

令和元年6月13日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01284

研究課題名(和文) ベイズ推定によるモニタリング時の定量的破損確率・リスク評価手法の検討

研究課題名(英文) Study of the Evaluation method of PoF and risks from the monitoring data using Bayesian estimation

研究代表者

岩崎 篤 (Iwasaki, Atsushi)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：70361516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではモニタリングによる構造状態評価時の信頼性評価手法として、評価誤差を考慮した破損確率および工学リスクの定量評価手法を提案し、手法の有効性を明らかとした。また、複数の損傷評価問題へと適用し手法の汎用性を明らかとした。提案手法では、ベイズ推定により評価結果から真の損傷寸法分布の推定を行い、破損確率を定量評価する。本研究では同リスク評価手法を用い、評価精度の向上ではなく信頼性を向上させるための損傷同定手法の検討を実施、リスクの低減には破損発生が想定される寸法よりも小さい損傷での評価精度が重要であり、その領域の評価精度を優先することで、リスクが低減可能であることを明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果は、CBM手法としてモニタリングによる構造状態評価を実施した際の、信頼性定量評価手法の提案と実証である。多くの社会資本構造やプラントでは、TBMによる保全が実施されているが、CBM実施により効率的な保全への切り替えが可能な部位が多数考えられる。しかし、モニタリング実施の定量的な信頼性評価モデルが確立されておらず、これが部分導入への妨げとなっている。提案手法はモニタリング結果からの定量的な信頼性評価を可能とする。TBM、CBMを混在させた同一指標による信頼性評価、すなわち両者を混在させた保全計画立案を可能とし、RBM等による保全意思決定の合理化の推進の原動力となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, as a reliability evaluation method at the time of structural condition evaluation by monitoring, a quantitative evaluation method of probability of failure(PoF) and engineering risk in consideration of the evaluation error was proposed. Also, the effectiveness of the method was clarified. Moreover, the versatility of the method was clarified by applying it to several damage evaluation problems.

In the proposed method, the true damage size distribution is estimated from the evaluation result by Bayesian estimation, and the PoF is quantitatively evaluated. In this study, the proposed risk evaluation method was used, and the damage identification method for improving the reliability rather than the damage estimation accuracy was examined. In order to reduce the risk, it was clarified that the evaluation accuracy for damage smaller than the expected size is important and that risk reduction is possible by giving priority to the evaluation accuracy of the area.

研究分野：構造信頼性

キーワード：リスクベースメンテナンス 構造信頼性 破損確率評価 モニタリング ベイズ推定

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

構造にセンサ等を取り付けその自律化をはかる知的構造の一種として構造ヘルスマニタリングシステムがある。構造ヘルスマニタリングシステムとは、センサ情報に基づき、構造状態の評価およびその信頼性評価を行うシステムであり、近年、状態監視型保全(CBM)の一種として社会資本構造や製造施設のメンテナンスへの適用が重要視されてきている。また ICT 技術の進歩により、システム化技術および遠隔計測技術は飛躍的な進歩を遂げており、これまでコストによる問題も含め計測不能であった構造状態の計測や高精度評価を実現してきている。しかしながらそれらは、それぞれ構造の状態推定あるいは作用外力推定の高精度化を行っているに留まっており、構造の信頼性を定量的に評価するモデルの構築が行われていない。そのため、構造ヘルスマニタリングを導入した際の安全面、経済面の影響評価が困難となっている。本研究では、CBM 手法としての構造ヘルスマニタリングシステム実用化のため、センサによる常時計測に基づいた構造信頼性の定量評価を目的とし、常時計測に基づく定量的な破損確率評価法の構築を実施するものである。また、最終的には破損確率と破損影響度の積と定義する工学的リスクの適正化に基づく、保全計画の最適化法への構造ヘルスマニタリング導入の検討を行い、構造ヘルスマニタリングと従来の検査技術を組み合わせることで、最適な検査を実施するための筋道を示す。

2. 研究の目的

本研究は構造ヘルスマニタリングシステムの CBM 手法としての実用化のため、逆問題解析結果の信頼性評価から破損確率を算出する手法の確立を目的としている。TBM では、破損は想定外で速度で損傷が発生・進展した場合に生じるが、モニタリングにより常時状態評価を行う場合、その損傷を過小評価した場合に生じる。本研究では、ベイズ推定による真の損傷寸法の発生率評価に基づき破損確率を算出する手法の提案および有効性の検証を行う。また、確率論的な機器の保全効率化法として RBM が近年着目されている。本研究では、実機での検討結果に基づき、状態計測に基づき破損確率、および工学的リスクの時間的推移を算出する事までを目的とする。

