

## 技術論文

Tier3 対応 4D95 エンジンシリーズの開発  
Development of 4D95 Engine Series Meeting Tier3

田中正樹  
Masaki Tanaka  
猪尾圭輔  
Keisuke Inoo  
大島純  
Jun Oshima  
篠原正喜  
Masaki Shinohara

第三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・市場導入してきたが、このたび ecot3 エンジンのアンカーとも言うべき 4D95 エンジンシリーズの開発・市場導入を完了した。排気ガス規制だけでなく、社会的要求から低騒音・低燃費もエンジン開発においては重要な命題であるが、4D95 エンジンシリーズでは最新の排気ガス規制達成手段を織込むことで、これらの命題をクリアしつつ、小型エンジンのもう一つの命題である搭載性・汎用性についても、それらを損なうことなく、バランスのとれたエンジンに仕上がった。本稿では、4D95 エンジンシリーズ 4 機種について、その概要ならびに技術的特長について紹介する。

The ecot3 engine has been developed and sold on the market as a Komatsu engine series that complies with the Tier3 exhaust gas regulation. Komatsu has recently completed the development and market entry of its 4D95 engine series as the anchor engines in the series. Not only exhaust gas regulation, but also low noise and a high fuel consumption efficiency are the important missions in engine development as social demands. The 4D95 engine series accomplishes these missions and features a good balance without sacrificing the engine placement property in the vehicle and versatility, which are other missions of the small engine, by incorporating the state-of-the-art technology to clear the exhaust gas regulation.

Four models in the 4D95 engine series are overviewed and their technical features are introduced.

*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, 渦流室式

## 1. はじめに

コマツにおいては、第三次排気ガス規制に対応するエンジン ecot3 の開発・商品化を順次進めてきた。75kW～560kW の出力範囲をカバーする排気量 4.5～23 リッタのエンジン系列については、2006 年初までに商品化を完了しているが、コマツのエンジン系列では最も排気量が小さい 4D95 シリーズ (排気量 3.3 リッタ) の商品化をこのたび完了した。

第二次排気ガス規制対応 4D95 シリーズエンジンは、40kW～75kW の出力を無過給(NA)、ターボ付 (T)、ターボ・空冷アフタークーラ付 (TAA) の 3 つのアスピレーションと、機械式燃料噴射ポンプの組み合わせでカバーしてきたが、さらに厳しくなった第三次排気ガス規制に対

応するために、電子制御・高圧噴射システム (コモンレールシステム) を搭載する仕様を追加し、最大 82kW までカバーした。また、搭載性、汎用性を考慮して、第二次排気ガス規制と同じ出力領域をカバーする仕様には機械式燃料噴射ポンプを継続採用して、エミッション対応のため NA、T 仕様の燃焼方式を渦流室式 (IDI) とした。

本稿では、コマツ ecot3 シリーズのアンカーとも言うべき 4D95 シリーズの概要ならびに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、米国 EPA 規制を代表例に、4D95 シリーズでの 56kW-75kW における Tier1 ⇒ Tier2 ⇒ Tier3 ⇒ Tier4 規制値の推移を、主たる規制である NOx + NMHC と PM エミッションを軸として示したものである。マクロ的に、NOx, PM といった主たる規制値は、段階的に約 30%レベルずつの低減が課せられてきており、1996 年から適用された米国 EPA Tier1 規制レベルと 2007 年、或いは 2008 年から開始された米国 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 1/2 のレベルに、さらに 2015 年から始まる 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。

