

車両駆動用リチウムイオン蓄電池の長寿命化手法

三木 真幸* 田口 義晃*

Extending the Life of Lithium Ion Battery for Vehicular Traction

Masaki MIKI Yoshiaki TAGUCHI

Recently research and development of railway vehicles equipped with onboard energy storage devices have been carried out widely. Lithium ion battery (LIB), which is a major candidate for onboard energy storage devices due to its high power and energy density, has a problem that degradation is accelerated under high temperature. We conducted cyclic charge/discharge experiments to show that by connecting Lithium ion capacitor (LIC) parallelly with LIB, the current of the LIB decreases, and the rise in temperature is reduced. We also showed that the rise in temperature of the LIB is proportional to the internal heating power without depending on the ambient temperature. Finally, we compared LIC and LIB from the viewpoint of the relationship between the LIB current and net weight or volume of the total energy storage modules.

キーワード：蓄電池電車，リチウムイオン電池，リチウムイオンキャパシタ，電池寿命

1. はじめに

近年，省エネや電化区間と非電化区間の直通運転などを目的として，鉄道車両の駆動エネルギー源として蓄電媒体の車載に関する技術開発が盛んに行われている^{1) 2) 3)}。蓄電媒体としてはリチウムイオン電池（以下，LIB）が出力密度，エネルギー密度の観点から現在広く用いられているが，劣化の抑制が課題である。LIBの劣化の抑制は交換周期の延伸につながり，LIBを用いたシステムの費用対効果にも直結する。

図1に示すように，経年に伴い進行するLIB構成部材の化学的変化によるカレンダー劣化は，温度上昇により促進される^{4) 5)}。そこで，充放電電流の一部を他の蓄電媒体が担うことによりLIBの温度上昇を抑制する長寿命化手法を考える。このとき併用する蓄電媒体としては，次の条件を満たす必要がある。

- (1) LIBと同程度のパワー密度（LIB電流をある程度肩代わりするため）
- (2) LIBより優れた寿命特性（併用により蓄電媒体全体の寿命が短くなることを避けるため）

今回，これらの条件を満たす蓄電媒体としてリチウムイオンキャパシタ（以下，LIC）に着目し，研究を行った。異種媒体の併用に際しては，電圧差への対応や各媒体の電流制御を目的としてDC/DC変換器を介する方法も考えられるが，本研究ではシステム構成が簡素化できる変換器レスでの併用，すなわち異種の蓄電媒体を直接に並列接続する方法を採用した。これまでも鉛蓄電池とLIC

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

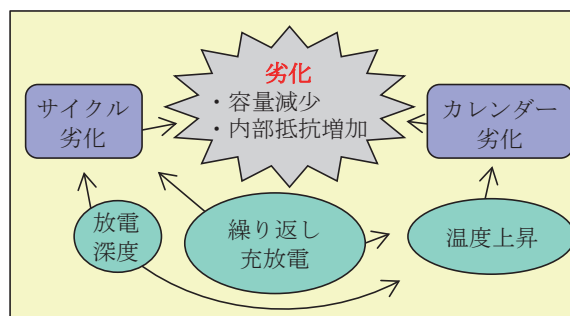


図1 リチウムイオン電池の劣化メカニズム

あるいは電気二重層キャパシタ（以下，EDLC）との並列接続による蓄電池の負担軽減や寿命延伸が報告されているが^{6) 7)}，鉄道車両用途を含む大型LIBに対するLICの並列接続による長寿命化の研究はなされていない。

本稿では，LIBモジュールにLICモジュールを併用し，LIBの長寿命化につながる温度上昇低減効果について，繰り返し充放電試験結果^{8) 9)}に基づき報告する。

2. 試験環境および試験条件

2.1 リチウムイオンキャパシタ

LICはハイブリッドキャパシタとも呼ばれ，EDLCと同様の正極（活性炭）およびLIBと同様の負極（Li吸蔵炭素）から構成される，EDLCとLIBの中間的な特性を持つ蓄電媒体である。すなわち，EDLCより高い電圧およびエネルギー密度を持ち，低温環境での性能や寿命の面でLIBより優れた特性を持つ⁶⁾。また，EDLCと

