

EPA Interim Tier 4 排出ガス規制対応 小型ディーゼルエンジンの開発

Development of EPA Interim Tier4 Certified Small Diesel Engine



平岡 賢二*¹
Kenji Hiraoka

山田 哲*¹
Satoshi Yamada

井手 和成*²
Kazunari Ide

西澤 和樹*³
Kazuki Nishizawa

山田 知秀*⁴
Tomohide Yamada

岡島 昭英*⁵
Akihide Okajima

ディーゼルエンジンは他の内燃機関と比較して、燃料汎用性が高く、また、燃費に優れていることから、様々な産業機械の動力源として利用されている。一方で、排出ガス規制は年々厳しくなっており、定格出力 56kW 以上 75kW 未満では 2012 年より米国にて EPA Interim Tier4 排出ガス規制が開始されている。この規制では従来規制に比べて PM (Particulate Matter: 粒子状物質) 排出量を 1/20 以下に低減するなど、さらなる排出ガスの低減が求められる。そこで、従来規制対応機よりも排出ガス規制物質を低減しつつ、同時に低燃费率化を実現した EPA Interim Tier4 排出ガス規制対応エンジン D04EG を開発したので紹介する。

1. はじめに

ディーゼルエンジンは、燃料汎用性の高さや燃費の良さから、建設機械、農業機械など、様々な産業機械の動力源として利用されており、これまで当社は Tier3 排出ガス規制対応エンジン等を開発、商品化し、性能と信頼性に優れたエンジンをお客様に提供してきた⁽¹⁾。

一方で、日米欧を中心として制定されている排出ガス規制は年々厳しくなっている。図 1 に米国 EPA が制定しているオフロードエンジンの排出ガスに対する規制の動向を示す。

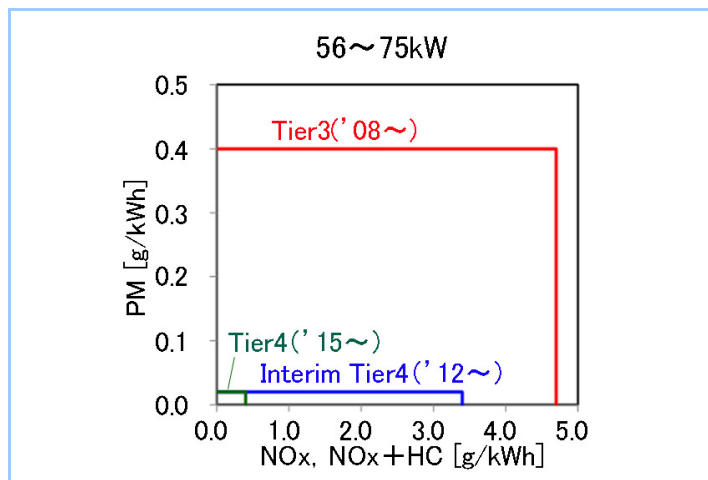


図1 米国 EPA オフロードエンジン排出ガス規制(56~75kW)
横軸について、Tier2, Tier3 は NOx+HC, Tier4 以降は NOx

*1 技術統括本部横浜研究所

*2 技術統括本部長崎研究所 室長

*3 技術統括本部横浜研究所 主席研究員

*4 汎用機・特車事業本部エンジン事業部エンジン技術部

*5 汎用機・特車事業本部エンジン事業部エンジン技術部 課長

定格出力 56~74kW クラスのエンジンの場合、2012 年より米国にて施行された EPA Interim Tier4 排出ガス規制では、従来のTier3 規制に対し排出ガス中の PM を 1/20 以下に低減する必要があるなど、より一層の排出ガス低減が求められている。また、EPA Interim Tier4 排出ガス規制では新たに NRTC(Non Road Transient Cycle) 過渡評価モードが追加され、定常運転時だけでなく、過渡運転時の排出ガスを評価する必要がある(図2)。

