

鉛バッテリー用状態検知センサ

Monitoring and Diagnosis Sensor for Automotive Lead-Acid Batteries

前田謙一* Kenichi Maeda 大越哲郎* Tetsuro Okoshi

山田恵造** Keizo Yamada 福原啓介*** Keisuke Fukuhara 曾根原理仁**** Masahito Sonehara

燃費向上や排ガス低減のため、自動車メーカーはアイドリング・ストップ&スタートシステムや加速時にモータ駆動し減速時に回生充電するマイクロ・ハイブリットシステムを有する車両の開発を急いでいる。これらの用途では、鉛バッテリーは放電状態で使用されるため、適正な状態に保ち、充電不足や寿命などが発生する前にユーザに警告を発する鉛バッテリー用状態検知センサが必要不可欠です。アイドリング・ストップ&スタートシステム車両用の状態検知アルゴリズムを組み込んだ鉛バッテリー用状態検知センサを開発した。状態検知アルゴリズムは、アイドリング・ストップ判定、残容量推定、要交換判定の3要素からなる。新規な制御アルゴリズムの開発により、状態検知の信頼性が大きく向上した。また専用のカスタムICを開発し、小型かつ低コストの見通しを得た。

Automakers have been developing the next-generation automotive systems such as idling stop/start systems (ISS) and micro hybrid (Micro-HEV) systems in order to improve the fuel efficiency and to reduce the exhaust gas emissions. In such systems, the lead-acid battery is used in a partial-state-of-charge (P-SOC) condition and the battery monitoring system is required to warn the user about the unacceptable level of the functional capacity and battery replacement timing.

The battery monitoring system for the ISS vehicles has been developed with a battery monitoring algorithm of high accuracy. The algorithm consists of three elements: idling stop diagnostic criteria, replacement diagnostic criteria, and SOC estimation. The reliability of the battery monitoring system has been improved by using newly developed algorithm. We also developed custom IC for the monitoring system, which is expected to reduce its size and cost.

〔1〕 緒 言

近年、自動車メーカーはCO₂排出量の削減、燃費の向上を目的として、信号待ちなどの停止時にエンジンのアイドリングをストップするアイドリング・ストップ&スタートシステム(以下、ISS)や、加速時にモータ駆動し減速時に回生充電するマイクロ・ハイブリット(Micro-HEV)システムなどの開発に取り組んでいる^{1) 2)}。特にISSは、以前よりトラック、バスなど大型車では一般的に採用されてきたが、最近では乗用車でも普及してきた。

現在の自動車は鉛バッテリーを搭載しているが、ISSにおいても鉛バッテリーが主に使用される。アイドリング・ストップ中、ライトやオーディオ等の補機類へ電力を供給するため、鉛バッテリーは部分的に放電された状態

(P-SOC状態)で使用されることが多くなる。そのため充電受入性がよく、耐久性に優れた鉛バッテリーと、鉛バッテリーを適正な状態に保ち充電不足や寿命などの不測の事態に陥る前にユーザに警告を発する鉛バッテリー用状態検知センサが必要不可欠になる。

状態検知の精度を向上させることにより、鉛バッテリーの性能を充分引き出すことができ、燃費向上につながる。

当社ではこれまで状態検知機能付自動車用バッテリーであるAIバッテリーについて開発を続けてきた^{3) ~5)}。本研究ではAIバッテリーの技術を基に、さらに状態検知の精度を向上させたアルゴリズムを組み込んだ、鉛バッテリー用状態検知センサを開発したので、その内容について報告する。

