

攻めめる ディーゼルエンジン

——新たな技術に挑戦した生粋の“エンジン屋”たち

インタビュー



ランドクルーザーが2021年、14年ぶりのモデルチェンジを果たした。
その心臓部となるエンジンは、ガソリンエンジンとディーゼルエンジンの2種類で
先代(1VD-FTV)に引き続き、当社がディーゼルエンジンの開発・生産を担当。
トルクアップ、排気規制のクリア、燃費や静粛性の向上など、
多くの要望を満たすため、まったく新しいエンジンとして開発をスタートさせ、
数々の挑戦を重ねながら、約5年の歳月をかけて完成させた。
今回はこの新型V6ディーゼルエンジン(F33A-FTV)に尽力した
開発メンバーのチャレンジとエンジン開発にかける想いを記したストーリーである。

新型ディーゼルエンジンは「ホットインサイド」レイアウト

トヨタ自動車(株)(以下、トヨタ自動車)のランドクルーザーに搭載されるディーゼルエンジンは、国内市場向けとしては2007年まで発売された100系以来となる。

先代のディーゼルエンジンから時は経ち、ディーゼルエンジンに対するイメージや求められる性能は大きく変化した。ランドクルーザーにふさわしい耐久性、信頼性、悪路走破性などをしっかりと継承しながら、年々厳しくなる燃費規制や排気規制にも適応しなければならない。そんな多くの課題を解決するために、エンジンは4.5L V8から3.3L V6へとダウンサイジング。ランドクルーザーらしさを維持しながらも、軽量化、低燃費化を図り、さらに爽快な加速感、静粛性の向上までもターゲットにし、まったく新しいエンジンとして開発が進められた。



浅野 智幸
技術第一部

F33A-FTVは排気量、気筒数ともに減らしているが、そもそもの構造から刷新されている。それは「ホットインサイド」という国産量産車として初のレイアウトを採用していることだ(*当社調べ)。このレイアウトはV6エンジンでありながらバンク角90度を採用することで、Vバンク間を広げ、その広げたスペースを利用して排気系をVバンク内にまとめている。一般的にはバンクの内側には吸気系を、その外側には排気系をレイアウトするのだが、このホットインサイドはその逆と捉えてもらいたい。F33A-FTVのエンジン設計・機能評価の取りまとめを行った浅野智幸はこう話す。

「ホットインサイドを採用することで、高価な排気浄化装置(DOC*1やDPF*2など)を1系統にまとめ、かつ触媒の早期活性化のために、エキゾーストポートの最短距離に配置することで、熱容量を低

減できます。排気浄化装置は高温を維持することで性能を発揮するので、この場所が好都合なんですね。あと、動力性能に大きく寄与する2wayツインターボをVバンク内側に配置し、吸気ボリュームを低減させることで、加速レスポンスを向上させたかったことも採用の理由です」。

その他にもホットインサイドのメリットは様々だが、大きな理由としては上記の2つが有力だ。

F33A-FTVエンジンの大まかな構成が決まり、いよいよ本格的な開発が始まっていく。

- *1……DOC(Diesel Oxidation Catalyst/ディーゼル酸化触媒)
- *2……DPF(Diesel Particulate Filter/ディーゼル微粒子捕集フィルター)

——エンジンのトルク向上 「ガソリン車より走らないよね」 その印象を覆す

排気量が4.5Lから3.3Lにダウンサイジングされていることから、当然そのままではエンジンのパワーもトルクも低減してしまう。そのため、後述する2wayツインターボとの組み合わせにより、燃費向上や排気のクリーン化などにも配慮しながら、パワーやトルクも上げていかなければならない。

「エンジンのトルクアップについては、650Nmを1200rpmという低い回転数で発生させることを目標の一つとして、トルクカーブをつくっていききました」。



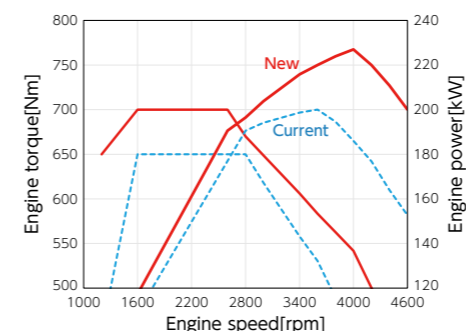
川浦 聡司
技術第二部

そう話すのはエンジン適合を担当した川浦聡司だ。そもそもディーゼルエンジンは低回転域でのトルクが出しやすい特性を持っているが、なぜ1200rpmなのだろうか？ その疑問に車両適合に携わった井上崇が答える。



井上 崇
技術第二部

「クリアしなければならない法規として車外騒音があるのですが、それを元にしていきます。1200rpmであれば厳しい規制値をクリアできるからです。1200rpmで650Nmを出し、1600~2600rpmの間で700Nmが出るようなトルクカーブを描き、それ以上のエンジン回転数のトルクカーブも含め、目標を設定し、それを満足できるように開発を進めていきました。これは従来の開発では行わなかった方法です」。



エンジン全負荷性能

エンジンができてしまってから「もうちょっとトルクがあるほうが良かったよね」と言われても、そこから変更するのはかなり困難である。そうならないようにエンジンをつくる前の段階で理想のトルクカーブを決めていったのだ。どのようにしてトルクアップを果たしたのか、その具体的な内容はターボの項に譲るが、ここで井上(崇)が興味深い話をしてくれた。それはトルクカーブが2600rpm以降の高回転側で緩やかに下がっていることについてだ。これでは運転している人がアクセルを踏んで回転を上げて、加速しないと感ずるのではないだろうか。

「人間工学的に『等加速度感線』というのですが、実際の加速度は下降しているのに、ずっと同じ加速をしているように感じるトルクカーブを設計できるんです。それは『ウェーバー・フェヒナーの法則』に基づくものです。その法則は、ある時間に対

