

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

バッテリーLRVの 鉄道線走行エネルギー

鉄道が省エネな理由の1つに架線を使った電力回生があります。架線区間を走行する電車にもバッテリーを車載することで、回生ブレーキの失効防止によるさらなる省エネ化や、非電化線の走行が可能となります。バッテリーLRVが鉄道線を走行した場合のエネルギー消費はどの程度の量でしょうか。軌道線走行時と比較したエネルギー消費量や消費原単位などを紹介します。



小笠 正道
Masamichi Ogasa
車両制御技術研究部
部長
【専門分野】回生有効活用の研究と蓄電車両の開発



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
前 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



仲村 孝行
Takayuki Nakamura
車両制御技術研究部
駆動制御研究室
研究員
【専門分野】電磁機器の小型軽量化の開発

はじめに

鉄道が省エネルギーな理由の1つに、“電力回生ブレーキ”による運動エネルギーの回収再利用があります。これ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に架線を介して電力を供給するものです。そのため、ブレーキをかける電車の近くに他の電車が居ない場合、例えば早朝深夜や閑散線区などでは、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。

架線と車載バッテリーによるハイブリッド電源車両（電力リサイクル車両）は、電化区間での回生失効を防止してエネルギーを回収再利用することによる省エネ化や、バッテリー走行による架線レス化、さらには電化／非電化区間の相互直通運転を実現します。

ここでは架線・バッテリーハイブリッドLRVによる鉄道線走行時のエネルギー消費量について紹介します。どれだけのエネルギーが使われるのか、エネルギー消費原単位はどうだったかの実態がお分かり頂けます。

バッテリーを車載する際の質量増加の考慮

○バッテリー搭載で質量が増加するの に省エネになる？

バッテリーなどの蓄電装置を車載すると、車両の質量が増加します。車両の質量増加はエネルギー消費量の増大につながります。しかしその増大分よりも、回生時に吸収して再利用するエネルギー増加分が上回るならば、現状に対して運行エネルギーは削減され、結果的に省エネルギーとなります。

○回生車では質量増加ほどにはエネルギー消費量は増大しない

鉄道線では走行抵抗が小さいため、平坦線区を比較的低速で走り、かつ頻繁に発進停止を繰り返す回生車両では、質量増加ほどにはエネルギー消費量が増大しない特長があります。これを簡単に説明すると以下ようになります。

走行抵抗や電気回路での損失が無視できるくらい小さいと仮定し、質量100の電車が力行時に100のエネルギーを使用したとします。回生が行われなければ、運動エネルギーとなった100のエネルギーはブレーキ時に、発電抵抗によるジュール熱または機械ブ

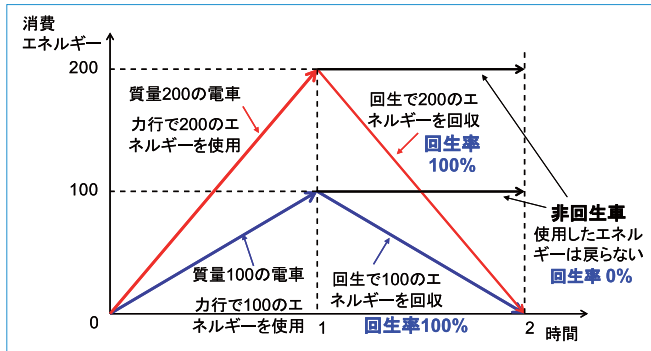


図1 回生車では質量増加ほどにはエネルギー消費量が増大しない



図2 LH02形架線・バッテリーハイブリッド(架線レス)LRV試験電車「Hi-tram(ハイ!トラム)」

ブレーキによる摩擦熱として全て放散消失されます。質量が2倍の200の場合は、200のエネルギーを力行時に使用して運動エネルギーが2倍となり、ブレーキ時にはそのエネルギーが全て消費されます。つまり質量100の場合の2倍のエネルギー消費量となります。

