報告

Technical Report

建設機械の排出ガス規制への取組み*

三 富 亮 治¹

Action for construction machinery exhaust emissions regulations

by Ryoji MITOMI^a

a. Shin-Caterpillar Mitsubishi LTD Product Planning Group, Sales Planning Dept, 3700 Tana,
Sagamihara, Kanagawa, 229-1192, Japan
(Corresponding author: E-mail ryoji_mitomi@scm.co.jp)

To meet exhaust emissions regulations that becomes severe worldwide every year, Caterpillar Inc. has developed the ACERT[®] technology that decreased exhaust gas of the diesel engine. ACERT[®], Advanced Combustion Emission Reduction Technology, that is concentration of technology that Caterpillar has cultivated in long history of engine development for past 75 years. ACERT[®] Technology is based on the theory "If all the processes of combustion can be controlled efficiently and best, exhaust gas can be suppressed to the minimum" and control four key elements (Air systems, Fuel systems, Electronics, and Aftertreatment) in the best. Cat engine with ACERT[®] Technology is simple and reliable, and it is already installed in many Caterpillar construction machines and Highway truck in North America.

KEY WORDS: ACERT[®], Exhaust Gas, NOx, Exhaust Emissions Regulation, Diesel Engine

1. は じ め に

近年、地球環境保護、生活環境保護を目的とした大気汚染防止に関する社会的要請は一層の高まりを見せており、大気汚染の原因である窒素酸化物 (NOx) や粒子状物質 (PM) 等を含むディーゼルエンジン排出ガスには、厳しい規制が課せられるようになった。一部の大都市地域のトラック、バス等の排出ガスに基準が設けられている「自動車 NOx・PM 法」はその一例として挙げられる。オフロード特殊自動車である建設機械も例外ではなく、2005 年 5 月 17 日の衆議院本会議で「特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律 (通称オフロード法)」が全会一致で可決、成立した。これにより、ディーゼルエンジンを搭載した公道を走行しない建設機械・農業機械等の排出ガスに対しても、法規制 (以下、オフロード法) が課せられることになった。この法律に基づき実施される排出ガス規制では、国土交通省の規制であったこれまでの第 1 次、第 2 次規制を上回る、より厳しい基準値が課せられる。また、国土交通省では、排出ガス規制対応車両の普及促進を目的とし、オフロード法の指定を受ける以前に製造・販売された排出ガス規制値をクリアする能力を有した車両に対し、「国土交通省排出ガス対策型建設機械 (第 3 次基準値)」(以下国交省排出ガス第 3 次規制) の指定制度を実施する。

このような状況下で建設機械メーカ各社は、厳しい規制に対応できるクリーンなエンジン、建設機械の研究・開発に取り組んで

いる。

ここでは、オフロード法および国交省排出ガス第 3 次規制に対する小社の取組みについてその概要を紹介する。

2. 排出ガス規制の現状と将来

国内では、国土交通省 (旧建設省) が 1991 年基準をもうけ、対象建設機械の指定を開始し、1996 年から直轄工事において「排出ガス対策型建設機械 (第 1 次基準値)」に認定された建設機械を使用することを定めた。更に、1997 年には第 2 次基準値が発表され、2003 年 10 月より導入されている。そして、2006 年 3 月には、窒素酸化物 (NOx)、微粒子状物質 (PM) とともに第 1 次規制と比較すると、約 6 割の削減となる第 3 次基準値が発表され、対象建設機械の指定が開始された。更に、同年 10 月からはオフロード法の規制が始まった (130kw 以上)。

また海外では、国内に先駆けて 2006 年 1 月に第 3 次規制にあたる EPA (米環境保護局) の Tier3, EU (欧州連合指令) の Stage3 が開始された。更に、規制値がより厳しくなる第 4 次規制 (2011 年以降) が EPA から導入される見込みであり、今後も国内外を問わず排出ガスに対する規制はますます厳しくなる傾向にある。また従来は、国内外でほぼ統一が図られていた規制値であるが、今回の国交省排出ガス第 3 次規制、オフロード法では、国内のみ一層厳しい基準値が採用されている (国交省排出ガス第 3 次規制およびオフロード法は同一基準値) (Fig. 1, Fig. 2)。

