

電動パワーステアリング用補助電源システムおよび 高耐熱リチウムイオンキャパシタの開発

Development of an Auxiliary Power Supply System for Electric Power Steering and a High-heat Resistant Lithium-ion Capacitor

三尾巧美 T. MIO 小松原幸弘 Y. KOMATSUBARA 大参直輝 N. OHMI 木元雄輔 Y. KIMOTO
飯塚健太郎 K. IIZUKA 管沼智幸 T. SUGANUMA 丸山 駿 S. MARUYAMA 西 幸二 K. NISHI

To motorize the steering system of a full-size vehicle equipped with a 12V power supply, JTEKT is developing an auxiliary power supply system for electric power steering (EPS) using a lithium-ion capacitor. In addition, as a result of working on expanding the temperature range of the lithium-ion capacitor in order to mount the system in a full-size vehicle free of a cooling-heating system, the world's first operating temperature range of -40 to 85 degrees C was achieved. The developed capacitor operates stably even in high temperatures exceeding 100 degrees C by restricting the upper limit of operating voltage.

Key Words: energy storage device, lithium-ion capacitor, heat-resistance, low temperature output, EPS

1. はじめに

先進運転支援システム (ADAS) と自動運転 (AD) は、現在および次世代の自動車の二つの主要トピックスである。2018年に首相官邸が発行した官民 ITS 構想・ロードマップには、SAE International J30162 (2016年9月)によって定義された自動運転レベルのレベル4を、2025年ごろから高速道路などの限られた場面において市場化させるという目標が掲げられている^{1), 2)}。

AD機能は、車両に何らかの故障が発生した場合においても、車両の前後・左右方向の誘導が継続されなければならない^{3)~5)}。したがって、ADレベルが高い車両に搭載するステアリングシステムは機能安全性向上が不可欠である。特に運転者が運転に介入しないADレベル4の車両においては、走行中に電源失陥・瞬断などが生じてもステアリングシステムが継続動作することを求められ、現行のステアリングシステムに対する機能安全性の向上が不可欠である^{6), 7)}。

また、ADASおよびAD機能を実現するためには、外部ECUより操舵コントロール可能な電動パワーステアリングの搭載が望ましい。しかしながら、車重3トン

以上、ステアリングラック軸力が14kN以上を要求される大型車両には油圧式パワーステアリングが搭載されている。これら大型車両に電動パワーステアリング (EPS) を搭載すると、すえ切り操舵・急操舵時などにおいて、短時間ではあるもののEPSが必要とする十分な電力を、12V車両電源から供給することができない、いわゆる鉛蓄電池から供給可能な最大電流量を超過するため、操舵途中にステアリングホイールが重くなる現象が発生する。この現象をアシスト不足と言い、この現象を解消するために、当社では蓄電デバイスにリチウムイオンキャパシタを用いたEPS用の補助電源システムを開発中である^{8)~10)}。本システムは高い機能拡張性を有し、前述したEPSの機能安全性向上にも貢献できる。これについては、次章で詳細を説明する。

また、同システムを安価に実現し、車両搭載自由度を高めるには、冷却装置を使用せずに車両搭載する必要がある。従来のリチウムイオンキャパシタは動作温度範囲が-20~60℃程度と狭く、車両の温度要求に不適合であり冷暖房装置が不可欠であったため、リチウムイオンキャパシタの動作温度範囲拡大についても当社独自で取り組むこととした。

2. EPS 用補助電源システム

2.1 コンセプト

EPS 用補助電源システムは EPS や 12V 車両電源を変更することなく、大型車両に EPS を搭載した際に発生する電力不足を解消することを目的に開発した。

図 1 に開発システムの試作品外観を示す。図 2 に示すとおり、本システムは 12V 車両電源と EPS システムとの間に設置する別体装置であり、蓄電デバイスとその充電・放電を制御する充放電コントローラから構成される。車両電源および EPS の電力消費が低い状況下において蓄電デバイスに電力を蓄え、すべ切り操舵時などの EPS が大電力を要求した状況において、蓄えておいた電力を利用する。充放電コントローラおよび蓄電デバイスには、自動車に要求される各種信頼性（機械的ストレス、電気的ストレス、動作温度範囲）などが求められる。



