

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04992

研究課題名（和文）大規模災害による被害最小化と保全費用効率化を考慮した最適保全方策のモデル化と応用

研究課題名（英文）Modeling and application of maintenance policies for large-scale disasters which minimize the loss cost and improve efficiency of maintenance one

研究代表者

水谷 聡志（Mizutani, Satoshi）

愛知工業大学・経営学部・教授

研究者番号：40469060

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）：オーバータイム取替方策に対して二つの故障モードを考慮したモデルを提案した。二つの故障モードとは、発生したならば即時に取替を実施するユニット故障と発生したとき小修理を実施する小故障である。また、 n 個のユニットから構成されるシステムに対し、予防保全可能な時刻を考える方策を提案した。また、信頼性理論における保全方策の比較検討に関する洋書 "Which-Is-Better (WIB): Problems in Reliability Theory", Springer (2023.6) (Satoshi Mizutani, Xufeng Zhao, Toshio Nakagawa)を執筆・出版した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多発する大規模な自然災害に対応するため、設備の強度を向上させるといった対策の他に、保全取替を適切に計画し実際に実施することも重要である。このように、災害対策は様々な要因を考慮する必要がある。とくに経済性に関しては短期的視野に陥ることがないようにしなければならない。信頼性理論は、様々な災害などのリスクに対し、稼働率や平均故障時間(MTTF)などの評価指標とその計算方法などを提案してきた。これらの研究成果は、災害に対応する保全計画を立案するための理論的基礎として有用である。また、具体的に数値例を上げて具体的な保全計画を立てる事ができる。

研究成果の概要（英文）：We proposed some models for overtime maintenance policy with two failure modes. One of the failure modes is unit failure at which the unit is replaced when the unit fails, and the other is minimal failure at which the unit is repaired when the unit fails. Further, we consider optimal preventive maintenance time for reliable system consisted of n unit. We wrote foreign book titled "Which-Is-Better (WIB): Problems in Reliability Theory", Springer (2023.6) (Satoshi Mizutani, Xufeng Zhao, Toshio Nakagawa) of comparison of stochastic models in reliable theory of maintenance policy.

研究分野：信頼性理論

キーワード：信頼性理論 保全方策 取替問題 点検方策 確率モデル WIB 問題 ランダムk-out-of-nシステム

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

(1) 多発する大規模な自然災害に対応するため、設備の強度を向上させるといった対策が考えられるが、その他に保全取替を適切に計画し実施することも重要である。2003年8月のアメリカ・カナダの大停電や2011年の大震災における原発非常用ディーゼル発電機の停止、2019年台風15号、19号による大規模停電などは、障害の予測と保全計画の不備が大原因の一つと考えられる。しかし、十分な保全の実施は、経済的な負担が大きいため予算が通らない可能性がある。そのため、保全費用と障害が発生した場合の損害費用とのトレードオフを考慮した保全計画モデルを構築する必要がある。

(2) 信頼性理論における保全方策には、多くのモデルが存在する。例えば、定期保全方策、ブロック保全方策、定期点検方策などがある。また、何回かの衝撃が繰り返し発生するとき、その損失が累積してシステム故障につながる累積損傷モデルがある。そのため、それらの保全方策のうち、どの方策を選んで保全計画を立てるかが問題になる。また、そのための数値計算手法を開発する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 多発する大規模な自然災害に対応するため、保全取替を適切に計画し実施することが重要である。近年多発している自然災害において、被害が拡大した原因の一つとして、障害の予測と保全計画の不備が考えられる。しかし、十分な保全の実施は、経済的な負担が大きいため予算が通らない可能性がある。そのため、障害が発生した場合の損害費用とのトレードオフを考慮した保全計画モデルを構築する必要がある。とくに、マルコフ過程、再生過程などの確率過程論を応用したモデルを構築する。

(2) 何回かの衝撃が繰り返し発生するとき、その損失が累積してシステム故障につながる場合がある。このような現象を分析するモデルとして、累積損傷モデルがある。衝撃の発生間隔と、それによる損傷量が確率分布に従うと仮定し、累積損傷量がある閾値を超えるまでの期待時間、期待費用、最適保全時間を分析する。この累積損傷モデルを応用し、自然災害など大規模な障害を与える可能性がある衝撃を考え、社会インフラなどの保全計画に応用する。

(3) 信頼性理論を応用した多くの取替保全モデルが存在する。例えば、保全する時刻をあらかじめ決めておく、または衝撃が一定する発生したならば取替を実施するなどがある。そのため、それらの保全方策のうち、どの方策を選ぶかが重要になる。そのためには、各モデルの期待費用や信頼度などを、具体的な数値例を挙げて計算する必要がある。モデル比較のため、どのような視点でモデルを比較するかについて考える必要がある。また、そのための数値計算手法の開発も重要である。本研究では、取替保全モデルにおいて、どのモデルを選べばよいかを比較し、計算するための手法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 確率過程論におけるマルコフ過程、再生過程、セミマルコフ過程などの確率過程を応用し、さまざまなシステムに対する保全・取替・点検の方策をモデル化する。モデルには、一定の計画時刻に取替を実施する年齢取替、同様に一定の時刻に取替を実施し故障が発生しても即時の取替を実施しないブロック取替など様々なものがある。それらのモデルに対して、期待費用、信頼度、故障率、稼働率などの指標を与える式を解析的に求める。とくに累積損傷モデルは、損傷量が時間の経過に従って累積していく累積損傷過程を応用する。この累積損傷モデルは、自然災害などの衝撃などに応用できる。

