

電気自動車のバッテリー保護に寄与する構造設計と性能評価技術

Structural Design for Battery Protection of Electric Vehicles and Crash Performance Evaluation Techniques

| | | | | | |
|-------|--------------------|----------|---------|-----------|----------|
| 石川 俊治 | ISHIKAWA Toshiharu | 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 |
| 堺谷 智宏 | SAKAIDANI Tomohiro | 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 |
| 大西洋一郎 | OHNISHI Yoichiro | JFE スチール | スチール研究所 | 薄板加工技術研究部 | グループリーダー |
| 時田 裕一 | TOKITA Yuichi | JFE スチール | スチール研究所 | 薄板加工技術研究部 | グループリーダー |

要旨

JFE スチールは薄鋼板を活用した部品設計提案に取り組んでいる。本稿では、電気自動車の電池保護に寄与する構造設計と性能評価技術について報告する。アルミ押出し材に代わる鋼板製サイドシル補強構造を 2 種類開発し、軽量化と衝突性能の両立を実現した。また、大容量のアルミ製バッテリーケースより軽量で衝突性能が同等の、鋼板製のバッテリーケースを設計した。衝突性能評価では、実車挙動を模擬する試験技術を確認し、スモールオーバーラップや前面衝突に対応した部品設計に寄与した。これらの成果は、電気自動車の安全性向上とコスト競争力のある車体構造の実現に貢献する。

Abstract:

JFE Steel is engaged in proposing component designs utilizing steel materials. This report presents structural design technologies focused on battery protection in electric vehicles. Two types of steel-reinforced side sill structures were developed as alternatives to aluminum extrusions, achieving both weight reduction and crash performance. Additionally, a large steel battery case was designed to be lighter than conventional aluminum cases while maintaining equivalent crash safety. In crash performance evaluation, testing techniques simulating actual vehicle behavior were established, contributing to component designs that address small overlap and frontal impacts. These achievements support enhanced EV safety and the realization of cost-competitive vehicle structures.

1. はじめに

環境保護の観点からバッテリー電気自動車 (BEV) が世界各国で開発され、自動車総生産台数に占める比率が近年急上昇している¹⁾。BEV は航続距離の長さを確保することが重要であることから、車両床下に大容積かつ大重量のバッテリーユニットを搭載する構造を有することが多い²⁾。バッテリーユニットは従来以上に衝突時の変形を厳重に管理する必要があるため、周辺構造が強靱になり、重量が増加する傾向にある。一方で航続距離延長には車両軽量化が必要であることから、各部品の素材にアルミニウムなどの低比重素材を使用することが多いが、鉄鋼素材と比較して素材価格が高く、ヤング率が低いことに起因して軽量化効果が少ないことから、適用車種や適用部位が限られる傾向にある。また素材の製造コストや製造時の CO₂ 排出量は鉄鋼素材の方が低い³⁾。

これらのことから、前突対応エネルギー吸収 (EA: Energy

Absorption) 部品であるフロントサイドメンバやバンパリンフォース、側突対応 EA 部品のサイドシルおよびその内部構造、そしてバッテリーユニットを、素材コストや CO₂ 排出の観点から圧倒的に有利な鉄鋼素材を用いて、従来同等もしくは下回る重量とすることは非常に重要である。

本稿では、上記の JFE スチールで独自開発した鋼板製構造に加えて衝突性能評価に必要な評価技術およびその技術で評価した新材料について紹介する。

2. BEV バッテリー保護構造の設計

2.1 サイドシル内部構造

2.1.1 アルミ押出し材の課題と研究目的

前述のとおり BEV は車両床下に大容積バッテリーユニットを搭載するため、ポール側面衝突 (ポール側突) 時の EA ゾーンが従来と比較して小さいことが課題である。ポール側突試験は静止した剛体ポールに対して 75° 傾けた車体が 32 km/h で衝突する試験であり、EA にはサイドシルが重要な役割を持つ。そのため、ポール側突に対応したサイドシル

