

⑥スーパークリーンディーゼル（SCD）エンジンにおける新展開

環境研究領域 ※鈴木 央一 石井 素 川野 大輔
青柳 友三（新エイシーイー）

1. はじめに

スーパークリーンディーゼルエンジン（以下、「SCD エンジン」という）は、自動車物流の根幹をなす大型ディーゼルエンジンの抜本的な改善を図るため、国土交通省が交通安全環境研究所を中核として実施している「次世代低公害車普及開発促進プロジェクト」の一環として、平成 14 年度より研究開発を実施している。プロジェクトを開始した平成 14 年は東京都の自動車排出ガス測定局（自排局）で浮遊粒子状物質（SPM）の環境基準達成率がゼロとなるなど、有害排出ガスの抑制が最重要課題であった。それに対し、最大 4 気圧以上の過給が可能な高性能ターボチャージャーと、高性能クーラを配置した多量の EGR 等の燃焼制御に加え、高性能後処理装置およびそれらの統合制御の研究開発を実施した。その結果平成 19 年度末までに、平成 21 年より実施されているポスト新長期規制をクリアするだけでなく、最も困難な窒素酸化物（NOx）排出について規制値の 1/3 以下を達成した。これは、2016 年以降に予定される排出ガス規制強化（ポスト新長期挑戦目標）にも適合できる水準である。このときの試験サイクル中排気 NOx 平均濃度は 5ppm 以下で、労働環境基準の一酸化窒素（NO）許容平均濃度 25ppm より明らかに低く、テールパイプレベルではほぼ無害といえるものであり、有害排出ガス対策については、究極といえる段階に到達したと考えている。

現在では、上記東京都の自排局で SPM 環境基準達成率が 100%になる（H20,21 年度。NO₂は約 88%の達成率）など、環境基準の達成率は大幅に向上している一方で、地球温暖化問題や燃料価格高騰などによる、CO₂および燃料消費率（燃費）改善の要求が急速に高まっている。一般に NOx 等の排出ガス抑止対策は、燃費の悪化につながることが多く、排出ガス性能と燃費の両立が、現在最も重要かつ困難な課題となっ

ている。その課題に対して、2 段過給機や排熱回生システムの導入など、本プロジェクト始まって以来の大幅なハードウェアの変更を行った。それにより平成 23 年度までに平成 27 年燃費基準+10%という挑戦的な水準を、これまで得られた「無害な」排出ガス性能を維持した上で達成することを目指して研究開発を実施している。これら大幅な改良により新しいステージへの展開を行っている SCD エンジンにおける、新技術導入の意味や効果予測について述べる。

2. SCD エンジンの基本性能と燃費向上に向けた課題

表 1 に SCD エンジンの諸元を、表 2 に現在のプロジェクト目標値を示す。NOx 排出目標について、いわゆる挑戦目標値以下として 0.2g/kWh としているが、環境省中央環境審議会第 10 次答申により 2016

表 1 SCD エンジン諸元

項目		内 容
ボア×ストローク		122 mm × 150 mm
排気量		10, 520 cm ³
圧縮比		15.3→17.0
最高出力・回転数		298kW / 2,000rpm
バルブ形式		OHV+可変バルブ機構
ピストン	材料	FCD
	燃焼室形状	浅皿
噴射装置	供給方式	コモンレール式
	最大噴射圧力	220 →260MPa
スワール比		1.0
排気後処理装置		DPF+NOx吸蔵還元触媒

表 2 プロジェクト目標値

対象	目標値	試験条件など
排出ガス	NOx	0.2 g/kWh
		(0.4 g/kWh)
	PM	0.01 g/kWh
燃費目標	4.5 km/L	重量車燃費評価法による

（参考：同クラスの燃費基準値 4.04km/L）

年の排出ガス規制強化が数値も含めて示されたことをうけ、WHTC モードにてそれを満たすことも考慮する予定である。SCD エンジン、車両総重量 (GVW) 25t クラスの大型トラック等を主対象としたものであり、298kW の最高出力は本クラスの最高水準に近いもので、クリーンであるだけでなく、十分なパワーも兼備している。GVW25t クラスのトラックは、高速道路を中心に都市間長距離輸送に携わるものが多く、従来から最も燃費が重要視されるカテゴリーである。そのため、燃費基準に対してさらに「上積み」することは容易でなく、他のカテゴリーでは燃費基準+5～10%を達成したものが存在するが、本カテゴリーで現状 (2010 年 9 月現在) 最も優れたものでも 4.15km/L (基準値 4.04km/L) に止まる。年間走行距離が 10 万キロ以上となるものが少なくない本クラスの車両における燃費向上は、マクロな CO₂ および物流コスト削減に大きな効果を有するものであり、本プロジェクトでは燃費基準+10%となる 4.5km/L を目標とした。

