

ハイブリッド鉄道車両に関する動向と最近の研究開発

山本 貴光*

The Trend and Recent Studies of Hybrid Railway Vehicles

Takamitsu YAMAMOTO

Recently, diesel-battery hybrid railway vehicles which enable us to charge the batteries on board with the regenerative energy and discharge it effectively have been realized in commercial lines. Furthermore, EMUs of a battery-mounted type were produced in order to use them as the interoperation between the electrified section and the non-electrified section. Thus, a variety of hybrid railway vehicles with energy storage devices have appeared in recent years. This report introduces the trend and recent studies of these hybrid railway vehicles.

キーワード:ハイブリッド車両, バイモード車両, バッテリー電車, 燃料電池車両, リチウムイオンバッテリー

1. はじめに

鉄道は走行抵抗が小さく、自動車や飛行機と比べて省エネルギーな交通機関である。日本国内ではおよそ6割の区間が電化されており、そこには電車が走行している。最近の電車ではブレーキ動作時に運動エネルギーを電気エネルギーに変換して有効利用する「回生ブレーキ」が採用されており、抵抗制御方式を採用していた非回生車両と比べて大幅な省エネルギーを実現した。一方、非電化区間では現在でも主流はディーゼルエンジンを搭載した気動車であり、ブレーキ時の運動エネルギーは熱に変換され有効に利用されていない。しかし、2006年に施行された「改正省エネ法」などによる省エネルギーへの関心の高まりと、バッテリー技術の向上により、自動車でも普及しつつあるハイブリッド技術が鉄道車両へ応用され、ブレーキ時の運動エネルギーを電気エネルギーに変換して車上のバッテリーに蓄えて有効利用する「ディーゼルハイブリッド車両」が一部の非電化区間で実用化された。さらに、電化区間と非電化区間を直通運転することを目的として、バッテリーを搭載した車両や交流電化～直流電化区間を直通運転するためのディーゼルハイブリッド車両などが登場した。本報告ではこれらのハイブリッド車両の開発動向と最近の研究開発について述べる。

2. 電気車駆動システムの変遷

電気車駆動システムの進歩は主に主回路方式においてなされ、抵抗制御方式からチョップ制御、添加励磁制御を経て、国鉄では1986年に登場した207系900番台がGTO素子を使ったVVVFインバータ+誘導電動機を採用した。1990年以降、IGBT素子の採用が行われ、さらに最近ではSiC

* 車両制御技術研究部 部長

素子が登場して新製電車の一部に採用されつつある。一方で、省エネルギーに対する関心が高まり、頻繁に発生するブレーキ時の回生失効・絞込現象の対策として2000年頃から回生電力有効利用の研究が進められ、そのアイテムの一つとしてバッテリー適用技術についての研究が始まった。回生電力を有効活用するためにはバッテリーには急速充電性能が要求されるが、この頃の高性能バッテリーの主力であった「ニッカドバッテリー」は急速充電性能が十分では無く、一部の用途でようやく「ニッケル水素バッテリー」や「リチウムイオンバッテリー」が出始めた程度であった。

その後、「リチウムイオンバッテリー」が自動車に試験的に採用されるようになり、2003年にJR東日本から、キヤE991（NEトレイン初代）がディーゼルハイブリッド試験車両として、また鉄道総研からLH01（りっちいとらみい）がバッテリー試験車として登場した。この時採用されたリチウムイオンバッテリーはキヤE991ではハイブリッド自動車向けの小型・高出力形のセルであり、LH01では電気自動車向け大容量・高エネルギー形を高出力形に改良したセルであった。これらがハイブリッド車両のさきがけとなり、それ以降多くの試験車両が登場して走行試験が実施されるようになった。

3. ハイブリッド車両の種類

3.1 これまでに登場したハイブリッド車両

鉛蓄電池、ニッカドバッテリー以外のエネルギー蓄積媒体を搭載し、これまで国内に登場したハイブリッド車両（バイモード車両も含む）を表1に示す。厳密に分類すると、「ハイブリッド」とはある瞬間に2つ以上の動力源を組み合わせるより高品質な性能を実現するシステムであり、電化・非電化区間を直通するために架線からの集電とエンジンによる走行を切り替えるシステムは

