

論文の内容の要旨

論文題目 ヒューマンエラー・マネージメントの観点からのフライトデッキ概念設計手法に関する研究

氏 名 井手 陽介

航空機事故発生率は近年世界的に一定に推移しており、発生原因の多くがパイロットに関わるものとされている。パイロットのヒューマンエラーを管理するため、クルー・リソース・マネージメントやフライト・マネージメントといった研究が行われ運航・訓練分野で実践されてきた。更に、新たに制定された FAR/CS25.1302 では、設計分野でもヒューマンエラー・マネージメントが要求されるようになった。従来のフライトデッキ開発では、ヒューマンエラー評価は後工程の開発段階でシミュレータ等を用いた実験的手法が中心であり、概念設計段階では操作性のみ評価されていた。一方で、日本で新たに開発されているリージョナル・ジェット機も同新規規定に適合する必要があるが、フライトデッキ開発経験が無い場合フライトデッキ全体の概念設計から行う必要がある。また、後工程のフェーズで規定適合に問題があることが分かった場合は設計変更により時間を要する。加えて、大型機と比べてフライトデッキ空間に限界があるリージョナル・ジェット機では、機器配置の設計が難しい。

以上を背景に、本研究では概念設計段階にヒューマンエラー・マネージメントを反映する手法を構築する。従来の概念設計段階における操作性評価に加えて、ヒューマンエラー評価を導入した解析的手法を構築し、その有効性を確認することで、今後の実機開発に資することが本研究の目的である。新規参入の航空機メーカーでも、後工程フェーズで大きな設計変更を生じさせることなく短期間でフライトデッキを開発することに活用できる。

まず、ヒューマンエラー解析の先行研究を分析し、フライトデッキ概念設計に適用可能な手法を選定する。原子力分野では、人間信頼性解析(HRA: Human Reliability Analysis)の各種定量的手法が研究されている。HRA では、ヒューマンエラー発生確率は基準過誤確率(HEP: Human Error Probability)と行動形成因子(PSF: Performance Shaping Factor)の積で求められ、前者は行動・認知・判断等における基本的なヒューマンエラー発生確率であり、後者は内的・外的な要因による発生確率の増減を示す。HRA の各種手法の中から、認知行動モデルも考慮し、航空宇宙分野におけるヒューマンエラーの実データの再現性が最も高かった CREAM 手法を本研究に適用する。併せて、本研究では定量的解析結果を検証するため、フライトデッキの FAR/CS25.1302 適合性評価のために開発されたヒューマンエラー・テンプレート(HET: Human Error Template)を定性的解析手法として用いる。

本研究で提案する設計手法の検討ステップは、1)タスク分析、2)ヒューマンエラー識別、3)モデル化、4)ハザードに至る確率の算出、5)ヒューマンエラー・マネージメントと操作性の最適化の 5 ステップから成る。各ステップの概要を以下に示す。まず、1)ヒューマンエラーによって至るハザードのうち、安全性への影響度が大きいプロシージャ(ノーマル及びノンノーマル)毎にタスクを整理する。次に、2)各タスクに関して、CREAM 手法を用いて起こり得るヒューマンエラーの識別を行う。更

に、3)識別されたヒューマンエラーについて、イベントツリー形式にモデル化しハザードに至る因果関係を整理し、4)イベントツリーの各分岐においてヒューマンエラー発生確率(=基準 HEP×PSF)を計算し、ハザードに至る確率の総和を算出する。最後に、5)同ハザードに至る確率と、ヒューマンエラー・マネジメントと関連性の高い操作性をもう 1 つの評価関数として多目的最適化問題を解くことで、両者のバランスのとれた設計解を得る。ここで、操作性は腕の到達範囲(Reach Zone)を用いた評価関数とし、ハザードに至る確率については機器配置のゾーン数に応じて PSF が変化する評価関数とする。その上で、フライトデッキ操縦・操作機器をいずれのゾーンに配置するかを検討する。最適化手法には、短時間で非線形の多目的最適解を得られる遺伝的アルゴリズムを適用し、本問題の特徴から NSGA-II 及び巡回セールスマン問題を組み合わせた手法とする。多目的最適化の結果得られた設計解と既存機の機器配置に基づく値と比較し、同等以上であれば、フライトデッキ機器配置を設計する指針とすることができる。

