

レクサス向け 8AR-FTS エンジン

8AR-FTS Engine for LEXUS

川村 誠 前田 裕幸 杉山 文敏 古澤 隆志 佐々木 和敬 岡田 祐介
水木 太喜 安藤 純介 佐藤 稔 國重 祐介 奥出 智重 菅原 徹 脇屋 努



Abstract

In July, 2015, the production of an automotive turbocharged engine began at Yamaha Motor Co., Ltd. for the first time in 8 years (figure 1). It is a FR version of the 8AR-FTS engine to be used in the Lexus IS, RC, GS models and the Toyota Crown Athlete. This new engine has achieved superior thermal efficiency and good fuel economy, and is one of the latest downsized turbocharged engines by Toyota Motor Co., Ltd. This engine has been jointly developed by Toyota and Yamaha and will replace the 4GR-FSE engine, of which more than 1,000,000 units have been produced at Yamaha.

This report introduces the engine overview, the major changes made to FR version engine from the FF version engine, and its production technologies.

1 はじめに

2015 年 7 月、ヤマハ発動機株式会社（以下、ヤマハ）で 8 年振りとなる自動車用ターボエンジンの生産が始まった（表 1）。レクサス IS、RC、GS とトヨタクラウンアスリートに搭載される FR 版 8AR-FTS エンジン（以下、8AR）である。高熱効率・低燃費を実現したこのエンジンは、トヨタ自動車株式会社（以下、トヨタ）の最新の過給ダウンサイジングエンジンの 1 つで、トヨタとヤマハが共同で開発した。またヤマハにとっては 100 万基以上の生産をしてきた 4GR-FSE エンジンの置き換えエンジンとなる。

本稿ではエンジン概要と、先行した FF 版エンジンから FR 版エンジンへの主要変更点および製造技術について紹介する。

2 エンジン概要

表 2 にエンジン諸元を、図 1 にエンジン断面図、図 2 に性能曲線を示す。

このエンジンを開発するにあたって、次世代過給エンジンに相応しいパフォーマンスを備え、幅広いお客様に満足して頂けるように次のコンセプトを掲げた。

- ①「滑らかな加速 G 曲線」を実現する低速からの分厚いトルクとワイドトルクバンドおよび高応答性を備えたエンジン特性
- ②低燃費かつ低排出ガスによる高い環境性能
- ③ V6 エンジンから乗り換えても違和感のない NV（Noise, Vibration）
- ④ NA（Natural Aspiration）エンジンと変わらないメンテナンス性
- ⑤ FF、FR の両方のプラットフォームに搭載可能な構造
これらを実現するために表 3 に示す技術を開発・採用した。

表1 ヤマハの自動車用ターボエンジン生産の歴史

エンジン型式	配列 排気量	'80	'85	'90	'95	'00	'05	'10	'15
3T-GT	直列4気筒 1,770cc		セリカ・カリーナ・コロナ						
1G-GTE	直列6気筒 1,988cc		マークII系 スーブラ・ソアラ						
3S-GTE	直列4気筒 1,998cc		セリカ MR2		カルディナ				
1JZ-GTE	直列6気筒 2,491cc		マークII・チェイサー クレスタ・ソアラ マークII限定車 スーブラ				マークII・マークIIブリッド・ヴェロッサ		
8AR-FTS	直列4気筒 1,998cc						IS・GS・RC・クラウン		

表2 エンジン諸元表

	3S-GTE	8AR-FTS	4GR-FSE
型式	→	直列4気筒 T/C	V型6気筒
排気量 (cc)	→	1998	2499
内径 (mm) × 行程 (mm)	→	86 × 86	83 × 77
圧縮比	9.0	10.0	12.0
燃料噴射方式	PFI	D-4S (DI + PFI)	D-4 (DI)
最高出力 (kW/rpm)	191/6200	180/5800	158/6400
最大トルク (Nm/rpm)	324/4400	350/1650~4400	260/3800
JC08モード燃費 (km/L)	10.6 (カルディナ) ※10・15モード燃費	13.2 (IS 200t)	11.6 (IS 250)

