

特集：MAZDA CX-60

24

直列 6 気筒エンジン組立ラインの紹介

In-Line 6-Cylinder Engine Assembly Line

| | | |
|--------------------------------------|--|---|
| 永尾 篤 ^{*1} Atsushi Nagao | 宮田 崇史 ^{*2} Takashi Miyata | 松浪 隆仁 ^{*3} Takahito Matsunami |
| 工藤 聖広 ^{*4} Kiyohiro Kudo | 松浦 恭 ^{*5} Takashi Matsuura | 池田 裕輝 ^{*6} Yuki Ikeda |

要 約

マツダで初となる直列 6 気筒エンジン導入に伴い、エンジン組立ラインを新設した。これまで、一括企画、コモンアーキテクチャー構想、フレキシブルライン構想により生産効率／フレキシビリティ／品質を両立した直列 4 気筒エンジン組立ラインを国内外の拠点に展開しており、同様な考え方を新ラインに織り込んだ。直列 6 気筒エンジン導入にあたり、多気筒化固有の生産上／品質保証上の課題を組立ラインの仕様にどう反映してきたのかという点を中心に紹介する。

Abstract

Mazda has newly constructed an engine assembly line according to the introduction of Mazda's first in-line 6-cylinder engine. Based on a bundled planning, a common architecture concept and a flexible line concept, we have deployed the in-line 4-cylinder engine assembly lines, which achieved both higher production efficiency & flexibility, to our domestic and overseas production bases. This new engine assembly line has been constructed by the same concepts. In addition to the above concepts, this paper focuses on how we reflected the solutions of the specific problems of in-line 6-cylinder engine production and quality assurance in this new assembly line.

Key words : Production • manufacture, Continuous production, Module, Flexible, Quality assurance

1. はじめに

CX-60 を手始めに展開していくラージ商品群の導入に伴い、マツダにとって初となる直列 6 気筒エンジン（以下、直 6 エンジン）を導入する。この直 6 エンジンは大排気量化と理想燃焼への進化を同時に実現させ、走り・燃費・エミッション・騒音・振動の全ての性能を高めた新世代ディーゼルエンジン「SKYACTIV-D」から生産を開始し、各国の市場のニーズに合わせ新世代ガソリンエンジン「SKYACTIV-X」、ターボチャージャー搭載のガソリンエンジンへとラインナップを追加していく予定である。

これまで、一括企画、コモンアーキテクチャー構想、フレキシブルライン構想により生産効率とフレキシビリティを両立した直列 4 気筒エンジン（以下、直 4 エンジン）組立ラインを国内外の拠点に展開してきている。直 6 エンジンにおいても、マルチソリューション戦略による電動化の推進と商品導入を実現するためにフレキシ

ブルかつ高効率な生産ラインを構築していく必要がある。本稿では、これら新規導入する直 6 エンジンの生産上、及び品質保証上の課題に対する取り組みを中心に紹介する。

2. 直列 6 気筒エンジン生産の課題

マツダでは、大排気量のエンジンとしては V 型 6 気筒エンジンを生産した経験があり、2011 年の SKYACTIV エンジン導入時には直 4 エンジンとの混流生産をしていた。この混流生産の考え方と知見を基に、直 6 エンジン組立ライン新設を検討したところ、以下の問題が顕在化し、新たな課題を抽出した。

(1) 高効率フレキシブル生産の進化

従来からフレキシブル生産構想の実現に向け取り組んできているが、人作業工程において、特定機種台数増や混流比率の変動に対して、作業工程の追加に大きな改造が必要となる、作業編成効率を高く維持できない問題を抱えている。また、自動化装置においても、機種追加の

