

(解説)

# xEV 車両の解体ベンチマークデータからのMBDモデル構築とエンジニアリング活用

清水洋志\*<sup>1</sup>・石原健一\*<sup>1</sup>(博士(工学))・板谷元宏\*<sup>1</sup>・中山 彰\*<sup>1</sup>

## Construction of MBD Models from xEV Vehicle Disassembly Benchmark Data and their Engineering Utilization

Hiroshi SHIMIZU・Dr. Kenichi ISHIHARA・Motohiro ITADANI・Akira NAKAYAMA

### 要旨

多くの自動車メーカーが電気自動車(EV)開発に注力している。その中で、競合他社や先進企業の車両を対象としたベンチマーク調査は、最新技術や市場の動向を知るための重要なプロセスである。ベンチマーク調査に Computer Aided Engineering (CAE) を活用することで、調査対象を損壊することなく、さまざまな調査が可能となる。CAEの活用例として、EV車のバッテリーパックの3次元形状測定データからCAEモデルを作成し、各種評価(衝撃圧壊、熱暴走、耐久性)を実施した。そこで確認された耐久性の問題点について、トポロジー最適化の結果を参考に部材断面形状の改良を実施した。結果として、耐久性および衝撃安全性を向上させることができた。

### Abstract

Many automakers are focusing on developing electric vehicles (EVs). In this effort, benchmarking research, which focuses on the automobiles of competitors and leading companies, is an important process for understanding the latest technology and market trends. Utilizing computer-aided engineering (CAE) in benchmark research allows for various investigations without compromising the research subject. An exemplary CAE model has been created from 3D-shape measurement data of an EV battery pack to perform several evaluations (e.g., impact crushing, thermal runaway, and durability.) The durability issue, herein identified, has been addressed by improving the cross-sectional shape of the components on the basis of the results of topology optimization. As a result, both durability and impact safety have been enhanced.

### 検索用キーワード

電気自動車, バッテリーパック, リチウムイオンバッテリー, 衝突安全性, 熱暴走, トポロジー最適化, 衝突変形, ランダム応答解析, PSD, RMS

まえがき = 多くの自動車メーカーが電気自動車(EV)開発に注力している中で、競合他社や先進企業の車両を対象としたベンチマーク調査は、他社製品との比較による自社製品の優位性や改善点を把握し、競争力を向上させることを可能とする。また、他社の最新技術や製品に対する理解度を高めて、市場動向やお客様の要望に適合した製品開発を行うために非常に重要なプロセスであると考えられる。

いっぽう問題点としては、耐久性試験や圧壊試験など、部品の消耗を伴う場合、調査車両における調達コストの増大により、調査項目が限られてしまうことが挙げられる。しかし、リバースエンジニアリングによる Computer Aided Engineering (CAE) を活用することで、部品を消耗することなく、さまざまな調査が可能となる。

2021年より、(株)コベルコ科研では最新の海外製EV車両を対象に解体ベンチマーク調査を実施し、車両から各コンポーネントにおける性能・構造・物性データをレポートにまとめ、販売を開始している。その中で、各調査データに基づく Model Based Development (MBD) モデル、CAD、有限要素解析 (FEA) データの構築も実

施している。本稿では、バッテリーパックを対象として、解体ベンチマークデータをもとにした3Dモデルを例に、エンジニアリング設計への活用事例として、バッテリーパックの耐久性評価、衝突安全性および熱暴走評価、バッテリーケース内部構造のトポロジー最適化設計を紹介する。

### 1. バッテリーパックのモデル化

衝突安全性評価の対象となるバッテリーパックの数値解析用モデルを構築するには対象物の3次元形状データ(CADデータ)が必要となる。ここでは海外製EV車両のバッテリーパックを対象として実機を解体しながら3次元形状測定を行い、得られた形状データを基にサーフェス化を行ってCADデータを作成した。3次元形状測定にはハンディタイプの非接触式3Dスキャナー(精度: 最大0.050 mm)を使用した。図1に対象とした実機バッテリーパック、そのスキャン形状およびサーフェス化したCADデータを示す。なお、CADデータ化の範囲は、衝突安全性能に寄与する構造部材のみを対象とした。このCADデータをもちいて、図2に示すCAE用のメッシュモデルを作成し、安全性および耐久性評価を目的とし

