

# レクサス LFA スーパースポーツエンジン 1LR-GUE こだわり生産

Special manufacturing system for LEXUS LFA super sport 1LR-GUE engine

鈴木 幸一 岡田 祐介 安藤 純介 國重 祐介 小曾 勉 戸塚 進之



図 1 1LR エンジン

## 要旨

ヤマハ発動機(株) (以下、当社) ではトヨタ 2000GT 以降、これまで多くのエンジンをトヨタ自動車(株)主導の下、共同開発し生産を受託してきた。その長い歴史の中で今回、LEXUS ブランドのスーパースポーツカー LFA 用エンジン 1LR-GUE (以下、1LR) の生産を AM 製造部で受託する運びとなった。

1LR は、約 2 年間で、500 台という極少量生産であり、高付加価値商品に相応しい高品質を求められる。当社はこの高い要求品質に呼応すべく、1 台 / 日のセル生産方式の確立と“全数良品”の実現を目標に掲げ、技術・生技・生産現場が一体となった SE<sup>注)1</sup> 活動を通じ、鑄造・加工・組立までを一貫した良品条件の作り込み活動を行なった。

本報では、1LR エンジンの極少量高品質生産に向けたシリンダヘッド加工とエンジン組立を中心とした取組みの概要を紹介する。

注)1… SE = Simultaneous Engineering

## Abstract

Beginning with its first collaboration in manufacturing the Toyota 2000GT, Yamaha Motor Co., Ltd. (hereafter “the Company”) has engaged in the joint development and manufacturing of a lot of automobile engines under the leadership of Toyota Motor Corporation. As the latest in this long series of projects, the Company's Automotive Manufacturing Division is manufacturing the 1LR-GUE (hereafter “1LR”) for the Lexus brand's super sports car, the Lexus LFA.

Since this engine is to be manufactured in extremely small lots totaling 500 engines over two years, the quality levels demanded in this high value-added product are also extremely high. To achieve the high levels of quality demanded in manufacturing this engine, the Company has established a cell manufacturing process to produce one engine a day with “100% quality production”. This involves implementing “SE” (simultaneous engineering) activities that systematically integrate engine engineering, manufacturing engineering and production people to create conditions that achieve and maintain a consistent 100% quality level (no defective parts) throughout the casting, machining and assembly processes.

In this report we summarize the activities taken to achieve this type of high-quality manufacturing for the extremely small-lot production of 1LR engines with a particular focus on cylinder head machining and engine assembly.

## 1 はじめに

1LRエンジンの特徴として、高回転、高出力、そして軽量、コンパクトが挙げられる。これらの実現には、内製部品はもちろん、トヨタ自動車(株)内製溶射ブロックをはじめとする多数の高機能部品の細部にまで渡る精密さと、それを組上げる緻密さが求められる。そこで、最高品質のモノを後工程へ確実に供給すべく鋳造、加工、組立の生産を一貫し、品質のために出来る事を全てやりきり、お客様へ最高の満足をお届けするという、“全数良品”への強いこだわりに基づいた生産準備に取り組んだ。

## 2 こだわりコンセプト

前述の“全数良品”の作り込みを達成する為、機械加工における“加工機一台生産”による誤差ゼロを目指した生産セルの実現、また組立における、作り手としての機能・品質への絶対的な責任感と、プロ意識の見える化に取り組んだ組立エキスパートによる“1人完結セル生産方式”の構築に取り組んだ。

以下に、我々が掲げた共通コンセプトを示す。

- ①SE活動
- ②極少量生産
- ③新規採用技術の工法開発
- ④全数良品

## 3 機械加工

### 3-1. 機械加工のコンセプト

1LRは、今までの市販自動車エンジンと一線を画するスーパースポーツを具現化したエンジンであるが、その要の部品ひとつが内製シリンダヘッドである。

ここでは、そのシリンダヘッドをどのようにして量産につなげたのかを以下に順を追って説明する。

#### 3-1-1. SE活動

確実に精度の出せる工法を採用し、事前に実証が出来た工法のみを生産に投入する。

超高性能車に搭載されるエンジンとして、確実に製品として保証できるものだけをお客様に提供すべきとの観点から、“500台全数 不良ゼロ”の考えのもとで生産準備を行った。

#### 3-1-2. 極少量生産

少量生産で今後につながる技術開発を目標とする。

現在大手自動車メーカーにおいては、リーマンショックを契機に、生産の主流は大量生産(20,000台/月)から中量生産(5,000～10,000台/月)へ変革が進められている。しかしながら、1LRの場合は、更に少ない20台/月の極少量生産であり、それらとは比較できない。

そこで我々は、この領域のエンジンを適正な価格で提供し、あわせて他の量産エンジンに展開できる極少量生産を支える技術開発の確立を目標とした。

#### 3-1-3. 1新規採用技術の工法開発

例えば、日本のモータリゼーションの幕開けである1970年代以降の自動車エンジンの動弁系の変遷の例でわかるように、OHV→SOHC→DOHC→DOHC 4Valve と、高出力、軽量化を目指してレースエンジンの技術を生産エンジンに導入し続けてきた歴史があるが、それを可能としてきたのは、生産技術と設計両部門のコラボレーションによりコスト低減と、その採用技術によるメリットの最大化を図ってきたからである。

