

新型ISUZU D-MAX EVの車両性能実験について

Vehicle Performance Test of New ISUZU D-MAX EV

薦田 剛*
Go Komoda

渡邊 一騎*
Kazuki Watanabe

富部 雅人***
Masato Tomibe

畠山 忠久*
Tadahisa Hatakeyama

加茂 元之*
Motoyuki Kamo

宇多 純人*
Sumito Uda

柿崎 貴央*
Takao Kakizaki

中山 大地***
Daichi Nakayama

中山 耕作*
Kousaku Nakayama

黒沼 猛之***
Takeyuki Kuronuma

宮島 駿太郎*
Shuntarou Miyajima

田島 一輝*
Kazuki Tashima

曽我 健史**
Takeshi Soga

松田 剛**
Tsuyoshi Matsuda

新井 匠**
Takumi Arai

小武 拓矢**
Takuya Odake

宮田 尚***
Hisashi Miyata

牛房 良徳**
Yoshinori Ushihusa

高山 正巳***
Masami Takayama

松本 信之***
Nobuyuki Matsumoto

相澤 和紀***
Kazunori Aizawa

要 旨

新型ISUZU D-MAX EVは、既存のディーゼルエンジンモデルの骨格はそのままに、ピックアップトラックに求められるタフな基本性能(耐久性／積載・けん引性能／悪路走破性)と、EV特有のリニアな加速感と低騒音・低振動を両立させるために評価・改良を実施してきた。本稿では新型ISUZU D-MAX EVの車両性能試験について紹介する。

Abstract

The New ISUZU D-MAX EV's system provides linear acceleration typical of EVs, while minimizing noise and vibration. Additionally, its high towing capacity, large payload, and excellent performance on rough terrain are made possible by powerful electric motors and a robust frame and body design, allowing the New ISUZU D-MAX EV to match the performance of existing diesel models. Here we introduce each of these performance features.

1 はじめに

新型ISUZU D-MAX EV(以下、D-MAX EV)は、既存のディーゼルエンジンモデルの骨格はそのままに、フロントとリヤに新開発のeAxleを組み合わせたフルタイム4WDシステムを採用することで、ピックアップトラックに求められる基本性能(耐久性／積載・けん引性能／悪路走破性)と、EV(Electric Vehicle)特有のリニアな加速感と低騒音・低振動を図った。本稿では性能、強度・耐久信頼性について、評価の詳細を報告する。

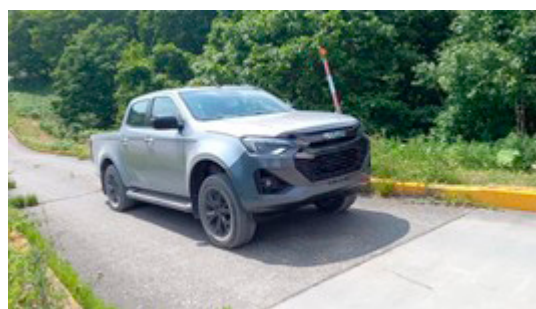


図1 発進性評価の様子

2 動力性能・ドライバビリティ

今回ディーゼルエンジンからパワートレインを刷新するに当たり、都市内・近郊の移動から積載・けん引等LCV(Light Commercial Vehicle)本来の使い方までを想定しつつ、既に市場で受け入れられているディーゼルエンジン搭載車に対し、EVならではの加速を伴わないスムーズな加速性が低速から高速まで得られるようにEVシステムの開発を行った(図1)。

開発評価では、EVらしい力強い加速性を演出するようにトルク制御の作り込みを実施した。アクセルオン時の加速レスポンスを追求し、力行および回生時の切り替え時におけるトルクの立ち上がり特性を最適化した。これにより、狙いどおりの力強い加速フィーリングとなっており、高車速側の伸びも相まって、全域で1.9Lディーゼルエンジンを凌駕(りょうが)する胸のすく加速性能を有した。

* 車両審査実験第一部

** 車両審査実験第二部

*** (株)いすゞ北海道試験場

また、いすゞのLCVでは初となるECOモードを採用した。トルクの立ち上がりをマイルドにして加速を抑えることにより、都市内等の低速域でのドライバビリティの向上を実現させ、不要な電力消費を抑えて経済的に運転することが可能となっている(図2)。

