

特集：新型デミオ

12

1180MPa級高強度鋼板の車体への適用について Application of 1180MPa Grade Ultra-high Strength Steel to Vehicle Body

坂野 律男*¹ 岡田 又治*² 丸山 秀幸*³
Ritsuo Sakano Mataharu Okada Hideyuki Maruyama
小田 修二*⁴ 清水 昇*⁵ 森林 竜也*⁶
Shuji Koda Noboru Shimizu Tatsuya Moribayashi

要 約

自動車車体への高強度・高剛性と軽量化の両立の必要性は増している。これを達成するために鋼板の更なる高強度化は費用対効果の面でのバランスが良く、主なる手法である。新型デミオでは従来に比べワンランクアップの1180MPa級高強度鋼板を採用した。高強度化に伴う材料特性の変化により、プレス・溶接等の生産加工性に及ぼす影響が大である。量産工場において、安定して品質と生産性を確保する必要がある。そのために、材料特性の変化に対して、基本特性を検証した。そして、製品設計・工程設計・要具設計・シミュレーション等事前評価ツール・加工条件・量産管理に反映していく活動を行った。これらの取り組みを紹介する。

Summary

The need of the coexistence of the high-strength, and high-stiffness to the car body and the light-weighting increase. The further high-strength steel is a major technique, because of a good balance of an effect and a cost. A 1180MPa grade high-tension steel sheet which one rank up in comparison with before is adopted to new Demio. The change of material property with becoming high strength, influence to a stamping formability, welding workability and so on very much. In a mass production factory, it is necessary to secure a quality and productivity for these characteristic. Therefore, the basic properties are evaluated for a change of various kinds of material property. And we performed the activity to upgrade for product design, process design, tool design, prior evaluation tool such as simulation, process condition, process control. We introduce these activities.

1. はじめに

地球環境を配慮したCO₂の削減、そして自動車の衝突安全と運転性能への要求は高まっている。その要求に答えるためには、自動車車体の高強度・高剛性と軽量化の両立が必要である。それに対しては、種々の取り組みがあるが、材料面からの取り組みの中では鋼板材料の更なる高強度化が費用対効果の面でバランスが良く主なる取り組みである。既にマツダ技報にも980MPa級高強度鋼板の採用は報告されている^①が、新型デミオでは1180MPa級高強度鋼板の量産適用に取り組み採用した。高強度化に伴う、材料特性の変化により、プレス成形及び溶接組立加工性が悪化し、加工方案・加工条件及び要具での対応が必要となる。本稿では、1180MPa級高強度鋼板の適用に当たり、お客様品質を確保し、安定生産を行うための取り組みを紹介する。

2. 材料特性と生産上の課題

1180MPa級高強度鋼板の引張強さは1180MPa以上である。材料特性の中で弾性変形から塑性変形に代わる降伏点、破断に至るまでの伸び量等は成形性に影響する。980MPa級と比べると、降伏点は30-40%アップ、伸び量は20-40%ダウンとなり、共に成形性は悪化する。高強度に伴い材料の硬度も高くなり要具の摩耗に影響を与える。また、高強度を得るためにSi、Mn、C等の合金成分の添加量を増加させ、熱処理を施し製造されている。この合金成分により、電気抵抗の固有値が増加するため、材料の電気抵抗発熱を利用したスポット溶接では加工性に影響を受ける。以上の影響に対する対応策を次章以下で述べる。新型デミオへの適用をFig. 1に示す。