\*1 (株)コベルコ科研 技術本部 計算科学センター

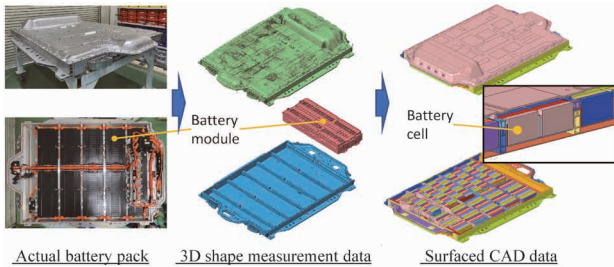


図1 実機バッテリーパックからのCADデータ作成  
Fig.1 Creating CAD data for the actual battery pack

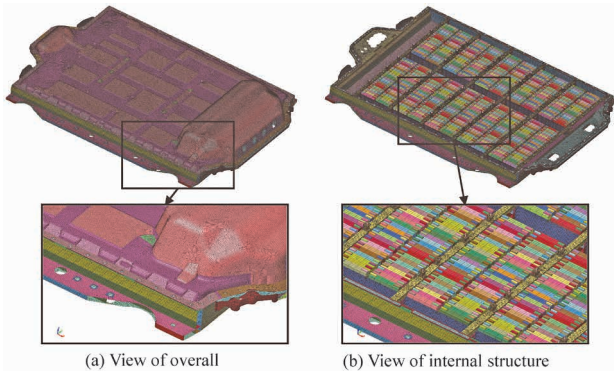


図2 CAE用メッシュモデル  
Fig.2 Mesh model for the numerical simulation

た数値解析を実施した。モデル規模は、節点数：約130万、要素数：約150万である。

## 2. CAEによる耐久性能評価

バッテリーパックの耐久性能評価は、標準試験法としてISO 12405が発行されており<sup>1), 2)</sup>、信頼性試験のひとつの項目に振動試験がある。この振動試験は、車両の走行時の振動や駆動系の振動によるランダム波によって電池が破損を起こしたり、電気的接触の不備が生じたりしないかを確認する試験法である。ISO 12405で規定されたパワースペクトル密度 (Power Spectral Density, 以下, PSD) を図3に示す。ISO 12405の振動試験法はドイツでの走行時の振動データを基にしているが、日本の道路環境下においても妥当であることが検証されている<sup>3)</sup>。いっぽう、ランダム波による振動試験を比較的短時間で効率的にシミュレーションする方法にランダム応答解析がある<sup>4)</sup>。実用的な計算コスト、設計への活用の観点からバッテリーパックの耐久性能評価はランダム応答解析をもちいた。解析ソルバーは、振動・構造解析の汎用コードMSC.Nastranを使用した。図4にランダム応答解析の解析条件を示す。バッテリーパックはサイドシルおよびフロアとボルト締結されるため、その伝達経路で振動が入力される。そのため、ボルト締結部を1Dの剛体要素で剛体結合し、全てのボルト締結部を同時に加振した。加振方向は「前後」「左右」「上下」の3軸同時、PSDは図3の値を使用した。図5にランダム応答解析の応力RMS値 (Root Mean Square 値) コンタ図を示す。応力RMS値<sup>5)</sup>はランダムな荷重に対する構造物の応答を統計的に評価するための指標であり、ランダム応答に対する平均的な応力変動レベルを示す。結果としてはボ

