

日・米・欧の排出ガス規制対応技術

岡崎 達・田村 好美

ディーゼル機関は、信頼性・耐久性が高く、小型から大型まで広い範囲で出力が得られることや機関の高い熱効率から建設機械の動力源として従来から広く使用されている。しかしながら建設機械においても1996年以降日米欧で排出ガス規制が開始され、現在では中国を始めとした他の国々でも排出ガス規制が実施されるようになってきている。もともと建設機械はグローバルな商品であるので、排出ガス規制は世界的に共通な測定モードと測定方法のもとで基準値が検討されてきている。

特に2011年以降の新しい規制への対応については新技術の導入が不可避であり、エンジン性能および信頼性・耐久性を維持向上するための方策や故障診断システムの充実が従来に増して重要になってきている。
 キーワード：建設機械，ディーゼルエンジン，排出ガス規制，後処理装置，窒素酸化物，パーティキュレート

1. はじめに

(1) 日米欧の排出ガス規制

米国連邦環境保護局(EPA:Environmental Protection Agency)は乗用車、トラックの排出ガス規制に続き建設機械に対してはノンロードディーゼルエンジン規制として1996年から規制を開始し、欧州連合(EU)においても同時期にノンロードディーゼルエンジンに対しての排出ガス規制が開始されている。日本においては同時期に当時の建設省(現国土交通省)が「排ガス対策型建設機械指定制度」により直轄工事に対する使用規制として同様な基準値を導入して規制への先鞭をつけた後、建設機械・産業機械・農業機械等の

オフロード用機械については特定特殊自動車として排出ガス規制が法制化され、日米欧で同様の排ガス規制が実施されるようになった。図-1に示すように1996年から5年毎に強化されてきた排出ガス規制は、2006年からは第三次規制(米国ではTier3, 欧州ではStage III A, 日本では平成18年規制)が開始され、2011年からは第4次と称される新しい規制(米国ではTier 4 interim, 欧州ではStage III B, 日本では平成23年規制)が導入されて新しい段階を迎えている。2011年からの規制ではパーティキュレート(以下PM)が第三次規制の1/10にまで低減され、また三年後の2014年から始まる次期規制では窒素酸化物(以下NOx)が第三次規制の1/10まで低減されることになり、

		NOx / PM, *NOx+NMHC / PM, **NOx+HC / PM (g/KWh)													
		kW	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
●	19...<37	8.0/0.80				6.0/0.4				4.0/0.03					
	37...<56	7.0/0.40				4.0/0.3				4.0/0.025					
	56...<75	7.0/0.40				4.0/0.25				3.3/0.02					
	75...<130	6.0/0.30				3.6/0.2				3.3/0.02					
	130...<560	6.0/0.25				3.6/0.17				2.0/0.02					
★	<19	9.5/0.8	*7.5/0.8				*7.5/0.4								
	19...<37	*7.5/0.6				*7.5/0.3				*4.7/0.03					
	37...<56	*7.5/0.4				*4.7/0.3				*4.7/0.03					
	56...<75	*7.5/0.4				*4.7/0.4				3.4/0.02					
	75...<130	*6.6/0.3				*4.0/0.3				3.4/0.02					
	>560	*9.2/0.54				*6.4/0.2				3.5/0.1					
★	19...<37	8.0/0.8				**7.5/0.6									
	37...<56	7.0/0.4				**4.7/0.4				**4.7/0.025					
	56...<75	7.0/0.4				**4.7/0.4				**4.7/0.025					
	75...<130	6.0/0.3				**4.0/0.3				3.3/0.025					
	130...<560	6.0/0.2				**4.0/0.2				2.0/0.025					
		Tier1	Tier2	Tier3 / Stage3A				Tier4 Int / Stage3B				Tier4 final / Stage4			