特集：車両技術

同様に大きなパワー密度を持つため、大電流での充放電が可能である。表1に、試験に用いたLICおよびLIBモジュールの諸元を示す。

表1 試験対象モジュールの諸特性

モジュール	LIC	LIB
セル数	4セル直列	8セル直列
使用電圧範囲 (V)	9.0 - 15.0	20.7 - 29.6 (※1)
定格電流 (A)	40	30
内部抵抗 (mΩ)	7.5	4.8 (※2)
静電容量 (F)	500	約5000 ~ 25000 (※3)
定格容量 (Ah)		30
質量 (kg)	2.7	19.5
寸法 (mm)	260 × 60 × 200	414 × 232 × 147
体積 (L)	3.12	14.12

値は下記を除き仕様書に定められた25℃定格値
 ※1：試験時における実質的な使用可能範囲
 ※2：電池温度約25℃における実測値
 ※3：放電カーブの傾きから得た等価静電容量であり、SOCにより異なる

2.2 試験方法

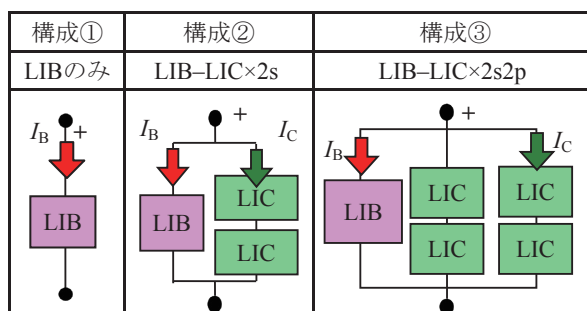
試験では、LIBモジュールとLICモジュールから構成されるモジュール群に対して後述する充放電電流パターンを繰り返し通電し、全てのモジュールの温度がほぼ飽和した時点で試験終了とした。各試験で、各モジュール電流およびLIB温度を測定した。

表2に試験対象モジュール群の構成一覧を示す。構成①はLIB1台のみの構成、構成②はLIB1台に対しLICを1並列(1バンク)、構成③はLIB1台に対しLICを2並列(2バンク)接続した構成である。なお、LICモジュールの使用電圧範囲がLIBモジュールのおよそ半

分なので、LICモジュール2直列をLIBに並列接続する基本単位とした。充放電装置は直流電源(充電)および電子負荷装置(放電)を用い、制御用シーケンサから充放電パターンに基づいた電流値を指令することにより定電流充放電を行った。図2に構成③の場合の試験装置回路図および測定・監視項目の一覧を示す。

表2に示すように、試験では最大4台のLICモジュールを同時に使用した。充放電試験前の予備試験にてこれらLICモジュールの内部抵抗および静電容量を個別に測定し、個体差は無視できることを確認した。

表2 試験対象モジュール群の構成



2.3 充放電電流パターン

充放電試験で採用した繰り返し充放電パターンは、鉄道車両への適用という観点から、LH02“Hi-tram”形架線レスLRV¹⁾が力行→惰行→制動(回生)→停車の一連の状態を経る際の典型的な速度パターン(図3上段)に対応する蓄電媒体1バンクあたりの充放電パターン(図3下段(a))に基づき決定した。なお、搭載する蓄電池容量は実際のLH02形電車の半分(600V-30Ah×2並列)と想定した。以降、電流の符号は蓄電モジュール群への充電方向を正とする。試験に当たっては図3下段のパターン(a)の最大出力は充放電装置の最大出力

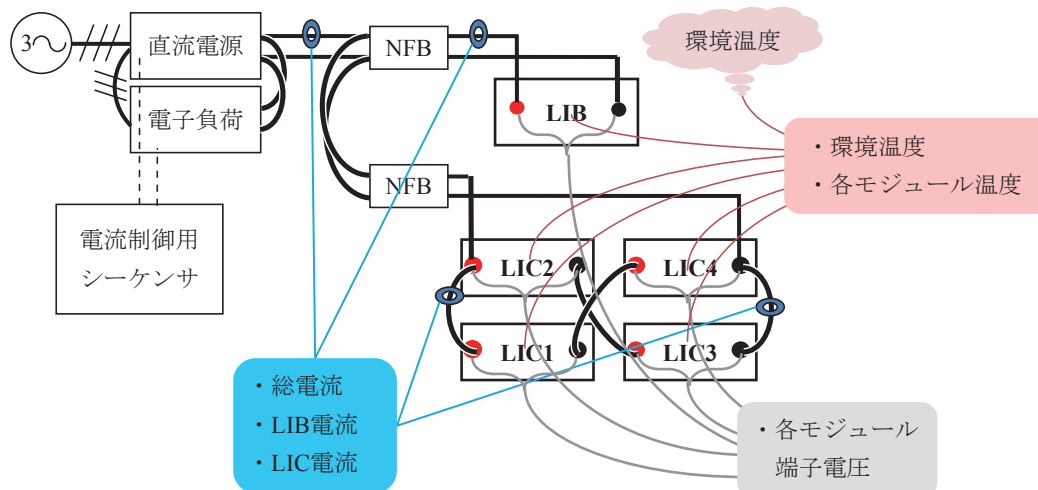


図2 試験装置の配線図および測定項目(構成③の例)

