

鉛蓄電池状態検知技術の開発

SOC Monitor of Automotive Lead Acid Batteries

大越哲郎* Teturo Okoshi 山田恵造* Keizo Yamada 平沢今吉* Tokiyoshi Hirasawa
宮崎英樹** Hideki Miyazaki 江守昭彦** Akihiko Emori

自動車メーカーは、CO₂ガスや有害排ガスを縮減するために、アイドリングストップシステム（ISS）や補機類（エアコン、ブレーキ、パワーステアリングなど）の電動化システム（X-By-Wire）といった新しい車輻システムの開発を急いでいる。これらのシステムにおいて、蓄電池の信頼性向上が要求されており、蓄電池の状態検知技術が必要である。

今回、内部抵抗のデータを理論式により補完し、信頼性の高いデータテーブルを提供できる手法と、カルマンフィルタ理論を応用した高精度の残容量演算手法を開発した。これらの手法による残容量の推定精度を制御弁式鉛蓄電池、液式鉛蓄電池について検証した結果、残容量の誤差は±5%であり、実用化できるレベルにある。

Auto makers have been developing next generation automotive system to reduce CO₂ and NO_x etc, and introduce X-By-Wire and ISS (Idling Stop System). Those new system will require more reliable SOC monitor of automotive lead acid batteries.

To meet such severe requirement, we have developed high reliable SOC monitor, with which estimated precision of stored capacity is improved in +/- 5% for both flooded type and vale regulated lead-acid batteries. SOC estimation algorithm using the internal resistance table and Kalman filtering theory contributed to develop above system.

〔1〕緒言

炭酸ガス排出規制の強化に対する燃費の向上と快適性の向上を目的として、自動車メーカーは、車輻の電動化を進めている¹⁾²⁾。図1に電動車輻システムと蓄電池の開発動向を示す。アイドリングストップシステム（ISS）、マイルドハイブリッド（M-HEV、42Vシステム）およびX-By-Wire（バイワイヤ、補機類の電動化システム）の拡大が予想されている。一方、蓄電池については価格の観点から従来の液式鉛蓄電池が当面主力で使用されるが、エネルギー回生が必要になるM-HEVからストロングハイブリッド（Strong-HEV、車輻電

圧が144V以上）の領域で、制御弁式鉛蓄電池や大きなエネルギー回生に応えられるリチウムイオン（Li）電池へと移行していくことが予想される。

上記の電動車輻システムでは、電源の信頼性の確保が最重要課題になる。そのために、蓄電池の残容量、劣化状態などを検知できる機能が必要になってきている。この開発は蓄電池メーカーに最も期待が寄せられている点である。今回、アイドリングストップが行なわれる環境下で自動車に搭載された鉛蓄電池の内部抵抗を測定して、鉛蓄電池の残容量を常時監視できる方法を開発したのでその内容について報告する。

*電池技術開発所 **株式会社日立製作所 日立研究所

〔 2 〕 鉛蓄電池の状態の定義と内部抵抗による状態検知方法について

鉛蓄電池の状態を示すものとして残容量 (SOC, State of Charge) と劣化度 (SOH, State of Health) を選定した。残容量は容量 (Ah) 表示で絶対量, %表示で満充電の容量に対する比率で定義した。

また, 劣化度は次式で定義した。

$$SOH = \frac{\text{劣化時の満充電容量}}{\text{初期の満充電容量}} \times 100 (\%) \quad \dots (1)$$

残容量, 劣化度の定義はMITコンソーシアムのワーキンググループで種々議論されており³⁾, 現時点では公式なものはないが, 本開発では容量を5時間率容量で定義した。

上記の状態の検知方法の開発において, 残容量あるいは劣化度に対して感度の高い変数 (パラメータ) の選定と演算方法の確立が重要になる。過去のパラメータの検討結果から残容量, 劣化度を推定できる最適なパラメータは内部抵抗であると考えられる。過去, 内部抵抗を用いた鉛蓄電池の状態検知方法として, 交流法による検討例が多数あるが^{4) 5) 6)} 交流法は応答性が遅く, 即時の応答性が要求される車載用途には不向きである。そこで, 本研究では, 起動したときに流れる電流と電圧から測定される直流内部抵抗 (DCR, Direct Current Resistance) を用いた状態検知方法について検討した。図2にアイドリングストップ走行での, 鉛蓄電池の充放電波形を示す。起動時に数100Aのパルスのな放電が生じ, 走行, アイドリングストップ, そして再起動のサイクルが繰返される。エンジン起動時の電圧低下を V , 電流変化を I とすると, 直流内部抵抗 (DCR) は (2) 式により算出される。

$$DCR = V / I \quad \dots (2)$$

表1に本研究の開発課題と目標を示す。直流内部抵抗による残容量推定精度目標を $\pm 10\%$ とした。

図1 電動車輛システムと蓄電池の開発動向

Fig.1 Road Map of Next Automotive Systems and Batteries in Near Future.