特集：車両技術

「バイモード」と区別するのが一般的である。主回路系で「デュアルモード」と呼んでいる場合もあるが「バイモード」と同意であり、線路と道路を走行可能な「デュアルモードビークル (DMV)」と混同しないように以下では「バイモード」を使用する。表1は登場年月順としたが、改造車両等ではっきりしないものについては、文献等で発表された年月を登場年月としたため、多少の前後および調査漏れについてはご容赦頂きたい。

3.2 ハイブリッド構成と効果

表1に示したハイブリッド車両は詳細についてはそれ

ぞれ異なるが、一部を除き大きく以下の3つに大別できる。それぞれの構成と効果・目的について示す。

(1) ディーゼルハイブリッド車両

ディーゼルエンジンとバッテリーを搭載したハイブリッド車両であり、従来、非電化区間を走行するディーゼルカーの代替を主な目的として開発・導入されている。構成としては、ディーゼルエンジンに発電機を直結し、駆動装置として電車と同じインバータ+誘導電動機とした「シリーズハイブリッド」方式が多く採用されている。非電化区間においてもブレーキ時の回生エネルギーが有効利用可能である他、駅停車時にアイドリングストップ

表1 これまで国内で試験等が実施されてきたハイブリッド車両

| 形式 (略名称) | キヤ E991 NE トロイ | LH-01 りっちいとらみい | モ 562 | 313 系 | キヤ R291 | 602 形 | 2103 形 | キヤ E995 NE トロイ |
|----------|---|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--|
| 所属 | JR 東日本 | 鉄道総研 | 福井鉄道 | JR 東海 | 鉄道総研 | 福井鉄道 | 川崎重工 | JR 東日本 |
| 登場年月 | 2003・4 | 2003・6 | 2004・12 | 2005・1 | 2006・4 | 2006・6 | 2006・8 | 2006・10 |
| 電源方式 | ディーゼルエンジン + リチウムイオンバッテリー (10 → 15.2kWh) | リチウムイオンバッテリー (33kWh)、後に架線集電装置搭載 | 架線集電 or リチウムイオンバッテリー (15 kWh) 切替 | 架線集電 + 電気二重層キャパシタ (1.4F・0.28kWh) | 燃料電池 (120kW) or 架線集電切替 | 架線集電 or リチウムイオンバッテリー (45 kWh) 切替 | 架線集電 or ニッケル水素バッテリー (92kWh) 切替 | 燃料電池 (65kW × 2) + リチウムイオンバッテリー (19kWh) |
| 備考 | | モ 3300 形を改造、インバータ + 誘導電動機搭載 | | 営業車両にて試験導入された | 2008・5 2 両編成、バッテリーハイブリッド化 (36kWh) | | キガセル使用 | キヤ E991 を改造 |
| 営業運転 | | | | △ | | | | |

| 形式 (略名称) | キハ E200 | キハ 160 Inno Tech Train | LH-02 Hi-tram | SWIMO-X | 555 形 | 3000 系 | キヤ E995 スマート電池くん | キハ 122 |
|----------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| 所属 | JR 東日本 | JR 北海道 | 鉄道総研 | 川崎重工 | 三菱重工 | 小田急電鉄 | JR 東日本 | JR 西日本 |
| 製造年月 | 2007・7 | 2007・8 | 2007・10 | 2007・11 | 2008・1 | 2009・4 | 2009・10 | 2009・11 |
| 電源方式 | ディーゼルエンジン + リチウムイオンバッテリー (15.2kWh) | ディーゼルエンジン + リチウムイオンバッテリー (7.5kWh) | 架線集電 + リチウムイオンバッテリー (72kWh) | 架線集電 + ニッケル水素バッテリー (86.4kWh) | 架線集電 or リチウムイオンバッテリー 切替 | 架線集電 + リチウムイオンバッテリー (18kWh) | 架線集電 or リチウムイオンバッテリー (168 → 72kWh) | ディーゼルエンジン + リチウムイオンバッテリー (18kWh 補機にのみ使用) |
| 備考 | 世界初のハイブリッド営業車両 | パワフルハイブリッド方式 | | キガセル使用 | | | 燃料電池車を改造 | マイルドハイブリッド方式 |
| 営業運転 | ○ | | | | | | | |

