

技術論文

Tier4 Interim 規制対応 ϕ 125, ϕ 140 エンジンの開発 Development of ϕ 125 and ϕ 140 Engines Meeting the Tier4 Interim Regulation

加藤 隆志
Takashi Kato
太田 弘
Hiroshi Ohta
長坂 昇平
Shouhei Nagasaka

Tier4 Interim 排出ガス規制に適したコマツエンジンシリーズとして、 ϕ 125, ϕ 140 エンジンを開発、市場導入した。従来機に対して同等以上の性能・信頼性・耐久性を確保しつつ、更に厳しくなった排出ガス規制を満足するために、後処理装置を始め様々な新技術を織り込んだ。本稿では、この開発の経緯と技術的特長について報告する。

ϕ 125 and ϕ 140 engines have been developed and launched on the market as the Komatsu engine series meeting the Tier4 Interim emission regulation. Various new technologies, including a post-processing device, are incorporated in the new engines to meet stricter emission regulations, while ensuring equivalent or superior performance, reliability and durability compared with the conventional machines. The background of and main events that took place in the development process, as well as the technical features of the engines, are reported.

Key Words: ディーゼルエンジン, 排出ガス規制, Tier4 Interim, 後処理装置, 窒素酸化物

1. はじめに

ディーゼルエンジンは、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高い機関の熱効率から産業界において動力源として広く使用されているが、環境や生体に及ぼす影響も指摘されているように、ディーゼルエンジンをとりまく環境は大きな転換期にあるといえる。

その中において、建設機械用ディーゼルエンジンについても年々その排出ガス規制が世界各国において強化されつつあり、特に日本・米国・欧州の3極を中心とした規制レベルが建設・鉱山機械用ディーゼルエンジン排出ガス規制を牽引している。

2011年1月から開始されている米国の EPA Tier4 Interim 排出ガス規制、欧州 EU による Stage III B、および 2011年10月から施行されている日本国内の建機指定制度・オフロード排出ガス規制（下線部分を以下「Tier4 Interim 排出ガス規制」と記す）を満足するコマツエンジンシリーズを開発・商品化を果たし、すでに建機・鉱山市場において稼働を開始している。本稿では、当社開発の Tier4 Interim 排出ガス規制対応 コマツ 中大型エンジンの概要ならびにその技術的特長について紹介する。

2. 建設機械用エンジンのエミッション規制動向

前述した様に、建設機械用ディーゼルエンジンにかかる排出ガス規制としては、2011年からは第4次と称される新しい Tier4 Interim 規制が導入されて新しい段階を迎えている。

図1に現時点における、日本、米国、EUにおける排出ガス規制動向を年次毎にまとめたものを掲げる。

図2は、EPA 規制を代表例にこれまでの Tier1⇒Tier2⇒Tier3⇒Tier4 規制の動きを、NOx と PM の排出ガス規制値を軸に推移として示したものである。マクロ的に、各規制段階は3～5年毎に厳しくなっており、窒素酸化物 (NOx)、粒子状浮遊物 (PM) といった主たる規制値は、約30%レベルずつの低減が要求されてきており、2011年から開始された EPA Tier4 Interim 規制では、Tier3 規制値に対して NOx を1/2に低減、PM は1/10のレベルにまで低減させることが求められている。

これまでの規制レベルまでは、エンジン本体の改良で対応可能であったが、排出ガスのクリーンレベルが一桁変わる程の大幅低減が求められる今回の Tier4 Interim 排出ガス規制においては、後処理装置の装着が必須となる。

