

車体ものづくりの変革に対応した部品統合技術

Component Integration Technology for Transforming Vehicle Manufacturing

揚場 遼 AGEBA Ryo	JFE スチール スチール研究所	薄板加工技術研究部	主査研究員
岸上 靖廣 KISHIGAMI Yasuhiro	JFE スチール スチール研究所	薄板加工技術研究部	主査研究員・博士 (工学)
飛田 隼佑 TOBITA Shunsuke	JFE スチール スチール研究所	薄板加工技術研究部	主任研究員
澄川 智史 SUMIKAWA Satoshi	JFE スチール スチール研究所	薄板加工技術研究部	主査研究員・博士 (工学)

要旨

近年、車体の製造コスト低減を目的とした自動車部品の統合が進められている。新興自動車メーカーを中心にギガキャストと呼ばれる大規模アルミ鋳造部品が実用化され、これに対抗するように、各自動車部品メーカーや鉄鋼メーカーからホットスタンプによる部品統合が提唱されている。これらの技術を用いた部品削減により、金型数削減や組み立て工程の省略を狙うが、物流や補修性等の課題も多い。JFE スチールでは、ギガキャストやホットスタンプとは異なるアプローチとして、超ハイテンと冷間プレスを活用した部品統合技術を開発している。本稿ではその検討例として、ドアリングアウトとリアメンバモジュールについて、衝突性能と成形性を考慮した、冷間プレスに適した部品統合構造を紹介する。

Abstract:

This paper discusses the integration of automotive parts aimed at reducing manufacturing costs for vehicle bodies. While emerging automakers are advancing the practical application of large aluminum cast components known as “Mega-casting,” automotive parts suppliers and steel makers are proposing part integration through hot stamping as a countermeasure. These technologies aim to reduce the number of dies for stamping and streamline assembly processes, yet they also present challenges related to logistics and repairability. JFE Steel is developing an alternative approach using ultra-high-strength steel and cold stamping for part integration. This report presents an optimal integrated structure using cold pressing for the door ring outer and rear member module, considering collision safety performance and formability.

1. はじめに

自動車車体製造工程の簡素化や製造コスト低減を目的とした、自動車部品の統合が盛んに検討されている。新興自動車メーカーを中心に、ギガキャストと呼ばれる大型のアルミ鋳造部品の自動車車体への適用が拡大しており¹⁾、日系メーカーも検討を進めている²⁾。また、自動車部品メーカーや大手鉄鋼メーカーは、ホットスタンプを用いた部品統合を提唱している³⁾。これらの技術は、従来どおり自動車用鋼板を冷間プレス成形して製造する部品と比較し、材料コストや生産速度の制約から単品製造コストは上昇する傾向にあるが、部品点数の大幅削減によるプレス金型数の削減、生産準備コストの削減、および組み立て工程の省略を狙っている。したがってコスト削減効果を最大化し、従来の車体製造比でコストを削減するためには、相当数の部品を統合する必要があり、例えばギガキャストの必要統合部品点数は数

十にも及ぶとされる。さらに、部品統合によるモジュール大型化に伴う物流コストの上昇および補修性の悪化など、課題も多い。

JFE スチールでは、ギガキャストやホットスタンプとは異なるアプローチとして、超高強度鋼板（以下、超ハイテン）材と冷間プレス成形を活用した部品統合を検討している。冷間プレスによる部品統合は、成形性の課題のため、部品統合により削減可能な部品点数には制限がある。一方で、前述の部品統合技術とは異なり、小規模な部品統合でもコストメリットが期待できること、物流コストや補修性の課題についても影響度を考慮しつつ統合部品を選択可能であることなど、利点が多い。本稿では、JFE スチールにおける部品統合検討の概要と、衝突性能を考慮した最適な統合部品構造の例、さらには超ハイテン材と冷間プレスで試作した統合部品を紹介する。

