

技術論文

Tier3エンジンecot3の開発(2)

Development of ecot3 for Tier3 engine (2)

吉 富 正 幸
Masayuki Yoshitomi
小 栗 秀 夫
Hideo Oguri

第3次の排気ガス規制に対応する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。排気ガス規制だけでなく、社会的要求から低騒音や低燃費もエンジン開発の重要な命題であり、新しい技術を織り込んで ecot3 エンジンは、その名の通り、環境に配慮したエンジンに仕上がった。前号では中大型の ecot3 エンジンを紹介したが、本稿では小型の ecot3 エンジンである 107 エンジンおよび 114 エンジンについてそ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. Not only the emission regulation but also the low noise and fuel economy are other important propositions, and ecot3 engine family has been launched as an ecological power source as its name indicates. Medium and Large ecot3 engines were introduced in last Technology Report. 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

1. はじめに

前回、第157号にてコマツ ecot3 中大型エンジンの概要ならびにその技術的特長を紹介したが、今回は 75kW から 225kW の出力レンジをカバーする、小型の ecot3 エンジンについてその特徴を紹介する。

本編で紹介するのは Tier3 エミッション規制対応の SAA6(4)D107 及び SAA6D114 エンジンで、織り込み技術も中大型のエンジンと多少異なっている。大きく異なる点は、クールド EGR 技術を使うことなく、Tier3 排気エミッション規制に対応させているという点である。難しいチャレンジではあったが、電子制御高圧コモンレールの採用、燃焼技術の最適化によって、最終的に従来並みの燃費を維持しつつ、Tier3 エミッション基準を達成することができた。

2005 年半ばから PC200-8 及び PC300-7E0 を皮切りに量産が開始され市場で好評を博している、Tier3 規制対応の SAA4(6)D107 と SAA6D114 エンジンについて以下に紹介する。

2. 建設機械用エンジンのエミッション規制動向

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。

SAA4(6)D107 及び SAA6D114 エンジンがカバーする 56 ~ 225kW の出力レンジでは、出力によって規制開始の時期および規制値自体が若干異なっている。130kW 以上の出力レンジに関しては'06年から規制が開始されたが、'07年より 130kW 以下の出力のエンジンについても、各出力レンジに応じて順次規制が開始される。

Tier3 の規制では Tier2 に対して粒子状浮遊物質(PM)の規制値は据え置きで窒素酸化物(NOx)の規制値が▲40%に設定されており、燃費効率や PM を悪化させずに、厳しい NOx の規制値にいかにして適合させるかが開発の焦点となった。

3. ecot3 小型エンジンシリーズ

ecot3 : ecology & economy – technology3

3.1 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 4.5L と 6.7L 及び 8.3L の中小型 ecot3 エンジンシリーズについて紹介する。

図1に ecot3 エンジンシリーズの排気量と出力を示す。この中で 4.5L の SAA4D107 と 6.7L の SAA6D107 エンジンは従来の 102mm ボアのエンジンをベースとしてボア、ストロークを増やして排気量を従来の 3.9L, 5.9L に対し約 14%アップさせ、余裕を持って使えるようにした。また、それまで 114 エンジンを搭載していた一部の機種に載せ換わることで、車両のコスト低減にも寄与している。この排気量アップはシリンダブロックのライナー部分をサイアミーズ構造にすることによってシリンダピッチを従来の 102 エンジンと同じに保ったまま実施しているので、シリンダブロックの外観寸法は従来と同じであり、102 エンジンからの載せ換えに対しても車体への影響がないように配慮されている。

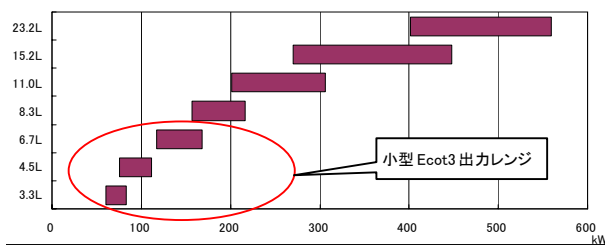


図1 コマツ ecot3 エンジンシリーズ

図2に Tier1 から Tier2 を経て Tier3 へと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推移の概要を示す。

