

排出ガス3次、4次規制に対応する 新型エンジンの開発

岩 脇 通 仁

建設機械に対する排出ガス規制は、2006年から3次規制が予定されているが、窒素酸化物（NO_x）、微粒子状物質（PM）ともに1次規制と比較すると約6割の削減となっており、厳しい規制となっている。更に、規制値がほぼゼロに近い4次規制（2011年以降）が米国EPAから提案されている。今後益々厳しくなる排出ガス規制に対応するため、キャタピラーでは、従来培ってきた吸排気システム、燃料噴射システム、及び電子制御システム技術の最適化を図ることにより、EGRを使用しないで将来規制に対応するACERT（Advanced Combustion Emission Reduction Technology）技術を開発したので、その概要について紹介する。

キーワード：建設機械、ディーゼルエンジン、排出ガス規制

1. はじめに

キャタピラーと聞くと、多くの人は建設機械のメーカーを想像すると思うが、実はキャタピラーは立派なエンジンメーカーでもある。

キャタピラーのエンジンの歴史は、今から約75年にも遡る。1925年に当時のHolt ManufacturingとC. L. Best Tractorが合併してCaterpillar Tractorが設立された。設立当時、ディーゼルエンジンは、重くかつ大きく、さらには、回転数が低いためそのほとんどが定置や船用といった用途に使用されていた。そのためもっぱら建設機械用のエンジンはガソリンエンジンであった。米国内外からディーゼルエンジンを購入し搭載試験を行ったが、どれも建設機械に使用できるスペックを持合わせていなかった。そこで、設立5年後の1930年にディーゼルエンジンの自社開発に取組み、翌年の1931年には自社の建設機械（当時Sixty Tractor）用にD 9900エンジン（86.8 HP×700 rpm）の生産を開始した。

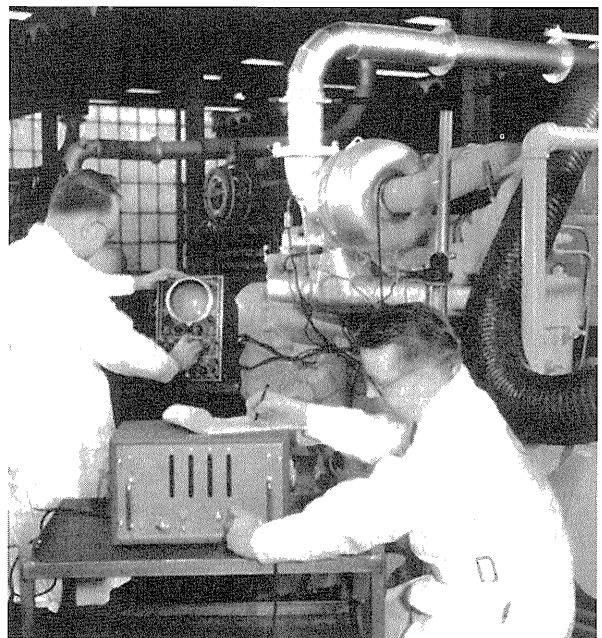
また1939年にはトラック向けにD 468（90 HP×1,800 rpm）の生産を開始した。その後、高出力化、高性能化、信頼性・耐久性向上、そして排出ガス対応と幾多の技術開発・改良を重ね、今日の建設機械に搭載しているエンジンとして大きく成長した。現在では、自社建設機械向けのみならず、北米オンハイウエイトラック用エンジンとして、1/3のシェアを誇っている。

2. これまでの技術開発

これまでのキャタピラーエンジンの技術開発について紹介したいと思う。

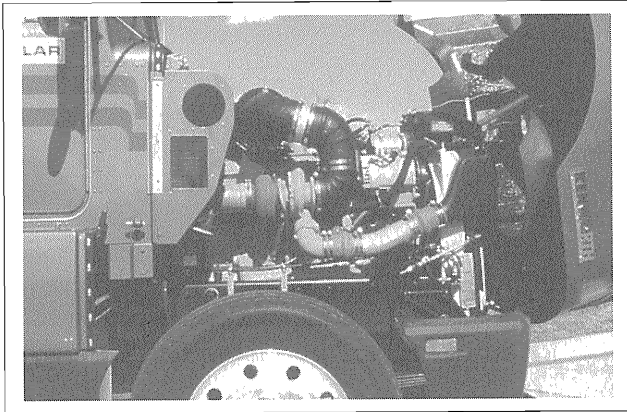
自社エンジンの生産を開始した翌年の1932年には米国のディーゼルエンジンメーカーとして初の自社噴射装置の生産も開始した。

