

論文・解説

23

エンジンシャフト部品加工ラインの進化 Evolution of Engine Shaft Parts Machining Line

渡邊 琢也^{*1} 小松 信介^{*2} 丸山 正悟^{*3}
Takuya Watanabe Shinsuke Komatsu Shogo Maruyama
足立 孝貴^{*4} 北川 廉^{*5}
Koki Adachi Ren Kitakawa

要約

当社では、「モノ造り革新」⁽¹⁾により、生産効率とフレキシビリティを両立したラインを構築している。今後のバッテリーEVへのシフトや顧客ニーズの変化に即応するため、更なる高効率フレキシブル加工ラインの追求に取り組んでいる。また、少子高齢化による労働人口減少の中にあっても、高品質な部品をお客様へタイムリーにお届けするため、省人化の追求にも取り組んだ。本稿では、新たな高効率フレキシブルラインと、省人化の取り組みについて報告する。

Abstract

Through “monotsukuri innovation”⁽¹⁾, we build production lines that achieve both production efficiency and flexibility. In order to respond urgently to the future transition to battery electric vehicles and changes in customer needs, we have been pursuing even more efficient and flexible machining line. Moreover, even as the working population is decreasing due to declining birthrate and aging population, we have also pursued labor saving in order to deliver high-quality components to customers in a timely manner. In this paper, the new high-efficiency and high-flexibility line and the challenge of manpower saving are reported.

Key words : Production • manufacture, Continuous production, Machining, Module

1. はじめに

自動車業界は現在、100年に一度の変革期を迎えている。気候変動の課題に直面する中、環境規制の強化や持続可能性への関心が高まる一方で、顧客のニーズも多様化し、その変化のスピードも急激である。マツダでは「Well To Wheelの視点」⁽²⁾に基づき、各地域のエネルギー事情に応じたパワートレイン（以下、PT）を用いるマルチソリューション戦略を採用している。PT部品の機械加工においては、自動車の電動化や顧客ニーズの変化スピードが増す中、これまでの部品単位でのフレキシブルラインを更に進化させ、PT機種ごとの台数構成の変化に柔軟に対応する必要がある。

また、少子高齢化による労働人口の減少も大きな課題となっている。これに対応するため、生産ラインにおいては省人化を追究し、自動化技術による生産効率の向上が求められる。

本稿では、フレキシブル性と省人化を進化させたエン

ジンシャフト部品の機械加工を行う「次世代フレキシブル加工ライン」について紹介する。

2. エンジンシャフト部品加工ラインの概要と課題

2.1 エンジンシャフト部品加工ラインの概要

エンジンシャフト部品加工ラインとは、クランクシャフトやカムシャフトの加工を行う生産ラインの総称である。本加工ラインは、前工程にて鋳造や鍛造によって成形された素材を、加工設備によって、図面に指定された寸法や形状に仕上げ、加工後には部品の品質確認を行い、組立工程に引き渡す役割を担っている。

エンジンシャフト部品加工ラインは、加工部位の要求精度に応じた設備を用いて、複数の工程で構成されている。各工程の設備台数は、生産計画と各設備の加工能力で決定し、直列に配置している。設備間の部品搬送には、設備頭上を跨ぐように自動で部品の脱着が可能なガントリーローダーを設置している（Fig. 1）。

*1~5 パワートレイン技術部

Powertrain Production Engineering Dept.

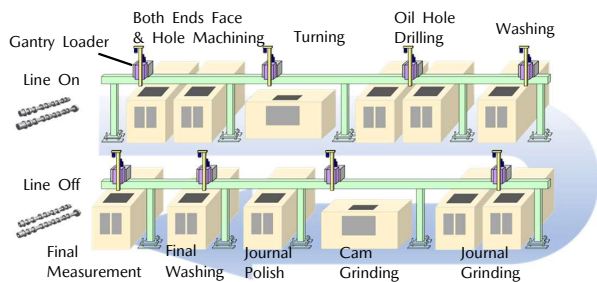


Fig. 1 Camshaft Machining Line

2.2 エンジンシャフト部品加工ラインの目指す姿と課題

(1) 生産する部品変化への柔軟な対応

当社では、従来から「モノ造り革新」の考えに基づき、生産する部品ごとに最適化した変種変量高効率ラインを構築している。上述ラインで加工する部品については、商品力を確保するため、エンジン機能に関する形状などを変動要素とし、ラインとしては生産に必要な加工&搬送基準を固定要素として共通化することで混流生産を実現している。具体的な変動要素として、エンジンのボアピッチや吸排気タイミングを担うカム形状などは設計自由度を持たせ、一方で部品の機能に影響がないセンター穴形状や回転方向の基準面は固定要素としている。

