

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2013

課題番号：21500273

研究課題名(和文) k-out-of-n型負荷分散システムの研究

研究課題名(英文) On modelling and load allocations of k-out-of-n load sharing systems

研究代表者

山本 渉 (Yamamoto, Watalu)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・講師

研究者番号：30303027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：負荷分散システムを構成するコンポーネントを線形劣化モデルでモデル化し、劣化の傾き(速度)が負荷量のべき乗に比例する場合の最適負荷配分について検討し、べきが1を超えていれば1の時と同様に各コンポーネントが同時に故障するように負荷を配分することが最適な配分であることを一部数値解析を援用して示した。また負荷だけでなく様々な特性値と寿命の関係を幾つかの事例に基づいて検討し、モデルの構築方法および寿命の予測方法について一定の知見を得ることが出来た。本研究により、システムの使われ方と寿命の関係について、一定の進展を見ることが出来たと考える。

研究成果の概要(英文)：This research project aimed to develop the optimal allocation for load-sharing systems, especially with k-out-of-n logics. To do so we also needed to develop modelling approaches for life times based on the records of degradation measurements, usage patterns, cumulative work loads and other variables, continuously monitored on the target systems. For the work load allocations, we investigated the piecewise linear degradation models with slopes which vary depending on the transformation of the loads powered by k. For  $k>1$  cases, we conclude that the optimal allocations are same as cases with  $k=1$ . For  $k<1$  cases, the optimal allocations are strange in that, the total work load must be put on one single component until its failure. We also investigate the modelling and prediction of lifetimes based on the continuously monitored data and developed several methods to predict individual lifetimes.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・統計科学

キーワード：線形劣化モデル 累積損傷則 時間尺度 多変量寿命データ

## 1. 研究開始当初の背景

n 個のコンポーネントからなるシステムの論理構成の一つに、k 個のコンポーネントの故障をシステムの動作停止とみなす、k-out-of-n:F 論理構成 (図 1 参照)がある。複数のセンサを用いた k-out-of-n:F 監視システムの研究が積極的に行われている。この論理構成はまた、並列コンピュータや RAID システム、またウェブサーバなどのネットワークサービスなどでも、負荷分散のモデルとして用いられている。

これらを合わせた負荷分散システムが k-out-of-n 型負荷分散システムである。(参考文献[4-7]) このシステムの性質の検討には、ステップストレス試験と同様、コンポーネントごとに尺度母数族の寿命分布を仮定して負荷量と尺度母数の関係をモデル化する、加速寿命試験モデルを用い、負荷量の変化と寿命分布の関係に累積損傷則を仮定する。(参考文献[8]) システムへの負荷の総量がコンポーネント単位の負荷の制約条件となる点が、ステップストレス試験とは異なるが、図 3 のような区分線形劣化モデルで検討できる点は共通である。

## 2. 研究の目的

本システムの信頼性設計には、コンポーネントごとの寿命分布が既知の場合にはシステム全体の寿命分布の定式化は可能(参考文献[4])だが、一般には  $nC_1 + \dots + nC_k$  の組み合わせでのコンポーネント数の次元の多重積分の数値評価が必要であり、n が大きい場合には現実的でない。

我々はその代わりに、全コンポーネントがある一定の信頼水準に到達するまでの時間をできるだけ長くする負荷配分を提案している。そしてこれまでに、我々は表 1 にまとめたように参考文献[5-7]にて、尺度母数が負荷量に比例して変化する、使用比率加速試験モデルの場合に、最適負荷配分を導出してきた。k=2 の場合には、寿命分布の母数が未知でも、途中のコンポーネントの故障時刻に基づいて、寿命分布を推定しながら負荷配分を調整する方法を提案している。また 1-out-of-n 型負荷分散システムについてのみ、より一般の加速試験モデルについて、最適な負荷配分方式を導出できている。

## 3. 研究の方法

次の目標に対して、各々、次の方針で取り組む。いずれも、解析的に検討・表現できる部分は解析的に進め、やむを得ない段階で数値的な検討とする。

(1) 負荷量と尺度母数の関係を単調非減少関数に拡張して、参考文献[7]で k=1 の場合のみに得られた性質を検討する。まずは下

に凸の場合と上に凸の場合に分けて検討する。次に一般の単調非減少関数に拡張する。

について、ある程度の予想を立てていたが、後述するように、実際には更に狭いべき乗のクラスについてのみ、一定の成果が得られている。については、今後の課題とした。(2) コンポーネントの劣化量もしくは劣化量の代替量が観測される状況をモデル化し、劣化量の断続的な観測に基づく最適負荷配分とその統計的性質を検討する。そのために測定される特性値と寿命の関係をモデル化し、寿命の予測方法を検討する。現在では、母数の最尤推定量に基づくプラグイン予測、設計情報を用いたベイズ予測などを用いたときの、負荷配分方法について検討する予定である。その精度についても検討する。

