

特集：新世代商品群の生産技術

31

1310MPa級高張力鋼板冷間プレス部品の開発

Development of 1310MPa Class High Tension Steel Sheet Cold Stamping Parts

酒井 明*1 Akira Sakai	松本 茂*2 Shigeru Matsumoto	矢野 峰治*3 Mineharu Yano	田丸 真司*4 Shinji Tamaru
新井 直樹*5 Naoki Arai	吉崎 真吾*6 Shingo Yoshizaki	庄司 庸平*7 Yohei Shoji	末長 昭大*8 Akihiro Suenaga

要約

ドライバーの手足のように意のままに動く「人馬一体」のドライブフィールと安全性を兼ね備えた車を実現するためにボディの軽量化と高強度化に日々取り組んでいる。ボディの軽量化にはCFRP、アルミ等の材料置換もあるが、我々はお客様が求めやすく、軽量化と高強度化を同時に達成できる高張力鋼板冷間プレスの技術開発にこだわった。鋼板の高張力化に伴う成形性・寸法精度及びせん断加工性の変化に対応するため、プレス工法・形状凍結技術の開発やせん断加工の適正化に取り組んだ。その成果として、世界で初めてボディ構造用に1310MPa級高張力鋼板（以下、1310MPa材）を採用した冷間プレス部品の量産化に成功した。また、ボディを組立てる際の溶接性への対応は、これまで溶接条件パターンを最適化することで適正電流範囲を確保したが、1310MPa材では更に、加圧力の適正化とそれに基づいた熱量コントロールを行うことで狙いの溶接強度を実現した。本稿では、これら人馬一体を実現するために取り組んだ自動車ボディの造り込み技術を紹介する。

Summary

In order to realize the vehicle which balances driving feeling with “Jinba Ittai” as if driving the car is part of driver’s hand and foot, we have challenged to realize weight saving and high strength of the body. There is material replacing method in CFRP and aluminum etc. to realize body weight saving. However, we have stuck to technology development of cold-stamping with high-strength steel to realize both lighter body and high strength at same time for customers to purchase the vehicles easily. We have worked on development of press method, shape fixability, and an adjustment of shearing workability to response to changes of material characteristics by formability, dimensional accuracy, and shearing workability according to realize high tensile of sheet metal. As a result of this, mass production of cold-pressed parts with 1310MPa class high-strength steel (hereinafter called 1310MPa sheet metal) for body structure was the first successful in the world. For weldability of body assembly, we used to secure optimal current range by optimizing the patterns of welding conditions before. In addition to this, the target welding strength was feasible by an adjustment of welding pressure and heat amount control base on this for 1310MPa sheet metal. This article introduces vehicle body manufacturing development to realize “Jinba Ittai”.

Key words : Materials, Production, High-Strength Steel Sheet, Forming Process, Die, Assembly, Stamping Technology, Welding, Weight Reduction

1. はじめに

地球環境に配慮したCO₂の削減、そして自動車の衝突安全性と操縦安定性への社会からの要求は年々高くなってい

る。その要求に答えるためには、自動車ボディの高強度化と軽量化の両立が必要である。材料面での解決策として、鋼板材料の更なる高張力化によるボディの高強度化とそれに伴う薄板化による軽量化がビジネス効率面でバランス

*1～8 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

が良い手法である。既にマツダ技報にて1180MPa級高張力鋼板の採用の報告をし、これまでも高張力化を推進してきたが、新型MAZDA3では1310MPa材冷間プレス部品を世界で初めて採用した⁽¹⁾。高張力化に伴う材料特性の変化は、プレス成形及び溶接組立加工が困難になり、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、1310MPa材を採用し、お客様に安心・安全なドライブを提供することを目指した自動車ボディーの造り込みを紹介する。

2. プレス成形上の課題と取り組み

2.1 高張力化に伴うプレス成形の課題

鋼板の高張力化が進むにつれ、プレス成形においては、Fig. 1に示すようなさまざまな課題が表面化してくる。その中で本章では、1310MPa材の適用において難易度の高い、プレスの成形性・寸法精度とせん断加工性の課題について紹介する。