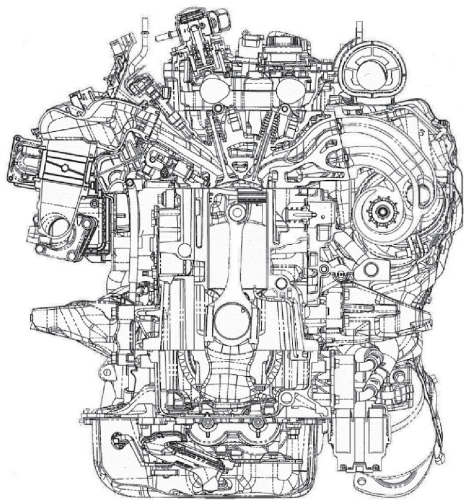


図1 エンジン断面図

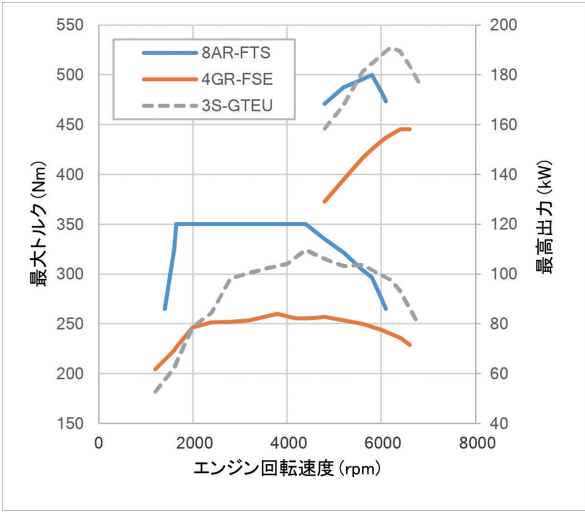


図2 エンジン性能曲線

表3 主要採用技術

部位・部品	出力	燃費	レスポンス	信頼性	搭載対応	採用技術、内容
シリンダヘッド		○	○		○	・4-2集合エキゾーストマニフォールド一体 ・素材共用・加工違いによる搭載方法対応 ・高タンブル吸気ポート
PCV系				○		・エゼクタを用いた過給域強制換気システムによるオイル劣化抑制
ピストン	○	○		○		・表面改質処理(スカート、ピンボス根元部) ・可変ON/OFF制御オイルジェットシステムによる冷却
吸気VVT		○	○			・中間ロック機構付センタースプール方式VVT(VVT-iW)
動弁系	○	○	○	○		・ロッカーアーム、リテーナ、バルブスプリングの小型軽量化 ・Na封入中空排気バルブ
冷却系	○	○		○		・シリンダブロック用サーモスタットによる暖機促進システム
ターボチャージャ	○	○	○			・ツインスクロール式小型・高効率ターボチャージャ ・アクティブWGV(ウエストゲートバルブ)
インタークーラ	○		○			・エンジン直付けコンパクト水冷式インタークーラ ・低水温冷却回路&電動ポンプによる低吸気温化
燃料系	○	○				・ファンスプレー式直噴システム →高タンブル筒内流動と合わせた高速燃焼システム(D-4ST) ・可変燃圧システム

※個々の採用技術詳細については参考文献[1]を参照のこと

3 FF版エンジンからの主要変更点

2014年6月にFF版8AR-FTSがトヨタ自動車九州株式会社（以下、トヨタ九州）にて先行して生産が開始された。この章ではFF版エンジンからFR版エンジンへの主要変更点について述べる。

3-1. 性能向上

セダン、クーペ車用として競合性を確保するために、FF版に対してFR版は+5kWの性能を向上させている。そのために以下に述べる手法を採用した。

性能向上により熱負荷が増える部品については、CAEや実機評価を行って信頼性を確認し、ピストンはピンボス根元部に表面改質処理を追加して信頼性を確保した。

3-1-1. 排気系の圧損低減

従来床下に配置していた2個目の触媒を、エンジンコンパートメントに前出しすることにより触媒断面の拡大を行い、圧損低減を図るとともに2個目の触媒の暖機性も向上させた(図3)。

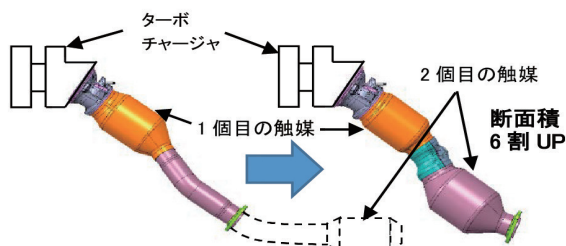


図3 2個目の触媒の前出し

3-1-2. 吸気系の圧損低減

ターボチャージャ上流の吸気系部品の2部品→1部品化や形状見直し、ターボチャージャ下流ではインタークーラ入口周辺を周辺部品との隙を確保しながらスムーズに繋ぐことにより吸気系の圧損低減を図った。

3-1-3. 最高出力回転の200rpm引き上げ

FF版では5600rpmで最高出力を出しているが、FR版ではターボチャージャの負担（回転数、温度）を上げずに吸入空気量を増やすために5800rpmに引き上げた。

3-2. 搭載対応

FF版→FR版にするための搭載対応点を述べる。

3-2-1. 潤滑系の対応

図4に示すようにオイルパンからヘッドに上がるまでの油路がFF版に対し長くなっている。VVTを始めとする各システム、部品に対しFF版と同じ適合定数(例えばVVT<Variable Valve Timing>制御定数)の使用、同等の機能と信頼性確保のために、ブロックのメインギャラリーの径を拡大して（最小径 $\Phi 12.5 \rightarrow \Phi 14$ ）FF版と同等の油圧を確保した。またオイルストレーナ、2次バルブサは同じくFR搭載されるHV（ハイブリッド）車用の2AR-FSEの部品を流用してコスト低減を図った。

