

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350490

研究課題名(和文) 共通原因故障とリスクに着目した確率論的安全評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of probabilistic safety assessment focused on common-cause failure and risk

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・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) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、共通原因故障を適切に組み込んだシステムの確率論的安全評価手法の提案、および、リスクを評価尺度とした最適なシステム設計・保全方式を決定することを目的とした。

成果として、(1)共通原因故障をダイナミックゲートにより表現し、ダイナミックフォルトツリーの頂上事象生起確率の算出方法の改善、(2)ファクタ法の適用範囲の改善および誤差の評価、(3)運用を考慮し、稼働率、コストを用いた保全方策の策定を行った。

研究成果の概要(英文)：This study considered a probabilistic safety assessment and the optimal maintenance policy for safety related systems considering common-cause failures.

We obtained the following results;

(1) Improvement of calculation efficiency in evaluating the top event probability of dynamic fault trees considering common-cause failures. (2) Improvement of the coverage of alpha-factor method and estimation of errors in system failure probability. (3) Optimal maintenance policy for the system considering the availability and the cost.

研究分野：社会システム工学・安全システム

キーワード：共通原因故障 確率論的安全評価 信頼性 安全性 リスク

1. 研究開始当初の背景

原子力発電設備等の確率論的安全評価 (Probabilistic Safety Assessment, PSA) において、同一原因によりシステム中の複数の機器が故障する共通原因故障 (Common Cause Failure, CCF) は、しばしばシステムリスクの主要因となるため、その解析は特に重要である。これは、CCF を原因とするシステム故障は、その生起確率が非常に小さくとも、一旦発生すれば甚大に影響を及ぼすことが多く、システムのリスクを事故生起確率とその影響度の組み合わせと考えるならば、リスクを適切に評価するためには、厳密な事故生起確率の推定が求められるからである。

CCF は従属故障の一種であり、一般に PSA における、システムモデル化フェイズに取り入れられる。解析は大きく 2 種類に分類でき、明示的方法と非明示的方法 (あるいはパラメトリックな方法ともいう) である。明示的方法とは、CCF の原因が明確であり、フォールトツリー (FT) など信頼性手法において独立な事象として容易に取り込むこと出来る場合に適している。一方、非明示的方法は、根本原因が不明確であり、FT など明示的に扱えないときに取られる方法である。非明示的方法では、機器故障の中での CCF の割合を推定し、それを用いて CCF 生起確率を算出した後、システム全体の故障生起確率の推定が行われる。一般に、冗長構造をもつサブシステムレベルでの PSA では、機器故障を明確で独立な共通原因基本事象に分解することは困難であり、非明示的方法により解析することが多い。このとき、CCF のモデル化手法として、 β ファクタ法、 α ファクタ法などが知られている。非明示的方法による解析においてもシステムの故障確率を求めるためには、最終的には FT のような明示的方法をとる必要があることから、2 通りの方法をそれぞれ適切に組み合わせた解析が必要となる。

以上の背景のもと、我々は、明示的方法における一般的な手法である FT、および非明示的方法において最も汎用性が高いと思われる α ファクタ法に焦点を当て、以下の問題を解決した新たな CCF 解析手法を提案する必要があると考えた。問題点とは

(1) FT は、本来従属である CCF を、複数の独立な故障事象に分解し、それを用いてシステム故障の定量化を行う。そのとき、機器間の従属性は多数の重複事象により表現され、この重複事象の存在により、厳密な解析が困難となり、解析可能な範囲が限定されること。

(2) α ファクタ法が適用できる範囲は、同一機能を有する小規模な冗長システムに限定されていること。また α ファクタ法を用いた際に生ずる誤差に関する議論が十分に行われていないこと。