*1～6 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

対応時にまだ大きな改造が必要な装置が残っており、更なるフレキシブル化と高効率化が課題である。

(2) 部品の大型化に対する作業工程の効率化

今回の SKYACTIV-D 3.3 は直 4 の SKYACTIV-D 2.2 に対して幅・高さに大きな差はないものの、長さについては約 180mm の違いがあり、また重量においては約 25kg も増加している。これらのサイズ拡大、重量増により、組立工程や部品供給工程において、作業時間が増加するという問題があり、いかに直 4 エンジン生産と同等な作業時間にしていかがが課題である。

(3) エンジン新機能に対する品質保証の確立

新開発の直 6 エンジンでは、走行性能と環境性能を高次元で両立させるために、大排気量化と燃焼進化を同時に実現させている。大排気量化をトルクアップだけではなく、クリーン排ガス、希薄燃焼による燃費低減へ合理的に機能配分し、お客様への提供価値を向上させている。

生産ラインにおいては、ねらいどおりの機能が造り込まれていることを確認した上で、お客様にお届けするために、生産工程内で、基本機能に加え新機能の品質保証技術の獲得に挑戦し、お客様へお渡しするユニット 1 台 1 台の機能保証を実現した。

本稿では、上記 3 つの課題への対応策を 3 章以降で紹介する。

3. 高効率フレキシブル生産の進化

Fig. 1 に今回の組立ラインの構成を示す。シリンダーブロック投入を初工程とし、ピストン・クランクシャフト等を組み付けるゾーン A、シリンダーヘッド・回転系部品を組み付けるゾーン B、燃料系・補器類部品を組み付けるゾーン C/D の 4 ゾーンとシリンダーヘッドサブ Assy ラインで構成される。

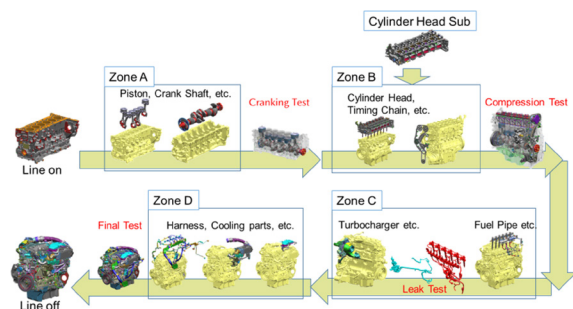


Fig. 1 Engine Assembly Flow

直 6 エンジンを生産するに当たり、将来の台数変動に対して既存の直 4 エンジンとの混流生産を前提としてライン設計を行った。その中で、機種混流をフレキシブルかつ高効率に対応した取り組み事例を以下に紹介する。

3.1 組立パレットの共通化

マツダのエンジン組立ラインでは、初工程のシリン

ダーブロックの搭載からエンジン完成まで、同一の治具パレット上で作業を行い、組立作業内容によって正立／倒立の姿勢変換をしながら生産を行う。一般的にはエンジンのサイズに合わせて治具パレットを設計するが、同一組立ラインに直 4 エンジンの混流を想定すると、搬送・締付等の設備も共用する必要がある。そのため、治具パレットの外寸と製品の位置関係であるクランクシャフトセンター及び気筒中心の配置に統一することで、治具パレット基準で動作する装置に適用した。この基準位置の統一により直 4 エンジンの混流が可能となり、将来の台数変動に対してラインの稼働率を高く維持できる。また、クランクシャフトの高さを直 4 エンジンと統一したこと、製品サイズの拡大により、治具パレットとオイルパンの干渉抑制のため、開発部門とのコンカレント活動にて治具パレットのモデルを共有し、オイルパンとの干渉を回避する形状とした。

しかし、治具パレットと製品の位置決めに使用する加工基準穴は、直 4 エンジンに対して約 200mm 長く、位置決めピンがパレットから飛び出す形となったため、直 4 エンジン混流時にはワンタッチ段替えで対応可能な仕様とした。一方、治具パレットは、締付や圧入反力にも耐えうる強度が求められる。位置決めピンが中心位置から離れることにより治具パレットが受ける反力が強くなり治具パレットに微小な変形があった。その変形を抑制するために、剛性解析を繰り返し、応力を分散させる最適な形状を導き出した。