2025 年 10 月 6 日受付

構造が必要とされ、サイドシルの補強部材として軽量かつ高剛性なアルミ合金製の押し出し材（アルミ押し出し材）を使用する BEV が増加している。押し出し材は 1 つの部品内で断面剛性を調節できることから、荷重伝達や EA といった複数の役割を同時に担えるため部品点数を抑えやすい。また、押し出し材は断面が一定であるため、衝突性能が位置によらず一定になりやすいという利点もある。一方で、断面が一定のため補強が必要ない箇所も補強してしまい重量増加につながりやすい。

本節では、アルミ押し出し材適用車 2 種と重量および衝突性能が同等以上となる鋼板製サイドシル補強構造を、それぞれの車種に対して開発したので報告する。

2.1.2 アルミ押し出し材の性能評価および開発目標

アルミ押し出し材適用車として、欧州 C セグメント車（車両 A）および米国 D セグメント車（車両 B）を調査した。車両 A は、サイドシル内のアルミ押し出し材の幅方向にフロアクロスメンバとバッテリーケースが配置されており、ポール側突時の荷重をサイドシルからこれらの部品に伝達させると考えた。一方で、車両 B はアルミ押し出し材の幅方向にはフロアクロスメンバのみであった。そのため、ポール側突荷重の大部分をフロアクロスメンバに伝達させ、バッテリーケースには荷重を伝達させない構造であると考えた。車両 A、車両 B のサイドシル部の重量はそれぞれ 22.5 kg、14.2 kg であった。

初めに、車両 A、車両 B のポール側突性能を評価するためにフルカーによるポール側突試験を模擬したサイドシルモジュール衝突解析を実施した。本解析は後述する衝突シミュレータでの実証試験を見据えて、静止したサイドシルに対してポールを模擬したパンチを衝突させる前提で設計した。図 1 にサイドシルモジュールモデルを示す。サイドシルは実部品の形状測定結果をもとに FEM（Finite Element Method）モデルを作成した。衝突解析には構造調査で得られた材料強度と同強度レベルの材料モデルを使用した。サイドシルを固定する治具として、バッテリーケースとフロアクロスメンバの形状の一部を簡略化した剛体モデルを作成した。

衝突解析ではサイドシルに衝突させたパンチの速度が

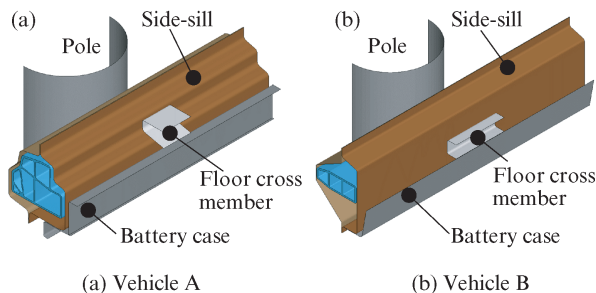


図 1 衝突解析モデル

Fig. 1 Crash analysis models

0 km/h となるまでのサイドシルとパンチとの間に発生する接触反力を評価した。パンチは直径 254 mm の半円柱型とし、初速度 32 km/h かつ初期運動エネルギー 30 kJ でフロアクロスメンバ直上に衝突させる。初期運動エネルギーはフルカー衝突解析でのサイドシルの変形をもとに決定した。

解析結果から、車両 A、車両 B ともに衝突エネルギー 30 kJ をサイドシルのみで吸収することを確認した。以上より、重量目標は車両 A 対抗鋼板製構造（開発構造 A）で重量 22.5 kg 以下、車両 B 対抗鋼板製構造（開発構造 B）は 14.2 kg 以下とした。さらにバッテリーケース保護の観点からパンチがバッテリーケースに接触しないように最大侵入量が 100 mm 以下となることを目標とした。

2.1.3 バルクヘッド活用による軽量補強構造

図 2 に開発構造 A を示す。サイドシル内に断面を 2 分割する中板（Center plate）を追加し、その両側にハット断面部材（Hat section members）を長手方向に沿って配置した。さらに補強が必要な箇所にはバルクヘッドをハット断面部材内に配置することで、重量増加を抑えつつ剛性を高めた。高強度化と軽量化を両立するために、ハット断面部材には厚さ 1.0 mm の 1470 MPa 材、バルクヘッドには厚さ 1.6 mm の 1180 MPa 材、中板には厚さ 0.8 mm の 1470 MPa 材を適用した。荷重伝達の増加および衝突位置による衝突性能バラツキ抑制のため、バルクヘッドの位置はフロアクロスメンバの延長上およびその間とした。サイドシルアウトおよびインナは元構造では厚さ 1.6 mm の 1.5 GPa 級ホットスタンプ材を適用しており開発構造でも同様とした。以上より、開発構造 A は 22.3 kg となり元構造から 0.2 kg の軽量化を実現した。また、開発構造 A の衝突解析を実施した結果、最大侵入量は 92 mm となるため、衝突性能の目標も達成した。