今回、1LRのシリンダヘッドにも、図2に示すように多くの新技術が採用されているが、これらの将来の市販車への応用に向けての技術的な見極めをすることも重要な目的として開発に臨んでいる。

#### 3-1-4. 全数良品

新技術と、既存技術のレベルアップとともに、全数測定、トレーサビリティ(後述の組立で紹介)を行い、全数良品活動を進めている。

### 3-2. こだわりの機械加工

今回は特に、1LRシリンダヘッド加工での、こだわりを持った取り組みを以下に紹介する。

SE活動より

1. 「SE活動の実施」による精度の高い工法の実現

極少量生産より

2. 「加工機一台生産」による工程集約型生産方式の導入
  3. 「加工精度保証」の確立
- 新規採用商品技術対応の工法開発より
4. 「3-D加工」の採用

#### 3-2-1. SE活動の実施

1LRの生産準備は、トヨタ自動車(株)生産準備の手法であるSE活動を協同で実施した。

1LRのSE活動(当社内呼称 CE活動)の目的のひとつは、設

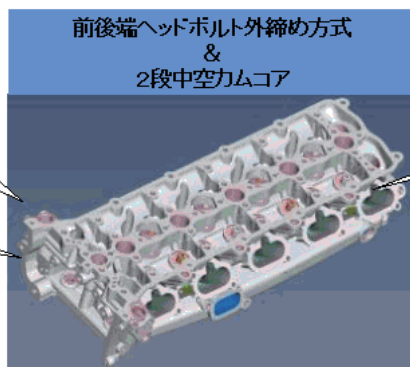
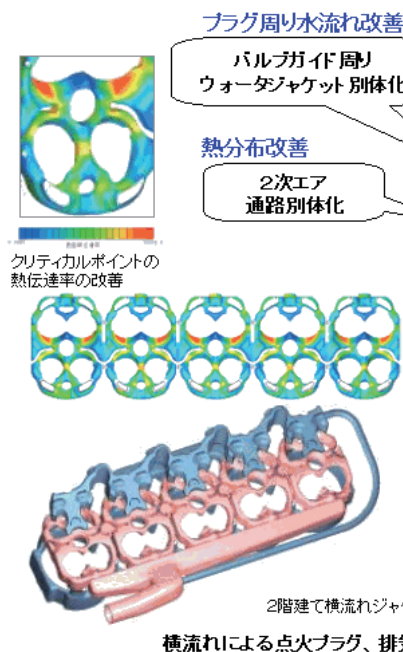
## 1LR-GUE用シリンダヘッド

### 軽量・コンパクト設計

軽量・コンパクトをメインに機能優先で設計。

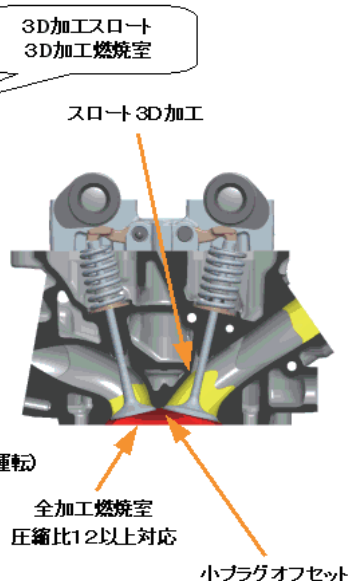
最終的に 同クラスV8に対してASSY状態で同等以下の軽量化を達成した。

### 高効率ウォータージャケット



### 高効率吸排気ポート

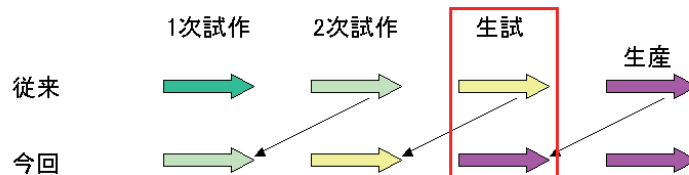
燃焼改善 ( $\lambda = 1$  運転領域の拡大)



流量係数とタンブル比を  
高い次元で両立  
・比出力117ps/L  
・高速燃費  
(超高速域まで  $\lambda = 1$  領域運転)

図2 1LR シリンダヘッド新技術

### SE活動



課題の早期つぶし込み → 生試＝生産を開始

二次試作に採用した具体的な内容は、  
Ⅰ 生産時使用するマシンと同一使用の機械を使用  
Ⅱ 生産時に使用する工程分割で  
Ⅲ 生産時使用する刃物で加工  
Ⅳ 生産時の切削条件を採用  
Ⅴ 生産時使用するクーラントで  
Ⅵ 生産を担当するオペレーターにより  
Ⅶ 生産と同じ素材(本型品)