1955年には、オンハイウエイトラックエンジン向けに現在のターボチャージャの技術とさほど変わらないターボチャージャを開発した（写真—1）。



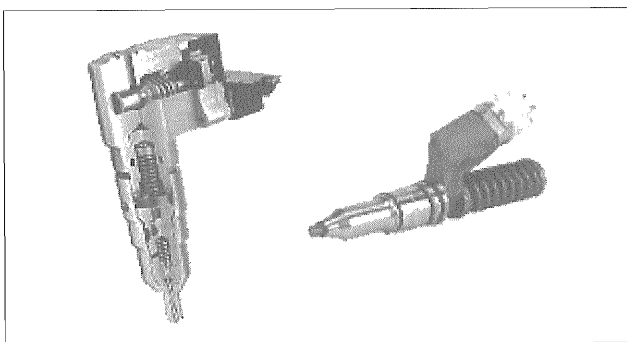
写真—1 1955年当時のターボチャージャ開発試験

また、1985年、オンハイウェイエンジンに、エア・ツリー・エア・アフタークーラ（ATAAC、空冷式給気冷却器）を導入し、より給気密度を増加させ高出力化を図った（写真—2）。



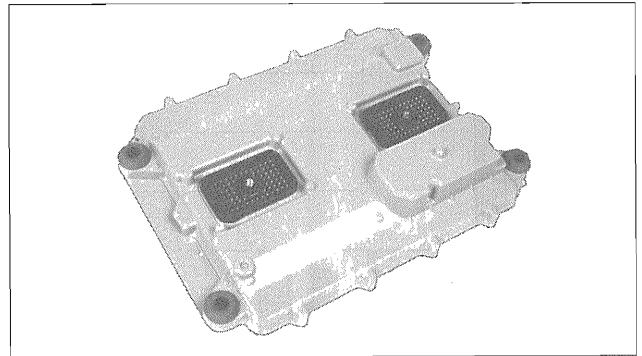
写真—2 トラックに搭載されたATAACエンジン

1995年、HEUI（Hydraulic actuated Electronically controlled Unit Injector）と呼ぶ電子制御式ユニットインジェクタを開発・導入した。従来ユニットインジェクタはカムシャフトで駆動していたが、HEUIは油圧駆動としたため低速域でも（エンジンの回転速度によらず）高圧噴射が得られる、当時では画期的な電子制御式高圧噴射ユニットインジェクタであった。もちろんカムシャフト駆動の電子制御式ユニットインジェクタMEUI（Mechanical Electrical UI）も自社開発・生産をしている（写真—3）。



写真—3 HEUI（左）とMEUI（右）

またキャタピラー社では、電子制御の要であるコントローラも自社開発している（写真—4）。ADEM（Advanced Diesel Engine Management）と称するECUは高速マイクロプロセッサを搭載しており、瞬時のうちにエンジンの状態を分析し、ユニットインジェクタの燃料噴射を最適に制御することが可能である。また建設機械という過酷な使用環境下でも信頼性、耐久性を確保した非常に頑丈な設計となっている。コントローラの開発陣を自社で抱えているエンジンメーカ



