

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02045

研究課題名(和文) 予防安全に向けたシステムの強靱性分析手法に関する実践的研究

研究課題名(英文) Research on System Resilience Analysis Method for Proactive Safety Management

研究代表者

狩川 大輔 (Karikawa, Daisuke)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40436100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,700,000円

研究成果の概要(和文)：状況変化や不測の事態に対する人・組織・システムのレジリエンスを高めることによる大規模複雑システムの安全性向上の支援を目的として、複雑システムの典型例である航空管制業務を対象に、多様かつ変化する条件下で日々の成功裏のオペレーションを支えている航空管制官の能力や備えを抽出・整理する手法の開発を行った。また、得られた知見をFunctional Resonance Analysis Method (FRAM) を用いて記述する手法を開発し、日常業務がなぜ上手くいくのかを説明するという方向からのモデル構築を行った。これらの研究を通じて、システムのレジリエンスを分析する上での基礎となる手法と知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、失敗面だけではなく成功面にも着目して教訓を得ることにより、複雑システムの一層の安全性向上を目指す新たな安全の考え方(Safety-II)が提唱され、注目を集めている。しかしながら、日常業務の成功裏の遂行を支えている要因をどのようにして抽出・整理するかなど、その実用化に向けた課題は未だ少なくないのが現状である。本研究を通じて得られた成果は、様々な条件変化の中で行われている日々の業務がなぜ上手くいくのかの明示的な説明とモデル化に資するものであり、システムの変化への適応能力(レジリエンス)を分析する上での基礎となる知見である。

研究成果の概要(英文)：A new safety perspective of safety called "Safety-II" aims at the enhancement of the safety of large-scale complex systems by improving the resilience of operator personnel, organizations, and systems. Taking Air Traffic Control (ATC) as an example of a complex system, the present study has proposed extraction and modeling methods of controller's abilities and readiness contributing to successful daily operations of ATC. By using the proposed methods, a functional model of ATC based on Functional Resonance Analysis Method (FRAM) has been developed. The characteristics of the model is that it depicts ATC tasks from the viewpoint of why things go right. The proposed extraction and modeling methods could be bases for analyzing system resilience.

研究分野：ヒューマンファクターズ

キーワード：レジリエンス 認知タスク分析 安全マネジメント Safety-II 航空管制 ヒューマンファクターズ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

航空・鉄道・プラント等の現代の複雑システムは、多数の人・組織・技術システムによって構成される「社会技術システム」である。そこで発生する事故は、その時々状況や構成要素間の相互作用によって生じる創発現象と考えられ、特定可能な少数の原因に起因して発生するというよりも、むしろシステムを構成する各要素が担う機能の揺らぎ（単体では安全上問題ない程度のパフォーマンス低下や出力の遅れなど）が偶然重なり、増幅されて事故に至るとする「機能共鳴型事故」という概念が提唱されている[1]。このようなシステムや事故生起メカニズムの複雑化に対して、失敗（ヒューマンエラーや違反など）とその原因の特定・除去に注目してきた従来の安全学（Safety-I）の限界が指摘されており[2]、安全実現の方法論の高度化が強く求められている。

