

機関番号：24201

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2010

課題番号：19360129

研究課題名（和文） リチウムイオン二次電池の過渡動作特性シミュレータの構築

研究課題名（英文） Development of Transient Performance Simulator of Lithium-Ion Secondary Battery

研究代表者

乾 義尚（INUI YOSHITAKA）

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：70168425

研究成果の概要（和文）：まず，劣化していないリチウムイオン二次電池を対象として，種々の温度と充電状態のもとで交流インピーダンス特性を測定し，それを等価回路にフィッティングすることにより，等価回路の回路定数を決定し，劣化していない電池の過渡動作特性シミュレータを完成させた．次に，劣化も考慮したリチウムイオン二次電池の過渡動作特性シミュレータを完成させ，完成させたシミュレータによる計算結果をそれと対応する実験結果と比較することにより，本シミュレータは劣化電池に対しても十分な精度を有することを確認した．

研究成果の概要（英文）：A simulator for transient voltage responses of lithium-ion secondary batteries that can apply to degraded batteries is proposed and established. In order to confirm the validity of the proposed simulator, the numerically obtained transient voltage responses of degraded battery are compared with the corresponding experimental ones in the cases two different current patterns with almost constant SOC and large SOC variation are supplied into the battery. Through these comparisons, the validity of the simulator proposed in this study is successfully demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
総計	12,600,000	3,780,000	16,380,000

研究分野：エネルギー変換工学，電力工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電気機器工学

キーワード：リチウムイオン二次電池，電圧過渡応答，モデル化，交流インピーダンス，等価回路，電力貯蔵，ハイブリッド車

1. 研究開始当初の背景

リチウムイオン二次電池は，小型のものは既に実用化され，高起電力かつ高エネルギー密度という特長を生かして，現在，携帯電子機器の電源として広く普及している．さらに，

この電池は，上記の特長に加えて充放電効率が低いという利点を併せ持つので，今後はハイブリッド自動車用の蓄電装置や太陽電池等自然エネルギー利用小型分散電源の負荷変動吸収用の蓄電装置としても広く用いら

れるようになるものと期待されている。実際、現在はニッケル水素電池が用いられているハイブリッド自動車用の蓄電装置も、今後はリチウムイオン二次電池に切り換えるべく自動車メカ各社が研究開発にしのぎを削っている。

従来のように、この電池を携帯電子機器の電源として使用する場合には、電池の端子電圧がデジタルLSIの動作可能範囲内に入っていれば機器は正常に動作するので、これまでは電池の端子電圧や負荷電流の過渡特性が問題となることはほとんどなかった。しかし、この電池の新たな応用分野であるハイブリッド自動車や小型分散電源用の蓄電装置の場合、時々刻々変化する負荷の要求電力を正確かつ応答よく出力する必要があるため、電池の端子電圧や充放電電流を、それが接続されているインバータ回路あるいはチョッパ回路を用いて、時々刻々高度に制御してやる必要がある。この場合、リチウムイオン二次電池は理想的な電圧源ではなく複雑な過渡応答を示すので、上記の目的のためには、電池の過渡応答を考慮に入れた動作特性シミュレータが必要となる。

しかし、リチウムイオン二次電池の過渡応答を考慮に入れた動作特性シミュレータについては、まだ開発されていないのが現状である。さらに、リチウムイオン二次電池は使用時間の経過とともに劣化するので、実用的なシミュレータであるためには劣化の影響も考慮されていることが必須であるが、そのようなシミュレータは構築の試みすらこれまでは行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、リチウムイオン二次電池の劣化を考慮した過渡動作特性シミュレータを構築することを目的とする。具体的には、研究期間内に以下の研究を行う。

(1) 劣化していない電池を対象として、種々の温度および充電状態のもとで交流インピーダンス特性を測定し、その結果を総合的に判断して電池の過渡動作特性を模擬する等価回路の構成を決定する。

(2) (1) で測定した交流インピーダンス特性をやはり(1)で決定した構成の等価回路にフィッティングすることにより、等価回路の回路定数を温度と充電状態の関数として決定し、この等価回路と既に開発済みの電池温度の過渡変化シミュレータを組み合わせることにより、劣化していない電池の過渡動作特性シミュレータを完成させる。

