

Euro6d対応 2.8Lディーゼルエンジンの開発

Development of 2.8L Diesel Engine Comply with Euro6d

荒巻 敦志^{*1} 嶋尾 浩幸^{*1} 高井 将平^{*1} 菰田 真広^{*1} 柿崎 隆太^{*1} 丹羽 智哉^{*1} 高橋 竜太^{*1}
 Atsushi Aramaki Hiroyuki Shimao Shohei Takai Masahiro Komoda Ryuta Kakizaki Tomoya Niwa Ryota Takahashi

*1 エンジン事業部 技術第二部

要旨

近年、世界的に地球環境保全への対応が求められる中、自動車より排出されるCO₂の削減、および排出ガスクリーン化が強く求められている。また、テストベンチだけでなく実走行時における排出ガスを評価する為に、欧州では路上走行時の排出ガス評価を行うReal Driving Emission (以下、RDE) も追加された。従来型エンジンを改良した新型エンジンは、環境性能とお客様の動力性能向上要望を高次元で両立する為に、低流動燃焼室をはじめとする燃焼技術、高効率ターボ技術等の技術を取り込み、Euro6d規制へ対応させた。また、開発プロセスの改善にも注力。机上検討ツールを活用した“燃焼設計”によって大幅に開発工数の低減、開発品質を改善した。本稿では、この新型エンジンの概要と主要技術を、開発プロセスを交えながら紹介する。

キーワード：ディーゼルエンジン、燃費、排出ガス、実路排気、高出力

Abstract

In recent years, as the worldwide demand for improvement of the global environment is getting higher, there is a strong demand for reducing CO₂ emitted from automobiles and converting to clean exhaust gas. Additionally, in order to evaluate the exhaust gas not only on the TEST BENCH but also during actual driving, the Real Driving Emission (RDE) which evaluates the exhaust gas when driving on the real road, has been added in Europe. The new engine, improved from the conventional engine, incorporates technologies such as low-fluidity combustion chamber and high-efficiency turbocharger to achieve environmental performance and high power performance for customer. And also it achieved Euro6d exhaust gas regulation.

We also concentrated energy on development process. "Combustion design" utilizing a desk study tool has significantly reduced development labor and improved development quality. In this paper, we will introduce the outline and main technologies of this new engine including the development process.

Keywords: Diesel Engine, Fuel Consumption, Exhaust Gas, RDE, High Power

1 はじめに

2015年に開発した2.8L直列4気筒直噴GD系ディーゼルエンジンは低冷損燃焼、小型高効率ターボチャージャの採用など最新技術を投入することで、中型SUV車用(図1) エンジンに重要な低中速トルクと燃費の大幅向上を実現し、世界各地で販売されているトヨタ車に搭載されており、低燃費、クリーン、高性能などの理由から、好評を得ている。

近年ますます厳しくなる環境性能、特に2020年以降に欧州で施行されるEuro6d規制に対応し、燃費性能、動力性能といった商品性向上を図った新型2.8L GD系ディーゼルエンジンを開発した。

本稿では、この新型ディーゼルエンジンの概要と主要技術について紹介すると共に、開発の効率化や開発品質向上を目的に、弊社が取り組む開発プロセスの変革を交えながら紹介する。



GDエンジン搭載車 ランドクルーザー プラド
出典：トヨタ自動車(株)ホームページ

GDエンジン搭載車 ハイラックス
出典：トヨタ自動車(株)ホームページ
本エンジンは国内向けには非搭載

図1 新型エンジン搭載車両
Fig.1 Vehicles equipped with a new engine

2 エンジン概要と主要諸元

新型GDエンジンは、従来エンジンの低燃費、クリーン、高性能といった基本コンセプトを踏襲しさらに進化させる為、表1のような改良を加え以下の項目に重点を置いた開発をおこなった。

