

# 博士論文

## 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

井手 陽介

# 目次

目次	i
概要	iii
略号表	iv
第1章 序論	1
1.1 ヒューマンエラー・マネージメントと規定の動向	1
1.2 航空分野におけるヒューマンエラー関連研究	5
1.3 従来のフライトデッキ設計とヒューマンエラー評価	10
1.4 研究目的と論文の構成	16
第2章 ヒューマンエラー解析手法の選定	18
2.1 ヒューマンエラーの定量的解析手法	18
2.2 ヒューマンエラーの定性的解析手法	23
2.3 概念設計に用いるヒューマンエラー解析手法の選定	25
第3章 概念設計手法	26
3.1 概念設計手法の全体ステップ	26
3.2 タスク分析	27
3.3 ヒューマンエラー識別	28
3.4 モデル化	28
3.5 ハザードに至る確率の算出	29
3.6 ヒューマンエラー・マネージメントと操作性の最適化	30
第4章 概念設計検討例	36
4.1 検討例：問題設定	36
4.2 検討例：タスク分析	38
4.3 検討例：ヒューマンエラー識別	42
4.4 検討例：モデル化	45
4.5 検討例：ハザードに至る確率の算出	49
4.6 検討例：ヒューマンエラー・マネージメントと操作性の最適化	49
第5章 考察	57
5.1 最適化結果の既存機との比較による妥当性確認	57
5.2 パイロット2名で解析した場合の評価	63
5.3 感度解析による妥当性確認	65
5.4 定性的解析手法による妥当性確認	72
5.5 非劣解の確認	76

5.6 将来のフライトデッキ開発・型式証明への応用について.....	78
第6章 結論.....	80
参考文献.....	82
謝辞.....	88
 Appendix A ヒューマンエラー・マネージメント詳細設計研究例.....	90
A.1. フライトデッキ設計のヒューマンエラー・マネージメント .....	90
A.2. チェックリストにおけるヒューマンエラー・マネージメント.....	92
Appendix B ヒューマンエラー等の解析手法.....	94
B.1 ヒューマンエラーの定量的解析手法.....	94
B.2 ヒューマンエラーの定性的解析手法.....	99
B.3 解析的ワークロード評価手法.....	100
Appendix C 最適化計算詳細.....	104
C.1. 最適化計算詳細.....	104
C.2. 単純な問題に適用することによる検証.....	112
C.3. 計算結果データ.....	114
Appendix D 操作性評価計算詳細.....	120

# 概要

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。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。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時間を要する。本研究ではヒューマンエラー・マネージメントをフライトデッキの概念設計段階から反映するため、従来の操作性解析に加えて原子力分野で研究されている人間信頼性解析 (**HRA: Human Reliability Analysis**) による評価を取り入れた概念設計手法を提案し、その有効性を確認する。

提案する設計手法の検討ステップは以下の通りである。1) ヒューマンエラーによって至るハザードのうち、安全性に影響が大きいパイロットのプロシージャ(ノーマルおよびノンノーマル)をタスクに整理する。2) 本検討に最も適する **CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method)** を用いて、各タスクに関して起こり得るヒューマンエラーを識別する。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を計算し、ハザードに至る確率の総和を算出する。5) ハザードに至る確率に加え、ヒューマンエラー・マネー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。

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に本設計手法を適用した。最適化計算結果からは、操縦・操作機器配置に関して既存機より評価値が優れる設計解を得ることができ、その根拠を明らかにした。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した。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した。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した。以上より、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できた。

## 略号表

略号	英語名	日本語名
AC	Advisory Circular	アドバイザリ・サーキュラ
ATHEANA	A Technique for Human Event Analysis	-
ALT	Altitude	高度
AMJ	Advisory Material Joint	-
AP	Auto Pilot	自動操縦
APU	Auxiliary Power Unit	補助動力装置
ASRS	Aviation Safety Reporting System	米国航空安全報告制度
AT	Auto Thrust	自動推力調整
ATA	Air Transport Association of America	米国航空輸送協会
ATC	Air Traffic Control	航空管制
CAS	Crew Alerting System	-
CHIRP	Aviation and Maritime Confidential Incident Reporting	-
CREAM	Cognitive Reliability and Error Analysis Method	-
CS	Certification Specifications	欧州航空規則
DA	Decision Altitude	決心高度
DEP	Design Eye Point	デザイン・アイ・ポイント
EGPWS	Enhanced Ground Proximity Warning System	対地接近警報装置
ELEC	Electric System	電源系統
Emer	Emergency	非常用
EPC	Error Producing Conditions	-
FAA	Federal Aviation Administration	米国連邦航空局
FAR	Federal Aviation Regulations	米国連邦航空規則
FD	Flight Deck	フライトデッキ
FD	Flight Director	フライト・ディレクタ
FHA	Functional Hazard Analysis	-
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis	故障モード・影響解析

FTA	Fault Tree Analysis	故障の木解析
FMS	Flight Management System	飛行管理装置
GA	Go Around	着陸復行
GS	Glide Slope	グライド・スロープ
GPWS	Ground Proximity Warning System	対地接近警報装置
(基準)HEP	Human Error Probability	(基準)過誤確率
HEART	Human Error Assessment and Reduction Technique	-
HEI	Human Error Identification	ヒューマンエラー識別
HET	Human Error Template	-
HRA	Human Reliability Analysis	人間信頼性解析
HYD, Hydro	Hydraulic System	油圧系統
H/W	Hardware	ハードウェア
ICAO	International Civil Aviation Organization	国際民間航空機関
IDHEAS	Integrated Decision-Tree Human Event Analysis System	-
LDG	Landing	着陸
LOC	Localizer	ローカライザ
LTS	Lighting System	照明系統
NASA	National Aeronautics and Space Administration	米国航空宇宙局
NARA	Nuclear Action Reliability Assessment	-
NAV	Navigation	航法
NSRP	Neutral Seat Reference Point	-
NTSB	National Transportation Safety Board	米国国家運輸安全委員会
OEI	One Engine Inoperative	1 エンジン不 작동
PAX	Passenger	旅客
PF	Pilot Flying	パイロット・フライング
PM	Pilot Monitoring	パイロット・モニタリング
PRA	Probabilistic Risk Assessment	確率論的リスク評価
PSF	Performance Shaping Factor	行動形成因子
RAT	Ram Air Turbine	非常用発電装置
ROC	Rate of Climb	上昇率
SHEL(L)	Software Hardware Environment Liveware	-

	(Liveware)	
SRK	Skill Rule Knowledge	スキル・ルール・ナレッジ
TCAS	Traffic alert and Collision Avoidance System	空中衝突防止装置
THERP	Technique for Human Error Rate Prediction	-
TO, T/O	Take off	離陸
TOGA	Take off and Go Around	離陸及び着陸復行
TAWL	Task Analysis Workload	-
VMO	Maximum Operating Limitation Speed	最大運用限界速度

# 第 1 章 序論

序論では、フライトデッキ設計に対して最近に制定されたヒューマンエラー規定と、従来のヒューマンエラー研究および、従来のフライトデッキ設計手法におけるヒューマンエラー評価法についてまとめ、本研究の目的を示す。

## 1.1 ヒューマンエラー・マネージメント規定の動向

ボーイング社の調査[1][2]によれば、世界的な航空機事故発生率は近年一定のまま推移する傾向であるが、その主たる原因の多くはパイロット(Flight Crew)に関わるものであるとされており、1995～2004 年の調査結果では航空機全損事故(Hull Loss Accident)における主原因の 56%を占めると分析された。(図 1.1-1 参照)

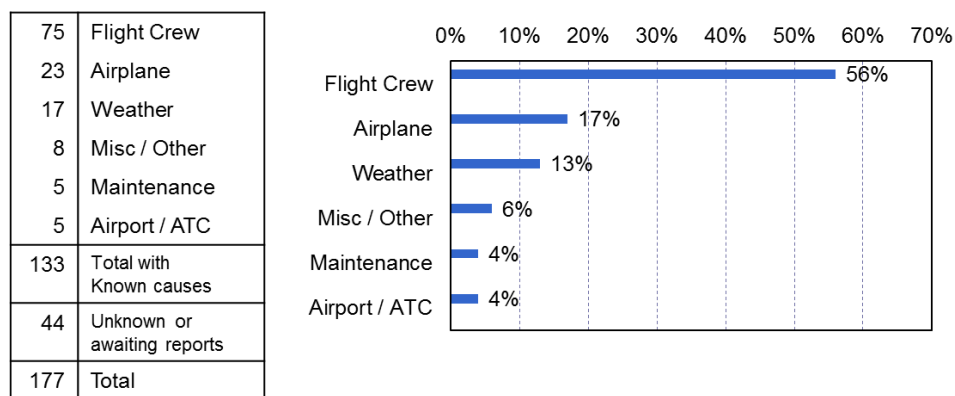


図1.1-1 航空機全損事故(Hull Loss Accident)における主原因([1]より作成)

このような状況において、米国連邦航空局(FAA)は 1994 年に発生した名古屋空港中華航空機事故を背景とした報告書[3]において、現在の民間旅客機におけるパイロットと航空機とのインタフェースにまつわる脆弱性を指摘し、設計(Design)、運航(Operation)、訓練(Training)の 3 分野から全 51 種類におよぶ提言をまとめた(図 1.1-2 参照)。また、その中でも、設計に起因するヒューマンエラーについて表 1.1-1 に示す提言を挙げている。



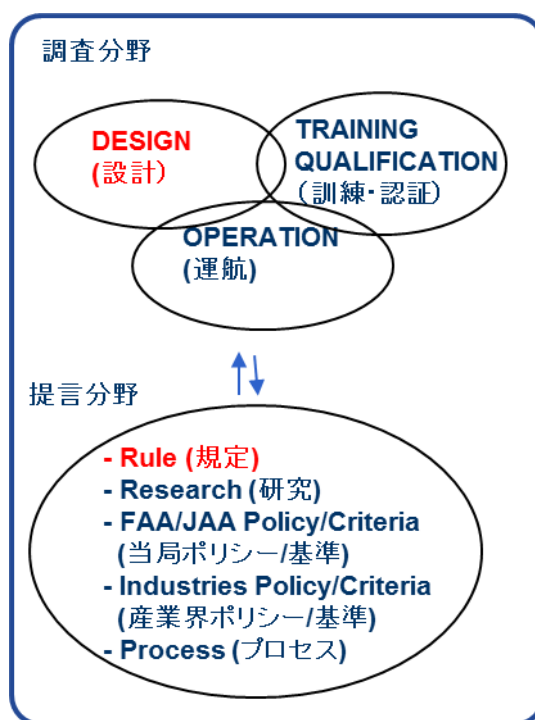


図1.1-2 設計・運航・訓練の観点の調査と提言分野([3]より作成)

表1.1-1 設計基準に関する提言([3]より作成)

Recommendation Criteria-1	The FAA should require evaluation of flight deck designs for susceptibility to design induced flightcrew errors and the consequences of those errors as part of the type certification process.
(筆者訳) 基準に関する提言-1	FAAは、設計に起因したパイロットのエラーへの影響とエラーの結果に関するフライトデッキ設計の評価を型式証明活動の一部として要求すべきである。

ここで、旅客機などの民間航空機は耐空性(Airworthiness)を証明して型式を取得する必要があり、その基準は耐空性審査要領(米国 FAR: 米国連邦航空規則, 欧州 CS: 欧州航空規則)に示される。またアドバイザリ・サーキュラ(AC: Advisory Circular)には、耐空性を証明する際の設計基準や試験方法などの詳細が示される。機体の設計・製造ができて、耐空性を証明するための設計審査や型式証明試験が完了するまでは機体開発は完了せず、エアラインが運航を開始することはできない。基準は大きな事故やインシデントを背景に、常にこのような提言に基づき厳しいものが制定されており、その分野も機体全体にまたがる課題から個々の系統の詳細仕様まで様々な観点がある。中でもフライトデッキ設計の分野においてはマン・マシン・インタフェースの高度化が図れてきた項目について重点的に新しい基準やアドバイザリ・サーキュラの制定が進められてきており、自動操縦(Auto Flight: AC 25.1329-1C)[4]、警告系統(Crew Alerting System: AC 25.1322-1)[5]、統合計器(Integrated Display: AC 25-11B)[6]等が整備されてきている。またこ

の流れで、パイロットが用いる任意の操縦・操作装置の全てを包括的に評価する FAR/CS 25.1302 が制定された[7][8]。英国クランフィールド大の Harris[9]が指摘するように、2003 年時点の FAA アドバイザリ・サーキュラ全体(旅客機型式証明(Part 25)以外も含めた全分野)でヒューマンエラーについて言及しているものが 45 文書、エラーと密接に関係しているワークロード(Workload)については 37 文書と数多く存在していたにも関わらず、最新の旅客機にて発生しているヒューマンエラーを抑制するには不十分であることが明らかとなり、FAR/CS25.1302 が欧州では 2007 年、米国では 2013 年に制定されるに至った。

この規定はフライトデッキ内全ての操縦・操作装置を包含した規定であり、中でも 25.1302(d)はヒューマンエラーに対する総合的な管理・対策(本研究ではヒューマンエラー・マネージメント: Human Error Management と呼称する)を設計時に考慮することを要求している(表 1.1-2 参照)。

表1.1-2 FAR25.1302(d):ヒューマンエラーに関する新規定 ([8]より作成)

FAR 25.1302(d)	To the extent practicable, installed equipment must incorporate means to enable the flightcrew to manage errors resulting from the kinds of flightcrew interactions with the equipment that can be reasonably expected in service. ...
(筆者訳) FAR 25.1302(d)	現実的な限り、(フライトデッキに)搭載された機器は、運航において予測されるパイロットと機器の相互干渉にて生じるエラーについて、管理できる方法を備えなければならない。

上記の要求事項に対して、AC 25.1302-1 には以下の 4 方針のいずれかを設計に考慮することで本要求を満足すると示されている。

- (1) パイロットが機器の操作を通じて、エラーを検知できる設計であること。
- (2) 航空機の機能及び性能に対するエラーの影響は明白であり、安全なフライト及び着陸を行うことができる設計であること。
- (3) スイッチガード、ロック、確認行為などの効果的な方法でエラーが抑制できること。
- (4) システムのロジック等によってエラーにより発生し得る影響が排除される設計であること。

(1)については、パイロットがエラーをおかしてしまった場合に、例えば計器に注意表示が成されることによってエラーの状況認識が正しくできることを求めている。(2)については、パイロットがエラーをおかしてしまった場合に、機能を大きく低下することなく安全な飛行を継続できることを求めている。(3)については、例えばガードによって誤操作を防止するなど、エラーの発生を抑制することを求めている。(4)については、パイロットがエラーをおかしてしまった場合に、例えば飛行管理システム(FMS)がそのエラーを受け付けないなど、影響が排除されることを求めている。このように、ヒューマンエラー・マネージメントは、ヒューマンエラーの検知・安全性への影響の低減・誤操作の抑制・システムによる排除、といった多面的でフライトデッキ設計の全般に関わる要求となっている。

一方、本要求では"現実的な限り"という条件も示され、スイッチガードを何重にも設定することで操作性が低減してしまう、といった運航上の操作性を著しく損なうようなことは求めている。これまで旅客機を開発してきた航空機メーカーが新たに旅客機フライトデッキを開発する際には、既存機と設計を共通化させる部分と、改善を図る部分を組み合わせるのが一般的であるが、これは既存機のエアライン運航で発生した事故やヒヤリハット情報を基に、操作性を維持する部分とヒューマンエラーを低減させるべき部分を識別できるためであり、これにより操作性とヒューマンエラー・マネジメントのバランスを取りつつ、新規開発項目を限定することで開発コストや型式証明取得にかかる期間の短縮が図られている[10]。このように従来と同様もしくはその延長線上のフライトデッキを設計する場合にはヒューマンエラーと操作性のバランスが適切に保たれやすいと考えられる。一方で、旅客機開発経験が無い新規参入の航空機メーカーが新たにフライトデッキを開発する場合は、ヒューマンエラー・マネジメントの十分な検討が必要であり、開発の後流フェーズにおける実験的評価において設計変更が必要な事が判明した場合には、型式証明取得にかかる時間が長期化せざるを得なくなる。

## 1.2 航空分野におけるヒューマンエラー関連研究

1.2 章では研究背景として従来の航空分野におけるヒューマンエラー関連研究について示す。ヒューマンエラーに関する認知心理学的モデルから発展したこれらの研究が 1.1 章に示したフライトデッキのヒューマンエラー・マネジメントの新規定に応用されている。なお、原子力分野にて応用されている人間信頼性解析については 2 章にまとめて示す。

ヒューマンエラーに関する認知心理学的モデルとして著名なものは 1980 年代初頭に著された Rasmussen のスキル・ルール・ナレッジ(SRK: Skill, Rule and Knowledge)モデル[11], Norman のスリップ(Slip)モデル[12]などがある。また Reason[13]は, Rasmussen のスキル・ルール・ナレッジ理論を応用して, SRK の各段階における認知行動のプロセスと起こり得るヒューマンエラーについて包括的に整理し, 物事の検知を行う段階のエラー(Slips と Lapse)と, それに続く段階でのエラー(Mistake)に分類した(図 1.2-1 参照)。

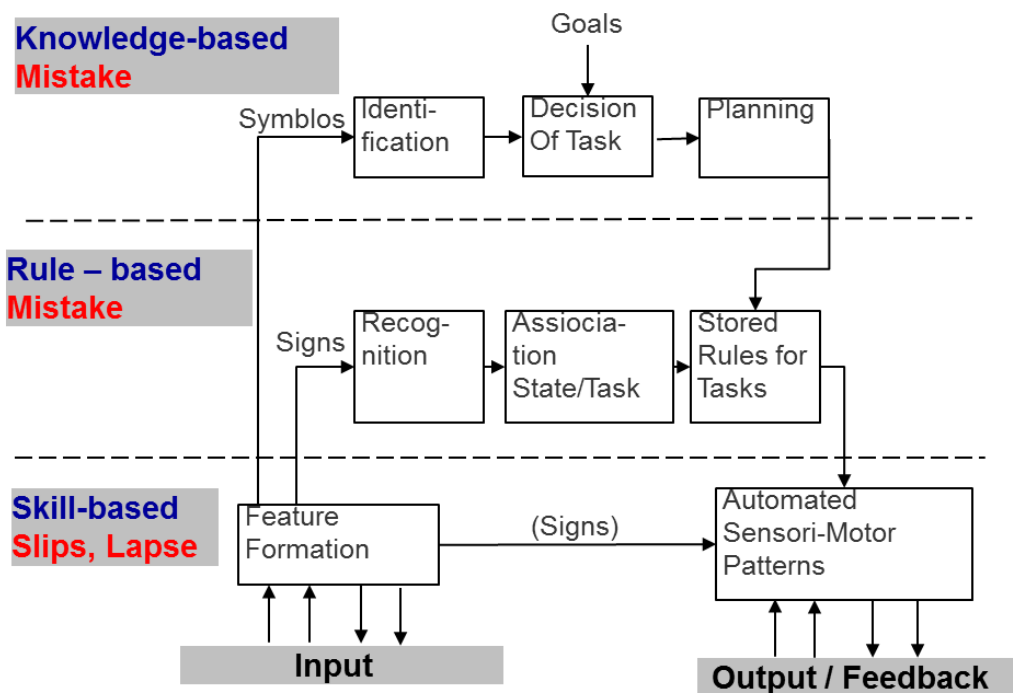


図 1.2-1 SRK モデル([11][13]より作成)

また, Reason[14]はシステムや組織におけるエラーとして, 著名なスイスチーズ(Swiss Cheese)モデル(図 1.2-2 参照)を示した。ある災害を引き起こす脅威に対して, 通常システムでは幾重に渡って防御策を講じているが, 実際には完全なものは存在せずスイスチーズの穴のように欠点が存在し, 何かのきっかけで一直線に並んだ場合に事故が起こることを示したモデルである。

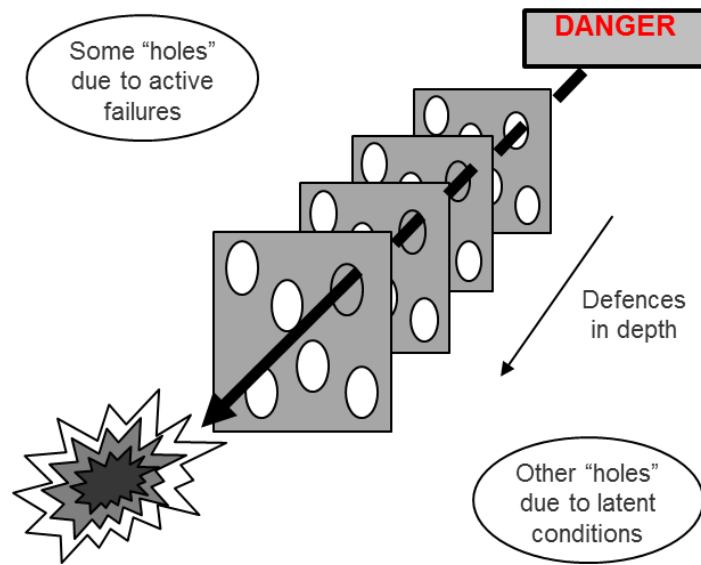


図 1.2-2 スイスチーズ・モデル([14]より作成)

また、これらのヒューマンエラーに対するモデルの発達と共に、フライトデッキにおける人間の能力とその限界を明らかにし、パイロットと航空機との間のマン・マシン・インタフェースの不具合に注目して、その根源的な解決策を模索する研究が進められるようになり、Edwards[15]によって著名な SHEL(Software, Hardware, Environment and Liveware)モデルが提唱された。また SHEL モデルは Hawkins[16]によって、中心に Liveware が追加された SHELL モデル(図 1.2-3 参照)へと進化することになった。ヒューマンエラーの発生要因を明らかにすると共に、人間中心な人間機械系となるフライトデッキという概念が示された。

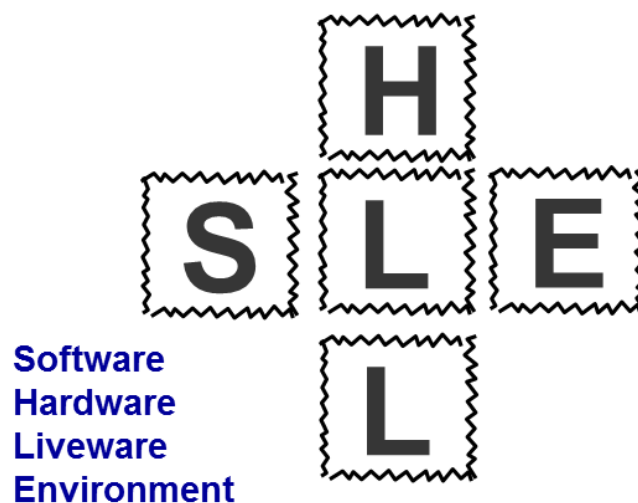


図 1.2-3 SHELL モデル([16]より作成)

また, NASA の Arbuckle や Abbott ら[17]はスイスチーズ・モデルを応用して, ヒューマンエラーの影響が伝播する過程の上流側で管理し対策を取ることが, 最もエラーによる影響を抑制する効果が高いことを示した(図 1.2-4 参照)。

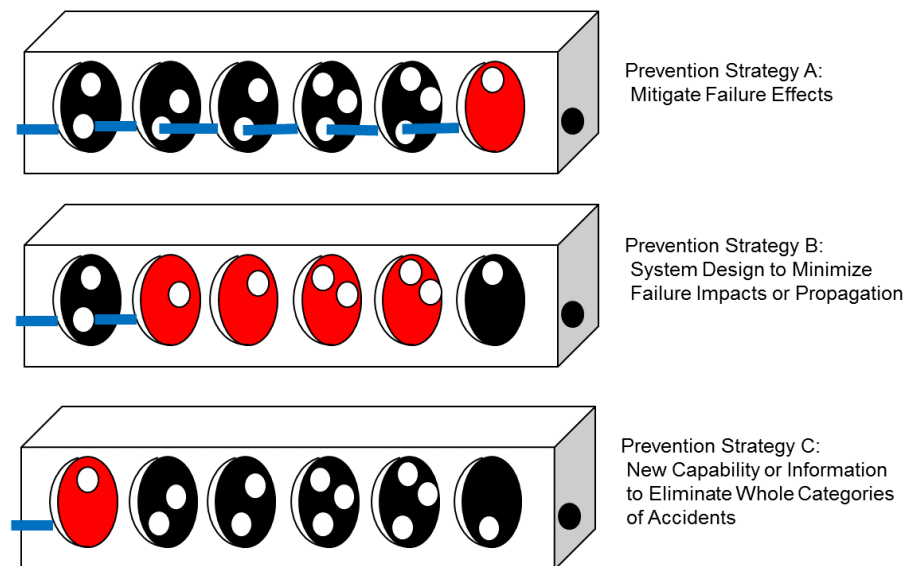


図 1.2-4 Arbuckle や Abbott らのエラー伝播モデル([17]より作成)

マイアミ大の Wiener[18]も介入方策(Intervention Strategies)なる理論を示し, エラー影響伝播を遮断する手法について論じており, 米国事故調査委員会(NTSB: National Transportation Safety Board)の事故調査結果や NASA ASRS(Aviation Safety Reporting System)でのヒヤリハット報告を分析し, ヒューマンエラーの波状の防御策(Line of Defense: 図 1.2-5 参照)が機能することの重要性を提言している(詳細は Appendix A.1 参照)。オハイオ大の Billings[19]はフライトデッキ自動化システム設計においては, エラーへの抵抗(Error Resistance)もしくはエラーへの耐性(Error Tolerance)の考え方に基づく設計が望ましく, 前者はパイロット・イン・ザ・ループによる適切な警告, 後者は“Layered Defense”による多重のエラー伝播防止により安全が脅かされない設計が有効であることを示した。

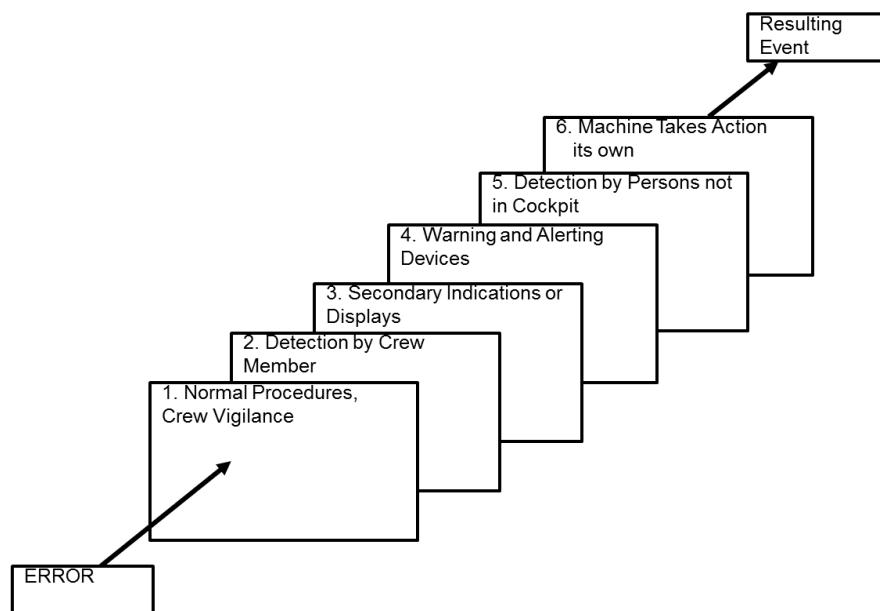


図 1.2-5 波状の防御策(Line of Defense) ([18]より作成)

また、筆者らは旅客機パイロットのフライト・マネージメント(Flight Management)の研究[20][21][22][23]として運航・訓練分野における総合的な状況対応能力について研究してきた。具体的にはエアラインのベテランパイロットにおける空港閉鎖や気象変化など不測の事態が急に発生した場合の対応に関する能力である。このような判断が迷いやすい場面において、新人パイロットはワークロードの高さから速やかに代替空港に向かう判断をする傾向があり、逆にベテランパイロットは代替空港に向かう案の他に安全性・経済性・定時性・快適性の4要素がいずれも高くなる案も模索した上で判断を行う傾向があることが分かった。新人パイロットの判断はヒューマンエラーでは無いが、ワークロードの高い場面において経験・知識が対処方針の意思決定に大きく影響することが示された。

また、エアラインの訓練プログラムにて取り組まれているスレット・アンド・エラー・マネージメント(Threat and Error Management)[24][25]は、機体・管制・空港や空域といった周囲環境においてどのような潜在的脅威が内在しているかを予測し、発生しうるエラーの抑制を図る訓練の取り組みである。スレット・アンド・エラー・マネージメントの訓練では、機体設計そのものにエラーを誘発するスレットが内在していることを前提した上でパイロットがエラーの管理を行う。同じくクルー・リソース・マネージメント(CRM: Crew Resource Management)[25][26][27]はフライトデッキの内外におけるリソース(パイロット以外の客室乗務員や運航管理者も含む)を活用するため、コミュニケーション・意思決定・チームワークといった能力を訓練する枠組みであり、日本においてもJAXA[28]にてCRM能力の行動指標が研究され航空会社のエアラインの運航・訓練に適用されてきている。FAAはスレット・アンド・エラー・マネージメントやクルー・リソース・マネージメントなどといった総合的な管理や対応について"マネージメント"という表現をしばしば用いるが、新規定25.1302でもそ

のような包括的なヒューマンエラー対策を機体設計分野においても要求していることになる。運航・訓練分野のチェックリストにおけるヒューマンエラー対策の先行研究については Appendix A.2 に詳細を示す。

以上のようなパイロットの能力やその訓練は、上記の図 1.2-4 や図 1.2-5 の理論で示される最も下流側でエラーを食い止める取り組みであるが、エラーを管理するには最も上流側である機体設計がエラーを誘発しないことが最も効果的である。また、FAR/CS25.1302 の原案を作成したヒューマンファクタ協調ワーキング・グループ(Human Factors Harmonizing Working Group)[7]が示すように、どんなに良く訓練されたパイロットでもヒューマンエラーを完全に防ぐことはできないものであり、運航・訓練分野でのマネージメント能力だけに頼ることなく、フライトデッキの設計としてヒューマンエラーへの対応が必要とされてきている。



### 1.3 従来のフライトデッキ設計とヒューマンエラー評価

1.3 章では従来のフライトデッキ設計における解析的評価方法やヒューマンエラー評価方法についてまとめ、概念設計段階における新規定への対応とヒューマンエラーの解析的手法の意義を明確にする。

旧来から存在するフライトデッキ設計分野の規定は、例えば FAR/CS 25.779 (操縦・操作装置の操作及び運動の向き)や FAR/CS 25.781 (操縦・操作装置のつまみの形状要求)といった部分的・要素的なものが多く、ヒューマンエラーについては FAR/CS 25.777(a)(d)(操縦・操作装置同士の混同防止)といった規定のみに限られていた。フライトデッキの概念設計では、操縦・操作機器の配置設計が重要な検討課題であるが、従来はヒューマンエラーについて考慮せず操作性の評価のみが行われている[29]。操作性の評価では、パイロットが着座時に操作可能なオーバーヘッドパネル(Overhead Panel)、グレアシールド及び計器パネル(Glareshield & Instrument Panel)、センターペDESTAL(Center Pedestal)、サイドコンソール(Side Console)に対してどのように機器を配置していくかを設計することになり、以下に定義される到達範囲(Reach Zone)[30](図 1.3-1 参照)を用いた検討に基づいて配置を設計している。

- ゾーン 1：ハーネスをロックした状態での通常操作範囲
- ゾーン 2：ハーネスをロックした状態で最大限手を伸ばして届く範囲
- ゾーン 3：ハーネスのロックを外した状態で手を最大限伸ばして届く範囲

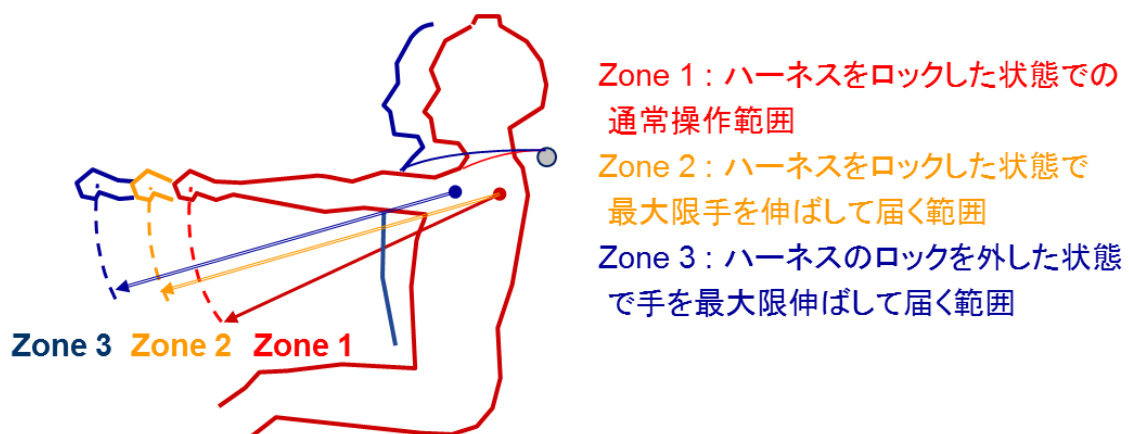


図 1.3-1 操作性評価に用いる到達範囲(Reach Zone)の定義 ([30]より作成)

Honda らによる人間中心コックピット研究[29]においても、概念設計段階で上記の操作性評価に基づき機器配置を検討しているが、その際にヒューマンエラーの評価はしていない。ヒューマンエラー・マネジメントについては計器表示上のグラフィカル・ユーザ・インタフェース (GUI:

Graphical User Interface)の詳細設計仕様について着目するのみであり、概念設計段階では考慮できていない。また、国際民間航空機関(ICAO: International Civil Aviation Organization)および英国民間航空管理局(CAA: Civil Aviation Authority)の報告書(Fundamental Human Factors Concepts)[31]においても、これまでの事故調査報告書からヒューマンエラーを防ぐ有効な手段として、フライトデッキのパネル類の配置や操作方向に首尾一貫性を持たせることを挙げているが、それ以外の観点については明確でない。図 1.3-2 は英国 CHIRP(ヒヤリハット報告制度: Aviation and Maritime Confidential Incident Reporting)で挙げられていた高度計規正值設定ノブにおけるヒューマンエラーを誘発しうる設計例であるが[32], こういった操作端の操作方向だけであれば開発フェーズの後工程においても比較的容易に設計変更することができる。ただし、このノブの配置に問題があり操作性が低い, という要因でエラーを誘発する場合には, ノブの配置や関連する電気配線などに設計変更が生じるため, 開発フェーズの後工程では手戻りが大きくなる。

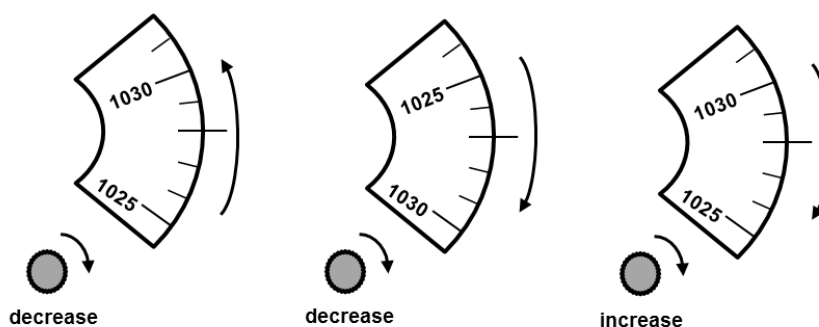


図1.3-2 高度計規正值設定つまみにおけるヒューマンエラーを誘発しうる設計例 ([32]より作成)