この規制に対応するために、燃焼室形状の適正化技術、CRS(Common Rail System:電子制御コモンレール式燃料噴射システム)による燃料噴射制御技術、過渡運転時の EGR(Exhaust Gas Recirculation:排出ガス再循環)制御技術、排出ガス後処理装置制御技術を開発し、これら技術を組み合わせることで、従来規制対応機より排出ガス規制物質を低減し、同時に低燃費率化を実現した EPA Interim Tier4 排出ガス規制対応エンジン D04EG を開発した。

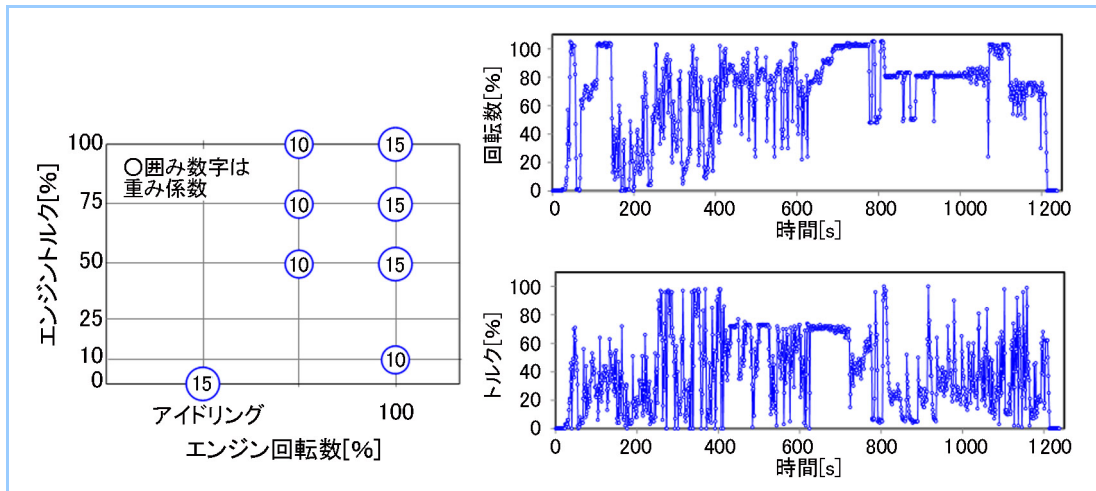


図2 C1 定常評価モード(左), NRTC 過渡評価モード(右)

2. D04EG エンジン諸元

今回開発した小型ディーゼルエンジン D04EG、及び、従来機の D04FR エンジンの諸元を表1に示す。D04EG では、従来機に対し低燃費率化を図るため、エンジン排気量あたりの出力を高めている。

表1 Tier3 規制対応機(D04FR)と InterimTier4 規制対応機(D04EG)のエンジン主要諸元

		Tier3 対応	Interim Tier4 対応
エンジンモデル名		D04FR	D04EG
ボア×ストローク	mm	102×130	94×120
気筒数		4	4
排気量	Liter	4.249	3.331
定格出力/回転数	kW/rpm	74/2000	74/2000
最大トルク/回転数	N・m/rpm	375/1600	375/1600
燃料噴射装置		コモンレール	コモンレール
過給機		過給機	WG 過給機
排ガス再循環		内部 EGR	外部 EGR
サイズ L×W×H ※1	mm	911×719×940	879×689×848
重量	kg	約 410	約 360

※1:エンジン単体での寸法。後処理装置は含まない。

図3に従来機との出力、燃費率の比較を示す。エンジンダウンサイジングによる摩擦損失の低減などにより、従来機に対し燃費率を5~8%程度低減することができている。また、外部 EGR システム、排出ガス後処理装置を採用することで、エンジン運転領域全体での排出ガス低減を図っている。