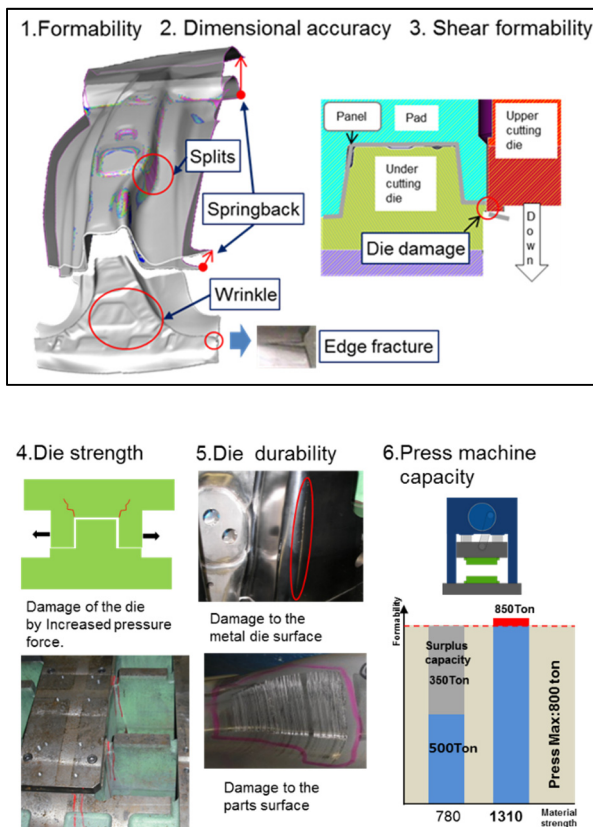


Fig. 1 Challenge in Press Forming UHSS

(1) 成形性の課題

プレスの成形性の課題は割れ、しわである。これらは高張力化に伴い鋼板が硬くなるほど延性が低下することで発生する。また同様に材料の縁から発生する縁割れも顕著になってくる。

(2) 寸法精度の課題

プレス成形は鋼板を塑性変形させることで目的の形状を得ることができる。しかしながら、高張力鋼板になるほど降伏応力と最大引張応力が上昇するためスプリングバック（弾性変形）量が増すことで、成形された鋼板を金型から取り出した際にスプリングバックにより大きく形が崩れてしまう課題がある。

(3) せん断加工性の課題

1310MPa材のせん断加工では、加工の過程で刃先の損傷が見られた。刃先の損傷が進展すると、プレス部品の品質阻害要因になるため、せん断加工性の課題はこの刃先の損傷問題を解決することである。

2.2 1310MPa材適用部の特徴

新型MAZDA3への1310MPa材の適用部品をFig. 2に示す。Fig. 3に示す特徴的な2部品を例に以降の話を進める。いずれも自動車骨格部品で前側面の衝突安全性を担う高強度な部品特性が求められる重要な部品である。ヒンジピラーレインフォースメント（以下、HピラーRF）の形状の特徴は深い断面ハット形状でボディー下部の片側はすり鉢形状をもつ成形難易度の高い部品である。一方、フロントピラーインナー（以下、FピラーIN）は、ハット形状部品に蓋をする部品となるため断面は比較的浅いため剛性は低く、平面視で見ると緩やかな弓型をしているため高張力化に伴い寸法精度が課題となる。

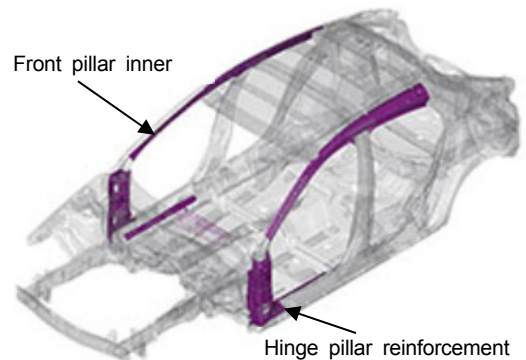


Fig. 2 1310MPa Grade Materials in All-New Mazda3

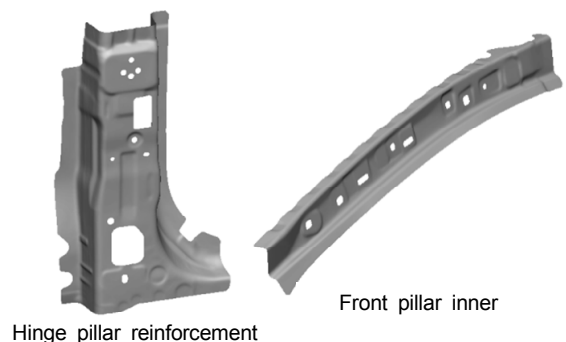


Fig. 3 In-House Manufactured 1310MPa Parts

2.3 成形性の課題解決の取り組み (HピラーRF)

