

論文・解説

28

バッテリーマネジメントによる燃費改善 Fuel Consumption Improvement with Battery Management

西里鉄也*1 平野晴洋*2 稲田潤*3
Tetsuya Nishizato Seiyo Hirano Jun Inada
八雲正*4 庄司明*5 前田敏正*6
Tadashi Yagumo Akira Shoji Toshimasa Maeda

要約

自動車の燃費改善手段の一つとして、減速エネルギー回生技術がある。本技術を有効なものにするには、高頻度でバッテリーの充電と放電を繰り返す必要があるため、バッテリーの状態を把握しながら充放電を制御するバッテリーマネジメント技術が必要である。現在量産されている自動車の大多数に搭載される鉛バッテリーのマネジメント技術を開発し、鉛バッテリー車の減速エネルギー回生技術を確立した。電源電圧の変動による各種電気デバイスへの影響、減速時の発電機駆動トルク変動などの課題も解決し、商品性を確保したうえでシステムコストと燃費効果をバランスさせ、デミオをはじめベリーサ、新型アクセラ、新型MPVへ本技術を導入したので紹介する。

Summary

Regeneration of deceleration energy is considered to be one of the technologies, which achieves automobiles' fuel economy improvement. To use this technology effectively, charging and discharging of battery should be repeated in high frequency. Thus, the technology of battery management system plays a crucial role to control charging and discharging while recognizing the battery condition accurately. The battery management system was developed for lead-acid battery, which is mounted on most of the vehicles in field today, and deceleration-energy-regeneration technology was established for automobiles with lead-acid battery. The technical issues, such as the impact of power supply voltage fluctuation on various electric devices, or fluctuation of generator-driving-torque during deceleration is resolved. Additionally, the commodification of lead-acid battery management system is ensured, and power supply system cost was well balanced with the fuel economy improvement. This technology is now widely introduced to various Mazda vehicle models as Demio, Verisa, New Axela, or New MPV.

1. はじめに

近年の自動車においては、国内のグリーン税制、欧州のCO₂削減自主規制などの指標で一般的に評価されるように、燃費向上に対するニーズが高まっている。

同時に、商品性を向上させるための各種電気部品の増加、機械式から電動式になるデバイスの増加等により、自動車が消費する全エネルギーに対し、電気エネルギーの比率は増加しており、燃費向上には効率的に発電させることが重要になっている。

この一つ的手段として、減速エネルギーを有効に利用して発電し電池に蓄える「減速エネルギー回生技術」がある。減速エネルギー回生を有効なものとするためには、電気エネルギーを蓄えるバッテリー自体の充放電特性を把握し、充放電によるバッテリー劣化状態や充電状態を把握するバッテリーマネジメント技術が必要である。

しかしながら、現在量産されている多くの自動車に搭載される鉛バッテリーは、エンジン始動性に重点をおき、常に満充電を保つという単純な使い方であったため、このようなバッテリーマネジメント技術は特に必要とされていなかった

*1, 3 パワートレイン先行開発部
Powertrain Advance Development Dept.
*5 技術研究所
Technical Research Center

*2 マツダノースアメリカンオペレーションズ
Mazda North American Operations
*6 パワートレイン開発推進部
Powertrain Development Promotion Dept.

*4 車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.

た。今回、鉛バッテリーでの高頻度の充放電による劣化形態の確認や、充電状態を把握する各種技術の検討を重ね、鉛バッテリーにおけるバッテリーマネジメント技術を開発し、「減速エネルギー回生技術」を量産車へ実用化した。

2. 本技術の基本原則

2.1 減速エネルギー回生

車両の減速時は、運転者がブレーキペダルを踏み、ブレーキ摩擦材で運動エネルギーが熱エネルギーに変換され、大気中に放熱されるのでエネルギーが無駄になっている。

減速エネルギー回生技術とは、減速時の運動エネルギーの一部を発電機によって電気エネルギーに変換してバッテリーに蓄えて、その電気エネルギーを再利用するものである。減速前後における動作イメージをFig.1に示す。