Safety-I の限界を補い、社会技術システムの安全性向上を図るための新たな安全学として提唱されているのが「Safety-II」である。Safety-II は、人や組織の状況適応能力（レジリエンス）を高めることで状況変化や不測の事態に対して強靱なシステムを実現し、システムの破局を防止することを基本指針とする。Safety-II が従来の安全学や安全実務を大きく進歩させる可能性には高い関心が集まっているが、既往研究の多くが2009年のUS Airways 1549便の不時着水や2011年の東日本大震災等の大規模な外乱に対するレジリエンス向上に焦点を当てているのが現状である。そのため、稀な大災害時のみならず、日常的なオペレーションの安全性向上問題に対するSafety-II概念の適用手法の確立が強く望まれている。平常時における社会技術システムのモデル化と安全分析を意図した手法としては、システムを機能のネットワークとして記述する機能共鳴分析手法（Functional Resonance Analysis Method: FRAM）[3]が提案されているが、現状では、事後的な事故分析や巨視的な視点からのシステムの記述・分析への適用にとどまっており、日常的な安全マネジメント高度化に向けた適用可能性や有効性は明らかにはなっていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、Safety-II概念の日常的な安全マネジメントへの適用手法として、「高詳細度FRAMモデルを用いた外乱に対するシステムの強靱性分析手法」を提案すると共に、複雑システムの一例として飛行場管制システムに対して適用し、実践的な有効性評価を行う。それを通じて、日常的なオペレーションの安全性向上問題に対するSafety-II概念の適用方法論の確立を図る。

### 3. 研究の方法

#### (1) FRAMを用いた飛行場管制業務の記述手法およびモデル可視化・分析支援ツールの開発

管制官に対するインタビュー調査を行うと共に、その結果に基づき、飛行場管制業務のプロトタイプFRAMモデルを構築する。また、モデル化の際の指針や適切な記述の詳細度を明らかにする。また、環境条件の変化や時間的な切迫等の攪乱が各機能に与える影響をFRAM上でシミュレーションする手法を開発し、FRAM可視化・分析支援ツールとして実装する。

#### (2) 高詳細度FRAMモデルの構築と熟練者からの知識抽出手法の開発

プロトタイプFRAMモデルに対する管制官との共同レビューと適宜の追加・修正を通じて、飛行場管制業務の高詳細度FRAMモデルとして完成させる。また、このようなFRAMモデルを媒介とした協働プロセスを通じた知識抽出が可能であることを示す。

#### (3) システムの強靱性分析の実施と有効性評価

高詳細度FRAMモデル上のシステムに様々な外乱を加え、その影響を管制官と共同で分析する。外乱に対する管制官の対処方法を調査することにより、システムの潜在的リスクのみならず、システムの強靱性に対する管制官の寄与についても明らかにする。分析結果の安全マネジメントにおける有効性について、現場サイドの安全マネジメント担当者による評価を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) FRAMを用いた飛行場管制業務の記述手法およびモデル可視化・分析支援ツールの開発

本研究項目では、まず、飛行場管制業務の高詳細度FRAMモデルの構築に向けた管制官の認知・判断プロセスに関する調査、ならびに調査結果に基づくFRAMモデルの試作に通じた記述手法の検討を行った。飛行場管制業務における管制官の主要な情報源は管制塔からの目視であるため、認知・判断プロセスを分析・モデル化する上での根拠となるデータを得ることが非常に難しく、先行研究も稀有である。このため、インタビュー、シミュレータ実験、現場観察・記録等の複数の手法を検討・試行し、最終的にインタビューを主としたデータ取得を行うこととした。調査対象の空港における飛行場管制業務を担当する管制官の各役割（飛行場管制席、地上管制席、管制承認伝達席、調整席、統括席）の業務に関するインタビューデータに基づいて、管制業務に共通する特徴であるマルチタスクを成功裏に行う上で必要とされる7つの認知的機能を抽出すると共に、FRAMを用いたモデルとして記述した。この試行を通じて、モデルのアウトプットを業務のある一部の要素に絞り込み（例えば、「マルチタスクの実行」）、それを達成するために必要な

機能的側面に着目することにより、多様な状況を扱う管制業務のモデルを過度に複雑化させることなく構築可能であることを見出した。また、(2)で詳細に述べる管制官に対する半構造化インタビューを通じて、管制官が業務の遂行を複雑化させる様々な阻害要因に対して発生防止や影響緩和のための対処を行いながら成功裏に業務を行っていることが明らかになったため、それらを「基本機能ノード」「スレットノード」「対処ノード」の3種類のノードを用いて記述するFRAMモデル記述手法を開発した。各ノードの詳細は以下のとおりである。