- (1) 燃費：従来比4%の燃費改善
- (2) 環境：Euro6d規制に対応
- (3) 動力：出力性能向上によるダイレクト&スムーズな加速性能

これらの重点項目に対応する為、燃焼室、水冷インタークーラシステム、インジェクタ、ターボチャージャなどの主要技術を織り込んだ。

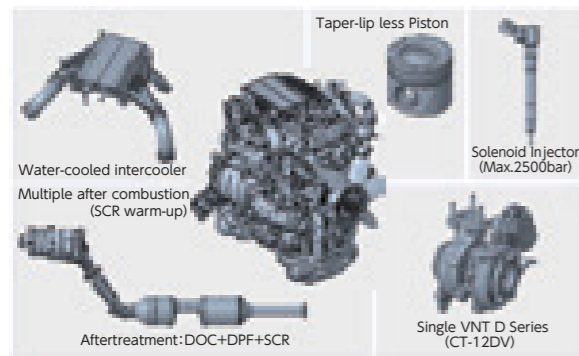


図2 主要採用技術
Fig.2 Adopted technology

表1 主要諸元表
Table.1 Specifications table

Engine	1GD-FTV Previous	1GD-FTV New
Engine Type	In-line4	←
Displacement [ml]	2754	←
Bore×Stroke [mm]	φ92×103.6	←
Compression Ratio	15.6	←
Fuel Injection System	Solenoid (Max. 2200bar)	Solenoid (Max. 2500bar)
Piston Combustion Shape	Taper-lip	Taper-lip less
Turbocharger	Single VNT D Series (CT8DV)	Single VNT D Series (CT12DV)
EGR System	HP Hot and Cooled EGR	←
Aftertreatment	DOC+DPF (engine side) +SCR (under floor)	←
Intercooler system	Air-cooled intercooler	Water-cooled intercooler
Max. Torque [Nm/rpm]	450/1600-2400	500/1600-2800
Max. Power [kW/rpm]	130/3400	150/3000-3400
Emissions	Euro6b	Euro6d

3 開発プロセス改善

従来の開発手法は、部品機能の検討、制御ロジックの検討、ECU制御値の検討、いずれもエンジン実機や実車での実験と解析を中心に行っていた。この開発手法の課題を下記に示す。

- ・エンジン実機や実車の多用による開発コストの増大
- ・部品の設計変更の度に再実験を要する為、開発期間が増大

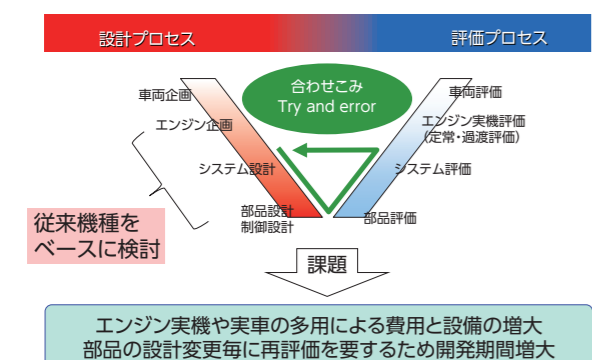


図3 従来の開発プロセス
Fig.3 Traditional development process

これらの課題を解決する為、エンジン事業部技術部では、物理状態指標を用いたV字プロセスに則った開発を推し進めている。車両企画を満たすためのエンジン要求性能を決め、次に燃焼設計・シ

ステム設計では要求性能を考慮した理想燃焼を実現するための「物理状態指標」と呼ぶ制御因子を明確にし、その算出においては0次元燃焼シミュレーションやGT-POWER等の机上検討ツールを用いた。

GT-POWERの制御には、実機と同じECUモデルを搭載し、エンジンハード・燃焼・制御を一体でシミュレーション可能なツールとした。そうすることで、物理状態指標を算出する際に、同時にそれを実現する各部の温度圧力を推定することが可能となった。インタークーラ、ターボチャージャ等のエンジン部品の要求特性算出に活用した。同様に、制御ロジック検討においても、運転時の要求制御値変化からロジック構築を行うことに活用した。

システム構築時に、物理状態指標を明確化することで 部品単体、実機評価での設計検証、要因解析の精度が向上し、設計プロセスへのフィードバックも迅速化、やり直しのない開発が可能となった(図4)。