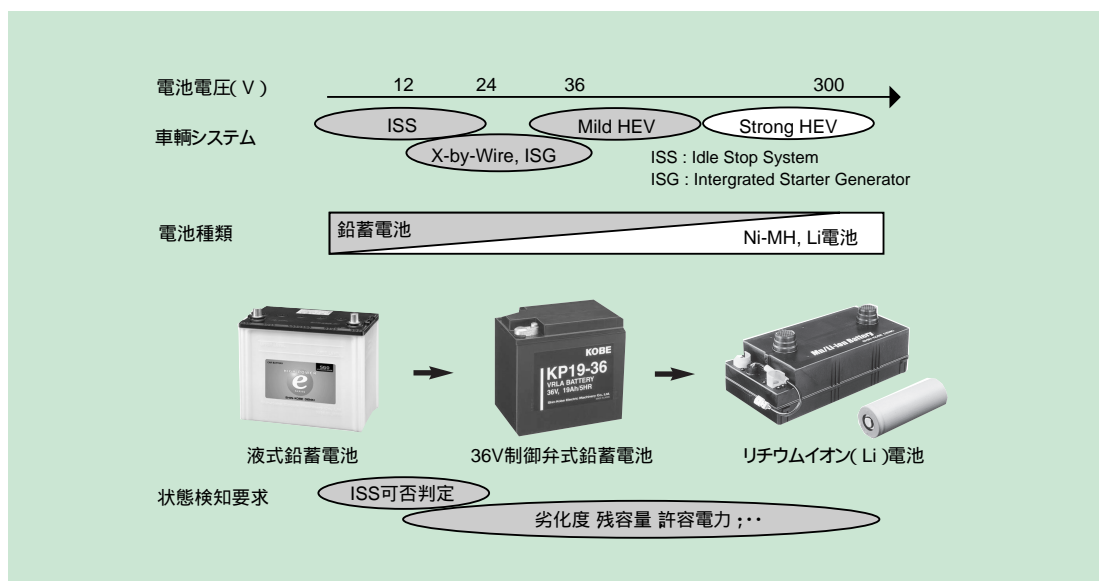


表1 開発課題と目標
Table 1 Subjects and Aims.

項目	課題	目標
手法の確立	残容量を検知するための鉛蓄電池特性の取得	直流内部抵抗 残容量特性テーブル取得と理論的裏付け検証
	高精度残量演算法の確立	残容量演算精度 $\pm 10\%$
システム対応	バッテリーコントローラの開発	1次試作と評価

〔 3 〕 内部抵抗と残容量, 劣化度の関係について

図3に36V制御弁式鉛蓄電池 (容量20Ah), 図4に12V液式鉛蓄電池 (容量52Ah) の残容量, 劣化度と直流内部抵抗の関係を示す。車輦に搭載された鉛蓄電池の劣化は種々のモードにより進行するが, これらの図はJISに定められている耐久性試験方法で充放電を繰返し, 鉛蓄電池の劣化を進行させた場合の測定例である。これらの結果より, 以下のことが分かった。

- 1) 残容量と直流内部抵抗の関係は非線形である。
- 2) 残容量と直流内部抵抗の関係について, 劣化度も考慮に入れるとばらつきがやや大きい, 相関があると言える。
- 3) 図3より, 制御弁式鉛蓄電池では, 液式鉛蓄電池に比べ, 直流内部抵抗の残容量に対する感度が高く, 高精度な残容量推定が期待される。上記の挙動の違いは制御弁式の

