

架線・ハイブリッド(架線レス)LRV“ハイ！トラム(Hi-tram)”の高速走行台上試験結果

○ [機] 末包 洋士 [電] 田口 義晃 [電] 仲村 孝行

[電] 小笠 正道 (鉄道総合技術研究所)

High-Speed Running Experimental Results on Rolling Stock Test Stand of “Hi-tram” LRV
with Trolley and Battery Hybrid (Contact-Wire-Less) Technology

○Hiroshi Suekane, Yoshiaki Taguchi, Takayuki Nakamura

Masamichi Ogasa, (Railway Technical Research Institute)

We experimented the vehicle performance in the high-speed region up to 80km/h of the Light Rail Vehicle “Hi-tram” on our rolling stock test stand. We obtain the data of temperature characteristics of mounted equipment and the regenerative ratio by continuous test running with the repetition of a basic pattern. We ensured the enough driving performance in the existed suburban lines. In this paper, we report on the above mentioned results.

キーワード：LRV，バッテリー，ハイブリッド，車両試験台，高速走行

Key Words：LRV, battery, hybrid, rolling stock test stand, high-speed running

1. はじめに

鉄道総研が開発したLRV「ハイ！トラム」は、直流1500V、600V区間においては架線とバッテリーのハイブリッド、非電化区間においては、バッテリーのみのエネルギーによって、3種類の電源区間への相互乗り入れが可能な複電圧架線・バッテリーハイブリッド車両である。2007年11月から2008年3月まで札幌市交通局での走行試験を通して、直流600V軌道線における「ハイ！トラム」の車両性能確認を行い、既存車両に比べて省エネルギー車両であることを確認した^{1),2)}。軌道線では速度40km/hの制限が定められており、鉄道線走行への前段として、鉄道総研所内の車両試験台において、80km/hまでの速度向上試験及び基本走行パターンによる連続走行試験を行った。そこで車両駆動性能、エネルギー回収率、各機器温度特性のデータ取得を行った。本論文では、その試験結果について報告する。

2. 試験設備

車両側のモータで駆動し、軌条輪側で負荷を吸収する役目となる。本試験で使用した軌条輪設備概要を図1に示す。連動軸により、軌条輪が接続されているため、フライホイ

ールは2基使用した。フライホイールによる負荷を23.5t軌条輪の質量各1tとして、合計27.5tの等価質量とした。また、騒音防止のため、試験車庫内シャッターを閉じた無風状態で行った。試験期間中の平均外気温は31℃であった。