しかし、今後バッテリーEV（以下、BEV）への移行も見込まれ、BEV用部品の生産比率の変化に柔軟に対応し競争力を確保していくためには、これまでの部品ごとのフレキシブルラインから、異なる部品の混流が可能な「次世代フレキシブル加工ライン」へ進化させる必要がある。

全く異なる部品を混流する場合、これまで構築してきた「固定と変動」の枠組みでは対応しきれないため、さまざまなバリエーションに対応できる汎用性の高い設備の導入を進める必要があるが、加工部位によっては量産性に優れる専用機に頼っている。今後は、品質と生産効率を維持しつつ、柔軟に対応することが課題である。

(2) 生産計画変動への対応

従来の加工ラインは、生産計画に応じた設備を直列に配置し、その頭上をガントリーローダーが跨ぐように設置されている。よって、当初の生産計画以上の要求に対応する場合は、設備を追加するための生産休止を伴う工事もしくは、ライン新設が必要となる。市場の需要が不透明な中、柔軟に対応するためには、生産計画に応じて段階的に能力増強可能なライン形態としていく必要がある。

したがって、能力増強に対して生産を休止させず、能力が不足する工程のみアドオンによる増強が可能な生産ラインを構築することが課題である。

(3) 加工ラインの省人化

これまで部品の加工や搬送など大部分の作業を自動化してきたが、素材のライン投入や完成品の梱包作業、ラ

イン内物流といった「単純作業」、部品の測定といった「認知／判断作業」、刃具交換に代表される「高度スキル作業」、設備の起動・停止、保守点検といった「維持／管理作業」などでは、多くの人作業が残されている。これらは、多様な部品形状やサイズに応じて、オペレーターによる認知／判断／調整が必要な作業であり、部品測定や刃具交換など、微細な違いを視覚や触覚で感じ取る必要がある。これらの感覚的判断を機械に任せるのは非常に困難であり、技術的な難易度が高いことが課題である。

3. 次世代フレキシブルラインの取り組み

3.1 ロードマップの策定

2.2節で述べた課題解決にあたり、PT加工ラインの目指す姿の実現に向けたロードマップを描き、必要な要素技術の開発を進めてきた（Table 1）。

Table 1 Roadmap for Our Vision

		FY2020	FY2024	FY2030	Our vision
		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Flexibility		Process fixation	Process flexibility	Process flexibility	Process flexibility
Bill of process	Machining process count	12 process	10 process	8 process	4 process
	Composition ratio of general-purpose equipment lines	62%	90%	100%	100%
Number of line workers	In-line logistics work	1 person	0.5 people	no one	no one
	High-skilled work	2 people	1.5 people	1 person	no one

今回の取り組みのポイントは、これまでの【部品ごとに最適な工程・工法で構成する考え】から、【加工対象部品全体最適視点で加工ラインを構成する考え】に変革したことである。

目指す姿は、これまで部品ごとに固定されていた工程を独立させ、部品の種類に応じて必要な工程を選択しつつ、既存資産を最大限活用することで異部品混流を可能とする。また、バリエーションに対応する変動要素は極小化し、加工設備は全て汎用機とすることで、異なる部品への迅速な対応を可能とする。工程は最小限に集約し効率化を図る。省人化の観点では、「単純作業」「認知／判断作業」「高度スキル作業」「維持管理作業」全てのオペレーター作業を自動化し、無人化した状態である。

本稿で紹介する次世代フレキシブル加工ラインでの取り組みはロードマップ（Table 1）のレベル2にあたり、工程独立のため各加工設備のモジュール化、工程集約、加工機の変動要素の極小化、設備の汎用機化率向上に取り組んだ。省人化については「単純作業」、「認知／判断作業」、「高度スキル作業」を対象に取り組んだので、4章で紹介する。

