

論文・解説

11

車体フレキシブル生産の進化

Evolution of Flexible Body Production System

有泉 雄一^{*1} 小池 慎二郎^{*2} 倉橋 聖矢^{*3}
 Yuichi Ariizumi Shinjiro Koike Seiya Kurahashi

要約

マツダ生産技術では、お客様の期待を超える『商品価値の実現』と市場環境の変化に即応可能な『高効率でフレキシブルな生産』を両立させたグローバルな生産・供給体制の構築に取り組んでいる。2019年には宇品車体工場にその第1号となる次世代ライン Flexible Module Line（以下、FML）を立ち上げた。本稿では、この次世代ラインに組み込んだコンセプト、機能、成果について紹介する。

Summary

Body Production Engineering Dept. has been tackling to establish the global production/supply system. This can realize both “Embodying the product value” that Mazda is pursuing and “High efficient and flexible production system” that can respond the change of market quickly.

In 2019, the first Next-generation production line called “FML” (Flexible Module Line) was launched at the vacant lot of Ujina Body shop B2 line. This article introduces the concept, function, results, and challenges of this new line.

Key words : Production・manufacture, Continuous production, Module, Total cost, Flexible Module Line

1. はじめに

近年自動車業界を取り巻く環境は100年に1度の劇的な変化を迎えている。この変化は過去に経験のない大きさとスピードである。

マツダの車体組立領域においては、ニーズの多様化や市場環境の急激な変化に柔軟に対応するため、汎用システムの導入による多種変量生産ラインを開発し、各拠点に展開してきた。

しかし、「CASE (Connected, Autonomous, Share, Electric)」と呼ばれる新しい領域での技術革新に表れているように、自動車の概念が大きく変わろうとしている。

この動きに対応するためにボディー構造は大きく変わりつつあり、その変化に対応するためマツダの生産ラインを更に進化させることが必要となっている。

本稿では、お客様価値向上のための商品進化を実現し、かつ効率的な生産を実現する次世代ライン Flexible Module Line（以下 FML）について紹介する。

2. 車体生産

2.1 車体ラインの概要

マツダの車両工場は、1台単位で生産する順序を決め、計画とおりに生産する多車種の計画順序生産である。車体工場は、鉄板部品を成型するプレス工場とボディーの塗装をする塗装工場の間にある。プレス工場及び社外部品メーカーで生産された約300点の鉄板部品を、主にスポット溶接で3,500~4,000点接合しボディーを組み立て、後工程である塗装工場へ送る (Fig. 1)。

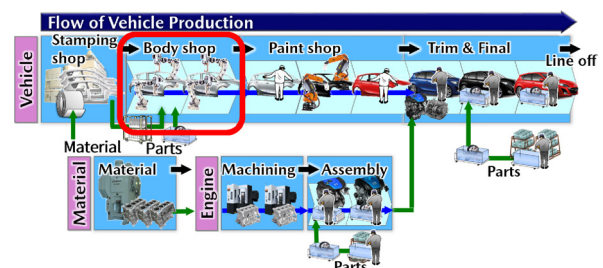


Fig. 1 Body Shop

*1~3 車体技術部
 Body Production Engineering Dept.

2.2 車体ラインの構成

車体生産ラインは大きく分けて3つで構成されている。各部品を小サブ Assembly（以下 Assy）するスモールサブライン、その小サブ Assy 部品やその他の部品を組み立ててアンダーボディーやサイドフレームなどのサブ Assy にするサブライン、そしてボディーにルーフやドアなどのフタ物を組み立てボディーシェルにするメインラインである。