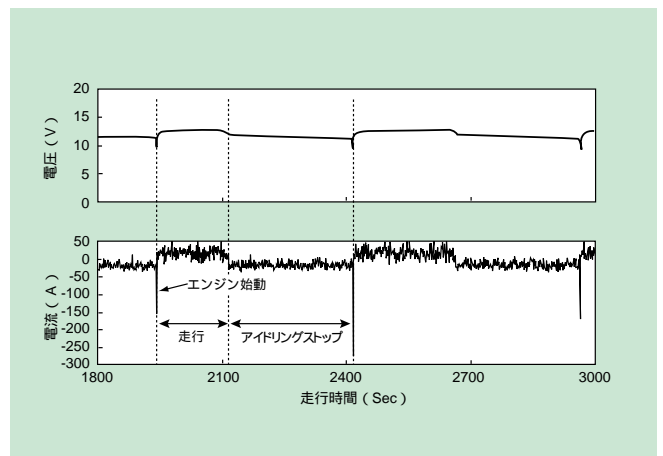


図2 アイドリングストップシステム走行における鉛蓄電池の充放電波形
Fig.2 Charge and Discharge Characteristics of a Battery at ISS mode.

方が、残容量に対する電解液比重の変化が大きい事に起因している。

4) 図4より、液式鉛蓄電池における直流内部抵抗は、残容量が高い領域では感度が小さいが、残容量が小さくなるにつれ、感度が高くなる。

以上の結果から、直流内部抵抗により、残容量の推定が可能になると考えられる。ところで図3、4のようなデータによる残量推定では、温度、劣化などの数多くのパラメータに関して、膨大なデータを取得する必要がある。そこで、従来なかった鉛蓄電池の抵抗 残量に対する理論式を導くことができれば、データテーブルの補完的手法とすることができ、開発工数を削減する事ができる。そこで直流内部抵抗の残容量に対する挙動に電気化学理論を適用し、簡略化したモデルを考えて検証した。

図5に、鉛蓄電池の放電反応式および反応機構を示す。放電反応は以下の3つの過程に分けられる。(図中の電極 溶液界面の拡大部分の説明は、正極を例に取ったものであるが、3つの反応過程は、正極、負極側同様に起こるものであり、以下、正極、負極共通として電極と称する。)

- 1) 電子が電極中を移動する過程(電子伝導過程; r)
- 2) 水素イオンが電気二重層を飛び越えることによって電極

表面上で電荷の授受が行われ中間生成物を形成する過程(電荷移動過程; Ret)

3) SO_4^{2-} , H^+ が拡散する過程(拡散過程; Rdiff)

直流内部抵抗は上記3つの反応過程での抵抗の和で表されると仮定した。

$$DCR = r + Ret + Rdiff \quad \dots (3)$$

各成分の抵抗の理論式を導出するために、従来から用いられている物理、あるいは電気化学的理論式を用いた。また、従来の電気化学的理論式は平板電極における反応に適用できるものであったのに対し、本開発で導出した理論式は、鉛蓄電池で実際に用いられている多孔質電極に適用できるように改良したものである。参考のために導出した理論式を付表として載せる。

図6に、本開発で導出した理論式と実験値の比較を示す。理論式と実験値は良く一致し、理論式の妥当性が証明できた。また、電荷移動過程の傾きが理論値や実験値の傾きとよく似ている。

以上より、直流内部抵抗と残容量の関係が理論式により導かれ、従来よりも信頼性の高いデータテーブルを提供できると考えられる。

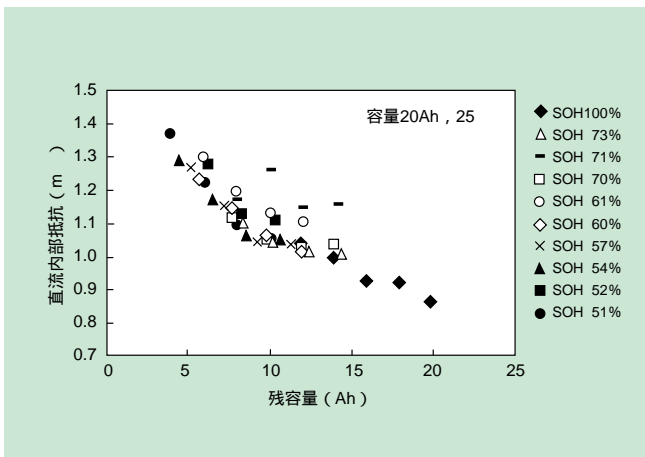


図3 36V制御弁式鉛蓄電池における残容量と直流内部抵抗の関係
Fig.3 Relationship Between DCR and SOC for 36V VRLA.