先に述べたようにHピラーRFは難成形部品でありながら、旧アクセラの590MPa級から一気に1310MPa級へと高張力化が進んだ。これにより、従来工法の絞り工程→リスト工程では成形が成り立たないことを成形シミュレーションによる事前検証で確認した (Fig. 4)。

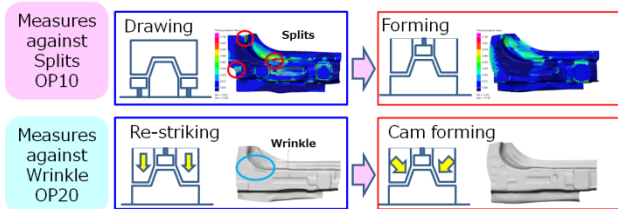


Fig. 4 Establish Forming Technology to Address 1310MPa Material

従来工法の初工程は絞り成形で大半の製品形状を成形し、次工程のリスト成形は残った細かな形状部分の成形を行う工程方案である。絞り成形は材料外周を強く拘束するためしわ抑制には有利であるが、それがゆえに延性の低い高張力鋼板では割れが発生する。そこで、1310MPa材においては初工程で材料外周を拘束しないフォーム成形とし、初期のしわ発生が多い平面視上部は先行的にパッドで押さえ込む工法を採用した。しかしながらそれだけでは、縦壁やフランジ部位にしわが発生するため初工程の予成形量や成形形状を適正化することで成立させた。一方、次工程のリスト成形では、初工程の予成形量が減ったことによる成形量増加と高張力化の影響で再びしわが発生した。これには、従来のプレス方向からの成形ではなく、しわを分散させやすい成形方向を導き出し、カム成形とすることで解決した。また、縁割れに関しては、材料端部に局所的にひずみが集中することで発生するため、材料端形状を扇状にすることで縁割れ懸念個所のひずみが均一になるよう工夫した。

これら一連の成形性向上策は工法のみならず、高精度な成形シミュレーションを活用し各工程が成立する成形パラメータを緻密に導き出すことで達成した。

2.4 寸法精度の課題解決の取り組み (FピラーIN)

FピラーINもHピラーRFと同様に旧アクセラに比べ、590MPa級→1310MPa級へ大幅な高張力化を進めた。更に板厚も1.8mm→1.4mmへと薄板化したことでボディの高強度化と軽量化の両立に成功した。この性能の両立はプレス部品からすると、特に剛性の低いFピラーINでは、薄板化でさらに剛性が低下し高張力化による成形後の内部応力増加の影響を受け、スプリングバック量の増加が顕著で寸法精度面の難易度が高くなる。また、寸法精度は図面寸法そのものが狙いであるが、スプリングバック量が大きくな

るにつれ、素材からプレス成形までの製造バラツキも無視できないものになる。そこで、スプリングバックそのものを抑制する形状凍結性を重視したプロセスに変革することを目指した (Fig. 5)。

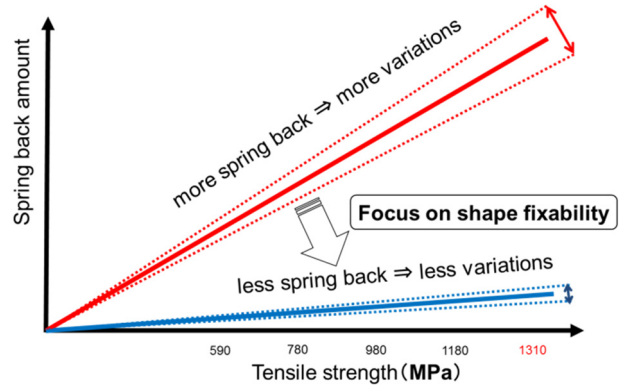


Fig. 5 Process Innovation for High Tensile Steel Sheet

スプリングバックを起こす要因は2つあり、一つは部品剛性、もう一つは成形時に発生する内部応力の不均一である。部品剛性は通常、車両性能面から決まるが、今回のFピラーINにおいては、車種開発の初期段階からボディ開発部門と共創することで性能と生産性を両立した部品形状を目指した。また内部応力の不均一についても、成形シミュレーションを活用し発生する応力不均一を見極めバランスさせるプレス方案や製品形状を開発した。その一例をFig. 6に示す。フロントウインドウの取付け部は弓型になっており、プレス成形時に材料が縮むことで圧縮応力が発生する。そのため弾性回復時に部品の両端が跳ね上がるキャンパーバックが起こる。そこで、あらかじめ縮み量を見越した座面を製品形状とすることでプレス成形後の圧縮応力を抑制できる。前述の共創活動の中で車両性能上も問題ないことを確認し採用した。