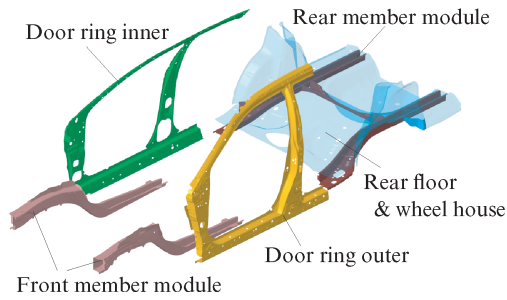


図1 JFE スチールにおける部品統合検討対象部位

Fig. 1 Target areas for component integration study by JFE

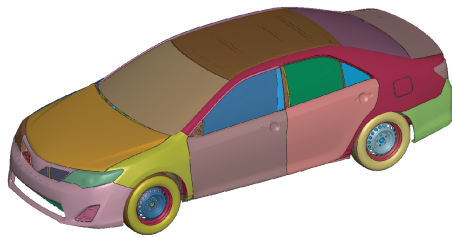


図2 部品統合検討用の車体モデル

Fig. 2 Full vehicle model for component integration study

2. 冷間プレスによる部品統合コンセプト

図1に示すように、フロントメンバモジュール、ドアリングインナー、ドアリングアウター、フロアパネル類、リアメンバモジュール等、自動車ホワイトボディのさまざまな部位を対象に、冷間プレス成形を活用した部品統合構造を開発している。前章で述べたとおり、冷間プレスでの部品統合は、成形性の課題からギガキャストやホットスタンプほどの部品点数削減が難しい一方で、小規模な部品統合でもコストメリットを出しやすく、最適設計に対する自由度も高い。本稿では特に、ドアリングアウターとリアメンバモジュールについて、衝突性能に着目した冷間プレス部品統合構造の検討内容を示す。さらに、リアメンバモジュールについては、考案構造を実現するための成形技術の一部についても併せて述べ、実際の部品試作結果を示す。検討に際しては、National Crash Analysis Center (NCAC) のホームページで公開されているトヨタ カムリ (2012) のLS-DYNA 向け衝突解析用車体データ (図2) を用いた。部品の材料構成については、各章での比較検討に適するよう適宜変更を加えた。

3. 部品統合の構造検討事例

3.1 ドアリングアウターの部品統合

ドアリングアウターは、多くの自動車部品メーカーや鉄鋼メーカーがホットスタンプによる一体化を志向しており、複数社から検討内容や展示品が発表されている。冷間プレス

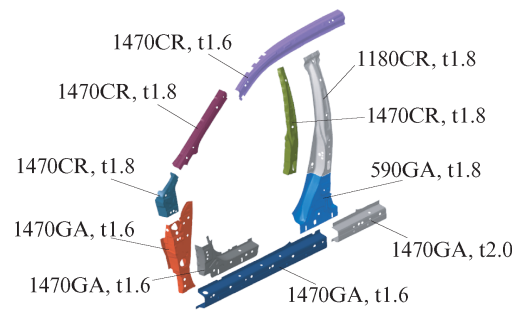


図3 冷間ハイテン適用従来ドアリング

Fig. 3 Conventional door ring structure using cold stamping

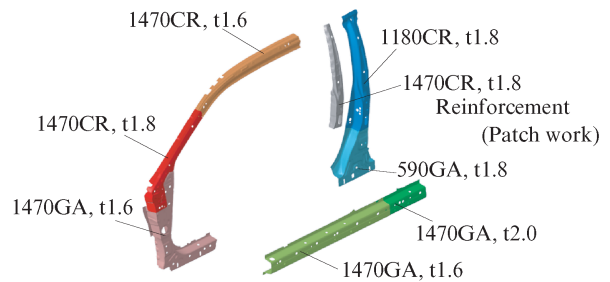


図4 冷間ハイテン適用統合ドアリング (三部品構造)

Fig. 4 Semi-integrated (three-piece) door ring structure using cold stamping

成形による部品統合検討の際に着目したのは、成形性に加え、ドアリングアウターに要求される各衝突モードにおける性能である。成形面で冷間プレスが可能となる制約下で、必要な衝突性能を満たす構造を考案した。

まず、検討対象としたドアリングアウターは計10部品からなる (図3)。図中の材料表記は、引張強度のグレードを表す数字に鋼種 (CRが裸材, GAが溶融亜鉛メッキ材) を併記し、板厚は、例えば1.0 mmであれば「t1.0」のように示した。以下、本章ではこの構造を従来構造と呼称する。従来構造のドアリング総重量は36.7 kg/台であった。次に開発構造を図4に示す。フロントピラーロアからルーフサイドレールまでを統合して1部品とし、サイドシル、センターピラーをそれぞれ1部品とした、合計3部品からなる構造 (以下、三部品構造) とした。総重量は32.9 kg/台であった。強度、板厚が異なる部位の境界はブランク時点でレーザー溶接する Tailor welded blank (TWB) とした。センターピラー部のレインフォース部品については、ブランク時点でスポット溶接した上で重ねて成形する「冷間パッチワーク工法」を適用することとした。さらに、比較としてホットスタンプによる一体構造 (以下、ホットスタンプ構造) を図5に示す。強度は一様に1500 MPaとし、板厚が異なる部位についてはTWBを適用した。センターピラー部のレインフォース部品については、こちらもパッチワーク構造を想定している。板厚構成は三部品構造と同様としたが、総重量

