

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350441

研究課題名(和文)多状態信頼性システムの構造関数の決定方法について研究

研究課題名(英文)A study on how to define a structure function of a multi-state system

研究代表者

大鑄 史男(Ohi, Fumio)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60116001

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)：状態空間が半順序の多状態信頼性システムについて、モジュール分解や直列システムへの分解などを用いた確率的パフォーマンスの評価方法、構造関数のFTAを用いた決定方法、構成要素の重要度のネットワーク論的議論を示した。多状態、多ユニットの保全問題についてマルコフ決定過程を用い、最適保全政策の構造を明らかにした。不良診断、故障予測などに有効である Higuchi法と呼ばれる時系列データのフラクタル的解析手法の理論的な特性を明らかにし、新たな手法を提案すると共にそれらの有効性を実データへの適用によって示した。

研究成果の概要(英文)：For a multi-state system with partially ordered state spaces, we have shown (1)stochastic evaluation methods of performance of the system by a modular decomposition and a decomposition of the structure function into a family of series systems, (2)how to determine the structure function by FTA method, (3)examinations of importance measures in a context of complex network theory, which relates the reliability theory to the complex network theory with understanding the partially ordered state spaces to be networks via Hasse diagram. For a maintenance problem of a multi-state and multi-unit system, a structure of the optimal maintenance policy is explained to be control-limit type by Markovian decision process method. A fractal analysis method of time series data, called Higuchi method, is mathematically showed to have a relation with the box-counting dimension. We also proposed a new analysis method and showed it to work efficiently in practical situations.

研究分野：信頼性理論

キーワード：多状態信頼性システム 半順序状態空間 モジュール分解 確率的信頼性評価方法 FTA 複数部品の最適取り替え政策 ネットワーク信頼性 フラクタル的データ解析手法

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 社会システムの大規模化・複雑化にともない、安全・安心のための信頼性・リスクの評価・解析技術が欠かせない。そのためには、従来の二状態システムのモデルだけでなく、多状態システムの理論体系の構築とそこで中核的な役割を果たす構造関数の実践的な決定方法が求められる。

(2) 二状態信頼性システムについての知見は体系化され、構造関数の決定方法、様々な信頼性評価方法は、FTA 技術とともに多様な現実の問題解決に活用されている。引用文献を参照。これらの議論は、要素及びシステムの状態として故障と正常の二状態のみを想定するものであり、現実の多様な状況における信頼性評価の要求に十分に答えられるものではないと考えられる。

(3) 多状態システムに関しては引用文献で議論されているが、理論的側面に関するものであり、得られた結果が即座に現実の問題に適用できる訳ではない。

(4) 多状態システムの概念は、生産システム、無線通信ネットワークシステム、電力配給ネットワークシステム等に適用され、さらに建築物の構造信頼性の議論にも用いられようとしており、その重要性は増している。引用文献を参照。しかしながら、これらの議論は、部品とシステムの状態間の関係を規定する構造関数が既知であるとする前提での議論であり、研究分野全体に於いて現実のシステムにおける多状態構造関数自体を決定する一般的な方法は見当たらない。

(5) 多状態の重要性が認識されながら現実での活用が停滞している一つの理由として、多状態構造関数の一般的な決定方法が提案されていないことが考えられる。

(6) 二状態システムについては、FTA などの実践的な構造関数の決定方法があり、故障解析において主要な役割を果たし、自動車業界をはじめとした多くの業界で活用されている。引用文献を参照。

## 2. 研究の目的

(1) FTA を用いた多状態システムの構造関数の決定方法の提案。

(2) 多状態システムの確率的な性能評価・解析技術の開発。

(3) 複雑系のパラダイムの中に信頼性の問題を位置づけていく。

## 3. 研究の方法

(1) 引用文献では多値論理関数を二値論理関数に分解・表現する試みがなされている。

この観点に習い、多状態構造関数を二状態構造関数に分解し、二状態システムについての FTA を活用した多状態構造関数の決定方法を開発し、同時に、引用文献で体系化されている二状態システムの信頼性評価方法を多状態システムの信頼性評価方法に活用する手順を開発する。

