

自動車用鉛蓄電池の技術動向

Technical Prospects of Lead-Acid Batteries for Automotive Applications

古河電池(株)

中野 憲二*
Kenji Nakano

竹島 修平**
Syuhei Takeshima

古川 淳**
Jun Furukawa

概要 近年、自動車用鉛蓄電池に対する要求性能は、車両側の変化に伴って大きく変わり始めている。従来のSLI機能(始動、照明、イグニッション)に加え、パワーステアリング、スタビライザなど車両装備の電動化に伴う補機用電源としての機能強化、温暖化ガス排出抑制や燃費向上を目的とした充電制御、アイドリングストップ、ブレーキエネルギー回生など環境改善技術の進展に伴う新たな機能への対応が求められている。当社ではこれらの要求に適した鉛蓄電池の基盤技術や製品開発、状態検知技術の開発を行うとともに、次世代車の高度な要求に応えるべく新しいタイプのキャパシタハイブリッド型鉛蓄電池「ウルトラバッテリー」の開発を進めている。

1. はじめに

自動車用鉛蓄電池は、1950年代に自動車電源が6Vから現在の12Vに変わってから50年以上が経過した。この間、自動車用鉛蓄電池はSLI用途として最適化が図られてきた。SLI用途の鉛蓄電池は自動車のエンジンコンパートメント内に配置されるため、高温に耐える必要があった。また、鉛蓄電池は放電状態に置かれると放電生成物である硫酸鉛がサルフェーションと呼ばれる結晶の粗大化に起因する不可逆な状態となって短寿命となる。そのため、電池は常に満充電状態しておかなければならず、耐過充電性能を有することが求められた。そこで、Pb-Sb系合金に代えてPb-Ca系格子合金を採用することによる電解液中の水の電気分解の抑制、いわゆるメンテナンスフリー化や正極格子の耐食性の向上が図られた。それにより、鉛蓄電池の寿命は延長され、寿命までに水を補充することはほとんど不要になった¹⁾。

しかし、近年になって自動車用鉛蓄電池の使用環境は大きく変わり始めた。従来のSLI用途に加え、車両装備の電動化に伴う補機用電源としての機能強化、温室ガスの排出抑制と燃費向上を目的とした充電制御やアイドリングストップ及びブレーキエネルギー回生などのMicro-HEVと呼ばれる次世代車に必要な機能への対応が求められるようになった。特に鉛蓄電池の性能に大きく影響する使用条件は、充電制御やブレーキエネルギー回生である^{2)~4)}。

充電制御とはこれまで鉛蓄電池を満充電に保つために行っていた過充電に制限を加え、充電量を低く抑えて発電に要する燃費を削減するものである。そのため、鉛蓄電池のSOC(充電状態: state of charge)は100%未満になる機会が増えることになる。

そしてブレーキエネルギー回生は、これまで摩擦熱として放

散していたエネルギーをオルタネータの回転運動エネルギーに置き換えて発電しそれを鉛蓄電池の充電に用いるものであり、燃費削減の切り札と言われる機能である。発電した電気エネルギーを効率良く蓄えるために、鉛蓄電池の充電は、60%から90%のPSOC(部分充電状態: partial state of charge)で用いることが必要となった。すなわち、これまではサルフェーションの発生により困難とされた条件での使用が求められるようになったのである。また、鉛蓄電池のSOCを特定の範囲に維持するだけでなく、アイドリングストップ後の始動性能も保証する必要があるため、電池の劣化状態を検知する診断装置の開発も重要となった³⁾。

当社ではこれらの要求に適した鉛蓄電池の基盤技術開発、電池開発や状態検知技術の開発を行うとともに、次世代車の高度な要求に応えるキャパシタハイブリッド型鉛蓄電池「ウルトラバッテリー」の開発を進めている。本報では、高度化する自動車用鉛蓄電池への要求に応える技術の一端を紹介する。

2. 当社における開発活動

まず、**図1**に鉛蓄電池の代表的な劣化モードとサイクル寿命の関係を模式的に示した。

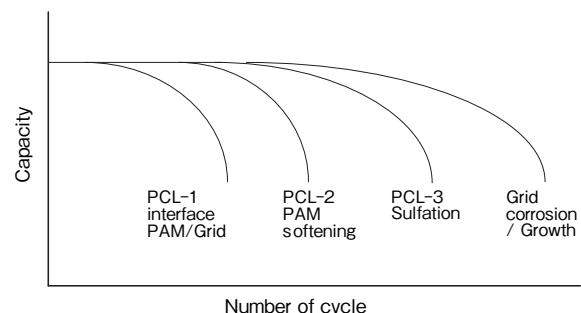


図1 鉛蓄電池の劣化モード
Failure modes of lead-acid battery.

