

(技術資料)

マルチマテリアルBEV車体コンセプトモデルの設計

濱田和幸*¹・渡辺憲一*¹(博士(工学))・吉田正敏*¹(博士(工学))・竹中 峻*¹・大川陽子*¹・内藤純也*¹(博士(工学))

Multi-material Body Concept Design of Battery Electric Vehicle

Kazuyuki HAMADA・Dr. Kenichi WATANABE・Dr. Masatoshi YOSHIDA・Shun TAKENAKA・Yoko OKAWA・Dr. Junya NAITO

要旨

現在、CO₂排出の削減要請の高まりを背景として、バッテリー式電気自動車（BEV）の普及が進展している。BEVでは、重量物であるバッテリーが搭載されるため、従来の内燃機関車（ICEV）に対して車両重量が大幅に増加することとなる。航続距離を向上させるためには車両重量低減、すなわち軽量化が不可欠である。この状況を踏まえて、当社の特長製品である超ハイテン、アルミ板、アルミ押出材といった軽量化素材を適材適所に配置した独自のマルチマテリアルBEV車体コンセプトモデルの設計を検討している。衝突時に乗員とバッテリーを保護するための車体構造およびバッテリーケース構造について、軽量化と衝突安全性を両立する設計を実現した。

Abstract

Battery electric vehicles (BEVs) are becoming increasingly popular against the background of increasing requirements for reducing CO₂ emissions. BEVs are equipped with heavy batteries, and the vehicle weight increases significantly compared with that of conventional internal combustion engine vehicles (ICEVs). Increasing the cruising distance of BEVs inevitably requires vehicle weight reduction. In light of this situation, Kobe Steel has been considering the design of a unique multi-material BEV body concept model, in which weight-reduction materials such as ultra high-tensile strength steel, aluminum plates, aluminum extrusions, which are the company's specialty products, are used in their proper locations. The vehicle body and battery case structures have been designed to combine weight reduction and collision safety, protecting occupants and batteries in the event of a crash.

検索用キーワード

電気自動車, BEV, バッテリー, 軽量化, 衝突安全, 超ハイテン, ホットスタンプ, アルミ板, アルミ押出材

ま え が き = 自動車業界ではCASE (Connected/Autonomous/Shared& Service/Electric) と呼ばれる新しい領域での技術革新に加え、気候変動への対応としてカーボンニュートラルやサーキュラーエコノミーといったグリーン社会の実現に向けた取組みが喫緊の課題となっている。その中で、世界的に自動車の電動化が加速しており、将来的にバッテリー式電気自動車（以下、BEVという）の普及が進んでいくと見込まれている¹⁾。BEVでは、重量物であるバッテリーが搭載されるため、従来の内燃機関車（以下、ICEVという）に対して車両重量が大幅に増加することとなる。したがって、航続距離を向上させるためには車両重量低減、すなわち軽量化が不可欠である。いっぽう、衝突に対するバッテリーの保護や車両重量増加による衝突エネルギー吸収性能の向上など、ICEVよりも衝突安全性能を向上させる必要がある。以上より、BEVでは軽量化と衝突安全性能の両立が大きな課題となる。

当社は、「グリーン社会への貢献」をマテリアリティの一つとして掲げており、「生産プロセスにおけるCO₂削減」を行うことに加え、独自の「技術・製品・サービスによるCO₂排出削減」に貢献する取組みを進めている。自動車の車体軽量化に対しては、超高張力鋼板（超ハイテン）、アルミ板、アルミ押出材、アルミ鍛造材といっ

た軽量化に寄与する特長ある多様な素材のニーズに対応した技術開発やソリューション提案を行っている。その特長として、車両のニーズに合わせた最適な軽量素材の選択を提示することに加え、軽量素材を適材適所に組み合わせ合わせたマルチマテリアル化、およびそれを実現するための異種材接合技術があり、素材、構造、工法を組み合わせ合わせた総合的なソリューション技術の開発および提案を行っている²⁾。

上記の状況を踏まえて、当社は、今後のBEVに対する当社ソリューションの基盤作成を目的として、マルチマテリアルBEV車体コンセプトモデルの設計を検討している。本稿では、軽量化と衝突安全性を両立する素材適用や構造設計の考え方を概説するとともに、衝突安全設計の検討事例を紹介する。

