

3. 高性能化しているディーゼルエンジンにおける 今後の方向性について

環境研究領域 ※鈴木 央一 水嶋 教文 山口 恭平

1. はじめに

ディーゼルエンジンは、内燃機関の中で最も高効率なだけでなく、信頼性、耐久性にも優れることから、自動車のみならず、建機、船用、発電所等大型エンジンを中心に広く用いられている。その一方で、窒素酸化物（NOx）や粒子状物質（PM）に代表される有害成分を生成、排出することがデメリットとして挙げられた。とりわけ自動車は台数が多く、それらの環境に及ぼす寄与率が高かったため、早い段階から排出ガス規制が行われ、環境性能改善のために多くの技術開発が行われてきた。近年では、有害排出ガスの低減のみならず、さらなる高効率化、低燃費化も求められている。排出ガス低減技術の多くは、熱効率と背反することが多く、その両立は容易でない。それに対して、過給機、燃料噴射系、排気後処理装置など多くの要素技術で顕著な進化がみられ、以前は不可能と思われた排出ガス低減を達成しつつ、燃費、CO₂排出性能についても従来よりも明らかに改善されている。

そこに至る技術の変化について、一例を挙げたい。

交通研で、'00~'01 年にかけて CD3 モード（その後改良された CD34 モードを経て、現在の JC08 モードになる）について多くの車両を用いた検証試験を行った際、各種ガソリン車に加え当時最も代表的といえるディーゼル乗用車も用いたが、それに搭載されていたディーゼルエンジンの主な諸元を記載すると、

燃焼方式 : 渦流室式

吸気方式 : 自然吸気

燃料噴射系 : 分配型

後処理装置 : なし

であり、直接噴射式で過給機やコモンレール式燃料噴射系搭載が前提となっている現在のディーゼルエンジンとは、名前以外は同じところがないくらいに大きく異なっている。つまり、十数年の間に根本が変わるほどの進化をした、ということができる。その劇的な変化をもたらした要素の代表例として

●コモンレール式燃料噴射系

●可変容量型ターボチャージャー（Variable Geometry Turbocharger = VGT）

が挙げられるが、それら自体で排出ガスを削減するというより、むしろ制御の自由度を提供し、排気再循環（Exhaust gas recirculation = EGR）等と組み合わせることでトータル性能を改善させるポテンシャルがある、というものである。つまり、最新ハードウェアはそれ自体で高性能が得られるのではなく、制御自由度の中から、そのポテンシャルを最大限引き出すだけの解を見つける試験、適合工数を投入することで初めて最先端といえる性能が得られるものである。最新のハードウェアを搭載、となるとその時点でコスト増や構造の複雑化が避けられないだけでなく、信頼性の確保等のための設計、開発時の工数、費用ともに増加する。その結果、ディーゼルエンジン開発は多額の費用がかかり、自前で開発するメーカー、そしてエンジンファミリーの数はいずれも減少傾向にあり、統合化、共通化等が進んでいる。つまり、限られた少数の勝者が多量生産をすることで開発コストを回収しようとする構図となっている。

恐らく、この傾向はしばらく継続するとみられ、従来に加えて 2 段過給機や低圧 EGR、さらには可変バルブタイミング機構、排熱回生機構等も加わって、複雑化は加速していくと予想される。

そのような形で高性能化されていく過程は、ユーザーにとって悪いものではない。しかしその状態が継続すると、画一化されて選択肢が狭まり、趣向や用途の違いによる適材適所、といった多様性に対応する少量多品種化などが失われ、自動車「文化」としては貧困になる恐れがある。

そのような状況下で、今後を考えていくにあたっては、現在の「価格上昇を抑えつつ、厳しい規制を満たすためにとにかく高性能化」という視点から、「安く簡単に」する視点を、という議論も出てくる。もちろん

ん自動車メーカーにおいても、低コスト化は重要課題であり、部品供給や生産性向上など多角的にコスト削減を進めている。その結果が現在の状況になっているわけで、たやすく「安く簡単に」ができるわけではない。ただし、現在前提とされているいくつかの事項を変えていくことでその可能性が生じるのではないか、というあたりを検討した結果を報告する。

