

ディーゼルエンジンの排出ガス規制対応技術の現状と将来

藤井恒介

大気汚染防止、低公害化への取組みは、自動車用エンジンが先行していたが建設機械分野のエンジンにおいても低公害化の対応が精力的に展開されつつある。ここでは自動車用及び建設機械用エンジンの排出ガス規制の動向、排出ガス低減技術の現状と将来、建設機械第3次排出ガス規制対応技術について記す。

基本的には燃料噴射圧の高圧化、ターボ過給、給気冷却、等々の燃焼技術開発によって、本来エンジンが備えるべき性能、機能、経済性、信頼性、耐久性の向上と共に排出ガス低減を図ってきた。今後更なる排出ガス低減のために、電子制御の拡大、EGR装着、後処理装置等々の研究開発が進んでいる。

キーワード：大気汚染防止、公害、ディーゼルエンジン、排出ガス規制

1. 排出ガス規制の動向

日本における大気汚染の問題は昭和40年代(1960年代)、東京の杉並区で窒素酸化物(NO_x)が原因とされている光化学スモッグによって、学生が朝礼中に頭痛を伴い倒れた事件に端を発し、本格的に注目されるようになった。以降、大気環境の改善に、現在の環境省を主軸として設定された環境基準値を満足すべく、排出ガスの移動発生源である自動車用エンジンを対象とした排出ガス規制が制定された。

日本における最初の排出ガス規制は昭和49年(1974年)に実施され、以降段階的に規制が強化されてきている。排出ガス低減技術開発に伴い、規制が無かった1960年代に比べディーゼルエンジンの窒素酸化物(NO_x)排出量は26%にまで低減、微粒子状物質(Particulate matter, PM)の排出量は28%にまで低減してきている(図-1参照)。

今後、2005年頃までに窒素酸化物(NO_x)は10%、微粒子状物質(PM)は4%にまで低減を図るべく、各社共に低減技術の研究開発を鋭意推進している。これを達成することで世界トップレベルの、低排出ガスディーゼルエンジンとなる。

建設機械用エンジンにおいても排出ガス規制が実施され、通称1次規制に対しては各メーカー共に

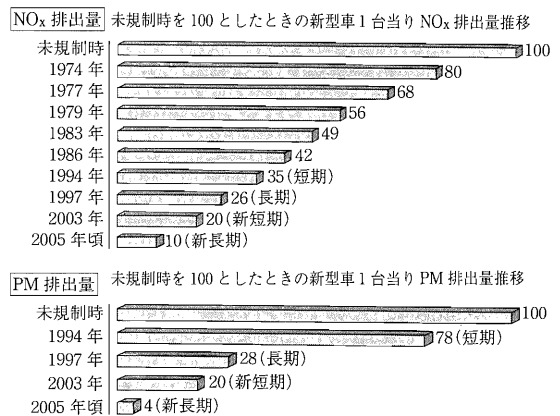


図-1 ディーゼルエンジンのクリーン化の経緯

対応を終え、2次規制、更に3次規制をどう対応して行くべきか模索中である。

図-2に自動車用と、建設機械用エンジンの各国の排出ガス規制値の比較を示す。

建設用エンジンの排出ガス規制は自動車用と若干異なり、出力レンジによって規制値及び実施時期が違っている。微粒子状物質(PM)の規制値は2次と3次規制とで同一であるが、窒素酸化物(NO_x)の規制値が3次規制で強化される予定である。

建設機械用エンジンの2次規制の対応は、出力129kW以下については、自動車用のEuro-Iまたは米国'91対応の技術、130kW以上については、Euro-IIまたは日本の長期規制対応技術の