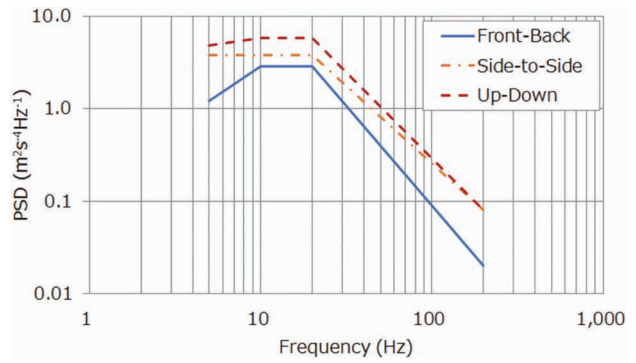


図3 ISO 12405の3軸のPSD  
Fig.3 PSD on 3 axes with ISO 12405

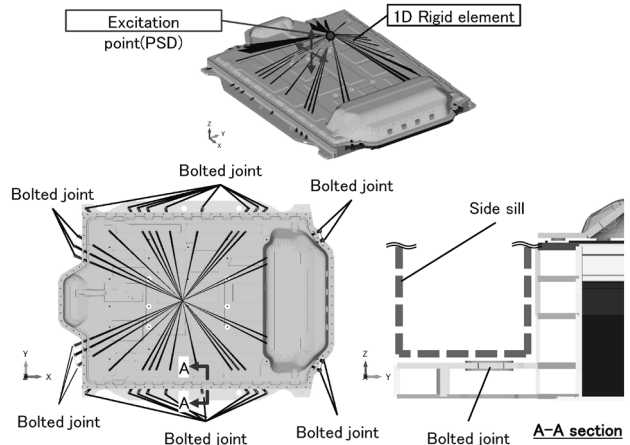


図4 ランダム応答解析の解析条件  
Fig.4 Analysis conditions for random response analysis

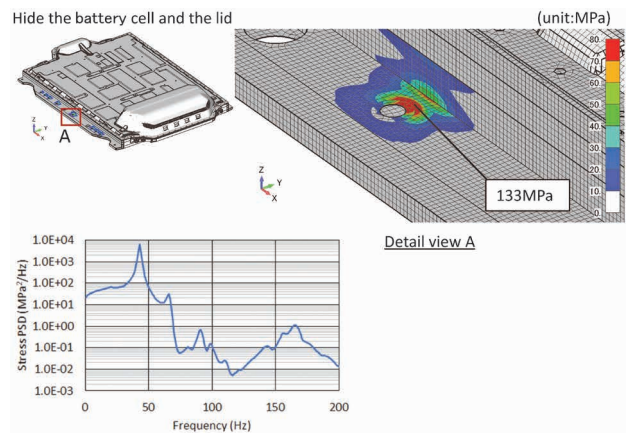


図5 ランダム応答解析の応力RMS値コンタ図  
Fig.5 Stress RMS value contour for random response analysis

ルト締結部で応力が最大となり応力RMS値は133MPaであった。これは、6N01-T5の押出材の疲れ強さ $\sigma_w$  ( $10^7$ 回) 108MPa<sup>6)</sup>よりも大きい。応力PSDは43Hzで明確なピークを示している。応力PSD<sup>7)</sup>とは構造物に作用するランダムな応力のパワー分布を周波数ごとに示した指標である。具体的には、応力の時刻歴データをフーリエ変換して得られるスペクトル密度を表す。43Hzの振動モードを把握するため固有振動数解析を行った結果を図6に示す。43Hzにバッテリーパックの曲げ1次の振動モードが存在し、応力PSDのピーク値を示す周波数と一致する。この振動モードはバッテリーパック全体が曲げ変形するモードであるが、とくにボルト締結部近傍

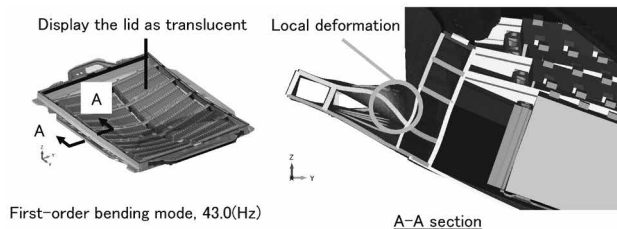


図6 1次曲げの固有振動モード  
Fig.6 Natural vibration modes of first-order bending

の局所変形が大きい。したがって、ボルト締結面の面剛性を高くすれば効率的に応力低減を図ることができると考えられる。

### 3. CAEによる衝突安全性評価

自動車の衝突安全性評価の基準は国や地域によって異なる。一般的には、前面、側面および後面などの代表的な3方向に対する衝突試験があり、自動車事故の際に乗員や歩行者などの被害を最小限に抑えるための性能が要求される。しかしながら、EV車においては、車両に搭載されたリチウムイオンバッテリーの熱暴走による火災のリスクもあり、バッテリーパック自体の衝突安全性も考慮することが望まれる。そこで、バッテリーパックのみに着目した衝突変形性能を数値解析により確認した。ここでは代表的な3方向のうち、バッテリーパックに波及する衝突変形が最も懸念される側面衝突試験について確認した。図7にバッテリーパック側面へのポール衝突を模擬した衝突条件を示す。

本来は車体全体に対する衝突安全性評価であるが、バッテリーパックの耐衝突性能に関する設計思想を理解するため、バッテリーパック単体の衝突現象を解析することとした。ここでは、バッテリーパックの質量によって生じる運動エネルギーを吸収して安全性が保てるか否かを確認した。

衝突速度はポール側面衝突試験（UN-R135）を参考にした32 km/hと、過大な条件として約2倍の60 km/hとした。解析ソルバーは汎用コードのAnsys LS-DYNA（以下、LS-DYNA）を使用した。

図8に衝突速度32 km/hにおけるバッテリーパックの変形状況を示す。ポールとの衝突部においてバッテリーパックの側面フレームが内部にまで湾曲していることが確認できる。なお、この変形は側面フレームとバッテリーモジュール間に設けられた空間内で留まっており、バッテリーモジュールには影響しないと判断される。このことから、この空間はクラッシュゾーンとして意図的に設けられており、側突によるフレームの変形がバッテリーセルに到達しないようにすることで安全性を確保した設計と推測される。

つぎに、UN-R135よりも過大な条件で衝突した場合の確認を行った。図9に衝突速度60 km/hにおけるバッテリーパックの変形状況を示す。60 km/h衝突では、側面フレームの変形がバッテリーモジュールに到達し、端部のセルに圧縮変形が生じていることが確認できる。よってクラッシュゾーン内では変形を吸収しきれてい