*埼玉事業所 **技術開発本部 電池研究開発センタ ***名張事業所 ****(株)日立製作所

〔2〕 開発課題

図1は状態検知の要素である。状態検知アルゴリズムは①アイドルング・ストップ判定、②残容量推定、③要交換判定の3要素を演算する。鉛バッテリー用状態検知センサはアイドルング・ストップからエンジン始動ができるか否か、アイドルング・ストップしつづけても大丈夫か否か、鉛バッテリーの寿命が近いかな否か、をバッテリー電圧、電流、温度の三つの測定パラメータから判定する。鉛バッテリー用状態検知センサによる状態検知はこれら三つのパラメータをもとにしたアルゴリズムを構築し、その結果によりアイドルング・ストップ判定、残容量推定、要交換判定が実施される。

図2はISSの基本構成を示す。状態検知の演算結果はCAN(Controller Area Network), LIN(Local Interconnect Network)などのネットワークを通じエンジンコントローラ(ECU: Engine Control Unit)に送信する。エンジンコントローラはその情報をもとにスタータ兼オルタネータであるISG(Integrated Starter Generator)を制御してアイドルング・ストップしたり、ユーザへ鉛バッテリー劣化の警告を表示したりする。万が一、鉛バッテリー用状態検知センサが誤判定をすると、例えば信号待ちでアイドルング・ストップしたがエンジン再始動ができず大渋滞するなど、場合によっては重大事故を引き起こす可能性もある。状態検知の信頼性の向上が開発の課題である。

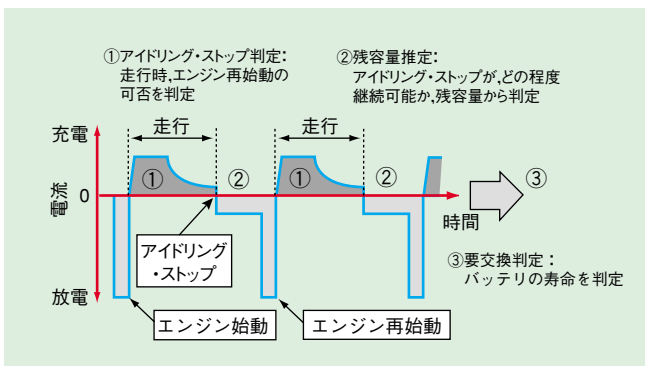


図1 状態検知の要素

Fig.1 Requirement for battery monitoring.

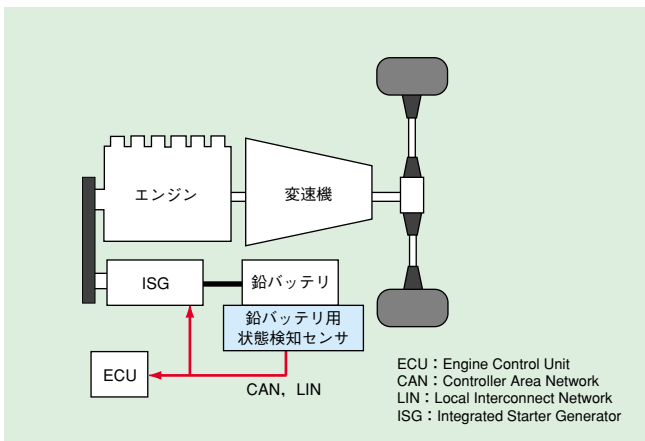


図2 ISSの基本構成

Fig.2 Basic configuration of the idling stop/start system.

〔3〕 鉛バッテリー状態検知アルゴリズムの開発

3.1 状態検知パラメータ

状態検知パラメータは以下の三つである。

- ①SOC(State of Charge: 充電状態); SOCは鉛バッテリーの残容量で、単位はAh表示で絶対量で定義した。
- ②SOH(State of Health: 劣化状態); SOHは鉛バッテリーの劣化の度合いであり、単位は%で(1)式で算出する。

$$SOH = (\text{劣化バッテリーの満充電容量}) / (\text{新品バッテリーの満充電容量}) \times 100 \quad \dots (1)$$
- ③V_{st}; エンジン始動時のバッテリー電圧。