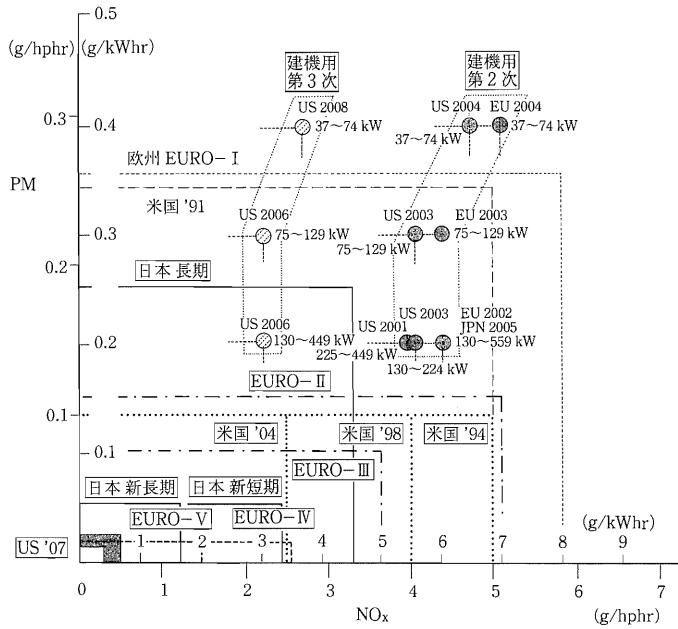


図-2 自動車用と建設機械用エンジンの排出ガス規制値の比較

応用となる。

3次規制対応は、129 kW までは日本の長期規制対応相当の技術、130 kW 以上は日本の新短期規制相当の技術が基本となる事が図-2 から読取れる。しかし建設機械用エンジンは実際に市場で使用される燃料を十分に考慮にいれたうえで対応技術の選択が必要となる。

2. 排出ガス低減技術の現状

排出ガス低減技術は大きく分けると、燃焼の改善と燃焼改善以外に分類される。燃焼改善の考え方は図-3 に示すように、吸入空気量の増大と、吸入した空気と噴射された燃料をいかに最適に燃焼させるかがポイントである。

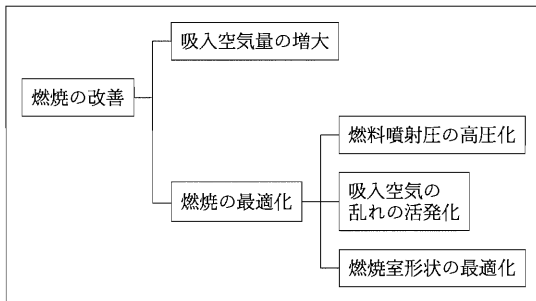


図-3 燃焼改善の考え方

(1) 吸入空気量の増大技術

吸入空気量増大を図る有効な方策の一つに4弁化構造がある。ディーゼルエンジンにおいては吸入空気量と共に、吸入された空気のシリンダー内における流動が燃焼を改善させる重要な要因である。

吸気ポートの代表的な形状はヘリカルとダイレクショナルの2種類があり、それらの組み合わせを種々変えて、スワール比と流量係数の関係について実験した結果を図-4 に示す。

