

運用負荷が大きいディーゼルハイブリッド車における 最適充放電制御の開発



高草木 敦理*1



蘭田 秀樹*1



河野 洋一*2

Development of the optimal charge and discharge control for diesel hybrid train under high operational load

Atsutoshi TAKAKUSAKI*1, Hideki SONODA*1 and Yoichi KOUNO*2

*1 Environmental Engineering Research Lab, Research and Development Center of JR East Group

*2 Matsudo Rolling Stock Center, Tokyo Branch Office of JR East Group

Abstract

Commercial operation of type Kiha-E200 hybrid train started from 2007 in Koumi-line. Series HB-E300 has been operated as 'Resort Shirakami' rapid service in Ouu and Gono-line. Because of charge and discharge in the rapid service, HB-E300 was found shorter life time of storage batteries than Kiha-E200 according to result of its investigation after five years from the operation start. To check degradation of the batteries and develop optimal charge and discharge control, data collection in commercial operation was carried out and good performance of the control was confirmed.

●**Key words:** Lithium-ion battery, Hybrid vehicle, Battery Life, Series HB-E300, Series HB-E210

1. はじめに

JR東日本は2007年にディーゼルハイブリッド車両（以下、ハイブリッド車両）キハE200形を小海線でデビューさせた¹⁾。以後、HB-E300系車両（長野、青森、秋田地区）、HB-E210系車両（仙台地区）を導入、燃料消費率約10%削減や窒素酸化物（NOx）と粒子状物質（PM）の排出量の低減や駅停車時のアイドリングストップにおけるエンジン騒音低減により環境負荷低減に寄与している。

キハE200形車両の導入時、ハイブリッド車両に搭載するリチウムイオン蓄電池（以下、蓄電池）の寿命は事前試験結果から8年以上と推定した。導入から4年経過したHB-E300系の蓄電池モジュールを詳細調査したところ、想定より早いペースで内部抵抗が上昇している蓄電池（劣化が進んでいる蓄電池）が確認された。キハE200形とHB-E300系の運用パタンの相違が影響していると考え、蓄電池寿命を早める要因の分析と運用パターンに適したハイブリッドシステム制御の開発を計画した。

本論文では、運用パタンの相違が蓄電池寿命に与える影響および省エネ効果を確保し、かつ蓄電池に優しい最適充放電制御について、現車データに基づいた評価結果について報告する。

2. ハイブリッド車両の運用形態について

2・1 概要

HB-E300系の蓄電池を抜取り調査したところ、2つの蓄電池モジュールで推定曲線よりも大きい内部抵抗上昇率を示した。図1にキハE200形の蓄電池寿命推定曲線と、キハE200形とHB-E300系で調査した内部抵抗上昇率（ともに4年経過時）を比較して示す。この結果から走行距離（充放電サイクル）以外にも蓄電池への充放電負荷が影響していると考えた。よって、これまでに収集していた現車測定データを基に営業運転における蓄電池充放電の特徴を分析した。

2・2 営業運転のデータ分析

図2にハイブリッド車両駆動システムの外略図を示す。以前測定していた営業運転でのデータから蓄電池への充放電や走行状態等を分析したところ、HB-E300系（青池編成）は、秋田地区にて「リゾートしらかみ」として運用しており、約10分おきに駅停車する快速運用のため、駅発車後は速度維持のための再力行等により走行中の充放電回数が多いことが判明した。また、HB-E210系は仙台地区にて「仙石東北ライン」として運用され、駅間が短いため、力行、ブレーキを頻繁に繰り返し、一度の充放電の変化量が多いことが判明した。1日の走行距離についても、①HB-E300系、②HB-E210系、③キハE200形の順に長かった。即ち蓄電池の使用時間も長いと言える。