今ここで、走行抵抗や電気回路の損失が無い永久機関的な回生車両を仮想します(実際には存在し得ません)。質量100の電車が力行時に100のエネルギーを使用してそれが運動エネルギーとなった後、ブレーキ時にはその100のエネルギーが回生によって戻ってくるので、差し引きのエネルギー消費量はゼロとなります。質量が2倍になって200のエネルギーを力行時に使用しても回生時には200のエネルギーが戻ってきます。つまり、損失の無い回生車両では、質量と消費エネルギーが無関係となるのです(図1)。

実際の回生車両は、回生を全く行わない場合と無損失回生車両との中間の

エネルギー消費量となり、走行抵抗、電気回路損失や捕機使用による消費の影響を受けます。

このことから、回生車両では質量増加ほどにはエネルギー消費量が増えません。逆に、軽量化しても質量減少ほどにはエネルギー消費量が低減しない実状も説明できます。さらに言えば、回生割合が高いほど、質量増加の影響を打ち消す効果が高いことになります。

Hi-tram(ハイ!トラム)の鉄道線走行

○供試車両

LH02形架線・バッテリーハイブリッド(架線レス)LRV試験電車「Hi-tram(ハイ!トラム)」(図2)は2007年9月に落成しました。車両は車長12.9mの単車で一般的なボギー台車を用いた部分超低床車両です。4軸全てが電動軸で、実測結果では、停止から速度60km/hまで17秒、最高速度80km/hまで40秒で加速できる性能を備えています。直流1,500Vと直流600Vの複電圧架線に対応し、直流600Vの車載リチウムイオンバッテリー(エネルギー量72kWh)との電源ハイブリッド走行と、バッテリーのみの架線レス走行が可能です。2007年11月から2008年3月まで札幌市交通局の軌道線で、併用軌道の法定最高速度40km/hまでの走行を行い、バッテリー搭載による

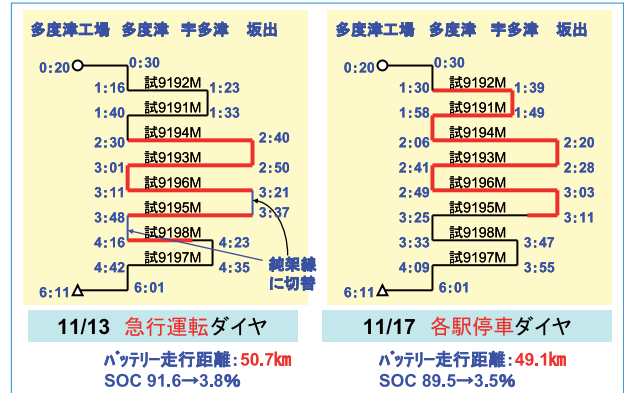


図3 走行ダイヤ(赤線はバッテリーのみからの電力供給)

省エネ効果を明らかにしました。

鉄道線走行の前に、軌道線(路面電車)と鉄道線(JRなどの在来鉄道)への乗り入れに必要な機器類を装備したところ、空車質量は27.3トンとなりました。2009年11月にJR四国の予讃線と高徳線を走行し、ハイブリッド動作やバッテリーのみでの非電化線走行、エネルギー消費量や回生効率などの性能を確認しました。

○走行条件

走行区間は主にJR予讃線の坂出～多度津間11.4kmの複線電化区間であり、速度80km/hまでの走行を実施しました。

走行ダイヤは、急行運転ダイヤと各駅停車ダイヤの2種類(図3)としました。

車載バッテリーはエネルギー容量18kWhの群が4群並列接続されており、いずれかの群のバッテリーセル端子電圧が2.5Vを下回ってから3秒継続した時点で、保護装置が動作してバッテリーが開放されます。走行開始からこの時点までを、バッテリー電力のみによる架線レス走行での1充電走行と定義してその距離を測定しました。