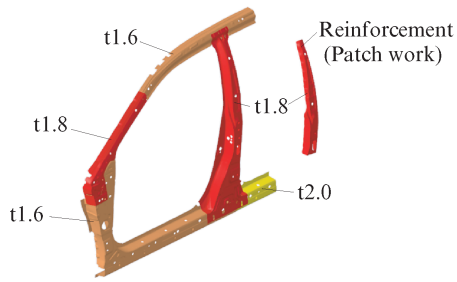


図5 ホットスタンプ適用一体ドアリング

Fig. 5 Fully-integrated door ring structure using hot stamping

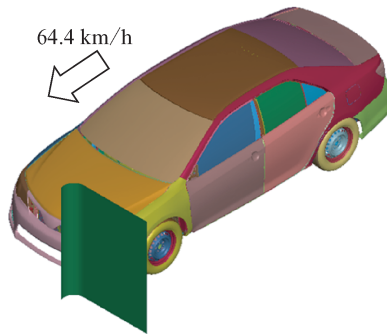


図6 微小ラップ前面衝突解析モデル

Fig. 6 Analysis model of small overlap front crash

は 29.6 kg/台と軽量であった。

次項以降、FEM 解析を用いた微小ラップ前面衝突、ポール側面衝突、および MDB (Moving Deformable Barrier: 移動式変形バリヤ) 側面衝突の評価結果について述べる。衝突解析ソルバーは ANSYS 社の LS-DYNA R9.2.0 を用いた。

3.1.1 微小ラップ前面衝突

微小ラップ前面衝突の解析モデルを図 6 に示す。車体の速度を 64.4 km/h として剛体壁に衝突させた。この条件のもとで、3.1 節で示した 3 種のドアリング構造を有する車体の応答をストローク荷重線図で比較した。結果を図 7 に示す。ドアリングの寄与が大きいストローク 1 000 mm ~ 1 200 mm 付近の荷重を比較すると、従来構造と三部品構造はほぼ等しく、ホットスタンプ構造は 10.3% 低い値を示した。

3.1.2 ポール側面衝突

ポール側面衝突の解析モデルを図 8 に示す。車体の速度を 32.0 km/h として直径 254 mm の剛体のポールに進入角度 75° で衝突させた。この条件のもとで、3.1 節で示した 3 種のドアリング構造を有する車体の応答をストローク荷重線図で比較した。荷重はポールの反力で、ストロークは変形を生じない逆側のサイドシル上の点の移動量で定義した。結果を図 9 に示す。ドアリングの寄与が大きいストローク 350 mm ~ 400 mm 付近の荷重を比較すると、従来構造と三部品構造はほぼ等しく、ホットスタンプ構造は約 3.0% 低い