図-1 日米欧の排出ガス規制

今後数年間のうちに建設機械用エンジンからの排出ガスは一桁変わるほどの大幅低減が図られることになる。

(2) 建設機械用エンジンの排出ガスの測定

建設機械用ディーゼル機関の排出ガス測定モードは使われ方の違いから自動車用とは異なったモードが設定され、従来からISO8178のC1モードと呼ばれる定常8モードでの測定モード(図-2)が採用されていた。2011年からの新規制では、ノンロードトランジェントサイクル(図-3)と呼ばれる過渡状態での測定モードが追加され、両者のモードでの測定結果がそれぞれ規制値を満足している必要がある。約1200秒に及ぶサイクルは、ホイールローダー、スキッドステアローダー、農業機械、油圧ショベル等々の実機に基づいたモードが組み合わされて成り立っている。排出ガス低減のための技術開発もさることながら、新しい測定モードと測定方法の導入は小型から大型までの幅広い出力範囲をカバーする建設機械用エンジンの開発においては計測設備の設置それ自体も大変な作業となっている。また2011年以降の大幅な排出ガスの規制値強化への対応として、NO_xあるいはPM低減のための後処理装置の採用が必須となっており、これへの配慮として日米欧では燃料の低イオウ化が義務付けられてオフロード用エンジンの燃料としても自動車用と同様に触媒の採用が可能なレベルまで規格が変更されている。

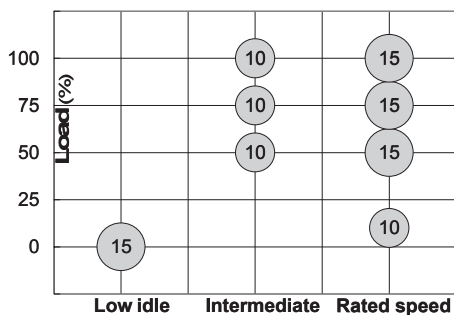


図-2 ISO8178 C1モード

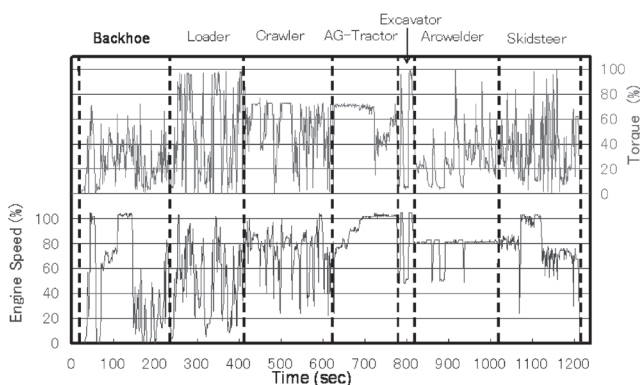


図-3 ノンロードトランジェントサイクル (NRTC)

2. 排出ガス規制対応技術

(1) 排出ガス規制対応技術 (~ 2010)

排出ガス規制の強化に伴い規制値に応じた低減技術の導入がエンジンに要求されることになるので、建設機械の排出ガス低減対応技術は段階的に大きく変化してきている。前述の通り建設機械は出力範囲が非常に広いことや使われ方および使われる環境が異なるので原理原則はともかく自動車用の技術やコンポーネントをそのまま建設機械に使えないものが多々あり、対応技術も自動車用と異なっていたり、エンジンサイズにより異なった仕様のものであり状況に応じて最適化が図られている。出力が130 kW ~ 560 kWクラスの機関について規制対応技術を述べると第二次規制(2001年~)までのエンジンの対応技術はエンジンの燃焼改善を柱として吸排気系(過給および給気冷却など)の改善により達成してきた。第三次規制(2006~)対応からはNO_xとPMの低減を両立させるためにこのクラスのエンジンでは、噴射系の改善(噴射圧の高圧化と噴射時期の電子制御化、マルチ噴射化)と排出ガス再循環システム(以下EGRシステム)の導入が多く多くの機関でなされてこれらをトータル制御するべくエンジンの電子制御化が一気に進んで現在に至っている。

