

技術論文

Tier3 エンジン ecot3 の開発
Development of Tier3 Engine ecot3

狩野 秀樹
Hideki Karino
安藤 初男
Hatsuo Andou
高貫 弘文
Hirofumi Takanuki

第3次排出ガス規制に適合したコマツエンジンシリーズとして、ecot3 エンジンを開発、市場導入した。従来機に対し同等以上の性能・信頼性・耐久性を確保しつつ、さらに厳しくなった排気ガス規制、騒音規制を満足するために、新たな技術とコンポーネントを開発し、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。

The ecot3 engines were developed to meet the Tier3 emission regulations and introduced into the market as Komatsu engine series. The new technology and components were developed and built in to overcome the more hard emission regulation and noise requirement, keeping the better performance, reliability and durability than the current engines. The background of the development and technical features are described below.

Key Words: ディーゼルエンジン、環境対応、Tier3、電子制御、コモンレールシステム、EGR システム

1. はじめに

ディーゼルエンジンは、燃料汎用性の高さや効率の良さから幅広い産業界において動力源として使用されているが、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取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。

2006年1月から開始されている米国EPA・欧州EUによる第3次排出ガス規制、および2006年10月から施行予定の日本国内の建機指定制度・オン/オフロード第3次排出ガス規制を満足するコマツエンジンシリーズとして、ecot3 エンジンシリーズの開発・商品化を果たし、すでに建機・鉱山市場において稼動を開始している。本稿では、当社開発の第3次排出ガス規制対応コマツ ecot3 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

前述したように、建設機械用ディーゼルエンジンにかかるエミッション規制としては、欧米を中心とするいわゆるTier3規制と、日本国内の建機指定制度・オン/オフロード第3次排出ガス規制がある。

図1に現時点における、日本、米国、EUにおける排気エミッション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+NMHC、とPMエミッション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、1996年の規制レベルと今回2006年から開始されたEPA Tier3規制にいたる約10年を比較すると、ほぼ排出ガスエミッションが約1/3のレベルに、Tier4にいたっては約20年のスパンで約1/20に到達することになる。

地域	エンジン	年次規制																
		91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07
日本	71→100	0.2/1.3/0.54																
	72→100																	
	73→100																	
	74→100																	
米国	71→100																	
	72→100																	
	73→100																	
	74→100																	
EU	71→100																	
	72→100																	
	73→100																	
	74→100																	
中国	71→100																	
	72→100																	
	73→100																	
	74→100																	

図1 Worldwide Emission Legislation

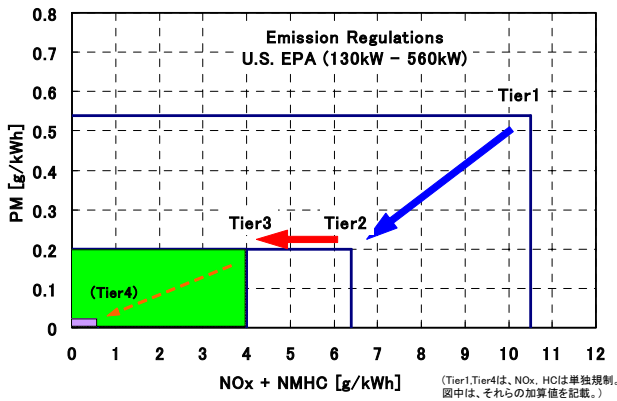


図2 History of NOx and PM emission Level

3. ecot3 エンジンシリーズ概要

3.1 ecot3 エンジン系列

ecot3 : ecology & economy – technology3

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。前述したように2006年から2007年にかけて日・米・欧の3極において新排気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以下の第3次排気ガス規制に適合する、3.3Lから23.2Lまでの系列の中から今回は11.0Lから23.2Lの中大型 ecot3 エンジンシリーズについて紹介する。