流量係数を低下させずに狙いとするスワール比を得るための、吸気ポートの配置及び形状の組み合わせを最適化することにより、燃焼の改善が図れ

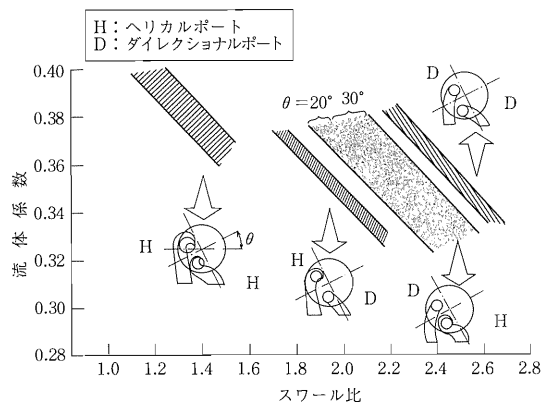


図-4 4弁ポート形状とスワール比/流量係数の関係

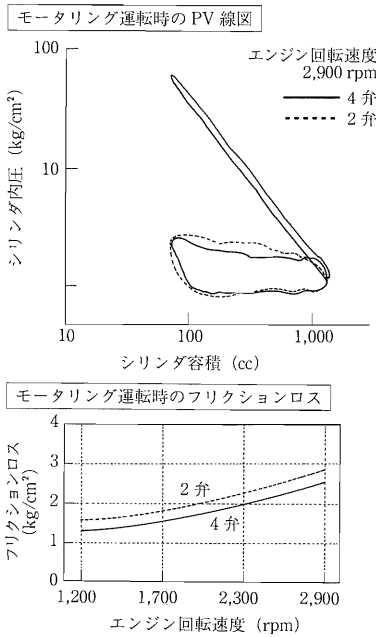


図-5 2弁と4弁のポンピングロス及びフリクションロスの比較

る。4弁構造は吸入空気が増大が図れるだけでなく、吸排気工程におけるポンピングロスの低減が図れ、燃費改善にも有効である(図-5参照)。

更に4弁構造は燃料噴射ノズルをシリンダの中心に垂直に装着できるため、噴射ノズルの各噴口からの燃料噴射が均等になるので、燃焼過程において2弁構造のエンジンに比較し局所的な温度上昇が少ないので窒素酸化物(NO_x)の排出量が低減する。4弁と2弁構造の燃焼ガス温度分布をKIVAプログラムでシミュレーション計算した結果を図-6に示すように4弁構造の方が燃焼最高温度を低く押さえられる事がわかる。

空気量増大の代表的手段はターボ過給である。ターボ過給は出力向上の手段として有効であるが、給気温度の上昇に伴い窒素酸化物(NO_x)の排出量が増大する欠点がある。ターボ過給により増大した分の窒素酸化物(NO_x)を低減するために、噴射時期の遅延が必要となる。結果として燃費増加が避けられず、ターボ過給は排出ガス低減の方策としては得策でない。

ターボ過給の欠点を補った技術がターボ過給インタークーラエンジンであり、低排出ガス、燃料経済性の面から大型車両用のディーゼルエンジンはターボ過給インタークーラエンジンに急速に置

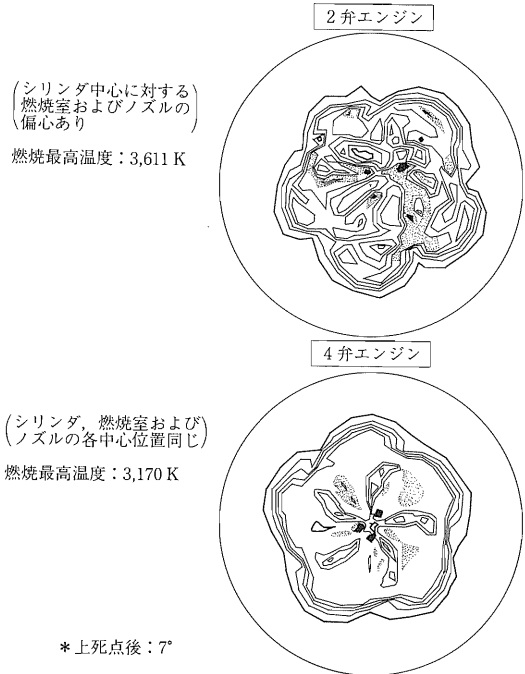


図-6 噴射ノズル位置の変更による燃焼温度の均一化

換わりつつある。

(2) 燃料噴射圧の高圧化

燃料噴射圧の高圧化はディーゼルエンジンの黒煙、微粒子状物質(PM)排出量低減、さらに燃費低減に有効であり、かつ必須技術である。

図-7に噴射圧と燃焼特性の関係を示すと

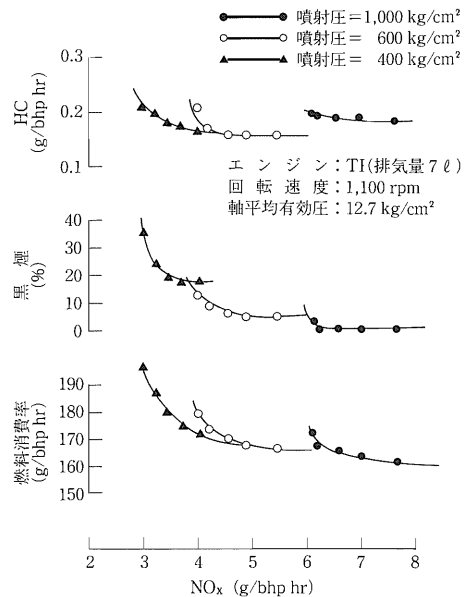


図-7 噴射圧アップに伴う燃焼特性の変化

り、高圧化に伴い黒煙及び燃料消費率は改善するが、単純な高圧化は窒素酸化物 (NO_x) 排出量が増加するデメリットを伴う事を示している。

高圧化に伴う窒素酸化物 (NO_x) の排出量増加を押さえるには、噴射時期の最適化、初期噴射率の低減、噴射率の制御がある。列型噴射ポンプの初期噴射率低減技術として図-8に示す定残圧弁 (CPV) が、一部のエンジンで採用されている。また2段開弁圧ノズルホルダも、初期噴射率の低減に有効である。さらに噴射率制御を電子制御により行う可変プレリフト列型ポンプ (Bosch TICS) も、窒素酸化物 (NO_x) 及び微粒子状物質 (PM) の両成分低減に有効である。