して、ある加速度の変化以内であれば、人間はその変化を感じないということが証明されています」と井上(崇)。

たとえば、2600rpmを超えてもトルクカーブをそのまま維持した状態にすると、トルクカーブが変化していないのに、人はどんどんとクルマが加速していくように感じ、恐怖感を覚えるという。そのため、むしろ緩やかに下降しているほうが運転者に心地良い加速感を与えられるというのだ。

「この法則が妥当なのかを検証するため、企画段階でBEV(電気自動車)を使い、実証実験をしてみました。結果、法則通りでした」と話す。

にわかには信じられないが、トルクカーブの設定にはこのような人間工学的な要素も参考にしながら、緻密に決めていったことがわかる。しかし、実機がない状態でトルクカーブまで決めていくことは、かなり大変な作業ではないだろうか。

「その通りです。目標とするトルクカーブや加速度ラインをどのように達成するのか。実機がない状態でイメージし、作り込んでいくのは苦労しました。ただ、その点においてはCAEなどの解析機器やシミュレータなどを活用して解決していききました」と川浦。

現在の自動車の開発現場では、CAE(Computer Aided Engineering)などを活用するのが常識だが、コンピュータ上でできたエンジンモデルが寸分変わらずリアルなエンジンになるわけではない。机上の理屈や理論も大切だが、その凶面を元でできてくる実機を想像する力も必要なのである。

開発を振り返ってみて、最も印象に残っていることは何だろうか。

「ディーゼル車って昔からガソリン車と比べられる存在で、そのたびに『ディーゼル車って燃費や低速域のトルク感はいいけど、ガソリン車より走らないよね』と言われ続けてきました。でも、F33A-FTVは関係者の試乗会で『ガソリン車よりいいね』と言ってもらえるようになり、すごくうれしかったです。ガソリン車よりもいいと言われたのは、僕の経験では初めてのことなので」と井上(崇)は笑顔で話す。さらに「私は関係部署とのコミュニケーションの重要性を再確認しました。エンジンは特に駆動系システムと密接な関係があります。だからこそ、より良いクルマをつくっていくためには、こちらの要望を他部署にもしっかりと伝え、連携・協力しながら仕事を進めていくことが重要です。トヨタ自動車のエンジンとAT*3と実験

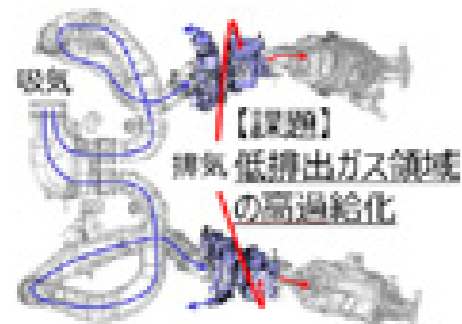
の3部門とは週1回ミーティングをし、どうやら高次元で走り・燃費・NV*4性能を成立させられるか、とことん意見交換ができたからこそ、満足いくエンジンを生み出すことができたと思っています」と締めくくった。

*3……AT(Automatic Transmission/自動変速機)
*4……NV(Noise Vibration/騒音および振動)

——2wayツインターボ エンジンとターボを同時に 開発できる当社の強みを再認識

F33A-FTVは先代の1VDからダウンサイジングしながらも、低速域でのトルクアップも図らなければならない。先代のツインターボシステムはエンジンの排気を2つのターボに割り振るので、どうしても低速トルクでの排気エネルギーが不足してしまうのが課題だった。その他、さまざまな条件を考慮しつつ、ツインターボシステムを選定していった結果、最終的に「シリーズシーケンシャル(直列)」か「2wayツインターボ(並列)」の2択に絞り込まれた。

これらのシステムは2つのタービンのつながり方が異なる。シリーズシーケンシャルは小型のタービンと大型のタービンを直列につなぐ方法。一方、2wayツインターボは並列につなぐ方法だ。さまざまな要件を総合的に検証していった結果、ホットインサイドのエンジンレイアウトによる搭載性やアクセルに対する応答性、さらに2基のターボの部品を共通化できるコストパフォーマンスの良さも相まって2wayツインターボを採用することに決まった。



1VD-FTV ターボシステム



F33A-FTV ターボシステム

2wayツインターボの仕組みをもう少し詳しく説明してもらおう。ターボの設計に携わった町田和也はこう話し出す。

「2つのタービンをプライマリとセカンダリに役割分担させるのが2wayツインターボです。低回転域はプライマリターボのみを動かしますが、エンジン回転が上がっていくとともにコントロールバルブを開き、セカンダリターボにも排気を導入。2基のターボを同時に動かす仕組みです。これにより低回転域でも高過給を維持でき、低速のトルクアップや出力向上を実現できました」。



町田 和也
技術第一部

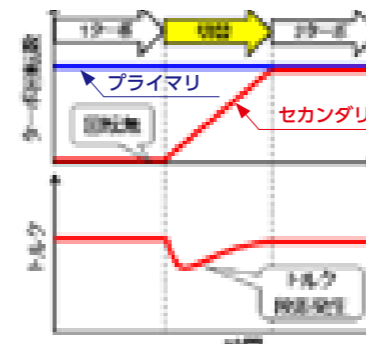
ただ、それだけではない。F33A-FTV専用インペラ(タービンの羽根)やコンプレッサの形状を最適化し、より幅広い回転域で高過給を可能にしたこともトルクアップ・出力アップに貢献している。

「2wayツインターボは非常に優秀なシステムなのですが、大きな課題があります。それはプライマリからセカンダリに切り替わるとき、急激なトルク変動が出てしまうことです」と、制御開発を行った小関知史は言う。

プライマリが回転しているとき、セカンダリはまったく回転していない。その状態で回転数が上がり、バルブを開くことでセカンダリのほうに急激に排気の流れると一瞬、トルクが落ち込んでしまう現象が起こるといふのだ。

