

特集：新型CX-9

12

## 新型CX-9でのボディー寸法精度育成技術の開発 Development of Virtual Dimensions Precision Control Technology

島田 知広\*<sup>1</sup> 高橋 大樹\*<sup>2</sup> 岡田 又治\*<sup>3</sup>  
Tomohiro Shimada Daiki Takahashi Mataharu Okada

### 要 約

車体技術部では、軽量・高強度ボディーを実現するため、精度・成形難度の高い高張力鋼板の生産技術開発に取り組み続けている。新型CX-9のボディーを構成する高張力鋼板の使用率は62%となり、精度品質の造り込みがより難しくなることが予測された。そこで、プレス部品から車体アッセンブリー領域までをCAEでつなぎ、量産準備を実機と机上で効率よく行う精度造り込み技術の開発を行った。この技術では車体アッセンブリー精度を計算できるシミュレーションが不可欠で、実機での検証結果とシミュレーション結果を比較しながらシミュレーションの精度を向上する必要があった。このシミュレーション開発とCX-9で行ったボディー寸法精度の造り込みをプレス領域から工程を追って紹介する。

### Summary

We continue wrestling for the production engineering development of the high tension steel sheet having high precision, molding relative difficulty to realize light weight, a high strength body in the we bodies technology. The high tension steel sheet (more than 590MPa) utilization of new CX-9 became 62%, and it was predicted that a finish of the precision quality became difficult more. Therefore I connected the body assembly domain from press parts in CAE and developed the precision finish technique to perform mass production preparations efficiently at an actual machine and on desk. The simulation that could calculate body assembly precision was indispensable in this technique, and it was necessary to improve precision of the simulation while comparing the simulation result with the inspection result with the actual machine. I chase a process from the press domain and introduce a finish of the body dimensions precision that reached in this simulation development and CX-9.

### 1. はじめに

クルマでまず目に留まるのがデザインであり、マツダは魂動デザインと称して、今にも動き出しそうな生命感や日本の美を形にしている。同時に、ボディーは走りと安全性を実現する骨格でもある。走る、曲がる、止まるといった基本性能はもちろん、安全性能、軽量化においても、ボディー構造が重要となる。これらの性能をねらいどおり実現するためには、ボディー骨格の精度やエンジンやシャシー、サスペンションの取り付け位置精度を保証することが不可欠である。近年、地球環境や安全性に対する要求が高まっており、それを実現するためには、高強度・高剛性と軽量化を両立したボディーにしなければならない。年々高まるこれらすべての期待に応えるために、寸法精度育成技術の開発に取り組んだ。本稿では、車両性能を最大限引き

出すために、ボディー構造と造り方の追及による技術開発を紹介する (Fig. 1)。

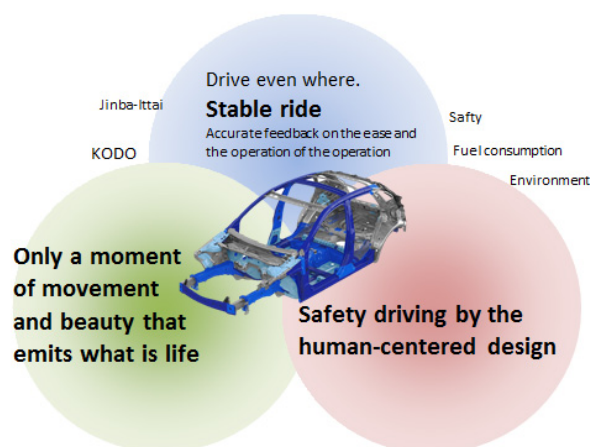


Fig. 1 Vehicle Performance of Body

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

## 2. 車両性能とボディー精度保証

### 2.1 車両性能とボディー精度のつながり

ボディーが実現すべき3大性能は、操縦安定性、衝突安全性、NVH性能である。これらの性能に加え、外板パネルの面品質と寸法精度は、ダイレクトにデザイン意匠に影響する。これらの車両性能とデザインは、寸分の狂いもないボディー精度の良さがないと成立しない。ボディーを構成するプレス部品一つ一つの精度と、それらを接合する車体アッセンブリ精度が重要で、接合時の応力、自重からくる変形を最小限に抑えるように、寸法精度を造り込んでいく必要がある。