Machine  
Method  
Machine  
Method  
Machine  
Man  
Material

図3 SE 活動

計段階で実際の工程を想定し、その工程で精度が保証できるか実証を行なうことである。

大量生産の場合には実際に生産ラインで使用する機械を試作段階で準備し、試作加工を通して工程能力評価を実施するが、今回は試作時に生産を見越した工程、設備、治具、刃具を準備して本来の二次試作を生産試作と位置づけ実施した。

本型本工程の先行生産を二次試作にて実現（生産時と80%同一条件の4M環境を整備）し、生産試作では工程能力が全て確認できた工程を採用する事により、今回目的とした「確実に精度の出る工法」を実現できた。

### 3-2-2. 加工機一台生産

ここでは、今までの生産ラインとは違い、究極のセル生産を目的に、加工機一台による全工程生産を目標にした（工程集約型の極限を目指す）。図4に各生産方法の特徴を示す。

1LRでは、「C.工程集約型 多工程1台」を採用した。工程集約の考え方は同一機能の工程を一台に集約することである。

例：加工機は一台に、洗浄機、リークテストは中間、完成をそれぞれ集約して一台にて対応。

今回はその中で、加工機を一台に集約するために、加工精度保証に特に注力した技術を紹介する。

### 3-2-3. 加工精度保証

加工精度の保証が必要な項目として以下の二点の対応が必要と考えた。

- 連続生産中に発生する機械各部の温度上昇による物理的な熱変位への対策
- 治具×ワークの取付け誤差発生への対応

#### 1) 熱変位対策

熱変位対策としては、図5に示すようにパレットの基準座を直接測定してワーク座標を補正する方法を採用した。

この方法の特徴は、今回のように工程集約したマシンにおいて使用する治具数が増えてきた場合に、複雑な管理をしな

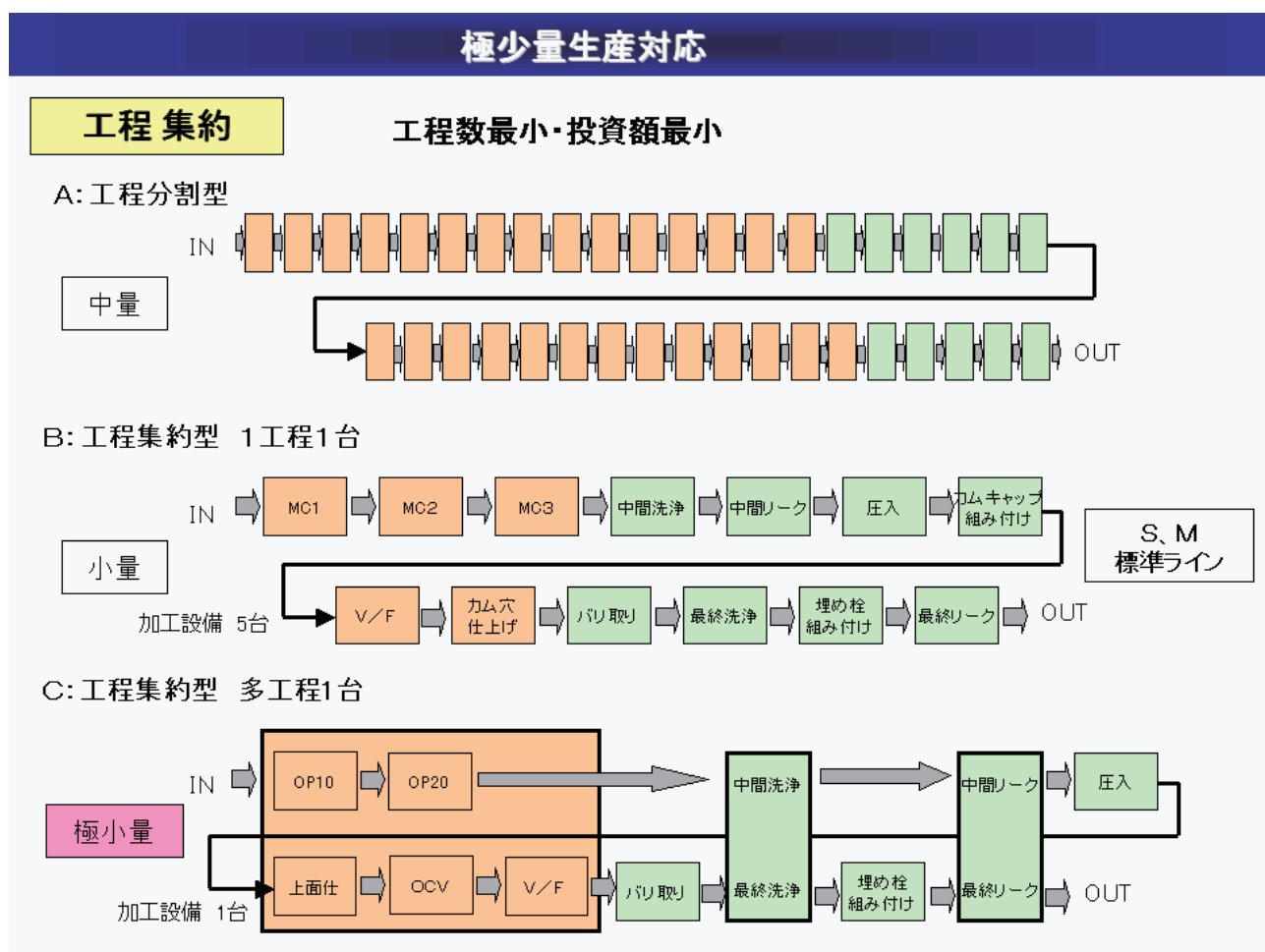


図4 生産方法の特徴

くてもマシンが補正をしてくれるところにある。これにより、ほぼメンテナンスフリーを実現することができた。

過去において、量産のFMSラインでは夏と冬で加工機のNCプログラムを修正する場面が多々見受けられたが、今回の設備は通常の工場環境(空調なし)での使用にも関わらず生産開始後1年を経過後も、NCプログラムの修正を必要としない。

## 2) 治具×ワークの取付け誤差発生への対応

現状生産されているシリンダヘッドは加工基準面と加工ノックを位置決めとして加工されている。しかし図6に示す

ように、加工孔と加工ノックの間は通常隙間が発生するように設計されている。つまりこの部分に関して最悪発生する隙間は各々の公差+隙間=数十ミクロン程度になる。しかし今回の様に高精度な孔位置を安定保証しようとした場合に数十ミクロンをこのノック孔の公差にて使われてしまうと、工程能力上、本当の意味での保証ができない。そこで今回はこの誤差をゼロにすべく拡張求芯式(コレットタイプ)のノックを採用した。

