

特集：新型車（デミオ EV）

24

デミオ EV の高エネルギー密度 Li イオンバッテリー開発

Development of High energy Density Li-ion Battery for Demio EV

松井 恒平*1
Kohei Matsui喜田 裕万*2
Hirokazu Kita栃岡 孝宏*3
Takahiro Tochioka

要約

電気自動車（EV）の普及には、航続距離が短い、車室内空間が制限される、価格が高い等の課題を解決する必要がある。これらの課題は主として、EV が従来の液体燃料に比べてエネルギー密度が極端に低いバッテリーのみをエネルギー源として使用していることに起因する。

今回開発したデミオ EV 用のバッテリーパックでは、比較的安価な 18650 型バッテリーセルを直並列に接続した薄型バッテリーモジュールとコントロールユニットやコンタクタといったその他電装品の最適配置により、信頼性・安全性を確保しながら高エネルギー密度を実現した。また、バッテリーの状態を判定・制御するバッテリーマネジメントシステムもあわせて開発した。本稿では開発したバッテリーパックシステムの技術的特長について述べる。

Summary

For the popularization of EV, it is necessary to solve issues such as the short driving ranges, limited interior space, and high prices. The main reason of such issues is that the energy source is only a battery, whose energy density is extremely low compared to the conventional liquid fuel.

For the newly developed battery pack for the Demio EV, thin battery modules consist of relatively-inexpensive 18650-type battery cells connected in series-parallel combinations and the electronic parts such as a control unit and a contactor were optimally arranged, realizing high energy density while securing reliability and safety. In addition, the battery management system that judges and controls the battery conditions was developed. The technological characteristics of the battery pack system are explained in this paper.

1. はじめに

近年、地球温暖化問題により、走行中にCO₂を全く排出しない電気自動車（以下EV）が注目されている。ただし、EVの普及には、航続距離が短い、室内空間が制限される、価格が高い等の課題を解決する必要がある。これらの課題は主として従来の液体燃料に比べてエネルギー密度が低く、大きくて重たいバッテリーに起因するものである。EV用のバッテリーには上記の課題を克服するための高いエネルギー密度と車載信頼性及び安全性の両立が求められる。今回、デミオEVの開発においては、車両の室内空間を制限することなく航続距離 200kmを達成することを目的として、高

エネルギー密度と高信頼性を両立させたバッテリーパックシステムを開発したので、その内容を報告する。

2. バッテリーパックの概要

2.1 バッテリーパックの構成

デミオ EV に搭載したバッテリーパックを Fig.1 に示す。バッテリーパックは、動力源となるリチウムイオンバッテリー、各バッテリー間を電氣的に接続するバスバー・ハーネス類、電流センサ、バッテリーの電圧・温度を計測するユニット（以下 CMU（セルモニタユニット））、CMU 及び電流センサからのデータを基に演算を行い車両コントロールユ

*1,2 電気駆動システム開発室
Electric Drive System Development Office

*3 技術研究所
Technical Research Center

ニットと通信を行うユニット（以下 BCU（バッテリーコントロールユニット））、パック外への高電圧の供給・遮断を行うコンタクタ、車両整備の際に高電圧を遮断するサービプラグ及び急速充電時等にエアコンからの冷却風を取り入れるためのファン等で構成される。

