The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Alpha-Decomposition for Cause-Informed Common Cause Failure Modeling through Bayesian Inference
Author(s)	Zheng, Xiaoyu
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27554
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

【175】

氏　　名	鄭（テイ）　嘯（ショ）　宇（ウェ）（Zheng Xiaoyu）
博士の専攻分野の名称	博　士（工学）
学　位　記　番　号	第　２６２４１　号
学位授与年月日	平成25年３月25日
学位授与の要件	学位規則第４条第１項該当 工学研究科環境・エネルギー工学専攻
学　位　論　文　名	Alpha-Decomposition for Cause-Informed Common Cause Failure Modeling through Bayesian Inference （ベイズ推定を用いた要因別αファクター分解モデルによる共通原因故障確率の定量化に関する研究）
論文審査委員	（主査） 教　授　山口　　彰 （副査） 教　授　中村　隆夫　　准教授　高田　　孝　　准教授　帆足　英二

論　文　内　容　の　要　旨

Traditional Basic Parameter Models (BPMs) for Common Cause Failure (CCF) modeling has focused on the occurrence frequencies of CCF events. The Alpha-factor model is the most widely adopted parametric model. Joint distributions of lumped parameters in the alpha-factor model are determined by a set of possible causes. Each possible cause has innate CCF-triggering ability and occurrence frequency. Cause-informed CCF modeling aims to provide a quantitative assessment of the risk from the shared causes and coupling factors for a system with redundant components. The purpose of this research is to investigate the numerical relationship between common causes and CCF risk as well as to reduce the uncertainty in the system-specific CCF parameter estimation.

This dissertation presents an approach which is named as the alpha-decomposition method. A Hybrid Bayesian Network is adopted to demonstrate the relationship between component failures and possible causes. The alpha factors in the alpha-factor model are re-notated as global alpha factors and the CCF-triggering abilities of causes are notated as decomposed alpha factors. A regression model is determined and proved by the theory of conditional probability, in which the global alpha factors are represented by explanatory variables (cause occurrence frequencies) and parameters (decomposed alpha factors). Databases combining with the CCF data and cause occurrence record are recommended to be built. The features of the alpha-decomposition method and calculation process are illustrated by numerical examples.

This dissertation demonstrates the analysis of modified system involving the construction and degradation of defense barriers against dependent failures. An important element in CCF analysis is the coupling factor. The coupling

factor is the condition that multiple components are affected by the same cause. The susceptibility of a certain system to dependent failures will be changed if a defense mechanism is introduced to interrupt the coupling factor. After the additional flood barriers are constructed, the CCF parameters of the Auxiliary Feedwater (AFW) Pump system are predicted according to the alpha-decomposition method. Furthermore, the seismic event will induce the failure of non-safety related water supply systems and the degradation of additional flood barrier. A Markov model is introduced to model the degradation process of flood barriers. It is illustrated by a numerical example that the dynamic CCF risk analysis after the occurrence of seismically-induced internal flood and flood barriers failure. The prediction of CCF parameters can be applied in the estimation of basic events in nuclear Probabilistic Risk Assessment (PRA). This research describes an approach which can be used to evaluate the plant- and system- specific CCF parameters based on generic databases.

論文審査の結果の要旨

高い安全性を要求される大規模工学施設などでは、安全設備に多重性や多様性を持たせることにより、安全機能の信頼性を確保する。そして確率論的リスク評価などによりその信頼性の程度は定量化される。しかしながら、多重の設備が同時に損傷することにより、安全機能が一度に失われるということが、工学におけるリスク管理の観点から重要な課題である。これを共通原因故障という。その例は、地震などの外的事象により複数の設備が同時に損傷を受ける場合、設置場所が同じなどにより複数設備が環境影響を受ける場合、共通の電源などに依存していることにより同時に機能喪失する場合などである。それが顕在化した例は、東日本大震災における福島第一発電所の事故であった。これらは、慎重な安全設計により回避すべき重要問題であるが、共通原因故障そのものが稀にしか発生しない現象であり、またその定量化手法の開発も容易ではない。

本論文は、共通原因故障をその根本要因に立ち返って分析し、定量化するとともに、その可能性を低減させるため評価手法を提案するとともにその有効性を定量的に示すものである。第１章では、共通原因故障の定義を与え、その特性を分析するとともに、本研究の動機を論じている。また、ここで提案する評価手法を確率論的リスク評価に適用する際に用いる、ベイズ推定理論とマルコフ連鎖モンテカルロ法について概説している。

第２章においては、共通原因故障に関する既往研究を広範にレビューし、重要な未解決の課題を指摘している。共通原因故障の評価モデルはいわゆる基本パラメータモデルと言われる共通原因故障の発生頻度によるものあり統計頻度論的手法ということができる。その中でも広く利用される手法はαファクター法と呼ばれるものである。本論文で提案する要因別αファクター分解モデルは、共通原因故障を引き起こす根本要因ごとに分析を行い、関連因子を定義する方法であり、既往の手法とは発想の異なるアプローチである。

第３章では要因別αファクター分解法を提案している。機器・系統の全故障数に対する共通原因故障の割合を全体αファクター、根本要因ごとの寄与を分解αファクターとした。そして、共通原因故障とその根本要因をハイブリッドベイズネットワークで結合させて数学的に関連づけた。この考え方を多重度が３のシステム(2 out of 3)に適用し、共通原因故障の定量化を例示した。その結果、αファクターの不確かさを数十パーセントも低減するとともに、共通原因故障に対してどのような根本原因の寄与が大きいかを定量化することに成功した。

第４章では、施設に固有の安全に関するデータを活用することにより、評価精度を向上させる手法を提案した。まず、共通原因故障に関するデータベースのプロトタイプを作成し、これを用いてベイズ推定によりαファクターの評価を行った。その結果、αファクターが確率分布として得られる。施設に固有の情報を導入することの効果により、共通原因故障を防ぐための有効なきめ細かな情報を提示することができた。昨今の確率論的リスク評価では、施設の安全性の評価は当該施設の特徴を踏まえた固有の評価により、重要なシナリオ、発生頻度、共通原因故障の影響などを分析することが求められている。本手法の提案は、施設固有のデータベースを構築できれば、そのような要求を満たすことができることを示した意義ある成果であり、将来において、実用的な手法として普及するものと期待される。

第５章は、米国の原子力発電所で洪水の対策として区画を水密化した事例に、本研究成果を応用したものである。水密化設備の部分損傷と水密機能喪失のモードを定義しマルコフ過程により水密性の状態を評価した。また、各区画への浸水挙動を流動の方程式を解くことにより定量化した。要因別αファクター分解法にマルコフ過程による水密性の状態（構造的損傷状態）評価と流動方程式による浸水影響評価を組み合わせ、実際の発電所の安全問題に応用性があることを示した。

以上のように、本論文は高度の安全を達成すべき工学施設における共通原因故障という、安全性に関する重要な問題を定量評価する手法を提案している。これは、実用性が高くかつ独創性に富む研究であると評価する。また、本手法の応用例が蓄積されることにより、将来は広く確率論的リスク評価に活用されるものと期待する。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。