また、航空機的设计に用いられる解析として、安全性評価[33]の一環として実施している FHA (Functional Hazard Analysis), FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), FTA(Fault Tree Analysis)といった手法がある。FHA は故障が航空機に与える安全性への影響度(Severity)を評価し信頼度要求を設定する。FMEAはボトムアップ的な手法であり故障モードを洗い出して安全性への影響度を評価し、FTA はトップダウン的に故障の木(Fault Tree)を解析しシステム全体としての故障確率を算出する(図 1.3-3 参照)。これらの解析結果から、故障確率と安全性への影響度が図 1.3-4 に示すクライテリアを満足するかどうかを評価する。これらの解析は実際の航空機開発に広く使われているが[34], 機体システムの信頼度や安全性への影響度評価に主眼が置かれており、ヒューマンエラーを考慮していない。AC/AMJ 25.1309[35]にも”定量的なパイロットのエラーの評価は成立しないと考えられる(quantitative assessments of crew errors are not considered feasible)”と明記されており、ヒューマンエラーの定量的評価は現状十分ではない。Yang らによるパイロットと自動操縦のシミュレーションモデルに関する最近の研究[36]においても、ヒューマンエラーは確定事象としてシミュレーションに入力されるだけであり、発生確率などを考慮していない。

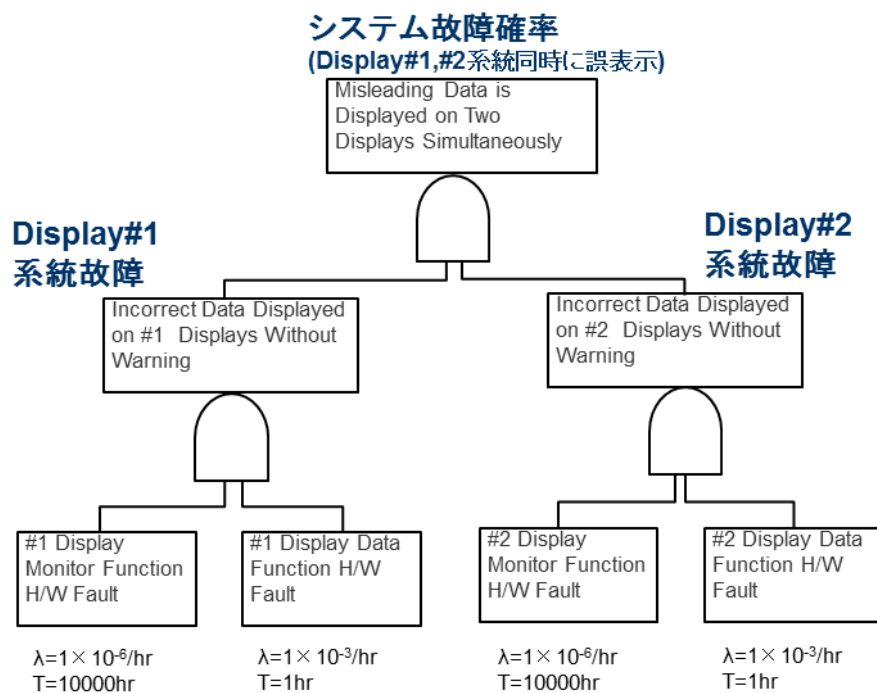


図1.3-3 FTA(Fault Tree Analysis)の例 ([33]より作成)

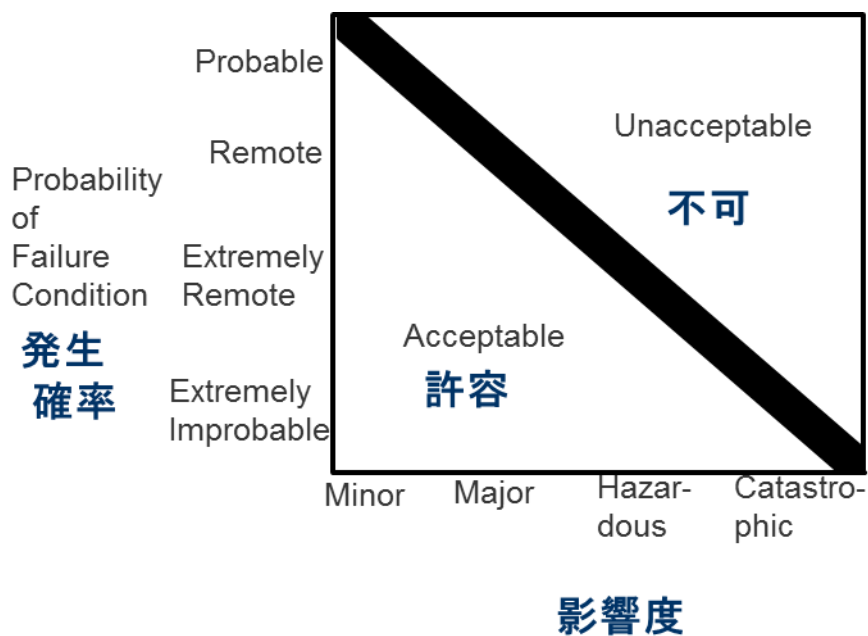


図 1.3-4 発生確率と安全性への影響度の評価([35]より作成)

また、航空機の操縦性(Handling Quality)に関しては、クーパー・ハーパー・レーティング・スケール(Cooper Harper Rating Scale)[37]を用いた定量的なパイロット評価方法が確立しているが、例えば油圧系統が故障して操縦性が悪化した場合の困難さ・影響度の度合い(Severity)について評価するものであり、ヒューマンエラーについては考慮していない[38]。

現状、FAA ポリシーメモ(Policy Memo ANM-01-03A)[39]にも示されるように、フライトデッキにおけるヒューマンエラーの評価はシミュレータや実機を用いた実験的評価が一般的である。概念設計では解析的評価が中心であり、実験的評価は簡易的なモックアップ等を用いた部分的なものに限られる。本格的な実験的評価は仕様がある程度固まってきた詳細設計以降のフェーズにおいてフライトシミュレータや実機を用いて行われることになる(図 1.3-5 参照)[40][41]。

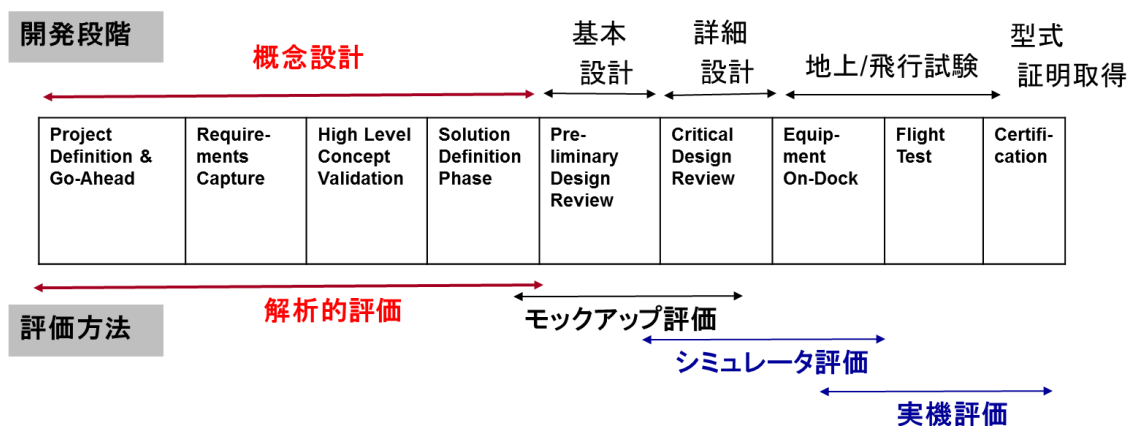


図1.3-5 フライトデッキの開発段階と評価方法([41]より作成)

しかしながら、ヒューマンエラー・マネジメントは、システム設計全体に影響するため、より早い概念設計フェーズから検討していくことが設計手戻りを抑制し開発期間を短縮する観点で望ましい。例えば、グラフィカル・ユーザ・インタフェースのソフトウェア設計だけであれば、後流の設計フェーズでも設計変更が比較的容易であるが、飛行試験を行うフェーズまで進んだ後に操縦・操作機器の配置にまで遡って設計変更が必要になった場合には手戻りが大きくなる。また、概念設計フェーズにおいてもケーススタディ毎にシミュレータを制作・変更するのではコストが増加するため、解析的な設計手法を用いることが望ましい。

NASA による旅客機フライトデッキ概念設計研究に示される設計プロセス(図 1.3-6 参照)[42]が示す通り、全機運航要求から全機機能要求やシステム要求へと分割されていくことでフライトデッキの設計要求が定義されていくことになるが、この設計プロセスの起点となっているのは既存機における設計・製造・運航経験とされている。旅客機の開発経験豊富な米国においてはこのようなプロセスが適当であると考えられ、例えばボーイング 777 のフライトデッキ設計においても計器配置な

ど既存機(ボーイング 747-400)と同じ設計が適用され, 新技術はカーソル・コントロール・デバイスなど一部に絞る設計方針がとられた[43]。旅客機開発経験が半世紀近く途絶えている日本においては既存機における設計・製造・運航経験を活用することが容易でなく, もし後流の試験・評価のプロセスで問題が分かった場合には開発に時間を要することになる。開発経験がないフライトデッキを設計していく場合には, 概念設計段階から効率的な検討が可能な解析的手法が必要である。

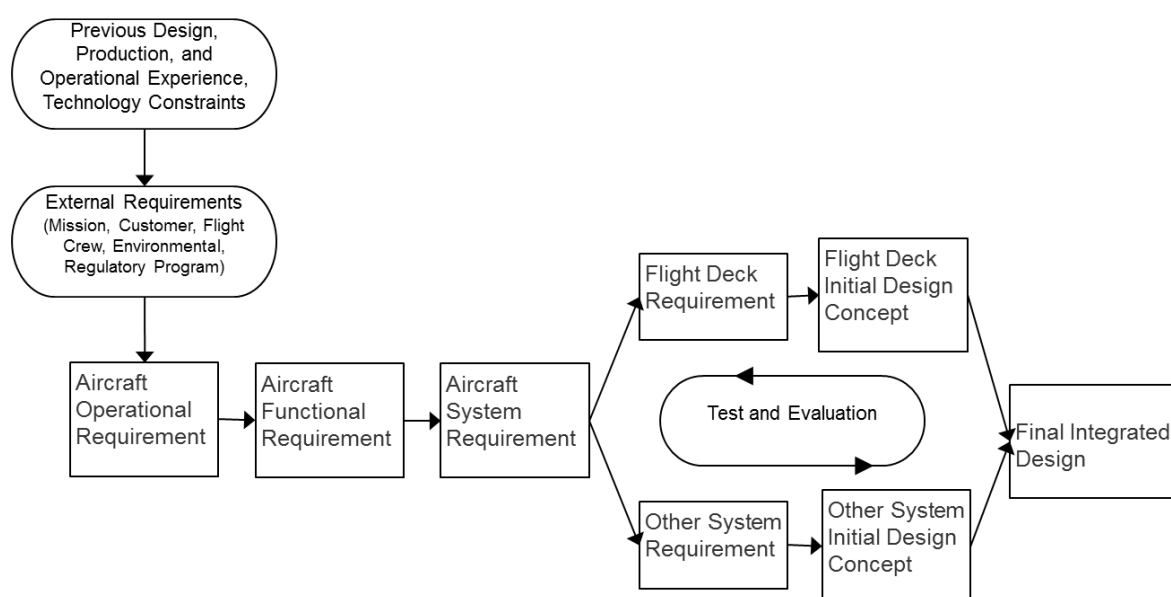


図1.3-6 NASA研究によるフライトデッキ設計開発プロセス([42]より作成)

また, 日本においても開発が進められているリージョナル・ジェット機は, 旅客機として大型機と同様に FAR/CS Part 25 が適用され, 高い安全性が要求されるものの, 一般に機体サイズが小型であることに起因して, フライトデッキ設計において操縦・操作装置配置が設計課題となりやすい。リージョナル・ジェット機の機体寸法(例:CRJ-200 全長 26.7m, E170 全長 29.9m)は, 大型のビジネスジェット機(例:Gulf Stream V 全長 29.4m)とほぼ同等[44]であるが, ビジネスジェット機ではディスプレイや操作端(カーソル・コントロール・デバイス等)に多機能を持たせて統合化することで空間に余裕を持たせるといった新技術が比較的自由に盛り込み易いとされる[45]が, 旅客機であるリージョナル・ジェット機に新技術を適用する場合は型式証明取得に必要な時間が膨大となるため, 結果的に多くのスイッチや警告灯などが狭い空間に並びやすい。Newman ら[46]は旅客機フライトデッキ設計における物理的制約(Physical Constraint)について言及しており, 機器配置設計において人間が効率的に作業できる生理学的な要求や, 緊急時に非常脱出が可能な空間的要求など様々な要求を整理しているが, リージョナル・ジェット機もそれらの要求を狭い空間制約の中で満足する必要がある。

以上から、フライトデッキの新規開発に際しては、概念設計段階の主要な課題となる操縦・操作装置配置について、操作性とバランスを取りながらヒューマンエラー・マネジメントに考慮した解析手法を概念設計段階から導入することが効率的と言える。

## 1.4 研究目的と論文の構成

前章までに述べてきたように、世界的に航空機事故発生率があまり低減しない中で、事故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に、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が、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・マネージメントを要求されるようになった。日本において新たに開発されているリージョナル・ジェット機も新規に適合する必要がある。従来のフライトデッキにおけるヒューマンエラー評価はシミュレータ等の実験的手法が中心であり、概念設計段階から考慮していく手法は操作性評価のみに限られる。フライトデッキ開発経験が豊富な航空機メーカーでは、これまでに開発した機体のエアライン運航において得られた事故やヒヤリハットの情報を収集することで、設計改善を図る部分を識別し新規開発要素を限定するが、新規参入者はフライトデッキ全体の概念設計から必要であり、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時間を要する。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・ジェット機では更に機器配置の設計が難しくなる。

以上を背景に、本研究ではヒューマンエラー・マネージメントを概念設計段階から反映する手法について構築することを目的として、解析的手法にヒューマンエラー評価を導入する。概念設計段階では従来操作性評価が中心であったが、同時にヒューマンエラーも評価することができる解析的手法を構築し、その有効性を確認することで、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が生じ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、今後の実機開発に資することが本研究の目的である。

本論文の構成は以下の通りである。第 1 章では最近の航空機事故原因を背景としたヒューマンエラー・マネージメントを求めるフライトデッキ設計への規定制定の動向をまとめる。また、従来の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 章ではこれまでの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について示し、フライトデッキ概念設計段階に適用可能な手法を選定する。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て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として、操縦・操作機器配置に関して本研究で提案する手法を適用する。ヒューマンエラーからハザードに至る確率と操作性の最適化を行った結果を示す。第 5 章では設計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が既存機と評価値が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。また感度解析を実施し、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。さらに定性的解析手法を用いた場合も同じ傾向の解を得ることができることを確認する。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流の設計段階におけるヒューマンエラー・マネ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に対する検証結果を記す。**Appendix D** では操作性の解析結果に対する検証結果を記す。なお、本論文の研究背景や概念設計方法等については学会発表にて一部報告した [47][48][49]。



## 第 2 章 ヒューマンエラー解析手法の選定

第 2 章ではこれまでのヒューマンエラー解析手法の先行研究として、2.1 章では定量的解析、2.2 章では定性的解析についてまとめる。2.3 章ではそれらの手法からフライトデッキ概念設計に適用するものを選定する。なお、適用しなかった手法や関連手法の詳細は Appendix B.1 および B.2 に説明する。

### 2.1 ヒューマンエラーの定量的解析手法

原子力分野では確率論的リスク・信頼性評価(PRA: Probabilistic Risk Assessment)の一環として、人間信頼性解析(HRA: Human Reliability Analysis)の各種手法が研究され、実際の原子炉開発においても適用されている。人間信頼性解析は航空機の安全性解析における故障の木解析(FTA)等と同様に、故障状態をイベントツリー形式で整理し、ヒューマンエラーの発生有無を分岐として扱う。ヒューマンエラー発生確率は基本的に式 1 で求まる。

$$\text{ヒューマンエラー発生確率} = \text{基準過誤確率(基準 HEP: Human Error Probability)} \times \text{行動形成因子(PSF: Performance Shaping Factor)} \quad (\text{式 1})$$

ここで基準 HEP は基本的な行動・認知・判断等ごとのヒューマンエラー発生確率であり、行動するタスクに応じて定まるものである。人間がどのような環境下で作業するか、或いはどのような設計がなされた装置を使うかに依らず、例えばレバーを操作するといったタスクについては共通の値となる。表 2.1-1～2.1-2 に、代表として CREAM 手法[50]における基準 HEP を示す。例えばエンジン計器を見るタスクであれば表 2.1-1 の Observe(観測)タスクが該当し、発生しうるヒューマンエラーとしては表 2.1-2 の O1: Wrong object observed(誤った対象の観測), O2: Wrong identification(誤った認識), O3: Observation not made(観測が行われない)が考えられ、確率はそれぞれ 0.001, 0.003, 0.003 と設定されている。

表 2.1-1 基準 HEP(Human Error Probability): CREAM ([50]より作成)

	O1	O2	O3	I1	I2	I3	P1	P2	E1	E2	E3	E4	E5
Coordinate													
Communicate													
Compare													
Diagnose													
Evaluate													
Execute													
Identify													
Maintain													
Monitor													
Observe													
Plan													
Record													
Regulate													
Scan													
Verify													

備考)記号は表 2.1-2 と対応する。

網掛けが各タスクで発生する可能性のあるヒューマンエラーを表す。

表 2.1-2 基準 HEP(Human Error Probability): CREAM ([50]より作成)

Cognitive Function	Generic Failure Type		HEP (Basic Value)
Observation	O1	Wrong object observed	0.001
	O2	Wrong identification	0.003
	O3	Observation not made	0.003
Interpretation	I1	Faulty diagnosis	0.2
	I2	Decision error	0.01
	I3	Delayed interpretation	0.01
Planning	P1	Priority error	0.01
	P2	Inadequate plan	0.01
Execution	E1	Action of wrong type	0.003
	E2	Action at wrong time	0.003
	E3	Action on wrong object	0.0005
	E4	Action out of sequence	0.003
	E5	Miss action	0.03

一方, PSF(行動形成因子)は内的・外的な要因による発生確率の増減を示すもので, 同じタスクであっても例えばワークロードの高い状況で操作性の悪い装置を使って作業を行う場合や訓練が不足している場合等は PSF が高い値に設定される。機体の設計によって PSF は影響を受け, ヒューマンエラー発生確率が高まることをモデル化するものである。表 2.1-3 に代表として CREAM 手法における PSF を示す。例えば”マン・マシン・インタフェースの適切さと運用上の補助(Adequacy of MMI (Man-Machine Interface) and operational support)”であれば, マン・マシン・インタフェースとなる操縦・操作機器の特性に応じて Supportive(役立つ), Adequate(適切), Tolerable(許容可), Inappropriate(不適切)の4段階に分類され, Observation(OBS:観測), Interpretation(INT:理解), Planning(PLAN:計画), Execution(EXE:実行)のタスクの種類ごとに PSF の値が設定されている。

表 2.1-3 行動形成因子 PSF(Performance Shaping Factor): CREAM([50]より作成)

PSF	PSF State	Type of Human Function			
		OBS	INT	PLAN	EXE
Adequacy of Organization	Very Efficient	1	1	0.8	0.8
	Efficient	1	1	1	1
	Inefficient	1	1	1.2	1.2
	Deficient	1	1	2	2
Working Conditions	Advantageous	0.8	0.8	1	0.8
	Compatible	1	1	1	1
	Incompatible	2	2	1	2
Adequacy of MMI and operational support	Supportive	0.5	1	1	0.5
	Adequate	1	1	1	1
	Tolerable	1	1	1	1
	Inappropriate	5	1	1	5
Availability of procedures/plans	Appropriate	0.8	1	0.5	0.8
	Acceptable	1	1	1	1
	Inappropriate	2	1	0.5	2
Number of simultaneous goals	Fewer than capacity	1	1	1	1
	Matching current capacity	1	1	1	1
	More than capacity	2	2	5	2
Available time	Adequate	0.5	0.5	0.5	0.5
	Temperately inadequate	1	1	1	1
	Continuously inadequate	5	5	5	5
Time of day	Day time	1	1	1	1
	Night time	1.2	1.2	1.2	1.2
Adequacy of training and preparation	Adequate, high experience	0.8	0.5	0.5	0.8
	Adequate, low experience	1	1	1	1
	Inadequate	2	5	5	2
Crew collaboration quality	Very efficient	0.5	0.5	0.5	0.5
	Efficient	1	1	1	1
	Inefficient	1	1	1	1
	Deficient	2	2	2	5

備考 1) MMI: Man Machine Interface (マン・マシン・インタフェース)

備考 2) OBS: Observation(観測), INT: Interpretation(理解), PLAN: Planning(計画), EXE: Execution(実行)。表 2.1-2 に対応。

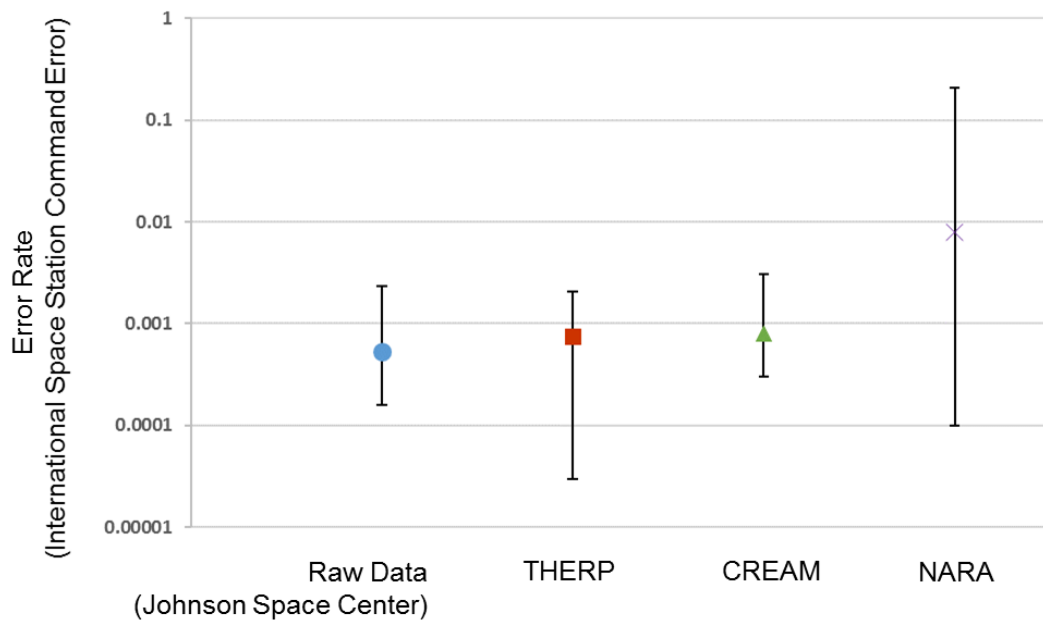
代表的な人間信頼性解析として以下が挙げられる。このうち HEART と THERP は第 1 世代 HRA, CREAM と ATHEANA は第 2 世代 HRA と分類され、既に原子炉開発に実践されている。IDHEAS は将来の第 3 世代 HRA として近年研究されている。

- HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique)[51]
- THERP (Technique for Human Error Rate Prediction)[52]
- CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method)[50]
- ATHEANA (A Technique for Human Event Analysis)[53]
- IDHEAS (Integrated Decision-Tree Human Event Analysis System)[54]

第 1 世代 HRA である HEART と THERP は、機械装置に対する安全性解析(図 1.3-3 や図 1.3-4 参照)を応用したものであり、人間行動の決定は画一的で、1.2 章に示したような人間の認知心理学的な行動は考慮されていない。また、HEART(詳細は Appendix B.1 参照)で挙げられている 9 種類のタスクの分類はパイロットのタスクとしては少なすぎると考えられる。また、THERP(詳細は Appendix B.1 参照)は、原子力分野を想定して設定されている判断のタイムスケールが、パイロットのタスクとしては長すぎる欠点がある。

第 2 世代 HRA である CREAM と ATHEANA は、認知心理学的な人間の行動を考慮し作業場の環境等がヒューマンエラー発生確率に考慮されるようになっている。CREAM は表 2.1-1～-3 に示す基準 HEP と PSF を有する手法であるが、NASA が新型有人宇宙機に関する研究[55][56]の一環で実施した HRA の各手法を航空宇宙分野に適用した場合のヒューマンエラー発生確率評価(図 2.1-3 参照)において、CREAM が最も実統計データ(図中の Raw Data)を再現したとの研究結果がある。また、同図に示す NARA(Nuclear Action Reliability Assessment)は HEART の派生形であるが、HEART 自体が汎用的で、また多数の PSF を考慮している性質上、ばらつき範囲が広くなる傾向があり、CREAM よりも実データと比べて安全側の値を算出することになる。安全側の解析結果となることは安全性の認証評価などには適すると考えられるが、概念設計に適用する観点では精度が高い方が望ましい。また、ATHEANA は原子力分野への適用を目的に研究された理論であり、システム構成が大きく異なる航空宇宙分野へ適用するには専門家による技術的検討が必要であるのに加え、概念設計段階では検討に適用できる設計データが得られないとされている[56]。

第 3 世代である IDHEAS は第 2 世代までの各種の手法を組み合わせで最良の結果を得る理論であり近年研究されているが、まだ原子力分野においても実用には至っていない。



備考) NARA は HEART から派生した解析モデル

図 2.1-3 NASA の研究例:HRA 手法の比較評価([55]より作成)

## 2.2 ヒューマンエラーの定性的解析手法

Stanton や Harris[57][58]は旅客機の型式証明活動において解析的なヒューマンエラーの識別や評価方法のプロセス確立を目的して、ヒューマンエラー・テンプレート(HET: Human Error Template)という手法を示した。HET 手法ではパイロットに関連するヒューマンエラーを、実運航で発生している事故やインシデント(近年の国内における事故・重大インシデントとの関係を 5.4.2 章に示す)を元に 12 種類の基本的なモードに分類する(表 2.2-1 参照)。また、パイロットの行動をタスク分析(Task analysis)[59]を基にタスクに分解した上で、ヒューマンエラーの発生確率と安全性への影響度をそれぞれ低/中/高(Low/Mid/High)の 3 段階に整理する(タスク分析の詳細な手法については Appendix B.2 に示す)。両者が高い指標となるものについては規定適合性に問題ありと評価されヒューマンエラー・マネージメントの設計対策が必要になる、といった識別手法を提案している。例えば、表 2.2-2 に示すエアバス A320 において自動着陸を行うシナリオにおいて、速度ノブ(Speed knob)を操作して 150 ノットまで減速するタスクであれば、エラーの種類は”Task executed on wrong interface element (間違ったインタフェースによるタスクの実行)”と”Task executed too much (タスクの過剰な実行)”として、速度ノブと間違えて方位ノブ(Heading knob)を操作すること、及び速度ノブを回しすぎてしまうことの 2 点が、発生確率と安全性の両方の観点で指標が高いヒューマンエラーであることを抽出している。本手法は、表 2.2-2 のようなテンプレートを用いて、簡便にヒューマンエラーの評価ができる長所があるが、発生確率と安全性の評価はあくまで定性的である。また、機体開発の最終フェーズにおいて規定適合性を判定することを主眼としており、合か否の 2 択評価となるため、概念設計段階でフライトデッキ設計最適化への適用が難しい短所がある。

表 2.2-1 パイロットのヒューマンエラーの分類([57]より作成)

No.	Error Mode
a	Fail to execute
b	Task execution incomplete
c	Task executed in the wrong direction
d	Wrong task executed
e	Task repeated
f	Task executed on the wrong interface element
g	Task executed too early
h	Task executed too late
i	Task executed too much
j	Task executed too little
k	Misread Information
l	Other

表 2.2-2 ヒューマンエラー・テンプレート(HET: Human Error Template)による定性的評価  
([57]より作成)

Scenario: Land A320 at New Orleans using the Autoland system			Task step: 3.4.2 Dial the “Speed/MACH; knob to slow down to 150kts on IAS/MACH display”								
Error Mode		Description	Outcome	Likelihood			Criticality			Pass	Fail
				H	M	L	H	M	L		
a) Fail to execute											
b) Task executed in wrong direction	✓	Pilot turns the Speed/MACH knob the wrong way	Aircraft speeds up instead of slowing down		✓		✓			✓	
c) Task execution incomplete											
d) Wrong task executed											
e) Task repeated											
f) Task executed on wrong interface element	✓	Pilot dials using the HDG knob instead	Aircraft changes course and not speed	✓				✓			✓
g) Task executed too early											
h) Task executed too late											
i) Task executed too much	✓	Pilot turns the Speed/MACH knob too much	Aircraft slows down too much	✓			✓				✓
j) Task executed too little	✓	Pilot turns the Speed/MACH knob too little	Aircraft does not slow down enough/Too fast for approach	✓				✓		✓	
k) Misread information											
l) Other											

また、最近の原子力分野における定性的解析の研究では、事故発生時における原子炉運転のストーリーや作業環境の背景といった「叙事知(Narrative)」が解析精度向上のために重要であると指摘されており、第 3 世代 HRA と連携して進められているが、現時点では叙事知分析をどのように進めていくか、まず実施ガイドラインの策定に向けた研究され始めている段階である[60][61]。

## 2.3 概念設計に用いるヒューマンエラー解析手法の選定

2.1 章および 2.2 章で示したヒューマンエラーの定量的・定性的解析の特徴を元に、フライトデッキ概念設計に用いる手法を選定した結果を表 2.3-1 にまとめる。HRA の各種手法の中から、定量的解析では第 2 世代 HRA として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 を適用する。定性的解析ではフライトデッキの FAR/CS25.1302 適合性評価のために開発された HET を適用するが、概念設計には不適であるため、定量的解析結果の検証として考察(5.4 章)で用いることとする。

表 2.3-1 概念設計に用いるヒューマンエラー解析手法の選定結果

ヒューマンエラー解析 (人間信頼性解析: HRA)	解析手法	評価	本研究への適用
定量的解析 (2.1章)	HEART	× 第1世代HRAであり認知行動モデルを非考慮	×
	THERP	× NASA実データの再現性が低い(図2.1-3)	×
	CREAM	○ 第2世代HRAとして認知行動モデルを考慮 ○ NASA実データの再現性が高い(図2.1-3)	○
	ATHEANA	○ 第2世代HRAとして認知行動モデルを考慮 × 航空宇宙分野への応用が容易でない	×
	IDHEAS	× 第3世代HRAとして既存解析モデルの長所を組み合わせを図るが、未だ研究段階で実用されていない	×
定性的解析 (2.2章)	HET	○ フライトデッキのFAR/CS25.1302適合性評価のために開発されている × 合否の2択に主眼。最適化計算には不適	○ (定量解析の検証)
	叙事知 (Narrative) 重視の方式	× ガイドラインが研究されている段階で実用化されていない	×



## 第3章 概念設計手法

提案するフライトデッキ概念設計手法について詳細を第3章にまとめる。まず本章では方法論を検討し、具体的な設計手法の検討例は第4章にまとめる。

### 3.1 概念設計手法の全体ステップ

本研究の目的を達成するために、概念設計手法の全体ステップは以下の考えで設定する。

- ・概念設計段階の主要課題であるフライトデッキ操縦・操作機器の配置設計に当たって、従来行っていた操作性解析評価に加えヒューマンエラー・マネージメントの解析評価を行う。
- ・ヒューマンエラーの解析手法としては人間信頼性解析(HRA)の CREAM を用いる。
- ・操作性とヒューマンエラー・マネージメントの両方がバランスよく優れる設計を行うため、多目的最適化手法を用いる。2つの評価値に対して目標値以上の機器配置設計解が得られるまで最適化計算を繰り返す。

以上の方針を基に設定したヒューマンエラー・マネージメントと操作性の両方を評価関数とした多目的最適化問題としてフライトデッキ概念設計を行う手法のステップを図3.1-1に示す。

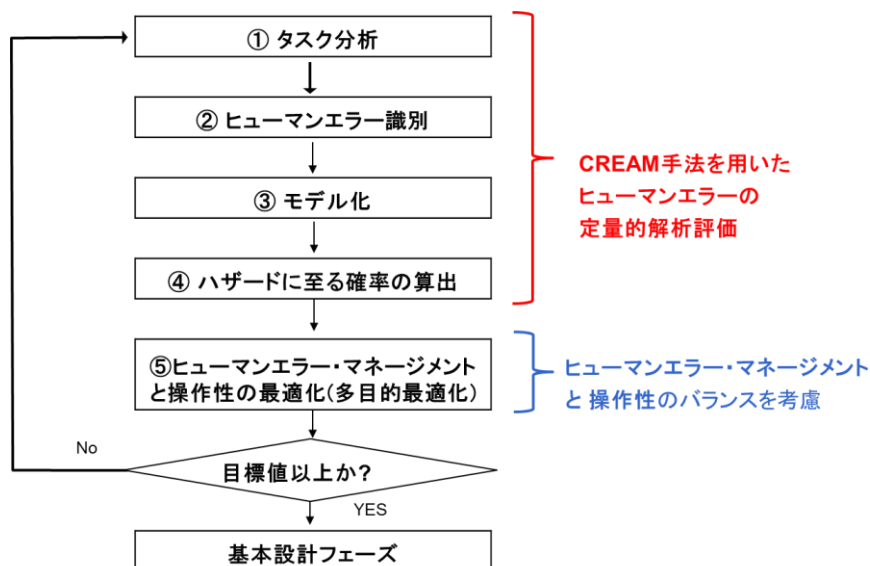


図 3.1-1 概念設計手法のステップ

また、先行研究と比較して、上記の設計手法の特長は以下の通りである。

- ・ヒューマンエラー解析単体での解析ステップ(図3.1-1中の①～④)は先行研究例(図3.1-2参照)[62]と同等であるが、本研究では操作性解析についても考慮して評価に加えたこと。

- ・更に、ヒューマンエラー評価と操作性評価を、多目的最適化手法に組みこんで同時最適化を行うこと。
- ・フライトデッキの概念設計の主要課題であるフライトデッキ操縦・操作機器の配置設計が可能なこと。

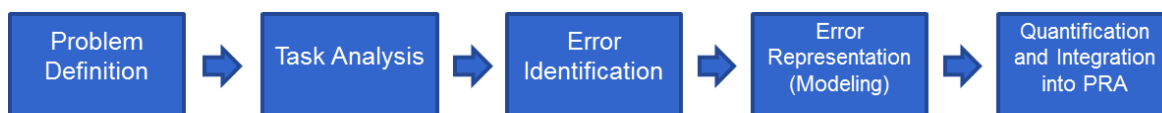


図 3.1-2 NASA の HRA 解析ステップ([62]より作成)

また、ISO 等 に示されるリスクアセスメント手法と本設計手法の関係は以下の通りである。ISO12100[63]では機械類全般に対するリスクアセスメントおよびリスク低減の一般原則が示されるが、航空機開発においてはその具体的な評価手法として、業界団体である SAE International が制定した ARP4761[33]が用いられている。ARP4761 では航空機に搭載される装置・機械の故障について図 1.3-4 に示す発生確率と安全性への影響度の評価基準を用いて許容範囲内となるまで設計改善が図られる。しかし、本研究で扱うヒューマンエラーについては発生確率の基準(図 1.3-4 縦軸の絶対値)が定められておらず、本評価基準を適用することはできない。このため本概念設計手法では、安全性への影響度が大きいハザード(Hazardous 以上)に対して、発生確率が既存機より小さくなるまで設計改善を繰り返し替すことを提案することとしている。

