

架線・バッテリーハイブリッド LRV の車両試験台試験

車両制御技術研究部 駆動制御

研究員 末包洋士

1. はじめに

鉄道総研が開発した「架線・バッテリーハイブリッド LRV」LH02 形は、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 種類の異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殿での走行試験を通して、直流 600V 軌道線における LH02 形の車両性能確認を行い、この車両が既存車両に比べて省エネルギーであることを確認した⁽¹⁾。一方軌道線では速度 40km/h の制限が定められていたことから、鉄道線走行への前段として、鉄道総研内の車両試験台において、速度 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。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い高速走行の可能性を評価した。また、今回取得したデータを用い鉄道線非電化区間を想定したランカーブシミュレーションを行った。その結果について報告する。

2. 試験設備

本試験で使用した車両試験台設備概要を図 1 に示す。車両側のモータで駆動し、軌条輪側で負荷を吸収する。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。試験は試験台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。車体端部は連結棒をユニバーサルジョイントに連結することで固定した。



図 1 鉄道総研内車両試験台設備概要

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 LRV LH02 形のエネルギーフローを図 2 に示す。ここで回生効率はインバータ回生電力量をインバータ力行電力量で除したもので、電源回生率は(架線回生電力量+バッテリー充電電力量)を(架線集電電力量+バッテリー放電電力量)で除したものとする。

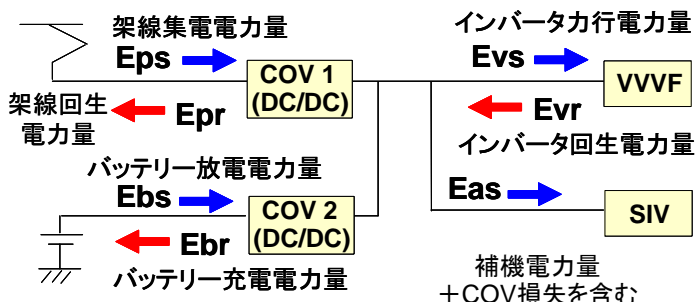


図 2 LH02 形のエネルギーフロー

4. 最高速度試験

最高速度試験結果を図3に示す。また、速度特性の実測波形を図4に示す。ノッチ扱いは「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。速度40km/hまでの加速度は3.5km/h/sであった。LH02形の設計加速度は40km/hまで4.0km/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ている。図3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は(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%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。

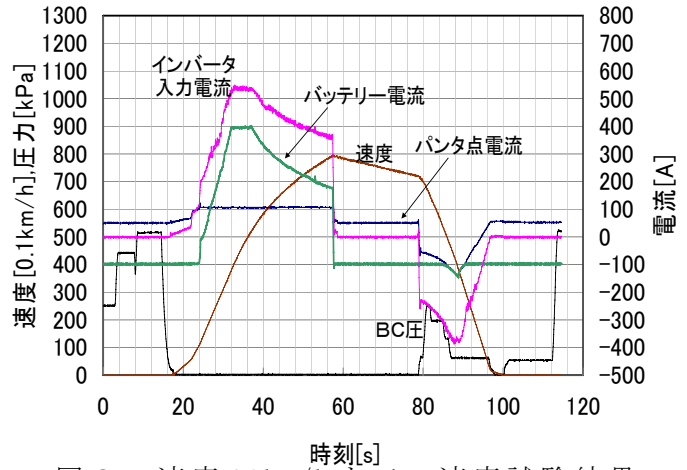


図3 速度80km/hまでの速度試験結果

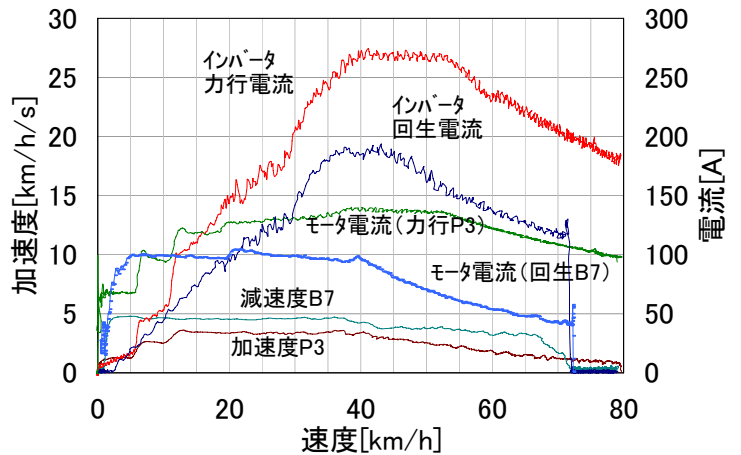


図4 LH02形速度特性の実測波形

5. 連続走行試験

(1) 基本走行パターン

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。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)」とした。1500Vハイブリッドモードの走行パターンを図5に示す。1500Vハイブリッドモードでは、基本走行パターン1回あたりの走行距離は1.56kmとなり、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。バッテリーモードでは基本走行パターン1回あたりの走行距離は、1.51kmとなった。両モードとも停車時間は20sとし、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。空調等(空調設定温度24℃)サービス機器は稼働状態である。