### 2.2 ボディー精度保証プロセスの進化

従来のプロセスでは、プレス部品・車体アッセンブリそれぞれでの並列育成及びゲート管理を実施し、CAEも活用するが実パネルの精度に応じた修正ありきの品質の造り込みを行ってきた。今回のプロセスでは、従来よりも早い工程設計段階からCAE技術を活用し、プレス部品、車体アッセンブリをそれぞれ並列育成することに加え、ボディー領域全体としてつながりを持たせ、相互補完しながらねらいの寸法精度を実現していくプロセスとした (Fig. 2)。

このプロセスに沿って、3章で「プレス部品のCAE精度向上」、4章で「接合部のすり合わせ精度向上」、5章で「車体アッセンブリ精度向上」について述べる。

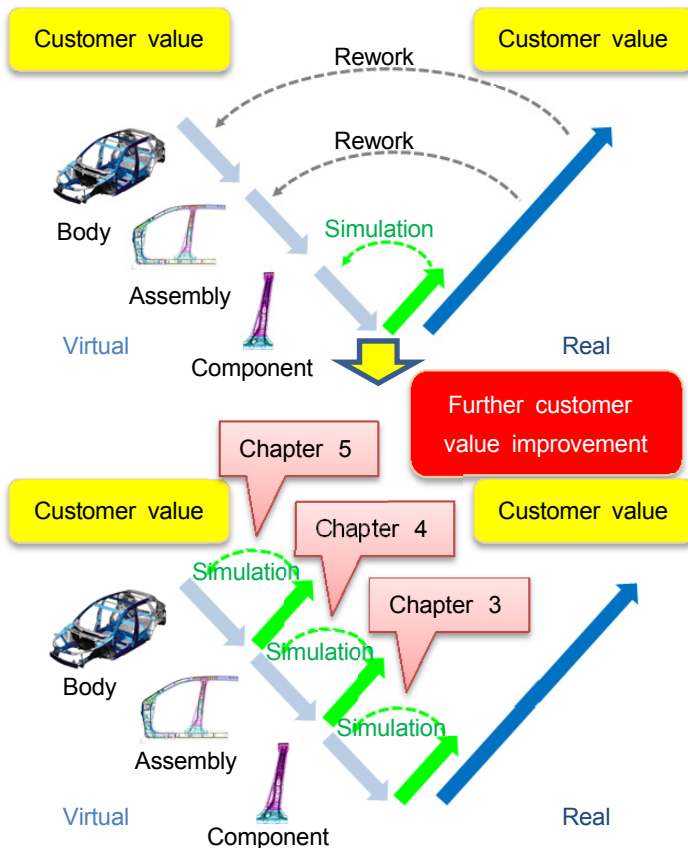


Fig. 2 Dimensional Control Process

## 3. プレス部品のCAE精度向上

### 3.1 CAE検証における寸法精度保証に対する課題

ボディーへの高張力鋼板の適用において、軟鋼板と比較した場合の一般的なプレス成形上の課題は、延性の低下による割れやしわなどの成形性の劣化にはじまり、降伏応力が高いことでスプリングバック量の増大に伴う寸法精度悪化、また材料硬度による金型の成形面における耐摩耗性低下などがある。なかでも寸法精度の悪化については、アッセンブリー時の溶接組立工程において接合面に隙間が生じ、外観に対する品質や衝突性能の低下などボディー全体に影響を及ぼしかねない点で重要な課題として捉えている。