また、建設機械用ディーゼル機関の排出ガス測定モードは、従来から ISO08178 の C1 モードと呼ばれる定常8モードでの測定モードが採用されてきた。

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をそれぞれ規制値に適合させる必要がある。

新しい測定モードに対応するためには、より高精度な各部の制御が必要となってきている。

図3に建設機械用エンジンの排出ガスの測定方法について示す。

		NOx / PM , *NOx+NMHC / PM , **NOx+HC / PM (g/kWh)												
		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
JAPAN	19_<37	8.0/0.50				6.0/0.4				4.0/0.03				
	37_<66	7.0/0.40				4.0/0.3				4.0/0.025				
	66_<75					4.0/0.25				3.3/0.02				
	75_<130	6.0/0.30				3.6/0.2				3.3/0.02				
	130_<660	6.0/0.25				3.6/0.17				2.0/0.02				
US	<19	8.5/0.4				7.5/0.3				7.5/0.4				
	19_<37	7.5/0.6				7.5/0.3				4.7/0.03				
	37_<66	7.5/0.4				4.7/0.3								
	66_<75					4.7/0.4				3.4/0.02				
	75_<130	6.0/0.3				4.0/0.3				0.4/0.02				
EU	19_<37	8.0/0.8				7.5/0.6				4.7/0.025				
	37_<66	7.0/0.4				4.7/0.4				4.7/0.025				
	66_<75					4.0/0.3				3.3/0.025				
	75_<130	6.0/0.3				4.0/0.3				0.4/0.025				
	130_<660	6.0/0.2				4.0/0.2				2.0/0.025				
		Tier1	Tier2	Tier3 / Stage3A		Tier4 Int/ Stage3B		Tier4 final / Stage4						

図1 Worldwide Emission Legislation

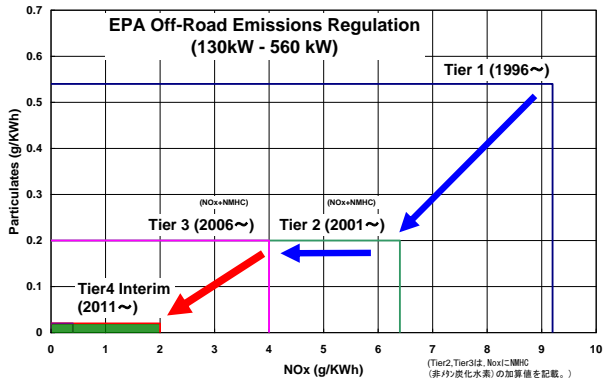


図2 History of NOx and PM emission Level

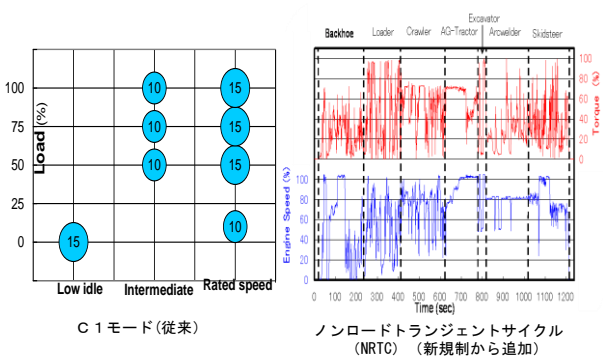


図3 建設機械用エンジンの排出ガス測定方法

3.1 Tier4 Interim φ125, φ140 エンジンシリーズ概要

コマツでは現在、3.3L から 78L までの産業用ディーゼルエンジンを開発・製造・販売している。前述した様に 2011 年から 2012 年にかけて日・米・欧の 3 極において新排出ガス規制が施行される。この規制の施行にあわせて開発した 560kW 以下の Tier4 Interim 排出ガス規制に適合する中から今回は φ125 エンジン (11.0L) と φ140 エンジン (15.2L) の中大型エンジンシリーズについて紹介する。

図4にコマツ エンジンシリーズの排気量と出力を示す。

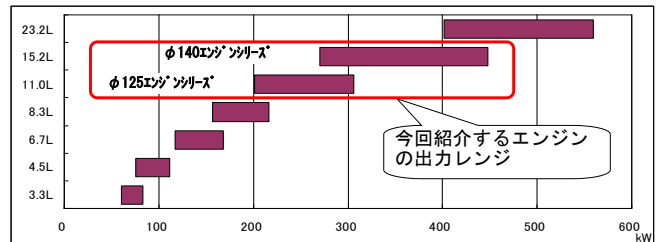


図4 コマツ エンジンシリーズ

3.2 Tier4 Interim エンジンシリーズの開発の狙い

- 1) 日・米・欧 3 極の Tier4 Interim 排出ガス規制に適合
- 2) 現行機に対して同等以上のエンジン性能 (出力・燃費) 確保
- 3) 建設機械用エンジンとしての過酷な環境や使われ方での信頼性・耐久性の確保

図5にこの開発の狙いを達成するための主要織り込み技術について示す。

今回の開発は、後処理装置の新規開発が大きなハードルであったが、それだけでなく電子制御式高圧コモンレールシステムの更なる高圧化、可変ターボチャージャ (Komatsu Variable Geometry Turbo {以下 KVGT と記す}) の開発、Exhaust Gas Recirculation (以下 EGR と記す) バルブ制御の高精度化、EGR クーラの大容量化、ブローバイガスを大気に放出せずに吸気に戻すブローバイ吸気還元 (Komatsu Closed Crankcase Ventilation {以下 KCCV と記す}) システムの採用など様々な新技術を導入した。

