

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：85406

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K12986

研究課題名（和文）トレンド再生過程を用いた小型船舶機関の年齢特性の把握及び予防保全方策への応用

研究課題名（英文）A study on the application of age properties of small vessel engines with the trend renewal process to preventive maintenance policy

研究代表者

齋藤 靖洋 (Saito, Yasuhiro)

海上保安大学校（国際海洋政策研究センター）・国際海洋政策研究センター・准教授

研究者番号：20787254

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、船舶事故の多くを占める小型船舶の機関故障を回避するための予防的仕組みを提供し、海難発生確率を低下させることを目的として、故障時刻列データの解析を実施した。実際の機関故障データを収集した上で船舶の運航時に確率的に発生する機関故障のふるまいを推定し、船舶使用者にとって最適な予防保全スケジューリング問題を定式化して、その経済的効率性について検証した。最終的に、複数の推定手法を用いて、最適な予防保全タイミングを導出する方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の提案手法は、小型船舶の事故予防の観点から現状では画一的に導入されている定期的な検査と比較して、各小型船舶機関の運航環境等を考慮した細やかな予防保全のタイミングを船舶利用者に示すことにより、機関故障を原因とする海難発生確率の低下に繋がる可能性を持つ。更に、本研究においてモンテカルロシミュレーションを通じて得られた未来の故障発生タイミングに関する情報は、目撃情報の乏しい海洋における捜索救助理論の分野においても活用が期待されるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, I analyzed the failure time series data with the aim of providing a preventive scheme for avoiding engine failures of small boat, which account for most of the maritime accidents, and reducing the probability of maritime accidents. After collecting actual engine failure data, I estimated the behavior of engine failure that occurs stochastically during ship navigation, formulated the optimal preventive maintenance scheduling problem for ship users, and verified its economic efficiency. Finally, some methods to derive the optimum preventive maintenance timing using various estimation approaches are proposed.

研究分野：信頼性工学

キーワード：故障時刻データ トレンド再生過程 予防保全計画問題 モンテカルロシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

海上保安庁が発表した『平成 26 年における海難の現状と対策について』によれば、例年、船舶事故のうちプレジャーボートが事故全体の 4 割以上を占めており、中でもここ数十年の間で事故原因の一位にランクづけられているのは機関故障である[参照]。陸上における自動車とは異なり、海という自然に強く影響を受ける環境での機関故障は、船舶使用者の生命危機に直結する恐れが多分にある。これらの事情から、プレジャーボート等の小型船舶には、機関故障を回避するための予防的仕組みとして、定期的(3年に1回)に検査を受けることが義務付けられている。これら定期的な検査の間隔は、従来の事故発生状況を踏まえて設定されたものであるが、日本周辺の海上模様はその地域毎の特色を持っているものであり、航行環境の異なる各種小型船舶の検査間隔を一律に設定することが必ずしも最良であるとは言い難い。また小型船舶の船長は、その発航前に必ず自船の検査を実施しなければならないという義務を負っている。しかしながら、海難事故の約 30%は発航前検査が不十分なことによって発生していると言われており、発航前検査を適正に行うことにより多くの海難事故を未然に防ぐことができる中で、十分に実施されているとは言えない現状がある。

小型船舶使用者の身からすれば、事故は稀にしか起こらない事象であることから、どこか他人事であり、また明らかな不調が見られない限りは、故障が顕在化する前に機関の部品を予防的に取替えるといった発想には至らないのが一般的であろう。このような状況から、機関故障による小型船舶事故はなかなか減る気配がなく、ここ数十年横ばいの状態が続いているのに加え、個々の小型船舶利用者に合わせて効果的な対策については、その困難性も相まって、実施が難しい実情にあった。

2. 研究の目的

本研究では第一に、船舶運航中に確率的に発生する機関故障のふるまいを、確率点過程にてモデル化し、その年齢特性を把握することを目的に挙げた。また第二には、効率的な予防保全(予防的修理)方策を提案し、危機的な機関故障の回避を実現する枠組みを提供することを目的とした。具体的には、故障データ解析に用いることが可能な強力な数学モデルであるトレンド再生過程を導入し、船舶使用者にとって最適な予防修理スケジューリング問題を定式化し、その経済的効率性について検証する。これら経済的効率性を小型船舶使用者に対して提示することによって、予防保全を行うことによる経済的利点を理解してもらうことが出来れば、発航前点検等に関しても自ら積極的に実践する風潮を形成することが出来、結果的に小型船舶の機関故障による海難発生確率の低下に寄与できるものと考えた。