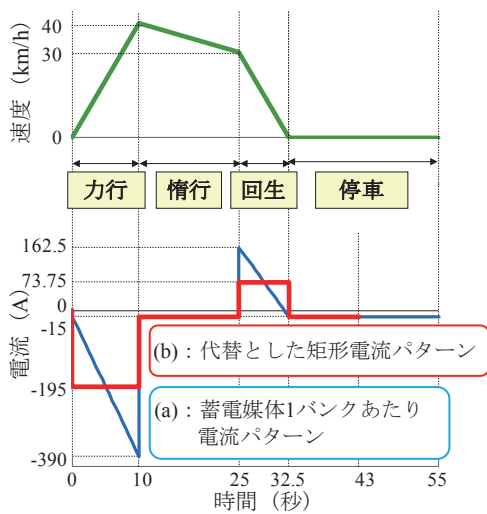


図3 架線レス LRV の走行を想定した速度および電流パターン

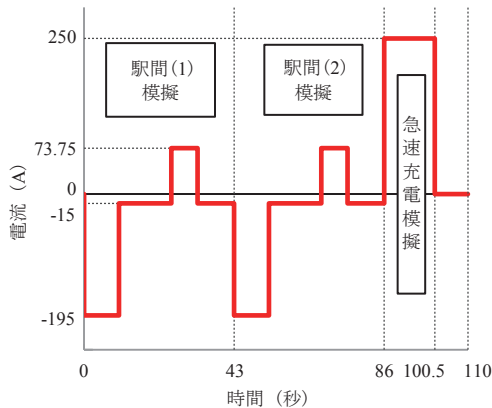


図4 実車模擬電流パターン（1周期分）

制限を超え実施不可だったため、代替として力行・回生時の電流値を平均値で置き換えた矩形パターン (b) を適用した。ただし、温度上昇に寄与する RMS 電流がパターン (a) と等しくなるよう、停車中に相当する時間を短縮した。モジュール群に通電される電流パターンの1周期分は、図4に示すように、車載蓄電装置による走行を2駅間分行った後、駅停車中の急速充電で充電率を回復するパターンとした。

2.4 温度環境

試験対象モジュールは、環境温度が安定した室内におかれた。試験中、LIC はモジュールから約 1 m の位置に設置した送風機により、LIB はモジュール背面に固定されたファンにより一定風量で冷却された。LIB および LIC 特性に対する環境温度の影響を把握するため、試験は夏期（環境温度 30℃程度）および冬期（環境温度 8-10℃程度）の2期にそれぞれ行った。

3. 試験結果

3.1 定性的比較

図5に LIB 温度 T_B および環境温度 T_{env} の時間変化の例として、表2に示す構成② (LIB-LIC2s) に対する冬期試験の結果を示す。全ての試験は図5の例と同様に環境温度が安定した中で行われ、LIB 温度が飽和したとみなせた時点で試験終了した。

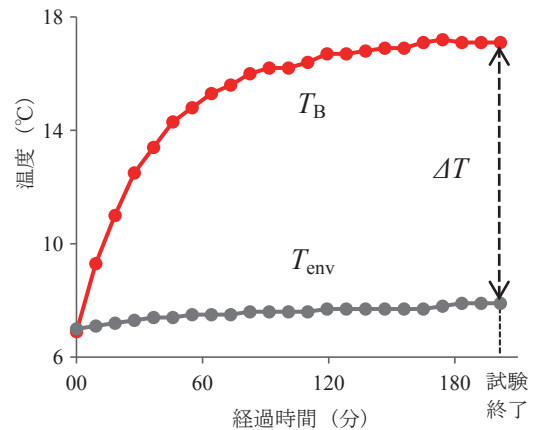


図5 試験中の環境温度および電池温度の推移

3.1.1 LIC 並列数の影響

図6に、表2に示す各モジュール構成における実車模擬通電パターンの1周期間の LIB 電流 I_B および LIC 電流 (バンクあたり) I_C の夏期試験結果を示す。なお、構成③ (LIB-LIC2s2p) においては LIC 電流は図2に示した通り2バンクとも測定したが、両バンクの電流値は試験を通じてほぼ等しかったため、以降は構成③の LIC 電流については片方のバンクの値を代表して扱う。