業界内ではこのノックの採用実績はまだ少ないが、今回、生産開始1年経過後も結果は良好である。

このメリットを今後も注視しながら、他の量産エンジンへ展

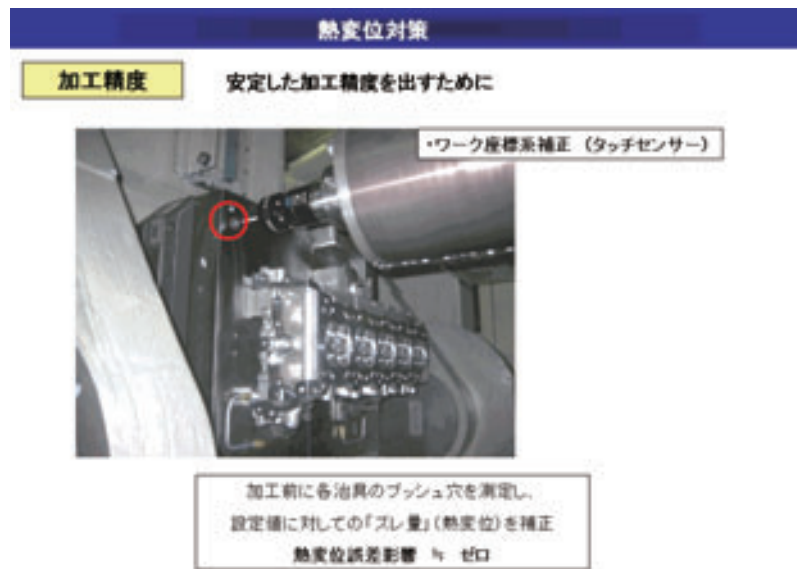


図5 熱変位対策

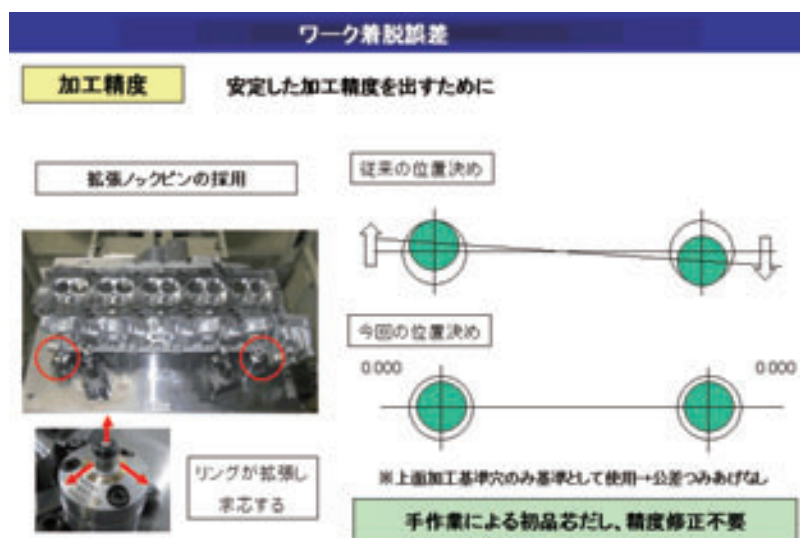


図6 ワーク脱着誤差

開を判断して行く計画である。

### 3-2-4. 3D加工

前述した新規採用技術の中からシリンダヘッドの心臓部である燃焼室、吸排気スロート部の加工に関して説明する。

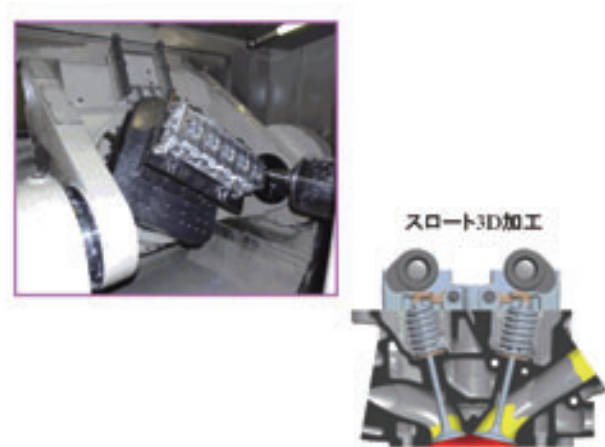


図7 3D加工

本加工に関しては、当社の持つCAD/CAMシステムを適切に運用することにより、技術的大きな課題もなく確立できた。その中で課題を挙げると、量産時における加工部の測定方法、測定インターバル、刃具寿命の管理手法である。

実際の運用では、次のように管理を実施し、生産終了までの全データから今後量産時のデータを推測する事にした。

- 測定方法                      燃焼室容積、燃焼室深さ、ポート加工径
- 測定インターバル          全数
- 刃具寿命                      加工終了後に刃先の写真撮影と磨耗量の測定

加工開始から約1年経ったが、加工精度は概ね公差の1/4以下の範囲にあり、生産時には燃焼室深さとポート径をインラインで抜き取り確認すれば良いことが判明してきた。

この結果から、量産品への展開をしていく所存である。

## 4 組立

### 4-1. 組立コンセプト

LEXUSブランドのスーパースポーツカーのエンジン組立にあたり、作り手として機能・品質への絶対的な責任感とプロ意識の見える化に取り組むことを念頭においた。その結果として、エンジン組立には“1人完結セル生産方式”を採用した。これ

は、「お客様と顔を合せても誇れる製品を作りたい。」という思いを実現するものであり、極少量生産モデルを構築するのにふさわしい生産形態と判断したからである。

エンジン組立工程では、1LRエンジンの生産全体コンセプトを達成するため、以下の様な取組みを行った。