車体端部の固定はユニバーサルジョイントに製作した治具を連結し車両側は連結ピンで固定した。連結部高さは675mmとした。図2にその様子を示す。

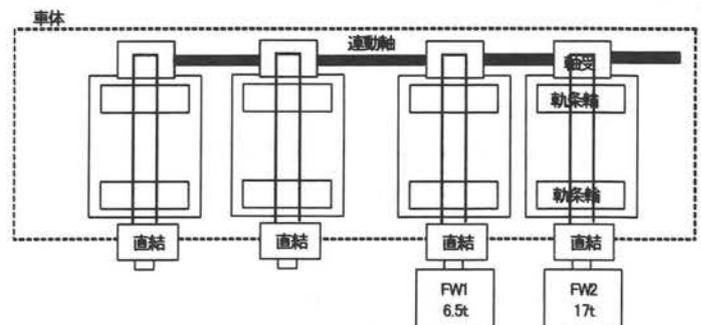


図1 軌条輪設備概要図

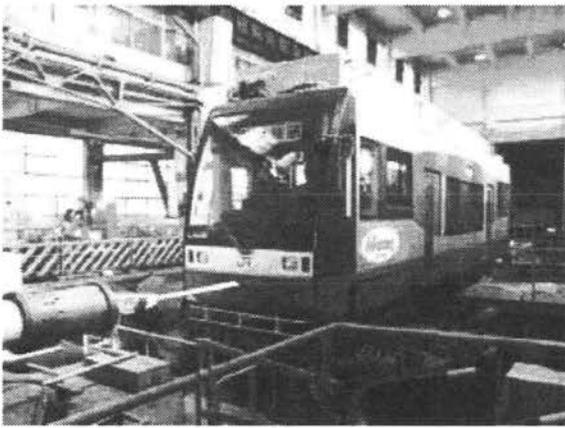


図2 旧車両試験台への固定状態

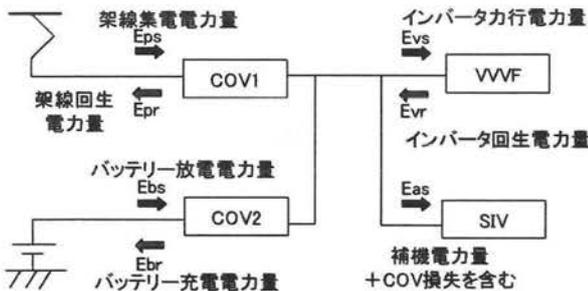


図3 ハイ！トラムエネルギーフロー

3. エネルギーフロー

消費電力量把握のため、架線・バッテリーハイブリッド車ハイ！トラムのエネルギーフローを図3に示す³⁾。ここで回生効率 η_v は(1)式で、電源回生率は η_s は(2)式で定義する。ただし記号は図3に準ずる。

$$\eta_v = \frac{E_{vr}}{E_{vs}} \tag{1}$$

$$\eta_s = \frac{E_{pr} + E_{br}}{E_{ps} + E_{bs}} \tag{2}$$

4. 台上試験における確認項目

台上試験では最高速度試験、1500Vハイブリッドモード試験、バッテリーモード試験の3項目について測定による確認を行った。以下に試験条件について記す。

4.1. 最高速度試験

ハイ！トラムの80km/hまでの速度向上試験を行った。走行パターンは「力行(80km/h)」-「惰行(80km/h→70km/h)」-「ブレーキ(70km/hから常用最大B7ノッチ)」である。

4.2. 1500Vハイブリッドモード試験

鉄道線での走行を等価的に模擬した基本走行パターンによる連続走行試験を行った。10パターン繰返し後に数分停車し、例えば単線区間における行違い等を模擬した。走行パターンは「力行(80km/h)」-「惰行(80km/h→70km/h)」-「ブレーキ(70km/hからB4ノッチ)」である。

4.3. バッテリーモード試験

バッテリーのみで基本走行パターン繰返しによる連続走行試験を行った。空調等(空調設定温度24℃)サービス機器は使用している。

基本走行パターンは、1500Vハイブリッドモード基本走行パターンと同様である。

5. 試験結果

5.1. 最高速度試験

最高速度試験結果を図4に示す。また、速度特性の実測波形を図5に示す。実測波形はノッチ指令開始からノッチ指令停止までを表している。速度40km/hまでの加速度は3.5km/h/sであった。ハイ！トラム設計加速度は40km/hまで4.0m/h/sであるが、車両試験台のフライホイール負荷による等価質量が車両重量より15%ほど重くなったため加速度が低下したと推察される。図4において回生効率は33.5%である。ブレーキ時運動エネルギー回収率(電源端でみた回生電力量をブレーキかけ始めの回転慣性を含む電車の運動エネルギーで除した値)51.6%であった。B7ノッチにおけるブレーキパワーが大きく空気ブレーキが一部補足されているため回生効率が40%を下回る値となった。

5.2. 1500Vハイブリッドモード試験

基本走行パターン1回あたりの走行距離は1.56kmとなった。停車時間は20sとし、架線電流が100Aを超えるパワー分はすべてバッテリーから供給した。基本走行パターンを図6に示す。