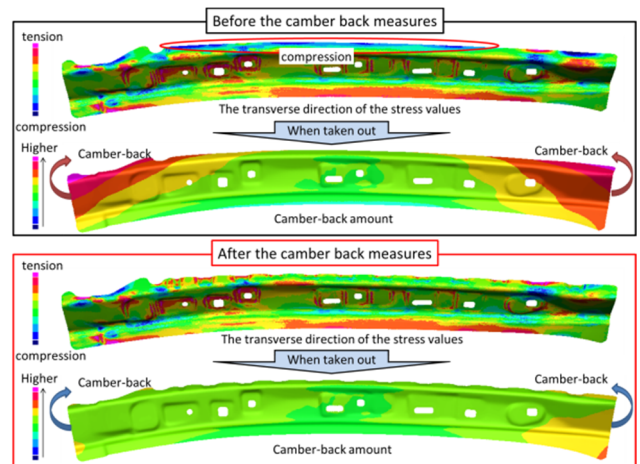


Fig. 6 Example of Spring-Back Suppression

2.5 せん断加工性の課題解決の取り組み

(1) せん断加工の過程

せん断加工はFig. 7の①～④の過程で加工される。まず、①下刃に置かれた鋼板が板押えで押えられた状態で上刃が下降し、だれが形成される。次に、②上刃下降に伴いせん断面が形成される。そして、③上下刃の刃先付近から亀裂が生じる。最後に、④この亀裂が進展することにより、破断面が形成され、加工が完了する。このせん断加工の過程で、上下刃間のクリアランスによってはカエリが発生する。このカエリの高さは、上下刃間のクリアランスが数十ミクロン変わるだけで増減する。増加するとプレス成形時の割れや接合時の部品間に隙間が発生するため、成形性・溶接性などに悪影響を及ぼす。

