

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04890

研究課題名(和文) モニタリングデータに基づく極値理論とその統計的推測理論の構築

研究課題名(英文) New developments of extreme value theory based on monitoring data and its statistical inference

研究代表者

長塚 豪己 (Nagatsuka, Hideki)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：30384738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：(1)一般化パレート分布(GPD)において、全てのパラメータ範囲において一意に推定値が求められる推定法に基づく漸近理論の構築とそれに基づく区間推定法、及び仮説検定法の構築。た。(2)多変量極値理論において得られる統一分布である多変量一般化パレート分布に基づく異常検知手法の構築。(3)レヴィ過程の一つである逆ガウス過程の混合変量モデル化、ならびにその最尤推定量の解の存在と一意性の定理下と証明、加速劣化試験における最適試験計画の定理化。(4)リチウムイオン電池の劣化現象モデリングに関する研究。(5)太陽光発電における電力量データの統計的モデリングに関する研究。

研究成果の学術的意義や社会的意義

計測技術、及び情報技術の高度な発達により、対象とする事象だけでなくそれに至るまでの過程で得られるデータ「モニタリングデータ」が得られるようになってきた。対象とする事象に関するデータ(例えば、故障)のみでなく、モニタリングデータ(例えば、劣化や強度)を用いると情報が増え、より精度の高い解析を行うことができる。しかし、これらを扱うには、これまで計測技術が発達していなかったことに加え、確率過程に基づく高度な数理手法が必要であり、これまで統一された方法論はなかった。本研究において、新たな手法を提案し、方法論の構築を進めることができた意義は大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：(1) We constructed an asymptotic theory based on an estimation method that can be obtained uniquely for all parameter ranges for the generalized Pareto distribution (GPD), and constructed interval estimation methods and hypothesis testing methods based on the proposed estimators. (2) We constructed an anomaly detection method based on the multivariate generalized Pareto distribution, which is the unified distribution obtained in multivariate extreme value theory. (3) We formulated theorems for mixed effect model of the inverse Gaussian process, about the existence and uniqueness of solutions for maximum likelihood estimators, and optimal test plans for accelerated degradation tests. (4) We conducted research on modeling the degradation phenomenon of lithium-ion batteries. (5) We advanced research on the statistical modeling of power data in solar power generation.

研究分野：統計学、信頼性工学

キーワード：統計的推測理論 劣化現象 異常検知 多変量極値理論 一般化パレート分布 多変量一般化パレート分布 逆ガウス過程 最適試験計画

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

災害や事故等、社会に甚大な被害を及ぼす現象は、異常に大きな、あるいは小さなデータが観測されるようなケースで発生する。異常に大きな(小さな)データは稀にしか起こらない事象と結びついているので、通常の統計手法では歯が立たない。このような極値データを扱う極値統計は、近年極めて重要性を増しており、自然災害への対策だけでなく、製品やシステムの故障を取り扱う品質管理・信頼性工学分野や、金融リスクを取り扱うファイナンス分野等で広く用いられている。得られたデータを一定の区分で区切り、区分毎の最大(小)値を集めたものを「極値データ」と呼ぶ。極値理論により、得られたデータがどのような分布に従っていようと、極値データの漸近分布は、Gumbel 分布、Frechet 分布、Weibull 分布の 3 つの分布に限られることがわかっている。この 3 つの分布は一般化極値分布(以下、GEV 分布)を用いて統一的に表現することができる。そこで、極値理論では、GEV 分布を用いて統一的に議論を進める試みがなされてきた。しかし、GEV 分布は、非正則分布と呼ばれる特殊な分布で、正則条件が破綻しており、一部のパラメータ範囲でしか推定量が得られなかった。そのため、全てのパラメータ範囲における、点推定、区間推定、仮説検定から構成される統計的推測理論が構築されていなかった。この非正則性の問題は、GEV 分布が発案された 1955 年頃から 50 年以上にわたって JASA 誌や Technometrics 誌といった統計学・信頼性・品質分野におけるトップジャーナルを中心に議論されてきた問題だが未解決であった。このような状況の下で、申請者は、この非正則問題を解決した極値理論に基づく統計的推測理論の研究に従事してきた。

極値統計では、一定区分毎の最大(小)値として集められた極値データを用いて解析が行われる。つまり、得られたデータをすべて用いるのではなく、その一部のみを利用する。そのため、データ数が極めて少なくなる、という統計解析における致命的な問題「小標本問題」が発生する。一方で、近年、計測技術、及び情報技術の高度な発達により、対象とする事象だけでなくそれに至るまでの過程で得られるデータ「モニタリングデータ」が得られるようになってきた。対象とする事象に関するデータ(例えば、故障)のみでなく、モニタリングデータ(例えば、劣化や強度)を用いると情報が増え、より精度の高い解析を行うことができることが期待される。