NO_xとPMの低減のためには燃焼温度の低減とすすの少ない燃焼を目指す必要があるが、前者のためにはEGRシステムが、後者のためにはコモンレール噴射システムのようなパイロット噴射やポスト噴射が可能なマルチ噴射機能を備え、噴射圧・噴射時期が自由に変えられる電子制御式高圧燃料噴射システムが非常に有用である。130 kWを超えるエンジンの多くがこれらのシステムを採用し電子制御を導入することによって、温度や高度等の環境対応を含めたエンジン性能の向上と排出ガスの低減の両立を図ることが可能となった。第三次規制対応においては一部にEGRシステムを採用せず燃焼改善のみで対応したエンジンも見られるが、給気冷却器付過給エンジンを基本に前述のEGRシステムと電子制御式高圧燃料噴射システムを採用したエンジンが主流となっており、EGRシステムとしては再循環するガスを冷却して吸気側に戻すクールドEGRシステムが多く採用されている。

2011年から始まる第四次規制対応の車両は、現時点ではまだ市場導入には至っていないので各社の詳細は不明であるが低減技術の概要について以下に述べる。

(2) 排出ガス規制対応技術 (2011 ~)

第3次規制対応に対してNO_xを半減しPMを1/10

にまで低減するためには大きく分けて二通りの方策が考えられている。

第一は第三次規制対応で多くのエンジンが採用している EGR システムと電子制御噴射システムを基本的に継承し、EGR システムの排出ガスの循環量 (EGR 量) を増やして NO_x を半減すると共に PM 低減のためにパーティキュレートフィルタと呼ばれる後処理装置を新たに導入するという組み合わせである (図—4, 9, 10)。

EGR 量を増大し且つ自由に EGR 量を調整可能にするためには単に EGR 用の調整バルブの制御能力を向上させるだけではなく過給装置を可変化 (可変ターボチャージャ) とするなどの機能向上も合わせて必要である。また EGR 量増大に伴う燃焼の悪化、特に PM の悪化に対しては燃焼室形状の見直しや噴射系能力の向上による燃焼の改善で悪化前のレベルまで戻すことが必要である。後述の通りコモンレール燃料噴射システムにおいては規制の強化に伴って高噴射圧化への開発が進められ、2011 年からの規制対応エンジンでは 200 Mpa レベルにまで噴射圧が高められて PM 低減に非常に大きな寄与をしている。各コンポーネントの改良によってエンジン出口での排出ガスレベルは、第三次の規制レベルに対して NO_x が半減され、PM については同等レベルにまでに回復した排出ガスは後処理装置によって約 1/10 まで PM が低減され、結果として 2011 年規制レベルの排出ガスにまで浄化される。本方策は 2006 年からの第三次規制対応技術をベースに更に各コンポーネントを改善すると共に新たに PM 低減のための後処理装置を追加して導入するシステムであり、多くのエンジンメーカーが本方策で規制対応している。

第二の方策はまず PM の低減に対してあくまで燃焼改善により規制値レベルまで低減し、NO_x については後処理装置を導入して規制値まで低減するという方策である (図—4)。PM を規制値レベルまで燃焼改善にて改善するためには先に述べた方策と同様に電

子制御による高圧噴射システムを活用すると共に燃焼のマッチングを NO_x-PM トレードオフ上で低 PM となるようにマッチングさせることで達成している。結果として第三次規制レベル以上に増大した NO_x は後処理装置によって規制値レベルまで低減する。NO_x の後処理装置としては近年トラック等で実用化されている還元剤として尿素を用いた SCR と呼ばれる脱硝触媒を使ったシステムが主に採用されている。

2011 年からの第四次規制対応については上述の通りそれぞれ新技術の導入が必須であり、これらの新技術はシステムとしての開発が必要である。第一の方策では後処理装置での「PM を溜める」「PM を燃やす」という基本的な機能に対して、PM の量を検知し適当な時期に適当な環境の下で自然にまたは強制的に適宜且つ適当に燃焼させることが重要である。建設機械のようにエンジンの負荷変動および回転速度変動が大きく、様々な環境で使われることを想定したシステムとして作り上げることは自動車用とは異なったソフトとハードが必要である。一方第二の方策では NO_x 低減のための後処理装置の導入が必要となり、この方策では還元剤となる尿素タンクが必要となるばかりでなく低温での流動性の悪さからヒーターによるタンクおよび配管系の加熱または保温が必要である。道路を走る自動車と違い様々な場所にて稼働する建設機械については還元剤の供給についても燃料供給と同等以上の設備が必要となるのでインフラの整備が技術開発と合わせて重要である。