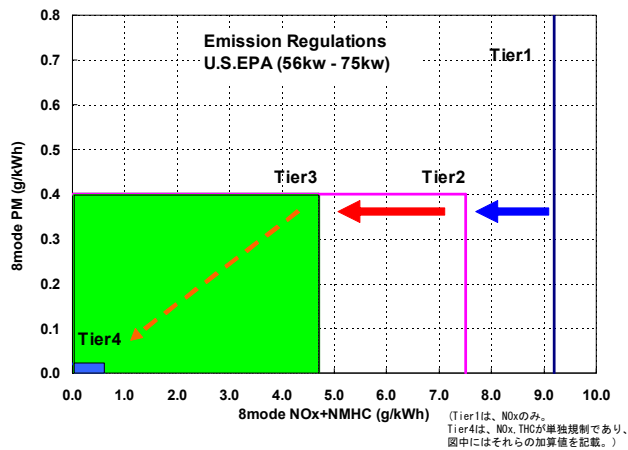


図1 History of NOx+NMHC and PM emission Level

## 3. 4D95 エンジンシリーズ概要

4D95 シリーズはコマツ ecot3 エンジンシリーズの中では最も排気量の小さい4気筒、ボア径 95mm、ストローク 115mm、総排気量 3.3 リッタのエンジンである。コマツ ecot3 エンジンシリーズの総排気量と定格出力範囲の関係を図2に、4D95 エンジンシリーズの主要諸元を表1に示す。

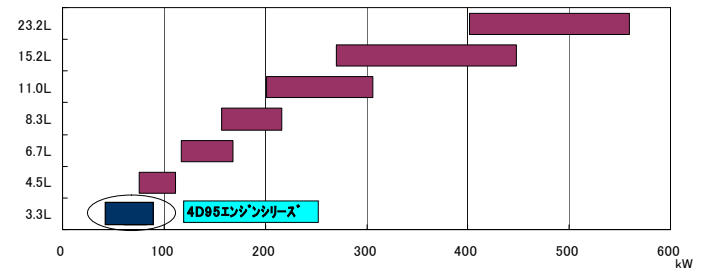


図2 コマツ ecot3 エンジンシリーズ

表1 4D95 シリーズ 主要諸元

Model	unit	4D95LE-5	S4D95LE-5	SAA4D95LEM-5	SAA4D95LE-5
気筒数	-	4			
ボア×ストローク	mm	95×115			
排気量	L	3.3			
出力範囲	kW	40-48	42-55	56-63	50-82
給気方式	-	NA	T	TAA (CAC)	TAA (CAC)
燃焼方式	-	IDI	IDI	DI	DI
燃焼室	-	-	-	2 段燃焼室	2 段燃焼室
燃料噴射装置	-	分配型ポンプ	分配型ポンプ	分配型ポンプ	コモンレールシステム
最高噴射圧	MPa	30	30	65	110
圧縮比	-	21.0	20.8	19.0	17.3
ターボチャージャ	-	無	スタンダードターボ	高圧力比ターボ	高圧力比ターボ
圧力比	-	-	1.4	2.4	2.4
Control	-	メカニカル	メカニカル	メカニカル	電子制御
EGR	-	無	無	無	無

### 3.1 SAA4D95LE-5 エンジン概要

4D95 シリーズの中で高出力領域をカバーするのが SAA4D95LE-5 エンジンである。このエンジンには、中大型エンジンと同様に電子制御・高圧コモンレールシステム (HPCR) を採用した。一方で EGR を必要としない第三次排気ガス規制対応を目指し、空冷アフタークーラを搭載し、燃焼室形状の改良を主とした燃焼改善により、第三次排気ガス規制に適合した。SAA4D95LE-5 エンジンの外観を図 3 に示す。以下に本エンジンに採用した技術を紹介する。

