

小型電気自動車用バッテリーの高効率利用法

High Efficient Use of Batteries for Small EVs

○五十嵐 和広, 王 磊, 江村 超

○Kazuhiro Igarashi, Lei Wang, Takashi Emura

東北大学大学院

Graduate School of Tohoku University

キーワード : 電気自動車 (electric vehicle), 回生ブレーキ (regeneration-brake), 鉛蓄電池 (lead-acid battery), 充放電特性 (characteristics of charge and discharge), シミュレーション (simulation)

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院 工学研究科 機械電子工学専攻 江村研究室
五十嵐 和広, Tel.: (022)217-6969, Fax.: (022)217-6967, E-mail: igarashi@emura.mech.tohoku.ac.jp

1. 緒 言

近年, 地球温暖化や大気汚染などの環境悪化が問題となっているが, その主たる原因に自動車の排気ガスが挙げられる。そのため先進各国で排気ガスの規制が厳しくなりつつある。そこで排気ガスを出さない電気自動車が注目され, 実用に向けた研究が盛んになってきている¹⁾。

電気自動車の大きな特徴は, バッテリーなどに蓄えた電気エネルギーを用いて走行することである。そのため低公害であるが, 航続距離が短いという欠点がある。そこで, 高性能のバッテリーを開発することにより, 電気自動車の走行性能を向上しようとする試みがなされている。一方, バッテリーの特性を良く知り, その性能を最大限に生かし, 効率良くエネルギーを取り出すことも重要であると考えられる。

また, 電気自動車はその動力源としてモータを用いているため, モータを発電機として利用する

ことによりエネルギーの回生が可能となる。急な下り坂や停止する際に回生ブレーキを利用することにより, 運動エネルギーが電気エネルギーに変換され, 制動力を得ると同時に発生したエネルギーを回収することができる。電気自動車がバッテリーへの回生を行いつつ走行するとき, バッテリーに対して充電と放電が度々繰り返されることになる。このようにバッテリーが断続的に充放電される状況において, 電気自動車の高効率制御を実現するには, バッテリーの充放電特性を知ることが必要不可欠である。

以上の見地から, 本研究ではバッテリーを効率良く利用することで, 電気自動車の高効率制御を実現することを目的とし, 以下のようなことを行った。はじめに, バッテリーの充放電実験を行うことでその特性を調べた。次にその特性を踏まえて, バッテリーの充放電シミュレーションを行うためのアルゴリズムを考案した。最後にソフトウェアによるバッテリーシミュレータを構築し, その有効性を確認した。

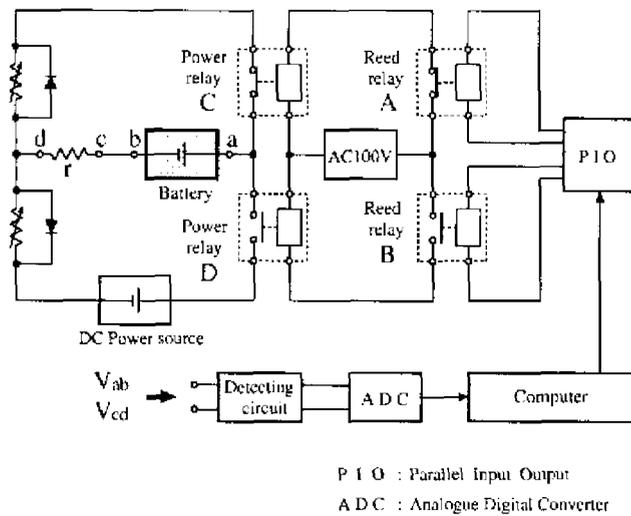


Fig. 1 実験装置の概略図

2. バッテリの充放電実験

2.1 実験装置

本研究で用いた実験装置の構成を Fig. 1 に示す。バッテリーとして 定格 12 [V]、7.2 [Ah] の小型シール鉛蓄電池を用いている。このバッテリーは 2.5 [A] で約 2 時間放電できる。

