

氏 名 田中 康平

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1913 号

学位授与の日付 平成29年3月24日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 宇宙機搭載リチウムイオン二次電池の内部状態推定による異常検知に関する研究

論文審査委員 主 査 准教授 田中 孝治  
准教授 福田 盛介  
助教 豊田 裕之  
教授 板垣 昌幸 東京理科大学  
准教授 山縣 雅紀 関西大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

宇宙機搭載リチウムイオン二次電池の内部状態推定による異常検知に関する研究

人工衛星や惑星探査機を始めとする宇宙機において、リチウムイオン二次電池を搭載したことにより運用が長期化すると同時に、安全管理に関する要求が高まっている。宇宙機搭載電池の管理手法については明確な基準は定められていない中で、「寿命末期におけるパッシベーション」および「不具合のプロパゲーション防止」が国際的に安全管理の面から近年求められている。寿命末期におけるパッシベーションでは、宇宙機の安全な運用終了を求められている。また、不具合のプロパゲーション防止では、搭載した電池に不具合が生じた際に、その影響が他のシステムへと伝搬しないようにすることを求められている。そのため、近年宇宙機においては、バッテリーの管理手法の明確化のみならず、より安全な電池の適用と、宇宙機搭載電池の劣化状態把握が期待されている。

宇宙機の主電源用の電池としてリチウムイオン二次電池を採用することにより、運用の長期化は従来に比べると望みやすくなってきた。しかしながら、運用年数が長くなるにつれて、電池は劣化し、さらには故障するリスクが増す。電池の故障の中でも、内部短絡による永久故障が運用を継続する上では大きな問題となる。そのため、内部短絡が生じることを宇宙機の運用情報から予測することが必要となるが、内部短絡に至るメカニズムは民生分野においても未だ明確に解明されていない。つまりは、宇宙機において内部短絡が発生する兆候を運用情報から検知する手段は現在のところない。

本論文は、宇宙機を安全に長期運用することに向け、宇宙機から得られる情報を利用し、宇宙機搭載電池の内部状態を診断することで、宇宙機搭載電池における異常状態、すなわち内部短絡の兆候（リチウムプレーティングと言う）を検知することを提案するものである。宇宙機の状態診断の指標としてインピーダンスに着目した。インピーダンスは非破壊に電池の内部状態を診断する技術として民生分野で着目されており、周波数を 10 kHz から 10 mHz 程度まで掃引した際の、各周波数における電圧と電流の比で表される値である。民生分野では 1 kHz とした高頻度データサンプリングを行うことや、電池を低温環境に置くこと、他には電圧と電流を高分解能でモニタすることにより、充放電データから AC インピーダンスを算出することに成功している。しかしながら、宇宙機では 1kHz での高頻度データサンプリングを行うことおよび、電池の温度を極端に変更することは難しい。そこで、1 Hz 以下のサンプリング頻度で運用情報を取得し、低分解能でデータを計測している宇宙機においても、AC インピーダンスを求め、内部短絡の兆候を検知する手法の確立が必要となる。

第二章では、現在行われている宇宙機搭載電池の状態管理手法について報告している。また、宇宙機の長期運用に向けて課題となることをまとめている。

第三章では、宇宙機運用情報を加工することで求めることができる情報について報告している。本論文においては、加工情報として DC 抵抗、AC インピーダンス、微分容量に着目した。2005 年に打ち上げられた「れいめい」衛星の運用情報から、DC 抵抗と AC イ

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

ンピーダンスの算出を試みた。「れいめい」衛星は 0.125 Hz の間隔でサンプリングを行っているため、0.1 Hz 以下の低周波数領域の AC インピーダンスの算出を試みた。日照日陰切り替え時のデータから DC 抵抗を算出し、日陰中に放電電流が変わる際の電圧応答から AC インピーダンスを算出したところ、DC 抵抗については運用初期から 11 年を超えて値に変化がない中で、AC インピーダンスについては運用年数が延びるごとに値が増大する傾向が確認された。「れいめい」衛星のように低サンプリングレートでデータ取得をしている宇宙機であったとしても、0.1 Hz 以下の低周波領域における AC インピーダンスの算出は可能であることが分かった。また、地上における実験データから微分容量と低周波領域における AC インピーダンス、充電状態の関係性について明らかとした。そのため、地上における実験より、電池の低周波領域における AC インピーダンスが劣化によってどのように変化するかを確認することとした。