3. 排出ガス規制への対策技術

排出ガス規制の対象ガス成分の 1 つである NOx は、高温燃焼になると増加しやすいという性質がある。そのため、発生を抑えるためには出来る限り低温燃焼をさせる事が望ましい。一方、同

* 2006 年 7 月 24 日受付 10 月 24 日受理
1. 新キャタピラー三菱 (株) 販売企画部 商品企画グループ
[著者連絡先] FAX : 042-764-8740

E-mail : ryoji_mitomi@scm.co.jp
キーワード : アサート, 排出ガス, NOx, 排出ガス規制, ディーゼルエンジン

Fig.1 Transition of NOx Regulation Value for 130-560kW Engines.

Fig.2 Transition of PM Regulation Value for 130-560kW Engines.

Fig.3 Mechanism of Combustion and Emission.

じく規制対象ガス成分である炭化水素 (HC) と PM は、不完全燃焼を起こすことにより発生しやすく、高温で完全燃焼に近づけることでその発生を抑制することができる。この発生要因と低減策がそれぞれ相反する排出ガス成分の低減を両立させるためには、非常に高度な技術が必要になる (Fig. 3, Fig. 4)。

第3次規制で主となる低減技術としては、まず NOx の低減技術として、第2次規制でも採用されている

① 燃料噴射時期遅延

② アフタークーラ

をはじめ、

③ EGR

④ 多段噴射等の高度な電子制御

が挙げられる。①の燃料噴射遅延では、燃焼効率が最適になる燃料の噴射時期より遅らせて燃料を噴射するため、技術的におのずと限界があり、燃費の悪化を招きやすい。②のアフタークーラは、

排出ガス	発生要因	低減策
NOx	高温燃焼 (高効率燃焼)	低温燃焼 (低効率燃焼)
トレードオフの関係 低減両立困難		
CO HC 黒煙 PM	不完全燃焼 (低効率燃焼)	完全燃焼 (高効率燃焼)

Fig.4 Difficulty in Emission Gas Reduction.

Fig.5 Cooled EGR.

ターボで圧縮した空気を、一旦冷却してから供給することで、燃焼温度を下げる技術である。③の EGR は Exhaust Gas Recirculation の略であり、排気ガスの一部を再び吸入空気に戻し、酸素の少ない状態で燃焼させ、燃焼温度を下げる技術である (Fig. 5)。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、ある程度の実績がある。④の多段噴射は燃料噴射の制御技術であり、次章で紹介する小社が採用する技術の中核である。また、HC や PM の低減技術としては、高圧噴射、高過給、吸気冷却、後処理等が挙げられ、これらの技術を複合的に採用することにより、メーカ各社、厳しい排出ガス規制をクリアするクリーンなエンジンの開発を目指している。

4. ACERT®技術

3章では一般的な排出ガス低減技術について述べたが、ここでは第3次規制に対応すべくキャタピラー社が開発した ACERT®技術について紹介する。

「ACERT® (アサート)」とは、Advanced Combustion Emission Reduction Technology の略であり、キャタピラー社が75年にわたるエンジン開発の歴史の中で培った技術を集結し、開発した、最新の排出ガス低減技術の総称であり、各国の第3次規制をクリアすることを目的に、さらには、第4次規制をも見据えて開発された技術である。

Fig. 6 に Cat C15 ACERT®エンジンを示す。

ACERT®技術は、「燃焼のあらゆる工程を効率的に最適に制御できれば、排出ガスを最小限に抑えることができる」という極めてシンプルな考えに基づいており、既存の第2次規制対応技術の要素を1つずつ高度化したシンプル且つ極めて高度な燃焼制御技術と言える。

従来のエンジン制御システムでは、エンジン回転数と負荷変動の影響を受け、燃焼工程全般を最適に制御することは非常に困難であった。また、機械式のインジェクタでは噴射タイミングや噴射率がカムの形状で制限され、自由度がなかった。しかし、

Fig.6 Cat C15 ACERT®

Fig.7 ACERT® Building Block.