(2) (1)で求めた指標を最適化するパラメータを計算するための式を求める。指標の例として単位時間当りの期待費用、稼働率などが挙げられる。期待費用は最小化、稼働率は最大化する。パラメータの例としては、保全取替の時刻、取替を実施する前の修理の回数、点検間隔などが挙げられる。例えば、単位時間当りの期待費用に対して、パラメータで微分して、0に等しいとおいた式が、期待費用を最小化する。

(3) (2)で導出した式を満たす最適なパラメータを、数値例として計算する。その他のパラメータには、故障率、取替費用などがある。最適なパラメータを計算するには、主にニュートン法、二分法などの非線形計画法の手法が用いられる。場合によっては、多変数に対する数値計算手法が必要となる。

(4) 様々な保全方策を比較検討する。まず、解析的に二つの方策を比較し、何等かの定理を得る。例えば、年齢保全方策とランダム取替では、費用が同じならば、年齢取換の方がよい結果が得られている。さらに、保全費用などのパラメータが等しい場合のみ比較するのではなく、異なる場合についても比較する。保全方策が異なると保全費用が異なる可能性があるからである。理論的だけでなく、数値例を挙げて比較検討する。この場合、適切な計算手順を示す必要がある。具体的な数値例に対し、様々なパラメータに対して種々議論する。

4. 研究成果

(1) オーバタイム取替方策に対して二つの故障モードを考慮したモデルを提案した。二つの故障モードとは、発生したならば即時に取替を実施するユニット故障と発生したとき小修理を実施する小故障である。とくに、(i) オーバタイム最早取替方策：ユニットは時刻 T 後の最初の小故障発生または K 回目の小故障のどちらか早い方、またはユニット故障で取替を実施する。(ii) オーバタイム再遅取替方策：ユニットは時刻 T 後の最初の小故障の発生または K 回目の小故障のどちらか遅い方、またはユニット故障で実施する、といったモデルを検討した。これらのモデルに対し、単位時間当りの期待費用を導出し、最適な取替方策について議論した。

(2) n 個のユニットから構成されるシステムに対し、予防保全可能な時刻 Y_j ($j=1, 2, \dots, N$) を考え、いくつかの汎用的な取替方策を提案した。具体的には、次の拡張年齢取替問題を考た：(a) Replacement First, (b) 拡張 Replacement Last, (c) Replacement Last, (d) 拡張 Replacement Last. また、故障分布が単一ユニットシステムとランダム K -out-of- n システムの場合に応用した。ランダム K -out-of- n システムは、直列、並列システムなどの冗長システムを表現することができる。

(3) 複数のユニットからなるシステムに対して、ランダムな取替時刻が複数存在する場合を考えた。ランダムな取替時刻とは、仕事の完了した時刻、燃料が切れた時刻、自然災害があった後などが考えられる。このようなシステムの取替方策として年齢取替方策を拡張した (a) Replacement First, (b) 拡張 Replacement First, (c) Replacement Last, (d) 拡張 Replacement Last を提案した。これからの方策に対して、直列システムやランダム K -out-of- n システムの具体例として 4 ユニット並直列システムなど、いくつかの冗長システムへの応用を検討した。

(4) 逐次点検方策に対する拡張モデルについて、単位時間当りの期待費用を最小にする最適な点検時刻を計算する方法を議論した。最初に基本的な逐次点検方策のモデルを取り上げた。単位時間当りの期待費用を最小にする最適な点検時刻について、故障分布がワイブル分布に従うとき、数値例を挙げて議論した。

(5) 年齢取替方策とランダム取替を最適な単位時間当りの期待費用を基準として比較するとき、予防保全費用が等しいならば、年齢取替の方がよいという結論はよく知られている。しかし、予防保全の費用が等しくない場合は、この限りではない。そこで予防保全費用について、ランダム取替のものが年齢取替のものよりも小さくなる場合について検討した。とくに、 N 回の仕事完了で取替を実施するランダム取替方策、時間の閾値 T をもつオーバタイム取替方策についても検討した。

(6) 信頼性理論における保全方策の比較検討に関する洋書 "Which-Is-Better (WIB): Problems in Reliability Theory", Springer, Switzerland (2023.6) (著者 Satoshi Mizutani, Xufeng Zhao, Toshio Nakagawa) を執筆・出版した。様々な取替方策があるが、それらの比較検討を理論、数値例の両面が議論し、得られた結論は公式の形でまとめている。通常、省略されることの多い証明なども付録においてまとめている。確率モデルを実際の問題に応用する必要性が増加している現在、本書の意義は大きく、信頼性以外の諸分野における問題解決にも参考するであろう。