図6に記すように、LIC が充放電電流の一部を担うことにより LIB 電流のピークが軽減されること (ピークカット) を確認した。一方、LIB と LIC の特性の差異により、充放電電流がゼロに近い場合でもモジュール間に横流が確認された。これらの寄与による LIB 電流軽減効果の評価については次節で述べる。

3.1.2 環境温度の影響

図7に構成③ (LIB-LIC2s2p) における夏期および冬期試験の LIB 電流 I_B および LIC 電流 I_C の比較を示す。大電流の充電・放電にパターンが変化した際、総電流に対する LIC 電流の分流比はパターン変化直後から指数関数的に減少することが分かるが、低温環境下では減少ペースが遅い (時定数が大きい)。その結果夏期試験と比較して LIC への分流がやや増え、LIB 電流の低減につながっている。

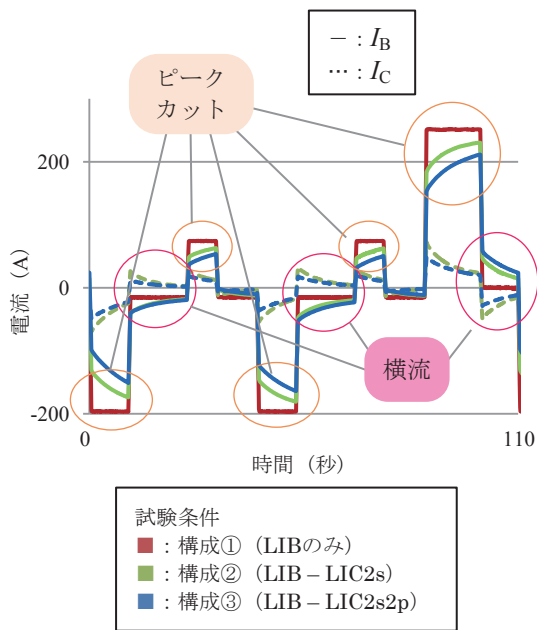


図6 モジュール構成ごとの LIB および LIC 電流分布

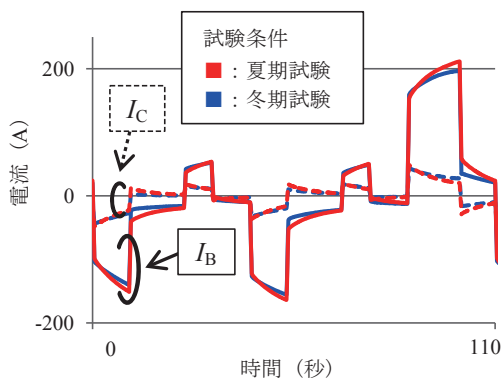


図7 LIB および LIC 電流分布の温度依存

3.2 定量的比較

LIB 電流 I_B (A) の低減効果の定量的な比較のため、充放電電流パターンの1周期(110秒間)を通しての実効値(RMS) $I_{B,RMS}$ (A) を指標とする。

$$I_{B,RMS} = \sqrt{\frac{1}{110} \int_0^{110} I_B^2(t) dt} \quad (1)$$

表3に、LIBのRMS電流 $I_{B,RMS}$ 、LIB温度 T_B 、環境温度 T_{env} 、吸気温度と電池温度の差(温度上昇) ΔT について、各試験条件(モジュール群構成)および試験時期ごとに示す。夏期試験を例にとり比較すると、LIBのRMS電流 $I_{B,RMS}$ は構成②(LIB-LIC2s)の場合108Aとなり構成①(LIBのみ)の126Aと比較して14%減、構成③(LIB-LIC2s2p)では94Aとなり構成①から25%減少することを確認した。また、LIBの温度上昇 ΔT についても構成①の8.5℃に対し、構成②で6.3℃(-2.2℃)、構成③で4.7℃(-3.8℃)と、軽減されることが確認された。冬期試験の結果についても、構成①~③における $I_{B,RMS}$