1. BEV車体コンセプトモデルの検討条件

1.1 車体の設計要件

ICEVでは主に衝突時の乗員保護が求められているが、BEVでは衝突によりバッテリーから火災が発生するリスクがあることから、乗員に加えてバッテリーを保護する必要がある。本検討では、世界の主要な自動車アセスメントの中から、BEV車体の設計において厳しい基準となる衝突安全試験を選定して設計検討を行った。

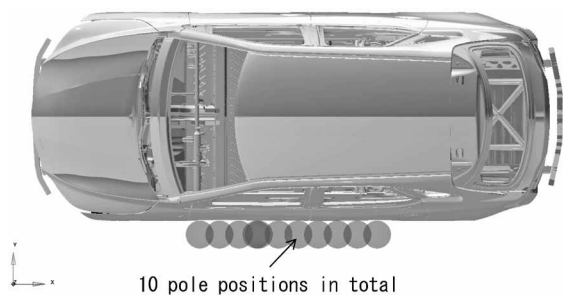
*¹ 技術開発本部 ソリューション技術センター

表1に対象とした衝突安全基準の一覧を示す。まず、側面衝突ではIIHS側面衝突（2023年より採用された新基準）、ポール側面衝突の2種のモードを選定した。ポール側面衝突において、バッテリーを保護するためにショートストロークで運動エネルギーを吸収する必要がある。本検討では、ポール側面衝突におけるバッテリー保護のロバスト性を確保するために、図1のとおり車両長手方向に沿ってポール衝突位置を10か所選定した評価も行った。つぎに、前面衝突ではフルラップ前面衝突、オフセット前面衝突、スモールオーバーラップ前面衝突の3種のモードを選定した。BEVでは、ICEVに対して車両重量が増加することから、車体で大きな運動エネルギーを吸収する必要がある。最後に、後面衝突ではオフセット後面衝突モードを選定した。

設計要件として、衝突解析により (a) ボデー骨格の各部位の侵入量を評価し、上記衝突安全基準で“Good”評価（侵入量が設定した基準値未満）となること、(b)

表1 対象とした衝突安全基準
Table 1 List of crash safety standards

Category	Test method
Side crash	Euro-NCAP - pole crash 75° (32 km/h)
	IIHS - MDB barrier 90° (1,900 kg, 60 km/h)
Front crash	US-NCAP - full width rigid wall (56 km/h)
	J-NCAP - offset crash ODB 40% (64 km/h)
	IIHS - small overlap 25% offset (64 km/h)
Rear crash	FMVSS301R - rear crash 70% offset with deformable barrier (1,368 kg, 80 km/h)



10 pole positions in total
図1 ポール衝突位置の追加条件
Fig.1 Variation of pole position

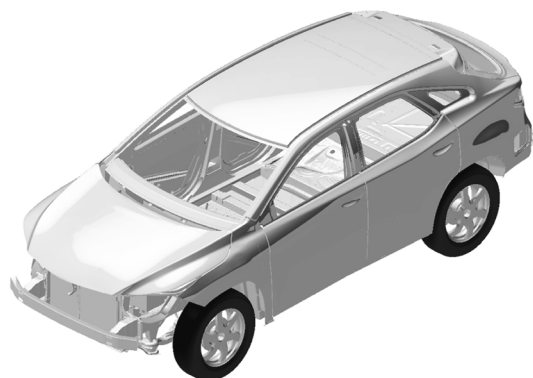


図2 BEV車両の外観および仕様
Fig.2 Vehicle specifications

バッテリーモジュールの変形量を評価し、バッテリーへのダメージが安全上問題ないレベル（設定した基準値未満の変形量）であることとした。

1.2 車両の諸元

当社では、過去にICEVの車体コンセプトモデルの設計を行っており²⁾、車体の衝突安全性と剛性の要件を満足する構造を検討した。本BEV車体モデルは、そのICEVモデルをベースとして設計検討を行った。図2にその外観および仕様を示す。車体はEセグメントSUVとした。駆動方式は、フロントのみに電動ドライブユニットを搭載したFWDと、フロントとリアにそれぞれ電動ドライブユニットを搭載した4WDの両方式でそれぞれ設計した。容量119 kWh（バッテリーモジュールの体積より試算）のバッテリーを収納したバッテリーケースは車両のフロア下で車体に搭載されている。なお、今回設計した車体にはシートなどの内装部品は含まれていないが、衝突解析にはその重量を模擬して性能を評価している。