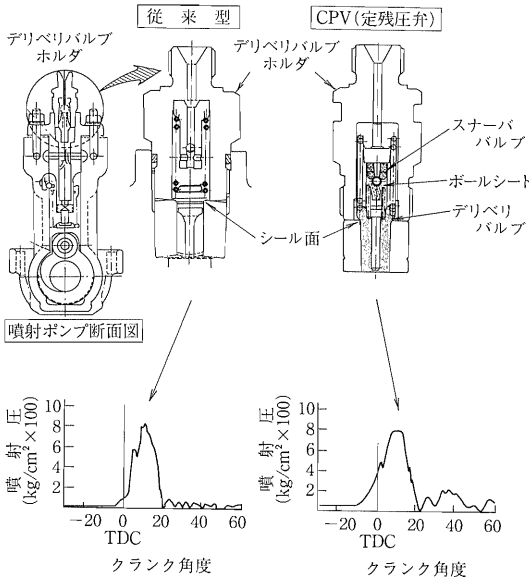


図-8 定残圧バルブ (CPV) と従来バルブの構造及び噴射圧波形の比較

低排出ガス燃焼のために噴射装置に要求される重要な機能は、高圧噴射、特に低速回転域での高圧化、噴射時期制御の自由度、噴射率制御、パイロット噴射及びポスト噴射の自由度等があげられる。このような要求機能に対して高いポテンシャルを有しているのが共通レール式噴射装置である。共通レール式の噴射装置は、デンソーと日野自動車とで共同開発し低公害中型エンジンに装着して、1995年に商業トラック用としては世界で初めて発売した。

共通レール噴射装置の概念図を図-9に示す。従来の列型噴射ポンプと共通レール式の噴

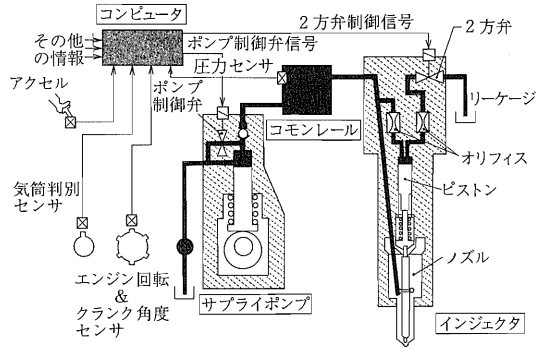


図-9 共通レールシステムの概念図

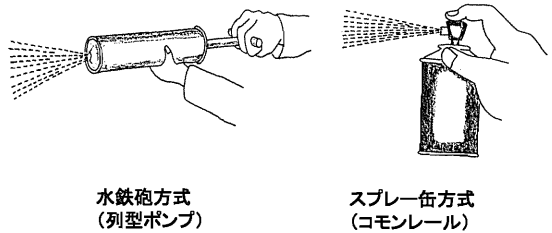


図-10 噴射特性イメージの比較

射特性の違いをイメージで表現すると図-10に示すように共通レール式はスプレー缶に相当する、缶 (共通レール) に蓄圧した燃料を電磁弁の開閉制御により任意の時期に任意の量噴射させる事が可能で、さらにパイロット噴射、ポスト噴射等カム駆動の列型ポンプでは技術的に困難な噴射が容易に可能となり、将来の噴射装置として要件を満たす能力が極めて高い。

図-11に共通レール噴射装置の効果の一例を示す。燃料を共通レール内に高圧で蓄圧してあるため極低速回転域でも高圧噴射が可能となり黒煙の低減が図れ、結果として低速域のトルク増大が可能である。またパイロット噴射により大幅にエンジン騒音の低減も可能となる。

