

ディーゼルエンジンの超低公害化と高効率化に関する将来動向

瀬古 俊之

(財) 日本自動車研究所
305-0822 茨城県つくば市荻間2530

Future Trend of Diesel Engine Technology for Ultra Low Emission and High Thermal Efficiency

Toshiyuki SEKO

Japan Automobile Research Institute
2530 Karima, Tsukuba, Ibaraki 305-0822

Diesel vehicle is thought as one of the sources of air pollution, as diesel vehicle emits NO_x, PM and so on. Diesel engine's issue is the improvement of exhaust gas emissions. Therefore, the trend of energy resources, exhaust emission regulation and fuel economy standard, and advanced diesel engine technology for ULEV and high thermal efficiency are reviewed. From the results, it is found that future diesel engine has a great potential for the reduction of exhaust emissions and the improvement of fuel economy.

Key words: Diesel Engine, Combustion, Emissions, Fuel Economy, Hybrid vehicle

1. 緒言

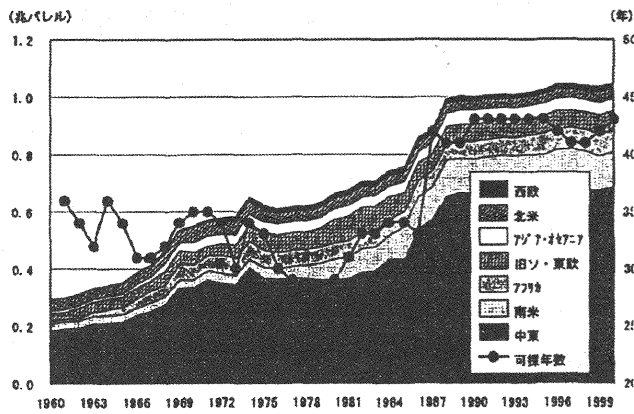
現在、大気中の浮遊粒子状物質 (SPM) や二酸化窒素 (NO_x) の環境基準は十分に達成されておらず、これらの大気汚染に大きく関与しているのがディーゼル自動車と目されている。また、尼崎公害訴訟や名古屋公害訴訟においてディーゼル自動車から排出される微粒子が有害である判断が示され、さらに、2002年10月には東京大気汚染訴訟において、道路沿道における自動車からの排出ガスと健康被害との因果関係を認めた判決となっている。したがって、現状ではディーゼル自動車は大気汚染、特に道路沿道の大気汚染の元凶と見られている。このような背景のもと、ディーゼル自動車に対する厳しい排出ガス規制が2010年頃まで次々と実施されることが予想され、ディーゼル自動車のクリーン化は急速に進むものと考えられる。ここでは、現状の自動車用燃料動向、排出ガスおよび燃費規制動向、および先進ディーゼルエンジン技術動向をもとに、2010年頃のディーゼルエンジンの低公害性と高効率性のポテンシャルを私見を入れながら予測する。

2. 自動車用燃料の動向

自動車用燃料としては石油燃料であるガソリンおよび軽油が主流であり、天然ガス等の石油代替燃料の普及は一部

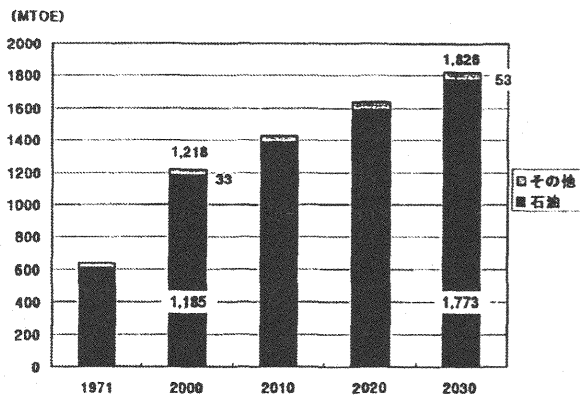
の限られた地域にとどまっている。将来の自動車用燃料の動向としては、ガソリンや軽油の石油資源がいつまで続くかが焦点になる。図1に、石油資源の石油確認埋蔵量および可採年数の変化を示すが、可採年数は増加傾向を示しており、2000年で43年程度となっている[1]。また、IEAの輸送用燃料需要見通しを図2に示す[2]。2030年になっても石油燃料依存は変わらない見通しを出している。このような石油資源の状況及び見通しから判断すると、2030年頃には現在確認されている石油資源は採掘されつくされるが、採掘技術の進歩とともに新たな石油確認埋蔵量が発見されるため、21世紀の前半においては石油確認埋蔵量は無くなることはなく、自動車用燃料としては石油燃料が主体になると予想される。