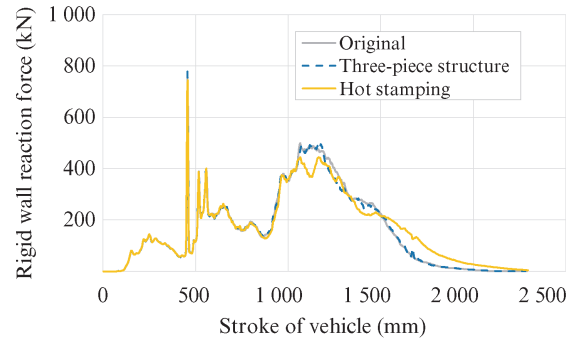


図7 微小ラップ前面衝突の荷重ストローク線図

Fig. 7 Load-Stroke diagram of small overlap front crash

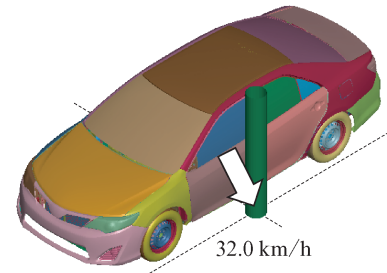


図8 ポール側面衝突解析モデル

Fig. 8 Pole side-impact analysis model

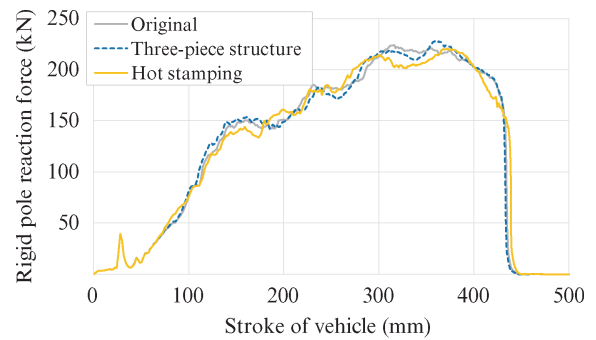


図9 ポール側面衝突の荷重ストローク線図

Fig. 9 Load-Stroke diagram of pole side-impact

値を示した。

3.1.3 MDB 側面衝突

MDB 側面衝突の解析モデルを図 10 に示す。台車の速度を 55.0 km/h として側面から車体に衝突させた。この条件のもとで、3.1 節で示した 3 種のドアリング構造を有する車体の応答をセンターピラーと運転席シートまでの距離の時間変化で比較した。結果を図 11 に示す。従来構造と三部品構造はほぼ等しかったが、ホットスタンプ構造は約 12 mm 侵入量が小さく、優位であった。これは、ホットスタンプ一体構造は、材料強度を 1 500 MPa で統一し、板厚構成をその他のケースと同様としたことによる強度差がそのまま表れたためであると考えられる。

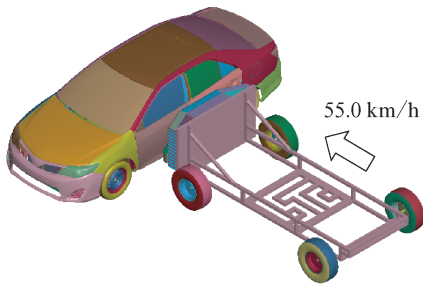


図 10 MDB 側面衝突解析モデル
Fig. 10 MDB side-impact analysis model

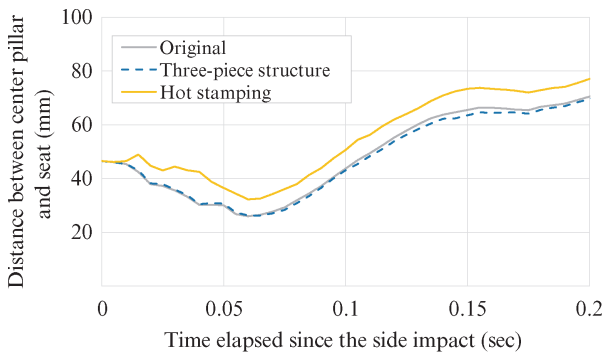


図 11 側面衝突におけるセンターピラーとシート間距離
Fig. 11 Distance between center pillar and seat in side impact

3.1.4 冷間プレスによる三部品構造の優位性

MDB 側面衝突では材料強度がそのまま性能に影響したため、ホットスタンプ構造が性能優位であったが、微小ラップ前面衝突とポール側面衝突では、材料強度の構成が劣位であるにもかかわらず、従来構造および三部品構造が性能優位であった。その理由のひとつに、センターピラー下部の変形状態の違いが考えられる。図 12 は、ポール側面衝突のストローク 250 mm 時点でのセンターピラー下部の変形状態を車体の側面から見て比較したものであり、さらにこの時の AA' 断面を併せて示した。側面図において、ホットスタンプ構造は図中左下のサイドシル下部が大きく変形していることが見て取れる。これが荷重低下の要因のひとつであるが、変形状態に差異が生じる理由として、AA' 断面および BB' 断面におけるサイドシル上面および上面と側面を接続する稜線の有無が考えられる。ホットスタンプ構造は、サイドシルとセンターピラーが統合されているため、この部位が存在しない。微小ラップ前面衝突については変形状態の図示を省略するが、ポール側面衝突と同様、この部位が重要な役割を担う。冷間プレスによる部品統合では、小規模な部品統合でもコストメリットが見込めるため、このように性能面で重要な部位を敢えて統合せず、分割を維持する選択が容易である。

