

特集：MAZDA MX-30

10

高電圧電池パックの耐振動性開発

Vibration Resistance Development for High Voltage Battery Technology

伊藤 智昭^{*1} 丹羽 貴大^{*2} 花田 裕^{*3}
Tomoaki Ito Takahiro Niwa Yu Hanada
岸田 直樹^{*4} 鍋島 範之^{*5}
Naoki Kishida Noriyuki Nabeshima

要 約

マツダはクルマのライフサイクル全体でのCO₂排出量を考え、各国に対応できるマルチソリューション戦略を推進している。今回、カーボンニュートラル実現の第一歩であるマツダ初の量産電気自動車であるMX-30 EV MODELを開発した。MX-30に搭載する高電圧電池は、お客様の求める走行距離、走行加速性能、回生ブレーキ性能、充電時間といった商品性能を実現しつつ、安全性能、信頼性能、高寿命、低重量を満足するよう材料選定や部品配置の最適化を目指した。本稿では、安全信頼性能の一つである耐振動性能開発について紹介する。高電圧電池パックは多数の電子部品から構成されており、振動伝搬が複雑化している。そのため、それぞれの部品の耐振動性を保証しながら最適な部品配置を実現できる開発と解析精度の向上が必要である。

振動開発では、振動の伝達を考慮した各部位への共振周波数のコントロールを決めた。そして、モデルを活用した振動に対するレイアウトの開発要素を見定め、応力を低減する形状・締結方法などに変更した。更に、実機の振動評価のコリレーションを行いモデルに反映できていない部分を見極め、より実機に近いモデルで解析することで耐振動性能の高い高電圧電池パックを開発した。

Abstract

Mazda has been promoting a multi-solution strategy responding to each country's demand, considering CO₂ emissions throughout the life cycles of vehicles. This time, we have developed Mazda's first mass-produced BEV, MX-30, which is the first step for carbon neutrality. The high-voltage battery installed in the MX-30 satisfies customers' requirements by optimizing the materials and layouts, including safety and reliability performance, long life, low cost, and light weight, while realizing product performances such as mileage, driving dynamics, regeneration performance, and charging time.

This technical report introduces the development of vibration resistance that is one of the safety and reliability performances. The high-voltage battery pack is composed of many electronic components, which complicates the vibration propagation. Therefore, it was necessary to establish a development process for the optimum components layout while guaranteeing the vibration resistance of each component and to improve the accuracy of analyses. As a vibration-resistance development process, taking into consideration of the way of vibration transmission, we have defined the concept of controlling resonance frequencies transmitted to each component, then determined Weak-Points of the layout against vibrations by using models, and changed the shapes and fastening methods of the components to release stress. We have also performed vibration evaluation to examine correlations between predictions made by a model and results gained on actual machine, and identified areas not reflected in the models. As a result, we have developed a high-voltage battery pack with high vibration resistance through analyses using the model which was closer to the actual machine.

Key words : Battery Technology, Frequency Analysis, Modal Analysis, Body Vibration While Driving, CAE

*1~2 電子性能開発部
Electrical & Electronics Performance Development
Dept

*3~4 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

*5 マツダ E&T CAE 技術推進部
CAE Technology Promotion Dept.

1. はじめに

MX-30 に搭載する高電圧電池パックは、電池モジュールをはじめ、電池の状態を監視・制御するコントロールユニット、高電圧回路の起動遮断を行うジャンクションボックス、電池を適温にコントロールする冷却配管や電池ヒータなどさまざまな部品から構成されている。車両の使い方や保証すべき耐久性能を見定め、振動試験条件を設定し、各部品に対して異常な共振をさせない構造を検討している。

また振動開発では、路面から車両、電池パック、内部部品への振動伝達や部品に加わる応力・加速度を実機やCAEを用いて解析している。それらのデータや結果を活用し、車両やユニット設計（モデル作成）段階で、電池パック全体に対する振動増大・応力集中箇所などを事前に把握し、振動を抑える対策や重量の最小化を行っている。更に、実機による対策の妥当性を検証し、CAEモデルに反映することで解析精度を向上させている。

2. 耐振動の保証方法

2.1 共振周波数

あらゆる物体は最も振動が増幅される共振周波数をもっている。例えば、部品を固定させるブラケットを作成するとき、部品とブラケットの共振周波数が近いと部品の振動がブラケットの共振の影響を受けて増大する可能性がある。このように接続する部品ごとに共振周波数を近付けない考え方をMX-30の電池パックのレイアウト設計に用いている。

具体的に考慮すべき部品の共振周波数について説明する。走行時における振動の伝達は、路面→サスペンション→車体→電池筐体→ブラケット→電子部品とされていく (Fig. 1)。