SCD エンジンにおいて、これまでも燃費向上につながる方策を取り入れている。その一つが「ダウンサイジング」である。300kW 級の重量車用ディーゼルエンジンでは、一般的に 13L 前後の排気量のものが多いのに対し、SCD エンジンでは高過給により出力確保が可能であると判断し、10.5L とすることで低負荷時のフリクション低減などを試みた。この手法は、その後市販車用エンジンにも取り入れられ、現在では 9～11L のものも多く存在している。一方で、このような過給ダウンサイジング時は、エンジン全体の性能に及ぼす、過給機の影響が大きくなる。

図 1 は、従来 SCD エンジン用過給機における、空気流量と圧力比に対するコンプレッサ効率の等高線マップを示したものである。図中には、代表的な運転ポイントにおける使用領域をプロットしているが、JE05 モードを代表とする都市内走行時における空気量、圧力比は概ね黄色で示される部分で、最大トルク点などと比べると、いずれも大幅に低い。その結果、以下の 2 点で熱効率向上の阻害要因となっている。

- ①グラフ中央付近のコンプレッサ効率の高いエリアを活用できず、過給機で使用するはずのエネルギーを排気熱としてロスしている。
- ②従来の過給機とエンジンの組合せでは都市内走行時に圧力比 2 以上を確保することは困難で、本エン

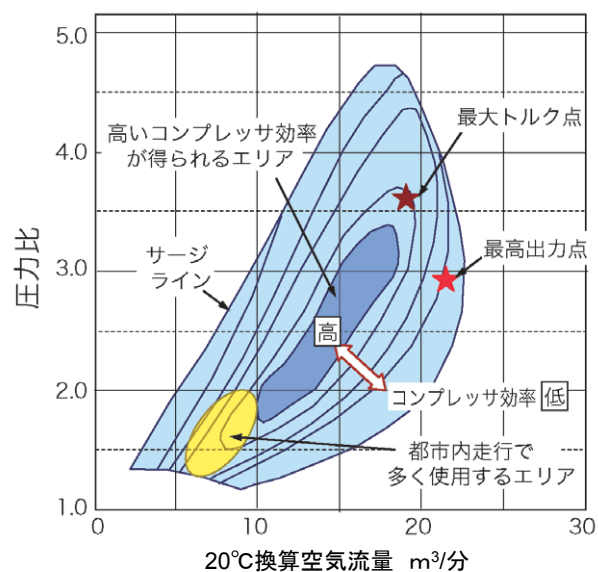


図1 SCD エンジンで採用している過給機のコンプレッサ効率マップおよび代表的運転条件における使用域

ジンの基本コンセプトである「高過給・多量 EGR」が限定的にしか行えない。さらに、この問題は、低速エンジン回転数における高トルク化を不可能にする原因にもなり、燃費に不利に働く。

昨年度の報告で、GVW25t クラスの実車両に関する燃費動向を調査した結果、ダウンサイジングを取り入れたものでかえって燃費が悪化する例があるとしているが、これは前記の課題が SCD エンジンに限らず一般的に起こりうることを示唆している。したがって、本課題に対するブレークスルーを提示することは、ダウンサイジングの長所を生かした総合熱効率向上に大きく寄与するものである。

3. 主な新規導入技術

課題への対処として、

①2 段シーケンシャル過給機

②排熱回生システム

の導入を行うとともに、さらなる燃焼改善を目的として、

③超高圧コモンレール式燃料噴射システム

を従来の燃料噴射系に置き換えることで、燃費基準+10%という挑戦的な目標の達成を目指す。

それらを導入したエンジンの状況を図 2 に、エンジンシステムの構成図を図 3 に示す。以下、それらのデバイス導入の目的や効果予測などについて紹介する。

3. 1. 2 段シーケンシャル過給機

2 段過給機を導入する主な目的は、既述の都市内走

行など低速エンジン回転数での過給機効率および圧力比向上である。図1に黄色で示した領域、横軸に示す空気量で5~9m³で最高効率を得られる小型の過給機を追加し、2段のシーケンシャル過給システムとした。いずれもタービンノズルを持つ可変容量型過給機(VGT)で、大型エンジンでは世界で初めてである。図3に示すように、追加した過給機は従来の大型過給機が加圧した後に直列的に配置されている。小型過給機は、従来過給機の効率の上がない低空気量領域で効果的に過給圧力の向上に寄与するが、逆に空気量の多い状態では流路抵抗となってしまうため、バイパス弁により大型過給機から直接エンジンに導入できるように切り替える。このように運転条件により作動を切り替えるシーケンシャル過給機とすることで、実走行のあらゆる状況で、高い熱効率確保を狙ったものである。

