

## [特別企画(ミニ講演+ポスター講演)(2)]

### フリー技術による軽やかな鉄道の実現

#### 架線フリー技術 (ハイ! トラム)

正 [電] ○小笠 正道 (鉄道総研)

#### Catenary free technology ("Hi-tram" as contact-wire/battery hybrid LRV)

Masamichi OGASA, Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

Contact-wire and on-board battery hybrid electric railway vehicle can be defined as electric energy source hybrid electric vehicle that can drive by the energy from either contact-wire collection or on-board storage battery or from both of energy, and that can return the regenerative brake energy to either or both of the two sources. Then it can reuse the regenerative electric energy effectively. And contact-wire-less electric drive is also available by the on-board battery stored energy in non-electrified lines.

We carried out the development and fabrication of a contact-wire and on-board battery hybrid light rail vehicle, and data acquisition of the running tests on the tram line at Sapporo City Transportation Bureau and on the railway main line at JR Shikoku, such as one charge running distance by catenary free operation, comparison of the consumed energy against the conventional type of inverter vehicles by hybrid running.

In this paper, we reports on the running test results of our new contact-wire and battery hybrid LRV.

**Keywords:** catenary free, contact-wire-less, hybrid, lithium ion battery, energy saving, Light Rail Vehicle

#### 1. はじめに

架線レス LRV (架線・バッテリーハイブリッド LRV) 「Hi-tram (ハイ! トラム)」は、架線または車載リチウムイオン二次電池のいずれか、またはその両方から駆動エネルギーを得て走行し、またブレーキ時の回生エネルギーを上記電源のいずれかまたはその両方に返還することでエネルギーの有効活用が可能な、電源ハイブリッド型 LRV である。

バッテリーに回収蓄積されたエネルギーは加速時等に再利用される。バッテリーと充放電器の搭載による重量増加に伴う消費エネルギー増大に対し、回収できるエネルギー増加量が上回れば省エネになる。さらに無架線区間では、バッテリーのみのエネルギーによる架線レス走行が可能 (図 1) で、都市景観の改善に寄与できる。

車両構成と走行結果について概説する。

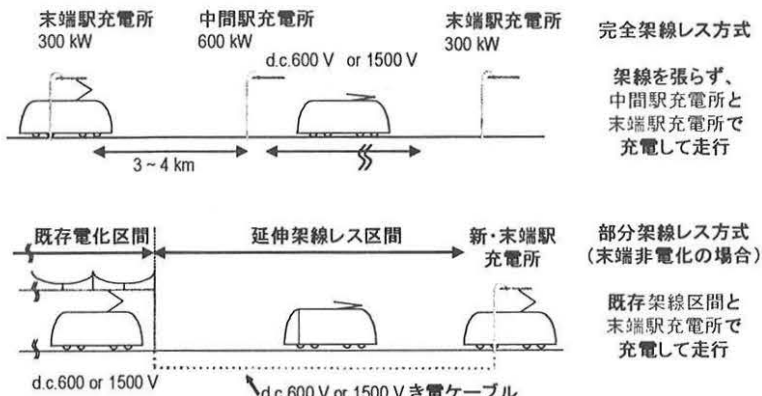


図 1 架線レス走行のイメージ

#### 2. 架線・バッテリーハイブリッド電車のメリット<sup>(1)</sup>

##### 2.1 架線・バッテリーハイブリッド走行の意義

###### (1) 環境面

回生負荷に起因する回生失効や回生絞込みを低減し、架線に返せない回生エネルギーを車載バッテリーに蓄電して再利用することで、エネルギーの有効活用による省エネルギー化が図られる。

摩擦ブレーキ使用割合の減少による摩耗粉塵低減や不快なきしり音低減も可能である。

###### (2) サービス面・運用面

回生失効や回生絞込みの低減により、回生ブレーキ信頼性の向上が可能となる。

摩擦ブレーキ使用割合減少で、ブレーキシュー (制輪子) 交換頻度低減、車輪熱亀裂、凹摩耗の抑制に役立つ。

また、き電抵抗とパンタ点上限電圧制限による架線授受可能パワーを超える電気パワーを車両駆動系に持たせることが可能である。その結果、高速域で設計上増大する電気パワーを車載バッテリーで負担することで、架線と授受するパワーを抑えながら加速アシストによる時分短縮を実現したり、ブレーキ時の高速から停止までの回生ブレーキ分担率を向上したりできる。