図—4 自社開発のADEMコントローラ

は、恐らくキャタピラーだけであろう。

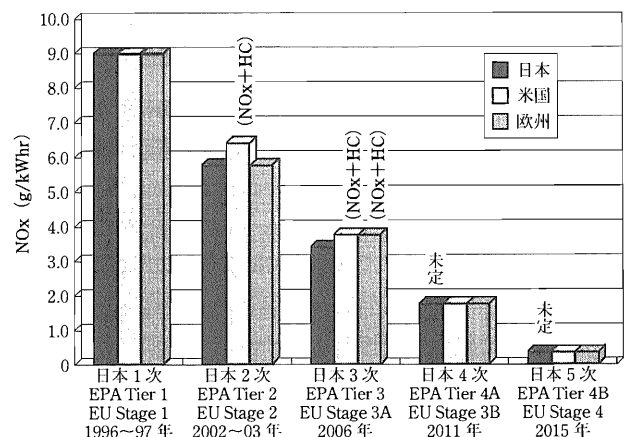
3. 排出ガス規制

さて、前置きが少し長くなったが、本題に入りたいと思う。

建設機械に対する排出ガス規制は、この10年間で大きく変化した。筆者が社会人となった1985年は、建設機械に排出ガス規制がかかるなど思いもしていなかった。したがって、建設機械用エンジンに対しては、信頼性、耐久性の向上と、燃費の向上を主に追及していた。

1988年頃だったか、オンハイウェイの排出ガス規制に適合するための技術（ユニットインジェクタ）を建設機械にも導入した。エンジンの仕様をオンハイウェイトラックと建設機械とを合わせるのには、エンジン設計にとっては非常に有利なことであるが、当時はまだ、建設機械に対する排出ガス規制など無く、周りからずいぶん無駄なことをすると言われた。しかし、後に排出ガス規制が建設機械に適用されるようになった時は、お陰でスムーズな対策導入を図ることができた。

さて、建設機械に対する排出ガス規制も年々厳しく



図—1 130~560 kWクラスのNO_x

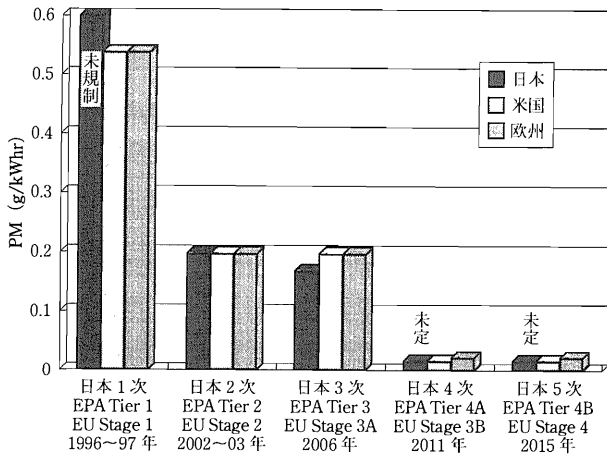


図-2 130~560 kW クラスの PM 規制値の推移

なってきた。第3次規制の開始は、第1次規制が始まってから約10年である、窒素酸化物 (NO_x)、微粒子状物質 (PM) とともに、排出基準値は第1次規制の約40%となっている。また EPA (米環境保護局) より示されている第4次規制最終基準値 (Tier 4 B) は、ほぼ排出量をゼロに抑えなければならないゼロエミッション規制となっている (図-1 及び 図-2)。

第3次規制も非常に厳しい規制であるが、第4次規制以降は一体どうやって適合させればよいのか、技術者の頭を抱えさせる規制である。

4. 排出ガス対策

ここでは、まず第3次規制に焦点を合わせて話を進める。

第3次排出ガス規制対応として、一般的に各エンジンメーカーでは Exhaust Gas Recirculation (EGR) の採用が検討されているようである。日本では、既にトラック用ディーゼルエンジンで採用され、ある程度の実績はあると考えるが、建設機械の環境下での使用に対し、まだまだ信頼性、耐久性に懸念があると考えられる。

EGR には、排気を外部回路を通して吸気に入れる外部 EGR (その中でも排気をそのまま入れるホット EGR と冷却するクールド EGR) と、排気を排気バルブから一部シリンダ内へ戻す内部 EGR がある。トラック用ディーゼルエンジンでは、クールド EGR が一般的なようだ。内部 EGR は余計な外部回路を必要としないので、新たな EGR の装置が不要であり、その分信頼性を損うことは少ないと考える。