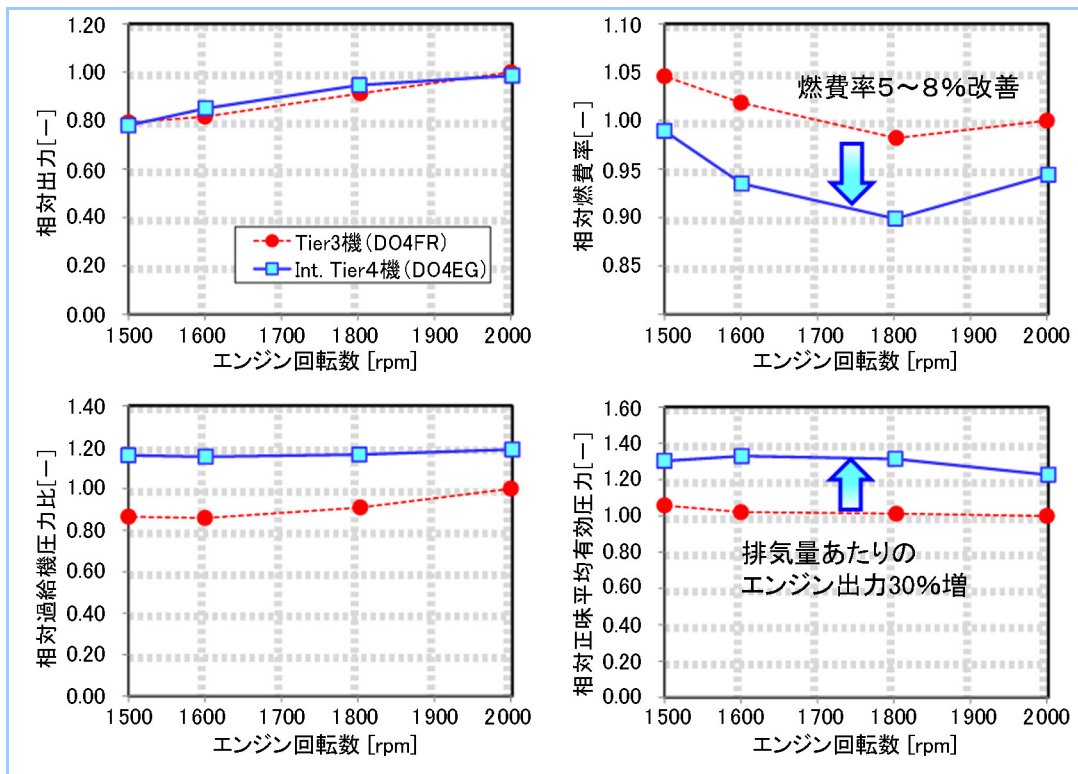


図3 Tier3 規制対応機 (D04FR) と InterimTier4 規制対応機 (D04EG) のエンジン性能比較
それぞれ D04FR 2000rpm での値を 1.00 とした場合の相対値を表示

エンジンサイズについては、外部 EGR システム、排出ガス後処理装置を追加したものの、エンジン本体のダウンサイジングにより従来機と同等のサイズに留めることで (図4)、車両のエンジン搭載スペースの変更を最小限に抑えている。

