

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05021

研究課題名（和文）外乱によるシステムの機能低下と回復性能の定量評価に関する研究

研究課題名（英文）Quantitative evaluation of degradation and recovery for systems upon disturbances

研究代表者

弓削 哲史（Yuge, Tetsushi）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・電気情報学群
・教授

研究者番号：50546041

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：電力網等のインフラシステムに想定を超える外乱が発生し、システムの機能が大きく低下し、その影響が長期化する問題に対し、保全活動を含めたシステムの性能の定量評価（レジリエンス評価）に取り組んだ。主な成果は、(1)外的ショックにより発生する共通原因故障により大規模障害をモデル化、あわせて障害時の修復作業をモデル化し、システムを長期運用した際の運用レジリエンスを得る方法を確立したこと、(2)システムのパフォーマンスを定量化し、パフォーマンスが最大となる修理方策の検討を行ったことである。既存の電力網ネットワークに対し上記手法の有効性を確認し、従来に比べより現実的なレジリエンス評価が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、機能低下が社会に大きな影響を与えるシステムに対して、大規模障害の発生と、機能が低下した状態からの回復に焦点を当て、システムのレジリエンス性能の定量的評価を行った。システムの頑強性を打ち破る大規模障害が発生しうることを前提に、その影響を最小にする回復性能を含めたシステムの性能を評価すること、大規模災害の発生と修復を確率過程を用いてモデル化し、長期運用時の運用レジリエンスを導出したことが特徴である。電力網を対象とし、システムの能力を定量化し、それを用いた最適な修理順序の策定が可能となった。本研究により、レジリエンスが高いネットワークの設計や修復リソースの見積もりが可能となった。

研究成果の概要（英文）：It is a serious problem that unexpected disturbances occur in infrastructure systems such as electric power grids, as the result, the functions decrease greatly and the disturbance continues for a long period. This study addressed a quantitative evaluation of system performance (resilience evaluation), including maintenance activities.

The main results are: (1) modeling large-scale failures due to common cause failures caused by external shocks, modeling repair action, and establishing a method to obtain operational resilience during long-term system operation; (2) quantification of system performance to establish the repair strategies that maximize the system performance.

研究分野：信頼性工学

キーワード：運用レジリエンス 共通原因故障 最適保全方策 電力網

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、システムが複雑化するとともに、オープン化、相互接続が急速に進んでいる。その結果、想定していない機器間の相互作用の発生、想定外あるいは想定を超える外乱の発生(エマージングリスク)が障害の主な原因となり、障害が大規模化する傾向にある。また大規模障害の発生により、必要な保全資源を確保できず、重要施設が長期にわたり使用できない障害が社会問題となり、信頼性工学での解析が必要とされている。

信頼性工学は電子系の信頼性と構造系の信頼性に大別される。電子系の信頼性においては、近年は時間に関する品質特性をあらゆる包括的な概念であるディペンダビリティ(総合信頼性)という概念に拡張されてきている。修理系においてはアベイラビリティが主な分析対象であったのに対し、ディペンダビリティ解析では、それらに加えて保全支援性能が重要な評価尺度となる。これは、アベイラビリティ解析では、必要な外部資源が用意されると仮定した解析を行うのに対し、エマージングリスクによる大規模障害では、必要な資源が準備できず、保全支援の性能がシステムの性能に大きな影響を与えるためである。しかしながら複雑化・オープン化が進んだシステムでは、エマージングリスクおよび保全支援性能評価のためのモデル化が困難であり、これらの定量的評価に関する研究は確立されていない。

一方、構造系の信頼性の分野で、近年、エマージングリスクに対する回復性、レジリエンス性の研究が行われている。レジリエンスが高いシステムを構築する方法として、安全余裕がある設計、平時からの学習・備え、状況のモニタリング、回避行動などの重要性が指摘されているが、定性的な議論の域を出ておらず、レジリエンス性能の定量化が求められている。