3. 研究の方法

進行ステップは、(1-1)ベイズ推定を用いた真の損傷寸法の発生確率推定および破損確率評価法の検討、(1-2)破損確率を低減する損傷同定手法の検討、(2)RBM への適用試行、(3)他の損傷同定手法への展開である。各年度の実施内容概要を下記に、成果の詳細を4章に示す。

◆平成 28 年度：平成 28 年度は(1-1)を重点的に行い、システム構築および実験的な損傷同定問題への適用から提案手法および構築したシステムの有効性検討を行った。システムは R 言語にて構築し、(i)逆問題解析による損傷評価(ii)ベイズ推定による真の損傷寸法発生率の推定(iii)残留強度分布の推定(iv)限界状態関数法による破損確率評価を行うアルゴリズムの構築を実施した。電気抵抗変化法による複合材料平板の層間はく離同定へと適用し、提案手法および構築したシステムにより、破損確率が評価可能であることの確認を行った。結果、外力より想定される破損開始寸法近傍をより下側の評価結果を得た場合から破損確率が上昇し、損傷寸法の増大に伴い増加、飽和することが確認され、本手法により有効に破損確率が評価可能であることが確認された。また、(2)は実用化のための検討で有り、モニタリング実施時のリスク発生シナリオの検討を行った。一定の損傷寸法以上の評価結果が出力した場合に補修すると考えた場合、損傷の過小評価により事故、損傷の課題評価により不要な検査が生じる。前者の影響度は後者に比べて膨大であり、前者の発生率と影響度の積を事故リスク、後者の積を経済リスクとし、事故リスク一定下で経済リスクを低減する様、損傷同定手法を改善することリスクに基づくメンテナンスに有効であることを示した。

◆平成 29 年度：平成 29 年度は、前年度の継続に加え、(1-2)の検討として、破損確率を低減し、リスクを低減する損傷同定手法の検討を行った。多くの損傷評価法では、損傷が小さい場合から非常に大きい場合までの全領域で評価誤差を低減することが主眼となっているが、リスクを低減するには、全領域の評価精度を向上させるのでは無く、特定の領域の高精度化が重要であると考えられる。本年度の検討では、特定領域の学習データ数を増大させ、その領域の評価精度を改善する重点回帰法を用いた経済リスク低減法の検討を行った。本年度の検討では、1 ピーク型の重み関数を用いることで、破損発生寸法より、さらに小さい領域にピークを設定することで、破損確率を低減し、経済リスクの低減が可能であること明らかとした。また(3)の検討として、ディープラーニングによる損傷同定へと同手法を適用し、提案手法の汎用性を明らかとした。

◆平成 30 年度：平成 29 年度は、前年度の継続に加え、(1-2)の検討として、重点回帰法に用いる重み関数として、複数ピーク型の重み関数の検討を行った。結果小損傷の誤評価が結果として補修対応の閾値を引き上げてしまい、経済リスクだけでなく事故リスクの上昇につながるため、特に小損傷の評価精度が重要であることを明らかにした。また、破損確率が急上昇する損傷寸法領域の高精度化によりさらなる経済リスクの低減が可能であることを明らかにした。また明らかとするため様々な損傷寸法発生分布についての検討を行い、(1-1)の手法の汎用性および重点回帰法によるリスク低減手法の有効性を明らかにした。

また、実環境での腐食評価データでの状態評価および工学的リスクの時間的推移評価を実施

し、同様に小損傷の評価精度を重視した評価をすることが、将来のリスク軽減につながることを明らかにした。

4. 研究成果

4. 1 破損確率評価法 図1に提案する破損確率評価法を示す。初めに学習データをランダムサンプリングし、ブートストラップ法を用いた最尤推定を行い、損傷パラメータの発生率分布の推定を行う。損傷パラメータ発生率分布は図1中の①に示すような横軸は損傷の推定値、縦軸はPDFのグラフとなる。次に、ベイズの定理と②に示すような損傷の発生率分布を用いて真の損傷発生確率推定を行う。真の損傷発生確率分布は③に示すような横軸は損傷の真値、縦軸はPDFのグラフとなる。その後は、損傷寸法から残留強度を推定し、残留強度分布への変換を行う。残留強度分布は④に示すような横軸は残留強度、縦軸はPDFのグラフとなる。最後に破損は外力が残留強度を超えた時に生じるため、RSモデルから⑤に示す破損確率評価を行う。提案手法により、図2に示す様な損傷寸法評価結果に対する破損確率を得られる。なお、外力は損傷平均15mmで破損が発生するよう仮定した。外力より想定される破損開始寸法近傍をより下側の評価結果を得た場合から破損確率が上昇し、損傷寸法の増大に伴い増加、飽和する結果となっている。