3.2 前提条件

この次世代フレキシブル加工ラインでは、加工対象部品を従来のエンジンシャフト部品に留まらず、将来のBEV用部品に対しても対応することを目標に取り組んだ。この検討にあたっては、加工対象部品をエンジンのクランクシャフト、カムシャフトに加えて、長さが同等であるモーターシャフト、カウンターシャフトとした。

3.3 フレキシブルモジュールライン

従来のエンジンシャフト部品加工ラインは、加工対象部品ごとにラインの構成やレイアウトを最適化した専用設計であるため、部品搬送速度が速く、ライン全体の占有面積をコンパクトにできるという特長がある。

一方、異部品混流への対応や生産能力増強への対応は、生産ラインを休止させて設備の大掛かりな移設・追加工事を行うかライン新設が必要となり、多くの期間と費用を要する。

そこで、この次世代フレキシブル加工ラインでは、設備と部品脱着ロボットを組み合わせセルモジュール化し、無軌道AGV（無人搬送機）によってモジュール間の部品搬送を行う構成とした（Fig. 2）。

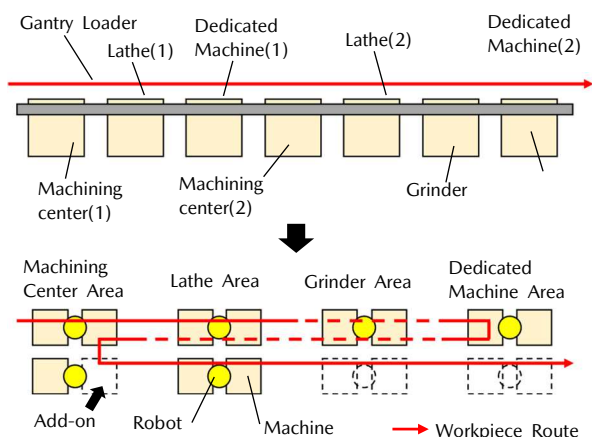


Fig. 2 The Concept of Conventional Line (Above) and Flexible Module Line (Below)

1つのモジュールは、ロボット1台と工程設備2台による構成を基本としており、1つのモジュールで1工程または2工程を担当する（Fig. 3）。モジュールがラインを構成する最小単位となり、加工する部品の工程や生産台数に応じてモジュール構成を決定する。AGVはガントリーローダーに比べて搬送経路を変更しやすく、モジュールの配置自由度が高い。

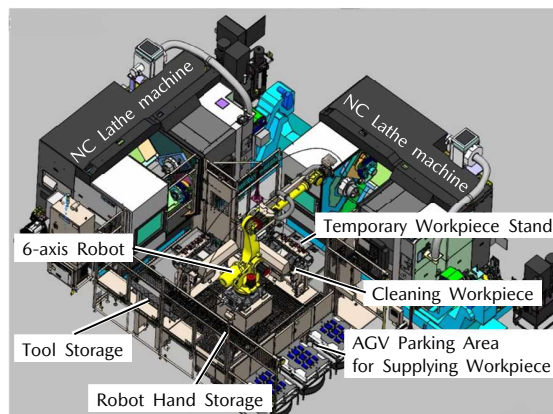


Fig. 3 Layout of Module

工程のモジュール化とAGV搬送化により、新規部品の生産が必要になった場合、新工程をモジュール単位でアドオンできるほか、AGV経路を変更するだけで工程順序も変更できる。また、該当設備とAGV経路をモジュール単位で追加することで比較的容易に能力増強も可能となる。各モジュールが独立しているため、モジュール追加工事に伴う生産への影響も少なく、柔軟かつ段階的に能力増強を行える。

AGVで部品を搬送するための搬送台車も、腰下部分は部品種類に関係なく共有とし、部品を搭載する腰上部分のパレット交換のみで新規部品にも対応できる構造とした。

3.4 変動要素の極小化

従来は、排気量によって異なる全長や形状などの複数のエンジン機種を同一ラインでフレキシブルに生産するため、加工基準形状を統一してきた。具体的には、加工時に支持する部品両端部のセンター穴形状、把持する外径、回転方向の基準などの加工基準を固定要素とすることでフレキシブル生産を可能としている（Fig. 4）。