(3) 高温状態で電池の充放電を繰り返すこと

により、電池の加速劣化試験を行い、劣化にともなう電池の交流インピーダンス特性の変化を詳細に測定し、その結果を総合的に判断して電池の簡便な劣化度判定試験手法を確立する。

(4) (3)の加速劣化試験の結果を利用して、やはり(3)で確立した劣化度判定試験の結果から電池の劣化時の過渡動作特性を模擬する等価回路を推定する手法を確立し、劣化も考慮した電池の過渡動作特性シミュレータを完成させる。

3. 研究の方法

本研究は、2007～2010年度の4年間で実施し、上述の研究目的に記した(1)～(4)の研究を、それぞれに1年ずつをかけてその順に年次進行で遂行した。各年度の具体的な研究方法は以下の通りである。

(1) 劣化していないリチウムイオン二次電池の特性測定 (2007年度)

- ① 劣化していない電池を対象とした交流インピーダンス特性の測定
- ② 電池の過渡応答を模擬する等価回路の構成の決定

(2) 劣化していないリチウムイオン二次電池のシミュレータの構築 (2008年度)

- ① 交流インピーダンス特性のフィッティングによる等価回路定数の決定
- ② 劣化していない電池の過渡動作特性シミュレータの構築

(3) リチウムイオン二次電池の加速劣化試験 (2009年度)

- ① 電池の加速劣化試験による劣化時の交流インピーダンス特性の測定
- ② 簡便な電池の劣化度判定手法の確立

(4) 劣化を考慮したリチウムイオン二次電池のシミュレータの構築 (2010年度)

- ① 劣化度判定試験結果からの劣化時の等価回路定数推定法の確立
- ② 劣化を考慮した電池の過渡動作特性シミュレータの構築

4. 研究成果

本研究で得られた各年度の研究成果は、以下の通りである。

(1) 2007年度は、劣化していないリチウムイオン二次電池を対象として、その詳細な交流インピーダンス特性の測定を行った。そして、測定したすべての充電状態と温度における

電池の交流インピーダンス特性を総合的に判断して、それらを包括的に表すことができる電池の等価回路の構成を決定した。決定した電池の等価回路の構成を図1に示す。

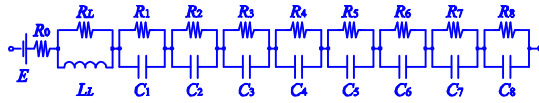


図1 電池の等価回路の構成

(2) 2008年度は、前年度に得た種々の温度と充電状態における交流インピーダンス特性の測定結果を、やはり前年度に決定した等価回路にフィッティングすることにより、等価回路中の各素子の値を温度と充電状態の関数として決定した。そして、このフィッティング済みの等価回路を利用して、劣化していない電池の過渡動作特性シミュレータを完成させた。シミュレータによる計算結果と実験結果の比較の例として、ハイブリッド自動車用の高出力タイプラミネート型電池にパルス充放電電流を流した場合の電圧過渡応答を図2および3に示す。図2は充電状態がほぼ一定の場合で、図3は充電状態が大きく変化する場合である。これらの図より、計算結果は実験結果とよく一致しており、シミュレータの妥当性が確認できる。

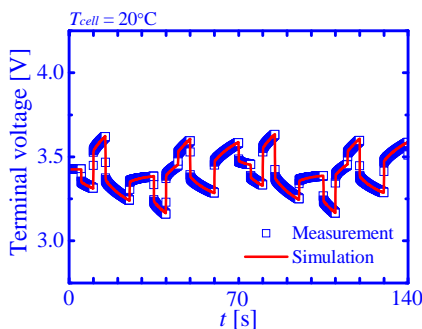


図2 劣化前電池のシミュレーション結果 (充電状態がほぼ一定の場合)

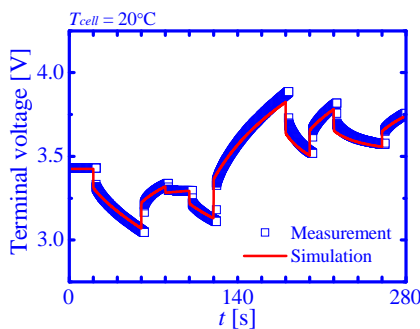


図3 劣化前電池のシミュレーション結果 (充電状態が大きく変化する場合)