変電所のピークパワー低減や地上設備増強なしに架線電圧低下の防止も可能である。

###### (3) 建設・保守面

電気エネルギーで一元化されており、同じハイブリッドでもエンジン方式や燃料電池方式と異なり、液体燃料 (軽油) や気体燃料 (水素) を扱わないので保守が容易である。

パンタグラフ上昇によって架線からの充電が容易であり、蓄電残量調整によるエネルギー管理を行い易い。将来的には電気バスや電気トラックなどとの充電所の兼用も想定できる。

## 2.2 架線レス走行の意義

### (1) 環境面

電気駆動のため排ガスを出さない走行が可能であり、エンジン方式に比べて街中の低公害化が図られる。

パンタグラフの摺動音が気になる箇所や、架線と帰線レールに流れる高調波が課題となる箇所では、集電を行わずに走行することで課題を解決できる。

また、場所により架線敷設を省略することで、都市景観の保全、改善が可能となり、観光資源価値の向上に寄与することができる。

### (2) サービス面・運用面

無架線区間や、架線区間でも電圧の異なる直流電化区間や交流電化区間へは、バッテリー駆動による乗入れ走行を行なうことで、電源面での直通運用（インターオペラビリティ）が可能となる。その結果、乗換え低減による旅客利便性向上が見込まれる。

また、架線停電などの非常時には、自車バッテリーの電力による自力移動が可能のため、旅客閉じ込め防止も可能となる。

### (3) 建設・保守面

架線設置設備費用の低減や、架線設備保守のための費用低減が見込まれる。

また、上下寸法が狭小な場所で架線高さの問題から線路敷設ができない場合がある。このような場所でバッテリー走行を前提とすれば新たな路線建設が可能となり、公共交通ネットワークの拡充に役立つ。

併用軌道の交差点では、架線設備の高さが大型自動車の走行を妨げている実例があり、自動車交通阻害防止の観点から交差点だけでも架線をはずすことは有効である。

## 3. LRV 試験電車の概要<sup>(1)</sup>

### 3.1 愛称

愛称は、架線電源と車載バッテリー電源による Hybrid の H、電化線と非電化線、鉄道線と軌道線を直通運用できる Interoperable の I の頭文字を取り、また高い加減速度による元気な走行を期して、「Hi-tram（ハイ！トラム）」と命名された。

### 3.2 車両構成

主要諸元を表 1 に示す。

車両は、車長 12.9m の単車体で、一般的なボギー台車を用いた超低床車両である（図 2）。レール面からの乗降口および床面高さは 350mm、超低床部はスロープのな

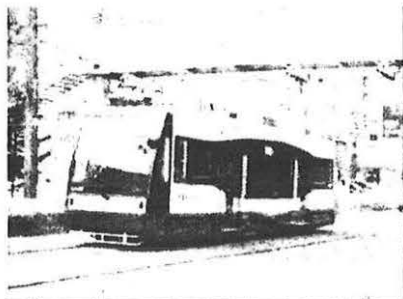
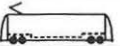