2. 軽量素材の適用コンセプト

車体軽量化のためには、部品ごとの形状や要求性能に応じて適切な素材を選定する必要がある。表2に、BEV車体を構成するボデー骨格、バッテリーケース、外板パネル（クロージャパネルを含む）ごとの軽量素材適用方針を示す。

ボデー骨格の中で、衝突時の変形抑制が必要な部品に対しては、軽量化を図るために素材の高強度化が有効であるため、基本的にはアルミに対して比強度に優れた超ハイテン（引張強度が980 MPa以上）が適している。難成形部品に対しては、加工性に優れた超ハイテンやPHS（ホットスタンプ用鋼板）との使い分けが考慮される。逆に、衝突時に大変形を伴い衝突エネルギーを吸収する性能が求められる部品においては、圧壊時に早期に破断が生じてしまうとエネルギー吸収性能が低下してしまうため、耐圧壊割れ性に優れた超ハイテンが適している。

いっぽう、ボデー骨格の中で長尺かつ一定断面の形状的な特徴を有する部品に対しては、アルミ押出材も軽量化の観点で有効である。さらに、該部品に対しては、超ハイテンでロール成形を適用すると、冷間プレスに比べて断面形状の自由度が高くなるため、さらなる軽量設計

Specification	Detail
Car type	SUV (E segment)
Drive system	FWD or 4WD
Length [mm]	4,826
Width [mm]	1,885
Height [mm]	1,710
Wheelbase [mm]	2,785
Curb weight [kg]	2,450-2,650
Battery capacity [kWh]	119 (estimate)

表2 軽量素材適用の考え方
Table 2 Concept of applying lightweight materials

Category	Required characteristics of part	Material option	Features of part shape		
			Common	Difficult to mold	Long and constant cross section
Body frame structure	Strength	Ultra high strength steel sheet	○	○	○*
		Press hardened steel sheet		○	
		Aluminum extrusion			○
		Aluminum sheet	○	○	
	Energy absorption	Ultra high strength steel sheet	○	N/A	○*
		Aluminum extrusion		N/A	○
Battery frame structure	Strength	Ultra high strength steel sheet	○	N/A	○*
		Aluminum extrusion		N/A	○
Outer panel / Closure	Tension stiffness, dent resistance	Aluminum sheet	○	○	N/A

(*) Suitable for roll form

表3 主要な軽量化素材のメニュー
Table 3 Major lightweight material menu

Category	Classification	Characteristic feature	Tensile strength
Steel sheet	DP steel/ Martensitic steel	High strength	Up to 1,470 MPa class for cold press Up to 1,700 MPa class for roll form
	TBF steel/ TRIP steel	High strength and formability	Up to 1,470 MPa class for cold press
	CP steel	High strength and crash-cracking resistance	Up to 980 MPa class for cold press or roll form
	PHS	High strength and formability	Up to 1.8 GPa class for hot stamp
Aluminum extrusion	6000 series (Al-Mg-Si)	Common	Typ. 295 MPa (6061-T6)
	7000 series (Al-Zn-Mg)	High strength	Typ. 480 MPa (Z6W-T5)
		High strength and crash-cracking resistance	Typ. 365 MPa (Z35B-T7)
		High strength and stress-corrosion-cracking resistance	Typ. 450 MPa (7K55-T7)
Aluminum sheet	6000 series (Al-Mg-Si)	Common	Typ. 275 MPa (6022-T4, after paint baking*)
		High formability	Typ. 265 MPa (6016-T4, after paint baking*)
		High strength	Typ. 345 MPa (6011-T4, after paint baking*)

(*) 2% stretch + 170°C×20min

が可能となる³⁾。また、ボデー骨格の中で、超ハイテンほどの強度が求められないリア周りの部品などに対しては、ハイテン（引張強度が340 MPa以上）が適しているが、必要とされる強度や周辺部品に適用される素材との組合せにおいてアルミ板との使い分けも考慮される。

バッテリーケースも、バッテリー保護の観点で衝突時の変形抑制が必要な部品として位置付けられる。そのため、ケースを構成するフレームに対してはボデー骨格と同様に超ハイテン、アルミ押出材が適している。バッテリーケースの構造に応じて両者の使い分けが考慮される。

外板パネルは、衝突性能への影響が小さく、張り剛性や耐デント性などが求められるため、鋼板に対して比剛性が優れるアルミ板が適している。ただし、難成形部品においては鋼板や樹脂との使い分けも考慮される。