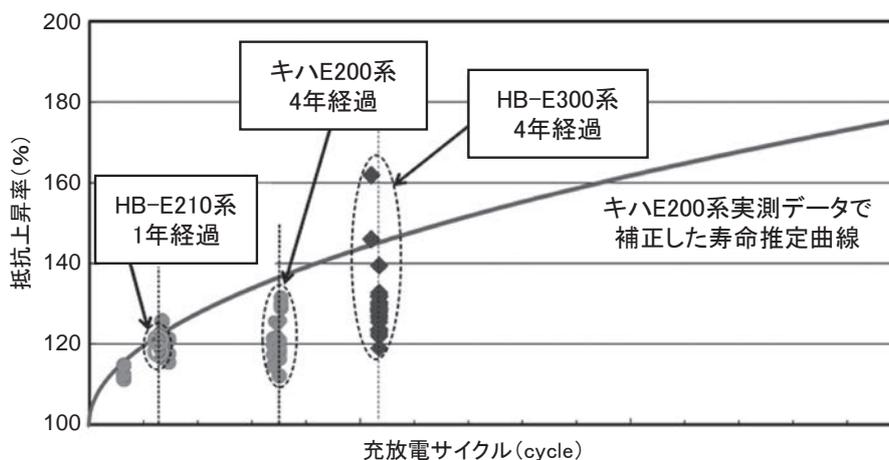


図1 キハE200形とHB-E300系の内部抵抗上昇率の比較

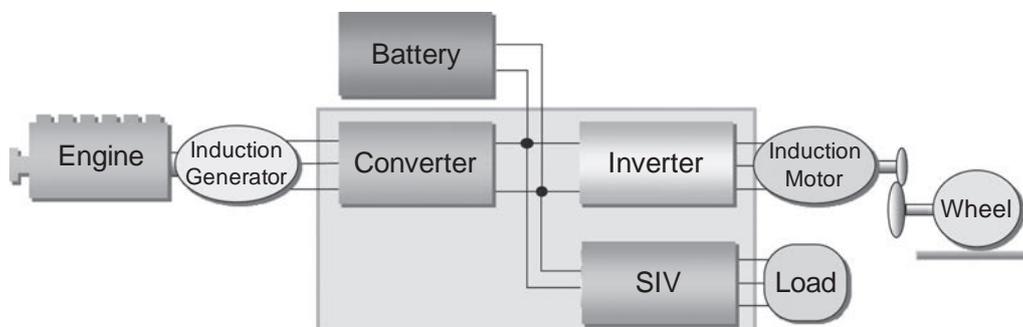


図2 ハイブリッド車両駆動システムの概略図

3. 主回路制御手法の開発

3・1 制御機能の検討

リチウムイオン蓄電池にて考えられる劣化要因と現象、劣化を加速させる要素をまとめた(表1参照)。蓄電池の劣化を抑えるためには、表1の蓄電池劣化を加速させる要素を回避することで実現できると考え、

- 機能①：通電電流を小さくする
- 機能②：充電率(SOC)の変動幅を小さくする
- 機能③：蓄電池の高温状態を避ける

の3項目をコンセプトに最適充放電制御を検討した。

表1 リチウムイオン電池の劣化要因

No.	劣化要因	現象	劣化を加速させる要素
①	正極/負極の劣化	活物質間もしくは、集電箔との電氣的接触が失われる	高温
②	リチウム損失(不可逆)	電解液とLiイオンの反応で皮膜(SEI…Solid electrolyte interface)が生成、充放電に使用されるLiイオンが消失	高温、高SOC
③	電解液分解	高SOC領域にて電解液溶媒が分解される	高SOC
④	リチウム損失(可逆)	正極に滞留したLiイオンにより高抵抗な皮膜を生成	大電流放電、低SOC

3・2 制御機能の検討

主回路制御において、機能①～③を実現する制御方式として、表2に示す制御(A)～(C)を考案した。

図3は、ハイブリッド車両のエネルギー管理制御にて制御(A)～(C)を実現する具体的な処理の模式図であり、図4は1駅区間での制御動作のタイムチャートである。

表2 蓄電池負荷軽減の制御方式

制御	概要	適用対象	機能①	機能②	機能③
制御 (A)	VVVF+SIV消費電力とエンジン発電電力の偏差を最小化する	駅停車が少なく、力行のオンオフにより走行を維持する運用→快速	○	○	○
制御 (B)	停車から力行開始時のアイドルストップ走行上限速度を低下	駅停車が多く、アイドルストップでの走行頻度が高い運用→各駅停車	○	—	○
制御 (C)	停車時にSOC維持する充放電領域を変更。	折返し時の長時間停車、システム起動状態で留置が多い運用→各駅停車	—	○	—