| 形式 (略名称) | HD300 | HB-E300 | LFX-300 ameri TRAM | DGBC2 Smart BEST | 223 系 | 817 系 DENCHA | EV-E301 ACCUM | HB-E210 |
|----------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 所属 | JR 貨物 | JR 東日本 | 近畿車輛 | 近畿車輛 | JR 西日本 | JR 九州 | JR 東日本 | JR 東日本 |
| 製造年月 | 2010・3 | 2010・6 | 2010・7 | 2012・10 | 2013・2 | 2013・3 | 2014・1 | 2015・1 |
| 電源方式 | ディーゼルエンジン + リチウムイオンバッテリー (67.2kWh) | ディーゼルエンジン + リチウムイオンバッテリー (15.2kWh) | 架線集電 or リチウムイオンバッテリー (40kWh) 切替 | ディーゼルエンジン + リチウムイオンバッテリー (72kWh) | 架線集電 or リチウムイオンバッテリー (102kWh) 切替 | 架線集電 (交流) or リチウムイオンバッテリー (83kWh) | 架線集電 or リチウムイオンバッテリー (190kWh) | ディーゼルエンジン + リチウムイオンバッテリー (15.2kWh) |
| 備考 | DE10 置換え用 | キハ E200 のリゾート版 | | | | 営業車両製作予定 | | |
| 営業運転 | ○ | ○ | | | | | ○ | ○ |

可能であることが大きなメリットとなっている。JR貨物のHD300形ではディーゼルエンジンを小型化できる他、入換用機関車の場合は待機時間が一般の鉄道車両より長めであり、この時のアイドルストップが省エネに貢献している。

(2) 架線・バッテリーハイブリッド車両

電化区間では架線から集電し、走行用電力とバッテリーへの充電電力を供給し、また、ブレーキ時の回生電力もバッテリーに充電することにより回生失効・絞込を低減して省エネに寄与するハイブリッド車両である。非電化区間に直通し、その電力をバッテリーからの放電で供給する蓄電池電車や、回生失効対策、さらには、停電時も走行可能とすることを目的としたハイブリッド車両が営業線導入および研究開発されている。

(3) 燃料電池車両

燃料電池とバッテリーを搭載したハイブリッド車両であり、非電化区間を走行するディーゼルカーの代替などを目的として研究開発が進められている。燃料電池の高いエネルギー変換効率を活かし、バッテリーとハイブリッド構成にすることにより回生電力も有効利用できることから従来のディーゼルカーと比べて消費エネルギーは半分以下と試算される。燃料となる水素は自然界では燃料とするほど存在しないが、工業製品を製作する過程で発生する副生水素の利用や天然ガスからの改質、太陽光や風力発電などの自然エネルギーから製造することが可能である。環境に優しい、多様性に富んだ燃料であり、将来的にエネルギー持続社会構築への切り札として期待されている。

4. ハイブリッド車両に向けた最近の研究開発

4.1 リチウムイオンバッテリーの開発動向

表1に示した車両の多くはリチウムイオンバッテリーを搭載しており、ハイブリッド車両の開発においてはリチウムイオンバッテリーの開発動向が大きな影響を与えていると考えられるため以下に記述する。

(1) 安全性向上に関する動向

リチウムイオンバッテリーは正極にリチウムイオン含有金属系酸化物、負極に炭素系材料、電解質としてはリチウム塩を含む有機電解液により構成される。

初期のリチウムイオンバッテリーは正極材料にコバルト系酸化物が使われ、エネルギー密度などの性能が高いという特徴があるが、熱暴走開始温度が200℃程度と比較的低く、また、熱暴走時は高温となり発火に至る。熱暴走は浮動充電時に満充電を超えて充電される際に電解液の分解による発熱や負極表面にリチウム金属が針状析出して絶縁物を破壊することにより発生する。携帯電話やパソコンにおけるリチウムイオンバッテリーの発火事