(3) 機器の修理や取り替えなど運用を考慮した考慮した解析が行われていないこと。の 3 点である。

(1) に関して、我々は、時間的従属性を有する事象 (機器) から構成されるシステムの信頼性に関して、FT を用いて解析する手法すなわち、ダイナミック FT (DFT) の研究を行ってきた。DFT は従属性を表現する様々なゲートを組み込むことにより、従属事象を含む FT を直接定量化することが可能である。当初、マルコフ解析を用いる方法が主流であり、PSA における CCF 従来解析法と同様の状態爆発の問題が存在したが、近年、代数的手法の開発、ベイジアンネットワーク (BN) を用いる手法が開発された。しかしながら CCF を直接取り込めるダイナミックゲートは現在まで開発されていない。

(2) の α ファクタ法は、同一機能を有し、故障率が同一である機器から構成される冗長システムに対して、その解析方法が提案され、いくつかのシステム構造に対して、システムの故障確率の定式化が行われている。しかし、冗長構造として一般的な k -out-of- n 型システムの故障確率を算出する一般式は得られていない。また、実際に多く用いられている、同一機能を有するが、故障率が異なる機器から構成されるシステム、あるいは故障率が時間に依存し、特に次第に上昇する IFR 型の故障分布に対しては、有効な方法が知られていないという現状がある。

それとともに、 α ファクタ法は、本来従属である CCF 事象を独立な基本事象として扱うことにより定式化する方法であるため、システム故障確率に近似誤差が生ずるが、その誤差に関する議論は現在まで報告されていなかった。

(3) の問題は、一般に、部品の取り換えや修理により、システムの安全性を向上させることが行われるが、従来の CCF 解析ではその効果を取り入れることが困難であった。IFR 型故障分布の導入により、最適な点検時期、修理、取り替え時期に関する議論が可能となると思われる。

2. 研究の目的

原子炉等、事故による社会的影響が大きなシステムに対して、事故の生起確率と事故による影響を評価尺度とした、新たな確率論的安全評価手法の開発を行う。事故生起確率の算出に大きな影響を与える CCF を適切に考慮してシステムを評価するために、

(1) DFT を用いた CCF のモデル化の提案と、その解析法の検討

(2) 従来の代表的なパラメトリック手法である α ファクタ法の適用範囲の拡大と、解析誤差の検討、さらに、誤差が少ない新たな手法の提案

(3) システムの故障を防ぎ、安全性を高めるための点検方式に関する基礎的研究を行い、CCF を適切に組み込んだ、より現実的な PSA が可能な解析手法を開発する。

3. 研究の方法

研究の進め方は、大まかには、CCF 事例、解析方法の国内外の文献調査(□)に基づいて、現状の適用範囲、問題点を明確化したのち、研究目的(1)に関し、CCFを明示的にモデル化する手段としての、ダイナミックゲートの適用可能性を検討() および、CCFゲートを含むDFTの頂上事象生起確率を算出する効率的な手法の提案()を行う。また、研究目的(2)に関しては、従来の代表的なCCFモデル化手法である α ファクタ法を、 k -out-of- n 冗長システムに適用したときの、システム故障確率の導出() 機能・故障率が異なる機器間に拡張した改良 α ファクタ法の開発()、 α ファクタ法によりシステムの故障確率算出における解析誤差の検討()、また、研究目的(3)について、システムの長期運用を考慮し、部品の取り換え・修理を考慮した最適保全方策の検討()を行う。7段階の詳細は下記の通りである。

国内外の原子力施設の安全性に関する文献調査として、米国原子力規制委員会(NRC)、Electric Power Research Institute(EPRI)、国内では電力中央研究所、原子力規制委員会、原子力安全基盤機構などの報告書などを積極的に活用する。それらに加え、原子力関係の学会・国際会議に積極的に参加し、担当者から意見を聞くことによりCCFに関するデータおよび解析方法に関する情報収集を行う。同時に、研究目的(1)に係るDFT、BN等の解析手法、および研究目的(2)に関する、 α ファクタ法等のCCFモデル化手法の再調査を行う。また、本研究では、故障の影響を定量化するため、FMECAを使用するためこれらの再調査を行う。