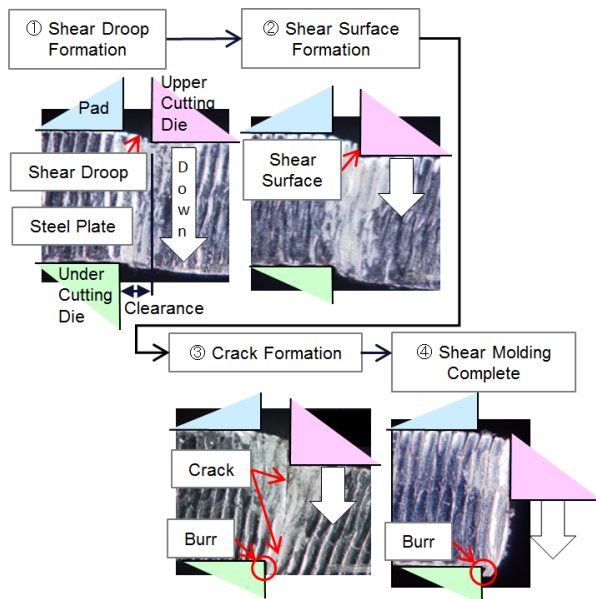


Fig. 7 Process of Shear Molding

(2) 1310MPa材のせん断加工実現のための課題

1310MPaの高張力鋼板では、せん断加工後に、Fig. 8のように、上刃刃先に塑性変形による損傷が見られた。

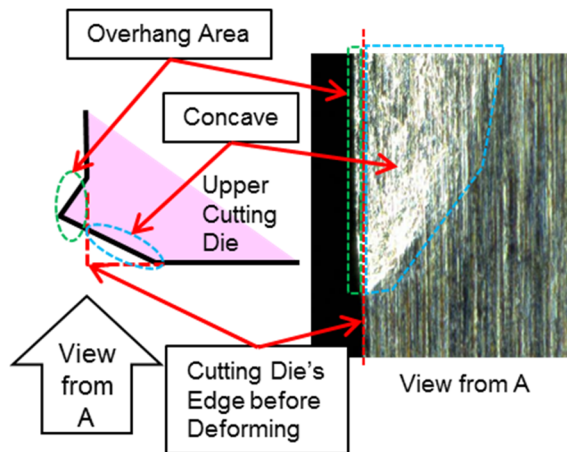


Fig. 8 Image and Photo of Upper Cutting Edge eformation

この塑性変形が進行し亀裂が生じると、せん断加工後に上刃が上昇する際、Fig. 9のように、①塑性変形により上刃が飛び出た部分に鋼板が引っ掛かり、②上刃の亀裂部から欠けが発生する。この欠けが発生すると、上下刃間のクリアランスが広がり、カエリ高さの増加となる。そのため、1310MPa材のせん断加工を実現する上での課題は、せん断加工時の上刃刃先の塑性変形問題を解決することである。

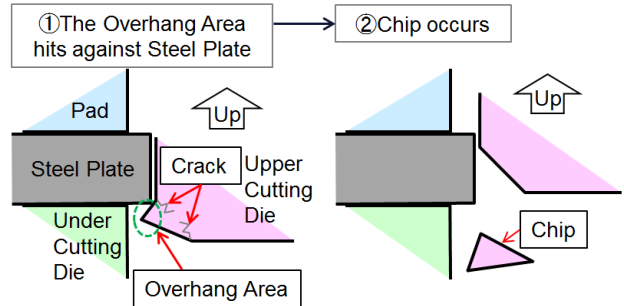


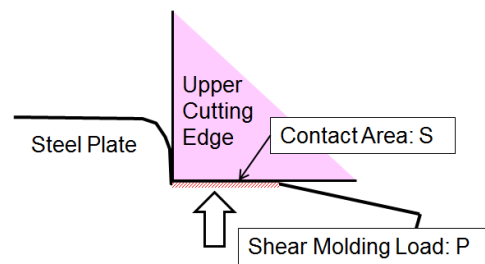
Fig. 9 Image of Chip Occurrence

(3) 上刃刃先の塑性変形問題解決への取り組み

1) 上刃刃先の塑性変形メカニズムの解明

はじめに、上刃刃先の塑性変形問題の解決に向け、高張力鋼板をせん断加工した際に刃先に発生する塑性変形のメカニズムの解明に取り組んだ。

上刃刃先の塑性変形は刃先にかかる応力が、降伏点を越えることで発生し、更に応力が高くなることで塑性変形量が大きくなる。この刃先にかかる応力は、Fig. 10のように上刃にかかるせん断荷重と上刃と鋼板の接触面積により決まるため、このせん断荷重と接触面積の2つの視点で上刃刃先の塑性変形の原因追究を行った。



$$\text{Stress on Upper Cutting Edge} = \frac{\text{Shear Molding Load: } P}{\text{Contact Area: } S}$$

Fig. 10 Stress on Upper Cutting Edge

まず、上刃刃先の塑性変形が起こる原因として、せん断荷重に着目した。せん断荷重P[N]は、せん断部の長さL[mm]、板厚t[mm]、引っ張り強さσ_B[MPa]としたとき、式(1)によって求められる。

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

1310MPa材は、鋼板の引っ張り強さ σ_B を高くすることで強度を上げつつ、板厚 t を薄くすることで軽くし、より軽量高強度なボディを実現している。そのため、式(1)により、理論上せん断荷重 P は減少する。このことは、実機検証結果からも確認できた。以上のことより、刃先の塑性変形量増加の原因は、せん断荷重ではないことが分かった。

次に、上刃刃先の塑性変形が起こる原因として、接触面積に着目した。接触面積の変化を確認するため、鋼板の引っ張り強さを変えて実機でせん断実験を行い、せん断後の上刃と鋼板の接触面積を計測した。その結果、引っ張り強さが上がるほど、接触面積が狭くなること確認できた (Fig. 11)。