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 SAA4(6)D107, SAA6D114 エンジンシリーズは全てのエンジンが空冷アフタークーラ仕様となっている。

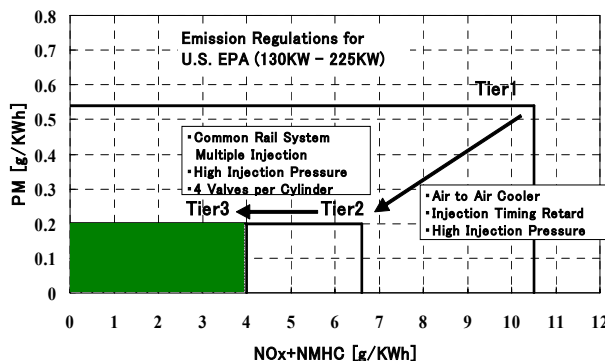


図2 エミッション低減織り込み技術の概要

Tier3 規制対応の命題である窒素酸化物の 40%低減については、燃焼コンセプトの見直し及び噴射時期の最適化

やマルチ噴射による燃焼改善技術の織り込みによって実現した。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高圧噴射による燃料噴霧の微粒化、燃料多段噴射による燃焼後期の燃焼改善等を、電子制御式コモンレール高圧噴射システムを採用することによって実現することができた。

3.2 ecot3 エンジンシリーズの開発の狙い

- 1) 日・米・欧 3 極の第 3 次排気ガス規制すべてに適合
- 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 騒音規制及び国内超低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
- 5) 全世界、多様な環境での使用に耐えられる Tier2 エンジン並みの多用途性の確保

図3に小型 ecot3 エンジンの主要諸元表を掲げる。開発の狙いを達成するため、Tier2 規制対応までの機械制御式燃料噴射ポンプに代わって電子制御式高圧コモンレールシステムを採用している。また、吸排気バルブを従来の 1 気筒あたり 2 弁から 4 弁へと変更することによる吸入空気量の増加と、インジェクタをシリンダの中心に配置することによる燃焼室内の均一な燃料噴霧の効果によって、狙いのエミッション性能を得ている。

Engine Model	Tier2			Tier3		
	SAA4D102	SAA6D102	SAA6D114	SAA4D107	SAA6D107	SAA6D114
Number of Cylinder	4	6	6	4	6	6
Bore×Stroke (mm)	102×120	102×120	114×135	107×124	107×124	114×135
Displacement (ltr)	3.92	5.88	8.27	4.46	6.69	8.27
Aspiration	Turbocharged Air-Cooled Aftercooler			Turbocharged Air-Cooled Aftercooler		
Fuel System	Conventional Mechanical Pump			Common Rail System		
Engine Control	Mechanical			Electronic		
Valve per Cylinder	2 valves per cylinder			4 valves per cylinder		

図3 ecot3 小型エンジンシリーズ主要諸元と織り込み技術

図4にコマツの基幹車両である PC200-8 に搭載されている SAA6D107 エンジンの外観写真を掲載する。



図4 ecot3 シリーズ SAA6D107E-1

4. ecot3 エンジンテクノロジー

今回開発した 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、同時に現行機に対して同等以上のエンジン性能（出力・燃費）及び信頼性と耐久性を確保し、さらに従来エンジンに対して大幅な騒音低減を実現することができた 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、小型から大型まで共通の電子制御システムを使用している。この共通化のため、延べ 10 万時間近くにも及ぶ品質確認を行い、様々な環境条件、使われ方に対して、お客様の期待に十分応えられる耐久性・信頼性を確保するようにしている。

機能的には、コモンレール噴射システムの制御をはじ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。

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。小型の燃料噴射システムは世界的に実績のある Bosch 社製のシステムを採用しており、その中で SAA6D114 エンジンの燃料サプライポンプはカミンズ社製を採用している。

