

# リチウムイオン電池／スーパーキャパシタハイブリッド駆動 LRV の走行特性

荻原 隆 (福井大学 大学院工学研究科, ogihara@matse.u-fukui.ac.jp)

小寺 喬之 (福井大学 大学院工学研究科, t-kodera@u-fukui.ac.jp)

## Running characterization of LRV powered by hybrid of lithium ion battery and super capacitor

Takashi Ogihara (Graduate School of Engineering, University of Fukui, Japan)

Takayuki Kodera (Graduate School of Engineering, University of Fukui, Japan)

### 要約

近年、鉄道車両やLRV (Light Rail Vehicle) の走行に二次電池や燃料電池を適用する研究が進められている。リチウムイオン電池は二次電池の中でエネルギー密度と出力密度が最も高いことから、鉄道車両の走行源として最も期待できる。現在の鉄道車両やLRVではVVVFインバータを用いて走行する車両が主流となり、効率良くブレーキ時の回生エネルギーを架線に戻し、近くを走行する車両へエネルギーを供給しているが、走行している車両がない場合、回生失効が起こることから、リチウムイオン電池等の二次電池へ充電して走行することが考えられている。しかしながら、回生エネルギーをリチウムイオン電池へ高頻度で充電することは、電池寿命を著しく減少させることが考えられる。そこで、本研究ではブレーキ時の回生エネルギーの一部をスーパーキャパシタへ充電することで、リチウムイオン電池への負担を軽減することを目的に、VVVFインバータ型LRVをモデルとしてスーパーキャパシタとリチウムイオン電池によるハイブリッド駆動システムの鉄道車両を試作した。本研究ではマンガン系リチウムイオン電池を使用した。L型シートセルを3直列し、さらに6並列したものを組電池として、これを54直列し、60 kWhの電気容量を得た。これをLRVの中央部に、スーパーキャパシタを前方部にレイアウトしてLRVを完成させ、その走行性能および省エネ効果を検討した。走行実験はリチウムイオン電池の低温での動作検証も行うために、冬季に行われた。LRVは福井鉄道の営業路線20 kmを営業時と同じ条件で夜間、往復走行した。600 V架線から100%充電した後、660 Vから480 Vまで放電して往復走行した結果、架線走行と同等の走行が可能で、60 km/hまでの加速、および、1回の満充電で約40 km走行できることがわかった。このとき、60 km/hから40 km/hまで減速したときの回生エネルギーを充電しながらリチウムイオン電池で走行させた場合、充電しない場合に比べて、消費エネルギーは22%減少した。さらに、スーパーキャパシタを併用することで、リチウムイオン電池のみの走行に比べて約10%の燃費向上が確認された。また、リチウムイオン電池の温度上昇も低減できることがわかった。

### キーワード

回生エネルギー, 省エネ効果, スーパーキャパシタ, トラム, リチウムイオン電池

### 1. はじめに

運輸部門におけるCO<sub>2</sub>排出削減とさらなる省エネを目指して、電気自動車あるいはハイブリッド自動車用リチウムイオン電池の開発が進められている。リチウムイオン電池は二次電池の中でエネルギー密度及び出力密度が最も高いため電気自動車の蓄電池として好適である。また、燃料電池車の補助電池としても適している。これを鉄道用駆動装置の電源に適用することができれば、電気鉄道においてもさらなる省エネ効果が期待できると共に、架線レスによる都市景観の向上、低騒音化にも貢献できる。その他に、災害、事後による架線供給不可時の緊急動力源、電圧の異なる路線への相互乗り入れ技術としての活用も見込まれる。また、ディーゼル鉄道におけるCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等の環境負荷低減にも有効である。二次電池を用いた鉄道車両については、これまで、鉄道総研(Ogasa and Taguchi, 2006)が開発したリチウムイオン電池駆動のLRV (Light Rail Vehicle)や川崎重工が開発したニッケル水素電池駆動(小倉他, 2007)のLRT (Light Rail Transit)がある。

我々もリチウムイオン電池を鉄道車両の走行源として検討

し、DCの鉄道車両 (Matsuo and Ogihara, 2009) 及びVVVFの路面電車をモデルとして走行実験を行ってきた (Ozawa and Ogihara, 2008)。その結果、リチウムイオン電池を使用することにより、架線車両と同等の走行性能、走行時の電圧変動の改善及び省エネ効果が改善されることを明らかにしてきた。しかしながら、リチウムイオン電池はVVVF車両の走行に適用するとブレーキ時の回生失効の改善に有効であるが、高頻度で回生エネルギーを充電することは、リチウムイオン電池の寿命の観点からは好ましくない。そこで、本研究では、回生ブレーキ時のエネルギーを一時的にキャパシタへ充電することでリチウムイオン電池の負担を軽減することができないかとの観点から、スーパーキャパシタとリチウムイオン電池とのハイブリッド駆動での走行試験を行い、走行性能と省エネ効果を検討した。

