

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25750121

研究課題名(和文)変動要因による非定常劣化モデルに基づく最適保全方策に関する研究

研究課題名(英文)Optimal maintenance policy for non-stationary deteriorating systems subject to varying factors

研究代表者

金路(JIN, LU)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：00436734

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では劣化過程が様々な環境要因の影響を受けて変化する非定常なシステムを対象として、保全方策の最適化問題の研究を進めた。そして最適保全方策がコントロールリミットポリシーに限られるための十分条件を得た。コントロールリミットポリシーとは劣化状態の観測値、使用・環境条件、保全履歴等の全ての情報を集約された情報群に関し、保全行動の切り替え点が高々数回のみでの保全方策であり、最適化の際に考え得る莫大な方策数を有限の方策数に限定できる。さらに、保全方策の最適解を提示するアルゴリズムを提案し、実際の事例への適用を可能にした。

研究成果の概要(英文)：This project investigates the optimal maintenance decision-making problem for deteriorating systems operating in a variable environment with selectable operations. Since there are strong dynamic interactions among a deteriorating system, its surrounding environment, and the operation being executed, this project formulates the optimal decision-making problem for this system as a non-stationary Markov decision process. The structural properties of the resulting optimal expected cost function are examined, and the optimal maintenance policy is found to be given by a control limit policy under certain conditions. Based on the obtained control limit structure, an algorithm is provided for searching the optimal maintenance policy for a deterioration system under a varying environment. Such maintenance policy enhances the dynamic decision-making process for deteriorating systems operating in a variable environment, and supports the implementation of a system-specific maintenance plan.

研究分野：信頼性工学・保全性工学

キーワード：信頼性 保全性 安全性 最適方策

1. 研究開始当初の背景

原子炉や航空機など、複雑なシステムを安全に運用するために、状態監視保全技術が必要不可欠である。状態監視保全における最適保全方策の問題は、部分的に観測可能なマルコフ決定過程を用いて定式化され、50年以上にわたり、数多くの研究者により研究が続けられてきた。従来の状態監視モデルは様々な要因の対象システムへの影響を考慮せず、システムの劣化を定常とする第I世代・第II世代モデルである。しかし現実問題では、対象システムが常に一定な条件の下で稼働するとは限らない。例えば、システムの制御などに用いる電子機器は、高温高湿な環境下では劣化が加速される。そのため温度や湿度の季節ごとの変化により劣化の進行は異なる。従って、それらを含む仕様・環境条件などのシステムの劣化への影響の評価と、それに基づく最適保全方策の立案を行うために、様々な要因からのシステムの劣化への影響を考慮できる状態監視モデルの構築と、その下での最適保全方策の検討が必要となる。

表1 状態監視モデルの遷移

	第I世代 (1960's ~)	第II世代 (1980's ~)	第III世代 (2010's ~)
モニターによる 状態監視	完全	不完全	不完全
様々な要因からの システムへの影響	なし	なし	あり
システムの劣化	定常	定常	非定常

2. 研究の目的

システムの状態や使用・環境条件などのとりまく要因を監視し、適切な保全を適切な時期に施す状態監視保全の方策を確立し、事故や故障を未然に防止することが本研究の最終目的である。そのために、劣化メカニズムが様々な要因の影響を受けて変化する非定常なシステムを対象とした第III世代の状態監視モデルを構築し、その最適保全方策の単調性に関する検討及びその実用性の検証を本研究目的とする。具体的には、最適保全方策がコントロールリミットポリシーで与えられる為の条件を究明し、その後、研究成果の実用性を事例にて検証する。コントロール

リミットポリシーとは劣化状態の観測値、使用・環境条件、保全履歴等の全ての情報を集約された情報群に関し、保全行動の切り替え点が高々数回のみの方策であり、最適化の際に考え得る莫大な方策数を有限の方策数に限定できる。最適保全方策をコントロールリミットポリシーに限定させることにより、異なる状況に合わせて、最適な保全方策の決定が容易になり、社会的に大きな意味を持つ。

