

自動車シミュレーションのための 鉛蓄電池モデルの開発

Development of the lead-acid battery model for automotive simulation

佐藤 克征* Muhammad Syahid* 竹内 泰輔*
今村 智宏** 大前 孝夫*

Katsuyuki Sato Muhammad Syahid Taisuke Takeuchi
Tomohiro Imamura Takao Ohmae

Abstract

The evolution of mobility, that is, the pursuit of high safety, low environmental impact, high comfort, etc., is supported by the innovation of advanced control technology. And model-based development is considered an effective method to verify the complicated control technology more comprehensively and quickly. In this report, the battery model that simulates the charge and discharge behavior of the vehicle is improved based on the basic technology that has already been disclosed, and the newly acquired battery characteristics are reflected to improve the estimation accuracy of the charge and discharge behavior. As a result, in the relatively frequent charge and discharge control pattern based on the image of urban riding, we confirmed the estimation accuracy of voltage, current, and integrated current quantity transitions have been improved.

Key words: Lead-acid battery, Model-based development, Battery mode

1 はじめに

自動車の制御システムは、環境負荷低減や快適性、安全性などの追求のため、日々複雑化しており、車両

全体のエネルギー制御や自動運転制御といった開発が盛んである。一方で、これら開発は様々なケースを想定した多くの検証が必要であり、こうした背景から、机上で効率的に検討を進め、開発資源の削減や期間短縮を狙った、モデルベース開発（MBD：Model-Based Development）の重要性が高まっている¹⁻⁴。

車両全体のエネルギー最適化や非常時の動力源制御の机上検討においては、適切なバッテリーモデルを用いることが重要であり、公益社団法人自動車技術会（以下、自技会）のワーキングなどでもバッテリーモデルの検討がなされてきた⁵。

* グローバル技術統括センター 技術開発本部
第三開発部

Department III, Technical Development Division,
Global Technical Center

** 台湾湯浅電池股份有限公司

Taiwan Yuasa Battery Co.,Ltd.

本報告では、前述の自技会より公開されているバッテリーモデルをベースとし、モデルパラメータの設定に用いるデータをより詳細な電池試験から得られた特性とすることで、より再現精度の高いモデルが作成可能か検討を行ったので報告する。

2 バッテリーモデル

バッテリーの充放電挙動を模擬する手法としては、電気化学反応にもとづいた数式モデル⁶⁻⁹や簡易的に電気素子特性の組み合わせで表現した等価回路モデル¹⁰⁻¹⁸などがある。また一般に、モデルの再現精度とモデル構成の複雑さ（設定パラメータ量や条件分岐数など）とはトレードオフの関係があり⁶、すべての充放電条件に対応した万能モデルの構築は極めて難しく、机上検討の目的に合わせ使用条件を限定したモデルの構築・活用が現実的とされている⁵。

現在自技会より公開されているモデル（以下、自技会モデル）は、目的に応じてモデル構造やパラメータを調整することを前提とした等価回路モデルとされており、またその作成においては、モデル作成工数の低減を狙い、アイドリングストップシステム搭載車（以下、IS車）用鉛蓄電池の耐久性試験として業界標準であるSBA S 0101での寿命試験（以下、SBA-IS試験）で取得したデータにもとづいて各パラメータを設定している。一方で、充電制御車やIS車における鉛蓄電池の使われ方としては、限られた充電状態（State-Of-Charge、以下、SOC）で細かく制御されることも多く、街中での実車走行データでは、渋滞や車両独自の制御によりSBA-IS試験よりも頻繁な充放電の繰り返しを確認されている¹⁹⁻²¹。そのため、SBA-IS試験中の充放電挙動のみを参考にした自技会モデルでは、実車を模擬した充放電制御において十分な精度が得られないことが想定され、今回、より詳細な電池特性を反映することで頻繁な充放電にも対応した高精度モデルの構築を試みた。

3 バッテリーモデルの作成

3.1 等価回路

本報告では、2017年に自技会より発行されている書籍²²に記載のバッテリーモデルに倣い、Fig. 1に示すような起電力 V_e と直列抵抗 R_0 および2段のRC並列回路で構成される等価回路を採用した。等価回路中の各パラメータを定める方法としては、実電池のバル

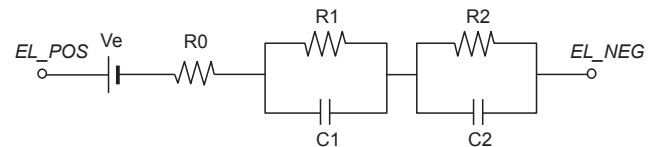


図1 バッテリーモデルに用いた等価回路。
Fig. 1 Equivalent circuit of battery model.

ス応答特性から設定する方法や実測との誤差をフィードバックしながらパラメータを変動させて同定する方法など⁶⁻¹⁸があるが、今回は後述の実測結果をもとに電流やSOCなどとの関係性を考慮しつつ、各回路パラメータを設定した。

3.2 起電力特性

鉛蓄電池の起電力については、電池の電解液である硫酸濃度と線形関係があることが知られており²³、硫酸濃度はSOCと対応することから、式(1)に示すように、起電力 V_e をSOCの関数として設定した。なお、モデル内で用いるSOCは、満充電時の電池容量および積算電気量をもとに算出した。

$$V_e = K_a \times (\text{SOC}) + K_b \dots \dots \dots (1)$$

[K_a , K_b は、液量、硫酸濃度、満充電時の電池容量などによって定まる係数]

3.3 分極特性

実際に充放電している時の電池電圧は、前項で示した起電力とは異なる値を示し、この起電力と実際の電池電圧の差を分極と言う。Fig. 1に示すような等価回路モデルでは、抵抗やコンデンサの組み合わせによってこの分極を模擬しており、以下に、本報告で用いたパラメータおよびそれらパラメータを導出するにあたって使用した実測特性について抜粋して示す。

本報告の対象電池はIS車用の12V電池（M-42、定格32Ah）としており、Table 1に示す試験A、試験Bにより各種特性を取得した。試験Aは、充放電開始後数%のSOC変動で安定する電圧電流推移と各充放電条件の関係について調査することを狙いとし、試験Bは、完全放電や満充電といった極端なSOC領域を含む電圧推移と各充放電条件の関係を調査することを狙いとして実施した。

瞬間的な分極特性を表現する直列抵抗 R_0 については、例えばハイレート放電時の瞬間的な電圧変動などから読み取ることができ、試験Aの実測結果をもとに算出した。

過渡的な分極特性を表現する2段のRC並列回路部

表1 特性取得用の試験条件一覧.