* 古河電池(株) 自動車電池事業本部

** 古河電池(株) 技術開発本部

鉛蓄電池は代表的な劣化モードをPCL(早期容量低下: premature capacity loss) -1, -2, -3と記し区別している。PCL-1は正極格子と活物質の界面に硫酸鉛や酸化鉛からなる不導体層が形成され、容量低下する劣化モードである。PCL-2は正極活物質のマイクロ構造が変化して軟化・脱落し、容量低下する劣化モードである。PCL-1とPCL-2はPb-Sb系合金に代えてPb-Ca系合金を正極に適用して明らかになった劣化モードでSbフリー効果とも呼ばれ、メカニズムの解明や対策が進んでいる⁵⁾。一方、PCL-3はPSOC用途で初めて顕在化した劣化モードである。負極の表面に緻密な硫酸鉛層が形成され、これがイオンの移動を妨げて容量低下することが分かってきたが、世界的には対策途上にある⁶⁾。

正極格子の腐食やグロスも鉛蓄電池の代表的な劣化モードであるが、当社は新しい合金の開発により、他に類を見ない耐久性の向上を達成している。

そこで、2.1項では世界的に注目を集めた正極格子の耐久性向上技術について紹介し、次に2.2項では状態検知のユニークな取り組みを紹介する。2.3項、2.4項では先進的なPCL-3対策を行った次世代車用鉛蓄電池を紹介する。そして2.5項では、今世界中の注目を集めているキャパシタハイブリッド型鉛蓄電池「ウルトラバッテリー」の開発状況を紹介します。

2.1 正極格子用高耐食性合金^{7)~11)}

従来の自動車用鉛蓄電池の主要劣化モードは正極格子の腐食であり、特にエンジンコンパートメント内が高温になりやすい車両や高温地域においては腐食が進みやすい。腐食はその生成物の引張応力に起因するクリープ現象であるグロスも発生させる。格子には集電体としての役割と活物質の保持体としての役割があるため、格子の腐食が進行すると、通電断面積の減少による電気抵抗増加と格子のグロスに起因する格子と活物質との密着性の悪化による充放電性能の低下を招き、その結果寿命となる。使用環境の高温化は腐食とグロスを相乗的に加速するため電池寿命への影響は大きい。

この高温対策として、90年代から欧米でPb, Ca, Sn系にAgを0.01~0.03 wt.%添加した合金が普及してきた。この結果、リサイクルされた鉛のAg不純物濃度がそれ以前の約15 ppmから急上昇して50 ppm前後に達していると言われていた¹²⁾。JISをはじめ多くの国々の工業規格ではAgの濃度は50 ppmが上限と制限されているので、電池性能への影響が懸念される。これに代わる合金としてBa添加合金が検討されてきたが、本格的な実用化に至っていない¹³⁾。

当社では、リサイクルで蓄積しない添加元素としてBaを見直し、これと他の元素との組合せ合金について数多くの試作評価を繰り返し、従来よりも格段に耐食性と耐クリープ性に優れた新合金を開発した^{7)~11)}。この合金は21世紀の顧客満足度を担うものとして『C-21』合金と名付けられた。

公表されている他の正極格子用合金とC-21合金の性能を比較した。比較に用いた合金サンプルの組成を表1に示す。これらの合金を用いた定電位腐食試験の結果を図2に、また高温クリープ破断試験(100℃, 16.5 MPa一定加重)の結果を図3に示す。C-21合金は他の正極格子用合金と比較して、高温環境下で格段に優れた耐食性と耐グロス性を有することが分かる。

表1 合金サンプルの組成(単位: wt.%)
Compositions of test alloys (wt.%)

	ベース合金	添加元素
従来合金(a)	高Sn Pb-Ca合金	—
C-21合金(b)	Pb-Ca-Sn	Ba
Ag合金(c)	Pb-0.04Ca-0.60Sn	0.03 Ag
Ba合金(d)	Pb-0.06Ca-1.60Sn	0.016 Ba

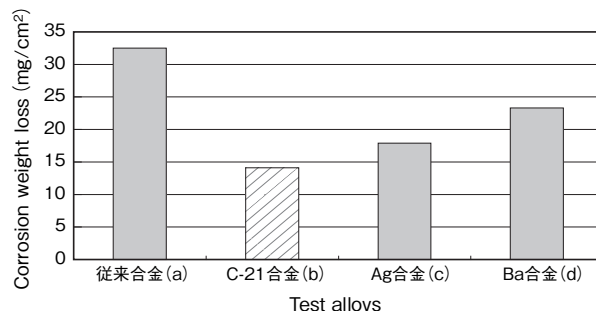


図2 定電位での各種合金の腐食量比較
Comparison of corrosion weight loss among 4 alloys at constant potential (720 hours, 1350 mV vs. Hg/Hg₂SO₄, 4.9M H₂SO₄, 60℃).