図3はエンジン始動時のバッテリー電圧を示す。エンジン始動時のバッテリー電圧は下に凸の波形になり、最低値をV_{st}と定義した。V_{st}はアイドルング・ストップ判定の状態検知パラメータである。

図4は残容量とV_{st}の関係を示す。図4でV_{st_min}はエンジン始動できる最低のV_{st}を、SOC_{min}はエンジン始動できる最低の残容量をそれぞれ示している。温度一定の場合、V_{st}は残容量が減少するほど低くなる。走行時に推定されるV_{st}が、V_{st_min}より小さい場合、アイドルング・ストップNG判定とした。V_{st_min}は電装システムのIR損と計測誤差の余裕度を考慮して設定される。

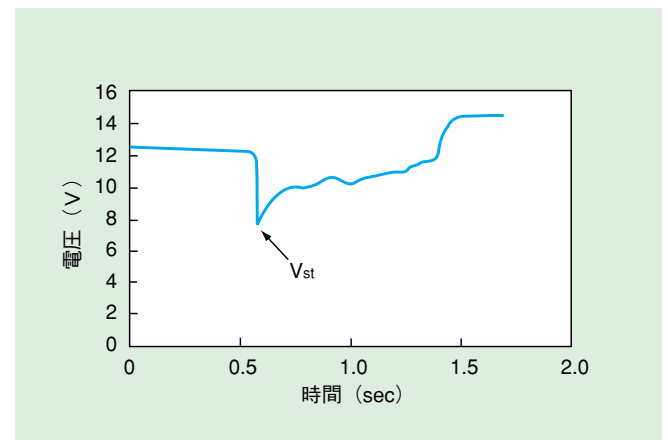


図3 エンジン始動時のバッテリー電圧

Fig.3 Battery voltage at engine start.

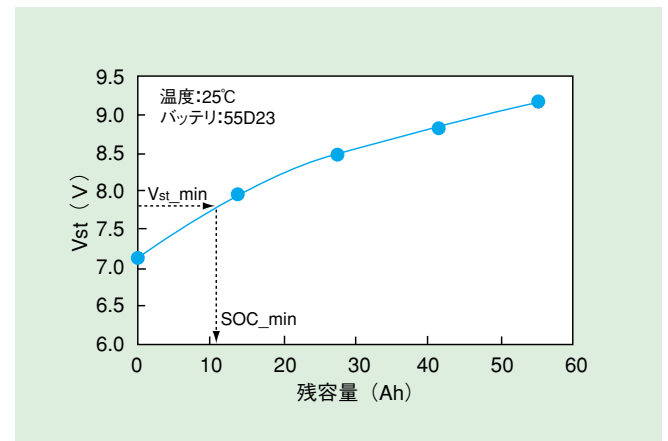


図4 残容量とV_{st}の関係

Fig.4 Relationship between SOC and V_{st}.

3.2 状態検知アルゴリズムの信頼性向上策

開発課題である状態検知アルゴリズムの信頼性はどのように向上できるかを説明する。信頼性向上は信頼度を上げることである。信頼度はJISで「信頼性の対象となるシステムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たす確率」と定義されている。本研究における信頼度は、真値に対する誤差が目標とする許容誤差範囲内に入る割合、または判定が正解する確率とした。例えば残容量の許容誤差±10%以内を目標とした場合、推定値が100回中95回、±10%以内に入った場合、信頼度95%である。あるいはアイドルリング・ストップ判定が100回中99回、正解した場合、信頼度99%である。信頼度の算出はt検定法を用いた。

本研究の判定アルゴリズムは、複数の手法により算出した結果の中から一番悪い結果を採用することで、鉛バッテリーをより安全サイドで使用することができる。

図5は信頼性向上の概念図を示す。測定パラメータはバッテリー電圧、電流、温度の三つの物理量である。3.1で述べた三つの状態検知パラメータ、①SOC、②SOH、③V_{st}はこれら三つの測定パラメータをもとにして算出される。本開発品の特徴は、一つの状態検知パラメータを異なる手法で複数算出することである。例えばSOCは、バ