はそれぞれ夏期試験の場合とほぼ同様であった。LIBの温度上昇 ΔT は構成①の11.6℃に対し、構成②で9.2℃(-2.4℃)、構成③で7.8℃(-3.8℃)と、LIC併用による温度上昇低減量は夏期試験と同程度であった。

表3 試験終了直前の LIB RMS 電流および各温度

モジュール構成		$I_{B,RMS}$ (A)	T_{env} (°C)	T_B (°C)	ΔT (°C)
夏期試験	① LIBのみ	126	30.6	39.1	8.5
	② LIB-LIC2s	108	30.9	37.2	6.3
	③ LIB-LIC2s2p	94	31.6	36.3	4.7
冬期試験	① LIBのみ	128	9.3	20.9	11.6
	② LIB-LIC2s	105	7.9	17.1	9.2
	③ LIB-LIC2s2p	90	8.2	16.0	7.8

ここで、LIBの温度上昇低減がLIBのカレンダー劣化へ与える影響について試算例を示す。カレンダー劣化の度合いは、一般に蓄電池の初期容量に対する現在の容量の比である容量保持率(%)により下記の式で表される^{4) 5)}。

$$\text{容量保持率(\%)} = 100 - K_s \sqrt{D} \quad (2)$$

ここで、 D は経過時間(日数)、 K_s は劣化速度係数であり、温度に依存する。 K_s の推定手法については各種研究がなされているが、ここでは文献5)にある計算式に基づき概算する。3.8℃の温度低下は、一定温度で保管した場合のカレンダー劣化が16%抑制されることに相当する⁵⁾。図8に、ある温度で等温保管した場合(構成①相当)および3.8℃低い環境で保管した場合(構成③相当)の容量保持率の時間推移の模式図を示す。LIBの寿命を容量保持率が80%まで低下した状態と定義すると、3.8℃の温度上昇低減は等温保管時のカレンダー寿命への影響に換算して約1.5倍の長寿命化に相当する結果を得た。

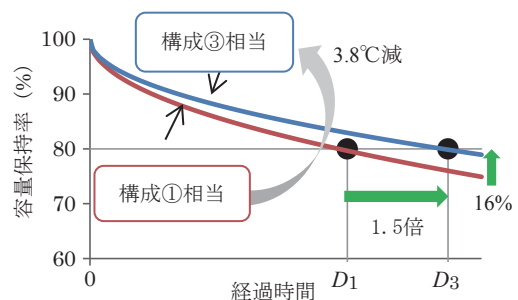


図8 一定温度保管時の容量保持率の模式図

3.3 LIB電流とLIB温度上昇の相関

LIB電流軽減量と温度上昇抑制効果との相関について考察するため、温度飽和時のLIBの平均内部発熱パワー $R_B I_{B,RMS}^2$ (W) を採用した。ここで、 R_B は飽和温度におけるLIBの内部抵抗であり、表4に示す参考値を用い

た。平均内部発熱パワーを横軸にとり、LIB 温度一吸気温度の差のプロット、および夏期・冬期試験全てのプロットに対する線形近似を図9に示す。図9から、LIB の温度上昇量（環境温度との差）は、LIB 電流および内部抵抗から得られる平均内部発熱パワーに対し、温度領域によらず一意な線形関係で表せることが明らかになった。LIB の冷却条件が一定の下での LIB 温度上昇量 ΔT の大小比較は平均内部発熱パワーの大小比較によって可能となる。また、この比例関係に基づき、LIB 電流の測定値

から LIB 温度について、推定できる可能性がある。

4. 総質量および総体積に対する温度上昇抑制効果の比較

ここまで、LIB モジュールに LIC モジュールを併用した場合の温度上昇低減効果について論じてきた。一方、LIB モジュールあたりの電流の低減は、LIC 併用ではなく LIB の並列数を増やすことによっても達成される。すなわち、LIB モジュール n 並列から成る構成に更に同一 LIB モジュールを1並列追加した場合、LIB モジュールあたりの電流 $I_{B,RMS}$ は $n/(n+1)$ 倍となる。

また、蓄電媒体の車載に際しては、電気的特性や温度特性のほか、蓄電媒体全体の質量および体積が艱装の観点から重要な指標となる。

そこで、LIB と LIC を併用する場合と LIB の搭載量を増やす場合について、蓄電媒体全体の質量および体積に対する LIB の温度上昇抑制効果の観点から比較検討を行った。尺度として、規格化質量と規格化体積の概念を用いた。それらはそれぞれモジュール併用時の蓄電媒体全体の総質量または総体積を LIB モジュール1台の質量または体積で除したものであり、LIB モジュール1台のみの場合を1とした蓄電媒体全体の総質量または総体積を表す。各モジュールの質量および体積は表1に示す値を用いた。