(3) 2009年度は、電池を高温環境下で繰り返し定電流充放電する加速劣化試験を行った。その際、50サイクルごとに試験を中断し、その劣化状態で、電池の容量と種々の温度と充電状態の場合における交流インピーダンス特性を測定した。劣化にともなう電池の特性変化の測定結果の例として、交流インピーダンス特性と等価回路定数の劣化前と劣化後の変化を図4および図5に示す。これらの図より、劣化にともなう電池の交流インピーダンスの変化は0.1 Hz程度より低い周波数で顕著に表れることがわかる。この結果を総合的に判断して、0.1 Hzの周波数でインピーダンスを測定するだけで電池の劣化度を判断することができる、電池の簡便な劣化度判定試験手法を確立した。

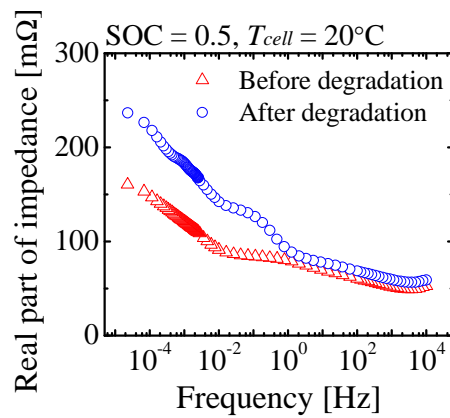


図4 劣化前電池と劣化後電池の交流インピーダンス実部の周波数依存性

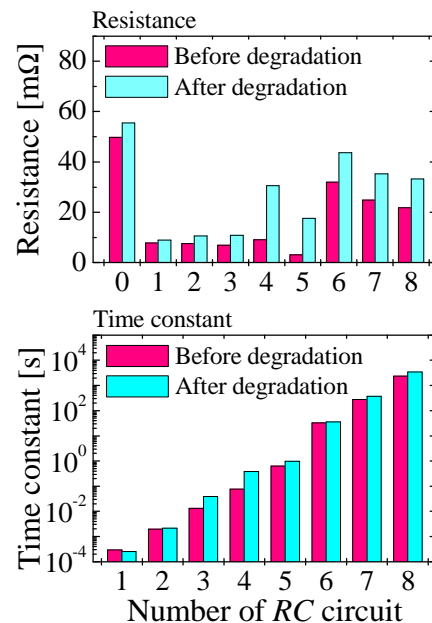


図5 劣化前と劣化後の回路定数

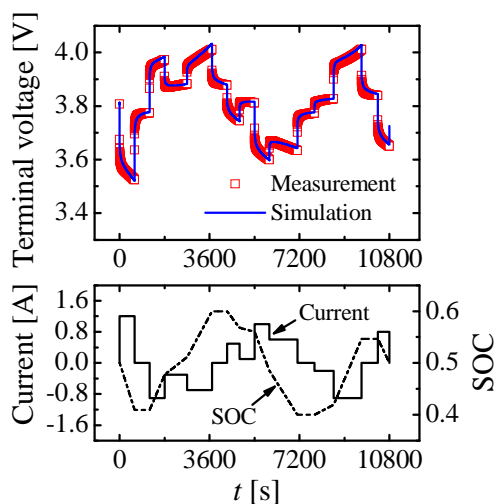


図 6 劣化後電池の電圧過渡応答の測定結果とシミュレーション結果の比較

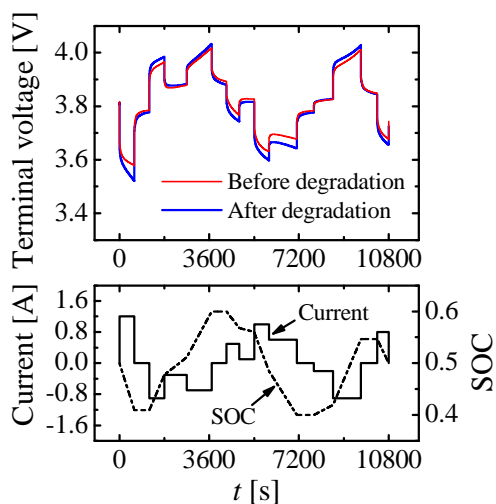


図 7 劣化前電池と劣化後電池の電圧過渡応答のシミュレーション結果の比較

(4) 2010 年度は、前年度に確立した劣化度判定試験の結果から電池の劣化時の過渡動作特性を模擬する等価回路を推定する手法を確立した。この推定手法を用いることにより、電池が劣化している場合でも、劣化度判定試験を行えば、その過渡動作特性を模擬する等価回路を決定することができるようになった。さらに、2008 年度に作成したシミュレータの等価回路の部分はこの新しい等価回路に変更することにより、劣化を考慮した電池の過渡動作特性シミュレータを完成させた。シミュレータによる計算結果と実験結果の比較の例として、劣化した汎用の 18650 タイプ円筒型電池にパルス充放電電流を流した場合の電圧過渡応答を図 6 に示す。この図より、計算結果は実験結果とよく一致してお

り、劣化も考慮したシミュレータの妥当性が確認できる。また、劣化前と劣化後の同電池の電圧過渡応答のシミュレーション結果の比較を図 7 に示す。この図より、劣化の前後で電池の電圧過渡応答は変化しており、劣化も考慮したシミュレータの必要性が確認できる。