### 2. 実験方法

本実験では、EVに使用されるマンガン系リチウムイオン電池を用いた。ENAX社より提供されたマンガン系リチウムイオン電池用L型シートセル (図1) を使用して組電池を作製した。L型シートセル (D323 mm × W130 mm × H7.2 mm) の電気容量は16 Ah、電圧は3.8 V、重量は570 gであった。L型シートセルは3直列したものを6並列に接続した。これをアルミ



図1：L型シートセル



図4：試験車両



図2：組電池

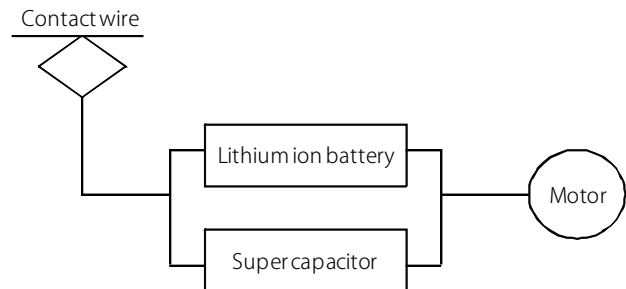


図5：システムの系統図

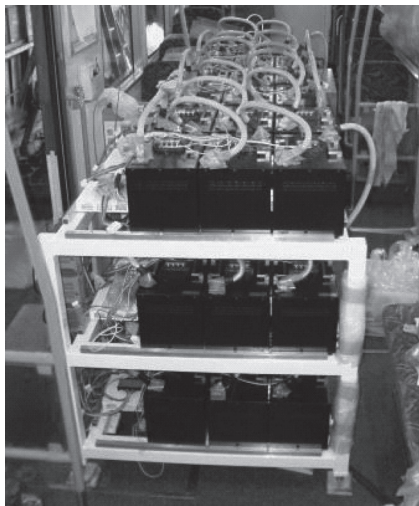


図3：60 kWh組電池

ニウム製ケースに収納し、組電池（図2）を得た。得られた組電池（D323.2 mm × W240 mm × H323.2 mm）の電気容量は96 Ah、平均電圧動作は11.4 V、重量は10 kgであった。各組電池には、それぞれ過充電および過放電保護回路を取り付けて電圧管理を行った。組電池は54個を用いて直列に接続し、平均動作電圧620 V、電気容量60 kWh（図3）を得た。この組電池は、走行中の振動を避けるために専用の金属製ラックに収納し、福井鉄道VVVFインバータ型LRV車両（図4、DC600 V、

重量25 t）車両の中央に配置した。このとき、組電池の総重量は1.1 tであった。LRVのシステムの系統図を図5に示す。回生ブレーキ使用時の充電に用いたスーパーキャパシタは車両スペースの都合から前方に設置した。リチウムイオン電池とスーパーキャパシタは並列接続し、これをモーターと接続した。

スーパーキャパシタは電気二重層コンデンサー（指月電気製、54 V、60 F）を14直列し、756 V、4.2 F、40 Aとしたものを1ユニットとして、それを3並列して接続したものを用了。LRVは走行前に600 Vの架線から直接、リチウムイオン電池へ充電した。充電は最大で1.5 Cまでとし、充電深度は80%から100%の範囲で行った。

LRVの走行実験は、福井鉄道福武線にて夜間に行われた。走行実験は低温でのリチウムイオン電池の動作の検証を兼ねて1月から2月にかけて行われ、外気温は0℃から-5℃であった。西武生駅から福井新駅間の片道約20 kmを力行－隋行－減速－停止のパターンを繰り返しながら各駅を停車して連続走行を行った。走行中の各組電池の電圧、電流および温度のそれぞれの変化はデータロガーを介してパソコンへ1秒間隔でデータを取り込んだ。組電池の温度はケースの内部へ熱電対を3本挿入して測定し、その平均値を温度とした。なお、本実験に使用したLRVは、使用路線の運行上の理由から、ブレーキの仕様が変更されており、60 km/hから40 km/hまで減速したときのみ回生ブレーキが使用され、40 km/h以下では機械ブレーキを使用している。