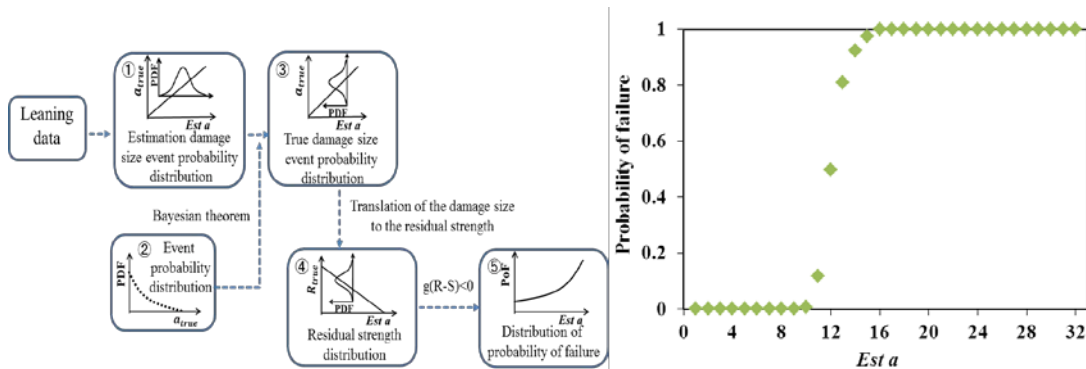


図1 ベイズ推定を用いた破損確率評価モデル 図2 得られた同定結果に対する破損確率

4. 2 リスク評価 全体のリスクは事故リスクと経済リスクに分けて考える。事故リスクとは、損傷寸法の過小評価により破損が生じるリスクである。一方、経済リスクとは、損傷寸法の過大評価による不要な補修により、経済的コストが生じるリスクである。図3に全体のリスク評価法を示す。横軸は推定損傷寸法、縦軸は調整前破損確率と推定損傷の発生率の積（以下、調整済み破損確率、 PoF_{adj} ）である。事故リスクは破損確率と補修実行のしきい値とで囲まれた面積で定義され、経済リスクは推定損傷の発生率（ $Po0$ ）と破損確率との差、しきい値とで囲まれた面積として定義される。事故と不要な補修の場合、前者の影響度は後者に比べ膨大であるため、また社会通念上許容可能な事故によるリスクは一定であると考えられるため、事故リスクが一定値となるようしきい値を設定し、経済リスクを低減させる重み関数の検討を実施した。

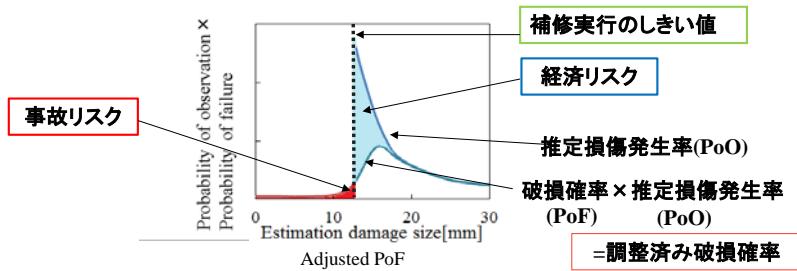


図3 調整済み破損確率と事故リスク及び経済リスクの定義

4. 3 重点回帰法による破損確率評価の高精度化 図1①より学習データから損傷パラメータの発生率分布を推定するとき、任意の大きさの損傷データがサンプリングされやすいように重み関数を用いた重点回帰を行うことで、学習データのサンプリング比率を変更する。サンプリング比率が高く設定された領域では、サンプリングデータ数が増加し、推定精度が向上する。

4. 4 経済リスクへの影響

1) 1頂点型重み関数の経済リスク 図4に重み関数を用いなかった場合の破損確率を示す。横軸は推定損傷寸法、縦軸は破損確率である経済リスクを低減させようと考えた場合、しきい値を右側にシフトさせる必要がある。しきい値は事故リスク一定となるように設定していることから、推定損傷寸法0~9mm近傍にあたる小損傷領域の破損確率を低下させる必要がある。そこで、図5に示すような1頂点型の重み関数を用いた。横軸は損傷寸法、縦軸は確率密度関数で