基本機能ノード：目標となるアウトプットを達成する上で最低限必要となる機能

スレットノード：基本機能の実行を複雑化させたり、実行する際の制約条件になったり、あるいは適切なタイミングでの実行を阻害する可能性のある要因

対処ノード：管制官はスレット要因を認識し、それらの発生を抑制したり、あるいは影響を緩和するための対応をとりながら業務を行っている。対処ノードは、このようなスレット要因に対する事前・事後の対応を表す。

なお、上記の各ノードを用いたFRAMモデルの可視化・分析支援ツールについては、試行の結果、既存のFRAM Model Visualizer[4]が適用可能であることが明らかになったため、これを用いることとした。

### (2) 高詳細度 FRAM モデルの構築と熟練者からの知識抽出手法の開発

管制官の業務プロセスの特徴を表す「基本機能ノード」「スレットノード」「対処ノード」の3種類のノードに対応した形で質問項目を整理・構造化するインタビュー指針を明示化した。また、それを用いたインタビューを通じて得られた結果をもとに、飛行場管制席の業務を対象とした高詳細度 FRAM モデル (図 1) を構築した。図 1 中で、各ノードは色によって表現されており、基本機能ノードは緑色、スレットノードは赤色、対処ノードは青色で示されている。例えば、飛行中または地上走行中の航空機からの呼び込みは、他の機能を実行する上での阻害要因となる可能性があるため、スレットノードとして表されている。これに対して管制官は、事前に情報を提供することによってパイロットからの呼び込みを抑制する等の事前対策をとったり、必要に応じて地上走行中の航空機からの通信を避けるために他席の管制官が業務移管のタイミングを調整するなど、管制官個人あるいはチームとしての対処を行いながら、成功裏に業務を行っていることが図 1 上に示されている。このように、主要な業務とそれを複雑化させるスレット、およびスレットに対する事前・事後の対処という3つの観点から熟練者の知識を抽出・整理し、モデルとして記述する一連のフレームワークを開発した。

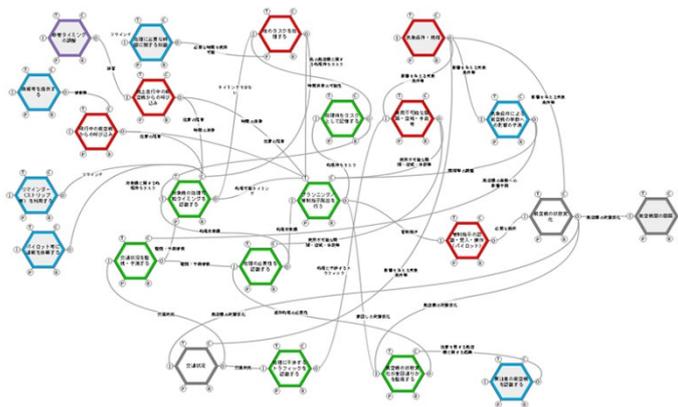


図 1 構築した高詳細度 FRAM モデル

### (3) システムの強靭性分析の実施と有効性評価

構築した高詳細度 FRAM モデルの予備の有効性評価として、新たに航空会社の安全マネジメント担当者のご協力を頂き、安全マネジメントの実務や課題に対する情報提供を受けると共に、高詳細度 FRAM モデルの応用可能性について意見交換を実施した。その結果、①安全関連事象の分析と対策立案にあたって、現状では特定事例の再発防止が偏重される傾向があるが、より一般的・汎用的な分析と対策を支援する必要がある、②高詳細度 FRAM モデルに関しては、実際の安全マネジメント業務で使用するためには FRAM モデル自体への習熟に多くの時間を必要としないようにシンプル化を図る必要がある、という課題が明らかとなった。これらの課題に対して、航空安全自発報告制度で公開されている事例を対象とした試行的分析を行うことを通じて、高詳細度 FRAM モデルの妥当性評価と改良を行った。ま