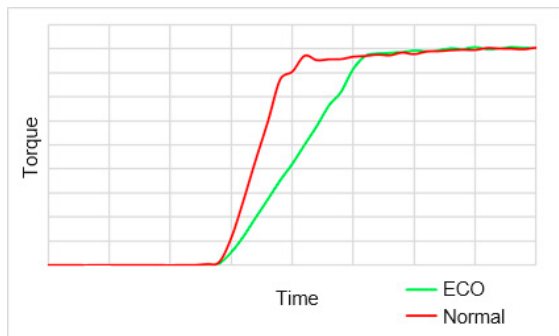


図2 ECOモードとNORMALモードのトルク制御

3 冷却・空調性能

D-MAX EVのサーマルマネジメントシステム構成では、バッテリー冷却は冷却水を用いた温度管理を行った。温度管理はラジエータによる熱交換に加え、室内空調にて使用される冷媒とチラーを介して熱交換を行うよう回路を共用することで、連続する高負荷走行及び急速充電時においても安定した冷却性能を確保した。一方で、チラーによるバッテリー冷却が必要な場面においては、冷媒回路の共用により室内冷房能力が低下することとなり、乗員快適性との両立が課題であった。

D-MAX EVの冷却及び空調開発は、先行して投入する欧州市場の環境をベースに各性能の土台を作り上げてきた。さらに、拡販を見据えた各国仕向けにおける厳しい環境や使われ方を代表条件に落とし込み、環境シャシダイナモメータを活用しながら効率的に適合評価を推進した。

バッテリーの冷却は、バッテリーセル温度に応じてチラー膨張弁開度を段階的に調整する方式を採用。常用域における一時的な温度上昇に対しては、チラー冷却による空調吹き出し温度への影響は最小限とし乗員快適性を確保した。また、想定を超えるセル温度上昇（緊急時）が発生する場合には、十分な冷却容量を確保することでオーバーヒートを防止する。

D-MAX EVは、適合の検証評価を欧州実路にて実施した(図3)。あらゆる地形や道路状況(市街地、郊外、山岳路)にて走行を重ねた。バッテリー冷却においては、お客様の使われ方の中で想定される「連続する高負荷走行」と現地の高出力充電器による「急速充電」にて発生しうる複合的な温度上昇に対して、実路環境の中で重点評価し信頼性を高めた。実路走行中にバッテリー冷却が作動する場面においても空調フィーリングに違和感なく、それぞれが最適化されていることを確認した。



図3 欧州実路 急速充電中の冷却評価

4 振動騒音性能

EVはディーゼルエンジン車に比べてエンジンの騒音と振動がなくなることから、静粛性・低振動が期待される。一方で、暗騒音・暗振動が小さくなることにより、今までマスキングされていた騒音・振動が目立つようになる。このため、EVならではの加速感につながる音は残しつつ、加速感とは関連のないノイズは除去するコンセプトで開発を行った。ノイズとなる装置騒音・振動を極力装置単体あるいは装置回りのパッケージで抑え込むことにより、コンセプトに合った車に仕上げる事ができた。

以下にいくつか改善事例を紹介する。

4.1 補器類音の低減

EV化されたことでブレーキを作動させるための負圧を作り出すバキュームポンプが必要となるが、停車時にはほぼ無音となるため、この作動音が目立つことが想定され、ここの対応として改良を行った。図4に示すようにポンプの位置を運転席や車外開口部から離してレイアウトし、かつ管内の音伝達を低減させるためのサイレンサを室内側・排気側両方に施した。対策の効果を図5に示す。車外音、車内音共に大幅に音圧レベルを低減させることができ、お客様が違和感を持たないレベルを実現することができた。