図3に ecot3 エンジンシリーズの排気量と出力を示す。

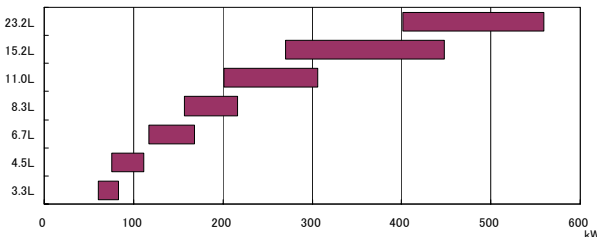


図3 コマツ ecot3 エンジンシリーズ

図4に排気エミッション規制を満足するためにエンジンに織り込まれてきた技術動向の概要を示す。

窒素酸化物 (NOx) を低減するためにはシリンダ内の燃焼温度を下げて窒素の酸化を抑えることが必要であり、その手段の一つとして燃焼前の給気温度を下げるため、過給エンジン (S) から 水冷アフタークーラ (SA) さらに Ait-to-Air 空冷アフタークーラ (SAA) 付エンジンに移行してきた。ecot3 エンジンシリーズはほとんどのエンジンが空冷アフタークーラ仕様となっている。また、噴射時期の最適化やマルチ噴射による燃焼改善技術の織り込み、クルード EGR (Exhaust Gas Recirculation) の採用により、さらなる窒素酸化物の低減を図った。一方、粒子状浮遊物 (PM) の低減に関しては、噴射期間の短縮化や噴霧の微粒化、燃焼改善を、電子制御・高圧噴射系システムやインジェクタノズルの改善などによって実現した。

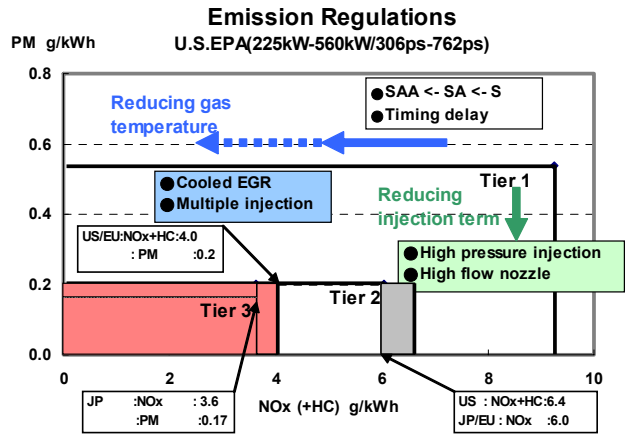


図4 エミッション低減織り込み技術の概要

3.2 ecot3 エンジンシリーズの開発のねらい

- 1) 日・米・欧3極の第3次排気ガス規制に適合
- 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) 建機 EU 騒音規制をにらんだ静粛性の確保
- 4) 建設機械をはじめとする産業用エンジンとしての信頼性・耐久性の確保

Displacement	L	3.3	4.5	6.7	8.3	11.0	15.2	23.2
Bore	mm	95	107	107	114	125	140	170
Emission level		Tier3						
Fuel Injection System		New Heavy Duty Common Rail						
Engine control		Electronic						
EGR		None					Cooled EGR System	
Emission level		Tier2						
Fuel Injection System		Conventional mechanical pump			Common Rail		EUI	
Engine control		Mechanical			Electronic			
EGR		None						

図5 ecot3 エンジンシリーズ主要織り込み技術

この開発のねらいを達成するため、図5に示すように第二次排気ガス規制対応で電子制御式噴射システムを採用している11.0Lから23.2Lの中大型 ecot3 エンジンシリーズには、次世代の電子制御式高圧コモンレールシステムを採用すると同時に、新たに、電子制御式クルード EGR

