

学位論文及び審査結果の要旨

横浜国立大学

氏名	河津 要
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	環情博甲第529号
学位授与年月日	令和5年3月23日
学位授与の根拠	学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第4条第1項及び横浜国立大学学位規則第5条第1項
学府・専攻名	環境情報学府 人工環境専攻
学位論文題目	宇宙機システムのライフサイクルを通したリスク視点での複合物理・システムレベルモデル活用フレームワークの研究
論文審査委員	主査 横浜国立大学 教授 三宅淳巳 横浜国立大学 教授 大矢 勝 横浜国立大学 教授 澁谷忠弘 横浜国立大学 准教授 伊里友一朗 九州大学 准教授 井上智博

論文及び審査結果の要旨

今後のさらなる宇宙活動の推進とその領域拡大に向けて、多様かつ複雑なミッションに対応すべく、宇宙機システムとその機能のより一層の高度化が進められている。加えて、近い将来、国際宇宙探査等の取り組みを支える基盤として、軌道上や月面での推薬補給等のサービス提供とそのための宇宙インフラの構築が必要となる。一方で、それらの実現に向けて、限られたリソースや厳しい制約のもと、これまで以上に効率的なリスクアセスメントや、合理的なリスクへの対処等が求められている。昨今の情報・計算工学技術やデータサイエンス技術等の目覚ましい発展・進歩に伴い、リスクアセスメントにおけるリスクの定量化や、リスクへの対処方策の確実化において、モデル活用が進められているものの、対象となる宇宙機システムのライフサイクルを通したモデル活用のフレームワークとして未だに確立されていない。

本研究における“宇宙機システム”の定義として、コンポーネント／サブシステム／システムといった構造における“静的なシステム”を指すものではなく、多数の要素が結合し相互に作用しあう“動的なシステム”を指すものとした。また、宇宙機システムは、複雑なシステム構成であるが故に多領域にわたる相互作用を内包しており、高度な機能により利便性や経済性を実現するシステムである。そのため、多数の要素が有機的に結合し全体として特定の機能をもつものという定義において、工学システムの一つである。一方で、その社会実装のフェーズとして、これから広く導入・普及されつつある段階にあることから、運用実績やデータの蓄積が乏しいという課題を有しているという観点において、本研究においては、宇宙機システムを“先端的工学システム”として定義した。

これまでの宇宙機の軌道上での異常や不具合の要因として、事前の検討／評価／検証が不足していたことが挙げられている。この背因として、宇宙機システムの開発に必要とされる知識は総合工学であり、広い分野の知識が必要とされる点が挙げられている。また、宇宙機ならではの課題として、無重力環境等の実運用条件の地上での再現が難しく、かかるコストが膨大であるといった点も指摘されている。そこで本研究では、宇宙機システムが内包するリスクの観点において、ミッションの失敗や安全性の喪失につながるリスク事象としてどのようなことが起き得てしまい、その結果がどのような被害や影響につながるのか、そのような事態はどの程度起き得てしまうのかを、より確からしく特定／分析／評価し、そのリスクに適切に対処することで、ミッション成功や安全性の確保に資することを本研究の目標とした。

この目標の達成に向けて、本研究では、宇宙機システムを対象としたリスク視点での複合物

理・システムレベルモデルの活用について、宇宙機システムのライフサイクルを通じたモデル構築、検証、及び活用の一連のプロセスとして、そのフレームワークの構築に取り組んだ。また、提案手法とそのフレームワークについて、宇宙機システムへ適用によりその効果を確認した。さらに、宇宙機システムと同じく、今まさに本格的な普及フェーズに移行しつつあることから、先端的工学システムとしての共通的な課題を有する、水素ステーションへの提案手法の展開を通してその有効性を確認した。

第1章では、本研究の背景と目的として、宇宙機システムの現状と将来動向を踏まえた課題と、その課題の中でも、特に宇宙機の動的なシステムとしてのリスクに着目した理由を述べるとともに、課題解決に向けた本研究の構成とその対象について概説した。