Fig. 2 にエンジン搭載の治具パレットを示す。左から直 4 エンジン正立、直 6 エンジンの正立／倒立搭載状態の姿勢である。位置決め機構をフレキシブル対応することで、同一パレットに搭載可能としている。パレットを 90 度旋回することにより、正立／倒立の両方の姿勢で搭載できる構造とした。

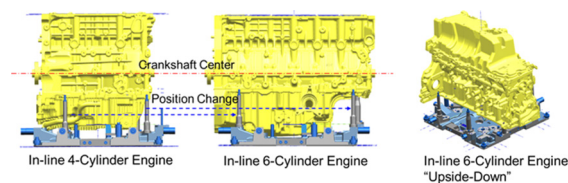


Fig. 2 Jig Pallet

3.2 機種間作業時間差に対する取り組み

通常、エンジン組立ラインでは 1 ライン当たり 60-80 名の作業者が組立作業を行っている。機種混流をフレキシブルかつ高効率化する場合の課題は、作業時間差への対応である。例えば同じエンジンのターボあり／なしでは 10 分以上の作業時間差が発生する。この時間差は、ターボなどの補機類を組み付けるライン後半の工程で多く発生し、従来のラインでは Fig. 3 のようなバイパスラインを用いて作業時間差を吸収してきた⁽¹⁾。

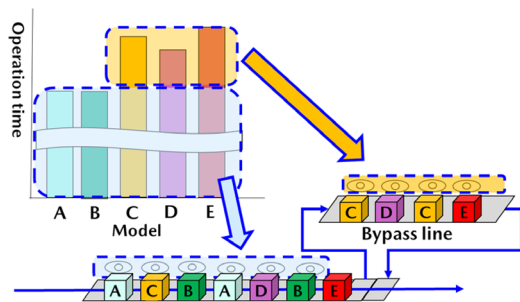


Fig. 3 Absorption of Work Time Differences

しかしながら、生産する機種種の追加や台数増に対しては、バイパスラインの延長／工程追加の改造工事を何度も実施し、大きな投資・準備工数を費やしてきた。更に、生産する機種種が複数になると、バイパスラインの中での作業時間差も発生し、機種種間の作業時間差を吸収する工程長さに限界があるため、機種比率の変動によって編成効率が悪化することがあった。これらの問題に対して生産環境の変化に柔軟に対応できるライン拡張性を持ち、複数機種種の作業時間差を吸収できる工程を実現することが課題であった。その解決手段として「低床フレキシブルAGV」を活用した工程づくりの事例を紹介する。

(1) 自在工程システムの構築

エンジン組立工程で最も機種種間の作業時間差が発生する最終ゾーンに対し、Fig. 4に示す柔軟性の高い工程を配置した。

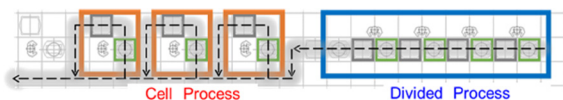


Fig. 4 AGV Model Area

本工程には機種種間で共通の作業を行う「分業工程ゾーン」と「セル工程ゾーン」を設けた。分業工程は、既存コンベアと同様に“連続した工程”とすることで、複数機種種間で編成効率を高く維持できる工程とし、複数設置したセル工程において編成効率を高く維持したまま、機種種間における作業時間差を吸収する。AGVは将来、他領域や物流での拡張性を考え、市販されている物流用AGVをベースに、前述の治具パレットの考え方を適用し、エンジン搬送と部品搬送をそれぞれアタッチメントで対応することにより、1種類のAGVで複数の作業を可能とした。

また、従来のコンベアを適用した工程配置からAGVに変更することで、レイアウト自由度を高くすることができた。この効果はコンベアでは生産機種が増えるたびに改造工事を必要としたが、AGVではレイアウトの自由度が高いことに加え、分業工程とセル工程の工程数比率を変化させることで、機種追加・生産比率の変動への追従性が大きく向上した。