## 3.2 タスク分析

フライトデッキのヒューマンファクタ研究において一般的な方法であるタスク分析(Task Analysis)を実施しパイロットのタスクについて洗い出す。タスク分析の研究事例としては階層的に整理した階層的タスク分析(HTA: Hierarchical Task Analysis)[59]などの網羅的に全タスクを洗い出す手法もあるが、概念設計への応用の観点では設計に影響の大きいハイレベルなタスクを考慮することが望ましく、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ものを含むよう、代表的なプロシージャ(ノーマル及びノンノーマル)を用いてタスクを整理する。ここで、ノーマル・プロシージャは離陸・巡航・着陸といった通常の飛行におけるパイロットの手順、ノンノーマル・プロシージャは例えばエンジン火災発生といった故障発生時にエンジン停止や消火剤噴射といった手順のことを表す。

なお、FAR/CS Part 25 を適用して現在運航されている旅客機では、例えば”エンジン計器を視認”して”スラスト・レバーを前方にする”といった離陸時におけるタスクは、機種を問わず共通のものが大半となり、4 章に示すフライトデッキの操縦・操作機器の配置を検討する問題でも共通のタスクを適用している。ここで、ボーイング機種とエアバス機種のように航空機に対するパイロット関与の設計思想が異なるものを比較検討していく場合(5.1 章参照)、更には NASA 次世代航空輸送シ

システム研究(NextGEN: Next Generation Air Transportation System)[64]のようにタスクの自動化の割合を高めパイロットと航空機の機能分担(Functional Allocation)を再構築するような斬新なフライトデッキを検討していく場合には、パイロットが行うタスクは詳細検討が必要になる。

### 3.3 ヒューマンエラー識別

3.2 章で洗い出されたパイロットの各タスクに関して、起こり得るヒューマンエラーの識別(HEI: Human Error Identification)を行う。識別手法としては 2.1 章で示した原子力分野での HRA 手法の中から、NASA の研究[55]にて最も実統計データの再現性が高かった CREAM を適用する。

具体的には、パイロットの各タスクを表 2.1-1 に示す調整(Coordinate)、会話や通信(Communicate)、比較(Compare)などといった行動分類のいずれかに当てはめ、発生するヒューマンエラーを選定する(表 2.1-1 の網掛けの項目と表 2.1-2 参照)。また、概念設計を行う上では全てのヒューマンエラーを網羅的に識別することよりも、全体的な設計に影響が大きいものを抽出する方が望ましいことから、ヒューマンエラーによって引き起こされるハザードの影響が大きいものを適用する。安全性解析の分類で、安全性への影響が Hazardous 或いは Catastrophic レベル(図 1.3-4 参照)に相当するハザードを考慮する。例えば、エンジン火災が発生して故障側エンジンを停止するタスクであれば、行動分類は実行(Execution)と考え E1~E5(表 2.1-2 参照)のヒューマンエラーが発生すると考えられるが、ハザードの影響が大きいものとして Action on wrong object(誤って正常側エンジン側を停止)することが考えられる。

### 3.4 モデル化

上記で識別された安全性への影響があるヒューマンエラーについて、故障の本解析(FTA)と同様にイベントツリー形式にモデル化し、ヒューマンエラーからハザードに至る因果関係を整理する。

また、FAR/CS 25.1523(最少乗組員数・ワークロード)に基づき、パイロット 2 名のうち 1 名が対応不能となった場合(代表として右席パイロットが不能となり左席パイロットのみで運航)を前提としたイベントツリーとする。ここで、本研究ではフライトデッキ設計の良し悪しを評価することに主眼を置き、ヒューマンエラーが発生した場合にはそのままハザードに直結するモデルにて解析を行う。例えば、エンジン火災が発生時に誤って正常側エンジンを停止してしまうヒューマンエラーであれば、その時点でハザードに至るとモデル化する。実際の旅客機の運航においては、設計に起因するヒューマンエラーが発生し得る場合でも、お互いの行動をモニタしている両パイロット間のコミュニケーションや確認行為によりハザードに至ることが未然に防がれる。図 1.2-2 で示したスライス・モデルで考えると、設計のチーズに穴があったとしても訓練や運航といった 2 枚目以降のチーズにより防がれハザードへ至る確率は低くなるが、フライトデッキ概念設計手法としては 2 枚目以降のチーズによるエラー抑制効果に期待せずフライトデッキ設計のチーズの穴のみを評価する。

なお、以上に示す通り解析条件はパイロット 1 名としたが、パイロット 2 名とした場合の考察につ

いても 5.2 章に示す。

### 3.5 ハザードに至る確率の算出

故障の木解析(FTA)と同様にモデル化した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)を定義することで、ハザードに至る確率の総和を計算する。前者の基準 HEP については CREAM 手法によってタスクの種類毎に定義されている値(表 2.1-2 参照)を適用する。後者の PSF については、フライトデッキの設計仕様によって定まる値であり、あるタスクを実行するにあたって操作性が高い機器を操作する場合は表 2.1-3 のうち PSF が小さい値を選択し、操作性の低い機器を操作する場合は PSF が大きい値を選択する。操作性と PSF の関係性についての詳細は 3.6 章にまとめて示す。

なお、ヒューマンエラーからハザードに至る確率の総和は、3.4 章に示すイベントツリー形式のモデルより総乗記号( $\Pi$ )を用いて式 2 の通り計算される。ここで、基準  $HEP_k \times PSF_k$  は 1 番目(最初)から  $n$  番目(最後)までの  $k$  番目のイベントツリーの分岐におけるヒューマンエラー発生確率を表す。式 2 の右辺第 2 項が一度もヒューマンエラーが発生しなかった場合に相当し、それを 1 から引くことでハザードに至る確率が求まる。なお、1 つの分岐に複数のエラーが考えられる場合は、ヒューマンエラー発生確率(基準 HEP×PSF)をエラーの数だけ合計したものに読み替える。

$$\text{ヒューマンエラーからハザードに至る確率の総和} = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - \text{基準 } HEP_k \times PSF_k) \quad (\text{式 } 2)$$

ここで、ヒューマンエラー発生確率に用いる基準 HEP は高々 0.03 程度と小さい値であることに注目し、2 次以上の項を無視することで式 3 に示す通り計算を単純化できる。

$$\begin{aligned} \text{ヒューマンエラーからハザードに至る確率の総和(式 2)} &= \\ &= 1 - (1 - \text{基準 } HEP_1 \times PSF_1) \times (1 - \text{基準 } HEP_2 \times PSF_2) \times \dots \times (1 - \text{基準 } HEP_n \times PSF_n) \\ &= \text{基準 } HEP_1 \times PSF_1 + \text{基準 } HEP_2 \times PSF_2 + \dots + \text{基準 } HEP_n \times PSF_n + (2 \text{ 次以上の項}) \\ &\doteq \sum_{k=1}^n (\text{基準 } HEP_k \times PSF_k) \quad (\text{式 } 3) \end{aligned}$$

図 4.4-1 に示す通常の離陸(Normal Takeoff)時のシナリオについて、厳密な式 2 を用いた場合と、単純化した式 3 を用いた場合のヒューマンエラーからハザードに至る確率の総和の差は、0.003 以下であり、他機の評価値(例:B 機種=0.671, C 機種=0.615, 図 4.6-4 など参照)と比較して十分小さいため、概念設計段階のヒューマンエラー解析としては式 3 を適用することは妥当である。以下の計算では式 3 を適用する。

## 3.6 ヒューマンエラー・マネージメントと操作性の最適化

3.5 章までに示したヒューマンエラーからハザードに至る確率を評価関数の 1 つとして、3.6 章ではフライトデッキ概念設計に最適化手法を適用する。最適化に当たっては、ヒューマンエラー・マネー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考慮し、多目的最適化問題として扱うことで、両者のバランスのとれた設計解を得ることを図る。計算手法を 3.6.1～3.6.4 章にまとめる。

### 3.6.1 評価関数

評価関数については、3.2～3.5 章に示したヒューマンエラーからハザードに至る確率と操作性の 2 つとする。操作性については、1.3 章で示した以下の到達範囲(Reach Zone)を適用する(図 1.3-1 参照)。

- ゾーン 1：ハーネスをロックした状態での通常操作範囲
- ゾーン 2：ハーネスをロックした状態で最大限手を伸ばして届く範囲
- ゾーン 3：ハーネスのロックを外した状態で手を最大限伸ばして届く範囲

図 3.6-1 に示すオーバーヘッドパネル(Overhead Panel)、グレアシールド及び計器パネル(Glareshield & Instrument Panel)、センターペデスタル(Center Pedestal)、サイドコンソール(Side Console)に、操縦・操作機器をどのように配置するかについて、上記の到達範囲を用いて評価する。FAR/CS 25.777 に示されるパイロットの最小身長(5 フィート 2 インチ)を考慮すると、ゾーン 1 はパイロットすぐ近くの操縦桿/ホイール(Control Column/Wheel)やグレアシールドなどに相当し、ゾーン 2 はセンターペデスタル上の広い部分に相当し、ゾーン 3 はオーバーヘッドパネル上方などに相当する(図 3.6-2 参照, Appendix D に示す計算から概略設定)。低いゾーンほど手が届き易くワークロードが小さくなり操作性が良くなる。この到達範囲の分類を用いて、操縦・操作機器をゾーン 1, 2, 3 の何れに配置するかで、操作性が変化し、また PSF も変化してヒューマンエラー発生確率が変化する解析モデルを考える。

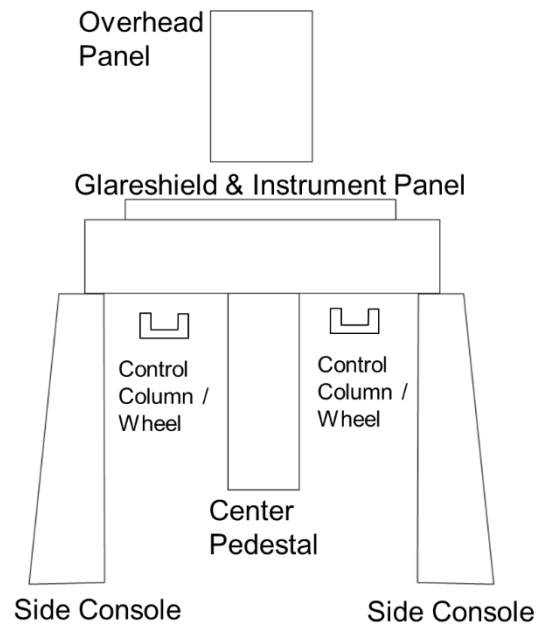


図 3.6-1 フライトデッキ機器配置検討用レイアウト概要

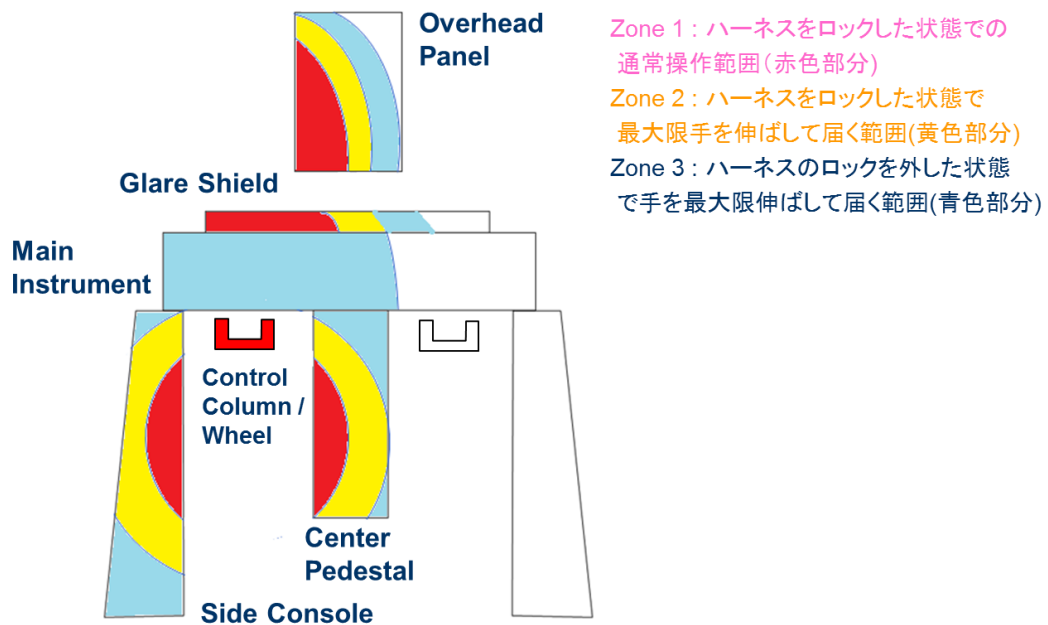


図 3.6-2 左席パイロットの操作範囲(Appendix D の計算結果から概略設定)

評価関数のうちヒューマンエラーからハザードに至る確率については, CREAM の PSF のうち”マン・マシン・インタフェースの適切さと運用上の補助(Adequacy of MMI (Man-Machine Interface) and operational support)”, ”同時達成が必要な目標の数(Number of simultaneous goals)”および”対処可能な時間(Available time)”の 3 項目がゾーン 1, 2, 3 に応

じて変化すると考える(表 3.6-1 参照)。この 3 項目はいずれも手の届き方や到達するまでにかかる時間などが変わることによって影響を受けるものとして選択した。表 3.6-2 に示すように、例えばエンジン火災時にエンジンを停止するタスク(分類は EXE: Execution)において、正常側のエンジンを誤って停止してしまうヒューマンエラーを考える場合、エンジン停止スイッチがゾーン 1 に配置されていれば PSF は 0.25 ( $= 0.5 \times 1 \times 0.5$ : 表 3.6-1 の Zone 1 参照), ゾーン 2 に配置されていれば 1.0 ( $= 1 \times 1 \times 1$ : 表 3.6-1 の Zone 2 参照), ゾーン 3 に配置されていれば 2.0 ( $= 1 \times 2 \times 1$ : 表 3.6-1 の Zone 3 参照)と計算できる。このように、あるフライトデッキの操縦・操作機器配置の設計例に対し PSF を定めることで、各タスク実行に発生し得るヒューマンエラーの基準 HEP とかけあわせ、ノーマルおよびノンノーマルの全てのシナリオの全タスクに対して基準  $HEP \times PSF$  の総和を取ることでハザードに至る確率が求められることができる。

表 3.6-1 機器配置と PSF の関係

PSF (操作性・ Workload)	PSF Status	Type of Human Function				Arrange ment
		OBS	INT	PLAN	EXE	
Adequacy of MMI and operational support	Supportive	0.5	1	1	0.5	Zone 1
	Adequate	1	1	1	1	Zone 2
	Tolerable	1	1	1	1	Zone 3
Number of simultaneous goals	Fewer than capacity	1	1	1	1	Zone 1
	Matching current capacity	1	1	1	1	Zone 2
	More than capacity	2	2	5	2	Zone 3
Available time	Adequate	0.5	0.5	0.5	0.5	Zone 1
	Temperately inadequate	1	1	1	1	Zone 2 Zone 3

表 3.6-2 機器配置による PSF 変化の例

タスク	エラー モード	基準 HEP	PSF	基準HEP × PSF
NN1	O2	0.003	0.25	0.000750
NN2	E3	0.0005	0.25	0.000125
NN3	E3	0.0005	0.25	0.000125
NN4	E3	0.03	0.25	0.007500
NN5	E5	0.03	0.25	0.007500
NN6	E5	0.03	0.25	0.007500
NN7	P2	0.01	0.50	0.005000

例)  
タスク NN3: 火災発生側エンジン停止  
エラー E3: 正常側エンジン誤停止

エンジン停止スイッチの配置  
- ゾーン1の場合: PSF = 0.25 (左表)  
- ゾーン2の場合: PSF = 1.0  
- ゾーン3の場合: PSF = 2.0

備考) ノーマルおよびノンノーマルの全シナリオの全タスクに対して基準  $HEP \times PSF$  の総和をとった値(即ちスカラー量)を評価値とする。

評価関数のうち操作性に関しては、最も単純な検討モデルとして、ゾーン 1 の装置を操作するタスクであれば「+1」、ゾーン 2 であれば「+2」、ゾーン 3 であれば「+3」と単純に加算した総和を用い

る。表 3.6-3 に示すように、例えば火災発生側のエンジンを停止するタスクにおいて操作するエンジン停止スイッチがゾーン 2 に配置されていれば+2、消火剤を噴射(Discharge)するタスクにおいて操作する防火ハンドル(Fire Handle)がゾーン 3 に配置されていれば+3 として加算していき、ノーマルおよびノンノーマルのタスクに対して総和を取ることで一連のタスクを通じた操作性を評価する。なお、フライトデッキ操縦・操作機器配置検討の評価関数としてワークロードを用いることで解析精度が向上すると考えられるが、本研究では効率的な概念設計手法を構築するため、このような簡易的な評価手法を適用した。ワークロードの解析的評価手法については Appendix B.3 に示す。

表 3.6-3 機器配置による操作性評価値の例

No.	Task	操作性評価値 (例)
NN2	左(火災発生側)スラストレバーをアイドル	+1 (スラストレバー: ゾーン1)
NN3	左(火災発生側)エンジン停止	+2 (エンジン停止スイッチ: ゾーン2)
NN4	左(火災発生側)エンジン防火ハンドル・シャットオフ	+3 (防火ハンドル: ゾーン3)
NN5	警告継続時は消火剤1デイスチャージ	+3 (防火ハンドル: ゾーン3)

備考) ノーマルおよびノンノーマルの全シナリオの全タスクに対して総和をとった値を操作性評価値とする。

以上に示す通り、操作性とヒューマンエラーからハザードに至る確率の 2 つの評価関数は、いずれも使いやすい位置に機器を配置するほどに評価値が優秀になるが、前者は主にノーマル時に使用する機器の影響が大きく、後者は主にノンノーマル時に使用する機器の影響が大きい。このことから、どちらの機器を優先的に配置させるかについて、お互いトレードオフの関係となる。

## 3.6.2 独立変数

3.6.1 章で述べたゾーン 1, 2, 3 のいずれにフライトデッキの操縦・操作機器を配置するかを独立変数とする。なお、概念設計段階では後工程に影響が大きいハードウェアの配置を考慮し、ソフトウェアによるディスプレイ上の表示等は後工程でも設計自由度があるため独立変数には含めない。また、近くて操作しやすいゾーン 1, 2 に配置可能なスペースは限られるため、その配置数に制約を設ける。さらに、FAR/CS 25.1302(d):ヒューマンエラー・マネージメント以外の個別の規定要求にて配置が確定する操縦桿/ホイールや酸素マスクといった機器については、ゾーン 1 に固定して配置することで独立変数としては含めない。

以上の考え方にて独立変数として設定する具体的な機器については 4.6 章に示す。



### 3.6.3 最適化手法

上記の評価関数および独立変数は非線形の最適化問題となるが、短時間で非線形の多目的最適解を得る有効な手法として、遺伝的アルゴリズムを適用する。本問題の評価関数および独立変数の特徴から、最適化問題の基本的手法のうち NSGA-II[65]及び巡回セールスマン問題[66]を組み合わせ適用する。以下に概要を示し、具体的な計算過程は Appendix C.1 に示す。また検証として、適用した最適化手法の妥当性について簡単な問題例に適用して確認した結果も Appendix C.2 に示す。

NSGA-II は評価値の高い個体の淘汰(Sorting)に適用し、ヒューマンエラーからハザードに至る確率および操作性の 2 つの評価関数に対して、高速で非劣解が得ることを目的とする。2 つの評価関数について、全ての個体に対して他の個体を圧倒(Dominate)する個体をランク 1 とし、ランク 1 を除いた他の個体を圧倒する個体をランク 2 とする。このようなランク付けに基づき世代間の淘汰を行う。

巡回セールスマン問題は、セールスマンが多数の目的地を 1 度ずつだけ巡回する制約条件のもと、最短経路となる巡回順番を求める問題である。多地点の巡回順番を多数の機器配置に読み替え、例えば、巡回順番 1~4 番はゾーン 1 に機器を配置、順番 5~10 番はゾーン 2 に機器を配置、といった扱いをすることで本検討へ適用する(表 3.6-4 参照)。突然変異についてはランダムに 2 つの機器の順番を取りかえることで重複が発生しない制約条件を満足する(表 3.6-5 参照)。交叉については、巡回順番を「パス表現」と呼ばれる基準経路を基にした順序表現に変換することで、重複が発生しない制約条件を満足する(表 3.6-6 参照)。

表 3.6-4 巡回セールスマン問題の応用

機器	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳	
巡回順番 (配置)	13	3	8	20	2	18	9	14	17	1	6	15	10	4	19	11	5	12	16	7

①~⑳機器について、配置をセールスマンの巡回順番と捉え、  
 ゾーン1:巡回順番1~4番目、ゾーン2: 5~10番目、ゾーン3: 11~20番目 とする。

表 3.6-5 巡回セールスマン問題の応用(突然変異)

個体1	⑱	⑪	③	④	⑤	⑥	⑦	①	⑨	⑩	②	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑧	⑳
個体2	⑱	⑪	③	⑬	⑤	⑥	⑦	①	⑨	⑩	②	⑫	④	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑧	⑳

巡回セールスマン問題の解法を用いて、同一個体内でランダムに選択した2つ機器の配置を交換。これにより、順序の重複が発生しない。

表 3.6-6 巡回セールスマン問題の応用(交叉)

個体1 (パス表現)	10	11	9	7	15	1	5	10	10	5	1	6	4	1	3	1	1	3	1	1
個体2 (パス表現)	8	8	11	6	8	14	4	12	5	5	9	2	4	2	3	3	2	2	2	1
交叉個体 (パス表現)	10	11	9	7	15	1	5	10	10	5	9	2	4	2	3	3	2	2	2	1

巡回セールスマン問題の解法を用いて、"順序表現"を基準経路を用いた"パス表現"に変換した上で、2個体間の交叉を行う。これにより、順序の重複が発生しない。

例) 基準経路を①②③④とすると、①④③②の個体は、パス表現では1321となる。

- 1:①が、基準経路の1番目
- 3:④が、①を除いた基準経路の3番目
- 2:③が、①④を除いた基準経路の2番目
- 1:②が、①④③を除いた基準経路の1番目

### 3.6.4 設計目標と解選択

操縦・操作機器の配置について、一様乱数を用いてランダムに発生させた初期個体から遺伝的アルゴリズムを用いて多目的最適化(ヒューマンエラーによりハザードに至る確率及び操作性を共に最小化)を実施する。多目的最適化により求めた設計解について、既存の旅客機の機器配置に基づいて計算した評価値と比較して、その成績と同等以上の評価を出すことができれば、新造機の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。以上の方法により、フライトデッキ内の操縦・操作装置配置は解析的手法を用いて、操作性とヒューマンエラーによりハザードに至る確率の2つの目的関数を最適化できる。

## 第 4 章 概念設計検討例

### 4.1 検討例:問題設定

3 章に示したフライトデッキ概念設計手法の有効性を確認するため、第 4.1 章ではリージョナル・ジェット機程度の機体規模(既存機の代表例としては B737NG, A320, E190, CRJ-700)のフライトデッキを想定した概念設計検討例を示す。リージョナル・ジェット機は旅客機として大型機と同じ規定への適合を要求される一方で、フライトデッキ空間が狭く、例えば B787[67]のように大型ディスプレイを数多く並べて操作・表示端末をディスプレイに統合させていくことが難しいためスイッチや警告灯が並ぶことになりやすい。このため、フライトデッキの機器配置検討としては設計が難しい側であり、検討例として適当であると考える。

以上の特徴より、表 4.1-1 に示すリージョナル・ジェット機フライトデッキに装備される代表的な操縦・操作機器の配置を検討する問題を考える。表 4.1-2 に示す通り、これらの操縦・操作機器は ATA チャプタ(航空分野で多用される米国航空輸送協会による系統分類)の主要なシステムの機器をカバーするよう選定した。表 4.1-2 の白抜きの ATA チャプタの機器を含めない理由は 4.2 章に示す。また、図 4.1-1 に典型的なフライトデッキの操縦・操作機器(例:B737NG[67][68][69])を示す。同図に示す通り、表 4.1-1 の機器はフライトデッキのほぼ全体に渡って配置されており、設計法の有効性を確認する目的で十分な例になると考える。

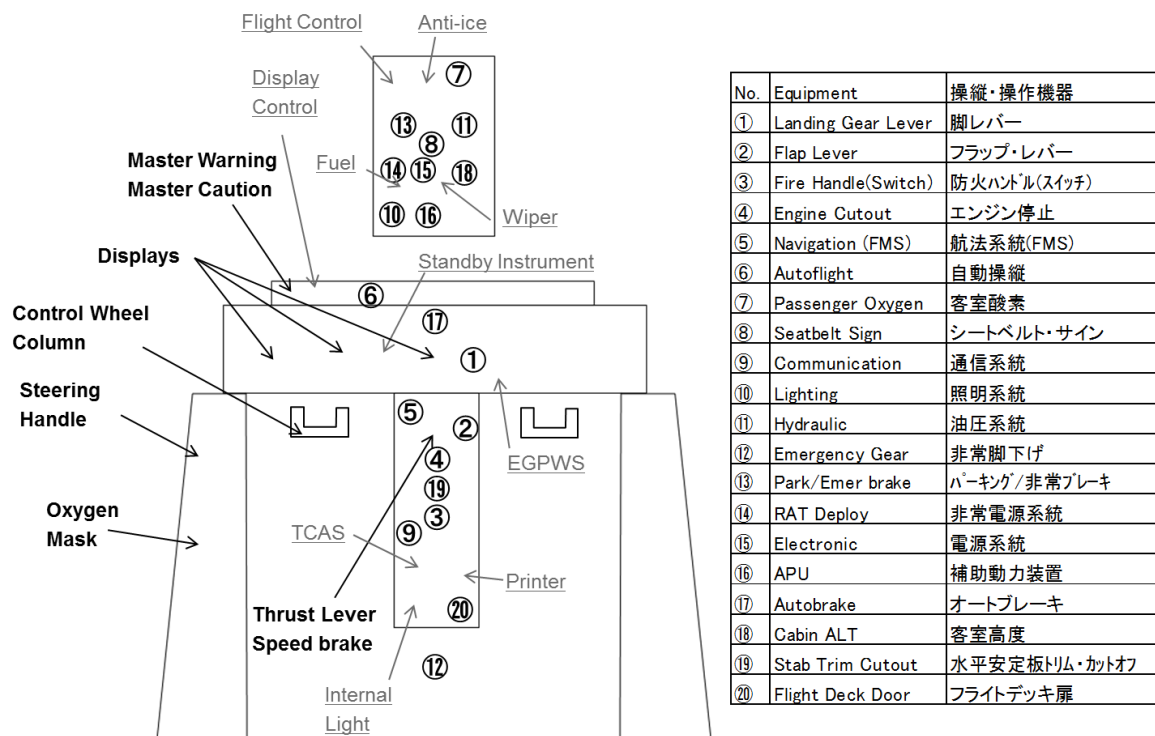
表 4.1-1 配置を検討するフライトデッキ操縦・操作機器

Column / Wheel	Passenger Oxygen
Thrust Lever	Seatbelt Sign
Rudder Pedal	Communication
Steering Handle	Lighting
Speed Brake	Hydraulic
Displays	Emergency Gear
Oxygen Mask	Parking brake
Master Caution / Master Warning	RAT Deploy
Gear Lever	Electronic
Flap Lever	APU
Fire Handle(Switch)	Autobrake
Engine Cutout	Cabin ALT
Navigation (FMS)	Stab Trim Cutout
Autoflight	Flight Deck Door

表 4.1-2 検討する操縦・操作機器と対応する系統(ATA チャプタ分類)

ATA	Cockpit Control	ATA	Cockpit Control	ATA	Cockpit Control
21	Cabin Pressure Control	28	Fuel Control	34	Navigation Display
	Temperature Control	29	Hydraulic Control		Weather Radar
22	Autopilot	30	Anti-icing Control		EGPWS
	Autothrottle	31	Main Instrument Panel		TCAS
23	Communication		Overhead Panel	FMS	
24	Electrical Powers	31	Pedestal	35	Oxygen
26	Fire Protection	32	Extension and Retraction	49	APU
27	Control Wheel		Main Brake Control	74	Ignition & Starting
	Flap Control		Autobrake	76	Throttle
	Spoiler Control	Nose Wheel Steering	Fuel Shutoff		
	Aileron Trim	Master Warning & Caution	78		Fire Shutoff
	Rudder Trim	Display Dimming & Test	78	Thrust Reverser	
	Stabilizer Trim	33	Lighting		

備考) 表 4.1-1 の機器に対応する系統(ATA チャプタ)を網掛けで示す。



備考) 下線付きの機器については本検討では省略した(4.2 章参照)。左右 2 対ある機器は左側のみ記載した。

図 4.1-1 典型的なフライトデッキ操縦・操作機器(例:B737NG[67][68][69])

## 4.2 検討例:タスク分析

3.2 章に示した方法にて、ノーマル及びノンノーマルの代表的な 8 つのシナリオ(表 4.2-1 参照)にて、パイロットのタスクを分析する。ノンノーマルに関しては、操縦・操作機器(エンジン, 防火, 空調, 油圧, 操縦, 脚, 電源など)に関連するヒューマンエラーによって至るハザードの影響度が大きいクリティカルな故障シナリオを含めた。この 8 つのシナリオは表 4.1-2 に網掛けで示した系統を網羅するように設定している。一方で、表 4.1-2 に白抜きで示した系統のうち ATA21(温度調整), ATA28(燃料制御), ATA30(防氷), ATA33(計器輝度調整)については、パイロットが緊急操作するような故障シナリオが無い場合、本検討に含めていない。また、ATA34(対地接近警報装置(EGPWS), 空中衝突防止装置(TCAS), 気象レーダ)に関連しては、パイロットの緊急操作はディスプレイ内に表示される警報表示や音声警報に対して行うものであり、ディスプレイ表示の詳細設計で検討されるものであるため、操縦・操作機器配置の概念設計手法には含めない。

ノーマル及びノンノーマルの代表的な 8 つのシナリオのタスク分析結果を表 4.2-2~4.2-9 に示す。表中の N1, N2 といった記号はタスクの識別記号を表す。なお、通常の巡航(Normal Cruise)時のタスク(表 4.2-3 参照)においては、FMS(Flight Management System:飛行管理装置)といった航法系統, フライト・ディレクタ(FD:Flight Director), 自動操縦(AP:Autopilot)や自動推力(AT:Autothrust)といった自動操縦系統, 通信系統(COM:Communication)については長時間の飛行フェーズでパイロットが繰り返し使用するため 10 回タスクを実行するものとして、後の解析で扱う。

なお、ここで示すタスクは機種に依らず旅客機として一般的なものとして、各種文献にある既存機のものから検討目的用に単純化した[70][71][72][73][74][75][76][77][78][79][80]。実際のボーイング機のノンノーマル・チェックリストでは、例えば交流電源バス左系統故障(Left AC BUS OFF)の場合では、まず操作スイッチのオン・オフのリサイクル操作を行ったり、APU を始動させた後に左右の電源系統を連結させたりなどの復旧操作を試みたりする手順となっており、チェックリストにも if 文による分岐が数多く登場する[81]。本検討では故障が最も厳しい状態を想定し、途中で故障が回復することはないことを仮定した。

表 4.2-1 ノーマル及びノンノーマルシナリオ一覧

1	通常の離陸(Normal Takeoff)
2	通常の巡航(Normal: Cruise)
3	通常の進入・着陸復行(Normal Approach & Go Around)
4	1エンジン不 작동/エンジン火災離陸 (One Engine Inoperative / Engine Fire Takeoff )
5	緊急降下 (Emergency Descent)
6	複数油圧系統喪失/非常脚下げ (Multiple Hydraulic Loss / Emergency Gear Extension)
7	全発動機喪失/非常電源装置作動 (All Generators Loss / Ram Air Turbine operation)
8	水平安定板トリム暴走(Stabilizer Trim Runaway)

表 4.2-2 通常の離陸(Normal Takeoff)時のタスク

No.	Task	タスク
N1	Advance thrust lever & stabilize	スラストレバー前進・安定化
N2	Set thrust lever to TOGA	スラストレバーをTOGAに設定
N3	Continue hold thrust lever till V1	スラストレバーをV1まで保持
N4	Identify any abnormal indication	異常な表示を識別
N5	Monitor speed & call V1	速度をモニタしV1をコール
N6	Verify V1 & hand off thrust lever	V1を確認し手をスラストレバーから離す
N7	Monitor speed & call VR	速度をモニタしVRをコール
N8	Rotate & establish positive rate of climb	引き起こし・正の上昇率を確立
N9	Verify & call positive rate of climb	確認・正の上昇率をコール
N10	Landing gear lever up	脚レバーをアップ
N11	Retract flaps	フラップ格納

表 4.2-3 通常の巡航(Normal Cruise)時のタスク

No.	Task	タスク
CR1	FMS setting	FMS設定
CR2	FD & AP setting	フライトダイレクタ・自動操縦設定
CR3	AT setting	自動推力設定
CR4	Communication	通信系統
CR5	Lighting & dimming	照明・明暗操作
CR6	Flight deck door open/close	フライトデッキ扉開閉操作

備考) 航法系統(FMS), 自動操縦, 通信系統はタスクを 10 回繰り返すとした

表 4.2-4 通常の進入・着陸復行(Normal Approach & Go Around)時のタスク

No.	Task	タスク
GA1	Set ILS tuned	計器着陸装置周波数設定
GA2	Set autoflight approach mode	自動操縦を進入モードに設定
GA3	Check Localizer captured	ローカライザ・キャプチャを確認
GA4	Check Glide Slope captured	グライドスロープキャプチャを確認
GA5	Landing gear down	脚下げ
GA6	Set landing flaps	着陸時フラップに設定
GA7	Set missed approach course	着陸復行方向を設定
GA8	Complete landing Checklist	着陸時チェックリスト実施
GA9	Go around or landing at Decision Altitude	決心高度にて着陸復行もしくは着陸を決心
GA10	Set autoflight TOGA mode	自動操縦をTOGAモードに設定
GA11	Set take off flaps	離陸時フラップに設定
GA12	Landing gear up at positive rate of climb	正の上昇率にて脚上げ

表 4.2-5 1 エンジン不 작동/エンジン火災 離陸

(OEI (One Engine Inoperative)/ Engine Fire Takeoff)時のタスク

No.	Task	タスク
-	通常時のタスクN1～N11と同じ	
NN1	Check alert - left engine fire	警告確認 - 左エンジン火災発生
NN2	Left thrust lever idle	左スラストレバーをアイドル
NN3	Left engine cutoff	左エンジン停止
NN4	Left engine fire handle shutoff	左エンジン防火ハンドル・シャットオフ
NN5	If alert stay shown, discharge agent 1	警告継続時は消火剤1ディスチャージ
NN6	If alert stay shown, discharge agent 2	警告継続時は消火剤2ディスチャージ
NN7	Plan to land	着陸を計画

表 4.2-6 緊急降下(Emergency Decent)時のタスク

No.	Task	タスク
ED1	Don oxygen mask	酸素マスク装着
ED2	Check cabin altitude	客室高度確認
ED3	Deploy passenger oxygen	客室酸素展開
ED4	Seatbelt sign on	シートベルトサイン点灯
ED5	Thrust lever idle	スラストレバーをアイドルに
ED6	Speedbrake lever full	スピードブレーキ・レバー最大展開
ED7	Airspeed VMO	最大運用限界速度を保持
ED8	Descend safety altitude	安全高度に降下
ED9	Control cabin altitude manually	客室高度を手動設定

表 4.2-7 複数油圧系統喪失/非常脚下げ  
(Multiple Hydro Loss / Emergency Gear Extension)時のタスク

No.	Task	タスク
HD1	Check backup pump Left	左予備ポンプを確認
HD2	Check backup pump Right	右予備ポンプを確認
HD3	Plan to land	着陸を計画
HD4	Disable autobrake	自動ブレーキを解除
HD5	Check landing distance	着陸制動距離を確認
HD6	Use alternate gear extension	非常脚下げを使用
HD7	Use emergency brake	非常ブレーキを使用