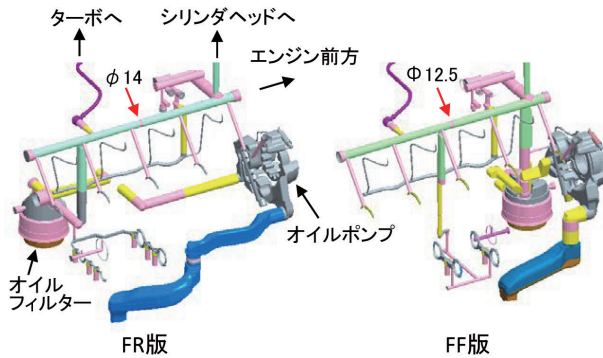


図4 FF版とFR版の油路比較

3-2-2. 水流れの対応

FF 版、FR 版車両におけるエンジン搭載方向、およびラジエータ位置に合わせて、エンジンの水アウトレットを配策上最適な配置（図 5）とするため、FF 版、FR 版でヘッド内の水流れ方向を逆にした（図 6）。シリンダヘッド鑄造素材は FF 版、FR 版共通としながら、加工違い・ヘッドガスケット水穴違いのみでこれを実現した。

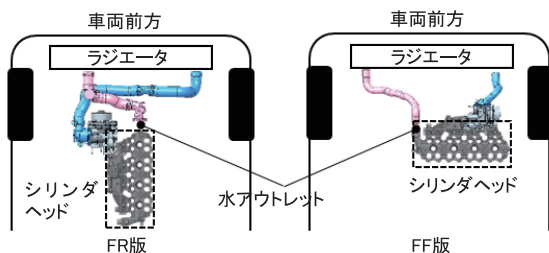


図5 車両搭載時のエンジン向き

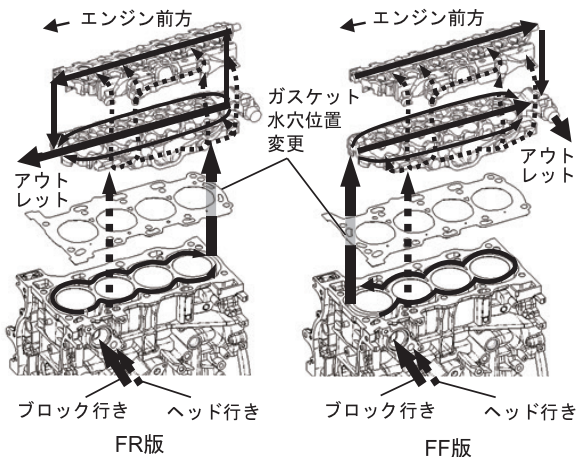


図6 エンジン内の水流れの違い

3-2-3. シリンダヘッド内のブローバイガス通路、オイル落とし通路の対応

エンジン搭載角度は FF 版が 12.5°または 12.9°エンジン左側上がりに対して、FR 版は 1.9°エンジン前側上がりである（図 7）。このためシリンダヘッドの上下貫通穴の役割を変更し、さらに FR 版でシリンダヘッド内のオイルが溜まる最後端に加工でオイル落とし穴を追加してオイル戻りの改善を図った（図 8）。

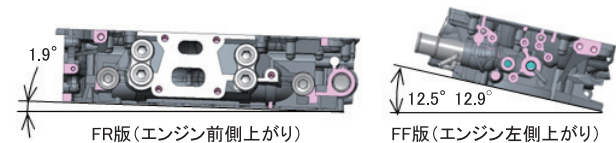


図7 エンジン搭載角度（車両左面視）

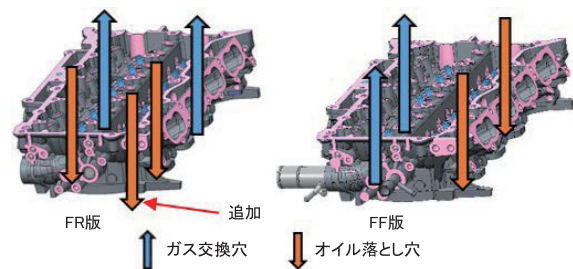


図8 シリンダヘッド内のブローバイガス交換通路、オイル落とし穴比較

4 製造技術について

8AR の生産にあたり、採用した製造技術について紹介する。

4-1. シリンダヘッド鑄造

FR 版 8AR はトヨタ九州と併産するモデルで、トヨタ九州の FF 版が先行していたため、従来モデルの生産準備と異なり、鑄造素材形状や目標コストが事前に決まっている中での作り込みとなった。

その中で高品質、低コストを実現するために「金型方案」「設備の汎用化」「海外生産化」の視点で作り込みを実施した。

- ◆接着中子による鑄造サイクルタイム（以下、CT）短縮
- ◆汎用型自動検査ラインの導入
- ◆海外工場生産化（国内との併産）

4-1-1. 中子接着化による鑄造CT短縮

低圧鑄造の鑄造 CT は、「型閉まり時間」と「型開き時間」の 2 つに分類することができる。その中の「型開き時間」を短縮することは、CT 短縮はもちろん、金型温度の安定化

にも繋がるため、鑄造品質向上にも寄与する。また今回はエキゾーストマニホールド一体ヘッドであるため、従来の(中木)方案では、形状的に排気ポートの位置精度を出すことが非常に困難であることが予想された。そのため、今回は品質の向上(鑄造品質・寸法)と鑄造 CT 短縮を同時に達成するために、排気ポート周辺の4点の中子を1点に接着する中木方案を採用した。※吸気ポートは4→3点とした(図9)。