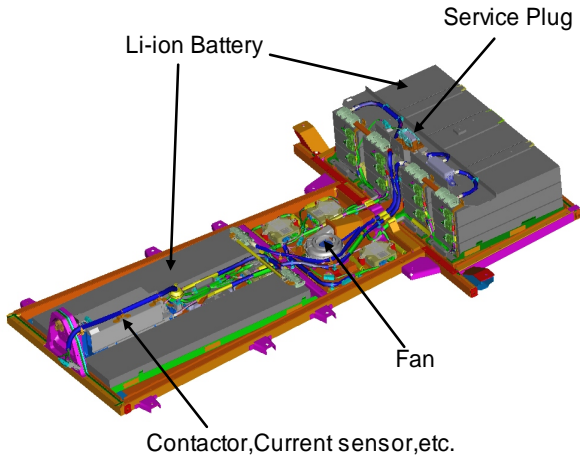


Fig.1 Configuration of Battery Pack

2.2 バッテリーパックのレイアウト

バッテリーパックは前後車軸間の客室の下にレイアウトされている。これはベース車で実現している居住空間、荷室容量はそのままに確保しつつ、低重心・ヨー慣性モーメントの低減による“Zoom-Zoom”な走りの実現のためである。更には、万が一の衝突の場合、あらゆる方向からの衝突に対して最もバッテリーを保護できるためである。ただし、ベース車であるデミオのガソリン車のパッケージングにおいて、床下の形状は、前席の乗員着座位置の下は車両の前後方向には比較的空間があるものの、上下方向には余裕がない。逆に後席の乗員着座位置の下は車両の上下方向には比較的空間があるものの、リヤサスペンション部品との関係から前後方向には余裕がない。このような客室床下の特徴と車両の最低地上高確保の観点からバッテリーパックの形状は前方部分の高さが低く、後方部分の高さが高い特徴的な形状に制約される (Fig.2)。

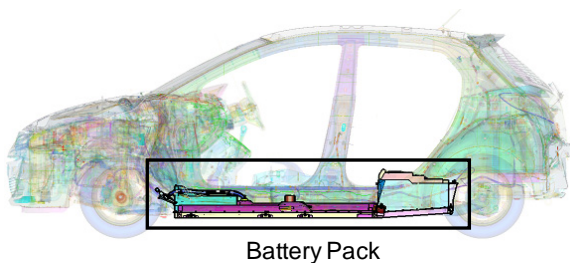


Fig.2 Layout of Battery Pack

このパック形状制約条件に対応するため、レイアウト自由度の高い薄型バッテリーモジュールを開発し、それらをパック前方部分・後方部分の形状に合わせて最適配置することでスペースを有効活用し、業界トップレベルの高エネルギー密度と居住空間の両立が可能となった。

2.3 バッテリーモジュールの構成

(1) バッテリーセル

蓄電デバイスの基本単位であるセルに関しては、ノートパソコン用等で多くの市場実績がある 18650 型リチウムイオンバッテリーセルを採用した (Fig.3)。

- ・高エネルギー密度である
 - ・市場実績のある汎用形式セルであるため価格が安い
- といった特長があり、EV の主要課題である航続距離の延長とコストの低減を両立するために最適であると判断した。



Fig.3 18650type Battery Cell

(2) バッテリーモジュール

Fig.4 にモジュール構成概要を示す。今回採用した 18650 型セルは小型であるため、セル 1 個当たりの容量 (Ah) が小さい。従って、車載適用する場合は複数のセルを並列接続し、容量を確保する必要がある。デミオ EV においては、車両としての必要容量及びモジュール化の際の汎用的な形状を考慮して 20 個のセルを並列接続して基本セルブロックを構成し、このセルブロックを直列接続してモジュールを構成した。

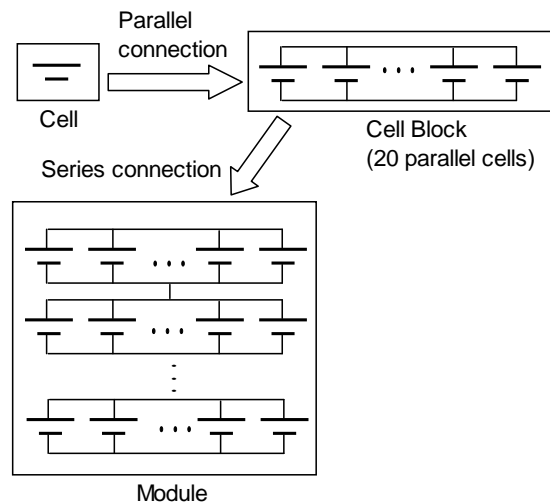


Fig.4 Configuration of Battery Module

3. バッテリーパックの性能

3.1 基本性能

EV においては車両を駆動するエネルギー源がバッテリーのみであるため、バッテリーの性能が航続距離・加速性能といった車両の基本性能に大きな影響を与える。デミオ EV では、“Zoom-Zoom”な走りと航続距離を両立するため、高エネルギー密度のバッテリーパック設計としている。Table 1 にセルの主要諸元、Table 2 にバッテリーパックの主要諸元を示す。デミオ EV のバッテリーパックは 20 並列、96 直列のセル（総セル数：1,920 個）で構成され、パックとしての公称電圧は 346V、公称容量は 58Ah である。高エネルギー密度なセルの特長とパック内でのバッテリーの最適配置により、パックとしてのエネルギー密度は体積当たりで 125Wh/L、重量当たりで 89Wh/kg と業界トップレベルの水準を実現している。