3. 研究の方法

システムをトラブルなく稼働させ続けるには、製造・構築時の信頼度の確保とともに、その状態を継続的に監視してトラブルが発生する前に適切な保全を実施することで高いアベイラビリティを確保する状態監視計画保全が必須となる。そしてその保全行動は、将来に渡って発生する費用を最小にするように、合理的に選択されるべきである。この合理的な保全行動の選択の定め方を、最適保全方策という。

最適保全方策についての研究は大きく、解析的にその性質を論じる研究と数理計画法によって改善解を提供する2つに分かれる。前者の研究の多くは、対象システムの劣化や取り巻く環境などの状態の変化過程に定常性を仮定して、一定の方策のクラスの最適性を解析的に論じてきた。しかし現実には、対象システムの状態変化は、システムの年齢、取り巻く環境や操作条件の違いなど、様々な要因の影響を受けて変化する可能性がある。また後者は、数理計画法の適用によって最適保全方策を提示するもので、状態の変化過程に定常性を仮定する必要はなく、現状と比べて改善しているかもしれないが、得られた方策が最適とは保証されない。本研究は、この最適化問題に対して、前者の立場から、変化過程のモデルを非定常なモデルに拡張しつつ、最適保全方策の性質を明らかにすることを目標としている。これは後者の研究に対し

ても、最適化アルゴリズムの改善、また従来の解の最適性を保証する貢献が期待される。

我々の目的は、システムの状態とそれを取り巻く使用・環境条件などの要因の監視に基づいて、保全行動とその実施時期を将来に渡って発生する費用を最小にするよう合理的に定める状態監視保全の方策を確立すること、そしてシステムの故障とその故障が引き起こす事故を未然に防止することである。そのため本研究では、表1の第Ⅰ・第Ⅱ世代モデルを拡張して、様々な要因によるシステムの劣化への影響を考慮する第Ⅲ世代モデルを構築し、そのモデルの下での状態監視保全における最適方策の性質について研究する。具体的には、システムの劣化に影響する要因を定常と非定常に分類し、監視装置（以下モニターという）による状態監視が完全と不完全に分けて、それぞれの場合に対して、次の研究課題を進めてきた。

- 1) 第Ⅲ世代状態監視保全モデルを構築して、最適保全方策がコントロールリミットポリシーの中のみ限定しうるためのシステムの劣化メカニズムの条件、及びモニターの設計条件を明らかにする。
- 2) 得られた条件の必要十分性の検討(更に緩める可能性の確認)を検討する。
- 3) 実例や実データに適用して、成果を検証し、現場へ適用を試みる。

4. 研究成果

本研究を通して、表1に掲げた第Ⅲ世代のモデルの構築を目指して、従来は定常な劣化過程の下で研究されていた最適保全方策の問題を、非定常過程の場合に取り組み、研究を推進した。

ひとつ目の成果は、劣化の進行への取り巻く環境の影響が大きいシステムのための最適保全方策の導出である。環境を定常マルコフ過程、劣化を環境に依存する非定常マルコ

フ過程でそれぞれモデル化することにより、環境状態とシステムの劣化状態の双方に関するコントロールリミットポリシーが最適解となるための条件を平成25年度に与えた。この成果は、異なる使用・環境条件等に合わせた適切な保全行動を、目的関数の評価をし直すことなく定めることを可能にする。これにより、効果的な状態監視保全の実装が期待できる。

2つ目の成果は、劣化の進行が年齢による変化が大きいシステムのための最適保全方策の導出である。そのようなシステムをエイジングシステムと呼んで、非定常マルコフ過程でモデル化した。そして、保全行動が稼働継続と取替の2つの場合を想定して、状態が完全に観測される場合に、2次元のコントロールリミットポリシーが最適方策を与えるための十分条件を平成26年度に示した。ひとつ目の成果と同様に、この成果も最適保全方策の事前の導出を可能にする。