2.1.4 閉断面フレーム活用による少部品補強構造

車両 B は車両 A と荷重伝達経路が異なることから、新たな内部構造を設計した。図 3 に開発構造 B を示す。車両外側の曲げ剛性を高めて荷重分散させることを目的として、質量効率が高い日の字断面部材を採用した。日の字断面の質量効率については次節で詳細に説明する。その内側に断面ハット部材を車両幅方向が軸方向となるように配置し、また

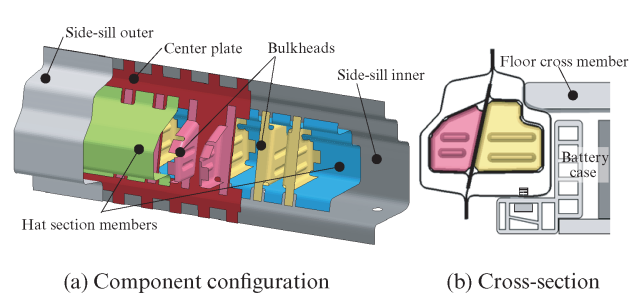


図 2 開発サイドシル構造 A

Fig. 2 Developed side-sill structure A

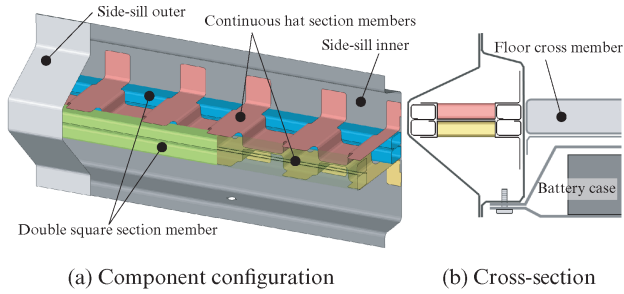


図3 開発サイドシル構造 B
Fig. 3 Developed side-sill structure B

フランジ同士を接続し連続的にすることで車両長手方向にも荷重伝達できるようにし、EA性能を高めた。さらにその内側に再び日の字断面部材を配置することで、衝突初期に分散した荷重を本部材に沿ってフロアクロスメンバに伝達させる構造とした。補強構造は4部品構成であるが、2本の日の字断面部材は同形状であり、連続ハット部材は同形状部材を上下反転させているため、実質2種類の部品で構成されている。車両Bは3部品構成であるため、元車両とほぼ同等の部品点数となった。日の字断面部材には1180 MPa級GA材、連続ハット部材には980 MPa級GA材を適用し、板厚はそれぞれ1.8 mm、1.4 mmとした。日の字断面部材は突合せ部をレーザ溶接により連続的に接合することで曲げ剛性を向上させた。連続ハット部材はスポット溶接により組み上げ、日の字断面部材との接合はアーク溶接、サイドシルインナとの接合はスポット溶接とした。以上より、開発構造Bの重量は14.2 kgと元構造と同等になった。また、開発構造Bの衝突解析結果から最大侵入量は79 mmとなり衝突性能の目標も達成した。

2.2 バッテリーケース構造

2.2.1 設計コンセプト

近年はアルミ押出し材や鋳物、板材を構成部品とするバッテリーケースが増えており⁴⁾、前述した車両Aもアルミ製バッテリーケースを適用している。本節では車両Aと同じ容量の電池を搭載でき、かつ軽量化、衝突性能同等を実現した独自の鋼板製のバッテリーケース構造（鋼板ケース）を開発したので報告する。

図4に本開発品の側面衝突対応の設計コンセプトを示す。前述のように、車両Aは側面衝突時にサイドシルからバッテリーケースとフロアクロスメンバに荷重伝達する車体構造である。さらに、バッテリーケースへの入力荷重をサイドフレームで受け、クロスメンバに伝達する構造であり、本開発品も同様の構造とした。

