

Tier4 Final 排出ガス規制対応エンジンの開発

太田 弘・加藤 隆志・長坂 昇平

2014年1月より施行されている米国のEPA Tier4 Final 排出ガス規制、欧州EUによるStage IV、および2014年10月から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 Final 排出ガス規制」と記す）では、窒素酸化物（以下NOxと記す）の排出量を従来規制値比で、1/5にまで抑える必要があった。

Tier4 Interim 排出ガス規制（2011年1月開始）から3年という短期間で、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、さらに厳しくなった排出ガス規制を満足するための新たな技術の開発・商品化を果たした11L、15Lクラスのエンジンを紹介する。

キーワード：建設機械、ディーゼルエンジン、排出ガス規制、NOx 低減後処理装置、尿素水

1. はじめに

ディーゼルエンジンは、信頼性・耐久性の高さと、小型から大型まで幅広い出力レンジを得られて熱効率が良いことから、産業界において動力源として広く使用されているが、排出ガス中のNOxや粒子状浮遊物（以下PMと記す）による環境や生体に及ぼす影響も指摘されている。

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、1996年以降、排出ガス規制が世界各国において強化されてきた。特に日本・米国・欧州の3極を中心とした排出ガス規制レベルが、建設・鉱山機械用ディーゼルエンジンの排出ガス規制を牽引している。

2014年1月から施行されているTier4 Final 排出ガス規制に適合するために、実績あるTier4 Interim 排出ガス規制対応技術に改良を加えて継続採用し、新技術であるNOx低減後処理装置の開発・商品化を果たした。本稿では、Tier4 Final 排出ガス規制に対応した11L、15Lクラスのエンジンの概要と、その技術的特長について紹介する。

2. 建設機械用ディーゼルエンジンの排出ガス規制動向

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、2014年から、Tier4 Final

と称される新しい規制が導入されて最終段階を迎えている。

図-1に、現時点での日本・米国・欧州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。

| | | NOx / PM、**NOx+PMHC / PM、***NOx+HC / PM (g/kWh) | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----------|---|------|---------|-------|---------|----------|-----------------|------|---------|---------------------|-----------|------|----------------------|--|--|
| | | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | | |
| JAPAN | 19_<37 | 8.0/0.80 | | | | | 6.0/0.4 | | | | | 4.0/0.03 | | | | |
| | 37_<56 | 7.0/0.40 | | | | | 4.0/0.3 | | | | | 4.0/0.025 | | | | |
| | 56_<75 | 6.0/0.30 | | | | | 4.0/0.25 | | | | | 3.3/0.02 | | | | |
| | 75_<130 | 6.0/0.25 | | | | | 3.6/0.2 | | | | | 3.3/0.02 | | | | |
| | 130_<560 | 6.0/0.25 | | | | | 3.6/0.17 | | | | | 2.0/0.02 | | | | |
| US | <19 | 9.5/0.4 | | 7.5/0.8 | | 7.5/0.6 | | 7.5/0.4 | | 7.5/0.4 | | 4.7/0.03 | | | | |
| | 19_<37 | 7.5/0.6 | | 7.5/0.6 | | 7.5/0.6 | | 7.5/0.3 | | 7.5/0.3 | | 4.7/0.03 | | | | |
| | 37_<56 | 7.5/0.4 | | 7.5/0.4 | | 7.5/0.4 | | 4.7/0.3 | | 4.7/0.3 | | 4.7/0.03 | | | | |
| | 56_<75 | 6.6/0.3 | | 6.6/0.3 | | 6.6/0.3 | | 4.7/0.4 | | 4.7/0.4 | | 3.4/0.02 | | | | |
| | 75_<130 | 6.6/0.3 | | 6.6/0.3 | | 6.6/0.3 | | 4.0/0.3 | | 4.0/0.3 | | 3.4/0.02 | | | | |
| EU | 19_<37 | 8.0/0.8 | | | | | 7.5/0.6 | | | | | 4.7/0.025 | | | | |
| | 37_<56 | 7.0/0.4 | | | | | 7.5/0.4 | | | | | 4.7/0.025 | | | | |
| | 56_<75 | 6.0/0.3 | | | | | 4.0/0.3 | | | | | 3.3/0.025 | | | | |
| | 75_<130 | 6.0/0.2 | | | | | 4.0/0.2 | | | | | 2.0/0.025 | | | | |
| | 130_<560 | 6.0/0.2 | | | | | 4.0/0.2 | | | | | 2.0/0.025 | | | | |
| | | Tier1 | | | Tier2 | | | Tier3 / Stage3A | | | Tier4 Int / Stage3B | | | Tier4 final / Stage4 | | |