*1~6 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

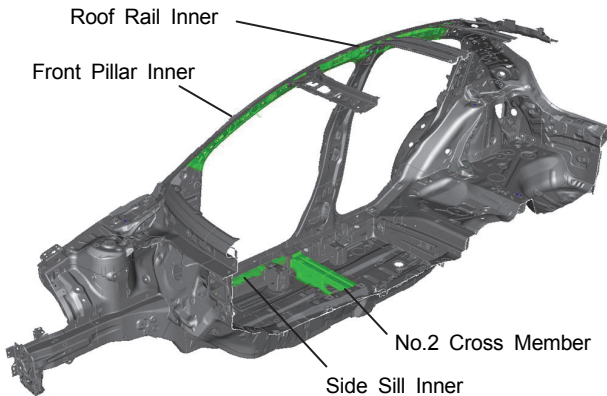


Fig. 1 1180MPa Grade Materials in New Demio

3. プレス成形上の課題と取り組み

3.1 1180MPa級材料の現状把握

1180MPa級材料を扱うにあたり、機械特性から成形時に困難が増すことは予想されたが、問題への対応は未知の領域であった。そこで、実際のパネル挙動とCAEによる机上予測精度を確認するため実験型による実機検証を行った。金型はBピラーレインフォースメントの絞り工程上部を模した成形面とし、供試材は引張強さ1180MPa、複数の鋼種を用いた。



Fig. 2 Stamped Panel of Experiment

取得したパネルの状態を確認すると割れやしわが発生しスプリングバック量も大きくなっているものの、極度に深刻な現象は見受けられなかった (Fig. 2)。また、机上予測精度としては割れやしわなどの成形性ではおおむね良好だったが、寸法精度では±1.0mmの範囲で一致度が65%に留まり予測精度の不足が明らかになった。

実験で一連の知見を踏まえ1180MPa級材料を扱うにあたり、形状凍結性（金型どおりの寸法、形状が確保できること）による寸法精度対策と机上予測精度の更なる向上の必要性を見出すことができた。

3.2 新型デミオ適用部品での工法選定

1180MPa級材料適用部品の内、板厚1.2mmのフロントピラーインナ (Fig. 3) の事例を紹介する。



Fig. 3 Front Pillar Inner in New Demio

当該部品を既存車種（アクセラ）と比較すると引張強さは2倍、板厚は2/3である。高強度化による延性劣化、薄肉化による座屈耐性悪化、高強度化と薄肉化双方による形状凍結性悪化を考慮すると従来工法のままでは金型調整時の困難さが予想された。

初期工程設計段階において旧型デミオで用いた深絞り工法に対し、新たにフォーム工法とフランジ工法の組み合わせを検討した。当工法は初工程でフォーミングにより浅く成形し、後工程で正規位置までフランジ曲げを行う (Fig. 4)。

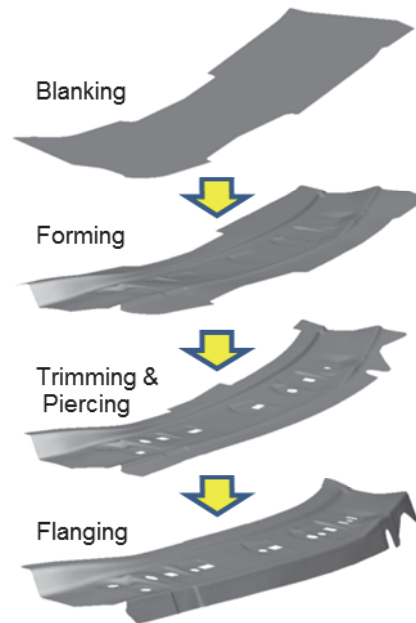


Fig. 4 Stamping Methods for Front Pillar Inner

この工法立案の狙いは以下のとおりである。

(1) 絞り成形からフォーム成形への変更

絞り成形からフォーム成形へ変更することで、材料の伸び及びすべりに依存することなく成形を行う。これにより安定した成形を可能とする。また、壁そりの発生や寸法精度変化を低減させる。

(2) 初工程で浅く展開する成形の採用

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なることで、トリム型の負荷軽減と製品端精度の向上を図る。

最終的にCAEを用いた比較検証により新たな工法の優位性を確認し、詳細工程設計段階に移行した。

3.3 机上検証での寸法精度保証に対する取り組み

机上予測精度向上に対して、曲げ・曲げ戻しを受ける成形を正確に表現するために用いているバウシinger効果の考慮可能なY-Uモデル（吉田・上森モデル、移動硬化則）に対して、構成パラメータの調整など実機結果を織り