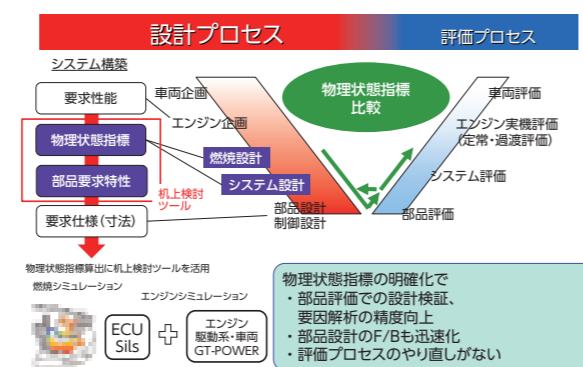


図4 物理状態指標を用いた新しい開発プロセス
Fig.4 New development process using physical state index

燃焼設計や、システム設計プロセスでは、燃費・環境・動力といった車両企画を満たす部品設計をする為に、各部品には複雑に絡み合った、様々な性能が求められる。すべての性能要求を満足させ・開発の手戻り無く実施するために、物理状態指標を明確にし、各部品の要求特性(例えば、過給圧・インタークーラ効率)を設定し、その要求特性を満たす部品設計を行った。ターボチャージャを例にとると、燃費・環境・動力すべてにおいて要求性能を達成するための物理状態指標をそれぞれ

- ・燃費：吸排気の圧力差
- ・環境：O₂濃度
- ・動力：空気量

などのように決め、それらを机上検討ツールを活用し算出、部品への要求特性(例：コンプレッサ効

率、圧力比)を明確にすることで 燃費・環境・動力すべてを満足したターボチャージャの設計を行った(図5)。

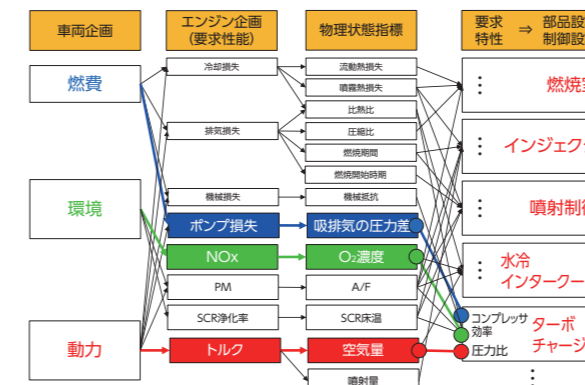


図5 システム構築(例：ターボ コンプレッサ効率と圧力比)
Fig.5 System construction

4 低燃費化対応技術

新型GDエンジンはさらなる熱効率改善を図る為に、各種損失を低減する技術を投入した。その内本稿では、冷却損失低減技術について紹介する。0次元燃焼シミュレーション(図6)を活用し、冷却損失を筒内ガス流動分と燃料噴霧分に分解し、それぞれの低減策をシミュレーションを用いて検討を進めた。筒内ガス流動分の冷却損失は、目標の物理状態指標を「燃焼室内の気流速度」とし、目標熱損失を達成する為の気流速度を燃焼シミュレーションで算出。気流速度を満足する新燃焼室形状(テーパリップレス)を設計した(図7)。

また、燃料噴霧分の冷却損失低減策としては噴霧の少量多段噴射を実施した。パイロットの少量多段噴射により噴霧のペネトレーションを小さくし、噴霧と壁面との熱伝達を低減した。目標熱損失を達成する噴射段数、間隔、量を燃焼シミュレーションにより算出し、それを満たすインジェクタ噴射制御を設計し採用した。

従来は実機評価を主体とした検討のため、多くの時間を要していたが、0次元燃焼シミュレーションを用いることで、高精度かつ高速な解析が可能となり、燃焼室形状の検討や、最適な燃料噴射パターンの検討を行うことで、冷却損失の低減を短時間で実現した。