図 1 EPS 補助電源システムの試作品外観 (W137×D83×H80mm)

External view of an auxiliary power supply system for EPS (W137×D83×H80mm)

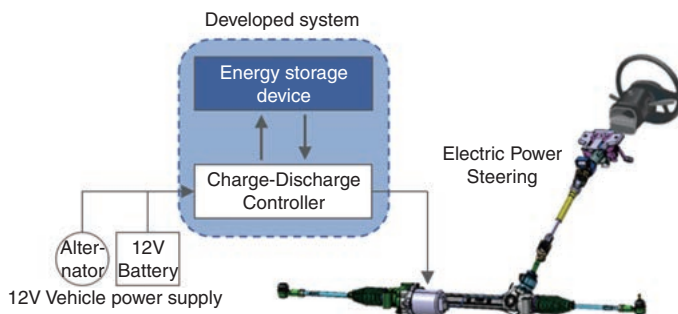


図 2 システム構成
System configuration

2.2 構成および概要

図 3 に EPS 用補助電源システムのブロック図を示す。本システムは、12V 車両電源 [A] と EPS システム [B] との間に設置する。蓄電デバイスには充放電速度、繰り返し充放電寿命、エネルギー密度、安全性などを考慮し、リチウムイオンキャパシタ [C] を採用した。

リチウムイオンキャパシタと 12V 車両電源は、充電回路 [D] と放電回路 [E] で接続される。充放電 ECU の中央処理装置 (CPU) [F] は、EPS や 12V 車両電源の状態を監視し、EPS が 12V 車両電源の供給可能電力を上回る電力を必要とする状態となると放電回路を動作させる。12V 車両電源にリチウムイオンキャパシタの電圧を加算し、供給電圧を高めることで EPS を高出力化する (図 3 中 x)。リチウムイオンキャパシタの電圧が低下すると、充電回路を動作させて 12V 車両電源から充電を行う (図 3 中 y)。

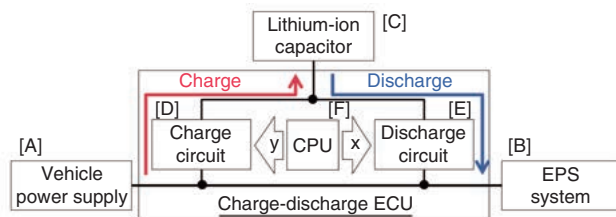


図 3 EPS 用補助電源システムのブロック図
Block diagram of an auxiliary power supply system for EPS

2.3 回路動作

同システムの詳細な回路動作を図4に示す。直線走行時など、EPSの消費電力が小さい場合はFET1とFET2がクローズして、EPSは12V車両電源によってのみ動作する。すべり切り操舵、急操舵時など、EPSが大電力を必要とする場合はFET1・FET3がクローズして、リチウムイオンキャパシタが12V車両電源に直列に接続される。12V車両電源にリチウムイオンキャパシタのセル電圧が加算され、電源電圧が昇圧される結果、EPSへの大電力供給が可能となる。リチウムイオンキャパシタの直列数の増加に伴って、システムの最大出力電力は増加する。システムが作動してリチウムイオンキャパシタの電圧が低下したら、FET4・FET5・コイルを使用してリチウムイオンキャパシタを再充電する。

なお、リチウムイオンキャパシタは1セルあたり、3Vの平均動作電圧を有していることから、キャパシタを4直列することでシステム内部に12V電源が構築されることとなる。走行中に電源障害が発生した場合、FET3・FET5をクローズすることによって、システム内に構築された12V電源によってEPSを継続駆動させることができる。これは電源故障を含むEPSの完全なフェイルオペレーショナルを必要とするADレベル4の実現に有用なシステムである。