Table 1 Specifications of Battery Cell

Cell type	18650 type
Nominal voltage	3.6V
Nominal capacity	2.9Ah
Energy density	Over 600Wh/L

Table 2 Specifications of Battery Pack

Weight	225kg
Volume	160L
Nominal voltage	346V
Nominal capacity	58Ah
Nominal energy	20kWh
Energy density	89Wh/kg
	125Wh/L
Max power	89kW
Max current	300A
Operating temperature	-20 ~ 60

3.2 耐久性

リチウムイオンバッテリーは長期間使用していく中で徐々に劣化し、容量が低下していく。EV ではバッテリーの容量劣化がそのまま車両の航続距離の減少につながるため、バッテリーの耐久性確保が重要になる。バッテリーの劣化モードは充放電サイクル劣化と保存劣化の 2 種類があり、これらの複合でバッテリーの耐久性が決まる。また、バッテリーの劣化現象にはセル内部の化学的副反応（電極表面での皮膜形成等）が深く寄与していることから、劣化度合いはバッテリーの使用温度にも大きな影響を受ける。

一方、EV 車両としてのバッテリーの使われ方は

- (a) 走行（力行・回生による放電・充電の繰り返し）
- (b) 車両充電（普通充電・急速充電）
- (c) 車両放置（ガレージでの駐車等）

のパターンがあるが（Fig.5）、(a)、(b)での劣化は充放電サイクル劣化、(c)での劣化は保存劣化に相当する。

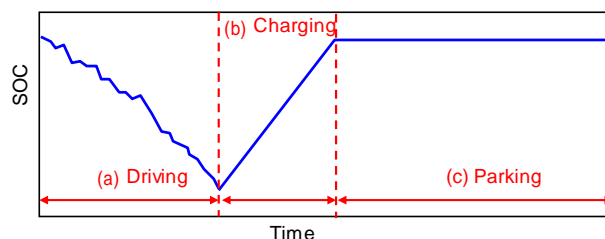


Fig.5 Pattern Diagram of SOC Change

そこで、EV 車両用途としてのバッテリー耐久性検証として、市場走行を想定した充放電パターン、車両充電相当の充電及び保存を組み合わせ、温度を劣化加速因子として取り入れた複合劣化サイクルテストでバッテリーの容量劣化を評価した。結果を Fig.6 に示す。リチウムイオンバッテリーにおいては電極表面での皮膜形成が容量劣化の大きな要因であることが多数報告されている。この場合、容量劣化は皮膜の形成速度に起因して経過時間や充放電サイクル数の平方根に比例するが、本テスト条件においてもバッテリーの容量は設定した複合劣化サイクルのサイクル数の平方根に比例して劣化していくことが分かった。この関係性を用いて劣化を予測すると、実用的な走行距離及び耐用年数において顕著な容量劣化がないことが示唆され、EV 車両用途として十分なバッテリー耐久性の目処がついた。

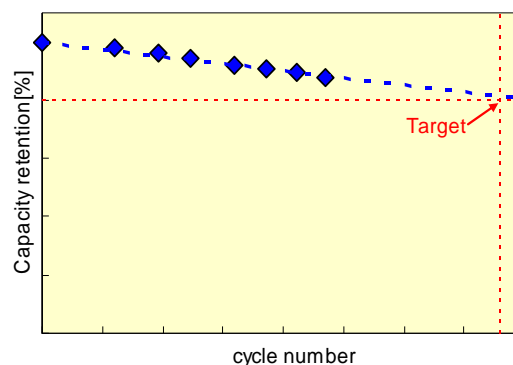


Fig.6 Capacity Retention in Combined Degradation Cycle

3.3 安全性

(1) 安全性確保の考え方

リチウムイオンバッテリーは可燃性の有機電解液を使用しており、エネルギー密度が高いことから不適切な使用方法で使用すると、発熱・発火の可能性がある。そこで、車載適用する場合はパックシステムとして安全性を確保することが重要である。Fig.7 にパックシステムにおける安全性確保の概念図を示す。デミオ EV のバッテリーパックにおいては、セル製造・検査工程での管理を徹底し、異常発熱等につながるコンタミによる内部短絡等の不良セルの流出防止を行うことはもちろんであるが、それに加えて、