バッテリーの充放電を行うため、パワーリレーを用いて回路を開閉し、パワーリレーの開閉はリードリレーで制御する。放電の場合にはリレー A、C を閉じて、リレー B、D を開き、放電用の抵抗に電流を流すことによりバッテリーを放電する。抵抗値は 7 種類選択でき、放電電流はおおよそ 2, 3, 4, 6, 9, 12, 18 [A] となる。また、充電の場合にはリレー B、D を閉じて、リレー A、C を開き、電源からバッテリーに電流を流すことによりバッテリーを充電する。抵抗値は 3 種類選択でき、充電電流はおおよそ 1.8, 3.6, 5.4 [A] となる。

検出回路により a-b 間及び、c-d 間の電圧を測定する。これらの測定値をコンピュータに読みとり、a-b 間の電圧からバッテリーの端子間電圧を測定し、c-d 間の電圧から電流検出用抵抗 r の両端の電圧を求め、この値より充放電の電流を算出する。これら値によって充放電用の回路を制御し、また測定結果として記録する。

2.2 実験方法

2.2.1 容量と出力電気量

バッテリーからどれだけのエネルギーを取り出せるかを電流と時間の積で評価し、これを容量と呼んでいる。ここでの容量とはバッテリーの持っているエネルギーのすべてを取り出したときの量ではなく、バッテリーの電圧がある電圧に達するまでに取り出した量である。この電圧のことを放電終止電圧と呼び²⁾、本研究では 9 [V] とした。電流 I で放電がなされたとし、放電開始からバッテリー電圧が放電終止電圧に達するまでの時間を T とすると、容量 Q は以下の式で表すことができる。

$$Q = \int_0^T I dt \quad (1)$$

また、本研究では容量と同単位の量として出力電気量を以下のように定義する。ある時間 t_a から t_b までに取り出すことができた電気量を出力電気量 Q_o とし次式で表す。

$$Q_o = \int_{t_a}^{t_b} I dt \quad (2)$$

2.2.2 開放電圧と内部抵抗

本実験装置で得られるデータは通常の場合、バッテリー充放電中の端子間電圧と充放電の電流のみである。そこで、バッテリーの開放電圧と内部抵抗を測定するために、充放電中にある時間ごとに回路を一瞬開放し、その時の電圧を測定する。開放した瞬間の電圧をバッテリーの開放電圧 V_o とする。このときバッテリーに電流が流れないので、バッテリーの内部抵抗による電圧降下がなく、開放電圧はバッテリーの起電力に相当する。また、開放直前の端子間電圧と開放電圧の電圧差がバッテリーの内部抵抗による電圧降下となる。よって、バッテリーの端子間電圧を V 、充放電電流を I とすると、バッテリーの内部抵抗 R_i は次式で計算することができる。