なお、本エンジンは PC138-8 を初めとしたコマツ建設機械に搭載されている。

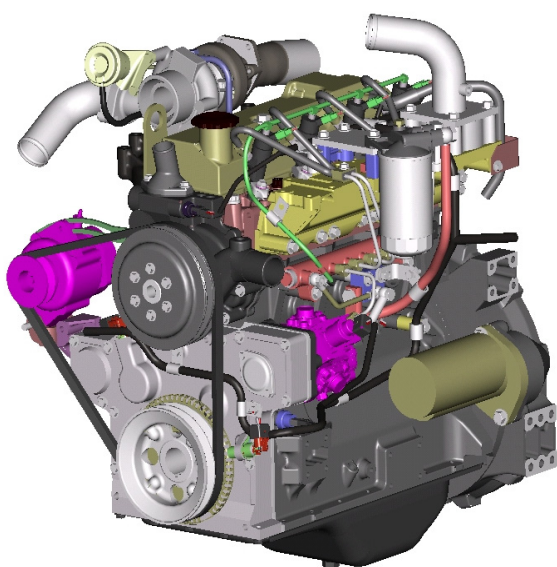


図 3 SAA4D95LE-5 エンジン外観図

#### 3.1.1 コモンレールシステム

コモンレールシステムは、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である。コマツは、建設機械用中大型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、建設機械用として要求される品質確認を行い、コモンレールシステムの細部にいたるまで改良を加え、高い信頼性と耐久性を培ってきた。

SAA4D95LE-5 エンジンでは、さらに小型エンジン用として改良を加え、小型コモンレールシステムを開発した。

図 4 に今回開発した小型コモンレールシステムの外観を示す。

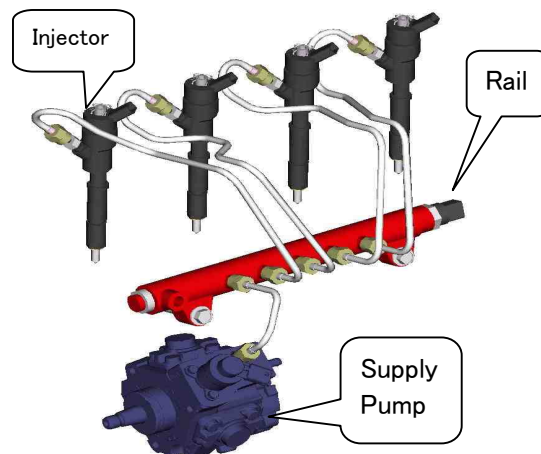


図 4 小型 コモンレールシステム外観図

#### 3.1.2 過給機および Air-to-Air 給気冷却システム

SAA4D95LE-5 エンジンでは、コマツ ecot3 エンジンシリーズのキーテクノロジーである Air-to-Air 過給冷却技術を採用した。これは、エンジンの筒内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にしており、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 (Air-to-Air 冷却) により、冷却するシステムである。これによって、高性能を維持しつつ、燃焼温度の低減、すなわち NO<sub>x</sub> を低減させることが可能となる。

また、ターボチャージャについては、コンプレッサの翼形状の最適化、空気取入口の改良により、高圧力比かつ高効率化を実現した。

### 3.1.3 新燃焼方式

SAA4D95LE-5 エンジンでは、燃焼改善を主眼とした新燃焼方式を採用した。ピストンは、大小二つのキャビティを持ち、燃焼初期のNOx低減と、燃焼後期でのPM低減に寄与している。この結果、燃焼期間の大幅な増大なく、エミッションの低減を達成した。図5に新燃焼方式燃焼室の外観を示す。

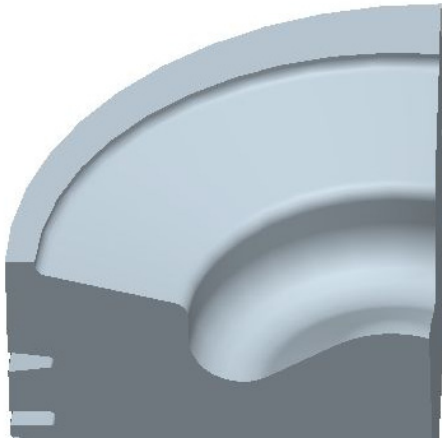


図5 SAA4D95LE-5 エンジン用燃焼室形状

SAA4D95LE-5 エンジンでのエミッション性能、本体騒音を各々図6、図7、に示す。第三次排気ガス規制に対して十分余裕のあるNOx+NMHC, PM レベルを達成した。また燃費率に関しても、第二次排気ガス規制対応エンジンと同等の燃費率を確保した。

