

特集：MAZDA CX-60

26 新型 CX-60 のボディー構造を実現する車体工程・工法開発

Body Assembly Process and Method Development Realizing Body Structure for CX-60

王 強^{*1}

Kyo Ou

足立 圭^{*2}

Kei Adachi

井上 翼^{*3}

Tsubasa Inoue

小林 正治^{*4}

Masaharu Kobayashi

島内 仁士^{*5}

Hitoshi Shimauchi

要 約

車の電動化による環境性能と走行性能の両立のため、軽量化は新型車開発における課題の一つである。新型車の CX-60 では、この課題解決とともに車の商品価値を飛躍的に向上させるため、ボディーのフレーム間を強固に接合し、ボディー質量低減が可能なインナーフレーム構造を開発部門と共創した。2019 年宇品工場で立ち上げた Flexible Module Line（以下、FML）⁽¹⁾ をベースにし、2021 年に新しいモジュールを追加した FML を防府工場に展開した。このインナーフレーム構造実現に向け、デジタルツールでの工程・品質の作り込みにより、新構造対応のための工程モジュールを開発した。また接合課題に対しては新しい片側接合法である“Closed Section Spot Welding”（以下、CSSW）を適用することで解決した。

これらの取り組みにより、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』を両立できるグローバルな生産システムを実現した。本稿では、この実現に向けた取り組みを紹介する。

Abstract

To combine the environmental and driving performance with electrification of cars, body weight reduction is one of the key issues for developing new models. CX-60, we have co-created the Inner-frame structure, which connects body frame components more firmly, with R&D dept. It enables us to solve the issue and to improve the value of the model dramatically. And we have developed FML (Flexible Module Line) in Hofu plant in 2021 that was based on the FML developed in the Ujina plant in 2019 with added “New modules”. To realize the Inner- Frame structure, we developed new process module by building up the assembly process and body quality with digital tools for new architecture, then solved by adopting new one-side welding method “Closed Section Spot Welding” for body jointing problem.

With those activities, we have established the global assembly system which satisfies both “Product Value” beyond customer’s expectation and “Highly Efficient and Flexible Production” corresponding to the market change quickly. This article introduces the challenges for these activities.

Key words : Flexible Module Line, Mixed-Flow Production, Inner Frame Body, In-direct welding

1. はじめに

自動車業界を取り巻く環境は 100 年に 1 度の変革期を迎えている。「CASE (Connected・Autonomous・Shared・Electric)」に代表される環境変化に直面しており、電動化へのニーズが近年急速に高まっている。その中で、BEV, PHEV への駆動用バッテリーセルの搭載により、車

の質量は増加傾向となっている。

マツダは、車の環境性能と走行性能の両立のため、質量低減が大きな課題の一つととらえている。車体組立領域では、この課題解決に向け開発部門と共創し、CX-60 で新たなボディー構造を実現するとともに、机上での工程機能と品質の作り込みを行い、生産として QCD (Quality・Cost・Delivery) を最大化できる生産ラインを実現した。

*1～5 車体技術部

Body Production Engineering Dept.

2. 新世代ボディー及び新ライン概要

2.1 新世代ボディー

これまでのボディー構造において、基本骨格のストレート化、マルチロードパス構造、環状構造化に取り組み、軽量・高剛性なボディーを実現してきた。CX-60では、更なる性能向上の実現のため、各フレーム接合部の強化や部品板厚の最適化等によって、①身体拡張能力を引き出す剛性の連続性、②快適な乗り心地と上質な静粛性、③世界最高レベルの衝突安全性能という三つの価値をもつ軽量・高剛性ボディーを目指した。

これまでのボディー構造は、車体側面にあたるサイドフレーム、車体上部のルーフをそれぞれアウターパネルとレインフォースメントをサブアセンブリ後、ボディーフレーミング工程にてアンダーボディーと接合する。そのため、アウターパネルによって隠れるフレーム同士の接合ができなかった。そこでCX-60は、アンダーボディーに対してサイドフレーム、ルーフのレインフォースメントをボディーフレーミング工程で先に接合し、その骨格にアウターパネルを位置決め・接合するインナーフレーム構造へ変更した (Fig. 1)。アウターパネルセット前に溶接工程を追加することで、環状構造部に対してスポット溶接の自由度を高めることができる (Fig. 2)。そしてCAE解析によって導いた接合効率のより良いポイントに対して、重点的に接合点を追加でき、その結果としてプレス部品の板厚最適化による軽量化、車体強度・剛性アップを実現した。