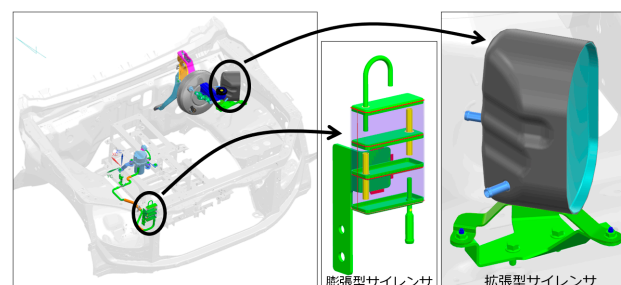


図4 バキュームポンプ作動音低減の対策

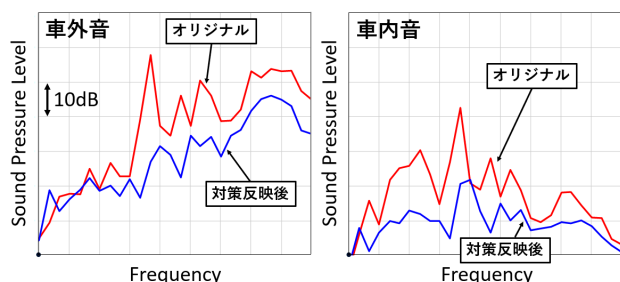


図5 対策反映による効果

また、電動コンプレッサについても、ラバーマウントによる振動伝達の遮断、防音カバーと回転数最適化による単体音低減、及び同時に作動する冷却ファンの回転数最適化によってコンプレッサ音をマスキングすることで、ノイズ感を除去することができた。

4.2 リヤeAxle音の低減

リヤeAxleの採用により、ベースのディーゼルエンジン車では元々動力源の音源がなかったキャビン後方からの音が顕著になることが想定された。そこで、キャブバックトリム内に吸遮音材とシールを追加してキャビン後方から侵入する音に対しての吸遮音性能を向上させるとともに、リヤeAxleに直接装着されているアンダガードからの放射音を制振材で制御することで(図6)、加速感を残しつつもリヤeAxleから放射される音の低減を図った。

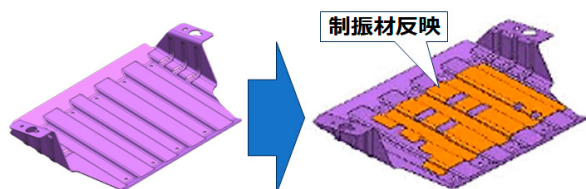


図6 アンダガード制振材反映

これらの対策により、コンセプトであるノイズを除去しつつもEVならではの加速感を感じられる振動騒音性能を実現することができた。

5 操縦安定性・乗心地性能

ピックアップトラックの電動化に当たっては、お客様が今までと変わることなく、貨客兼用でお使いいただけることが重要だと考えた。その一方で、ディーゼル従前車と共用となるシャシ部分に大容量のバッテリーを搭載することや、アクスルの電動化(eAxleの搭載)によって、サスペンション周辺のレイアウトに大きな制約が課された。これらを両立するために、D-MAX EVではリヤサスペンションをドディオン形式とした。操縦安定性・乗心地性能においては、貨客兼用の思想に基づき、ディーゼル従前車同等の性能を確保するこ

とを目標として開発を行った。特に軽積載から積載までの性能両立が求められるため、開発に当たっては、次の2点に着目して性能の作り込みを行った。

操縦安定性：新規開発のリヤサスペンションに対する積載時の安定性の作り込み。

乗心地性能：バッテリー搭載による車両重量増加に対する軽積載時の乗心地の作り込み。

5.1 操縦安定性

リヤサスペンションをドディオン形式に決定したが、前述したようにサスペンションのレイアウトには制限がある。それでもディーゼル従前車並みにバンプストロークを確保するために、リーフスプリングのレイアウトをアンダスラングとした。アンダスラング化により、サスペンションが上下変位する際の軌跡が変化し、支持剛性が低下することが確認された。その結果、旋回時にアンダステア特性が弱くなり、車両の安定性が低下することが確認された。これに対応するため、サスペンションの支点位置を見直して軌跡を安定性に有利な特性に変更した。また、リーフスプリングの後端を支持するシャックル部分及びブラケットの支持剛性を向上させる改良をした。これらの対策により、旋回中のリヤタイヤのトー角が適正化されたことでディーゼル従前車と同等のアンダステア特性を確保した(図7)。また、旋回時にサスペンションに横力が加わった場合でも支持点を動きにくくすることでリヤタイヤ発生力の応答性も上がり、車線変更のような過渡現象についても安定性を高めることができた。