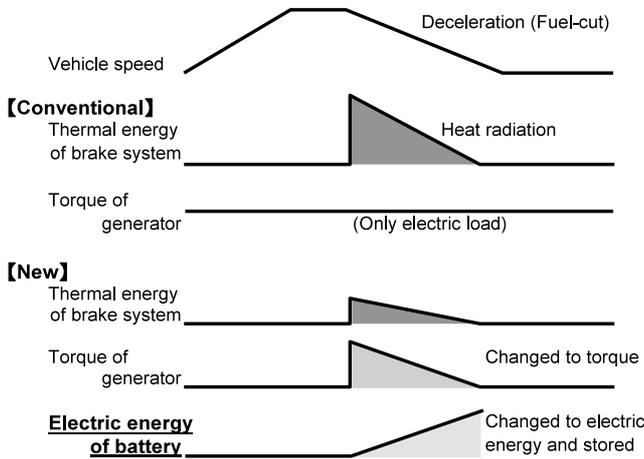


Fig.1 Image of Energy Conversion

減速時に蓄えた電気エネルギーを減速以外で再利用し、発電機駆動トルクを低減するイメージをFig.2に、電源システム上での電気の流れをFig.3に示す。

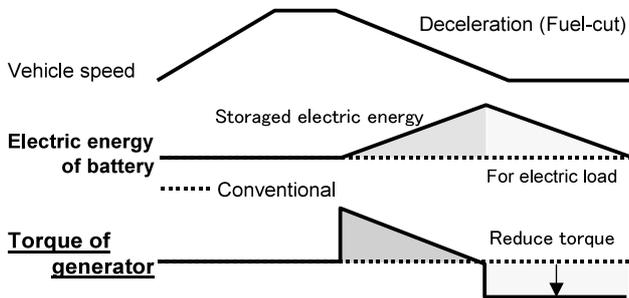
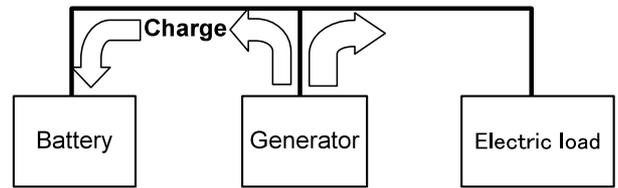


Fig.2 Image of Generator Torque Reduction

During deceleration (Fuel-cut)



Except deceleration

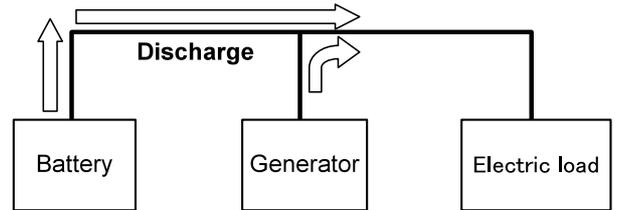


Fig.3 Flow of Electric Energy

減速時にバッテリーに充電し、それ以外では充電した電気エネルギーを放電して使うため、バッテリーの充放電頻度は従来に比べかなり大きくなる。

2.2 発電エネルギーと燃費効果

発電機の駆動トルク軽減が燃費に及ぼす影響度合いについて具体事例で示す。走行モード（燃費測定モード）および車種毎に、消費する全エネルギーに占める発電機の駆動に必要なエネルギーの比率を指標としてFig.4に示す。

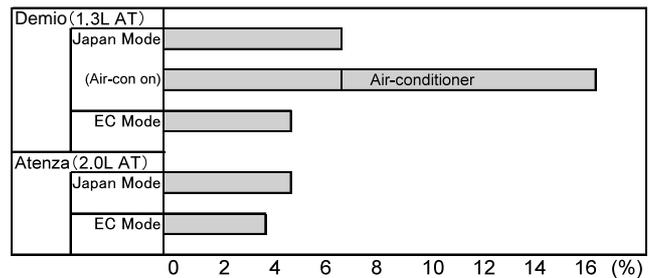


Fig.4 Energy Proportion of Kinetic to Generator

走行に必要なエネルギーは、走行モードや車両重量の違いで異なること、および、発電エネルギーは電気負荷の大小（例えばエアコンのオン/オフ）で増減することは周知の通りである。同一走行モードでも車種によってその比率が異なるのは、モード走行で使用される電気負荷や発電機の効率は車種に関係なくほぼ同一だからである。