- ・セルでの基本的な安全性確保
- ・バッテリーマネジメントシステム (BMS) による適切な制御とフェイルセーフ
- ・バッテリーパック構造による保護

という考え方でパックシステムとして安全性を確保している。

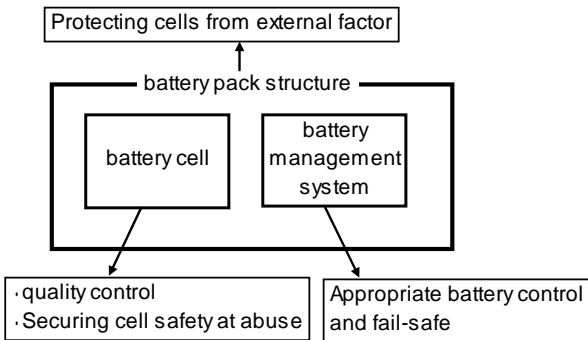


Fig.7 Concept of Battery Pack System Safety

(2) セルでの安全性確保

Table 3 にセルでの安全性試験項目例を示す。今回採用したセルの過充電、外部短絡、圧壊といった異常状態に対する基本的な安全性を確認している。

Table 3 Example of Battery Safety Test

Item	Result
External short circuit	
Forced Internal short circuit	
Overcharge	
Heating	
Crush	
Impact	

(3) BMS による制御とフェイルセーフ

デミオ EV のバッテリーパックでは全セルブロックの電圧監視、各モジュールでの温度監視、電流・電圧情報に基づく SOC (State of charge) 推定等バッテリーの状態を常時正確に把握して入出力を適切に制御するシステムを開発し、外気温やユーザの走り方といった非制御要因がある中でもバッテリーが過充電・過放電・異常高温といった異常状態に陥らないようにしている。また、バッテリー自体や付随するセンサ系に異常が発生した場合においても、故障を自己診断し適切な制御を行うシステムとしている。

(4) パック構造での安全性確保

外部衝撃からのバッテリー保護

外部からの衝撃に対して内部のバッテリーモジュールを保護することがパック筐体の重要な役割である。車両衝突時の衝撃対策として、車両前面・側面・後面いずれの方位からの衝突に対しても最も有利な車両の中心（前後輪軸間及びフロアフレーム間）にバッテリーパックを配置している。これにより衝突相手物（車両や壁等）及び搭載物（モータ

等）からの衝撃荷重を作用させない配置にすることができた。万が一衝撃荷重が作用した場合でも内部のバッテリーモジュールが破壊されないよう、バッテリーパックの外周はすべて閉断面のフレーム構造をとし、衝撃に対する十分な強度を確保している。

類焼防止構造

何らかの理由で万が一セルが発火した場合、セルからは高温のガスが噴出する。デミオ EV のバッテリーパックではこの高温の噴出ガスを適切に排気し、高温ガスの熱が周囲のセルに伝わらない構造とした。また、各セル間距離を適切な距離に設定することで発火セル自身の熱が周囲のセルに伝わりにくい構造としている。以上のような構造上の工夫で、万が一セルが発火した場合でも周囲のセルへの類焼を防止して、パックとしての安全性を確保している。

4. バッテリーマネジメントシステム

4.1 バッテリーマネジメントシステムの概要

Fig.8 にバッテリーマネジメントシステム (BMS) の構成を示す。BMS は電流センサ、バッテリーモジュール内のセル電圧及び温度を計測する CMU、電流センサ及び CMU からの情報に基づきバッテリーの状態を判定し、車両 ECU に送信する BCU で構成されている。CMU BCU 間、及び BCU 車両 ECU 間の通信には CAN を用いた。

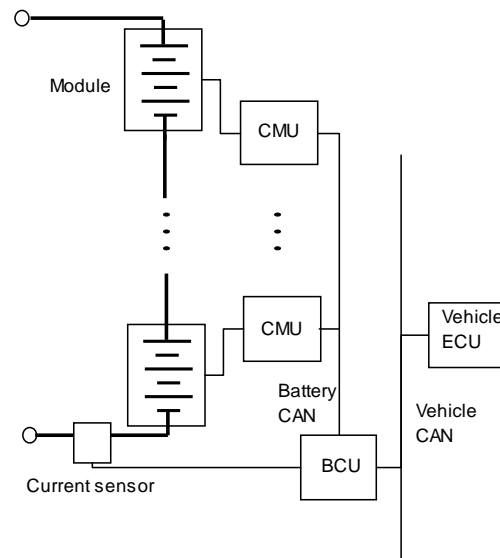


Fig.8 Configuration of Battery Management System

デミオ EV の車両全体のシステムとしては BMS のバッテリー情報を基に車両 ECU がエネルギー管理を行うことから、BMS でのバッテリー状態判定の正確さが車両全体の挙動・性能に大きな影響を与えることになる。以下、BMS の代表的な機能について説明する。

