

特集：MAZDA MX-30

13

マルチパワーソース車における外観品質の造り込み Built-In Appearance Quality in Multi-Power Sources Vehicle

石井 哲雄^{*1} 梶原 彰人^{*2} 吉崎 真吾^{*3}
Tetsuo Ishii Akito Kajihara Shingo Yoshizaki
江口 覚^{*4} 中塚 勇輝^{*5} 山田 孝行^{*6}
Satoru Eguchi Yuki Nakatsuka Takayuki Yamada

要 約

MX-30 はガソリンをパワーソースとするマイルドハイブリッド車と、バッテリーをパワーソースとする BEV (Battery Electric Vehicle) の 2 車種を展開するマツダ初の量産モデルである。それぞれのパワーソースで、共通のデザインコンセプトである「Human Modern」を実現するためには、パワーソースによらず同じ外観品質の完成車を造り込む必要があった。そのため、図面段階から開発・生産技術・製造部門で車体・車両構造差による課題抽出と解決に向けた活動を進め、両パワーソースともに量産車においてねらいの外観品質を実現した。

本稿では、パワーソースにより異なる構造に対して、共通の外観品質を実現するために取り組んだ車体領域の生産技術開発とそのプロセスを紹介する。

Abstract

MX-30 is Mazda's first mass-produced model that develops a Mild Hybrid vehicle that uses gasoline as its power source and BEV (Battery Electric Vehicle) that uses a battery as its power source. In order to realize the common design concept "Human Modern" for each power source, it was necessary to built-in the same appearance quality regardless of the power source. Therefore, from the drawing stage, development and production engineering, production division proceeded with activities to identify and solve the challenges due to differences in body and vehicle structure, and both power sources achieved the desired appearance quality in mass-produced vehicles.

This paper introduces the production technology development and its process that we worked on to realize common appearance quality for structures that differ depending on the power source.

Key words : Battery, Electric, Hybrid, Die, Cam, Stress, Plat Form, Spot Welding

1. はじめに

地球温暖化の抑制のため、世界各国で CO₂ 排出量の削減に向けた取り組みが進められている。日本においても 2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことが宣言された。マツダも LCA (Life Cycle Assessment) 視点で CO₂ 排出量削減に取り組んでいる⁽¹⁾。この実現に向けて、自動車のパワーソースの多様化による、適材適所の対応が可能となる開発が必要となってくる。生産技術としても、パワーソースの多様化に伴う構造変更柔軟に対応しつつ、「走る喜び」を感じるクルマ造りを進化させていく必要がある。本報告では、マルチパワーソース化に伴う、車体領域の課題と、その解決に

向けた取り組みについて紹介する。

2. ボディーサイドのデザイン等価実現と金型造り

2.1 ボディーサイド構造とプレス量産準備

MX-30 にはマイルドハイブリッド車と BEV の仕様が有り、Fig. 1 に示すようマイルドハイブリッド車ではボディーサイドの左側に給油口・右側に開口なし、BEV ではボディーサイドの右側に給電口・左側に開口なしの設定となる。そのため、サイドフレームアウターに開口設定あり・なし、左右で開口形状違いが発生する。開口のあり・なしにかかわらず、開口周辺における面位置精度とデザイン面品質を保証し、デザイン面の流れを意図ど

*1~6 車体技術部

Body Production Engineering Dept.

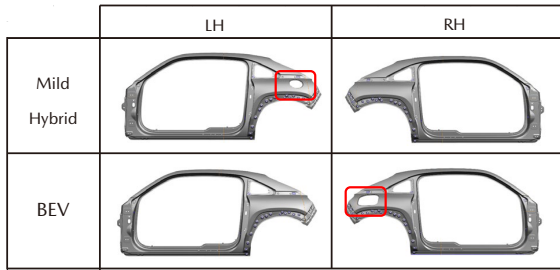


Fig. 1 Type of Side Frame Outer Panel

おりにすることが必要となる。

そのため、従来のプレス工法を前提にすると、開口あり・なしそれぞれで金型を準備する必要があった（詳細は2.2参照）。MX-30以降の車種でもマルチパワースourceの設定が想定されるため、今後の共通要素技術として、開口あり・なしパネルを同一型で生産することに挑戦した。