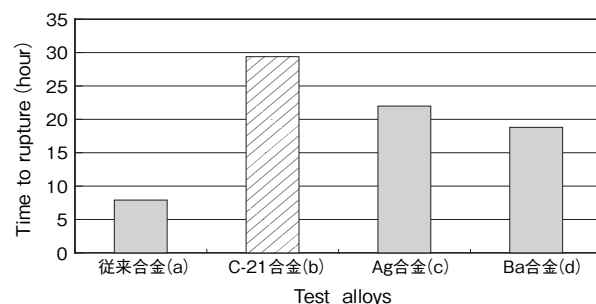


図3 高温クリープ試験破断時間比較
Comparison of time-to-rupture among 4 alloys in constant-load creep test at 100℃.

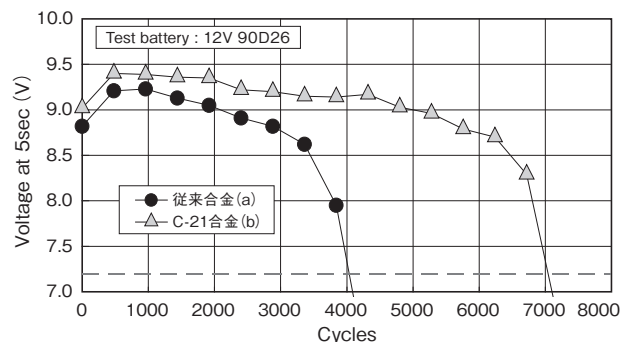


図4 75℃ JIS軽負荷寿命試験結果
Results of JIS shallow cycle endurance test at 75℃.

次に、C-21合金を適用した電池を試作し、75℃におけるJIS軽負荷寿命試験を行った。その結果を図4に示す。また、図5に試験後の正極格子の外観を示す。これらの結果から、C-21合金は耐食性と耐グロス性が優れ、従来合金を使用した電池に比べ大幅に寿命が向上することが実証された。C-21合金を適用した電池は2002年10月から補修用電池として上市され、その後は自動車メーカーや海外支援先などに広く展開されている。

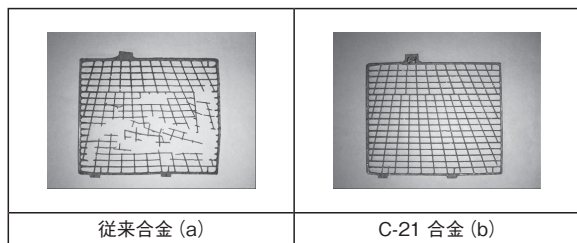


図5 寿命試験終了後の正極格子外観
Appearance of positive grids after JIS shallow cycle endurance test at 75°C.

2.2 状態検知技術³⁾

2.2.1 状態検知の方法

鉛蓄電池の状態検知の目的としては、次の2つがある。

- ①劣化状態を診断して電池の交換時期を判断
- ②Micro-HEVなどの次世代車におけるSOC, SOH, SOF (機能の状態: state of function)の判定

②では、鉛蓄電池の温度、開路電圧、充放電電流、電圧、交流インピーダンスなどを測定し、同時にこれらの履歴と組み合わせる方法などが取られる。Micro-HEVにおいて使用される鉛蓄電池は、エンジンの再始動性能を保証しながら回生充電を行うため、所定のPSOC状態に管理する必要がある。また、走行時は頻繁に変化する電池の状態を電流、電圧、温度などの情報を元に精度良く検知する必要がある。これは、鉛蓄電池に特有の電解液の成層化などから難しい面があるが、世界中の自動車メーカ、電装品メーカ、電池メーカが状態検知アルゴリズムとセンサを開発中であり、一部実用化が始まっている。

2.2.2 テスタ機能内蔵鉛蓄電池¹⁴⁾

一方、従来自動車用鉛蓄電池の交換時期の判定は、ガソリンスタンドなどでのテストによる診断が一般的であったが、最近では電池自体に診断機能を持たせた鉛蓄電池も登場している。そこで、当社が世界で最初に実用化したテスト機能内蔵の自動車用鉛蓄電池を紹介する。

従来の診断方法は、強制的に放電させた時の電圧低下で判断するロードテストが主流であるが、放電状態では判定ができない欠点がある。また、診断のためにはテストを備えたガソリンスタンドなどに行く必要があった。これら欠点をなくして、いつでも、どこでも劣化状態を診断できるようにしたテスト機能内蔵鉛蓄電池「FGUARD[®]」を2003年10月に補修市場向けに上市した。FGUARDは米国MIDTRONICS社が開発したコンダクタンス法による判定回路を蓋に内蔵している。診断は、テストのボタンを押して、開路電圧、電池温度及びパルス電流印加時のコンダクタンスを測定し、判定アルゴリズムと照合することでSOCとSOHを判定する。この結果はLEDで表示される。図6にFGUARDの外観を示す。FGUARDは発売から3年半経過した現在もお客様の好評を博している。



図6 電池外観
Appearance of FGUARD.