#### ①SE活動

“1人完結セル生産方式”を導入するにあたり、あえて従来の生産方式の常識を考慮に入れなかった。今回はSE活動を通じ、設計部門、生産前工程（ casting・加工・部品メーカー）、生産後工程（車両組立て工程）と初期の段階から問題点の抽出、事前実証テストを行ってきた。エンジン組立工程においても、17項目に及ぶ実証テスト項目を行い、生産工程に織り込んだ。今回紹介する事例は、実証テストから生産工程に織り込んだ工程の一部である。

#### ②極少量生産

極少量生産を実施するにあたり、“1人完結セル生産方式”を採用することは前述した。今回、取り組んだ“1人完結セル生産方式”では、エキスパートと呼ばれる作業員によって精密な機能部品の緻密な連続組立と保証のサイクルを幾度も繰返し、設備のアシストを受けながらエンジン1台を1人で完成させていく。それはエンジン機能の最終検査となるファイアリングまで徹底して1人が担当し、お客様にとって特別な製品、そして自らも納得できるエンジンを組上げることを意味している。

#### ③新規採用技術の工法開発

SE活動を通じ、製品設計者と幾度となく打合せを行っていく中で、製品性能と生産性を如何に両立させるかが大きな課題となった。商品の要求性能を満たしつつ、レクサス品質を満足するためには、今までの量産工程の概念を壊し、新しい工法を開発する必要があった。前述の実証試験を行い開発したものの一部を以下で紹介する。

#### ④全数良品

エンジンの全数良品を満足するために、今まで培ってきた品質活動のレベルアップも必要である。新規採用工程の実証試験のほかに、既存技術のレベルアップ項目を以下で紹介する。

## 4-2. こだわりのエンジン組立

1LRエンジンの組立で特にこだわりをもった取組みを以下に紹介する。

極少量生産より

1. 姿勢自動変更セル+工程ナビゲーション
2. 組立エキスパート育成

新規採用技術の工法開発より

3. 独立カムキャリアの芯出し組立
4. ユニバーサルソケットを使用した高精度締付

全数良品活動より

5. 組立工程への部品供給品質
6. 全数ファイアリング検査
7. トレーサビリティ

### 4-2-1. 姿勢自動変更セル+工程ナビゲーション

“1人完結セル生産方式”ではエンジン1台を最後まで1人の作業者が担当する。それには、1台のエンジンを組上げる3日間全てに集中力を持続させなくてはならない。したがって、作業している間の負荷をできる限り軽減させる必要がある。そこで今回、自動でワーク姿勢が変更できる姿勢自動変更セルと工程ナビゲーションが連動するシステムを開発・導入した(図8)。