システムを開発した。

図6に15.2L 中型エンジンの概観を示す。

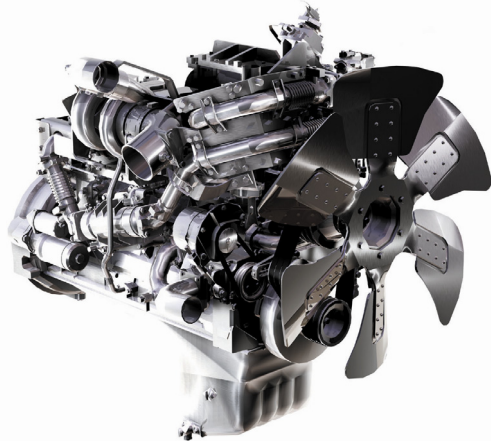


図6 ecot3 シリーズ SAA6D140E-5

4. ecot3 エンジンテクノロジー

今回開発を行った Tier3 エミッション規制対応エンジンで世界中の最新排気ガスエミッション規制に適合させながら、前述した開発のねらいである、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となった ecot3 テクノロジーについて以下に紹介する。

4.1 電子制御システム

今回開発した ecot3 エンジンシリーズには前述したように、電子制御コモンレール噴射システムを搭載し、電子制御システムのフルライン化を行った。

この電子制御システムを採用するにあたって、これまで培った建設機械・産業機械との車両トータル制御技術を活かしながらも、エンジンの高性能化に対応するために、従来に比べ、メモリー容量を約10倍にアップ、ピン数も1.5倍とした全く新しいECMを開発し搭載した。

これにより、小型から大型まで共通のECMハードウェア、ソフトウェアを実現し、エンジン間の共通性のみでなく、車体アプリケーションシリーズ間の共通性を高めることにより、ユーザに対してより統一されたインターフェースを提供することに成功した。また、この共通化により、延べ10万時間近くにも及ぶ品質確認を行い、さまざまな環境条件、使われ方に対して、お客様の期待に十分こたえられる耐久性・信頼性を確保することができた。

機能的には、コモンレール噴射システム、EGRシステムの制御を始めとするエンジン制御とともに、高速CAN通信によりVCM（車両コンピュータ）との交絡制御を行っている。また、KOMTRAXシステムに対応したインターフェースを提供している。

エンジン制御に関しては、トルクベース制御を採用し、車両との交絡制御を容易化し、またソフトウェアをMatlab/Simulinkによるモデルベースソフトとすることで、開発のスピードアップを行った。

4.2 Heavy Duty コモンレール噴射システム

ecot3 エンジンシリーズでは、全エンジン系列に電子制御コモンレール噴射システムを搭載した。

コモンレール噴射システムは、高圧噴射が可能であるのみならず、噴射時期の自由度の高さ、マルチ噴射が可能であること等、様々な噴射システムの中で最も高いポテンシャルを持つものと考えられる。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・耐久性をベースにさらに改良を加え、最高噴射圧力160MPaのシステムで系列化を行った。図7は今回採用した Heavy Duty コモンレールのシステムを示す。図8は、コモンレール噴射システムでマルチインジェクションを適用することによって得られた性能改善効果を示す。マルチ噴射を行うことによりNOx一定で、PMを悪化させることなく燃費率を約2%改善することができた。