図6に 11.0L φ125 エンジン及び図7に 15.2L φ140 エンジンの外観形状を示す。

エンジンモデル	unit	Tier3		Tier4Interim	
		SAA6D125E-5	SAA6D140E-5	SAA6D125E-6	SAA6D140E-6
気筒数	--	6			
ボア×ストローク	mm	125x150	140x165	125x150	140x165
排気量	L	11.04	15.24	11.04	15.24
燃料噴射装置	--	コモンレールシステム			
最高噴射圧	MPa	140	140-160	180	200
燃焼室	--	リントラト		新燃焼室 (TSCC)	
ターボチャージャ	--	固定		可変 (KVGT)	
EGR	--	付き		付き (EGR-クア容量UP)	
コントローラ	--	電子制御			
ブローバイ	--	大気開放		ブローバイ吸気還元 (KCCV)	
後処理装置	--	無し		付き (KDPF)	

図5 φ125, φ140 エンジンシリーズ主要織り込み技術

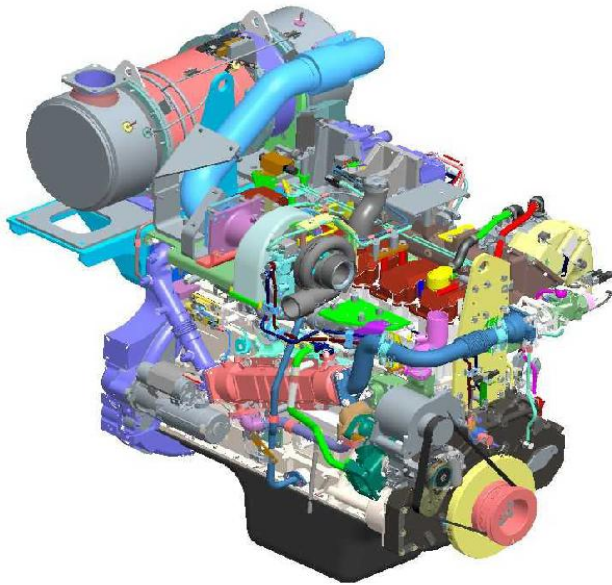


図6 Tier4 Interim エンジン SAA6D125E-6

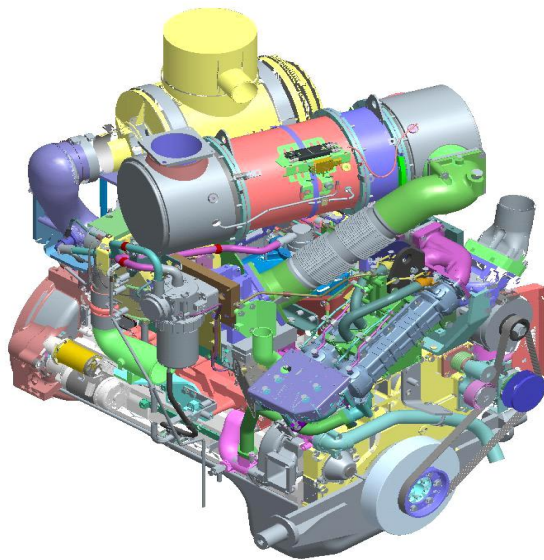


図7 Tier4 Interim エンジン SAA6D140E-6

4. Tier4 Interim エンジンテクノロジー

今回開発を行った Tier4 Interim 排出ガス規制対応エンジンで日・米・欧の最新排出ガス規制に適合させながら、前述した開発の狙いである現行機に対して同等以上のエンジン性能（出力・燃費）確保を実現するキーコンポーネントについて以下に紹介する。

4.1 燃焼システム

現行システムのまま NOx を約 1/2 まで低減した場合、EGR 率を Tier3 の 10% 台から 20% 台へと増大させる必要があり、このために燃焼が大幅に悪化し、特に PM については Tier3 に対して約 2 倍程度の悪化が避けられない。

そこで燃焼システムに関する技術において、大きく 2 つの改良を織り込んだ。

まず 1 つ目としては、Tier3 エンジンにて全エンジン系列に搭載した電子制御コモンレール噴射システムをベースに、更に高圧化、高応答性を可能とした新システムを採用したことである。

コマツは、建設機械用高速ディーゼルエンジンにいち早くコモンレール噴射システムを搭載しており、これまでに培った信頼性・耐久性をベースに更に改良を加え、最高噴射圧力 200MPa のシステムで系列化を行った。