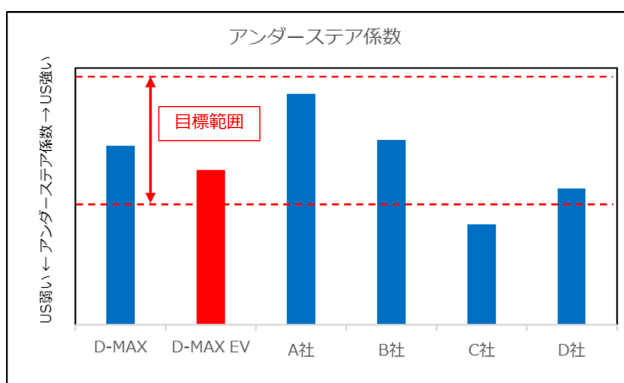


図7 旋回時のステア特性(積載時)

5.2 乗心地性能

バッテリー搭載により、車両重量はディーゼル従前車よりも500kg以上増加した。ただし、車両総重量の変化はほぼないため、従前比重量変化の大きい軽積載時の乗心地の作り込みに注力した。ピックアップトラックのリヤサスペンションは貨客兼用の観点から、1つのサスペンションで分担する荷重に応じてばね特性が変化する。このような非線形性のあるばね特性(図8)

は、突き上げなどのショックの強さに影響する。D-MAX EVでは空車重量が重くなったことに合わせて、主に軽積載時に使われる1次ばね定数と1次-2次ばね特性の変化点を調整した。1次ばね定数においては重量増加分を加味して、ばね上挙動と相関のあるばね上共振周波数を近づけるように特性値を変更している。1次-2次ばね特性の変化点については、空車重量の増加を考慮してポイントを高荷重側にずらして、バンブ時のショック感やソフト感を改良した。

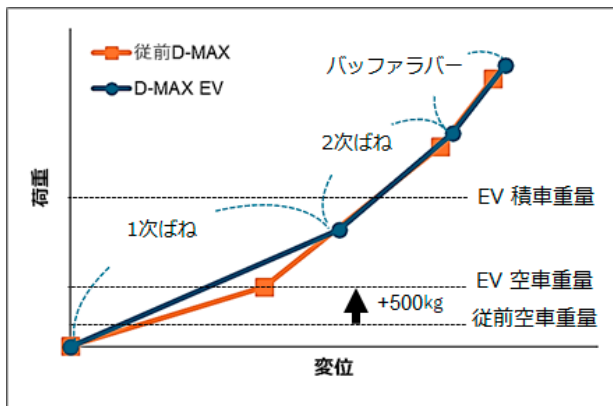


図8 リヤサスペンションのばね特性

これらの改良を実施することにより、従来と変わらない安定性と快適性を両立し、貨客兼用の狙いどおりの車両を開発することができた。

6 回生制動力

D-MAX EVにおいては前後のeAxleモータから得られる回生力を車両減速のためのブレーキとして積極的に活用している。これにより、車両の運動エネルギーを効率的に回収することで電費向上に寄与するとともに、サービスブレーキ(摩擦ブレーキ)への負荷を低減し、ブレーキパッドの摩耗を抑制することでメンテナンスコスト削減に貢献する。

ピックアップトラックにおける積載条件はさまざまであり、ドライバーが求める回生力も走行状況により異なることから、ドライバーユーズに合わせて回生力を選択できるよう回生レベルを4段階(レベル0~3)に設定した。また、回生力の変更方法はハンドルに設置されたパドルシフトスイッチにて行う(図9)。これにより積載条件や路面状況が変化した場合、ドライバーはハンドルから手を離すことなく素早くかつ安全に回生力を変更することが可能である。

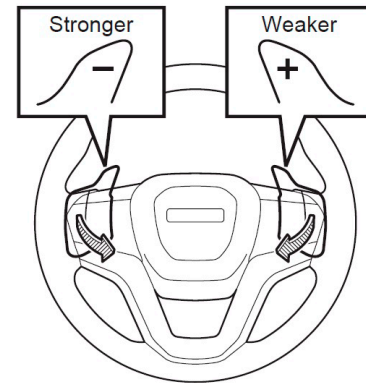


図9 回生ブレーキスイッチ

7 電装品の性能

7.1 高電圧システムの感電防止(安全性)評価

D-MAX EVは、いすゞピックアップトラックとして初めて電動化された車両であり、海外市場での販売には、国連欧州経済委員会(UNECE)が定めるUN規則(欧州規則)への適合が必要となる。特にEVとしては、高電圧システムの安全性に関する新たな規則(高電圧部品の配置・保護、絶縁・感電防止、衝突時の安全性など)への対応が求められている。