ある。1 頂点型重み関数の頂点を小損傷領域にあたる $0\sim 9\text{mm}$ 間で頂点を 1mm ずつ移動させ、経済リスクの変化をみた。図 6 に経済リスクの変化を示す。横軸が重み位置、縦軸が経済リスクである。図より損傷寸法 $2\sim 5\text{mm}$ 付近において経済リスクが低減していることがわかる。また図 7 に重み位置 5mm での破損確率を示す。図 4 と比較すると、小損傷領域の破損確率が低下したことで、しきい値が右にシフトしていることがわかる。このことから、少損傷領域への重み付けが経済リスク低減に効果的だといえる。また、図 6 をみると損傷寸法 9mm 以降においても僅かであるが経済リスクの低減がみられる。図 4 よりこの近傍は破損確率が急激に上昇を開始する領域と一致する。つまり、この領域近傍に重みを付け、立ち上がりを右にシフトすることで、さらなる経済リスク低減の可能性がある。

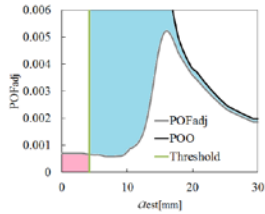


図 4 事故・経済リスク (重点回帰無し)

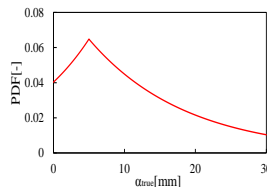


図 5 1 頂点型重み関数

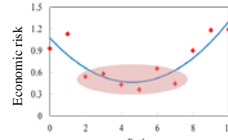


図 6 各頂点位置での経済リスク

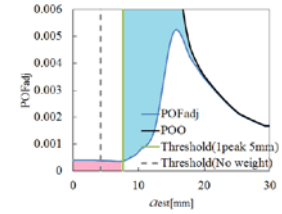


図 7 事故・経済リスク (重点回帰有り)

2) 2 頂点型重み関数の経済リスク 続いて小損傷領域および破損確率上昇領域のどちらともサンプリング比率を高く設定するような重み関数を設定した場合の結果を示す。図 8 に 2 頂点型の重み関数を示す。1 頂点目を 5mm に固定し、2 頂点目を破損確率上昇領域にあたる損傷寸法 $9\sim 15\text{mm}$ の間で 1mm ずつ、重み強さ一定で移動させ、経済リスクの変化を見た。図 9 に経済リスクの変化を示す。1 頂点型 5mm と比較しても、2 頂点型では経済リスクが低減していることがわかる。また図 10 に重み位置 5mm 、 9mm の破損確率を示す。図 7 と比較すると、破損確率の上昇開始が右にシフトしており、しきい値も右にシフトしていることがわかる。この結果より、小損傷領域と破損確率上昇領域の両領域への重み付けが経済リスク低減に有効である。

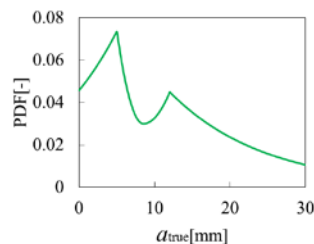


図 8 2 頂点型重み関数

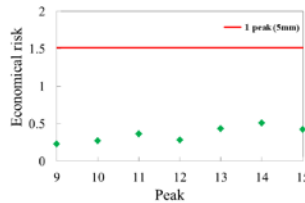


図 9 各第 2 頂点位置での経済リスク

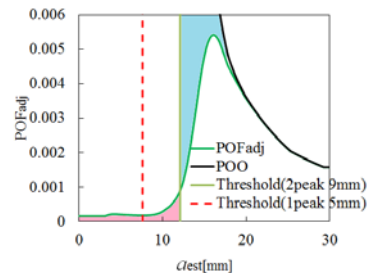


図 10 事故・経済リスク (第 2 ピーク 9mm)

3) 結論 本研究ではモニタリングによる損傷同定を行う際の、工学リスク定量化手法の提案及び、リスクの内経済リスクを低減する損傷同定手法の検討を行った。以下に結言を示す。

