

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：32702

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23540

研究課題名（和文）従属故障を伴う大規模システムに対する信頼性設計手法の新展開

研究課題名（英文）A study on reliability design methods for large-scale systems with dependent failures

研究代表者

太田 修平（Ota, Shuhei）

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号：00846462

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：複数のシステムが相互依存的に故障することを従属故障という。本研究はシステムの信頼性に関わる情報から、従属故障の発生リスクの評価手法の開発および精緻化をした。具体的には、システム間の従属性を表現するための数理モデルを開発し、従属故障の発生がシステム全体の信頼性に与える影響をモデルベースで評価可能とした。さらに、統計的推定によってシステムの運用段階で得られるデータから、システム間の従属性を定量的に評価する方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、システムの信頼性を数理モデルで評価する際に、従来は数学的な取り扱いが困難であった従属故障の要因（とくに非線形な従属性）をモデルに導入可能とした点である。合わせて、そのモデルパラメータをデータから統計的に推定する手法を開発することで、定量的にシステムの従属性を評価可能とした点である。本研究は、金融商品や経済指標の相互従属的なリスク評価にも応用できるため、幅広い学術領域への技術の還元も期待できる。

研究成果の概要（英文）：The dependent failure is a set of mutual failures of systems. This research developed a methodology that can precisely evaluate the risk of dependent failure occurrences in systems. In particular, the dependence among systems is described by a stochastic model. The developed method can quantitatively evaluate the potential dependence among systems through statistical inference with real data.

研究分野：信頼性工学

キーワード：信頼性工学 従属故障 システム信頼性 多変量確率モデル コピュラ 統計的推定 データ分析

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

情報通信技術の発展と普及によって、送電網や通信ネットワークのような大規模システムは、人々の生活を支える重要な社会基盤となっている。しかし、これら大規模システムでは、一部の故障が短期間で広範囲の故障を引き起こし、人々の安全・安心な生活を脅かすリスクを伴ってきた。その故障の大きな要因の1つが、システムの従属故障である。

従属故障とは、あるシステムの故障原因が他のシステムの故障に起因する故障を意味する。例えば、2018年9月6日に北海道全域(約295万戸)で大規模停電が発生したが、これは従属故障の一例である。地震の影響による苫東厚真発電所の緊急停止が引き金となり、負荷の共有によって近隣の発電所も運転を停止し、最終的には地震発生から20分以内に大規模停電が起きてしまった。これによって北海道在住者は一時的に生活困難状態に陥り、また企業の経済活動は停止し甚大な被害が発生した。同様の事例は世界各地でも散見されており、防災の観点から、従属故障を防ぐための研究は現在進行形で世界的に重要性が高いと言える。

これらの事例を解決するには、あらかじめシステムの設計段階において、数理モデルを用いた従属故障のリスク評価を行ったうえで、正確な信頼性設計(システムが与えられた条件の下で、与えられた期間、要求機能を遂行できるようにする設計)を行うことが肝要である。ところが、システムの信頼性を数理モデルで評価する際に、従属故障の要因をモデルに導入することは、数学的な取り扱いが非常に困難であった。そのため従属故障が起こる場合でも、代替策として従来通り各システムの独立性を仮定した、リスク評価手法が用いられ、精緻な信頼性設計が行われてこなかった。このことが大規模システムにおける広範囲の故障が発生してしまう一要因となっている。

この問題を打開するために、本研究は従来の数理モデルにコピュラ(接合関数)を導入した新しい信頼性設計手法の開発に取り組む。コピュラとは多変量の確率同時分布関数の別表現であり、各変量が従う確率則と分離して、それら変量間の従属性を表現することができる。すでにコピュラは様々な種類が発見されており、本研究は、その中から適当なコピュラを選択することで、従属故障のリスク評価を精緻化する。これによって、システムの頑健性を高め従属故障を防止できるのではないか、ということが本研究の学術的問いである。従って本研究は、電力インフラにおける広域停電や、通信インフラにおける大規模障害をなくし、安定的な社会の実現への貢献が見込まれる。