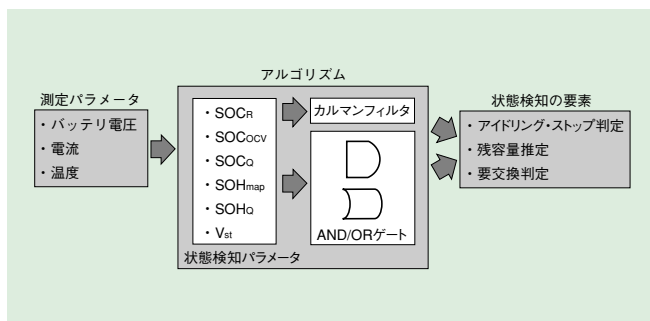


図5 信頼性向上の概念図
Fig.5 Reliability improvement plan.

表1 状態検知パラメータの算出方法

Table 1 Calculation method of monitoring parameters.

状態検知パラメータ	定義	算出方法
SOC _R	バッテリー内部抵抗Rから求めたSOC	バッテリー内部抵抗RとSOCの関係からSOCvs.Rマップを作成。このマップにバッテリー内部抵抗Rと温度を代入しSOC _R を算出。Rはエンジン始動時の電圧、電流データから最小二乗法により求めた近似線の傾きとした。
SOC _{ocv}	OCVから求めたSOC	OCVとSOCの関係からSOC-OCV関係式を算出。この式にOCVを代入しSOC _{ocv} を算出した。OCVは充放電後に安定するまで時間を要するためエンジン停止後から6時間後のOCVを用いた。
SOC _q	電流積算から求めたSOC	SOC _q =電流×サンプリング時間×充電効率 充電効率はバッテリー電圧と温度から算出。
SOH _{map}	OCVvs.ΔR/ΔOCVマップから求めたSOH	OCV-Rプロット2点間の傾き(ΔR/ΔOCV)をOCVに対しプロットしたOCVvs.ΔR/ΔOCVマップを作成。このマップにOCV、Rをプロットし判定閾値であるSOH40%以上かを判定する。
SOH _q	充放電量から求めたSOH	SOH _q =100-(放電1Ah当りの劣化度)×(バッテリーの放電量) 放電1Ah当りの劣化度は走行中の放電量、放電回数、平均温度から算出。
V _{st}	残容量から求めたエンジン始動時の最低電圧	V _{st} =OCV _{soc} ×R _c /(R _{soc} +R _c) OCV _{soc} :推定したSOCをSOC-OCV関係式に代入し算出したOCV。 R _{soc} :推定したSOCと温度をSOCvs.Rマップに代入し算出したバッテリー内部抵抗。 R _c =車両の抵抗

ッテリ内部抵抗Rから求めたSOC_R、OCV(Open Circuit Voltage:開回路電圧)から求めたSOC_{ocv}、電流積算量Qから求めたSOC_qの三つを算出する。信頼性はこれら複数の状態検知パラメータをカルマンフィルタ理論⁶⁾やAND/OR論理の演算処理をすることによって向上する。参考として状態検知パラメータの算出方法を表1に載せた。

3.3 アイドリング・ストップ判定

図6はアイドルリング・ストップ判定のアルゴリズムを示す。V_{st}がyesの意味はV_{st}がV_{st_min}より高いことを示し、SOH_{map}、SOH_qがyesの意味は鉛バッテリーがまだ寿命に達していないことを示している。鉛バッテリーが寿命となる閾値は実車試験の結果からSOH40%以下とした。アイドルリング・ストップ判定は、V_{st}とSOH_{map}とSOH_qとをAND演算処理する。AND演算処理によりV_{st}、SOH_{map}、SOH_qの三つ全てがyesの場合にアイドルリング・ストップOK判定となる。逆に三つの内どれかがnoの場合はアイドルリング・ストップNG判定とする。このようなフェールセーフ処理により信頼性を向上させている。誤判定の確率は、V_{st}、SOH_{map}、SOH_qの信頼度が95%とすると5%×5%×5%=0.0125%であり、誤判定となる確率は0.02%未満に抑えることができる。