ディーゼルエンジン用燃料としても軽油は継続して使用されるが、その燃料性状は改善されていくものと予想される。特に、燃料中の硫黄分は排気ガスを浄化する触媒等の後処理装置の浄化性能維持に大きな影響を及ぼし、硫黄分の低減が求められている。現在の軽油中の硫黄分は500ppm以下であるが、2004年には50ppm以下になる。さらに2010年までには10ppm以下になることが見こまれる。このようにディーゼル自動車の低公害性を高めるために燃料性状の改善が積極的に行われている。



〔出所：「BP統計」等から（財）日本エネルギー経済研究所が作成〔1〕〕

図1 石油資源の石油確認埋蔵量および可採年数の変化



〔出所：IEA/WEO2002から（財）日本エネルギー経済研究所が作成〔1〕,〔2〕〕

図2 IEAの輸送用燃料需要見通し

3. 排出ガスおよび燃費規制動向

自動車は高い利便性や移動性を人間社会にもたらした反面、前述のように各種の環境問題を引き起こしてきた。局所的な環境問題としては、窒素酸化物 (NO_x) や粒子状物質 (PM) などによる大気汚染、広域的にはNO_x等による酸性雨問題、地球環境的には温室効果ガス (CO₂) による地球温暖化問題などである。

我が国において、二酸化窒素 (NO₂) や浮遊粒子状物質 (SPM) に関する環境基準の達成状況は十分ではなく、光化学オキシダントについては更に厳しい状況である。このような背景のもと、自動車からの排出ガスに対する厳しい規制が実施されている。図3に、2010年までの排出ガス規制動向を示す。2003年には新短期規制が実施され、PMは現在の長期規制の約30%減になる。さらに、2005年には新長期規制が予定されており、NO_xは約40%、PMは85%

の大幅な低減が決まっている〔3〕。図4に、試験モードは異なるが、日欧の重量ディーゼル車に対するPMとNO_xの排出ガス規制値の比較を示す。欧州では、NO_xよりもPMに厳しい規制となっており、今後、日本においてもPM規制が厳しくなることが予想される。したがって、2010年頃にはポスト新長期規制も考えられ、冷間始動時も含めディーゼル自動車の排出ガスは超低公害性を達成する見込みが高い。このようにディーゼル自動車の排出ガスが2010年頃までに急速に低公害化するの欧米も同様である。

一方、燃費規制については、1997年に京都で開催された「気候変動枠組み条約締結国際会議 (COP3)」において、我が国は2010年前後までに1990年比で温室効果ガスの6%低減の目標値が決まった。これをもとに自動車については2010年度までに1995年比で15%ないし20%超の燃費向上を目指すことになった。それに対応して自動車燃費目標基準が設定され、ガソリン自動車は2010年度、ディーゼル自動車は2005年度に設定された燃費目標値をクリアすることが要求されている。したがって、2010年頃のディーゼル自動車は排出ガス規制の他に燃費目標値もクリアすることが求められる。

年度	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
日本				ガソリン新短期規制			ガソリン新長期規制				
米国乗用車							米連邦 Tier 2				
HDディーゼル					2004MY規制			2007MY規制			
欧州乗用車	STEP3					STEP4					
大型トラック			EURO3				EURO4				EURO5