ラインは複数の工程から構成されており、各工程が決められた作業を行い、その作業が完了したら次の工程に部品を送るということを繰り返す（Fig. 2）。

それぞれの加工工程は、部品を位置決め・拘束する治具、部品を接合する溶接ロボットなど、多くの治具・加工設備で構成されている。

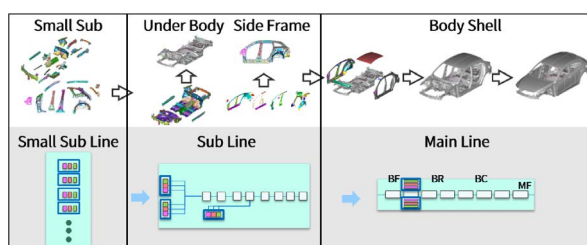


Fig. 2 Configuration of Body Shop Assembly Line

2.3 車体ラインでの加工

車体ラインでは次の加工プロセスを繰り返すことでボディーを組み上げている。

搬送（部品組付）⇒位置決め⇒接合⇒搬送（部品組付）

多数の治具での組付加工を繰り返し1台のボディーを組み上げるため、それぞれの治具において決められた精度で位置決め・接合を行い、高い精度のボディーを生産している。

(1) 部品の位置決め

部品の基準穴に基準ピンを挿し、部品の基準面を受けて、拘束することで部品を正しい位置に固定する。この基準穴、基準面のことを総じて加工基準と呼んでいる。これらの基準ピン、基準面を受ける、押さえるユニットの集合体が“治具”である。この治具には部品を正しい位置に位置決めをする機能（精度）と溶接加工中の部品位置を保持する機能（剛性）が求められる。

(2) 接合

約300点の部品を1台のボディーに組み立てるための主要な接合方法はスポット溶接であり、溶接機を保持したロボットにより行われる。スポット溶接は2枚または3枚の鉄板部品を両側から電極で挟み込み、加圧し、電流を流すことで発熱溶融させる接合方法である。

3. 車体フレキシブル化の取り組み

車体組立ラインのフレキシブル生産技術は、1990年前後に電動ロボットの性能向上と適用技術の強化に伴い飛躍的に進歩した。C-BAL（Circulation of Body Assembly Line）と称する多種変量生産ラインを防府工場に構築し1992年に生産を開始した。C-BALのコンセプトは“車格や車型に関係なく繰り返し生産できる車体組立ライン”である。そしてそれを達成するための重要な考え方が標準ボディー構造である。生産技術のみで高効率生産を実現するのではなく、開発部門と十分な相互理解と協力の下商品性を阻害せず、生産しやすいボディー構造を開発し、それを標準構造として長期的に改善・進歩させることによりフレキシブル生産を実現した。このC-BALのコンセプトが現在のフレキシブル生産のベースとなっている⁽¹⁾。

2000年初めには、C-BALの発展形としてサブラインであるアンダーボディー・サイドフレームラインのフレキシブル化にも取り組んだ。その過程でさまざまな多種変量生産技術を開発し、各拠点に展開した。その後、これらの技術に改善や見直しを加え、現在に至っている⁽²⁾。

このように新技術を取り入れながら車体組み立てラインのフレキシブル生産技術を進化させてきたが、標準ボディー構造を元に繰り返し生産できるラインすなわち汎用性が高いラインというコンセプトは一貫してきた。

4. 現状の課題

ボディー構造の標準化を前提とした従来の汎用システムでは対応しきれない変化に対応するために、コンセプトを更に進化させた次世代のフレキシブル生産を具現化していく必要がある。

4.1 商品進化への対応

従来のフレキシブル生産ラインは“ボディー構造の標準化”の上に成り立っている。しかし、近年では自動車の電動化によるバッテリー搭載、車両重量の増加による衝突安全対応の変化、エンジンと電動でプラットフォームが異なる等、ボディー構造は標準化の枠組みから外れつつある。

商品の進化が多車種混流生産ラインに与える影響は下記のとおりである。

- ・新構造と現行工程のアンマッチ
- ・部品点数の増加による組付け時間の不足
- ・加工量増加による加工時間の不足または工程数不足
- ・材料の高強度化による治具機能や溶接機の能力不足

従来の“標準”から外れたボディーを生産するために現行ラインの工程設計をやり直し現行車を含めた工程の追加／改造に投資と時間をかけて対応してきた。しかし、この手法では現行車の生産、品質に影響を出すケースも

ある。

現在起こっている進化は従来の生産ラインの枠組みの中では対応できなくなりつつあり、また現行ラインでの生産成立を優先させると商品に制約をかけてしまう可能性が出てきた。