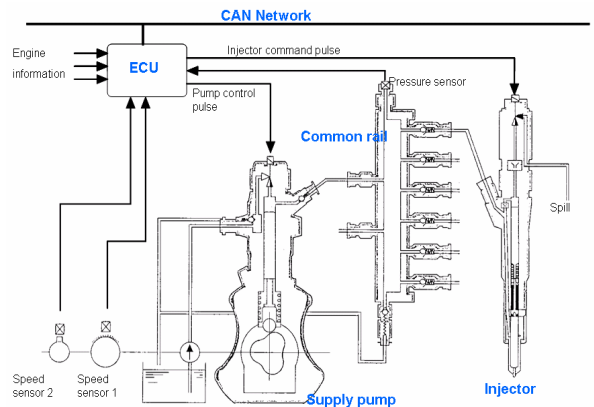


図7 Heavy Duty コモンレール燃料噴システム

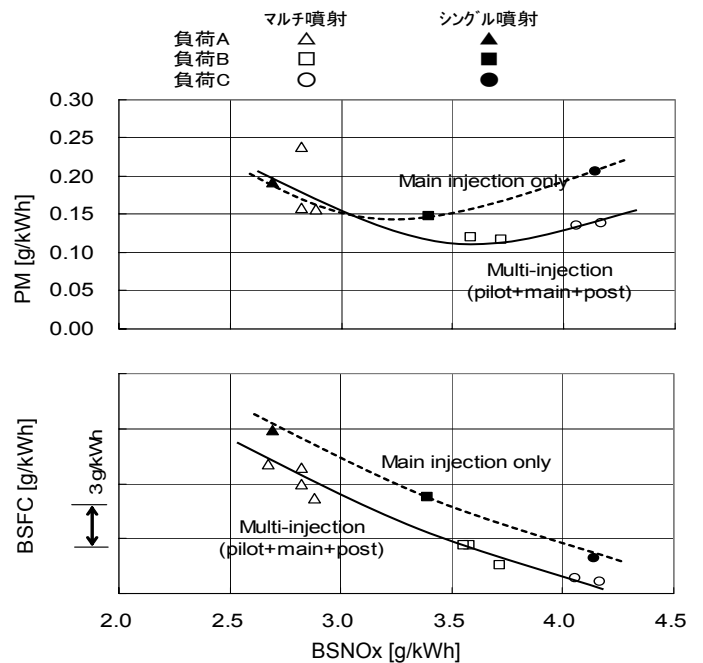


図8 Multi-injection による性能改善効果 (SAA6D140E-5)

また、コモンレール噴射システムの全エンジン系列へのシリーズ化に関しては、Tier2 エミッション対応エンジンで培った経験と実績をベースに、建設機械用として要求される様々なテストコードで品質確認を行うとともに、細部に及ぶ改良を行い、Heavy Duty 仕様と呼ぶにふさわしいシステムとした。

4.3 ecot3 の燃焼システム

今回のTier3 排気エミッション適合エンジン開発においては、燃焼システム開発に高い重点をおいた。エミッション低減方策としては、トラック用エンジン等で既に広く使われているEGR 技術があり、エミッション低減と燃費向上のために非常に有効な技術である。一方、そのためのEGR クーラ・バルブ等のコストアップは特に小型エンジンにとってマイナス要因となってしまう。

そこで、前述したように、ecot3 エンジンシリーズでは、小型エンジンにはコスト競争力を維持しつつ、電子制御コモンレールによる噴射性能アップおよび燃焼技術開発で高性能・エミッション規制適合させる新燃焼方式を採用し、さらに、より燃費が重要な中大型エンジンには後述するEGR システムを装着し、競合他社を凌駕する低燃費を狙う方策をとった。

新燃焼方式の基本コンセプトとして、図9に筒内のヒートリリースパターンで示すように、燃焼初期の火炎の発達を抑え最高筒内温度の上昇を抑制することによりNOx を低減し、かわりに燃焼後期の拡散燃焼を活発に行わせることにより、PMの低減を行うとともに燃焼期間の大幅短縮を図り高性能化を達成した。このチューニングでは3Dシミュレーションを活用することにより、燃焼室形状・インジェクタ諸元を効率的に設計した(図10)。

燃焼方式の基本コンセプトに対して、噴射方式の基本コンセプトとしては図11に示すマルチ噴射を有効に利用することにより、エミッション低減と低燃費の背反する命題に対して最適化を行った。Tier3 SAA6D140E-5 エン

ンでの達成性能は、図12に示すように、Tier3 エミッション規制レベルに対して十分余裕のあるNOx, PM レベルとしながらも、Tier2 エンジンに対して燃費低減を達成している。