表 4.2-8 全発動機喪失/非常電源装置作動  
(All Generator Loss / Ram Air Turbine operation)時のタスク

No.	Task	タスク
EC1	RAT deploy	非常電源装置展開
EC2	Maintain airspeed	速度を保持
EC3	Check left generator	左側発動機を確認
EC4	Check right generator	右側発動機を確認
EC5	Check APU	APUを確認
EC6	Avoid icing condition	着氷条件を避けての飛行
EC7	Plan to land	着陸を計画

表 4.2-9 水平安定板トリム暴走(Stabilizer Trim Runaway)時のタスク

No.	Task	タスク
SR1	Autopilot disconnect	自動操縦を解除
SR2	Stabilizer trim cutout	水平安定板トリムをカットアウト



### 4.3 検討例:ヒューマンエラー識別

タスク分析を行って整理した各タスクについて、3.3 章に示す CREAM 手法を用いた方法にてヒューマンエラーを識別した。ノーマルおよびノンノーマルの 8 シナリオのタスクについて識別した結果を表 4.3-1～4.3-8 に示す。同表左の Task と書かれた列が表 4.2-2～4.2-9 の各タスクに相当する。その右隣の列が CREAM 手法におけるヒューマンエラーの分類を示す。なお、エラーの分類においてはヒューマンエラーによる安全性への影響が低いもの(安全性解析の定義[35]で影響度が Major 以下)については設計評定とならないため検討から除外した。

表 4.3-1 通常の離陸(Normal Takeoff)時のヒューマンエラー

Task	Human Error (CREAM)		
N1	E1	Action of wrong type	推力過不足
N2	E1	Action of wrong type	推力過不足
N3	E2	Action at wrong time	タイミング誤り
N4	O2	Wrong identification	誤った認知
	I3	Delayed interpretation	故障検知遅れ
N5	O2	Wrong identification	誤った認知
	I3	Delayed interpretation	認知遅れ
N6	O2	Wrong identification	誤った認知
	I2	Decision error	誤った離陸判断
N7	O2	Wrong identification	誤った認知
	I3	Delayed interpretation	認知遅れ
N8	E1	Action of wrong type	引き起こし過不足
	E2	Action at wrong time	タイミング誤り
N9	O2	Wrong identification	誤った認知
N10	E5	Miss action	脚不収納
N11	E5	Miss action	フラップ不収納

表 4.3-2 通常の巡航(Normal Cruise)時のヒューマンエラー

Task	Human Error (CREAM)		
CR1	E1	Action of wrong type	FMS設定誤り
CR2	E1	Action of wrong type	自動操縦モード誤り
CR3	E1	Action of wrong type	自動操縦モード誤り
CR4	E1	Action of wrong type	周波数設定誤り
CR5	E5	Miss action	点灯/消灯忘れ
CR6	E3	Action on wrong object	別のスイッチを誤操作

備考) FMS, 自動操縦, 通信系統は上記タスクを 10 回繰り返すとした

表 4.3-3 通常の進入・着陸復行(Normal Approach & Go Around)時のヒューマンエラー

Task	Human Error (CREAM)		
GA1	E1	Action of wrong type	周波数設定誤り
GA2	E1	Action of wrong type	自動操縦モード誤り
GA3	O2	Wrong identification	誤った認知
GA4	O2	Wrong identification	誤った認知
GA5	E5	Miss action	脚出し忘れ
GA6	E5	Miss action	フラップ展開忘れ
GA7	E3	Action on wrong object	自動操縦設定誤り
GA8	E5	Miss action	チェックリスト非実施
GA9	I2	Decision error	着陸復行判断誤り
GA10	E1	Action of wrong type	自動操縦モード誤り
GA11	E5	Miss action	フラップ設定忘れ
GA12	E5	Miss action	脚収納忘れ

表 4.3-4 1 エンジン不作動/エンジン火災 離陸  
(OEI / Engine Fire Takeoff)時のヒューマンエラー

Task	Human Error (CREAM)		
-	通常時と同じ		
NN1	O2	Wrong identification	誤った認知
NN2	E3	Action on wrong object	正常側エンジン停止
NN3	E3	Action on wrong object	正常側エンジン停止
NN4	E3	Action on wrong object	正常側エンジン停止
NN5	E5	Miss action	消火手順非実施
NN6	E5	Miss action	消火手順非実施
NN7	P2	Decision error	誤った飛行計画

表 4.3-5 緊急降下(Emergency Decent)時のヒューマンエラー

Task	Human Error (CREAM)		
ED1	E2	Action at wrong time	マスク装着遅れ
ED2	O2	Wrong identification	誤った客室高度認知
ED3	E5	Miss action	客室酸素展開忘れ
ED4	E5	Miss action	ベルト点灯忘れ
ED5	E1	Action of wrong type	推力過大
ED6	E1	Action of wrong type	ブレーキ不十分
ED7	E1	Action of wrong type	最大運用限界速度超過
ED8	E2	Action at wrong time	安全高度下降遅れ

表 4.3-6 複数油圧系統喪失/非常脚下げ

(Multiple Hydro Loss / Emergency Gear Extension)時のヒューマンエラー

Task	Human Error (CREAM)		
HD1	O2	Wrong identification	誤った認知
HD2	O2	Wrong identification	誤った認知
HD3	P2	Decision error	誤った飛行計画
HD4	E1	Action at wrong type	誤った自動ブレーキ設定
HD5	E1	Action at wrong type	FMS設定誤り
HD6	E5	Miss action	非常脚下げ忘れ
HD7	E5	Miss action	非常ブレーキ忘れ

表 4.3-7 全発電機喪失/非常電源装置作動

(All Generator Loss / Ram Air Turbine operation)時のヒューマンエラー

Task	Human Error (CREAM)		
EC1	E1	Action of wrong type	非常電源装置展開不十分
EC2	E1	Action of wrong type	速度不足
EC3	O2	Wrong identification	誤った認知
EC4	O2	Wrong identification	誤った認知
EC5	O2	Wrong identification	誤った認知
EC6	E5	Miss action	着氷条件での飛行
EC7	P2	Decision error	誤った飛行計画

表 4.3-8 水平安定板トリム暴走(Stabilizer Trim Runaway)時のヒューマンエラー

Task	Human Error (CREAM)		
SR1	E2	Action at wrong time	自動操縦解除遅延
	E3	Action at wrong object	類似スイッチの誤操作
SR2	E2	Action of wrong type	カットアウト遅延
	E3	Action at wrong object	類似スイッチの誤操作

## 4.4 検討例:モデル化

3.4 章に示した方法にて、識別され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た。ノーマルおよびノンノーマルのシナリオについて結果を図 4.4-1～4.4-8 に示す。図中の記号は表 4.2-2～4.2-9 のタスク及び表 4.3-1～4.3-8 のヒューマンエラーの分類に対応する。赤線はヒューマンエラーが発生せず正常に飛行した場合に相当し、黒線がヒューマンエラーからハザードへ至るケースである。

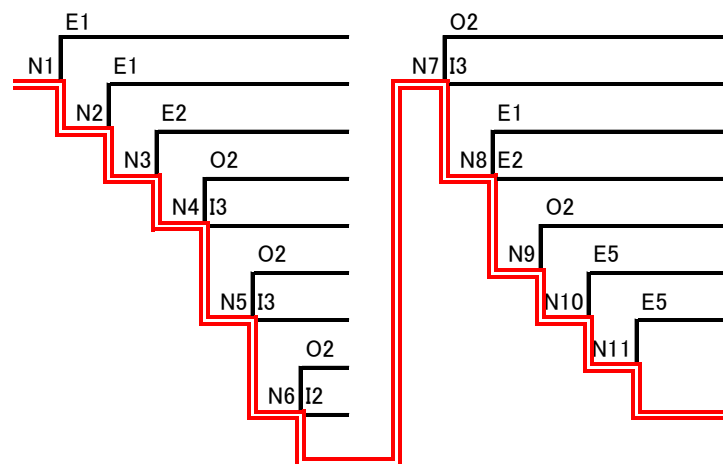


図 4.4-1 通常の離陸(Normal Takeoff)時のイベントツリー

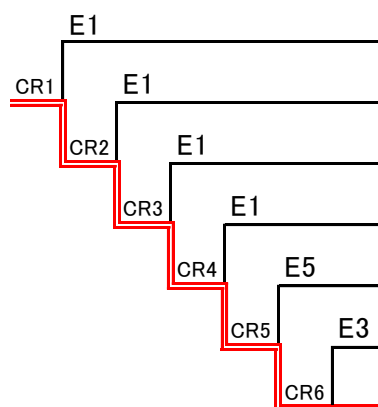


図 4.4-2 通常の巡航(Normal Cruise)時のイベントツリー

備考) FMS, 自動操縦, 通信系統は上記タスクを 10 回繰り返すとした

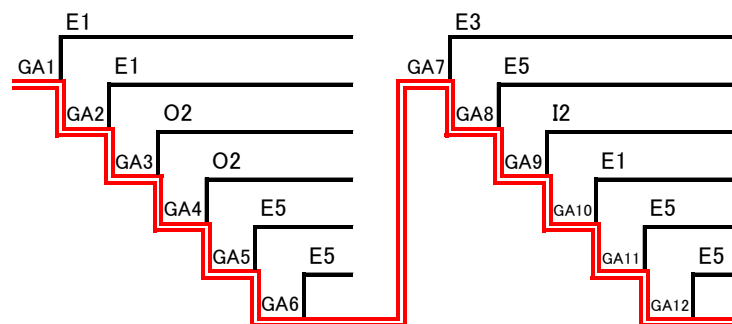


図 4.4-3 通常の進入・着陸復行(Normal Approach & Go Around)時のイベントツリー

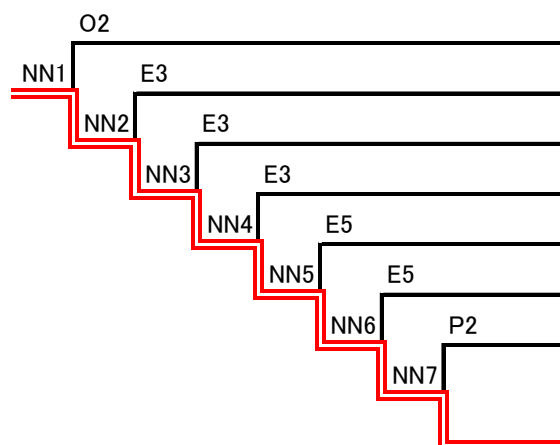


図 4.4-4 1 エンジン不動作/エンジン火災 離陸  
(OEI / Engine Fire Takeoff)時のイベントツリー

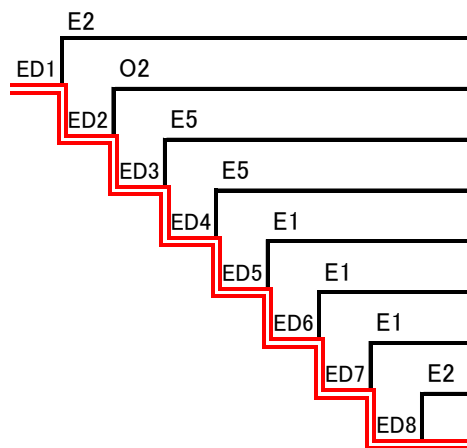


図 4.4-5 緊急降下(Emergency Decent)時のイベントツリー

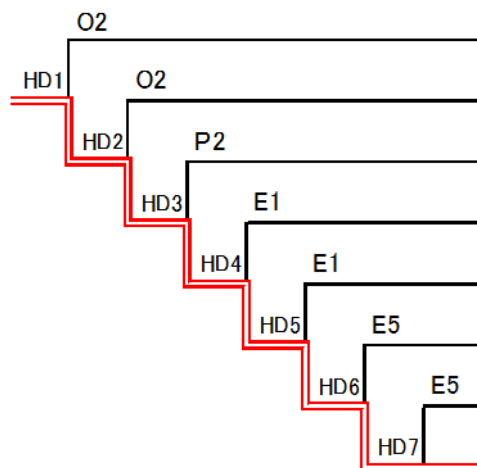


図 4.4-6 複数油圧系統喪失/非常脚下げ  
(Multiple Hydro Loss / Emergency Gear Extension)時のイベントツリー

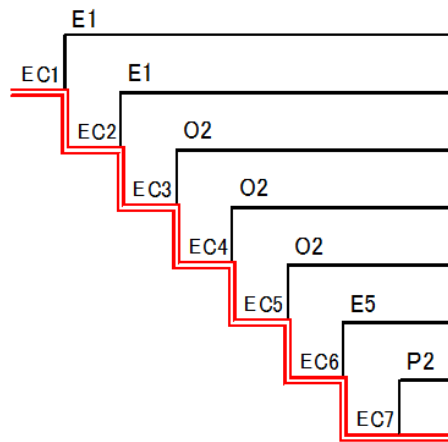


図 4.4-7 全発電機喪失/非常電源装置作動  
(All Generator Loss / Ram Air Turbine operation)時のイベントツリー

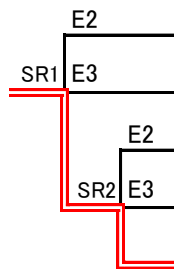


図 4.4-8 水平安定板トリム暴走(Stabilizer Trim Runaway)時のイベントツリー

## 4.5 検討例:ハザードに至る確率の算出

3.5 章に示した方法にて、上記のイベントツリーを基に CREAM 手法の基準 HEP と PSF を適用してヒューマンエラーからハザードに至る確率を算出した。基準 HEP は固定値とし、PSF は設計解毎に、即ち 4.6 章にて検討する遺伝的アルゴリズムの個体毎の配置に応じて変化する変数として、ハザードに至る確率を全てのタスクについて和を求めた。詳細は 4.6 章の最適化計算の通りである。

## 4.6 検討例:ヒューマンエラー・マネージメントと操作性の最適化

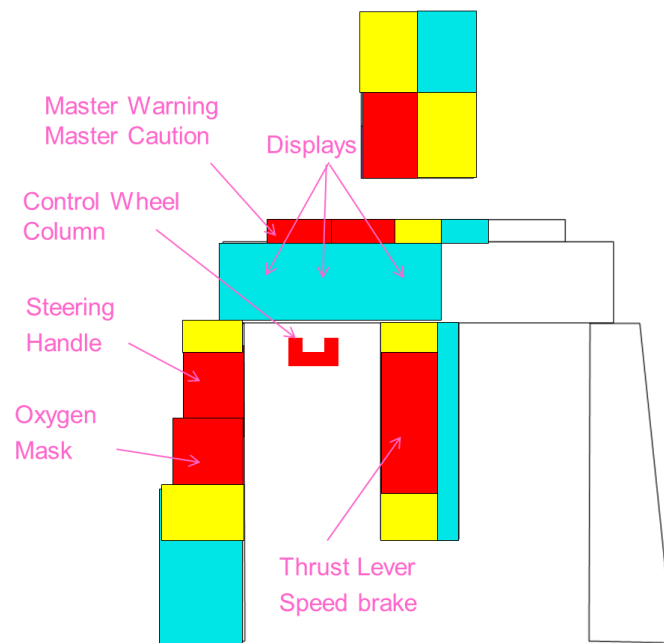
3.6 章に示した方法にて、遺伝的アルゴリズムを用いた解析手法にてフライトデッキ機器配置の最適解を求める。

独立変数として、表 4.1-1 に示すフライトデッキ操縦・操作機器について、ゾーン 1, 2, 3 のいずれに配置するかを検討する。近くて操作しやすいゾーン 1, 2 に配置可能な数に制約を設ける。ここで、FAR/CS 25.1302(d)ヒューマンエラー・マネージメント以外の規定要求にて配置が確定する操縦桿/ホイール、スラスト・レバー、ラダー・ペダル、ステアリング・ハンドル、スピード・ブレーキ・レバー、ディスプレイ、酸素マスク、マスターワーニング/マスターコーションの 8 つの機器についてはゾーン 1 に固定して配置するものとし、残る 20 種類の機器の配置を独立変数とした。このため、これらの機器を使用するタスク(例:表 4.2-2 タスク N4 通常の離陸時にディスプレイで異常な表示を確認)に関連する評価値は固定値となり、最適化計算における解の優劣に影響しない。本検討では一例として、Appendix D に示す操作性検討を基に、ゾーン 1 に 4 機器、ゾーン 2 に 6 機器、残り(10 機器)はゾーン 3 に配置する制約条件とした(表 4.6-1 および図 4.6-1 参照)。

表 4.6-1 独立変数とするフライトデッキ操縦・操作機器

独立変数とする(ゾーン1, 2, 3へ配置検討する) 操縦・操作機器			
① Gear Lever	⑥ Autoflight	⑪ Hydraulic	⑯ APU
② Flap Lever	⑦ Passenger Oxygen	⑫ Emergency Gear	⑰ Autobrake
③ Fire Handle (Switch)	⑧ Seatbelt Sign	⑬ Parking brake	⑱ Cabin ALT
④ Engine Cutout	⑨ Communication	⑭ RAT Deploy	⑲ Stab Trim Cutout
⑤ Navigation (FMS)	⑩ Lighting	⑮ Electronic	⑳ Flight Deck Door
独立変数としない(配置固定する) 操縦・操作機器			
Column / Wheel	Speed Brake	Thrust Lever	Displays
Rudder Pedal	Oxygen Mask	Steering Handle	Master Caution / Master Warning





左席パイロットの到達範囲例

- ・制約条件: Zone 1: 4か所, Zone 2: 6か所, Zone 3: 残り
- ・配置のサンプル

No.	Equipment	操縦・操作機器	Zone
①	Landing Gear Lever	脚レバー	3
②	Flap Lever	フラップ・レバー	2
③	Fire Handle(Switch)	防火ハndl(スイッチ)	3
④	Engine Cutout	エンジン停止	2
⑤	Navigation (FMS)	航法系統(FMS)	1
⑥	Autoflight	自動操縦	1
⑦	Passenger Oxygen	客室酸素	3
⑧	Seatbelt Sign	シートベルト・サイン	2
⑨	Communication	通信系統	3
⑩	Lighting	照明系統	3
⑪	Hydraulic	油圧系統	3
⑫	Emergency Gear	非常脚下げ	1
⑬	Park/Emer brake	パーキング/非常ブレーキ	2
⑭	RAT Deploy	非常電源系統	1
⑮	Electronic	電源系統	3
⑯	APU	補助動力装置	2
⑰	Autobrake	オートブレーキ	3
⑱	Cabin ALT	客室高度	2
⑲	Stab Trim Cutout	水平安定板トリム・カットオフ	3
⑳	Flight Deck Door	フライトデッキ扉	3

備考) Appendix D の操作性検討結果から概略設定。左右 2 対ある機器は左席のみ記載。  
左席パイロットの場合の図。右席の場合は左右対称。

図 4.6-1 独立変数とするフライトデッキ操縦・操作機器と制約条件

また, 比較対象となる既存機のフライトデッキ操縦・操作機器の配置を表 4.6-2 に示す。本表のゾーン 1, 2, 3 の分類については, 既存機の詳細寸法は未公開であるため, 雑誌等で公開されているフライトデッキの写真等[44][67][68][69][82]から概略で設定した。また, 詳細なシステム仕様は既存機種ごとに異なるため本研究では機器配置のみを参考とし, 以降, 具体的な機種名に代えて「B 機種, A 機種, E 機種, C 機種」と呼称する。

表 4.6-2 フライトデッキ操縦・操作機器の既存機例

No.	Equipment	操縦・操作機器	B機種 (B737NG)	A機種 (A320)	E機種 (E190)	C機種 (CRJ700)
①	Landing Gear Lever	脚レバー	3	3	3	2
②	Flap Lever	フラップ・レバー	2	3	3	3
③	Fire Handle(Switch)	防火ハントル(スイッチ)	2	3	3	1
④	Engine Cutout	エンジン停止	2	2	2	2
⑤	Navigation (FMS)	航法系統(FMS)	1	1	1	1
⑥	Autoflight	自動操縦	1	1	1	1
⑦	Passenger Oxygen	客室酸素	3	2	3	2
⑧	Seatbelt Sign	シートベルト・サイン	3	2	2	3
⑨	Communication	通信系統	1	1	1	2
⑩	Lighting	照明系統	1	1	2	2
⑪	Hydraulic	油圧系統	3	3	3	3
⑫	Emergency Gear	非常脚下げ	3	3	3	3
⑬	Park/Emer brake	パーキング・非常ブレーキ	3	3	1	3
⑭	RAT Deploy	非常電源系統	3	3	2	3
⑮	Electronic	電源系統	3	3	3	3
⑯	APU	補助動力装置	2	2	3	3
⑰	Autobrake	オートブレーキ	3	3	3	2
⑱	Cabin ALT	客室高度	2	2	3	3
⑲	Stab Trim Cutout	水平安定板トリム・カットオフ	2	3	2	1
⑳	Flight Deck Door	フライトデッキ扉	3	2	2	3

備考) 詳細な機器配置・寸法は未公開のため写真等から概略で設定[44][67][68][69][82]。

本研究例と同様にゾーン 1 を 4 機器, ゾーン 2 を 6 機器と仮定した。

操縦・操作機器の配置について、一様乱数を用いて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多目的最適化(ヒューマンエラーからハザードに至る確率及び操作性を共に最小化)を実施した。計算過程詳細は Appendix C.1 に示す。

計算結果について、図 4.6-2 に初期世代、図 4.6-3 に 20 世代後、また、図 4.6-4 に 20 世代後の拡大図を示す。図中には既存機の評価値も併せて示す。ここで、縦軸が全 8 シナリオ全タスクの操作ステップの総和(図中では操作性と記載)、横軸が全 8 シナリオ全タスクのヒューマンエラーからハザードに至る確率の総和(図中では HRA と記載)である。1 つの設計解に対して操作性とヒューマンエラーからハザードに至る確率の 2 つの計算結果が求められ、1 枚の 2 次元グラフ中に評価値が表される。これらの図から、ランダムに発生させた初期世代から 20 世代後には図中の左下に解が収束していき、既存機と比較して成績が同等以上の評価値の解が得られたことが分かる。

また、世代を経た推移を確認するため、図 4.6-5 および図 4.6-6 に 5 世代ごと(初期世代, 5 世代後, 10 世代後, 15 世代後, 20 世代後)の結果を重ね書きにて示す。これらのデータ詳細は Appendix C.3 に掲載する。図 4.6-5 を拡大した図 4.6-6 から分かる通り、初期値は一様乱数を用いてランダムに発生させているが、10 世代程度経過すると既存機と比較して操作性、ハザードに至る確率共に同等以上の評価値となるフライトデッキ機器配置の設計解を得られた。更に、15 世代程度まで経過すると既存機よりも 2 つの評価関数共に優れる解が多数得られるが、その後は 20 世代程度まで経過しても改善は小さい。

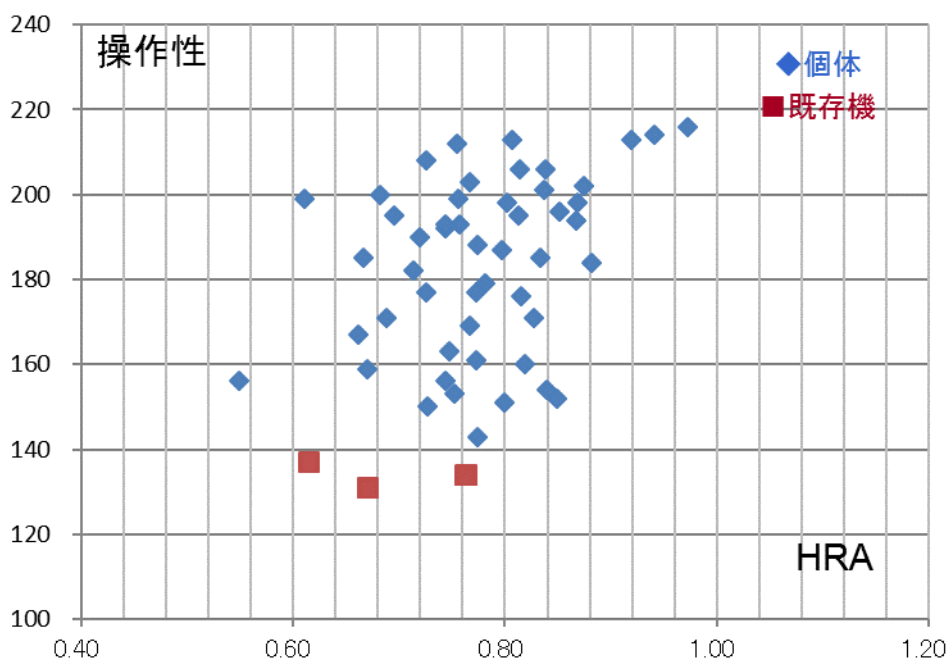


図 4.6-2 遺伝的アルゴリズムによる最適化結果(初期世代)

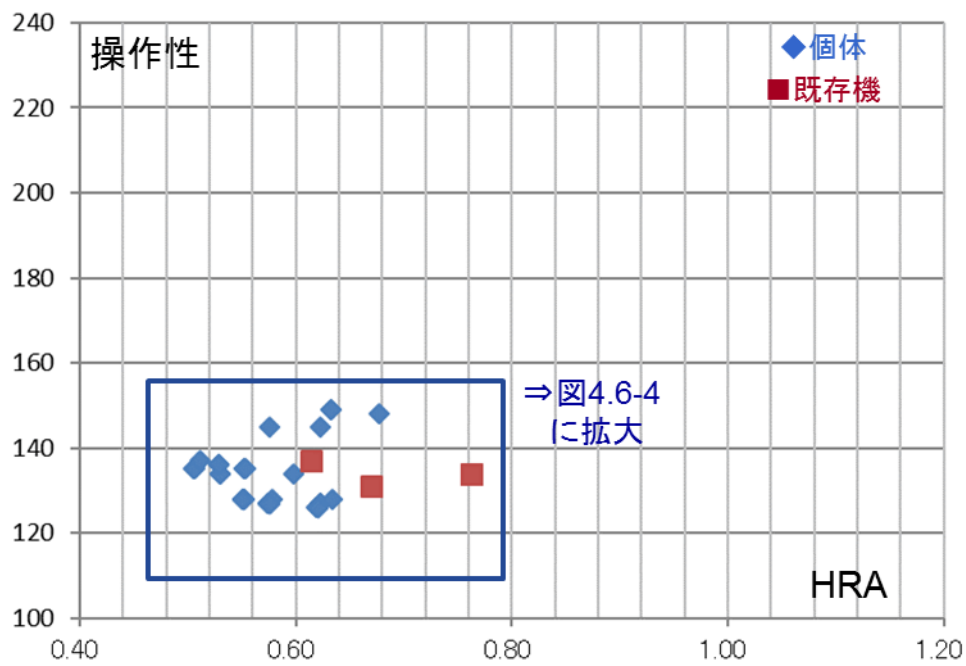


図 4.6-3 遺伝的アルゴリズムによる最適化結果 (20 世代後)

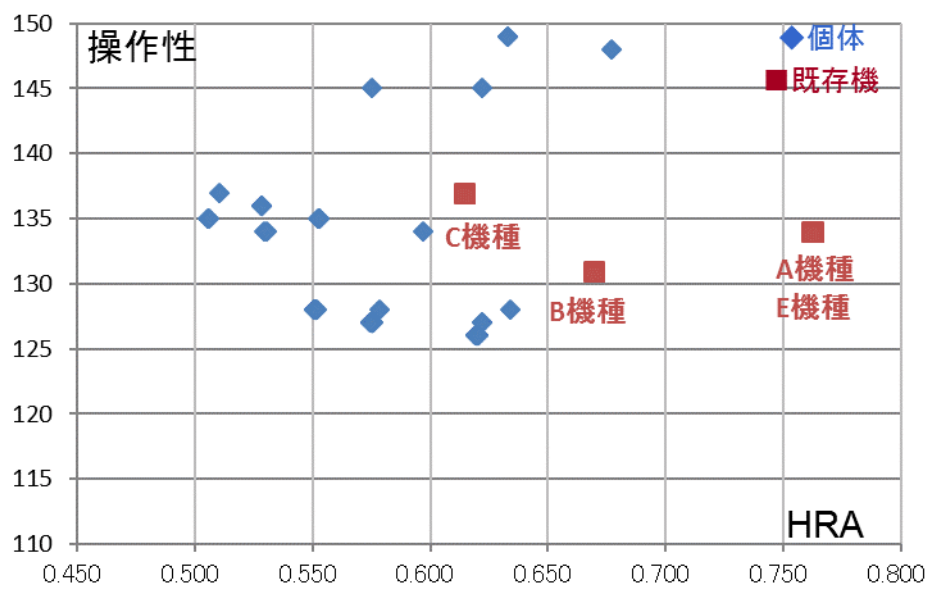


図 4.6-4 遺伝的アルゴリズムによる最適化結果  
(20 世代後: 拡大図)

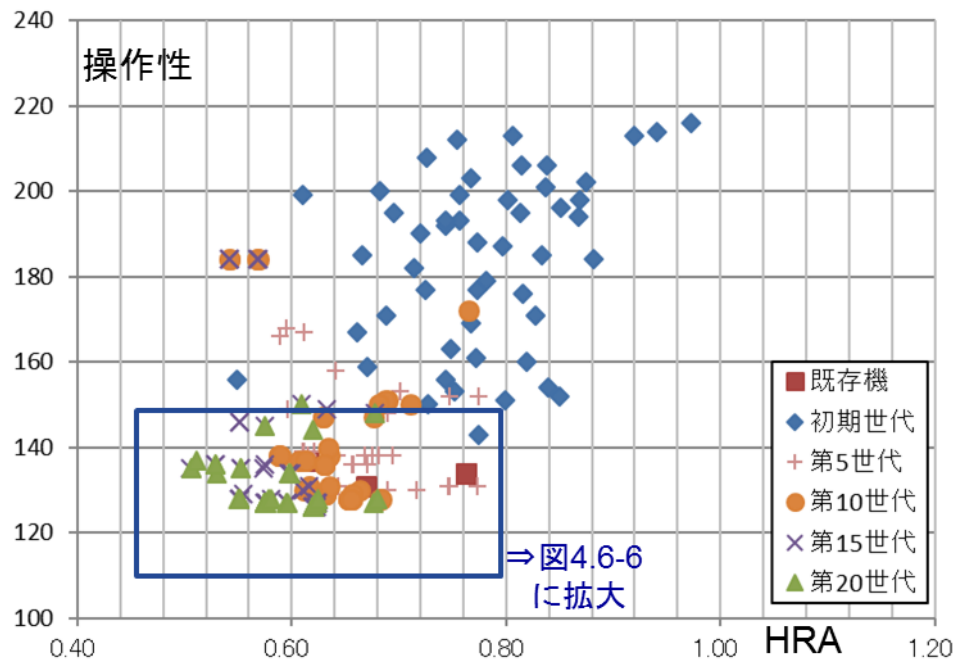


図 4.6-5 遺伝的アルゴリズムによる最適化結果  
(5 世代ごとの重ね書き)

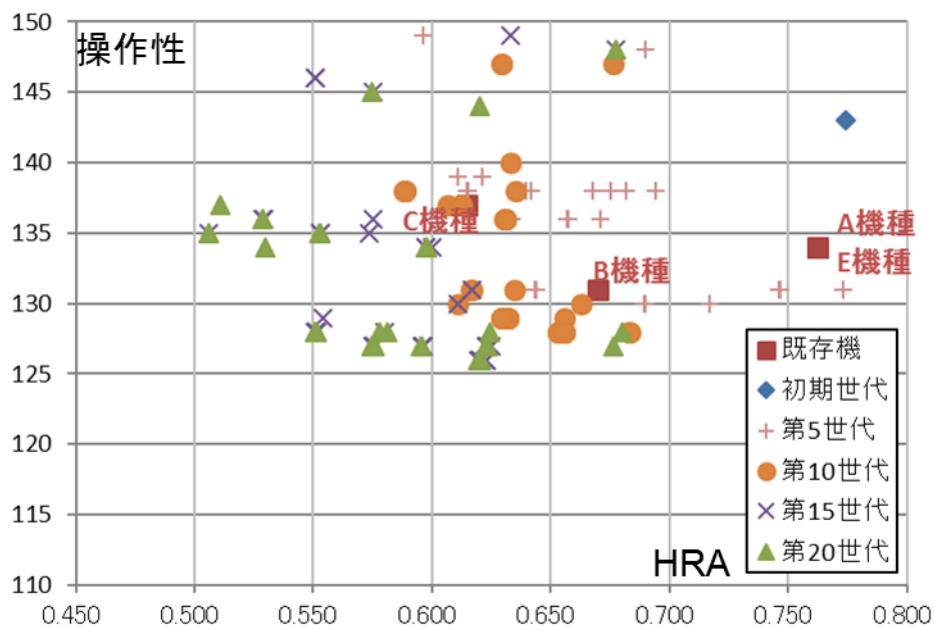


図 4.6-6 遺伝的アルゴリズムによる最適化結果  
(5 世代ごとの重ね書き: 拡大図)

この傾向をさらに詳細に確認するため、図 4.6-7 と図 4.6-8 に、優秀な 10 個体について、目的関数(操作性ないしハザードに至る確率)(縦軸)を 1~20 世代別に比較した。破線は既存機の評価値を示す。両図からも分かる通り、ランダムに求められた初期世代から、5~10 世代程度経過すると上位 10 個体は既存機の各評価値を上回ることになり、また 15 世代以降はあまり改善がみられず収束していることが読み取れる。

以上から、3 章で提案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内の操縦装置配置の概念設計手法は、従来のシミュレータを用いた実験的評価によらず、解析的手法を用いてヒューマンエラーからハザードに至る確率と操作性の両方を同時に最適化できることが示された。上記の解析結果の妥当性は 5 章にて考察する。