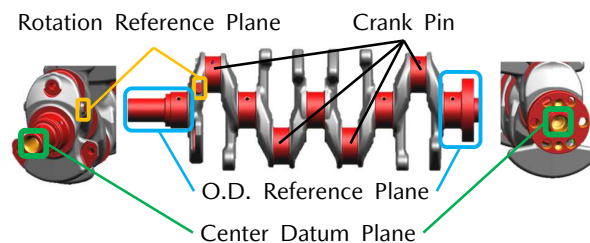


Fig. 4 Crankshaft Reference Plane

しかし、BEV用部品はエンジンとは異なる機能に応じた形状となるため、従来のような加工基準を固定要素としてエンジン部品と共通化することは困難である。この問題に対して、治具の先端部分の交換のみで機種ごとのユニーク形状へ対応するなど、専用部分を極小化することで柔軟な対応を可能とした。

具体的な事例としてNC旋盤での取り組みを紹介する。

従来は、加工対象部品が切り替わると設備を停止させ、オペレーターによるチャック全体の交換が必要となるが、今回は部品と接する先端部分のみをワンタッチかつ、ロボットで交換可能な構造とすることで、多様な部品に対し先端部品と加工プログラムのみの変更で対応可能とした。今回は、部品と接する部分である、チャック爪やセンターと呼ばれる部品をロボットで自動交換できる構造とした (Fig. 5)。

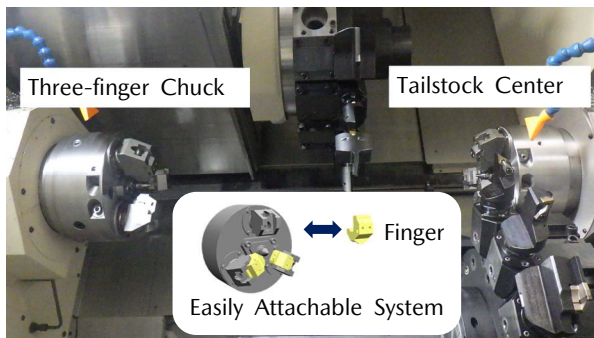


Fig. 5 NC Lathe In-Machine Tooling

また、ロボットを用いて自動で交換するための制御及びプログラム構成についても標準化し、交換時の基本的な動作を「固定」、交換対象によって変わる動作のみを「変動」とすることで、プログラム作成のリードタイム短縮を図った。

3.5 汎用機化率向上と工程集約への取り組み

(1) クランクピン外径加工

クランクシャフトの偏心部位であるクランクピン部の粗加工において、従来は本工程に特化した専用機を使用してきた。工程集約と設備の汎用機化率の向上を実現し、異部品の生産に柔軟に対応するため、当社の量産ラインでは初となる複合加工機を導入した (Fig. 6)。複合加工機とは、従来の旋削加工とミリング加工を1台で行える汎用多軸制御加工機である。これにより、専用機を使用していた2工程を汎用機での1工程に集約した。

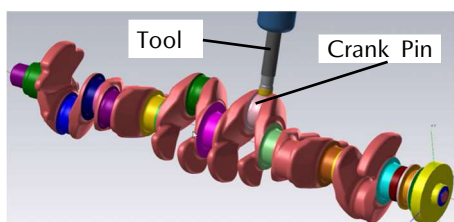


Fig. 6 Crankshaft Pin Milling

(2) クランクシャフトギア加工

クランクシャフトには燃料ポンプ駆動用のギアがあり、歯切り加工が必要である。これまで、歯切り加工専用機を使用してきたが、汎用機である複合加工機に置換した

(Fig. 7)。複数機種にもフレキシブルに対応する刃具の設計にあたり、刃具剛性低下による形状不良を招く可能性があり、加工時の刃具変位量を抑える必要がある。そこで、切削力のシミュレーションを行い、切削抵抗と切削面に対し逃げ方向に作用する剛性値から適正な刃具形状を選定した (Fig. 8)。また、粗加工と仕上げ加工で別々の加工軸を用いることで2軸同期加工を実施し、成り行きの加工時間に対し、加工時間を約25%短縮した。