MX-30の電池パックは、車体共振、電池筐体共振、ブラケット共振、各電子部品（例えば電池）の共振がそれぞれ重ならないように設計し、過大な振動加速度を抑制している (Fig. 2)。車両の特性として10~15Hzと低い領域に車体の共振が表れ、周波数が大きくなるにつれて振動加速度は小さくなるため、各部品の共振周波数をより高周波数域へシフトさせることで電池パック内部部品の加速度を抑えることができる。

部品の共振周波数は、式(1)によって決まる。

$$\text{周波数 } f[\text{Hz}] \text{ の式: } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

m : 部品重量 [kg]

k : ばね定数

共振の影響を抑制する方法として部品の材料特性変更、搭載位置や固定箇所・数の変更などといった方法がある。電池パックに搭載する全ての部品の振動加速度が、各

部品の保証する耐振動性条件の範囲内であれば、電池パックに対する耐振動性保証ができる。

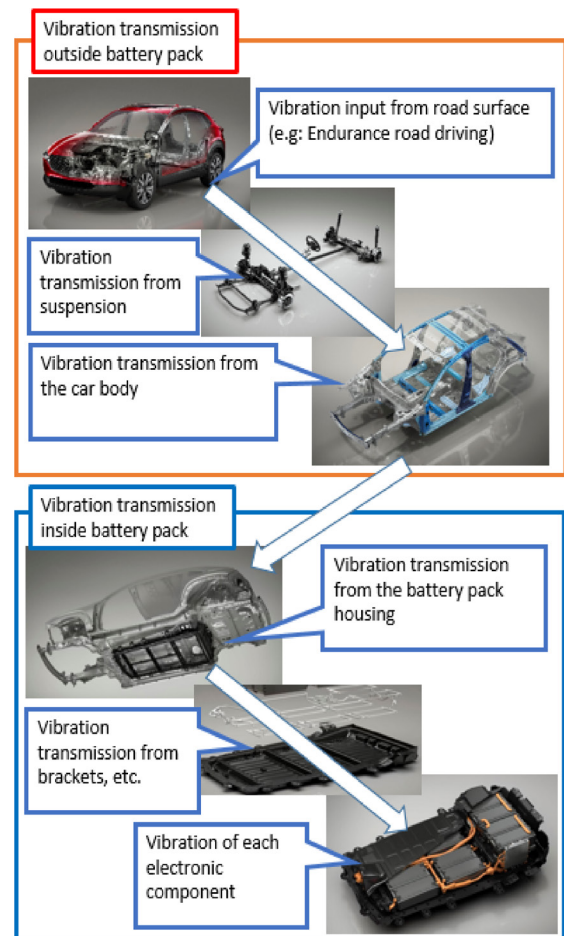


Fig. 1 Vibration Transmission from Outside of Vehicle to Battery Pack

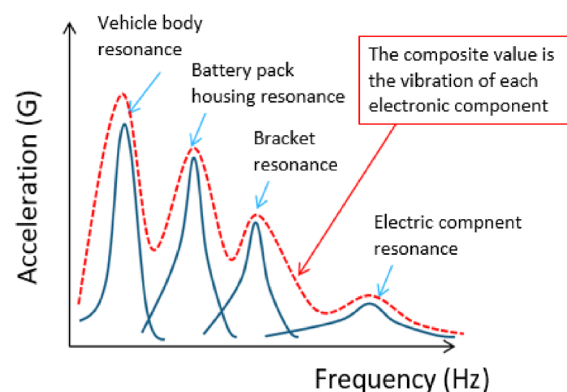


Fig. 2 How to Divide Resonance of Each Part

2.2 耐応力

(1) S-N 曲線

耐振動性を保証するにあたり、振動の繰り返しにより部品に発生する応力が疲労寿命を上回り、変形や破壊に至らないか検証している。S-N 曲線は金属材料や種類で特性が異なる⁽¹⁾ため部品に使用している材料を細かく分類して比較する必要がある。また、アルミニウムなどの

非鉄金属は疲労限界が存在しないものもあるため、以下のやり方を採用した。

繰り返し回数に任意の値（鉄の疲労限回数程度）を与え、それに対し各部品のピーク応力が許容応力以下とすることで、振動ダメージに対する部品信頼性を保証した（Fig. 3）。