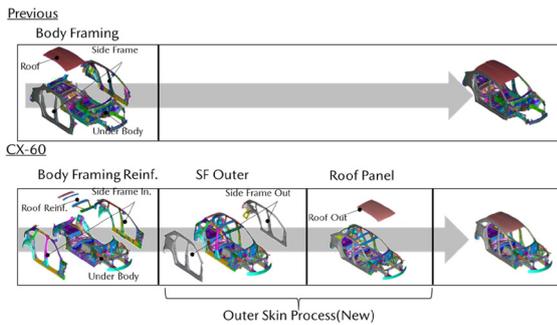


Fig. 1 New Module for Outer Skin Process

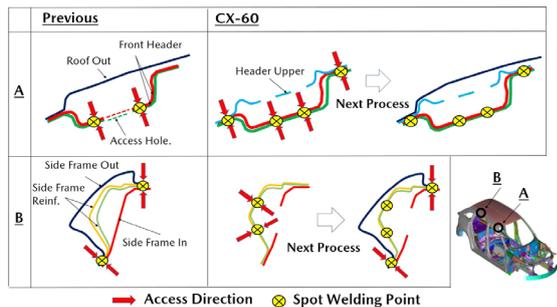


Fig. 2 Reference Section of Spot Welding

2.2 新ボディーフレーミングライン

ボディー性能と生産効率の向上を両立させるため、開発部門との共創を行った。これまでのボディー構造の車とCX-60を同一生産ラインで混流生産を実現するため、ボディーフレーミングラインに対して新コンセプトのアウターパネルの投入と位置決め・接合工程 (アウタースキン工程モジュール) の追加のみでグローバル拠点でも生産可能とした。

ここからは、CX-60の生産を高品質かつ短時間で実現するため、三つの取り組みについて各章にて紹介する。

(1) 3章では、フレキシビリティ進化と商品価値を高めるため、机上段階での加工効率 (加工速度・加工可能時間) 最大化の取り組みについて紹介する。

(2) 4章では、柔らかいアウターパネルをねらいの位置で接合し、滑らかにつながる面の連続性を実現させるボディー寸法精度保証の取り組みについて紹介する。

(3) 5章では、インナーフレーム構造における理想断面実現のため、新しい片側接合工法である Closed Section Spot Welding (以下 CSSW) を開発・適用について紹介する。

3. フレキシビリティ進化と生産効率向上の取り組み

3.1 フレキシビリティの進化

マツダは、多品種少量生産を実現する考え方の下、複数車種を同一ラインで混流し、少量でも効率の高い操業レベルを維持できる生産システムを構築してきた。その上で、更なるフレキシビリティ向上のためFMLを構築し、商品機能の進化、生産台数の変動により柔軟に対応できるようにしている。具体的には、生産設備を①治具モジュール、②セルモジュール、③工程モジュールの三つのモジュール概念で構成、モジュールの組み合わせや追加により構造進化への柔軟な対応を実現した。

①治具モジュールでは、車種専用の治具を切り替える仕組みを取ることで、製品形状の変動の吸収を可能にしている。②セルモジュールでは、スモールサブラインをセル化し増減することにより、加工量や部品点数の変動の吸収を可能にしている。また、ボディー構造の大幅な変更に対しても③工程モジュールを既設のラインに追加することで対応可能としている (Fig. 3)。

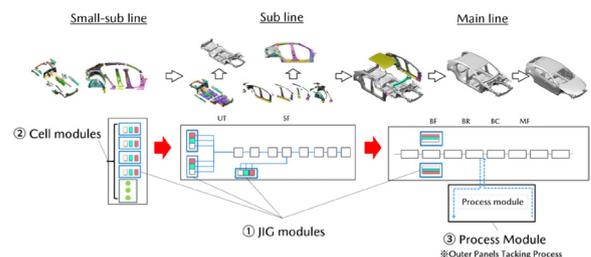


Fig. 3 Module Concept

更に、このモジュール構想を有したライン構成をグローバルに展開することによって、拠点間での生産車種移管が短期間で可能となり、台数比率変動に対する生産車種編成の変更を容易にした (Fig. 4)。