2. 「安く簡単に」で得られる燃費水準

近年燃費や CO₂ 排出性能が、とりわけ強く求められているが、ディーゼル車では同時に排出ガス規制強化が相次いでおり、それに適合させるような各種の技術開発が行われてきた。燃費と異なり排出ガス規制は強制基準であるため、譲歩できない。つまり最新のディーゼル車は、日本ではポスト新長期規制、欧州であればユーロ Vb、VI などの最新排出ガス規制を満たすものとなり、必然的に最新技術を最大限盛り込み、そのための膨大な適合作業を行ったものとなる。それに対して、排出ガス規制だけ一世代（5～7 年）前の水準として、最新といえないハードウェアで今どきの低燃費化を図るとどこまで燃費が良くできるか？ということを論ずることとする。



図1 ホンダがインド市場で市販する小型乗用車
(同社 HP より)

一つの例としてホンダがインドで市販するディーゼル乗用車「アメイズ (Amaze)」を取り上げる (図1)。本車両は、排気量 1.5L、100 馬力のエンジンを搭載した小型乗用車で、排出ガス規制としてはユーロ IV 相当である。ハードウェア構成について、得られた情報から推定すると、

- ・(前世代の) コモンレール式燃料噴射系
- ・(可変容量でない) 従来型ターボチャージャー

- ・クーラーを持たない EGR
- ・後処理装置は酸化触媒のみ

となっており、最新といわれる技術はなく、非常にシンプルである。その結果、国産車との単純な比較は妥当性を欠くかもしれないが、価格についても 100～120 万円程度 (9 月時点の 1 ルピー＝約 1.5 円で計算) であり、決して高いものではない。しかしながら、その燃費性能は EU モード (ただし、最高速度 90km/h) で 25.8km/L と非常に優れており、「安く簡単に」を高次元で達成したものといっている。同等クラスの国産ガソリン車で JC08 モードにてそれに近い値を出すものもあるが、それらでは CVT、アイドルストップ、充電制御等、最先端技術を盛り込んだ結果であり、条件がかなり異なる。

以上より、フリクションに関わる基本骨格等の改善は実施していると思われるものの、一世代前のハードウェア構成であっても、燃費面のポテンシャルの差は必ずしも大きいものではなく、安く少ない制御変数で相当レベルの低燃費化が可能であることがわかる。

3. 「安く簡単に」性能向上させる可能性

3. 1. 後処理装置の性能改善によるトータルポテンシャル向上とその評価方法について

近年のガソリン車の燃費向上には目を見張るものがある。2010 年燃費基準は前倒しで達成され、2015 年燃費基準についても、ハイブリッド車以外で 20% 以上超過達成したものが少なくない。そこに至るには多くの技術開発が行われているが、大きな要素として、三元触媒の排出ガス浄化率が極めて高いため、燃焼時における NO_x 等排出ガスの生成をほぼ気にすることなく燃費向上に集中した技術開発が可能である点がある。つまり、圧倒的な浄化性能を持つ後処理装置が燃費向上に特化した技術進歩を加速させているといえる。ディーゼル車でそれを可能にすることはできるのだろうか。

新長期およびポスト新長期排出ガス規制適合の大型ディーゼル車の多くで、NO_x 浄化のために、尿素水を使用する NO_x 選択還元システム (尿素 SCR : Selective Catalytic Reduction) が採用されている。燃焼における NO_x 生成抑止は燃費の悪化を伴うことが多く、尿素 SCR のような後処理装置で NO_x を浄化できれば、燃費改善に寄与することができる。さらに尿素 SCR の NO_x 浄化率がガソリン車の三元触媒

並みになれば、NO_x 排出を気にせず燃費優先の適合が可能となり、燃費改善のみならず、適合工数の大幅な削減にもつながり、作業工数を減らしつつ燃費を良くする目的に近づくことができる。以下に、その可能性を検討する。