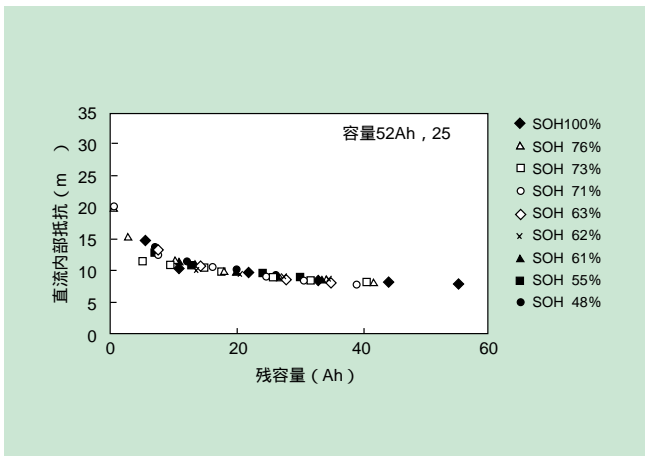


図4 12V液式鉛蓄電池における残容量と直流内部抵抗の関係
Fig.4 Relationship Between DCR and SOC for 12V Liquid Type Lead Acid Batteries.

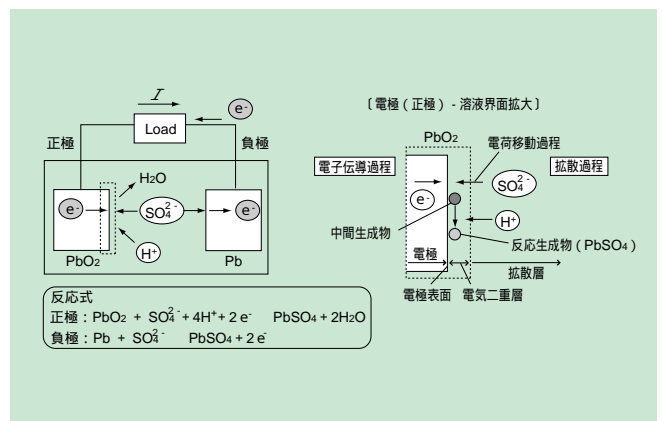


図5 鉛蓄電池の放電反応式および反応機構
Fig.5 Reaction Equation and Mechanisms at discharge of Lead-Acid Battery.

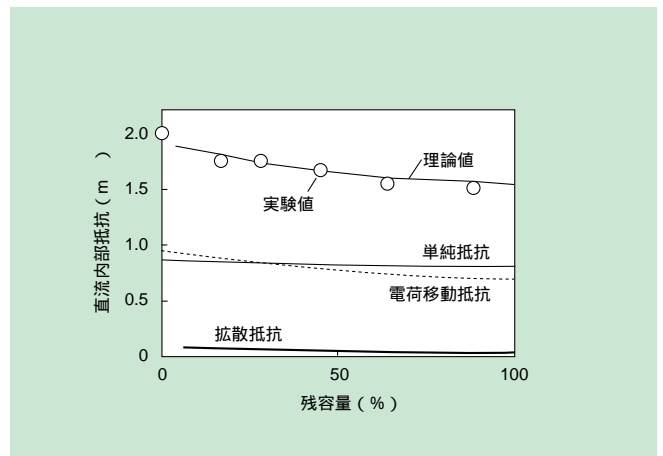


図6 理論式と実験値の比較
Fig.6 Comparison Between Theoretic Equations and Experimental Values.

〔4〕パラメータを用いた高精度演算手法の確立について

電流積分型の蓄電池残容量推定は、蓄電池に流れる電流を微小時間毎に積分し、残容量を計算する手法である。計算式は次式で表される。

$$SOC = SOC + SOC(j) \quad \dots (4)$$

$$SOC(j) = I dt \quad \dots (5)$$

鉛蓄電池を用い、アイドリングストップを模擬した充放電にこの方法を適用した例を図7に示す。ここで、電流検出の誤差はフルスケール500Aに対して0.1% (0.5A)と仮定した。その結果、誤差が時間とともに蓄積し、23分後には5%となる。このため、エンジン起動時の大電流も測定するような用途には不向きといえる。

一方、抵抗型の蓄電池残容量推定は、電圧、電流の変化分から得られる直流内部抵抗と残容量との関係を用いる方法である。図8に制御弁式鉛蓄電池で、残容量70%付近で抵抗型による残容量推定精度を評価した結果を示す。誤差が大きかったが、特に、SOCが高い領域で誤差が大きくなる事が分かった。これは、図3、4に見られるように直流内部抵抗と残容量の関係が、残容量が高い領域で変化感が小さい事に起因する。