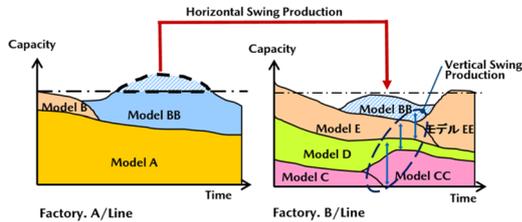


Fig. 4 Mazda Flexible Production Line Concept

CX-60 の導入にあたっては、接合強度向上のため、各フレーム部を接合する工程と、インナーフレーム構造へアウターパネルを組み付ける工程機能を追加する必要がある。

各フレーム部を接合する工程については、既存工程を最大活用するため、新構造に対応しつつこれまでの治具モジュールと入れ替え可能とする構造に進化させた。特に構造実現については、製品設計初期段階から開発部門と共創、各フレーム同士の接合位置や形状を工夫し、これまでの工程仕様が活用できる構造を製品形状に織り込んだ。

インナーフレーム構造にアウターパネルを位置決めする工程機能については、既存工程に工程モジュールとして追加できるようにするため、工程の小型化、汎用化を進めた。治具モジュールについては、4章で紹介する工程検証を実施し、必要最小限な加工基準ユニットに絞り込むことで小型・軽量化を実現した。更に、これまでのボディーフレーミング工程のような大型汎用装置での治具モジュール入れ替えではなく、汎用ロボット・NC装置を活用した治具入れ替えと、治具モジュールの位置決めを実現した。

これらの対策により、環状構造の閉断面化を実現し高剛性化に寄与するとともに、これまでのボディー構造の車とCX-60が混流生産できる生産ラインを実現した (Fig. 5)。

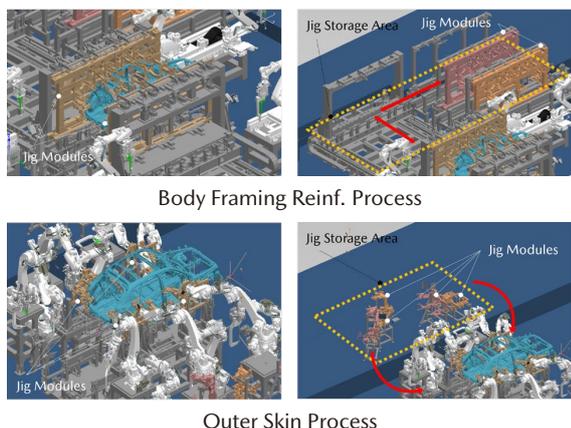


Fig. 5 Process Module Comparison

3.2 加工効率の追求

新たな構造や加工量の増加に対し、加工工程の追加が必要になるが展開スペースには制約がある。そこで、加工効率を向上させ、既存ラインと同等の展開スペースにするため、(1) 加工速度の向上と、(2) 加工時間の最大化の視点で取り組んだ。

(1) 加工速度の向上

溶接作業ロボット動作速度向上のため、通信速度に着目、これまで上位通信のPLC (Programmable Logic Controller) 経由だった溶接指令をロボットコントローラーからの直接指令に見直した。加えて、ロボットの動作を構成するサーボモーターの軸移動量最小を理想状態と定義、ロボットプログラムの教示要領を改定した。これらの取り組みにより、加工速度は33%向上した。

(2) 加工時間の最大化

以下三つの施策に取り組みし、加工可能時間を最大化した。

①ロボットインターロック待ち最小化：溶接工程においては複数のロボットが同時に加工作業を行うが、加工量そのものに差があれば待ち時間が発生する。また、動作範囲が干渉する領域においては相互インターロック回路を設定し、一方のロボットが干渉域での作業を完了するまで他方のロボットは干渉域外で作業完了を待たなければならない。これらの待ち時間を極小化するため、溶接機形状の標準化・小型化を進め、加工可能部位の選択肢を拡大した。

②密集配置化：加工密度を向上させるため、ロボット動作シミュレーションを活用しロボット動作範囲の干渉最小となるロボット配置を検討し、加工量の平準化と複数部位が同時加工できる密集配置レイアウトを実現した (Fig. 6)。