込む取り組みを行った。その結果、机上検証ではスプリングバック増大による長手方向に沿った寸法精度不良が最も大きな課題となった。Fig. 5に異車種、同一部品でのスプリングバック量の違いを示す。

CAE結果からスプリングバック増大の主要因は降伏点が高いために部分的に塑性域に移らず弾性域内で形状が元の形に戻ろうとするためであることを解析し、形状凍結性向上と縮み量低減による対策案を検討した。

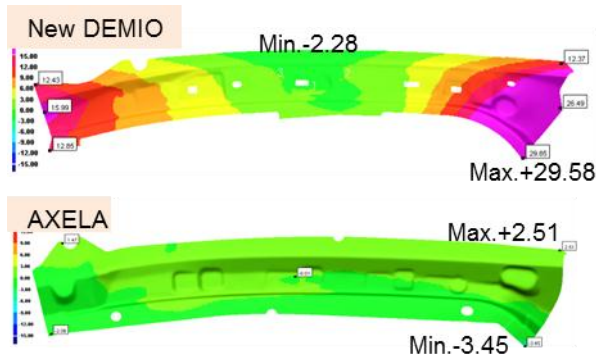


Fig. 5 Amount of Spring Back

具体的には、型から離形後のパネルでは形状がだれて形状剛性が低下していることから、部品長手方向の稜線Rを離形後に正寸Rになるように見込む。そして剛性を上げるための部品内ビード形状の追加を検討した。また、フランジ部分へ新たにノッチを追加することでフランジ成形での縮み量を低下、分散を図った。これら部品形状変更を伴った検討内容を開発部門に提起し部品、車体性能と量産性の両立を図りながら対策を実現した (Fig. 6)。

対策の結果、各工程でのスプリングバック量はフォーム工程では52.7%、フランジ工程では43.2%の低減を実現した。残りのスプリングバック量に対しては金型を見込むことで対処し金型製作の段階に移行した。

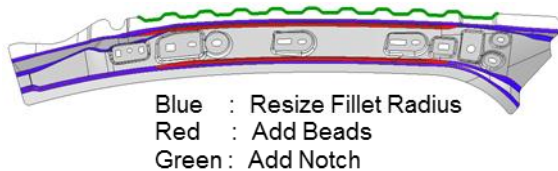


Fig. 6 Measures Shapes in Part Shape

3.4 実型における机上検証結果の確認

金型製作後の初加工品では机上検証結果以上のキャンパーバックが発生した。発生原因はCAE検証において実機での成形状態を詳細に再現しきれず成形荷重に差異が生じていたためであった。成形荷重の差異を解消したCAE検証要領により実機との一致度を取り、金型を見込み直すことで部品単体での寸法精度を満足させた。

4. プレス金型設計上の課題と取り組み

4.1 高強度鋼板におけるプレス金型の現状

引張強さ980MPa級をはじめとした高強度鋼板は、金型調整に多くの工数がかかっている。1180MPa級材料の採用にあたり、プレス金型にかかる負荷がより高まることで、金型調整工数増加が懸念され、対応が求められた。

4.2 金型に負荷される打ち抜き荷重について

ここでは、鋼板を切る機能を持つせん断型にかかる負荷として、打ち抜き力について説明する。せん断部の長さL [mm]、板厚t [mm]、引張強さ σ_B [N/mm²]の打ち抜きに要する力P [N]は、式(1)によって求められる。

$$P = K \cdot L \cdot t \cdot \sigma_B \quad (1) \quad K: \text{係数}$$

Fig. 7に現行と新型デミオに適用された鋼板の板厚と引張強さを示す。現行モデルに対し引張強さは増加傾向にあり、式(1)より1180MPa級をはじめとして、打ち抜き力がより高まる傾向にあり、金型に与える負荷が高くなっている。