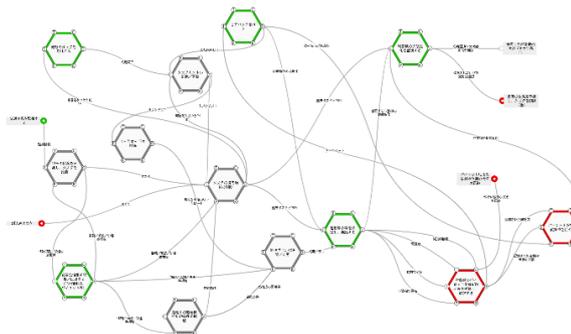


図 2 シンプル化を図った FRAM モデル

た、シンプル化のために、モデルへの明示的な記述を「基本機能ノード」のみにとどめ、分析中に必要な「スレットノード」や「対処ノード」を考慮していく方式をとることとし、それを前提とした新たな FRAM モデル（図 2）を構築した。

これらの枠組みを用いて実際に現場の実務者との協働を通じたシステムの強靭性分析を試行するまでには至らなかったが、「基本機能ノード」「スレットノード」「対処ノード」の 3 種類の観点に基づくインタビュー指針および整理・モデル化手法の開発や、安全マネジメント実務に対する適用を想定した詳細度・抽象度の FRAM モデルの構築など、特定事例の再発防止にとどまらず、システムのレジリエンス分析に基づく安全性向上を図る上での基礎となる手法と知見を得ることができた。

#### 参考文献

- [1] Hollnagel, E., *Barriers and Accident Prevention*, Routledge, (2004).
- [2] Hollnagel, E., *Safety-I and Safety-II*, Ashgate, (2014).
- [3] Hollnagel, E., *FRAM: The Functional Resonance Analysis Method*, Ashgate, (2012).
- [4] FRAM Model Visualiser (FMV),  
<https://functionalresonance.com/the%20fram%20model%20visualiser/index.html>  
(2020.5.28 参照).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 狩川大輔、青山久枝、大橋智樹、高橋信
2. 発表標題 飛行場管制業務におけるマルチタスク能力指標に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本人間工学会第59回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Karikawa, Hisae Aoyama, Tomoki Ohashi, Makoto Takahashi, Masaharu Kitamura
2. 発表標題 Resilience of Air Traffic Controllers in Control Tower
3. 学会等名 8th REA Symposium on Resilience Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青山久枝、飯田裕康、狩川 大輔
2. 発表標題 航空管制業務のタスク処理プロセスにおける処理待ちタスクの影響
3. 学会等名 日本人間工学会第60回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 狩川大輔、青山久枝、大橋智樹、高橋信、北村正晴
2. 発表標題 機能共鳴分析手法を用いた航空管制業務のモデル化(1) - 状況変化に対する航空管制官のパフォーマンス調整のモデル化 -
3. 学会等名 ヒューマンインタフェースシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青山久枝、飯田裕康、狩川大輔
2. 発表標題 機能共鳴分析手法を用いた航空管制業務のモデル化(2) - 処理待ちタスクと航空管制官のワークロードの関係性に関する考察 -
3. 学会等名 ヒューマンインタフェースシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 機能共鳴分析手法による航空管制業務のモデル化
2. 発表標題 青山久枝、狩川大輔、飯田裕康
3. 学会等名 日本人間工学会第61回大会
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
研究分担者	高橋 信  (Takahashi Makoto)  (00243098)	東北大学・工学研究科・教授    (11301)	
研究分担者	大橋 智樹  (Ohashi Tomoki)  (00347915)	宮城学院女子大学・学芸学部・教授    (31307)	
研究分担者	青山 久枝  (Aoyama Hisae)  (40392790)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・電子航法研究所・上席研究員    (82627)	