その結果、4%の鑄造 CT 短縮と、排気ポート位置精度を Cpk (工程能力指数) で 0.4 上げることができた。

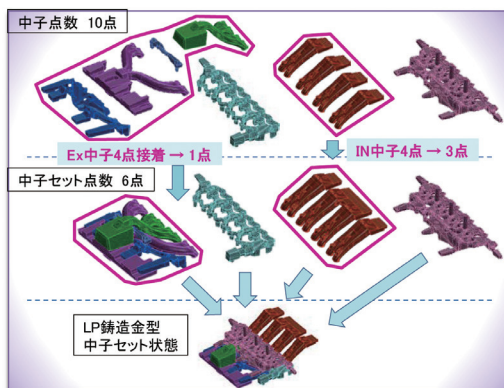


図9 中子点数と接着中子

4-1-2. 汎用型 自動検査ラインの導入

8ARは、ウォータージャケット形状が複雑である。また、ポートの位置精度を出すことが難しい形状(排気ポート)／規格(吸気ポート)であるため、品質保証の観点から全数「ウォータージャケット貫通確認」と「ポート位置測定」を実施することを選択した。また、投資効率を高めるため、モデル視点(専用設備)ではなく、工場全体視点(汎用設備)で投資／工数の最適化を図ることにした。その具体的な施策は、以下の3点である(図10～13)。

- ◆既存設備の流用(Cost)
- ◆従来の手作業内容を自動化(Cost/Quality)
 - ※砂払い作業、ファイバー検査、搬送
- ◆汎用設備化による他モデルへの展開(Cost/Quality)
 - ※ロボット化、治具段取り仕様化による汎用化

その結果、高い品質保証工程を構築するとともに、8ARを含む3モデルにおいて検査作業工数を2人→1人とすることができた(図14)。

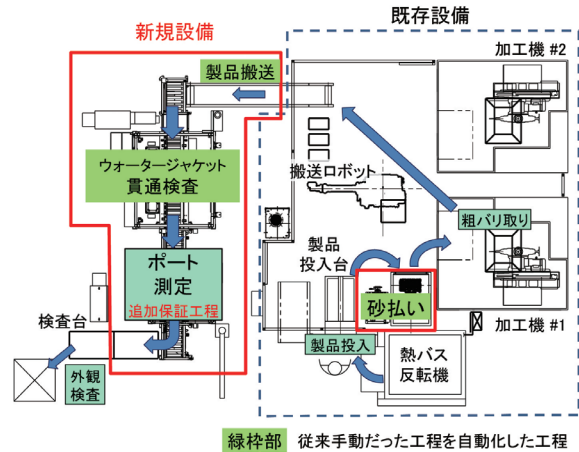


図10 汎用型 自動検査ライン

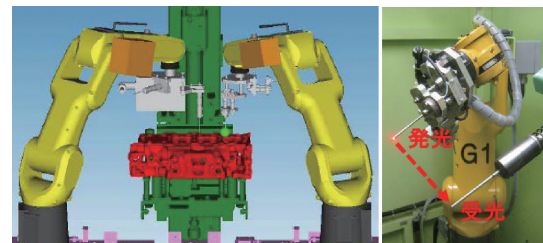


図11 ロボット式汎用光学貫通確認機

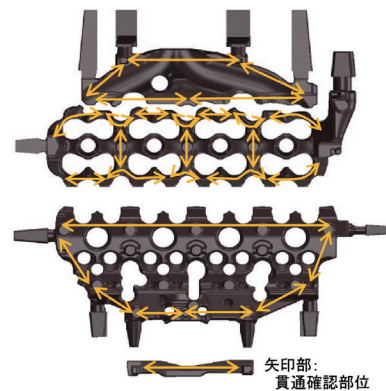


図12 ロボット式光学貫通確認部

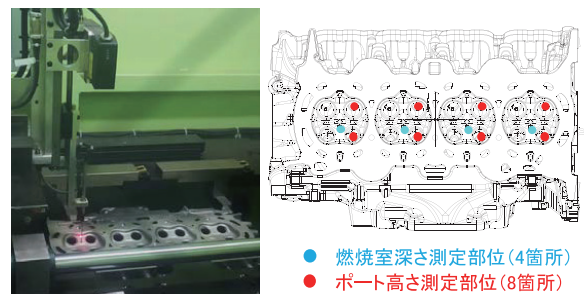


図13 自動ポート測定機

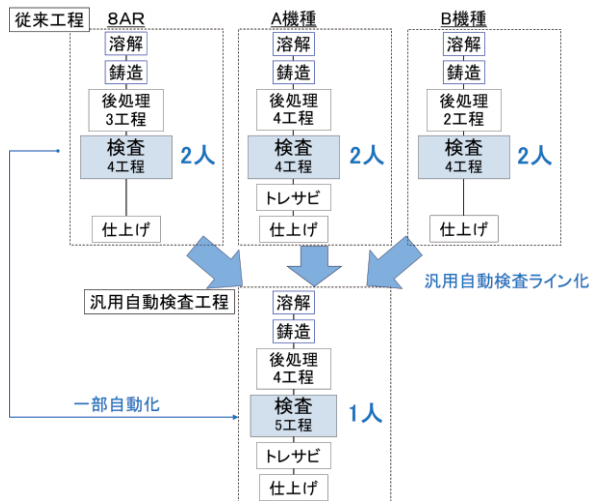


図14 設備導入前後の工程フローと工数変化

4-1-3. 海外工場生産化

コスト要求に応えるため、海外工場での生産を検討した。その際、設定した前提条件は以下の通りである。

- ◆コストダウンができる
- ◆低投資で国内と同等以上の品質保証工程が構築できる
 - ※ 1. 国内の自動ライン部分を手動ライン化（投資削減）；
検査内容は国内と同等
 - ※ 2. 国内では加工工程で保証している検査工程を一部省略しているが、海外工場では全て実施（輸送リードタイムを考慮）（図 15）
- ◆国内と併産（供給リスク回避）