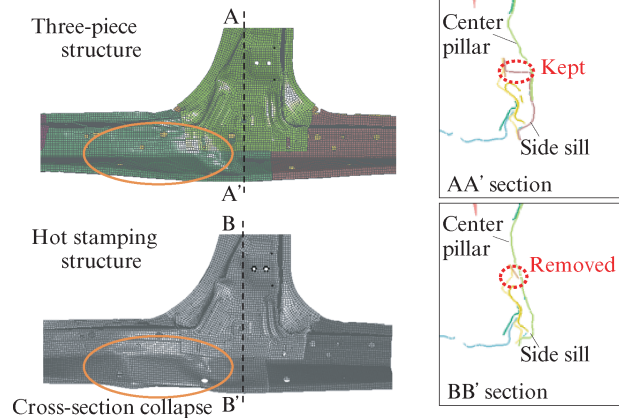


図 12 ポール側面衝突時のセンターピラー下部変形
Fig. 12 Deformation of lower center pillar in pole side-impact

3.2 リアメンバモジュールの部品統合

リアメンバモジュールは、ドアリングアウターと同様、複数の自動車メーカー、部品メーカーからホットスタンプによる一体構造の検討対象とされている。JFE スチールは、冷間プレスでの部品統合に適した構造を 2 種考案した。まず、対象とした計 11 部品からなるリアメンバモジュールを図 13 に示す。図中の材料表記は、3.1 節のドアリングアウターと同様とした。リアメンバモジュールは後面衝突から車体を保護する役割を持つ部位であり、サイドメンバに着目すると、非変形部である車両前側は、補強部材を含めて板厚が厚く設定されており強度が高く、エネルギー吸収部である車両後側の強度が相対的に低い。総重量は 14.8 kg であった。以下、この構造を従来構造と呼称する。次に 2 種の開発構造について述べる。いずれの構造も、左右一対のサイドメンバとそれらを接続する 1 本のクロスメンバの計 3 部品からなる。クロスメンバ部は、従来構造ではサイドメンバとの接続部品を含め 590 MPa の 1.0 mm で統一された 3 部品であったものを、同強度、同板厚の 1 部品に統合した。開発構造 2 種の違いはサイドメンバであり、いずれもサイドメンバを一体としながらも部品前後に強度差が生じるよう工夫した。図 14 に示す構造は、サイドメンバを 1470 MPa 級鋼板を TWB で板厚差をつけた構造（以下、1470TWB 構造）で、クロスメンバを含む総重量は 11.5 kg であった。もうひとつの開発構造は、図 15 に示すとおり、サイドメンバ前方の補強材をブランクの段階でスポット溶接することで部品を統合する「冷間パッチワーク工法」を適用した構造（以下、冷間パッチワーク構造）とした。総重量は 12.3 kg であった。比較として、ホットスタンプによる一体構造を図 16 に示す。クロスメンバとの接続部の形状が、他の構造と異なる。強度は一樣に 1500 MPa とし、重量を 1470TWB 構造とおおよそ一致させるため、板厚は 1.6 mm で統一した。重量は 11.3 kg であった。