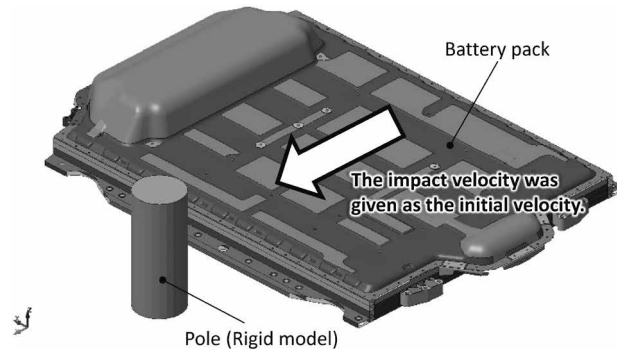


図7 バッテリーパック側面への衝突条件  
Fig.7 Battery pack side impact conditions

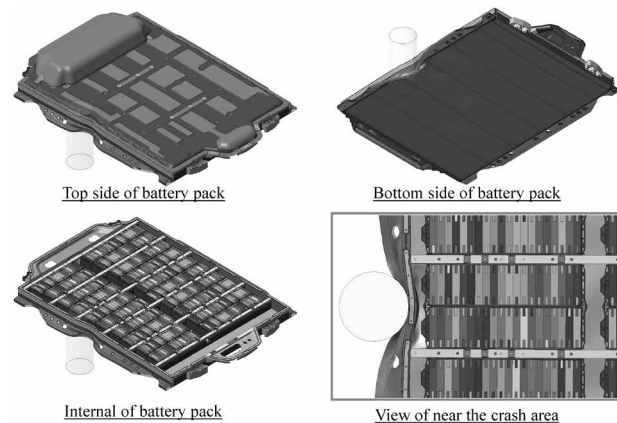


図8 衝突速度32 km/hにおける変形状況  
Fig.8 The deformation condition at an impact speed of 32 km/h

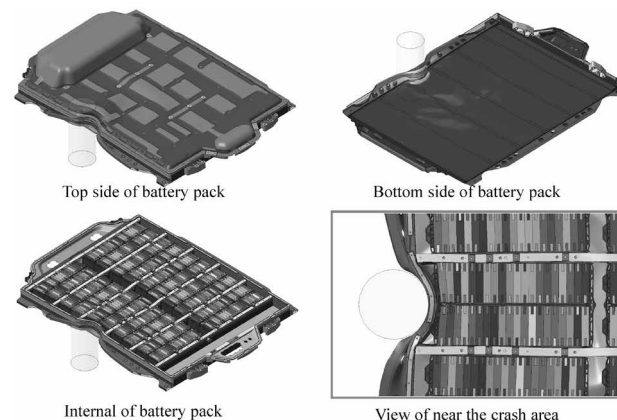


図9 衝突速度60 km/hにおける変形状況  
Fig.9 The deformation condition at an impact speed of 60 km/h

ない。衝突速度60 km/hは運動エネルギーが32 km/h衝突の約4倍となり、この圧縮変形によりバッテリーセルが短絡して熱暴走を引き起こす懸念がある。本バッテリーパックの構造としては、車体左右方向に分散配置されている各モジュール間（パック中央）にも側面と同様な空間が設けられている。よって、側面からモジュールに到達した変形もモジュール自身の剛体運動（スライド運動、図9右下図参照）で吸収され、セルが受ける荷重が少なくなるよう工夫された構造と推測される。

### 4. CAEによる短絡熱暴走評価

つぎに、LS-DYNAの構造・熱・電磁場 (Electromagnetic, EM) 連成解析ソルバーを使用して短絡熱暴走のシミュ

レーションを行った。バッテリーの短絡は、正極と負極が直接接触する現象で、絶縁体の損傷や衝撃により生じる。これによりバッテリー内部に電流が急激に流れ、温度が上昇する。また、熱暴走はバッテリー内部の温度が急上昇し、制御不能になる現象で、過充電、内部短絡、外部からの過度な熱により生じる。これが進行すると、蓄積されたエネルギーが一気に放出され、バッテリーが過熱し、火災や爆発を引き起こす可能性がある。

バッテリーの性能や安全性を評価するため、従来のシミュレーションでは、セルの各層を詳細にモデル化する必要がある、大規模なモデルと解析コストを要した。いっぽうで、多くのセルやバッテリー全体を扱う際に有効な、少ないメッシュでバッテリーセルを表現する Battery macro モデル（以下、Batmac モデル<sup>8)</sup>）という方法がある。Batmac モデルでは、各節点に Randles 型等価回路<sup>9)</sup>（図 10）が考慮されている。これにより内部の短絡や熱暴走などの現象を効率的に表現することが可能となるため、ここでは Batmac モデルを使用することとした。