これらを実現できる工場として、自動車エンジン用のシリンダヘッド製造経験がある YPMI（PT.Yamaha Motor Parts Manufacturing Indonesia）を対象工場として選定した。

その結果、品質保証工程を低コストで構築し、素材単価として 2 割のコスト低減を実現した。（コスト低減要因；人件費差、低投資化による）

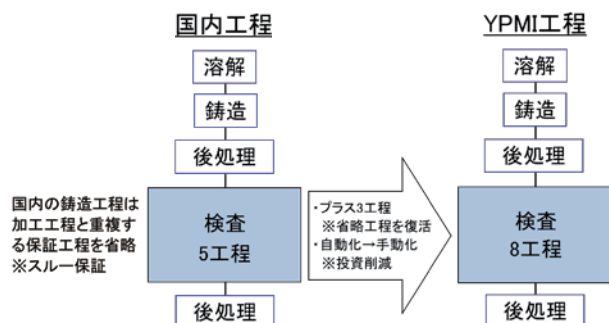
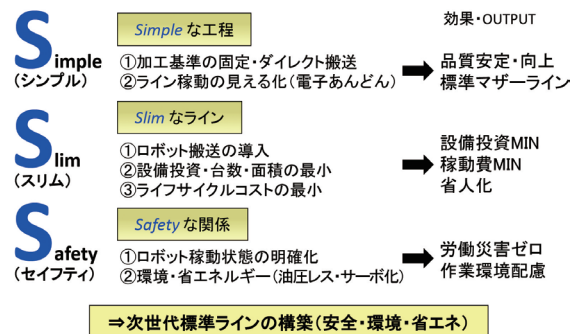


図15 国内とYPMIの工程比較

4-2. シリンダブロック・ヘッド加工

4-2-1. コンセプト

8AR 加工ラインのコンセプトとして以下 3 つの「S」にこだわり、ヤマハ流の次世代標準ラインを構築した（図 16）。



YAMAHA'nize 3S Next Generation Line

図16 ブロック・ヘッドの加工コンセプト

4-2-2. ロードマップ

生産準備にあたり加工ロードマップを作り、新技術の整理と重点的に取り組むキーワードを選定した（図 17）。

最近の設計要望の主流である低コスト・低燃費・低フリクションから、高品質・低コストの両立を目指し加工技術トレンドを持ち寄り、様々な課題に挑戦した。



図17 加工ロードマップ

4-2-3. こだわり新技術

今回、特にこだわりを持って取り組んだ内容について、シリンダブロック・シリンダヘッドそれぞれの重点項目を紹介する。

4-2-3-1. 高能率加工（シリンダブロック）

従来、ボア穴の鑄鉄スリーブ加工には、安価な超硬のインサートを使用し、高剛性の設備で加工を行ってきた。し

かし、設備投資を抑え低コストを実現するため、剛性の低い比較的安価な設備を選定し（図 18）、高周速領域にて低トルク加工を行える CBN（立方晶窒化ホウ素）材質のインサートを採用した。CBN 特有の低靱性については、ツール振動を抑制する機構を追加し対応した。

その結果、加工時間を 56% 低減し、工程数・設備台数もあわせて削減できた（図 19）。

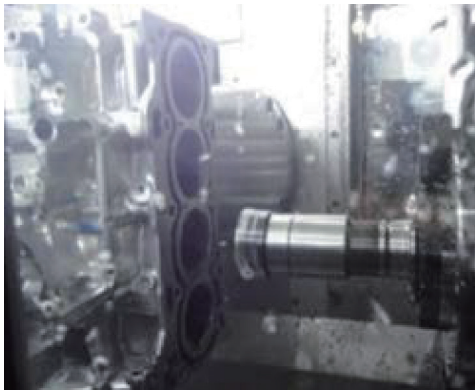


図18 ボア粗ボーリング加工

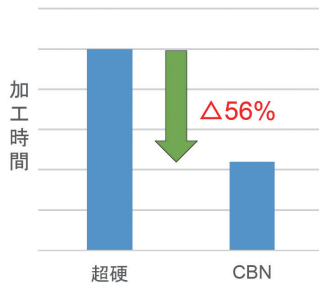


図19 シリンダブロックの加工時間の短縮

4-2-3-2. 設備スリム(シリンダヘッド)

8AR の 4 気筒（ワーク長さ 500mm、重量 15kg）サイズに使用する加工設備として、通常は #40 番クラス（主軸ベアリング内径 ϕ 70 ～ 80mm）のマシニングセンタを選定しており、設備投資・設備サイズ共に大きくなっていた。