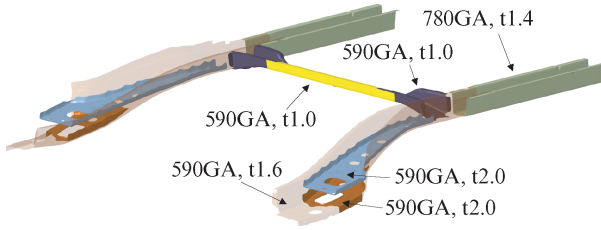


図 13 従来のリアメンバモジュール構造

Fig. 13 Conventional rear member module structure

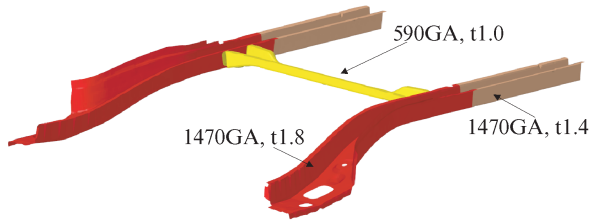


図 14 1470TWB 構造

Fig. 14 1470 TWB structure

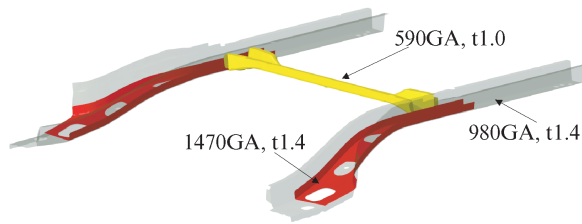


図 15 冷間パッチワーク構造

Fig. 15 Patchwork structure

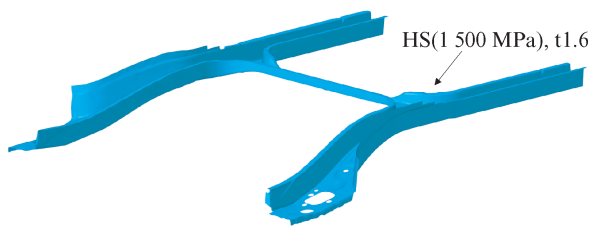


図 16 ホットスタンプ構造

Fig. 16 Hot stamping structure

3.2.1 リアメンバモジュールの後面衝突性能

前項で示したそれぞれのリアモジュール構造を有する車体の後面衝突性能を FEM 解析により比較した。後面衝突解析モデルを図 17 に示す。50 km/h で後方へ動く車体を剛体壁へ衝突させた。解析結果として、荷重ストローク線図を図 18 に示す。ここで、ストロークは運転席の移動量、荷重は剛体壁の反力とした。総ストロークは従来構造と比較し、その他すべての構造の方が小さく、優位であった。いずれも従来構造と比較して軽量化しているが、材料のハイテン化が影響した結果となった。また、開発構造 2 種はストローク

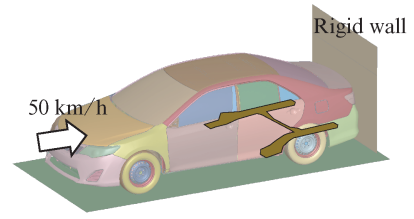


図 17 後面衝突解析モデル

Fig. 17 Full vehicle model for component integration study

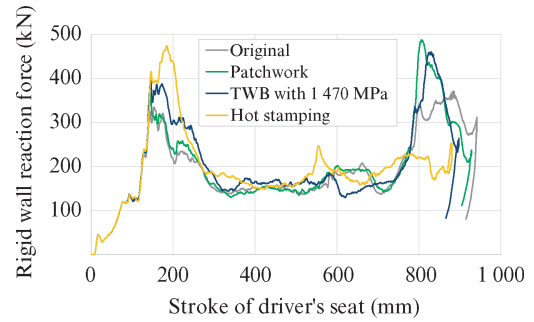


図 18 後面衝突解析における荷重ストローク線図

Fig. 18 Rear impact analysis model

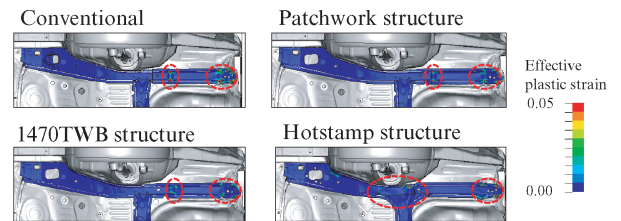


図 19 後面衝突時のリアメンバモジュール変形比較

Fig. 19 Comparison of rear member module deformation during rear impact

100 mm から 200 mm 付近、およびストローク 800 mm から 900 mm 付近で荷重が大きくなったが、ホットスタンプ構造では後半の荷重上昇が発生しなかった。100 mm から 200 mm の最大荷重が他の構造よりも大きかったことが要因と考えられる。次に、ストローク 200 mm 付近における変形の様子をひずみのコンター図として図 19 に示す。従来構造および開発構造 2 種は、リアサイドメンバ後部に变形が生じた。一方、ホットスタンプ構造では後輪付近のクロスメンバ接続部に变形が生じたが、後部の变形が完了する前にキャビンに近い部位が变形することは好ましくない。ホットスタンプ構造でこのような変形が生じたのは、サイドメンバとクロスメンバの接続部付近の縦壁と稜線が省略されたことが要因であると考えられる。補強部品の追加等でこの部位の早期変形を回避する必要があるが、その結果さらなるコストアップに繋がる懸念がある。