バッテリーケースに要求される他の特性として電池の発火防止のための防水性が挙げられる。防水性確保のため、電池格納部は1枚の鋼板を絞り成形したトレーとし、蓋とのシール性確保のためにトレーのフランジは平坦にした。さら



図4 側突対応構造のコンセプト
Fig. 4 Structural design concept for side impacts

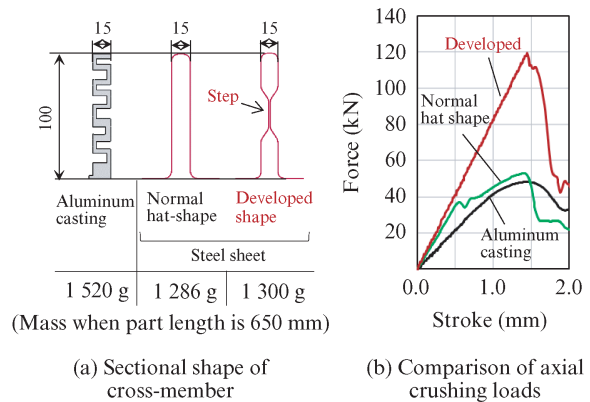


図5 クロスメンバ衝突性能の基礎解析
Fig. 5 Basic analysis of cross member crash performance

に電池大容量化も実現するためパンチRや平面視でのコーナーRは可能な限り小さく設計した。

2.2.2 衝突用構造部品の設計

側突対応の主要な骨格部品となるクロスメンバとサイドフレームについて、薄鋼板で高耐力が得られる断面形状を設計するため各部品の基礎検討を行った。

初めに、クロスメンバの基礎検討について説明する。車両Aの構造調査からクロスメンバは断面の幅15 mm、高さ100 mm、部品長さ605 mmのアルミ鋳物部品であった。鋼板ケースのクロスメンバも部品外形寸法を同じとし、細幅かつ長尺の部品で高耐荷重を得られる断面を検討した。図5(a)に車両Aのアルミ鋳物製クロスメンバ（YS140 MPa）および検討した鋼板製クロスメンバの断面形状を示す。鋼板ケースは通常のハット形状に加えて縦壁中央部に凹形状を設定した閉断面形状（開発形状）を検討した。この開発形

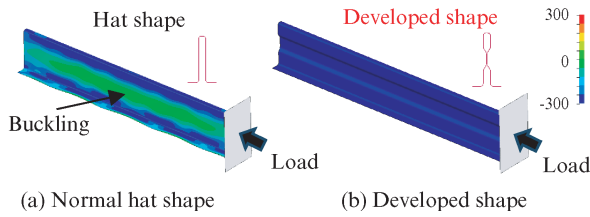


図6 ハット形状と開発形状の応力分布比較

Fig. 6 Comparison of stress distribution between normal hat shape and developed shape

状を通常のプレス機で成形できる閉断面成形技術を開発した⁶⁾が、本稿での詳細説明は省略する。この2ケースと車両Aについて、断面一定で長さ650mmの部品モデルを作成した。鋼板材質は1180MPa級鋼板(YS895MPa)とし、板厚は1.0mmとした。部品重量は図5(a)に示すように、今回の検討断面はいずれもアルミ鋳物製品よりも15%程度軽量である。部品片端を固定し、もう一方の端に剛体壁を100mm/sで押し当てて軸圧壊変形解析で衝突性能を評価した。

図5(b)に軸圧壊変形時の反力の比較を示す。ハット形状の最大荷重は車両Aと同等である。さらに、開発形状では最大荷重が2.3倍向上することを確認した。図6に押し込み量1mmでの軸方向の応力分布を示す。ハット形状では弾性座屈が発生し応力が低下するが、開発形状では圧縮応力が一様に発生し断面が有効に使われている。

次にサイドフレームの基礎検討について説明する。サイドフレームは衝突時に曲げ荷重を受けるが、ボディ部品であるサイドシルとトレーの間の限られたスペースに設置するため、狭い設計空間で効率的な反力を得る形状が望ましい。車両Aは、サイドシルと電池格納部との間の車両幅方向35mmの空間に幅25mmのアルミ押し出し部品が配置され、この押し出し部品は車両前後方向に260mm間隔でクロスメンバ4本に支持されている。