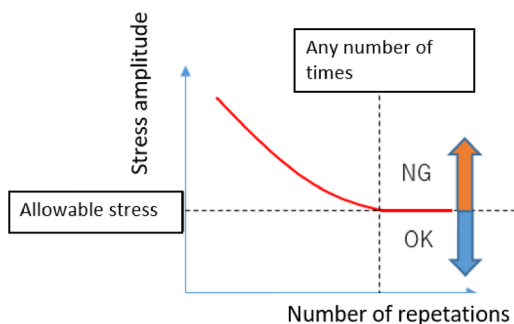


Fig. 3 Relationship between S-N Curve and Allowable Stress

(2) ダメージ量の算出

S-N 線図は規則的な繰り返し（一定加速度の）振動に対する応力の関係を表すが、実際の電池パックの振動加速度は刻一刻と変化し続けるため、実機結果を S-N 線図に当てはめることができない。そこで、社内テストコースの走行データを用いて電池パックに生涯で入力される振動総ダメージ量を用いた。式(2)に総ダメージ量を与えると、繰り返し回数と 1 回あたりの振動加速度の関係が決まる。

$$D = \sum_{i=1}^n \sigma_i^m T_i \quad (2)$$

σ : 加速度 [G]

T : 加速度が σ のときの回数

m : 特定の疲労メカニズムに関する材料定数

ダメージ量を計算する過程で、市場のさまざまな振動を模擬した試験路走行を行い、発生するランダム実働波形の振動から特定入力加速度を決定している。

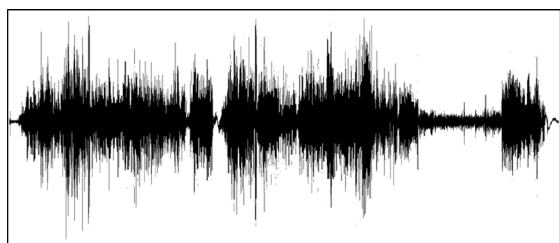


Fig. 4 Endurance Test Road Vibration Waveform

Fig. 4 はランダム実働波形を示している。この波形の疲労寿命予測を行うために、応力・ひずみ頻度の計数手法の一つであるレインフロー法を適用して入力加速度回数を算出している。

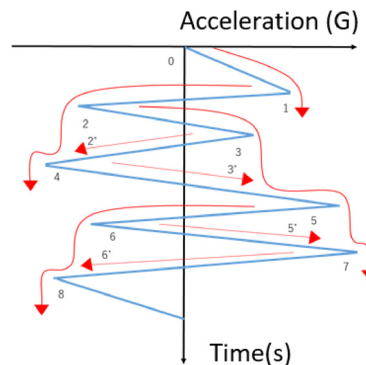


Fig. 5 Random Working Waveform to which Rainflow Method is Applied

レインフロー法は別名「雨だれ法」とも呼ばれている。計数条件として Fig. 5 に示す 2', 3', 5', 6' のように流れが止められる場合、及び 1, 4, 7, 8, のように流れが止められずに底なしで水が流れ落ちる場合、その水が流れた横方向の長さが半サイクル分の波の全振幅（振動加速度）としてカウントする。振動加速度とカウント数を式(2)へ代入し、社内テストコース走行時のダメージ量を算出した。

2.3 認証試験（振動）について

開発したクルマをお客様へお届けするために市場環境適合性を確認する認証試験を受験している。認証試験については 2021 年 EU 仕向け：UNR-100, 中国仕向け：GB 規格（GB38031）の 2 つがあり、いずれも電池パックに対し実施する規格となっている（Table 1）。

Table 1 List of Vibration Test Conditions

UN R100 (Vertical direction)		GB38031 (lateral direction)	
Frequency (Hz)	Acceleration(m/s ²)	Frequency (Hz)	PSD(m/s ²) ² /Hz
7-18	10	5	0.576
18-30	10-2	30	0.576
30-50	2	200	0.003
		RMS	4.9 m/s ²

GB38031 (Longitudinal direction)		GB38031 (Vertical direction)	
Frequency (Hz)	PSD(m/s ²) ² /Hz	Frequency (Hz)	PSD(m/s ²) ² /Hz
5	0.192	5	1.441
10	0.480	15	1.441
20	0.480	65	0.096
200	0.014	100	0.096
RMS	4.41 m/s ²	200	0.010
		RMS	6.272 m/s ²

マツダでは走行時の振動波形を測定しており、搭載位置ごとに電子部品の振動評価条件を決定している。UNR-100 や GB 規格に対し、車両走行時の電池締結部への振動加速度がそれ以上になっており、かつ極端に大きい振動加速度が入っていないことを確認することで、認証試験の耐振動性を保証するとともに、振動評価条件の確からしさを確認している。