上述のように短絡や熱暴走はセル内の反応によって生じる複雑な現象である。熱・EM 解析で要求される時間刻みは、一般的な短時間の衝突解析に比べて長い現象のため、一連の連成解析には多大なコストを要する。そこで、今回のシミュレーションでは、衝突解析の変形およびひずみの状態を熱・EM 解析の初期条件として設定し、短絡は初期ひずみ分布、熱暴走は短絡後の温度変化をもとにモデル化することで、実用的な時間でのシミュレーションを可能とした。

#### 4.1 単セルを対象とした解析

最初に、単セルを対象に Batmac モデルをもちいた短絡熱暴走シミュレーションを行った。シミュレーションにもちいた機械的特性は衝突解析と同じとし、伝熱特性および電気特性は各部材の材料に応じた一般的な物性値を使用した。セルの容量（=57 Ah）、電圧と SOC（State of charge）の関係（図 11）は測定値を使用した。Randles 型等価回路のパラメータは、充放電曲線の測定結果を参考に、 $R_0=R_{10}=0.001$ 、 $C_{10}=1,000$  とした。短絡の発生条件は、試験などで具体的な閾値（いきち）を確認できなかったため、衝突解析から得られたひずみ分布を基に、ここでは、セルの 10% のひずみを短絡の閾値と仮定した。また、熱暴走については、一般的なリチウムイオン電池が熱暴走する温度<sup>10)</sup>を参考に、温度が 200℃ を超えたときに発生すると仮定した。

図 12 に初期ひずみ分布、ジュール熱分布を示す。図を見比べると、ひずみが 10% を超えた領域で短絡が生じて、セル全体に大きな電流が流れた結果、短絡していない領域を含めてセル全体のジュール熱が大きくなっていることがわかる。

図 13 にセル上部タブ間の温度履歴を示す。変形直後 40 秒手前までは短絡による温度上昇が生じ、200℃ を超えたあたりの急激な温度上昇は熱暴走によるものである。その後、所定の熱量に達したところで温度上昇がとまり熱暴走が終了している。このように、Batmac モデ

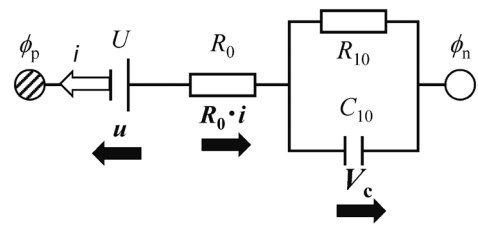


図 10 Randles 型等価回路  
Fig.10 Randles-type equivalent circuit

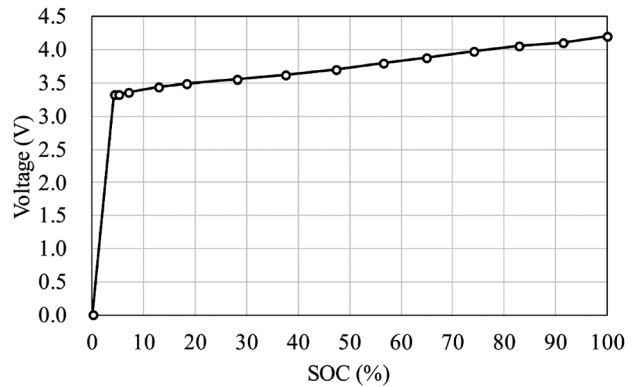


図 11 電圧と SOC の関係  
Fig.11 Relationship between voltage and SOC

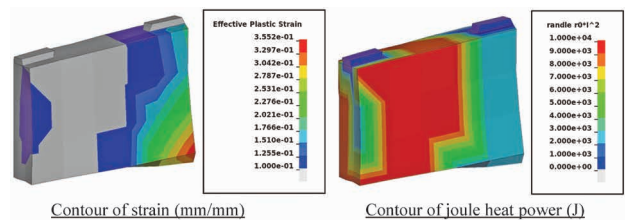


図 12 セルのひずみ分布、ジュール熱分布  
Fig.12 Initial strain distribution and joule heat power distribution of cell