課題は高品質で安価な多種類の商品をタイムリーに供給するという考え方はそのままに、現行車生産に影響を及ぼさずに短期間で商品の進化に対応し生産できるようにすること。ボディ構造の進化に柔軟に対応でき、進化し続けることが可能な生産ラインを構築することである。

4.2 台数変動への対応

昨今のSUV需要に表れているように消費者のニーズの変化は量・スピードが従来とは比較にならない。

多車種の計画順序生産に取り組んでいるマツダでは同一ライン内の車種の組み合わせの台数比率変更（縦スイング）、ラインをまたいだ生産車種の追加や組合せの変更（横スイング）により対応してきた。しかし、ライン改造のボリュームが増え、また長年繰り返す中で生産ラインごと（拠点）で構成に違いが生じてきた。同一車種を複数ラインに導入するケースでラインごとに対策内容が異なるケースが出てきた。

縦・横スイングの対応に費やす追加投資とリードタイムをミニマムにしなければならない。

課題は現状ラインごとに決まっている生産車種と車種ごとの生産台数の容易な変更を可能とすること、縦スイングと横スイングにより制約無く短期間で要求と通りの車種と台数が生産できる生産体制とすること。

4.3 高精度化

マツダ車の魅力である魂動デザインを実現するためにはボディ精度の向上が不可欠である。例えば、魂動デザインの特徴にデザインハイライトの流れの美しさがあるが、これには外板部品の面の流れのつながりが重要となる（Fig. 3）。

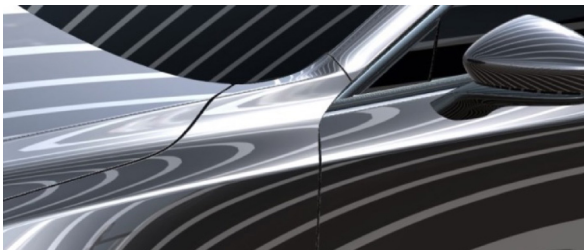


Fig. 3 Design Highlight

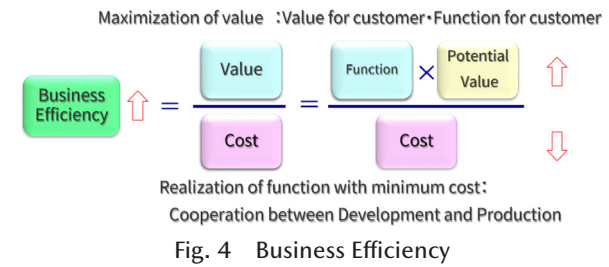
外板部品は1部品ではなく、サイドフレームアウター、フロントフェンダー、ドア、ボンネット等、複数の別々の部品があり、これらを一枚のパネルであるかのように部品と部品を段差なく、隙間を均一に組み立てて、面の

流れを表現する。前述のようにボディはおおよそ300点の非常に多くの部品で構成されており、これらの全てを従来よりも高精度で組み立てる必要がある。

5. FMLでの取り組み

マツダのモノづくりのベースである“最高の効率で最高の価値をお客様にお届けする”というビジネス効率（Fig. 4）の考え方を念頭に置いて最新の多車種変量車体ラインのフレキシブル生産のレベルアップに取り組んだ。

以下に、4.1節、4.2節のFMLの取り組みを紹介する。



5.1 固定と変動の再定義

開発の目指す理想構造（コモンアーキテクチャー構造）と生産の目指す理想工程（フレキシブルライン構想）を徹底的にすり合わせ、製品・生産工程の固定要素と変動要素を再定義した（Fig. 5）。

