

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04459

研究課題名（和文）分数階システムに対する制御理論構築と電気化学系のモデリング・制御への応用

研究課題名（英文）Fractional Order System and Control: Application to Modeling and Control of Electrochemical System

研究代表者

畠山 省四朗 (Hatakeyama, Shoshiro)

東京電機大学・未来科学部・研究員

研究者番号：40138954

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）：研究実施期間を通じてLi-ion電池の温度と劣化度（サイクル数）を条件として、各条件における周波数応答Cole-Cole plotを導出し、これまでに導出した分数階微分モデルのシステム同定を行い、温度と劣化の条件下において同定されたパラメータ変化を分析した。分析結果から、温度に対する感度が低く、劣化に関して感度が高いパラメータを見出すことができた。また、外生入力のあるシステムに対する分数階システムの応答を簡便に計算する手法を開発し、これによるシミュレーションが行った。分数階システムの電気化学系（特に本研究ではLi-ion二次電池）のモデリングや制御への応用事例を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気化学系の反応や応答は、制御分野でよく用いられる整数階微分方程式では十分に記述することができないという課題に対して、本研究では分数階微分方程式をモデルとして導入し、リチウムイオン二次電池を対象としたモデリングと劣化診断を実施し、分数階微分方程式で表現されるクラスのシステム制御の一端を切り拓いた。また分数階微分方程式で記述されるシステムの制御応答を簡便に計算する方法を導出し、それによるシミュレーションと実験値の比較検証を行った。これらの成果は今後、分数階システムを対象とした制御理論、制御技術の発展に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Frequency response Cole-Cole plots were derived for each condition, based on temperature and degradation (number of cycles). System identification was performed on the frequency responses obtained for each condition using the fractional-order differential model derived previously. The analysis revealed parameters with low sensitivity to temperature and high sensitivity to degradation.

A simple method for calculating the response of a fractional factorial system to a system with exogenous inputs has been developed, and simulations and comparisons between the control response based on a model of a fractional factorial system and experimental values can now be verified. These results have been presented at domestic and international conferences on automatic control. We were able to show examples of applications of fractional factorial systems to modeling and control of electrochemical systems, especially Li-ion rechargeable batteries in this study.

研究分野：制御工学

キーワード：分数階微分方程式 分数階システム 二次電池 モデリング システム同定 劣化診断

## 1. 研究開始当初の背景

分数階微分 (Fractional Calculus) を用いた数理モデルである分数階システムでは、古くは 1800 年代の Liouville や Grünwald, Letnikov らの分数階微積分に端を発するが、拡散系などの分布定数系において分数階微積分が現れるため、工学的応用においても本質的であり、現在においても、一層注目を集めている。分数階微分を含む微分方程式の解の固有関数を Mittag-Leffler が提唱したが、分数階システムに基づく制御系設計理論は 2018 年度現在においても非常に限定された結果しか生み出されていない。分数階システムの周波数領域における表現は古典制御理論と親和性が良い一方、時間領域では固有関数である Mittag-Leffler 関数が、整数階システムにおける固有関数である指数関数に比べて、その性質が複雑であることに起因し、分数階システムに対応する現代制御論的な理論構築が進んでいないためと考える。

詳しく問題点を分析すると、(a) 解析解が Mittag-Leffler 関数によって記述できるにも関わらず Closed-form が与えられていないことや、行列 Mittag-Leffler 関数の数値的安定な計算手法が今なお研究対象であること、(b) 外生入力が増加する非自律系分数階システムにおいて、入力と Mittag-Leffler 関数を畳込む必要があるが、この畳込みを効率的に計算する手法がないこと、(c) 分数階システムの最適制御など、構造と最適化に基づく制御系設計への取り組みがなされていないこと、が根本の原因である。これに対し、従来では Grünwald-Letnikov 微分などを利用して、分数階システムを差分方程式へ近似することが主流となっており、この方法では分数階システムに対する制御理論の発展は望めない。いかに分数階システムに対する現代制御論的な枠組みの制御理論を構築できるかが本研究の学術的な問いであった。

## 2. 研究の目的

分数階システムをラプラス変換によって伝達関数で表すと、周波数領域における古典制御理論と親和性が良いが、時間領域では固有関数となる Mittag-Leffler 関数の取り扱いが、整数階システムにおける固有関数である指数関数に比べて、その性質が複雑であることに起因し、分数階システムに対応する現代制御論的な制御系設計理論の構築が進んでいないためと考える。

そこで、本研究は分数階システムの解の性質を明らかにし、これに基づいた分数階システムの現代制御論的な制御系設計理論を構築・整備することを目指す。これにより、分布定数系 (拡散反応、電気化学インピーダンスなど) で分数階システムとして記述される広いクラスのシステムに有効な制御系設計理論を与えることができる。本研究では、電気化学反応系の 1 つである二次電池をアプリケーションとして理論の有効性を実証することを目的とする。

## 3. 研究の方法

これまでの分数階システムに対する制御系設計論は主に伝達関数に基づく周波数応答整形や、極配置法など状態方程式の構造を利用する手法に留まっていた。そこで、分数階システムのモデル表現ならびにシステム解析論を経て、分数階システムに対する制御系設計論を明らかにしたい。この時に分数階システムに制御応答や自律応答が明示的に与えられるまたは、数値計算として容易に求められることが重要である。

そこでシステム行列が重複固有値を持つ場合にジョルダン細胞に変形することで、対応する行列 Mittag-Leffler 関数の形を明らかにしその数値計算法を与え、行列 Mittag-Leffler 関数の構造や性質の解析を一層進める。