以上、電流積分型、抵抗型の残容量推定方法の短所につい

て述べた。しかし、電流積分型の長所は微小時間毎の計算結果については誤差が小さいという点であり、また、抵抗型の長所は経過する時間に対して誤差が蓄積しないことである。そこで、2つの手法の長所を補完的に組み合わせることを考えた。この考え方は、抵抗型の誤差をフィルタ的な処理で軽減させ、フィルタの時間遅れを電流積分型で解消するというものである。このフィルタにはカルマンフィルタ理論を応用することとした⁷⁾⁸⁾⁹⁾。この理論は誤差に応じて更新される重み係数を用いるもので、ロケットの軌道計算や気象予報で使用され、有効と言われている手法である。図9に、カルマンフィルタ理論による残容量推定法の原理図を示す。

この方法は、カルマンフィルタ理論の結果に微小時間の電流積分型残容量を加算する方法である。カルマンフィルタ理論では1回前の抵抗型、電流積分型残容量が重み係数を用いて平均化される。

この演算手法を36V制御弁式鉛蓄電池に適用したときの残容量推定結果を図10に示す。4kW相当のモータージェネレータを用いてエネルギー回生、パワーアシストした場合をシミュレーションし決定した電流パターンで、実際に電池を充放電したものである。この場合には初期の誤差を真値に対して30%に設定した。すなわち、初期の残容量の真値は70%であるが、演算値を40%とした。また、直流内部抵抗は放電側

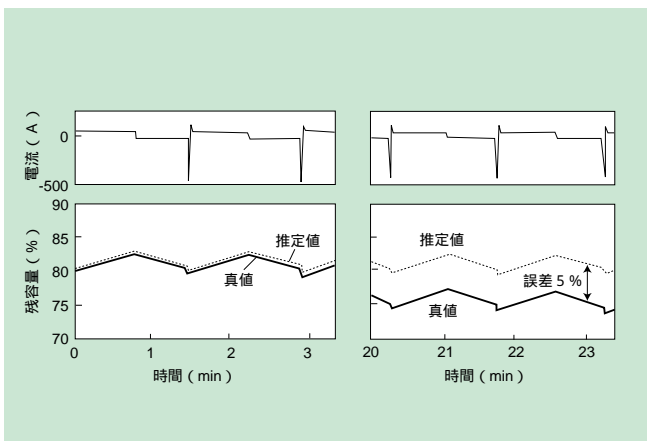


図7 電流積分型の残容量推定の課題
Fig.7 Subject of Method of SOC Estimation by Current Integration Method.

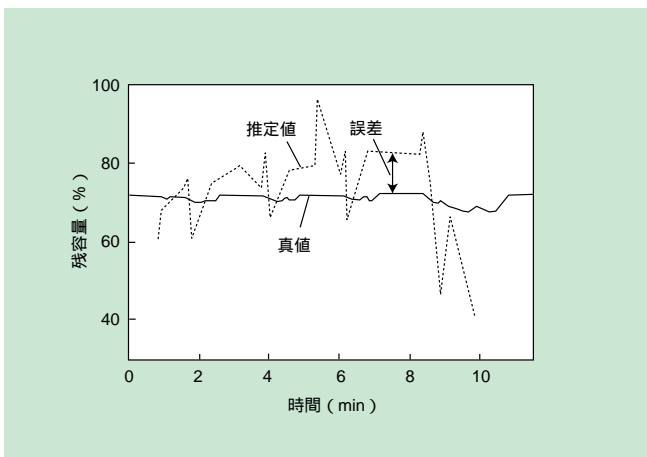


図8 抵抗型の残容量推定の課題
Fig.8 Subject of SOC Estimation by DCR Method.

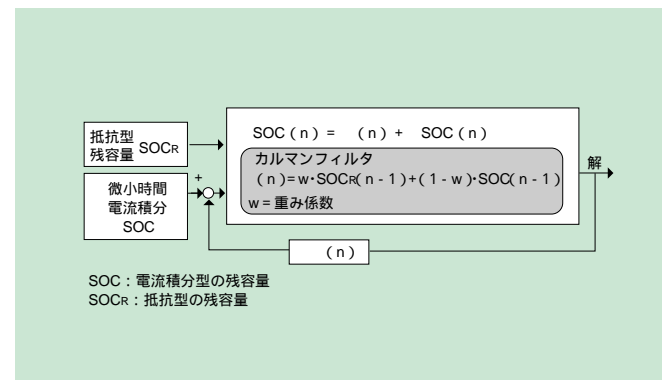


図9 カルマンフィルタ理論による残容量推定法の原理図
Fig.9 Kalman-Filter SOC Estimation Diagram.