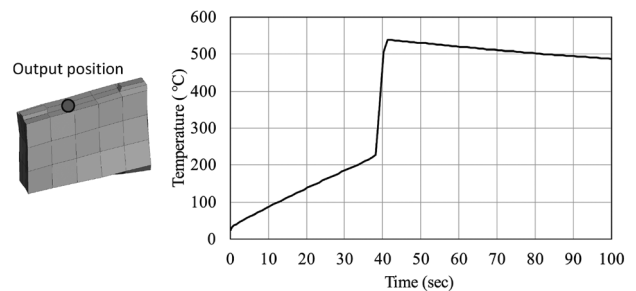


図 13 セル上部タブ間の温度履歴  
Fig.13 Temperature history between cell top tabs

ルをもちいると、短絡熱暴走の現象がシミュレートできることが確認された。

#### 4.2 バッテリーパックを対象とした解析

つぎに、3章の衝突速度 60 km/h の解析結果をもとに、バッテリーパックを対象として 4.1 節で設定したパラメータをもちいて短絡熱暴走シミュレーションを行った。セル間や各部材間には接触熱伝達を考慮し、バッテリーパックの周囲には空気との熱伝達を考慮した。

図 14 に初期ひずみ分布、電流分布を示す。図に示すように衝突によるひずみは衝突部（図左側）から 2 番目のセル②にもおよんでおり、単セルでの解析と同様、短絡領域に大きな電流が流れていることがわかる。

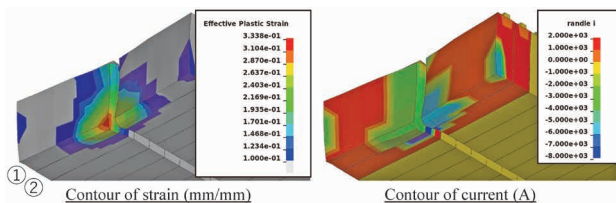


図14 モジュールのひずみ分布、電流分布

Fig.14 Initial strain distribution and current distribution of module

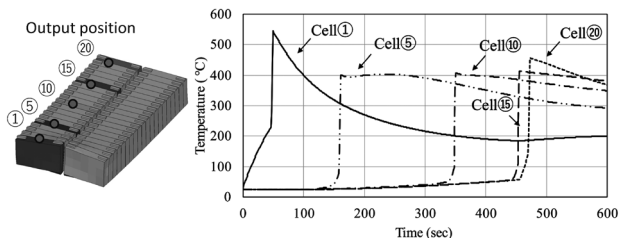


図15 代表セル上部タブ間の温度履歴

Fig.15 Temperature history between top tabs of representative cells

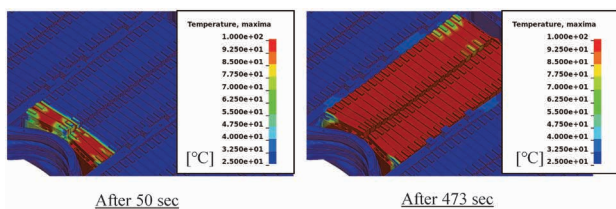


図16 代表時刻の温度コンター図

Fig.16 Temperature contour of the module at representative time

図15に代表セル①、⑤、⑩、⑮、⑳の上部タブ間の温度履歴を示す。衝突部から1番目のセル①は短絡開始直後から温度が上昇し、200℃を超えたあたりで熱暴走が生じている。5番目のセル⑤（二点鎖線）では衝突後約120秒で温度が上昇し始め、約150～160秒で急激に温度が上昇している。このように衝突部のセルで短絡熱暴走が起きた場合、熱伝導によって衝突部から離れたセルへ熱暴走が連鎖し、480秒後には1モジュール分の熱暴走が生じた。

図16に短絡開始からの所定の経過時間に対する温度分布を示す。短絡開始50秒後では温度上昇がみられたのは衝突部から1番目、2番目のセルであったが、473秒後には温度上昇がほぼモジュール全体に及んでいることがわかる。なお、温度が高くなったのは1モジュール分であることから、今回対象としたバッテリーパックはモジュール間で温度拡散が生じ難い構造と推測される。

以上のように、Batmacモデルを使用することで、バッテリーパック全体を対象とした短絡熱暴走現象が実用的な解析コストで可能となった。

## 5. CAEによる最適設計

### 5.1 押出し材形状の最適化

2章の耐久性評価で述べた、構成材の疲れ強さを超える応力が発生していることに対して、トポロジー最適化により対策案の検討を行った。トポロジー最適化とは、構造的な制約、荷重、拘束条件の下で設計領域から材料を削減しながら最適な材料の配置を導き出す構造最