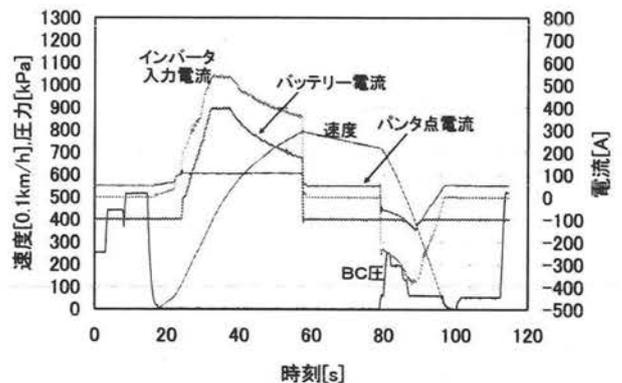


図4 速度80km/hまでの速度試験結果

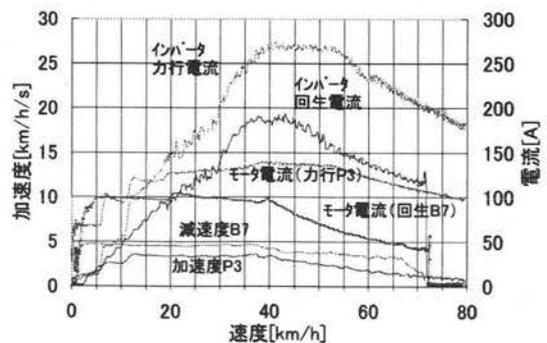


図5 ハイ！トラム速度特性の実測波形

5.2.1. 1500Vハイブリッドモードエネルギー回収率

本試験における、消費電力量、エネルギー回収率の結果は表 1 の通りである。

本試験では、1 時間 50 分、78.2km 走行した。回生効率はインバータ力行電力量に対して 44.9%、ブレーキ時運動エネルギー回収率は 74.1%であった。電源端で見る電源回生率は 32.5%であった。本走行パターンでは、1 回の走行パターンあたりの平均インバータ力行電力量、平均回生電力量、平均ブレーキ時運動エネルギーは、それぞれ 10.1MJ, 4.56MJ, 5.48MJ であった。

5.2.2. 1500Vハイブリッドモード各機器温度特性

前節で述べた連続試験を行った時の各機器の温度推移を図 7 に示す。結果を表 2 に示す。各機器に熱電対の貼付を行い測定した。各機器の最高温度はモータフレーム温度 72.6℃、歯車箱温度 55.1℃、軸箱温度 65.1℃、IGBT 冷却用アルミ板温度 40.3℃、バッテリー温度 35℃であった。これは、各機器の通常使用可能の範囲内であった。なお、本試験においては走行風を模擬した扇風機は使用しておらず無風状態であった。

5.3. バッテリーモード試験

1 回あたりの走行距離は 1.51km となった。停車時間は 20 s とした。1500V ハイブリッドモード連続試験同様、途中 10 パターン繰返し後に数分停車し、行違い等を模擬している。

5.3.1. バッテリーモードエネルギー回収率

バッテリーモード連続走行試験結果を表 3 に示す。

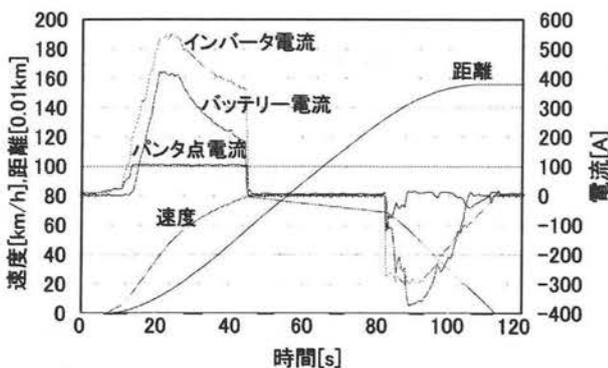


図 6 1500Vハイブリッドモード基本走行パターン

表 1 1500Vハイブリッドモード連続試験結果

走行時間	1時間50分
パターン回数	50回
走行距離	78.2km
インバータ力行電力量	507.0MJ
インバータ回生電力量	227.8MJ
ブレーキ時運動エネルギー $(\sum 1/2 \cdot M \cdot V^2)$	274.0MJ
回生効率 η (インバータ力行電力量)	44.9%
電源端でのブレーキ時運動エネルギー回収率	74.1%
電源回生率 η_s (対総投入エネルギー)	32.5%

表 2 機器温度 (1500Vハイブリッドモード)

	使用限界温度(目安)	試験開始前温度	試験時最高温度
モータフレーム温度	120℃ (一次巻線温度 上昇限度180K)	39.8℃	72.6℃
歯車箱温度	70℃ (従来の実績 より決定)	38.0℃	55.1℃
軸箱温度	80℃ (メーカ推奨)	36.6℃	65.1℃
IGBT冷却用アルミ板温度	70℃ (冷却器温度上昇 保護値85℃)	33.3℃	40.3℃
電池最高温度	65℃ (メーカ推奨)	31℃	35℃
電池平均温度	—	29.3℃	32.5℃