鋼板製のサイドフレームについて、図7に示す四角形断面(Single square)と一筆書きの日の字断面(Double square)の、幅(W)と高さ(H)を変化させて重量効率の良い断面を検討した。一定の断面の部品モデルを作成し、支点間距離260mmの3点曲げ変形解析を実施した。端部の回転は拘束せず、片側を並進拘束した。部品に直径200mmの剛体円柱を500mm/sの速度で衝突させ、反力を評価した。鋼板材質は1180MPa級鋼板かつ板厚は1.2mmとした。

図7に3点曲げ変形時の部材に発生する最大荷重を部品重量で除した値と部品形状の関係を示す。横軸が部品の幅であり、断面の高さごとに結果を整理した。比較のために車両Aのアルミ押し出し材の重量効率も示す。図7より、四角形断面よりも日の字断面の方が最大荷重に対する重量効率が良い。さらに両断面ともに、幅が大きく高さが小さい方が最大荷重に対する重量効率に優れ、日の字断面の幅25mm、高さ75mmでアルミ押し出し材と同等の重量効率となる。

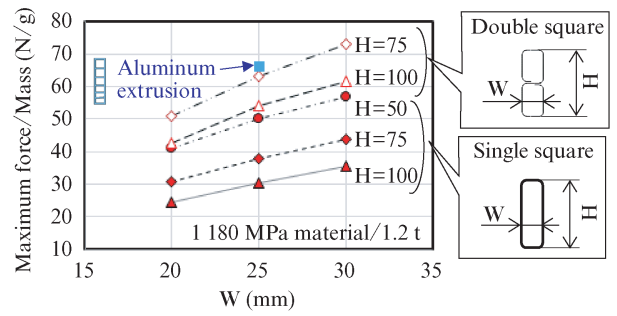


図7 3点曲げ性能に対する効果的な部品形状の検討

Fig. 7 Study of effective part geometry for three-point bending performance

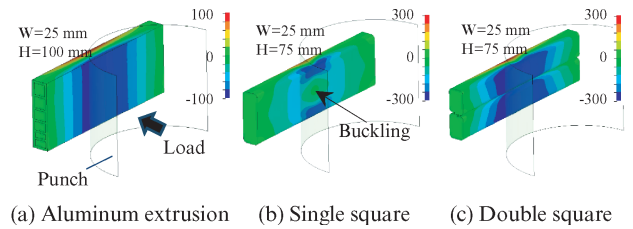


図8 3点曲げ変形時の応力分布比較

Fig. 8 Comparison of stress distribution during three-point bending test

図8にアルミ押し出し材と鋼板の幅25mm、高さ75mmの四角形断面および日の字断面の曲げ変形初期(パンチ変位2.5mm)における長手方向応力分布を示す。アルミ押し出し材は肉厚で隔壁が複数あることから圧縮応力が一様に発生している。一方で、四角形断面では弾性座屈して応力が低下しているが、日の字断面は断面中央部に隔壁があることで側面に応力が発生しており、効率的に荷重分担している。これにより、日の字断面が有効であることが明らかになった。

2.2.3 バッテリーケースの試作

前項の検討に基づきクロスメンバ、サイドフレームを設計した。サイドフレームは安全率を設けて1180MPa級鋼板で板厚1.4mmとした。サイドフレームはブラケットを介してトレーとボルト締結した。このブラケットはボディ側部品であるサイドシルとの締結も担う。クロスメンバはトレーにスポット溶接した。さらに、重量物であるケース全体を支持するアンダーフレームを設計しケース下部に配置した。深絞りトレーは非常に大型の部品であることから従来の1回絞り成形では成形できない。そこでJFEスチールの独自技術である予成形技術⁵⁾により成形することで割れ・しわなしのトレーが得られた。

図9にすべての構成部品を組み立て試作した鋼板ケースを示す。車両Aのアルミ製ケース構造から2kgの軽量化を実現した。最後に、フルカーモデルによるボール側突解析を行った。図10に入力した運動エネルギーがゼロになる時刻における変形の断面を示す。車両Aと同様に鋼板ケース