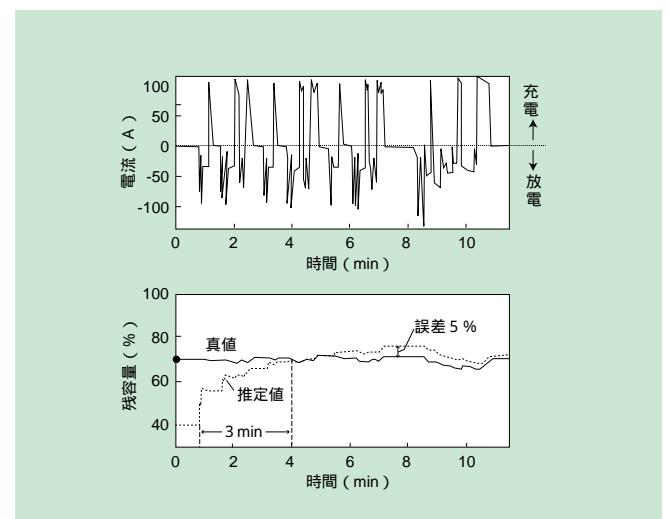


図10 カルマンフィルタ理論による36V制御弁式鉛蓄電池での残容量推定結果
Fig.10 SOC Estimation by Kalman-Filter Theory for 36V VRLA Battery.

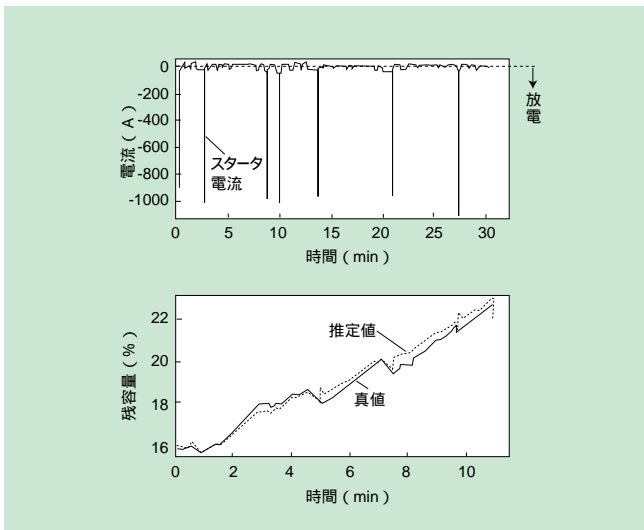


図11 カルマンフィルタ理論による12V液式鉛蓄電池での残量推定結果

Fig.11 SOC Estimation by Kalman-Filter Theory for 12V Liquid Type Lead Acid Battery.

の直流内部抵抗で求めた。その結果、充放電試験装置の残容量計測値を真値として、演算値の誤差は約5%であり、初期の誤差30%は約3分で解消することが分かる。

次に液式鉛蓄電池に適用した結果を図11に示す。測定には12V液式鉛蓄電池(80Ah)を用いた。これを車輻に搭載し、実際に走行してアイドリングストップをした場合の電流波形を採取し、充放電試験装置で再現して、実際に鉛蓄電池に通電を行った。初期条件は鉛蓄電池の無負荷時の電圧から与えた。アイドリングストップの動作に対して、起動時に大電流が流れる際に鉛蓄電池の直流内部抵抗を計算し、抵抗型の残容量を求めた。その結果、充放電試験装置の残容量計測値を真値として、演算値の誤差は約5%であり、実用化できるレベルにある事が分かった。

〔5〕バッテリーコントローラの試作

図12に試作したバッテリーコントローラの外観を示す。バッテリーコントローラは鉛蓄電池の電圧計測部、シャント抵抗で電流を計測し積分する電流積分IC、これらの計測結果から電池の残容量を演算するマイクロコンピュータなどから成立っており、LANで通信する手段を備える。車輻のインバータ用マイクロコンピュータを模擬しており、部品点数の減少により低価格化が可能になる。電圧、電流はいずれもフルスケールに対し $\pm 0.5\%$ の精度、残容量演算精度 $\pm 5\text{ Ah}$ である。上記の部品は、車輻のシステムとして有効である。