2.3 アイドリングストップ車 (Micro-HEV) 用鉛蓄電池¹⁵⁾

地球温暖化対策として、アイドリングストップは一部のタクシーや路線バスで普及し始めている。東京都が行った路線バスのアイドリングストップ試験では燃費が14%向上したと報告されている。また、2002年の地球温暖化対策推進大綱も運輸部門の対策にアイドリングストップを挙げ、国内自動車メーカに普及を働き掛けている。このような背景から、アイドリングストップ車用鉛蓄電池の寿命試験法を自動車技術会と電池工業会が共同で検討し、2006年に電池工業会規格(アイドリングストップ寿命試験SBA S 0101)として制定されている¹⁶⁾。

ところで、従来の自動車用鉛蓄電池の寿命要因は主に正極の劣化であったが、アイドリングストップ寿命試験では電解液比重の低下と負極サルフェーションが優先的に進み、更に進行すると負極の集電部である耳が細る現象が出現した。当社では負極の耳細りの原因を解明するとともに、負極サルフェーションの抑制、更には正極の改良によりアイドリングストップ寿命を大幅に改善した電池を開発した。

図7にアイドリングストップ寿命試験パターンを示す。この充放電パターンを3,600サイクル繰り返す毎に40～48時間放置し、再びこのサイクルを繰り返す。試験環境は電池に当たる風を規制した25°Cの気槽であるため、ジュール発熱により電池温度は上昇する。この試験の目標サイクル寿命は30,000サイクル以上である。

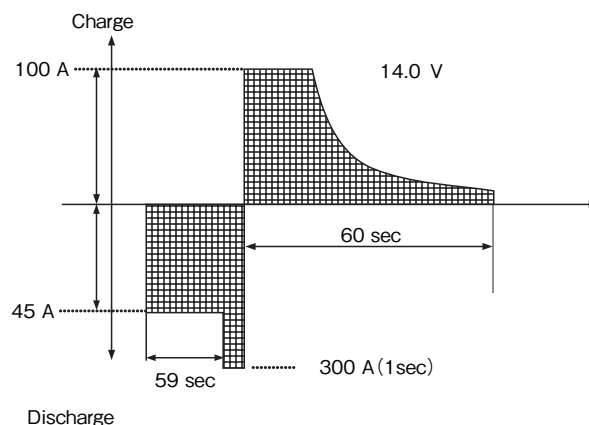


図7 アイドリングストップ寿命試験パターン
Life cycle test profile for idling-stop by SBA S 0101

JIS D23サイズの従来鉛蓄電池でこの試験を行ったところ、寿命は15,000サイクル以下であった。劣化モードは負極サルフェーションであったが、負極の耳細りも観察された。負極サルフェーション抑制には、負極添加剤のカーボンを増量して硫酸鉛の周囲に導電ネットワークを形成して硫酸鉛を還元しやすくすることなどが行われている^{17), 18)}。しかしこのアイドリングストップ寿命試験では効果が不十分であったため、更に新添加剤による負極サルフェーション抑制を試みた。新添加剤を用いたD23サイズの鉛蓄電池で試験を行った結果、負極サルフェーションは大幅に抑制され耳の細りも観察されず、従来電池より寿命が75%向上したが目標の30,000サイクルには及ばなかった。

一方、負極サルフェーションを抑制したこの電池の寿命要因は正極活物質の軟化に変わり、更なる寿命延長には正極の改善が必要となった。そこで軟化を抑制するために、活物質密度の最適化、新添加剤の開発、更に新型セパレータの開発を行った。これらによる改善効果を軟化の影響が反映されるJIS重負荷試験で確認したところ、寿命は35%改善された。

このような改善諸策を施したD23サイズのアイドリングストップ用鉛蓄電池を試作し、性能を評価した。5時間率容量や-15℃における高率放電特性などは従来の鉛蓄電池と同等の性能を維持していた。図8にアイドリングストップ寿命試験結果を示す。開発品は電解液比重の低下が抑制され、目標の30,000サイクルを大きく越える寿命延長を達成した。試験後の解体調査でも負極サルフェーションと耳の細りはほとんど認められなかった。現在この電池はタクシーやオーナー実車試験など実用データの蓄積と平行して商品化の準備を進めているところである。