“時間を無駄なく、製品・人に優しく”を開発コンセプトとし、ワークの姿勢変更時間の有効活用と作業時の姿勢負荷低減を中心に取り組んだ。姿勢変更時間を価値もしくは準価値時間へ有効活用するとともに、製品に対して重力に逆らわない上からの組付、作業・人ごとの適正高さへ姿勢設定することで製品品質と人の負荷低減ができる設備構成にした。

今回採用したシステム構成では、姿勢自動変更セルにおいてはサーボモータを3軸使用し、エンジンクランク中心に回転する1軸、エンジン前面部品を上方向組立とするエンジン



図8 姿勢自動変更セル

倒立の2軸、作業毎にワーク高さを変更する3軸の構成とした。更に、その組立サポートを情報として表示・連動する工程ナビゲーションを追加した。これにより、作業・人ごとの適正配置を実現し作業負荷を低減できた。また、工程ナビゲーションと作業姿勢変更の連動を100%リンクさせ、最適な作業手順と作業姿勢を確立した。

### 4-2-2. エキスパート育成

“1人完結セル生産”は、組立作業者の育成が重要な要素を占めている。組立エキスパートを育成する為に、まず2名を開発試作部門に派遣し育成を行った。約2年の育成期間で、組立方法の習得だけでなく、開発時の課題を通して組立注意点を覚え組立技術部門に展開することにより、工程設計に直接生かす事が出来た。

この2名を中心として更に組立エキスパート2名、部品供給者1名、品質管理者1名を養成した。組立エキスパートが組立に携わった証として完成エンジンにアルミ製ネームプレート



図9 アルミ製ネームプレート

#### 4-2-3. 独立カムキャリアの芯出し組立

エンジン軽量・コンパクト化のため、多気筒にもかかわらずカムキャリアを気筒ごとに独立させるという新機構が採用されている。しかし、この機構ではカムジャーナルがキャリア単体で加工されてくるため、組立で各気筒のカム軸の最終調整が必要となる。そこで、ダミーカムシャフトで仮組みし、独立したカムジャーナル間の芯出し調整を行い、その回転トルクで調整状態を判定して管理する(図10)。これによりカムジャーナル軸中心の数十ミクロンのズレ量を検出し、実際のカムシャフトで必要とされるジャーナルクリアランスが確保できるように生産している。

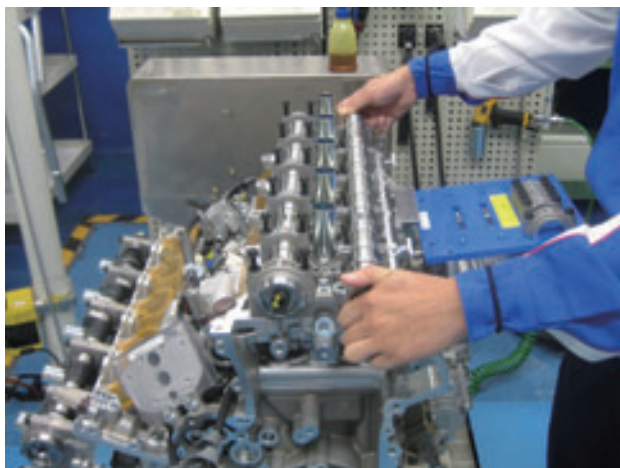


図10 ダミーカムシャフトによる芯出し

#### 4-2-4. ユニバーサルソケットを使用した高精度締付

1LRでは、コンパクトな完全等長のステンレスエキゾーストマニホールドを採用している。スペースと性能を両立させる為に入り組んだ構造となり、締付ソケットのツールアクセスにも制限が生じ、通常の組立工程では使用しないユニバーサルソケット(首降りソケット)を使用する必要があった。

発生トルクの保証を規定内にする為に、ユニバーサルソケットの締め付けトルク変動を押さえる必要があった。等速ジョイントタイプを使用すれば理論上トルク変動は起きないが、スペース的に無理がある。そこで小スペース化できるピンタイプのユニバーサルソケットを採用し、一般的な1ピンタイプよりもトルク変動が少ない2ピンタイプのユニバーサルソケットを、工具メーカーに特注した。実証の結果、最大首振り角度の決定と、ACサーボナットランナーとの組合せで締付保証できることが証明された。

