

大型天然ガス機関の技術展望

後藤 雄一*

Technical Review of Heavy Duty Natural Gas Engine

by

Yuichi Goto*

Abstract

Vehicle power source for the near future will be still mainly a conventional reciprocating internal combustion engine. And the reciprocating internal combustion engine is necessary to continue efforts to improve its fuel economy and to reduce the harmful emissions. From the viewpoint of energy security, it is important that the possibilities of utilizing alternative both power and fuels are investigated. In particular, large vehicles such as trucks are supporting logistics as a blood of industry, and promising engines that can replace the diesel engines of large vehicles have not been able to be found until now. From the viewpoint of both energy security and environment conservation, alternative engines to replace the diesel engine have been required in the near future.

This report focuses on a natural gas engine on the basis of diesel engines widely used in large vehicles such as trucks. In the future, natural gas is the most promising fuel among alternative fuels. The future prospects and technical trends for the engine will be shown.

*環境研究領域、企画室

1. 序 論

1. 1 はじめに

人間の活動が地球環境に無視できない影響を与える規模となってきたため地球環境問題が大きくクローズアップされ、本格的に取り組み後回しは許されない時期に来ている。例えば、地球温暖化、化石燃料等の資源の有限性、さらに国境を越える広範囲のPM2.5、局所的汚染の光化学スモッグなどの諸問題に直面している。このような有害物質や地球温暖化ガス(CO₂)増加の問題は自動車用を始めとする各種内燃機関の排出ガスが大きく関係しており、自動車から排出される有害排出ガスの低減が強く望まれている。さらに、燃料資源の枯渇に備えたクリーンな代替燃料や代替動力源の開発などによる対策も喫緊の課題となっている。¹⁻¹⁾

石油エネルギーに加え米国から始まったシェールガス革命¹⁻²⁾により天然ガスやオイルの供給量と価格が今後大きく変化すると考えられる。その中で、日本では2011年3月の福島第一原子力発電所の事故¹⁻³⁾によりCO₂を削減する低炭素社会への道筋について原子力発電利用の見直しが進んでいる。また、2012年8月から開始されたFIT(Feed-in Tariff、固定価格買い取り制度¹⁻⁴⁾)プログラムにより太陽光発電、風力発電等の再生可能エネルギーの促進が図られる中で、日本の将来のエネルギーミックスをどうするかは重要な課題である。自動車用エネルギーとしては、ガソリン、軽油、LPG(Liquefied Petroleum Gas)、天然ガス(Natural Gas)、水素、電気、DME(Dimethyl Ether)¹⁻⁵⁾、バイオ燃料(BDF(Bio Diesel Fuel)¹⁻⁶⁾、HVO(Hydrotreated Vegetable Oil)¹⁻⁷⁾、BTL(Biomass To Liquids)¹⁻⁸⁾、FTD(Fischer-Tropsch Diesel、合成軽油)¹⁻⁷⁾、¹⁻⁹⁾等の多くのエネルギー源が考えられる。車両単体では、それぞれのエネルギーに対応した車両の省エネルギーへの開発が進んでいる状況で、低炭素社会を実現するためにはエネルギー供給の観点により重要性が増している。以上のような背景の中で、自動車用エネルギーとして、いわゆるシェールガス革命による天然ガスの利用への関心は高まっている。

ガソリン火花点火機関では三元触媒の活用によりNOx(Nitrogen Oxide)、HC(Hydrocarbon)、CO(Carbon monoxide)の排出ガスの浄化は高いレベルに達している。しかしながら、熱効率の面でディーゼル機関には及ばず、その向上により燃費の改善に注力されている。また最近では、電子制御技術

が大幅に進歩したエンジンとトランスミッションを含めたパワートレイン全体で熱効率を向上させるハイブリッド技術が活用されている。

一方、ディーゼル機関は熱効率が高く、CO₂排出抑制の観点から好ましいが、排気中のNOxとPM(Particulate Matter)が課題となってきた。しかしながら、近年の大幅な技術進歩によりこれら課題は改善されてきた。大型車用ディーゼル機関では燃焼改善の面において燃料を高圧噴射で微粒化し、乱流混合を促進して、微粒子を大幅に低減すると同時にEGR(排出ガス再循環)等によりNOx濃度も低減するエンジン改良がなされている。また、後処理技術ではDPF(Diesel Particulate Filter)、NOx吸蔵還元技術を利用したPMとNOxを同時に低減する触媒(四元触媒)や尿素を利用したNOx還元尿素SCR触媒システムの開発が行われ、ポスト新長期規制に適合するためにDPFと尿素SCR触媒を合わせたシステムが主流となっている。¹⁻¹⁰⁾

以上の燃焼改善および後処理技術に加えて代替動力源と代替燃料が検討されている。Fig.1-1¹⁻¹¹⁾に示す動力源の単位質量当たりのエネルギー発生量と単位質量当たりの動力からみると、特に車両用の動力源としては現在の所、やはり往復式内燃機関が優れており、当面は内燃機関の低環境負荷化や高効率化を進めてその特長を生かすことが不可欠である。

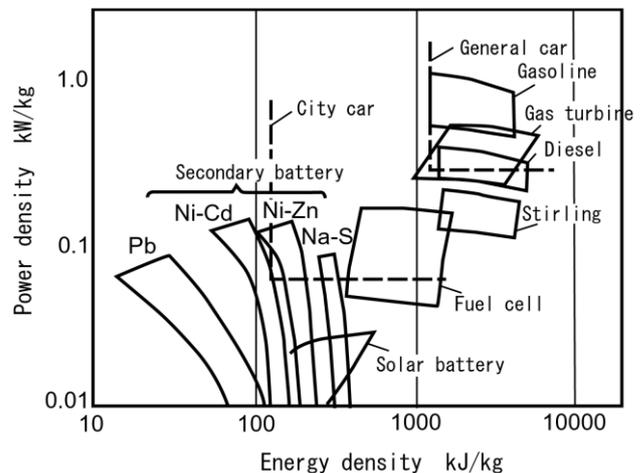


Figure 1-1 Characteristics of Power Source¹⁻¹¹⁾

代替燃料は、石油系以外の燃料を用いることで化石燃料の有限性の問題や環境問題を解決あるいは軽減しようというもので、その候補には天然ガス、DME、メタノール、水素などがある。このうち天然ガスは水素と同じように気体であるため、可搬性に難点があるが、自然のままに使える燃料加工ロスが

少なく有望な代替燃料である。

また天然ガスは、特に、排出ガスがクリーンであること、世界各地に供給源が存在するため将来の石油燃料の有限性に対して非常に有効な代替燃料であること、および地球温暖化物質であるCO₂の排出が少ないことという3つの側面から、代替燃料のうちでは高いポテンシャルを持ち現在最も注目されている。また、今後天然ガスの黄金時代に入りつつあるとの報告もある。¹⁻¹²⁾さらに、最近は米国から始まったシェール（ガス）革命により天然ガスやオイルの供給量と価格が今後大きく変化すると考えられる。

¹⁻²⁾

以上のように、当面の車両用動力源については従来の往復式内燃機関を基として燃料経済性を高め、有害排出物質の発生を低減する努力を積み上げるとともに、代替動力、代替燃料の活用の可能性を見極めることが重要である。

特に、産業の血液として物流を支えるトラックなどの大型車については、ディーゼル機関に代わりうる有望な機関が現在の所見当たらない。将来のエネルギー安全保障、また低環境負荷化の面からも、ディーゼル機関に代わる代替機関が求められている。

したがって、本報告では、トラック等の大型車で広く使用されているディーゼル機関を基に、代替燃料として今後最も有望と考えられる天然ガスで走行させるために必要な内燃機関についてその技術的動向と将来展望を明らかにする。

1. 2 本報告の概要

本報告は、6章より構成される。なお、当該論文¹⁻¹³⁾を基に最近の動向等を加えて修正した内容とし、以下に各章の概要を列記する。

1. 「序論」では、本報告の社会背景と目的を述べる。

2. 「エネルギー資源の現状」では、エネルギー資源の動向について述べるともに、特にシェールガス革命による天然ガスの自動車燃料への影響について述べる。

3. 「自動車用燃料としての天然ガス」では、自動車用燃料としての天然ガスの適性と課題について述べる。

4. 「大型車用天然ガス機関についての研究」では、大型車用天然ガス機関に関する従来の研究を概説し、気筒内直接噴射火花点火方式の可能性をさらに発展させる方向で新たな燃焼方法を見出すことが技術的

には最も有望であることを述べる。

5. 「今後の展望」では、国内での大型車用天然ガス機関の実用化と普及に向けての検討を行い、ディーゼル代替機関としての可能性を示す。

6. 「結論」では、本報告で得られた結果を総括し、大型車用天然ガス機関による大型天然ガス自動車の可能性と今後の課題について述べる。また、燃料技術と燃焼技術及び排出ガス処理技術の三者の統合に基づく天然ガス自動車の技術可能性について述べる。

2. エネルギー資源の現状

2.1 エネルギー資源の分類

エネルギー資源として、石油、オイルサンド（地表付近の砂層に染み出て来た石油が変質したもの）、オイルシェール（石油の前駆体であるケロジェン（数億年前の海や湖のプランクトン・藻などの生物体の死骸が堆積した高分子化合物）を多く含む堆積岩）、石炭、天然ガス（シェールガスを含む）、ウラン、再生可能自然エネルギー（水力、風力、太陽光、地熱）がある。Table 2-1 に資源の特性パラメータを示す。

2-1)

Table 2-1 Characteristics of resources

Energy resource	Crude oil	Oil sand	Oil shell	Coal	Natural gas	Uranium
Confirmed deposits	120 billion barrels ('96)	20 billion barrels (Estimated recoverable resource)	60 billion barrels (Estimated recoverable resource)	Smokeless coal・bituminous coal 52 billion tons, sub-bituminous coal・brown coal 51 billion tons ('96)(Equivalent of crude oil 470 billion barrels)	14.1 trillion m ³ ('96) (Equivalent of crude oil 90 billion barrels)	45.1 million tons ('94)
Annual production	23.1 billion barrels ('96)	—	—	4.6 billion tons ('96)	230 billion m ³ ('96)	61.4 thousand tons ('95)
Estimated ultimately recoverable resource	44.2 year	—	—	224 year	62.2 year	73.5 year
CO ₂ emissin per a calorie	1 (Standard)	—	2.4	1.2, 2.0(Liquified oil)	0.7	0
Phase state in the normal condition	Liquid	—	—	Solid or liquid	Gas or liquid	Solid

石炭は、液体の石油に比べ、固体のため取り扱いや輸送が容易ではなく、燃焼に伴う硫黄酸化物(SO_x)、CO₂排出量も多く、灰の処理に手間がかかるなどの欠点を持つ。その反面、石炭は、豊富な確認埋蔵量、安価なコスト、世界に広く分布する等優れた特長を持つ。

天然ガスは、熱量当たりのCO₂排出量がガソリンや軽油より少ない。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)はCO₂排出が少ないことから、またIEA(International Energy Agency)はエネルギー安全保障の観点から、いずれも天然ガスを重要な石油代替エネルギーと位置付けている。また、天然ガスは中東以外にも世界に広く分布する。数百メートルから千メートルほどの海底にメタンが水の分子と結合してシャーベット状に固まって存在するメタンハイドレートが、世界の海溝に広く存在すると言われ、日本の周辺でも国内の使用量の約100年分に当たる7.35兆m³が存在すると推定されている。2-2)

最近、地下からの回収がこれまで難しいと考えられていた「非在来型天然ガス」が、回収技術の飛躍的な進歩により回収可能となってきた。「非在来型天然ガス」には、タイトガス、コールベッドメタン、シェールガスの三つがあり、その中でシェールガスが大幅な技術の進歩により、経済的にも回収可能となったため注目されている。IEAは2001年6月にガス黄金時代を迎えたとするレポートを公表した。2-3)、2-4)

核燃料は電力源として既に利用されており、CO₂を排出しないエネルギー源として不可欠のものである。日本では2011年3月の福島第一原子力発電所

の事故によりCO₂を削減する低炭素社会への道筋について原子力発電利用の見直しが進められ、2012年の革新的エネルギー・環境戦略では2030年代に原発ゼロを可能とするようグリーンエネルギーを中心にあらゆる政策資源を投入することとしていた。2-5)

2014年4月12日には新エネルギー基本計画が閣議決定され、原子力発電所は安全を確保したうえで再稼働させるが、将来の原子力発電所依存度に関しては「可能な限り低減させる」とする方向に転換された。2-6)

再生可能エネルギーは、エネルギーとして利用できるが必ずしも十分な量を供給できるとはいえないことから課題を多く抱えている。2012年8月から開始されたFITプログラムにより太陽光発電、風力発電等の再生可能エネルギーの促進が図られており、特に太陽光発電の普及が進んでいる。