図3 2010年までの排出ガス規制動向

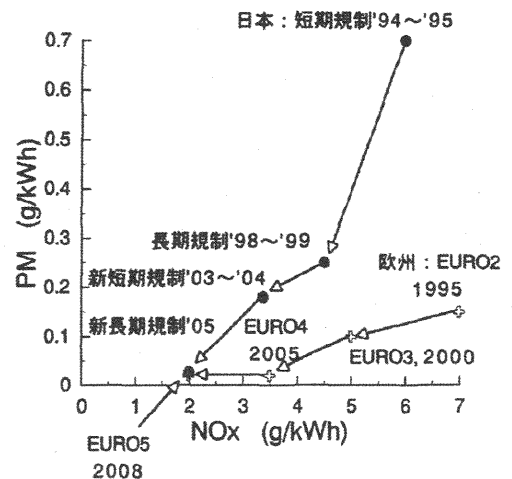


図4 日欧の重量ディーゼル車のNO_x-PM規制値比較

4. 先進ディーゼルエンジンの環境対策技術

現在、ディーゼルエンジンは低公害化、高効率化、高出力化等を達成するために各種の技術開発を行っている。特に、ディーゼルエンジンは低公害性を高めるため、今までエンジンの燃焼改善（エンジンモディフィケーション）により対応してきた。今後の更なる低公害性向上のためには排気ガス浄化用の後処理装置は必須となり、両面から技術開発が行われている。また、高効率化技術として、ハイブリッド技術が開発されており、2倍以上の燃費性能の向上を狙っている。

4.1 エンジンモディフィケーション

エンジンモディフィケーションによるエンジン燃焼改善技術としては、主に次のような技術が挙げられる。

(1) 燃料噴射系

現在、エンジン燃焼の改善に大きく寄与している技術は燃料噴射系の電子制御化である。いわゆるコモンレール方式と言われる噴射系の実用化である[4]。このコモンレール方式では噴射圧力の高圧化や制御性が格段に向上し、大幅なエミッション低減に寄与してきた。高圧化は燃料噴霧の微粒化を促進させ、PMの発生を低く抑えられる効果がある。また、噴射率制御を行い、急激な燃焼を抑えてNOx生成を抑制する。今後は更なる噴射圧力の高圧化と針弁リフトの応答性の向上が求められ、ピエゾアクチュエータ等の新しい技術が開発されている。次世代コモンレール式噴射システムの一つには、図5に示したような1サイクルにマルチ噴射が行える噴射システムが開発されている[5]。

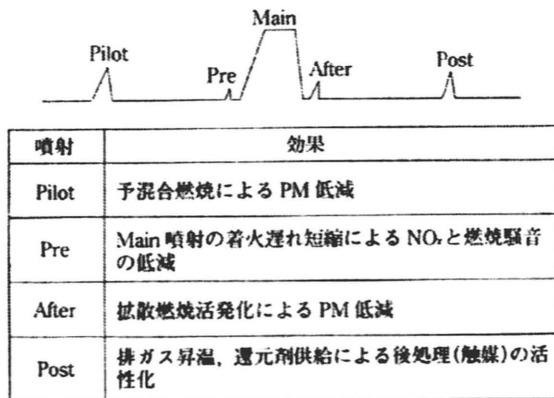


図5 次世代コモンレールのマルチ噴射[5]