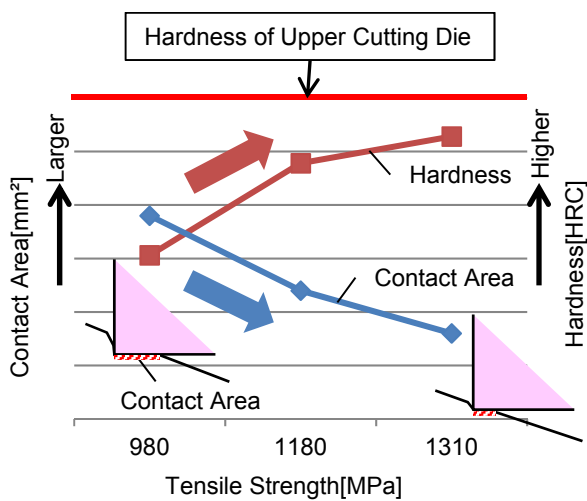


Fig. 11 Contact Area and Hardness per Tensile Strength

また、鋼板の硬度を計測した結果では、Fig. 11のように引っ張り強さが上がるほど、鋼板の硬度が切刃の硬度に近づいてきており、鋼板が変形しづらくなることで、上刃と鋼板の接触面積が狭くなることわかった。そのため、刃先にかかる応力が大きくなり、刃先の塑性変形が大きくなることわかった。

2) 刃先の塑性変形対策の取り組み

上記の刃先の塑性変形のメカニズムを基に、刃先の塑性変形の対策に取り組んだ。鋼板にかかる応力が降伏点を超えないようにするためには、Fig. 12のように①上刃の降伏点を上げる対策と、②刃先にかかる応力値を下げる対策の2つの対策が考えられる。

対策①として降伏点の高い切刃の材質に変更すると、大幅に材料費がかかってしまう。そのため、対策②の刃先にかかる応力を低減するための接触面積を広げる対策として、Fig. 13のように、抜き角を抑えることが有効であると考え、抜き角に着目した。

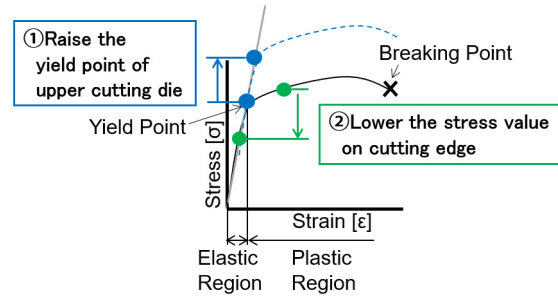


Fig. 12 Concept of Measures against Deformation

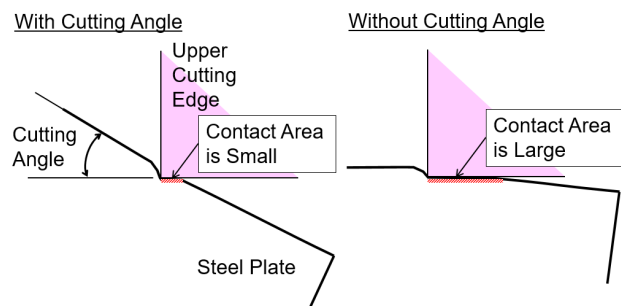


Fig. 13 Concept of Contact Area with and without Cutting Angle

そこで、抜き角を変更した際の接触面積と刃先の変形を実機により検証した結果、Fig. 14のように抜き角を抑えることで、接触面積を広げられ、刃先の変形も小さくできることが確認できた。この検証結果より、1310MPa材のせん断加工では、刃先が損傷しない抜き角を標準化し、それを達成するため新たに工程方案の見直しを行った。具体的には、せん断加工工程で問題ない抜き角に設定した展開形状にてせん断し、次工程でリスト成形を行い図面形状にすることで成立させた。

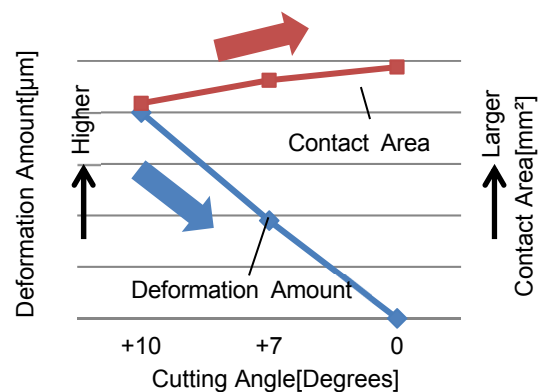


Fig. 14 Deformation Amount and Contact Area per Cutting Angles

以上のように、本章ではプレス成形性、寸法精度及びせん断加工性の課題に対しさまざまな取り組みを行い、衝突安全性と操縦安定性を両立したプレス部品の造りこみに成功した。これは高精度なシミュレーションを活用し、開発部門と生産技術部門の共創活動の中でボディー性能と生産性を追求することで実現した。

