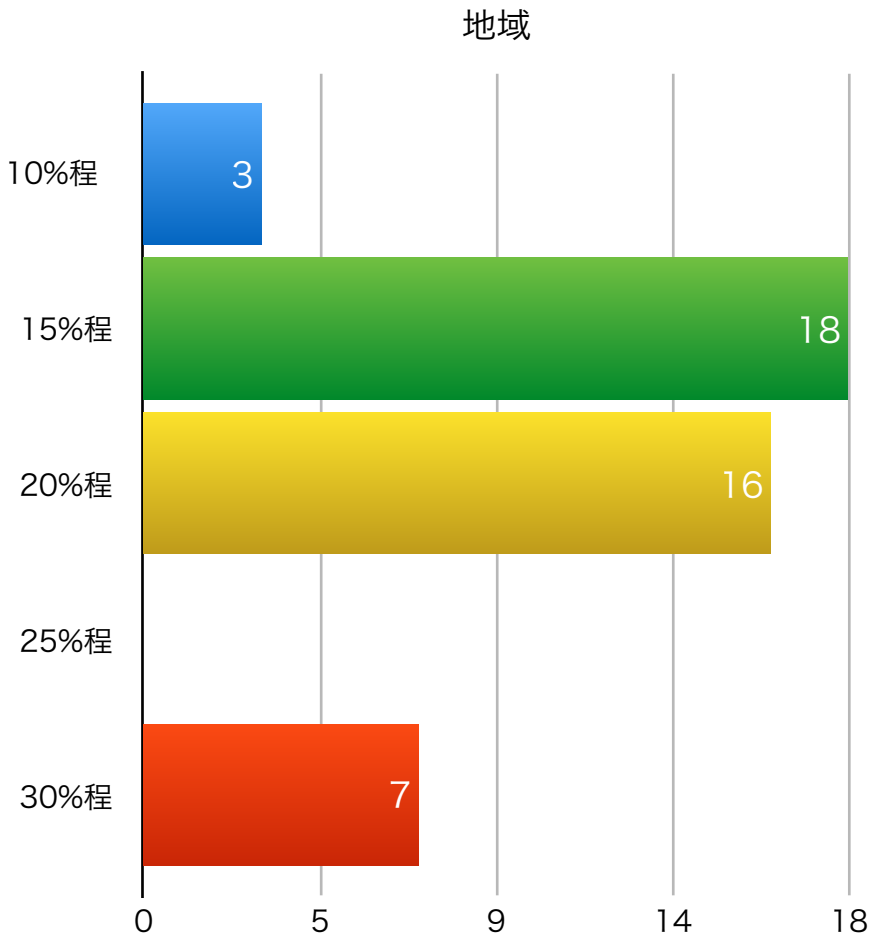

**Q16. 何年で改造費用を回収出来たらこのトラックの導入を検討しますか？**

| 1年 | 2年 | 3年 | 4年 | 5年 |
|---|---|---|---|---|
| 20 | 23 | 12 | 1 | 7 |

## Q17. 改造費用を援助する補助金は必要だと思いますか？



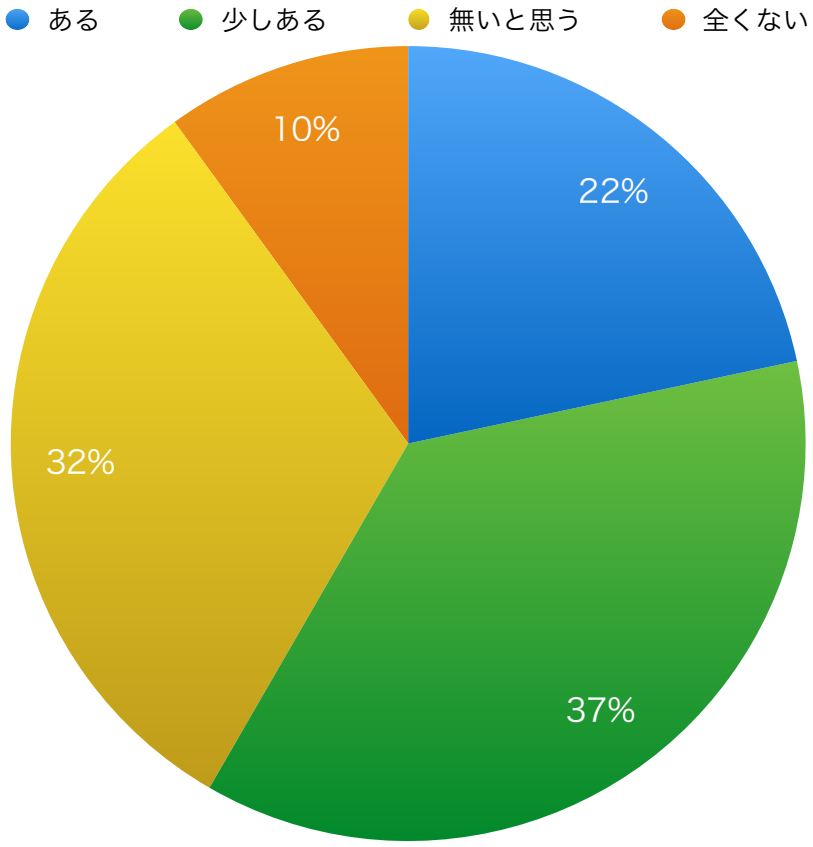

| 絶対に必要 | あったらよい | 必要ない | どちらとも言えない |
|---|---|---|---|
| 40 | 26 | 1 | 0 |




**Q18. どのくらいの燃料費が最低削減できたらこのトラックの導入を検討しますか？**

| 10%程 | 15%程 | 20%程 | 25%程 | 30%程 |
|---|---|---|---|---|
| 3 | 18 | 16 | 0 | 7 |

**Q19. 現在、購入しているトラックの不安（価格、車両の問題）は、ありますか？**




| ある | 少しある | 無いと思う | 全くない |
|---|---|---|---|
| 13 | 22 | 19 | 6 |

## Q20. 本日のプレゼンのご感想をお聞かせください。

**ポジティブな感想として**

・これからも燃費改善よろしくお願いします
・大変面白い内容だとは思います
・少ない時間なのでもう少しゆっくり話を聞たい
・とても参考になりました
・世界では開発されていて国内では普及していないのは問題であると感じました　ぜひ広めて頂きたいと思います。
・いままで聞いた事がなかった事なので「こんなのあるんだ！！」と思いました。
・非常に分かりやすかった。
・実用化に向けて頑張って頂きたい！
・わかり易く、興味のある内容です。
・興味あります
・わかりやすく、よかったです
・興味があり、じっくりわかりやすかったです。
・非常に分かりやすかった。
ガソリン車対応はないですか？

**ネガティブな感想として**

・初めて聞いたのであまりよくわからなかった
・内容がよくわかったが、実績がわからない
当社には不要です。ガスを充てんする手間がかかりすぎる。タンクの重量で減トンされる等の理由