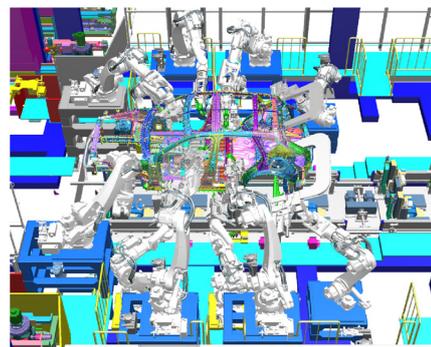


Fig. 6 Robot Concentrated Layout

また、搬送時間を短縮し、タクトタイム内の加工可能時間を拡大した。これまでの搬送措置は、スライド装置と昇降装置を一体化させた構造にてボディーを次工程へ搬送してきた。この昇降機能を位置決め機能装置側へ移管、搬送時間から昇降にかかっていた時間を削減した。加えて、昇降ユニット削減による軽量化により、搬送設

備の高速化を実現した。これらの三つの対策により、工程内の加工可能時間を 16%改善した。

加工速度の向上と加工可能時間最大化の取り組みにより、生産ラインの単位面積当たり加工量は 17%向上し、従来ライン同等のスペースへ設備展開を可能にした (Fig. 7)。

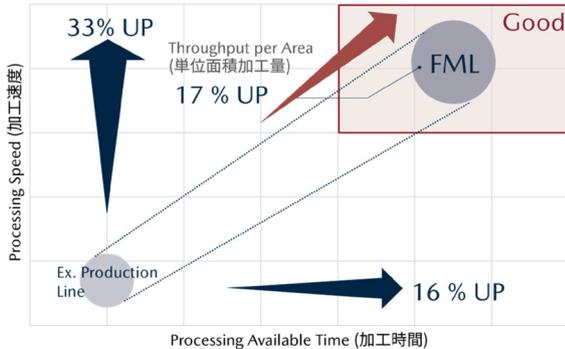


Fig. 7 Double Core Efficiencies Result

3.3 机上評価精度の向上

CX-60 の新車開発と並行し、工程のフレキシビリティと加工効率を突き詰めるためには、シミュレーションで検証をやりきり、これを実機で 100%再現できる検証プロセスが不可欠である。実現に向け、デジタルツイン環境を構築し、工程設計の精度向上を図った (Fig. 8)。



Fig. 8 Digital Twin Concept

3D モデルの再現精度向上については 3D スキャン技術を活用し、これまで机上再現が難しかった工場内の配線・配管やロボット付帯のケーブル類を評価環境に再現した。これにより干渉確認精度を向上させ、ロボット回避動作の最小化やタクトタイムの能力・精度向上を実現した。

これと並行し、設備を制御する PLC 動作環境についても机上に再現した。これまでは現場確認しかできなかったラインコントロール全体での動作成立性・タクトタイム検証が可能になった。本システムの活用により、製品設計と並行した工程設計が可能となった。今後は展開ラインを拡大させ、量産早期化によるお客様へのタイムリーな商品のお届けに貢献していく。

4. ボディー寸法精度保証の取り組み

魂動デザインを忠実に再現できるボディー寸法精度保証のため、ボディーの骨格であるインナーフレームに組み付けるアウターパネルの位置決め・拘束のための基準 (以下、加工基準)、治具解放後寸法精度保持に必要な溶

接打点位置と順序の適正化に取り組んだ。ボディー側面にあるサイドフレームアウターパネルは板厚 0.7mm の鉄板で作られた 12Kg を超える大型薄板部品である。また、ドア開口があり、部品自体の剛性が低いため、自重の影響により容易に変形する。この部品を 3次元空間内で寸法精度保証するためには、重量・剛性を考慮した加工基準の設定が重要となる。これまでの車では、水平状態で治具にサイドフレームアウターパネルをセットし形状を整え、そこに剛性の高いレインフォースメントを投入・接合することで高い寸法精度 ($\pm 0.1\text{mm}$) を実現してきた (Fig. 9 左図)。一方、インナーフレーム構造の CX-60 は、サイドフレームアウターパネルを実車状態で保持し、インナーフレームに組み付ける構造であり、従来同等の寸法精度を確保するためには、加工基準と溶接打点位置と順序などの良品条件を新たに設定する必要があった (Fig. 9 右図)。