しかし、上記で説明したように極値データに基づく統計的推測理論においては非正則問題があり、また、モニタリングデータに基づく統計解析手法においては、未だ、極値理論のような一般化された理論が確立されていない。そのため、モニタリングデータにおける統合的な統計的推測理論の構築も行われていない。

## 2. 研究の目的

本研究は、モニタリングデータに基づく極値理論とその統計的推測理論の構築を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

まず、モニタリングデータに基づく極値理論の整理を行う。次に、モニタリングデータに基づく極値理論における極限分布である一般化パレート分布について、非正則性を回避した、全てのパラメータについて一意性を持つ推定量の導出、漸近理論の導出、並びに漸近理論に基づく、区間推定と仮説検定の方法論を構築する。

次に、対象を多変量のケースに広げ、多変量の極値理論の整理を行う。そして、モニタリングデータに基づく極値理論における極限分布である、多変量一般化パレート分布についての理論整備も行う。さらに、モニタリングデータに対し、多変量一般化パレート分布に基づく、異常検知手法を構築する。

続いて、モニタリングデータの中でも劣化データに焦点を当て、劣化現象に対する確率過程とその統計的推測手法、更には、加速劣化試験手法についても統一的な方法論の構築を目指し、提案を行う。

また、昨今、重要性が高まっているエネルギー分野における、リチウムイオン電池、太陽光エネルギーも取り上げ、精度の高いモデル構築、推定法の構築についても研究を行う。

## 4. 研究成果

以下の成果が得られた。

- (1) 閾値超過データにおける統合された分布である一般化パレート分布(GPD)において、全てのパラメータ範囲において一意に推定値が求められる推定法に基づく漸近理論の構築とそれに基づく区間推定法、及び仮説検定法を構築した。
- (2) 時間とともに変化するデータ(モニタリングデータ)であり、かつ多変量データに基づく極値理論に関する理論と応用に関する研究を進めた。多変量極値理論において得られる統一分布である多変量一般化パレート分布に基づく異常検知手法を構築した。

- (3) モニタリングデータの一つである劣化データに対し、レヴィ過程の一つである逆ガウス過程の混合変量モデル化を行った。さらに、混合変量逆ガウス過程の最尤推定について、その解の存在と一意性についての定理化と証明を行った。そして、混合変量逆ガウス過程に基づく、加速劣化試験における最適試験計画について、定理化を行った。
- (4) 企業と連携し、モニタリングデータの一つであるリチウムイオン電池の容量維持率に対する劣化現象に対して、レヴィ過程の一つであるウィーナー過程、及びその各種混合変量モデルの構築を進めた。さらに、逐次最適試験に関する研究を行った。
- (5) 企業と連携し、モニタリングデータの一つである太陽光発電における電力量データの統計的モデリングと電力量予測モデルの構築に関する研究を進めた。

これらの成果を、学術論文 9 件、招待講演 10 件、国際会議 12 編としてまとめ、発信した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nezaki Ryo, Nagatsuka Hideki	4. 巻 8
2. 論文標題 New Anomaly Detection Method based on the Multivariate Generalized Pareto Distributions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Total Quality Science	6. 最初と最後の頁 89 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17929/tqs.8.89	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 Takagi Aoi, Ichikawa Ryo, Miyagawa Takeru, Song Jinlan, Yonezu Akio, Nagatsuka Hideki	4. 巻 126
2. 論文標題 Machine learning?based estimation method for the mechanical response of composite cellular structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Polymer Testing	6. 最初と最後の頁 108161 ~ 108161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymertesting.2023.108161	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 Peng Chien-Yu, Nagatsuka Hideki, Cheng Ya-Shan	4. 巻 23
2. 論文標題 Optimum test planning for heterogeneous inverse Gaussian processes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Lifetime Data Analysis	6. 最初と最後の頁 401-427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10985-022-09556-6	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 該当する
1. 著者名 Youhei Tomio, Hideki Nagatsuka	4. 巻 7
2. 論文標題 A Conditional Maximum Likelihood Estimation of the COM-Poisson Distribution and its Uniqueness and Existence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Total Quality Science	6. 最初と最後の頁 137-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17929/tqs.7.137	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 Takuya Fushihara, Hideki Nagatsuka	4. 巻 7
2. 論文標題 New Stochastic Degradation Models Based on the Family of Powered Inverse Gaussian Distributions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Total Quality Science	6. 最初と最後の頁 102 ~ 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17929/tqs.7.102	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 Hideki Nagatsuka and N. Balakrishnan	4. 巻 73
2. 論文標題 Efficient likelihood-based inference for the generalized Pareto distribution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annals of the Institute of Statistical Mathematics	6. 最初と最後の頁 1153 ~ 1185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10463-020-00782-z	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 該当する

