

令和 4 年 6 月 5 日現在

機関番号：24201
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19K04333
研究課題名（和文）リチウムイオン電池の低温低周波領域の交流インピーダンスに基づく動作特性モデル構築

研究課題名（英文）Development of Performance Characteristics Model of Lithium-Ion Battery Based on Its Electrochemical Impedance Spectrum in Low Temperature and Low Frequency Range

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
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：まず、リチウムイオン電池の電気化学インピーダンス特性を低温・低周波領域を含む広い範囲で測定し、DRT法とDDT法によりそれを電池内の各素過程に分離する手法を確立した。また、各素過程の抵抗成分の温度依存性はアレニウスの式に従うことを明らかにした。次に、電池の高周波から低周波まで全周波数領域の動作の模擬が可能な等価回路の作成手法を確立し、その回路中の抵抗がアレニウスの式に従うことを利用して、低温での電気化学インピーダンス特性の測定結果から常温での同特性を推定することができる手法を開発した。さらに、その推定手法を組み込むことにより、より汎用性の高いリチウムイオン電池の動作特性モデルの構築に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、リチウムイオン電池の過渡応答と発熱量の両方を高精度にシミュレートできる動作特性モデルをその低温・低周波数領域を含む広い範囲の電気化学インピーダンス特性に基づいて構築するという、オリジナルなアイデアに基づくものであり、このような研究は国内外を問わずこれまでに行われたことがない。さらに、本研究の成果は、リチウムイオン電池のユーザサイドの技術者が待ち望んでいるものであり、次世代自動車や電力調整設備の本格的な普及に非常に大きなインパクトを与えるものと考えられる。従って、本研究は、非常に重要であるにもかかわらず、世界的に見ても類を見ない研究であり、それが本研究の学術的かつ社会的な意義である。

研究成果の概要（英文）：At first, electrochemical impedance spectra of lithium-ion batteries were measured in wide temperature and frequency range including low temperature and low frequency conditions, and a method that can separate the measured impedance spectrum into each elementary process was established by using the DRT and DDT methods. It was also confirmed that the Arrhenius type temperature dependence holds for resistance of each elementary process. Next, a creating method of an equivalent circuit model that can simulate battery performance in wide frequency range was established, and an estimation method that can calculate the electrochemical impedance spectra under room temperature conditions from that measured under low temperature condition was developed. Then, by comprehensively employing the above outcomes, a more versatile performance characteristics simulation model of lithium-ion battery was successfully developed.

研究分野：電力工学

キーワード：電力工学 電力貯蔵 二次電池 リチウムイオン電池 動作特性モデル

1. 研究開始当初の背景

電気自動車等の電動機駆動や自然エネルギー発電等の電力調整用の蓄電池として広く用いられるようになってきているリチウムイオン電池の能力を最大限に引き出すためには、その高精度な動作特性モデルが必要不可欠である。さらに、リチウムイオン電池は、高エネルギー密度であるため、充放電時の発熱により顕著に温度が上昇し、しかもその温度上昇により電池の特性が変化してしまうため、その正確な発熱量の推定モデルの確立も必要不可欠である。

以上を考慮して、研究代表者らは、以前からリチウムイオン電池の高精度な動作特性モデルの非破壊的かつシステムの手法による構築を目指した研究を行ってきており、電池の交流インピーダンス特性（電池に印加した微小な交流電流に対する電圧応答の測定等から得られる電池の内部インピーダンスの周波数特性で、電気化学インピーダンス特性とも呼ばれる）を測定し、それに基づいて電池の内部等価回路をフィッティングにより構成すれば、電池の過渡応答と発熱量の両方を高精度にシミュレート可能な動作特性モデルを構築することができることをこれまでの研究で明らかにしている。電池の交流インピーダンス特性は、それにより電極の良否が判定できるため、電気化学の技術者の間では従来から測定されていたが、本特性に電池の過渡動作特性に関する全ての情報が含まれていることに気がつき、それをリチウムイオン電池の過渡応答と発熱量の両方の高精度な動作特性モデルの構築に利用したのは研究代表者らが最初である。