Fig. 5に示すように、コンベアであれば部品容器もエンジンと横並びにレイアウトせざるを得なかったが、AGVを用いることで、作業者の横に部品容器を配置し、更にAGVを自転させることで部品容器の向きを任意に設定することができるため、部品取り出し性の向上にも大きく貢献した。

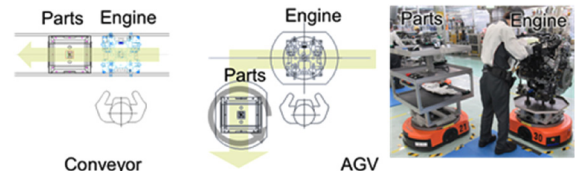


Fig. 5 AGV Layout

(2) AGV要素動作パラメーター化

自在工程システムの操作性及び拡張性を確立するため、AGVの要素動作をパラメーター化した。要素動作として、走行／回転／リフター上下動作があるが、これらを走行経路や作業ゾーン、搬送物ごとに決められた固定の動作プログラムではなく、パラメーターとして動作を選択指示することで、機種追加や生産比率などに応じたレイアウト変更をプログラム変更レスで対応可能とさせた。更に、パラメーター化した要素動作を外部入力とすることで、生産状況に応じて短時間で工場スタッフによりレイアウト／作業編成を変更可能とした。

(3) 作業指示システムと締付ツール

自在工程システムは高効率フレキシブル生産を実現するために、2003年から内製で開発してきた作業指示システムを適用している。このシステムは、機種ごとに設定した作業手順とパラメーターに応じて、締付ツールや作業確認センサー等を制御しながら、機種ごとに異なる作業をナビゲートし、インターロックをとっていくシステムである⁽²⁾。また、今回、組立要素作業の締付で使用する「手持ち締付ツール」は、AGV自在工程の柔軟性を最大限に生かすため、コードレスツールを採用し作業編成の変更時に即時対応可能とした。従来は有線式のため、編成替えやレイアウト変更のたびに締付制御コントローラーとツールの移設が必要となり、PLCとの配線工事も発生していたが、編成替えの容易化を目指し、コードレス化にすることでツールの移動のみで実現した。

品質保証に関しては、これまでと同様に締付トルクだけでなく締付過程を締付波形判定することで作業間違いや部品不良などの異常を検出し、作業指示システムと連携させることで確実な品質管理を行っている。これらの効果として、工程追加変更投資32%削減、編成効率15%向上を達成することができた。

3.3 自動化装置のフレキシブル度進化

エンジン組立ラインでは、“高い精度が求められる作業

や重筋作業にあたる作業は自動化する”を基本的な考え方としている。また、フレキシブル性の観点から動作変更のみで新機種対応できる設備仕様が必要条件である。これらの考え方からエンジン組立の作業の主要要素の中でも締付、シール塗布、検査についてはロボットを用いて自動化し、機種追加に柔軟な対応ができています。しかしながら、機種追加対応のたびに改造を伴うような装置が存在していることも事実である。今回ラインを新設するにあたり、そのようなフレキシブル性を向上させた設備事例を紹介する。

(1) ステムシール圧入、コッター組付装置

シリンダーヘッドサブラインでのバルブステムシールやコッターリテーナーの組付けを自動機で行っているが、直4エンジンではバルブ角度が異なる機種など新機種が設定されるたびに製品のチルト角度を増やす改造を行い、調整に時間がかかっている装置となっている。これに対して、製品チルト角度を、サーボモーターを用いて可変にすることでバルブ角度が変更されても数値制御だけで対応できるようにしフレキシブル性を高めた。更に、従来、鉛直方向の動作は全軸をまとめて動作させていたが、各軸単独構造とすることで圧入必要数や圧入高さに対するフレキシブル性を向上し、直6エンジンだけでなく直4エンジンにも対応できるようにしている。直6エンジンと直4エンジンに対して圧入動作をしている写真をFig. 6に示す。必要軸のみ下降して圧入動作をできるようにし、フレキシブル性を向上させた。