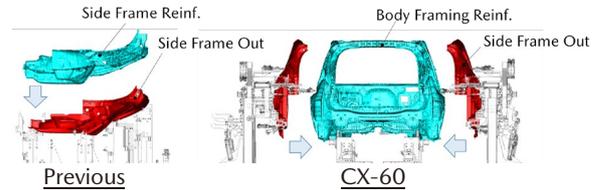


Fig. 9 Locating Method of Body Side Outer Panel

以降に事例を踏まえ、ボディー寸法精度をねらいどおりに作るための良品条件の決め方と工夫を記述する。

4.1 加工基準の位置と数の決め方

サイドフレームアウターパネルは車両側面の外板部品であり、ドアやリフトゲートなどと合わせ連続したデザインを構成しているため、その寸法精度が非常に重要となる。そのためには、ドアやリフトゲートを取り付けるヒンジ面は $\pm 0.1\text{mm}$ 、ドア開口、リフトゲート開口との境目であるパーティングラインの面精度は $\pm 0.2\text{mm}$ が目標となることを、蓄積した知見より導出した。この目標を達成する加工基準の位置と数を CAE 活用により決定した。CAE 検証の結果、位置決めした時点でリアドア開口のパーティングラインの面精度が重力の影響を受け、面の位置が車の下方向に 0.3mm、前後方向に 0.3mm 精度変化 (青色) した (Fig. 10 左図)。サイドフレームアウターの精度目標を達成させるために、寸法精度変化を抑制できる最も効果のある位置を CAE で再検証し、加工基準を設定した。その結果、Fig. 10 右図のカラーマップのように、実車状態 (組み付け姿勢) においても、寸法精度に変化がなく (緑色)、リアドア開口のパーティングラインの面位置を $\pm 0.1\text{mm}$ 以内で実現させることができた。

他の部位・部品・工程に関しても、同様のプロセスを踏むことで、精度目標を達成できる加工基準の位置と数を設定した。

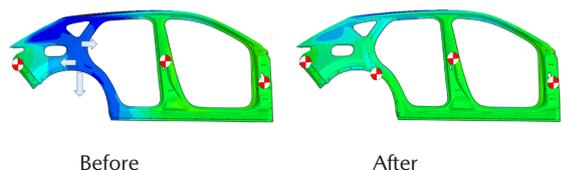


Fig. 10 Measures Against Self-Weight Deformation

4.2 寸法精度保持の溶接打点位置と順序の決め方

4.1で紹介した活動により、加工基準を机上にて決定し、治具内でねらいの寸法精度を保持することが可能となった。次のステップは、ねらいの寸法精度を保持したままサイドフレームアウターパネルをインナーフレームに組み付けられる溶接打点位置と順序を決定することである。ただし、1工程で加工できる溶接打点数には限りがあり、該当工程のタクトタイム、ロボット等の動作範囲も考慮し、かつねらいの寸法精度を実現できる打点位置と順序を検証し設定する必要がある。

ここでは、リフトゲート開口のパーティングラインの面精度保証を例として、CAEを用いて溶接打点位置と順序を決定した活動について紹介する。

Fig. 11に示すa, b, cの溶接打点はリフトゲート開口の寸法精度保証に寄与することがこれまでの車の検証結果より得られていた。一方、ラインタクトの制約から全ての溶接打点を同工程内で同時に加工することはできないため、CAEで溶接打点位置、順序による寸法精度保証の検証を行った。Fig. 12(1)のカラーマップに示すように、打点bを先に溶接した場合、リフトゲート開口部に0.3mm寸法精度変化があり(赤枠部)、治具解放前後で寸法精度が変化すること(青色)が分かった。逆にFig. 12(2)打点aを先に溶接した場合、精度変化がほとんどない(緑色)。また、Fig. 12(3)(4)打点cの有無で、リフトゲート開口部の寸法精度変化がなく(緑色)、この工程での寸法精度保証に関して、溶接打点cの寄与度が低く、その他の工程への移管を行った。

このような検証により、タクトタイム内の加工量の制約やロボット動作範囲を考慮した上で、ボディの寸法精度目標達成に必要な溶接打点位置と順序を決定し、工程設計へ折り込んだ。