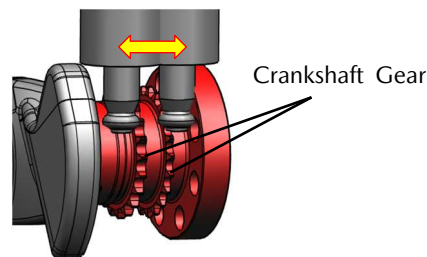


Fig. 7 Form End Mill

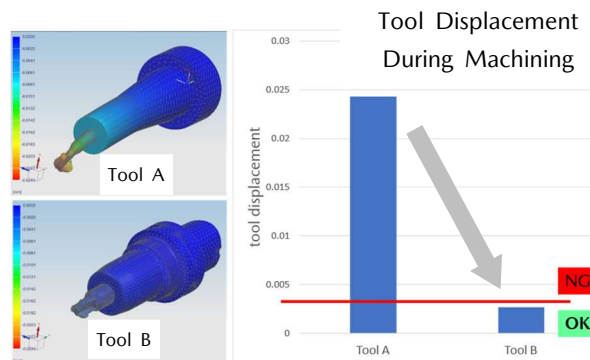


Fig. 8 Simulation of Tool Displacement

これら3章の取り組みにより、次世代フレキシブル加工ラインでは設備全体における汎用機の割合を90%まで高めた。

4. 加工ラインの省人化追究

4.1 単純作業の自動化

(1) 部品投入／完成品梱包作業の自動化

クランクシャフトやカムシャフトの素材が搬入される際の荷姿は、部品ごとに数十本から数百本ずつ、搬送ラックにバラ積みされた状態や井桁状に積まれた状態である。この荷姿の違いに対応するために、従来は、作業者が部品を1本ずつ取り出し、ベルトコンベアに載せる作業が必要であった。また、加工が完了した完成品の梱包作業についても、同様の手搬送作業であった。

次世代フレキシブル加工ラインでは、ライン投入を素材ピッキング装置、完成品をパレットへ積み上げ梱包する完成パレタイズ装置にそれぞれ置換し、従来の作業を自動化している。

素材ピッキング装置 (Fig. 9) はロボット1台に3Dカメラを組み合わせ、ラックから素材を1本ずつ取り出し、

位相決め装置を経由してライン内搬送用の台車まで移載する。素材用ロボットハンドは、バラ積みの部品を1本ずつ抜き取るために最適な形状と強度を両立する専用部品を設計し、素材種類ごとにロボットハンドを自動で持ち換える形態とした。

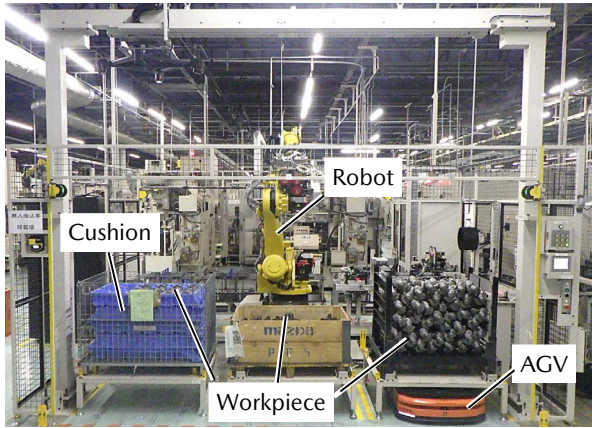


Fig. 9 Material Picking System

完成パレタイズ装置は、仕様の基本構造を素材ピッキング装置と共通設計にすることで製作期間を短縮した。本設備は、部品が整列しておりバラ積み状態からの抜き取り作業が不要なため、ハンドもクランクシャフトとカムシャフトの両方を把持できる形状で共通化した。

これらの取り組みにより、部品投入・完成品梱包作業に必要であった作業工数0.6人を削減した。

(2) 無軌道AGVによるライン内運搬作業の自動化

① 素材／完成品の入替

前述の素材ピッキング装置／完成パレタイズ装置の稼働において、複数部品の混流を実現するためには、部品ラックを必要に応じて随時装置内外へ出し入れを行う必要がある。そこでこの次世代加工ラインでは、部品ラックを搬送台車に載せ、AGVによって装置内外へ自動で搬送台車の出し入れを行う搬送システムを構築した。本システムは、素材ピッキング装置／完成パレタイズ装置と連携し、部品ラック内の部品数の変動や、装置からの要求に応じて任意のタイミングで搬送台車の交換を実施している。