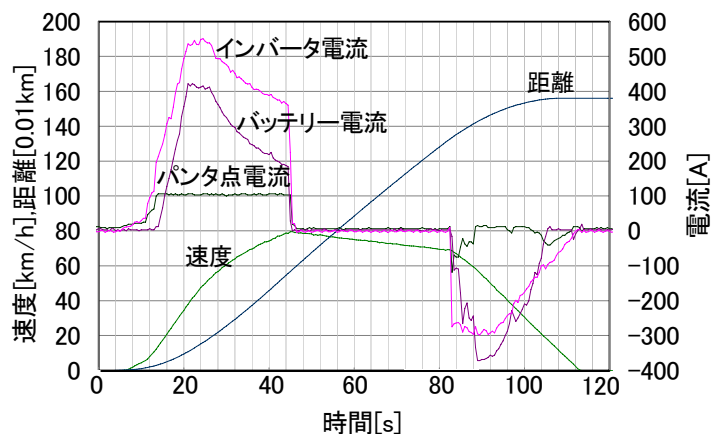


図5 1500Vハイブリッドモード基本走行パターン

(2) エネルギー回収率

連続走行試験における，消費電力量，エネルギー回収率の結果を表1に示す．1500Vハイブリッドモードでは走行パターン回数50回、距離78.2km走行し、バッテリーモードでは走行パターン回数34回、距離51.3km走行した．両モードとも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、電源回生率は30%以上であった．

表1 連続走行試験結果

	1500Vハイブリッドモード	バッテリーモード
走行時間	1時間50分	1時間10分
パターン回数	50回	34回
走行距離	78.2km	51.3km
インバータ力行電力量	507.0MJ (140.8kWh)	343.5MJ (95.4kWh)
インバータ回生電力量	227.8MJ (63.3kWh)	150.1MJ (41.7kWh)
ブレーキ時運動エネルギー $(\sum 1/2 \cdot M \cdot V^2)$	274.0MJ (76.1kWh)	187.1MJ (52.0kWh)
回生効率(インバータ力行電力量)	44.9%	43.7%
電源端でのブレーキ時運動エネルギー回収率	74.1%	71.0%
電源回生率(対総投入エネルギー)	32.5%	31.5%

(3) 1500Vハイブリッドモード温度特性

連続走行試験時における各機器の温度推移を図6に最高温度を表2に示す．各機器に熱電対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35.0℃であった．これは，各機器の通常使用可能範囲内であった．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．

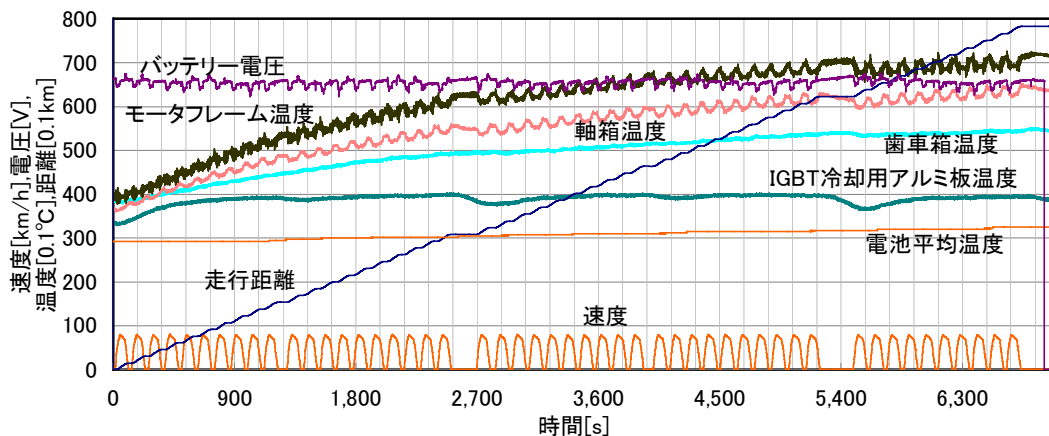


図6 1500Vハイブリッドモード連続走行試験時の各機器温度推移

(4) バッテリーモード温度特性

バッテリーモード連続走行試験時のバッテリーの温度推移を図7に、最高温度を表2に示す．走行中バッテリー最高温度は40℃であった．バッテリーのRMS電流は、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、使用限界温度と比較しても、十分に使用可能の範囲内であった．