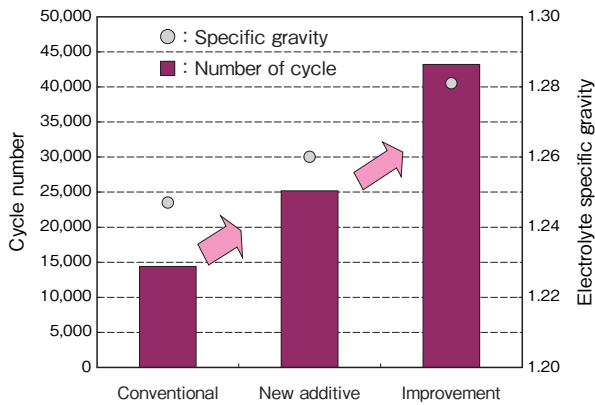


図8 アイドリングストップ寿命試験回数と電解液比重
Improvement in idling-stop cycle life and electrolyte specific gravity through the development.

2.4 高電圧系ハイブリッド車 (Medium-HEV) 用鉛蓄電池^{9), 19)}

制御弁式鉛蓄電池は微細なガラス繊維からなるマット状セパレータを使用し、極板を高圧迫状態に維持するとともに、電解液は極板とセパレータ中に含浸した量に制限されているため、軽くて充放電特性に優れた特長がある。このため、液式電池よりもアイドリングストップ車 (Micro-HEV) やマイルドハイブリッド車 (Mild-HEV) に適している。当社でもこれらの用途に適した長寿命の12 Vや36 V用VRLA電池の開発を進めている。ここでは、2003年1月発売のスズキ(株)殿の高電圧系ハイブリッド軽自動車「Twin」(Twin:スズキ(株)の登録商標)に搭載された制御弁式鉛蓄電池「FT7C-HEV」の開発概要を述べる。図9に、この電池の外観を示す。この電池は12 V、6.3 Ah (3 HR)の容量を持ち、小形で高密度構造、入出力性能が高い、PSOCサイクル寿命が長い、などの特長がある。この電池16個がシリーズ接続され、組電池として「Twin」に搭載された。



図9 FT7C-HEVの外観
Appearance of FT7C-HEV.

この電池は、狭いスペースに収納するため、電池内部空間を最小限に抑える設計を採用することにより、同容量の二輪用VRLA電池と比較して体積を約10%削減することができた。端子は接続時の信頼性に応えるため、締め付け強度の高い端子構造を採用した。

正極板は、格子に高耐食性合金を用いるとともに、活物質密度は「Twin」の充放電パターンと放電深度に合わせて最適化した。

また、一般に高電圧系ハイブリッド車では走行中に電池は頻繁に大電流の充放電が繰り返されるため、鉛蓄電池の場合は負極のサルフェーションにより充放電性能や回生充電性能が低下する。そこで、負極活物質添加剤の見直しを行い、カーボン、リグニン及び硫酸バリウムの添加量を最適化して、サルフェーションの抑制を図った。また、組電池では個々の電池に高い信頼性が要求されるため、セパレータの役割は重要である。そこで、微細ガラス繊維や添加剤を最適化して耐短絡性を大幅に向上したセパレータを採用して信頼性を高めた。

図10に、開発した電池の入力性能を二輪用制御弁式鉛蓄電池と比較して示す。放電深度DOD50%で開発電池は二輪用の2倍以上の入力性能を示した。また、図11にPSOCサイクル寿命試験の結果を示す。二輪用制御弁式鉛蓄電池と比較し開発電池は約4倍の寿命を達成することができた。

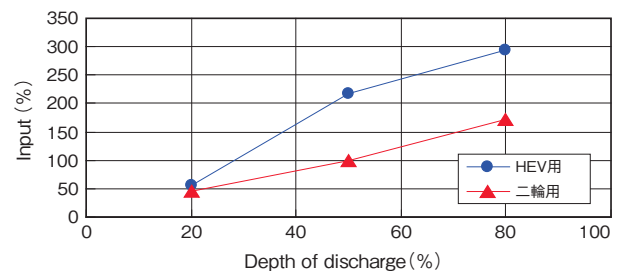


図10 入力特性
Input power characteristics.

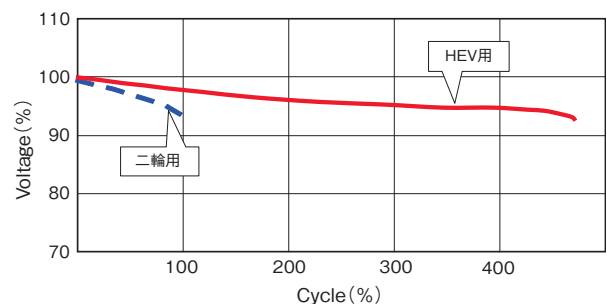


図11 サイクル寿命試験
Characteristics of endurance cycle life.