$$R_i = \frac{V_o - V}{I} \quad (3)$$

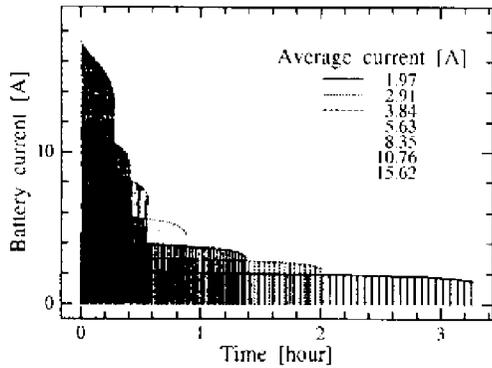


Fig. 2 定電流放電による放電電流の変化

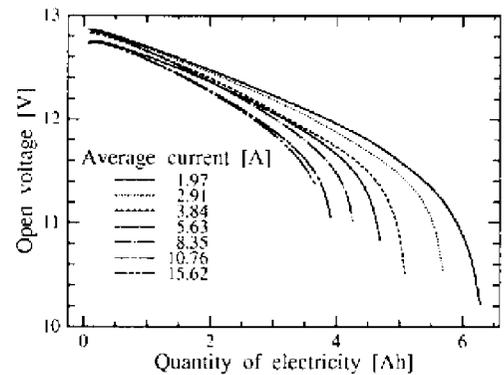


Fig. 4 定電流放電による開放電圧の変化

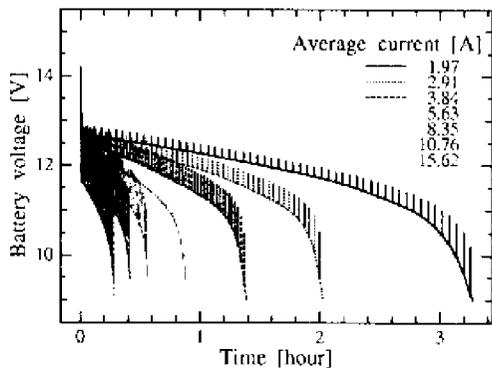


Fig. 3 定電流放電による端子間電圧の変化

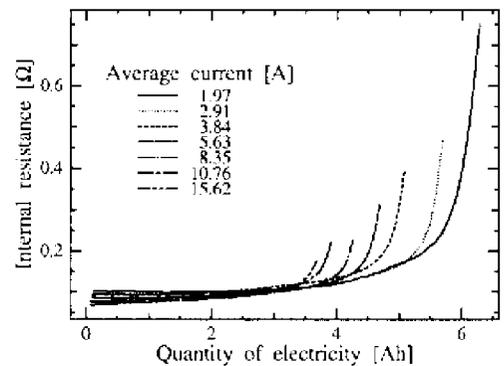


Fig. 5 定電流放電による内部抵抗の変化

2.3 実験結果

2.3.1 定電流放電特性

バッテリーが完全に充電された状態から、ほぼ定電流で放電した場合の経過時間と放電電流の関係を Fig. 2 に、経過時間と端子間電圧の関係を Fig. 3 に示す。一定時間ごとに一瞬だけ放電電流が 0 [A] となり、端子間電圧が上昇しているのが Fig. 2, Fig. 3 からわかる。これはバッテリーの開放電圧を測定するために、一定時間ごとに回路を一瞬だけ開放しているからである。放電の進行に伴い放電電流が減少してくることが Fig. 2 からわかる。これはバッテリーの端子間電圧の低下が原因であると考えられる。また、放電の進行に伴い端子間電圧が低下してくることが Fig. 3 からわかる。端子間電圧の低下は開放電圧の低下、もしくはバッテリーの内部抵抗の増加が原因であると考えられる。そこで以下に開放電圧及び内部抵抗を計算した結果を示す。

2.3.2 開放電圧と内部抵抗

前述した端子間電圧のデータをもとに開放電圧と内部抵抗を算出し、放電電流のデータをもとに出力電気量を算出した。これらを調べることで放電の進行によってバッテリーの内部の状態がどのように変化していくかがわかる。また、バッテリーシミュレータを構築する上で重要なデータとなる。

ほぼ定電流で放電した場合の出力電気量と開放電圧の関係を Fig. 4 に、出力電気量と内部抵抗の関係を Fig. 5 に示す。放電が進むに従って開放電圧が低下し、内部抵抗が増加することが Fig. 4, Fig. 5 からわかる。これは導電率の悪い PbSO_4 が増加するためであると考えられる。

また、どちらの場合においても、放電電流が大きいと、出力された電気量が少ないにもかかわらず、開放電圧は低下し内部抵抗は大きくなるといえる。そこで以下では放電電流の大きさによる特性について詳しく説明する。