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、Tier2 排気エミッション規制の時点から、中大型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、これまでに培った経験を生かしてエンジン性能を作り込み、低エミッションと高性能を両立させることができた。図 5 に今回採用した Heavy Duty コモンレールのシステム模式図を示す。

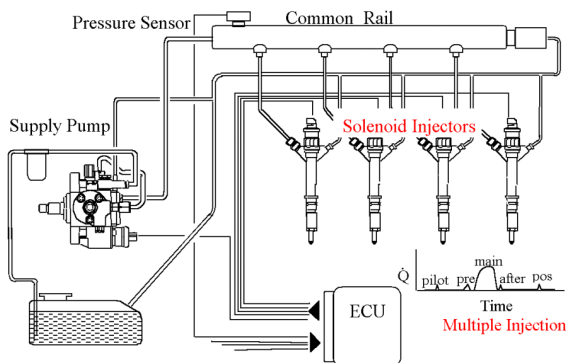


図 5 コモンレール燃料噴射システム

図 6 は、インジェクタの外観写真を示す。インジェクタ上部のソレノイドが、プッシュロッド上の 2 方弁を開閉させることによる燃料圧力バランス切り替えで瞬時の噴射切り替えを行い、マルチ噴射を可能にしている。107 及び 114 エンジンでは同じ Bosch 製のインジェクタを使用しており、耐ダスト性等の検証を行って、使用環境の厳しい建機用の燃料噴射系部品としての品質確認を十分実施したインジェクタである。



図 6 インジェクタ外観写真

図 7 は、小型 ecot3 で採用しているマルチ噴射の模式図である。

- ① パイロット噴射を行うことで主噴射による急激な熱発生を抑え、NOx 生成を抑制する。またパイロット噴射は燃焼騒音低減にも効果がある。
- ② 高出力高回転の領域ではポスト噴射を追加して燃焼後期のススの酸化を促進させ、スモーク、PM の低減を実現した。

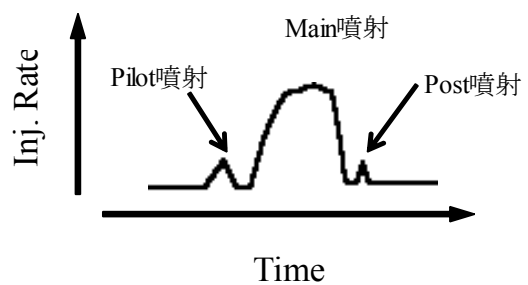


図 7 マルチ噴射の模式図

図 8 は、SAA4(6)D107 エンジン用の燃料サプライポンプの外観と断面のモデルである。本ポンプは Bosch 社製でトラックエンジン用に相当数量の量産実績のある燃料サプライポンプである。燃料潤滑のため軽量コンパクトな構造で、潤滑油の配管もないため、周囲もすっきりとまとめ小型エンジンに適した構造になっている。本ポンプはエンジン回転の 1.33 倍に設定され、3 本のプラン

ジャで燃料を高圧で圧送する。本コモンレールシステムは最高噴射圧 1600bar まで発生することができる。

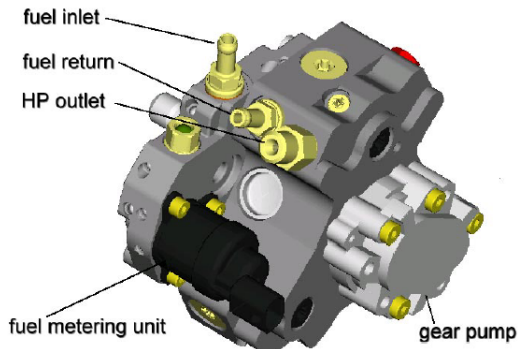


図8 107 エンジン用燃料サプライポンプ

一方で SAA6D114 エンジンの燃料サプライポンプはタンドムの列型プランジャ式でオイル潤滑方式のため、より信頼性に重きをおいた燃料ポンプと言える。その外観図を、図9に示す。