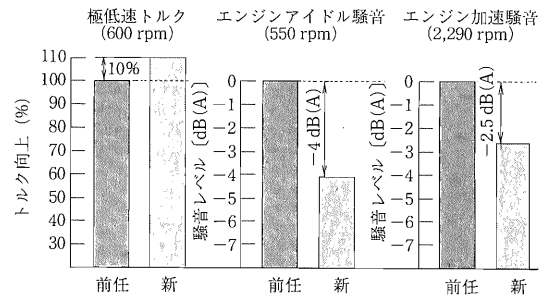


図-11 エンジン性能、騒音に対する共通レール噴射装置の効果

(3) 燃焼室形状の最適化

吸気ポート、燃料噴射装置について述べてきたが、燃焼室の形状も燃焼改善に重要な要素を占める。図-12に燃焼室の形状の相違による、燃焼室内の空気流動エネルギーの保持度合いをシミュレーション計算した結果を示す。ピストン上死点後における空気流動エネルギー保持度合いの高い燃焼室形状が燃焼改善、特に黒煙、微粒子状物質(PM)低減に有効である。

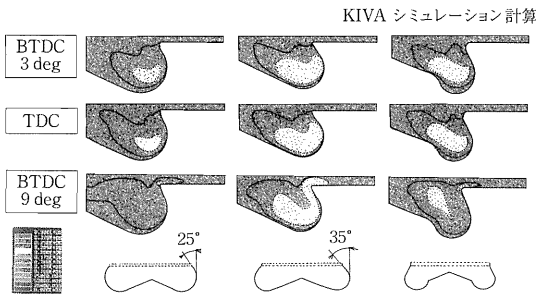


図-12 燃焼室形状による乱れエネルギーの相違

3. 今後の排出ガス低減技術

今後の排出ガス低減技術は、前述した燃焼改善基本技術の延長上と、これらの技術に加え EGR (Exhaust Gas Recirculation)、後処理装置、電子制御が拡大してくる。特に EGR 及び後処理装置に対しては、燃料中の硫黄含有率が排出ガス成分及びエンジンの耐久性、後処理装置の耐久性に大きく影響を与える。

(1) EGR (排気再循環)

EGR の概念を図-13 に示す。

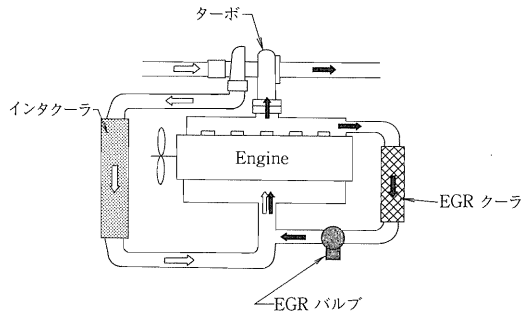


図-13 EGR システムの概念図

窒素酸化物 (NO_x) の低減に有効な技術であり、ガソリンエンジンでは一般的な技術となっているが、ディーゼルエンジンでは燃料中の硫黄含有量が高いため、燃焼に伴って硫酸が生成しエンジン内部の酸化腐食を促進させる。そのためエンジンの耐久性が低下し、実用化が困難であった。近年石油業界の協力により軽油中の硫黄含有率が段階的に低減されてきており (表-1 参照)、耐腐食性の高い材料の技術開発と合わせて、耐久性を低下させることなく EGR 装着が可能になってきた。しかし軽油以外の燃料使用に対しては信頼性、耐久性等の確認が今後必要である。

(2) 後処理装置

後処理装置は図-14 に示すように分類される。酸化触媒は排出ガス成分中の炭化水素 (HC)、一酸化炭素 (CO)、微粒子状物質構成成分中の有機

表-1 軽油中の硫黄含有率の変遷 (米, 欧, 日)¹⁾

	昭45 1970	昭50 1975	昭55 1980	昭60 1985	平2 1990	平7 1995	平12 2000	平17 2005	平22 2010		
米 国 (Type 2-D)	0.2% (最小)		49 CFR Part 86. 307-79	49 CFR Part 86. 1313-84	0.2%~0.5%	0.08%~0.12%	49 CFR Part 86. 1313-91	49 CFR Part 86. 1313-94	300~500 ppm	7~15 ppm	
欧 州					0.3%	88/77/EEC	500 ppm	91/542/EEC	350 ppm	1999/96/EC	50 ppm
日 本 (注1)	1.2%		0.5%		0.2%		0.05% (=500 ppm)			50 ppm	