第四章では、リチウムプレーティングが生じるまでの電池の内部状態変化について実験的に確認した結果を報告している。実験では、高安全な電池と言われている、リン酸鉄を正極に持つ電池(以下、オリビン型電池)を利用した。先行研究では、セルの温度を固定して放電レートを変えることで電池のサイクルによる容量劣化を確認していた。対して我々は、充放電レートを固定し、温度を変えた場合、電池の充放電容量と AC インピーダンスがどのように変化するか調べた。定格 1.05 Ah の市販セルを対象に、10°C、23°C、45°C で充放電を繰り返した。充電は CC-CV モードで 0.55 A で 3.6 V まで 65 分間充電し、放電は CC モードで 1.1 A で 30 分間放電した。定期的に容量と AC インピーダンスのサイクル試験に伴う継時的変化を確認した。その中で、10°C にて行った試験において、特徴的に AC インピーダンスの電荷移動抵抗が下がり続けることを報告した。さらに、特徴的に変化した 10°C に温度を固定し、1.1 A とより高レートで充放電を繰り返した際の内部状態変化を確認することとした。充電は CC-CV モードで 1.1 A で 3.6 V まで 35 分間充電し、放電は CC モードで 1.1 A で 30 分間放電した。その結果、高レートで充電した電池の方が顕著に AC インピーダンスの電荷移動抵抗が小さくなることが分かった。そして、充放電を繰り返したところ、リチウムプレーティングと思われる傾向が充放電データに表れた。ここから、我々は電荷移動抵抗が小さくなることとリチウムプレーティングの関係について考察し、リチウムプレーティングに至るまでの過程について推察している。

第五章では、安全に宇宙機を運用するための方法について報告している。第三章の報告より、宇宙機においても AC インピーダンスを算出することで電池の内部状態を推測することが可能であることが分かっており、第四章の報告から、リチウムプレーティングに至るまでの過程を AC インピーダンスの低周波領域に着目することで推測可能であることが分かった。これらの情報を合わせることで、宇宙機を安全に運用するための方法について議論している。

以上の成果を利用することで、限られた情報しか取得できない宇宙機においても、特別な運用を行うことなく AC インピーダンスを算出することができ、さらに AC インピーダンスの変化に着目することで、リチウムプレーティングに至る可能性がある際には検知できるようにする。

(別紙様式 3)  
(Separate Form 3)

博士論文審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

近年、宇宙機搭載用二次電池としてリチウムイオン二次電池が主流となっている。出願者は、本論文において、宇宙機搭載二次電池の長期安全運用を実現するために、宇宙機搭載リチウムイオン二次電池の内部状態の定量的評価方法を考察し、新しい衛星運用方法を提示している。民生分野において電池の内部診断方法として着目されているインピーダンス計測の応用から本研究の主要項目の一つである AC インピーダンスの応用に関する着想を得ているが、宇宙機搭載二次電池に関しては、高速サンプリング、高分解能モニタ、温度条件の設定は困難であるため、宇宙機搭載二次電池の運用における AC インピーダンスの応用に関する研究事例はほとんどない。

出願者は、リチウムイオン二次電池が内部短絡にいたる過程でのインピーダンス計測と容量計測を詳細に実施した。安全に実験を実施するために  $\text{LiFePO}_4$  を正極に持つオリビン型電池を採用している。リチウムイオン二次電池は、負極由来でリチウムプレーティングを経て内部短絡に至ることが知られており、オリビン型電池は、負極構成は広く流通している他のリチウムイオン二次電池と同じ構成であるため、リチウムプレーティングから内部短絡に至る現象を安全に実験的に確認できることを考察して採用した。出願者は、充放電サイクルを経ると、AC インピーダンスが低下する現象を発見した。また、AC インピーダンスの変化が、リチウムプレーティングの発生と相関があることを実験結果から合理的に説明した。また、微分容量の変化にも着目し、電池の内部状態の考察から、微分容量の変化をモニタすることで正負極のバランスのずれを確認できることを示した。AC インピーダンスの減少及び微分容量の変化を電池の短絡に至る内部状態状態の指標として実験的に定量的に示した研究は、他に例はない。

次に、出願者は、宇宙機搭載状態で二次電池の状態変化をモニタするために必要な電流、電圧、温度の取得条件を定量的に考察した。その結果を、「れいめい」衛星の実運用データに適用し、宇宙機の HK データとして、サンプリング間隔、電圧・電流・温度の分解能を提案した。さらに、従来衛星運用で用いている DC 抵抗、新たに提案する AC インピーダンス及び微分容量の取得方法と把握できる状態を整理して示し、新しい安全な衛星運用方法を提示した。

このように本論文は、宇宙機用リチウムイオン二次電池における安全な長期運用実現のために出願者の新発見と現象の実験的な解釈及び衛星運用における物理量の定量的な評価と新しい運用手順の提案を行ったものである。衛星寿命を決定する主要要因の一つである二次電池の寿命予測に関して、重要な知見を与えるものであり、宇宙工学分野での貢献は顕著なものと言える。

これら成果は、査読付き論文 1 件、国際会議 3 件にすでに発表されており、また、語学力に関しても学位授与に十分なレベルに達していると判断された。

これらのことを総合し、本審査委員会は、博士（工学）の学位を授与するに値すると全員一致で判断した。