(2) 状態空間が全順序の場合から始めて、半順序の場合に順次拡張する。

(3) 企業の技術者の意見を聞くと共に実際の例を考えることによって提案された手法の問題点を明らかにすると共に解決を図る。

## 4. 研究成果

(1) 多状態システムの構造は構造関数によって定まるが、さらにこれは極小状態ベクトル又は極大状態ベクトルと呼ばれる特定の状態ベクトルによって一意的に定まる。これらの状態ベクトルを用いたシステムの確率的な性能評価方法、さらにモジュール分解と融合することでより改善された確率的評価方法を与えた。一般にシステムはモジュールのスケールに従った階層構造を成す。モジュール分解を利用した確率的評価方法は、この階層に応じた評価を積み上げることで、システム全体の詳細な構造に関する知識を前提とするよりもよりよい評価を与える。これは現場の信頼性設計や評価に携わる技術者にとって有益な結果である。これらの議論は、二状態システムに於いてよく知られている評価方法を多状態の各状態に適用したものになっているが、その際に発生した多状態であるが故の問題が normal 性の概念によって解決されている。

二状態システムの構造関数は、極小カットセットや極小パスセットを用いることで直列・並列システムで分解・構成できることが知られている。多状態システムに於ける直列システムによる分解とそれを用いた確率的な性能評価方法を与えた。

(2) 多状態システムの構造関数の決定方法について、状態ごとに指示変数を用意し、一群の二状態システムの族に対応させることで二状態システムへの分解方法を与えた。又これを用いて、二状態システムの極小パスセットが多状態システムの極小状態ベクトルに対応づけられ、従って前者の構造関数から後者の構造関数が決まることが示されている。さらに、normal 性や relevant 性が如何に決まるかも示されている。この問題を扱った学会発表は、best paper award を受賞した。

工場に於ける樹脂押し出し機を多状態システムの観点から解析することを目的に圧力及び温度を状態とし FTA の結果から構造関数を定める際の問題点を定式化した。システムの概念の定義を拡張しなければならない

こと、構造関数の決定方法、順序の定義の方法、-同値関係を用いた relevant 化、極小状態ベクトルの決定方法、normal 性の判定方法などについて一群の定理構築を試みた。

(3)多状態システムにおける構成要素のシステム全体に於ける重要度を、二状態の場合を参考にしながら定義し、特に構造重要度が複雑ネットワークに於ける媒介中心性に対応することを示した。また半順序が Hasse 図を介してネットワークを意味することから、多状態システム自体が重層的なネットワークのモデルになることが示された。このことは、多状態システムの問題が複雑系の中に位置づけられ、特に信頼性理論の様々な確率的解析手法がネットワークの解析、特徴付けに応用できる道が開かれたことを意味するが、より広くそれぞれの分野に於ける手法を相互に活用出来ることを意味する。

(4)多状態、多ユニットからなるシステムについてマルコフ決定過程を用いた最適保全政策についての議論を行った。特にエンジン部品に対して管理限界方式が最適になるための十分条件を与え、さらに管理限界方式が最適でない場合を数値的に議論し、管理限界方式が近似的に最適になることを示した。

(5)時系列データの代表的なフラクタル的解析手法である Higuchi 法がボックス次元を推定していること強く示唆した。この為に、Higuchi 法を理論的に定式化し、河野の自己アフィン関数及びファルコナーの自己アフィン関数に適用し、それらのグラフのボックス次元が導かれることを示した。さらに拡張されたファルコナーの自己アフィン関数については、ボックス次元が存在するのかどうか、Higuchi 法によってどのような巾則が導かれるのか等の問題が提起されている。一方で、ボックス次元を直接に求めることが出来る最大-最小変動法を提案した。これらの手法は、樹脂押し出し機の圧力データに適用し不良品排出予測に用い得ることが示されている。