7.2 電気的安全性の確保

D-MAX EVは、既に販売を開始しているエルフEVとは車両レイアウトが大きく異なることから、高電圧システムの評価方法について再検討を行う必要があった。それは、高電圧バッテリーへのアクセスが車外から容易に観察できたエルフEVに比べ、D-MAX EVではフロア下に設置されることによる視界不足から、観察方法が重要課題となっていたためである。特に、車両衝突試験後の感電防止(安全性)に関する確認内容については、新たに導通試験(高電圧部品の適切なアース接地状態を確認する試験法)を採用することとなった。この手法だけでは衝突後に高電圧部品に問題がないと証明することが容易でなく、加えて衝突後には車体の損傷部位等からの破片飛散なども新たな危険要素として配慮する必要があったため、更なる観察手段の検討を行った。

そこで、CAE(Computer Aided Engineering)を活用した損傷予測(被害度評価)を取り入れることで、車両客室の安全性確認を可視化しながら確認を行う手法を盛り込んだ。実際に衝突後の確認が困難と判断される部位に関しては、CAE解析結果に基づいた計測配線の設置をあらかじめ行った。これら一連の取り組みにより、衝突後においても感電や漏電のリスクが極めて低い車両開発に貢献し、結果として実際の衝突事故時における乗員の安全確保につなげることが可能となった。

8 衝突安全性能

8.1 衝突安全性能開発

D-MAX EVは、いすゞ初のLCV EVである。この車は世界各国のNCAP(New Car Assessment Program)に対して最高評価(5つ星)を獲得したディーゼルエンジン車である新型D-MAXをベースに開発を推進した。特に、EV固有の高電圧部品の保護に重点を置き、構想段階からMBD(Model Based Development)を活用することで、高い衝突安全性能を実現した。

8.2 EV固有の法規要件に対する開発の取り組み

D-MAX EVは前面・側面・後面が衝突法規対象となっており、EV固有の要件としてバッテリーからの電解質の漏出及び火災の発生を防止することが求められている。D-MAX EVは、ディーゼルエンジン車で開発されたキャブ及びフレームをベースに、限られたスペースにバッテリーパックなどの高電圧部品を配置する必要があった。この制約の中で安全性を確保するため、特に次の2点が課題となった。

1つ目は、キャブ下のフレーム間に配置したバッテリーパックが周辺部品と接触することでバッテリーカバーが変形し、その結果、内部のバッテリーモジュールに物理的負荷を与えること。2つ目は、車両の衝突によりバッテリーモジュールへの加速度が加わること。これらの課題に対応するため、構造設計や部品配置の最適化など、安全性向上に向けた開発に取り組んだ。

8.2.1 バッテリーモジュールへの物理的負荷

バッテリーモジュール内にはセルが並べられており、周辺部品との接触などによる変形によって、発火などの重大なリスクが高まる。この事象に対して、CAEによる衝突解析に加え、実機による単品検証を実施した。初期段階のCAE衝突解析では、バッテリーカバーの変形により、バッテリーモジュール上面との接触が多数発生した。この事象に対して、バッテリーカバーとバッテリーモジュールの間にある非常に限られたスペース内で、最適な耐衝突用ブラケットを設計・配置することで安全性を確保した。

8.2.2 バッテリーモジュールへの加速度入力

バッテリーモジュールは加速度が入力されると、正極と負極が直接接触する内部短絡が発生し、発火などの異常が生じる可能性がある。そのため、各衝突形態において、バッテリーモジュールに入力される加速度によって発火などの異常が発生しないかを検証した。バッテリーモジュールの異常有無は、加速度入力の瞬間的最大値でなく、速度変化を含めた許容加速度で確認する必要がある。よって、CAE衝突解析により、各バッテリーモジュールに入力される加速度を確認し、速度変化を含めた許容加速度に置き換えたものをバツ