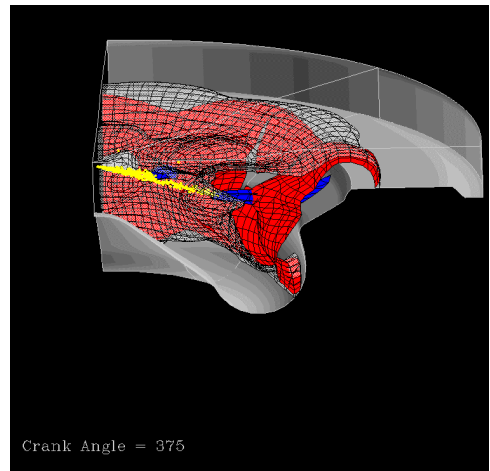


図10 燃焼パラメータ設計のための3Dシミュレーション例

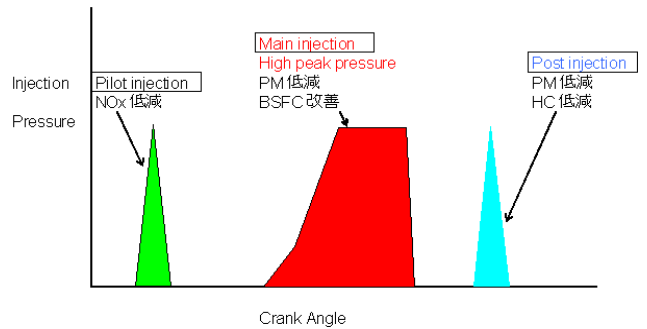


図11 ecot3 エンジンでの典型的な噴射制御コンセプト

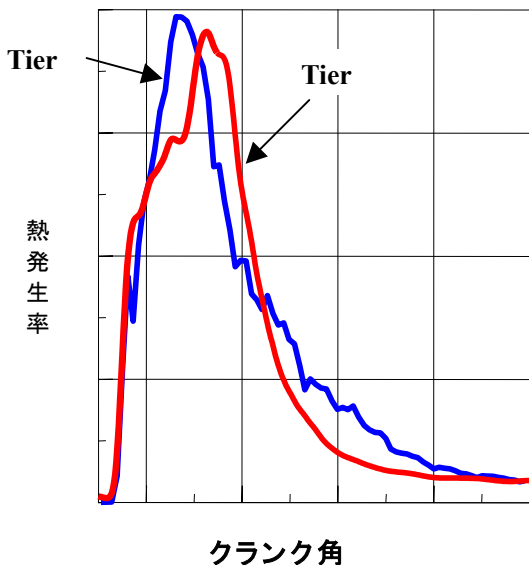


図9 新燃焼コンセプト

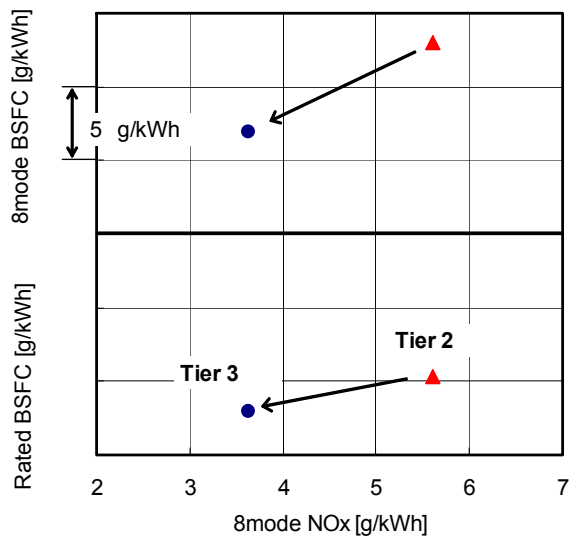


図12 Tier2 → Tier3 性能変化の例 (EGR, 燃焼改良, 空冷アフタークーラ, Heavy Duty コモンレール搭載 SAA6D140E-5 の例)