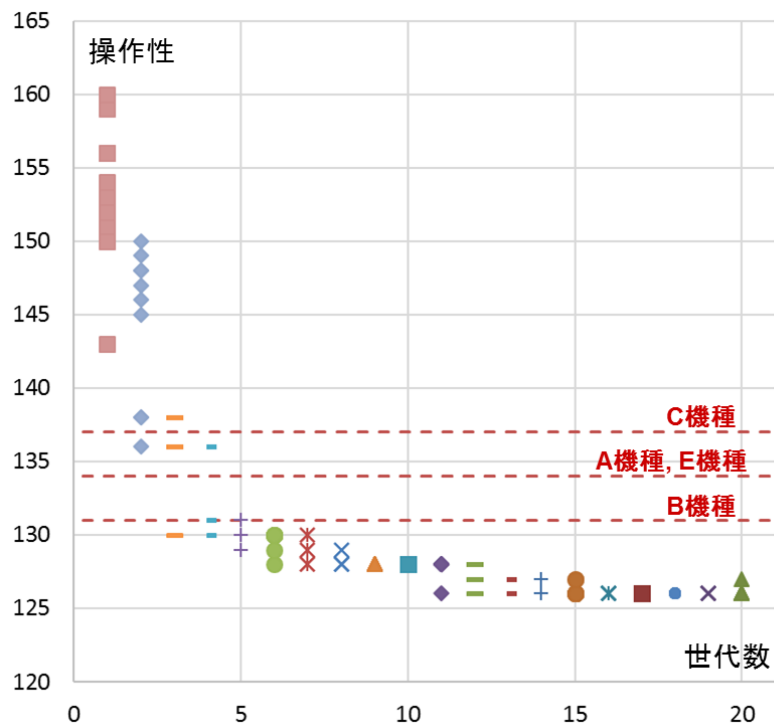


図 4.6-7 遺伝的アルゴリズムによる最適化結果：  
操作性(上位 10 個体) 収束の様子

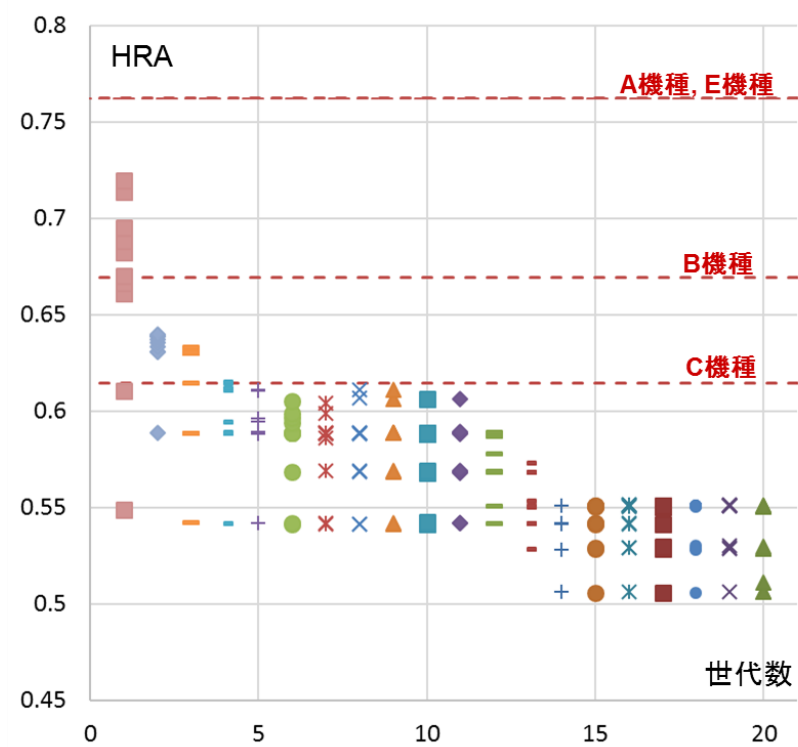
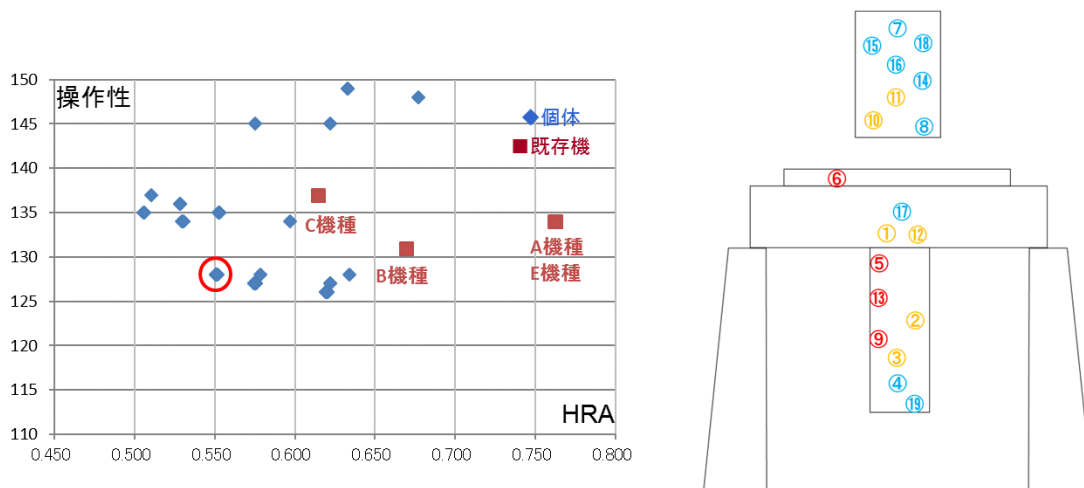


図 4.6・8 遺伝的アルゴリズムによる最適化結果：  
ハザードに至る確率(上位 10 個体) 収束の様子

## 第5章 考察

### 5.1 最適化結果の既存機との比較による妥当性確認

最適化計算結果からは、操作性とヒューマンエラーからハザードに至る確率の2つの評価値がいずれも既存機よりも優秀となる解が得られた。これらの解のうち2例について各ゾーンへの操縦操作機器を配置したレイアウトの例を図5.1-1、図5.1-2に示す。表5.1-1は解の値(ゾーン)を表に示したものである。優秀な成績となった理由を考察すると、これらの解は共通してゾーン1には⑤航法系統(FMS)、⑥自動操縦、⑨通信系統といったノーマル時に頻繁に使用する機器を配置するのに加え、⑬パーキング／非常ブレーキといったノーマル時・ノンノーマル時いずれでも使用する機器を配置する特徴がある。ゾーン2にはノーマル時に使用する①脚レバー、②フラップレバー、⑩照明系統を配置しているのに加えて、③防火ハンドル、⑪油圧系統といったノンノーマル時で使用する機器を配置していることが考えられる。即ち、ノーマル時・ノンノーマル時の両方で使用する機器を最優先でゾーン1に配置し、続いてノーマル時にのみ使用する機器と、ノンノーマル時でしか使用しないがヒューマンエラーからハザードに至る確率への影響が大きい機器を次に優先してゾーン2へ配置することで、操作性・ハザードに至る確率の2つの評価値が共に既存機よりも優れた解を得ている。特にB機種と比較すると、ノーマル時には使用するがハザードには寄与しない⑩照明系統をゾーン2に優先度を下げて配置することで、ハザードに至る確率の評価値を改善することができている。また、本研究ではリージョナルジェットを想定して⑬パーキングブレーキが非常ブレーキも兼ねる仕様(B機種では両機能が別々の操作機器)としたことで優先度が高く評価され、ゾーン1に配置されたことも影響すると考えられる。



2評価値とも既存機を上回る解(図中 ○赤丸)

・Zone 1:

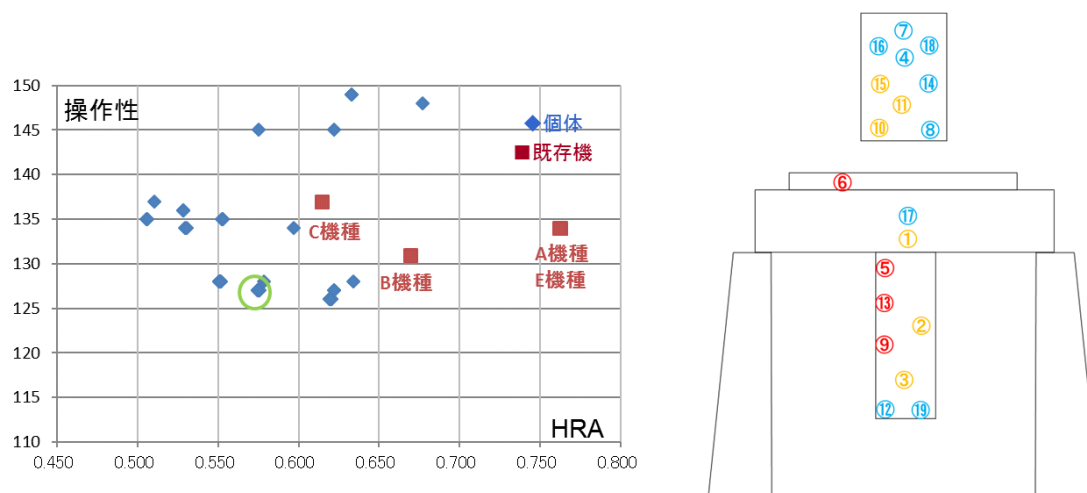
⑤Navigation(FMS), ⑥Autoflight, ⑨Communication ⑬Parking/Emergency Brake,

・Zone 2:

①Landing Gear Lever, ②Flap Lever, ③Fire Handle, ⑩Lighting, ⑪Hydraulic, ⑫Emergency Gear

図 5.1-1 2つの評価値がいずれも既存機を上回る解(その1)





2評価値とも既存機を上回る解(図中 ○緑丸)

・Zone 1:

⑤Navigation(FMS), ⑥Autoflight, ⑨Communication, ⑬Parking/Emergency Brake,

・Zone 2:

①Landing Gear Lever, ②Flap Lever, ③Fire Handle, ⑩Lighting, ⑪Hydraulic, ⑮Electronic

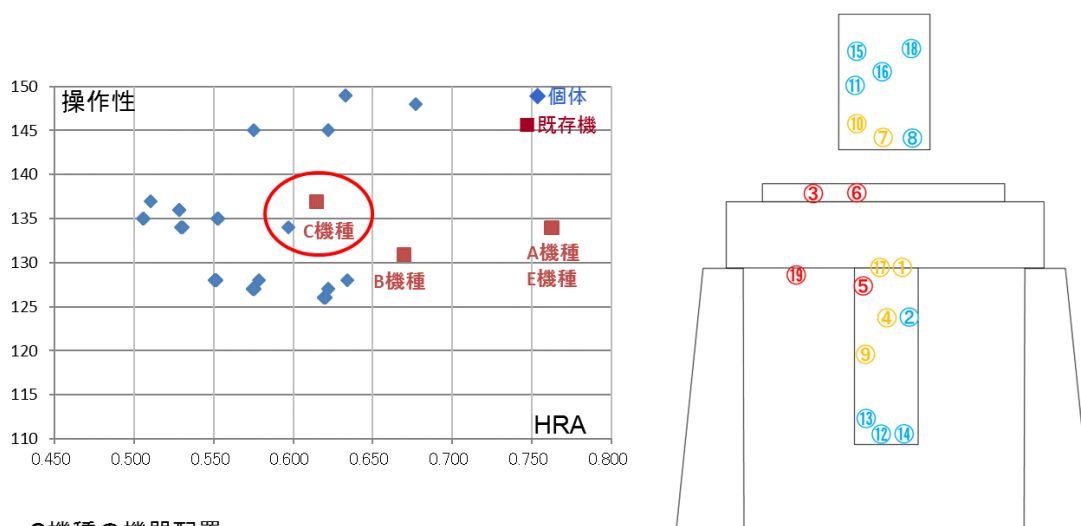
図 5.1-2 2つの評価値がいずれも既存機を上回る解(その2)

表 5.1-1 2つの評価値がいずれも既存機を上回る解と既存機配置の比較

No.	Equipment	操縦・操作機器	B機種 (B737NG)	A機種 (A320)	E機種 (E190)	C機種 (CRJ700)	最適解 図5.1-1	最適解 図5.1-2
①	Landing Gear Lever	脚レバー	3	3	3	2	2	2
②	Flap Lever	フラップ・レバー	2	3	3	3	2	2
③	Fire Handle(Switch)	防火ハンドル(スイッチ)	2	3	3	1	2	2
④	Engine Cutout	エンジン停止	2	2	2	2	3	3
⑤	Navigation (FMS)	航法系統(FMS)	1	1	1	1	1	1
⑥	Autoflight	自動操縦	1	1	1	1	1	1
⑦	Passenger Oxygen	客室酸素	3	2	3	2	3	3
⑧	Seatbelt Sign	シートベルト・サイン	3	2	2	3	3	3
⑨	Communication	通信系統	1	1	1	2	1	1
⑩	Lighting	照明系統	1	1	2	2	2	2
⑪	Hydraulic	油圧系統	3	3	3	3	2	2
⑫	Emergency Gear	非常脚下げ	3	3	3	3	2	3
⑬	Park/Emer brake	パーキング/非常ブレーキ	3	3	1	3	1	1
⑭	RAT Deploy	非常電源系統	3	3	2	3	3	3
⑮	Electronic	電源系統	3	3	3	3	3	2
⑯	APU	補助動力装置	2	2	3	3	3	3
⑰	Autobrake	オートブレーキ	3	3	3	2	3	3
⑱	Cabin ALT	客室高度	2	2	3	3	3	3
⑲	Stab Trim Cutout	水平安定板トリム・カットオフ	2	3	2	1	3	3
⑳	Flight Deck Door	フライトデッキ扉	3	2	2	3	3	3

また、既存機の中には、操作性が特に優秀なもの、ヒューマンエラーからハザードに至る確率が特に優秀なもの傾向が異なるものがあり、どちらに重点を置く設計思想に基づくかで設計解の選択肢が異なる。

まず、C 機種及び近似の評価値となる設計解(図 5.1-3 の丸に囲まれたもの)については、C 機種を代表として機器配置を見ると、ゾーン 1 に③防火ハンドルや⑬水平安定板トリム・カットアウト、ゾーン 2 に①脚レバーや⑬自動ブレーキといった機器を配置している特徴がある。あまり頻繁には使用しないがノンノーマルで速やかに動作が求められる③防火ハンドルや⑬水平安定板トリム・カットアウトがゾーン 1 に配置されることで、ヒューマンエラーからハザードに至る確率は小さいが操作性が悪い(操作ステップが多い)解となっている。これらの設計解については、ハザードに至る確率を低くすることに重点を置いた設計思想がとられていることが想定される。



#### C機種の機器配置

##### ・Zone 1:

③Fire Handle, ⑤Navigation(FMS), ⑥Autoflight, ⑬Stab Trim Cutout

##### ・Zone 2:

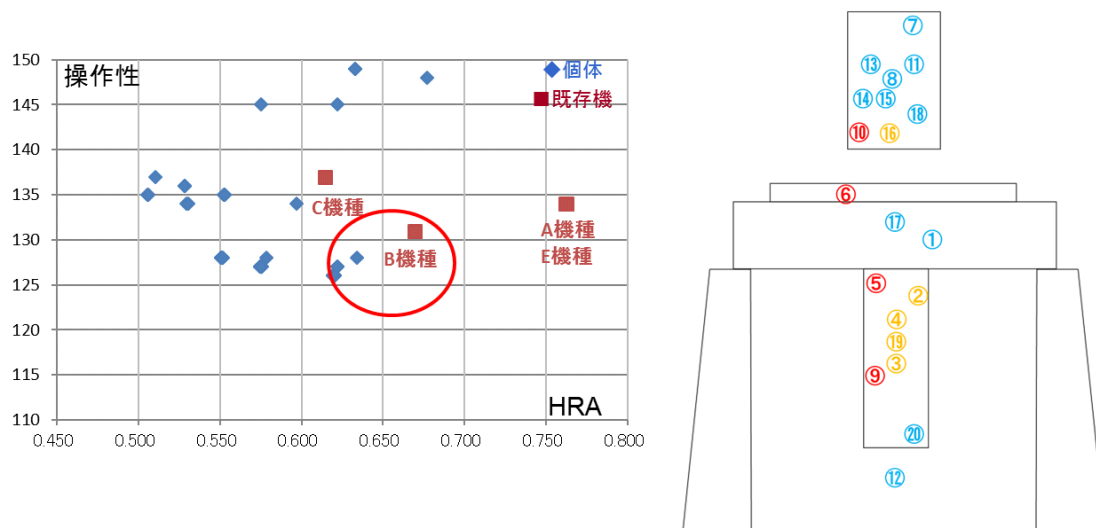
①Landing Gear Lever, ④Engine Cutout, ⑦Passenger Oxygen, ⑨Communication

⑩Lighting, ⑬Autobrake,

図 5.1-3 最適化計算結果と既存機(C 機種)との比較・C 機種の機器配置

次に、B 機種及び近似の評価値となる設計解(図 5.1-4 の丸に囲まれたもの)については、B 機種を代表として機器配置を見ると、ゾーン 1 に⑨通信系統や⑩照明系統、ゾーン 2 に②フラップ・レバーといった機器を配置している特徴がある。特に、安全性への寄与は小さいが、通常時に頻繁に使用する⑨通信系統や⑩照明系統がゾーン 1 に配置されている。これによりヒューマンエラーからハザードに至る確率は C 機種より大きい操作性が良い(操作ステップが少ない)解となっている。これらの設計解については、ハザードに至る確率を少々悪化させても操作性を向上させるこ

とに重点を置いた設計思想がとられていることが想定される。



#### B機種の機器配置

##### ・Zone 1:

⑨Communication, ⑤Navigation(FMS), ⑥Autoflight, ⑩Lighting

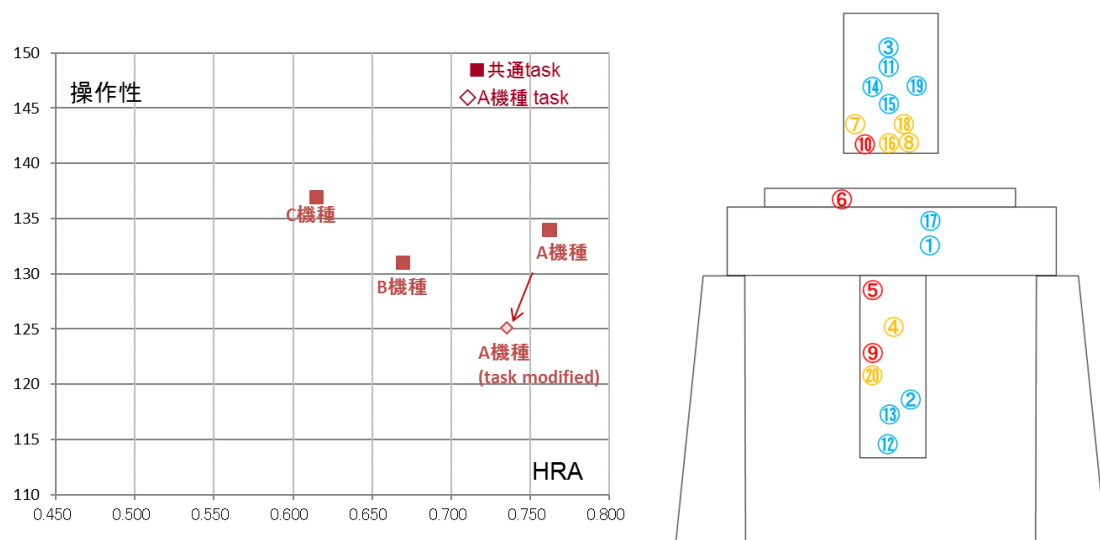
##### ・Zone 2:

②Flap Lever, ③Fire Handle, ⑬Parking Brake, ⑯APU, ⑱Cabin ALT

⑲Stab Trim Cutout

図 5.1-4 最適化計算結果と既存機(B機種)との比較・B機種の機器配置

また、A機種と近似の評価値となる設計解については、A機種を代表として機器配置(図 5.1-5 参照)を見ると、ゾーン 1 に⑨通信系統や⑩照明系統といった機器を配置している特徴がある。操作性はC機種とB機種の間程度となる。なお、自動化が進んでいるA機種では、パイロットのタスク及び関連するヒューマンエラーが他機と異なるため、これを考慮した評価として、通常時のスラスト・レバー操作やエンジンモニタ関連タスクを全て自動化(タスク無し)した場合の操作性及びヒューマンエラーからハザードに至る確率を図 5.1-5 に示す。同図に示すように、自動化レベルが他機より進んだ自動操縦系統を用いることで操作性が向上した優秀な解となるが、一方でエンジン火災などのノンノーマル時には高度な自動操縦系統適用による効果は無いためヒューマンエラーからハザードに至る確率はあまり変化が無いことが分かる。A機種については、ノンノーマル時には利点が大きくないものの自動操縦系統の高度化を進めることでノーマル時の操作性を向上させることに重点を置いた設計思想がとられていることが想定される。



#### A機種の機器配置

##### ・Zone 1:

⑨Communication, ⑤Navigation(FMS), ⑥Autoflight, ⑩Lighting

##### ・Zone 2:

④Engine Cut off, ⑧Seatbelt sign, ⑦Passenger Oxygen, ⑯APU, ⑱Cabin ALT

⑳Flight Deck Door

図 5.1-5 A 機種の機器配置について

なお, E 機種については評価値が A 機種と同等である(図 5.1-6 参照)。E 機種の自動操縦系統は他機種のそれと比べて顕著な特徴を有しておらず, 特に優れる点は見いだせていない。

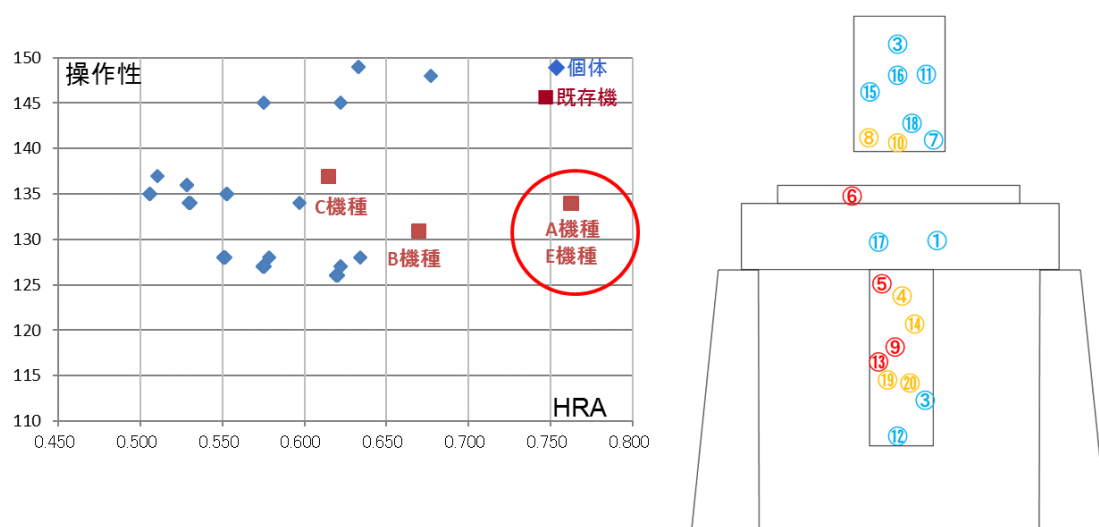


図 5.1-6 最適化計算結果と既存機(E 機種)との比較・E 機種の機器配置

これらの結果から各航空機メーカーの設計思想についてまとめると、C 機種ではノーマル時の操作性とのトレードオフにエンジン火災時などのノンノーマル時のヒューマンエラー・マネージメントを向上させているのに対して、B 機種では操作性とヒューマンエラー・マネージメントのバランスを重視している。A 機種については、ヒューマンエラー・マネージメントの向上は小さいが自動化を進めることでノーマル時の操作性を向上させることに重点を置いた設計思想がとられていることが想定される。

このように本研究で検討した解析的手法では、操縦・操作機器配置の検討に加え、各航空機メーカーの設計思想も考察することができた。例えば B 機種と A 機種などパイロットに求められる役割・タスクが大きく異なる機種間でも比較することができた。

ここで、最適化計算結果で既存機より優位な解が得られた点について、パイロット経験者から聴取した意見を以下に示す。これらの意見は上記に示した考察と整合している。

- ・ 照明系統は両パイロットから手の届きやすいオーバーヘッドパネル下方(前方)にあることが多い。誤操作した場合、直ちにクリティカルなハザードに至ることは無い観点で優先度が低いことは理解できる。ただし、日没などで周囲の明るさが変わっていく際には細やかに明るさを調整することがあり、飛行に直接影響しないものの当該タスクにできるだけ時間をとられたくない、という点から既存機では優先度を高くしていることも考えられる。
- ・ B 機種のように非常ブレーキがペダル操作と兼ねる場合はパーキングブレーキ自体は優先度が低く、E 機種のようなリージョナル・ジェット機のシステムを前提とすれば優先度が高いことは理解できる。ただしリージョナル・ジェット機の場合、パイロットはスラスト・レバーと非常ブレーキを片方の腕で忙しく操作することになり、ワークロードの観点からは B 機種のようなシステム構成が望ましい。操縦・操作機器配置のみならず、油圧操縦系統の全体構成まで遡って検討する際は考慮すべきである。
- ・ エンジン防火ハンドルについては、過去の機体で求められていた乗員 3 名による運航であれば、フライトエンジニアからも操作可能なようにオーバーヘッドパネル上方(後方)としていたことは納得できる。A 機種では過去に開発された機体との機器配置の共通性を重視していることも考えられる。C 機種については、エンジンの信頼性が低くまた CAS(Crew Alerting System)も無かった時代ではグレアシールドに配置している機体もあり、過去の機体との共通性が推察される。しかし、乗員 2 名運航でエンジンの信頼性も上がった現代の旅客機を初めから設計した場合は、これらの既存機と異なる配置になる可能性は十分考えられる。

## 5.2 パイロット 2 名で解析した場合の評価

以上の検討は 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 名を前提とした(代表として右席パイロットが対応不能となり左席パイロットのみで運航)のに対し、2 つの評価値の両方もしくはいずれかが既存機を上回る設計解 7 つ(図 5.2-1 参照)について、パイロット 2 名を前提として評価値を整理した場合について考察する。なお、既述の通りヒューマンエラー・マネジメントは訓練・運航等での対応も含まれるため、既存機の設計はパイロット 2 名でのオペレーションを前提としたものとも考えられる。

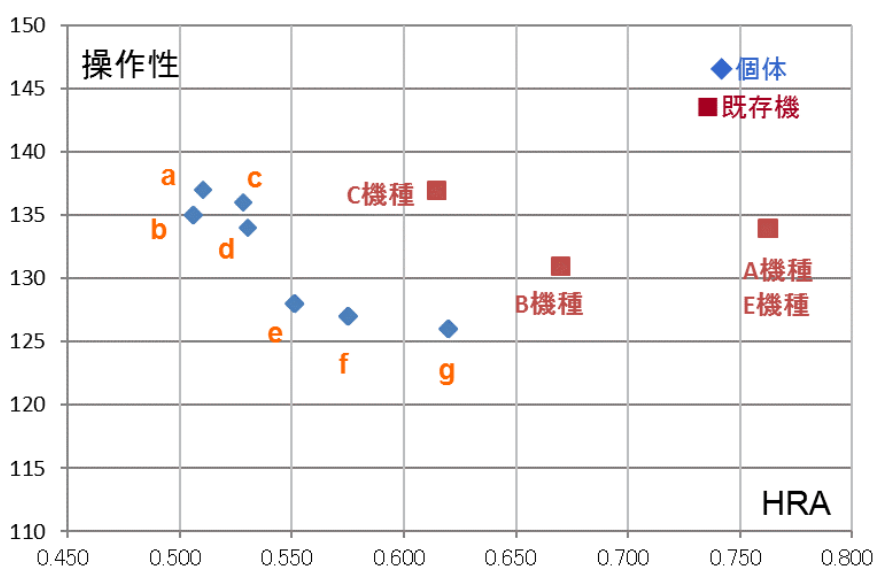


図 5.2-1 最適化計算結果と既存機との比較  
(7 個体をプロット:パイロット 1 名前提)

パイロット 2 名を前提とした場合の評価値の計算条件は下記の通りである。

- ・パイロット・フライング(PF)の操縦等に関するタスクは左席が担当する(機器④⑥⑬⑰⑱を操作)。
- ・パイロット・モニタリング(PM)のシステム操作等に関するタスクは右席が担当する(機器①②③⑤⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳を操作)。
- ・左席のゾーン 1 に配置した機器は、右席からはゾーン 3 に相当するとして操作性および PSF を計算する。ただし、左右共に 2 式配置されることが多い⑤航法系統(FMS)と⑨通信系統は、右席からもゾーン 1 に位置することとする。

上記に示すパイロット 2 名の条件にて再計算を行って既存機と比較した結果を図 5.2-2 に示す。図中の a~g は図 5.2-1 の解に対応する。⑤航法系統(FMS)と⑨通信系統以外の左席ゾーン 1

に配置された機器は右席ゾーン 3 と扱うことで、操作性とヒューマンエラーからハザードに至る確率の評価値は全個体においていずれも増加している。他に全体的な傾向としては、パイロット 2 名の場合では a～g の設計解は既存機の評価値と比較して概ね同等もしくは優れる側となっており、パイロット 2 名を前提とした場合でも優秀な解となっている。ただし、パイロット 1 名の場合(図 5.2-1)で、ハザードに至る確率が他の解を圧倒(Dominant)していた a～d の設計解は、パイロット 2 名の場合では他の解に比べて両評価値とも劣る結果となった。これは a～d の設計解が③防火ハンドルを左席ゾーン 1 に配置しており右席からはゾーン 3 として扱うため、PSF が大きくなっていることに起因する。また e～g の設計解について、既存機より操作性とハザードに至る確率共に優位性を保っていることは、パイロット 1 名および 2 名の計算条件の差よりも、5.1 章で述べた⑩照明系統や⑬パーキング／非常ブレーキといった機器に対して、既存機と異なる優先度となっていることに起因していると考えられる。

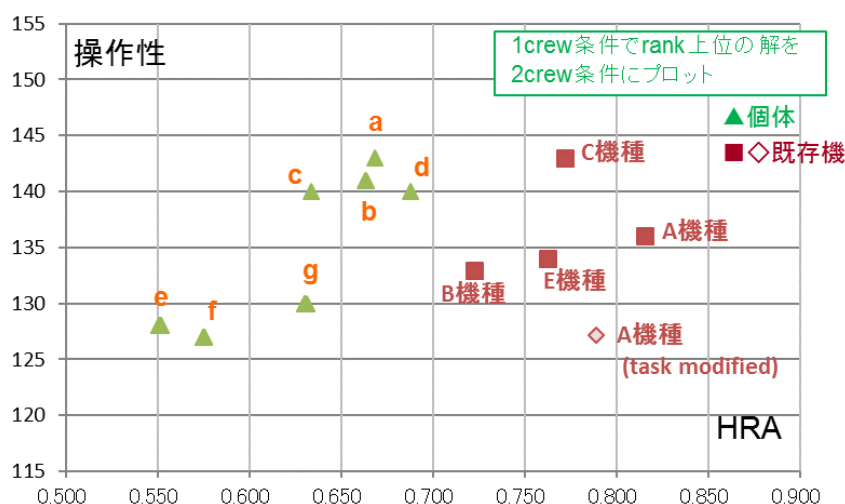


図 5.2-2 最適化計算結果と既存機との比較

(パイロット 1 名を前提とした上位個体をパイロット 2 名の条件で再計算)

本検討結果から、本研究では FAR/CS 25.1523(最少乗組数に関する規定)への適合性に主眼を置き、パイロット 1 名を前提としたが、通常のパイロット 2 名の条件に変更した場合についても傾向としては優秀な解が得られた。将来的な研究課題として、パイロット 2 名を前提とした操作性とヒューマンエラーからハザードに至る確率の 2 評価関数を、パイロット 1 名の場合の 2 評価関数に加えて、計 4 評価関数にて多目的最適化問題を解くことで、より一層多面的な概念設計に拡充できると考えられる。

## 5.3 感度解析による妥当性確認

5.3 章では最適化計算に用いた以下の主要な 3 つの前提条件について感度解析を実施して計算結果への影響を評価し、解析手法の妥当性を確認する。

- (1) 評価関数: ヒューマンエラー発生確率(基準 HEP×PSF)
- (2) 評価関数: 操作性(機器配置ゾーンに基づく評価値)
- (3) 制約条件: 各ゾーンにおける機器配置数

### 5.3.1 感度解析:ヒューマンエラー発生確率の評価関数

本研究でヒューマンエラー発生確率の算出に用いた CREAM 手法は原子力分野で開発され、NASA による航空宇宙分野での応用研究(図 2.1-3 参照)にて最も実データを再現した手法であるが、CREAM の基準 HEP や PSF は原子炉運転員のオペレーションを想定して整理されたものであるため、旅客機パイロットのオペレーションに適用する場合は数値が異なることが想定される。数値が変動した場合における最適化計算結果について感度解析を行う。検証方法として、CREAM ではヒューマンエラー発生確率(基準 HEP×PSF)のうち基準 HEP について 5 および 95 パーセンタイル信頼性区間の上限・下限値(表 5.3-1)が定義されており、本編で用いた基準値(Basic Value)から変更してこれらの上下限を用いた場合について、最適化計算によって求めた設計解への影響について考察する。ここで、基準 HEP の変動幅の多くは上限・下限値と比較して 1 桁あるいは 2 桁のオーダーであるのに対し、PSF の変動幅(表 2.1-3 の PSF State による変化)は高々 1 桁のオーダーである。このため、基準 HEP の変動の方が支配的であり、基準 HEP のみ感度解析を行う。

基準 HEP を全て 95 パーセンタイル(上限)とした場合および 5 パーセンタイル(下限)とした場合の 2 ケースに場合分けし、他は 4 章と同じ条件で遺伝的アルゴリズムを 20 世代に渡って実施して最適化させた。それぞれのケースで最適化計算にて得られた設計解のランク上位 20 個体(重複あり)について機器の配置結果を図 5.3-1 に示す。さらに 20 種類の機器の配置ゾーンについて 20 個体の平均値を図 5.3-2 に比較する。また、同平均値と標準偏差を図 5.3-3 に示す。図 5.3-2 の通り平均値同士を比較した場合、4 章に示す計算結果と基準 HEP を下限に変更した場合の相関係数は 0.823 であり、同様に基準 HEP を上限に変更した場合との相関係数も 0.825 である。図 5.3-1 でゾーン 1 に配置した機器に注目すると、基準 HEP を下限としたケースでは①脚レバーの優先度が高くなり、基準 HEP を上限としたケースでは⑬パーキング／非常ブレーキの優先度が低くなる。また、図 5.3-3 の通り基準 HEP を下限としたケースでは②フラップ・レバーをゾーン 1 とする解とゾーン 3 とする解に分かればらつきが大きくなる。結論として、基準 HEP を変動させた場合も 4 章の計算結果との相関係数は高く本解析手法はロバストであると言えるが、ノーマル時に使用する機器については優先度が異なる。



表 5.3-1 CREAM の 5%及び 95%信頼度区間([50]より作成)

Cognitive Function	Generic Failure Type		Lower Bound (5%tile)	Basic Value	Upper Bound (95%tile)
Observation	O1	Wrong object observed	0.0003	0.001	0.003
	O2	Wrong identification	0.001	0.003	0.009
	O3	Observation not made	0.001	0.003	0.009
Interpretation	I1	Faulty diagnosis	0.09	0.2	0.6
	I2	Decision error	0.001	0.01	0.1
	I3	Delayed interpretation	0.001	0.01	0.1
Planning	P1	Priority error	0.001	0.01	0.1
	P2	Inadequate plan	0.001	0.01	0.1
Execution	E1	Action of wrong type	0.001	0.003	0.009
	E2	Action at wrong time	0.001	0.003	0.009
	E3	Action on wrong object	0.00005	0.0005	0.005
	E4	Action out of sequence	0.001	0.003	0.009
	E5	Miss action	0.025	0.03	0.04