スプリングバックは弾性変形によるものと仮定し、その量を板曲げ半径Rにおける曲げ角 $\theta_0$ とその戻り量 $\Delta\theta$ で表すと、弾塑性力学計算によりヤング率E、降伏応力 $\sigma$ 、板厚tでは次式になる<sup>(1)</sup>。

$$\text{スプリングバック量} = \frac{\Delta\theta}{\theta_0} \approx 3 \left( \frac{\sigma}{E} \right) \left( \frac{R}{t} \right)$$

この式から高張力化と薄肉化の併用により軽量化を図ろうとすると、スプリングバック量は総じて増大する方向に変化することがわかる (Fig. 3)。

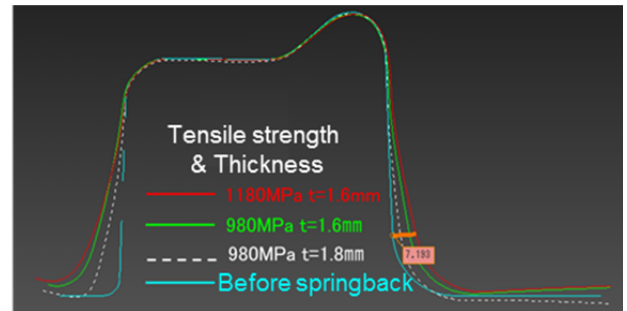


Fig. 3 After Springback Shapes

高張力鋼板におけるCAE検証時の課題についても、軟鋼板と比較して割れやしわなどの成形性に対する検証回数は増加し、それ以上にスプリングバックに対する寸法精度の保証に多くのリソースを要する。例えば、スプリングバックの量や範囲をあらかじめ方案面に織り込むことで対処する見込み形状を作成し、スプリングバックの低減を確認する検証サイクルが新たに加わるなどである。

そして、引張強さの増大は更なる検証の繰り返しや対策立案の検討工数の増加を招く。成形性よりも寸法精度に対する検証回数、対策工具形状作成工数の比率が大幅に増大するとともに、成形性を確保した後も見込みによる工具形状変更などにより、寸法精度の対策確認とともに成形性の再確認のための検証が上積みされる。また、スプリングバック量の増大に比例して、CAE検証結果と実パネルとの一致度もバラツキが大きくなる。

### 3.2 工法、見込みによる寸法精度への対策

高張力鋼板のスプリングバック対策には主に以下の3つ

が考えられる。

- ① 工法による曲げモーメントの低減
- ② 製品形状の変更による形状凍結性の向上
- ③ 方案形状への見込みによる織り込み

当初、軟鋼板から高張力鋼板の材料置換に対してはこれまでの経験則をもとに主に②による対策が取られてきたが、高張力化に伴い、①や③による対策を拡大してきた。例えば工法では、主に成形工程を2つに分け、初工程で浅く成形したのち、次工程で正規位置まで成形する方法を用いている<sup>②</sup>。この意図は、

- (1) 寸法精度に対して

初めに浅く成形することで、与歪量変化を低減し寸法精度のバラツキを抑制する。また、残りを折り曲げ成形することで、壁そりの発生や寸法精度変化を低減させる。

- (2) 成形性に対して

割れ懸念箇所などにオーバードローを設置でき、成形余裕を確保しやすくする。また、しわについては二つの工程で成形量のバランスをとりながら発生の低減を図る。

- (3) 生産性に対して

成形荷重と材料の流入量を低減することで金型への負荷を下げ、型かじりの発生を防ぐ。また、成形方向と同じ方向でトリム加工が行えるようにすることで、トリム型の負荷軽減と製品端精度の向上を図る。これらをCAEによる検証を進め工法の最適化を行い、実型の製作を行う取り組みを進めてきた。また、見込みについては、CAE解析結果より妥当性の高い見込み情報を導出しシームレスに見込み形状を作成する検証要領を確立した<sup>③</sup>。これは、スプリングバックの原因となる離型前の残留応力を用い、この応力のベクトルを反転しスプリングフォワード情報を算出しこれを見込み量に用いる。また、複数の曲面で構成される工具形状を大域変形技術の適用によりトポロジーを変更することなく、滑らかにかつ見込み量を正確に織り込んだ見込み形状の作成を実現し、寸法精度検証期間の短縮を実現した。