(6)分担執筆ではあるが、二冊の図書を発刊し、“新版 信頼性ハンドブック”，日科技連出版社 は、日経品質管理文献賞受賞(2014)を受賞している。

#### <引用文献>

- R.E.Barlow and F.Proshan, Statistical Theory of Reliability and Life Testing, Probability Models, Holt, Rinehart and Winston, INC., 1975  
E. El-Newehi, F. Proshan and J. Sethuraman, Multistate coherent systems, J. Appl.Probability, Vol.15(1978), pp.675-688,

- F. Ohi and T. Nishida(1983), Generalized multistate coherent systems, J. Japan Statist.Soc., Vol.13, pp.165-181,  
M. J. Zuo, J. Huang and W. Kuo(2003), Multi-state k-out-of-n systems, Handbook of Reliability Engineering edited by H. Pham, Springer, pp.3-17,  
F.Ohi(2011), Lattice Set Theoretic Treatment of Multi-state Coherent Systems, Proceedings of The 7th International Conference on Mathematical Method in Reliability: Theory. Methods. Applications, edited by Lirong Cui and Xian Zhao, pp.383-389.  
Anatoly Lisnianski and Gregory Levitin, Multi-State System Reliability, Assessment, Optimization and Applications, World Scientific, 2003  
Hoanf Pharm edit., Handbook of Reliability Engineering, Springer, 2003  
Bent Natvig, Multistate Systems Reliability Theory with Applications, Wiley, 2011  
森崎 他, Multi-State System による道路橋システムの最適耐震性能レベル設定法の提案, 構造物の安全性および信頼性 (JCROSSAR 2007) 論文集, 土木学会, Vol.6, 2007.6  
[http://www.i-juse.co.jp/statistics/xdata/sympo09\\_toyota.pdf](http://www.i-juse.co.jp/statistics/xdata/sympo09_toyota.pdf)  
[http://www.semicon.toshiba.co.jp/product/reliability/device/concept/1186200\\_7633.html](http://www.semicon.toshiba.co.jp/product/reliability/device/concept/1186200_7633.html)  
[http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2006/11/61\\_11pdf/f04.pdf](http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2006/11/61_11pdf/f04.pdf)  
井上威恭 監修, 総合安全工学研究所編, FTA 安全工学, 日刊工業新聞社  
Kyoichi Nakashima, et all, Characterization of Monotonic Multi-Valued Functions and Their Logic Expressions, IEICE Trans. INF. and Syst. Vol.E81-D, No.6, 1998, pp.496-503

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

- Fumio Ohi, Lattice set theoretic treatment of multi-state coherent systems, Reliability Engineering and System Safety, 査読有, Vol.116 (2013), August, 86-90

大鑄史男, 関数の変動量を用いたフラクタル次元, 数理解析研究所講究録, 査読無, 2013, 1857

大鑄史男, 隠れた階層構造を見いだす - 試論 -, オペレーションズ・リサーチ, 査

読無, 2013, Vol.58, No.9, 533 頁 ~ 539 頁

Fumio Ohi, Steady-State Bounds for Multi-state System Reliability via Modular Decomposition, Applied Stochastic Models in Business and Industry, 査読有, Published online in Wiley Online Library, 13, JUNE, 2014, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asmb.2044/abstract>, DOI: 10.1002/asmb.2044

Fumio Ohi, Converting a Multi-state System into a Family of Binary State Systems, 査読有, International Journal of Performability Engineering, 2015, Vol.11, No.4, July, 2015, pp. 329-338

大鑄史男, 多状態システムの直列システムによる分解 (Decomposition of a Multi-State Systems by Series Systems), 電子情報通信学会技術研究報告 (IEICE Technical Report), 査読無, Vol.115, No.167, 2015, 31 - 35.