□ベイズ推定により、損傷同定結果に対する真の損傷発生率を評価することで、同定結果に対する破損確率を評価可能である。

□想定破損寸法以下の小損傷領域、破損確率が急激に上昇を開始する破損確率上昇領域の両領域に重みを付けることで、経済リスクの低減が可能である。

4. 4 まとめ

本研究ではモニタリングによる構造状態評価時の信頼性評価手法として、評価誤差を考慮した破損確率および工学リスクの定量評価手法を提案し、手法の有効性を明らかとした。また、複数の損傷評価問題へと適用し手法の汎用性を明らかとした。提案手法では、ベイズ推定により評価結果から真の損傷寸法分布の推定を行い、破損確率を定量評価する。本研究では同リスク評価手法を用い、評価精度の向上ではなく信頼性を向上させるための損傷同定手法の検討を実施、リスクの低減には破損発生が想定される寸法よりも小さい損傷での評価精度が重要であり、その領域の評価精度を優先することで、リスクが低減可能であることを明らかとした。研究成果は、CBM 手法としてモニタリングによる構造状態評価を実施した際の、信頼性定量評価手法の提案と実証である。多くの社会資本構造やプラントでは、TBM による保全が実施されているが、CBM 実施により効率的な保全への切り替えが可能な部位が多数考えられる。しかし、モニタリング実施の定量的な信頼性評価モデルが確立されておらず、これが部分導入への妨げとなっている。提案手法はモニタリング結果からの定量的な信頼性評価を可能とする。TBM, CBM を混在させた同一指標による信頼性評価、すなわち両者を混在させた保全計画立案を可能とし、RBM 等による保全意思決定の合理化の推進の原動力となることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

1. A. Iwasaki, Evaluation of the Probability of Failure using Bayesian Theorem for Real-time Condition Monitoring, e-Journal of Nondestructive Testing, 2016, 19990-19994, 査読有
2. 岩崎篤, リスクベースメンテナンスによる保全データの活用と意思決定, 信頼性, 39(3), 2017, 90-961, 査読有
3. 酒井信介, 岩崎篤, 宮崎信弥, 佐々木哲也, 石崎陽一, 局部減肉信頼性管理のための部分安全係数表の作成, 圧力技術, 56, 2019, 66-72, 査読有

〔学会発表〕(計 13 件)

1. A. Iwasaki, Evaluation of Probability of Failure using Bayesian Theorem for Real-time Condition Monitoring, EWSHM2016, 2016
2. A. Iwasaki, K. Kawakata, EVALUATION OF ECONOMICAL RISK USING BAYESIAN THEOREM FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING, NMDFASP2016, 2016
3. A. Iwasaki, Numerical Evaluation of Economical Risk using Bayesian Theorem from Condition Monitoring Data, SMART2017, 2017
4. A. Iwasaki, Bayesian Evaluation of Damage Risk from Monitoring Data, ICMST 2018, 2018
5. 上島清正, 岩崎篤, 定性検査データからのベイズ推を用いた減肉速度推定および破損確率評価の最適化, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016
6. 川方皓平, 岩崎篤, 損傷モニタリング時のベイズリスク評価における重点回帰による破損確率低減, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016
7. 上島清正, 岩崎篤, 定性検査からのベイズ法による耐候性鋼材の腐食速度推定および破損確率評価, 平成 28 年度日本材料学会関東支部学生研究交流会, 2016
8. 岩崎篤, リスクベースメンテナンスと知的構造によるリスク評価, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017
9. 上島清正, 岩崎篤, 鋼材表面状態の定性検査データからベイズ法を用いた破損確率評価, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017
10. 上島清正, 岩崎篤, ランク分け検査データからのベイズ法を用いた破損確率評価におけるランク分割法の影響, 平成 29 年度日本材料学会関東支部学生研究交流会, 2017
11. 岩崎篤, ベイズ法を用いた減肉定性検査データによる将来破損確率評価におけるランク分割の影響, 日本材料学会第 67 期学術講演会, 2018
12. 酒井信介, 岩崎篤, 佐々木哲也, 宮崎信弥, 石崎陽一, 局部減肉健全性評価の信頼性工学的取り扱い, 安全工学シンポジウム 2018, 2018
13. 岩崎篤, モニタリングによる工学リスク評価におけるコストリスク軽減方の検討, 日本材料学会第 68 期学術講演会, 2019

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：算用子 恵慎

ローマ字氏名：Yoshinori Sanyoshi

研究協力者氏名：上島 清正

ローマ字氏名：Kiyomasa Uejima

研究協力者氏名：川方 皓平

ローマ字氏名：Kouhei Kawakata

※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、研究者個人に帰属されます。