今後、車両全体での技術革新で車両の軽量化が進み、同時に先述のように電気負荷が増加するに従って、この比率は増加する一方であり、発電機の駆動トルク低減による燃費向上効果はますます大きくなる。

減速エネルギー回生技術は、今後の燃費向上に不可欠な重要な基盤技術の一つであるといえる。

3. バッテリー状態を把握する技術

3.1 バッテリー劣化の検討

(1) 高頻度充放電による影響

減速エネルギー回生により高頻度で充放電させるという、従来とは異なった使い方をした場合のバッテリー劣化の進み方を確認する必要がある。

そこで、従来の劣化サイクル評価モード (SAE : Society of Automotive Engineers) をベースに、実走行での減速回生を考慮した高頻度充放電パターンを追加した評価モードとで比較した。その評価指標には、鉛バッテリーの代表的な物理量である「内部抵抗」と「残存容量」の二通りの指標を用いた。

その結果、従来の劣化サイクル評価モードでテストしたバッテリーでは、内部抵抗が2倍程度に増加し、残存容量が50%程度減少したのに対し、高頻度充放電での評価モードでのテスト結果では、残存容量が著しく減少したにもかかわらず、内部抵抗は30%程度の増加であった (Fig.5)。

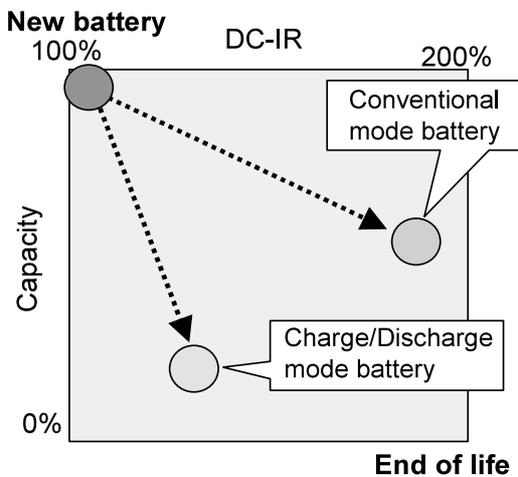


Fig.5 Battery Damage Index

従来の劣化サイクル評価モード、高頻度充放電での評価モードでテストしたバッテリーの内部変化を比較するため、バッテリーを分解して電極を観察した (Fig.6)。

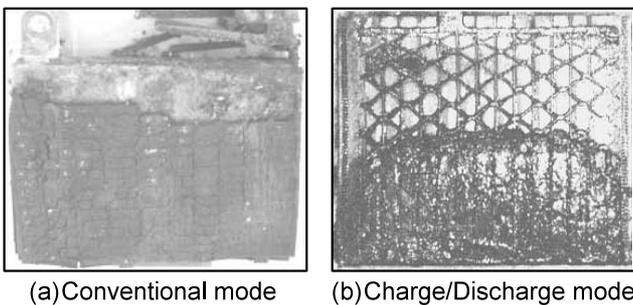


Fig.6 Positive Plate of Damaged Battery

従来モードでは、電極において集電極となる格子の上部が著しく腐食している劣化形態であった (Fig.6(a))。一方、高頻度充放電モードでは、格子腐食はほとんど見られず、従来は顕著ではなかった正極板の活物質の軟化が著しく進行して電極面積が減少するという劣化形態 (Fig.6(b)) となることが判明した。