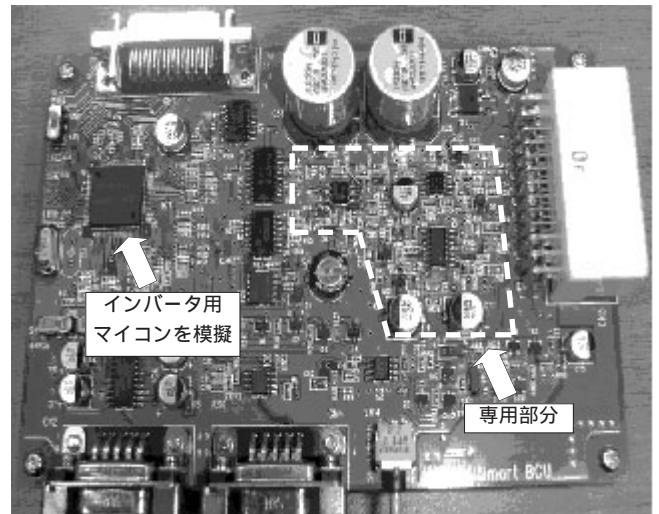


図12 試作バッテリーコントローラの外観

Fig.12 External view of Battery Controller.

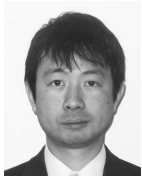
〔6〕結言

- (1) 直流内部抵抗と残容量との関係から、鉛蓄電池の状態を検知する手法を開発した。
- (2) 直流内部抵抗の理論式を導いた。データテーブルを補完し、信頼性の高い残容量推定法を提供できる。
- (3) カルマンフィルタ理論を応用した残容量演算法を開発した。残容量推定精度は約 $\pm 5\%$ であり、実用化できるレベルにある事が分かった。
- (4) 本開発手法の特長を活かし、組込み型のバッテリーコントローラを試作・評価し、実用化への見通しを得た。

〔参考文献〕

- 1) 湊清之：“第4回締結国会議(COP4)と今後の地球環境対策”，JARI Research Journal, 99, 13 (1999)。
- 2) 寺谷達夫：“自動車用電源の現状と展望”，電気化学, 122, p.356 (2002)。
- 3) T.J.Dougherty：“Proposed New Data Parameters for Battery Simulation and Monitoring.”, MIT Consortium Subcommittee in Plymouth(2001)。
- 4) 塩谷宏 他：“据置シール鉛蓄電池劣化判定方法の開発”，新神戸テクニカルレポート, 6, p.19 (1995)。
- 5) K.Champlin et al：“DFRA/DFIS-A New Technology for Battery Instrumentation and Testing”, Battery Council International (2001)。
- 6) W. B. Gu et al：“Numerical Modeling of coupled electrochemical and transport process in lead-acid batteries”, J. Electrochem. Soc., 144, 2053 (1997)。
- 7) S.Piller et al：“Models for State of Charge determination and their applications” Journal of Power Sources, 96, 113(2001)。
- 8) R.Kalman：“A new approach to linear filtering and prediction problems” Transaction of the ASME Journal of Basic Engineering, 82 Series D(1960)。
- 9) 木下拓哉 他：“カルマンフィルタを用いた二次電池の残量推定”，電気学会自動車研究会, VT-03-7 (2003)。

【執筆者紹介】



大越 哲郎
1993年入社
技術開発本部電池技術開発所 所属
現在、鉛蓄電池の開発に従事



宮崎 英樹
1983年入社
(株)日立製作所日立研究所 所属
現在、自動車向けインバータ及びバッテリー制御の研究開発に従事



山田 恵造
1996年入社
技術開発本部電池技術開発所 所属
現在、鉛蓄電池の開発に従事



江守 昭彦
1993年入社
(株)日立製作所日立研究所 所属
現在、各種バッテリーシステムの研究開発に従事



平沢 今吉
1978年入社
技術開発本部電池技術開発所 所属
現在、鉛蓄電池の開発に従事

付表 内部抵抗の各成分の理論式
Theoretical equations for each components of internal resistance.