大規模システムのレジリエンスを評価するためには、電子系信頼性工学で用いられる統計的確率論的手法が必要であるが、従来の信頼度、アベイラビリティを中心とした評価では不十分であり、エマージングリスクによる大規模な機能障害と、その状態からの効率的な復旧、すなわち、低下した機能と、修復能力、復旧時間の関係を明らかにすること、また限られた資源を効率的に割り振る方法など、システムの回復性能に関する定量的評価方法の確立が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、機能低下が社会に大きな影響を与えるシステムに対して、エマージングリスクによるシステムの機能障害と、機能が低下した状態からの回復性能に焦点を当て、システムのレジリエンス性能あるいはディペンダビリティ性能を定量的に評価することを目的とする。従来の解析は、システムが正常である確率を求めること、ならびにその確率が基準以上となるシステムの設計を行うことが主な目的であったのに対し、本研究では、システムのロバスト性、頑強性を打ち破るエマージングリスクが発生しうることを前提に、その影響を最小にする回復性能を含めたシステムの性能を評価したことが大きな特徴である。また修復する機器の順序は、回復性能に大きな影響がある。従来、信頼性設計において用いられるコンポーネント重要度は、システムの信頼度や最小カット、最小パスから算出し、システムが正常であるために必要な情報を用いている。その場合、回復するまでの途中経過は考慮されない。しかし、大規模障害には様々なレベル・状態があり、より障害規模が少ない状態へのすばやい推移が求められる。本研究では、コンポーネント信頼度やシステム信頼度に依存せず、修復によるシステム機能の上昇割合に着目した新たな修理優先順位(修復作業に特化したコンポーネント重要度)を考案した。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、2つの研究細目: 1. 外的ショックによる機能障害の定量化および回復性能の定量化に関する研究、2. ネットワークトポロジーを用いた最適修理方策、に分け、研究を進めた。各細目で明らかにする目標と達成するための方法は以下の通りである。

研究細目1の目標

本研究細目では、外的ショックによる機能障害を定量化するとともに、新たなショックモデルを考案し、機能低下量と回復時間の関係を明らかにする。

研究細目1を達成するための方法

- 研究代表者が行ってきた共通原因故障の研究を拡張し、エマージングリスクによる機能障害のモデル化を行う
- 機能障害からの回復をモデル化するため、機能低下量と、回復時間分布の関係を文献調査により検討する。
- (a)により得られる機能障害モデルと(b)から得られた知見を用いて、保全資源に制約がある場合のレジリエンス評価モデルを作成し、機能障害の発生量と所定の状態までシステムの機能が回復するまでの時間の関係を定式化する。
- 送電システムなど具体的なシステムにおいて、文献調査により各種パラメータの推定を行う。それらを用いて、回復性能とアベイラビリティを組み合わせたレジリエンス性能の定量化を図る。

研究細目2の目標

本研究細目では、多数の機器が同時に稼働しなくなる大規模な機能障害が発生したとき、限られた保全資源をどのように配分するか、ネットワークの構造などトポロジーの情報から機器の重要度を算出し、優先して復旧させるべき機器の選定、保全資源の最適化に関する知見を得る。

研究細目 2 を達成するための方法

- (a) コンポーネント重要度に関する既存の研究をサーベイするとともに、ネットワークトポロジーを用いてコンポーネントの依存性に関する研究を行うため、グラフ論、ネットワーク理論に関する文献調査を行い、本研究への適応可能性の検討を行う。
- (b) ネットワークのトポロジーを利用し修復に特化したコンポーネント重要度を導出する。
- (c) 機器復旧による障害の減少数、あるいは割合など、本研究目的に合致した評価尺度の選定を行い、その評価尺度の定式化に関する研究を行う。
- (d) システムに広範囲な機能障害が発生した状態を出発点とし、有限な資源の最適配分に関する研究を行う。

4. 研究成果

(1) ネットワークにある特定の大規模障害が発生した際のレジリエンス評価

ネットワークに大規模災害が発生し、ある特定の d 本のエッジが同時故障した状況を考え、全てのエッジが修理完了するまでのネットワークのレジリエンス算出方法を検討した。修復能力に上限があり、故障したエッジを 1 つずつ修復する状況で、レジリエンスは平均パフォーマンス量である

$$R = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d P_i$$

により求められることを示した。ここで P_i は i 番目のエッジを修復中のネットワークパフォーマンス量を示す。この値は修復時間分布に依存せず、故障エッジ数とパフォーマンス量のみ依存し、パフォーマンス量は修復を実施する順序によってのみ決定されるため、故障エッジの修復順序の決定が高レジリエンス実現のために重要であることが示された。

(2) ネットワークのパフォーマンス量導出アルゴリズム

レジリエンスを評価するためにはネットワークのパフォーマンス量を評価する必要がある。パフォーマンス量は対象とするネットワークごとに決まるが、従来は、ソースノードと連結するノードの割合が多く用いられてきた。しかしながら電力網では、ノードに相当する変電所や開閉所には必要とする電力需要量があり、エッジに相当する電力線には容量がある。これらを考慮した複数のソースノードが供給可能なネットワークの総電力量を電力網のパフォーマンス量と定義し、これを求めるアルゴリズムを 2 種類提案した。1 つは、複数のソースノードを持つ重み及び容量付ネットワークを、深さ優先探索と分枝限定法を用いて直接総電力量を求める方法、もう 1 つは、ソースノードとシンクノードが 1 つずつありノード重みを持たないネットワークに変換し、通常の最大流算出アルゴリズムを適用する方法である。いずれの方法もノード、エッジが数百程度存在する電力網に十分適用できることを確認した。具体例として、既存の電力網に関して電力網のパフォーマンス量である総供給電力量を求めた。