○急行パターン(速度維持・駅通過)によるバッテリー走行

急行運転ダイヤ(図3左)では、距離11.4kmを無停車で走行し、折り返し運転を行いました。なお、2回目の坂

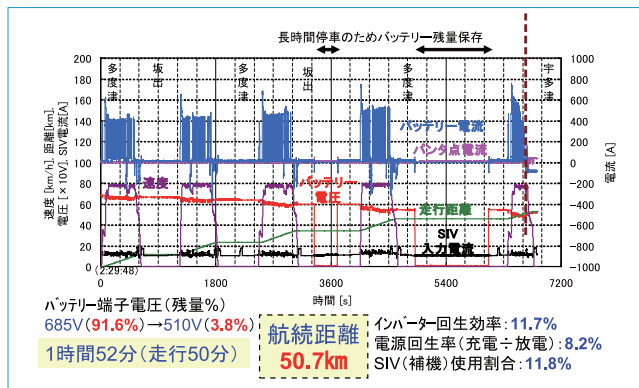


図4 急行パターン走行での1充電走行距離

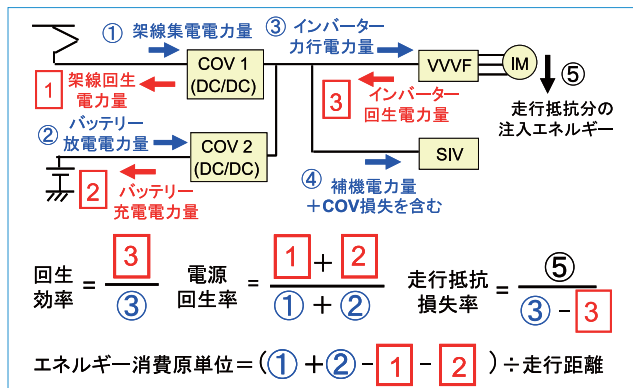


図5 エネルギーフローと各効率値の定義

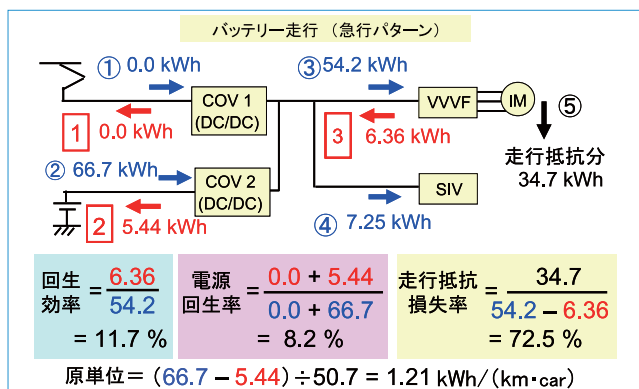


図6 急行パターン走行でのエネルギー消費量と回生効率

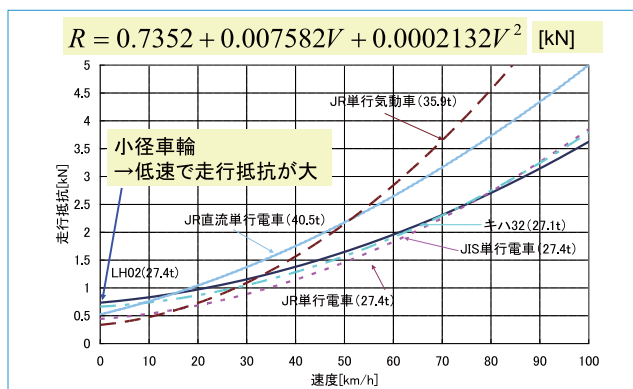


図7 LH02形 (Hi-tram) および他車の走行抵抗値

出駅折り返し16分間と2回目の多度津折り返し28分間については停車時間が長いことから、空調などの捕機電力によるバッテリー使用量が多大となるため、バッテリー残量を維持するために架線からの電力供給(純架線モード)に切替えました。それ以外は全てバッテリーからのエネルギーで賄いました。