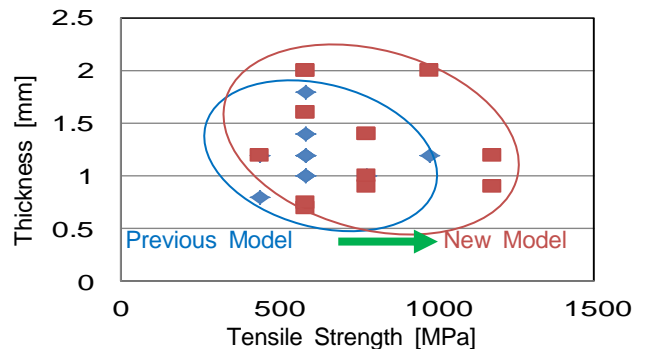


Fig. 7 Thickness per Tensile Strength

4.3 高強度鋼板におけるプレス金型の課題

せん断加工の中でも切断部の加工精度が必要なテーラードブランク材を取得するブランキング型の事例を紹介する。ブランキング型とは、コイル材から絞り成形に最適なシート材を打ち抜く金型である。その複数のブランキング型で取得されたシート材同士を溶接して1枚のシート材にしたものをテーラードブランク材と呼び、最適な板厚と高剛性を両立させる軽量化対応として適用拡大している。シート接合部となるせん断部は、一般的なせん断部と比較して要求品質が高く、その金型調整には多くの工数を要している。

これまでは、テーラードせん断部の品質問題を現場の経験的な対処法により解決してきたが、材料の高強度化により打ち抜き力が高まるにつれて、より多くの工数を費やすようになってきた。しかしながら、品質問題の発生メカニ

ズムが明確でなく、金型設計段階に打ち抜き力の増加に伴ったリブの配置、形などを保証できていなかった。このせん断部の要求品質を満足させるためには、机上で打ち抜き力によって生じる金型の挙動を予想し対策する必要があり、金型構造解析の技術構築に取り組んだ。

4.4 構造解析を用いた金型構造革新の取り組み

従来の解析手法では、金型を構成する部品単体でしか解析が行えず、ブランキング型を構成する1000点以上の部品全てをまとめて解析し、複数部品間の力の伝ばを机上で再現できなかった。また、金型サイズが約3000×2000×800mmもある中で、テーラードせん断部の要求品質は、0.01mmオーダであり、解析でも同等のオーダで挙動を把握する必要性があった。上記を実現するために、新たな解析環境を構築した上で、最適なメッシュ作成、境界条件設定などのプリプロセッシングにおける技術構築を行うことで、複数部品の解析が可能となり、部品間を力が伝ばする状態を机上で確認することができるようになった。

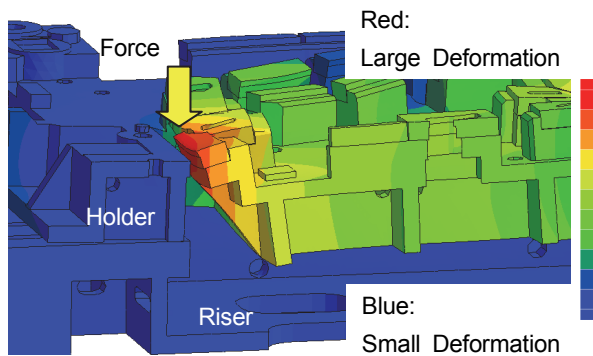


Fig. 8 Structure Analysis of the Die

この解析技術を用いて、過去に品質問題が発生した型と発生しなかった型を解析し、金型の挙動を相対比較した。結果、問題発生箇所と金型のたわみに相関関係が認められ、この品質問題の発生メカニズムは、せん断加工部が打ち抜き力の影響によりたわんだ状態で、シート材をせん断することによって発生していると推測された。また、解析上で品質保証ができるように、せん断加工部のたわみと現物のシート材の加工精度の関係より、たわみの閾値を導き出した。

設定した閾値による評価を金型設計時に適用したところ、高い打ち抜き力が負荷される金型において、閾値を超えた、たわみが発生していることが確認された (Fig. 8)。

解析技術構築時において、力を受ける機能部位周辺にかかる力を分散させることが、金型のたわみ低減に有効である知見を得られており、テーラードせん断加工部も同様に、打ち抜き力を分散するように、リブの配置や厚さなど周囲の金型構造を再設計した。従来は、品質改善初期段階にお