既存のダイナミックゲートの中で、CCFともっとも近い特徴を有するゲートは、トリガー事象と複数の従属事象を持つfunctional dependency(FDEP)ゲートである。そこで、まずはFDEPゲートを用いて、CCFのモデル化、定量的評価手法の開発を行う。しかしCCFグループ内に複数のCCFの組み合わせが存在する場合、非常に多くのFDEPゲートを考える必要があり、結果として解析が困難になる可能性がある。そこで複数の組み合わせを同時に表現可能な新たなCCFゲートを考案し、単一CCFゲートの性質に関する理論的解明を行う。

CCFゲートを多数組み込んだDFTを解析し、事故生起確率を算出するための方法について検討する。他のダイナミックゲートに対して適用されている、マルコフ解析を用いる方法、BBD手法を適用した複合手法、BNを利用する方法、最小カットを求め、それを用いて生起確率を算出する方法等を用いて頂上事象生起確率を算出する方法の適用を試みる。また機器の故障分布が一般分布に従う場合の解析の可能性を検討する。これらの

解析結果は、モンテカルロ・シミュレーションを用いて妥当性に対する検討を行う。

従来の非明示的CCFモデル化手法の中で α ファクタ法に着目し、これを持って冗長システムの故障確率の算出を行う。従来は、 n が5以下である、ごく小規模な k -out-of- n 型システムに対してのみシステム故障確率が得られていたが、これを任意の k, n に対して得られるよう一般化を図る。

従来、非明示的CCFモデル化手法は、同一故障率を有する同一機器から構成されるシステムにのみ有効であった。この同一性の仮定は、解析を容易にするが、現実には、同じ機能を持っていても、仕様や製造メーカーの違いにより故障率が異なる場合が多々存在する。そのような冗長システムに対して、 α ファクタ法を適用するための検討を行う。すなわち、機能・故障率が異なる機器間に対するCCFに適用可能な改良 α ファクタ法の開発を行う。

非明示的CCFモデル化手法を用いてシステムの故障確率を算出する際には、通常、いくつかの仮定を設ける必要がある。CCF事象間の独立性に関する仮定、機器の同一性に関する仮定などである。これらの結果により生じる誤差の検討を行う。また改良 α ファクタ法を用いた方法、従来のCCFモデル化手法による方法と解析結果を比較検討し、提案手法の妥当性、優位性を確認する。その際、モンテカルロ・シミュレーションを実施することにより、2つの方法の誤差を比較する。

~の結果により時間に依存した解析が可能となるため、システムの長期運用を考慮し、運用コストと稼働率を評価尺度とした、最適な点検間隔、取り替え時期などの保全方策の基礎的検討を行う。

4. 研究成果

本研究では、研究方法の従来研究の再調査結果を踏まえ、研究方法からを検討し、以下の成果を得た。

(1) ダイナミックフォルトツリーの頂上事象生起確率の算出方法の改善

CCFをFDEPゲートのようなダイナミックゲートを用いて明示的に表現するとき、その頂上事象生起確率の算出方法について、BNを利用して解析する方法を提案した。CCFをFDEPゲートにより表現し、他のダイナミックゲートを多数含んだFTを解析した。BNにおいて重要な条件付き確率は、各シーケンスの生起確率を求めることにより算出した。この方法は、故障分布が一般分布にも適用可能である。解析の一例を図1に示す。図1は、9個のモーター、ポンプ、プロセッサなどが

らなる冗長構造を含むシステムにおいて、各機器がワイブル分布、ガンマ分布に従うときの頂上事象生起確率を表したものである。一般分布の提案手法、並びにそのモンテカルロ・シミュレーション値、および一般分布と平均が同じである指数分布での解析結果を示している。(雑誌論文 学会発表 図書)