試験中の結果の一例として、2段過給導入前後の最大トルクを図4に示す。1,000rpm以下で大幅なトルク向上を図ることができた。とりわけ、700rpmでは従来の850Nから1500Nと飛躍的なトルクアップを可能とした。この最大トルク向上の燃費への効果を把握するため、シミュレーション燃費を算出した。その結果、JE05モードで0.5-1.0%の向上が得られた。これは、従来得られているSCDエンジンの燃費マップに、最大トルクの変更のみを適用したものであり、実際にはさらに過給効率の向上や空気量増加による改善ポテンシャルを生かして燃費マップそのものを改善していくこととなる。その効果と合わせて本要素で5%以上の改善を目指して開発を進めている。

3. 2. 排熱回生システム

排熱回生は様々な手法がある。ランキンサイクルも考慮しつつ、現実性等を踏まえ排熱回生タービンを用いたターボコンパウンドを採用した。2段過給機導入により、幅広い運転領域で過給機効率が高まり、排気エネルギーは減る方向であるが、1,000~1,200rpmの実用運転領域で負荷による差はあるものの1~3%程度の燃費改善効果が得られる試算を行っている。この数値は必ずしも大きいとはいえないが、排気エネルギーが増加する高速高負荷領域では効果が拡大し、最高出力点では10%以上の改善効果が見込める。乗用車では一般に最高出力を使用することは極めて稀なのに対し、GVW25tクラスのトラックが全積載時に5%

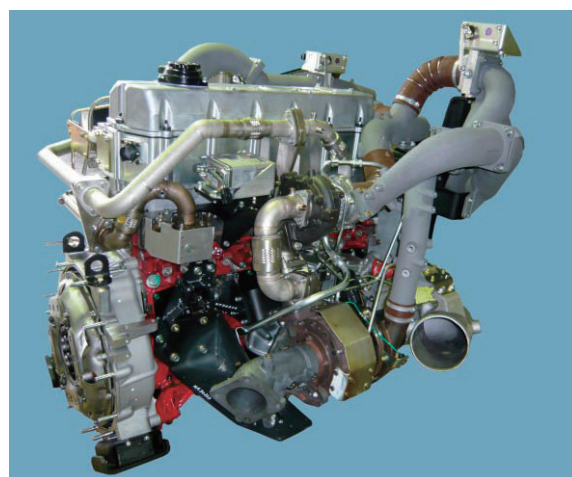


図2 SCDエンジン外観

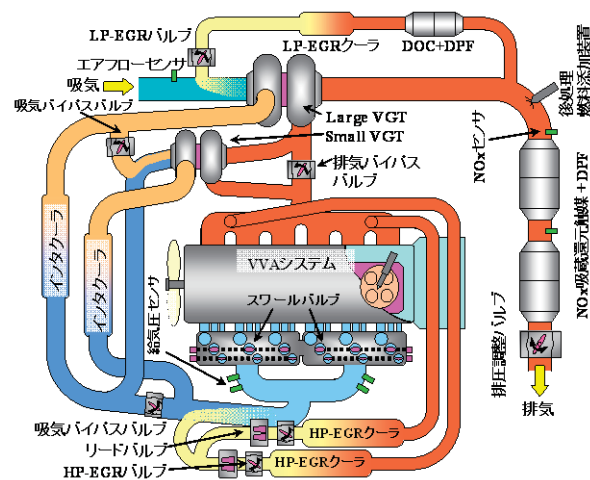


図3 SCDエンジンシステム構成図

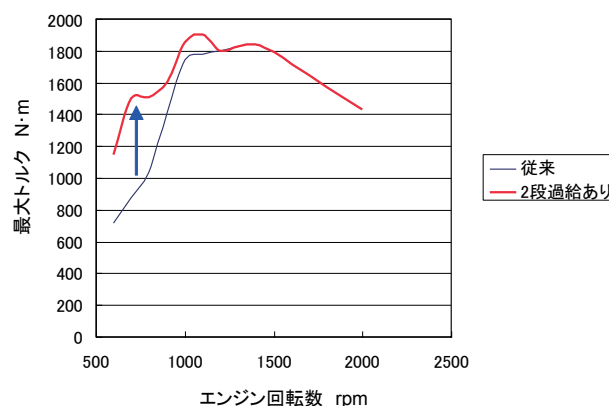


図4 2段過給機導入による最大トルク向上

の勾配を80km/hで登坂する場合、300kW以上を必要とする。この数値は、本クラスの平均的な最大出力値を約20kW上回る。したがって東名高速道路の走行を仮定した場合、御殿場や牧ノ原の登坂路には4%を超える勾配が少なからず存在することから、毎日複数回最高出力を使用する車両も多く存在するといえる。また、登坂は短時間であっても、燃料消費は莫大で、その部分で大幅な改善が可能であれば、全体への寄与