第2章では、これまでの宇宙機システムのリスクとして、軌道上での不具合とその要因・背因について調査した結果を整理するとともに、既存のリスクマネジメントの取り組みや既往研究でのアプローチを調査し、その問題点を指摘した。従来のリスクアセスメント手法である FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) や FTA (Fault Tree Analysis) は、過去の開発・運用経験から得られた専門知識に依存しており、かつ複雑・大規模なシステムの場合、それぞれをコンポーネント/サブシステム単位に分割し、それぞれを担当する技術者/組織に分かれて実施されることが多い。そうした状況から、宇宙機システムにおいて、システムレベルの故障モードを正確かつ包括的に特定し、分析することは、動的な物理現象が複雑に絡み合うシステムレベルの相互作用により困難となる。また、リスクへの対処方策の一つとして、冗長化や多重防護による信頼性と安全性の確保が図られているが、それらの適用により、宇宙機システムは重厚長大なものとなってしまう。さらに、リスクへの対処方策として、FDIR (Fault Detection Isolation Recovery) 機能による異常検知/隔離/回復は、宇宙機システムに広く適用・実装されており、システムの信頼性・安全性を高めるために有効な手法の一つであるが、その設計には経験豊富な安全技術者の専門知識が必要となる。こうした課題を踏まえ、本研究において、従来のリスクマネジメントにおけるドキュメントを中心とした組織/企業間でのインターフェース管理や定性的でかつ静的な分析に加えて、複合物理・システムレベルモデルの活用により、対象システムを動的なシステムとして取り扱い、かつ多領域にまたがった相互作用を考慮可能とすることに取り組むこととした。

第3章では、リスク視点でのモデル活用について、現状の取り組みや既往研究での問題点として、対象システムを静的なシステムとしての構造・プロセスに着目した事例が多く、動的なシステムとしての振舞いについて十分に取り組みが進められていない点を指摘した。また、本研究でその活用に取り組む複合物理・システムレベルモデルについても、設計・開発の上流フェーズでの適用に留まっており、そのメリット・効果が十分に引き出されていない点を指摘した。こうした問題点を踏まえ、複合物理・システムレベルモデルについて、宇宙機システムのライフサイクルを通じたリスク視点での活用フレームワークを提案した。本研究では、リスク視点での複合物理・システムレベルモデルの活用にあたり、既存の取り組みのように設計プロセスの上流・下流フェーズでの使い分け・分別をすることなく、宇宙機システムのライフサイクルを通じた活用を提案した。その際に重要となるのがモデルの検証であり、モデルの検証度合によって、リスク分析・評価の結果の確からしさが大きく左右されてしまうことになる。特に、モデル検証のためのデータ取得機会が限られる宇宙機システムにおいては、宇宙機システムのライフサイクルを通して、モデル・ツールの検証の度合いを高めていくことが必要となる。そこで、各フェーズにおいて、モデルの構築/検証/利用/改善・利活用のサイクルを連続的に回し、設計・開発の進捗に応じてモデルを段階的に更新・統合するアプローチを提案した。

第4章では、3章において提案したリスク視点での複合物理・システムレベルモデルの活用フレームワークについて、具体的な対象として、宇宙機システムの中でも特にミッション成功や安全性確保の観点で重要なシステムの一つである宇宙機の航法誘導制御・推進システムを対象とした適用結果を示し、提案したフレームワークの適用によって得られる効果を明らかにした。複合物理・システムレベルモデルのリスク分析での活用の重要な効果の一つは、配管系統を介した水撃サージ圧の伝播・波及 (Cross-talk) のような、システムレベルの望ましくない事象によって引き起こされる性能低下や異常事象等の定量的な評価が可能となったことである。さらに、その後のリスク対処での異常検知・故障診断を目的としたモデルの利活用により、モデルの段階的な

成長、モデルの継承・再利用、情報・データソース管理など、モデルベース手法のメリット・優位性を引き出すことにつながった。

第5章では、宇宙機システムを対象としたリスク視点での複合物理・システムレベルモデルの活用について、先端的工学システムとしての共通的な課題を有する水素ステーションへの展開に取り組んだ。その結果、水素ステーションを対象とした定量的リスク評価において、従来のリスク分析手法と比較して、より物理的かつ現実的な水素漏洩量の評価結果を提供することが可能となった。また、水素ステーションの既存の安全対策のひとつである過流防止弁について、その代替案となる簡易オリフィスについて、安全性の観点に加えて、利便性の観点での定量的なトレードオフ検討を可能とした。

以上より、リスク視点での複合物理・システムレベルモデルとその活用フレームワークを宇宙機システム、及び水素ステーションを対象としたリスクアセスメント、及びリスクへの対処方策の検討に適用した結果、より効率的なリスク定量化と、合理的なリスクへの対処方策の検討が可能となり、本フレームワークの有効性が検証された。

以上の成果は次世代宇宙機システムの開発に大きく貢献するものであり、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと認められ、合格と判定した。

注 論文及び審査結果の要旨欄に不足が生じる場合には、同欄の様式に準じ裏面又は別紙によること。