故の多くはリチウムイオンバッテリーのこのような特性が考慮されず浮動電圧が不適切に設計された充電器の使用や落下などにより絶縁が低下したことによる内部短絡が原因であった。

最近のリチウムイオンバッテリーの正極にはマンガン系（熱暴走開始温度300℃以上、熱暴走後も発火に至らず）やりん酸鉄系（マンガン系より安全）が用いられ、また充電装置の浮動充電電圧の適切な設計や安全装置の高度化により、発火に至る事象は回避できるようになった。しかし、事故などにより内部短絡などが発生した際は内部の電解液の分解、ガス発生により圧力が上がり、安全栓が解放してガスが放出される可能性があるため、営業車両への搭載箇所は客室外（屋根上又は床下）とされている。

(2) 大容量（軽量）化に関する動向

非電化区間へ直通するバッテリー搭載車両では走行可能距離延伸のため、搭載するバッテリーの大容量化が課題である。これまで営業車両に適用されてきたバッテリーは600V系で構成されているが、従来の電車の主変換装置の入力電圧は1,500V系であり、大容量化に向けて高電圧化が進められている。

バッテリーは出力(kW)とエネルギー(kWh)を独立に設定することはできないため、これまでのハイブリッド鉄道車両では加速・ブレーキ時の大電力を扱うのに有利な高出力タイプが採用されてきたが、上記目的のため、最近では高エネルギータイプも検討対象となっている。但し、高出力タイプと比べて内部抵抗が大きいので採用にあたっては発熱・温度上昇の確認が必要である。

また、電解質にポリマーを使った「リチウムイオンポリマーバッテリー」では外装容器にアルミラミネートが採用されているが、最近では封止技術の向上により、リチウムイオンバッテリー（有機電解液）の外装容器もアルミラミネート化が適用可能となってきており、軽量化に向けて期待される。

4.2 鉄道総研における最近の研究開発

(1) バッテリーの温度上昇推定手法

ハイブリッド車両の多くに搭載されているリチウムイオンバッテリーは経年（カレンダー）及び充放電サイクルにより劣化する。特に経年劣化はバッテリー温度に依存することが知られているが、その温度上昇を簡便に推定する手法は確立されていなかった。そこで、熱回路網法により構築した熱モデルを用いて簡便に推定する手法について研究した¹⁾。図1に構築した熱回路網の例を示す。これまでに取得した試験データと本検討から算出した結果を比較したところ、その誤差は2K程度であった。実際に走行試験を行う前に温度上昇が推定でき、寿命算出に貢献することが期待される。

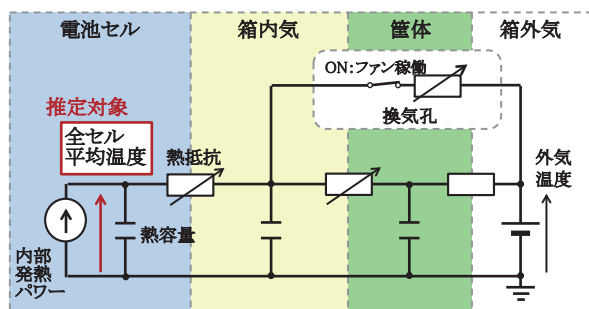


図1 鉄道車両向けバッテリー熱回路網の例

(2) ハイブリッド車両の走行シミュレーション

鉄道総研では運転曲線作成ソフト SPEEDY にエネルギー評価機能、ハイブリッド車両対応機能、運転ノッチ指定機能を付加した Hybrid SPEEDY²⁾を開発した。図2にこの Hybrid SPEEDY を用いて、燃料電池車両の走行シミュレーションを行い、水素消費量を試算した例を示す。ハイブリッド車両を設計する上で、導入した場合の省エネルギー効果やバッテリー容量などの仕様が十分かを事前に検討することに貢献することが期待される。