(2) 吸排気系

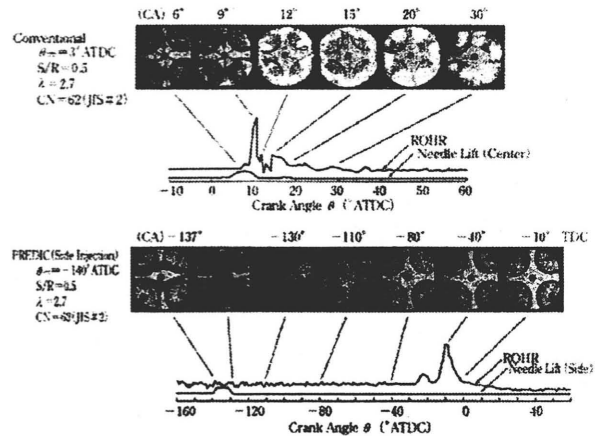
エンジン吸入する空気量を増加させることは燃焼時の温度が低下してNOx生成やPM発生を抑制につながり、さらに、高出力化及び高効率化にもつながるため、重要な技術となっている。具体的には、インタークーラー化した可変

過給や吸排気系の多弁化が行われている。また、EGR（排気再循環）はNOxを低減する有効な技術であり、大幅な噴射遅角と組合せて大量EGRが行われている。

(3) HCCI燃焼

従来のディーゼル燃焼は、拡散的燃焼が主体である。すなわち、燃料が不均一に分布し、燃料混合気には過濃な部分が存在してPMの発生が生じやすくなり、かつ、燃焼領域では高いNOx生成が起きやすくなる。このような燃焼を根本的に解決するために考案された燃焼方式が予混合圧縮着火（HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition）燃焼方式である。この方式では予め燃料と空気を混合させ、均一な希薄混合気形成を行って燃焼させるため、超低NOxとPMゼロを同時に達成できるポテンシャルを有している。しかし、現状技術では高負荷領域において混合気がシリンダ内壁に付着し、HCの増大や熱効率低下を招いている。そのため、HCCIの燃焼改善の研究が活発に行われており、2010年頃には実用化されることが期待される[6-7]。図6に、希薄予混合ディーゼル燃焼の一例を示す[8]。

図6 希薄予混合ディーゼル燃焼の一例[8]



4.2 後処理技術による排気浄化

近年、大幅な排気浄化に対応するため、ディーゼル自動車用の後処理技術の開発が活発に行われている。しかし、現状では耐久性、信頼性の課題を残し、広く実用化されるほどのレベルではない。下記に、今後有望になるであろう後処理技術をレビューする。

(1) PM (Particulate Matter) 低減技術

DPF (Diesel Particulate Filter) は排出ガス中のPMを捕集するフィルタである。代表的なDPF構造の模式図を図7に示す[9]。DPFによるPM浄化方式は古くから各種の提案が行われてきたが、ディーゼル自動車用としては捕集したPMを燃焼させる再生時の耐久性が十分に確保さ

れていないために実用化されていない。このような背景の中で新たに提案されたのが連続再生式DPFである。代表的な例として、ジョンソンマッセイ社のCRT™が挙げられる。図8にCRT™の概略を示す[10]。この方式では、DPF前段に強力な酸化触媒を装着して排出ガス中のNOからNO₂を生成し、NO₂によりDPFに捕集されたPMを酸化除去する。この方式の特徴はNO₂によりPMを酸化させるため、300℃程度の比較的低い排気温度でもPMを除去することである。

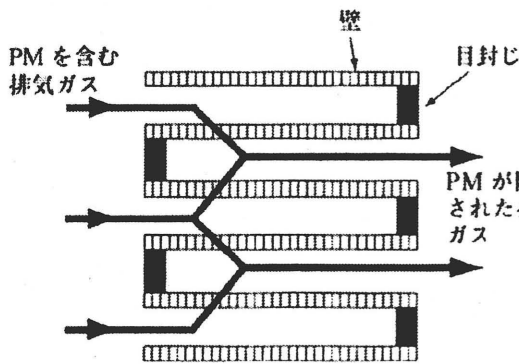


図7 代表的なDPF構造の模式図[9]