Table 1 Testing requirement.

	Initial SOC [%]	Δ SOC [%]	Discharge Current [A]	Charge Voltage [V]	Regulate Current / Charge Current [A]
A	80 / 90 / 100	± 2	0.2 / 0.5 / 1.0 / 1.5 I _s 4.0 / 4.5 / 7.0 / 9.5 I _s	13 / 14 / 15	100
B	0 / 100	± 100	0.1 / 0.2 / 0.4 I _s	-	0.1 / 0.2 / 0.4 I _s

※ I_s = 6.4 A

の各素子値については、「充電または放電開始後数%程度のSOC変動で安定する分極(分極Ⅰ)」と「低SOCおよび高SOC領域における劇的な挙動変化に対応した分極(分極Ⅱ)」との2種類の分極を考慮し設定した。上記分極Ⅰは、極板近傍の電気二重層容量などが関係していると考えられ、上記分極Ⅱは、極板構造変化や副反応量の変化などが考えられる^{6,11,15,16}。本報告のモデルでは、分極Ⅰを主に比較的小さな時定数をもつ1段階RC並列回路で模擬し、分極Ⅱを主にSOC特性が反映された2段階RC並列回路で模擬することで、より実測に近い分極の模擬を試みた。

Fig. 2に、試験A実施時の各放電電流における電圧挙動を示す。この試験結果より、早期に安定する分極Ⅰに関する特性を抽出した。一般に、時刻tにおけるRC並列回路の端子電圧V_{RC}(t)は、電流Iおよび抵抗R、コンデンサCを用いて、式(2)のようにあらわすことができる。

$$V_{RC}(t) = I \times R \times (1 - e^{-t/RC}) \dots \dots \dots (2)$$

時刻tが十分に大きいときは、V_{RC}(∞) ≒ I × Rとなることより、例えば試験A実施時の放電末電圧を定常状態と仮定することで、各電流条件の抵抗Rの値を算出することができる。また一般に、同RC回路において、時刻t = R × Cとなる時刻を時定数τと言い、このとき、式(2)より、V_{RC}(τ) ≒ I × R × 0.63となる。この特性を用いて実際の電圧変動から時定数τを求めることができ、さらにその時定数τを先の抵抗Rで除することでコンデンサCの値を得ることができる。

Fig. 3に、これらの手法で得られた1段階目の抵抗R1およびコンデンサC1の電流特性を示す。実際のモデルでは電流特性のほかSOC特性も考慮するため、ここでは-6.4 A放電時の抵抗およびコンデンサ値との相対値を示す。

極板構造変化や副反応量などに起因する反応律速による分極Ⅱについては、Fig. 4に示すような試験Bの結果を参考とし、Fig. 5のように完全放電や満充電に

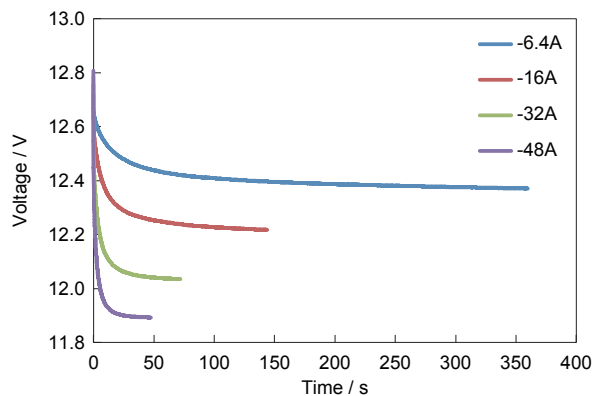


図2 試験A(放電)における電圧推移.
Fig. 2 Voltage transition at test-A(discharge).

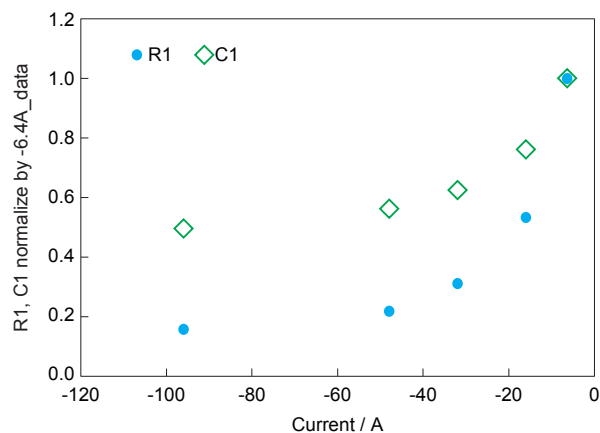


図3 試験A(放電)から算出したパラメータ特性.
Fig. 3 Calculated Parameter from test-A(discharge).