万が一、回路やFETに何らかの問題が生じた場合においても、FET6をクローズすることで、バイパス回路によってEPSが駆動できるシステムとなっている。

一つの回路で多彩な機能を発揮させられる拡張性の高さが当社開発システムの特長であり、本システムの有用性は実車評価においても立証することができたが、冷却装置を使用せずに本システムを車両搭載するには、リチウムイオンキャパシタの高耐熱化が必須である。そこで、高温環境下におけるリチウムイオンキャパシタの性能劣化抑制に取り組んだ。

3. リチウムイオンキャパシタ

3.1 構造・特長

リチウムイオンキャパシタは、リチウムイオン二次電池と電気二重層キャパシタの中間的な特性を有する新しい蓄電デバイスであり、リチウムイオン二次電池の黒鉛系負極と電気二重層キャパシタの活性炭正極を組み合わせた構造を有している^{11), 12)} (図5)。

電気二重層キャパシタの長所である、瞬間的に大きな電力を供給・回生することができる入出力特性と、繰り返し充放電耐性に優れる特長を維持しながら、体積エネルギー密度が3～6倍に増加した蓄電デバイスであるため、今後さまざまな産業分野での活用が期待されている¹³⁾。しかしながら、用途拡大に向けた課題の一つに動作温度範囲の拡大が挙げられており、約60℃以上の温度で生じる性能劣化の抑制が必須である。

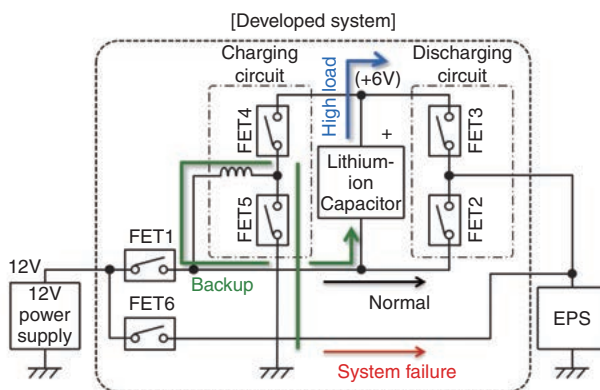


図4 回路動作詳細
Circuit operation details

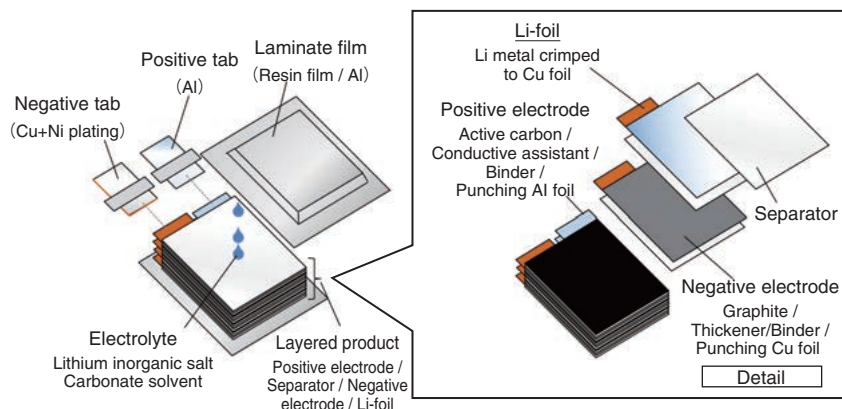
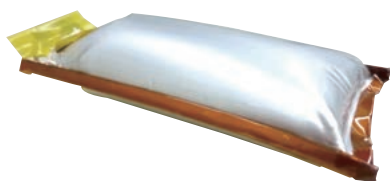