図 2 バッテリー走行中のハイ！トラム（2008.03.06）

表 1 主要諸元

| Item                        | Specification of 'Hi-tram'                                                                                                                          |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| train set                   | single car                                                       |
| type                        | LH02                                                                                                                                                |
| passenger capacity          | 44 persons (seat: 20 persons including foldable seat)                                                                                               |
| weight (tare)               | 27.0 ton                                                                                                                                            |
| size                        | length 12,900 mm                                                                                                                                    |
|                             | width 2,230 mm                                                                                                                                      |
|                             | height 3,800mm (current collector folded)                                                                                                           |
|                             | floor height 350mm (low floor part) from rail surface                                                                                               |
| supply power                | dc 1500 V / dc 600 V<br>and on-board battery dc 600 V                                                                                               |
| vehicle performance         | maximum operating speed 40 km/h (on-street line)                                                                                                    |
|                             | maximum operating speed 80 km/h (railway main line)                                                                                                 |
|                             | acceleration: 1.1 m/s <sup>2</sup> (4.0 km/h/s)                                                                                                     |
|                             | deceleration: service braking 1.3 m/s <sup>2</sup> (4.6 km/h/s)                                                                                     |
|                             | emergency braking 1.4 m/s <sup>2</sup> (5.0 km/h/s)                                                                                                 |
| main secondary battery      | preventive braking 1.4 m/s <sup>2</sup> (5.0 km/h/s)                                                                                                |
|                             | lithium ion rechargeable battery<br>(lithium manganese oxidized positive actual material)<br>(rated voltage of dc 605 V, energy capacity of 120 Ah) |
| current controller          | IGBT-VVVF inverter 1C2M (150kVA) × 2 units<br>IGBT-current reversible chopper (600 kW) × 2 units                                                    |
| bogie (leverage ratio 5.14) | coil spring in-direct mounted bolster type                                                                                                          |
|                             | * gauge 1,067mm                                                                                                                                     |
|                             | * monoblock wheel (diameter of 660 mm)                                                                                                              |
|                             | * 1st axle: measuring wheelset for wheel/rail contact force                                                                                         |
|                             | * 2nd,3rd,4th axles: with earthing brushes to axle boxes                                                                                            |
| braking system              | * 1st, 4th axles: with jetting device<br>(for adhesion improvement materials)                                                                       |
|                             | length: 2,553 mm (including jetting device)                                                                                                         |
| traction motor              | width: 2,200 mm, height: 661 mm                                                                                                                     |
|                             | electric command pneumatic brake with regenerative function for contact-wire/on-board storage                                                       |
| auxiliary power supply      | three phase induction motor 60kW × 4 units                                                                                                          |
| current collector           | static inverter type:                                                                                                                               |
|                             | * single phase ac 100 V (3 kVA)                                                                                                                     |
|                             | * three phase ac 200 V (28 kVA)                                                                                                                     |
|                             | * dc 100 V (2 kW)                                                                                                                                   |
| air compressor              | * dc 24 V (6 kW)                                                                                                                                    |
|                             | single arm current collector with spring rise and air descent                                                                                       |
| supply select operation     | mode selecting switch<br>(1500 V mode <-> 600 V battery mode <-> 600 V mode)                                                                        |

いフルフラット構成である。4 軸全てが電動軸で、空転滑走を抑制しつつ、自動車交通を妨げない高い加減速度を確保している。また、鉄道線走行を可能とするため、最高速度 80km/h の性能を有している。

バッテリーは定格電流の 20 倍電流による急速充放電が可能なマンガン系リチウムイオン二次電池で、定格 600V・120Ah (72kWh)、冷却系や遮断器等の保護システムも全て含めて約 2 トンの質量である。車両前後端のスラント部から優先的にモジュールを配置し、残りを乗務員席近傍に配置した。

### 3.3 主回路構成と制御

開発した LRV 試験電車は、直流 1500V と 600V の複電圧架線に対応し、車載リチウムイオンバッテリー 600V のハイブリッド構成を取るコンバータ・インバータシステム（図 3）である。

コンバータは架線側チョップ Conv1 とバッテリー側チョップ Conv2 から成り、中間回路電圧は 750V 基準に制御され、負荷側機器は全て低圧対応である。運転台のモード切替スイッチ（1500V モード、バッテリーモード、600V モードのいずれかを選択）を扱うことで、Conv1 は DCPT1-1 で検出された電圧が所定範囲内ならば選択されたモードに該当する接触器を閉じる。