上記を踏まえて、当社では多様な軽量素材の開発、量産を行っている。表3に主要なメニューを示すが、成形性、接合性、さらにコストも考慮したうえで、適切な素材を選定することが肝要である。とくに鋼とアルミの

異種材接合においては、要件に応じた適切な工法選択、電食への対策を考慮する必要がある。

3. マルチマテリアル車体構造の設計コンセプト

本車体モデルの設計コンセプトをボデー骨格、バッテリーケース、外板およびクロージャごとに概説する。

3.1 ボデー骨格

BEVでは、衝突荷重をボデー骨格とバッテリーケースの両方で分担して負担することとなる。バッテリーケースの荷重分担を大きくすると、バッテリーケース内に補強部材を多く配置する必要があるが、バッテリーを搭載可能な容積、ひいては、バッテリー容量の低下が問題となる。そのため、バッテリーケースへの荷重分担を低減する、すなわちボデー骨格側の分担を大きくする設計が近年のトレンドとして見られる。本モデルにおいてもその設計を志向することとした。

図3にボデー骨格（外板、クロージャを除く）の構造および適用素材を示す。以下で、主要部位ごとに設計の考え方を概説する。フロア構造に関しては、ICEVで

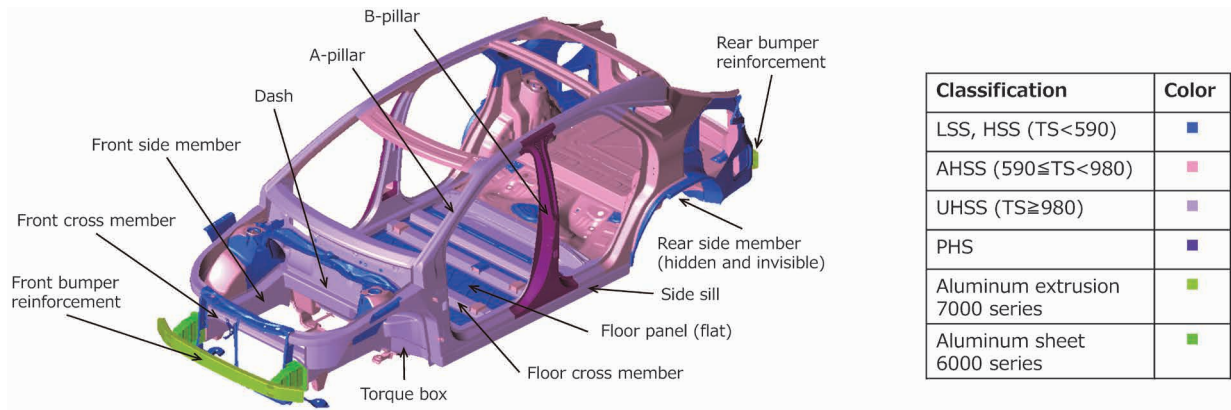


図3 ボデー骨格の構造および適用材料
Fig.3 Body frame structure and applied materials

必要であったトンネルを排除し、フラットな形状とした。また、フロア下にバッテリーケースを搭載するため、一般的なICEVに対してフロアを高く配置している。また、ポール側面衝突に対応するため、1,470 MPa級超ハイテンを適用したフロアクロスメンバを追加配置した。

サイドシル構造の断面図を図4に示す。BEVでは一般的にポール側面衝突に対応するため、サイドシル内部にエネルギー吸収部材が追加されることが多い。現状、この部材には軽量化の観点でアルミ押出材が適用されることが多いため、本モデルでも耐圧壊割れに優れた7000系アルミ押出材を適用し軽量化を図った。6000系を適用した場合に比べて3~5 kg/台の軽量化が可能となる見込みである。また、長手方向に連続的に配置することで、衝突位置によらず、バッテリー保護性能を確保しやすい。アルミ押出材はボデー側への荷重伝達を大きくするため、サイドシル内の上部に配置した。また、その断面形状は、比較的要件が緩い打撃位置に併せて設計し、ポール側面衝突対応で最も厳しい部位に鋼製補強材を追加することで、構造の最適化を図った。