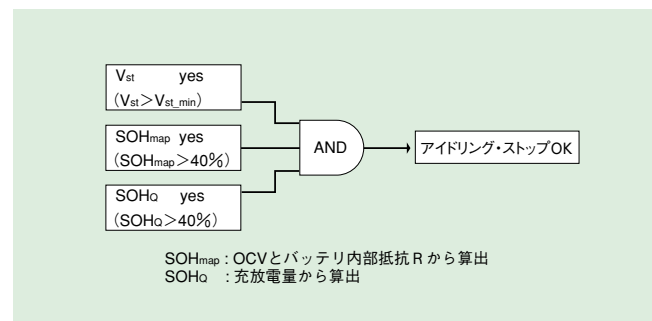


図6 アイドリング・ストップ判定のアルゴリズム
Fig.6 Algorithm of diagnostic criteria for idling stop.

3.4 要交換判定

図7は要交換判定のアルゴリズムを示す。要交換判定は、OCVとバッテリー内部抵抗Rのマップから求めたSOH_{map}と総充放電量から求めたSOH_QとをAND/OR論理で演算処理することによって信頼性向上を図った。つまりSOH_{map}とSOH_Qの両方がyesでないと良好判定せず、二つの内一つがnoの場合は要交換判定する。

3.4 残容量推定

図8は残容量推定のアルゴリズムを示す。残容量推定は、バッテリー内部抵抗Rから求めたSOC_RとOCVから求めたSOC_{ocv}とをカルマンフィルタ処理することによって走行前の残容量を決定し、走行中は電流積算から求めたSOC_Qを加算することにより残容量を算出する。カルマンフィルタ処理は、誤差に応じて更新される重み係数w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。重み係数wはR、OCV、

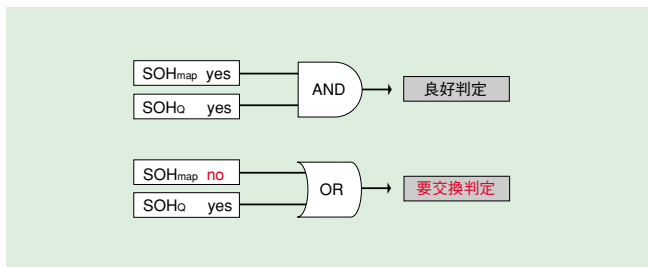


図7 要交換判定のアルゴリズム

Fig.7 Algorithm of diagnostic criteria for replacement.