首振り角度を規制するために、専用の治具を使用し締付を行っている。ナットランナーの締付パラメーターにも専用チューニングを施し、締付け精度を確保している。

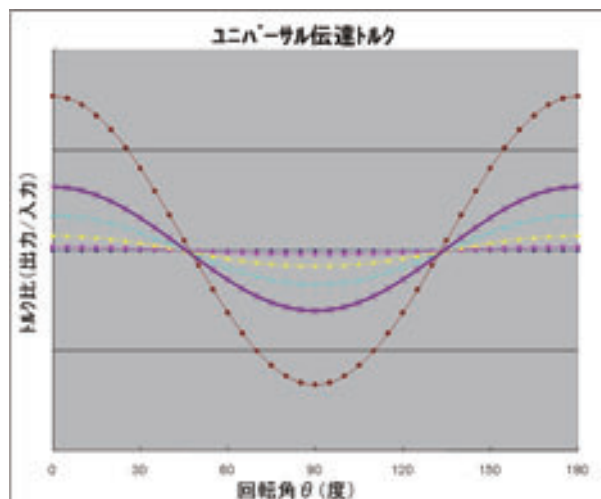


図11 ユニバーサルソケットによるトルク変動



図12 エキゾーストマニホールド締付

#### 4-2-5. 組立工程への部品供給品質

高品質生産をおこなうためには、部品供給側の品質向上も

不可欠である。今回の1LR生産は、1台/日の極少量生産という特徴もあり、部品供給にも3つのコンセプトを持ち生産準備を進めた。一つ目は、部品の異物混入ゼロ。二つ目は組立工程へ誤品・不良品の供給排除。三つ目は部品の防錆徹底である。

1LRの生産は防塵・防錆を目的として、専用部品庫、別棟の組立室を防塵ルームとしている。3つのコンセプトを確立する為には、陽圧・空調管理・エアシャワーによる外部雰囲気との隔離が必要と考えたからである。また、作業者はもちろん、スタッフ・見学者も静電服・ヘアキャップを着用しエアシャワーを通過しないと部品庫・組立室に入れない構成とした。

納入部品の防塵・防錆対応はサプライヤーにも協力いただき、全部品にビニール梱包+蓋付き納入をお願いした。部品庫に格納する際は、外周吸引して部品格納を行っている。

防塵・防錆管理された状態で格納された部品は、部品庫で専用キット箱に格納し部品供給する。部品をキット箱に格納する際は、バーコードによる部品指示システムを採用した。キット箱のバーコードを読取ると、部品品番と個数が表示され、棚の部品バーコードを読取ることによって次部品に進む方式と



図 13 キットパレット



図 14 搬送コンテナ

した。もちろん格納作業をおこなうのは、教育を受けた専任者で、シール面や、部品外見のチェックを行った上でキット箱に格納する。

部品を組立室に供給する為に外を通る必要がある。今回は、ステンレス製の搬送コンテナを使用した。約20℃の防塵室から外を通して搬送するのは、防塵のほかにも、結露の危険性が高い。そこで、専用のコンテナに気密性を高める改造を施し、防塵と防錆を両立した。

整然と部品が並べられたキットパレットで、組立エキスパートに供給される。このキットパレットは供給品質を安定させるだけでなく、組立作業の価値作業率向上にも寄与している。

#### 4-2-6. 全数ファイアリング検査

品質保証の最後のゲートとなるファイアリングテストは、一つの不具合も後工程へ流出させないゲートとして不可欠な存在となる。そこで1LRのファイアリングテストでは、異常検出能力向上をコンセプトとして数値判定の強化と官能検査環境の向上を図った。そのために、エンジン開発で使用されるコントロールコンピュータを採用すると共に、火が入ったエンジンのみが放つ音や温度、振動を感じる事が出来る官能検査環境を構成した。

エンジンの各電子デバイスから計測情報を集め自動判定する。また、その情報は些細な異常にも気付けるように波形としてエキスパートの目へ、リアルタイムで表示させると共に、トレーサビリティとして全ての号機毎に保存できるシステムを構築した。このシステムの採用により、従来は膨大に時間がかかっていた生産時のファイアリングベンチ用のソフト開発も大幅に時間短縮できコストダウンに大きく貢献できた。

