# 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

[電]〇田口 義晃, [電] 小笠 正道, [電] 門脇 悟志, 大江 晋太郎,

[電] 廿日出 悟, [機] 末包 洋士, [電] 仲村 孝行 (鉄道総研)

Considerations on Hybrid-LRV Energy Consumption thorough a Running Test in the Cold Region

O Yoshiaki TAGUCHI, Masamichi OGASA, Satoshi KADOWAKI, Shintaro OHE, Satoru HATSUKADE, Hiroshi SUEKANE, Takayuki NAKAMURA (Railway Technical Research Institute)

A long-term running test of hybrid LRV type LH02 was carried out from November 2007 to March 2008 in Sapporo-city tramway. In this paper, we discuss on energy consumption of the hybrid LRV through the running test. For the first, we describe a measure developed for calculating the energy consumption and drawing the power flow diagram. Then we study on the differences of the average energy consumptions under the various conditions such as season, snowproof brake, gradient, and torque pattern.

キーワード: 消費エネルギー, 回生電力, LRV, リチウムイオン電池 Keywords: Energy consumption, Regenerative power, LRV, Lithium-ion battery

# 1. まえがき

2007 年 9 月に架線・バッテリーハイブリッド LRV である LH02形(ハイ!トラム)(図1)が完成した<sup>(1)</sup>. LH02形はその後, 2007 年 11 月から翌年 3 月にかけて札幌市交通局軌道線(図 2)にて走行試験を実施する機会を得た. 厳冬期の営業線ダイ ヤの中で各種データを収集しながら順調に走行し, 累積走行 距離は 2196km に達した. バッテリー連続走行や省エネ性等 の主要な試験結果は文献(2)に示されている. 著者らはその後 さらにデータ整理を深度化したところ, 消費エネルギーに関して は他にも興味深い考察が得られたので本稿にて紹介する.

本稿ではまず、電力量の定義や電力量演算手法について 述べる.この手法によって、回生電力や調整充電の分離演算 を行い、本ハイブリッドシステムのパワーフローを整理する.次 いで、整理した電力量データに基づき、寒冷地特有の耐雪ブ レーキや、試験路線特有の勾配、その他条件と消費電力量と の関連を考察する.

# 2. 電力演算の定義と手法

# 2.1 主回路構成と計測点

LH02 形の主回路構成と計測点を図3に示す.電源側の2 台の変換器(COV1, COV2)は,架線電力と電池電力の配分 を制御する.ハイブリッド走行時においては,力行時および回 生時いずれも架線を優先的に使用し,閾値を超えた分をバッテ リーで補償する制御としている.また,これら変換器は架線から



図1 LH02形(ハイ!トラム) 図2 札幌

電池への充電動作も担う. 走行試験では急速充電は行わず, 架線区間で電池残量を徐々に回復する調整充電のみ実施し た. 負荷は通常のインバータ電車と同様に駆動用の VVVF イ ンバータ(INV1, INV2)および補機用インバータ(SIV)である. これらは中間回路で接続されており,中間回路電圧は750V程 度に維持される.

消費エネルギー演算に使用する計測点は、電流信号 3 点 ( $I_p$ ,  $I_b$ ,  $I_{inv}$ )および電圧信号 3 点( $V_p$ ,  $V_b$ ,  $V_{inv}$ )である. これら から、各部の電力( $P_p$ ,  $P_b$ ,  $P_v$ )を演算する. 演算箇所は、各変 換器の入力部とし、電源から負荷へ向かう向きを正方向とする. なお電源電力  $P_s$ は、当該箇所での電流・電圧信号からは算出 せず、次式(1)によって算出したため、実際よりコンバータ損失 分だけ値が大きい.

 $P_s = P_p + P_b$  (1) 補機電力  $P_a$ については, SIV 入力電流がスペース等の制約

で測定できなかったため、次式(2)によって算出した.  $P_a = P_s - P_v$  (2) 式(1)および(2)の前提により、本測定においてはコンバータ





図3 架線ハイブリッド LRV の主回路構成と計測点

図2 札幌市電の路線概要

# 2.2 電力量の演算

図3に示す各部電力を積算することで、図4の各部電力量 が定義される.後述の方向別電力量と区別する箇所では、名 称に"正味"を付加する.ここで注意すべきは、調整充電電力 量 *Ep2*の存在である.このように電源間を移動するエネルギー には"2"を付加し、電源⇔負荷間を移動するエネルギーには "1"を付加して区別する.なお、調整放電機能も有するが、試 験期間中には使用しなかったため本稿では考慮しない.