また、コモンレールシステムの特徴を生かし、マルチ噴射などにより第二次排気ガス規制対応エンジンに対して、使用回転全域で約1~2dB(A)の低騒音化を達成した。

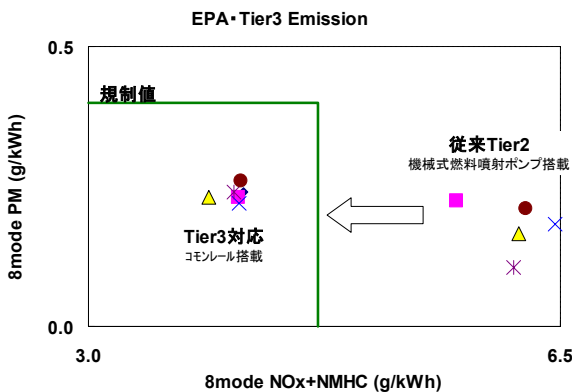


図6 SAA4D95LE-5 エンジンのエミッション性能

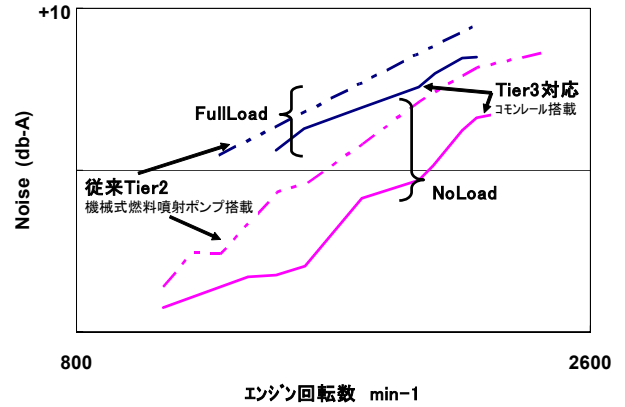


図7 SAA4D95LE-5 エンジン本体騒音

この新燃焼方式により、中大型エンジンで既に使われているEGR (Exhaust Gas Recirculation) 技術を使うことなく、第三次排気ガス規制に適合した。またECM (Engine Control Module) はEGRを搭載する中大型エンジン用ECMに対してEGR駆動部分を割愛することで簡素化を行い、小型エンジンにとって重要なコスト競争力に寄与している。

### 3.2 SAA4D95LEM-5 エンジン

SAA4D95LEM-5 エンジンは、3.1項で紹介したSAA4D95LE-5 エンジンと基本設計を同じくして、機械式燃料噴射ポンプを搭載した56kW~63kWの出力範囲をカバーするエンジンである。機械式燃料噴射ポンプではコモンレールシステムのような高圧噴射、マルチ噴射、高い噴射時期の自由度が得られないことから、SAA4D95LE-5 エンジン用新燃焼方式に対して燃焼室のチューニングを行い、第三次排気ガス規制を達成することに成功した。

### 3.3 S4D95LWE-5, 4D95LWE-5 エンジン

S4D95LWE-5, 4D95LWE-5 エンジンは、各々48kW～55kW, 40kW～48kW の出力範囲をカバーする渦流室式 (IDI) エンジンである。IDI エンジンは渦流室 (Swirl Chamber) といわゆる副室と、主室の2つの燃焼室を持ち、副室での低温燃焼により NOx の生成を抑え、副室から出た燃焼ガスをさらに主室で燃焼させることで PM の発生を抑えることが可能である。4D95LWE-5 エンジンの外観を図8に示す。以下に本エンジンに採用した技術を紹介する。