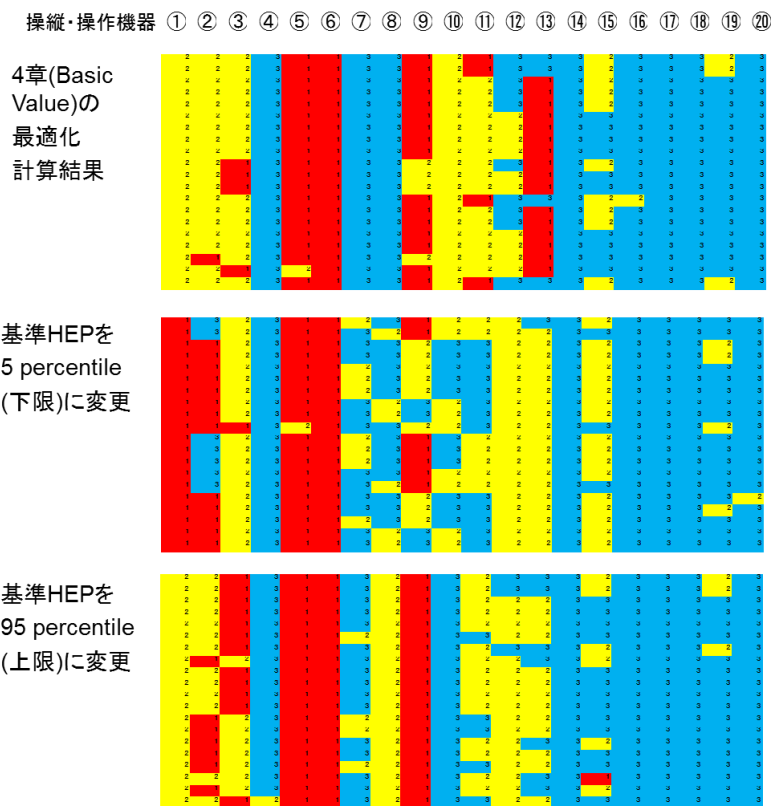
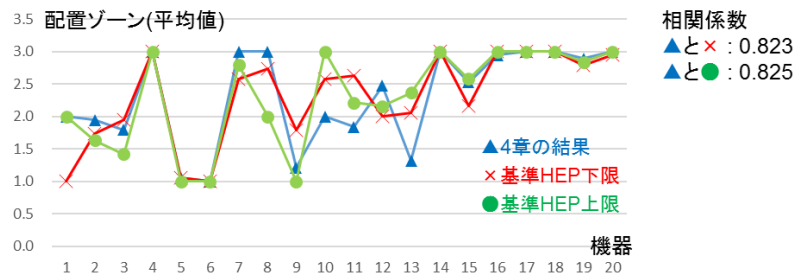
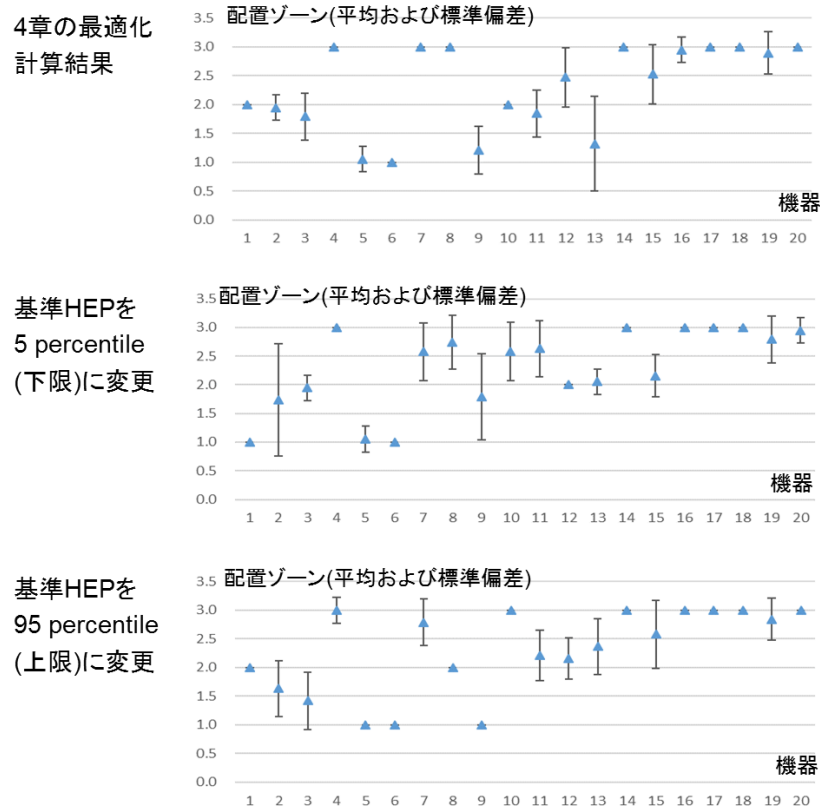


図 5.3-1 基準 HEP を上・下限値に変更した場合の最適化計算結果  
(20 世代後のランク上位 20 位までの個体)



備考) 20 世代後のランク上位 20 個体の平均値

図 5.3-2 基準 HEP を上・下限値に変更した場合の最適化計算結果(平均値比較)



備考)20 世代後のランク上位 20 個体の平均と標準偏差

図 5.3-3 基準 HEP を上・下限値に変更した場合の最適化計算結果(平均と標準偏差)

## 5.3.2 感度解析:操作性の評価関数

ヒューマンエラー発生確率の評価関数と同様に, 操作性の評価関数についても感度解析を行う。本検討ではゾーン 1, 2, 3 の配置の機器を使用する毎に, それぞれ+1, +2, +3 と操作性の評価

値を加算したが、Appendix B.3 に示すワークロードの定量的解析では機器操作に要する時間を距離の対数( $\log_2$ )に比例するとして評価していることから(図 B.3-3 Fitts の法則参照)、評価関数を  $+0(=\log_2 1)$ ,  $+1(=\log_2 2)$ ,  $+1.58(=\log_2 3)$  とゾーン数の対数関数とした場合について検証する。

操作性評価関数を対数関数とし、他は 4 章と同じ条件で遺伝的アルゴリズムを 20 世代に渡って実施して最適化させた。最適化計算にて得られた設計解のランク上位 20 個体(重複あり)について機器の配置結果を図 5.3-4 に示す。さらに 20 種類の機器の配置ゾーンについて 20 個体の平均値を図 5.3-5 に比較する。また、同平均値と標準偏差を図 5.3-6 に示す。図 5.3-5 の通り平均値同士を比較した場合、4 章に示す計算結果と操作性評価関数を変更した場合の相関係数は 0.828 である。図 5.3-4 でゾーン 1 に配置した機器に注目すると、操作性評価関数を変更したケースでは①脚レバーの優先度が高くなり、⑬パーキング／非常ブレーキの優先度が低くなる。また、図 5.3-6 の通り解のばらつきが特に大きい機器は無くなる。結論として、操作性評価関数を変更させた場合も 4 章の計算結果との相関係数は高く本解析手法はロバストであると言えるが、基準 HEP の変動ケースと同様にノーマル時に使用する機器についての優先度が異なる。

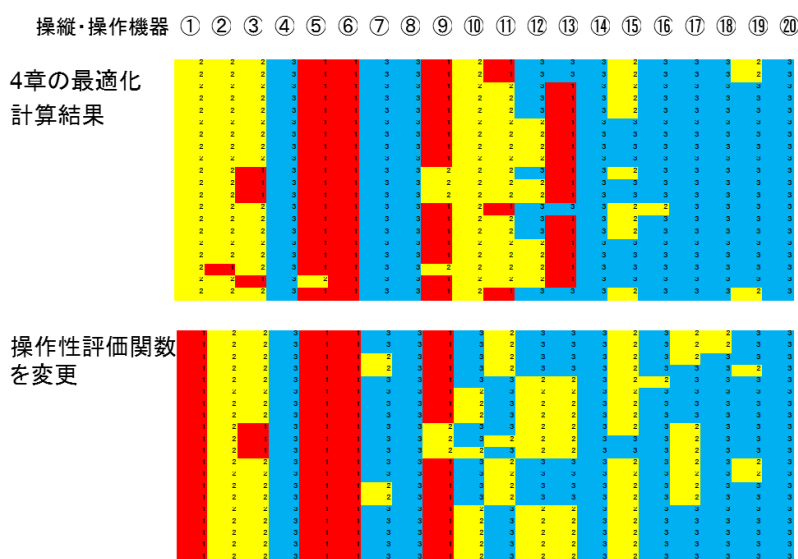
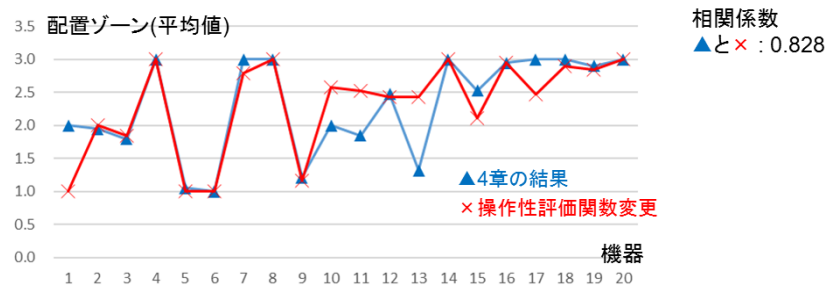
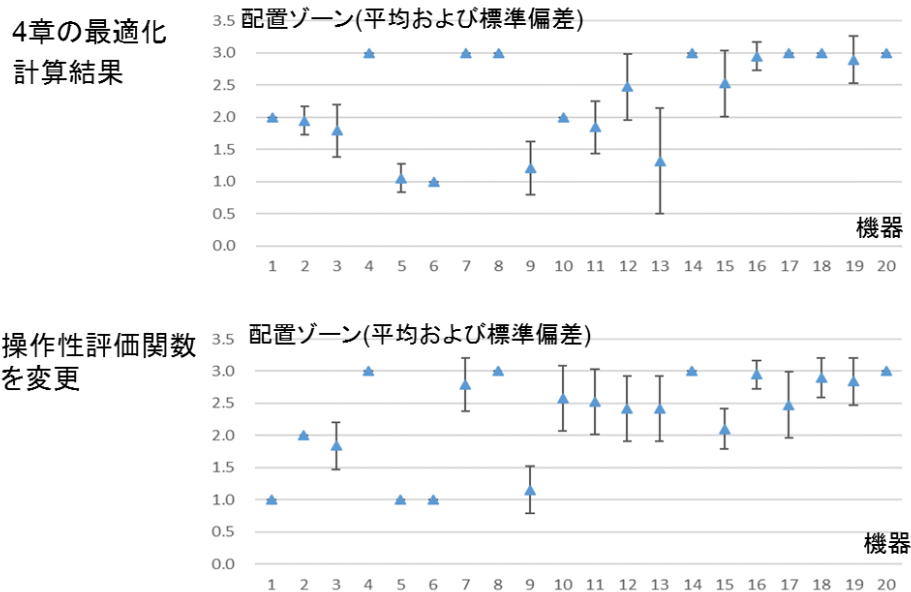


図 5.3-4 操作性評価関数を変更した場合の最適化計算結果  
(20 世代後のランク上位 20 位までの個体)



備考) 20 世代後のランク上位 20 個体の平均値

図 5.3-5 操作性評価関数を変更した場合の最適化計算結果(平均値比較)



備考)20 世代後のランク上位 20 個体の平均と標準偏差

図 5.3-6 操作性評価関数を変更した場合の最適化計算結果(平均と標準偏差)

### 5.3.3 感度解析:機器配置数の制約条件

上記の 2 つの評価関数と同様に、制約条件であるゾーン 1 および 2 の機器配置数についても変化させ感度解析を行う。4 章の検討では Appendix D に示す検討用フライトデッキの操作可能範囲を基に、ゾーン 1 に 4 機器、ゾーン 2 に 6 機器、ゾーン 3 に残り(10 機器)を配置するとして検討したが、ゾーン 1 および 2 の機器を増加させた場合(5 機器および 7 機器)及び、減少させた場合(3 機器および 5 機器)について検証する。

制約条件であるゾーン 1 および 2 の機器配置数を増減させ、他は 4 章と同じ条件で遺伝的アルゴリズムを 20 世代に渡って実施して最適化させた。それぞれのケースで最適化計算にて得られ

た設計解のランク上位 20 個体(重複あり)について機器の配置結果を図 5.3-7 に示す。さらに 20 種類の機器の配置ゾーンについて 20 個体の平均値を図 5.3-8 に比較する。また、同平均値と標準偏差を図 5.3-9 に示す。図 5.3-8 の通り平均値同士を比較した場合、4 章に示す計算結果と機器配置数制約を増加させた場合の相関係数は 0.875 であり、同様に機器配置数制約を減少させた場合の相関係数も 0.873 である。図 5.3-7 でゾーン 1 に配置した機器に注目すると、配置数制約を増加させたケースでは③防火ハンドル及び⑩照明系統の優先度が 4 章の最適化計算結果より高くなり、配置数制約を減少させたケースでは③防火ハンドルの優先度が高くなるが⑨通信系統の優先度は低くなる。また、図 5.3-9 の通り⑬パーキング／非常ブレーキについては 4 章の最適化計算結果ではばらつきが大きかったが、制約を変更した場合はゾーン 1 に配置した解が少なくなりばらつきも小さくなった。結論として、機器数制約を変更した場合も 4 章の計算結果との相関係数は高く本解析手法はロバストであると言えるが、ノーマル時及びノンノーマル時に使用する複数の機器で優先度が変化する。

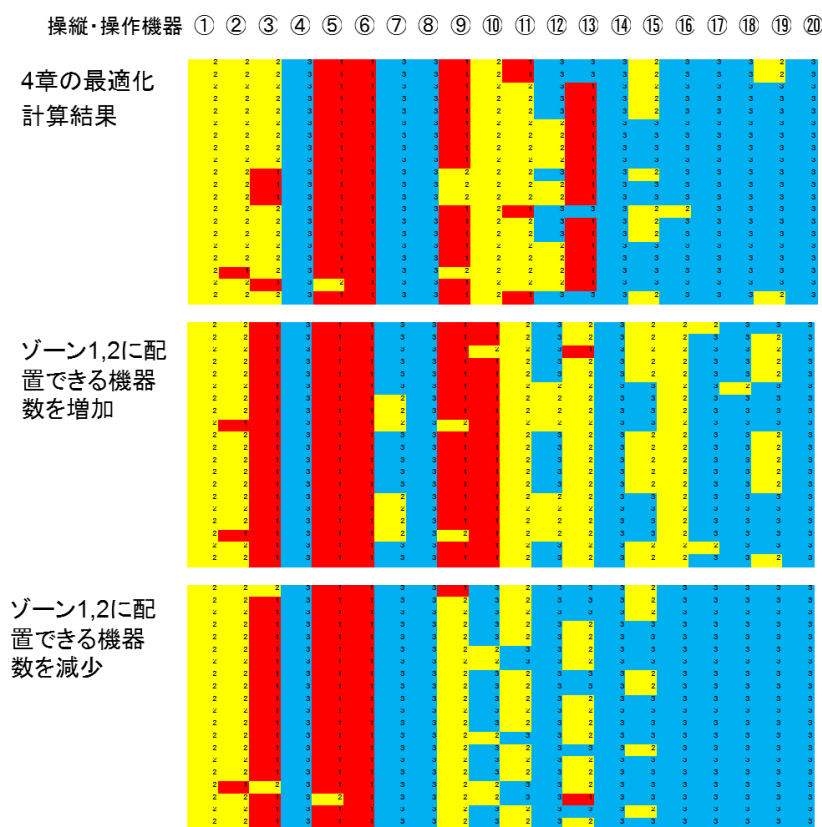
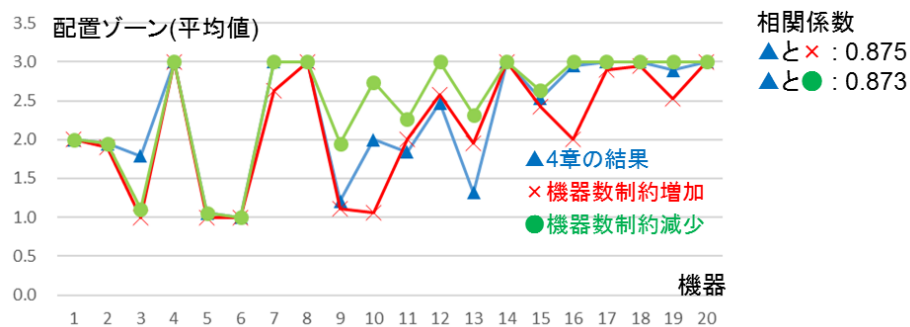


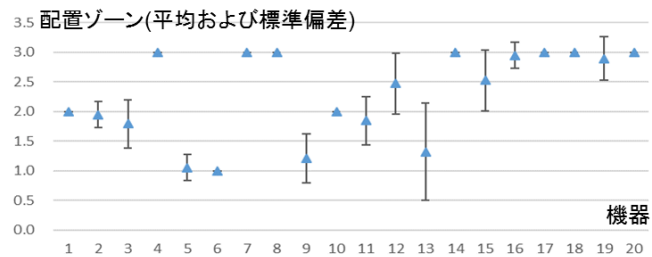
図 5.3-7 機器配置数制約を変更した場合の最適化計算結果  
(20 世代後のランク上位 20 位までの個体)



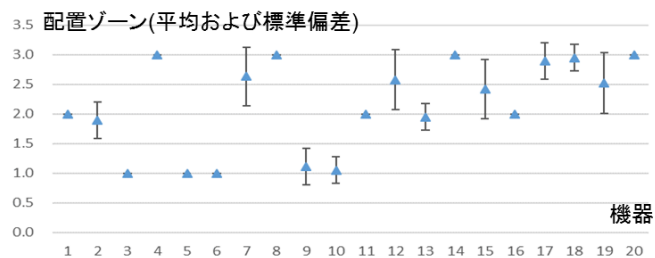
備考) 20 世代後のランク上位 20 個体の平均値

図 5.3-8 機器配置数制約を変更した場合の最適化計算結果(平均値比較)

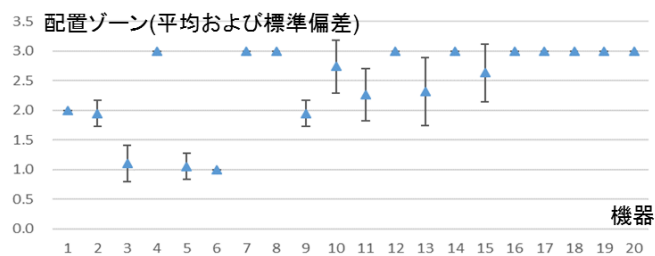
4章の最適化  
計算結果



ゾーン1,2に配  
置できる機器  
数制約を増加



ゾーン1,2に配  
置できる機器  
数制約を減少



備考)20 世代後のランク上位 20 個体の平均と標準偏差

図 5.3-9 機器配置数制約を変更した場合の最適化計算結果(平均と標準偏差)

## 5.4 定性的解析手法による妥当性確認

### 5.4.1 妥当性確認

本検討で用いた CREAM 手法は原子力分野で開発された基準 HEP や PSF のデータを用いており旅客機パイロットのタスクに適用する目的で手法が構築された訳ではない。ボーイング社の調査[2]によると 2004～2013 年の旅客機(全ボーイング機および全エアバス機合計)における事故の発生率(事故数/離発着回数)は約 2 件/100 万回程度と、最適化計算結果で得られた値よりも極めて小さい。これは訓練や運航といった観点によりヒューマンエラーが未然に防がれていることが大きいと考えられる。本研究で示した設計手法は、訓練や運航によるヒューマンエラー防止に頼らない点では安全側であり、設計解同士を比較検討するには有効であると考えられるが、評価値の絶対値には意味が無いため、定性的解析も併用することが望ましい。

そこで定性的な解析による評価として、通常の離陸(Normal Takeoff)時およびノンノーマル時の離陸/エンジン火災(Non-normal Takeoff / Engine Fire)の 2 ケースについて、2.2 章に示した HET[57][58][59]手法を適用した結果を表 5.4-1 および表 5.4-2 に示す。本手法ではヒューマンエラーの発生確率(Likelihood)については、定性的な評価手法であるため判定基準が明確でないことから、ここでは FAR/CS25.1302 の原案を作成したヒューマンファクタ協調ワーキング・グループ(Human Factors Harmonizing Working Group)による過去の事故調査と知識に基づき挙げられている 17 の典型的なヒューマンエラー事例(表 5.4-3)[7]に該当するものを高(High)とした。また、FAR やアドバイザリ・サーキュラにて既にヒューマンエラー対策が規定されているもの(例: FAR/CS 25.703 離陸形態警報(Takeoff Configuration Warning))については低(Low)とした。その他のものについては中(Mid)とした。また、安全への影響度(Criticality)については AC/AMJ 25.1309[35]を参考としてカタストロフィック(Catastrophic)レベルであれば高(High)とした。メジャー(Major)以下のものを低(Low)とした。その他のものについては中(Mid)とした。ここでは、これらの分析結果でヒューマンエラーの発生確率と安全への影響度がいずれも高になった項目から優先的にヒューマンエラー・マネージメントの策を講じることとし、配置も極力アクセス性が良い場所に設置する。両方が高となったタスクの代表例として、NN3(火災側エンジン停止)、NN4(防火ハンドルによる火災側エンジンのシャットオフ)であれば、④エンジン停止スイッチや③防火ハンドルといった機器が優先的にアクセス性の良いゾーンに配置することになるが、これは定量的解析で求められた図 5.1-3 に示す C 機種付近の解が④エンジン停止スイッチと③防火ハンドルの両者をゾーン 1 もしくはゾーン 2 に配置する設計解となっていることに近い。C 機種の設計方針としてエンジン火災への対応を重視していると考えられるが、定性的解析結果が示す傾向が、定量的解析結果(最適化計算結果)の最適解の一部の傾向を再現していることが確認できた。

表 5.4-1 HET 手法: 通常の離陸(Normal Takeoff)時

タスク	エラーモード		ハザード	Likelihood			Criticality		
				H	M	L	H	M	L
N1	Task executed too much	推力過剰	Runway excursion		○		○		
N1	Task executed too little	推力不足	Runway excursion		○		○		
N2	Task executed too much	推力過剰	Runway excursion			○	○		
N2	Task executed too little	推力不足	Runway excursion			○	○		
N3	Task executed too early	V1前に手放す・誤った中断判断	Runway excursion		○		○		
N3	Task executed too late	V1後も保持・誤った中断判断	Runway excursion		○		○		
N4	Task executed too late	故障検知/中断判断遅れ	Runway excursion	○			○		
N4	Misread Information	誤識別による離陸中断判断	Runway excursion	○			○		
N5	Task executed too early	V1前に手放す・誤った中断判断	Runway excursion		○		○		
N5	Task executed too late	V1後も保持・誤った中断判断	Runway excursion		○		○		
N5	Misread Information	V1を誤認	Runway excursion		○		○		
N6	Task executed too early	V1前に手放す・誤った中断判断	Runway excursion		○		○		
N6	Task executed too late	V1後も保持・誤った中断判断	Runway excursion		○		○		
N7	Misread Information	VRを誤認	Runway excursion		○		○		
N8	Task executed too much	引き起こし過剰	Abnormal flight path		○		○		
N8	Task executed too little	引き起こし不足	Abnormal flight path		○		○		
N9	Misread Information	上昇率を誤認	Abnormal flight path			○	○		
N10	Fail to execute	脚上げ非実施	Abnormal flight path			○	○		
N10	Task executed too early	脚上げタイミング早い	Abnormal flight path			○	○		
N10	Task executed too late	脚上げタイミング誤り	Landing gear speed exceed			○		○	
N11	Fail to execute	フラップ収納非実施	Abnormal flight path			○	○		
N11	Task executed too early	フラップ収納タイミング早い	Flap speed exceed			○		○	
N11	Task executed too late	フラップ収納タイミング遅れ	Flap speed exceed			○		○	

表 5.4-2 HET 手法: ノンノーマル時の離陸/エンジン火災  
(Non-normal Takeoff / Engine Fire)

タスク	エラーモード		ハザード	Likelihood			Criticality		
				H	M	L	H	M	L
NN1	Misread Information	火災警告を誤認	Loss of aircraft			○	○		
NN2	Task executed on the wrong interface element	正常側エンジン停止	Loss of aircraft	○			○		
NN3	Task executed on the wrong interface element	正常側エンジン停止	Loss of aircraft	○			○		
NN4	Task executed on the wrong interface element	正常側エンジン停止	Loss of aircraft	○			○		
NN5	Misread Information	火災警告を誤認	Loss of aircraft		○		○		
NN5	Task execution incomplete	消火手順未完遂	Loss of aircraft		○		○		
NN6	Misread Information	火災警告を誤認	Loss of aircraft		○		○		
NN6	Task execution incomplete	消火手順未完遂	Loss of aircraft		○		○		



表 5.4-3 典型的なヒューマンエラー([7]より作成)

1	Absence of reaction	反応の欠如
2	Procedural deviations	手順の逸脱
3	Limitations transgressions	制限超過
4	Pilot fighting against automation	自動化システムとの格闘
5	Incorrect data entry	データの誤入力
6	Energy management	エネルギー管理
7	Poor mastery of novel systems	新規システムの未修得
8	Fuel management	燃料管理
9	Ice and consequences of icing awareness	着氷とその状況認識
10	Information integrity	情報の完全性
11	Language	言語
12	Minimum altitude violation	最小飛行高度の逸脱
13	Misuse of adjacent controls	隣り合う操作装置の誤使用
14	Standardization issues	標準化
15	Take-off configuration	離陸形態の誤り
16	Incorrect take-off data	誤った離陸データ設定
17	Wrong approach path	誤った進入経路

## 5.4.2 近年の事故・重大インシデントにおけるエラーに関して

近年、国内で発生したヒューマンエラーに起因する事故・重大インシデントとして、中華航空 140 便事故およびエアーニッポン JA16AN 便重大インシデントが挙げられる。これらの調査報告書 [83][84]によれば、通常操作中に誤ってゴー・レバーを作動させたこと、及びドアロック・セレクターと誤ってラダー・トリム・スイッチを作動させたことが主原因の一つとして報告されている。本検討で考慮した CREAM 手法では、近接する類似の操作機器との誤操作に関する PSF は明示されていない。また、近接する類似の操作機器との誤操作においては、概念設計において検討対象となる配置の近接性に加えて、機器の形状・操作方向といった後流の設計フェーズで詳細検討する要素も影響する。

このような理由から概念設計段階の定量的解析手法では、近接する操作機器の誤操作は扱わず、5.4.1 章で示した定性的解析手法にて評価する。表 5.4-3 のヒューマンファクタ協調ワーキング・グループが示す典型的なヒューマンエラーにおいて”No.13 Misuse of adjacent controls: 隣

り合う操作装置の誤使用”がリストアップされており、定性的解析においてこれらヒューマンエラーの発生確率が高い項目として評価されている。また、このヒューマンエラーに関連するハザードの影響度も大きい場合は、後流の設計フェーズにおいて機器の形状・操作方向といった詳細設計仕様を検討する際にヒューマンエラー・マネージメントの観点での対策が必要になる。以上に示す通り、概念設計段階で定量化が難しいヒューマンエラーの要因についても定性的解析を併用することで設計検討に取り入れることが可能となる。

## 5.5 非劣解の確認

遺伝的アルゴリズムを用いた最適化結果について非劣解が得られているかどうかについて確認する。これを確認するため、4章で計算した10倍の個体数(500個体)について20世代まで最適化を行った。その結果、図5.5-1及び図5.5-2に示す通り、非劣解が得られている。なお、通常の巡航(Normal Cruise)時に繰り返し使用する⑤航法系統、⑥自動操縦系統、⑨通信系統の機器についてはタスクを10回行うこととしているため、特に縦軸方向の分布が離散的になっている。

得られた非劣解の特徴としては、ヒューマンエラーからハザードに至る確率に関して、4章の計算結果の最適解が0.5から0.55の間であったのに対し、0.45から0.5と更に評価値の良い解が得られた(図5.5-2の赤丸参照)。これらの解はノーマル時に頻繁に用いる⑨通信系統機器をゾーン2に配置、ノンノーマル時にのみに使う③防火ハンドルをゾーン1に配置するといった特徴があり、ハザードに至る確率の観点に特化した解となっている。非劣解からは、このように既存機的设计には無い解も得ることができた。

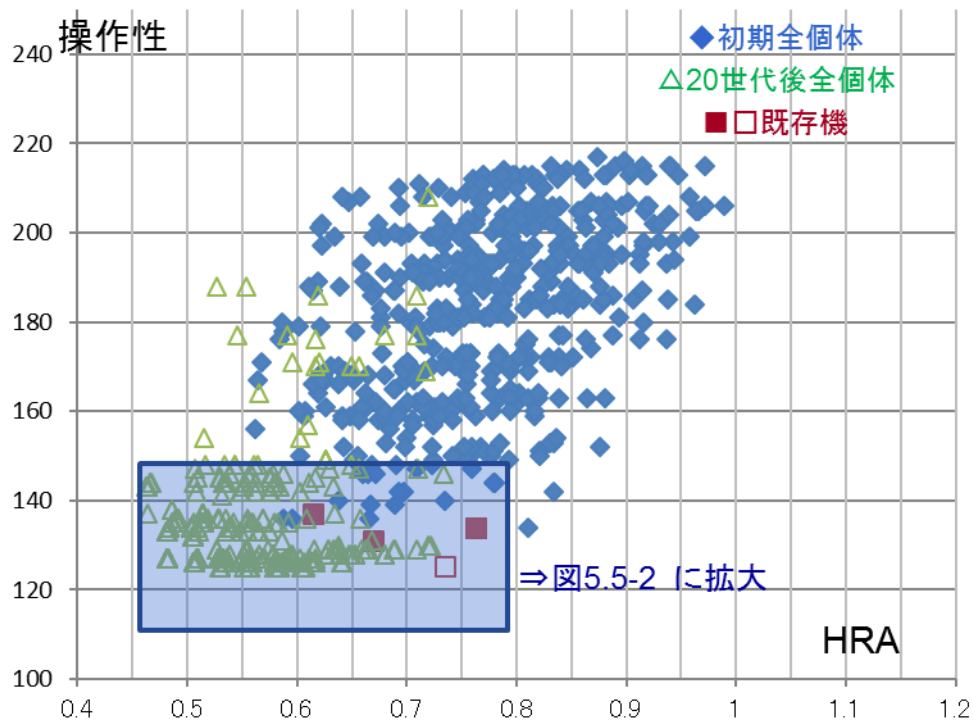


図 5.5-1 遺伝的アルゴリズムによる最適化結果(500 個体, 20 世代後)

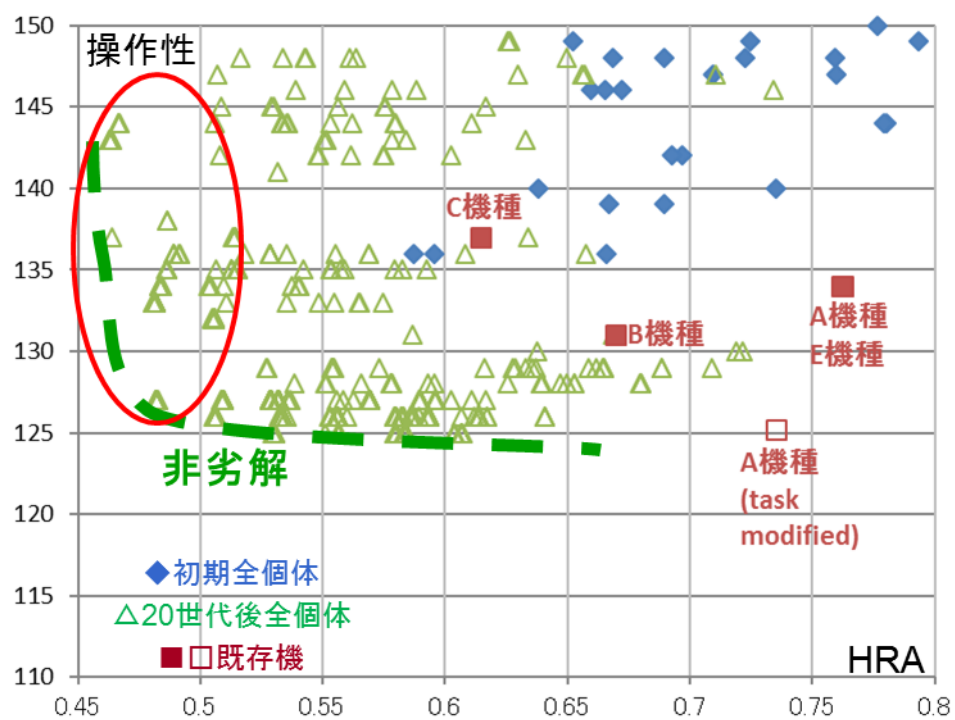


図 5.5-2 遺伝的アルゴリズムによる最適化結果 (500 個体, 20 世代後, 拡大図)

## 5.6 将来のフライトデッキ開発・型式証明への応用について

本研究にて提案し有効性を確認した概念設計手法について、将来のフライトデッキ開発や型式証明取得活動における応用について考察する。

### 5.6.1 フライトデッキ開発への応用について

従来のフライトデッキ開発におけるヒューマンエラーの評価は、概念設計段階以降の開発の後工程フェーズにおいてシミュレータを用いた実験的評価が中心であった。本手法を用いることで操作性の評価と同時に解析的に開発初期の概念設計段階から評価することができる。また、既存機種についても解析的手法により定量的評価が可能となり改善点を分析することができる。本研究成果の実機開発への応用の指針について以下の通りまとめる。

- ・C 機種のように機器配置によりヒューマンエラー・マネージメントを優先する方針をとる場合、規定適合性の観点では優位であるが通常の運航において操作性は低くなる。新規定に関する型式証明活動は有利であるもののヒューマンエラー対応に偏ったフライトデッキにならないよう、既存機以上の評価値となる操作性は確保する必要がある。
- ・A 機種のように、機器配置の観点でヒューマンエラー・マネージメントについて不利である機体は、実際に A 機種が採用しているように、例えばパイロットの誤入力がなされた場合に自動的にプロテクションが働くシステム機能など、ヒューマンエラー・マネージメントをソフトウェア詳細設計等で検討することが必要となる。ただし、これはスイスチーズ・モデルの下流側で対策をとることに相当し、過去の事故や先行研究が指摘するように、新たなエラーを生まないような入念な検討が別途必要になる。
- ・B 機種のように操作性とヒューマンエラー・マネージメントのバランスを保つ方針とする場合、開発経験豊富な航空機メーカーでは、既存機の運航からヒヤリハット情報等を収集し、新規開発する機器を絞って既存機と比較評価を行うことで、このバランスを保ち易かった。フライトデッキ全体を新たに開発する新規参入メーカーにおいては、本解析手法を用いることで、概念設計段階から操作性とヒューマンエラー・マネージメントの両観点でバランスのとれた設計解を採用することができるようになり、新規参入のデメリットを低減できる。

また、シミュレータによる評価はパイロットの主観的评价に基づくが、本手法を用いることで主観評価に加えて定量的評価を基に設計を行うことができる。様々な国籍や背景をもつパイロットや技術者が多数関わる現代の旅客機開発において、定量的な評価尺度も併用することは、偏った意見にとらわれた設計を行ってしまうリスクを低減し、客観的根拠に基づいて開発を円滑に進めることに

活用できる。

## 5.6.2 型式証明取得活動への応用について

上記のフライトデッキ開発への応用と同様に、型式証明活動にも本手法は活用できると考えられる。”定量的なパイロットのエラーの評価は成立しないと考えられる“とアドバイザリ・サーキュラに示される通り、従来、型式証明活動においてヒューマンエラーの審査は飛行試験等における主観評価が主であった。飛行試験段階で規定不適合が発見された場合は、設計手戻りが大規模になるため、概念設計段階から規定適合性を確認できることは、型式証明取得期間の短縮に資する。

また、従来、新規参入メーカーがフライトデッキ全体を新規開発する場合、既存機との比較審査が困難なため、当局から膨大な量の確認を要求される。本手法は新規参入メーカーでも既存機との比較を定量的に示すことが可能となるため、審査期間を短縮していくことに応用できると考える。

また、原子力分野の安全性審査では定量的評価が研究され既に実践されてきており、将来的には上記のアドバイザリ・サーキュラに示される見解も見直され、定量的評価が新規定として制定されていく可能性がある。従来、新規定の策定は欧米の当局や航空機メーカーが中心となり議論され、新規参入者はその枠組みに殆ど参加してこられなかったが、本研究を応用することで規定策定の議論に主導権を持って参画していくことが可能になると考える。一般に、新規定は様々な状況に対応するため曖昧な表現で書かれることが多いが、策定議論に参画することでその背景・目的を正しく解釈し、過不足無く必要十分な量・内容の型式証明活動が行えることは、航空機メーカーにも審査当局にもメリットとなると考える。

## 第 6 章 結論

航空機事故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中で、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の総合的な対策(ヒューマンエラー・マネージメント)を要求されるようになった。従来のフライトデッキ設計におけるヒューマンエラー評価は詳細設計段階以降に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。特に新規参入メーカーはフライトデッキ全体の概念設計が必要であるが、後工程のフェーズで規定適合に問題が判明した場合は設計変更に大きな時間を要する。

このような背景のもとで、本研究では、従来の研究ではなかった解析的手法を構築しその有効性を確認することで、概念設計段階から操作性と同時にヒューマンエラー・マネージメントも評価し、短期間でフライトデッキを開発することに活用でき、今後の実機開発に資することを本研究の目的とした。

上記の目的のため、原子力分野で第 2 世代 HRA として用いられており航空宇宙分野への応用が研究されている CREAM を適用したフライトデッキ概念設計手法を構築した。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。5 つ目のステップでは、遺伝的アルゴリズムを適用して、ヒューマンエラー・マネージメントと操作性について多目的最適化問題を解くことで、評価値が既存機より望ましい解を選択する。従来のヒューマンエラー解析と操作性解析の手法を組み合わせ、多目的最適化問題としてフライトデッキ概念設計に組み込んだことが本手法の特長である。

構築した本手法をリージョナル・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・操作機器配置の検討に応用した結果から以下の結論を得た。

- (1) 最適化計算結果から既存機よりも優れる解を得ることができた。優れる解はヒューマンエラーによるハザードの影響が小さい照明系統の優先度を既存機より低くすることで他の機器の優先度をあげることができ、良い評価値を得ている。また、既存機との比較から、操作性が優秀な B 機種、ヒューマンエラーからハザードに至る確率が優秀な C 機種と、傾向が異なるものがあることが分かった。また、自動化が進んでいる A 機種ではパイロットのタスク及び関連するヒューマンエラーが他機と異なるため機器配置の傾向が異なることが分かった。本手法では B 機種と A 機種などパイロットと航空機の役割が大きく異なる機種間でも、操作性とヒューマンエラー・マネージメントについて設計解の良し悪しを比較することができた。
- (2) 本検討が FAR/CS 25.1523 (最少乗組員数を定める規定)に基づき、パイロット 1 名での対応を前提した条件で既存機を評価値が上回る解が得られた。これらの優秀な解についてパイロット 2 名の条件にて評価値を再計算した場合でも、既存機を上回るものがあることを確認した。将来的な研究課題として、パイロット 2 名での操作性とヒューマンエラーからハザードに至る確率を追加した計 4 評価関数にて多目的最適化を行うことで、より多面的な概念設

計手法に拡充できることが分かった。

- (3) 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制約について感度解析を実施して数値が変動した場合の影響を確認した。その結果、これらの評価関数および制約条件を変更した場合に優先される機器が変わり得るものの、得られる解の全体的な傾向としては一致し、各機器の配置ゾーンの相関関数は高く、ロバストであることを確認した。
- (4) ノーマル時及びノンノーマル時の 2 ケースについて、定性的解析手法である HET 手法を適用した結果、定性的解析結果の示す傾向は定量的解析結果の最適解の傾向を再現していることが確認できた。アクセス性が良い場所に設置する操縦・操作機器は、最適化計算結果で得られた設計解のうち C 機種付近の解に近い結果となった。
- (5) 遺伝的アルゴリズムを用いて最適化手法の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に関しては既存機を更に上回る解もあり得ることが分かった。ただし、これらの解はノンノーマル時にのみに使う機器をアクセス性の良い配置にする特徴があり、操作性を犠牲にしてヒューマンエラーからハザードに至る確率を優先する解となっている。このように、既存機には無い設計も解としては得ることができた。
- (6) 以上より、従来ヒューマンエラーはシミュレータを用いた実験的評価の結果フライトデッキ内の操縦・操作機器配置の検討に反映されていたが、本研究では人間信頼性解析の CREAM を適用した解析的手法を提案した。これにより、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、遺伝的アルゴリズムを用いて多目的最適化問題を解くことで概念設計段階から機器配置を設計する手法が構築でき、また手法の妥当性が確認できた。



## 参考文献

- [1] Boeing, *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1954 – 2004*, 2005.
- [2] Boeing, *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959 – 2015*, 2015.
- [3] FAA, *FAA Human Factors Team report on: The Interfaces between Flightcrews and Modern Flightdeck Systems*, 1996.
- [4] FAA, *Approval of Flight Guidance Systems*, AC25.1329-1C, 2014.
- [5] FAA, *Flightcrew Alerting*, AC25.1322-1, 2010.
- [6] FAA, *Electronic Flight Deck Displays*, AC25-11B, 2014.
- [7] Human Factors-Harmonization Working Group, *Human Factors – HWG Final Report*, June 15, 2004.
- [8] FAA, *Installed Systems and Equipment for Use by the Flightcrew*, Advisory Circular 25.1302-1, 2013.
- [9] Harris, D., *Rule fragmentation in the airworthiness regulations: A human factors perspective*, *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, 1(2), 75, 2011.
- [10] Harris D., *Human factors for civil flight deck design*, ashgate, 2004.
- [11] Rasmussen, J., *Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs and Symbols, and Other Distinction in Human Performance Models*, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-13, No.3, 1983.
- [12] Norman, D. A., *Categorization of action slips*, *Psychological Review*, 88(1-15), 1981.
- [13] Reason, J., *Human Error*, Cambridge University Press, 1990.
- [14] Reason, J., *Managing the Risks of Organizational Accidents*, Ashgate Publishing, 1997.
- [15] Edwards, E., Wiener, Earl L., and David C. Nagel, *Human factors in aviation (chapter 1)*, Gulf Professional Publishing, 1988.
- [16] Hawkins, Frank H., and Harry W. Orlady, *Human factors in flight*, 1993.
- [17] Arbuckle, P. D., Abbott, K. H., Abbott, T. S., & Schutte, P. C., *Future flight decks*, Proc. 21th Congress of International Council of Aeronautical Sciences, Melbourne, Australia, ICAS1998-1.9.3., Sep. 1998.
- [18] Wiener E. L., *Intervention strategies for the management of human error*, NASA-CR-4547, 1993.
- [19] Billings C. E., *Human-Centered Aviation Automation: Principles and Guidelines*, NASA-TM-110381, 1996.