このような低燃費化対応技術の採用により、NEDC(New European Driving Cycle)モードで従来比4%の燃費改善を図った(図8)。

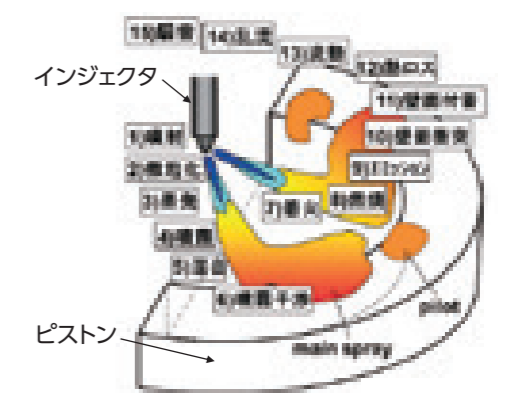


図6 燃焼シミュレーションのモデル化項目
Fig.6 Combustion simulation modeling items



図7 燃焼室形状
Fig.7 Combustion chamber shape

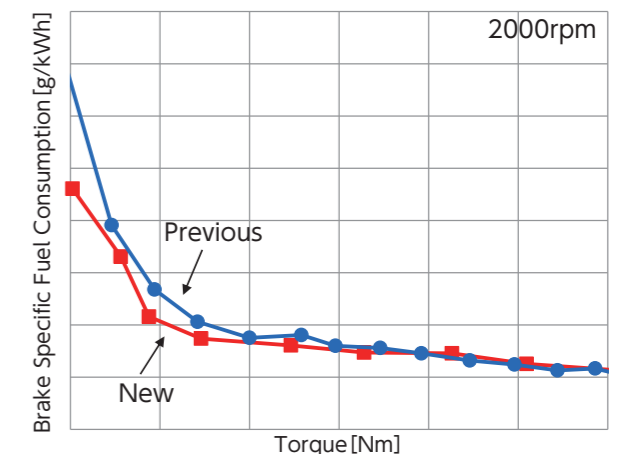


図8 燃費達成状況
Fig.8 Achievement of fuel efficiency

5 環境性能向上技術

新型GDエンジンは、あらゆるエンジンの使用状態においても、排出ガス成分を低減させるため、下記3つのコンセプトを掲げ開発を進めた。

- (1) 全エンジン作動域で低NOx(窒素酸化物)
- (2) 気圧・外気温によるNOx変化を抑制
- (3) 冷間時においてもNOx排出量低減

上記コンセプトを達成する為、(1)に対しては、エンジン全作動域でEGR(Exhaust Gas Recirculation)を導入する為のターボ設計やEGR制御構築を実施。(2)に対しては水冷イン

ターコラシステムを採用した。その内本稿では、(3)に対して行った、新燃焼技術について紹介する。新型GDエンジンはこの燃焼技術を採用することで、NSR(NOx Storage Reduction)等の高価な後処理システムを追加することなく、従来エンジンを踏襲したSCR(Selective Catalytic Reduction)後処理システムでEuro6d規制に対応した。

エンジン冷間時にNOx排出量が高いのは、SCR触媒温度が低く、その性能を発揮できないことが課題であった。そこで、エンジン始動後に速やかにSCR触媒を暖機するため、新噴射制御を開発した。アフタ噴射を少量多段化する燃焼のコンセプトを採用し、連続して燃焼させ、排気温度上昇させることでSCR触媒の早期暖機を狙った(図9)。

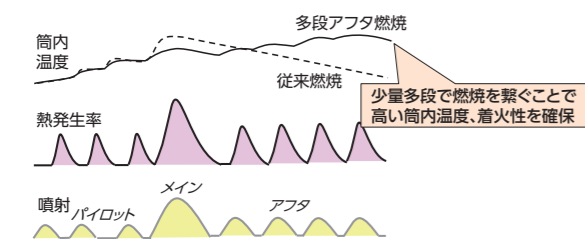


図9 多段アフタ燃焼コンセプト
Fig.9 Multiple after combustion concept

アフタ噴射を多段化することで、1段で大量噴射するよりも、排気温度や燃焼安定性が向上すると同時に、噴霧飛距離を低減することでオイル希釈を防止することができる(図10)。

オイル希釈イメージ

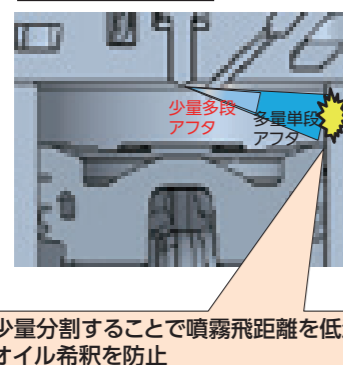


図10 多段アフタ噴射のメリット
Fig.10 Advantage of multiple after injection

一方で、目標となる排気温度、制約となるオイル希釈などを満足しつつ、噴射量や噴射時期などを最適に制御する為には2つの大きな課題があった。

1. 膨大なパラメータスタディが必要、性能目

標や信頼性制約を満足しないとやり直し評価が必要

2. エンジンの吸気状態(大気圧変化等)により最適パラメータが変化

従来通りのエンジン実機評価を用いた開発では、図11のように上記2つの課題から約9600通りのパラメータスタディが必要であったが、0次元燃焼シミュレーションツールを活用することでこの課題を解決した。目標の排気温度や、信頼性制約条件である失火、オイル希釈などの思想をモデル化して、燃焼シミュレーションに反映することで、回転数や負荷・吸気状態に応じて最適となる噴射パラメータを自動で算出。その結果から作成した制御値を、ECUに織込むことで2つの課題を克服し、開発期間は従来手法と比較し、60%低減することができた。