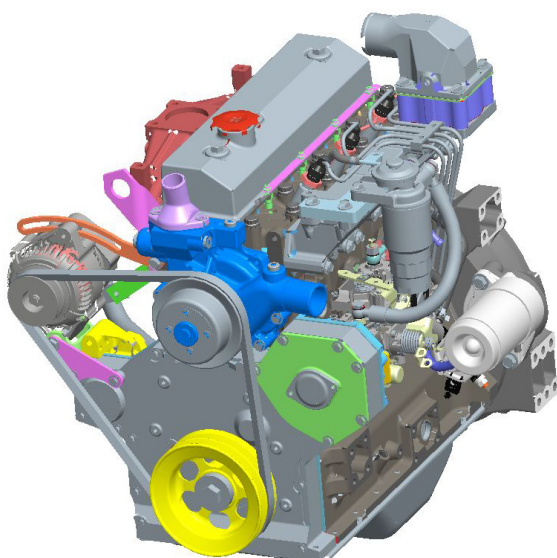


図8 4D95LWE-5 エンジン外観図

#### 3.3.1 IDI 用燃焼室

IDI エンジン用燃焼室の断面を図9に示す。

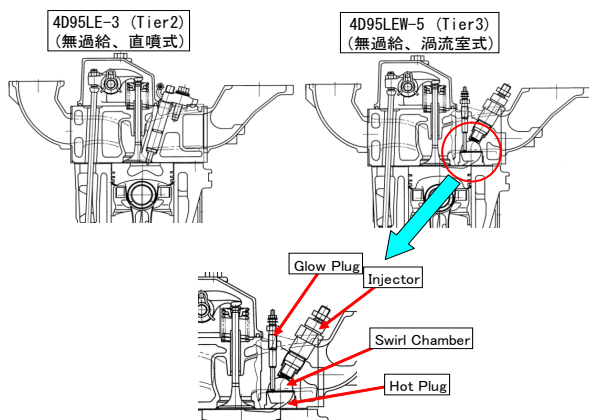


図9 IDI エンジン用燃焼室断面図

IDI エンジンの燃焼は、以下の二つの燃焼形態から構成される。一つ目は、圧縮行程時にシリンダ内の空気が副室内に送られる際に発生するタンブル流 (縦渦流) と、インジェクタより噴射される燃料が混合されて起こる一次燃焼。二つ目は、副室内の燃焼ガスがピストンの下降に伴い、ホットプラグのスロート部から噴出され、主室内で起こる二次燃焼である。

S4D95LWE-5, 4D95LWE-5 エンジンでは、第三次排気ガス規制に適合するため、ホットプラグと呼ばれる副室を構成する部品のスロート部 (燃焼ガス流出部) 形状と、主室を構成するピストン燃焼室形状のチューニングにより燃焼改善を行った。具体的には上述の各形状を三次元モデル化し、空気および燃焼ガスの流れシミュレーションを行った。図10にシミュレーション結果の一部を示す。