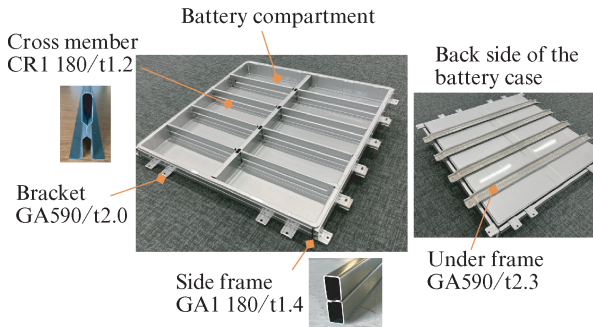


図9 鋼板製バッテリーケース試作品

Fig. 9 Prototype of steel battery case enclosure

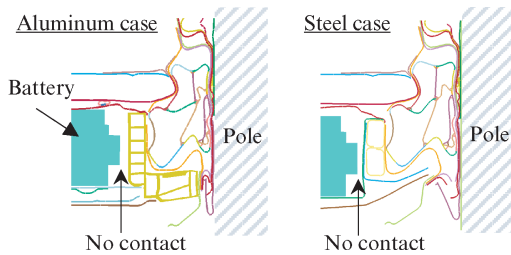


図10 フルカーでのポール側突解析結果

Fig. 10 Comparison of aluminum and steel battery cases in a full-car pole impact simulation

においても内部の電池とケースの接触はなく、開発目標であるアルミ製ケースと同等の衝突性能が得られた。

3. 衝突性能評価技術および新材料設計

3.1 自動車衝突シミュレータ概要

各国で定められた自動車の安全性能評価基準は、安全意識の高まりとともに年々厳格化している。性能評価には車両1台を使用して衝突試験が行われるが、高コスト、かつ長い準備期間を要する。特に開発初期段階では設計変更が多いため、その都度試験を実施することはコスト増加と開発の遅延を招く。したがって、近年では車両性能をモジュールでの性能まで落とし込み、性能設計と評価を行い、それを積み上げて車両1台の性能開発を行う手法が主流となりつつある。

JFE スチールではこのニーズに応えるため、図11(a)に示す自動車衝突シミュレータを2017年に導入した。この装置は、0.1~100 km/hの任意の速度で衝突させることができる。また、各種部品や大型のモジュール部品に対応できるように高さ2000 mm、幅1500 mmの試験体設置空間を設けており、今後の安全性能評価基準に対応した評価を可能としている。

3.2 実車変形モードを模擬する衝突性能評価技術

部品単位あるいはモジュールでの評価試験を行う上で重要なことの1つとして、実際のフルカーでの変形挙動を再現

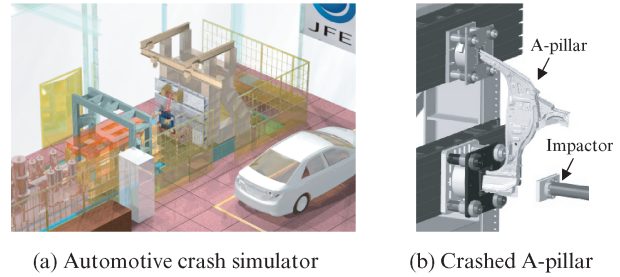


図11 自動車衝突シミュレータを活用したAピラー衝突試験
Fig. 11 A-pillar crash test by automotive crash simulator

することが挙げられる。JFE スチールでは、そのための各種評価手法を開発している。

3.2.1 スモールオーバーラップ模擬Aピラー評価

自動車の衝突性能評価試験の中に、スモールオーバーラップ試験がある。オフセット試験の1種で、車両前方の一部に強い衝撃が加わることを想定した、従来よりも厳しい25%のオーバーラップ率で行う64 km/hの前面衝突試験である。前方からの衝撃に対しエネルギー吸収を担うフロントサイドメンバよりも車両の外側に大きな荷重が加わるため、フルカーにおいては、タイヤが後方に押し込まれ、Aピラー下部に衝撃が加わる挙動を示す。図11(b)にこの状況を再現したAピラーの衝突試験を示す。この手法を活用することで、スモールオーバーラップ試験に対応した最適なAピラー部品構造を検討できた。