研究代表者らは、上記の内部等価回路に基づく動作特性モデルを用いて多大な研究成果をあげてきた。しかし、この動作特性モデルは純粋にシステムの手法で構築されているため、電池の特性を変化させる温度や充電状態の変化に対して網羅的に作成する必要がある、しかも劣化により特性が変化した電池は別種の電池として扱われるため、汎用性の面で難があった。そして、より汎用性の高い動作特性モデルを構築するためには、温度や充電状態および劣化状態の変化に対する電池の特性変化を理論的に解明しておく必要がある。

従って、「電池の動作特性モデルの各パラメータの温度や充電状態および劣化状態に対する変化にはどのような法則性があるのか」というのがこの研究の核心をなす学術的問いであり、研究代表者らはその法則性を見だし定式化することを目指した研究を最近開始した。

その研究では、非破壊的かつシステムの手法は踏襲しているが、電気化学の知見を取り入れて、電池の交流インピーダンス特性をオーム抵抗と正負極の表面被膜・電荷移動過程および拡散過程の各インピーダンス成分に分離し、分離された各成分の温度や充電状態および劣化状態に対する依存性を検討しているが、その過程で各インピーダンス成分を明瞭に分離するためには電池の通常の動作温度領域ではない氷点下の低温での交流インピーダンス測定が必要で、さらに低温では電池反応が遅くなるため、測定周波数領域の下限を通常のインピーダンス計で測定可能なミリヘルツオーダーよりも3桁低いマイクロヘルツオーダーまで下げる必要があることが明らかになってきた。

2. 研究の目的

上記の背景を考慮して、リチウムイオン電池を対象とし、その交流インピーダンス特性を低温低周波数領域も含めた幅広い条件で測定し、それを用いてより汎用性の高い電池の動作特性モデルを構築することを本研究の目的とした。具体的には、下記の通りである。

- ① リチウムイオン電池の交流インピーダンス特性の測定に関して、氷点下の低温領域での測定技術およびマイクロヘルツオーダーの低周波数領域まで測定する手法を確立する。さらに、それらを用いて、電池の交流インピーダンス特性を、氷点下の低温を含む幅広い温度と充電状態の条件で、マイクロヘルツオーダーの低周波数領域まで測定する。
- ② 各条件における上記の測定結果を等価回路にフィッティングすることにより、等価回路の各素子のパラメータを決定し、交流インピーダンス特性をオーム抵抗成分と正負極の表面被膜・電荷移動過程および拡散過程の各インピーダンス成分に分離する。さらに、各成分の測定条件に対する依存性を検討し、正負極の表面被膜・電荷移動過程および拡散過程のインピーダンス成分について、成分毎に温度と充電状態に対する変化の法則性を見だし定式化する。
- ③ 定式化した正負極の表面被膜・電荷移動過程および拡散過程の各インピーダンス成分の法則性を利用して、ある温度や充電状態および劣化状態における交流インピーダンス特性の測定結果からそれらが異なる条件での交流インピーダンス特性を推定する手法を確立する。さらに、この確立した推定手法を研究代表者らが以前から開発してきている動作特性モデルに組み込むことにより、より汎用性の高いリチウムイオン電池の動作特性モデルを完成させる。

3. 研究の方法

研究は2019～2021年度の3年間で実施し、上記の研究目的に記した①～③の研究を、それぞれに1年ずつをかけて、年次進行で遂行した。具体的な研究方法と内容は下記の通りであった。

① 2019年度の研究方法と内容

1. 時間領域測定法により交流インピーダンス特性を低周波数領域で測定する手法の確立
2. 恒温槽を用いた低温を含む条件で低周波数領域までの交流インピーダンス特性の測定

② 2020 年度の研究方法と内容

1. DRT と DDT 法に基づく等価回路フィッティングによる交流インピーダンス特性の成分分離
2. アレニウスの式等を適用した分離後の各成分の温度および充電状態依存性の法則性の検討

③ 2021 年度の研究方法と内容

1. 低温での交流インピーダンス特性の測定値から室温での同特性を推定する手法の確立
2. その確立した推定手法を組み込むことによるより汎用性の高い動作特性モデルの構築

4. 研究成果

(1) 本研究では、供試電池として、ソニー製ビデオカメラ用バッテリーパック NP-F970 とパナソニック製の電動アシスト自転車用バッテリーパック NKY450B02 からそれぞれ取り出した電池を使用した。どちらも 18650 タイプの円筒スパイラル型リチウムイオン電池（直径 18 mm，高さ 65 mm）で、公称電圧は 3.6 V である。公称容量は、ソニー製の電池が 2.2 Ah，パナソニック製の電池が 2.1 Ah である。ただし、特性を安定させるために、あらかじめ 100 回程度の繰り返し充放電を行ったため、供試電池としての使用時には若干劣化していた。本報告では、以下、ソニー製の電池を供試電池 A，パナソニック製の電池を供試電池 B と記すこととする。