Fumio Ohi, FROM A BINARY-STATE SYSTEM TO A MULTI-STATE SYSTEM, to appear in International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice, 査読有

Fumio Ohi, Stochastic Evaluation Methods Of A Multi-state System Via A Modular Decomposition, accepted by Journal of Computational Science, 査読有

[学会発表] (計 28 件)

Fumio Ohi, Stochastic bounds for multi-state coherent systems, Proceeding of the 8th International Conference on Mathematical Methods in Reliability: Theory, Methods and Applications, 224-228, Porter Hotel, Techno Park, Stellenbosch, South Africa 2013 年 7 月 1 日 ~ 4 日

大鑄史男, 多状態システムの確率上下界について, 平成 25 年度 RIMS 研究集会「不確実性の下での数理的意思決定の理論と応用」, 研究代表者: 金正道 (弘前大学), 平成 25 年 11 月 11 日 (月), 12 日 (火), 13 日 (水), 京都大学数理解析研究所 420 号室 (4 階)

大鑄史男, 高層ビルにおける避難流動シミュレーション - 避難計画について -, 日本オペレーションズリサーチ学会 2013 年秋季研究発表会予稿集, 60 頁 ~ 62 頁, 2013

年 9 月 11 日, 12 日, 徳島大学常三島キャンパス

大鑄史男, 商用ビルにおける避難流動のシミュレーション - 避難計画について -, 日本 OR 学会 2014 年春季研究発表会予稿集, 226 頁 - 227 頁, 2014 年 3 月 6 日, 7 日, 大阪大学豊中キャンパス

大鑄史男, 時系列データのフラクタルの解析方法について, 愛知大学経営学会主催ワークショップ「数理的意思決定モデルの新たな展開と応用」, 2014 年 2 月 22 日 (土), 名古屋校, 厚生棟 3 階会議室

Fumio Ohi, Stochastic Bounds for Multi-state Coherent systems via Modular Decompositions - Case of Partially Ordered State Spaces -, APARM2014, Hokkai Gakuen University, 2014 年 8 月 21 日 ~ 23 日, in Advanced Reliability and Maintenance Modeling VI, edited by Suk Joo Bae, Yasuhiro Tsujimura and Li-Rong Cui, Mc Graw Hill, 357-364, 2014

Fumio Ohi, Mutual Relationships Between A Multi-state system and Family of Binary Syate Systems, in Proceeding (CD version) of QR2MSE2014, 2014 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, The 5th International Conference on Maintenance Engineering, 2014 年 07 月 22 日 ~ 25 日, Dalian, Liaoning, China, best paper award

大鑄史男, 多状態システムの信頼性評価方法について, 日本 OR 学会信頼性研究部会, 2014 年 5 月 23 日 (金), 金城学院大学

大鑄史男, 信頼性システムにおける部品の重要度, 日本 OR 学会 2014 年秋季研究発表会, アブストラクト集, 108-109, 2014 年 8 月 28 日 ~ 29 日, 北海道科学大学

Fumio Ohi, Stochastic Evaluation Methods of Multi-State Systems with Partially Ordered State Spaces, International Summer Seminar 2014 in Hiroshima, August 19, 2014, Hiroshima University, Room 111, Engineering Building A1, 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Japan

大鑄史男, Stochastic bounds for multi-state systems, 平成 26 年度 RIMS 研究集会プログラム「不確実性の下での数理モデルとその周辺」, 研究代表者: 藤田敏

治(九州工業大学),平成26年11月12日(水)~14日(金),京都大学数理解析研究所420号室

大鑄史男,多状態システムの確率的評価方法について,Proceedings of Symposium on Stochastic Models 2015,172頁~181頁,確率モデルシンポジウム,2015年1月22日~24日,東北大学桜ホール

大鑄史男,時系列データのフラクタル的解析法について,国際数理科学シンポジウム予稿集,16頁~19頁,Proceedings of 2015 Mathematical Sciences Symposium,平成27年3月14日,大阪国際大学

大鑄史男,多状態直列システムとその同値な条件-半順序集合の場合-,日本OR学会春季研究発表会アブストラクト集,114頁~115頁,平成27年3月26日~27日,東京理科大学神楽坂キャンパス