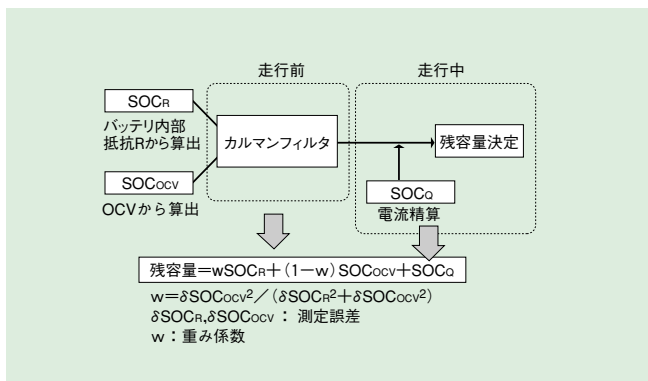
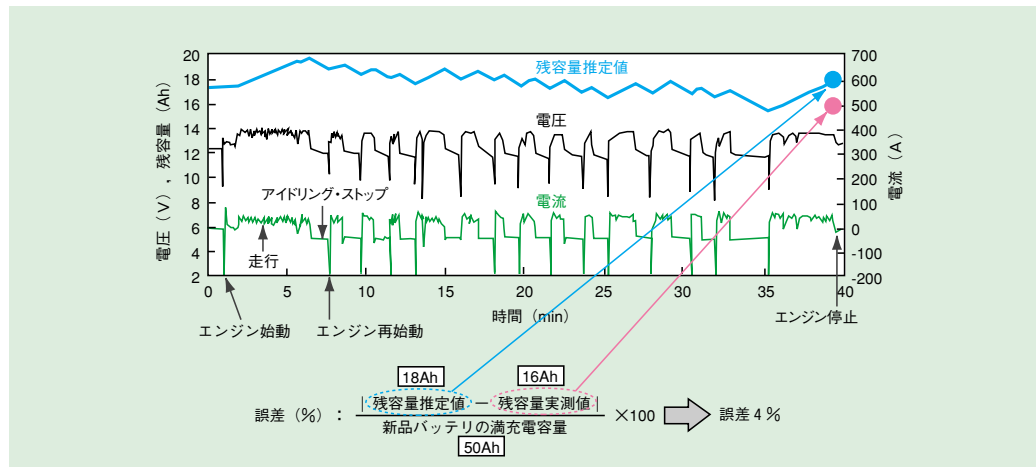


図8 残容量推定のアルゴリズム

Fig.8 Algorithm of SOC estimation.

図10 ISS走行パターンの残容量推定結果

Fig.10 Result of SOC estimation in the idling stop/start system.



それぞれの測定誤差 $\delta SOC_R, \delta SOC_{ocv}$ から算出する。

図9は残容量と残容量測定誤差の関係の概念図を示す。OCVの測定誤差 δSOC_{ocv} が残容量によらず一定であるのに対し、バッテリー内部抵抗Rの測定誤差 δSOC_R は残容量が小さいほど測定誤差が小さくなる。カルマンフィルタ処理では残容量が小さい領域ではSOC_Rの重みが大きくなり、また残容量が大きい領域ではSOC_{ocv}の重みが大きくなるよう残容量推定し、誤差が小さくなるように重み係数wが更新される。この手法により高精度に走行前の残容量を決定することができる。

図10はこの演算法をISS走行パターンに適用した場合の残容量推定結果を示す。これは12V液式鉛バッテリーを搭載したISS車両で実車走行試験したものである。試験後に測定した、鉛バッテリーの残容量の実測値と推定値との差を新品バッテリーの満充電容量で割り誤差とした。図10では試験後に測定したバッテリーの残容量は16Ahであり試験終了時の残容量推定値は18Ahだったのでこの差の絶対値2Ahを新品バッテリーの満充電容量50Ahで割り誤差4%を得た。残容量推定の目標値は、この誤差が新品バッテリーはもちろんバッテリーが劣化しても±10%以内に入ることとした。鉛バッテリーは使用状況により様々な劣化状態になるため、劣化バッテリーを精度よく状態検知することは難しい。このためバッテリーが劣化しても残容量推定誤差を±10%以内にするには高度な技術レベルであると言える。

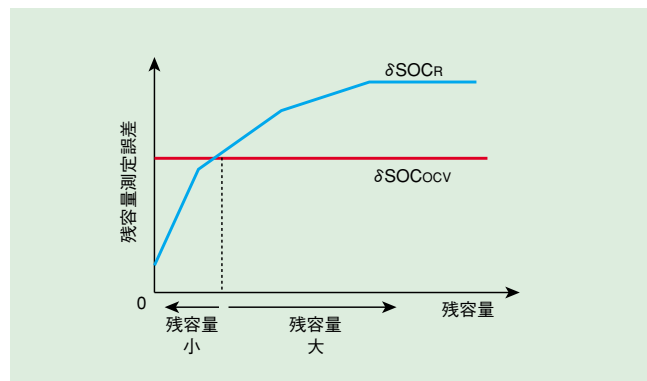


図9 残容量と残容量測定誤差の関係

Fig.9 Relationship between SOC and SOC estimation error.