3.2.2 前面衝突模擬フロントサイドメンバ評価

前面衝突では、乗員が持つ運動エネルギーがシートベルト等の拘束装置を介して車体側に移る比率が大きいほど乗員傷害値に有利であり⁷⁾、この比率を上げるには衝突初期の車両減速度を大きくすれば良い⁸⁾。車両減速度を大きくするためには衝突初期に荷重が加わるフロントサイドメンバに高荷重を発生させることが必要であり、そのためには高強度化が有効である。一方で、変形時の荷重の急激な減少は車両減速度が低下して乗員傷害値の増加に繋がるため、荷重減少の要因となる大きな破断は許容されないことから、衝突変形による破断発生を評価できる試験が必要である。さらに、フロントサイドメンバの周囲には、損傷した場合に重大な事故に繋がる可能性が高い高電圧部品や燃料配管等が配置されており、衝突時の接触による損傷を回避するよう変形モードを制御する必要がある。そのために、稜線部へのノッチ配置や天板面へのビード設定等の形状工夫により、2~3か所で「く」の字変形をさせ、保護部位への接触を避けるよう設計されている。

以上より、フロントサイドメンバの評価に必要な「く」の字変形を再現するため、狙いの座屈位置にビードを設定し再現試験を実施した。試験体形状はCセグメント車の形状を模擬し、長手方向500 mm、幅170 mm、高さ70 mmのハット型断面とした。試験速度は静的速度0.01 km/hと高

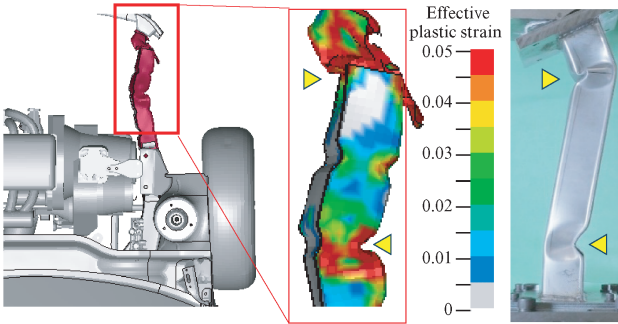


図12 フロントサイドメンバの変形モード比較

Fig. 12 Comparison of front side member deformation mode

速試験条件の 64 km/h で評価した。図 12 に 64 km/h の解析結果と試験結果を示す。再現試験でも「く」の字変形を得られたことから、開発した評価技術でフロントサイドメンバの衝突性能を評価できることが明らかになった。

3.2.3 オフセット前突模擬バンパリフォース評価

BEV は航続距離延長のために大容量バッテリーを搭載することから、従来のガソリン車と比べると車両重量は重くなる。衝突時に発生する荷重は車両重量に比例するため、高強度部品での耐変形が有効となる。バンパリフォースの性能評価のため、3点曲げ試験に加えて前面衝突評価の1つである ODB (Offset Deformable Barrier) を模擬した試験を行った。ODB は剛体壁に固定したアルミハニカム製バリアに試験車両の運転席側 (車両全幅に対してオーバーラップ率 40%) を衝突させるもので、フロントサイドメンバ 1 本に荷重が集中するため、バンパリフォース本体やその締結点での破断が課題として挙げられる。フルカーでは 2 本あるフロントサイドメンバの 1 本に荷重が集中して変形するため、ODB 条件の試験では、インパクトを中央よりフロントサイドメンバ側にオフセットして負荷することで ODB の変形を模擬した。