また部品ラックには部品情報を付与した電子タグを取り付けており、建屋への入退場は管理ゲートで監視し、ライン内への搬送状況はAGVの搬送履歴をトレースすることで、各部品の所在を確認することが可能となり、在庫管理を効率化した。

② 刃具／切りくず収集台車自動搬送

加工ラインでは、加工により摩耗した刃具を加工機内から取り出し、刃具のメンテナンスエリアにて刃先の再研磨や刃先チップの交換を行い、加工機内に再度取り付ける作業が発生する。このためライン内に点在する加工機と刃具メンテナンスエリア間の刃具搬送が必要であり、従来は作業者が搬送していた。次世代フレキシブル加工

ラインでは、AGVで刃具を搬送するシステムを構築し、後述のロボットによる刃具交換システムと組み合わせることで、刃具交換に関する一連のライン作業工数を削減している。

また、加工の際に排出される切りくずは専用の収集台車に集積されるが、刃具の運搬と同様にAGVにて、切りくず堆積周期に応じて各加工機と切りくず回収エリアとの間で搬送することで、ライン内の運搬作業に要する工数を削減した。

4.2 認知／判断作業の自動化

加工ラインでは部品の品質を維持管理するため、定期的に品質チェック作業を行っている。従来、品質チェック作業は作業者が品質項目ごとに専用の検査具を用いて計測作業を行っており、シャフト系部品では「円筒部の外径、形状、穴径、ネジ形状」が主な計測項目である。

今回、上記計測作業を自動化し、エンジン以外のシャフト系部品にも対応可能な「自動インラインチェック装置」を開発した (Fig. 10)。

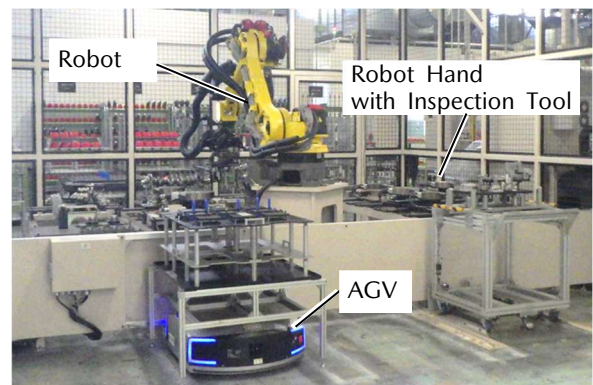


Fig. 10 Automatic Inline Measurement System

本装置は、ロボットが計測作業と部品搬送を担っており、各計測機器を搭載したロボットハンドと、各部品の搬送に対応したロボットハンドを適宜交換し、全自動で稼働するものである。また、AGVによる部品搬送システムと連動することで、加工機から本装置の区間及び計測後の次工程エリアまで、一連の搬送を自動で完結している。

次に、各種計測装置を搭載したロボットハンドについて説明する。円筒部の外径測定については、投影式の非接触型センサーを採用し、外径の異なる部位を1つの計測機で測定可能とした。形状測定はレーザー式の測定機を用いて測定部位を撮影し、面取りの形状や加工面の幅の測定など、複雑な形状の品質管理を可能としている。穴径計測及びネジ形状の測定については、穴径計測ではエアマイクロ、ネジ部の計測ではトルク管理式のネジゲージを採用した。また、ロボットハンド先端の測定子を交換する機構を設け、複数の穴径・ネジ径の計測に対応した (Fig. 11)。

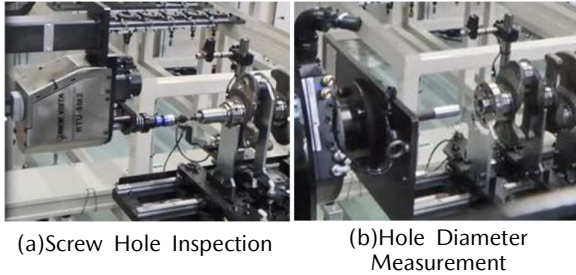


Fig. 11 Automatic Inspection

これらの取り組みにより、従来作業が行っていた測定作業の64%を自動化し、0.2人分の作業工数削減を達成した。

また、自動化により人作業のバラツキを排除したことによって、計測結果への信頼性が向上し、測定周期の見直しや管理特性の削減を実現した。

4.3 高度スキル作業（刃具自動交換）

従来、人が手動で実施していた刃具交換を、ロボットに置換した刃具自動交換システムを開発し自動化した。人作業による刃具交換では、設定した加工数に達すると設備が警報を出力し、作業員へ認知させ、作業員が設備の扉を開けて、刃具の取り外し及び取付け作業を実施していた。