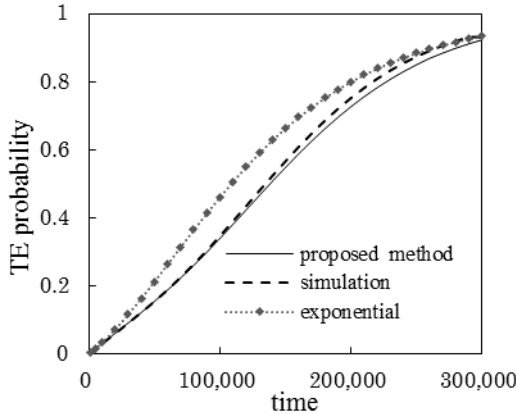


図1 DFTの頂上事象生起確率

(2) α ファクタ法の適用範囲の改善

従来の α ファクタ法の適用範囲を拡大するために、 k -out-of- n システムの故障確率 $F_{k/n}$ の一般式を導出した。すなわち $F_{k/n}$ は以下で与えられる。

$$F_{k/n} = \sum_{j=0}^{k-1} P_n(n-j) \quad (1)$$

ここで $P_n(j) = n! \prod_{i=0}^j \frac{Q_i^{x_i}}{x_i! (i!)^{x_i}}$ であり、 j 個の

機器が故障している確率を表している。また

$$X_j = \{x \mid x_0 = n - j, \sum_{i=1}^j ix_i = j\}$$

一方、 α ファクタ法を非同一機器から構成されるシステムに適用するための検討を行った。その結果、 n 個の機器から構成されるシステムにおいて、機器 i の総故障率のうち、機器 i を含むある特定の k 個の機器が同時に故障する割合 $\alpha_{ij}^{(k)}$ の推定方法を

$$\alpha_{ij}^{(k)} = \frac{n_{ij}}{\sum_{k=1}^n \sum_j n_{ij}}$$

により推定する方法を提案した。ここで j は k 個の機器が同時に故障する組み合わせの識別番号を表し、 n_{ij} はその組み合わせの機器が同時故障した故障データ数である。この $\alpha_{ij}^{(k)}$ を用いて、 k 個の機器が同時に故障する j 番目の組み合わせにてCCFが発生する確率 $Q_j^{(k)}$ を導出した。またこれを用いて、(1)式と同様の表現で非同一要素からなる k -out-of- n 型システムの故障確率を定式化した。(雑誌論文 学会発表)

(3) 冗長システムのCCF解析を α ファク

タ法で実施する場合の誤差の評価

α ファクタ法を用いてシステムの故障確率を求める際、通常2つの仮定と1つの近似手法が用いられる。すなわち、1)機器の同一性・対称性の仮定、2)CCF事象間の独立性の仮定、3)レアイベント近似、である。1)に関しては、研究の方法により排除が可能となった。残る2つの仮定および近似がシステム故障確率に与える影響を調査した。その結果の一例を表1に示す。表1は同一機器から構成される2-out-of- n システムにおいて、各機器の総故障率が0.01であり、そのうち2つの機器が同時故障を起こす割合 $\alpha_2 = 0.2$ 。以下 $\alpha_m = \alpha_{m-1}/2, m = 3, 4, \dots, n$ で与えられるとき、時刻100時間時点でのシステム故障確率を示している。A列はシミュレーションおよびマルコフ解析により得られた値(すなわち上記2)と3)の仮定を排除した厳密解)であり、B列は、3)の近似計算のみ排除した値、C列が一般に用いられている2)と3)の仮定および近似を併用した値である。B、C列における括弧の中の数字はA列の値に対する誤差を示している。

表1 2-out-of- n システムの故障確率

n	A	B (Error %)	C (Error %)
2	0.8347	0.7542 (-9.6)	1.1378 (36.3)
4	0.4389	0.4243 (-3.3)	0.6065 (38.2)
6	0.2012	0.2128 (5.8)	0.2944 (46.3)
8	0.0861	0.0947 (10.0)	0.1320 (53.4)
10	0.0351	0.0389 (10.8)	0.0553 (57.5)
15	0.0033	0.0034 (4.4)	0.0050 (54.4)
18	0.0009	0.0012 (30.4)	0.0018 (94.4)