2.5 ウルトラバッテリーの開発^{20)~23)}

アイドリングストップや充電制御機能を備えたマイクロハイブリッド車、更にはこれにブレーキエネルギー回生やパワーアシスト機能を加えたマイルドハイブリッド車や高圧系ハイブリッド車では、鉛蓄電池の充電状態は常にPSOC状態に保たれ、しかも大電流のパルス充放電が行われるなど、従来にない過酷な使用条件が要求される^{3), 4), 6), 9)}。この用途では、鉛蓄電池は硫酸鉛の再結晶化が避けられないという本質的課題を抱えているばかりでなく、充放電パワー特性の向上も必要とされる。これらの性能改善策として鉛蓄電池と高容量電気二重層キャパシタを並列接続したバッテリーキャパシタモジュールが提案されている^{24)~26)}。しかし、電気二重層キャパシタはコストが高い、体積エネルギー密度が低い、電池とのハイブリッド化には制御回路が必要で更にコストと体積で不利になるなど、バッテリーキャパシタモジュールの実用化には課題が多い。

当社では、PSOCの課題を一挙に解決するため、鉛蓄電池とスーパーキャパシタを極板レベルで結合したハイブリッド型鉛蓄電池「ウルトラバッテリー」を豪CSIROと共同開発している。

2.5.1 ウルトラバッテリーの構成

図12にウルトラバッテリーの構成を示す。ウルトラバッテリーは鉛蓄電池と非対称キャパシタを同一セル内に組み込んでいる。鉛蓄電池は、正極が二酸化鉛、負極は海綿状鉛からなる。一方、非対称キャパシタは、正極は鉛蓄電池の正極と同じ二酸化鉛であり、負極は多孔質カーボンからなる。これらは共通の正極を持つため、鉛負極とキャパシタ負極を並列に接続して正極と共に同一のセル内に収納できる。その結果、キャパシタ電極は鉛蓄電池の負荷の一部を負担することになる。したがって、PSOC特性や大電流充放電など、これまでの鉛蓄電池では十分に対応できなかった用途への適用が期待できる。また、ウルトラバッテリーは特別な電子制御回路などは必要なく、コスト面でのメリットがある。

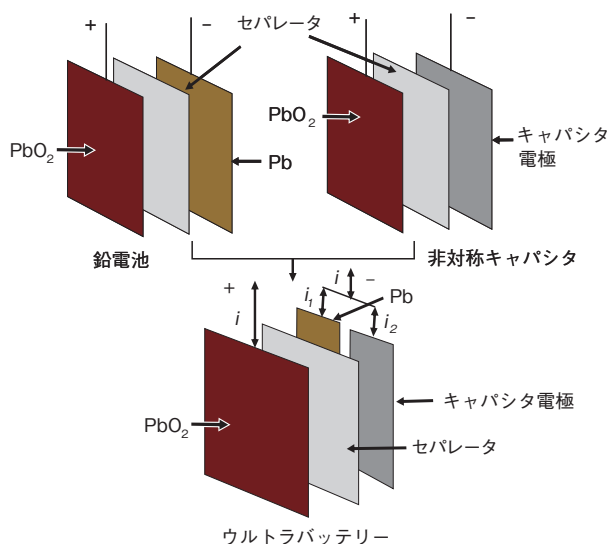


図12 ウルトラバッテリーの構成
Construction of Ultrabattery.

2.5.2 キャパシタ電極

キャパシタ電極は多孔質カーボンで構成されるため、充電時の水素ガス発生抑制が必要であり、このための添加剤を開発

した。図13に電位を変化させた時の水素発生量の測定結果を示す。添加剤を用いないキャパシタ電極に比べて、添加剤を用いたキャパシタ電極の水素発生量は鉛電極とほとんど同じであった。

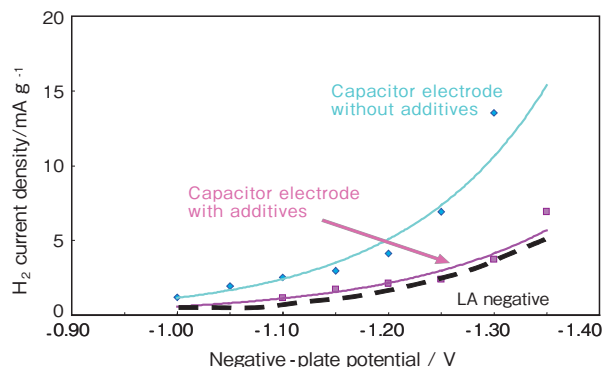


図13 鉛電極とキャパシタ電極のTafelプロットと添加剤の効果
Tafel plots of H₂ evolution capacitor electrodes with and without additives in comparison with lead-acid negative.