またこれまで技術的に困難であった、モデルベースでの従属故障に対する精緻なリスク評価を実現する点は、様々な大規模システムにおける防災に役立ち創造性がある。さらに、コピュラの解析手法を解明することは、金融商品や経済指標の相互従属的なリスクを評価することにも応用ができるため、幅広い研究分野への技術の還元も期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従属故障による大規模故障のリスク評価手法の開発である。具体的にはシステムの寿命時間が確率分布していると仮定したもとの、図1に示すように各システムの従属関係をコピュラによって表現する。コピュラには種類があり、本研究は数学的扱いが比較的容易なFarlie-Gumbel-Morgenstern(FGM)コピュラおよびArchimedeanコピュラを研究対象とする。これらすべてを数理モデルに導入し解析手法を解明できれば、上述の目的は部分的に達成され、従属故障のリスクを加味した大規模システムの運用安全性の向上に大きなインパクトを与えることができると考えられる。

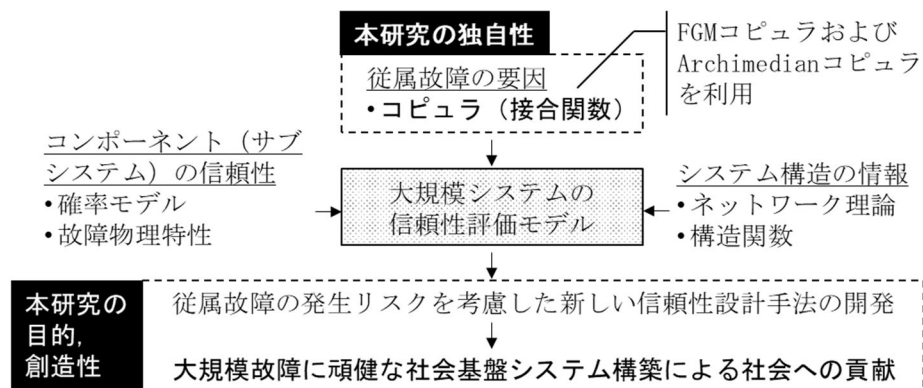


図1 本研究の目的および学術的独自性と創造性の概略。

3. 研究の方法

本研究は採用後2年度間で上述の2種類のコピュラの解析手法を明らかにする。まずは「(1)FGMコピュラを用いたモデルの解析手法と、従属故障のリスク評価手法の開発」を実施する。具体的には、前者のモデルの解析手法としては、従属故障が発生する条件下でのシステムの

最適保全計画に FGM コピュラを取り入れた手法を開発する。また後者の従属故障のリスク評価手法としては、FGM コピュラのパラメータ推定手法の開発を行う。本研究課題(1)は、令和元年度から最終年度まで継続して研究を実施する。

次に、「(2)Archimedian コピュラを用いた数理モデルの開発、モデルの解析、及びリスク評価手法の開発」を行う。ただし、もし の計画が難航した場合は、Archimedian コピュラの代わりに実用上で重要な正規コピュラの解析を実施し、研究を遅延させないようにする。本研究課題(2)は、令和元年度の後半から最終年度まで継続して研究を実施する。

研究成果は国際学会と国内学会で発表し批評を受ける。そして国内外の論文誌で公表を行い、アウトリーチ活動の一環として、それらの論文はオープンアクセス化する。

4. 研究成果

(1)令和元年度の研究成果

令和元年度は研究計画に沿って、FGM コピュラを用いた信頼性評価モデルの開発および、Archimedian コピュラの活用方法の検討に取り組み、以下の ~ の研究成果を得た。

多変量確率分布である FGM コピュラのパラメータを効率よく推定する手法を開発した。これにより、サブシステムの故障時刻データから、システムにおける従属故障の発生リスクを定量的に評価することを可能とした。本来、従属性とは目に見えるものではないため、従属故障の発生有無を判断するのが難しかったが、本成果によってそれが定量的に評価可能となった。ただし、パラメータの推定に関してパラメータの制約条件を考慮する方法や、推定するパラメータの順序の決定方法など研究課題が残ったため、翌年度も継続して研究することとした。

FGM コピュラを用いたシステムの信頼性評価モデルおよびその解析手法の提案を行った。具体的には提案モデルにもとづき、従属故障が起こる場合の直列構造を有したシステムの運用コストを最小化する最適保全方を明らかにした。本成果は国内の学会および国際会議 MMR2020 にて発表した。

Archimedian コピュラを用いたシステムの信頼性評価モデル構築のために、コピュラとコピュラを組み合わせる新たなコピュラを表現するファクターコピュラの活用方法を検討した。本成果は国際会議 PRDC2020 にて報告を行った。これによって、従属故障の発生要因(ファクター)を明示的に信頼性評価モデルに組み込むことが可能となった。ただし、ファクターコピュラを構築する際に、どのようなコピュラを組み合わせると、どのような従属性を表現できるかの解明には至らず、翌年度も継続して研究することとした。