規格化総質量を横軸とし、LIB の RMS 電流の2乗 $I_{B,RMS}^2$ (A²) を縦軸にとり、夏期試験結果をプロットした結果を図10(a)に示す。縦軸である $I_{B,RMS}^2$ が小さいほど LIB の温度上昇 ΔT が小さいことを意味するが、内部抵抗が表4に示す通り温度に依存するため、 $I_{B,RMS}^2$ と

表4 温度ごとの LIB 内部抵抗 (参考値)

モジュール構成		電池温度 T_b (°C)	電池内部抵抗 R_b (mΩ)
夏期試験	① LIB のみ	39.1	3.8
	② LIB-LIC2s	37.2	
	③ LIB-LIC2s2p	36.3	
冬期試験	① LIB のみ	20.9	4.9
	② LIB-LIC2s	17.1	5.5
	③ LIB-LIC2s2p	16.0	6.0

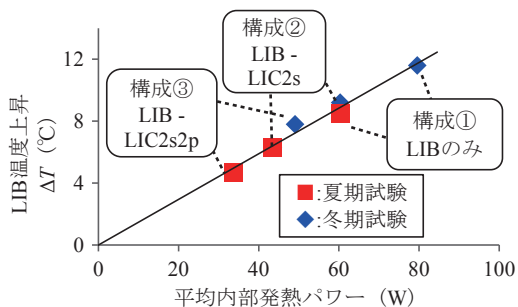
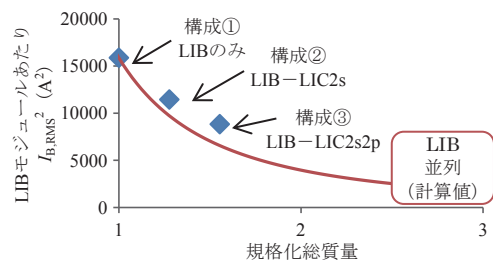
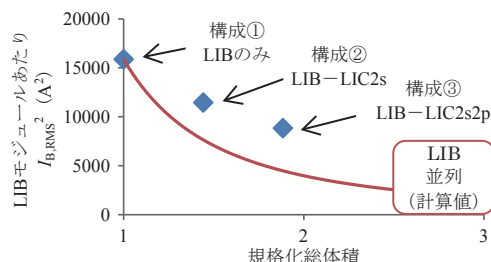


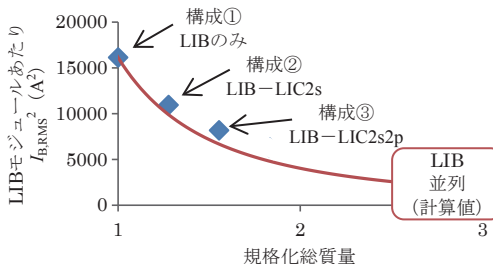
図9 LIB の温度上昇と内部発熱の関係



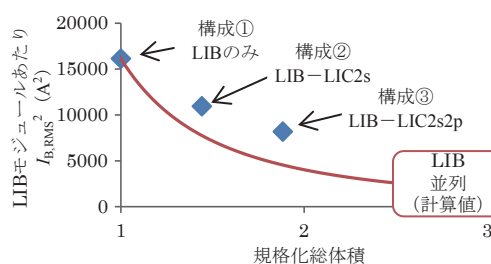
(a) 夏期試験における総質量に対する $I_{B,RMS}^2$



(b) 夏期試験における総体積に対する $I_{B,RMS}^2$



(c) 冬期試験における総質量に対する $I_{B,RMS}^2$



(d) 冬期試験における総体積に対する $I_{B,RMS}^2$

図10 蓄電媒体全体の総質量、総体積に対する LIB の RMS 電流の2乗

特集：車両技術

LIBの温度上昇とは必ずしも比例関係にない。ここで、LIB-LIC併用構成のプロットは表3に示す実測値である。曲線で示されるのはLIBのみで並列群を構成する場合についての計算値であり、LIB並列数を n 倍とすると蓄電媒体の総質量および総体積は n 倍、LIBモジュールあたりの電流は $1/n$ 倍となる。同様に規格化総体積を横軸としたものを図10(b)に示す。更に、冬期試験結果についても図10(c)および(d)に示す。