以上説明したように、本研究で開発したシミュレータは、劣化電池に対しても十分な精度を有しているので、実際にリチウムイオン二次電池をさまざまな機器の電源として利用する場合に必要な電池の最適充放電制御アルゴリズムを検討する際に強力なツールとなるものと期待している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 田中正志, 乾 義尚, 北村保彦, 朝倉章太: 「高出力タイプリチウムイオン二次電池のパルス充放電時の電圧応答シミュレーション」, 電気学会論文誌 B 分冊, 査読有, 131 巻, 2 号, pp. 231-237 (2011)
- ② I. Yusuf, Y. Kemmoku, Y. Inui, T. Sakakibara: "Management of Daily Charge Level Based on Weather Forecast for a Photovoltaic/Diesel/ Battery Power System", Journal of Japan Solar Energy Society, 査読有, Vol. 33, No. 5, pp. 37-42 (2007)
- ③ Y. Inui, Y. Kobayashi, Y. Watanabe, Y. Watase, Y. Kitamura, "Simulation of Temperature Distribution in Cylindrical and Prismatic Lithium-Ion Secondary Batteries", Energy Conversion and Management, 査読有, Vol. 48, No. 7, pp. 2103-2109 (2007)

[学会発表] (計 17 件)

- ① 村松優彦, 田中正志, 高木 剛, 垣本直人, 乾 義尚, 坂本眞一: 「リチウムイオン二次電池の劣化を考慮した電圧過渡応答シミュレーションの検討」, 平成 23 年電気学会全国大会, 2011 年 3 月 16 日, 大阪大学 (豊中市)
- ② 田中正志, 村松優彦, 高木 剛, 垣本直人, 乾 義尚, 坂本眞一: 「劣化を考慮したリチウムイオン二次電池の電圧過渡応答の解析」, 電気学会新エネルギー・環境研究会, 2011 年 3 月 10 日, 産業技術総合研究所 (つくば市)
- ③ 田中正志, 村松優彦, 高木 剛, 垣本直人, 乾 義尚, 坂本眞一: 「定電流充放