図8に今回採用した Heavy Duty コモンレール燃料噴射システムを示す。

2 つ目としては、新燃焼室（Two Stage Combustion Chamber : TSCC）を開発したことである。

この技術により、膨張行程時の残酸素利用率を増加させることが可能となり、PM 低減に大きな効果を得ることが出来た。

図9に新燃焼室の概要を示す。

このコモンレールの高圧化及び新燃焼室との組み合わせ効果により、悪化した PM を元のレベルまで戻すことが出来たばかりでなく、燃費についても Tier3 に対して同等以下のレベルにまで抑えることが実現出来た。

結果として、このことが後処理装置の負担を最小限に抑えることにつながり、最終的な排出ガスの PM レベルを Tier3 の約 1/10 にまで低減することが出来た。

図10に燃費マップの比較について示す。

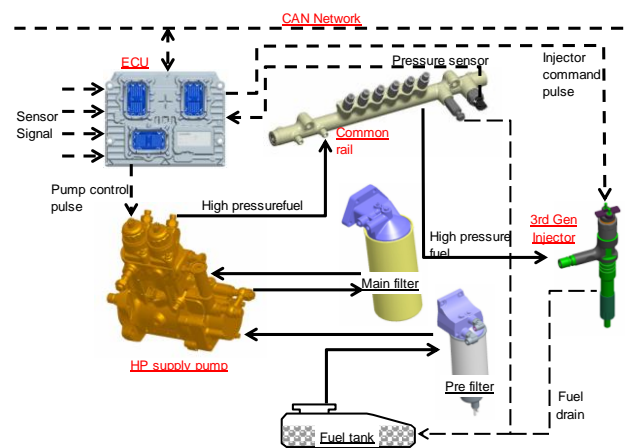


図8 Heavy Duty コモンレール燃料噴射システム

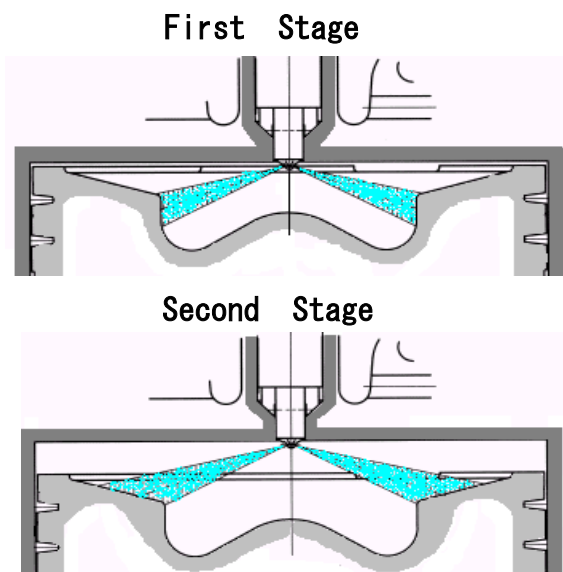


図9 新燃焼室 (TSSC)の概要

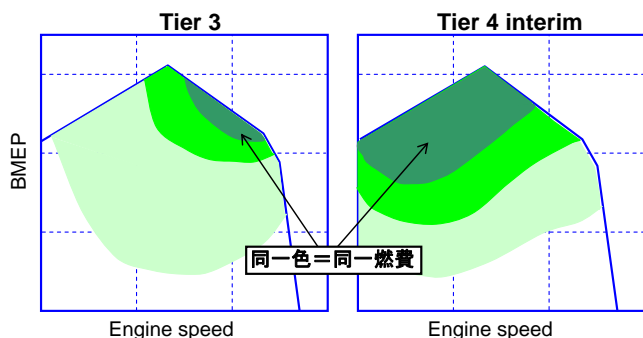


図10 SAA6D125E-6 燃料消費率の比較

4.2 排出ガス再循環システム (EGR システム)

建設機械用としては、第3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 NOx の低減が可能となることである。

前述の通り、Tier4 Interim 排出ガス規制対応エンジンでは、大量の EGR が必要となることから後述の KVGT の採用と EGR バルブの高精度化および EGR クーラの大容量化/高効率化を実施した。

(1) EGR バルブ

EGR バルブ駆動方法は、トラックや乗用車においてはモータ駆動を用いているが、コマツは Tier3 から建設機械として過酷な環境や使われ方においても十分な信頼性と耐久性を兼ね備えたコマツが培った技術である油圧駆動を採用している。

今開発においては、油圧駆動方式を更に発展させた油圧サーボ機構を追加し、Tier4 Interim 排出ガス規制で要求される高精度の EGR ガス流量制御を実現させた。