本研究では、まず、両供試電池の氷点下を含む低温環境における高・中周波数領域（2 mHz～20 kHz）の電気化学インピーダンス特性（交流インピーダンス特性）を測定した。なお、高・中周波数領域は、主に正負電極における表面被膜と電荷移動過程のインピーダンスが現れる周波数領域である。

測定には、ポテンシオ/ガルバノスタット・周波数応答アナライザ一体型の交流インピーダンス計（ソーラトロン 1280Z）を用いた。測定の結果得られた、供試電池 A, B の充電状態（SOC）が 0.5 で電池温度が -20, -10, 0 および 10 °C の場合の電気化学インピーダンス特性のナイキストプロットを図 1 および 2 に示す。両図より、電池温度が低くなるに従って、電池の電気化学インピーダンスが急激に増大し、それにとまって、ナイキストプロットにインピーダンスの周波数特性の特徴がより明瞭に現れてくるのが分かる。このことは、電池の電気化学インピーダンス特性を素過程分離し等価回路を作成するにあたっては、低温での測定結果を用いることにより精度の向上が期待できることを示している。

測定した電気化学インピーダンス特性を素過程分離するために、図 1 および 2 に示した供試電池 A, B の電気化学インピーダンス特性に対して DRT（緩和時間分布）解析を行った。結果を図 3 および 4 に示す。両図より、どちらの供試電池においても、電池温度が低くなるに従って DRT のピー

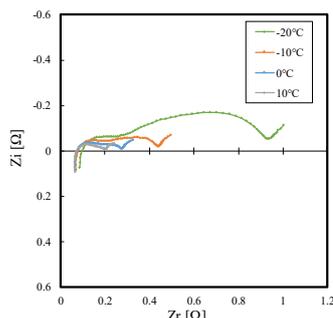


図 1 低温環境でのインピーダンス測定結果（高・中周波数領域，供試電池 A，SOC 0.5）

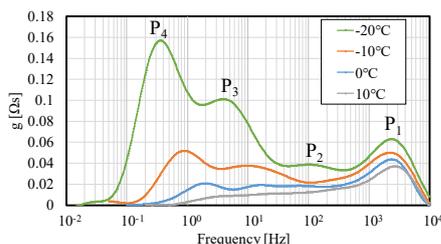


図 3 DRT 解析結果（高・中周波数領域，供試電池 A，SOC 0.5）

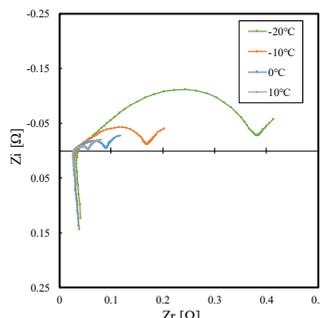


図 2 低温環境でのインピーダンス測定結果（高・中周波数領域，供試電池 B，SOC 0.5）

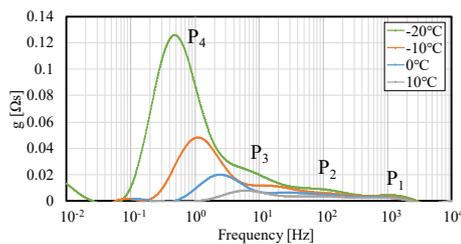


図 4 DRT 解析結果（高・中周波数領域，供試電池 B，SOC 0.5）

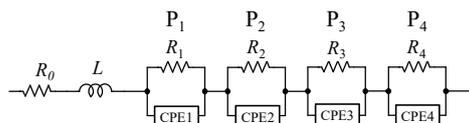


図 5 フィッティングに用いた等価回路モデル

測定した電気化学インピーダンス特性を素過程分離するために、図 1 および 2 に示した供試電池 A, B の電気化学インピーダンス特性に対して DRT（緩和時間分布）解析を行った。結果を図 3 および 4 に示す。両図より、どちらの供試電池においても、電池温度が低くなるに従って DRT のピー