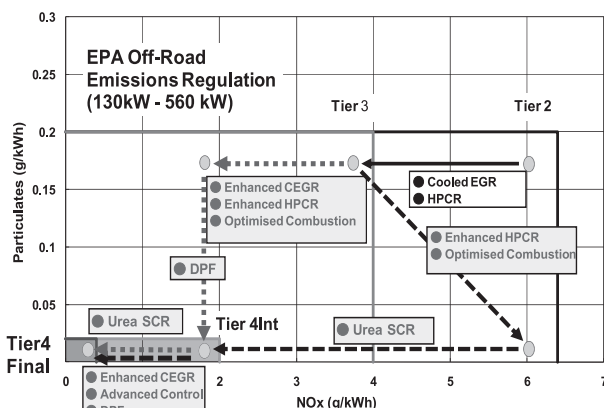
NO_x 低減の後処理装置については 2014 年からの規制対応に多くのエンジンメーカーが導入を予定しており、ここ数年間でのインフラの整備が急務である。またこのような排出ガス低減の技術開発と並行して、エンジンとして基本的に重要な性能・信頼性・耐久性・サービス性・メンテナンス性などの維持向上もなされている。

排出ガス低減のキーコンポーネントについては以下に述べる。

3. 排出ガス規制対応技術 (コンポーネント)

(1) 排出ガス再循環システム (EGR システム)

排出ガスを不活性ガスとして吸気と共にシリンダー内に導き、燃焼時の熱容量を増大させることによって燃焼温度を下げることで NO_x を低減することをねらいとしたシステムである (図—5)。建設機械用としては 2006 年第三次規制から導入されており、本システムの特徴は燃料消費の悪化を抑えつつ NO_x の低減が可能となることである。第四次対応エンジンではよ



図—4 排出ガス規制対応技術

り大量の EGR が必要となることから後述の過給システムの改良（可変ターボチャージャの採用）と EGRクーラーの大容量化および高効率化が図られている。また EGR 量増大による各部の摩耗や腐食への対応またオイル劣化への対応など信頼性・耐久性の観点から各部の改善が図られている。

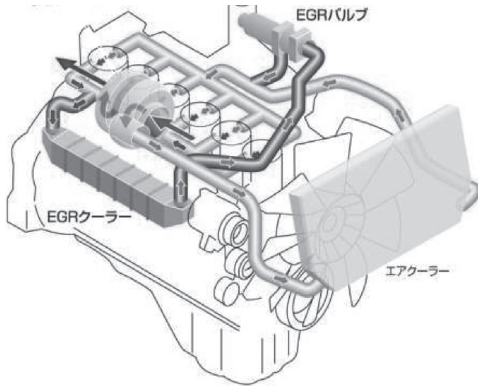


図-5 エアハンドリング

(2) 可変ターボチャージャ

ターボチャージャのタービン側の羽根への通路面積を変えることによりタービンのマッチング特性を変化させて、排出ガス特性とエンジン性能の両者を改善することが狙いである（図-6）。

通常のターボチャージャの特性を固定ではなく状況によって変えることが可能となれば EGR 制御の精度と自由度を上げることができるだけでなく、建設機械にとって重要な過渡特性に対しても改善することが可能である。建設機械にとっては負荷変動に対するエンジンの応答性は重要な特性であり、排出ガス規制の開始に伴い PM の低減や NOx 低減に重要な EGR の制御特性との絡みからその改善は難しいものとなっていたので本機能の導入は非常に効果的である。しかしながら一方で高度や気温など特殊な環境下やエンジン回転および負荷の急激な変動を伴う使われ方をする建設機械に装着され

