

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

架線・バッテリーハイブリッド電車による省エネ化

ブレーキをかける際にモーターから戻ってくる電力を再利用する電力回生は、鉄道が省エネである理由の1つです。電力回生による省エネ性をさらに高める可能性を持つのが、電車で駆動用のバッテリーを搭載した架線・バッテリーハイブリッド電車です。2014年には国内で営業車両も登場しました。今後は電力回生の性能を高速域で向上させるなど、より一層の省エネ化につながる技術にも期待できます。架線・バッテリーハイブリッド電車による省エネ化のからくり、実車でのエネルギー消費改善例、国内外の最近の動向を紹介します。



田口 義晃
Yoshiaki Taguchi
車両制御技術研究部
駆動制御研究室
副主任研究員
[専門分野]蓄電媒体の
特性研究と蓄電車両の
開発



門脇 悟志
Satoshi Kadowaki
車両制御技術研究部
駆動制御研究室
副主任研究員
[専門分野]蓄電車両の
運動解析、エネルギー
とコスト分析



小笠 正道
Masamichi Ogasa
車両制御技術研究部
主管研究員
[専門分野]電気鉄道車
両の性能設計、回生有
効活用の研究、蓄電形
車両の開発

架線と車載バッテリーのハイブリッド化の意義と技術動向

(1) 回生電力の有効活用

電気鉄道における回生ブレーキは、ブレーキ中の電車が運動エネルギーを電気エネルギーに変え、近くを走行中の他の電車で架線を介して電力を供給するものです。電気エネルギーを有効活用して省エネ化に貢献しています。ただし、ブレーキをかける電車の近くに他の電車がいないと、架線に電力を返せない“回生ブレーキの失効（回生失効）”が発生します。

これに対し、近年の高性能バッテリーなど蓄電媒体を車載して架線との電源ハイブリッド化を行えば、架線に返せない電気エネルギーを自車の蓄電媒体に吸収して回生失効を防止し、力行時や補機電力用に再利用して本来の省エネ性能を確保できます。

非電化線でも、バッテリー走行して回生ブレーキを活用すれば省エネになります。費用面でも、安価な電気を用いることができるので、ディーゼル車と比較してエネルギー代の節約も可能です。

架線停電時の脱出走行、電化線と非電化線の相互直通運転による旅客利便

性の向上、車両運用の効率化、乗務員免許の一本化など、省エネ以外にも多くの効果が期待できます。

(2) バッテリー搭載による質量増加があっても省エネになる

バッテリーなど蓄電媒体とその充放電制御装置を搭載すると車両は重くなります。車両質量の増加はエネルギー増大につながるため好ましくありません。しかし、下記3つの理由で省エネ化が可能です。

①回生回収量が上回る

回生失効防止の観点からバッテリー搭載を検討する線区では、列車頻度があまり高くないので電力回生が望めないことが多いです。このような線区では質量増大による走行エネルギー増加よりも、回生ブレーキによる電気エネルギー回収量が上回るため、現行に比べて省エネとなります。また、電化自体が採算に合わないような列車密度の低い非電化短距離線では、バッテリー搭載形車両の導入による回生ブレーキの活用は有効な選択です。

②回生効率が高いほど質量増減の影響を受けにくい¹⁾

走行抵抗や回路損失の無い理想回生



図1 架線・バッテリーハイブリッド交流電車
(蓄電池電車試験車)の外観(提供写真)

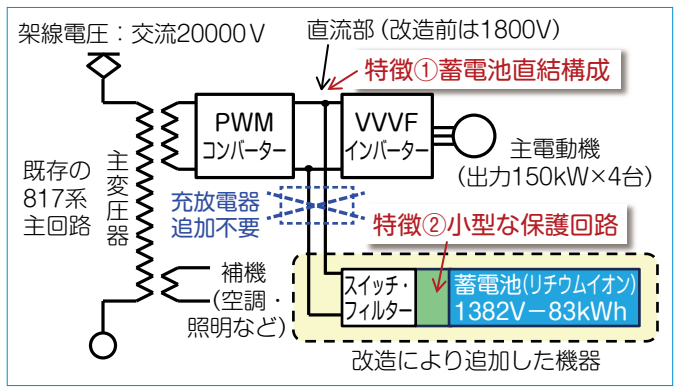


図2 架線・バッテリーハイブリッド交流電車(試験車)の
主回路構成

車では、質量と消費エネルギーが無関係になります。このような車両は実在しませんが、回生効率が高いほど、理想回生車に近づきます。つまり、回生効率の高い線区や車両では、質量増加ほどには消費エネルギーが増えません。逆に軽量化しても質量減少ほどには省エネにならないのです。