(注1) 道路運送車両の保安基準(昭和26年7月28日 運輸省令第67号) 第1条の2(燃焼の規格) 別表1の2(逐次改訂)

溶剤可溶成分 (SOF 分) の低減に効果があるが、ディーゼルエンジンは炭化水素、一酸化炭素の排出量はガソリンエンジンに比べ非常に低いレベルなので特殊な用途以外は採用されていない。

Kinds		Construction
Diesel Particulate Filter	Continuous Regeneration Trapper	Oxidation Catalyst → Filter
	Catalytic Soot Filter	Catalyst Coated Filter
	CRT + CSF	Oxidation Catalyst → Catalyst Coated Filter
Diesel Particulate - NO _x Reduction System		DPNR (SCR Catalyst, Removal NH ₃ Catalyst, Oxidation Catalyst, Catalyst Coated Filter)
Selective Catalytic (Continuous) Reduction (Regeneration) Trapper		Oxidation Catalyst → Catalyst Coated Filter → SCR Catalyst → Removal NH ₃ Catalyst

図-14 後処理装置の種類と構成

微粒子状物質 (PM) 低減のためディーゼルパーティキュレートフィルタ (DPF) の実用化の研究開発が世界各国で進められている。DPF の代表的な例を図-15 に示す。フィルタに捕集した粒子状物質をあらゆる走行条件で、いかに燃焼させ自己清浄機能を持たせるかが DPF 実用化のために解決しなければならない最大の技術課題である。

システム	CRT 方式 (酸化触媒+触媒無し DPF)	CSF 方式 (触媒担持 DPF)	CRT 方式+CSF 方式 (酸化触媒+触媒担持 DPF)
構成	酸化触媒 → DPF	触媒担持 DPF	酸化触媒 → 触媒担持 DPF
反応式	$\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2$ $\text{HC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \Delta Q(\text{熱})$	$\text{NO}_2 + \text{C}(\text{煤}) \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NO}$ $\text{C}(\text{煤}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	$\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2$ $\text{HC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \Delta Q(\text{熱})$ $\text{NO}_2 + \text{C}(\text{煤}) \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NO}$ $\text{C}(\text{煤}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$

図-15 DPF システムの構成

代表的な窒素酸化物 (NO_x) 低減触媒は尿素を使った SCR (Selective Catalytic Reduction) (図-16 参照) と、トヨタ自動車が開発中の DPNR (Diesel Particulate NO_x Reduction) (図-17 参照) が知られている。

SCR は尿素が添加剤として必要となるため車両に燃料タンクと別に尿素タンクが必要となる。また尿素補給のための設備環境の構築が伴わねばならない。

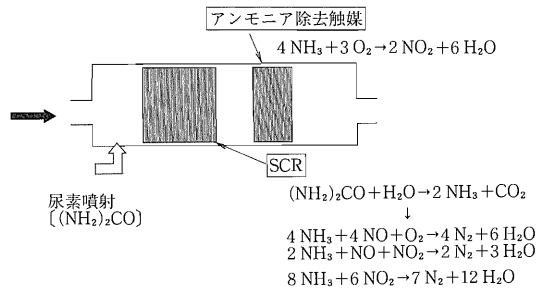


図-16 選択還元触媒の構成とメカニズム (尿素)