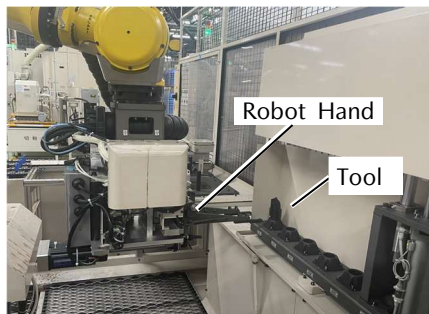


Fig. 12 Tool Change on the Tool Storage

今回導入した刃具自動交換システムでは、加工機からの刃具交換要求信号にて、ロボットハンドを部品搬入用ハンドから刃具交換用ハンドへ自動交換し、加工機内の刃具を取り外し、モジュール内に設けた刃具仮置き台の新品刃具と交換する (Fig. 12)。

刃具交換用ハンドは、製作期間とコストを抑えるため、市販のナットランナーや電動アクチュエーターなどで構成するロボットハンドを開発した (Fig. 13)。

刃具自動交換システムにおける最大の課題は、刃具と加工治具（ベースホルダー）の取付け面に切りくずが付着することで生じる加工不良を防ぐため、従来は作業員が目視チェックによって行っていた作業を自動化することである。刃具取付け面に、交換した刃具を正しく密着させることによって、精度を確保できるが、この部分に切りくずなどの異物が噛み込むと、刃先位置が変化し加

工精度を悪化させる。そこで、ロボットハンドに組み込んだナットランナーを用いて刃具締付時の締付トルクを監視し異常を検出するシステムを導入した。微細な異物については、前述のシステムでは検出が難しいため、刃先交換後の1サイクルのみ仕上径に対し余分に取り代を残した加工を行い、自動機内計測による寸法補正で、刃先ずれ量を補正するようにした。以上の取り組みにより、従来人が実施していた刃具交換の自動化によって、作業工数を0.2人削減した。

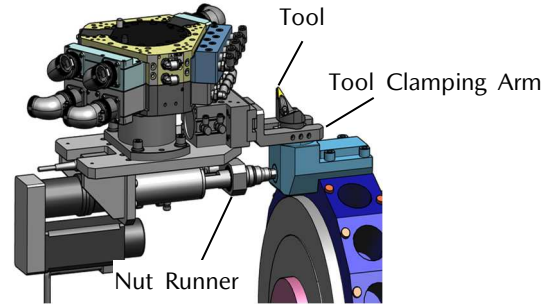


Fig. 13 Robot Hand for Tool Change

これら省人化の取り組みにより、ライン全体として、ロードマップに示す作業工数を1.0人削減した。

5. おわりに

本稿では、エンジンシャフト部品加工ラインの「次世代フレキシブル加工ライン」への取り組みについて紹介した。今回の次世代フレキシブルラインでは、工程のモジュール化とAGV搬送化、工程集約により、柔軟かつ効率的な生産体制を実現した。また、省人化の観点から、単純作業や認知/判断作業、高度スキル作業の自動化を進め、作業人員の削減を達成した。特に、刃具自動交換システムの導入により、精度保証の課題を克服し、加工精度を維持しつつ自動化を実現した。これらの取り組みは、将来のBEV用部品にも対応可能な柔軟性をもち、持続可能な生産体制の構築に寄与するものである。今後もロードマップに沿って技術開発を着実に進めていく。

参考文献

- (1) 杉山ほか：「魂動」デザイン実現に向けた生産技術の取り組み紹介，[マツダ技報, No.34, pp.70-74 \(2017\)](#)
- (2) マツダ：マツダ統合報告書 2024，https://www.mazda.com/content/dam/mazda/corporate/mazda-com/ja/pdf/investors/ir2024j_all.pdf (2024)

■著者■



渡邊 琢也



小松 信介



丸山 正悟



足立 孝貴



北川 廉