駅出発後に一括ノッチで速度80km/hまで加速後、惰行して速度77km/hまで低下したら再力行し80km/hまで加速する運転を繰り返して、速度を維持しました。走行結果の例を示します。

①1充電走行距離：走行開始時のバッテリー開回路電圧685V、SOC (State of Charge：バッテリー残量) 値91.6%から開始し、保護装置動作時にはバッテリー開回路電圧510V、SOC値3.8%まで低下しました。走行時間は1時間52分で、折り返し時間を除く正味走行時間は50分、1充電走行距離50.7kmの値が得られました(図4)。

②エネルギー消費量：バッテリー端子でみた総放電量とバッテリーへの回生量から、正味の使用エネルギーが求められます。これを走行距離で割るとエネルギー消費原単位が算出できます。また電源回生率は電源への回生量を電源からの総供給量で割った値として、インバーター回生効率はインバーター端における回生量を力行量で割った値として算出します(図5)。その結果、回生効率11.7%、電源回生率8.2%、エネルギー消費原単位1.21kWh/(km・car)となりました(図6)。回生ブレーキが全く効かなかった状況を想定すると、エネルギー消費原単位は1.32kWh/(km・car)となります。電力回生によって9.2%の省エネ効果があったことが分かります。

③走行抵抗：惰行時の減速度から勾配を補正して走行抵抗式を算出しました(図7)。Hi-tramの走行抵抗値が低速で他の鉄道線車両に比べて高いのは、車輪径が小さいことによる影響で

す。走行抵抗式の定数項(速度ゼロにおける走行抵抗値)は車軸と軸受の摩擦抵抗に起因し、車輪径に反比例して大きくなることが知られています。速度80km/hでは他の車両とほとんど差がなくなります。

$$R = 0.7352 + 0.007582 \times V + 0.0002132 \times V^2$$

但、R：車両の走行抵抗値[kN]、
V：列車速度[km/h]

この式に基づいて計算したところ、走行抵抗によるエネルギー損失は正味の駆動エネルギーに対し72.5%となりました。機械ブレーキがほとんど入らないことから、残りの27.5%は「駆動インバーターと主電動機による損失」と「走行開始場所とバッテリー走行終了場所の高低差による位置エネルギー」の和となります。

○各停パターン(惰行活用・各駅停車)によるバッテリー走行

各駅停車ダイヤ(図3右)により、速

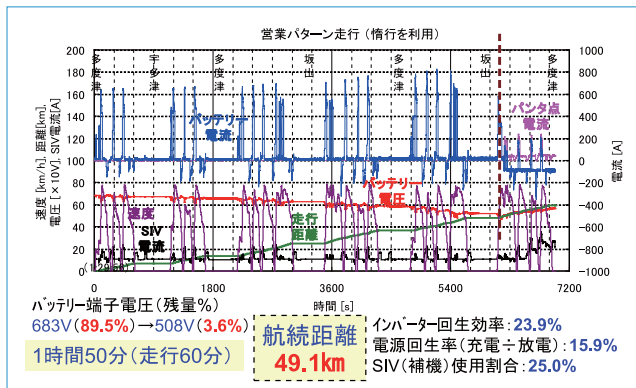


図8 各停パターン走行での1充電走行距離

度80km/hまで力行後、なるべく惰行して次駅手前で回生ブレーキを動作する運転により走行しました。走行結果の例を示します。

①1充電走行距離：折返し時間を除く正味走行時間は60分、1充電走行距離49.1kmの値が得られました(図8)。

②エネルギー消費量：電源回生率15.9%，インバータ回生効率23.9%，エネルギー消費原単位1.18kWh/(km・car)の値が得られました(図9)。回生ブレーキが全く効かなかった状態を想定すると、エネルギー消費原単位は1.40kWh/(km・car)となります。電力回生によって16%の省エネ効果があったことが分かります。