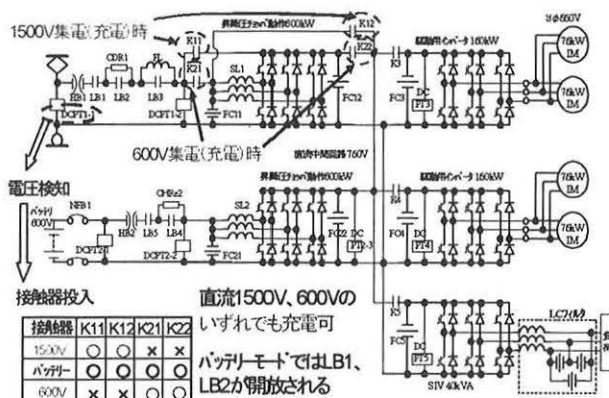
例えば、1500V 架線対応（ハイブリッドを含む）時には

接触器 K11 と K12 が閉じ、Conv1 は中間回路電圧 750V まで降圧動作を行う。600V 架線対応時には K21 と K22 が閉じ、Conv1 は昇圧動作を行う。中間回路電圧は主として Conv2 により 750V を目標値として制御される。

力行時や回生時には、架線電圧または中間回路電圧が所定値に達した段階でバッテリーとのパワー授受が開始される。架線電流リミッタの設定で、架線と授受する電流を希望値以下に抑制する設定も可能である。また、バッテリー電圧が所定範囲を超えるとバッテリー電流 100A 程度による緩慢充電を行ない、バッテリー残量の自動調整を行なう。これを調整充電と称している。

なお、急速充電設備のある駅、停留所では運転台の急速充電ボタンを押すことでバッテリー充電電流 1000A の停車中充電が可能である。

この回路構成により、直流 1500V き電の鉄道線への乗入走行が可能となっている。



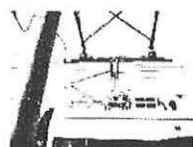
架線電圧ゼロの時に逆起動のない安全な構成

図3 複電圧架線・バッテリーハイブリッド主回路構成

#### 4. 急速充電（所内試験）<sup>(2)</sup>

停留場に見立てた長さ 3m の剛体架線下で停車中の LRV へパンタグラフを介して、急速充電を行った（図4）。

路線途中の停留場での充電を模擬したバッテリー電流 1,000A で 60 秒間の充電では、空調使用も見込んで約 4km 相当の走行エネルギーを充電できた。また、折返し駅を模擬した電流 500A 3分の充電では、約 6km 相当の充電が可能であった（表2）。



3m長の剛体架線(1500V)からパンタグラフを介して、停車中LRVのバッテリーを急速充電

図4 1500V 剛体架線からの 600kW 急速充電

表2 急速充電で充填できた走行電力量

| バッテリー充電電流と継続時間 | バッテリー端子での充電電力量       | 1急速充電当りの走行距離<br>(空調なしの場合) | 1急速充電当りの走行距離<br>(空調最大負荷時) |
|----------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1000A × 61秒    | 35.6MJ<br>(容量の13.7%) | 7.9km 相当                  | 4.0km 以上                  |
| 500A × 3分16秒   | 56.9MJ<br>(容量の21.9%) | 12.7km 相当                 | 6.4km 以上                  |

#### 5. 軌道線走行（札幌市交通局軌道線）<sup>(1)</sup>

##### 5.1 概要

2007年11月22日から2008年3月7日までの間、延べ40日に亘り札幌市交通局軌道線で本線走行を行った。

期間中の電車事業所構内も含む総走行距離は2,196km、本線走行距離は2,083kmで、うちバッテリー走行分が413km（約20%）であった。

片道8.5kmの路線1.5往復（入庫分を併せると25.8km）を基本単位として1日当り3往復または4.5往復の試験を行った。架線・バッテリーハイブリッドモードを基本としており、直流600V架線では、フルノッチを取った時に本来必要となる架線電流700Aに対して架線電流を200Aに抑制し、それを超える500Aに相当する駆動パワーは全てバッテリーから供給した。変電所から取る電流を抑制しつつ高加減速を実現できた。

##### 5.2 バッテリーのみの無給電走行

空調暖房（平均外気温マイナス2℃時に空調温度20℃設定）動作状態で距離25.8kmの値を得た（図5）。バッテリー容量72kWhの58%（42kWh）を使用、約3時間で走行した。