尿素 SCR の NO_x 浄化性能を決定する因子は数多く存在するが、その中の一つで影響度の大きなものとして排気温度が挙げられる。概ね 180℃程度以上の触媒活性温度にならないと NO_x 浄化が行えない。ただ、180℃を多少超えたとしても浄化率を維持するには、排気流量や NO_x 中 NO₂ 比率などがある範囲にないと困難で、安定した浄化性能を保つには少なくとも 200℃を上回る温度が必要となる。それに対して、JE05 モードに代表されるような都市内走行では、200℃以下で推移する時間が長く、浄化性能向上が難しい状況にある。それならば温度を維持、上昇させることが必要になるが、どの程度温度を上昇させれば将来規制をクリアしうる水準になるのか考察する。

そこを考えるにあたり、交通研で過去に尿素 SCR の環境安全性の確保等に関して、新長期規制適合の尿素 SCR システムに改造を施して将来レベルの NO_x 排出となった時も含めてアンモニア、シアン化合物等有害成分排出評価を行ったときのデータ¹⁾を基に検討する。

表 1 エンジン諸元

シリンダ配置	直列6気筒
吸気系統	ターボインタークーラ、EGR
排気量 L	9.2
最大出力 kW/rpm	250/2200
最大トルク Nm/rpm	1400/1400
燃料噴射装置	コモンレール式
後処理装置	尿素SCR

表 1 に諸元を示す車両総重量（Gross Vehicle Weight=GVW）20～25t クラスを対象とした排気量 9.2L の新長期規制適合エンジンにおいて、エンジン側の制御は変更せず尿素 SCR の NO_x 浄化率を向上させるための手法として、標準の状態に加えて以下の3通りの手法を盛り込んだ。

- ① NO_x 量に対して還元剤量の不足を解消するため
尿素水添加量増加
- ② 排気管と触媒に断熱材を巻くことで断熱を強化
- ③ 触媒温度低下を防ぐためにアイドルストップを実施

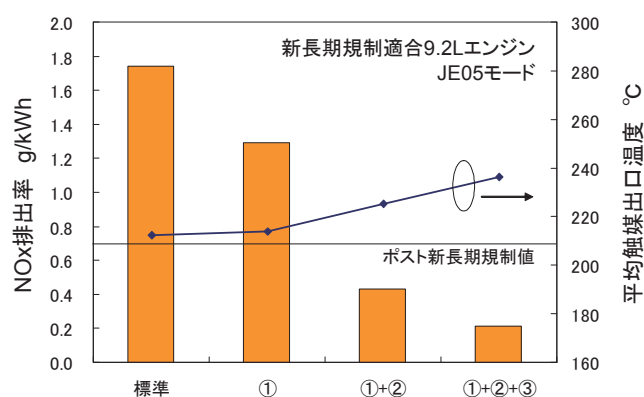


図 2 新長期規制適合尿素 SCR エンジンに各種方策を行い NO_x 浄化率向上を図った時の NO_x 排出率と平均触媒出口温度（①～③については本文参照）

図 2 は、これらを実施した場合の JE05 モードにおける NO_x 排出率と平均触媒温度の変化を示したものである。図より、上記 3 つの方策を全て実施した時には、NO_x 排出率が 0.22g/kWh と 2016 年規制並みの水準にまで低減した。その時の尿素 SCR による NO_x 浄化率は 96%以上におよんでいる。また、触媒平均温度は当然ながら上昇しているものの、その差は 25℃程度であり、高速走行時には標準状態でも平均温度が 250℃を超えることを考えると大きいとはいえない。その温度差を埋める手法を検討するにあたり、別途燃料エネルギーを使用するようでは、燃費悪化につながる。一方、有効な燃費向上策にエネルギー回生が可能で電気ハイブリッド化があるが、大型トラック等でハイブリッド化を行うとした場合、搭載バッテリーの重量がトンオーダーとなり現実的でない。そこで回生エネルギーを後処理装置の触媒昇温に用いることを考える。