2.2 天然ガスの燃料事情

Fig. 2-1 に一次エネルギーの供給構成の推移と将来動向を示す。2-7)、2-8) 自動車燃料としては、燃料供給体制、供給量の確保、可搬性、低価格、安全性、エンジンへの適応性などの条件を考えると、いまだ石油系燃料を越える代替燃料は現れていない。今後、環境・エネルギー問題の深刻さを踏まえると、上記の条件の中で一部の条件が犠牲になったとしても代替燃料が石油系燃料に替わってある程度使用されるだろう。

天然ガスは油田・ガス田から産出するメタンを主

(CH_3OH)、DME (CH_3OCH_3)、合成液体燃料油 (GTL : Gas To Liquids) が製造可能であり、液体燃料として利用される可能性がある。2-10) いずれにしても、天然ガスは石油代替の一次エネルギーとしての資質を十分にもつ有望なエネルギー資源である。

天然ガス資源については、世界の 12 の海溝にメタンハイドレート (シャーベット状のメタンの水和物、理想化学式は $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$) としてまだ大量に存在すると言われ 2-11)、日本列島周辺の海溝にも国内天然ガス消費の約 100 年分に相当するメタンハイドレ

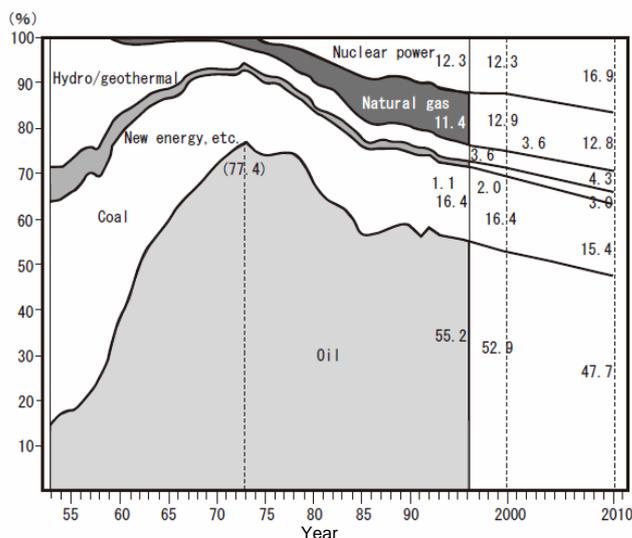


Figure 2-1 Supply configuration change and future trend of primary energy 2-8)

成分とする無色透明の可燃性ガスであり、Fig.2-2 に示す世界各地で産出され 2011 年現在確認されている埋蔵量は 208.4 兆 m^3 である。未確認の在来型ガス、非在来型ガスを含めると埋蔵量は 752 兆 m^3 と見られており、実に 230 年を賄えると考えられる。採掘・生産技術の進化により、今後も確認埋蔵量が増加すると考えられている。2-9)

天然ガスからは合成軽油、DME など種々の燃料転換が可能で、その研究開発も進んでおり、メタノール

ートの存在が予想されている。2-12) 埋蔵量の評価は、種々の物性値が未だ十分に把握されていないため正確な算出を行うことは非常に困難である。そのため、多くの研究者により多くの仮定に基づいた埋蔵量の試算結果が発表されている。2-13) しかしながら、それらの推定値には大きな開きがある。

また、最近注目されているシェールガスは頁岩層に自然にできた割れ目から採取されていたが、2000 年代に入ってから水圧破砕によって坑井に人工的に大きな割れ目をつくってガスを採取する技術が確立した。更に頁岩層に接している坑井の表面積を最大にするために水平坑井掘削技術で 3,000m の長さの横穴を掘ることが可能となった。これらの技術進歩の結果シェールガス生産量が飛躍的に増加しシェールガスブーム、シェールガス革命などと呼ばれるようになった。2-14)

我が国においても新潟県、千葉県、北海道などの一部で天然ガスが産出されるが、Fig.2-3 に示す海外各地から -162°C の超低温に冷却して液化し硫黄分などの不純物が除かれた液化天然ガス (LNG :

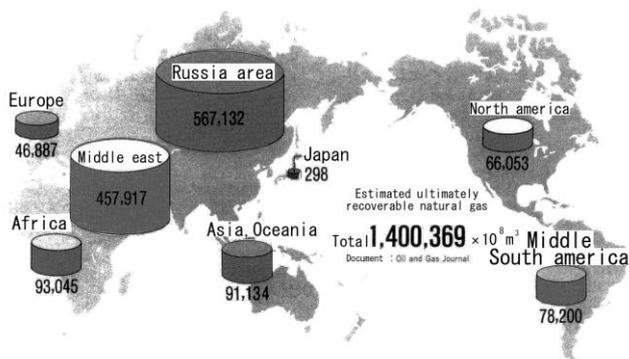


Figure 2-2 Natural gas reserves of all over the world 2-9)

Liquefied Natural Gas) として大部分は輸入されている。シェールガスから作られた米国産の LNG は 2017 年から日本に輸入する計画となっている。

圧縮天然ガス (CNG : Compressed Natural Gas) スタンドの設置は、Fig.2-4 に示す天然ガスが導管で

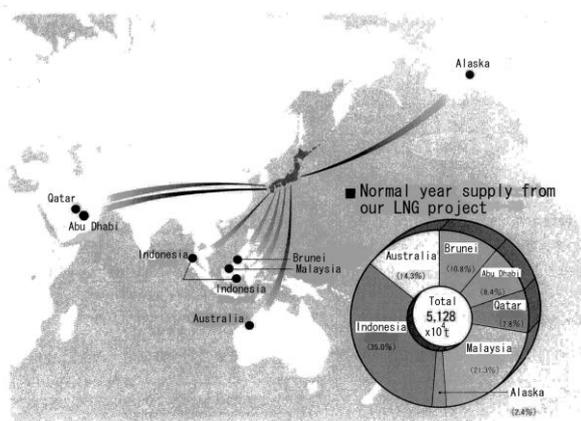


Figure 2-3 Natural gas imported from all over the world 2-9)

供給される国土の約 5% の範囲に限定されている。天然ガス導管が敷設されていない地域においても、天然ガスの利用を国土の広い範囲で促進する目的として航続距離の長い LNG トラックの普及の可能性はある。

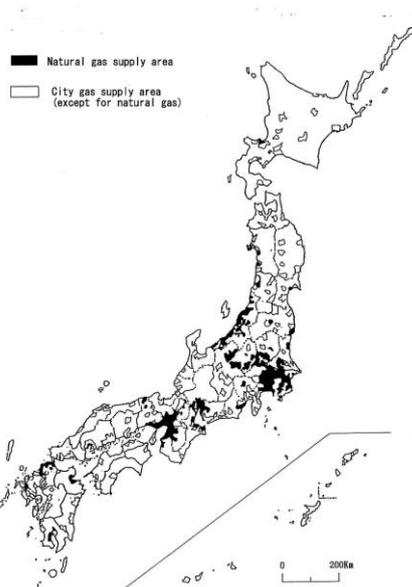


Figure 2-4 Natural gas supply area in Japan 2-9)

2. 3. 天然ガスの燃料特性

国内で都市ガス (12A, 13A) として利用されている天然ガスは、輸入された LNG から熱量調整して製造されたものであり、硫黄分などの不純物を含まない。13A の場合、若干の変動はあるが、メタンが約 88 vol%、エタン、プロパンが約 5 vol%、ブタンなどがそれ以外の組成となっている。対空気比重が 0.65 と空気より軽く、主成分のメタンでは自然発火温度が 540℃、オクタン価も約 130 とそれぞれ高い。

圧縮天然ガスはその成分の約 90% がメタンを主成分とする調整ガスである。Table 2-2 に代表的な天然ガス燃料の組成を示す。その他の成分も低級炭化水素に限られるため、燃焼特性はほとんどメタンの特性と考えてよい。

Table 2-2 Natural gas composition

Formula	vol %
CH ₄	88.19
C ₂ H ₆	4.92
C ₃ H ₈	5.31
i-C ₄ H ₁₀	0.78
n-C ₄ H ₁₀	0.73
i-C ₅ H ₁₂	0.02

Table 2-3 のメタンの燃焼特性 2-15) から、メタンの特徴として空気より軽い、オクタン価が高い、可燃範囲が広い、自発火温度が高い、燃焼速度が遅いなどが挙げられる。特に、自発火温度が高く、燃焼速度が遅いこと、および空気に対する密度比が小さいこと等はガソリンなどの液体燃料とは大きく異なる。

一方、LNG の成分の沸点は Table 2-4 に示すように各成分で異なりメタンの沸点が最も低い。LNG を容器に保存するときにはメタンの沸点以下の温度で保存する必要がある。LNG は極低温のため断熱容器に保存されるが、燃料充填後に周囲からの入熱により最低沸点成分のメタンから蒸発し BOG(Boil-Off Gas) 2-16) が発生する。容器圧力上昇を防ぐため BOG を容器から除去すると LNG 中のメタン濃度が減少し LNG 組成が変わる「ウェザリング」 2-17) 現象が起きる。BOG による損失は現在の断熱容器で一日に約 2% 以下である。軽油 (JIS2 号相当) に対する

Table 2-3 Combustion properties of methane

Fuel	Formula (l):liquid,(g):gas	Molecular weight	Density ratio with Air	Octane number	(A/F) wt	autogenous ignition temperature (deg.)	Lower heating value (kJ/kg)	Combustion speed (cm/s)
Methane	CH ₄ (g)	16.04	0.56	120	17.23	537	49925.92	33.8
Gasoline	C _n H _{1.87n} (l)	~110	3.3	92 ~ 98	14.6	~257	43935.98	~38
Light diesel	C _n H _{1.8n} (l)	~170	3.78		14.5		42439.54	

CNG(13A 相当、20 MPa)、LNG のエネルギー密度比は、それぞれ 0.23、0.64 であり、LNG は CNG の約 3 倍のエネルギー密度をもつ。

Table 2-4 The boiling point of the LNG ingredient

	Boiling point °C (1 barometric pressure)
Methane(CH ₄)	-162
Ethane(C ₂ H ₆)	-88
Propane(C ₃ H ₈)	-42
Butane(C ₄ H ₁₀)	-0.5

メタンハイドレートは、Fig.2-5 に示すように高圧・低温下において水分子で構成されるかご型結晶構造にメタン分子が一つ取り込まれた氷状の固体である。2-18)メタンハイドレートの特徴は、メタンの貯蔵能力が非常に大きく、理論上結晶状メタンハイドレート 1 m³ 当りに標準状態メタンガスが 164m³ まで貯蔵できる。メタン、水、メタンハイドレートの相図 2-19)から、10 気圧 (水深 100m) 以上で 15°C 以下の圧力・温度条件から 1000 気圧 (水深 10000m) 以上で 32°C 以下までの範囲でメタンハイドレートが存在するので、低温・高圧の深海で容易にメタンハイドレートが保持される。

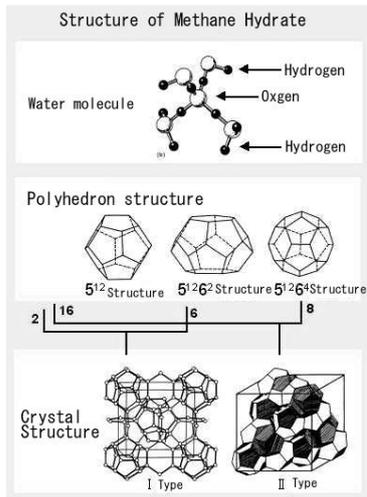


Figure 2-5 Structure of the methane hydrate 2-18)

メタンハイドレートを開発するには、圧力・温度変化を与えてメタンガスを放出させ、これを地表に輸送する必要がある。開発の過程では、固体が分解して液体とガスに変化する相変化に加えて分解に伴う吸

熱反応が生じるため、熱・流体力学的観点などのマクロ的側面と分子制御・マイクロ輸送などのマイクロ的側面から調査を進める必要がある。さらに、メタンハイドレート中のメタンを CO₂ に置換して CO₂ ハイドレートにしてメタンを取り出す方法 Fig.2-6 なども研究されている。2-20)、 2-21)

General idea of development of gas hydrate (gas mining under molecular control technique)

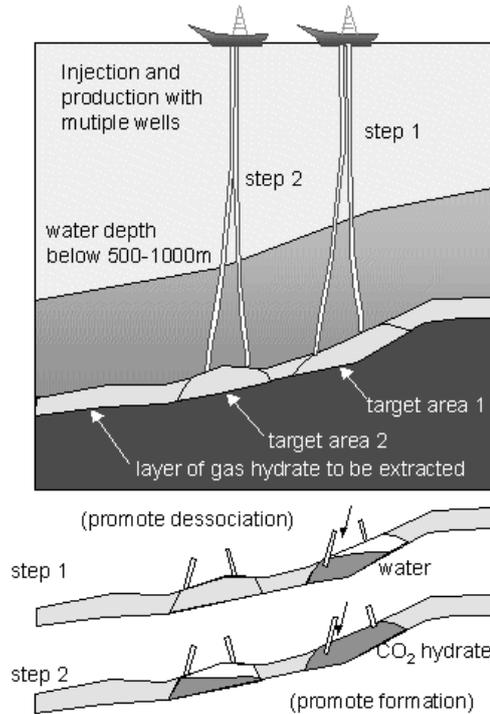


Figure 2-6 The concept of methane hydrate development 2-20)