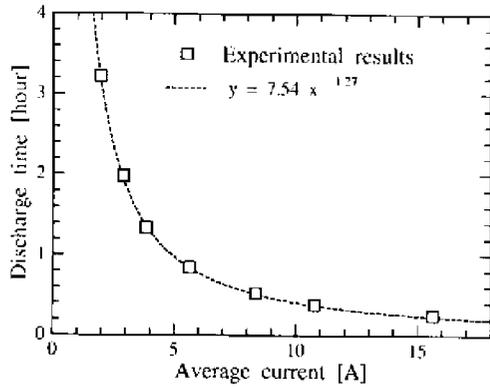


Fig. 6 定電流放電での電流と放電時間の関係

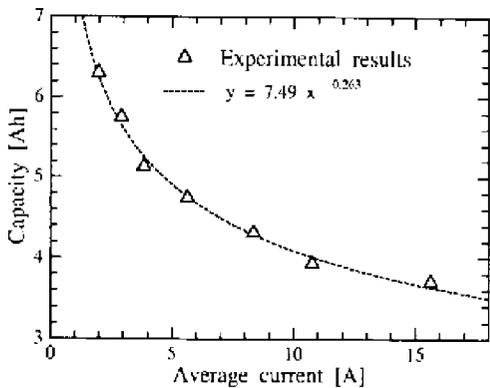


Fig. 7 定電流放電での電流と容量の関係

2.3.3 放電電流の大きさによる特性

ほぼ定電流で放電した場合の電流と放電時間の関係を Fig. 6 に、電流と容量の関係を Fig. 7 に示す。放電電流を I 、容量を Q 、放電時間を T とすると、次のような関係が成り立つ。

$$Q = 7.49 I^{-0.263}, \quad T = 7.54 I^{-1.27} \quad (4)$$

これは、下記の Peukert の式³⁾に一致する。

$$Q = \frac{m}{I^\beta}, \quad \text{あるいは} \quad I^n \times T = m \quad (5)$$

ここで m, β はバッテリーの定数、 $n = \beta + 1$ 、 $n = 1.3 \sim 1.7$ である。Peukert の式は放電電流の大きさによる特性を表す式である。Fig. 6, Fig. 7 より、放電電流が小さいほど放電時間は長くなり、容量は大きくなるのがわかる。すなわち小さな電流で長時間にわたってゆっくりと放電すると、バッテリーからより多くのエネルギーを取り出すことができる。

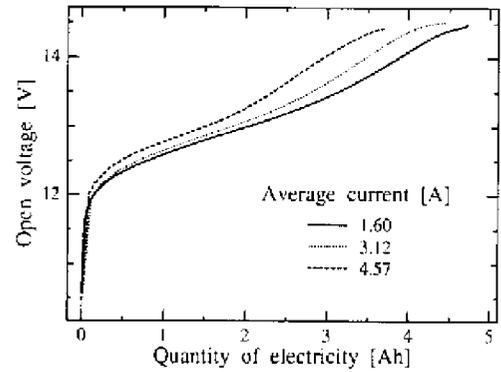


Fig. 8 定電流充電における開放電圧の変化

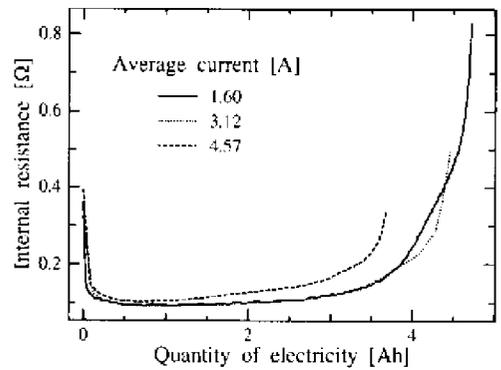


Fig. 9 定電流充電における内部抵抗の変化

2.3.4 定電流充電特性

電気自動車が回生を行う際にバッテリーは様々な条件で充電される。そこで、バッテリーの充電特性を調べるために、以下のような条件で実験を行った。バッテリーが完全に充電されている状態から、バッテリーの端子間電圧が放電終止電圧に達するまで放電した後、充電中の端子間電圧が 16 [V] に達するまで充電するという実験を行った。また充電の際には開放電圧と内部抵抗を調べるために、ある周期で回路を一瞬開放している。充電時の特性を詳しく調べるために、充電時の開放電圧と内部抵抗を算出した。