続いて、エイジングシステムの状態観測が不完全な場合を、観測確率行列を伴う非定常な部分観測マルコフ決定過程でモデル化して、2次元のコントロールリミットポリシーが最適方策を与えるための十分条件を平成27年度に示した。エイジングシステムは発電プラントの大型変圧器、橋梁などの社会インフラを含んでおり、2次元のコントロールリミットポリシーがそれらの保全への指針を与えることが期待される。また工学以外の加齢による影響を受ける医療や生体分野への適用も期待を寄せたい。

以上の成果は、保全方策の最適化問題の解をそれぞれのコントロールリミットポリシーの性質を持つ方策のみから探せば良いことを保証する。これらの性質を活用した保全方策の最適解を提示するアルゴリズムを平成28年度に提案し、実際の事例への適用を可能にした。

3つ目の成果は、状態監視に点検を要する

システムのための、最適な点検計画の導出である。通常は一定間隔の完全点検を用いているところに、完全点検の間にコストは低いが高不具合の発見確率も低い不完全点検を適切な頻度で加えると、システムの総費用を軽減できることを示した。この成果は、システムの状態が正常と隠れ故障の2状態の場合に限られ、まだ数値的な成果の段階でもある。定期点検と状態監視保全を併用する保全方策の問題という保全分野での新しい挑戦を見つけ、この四年間の研究成果を今後の新しい課題へと繋げることができた。今後この問題については引き続き取り組んでいきたい。

これらの成果はそれぞれ、国際会議で発表するなど議論を重ね、得られた意見を反映して論文としてまとめて投稿・掲載した。得られた成果を社会に発信できたことを、本科研費の援助のおかげと感謝する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- 1) Jin, L., Bayarsaikhan, U. and Suzuki, K.: Optimal Control Limit Policy for Age-dependent Deteriorating Systems Under Incomplete Observations, *Journal of Risk and Reliability*, Vol. 230, No.1, pp. 34-43, 2016. (査読あり) DOI: 10.1177/1748006X15589208, 2016.
- 2) Jin, L.: Optimal Decision Policy for Deteriorating Systems with On-line Monitoring in a Variable Environment with Selectable Operations, *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, Vol. 3, 2016. DOI:10.1080/23302674.2015.1074760 (査読あり)
- 3) Jin, L.: Optimal Maintenance Policy for Aging Systems Under Non-stationary Markov Deterioration, *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, Vol.45, No. 4, pp. 65-73, 2015. (査読あり)
- 4) Jin, L.: Optimal Decision Procedure for an Operation-dependent Deteriorating System, *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, Vol. 31, No. 3, pp. 394-404, 2015. (査読あり)
- 5) Jin, L., Miyawaki, K. and Suzuki, K.: Optimal Maintenance Policy for

Partially Observable Markovian Deteriorating System Subject to a Restorable Varying Environment, *Journal of Reliability Engineering Association of Japan*, Vol. 35, No. 3, pp. 177-187, 2013. (査読あり)

[学会発表] (計12件)

- 1) Jin, L. and Yamamoto, W.: Adaptive Age Replacement Using On-line Monitoring, 2016 Global Congress on Manufacturing and Management (GCMM 2016), Zhengzhou, China, 2016. (招待講演) (2016年11月28日)
- 2) Jin, L., Uwano, T. and Suzuki, K.: Maintenance Policies for Multiple-Component Systems under Dependent Markovian Deterioration, The 7th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2016), Seoul, Korea, pp.194-201, 2016. (招待講演) (2016年8月25日)
- 3) Jin, L., Yukimoto, Y. and Suzuki, K.: Age replacement policy under Weibull regression model with measurement errors, the 14th Asian Network for Quality Congress (ANQ 2016), pp.1-10, Vladivostok, Russia, 2016. (査読付き) (2016年9月22日)
- 4) Jin, L.: Optimal Inspection Policy for Scheduled Maintenance of Aging Systems, The 2nd East Asia Workshop on Industrial Engineering (EAWIE2015), Seoul, Korea, pp.1-9, 2015. (2015年11月7日)
- 5) Jin, L., Uwano, F. and Suzuki, K.: Weakly Monotone Policies for Deteriorating Systems with Multiple Dependent Units, the 13th Asian Network for Quality Congress (ANQ 2015), PM-3, pp.1-10, Taipei, 2015. (査読付き) (2015年9月23日)
- 6) Jin, L. and Kashiwai, K.: Optimal Decision Making Problem for Systems Under Multiple Deteriorating Mechanisms, the 16th Conference of the Applied Stochastic Models and Data Analysis International Society (ASMDA 2015), Piraeus, Greece, 2015. (招待講演) (2015年7月2日)
- 7) Jin, L.: Optimal Maintenance Policy for Deteriorating System with On-line Monitoring in Environments and Operating Condition, Proceedings of the 8th International Conference on Mathematical Methods in Reliability: Theory, Methods and Applications (MMR 2015), 2D4, pp.1-8, Tokyo, Japan, 2015. (招待講演) (2015年6月3日)
- 8) Jin, L.: Optimal Decision Policy for