抵抗成分		計算式・計算方法
電荷移動抵抗	硫酸濃度および多孔度考慮の場合	<p>電池状態依存成分</p> $R_{ct1} = \frac{RT}{IF} [H(\gamma^{(+)} - 1)\ln(\gamma^{(+)}) + H(\gamma^{(-)} - 1)\ln(\gamma^{(-)}) - 2\ln(A) - \ln(a_{H_2O}^{(+)})]$ <p>ここで、</p> $\gamma^{(\pm)} = \frac{d^{(\pm)}IF}{2RTA\kappa_{pore}^{(\pm)}} \left[\frac{1}{2} - \cos\left(\frac{\pi}{3} + \arccos\left(\frac{2-4\theta^{(\pm)}}{3}\right)\right) \right]^{-2}$ $\theta^{(+)} = \theta_{bl}^{(+)} - \frac{Q_{bl} - Q_{res}}{2Ad^{(+)}F} \left\{ \frac{M_{PbSO_4}}{\rho_{PbSO_4}} - \frac{M_{PbO_2}}{\rho_{PbO_2}} \right\}$ $\theta^{(-)} = \theta_{bl}^{(-)} - \frac{Q_{bl} - Q_{res}}{2Ad^{(-)}F} \left\{ \frac{M_{PbSO_4}}{\rho_{PbSO_4}} - \frac{M_{Pb}}{\rho_{Pb}} \right\}$ <p>電池状態非依存成分</p> $R_{ct2} = \frac{2RT}{IF} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$
	電気二重層容量考慮の場合	$R_{ct3} = -\frac{RT}{IF} \ln\left\{ \left[\left(1 - \frac{I_0^{(+)}A}{I}\right) \exp\left(-\frac{FI}{RTC_d^{(+)}}t\right) + \frac{I_0^{(+)}A}{I} \right] \left[\left(1 - \frac{I_0^{(-)}A}{I}\right) \exp\left(-\frac{FI}{RTC_d^{(-)}}t\right) + \frac{I_0^{(-)}A}{I} \right] \right\}$
拡散抵抗		$R_{dif} = \frac{RT}{2IF} \ln \left[\frac{a_{H^+}^3 \left(c_{H^+}^* - \frac{3I^{0.5}}{FAD_{H^+}^{0.5}\pi^{0.5}} \right) a_{HSO_4}^2 \left(c_{HSO_4}^* - \frac{I^{0.5}}{FAD_{HSO_4}^{0.5}\pi^{0.5}} \right) a_{H_2O}^2 (c_{H_2O}^*)}{a_{H_2O}^2 \left(c_{H_2O}^* + \frac{2I^{0.5}}{FAD_{H_2O}^{0.5}\pi^{0.5}} \right) a_{H^+} \left(c_{H^+}^* + \frac{I^{0.5}}{FAD_{H^+}^{0.5}\pi^{0.5}} \right) a_{HSO_4}^2 (c_{HSO_4}^*)} \right]$
オーミック抵抗	接続部品	<p>各部品を長さ l_n、断面積 A_n の形状に近似して計算</p> $R_{ohm1} = \sum_n \frac{l_n}{\kappa_{Pb} A_n}$
	電解液	$R_{ohm2} = \frac{d^{(R)}}{\kappa_{H_2SO_4} (c_{ful} - (Q_{ful} - Q_{res}) / FA(d^{(R)} + d^{(+)} + d^{(-)}))A}$
	電極	$\left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} \right) \frac{\phi}{\rho^{(+)} / d^{(+)} + \rho^{(-)} / d^{(-)}} = j_0 \exp\left(\frac{F}{2RT} \{V - \phi - I(R_{ct1} + R_{dif} + R_{ohm1} + R_{ohm2} + R_u)\} \right)$ <p>境界条件： 外周部：$\left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy}\right)\phi = 0$, 上端：$\phi = 0$</p> <p>格子に活物質充填した電極の電位分布からジュール熱を求め抵抗換算</p>

I : 電流 (A)
t : 時間 (s)
 $a_x(c)$: 濃度 c の x 種の活量 (-)
H() : ヘビサイド関数
ful : 満充電での多孔度 (-)
x : x 種の導電率 (S/cm)
(R) : リテナーでの値

R : ガス定数 (8.31441 J/mol K)
d : 厚さ (cm)
Q_{res} : 残存容量 (C)
Mx : x 種の分子量 (g/mol)
c_x : x 種の濃度 (mol/cm³)
D_x : x 種の拡散係数 (cm²/s)
* : 時間ゼロでのリテナーでの値

T : 温度 (K)
A : セル当たり極板対向部面積 (cm²)
Q_{ful} : 満充電容量 (C)
x : x 種の密度 (g/cm³)
: 極板厚さと多孔質電極反応可能厚さの比 (-)
(±) : 正極または負極での値