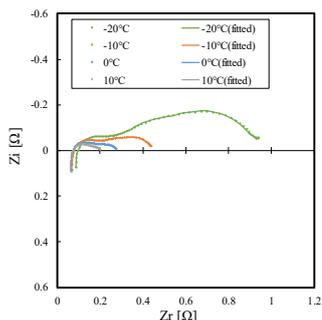


図 6 フィッティング結果と実験結果の比較（高・中周波数領域，供試電池 A，SOC 0.5）

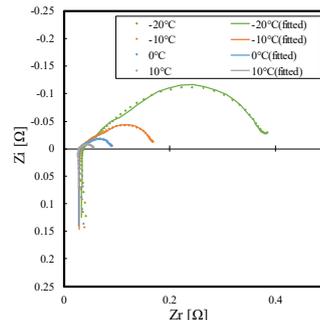


図 7 フィッティング結果と実験結果の比較（高・中周波数領域，供試電池 B，SOC 0.5）

クが明瞭になり、特に電池温度が $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合には 4 個のピークがはっきりと現れていることが分かる。この DRT 解析結果からも電気化学インピーダンス特性の低温における測定の優位性が確認できる。

DRT 解析結果にピークが 4 個現れたことおよびこれらの 4 個のピークは正負電極における表面被膜・電荷移動過程のインピーダンスに対応していると推測されることを考慮して、等価回路モデルとして図 5 に示す抵抗と CPE 素子の並列回路を 4 個もつものを設定した。そして、各電池の各温度の場合について、複素非線形最小二乗法を用いたフィッティング計算によりその全ての回路素子定数を求め、等価回路を同定した。得られた等価回路のインピーダンスのナイキストプロットとそれに対応する測定結果の比較を供試電池 A, B について図 6 および 7 に示す。両図より、作成された等価回路が十分な精度を有していることが確認できる。

(2) 次に、供試電池 A を用い、高・中周波数領域 ($10\text{ mHz}\sim 20\text{ kHz}$) だけではなく、正負電極内リチウムの拡散過程のインピーダンスが現れる低周波数領域 ($10\text{ }\mu\text{Hz}\sim 10\text{ mHz}$) も含む広い周波数領域で、SOC を種々に変化させて電気化学インピーダンス特性を測定し、その SOC 依存性を検討した。なお、前述した低温環境での測定の利点を考慮して、測定時の電池温度は $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ とした。また、高・中周波数領域の電気化学インピーダンス特性の測定には交流インピーダンス計を用いたが、低周波数領域の同特性の測定は、インピーダンス計では困難であるため、TDM (時間領域モデリング) 法を適用し、電流レート 0.01 C (100 時間率) で 2 時間の定電流放電後の休止時間における電圧データから算出した。ここで、本研究で用いた TDM 法は、電池の過渡応答を線形と仮定し、応答電圧の測定値を多段の RC 並列回路で構成された等価回路で模擬することによりインピーダンス特性を算出する手法で、上記の電流レートと休止時間は研究代表者らが最適化したものである。本測定の結果得られた、供試電池 A の電池温度が $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合の電気化学インピーダンス特性のナイキストプロットの SOC による変化を図 8 に示す。

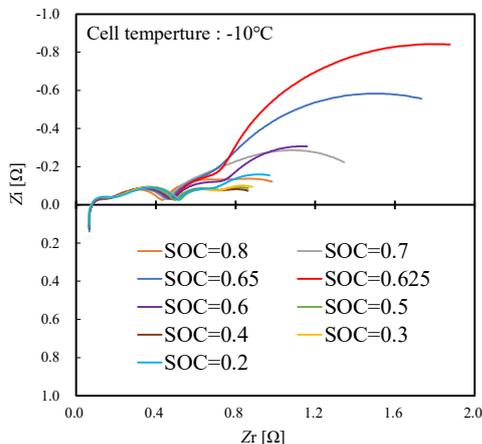


図 8 低周波数領域を含むインピーダンスの SOC 依存性の測定結果 (供試電池 A, 温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

主に正負電極における表面被膜と電荷移動過程のインピーダンスが現れる高・中周波数領域については、同周波数領域の電気化学インピーダンス特性に対して DRT 解析を行えば、電池の等価回路モデルが決定できることは既に説明した通りである。一方、正負電極内リチウムの拡散過程のインピーダンスが現れる低周波数領域については、DRT 解析で設定する RC 並列回路の無限直列接続は適切ではないため、そのかわりにワールブルグ (拡散) インピーダンスの無限直列接続を用いる、DDT (拡散時間分布) 解析手法を本研究で新たに開発し、それを利用して等価回路モデルを決定した。