しかし、更なる引張強さの高張力鋼板を適用するとなると、スプリングバックの絶対量や材料特性のバラツキがより大きくなることから、対処療法的な①や③の取り組みの延長線上では限界が見えてきた。そこで、今一度②の視点に立ち返り、製品形状が持つ本来の機能に併せて形状凍結性を向上する機能を備えることで、スプリングバックの発生を低減させる点に着目した。

### 3.3 形状凍結性向上の取り組み

新たな着目点は経験則のみに沿った製品形状変更による検証の繰り返しではなく、離型前の残留応力の分布状態を解析することでスプリングバックの発生要因を特定し、各要因に応じた形状凍結性を向上する形状付与や変更による確認検証を繰り返すことで寸法精度のスパイラルアップを図る点にある。

この検証の大まかな流れは以下のとおりである。

- ① 最初にスプリングバックの状態を大別し、最も製品形状全体に影響を及ぼしている状態、多くの場合は稜線そりやねじれなどに着目し、応力の分布状態を確認する。
- ② パネルの応力を引張は符号+、圧縮は符号-によりカラーマップを用いて表現し分布状態を確認する。しかし、製品全体の複雑な応力状態のままから、着目した状態との関連性のある個所を即座に見出すのは難しく、大抵の場合は検証領域の絞り込みを行う。
- ③ 例えば、稜線そりの場合は稜線方向に形状全体を数分割し、各分割領域の応力をゼロにしてスプリングバックの計算を行う。各結果での稜線そりの状態を確認し最も変化が大きい領域を関連性が高いと想定し該当領域内で更に詳細に応力の分布状態を確認する。
- ④ ある程度領域が狭められてからの要因応力の特定では、応力の存在有無のみならず、引張応力と圧縮応力の位置関係や大きさによるバランス、成形過程での応力発生の様子などを勘案する。これらの手順により検証を進め、スプリングバックの状態と関連する応力の存在箇所や状態を明らかにし、対策に向けた形状や工法を検討する。この検証要領を適用した部品Bピラーインナーでは、主に稜線そりのスプリングバック量を検証着手前から70.4%低減することができた (Fig. 4)。

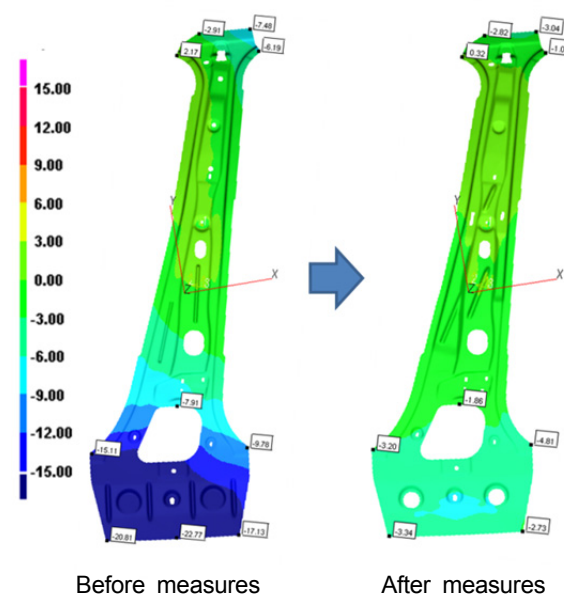


Fig.4 Amount of Springback

また、この検証要領の適用により事前検証期間の短縮も実現することができた。従来は事前検証期間の終末期に見込みによるCAE解析を繰り返し、部品によっては検証期間の延長が必要であったが、形状凍結性向上による寸法精度保証を事前検証期間の前半部分に収束させることで、最終的な補正量を小さくし、補正形状作成工数や検証回数を低減することができた (Fig. 5)。