2.5.3 ウルトラバッテリーの性能

2Vの制御弁式ウルトラバッテリーを試作し、従来の制御弁式鉛蓄電池と入力及び出力性能、並びにサイクル寿命特性を比較した。

図14に入力及び出力特性を示す。マイルドハイブリッド車では電池の放電深度が30%から70%程度の範囲で使用されるが、ウルトラバッテリーは広い放電深度で優れた入力と出力特性を示し、PSOC用途に適した性能を有することが分かる。

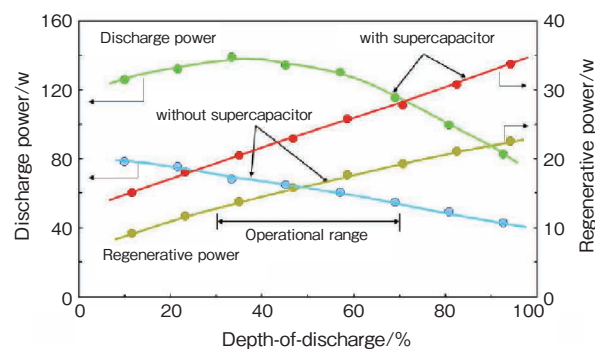


図14 入力及び出力特性
Relationship between depth-of-discharge and charge / discharge power.

マイルドハイブリッド車の高速走行と丘陵登坂走行条件の組み合わせをシミュレーションしたRHOLAB (reliable, highly optimised lead acid battery) プロファイルによるPSOCでのサイクル寿命試験を行った。その結果を図15に示す。鉛蓄電池に比較して寿命が約4倍と格段に優れていることが分かった。

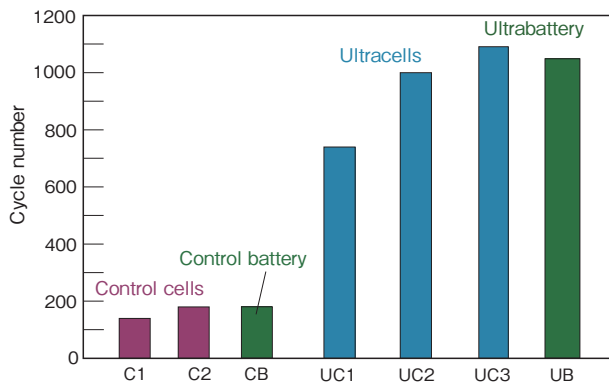


図15 RHOLABサイクル寿命
Comparison of life cycle under RHOLAB profile.

以上のように、ウルトラバッテリーは鉛蓄電池に比べてPSOCにおける大幅な優位性が確認されており、これまで鉛蓄電池では適用が難しいと思われたより高度な次世代自動車への展開が期待できるため、世界中の注目を集めている。

3. おわりに

今や地球温暖化対策は待ったなしの状況になり、自動車にとってこれまでにない厳しい排出ガス規制が始まろうとしている。当社は自動車会社殿のおかげで、日本有数の品質と技術を誇る自動車用鉛蓄電池サプライヤとして発展してきた。今後は、本報で紹介した鉛蓄電池の先進的な技術開発に加え、更に革新的な技術開発を進め、次世代自動車による温室ガスの排出抑制を通して、社会の持続的な発展に貢献して行く所存である。

参考文献

- 1) 金村聖志, 坪田正温, 高橋克仁, 大角重治: 鉛蓄電池, 電池便覧, 第3版, 松田好晴, 竹原善一郎編集代表, 丸善, (2001), 151.
- 2) 自動車用次世代電源システム調査専門委員会編: 自動車用次世代電源システムのロードマップ, 電気学会技術報告第1049号, 電気学会, (2006), 3, 8, 26, 32, 52.
- 3) 42V電源化調査専門委員会編: 自動車電源の42V化技術, オーム社, (2003), 1, 63, 161.
- 4) M. Anderman: "Market development for HEVs and HEV batteries", 7th International Advanced Automotive Battery and Ultracapacitor Conference, (2007) Long Beach.
- 5) R. D. Prengaman, Lead alloys for valve-regulated lead-acid batteries, Valve-Regulated Lead-Acid Batteries, Ed. D. A. J. Land, ELSEVIER, (2004), 15.
- 6) A. Cooper, L. T. Lam, P. T. Moseley, and D. A. J. Rand, The next great challenge for valve-regulated lead-acid batteries: High-Rate Partial-State-of-Charge Duty in new-generation road vehicles, Valve-Regulated Lead-Acid Batteries, Ed. D. A. J. Land, ELSEVIER, (2004), 549.
- 7) 根兵靖之, 尾崎正則, 本間徳則, 古川淳, 新妻滋: "C-21合金を用いたGOLDシリーズの開発", FBテクニカルニュース, **59** (2003), 8.
- 8) J. Furukawa, Y. Nehyo, S. Shiga: "Development of new positive-grid alloy and its application to long-life batteries for automotive industry", J. Power Sources, **133** (2004)25.
- 9) J. Furukawa, S. Takeshima, M. Ozaki, S. Shiga: Current advancement of lead-acid technology for automotive industry", 4th International Advanced Automotive Battery Conference, (2004) San Francisco.