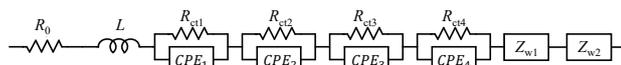


図 9 低周波数領域を含む等価回路モデル

上記の DRT 解析と DDT 解析の計算結果を考慮して、供試リチウムイオン電池の等価回路モデルとして、図 5 の回路に 2 個のワールブルグインピーダンスの直列接続を追加した、図 9 の回路を決定した。図中の $R_{ct1}\sim R_{ct4}$ は、表面被膜・電荷移動抵抗で、図 5 の $R_1\sim R_4$ と対応している。一方、 Z_{w1} および Z_{w2} はワールブルグインピーダンスを表し、本報告書では以下それらの拡散抵抗をそれぞれ R_{d1} および R_{d2} とする。そして、本研究でも、この等価回路の電気化学インピーダンスが図 8 の測定結果とできるだけ一致するように複素非線形最小二乗法によるフィッティング計算を行い、等価回路の回路定数を同定した。

同定された表面被膜・電荷移動抵抗 $R_{ct1}\sim R_{ct4}$ と拡散抵抗 R_{d1} および R_{d2} の SOC 依存性を図

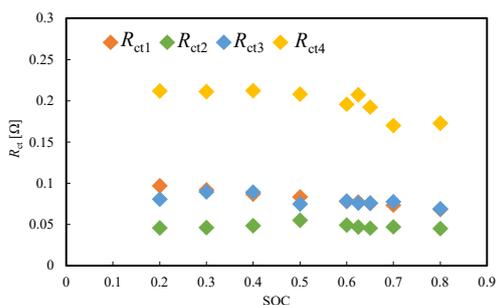


図 10 表面被膜・電荷移動抵抗 $R_{ct1}\sim R_{ct4}$ の SOC 依存性 (供試電池 A, 温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

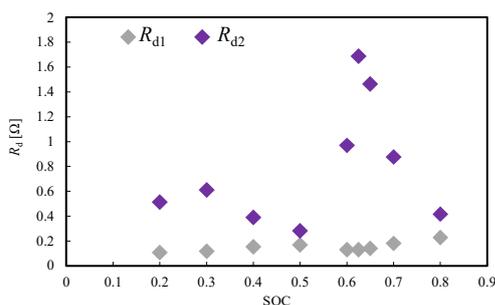


図 11 拡散抵抗 R_{d1} および R_{d2} の SOC 依存性 (供試電池 A, 温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

10 および 11 に示す. なお, 各抵抗の添字数字は周波数領域が高い方から低い方へ昇順で並べた. 図 10 より, 4 個の表面被膜・電荷移動抵抗については, いずれも SOC による変化があまり大きくないことが明らかになった. 一方, 図 11 より, 拡散抵抗については, R_{d1} は SOC による変化があまり大きくないが, R_{d2} は SOC が 0.3 付近と 0.6 付近で顕著に増大することが明らかになった. SOC が 0.3 付近と 0.6 付近では負極のグラファイトが相転移を起こすことが報告されており, この拡散抵抗 R_{d2} の顕著な増大はそれに起因するものと考えられる. この結果より, 電池動作特性のシミュレーションにあたっては, インピーダンスを測定しておく SOC の間隔を SOC が 0.3 付近と 0.6 付近は細かくする必要があることが分かった.

(3) 上述したように, DRT および DDT 解析を導入した検討により, リチウムイオン電池の電気化学インピーダンスを 6 個の素過程に分離し, それらの抵抗成分である表面被膜・電荷移動抵抗 $R_{ct1} \sim R_{ct4}$ と拡散抵抗 R_{d1} および R_{d2} の同定に成功した. そこで, 本研究では, 引き続き, これらの同定された各抵抗成分の温度依存性の検討を行うことにし, そのために供試電池 A の各抵抗成分の温度依存性のアレニウスプロットを作成した. 作成例として, SOC が 0.5 で電池温度が $-10, 0$ および 10 °C の場合の電気化学インピーダンス特性から同定した表面被膜・電荷移動抵抗 $R_{ct1} \sim R_{ct4}$ と拡散抵抗 R_{d1} および R_{d2} のアレニウスプロットを図 12 および 13 に示す. これらの図より, 全ての表面被膜・電荷移動抵抗および拡散抵抗において, アレニウスプロットが直線状になっており, それらの温度依存性はアレニウスの式に従うことが明らかになった.