しかしながら、いずれにしても EGR は排気をシリンダ内に取込むので、シリンダの摩耗や腐蝕が起り、エンジンの耐久性を著しく損ねることに間違はないと

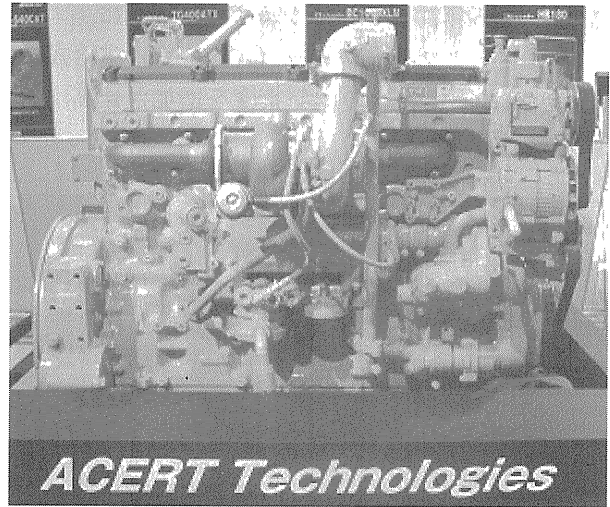


写真-5 ACERT C13 エンジン (2004 NEW 環境展出展)

考える。

キャタピラーも当初はクールド EGR の調査を行ったが、多岐にわたる検討の結果、クールド EGR の採用を取りやめた。なぜなら、クールド EGR は排気ガスの抑制に効果的である反面、頻繁な整備が必要とされるなどメンテナンス上の問題や、燃料消費の増大、信頼性の損失、耐久性の減少などの多くの弊害をもたらす可能性がある。

EGR のデメリットを考慮し、なんとか EGR 無しで第3次規制をクリアできないかを考えた。そして、先ほど紹介したキャタピラーが自ら開発し培って来た技術を集結し、第3次規制をクリアする技術を開発した。それが ACERT (アサート, Advanced Combustion Emission Reduction Technology) 技術である。

5. ACERT 技術 (第3次排出ガス規制対応)

ACERT 技術の原理はいたって簡単である。燃焼工程を効率的に制御できれば、排出ガスを最小限に抑えることができると考えた。燃焼工程を制御するには空気と燃料という2つの要素を精密に制御する技術が要求されるが、キャタピラーは信頼と実績のあるエンジン技術を駆使して、オンハイウェイ及びオフロードの双方において効果的な排出ガス低減対策を研究してきた。

そこで開発された技術が ACERT 技術である。この技術開発に、キャタピラーは過去最大級の新製品開発投資を行った。ACERT 技術は、最適な燃焼効果により排気ガスを最小限に抑制するシンプルで洗練された技術を要する考えに基づいている。

ACERT エンジンの中心となる技術に、

- 吸排気システム
 - 燃料噴射システム
 - 電子制御システム
 - 後処理（オフロードの第3次規制対応には不要）
- の4つがある。

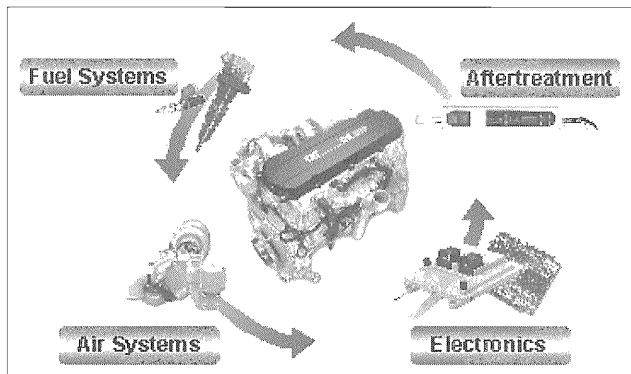


図-3 ACERT エンジンの中心技術

オフロード（建設機械）用第1次世代 ACERT 技術（排出ガス第3次規制対応）は、後処理を除く3つの技術を採用している。

ACERT エンジンは、1,000万通りにも及ぶさまざまな燃焼パターンがプログラミングされたコンピュータの制御により、非常に正確な燃焼を行うことができる。従来のエンジン制御方式は、エンジン回転数と負荷の影響を受け、正確な燃焼は非常に困難なものであったが、この ACERT 技術により、極めて正確かつ素早く燃焼工程をコントロールすることができるようになった。