ピラーに関しては、ICEVに対して構造面の大きな変化はない。Aピラーに関しては、スモールオーバーラップ衝突時の強度を高めるため、PHSの適用や補強材の追加などで対応している例が見られる。本モデルでは1,470 MPa級超ハイテンを適用するとともに、内部に補強材を追加した。Bピラーに関しては、難成形かつIHSS側面衝突対応のため1.8 GPa級PHS（本号「1.0 GPa, 1.5 GPa, 1.8 GPa級ホットスタンプ用鋼板」p.151参照）を適用したが、加工性に優れた超ハイテン⁴⁾も選択肢となる。

フロントエンドに関しては、エネルギー吸収性能を高めるため、材料面ではフロントサイドメンバーに耐圧壊割れ性に優れた980 MPa級超ハイテン⁵⁾を適用することで対応した。構造面では左右のフロントサイドメンバーをつなぐクロスメンバを追加するなどの対応により、フロントサイドメンバーの変形時の座屈挙動を制御することでエネルギー吸収性能を向上させた。

リアエンドに関しては、フロントと同様にエネルギー吸収性能を高めるため、リアサイドメンバーに耐圧壊割れ性に優れた980 MPa級超ハイテンを適用することで

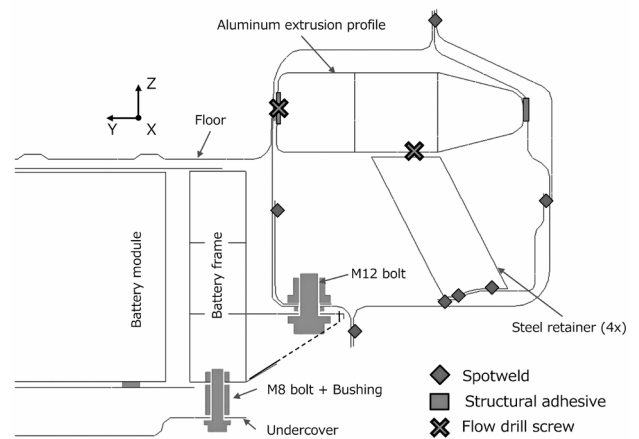


図4 サイドシルの断面構造
Fig.4 Cross-sectional structure of side sill

対応した。また、リア周りのその他部品に対しては、主にハイテンを適用したが、高強度型6000系アルミ板も選択肢となり得る。

ダッシュ部に関しては、前面衝突時にフロントサイドメンバーから伝達される荷重に対して変形させないように、1,180 MPa級超ハイテンを適用するとともに補強部材を追加することで対応した。また、フロントサイドメンバーからサイドシルに荷重を伝達するトルクボックスの構造強化を図り、バッテリーケースに伝達される荷重を低減した。トルクボックスなどの難成形部品に対しては、加工性に優れた超ハイテンを適用した（本号「高延性980/1,180 MPa級合金化熔融亜鉛めっき鋼板」p.60~63参照）。

バンパーレインフォースメント（ハングオン）に関しては、ICEVから大きな構造変化はなく、高強度が必要とされるため、フロント、リアともに7000系アルミ押出材を適用したが、ロール成形を適用した1,300~1,700 MPa級超ハイテン⁶⁾（本号「1,700 MPa級マルテンサイト鋼板」p.64~68参照）も選択肢となる。

3.2 バッテリーケース

バッテリーケースは、構造として大きくフレームタイプとトレイタイプに分類される。同様に、適用材料もアルミ製、鋼板製に分類される。本モデルでは、軽量化に主眼を置き、現在主流となっているアルミ製のフレーム

タイプを採用した。図5にバッテリーケースの構造と適用材料を示す。バッテリーケースへの荷重分担を低減する方針の下、内部の補強部材は縦方向、横方向に1本ずつと最小限に設定した。腐食環境ではない内部の補強部材には最高強度の7000系アルミ押出材を、腐食環境にある外周フレームには耐応力腐食割れ性に優れた7000系アルミ押出材⁷⁾を適用した。底板およびアンダーカバーには6000系アルミ板を適用したが、強度も求められることからT6調質材とした。いっぽう、該部品が成形を必要とする形状の場合は、T4調質で加工した後、熱処理を行うことで強度を確保しても良い。その場合は、高強度6000系アルミ板の適用も選択肢となる。また、未表示となっている蓋には軟鋼板を適用した。前