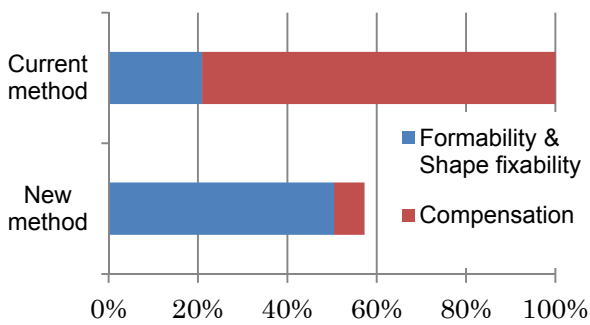


Fig. 5 Rate of Modeling Hour Rate

#### 4. 接合部のすり合わせ精度向上

##### 4.1 接合部のすり合わせが必要な理由

3章で紹介した製品形状による形状凍結向上の後、CAE解析によるスプリング量に応じた見込みを金型形状に入れていく。この寸法精度の最終補正段階においてはプレス部品の精度を設計公差内に入れるのと同時に、複数の部品にまたがる接合部のすり合わせを行う必要がある。ボディーは多数のプレス部品が複雑な接合部で組み合わされて構成されており、ここで述べる「すり合わせ」とは、接合部の各部品の部品素性に合わせて0.1mm単位での接合面精度の調整を行い、高精度なボディーを短期間で造り込む方法である。複数部品の連続した面からなる接合隙を0にするには2つの方法がある。1つは全部品をゼロねらいの図面寸法に保証する方法である。この手法はプレス部品の加工後の弾性回復による変形・加工のバラツキを考慮するとコスト・納期の面から考えても現実的ではない。そこで、次で紹介する接合部のすり合わせを行うことで、効率的にボディーに要求される0.1mm単位の精度を造り込んでいる。

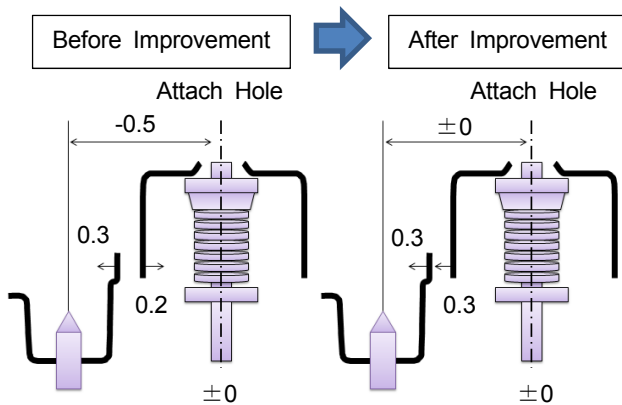


Fig. 6 Adjustment of Dimensional Accuracy

すり合わせのイメージをつかむために、走りに大きく影響を与えるボディーとサスペンションの相対位置を例にとってFig. 6で説明する。ボディーのサスペンションの取り付け穴がプレス単品で±0の穴位置できていたとする。プラットフォームを構成する部品を成り行きでアッセンブ

リーしていくと、接合面の影響によりサスペンション取り付け穴位置が実車のセンター位置からピッチで0.5のズレが発生してしまう。最高の走りのパフォーマンスを發揮できる取り付けピッチが±0だとすると、このズレが最小になるよう片方の接合面精度を凍結し、もう一方の接合面を相手精度に合わせて修正を行い、サスアライメントとして中心値をねらったピンポイントの造り込みを行う手法が「すり合わせ」である。