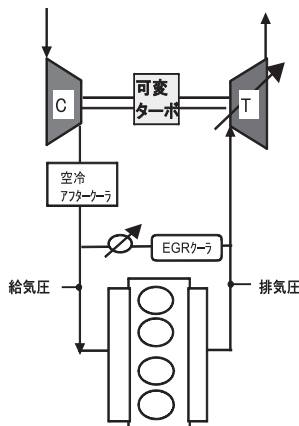


図-6 エアハンドリングシステム

るターボチャージャは信頼性と耐久性を確保することが非常に難しく可変ターボチャージャについてはこれまで建設機械では積極的に導入されてこなかった経緯があったことも事実である。図-7はベーンをスライドさせてタービンの通路面積を変化させるタイプの例を示しているが、このように可変化の方策や材質・形状に工夫を凝らしての建設機械用への導入が進められている。

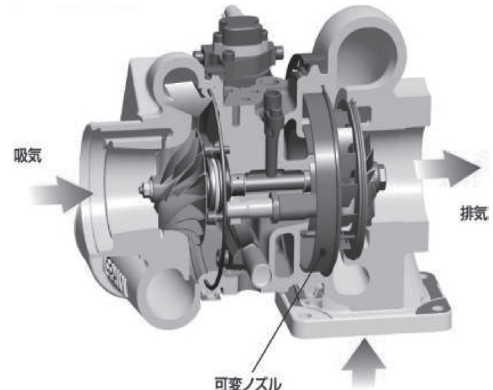


図-7 可変ターボチャージャ

(3) 電子制御式高圧燃料噴射システム

燃料噴射システムとしては、コモンレールタイプの採用が中大型への普及に続いて小型にまで普及してきている。従来と比較すると、2001年第二次規制では噴射圧が120 Mpa程度であったものが2006年第三次規制では160 Mpaへ、そして2011年からの第四次規制では200 Mpaまで高圧噴射が可能となり、噴射率の増加や噴射の分割化（マルチ噴射）が図られて、噴射率および噴射時期の可変制御の自由度が大幅に増している（図-8）。

このような噴射系の機能向上は単に排出ガスの低減に寄与するだけでなくエンジンの低温時を含めた始動性、環境（温度、高度）への対応、後処理装置への排ガス温度のマネージメント、酸化剤または還元剤としての HC 供給装置の役割など従来噴射系とは大幅に異なった役割を担っている。

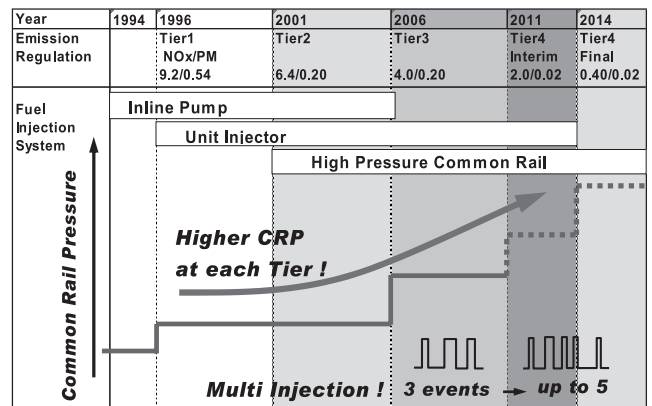


図-8 コモンレール燃料噴射システム

(4) 排出ガス後処理装置

2011年からの排出ガス規制においてPMは第三次規制に対して1/10にまで低減しなければならないので後処理装置前のエンジン出口のPMレベルを第三次規制並の0.2g/kWh以下に維持すると新たに導入する後処理装置はPMを90%以上捕捉する(結果としてPMが0.02g/kWh以下となる)必要がある。すす(PM)をフィルタで捕捉し続けると詰まってしまうので、あるレベルまで堆積すると溜まったPMを燃焼させて除去する仕組みをシステムとして組み込んでいる。その方策としてはバーナーを使ってフィルタ内温度をPMが燃焼するレベルまで上げて燃焼させる方法や酸化触媒を用いて供給燃料を酸化させて升温しPMを燃焼させる方法などが採用されている(図-9)。