(3) これまではコンポーネントごとの負荷量に制限を置いてこなかったが、現実には各コンポーネントが対応できる負荷には上限がある。負荷配分の最適化に制約条件が加わり、解析的な検討が難しくなるが、より現実的なモデル化となるため、応用上は重要であり、数値的に検討を行う。

(4) コンポーネントごとの故障(あるいは寿命)が独立でない場合の負荷配分について検討する。これは解析的には困難であり、現実に即したモデルに基づく、数値的な検討を行う。

(5) コンポーネント故障に修理で対応するシステムの修理方策について検討する。たとえば指数分布など、簡単な寿命分布の場合には再生過程の理論に基づく故障間隔の評価、予測などを行う。より一般の分布については、D と同様、数値的な検討となる。

## 4. 研究成果

本研究のコアなモデルは負荷に応じて傾きが変化する線形劣化モデルである。当初は前述のように、理想的なモデルの下での最適負荷配分に関する研究と、実際の劣化量の代替測定としての仕事量や特性値の測定に基づく寿命予測の研究とを並行して進めた。また

(1)につぎ、の予想を示すために、線形劣化モデルの傾きが負荷に対して比例するのではなく、負荷のべき乗に対して比例するようなモデルの下での最適負荷配分を検討した。当初、解析的に検討を続けたが、徐々にその困難さが判明した。最終的には、証明の一部に数値的な考察を加えることで、負荷のべき乗のパラメータが 1 を超える場合には、すべてのコンポーネントが同時に故障するように負荷配分を行うことが最適であること、またべき乗のパラメータが 1 未満の場合には、負荷を 1 台に集中させ、壊れたら次を用いるなど、ひとつずつ故障させていくように配分することが、最適であることを示した。

(2)は線形劣化モデルによるモデル化の精緻化の試みである。これにつき、実際の故障データと監視データに基づき、特性値と寿命の関係のモデル化を行った。

まず累積使用量直線の傾きが、製品ごとに異なるデータを解析し、その傾きが寿命に影響を与える場合のモデルを確立した。傾きを所与とした場合の寿命の条件付き分布を、尺度母数が傾きに依存するように推定したものである。(2010/10)

特性値が多次元で測定される製品の寿命データを扱い、個々の次元に基づいた回帰分析による寿命予測モデルと、複数の次元を組み合わせて正準相関分析を用いて構築した寿命予測モデルを提案し、両者を実際の寿命データに適用して比較した。そして、複数の変数を組み合わせたモデルの方が、寿命の予測精度がよくなる場合があることを示した。

この研究成果により、単一次元での寿命の個別予測には寿命分布に基づく方法ではなく、回帰分析を用いた。個々の対象について測定した特性値と寿命分布の関係を推定しても、寿命の個別予測にはB50、平均寿命を用いざるを得ず、その場合には予測誤差がとて大きく、との観点を抱くに至った。以降の研究で、寿命予測とは、故障もしくは使用不能となる時点の予測のことを指している。(2011/10)製品によっては、特性値の変化(累積使用量の成長)が非線形となることも少なくない。そのために、関数データ解析を用いたモデル化を試みた。ここでは関数データ解析を、個々の特性値の長期的なトレンドが、幾つかの関数の重み付き和として表現できるように分解する手法として用いた。その分解に基づいて、寿命の予測モデルを構築し、特性値の変化の様子が寿命の長短に与える影響をモデル化した。

これにより特性値の平均を用いざるを得なかった回帰分析と比べて、寿命の予測精度を平均二乗誤差の意味で向上させることができた。(2012/05)

多次元の特性値が継続的に測定される製品の監視データと寿命データを扱い、寿命の予測問題を、寿命の予測のためのモデルと、予測した寿命への暦上の到達時点の予測、の二つの問題に分解することを提案した。