図11は種々の劣化度の鉛バッテリーでの残容量推定の誤差を示す。劣化バッテリーには充放電器でISS走行を模擬した充放電パターン、及び実車走行試験により劣化させたものを用いた。誤差は全て±10%以内だった。誤差が±10%以内に入る信頼度をt検定法で算出したところ、99%以上であり、実用化できるレベルであることがわかった。

[4] ハードウェアの開発

図12は鉛バッテリー用状態検知センサのハードウェア構成を示す。鉛バッテリー用状態検知センサはバッテリー電圧、電流、温度を測定し、それらの値からアルゴリズムにより状態検知パラメータを演算し、その結果をLINなどで通信する手段を備える。(株)日立製作所と共同開発したカスタムICはADC、演算機能、通信機能などを一体化し、低コスト化、小サイズ化を実現した。

図13は鉛バッテリー用状態検知センサの外観である。電流センサはイザベリン製のシャント抵抗(抵抗値:0.1mΩ, 抵抗体:マンガン)を、また温度センサは石塚電子製のサーミスタ(型式:502AT-11, 使用温度範囲:-50~105℃)を採用した。シャント抵抗上に設置されたケース内に前述したカスタムICを搭載した基板が内蔵されている。

表2は鉛バッテリー用状態検知センサの仕様を示す。ハードウェアに起因する直接測定量の誤差は、ソフトウェアによる誤差補正と平均化処理で、許容条件を満足した。停止中のバッテリーあがりを防止するため、停止中は消費電流の小さい省電力モードで動作する。消費電流は走行中の通常モードで20mA, 省電力モードで2.8mA(@-20~85℃)である。またPCとシリアル接続し状態検知結果をモニタ表示できる。

[5] 課題と今後の方針について

現在、ISS用途以外にも据置電源用、HEV補機用などで鉛バッテリー用状態検知センサが必要である。用途毎に適した測定パラメータの選定と判定アルゴリズムの開発が必要になる。これらに適用できる状態検知アルゴリズムの開発が今後の課題であり、様々な用途に対応できる汎用性のあるアルゴリズムを開発していくことが重要である。

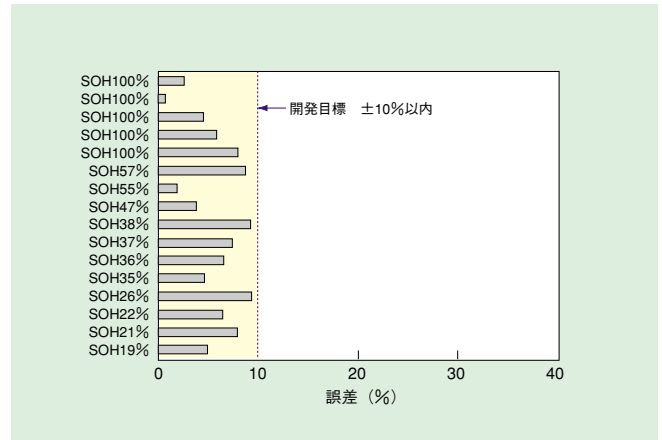


図11 種々の劣化度の鉛バッテリーでの残容量推定の誤差

Fig.11 SOC errors of deteriorated batteries.