3. 研究の方法

(1) 本研究で用いる確率点過程は、任意の時刻における事象の発生しやすいさを表す『条件付き強度関数』によって定義され、時間変化と共に確率的に故障が発生し、故障数が増加していくふるまいを表現することが出来る。年齢特性を把握するための故障データ解析によく利用される確率点過程の代表例として、非同次ポアソン過程(NHPP)や再生過程(RP)がある。前者は、故障した機関に対して必要最小限の修理のみを行う状況を表し、修理後も機関の劣化具合は改善されることなく修理前と変わらない状態を保つ。これとは対照的に後者は、故障した機関を新品に取替えることで、故障が発生するたびに劣化状態を新品同様に戻す現象を表している。しかしながら、実際の故障修理においては、これら両極端な修理効果は現実的とは言えず、特に機関故障の現象を記述するためには上述の確率モデルでは不十分である。これに対して本研究では、上記二つの代表的な確率点過程を特別の場合として含むより一般的な確率点過程であるトレンド再生過程(TRP)を用いて、一般修理と呼ばれる中間的な修理現象を数学的に記述する[参照]。

(2) 本研究を遂行するにあたっての最重要事項として、プレジャーボート等における実際の機関故障データを計測・収集することが挙げられる。本研究では、申請者の所属機関が所有するプレジャーボートの実故障データを解析することにより、海上における船舶機関の年齢特性の把握に努めた。一方で、これらのデータは故障した小型船舶機関から自動的に読み取られ、記録することが出来る訳ではない。実際には、機関故障による海難が発生した場合に、その事故調査に合わせて、小型船舶利用者等からの聞き取り調査などによって得られたものである。現実には、小型船舶利用者自身も自船の機関の基礎情報を全て知っている訳ではないことが多く、一定程度の正確性が担保されたデータの収集が困難であるという特徴を持つ。したがって、従前から蓄積されてきた機関故障データを利用するにあたり、正確なデータの抽出に関するスキームの構築に多くの時間を必要とした。具体的には、過去の膨大な船舶事故概要の記録から必要なデータを抽出し、船舶要目、機関の型式、年代、現時点までの使用期間などを含む船舶機関の故障データを網羅的に収集した。

(3) 次に、確率点過程を用いた年齢特性の把握を行う上で重要なことは、対象とする故障データが従う確率点過程を正確に推定することである。一般的に、故障データに基づいて確率点過程

の推定を行う手法として、パラメトリック推定とノンパラメトリック推定の二種類が考えられる。パラメトリック推定は確率点過程を特徴付ける条件付き強度関数の関数形が予め既知であるという条件の下で、関数形に含まれるパラメータを推定することで確率点過程の推定を行うものである。これは例えば、故障データの解析が頻繁になされており、故障データが従う確率点過程の持つ条件付き強度関数形に対して事前情報が存在し、関数形の特定がなされている場合などに用いられる推定手法である。一方で、ノンパラメトリック推定は、条件付き強度関数の関数形が完全に未知であり、パラメトリック推定とは異なる様々なアイデアを導入することで、データから直接的に条件付き強度関数を推定するものである。

(4) 本研究では、小型船舶の機関故障に対する予防修理スケジューリング問題として、ある周期的時刻毎に取替えを実施する周期的取替え問題を考える。これは任意の時刻における累積故障発生数の期待値を用いて、定常状態における単位時間当たりの総期待費用を導出した上で、それを最小化する最適な周期的取替え間隔を求める問題である。一般修理化における周期的取替え問題を解くためには、上述したいずれの推定手法を適用する場合についても、TRP に基づく期待累積故障数を導出する必要がある。TRP の条件付き強度関数は NHPP の要素である累積トレンド関数と RP の要素である再生分布によって記述され、TRP には、累積トレンド関数を用いて時間スケール変換した後の故障時刻間隔が再生分布に従うという性質がある。したがって、任意の時刻における期待累積故障数は再生関数と累積トレンド関数を用いて表現することが出来る。しかしながら、一般的な再生分布に対しては常に再生関数が陽関数として求められるとは限らない。