充電した電気量と開放電圧の関係を Fig. 8 に、充電した電気量と内部抵抗の関係を Fig. 9 に示す。充電された電気量と開放電圧の関係がほぼ直線になることが Fig. 8 からわかる。また、充電電流の大きさによる違いが小さいことが Fig. 8, Fig. 9 からわかる。

2.3.5 休止による容量の回復特性

バッテリーには休ませると容量が回復する特性がある。この特性について調べるため、休止時間を設けた放電実験を行った。バッテリーの容量の回復特性を知ることは、電気自動車の航続距離を延ばす上で重要である。実験方法を以下に示す。バッテリーの電圧が放電終止電圧に達するまではほぼ定電流で放電し、その後にある時間だけバッテリーを休ませ、また同様に放電を行った。放電電流が約 6 [A] の場合を例に取り、休止時間と休止によって回復した容量の関係を Fig. 10 に示す。短時間の休止によってある程度容量が回復し、休止が長時間になると容量の回復がほとんどなくなることがわかる。

次に放電電流の大きさを変化させた場合について説明する。ある大きさの電流で準定電流放電を行い、バッテリーの電圧が放電終止電圧に達したら 10 分間だけバッテリーを休ませ、その後約 1 [A] で放電を行った。休止前の平均放電電流の大きさと休止によって回復した容量の関係を Fig. 11 に示す。大電流で放電した後は休止による容量の回復が大きいが、小電流で放電した後はバッテリーを休ませてもあまり容量が回復しないことがわかる。

3. バッテリーシミュレータ

3.1 シミュレータの原理

バッテリーの充放電シミュレーションを行う上で、想定したバッテリーシミュレータの概念を Fig. 12 に示す。バッテリーモデルを想定するに当たり、バッテリーの充放電実験の結果を利用する。入力としては充放電電流と充放電時間がある。入力はファイルのデータを読み取ることも可能であり、実際に行った充放電実験と全く同様の充放電をシミュレーションを行うことができる。出力としては残り容量と端子間電圧がある。バッテリーの端子間電圧が分かることで、実際のバッテリーと同様に扱えることができる。また、実際のバッテリーでは知

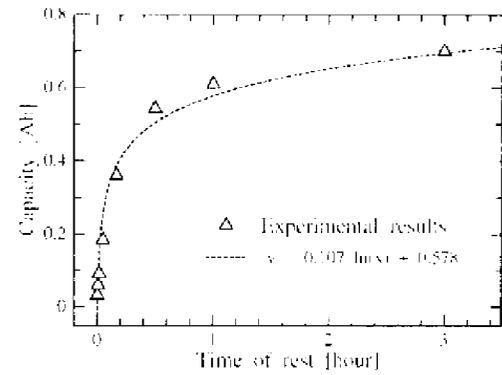


Fig. 10 休止時間と回復した容量の関係

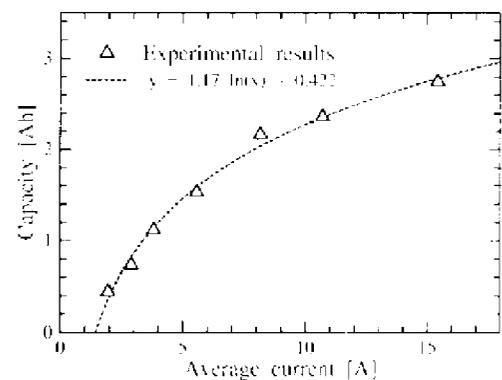


Fig. 11 放電電流と回復した容量の関係

ることができない残り容量を知ることができるため、電気自動車の航続距離をより確実に予測できると考えられる。

3.2 活物質の利用率

放電のアルゴリズムを考える上で、放電電流の大きさによる放電特性が重要となる。この特性を数式で表したのが前述した Peukert の式である。この式は活物質の利用率という考え方で導出される³⁾。以下では活物質の利用率について説明する。