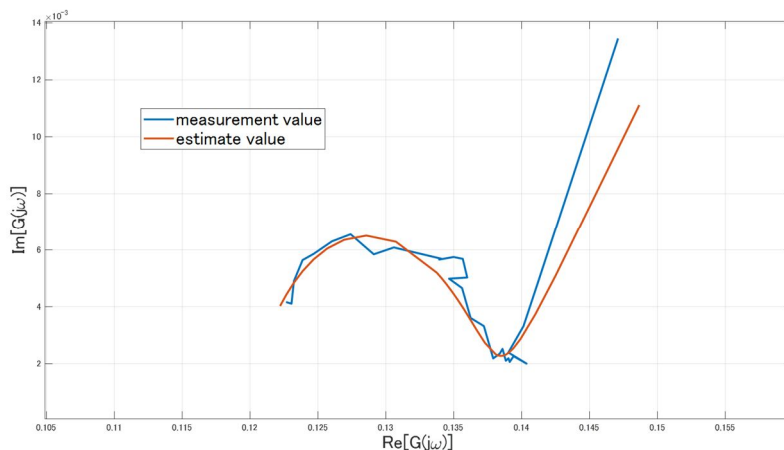
提案法の有効性を検証するため、電気化学反応系の一つである二次電池を対象として、Constant Phase Element や Warburg インピーダンスを含めた分数階システムを構成し、二次電池の内部状態推定やそれに基づく劣化診断技術に応用する。これを通じて提案する分数階システムの現代制御論的な解析や制御系設計の有効性を示す。

## 4. 研究成果

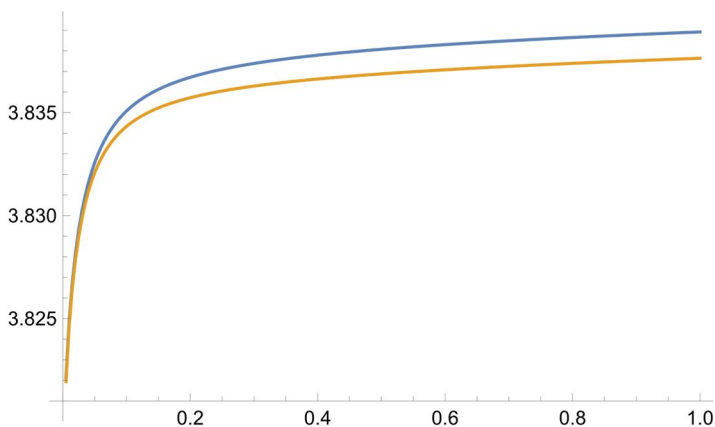
Lithium-ion 二次電池を対象として、分数階システムを利用した正確な動特性表現を得ることが可能となった。特にイオンの拡散運動や、電池内部の抵抗成分とキャパシタ成分の中間的な特徴を有する成分を分数階システムのモデルによって表現することが可能となった結果、Cole-Cole プロットと呼ばれる周波数応答を十分に記述することが可能となった。

この実用的な応用として、Li-ion 二次電池の劣化診断法を確立した。二次電池の分数階システムによるモデル表現を得て、これらのパラメータ変化と劣化度を調査した結果、劣化と相関

関係にあるパラメータ群を得ることができた。しかし、この劣化と相関のあるパラメータ群の中で大半は、二次電池の稼働温度とも相関があることがわかったため、パラメータ変動が劣化に依存するものなか、温度によって依存するものなのかを切り分ける必要があった。そこで、恒温槽を利用した実験を重ねることにより、劣化に対して感度が高く、温度に対して感度が低いパラメータを見出すことができた。これは、分数階システムの研究の成果の一つである。



さらに、制御的な側面としては、行列 Mittag-Leffler 関数の性質や取扱いについても基礎研究を進めた。Mittag-Leffler 関数と Caputo の定義に基づいた分数階微分方程式によるシステム表現、その解軌道について研究を進め、簡便な方法でその解をシミュレートする方式を導出した。これによって、例えば先ほどの二次電池の分数階システムに対して、劣化と相関のあるパラメータを変動させたときに、その制御応答の変化を容易に調べることが可能になった。下図のその一例であり、CPE パラメータを変化させたときの充電時電圧変化波形である。CPE パラメータが変動することで、抵抗とキャパシタの中間的な性質が表現できる一方、これを状態空間表現しようとする、システムの次数(状態変数のサイズ)が大きく変動する。これらを含めた応答計算などが可能に、モデルに基づく制御応答と実験値との比較、有効性検証が可能となった。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 戸田 耕佑, 進藤 卓朗, 畠山 省四朗, 岩瀬 将美
2. 発表標題 温度を考慮したリチウムイオン電池の劣化診断
3. 学会等名 第7回制御部門マルチシンポジウム (MSCS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅弘太, 佐藤康之, 岩瀬将美
2. 発表標題 温度変化を考慮した分数次システム表現に基づくリチウムイオン電池の劣化診断：等価回路モデルパラメータの劣化依存性の検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2022), 札幌, 6月, 1P1-C12
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kota Suga, Yuki Odagaki, Masami Iwase
2. 発表標題 Degradation Diagnosis of Lithium Ion Batteries based on Fractional-Order System Considering Temperature Variations
3. 学会等名 IFAC World Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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	井上 淳 (Inoue Jun) (20609284)	東京電機大学・工学部・准教授  (32657)	

6. 研究組織（つづき）

	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	岩瀬 将美  (Iwase Masami)  (50339074)	東京電機大学・未来科学部・教授    (32657)	

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