

## 学位論文審査結果の概要

氏名	Wang Jiwei (ワン ジウエイ)
学位論文審査委員氏名	主査 阿布里提
	副査 官国清
	副査 佐川 貢一
	副査 丹波 澄雄
	副査 吉田 暁弘
論文題目	Research on key issues of health estimation based on data-driven method for lithium-ion batteries (データ駆動法を用いた電池健全性評価に関する研究)
審査結果の概要（2,000字以内）	
<p>カーボンニュートラルの実現に向けて、徹底した省エネルギーの推進と再生可能エネルギーの導入が求められており、その実現には技術革新による蓄電池の高性能化・低コスト化が不可欠である。一方、蓄電池は使用に伴い劣化していくため、リスクを回避しながら電池の性能を十分に引き出す技術開発の他、運用停止を最小化するための蓄電池の健全性(State of Health, SOH)評価などのバッテリーマネジメントも重要である。これらの技術開発の指針として、劣化を正確に評価する必要がある、そのために用いるパラメータは、温度や充電率、充放電速度など多種にわたり複雑である。本研究では、リチウムイオン蓄電池(LiB)の効果的なマネジメント手法を開発する目的として、深層学習による特徴抽出やガウス過程回帰(Gaussian Process Regression, GPR)を組み合わせたデータ駆動法を用いて、新たに LiB の SOH 推定方法及び残量予測や劣化予測モデルを提案した。また、提案したモデル技術に基づき様々な核関数が推定方法の性能に与える影響を分析し、SOH モデル技術の有効性を検証した。本論文は英語で書かれており、その成果を要約すると以下の通りである。</p> <p>(1) 蓄電池の劣化挙動は複雑であり、劣化原因も電池内部で複数の要因が同時発生することがある。各劣化要因の変化に基づいて電池容量と内部抵抗を予測するために、まず、LiB の容量試験及び評価用のプラットフォームを構築して、温度や充電率、充放電深度などのパラメータごとに劣化の試験データを抽出し、統計的な比較・評価方法（物理モデル）に基づき、電池の残存容量や残存性能に加えて電池そのものの内部状態まで詳細に把握できる 2 種類のモデルを提案し検証を行っている。</p> <p>(2) GPR 法はデータの入力と出力の関係のみを記述しメカニズムを考察しないブラックボックスであり、回帰・予測として優れた性能を示すものの、劣化要因を推定できないためあらかじめ劣化要因を仮定する必要がある。このため、支配因子を適切にモデル化できているかが鍵となり、劣化現象が複雑である場合や要因が十分に明らかでない場合はモデル化自体が難しい。そのため、本研究では、異なる温度や電圧条件における劣化のデータをグラフ化して、劣化の傾向や要因を詳細に分析した上で統計的に特徴指標量(health indicators ,HIs)を抽出し、SOH 予測のために HIs と GPR モデルを組</p>	

み合わせた新しい技術を提案している。また、ピアソンの積率相関係数法を適用して HIs と SOH の相関分析を行った結果、強い相関があることを明らかにしている。さらに、この新規データ駆動型モデルを用いて技術の有用性を検証した結果、評価データ全体に対する SOH の推定精度は平均絶対誤差(Mean Absolute Error, MAE)で 1.7%、二乗平均平方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)で 2.4%となり、従来技術の推定精度を上回る高い推定精度を実現した。これらの結果から、本技術はオンラインにて SOH 評価に高い信頼性を有することも明らかにしている。

(3) 蓄電池の保守管理の良否が性能・寿命に大きな影響を及ぼすことから、異常時の早期発見が重要である。一方、運用中の蓄電池について、保守点検及び診断は定期的に行う場合が多く、時間と費用などを要するため、効率的かつ経済的な診断技術を確立することが課題である。本研究では、単セルの劣化解析データに基づき、複数のバッテリーセルを含むバッテリーパック(電池パック)の状態推定機能を有するモデルを提案している。さらに、このモデルにより蓄電池劣化の兆候や問題が現れる前に運用中の電池パックの SOH を早期に予測診断できることを確認した他、ピアソンの積率相関係数法を適用して HIs と SOH の相関分析を行った結果、HIs と電池容量間に強い相関があることを明らかにしている。次に、蓄電池の SOH 推定のために抽出した間接指標 HIs に基づいてデータ駆動型 GPR モデルを構築し、容量 100Ah のリン酸鉄リチウムイオン電池を用いて検証した結果、電池パックの MAE と RMSE はそれぞれ 7.2%と 7.8%となり、提案した手法は電池パックを正確かつ有効にオンラインによって SOH の推定情報を提供できることを明らかにしている。

以上のように、本学位論文は、データ駆動法を用いた電池健全性評価に関する独創的な研究成果をまとめたものである。その研究内容は査読付き国際論文誌 3 編と 4 件の学術講演会を通して報告され、得られた成果は工学的に重要な貢献があると認められるとともに、今後の蓄電池の長期安定性や信頼性向上に寄与することが期待される。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認められる。

学位論文の基礎となる参考論文

- ① ***Jiwei Wang***, Zhongwei Deng, Tao Yu, Akihiro Yoshida, Lijun Xu, Guoqing Guan, Abuliti Abudula, “State of health estimation based on modified Gaussian process regression for lithium-ion batteries”, *Journal of Energy Storage*, 51(2022)104512.
- ② ***Jiwei Wang***, Zhongwei Deng, Kaile Peng, Xinchun Deng, Lijun Xu, Guoqing Guan and Abuliti Abudula, “Early Prognostics of Lithium-Ion Battery Pack Health”, *Sustainability*, 14(2022)2313.
- ③ ***Jiwei Wang***, Yunhong Che, Zhongwei Deng, Kaile Peng, Guoqing Guan, Abuliti Abudula, “Lifetime prognostics of lithium-ion battery pack based on its early cycling data and complete degradation information of battery cells”, *Proceedings of 2021 IEEE 2nd International Conference on Information Technology Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA 2021)*, 961-965.