しかし、今回は単一機種の専用生産でもあることから、エクspansionクランプを採用することによりベースプレート小さくしてワーク治具重量を最小限に抑え、縦型 #30 番マシニングセンタ（主軸ベアリング内径 ϕ 50 ～ 55mm）を使えるようにして、設備のダウンサイジングを実現させた（図 20、21）。

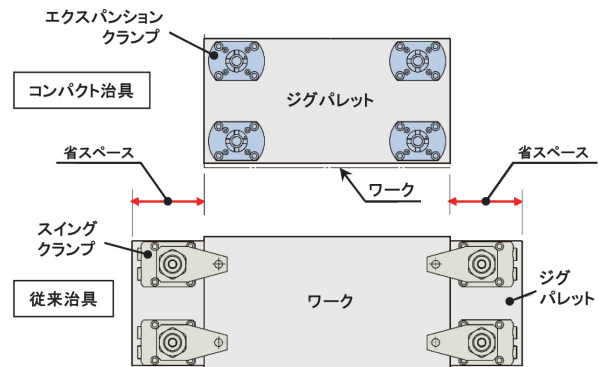


図20 コンパクト治具構想

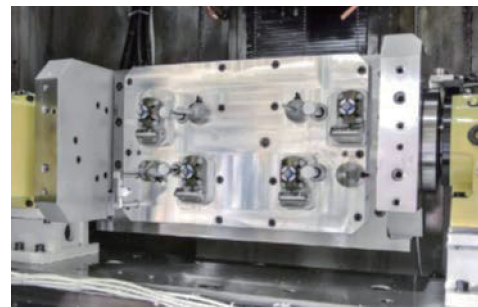


図21 シリンダヘッド用 エクspansionクランプ治具

成果として、他ラインに対し設備投資を 50% 低減できた（図 22）。2004 年に立ち上げた 4GR シリンダヘッド（片側 3 気筒）から採用しているが、4 気筒での採用は今回が初めてである。

また、#30 番マシニングセンタはツールマガジンが機内にあることから、主軸テーパ部への切り粉の噛み込み原因による、穴径の規格外れが慢性的に発生した。今回のラインには全設備に「ツール振れ検知機能」を取り付けることで、安定した品質を確保した。

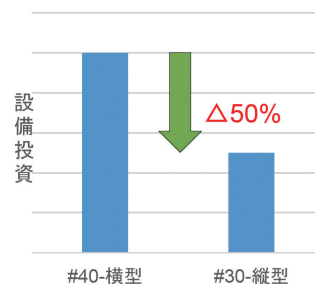


図22 シリンダヘッド設備投資の抑制

4-2-3-3. ロボット搬送の導入(自走式)

ワーク搬送・脱着時に発生する、傷・打痕をなくするため横転がしの手搬送を行わず、多関節ロボットによる「置く」、「取る」のような転がしレス搬送方式を採用した。

その相乗効果として、各設備前方の搬送コンベアや、ワーク姿勢反転装置が不要になり、特殊対応分の設計、製作費用が無くなり投資削減にも貢献できた。

多関節ロボット 2 台を、1 台の自走行台車として構成し、全長約 25m を行き来し搬送している (図 23)。

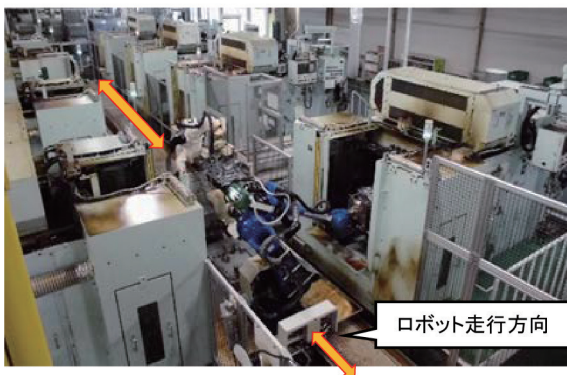


図23 シリンダブロック加工ライン 多関節ロボット搬送

4-2-3-4. 作業環境への配慮

部品圧入工程には全て電動サーボプレスを使用し、品質の向上を図るとともに、油圧レスを推進し低環境負荷・省エネルギーにも貢献し、騒音や振動の少ない快適な作業環境の配慮も行ってきた。

4-2-3-5. 指標比較

従来の乗用車単一機種専用ラインに比べ、ライン設備投資を 27%、設備台数 23%、ライン面積 12%、直接作業人員 43% の削減を達成した。(生産規模を同等として)

4-3. エンジン組立

8AR のエンジン組立工程はコンセプトを 3 つ設定して生産準備を行った。本項では 3 つのコンセプトに沿った取り組みの内容を紹介する。

- ◆変化が目で見えるコンパクトライン
- ◆変化に対応できるフレキシブルライン
- ◆高品質へ進化させる品質強化ライン

4-3-1. 変化が目で見えるコンパクトライン

8AR 組立ラインでは従来に比べ大幅なコンパクトラインを実現させた。従来の組立ライン (4GR エンジン用) に対し、ライン長を 6 割に抑え、エンジン組立に必要な全組立工数に対するライン必要長さも 3 割削減させてコンパクト化を達成した (図 24)。