本検討では、FEM 解析を実施するにあたって材料破断を

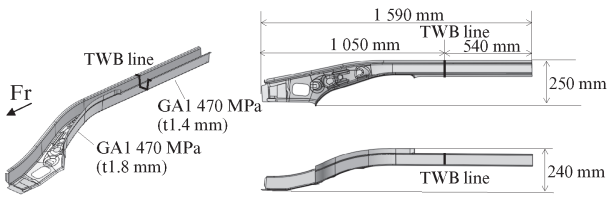


図 20 1470TWB 構造のサイドメンバ
Fig. 20 Side member of 1470 TWB structure

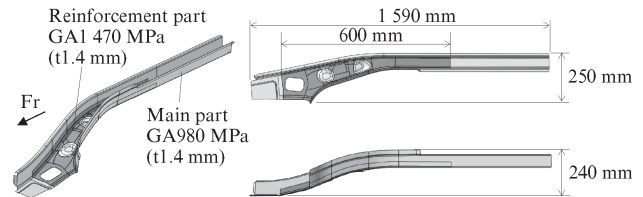


図 22 冷間パッチワーク構造のサイドメンバ
Fig. 22 Side member of patchwork structure

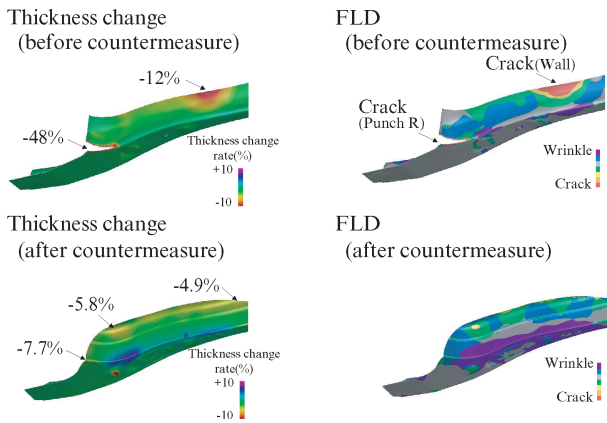


図 21 対策前後の板厚減少率と FLD 判定比較
Fig. 21 Comparison of thickness reduction rate and FLD judgment before and after countermeasures

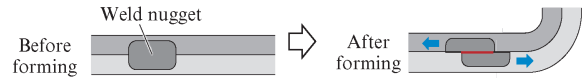


図 23 プレス成形中の溶接ナゲット破断
Fig. 23 Weld nugget fracture during press forming

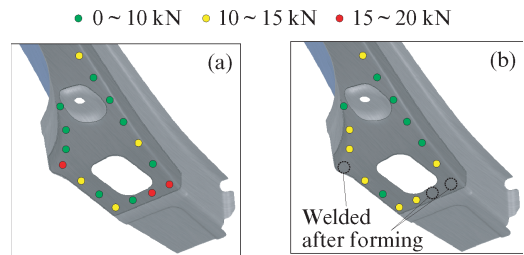


図 24 プレス成形における最大せん断荷重
(a) すべて成形前に溶接 (b) 一部の打点は成形後に溶接
Fig. 24 Maximum shear load at welding spots during 1st and 2nd forming; (a) all welding spots, (b) selected welding spots

考慮しなかったが、実際は破断によるエネルギー吸収性能低下が生じる。その場合はサイドメンバ後部側に、例えば高延性かつ高穴広げ率のハイテン材⁴⁾を適用することにより、材料破断を回避できる可能性がある。部位ごとに適した材料を配置しやすく、その選択肢が多いことも冷間プレスを用いた開発構造の利点と考えられる。

3.2.2 1470 MPa 級鋼板 TWB 構造の成形課題と対策

1470TWB 構造のサイドメンバは、図 20 に示すように、車両前方は GA1470 MPa 材 (t1.8 mm)、車両後方は GA1470 MPa 材 (t1.4 mm) を適用し、TWB で接合した一体構造である。部品形状は長手 1590 mm、幅 250 mm、高さ 240 mm で、上面視と側面視それぞれで湾曲している。1470 MPa 級鋼板によるプレス成形としては非常に難度が高く、割れ、座屈しわ、スプリングバックによる寸法不良と、多くの課題が生じたが、JFE スチールで開発した種々の超ハイテン成形工法を適用し、これらを解決した。ここでは割れ対策の結果を図 21 に示す。対策前は板厚減少率が 48%と、致命的な割れが発生する予測であった。これに対し、成形中の材料移動方向を制御する工法や、ブランク形状の最適化等の対策により、板厚減少が大きく緩和され、FLD による割れ判定でも問題なく成形できる結果が得られた。