2.2 プレス工法と金型切替え構造課題

開口のあり・なしパネルを同一型で生産するためには、成形有無を切り替えできる金型構造にする必要がある。従来工法では開口の成形を、①絞る⇒②切る⇒③曲げるという3工程で行っている（Fig. 2）。

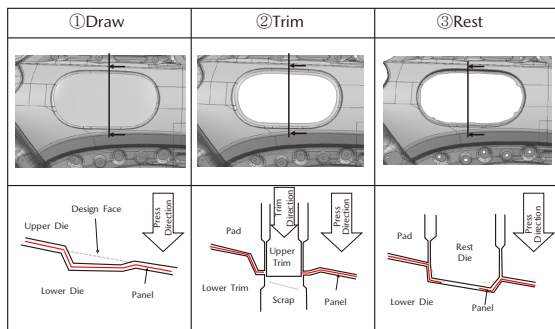


Fig. 2 Conventional Method

開口のあり・なしパネルを同一型で成形するためには、①絞る工程で同じデザイン面を成形し、②切る⇒③曲げるという2工程で開口の成形をする必要がある（Fig. 3）。

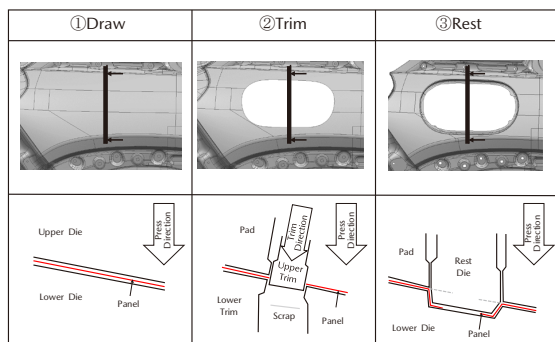


Fig. 3 MX-30 Method

従来工法は開口ありパネルを加工する際、絞る工程でプレス上下方向から切断できる方向に形状を作っている。MX-30の工法は、絞る工程で開口あり・なしパネルの同

じデザイン面を成形することから、開口ありパネルはデザイン面上を切断する必要がある。切断面品質と金型耐久性を満足させるには、デザイン面に対して垂直の方向から打ち抜く必要があるため、プレス加工方向に対して斜めに加工するカムという機構（Fig. 4）を金型に配置する必要があり、金型構造が複雑化する。



Fig. 4 Difference between Previous and MX-30 Structure

また、従来工法に対して少ない工程数で開口形状を成形することから、Fig. 3 ①のように絞る工程で形状を付与できないため、デザイン面品質保証の難易度が上がる。

これら、金型構造の成立性とデザイン面品質保証についてMBD (Model Based Development) を駆使した解決事例を報告する。

2.3 金型構造の成立

開口部の切断面品質と量産での金型の耐久性を保証するため開口を成形する切刃に加えて開口あり・なしを切り換える機構、更にカム機構を収めるスペースを確保しながら、周辺にある既存金型部品とのレイアウトを成立させることが課題となった。レイアウト成立のために金型構造の肉厚や補強リブの位置をむやみに変更し、金型の強度が低下すれば、プレス加工時に発生する力に耐えられず金型破損のリスクが高まる。また、金型破損に至らなくとも金型の剛性が低下し過剰な変形が発生すると、開口部のカエリやデザイン面ひずみなどの品質不良の原因となる。そこで、パネル品質・金型部品のレイアウトが成立する要件を明らかにし、開発・デザイン部門と共創することで、車両要件やデザイン面のつながりを損なうことなく切り換え機構とカム機構が成立する充電口の位置を実現した。金型強度や剛性については、強度解析を用いてプレス加工時に金型に発生する応力や変位量を分析し、金型構造の肉厚やリブ配置の最適化を行った（Fig. 5）。特に成形時にパネルを保持する役割をもつ板押さえ（Pad）については、パネルの保持に必要な圧力源の荷重が金型に加わることを考慮し、圧力源の配置バランスと構造の最適化を行うことで、同一金型で開口あり・なしのサイドフレームアウターを生産する機構を実現した。