図5 リチウムイオンキャパシタの一般的な構造
General structure of a lithium-ion capacitor

3.2 動作温度範囲外における劣化現象の把握

文献調査および検証試験によって、従来のリチウムイオンキャパシタが動作温度範囲よりも高い温度領域や低い温度領域において、どのような現象が発生してリチウムイオンキャパシタの性能低下が生じているかを明らかにした。

高温領域では、電解液の熱分解に起因する不可逆的な内部抵抗増加と静電容量の減少が不可逆的に進行した。電解液の分解ガスの発生に伴ってキャパシタが膨張し、最終的にセル破裂に至った(図6)。電解液の分解は、リチウムイオンキャパシタおよびリチウムイオン二次電池で一般的に使用される電解質である、6ふっ化リン酸リチウム(LiPF₆)の熱分解に起因することが分かった¹⁴⁾。



(85°C, 100 時間)

図6 高温環境下に保管したリチウムイオンキャパシタ
Lithium ion capacitor stored in a high temperature environment

低温領域では、内部抵抗の増加に伴う出力低下が可逆的に生じ、-20°C以下になると電解液が凍結し、リチウムイオンキャパシタを充放電することができなくなった。リチウムイオンキャパシタの負極はリチウム二次電池と同様の材料系であり、充放電時に化学反応を利用す

る。化学反応の速度は環境温度に依存するため、温度低下に伴ってリチウムイオンキャパシタの出力が低下する。

以上の検討結果から、リチウムイオンキャパシタの動作温度範囲を広げるためには、主として電解液の改良が必要であることが分かった。

3.3 改善事項

表1に改善実施事項を示す。高温時における電解液の熱分解の原因となっていた電解質(6ふっ化リン酸リチウム)を、耐熱性に優れるイミド系のリチウム化合物に変更した。さらに、電解液溶媒の配合比などを見直して、-40°Cで凍らず、100°Cでも沸騰しない当社独自の組成系に変更した。さらに、キャパシタ材料同士の相性を制御する当社独自改良を施した。

4. 評価試験条件

4.1 リチウムイオンキャパシタの製作

アルミはく上に活性炭を塗布したものを正極、銅はく上に黒鉛を塗布したものを負極とし、セパレーターを介して正極・負極を交互に積層した。

- ①一般的な電解液(1.0 mol/L LiPF₆ / Ethylene carbonate (EC) : Ethyl methyl carbonate (EMC) : Dimethyl Carbonate (DMC) = 3 : 4 : 3)
- ②新電解液(高耐熱電解質/高沸点かつ低凝固点な非水系溶媒)
- ③新電解液+当社独自改良

の3水準で動作電圧2.2~3.8V、静電容量500Fのラミネート型リチウムイオンキャパシタを製作した。

表1 改善実施事項
Implementation items

	Technical challenge	Implementation items
Heat-resistance improvement	Prevention of electrolyte liquid decomposition	Adoption of high-heat resistant electrolyte salt
	Prevention of electrolyte liquid boiling	Adoption of high boiling-point organic solvent
	JTEKT original improvements	
Improvement of low temperature output	Prevention of electrolyte liquid freezing	Adoption of low freezing point organic solvent
		Optimization of organic solvent mixing ratio
	Prevention of internal resistance rising	Affecter identification
		Changing of positive and negative materials

4.2 耐熱性

リチウムイオンキャパシタの高温耐久試験は、IEC 62813-2015「電気および電子機器用リチウムイオンキャパシタの試験方法－電気的特性」の「高温連続定格電圧印加試験」に準拠し、85℃の雰囲気温度において3.8Vのフロート充電試験を実施した。同規格では、フロート充電試験1000時間後の内部抵抗増加率が50%以下であり、静電容量減少率が20%以下であることを要求している。