上記に示される GVW25t クラスの大型トラックでは JE05 モード（半積載）試験時のエンジン仕事量は、約 14.5kWh であるのに対し、それより総重量が約 14t 重いトラクタでの JE05 モードでは 19kWh 強となった。これらの車両設定にて、同一エンジンでエンジンベンチ試験を行ったところ、触媒出口温度は平均で約 30℃変化した。このことから、エンジン仕事 4.5kWh 分の排気エネルギー量があれば、十分に目標とする温度域に達するとみなせる。また、ディーゼル燃焼でエネルギー収支を試算した例²⁾では、排気エネルギーは有効仕事よりも小さいことから、4.5kWh のエンジン仕事は排気エネルギー 3～4kWh に相当し、そのエネ

ルギーで必要な加熱を行えると判断できる。

図3は、GVW25tトラックでJE05モードシャシダイナモ試験を実施したときの仕事量について内訳を示したものである。エンジン仕事量は既述のエンジンベンチ試験の数値と同じであるのに対して、車両がダイナモローラを駆動した仕事は、タイヤを含む駆動系の損失などから、それより1割あまり減少した。そのうち制動仕事とした5.7kWhは、減速時に車両がブレーキをかけたため、ダイナモが駆動を行ったものであり、車両が減速時に回生しうるエネルギー量といえる。この値は上記触媒の加熱に必要なとした3~4kWhよりも十分に大きい。したがって、回生エネルギーを用いた後処理装置の抜本的な性能向上は、理論的には十分可能で、そのことがエンジン制御に大きな余裕をもたらし、トータルコストの改善につながりうるものといえる。

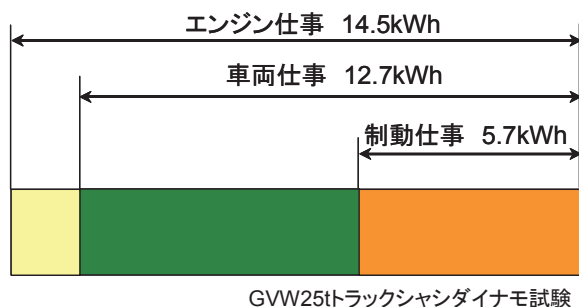


図3 JE05モードにおけるエンジン仕事と内訳

なお、現在このようなシステムを適切に評価できる試験方法は存在しない。これまで大型車用エンジンは、エンジン単体で認証試験を行い、その認証の得られたエンジンを様々な型式の車両に搭載する形態を取っていたため、車両で発生する減速時の仕事などについては考慮されなかったためである。これは欧米をはじめ世界中同様である。後述するハイブリッド車では、車両で起こる回生の評価などを考慮した試験方法が検討されているものの、それらは通常のエンジンには適用されない。しかし、今後は単にエンジン単体に止まらず、車両に搭載され、実際に運用される状態での燃費や排出ガスの評価が重要になっていくと考えられる。

表2は重量車用エンジンにおける認証試験サイクルの移り変わりについてまとめたものである。表より一つの試験サイクルは10年程も使用すると、エンジン技術と測定技術の進歩等を反映させた新たな試験

表2 重量車における認証試験サイクルの遷移

試験サイクル	運転方法	導入年
D13	定常	1994
JE05	過渡	2005
WHDC	過渡(WHTC)+定常(WHSC)	2016

サイクルへと移行しているのがわかる。これまでの考え方では、新たな試験サイクルはそれ以前のものよりも広い範囲における排出ガス性能を評価する意味合いの強いものとなっていた。しかし、国際基準調和試験サイクルWHDC (Worldwide Harmonized Heavy Duty Certification) の次を考えた場合、単にエンジン単体を対象にチェックできる範囲を広げる、という従来の意識よりも、既述のように実際の車両でどれだけ低くできるか、という視点が重要性を増していくとみられる。その場合、従来のエンジンベンチ試験で実走行を反映させた仕組みを作るのか、シャシダイナモで試験をするのか、さらに究極のリアルワールド評価として車載型排出ガス分析計 (Portable Emission Measurement System = PEMS) を用いた評価を中心にするのか、従来の手法にとらわれない議論が必要になる。このような認証試験時における評価試験方法の策定支援は、交通安全環境研究所の主たる業務であり、多岐にわたる可能性について検討し、今後活用できる知見を深めていきたい。