- 電サイクルにより劣化したリチウムイオン二次電池の過渡動作特性の数値解析」平成 22 年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会，2010 年 11 月 14 日，日立市シビックセンター（日立市）
- ④ 田中正志，村松優彦，高木 剛，垣本直人，乾 義尚，坂本眞一：「定電流充放電サイクルにより劣化したリチウムイオン二次電池の電圧過渡応答解析」，第 51 回電池討論会，2010 年 11 月 9 日，愛知県産業労働センター（名古屋市）
- ⑤ 田中正志，乾 義尚：「リチウムイオン二次電池の劣化度の簡易測定法に関する検討」，平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会，2010 年 9 月 3 日，九州大学（福岡市）
- ⑥ 田中正志，村松優彦，高木 剛，垣本直人，乾 義尚，坂本眞一：「定電流充放電サイクルにより劣化したリチウムイオン二次電池の電圧過渡応答の数値解析」，電気学会新エネルギー・環境研究会，2010 年 8 月 26 日，電気学会本部（東京都）
- ⑦ T. Tanaka, S. Asakura, Y. Inui: "Study on Equivalent Circuit of Lithium-Ion Secondary Battery Degraded by Constant Current and Intermittent Charge/Discharge Cycles", International Conference on Electrical Engineering 2010, 2010 年 7 月 14 日，パラダイスホテル（韓国釜山市）
- ⑧ 田中正志，朝倉章太，乾 義尚：「リチウムイオン二次電池の定電流および間欠充放電による劣化前後の等価回路の検討」，電気学会新エネルギー・環境研究会，2009 年 12 月 2 日，長岡技術科学大学（長岡市）
- ⑨ 田中正志，朝倉章太，乾 義尚：「リチウムイオン二次電池の間欠充放電サイクルによる劣化前後の等価回路の検討」，平成 21 年度電気関係学会東海支部連合大会，2009 年 9 月 11 日，愛知工業大学（瀬戸市）
- ⑩ 朝倉章太，田中正志，大河幸太，乾 義尚：「高出力型リチウムイオン二次電池のパルス充放電電流に対する電圧過渡応答解析」，平成 21 年電気学会全国大会，2009 年 3 月 19 日，北海道大学（札幌市）
- ⑪ 朝倉章太，田中正志，大河幸太，乾 義尚：「リチウムイオン二次電池のパルス充放電時の電圧過渡応答解析」，第 49 回電池討論会，2008 年 11 月 7 日，リーガロイヤルホテル堺（堺市）
- ⑫ 朝倉章太，田中正志，大河幸太，乾 義尚：「リチウムイオン二次電池のパルス充放電電流に対する電圧過渡応答解析」，電気学会新エネルギー・環境研究

会，2008 年 9 月 29 日，長岡技術科学大学（長岡市）

- ⑬ 朝倉章太，田中正志，大河幸太，乾 義尚：「リチウムイオン二次電池のパルス状の充放電電流に対する電圧過渡応答解析」，平成 20 年度電気関係学会東海支部連合大会，2008 年 9 月 19 日，愛知県立大学（愛知県愛知郡長久手町）
- ⑭ 朝倉章太，北村保彦，道久隆幸，乾 義尚：「高出力型リチウムイオン二次電池の電圧過渡応答シミュレーション」，平成 20 年電気学会全国大会，2008 年 3 月 21 日，福岡工業大学（福岡市）
- ⑮ 北村保彦，小林善和，朝倉章太，乾 義尚：「高出力型リチウムイオン二次電池の充放電時の温度上昇解析」，第 48 回電池討論会，2007 年 11 月 14 日，福岡国際会議場（福岡市）
- ⑯ 北村保彦，小林善和，朝倉章太，乾 義尚：「高出力型リチウムイオン二次電池の充放電時の温度上昇シミュレーション」，平成 19 年度電気関係学会東海支部連合大会，2007 年 9 月 28 日，信州大学（長野市）
- ⑰ I. Yusuf, Y. Inui, T. Sakakibara: "Operation Method of Photovoltaic/Wind/Diesel/Battery Hybrid Power System Based on Next Day Weather Forecast", International Conference on Electrical Engineering 2007, 2007 年 7 月 10 日，香港日航ホテル（香港市）

〔図書〕（計 2 件）

- ① 菅原秀一，乾 義尚，他著：「リチウムイオン二次電池／材料の発熱挙動・劣化評価と試験方法」，第 4 章第 6 節の執筆を担当，技術情報協会，pp. 237-246 (2011)
- ② 立花和宏監修，乾 義尚，他著：「インピーダンスの測定ノウハウとデータ解析の進め方」，第 5 章第 6 節の執筆を担当，技術情報協会，pp. 196-202 (2009)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

乾 義尚 (INUI YOSHITAKA)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：70168425

(2) 研究分担者

荒木拓人 (ARAKI TAKUTO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90378258

(2007 年度：研究分担者，2008 年度：連携研究者)

桶真一郎 (OKE SHINICHIRO)

豊橋技術科学大学・工学部・助教

研究者番号：20362329

(2007 年度：研究分担者, 2008 および

2009 年度：連携研究者)

坂本真一 (SAKAMOTO SHINICHI)

滋賀県立大学・工学部・准教授

研究者番号：40449509

(2008 および 2009 年度：研究分担者,

2010 年度：連携研究者)

田中正志 (TANAKA TADASHI)

茨城大学・工学部・助教

研究者番号：40583985

(2009 年度：連携研究者, 2010 年度：研

究分担者)

(3) 連携研究者

研究分担者欄に記載した通り.