(2)令和二年度の研究成果

令和二年度は前年度に残った研究課題を解決し、以下の ~ の研究成果を得た。

FGM コピュラを用いた信頼性解析手法を開発するために、多変量 FGM コピュラのパラメータの制約式を陽な式で明らかにした。多変量 FGM コピュラのパラメータ数は変量に対して指数関数的に増加することが知られており、これまでその制約式の扱いの難しさが多変量 FGM コピュラを確率モデルの中で利用する際の問題であった。本研究成果によって、ある条件下では FGM コピュラのパラメータを推定する際に、効率良く制約条件を求められるようになった。本研究成果は研究計画に沿って、オープンアクセスの論文として一般に広く公開した。

多変量 FGM コピュラのパラメータを制約下で効率よく推定する手法を開発した。多変量 FGM コピュラのパラメータ数および制約式は、変数の数に対して指数関数的に増えることが知られており、従来は多変量 FGM コピュラのパラメータの推定が困難であった。本研究はこの問題を解決し、開発した手法を NASA Ames Prognostics Data Repository で公開されているベアリングの信頼性試験データに適用し、同一シャフト上の複数のベアリングの振動データから、ベアリングの従属故障発生リスクの評価を試みた。本研究成果は研究計画に沿って、オープンアクセスの論文として一般に広く公開した。

さらに汎用的な従属故障の発生リスクを定量的に評価する手法を開発するために、ファクターコピュラを用いたシステム信頼性評価モデルを開発した。その中では、ファクターコピュラの構築に FGM コピュラや Archimedian コピュラを活用し、従属故障の性質に合わせたコピュラを選択法について検討した。本成果は国際会議 APARM2020 で報告した際に、Best Paper Award を受賞し、国際的に研究成果が評価された。ただし、今回開発した手法では、1つのシステムに関係する従属故障の発生要因(熱や振動など)を同時に1つまでしか考慮することができず、多要因を同時に考慮する手法の開発は今後の課題となった。

一方で、本研究を進める中でファクターコピュラを拡張することで、ファクターコピュラとは異なる新たな従属性の表現手法を発見した。この手法は国内の学会発表で他の研究者から関心を受けており、実データを用いた活用方法の検討を今後行うこととした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shuhei Ota and Mitsuhiro Kimura	4. 巻 E104.A
2. 論文標題 Exact range of the parameter of an n-variate FGM copula under homogeneous dependence structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 823 ~ 826
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2020EAL2080	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shuhei Ota and Mitsuhiro Kimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Effective estimation algorithm for parameters of multivariate Farlie-Gumbel-Morgenstern copula	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Statistics and Data Science	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) 10.1007/s42081-021-00118-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shuhei Ota, Mitsuhiro Kimura, Nacef Tazi and Toshio Nakagawa
2. 発表標題 Optimal block-replacement policy for an n-unit series system with dependency based on an FGM copula
3. 学会等名 11th International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuhei Ota and Mitsuhiro Kimura
2. 発表標題 Reliability modeling of coherent systems with dependent components due to common factors
3. 学会等名 24th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田修平, 木村光宏
2. 発表標題 従属故障環境下での直列システムに対する最適な周期的取替え方策に関する一考察
3. 学会等名 日本信頼性学会第27回春季信頼性シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田修平, 木村光宏
2. 発表標題 FGMコピュラの漸近不偏推定量に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会信頼性研究会 (R) (7月開催)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村光宏, 太田修平
2. 発表標題 学校等での集団食中毒事例における原因給食提供日の推定
3. 学会等名 電子情報通信学会信頼性研究会 (R) (12月開催)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田修平
2. 発表標題 信頼性解析におけるコピュラを用いたモデリング・推定・シミュレーション
3. 学会等名 OR学会「信頼性とその応用」研究部会第4回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shuhei Ota and Mitsuhiro Kimura
2. 発表標題 Factor copula modeling of coherent systems with dependent components
3. 学会等名 9th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 太田修平, 木村光宏
2. 発表標題 ファクターコピュラを用いたシステムにおける従属故障のモデリングと信頼性評価の一考察
3. 学会等名 電子情報通信学会信頼性研究会 (R) (6月開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 太田修平, 木村光宏
2. 発表標題 共単調コピュラの一般化と信頼性評価モデルへの応用
3. 学会等名 統計関連学会連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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

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
---------	---------