4.2 SOC (State of charge) 推定

リチウムイオンバッテリーはバッテリー温度、SOC によって入出力特性が大きく変化する。また SOC 精度の良し悪しによって使用可能 SOC 範囲が制限され、バッテリーの実使用エネルギーも制限を受ける。以上のことから、EV の車両性能を確保する上で、正確な SOC を推定することが重要である。SOC は電流値を積算することで以下の式から推定される。

$$SOC_n = SOC_{n-1} + \frac{\int Idt}{\text{バッテリー容量}} \times 100$$

しかし、この電流積算法のみでは以下の懸念がある。

- ・電流センサのオフセット等による電流積算誤差が時間とともに拡大し、SOC 推定精度が低下する。
- ・制御電源 OFF 時のバッテリーの自己放電に起因する SOC 減少に対応できない。

一方、リチウムイオンバッテリーではバッテリーの開放電圧 (OCV) と SOC に相関性があり、OCV を推定することで SOC を推定することが可能である。(OCV 推定法)

そこで、デミオ EV の BMS では電流積算法と OCV 推定法を状況に応じて最適に組み合わせた SOC 推定ロジックを構築した。Fig.9 に車両走行時の充放電パターンにおける SOC 精度検証結果を示す。上記ロジックで SOC を推定した場合、8 時間以上の長時間にわたる連続充放電においても、実用上十分な精度の SOC 推定ができることを確認できた。

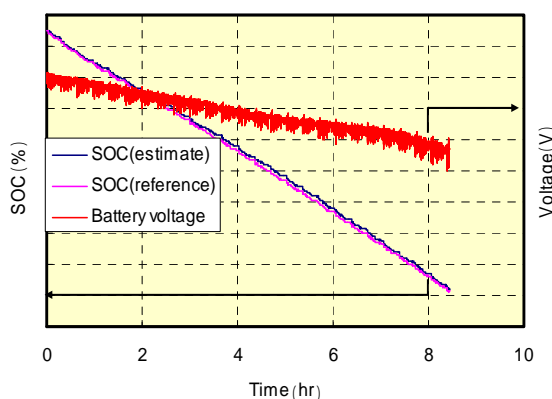


Fig.9 Time Charts of SOC Estimation

4.3 故障診断

デミオ EV の BMS では BCU がバッテリー内の各種情報を判定し故障診断を行う。以下に代表的な故障診断項目を示す。

- ・バッテリー自体の異常 (電圧異常, 温度異常等)
- ・センサ系の異常 (電流センサ, 電圧センサ, 温度センサ, 絶縁抵抗センサ)
- ・CAN 通信異常
- ・高電圧回路の絶縁抵抗低下

なお、各故障によって車両安全性に与える影響度が異なる

ことから、発生した故障によって車両制御を、車両停止、制限走行等にレベル分けし、故障が発生しても可能な限り安全に走行できるシステムとしている。

4.4 セルブロック電圧均等化

デミオ EV のバッテリーパック内には 96 直列のセルブロックがあるが、使用状況によって、各セルブロック間の電圧にバラツキが生じる場合がある。電圧バラツキが生じた場合、充電側では最も電圧が高いセルブロックに、放電側では最も電圧が低いセルブロックに充放電が制約され、パック全体としての使用可能容量が制限される。この現象を抑制するため、各セルブロックの電圧を計測し、必要に応じてセルブロック電圧を均等化して、パック全体としての容量を最大化できるシステムとしている。

5. まとめ

デミオ EV 用に、18650 型セルを用いた薄型バッテリーモジュールを最適配置するとともに、独自のバッテリーマネジメントシステムを開発することで、高エネルギー密度と信頼性・安全性を両立したバッテリーパックシステムを成立させることができた。本バッテリーパックを車両フロア下に配置することで、車室空間を制限することなく航続距離 200km (JC08) を実現した。今後も航続距離の更なる伸長、価格の低減といった EV に対する社会のニーズに答えるためバッテリーシステムの技術開発を進めていく。

参考文献

- (1) 久米ほか：次世代バッテリーマネジメント技術の開発，マツダ技報，No.28，pp.54-58 (2010)

著者



松井 恒平



喜田 裕万



柘岡 孝宏