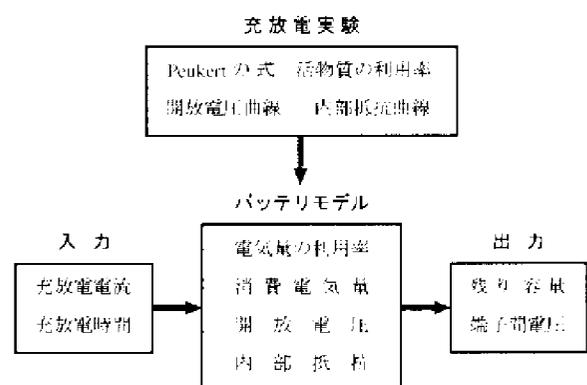


Fig. 12 バッテリーシミュレータの概念

鉛蓄電池の充放電反応は次の通りある。



ここで活物質とはバッテリーのエネルギーを化学的に貯蔵している有効物質のことであり、鉛蓄電池の場合、電極の PbO_2 および微粉末の Pb がそれに相当する。1 [Ah] で消費される活物質の理論量を ω_0 とすれば、 It [Ah] で消費される活物質の理論量は $\omega_0 It$ となる。しかし実際には活物質粒子は放電が進行するのに伴い化学反応によって PbSO_4 に変化するが、放電電流が大きいと拡散遅滞などのために化学変化の進行が放電に対して追従できなくなる。そのため粒子の内部に活物質を有するにもかかわらず、その粒子はその放電電流に対しては、もはや役に立たなくなるものが現れる。ここに活物質粒子の利用率 φ が生ずる。ここで実際に It [Ah] で消費される活物質の量を ω とすると次式が成り立つ。

$$\omega = \frac{\omega_0}{\varphi} It \quad (7)$$

活物質粒子の利用が完全であれば $\varphi = 1$ であるが、放電電流 I が大きいほど利用率が悪い。ここでバッテリーに固有な定数 φ_0 を用いて、放電電流と利用率の関係は次式で表すことができる。

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{I^\beta} \quad (8)$$

バッテリーが完全に充電された状態で保有する活物質粒子量を W とし、放電終止電圧に達するまでの時間を T とし、このときに有効に存在する活物質がほとんど無いものとする、以下の関係式が成り立つ。

$$W = \frac{\omega_0}{\varphi} IT = \frac{\omega_0}{\varphi_0} I^{\beta+1} T \quad (9)$$

以上のように活物質の利用率という考え方によって Peukert の式が導かれる。放電電流が小さいとバッテリーから多くのエネルギーが取り出せるのは、活物質の利用率が良いからであるといえる。

3.3 残り容量算出のアルゴリズム

3.3.1 残り容量と消費電気量

バッテリーシミュレータの出力の一つである残り容量について考える。最大容量 Q_{max} と消費電気量 Q_c を用いて残り容量 Q_r を次式のように定義する。

$$Q_r = Q_{max} - Q_c \quad (10)$$

ここで最大容量とは完全に充電された状態でバッテリーが保有する電気量である。実験に用いたバッテリーを想定する場合には、そのバッテリーの20時間放電率での定格容量を最大容量とし、 $Q_{max} = 7.2$ [Ah] としている。充放電を何度も繰り返すとバッテリーの性能が低下し、最大容量が減少する。このようなバッテリーを想定する場合には、最大容量の値を調整することでバッテリーモデルを現実のものに近付けることが可能である。充放電の繰り返しの回数と最大容量の減少の関係については、本研究では対象外としたが、バッテリーの寿命を示す重要な関係である。

また、ここで消費電気量というのは仮に消費された電気量であり、放電によって利用不可能となった電気量と定義する。この消費電気量を求めるために電気量の利用率というものを定義する。以下で電気量の利用率について説明する。