### 3. 結果と考察

走行実験に使用した1個の組電池のサイクル特性を図6に示す。充放電は室温、1.5 Cとした。このとき、充電時の深度(SOC)を100%および80%とした。SOC100%のとき、900サイクル後の容量維持率は93%、80%では99%であった。このような組電池の試験データはほとんど公開されていないために、比較の対象がないものの、EV用マンガン系リチウムイオン電池のサイクル特性は1C・500サイクルで80%程度(川上他, 2004)であることから、サイクル安定性に優れた組電池であると考えられる。

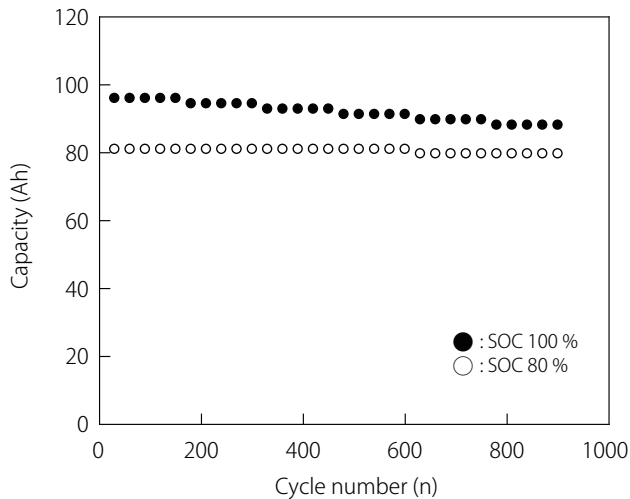


図6：組電池のサイクル特性

LRVの車内空調を使用せずに走行実験を行った。本車両では車内の空調もリチウムイオン電池から動作させているため、走行中のリチウムイオン電池の電力を消費してしまうことから、空調を使用せずに走行を行った。電池で走行することから、LRVは架線使用時と同等の走行が可能であり、60 km/hまで加速することができた。また、本実験では100%の充電で西武生駅ー福井新駅間を1時間で往復40 kmを走行すること

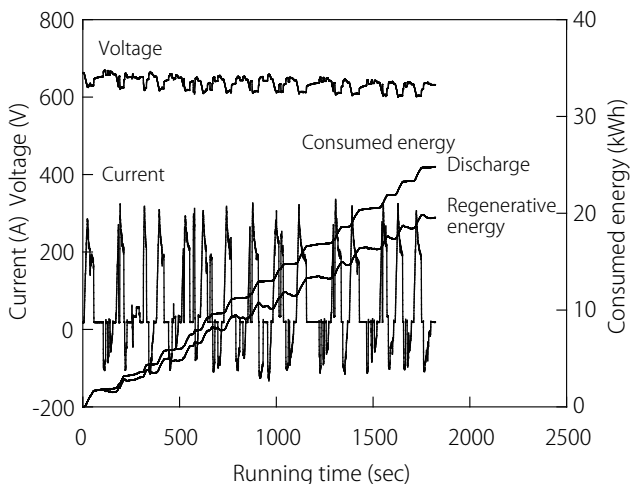


図7：走行時間と電流、電圧および消費エネルギーとの関係(リチウムイオン電池のみを使用した場合)

ができた。リチウムイオン電池による20 kmの走行試験結果を図7に示す。外気温は-5℃であった。20 kmには約30分を要した。比較のために、回生ブレーキを動作させずに、リチウムイオン電池の放電のみで走行を行った時の消費エネルギーのデータを示す。-5℃においてもリチウムイオン電池の動作に問題はなく走行できることが確認された。本実験では架線使用時と同じモードで加速を行ったところ、60 km/hrまでの加速毎に最大300A程度の電流が流れた。本実験では、車両の回生ブレーキの仕様から時速60 km/hrから時速40 km/hrまで減速する際に発生する回生エネルギーをリチウムイオン電池へ充電した。リチウムイオン電池へは約1.5 C(150 A)で約10秒間充電することがわかった。

ここで、電池走行と回生エネルギー充電による走行の消費電力を比較すると、放電のみの走行では30分間の走行で24.8 kWhであったのに対し、回生エネルギーの充電による電池走行では19.5 kWhであった。この結果から、リチウムイオン電池による回生エネルギーの充電で、約22%の省エネ効果のあることがわかった。このとき、回生エネルギーをリチウムイオン電池へ充電した際の各電池の電圧のバラツキは0.2 V以内であった。本実験では、使用したLRV車両の仕様上の関係から40 km/hまで減速したときの回生エネルギーを充電したが、これを数km/hまで減速した時の回生エネルギーを充電することができれば、さらに省エネ効果が向上すると考えられる。走行回数と消費エネルギーとの関係を図8に示す。走行回数は5回と少ないものの、1回の走行当たり、ほぼ20 kWh程度の消費エネルギーであった。消費エネルギーのバラツキが出た原因は、運転回数毎に運転手の加速および減速時の操作が若干異なったことに起因している。