Fumio Ohi, Stochastic Evaluation Methods of Multi-state Systems via Modular Decompositions - A Case of Partially Ordered States -, MMR2015, The Ninth International Conference on Mathematical Methods in Reliability: Theory, Methods and Applications, Tokyo Campus of University of Tsukuba on June 1-4, 2015

Fumio Ohi, Multi-state systems and binary state systems, International Summer Seminar 2015 in Hiroshima, Hiroshima University, June 6, 2015

Fumio Ohi, A Multi-State Series System with Partially Ordered State Spaces, QR2MSE2015, 2015 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, JiuHua Resort & Convention Center, Beijing, China, July 21-24, 2015

大鑄史男,多状態システムの直列システムによる分解,電子情報通信学会信頼性研究会(R),2015年7月31日,青森むつ市本町ホテルニューグリーン

大鑄史男,FTAによる多状態構造関数の決定方法,2015年日本OR学会秋季研究発表会アブストラクト集,240-241,2015,9月10日~11日,九州大学戸畑キャンパス

Fumio Ohi, Binary State Reliability Systems - Onto Multi-State Systems - 2015.11.4, Department of Industrial Engineering, Pusan National University

Busan, 609-735, Korea

⑳Fumio Ohi, From Binary State to Multi-State Systems in Reliability Theory, EAWIE2015, The 2nd East Asia IE Workshop on Logistics and Reliability, 2015年11月6日~7日, Yonsei University, Seoul, Korea

㉑大鑄史男,時系列データのフラクタル的解析方法について,経営学会主催ワークショップ「オペレーションズ・リサーチの最近の展開」,2016年2月20日(土),愛知大学名古屋キャンパス講義棟508

㉒大鑄史男,信頼性における多状態問題について,日本OR学会中部支部研究発表会特別講演,2016年3月5日,ウインク愛知,愛知県立大学サテライト教室

㉓大鑄史男,信頼性システムに於ける重要度-複雑ネットワークの観点から-,2016年日本OR学会秋季研究発表会アブストラクト集,83-84,2016,3月17日~18日,慶應義塾大学矢上キャンパス

㉔Koichi Nakade and Hiroaki Mikuri, Optimal maintenance policy of multiple parts with operating cost dependent on repair level, International Symposium on Scheduling, 4B1, Kobe Industrial Promotion Center Convention Hall, July 4-6, 2015

㉕中出康一,土屋至駿,部品の加工順序を考慮した最適刀具保全政策,2015年日本OR学会秋季研究発表会アブストラクト集,180-181,2015,9月10日~11日,九州大学戸畑キャンパス

㉖中出康一,稼働時間コストを考慮した部品の修理・取替政策,日本オペレーションズ・リサーチ学会「確率モデルとその応用」,「信頼性」,「不確実性環境下の意思決定モデリング」3研究部会合同研究集会,2015年10月10日,名古屋工業大学,名古屋

㉗Koichi Nakade and Takahito Narumi, Indices to Critical Activities in Stochastic PERT Networks, Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2015 (IEEM 2015), Project Management 1-6, Singapore, Suntec Convention Center, Dec. 6-9, 2015

[図書](計2件)

Fumio Ohi (分担執筆), Modules of Multi-State Coherent Systems - Order

Theoretical Relations, in Stochastic Reliability Modeling, Optimization and Application, Edt. S. Nakamura, C. H. Qian and M.Chen, World Scientifics (Singapore), pp.101-116, 2014

大鑄史男(分担執筆), 日本信頼性学会編, “新版 信頼性ハンドブック”, 分担執筆 (第IV部 第3章2. システムの信頼性の理論), 日科技連出版, 2014, 日経品質管理文献賞受賞(2014)

〔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) 研究代表者

大鑄史男(Ohi Fumio)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60116001

(2) 研究分担者

中出康一(Nakade Koichi)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 50207825