実際に寿命の予測には前述の①～の方法を用いた。また暦上の到達時点の予測のために、特性値や仕事量の変換のための予測モデルを動的線形モデルを用いて構築し、両者を組み合

わせることで、直接に暦上の寿命を予測する場合と比べて、最小二乗誤差が改善されることを示した。(2013/05)簡単には故障しない製品について、故障実績が多く得られるに長期間の観測が必要となる。しかし、故障するまで待っていたのでは、それらを未然に防ぐための保全を行うことはできない。つまり予測する意味がない。

そのような場合に、少ない故障実績とモニタリングデータに基づいて、故障の発生リスクを比例ハザードモデルで定量化して予測する方法を提案した。そこでも、前項と同様、リスク評価モデルは使用量や仕事量を時間尺度として構築し、そこでリスクの累積を暦時間に変換するために動的線形モデルを用いた。そして個別に予測した累積リスクに基づく保全基準を提案し、データにおいて実際に発生した交換を事前に予防保全で防ぐことが可能なこと、また現状の統一的な保全基準と比べて使用できる期間を伸ばせるシステムもあり、十何な保全が可能となることを示した。

以上とは別に、多変量の寿命データを解析する際に、重み付きの算術平均にや重み付きの幾何平均に合成して寿命分布をモデル化するタイムスケール解析による寿命分布の推定方法も検討した。この手法はまだ提案されて日が浅く、性質の検討を進めている段階ではあるが、広く多様なデータを取得できる場合には、良い手法となりうる感触を得ている。

(5)につき、実際の故障データが、すべての製品に関して使用開始時点からの全ての履歴を含めていることは少なく、観測期間が寿命の途中から始まっていることもしばしばである。そのような場合に、再生過程と同様の仮定に基づいて、故障間隔が従う確率分布の推定を試みた。これには単純なEMアルゴリズムの適用は難しく、モンテカルロ法を援用したMC-EMアルゴリズムの考え方が鍵となる。

とある製品の部品の故障と交換のデータを用いて、指数分布とワイブル分布の場合のパラメータ推定のためのMC-EMアルゴリズムの近似的な推定法を提案した。再生過程のモンテカルロシミュレーションは簡単だが、期間を限ること、故障時点は所与とした条件付き分布を陽に表現することが困難なことから、勘弁な近似を用いている。この交換実績データにより、故障間隔の分布だけでなく、交換部品の保管の寿命への影響も定量化することができた。

残念ながら(3)と(4)については、(1)についての見通しが甘かったために、将来の課題と

せざるを得なかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 10 件)

1. 小林壮大、山本涉、金路、鈴木和幸「非定常な計数過程データの時間尺度について」、日本品質管理学会第 104 回研究発表会、東京 (2014/06)
2. 山本涉「部分的な観測データに基づく再生過程の母数推定について」2013 年度統計関連学会連合大会、大阪大学 (2013/09)
3. Yamamoto, W. and Takeshita, K. 「Comparative Study of Time Scales in Optimal Time Scale Analysis of Field Reliability Data」XIth International Workshop on Intelligent Statistical Quality Control 2013, Sydney, Australia (2013/08)
4. Yamamoto, W. and Tomotaki, J. 「On Modelling and Prediction of Lifetimes on Multiple Time Scales from Online Monitoring Data」The 8<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Methods in Reliability: Theory, Methods and Applications, Stellenbosch, South Africa. (2013/07)
5. 友滝絢也、山本涉「動的線形モデルを用いた消耗品の交換時期の予測について」日本品質管理学会第 101 回研究発表会、東京 (2013/05)
6. 山本涉「累積使用量尺度上の寿命分布と予測について」日本品質管理学会第 42 回年次大会、小松 (2012/10)
7. 山本涉「使用限界の関数データ解析を用いた予測について」2012 年度統計関連学会連合大会、北海道大学 (2012/09)
8. 齋藤大貴、山本涉「関数データ解析を用いた使用限界の予測」日本品質管理学会第 98 回研究発表会、東京 (2012/05)
9. 山本涉「累積使用量の選択に関する一考察」日本品質管理学会第 41 回年次大会、名古屋工業大学 (2011/10)
10. 山本涉、横山真弘、鈴木和幸「累積使用量曲線の特徴量としての傾きの分布の推定について」日本品質管理学会第 40 回年次大会、成蹊大学 (2010/10)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 涉 (YAMAMOTO, Watalu)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・  
講師

研究者番号：30303027