油圧サーボアクチュエータは従来の油圧アクチュエー

タに対して、あらゆるバルブ開度で EGR ガス圧によるバルブにかかる外力に左右されないため安定した制御性能を発揮出来る。

バルブ本体は燃料中のサルファ分による腐食にも耐えることができるようステンレス鋳鋼のボディとクロムメッキ付きのバルブを Tier3 エンジンから引き続き採用した。

制御用の比例電磁弁とストロークセンサを一体にまとめ、コンパクトで高精度、高信頼性の EGR バルブに仕上げることが出来た。

図11にEGRバルブ外観形状を示す。

図12に油圧サーボ機構の概要を示す。

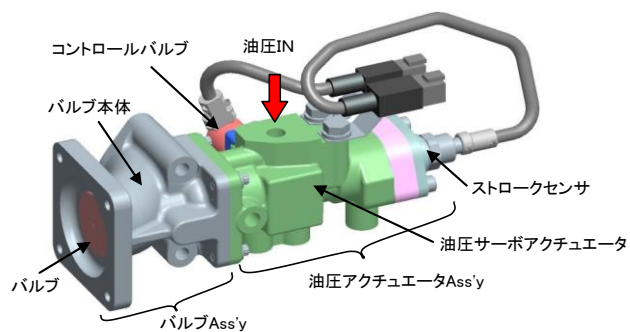
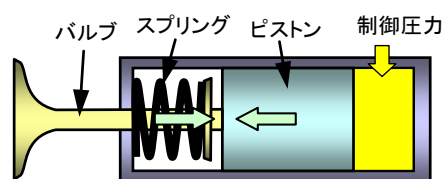
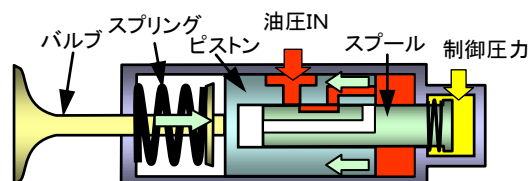


図11 EGR バルブの外観形状



バルブ外力が直接制御圧力にかかるため制御が安定しづらい

Tier3: 油圧アクチュエータ



バルブ外力が直接制御圧力にかからないため制御が安定する

Tier4 Interim: 油圧サーボアクチュエータ

図12 油圧サーボ機構の概略(Tier3vs.Tier4 Interim)

(2) EGR クーラ

図13にTier4 Interim 規制対応エンジン用 EGR クーラの 外観形状及び構造を示す。

NOx の大幅低減のため大量の EGR ガスの温度を十分に下げることが重要となる。すなわち Tier3 と比較して要求される熱交換容量が大幅に増大することとなる。

このため従来の多管式からフィン&チューブ式に変更し、EGR ガス流路である扁平チューブ内にフィンを設置する構造を採用した。

この変更により、全体の大きさをほぼ変えることなく、熱交換面積を Tier3 の約 2.3 倍まで増加させることが実現出来た。

一方、EGR ガス流量の増大に伴って、ガス入口近傍では大幅な温度上昇が生じる。この大容量クーラにとって不可避の過酷な温度環境が、開発上の重大な課題であった。

CFD 解析を活用し水入口の内部形状を工夫することで、水流を最適化し温度低減に成功した。

更にエアや沸騰による蒸気の滞留に起因するヒートスポット発生を避けるため、水経路のエア排出性を重視した構造を採用した。具体例として下流側を持ち上げたマウント方式 (Angle α) や、エア抜きを設置、扁平チューブの縦列配置が挙げられる。

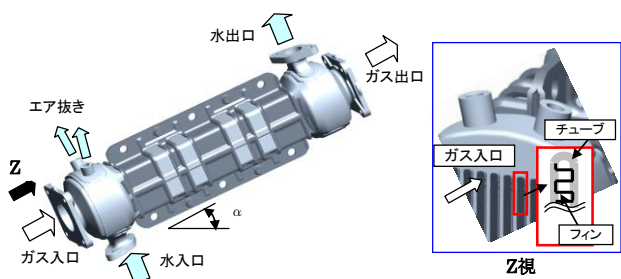


図 13 EGR クーラの外観形状及び構造

4.3 可変ターボチャージャ (KVGT)

KVGT は、翼をスライド方式によりスライドさせて通路幅を変化させる機構を採用した。

また、KVGT の駆動方式は前述の EGR バルブと同様に自社の技術である油圧駆動方式を採用した。油圧駆動はコンパクトでありながら大きな駆動力を有する方式であり、中大型エンジン用 KVGT には適している。また、前述のスライド方式は可動部分が少なく、直線的な可動のため油圧駆動に適している。