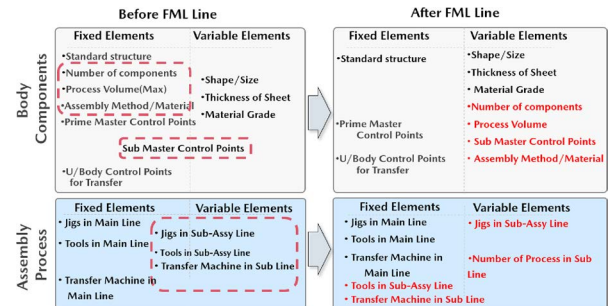


Fig. 5 Fixed Elements and Variable Elements

ボディ構造の“固定と変動”は、商品進化によるボディ構造の変化に制約を与えない様、固定要素を減らし変動要素を拡大した。

例えば部品点数と加工量の上限については、これまで固定要素と位置づけ工程を汎用化してきた。FMLでは変動要素と定義した上で工程の汎用化に取り組み、新構造・新機能への対応能力を大幅に広げることが可能とした。

生産工程の“固定と変動”は、拡大させたボディ構造の“変動”を工程で吸収ができるよう、以下に取り組んだ。

部品点数、加工量のような量の変化に対してはメインライン、サブラインの加工量の上限を考慮して前工程のsmallサブラインで吸収する。つまりsmallサブラ

インの数を変動とし増減させることで対応する。

また、工法や材料の変化に対してもスモールサブラインをモジュール単位で変更することで対応する。これによりメインライン、サブラインを都度大きく改造することなく治具などの専用部分のみの変更で対応することを可能とする。

5.2 サブラインの並列化

車種追加時に工程改造の多いサブラインの在り方について見直した。

これまではメインラインとサブラインを直列としたライン構成として変化に対して工程や加工機の追加などで対応してきた。“変動”を増やしていくためにサブラインの加工工程をゼロベースで見直し加工効率の最適を導き出した。

サブラインは部品の増加に伴いサイクルタイムの中で部品組付けや搬送の時間の割合が増加し加工時間が短くなる傾向にある。サブラインの加工時間を増やす対応として加工時間によって工程数を決めるのではなく必要な加工を同じ工程で完結させ、加工時間に対してはサブラインを複数（並列）もつことで対応するライン構成とした。そうすることでメインライン同等の加工時間を確保し、より少ない工程数かつ省スペースでの展開を可能とした (Fig. 6)。

“変化”に対して工程を増減することなく対応が可能となり、対応アイテム削減にもつながる。

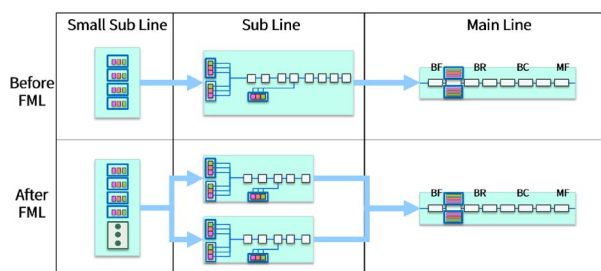


Fig. 6 Parallelization of Subline

6. FML の具体像—3つのモジュール

6.1 治具モジュール

FML では5章で述べた“固定と変動”の考えに基づき治具を車種専用として車種の切替を装置によって行う設備構成とした。これを治具モジュールと定義した。

切替装置 (図はターンテーブル) 上に A 車, B 車それぞれの専用治具を配置し, 装置が回転することにより車種の切替を行った (Fig. 7)。

これにより, 従来の多車種共用治具から車種ごとの専用治具とし部品形状とそれに付随する加工基準の変化に柔軟に対応し加工の最適化を図るとともに改造時に混流する他の車種への影響を排除する。