本手法の有効性を確認するため、リージョナル・ジェット機程度の機体規模のフライトデッキを想定した設計検討例を示す。具体的には、ノーマル及びノンノーマルの代表的な 8 つのシナリオでパイロットのタスクを分析し、CREAM 手法を用いてヒューマンエラーの識別を行った。ヒューマンエラーからハザードへと至る過程をイベントツリー形式で整理し、基準 HEP と PSF を用いてハザードに至る確率を算出した。独立変数として 20 種類の機器をいずれのゾーンに配置するか検討し、操作しやすいゾーンには配置可能な機器数に制約を設けた。以上の条件で、一様乱数でランダムに発生させた初期個体(50 個体とした)から 20 世代に渡って遺伝的アルゴリズムを用いて、操縦・操作機器の配置を最適化した。

検討例に関する考察から、以下の結論を得た。i)最適化計算結果からは、既存機よりも優れた解を得ることができた。これはハザードの安全性への影響が小さい照明システムの優先度を既存機より低くすることで、良い評価値を得ている。また、既存機の中にも、操作性が優秀なものと、ヒューマンエラーからハザードに至る確率が低いものと傾向が異なることが分かった。本手法ではパイロットと航空機の役割の異なる機種間でも、設計解の良し悪しを比較することができた。ii)本手法の構築には FAR/CS 25.1523 (最少乗組員数に関する規定)に基づき、パイロット 1 名での対応を前提した。一方で、有効性の検討に当たっては既存機より評価値が上回る解について、パイロット 2 名の条件で再計算した結果、既存機より優れた設計解があることを確認した。将来的にはパイロット 2 名を前提とした評価関数を追加することで、より多面的な概念設計手法に拡充できる可能性がある。iii)本手法のロバスト性を確認するため、評価関数であるヒューマンエラー発生確率と操作性、および制約条件である各ゾーンに対する機器配置数について感度解析を実施した。その結果、優先される機器は変わり得るものの、配置ゾーン数の平均値の相関関数は高く解の全体的な傾向としては一致し、本手法はロバストであることを確認した。iv)ノーマル及びノンノーマル時の 2 ケースについて、定性的解析である HET 手法を適用した結果、定量的解析結果の最適解の傾向を再現していることを確認した。v)遺伝的アルゴリズムを用いた最適化手法について得られる非劣解について確認した結果、個体を増やして計算を行っていくことで、ハザードに至る確率が既存機より優れた設計解も得ることができた。vi)以上より、従来はヒューマンエラーの評価はシミュレータを用いた実

験的評価によりフライトデッキ内の操縦・操作機器配置に反映されていたが、本研究により提案したHRAのCREAMを適用し遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化問題を解くことで、操作性とヒューマンエラー・マネージメントを同時に考慮して概念設計段階から機器配置を設計する解析的手法が構築でき、またその妥当性が確認できた。

本論文の構成を以下に示す。第1章では、航空機事故を背景としたヒューマンエラー・マネージメントを考慮したフライトデッキ設計を求める規定の動向及び経緯をまとめる。また、航空分野におけるヒューマンエラー関連研究をまとめ、従来のフライトデッキ設計手法における問題点と解析的手法の必要性を示す。第2章ではヒューマンエラー解析手法の先行研究として、原子力分野で研究されている人間信頼性解析の詳細を示し、概念設計段階に適用可能な解析手法を選定する。第3章ではヒューマンエラー・マネージメントと操作性を同時に解析的に評価し、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化するフライトデッキ概念設計手法のステップについて示す。第4章では提案した概念設計手法の有効性を確認するため、リージョナル・ジェット機程度の機体規模のフライトデッキを例に、操縦・操作機器配置に適用して最適化計算を行った結果を示す。第5章では設計手法の妥当性について検証・考察し、最適化計算結果により得られた設計解の評価値が既存機と同等もしくは優れることを確認する。また、規定で求められるパイロット1名の運航に加えて通常の2名運航を前提とした場合でも、既存機と評価値が同等もしくは優れることを確認する。更に、感度解析を実施し、評価関数および制約条件のパラメータが変動した場合でも設計手法がロバストであることを確認する。最後に、定性的解析手法を用いても同傾向の解を得られることを確認する。これらの結果より、従来は実験的評価が中心であったヒューマンエラーについて、概念設計段階から操縦・操作機器配置の最適解を解析的に求める手法の有効性を確認する。Appendix Aではチェックリスト設計など後工程の設計段階におけるヒューマンエラー・マネージメントの研究例について示す。Appendix Bでは、第2章で示した手法以外のヒューマンエラー評価手法の研究例やワークロード評価手法の研究例を示す。Appendix Cでは、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化計算手法の検証結果を記す。Appendix Dでは、操作性解析の検証結果を記す。