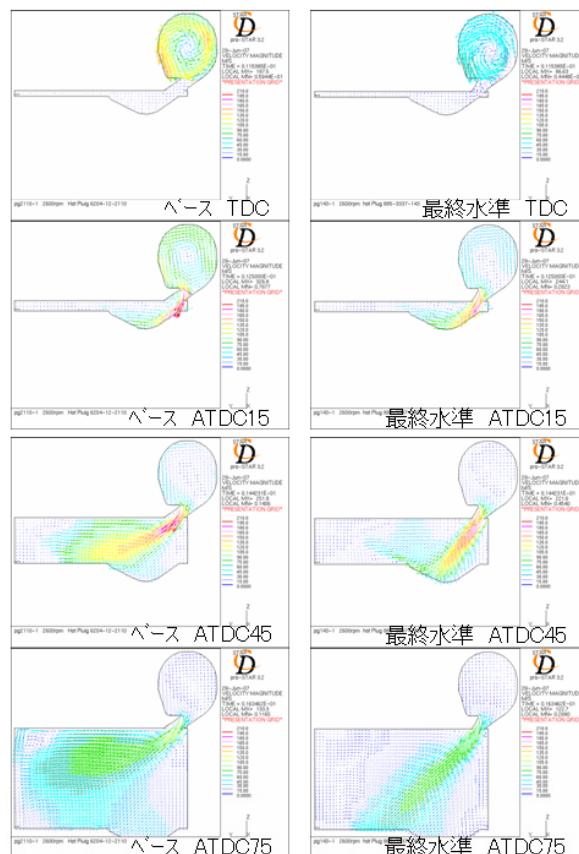


図10 空気・燃焼ガスのシミュレーション結果

最終水準のシミュレーション結果が示すように、副室内に発生する空気のタンブル流（縦渦流）を小さくすることで、燃料と空気の混合が抑制され、NO<sub>x</sub> が低減できると予測した。また、スロート形状を最適化させることにより、副室からの燃焼ガス噴出速度を上昇させ、後期拡散燃焼における空気の利用率を高めて、黒煙、PM エミッションが低減可能と予測した。本シミュレーションをベースに設計を行い、図 11 に示すようにエミッション性能を改善させた。

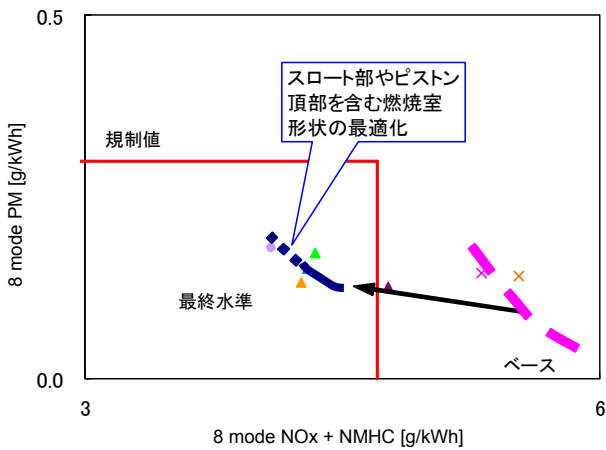
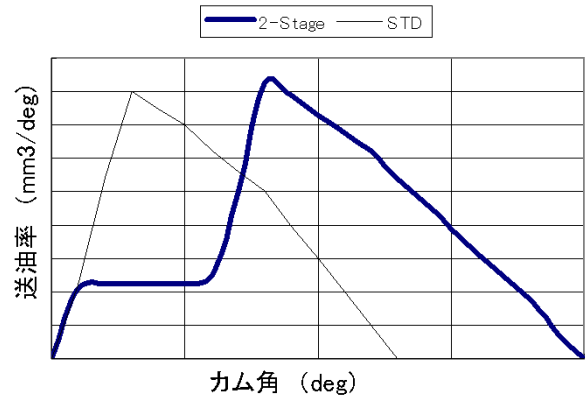


図 11 4D95LE-5 エンジンのエミッション性能

### 3.3.2 IDI エンジン用機械式燃料噴射ポンプの特徴

#### (1) 2-Stage カムシャフト

図 12 に機械式燃料噴射ポンプの燃料送油率の比較を示す。一般的な燃料噴射ポンプでは、圧送始めに燃料送油率が最大となるのに対して、IDI 用燃料噴射ポンプでは、2stage カムを採用したことにより、圧送始めの燃料送油率を抑えることができた。これにより、初期の燃料と空気の急激な混合を抑え、燃焼温度を抑制することで NO<sub>x</sub> の低減を行った。また、燃焼後期に燃料送油率を上昇させることで、副室から主室へ噴出する燃焼ガスの流速を上げて、後期拡散燃焼を促進させ黒煙と PM を抑制することができた。



2-Stageカムの送油率特性

図 12 燃料噴射ポンプの送油率特性

#### (2) CSD (Cold Start Device) 始動時進角装置

NO<sub>x</sub> を低減させるために、噴射時期を遅角していくと、噴射時期の自由度が低い機械式燃料噴射ポンプでは、低温時の始動性や白煙抑制に必要な進角量がとれない。そこで、低温時のみ噴射時期を進角させる装置 (CSD—Cold Start Device) を燃料噴射ポンプに装着して、この問題を解決した。その外観を図 13 に示す。CSD とは、冷却水温により膨張・収縮するワックスを封入したピストン部と噴射ポンプの進角装置とをリンクさせることで、低温時に噴射時期を進角させることができる装置である。低温時には噴射時期を最大 10°CA 程度進角させることができ、良好な始動性を達成し白煙も抑制できた。