「実はこの課題は、2wayツインターボを採用するときから想定していました。解決方法はセカンダリに排気の流れる前にタービンを回転させておくこと。そのために電動式のエアバイパスバルブ

(ABV)を装着することでセカンダリをあらかじめ回転させておき、1ターボから2ターボへの切り替えをスムーズにしました」と町田はその解決方法を話してくれた。たとえるなら、リレーでボタンをもらう走者を助走させていくようなイメージだろうか。



2wayツインターボの切替段差

「ただ、これだけで解決したのではなく、排気量の調整ができる可変ノズル式のタービンを採用したり、各種バルブを装着することで、よりスムーズな切り替えを実現しているんですよ」と小関が付け加える。

この問題は想定内だったため、順当に対応できたが、開発中に思わぬ課題も発生した。

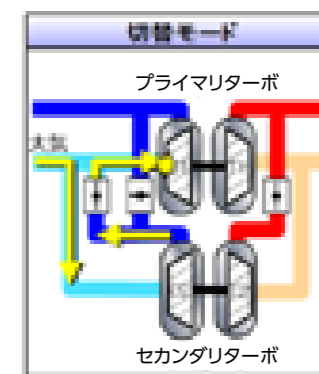
「低回転域でプライマリが回転しているとき、セカンダリは無回転です。ただオイルは常に両方のターボに供給されているため、回転していないセカンダリのほうにオイル漏れが発生しました。これはオイルの経路と形状を見直すことで解決しました。しかし、プライマリのインペラが破損してしまう問題は頭を悩ませましたね」。



小関 知史
技術第二部

このインペラ破損問題は1ターボから2ターボになる切り替えモードのときのみ発生するという。当初はなぜ壊れるのかまったく見当がつかなかったが、切り替え時にセカンダリとプライマリの吸気経路が直列につながることで、セカンダリの空気脈動がプライマリに伝わり、プライマリのイン

ペラが持つ固有振動数とたまたま合致。そのため、共振して破損するということがわかったのだ。



切替モード中のインペラ共振

「原因がわかれば単純なことです。そこに着目するまでに苦労しましたね。対策としては、インペラの形状を変更し、セカンダリから流れてくる空気脈動と共振しないようにすればOK。無事解決しました」と町田は安堵の表情を浮かべながら話す。

今回、ここに紹介したのは、2wayツインターボシステムに関連したものだけだが、その他にもさまざまな新規アイテムを考え、盛り込んでいる。それらはもちろん、当社単独で開発できるものではなく、トヨタ自動車の設計部門をはじめ、さまざまな部署と連携することでチャレンジすることができた。

「私は特に適合チームとの連携が印象に残っています。今回の2wayツインターボは1ターボから2ターボへの切り替えに3つのバルブを使うだけでなく、細かな排気量の調整ができる可変ノズルベーンも採用し、非常に制御の幅が広がっています。そのため、どのようなエンジンの味付けにするのかは無限に組み合わせられるんですね。そこを絞り込むために適合チームと密接に連携し、彼らの要望を迅速に制御システムに反映し、実現できたと思っています」。

小関は開発を振り返ってこのように話してくれた。町田は小関の発言を受けてこう語る。

「それができたのも、やはりターボを内製していることに尽きると思うんです。たとえば出力性能の不足が指摘されたときも、短期間でインペラをさらに改良することで解決できました。エンジンと一緒にターボも開発しているからこそ、ターボ単体ではなく、システムとして捉えることができ、高性能化、短納期化を実現できるのだと思います。これは他社では真似できない私たちの強みだとあらためて実感しましたね」。

低燃費化、排気のクリーン化 低燃費化、排気のクリーン化は エンジンだけでなくエンジン以外 の領域との連携も肝

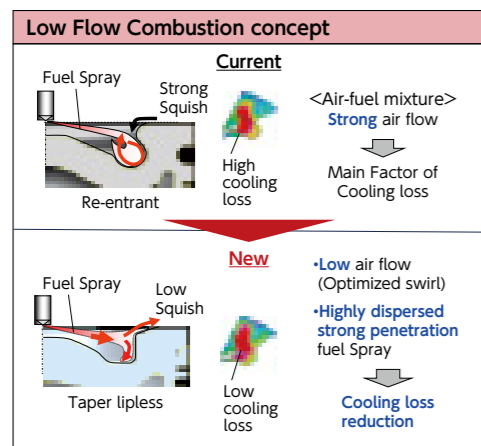
燃費改善と排気のクリーン化においては、燃費を先代エンジンの-25%に設定。排気(NOx)は今後、さらに厳しくなる規制を見据え、-56%とし、開発に取り組んだ。今回、4.5L V8から3.3L V6へダウンサイジングしているため、8気筒から6気筒への変更による機械的な抵抗(フリクション)などが減るが、それに加えてさらなる燃焼効率の改善とフリクション低減アイテムを追加している。

「燃焼効率とフリクション低減には、新たにスチールピストンを採用したことが大きなトピックです」と川浦は言う。

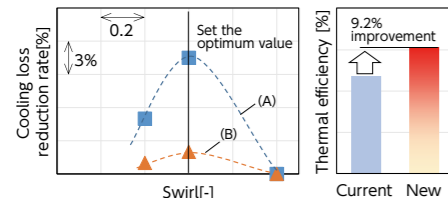
いまどきのピストンはアルミ材が使われているのが常識だが、あえてスチールを採用したのはなぜだろうか。

「高強度のスチール材を使うことで、ピストンの全長を短くでき、フリクションを低減できるからです。ピストンリングの張力を低くすることで、さらに抵抗を少なくしているのも特長ですね」と浅野(智)は続ける。

燃焼改善についてはどのような方法でアプローチしたのだろうか？



(A) Engine speed = 1600[rpm], BMEP = 0.67 [MPa], 2400[rpm], 1.1 [MPa]
(B) Engine speed = 1600[rpm], BMEP = 0.67 [MPa]