いずれのポンプにしても 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。

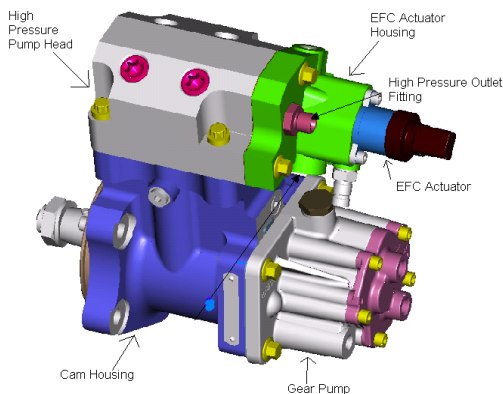


図9 114 エンジン用燃料サプライポンプ (外観)

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特に重点をおいた。中大型エンジンで採用したクールド EGR は、燃費を悪化させずに NOx を低減するのに有効であるが、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は、マイナス要因になってしまう。EGR を用いずに NOx と PM の同時低減を図るため、電子制御コモンレールによる噴射性能のアップ及び燃焼技術開発で高性能・エミッション規制に適合させる新燃焼方式を採用した。

新燃焼方式の基本コンセプトを図10に示す。クールド EGR を用いずにいかにして NOx を低減するかがポイントとなるが、下記の2点をメインコンセプトとして、開発を行った。

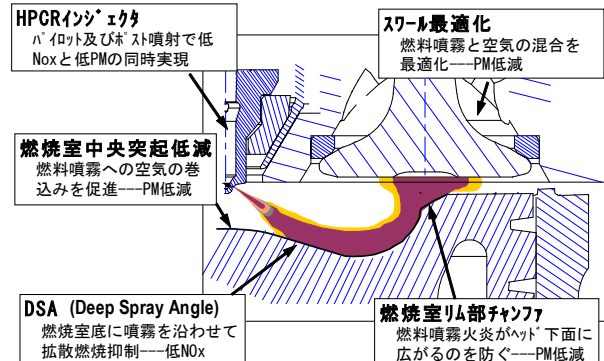


図10 Ecot3 燃焼のコンセプト

- ① 燃料噴射初期の急激な燃焼を抑えることで、燃焼ガスの温度上昇によるサーマル NOx 生成を抑制するように、ピストンの燃焼室形状と燃料噴霧の関係の最適化を行う。
- ② 燃焼後期で活発な燃焼が起こり、ススの酸化を促進させて PM 及びスモークの排出を抑制するような燃焼室形状とする。

前述の燃焼コンセプトを実現させるために、ピストンの燃焼室形状とインジェクタからの燃料噴霧穴径との配置が最適になるように KIVA によるシミュレーション計算とベンチ性能テストを繰り返して行い、エミッションおよび一般性能を作り込んだ。

図11に KIVA による燃焼シミュレーションの解析の結果を掲載する。

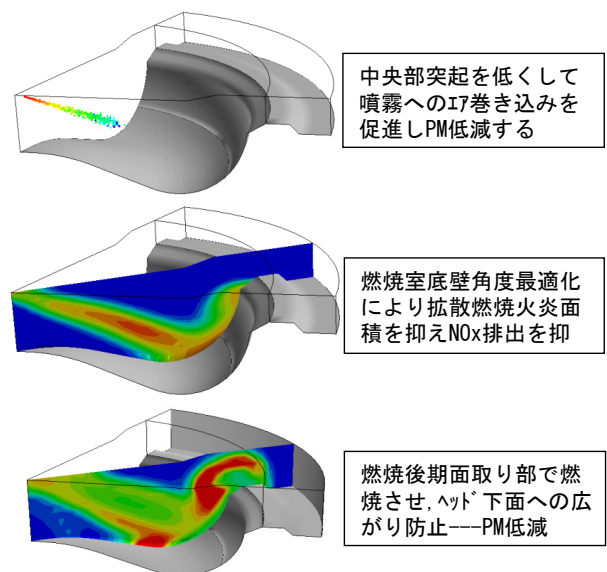


図11 KIVA による燃焼シミュレーション

図 12 の筒内のヒートリリースパターンが示すように、燃焼初期の熱発生が緩やかに進み、初期のサーマル NOx 抑制に貢献し、かつ燃焼後期は急激に熱発生率が落ち込み、後期に一気にススの酸化が進み燃焼を終わらせて、PM 発生を減らしている様子が窺える。