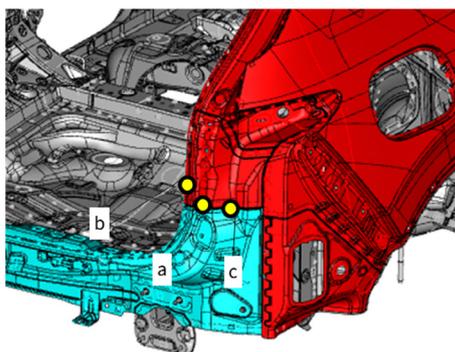
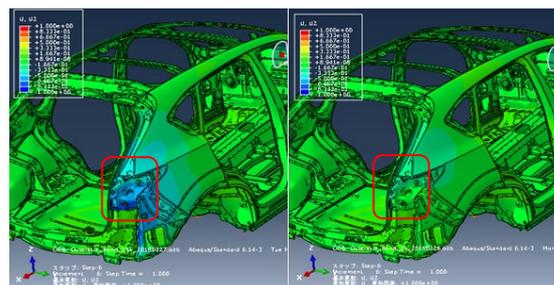
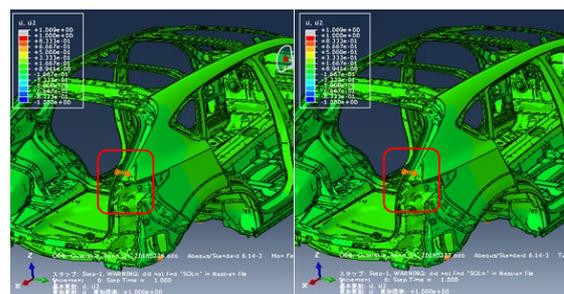


Fig. 11 Spot Welding Positions



(1) b⇒a (2) a⇒b



(3) a⇒b With c (4) a⇒b Without c

Fig. 12 Verification Result of Welding Sequence

4.3 ボディー精度作り込みの実機検証

机上で決めた寸法精度保証の良品条件に基づき、実機検証を行った。ボディ寸法精度の結果だけでなく、CAEへ入力する実測値や溶接打点ごとの寸法精度変化量等も合わせて実機計測した。その結果、サイドフレームアウターパネルのリアドア、リフトゲート開口部において、寸法精度変化が0.2mm以下であり(赤枠部)、机上で決めた加工基準、溶接打点位置と順序の有効性を確認できた(Fig. 13)。

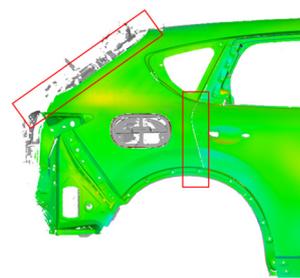


Fig. 13 Verification Result of Body Assembly

以上のように、実際の量産ラインでの現象を想定し、それを再現した解析モデルで机上検証することで、魂動デザインを忠実に再現できた。今後も、本活動により得た技術をベースに、更なるお客様の期待を超えるボディ実現に向けて挑戦し続けていく所存である。

5. ロバストな CSSW 溶接工法開発

5.1 インナーフレーム構造の接合課題

インナーフレーム構造の採用により、レインフォース

メント同士の強固な接合ができる。一方で、アウターパネルとレインフォースメント間の接合は閉断面となり、スポット溶接機での接合ができなくなる。通常の接合面を両側から挟み込むスポット溶接で加工するためには、アウターパネルを接合可能なフランジ位置まで延長させる必要があり、ねらいのサイドシル断面積がとれないこと、また質量増加につながる課題があった (Fig. 14)。