近づくとつれて大きくなるSOC特性を考慮した抵抗R2として設定した。また、分極Ⅱの応答特性すなわち2段階目のRC回路における時定数に関するコンデンサC2については、自技会モデルの時定数を参考にしつつ、SOCの関数を用いて1段階目の1~10倍の範囲で設定した。

3.4 モデル記述

バッテリーモデルは、機械・熱・電気・油圧・電気化学などを統合したマルチドメインシミュレーションで

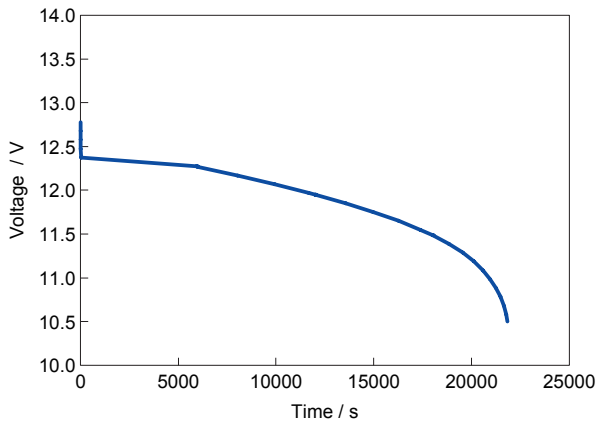


図4 試験 B (放電) における電圧推移.
Fig. 4 Voltage transition at test-B(discharge).

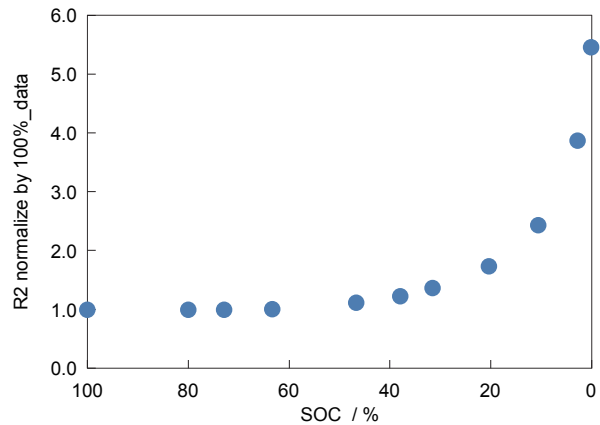


図5 試験 B (放電) から算出したパラメータ特性.
Fig. 5 Calculated Parameter from test-B(discharge).

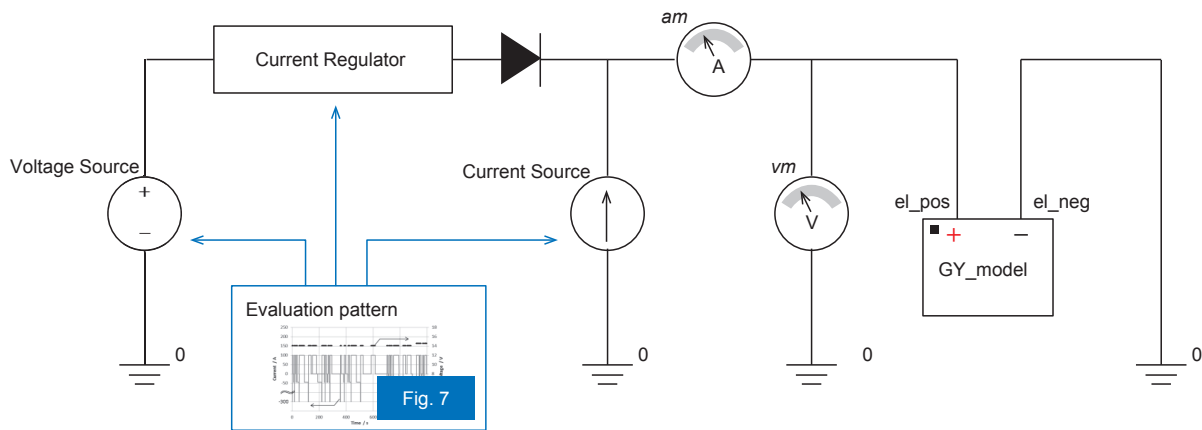


図6 モデル検証回路.
Fig. 6 Evaluation circuit.

取り扱いが可能であり、幅広い活用が期待できる^{13,24,25} 言語である VHDL-AMS (IEEE1076.1) を用いて作成した。

4. バッテリモデルの検証

4.1 検証方法

作成したバッテリーモデルを Fig. 6 に示すような検証回路に接続し、Fig. 7 に示す検証パターンを入力した際の電圧や電流挙動を実測値と比較して検証した。検証パターンとしては、JC08 モードの車速より走行 / 停止 / 走行直前に分類し、充放電条件を割り当てた 1204 秒間の充放電パターン X と、独自に実施した発進 / 停止が頻繁に起こるような街乗りでの実車試験結果などを参考に、充放電の切り周期が SBA-IS 試験やパターン X よりも短くなるように作成した 10 分間

の充放電パターン Y の 2 つを設定した。各検証パターンともに、電流電圧レンジは前述の SBA-IS 試験条件を参考に設定し、初期 SOC を 90% に調整したのちに、各検証パターンで充放電試験を行い、実測の電流電圧推移を得た。

4.2 従来モデルの動作確認

今回作成したモデル (以降、GY モデル) の精度検証にあたり、比較対象として従来モデルでも同様のシミュレーションを行った。ここでの従来モデルとは、既に自技会より公開されている情報をもとに、今回の対象電池に合わせ一部パラメータを調整したモデルを指し、Fig. 8 に示すように SBA-IS 試験時の実測推移 (-Real) と比較して、作成した従来モデルの推移 (-Sim_Conv.) が問題ないことを確認したモデルを用いた。