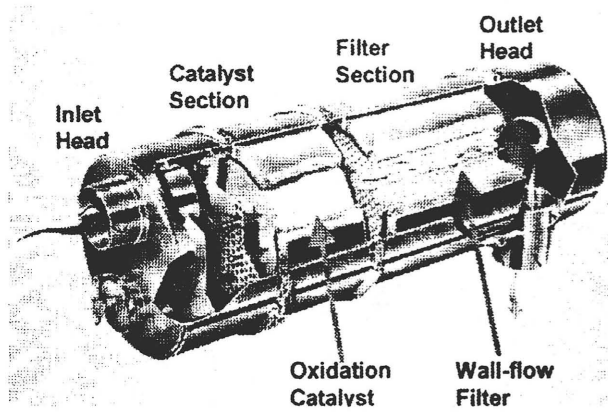


図8 連続再生式DPFの代表例のCRT™[10]

② NO_x 低減技術

NO_x低減技術としては、NO_x吸蔵還元触媒、尿素SCR、リーンNO_x触媒等があるが、図9に示したようにリーンNO_x触媒のNO_x浄化性能は低く、尿素SCR技術は最も高いNO_x浄化性能を示す[11]。この尿素SCR技術には、還元剤として尿素水が必要であり、実用化のためには尿素水のインフラ整備が必要となる。欧州では尿素SCRの開発に力を入れている。また、NO_x吸蔵還元触媒技術は、直噴ガソリンエンジンに適用されているように希薄燃焼時にNO_xを吸蔵し、理論空燃比より過濃時にNO_xを脱離還元させるものである。このNO_x吸蔵還元触媒技術はインフ

ラ整備も必要無く、実用化が期待されているが、2010年頃のNO_x規制値を考慮するとNO_x浄化性能を更に向上する必要がある。

③ PMとNO_xの同時低減技術

PMとNO_xを同時に浄化するシステムとして、DPNR (Diesel Particulate and NO_x Reduction System) が提案された。この方式のPMとNO_xの低減原理を図10に示す[12]。この方式では、吸蔵還元方式によりNO_xを浄化するとともに、その時に発生する活性酸素によりPM浄化を行うものである。

一方、同時浄化システムとして、連続再生式DPFと尿素SCRの組合せも提案されている。その代表的な例を図11に示す。最初に連続再生式DPFを、その後に尿素SCRを配置している。連続再生式DPFの前段に設置された酸化触媒によりNO_xをNO₂に酸化するほか、SO₂、HC、COを酸化触媒により浄化する。フィルター部でNO₂によりPMを浄化する。次にSCR部において尿素水がアンモニアに変換されてアンモニアによりNO_xが浄化される。このシステムの性能として、Johnson Matthey社が行った連続再生式DPFと尿素SCRを組み合わせた性能結果を図12に示

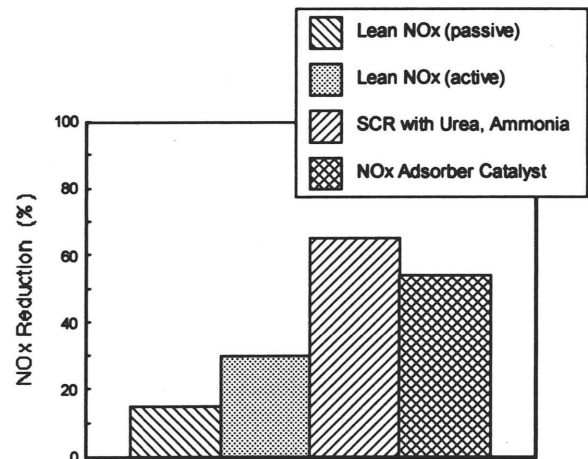


図9 各後処理装置のNO_x浄化性能[11]