述のとおり、バッテリー容量は約119 kWhと試算しており、効率的なバッテリー搭載を実現している。

3.3 外板およびクロージャ

図6に外板およびクロージャの構造と適用材料を示す。フード、フェンダ、サイドドアのパネルには6000系アルミ板⁸⁾を適用した。いっぽう、サイドパネル、ルーフ、バックドアサイドの難成形部品に関しては、素材の加工性やコストのバランスを考慮し、軟鋼板を適用しているが、加工性に優れた6000系アルミ板も選択肢となる。サイドドア内のドアビームに関しては、ICEVから大きな構造変化はなく高強度が必要とされるため、1,470 MPa級超ハイテンを適用したが、7000系アルミ押出材も選択肢となる。

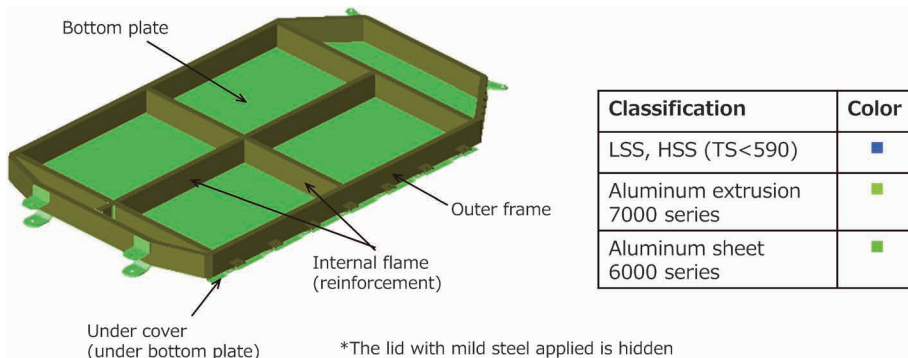


図5 バッテリーケースの構造および適用材料
Fig.5 Battery case structure and applied materials

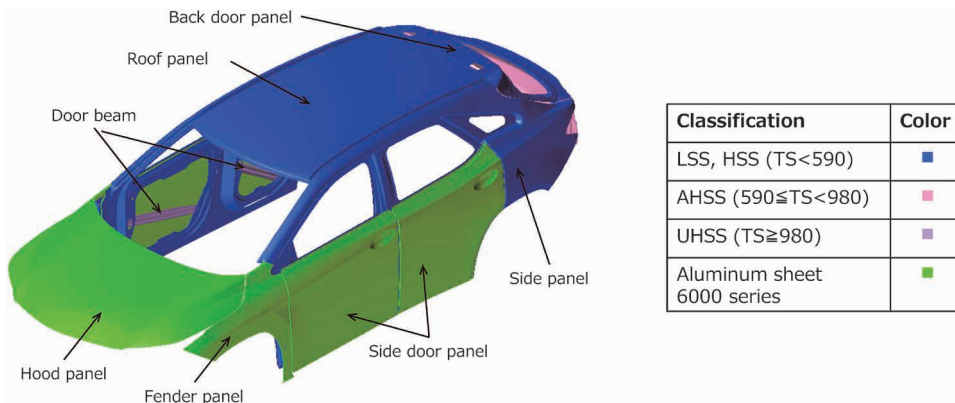


図6 外板およびクロージャの構造および適用材料
Fig.6 Outer panel and closure structure and applied materials