冷却損失低減効果

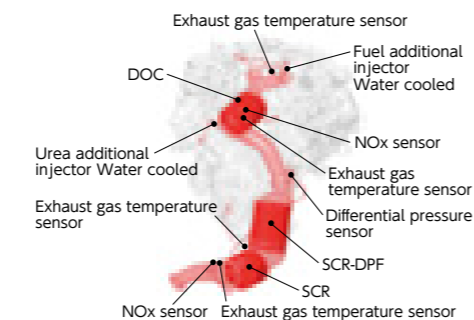
「筒内ガス流動の最適化に着目しました。筒内流動が大きいと、壁面を通じて熱が失われる量が増え、冷却損失増加につながります。そのため筒内流動を抑える新しい燃焼室形状を採用しました。ただ、筒内流動を抑えると噴射した燃料が拡散できずに燃焼が悪化してしまうため、高拡散、高貫徹噴霧を可能にした噴射系を組み合わせることで低流動化を実現しています」と川浦は言う。

燃焼効率の改善とフリクションの低減によって、目標の半分以上をクリアするほど効果を出したというから驚きだ。併せてエンジン回転数とトルクの関係性を考慮し、エンジンが高効率に仕事をしてくれる領域を拡大。F33A-FTVは低回転かつ高負荷の領域が使えるようATとのマッチングも煮詰めていった。

「今回、先代の6速ATから新開発の10速ATを組み合わせています。より多段化したことで、広げた高効率領域に細かくミートできるようになりました」と川浦は話してくれた。

一方、排気のクリーン化については、どのような取り組みを行ったのだろうか。

「基本的な考えは燃料をきれいに燃やして、Euro5の排気規制達成レベルに改善した上で、排気浄化装置にNOxを低減する触媒を追加し、さらに上のレベルのEuro6排気規制にも対応できるようにする方向性です」と井上(崇)は言う。



尿素SCR-DPFシステムレイアウト

エンジンから出た排気はEGR(Exhaust Gas Recirculation)を通して、吸入空気とともに再度燃焼室に誘導される。そのEGRの性能を強化することで排気をクリーン化し、さらにその後、DPFシステムとNOx選択触媒還元(SCR)機能を合体させた「尿素SCR-DPFシステム」の技術を新たに採用することで、さらなるNOx低減を実現することができた。

燃費向上や排気のクリーン化においては、エンジン単体だけでなく、ATを担当するトヨタ自動車

の駆動系部署や性能実験をする部署と連携して進めていった。

「燃費マップやNOxマップを製作し、どこをターゲットにするのが理想なのかを協議し、見定めていきました。たとえば、ディーゼルエンジンにとって低回転・高負荷で走らせるのが理想で、燃費的にも高効率ですが、一方でNOxの排出量が大きくなってしまふ弱点もあります。また、燃費や排気は、NVやドライバビリティにも影響するので、緻密な連携が必要なのです。このような経験をすることで、折衝能力がさらに身に付いたような気がします。エンジンだけでなく、広い視野で開発全体を見つ、こちらの要望もしっかり主張する。そんな自身の成長を実感しました」と井上(崇)。

川浦も続けて話す。

「走りの良さを高めていくと、排気のクリーン化に影響が出るなど、背反することが多いんですよ。だからこそ、お互いが集まって話し合うことで、より良い落としどころを決めていくことが重要。そこが苦労した部分でもありますね」。

エンジンはクルマの心臓部であるからこそ、あらゆる部分に影響する。エンジン開発の奥深さを実感できるエピソードだ。

熱対策 攻めの姿勢で熱を制する

F33A-FTVは排気エネルギーを効率的に活用するため、排気系部品をVバンク間に収める「ホットインサイド」レイアウトを採用したことは先述した。2wayツインターボとの相性も良く、死角のない理想的なレイアウトに思えるが、弱点もある。それが熱問題だ。機能性・信頼性を担当した井上幸治はこう説明してくれた。

「エンジンの排気系部品は700~800℃とかなり高温になります。その温度は一定ではなく、走行

条件によって、高温になったり低温になったりするため、金属部品の熱疲労が課題となります。従来のホットアウトサイドに対し、今回採用したホットインサイドのレイアウトだと、限られたスペースに排気系部品が集められているので、熱疲労の課題がより顕著になったと言えます」。

「井上(幸)が言うように排気系部品は温度が変化するため、金属部品の熱疲労を予測するのは難しいのですが、試作する前にCAEである程度予測し、熱対策を行っていきました」と話すのは、CAEを担当した浮田和彦だ。



浮田 和彦
技術第一部

その方法はCAEに温度条件を入力し、熱ひずみを計算することで排気系の熱疲労を算出していく。熱ひずみを計算するうえで締結部品間の滑りも重要だ。温度変化によって締結部品の膨張差が生じると同時に、締結面の面圧が変化。摩擦限界を超えれば、部品間で相対滑りが起きてしまう。F33A-FTVはホットインサイドになったことで、先代のエンジンよりも締結部品数が増え、締結構造も複雑になったという。CAEは締結部品の滑りを予測するのが苦手なので、なおさら難しい。

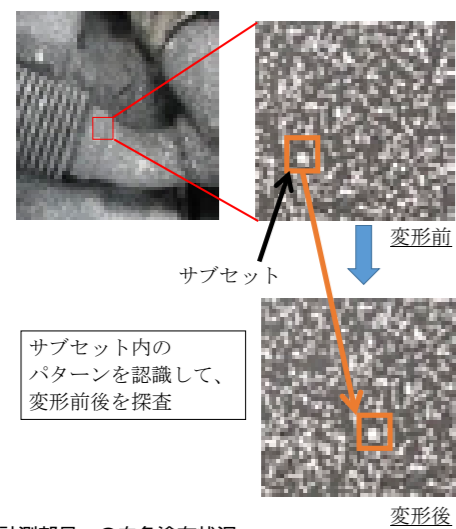
「ただ、CAEで算出した数値があるからこそ、実機ができてきたときに実際の数値とどれだけ乖離があるかなどを知ることができ、それをまた開発にフィードバックできます。排気系部品の予測精度はまだまだですが、重要なデータであることは確かです」と浮田は話してくれた。