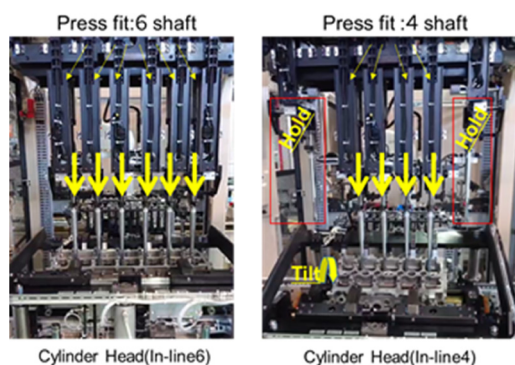


Fig. 6 Valve Stem Seal Press-fit Machine

(2) エンジン No. 刻印装置

マツダでの従来のエンジン No. 刻印は、テーキンによる打刻方式であり、大きな荷重がかかることにより機械的なバックアップ構造が必要となり、機種追加のたびに製品と接触する部分の設備改造が必要であった。また、刻印部位も強度が必要でFF車ではリア側の吸気面に統一されていた。リア側チェーン配置や長尺化、車載状態での周辺部品による視認性悪化の影響等により刻印位置の自由度が必要となり、マツダでは初となるドットペンでの刻印を品質検証、認証課題調整を行い採用した装置をFig. 7に示す。

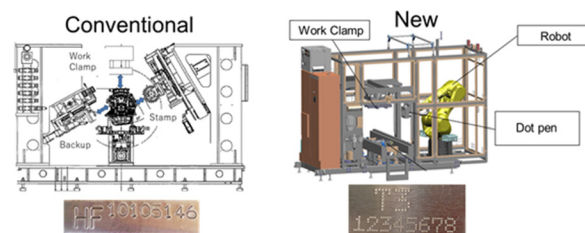


Fig. 7 Engine Number Engraving Machine

ドット方式に変更することで、荷重が大幅に軽減され、バックアップ構造が不要になり、また多関節ロボットを用いて、位置/角度が変更されても容易に追従可能になった。今まで直4のFFエンジン用とFRエンジン用で3台の刻印装置が必要となっていた装置を1台に集約させた。更に今後は、ロボットにレーザーセンサーを付け加え、刻印の検査を行うとともに、刻印の品質に関わるドットペン先も管理することにより、最適なタイミングでペン先交換を行う予定である。

(3) 外観検査装置

複数機種の混流における課題は、機種ごとに異なる部品が正しく組み付けられていることを保証することである。従来は、部品ごとに専用の検査装置を設けていたが、種類が増えるごとに確認装置が増え対応に多くの工数をかけていたため、現在は、ラインの5か所に多関節ロボットに画像処理カメラとセンサーを持たせたフレキシブル性の高い外観検査装置を設置し、専用検査装置を設けずに外観検査装置にて仕様確認を行っている。今回のラインにも同様に外観検査装置を5か所に設置している。5か所の装置では組み付け順序上検査できない部位については作業工程に影響を与えないように協調ロボットを使用し省スペースでフレキシブル性を持たせる装置を展開している。

4. 部品の大型化に対する作業工程の効率化

4.1 部品大型化、重量増に対する組立工程の取り組み

直6エンジンではオイルパンなど従来直4エンジンでは手作業で組み付けてきていた部品については、直6エンジンにおいては長尺化による重量増により、エルゴノミクス評価において、手作業は不可である。ロアブロックにおいても、軸力アップと長尺化により10kg以上の重量増となった。このロアブロックは、クランクシャフト等の内臓部品を組み付けるため、分解と組み付けの2回の作業が必要となる。作業者の身体的負担を減らすために組付補助装置を用いるが、作業時間増加を最小限にすべく専用治具を開発した (Fig. 8)。