C列の従来手法は非常に大きな誤差を含んでいることを確認した。一方、B列の事象間の独立性のみを仮定した解析では、誤差は減少するものの、特にシステム故障確率が小さい現実的な範囲において無視できない誤差が依然存在していることがわかった。この独立性の仮定は、 α ファクタ法等従来の非明示的手法では排除不可能であるので、これを排除するためには、従来とは全く異なるアプローチの開発が必要と言える。(雑誌論文 学会発表 図書)

(4) 運用を考慮し、稼働率、コストを評価尺度とした最適保全方式の策定

CCFを伴うPSAは、機器の故障分布として指数分布を仮定し、故障率の時間依存がないときの解析が行われてきた。しかしシステムの長期運用を考慮した時、故障率が次第に増加するIFR型故障分布を考慮する必要がある。その場合、適当な時期に点検、修理、取り替えを実施するモデルの解析が必要となる。特に、安全関連システムで多く用いられている非常停止装置のような1回使い切りのシステムに着目し、点検によってのみ装置の故障が発見され、故障が発見されたら小修理を実施

し、ある複数の故障が発見されたのちにシステムを更新するモデルを考え、点検間隔、更新時期に関して、稼働率とコストの観点から最適化を図った。図 2,3 は解析の一例を示す。通受故障、CCF を想定した、2 種類の故障モードがあり、それぞれワイブル分布に従い故障が生起すると仮定する。各故障モードごと異なる間隔 (T_1, T_2) で点検したときの稼働率およびコストレートの関係を示している。(雑誌論文 学会発表)

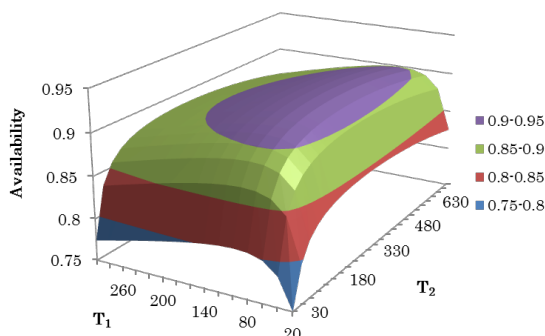


図 2 複数の点検周期を持つワンショット型システムのアベイラビリティ

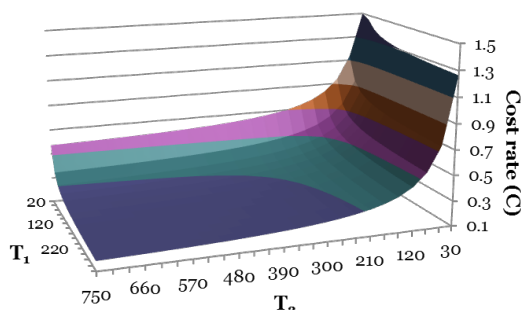


図 3 複数の点検周期を持つワンショット型システムのコストレート

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

Tomohiro Kitagawa, Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Periodic and Non-Periodic Inspection Policies for a One-Shot System with Minimal Repair, Journal of Japan Industrial Management Association, 査読有, Vol.66, No.4E, 2016, 387-395

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jima/66/4E/66_387/_article/-char/ja/

Tomohiro Kitagawa, Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Optimal Maintenance Policy of a Multi-unit One-shot System with Minimal Repair, 電子情報通信学会英文論文誌, 査読有, Vol.E98-A, No.10, 2015, 2077-2083

DOI:10.1587/transfun.E98.A.2077

Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Estimating

Failure Probability of a k -out-of- n System Considering Common-cause Failures, 電子情報通信学会英文論文誌, 査読有, Vol.E98-A, No.10, 2015, 2025-2030