③高速域回生ブレーキパワー増大²⁾

現在の在来線鉄道では、高速から強いブレーキをかけた際、ブレーキエネルギーの一部しか架線側で処理できない設計となっています。残りのエネルギーは発電ブレーキか機械ブレーキで熱放散して処理します。この部分の回生ブレーキ化には、車載電機品のパワー増大と、増大したパワーを吸収する回生負荷が必要となります。

地上側で対処するには高密度線区でも600m程度ごとに蓄電ポストが必要となりますが、車載バッテリーならばこれを解決でき、回生量増大分がさらなる省エネ化につながります。新パワー素子適用などによる電機品小型化を前提に、今後の試みが期待されます。

(3) バッテリーの充電場所

従来から使われている架線というインフラを用いれば、車載バッテリーを容易に充電できます。

非電化線走行前後の電化線走行中に架線から車載バッテリーをゆっくり充電すると特別な充電設備は不要です。自動車の世界で「走行中に給電できる

クルマ」が実現するのはもう少し先とされますので、現時点では電気鉄道のみが有する特長な技術です。

あるいは充電所で停車中にパンタグラフを介して剛体架線(直流電化区間)や通常架線(交流電化区間)から急速充電を行うことも可能です。

(4) 鉄道総研における一連の開発

鉄道総研では1999年以降、架線と車載蓄電との電源ハイブリッド技術開発を研究テーマ化して進め、2002年には当時では最高となる電圧600V、エネルギー量33kWhのリチウムイオンバッテリー車載システム、架線とのハイブリッド制御アルゴリズム、充放電制御用チョッパー装置を開発しました。これらを搭載した中古路面電車「りっちい・とらみい」により、2003年には車載バッテリーのみで1充電での無給電走行距離17km、2005年には架線・バッテリーハイブリッド走行で回生効率40%以上を得ました。

2007年にはエネルギー量72kWhのリチウムイオンバッテリーを搭載したLRV「Hi-tram(ハイ!トラム)」が完成し、冬の札幌市内軌道線での走行で既存インバーター車と比べて10%以上の省エネ効果を得ました。

2009年にはJR予讃線で最高速度80km/hで走行し、1充電での無給電走行距離50km以上を実証済みです。

続く2011年以降の交流電車のバッテリーハイブリッド化開発や、2014

年夏の万葉線におけるHi-tram走行結果については、次章以降で紹介します。

(5) 国内外の動向

2010年代に入り、国内外でも架線集電と車載蓄電のハイブリッド電車の営業車が登場し始めました。

2014年3月にはJR烏山線で電圧630V、エネルギー量190kWhのリチウムイオンバッテリーを搭載した2両編成のバッテリー電車「ACCUM(アキュム)」が営業開始しました。

海外では主にLRTで導入が進んでいます。広州(Guangzhou)では2014年大みそかに全長36.5m、4連節車体の架線レスLRVによる距離7.7km、11停留場の路線が開業しています。

交流電化区間を走る電車の バッテリーハイブリッド化の 試み

(1) 非電化路線の省エネ化

現在、非電化路線での旅客輸送の主役はディーゼルエンジンで駆動する気動車です。化石燃料をエネルギー源とする気動車は、非電化路線の長距離走行には欠かせない存在です。しかし、老朽化した気動車については、省エネ性や排ガスなどの環境性能が課題になっています。

一般に気動車よりも電車の方がエネルギーの利用効率が高く省エネです。やや古い比較例³⁾を挙げると、交流電気機関車が駆動する際に、火力発電所

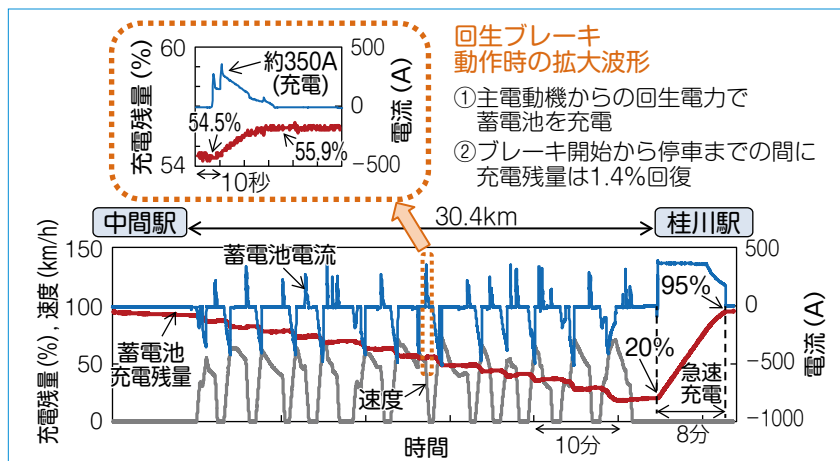


図3 蓄電池のみでの走行試験結果(空調を不使用とした場合)