図-1 日本・米国・欧州における排出ガス規制値

図-2は米国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5年毎に厳しくなっており、NOxと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いる。2011年1月から施行された米国EPA Tier4 Interim 排出ガス規制では、Tier3規制値に対してNOxを1/2に低減、PMは1/10にまで低減させることが求められ、新技術として後処理装置の装着などで対応した。

今回のTier4 Final 排出ガス規制においては、PMの規制値は同一とし、NOxの排出量をさらに1/5に

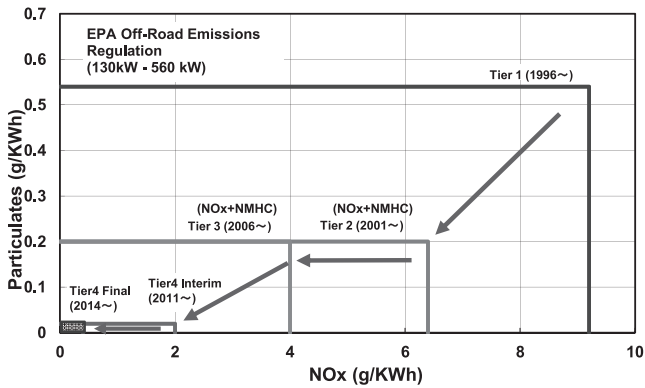


図-2 米国 EPA 規制を代表とする排出ガス規制値

低減することが求められており、NOx 低減後処理装置が必須である。

また、建設機械用ディーゼルエンジンの排出ガス測定モードは、2011年のTier4 Interim 排出ガス規制と同じく、従来からのISO08178のC1モードと呼ばれる定常8モードと、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であり、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。

Tier4 Final 排出ガス規制においては、特にノンロードトランジェントサイクルの測定モードで規制値に適合させるために、Finalで追加された、NOx 低減後処理装置の高精度な制御が必要となってきた。

図-3に建設機械用ディーゼルエンジンの排出ガスの測定方法について示す。

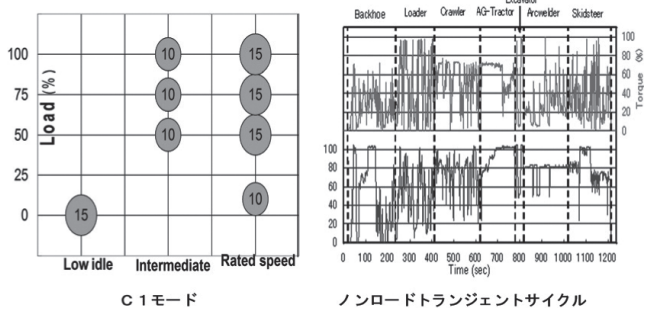


図-3 建設機械用エンジンの排出ガス測定方法

3. Tier4 Final 排出ガス規制対応エンジンシリーズの概要

(1) 11 L, 15 L クラスのエンジンの概要

前述した様に2014年1月から米国・欧州、同年10月から日本の3極においてTier4 Final 排出ガス規制が施行されている。この規制の施行にあわせて開発した560 kW以下のTier4 Final 排出ガス規制に適合するエンジンシリーズの中から、今回は、11 L, 15 L クラスのエンジンシリーズを紹介する。