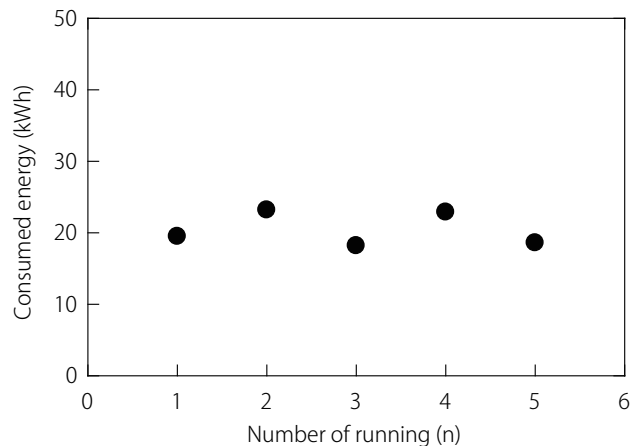


図8：走行回数と消費エネルギーとの関係

次に、スーパーキャパシタを併用した時の走行試験結果を図9に示す。本試験では車内の空調もリチウムイオン電池から供給した。走行特性はリチウムイオン電池のみの時と同じであった。回生エネルギーの充電をリチウムイオン電池のみで行った時の消費電力は21.5 kWhであった。従って、図9の結果から、空調に使用されたリチウムイオン電池の消費エネルギーは約2 kWhであった。一方、スーパーキャパシタを併用した時の消費電力は16.8 kWhであった。本試験は3回行わ

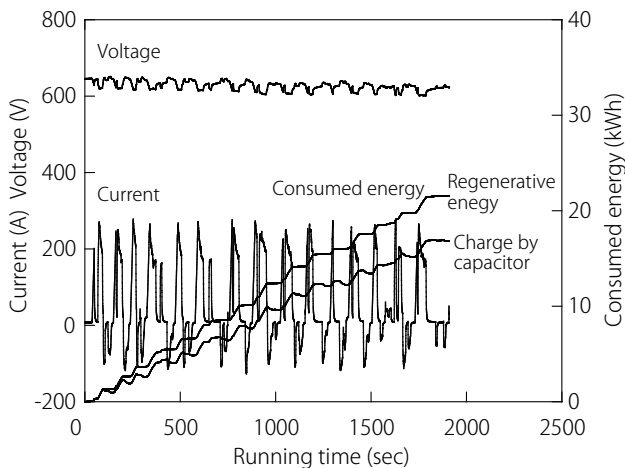


図9：走行時間と電流、電圧および消費エネルギーとの関係  
(スーパーキャパシタを用いた場合)