(1) 吸排気システム

ACERT エンジンは、EGR を使用していないので、吸排気システムが非常にシンプルである。

図-4 に ACERT エンジンの吸排気システムの概略図を示すが、従来のエンジンと全く変わりがないこと

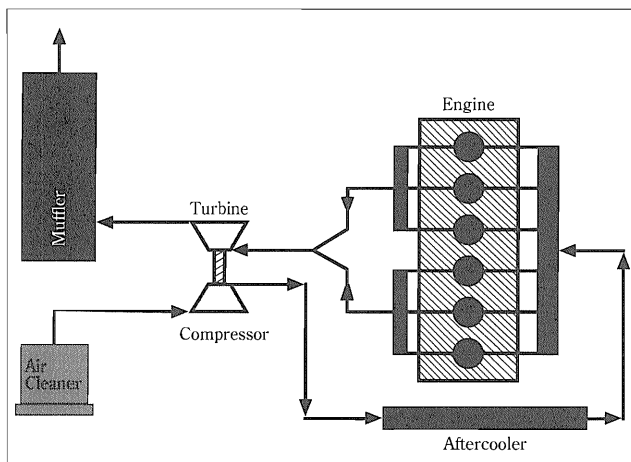


図-4 ACERT エンジン吸排気システム

がわかる。それが ACERT の大きな特徴でもある。

ACERT エンジンは、クロスフロー型のシリンダヘッドを採用し、そのほとんどが4バルブを採用している。それには次の2つの狙いがある。

- ① エンジンによりクリーンな空気を吸入させること。
- ② 吸入された空気をより一層均一に拡散させること。

吸入された空気の均一化を適切に行うことは、本当にチャレンジングな技術である。その時間は非常に短く、数千分の1秒の世界である。燃焼室は、非常にダイナミックな環境のもとにある。すなわち、あちらこちらの場所で熱や圧力の大きな相違があり、また作動するピストンは規則的に燃焼室を幾何学的に変化させる。クロスフロー型のヘッド及び4バルブ設計により、吸入空気システムの制御を飛躍的に向上させることができた。

改良型のターボチャージャーも吸入空気の制御を向上させている。大半の ACERT エンジンは、性能を向上させるために、ウエイストゲート付きターボチャージャーを採用している。

(2) 燃料噴射システム

空気の流れを制御する以上に重要なのは、燃料供給を制御することである。最適な条件を維持するためには、適切な圧力の下、適正なタイミングで適正量の燃料が供給されることが必要である。

燃料の主噴射を行う前後に、マイクロレベルの噴射を行うことによって、排気ガスをより抑制できる。こうした僅かな時間に行われる工程を管理するには、先に述べた油圧作動式電子制御ユニットインジェクタ (HEUI) または機械式電子制御ユニットインジェクタ (MEUI) の技術が必要となる。HEUI 及び MEUI とも、3次規制対応からマルチ・インジェクション・システム（多段噴射）を採用している。また、両システムの技術は実際に数百万時間もの稼働実績に裏付けられている（写真-6）。

さらに、この高度な電子制御技術によるレートシェープ技術（可変噴射率制御）は、騒音、振動、耳鳴り音の制御にも貢献している。図-5 に示すように ACERT エンジンでは、マルチ・インジェクションとレートシェープを、負荷条件に応じ自在に組み合わせることができるようになった。