も少なくないと期待される。これがただちに費用対効果も含めて有効といえるかは明かでないが、先駆的な技術について効果を定量的に示すことは、業界全体の効率的発展に寄与しうるものと考えている。

現在は、ターボコンパウンドはシステム単体での性能試験等を実施しており、今年度末以降、SCD エンジンに組み込んで試験を実施していく予定である。

3. 3. 超高压（最大 260MPa）コモンレール式燃料噴射システム

これは、先の 2 つの技術と異なり、従来に対して新しい概念の導入となるものではなく、いっそうの燃料噴霧の微粒化や混合促進を図り、これまで地道に継続してきた燃焼改善について、より高い制御自由度をもたらすものである。最大 260MPa のコモンレール圧力は、現状世界トップレベルであるが、SCD エンジンでは、従来より 200～220MPa のコモンレール圧力で性能改善を図ってきており、圧力の上昇幅は必ずしも大きなものでない。インジェクターのノズル噴孔が同じ条件で燃料噴射圧力を上昇させると、噴射期間は短縮する。これは一般に PM 抑止に有利に働くが、短時間に多くの燃料噴射を行うことは、高負荷では急速燃焼による燃焼騒音や冷却損失の増加を招き、低負荷では噴射量ばらつきが拡大しやすいなど、性能低下につながる。そこで噴射圧力を上昇させる場合には、インジェクターのノズル噴孔径を小さくすることを併せて実施する。小径化もまた燃料噴霧の微粒化を促進するものであることから、いずれか一方では小幅な変化でも両者併せて、有効な改善をもたらすものと考えられる。本噴射系を使用した燃料噴射制御の最適化に加え、過給機や EGR との再適合も含めて 3～5% 程度の燃費向上を見込んでいる。

4. SCD エンジン研究の今後の方向

環境一般にいわれるキーワードとして「人にやさしい」「地球にやさしい」ことがしばしば取り上げられる。SCD エンジンでは無害といえるレベルを達成し、燃費（CO₂）も大幅に改善できる見込みで、それに応えるものといえる。一方で、プロジェクトを開始して以降 3 回に及ぶ排出ガス規制の強化が行われるなどディーゼルエンジンの進歩は顕著で、現在の 2009 年規制に適合したものでは、過給圧力などで SCD エンジンに比肩しうる状況にある。そこで、今回の改良で

は 2 段過給機等の導入を行ったが、その先となるとエンジンの改良のみでは、莫大なコストをかけても取り分の少ない状況になりつつある。にもかかわらず、さらなる CO₂ 低減は必須で、それに対するアプローチの一つとして燃料を含めた WTW（Well To Wheel）の視点が重要と考えられる。そのためにはバイオ系の再生可能エネルギーに由来する燃料の導入が必須となるが、供給量およびインフラ等を考慮すると軽油に混合した形が普及への障害を最小限度にできる。燃料性状としては、バイオマスなどから生成する合成軽油が、技術的障害が少ない。合成軽油は、セタン価が高いほか PM 生成につながる芳香族を含まない性状を有することから、それらを生かした新たな燃焼制御法などを研究開発していくことが重要性を増していく。この研究開発は、再生可能エネルギーに由来する燃料面の CO₂ 低減とのシナジー効果を産み出すもので、それぞれの CO₂ 削減効果の合計にプラスアルファをもたらすこと可能となる。それが、軽油の利便性を確保しつつ大幅な CO₂ 削減を加速する現実的かつ効果的な方法である。

さらに先のポイントを挙げるとすれば、経済的な面を含めて「負担を減らす」ことが鍵になると考えられる。2 段過給機にせよ超高压燃料噴射系にしる、性能向上へのポテンシャルを得たに過ぎず、それを生かすためには従来以上の試験、開発工数を必要とし、コストも上昇傾向にある。この先は、革新的技術の導入で負担が減らせることが、将来を見据えた発展を可能とするものであり、今後検討を行っていく。

5. ま と め

スーパークリーンディーゼル（SCD）エンジンでは、平成 19 年度までに「無害」といえる排出ガス性能を達成し、現在は燃費および CO₂ 削減に向けた研究開発を行っている。とりわけ、前年度より従来にない大幅な改造を行い、主要要素として

①2 段シーケンシャル過給機

②排熱回生システム

③超高压コモンレール式燃料噴射システム

を導入した。現在は、燃費基準+10%となる 4.5km/L を目標とした各種適合作業などを行っており、平成 23 年度の目標値達成を目指して研究開発を継続しているところである。