##### 4.2 CAEを活用したすり合わせプロセスの革新

従来、接合部のすり合わせは、PCF (Parts Coordinate Fixture)と呼ばれるハードツールと実パネルを用いて行ってきた。PCFは車体工程での溶接による精度変化や車体アッセンブリー治具の工程起因による精度変化の要素を排除し、プレス部品精度と車体工程を並行して育成するためのツールである。従来のプロセスでは、このPCFを用いた実パネル検証により接合部の板間隙・干渉量を抽出し、部品の修正量を決定後、金型修正の対策を織り込んできた。しかしながら、現物ができてしまった後の対策はスプリングバック量を金型で見込むトライ&エラーの対策となっており、金型修正によるコスト増加・精度造り込み期間の長期化の要因となっている。そのため、新プロセスではプレス部品のCAE結果を用いて接合部の隙・干渉量を机上で予測することで、ボディーの精度を保証できる成形方案や製品図面への源流対策に結び付けることを目的としている (Fig. 7)。

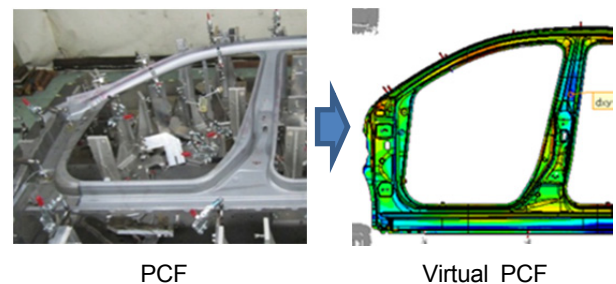


Fig. 7 Parts Coordinate Fixture

##### 4.3 机上での品質造り込み課題と取り組み

机上で接合部のすり合わせを行う上での課題は大きく2つある。1つ目は、CAEによるプレス部品の机上予測精度の向上である。これについては、前述の3.3 形状凍結性を向上する取り組みで紹介した。2つ目は、CAEによるアッセンブリー時の位置決めと拘束状態 (クランプ状態) の再現である。従来はプレス部品単品の育成目的で使われていたスプリングバック後のCAEデータを使って、車体溶接前のクランプ状態を机上で再現することに取り組んだ。この検証の大まかな流れは以下のとおりである。

① CAEでスプリングバックさせたデータを、アッセンブリー時の部品位置決め主基準の2つの穴と3つの面で位置

決めを行う。

② 次にスプリングバックの矯正や自重ダレを補助する基準面を、図面上の正規位置になるよう解析ソフトで変形解析を実施する。

このクランプシミュレーションの確からしさを確認するため、実パネルを用いてCAEクランプ状態と検査具クランプ状態の一致度を確認する実験を行った。実パネルで①の状態を検査具上で作り、非接触測定器で実パネルの3Dデータ化を行った。このデータを②の状態になるようにCAEと検査具でクランプを行い、それぞれの寸法精度の差異を確認した(Fig. 8)。

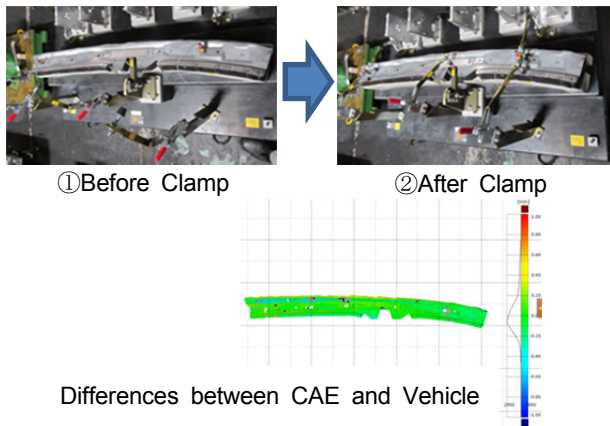


Fig. 8 Clamp Simulation

カラーレンジは緑色が0近傍を示しており、CAEと実パネルのクランプ状態の寸法精度の差異を $\pm 0.3\text{mm}$ 以下に収めることができた。この取り組みによりアッセンブリー時の拘束状態をCAEで再現することが可能となった。この検証要領を適用したBピラーレイン部の机上と実車の接合部の隙・干渉量をFig. 9に示す。机上と実車の隙・干渉量の一致度(接合部の机上と実車の差異が $\pm 1.0\text{mm}$ の中に入る率)は87.5%となり、机上で隙・干渉量の予測ができるようになってきた。