4.4 過給機および Air-to-Air 給気冷却システム

建設機械用エンジンのエミッション対応技術のもう 1 つの重要な傾向は、トラック用エンジンでも広く採用されている Air-to-Air 過給冷却技術の採用である。これは、エンジンのパワーシリンダに吸入される空気の重量流量の増加と吸入空気温度の低減を目的としており、図 13 に、コマツの油圧ショベルに搭載されたエンジンに示されるように、ターボチャージャで過給され温度上昇した空気を外気との熱交換機 (Air-to-air) によって必要な温度に低減するシステムである。これによって、燃焼温度の低減⇒NOx 低減につながっている。

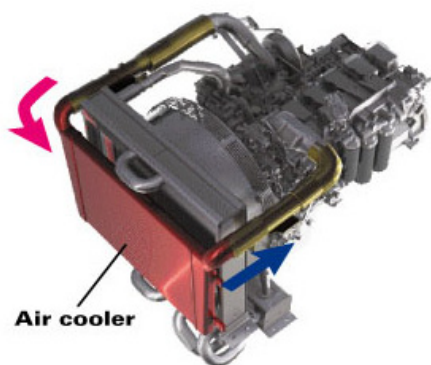


図 13 KOMATSU SAA6D140E-5

図 14 は、Air-to-air システムの効率予測のための CFD を用いたパワーショベル空気流れの可視化計算結果を示す。ラム効果を活用して冷却を行うトラックと違い、建設機械用ディーゼルでは、機械の騒音規制/ヒートバランスの両立とも関係し空気流れの検討・検証は非常に重要な役割を持っている。

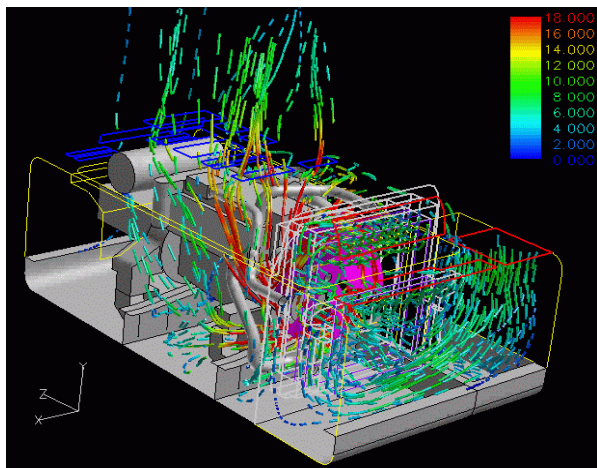


図 14 CFD model for air flow visualization

また、過給機についても、長年にわたり自社開発・生産の過給機 KTR シリーズで過酷な使われ方での信頼性・耐久性技術を確立してきており、今回さらに中型エンジン用に KTR90 (図 15) を新開発し、系列の拡充を図った。尚、Tier3 では、EGR 装着の場合でも高出力と良好な燃焼特性の両立が得られるように、コンプレッサバックワード角度の最適化、インレットリサーキュレーションの最適化により高圧力比高効率化を実現した。

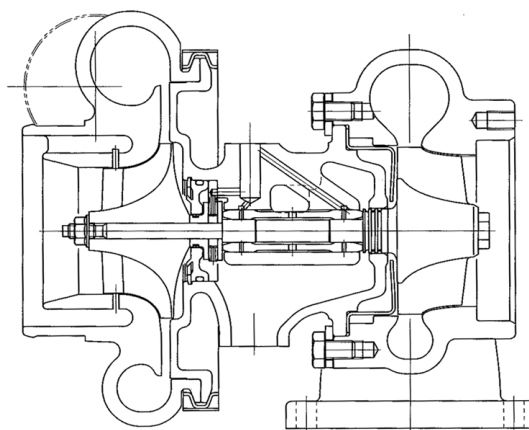


図 15 新開発 KOMATSU KTR90 ターボチャージャ

4.5 ツインバルブ EGR システム

11.0L 以上の中大型エンジンには今回新たにクールド EGR システムを開発して搭載した。15.2L SAA6D140E-5 エンジンの概観を図 16 に示す。第 3 次排気ガス規制を満足しながら現行機と同等以上の性能を確保するため、前述した電子制御高圧コモンレールシステムに加え、コマツ独自のツインバルブ・バイパスアシスト式油圧駆動電子制御クールド EGR システムを開発した。