テリーモジュールへの入力とした。また、バッテリーモジュールの質量や内部構造などから単体で耐えられる加速度の保証値を算出。これらのバッテリーモジュールへ入力される加速度と保証値を机上で検証し、火災などの異常が発生するリスクがないことを確認した。そのうえで、実機試験を実施し、狙い通りの結果を与えることができた。

8.3 衝突安全性能のまとめ

いすゞLCV初のD-MAX EVの開発は、CAE衝突解析を活用した作り込みにより仕様を決定し、実車試験を実施した(図10)。その結果、目標とする性能を満足することができた。本開発を通じて得られた高電圧部品の保護に関する技術的知見は、今後の次世代EV開発にフィードバックし、より効率的かつ安全性の高い車両開発へとつなげていく。

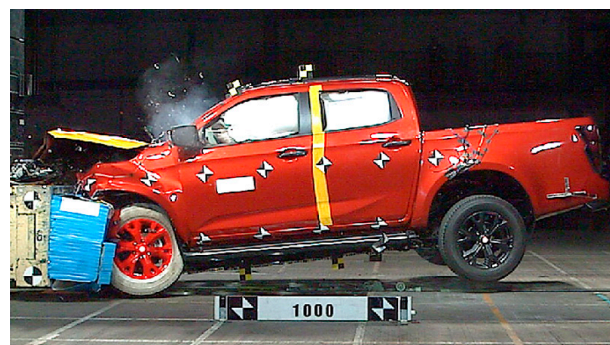


図10 衝突試験風景

9 強度・耐久信頼性能

9.1 サブフレーム・バッテリーパック

D-MAX EVにEV機器、及び高電圧バッテリーを搭載するため、ピックアップトラックのレイアウトに合わせたサブフレーム・バッテリーパックを新規開発した(図11)。

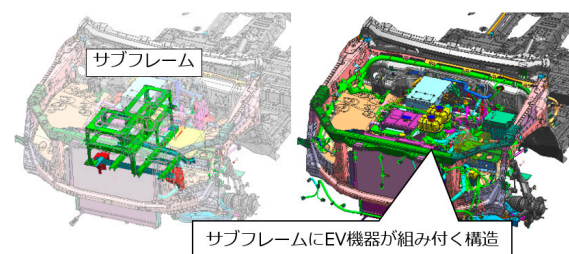


図11 サブフレーム・バッテリーパック

搭載されるEV機器は精密であり振動要件が厳しいが、高精度モデルでのCAE (Nastran) を用いて悪路走行時の実車入力を負荷し、各要件を満たすサブフレーム・バッテリーパックを効率的かつ、迅速に作り込みを行った(図12)。

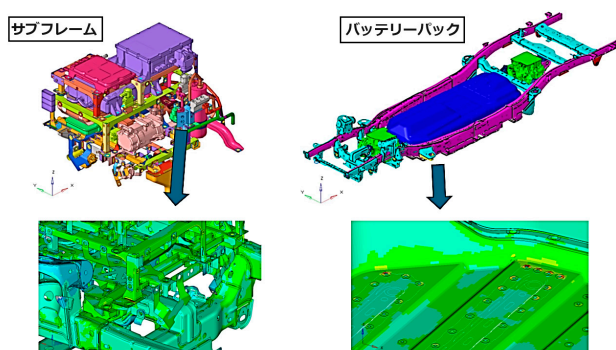


図12 CAEでの強度評価

その後、完成したサブフレーム・バッテリーパックをメインフレームに搭載し、悪路走行時の実車入力を再現した実機台上振動耐久試験を実施した。

台上の強度懸念箇所の発生応力とCAE強度解析結果の発生応力を比較し、CAE強度評価の確からしさを確認した。高い強度耐久信頼性を有するサブフレーム・バッテリーパックの開発に成功した(図13)。