いて、このせん断部に真直度0.09mm、だれ0.3mm、溶接接合不良率20%発生していたが、(Fig. 9にせん断部溶接接合箇所を示す)保証した金型構造では、1回の金型調整で真直度0.04mm、だれ0.15mmに抑え、溶接接合不良率0%を達成し、金型改善工数を大幅に削減することができた。

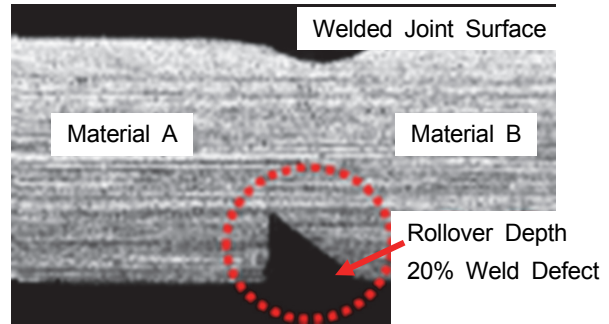


Fig. 9 Welded Joint Shearing Surface

5. 接合の課題と取り組み

5.1 接合強度面での課題

材料強度とスポット溶接接合強度の関係をFig. 10に示す。引張せん断強度は材料強度が上がるにつれて増加していくが、十字引張強度は780MPaを超えたあたりで飽和し、1180MPaでは低下していることが分かる。また、軽量化のため高強度化とともに薄板化された部位は、更に接合強度が低下する。このような高強度鋼板の強度特性を把握し、打点位置や打点数など製品設計への織り込みを行った。

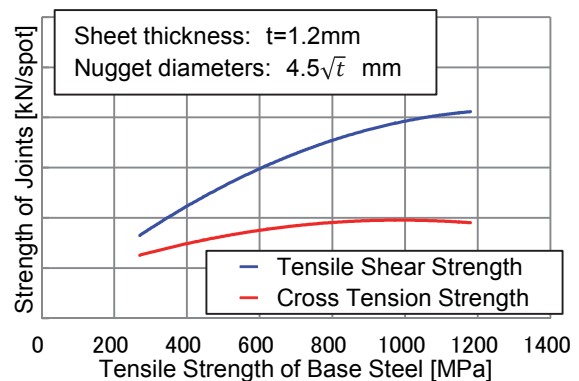


Fig. 10 Effect of Tensile Strength of Base Steel on Spot Weld Strength

5.2 スポット溶接性の課題

材料強度とスポット溶接性の関係をFig. 11に示す。一定条件下で溶接電流のみを変化させ、基準強度を満足する電流から入熱過多によりスパッタが発生する電流までを求めた。この電流範囲を適正電流範囲とよび、広いほど溶接性が良い。同板2枚重ねで溶接性の比較を行った場合、同一条件では、材料強度が上がるにつれて適正電流範囲が低電流側にシフトし、範囲が狭くなっていることが分かる。

これは、材料成分による電気抵抗率の増加や、母材強度の増加による通電面積の減少の影響と考えられる。2枚重ねの場合、電極加圧力の増加や、本通電前に余熱を加えるプリヒート等により、通電面積を拡大することで適正電流範囲を拡大できる。

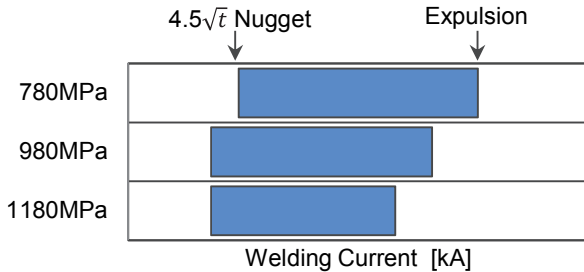


Fig. 11 Effect of Tensile Strength of Base Steel on Suitable Welding Current Range

5.3 生産面での課題と取り組み

生産現場では、溶接強度とスパッタレスの両立に取り組み、溶接品質の安定化を図っている。実車では、さまざまな板組が存在し、適正な溶接条件が異なる。Table 1に新型デミオの板組の一例を示す。