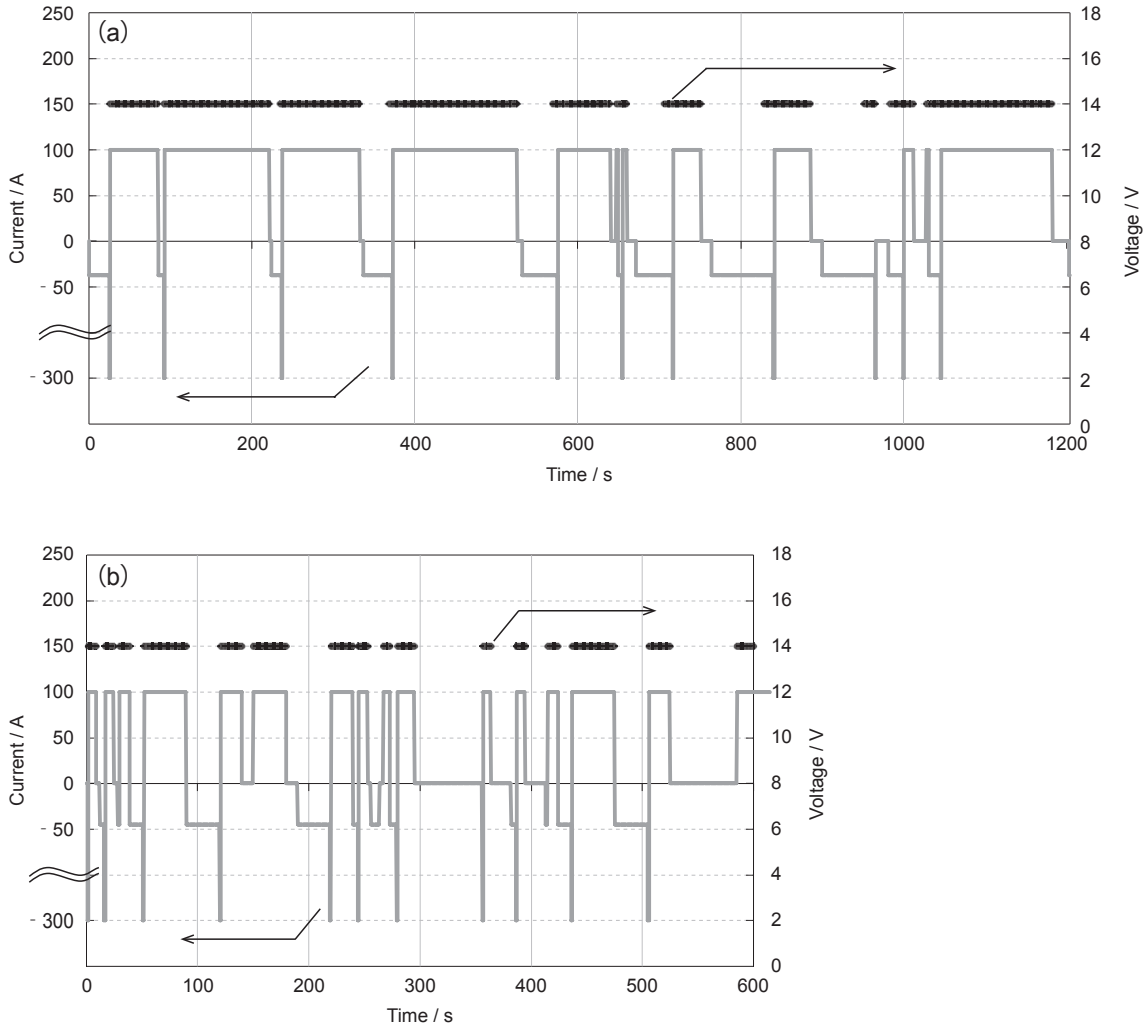


図7 モデル精度評価パターン. (a)パターンX (b)パターンY
Fig. 7 Evaluation pattern. (a) pattern-X (b) pattern-Y

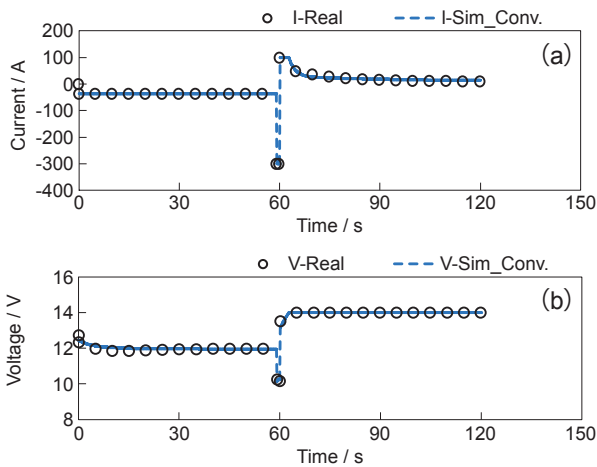


図8 SBA-IS 試験中の実測およびシミュレーション結果. (a) 電流推移 (b) 電圧推移
Fig. 8 Measured/Simulated data in SBA-IS life cycle test. (a) Current transition (b) Voltage transition

4.3 作成モデルの検証結果

Fig. 9, Fig. 10 に、各検証パターン全体の実測結果 (-Real) と今回作成したGYモデル (-Sim_GY) および従来モデル (-Sim_Conv.) の再現結果を示す。

また Table 2 に、電流、電圧、積算電気量の平均誤差を示す。平均誤差は 0.1 秒毎の各データより式 (3) を用いて算出した RMSE (Root Means Square Error : 平方 2 乗平均誤差) にて評価した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (f_i - y_i)^2} \dots \dots \dots (3)$$

[n : データ数, f : 予測値, y : 実測値]

Table 2 より、検証パターン X, Y とともに、いずれの指標においても従来モデルと比較して GY モデルの精度向上が確認できた。特に充放電が頻繁に起こるパ