図4 万葉線をバッテリーモードで走行するHi-tram(田澤元氏撮影)

で使用した燃料エネルギーが列車のけん引に使われる割合は28%、ディーゼル機関車が駆動する際は、燃料エネルギーがけん引に使われる割合は22%とされています。近年の電車は回生ブレーキの装備によって格段に省エネになっているため、この差はさらに拡大していると考えられます。このように、非電化路線を電化して電車を走らせれば省エネとなりますが、電化工事は高価です。そこで、架線・バッテリーハイブリッド電車があれば、電化することなく非電化路線に省エネな電車を導入でき、電化工事より安価になる可能性があります。

(2) 交流電車のバッテリーハイブリッド化

JR九州の在来線においては、営業キロの約47%が非電化であり、電化された在来線の約95%は交流電化です。そこで、交流電化路線で充電できる、架線・バッテリーハイブリッド交流電車(試験車)を開発しました(図1)。鉄道総研は、試験測定や主回路方式の開発⁴⁾、⁵⁾などの技術協力を行いました。

開発したハイブリッド主回路(図2)は、既存の近郊型交流電車(817系)の直流部に蓄電池システムを直結するシンプルな構成です。直結するためには、過去に鉄道車両用として例がない高電圧の蓄電池(試験車は1382V)を用い

る必要があります。電気的な安全を十分に確保しつつ小型化できる保護回路を開発しました。直結した蓄電池の充電や放電は既存の機器で制御可能とし、蓄電池用の新たな充放電器を不要とすることで主回路をコンパクトにしました。

このようにして蓄電池のためのスペースを最大限に確保した結果、エネルギー量83kWhの蓄電池を搭載できました。この試験車を使って2013年度の3シーズン(春・夏・冬)に合計46日間の走行試験を行い、消費電力量や蓄電池の持続性能、急速充電性能などを調べました。

(3) 主な走行試験結果

蓄電池のみで走行した結果の一例を図3に示します。春に空調を使わない条件下で、JR筑豊本線の30.4km(中間駅⇒桂川駅間)を蓄電池のみで走行しました。拡大部分は蓄電池にブレーキ時の回生電力が戻って充電残量⁶⁾が回復している様子です。回生電力を活用するおかげで高効率な走行になります。約50分走行して桂川駅に到着した際の充電残量は20%まで低下していますが、その後のわずか8分間の急速充電でほぼ満充電(95%)まで回復しています。

短時間で急速充電できるのは、内部

抵抗が小さいというリチウムイオン電池の長所のおかげです。内部抵抗が小さいほど、充電や放電の際に電池内部で生じる損失が減るため、発熱を減らし省エネ性にも寄与します。一方で電池内部での損失を減らすには、充電電流を小さくすることも効果的です。

リチウムイオン電池は低温になると内部抵抗が増加するので注意が必要です。満充電が近くなると、内部抵抗が大きい時ほど充電電流を大幅に減らす必要があります。39℃から充電を開始した図3では8分で充電完了しましたが、冬期に17℃から開始した場合は12分かかりました。

蓄電池のみで走行できる距離は、冷暖房や最高速度の条件によって変化します。一例として、冬に暖房が強く動作し、最高速度をできるだけ高くする最速運転とした場合には19.9kmまで短くなりました。搭載する蓄電池のエネルギー量を定める際には、こうした負荷の変動(最大値)も計算に入れる必要があります。