官能検査はエンジンの全方向から300mm以内での目視、聴感、手感検査を可能とした検査機器の配置により検査環境



図 15 ファイアリングテストベンチ



図 16 聴感検査と目視検査

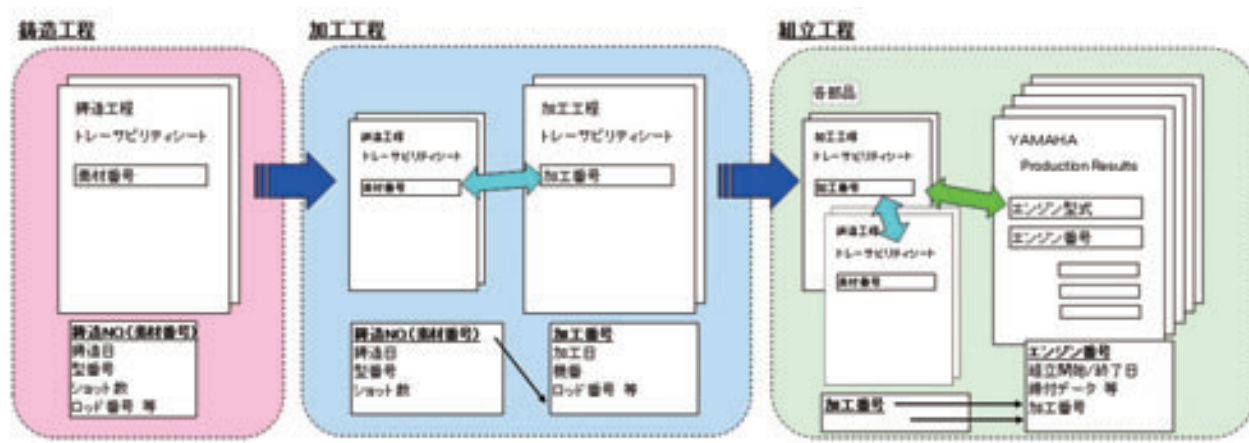


図 17 内製部品のトレーサビリティ 铸造⇔加工⇔組立の紐付け

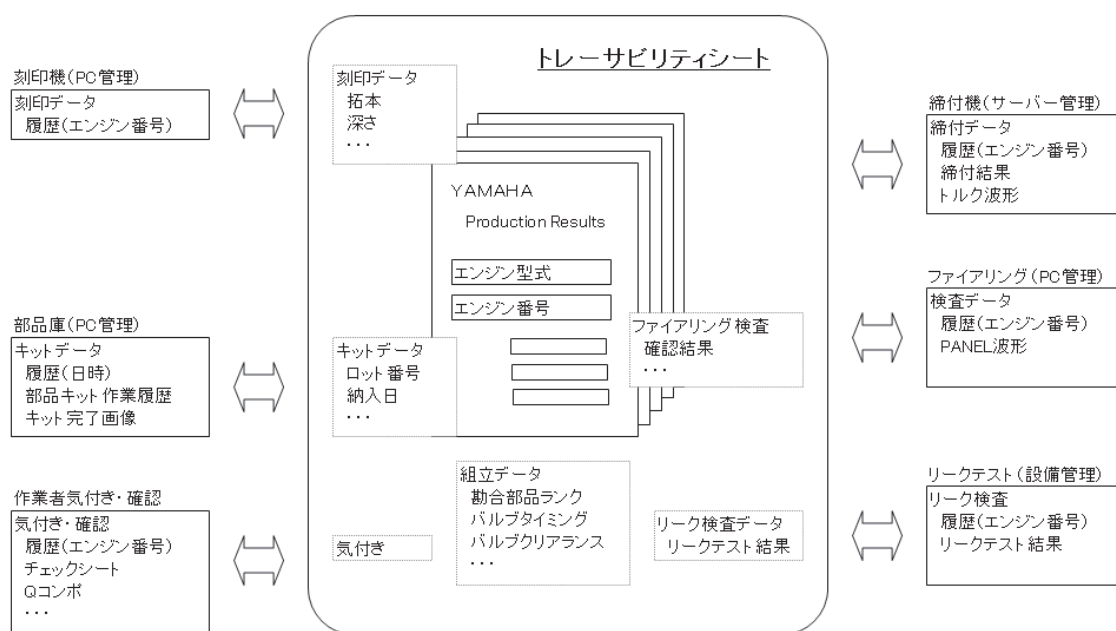


図 18 組立のトレーサビリティ体系イメージ図

を向上させた。特に官能検査で一番重要な聴感検査では、試作段階からエキスパート全員による耳あわせ訓練を繰り返しい、高感度で均一化された聴感検査を実現した。この双方の達成によりエンジンの高度な品質保証の最終ゲートを確立させた。

#### 4-2-7. トレーサビリティ

全数良品活動において、その品質保証の履歴管理としてトレーサビリティシートでの運用を採用した。組立工程では、エンジン番号に紐付けして、内製部品を含む重要部品の部品履歴から単品検査、組立検査、さらにエキスパートによる細かな気付きなども合せて履歴管理を行う。1台のエンジン組立が終了すると、そのエンジン1台に1冊の保証書、記録が残るようにファイリングして保管する。

## 5 おわりに

1LRの生産準備を通じ、極少量生産の手法を確立できた。また、鋳造から組立まで一貫し、各部署が協力した良品条件作りに取り組む事で品質絶対の“全数良品”活動を完遂できた。

今回の生産準備で得た技術は、今後の多品種少量生産のみならず、既存中量生産へも応用できると自負している。今後もこの技術を伸ばすとともに新しい価値観を創造し、お客様に喜んで頂ける生産技術へ挑戦していく所存である。

最後に、今回の設備開発に協力いただいた設備メーカーの方々、厳しい品質管理要求に対応いただいた部品サプライヤーの方々に感謝いたします。

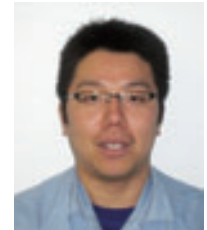
#### ■著者



**鈴木 幸一**  
Kouichi Suzuki  
生産本部  
EG製造統括部  
AM製造部



**岡田 祐介**  
Yuusuke Okada  
生産本部  
EG製造統括部  
AM製造部



**安藤 純介**  
Junsuke Andou  
生産本部  
EG製造統括部  
AM製造部



**國重 祐介**  
Yuusuke Kunishige  
生産本部  
EG製造統括部  
AM製造部



**小曾 勉**  
Tsutomu Koso  
生産本部  
EG製造統括部  
AM製造部



**戸塚 進之**  
Nobuyuki Totsuka  
生産本部  
EG製造統括部  
AM製造部