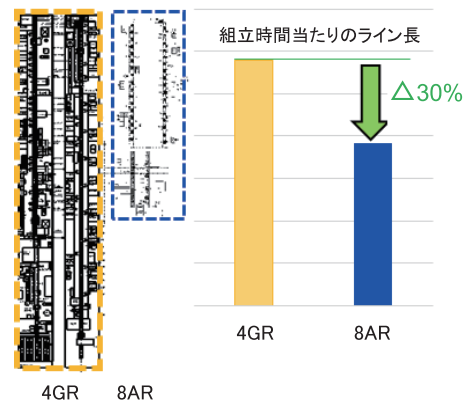


図24 組立ライン比較

また、従来の組立ラインでは、搬送コンベア周りに部品棚を配置する際、ライン横に棚が集中してライン外からの視界を阻害し、作業点が見えなくなること、作業者に起きた現象を即時に確認できないという問題があった。8AR 組立ラインではその問題を解決するため 2 つのアイテムをあわせて採用した。

・キット供給

エンジン 1 台分の部品を段取り、作業点近くに供給する「キット供給」を採用し、ライン横の棚を最小限に抑えた (図 25)。これにより、部品取り出し距離を最短にし、本線内の価値作業を向上させた。また、供給箱返却ロスもあわせて削減し、サイクリックな作業が可能なラインを実現させた。

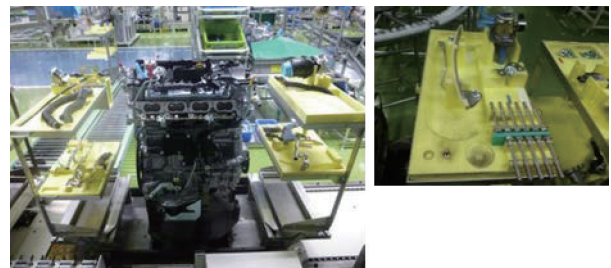


図25 8ARキット供給パレット

・低床コンベア

エンジン搬送コンベアは従来、上段を搬送、下段を空パレット返却とし、2 段構造を採用していた。しかし、搬送面が高

くなり作業点も高くなるため踏み台が必要になり、周囲からも作業点が見えにくいという問題を抱えていた。そこで、ライン配置をU字形に見直すことで空返却レーンを廃止するとともに、コンベア自体の構成部品も可能な限り低くレイアウトすることで低床コンベアを実現させた。これにより、踏み台も不要になり、外側からでも作業点が視認しやすいラインを実現した（図26）。



図26 8ARエンジン組立ラインサイド

4-3-2. 変化に対応できるフレキシブルライン

直近のエンジン組立ラインでは、機種専用に特化させて生産性向上および問題点の解消に取り組んできた。しかし、今後のモノ創りを見据えた多品種化や小規模での工程移動など変化に対応できるラインが必要となる。そこで今回、変化に対応できる施策を織り込んだ設備導入を進めた。

・天吊り型締付フレキシブル締付設備

一般的には設備を地面に設置するが、その場合は設備移動を伴う工程変更が容易にできなくなる。そのため工程編成に制約が残りロスを抱え続けるという課題があった。

8AR組立ラインでは天吊り型の設備を一部の工程に採用し

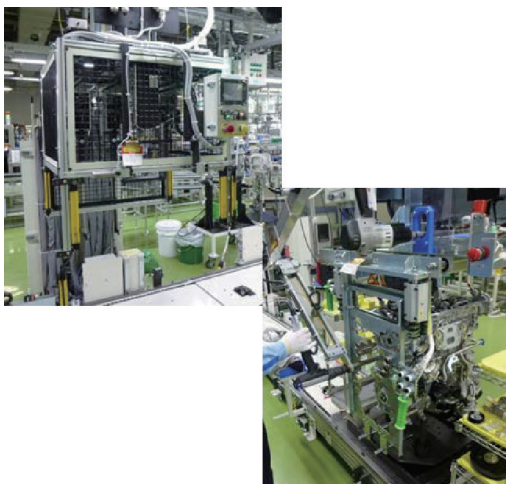


図27 天吊り型フレキシブル設備

てその問題点を解消した。設備を架台に吊り、滑車を採用することで移動を容易にし、また、設備内も製品形状に合わせて締付位置など作業点を自由に変更できる機能を持たせた締付軸（3軸）を採用することでフレキシブルな設備を導入した（図27）。

また天吊り型設備は、コンベア上を移動するエンジンと同期して移動しながら組付・締付も行うことができる。チェーンケース締付設備ではエンジンと設備が同期して移動し、さらに位置検知機能付きの締付機も採用し、対象ごとに締付プログラムを変更できるフレキシブル設備を導入した。

4-3-3. 高品質へ進化させる品質強化ライン

エンジン組立工程は部品点数が多く、精度の必要な組付が要求される場合も多い。しかし、各部品ともに公差があり、そのバラつきを全て解決できる工程作りは困難となる。8AR組立ラインでは、バラつきに対応する技術を織り込み、高品質な組付が可能な設備を導入した。

・画像補正機能付き液体ガスケット塗布設備

エンジンには液体ガスケットを部品合わせ面に塗布してシールする部位がある。その塗布は位置精度が重要で、部品のバラつきで少しのズレが発生してもオイル漏れに直結してしまう。