これらの天然ガス資源とは別に、非在来型天然ガスがタイトサンドガス、石炭層ガス、シェールガス、地圧水溶性ガスなどからも生産されているが、特にシェールガスの採掘技術にブレークスルーがあり、革命といえるほどに世界のエネルギー需給に影響を与えている。2-22)、 1-2)

3. 自動車用燃料としての天然ガス

3. 1 天然ガス機関の燃焼方式の分類

Table 3-1 に天然ガス機関燃焼方式の分類を示す。混合気形成法と点火方法の組み合わせにより、基本的に平均空燃比、空燃比分布、排出ガス浄化方法が決まる。

Table 3-1 Natural gas engine combustion method

Mean air-fuel ratio	Air-fuel distribution	Mixing method	Ignition method	Emission purification	Characterization	Vehicles
Stoichiometric air-fuel ratio	Uniform	Pre-mixed	Spark	Three-way catalyst	Anti-knocking measure	Light duty
Lean air-fuel ratio	Uniform	Pre-mixed	Spark	Oxidation catalyst EGR	Power-up measure (Turbo-charged, Inter-cooler)	Medium duty Heavy duty
			Diesel fuel pilot			
	Non-uniform	Pre-mixed (Stratified intake)	Spark	Oxidation catalyst EGR DPF Four-way catalyst Urea-SCR catalyst	Ignition stabilization	
			Mixing-controlled (Direct injection)		Diesel fuel pilot	
		Glow plug				
			Spark			

供給する燃料種の観点からは、天然ガスのみを燃料とする専焼方式と、他の燃料と組み合わせる方式があり、後者にはガソリン等と天然ガスを切り替えて使うバイフューエル方式と点火に軽油を使うデュアルフューエル方式³⁻¹⁾、³⁻²⁾、³⁻³⁾、³⁻⁴⁾、³⁻⁵⁾がある。燃焼室への燃料供給の観点からは、吸気管に導入する予混合方式³⁻⁶⁾、³⁻⁷⁾と燃焼室内に直接にガス噴射する直接噴射方式³⁻⁸⁾、³⁻⁹⁾がある。天然ガスはオクタン価が高いため自着火は困難なので、着火補助装置が必要であり火花点火方式³⁻⁹⁾、グロープラグ点火方式³⁻⁸⁾及びデュアルフューエル方式がある。

3. 2 予混合火花点火方式

3. 1の組み合わせの中で、火花点火予混合専焼方式の実用化が最も進んでおり、LD(Light Duty)を中心に乗用車やトラック用のエンジンが既に数多く市場に投入されている。大型車用のHD(Heavy Duty)エンジンでは、殆どが予混合火花点火方式である。予混合火花点火方式では希薄燃焼方式と三元触媒を利用した理論混合比方式³⁻⁶⁾、³⁻¹⁰⁾が考えられる。特にHD用の天然ガスエンジン技術としては希薄燃焼方式に高い関心が寄せられていたが、メタンなどの未燃燃料やCOの排出量が高く、強化されつつある排出ガス規制への適合が難しいことから最近では下火になっている。希薄燃焼方式の特徴として燃焼温

度が低いことから低NO_x性、燃費がよいことに加えて、ベースエンジンをCNGエンジンに改造する際にシステムが単純であること、改造コストが低いこと等が挙げられる。

予混合希薄燃焼方式では、吸気管中にガス燃料が供給されるため吸入空気の充填効率が低下するとと

もに³⁻¹¹⁾、吸気絞りで出力制御を行うため吸気絞り損失が大きく、ガソリンエンジンに比較して出力性能は10%~20%低下する。³⁻⁷⁾ 出力低下対策として、高圧縮比化、過給、吸気動弁系の改善などが行われている。³⁻¹²⁾、³⁻¹³⁾ 絞り損失が大きいため、特に部分負荷領域での高効率化は困難である。したがって、発進・停止の多い都市内走行では部分負荷領域が多用されるため、高効率化が期待できない。さらに、CNGの場合には高圧燃料タンクによる車両重量の増大によって燃料消費量が悪化し、小型トラックの場合にCNG車とディーゼル車では、前者のエネルギー消費率が約35%悪い。³⁻¹⁴⁾

予混合希薄燃焼方式エンジンでは、過給によって出力の低下を補いながら希薄燃焼にインタークーラ、空燃比の電子制御、点火時期の遅延などを組み合わせてNO_x等の排出ガス低減を図るものが多い。³⁻¹⁵⁾、³⁻¹⁶⁾、³⁻¹⁷⁾、³⁻¹⁸⁾

また、予混合方式では高圧縮比によりノッキングが起きやすいために、高効率化の方策として高圧縮比化をとることが難しい。そのため、予混合方式の機関は、希薄燃焼によるNO_xの低減や吸気絞り損失の低減を図るとともに、吸気絞りが少ない全負荷域の利用率向上が期待できる走行条件、例えば、大都市間で高速道路を利用する大型トラック定期便などの利用により、高効率化が試みられている。³⁻¹⁹⁾、³⁻²⁰⁾

希薄燃焼方式で燃焼の安定性を確保するために Prechamber 方式にするものもある。^{3-21)、3-22)、3-33)} Prechamber 内はほぼ理論空燃比に制御され点火プラグにより点火される。排出ガス特性には Prechamber 方式と Open chamber 方式で大きな差はないものの、Open chamber 方式の方が燃焼室容積に対する燃焼室表面積が小さいため熱損失が小さいことから熱効率面で優れており、また単純構造による信頼性、コスト等の点でも優れている。

Prechamber 方式では、燃焼室をセラミックとして高温に維持し、天然ガスを自己着火させる方式の天然ガスエンジンも研究されている。³⁻²³⁾

熱効率においてもガソリンエンジンと同じオットーサイクルの燃焼方式のためガソリンエンジンの熱効率と同程度であり、ディーゼルエンジンの熱効率には及ばない。CNG の場合には高圧燃料タンクによる車両重量の増大によって燃料消費量が悪化し、特に部分負荷が多い都市内走行ではディーゼル車と比べて CNG 車はエネルギー消費率が低い。³⁻²⁴⁾したがって、天然ガス本来の CO₂ 削減効果が相殺され、CO₂ 排出量で比べた場合、必ずしも天然ガスエンジンは CO₂ 排出が少ないとは言い切れない。

厳しくなりつつある排出ガス規制への適合の必要性から、理論混合比で燃焼し三元触媒を用いて排出ガスの浄化を行う方式が現在では主流である。

LD エンジンでは、ガソリンエンジンをベースとしたオットータイプで理論混合比燃焼の CNG エンジンに改造し三元触媒で排出ガスの低減を行う方式が主流である。また、燃料供給システムには、マルチポイントまたはシングルポイントの吸気管燃料噴射方式を用いる例が多い。すなわち吸気管噴射の低圧インジェクターと O₂ センサーを装着し、空燃比を理論混合比近傍に制御して負荷に応じて燃料噴射量を電子制御するシステムである。急激な負荷変化を伴う過渡時には、空燃比が制御ウィンドウの領域から逸脱しやすいため、この空燃比のずれを改善、補償する制御が用いられている。

HD エンジンでは、ディーゼルエンジンをベースとして予混合火花点火式エンジンおよび直接噴射式エンジンの研究開発が行われているが、現在エンジンシステムとして報告がされているのは予混合火花点火方式がほとんどである。

3. 3 直接噴射方式

直接噴射式では、気筒内に直接燃料を噴射するた

めに、吸入空気の充填効率が低下しないことに加えて、出力制御を気筒内に噴射するガス燃料量により行うため吸気を絞る必要がない。従って、直接噴射式は吸気絞り損失が基本的に無く予混合方式に比べて全負荷領域及び部分負荷領域ともに大幅な高効率化が可能となる³⁻²⁵⁾ため、全ての負荷と速度域でディーゼルエンジン並の燃費、出力特性を維持できる可能性がある。

トラック等の商用車を中心に大型ディーゼル車代替として天然ガス自動車が普及するには、熱効率の改善は重要な課題である。既存ディーゼルエンジンの代替としての HD 天然ガスエンジンでは、予混合火花点火方式の天然ガスエンジンは優れた排出ガス特性を示すが、絞り弁を付加することによる部分負荷領域での熱効率の低下が非常に大きな問題となる。

絞り損失を低減するため、火花点火直接噴射専焼方式^{3-9)、3-26)、3-27)、3-28)、3-29)}、グロープラグ直接噴射専焼方式^{3-8)、3-30)}、直接噴射デュアルフューエル方式^{3-1)、3-31)}などの燃焼方式による熱効率の向上が行われている。この場合、ディーゼルエンジン相当の熱効率の可能性をもつ³⁻³⁰⁾が、気筒内噴射には高圧の天然ガスを使うので、持続的な燃料供給のために加圧装置が必要となる。加圧による駆動損失を低減するため LNG を加圧して周囲熱による気化で高圧ガスを得る方式等も存在する。^{3-32)、3-33)}

3. 4 その他の方式

天然ガスエンジンの低環境負荷性を利用して、ハイブリッド自動車用の動力として天然ガスエンジンを利用することが試みられている。ハイブリッド自動車では、負荷変動や回転数変動はハイブリッドシステムにより吸収できるためエンジンそのものは回転数と負荷を最適点で運転すればよい。Prechamber 方式において燃焼室をセラミックとして高温に維持し、天然ガスを自己着火させる方式の天然ガスエンジンを定常条件で運転すると同時に、発電機による発電でモーター駆動をするシリーズハイブリッド方式自動車が研究されている。³⁻²³⁾

予混合火花点火方式の天然ガスエンジンにおいても部分負荷領域の熱効率向上のためにハイブリッド化によるエネルギー効率向上の試みも行われている。回転数と負荷の最適点近傍で定常運転を行えば、吸気絞りをほとんど開けた状態での運転ができるため熱効率の悪化を防ぐことができる。さらに、吸気管に取り付けた回転弁によるミラーサイクルを利用し

て膨張比を変えることにより熱効率の向上をはかることができる。いずれの場合も、エネルギー貯蔵装置としてスーパーキャパシタを利用してブレーキ使用時のエネルギーを回生保存し、それを加速時に利用してエネルギー効率を大幅に向上させることができる。³⁻³⁴⁾しかしながら、ハイブリッド化によるシステムの複雑化、全車両重量の増加などによる積載量への影響など検討する課題は数多く存在する。³⁻²³⁾³⁻³⁴⁾

3. 5 自動車用燃料としての天然ガスの適性と課題

天然ガスは世界各地に供給源を求めることができ、将来の非常に有効な石油代替燃料として有望視されている。さらに、自動車用燃料として用いた場合、低 NOx で粒子状物質の排出が極めて少ないため NOx 対策が行いやすく、地球温暖化物質である二酸化炭素の排出も少ないことから、クリーンエネルギーとして高いポテンシャルをもつ。

このため、ディーゼルベース天然ガス自動車の導入は、大都市圏における大気汚染や二酸化炭素等の地球温暖化物質による地球規模の環境汚染に対する有効な対策の一つと考えられる。しかしながら、未燃メタンの処理、液化天然ガス自動車の BOG 等の問題については未だ十分には研究開発が進んでいないのが現状である。

自動車用燃料として使用される場合には、大部分が天然ガスを気体の状態のまま高圧 (20 MPa) でガス容器に充填する圧縮天然ガスの状態で利用される。しかしながら、CNG 自動車では、通常 1 回の充填あたりの走行距離が 200km 程度と短く、また充填容器がかさばる点や重い等の点に課題があり、コンポジット容器等の利用例も見られるがコストの面で課題がある。³⁻³⁵⁾ ³⁻³⁶⁾

Table 2-2 に示すように、天然ガスの主成分であるメタンは、空気より軽い、オクタン価が高い、可燃範囲が広い、自発火温度が高い、燃焼速度が遅いなどの特徴がある。特に、高い自発火温度は自己着火が困難な点に、遅い燃焼速度は着火による初期火炎伝播状態の燃焼全体に及ぼす影響が他の炭化水素燃料と比べて大きくなる点に、小さい空気密度比は液体燃料とは混合気形成が大きく異なる点に影響を与える。また、PM や光化学反応性の高い HC の大幅な低減が NOx 排出量の増加なしに期待できる。

³⁻³⁷⁾

したがって、特に大都市域で使用されている中型以上のディーゼルトラック・バスや大都市間の高速道路で利用されている大型トラックなどの大型天然ガス自動車に着目し、それらを天然ガスで走行させるための技術的な可能性や課題、展望を明らかにすることは重要である。さらに、大型天然ガス自動車の低環境負荷性、二酸化炭素による地球温暖化の防止効果、代替エネルギーとしての経済性等についてそれらを総合的に向上させるための技術的方向性を示すことも併せて重要である。