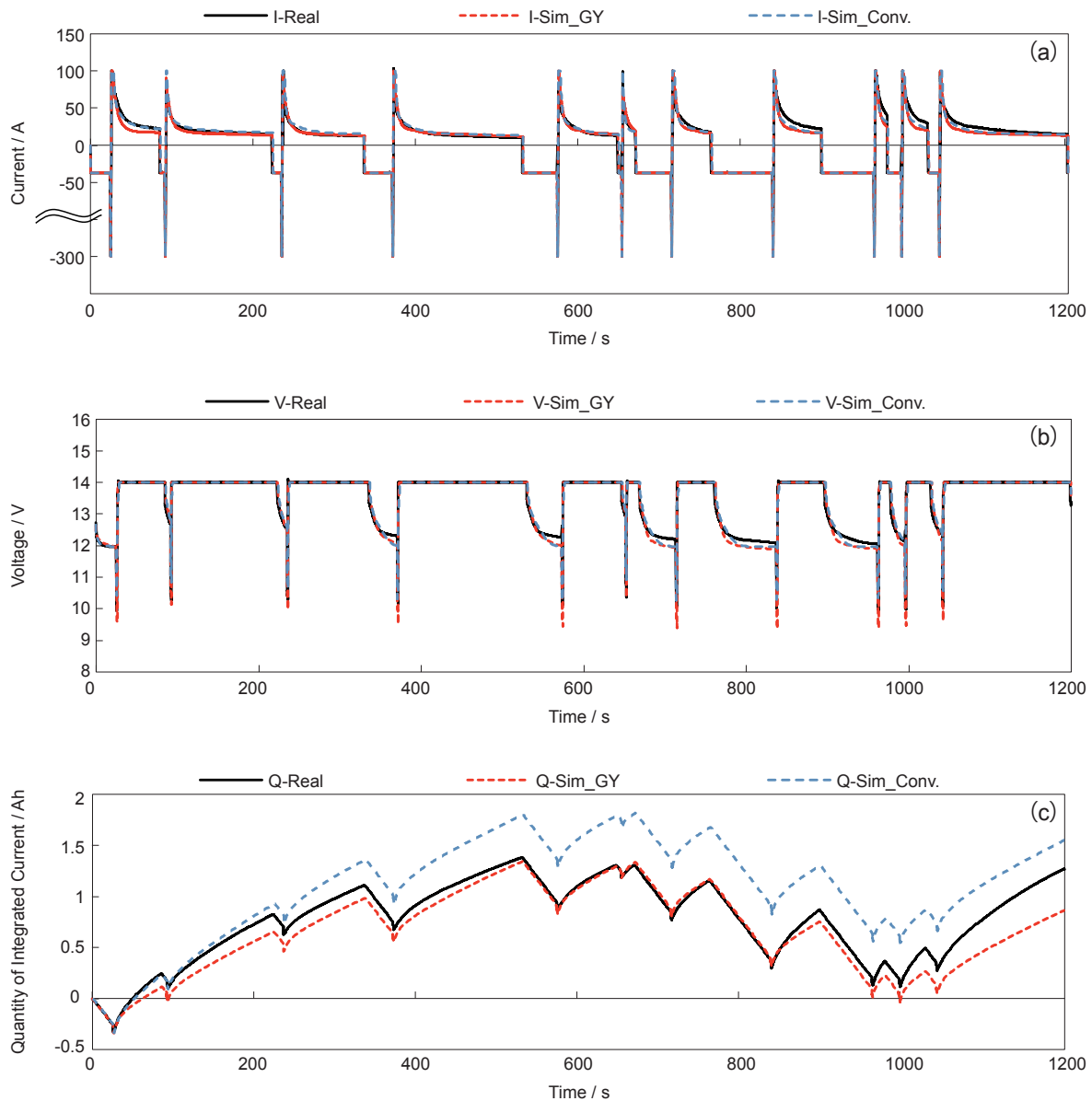


図9 パターンXの実測およびシミュレーション結果. (a) 電流推移 (b) 電圧推移 (c) 積算電気量推移

Fig.9 Measured/Simulated data in evaluation pattern-X.

(a) Current transition (b) Voltage transition (c) Integrated current transition

表2 モデル精度の比較.

Table 2 Accuracy(RMSE) of each model.

Evaluation pattern	Evaluation points	Average error (RMSE)	
		GY_model	Conv_model
X	Voltage	0.14 V	0.14 V
	Current	9.26 A	9.85 A
	Integrated Current	0.16 Ah	0.36 Ah
Y	Voltage	0.11 V	0.17 V
	Current	4.34 A	8.55 A
	Integrated Current	0.05 Ah	0.33 Ah

ターンYでは、積算電気量の平均誤差が1/6程度まで低減されていた。一方でFig. 9 (c)より、パターンXの1000秒目以降の電気量推移においては、GYモデルの誤差拡大が確認された。同図(c)において実測積算電気量がゼロ付近の100秒目や1000秒目前後は同等のSOCと見ることができ、同図(a)において上記時刻付近の充電電流挙動に着目すると、GYモデルや従来モデルではいずれの時刻も同様の推移であるのに対し、実測挙動においては各時点で充電挙動が異なっており、試験中に電池特性が変化していることが確認された。その充電挙動の特徴としては、直前