図 14 に KVGT の構造を示す。

可変機構は主に水冷されたベアリングハウジング部に組込まれ、熱の影響を受けにくくなっている。可変は図中のノズルリングを軸方向に移動させることにより通過通路幅が変化することによって行われる。ノズルリングの可動メカニズムを図 15 に示す。

油圧アクチュエータ駆動用のオイルはエンジンのメインギヤラよりオイルポンプによって所定の圧力に昇圧され油圧ピストン駆動用として油圧アクチュエータに接続される。ノズルリング位置を決める油圧ピストン位置は設定された油圧によって制御され、制御弁より制御油圧として油圧アクチュエータに接続される。また、油圧ピストン

位置はストロークセンサによってコントローラにフィードバックされる。

KVGT を採用した事により広い運転領域での EGR が可能となり、このメリットを燃費率の低減、加速性に配分する事により、車両性能向上に大きく貢献した。

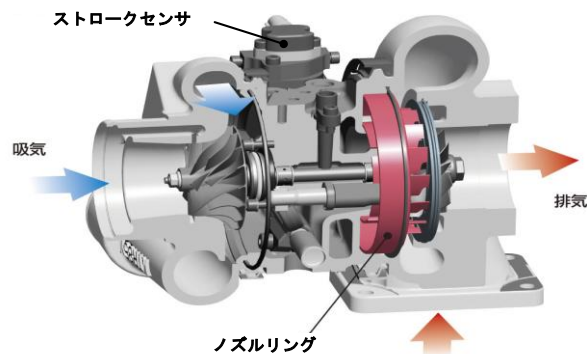


図 14 KVGT の構造

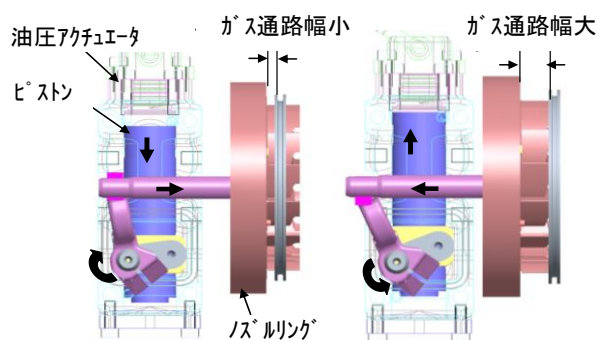


図 15 ノズルリングの可動メカニズム

4.4 ブローバイ吸気還元システム (KCCV)

Tier4 Interim 規制より、ブローバイガスも排気ガスの一部として規制の対象に加算されるようになるため、従来のブローバイガス大気開放タイプから、ブローバイガス吸気還元タイプへと回路の変更を実施した。

その際、ブローバイガスは大量のオイルミストを含むため、ターボチャージャなど、ブローバイガスの還流先に位置している吸気系部品にはオイルが付着するが、負荷率の高い建設機械用エンジンはターボチャージャが高温になるため、付着したオイルが炭化して積層し、ターボチャージャの性能を劣化させる問題がある。

これを防止するため、オイルの除去効率を極めて高いレベルに設定した高性能 KCCV フィルタを開発した。

更に、KCCV フィルタは、建機の使われ方に耐える剛性の高いアルミ本体に、ターボ吸気負圧でクランクケースが減圧することを防止するための調圧弁と、フィルタ目詰まりを検出する圧力センサを備えた、高信頼性、かつコンパクトなデザインを採用している。

図 16 に KCCV の外観形状を示す。

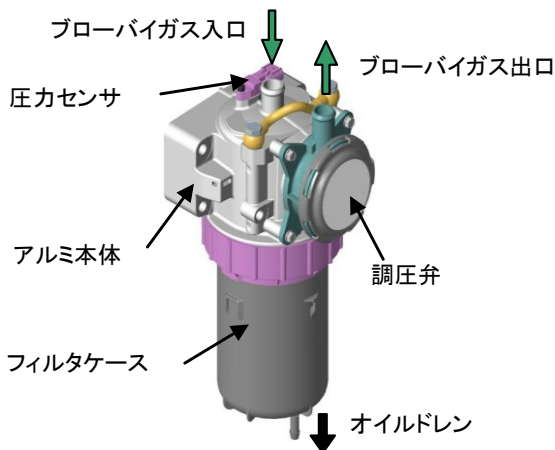


図 16 KCCV の外観形状

4.5 後処理装置 (Komatsu Diesel Particulate Filter)