4. 大型天然ガス機関についての研究

4. 1 はじめに

3. 1に示した方式の組合せにより多様な天然ガスエンジンがあり得るが、予混合火花点火式理論混合燃焼方式と火花点火式希薄燃焼方式、軽油圧縮着火式予混合希薄燃焼の組合せの例が多く、高出力化の場合には混合気の過給をすることが多い。

HD エンジンでは、ディーゼルエンジンをベースとして予混合火花点火式エンジンおよび直接噴射式エンジンの研究開発が行われている。現在、エンジンシステムとして報告がされているのは予混合火花点火方式がほとんどである。

多くの大型車用 HD 天然ガスエンジンは、大型車用ディーゼルエンジンを火花点火式オットーサイクルエンジンに改造したものである。HD 天然ガスエンジンの最大の課題は、エンジンの熱負荷制御とNOx の排出制御である。現在、多くの HD 天然ガスエンジンは、三元触媒+理論混合比燃焼方式または希薄燃焼方式のどちらかが採用されている。エンジン耐久性の点では一般的に三元触媒+理論混合比燃焼方式に比べて熱負荷が低い希薄燃焼が望ましいとされる一方、排出ガス低減および運転性の点では理論混合比燃焼と三元触媒の組合せの方が優れている。これまで、米国のメーカーは希薄燃焼方式を、欧州のメーカーは希薄燃焼方式と理論混合比燃焼方式の両方を採用してきた。以下に主な特性を下記の Table 4-1 に示す。

天然ガス自動車の普及を考えると、天然ガス自動車の中で大型天然ガス自動車に以下の点で適性がある。
 ①大型貨物自動車の多くが高速道路などの全負荷領域を多用することから、オットーサイクルのエンジンでも吸気絞り損失が少なくディーゼルサイクルのエンジン相当の熱効率が期待できること、
 ②充填所にとっても一充填量が大型貨物自動車の場合には充填量が多いため少ない台数でもそれなりの充填ガス量が一充填所当たりで期待できること、
 ③大型貨物自動車の利用形態は拠点となるターミナル間の輸送であるので、大都市郊外のトラックターミナル近くに大型充填所を重点的に配置することで効率的に充填所を展開できること、
 ④大都市間の高速道路を中心に走行すると全負荷条件に近い運転を行うため吸気絞り損失が小さく燃費がよいことなどである。普及を推進するには、技術課題、利便性課題、経済性課題の各面からステークホルダー（関係者）の役割に応じた方策を示す必要がある。⁴⁻¹⁾

4. 2 予混合式天然ガスエンジン

4. 2. 1 理論空燃比方式

理論空燃比方式では、着火方式に火花点火方式を採用し後処理装置として三元触媒を多くの場合に採用している。大型天然ガス自動車に理論空燃比方式を採用した例として「次世代低公害車開発促進プロジェクト」における大型天然ガストラックの例を示す。⁴⁻¹⁾

大型ディーゼル車を代替する各種次世代低公害車

Table 4-1 Stoichiometric and Lean burn characteristics

	Merit	Demerit
Stoichiometric burn	Possibility to significantly reduce emissions	Three-way catalyst and the closed-loop fuel control system is required.
	Engine performance is stable	Emissions performance is determined by the reliability of the control device and an oxygen sensor
	Ignition is stable	There is a limit to turbocharging.
	BMEP of naturally aspirated engine is high.	Thermal efficiency reduction due to the pumping loss in the partial load condition
		High octane number is necessary.
Lean burn	It is possible to reduce NOx emissions by lean burn	Turbocharging is required in order to obtain the desired output
	NOx emission is reduced by use of EGR	The response of the engine during transient operation is inferior.
	Power increase by turbocharging	Ignition of air-fuel mixture is unstable
	Heat load is similar to one of the diesel fuel case	Cycle variation is large
		Unburned methane emission is high.
		The oxidation catalyst is required for HC reduction and CO

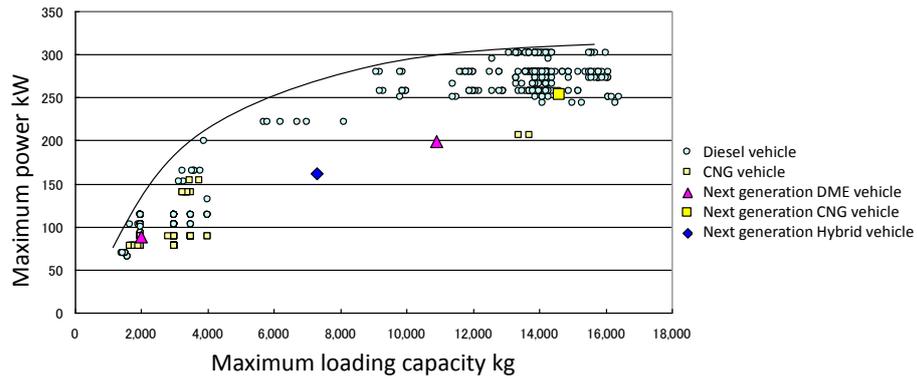


Fig.4-1 Maximum power and loading capacity of diesel and conventional CNG vehicles⁴⁻²⁾

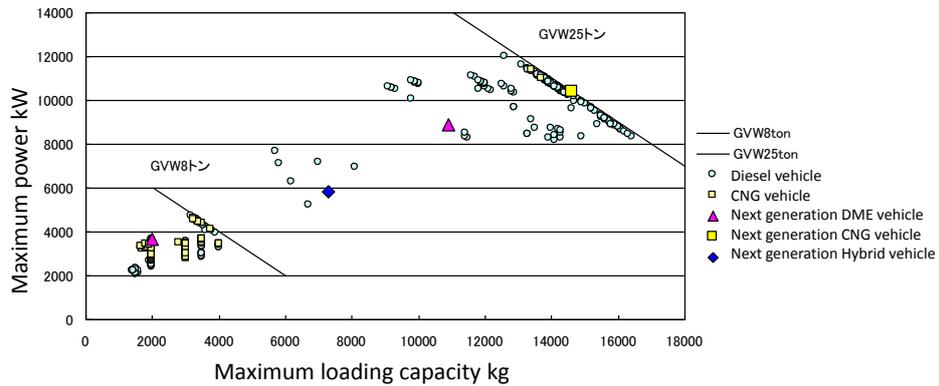


Fig.4-2 Maximum torque and loading capacity of diesel and conventional CNG vehicles⁴⁻²⁾

の開発・実用化を促進するため、平成 14 (2002) 年度から平成 16 (2004) 年度の 3 カ年で、2005 年規制値を基に目標を決め、最も高い目標の車種では規制値の 10 分の 1 を目標とした「次世代低公害車開発促進プロジェクト」が、国土交通省と (独) 交通安全環境研究所 (中核研究機関) を中心に行われた。

このプロジェクトの中で、車両総重量 25 トンクラスの大型天然ガストラックが開発され、NO_x 目標 0.5 g/kWh (当時の最新の新長期規制値の 1/4) 以下、PM 目標ほぼゼロ、燃費目標 CO₂ 排出率でディーゼルエンジン以下という目標を設定し、すべて目標値を達成している。以下に詳細を述べる。

当初は、気筒内のオイル上がりに起因する PM の排出が認められたが、ピストンリングとライナー間のオイル上がりを抑えるようにピストンリングの最適化をする改良により PM の排出は 0.002 g/kWh まで低減することができ、NO_x は新長期規制値の 10 分の 1 以下まで達成された。

エンジンの最大出力は 244kW である。最大車両重量 GVW は 25 トンで、航続距離は 600km 以上 (高速走行時、計算値) である。その技術的特徴は、三

元触媒が最も機能する理論混合比近傍に空燃比の安定的制御を実現することで三元触媒を効果的に利用 (NO_x の大幅低減) したことと、燃料一充填のみで東京～大阪間 (約 600km) の走行を実現 (航続距離の拡大) したことである。⁴⁻²⁾

(1) 出力性能

Fig.4-1 に自動車諸元データから求めた市販のバン型のディーゼル車と従来の CNG 自動車の最高出力と最大積載量との関係を示す。同時に次世代低公害車 (DME 自動車 (小型、大型)、CNG 自動車、IPT ハイブリッド車) の最高出力を比較した。次世代 CNG 車と小型 DME 車の最高出力は、ほぼ従来の自動車と同等である。

Fig.4-2 は、同様に最大積載量に対する最大トルクの関係を示す。次世代低公害車の最大トルクは、最大出力で見られた関係と同様な傾向を示している。

貨物自動車の場合、最大積載量は出力性能とともに重要な要素である。参考に最大積載量と車両重量の関係を Fig.4-3 に示す。図に示された範囲では、次世代低公害車の車両重量が最大積載量に比べて著しく大きいということはなく、次世代低公害車の車両

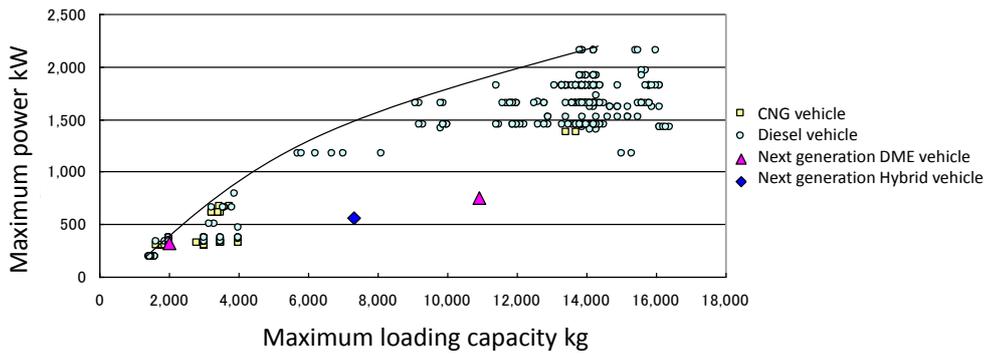


Fig.4-3 Dead weight and maximum loading capacity of trucks⁴⁻²⁾

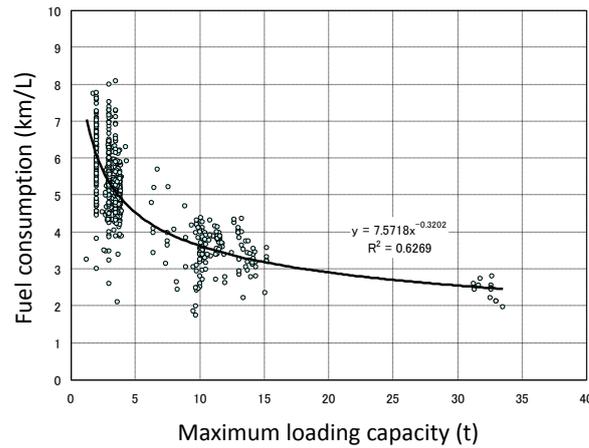


Fig.4-4 Mileage of conventional diesel and CNG vehicles⁴⁻²⁾

重量と最大積載量の関係は、実用的レベルにあると考えられる。

1回の燃料補給あたりの走行距離（以下、航続距離とする）は、貨物自動車にとって実用上重要な要素である。航続距離は、燃料タンク容量（L）と実用燃費（km/L）の積で求めることができることから、以下の方法により次世代低公害車の航続距離と既存のディーゼル貨物自動車の燃料一充填あたりの航続距離を比較した。

既存のディーゼル貨物自動車の一充填あたりの航続距離は、最大積載量別の貨物自動車の実走行燃費（Fig.4-4）から最大積載量に対する燃費の近似式を作

成し、カタログ諸元から、標準的に販売されているバン型のディーゼル車や天然ガス自動車の燃料タンク容量に対する車両の航続距離を試算した。

CNG車の場合は、燃料タンク容量に対し、燃料を200気圧に圧縮して充填しているため、CNG車の一充填あたりの航続距離は、航続距離（km）＝燃費（km/Nm³）×燃料タンク容積（L）／1000×200と計算される。

これらの値を用いて、既存ディーゼル車、CNG車の航続距離とこれに対する次世代低公害車（DME自動車、CNG自動車）の航続距離を比較したものがFig.4-5である。