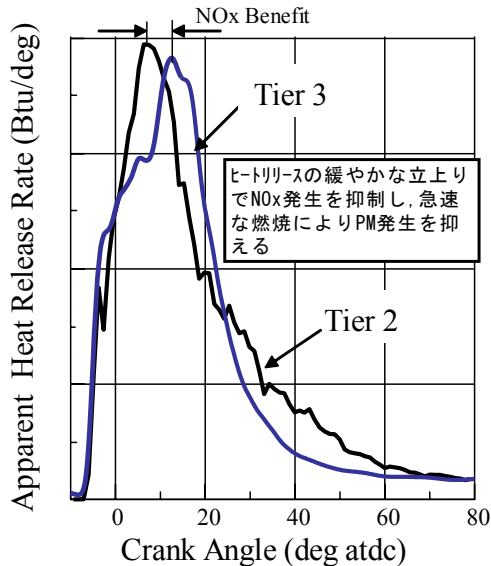


図 12 ヒートリリースパターンの燃焼シミュレーション結果

4.4 エミッションと燃費

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 7 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維持という背反する命題に対して最適化を行った。Tier3 SAA6D107E-1 エンジンでの達成性能は、図 13 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 エンジンに対して同等の燃料消費率を達成している。

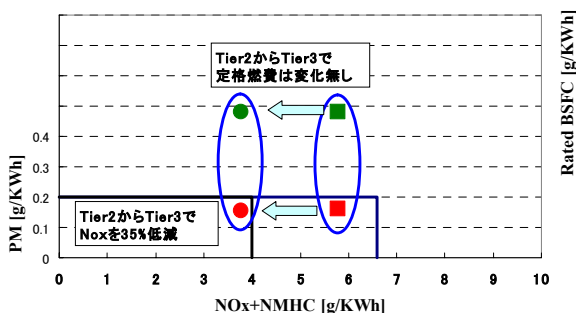


図 13 エミッションと燃費の達成状況

4.5 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。また、PC200-8 は標準で日本国内超低騒音達成を品目として掲げていた。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、107 エンジンシリーズにおいてはリヤギヤトレン構造としてクランク軸の捻り振動の節にギヤを配することでギヤ騒音の低減を図り、またシリンダブロックスカート部のスティッフナの強化によってシリンダブロックの振動による放射音を低減させている。

騒音低減のアプローチとして、下げるべき高い音源を洗い出す必要があり、今回の開発において、ビームフォーミング法を用いて音源の探査を行った。図 14 にビームフォーミング法による音源調査の例を示す

エンジン構造の変更や新手法の導入による音源調査の洗い出しと潰し込みによって、従来エンジンに比較して大幅な騒音低減を達成することができた。



図 14 ビームフォーミングによる音源調査と対応後の様子

図 15 に SAA6D107E-1 エンジンの全負荷時本体騒音を従来の SAA6D102 エンジンとの比較で記載する。負荷時及び無負荷時共、全域で平均 2dB(A)の騒音低減を実現している。