図5に示す電力量は、図3の各部電力を、方向別(極性別) に分離して積算したものである、方向が常に一定の箇所では定 義しない、プラス側の積算には"s"を付加し、マイナス側の積算 には"r"を付加する、各部での差し引き(*Xs*-*Xr*)は図4の正 味の電力量(*X*)に一致する、

# 2.3 調整充電電力と回生電力の分離演算手法

本システムの特徴である調整充電動作は,パワーフローを整 理しにくくする要因となる、調整充電が行われた試番では、架 線集電電力量と、電池への回生が大きく記録されるため、調整 充電が行われない他の試番と比較しにくい.よって、調整充電 分 En2を分離することとした.このためには、記録した波形から 調整充電期間を切り出して別途積算する方法が考えられるが 大変煩雑となる. そこで, バッテリーへの充電電力量のうち, イ ンバータから回生される分を除去する方法とした.これにはまず, インバータ回生電力の行き先を分離する演算から行う必要があ る.図6がそのために生成した分離演算用ブロック図である.こ のブロック図に従い、まずインバータ回生電力 Pvrが、架線に至 るもの Pvrp, 電池に至るもの Pvrb, 補機に至るもの Pvra に分離 される. その後, 電池充電電力 Pbrから Pvrbを減じて調整充電 電力 Ppzが算出される. ブロック図の導出は,表1のように回生 電力の行先が一定の優先順位となることに基づく.ある順位で 受入れ可能な最大パワーに達すると次の順位にも到達するよう 制御される.

優先順位	1	2	3	4
調整充電	補機	架線	電池	-
非実施	Pvra	Pvm	Pvrb	
調整充電	補機	電池 a <sup>*</sup>	架線	電池 b <sup>**</sup>
実施中	Pvra	P <sub>vrb</sub>	Pvrp	Pvrb

表1 回生電力の行先優先順位

# 2.4 パワーフロー分析例

前節までに述べた電力量演算手法を用いて、ハイブリッド走 行時の典型的な試番のパワーフローを分析した. 図 7 に調整 充電が殆ど行われなかった試番を, 図 8 に調整充電が行われ た試番を示す. 行路はともに西 4 丁目駅~すすきの駅間の片 道とし、架線とバッテリーのハイブリッドモードとして条件を揃え た. いずれも日中に測定されている. 数値は走行キロ当りの電 力量としており、片道走行分の距離 8.5kmを乗じれば実際の 電力量となる.

帯の長さは電力量の大小と対応する.上側を電源,下側を 負荷とし,電源への回生電力量は下から上に戻るように描いた. 電池やインバータ等各部ごとに力行分-回生分=正味分の関 係が成立している.一部では最小桁に誤差の影響があるが十 分小さい.また,各部の回生率が容易に読み取れ,図7の例で は次式のように求まる。

$$42n^{\circ}-9回生効率: (E_{vrs}+E_{vrb}+E_{vrp}) \div E_{vs} = 42\%$$
 (3)  
電源回生率:  $(E_{pr}+E_{b1r}) \div E_{ss} = 14\%$  (4)

架線への回生電力量 Eprは自車近傍の負荷状態によって異なるが、本試番の場合、Eprだけでは 7.5%であったはずの電



図4 電力量の定義



図5 方向別に積算した電力量の定義



図6調整充電電力・回生電力の分離演算ブロック

源回生率が、電池を搭載したことによって 14%に高まったと言 える. なお、省エネルギー効果の詳細については文献(2)を参 照されたい.

カ行と回生を区別せずに正味の消費電力量のみを扱うなら ば、正味分( $E_p$ ,  $E_b$ 等)を抜粋すればよい. 図 7 では架線から  $E_p=1.90$ (単位 kWh/km は本節では省略する)が集電され、電 池から $E_b=0.32$ が放電され、両者を合わせた $E_s=2.22$ が負荷 で消費されている.