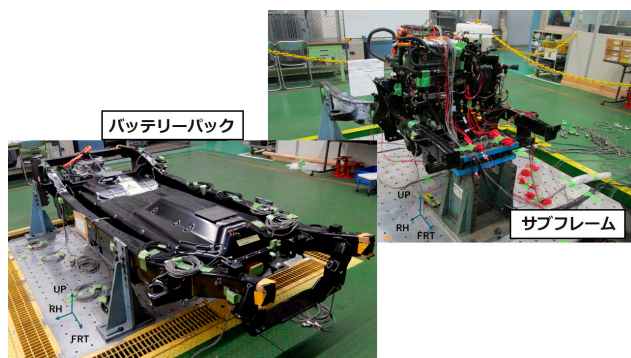


図13 実機振動耐久試験

9.2 eAxle搭載に伴うドディオンアクスル新規開発

D-MAX EVでは、eAxle搭載のためにリアアクスル構造を変更し、ドディオンアクスルを新規開発した。

従前のディーゼルエンジン車においては駆動装置(ファイナルドライブギヤ)を内蔵するバンジョーアクスルを採用していたが、耐振性の制約があるeAxleをシャシ側に搭載する必要があり、駆動装置と車軸が別体となるドディオンアクスル採用を決定した(図14)。

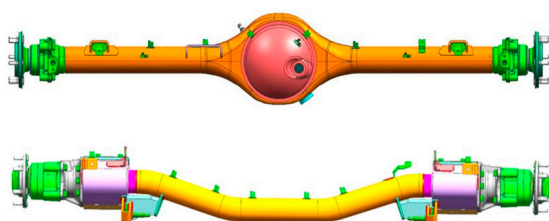


図14 バンジョーアクスル(上)及びドディオンアクスル(下)

ドディオンアクスルはいすゞ車として初めて採用された構造であるため、実車での入力測定試験、及び悪路耐久性の検証を行った。その結果、従前のディーゼルエンジン車と同等の悪路走行に耐えうることを確認した。

また、車両入力測定結果を踏まえて台上での耐久試験(図15)を行い、強度耐久性を作り込んだ。ディーゼルエンジン車と同等の耐久性を確保するためアクスルの補強を工夫し、剛性をチューニングすることで軽量かつ高耐久・高剛性なドディオンアクスルを作り込むことができた。



図15 台上耐久試験

9.3 実車耐久試験

D-MAX EVでは従前ディーゼルエンジン車と同等の耐久信頼性が求められた。各種耐久試験を実施した結果、お客様の要求を満たした耐久信頼性を確保した。

9.3.1 高速耐久試験

高速走行に駆動系入力を加えた高速耐久試験を実施し、パワーソースであるバッテリーを含むパワートレイン全体の耐久信頼性が従前ディーゼル車と同等であることを確認した(図16)。

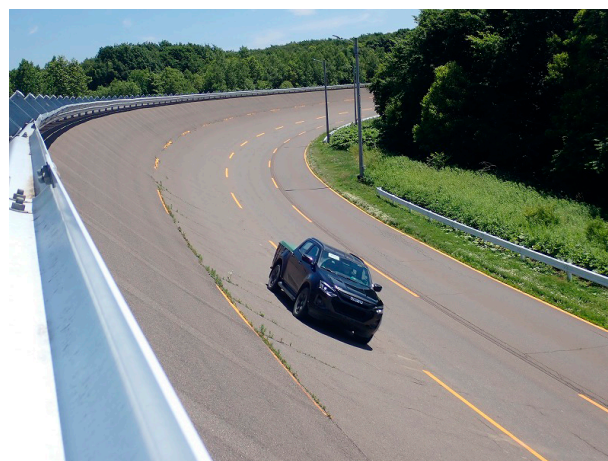


図16 高速耐久試験の様子

9.3.2 悪路系耐久試験

EVコンポーネント及びEV化に伴い変更されたシャシ部品の悪路入力における耐久信頼性を確保するため、ベルジアン路や長波形路走行を主体とした試験を実施し、従前ディーゼルエンジン車と同等の耐久信頼性であることを確認した(図17)。