- [20] 井手陽介, 旅客機パイロットのフライト・マネージメント能力評価に関する実験的研究, 東京大学大学院修士論文, 2006.
- [21] Yosuke Ide, Shin Ogawa and Kenichi Rinoie, *Evaluation on Flight Management Skill of Jet Airliner Pilots - A Case of Go-around*, Proc. 25th Congress of International Council of Aeronautical Sciences, Hamburg, Germany, ICAS-2006-9.10.4, Sep. 2006.
- [22] Asei Tezuka, Hiroki Hatake and Kenichi Rinoie, *PC tool development for simulating flight management process of jet airliner pilots*, Proc. 27th Congress of International Council of Aeronautical Sciences, Nice, France, ICAS2010-10.8.3, Sep. 2010.
- [23] Ayaoko Kono, Hiroki Hatake, Kenichi Rinoie, Asei Tezuka, and Ro Kobayashi, *Experimental study on decision making of jet airliner pilots-a case of wind shear*, Proc. 27th Congress of International Council of Aeronautical Sciences, Nice, France, ICAS2010-10.8.2., Sep. 2010.
- [24] Thomas, M. J. W., *Predictors of Threat and Error Management: Identification of Core Non-technical Skills and Implications for Training Systems Design*, International Journal of Aviation Psychology Vol. 14, No. 2, pp. 207-231, 2004.
- [25] Helmreich R., Klinec J., and Wilhelm J. A., *Models of threat, error, and CRM in flight operations.*, Proceedings of the tenth international symposium on aviation psychology. Columbus: Ohio State University, pp. 677-682, 1999.
- [26] FAA, *Crew Resource Management Training*, AC120-51E, 2004.
- [27] Helmreich R. L., Meritt A. C., and Wilhelm J. A., *The evolution of crew resource management training in commercial aviation*, International Journal of Aviation Psychology Vol. 9, pp. 19-32, 1999.
- [28] 飯島朋子, 野田文夫, 須藤桂司, 村岡浩治, 船引浩平, *CRM スキル行動指標の開発*, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1465, 2003.
- [29] Kenichiro Honda, Yukihiko Nakata, Kazuhide Shinoda, *Human-Centered Cockpit Study*, Proc. 24th Congress of International Council of Aeronautical Sciences, Yokohama, Japan, ICAS-2004-7.11.3., Aug. 2004.
- [30] Military Standard, *Aircrew Station Geometry for Military Aircraft*, MIL-STD-1333B, 1987.
- [31] ICAO, *Fundamental Human Factors Concepts*, CAP719, 2002.
- [32] Green, R. G., et al., *Human Factors for Pilots*, Avebury Aviation, 1996.
- [33] SAE, *Guidelines and Methods For Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment*, ARP4761, 1996.
- [34] 篠田和英, *民間航空機の安全・開発保証プロセスについて-MRJ 開発における取組み-*, 第 11 回クリティカルソフトウェアワークショップ, January, 2014.

- [35] Systems Design and Analysis Harmonization Working Group, *System Design and Analysis*, AC/AMJ 25.1309 (Draft Arsenal revised), 2002.
- [36] Yang, B., Park, S. G., Suraj Nandiganahalli, J., and Hwang, I., *A Hybrid-Systems Approach for Analyzing Pilot-Cockpit Interactions.*, AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, AIAA SciTech Forum, AIAA 2017-1315, 2017.
- [37] Cooper, George E., and Robert P. Harper Jr., *The use of pilot rating in the evaluation of aircraft handling qualities.*, No. AGARD-567. Advisory Group for aerospace research and development Neuilly-Sur-Seine (France), 1969.
- [38] 山口恭弘, 篠田和英, 池松隆, 葉山鉄夫, 民間航空機における *Handling Quality* 要求とパイロット評価, 計測と制御, 45(8), pp. 683-688, 2006.
- [39] FAA, *Factors to Consider when Reviewing an Applicant's Proposed Human Factors Methods of Compliance for Flight Deck Certification*, ANM-01-03A, 2003.
- [40] Adelstein B., Hobbs A., O'Hara J., and Null C., *Design, development, testing, and evaluation: Human factors engineering*, NASA/TM-2006-214535, 2006.
- [41] SAE, *Flight Crew Interface Considerations in the Flight Deck Design Process for Part 25 Aircraft*, ARP5056, 2006.
- [42] Palmer, Rogers, Press, Latorella, S. Abbott, *A Crew-Centered Flight Deck Design Philosophy for High-Speed Civil Transport Aircraft*, NASA-TM-109171, 1995.
- [43] Kelly, B. D, Graeber, R. C. and Fadden, D. M., *Applying Crew-Centered Concepts to Flight Deck Technology: The Boeing 777*, the Flight Safety Foundation 45th International Air Safety Seminar, Long Beach, CA, November 1992.
- [44] ザ・コクピットー航空機操縦席図鑑, イカロス出版, 2007.
- [45] Abbott, K. H., *Human factors engineering and flight deck design*, Digital Avionics Handbook, Third Edition, CRC Press, 241-256., 2014.
- [46] Newman, R. L., Greeley, K. W., *Cockpit displays: Test and evaluation*, Ashgate Pub Limited, 2001.
- [47] 井手陽介, *Human Error Management* の観点からのフライトデッキ概念設計に関する研究, 第 53 回飛行機シンポジウム講演論文集, 3A09, 2015.
- [48] 井手陽介, *Human Error Management* の観点からのフライトデッキ概念設計に関する研究 (第 2 報), 日本航空宇宙学会 第 47 期年会講演会講演集, 2C07, 2016.
- [49] 井手陽介, *Human Error Management* の観点からのフライトデッキ概念設計に関する研究 (第 3 報), 第 54 回飛行機シンポジウム講演論文集, 3L12, 2016.
- [50] Hollnagel E., *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*, Elsevier., 1998.
- [51] Williams J. C., *A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance*, 4th IEEE conference on Human factors in

Nuclear Power plants, Monterey, California, pp.436-450, June 1988.

- [52] Swain A. D., and Guttman H. G., *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, NUREG/CR-1278, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1983.
- [53] Barriere, M., D. Bley, S. Cooper, J. Forester, A. Kolaczowski, W. Luckas, G. Parry, A. Ramey-Smith, C. Thompson, D. Whitehead, and J. Wreathall., *Technical Basis and Implementation Guideline for A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA)*, NUREG-1624, Rev. 1, Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2000.
- [54] US Nuclear Regulatory Commission, *NRC/EPRI Draft Report on Integrated Decision-Tree Human Event Analysis System (IDHEAS)*, Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission, 2013.
- [55] Chandler F., Heard A., and Presley M., *NASA Human Error Analysis*, NASA, Final Report, 2010.
- [56] Chandler F. T., Chang Y. H. J., Mosleh A., Marble J. L., Boring R. L., and Gertman D. I., *Human reliability analysis methods: selection guidance for NASA*, NASA/OSMA Technical Report, July 2006.
- [57] Stanton N. A., Harris D. Salmon P. M., Demagalski J. M., Marshall A., Young M.S., Dekker S. W. A., and Waldmann T., *Predicting Design Induced Pilot Error using HET (Human Error Template) – A New Formal Human Error Identification Method for Flight Decks*, Aeronautical Journal, February 2006, Vol 110, No 1104, pp107-115, February 2006.
- [58] Harris D., *Human Performance on the Flight Deck*, ashgate, 2011.
- [59] Stanton N. A., *Hierarchical Task Analysis: Developments, applications, and extensions.*, Applied ergonomics, 37(1), 55-79, 2006.
- [60] Kirimoto Y., Miura H., Nagasaka A., and Sasou K., *NRRC HRA upgrading, and research plan of HRA method development for extreme condition*, 13th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 13), Special Sessions SS6.5, Seoul, Korea, October 2016.
- [61] 電力中央研究所原子力リスク研究センター, *NRRC の取組について*, 総合資源エネルギー調査会自主的安全性向上・技術・人材 WG 第 11 回会合資料 3, 2016 年 9 月. [http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denkijigyuu/jishutekianzensei/pdf/011\\_03\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denkijigyuu/jishutekianzensei/pdf/011_03_00.pdf) (2017 年 3 月閲覧).
- [62] NASA, *Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners*, SP-2011-3421, 2011.
- [63] International Organization for Standardization, *Safety of machinery–General*

- principles for design—Risk assessment and risk reduction*, ISO12100:2010, 2010.
- [64] Letsu-Dake, E., Rogers, W., Dorneich, M.C., & De Mers, R., *Innovative Flight Deck, Function Allocation Concepts for NextGen*, Advances in Human Aspects of Aviation, CRC Press, pp. 301-310., 2012.
- [65] Deb, K., et. al., *A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II*, *Evolutionary Computation*, IEEE Transactions on, 6(2), 182-197, 2002.
- [66] 坂和正敏, 田中雅博, *遺伝的アルゴリズム*, 朝倉書店, 1995.
- [67] *コクピットイズム Vol. 12*, イカロス出版, 2012.
- [68] *コクピットイズム Vol. 09*, イカロス出版, 2008.
- [69] *ザ・コクピット—メカニカルな旅客機コクピットを徹底紹介*, イカロス出版, 2002.
- [70] Degani, A., Wiener E. L., *Human Factors of Flight-Deck Checklists: The Normal Checklist*, NASA-CR-177549, 1990.
- [71] Foernsler L. J., *Integration of Multiple Non-Normal Checklist Procedures into a Single Checklist Procedure for Transport Aircraft- A Preliminary Investigation*, NASA-TM-110290, 1996.
- [72] Degani A., Wiener E.L., *On the Design of Flight Deck Procedure*, NASA-CR-177642, 1994.
- [73] Airbus, *Takeoff and Departure Operations, Revisiting the “Stop or Go” Decision*, Flight Operations Briefing Notes, 2005.
- [74] Airbus, *Supplementary Techniques, Handling Engine Malfunctions*, Flight Operations Briefing Notes, 2006.
- [75] FAA, *Aviation Maintenance Technician Handbook – Airframe Volume 2*, FAA-H-8083-31, 2012.
- [76] National Transportation Safety Board, *Aircraft Accident Report*, PB98-910403, 1996.
- [77] National Transportation Safety Board, *Aircraft Accident Report*, PB2002-910402, January 2000.
- [78] National Transportation Safety Board, *Aircraft Accident Report*, PB00-910401, 1997.
- [79] Dismuke R. K. and Berman B., *Checklists and Monitoring in the Cockpit: Why Crucial Defenses Sometimes Fail*, NASA-TM-216396, 2010.
- [80] Degani A. and Wiener E. L., *Cockpit Checklists: Concepts, Design, and Use*, Human Factors 35(2), pp. 28-43, 1994.
- [81] Holder, B. E., *Improving the Boeing Quick Reference Handbook*, Emergency and Abnormal Situation Symposium, June 2003.
- [82] *コクピットイズム Vol. 10*, イカロス出版, 2009.
- [83] 航空事故調査委員会, *航空事故調査報告書 中華航空公司所属 エアバス・インダストリー式 A300B4-622R 型 B1816 名古屋空港 平成 6 年 4 月 26 日*, 96-5-B-1816, 平成 8 年 7 月

19 日.

- [84] 運輸安全委員会, *航空重大インシデント調査報告書 エアーニッポン株式会社所属 ボーイング式 737-700 型 JA16AN 異常姿勢からの急降下*, AI2014-4-II, 平成 26 年 9 月 25 日.
- [85] 津田宏果, 村岡浩治, 稲田崇志, 宮田貴弘, *コックピット・ワークロード推算プログラムの開発*, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-07-048, pp. 1-19, 2008.
- [86] Sundstrom J.L., *NASA TLA Workload Analysis Support Volume 1 Detailed Task Scenarios for General Aviation and Metering and Spacing Studies*, NASA-CR-3199, 1980.
- [87] Card S. K., Moran T. P., and Newell A., *The psychology of human-computer interaction*, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1983.
- [88] Hamilton D. B., Bierbaum C. R., and Fulford L. A., *Task Analysis/Workload (TAWL) (User's Guide). Version 4.0.*, AS1690-330-90, 1991.
- [89] SAE, *Flight Deck Layout and Facilities*, ARP4101, 1988.
- [90] SAE, *Seats and Restraint Systems for the Flight Deck*, ARP4101/1, 1990.
- [91] Military Standard, *Control Panel, Console Type, Aircraft Equipment, Basic Dimensions*, MS25212C, 1991.
- [92] FAA, *Pilot Compartment View Design Consideration*, AC25.773-1, 1993.
- [93] FAA, *Human Factors Design Standard (HFDS)*, HFDS2003, 2003.

## 謝辞

本研究では、研究方針を当初の実験主体から解析手法に転換するなど博士論文執筆が長期にわたりました。東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 李家賢一教授には、一貫して寛大なサポート、そして懇切なアドバイスを賜りました。この場をお借りして、改めて厚く御礼申し上げます。

本論文をとりまとめるにあたり貴重なご意見を頂いた 5 名の先生(同鈴木真二教授, 同土屋武司教授, 同西成活裕教授, 同今村太郎准教授, 宇宙航空研究開発機構の舩引浩平先生)に心より感謝申し上げます。

NASA Ames Research Center の Hayashi Miwa 氏には米国におけるヒューマンファクタ研究動向や国際的な視点についてアドバイスを賜り心より感謝申し上げます。

宇宙航空研究開発機構の舩引浩平氏, 津田宏果氏には航空宇宙機ヒューマンファクタ研究に関する深い知見と数多くの着眼点について示唆を頂き心より感謝申し上げます。

三菱航空機の河辺信幸氏には豊富な旅客機オペレーション経験に基づく意見を賜り心より感謝申し上げます。

同真保雄一氏, 本田健一郎氏, 山本憲一氏には研究活動に対する理解と激励を賜りましたこと心より感謝申し上げます。

同 Gabrielle de Brito 氏, Jose Sanchez Alarcos 氏には欧州の先進的なヒューマンファクタ研究事例を紹介頂き心より感謝申し上げます。

三菱重工業の仲谷尚郁氏には幅広い分野における人間工学研究に関する知見と助言を頂き心より感謝申し上げます。

同真塩健二氏には原子力分野におけるヒューマンファクタ研究に関する知見を賜り, 本研究の着想を得ました。心より感謝申し上げます。

同苑田義明氏には ISO など国際標準に関する最新動向について知見を賜り心より感謝申し上げます。

東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 李家・今村研究室の千葉崇氏(現三菱重工業), 益子哲行氏(現三菱重工業)には多目的最適化問題に関する知識を教示頂き心より感謝申し上げます。

また, 研究を進めるにあたり, ご支援ご協力を頂きながら, ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に心より感謝申し上げます。

最後になりますが, 本研究活動を温かく支援し続けてくれた妻 望に心から感謝の意を示します。

## Appendix



# Appendix A

## ヒューマンエラー・マネージメント詳細設計研究例

本研究では概念設計段階における操作性やヒューマンエラー・マネージメントを考慮したフライトデッキの設計手法について示したが、Appendix A では設計分野において、概念設計よりも後流工程において詳細検討されるヒューマンエラー・マネージメント設計や、チェックリスト設計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まとめる。

### A.1 フライトデッキ設計のヒューマンエラー・マネージメント

マイアミ大の Wiener[18]は、ヒューマンエラー防止(Prevention)ではなく ヒューマンエラー・マネージメントが重要であると主張し、介入方策(Intervention Strategies)という手法を提案している。介入方策は、ヒューマンエラーから結果に至るまでの過程にて、その影響を遮断することで管理・対応を行う概念である。以下に提言されている 15 の設計ガイドライン(筆者要約)をまとめる。

1. 介入の必要性や介入により低減される問題が良く定義されていること。
2. パイロットが実施困難な介入やプロシージャは適用してはならないこと。
3. 政策で奨励されているような新しい介入の適用には慎重になること。
4. 全ての介入は他の系統に干渉し、安全性を阻害して新たな問題を生まないこと。
5. 情報は容易に理解できること。
6. ハードウェア・ソフトウェアの設計はヒューマンファクタの関連標準に適合すること。
7. 全ての介入は航空管制に悪影響を及ぼさないこと。
8. 懲罰による介入方策であってはならないこと。
9. 介入は経済的に成り立つものであること。
10. 極力、介入は機種ごと、あるいは機種間を通じて共通性をもつこと。
11. より容易に低コストで同じことが達成できる方法がないか精査すること。
12. 介入方策に関する文書は精査されること。
13. 介入方策はパイロット及び関係者に受け入れられなくてはならないこと。
14. 介入方策は他の必需品と不調和ではならないこと。
15. 全ての介入方策は効力を発揮している状態であること。

これらのガイドラインは、米国 NTSB の事故調査結果や NASA ASRS でのヒヤリハット報告を基に提言されたものであり、ヒューマンエラーの波状の防御策(Line of Defense: 図 1.2-5 参照)が機

能してエラーへの対応がなされることに主眼を置いている。また、初期の対地警報(GPWS: Ground Proximity Warning System)の誤警報(False Alert), FMS へ紛らわしい名前の通過点(FIX)を誤入力する, といった元来ヒューマンエラーを防ぐ働きを有する機器を導入することで, 新たなエラーが Line of Defense の下流側(即ち事故に直結しやすい側)で誘発される事故が起こってきた点にも注意喚起を行っている。

## A.2 チェックリストにおけるヒューマンエラー・マネージメント

チェックリストは機体システムの仕様を基に航空機メーカーが原案を作成し、エアラインが会社ごとに編集して使用する。元来ヒューマンエラーを防ぐ働きを持つものであるが、NASA の Dismukes[79]は、なぜチェックリストからの逸脱が発生しヒューマンエラーを管理する機能が失われるのかについて NTSB 事故調査報告書や同乗観察から研究し、分類として(1)チェックリストの逸脱(Checklist Deviation), (2)モニタリングの逸脱(Monitoring Deviation), (3)重要プロシージャの逸脱(Primary Procedure Deviation)に整理した。(1)チェックリストの逸脱については、目視せず反応・チェックリストの不作為(Omission)・不十分な実施・チェックリスト開始タイミングの不適切・記憶に頼ったチェックリスト実施・チェックリスト開始の失敗を挙げている。(2)モニタリングの逸脱については、コールアウトの遅れ又は不作為・確認行為の不作為・航空機の状態モニタリングの不作為を挙げている。(3)重要プロシージャの逸脱については、航空管制に関するエラー・自動化システムの誤使用・進入時の不安定・飛行経路および速度制御や機体形態に関するエラー・計画及び実施に関するエラーに分類している。

このようなチェックリスト逸脱に対する対策として、組織的なポリシー・訓練・試験・メンター制度といった訓練・運航分野での対応に加え、システム設計の観点の重要性を指摘している。近年登場した電子チェックリスト(Electrical Checklist)は上記で多く挙げられている不作為関連のエラー対策に有効であり、また高度な電子チェックリストでは監視機能を補完する役割も持っており、ヒューマンエラー・マネージメントに資する反面、自動化システムへの過度な依存を防ぐためにパイロットを常に”ループ内に保つ”ことの重要性を注意喚起している。

また、サンノゼ大の Degani とマイアミ大の Wiener[80]は、チェックリスト作成および使用に関する以下の 11 のガイドライン(筆者要約)について、チェック項目の順番や実施されるべきフェーズといった設計分野の提言や、チェックリスト上の記載方法といった運航分野の提言を行っている。

1. チェックリストのレスポンス欄はあるべき状態や数値を示すこと。
2. 機器や表示に対して手や指を差して確認させることが望ましい。
3. 長いチェックリストは小さなタスク毎に分割されること。
4. チェックリストの実行順番は、体系立って論理的な順序で実施されること。
5. チェックリストの実行順番は、機内・機外の活動に順じて実施されること。
6. 最も重要な項目は出来る限りチェックリストの初めに記載されること。
7. クリティカルなチェックリスト項目は地上フェーズでも繰り返し行われること。
8. チェックリスト完遂についてはチェックリストの最後に記載されること。
9. 地上滑走のようなクリティカルなチェックリストは地上フェーズの早期に実施されること。
10. チェックリストは他のタスクと密に結びつくように設計しないこと。
11. プロシージャは経済的圧力(定時運行等)に影響され易いことを認識すべきこと。

以上を示したようなヒューマンエラー・マネージメント研究で示された詳細な設計分野への提言

は, 筆者らが過去に研究した訓練・運航分野における旅客機パイロットのフライト・マネジメント能力[20][21][22][23]などと共に, スイスチーズ・モデルの 1 枚ずつとなり実運航においてヒューマンエラー・マネジメントを構成することになる。

## Appendix B ヒューマンエラー等の解析手法

Appendix B では本研究では採用しなかった他のヒューマンエラー関連解析手法について詳細を示し、また本研究の採用した手法の妥当性を考察する。

### B.1 ヒューマンエラーの定量的解析手法

本研究では HRA として CREAM を採用したが、原子力分野での HRA 手法でその他の著名な手法である THERP[52]と HEART[51]について CREAM と比較する。

THERP では、故障発生などをトリガーに人間が判断および行動を求められた際のヒューマンエラーを解析的に求めるため、診断(Diagnosis または Initial Screening)と行動(Action)の 2 段階に分けてモデル化している。図 B.1-1 は前者の診断のモデルであり、人間が判断するまでに許容される時間に応じて(即ち PSF の時間的要素を含める形で)基準 HEP を整理している。表 B.1-1 が、診断が成された後の行動における基準 HEP の値である。また、THERP は PSF のリスト(表 B.1-2)を示しているものの各ヒューマンエラーとの関連性は明確ではない。THERP は HRA 研究の初期段階に考案されたものであり、その後、様々な応用問題の基盤となっていた汎用的なモデルであるが、図 B.1-1 に示される診断で考慮しているタイムスケールがパイロットのタスクとしては長いことが欠点として挙げられ、また、ヒューマンエラーの識別方法なども明確でなくナレッジ・ベースなエラーのみしか示されていないため、本研究ではこれらの欠点が改善されている CREAM を適用した。

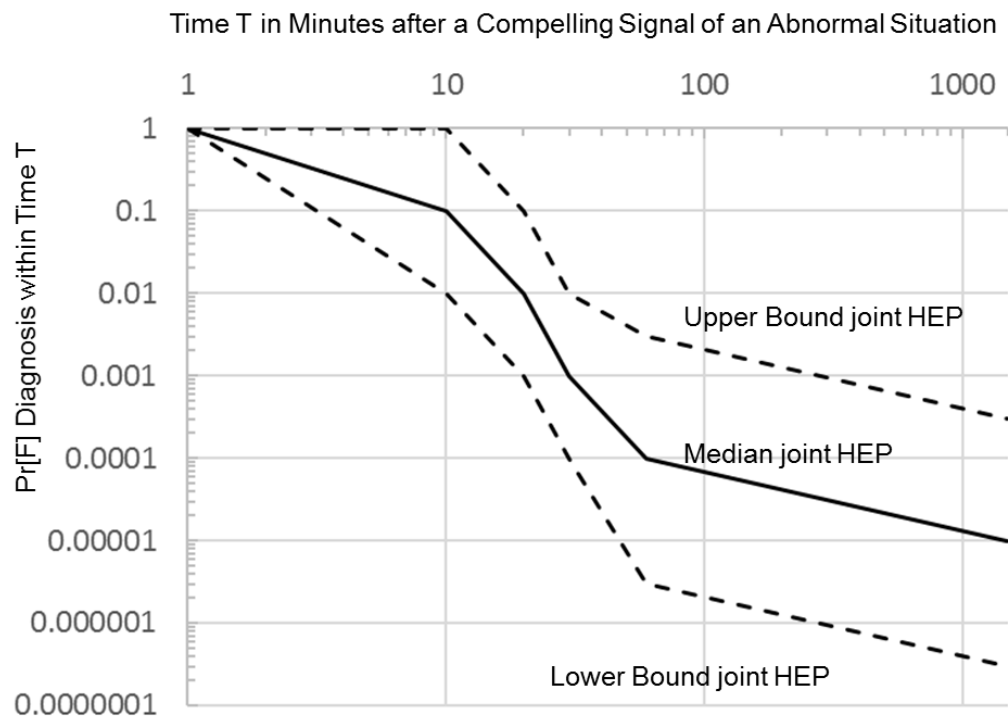


図 B.1-1 THERP における基準 HEP(Human Error Probability) (診断時) ([52]より作成)

表 B.1-1 THERP における基準 HEP(Human Error Probability) (行動時) ([52]より作成)

Item	Potential Errors	HEP	EF
Failure to perform rule-based actions correctly when written procedures are available and used:			
(1)	Errors per critical step without recovery factors	0.05	10
(2)	Errors per critical step with recovery factors	0.025	10
Failure to perform rule-based actions correctly when written procedures are not available and used:			
(3)	Errors per critical step with or without recovery factors	1.0	-

Note that this model pertains to the control room crew rather than to one individual.

備考) EF: Error Factor (EF) と PSF は同義

表 B.1-2 THERP における PSF(Performance Shaping Factors) ([52]より作成)

EXTERNAL PSFs	
SITUATIONAL CHARACTERISTICS	Those PSFs general to one or more jobs in a work situation
JOB AND TASK INSTRUCTIONS	Single most important tool for most tasks
TASK AND EQUIPMENT CHARACTERISTICS	Those PSFs specific to tasks in a job
STRESSOR PSFs	
PSYCHOLOGICAL STRESSORS	PSFs which directly affect mental stress
PHYSIOLOGICAL STRESSORS	PSFs which directly affect physical stress
INTERNAL PSFs	
ORGANISMIC FACTORS	Characteristics of people resulting from internal & external influences

HEART では表 B.1-3 に示す 9 つの一般的なタスクに分類し、それぞれに対して発生し得るヒューマンエラーの内容と基準 HEP を定義し、また、表 B.1-4 に示す 38 の PSF(原文献では EPC: Error Producing Conditions と呼称)を挙げている。HEART は原子力分野に限らず任意の分野で汎用的に適用されることを目的としており、タスクも一般的な分類となる。また、PSF の種類も多数挙げられており、実際に適用する際には専門家による技術的判断を要する。また、図 2.1-3 に示す NARA は HEART の発展形であるが、HEART 自体が汎用的で、また多数の PSF を考慮している性質上、同図に示す通り解析誤差の範囲が広がる傾向があり、CREAM よりも実データと比べて安全側の値を算出することになる。安全側の解析結果となることは、安全性の認証取得などには適すると考えられるが、本研究では概念設計に適用する観点から精度が高い方が望ましく、本研究では図 2.1-3 で最も実データの再現性が高かった CREAM を適用した。

表 B.1-3 HEART における基準 HEP(Human Error Probability) ([51][56]より作成)

General Tasks	Basic HEP	5 <sup>th</sup> -95 <sup>th</sup> Percentiles
A) Totally unfamiliar, performed at speed with no real idea of likely consequence	0.55	0.35–0.97
B) Shift or restore system to a new or original state on a single attempt without supervision or procedures	0.26	0.14–0.42
C) Complex task requiring high level of comprehension and skill	0.16	0.12–0.28
D) Fairly simple task performed rapidly or given scant attention	0.09	0.06–0.13
E) Routine, highly-practiced, rapid task involving relatively low level of skill	0.02	$7 \times 10^{-3}$ – $4.5 \times 10^{-2}$
F) Restore or shift a system to original or new state following procedures, with some checking	$3 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-4}$ – $7 \times 10^{-3}$
G) Completely familiar, well-designed, highly practiced, routine task occurring several times per hour, performed to highest possible standards, by highly-motivated, highly-trained and experienced person, totally aware of implications of failure, with time to correct potential error, but without the benefit of significant job aids	$4 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-5}$ – $9 \times 10^{-3}$
H) Respond correctly to system command even when there is an augmented or automated supervisory system providing accurate interpretation of system state	$2 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-6}$ – $9 \times 10^{-4}$
I) Miscellaneous task for which no description can be found	$3 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-3}$ –0.11



表 B.1-4 HEART における PSF(Performance Shaping Factor) ([51][56]より作成)

#	Error Producing Contents (multiplicative weight factor show in parentheses)		#	Error Producing Contents (multiplicative weight factor show in parentheses)	
1	Unfamiliarity	× 17	21	Dangerous Incentives	× 2
2	Time shortage	× 11	22	Lack of exercise	× 1.8
3	Low Signal / Noise ratio	× 10	23	Unreliable Instruments	× 1.5
4	Features override allowed	× 9	24	Absolute judgements	× 1.6
5	Spatial and functional incompatibility	× 8	25	Unclear allocation of function	× 1.6
6	Model mismatch	× 8	26	Progress tracking lack	× 1.4
7	Irreversibility	× 8	27	Physical capabilities	× 1.4
8	Channel overload	× 6	28	Low meaning	× 1.4
9	Technique unlearning	× 6	29	Emotional stress	× 1.3
10	Knowledge transfer	× 5.5	30	Ill-health	× 1.2
11	Performance ambiguity	× 5	31	Low morale	× 1.2
12	Misperception of risk	× 4	32	Inconsistency of display	× 1.2
13	Poor feedback	× 4	33	Poor environment	× 1.15
14	Delayed / incomplete feedback	× 4	34	Low loading - 1st half hour - each hour	× 1.1 × 1.05
15	Inexperienced	× 3	35	Sleep cycle disruption	× 1.1
16	Impoverished information	× 3	36	Task pacing	× 1.06
17	Inadequate checking	× 3	37	Supernumeraries	× 1.03
18	Objectives conflict	× 2.5	38	Age	× 1.02
19	No diversity	× 2.5			
20	Educational mismatch	× 2			

備考) Error Producing Contexts (EPC) と PSF は同義

## B.2 ヒューマンエラーの定性的解析手法

2.2 章に示す Harris や Stanton[57][58][59]らによる HET(Human Error Template)を用いた定性的解析手法は, FAR/CS 25.1302 の適合性証明活動に用いるため, 機体開発の最終フェーズにおいて規定要求に対して適合か不適合かを簡便に判別することを目的としている。このため, 合否の 2 択に重きが置かれるためフライトデッキ設計の最適化を行う目的には適用が困難であることに加え, 適合性証明活動としてタスク分析についても網羅的に実施する必要がある。また HET 手法では, 本研究のような影響が大きいと考える主要なタスクを抜粋するのではなく, 図 B.2-1 に示す階層的タスク分析(Hierarchical Task Analysis)手法のようにタスクの階層構造に注目して, 漏れなく網羅的にパイロットのタスクを整理する手法が適用されている。本手法は, 実際のタスクの順番通りに時系列的に並べる観点よりも, タスクを実行することで達成される目標(Goal)を, 副目標(Sub-Goal)といったより詳細な単位に分解していくことで, 階層化して網羅的に抽出することができるが, 概念設計段階では影響の大きいタスクのみに絞ることが効率的で望ましいこと, また, 実際のパイロットが行うタスク通りの時系列で整理するものではないため, 従来のような実験的なアプローチによるヒューマンエラーの評価と解析を比較検討することも困難になる。また, タスクを時系列で検討することは次章に示すワークロード評価にも適用できるため, 本研究では Harris や Stanton らの方法は適用していない。