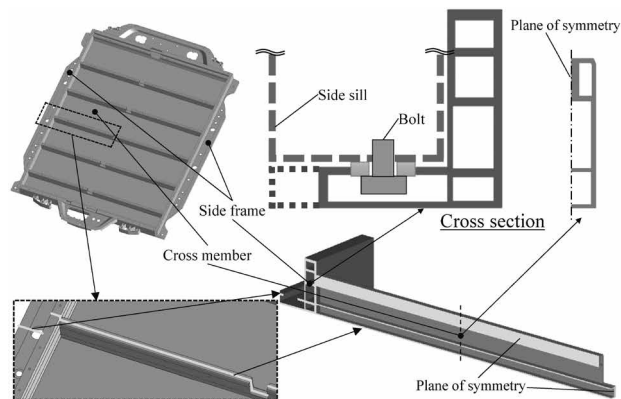


図17 トポロジー最適化のための部分構造モデル

Fig.17 Substructure model for topology optimization

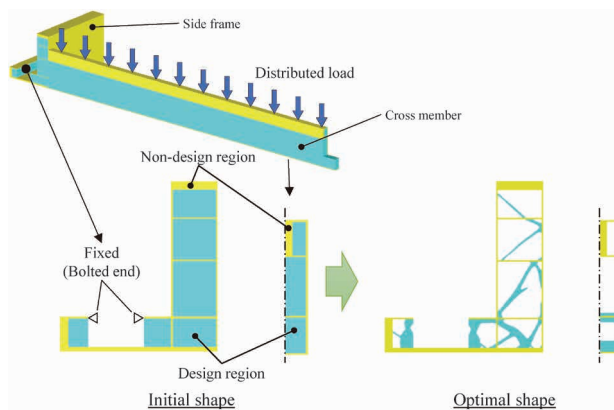


図18 設計領域と境界条件、および最適化結果

Fig.18 Design region, boundary conditions, and optimization results

適化手法である。本検討では、最適化解析の汎用ソルバーである Altair OptiStruct を使用した。

最適化領域として、サイドフレームとクロスメンバーに着目した。これらは、バッテリーパックの曲げ1次振動モードの変形に影響が大きい主要構造部材である。図17にトポロジー最適化のための部分構造モデルを示す。解析モデルは、サイドフレームとクロスメンバーを部分的に取り出し、幾何学的対称性から1/4対称モデルとした。図18に設計領域（水色部）と境界条件、およびトポロジー最適化結果を示す。設計領域は元構造の外表面より内部の領域として、当初のリブの配置を維持、機能上必要な部位以外は最低残存板厚を1mmとして設定した。拘束条件はボルト締結部の近傍を固定し、曲げ1次の変形モードを表現する目的でクロスメンバー上面に面圧を負荷した。サイドフレームとクロスメンバーの制約条件質量を同等以下と、剛性最大化（クロスメンバーのたわみ最小化）とした。

トポロジー最適化結果として、サイドフレームはボルト締結部において上下面の板をつなぐようなリブが追加されており、上面のみのボルト締結を下面も含めた締結にすることで、クロスメンバーは下側の2枚のリブの板厚を厚くすることが示唆された。この結果を基に、図19に示す構造変更を行った。なお、構造変更後のバッテリーケースの質量変化はわずか120gの増加にとどまり、元構造からの顕著な変化はない。

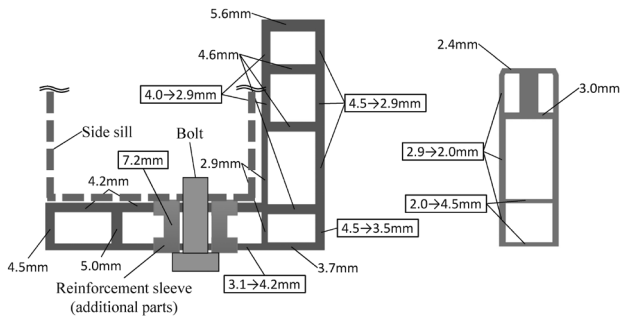


図19 トポロジー最適化結果に基づく構造変更案  
Fig.19 Structural modification proposal based on topology optimization results

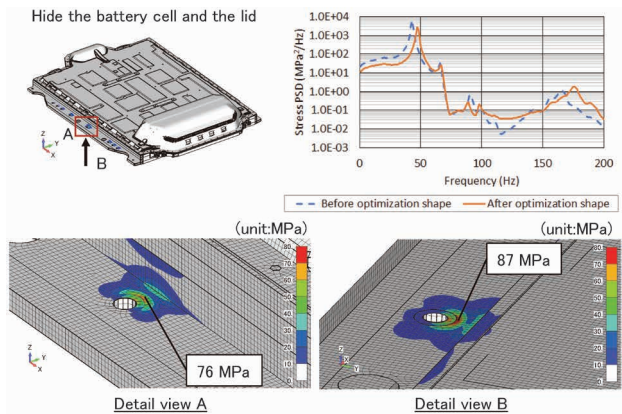


図20 最適化後の応力RMS値コンタ図  
Fig.20 Contour plot of stress RMS values after optimization