(5) 上記を踏まえ、パラメトリック手法においては、均衡分布に基づく再生関数の近似手法を導入することで、任意の再生分布に対して近似解を求める手法を考察した。一般修理下における故障発生事象においては、時間の経過と共に故障は起こりやすくなるものと考えられる。この場合、条件付き強度関数は時間に対して増加傾向を持ち、これを確保するため、トレンド関数及び故障率関数については単調増加であることが望ましい。したがって、パラメトリック手法としては具体的に、単調増加となるトレンド関数としてベキ法則トレンド関数や Cox-Levis トレンド関数を用いることが適切である。また再生関数としては、ガンマ分布や超指数分布を仮定するのが自然である[参照]。ただし再生分布が任意の一般分布である場合、これらガンマ分布や超指数分布の場合と異なり、容易に再生関数が得られるとは限らない。そこで本研究では特に、均衡分布を用いた 3 つの近似再生関数を導入し、その精度に関しても調査した。

(6) 一方でノンパラメトリック手法においては、上述した時間スケール変換後の時刻列が RP に従う性質を利用して、モンテカルロシミュレーションを用いて任意の時刻における期待累積故障数を求めるアルゴリズムを提案することで、問題の解決を図った。具体的にノンパラメトリック推定法の一つ目には、パラメトリック推定より自由度が高くデータによって形状が変化する性質を持つカーネル関数を用いて、条件付き強度関数を表現したカーネル推定手法を用いた。カーネル推定ではバンド幅を適切に設定する必要があり、その設定法としてカーネル関数を用いて推定した条件付き強度関数と故障データの背後にある真の条件付き強度関数の差を最小にする様にバンド幅を決定する『最小二乗クロスバリデーション法』やクロスバリデーションの意味で対数尤度関数（現在の故障時刻列データが推定したカーネル条件付き強度関数から得られる可能性の大小を表す）を最大化する様にバンド幅を決定する『対数尤度クロスバリデーション法』を採用した。更に、ノンパラメトリック推定法の一つ目としては、条件付き強度関数の一部に単調性の条件を与え、その条件の下で対数尤度関数を最大化する『制約付きノンパラメトリック最尤推定』を考察した[参照]。このような複数のノンパラメトリック推定アルゴリズムは、条件付き強度関数の関数形を特定する必要がない大きなメリットを持つ一方で、パラメトリック手法と比較して計算コストが高いというデメリットも存在する。

4. 研究成果

(1) パラメトリック手法に関しては、様々なトレンド関数及び再生関数が陽関数として求められる再生分布を仮定した場合の周期的取替え問題を解くのに加え、真のモデルと上述した 3 つの近似手法を適用した場合の最適周期的取替え間隔の精度についても比較した。各モデルに共通する性質として、単純に最適周期的取替え間隔のみに着目すれば、周期的な取替えに要する費用が大きくなるにつれて最適予防保全間隔が長くなることが確認できた。これは、予防保全の費用が増加した場合、費用の高い予防保全を出来る限り避ける傾向が表れることを意味する。したがって小型船舶の機関故障に関しては、故障発生により小型船舶利用者にどの程度の危機的損失が生じるかを適切に設定することが重要であり、故障発生時のコストと予防保全のコストのバランスによって最適予防保全間隔が決定されると言える。一方でトレンド関数のパラメータ設定に関しては、増加傾向が大きくなるほど、より最適周期的取替え間隔が短くなる傾向にあることが分かった。これは、トレンド関数の増加傾向の大小はそのまま故障数の増減に直結することから、増加傾向が大きいことが故障数の増加を招き、結果として早めの周期的取替えを促す結果に繋がったものと考えられる。したがって、トレンド関数の増加傾向が大きくなる傾向を持つ関数を仮定することにより、小型船舶の機関故障を出来る限り回避する（安全側の）視点に立つ

た運用方法を確立するといった応用も考えうる。

一方、3つの近似手法を用いた場合の精度に関しては、いずれの場合についても、予防保全の費用が大きくなるほど最適周期的取替え間隔の相対誤差は0に近づく傾向にあることが確認できた。このことは、予防保全のコストが故障発生時のコストと比較してある程度の大きさを持つ場合、3つの近似手法がいずれも周期的取替え問題に関して実用上問題なく採用できる精度を有していることを意味する。最小総期待費用に関しても、概ね最適周期的取替え間隔と同様の傾向が得られており、精度に関しては最適周期的取替え間隔と比較して若干悪くなることもあったが、その差は比較的小さいものであった。したがって、ガンマ分布や超指数分布とは異なり再生関数が陽関数として求められない再生分布に対しても、本研究で考察した近似手法を用いた解法が有益となる場面は少なくないと言える。