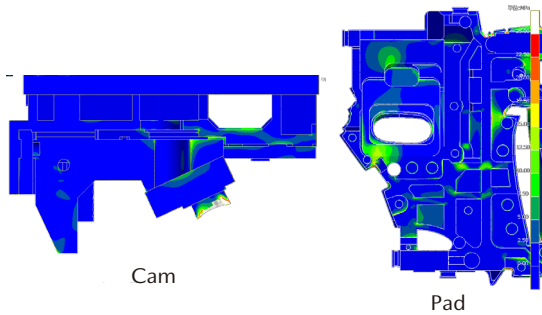


Fig. 5 Stress Distribution of Structure (Cam, Pad)

2.4 デザイン面品質の等価性確保

デザイン面品質を保証するために大きな課題であったのが、開口コーナー部 (Fig. 6 の A 部) に発生する外板面ひずみ (以下ひずみ) である。ひずみはパネルに光を反射させ、Fig. 6(a)に示すデザイン面データに対する乱れのあり・なしを評価する。Fig. 6(b)は成形シミュレーションを使って成形後の面位置を再現し、光を反射させた図である。

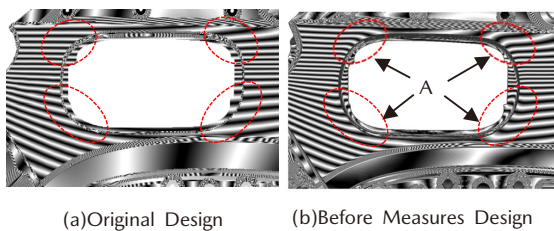


Fig. 6 Reflection of Light (Before Taking Measures)

開口の成形過程でパネル内部に発生する応力が駆動力となり、デザイン面を変形させひずみとなる。また、成形完了後の変形が局部的になるほど大きなひずみとして認識される。従来工法は絞る工程と曲げる工程の2工程でひずみの起因となる応力を抑制しているが、MX-30の工法は曲げる工程のみで応力を抑制する必要がある。しかし、曲げる工程だけでは抑制が難しく、適正値を超える応力が発生する (Fig. 7)。(1) 成形過程で適正な応力値内にすること、(2) 成形完了後に内板部の広範囲で均等に応力を分布させることで局所的な変形を抑制する、という考え方の基、製品形状工夫による対策を講じた。

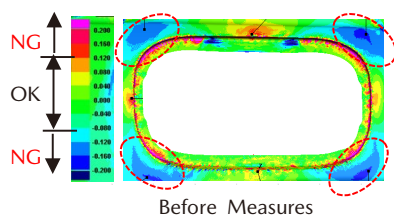


Fig. 7 Panel Minor Stress (GPa)

(1) 応力値の抑制

成形時に発生する応力は Fig. 8 に示す外廓コーナー曲率 (R)・フランジ長さ (L)・成形深さ (D) に起因することがこれまでの活動から分かってきた。

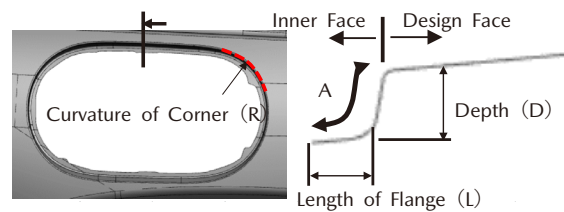


Fig. 8 Part Name

適正な応力値内にするためには成形量を減らすことが有効であり、フランジ長さ・深さの最小化、開口の外廓ラインのコーナー部曲率の拡大が必要だった。また、マツダ量産モデル初の給電口採用にあたり、シール性能や組付け性等の課題もあり、開発・デザイン部門とともに細部に至るまですり合わせを行うことで、製品形状を造り込み、適正な応力値に近づけた。

(2) 変形の抑制

従来は (1) の取り組みでデザイン面品質保証することができていた。しかし、MX-30の工法では適正な応力値内まで至れなかった。そこで、新しいアプローチとして成形完了後の応力分布に着目した局所的な変形の抑制に取り組んだ。

デザイン面の変形を抑制するためには、成形完了後の変形を内板面 (Fig. 8 の A 部) の中で留めることが重要である。従来の製品形状はフランジ面からデザイン面の間で稜線が1本しか通っておらず剛性が低い。そのため、コーナー部のように成形過程で発生する応力が高い部位では、成形完了後に局所的な変形を発生させてしまう。そこで、コーナーからストレート部にかけて稜線を追加し剛性を付与した。それにより、Fig. 9(b)に示すよう内板部における成形完了後の応力分布を広範囲で均等にし、局所的な変形を抑制した。