PM の大幅低減のために、Komatsu Diesel Particulate Filter (以下 KDPF と記す) を新たに開発した。

KDPF は、今までのエンジンのマフラとしての機能も兼ねており、消音性能は、マフラより更に 3 dB(A) 以上高い低減効果が得られている。

KDPF は、酸化触媒を触媒付スーツフィルタの前段に配置することで連続再生式フィルタシステムとし、通常の運転時は、すすを連続的に燃焼させることのできるシステムとした。また、低温環境での作業や、軽負荷作業などの際にすすが溜まったことをコントローラで自動的に検出し、強制的にフィルタを再生できる制御システムを搭載し、様々な使われ方に対応するシステムとした。

KDPF のサイズは、建設機械として高い負荷率で使用された場合の Ash (排気ガス中の燃えない灰分) 堆積を考慮しても、十分な KDPF のメンテナンスインターバルとなるようにサイズ選定を行い、KDPF サイズの系列化を行った。

KDPF の制御に使用する温度センサ、圧力センサなどのコネクタは、KDPF のほぼ中央部に集中的に配置し、サービス性の向上を図っている。

図 17 に KDPF の構造を示す。

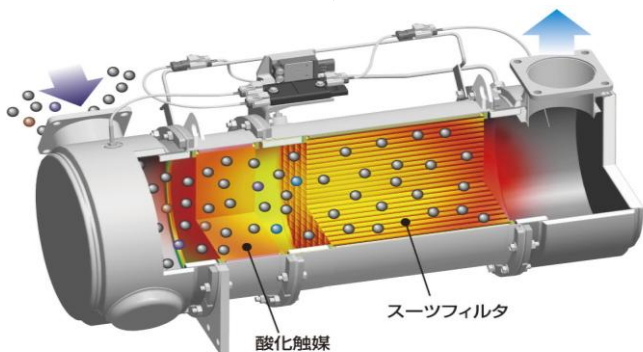


図 17 KDPF の構造

4.6 電子制御システム

電子制御システムは、排気エミッション低減のために新たに採用した KVGT, KDPF などのセンサが大幅に増加し、且つ燃料システム、エアハンドリング、EGR & KVGT & KDPF コントロールなどの制御を行いながら、更に車両全体の制御との高速通信を行うために、新規に開発された Engine Control Unit (以下 ECU と記す) を採用した。

ECU は、小型エンジンから大型エンジンに至るまで、全てインターフェースを共通化し、サービス性にも十分配慮した設計とした。また、オペレータが例えば KDPF の再生を行う際に、分かりやすいユーザインターフェースを提供できるシステムとした他、お客様に定評のある KOMTRAX システムに、故障時の情報だけでなく主要コンポーネントの稼働時の情報を送り、より高度な制御システムの導入を行い、お客様の機械の稼働率向上のための故障診断システムの高度化を行った。

図 18 にオペレータのモニター画面の例を示す。

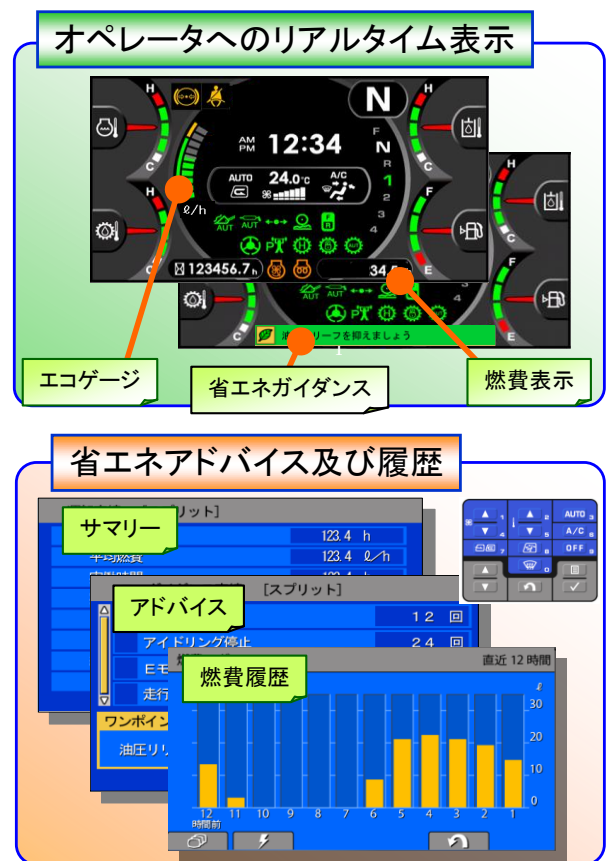


図 18 オペレータに分かりやすいモニター画面

5. 信頼性・耐久性

今回の Tier4 Interim 規制対応エンジンシリーズの開発にあたっては、従来から培われてきたコマツの産業用エンジンの品質確認コードをすべて満足することはもちろんのこと、新技術である KVGT, KCCV, KDPF に新たな評価テストコードを開発追加し、新技術に対する十分な信頼性・耐久性の確認テストを実施した。