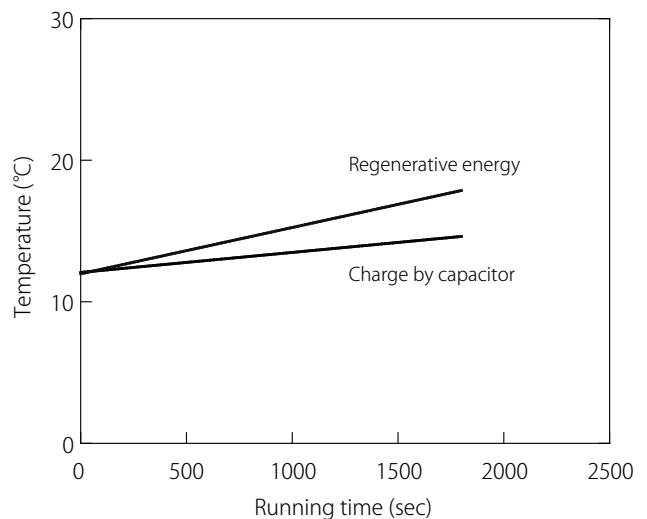


図11：走行中のリチウムイオン電池内部における温度変化の比較

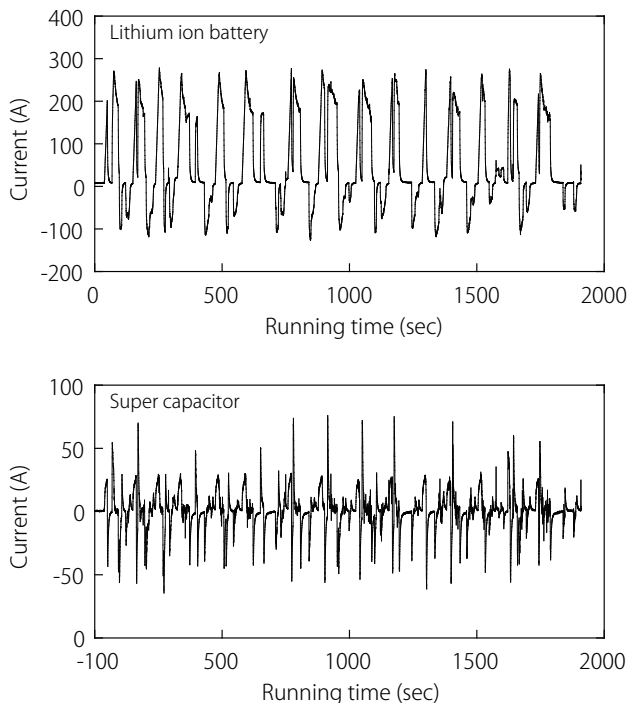


図10：走行時における電流変化の比較

れ、消費電力は平均16.7 kWhであった。このことから、スーパーキャパシタの併用でLRVの消費電力がさらに約10%低減されることがわかった。また、走行中のスーパーキャパシタとリチウムイオン電池の電流変化を図10に示す。スーパーキャパシタへは約1C (50 A)で充電することがわかった。

LRVの走行において、回生エネルギーをリチウムイオン電池へ繰り返し充電すると、組電池の内部温度が上昇することをこれまでの実験から明らかにしている (Ogihara and Yamanaka, 2009)。そこで、走行中のリチウムイオン電池の温度変化について検討した。回生エネルギーをリチウムイオン電池のみで充電した場合とスーパーキャパシタを併用した場合のそれぞれのリチウムイオン電池の温度変化を図11に示す。リチウムイオン電池のみを用いた場合、30分間で12.5℃

から18.5℃まで上昇した。一方、スーパーキャパシタを併用した場合、リチウムイオン電池の温度は12.5℃から15.7℃まで上昇した。スーパーキャパシタを用いることで回生エネルギーの充電におけるリチウムイオン電池の温度上昇も低減できることがわかった。

#### 4. まとめ

マンガン系リチウムイオン電池とスーパーキャパシタを用いたLRVを開発した。LRVの走行試験を行った結果、3Cの放電で60 km/hまで加速できることがわかった。60 km/hから40 km/hまで減速した際の回生エネルギーはリチウムイオン電池により約1.5Cで充電していた。回生エネルギーを充電しながらリチウムイオン電池で20 kmの区間を30分間走行させた場合、回生エネルギーを充電しない時に比べて、22%の消費エネルギーを低減できることがわかった。また、スーパーキャパシタを併用することで、リチウムイオン電池のみの走行よりも約10%の燃費向上が見られた。また、リチウムイオン電池の温度上昇も低減できることがわかった。

#### 謝辞

本研究を実施するに当たり、試験車両の提供および走行試験に協力を頂いた福井鉄道に深く感謝する。また、リチウムイオン電池およびスーパーキャパシタの製作および改良に協力を頂いた大研化学工業、栗田製作所および名古屋鉄道に深く感謝する。

#### 引用文献

- Ogasa, M., and Taguchi, Y. (2006). Recent researches of contactwire-less tram. *Railway Research Review*, Vol. 63, 12-15.
- 小倉弘毅・吉田賢治・堤香津雄・西村和也 (2007). 低床電池駆動路面電車 (LRV) の開発. *J-Rail2007*, 123-126.
- Matsuo, H., and Ogihara, T. (2009). Characterization of large lithium ion battery and its application to railcar. *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol. 7, No. 2, 1333-1336.

- Ozawa, H., and Ogihara, T. (2008). Running test of contactwireless tramcar using lithium ion battery. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 3, 360-361.
- 川上和幸・西田伸・大下竜司・寺坂雅行・高橋昌利 (2004). マンガン酸リチウムを用いた高信頼性リチウムイオン電池. *三洋テクニカルレビュー*, Vol. 36, No. 2, 12-19.
- Ogihara, T., and Yamanaka, S. (2009). Running test of VVVF inverter type railcar using lithium ion battery. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 4, 685-686.

(受稿：2012年4月18日 受理：2012年5月21日)