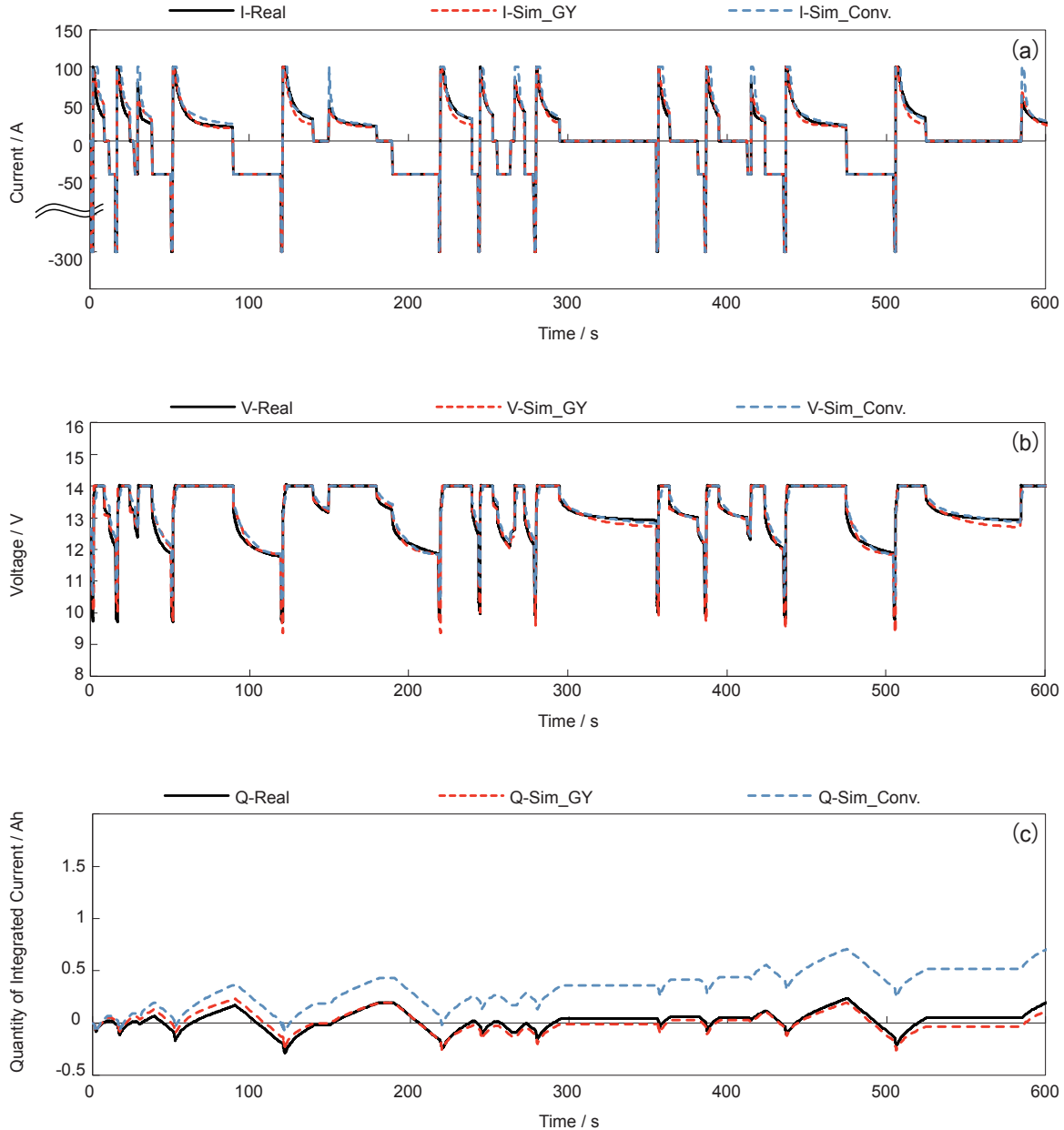


図 10 パターン Y の実測およびシミュレーション結果 .(a) 電流推移 (b) 電圧推移 (c) 積算電気量推移

Fig. 10 Measured/Simulated data in evaluation pattern-Y.

(a) Current transition (b) Voltage transition (c) Integrated current transition

までの充電量が比較的多い 100 ~ 600 秒よりも、比較的放電量の多い 800 ~ 1000 秒の方が大きな電流が流れる傾向にあり、充放電履歴による影響が示唆された。また一般に、鉛蓄電池は高温ほど充電性能が向上することが知られており、試験中の電池温度上昇なども影響し後半の充電性能が向上していることも推察される。これら試験中の特性変化についても考慮したモデルとすることで、更なる精度向上が期待できる。

4.4 精度向上に関する考察

GY モデルが従来モデルよりも高精度となった要因

について考察するため、Fig. 11 に、Fig.10 の 0 ~ 100 秒の推移抜粋を示す。

Fig. 11 に示すように、GY モデルは従来モデルよりも充電直後の電圧立ち上がり早く、より実測に近い挙動となっており、0 秒目や 30 秒目付近の電流に着目すると、実測電流が制限電流到達後早期に垂下しているのに対して、従来モデルでは一定期間制限電流が流れた後に電流垂下に移行していた。ここでの実測のように、頻繁な充放電において充電電流が早期に垂下する要因としては、直前の放電分極の影響などが考え