図-4にエンジンシリーズの排気量と出力レンジを示す。また、図-5にこれらのエンジンを搭載する建設機械アプリケーションの代表例を示す。

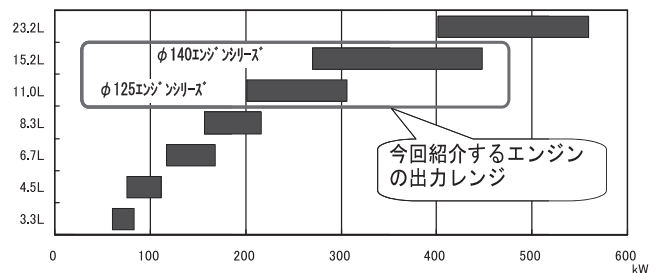


図-4 エンジンシリーズの排気量と出力



図-5 建設機械アプリケーションの代表例

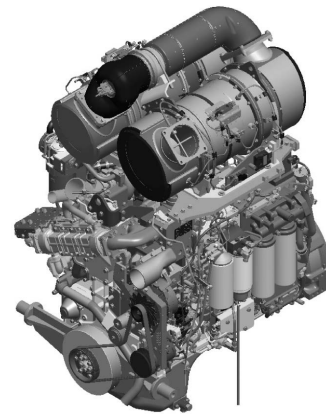
(2) Tier4 Final 排出ガス規制対応エンジンの開発の狙い

- (a) 日本・米国・欧州 3極のTier4 Final 排出ガス規制に適合
- (b) 尿素水消費量を考慮した燃料消費量で従来機と同等以下を狙う
- (c) ベースエンジンの変更は最小限に留めて、コンポーネントはTier4 Interim 対応技術を継続使用
- (d) 建設機械用エンジンとしての過酷な環境や使用での信頼性・耐久性の確保

表-1にこれまでの排出ガス規制と織込み技術の変遷を示す。表-2に今回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。表中の記載説明を記す。Exhaust Gas Recirculation (以下 EGR と記す), 可変ターボチャージャ (Komatsu Variable Geometry Turbo (以下 KVGT と記す)), Komatsu Diesel Particulate Filter (以下 KDPF と記す), 選択的触媒還元 (Selective Catalytic Reduction (以下 SCR と記す)), プローバイガス吸気還元 (Komatsu Closed Crankcase Ventilation (以下 KCCV と記す))

表一 排出ガス規制と織り込み技術の変遷

| 規制 | 対応技術 |
|----------------|--|
| Tier2対応 | ①空冷アフタークーラ+②高圧噴射 (120MPa対応) |
| Tier3対応 | ①空冷アフタークーラ+②高圧噴射+③EGR (160MPa対応) |
| Tier4Interim対応 | ①空冷アフタークーラ+②高圧噴射+③高EGR+④KVGT+⑤KDPF (200MPa対応) (可変ターボ) |
| Tier4Final対応 | ①空冷アフタークーラ+②高圧噴射+③高EGR+④KVGT+⑤KDPF+⑥SCR (200MPa対応) (可変ターボ) (触媒変更) |



図一七 Tier4 Final 対応 SAA6D140E-7 エンジン

表二 11L, 15L クラスのエンジン主要織り込み技術

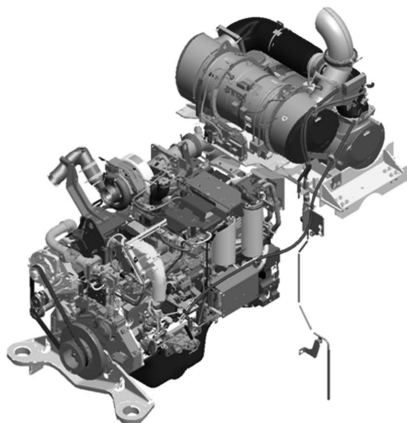
| エンジンモデル | unit | Tier4Interim | | Tier4Final | |
|-----------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | SAA6D125E-6 | SAA6D140E-6 | SAA6D125E-7 | SAA6D140E-7 |
| 気筒数 | - | 6 | | | |
| ボア×ストローク | mm | 125x150 | 140x165 | 125x150 | 140x165 |
| 排気量 | L | 11.04 | 15.24 | 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 | 180 | 200 | 180 | 200 |
| 燃焼室 | -- | 新燃焼室 | | ← | |
| ターボチャージャー | -- | 可変(KVGT) | | ← | |
| EGR | - | 付き(フィン&チューブ) | | ← | |
| コトローラ | -- | CM2250 | | CM2350 | |
| ブローバイ | -- | ブローバイガス吸気還元(KCCV) | | ← | |
| 後処理装置 | -- | KDPF | | KDPF + SCR | |