3. 2. 課題解決手段としてのハイブリッド化

もう一つ「安く簡単に」する方策の一つとして、「電気ハイブリッド化」を挙げたい。先に大型車では現実的でないと言ったが、乗用車クラスまで対象を広げたとしても、通常高価になりやすいディーゼルエンジンに、さらにバッテリーやモーター、インバータ等の追加コストが発生するハイブリッド化は、費用対効果の点で優れているとは言い難い。そのため、ガソリン乗用車では多く普及しているハイブリッド車が、ディーゼルではほとんど例がみられない。ただし、ハイブリッド化によるエンジン使用領域の限定が、従来の困難さを解決するブレークスルーになりうる。

その例として、表3に示すハイブリッド乗用車(車両A)と、同等重量クラスのマニュアルトランスミッション搭載車(車両B)を用いて、走行時のエンジン使用領域を比較した。

図4は車両A、BでJC08Hモードを走行した場合のエンジン回転数と負荷率の使用頻度分布を比較したものである。負荷率は汎用スキャンツールにて記録されたデータであり、プロットの総数は車種により異なる。図より、2台の車両で使用するエンジン負荷領域が大きく異なることがわかる。ハイブリッド車では、60%負荷率以上がエンジン作動時間の80%以上を占めるのに対し、MT車ではそれが1.5%でしかない。負荷率は概ね1サイクルあたりの燃料噴射量に比例するため、高負荷域での使用が多いことは、触媒温度と浄化性能の向上に直結する。

表3 エンジン使用領域比較を行う車両の諸元

	車両A	車両B
車体形状	ハッチバック	クーペ
パワートレインシステム	ガソリン電気ハイブリッド	ガソリンエンジン
エンジン排気量	1.8L	2.0L
車両重量	1,310kg	1,230kg
変速機	電子制御CVT	6速マニュアルミッション

また、図から明らかなように、シリーズハイブリッドの要素を含むハイブリッド車では、エンジン運転領域を燃費の良い限られた部分のみに限定することが可能となる。このようにして、適合を行わねばならない範囲を減らすことができれば、開発時の作業工数を大きく削減することが可能となる。

これらで示されたように、ハイブリッド化することが、後処理温度維持と適合工数の削減という、現在のディーゼルエンジンにおける根本的な課題に対する解になり得るものである。

通常エンジンの車両では、最高熱効率になる運転ポイントを使用できるケースが極めて限られたことから、熱効率の最高値よりも、部分負荷を含めてサイクル全体の燃費を良くするためにどうするか、が課題となっていた。それに対して、シリーズ的な要素を持つハイブリッド車では、エンジン使用領域が限られることから、その領域での最高熱効率が車両全体の燃費に大きく影響を与える。そのため、ガソリンエンジンにおいてもアトキンソンサイクルを用いるなど、最大トルク等他の要素を譲歩してさえも最高効率を求める方向になっている。ただ、最高熱効率では、ディーゼルエンジンは高いポテンシャルを持っており、ディーゼルハイブリッドは、単にディーゼルエンジンにおける現状の課題を解決する手段としてのみならず、性能