SAA6D107E-1本体全負荷騒音

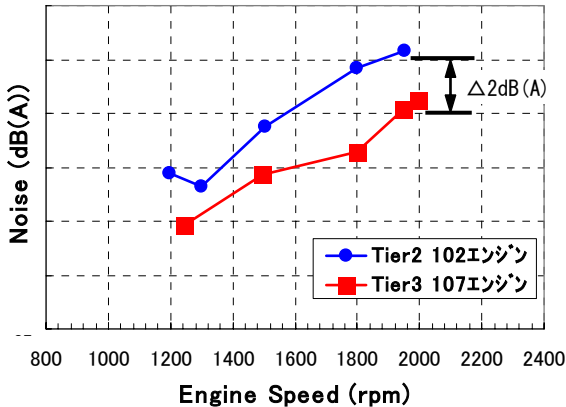


図 15 エンジン本体騒音低減の効果

エンジン全負荷時については、燃焼騒音が支配的であるため、パイロット噴射による緩やかな初期燃焼によって急激なシリンダ内圧上昇が抑えられることで騒音低減に繋がっている。一方無負荷時の騒音はギヤの歯打ち音やシリンダブロックの振動による機械騒音が支配的となるが、リヤギヤトレイン構造やシリンダブロック下部の強化スティフナ等が機械騒音の低減に寄与している。

また、107, 114 エンジン共、車両要求に合わせて、アイソクロナス制御によって軽負荷時のエンジン回転数を下げることでも、騒音低減に寄与している。

4.6 エンジンの始動性

今回、電子制御コモンレール噴射システムの採用で、従来のTier2までの機械制御式燃料噴射システムでは十分制御しきれなかった始動時の燃料噴射特性を最適制御することにより、低温時における良好な始動性を達成しつつ、同時に常温時の黒煙の排出を大幅に低減する事ができた。

また、北米などではセタン価の低い燃料が使用されるため、これまでTier1, Tier2の規制対応時には、制約の多い機械式制御の燃料噴射ポンプでいかに低温始動時の白煙排出を抑えるかが大きな課題であった。今回、電子制御噴射システムを採用することによりセタン価の低い燃料を使用しても、低温始動時の白煙の排出を大幅に低減することにも成功しており、まさに様々な環境条件下で環境に優しいエンジンとなっている。

4.7 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つの重要な要素は、既にTier2規制対応から採用している空冷アフタークーラの技術である。これは、エンジンのシリンダに吸入される空気の密度の増加と吸入空気温度の

低減を目的にしている。ターボチャージャー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 排出量の抑制を行っている。

図 16 に吸気温度と NOx 排出量の関係を示す。吸気温度を5℃下げることによって定格点のNOx 排出量を約7%低減することができる。小型 ecot3 では Tier2 仕様よりも大量の空気をエンジン内に導入してエミッション低減しているため、この空冷アフタークーラがより重要なウエイトを占めている。

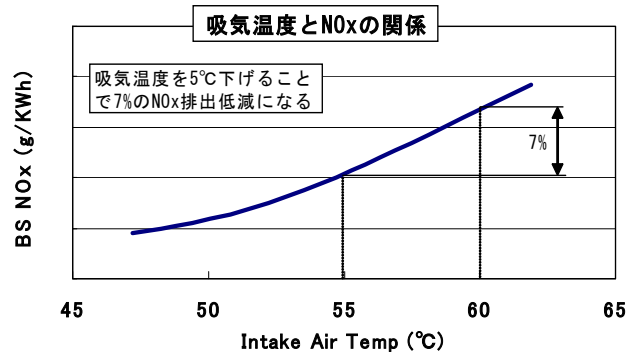


図 16 吸気温度と NOx 排出量の関係

図 17 は、今回開発の SAA6D107 エンジンと当社 Tier2 対応エンジンとの冷却損失の比較グラフである。Tier2 対応エンジン並みの燃焼効率を達成したため、冷却水への熱損失は変化がない。一方で、Tier3 規制を達成するために吸入空気量を増やしたことで空冷アフタークーラ出口温度を従来の Tier2 仕様より 5℃低く設定したため、空冷アフタークーラからの冷却損失は 17%増加したが、エンジントータルとしては4%の熱損失増加にとどめているため、ラジエータや空冷アフタークーラ等の冷却部品の大規模な容量アップを抑えることができた。