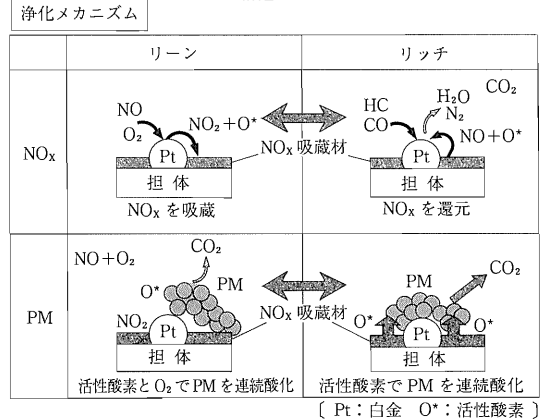
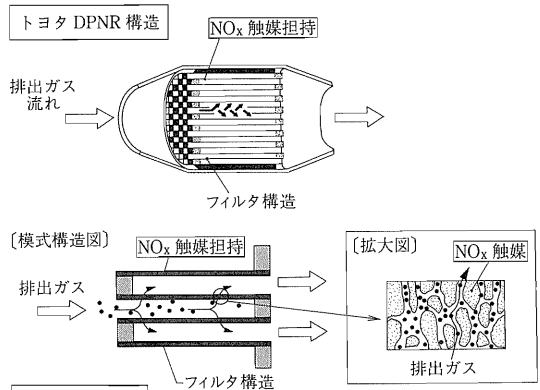


図-17 トヨタ DPNR の構造と浄化メカニズム²⁾

DPNR は窒素酸化物 (NO_x) と微粒子状物質 (PM) を同時に低減可能であり、触媒は多孔質セラミック構造体に NO_x 吸蔵還元型触媒を担持した構成である。空燃比リーンとリッチを繰り返すことで NO_x と PM を連続的に浄化可能である²⁾。

4. 建設機械用エンジンの排出ガス低減

自動車用ディーゼルエンジンの排出ガス低減技術について述べてきたことを集約した形で表-2

表—2 ディーゼルエンジンの排出ガス対策の経緯¹⁾

排出ガス低減技術		排出ガス規制								
		西暦 規制	'74 S 49 年	'77 S 52 年	'79 S 54 年	'83 S 58 年	'89 H 元年	'94 短期	'97 長期	'02 新短期
排 出 ガ ス 対 策	エンジン 本体	燃焼室の改良(含、無駄容積減少) 排気量増大、圧縮比増大、燃焼室の冷却性向上 EGR LOC 低減	●	●	●	●	●	●	●	●
	燃 料 噴 射 系	燃料噴射時期遅延、ガバナとタイマ特性変更	●	●	●	●	●	●	●	●
		噴射ノズルと噴射管の変更	●	●	●	●	●	●	●	●
		噴射ポンプの高圧化			●	●	●	●	●	●
		プリストロークの可変化				●	●	●	●	●
		ガバナとタイマの電子制御化				●	●	●	●	●
		2段スプリングノズル				●	●	●	●	●
		可変噴射率制御(VE ポンプ) コモンレール, U/I					●	●	●	●
	吸 排 気 系	吸気ポート等の改良 吸排気 過給化および過給機性能向上	●	●	●	●	●	●	●	●
		インタークーラ化、慣性過給の可変化			●	●	●	●	●	●
可変ノズルターボ 可変スワール機構(副ポート式)					●	●	●	●	●	
その他	バラッキ低減(排気ガス関連部品および調整精度) 始動補助装置の改良			●	●	●	●	●	●	
後 処 理	酸化触媒 DPF NOx 低減触媒							●	● ? ?	

に示す。

建設機械用エンジンの排出ガス低減技術も基本的には自動車用エンジンと同じである。しかし建設機械用エンジンは使用される燃料性状、環境条件、等々が自動車用とは異なるので、それらを十分把握したうえで慎重に採用する技術装置の仕様を決定していくことが重要な点と考える。

特に市場で実際に使用される燃料に対して、石油業界との協力による燃料性状の改善行動が急がれる課題である。

5. ま と め

今後の排出ガス低減技術は、電子制御の拡大、燃料噴射系の高圧化、EGR 装着、後処理装着等々、デリケート化していく方向にある。また、エンジンの改善と同時に、燃料中の硫黄含有率の低減等、性状の改質が必要である。

建設機械用エンジンの排出ガス低減は、自動車用技術の応用、転用が基本であるが、仕様決定に当たっては、自動車用途とは違った建設機械固有の使用環境条件に適合させる技術検討と並行してコスト検討が必要である。

J C M A

《参考文献》

- 1) (社)日本自動車工業会「自動車排出ガス低減対策について」, 2001年7月13日
- 2) 広田信也, 他: 「ディーゼルPM, NO_x同時低減触媒システム」, 自動車技術会2001年春季大会前刷集

【筆者紹介】

藤井 恒介 (ふじい つねすけ)
日野自動車株式会社
パワートレイン R&D 部