調整充電が行われた図 8 はやや複雑となり, 架線集電の正 味  $E_p = 2.94$  のうち  $E_b = -0.44$  は電池の充電分となり, 残りの  $E_s = 2.50$  が負荷に供給されている. 電池に注目すると, 架線か ら $E_{p2} = 0.99$  が調整充電されたうち,  $E_{b1} = 0.55$  は電池から負荷 に供給したため, 電池充電分は  $E_b = -0.44$  である. また,  $E_{b1}$ = 0.55 は供給した  $E_{b1s} = 0.66$  と回生されて返った  $E_{b1r} = 0.11$ の 差し引きである.

このような図表に整理すればLH02 形のようなハイブリッド車 両特有のパワーフローを詳細に把握できる利点がある.

#### 3. 期間別の消費電力量

主回路電力量と補機電力量の推移を図9に示す.期間によ

a:調整充電所要パワー以下の分, b:左記を超える分



図7パワーフローの分析例(1)



って走行距離が異なると比較しにくいため,走行キロ当たりの電力量[kWh/km]を縦軸としている. 図9最上部の車両消費電力量はインバータ消費電力量と補機電力量の和を表し,期間によって大幅に変動している.

補機電力量の変動要因を調べるため、期間別の暖房電力 量の推移を図 10 に示す、暖房電力量の詳細については文献 (3)に述べられており、概して外気温が高いほど暖房合計電力 量は小さい、特に12/10~12/14の期間は、外気温が高い条件 に加え、省エネな民生用空調のみを使用したため全期間で最 小となっている、この空調電力量の変動が、図 9 の補機電力量 の変動を生じていると言える、補機電力量のうち、暖房以外の 分(コンプレッサ、照明、変換器ブロワ、本稿ではコンバータ損 失も含む)は、0.8~1.5 kWh/km 程度であり、暖房分より大き いことが読み取れる.

インバータ消費電力量は 1/21~2/6 の期間だけ大幅に上昇



図 10 暖房電力量と平均外気温度の推移

している. これは主に電制開放(機械ブレーキのみによる制動) と耐雪ブレーキ(力行・惰行中に常時 B1ノッチ相当の機械ブレ ーキを作動)の適用による. これらは積雪区間で制輪子と車輪 の間に雪氷が挟まってブレーキ力が低下するのを防ぐ措置で ある. 平均耐雪ブレーキ割合なる指標で適用の度合を表示し たところ, このグラフの変化と呼応してインバータ消費電力量が 変化していることが分かる. 電制開放は短時間しか使用しなか ったため, 耐雪ブレーキほどの影響は生じていない. LH02 形 の耐雪ブレーキ力は必要以上に強い設定であったと思われ, その結果消費電力量の増加が顕著であった. 耐雪ブレーキ力 を適切に設定できれば消費電力量が低減する.

全期間で見ると、補機電力量がインバータ消費電力量を上回ることが特徴的である.低速で走行する車両は補機電力量の比率が大きいが、LH02 形はインバータ消費電力量の省エネ化によってその傾向が強まったものと考えられる.今後一層の省エネのためには、補機電力量すなわち暖房や変換器ブロワの電力等も低減することが重要である.

# 4. 条件別のインバータ消費電力量

本線走行試験では、片道を1 試番として区切ることを基本と して計 226 試番で有効な測定結果が得られた.本章では、各 種条件毎に電力量の平均値を算出することで、走行条件とイン バータ消費電力量の関連性を考察する.以後、電停名の略号 は電=電車事業所前、す=すすきの、西=西4丁目とする. 4.1 行路による差異

図 11 に示すように,行路①は②に比べて約半分のインバー タ消費電力量である.これは図 2 に示すように電車事業所前電 停に比べ,すすきの電停の標高が 15.7 m 低く,行路①は下り 勾配が支配的なためである.位置エネルギーの差 *ΔU*は LH02 形の積車質量 *M*=24 t,標高差 *b*=15.7 m を用いると,

#### $\Delta U = Mgh = 3.69 MJ = 1.03 kWh$

(5)

となる。これを両電停間の距離 4.2 km で割ると, 0.24 kWh/km となる. 下り勾配では位置エネルギー分を吸収しなが ら走行し, 上り勾配では余分に放出しながら走行したと考えると, 行路①よりも②のほうが 0.48kWh/km 大きくなる計算である. 測定結果は 0.50kWh/km 大きくなっており, ほぼ整合してい る.