3. 抵抗スポット溶接の課題と取り組み

3.1 抵抗スポット溶接の原理

車体組み立て工程では主な接合法として抵抗スポット溶接を使用している。この接合法では、銅電極を用いてプレス成形部品を挟み、電流による抵抗発熱を利用して溶融部を形成する。一般的に高強度の材料ほど固有抵抗値が高いため発熱しやすくなり、材料硬度に起因する接触抵抗の影響を受けやすくなるため、材料特性に応じて適切に加工条件を設定する必要がある。Fig. 15は材料強度による加工条件の違いを図示したものである。材料単体の比較では、外板等に使う270MPa材と本稿の1310MPa材では加工条件のレンジが異なる。そのため、270MPa材と1310MPa材を組み合わせて溶接する場合、重なり合う加工条件のレンジが狭く、強度を保証しようとするスパッタが発生しやすいという問題がある。このスパッタは外板面にダメージを与えることから、魂動デザイン再現のためにはスパッタが出ないスポット溶接の実現が必須である。事前検証では高張力鋼板に対する有効な加工条件パターンを検討した。実験的に材料による条件レンジを吸収するため、電極で挟む力による通電面積の制御と、溶接電流の多段階制御による溶融状態の制御により、溶融部を安定して形成できる加工条件を実現した。

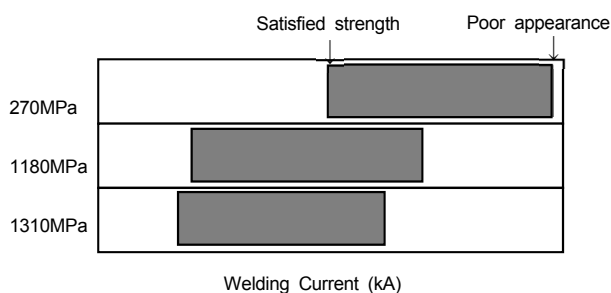


Fig.15 Effect of Tensile Strength of Base Steel on Suitable Welding Current Range

3.2 生産工程の課題と取り組み

実際の生産工程ではスポット溶接を高速(1点あたり1秒)で行う。一方で高張力鋼板向けに導出した加工条件は従来比で高い溶接電流と長い溶接時間となるため、高速で加工すると溶接機自体の放熱が間に合わず熱による故障が発生する。そのため、前述の加工条件を実現できる溶接機器仕様を決定し量産設備として導入している。具体的にはスポッ

ト溶接ガン内蔵の溶接トランスの定格容量UP、インバータ整流器のダイオードスタック容量UPにより、耐熱性を向上した。更に冷却水経路の見直しにより放熱効率も向上している。この設備を生産工程に導入し、高速で安定して接合を行える量産ラインを構築した。

3.3 生産管理の課題と取り組み

実際の部品に対する溶接では、特定の打点で部品形状及び加工位置の微小な差により溶接時のスパッタが発生してしまう場合がある。3D計測機の活用により部品に対する加工位置の適正化を実施しているが、最終的にスパッタ撲滅を達成するには1点1点に対する加工条件の緻密な調整が不可欠である。クルマ一台当たりの溶接打点数は数千点にも及ぶため、ヒトによる管理には限界がある。そこで溶接ガン先端部の状況を定量データで可視化するシステムを導入し、設備のネットワーク経由で生産中のデータを自動収集/判定する仕組みを導入した。これらのシステムを活用することで、量産移行前に加工パラメータが適正であることをデータで確認し、1点1点の溶接加工の最適化を短い量産準備期間の中で達成した。

また、溶接検査工程において、従来行ってきたタガネを挿し込む検査方法ではクルマに微小な傷が残る可能性があるため、傷のつかない磁気タイプの非破壊検査装置を導入した。これらの検査データもネットワーク経由で収集し、異常を検出する精度/感度を高めている。

以上の取り組みにより、これらの打点の1点1点の加工を鋼板の組み合わせに応じて最適化することで、お客様にお渡しするクルマの安全性を保証している。

4. ボディーの精度保証

ボディー精度は複数のプレス部品を接合し、多数の車体組立工程を経て精度を保証する。ボディー精度を保証するために、位置決め、拘束、接合、解放という実ラインのプロセスを机上検証し、車体でボディー精度をコントロールする条件を車体組立ての各工程へ織り込んだ。位置決めと、拘束と解放の事例を中心に紹介する。