DOI:10.1587/transfun.E98.A.2025

Tomohiro Kitagawa, Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Optimal periodic inspection interval and replacement policies for a one-shot system with minimal repair, Applied Mathematics, 査読有, Vol.6, No.2, 2015, 326-331

DOI:10.4236/am.2015.62031

Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Dynamic Fault Tree Analysis for Systems with Nonexponential Failure Components, 電子情報通信学会英文論文誌, 査読有, Vol.E96-A, No.8, 2013, 1730-1736

DOI:10.1587/transfun.E96.A.1730

Tetsushi Yuge, Shinya Ozeki, Shigeru Yanagi, Fault Tree Analysis Considering Sequence Dependence and Repairable Input Events, Journal of Quality in Maintenance Engineering, 査読有, Vol.19, No.2, 2013, 199-214

DOI:10.1108/13552511311315986

Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Dynamic Fault Tree Analysis Using Bayesian Networks and Sequence Probabilities, 電子情報通信学会英文論文誌, 査読有, Vol.E96-A, No.5, 2013, 953-962

DOI:10.1587/transfun.E96.A.953

[学会発表](計10件)

丸山 恵, 弓削哲史, 柳 繁, 多変量指数分布を用いたシステムの共通原因故障解析, 電子情報通信学会 2016 年総合大会, 2016 年 3 月 15-18 日, 九州大学(福岡)
Tomohiro Kitagawa, Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Maintenance Modelling for a System on Navy Ship, The 2nd East Asia Workshop on Industrial Engineering (EAWIE2015), 2015 年 11 月 6-7 日, Seoul (Korea)

Tomohiro Kitagawa, Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Non-periodic inspection and replacement policy for a multi-unit one-shot system with minimal repair, The 9th International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR2015), 2015 年 6 月 1-4 日, 筑波大学(東京)

Tomohiro Kitagawa, Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Optimal periodic inspection interval and replacement policies for a one-shot system with minimal repair, The 6th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability Modeling (APARM2014), 2014 年 8 月 21-23 日, 北海学園大学(札幌)

Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Failure

probability of a k -out-of- n system considering common-cause failures, The 6th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability Modeling (APARM2014), 2014年8月21-23日, 北海学園大学(札幌)

Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, System Failure Probability of a k -out-of- n System considering Common-Cause Failures, 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies, 2014年07月13-18日, Barcelona (Spain)

Tomohiro Kitagawa, Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Optimum periodic inspection interval and replacement policies for a one-shot system with minimal repair, 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies, 2014年07月13-18日, Barcelona (Spain)

弓削哲史, 柳 繁, 共通原因故障を考慮した k -out-of- n システムの故障確率, 電子情報通信学会信頼性研究会, 2014年6月13日, 機械振興会館(東京)

北川智大, 弓削哲史, 柳 繁, 小修理を伴うワンショットシステムの定期点検間隔及び交換方策, 電子情報通信学会 2014年総合大会, 2014年3月18日, 新潟大学(新潟)

弓削哲史, 柳 繁, システムの共通原因故障率の推定について, 電子情報通信学会信頼性研究会, 2013年10月18日, 九州工業大学(福岡)

防衛大学校・電気情報学群・教授
研究者番号: 50546041

(2)研究分担者

柳 繁 (YANAGI Shigeru)
防衛大学校・電気情報学群・教授
研究者番号: 10546039

(3)研究協力者

北川 智大 (KITAGAWA Tomohiro)

(4)研究協力者

丸山 恵 (MARUYAMA Megumi)

〔図書〕(計2件)

弓削哲史, 新版 信頼性ハンドブック, 第1部1.4.2節: ブロック図と冗長システム, 日科技連(日本信頼性学会編), 2014, 414-419(全915頁)

Tetsushi Yuge, Shigeru Yanagi, Chapter15: Dynamic Fault Tree Analysis, Reliability Modeling with Applications, World Scientific (ed. S.Nakamura, C-H.Qian and M. Chen), 2014, 271-290(全364頁)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

弓削 哲史 (YUGE Tetsushi)