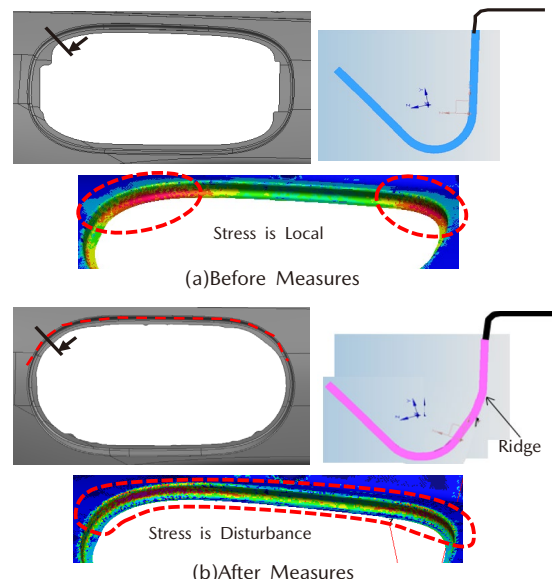


Fig. 9 Changes of Production & Residual Stress

上記取り組みにより、成形過程での応力緩和と成形完了後の変形抑制することに成功した。これらを量産金型に織り込み、Fig. 10 に示すよう同一型でMX-30の開口あり・なしのデザイン面品質保証を実現した。

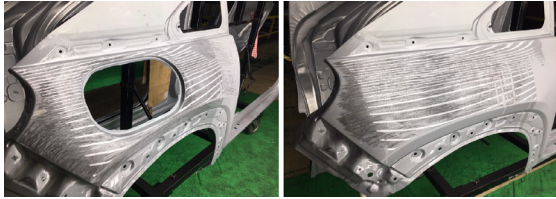


Fig. 10 Reflection of Light

3. マルチ PF における等価品質課題と取り組み

3.1 PF 構造

MX-30 にはマイルドハイブリッドとバッテリーの 2 種類のパワーソースがあり、マイルドハイブリッド車については、これまでのガソリン車の PF を踏襲した構造となっている。一方、BEV はバッテリー搭載性を考慮した PF 構造となっている。そのため、これら 2 つの PF 構造では Fig. 11 に示すように、中央部に位置するフロントフロア構造、フロントシート下の構造に大きな差がある。それぞれのパワーソースにおいて、完成車でねらいの外観品質を実現するためには、車両構造差を踏まえた PF の造り分けが重要となる。

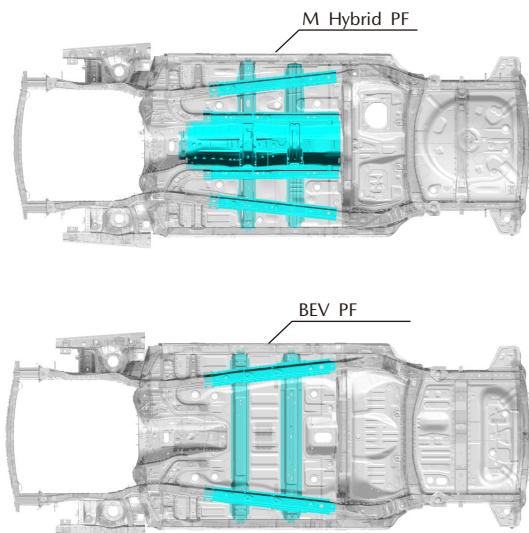


Fig. 11 PF Structure Comparison

3.2 車体 PF 組立ライン概要

車体の PF 組立ラインは大きく 2 つに分けることができる。1 つはそれぞれの部品の関係を治具と呼ばれる要具で位置決めを行い、スポット溶接・プロジェクション溶接などの加工を行う Underbody Tack (Fig. 12, 以下, UT) 工程、もう 1 つは UT 工程にて部品の相対位置関係が固まった PF に対し、ねらいの剛性・強度を出すための加工を行