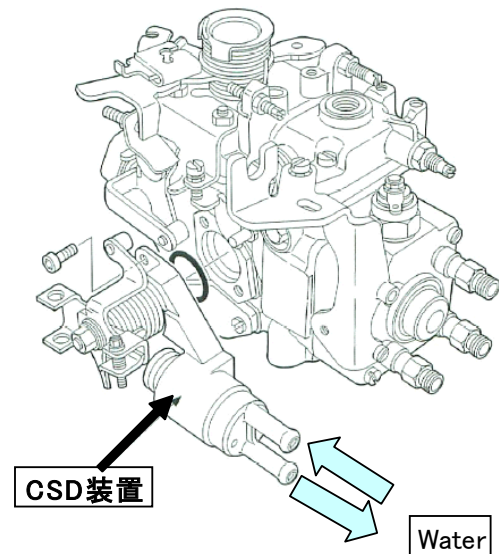


図 13 CSD 外観図

3.3.3 4D95LWE-5 エンジンの性能達成状況

(1) エミッション性能

37kw 以上 56kw 未満の出力範囲の米国 EPA Tier3 規制においては、Option1 (Opt1) と Option2 (Opt2) の二つの規制値から選択可能であり、各々の規制値、及び暫定 Tier4 の開始年度は、表 2 のようになっている。

表 2 米国 EPA 規制値 (37kW 以上 56kW 未満)

EPA Tier3 規制	規制値 (g/kWh)		暫定 Tier4 開始年度
	NOx+NMHC	PM	
Opt.1	4.7	0.3	2013 年
Opt.2	4.7	0.4	2012 年

Opt1 を選択することには、以下のメリットがある。

- ・ 欧州 EU 規制と米国 EPA 規制で暫定 Tier4 開始年度が 2013 年と同じになり、両規制対応エンジンの導入時期を同じとすることができる。
- ・ 暫定 Tier4 規制対応では DPF などの後処理装置が必要となる可能性があり、それらによるエンジンのコストアップが否めないが、1 年長く安価な Tier3 対応エンジンが供給できる。

以上のようなメリットも考慮し、この出力範囲をカバーする 4D95LWE-5 エンジンおよび、S4D95LWE-5 エンジンでは、Opt1 を選択し、その規制に適合することができた。代表として 4D95WE-5 のエミッション性能を図 14 に示す。

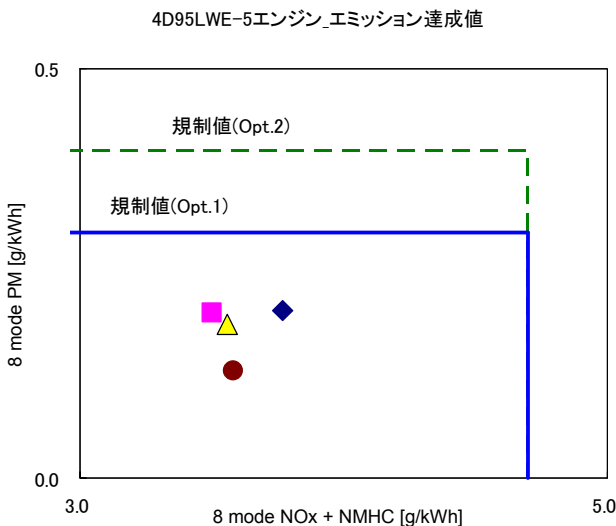


図 14 4D95LWE-5 エンジンのエミッション性能

(2) 本体騒音性能

代表として 4D95LWE-5 エンジンの本体騒音性能を図 15 に示す。4D95LE-5 エンジンでは、直噴式である第二次排気ガス規制対応エンジンに対して、使用回転全域で約 3 ~4dB (A) の低騒音化を実現した。