今回の開発は、エンジンから排出される NOx を 1/5 以下に低減する尿素 SCR システムの新規開発が大きなハードルであった。

これまでにない 3 年間での開発期間で、従来機と同等以上の性能・信頼性・耐久性を確保するために、ベースエンジン部品および主要織り込み技術は、実績ある Tier4 Interim 排出ガス規制対応で開発した技術を継続使用した。

主な対応技術は、電子制御式高圧コモンレールシステムの高圧化、KVGT の採用、EGR 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 KCCV システムの採用などである。

図一六に油圧ショベル用 SAA6D125E-7 エンジンおよび、図一七にブルドーザー用 SAA6D140E-7 エンジ



図一六 Tier4 Final 対応 SAA6D125E-7 エンジン

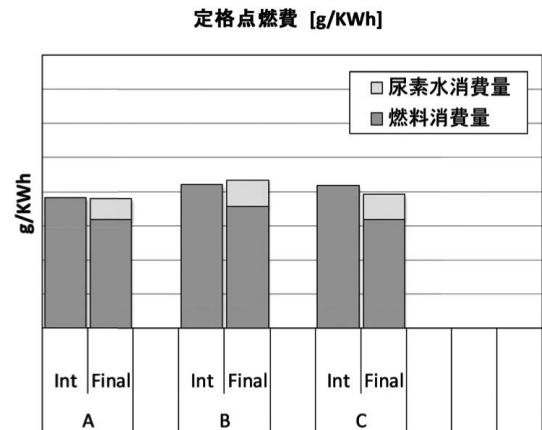
ンの外観形状を示す。

4. Tier4 Final 排出ガス規制対応エンジン技術

今回開発を行った Tier4 Final 排出ガス規制対応エンジンで、日本・米国・欧州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従来機に対して同等以上の性能(出力・燃費)確保を実現したキーコンポーネントについて、以下に紹介する。

(1) 燃焼システム

燃焼システムは Tier4 Interim 排出ガス規制対応エンジン用として開発した最高噴射圧力 200 MPa の電子制御コモンレール噴射システムと新燃焼室を継続採用し、性能チューニングを行った。後処理装置である尿素 SCR システムを追加することで、尿素水消費量を考慮しても従来機に対して同等以下の燃料消費量(軽油+尿素水)と同一レベルの PM 排出量とすることができた。図一八に 15L クラスのエンジンの燃料消費量比較を示す。



図一八 15L クラスのエンジン燃料消費量の比較

(2) EGR バルブ

EGR バルブは、Tier4 Interim 排出ガス規制対応エンジン用として開発した油圧サーボ機構を追加した油圧駆動方式を継続採用した。図-9 にコンパクトで高精度、高信頼性の EGR バルブ外観形状を示す。

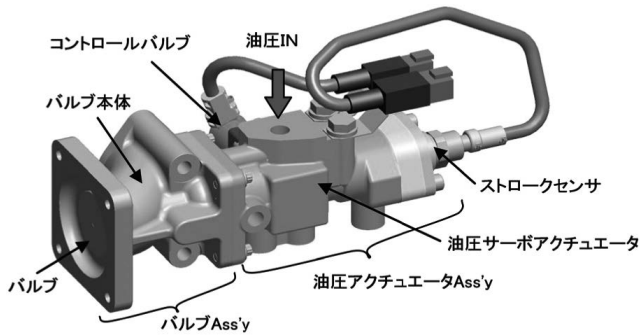


図-9 EGR バルブの外観形状

(3) EGR クーラ

図-10 に Tier4 Interim 排出ガス規制対応エンジン用として開発した大容量 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容量の EGR ガスの温度を十分に下げることが重要となる。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配置する構造を採用した。