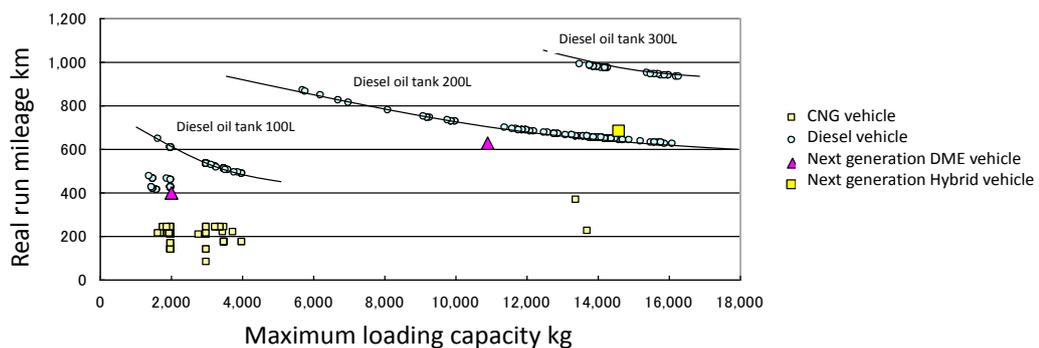


Fig.4-5 Real run mileage of diesel trucks⁴⁻²⁾

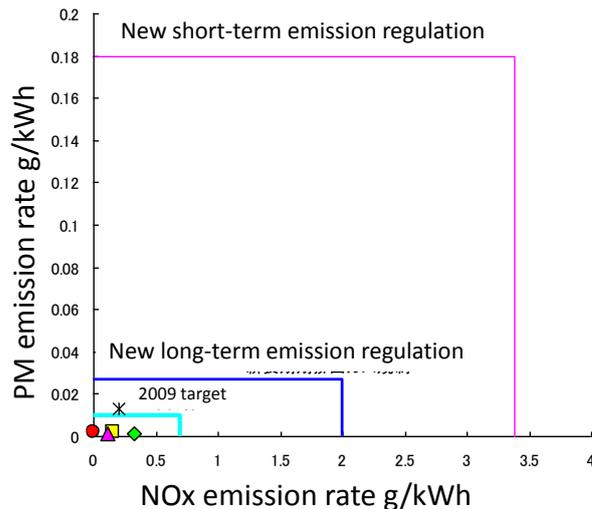


Fig.4-6 Performance of exhaust emissions of Next generation Friendly Environmental vehicles⁴⁻²⁾

既存のディーゼル貨物自動車には、一般的に100リットルから300リットルまでの燃料タンクが装着される。次世代の大型DME自動車やCNG自動車では、Fig.4-5から軽油タンク200リットルを搭載したディーゼル車相当の走行が可能である。

(2) 排出ガス性能

Fig.4-6は、平成15年度から平成17年度にかけて、国土交通省のプロジェクトとして開発が行なわれた次世代低公害車の排出ガス性能の達成状況を示したものである。その結果、次世代低公害車の排出ガスは、次期排出ガス規制値として検討されている09年目標値、挑戦目標値にも概ね適合するレベルで達成された。

(3) まとめ

次世代低公害車の出力性能、走行距離および排出ガスについて従来の貨物自動車との比較を行い、次世代CNG車と小型DME車の最高出力はほぼ従来の自動車と同等であることが分かった。走行距離の点では、次世代の大型DME自動車やCNG自動車では、軽油タンク200リットルを搭載したディーゼル車相当の走行が可能である。排出ガス性能については、NOx新長期規制値の4分の1以下を達成している。⁴⁻³⁾

4. 2. 2 希薄燃焼方式

大型車用天然ガスエンジンは、ディーゼルエンジンを火花点火式オットーサイクルエンジンに改造したものが多く、大型車用天然ガスエンジンは、高負荷条件での運転が多いことから熱負荷が高くエンジン出口でのNOxも高いため、その最大の課題はエン

ジンの熱負荷制御とNOxの排出制御である。

排出ガス規制が今日ほど厳しくない時期には、希薄燃焼方式が耐久性の面で望ましく、燃費等の面でも有利であることから希薄燃焼方式が多く採用されてきた。しかしながら、排出ガス規制が厳しくなるにつれて、COやHC排出量規制への適合が難しくなったため希薄燃焼方式エンジンは減少している。

Volvoは初期のガスエンジンに希薄燃焼方式を採用していた。最初のエンジンには、オープンループの燃料制御が用いられ、その後、クローズドループの装置が加えられた。Volvoは現在、ストイキ燃焼方式とEGRの組合せを採用している。EGRはエンジンの熱負荷を下げ、エンジンから排出されるNOxを低減すると同時に、部分負荷時のポンプ損失を減らすことで燃費を向上させる。Cummins-Westportもまた、2007年以後、希薄燃焼方式からストイキ燃焼とEGRの組合せに移行しようとしている。^{4-3)、4-4)}

4. 3 直接噴射式天然ガスエンジン

4. 3. 1 火花点火式

(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「高効率・超低公害天然ガス自動車実用化開発」プロジェクトにおいて、火花点火式の直接噴射式天然ガスエンジンを搭載した4tトラックが、当時の日産ディーゼル(株)(現在のUDトラックス)により開発された。都市部を走行するトラックのエンジン負荷域は、アイドルと部分負荷域が非常に多い。そのため走行燃費を向上させるには、この領域の燃費改善が必要である。そのため部分負荷域では、

点火プラグ近傍に可燃混合気を形成する成層燃焼により高効率化を図った。また、高負荷および高速域では、燃料の早期噴射により燃料と空気の混合を促進して予混合希薄燃焼により動力性能を確保した。後処理装置は尿素 SCR 触媒とした。触媒システムについては、触媒単体の耐久信頼性および尿素インジェクターの耐久信頼性が必要である。

Fig.4-7 に 4t 車のエンジンシステム概要図を示す。4-6)、4-7)

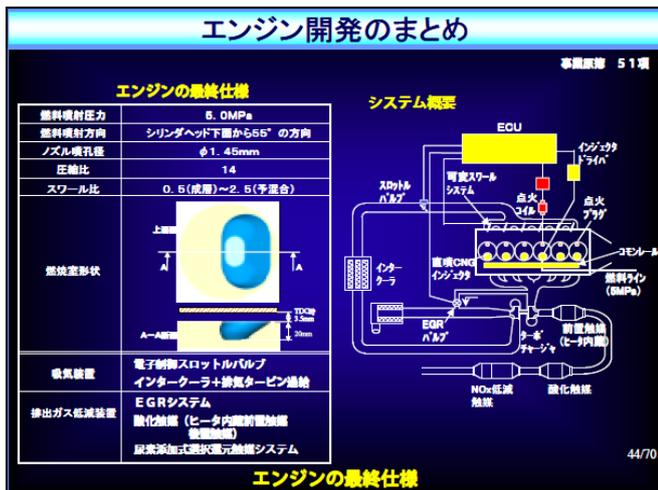


Fig.4-7 Engine system of the 4t vehicle⁴⁻⁷⁾

Fig.4-8 に 4t 車のトルク・エンジン回転数マップと出力・排出ガス性能を示す。4-6)、4-7)

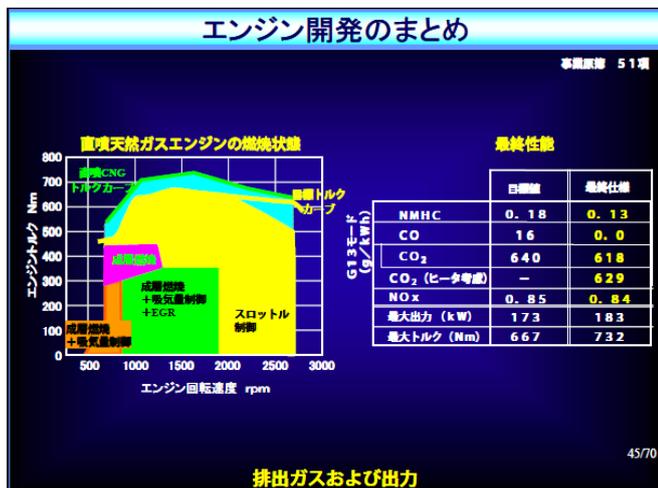


Fig.4-8 Torque-engine speed map, power and exhaust emission performance of the 4t vehicle⁴⁻⁷⁾

4. 3. 2 グロープラグ点火式

NEDO の「高効率・超低公害天然ガス自動車実用化開発」プロジェクト⁴⁻⁵⁾において、グロープラグ点火式の直接噴射式天然ガスエンジンを搭載し 2 tトラックが、いすゞ自動車㈱により開発された。

着火方式は、連続加熱のグロー着火システムとし、

着火安定性と信頼耐久性の観点からグロープラグの周りを完全に覆ってしまうクローズシールドを採用している。噴射された噴霧の一部がシールドに開けた穴から内部に入り、着火し火炎となって穴から外へ噴出し、メイン噴霧を着火・燃焼させる。NOx の低減技術として、NOx 吸蔵型 (LNT : Lean NOx Trap)、尿素 SCR の両者で選定検討を行った。LNT については、基礎的に実施した模擬ガス試験等から、最終的に尿素 SCR を選定した。2t、4t 車のいずれも排出ガス規制に適合するには尿素 SCR 触媒が不可欠となっている。

4. 3. 3 軽油着火式 (DDF、Diesel Dual Fuel) CNG-DDF

2001年5月にカナダの AFS 社 (Alternative Fuel Systems Inc.) の協力を得て日本エコス㈱が CNG-DDF 車両を製作している。⁴⁻²⁾

Westport Innovations 社は、天然ガスエンジン用の直接燃料噴射装置を積極的に研究・開発している。天然ガス直接噴射装置は、ガスを吸気行程後期に高圧で燃焼室に噴射する。天然ガスは軽油より着火温度が高いため、着火に補助が必要である。ガスを着火させるには、先端がセラミック構造のグロープラグ等の熱面を使用する (CNG-DI) 方式や軽油のパilot噴射により高圧筒内直接噴射 (HPDI : High Pressure Direct Injection) でガスの着火する方式がある。両者とも、天然ガスエンジンがディーゼルエンジンと同等の効率を維持するのに役立つ。Fig.4-9 は、HPDI 技術を図解したものである。

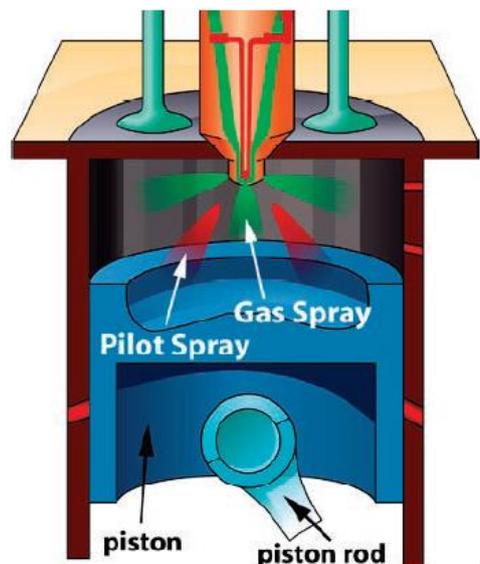


Fig.4-9 HPDI technology of Westport Innovations⁴⁻⁹⁾

Westport Innovations 社はさまざまなサイズのエン

ジンを使って技術の実証を進めている。^{4-3)、4-8)、4-9)}

HPDIは、DDF(Diesel Dual Fuel Engine、軽油着火型天然ガスエンジン)を技術的に高度化したものであり、ディーゼルと同等の熱効率を実現でき、CO₂排出量ではディーゼル車に比べ約2割程度低減することが可能となる。高負荷条件では、ほとんど天然ガスを燃料とするが、部分負荷条件やアイドル条件では、軽油の使用割合が増加し軽油を燃料とするディーゼルエンジンに近い状況となる。最近の大幅に強化された排出ガス規制に適合するには、特にNO_x排出量を低減するために尿素SCR触媒システム等の後処理装置の搭載が避けられない可能性が高く、通常の最新のディーゼル車の尿素SCR触媒搭載エンジンシステムに加えて、更に高圧天然ガス燃料供給システムを必要とする。そのため、システムが複雑となることやコストが高くなることが普及のための課題となる。

5. 今後の展望

5. 1 今後の天然ガス機関の方向性

自動車には有害排出ガス低減ならびに CO₂ 排出削減、すなわち燃費向上の課題が課せられている。特に、貨物ディーゼル自動車の排出ガスはその排出原単位 (g/台 km) が大きく、走行距離が長いため 1 台あたりの年間排出量が際立って多い。NO_x は Fig.5-1 に示すように約 5 割を排出し、また、PM は約 6 割、HC で約 4 割を占めている。

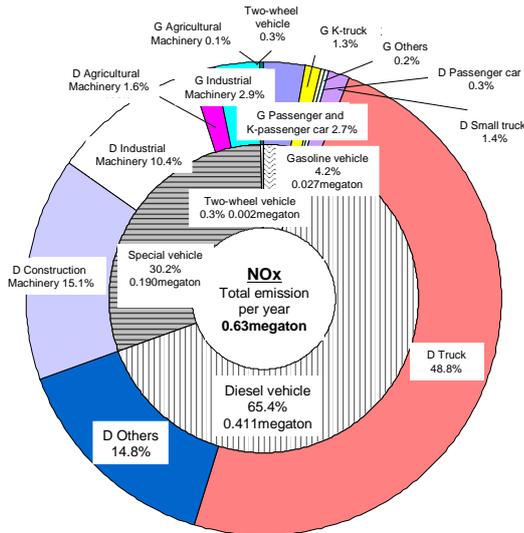


Fig.5-1 NO_x emission rate of generation sources(2010)