4.3 大電流充放電耐性

開発したリチウムイオンキャパシタの大電流充放電に対する耐性を調べた。キャパシタの性能劣化は、最高温度を85℃から110℃まで5℃ずつ変化させる充放電サイクル試験により確認した。キャパシタの上限電圧を3.8Vから3.6Vまで段階的に減少させ、約900Cの充放電レートで約10000回の充放電試験を実施した。なお、充放電のモードはCC(定電流)－CV(定電圧)モードである。

サイクル試験後、IEC 62813-2015に準拠して内部抵抗および放電容量を測定し、約10%以上の性能劣化を試験OK/NGのしきい値として設定した。

4.4 低温特性

低温環境下における内部抵抗上昇率は、25℃における内部抵抗に基づいて調べた。測定方法はIEC 62813-2015に準拠している。開発したリチウムイオンキャパシタの

シタの-40℃における充放電サイクル性能も調べた。動作電圧範囲は2.2～3.8V、CC-CV充放電モード、充放電レートは85Cとした。リチウムイオンキャパシタの性能確認時はワーク表面温度を25℃に戻したのち、IEC 62813-2015準拠した条件で内部抵抗および放電容量を測定した。

5. 各種評価結果

5.1 耐熱性

結果を図7に示す。従来のリチウムイオンキャパシタは、容量維持率と内部抵抗上昇率の両方の悪化が著しい。試験開始から約100時間で規格要求を下回った。電解質中のLiPF₆の熱分解によるガスが発生し、リチウムイオンキャパシタの著しいセル膨張のために試験を中断した。電解液のみを変更したキャパシタは、容量維持率が向上し、セル膨張が解消した。しかしながら、内部抵抗上昇率については改善が認められなかった。電解液交換および当社独自改良を施したキャパシタは、フロート充電試験が規格で指定された1000時間を超えても、容量維持率および内部抵抗増加率の要求値を満足し続けた¹⁵⁾。以上の結果から、リチウムイオンキャパシタの耐熱性を向上させるためには、構成材料の耐熱性の向上だけでなく、各材料の性能を十分に発揮させるための材料の相性を制御する必要があることが明らかとなった。

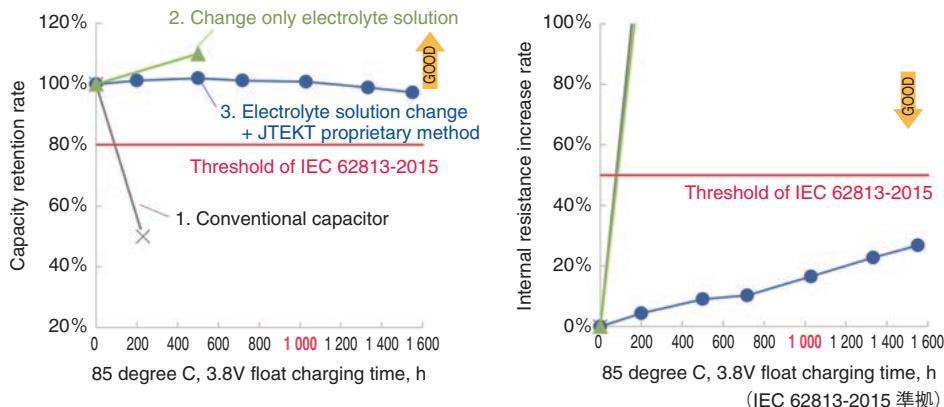


図7 85°Cでのフロート充電の試験結果
Test result of float charging at 85 degree C

表2 内部抵抗増加挙動
Internal resistance increase behavior

		Capacitor upper limit voltage, V				
		3.60	3.65	3.70	3.75	3.80
Test atmospheric temp., deg. C	110	24.6%				
	105	7.1%	5.7%			
	100	3.1%	1.8%	6.8%		
	95	0.3%	2.2%	3.7%	5.1%	
	90	0.7%	-0.2%	3.0%	2.1%	
	85	0%	2.1%	3.5%	3.5%	7.7%