Fig.8 ACERT® Intake & Exhaust Air system.

ACERT®技術では、様々な燃焼パターンをプログラミングされた新開発の電子制御システムである ADEM4 (Advanced Diesel Engine Management) により燃焼工程全般を制御することで、非常に正確な燃焼を行い、排出ガスの低減を可能にした。ACERT®技術は、Fig. 7 に示す吸気システム、燃料噴射システム、電子制御システム、後処理システムの 4 つの技術を中心に構成されている。

4・1 吸気システム

ACERT®エンジンの吸排気システムは、第 2 次規制のエンジンの吸排気システムと同じ構造であり、非常にシンプルなため、高い信頼性を確保することができる (Fig. 8)。また、新鮮な空気だけをシリンダ内に供給するため、EGR で心配されるようなシリンダ内の腐食、磨耗等、耐久性低下の懸念も少ない。

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、その多くが 4 バルブ設計になっている。それにより、排気の流れをスムーズにし、吸入した空気をより均一に拡散することが可能であり、PM や HC 削減のための完全燃焼を行うことを実現した。

さらに、ターボチャージャには、既に多くのエンジンでその耐久性、信頼性、性能等が実証済みのウェストゲート付ターボチャージャを採用し、エンジン回転の低速から高速まで効率よくマッチングさせている (Fig. 9)。またそれらの中には、低サイクル疲労特性を持つ、チタン合金製コンプレッサ・ホイールを特徴とするものもあり、ターボチャージャの寿命を向上させている。

ターボチャージャによって過給された空気はアフタークラで冷

Fig.9 Mechanism of Turbocharger with Wastegate.

Fig.10 HEUI and MEUI

却し、燃焼温度上昇の抑制を図っている。それにより、NOx の発生を抑制している。なお、第 3 次規制対応車では、総じてヒートバランスが悪化するため、ラジエータ等の冷却装置は大型化され、それに伴いファンの大型化により騒音が大きくなるケースもある。この部分では、吸音材や可変スピードファン制御を採用し、騒音を車両側で低減させている。

4・2 燃料噴射システム

ACERT®技術の中核となるのは、エンジンへの燃料供給の制御である。最適な燃焼を可能にするためには、適切な圧力の下、適正なタイミングで、適正な量の燃料をエンジンに供給することが必要である。これらを可能にするのが、既に多くのエンジンで採用され、長時間にわたる稼働で実績のある、油圧作動式電子制御ユニットインジェクタ (Hydraulic Electronic Unit Injector : 以下 HEUI) と機械式電子制御ユニットインジェクタ (Mechanical, Electrical Unit Injector : 以下 MEUI) (Fig. 10)、および CAT コモンレールシステムである。これらの噴射システムは、後述するコントローラの ADEM4 との組み合わせにより、適切な噴射のタイミングや時間、圧力などを細かく制御することが可能である。

Fig. 11 に噴射サイクルの模式図を示した。ACERT®の噴射システム (マルチインジェクション) では、主噴射を含め、1 回の噴射サイクルの中で、最大で 5 回の多段噴射を行うことができる。さらに、メイン噴射の噴射率を、状況に応じて可変的に細かく制御できるため、常に最適な燃焼が保たれる。この可変噴射率制御は、騒音、振動、耳鳴り音の制御にも貢献している。これらの噴射システムはエンジンの状況や周囲環境の変化に応じ様々な噴射パターンが可能であり、それらのパターンの組み合わせは理論上、1,000 万通りにも及ぶ。

Fig. 12 にマルチインジェクションによる排出ガス低減のメカニズムを示す。通常の燃焼制御では細かい噴射制御が出来ないため、燃焼初期に燃焼室内が極めて高温になり、この段階で NOx が多く生成されてしまう。しかし、ACERT®エンジンは、マルチインジェクションにより、最初にパイロット噴射を行うことで燃焼のピーク温度を下げる事が可能であり、NOx の発生を抑制

Fig.11 Injection cycle.

Fig.12 Mechanism of Emission Gas Reduction.