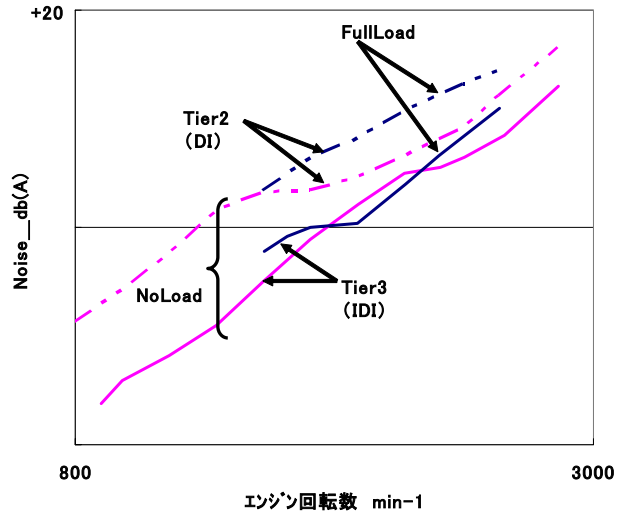


図 15 4D95LWE-5 エンジンの本体騒音

## 4. おわりに

コマツ ecot3 シリーズのアンカーとも言うべき 4D95 シリーズについて、その特徴とエミッション低減技術に関して紹介した。今回の開発では空冷アフタークーラとコモンレールシステムを搭載した仕様を新規開発した。コモンレールシステムのポテンシャルは非常に高く、SAA4D95LE-5 エンジンは第三次排気ガス規制を達成しつつ、すばらしい性能を発揮し、定格出力 82kW という高出力も達成した。しかし、同じ手段を定格出力 48kW の 4D95LWE-5 エンジン(無過給)に水平展開できるか? と言うと、そうではない。小型エンジンの排気ガス規制対応設計の難しさは、「コスト」と「出力に応じた排気ガス規制達成手段」のバランスをとることにある。高出力仕様は高機能な最新技術を採用しても、それに見合った高性能が供給でき、その高性能に見合った価格を設定することができるが、同じことを低出力エンジンに行った場合、出力あたりの価格が大幅にアップし、競争力を失う。第三次排気ガス規制対応 4D95 シリーズでは、TAA, T, NA の 3 つのアスピレーションと、コモンレールシステムと機械式燃料噴射ポンプの 2 つの燃料噴射系を設定し開発してきたが、一言で「4D95 シリーズ」と言うものの、実際は 4 機種の異なったエンジンを開発したに等しいと思う。

今後エミッション規制はさらに厳しくなっていく。それに対応するための EGR, DPF など、まだ高価なエミッション低減技術を織込むことによるコストアップをどのように「中和」していくか、同エンジン系列の中で低出力範囲をカバーするエンジンに織込むエミッション低減技術をいかにシンプルで安価なものでまとめられるか、の 2 つが小型エンジンにとっては「生き残りのキー」になると思う。

## 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



Masaki Tanaka  
田中正樹 1992 年、コマツ入社。  
現在、(株)アイ・ピー・エー エンジン開発G所属。



Keisuke Inoo  
猪尾圭輔 1988 年、コマツ入社。  
現在、(株)アイ・ピー・エー エンジン開発G所属。



Jun Oshima  
大島純 1982 年、コマツ入社。  
現在、(株)アイ・ピー・エー エンジン開発G所属。



Masaki Shinohara  
篠原正喜 1991 年、コマツ入社。  
現在、(株)アイ・ピー・エー 燃焼噴射系開発G所属。

## 【筆者からのひと言】

第三次規制対応エンジンの開発が完了し、これから第四次規制対応エンジンの開発に向かわなければなりません。本文中でも述べましたように、第四次規制対応のためには、EGR や DPF などの装置を搭載しなければならない可能性があります。これらの搭載により、小型ディーゼルエンジンに求められるコンパクトさコスト競争力などの要求特性が損なわれないよう、エンジン本体の基本性能の改良にも取り組み、全ての面で競争力のあるエンジンにして行きたいと考えています。