2019年頃から現象把握のための本格的な計測を開始した。ここで採用されたのが「デジタル画像相関法」という新しい技術だ。通常、高温部の熱疲労の実験には溶接型ひずみゲージを用いるが、ゲージ本体が大きく、小さな曲率部には設置不可能であるため、F33A-FTVでは非接触で微小変位を計測する手法にチャレンジした。その方法は、計測したい部品に白い点を塗布し、エンジンを回す。あらゆる運転状況をシミュレーションしつつ、2



井上 幸治
技術第一部

台のカメラでその白い点がどれくらい、どの方向に動いたかを撮影。



計測部品への白色塗布状況

撮影データを分析すると、各部の変位量分布を示してくれるのだ。その数値から締結部品間の相対滑りを把握できる。

井上(幸)は「デジタル画像相関法は、まだ一般的ではない特殊な技術。そのため、この技術を使いこなすオペレーターも少ないのが現状です。しかも今回の計測部位は、高温かつ振動も加わるため、さらに難易度が上がりました」と教えてくれた。

排気系部品の中でも最も厳しい条件下に置かれているのが「クロスオーバーパイプ」であることも、この技術で再確認した。クロスオーバーパイプはプライマリターボとセカンダリターボへ排気を流す役割を持つ。この部品はターボとシリンダヘッドに隣接している上、非常に狭いスペースに押し込められている。そのため、耐熱疲労性を確保することが大きな課題となっていた。デジタル画像相関法によって得たデータに基づいてCAEの精度を向上。クロスオーバーパイプの対策形状を導き出し、課題をクリアしていった。

このような熱対策への取り組みについて、印象に残っていることを聞いてみた。浮田はこう話し出す。

「F33A-FTVで適用したCAE手法においては、モデル構成部品が従来の直列4気筒エンジンに比べて約6倍に増え、1諸元の計算が1週間くらいかかるようになりました。そのため、計算方法の工夫に加えて、ITデジタル推進部に全社共有コンピュータの割り当てを増やしてもらうことで、1日程度で計算できるようになりました。開発期間が限られている中、さすがに計算1回で1週間も取

りませんからね」。

浮田にとって想定外の出来事であり、それが判明した当時は絶望しただろう。そんな中でも他部署の協力を迅速に得ることで、ピンチをクリアしていったことを考えると、デジタル的な支援がいかに重要なのかを思い知らされる。

「F33A-FTVの開発期間は短く、厳しかったにも関わらず、今回新たな計測方法にチャレンジしました。一般的に考えれば、時間が無いのであれば、従来のやり方を踏襲する“守りの開発”をすると思うのですが、攻めの姿勢で臨んだことで、結果的に大きな成果を得ることができました」と井上(幸)は振り返る。浮田も開発を総括してこう話す。

「熱問題はホットインサイドのレイアウトを採用した時点で想定していましたが、やはり実際に取り組みと課題は多く、悩まされました。特にスペースが限られているので、クロスオーバーパイプに手を加えると他の部分にも影響してくる。周囲の部品にも配慮をしながら開発していく大切さをあらためて学びましたね」。

—NV対策

「ディーゼルとは思えないエンジン音だ」と驚きの声

「ディーゼルエンジンの特長とは何か？」と質問をすると、多くの人は「燃費がいい」、「低速トルクがある」と回答するだろう。同時に「ガラガラという不快な音がする」とネガティブな印象を持つ人もいる。では、そもそもディーゼルエンジンの「ガラガラ音」はなぜ発生するのだろうか。NV対策を担当した村井義之に聞いてみた。



村井 義之

技術第一部

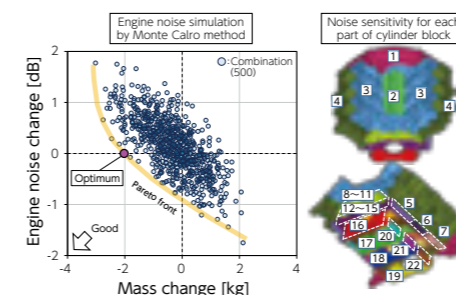
「ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べて燃焼圧が高いので、そもそも大きな燃焼音がします。音が大きいだけでなく、ガラガラという特

有の音も気になりますよね。F33A-FTVのアイドルリングは600rpmに設定されていますが、アイドルリング状態では1秒間に30回爆発している計算になります。1秒間に30回も爆発していれば、普通は連続した音に聞こえ、あのようなガラガラという音にはならないはず。なぜなのか？ 詳しく検証していくと、大きく2つの原因があることがわかりました。1つはエンジンの向きによって聞き手に近い位置にある気筒の音がとりわけ大きく聞こえるという点。もう1つは、6気筒すべてがまったく同じ燃焼をしているわけではないので、しっかり燃えた気筒の音は大きく、そうでない気筒の音は小さく聞こえる。そのバラつきが、ガラガラという音となって聞こえることが判明したのです」。

ディーゼルエンジン特有のガラガラ音は、単に爆発音が大きいという理由だけではないことは理解できた。では、この問題をどのように解決していったのだろうか。川浦は言う。

「まず各気筒における燃焼のバラつきを抑えるため、EGRガスを各気筒に均等に送り込むことを考えました。そもそもEGRガスは燃えにくいので、1気筒だけ多く入ってしまうとその分、燃焼も悪くなり、それが音のバラつきの原因になります」。

EGRガスを均等に分配できれば、各気筒の燃焼状態も揃い、音のバラつきも低減できるというわけだ。その他にもシリンダブロックに補強を加えて音を伝わりにくくするため「モンテカルロ法」を使った最適化も行った。