これまでディーゼル車については厳しい排出ガス規制が順次実施されてきたが、大都市を中心とする大気環境改善のためには、ディーゼル車の排出ガス（特に NO_x）及び黒煙・微粒子（PM）の大幅低減の必要性が強く指摘されてきた。排出ガス規制強化⁵⁻¹⁾により DPF の装着が不可避となった最新のディーゼル車では、PM の排出量は大幅に低減し、尿素 SCR 触媒システムにより NO_x 排出量の低減が進められている。

一方、自動車の燃費向上、すなわち CO₂ 排出低減に関連しては、1997 年京都で開催された気候変動枠組条約第 3 回締結国会議（COP3）⁵⁻²⁾以降に CO₂ などの地球温暖化物質削減を求められている。CO₂ 排出量を低減するには燃費向上の点から現状ではエンジンを燃費の良いディーゼルエンジンとすることが有効であるが、そのためには NO_x と PM 排出量が十分に低いことが前提条件となる。さらに、都市内物流の基幹を担う貨物自動車について石油消費抑制

ならびに将来の石油危機に対するエネルギー安全保障の観点から、その一部を石油燃料以外のエネルギー源に転換しておく必要がある。自動車の石油依存度を軽減していく観点からも既存車両でも使用できる代替燃料を長期的に開発していく必要がある。

以上より、物流において大きな比重を占め大気環境へ悪影響が懸念される従来の貨物用ディーゼルエンジンに代わる低環境負荷エンジンの技術開発が必要とされている。すなわち、NO_x 及び PM について低環境負荷性を有しディーゼルエンジン並みの高効率性を備え、しかも代替燃料を用いることにより CO₂ 削減と石油代替化が可能な低環境負荷型エンジンを開発することが切望されている。

前述したように、天然ガス機関には燃料供給方法として予混合方式と直接噴射方式、着火方式として火花点火方式、グロープラグ方式、軽油着火方式などがある。また、新しい着火方式として Radical Ignition⁵⁻³⁾、APIR(Auto-inflammation Pilotée par Injection de Radicaux)⁵⁻⁴⁾、Jet-Ignition⁵⁻⁵⁾などがある。これらの多くは、希薄混合気の着火性を確実にする方法として、点火プラグを装着した一種の小さな副室を導入し、副室で濃い混合気に着火して副室からの Jet により主燃焼室の混合気の着火を行うものである。副室は点火プラグの拡張、インジェクターの拡張などの形で導入されている。⁵⁻⁶⁾

Radical Ignition⁵⁻³⁾は、Fig.5-2 に示す主室と副室から成り副室で種々の活性ラジカルを含む燃焼生成物を高温・高エネルギー密度で噴孔から噴射して主室での急速燃焼を達成するものである。

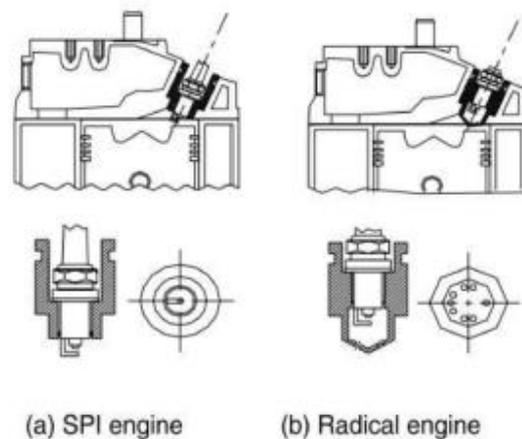


Fig.5-2 Schematic diagram of SPI and radical engine combustion chamber⁵⁻³⁾

APIR⁵⁻⁴⁾は、Fig.5-3 で示す点火プラグと副室が一体化した構造で Radical Ignition を引き金として自

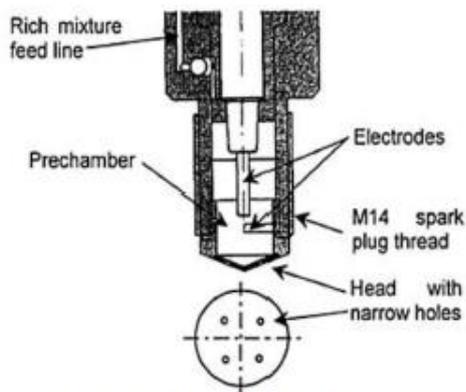


Figure 6. Section of the APIR device & top-view of its

Fig.5-3 Section of the APIR device & top-view of its head⁵⁻⁴⁾

己着火するものである。

Jet-Ignition⁵⁻⁵⁾も基本的にはインジェクターと点火プラグを取り付けた Fig.5-4 に示す副室から燃焼火

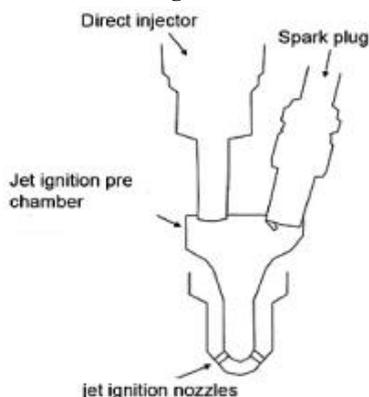


Fig.5-4 Jet ignition device assembly for the four valve direct injection jet ignition engine with spark plug⁵⁻⁵⁾

炎を噴射するものである。

重量車用天然ガス自動車は、シェールガス革命により燃料コストが下がると期待され地球温暖化ガスCO₂を大幅に低減できることから今後より低環境負荷自動車として有望になると考えられる。大型車用天然ガス自動車の大幅な普及を考えると、高い出力密度と一層厳しくなる排出ガス規制から、EGRと三元触媒技術を用いた理論混合比燃焼コンセプトがシステムの簡素さやコストパフォーマンスから最も現実的な解の一つであるとの見方がある。⁵⁻⁷⁾このような考え方は、技術の先進性の観点からは非常に保守的であるが車両の経済的な現実解として十分にありうる。ただし、高い負荷運転領域でエンジンを使うことから熱負荷に対して十分な対策が必要となる。

直接噴射式天然ガス機関は熱効率の面では、部分負荷を含めてディーゼル機関と同等のポテンシャル

を持ち、予混合燃焼方式の天然ガス機関に比べると燃費の面で非常に有利である。しかしながら、高圧となる燃焼室内に天然ガスを噴射するには高圧の天然ガスが必要であり、従来のCNGタンクの場合には使用するために従い容器内圧力が低下するため噴射に必要な高圧燃料を十分には利用できない。従って、燃料を加圧する装置が必要である。システム全体のエネルギー効率を損なうことなく加圧するシステムとして液化天然ガスを液体加圧したのち周囲大気からの吸熱により加圧するシステムが有望と考えられる。また、LNGはCNGと比べて3倍のエネルギー密度を持つことから一充填走行距離が長い利点がある。

しかし、LNGは沸点が極低温(-162℃)であるために常温下の使用では自然に気化するガス(BOG)の管理等が難しいという欠点をもつ。そこで、LNG自動車は、大型バスや長距離運行する重量貨物車等、一充填走行距離の長さが本質的に必要で、かつBOGが余り問題とならないほど密に運行される分野で有利であると考えられる。また、これらの分野は、他の種類の代替エネルギー車、低環境負荷車の多くが不得意とする分野である。LNG自動車の先駆者である米国の場合は、メタン濃度が95%以上のLNGを利用しBOGの問題を減少させている例が多い。⁵⁻⁸⁾

LNG自動車は、米国を中心として既に700台以上の車両が走行しているが、日本においてはほとんどこの分野の研究が進んでいない。米国のGTI(Gas Technology Institute)⁵⁻⁹⁾によると、米国での有望なLNG自動車の市場は、定型の走行を行う大型トレーラー、充填拠点をもつ重量都市内走行トラック、鉱石運搬車(オフロード)にあるとしている。したがって、直接噴射式天然ガス機関の実用化の分野としては、LNGタンクと組み合わせたLNG貨物自動車にあると考えられる。また、この分野は、代替燃料車、低環境負荷車の中でディーゼル代替車の有力な候補が未だ存在しない分野であり、代替策が見当たらない現状から将来の石油が不足した際に最も深刻に対策を迫られる分野と考えられる。

5. 2 貨物自動車液化天然ガス機関への適用

5. 2. 1 貨物自動車用液化天然ガス機関の検討(1)はじめに

天然ガスは石油代替性に優れ、粒子状物質の排出が非常に少ないことから、ディーゼル車による大気

汚染を防止するための代替燃料として期待されている。現在利用が進められている CNG は高压容器に充填するため容器重量が増大し、従来の液体燃料に比べてエネルギー密度が低い。そのため貨物自動車用機関に用いた場合、現状では高い熱効率と低環境負荷性の両立が困難と見られ、また長距離走行には大容量の高压容器を必要とするため大幅に重量が増大し荷物の積載量を圧迫するなどの問題点を有する。

一方、LNG はエネルギー密度が高く、長い航続距離の確保も容易であることから貨物自動車用天然ガス機関として有望な選択肢の一つと考えられる。現在実用化されている多くの天然ガス自動車のエンジンは CNG エンジンが主流で予混合燃焼方式によるため本質的にディーゼル並の高い熱効率の達成は困難であり特に部分負荷領域での熱効率が低い。そこで5. 1で述べたように貨物自動車用液化天然ガス機関に適した燃料供給システムとして、LNG 加圧供給システムと直接噴射式天然ガス機関の組み合わせが有望な選択肢と考えられる。

(2) LNG の性状⁵⁻¹⁰⁾

日本では、 -162°C に冷却して液化し硫黄分などの不純物を除いた液化天然ガスの殆どを海外から輸入している。日本における大部分の天然ガス自動車は、圧縮天然ガス自動車であり、輸入した LNG から CNG に転換して利用している。そのため、LNG で輸入している日本では LNG から CNG に転換するためにエネルギーを使用せず直接 LNG を利用すればエネルギー利用効率の向上が期待できる。

Table 2-3 に示した代表的な LNG 成分の沸点が示すように LNG 自動車では、燃料充填後に周囲からの熱により最も低沸点のメタンから蒸発し、BOG となる(ウェザリング)。このため、LNG 燃料を充填してから長期間に渡って燃料を搭載し続けることは困難である。従って、自動車の利用形態としては定期的に一定経路に利用する貨物自動車での使用が最も可能性が高い。容器が大型になるほど S/V 比(表面積/内容積比)が小さくなり、単位 LNG 量当りの容器への熱進入量が減少するため容器の断熱性能は向上する。運転中におけるエンジンでの BOG 消費、また吸着剤を利用した BOG の一時的トラップとエンジンでの消費などが今後の検討課題である。

Table 5-1 に LNG、CNG、軽油のエネルギー密度比較を示す。⁵⁻¹¹⁾ CNG の組成は 13A 相当で充填圧力 20 MPa である。軽油は JIS2 号相当である。表から、LNG は CNG の約 3 倍のエネルギー密度を持

つことが分かり、LNG 自動車は CNG 自動車の航続距離を約 3 倍に伸ばすことが可能になる。

Table 5-1 Energy densities of LNG, CNG and diesel oil

	LNG	CNG	Light oil
Phase	Liquid	Gas	Liquid
Density (kg/L)	0.465	0.168	0.83
Lower heat value (kJ/kg)	49,305	49,203	43,124
Energy density (kJ/L)	22,927	8,266	35,793
Energy density ratio based on light oil	0.64	0.23	1

(3) エンジンへの LNG 供給方法の検討

LNG を直接エンジンに供給すると、周囲からの熱により激しい沸騰を起こしガス化する。主成分のメタンの臨界温度(-82.6°C)以上の温度ではどれだけ圧力をかけても液相にならないので、燃焼室内に供給するときは気相のみが可能である。

従来の CNG 自動車はすべて予混合方式の燃料供給を行っている。予混合方式は、吸気管に天然ガスを供給するため吸入空気量が低下する。また、予混合方式は充填効率の低下や吸気絞りによるポンピングロスのため熱効率がガソリンエンジンと同程度でありディーゼル並の熱効率の達成は困難である。

従って、予混合方式の CNG 貨物自動車では、高压容器による重量増加と熱効率の点からディーゼル貨物自動車に比べ、エネルギー消費量で約 30%悪化する。⁵⁻¹²⁾直接噴射式天然ガス機関では充填効率の低下がなく吸気絞りが無いため、部分負荷運転領域を含めてディーゼル機関と同等の熱効率を得る可能性がある。⁵⁻¹³⁾ただし、燃焼室内に直接燃料を噴射するためには、噴射時の燃焼室内圧力に比べ十分高い圧力に燃料を加圧する必要がある。

以上のことから、ディーゼル機関を搭載した貨物自動車に匹敵する天然ガス貨物自動車を検討すると、航続距離の面から CNG より 3 倍エネルギー密度の高い LNG を燃料とし、部分負荷領域を含めた熱効率の面から直接噴射式のエンジンを搭載した直接噴射式 LNG 貨物自動車、自動車への燃料供給体制に課題はあるものの天然ガスから安価な合成燃料が可能とならない限り最も有効性が高いと考えられる。従って、LNG 加圧供給システムと直接噴射式エンジンを組み合わせたシステムが有望となる。