Table 1 Sheet Combination

Parts name	Strength	Thickness
Side Flame Outer	270MPa	0.65mm
Front Pillar Reinforcement	780MPa	1.4mm
Front Pillar Inner	1180MPa	1.2mm

高強度鋼板2枚に軟鋼板（270MPa）の薄板を加えた3枚重ねでは、高強度鋼板間と軟鋼板薄板－高強度鋼板間とで抵抗率の差が大きいことから熱バランスが悪化し、薄板側のナゲットの生成が困難であるため、一般的な溶接条件では適正電流範囲を十分に得ることができない。

そこで、溶接条件の設定を改善した。一例として、2段通電として溶接性を改善する通電パターンでは、第一通電を短時間高電流にすることで薄板側ナゲットを生成させ、第二通電を長時間低電流にすることで厚板側ナゲットを生成させた。これにより適正電流範囲を拡大することができた。

また、生産現場では、部品の合い沿いや溶接ガンの施工状態によって、適正電流範囲が変化する。特に、高強度化により溶接性に対する板間隙の影響が従来材と比較して大きくなる。Fig. 12に板間隙と適正電流範囲との関係を示す。

板間隙により溶接性は大きく変化することが分かる。そのため、溶接品質という目的で従来よりも厳しい公差で板間隙を管理した。更に、適正溶接条件はスポット溶接1打点ごとに異なるため、それに合わせて溶接条件は1打点ご

とに1条件を設定し調整することで溶接品質を確保した。

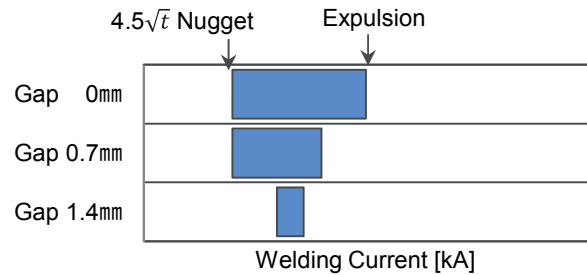


Fig. 12 Effect of Gap on Suitable Welding Current Range

6. ボデー精度保証の課題と取り組み

ボデーへの超高強度鋼板適用にあたっては、プレス成形や金型設計等の部品精度保証課題への取り組みに加え、それらを接合するボデー精度保証への取り組みも必要である。そこで、本章では車体組立工程でのボデー精度保証に対する取り組みについて述べる。

6.1 ボデー精度保証の現状と課題

ボデーは複数のプレス部品を組み合わせているため、ボデー精度は部品の接合面精度の影響を受けやすい。通常、接合面精度は0.1mm単位の調整を複数回繰り返して行っている。鋼板は強度が上がるほど寸法精度のコントロールが難しく、寸法精度を調整する期間もそれに比例して必要となる。超高強度鋼板を適用する比率が増えてくるこれからのボデー精度保証においては、接合面精度を部品精度のみで保証するのではなく、車体組立工程として接合面精度を補助する保証方法とプロセス構築が急務である。

6.2 接合面精度を補助するボデー精度保証の取り組み

6.1で述べたように超高強度鋼板は寸法精度のコントロールが難しい。そこで、部品精度の許容範囲を通常よりも緩和しつつボデー精度を保証するために、加工基準の配置を見直して部品の接合面精度を補助する方法を考えた。加工基準とは、3次元空間中の指定位置に部品を配置し、接合での変形を防止し、狙いのボデー精度を保証するための基準穴と保持面のことを指す。この加工基準を1180MPa級超高強度鋼板に合わせて、部品の接合面精度を補助するために配置を見直した。以下に加工基準の配置とボデー精度保証の考え方について述べる。

(1) 旧型デミオまでの考え方

部品の位置を拘束できる必要最低限の加工基準を配置し、商品機能に必要な精度を部品として保証する。部品単体の寸法精度が満足していることを前提として、その寸法精度を重力やその他の外力により変化させないように加工基準を配置し、接合することでボデー精度を保証していた。