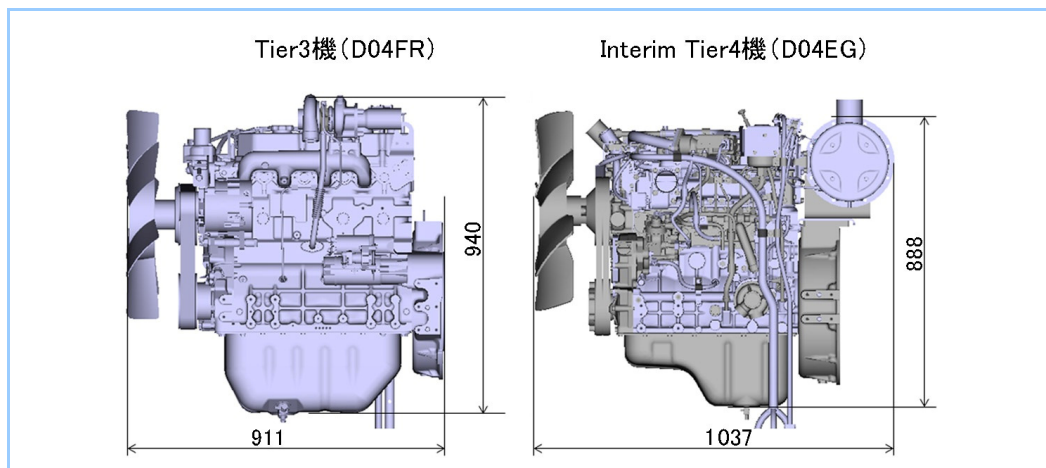


図4 Tier3 規制対応機 (D04FR) と InterimTier4 規制対応機 (D04EG) のエンジンサイズ比較

3. 排出ガス低減技術

エンジン排出ガス低減の手段として、CRS、EGR を採用し、さらに燃焼室形状の適正化を行うとともに、エンジンから排出されるPMを捕集、低減するためにDPF (Diesel Particulate Filter: PM 捕集装置) を採用した。これらの仕様、作動条件、制御手法の選定にあたり、数値シミュレーションや最適化手法を適用して効率的な技術開発に取り組んだので、詳細について説明する。

3.1. 最適化手法を活用した燃料噴射パターンの短期適正化

CRS、及び、外部 EGR システムの採用により、各エンジン運転状態に対応した燃料噴射パターン、吸気酸素濃度の緻密な制御が可能となった。CRS は、噴射回数、噴射時期、噴射量を自由

に制御することが可能であり(図5), また, 外部 EGR は EGR バルブの開弁量を制御することで吸気酸素濃度を自由に調整することが可能である. しかしながら, その組み合わせは数億通りにもなり, 全運転領域での燃料噴射パターンの最適化には多大な時間を要することになる.

そこで, 複数の制御パラメータを短期間で効率よく適正化するために最適化支援ツールを活用した. 直交表試験, 応答曲面モデル, 最適化手法を組み合わせたハイブリッド最適化手法を適用することで, 各運転状態に応じた最適な制御パラメータを短期間で選定できるようになった⁽²⁾⁽³⁾.

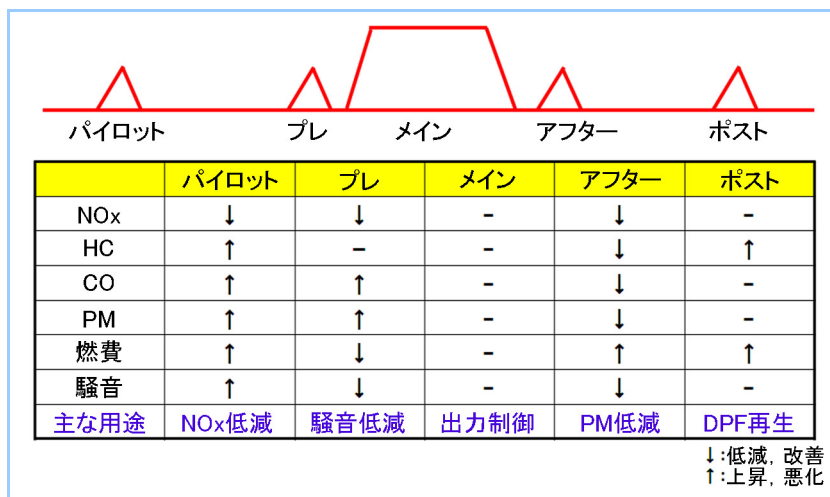


図5 燃料噴射パターンとその効果

3.2. EGR(排出ガス再循環システム)の採用と制御技術

燃焼室内でのNOx(窒素酸化物)生成量低減のため, D04EG では外部 EGR システムを新規に採用した. 排出ガスの一部を吸気に戻すことで, 燃焼室内部の酸素濃度を低減させている. これにより燃焼温度を下げるができるため, NOx の生成を抑制することが可能となる.