この現象を受けて、次に正極面積と内部抵抗との関係を調べるために、正極板の上部 (or下部) 活物質を除去して電極面積を半減させたバッテリーを試作し、内部抵抗を測定した。その結果、電極面積の半減による内部抵抗増加は1m程度に留まることを確認した (Table 1)。

Table 1 Active Material vs DC-IR

	DC-IR
New battery	6.0 (mΩ)
Active material	
Upper-half only	6.2 (mΩ)
Lower-half only	7.2 (mΩ)
Upper limit of engine start : 13 (mΩ)	

以上より、劣化による内部抵抗の増加は、主に格子腐食による劣化に起因するものと考えられる。高頻度充放電によって、たとえ活物質が軟化・減少したとしても、格子を健全な状態を保ち続けることで、寿命末期において活物質が減少した状態でも内部抵抗増加を抑え、十分なエンジン始動性能を確保することができると考えられる。

(2) 最適なバッテリー充電状態 (SOC : State of Charge)

鉛バッテリーの劣化形態は、一般的に以下の三通りである。

- ① 格子腐食.....継続的な過充電により発生する。常時満充電に伴う従来の使い方の主な劣化形態である。
 - ② 活物質軟化.....活物質と放電反応物質である硫酸鉛との密度の違い (約3倍) によって、充放電反応毎に発生する。
 - ③ サルフェーション.....低SOC, 高温放置で発生する。
- これらの劣化形態とSOCの関係をFig.7に示す。

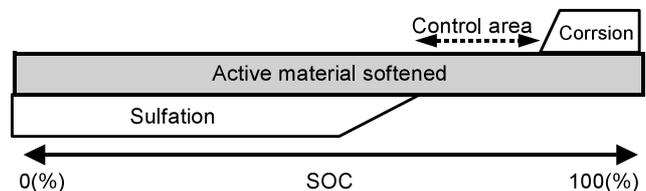


Fig.7 SOC vs Damage Mechanism

上記の各劣化メカニズムに対する考察から、満充電より若干下げた充電状態となるようにSOCを制御し、格子腐食、および、サルフェーションの劣化抑制による鉛バッテリー長寿命化の可能性を簡易評価した。寿命試験結果をFig.8に示す。

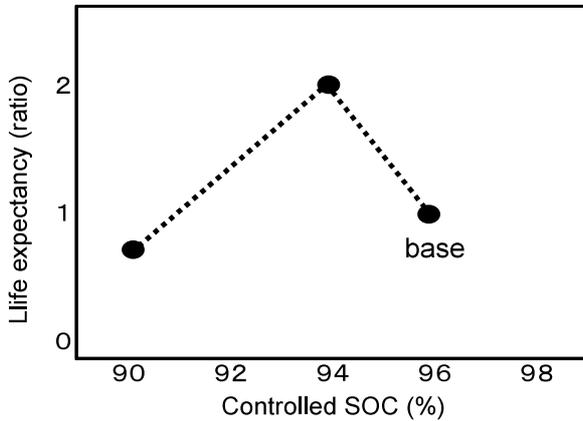


Fig.8 Total Capacity vs Controlled SOC

今回の劣化サイクル評価モード条件下においては、SOC94%程度で制御すれば寿命を最大にできる可能性があることがわかった。

この結果を参考に、一般市場での使用環境、すなわち放置時の暗電流による放電、走行条件による減速回生頻度、季節ごとの温度変化などの変動要素を総合的に検討し、燃費効果とバッテリー劣化抑制のバランスが最適と考えられるSOC値を目標に作動するよう設定した。