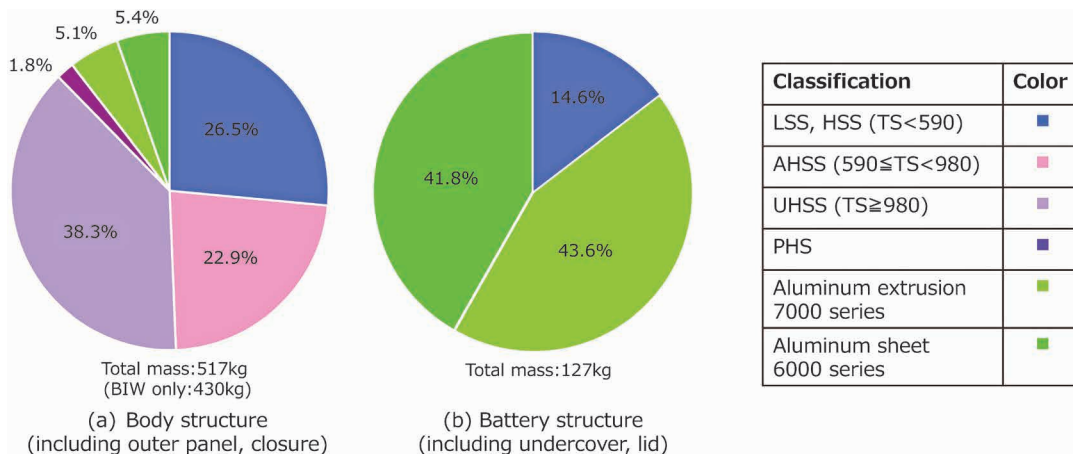


図7 材料ポートフォリオ
Fig.7 Material portfolio

3.4 材料ポートフォリオ

図7に、ボデー全体（ボデー骨格、外板、クロージャ）とバッテリーケースそれぞれの材料ポートフォリオを示す。当社が有する軽量素材を幅広く適用しているが、車両形状、要求性能、コストの観点から最適なポートフォリオは変化すると考えられる。現在、提案バリエーションを拡充するための代替案の検討もっており、本章で紹介した設計内容はその一例とご理解いただきたい。

4. 衝突安全設計の検討事例

本章では、衝突安全設計の一例として、乗員やバッテリー保護の観点でクリティカルとなる側面衝突に関する検討事例を示す。

4.1 ポール側面衝突

ポール側面衝突試験を模擬した解析結果を示す。本解析では、破断予測モデルとしてGISSMO (Generalized Incremental Stress State dependent damage Model)⁹⁾を用いて、超ハイテンやアルミ押出材の母材破断を考慮した解析を実施している。図8に、衝突中の車体変形状態を示す。また、図9に、ポール衝突位置におけるサイドシル、フロア、バッテリーケースの変形状態を示す断面図を示す。サイドシル内のアルミ押出製エネルギー吸収部材は良好な圧壊変形を示しているとともに、超ハイテン製フロアクロスメンバの座屈変形も抑制できている。図10に、ポールの反力に加えて、ボデー側とバッテリーケース側の荷重推移をそれぞれに示す。平均荷重で見ると、およそ75%の荷重をボデー側で、残り25%をバッテリーケースで負担する割合となっており、狙いとしていた荷重分担を実現できている。また、サイドシルの侵入量およびバッテリーモジュールのダメージの指標となる変形量は、いずれも設定した基準値以下とな

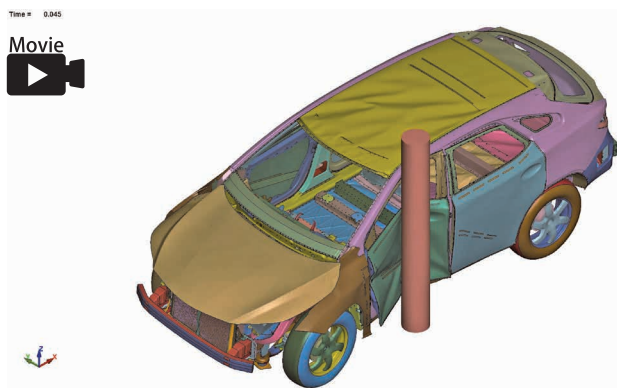


図8 ポール側面衝突における車体変形
Fig.8 Body deformation in pole side crash

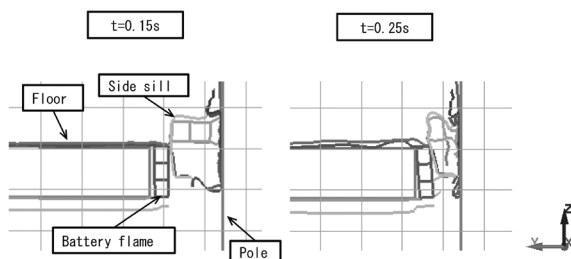


図9 ポール側面衝突時の断面変形
Fig.9 Cross sectional deformation in pole side crash

っている。なお、本解析では、サイドシル内部のエネルギー吸収部材には7000系アルミ押出材を適用しているが、同押出形状で6000系アルミ押出材を適用した場合、バッテリーモジュールの変形量が基準値を超過してしまうことを確認している。

上記条件に加えて、車両前後方向にポール衝突位置を10か所変化させた条件においても、サイドシルの侵入量、バッテリーモジュールの変形量が問題ないことを確認しており、ロバスト性が高い設計を実現できている。

4.2 IIHS側面衝突

IIHS側面衝突試験を模擬した解析結果を示す。図11に、衝突中の車体変形状態を示す。また、図12に、Bピラー、ドア、サイドシルの変形状態を示す断面図を示す。バリアがサイドシルに衝突するが、ポール側面衝突対応で強化されたサイドシルに大きな回転は見られず、バリアが潰れる様子が確認できる。その結果、Bピラーの侵入量を十分抑制することができ、“GOOD”評価を実現した。