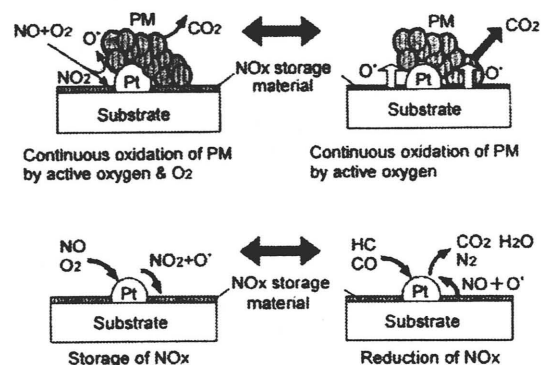


図10 DPNRのPMとNO_xの低減原理[12]

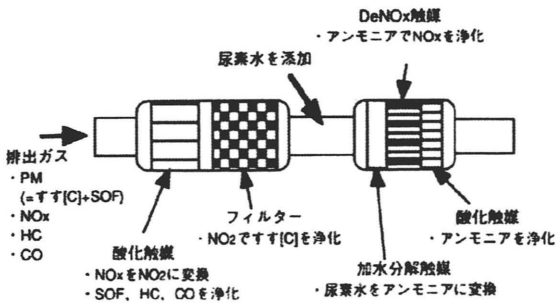


図11 連続再生式DPFと尿素SCRを組合せた排出ガス浄化システムの一例

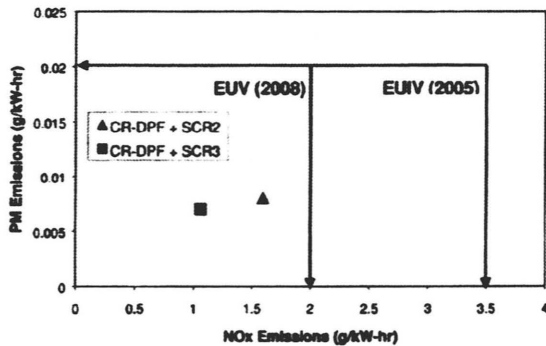


図12 連続再生式DPFと尿素SCRを組合せた排出ガス浄化システムのPMとNOxの浄化性能[13]

す[13]。図12より、2005年における欧州のPMとNOxの排出ガス規制値および2008年の提案値をクリアしていることがわかる。

4.2 ハイブリッド技術による燃費向上

エンジンとモータによるハイブリッド技術の特徴は、駆動システムの高効率化とブレーキ時のエネルギー回生による高効率化である。特に、重量車の場合、後者のエネルギー回生による高効率化が見こまれる。ただし、都市域などの加速と減速を頻りに繰り返す運転条件では高い効率化をもたらすが、高速走行が多い運転条件では、その効果は半減する。

図13に、近年発表されたディーゼルハイブリッド車のシステム構成を示す[14]。エネルギー貯蔵装置として瞬時に大エネルギーの出し入れが可能なキャパシタを用いている。図14にディーゼルハイブリッド車と通常のディーゼル車との燃費性能の比較を示す[14]。図14より、走行燃費は通常のディーゼル車の1.5倍を達成している。

5. 先進ディーゼルエンジンと他の動力源とのポテンシャル比較

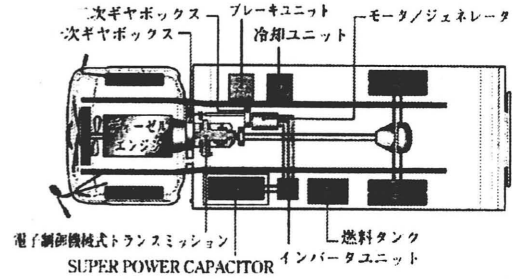


図13 ディーゼルハイブリッド車の代表的なシステム構成[14]

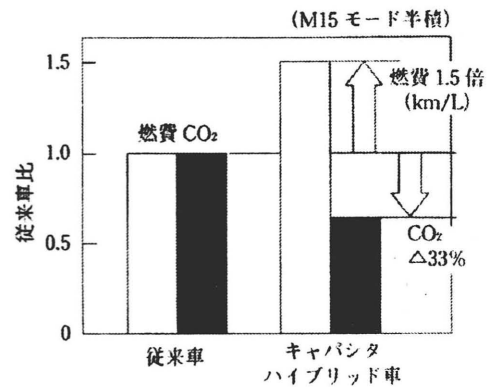


図14 ディーゼルハイブリッド車と通常のディーゼル車との燃費CO2比較[14]