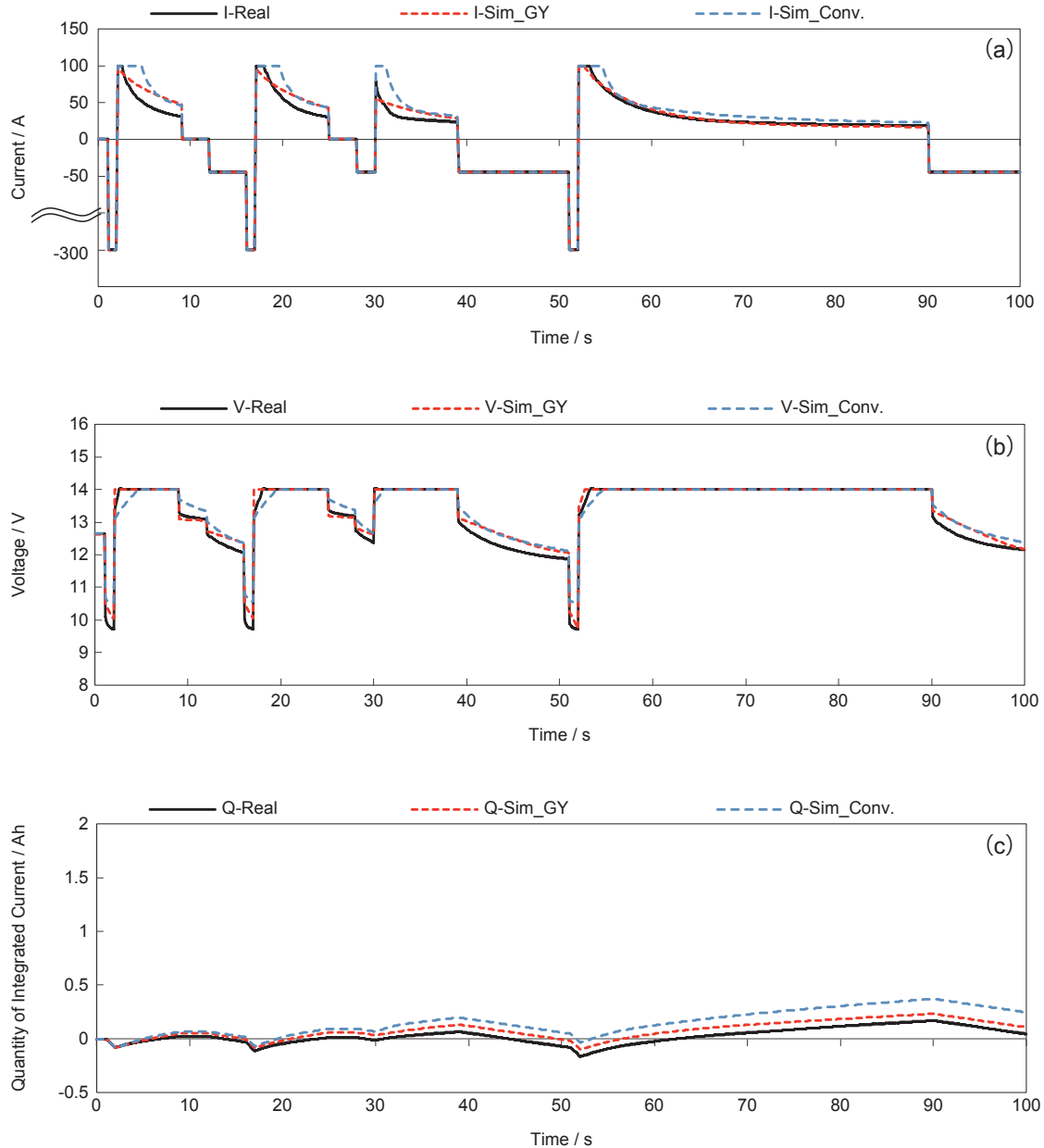


図 11 パターン Y の実測およびシミュレーション結果. [0~100s] (a) 電流推移 (b) 電圧推移 (c) 積算電流量推移
 Fig. 11 Measured/Simulated data in evaluation pattern-Y. [0-100s]
 (a) Current transition (b) Voltage transition (c) Integrated current transition

られ,例えば「充電開始時の電圧」を「放電分極の減少」と「充電分極の増加」との合成と考えると,充電直前の放電量が少ない場合は放電分極が小さくなるため,「充電開始時の電圧」が「充電分極の増加」の影響を受け易くなり,早期に電圧上昇となることが想定される. 今回のモデル作成にあたっては,試験 B で得られた SOC 特性をモデルに反映することで,鉛電池特有の高 SOC 領域の分極特性を考慮しており,この特性をもとに「充電分極の増加」をより正確に再現できるよう設計したため, Fig. 11 のような素早い電圧立ち上

がりが再現できたと考える. また,このように充電初期の精度向上という特徴から,今回作成した GY モデルは,特にパターン Y のように頻繁な充放電を繰り返すパターンにおいて有効であることが推察される.

Fig12 に,今回の作成時に参考とした試験 B の充電時の実測電圧推移および各モデルでの再現結果を示す. Fig. 12 に示すように,今回作成したモデルは,充電末期の電圧上昇を含め比較的良好に再現することができているのに対して,従来モデルでは全体的に電圧が低く推移しており,特に充電末期においては,電圧

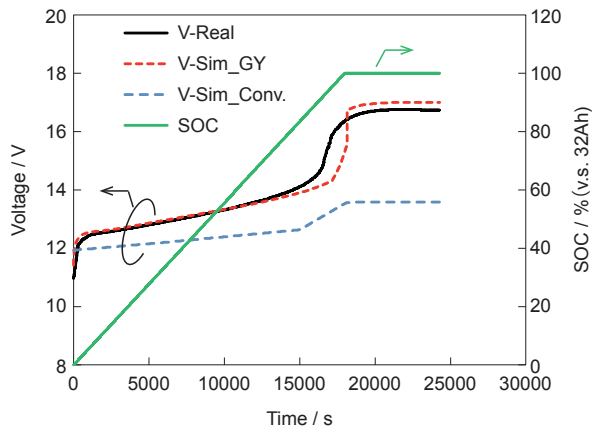


図 12 試験 B (充電) の実測およびシミュレーション結果.
Fig. 12 Measured/Simulated Voltage in test-B (charge).