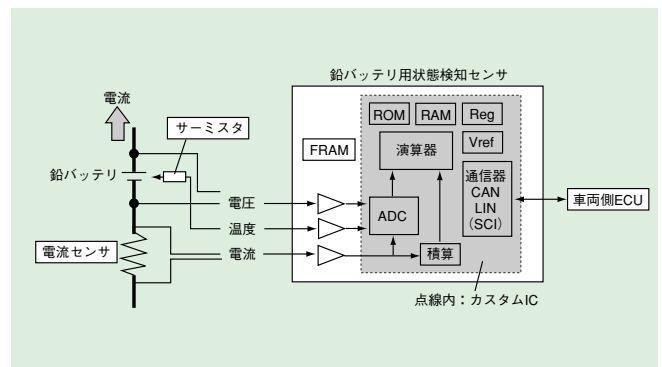


図12 鉛バッテリー用状態検知センサのハードウェア構成

Fig.12 Configuration of battery monitoring system.

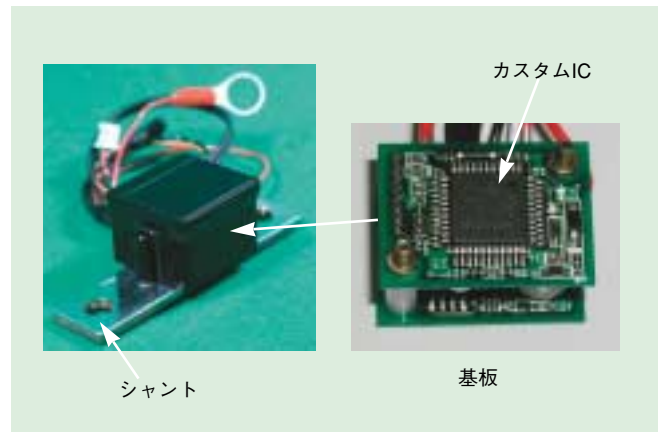


図13 鉛バッテリー用状態検知センサの外観

Fig.13 Appearance of battery monitoring system.

表2 鉛バッテリー用状態検知センサの仕様

Table 2 Characteristics of battery monitoring system.

項目	開発品	
本体サイズ (mm)	L 40×W30×H31	
IC	仕様	専用カスタム IC, 8 bit/8 MHz
	ROM容量	16 kB
	RAM容量	512B (+FRAM 8 kB)
	ADC	12-14 bit
測定精度	電圧	±15 mV@12V
	電流	±0.4 A @100 A
	温度	±3 °C
インターフェイス	電圧,電流,RS232C,イグニッション	

〔6〕 結 言

- (1) 信頼性の向上した鉛バッテリー用状態検知センサを開発した。状態検知アルゴリズムはアイドリング・ストップ判定, 残容量推定, 鉛バッテリーの要交換判定の3要素を演算することができる。
- (2) 本手法では各演算要素に対して, 複数の方法で演算する。これらの異なる演算結果をAND/OR論理やカルマンフィルタ理論を活用することにより, 状態検知の信頼性向上を図った。残容量推定の誤差が±10%以内に入る信頼度は99%以上であることを確認した。
- (3) 開発した鉛バッテリー用状態検知センサは, (株)日立製作所と共同開発した専用のカスタムICにより小型化かつ低コスト化を実現できる見通しを得た。

〔参考文献〕

- 1) 深田隆文他: “自動車を取り巻く環境の変化”, 電気学会自動車研究会, VT, P1 (2008).
- 2) 富士経済: “アイドリング・ストップ機構付自動車”, エネルギー・大型二次電池・材料の将来の展望2010 (上巻), P110 (2010).
- 3) 山田恵造他: “自動車用AIバッテリー<CYBOX>の開発”, 新神戸テクニカルレポート, 15, P18 (2005).
- 4) 大越哲郎他: “自動車用次期AIバッテリーの開発”, 新神戸テクニカルレポート, 16, P22 (2006).
- 5) 大越哲郎他: “状態検知機能付自動車用バッテリーの開発”, 新神戸テクニカルレポート, 19, P17 (2009).
- 6) 大越哲郎他: “鉛電池状態検知技術の開発”, 新神戸テクニカルレポート, 14, P7 (2004).