③走行抵抗：走行抵抗によるエネルギー損失は、正味駆動エネルギーに対し、65.5%となりました。

○急行パターンと各停パターンのエネルギー消費比較

全日程における各走行パターンでの平均値から、エネルギー消費の傾向を比較しました。

①インバータ力行電力量は、急行パターンでは79kWh、各停パターンでは103kWhでした。急行パターンの方が少ないのは、停車しないことにより加速時間の割合が少ないことに起因します。

②回生電力量は、急行パターンでは10kWh、各停パターンでは30kWhでした。急行パターンの方が少ないのは、

単純にブレーキ回数が少ないことによります。

③正味のインバータ使用電力量は、急行パターンの69kWhに対し各停パターンは、74kWhでした。平均速度は急行パターンの60.8km/hに対し営業パターンは49.1km/hと1.2倍でエネルギー消費が増える方向でしたが、急行パターンの停車回数は営業パターンの3割程度で済むことから、両要因が相殺されて、使用電力量の差が小さくなったものと考えられます。

④正味のエネルギー消費量のうち駆動用に70～80%程度、捕機用に10～25%程度使用されています。残りの5～10%程度がチョップ装置による変換損失となります。

⑤インバータ回生効率は、急行パターンで10～13%、営業パターンで26～28%でした。

○軌道線と鉄道線でのエネルギー消費比較

軌道線と鉄道線でのエネルギー消費概況を図10に示します。軌道線でのエネルギー消費原単位は1.62kWh/(km・car)でした。鉄道線では軌道線に比べて発進停止が少なく高速で走行することから、ブレーキ割合が減って回生効率は低下しますが、エネルギー消費原単位は低く抑えられ、

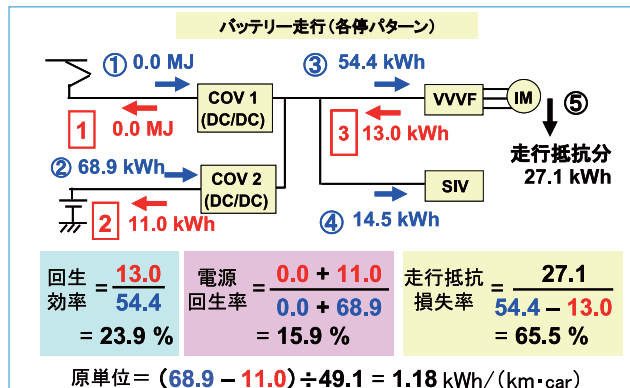


図9 各停パターン走行でのエネルギー消費量と回生効率

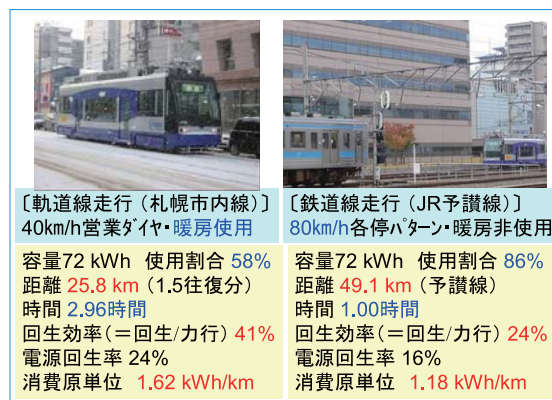


図10 1充電走行距離の比較(軌道線と鉄道線)

省エネルギーな走行となることが分かります。

おわりに

省エネをはじめ、多様な観点から回生機能の重要性が増していますが、回生車の導入量増加に伴い回生負荷の確保が重要です。車載または地上の蓄電装置は回生負荷として有用で、特に冒頭で触れたように、回生割合が高い車両ではバッテリー搭載による質量増加に伴うエネルギー消費の増大を低く抑えることができます。エネルギーの有効活用以外にも多くのメリットがあります。

本研究開発は、2008～2010年度にかけてのNEDO技術開発機構の委託に基づいて実施しました。当走行実施に当たりご尽力頂いた関係各位に深く感謝致します。[RRR]