モンテカルロ法による軽量化と低騒音の両立

「モンテカルロ法とは、数値計算法の一つです。シリンダブロックを22の領域に細分化し、各部の形状を変化させてCAEで騒音解析を繰り返し、なるべく軽く、なるべく音が小さくなる形状の最適解を導き出しました」と村井は話す。

ただ、この手法はエンジンの軽量化と大きく関わってくる。基本的に各部に補強を入れていけば、音は静かになるが、それではエンジンがどんどん重くなってしまふ。軽く、しかも静かなエンジンを

実現するため、どのようにバランスを取っていくかが開発の肝となった。

もう一つ大きな取り組みとして「D-SPIA」と呼ばれる2段着火予混合燃焼を採用したことも大きな効果を発揮した。D-SPIAとは何だろうか。川浦はこう説明する。

「すす(PM)の発生を抑えるため、燃料噴射から着火までの時間を長く取り、均一に燃料を燃やす『予混合燃焼』という方法がありますが、燃焼音が悪化するデメリットがありました。そこで私たちは予混合燃焼を2分割し、2つの燃焼ピーク間隔を制御し、1回目の爆発と2回目の爆発で発生した音同士をぶつけて打ち消し合うようにしました。これによって、人がうるさいと感じる燃焼音の主成分1~2kHzの周波数帯を下げることができました」。

D-SPIAは1回目の噴射と2回目の噴射をする間隔がポイントだという。この間隔を運転状況に合わせてコントロールしていくことが重要。もしこの間隔を間違えると、打ち消し合うタイミングがずれ、より大きな燃焼音を発生させてしまうという。そのため、これまでの「マップ制御」に対し「モデルベース制御」という燃料噴射制御手法を採用。これも前例のない大きなチャレンジである。

「このようなさまざまな取り組みによって、高い静粛性を実現できたと思っています。後ろの人と会話するときも、わざわざ振り向いて大きめの声で話さなくてもいいレベルまで持っていくことができた」と自負しています。これまで以上に車内で会話がしやすくなっていますよ」。

村井はうれしそうな顔で話してくれた。「ちょっと大げさかもしれないですが、常識を覆した開発だと思います。基本的に軽いエンジンはうるさくなりがちなので。あとは音の質感をどのように作り込むかを学べた開発でした。いくら音量を下げても、ガラガラという音質は変わりませんからね。D-SPIAのおかげでディーゼルらしくない音質を実現できたと思っています」。

続けて川浦も言う。「D-SPIAは開発後半から取り組んだので、それまでは関係者の試乗会をするたびに『うるさい』、『ランドクルーザーという高級車にふさわしくない』と散々な言われようでした。でも、D-SPIAを採用してから評価は一変。『ディーゼルとは思えないエンジン音だ』、『燃焼の切り替わりも気づかない』という意見が出て、手応えを感じました。音の面で

ディーゼルの常識を覆すことができましたね」と話してくれた。

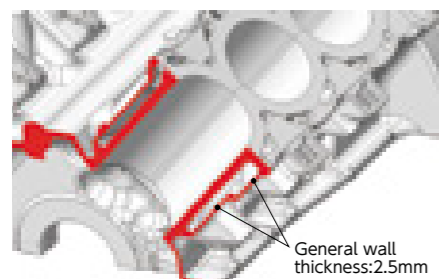
——軽量化

これまで踏み込んだことのない領域まで追求し、答えを出す

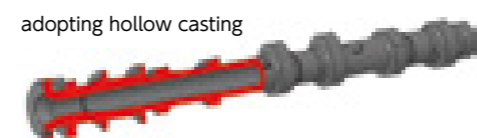
車両の軽量化に貢献するため、車両を構成するパーツの中で重量物であるエンジンのシェイプアップは避けて通れない。F33A-FTVは先代のV8からV6になっているため、それだけで-35kgの軽量化を実現しているが、さらなる軽量化を図るため、前項のNV対策で述べた「モンテカルロ法」を用い、軽量化できる部分を探っていく。そこで突き止めたものの一つが、エンジンの最重量部品であるシリンダブロックのウォータージャケット外壁である。先代エンジンの外壁は3.5mm厚だったが、鋳造部門での高強度鋳鉄材料の開発と薄肉化技術の確立により、2.5mm厚まで薄くすることができた。

山口 猛
技術第一部

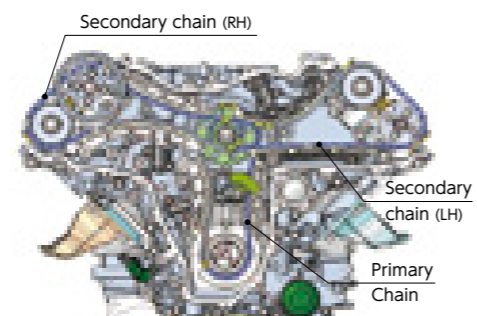
「クランクシャフトの中間ウェブをなくす『スプリットピン構造』も軽量化に貢献しました。他にもカムシャフトを中空化したり、ピストンやピストンピンの軽量化、燃料ポンプ駆動をギアからチェーン化するなどさまざまな部分にメスを入れ、結果的にエンジン全体で-62kgの軽量化に成功しました」と山口猛は話してくれた。



シリンダブロック



カムシャフト



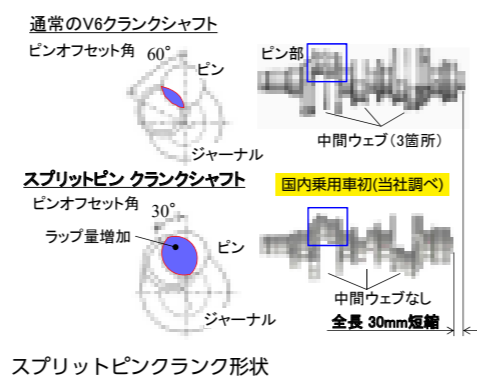
タイミングチェーンシステム

ただ、-62kgという驚異的な数値を実現した陰には、想像を絶する困難とそれを乗り越える飽くなき追求があった。その一例がクランクシャフトの焼き入れだ。

クランクシャフトは先述した通り、軽量化のために中間ウェブをなくしているが、その影響で強度を高めるための焼き入れが従来通りにいかなかった。その詳細について、生産技術部の浅野司はこう話す。