## 5.2 耐久性性能評価

図20に5.1節で検討した最適化形状にてランダム応答解析を行った結果を示す。ボルト締結部の発生応力が最大となり応力RMS値は87 MPaとなつて、元の形状から35%応力を低減した。これは、6N01-T5の押出材の疲れ強さ $\sigma_w$  ( $10^7$ 回) 108 MPa<sup>5)</sup> 以下である。最適化形状に変更することで応力PSDのピーク値の周波数は高周波側へシフトし最適化形状に変更することで減少した。図21に最適化形状の固有振動数解析の結果を示す。バッテリーパックの曲げ1次の固有振動数は43.0 Hzから47.3 Hzへ10%増加した。最適化形状は2枚のプレートで締結したことで局所的な変形を抑制している。これらのことから最適化形状が応力RMS値を低減させたのは二つの要因が考えられる。一つ目は2枚のプレートでボルト締結することによるボルト締結面の剛性アップであり、二つ目は固有振動数が増加したことによる入力加振PSDの減少である。図3のPSDは20 Hz以上では周波数が大きいほど減少するため、固有振動数の増加が入力加振PSDを減少させ応力を低減させる効果がある。

以上のように、断面形状の最適化により、耐久性の観点での最適な設計断面を、個人の力量に依存することなく効率的に求めることができる。

## 5.3 衝突安全性評価

図22に5.1節で検討した最適化形状にて3章と同様の衝突解析(衝突速度32 km/h)を行った結果を示す。衝

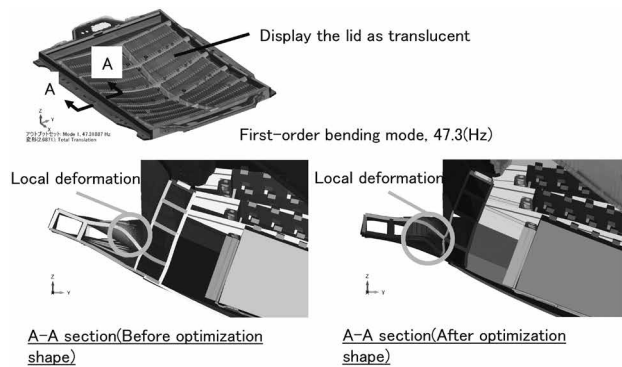


図21 最適化後の1次曲げの固有振動モード  
Fig.21 Natural vibration modes of first-order bending after optimization

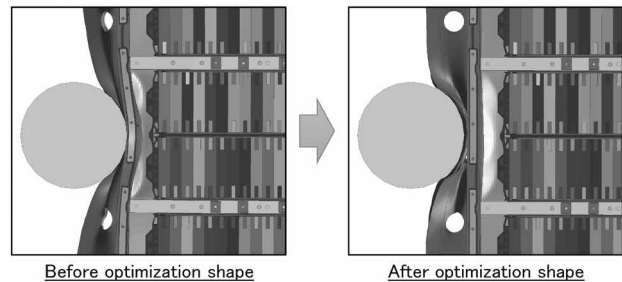


図22 最適化後の衝突速度32 km/hにおける変形状況  
Fig.22 The deformation condition at an impact speed of 32 km/h after optimization

突の影響が大きいボルト締結部下面の板厚を3.1 mmから4.2 mmに増加させたことで衝撃吸収能が増加し、サイドフレームの変形量は減少した。このように、構造変更による衝突安全性の向上まで確認することができた。

むすび=本稿では、バッテリーパックを対象としたエンジニアリング設計として、耐久性性能評価、衝突安全性評価、短絡熱暴走評価およびCAEによる最適設計技術について述べた。解体ベンチマーク調査におけるCAEの活用は、他社製品との性能比較や設計傾向の把握に非常に有効な手段である。これにより、短時間で設計フェーズにフィードバックでき、開発プロセスの効率化が図れると考える。

## 参考文献

- 1) Electrically propelled road vehicles -Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems- Part1:High power applications, ISO 12405-1 (2011).
- 2) Electrically propelled road vehicles -Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems- Part2:High energy applications, ISO 12405-2 (2012).
- 3) 前田清隆ほか. 自動車技術会予稿集. 2015, Vol.46, No.1, p.109-114.
- 4) 板谷元宏ほか. こべるにくす. 2023, Vol.31, No.57, p.23-29.
- 5) 藤田真治ほか. 富士通テン技報. 2016, Vol.33, No.1, p.45.
- 6) 日本アルミニウム協会. アルミニウムハンドブック. 第7版, 昭栄社印刷所, 2007, P.57.
- 7) 竹田憲生ほか. 材料. 2012, Vol.61, No.10, p.853.
- 8) LST, an Ansys company. LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME III. Multi-Physics Solvers. LS-DYNA R13.
- 9) P.L'Eplattenier et al. 12th European LS-DYNA Conference. 2019.
- 10) 向井ほか. 表面技術. 2019, Vol.70, No.6, p.301-307.