- 10) J. Furukawa, Y. Nehyo, M. Ozaki, S. Takeshima, S. Shiga: "Development of new lead alloy for positive grids", 4th International Lead Battery Fair, (2004) Beijing.
- 11) 古川淳, 安野拓也: "電子顕微鏡を用いた微細組織観察による正極格子用Ba添加Pb-Ca-Sn合金の強化機構の検討", FBテクニカルニュース, **60** (2004), 3.
- 12) M.W.Stevenson, J.E.Manders, S.eckfeld, R.D.pregaman: "Impact of modern battery design and the implications for primary and secondary lead production", J. Power Sources, 107 (2002), 146.
- 13) E.Jullian, L. Albert, J. L. Caillere: "New lead alloys for high-performance lead-acid batteries", J. Power Sources, **116** (2003), 185.
- 14) 竹島修平, 白川亮借, 田口 仁, 瀬尾秋男, 大内久士, 水野隆司, 後藤武廣, 矢吹修一: "テスター機能内蔵自動車用電池「FGUARDTMの開発」", FBテクニカルニュース, **59** (2003), 15.
- 15) 高田利通, 門馬大輔, 古川 淳: "アイドリングストップ車用鉛蓄電池の開発", FBテクニカルニュース, **62** (2006), 15.
- 16) 電池工業会規格 S 0101:2005アイドリングストップ車始動用鉛蓄電池: 試験方法, 性能, 寸法及び表示.
- 17) K. Nakamura, M. Shiomi, K. Takahashi, M. Tsubota: "Failure modes of valve-regulated lead/acid batteries," J. Power Sources, **59** (1996), 153.
- 18) M. Shiomi, T. Funato, K.Nakamura, K.Takahashi: "Effects of carbon in negative plates on cycle-life performance of valve-regulated lead/acid batteries", J. Power Sources, **64** (1997), 147.
- 19) 竹島修平, 小浦方智樹, 松本健之, 清水博文, 矢吹修一: "ハイブリッド軽乗用車用VRLA電池の開発", FBテクニカルニュース, **60** (2004), 13.
- 20) L. T. Lam, R. Louey: "Development of ultra-battery for hybrid-electric vehicle applications", J. Power Sources, **158** (2006), 1140.
- 21) L. T. Lam, N. P. Haigh, O. V. Lim, R. Louey, C. G. Phyland, D. G. Vella, L. H. Vu, J. Furukawa, T. Takada, D. Monma, T. Kanou: "Ultrabattery for hybrid-electric vehicle applications", 2nd International Symposium on Large Ultracapacitor (EDLC) Technology and Application, (2006) Baltimore.
- 22) 古川 淳, 高田利通, 加納哲也, 門馬大輔, L. T. Lam, N. P. Haigh, O. V. Lim, R. Louey, C. G. Phyland, D. G. Vella, L. H. Vu: "ウルトラバッテリーの開発", FBテクニカルニュース, **62** (2006), 10.
- 23) L. T. Lam, C. G. Phyland, R. Louey, O. V. Lim, N. P. Haigh, D. G. Vella, L. H. Vu, J. Furukawa, T. Takada, D. Monma, T. Kanou: "Development of ultrabattery for hybrid electric vehicle applications", 10th European Lead Battery Conference, (2006) Athens.
- 24) 坂本 光, 古川 淳: "電気二重層キャパシタとの組み合わせによる鉛蓄電池の性能改善の可能性-簡易型バッテリーキャパシタモジュール(BCW)について-", FBテクニカルニュース, **59** (2003), 22.
- 25) H.Ollhauser: "Alcoa-Audi micro-hybrid architecture", 6th International Advanced Automotive Battery Conference, (2006) Baltimore.
- 26) A.Schwake: "EC-funded "SOPERCAR": Ultracapacitor modules for mild hybrid applications ", 2nd International Symposium on Large Ultracapacitor (EDLC) Technology and Application, (2006) Baltimore.