3.3.2 電気量の利用率

消費電気量を求めるために電気量の利用率というものを考える。出力電気量 Q_o 、消費電気量 Q_c を用いて、電気量の利用率 K_q を次のように定義する。

$$K_q = \frac{Q_o}{Q_c} \quad (11)$$

ここで前述した活物質の利用率という考え方を電気量の利用率に置き換えて考える。活物質の消費と電気量の消費は線形関係にあると考えられるか

ら $K_q = \varphi$ として、式 (8)、式 (9) より次式が導かれる。

$$K_q = \frac{\varphi_0}{I^\beta} = \frac{\omega_0}{W} \frac{m}{I^\beta} \quad (12)$$

ここで前述したように W はバッテリーが完全に充電された状態で保有する活物質の量であり、また ω_0 は 1 [Ah] で消費される活物質の理論量である。よって W/ω_0 はバッテリーが完全に充電された状態で保有する電気量である。これは前述した最大容量 (Q_{max}) である。

消費容量は以下の式で求められる。

$$Q_c = \frac{Q_0}{K_q} = Q_0 Q_{max} \frac{I^\beta}{m} \quad (13)$$

m および β は Peukert の式で用いられたバッテリーの定数であり、式 (4) からその値が得られる。これらの値と放電電流の大きさから K_q の値が求められる。この K_q を用いることにより出力電気量 Q_0 から消費電気量 Q_c を算出できる。つまり残り容量を求めることができる。

3.4 端子間電圧算出のアルゴリズム

3.4.1 開放電圧と内部抵抗

バッテリーシミュレータのもう一つの出力である端子間電圧について考える。端子間電圧は開放電圧と内部抵抗が求めれば算出できる。ここで開放電圧および内部抵抗はバッテリー内部の状態によるものであると考えられる。バッテリー内部の状態を表すものとして残り容量が考えられる。消費電気量と残り容量は線形関係にあるので、消費電気量もバッテリー内の状態を表す値といえる。放電電流の大きさによらず消費電気量によって開放電圧と内部抵抗が求めれば、端子間電圧を算出することができる。

ここで Fig. 4 と Fig. 5 で示した実験結果において、横軸を出力電気量から消費電気量に変換することにより、消費電気量によって端子間電圧を算出すること可能であることを確認する。横軸を出力

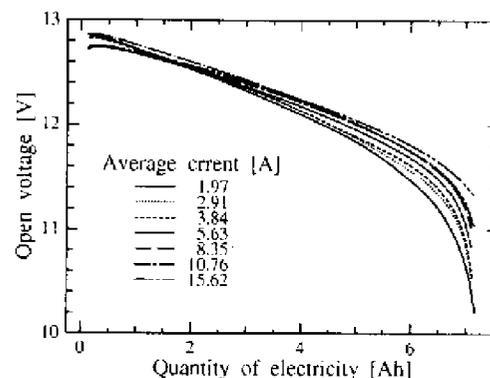


Fig. 13 消費電気量と開放電圧の関係

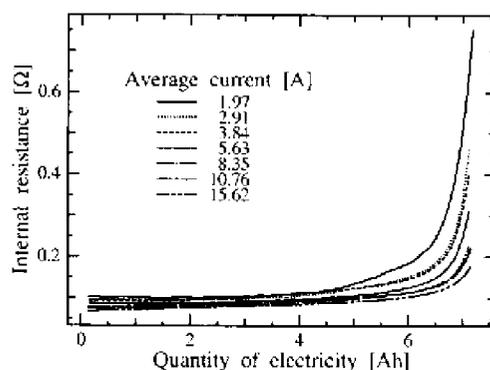


Fig. 14 消費電気量と内部抵抗の関係

電気量から消費電気量に変換した結果をそれぞれ Fig. 13 と Fig. 14 に示す。放電電流の大きさによって開放電圧と内部抵抗が違ってくることが Fig. 13 と Fig. 14 からわかる。このことから開放電圧や内部抵抗が消費電気量のみによって算出することができないことがわかる。