Fig.5-5 に機関システム構成例の概念図を示す。LNG を LNG ポンプにより加圧して Buffer tank に送り込み、周囲熱またはエンジン冷却水等からの吸熱により高圧天然ガスを得る。Buffer tank 内の圧力でフィードバックを LNG ポンプにかけることにより常に一定の高圧天然ガスを Buffer tank に保持する。Buffer tank 内の高圧天然ガスにより直接噴射式天然ガス機関を運転することが可能になる。

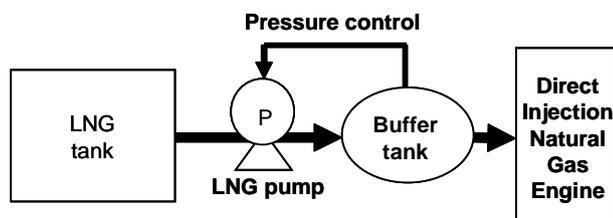


Fig.5-5 Concept of LNG Power system

ここで、直接噴射式天然ガス機関の点火方式は火花点火方式としている。HPDI のような先進的な軽油着火直接噴射式天然ガス機関は、安定した着火には望ましいが、燃料システムが天然ガスと軽油の 2 系統必要となること、最新の排出ガス規制（ポスト新長期規制や EURO VI など）に対応するためには、尿素 SCR システムなどの最新ディーゼル車と同様な後処理システムが必要となる可能性が高く、ディーゼル車より大幅にコストが高くなり構造も複雑となるため、技術的には非常に先進性をもつが普及の面では多くの課題が残る。⁵⁻⁷⁾

(4) 燃料供給システムを含めたガス機関のエネルギー効率

燃料供給システムを含めた直接噴射方式天然ガス機関のエネルギー効率を求めるには、図示平均有効圧、機械損失、ポンプ駆動動力を考慮する必要がある。LNG と直接噴射式天然ガス機関との組み合わせにおいて、ディーゼル機関相当のエネルギー効率が可能となるかを調べるために機関の図示熱効率、直接噴射に必要な高圧を作る駆動動力の LNG 加圧ポンプを含めた機械損失等を検討したところほぼ同等であることが計算により得られた。¹⁻¹³⁾

(5) 燃料消費率と航続距離

LNG の搭載量は一充填当たりの航続距離に直接に影響するので、航続距離に見合った LNG 容器の大きさが必要である。対象車両は貨物自動車であるから、一充填当たりの航続距離はベースとなるディーゼル車と同等であることが求められる。ベースとなるディーゼル車の軽油容器容量を 200L とすると、

軽油容器中の総発熱量に相当する LNG の容量は 312.2 L である。LNG エンジンの熱効率がディーゼルエンジンと同等とすると、軽油燃料容器の約 1.5 倍の LNG 燃料容器とすればディーゼル車と同等の航続距離とすることが出来る。軽油の燃料容器と異なり LNG の容器は外界との断熱を必要とする。真空断熱が最も効果的であるがそのために燃料容器の容積が増大する。

(6) まとめ

LNG は、CNG 自動車に比べエネルギー密度で約 3 倍大きい。直接噴射に必要な高圧を供給する加圧方式として、LNG ポンプによる LNG 直接加圧方式ではガス加圧方式に比べ大幅に少ない動力で加圧が可能であるので省エネルギー利用の面で有利である。

直接噴射方式天然ガス機関においては部分負荷においてもディーゼル機関とほぼ同等の熱効率が得られる¹⁻¹³⁾ので、直接噴射式天然ガス機関と LNG タンク、LNG ポンプを組み合わせた貨物自動車では、燃料容器容積を軽油燃料容器の約 1.5 倍にすればディーゼル貨物自動車と同等の航続距離を有する。¹⁻¹³⁾

HPDI のような先進的な軽油着火直接噴射式天然ガス機関は、安定した着火や高効率化には望ましいが、最新の排出ガス規制（ポスト新長期規制や EURO VI など）に対応するためには、尿素 SCR システムなどの最新ディーゼル車と同様な後処理システムが必要となり、ディーゼル車より大幅にコストが高く構造も複雑となる。

5. 2. 2 貨物自動車用大型液化天然ガス自動車の開発・試作

(1) 大型液化天然ガス自動車開発の背景

トラック輸送に使われる燃料は軽油にほぼ 100% 依存しており、日本の自動車用燃料消費量の約 30% を占めている。軽油の原料の石油は 80% 以上が中東からの輸入に頼っているため最近の中東における政治・経済状態から地政学的リスクは非常に高い。

この中で安定した物流を確保するにはトラック燃料の安定的供給が不可欠であり、東日本大震災時に石油燃料の供給不足の例に見られるように軽油に代わる代替燃料の確保によるエネルギーセキュリティ対策が喫緊の課題となっている。

以上の状況から、実用的な石油代替燃料としての天然ガス自動車はエネルギー安全保障やエネルギー多様化の観点から非常に重要である。さらに天然ガス自動車は、PM の排出がほとんど無く NOx 等

の排出量も比較的少なく、天然ガス自体はその組成から CO₂ 排出量が軽油に比べ約 20%程度少ない特長があり、天然ガス自動車の普及が期待されている。

CNG 自動車は気体燃料を搭載するために、一回の燃料充填による航続距離が短いという課題がある。CNG 自動車は低環境負荷及び石油代替エネルギー車として既に 40,000 台以上普及しているが、航続距離の短い都市内の小型トラック等が中心である。

一方、LNG 自動車は、CNG 自動車と比較して燃料のエネルギー密度が単位体積あたり約 3 倍と高いため、一充填あたりの航続距離を大幅に改善できる。そのため LNG 自動車は、一充填あたりの航続距離を必要とする長距離大型トラックや観光バス等への適用拡大が可能である。また充填時の所要動力が CNG に比べ少ないため、充填所における省エネルギーが可能となる。このため LNG を搭載する液化天然ガス自動車が注目されている。

(2) 液化天然ガス自動車(LNG 自動車)の技術動向

LNG 自動車が CNG 自動車と技術的に大きく異なる点は、燃料供給システムである。エンジンについては、CNG の場合と同様に予混合方式と直接噴射方式があり、予混合方式の火花点火式エンジンが多いが、直接噴射式でも Cummins Westport 社の HPDI が実用化されている。HPDI は、天然ガスを主燃料とし少量の軽油をパイロット着火源または液体点火源とするもので、天然ガス噴射弁と軽油噴射弁は同軸上に配置された一本の噴射弁を利用している。火花点火式に比べ軽油着火式は着火が安定している反面、最新の排出ガス規制に適合する点で難しさがある。また、後処理装置について三元触媒と尿素 SCR 触媒を利用するものが多い。火花点火予混合方式に三元触媒のシステムがシンプルで適用例が多く、軽油着火直接噴射方式(HPDI 等)では尿素 SCR 触媒システムの利用が認められる。

米国において LNG 自動車は既に実用化されており、UPS (United Parcel Service) は 2002 年からカルフォルニア州オンタリオラスベガス間のトレーラーで使用している。また、California Cartage 社はカルフォルニア州で 320 台の LNG トラックを利用している運送事業者であり LNG 充填所も所有している。⁵⁻¹⁴⁾ その中で 50 台は、Cummins Westport の HPDI エンジンを搭載している。

日本では、(財) (現一般財団法人) 日本自動車研究所が中核機関となり日産ディーゼル工業(株) (現 UD トラックス) の協力を得て、1996 から(社) 日本ガス協会委託事業として実用化に向けた開発を開始し 1998 年に日本初の LNG トラック及び LNG スタンドの試作を行った。その後、国土交通省所管の「天然ガス自動車技術評価検討会」(2000 年度～2002 年度)において試作トラックを評価した。

試作した LNG トラックの開発目標と課題は以下のとおりである。

開発目標は、長距離輸送用大型車に適用できる大型 LNG トラックとし、試作した大型 LNG トラックは、車両総重量約 20t、最大積載量 9.5t、総排気量 12.5L で、圧縮比 11、最大出力 206kW、吸気管シングルポイント噴射の火花点火方式のインタークーラ付ターボ過給エンジン、二重殻真空断熱容器 230L×2 基の LNG タンクを搭載する。

燃料供給システムは、外部加圧方式を採用し、BOG をエンジン吸気に導入することで処理した。通常走行時においては、正常に燃料供給システムが稼動したが、燃料最大供給時及び LNG 容器内液面低下時において、エンジンへの燃料供給圧力が下降する事象が見られた。また LNG 容器内圧力が一定値を超えると BOG を優先的にエンジンへ供給するシステムのためウェザリング現象が認められた。従って、燃料供給システムの改善が課題となった。

環境性能を大幅に向上させた次世代の低公害トラック・バスの開発・実用化を進めるため、2005 年度から(独) 交通安全環境研究所が中核機関となって国土交通省の「次世代低公害車開発・実用化促進プロジェクト(第二期)」が行われた。このプロジェクトの対象車種の一つとして、一充填走行距離約 1,000km 以上を開発目標として燃料供給システムの改善を含めて大型 LNG トラックの開発を進めた。2007 年 12 月 18 日から 2008 年 3 月末まで一般道や高速道路において公道走行試験を実施した後、公道走行試験において 1,000km 以上の一充填走行距離を達成した LNG 自動車はこのトラック 1 台のみである。⁵⁻¹⁵⁾

なお、本内容は 2002～2004 年度の国土交通省「次世代低公害車開発促進プロジェクト」の成果の一部を述べたものである。

6. 結 論

近年、環境問題が大きくクローズアップされ、環境保全の立場から運輸システムによる環境負荷の低減を達成するために、その低環境負荷化と地球温暖物質である CO₂ の低減とが強く求められている。またクリーンな代替燃料や代替動力源の開発なども併せて緊急な課題となっている。動力源としては現在のところ、やはり往復式内燃機関が優れていることから、当面は低環境負荷化と高効率化を進めてその特長を生かすことが不可欠である。

すなわち、従来の往復式内燃機関をベースにして燃料経済性を高め汚染物質の発生を低減する努力を積み重ねるとともに、代替動力源、代替燃料の活用を見極めることが重要である。特に、産業の血液として物流を支えるトラックについては、ディーゼル機関によるトラックに代わりうる有望な機関が現在のところ見当たらない。将来のエネルギー安全保障の面から、また、低環境負荷化の面からディーゼルトラックに代わる代替機関が求められている。

これらの視点から、主にディーゼル代替トラックを念頭にすえ、それを天然ガスで走行させるためのエンジンの燃焼改善、高効率化そして有害排出ガス低減に加えて、燃料の利用システムおよび利用形態に関して基本的な検討と解明を行い、気筒内直接噴射式天然ガスエンジンによって優れた自動車用動力システムを構成し得ることを明らかにした。

1. 「序 論」では、本報告の背景を述べるとともに天然ガス機関に関する従来の研究を概説し、大型トラック用に天然ガス機関の燃焼方式として、気筒内直接噴射方式の可能性をさらに発展させる方向が望ましいことを述べた。さらに、直接噴射方式天然ガス機関における研究とその課題について概説し、これらの課題を克服するための方策とその意義を明らかにするとともに、本報告の目的について述べた。

2. 「エネルギー資源の現状」では、現在どのようなエネルギー資源が利用可能であるかを分類し、その中で天然ガスが自動車燃料として有望な燃料の一つであることを述べた。また、天然ガスの現在の燃料事情や燃料特性について示した。

3. 「自動車用燃料としての天然ガス」では、天然ガスを自動車用燃料として利用する場合に自動車用内燃機関における燃焼方式の分類を示すとともに、それらの特長について詳述して自動車用燃料としての天然ガスの適性と課題を明らかにした。

4. 「大型天然ガス機関についての研究」では、日本で天然ガス自動車を普及する上で大型貨物自動車を天然ガス自動車にすることは望ましいこと、適性があることを示すとともに、代表的な天然ガスエンジンシステムについて詳述した。

5. 「今後の展望」では、大型天然ガス自動車の中でも大型ディーゼル自動車と遜色ない航続距離と走行性能を持つ方法として直接噴射式天然ガス機関と液化天然ガス燃料を利用する方法、すなわち、LNG 加圧供給システムと直接噴射式天然ガス機関の組み合わせに対して、貨物自動車用 LNG 機関のディーゼル代替機関としての可能性について明らかにした。

6. 「結 論」では、本報告で得られた結果から、大型天然ガス機関の技術について今後の展望を総括した。今後の課題として、天然ガス用高圧弁を信頼性・耐久性のあるものとするのが重要であると考えられる。さらに、LNG を利用するには BOG の問題が不可避であり、当初は BOG の影響が少ない分野への適用が進められるが、本格的普及のためには吸着材の利用などによる一時的保留、小型再液化装置の適用などが今後の検討課題である。