また, EGR によるNOx 生成量低減を効率良く実施するには, 各気筒へ均一に EGR を導入させる必要がある. そのため, 数値シミュレーションを用いて EGR 導入部の形状を適正化することで, EGR 導入量の気筒間バラツキを抑制している(図6).

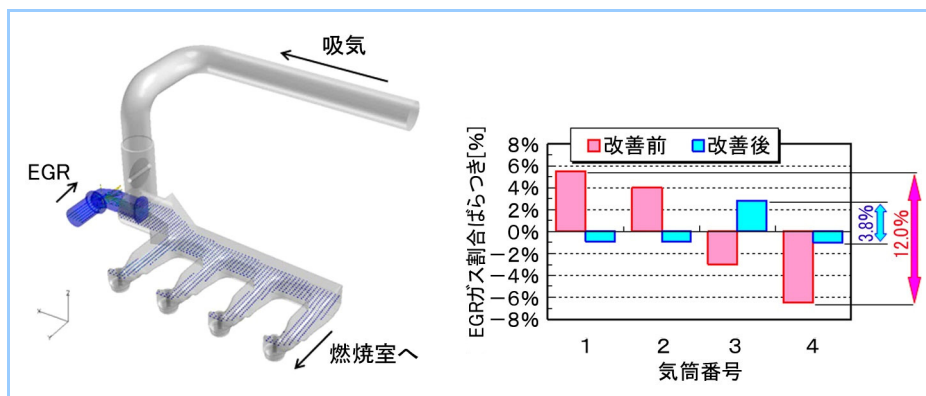


図6 EGR 導入部形状改善の数値シミュレーション結果

一方, EPA Interim Tier4 排出ガス規制で新たに追加された NRTC 過渡評価モードなど, エンジンの負荷が過渡的に変化する運転条件下では過給機の応答遅れなどにより, 燃焼室内の空気量が不足するため, PM 排出量が増大する. また, 吸排気圧力差が変化するため EGR 導入量も変化する. そのため, 過給機の応答遅れなどを考慮した適切な EGR 導入量の制御が必要となる. D04EG では, コンプレッサ(過給機)前に取り付けた AFM(Air Flow Meter:空気流入量計測器)により空気流量を逐次検出し, さらにインテークマニホールド部の圧力, 温度センサから, 時々刻々の空気過剰率(燃焼に必要な理論空気量に対する実際の供給空気量の割合)を推定

する制御ロジックを採用した。過渡運転時でも、空気過剰率が目標値となるようEGR流量をフィードバック制御することにより、過渡運転時のPM排出量増大を大幅に抑制することができる。図7に従来のオープンループ制御、及び、今回採用したフィードバック制御を用いた実機試験結果を示す。フィードバック制御によりPM排出量を低減できていることを実機にて確認した。