Mesuring method: IEC 62813-2015

表3 容量現象挙動
Capacitance reduction behavior

		Capacitor upper limit voltage, V				
		3.60	3.65	3.70	3.75	3.80
Test atmospheric temp., deg. C	110	3.0%				
	105	2.3%	-0.3%			
	100	1.6%	-0.2%	0.7%		
	95	0.8%	0.5%	0.2%	0%	
	90	2.0%	0.9%	1.4%	0.6%	
	85	0.0%	0.8%	0.5%	1.4%	0.2%

Mesuring method: IEC 62813-2015

5.2 大電流充放電耐性

結果を表2および表3に示す。リチウムイオンキャパシタの上限電圧を3.8Vから3.6Vへ制限することにより、100°C環境下においてもリチウムイオンキャパシタの性能変化は5%未満でほとんど変化がみられない。リチウムイオンキャパシタの耐熱性を向上させることが、大電流充放電を繰り返した際の自己発熱による劣化の抑制にも寄与することが明らかとなった。

5.3 低温特性

内部抵抗の測定結果を図8に示す。従来のリチウムイオンキャパシタは-30°C以下で電解液が凍結して充放電できなくなるのに対し、開発品は、-40°Cでも電解液が凍結することはなく、充放電が可能であった。開発品の-40°Cにおける内部抵抗は、従来品の-20°Cに

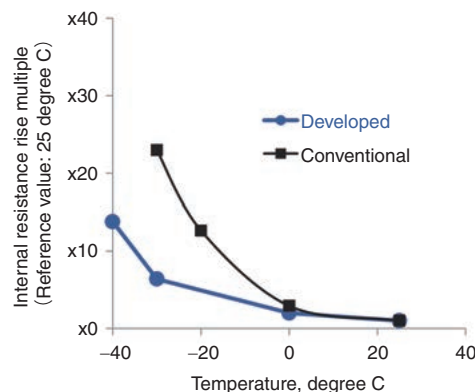


図8 低温での内部抵抗の測定結果
Measurement result of internal resistance at low temperature

おける内部抵抗とほぼ同等の値であった。

-40°Cでの充放電サイクル試験の結果を図9に示す。開発品は、20万回のサイクル試験を行ったが、若干の性能低下に留まった。高温環境だけでなく、低温環

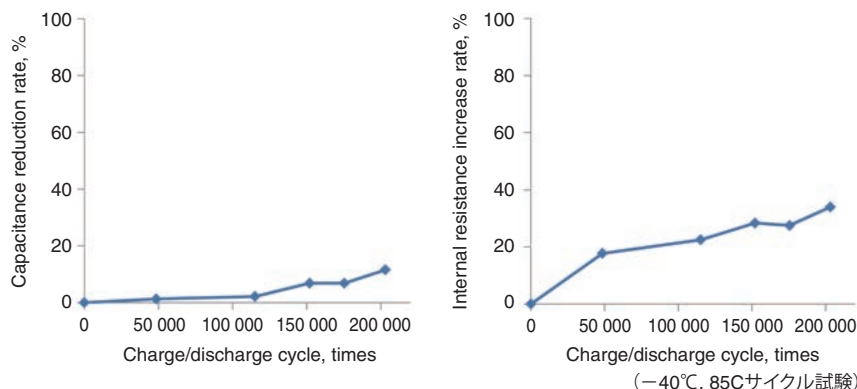


図9 低温充放電試験の試験結果
Test result of charge-discharge test at low temperature

境においてもリチウムイオンキャパシタの利点である大電流供給が可能であることを確認した。

6. おわりに

EPS用に新たに開発された補助電源システムは、12V車両電源を強化することなく、EPSを大型車両に搭載する際の電力不足を解消することが可能となる。また、開発したシステムは機能拡張性に優れ、車両の停電や一時的な停電の際には冗長電源としても機能することから、高い機能安全性が要求されるレベル4の高度自動運転システムの実現の一助となると考えられる。