最近の車両用大型ディーゼルエンジンの熱効率の年次経過を図15に示す[15]。正味熱効率は45%程度を達成しており、2010年には50%近くまで達することが予測される。他のエンジンと熱効率を比較した一例を図16に示す。図16より、中負荷以下において直噴ガソリンエンジンの熱効率はDIディーゼルエンジンに迫るが、高負荷領域では差が広がる[16]。また、MIT (Massachusetts Institute of Technology) は2020年を想定した13種類の燃料と自動車の組合せにおいてライフサイクル的なトータルのエネルギー効率 (well to wheel) による評価を行っており、そのまとめた結果を表1に示す[17]。表1より、軽油ディーゼルハイブリッド車が最も優れ、次いで直噴CNG (圧縮天然ガス)・ハイブリッド車、直噴ガソリンハイブリッド車、水素FCハイブリッド車の順に続いている。このように高効率化の観点からは、ディーゼルエンジン技術、直噴ガソリン技術、およびFC技術をハイブリッド技術と組み合わせるのが将来の高効率化技術になると見こまれる。

一方、ディーゼルエンジンの排出ガスの清浄性は、前述の燃焼改善や後処理装置により超低公害化が達成されることが見こまれる。したがって、2010年頃には厳しい排ガス規制をクリアした超低公害で、かつ、高効率なディーゼル自動車普及拡大を始めるものと見こめる。

表1 2020年想定の現行および将来自動車のエネルギー効率、炭素排出量
〔出所：文献(18)より日石テクノロジーが作成(17)〕

車両モデル	燃料	エンジン	エネルギー効率 %				炭素排出量 gC/km			
			燃料効率	走行効率		総合効率	車両製造	燃料製造	走行	全排出量
				市街地/高速	市街地/高速					
1996 ICE	ガソリン	SI	83	13.0/17.1	10.8/14.2	4.9	13.4	53.5	71.8	
2020 ICE	ガソリン	DI SI	83	16.9/19.4	14.0/16.1	4.3	8.6	34.3	47.2	
2020改良ICE	ガソリン	DI SI	83	16.2/18.1	13.4/15.0	4.2	7.5	30.2	41.9	
	軽油	DI CI	88	19.0/21.7	16.7/19.1	4.4	4.5	28.1	37.0	
2020改良ICE HEV	GTL軽油	DI CI	52	19.0/21.7	9.9/11.3	4.4	12.0	27.0	43.4	
	ガソリン	DI SI+電池	83	26.4/25.7	21.9/21.3	4.3	4.5	21.0	29.8	
	軽油	DI CI+電池	88	31.8/29.8	28.0/26.2	4.4	3.0	19.1	26.5	
	GTL軽油	DI CI+電池	52	31.8/29.8	16.5/15.5	4.4	8.2	18.4	31.0	
	CNG	DI SI+電池	85	27.8/26.6	23.6/22.6	4.4	4.3	15.5	24.2	
2020改良FC HEV	ガソリン	改質型FC+電池	83	17.6/17.5	14.6/14.5	5.1	8.8	35.1	49.0	
	メタノール	改質型FC+電池	65	22.5/22.7	14.6/14.8	4.9	7.8	24.9	37.6	
	水素	FC+電池	56	36.2/35.8	20.3/20.0	4.9	29.2	0.0	34.1	
2020改良EV	電気	電池	32	61.5/58.8	19.7/18.8	5.1	27.5	0.0	32.6	