することが出来る。また、メイン噴射ではおよそ 2,000 気圧の高圧で燃料を噴射することが可能であり、可変噴射率制御とあわせ、燃焼を最適化し燃焼効率を高め、PM, HC, 黒煙を低減している。

4・3 電子制御システム

ACERT®に採用されている ADEM4 は、32 ビット、動作周波数 56MHz、2 メガバイトのメモリを搭載しており、第 2 次規制エンジンで採用されていた ADEM2 に比べ処理速度が 28 倍に向上している (Fig. 13)。これらの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情報を交換することが出来るようになり、油圧系統からの要求、周囲の環境条件、オペレータの作動要求等に応答するように、エンジンの作動パラメータは最適に調整される。これによって排出ガスの低減、性能の向上を可能にした。

4・4 後処理装置

エンジンのサイズによっては、後処理装置の装着も ACERT®技術の選択肢の 1 つである。

ディーゼルエンジン用酸化触媒装置 (Fig. 14) は、触媒により排出ガスの成分の炭化水素 (HC) を無害な二酸化炭素 (CO_2) と水 (H_2O) に分解する。そのプロセスは迅速、効率的かつ信頼できるものであり、米国では既に多くのオンハイウェイトラックに採用されている。この酸化触媒装置を採用することにより、燃費の悪化等を引き起こす無理なセッティングを行うことなく、効率よく HC の排出量を低減することが可能になる。また、酸化触媒装置はエンジンのオーバーホール時までメンテナンスフリーである。

4・5 ACERT®技術の特長のまとめ

これまで ACERT®技術の概要について述べてきたが、ここで ACERT®技術がもたらすユーザメリットについて以下に整理する。

(1) 信頼性 既に多くの第 2 次規制エンジンで採用され、実績のあるコンポーネント及び確立されたシステムを採用しており、従来のエンジンと同等の信頼性を確保。

可能な限り確立された技術でオフロード法および第 3 次規制をクリア。

(2) 性能 良好な負荷応答性、高地性能、及び低温始動性を

Fig.13 ADEM 4 Controller.

Fig.14 Aftertreatment.

確保。

(3) メンテナンス性 第 2 次規制までのエンジンと基本構造で変化が少なく、メンテナンス性も必要なツールも同等で、維持・管理に伴う追加投資が少ない。

(4) 耐久性 シリンダライナ、ピストン周り、バルブ、ロッカシャフト及びベアリングの磨耗が従来エンジンと変わらないため、オーバーホール時間も従来のエンジンと同等。

ACERT®エンジンは以上に示した特長にあるように、信頼性、耐久性、性能を損なうことなく排出ガス規制に対応したエンジンである。なお、オフロード法、第 3 次規制対応のエンジンで排出ガスをクリーンに保つためには、ユーザのメンテナンスも重要である。適正なエンジンオイル (DH, CH 級) や燃料 (軽油) の使用等、管理はますます重要になるであろう。

小社の取扱製品の中では以下のモデルにこの ACERT®を採用したエンジンを搭載している (2006 年 10 月 1 日時点)。

- ・大型油圧ショベル : 385C / 365CL / 345C (L)
- ・中型油圧ショベル : 330D (L) / 328DLCL
325D (L) / 324D (L)
- ・大型ホイールローダ : 988H / 980H / 972H / 966H
962H / 950H
- ・大型ブルドーザ : D10T / D9T / D8T / D6R III
- ・アーティキュレートダンプトラック : 740 / 735 / 725
- ・コンパクト : 836H / 826H / 825H
- ・履帯式ローダ : 973C

5. おわりに

地球規模での環境破壊が進む現在、環境負荷の少ない製品の開発・生産はメーカに課せられた使命ともいえる。

ACERT®技術は、排出ガス低減という使命を果たしつつ、ユーザの満足を得よう、「最大の機械性能で最も低い運転経費」を実現した画期的な技術である。

今後は、ますます厳しくなる排出ガス規制に対応しつつ、ユーザの利益を第一に、新たなエンジン、建設機械の研究・開発にこれからも取り組んで行く。