(4) 省エネ性向上と副次的効果

架線・バッテリーハイブリッド電車の省エネ性をさらに高める技術としては、高速からブレーキをかけた際の大きな回生電力を受け入れられる蓄電池

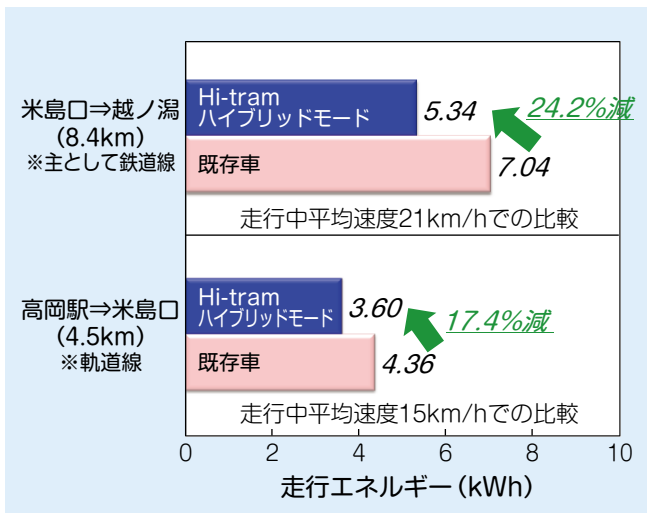


図5 走行エネルギーの低減効果

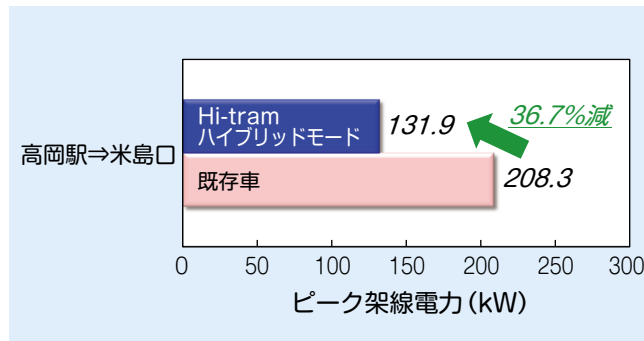


図6 ピーク架線電力の抑制効果

とすることや、冷暖房をはじめとする補機や主電動機の省エネ化が重要です。

こうして架線・バッテリーハイブリッド電車の省エネ性を高めれば、エネルギーコスト削減のような直接的な効果以外に、次のような副次的な効果が生まれます。①蓄電池のみで走れる現実的な距離は、現状の電池性能では平坦な路線で20～30km程度と考えられますが、これを延長できます。②電池の放電量が減れば充電にかかる時間が短くなります。③電池が寿命に至るまでの充放電回数は、放電が浅いほど増加するので、蓄電池の寿命⁷⁾が長くなります。このような効果を得るためにも、架線・バッテリーハイブリッド電車はできるだけ省エネな設計とすべきでしょう。

架線・バッテリーハイブリッドLRVの軌道線・鉄道線直通走行による省エネ効果

(1) 走行エネルギーの低減効果

富山県の万葉線において、省エネの推進、地域の公共交通への理解・関心の向上を目指し、2014年の夏にHi-tramの走行試験を行いました(図4)。図5は、走行中の平均速度が同じときの①Hi-tramハイブリッドモードと、②既存インバーター電車における

走行エネルギーの比較結果です。ここで、走行エネルギーとは照明や空調など補機エネルギーを除いた、走行に要した正味のエネルギーです。この結果、既存インバーター電車に対して、Hi-tramハイブリッドモードの方が最大で24%の省エネ効果を得ました⁸⁾。

(2) ピーク架線電力の抑制効果

東日本大震災以降、特に夏場のピーク電力カットが求められています。鉄道においても例外ではなく、こうした要請に対してHi-tramはハイブリッド走行により、変電所のピーク電力を抑えることが可能です。つまり、架線からの集電電流を制限することでハイブリッド制御が働き、不足するエネルギーは車載したバッテリーからアシストされ、車両性能を落とさずにピーク電力カットを実現できるのです。

図6は、高岡駅⇒米島口間における①Hi-tramハイブリッドモードで架線からの集電電流を200Aに制限したときと、②既存インバーター電車のピーク架線電力の比較結果です。既存車に対して、今回のハイブリッド設定ではピーク架線電力を37%抑制できました。既に架線がある区間でもこのようなハイブリッド車両を投入することで、変電所のピーク電力カットに寄与できることがわかります。

おわりに

バッテリーを車載することで省エネ化を実現できる例として、架線・バッテリーハイブリッド電車の技術を紹介しました。今後もこの種の車両が増え、省エネ化に貢献することが期待されます。[RRR]

文献

- 1) 小笠, 田口, 門脇, 仲村: バッテリーLRVの鉄道線走行エネルギー, RRR, Vol.69, No.5, pp.16-19, 2012
- 2) 小笠, 山本: 鉄道車両のエネルギー蓄積, RRR, Vol.59, No.9, pp.20-23, 2002
- 3) 電気学会編: 電気鉄道(第二次改訂版), p.9, 電気学会, 1978
- 4) 田口, 門脇, 仲村, 三木, 畠田, 有田: 交流電化区間に対応した蓄電池電車主回路の開発と走行試験による蓄電池性能評価, 鉄道総研報告, Vol.28, No.7, pp.17-22, 2014
- 5) 田口, 畠田, 金子, 木村: 交流電車の蓄電池電車化に向けた主回路方式の開発, 電気学会論文誌D部門, Vol.135, No.4, pp.403-410, 2015
- 6) 田口, 小笠: 架線ハイブリッド電車用リチウムイオン電池の充電率推定手法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.10, pp.35-40, 2012
- 7) 三木, 田口: 車両駆動用リチウムイオン蓄電池の長寿命化手法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.2, pp.5-10, 2015
- 8) 門脇, 田口, 三木, 小笠: 万葉線におけるハイブリッドLRVのエネルギー低減効果, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料, TER-15-027/LD-15-018, pp.1-6, 2015