う Underbody Respot (Fig. 13, 以下, UR) 工程である。

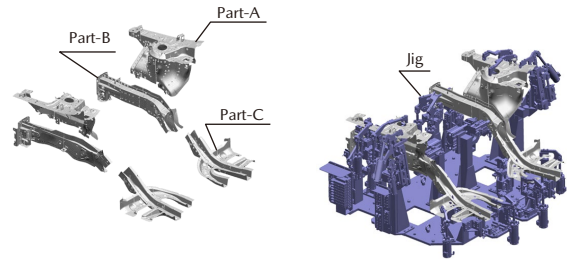


Fig. 12 Example of the Underbody Tack Process

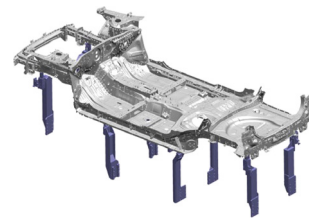


Fig. 13 Underbody Respot Process

3.3 等価品質実現における課題と取り組み

(1) 事前評価・ボディ精度ねらい値の決定

まず、重量差のある 2 種類の車両構造で同じデザイン・外観品質を実現するためのボディ精度のねらい値算出を実施した。先述したように、マイルドハイブリッド車と BEV では PF の構造が異なる。そのため、構造からくる剛性差によりバッテリーなどの重量物搭載が精度変化につながるものが懸念された。車両で精度差の出ないボディ剛性値を開発部門と協働で決定し、CAE 上でボディ状態の剛性差を抑える活動を実施した。指標にボディの自重たわみを置き、目標値を差異 0.1mm 未満として構造開発を進めた。PF の前後 4 点を拘束し、自重を与えたときの PF 中央部変位量を Fig. 14 に示す。この結果から分かるように、差異が 0.1mm 未満とボディ剛性差を抑えることができた。バッテリーなど重量物搭載による精度変化を無視できるボディ剛性・構造を造り込むことができたため、それぞれの仕様で同じ精度目標を設定し、目標が達成できる沿い面精度や打点順序などの良品条件設定を行った。

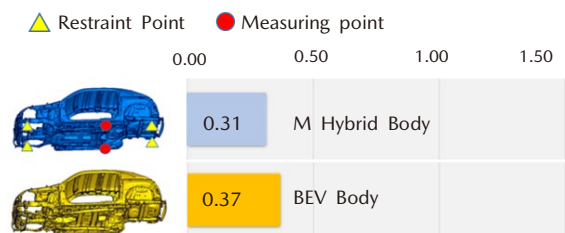


Fig. 14 Self-Weight Analysis

(2) 事前評価・車体工程良品条件設定

マイルドハイブリッド車の PF は現行量産車と共通部分

が多い。そのため、共通部分の精度を活かし新規部分の精度ねらい値・工程要件を決めることから着手した。以降、新規部品の精度ねらい値や工程要件の決め方をフロントフロアのサイドシル部を事例として説明する。Fig. 15 に示すサイドシルインナーが新規部分で、それ以外が共通部分である。新規部品の沿い面ねらい値や打点順序を設定するために、共通部品の形状データをCAEに入力した。また、部品位置決め・拘束条件については事前構想に基づいた設定とした。変数は、Fig. 15 ① a, b 図示のスポット溶接順序と新設部品であるサイドシルインナーの精度とし、CAEでの寸法精度評価を行った結果をFig. 16 に示す。Fig. 16 に示した偏差のカラーマップからも分かるように、下のb打点を先に加工した方が0.5mmほどサイドシル上部のフランジ面精度が良い結果となった。メカニズムとして、微小な沿い面精度差と断面形状の重心位置によって差が生まれることを突き止め、同構造部全てへ対策を展開した。次に新設部品であるサイドシルインナーの精度ねらい値を決めた。このように、精度品質の注力部位を検証し、マイルドハイブリッド車のPF良品条件（溶接順序・部品精度等）を設定した。BEVのPFも同様に、これまで設定したマイルドハイブリッド車のPF良品条件（主に部品精度ねらい値）をInputとして、部品精度ねらい値・打点順序・加工時の保持位置などの良品条件を決めた。