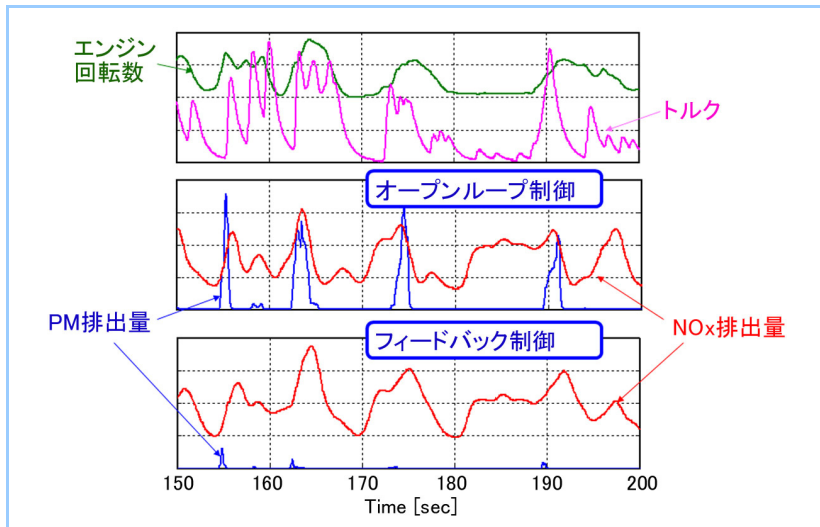


図7 フィードバック制御によるPM低減結果
フィードバック制御によりPM排出量を低減できている。

3.3. 数値シミュレーションによる燃焼室形状の適正化

燃焼室内でのPM生成量低減を図るため、燃焼室形状の見直しを実施した。従来は過去の試験データを元に、燃焼室形状を数種類決め、エンジン実機試験により、その中から最適な仕様を選定していたが、開発期間の制限もあり、必ずしも最適な形状を見いだせるとは限らなかった。そこで、今回、数値シミュレーションを用いて、燃焼室形状を机上で最適化する手法を適用することで、従来よりもPM排出量を低減できる燃焼室形状を早期に絞り込むことが可能となった。今回採用した燃焼室の数値シミュレーション結果を図8に示す。燃料弁から噴射される燃料が燃焼室内に広く分布するように燃焼室形状や燃料拡散方向を最適化することで、燃焼室全体の空気を有効に活用でき、その結果、PM排出量を低減することができている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

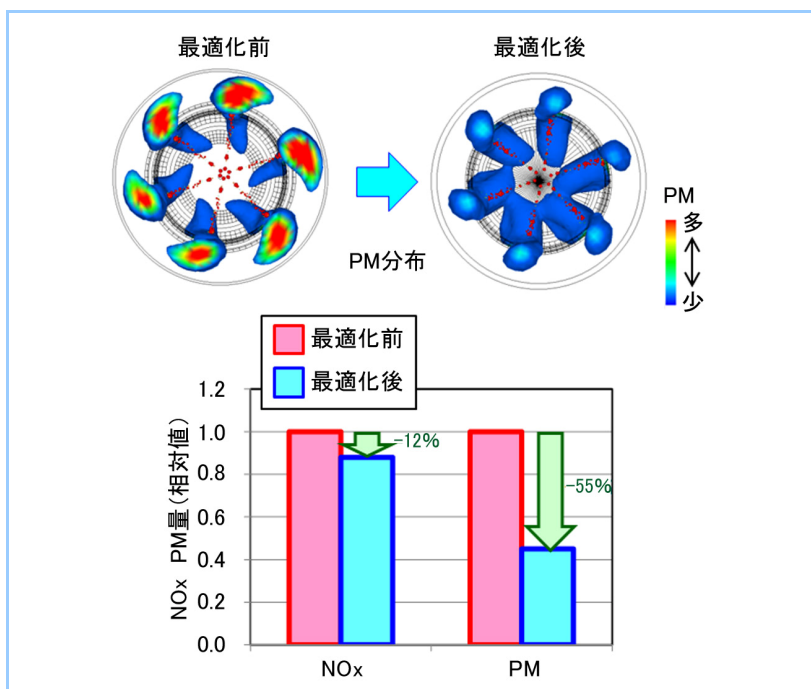


図8 数値シミュレーションによる燃焼室形状の適正化結果

3.4 排出ガス後処理装置と制御技術

PM 排出量の低減のために、D04EG ではDPFを採用している。図9に本エンジンの排出ガス後処理システムの概要を示す。DPFはエンジン本体から排出されたPMをフィルターで捕集することでエンジンシステム全体のPM排出量を低減することができる。DPFにて捕集されたPMは、排出ガス温度が一定温度以上の場合には連続的に再生されるが、この温度を下回る条件での運転ではPMがDPFに堆積するため、DPFに堆積したPMを定期的に燃焼させて除去するDPF再生が必要となる。