- Non-Stationary Deteriorating Systems, Proceedings of the International Conference on Quality 2014 (ICQ 2014), pp. 750-761, Tokyo, Japan, 2014. (査読付き) (2014年10月21日)
- 9) Jin, L. and Bayarsaikhan, U.: Optimal Maintenance Policy for Age-dependent Markov Deteriorating Systems under Partially Observation, Proceedings of the 6th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2014), pp.200-207, Sapporo, Japan, 2014. (査読付き) (2014年8月23日)
- 10) Jin, L. and Rajapaksha, R. P. D. J.: A Structured Inspection and Replacement Policy for Aging Systems over An Infinite Horizon, Proceedings of the International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS 2014), pp. 1-5, Guangzhou, China, 2014. (査読付き) (2014年8月7日)
- 11) Jin, L. and Bayarsaikhan, U.: Control Limit Policy for Aging Systems Using Markov Decision Process, Proceedings of the 8th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR 2014), pp.149-154, Oxford, UK, 2014. (査読付き) (2014年7月10日)
- 12) Jin, L. and Suzuki, K.: Optimal of Monotone Procedure for Monitored Systems Working Under Variable Operations, the 8th International Conference on Mathematical Methods in Reliability: Theory, Methods and Applications (MMR 2013), pp.156-160, Stellenbosch, South Africa, 2013. (招待講演) (2013年7月1日)

[図書] (計3件)

- 1) Jin, L.: Optimal Inspection Policy for Scheduled Maintenance of Markovian Deteriorating Systems, Statistical, Stochastic and Data Analysis Methods and Applications. Chapter 6 Reliability, Alex Karagrigoriou, Teresa Oliveira and Christos H Skiadas, Eds, pp. 441-454, 2016.
- 2) 金 路: 日本信頼性学会編, 「新版 信頼性ハンドブック」, 第3章12節 保全の理論(II), 日科技連出版社, pp. 31-36, 2014.
- 3) 益田 昭彦, 金 路: 日本信頼性学会編, 「新版 信頼性ハンドブック」, 付録8 信頼性用語対応外国語一覧, 日科技連出版社, 付録 pp. 1-15, 2014.

[解説論文, レビュー論文] (計3件)

- 1) 金 路: 劣化システムの保全計画, 日本

信頼性学会誌「信頼性」, Vol. 39, No. 3, pp. 139-147, 2017.

- 2) 金 路: 変動要因による非定常劣化モデルにおける最適保全方策, 日本品質管理学会誌「品質」, Vol. 45, No. 2, pp. 39-43, 2015.
- 3) 金 路: 状態監視保全における保全方策決定とその最適性, 日本信頼性学会誌「信頼性」, Vol. 36, No. 3, pp. 139-147, 2014.

[その他]

海外招待講演:

- 1) Jin, L.: Adaptive Maintenance Strategy for Deterioration System with Scheduled Maintenance, Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 2016. (2016年12月26日)
- 2) Jin, L.: Flexible Maintenance Strategy for Markov Deterioration System with Scheduled Maintenance, Ewha Womans University Seoul, Korea, 2015. (2015年11月6日)
- 3) Jin, L.: Condition Monitoring Maintenance for Non-stationary Deteriorating Systems, Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 2014. (2014年5月30日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 路 (JIN, Lu)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 00436734