8AR組立ラインでは、構成部品のバラつきを含むエンジン位置を画像処理で認識して補正するロボット技術を社内IM（Intelligent Machinery）事業部と共同開発し、補正データに合わせて塗布位置に精度良く塗布できる液体ガスケット塗布装置を導入した（図28）。パレットや部品バラつきによって発生する個体差をも補正できるため、 $\pm 20 \mu\text{m}$ の軌跡精度で塗布が可能である。またこの設備では、液体ガスケットを塗布する直前に塗布ノズルの曲がり、製品との距離

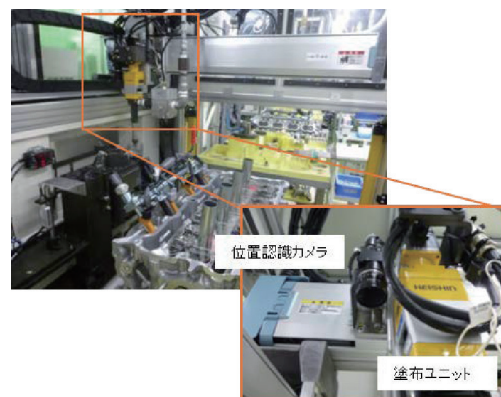


図28 画像補正機能付き液体ガスケット塗布機

のズレの有無を確認する仕組みを持たせており、ロボットによる位置精度保証とあわせて全数良品が達成できる設備とした。

・組付同時検査設備・治工具

これまでのエンジン組立ラインでは組立と検査の工程を別々で持っていたため、設備・治工具が2倍、組立工数も2倍かかっていた。

8AR組立ラインでは、組付と検査を同一工程・同一治具で行う設備を開発し、工程集約させることでコストダウンを図る取り組みを実施した。コッタ・リテーナ組付設備では組立ツール内に検査構造を組み込み、工程の集約を行った（図29）。

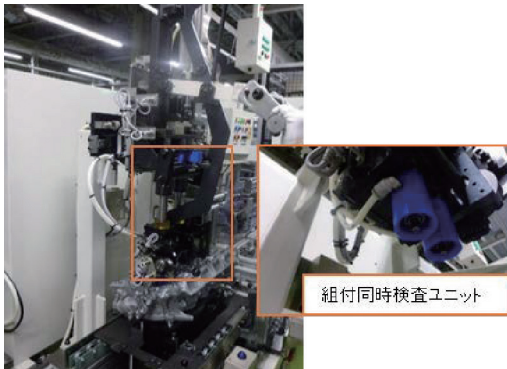


図29 組付同時検査機能付き設備

4-4. 8AR生産ラインの製造技術

8AR生産ラインでは、新技術のみでなく、従来技術をさらに突き詰めて発展させ、先を見据えたモノ創りに向けた競争力に挑戦した生産準備を進めることができた。また、鑄造工程から加工・組立・出荷まで一貫して良品を作る工程を築くことができたと考えている。

今後はこの取り組みを基礎に、さらに幅を広げる技術力と競争力を得るために生産ラインを進化させ、お客様の信頼と期待にお応えできるモノ創りを実現していく。

5 おわりに

8ARは最新の技術を投入し、運転する楽しさと環境性能を両立させた次世代エンジンを実現した。また最新の製造技術を投入して品質を十分に確保しつつ製造コストの低減を図ることができた。

最後に、8ARの開発と製品化に携わったトヨタおよび社内外の多くの関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

■参考文献

- [1] 鈴木 智明, 渡邊 泉, 川合 孝史, 米澤 幸一：
新型 2.0L 直列 4 気筒ガソリン直噴過給ダウンサイズエンジン，
自動車技術会 学術講演会前刷集，No.94-14, P1～4
(2014 年秋季大会)



■著者

川村 誠(写真①)

Makoto Kawamura

AM事業部
品質保証部

前田 裕幸(写真②)

Hiroyuki Maeda

AM事業部
AM第1技術部

杉山 文敏(写真③)

Fumitoshi Sugiyama

AM事業部
AM第1技術部

古澤 隆志(写真④)

Takashi Furusawa

AM事業部
AM第1技術部



佐々木 和敬(写真⑤)

Kazuhiro Sasaki

AM事業部
AM第1技術部

岡田 祐介(写真⑥)

Yusuke Okada

エンジンユニット
コンポーネント統括部
ユニット技術部

水木 太喜(写真⑦)

Taiki Mizuki

YPMI

安藤 純介(写真⑧)

Junsuke Ando

エンジンユニット
コンポーネント統括部
ユニット技術部

佐藤 稔(写真⑨)

Minoru Sato

エンジンユニット
コンポーネント統括部
ユニット技術部

國重 祐介(写真⑩)

Yusuke Kunishige

エンジンユニット
コンポーネント統括部
ユニット技術部

奥出 智重(写真⑪)

Tomoshige Okude

エンジンユニット
コンポーネント統括部
ユニット技術部

菅原 徹(写真⑫)

Toru Sugawara

エンジンユニット
コンポーネント統括部
ユニット技術部

脇屋 努(写真⑬)

Tsutomu Wakiya

トヨタ自動車株式会社
エンジン設計部