3. MX-30 電池パックの耐振動開発

3.1 電池パック内レイアウト

電池パック内レイアウトを決定する上で、スペース内に電池を詰め込むエネルギー高密度化と同時に、共振や応力集中させないブレークスルーが必要であった。本章では具体的に電池パックに折り込んだ技術を説明する。

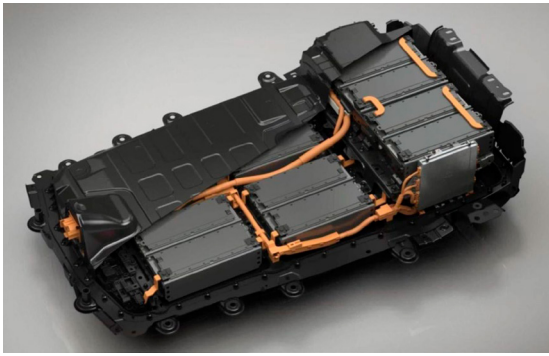


Fig. 6 MX-30 High-Voltage Battery Pack

Fig. 6 に MX-30 の電池パックを示す。本電池パックは耐振動技術として以下 (1)~(4) を折り込んでいる。

(1) 電池モジュールの配置

電池モジュールとは電池セルを直並列につなげた集合体のことである。MX-30 では 1 モジュールあたり電池セルが 12 個 (6 直列 2 並列) で接続している。筐体に搭載する電池モジュールは左右対称にすることで重量の偏りをなくしている。これにより振動時のねじれを抑え、電池パック全体にかかる応力を均等に分配している。後部の 2 段積の電池モジュールが 2 個なくなった場合、後部モジュールにかかる加速度が 1.3 倍程度に増幅されてダメージが増えることを実機で確認しており、現在のレイアウトが最適と考える。

また、電池の上部にジャンクションボックスとコントロールユニットといった電子部品を置かない構造にすることで、共振の重なりを物理的に起こさせないようにし、部品の過大ダメージを防止している。

(2) 高電圧バスバーの形状

高電圧バスバーは電池モジュール間をつなぐ部品であり、Fig. 6 のオレンジ色の部品である。隣り合う電池端子を互いに接続するとき、締結位置ばらつき (電池モジュールの搭載位置のばらつき) により締結部に発生する応力に加え、充放電時の膨張収縮や振動、衝撃に対する応力を分散させるため、曲げ形状のバスバーを使用している。上段 - 下段のモジュールをつなげるバスバーは、伸縮自在なバスバーケーブルを使用している。またバスバーケーブルは、電池端子への応力を下げるため、固定時の反力の低いケーブルカバーの採用や、上下に振れにくい位置で固定させるなどの工夫を凝らしている。

上記 (1) (2) は技術開発における限界 (破損させる

までの耐久) 試験により、対策する箇所を把握することで耐振動構造仕様に落とし込み設計をすることができた。これらを電池パックに実装することにより、市場耐振動性保証目標を大きくクリアし、お客様にいつまでも安心してお使いいただける電池パックを開発した。上記①②は技術開発における耐久試験により、応力がかかりやすい箇所を把握することで対策内容を決めている。これらを電池パックに実装することにより、市場の耐振動性保証 (走行可能距離) 目標の 4 倍相当を保証している。

(3) ブラケット形状の最適化

ジャンクションボックスとコントロールユニットそれぞれを固定させるブラケットを設計しており、重量の低減をしつつ、耐振動性能を悪化させない手段について解析ベースで検討した。Fig. 7 にジャンクションブラケットの最適化に関する検証内容を、Fig. 8 にコントロールユニットブラケットの最適化に関する検証内容を示す。

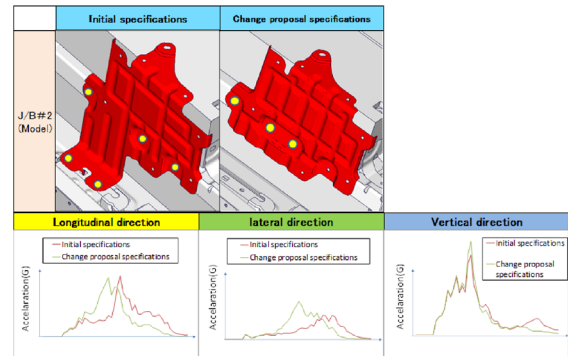


Fig. 7 Considering Design Change of Junction Box Bracket

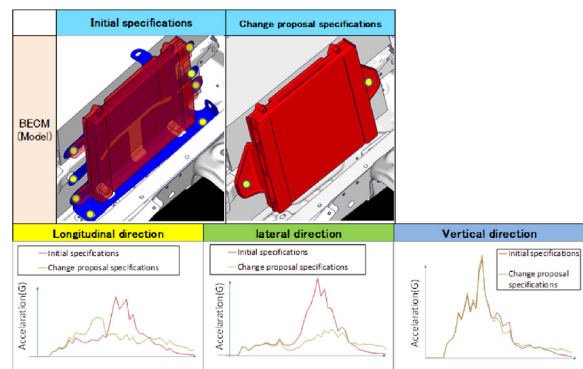


Fig. 8 Considering of Control Module Bracket Less

Fig. 7, 8 に示すグラフは車両も含めた振動解析結果であり、振動加速度はほとんど変わらない、もしくは低下することから、いずれもブラケットの形状や締結点の変更による悪化はないと考える。