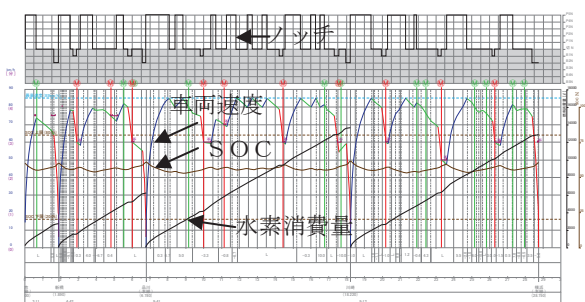


図2 Hybrid SPEEDY を用いた燃料電池車両走行シミュレーション例

(3) 燃料電池の劣化評価

燃料電池車両の実用化においては燃料電池の劣化評価が重要である。鉄道総研では試験電車で搭載した 100kW 級燃料電池を対象としてどのパラメータが劣化要因にもっとも相関が高いかの評価を行った³⁾。評価指標を一定の負荷電流における電圧維持率とし、約 10 年間使用した結果、電圧維持率は約 94%であった。最も相関が高い要因は起動停止回数であった。図3に電圧維持率と起動停止回数の劣化評価例を示す。

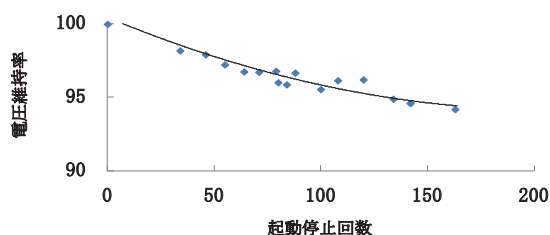


図3 燃料電池の劣化評価例

5. おわりに

これまでに開発されたハイブリッド車両はその構成・目的・目標はそれぞれ異なるが、いずれも従来の鉄道車両より品質が高い車両を目指したものである。

今後、JR 東日本からは豪華列車「TRAIN SUITE 四季島」が架線とディーゼルエンジンによる「バイモード」車両として 2017 年に、JR 西日本からは豪華列車「TWILIGHT EXPRESS 瑞風」がディーゼル・バッテリーハイブリッド車両として同じく 2017 年に登場することがアナウンスされている。また、交流区間～非電化区間直通運転用蓄電池電車が JR 東日本は男鹿線に、JR 九州は筑豊本線・若松線に登場させることが発表されている。このようにハイブリッド車両の営業運転はますます普及していくであろう。さらに、近畿車両からは架線集電とディーゼル・バッテリーハイブリッドの「HARMO」⁴⁾の登場が発表されている。これらの車両は従来のディーゼルカーや電車が主体であった鉄道システムに対して利便性や省エネルギー性の観点から大きな進歩をもたらすと同時により楽しい交通手段を提供するであろう。

また、2014 年末にトヨタから発売開始された燃料電池自動車「MIRAI」は鉄道システムにも大きな影響を与えたと考えられ、2015 年に入って、ALSTOM が HYDROGENICS の燃料電池を、中国中車が Ballard Power Systems の燃料電池を搭載した鉄道車両を 2020 年までに製作することをそれぞれ発表している。

鉄道総研においても「小型・軽量燃料電池システム」等の開発を進めると共に、水素を鉄道車両の燃料として使用するための各種法整備などを推進して燃料電池車両の実現によるエネルギー持続可能な鉄道システムの実現に尽力していきたい。

文献

- 1) 寺田篤人 他：蓄電池電車用リチウムイオン電池の熱回路網による温度上昇推定手法の検討，電気学会産業応用部門大会，pp.V-287-V-290，2015
- 2) 小川知行 他：汎用鉄道車両走行エネルギーシミュレータの開発，電気学会リニアドライブ／交通・電気鉄道合同研究会，LD-14-067／TER-14-030，2014
- 3) 山本貴光 他：試験電車で搭載した燃料電池の劣化要因の検討，電気学会産業応用部門大会，pp.V-189-V-192，2013
- 4) <http://www.kinkisharyo.co.jp/ja/news/news151120.htm>，(参照日 2016 年 1 月 18 日)