3.3 バッテリー保護性能に寄与する材料設計

3.3.1 JEFORMA[®] Type2 適用フロントサイドメンバ

図 13 に 980 MPa 級の汎用型 DP 鋼板および JEFORMA[®] Type2 を用いて作製したフロントサイドメンバ模擬部品の衝



(a) 980 MPa Conventional DP (b) 980 MPa JEFORMA[™] Type 2

図13 フロントサイドメンバ模擬部品の衝突結果

Fig. 13 Crash test results of front side member simulated parts



図14 1700 CR バンパリフォース

Fig. 14 1700 CR bumper reinforcement

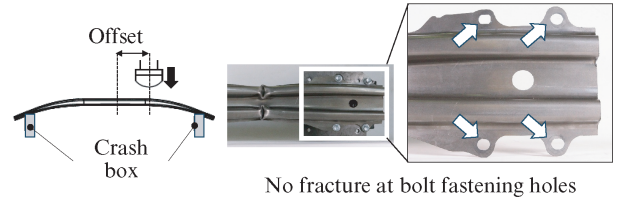


図15 ODB 条件試験条件と試験後の締結部

Fig. 15 ODB test condition and fastening area after test

突試験結果を示す。汎用型 DP 鋼板は座屈変形部で破断が発生したが、JEFORMA Type2 では破断は発生しなかった。これにより JEFORMA Type2 が汎用型 DP 鋼板に比べ曲げ性や耐衝突破断特性に優れた材料であることが示された。

3.3.2 冷延 1700 MPa 級鋼板 バンパリフォース

JFE スチールで新たに開発した冷延 1700 MPa 級鋼板 (以下 1700CR) を用いてコスト低減と軽量化の両立を目的としてバンパリフォースを試作した。図 14 に試作した 1700CR 製バンパリフォースを示す。市販車のホットスタンプ 1.5 GPa 級鋼板製バンパリフォースの形状をもとに検討した。前述のように衝突時の破断が懸念されるため、3点曲げ試験と ODB 条件の試験で評価した。

自動車衝突シミュレータによって評価したホットスタンプ 1.5 G と 1700CR の 3点曲げ試験の結果から、両部品の変形部において微小な割れが確認されたが大きな破断に至らなかったため、衝突性能は問題なしと判断した。次に、発生モーメントを比較したところ、1700CR はホットスタンプから最大値が約 8% 向上した。これは 1700CR がホットスタンプ以上の降伏応力を有するためである。この差は部品板厚で 0.5 mm (車両 1 台当たり 200 g の軽量化) に相当することから軽量化できることが明らかになった。

次に ODB 条件の試験を行った。この試験ではバンパリフォースとクラッシュボックスのボルト締結穴における破断有無を評価した。クラッシュボックスは市販車の部品を流用した。図 15 に結果を示す。ボルト締結穴周りでの破断は見られなかったことから、新たに開発した 1700CR はバンパリフォースに適用可能であり、板厚減少による軽量化とコスト削減を両立できることを確認した。

4. おわりに

本稿では、高度化する衝突性能をはじめとして、BEVに特徴的なバッテリー保護構造について、その対応構造・技術を紹介した。今後も本分野における性能向上や軽量化の追及は進展し続けると確信する。JFE スチールは今後とも常に動向を先読みし、お客様ニーズを的確に掴んで協力してより良いクルマづくりに貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 経済産業省 第4回 モビリティの構造変化と2030年以降に向けた自動車政策の方向性に関する検討会. 2022, 資料3, p. 23.
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/mobility_kozo_henka/004.html
- 2) Catalogue 新型BEVの電池はどうなっているか. Motor Fan illustrated. 2024, vol. 214, p. 58-65.
- 3) Cover Story 逆風の軽量化素材. 日経 Automotive. 2021, no. 6, p. 30-45.
- 4) 鈴木励一. EV用バッテリーケースの材料, 構造, 接合技術の動向—新技術開発編—. 溶接技術. 2022, vol. 70, no. 10, p. 78-84.
- 5) 卜部正樹, 飯塚栄治, 塩崎毅, 河野尚史. 超高張力鋼板を適用した細幅閉断面部品のプレス成形工法. 第76回塑性加工連合講演会論文集. 2025, no. 208.
- 6) 中川欣哉, 新宮豊久, 玉井良清. 角筒深絞り成形性向上に関する検討. 自動車技術会論文集. 2024, vol. 55, no. 4, p. 811-816.
- 7) 上西甲朗, 松久寛, 宇津野秀夫, 朴正圭. ライドダウン効果による自動車正面衝突時の乗員衝撃低減. 日本機械学会論文集. 2004, vol. 70, p. 2624-2630.
- 8) 横井祐輔, 水野幸治, 伊藤大輔. 自動車の前面衝突における車両減速度の最適化. 日本機械学会東海支部第63期総会講演会講演論文集. 2014, no. 143-1.