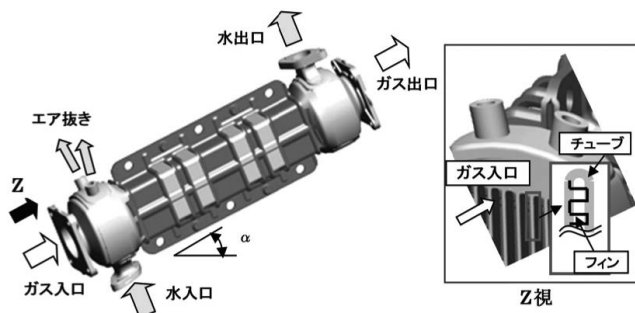


図-10 EGR クーラの外観形状及び構造

(4) 可変ターボチャージャ

可変ターボチャージャは、Tier4 Interim 排出ガス規制対応エンジン用として開発した、ノズル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継続採用した。

また、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。

可変ターボチャージャを採用した事により、広い運転領域での EGR が可能となり、燃料消費率の低減、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-11 に可変ターボチャージャの構造を示す。

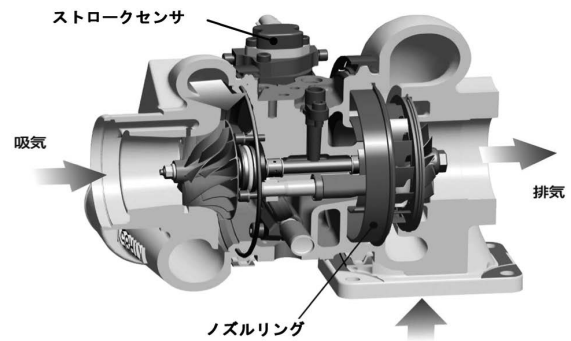


図-11 可変ターボチャージャの構造

(5) ブローバイ吸気還元システム (KCCV)

Tier4 Interim 排出ガス規制対応エンジン用として開発したブローバイガス吸気還元タイプを継続採用した。

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-12 に KCCV の外観形状を示す。

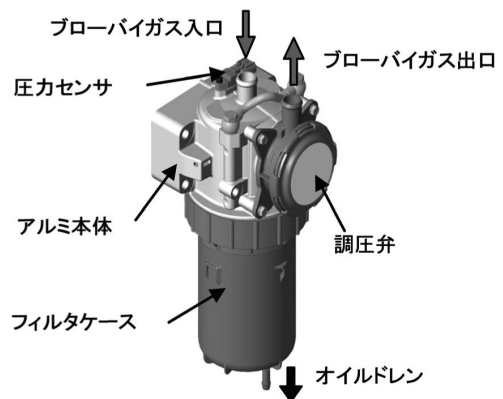


図-12 KCCV の外観形状

5. 後処理装置

Tier4 Interim 排出ガス規制対応エンジン用として、排気ガス中のすすを捕捉し浄化する装置である

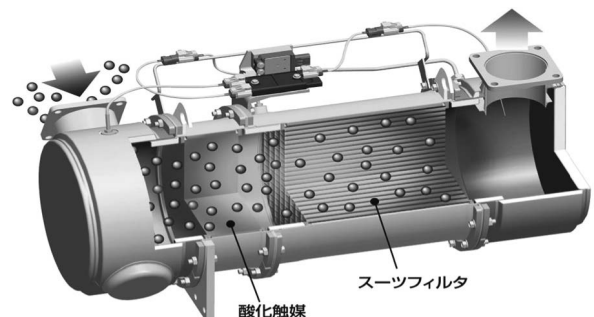


図-13 KDPF の内部構造

KDPF を開発した。

図-13 に KDPF の内部構造を示す。

Tier4 Final 排出ガス規制に対応するために、今回の開発で、KDPF に加え、エンジンから排出される NOx を 1/5 以下に低減する尿素 SCR システムを新たに搭載する。