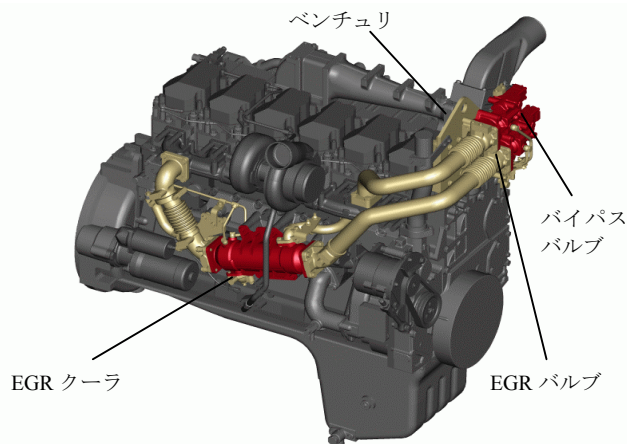


図 16 SAA6D140E-5 エンジン概観

図 17 に EGR システムの構成を示す。独自で開発した油圧駆動式電子制御バルブを、EGR バルブとバイパスバルブのツインバルブシステムとして採用し、建設機械の使い方を考慮し、低回転速度域から定格出力点までエンジン使用域全域で高効率の性能を達成するための最適な EGR 率を実現した。高 EGR 率と均一な EGR ガスを実現するためのベンチュリ機構を採用、その設計にあたって最適化を図るため実施した流体解析の例を図 18 に示す。

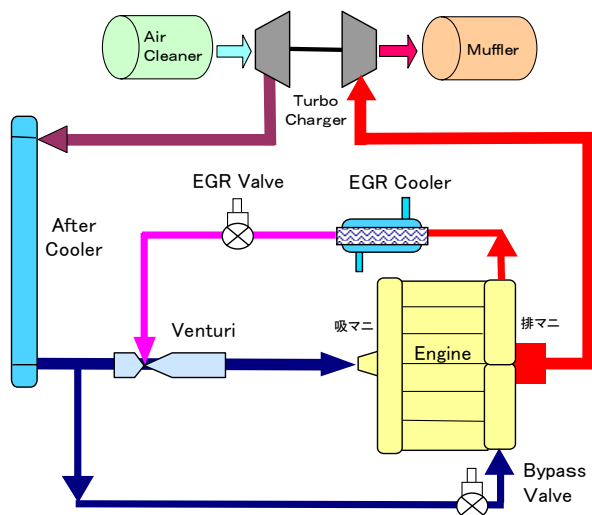


図 17 ツインバルブ EGR システム

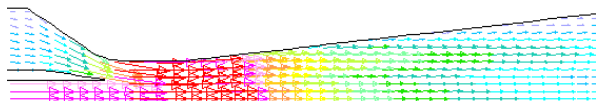


図 18 ベンチュリ機構 流体解析例

5. 騒音

2006 年から欧州では建設機械に対して EU ダイナミック騒音 2 次規制が施行される。従って今回のエンジンシリーズの開発においてエンジン本体の静粛性は重要な開発ターゲットのひとつであった。