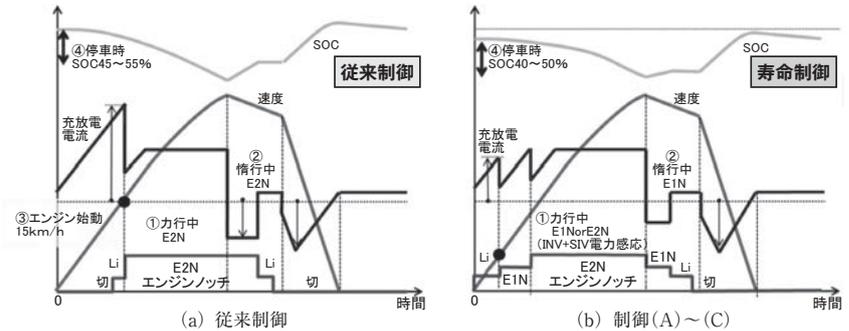
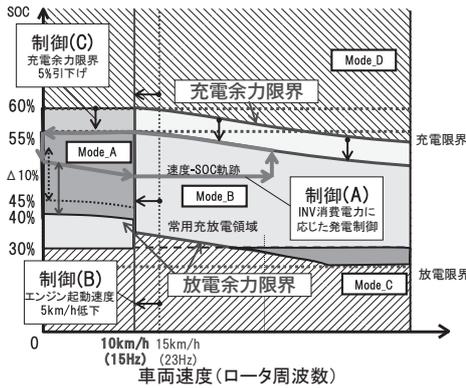


図3 制御 (A)～(C) 適用時のエネルギー管理マップ

図4 制御動作タイムチャート

制御 (A) は、インバータ・SIV消費電力に応じてエンジン発電電力を決定することで、両者の差異に相当する蓄電池充放電電流の最大値抑制かつSOC変動幅低減を目指した。

制御 (B) は、アイドルストップにて駅出発する際にエンジン起動速度を低下させて早めに発電を開始して、蓄電池放電電流の最大値抑制を目指した。

制御 (C) は、駅出発時のSOCを低下させ、制御 (A) との組合せでSOC領域を低めに推移させることを目指した。

3・3 シミュレーション検証

本走行シミュレーションにより、各制御方式の効果を事前に評価した。HB-E300系はリポートしらかみ運用 (秋田～弘前間往復)、HB-E210系は仙石東北ライン運用 (仙台～石巻間往復) の実車両条件、ランカーブにて評価した。

図5、図6に走行シミュレーションによる効果検証結果を示す。各評価指標は下記の定義により求めた。

- (1) 充放電 $P \cdot t$ 値 【評価対象：蓄電池セルの発熱】：充放電電流2乗値の30秒間積分値 (蓄電池1台あたり)
- (2) 電流積算値 【評価対象：充放電のエネルギー量】：充放電電流の時間積算値 (蓄電池1台あたり)

制御 (C) は、SOCがより低い領域で推移するため蓄電池が接続される直流部の電圧が従来より低下、同じ電力にて蓄電池充放電の電流値が増加する傾向、すなわち、逆に劣化が進む傾向を確認した。このため、最適充放電制御として制御 (A)、(B) を採用することにした。ただし、以上は一つの例であって、著者は内容に適した最も効果的な形式を選ぶことが望ましい。

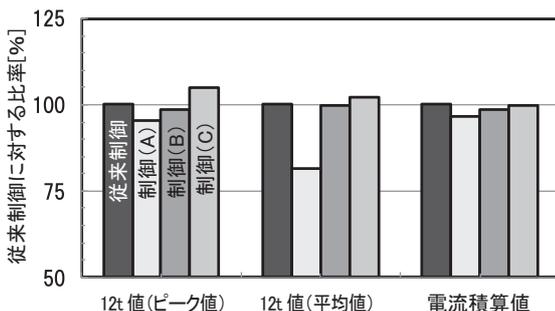


図5 走行シミュレーション効果検証 (HB-E300系)

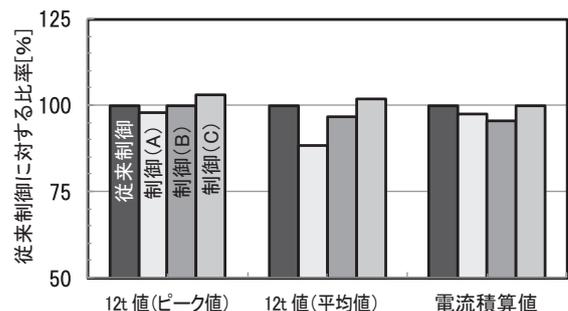


図6 走行シミュレーション効果検証 (HB-E210系)