エア制御で重さを感じることなく移動できる組付補助装置を用いているが、製品を把持しているとき/把持していないときの制御の切り替えをチャック動作と連動して自然な操作をサポートしている。また、チャック/アンチャック/製品の回転等の操作用スイッチを集中させ、

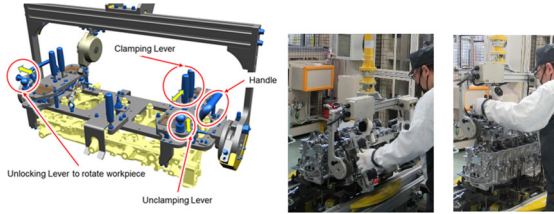


Fig. 8 Lower Block Hanging Fixture

作業性向上も考慮した仕様とした。

エンジンハーネスもエンジンの長尺化により、部品の体積が増大した。従来は、Fig. 1 で示すゾーンCの気密性テスト後に組み付け始め、コンベア上のエンジンの向きに応じて複数の工程で各コネクタに結合していた。この過程において他の部品の組み付け作業エリアを確保するため、ハーネスを束ねる、移動する等の付随作業を何度も行っている。開発構想段階においては、ハーネスのボリューム増加により移動させても他の部品組付けの作業空間が確保できなかった。このため、コンカレント活動を通じてハーネス構造の最適化を行い、従来よりも後工程の全方位組付け可能なAGV自在工程で組める構造とすることで不要な作業を排除することができた。

4.2 部品サイズ大型化に対する部品供給の取り組み

直4エンジンのSKYACTIV-D 2.2とSKYACTIV-D 3.3を構成する部品を比較すると、各々のエンジン1台当たりの部品の種類数は6点増えたに過ぎないが、部品の体積合計は、直6では直4比で37.4%増、供給作業時間に換算では25%増となる。部品供給は、組立工程に直接部品供給する一般供給、エンジンと同期して組付部品群を流すキット供給、1部品を生産順に供給する順序付け供給の3つに大別される。これらに対して部品大型化により、①順序付け供給部品が増え、部品庫スペースが不足する、②キット容器に部品が収まらない、③部品供給量の増大により、供給作業時間が増加するという3点の問題に対する課題解決を行った。

現在、直4エンジンラインは増産を重ね、国内では3本のラインで生産している。当初は各ライン個別に調達部品を受け入れていたが、3ライン共通使用部品も多いことから現在、調達部品の約7割は一括納入され、社内で各ラインへ巡回供給している。直6エンジンは直4エンジンとの共通使用部品は29%であるが、部品の製造輸送業者に大きな違いがなく、トラックの輸送効率向上のために「一括納入体制」に編入することとした。また、部品供給工程では組立ラインで収集している生産品質実績を活用し、生産計画と照合しながら必要なタイミングで必要な部品の供給量を指示するシステムを構築している。このしくみを直6エンジン組立ラインにも適用し、供給先へ必要最小限の部品のみを供給できるようにした。この一括納入の拡大による多回納入と部品供給指示シス

テムの導入により、①のスペース不足を荷受場とラインサイドで補完した。

②のキット容器へ収容化という課題に対しては、従来1セットだった容器を部品配置の自由度を高めるために、ゾーンCとゾーンDにキット容器を分けて、従来比2倍超体積の対象部品を供給できるようにした。更に2つに分けることにより、従来順序付け供給であったハーネスやEGRクーラーなどキット供給に取り込み、全体的な供給台車数を減らすことができています。

③の供給作業時間の極小化という課題に対しては、供給台車の収納数をそろえてライン全体としてサイクリックに複数の部品をまとめて供給するしくみ、上記の供給指示システムを適用して効率的に搬送を行うことで解決した。その結果、供給作業時間を8%増で抑えることができた。