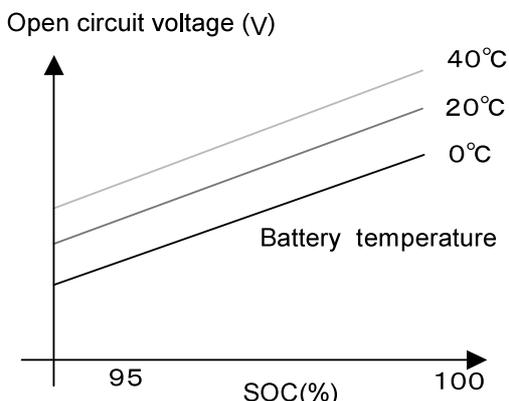
3.2 バッテリー充電状態 (SOC) 制御

(1) SOC推定方法の確立

目標のSOC値に正確に制御するために、SOC推定方法を確立する必要がある。車両上でSOCを推定する方法について、量産時のシステム保証や現実的なシステムコストなどを考慮して、以下の二通りの方法を検討した。

① バッテリー開放電圧 (Open Circuit Voltage) 計測

SOCと開放電圧が直線関係にある (Fig.9) ことを利用してSOCを推定する方法である。



Theoretical expression
 • $OVC(V) = (0.84 + \text{relative density}) \times 6$
 • $\text{Relative density} (@20^{\circ}\text{C}) = \text{Relative density}(T^{\circ}\text{C}) + 0.0007(T-20)$

Fig.9 Open Circuit Voltage vs SOC

この方法は、開放電圧の変化度合いがSOCの変化度合いに対して比較的小さいため、精度良くSOCを推定することが可能である。しかしながら、開放電圧はバッテリーが安定した状態で計測することが大前提であり、そのためには、充電電圧の影響がない車両放置中などに電圧計測する必要がある。技術的には充分可能であるが、現時点ではシステムコストと燃費効果のバランスが確保できるレベルにないと考え、量産車への採用は保留した。

② 充電電流の計測

従来のバッテリー性能評価指標の一つでもある、SOC値毎の充電電流時系列変化特性を利用してSOCを推定する方法である。充電電流とSOCの関係のイメージをFig.10に示す。

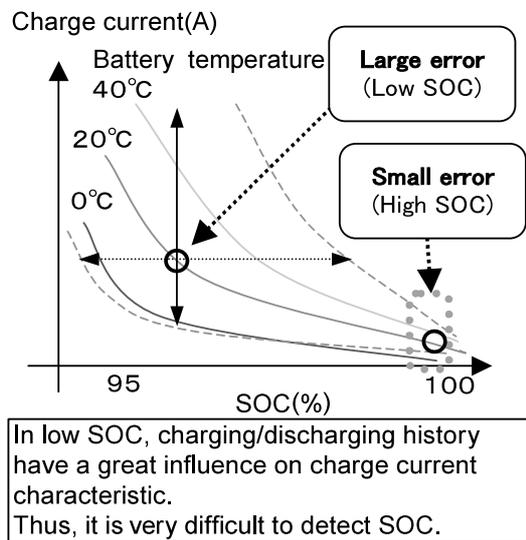


Fig.10 Charge Current vs SOC

この方法は、満充電付近では精度良くSOCを推定でき、SOC絶対値を一旦特定できれば、バッテリー充放電電流を積算することでSOCの相対変化を計測できる。バッテリー回路に電流センサを新設するだけのシンプルなシステムで実現できるため、今回、この方法を量産車へ採用した。

(2) バッテリー温度によるSOC推定精度の検討

バッテリー充電電流とSOCの関係は、バッテリー温度により大きく変化する (Fig.10) ので、正確にSOCを推定するには、バッテリー温度を正確に把握する必要がある。バッテリー温度を正確に計測するには、温度センサをバッテリー内部へ直接差し込む方法が最も精度が良いと考えられるが、この場合、バッテリー電槽の変更や温度センサ自体の信頼性が大きな問題となる。

そこで、バッテリー電圧を温度に応じて最適に保つ目的で開発した簡易的なバッテリー温度推定アルゴリズムを利用することを検討した。車両上で、バッテリー温度推定アルゴリズムによる温度、温度センサが設置可能と考えられるパッ