(2) ノンパラメトリック手法に関しては、最小二乗クロスバリデーション法(LSCV)及び対数尤度クロスバリデーション法(LLCV)で推定したバンド幅を持つ条件付き強度関数や制約付きノンパラメトリック最尤推定(CNPMLE)を仮定した場合の各種モデルのデータ適合性を測った上で、それぞれの推定法を適用した際の周期的取替え問題の解を比較した。これらのノンパラメトリック手法の中では、再生関数が完全に未知であるにも関わらず、LLCVに基づくノンパラメトリックモデルが真のモデルと非常に近いデータ適合性を示すことが確認できた。また、LLCVに基づくノンパラメトリックモデルは一般修理化における周期的取替え問題に対し、良い推定精度を発揮することを明らかにした。これは故障データ解析が十分に行われておらず、条件付き強度関数の関数形に対する既知の情報が得られにくいと考えられる小型船舶機関の故障解析に対して、きわめて有効であると言える。この結果から、再生分布が完全に未知な場合において、一般修理下における故障発生事象のふるまいを記述する場合、LLCVに基づくノンパラメトリックモデルが用いられるべきであろう。

(3) 今後の展望としては、費用の分散を考慮した周期的取替え問題を考察することや条件付き強度関数に依存する費用構造を導入することが挙げられる。特に後者のモデルにおいては損傷の蓄積程度による一般修理の難易度を表現することが可能となり、より現実的な修理行動下における予防保全行動を考察可能になることが期待出来る。更に、本研究においてモンテカルロシミュレーションを通じて得られた未来の故障タイミングに関する情報は、目撃情報の乏しい海洋における捜索救助理論の分野においても活用可能なものであると考える。具体的には、捜索理論において非常に重要な情報である海難の発生タイミングを、小型船舶の機関故障のタイミングから予測することによって、より精度が高く人命救助の成功確率を高めた捜索救助区域の設定に寄与しうるものである。

<引用文献>

平成26年における海難の現況と対策について、海上保安庁
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/26-6.html>

B. H. Lindqvist, G. Elvebakk and K. Heggland, "The trend-renewal process for statistical analysis of repairable systems," *Technometrics*, 45 (1), 31-44 (2003).

齋藤 靖洋, 土肥 正, "トレンド再生過程に基づく周期的取替え問題," 京都大学数理解析研究所講究録, 2126, 156-165 (2019)

Y. Saito and T. Dohi, "Comparison of kernel-based nonparametric estimation methods for trend renewal processes," *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 26(1), 1-11 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Okuzono Junji, Saito Yasuhiro, Tanaka Takahiro, Nakayama Yoshiyuki | 4. 巻 141 |
| 2. 論文標題 Empirical analysis method for evacuation timing of ships in storm areas | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Safety Science | 6. 最初と最後の頁 105323 ~ 105323 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ssci.2021.105323 | 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 Yasuhiro Saito and Tadashi Dohi | 4. 巻 26 |
| 2. 論文標題 Comparison of kernel-based nonparametric estimation methods for trend renewal processes | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice | 6. 最初と最後の頁 1-11 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 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 Y. Saito and T. Dohi | 4. 巻 印刷中 |
| 2. 論文標題 Parametric Bootstrap Methods for Estimating Model Parameters of Non-homogeneous Gamma Process | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences | 6. 最初と最後の頁 167-176 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 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 - |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 齋藤靖洋 |
| 2. 発表標題 沿岸海域におけるポイントデイトムに基づく捜索計画手法の改良 |
| 3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会－2021年秋季研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 齋藤靖洋, 土肥正 |
| 2. 発表標題 トレンド再生過程に基づく周期的取替え問題 |
| 3. 学会等名 京都大学数理解析研究所研究集会-不確実性の下での意思決定の数理とその周辺 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 齋藤靖洋, 土肥正 |
| 2. 発表標題 トレンド再生故障過程に対する最適周期的取替え方策 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会・信頼性研究会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 齋藤靖洋, 土肥正 |
| 2. 発表標題 ノンパラメトリック最尤推定量を用いたソフトウェアバグの逐次予測 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会・信頼性研究会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 齋藤靖洋, 土肥正 |
| 2. 発表標題 トレンド再生過程に基づくソフトウェア信頼性モデル |
| 3. 学会等名 京都大学数理解析研究所研究集会--不確実性の下での意思決定理論とその応用 |
| 4. 発表年 2017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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|