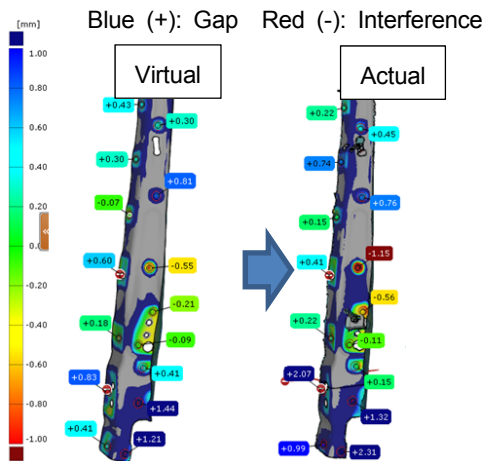


Fig. 9 Gap and Interference between Panels

#### 4.4 すり合わせプロセスの今後に向けた取り組み

今回の取り組みは、ボディー骨格として最重要となる高張力鋼板の部品を主体で取り組んだ。今後は、外板部品や軟鋼板部品へ取り組みを拡大することで車両性能とデザインのお客様価値向上に貢献していく。

新プロセスの活用により実車を介さず机上で部品精度の造り込みが可能となりつつある。これまでは、主にモノができた後に部品精度の造り込みを行ってきたが、この活動により実車では机上結果の確認のみとする部品精度育成プロセスに進化させていく。

### 5. 車体アッセンブリー精度向上

更なる精度向上のためには、各要素においてアッセンブリー工程で起きている現象を正しくつかみCAEモデルに再現する必要がある。部品については、これまで述べてきたので本章ではアッセンブリー工程について以下に紹介する。

#### 5.1 車体アッセンブリー工程での精度予測技術

車体の溶接工程は、複数のプレス部品同士を接合するサブアッセンブリー工程から始まり、サブアッセンブリー同士を接合しボディーを形づくるボディーシェルアッセンブリー工程等、約50超の工程でつながっている (Fig. 10)。

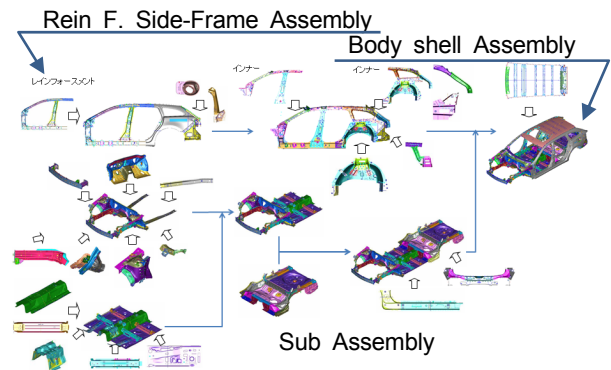


Fig. 10 Line of Body Assembly

初工程の溶接加工前は、各々のプレス部品はまだ閉断面を形成しておらず、自重だけでも変形するため、自剛性と重力の向き、打点位置を加味してプレス部品を保持する必要がある。また、スポット溶接は鉄の溶解凝固における応力を最小にした溶接方法だが、それでも多少の引張応力が生じるため、応力の向きと影響に打ち勝つように、拘束力と打点順序を決定しなければならない。これらをCAEで解析するため、まず、プレス部品の自重撓みを変形解析で明らかにし、保持位置を最適化してきた。この解析をサブアッセンブリーへ応用することで、0.1mm単位での接合面撓みが部位ごとに解析できるようになり、各工程での精度予測を向上させることができる。次に、溶接による熱応力の解析を加え、必要保持力を導けるようにして、スポ