浅野 司
生産技術部



スプリットピンクランク形状

「クランクシャフトは強度を高めるために『高周波焼き入れ』という方法を採用しています。誘導加熱の原理を利用し、コイルに電流を流し、クランク

シャフトを加熱して焼き入れするのですが、今回のクランクシャフトは中間ウェブがないため、加熱され過ぎて表面が溶けてしまうという現象が起きました。溶けないように電流を弱めると、今度は焼き入れが不十分になります」。

浅野(司)は電流を弱める、加熱時間を変える、予熱による温度の急上昇を抑える、コイルの形状を変える、周波数を下げるなど、思いつく限りの方法を試したが、すべて徒労に終わった。

「従来のクランクシャフトは、焼き入れしたい部分にコイルを当て、1カ所ずつ順番に実施できました。しかし、今回のクランクシャフトは中間ウェブを介さず、ピンとピンが直接つながっているため、1カ所を焼き入れた後、隣の焼き入れ部を加熱すると、1回目に焼き入れた部分にも熱が伝わって再加熱されてしまい、硬度が低下してしまうのです。そのため、2つのコイルで2カ所を同時に加熱する必要があります。この同時加熱の前提もまた、今回の焼き入れを難しくしていました」。



従来加熱方式と新加熱方式

「従来の延長線上の対策では解決できない」。そう考え、一度、原点に立ち戻った。焼き入れ時にコイルによる磁場や磁束がどのように発生しているのかを、(株)豊田中央研究所などの協力を仰ぎ、解析してみることにしたのだ。

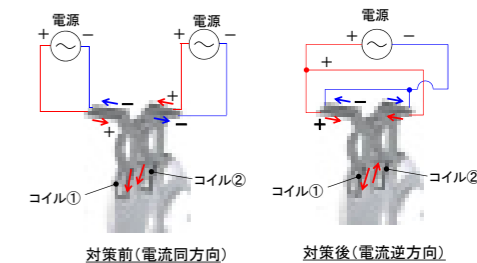
その結果、ピンとピンのつながっている部分に顕著な温度上昇が確認された。これを見て、2つのコイルから発生する磁束が干渉し、増大することで過加熱を起こし、クランクシャフトを溶かしているのではないかと考えた。



品質不良発生部位

「この仮説を確かめるため、1つの電源で2つのコイルに流す電流方向を逆向きにしたのです。つまり磁束がお互いに弱め合う方向に持っていったのです」。

仮説は正解だった。実際に検証してみると過加熱を起こしていたピンとピンのつなぎ目の温度上昇が抑えられており、溶けることなく焼き入れ深度も十分に確保できていることが判明。焼き入れ管理の難易度も量産レベルまで下げることができた。



対策前後のコイル電流方向

「ドットと肩の荷が下りた思いでした。これまでの焼き入れ工程整備では、対策の方向性の予測が付いたんですが、今回はまったく予測がつかない手探りの状態で正解を見つけていったので、それはもう大変でした。だからこそ、解決したときの達成感は大きかったですね。これまでやってこなかった深い領域まで踏み込んで仕事できたのは、初めての経験。私自身、大きく成長できたと思っています」。浅野(司)は感慨深く語ってくれた。

クランクシャフトができなければ、エンジンは回らない。エンジンが回らなければ、その後に控えている工程を待たせてしまうことになる。そんな重圧と戦いながら、見事に結果を出してみせた。

「先代からですが、エンジンの主要な重量部品を、設計から製造まで一貫して内製できているところが大きいですね。鋳造・生技・製造・品保部門と意見をぶつけながら、軽量化を追求しつつも、作りやすさと品質を兼ね備えた部品を、一体となって作り上げていくマインドが根付いていると思います」と山口も話してくれた。

ランドクルーザーへの 強い想いを実感した車両適合

車両開発において後半に行われる

「車両適合(以下、適合)」と呼ばれる工程がある。

今回の場合は、当社が開発したエンジンを最終製品である車両に搭載し、お客様の使われ方を想定した走り方をすることで、その性能を検証。

より良くするための課題を抽出していく工程である。

今回の適合ではどのようなことをしたのだろうか。

走って気持ちがいい 理想的なレスポンスを実現せよ!

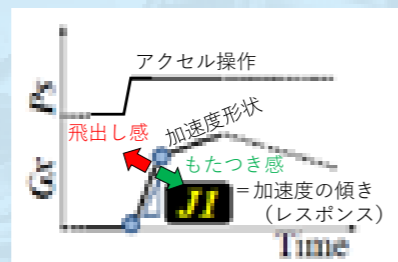
今回の適合で、私は車両で走行して得たデータをエンジン開発にフィードバックする役割を果たしました。国内だけでなくメイン市場となるオーストラリアや中近東での適合に参加した部署にも、エンジンデータを取得してもらい、そのデータを入手。有効活用しました。

エンジンの評価はハード・ソフトの進化によって、ベンチテストでもエンジン過渡の挙動などを再現できるようになりつつありますが、実車に載せた状態まで正確に再現できません。これは今後、取り組むべき課題だと認識しています。