4. 現車走行での検証

4・1 営業運転データの測定

本蓄電池の充放電電流の抑制の効果を検証するため、図7に示すように同一編成内で「制御(A) 搭載車両と従来制御車両」の組合せと、「制御(A)+(B) 搭載車両と従来制御車両」の組合せにて、各々約2週間営業運転における走行データをロガーで収集した。

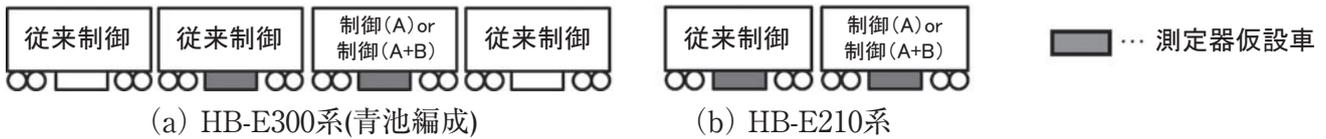


図7 試験時における各車両の制御状態

4・2 現車走行データの分析

図8に現車走行試験データを示す。従来制御では力行や惰行時におけるエンジンノッチが固定であるのに対し、最適充放電制御(制御(A)+(B))では、必要電力に応じたエンジンノッチが選択され、蓄電池の充電電流が抑えられている効果を確認した。また、図9にHB-E300系現車走行データによる効果検証結果、同じく図10にHB-E210系の結果を示す。

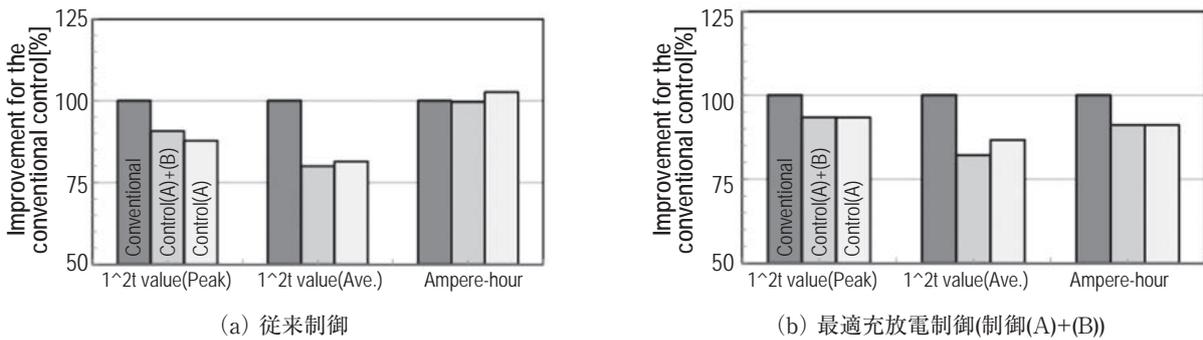


図8 HB-E300系 現車走行試験データ

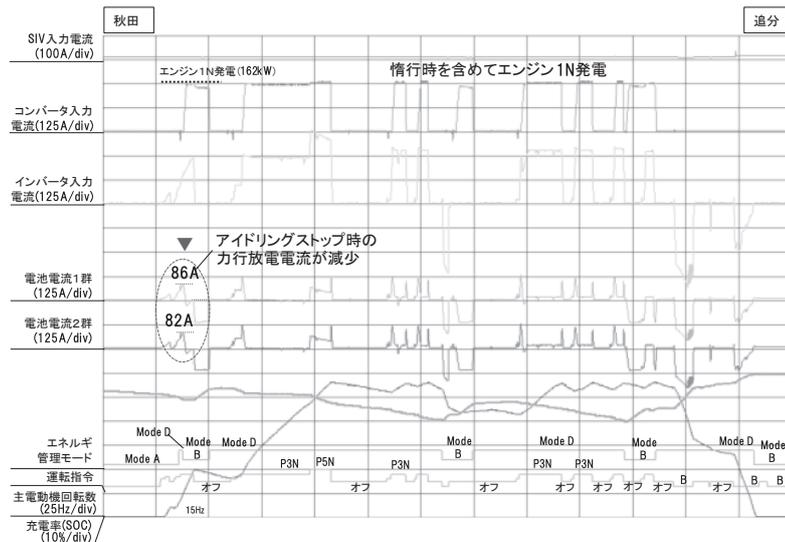


図9 現車走行データによる効果検証 (HB-E300系)