そこで他のバッテリー内部の状態量を考えなければならぬ。もう一つの状態量として余剰容量が挙げられる。以下で余剰容量について説明する。

3.4.2 余剰容量

バッテリーを急放電して電圧が低下したときには、未変化の活物質が存在するため、小さい放電電流ではさらにある量の電気量を取り出すことができる。この容量が余剰容量である³⁾。

大電流で放電した場合には活物質の利用率が悪い、すなわち電気量の利用率が悪いのである。そのため有効に利用できなかった活物質がバッテリー内に蓄積される。ここでこの蓄積された電気量は、

消費された電気量の中でその時点での電流では利用不可能となったが、活物質が未反応であるため小さい電流であるならば利用できる電気量である。よって本研究では余剰容量を Q_s とし次式で定義する。

$$Q_s = Q_c - Q_o \quad (14)$$

ここで Q_c は消費電気量、 Q_o は出力電気量である。また式(11)より次式が得られる。

$$Q_s = \left(\frac{1}{K_q} - 1\right) Q_o \quad (15)$$

このことから K_q が小さい、すなわち電気量の利用率が悪いと余剰容量が多く蓄積されることがわかる。

ここで余剰容量を用いてバッテリーの内部状態を表す変数を考える。この余剰容量を消費電気量で割り無次元化したものを余剰容量率と定義する。余剰容量を Q_s 、余剰容量率を K_s とすると次式が成り立つ。

$$K_s = \frac{Q_s}{Q_c} \quad (16)$$

前述した Fig. 13 と Fig. 14 の実験結果において、それぞれ放電電流について曲線近似を行った。ここで定電流放電では余剰容量率がほぼ一定であるから、近似曲線の係数を余剰容量率の関数になるように直線近似を行った。このことにより任意の放電電流に対して、消費電気量と余剰容量率から開放電圧と内部抵抗が計算でき、バッテリーの端子間電圧が求められる。

3.5 シミュレーション結果

構築したシミュレータが有効であることを確認するため、シミュレータで実際に行った実験と同じ充放電を行い、それぞれの電圧変化を比較した。

ここで、約 5.6 [A] で放電し、バッテリーの端子間電圧が 9 [V] まで下がったら放電を止め、約 3.1 [A] で充電し、端子間電圧が 16 [V] まで上がった放

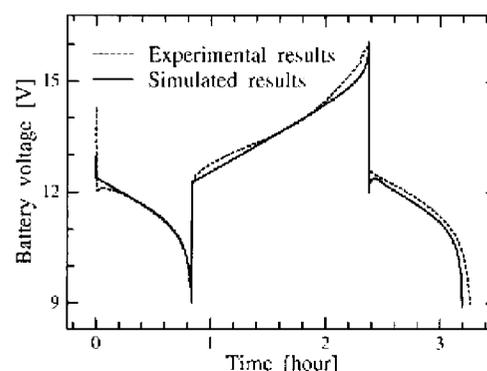


Fig. 15 実験結果とシミュレーション結果

電を止め、また約 5.6 [A] で放電した実験を例に挙げる。実験結果とシミュレーション結果を比較したものを Fig. 15 に示す。実機による実験結果とシミュレーション結果がほとんど一致していることから、構築したシミュレータが有効であるといえる。

4. 結 言

今回は、電気自動車の高効率制御を目的とした研究として、バッテリーの充放電特性を調べ、その結果に基づきバッテリーシミュレータを構築した。実験によりシミュレータが有効であることが確認され、ソフトウェアによる、信頼性の高い実験が可能となった。

今後の課題としては以下の様なことが挙げられる。

- 想定モデルを実際のバッテリーの充放電に近付けるために各係数を調整する。
- 電気自動車の走行シミュレータと組み合わせることによって、バッテリーの性能を最大限に引き出すための高効率制御方法を考える。

参考文献

- 1) 田口雅典：あなたのクルマをEVに乗り換えよう、12/15、オーエス出版社(1996)
- 2) 西村昭義：電池の本、46/47、CQ出版社(1992)
- 3) 亀山直人：電気化学の理論及応用、上巻・II、電池及蓄電池、32/38、丸善株式会社(1959)