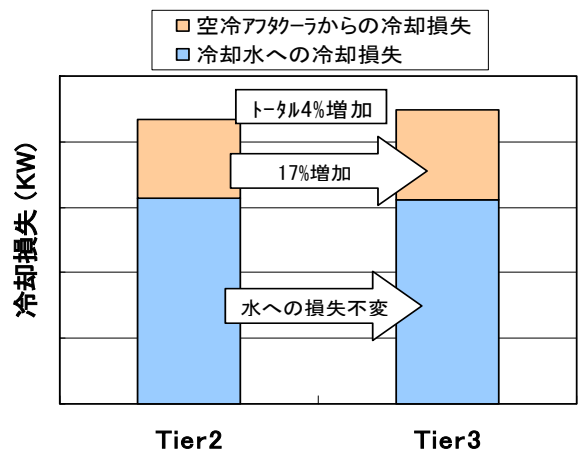


図 17 Tier2 と ecot3 の冷却損失比較

5. 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。特に今回電子制御コモンレールシステムを採用することで、高地や低温時等の様々な環境条件下や粗悪な燃料やオイル等の運転副資材の条件でも、きめ細かな制御が問題なく作動するかが懸念されるため、それらの過酷な条件下での品質確認についても十分なテストを実施した。また、今回からコモンレール噴射システムを採用するに当たって、ダストの多い環境下で燃料噴射システムをプロテクトする高効率燃料フィルタレーションシステムの開発も行い、グローバル展開を睨んでの開発を並行して実施した。

排気量をアップさせた 107 エンジンは構造体をはじめ、主運動、動弁系潤滑系、冷却系、噴射系まで殆どの部品が新規設計であるため、その耐久性・信頼性の確認はベンチでの様々な耐久・過酷テストだけでなく、実車での実用テストも、延べ 10,000 時間にわたって実施し、そこで検出された問題点に対しては確実な対策を織り込み、十分な品質確認に合格した上で量産へと移行した。

6. おわりに

新たに開発した第 3 次規制対応の小型“ecot 3”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。

今回の Tier3 エミッション規制対応では、従来の燃料噴射系の技術では対応できず、新規にコモンレールシステムを採用して対応することができたが、次に予定されている Tier4 の規制に対しては、さらに追加の技術として排気ガスの後処理が必須になってくる。また、排気ガスの規制以外にも、騒音の規制や部品のリサイクル等、環境に対する配慮が社会的に求められる状況にある。今後エンジンに携わるエンジニアとしては、それらの社会的ニーズに対応した商品をタイムリーに市場に投入して行かなければならない。

欧州ではその燃費効率の優位性から、乗用車用のエンジンとしてはディーゼルのシェアが増えている。ディーゼルの弱点であるディーゼルパーティキュレートを低減すれば、熱効率の高いディーゼルエンジンは CO₂ の排出量が少ないため、おのずと環境に優しいエンジンとして生き残って行くものと考えられる。

建設機械についてもハイブリッドや燃料電池などの技術に関して研究開発が進んでいるが、ディーゼルエンジンに取って代わるまでには至らない。ディーゼルエンジンで次の Tier4 に対応する技術を確立すべく、すでに各社次の段階に向けて動き出している。将来紹介する Tier4 エンジンは、排気ガス低減だけでなく、環境にもカスタマーにも優しいエンジンとなるよう日々技術の革新にチャレンジしていかなければならないと感じている。

ecot3 エンジンも市場導入から約 1 年が経過し、これから様々な市場の評価結果が出てくると思われる。それらの市場情報を吸収して、より良いエンジンへと熟成・昇華させていくこと、そしてその情報を Tier4 エンジンへと引き継ぐことが今後の我々の課題である。

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

「Tier3 エンジン ecot3 の開発」コマツ技報 157 号

筆者紹介



Masayuki Yoshitomi

吉富正幸 1981 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。



Hideo Oguri

小栗秀夫 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。

【筆者からのひと言】

Tier3 対応の 107 及び 114 エンジンに世に送り出してから早 1 年が過ぎ、大きな問題もなく、順調な滑り出しだったことで、それまでの開発の努力や苦勞が報われた気分です。と、一息つく間もなくすでに Tier4 に向けた戦いの火蓋が切られて落とされ、すでに Tier3 エンジンは IPA にとってはもう過去のもの。Tier4 エンジン量産に向けての IPA の次のチャレンジは、いよいよ佳境に入っているように感じています。