まず KVGT に関しては、油圧を駆動手段として用いた事により、信頼性が高い装置となった反面オイルの影響を受けやすい問題があった。よって、低温試験、オイルコンタミ試験等の過酷試験を十分に行い品質の作りこみを行った。

更に、KVGT の品質を保証する上で重要な項目は、高サイクル疲労破壊に対する信頼性である。建設機械では瞬時に負荷が変化する運転が多く、KVGT の制御方法によっては非常に高い膨張比（タービン入口圧力とタービン出口圧力との比）となる事がある。高い膨張比は高サイクル疲労破壊が発生しやすい条件となるため、これらの過酷条件に耐えられる設計を行い十分な評価試験を行った。

KCCV に関しては、低温環境下でのロングアイドリングテストを実施した際、配管の氷結が確認され一部問題が生じた所には、エンジン冷却水を廻す等の対応を実施した。

KDPF に関しては、新規に採用するにあたり、搭載するすべての建設機械アプリケーションの KDPF マウント位置での振動・衝撃加速度を評価し、それらを包括する条件を設計条件とした。評価試験は、大型の振動試験機を使い、高温環境下での単体振動試験を行った。また、建設機械の様々なアプリケーションにおいて、KDPF システムが安定して機能することを確認するために、広範なアプリケーションで想定される代表的使われ方条件で、すすの堆積状況の確認を行い、強制再生時に異常燃焼を起こさない制御パラメータの設定には、十分な確認試験を行った。

更に、φ125、φ140 それぞれのエンジンにおいて、ベンチ耐久試験を合計 1 万時間以上実施し、且つ車両試験を合計 5 千時間以上実施することで、十分な耐久性確認を行うことが出来た。

6. おわりに

新たに開発した Tier4 Interim 排出ガス規制対応 建設機械用ディーゼルエンジンについて、その特徴とエミッション低減技術に関して紹介した。

Tier4 Interim 規制対応のキーコンポーネントのほとんどを自社開発で行い、またその多くを自社生産とすることで、建設機械に要求される市場ニーズに合わせるだけでなく、競合他社との差別化をもはかった Tier4 Interim 規制対応エンジンシリーズを導入することができたものとする。また、車両全体としても、コマツの特長である低燃費だけでなく、環境に配慮した製品に仕上げる事が出来たと考え

る。

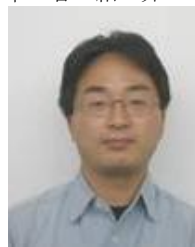
また、標準搭載するカラーマルチモニターを使用し、KDPF の再生や故障発生時のオペレータへの知らせ方、各種の省燃費ガイダンス機能などのユーザフレンドリーな Tier 4 時代にふさわしい車両となっているものと確信している。

KOMTRAX システムによる高度な管理システムと合わせ、ユーザのトータルコスト低減に今後とも寄与する開発を行っていきたい。

【参考文献】

「新技術（ICT 含む）、応用分野の紹介」
6. 日・米・欧の排出ガス規制対応技術

筆者紹介



Takashi Kato

かとう たかし
加藤 隆志

1994 年、コマツ入社。

現在、(株)アイ・ピー・エーエンジン開発 G 所属



Hiroshi Ohta

おおた ひろし
太田 弘

1981 年、コマツ入社。

現在、(株)アイ・ピー・エー エンジン開発 G 所属



Shouhei Nagasaka

ながさか しゅうへい
長坂 昇平

1996 年、コマツ入社。

現在、(株)アイ・ピー・エーアフターサポートメント研究開発 G 所属

【筆者からひと言】

ディーゼルエンジンの排出ガス規制対応技術は日々進化しています。Tier1→Tier2→Tier3→Tier4 Interim と開発を続けて、Tier4 Interim が量産化されてホッとされたのもつかの間、現在 Tier4 Final の開発に奮闘している日々です。Tier4 Final 規制の後には、どういう方向に進むのだろうかとふと考えたりもします。