表 3 バッテリーモード連続走行試験結果

走行時間	1時間10分
パターン回数	34回
走行距離	51.3km
インバータ力行電力量	343.5MJ
インバータ回生電力量	150.1MJ
ブレーキ時運動エネルギー $(\sum 1/2 \cdot M \cdot V^2)$	187.1MJ
回生効率 η (インバータ力行電力量)	43.7%
電源端でのブレーキ時運動エネルギー回収率	71.0%
電源回生率 η_s (対総投入エネルギー)	31.5%

本試験では、全体で1 時間 10 分、34 回パターンを実施し、充電量(SOC)85.5%、バッテリー電圧 679.9V から充電量 9.8%、バッテリー電圧 517.5V まで走行した。その間の走行距離は 51.3km であった。回生効率はインバータ力行電力量に対して 43.7%、ブレーキ時運動エネルギー回収率は、71.0%であった。電源回生率は 31.5%であった。1 回の走行パターンあたりの平均インバータ力行電力、平均回生電力量、平均ブレーキ時運動エネルギーは、それぞれ 10.1MJ, 4.41MJ, 5.50MJ であった。

5.3.2. バッテリーモード各機器温度特性

前節で述べた試験パターンで繰り返し走行を行った時の各機器の温度推移を図 8 に示す。バッテリー最高温度は 40 であった。バッテリーの RMS 電流については、270A ~300A で推移しており、バッテリー電圧の低下と共に上昇している。電池平均温度上昇値は 6K に抑えられており、サービス用空調もバッテリー温度上昇抑制に寄与していると推察される。バッテリーの使用限界温度と比較しても、十分に許容の範囲内であった。

表 4 機器温度 (バッテリーモード)

	使用限界温度(目安)	試験開始前温度	試験時最高温度
モータフレーム温度	120℃ (一次巻線温度 上昇限度180K)	32.3℃	68.1℃
歯車箱温度	70℃ (従来の実績 より決定)	31.8℃	48.0℃
軸箱温度	80℃ (メーカ推奨)	31.8℃	58.8℃
IGBT冷却用アルミ板温度	70℃ (冷却器温度上昇 保護値85℃)	31.9℃	39.5℃
電池最高温度	65℃ (メーカ推奨)	33.0℃	40.0℃
電池平均温度	—	31.3℃	37.3℃