さらに今後の石油エネルギーの枯渇問題を考えると、将来の石油代替燃料として天然ガスは最も有望な燃料の一つであり、石油代替燃料による貨物自動車の中で、ディーゼル貨物自動車と同等のエネルギー効率を持つ自動車として本研究で提案した直接噴射式天然ガス機関を用いた LNG 貨物自動車は最も有力な候補の一つと考える。

これからの自動車用燃料技術、燃焼技術及び排出ガス処理技術の進展を考えると、軽油を燃料としたディーゼル貨物自動車は今後とも主流として利用されると考えられるが、将来の我が国のエネルギー安全保障の面から、産業の血液である物流を担う貨物自動車の分野において軽油を燃料としたディーゼル貨物自動車の代替策がない現状では、早急に石油代替の貨物自動車を用意しておく必要がある。

参考文献

- 1-1) 朱, 火花点火機関ならびに天然ガス機関の燃焼および排気エミッションに関する研究, 京都大学博士論文, (1993)
- 1-2) 井原賢, シェールガス争奪戦, 日刊工業新聞社(2011)
- 1-3) <http://ja.wikipedia.org/wiki/福島第一原子力発電所事故>
- 1-4) <http://ja.wikipedia.org/wiki/固定価格買い取り制度>
- 1-5) <http://ja.wikipedia.org/wiki/ジメチルエーテル>
- 1-6) <http://ja.wikipedia.org/wiki/バイオディーゼル>
- 1-7) <http://www.ntscl.go.jp/news/2010/press100630.pdf>
- 1-8) <http://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&serial=3981>
- 1-9) <http://www.j-cast.com/2008/01/03014943.html?p=all>
- 1-10) <https://www.ntscl.go.jp/kouenkai/kouenkai25.html>
- 1-11) 清田, 日本機械学会関西支部講演論文集, 924-2, (1992), 269
- 1-12) IEA Report, We are entering a golden age of gas?, WORLD ENERGY OUTLOOK 2011, London, 6 June 2011
- 1-13) 後藤, 直接噴射式天然ガス機関の高効率化と低公害燃焼に関する研究, 北海道大学博士論文(2002)
- 2-1) 三崎, エコカーは未来を救えるか, ダイヤモンド社, (1998)
- 2-2) <http://ja.wikipedia.org/wiki/メタンハイドレート>
- 2-3) IEA, WEO2011_GoldenAgeofGasReport.pdf, London, 6 June 2011
- 2-4) 伊原賢, シェールガス争奪戦, 日刊工業新聞社(2013)
- 2-5) 今後の原子力政策について(資源エネルギー庁) 7th-1.pdf (2013)10
- 2-6) http://www.enecho.meti.go.jp/topics/kihonkeikaku/140411_energy.pdf
- 2-7) <http://www.eccj.or.jp/databook/1998/>
- 2-8) http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=01-02-02-05
- 2-9) <http://www.gas.or.jp/user/market/deposits/index.html>
- 2-10) <http://www.gas.or.jp/fuelcell/fctop.html>
- 2-11) 兼子, メタンハイドレートと自動車燃料の将来, 自動車技術, May, (1999)
- 2-12) 朝日新聞, April 23, (1998)
- 2-13) <http://www.gsj.go.jp/dMG/dMGGold/hydrate/hydrate.resources.html>
- 2-14) <http://ja.wikipedia.org/wiki/シェールガス>
- 2-15) J.B.Heywood, Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill, (1988)
- 1-16) <http://oilgas-info.jogmec.go.jp/dicsearch.pl?sort=KANA&sortidx=1&target=KEYEQ&freeword=ボイルオフガス>
- 2-17) 後藤雄一, 次世代自動車技術とシェール革命, 情報機構(2014)
- 2-18) <http://www.gsj.go.jp/dMG/dMGGold/hydrate/hydrate.resources.html>
- 2-19) 兼子, メタンハイドレートと自動車燃料の将来, 自動車技術, May, (1999)
- 2-20) <http://www.nire.go.jp/hyoka/h7-hyoka/4-6-1.htm>
- 2-21) <http://ja.wikipedia.org/wiki/メタンハイドレート>
- 2-22) http://www.fe.doe.gov/education/gas_production.html
- 3-1) 大聖ほか, 天然ガス直接噴射デュアルフェューエルディーゼルエンジンの燃焼と排出ガス特性, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.86(1998)
- 3-2) D.S. Jeong et al., Development of a Mechanical CNG-Diesel Dual Fuel Supply System, SAE Paper No.931947
- 3-3) M.D.Checkel et al., Performance and Emissions of a Converted RABA 2356 Bus Engine in Diesel and Dual Fuel Diesel/Natural Gas Operation, SAE Paper No.931823
- 3-4) K.B.Hodgins et al., Intensifier-Injection for Natural Gas Engine of Diesel Engines, SAE Paper No.921553
- 3-5) Y.Daisho, Toru Yaeo et al., Combustion and Exhaust Emissions in a Direct-Injection Diesel Engine Dual-Fueled with Natural Gas, SAE Paper No.950465
- 3-6) J.van der Weide et al., CNG City Bus Engine with Optimized Part-Load Efficiency, High Mean

- Effective Pressure and Low Emissions, NGV' 94, EV19
- 3-7) 稲田ほか, 天然ガスエンジンの出力・排気特性に関する研究, 日本機械学会講演論文集, 940, (1994), 223
- 3-8) 塩路ほか, 天然ガス噴射高圧縮比機関に関する研究, 自動車技術会論文集, 9307362, (1993)
- 3-9) 後藤ほか, 直接噴射式天然ガス機関の混合気形成に関する研究, 第13回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1996), 423
- 3-10) 長島ほか, 天然ガスエンジンの開発, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム' 94 講演論文集, July, (1994)
- 3-11) 稲田ほか, 天然ガスエンジンの出力・排気特性に関する研究, 日本機械学会講演論文集, 940, (1994), 223
- 3-12) 大坪, 天然ガス自動車用エンジン, 自動車技術, May, (1999)
- 3-13) 大坪, 天然ガス自動車用エンジン, 自動車技術, May, (1999); 乗用車用天然ガスエンジンの開発, JSAE SYMPOSIUM, September, (1999), 1
- 3-14) 運輸低公害車普及機構, 低公害・代替燃料自動車の普及・促進のための調査研究報告書, March, (1999)
- 3-15) R.C.Meyer et al., Development of a CNG Engine, SAE paper No.910881
- 3-16) R.C.Meyer et al, Development of a Heavy Duty On-Highway Natural Gas-Fueled Engine, SAE Paper No.922362
- 3-17) 高田ほか, ターボインタークーラー付きリーンバーン天然ガスエンジンの開発について, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム' 93 講演論文集, July, (1993)
- 3-18) 中村ほか, ターボ過給, 給気冷却, リーンバーン方式自動車大型 CNG エンジンの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集 934, October, (1993)
- 3-19) (社)日本ガス協会, 天然ガス自動車の実用化に向けて, March, (1998)
- 3-20) 小口ほか, LNG 自動車の開発, ガス燃料エンジン JSAE SYMPOSIUM, (1999)
- 3-21) K.D.Beatty et al., Development of a Low Emission Volvo 9.6 Liter Natural Gas Fueled Bus Engine, SAE Paper No.921554
- 3-22) 中園, 副室式ガス機関の副室諸元の影響, 日本機械学会論文集 Vol.58 No.563, September, (1992)
- 3-23) H.Sasaki, et al., New Combustion System of a Heat Insulated Natural Gas Engine with a Pre-chamber for Hybrid Vehicle, NGV2000, October, (2000), 155
- 3-24) 運輸低公害車普及機構, 低公害・代替燃料自動車の普及・促進のための調査研究報告書, March, (1999)
- 3-25) 塩路ほか, CNG 直接噴射機関における燃料-空気混合ならびに燃焼特性, 機械学会関西支部講演論文集, 944-2, March, (1994), 292
- 3-26) 酒井ほか, 天然ガスエンジンの燃料直接噴射方式に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集 932, 9302475, May, (1993)
- 3-27) 後藤ほか, 二段噴射による直接噴射式天然ガス機関の燃焼制御に関する研究, 日本機械学会論文集(B編)Vol.65 No.630, February, (1999)
- 3-28) T.Krepec et al., Towards Direct Gas Injection in NGV' s, NGV' 94, (1994), EV01
- 3-29) M.Oguchi, Development of High Efficiency Natural Gas Engine, NGV2000, October, (2000), 33
- 3-30) 塩路ほか, CNG 直接噴射機関における燃料-空気混合ならびに燃焼特性, 日本機械学会講演論文集, 944-2, March, (1994)
- 3-31) P.Quellette, High Pressure Direct Injection(HPDI) of Natural Gas in Diesel Engines, NGV2000, October, (2000), 235
- 3-32) 後藤ほか, 貨物用自動車液化天然ガス機関の LNG 供給法に関する研究, 自動車技術会論文集 Vol.33 No.1, January, (2002)
- 3-33) Alberto Boretti, et al., CNG Fueling Strategies for Commercial Vehicles Engine-A Literature Review, SAE2013-01-2812
- 3-34) H.Kanno, et al., Development of the High Efficiency Natural Gas Engine for Series Hybrid Bus, NGV2000, October, (2000), 253
- 3-35) 川原, 天然ガス自動車燃料容器の技術動向, JSAE SYMPOSIUM, November, (1996), 38
- 3-36) A.C.Haaland, et al., Conformable CNG Tanks for Increased Vehicle Range, NGV2000, October, (2000)
- 3-37) David L. Hofeldt: Alternative Fuel Technologies for Heavy Duty Vehicles: Performance, Emissions, Economics, Safety,

- and Development Status, SAE Paper 930731
- 4-1)超低公害大型天然ガストラック開発試作総括報告書(国土交通省 次世代低公害車開発促進プロジェクト), 平成 17 年 6 月, (社)日本ガス協会
- 4-2) 次世代低公害車普及のための基礎調査, 平成 18 年 3 月, (財)運輸低公害車普及機構
- 4-3) 次世代低公害大型車の実用化・普及に関する動向調査, 平成 20 年 3 月, (財)運輸低公害車普及機構
- 4-4) 海外における環境にやさしい自動車の開発・普及に関する調査報告書, 平成 18 年 3 月, (財)運輸低公害車普及機構
- 4-5) 「高効率・超低公害天然ガス自動車実用化開発」事後評価報告書, 平成 17 年 3 月, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 4-6) 「次世代自動車技術とシェール革命～NGV・FCV・EV/HEV・ガソリン車・ディーゼル車ー開発・流通への影響と課題」, 2014 年 3 月, (株)情報機構
- 4-7) 第 1 回「高効率・超低公害天然ガス自動車実用化開発」(事後評価)分科会
<http://www.nedo.go.jp/content/100091042.pdf>
- 4-8)天然ガス自動車の新技術開発状況調査報告書, 平成 15 年 3 月, (財)運輸低公害車普及機構
- 4-9) Westport Innovations/ Westport HPDI for the Cummins ISX/ Specification sheet
http://www.westport.com/pdf/WPT-HPDI_ISX_SpecSheet_MED.pdf
- 5-1)http://www.env.go.jp/air/car/gas_kisei/kisei.pdf
- 5-2)<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/kiko/cop3/>
- 5-3) Chung,S., Ha,J., Lee,M. et al., "Rapid Bulk Combustion of Lean Premixture by Using Radical Injection Method and an Application to an Actual Engine", SAE Technical Paper 2003-01-3212, 2003
- 5-4) Robinet,C., Higelin,P., Moreau,B., Pajot, O. et al., "A New Firing Concept for Internal Combustion Engines:"I'APIR", SAE Technical Paper 1999-01-0621, 1999
- 5-5) Boretti, A. and Watson, H., "The Lean Burn Direct Injection Jet Ignition Flexi Gas Fuel LPG/CNG Engine.", SAE Technical Paper 2009-01-2790, 2009
- 5-6) Alberto Boretti et al., SAE2013-01-2812 CNG Fueling Strategies for Commercial Vehicles Engines-A Literature Review
- 5-7) Gunter Figer, Potential and Limitations of Heavy Duty Commercial Vehicle Gas Engines, 2014 自動車技術会春季大会前刷集
- 5-8)岩井, 自動車技術この 10 年, その他の動力, 自動車技術 Vol.51 No.10, (1997), 160-167
- 5-9)<http://www.gastechnology.org/Pages/default.aspx>
- 5-10)(社)日本ガス協会, 天然ガス自動車の普及に向けて, (1998)
- 5-11)(社)日本ガス協会, 天然ガス自動車の実用化に向けて, March, (1997)
- 5-12)運輸低公害車普及機構, 「低公害・代替燃料自動車の普及・促進のための調査研究報告書」, March, (1999)
- 5-13)「ディーゼル車の天然ガス燃料化による排気浄化に関する研究」, 環境庁特別研究成果集, (1995～1998)
- 5-14) 「天然ガス自動車フォーラム」2012 年度事業報告
- 5-15)国土交通省/報道発表資料ー液化天然ガス(LNG)を燃料とする大型トラックの公道走行試験を開始
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/09/091218_.html