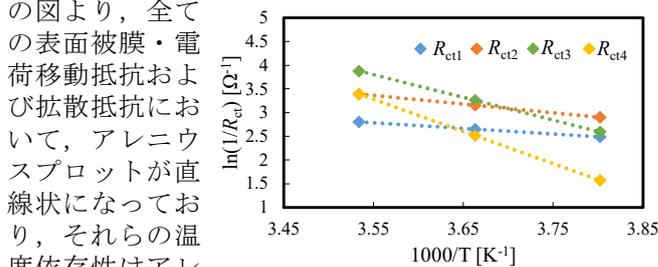


図 12 表面被膜・電荷移動抵抗 $R_{ct1} \sim R_{ct4}$ のアレニウスプロット (供試電池 A, SOC 0.5)

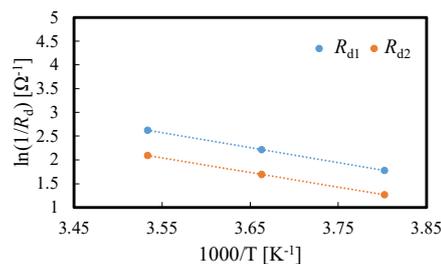


図 13 拡散抵抗 R_{d1} および R_{d2} のアレニウスプロット (供試電池 A, SOC 0.5)

この各抵抗成分の温度依存性がアレニウスの式に従うことをうまく利用して, 各抵抗成分の活性化エネルギーを測定によりあらかじめ同定しておき, それらと低温で測定した電気化学インピーダンス特性から室温における同特性を推定する手法を確立した. なお, 各抵抗成分の活性化エネルギーを同定するためには低温環境の複数の温度条件で電気化学インピーダンス特性を測定しておく必要があるが, それは最初に 1 回だけ行えばよいため, 本手法を用いれば常温で毎回同特性を測定する必要がなくなる. 本手法を用いた推定結果の一例として, 供試電池 A で, SOC が 0.5 の場合について, 電池温度が -10 °C でのインピーダンスの測定結果から推定した電池温度が 10 °C での同特性とそれに対応する同特性の実測結果の比較を図 14 に示す. この図より, 本推定手法の妥当性が確認できる.

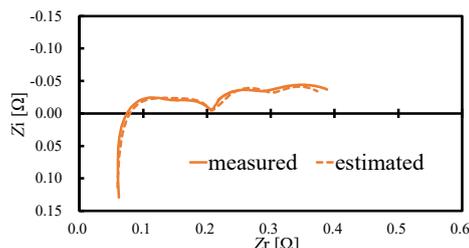


図 14 インピーダンスの推定結果と実測結果の比較 (供試電池 A, SOC 0.5, 温度 10 °C)

最後に, この確立した推定手法を研究代表者らが以前から開発してきている動作特性モデルに組み込むことにより, より汎用性の高いリチウムイオン電池の動作特性モデルを完成させた. 今回のモデルの改良により, 低温でインピーダンスを測定しておけば, インピーダンスを測定していない常温環境での電池の電圧過渡応答シミュレーションが可能となった. 電圧過渡応答のシミュレーションの結果例として, 供試電池 A で, 電池温度が 10 および 20 °C の場合の, シミュレーション結果とそれに対応する実測結果の比較を図 15 および 16 に示す. これらの図より, どちらの温度でもシミュレーション結果と測定結果はよく一致しており, 本研究で改良したより汎用性の高いリチウムイオン電池の動作特性モデルの妥当性が確認できる.