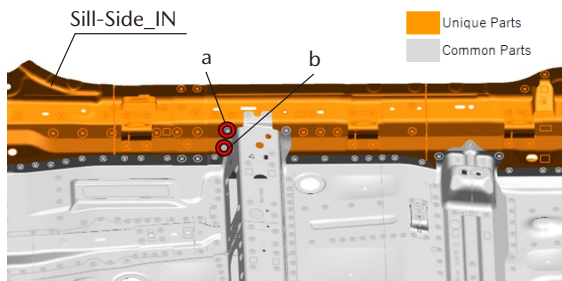


Fig. 15 Parts Condition and Spot Welding Point

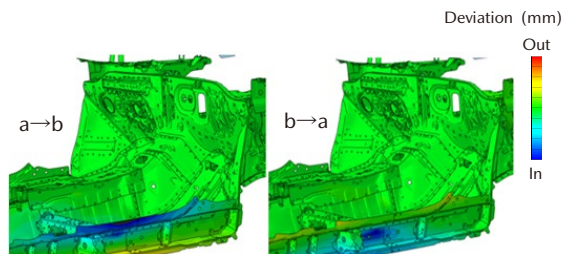


Fig. 16 Verification Result of Welding Sequence

(3) 実機検証

事前評価で決めた各良品条件を、試作段階以降の現物で検証するプロセスをつくり、項目ごとに実機検証を繰り返した (Fig. 17)。工程ごとに、良品条件が再現されていることを確認し、加工後の精度測定を実施した結果、

UT工程ではマイルドハイブリッド車・BEVのPFともねらいの精度を達成できていることが確認できた。しかしながら、UR工程においてBEVのPFのみ溶接加工による精度変化が生じた。変化が生じた部位はPF前方に位置するフロントボディーと呼ばれる構成単位で、車両上方へ変位する挙動を示した。フロントボディーは外観品質に大きく寄与する部位のため重点管理していたのだが、車体組立の途中工程におけるPFの構造差による精度影響が当初の想定より大きかった。そのため、BEVのPF構造における良品条件の見直しに向け、UR工程における精度変化の要因追求に取り組んだ。

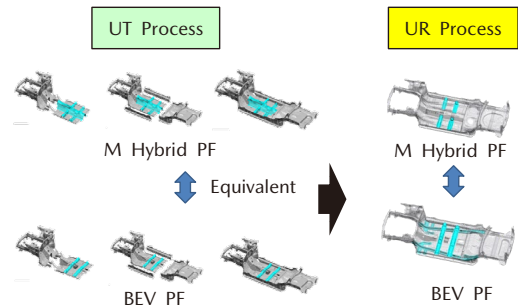


Fig. 17 Verification Process

(4) 精度変化要因調査

精度を決める要具（治具）・部品・加工の因子を切り分けて精度変化検証計画をつくり実施した。要具については事前に可搬式3次元測定器を用い、ねらいの精度となっていることは確認済みのため、沿い面精度・加工について重点的に調査を行った。精度変化が最も大きいフロントボディー前方を定点測定箇所とし、スポット溶接1打点ごとに計測を行った。UR工程は4工程あるが、そのうちの1工程の計測結果をFig. 18 に示す。Fig. 18 から分かるように、スポット溶接の11打点目より精度変化が発生している。

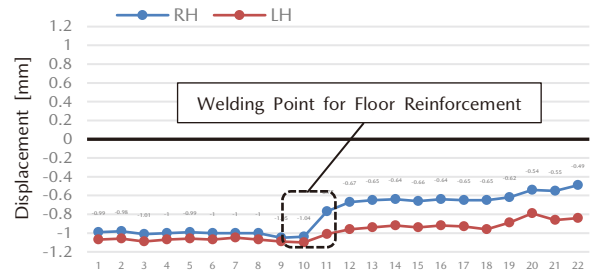


Fig. 18 Displacement Amount per Welding Point

11打点目はFig. 19に示すフロアレインフォースメントと呼ばれる部品とボディーの骨格となるフレームとを溶接している打点である。残りの3工程においても、フロアレインフォースメントに関係する打点で精度変化が確認できた。