このときの駆動インバータの回生効率（回生電力量を力行電力量で除した値）は41%で、最も良い山手線級のエネルギー回収率を実現できた。

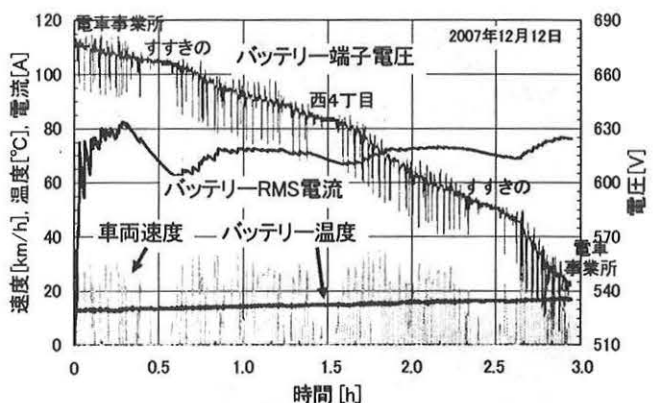


図5 軌道営業線でのバッテリー1充電走行（無給電走行距離1.5往復=25.8km）

##### 5.2 ハイブリッド走行による省エネ効果

架線・バッテリーハイブリッド走行1往復の1例における消費電力量内訳を図7に示す。

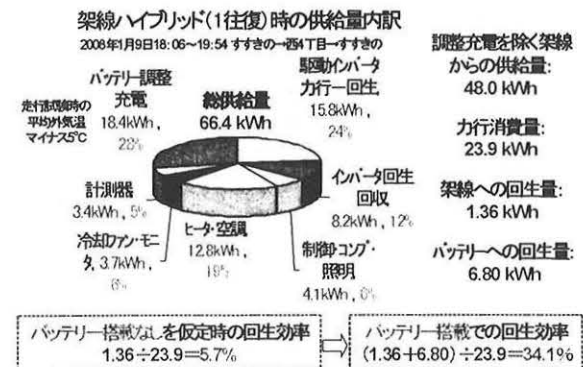


図7 バッテリー搭載による回生失効防止の有効性

空調暖房 20℃設定状況下での走行で、電源回生率（回生電力量を力行電力量と補機電力量の和で除したもの）が 17.0%、インバータ回生効率が 34.1%であった。空調使用状況下でも電力回生で 1～2 割の省エネとなっている。

バッテリーが搭載されていなかったと仮定した場合、電源回生は架線のみとなるため、バッテリーへの回生電力量を除いて算出すると、電源回生率が 2.84%、インバータ回生効率が 5.69%にまで低下する。結果として、1 往復での調整充電分を除く架線からの供給電力量 48kWh のうちバッテリーへの回生電力量 6.8kWh すなわち 14%のエネルギー削減が実現されたことになる。バッテリー搭載による回生失効防止効果が得られている。

## 6. 鉄道線走行（JR 四国予讃線）

2009 年 11 月に、JR 四国予讃線の多度津～坂出間で、営業時間帯を避け深夜の走行試験を実施した（図 8）。

Q/P 値、蛇行動の有無、台車各部の応力、軸受温度や歯車箱温度などを監視しながら速度向上試験を行い、最終的に速度 80km/h での走行に問題ないことを確認した。また、その後引き続き、速度 80km/h 走行ダイヤに基づいて、車体応力確認や、バッテリー 1 充電航続距離についても試験測定を実施した。

図 9 には、深夜で近傍に負荷車両が無く架線電圧が 1700V 程度まで上昇している状況下での架線・バッテリーハイブリッド走行を行なったときの状況を示している。



図 8 ホームで発車を待つ Hi-tram  
(2009.11.07 at. 多度津駅)