5. ユニット機能保証における取り組み

ユニット機能保証の考え方は、エンジンの燃焼性能を機能特性に展開し、機能特性を全数計測し確認を行うことで、ばらつきなく燃焼性能を保証したエンジンユニットをお客様のクルマに搭載し、お届けする品質保証システムをライン全体で構築することである。そのため、Fig. 9に示すように組立ライン内の要所に検査工程を設け、組み立てた機能特性を定量的な指標で計測し、全数保証を実現した。

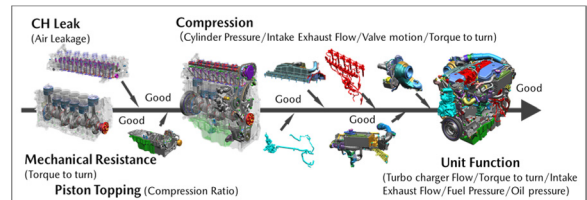


Fig. 9 Unit Function Assurance System

検査工程のシステムをFig. 10に示す。エンジン出力軸を、外部モーターで回転させ、電装部品を制御しながら模擬的に燃焼状態を再現させ、機能特性として、回転トルク/筒内圧力/吸排気流量/吸排気圧力/燃圧/油圧等の波形データを各センサーから取得し、特徴量を抽出することで良否判定を行っている。

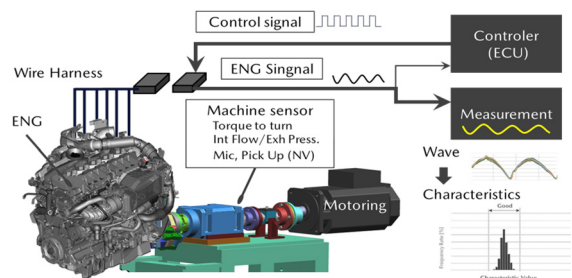


Fig. 10 Motoring Test System

このユニット機能保証の中で、性能向上のための新機能に対する機能保証技術の進化の取り組み事例を紹介する。

5.1 トルクアップと希薄燃焼を両立する吸入空気量保証

トルクアップと高効率な希薄燃料を両立するために、排気量アップと併せて空気を大量に取り入れる可変ジオメトリーターボチャージャー（以下、VG ターボチャージャー）過給システムを採用した。この過給システムの機能保証をするために、VG ターボチャージャー過給システムに関わる全ての部品を組み立てた完成状態で、エンジンユニットの吸入空気量をモニターしている。Fig. 11 に示すように、VG ターボチャージャーのベーンノズル間の隙間を絞ることでタービンの回転速度を上げ過給流量が上昇し、吸入空気量が大きくなっていることを確認している。

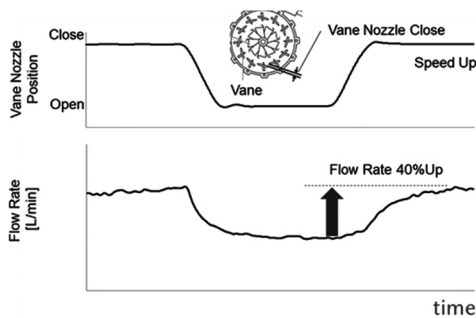


Fig. 11 Increased Intake Air Flow with Turbocharger with Variable Turbine Geometry

5.2 希薄燃焼のための高圧燃料システム保証

高効率でクリーンな希薄燃焼を追究するために、燃料噴射の圧力を高圧化した。組立直後のエンジンでは燃料経路は空気で満たされており、空気を燃料に置換する必要がある。検査装置で燃料置換を行うために、Fig. 12 に示すように、実際にエンジンへ軽油を入れて燃料ポンプを制御しながら空気と置換し、その上でねらいどおりの最高燃料圧力 250MPa まで昇圧することを燃料圧力センサーで確認している。