尿素 SCR システムは、排気ガス中の NOx を無害な窒素 (N₂) と水 (H₂O) に分解する装置である。

図-14 に示すとおり尿素水を排気ガス中に噴射し、尿素水から生成するアンモニアと NOx を SCR 触媒で反応させ、窒素と水に分解する。

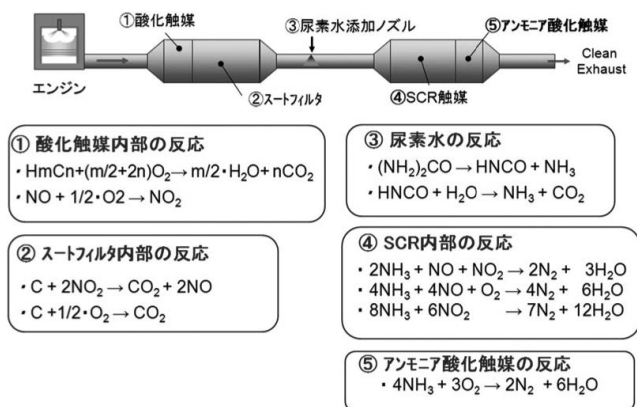


図-14 尿素 SCR システムの化学反応

また、図-15 に示すとおり尿素 SCR システムは、大きく分けて、排気ガス中に尿素水を噴射する尿素水供給システム、噴射された尿素水をアンモニアに分解し排気ガス中に分散させる尿素水ミキシング配管、NOx の分解反応を促進させる SCR 触媒を内蔵した SCR Ass'y から構成される。

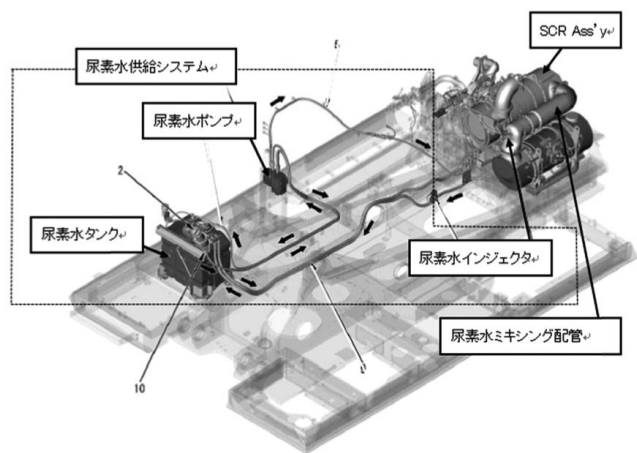


図-15 尿素 SCR システムの搭載

(1) 尿素水供給システム

尿素水供給システムは、尿素水タンク、尿素水ポン

プおよび、尿素水インジェクタから構成される。

尿素水ポンプで加圧された尿素水を尿素水インジェクタから排気ガス中に噴射する。噴射する尿素水の量が少なすぎると NOx の分解が不足し、排出される NOx が増加する。一方で、尿素水の量が多すぎると排気管の内部に尿素の析出物が生成したり、NOx の分解に使われずに余ったアンモニアが排出されてしまう。建設機械の稼働中は車両の負荷に応じてエンジン回転数や出力が常に変動するため、排気ガス中の NOx の量も常に変化する。尿素水供給システムは、エンジンの稼働状態と SCR Ass'y の状態を検出し、常に適切な量の尿素水を噴射できる制御システムを搭載している。

また、尿素水は -11℃ で凍結するため、低温環境下で稼働する建設機械においては、尿素 SCR システムを作動させるために尿素水の解凍・保温機能が必須になる。尿素水タンク・尿素水ポンプの各機器の接続配管用尿素水ホースには、ヒータ線が内蔵されており、周囲の温度に対して適切な解凍・保温ができるように制御される。

(2) 尿素水ミキシング配管

尿素水ミキシング配管では、排気ガス中に噴射された尿素水を、SCR 触媒に到達する前にアンモニアに分解し、排気ガス中に均一に分散させる。アンモニアを均一に分散させるために複雑な内部構造とすると、内部構造物に尿素の析出物が生成される可能性がある。建設機械の限られた搭載スペースの中で効率よく均一な分散ができるように、尿素水ミキシング配管の内部構造は、CFD 流れ解析を活用して、最適に設計されている。図-16 に尿素水ミキシング配管の CFD 解析例を示す。