図-10は酸化触媒を使って温度制御を行うシステムを示す。酸化剤としての燃料は上流側で噴射されフィルタ内の酸化触媒出口温度が目標温度となるように制御されPMを燃焼させる。また通常は排出ガス中のNOは酸化触媒により酸化されNO₂となって、比較的低温でのすすの燃焼(酸化)に寄与(自然再生と呼ばれる)し、フィルタ内のすす堆積を低減している。

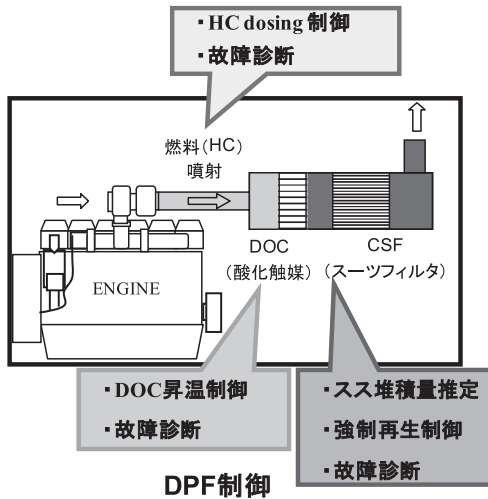


図-9 PM低減のための後処理装置(DPF)

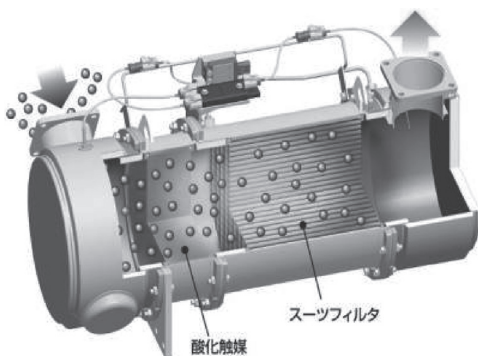


図-10 パティキュレートフィルタ

(5) 電子制御

燃料噴射装置の可変性と電子制御化が進み、燃料噴射量、噴射時期、噴射圧の電子制御が可能となり、EGRシステムはEGRバルブの制御と可変ターボチャージャの電子制御化により精度よくEGR量を制御できるようになった。またPM低減のための後処理装置についても同様に温度・圧力等の情報を採取して、それに基づくシミュレーションを行ってシステムの制御を行っている。電子制御の導入は、単に各システムの制御性の向上だけでなくエンジントータル制御こそが最大のメリットである。排出ガスの低減を含めて環境変化や使われ方に応じたエンジンの最適制御が可能となっている。更にエンジンばかりでなく車両とのトータル制御を図ることで車両としての機能・性能の向上は勿論のこと電子制御の高機能化をすることで、排気ガス性状維持のためのメンテナンスや故障診断に対しても大きな威力を発揮することになり、車載ネットワーク経由で車両の稼働情報を収集しデータ送信を行うことができるようになっている。

4. おわりに

ディーゼル機関はまだ建設機械においては不可欠な動力源であり、一方で大気環境負荷への対応も重要なことは充分認識している。発展途上国の経済成長には目を見張るものがあるが同時に環境にも充分配慮していくことは我々にとっても当然の使命である。世界各国の政府を始め、建設機械の供給メーカ、機械を使うお客様、それをサポートするサービス代理店までが一体で、国際的環境対策に取り組んでいくことを切望する。

JICMA

【参考文献】

- 1) 中央環境審議会 第六次、九次答申
- 2) ディーゼルエンジンテクノロジー 2006年4月号「コマツECOT3エンジンの最先端テクノロジー」、山海堂

【筆者紹介】



岡崎 達(おかざき とおる)
 ㈱IPA
 エンジン事業本部



田村 好美(たむら よしみ)
 ㈱小松製作所
 エンジン事業本部 企画室