3.2.3 冷間パッチワーク構造の成形課題と対策

冷間パッチワーク構造のサイドメンバは、図 22 に示す通り、板厚 1.4 mm の 980 MPa 級 GA 鋼板を適用し、前側

の非変形部位に相当する位置に板厚 1.4 mm の 1470 MPa 級 GA 鋼板からなる補強部品を重ね合わせた構造である。外形は 1470TWB 構造のサイドメンバと同様である。こちらも成形上の種々の課題があったが、ここでは成形時のスポット溶接点のナゲット破断対策について述べる。冷間パッチワーク工法は前述したとおり、先に重ね合わせた 2 枚のブランクをスポット溶接し、その後プレス成形をする工法であるが、プレス成形中、図 23 に示すように 2 枚のブランク間にズレが生じ、せん断変形によるスポット溶接点のナゲット破断が懸念される。図 24 に各スポット溶接点成形中に受ける最大のせん断荷重を示す。曲げ稜線に近くかつ端部の溶接部では 2 枚のブランクの相対変位が大きく、せん断荷重が過大となった。過去に実施した溶接試験片の引張試験の結果から、ナゲット破断に至るせん断荷重の閾値を 15 kN とし、閾値以上のスポット溶接点は破断リスクありと判断した。そこで、これら破断リスクがある溶接点を省略して成形すると、省略した溶接点の隣の溶接点のせん断荷重は増加する結果となったものの、最大荷重が 15 kN を超えることはなく、破断は生じないと判断した。省略した溶接点は、プレス成形

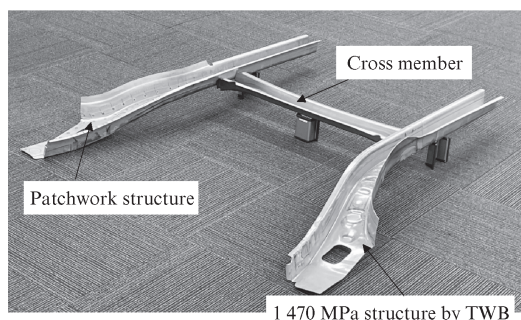


写真1 リアメンバモジュールの冷間プレス試作品

Photo 1 Prototype of rear member module using cold stamping

後にスポット溶接することとした。以上の対策により、スポット溶接部のナゲット破断懸念を解消した。

3.2.4 リアメンバモジュールの試作結果

前述した2種のリアサイドメンバの構造および成形工法で、冷間プレス成形により部品を試作した。いずれも、冷間プレス成形2工程とした。クロスメンバはリアサイドメンバとの接続部品を含めて3部品だったものを統合し、リアサイドメンバと同じく冷間プレス成形2工程で作製した。試作部品の写真を写真1に示す。いずれの部品も、実際に問題となるような割れやしわなく成形でき、寸法精度についても応力を制御するスプリングバック対策により断面開きやねじれが無いことを確認した。

4. おわりに

本稿では、JFE スチールにおける、超ハイテンと冷間プレスを用いた部品統合検討について紹介した。

ギガキャストやホットスタンプによる部品統合は、種々の懸念点があることや高額な設備投資が必要となることから、導入に慎重なメーカーが多い。一方、冷間プレスによる部品統合は、成形荷重増大等の一部成形課題への対応を除いては、現行設備で適用可能であるためハードルが低く、コストメリットが得られやすいと考えられる。

冷間プレスによる部品統合を実現するためには、適した材料開発はもちろん、プレス成形技術や溶接技術といった鋼板利用技術のさらなる深化が求められる。JFE スチールでは、このような要素技術の開発と、本稿で例として紹介したドアリング開発、リアサイドメンバモジュール開発のような要素技術の適用検討を継続し、自動車車体製造のコスト低減と品質向上に寄与していく。

参考文献

- 1) 渡辺千明. 乗用車 (総合, デザイン, 車体構造). 自動車技術. 2024, vol. 78, no. 8, p. 46-62.
- 2) 槇徹雄. 衝突安全技術から見た自動車車体の現状と将来. 自動車技術. 2024, vol. 78, no. 3, p. 12-18.
- 3) 木元野樹ほか. ホットスタンプ材を用いた高機能一体化部品を実現する要素技術開発. 自動車技術会 学術講演予稿集 (春). 2024, no. 26-24.
- 4) 堺谷智宏ほか. 980 MPa 級高張力鋼板の軸圧壊変形における破断現象. 自動車技術. 2021, vol. 52, no. 1, p. 197-202.