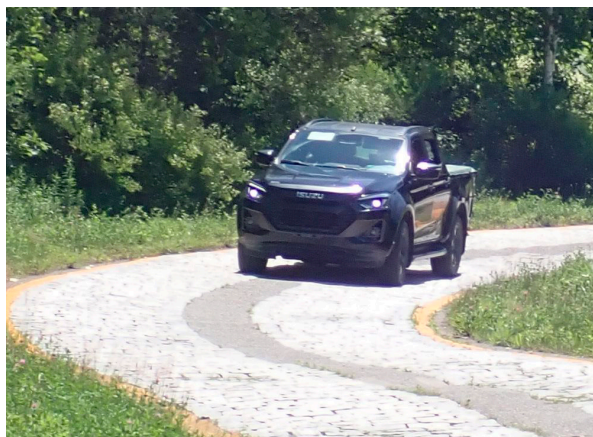


図17 悪路系耐久試験の様子

9.3.3 現地実路走行試験

テストコース及び台上試験で車両の作り込みを行った後、ノルウェー現地実路環境下でEVシステムを中心とした車両全体の信頼性確認やEV車ならではの充電性能評価を行った(図18)。



図18 現地実路走行試験の様子

走行試験は、お客様の使用方の調査結果より作成したルートで行った。これにより、お客様の使用域でも車両全体の信頼性が確保されていることを確認した。

9.4 防錆(ぼうせい)性能

防錆性能はCAEを行い、展開市場に対応する仕様となるよう、評価・改良を重ねてきた。新規のEV関連部品や材料の採用にあたっては、従来の知見だけでは対

応が難しいケースもあり、部品単体での腐食試験結果を含めて、市場適合性を判断した(図19)。

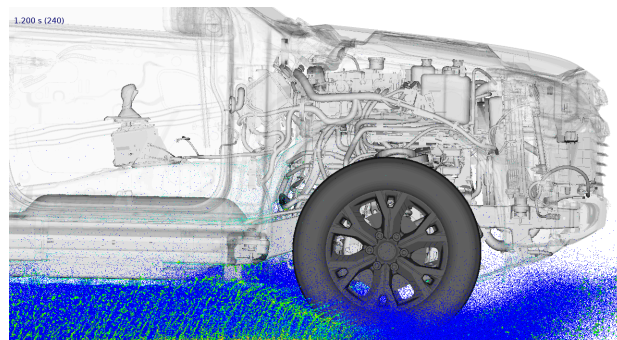


図19 CAEでの防錆性能評価

10 環境適合性能(寒地)

寒地性能はCAEを行い、耐えうる仕様になるよう評価・改良を重ねてきた。CAE及び机上で作り込んだ仕様を反映した実車を用いて、最終確認の位置づけで各性能試験を行い、狙い通りの仕様であることを確認した(図20)。

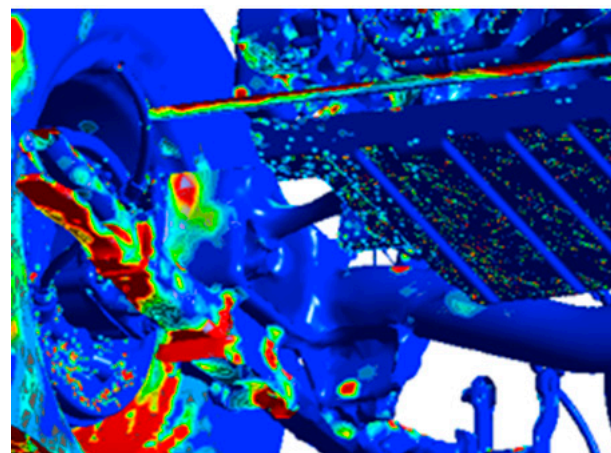


図20 CAE解析結果(上)と実車着雪試験結果(下)の比較

11 オフロード性能

D-MAX EVは、前後に2基のモータを搭載した4WDシステムを採用していることが、駆動システムにおける最大の特徴である。さまざまな環境への適合性が求められるピックアップトラックとして、駆動系の電子制御を中心に、悪路及び雪路環境下での走破性能について実車評価を行い、オフロード性能の市場適合性を確認した(図21、図22)。



図21 悪路走行試験の様子



図22 雪路走行試験の様子

12 おわりに

今回、D-MAX EVの開発における代表的な試験について紹介してきたが、これ以外にも紹介しきれなかった数多くの試験を実施し、技術的な課題を解決することで世界中のお客様に満足していただける製品に仕上がったと確信している。

今後も市場のニーズに応え、お客様にとって使いやすく、納得をいただける製品づくりに努めていく。