が十分に立ち上がることなく収束している。鉛蓄電池における充電末期の電圧立ち上がりについては、主に負極での副反応に由来すること、またその副反応量は充電電圧によっても変化することが知られており、実際の車両においては、副反応量を考慮した適正な定電圧充電制御が行われている。そのため、実車両においては上記試験 B ほど顕著な充電分極は発生しないと考えられるが、極板状態や充電電圧に応じて少なからず副反応は発生しており、さまざまな充電電圧での制御や高 SOC 領域における頻繁な充放電制御を精度よく推定するためには、本報告のような高 SOC 領域における電圧の立ち上がり特性を考慮することが重要になると考える。なお、本モデルの分極抵抗においては、SOC だけでなく充電電圧も考慮した設計とすることで、定電圧充電時に過剰な分極とならない仕組みとしている。

5 おわりに

今回、自技会より公開されている等価回路を用いて、その回路パラメータについて、いくつかの電池試験結果をもとに設定することで、実車の充放電挙動を模擬した検証パターンにて再現性の向上を確認した。

検討にあたっては、比較的短時間の充放電分極特性だけでなく、充放電分極が顕著に変化する SOC 領域での分極特性を調査し、それら特性をモデルに反映することで、充放電サイクルの精度向上を確認することができた。本報告の手法を用いることで、温度違いの充放電特性についても同様に再現可能なことを別途

確認しており、型式違いなどについても同様に作成可能と考える。これら技術の活用により、従来モデルより現物に近い充放電挙動が推定可能となるため、より効果的な机上検討が期待できる。

一方で、本手法では依然モデル作成に必要な試験項目が多く、また一般的な試験項目ではないため、すべての型式で実施していくことは現実的ではない。例えば一般的な初期性能 (20hR、RC、CCA など) の測定結果を用いた係数補正のみで型式固有のモデルが作成できるような、より汎用的なベースモデルの構築およびその補正方法の確立が今後の課題といえる。また今回の検討では割愛しているが、充電前の放電レートや充電前後の放置期間などによっても活物質の結晶状態が異なり、電池特性に影響を与えることが知られており^{26,27}、目的に応じてこれらの特性をモデルへ反映させることが必要となる。

今後、種々の反応メカニズム解明を進めながら、より現実的なモデル作成手法を検討していきたい。

参考文献

1. 藤本茂希, 大高義行, 小堂智史, *Honda R&D Technical Review*, **24** (2), 120 (2012).
2. 水野光, 直野隆哉, 及部七郎斎, 花田秀人, 城田幸司, *TOYOTA Technical Review*, **60**, 57 (2014).
3. 角倉盛義, 今野大輔, 江崎浩, 関根和憲, 勝山千春, 西澤智博, *CALSONIC KANSEI TECHNICAL REVIEW*, **11**, 45 (2014).
4. 関末崇行, 上田雅生, 阿部貴志, 加藤利次, 松本比呂志, 佐藤伸久, 公益社団法人自動車技術会春季大会学術講演会予稿集, 603 (2017).
5. 横山努, 藤田幸雄, 小池喜一, 河原洋平, 市原純一, 辻公壽, 加藤利次, 公益社団法人自動車技術会春季大会学術講演会予稿集, 9 (2013).
6. 岩根典靖, *古河電工時報*, 120, 62 (2007).
7. G. Pilatowicz, H. Budde-Meiwes, J. Kowal, C. Sarfert, E. Schoch, M. Königsmann and D. U. Sauer, *J. Power Sources*, **331** 348 (2016).
8. 濱野泰如, 伴郁美, 平川憲治, 山口義彰, *GS Yuasa Technical Report*, **13** (1), 14 (2016).
9. 加藤操, 自動車制御連合講演会報告資料, 757 (2016).
10. 枝本吉広, 馬場厚志, 寺西望, 板橋欣之介, 長村謙介, 丸田一郎, 足立修一, *CALSONIC KANSEI TECHNICAL REVIEW*, **10**, 13 (2013).

11. 小池喜一, 中西裕樹, 門内英治, 菊地亮太, 公益社団法人自動車技術会 春季大会学術講演会予稿集, 5 (2013).
12. 田尾洋平, 増田真規, 山福太郎, 森澄男, 佐々木丈, 稲益徳雄, 吉田浩明, *GS Yuasa Technical Report*, **14** (2), 17 (2014).
13. 加藤利次, *GS Yuasa Technical Report*, **14** (1), 1 (2014).
14. 藤田弘輝, 庄司明, 松井恒平, 宇都宮隆, 楊殿宇, 大路 潔, *マツダ技報*, 32, 185 (2015).
15. G. Pilatowicz, A. Marongiu, J. Drillkens, P. Sinhuber and D. U. Sauer, *J. Power Sources*, **296**, 365 (2015).
16. C. White, J. Deveau and L. G. Swan, *J. Power Sources*, **327**, 160 (2016).
17. 藤田嘉和, 廣瀬育之, 加藤優典, 渡辺雄大, 富士通テン技報, 34 (1), 60 (2017).
18. 岩根典靖, 光山泰司, 谷村雄大, 古河電工時報, 136, 52 (2017).
19. 桐林基司, 代谷直史, 和根崎誠, 沢井研, 大前孝夫, 大角重治 *GS News Technical Report*, **62** (2), 54 (2003).
20. T. Ohmae, K. Sawai, M. Shiomi and S. Osumi, *J. Power Sources*, **154**, 523 (2006).
21. 竹内泰輔, 沢井研, 松村拓児, 今村智宏, 石本信二, 大角重治, *GS Yuasa Technical Report*, **4** (1), 22 (2007).
22. 国際標準記述によるモデル開発・流通検討委員会 著, 自動車システムのモデルベース開発入門, 自動車技術会 出版 p.77-80 (2017).
23. 吉沢四郎 著, 電池ハンドブック, 電気書院 出版, p.3-36 (1975).
24. 辻公壽, 木戸康成, 市原純一, *TOYOTA Technical Review*, **57** (1), 73 (2010).
25. 辻公壽, 嶋田敏, 加藤利次, 電気学会全国大会講演論文集, 2012, 15 (2012).
26. Y. Yamaguchi, M. Shiota, M. Hosokawa, Y. Nakayama, N. Hirai, and S. Hara, *J. Power Sources*, **102**, 155 (2001).
27. G. Pilatowicz, J. Badeda, H. B. Meiwes, J. Kowal, C. Sarfert, E. Schoch, M. Königsmann and D. U. Sauer, *9th International Conference on Lead-Acid Batteries (LABAT) Conference Paper* (2014).