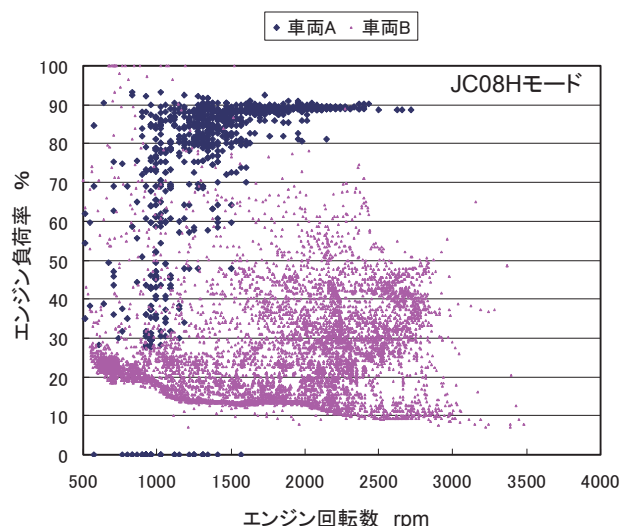


図4 車両A、BにおけるJC08モードでのエンジン使用領域の頻度分布

上の効果も高いと考えられる。

ディーゼルハイブリッド車の排出ガスや燃費を評価する場合、軽・中量車（GVW3.5t以下）では、現状で理論上問題は生じない。しかし、DPF（Diesel Particulate Filter）等の周期的制御等が加わった状態でのハイブリッド車評価は、相当煩雑になると見込まれる。さらに、プラグインハイブリッド車で、外部充電によりエンジン作動頻度が低下するような場合には、その問題がより顕著になる。外部充電が前提の場合、ディーゼルエンジンを用いるメリットが相対的に小さくなり、現実的には考えにくい。今後このような車両が登場する場合には、現実的な審査方法の検討が必要となる。

一方、エンジンベンチ試験が基本となる重量車では2016年以降に国際基準調和試験サイクル（WHDC）が導入された場合、車両の概念のないWHDCでどのように実際の走行を反映するかはまだ決められていない。それに関しては、現在国連自動車基準調和世界フォーラム（WP29）の排出ガス・エネルギー専門家会議（GRPE）傘下のHeavy Duty Hybrids Informal Group meeting（HDH）にて、HILS（Hardware In the Loop Simulation：ハードウェアを基本としたシミュレーション）法をベースに車両の概念を含めた排出ガス試験法の策定が進められている。その場には、交通安全環境研究所からも参画し、中心的役割を担って議論を行っている。

4. まとめ

ディーゼルエンジンが高度に進化している一方で、大きな課題として、構造面およびその適合について非常に複雑化している状況を示したうえで、今後より「安く簡単に」する技術的なブレークスルーの可能性と、そのような技術が導入された場合を含めた、将来見直しが必要となる技術基準項目等を検討した。

- (1) 一世代前の代表的な構成のディーゼル乗用車でも、優れた燃費性能を示す例もあることから、現状で前提とされている事項を変えることができれば、シンプルかつ低燃費なディーゼルエンジンは実現可能である。
- (2) ガソリン車では、三元触媒の浄化性能の高さから、燃焼面での NO_x 等があまり考慮されずに燃費に特化した技術開発が行われていることから、後処理装置の性能向上は、燃費改善にもつながる技術となる。
- (3) 尿素 SCR システムおよび大型トラック等のシャシダイナモ試験の結果等から、減速時のエネルギーを用いて触媒を加熱すれば、新長期規制適合エンジンで 2016 年規制並み(2 段階の改善)の NO_x 排出性能を達成しうる。
- (4) ディーゼルハイブリッドは、コスト増加につながり現状では一般的でないが、適合工数の削減や後処理装置の温度確保といった、現状の課題を解決しうるものとして、今後考慮されていくべき技術といえる。
- (5) これら进行评估する試験方法にあたっては、とくに現在エンジンベンチ上でエンジン単体の試験評価を行っている重量車において、車両トータルの制御等を反映させた試験評価方法の導入が必要になるとみられ、例えば排出ガス試験方法では従来と根本的に異なる手法が必要になる可能性もある。実環境の改善につながる手法について検討などを進めていきたい。

参考文献

- (1) 鈴木央一、石井素、“2009 年規制を視野に入れた尿素 SCR の技術的可能性と課題について”、自動車技術会論文集 Vol.39、No.2、p399～404、JSAE 20084296、(2008)
- (2) 島崎直基、港明彦、鈴木浩高、“将来ディーゼル機関の熱効率向上に向けた取り組み”、自動車技術会 2010 年春季学術講演会前刷集 No.80-10、p.19-24、(2010)