テリ周辺部の温度,およびバッテリー内部温度(電解液温度)を様々な条件下で計測した。その一例をFig.11に示す。

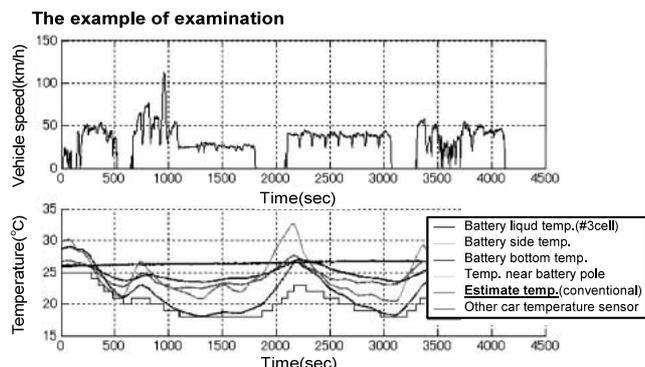


Fig.11 Accuracy of Battery Temperature Measurement Method

バッテリー内部温度に対して,いずれの方法でも10 程度の誤差を生じるが,温度推定タイミングを精度良く測定できる条件下に限定するなどの工夫をすることで,温度センサを追加することなく,従来のバッテリー温度推定アルゴリズムをベースにバッテリー温度を推定できる技術を確立した。

4. 車両適合性の確保

4.1 電源電圧変動

減速エネルギー回生の具体的な制御方法は,発電機の発電電圧を調整して行う。減速時には発電電圧を高めることでバッテリーに充電し,減速以外では発電電圧をバッテリー電圧(起電力)よりも低くして放電させる。

バッテリーの性能と信頼性をバランス良く保つため,バッテリー温度に応じて発電電圧を細かく調整する制御は従来から量産採用していたが,鉛バッテリーは熱容量が大きいため温度は急激に変化せず,発電電圧,すなわち車両全体の電源電圧が急激に変化することはなかった。

今回,減速開始時に発電電圧を急激に高くするので,車両全体の電源電圧が頻繁に変化する。電源電圧の急激な変化は車両の電気部品の機能や商品性へ影響をおよぼす可能性があるため,全ての電気部品について影響度合いを確認し,発電電圧制御方法を細かく設定した。

個別に電圧制御を設定した一例を以下に列記する。

- ・エアコン冷暖房性能との協調制御
(冷暖房性能要件を確保する)
- ・ヘッドランプ等のちらつき抑制制御
(照度変化を抑制する。バルブ寿命を確保する)
- ・ブレーキ制御時の電圧制御
(ABS作動時の安定性を確保する)

4.2 発電機駆動トルク変動

減速時には,バッテリーに充電するため発電機の発電量が

増大,つまり発電機駆動トルクが急激に増大する。

発電機駆動トルクの急激な変動は車両のNVH性能全般に影響を及ぼすため,その度合いに応じて発電電圧制御方法(駆動トルク制御方法)を細かく設定する必要があり,車両全体で総合的に評価した。

個別に電圧制御を設定した領域の一例を以下に列記する。

- ・減速瞬間のエンジン制御との協調制御
(アクセル全開操作後,燃料カットタイミングと協調し,減速瞬間のショックを抑制する)
- ・オートマチックトランスミッションのスリップロックアップ油圧制御との協調制御
(発電機駆動トルクに応じた油圧を設定し,スリップロックアップ制御の安定性を確保する)
- ・過度な減速感を感じさせない制御
(トランスミッションギア段位,発電量などに応じて発電量を抑制し適度な減速感を演出する)

5. おわりに

以上述べてきたように,バッテリーマネジメント技術の開発により,鉛バッテリー搭載車にも減速エネルギー回生技術が適用できるようになった。適用時の車両への悪影響についても克服して量産車への採用を実現し,燃費性能を1~2%程度向上できた。

今後も,今回得られた劣化メカニズムの解析結果をベースに,鉛バッテリーの更なる長寿命化と燃費性能を高次元でバランスさせたバッテリーマネジメント技術開発を継続していく。

著者



西里鉄也



平野晴洋



稲田潤



八雲正



庄司明



前田敏正