行路③と④に関しては両端(すすきの電停と西4丁目電停) の標高はほぼ等しい.ここから推察されるとおり、インバータ消 費電力量は行路③で 0.79kWh/km,行路④で 0.82kWh/km とほぼ同一となっている.

上記分析で、下り坂の行路では位置エネルギー減少分を回 収していることが明らかとなった.これは回生ブレーキの効用で ありインバータ車両の導入効果の一側面である.

本節の比較条件は、電制開放および耐雪ブレーキは不使用とした。各行路とも、該当した38~45試番の平均値である.

4.2 トルクパターンによる差異

図12に、モータのトルクパターンをフルパワー(39km/hまで 定トルク領域)とした場合とパワーセーブ(19.5km/hまで定トル ク領域,最大パワー1/2)とした場合の消費電力量の比較を示 す.この結果、パワーセーブのほうが3%程度の省エネとなった. 力行電力量と回生電力量はいずれもフルパワーのほうが大き いが、これはフルパワーのほうが高速(40km/h近傍)まで加速 して高速から減速する頻度が高い傾向があったためである.こ のランカーブではインバータやモータを通過するエネルギーが 増大して、これら機器での損失が増大する.その分が増エネに つながったものと考えられる.

なお一般的には、同一駅間距離を同一時分で走行させる条件で比較すると、フルパワーのようなトルクパターンで最大加速、 早めノッチオフ、としたほうが省エネとなることが知られている.

本節の比較条件は,行路は「西⇔す」,ノッチ操作は加減速 抑制(4.3 節参照)に限定,耐雪ブレーキと電制開放は不使用 の試番とした.各条件とも8試番が該当した.

## 4.3 ノッチ操作特性による差異

試験の全期間に亘り, 試番の約半分は加減速の回数や時間 を抑制して惰行を支配的にするノッチ操作とした. 図 13 から明 らかなように, 加減速を抑制しない通常時のほうが約 8%インバ ータ消費電力量が大きい結果となった. 考察は 4.2 節と同様で, 機器損失が増エネの要因と考えられる.

本節の比較条件は、行路は「す⇔西」、耐雪ブレーキと電制 開放は不使用、トルクパターンはパワーセーブに限定した. 各 条件とも38試番が該当した.

# 5. まとめ

架線ハイブリッド LRV の寒冷地走行試験における消費電力 量について,以下のような整理・考察を行った.

- (1) ハイブリッド車両に対応した電力量演算方法により回 生電力や調整充電電力を分離した.
- (2) LH02 形の典型的なパワーフローを例示した.
- (3) コンバータ損失を含む補機電力量は、走行用のインバ ータ消費電力量を上回ることが判明した.
- (4) 期間別・条件別の検討により、寒冷地特有の耐雪ブレ ーキ使用や勾配条件、ノッチ操作特性などが、インバ ータ消費電力量に与える影響を考察した。

本研究の実施にあたり、札幌市交通局の深澤様をはじめと する関係各位には長期試験の遂行のために多大なご協力を頂





図 12 トルクパターンとインバータ電力量の関係



図13 ノッチ操作特性とインバータ電力量の関係

いた.この場を借りて感謝申し上げる.

なお、本研究は経済産業省からの交付金を原資とし実施する「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一つとして、 NEDO 技術開発機構との委託契約に基づき実施した。

#### 参考文献

- 小笠、田口、前橋、門脇、末包:「架線ハイブリッド(架線レス)LRVの新車概要と車両性能」、S4-4、pp.119-122、 J-RAIL2007 (2007-12)
- (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 (架線レス LRV)の軌道線走行試 験結果概要」,3-18, Vol.III, pp.187-190,2008 年電気学 会産業応用部門大会(2008-8)
- (3) 門脇,田口,仲村,末包,廿日出,大江,小笠:「架線・バ ッテリーハイブリッド LRV における民生用空調利用による 省エネルギー暖房効果」,3·19, Vol.Ⅲ, pp.191·194, 2008 年電気学会産業応用部門大会(2008·8)