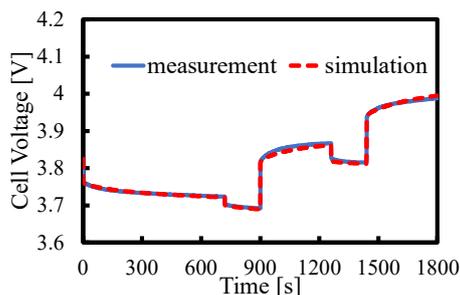


図 15 電圧過渡応答のシミュレーション結果と実測結果の比較 (供試電池 A, 温度 10 °C)

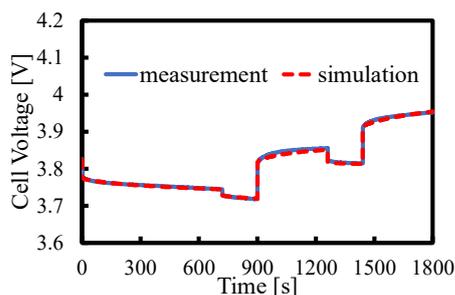


図 16 電圧過渡応答のシミュレーション結果と実測結果の比較 (供試電池 A, 温度 20 °C)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshitaka Inui, Satoshi Hirayama, Tadashi Tanaka	4. 巻 44
2. 論文標題 Temperature Dependence of Impedance Spectrum of Charge-Transfer Processes in Lithium-Ion Batteries with Nickel-Manganese-Cobalt Cathode and Graphite Anode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Energy Storage	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.est.2021.103390	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshitaka Inui, Satoshi Hirayama, Tadashi Tanaka	4. 巻 102(12)
2. 論文標題 Detailed Estimation Method of Heat Generation During Charge/Discharge in Lithium-Ion Battery Using Equivalent Circuit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electronics and Communications in Japan	6. 最初と最後の頁 3-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ecj.12221	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 鬼頭孝史, 平山智士, 乾 義尚
2. 発表標題 電気化学インピーダンス特性の温度依存性を考慮したリチウムイオン電池モジュールの電圧過渡応答シミュレーション
3. 学会等名 令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口大貴, 平山智士, 乾 義尚
2. 発表標題 緩和時間分布法によるNCMおよびNCA正極リチウムイオン電池の電気化学インピーダンスの比較検討
3. 学会等名 令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤隆太, 平山智士, 乾 義尚
2. 発表標題 強制空冷下におけるリチウムイオン電池の温度上昇量および電圧過渡応答シミュレーション
3. 学会等名 電気学会新エネルギー・環境研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口大貴, 富田壮平, 平山智士, 乾 義尚
2. 発表標題 NCMおよびNCA正極リチウムイオン電池の電荷移動過程の温度依存性
3. 学会等名 電気学会新エネルギー・環境研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡野将英, 平山智士, 田中正志, 乾 義尚
2. 発表標題 リチウムイオン電池の低周波領域を含む電気化学インピーダンスの充電状態依存性
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡野将英, 平山智士, 田中正志, 乾 義尚
2. 発表標題 リチウムイオン電池の拡散インピーダンスを考慮した詳細な等価回路の作成手法
3. 学会等名 令和2年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻 聡秀, 平山智士, 田中正志, 乾 義尚
2. 発表標題 リチウムイオン電池の拡散インピーダンスの等価回路作成手法の提案
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡野将英, 辻 聡秀, 平山智士, 田中正志, 乾 義尚
2. 発表標題 低温動作時におけるリチウムイオン電池の電極界面のインピーダンスに関する検討
3. 学会等名 第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihide Tsuji, Daiki Nakamura, Satoshi Hirayama, Tadashi Tanaka, Yoshitaka Inui
2. 発表標題 Study on Temperature Dependence of Charge Transfer Impedances of Lithium-Ion Batteries
3. 学会等名 International Council on Electrical Engineering Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naotsugu Fujimoto, Satoshi Hirayama, Yoshitaka Inui
2. 発表標題 Evaluation Method on Temperature Rise of Lithium-Ion Battery During Charge and Discharge Cycles
3. 学会等名 International Council on Electrical Engineering Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡野将英, 平山智士, 田中正志, 乾 義尚
2. 発表標題 リチウムイオン電池の低温環境での充放電時の電圧過渡応答シミュレーション
3. 学会等名 第38回エネルギー・資源学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻 聡秀, 平山智士, 田中正志, 乾 義尚
2. 発表標題 リチウムイオン電池の拡散インピーダンスの温度依存性解明に向けた基礎検討
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本直嗣, 平山智士, 乾 義尚
2. 発表標題 流体解析を用いた自然対流下におけるリチウムイオン電池の温度推定
3. 学会等名 電気学会新エネルギー・環境研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	平山 智士 (HIRAYAMA Satoshi) (70759274)	滋賀県立大学・工学部・講師 (24201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------