また、動作温度範囲が拡大されたリチウムイオンキャパシタは、冷暖房装置を使用せずに車両に搭載可能なシステムを実現するのに役立つ。自動車だけでなくさまざまな産業分野への用途拡大が期待される。

参考文献

- 1) 首相官邸：官民ITS構想・ロードマップ2018(2018)
Available online: <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20180615/siryou9.pdf>.
- 2) SAE International: Automated Driving - Levels of Driving Automation are Defined in New SAE International Standard J3016(2016) Available online: http://www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf.
- 3) International Organization for Standardization (ISO): Road Vehicles – Functional saFETy, ISO 26262, ISO Geneva, Switzerland(2011).
- 4) International electrotechnical commission(IEC): Functional saFETy of electrical/electronic/programmable electronic saFETy-related systems, IEC 61508-6 Annex B, IEC Geneva, Switzerland (2010).
- 5) T. KANEKO, H. NAKAMURA, R. FUKASAWA: SaFETy design for Automated Driving Systems, JARI Research Journal(2016)20161003.
- 6) 村田正博：ジェイテクトが考える自動運転化に向けたステアリングシステムの展望, 自動車未来サミット Spring, Tokyo, Japan, 11 April (2019).
- 7) 大橋正幸：EPS用駆動2系統MCU, Denso Technical Review, Vol. 21(2016)48-53.
- 8) S. SHINODA, M. HIGASHI, T. SUGIYAMA: Development of Auxiliary Power Supply System for Electric Power Supply Steering, JSAE Annual Congress (Spring) Proceedings (2014) 20145065.
- 9) F. SATO, M. HIGASHI, T. SUGIYAMA: Development of Auxiliary Power Supply System for Electric Power Supply Steering, JSAE Annual Congress (Spring) Proceedings (2015) 20155307.
- 10) T. HIBINO, F. SATO, S. SHINODA, T. SUGIYAMA: Auxiliary Power Supply System for Electric Power Supply Steering, JSAE Annual Congress (Spring) Proceedings (2018) 20180195.
- 11) H. TANIZAKI, K. MATSUI, S. TASAKI, N. ANDO, Y. HATO, H. SHIBUTANI: Development of Lithium-ion Capacitor, The 47th Battery symposium in Japan proceedings (2006) 3E04.
- 12) S. TASAKI, H. TANISAKI, R. MIYAKAWA, A. SHIRAKAMI, H. TAGUCHI, K. MATSUI, N. ANDO, O. HATOZAKI, Y. HATO, H. SHIBUYA: Development of Lithium-ion Capacitor, The 47th Battery symposium in Japan proceedings (2006) 3E05.

- 13) R. MIYAKAWA, Y. HATO, M. INAGAWA, K. INOUE, D. SEKI: Development of high-power Lithium-ion Capacitor, NEC Technical Report, Vol. 63, No. 4 (2010) 70-74.
- 14) D. AURBACH, A. ZABAN, Y. EIN-ELI, I. WEISSMAN, O. CHUSID, B. MARKOVSKY, M. LEVI, E. LEVI, A. SCHECHTER, E. GRANOT: Recent studies on the correlation between surface chemistry, morphology, three-dimensional structures and performance of Li and Li-C intercalation anodes in several important electrolyte systems, Journal of Power Sources, Vol. 68, Issue.1 (1997) 91-98.
- 15) Development of high heat-resistant Lithium-ion Capacitor, JSAE Annual Congress (Spring) Proceedings (2018) 20180194.

筆 者



三尾巧美*
T. MIO



小松原幸弘*
Y. KOMATSUBARA



大参直輝*
N. OHMI



木元雄輔*
Y. KIMOTO



飯塚健太郎*
K. IIZUKA



菅沼智幸*
T. SUGANUMA



丸山 駿*
S. MARUYAMA



西 幸二*
K. NISHI

* BR 蓄電デバイス事業室