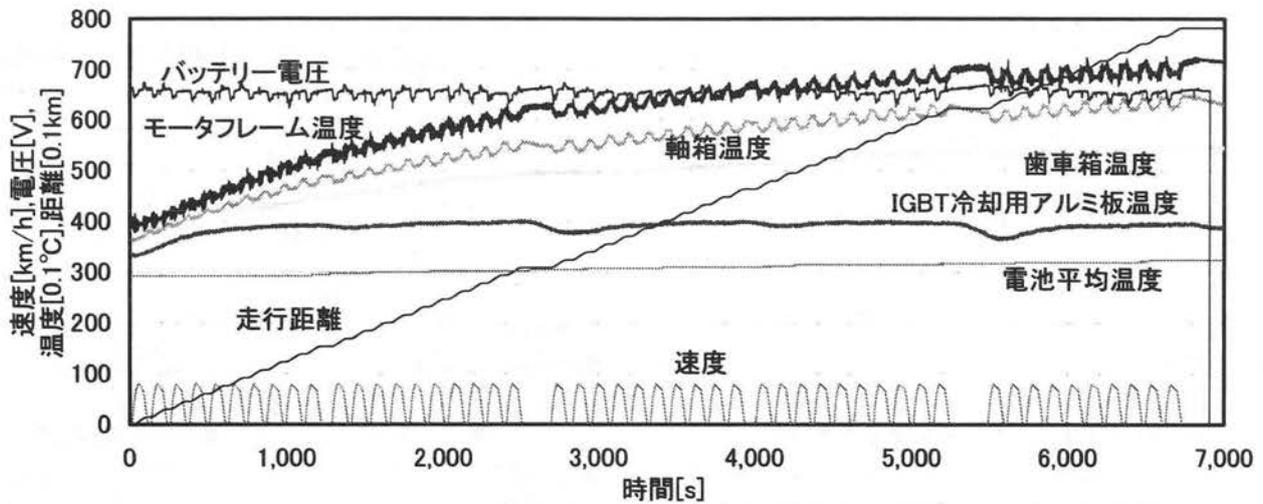


図 7 1500 ハイブリッド モード連続走行試験時の各機器温度推移

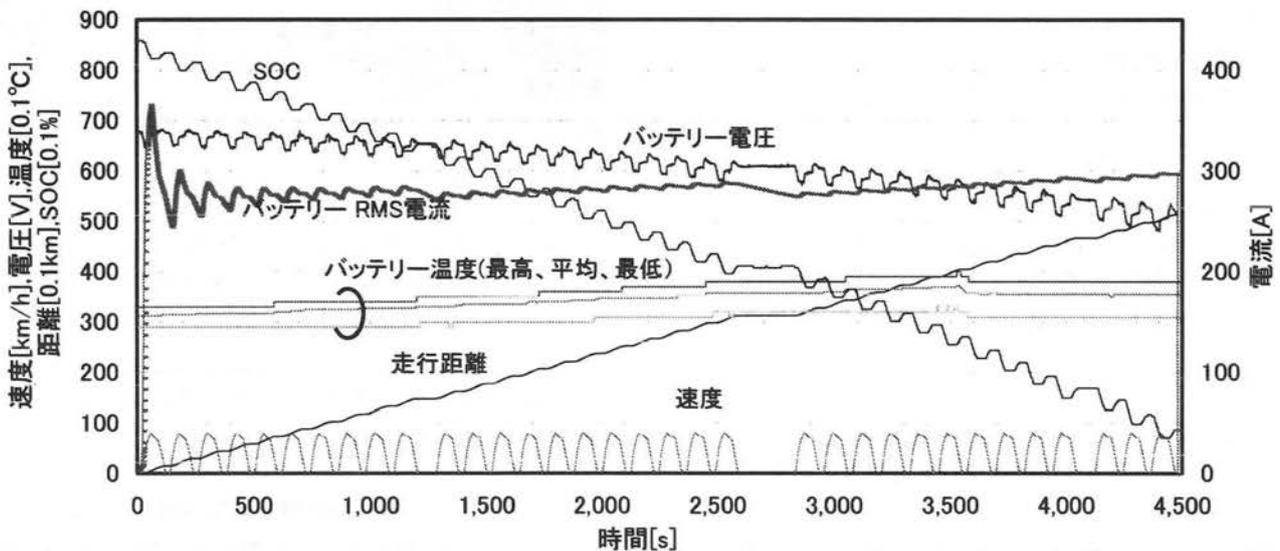


図 8 バッテリーモード連続走行試験時のバッテリー温度推移

7. まとめ

本試験では LRV 「ハイ！トラム」の速度 80km/h までの高速台上試験を行った。試験結果は以下の通りである。

- (1) ハイ！トラムの高速運転について駆動性能上走行可能なことを確認した。
- (2) 1500V ハイブリッドモード、バッテリーモードの連続走行試験結果より、回生効率は、インバータ力行電力量に対して 40%以上、電源端でのブレーキ時運動エネルギー回収率は 70%以上であった。電源回生率は 30%以上であった。
- (3) 連続走行試験結果から、速度 80km/h 連続走行時のモータフレーム温度、軸箱温度、歯車箱温度、IGBT 冷却用アルミ板温度、バッテリー温度について温度上昇値は通常に使用可能な範囲内であった。

参考文献

- 1) 小笠, 田口: 「鉄道総合技術研究所バッテリートラム「Hi-tram(ハイ！トラム)」の成果」, 鉄道車両と技術第 14 巻第 5 号, pp.19~36 (2008-8)
- 2) 小笠, 田口, 大江, 廿日出, 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. III-187~190 (2008-8)
- 3) 田口, 小笠, 門脇, 大江, 廿日出, 末包, 仲村: 「架線ハイブリッド LRV 寒冷地走行試験の消費エネルギーに関する考察」J-Rail2008 (2008-12)