(3) 電子制御システム

1985 年、エンジン用の電子制御システムには、

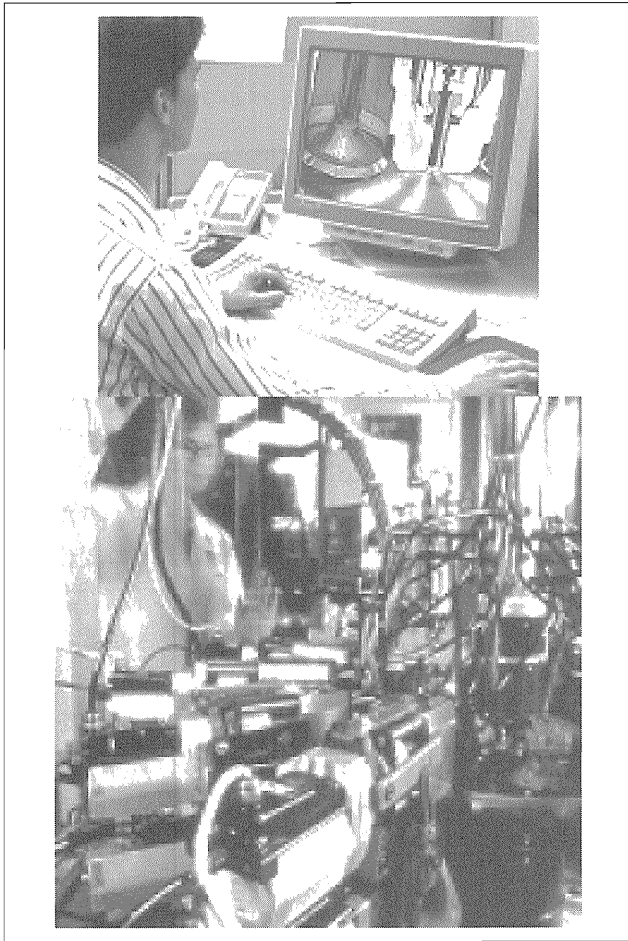
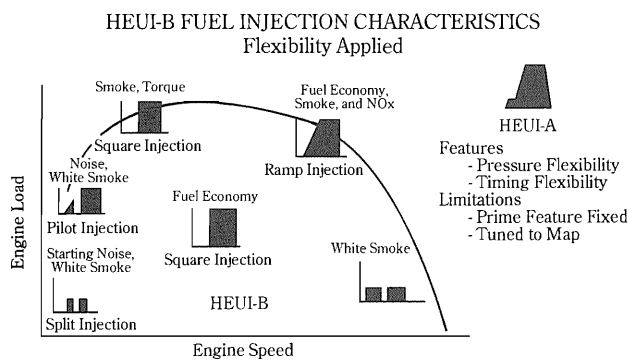


写真-6 燃料噴射システム開発風景



This is a graphical representation of the adaptability and flexibility of HEUI-B. The diagrams represent rate "shapes" that may be electronically selected to optimize performance and emissions at various engine operating conditions.

図-5 マルチ・インジェクションとレートシェープの組み合わせが自在となった ACERT エンジン

PEEC (Programmable Electronic Engine Control) モジュールを採用していた。この電子制御システムには、8ビット・プロセッサ、20Kのメモリ容量及び28本のI/O(入出力)ピンが搭載されていた。1993年に導入されたADEM II電子制御システムは、21MHzで作動する8ビット・プロセッサ2基、そして128Kメモリ容量、80本のI/Oピンが搭載されていた。

そして、今年2004年に導入予定の電子制御システムはADEM4である。ADEM4は、32ビットのアー

キテクチャ、動作周波数56MHz、2メガバイトメモリ容量及び190本のI/Oピンを特徴としている。

このADEM電子制御システムによって、エンジンは他のコンポーネントとの情報を交換することができる。エンジン作動パラメータは油圧システムからの要求、作動中の周囲環境条件及びオペレータの作動要求に回答するように最適調整を行う。この対話型のコミュニケーションにより、排気ガスを低減するだけでなく建設機械の性能改善も行うことが出来るようになった。

6. 将来排出ガス規制への対応

第4次以降の排出ガス規制は非常に厳しい規制となることが予定されている。それらの規制に適合するためには現状のACERTに、さらに多くの基盤技術を採用する必要がある。

まず第4次規制(EPA Tier 4 A)に適合するためには、オンハイウェイACERTエンジンではすでに採用している次の3つの技術を採用することが不可欠となると考える。