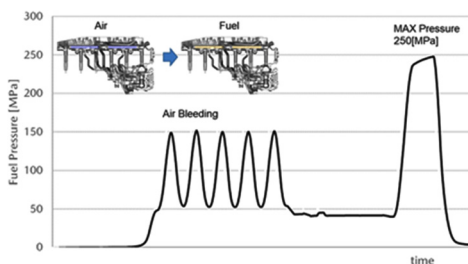


Fig. 12 Higher Fuel Pressure System

5.3 振動が小さい完全バランスの機能保証

直 6 エンジンのクランクシャフトの配置による構造的な強みである完全バランス機能の保証について紹介する。直 4 エンジンではクランクシャフト回転時に発生する二次振動は、直 6 エンジンでは完全バランスにより発生しない構造となっているため、静粛性が向上している。このユニット機能としての静粛性を NV（マイク、振動センサー）で保証することに加えて、振動の発生源であるピストンクランク機構の完全バランスを、機械抵抗トルクの波形で確認するプロセスはマツダ独自の取り組みである。

まず、量産中の SKYACTIV-D 直 4 エンジンにて、機械抵抗トルクの単気筒モデル式を確立させた (Fig. 13)。

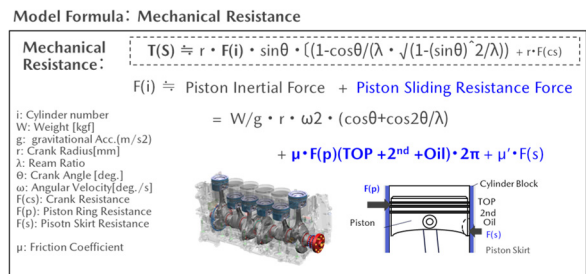


Fig. 13 Model Formula of Mechanical Resistance

このモデル式を使用して新開発の 6 気筒エンジンの諸元から理論波形を算出し、理論どおりになっていることを実エンジンで確認した。その上で、機械抵抗トルクの波形の振幅を指標として、この振幅が直 4 エンジンより 60% 小さくなっていることを定量化し、完全バランス機能を全数保証している (Fig. 14)。

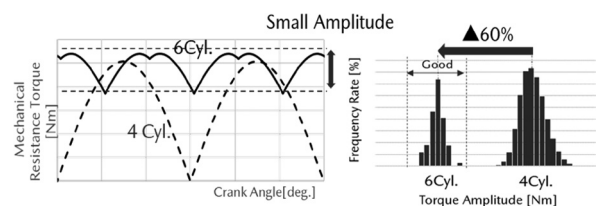


Fig. 14 Small Amplitude of 6-cylinder's Torque Curve

以上、3つの事例を紹介したが、今後は、市場のデータを活用し、更なる品質向上/機能進化へつなげる取り組みをしていく。

6. おわりに

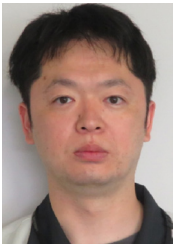
今後、カーボンニュートラル、CASE 対応と市場が激変していく中でマツダは 2030 年グローバルにて電動化 100%に向けて対応していく。内燃機関の規模は縮小していくが、マルチソリューション対応でいままでも以上にさまざまなニーズに応じた多機種の内燃機関をタイムリーに提供していく必要がある。このために、今回新設したエンジン組立ラインの高効率フレキシブル性を継続

して進化させていく。また、獲得してきた技術をエンジンだけでなく、他のユニット生産においても展開していく所存である。

参考文献

- (1) 野村ほか：エンジン組立ラインにおける多機種混流生産システムの開発，マツダ技報，No.19，pp.100-106 (2001)
- (2) 品川ほか：エンジン組立自己完結生産システムの開発，[マツダ技報，No.22，pp.178-182 \(2004\)](#)

■著者■



永尾 篤



宮田 崇史



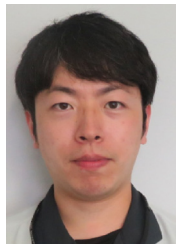
松浪 隆仁



工藤 聖広



松浦 恭



池田 裕輝