エンジン本体騒音については、電子制御式コモンレールシステムによるパイロット噴射によって燃焼騒音の低減を図った。

また大型ハイブリッドファンと油圧駆動制御を合わせて車体冷却システムを効率アップし、車体トータルの低騒音化を達成した。

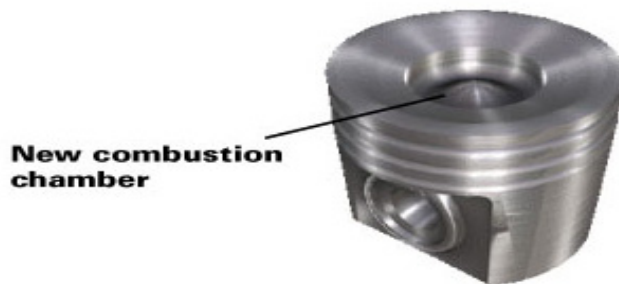
6. 信頼性・耐久性

今回の ecot3 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、新噴射システムの評価あるいは、EGR システムの評価のため、

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。それらのテストコードを満足するため、高効率燃料フィルタレーションシステムの開発、高サルファ燃料（北米 2006 年 off road 用燃料の Max 5,000ppm サルファレベル）に対しても十分耐久性のある特殊ステンレス鋼 EGR クーラの開発、前述したコマツ独自設計の油圧駆動式電子制御 EGR バルブの開発などを行った。その結果として、ecot3 エンジンシリーズは、建設機械をはじめとした産業用エンジンが使われるあらゆる過酷な環境および使用条件において十分な信頼性・耐久性が確保できていることを検証した。

エンジンの骨格をなすピストン等主運動系については、既に高信頼性・耐久性と定評の高いこれまでのコンポーネントに対して、さらにピストンクーリングノズル、ピストンリングに改良を加え、EGR との組合せにおいても、これまで以上の高い耐久性を実現することができた。

主要コンポのひとつであるコマツ独自の鋳鉄一体型ピストン（FCD ピストン）を図 19 に示す。その高温高強度の特性によって、耐久性を落とすことなく、前述した新燃焼方式を実現することができた。



New combustion chamber

図 19 FCD ピストンおよび燃焼室

7. おわりに

新たに開発した第 3 次規制対応“ecot3”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。

建設機械用ディーゼルに適用されるエミッション低減技術は、燃焼改善技術の領域で極めて重要な変革期にきているといえる。建設機械用として要求されるエネルギー密度とエネルギー総合効率を鑑みると、まだディーゼルエンジンが他の動力源に簡単に置き換えられるには時間がかかると思われるが、地球環境への負荷インパクトを最小にし続けていくことと、より優れた効率のより良い機械を作る、という使命を常に忘れぬようにすることは、いつの時代においても変わらぬ最も重要なことと考えている。その意味で、低燃費を追求し続けた本エンジンの開発コンセプトが、社会のニーズに合致し、かつ、お客さまに満足して御使用いただけるエンジンとなっているものと確信している。

市場導入から約 1 年が経過し、これからさまざまな市場評価結果が出てくると思われる。それらの市場情報に注目し、問題発生時には、「報・連・相」により早期対応を心がけていきたい。

参考文献

ENGINE TECHNOLOGY April 2006

「コマツ ecot3 エンジン」の先端テクノロジー

筆者紹介



Hideki Karino

かりのひでき
狩野 秀樹 1972 年、コマツ入社。
現在、(株)アイ・ピー・エー エンジン設計
グループ所属。



Hatsu Andou

あんのはつお
安藤 初男 1983 年、コマツ入社。
現在、(株)アイ・ピー・エー エンジン設計
グループ所属。



Hirofumi Takanuki

たかぬまひろふみ
高貫 弘文 1991 年、コマツ入社。
現在、(株)アイ・ピー・エー エンジン設計
グループ所属。

【筆者からのひと言】

ディーゼルエンジンの排気ガス規制対応技術は継続性が重要です。Tier1→Tier2→Tier3 と蓄積してきたものを基礎にし、これからさらにハードルの高い Tier4 対応に向けて挑戦し続けていきたいと考えています。