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 4件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Mizutani Satoshi, Zhao Xufeng, Nakagawa Toshio | 4. 巻 214 |
| 2. 論文標題 Age and periodic replacement policies with two failure modes in general replacement models | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Reliability Engineering & System Safety | 6. 最初と最後の頁 107754 ~ 107754 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.res.2021.107754 | 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 S. Mizutani, D. Wenjie, X. Zhao and T. Nakagawa | 4. 巻 15 |
| 2. 論文標題 Preventive replacement policies with products update announcements | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Communication in Statistics-Theory and Methods | 6. 最初と最後の頁 3821-3833 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/03610926.2019.1710762 | 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 S. Mizutani, D. Wenjie, X. Zhao and T. Nakagawa | 4. 巻 E103-A |
| 2. 論文標題 Which Replacement Is Better at Working Cycles or Number of Failures | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences | 6. 最初と最後の頁 523-532 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2019EAP1049 | 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 S. Mizutani, X. Zhao and T. Nakagawa | 4. 巻 29 |
| 2. 論文標題 Optimal Inspection Policies to Minimize Expected Cost Rates | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0218539322500012 | 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 |

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 水谷聡志, 中川覃夫 |
| 2. 発表標題 拡張年齢取替方を適用した冗長システムの数値例による比較考察 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, 信頼性研究会 (2021-05-28) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 水谷聡志, 中川覃夫 |
| 2. 発表標題 単位時間当りの期待費用を最小にする点検方策の数値解析 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, 信頼性研究会 (2021-07-17) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 水谷聡志, 中川覃夫 |
| 2. 発表標題 単位時間当りの期待費用を最小にする逐次点検時刻計算手法 |
| 3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 2022年春季発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Toshio Nakagawa |
| 2. 発表標題 Nine Memorial Research Works |
| 3. 学会等名 The Reliability and Maintenance Engineering Summit 2021 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Satoshi Mizutani |
| 2. 発表標題 Replacement First and Last Policies With Random Times for Redundant Systems |
| 3. 学会等名 The Reliability and Maintenance Engineering Summit 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Satoshi Mizutani, Xufeng Zhao, Toshio Nakagawa |
| 2. 発表標題 Optimal Inspection Policies Minimizing Expected Cost Rates |
| 3. 学会等名 26th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Mizutani Satoshi, Zhao Xufeng, Nakagawa Toshio |
| 2. 発表標題 Random Replacement Policies for Two Failure Modes |
| 3. 学会等名 The 9th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 水谷聡志, 中川覃夫 |
| 2. 発表標題 二つの故障モードを考慮したオーバータイム取替方策 |
| 3. 学会等名 日本OR学会2020年度春季研究発表会 (アブストラクト集) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 水谷聡志, 中川暲夫 |
| 2. 発表標題 ランダムK-out-of-nシステムを応用した冗長システムに対する保全方策 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, 信頼性研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 水谷聡志, 中川暲夫 |
| 2. 発表標題 単位時間当りの期待費用を最小にする逐次点検時刻計算手法 |
| 3. 学会等名 日本OR学会2022年度春季研究発表会 (アブストラクト集) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 水谷聡志, 中川暲夫 |
| 2. 発表標題 期待費用が年齢・定期取替と等しくなるランダム取替の保全費用 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, 信頼性研究会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 S. Mizutani, X. Zhao and T. Nakagawa |
| 2. 発表標題 Equilibrium Maintenance Costs between Random and Non-Random Replacements |
| 3. 学会等名 27th ISSAT International Conference Reliability and Quality in Design (ISSAT 2022) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 X. Zhao, L. Wang, S. Mizutani and T. Nakagawa |
| 2. 発表標題 Optimal Replacement Policies with Deviation Times for Cumulative Damage Processes |
| 3. 学会等名 The Reliability and Maintenance Engineering Summit 2021 (RMES 2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計4件

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 Satoshi Mizutani, Xufeng Zhao, Toshio Nakagawa (Eds. K.B. Misra) | 4. 発行年 2021年 |
| 2. 出版社 Springer | 5. 総ページ数 809 |
| 3. 書名 Handbook of Advanced Performability Engineering (chapter 23: WIB (Which-Is-Better) Problems in Maintenance Reliability Policies) | |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Misra, Krishna B. (Ed.) | 4. 発行年 2021年 |
| 2. 出版社 Springer | 5. 総ページ数 811 |
| 3. 書名 Handbook of Advanced Performability Engineering | |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Satoshi Mizutani, Xufeng Zhao, Toshio Nakagawa | 4. 発行年 2023年 |
| 2. 出版社 Springer | 5. 総ページ数 287 |
| 3. 書名 Which-Is-Better (WIB): Problems in Reliability Theory | |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 (Eds) Mitsutaka Kimura, Satoshi Mizutani, Mitsuhiro Imaizumi, Kodo Ito | 4. 発行年 2023年 |
| 2. 出版社 CRC Press | 5. 総ページ数 372 |
| 3. 書名 Reliability and Maintenance Modeling with Optimization: Advances and Applications | |

〔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 | 中川 寛夫 (Nakagawa Toshio) (60076544) | 愛知工業大学・経営学部・研究員 (33903) | |

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