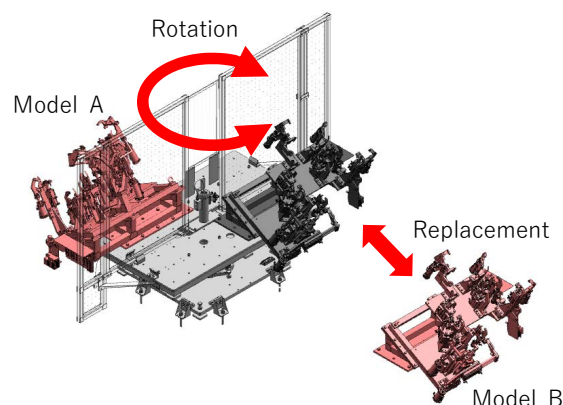


Fig. 7 Jig Module

治具モジュールとしての設計, 入替の効率化を図るために以下の標準化に注力した。

- 治具構造の最適化
- 治具と切替装置間の接続部の標準化
- 治具制御のソフトの標準化
- 配線配管の標準化
- 治具搬送時の搬送の標準化

これらを水平展開することで FML 展開後には複数ラインへのコピー展開時の図面完全流用も可能とした。

また, 本方式は治具の入替が前提の方案であるため, 治具の軽量化を必須として取り組んだ。過去のさまざまな車種・今後の構造予測により Assy 単位と加工基準の比較をおこない, それぞれの工程ごとに治具サイズと治具を位置決めする装置の対応範囲を決定した。専用の治具は角パイプをつなぎ合わせたフレーム構造を基本として不要な機能を削ぎ落とし, 構成要素ごとの機能の最適化を行った。

併せて近年各段に進歩した解析ツールを活用して治具の移動時の変形, 自重変形, 及び加工時の治具の変形の変形解析を繰り返し行い, 精度と剛性を満足した軽量構造を決定した。また実機の変化測定も実施し, 解析の確からしさの検証と解析条件の整備も合わせて行い解析精度も向上させた。

6.2 汎用セルモジュール

変動である加工量を吸収するためのスモールサブ工程においては最大限汎用化することに取り組んだ。治具モジュールと汎用溶接ロボットという最小限の設備での構成である。この工程を実現するために下記に取り組んだ。

- 加工ロボットの最適配置の標準化
- 加工機器のモジュール化

最大限の加工効率となる治具とロボットの配置について複数部品の加工動作シミュレーションを繰り返し行い汎用性の高い配置を割り出し, 加工量に合わせて1台又は2台設置可能とした。限られたスペースで最

大限の加工効率を目指し、省スペースかつ高い汎用性を実現した。これを汎用セルモジュールと定義した (Fig. 8)。

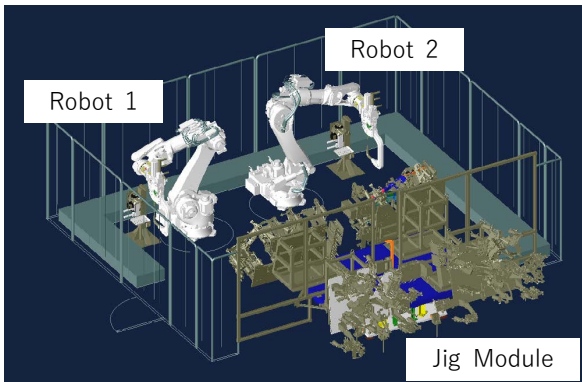


Fig. 8 Commonized Cell Module

6.3 工程モジュール

車体のメインラインは車体のラインの中では汎用化が進んでおり、製品の進化に対して大きく工程改造をすることのない高い汎用レベルを維持してきた。しかし今後、構造、新工法、加工量の大きな変化 (進化) により、現状の生産ラインでは対応できないことが必ずでてくる。メインラインについてもラインへの加工機能の追加は改造による対応ではなく工程単位のモジュールの追加で対応する。これを工程モジュールと定義した。現行ラインの生産をしながらモジュールの追加対応を可能とし、面積を変えずに実現するためにラインの加工効率を上げて工程を集約し新工程を間に挟み込むことが可能な形を準備した。

工程モジュール実現のために以下に取り組んだ。

- ・ 搬送システム高速化による加工可能時間拡大
- ・ ロボットと溶接機とラインコントローラーの接続制御の見直しによる溶接高速化
- ・ 加工部位ごとにグルーピングし、加工機をモジュール化 (Fig. 9)
- ・ モジュール化した加工機の組み合わせにより高密度配置 (Fig. 10)