- 可変バルブタイミングシステム
- 直列2段ターボチャージャ
- 後処理

(1) 可変バルブタイミングシステム

電子制御された可変バルブシステムは、吸入空気を効率よく供給し、クリーンな燃焼を行う。この技術の実際の魅力は、冷却水温、エンジン回転数、スロットル位置などのさまざまな要因に基づいて、変化しやすいエンジンの要求を満たすための空気の供給を形作れることである。

(2) シリーズ(直列)2段ターボチャージャ

小型のターボチャージャは低速域でのレスポンスが良い反面、高速域で必要条件に適合することができない。大型のターボチャージャは、高速域での要求を満たすが、低速域でのレスポンスが遅い場合がある。こ

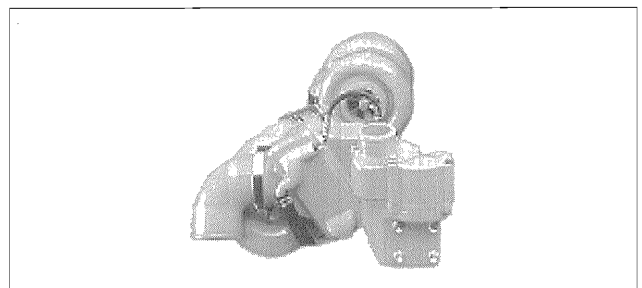


写真-7 直列ターボチャージャ

の2基の直列ターボチャージャーを使った精巧なアプローチは、小型ターボチャージャーの低速域でのレスポンスの良さと、大型ターボチャージャーの定格域でのブースト圧を確保するという良さを兼ね備えることができた。これにより燃費をより一層改善することができる。

(3) 後処理

ディーゼルエンジン用酸化触媒装置は触媒により排出ガスの成分を無害化させる。例えば、炭化水素を無害な二酸化炭素と水にする。そのプロセスは迅速、効率的かつ信頼できるものである。キャタピラーの触媒装置は、すでに多くのオンハイウエイトラックに採用されている。

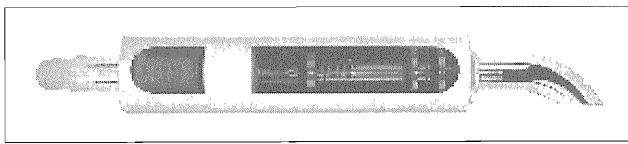


図-6 後処理装置（触媒装置）

上述の3つのコンポーネント（可変バルブシステム、直列2段ターボチャージャー及び後処理）を追加することで、キャタピラーのACERT技術は第4次排出ガス規制（Tier 4 A）もクリアすることが可能と考えられる。しかしながら、その後のTier 4 B規制（ゼロエミッション）には、更なるチャレンジが必要かもし

れない。

7. おわりに

オンハイウエイトラックのテストで、ACERT技術は他の排出ガス抑制技術と比較して高い信頼性と容易な保守点検性、低コストオペレーションを可能にするものであるということが実証された。

同様の特性が、オフロード用エンジンのACERT技術にも備わっている。

キャタピラーは厳しくなる排出ガス規制に対応しつつ、お客様の負担を極力軽減するようエンジンの開発に取り組んでいる。 JCMIA

《参考文献》

- 1) All In A Day's Work, Seventy-five years of Caterpillar (Caterpillar)
- 2) キャタピラー産業用エンジンACERTテクノロジー（キャタピラー・パワーシステムズ・インク）

【筆者紹介】

岩脇 通仁（いわわき みちひと）
新キャタピラー三菱株式会社
システム設計部
機器設計課
課長



絵で見る安全マニュアル 〈建築工事編〉

本書は実際に発生した事故例を専門のマンガ家により、わかりやすく表現しています。新入社員の安全教育テキストとしてご活用下さい。

■要因と正しい作業例

- | | | |
|----------|--------|---------|
| ・物動式クレーン | ・電動工具 | ・油圧ショベル |
| ・基礎工事用機械 | ・高所作業車 | ・貨物自動車 |

A5判 70頁 定価650円（消費税込）送料270円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館） Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289