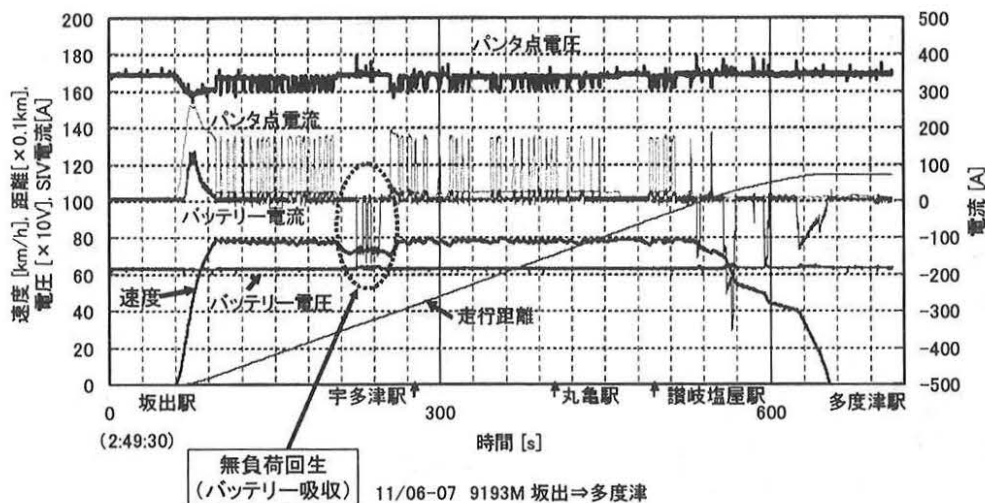


図 9 速度 80km/h での鉄道線走行

坂出駅出発後、一括力行ノッチで速度 80km/h まで加速後、惰行して速度が 77km/h まで低下したら再力行して 80km/h まで加速して惰行する、という運転を繰返し、速度を維持して走行した。力行直後からパンタ点電圧が急低下するものの閾値に達すると架線電圧低下を抑制するべくバッテリーから加速アシストが行われている。

宇多津駅直前的高架線下り勾配でブレーキノッチを取った際には、回生負荷が無いためパンタ点電圧が最大 1800V 近くまで急上昇するものの、パンタ点電圧上昇開始直後にバッテリーへの回生電流引込み動作が開始されており、パンタ点電圧はすぐに 1700V 程度に抑えられている。比較的高い速度から、空気ブレーキ補足なしで回生ブレーキのみでの減速が可能であった。

## 7. 終わりに

結論は以下のとおりである。

- (1) 充電パワー 600kW の急速充電機能を持つ、直流 1500V と 600V に対応可能な複電圧架線および電圧 600V でエネルギー容量 72kWh の車載リチウムイオンバッテリーによる電源ハイブリッド LRV を開発した。
- (2) 札幌市交通局軌道線における営業ダイヤによる走行を実施し、架線レス走行では、暖房併用時の 1 充電走行距離 25km 以上、回生効率（回生電力量を力行電力量で除した値）40%以上の値を得た。
- (3) 軌道線での架線・バッテリーハイブリッド走行では、バッテリー搭載による回生失効防止の有効性として、バッテリー搭載が無かったとした場合に比べて 14%の消費エネルギー量削減を実現した。
- (4) JR 予讃線での走行を実施し、最高速度 80km/h での走行と電源ハイブリッド制御による回生失効防止機能を確認した。これにより、JR 線など鉄道線へ乗入れるトラムトレインとしての走行が可能なことを実証した。

今後は、公共交通活性化に向けての在来鉄道と都市内鉄道の連携、相互直通乗入れ、そのための低床トラムトレイン車両といった開発ニーズへの対応も必要となってくるであろう。「Hi-tram (ハイ！トラム)」は、そのようなニーズに応えるための技術開発の第 1 歩でもある。

なお、本研究開発は 2005～2007 年度および 2008～2010 年度にかけての NEDO 委託により実施した。

試験フィールドを提供頂いた、札幌市交通局、JR 四国、ならびに関係各位に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 小笠・田口・大江・甘日出・末包・門脇・仲村，「架線・バッテリーハイブリッド LRV の軌道線走行試験結果概要」，平成 20 年電気学会産業応用部門大会 3・18，pp.187～190，(Aug.2008)
- 2) 小笠・田口・末包・前橋・鬼束・菅原，「架線レス LRV の停車中急速充電システムの開発」，鉄道総研報告 Vol.22，No.9，pp.35～40，(Sep.2008)