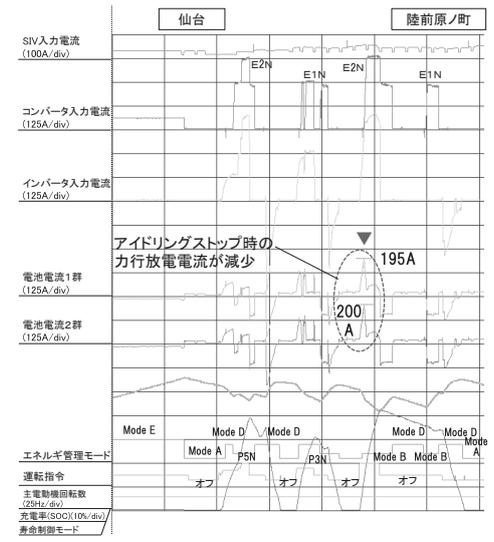


図10 現車走行データによる効果検証 (HB-E210系)

I_tt値については、従来制御に対してピーク値で約10%、平均値で20%の低減効果を確認でき、充放電繰返し(SOC変動)の低減、蓄電池発熱の低減効果を期待できる。また、HB-E210系については電流積算値を約10%低減しており、蓄電池の通流電流自体の低減効果を確認した。

4・3 劣化抑制効果の検証

現車走行データをもとに、蓄電池劣化シミュレーションを実施した。時間とサイクル数の関係は下記の通りとした。

(1) HB-E300系

- (a) 充放電サイクル：典型的充放電パタンより2[分/回]とした。
- (b) 運用時間：運行ダイヤより500[分/編成]とした。
- (c) 1日のサイクル数：500[分/編成]/2[分/回] = 250[回/編成]とした。
- (d) 年間サイクル数：年間240日運用として、240[日/編成]×250[回/編成] = 60000[回]とした。

(2) HB-E210系

- (a) 充放電サイクル：典型的充放電パタン2.8[分/回]、駅停車等の平均時間を考慮して7.4[分/回]とした。
- (b) 運用時間：運行ダイヤより757[分/編成]とした。
- (c) 1日のサイクル数：757[分/編成]/7.4[分/回] = 102[回/編成]とした。
- (d) 年間のサイクル数：年間274日運用として、274[日/編成]×102[回/編成] = 27825[回]とした。

4・4 蓄電池寿命シミュレーション結果

典型的充放電パターンを基に、8年経過時の蓄電池寿命を算出した。HB-E300系の結果を図11にHB-E210系を図12に示す。

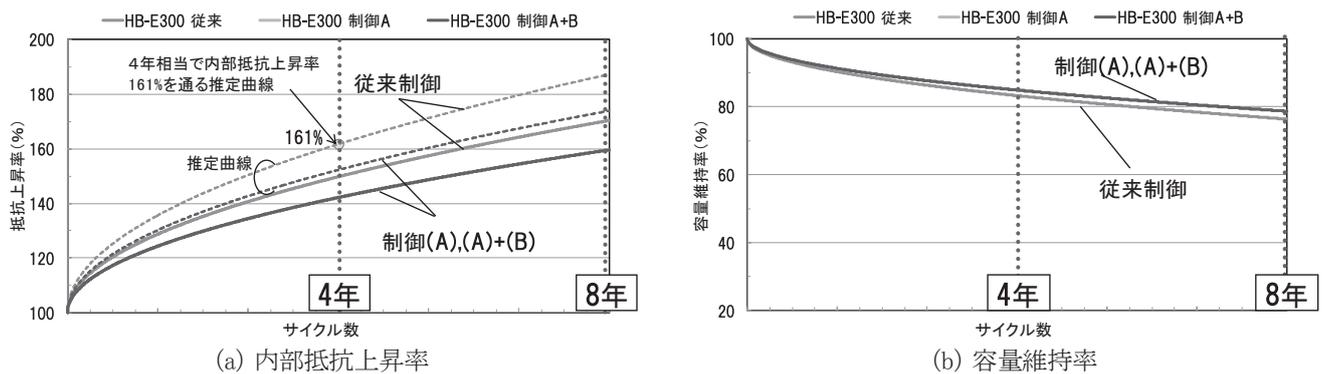


図11 蓄電池寿命シミュレーション結果 (HB-E300系)