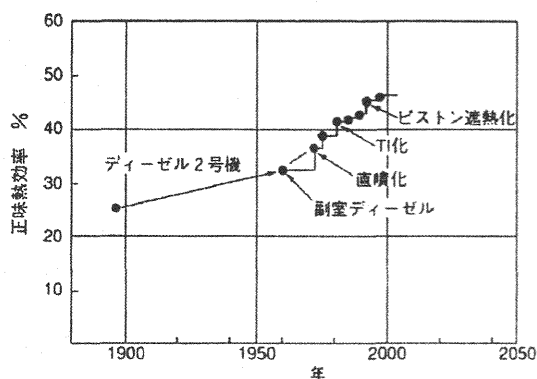


図15 大型ディーゼルエンジンの熱効率の年次経過[15]

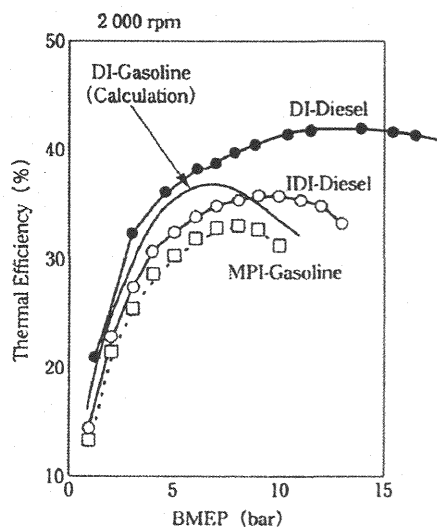


図16 各エンジンの熱効率の比較[16]

参考文献

- (1) 小川：エネルギー資源の現状・課題・将来、日本機会学会誌、Vol.105、No.1007、(2002)
- (2) IEA, World Energy Outlook 2002, (2002)
- (3) 今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について(第五次答申)、中央環境審議会、(2002)
- (4) 篠原 他：日本市場におけるコモンレール噴射技術の展開と進化、自技会シンポ「環境対応型ディーゼル機関の燃焼制御技術と後処理技術」、No.01-01、(2001)
- (5) 伊藤：コモンレールによるディーゼル排気ガスの浄化、自動車技術、Vol.55、(2001)
- (6) 島崎 他：上死点近傍燃料噴射による予混合圧縮着火機関の排気改善、自技会学術講演会前刷集、No.97-01、Paper No.20015506、(2001)
- (7) S. M. Aceves, et al.,: A Decoupled Model of Detailed Fluid Mechanics Followed by Detailed Chemical Kinetics for Prediction of Iso-Octane HCCI Combustion, SAE paper, No.2001-01-3612, (2001)
- (8) 佐々木：ディーゼル機関の開発動向、自動車技術、Vol.56、(2002)
- (9) 杉山：DPFの現状と課題、自動車技術、Vol.55、(2001)
- (10) S. Chatterjee, et al.,: Performance and Durability Evaluation of Continuously Regenerating Particulate Filters on Diesel Powered Urban Buses at NY City Transit-Part II, SAE paper, No.2002-01-0430, (2002)
- (11) H. Luders, et al., : SAE paper No.1999-01-0108, (1999)

- (12) 広田 他：ディーゼルPM, NOx同時低減触媒システム、自技会学術講演会前刷集、No.68-01、Paper NO.20015186、(2001)
- (13) G. R. Chandler, et al., : SAE paper No.2000-01-0188, (2000)
- (14) 西川 他：キャパシタハイブリッドシステムの開発、自動車技術、Vol.56、(2002)
- (15) 青柳：超高効率ディーゼル機関への挑戦、自動車技術、Vol.56、(2002)
- (16) 木村 他：直噴ディーゼル機関の熱効率特性とその改善対策、自動車技術、Vol.54、(2000)
- (17) 松原：エンジン用燃料のフロンティア研究と将来、自動車技術、Vol.56、(2002)
- (18) M. A. Weiss, et al., MIT EL 00-003 On the Road in 2020, A life-Cycle Analysis of New Automobile Technology, (2000)