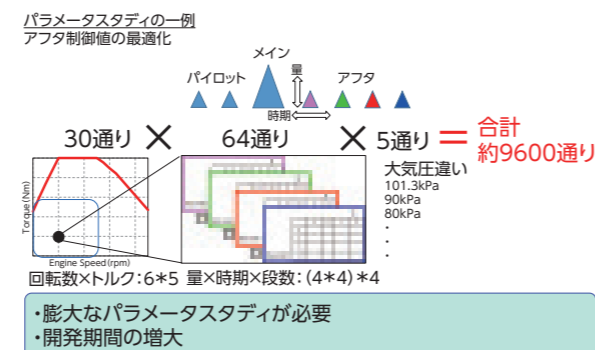


図11 従来開発手法での課題
Fig.11 Issues of conventional development method

燃焼シミュレーションを活用することで多段アフタ燃焼を実現した(図12)。排気温度を上昇させ、SCRの早期暖機をすることで、冷間時においてもNOx排出量を低減させた。

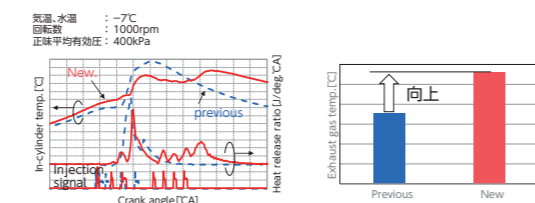
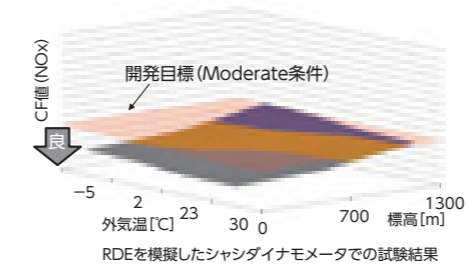


図12 多段アフタ燃焼の効果
Fig.12 Effect of multiple after combustion

これらの改良を加えることで、
(1)全エンジン作動域で低NOx
(2)気圧・外気温によるNOx変化を抑制
(3)冷間時においてもNOx排出量低減
の3つのコンセプトを達成し、あらゆる運転条件

で環境性能の良いエンジンを作りあげることができた(図13)。



- ・NOx排出量は法規要件を満足
- ・環境方向で変化代が少ない

図13 環境性能試験結果
Fig.13 Environmental performance test result

6 動力性能向上

高級SUVからワークユースまで幅広いニーズに応えるべく、低速トルクは従来同等を維持しつつ、最大トルク450⇒500Nm、最高出力130⇒150kWへ大幅向上させた(図14)。

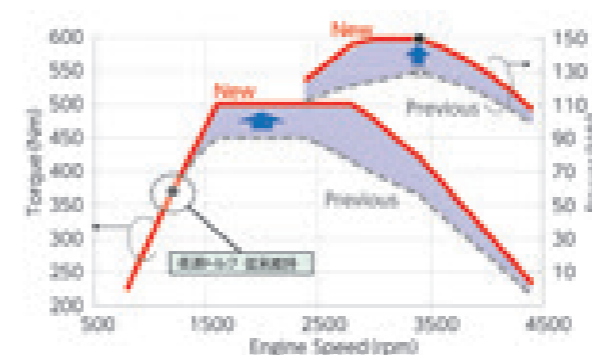


図14 全負荷性能曲線
Fig.14 Full load performance curve

出力性能向上技術の一つ、高効率ターボチャージャー技術について紹介する。ターボチャージャーへの要求として、図15のように動力性能を満足させるために低速トルク性能は維持しつつ、出力点の要求からワイドレンジ化。さらに燃費改善からの高効率化、排気要求からは高圧力比化など多くの要求があった。これらの要求性能を満足する物理状態指標を机上検討ツールを活用し算出し部品要求特性を設計した。この要求特性を満足させる為、新たにコンプレッサ・タービン翼を新設計、ケーシングトリートメントを採用することで、燃費・環境・動力を満足させる高効率ターボチャージャーを設計した。