(3) 修復順序の決定方法

(1) でレジリエンス向上には、修復する順序を適切に決めることが重要であることがわかった。そこで、(2) のパフォーマンス量を尺度とした修復に関するコンポーネント重要度を導入した。これを用いることで、故障エッジが与えられた時、修理すべきエッジを 1 つずつ決定することで、レジリエンスが高くなる効率的な修理順序を得ることが可能となった。この方法は与えられた故障パターンごとにコンポーネント重要度を計算する必要があるが、ネットワークの形状・トポロジーから事前に修理順序を策定する方法を検討した。すなわち、ソースノードから各ノードまでの経路数の平均値を尺度とし、それを用いたコンポーネント重要度を用いて修理順序を決める方法を提案した。しかしながらエッジ数および故障エッジ数が多いときに、最適な修理順序と一致しない割合が増大することが確認された。

(4) ネットワークの運用レジリエンス解析

大規模災害の発生とその修復を確率過程を用いてモデル化し、ネットワークを長期運用する際の運用レジリエンス、およびその算出方法を提案した。大規模災害の発生は外的ショックに起因する共通原因故障の発生によりモデル化し、修復に関しては、修理能力が限定されおり、修理時間が指数分布に従う、また故障エッジを 1 つずつ修復するという仮定のもとで、(3) で提案した最適修理順序を使用してモデル化した。解析はマルコフ過程を用いて、運用レジリエンスの厳密解を求める方法を提案した。提案した厳密手法はエッジ数が 13 程度の小規模なネットワークに限られるため、さらに規模が大きいネットワークに適用可能な近似手法を提案し、モンテカルロシミュレーションによる結果と比較することで近似精度を検証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 YUGE Tetsushi, SAGAWA Yasumasa, TAKAHASHI Natsumi	4. 巻 E107-A
2. 論文標題 Operational Resilience of Network Considering Common-cause Failures	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 855-863
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2023EAP1011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 藤倉 光太郎, 高橋 奈津美, 弓削 哲史
2. 発表標題 ネットワークパフォーマンス評価アルゴリズムとレジリエンス
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.Yuge, N. Takahashi
2. 発表標題 Quantitative resilience analysis of networks with common-cause failures and priority repair
3. 学会等名 12th International Conference on Mathematical Methods in Reliability (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.Yuge, N. Takahashi
2. 発表標題 Operational Resilience for Networks with Common-cause Failures and Priority Repair
3. 学会等名 28th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 N. Takahashi T.Yuge
2. 発表標題 Reducing Search Space in the Topological Network Design Problem with Reliability Constraint
3. 学会等名 28th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 N. Takahashi, T. Yuge
2. 発表標題 Genetic algorithm with search reduction using neighborhood in Bi-objective Network
3. 学会等名 32nd European Conference on Operational Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大久保直人, 弓削 哲史, 高橋 奈津美
2. 発表標題 同時故障を考慮した2段階整備方式のシステム稼働率解析
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 弓削 哲史
2. 発表標題 ネットワークレジリエンスの定量評価モデル
3. 学会等名 第13回横幹連合コンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Yuge, N. Takahashi
2. 発表標題 Operational Resilience of Network Considering Common-cause Failures
3. 学会等名 32nd European Safety and Reliability Conference(ESREL) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Okubo, T. Yuge, N. Takahashi
2. 発表標題 Availability of two echelon repair system with common-cause failures and limited repair capacity
3. 学会等名 10th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance (APARM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐川安正、高橋奈津美、弓削哲史
2. 発表標題 ネットワークのレジリエンス性能評価近似解法
3. 学会等名 電子情報通信学会信頼性研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsumi Takahashi, Shao-Chin Sung, Tomoaki Akiba and Tetsushi YugeGe
2. 発表標題 netic Algorithm Approach with Network Configuration for Bi-Objective Network Optimization
3. 学会等名 31st European Safety and Reliability Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Yuge
2. 発表標題 A Simulation Study on Resilience of Systems with Simultaneous Failures
3. 学会等名 The 9th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2020) (国際学会)
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
研究協力者	高橋 奈津美 (Takahashi Natsumi)		

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