表2 機器温度

	使用限界温度(目安)	1500Vハイブリッドモード		バッテリーモード	
		試験開始前温度	試験時最高温度	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℃	32.3℃	68.1℃
歯車箱温度	70℃ (従来の実績より決定)	38.0℃	55.1℃	31.8℃	48.0℃
軸箱温度	80℃ (メーカー推奨)	36.6℃	65.1℃	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℃)	33.3℃	40.3℃	31.9℃	39.5℃
電池最高温度	65℃ (メーカー推奨)	31.0℃	35.0℃	33.0℃	40.0℃
電池平均温度	—	29.3℃	32.5℃	31.3℃	37.3℃

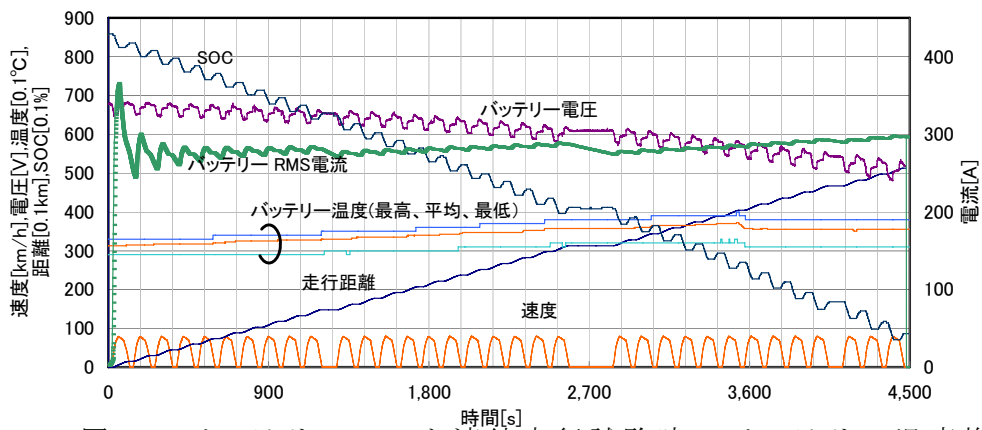


図7 バッテリーモード連続走行試験時のバッテリー温度推移

6. ランカーブシミュレーション比較

今回確認した 80km/h までの車両性能データを用い非電化線区を想定したランカーブシミュレーションで既存気動車と比較した。速度、曲線通過性能等は、表3のように設定した。その結果を図8に示す。LH02形は最高速度 80km/h 走行で、既存気動車の 110km/h に比べて低いのが、高加減速性能を活かして気動車とほぼ同時分での走行が可能であった。

表3 LH02形と気動車の速度比較

	LH02形	気動車(2006年製)
最高速度	90km/h (ただし80km/hまでの速度とした)	110km/h
曲線通過速度	本則	R \geq 600 本則+15 600>R \geq 300 本則+10 300>R 本則+5
下り勾配指定速度	85km/h	110km/h
乗車率	100%	100%
途中制動減速度	2.0km/h/s	1.75km/h/s
停止制動減速度	2.5km/h/s	2.0km/h/s

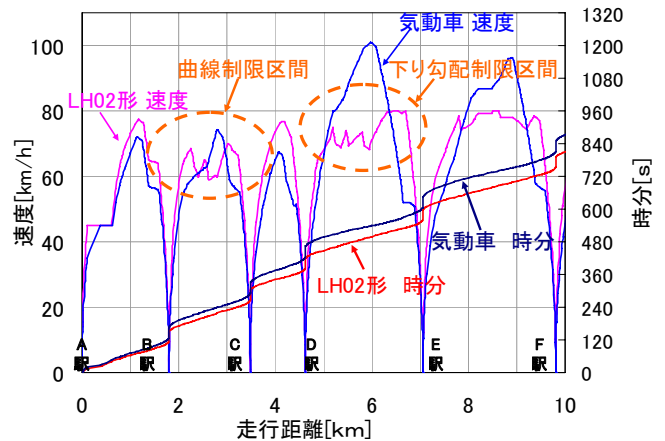


図8 LH02形と気動車のランカーブ比較

7. まとめ

- (1) LH02形は駆動性能上、高速運転が可能であることを確認した。
- (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の使用範囲内に治まり、問題なく速度向上できることが示された。
- (4) ある非電化区間を想定したランカーブシミュレーションの結果、LH02形は高加減速性能を活かすことで、最高速度の高い既存気動車とほぼ同時分で走行が可能であった。

参考文献

- 1) 小笠正道他：「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)