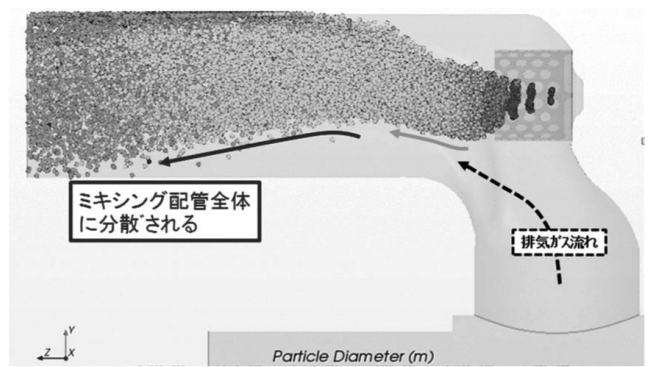
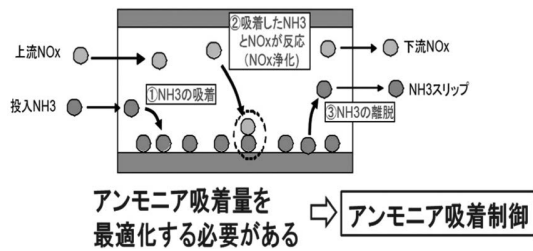


図-16 ミキシング配管の CFD 解析例

(3) SCR Ass'y

SCR Ass'y は、排気ガス中の NOx を、尿素水の分



図—17 SCR 触媒の NOx 還元

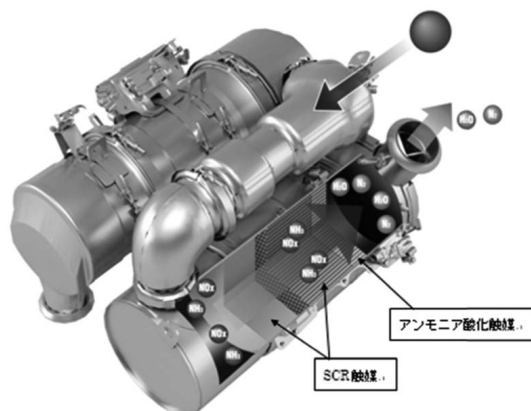
解で生成されたアンモニアと選択的に反応させ、無害な窒素と水への分解を促進させる SCR 触媒を内蔵している。その反応過程は、SCR 触媒内にアンモニアが吸着し、吸着したアンモニアと排ガス中の NOx が反応する (図—17)。このため、SCR 触媒内に多くのアンモニアを吸着させておくことにより、より多くの NOx を分解させることができる。搭載されるセンサ類で、車両稼働中の SCR Ass'y の状態を常に監視し、SCR 触媒に吸着されているアンモニアの量が推定されて、SCR 触媒で消費されるアンモニアの量やエンジンから流入してくる NOx の量に応じて、必要なアンモニアを供給するための最適な尿素水噴射量を決定している。

また、反応で余ったアンモニアが排気管より大気へ排出されることを防止するために、SCR 触媒の後流にアンモニア酸化触媒を配置している。

これらの触媒は、KDPF に内蔵されている酸化触媒やスツフィルタと同様に、セラミック製の基材上に担持され、その基材は高い耐熱性をもった特殊な繊維でできたマットで保持され、金属製の筐体に内蔵される。このような構造は、2011 年からの市場での稼働実績のある KDPF と類似構造であり、大きな衝撃が加わる建設機械の過酷な使用環境下においても、十分な信頼性・耐久性をもっている。

図—18 に SCR Ass'y の内部構造を示す。

建設機械の稼働条件は商用車・乗用車に比べて負荷



図—18 SCR Ass'y の内部構造

頻度が高く、排気ガス温度も高くなる傾向があり、後処理装置での各種化学反応が促進されやすい。今回開発した KDPF・尿素ミキシング配管・SCR Ass'y は、断熱構造で内部の温度低下を防止し、高い排気ガス温度を有効に活用するとともに、軽負荷での稼働や低温環境下での稼働による排気ガス温度の低下に対しても、機能低下を最小限に抑制することができるなど、建設機械への搭載のために最適に設計されている。