図10(a)-(d)から、本稿で行った試験の構成においては、夏期、冬期環境ともLICを追加する場合よりLIBを追加する場合のほうが、質量増または体積増に対する温度上昇抑制効果が見られた。この結果に基づき、LIBモジュール増設よりLICモジュール併用が優位となる場合について、以下の指針が得られる。

- (1) 内部抵抗が比較的大きい高エネルギー密度型LIBと併用し、LICが分担する電流が今回の試験条件による結果より増加(=LIBモジュールあたりの電流が減少)すると想定される場合(図11(A)に相当)
- (2) 内部抵抗や容量など電気的性質を保ちつつ、高電圧用途に最適化しモジュール筐体や配線などの体積および質量を削減したLICモジュールを用いた場合(図11(B)に相当)
- (3) 車両への蓄電池の艤装に際し、蓄電媒体搭載空間の体積や形状の制約でLIBを追加搭載できないが、今回用いたような小型のLICモジュールは搭載可能な場合

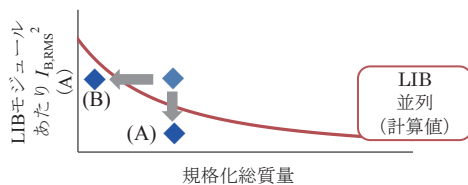


図11 LICモジュール併用による温度上昇抑制効果がLIB増設を上回る場合(想定)

5. おわりに

本稿では、LIBとLICの併用によるLIBの長寿命化について報告した。LIBモジュールおよびLICモジュールを用いて行った定置充放電試験により、下記の結果が得られた。

- (1) LIBモジュールとLICモジュールの並列接続により、充放電電流の一部をLICが負担することによりLIBの温度上昇を抑制できることを実験的に確認した。
- (2) LIBの温度上昇量(環境温度との差)は、LIB電流および内部抵抗から得られる平均内部発熱パワーに対し、温度領域によらず一意な線形関係で表せるこ

とを明らかにした。

- (3) 蓄電媒体の追加によるLIBの温度上昇抑制効果について比較した結果、LIBとLICを併用する場合よりLIBの並列数を増やす場合の方が温度上昇抑制効果が見られた。一方、車載艤装空間の制約によりLIBの並列数を増やせない場合など、LIC併用が有利となる条件について指針を得た。

今後は、LIBおよびLIC併用時の温度上昇抑制効果についてシミュレーションモデルの構築を行う予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり、旭化成FDKエナジーデバイス株式会社の関係各位より多大なるご協力を頂いた。ここに謝意を表する。

文献

- 1) 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, Vol.3, 3-18, pp. 187-190, 2008
- 2) 滝口: 蓄電池駆動電車EV-E301系の概要, R&M, Vol.22, No.5, pp.4-7, 2014
- 3) 田口, 門脇, 仲村, 三木, 畠田, 有田: 交流電化区間に対応した蓄電池電車主回路の開発と走行試験による蓄電池性能評価, 鉄道総研報告, Vol.28, No.7, pp.17-22, 2014
- 4) 田口, 門脇: リチウムイオン電池の温度変動に対応した容量減少推定法と劣化係数測定法の提案, 平成23年電気学会産業応用部門大会, Vol.3, 3-93, pp. 429-430, 2011
- 5) 廣田, 小笠原, 船渡, 三原, 出口, 初田: 電気自動車工学, 森北出版株式会社, pp.227-237, 2010
- 6) 電気学会・移動体用エネルギーストレージシステム技術調査専門委員会: 電池システム技術, オーム社, pp. 164-178, 2012
- 7) 宮脇, 藤原, 石原, 戸高, 岡田, 刀谷, 井上: 鉛蓄電池とEDLCを併用した電気式産業車両の検討, 平成19年電気学会産業応用部門大会, Vol.2, 2-7, pp. 177-180, 2007
- 8) 三木, 田口: リチウムイオンキャパシタの併用によるリチウムイオン電池の温度上昇抑制効果の実験的検討, 平成25年電気学会産業応用部門大会, Vol.5, 5-28, pp. 193-196, 2013
- 9) Miki, M., Taguchi, Y., "Reduction of Current and Rise in Temperature of Lithium Ion Battery by Combining with Lithium Ion Capacitor," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference VPPC, 2014.