(2) 新型デミオからの考え方

部品として保証する特性のうち、一部の接合面精度を車

体組立工程の中で補助する基準を検討した。3章で紹介したプレス部品の精度検証結果から、接合面の中でどこが精度を出しにくいかを明確にした。そして、解析ソフトを用いて、その部位を補助する上で最も効果がある部位、部品を狙いの精度に拘束するために必要な力、接合後の拘束解放時の変位も検証した。その結果、設計段階においては、部品が狙いの精度まで行きつかなくてもボデー精度を保証できる加工基準を設定した (Fig. 13)。この過程で、部品精度のコントロールの難易度によって、プレス部品の精度検証結果を活用する新たな加工基準設定プロセスを考案した。

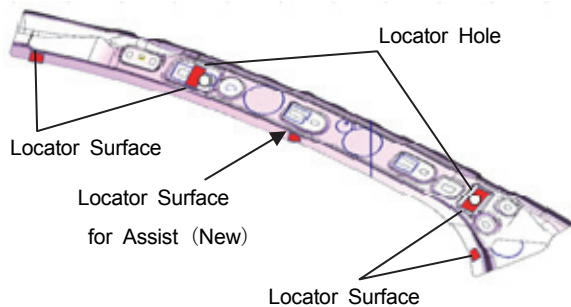


Fig. 13 Locator of Front Pillar Inner in New Demio

6.3 ボデー精度保証プロセス変革の取り組み

6.2で述べた加工基準によってねらいどおりの効果を得られるか、実際の部品と車体組立工程で検証した。

設計段階で設定した接合面精度を補助するための加工基準について、実際の工程内で狙いの精度で拘束できることを3次元測定器で確認し、そのために必要な拘束力も定量的に計測した。その結果、解析ソフトでの検証から得られた部品を狙いの精度に拘束するために必要な力について、実機との一致度が確認できた。一方で漏らしていた要素も見つかった。それは打点順序と打点位置である。部品を接合する打点の順序と打点位置によって、接合後の拘束解放時の変異に1.0mm程度の差が見られた。部品の接合後のボデー精度を1点1点確認しながら、最適な打点順序と打点位置を実機にて調整し、拘束解放時の変位を縮小した。

ボデー精度は保証されたが、接合面を拘束したことによる内部応力の影響が懸念された。内部応力の影響は車体組立工程の次工程である塗装工程で現れる。そこで、車体での検査ツールを塗装工程に持ち込み、塗装工程での精度を確認することで、内部応力による精度変化への影響がないことを確認した。

設計段階で足りていなかった打点順序と打点位置等の検証を補い、実機検証のやり方を改善して検証手順に織り込んだ。6.2で述べた新たな加工基準設定プロセスに加え、打点順序や打点位置の要素を設計段階での検証へ織り込むことで、設計段階での検証精度を更に高めたボデー精度保証プロセスを構築した。

6.4 今後に向けた取り組み

今回の取り組みでは、実機での検証によってボデー精度保証プロセスを補う必要があった。今後は、実機での検証を設計段階へ前倒すことによって、新たなボデー構造の提案や、他工程へまたがった精度保証プロセスの構築など、ボデー精度保証方法のアプローチの幅を広げ、これからの商品開発とお客様価値の向上に貢献していく。

7. おわりに

以上が1180MPa級超高強度鋼板を自動車車体に適用し、安定量産するための取り組みである。超高強度鋼板はその本来の特性により、生産性を悪化させる方向に働く。設計部門と生産部門が相反する要求の中で、各部門の担当者が密接に議論を重ねることにより達成できた。高強度・高剛性と軽量化との両立によるマツダのブランドが目指す“走る歓び”の実現に貢献できたものとする。

参考文献

- (1) 中村ほか：新型アクセラの軽量ボデーシェル開発～SKYACTIV-BODYの更なる進化～、マツダ技報、No.31, pp.14-18 (2013)

■ 著 者 ■



坂野 律男



岡田 又治



丸山 秀幸



小田 修二



清水 昇



森林 竜也