今回開発した KDPF・尿素ミキシング配管・SCR Ass'y は、自社内で製造し高品質が保証されている。

6. 電子制御システム

電子制御システムは、今回開発した尿素 SCR システムの高精度な制御を追加して、Tier4 Interim 排出ガス規制対応エンジンで採用した電子制御コモンレール噴射システム・可変ターボチャージャー・KDPF などの制御を両立させながら、車両全体の制御との高速通信を最適に行うために、新規に開発された Engine Control Unit (以下 ECU と記す) を採用した。

Tier4 Final 排出ガス規制で新しく対応が必要となった SCR Inducement に適合するため、エンジンと後処理装置システムの故障診断を新たに設定して、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さらなる高度化を行った。

7. 信頼性・耐久性

今回の Tier4 Final 排出ガス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、新技術である尿素 SCR システムを加えた後処理装置の十分な品質を作り込むために、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。

後処理装置の耐久性確認に関しては、SCR Ass'y と尿素水ミキシング配管を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での実車の振動・衝撃加速度を評価し、それらを包括する評価条件を設定した。

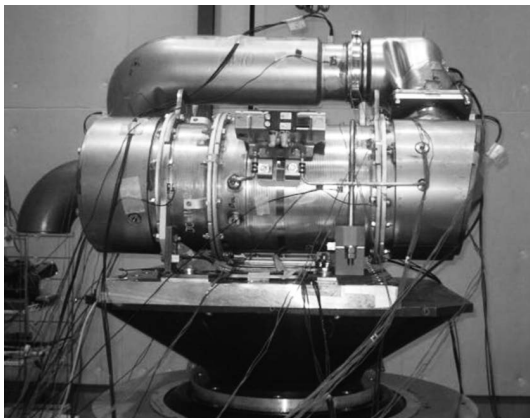
また、図—19 に示す後処理装置全体で、FEM 固有値解析を十分に行い、最適な構造設計を行った。

これらのステップを踏んで単体評価は、写真—1 の振動試験機を使い単体振動耐久試験を十分行った。

エンジン耐久試験においては、建設機械アプリケー



図一 19 後処理装置 FEM 固有値解析結果



写真一 1 後処理装置単体振動耐久試験

シヨンの様々な稼働条件で、KDPF と尿素 SCR システムが安定して機能すること、新規に開発した制御パラメータの設定が最適であることを確認するために、各アプリケーションで想定される代表的稼働条件を模擬したサイクル耐久試験を行い、すすの堆積状況と尿素の析出物生成状況の確認試験を十分行った。

11L, 15L クラス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、且つ車両の実用試験を合計 5 千時間以上実施することで、十分な信頼性・耐久性確認を行うことができた。

8. おわりに

新たに開発した Tier4 Final 排出ガス規制対応 11L, 15L クラスのエンジンの概要と、その技術的特長について紹介した。

Tier4 Final 排出ガス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はかった Tier4 Final 排出ガス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考ええる。

また、車両全体としても、自社の特長である低燃費・信頼性・耐久性を確保しただけでなく、環境に配慮した高品質の製品に仕上げることができたと考ええる。

J|C|MA

《参考文献》

- 1) 岡崎達, 田村好美: 日・米・欧の排出ガス規制対応技術, 建設の施工企画, 2011, 1月号, pp.28-32
- 2) 加藤隆志, 太田弘, 長坂昇平: Tier4Interim 規制対応 φ 125, φ 140 エンジンの開発, コマツ技報, Vol.57, No.164, 2012

【筆者紹介】



太田 弘 (おおた ひろし)
 (株)アイ・ピー・エー
 中大型エンジン開発 G
 チーム長



加藤 隆志 (かとう たかし)
 (株)アイ・ピー・エー
 中大型エンジン開発 G
 主任技師



長坂 昇平 (ながさか しょうへい)
 (株)アイ・ピー・エー
 アフタートリートメント研究開発 G
 チーム長