F33A-FTVは先代のエンジンに比べ、気持ちの良い加速感を重視しています。そのため、エンジン単体だけでなく、ターボやATなどとのマッチングも重要。全開加速においては、先述した等加速度感線を元にしたつくり込みをしていきました。ただ、一般のユーザーの使い方として、アクセル全開で加速させるシーンはそれほどあるわけではありません。そのため、一般道などの走行をターゲットとし、アクセルを少し踏み込んだときに、エンジンがどのような反応(レスポンス)をするのかに注力しました。レスポンスが速すぎると、クルマが急加速する恐怖感を与えてしまいますし、レスポンスが遅すぎると、走らないなあと不満を覚えてしまいます。アクセル開度とレスポンスのちょうどいいラインは、何度も関係者と乗り合わせを実施して評価していきました。企画時に導き出した目標ラインを目指し、それをいかに達成するかが私たちの腕の見せ所です。ターボの味付けやATについても、ちょうどいいところで変速できるプログラムを組めるよう、3者が一緒になって開発を進めていったのが印象に残っています。



Takashi Inoue



車両加速性能比較

コロナ禍で生まれた新しい適合の形

適合で苦労したのは、やはり新型コロナウイルス感染症の影響です。特に海外での適合はメイン市場であるオーストラリアに、当社メンバーは一度も行くことができませんでした。そのため、オーストラリアに車両を送り、現地のスタッフに適合を指示し、データを採取してもらいました。そのデータを見ながら「次はこんな走り方をしてほしい」と要望を出し、再び走行してもらってデータを取る……。そんな繰り返しでした。メンバーたちは現地で体感できなかったものの、リモートによる打ち合わせや車両を走行させるときに、カメラで撮影したテストドライバーのコメント付き映像をリアルタイムに見ながら検証するという新しい開発手法を手に入れることができました。オフロード走行においては、ドローンを飛ばし、クルマの挙動を車外から撮影し、エンジントルクをどのようにコントロールしたらよいかを検証。その様子もリアルタイムに体験できました。このような方法は従来にはなかったもので、とても新鮮でしたね。

F33A-FTVの適合はトヨタ自動車はじめ、関係部署全員がランドクルーザーにかける強い想いを再確認できた経験でした。

適合はお客様に提供する最終製品の形で行うため、私たちの仕事でそのクルマの評価が決まる最後の工程と言えます。そんなユーザーに近いところで仕事できたことを誇りに思っています。

——開発を終えて

ディーゼルエンジンの新規開発 未来に馳せる “エンジン屋”たちの想い

新型ランドクルーザーのディーゼルエンジンは、2016年からの先行開発を経て2021年、無事に完成を迎えた。このような人気車種の心臓部を開発できたことに対し、いま一度、開発メンバーにそれぞれの想いを語ってもらおう。

「現代において内燃機関を新規で開発できるのは、非常にまれなことで、そのチャンスをいただけたことに感謝しています。今回の開発を一言で言うと『変えるためのチャレンジがしやすかった開発』と言えます。というのも、既存のエンジンの改良だと設計上、制約が出てきて、変えたくても変えられないジレンマが起きてしまいます。しかし、新規開発であれば、変えることに躊躇する必要はありません。モンテカルロ法を試すことができたのも、新規開発だからこそ、挑戦できたことです」。

村井はそのように語ってくれた。

メンバーたちはディーゼルエンジンをまったくの新規開発として取り組めたことに大きな誇りを抱いているようだ。ただ、現在の自動車業界は電動化に追い風が吹き、内燃機関に厳しい情勢であることは確かだ。このような流れに対し、生粋の“エンジン屋”である開発メンバーは内燃機関の行く末をどのように考えているのだろうか。井上(崇)が口を開く。

「確かに先進国では電動化の風潮です。電動車には内燃機関車にない利点が数多くあり、私たちもそれは十分に理解しています。でも、世界に目を向けるとインフラが整備されておらず、内燃機関を必要としている地域がまだまだあります。ましてやこのランドクルーザーは『どこへでも行き、必ず生きて帰ってこられるクルマ』です。電動車がこのテーマを叶えられるようにならないと、内燃機関に置き換わるのは難しいと思いますね」。

「電動車と内燃機関車って『電動車=温室効果ガスを出さない』、『内燃機関車=温室効果ガスを出す』という二極で語られている気がするんです。しかし、内燃機関でも水素エンジンやeフューエルと呼ばれるカーボンニュートラル燃料などの開発も進んでいます。つまりカーボンニュートラルは

内燃機関でも達成できる可能性は充分あると思うんですよ」と村井は言う。

「電動化が進んでも、必要とする人がいる以上、内燃機関はなくなるしないし、必要とする人たちのニーズをくみ取り、改良しつづけていかなければならないと思っています」と川浦も語気を強める。

「時代の波を考えれば、ディーゼルエンジンを新規開発できるのは、これが最後かもしれないです。F33A-FTVはまだ生まれたばかり。これから10年、20年、30年と提供しつづければ幸せですが、そのためには必要な改良を地道に継続していかなければなりません。電動化、ディーゼルエンジンとカーボンニュートラル燃料の組み合わせなど、選択肢は多いです。まだまだ内燃機関に可能性を抱く一方、カーボンニュートラルに対する世の中の流れは非常に速いため、これからの3~5年をいかに過ごすかが重要。これまでの考え方、仕事のやり方も革新していく必要があると思っています」。

浅野(智)はこれからの内燃機関、そしてこれからのエンジン事業部についての私見を述べ、そう締めくくった。

約5年にわたるエンジン開発は、
関わるすべての部署が同じ方向を向き、
協力しなければ成し得ることはできない。
燃費を1%でも伸ばそう。

1gでも軽いエンジンにしよう。
そんな食欲の前に進む気持ちを支えるのは、
これまで数々のエンジンをつくりつづけてきた
彼らのプライドに違いない。

F33A-FTVは生まれたばかりである。
このエンジンが今後どのように
ブラッシュアップされていくのか
期待せずにはられない。

2022年、F33A-FTVは、
第72回自動車技術会賞において
「技術開発賞」を受賞
(トヨタ自動車との共同受賞)した。