Fig. 8 に示すコントロールユニットのブラケットレスについては、締結箇所周辺の剛性を向上させたことにより、車両前後左右方向に対しての振動加速度を低減させることができた。また、この 2 つの対策により、約

0.9kgの軽量化を行うことができた。

(4) 冷却配管の2階建ての形状変更

電池パックには、電池温度を最適にコントロールするため、電池パック筐体下側のロアケース上に冷却配管を設置している。電池冷却配管は各電池モジュールの底面をとおるように設計しているため、電池モジュールの2段積構造において、下段と上段の位相差により冷却配管に加わる応力を低減させることが課題であった。

Fig. 9に冷却配管構造を載せる。この課題に対して以下①②の対策を折り込んだ。

①ロアケースから上段の電池冷却配管へ分配するディストリビュータを、共振時上段の電池の位相に近い箇所に締結することで引っ張り圧縮を抑え、ねじれが発生しにくい角度で締結することで応力を低減させた。

②上段から下段へ向かう冷却配管はゴムを採用し、左右にクロスさせることで、上下方向から加わる応力を低減させた。これらの対策により耐振動性の優れた2段積電池の冷却構造を実現させた。

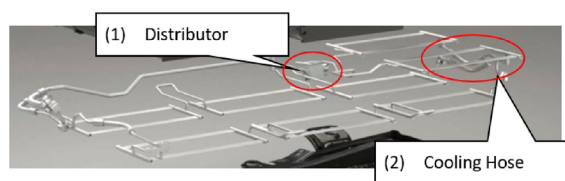


Fig. 9 Battery Pack Cooling Pipe

3.2 電池パックのCAEモデル

解析精度向上にあたり、モデル上での実機の再現性とメッシュ細分化が必須となるが、精度や解析時間の寄与度を考えて適度なレベルに調整する。そこで、さまざまな形状の電池パックや電子部品に対し、振動評価やハンマリング評価を行い、CAEモデル精度の妥当性検証を行った。

解析精度向上のため、上下／左右／前後3軸方向に対しての掃引振動を与え、各部位の伝達経路ごと・周波数ごとの振動伝達特性を評価することで解析とのコリレーションを行った。予測精度が低い箇所については原因分析を行った上でモデルを最適化していくことで、予測精度を向上させ、耐振動性能の優れた高電圧電池パックを開発した。

Fig. 10に電池パックの解析モデルを示す。電池モジュール、コントロールモジュール、バスバー、ジャンクションボックス、サービスプラグなど電子部品はモデル上で実機の形状を再現させており、電子部品の振動加速度を表現・再現ができています。

解析精度や振動保証への影響の小さい電池内部（セル）は重量のみをモデル化し、一方で応力が集中する電池締結部位は詳細までモデル化させることで、解析時間を抑えつつ必要な箇所の精度を上げる工夫を行っている。

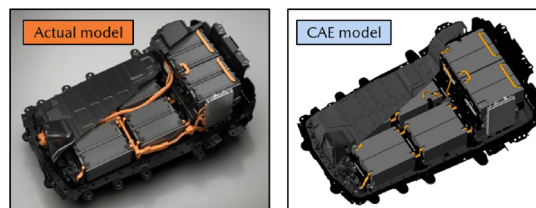


Fig. 10 MX-30 High-Voltage Battery Pack CAE Model

4. おわりに

本稿で紹介した耐振動のモデルベース開発により、早期に振動対策を折り込み、設計検討段階から重量最小化ができるようになった。

MX-30は、マツダ初の量産電気自動車であると同時に、初めてこの開発手法を採用した車両であり、実機の耐久テストにおいてこの効果を確認している。今後もこの手法を発展させ、マツダの電気駆動車両を安心安全なものとして全てのお客様に届けていきたい。

参考文献

- (1) 社団法人 日本材料学会：材料強度学（2004）

■ 著 者 ■



伊藤 智昭



丹羽 貴大



花田 裕



岸田 直樹



鍋島 範之