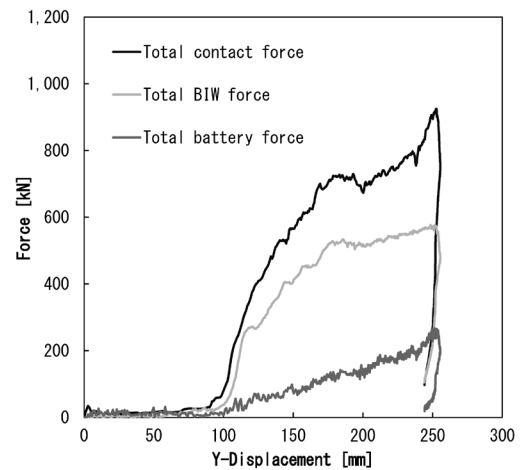


図10 荷重の推移
Fig.10 Force-Displacement curve

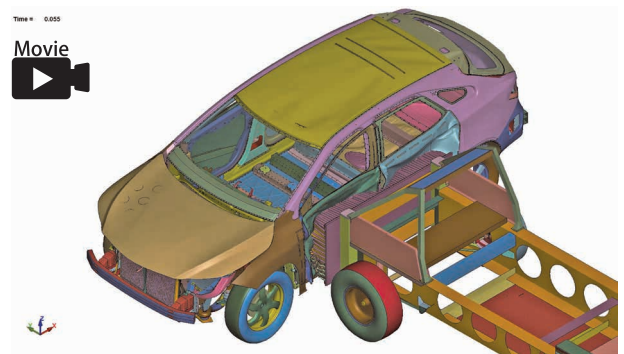


図11 IIHS側面衝突中の車体変形
Fig.11 Body deformation in IIHS side crash

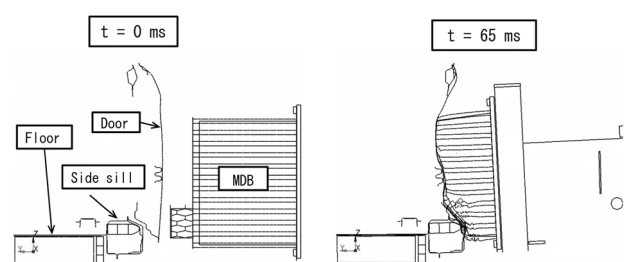


図12 IIHS側面衝突中の断面変形
Fig.12 Cross-Sectional deformation in IIHS side crash


むすび=以上、独自のマルチマテリアルBEV車体コンセプトモデルの設計の考え方や結果を報告した。現在、本モデルを基盤としたソリューション技術の開発や提案を進めている。例えば、コストと軽量化を両立するニーズに対応すべく、鋼板、アルミ、あるいはこれらを組み合わせたマルチマテリアルの条件で最も効率の良いバッテリーケースやサイドシルなど構成部品の構造を検討している。とくにマルチマテリアル構造の異種材接合部には、汎用接合法に加え、独自技術の適用も検討している。また、各種構造に対してライフサイクルアセスメント(LCA)の観点で、軽量化による走行時のCO₂排出量削減効果だけでなく、素材製造から廃棄に至るまでのCO₂排出削減効果を定量的に評価(本号「LCAを用いた自動車用アルミ部品のGHG排出量評価」p.100~105参照)し、低CO₂鋼材やリサイクルアルミの適用も含めた最適な素材提案につなげていく予定である。いっぽう、近年、

BEV車体のアンダーボデーに実用化されている大型アルミダイキャストに代表されるように、部品の一体化/大型化により車体製造工程を革新するトレンドがある。今後、本モデルを活用しながらそのトレンドに対応した技術開発も進めていき、継続して自動車のCO₂排出削減に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- 1) IEA. Global EV Outlook 2024
- 2) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.60-64.
- 3) 橋 美枝ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.2, p.31-36.
- 4) 村田忠夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.17-20.
- 5) 中屋道治ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.25-28.
- 6) 内海幸博ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.3-7.
- 7) 志鎌隆広ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.90-93.
- 8) 櫻井健夫. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.121-126.
- 9) 鎮西将太ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.76-81.

PDFにて本記事をご覧の方へ

図8, 図11にある動画マークをクリックいただくと動画が再生されます。