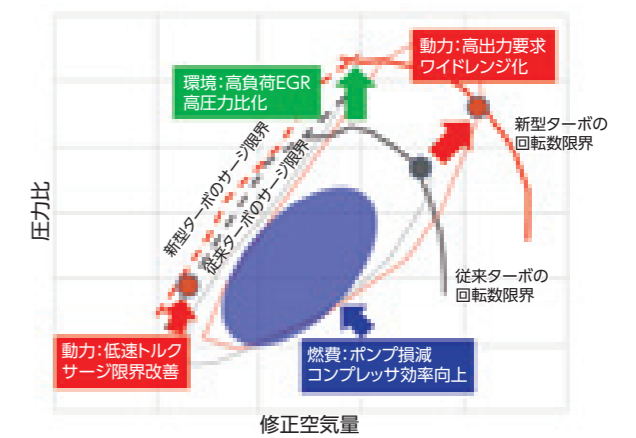


図15 ターボチャージャーへの要求性能
Fig.15 Required performance for turbocharger

このように設計したターボチャージャー技術により、クラストップレベルの動力性能を実現した(図16)。

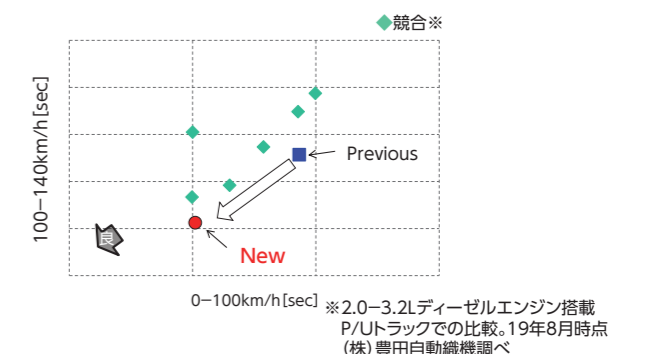


図16 動力性能比較
Fig.16 Power performance

7 まとめ

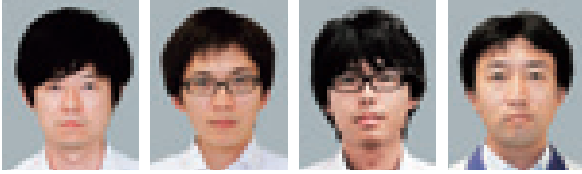
お客様の幅広いニーズに応えるべく、以下の性能を高次元で両立するエンジンを開発することができた。

- (1) 燃費：従来比4%の燃費改善
 - (2) 環境：Euro6d規制に対応
 - (3) 動力：クラストップレベルの動力性能
- このエンジンの開発に多大なご支援を頂いた社内外の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

■ 参考文献

- [1] トヨタ自動車(株) ホームページ
- [2] 自動車技術会シンポジウム NO.3-20『新開発エンジン』Euro6d対応 2.8L ディーゼルエンジンの開発

■ 著者紹介 ■

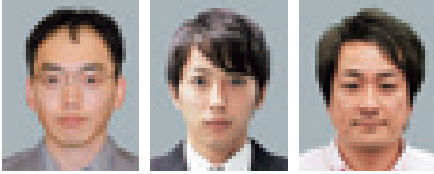


荒巻 敦志

嶋尾 浩幸

高井 将平

菰田 真広



柿崎 隆太

丹羽 智哉

高橋 竜太

開発の経緯と開発者の思い

近年ますます要求の高くなる燃費性能と環境性能の向上。さらにGDエンジンは、ハイラックスのような小型貨物自動車から、ランドクルーザープラドといった高級SUVに搭載される為、商用車に必要な高い信頼性と高級SUVにふさわしい静粛性を兼ね揃えたエンジンにすることを常に心がけ開発を進めました。多くの課題がありましたが、関係各部署に多大なご協力を頂き、MBDを活用した開発プロセスへ変革をしていくことで手戻りのない開発を進めることができ、各種性能を高次元で両立したエンジンを開発することができました。是非、この高性能エンジンを体感して頂きたいと思います。今後もお客様の期待を超えるエンジンの開発に邁進していきます。