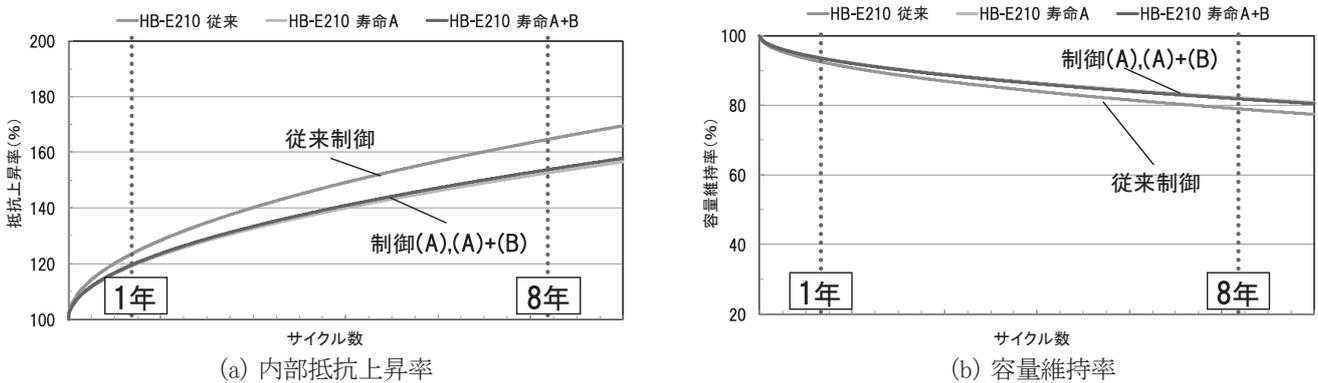


図12 蓄電池寿命シミュレーション結果 (HB-E210系)

(1) HB-E300系

- (a) 従来制御では、4年経過時点の抵抗上昇率は150%であり、実車両と同程度の劣化傾向であると考える。
- (b) 制御(A)の導入により、8年経過時点の抵抗上昇率は、従来制御170%に対して10ポイントの改善が見込まれる。制御(A)+(B)については、制御(A)のみの場合に対する優位性は確認できなかった。制御(B)の効果は駅出発時のみ発揮されるためと考える。

(2) HB-E210系

(a) 8年経過時点の抵抗上昇率(従来制御)は167%であり、HB-E300系と同等の結果を得た。

(b) 制御(A)の導入により、8年経過時点の抵抗上昇率は、従来制御167%に対して12ポイントの改善が見込まれる。制御(A)+(B)の8年経過時点の抵抗上昇率は156%、制御(A)のみの場合よりも2ポイント悪化した。これは、制御(A)を適用した現車のデータ測定時期が制御(A)+(B)よりも遅く、気温の上昇等で蓄電池の電流積算値が減少したためと考える。

図11(a)には、実測データに基づいた抵抗上昇率シミュレーション結果に対して、サイクル数4年相当で内部抵抗上昇率161%(実測蓄電池モジュール最大値)のポイントを通る推定曲線(従来制御)と、制御(A)、(A)+(B)を適用した場合の推定曲線を点線で追記している。

従来制御では、8年相当で抵抗上昇率187%に達するのに対して、制御(A)、(A)+(B)を適用した場合は抵抗上昇率174%に抑えられる(13ポイント低減)できることを確認できる。すなわち、最適充放電制御の適用により内部抵抗上昇率のばらつきを含め、蓄電池劣化の抑制効果が得られると言える。

4・5 燃料消費量

車両センターでの給油データを従来制御車両と最適充放電制御搭載車両を比較したが、燃料消費量の差異は±2%程度で両者拮抗し、顕著な優劣は確認できなかった。すなわち、最適充放電制御が燃費に与える影響は少ないと言える。

5. まとめ

運用負荷が大きいディーゼルハイブリッド車にて、蓄電池寿命を延伸する最適充放電制御について検討した。必要電力に応じたエンジンノッチを選択する制御「制御(A)」により蓄電池への急峻な充放電が抑制され、HB-E300系(青池編成)、HB-E210系ともに寿命延長効果を確認した。一方で、駅出発時のアイドリングストップ終端(エンジン起動)速度を低減する「制御(B)」は明確な効果を確認できなかった。

今後、主回路制御だけでなくディーゼル制御等、車両システム全体の視点から、蓄電池への負荷を抑制し、更なる蓄電池寿命延伸のための制御開発を進めたい。

参考文献

- 1) 白木、加藤、安井、金子、大石:「キハE200形ディーゼル気動車のハイブリッドシステム」、第17回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2010), pp.33-36 (2010,12)