ット溶接による接合部の変形解析に展開している。CX-9ではドアの取り付け面であるヒンジ面の構造がこれまでと異なるため、4つのヒンジ面精度をつかさどるサイドフレームレインFアッセンブリーを重点管理部品として、精度予測技術向上に取り組んだ。

## 5.2 治具モデル化の取り組み

従来、CAEモデル上では、効率を重視し複数の打点を同時に発生させており、打点順番を考慮していなかった。

今回計算速度を改善させることで、打点1点1点に順番をつけ、打点ごとの応力による変形がわかるようにした。更に、保持面もモデル化することで、溶接時の必要保持力も計算できるようにした。具体的には、従来、治具保持面附近のノード自体を4点拘束する方法を取っていたが、この方法では保持面内の変形が再現できない。そこで、保持面の3Dモデルを作成し、プレス部品との境界に条件を与え微小な変形やクランプと受け面によって生じる保持力をより詳細に表現できるようにした。

## 5.3 CAE精度向上の取り組みと結果

こうして作成したCAE手法を、実機と比較検証し、解析精度の向上に努めた。1点1点溶接するごとに非接触の三次元形状測定器で全体形状を計測、打点毎の精度変化を把握した。そして実機での測定結果とCAE結果を比較し、解析方法を見直していった。結果、精度を決定する影響因子として、プレス部品の精度、接合による応力、打点位置、治具の拘束力、部品の剛性等を、解析条件に反映させることにより、サブアッセンブリーの机上予測精度と実機精度の一致度において、これまでは0.7mm以内のところ0.3mm以内を実現した (Fig. 11)。

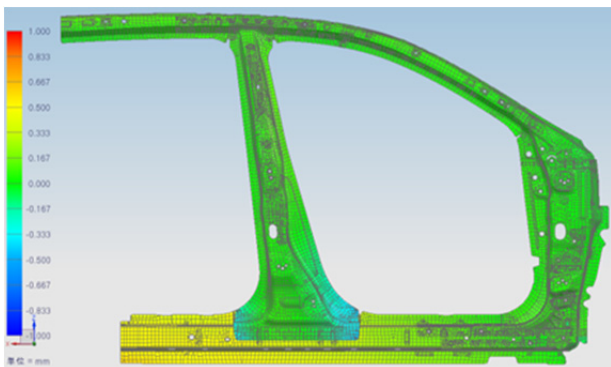


Fig. 11 Result of CAE

## 5.4 CX-9での成果と今後の課題

この手法を他のアッセンブリー工程へ展開することで、CX-9の初期精度向上に貢献した。まだ車体全体の精度解析ができるようになっていないが、プレス部品のメッシュの貼り方、解析方法、閾値等結果の判断を見直すことで、計算時間を短縮し、業務プロセスとリンクさせる。

## 6. おわりに

今後は、開発した寸法精度予測技術をもとに、寸法精度をコントロール可能な技術に発展させ、デザインや三大性能上最適な寸法精度をピンポイントでねらえるクルマづくりを実施していく。数々の技術革新から生まれた新型CX-9を早くお客様にお届けし、お客様の声に耳を傾けながら次世代のクルマづくりを日々進化させることで、世界中にいるマツダを愛してくださるお客様の笑顔へつなげることを目指していく。

## 参考文献

- (1) 吉田総仁：弾塑性力学の基礎／第9章，共立出版（1997）
- (2) 田丸ほか：980MPa級ハイテン部品の成形性改善と寸法精度の向上を両立させる新工法，型技術，Vol.28, pp.18-19（2013）
- (3) 岡田ほか：高ハイテン部品における見込み・事前検証—金型への転写に関する取り組み事例—，型技術，Vol.29, pp.70-71（2014）
- (4) 中野ほか：新型アクセラにおけるボディー造り革新デザインを際立たせるクルマ造り，2013年マツダ技報，pp.41-42（2013）

## ■ 著 者 ■



島田 知広



高橋 大樹



岡田 又治