このため、DPF内部のPM堆積量を精度良く予測し再生時期を把握するとともに、PMの異常燃焼によるDPF焼損や、燃え残りなく再生する技術を構築した。PMの燃焼には、DPFに高温の排気ガスを流入させればよい。D04EGでは燃焼室内にてポスト噴射(エンジン排気行程中での燃料噴射)を行い、未燃燃料をDOC(Diesel Oxidation Catalyst:前段酸化触媒)にて反応させることで、DPF入口のガス温度を600℃前後に昇温する制御を行っている。

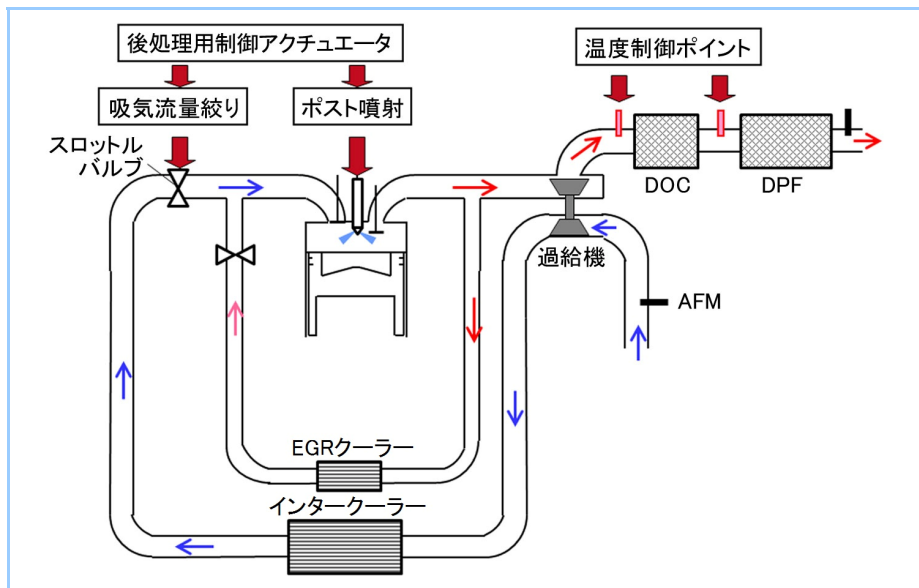


図9 排出ガス後処理装置の制御システム構成

4. まとめ

従来機よりも排出ガスを低減しつつ、低燃費率化を実現したEPA Interim Tier4 排出ガス規制対応小型ディーゼルエンジンD04EGを開発した。エンジン開発にあたっては、EGR、DPFなどの排出ガス低減技術だけではなく、数値シミュレーションや最適化技術を活用することで、燃焼室形状や燃料噴射パターンなど、設計・制御パラメータを効率良く最適化することができた。

D04EGは、EPA Interim Tier4、EU stage3bの認証取得を完了しており、2012年4月より量産を開始している。また、2015年より開始されるEPA Tier4 排出ガス規制についても、さらに多量のEGR、可変容量過給機、SCR(Selective Catalyst Reduction)脱硝技術を適用することで、対応可能であることを実機で確認している。

参考文献

- (1) 高井ほか、排気ガス3次規制適合小型エンジン、三菱重工技報 Vol.46 No.1 (2009) p.40~42
- (2) 佐竹ほか、燃料噴射制御の最適化によるディーゼルエンジン開発の迅速化
三菱重工技報 Vol.45 No.3 (2008) p6~9
- (3) 山田ほか、ディーゼルエンジンの最適制御パラメータ決定手法の開発
自動車技術会論文集 Vol.39 No.6 (2008) p131~135
- (4) 今森ほか、低排ガス・高信頼性ディーゼルエンジン開発に寄与する燃焼シミュレーションの取組み
三菱重工技報 Vol.48 No.1 (2011) p.72~p76
- (5) 平岡ほか、燃焼シミュレーションによるディーゼルエンジン燃焼系最適化手法の開発、自動車技術会論文集 Vol.41 No.1(2010) p.97~102