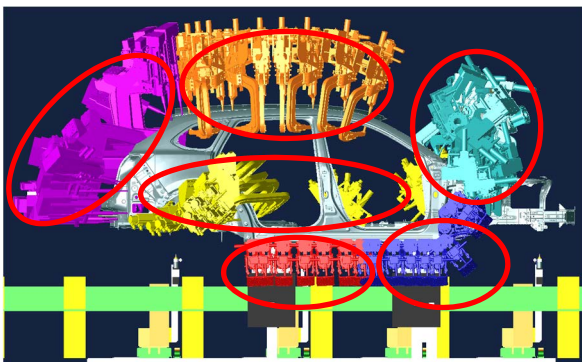


Fig. 9 Modularization for Each Processing Portion

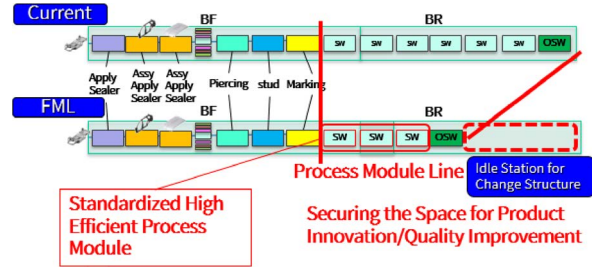


Fig. 10 Process Module

以上に述べた3つのモジュール構想により、製品の進化を妨げることなく、高効率の生産を実現する仕組みを作り上げた。

本取り組みにより変化に強い体制になったことと合わせて量産準備における期間、投資及び工数の面で大幅な低減を達成することができた。Fig. 11 に各対応における低減率を示す。

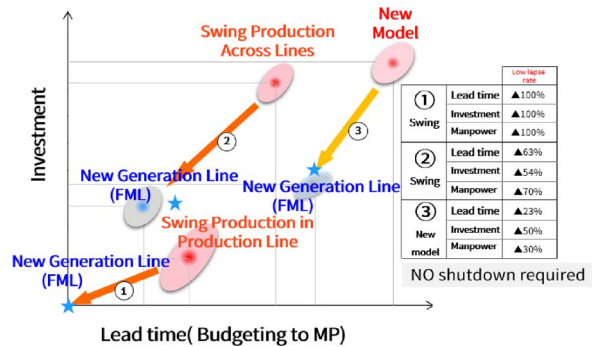


Fig. 11 Effects of FML

同一ライン内での生産台数の変更 (縦スイング) については期間、投資、工数全ての低減率が従来比で100%、すなわち対策不要となった (Fig. 11-①)。

生産ラインの移管や追加 (横スイング) については従来比で期間が63%、投資が54%、工数が70%の低減を達成した。(Fig. 11-②) これにより想定以上に大きな市場のニーズの変化が起こった際でも従来よりも短時間で車を届けることができるようになった。

新車導入においては期間23%、投資50%、工数30%の低減を達成 (Fig. 11-③) し、新商品をより早くお客様に届けることができる。

2020年時点で次世代車体ラインであるFMLの1本目を宇品車体工場に展開し1車種目としてCX-30を量産中である。更に、2車種目としてMX-30の導入を完了し量産を開始した。

7. 今後の課題

今後FMLの効果を最大限に発揮するために全生産拠点のFML化を進めていく。その課題は同体質性 (Global One Engineering) の維持である。FMLの展開が進む中で新技術の開発や車体新構造の採用など量産準備の要件は

常に変化し続ける。また、全拠点への展開はこれまでもそうであったように、立ち上げタイミングや拠点による部品の搬入単位の違い（社内 Assy の範囲の違い）など、拠点特有の条件により他ラインとは異なる対応を取らざるを得ない事態も考えられる。FML の効果を維持するためには、そのような大きな変化に対しても同体質性を維持・管理していく仕組みを作ることである。

8. まとめ

今回の取り組みにより高効率でフレキシブルな車体組み立てラインを具現化することができた。しかし、この生産体制が真価を発揮するのは各生産拠点に FML が展開された時である。グローバル展開の中で更なる改良と技術開発に取り組み、より容易かつスピーディーに変化に対応できるラインに進化させていく。

参考文献

- (1) 前島ほか：多種変量車体組立ライン，マツダ技報，No.11 (1993)
- (2) 五島ほか：フレキシブル車体組立ラインの進化，[マツダ技報](#)，No.23, pp.177-181 (2005)

■著者■



有泉 雄一



小池 慎二郎



倉橋 聖矢