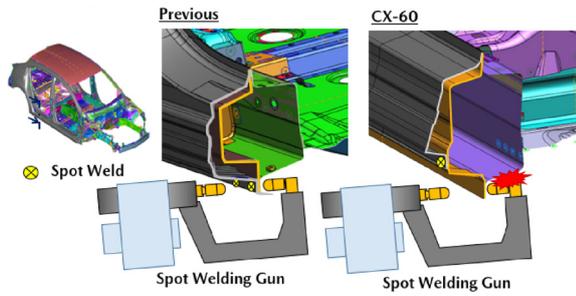


Fig. 14 Ideal Sill-Side Section

これを新たな片側接合法である Closed Section Spot Welding を開発することで解決した (Fig. 15 右図)。

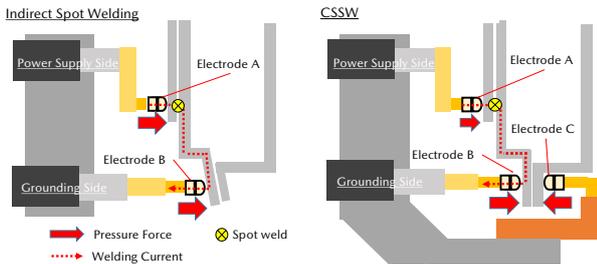


Fig. 15 Comparison of Indirect-Welding & CSSW

5.2 CSSW 工法について

インダイレクト溶接は、電極の両極を同一平面に配置した閉断面の抵抗溶接である (Fig. 15 左図)。これら抵抗溶接の品質は、3 大条件である①溶接電流、②通電時間、③加圧力で決まる。インダイレクト溶接は、通常のスポット溶接とは異なり、加圧力が部品剛性に依存するため、加圧力をいかにコントロールするかが課題となる。アース側での部品の弾性変形により溶通電経路が安定せず、溶接品質安定化のため溶接条件のチューニングが必要となる。結果、溶接品質が不安定となり、溶接部の防錆性能低下のみならず、溶接時間延長による加工効率の低下と無駄な電力消費につながる。

CSSW 溶接では、インダイレクト溶接の課題である加圧力の安定化のため、部品変形・溶接面のばらつきを抑制し、通電経路と電流密度の安定化を図った。コンセプトとして、アウターパネルをフレームと接合する給電側は低加圧力、サイドシルフランジのアース側は高加圧力のクランプ構造で安定した溶接品質が確保できるよう開発を進めた。品質工学手法を用いた基礎実験により、各

電極の先端形状・先端径や管理項目を決め、良品条件を明らかにした (Fig. 16)。スポット溶接同様、シンプルな管理で溶接性としてのロバスト性が確保できた。この導いた良品条件を基に、社外協力メーカーとともに、CSSW 溶接機を共同開発した。

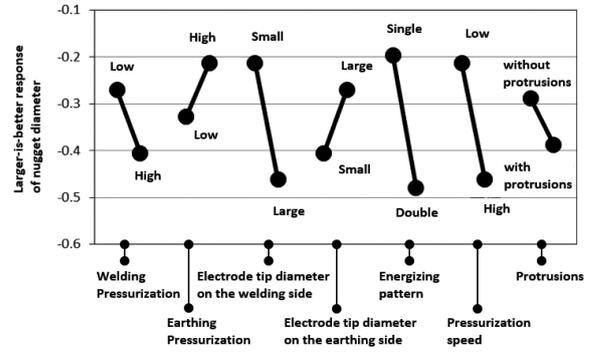


Fig. 16 Signal-to-Noise Ratio, S/N Ratio for CSSW

5.3 CSSW 工法の接合要件化

更なる CSSW 溶接品質のロバスト性確保のために、接合要件化と構造への織り込みを開発部門とコンカレントに進めた。CSSW は給電部からアース部の電極間に電流を分流させずに効率よく接合点を発熱させられるかがポイントとなる。そのため、CSSW の給電部とアース部のピッチを定義し、サイドシルフランジ内におけるスポット溶接位置と CSSW アース位置のピッチを定め、接合要件に反映した。

これらの取り組みの結果、電極と接合部品との接触面積、電流密度が安定し、従来のスポット溶接と同等レベルでの加工速度を実現できる工法を実現した。CSSW の採用は車の軽量化、高強度・高剛性化などの性能アップに貢献できる工法であり、CX-60 ではサイドシル部の適用としたが、良品条件の一般化を行い、更なる適応箇所の拡大に取り組んでいく。

6. おわりに

今回の取り組みにより、これまでのボディー構造と CX-60 の BOP 構造のボディーを同一ラインで高効率フレキシブルに生産する車体組立ラインを量産に結び付けることができた。多大な協力を得て H2 FML ラインを立ち上げることができ、今回ライン展開にご協力いただいた工場・開発・生産技術及び社外協力メーカー各位の方々へ深く感謝の意を表します。

参考文献

(1) 有泉雄一ほか：車体フレキシブル生産の進化、[マツダ技報, No.37, pp.63-68 \(2020\)](#)

■著者■



王強



足立圭



井上翼



小林正治



島内仁士