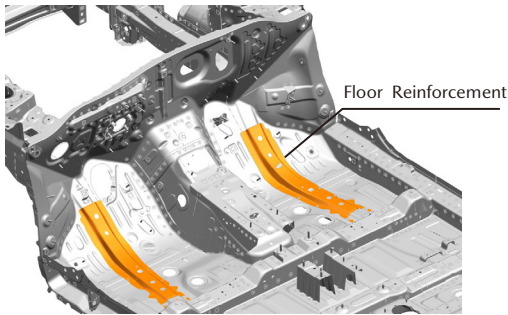


Fig. 19 Layout of Floor Reinforcement

このように、工程内での測定により精度へ影響を与える部位はつかめたが、この精度変化が溶接熱によるものか、沿い面精度によるものかを切り分けるために、スクリュー（ボルトアップ）検証を実施した。スクリューはスポット溶接部を溶接の代わりにボルトアップをしておくことで、熱の要素を排除した検証を行うことができる。この検証においてもスポット溶接検証と同様に、1打点ごとの精度変化を計測した。その結果、スクリュー検証では精度変化は0.2mm以下でほぼ変化しないことがわかった。続けて、沿い面隙の影響を検証した。沿い面隙を鉄板で詰めた状態でスクリュー検証とスポット打点検証を行い、精度変化を計測した。隙詰めスクリュー・スポット溶接検証では0.1mm以下の変化とわずかに減少したものの、大きな効果は得られなかった。以上の検証結果より、溶接熱収縮が構造剛性に勝っていることが要因であることをつかんだが、制御因子ではないため直接対策はできない。そこで、制御因子である、沿い面精度・打点順序・部品拘束条件を振って対応策を検証した。

(5) 施策

沿い面精度と打点順序を合わせてCAEを活用し検証した。Fig. 18で11打点目より変化していることに着目し、寄与度が高いと思われる沿い面、打点をグループ分けし、実験計画法を用いて解析した。CAEで相対的に比較して、精度変化が最小になる条件を抽出、実機で確認した。何度かPDCAを廻し、最適沿い面精度を導き、ねらいを決め、部品修正を行った。同様に打点順番も最も変化が少ない打点順番を導き工程へ反映させた。更に、量産期間中に安定した品質の車両精度を維持し続けるには工程でコントロールして、外乱を受けにくくする必要がある。そのため、UR工程での精度変化を予測したUT工程での部品位置決め・拘束条件、UR工程での形状規制により、電気のPFにおいてもねらいの寸法精度を実現し、同等の外観品質を実現した。

(6) 車両まで含めた外観品質の造り込み

ボディサイドパネルでデザイン面品質を保証し、ボディでねらいの等価精度と外観折り合い精度を達成した後は、車両完成までの外観品質確認に取り組んだ(Fig. 20)。塗装乾燥炉での熱影響分析ではドア等蓋物の外観折り合いを検証し、ねらいの折り合い精度を達成でき

るように造り込んだ。車両組立では、エンジンとモーター、ガソリタンクとバッテリーの搭載場所と重量差による精度差が出ないように、関係部署が一致団結して早期段階から検証活動を行い、MX-30の外観品質を造り上げた。

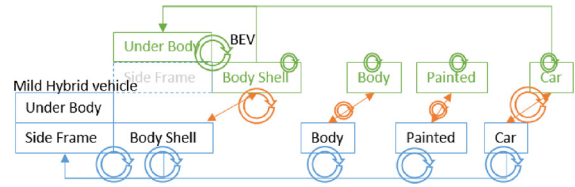


Fig. 20 Quality Control Process in 2-Power Sources Vehicle

4. おわりに

マツダが2050年にカーボンニュートラル化を実現する上で、マルチパワーソースに対応したクルマ造りを加速していく必要がある。中でも、マツダの独自性を訴求できるデザインを全ての仕様で再現し、お客様に感動をお届けし続けることを目指した活動を行っている。

MX-30では全ての仕様で同じデザイン・寸法精度を再現するために多くの苦労と期間を要した。今後のマルチパワーソース化拡大に向けて、溶接による精度変化予測と構造・工程への事前対策織り込みを行うための技術開発・プロセス構築を関連部門一丸となって進めていく。今回の取り組みから見てきた知見を技術へ転換することより、マツダの強みである「魂動デザイン」の進化へとつなげていき、お客様に更なる感動をお届けできるよう挑戦を続けていく。

参考文献

- (1) マツダサステナビリティレポート 2020

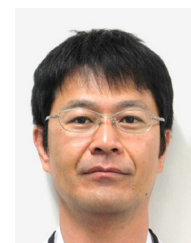
■ 著 者 ■



石井 哲雄



梶原 彰人



吉崎 真吾



江口 覚



中塚 勇輝



山田 孝行