4.1 位置決めの取り組み

2.4で紹介した通り、プレス部品の寸法精度は高張力化が進むにつれて、成形後の内部応力影響を受け、弾性変形の増加によって寸法精度保証の難易度が高くなる。ボディー精度はプレス部品同士を接合するときの隙間や部品同士の干渉の影響を受けやすく、接合面精度を保証するうえで大切な条件の一つである。そこで、弾性変形後のプレス精度の早期向上と精度の安定化、ボディー精度保証を早期にかつ経済的に行うため加工基準の使い方を1310MPa材で見直した。加工基準とは、図面で決められた空間上の位置に部品を固定し、接合による変形をコントロールしながら

狙いのボディ精度を確保するための穴と面のことである。これまでの考え方は、図寸で決められた位置の穴と面により絶対値を完全固定することで部品とボディ精度を保証するものであった (Fig. 16)。

1310MPa材を使うにあたり精度の作り込みに、実際に計測した部品精度をフィードバックすることで、部品精度を保証する考え方へ変えた (Fig. 17)。これにより、接合面精度の調整範囲と量が適正化され、ボディ精度を造りこむための条件を早期に実現することが可能となった。

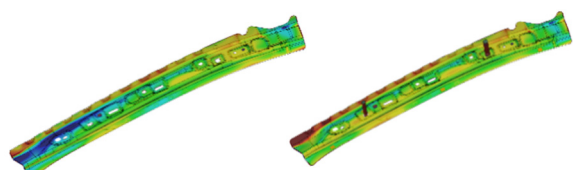


Fig. 16
Nominal Locating

Fig. 17
Feedback Locating

4.2 拘束の取り組み

部品を位置決めした後は、接合時に変形しないように拘束をする必要がある。今まで部品を拘束するために必要な力は、治具標準で決まった力で拘束していた。1310MPa材の導入するに先立ち、今までと同じ標準で問題ないかを再検討するため、2.4で実施した成形シミュレーション結果から加工基準にかかる反力を求めることで適正な拘束力を設定した。適正な力で拘束した部品同士を、接合によりその位置にとどめ、解放しても狙いの精度が保たれていることが条件となる。成形シミュレーションの結果から求めた拘束力をCAEで解析を行い、部品同士を接合し拘束力を解放したときにおこる精度変化が発生しないことをCAE上で検証することで仮説として完成させた。

4.3 精度保証

見直しを行った位置決めと、シミュレーション結果から得られた必要機能が確実に折り込まれていることを確認した後に、ボディ精度に対して狙いの精度が保証可能か、実機で検証を実施した。3次元測定器を用いて、工程の精度、部品の精度、位置決めから解放までのプロセスを計測していくことで狙いのボディ精度が確保できていることが確認できた。新しい構造に対して、CAEで事前予測を行い、現物で確からしさを確認するというプロセスを進めることで、図面検討段階中の構造変化に迅速に対応し、予測から考えられる対策をプロセスごとに反映していく活動により、狙いのボディ精度品質を早期に実現させた。

5. おわりに

お客様に意のままに動く「人馬一体」のドライブフィールと安全性を兼ね備えた車をお届けし、クルマのある生活を

楽しんでもらいたいという思いで、世界で初めての1310MPa高張力鋼板をボディに使用した。これまで積み上げてきたプレスとボディアセンブリの技術を、精度品質を含め一貫したプロセスとして組み込んだ。新型MAZDA3の人馬一体実現の裏側には、このようなつくり方の技術の詰め込みがあることをお分かりいただけたと思う。

この新手法で実現した乗り心地を新型MAZDA3で楽しんでいただきたい。

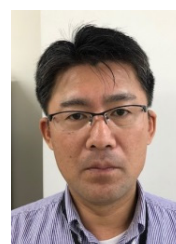
参考文献

- (1) 坂野ほか：1180MPa級高強度鋼板のボディへの適用について、[マツダ技報, No.32, pp.65-70 \(2015\)](#)

■ 著 者 ■



酒井 明



松本 茂



矢野 峰治



田丸 真司



新井 直樹



吉崎 真吾



庄司 庸平



末長 昭大