1. 著者名 Kodaira Yasuhisa, Miura Tatsuma, Ito Shoma, Emori Kanako, Yonezu Akio, Nagatsuka Hideki	4. 巻 96
2. 論文標題 Evaluation of crack propagation behavior of porous polymer membranes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymer Testing	6. 最初と最後の頁 107124 ~ 107124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymertesting.2021.107124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kenji Fujita and Hideki Nagatsuka	4. 巻 6
2. 論文標題 A Stochastic Degradation Model Based on the Birnbaum-Saunders Distribution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Total Quality Science	6. 最初と最後の頁 1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17929/tqs.6.1	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 Leona Tamaru and Hideki Nagatsuka	4. 巻 4
2. 論文標題 On a Stochastic Degradation Model based on the Generalized Inverse Gaussian distribution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Asian Journal of Management Science and Applications	6. 最初と最後の頁 49-58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/AJMSA.2019.10022919	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22件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Takuya Matsumoto , Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 The Study of Continuous Empirical Characteristic Function Estimation of Stable Distribution Parameters
3. 学会等名 The 21st ANQ Congress 2023 (ANQ2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kohei Fujii , Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 New Proposals of Estimation Method Based on the Empirical Moment Generating Function in the Tweedie Distribution
3. 学会等名 The 21st ANQ Congress 2023 (ANQ2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenji Doi , Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 A New Method of Parameter Estimation for the COM-Poisson Distribution and its Existence and Uniqueness
3. 学会等名 The 21st ANQ Congress 2023 (ANQ2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideki Nagatsuka , Kouhei Fujii
2. 発表標題 Successful Methods of Parameter and Interval Estimation for the Tweedie Exponential Dispersion Models
3. 学会等名 The12th International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideki Nagatsuka , Kenji Doi
2. 発表標題 An Efficient Conditional Maximum Likelihood Method of Parameter Estimation for the COM-Poisson Distribution
3. 学会等名 The12th International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takuya Fushihara, Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 New Proposals of Empirical Methods of Estimation for the Shape Function in Degradation Processes
3. 学会等名 The 19th ANQ Congress 2021 (ANQ2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 Interval estimation and hypothesis testing for the generalized Pareto distribution under non-regularity conditions
3. 学会等名 5th International Conference on Econometrics and Statistics (EcoSta 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 Successful Likelihood-Based Inference for the Generalized Pareto Distribution
3. 学会等名 2021 IEEE 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Nezaki, Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 New Anomaly Detection Method based on Multivariate Threshold Exceedance Models
3. 学会等名 The 19th ANQ Congress 2021 (ANQ2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Renta Yamamoto, Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 New Method of Point and Interval Estimation for the Tweedie Exponential Dispersion Process with All Power Parameter
3. 学会等名 The 19th ANQ Congress 2021 (ANQ2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Motoji Kawai, Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 A study of semi-sequential Bayesian optimal design of accelerated life tests
3. 学会等名 The 19th ANQ Congress 2021 (ANQ2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 長塚豪己
2. 発表標題 一般化パレート分布の統計的推測
3. 学会等名 2021年度 統計関連学会連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoya Sera and Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 A successful Method of Parameter Estimation for Tweedie Exponential Dispersion Models
3. 学会等名 The 18th ANQ Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Fushihara and Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 A New Stochastic Degradation Model Based on the Family of Powered Inverse Gaussian Distributions
3. 学会等名 The 18th ANQ Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Youhei Tomio and Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 Proposal of A Conditional Maximum Likelihood Estimator in the COM-Poisson Distribution and its Uniqueness and Existence
3. 学会等名 The 18th ANQ Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Iwama and Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 Sequential Bayesian Design for Accelerated Life Tests Based on Reinforcement Learning
3. 学会等名 The 18th ANQ Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideki Nagatsuka and N. Balakrishnan
2. 発表標題 On likelihood-based interval estimation methods for the generalized Pareto distribution
3. 学会等名 The Proceedings of Symposium in Reliability Theory and Industrial Statistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Fujita and Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 A New Stochastic Degradation Model Based on the Birnbaum-Saunders Distribution
3. 学会等名 Asian Network for Quality (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 On A Robust Statistic for Scale and its Application in Engineering
3. 学会等名 Fifth International Conference on the Interface between Statistics and Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Nagatsuka
2. 発表標題 On inference for the generalized Pareto distribution
3. 学会等名 The 28th South Taiwan Statistics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Nagatsuka and N. Balakrishnan
2. 発表標題 On a general framework of the inference for the generalized Pareto distribution
3. 学会等名 The 11th International Conference on Mathematical Methods in Reliability (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Nagatsuka and N. Balakrishnan
2. 発表標題 Point and interval estimation for the generalized Pareto distribution
3. 学会等名 International Workshop on Survival and Reliability Analysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Research Map  
<https://researchmap.jp/read0140964>  
 中央大学 研究者情報データベース  
[https://c-research.chuo-u.ac.jp/html/100003200\\_ja.html](https://c-research.chuo-u.ac.jp/html/100003200_ja.html)  
 中央大学 長塚豪己研究室  
<https://nagatsuka.r.chuo-u.ac.jp/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
カナダ	McMaster University			