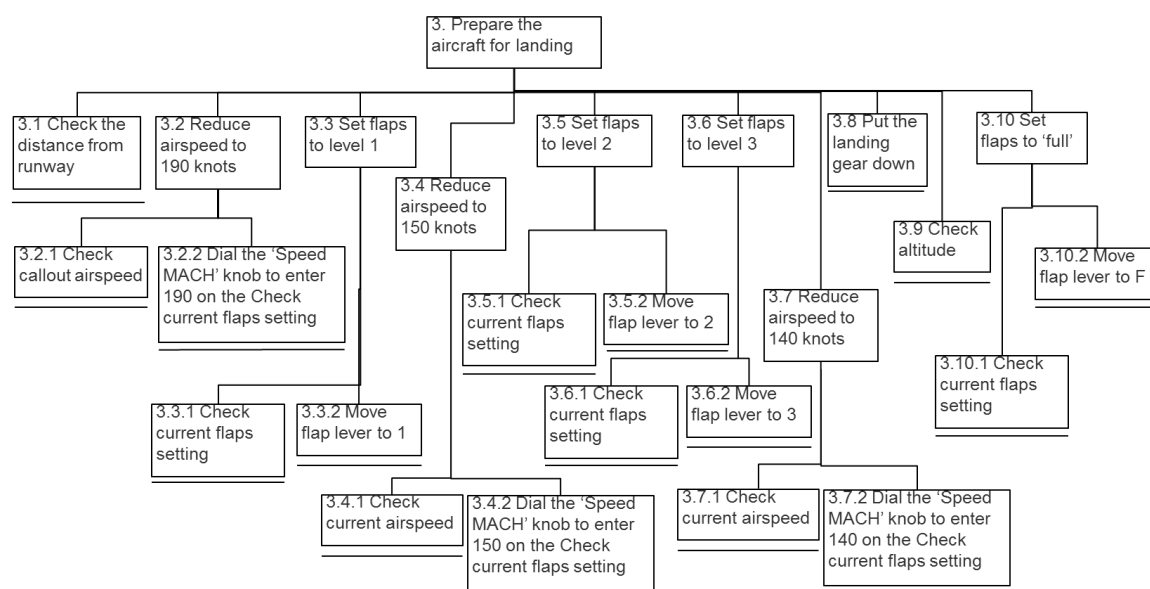


図 B.2-1 階層的タスク分析(Hierarchical Task Analysis) ([59]より作成)

## B.3 解析的ワークロード評価手法

本研究では操作性の評価関数として各タスク実行時にゾーン 1, 2, 3 の配置に応じて, +1, +2, +3 と単純加算することとした。また, ゾーン 1, 2, 3 の配置に応じて PSF の多寡を定義した。更に解析精度を高める手法として, JAXA のコックピット・ワークロード推算プログラム[85]など解析的なワークロード評価手法を適用することでより現実的なワークロードの多寡を配置設計の評価に考慮することができるが, それを本研究に適用することへの得失について考察する。

JAXA のコックピット・ワークロード推算プログラムは以下の 3 つのルーチンから構成され, ワークロードを算出する。

- シナリオ生成ルーチン(図 B.3-1 参照)
- 行動計算ルーチン(図 B.3-2 参照)
- 結果処理ルーチン

シナリオ生成ルーチンでは, フライトデッキの操縦・操作機器配置・パイロットの操作手順・航空機の飛行時刻歴といった設計データをインプットとしてワークロードを評価するシナリオを生成する。行動計算ルーチンでは人間の行動や思考をモデル化し, タスクにかかる時間, ワークロードなどを時刻歴で計算する。結果処理ルーチンではワークロード時刻歴の図示等を行う。

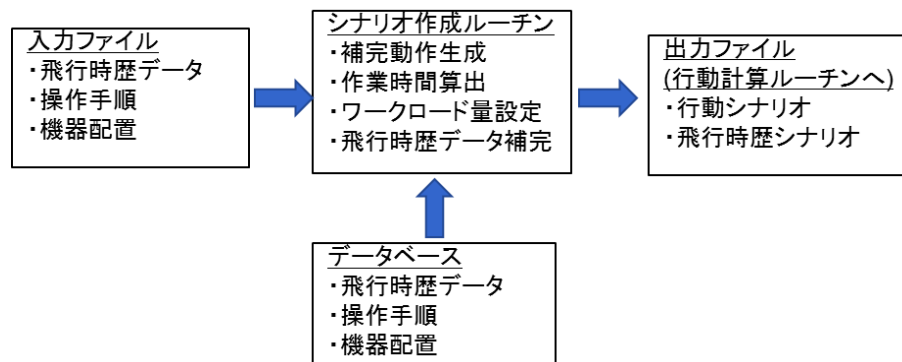


図 B.3-1 コックピット・ワークロード推算プログラム シナリオ生成ルーチン([85]より作成)

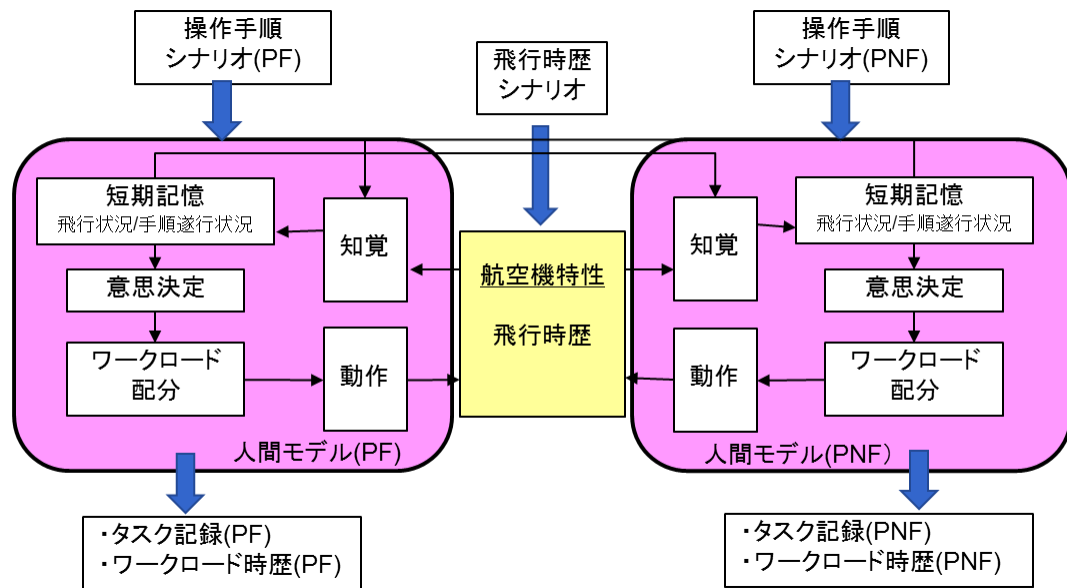


図 B.3-2 コックピット・ワークロード推算プログラム 行動計算ルーチン([85]より作成)

ここで、ワークロードの定量化に関しては、表 B.3-1 に示すような機器操作の標準時間[86]や、図 B.3-3 に示す Fitts の法則[87]といったモデルを適用し、フライトデッキ機器配置や操作対象までの距離を元にパイロットがタスクを実行するのに必要な時間を推算する。また、機器操作以外のその他の発話時間なども考慮し、全てのタスクに対して必要な作業時間を整理することで、TAWL(Task Analysis Workload)なるワークロード評価指標[88]を算出する。TAWL は人間のワークロードのリソースを V(視覚: Visual), A(聴覚: Auditory), C(認知: Cognitive), P(精神的運動: Psychomotor)の 4 種類に分類し、それぞれの種類ごとに定義されたワークロード量を各タスクに当てはめ時刻歴でワークロード量を計算する手法である。

表 B.3-1 機器操作の標準所要時間([86]より作成)

Control / Display type	Average operation time [sec]
Pushbutton	1.04
Two position toggle switch	1.11
Three position toggle switch	1.35
Coverer toggle switch	1.50
Single rotary switch	1.58
Rotary switch in an array	1.64
Single thumbwheel	1.95
Thumbwheel in an array	2.00
Hand lever, 5 deg to 10 deg movement	1.65
Hand lever, 10 deg to 20 deg movement	1.85
Hand lever, 20 deg to 40 deg movement	2.05
Hand lever, 40 deg to 60 deg movement	2.25
Rotary knob	1.69
Hand wheel	2.39
Discrete indicator	0.25
Analog indicator	2.00
Digital indicator	0.75

$$T = \text{eye angle change [deg]} / 90[\text{deg}] \times 0.66[\text{sec}]$$

Fitts's Law

The time  $T_{\text{pos}}$  to move the hand to a target of size  $S$  which lies a distance  $D$  away is given by:

$$T_{\text{pos}} = I_M \log_2 (D/S+0.5)$$

where  $I_M = 100$  [70-120] msec/bit

図 B.3-3 機器操作に要する時間 (Fitts の法則) ([87]より作成)

本研究で用いたゾーン 1, 2, 3 の配置に基づく操作性や PSF 設定は, 上記の計算の一部である機器操作標準時間や Fitts の法則に基づくタスク実行時間評価を最も単純化したものに相当すると考えられる。一方で, 本研究は概念設計手法であり, ワークロード解析のインプットとなるフライトデッキ機器配置・パイロットの操作手順・航空機の飛行時刻歴のいずれもが検討初期過程にあり, 精度の高いデータが得られないため適用する利点を得られない。設計が徐々に固まってこれらのインプットデータの精度がある程度向上してきた基本設計段階や詳細設計段階の検討においては,

時刻歴にてタスク実行時の操作性や PSF を求めることができるため、ワークロードを用いることで解析精度の向上が期待される。

# Appendix C 最適化計算詳細

## C.1 最適化計算詳細

Appendix C.1 では遺伝的アルゴリズムを用いた最適化計算過程の詳細および根拠を示す。なお、本計算は巡回セールスマン問題を用いた配列・順番に関する問題であることから、このような問題で利便性の良い表計算ソフトを用いた。

(1) 初期個体生成(図 C.1-1 参照)

- 1 個体(1 つの設計解)は、操縦・操作機器①～⑳に 1～20 までの数字を与えたものとし、50 個の個体を生成する。
- 初期個体生成に当たっては、操縦・操作機器①～⑳に一様乱数関数を用いて乱数を生じさせ、乱数の大小から 1～20 番目まで順位付けをすることで生成する。
- ゾーン 1 に 4 つの機器、ゾーン 2 に 6 つの機器を配置するという前提のもと、値が 1～4 の機器はゾーン 1、値が 5～10 の機器はゾーン 2、11 以上はゾーン 3 に配置するものとする。

初期個体  
(50個体)

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳		
15	8	19	6	18		2	14	11	7	17	16	13	3	5	1	12	9	20	10	4
1	3	20	8	11		14	19	13	9	10	15	17	2	16	6	18	12	4	5	7
19	8	2	18	3		12	10	6	1	7	5	16	20	17	14	4	15	13	11	9
4	7	14	6	15		20	5	9	17	18	11	19	12	16	10	1	8	13	2	3
9	20	5	10	18		2	1	15	6	13	11	17	8	19	14	4	12	16	7	3
10	14	8	2	16		13	12	15	20	3	18	11	5	9	7	1	17	6	19	4
1	2	5	16	12		14	9	4	20	6	7	10	11	8	3	13	17	15	18	19
14	4	10	9	13		7	12	11	3	2	5	19	17	16	20	15	1	6	8	18
13	19	8	12	9		10	1	15	11	20	7	2	4	17	5	3	18	14	16	6
14	9	3	18	13		2	8	5	4	7	17	20	15	16	1	19	11	10	12	6
17	3	1	7	20		10	18	11	6	16	4	15	2	12	5	9	19	8	14	13
19	3	12	4	13		20	16	11	17	7	2	18	1	14	8	15	9	5	10	6
10	6	16	2	19		12	18	20	3	1	15	11	9	7	5	17	4	13	14	8
3	13	2	18	17		19	5	16	4	10	15	6	14	1	8	12	20	7	11	9
18	17	8	9	7		20	10	19	16	13	5	3	4	15	12	11	2	6	14	1
⋮																				
19	10	13	8	17		2	4	14	5	12	9	20	7	6	1	3	11	15	18	16
6	7	10	17	19		20	15	8	2	3	14	11	1	5	13	12	16	9	18	4
5	17	10	13	15		19	11	20	7	18	9	8	14	12	6	3	2	16	4	1
10	8	18	12	5		14	19	7	16	9	1	3	13	4	11	17	6	20	2	15
19	13	20	17	6		4	8	2	1	7	16	18	3	14	15	9	11	10	12	5
1	5	4	8	6		7	10	9	12	17	14	2	18	15	13	11	19	16	3	20

機器①～⑳に一樣乱数を与え、個体内で順位付けして1～20の値を与える。

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳		
3	3	3	3	3	2	1	2	2	1	3	3	2	3	2	3	3	2	1	1	3
2	3	3	3	3	2	3	1	2	1	3	3	1	3	2	3	1	2	3	3	2
3	1	2	2	1	3	3	3	2	2	3	3	2	3	3	3	3	1	1	3	2
3	1	2	3	3	1	2	2	3	2	2	3	3	3	1	3	3	1	2	3	3
2	3	3	2	3	2	3	3	2	3	1	3	3	1	3	1	1	2	2	3	3
3	3	3	3	3	2	3	1	3	1	2	2	2	2	2	1	2	3	3	3	1
1	3	3	2	1	3	2	2	3	2	3	1	2	3	3	3	1	3	3	3	2
1	3	3	3	3	1	3	2	3	2	3	1	2	2	3	1	2	2	3	3	3
3	2	3	3	2	1	2	3	1	3	3	3	3	2	1	3	3	2	3	2	1
2	2	3	3	2	1	1	3	3	2	2	2	3	3	1	3	3	3	3	1	3
3	2	3	3	1	1	3	2	2	2	2	3	3	1	3	3	3	2	1	3	3
3	2	2	3	3	2	1	3	1	3	2	2	3	3	3	1	2	1	3	3	3
3	2	1	3	2	3	1	2	3	3	2	1	2	3	3	1	3	2	3	3	3
2	2	3	2	3	3	3	3	3	3	1	3	3	1	2	2	3	2	1	1	1
3	2	3	1	2	1	3	1	3	3	3	3	3	3	1	2	2	2	3	2	2
⋮																				
3	2	2	1	2	3	3	2	3	1	3	1	3	1	3	2	3	3	3	3	2
1	3	3	1	3	2	1	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	2	2	1	3
3	3	1	2	2	2	3	3	3	3	3	2	2	1	1	2	1	3	3	3	3
3	3	3	2	3	1	1	3	3	3	2	2	1	2	1	3	2	3	3	3	2
1	2	3	2	2	2	3	1	3	3	2	3	3	1	1	3	3	3	3	3	2
1	3	2	3	2	3	1	3	1	2	3	3	3	2	3	3	1	2	3	2	2

①～⑳の機器のうち1～4はゾーン1、5～10はゾーン2に配置する

図 C.1-1 初期個体生成



(2) 初期個体の評価値計算(図 C.1-2 参照)

- 操作性については、図 C.1-2 に示すように各タスクで用いる機器①～⑳がゾーン 1, 2, 3 のいずれに配置されているかによって+1, +2, +3 と加算し総和をとる。ここで図 C.1-2 で①～㉔の記載のないタスクは独立変数に該当しない機器(例:スラスト・レバー)を使用するタスクである。
- ヒューマンエラーからハザードに至る確率については図 C.1-2 に示すように、各タスクにおける PSF をゾーン 1, 2, 3 のいずれに配置されているかによって設定し、各タスクの基準 HEP と掛け合わせ総和をとる。
- なお飛行時間の長い通常の巡航(Normal Cruise)シナリオにおける自動操縦、航法系統(Navigation, FMS)、通信系統(Communication)の機器は 10 回タスクを行うものとする。
- 以上より、初期個体の評価値(操作性と、ヒューマンエラーからハザードに至る確率)が計算される。なお、この後で表計算ソフトの関数を用いて淘汰を行っていく都合から、評価値に十分小さい一様乱数(0.001 以下)を与え、50 個の個体の評価値は全て異なる値とする。

機器①～⑫の配置に応じて、各TaskのPSFと操作性を設定

Task	HEI	HEP	PSF	HEP×PSF	操作性	機器
N1	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	thrust
N2	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	thrust
N3	E2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	thrust
N4	O2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	monitor
	I3	0.0100	0.50	0.0050		
N5	O2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	monitor
	I3	0.0100	0.50	0.0050		
N6	O2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	thrust
	I2	0.0100	0.50	0.0050		
N7	O2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	monitor
	I3	0.0100	0.50	0.0050		
N8	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	thrust
	E2	0.0030	0.25	0.0008		
N9	O2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	monitor
N10	E5	0.0300	2.00	0.0600	3.0000	①Gear
N11	E5	0.0300	1.00	0.0300	2.0000	②Flaps
NN1	O2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	monitor
NN2	E3	0.0005	0.25	0.0001	1.0000	thrust
NN3	E3	0.0005	1.00	0.0005	2.0000	④ENG cutoff
NN4	E3	0.0300	2.00	0.0600	3.0000	③Fire
NN5	E5	0.0300	2.00	0.0600	3.0000	③Fire
NN6	E5	0.0300	2.00	0.0600	3.0000	③Fire
NN7	P2	0.0100	0.50	0.0050	1.0000	Plan

Task	HEI	HEP	PSF	HEP×PSF	操作性	機器
GA1	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	⑤NAV
GA2	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	⑥Auto
GA3	O2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	monitor
GA4	O2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	monitor
GA5	E5	0.0300	2.00	0.0600	3.0000	①Gear
GA6	E5	0.0300	1.00	0.0300	2.0000	②Flaps
GA7	E3	0.0005	0.25	0.0001	1.0000	⑥Auto
GA8	E5	0.0300	0.25	0.0075	1.0000	CKLT
GA9	I2	0.0100	0.50	0.0050	1.0000	Decision
GA10	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	⑥Auto
GA11	E5	0.0300	1.00	0.0300	2.0000	②Flaps
GA12	E5	0.0300	2.00	0.0600	3.0000	①Gear

Task	HEI	HEP	PSF	HEP×PSF	操作性	機器
ED1	E2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	mask
ED2	O2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	monitor
ED3	E5	0.0300	2.00	0.0600	3.0000	⑦PAX OXY
ED4	E5	0.0300	1.00	0.0300	2.0000	⑧Belt
ED5	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	thrust
ED6	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	SPDbrake
ED7	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	thrust/column
ED8	E2	0.0030	2.00	0.0060	3.0000	①Gear
ED9	E1	0.0030	1.00	0.0030	2.0000	⑧Cabin ALT

機器①～⑫の配置に応じて、各TaskのPSFと操作性を設定

Normalシナリオで Autoflight, Navigation, Communication Taskは10倍	Task	HEI	HEP	PSF	HEP×PSF	操作性	機器
	CR1	E1	0.0030	0.25	0.0075	10.00	⑤NAV
	CR2	E1	0.0030	0.25	0.0075	10.00	⑥Auto
	CR3	E1	0.0030	0.25	0.0075	10.00	⑥Auto
	CR4	E1	0.0030	2.00	0.0600	20.00	⑨COM
	CR5	E5	0.0300	2.00	0.0600	2.0000	⑩LTS
	CR6	E3	0.0005	2.00	0.0010	2.0000	⑫FD Door

Task	HEI	HEP	PSF	HEP×PSF	操作性	機器
HD1	O2	0.0030	2.00	0.0060	3.0000	⑪HYD
HD2	O2	0.0030	2.00	0.0060	3.0000	⑪HYD
HD3	P2	0.0100	0.50	0.0050	1.0000	Plan
HD4	E1	0.0030	2.00	0.0060	2.0000	⑪Autobrake
HD5	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	⑤NAV
HD6	E5	0.0300	0.25	0.0075	1.0000	⑫EmerGear
HD7	E5	0.0300	1.00	0.0300	2.0000	⑬EmerBrake

Task	HEI	HEP	PSF	HEP×PSF	操作性	機器
EC1	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	⑭RAT
EC2	E1	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	thrust/column
EC3	O2	0.0030	2.00	0.0060	3.0000	⑮ELEC
EC4	O2	0.0030	2.00	0.0060	3.0000	⑮ELEC
EC5	O2	0.0030	1.00	0.0030	2.0000	⑯APU
EC6	E5	0.0300	0.25	0.0075	1.0000	monitor
EC7	P2	0.0100	0.50	0.0050	1.0000	Plan

Task	HEI	HEP	PSF	HEP×PSF	操作性	機器
SR1	E2	0.0030	0.25	0.0008	1.0000	AP disconnect
	E3	0.0005	0.25	0.0001		
SR2	E2	0.0030	2.00	0.0060	3.0000	⑰Stab Trim
	E3	0.0005	2.00	0.0010		

備考) PSF および操作性の値は、ある 1 つの設計解の値(個体毎に変化する値)

図 C.1-2 評価値計算(操作性及びヒューマンエラーからハザードに至る確率)

(3) NSGA-II[65]の考え方をを用いた淘汰(Sorting)(図 C.1-3 参照)

- NSGA-II の考え方をを用いて, 初期個体を淘汰する。2 つの評価値(操作性とヒューマンエラーからハザードに至る確率)で他を圧倒(Dominate)する個体をランク 1 とする。以下同様に, ランク 1 の個体を除去した状態で他を圧倒する個体をランク 2, ランク 1, 2 の個体を除去した状態で他を圧倒する個体をランク 3 と淘汰していく。
- 同ランク内の個体同士については, ヒューマンエラーからハザードに至る確率の評価値にて順位づけを行う。
- 50 個体のうち半分を淘汰(上位 25 個体を次世代計算に使用)する。25 個体の淘汰のためにランク 8 まで順位づけを行っている(8 は本検討のトライ&エラー結果で設定した)。

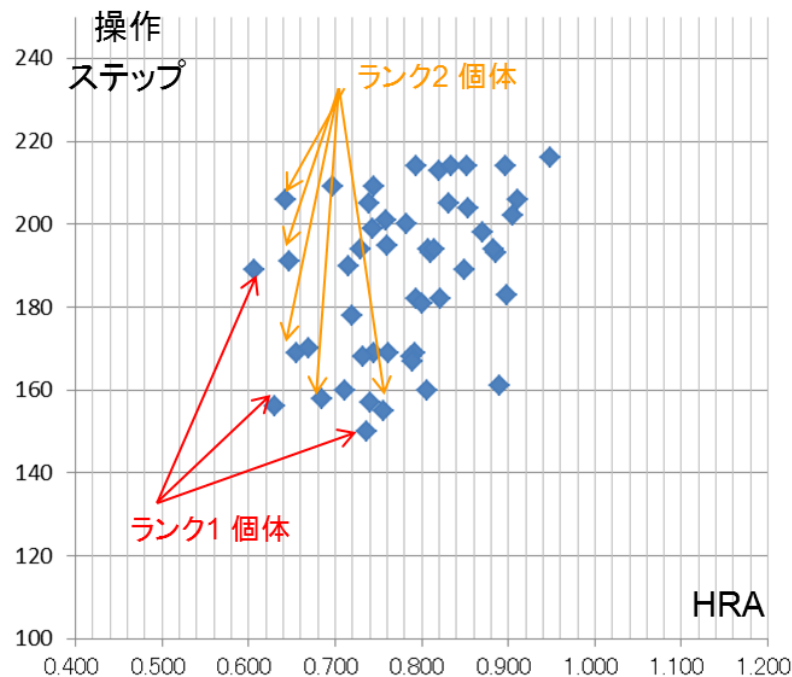


図 C.1-3 初期個体の淘汰(Sorting)

(4) 突然変異:巡回セールスマン問題の解法[66](図 C.1-4 および図 C.1-5 参照)

- 巡回セールスマン問題の解法を用いて, 図 C.1-4 に示す通り, 淘汰による上位 10 個体に対し, ランダムに選択した 2 点を組み替えることで突然変異を実行する。このような突然変異を, 上位 10 個体につき 3 回ずつ行い 30 個体を生成する。
- また, ゾーン 1, 2, 3 間での機器配置の変更を促すため, 図 C.1-5 に示す通り, 上位 10 個体につきゾーン 1(=1)とゾーン 2(=5)を強制置換を行う。同様にゾーン 1(=2)と 3(=11), ゾーン 2(=6)と 3(=12)についても強制置換し, 合計で 30 個体を生成する。

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳	
17	18	11	15	10	2	6	20	1	7	3	5	13	8	12	16	4	19	14	9
2	8	15	11	4	3	20	13	17	1	7	12	18	14	9	10	5	19	16	6
2	8	1	7	3	5	19	15	13	18	14	16	9	17	12	10	6	11	4	20
16	8	12	19	3	1	13	18	15	7	5	6	14	9	4	2	11	10	17	20
14	7	10	9	5	1	15	16	19	13	4	20	18	12	3	17	11	8	2	6
10	8	19	17	1	6	13	14	7	11	4	2	12	3	16	5	20	18	15	9
3	12	13	14	10	7	15	20	4	17	18	9	1	6	19	16	8	2	11	5
20	11	5	15	10	8	17	7	2	9	12	4	3	1	16	19	13	14	18	6
1	2	12	18	14	4	8	16	13	7	6	17	9	11	15	3	5	10	20	19
12	1	2	14	9	7	8	3	10	16	4	11	13	6	5	17	18	15	20	19

淘汰結果の上位10個体

17	18	11	14	10	2	6	20	1	7	3	5	13	8	12	16	4	19	15	9
10	8	15	11	4	3	20	13	17	1	7	12	18	14	9	2	5	19	16	6
2	8	1	7	3	11	19	15	13	18	14	16	9	17	12	10	6	5	4	20
16	14	12	19	3	1	13	18	15	7	5	6	8	9	4	2	11	10	17	20
14	7	9	10	5	1	15	16	19	13	4	20	18	12	3	17	11	8	2	6
10	8	19	17	1	6	7	14	13	11	4	2	12	3	16	5	20	18	15	9
14	12	13	3	10	7	15	20	4	17	18	9	1	6	19	16	8	2	11	5
20	11	5	14	10	8	17	7	2	9	12	4	3	1	16	19	13	15	18	6
1	2	12	18	14	4	8	16	10	7	6	17	9	11	15	3	5	13	20	19
12	15	2	14	9	7	8	3	10	16	4	11	13	6	5	17	18	1	20	19

ランダムに2点を組替えた突然変異後の個体

備考) 上記の突然変異を, 上位 10 個体につき 3 回ずつ行い 30 個体を生成する。

図 C.1-4 巡回セールスマン問題の解法:突然変異(ランダム)

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳	
19	13	10	4	11	2	15	1	3	9	7	20	12	6	14	18	17	8	16	5
19	5	7	20	16	4	18	12	9	1	3	13	8	10	6	2	17	15	14	11
9	1	10	11	3	6	20	17	15	14	12	16	4	19	2	5	7	18	13	8
20	10	4	9	19	5	8	7	1	2	15	16	11	18	6	17	13	12	3	14
4	3	5	8	2	17	1	18	7	14	16	6	19	11	20	10	9	13	15	12
4	3	7	1	10	15	5	8	2	6	11	18	12	13	9	20	17	14	19	16
12	15	7	17	19	1	9	4	6	18	5	8	10	16	13	3	20	14	11	2
16	7	1	8	13	4	14	20	11	3	2	12	6	19	18	5	15	9	17	10
12	2	3	1	7	6	20	14	11	8	13	18	4	5	9	15	17	16	10	19
10	12	11	16	17	2	8	15	7	13	6	19	5	14	18	1	20	4	9	3

淘汰結果の上位10個体

19	13	10	4	11	2	15	5	3	9	7	20	12	6	14	18	17	8	16	1
19	1	7	20	16	4	18	12	9	5	3	13	8	10	6	2	17	15	14	11
9	5	10	11	3	6	20	17	15	14	12	16	4	19	2	1	7	18	13	8
20	10	4	9	19	1	8	7	5	2	15	16	11	18	6	17	13	12	3	14
4	3	1	8	2	17	5	18	7	14	16	6	19	11	20	10	9	13	15	12
4	3	7	5	10	15	1	8	2	6	11	18	12	13	9	20	17	14	19	16
12	15	7	17	19	5	9	4	6	18	1	8	10	16	13	3	20	14	11	2
16	7	5	8	13	4	14	20	11	3	2	12	6	19	18	1	15	9	17	10
12	2	3	5	7	6	20	14	11	8	13	18	4	1	9	15	17	16	10	19
10	12	11	16	17	2	8	15	7	13	6	19	1	14	18	5	20	4	9	3

異なるゾーン間の2点を組替えた突然変異後の個体

備考) 上記は上位 10 個体につきゾーン 1(=1)とゾーン 2(=5)を強制置換。同様にゾーン 1(=2)と 3(=11), ゾーン 2(=6)と 3(=12)についても強制置換し, 合計で 30 個体を生成する。

図 C.1-5 巡回セールスマン問題の解法:突然変異(各ゾーンを強制置換)

(5) パス表現変換と交叉:巡回セールスマン問題の解法[66](図 C.1-6 および図 C.1-7 参照)

- 巡回セールスマン問題の解法を用いるため通常表現(順序表現)を基準経路(任意)を基にした表現(パス表現)に変換する。パス表現は、図 C.1-6 に示す通り、機器①が基準経路の何番目に対応するか、次に機器①を除去した状態で機器②が基準経路の何番目に対応するか、と最後の機器⑳まで繰り返して表現したものである。このようなパス表現への変換を、淘汰による上位 10 個体に対して実施する。
- このようなパス表現にした場合、単純に 2 点交叉を行っても機器が重複することはなく、必ず制約条件を満足する。交叉についてはランク上位の解同士での交叉を促すため、図 C.1-7 に示す通り、上位 1 位と 2~10 位の間、上位 2 位と 3~10 位の間、上位 3 位と 4~10 位の間、で 2 点交叉を行い合計 24 個体を生成する。



図 C.1-6 巡回セールスマン問題の解法:パス表現への変換

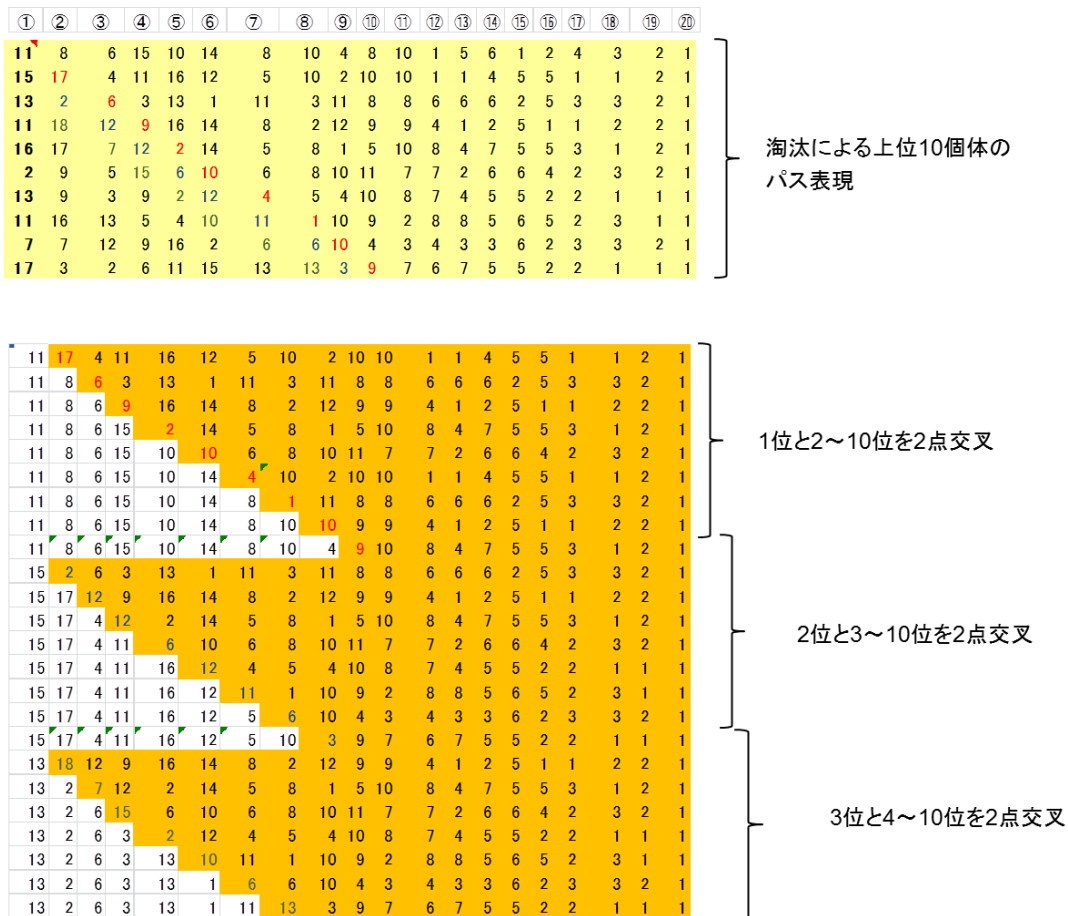


図 C.1-7 巡回セールスマン問題の解法：交叉

## (6) 次世代の計算

- 上記(3)で淘汰された 25 個体と、上記(4)(5)で突然変異および交叉で生成された個体のうち上位 25 個体を合計した 50 個体を次世代の計算に用いる。
- 次世代の 50 個体に対し、上記(1)～(5)の計算を同様にを行い、50 個体が次々世代の計算に用いる。このような遺伝的計算を繰り返すを行い、既存機との同等もしくはそれ以上の解が得られるまで実施していく。本研究で用いた検討例では 10 世代程度を繰り返すと、目標とする既存機よりも優れる解が複数発生し、15 世代程度以降はほとんど改善が得られなかったため 20 世代まで計算を行うこととした(図 4.6-5～図 4.6-8 参照)。

## C.2 単純な問題に適用することによる検証

Appendix C.2 では遺伝的アルゴリズムを用いた最適化計算の検証として、単純な問題に適用することで想定通りの最適解が得られることを確認する。

本研究における計算条件から表 C.2-1 の通りに単純化した場合を検討する。評価関数は本問題の性質(巡回セールスマン問題)を考慮し、離散的でかつ単純なものとした。また制約条件も単純化させることで全ての総当たり解が事前に求まっている状態(約 3900 万種類= ${}_{20}C_4 \times {}_{16}C_6$  が 190 種類= ${}_{20}C_2$  に単純化)で検証を行う。

表 C.2-1 検証用解析条件

解析条件	本研究の手法	検証用に単純化した問題
評価関数 1	操作性評価関数(到達範囲ゾーンに基づく操作ステップ数の全タスク総和)	$\sum_{N=1}^{20} N \times Z$ N: 機器番号(1~20), Z: ゾーン(1 or 2)
評価関数 2	ヒューマンエラーからハザードに至る確率(基準 HEP×PSF の全エラー総和)	$\sum_{N=1}^{20} 1/(N \times Z)$
制約条件	ゾーン 1=4 機器, ゾーン 2=6 機器, ゾーン 3=10 機器	ゾーン 1=18 機器 ゾーン 2=2 機器
遺伝的アルゴリズム	交差・突然変異:巡回セールスマン問題, 淘汰:NSGA-II	同左
個体数	50 個体	備考)図 C.1-5 に示す突然変異は, ゾーン 3 が無いため, ゾーン 1 と 2 の間のみとする
世代数	20 世代	

上記の条件で行った最適化計算結果を以下に示す。初期個体の評価値を図 C.2-1 に示す。最適化計算結果を図 C.2-2 に示す。同図に示すように、離散的な評価関数に対しても本検討で用いた手法により非劣解をもとめることができ、計算手法の妥当性を確認した。

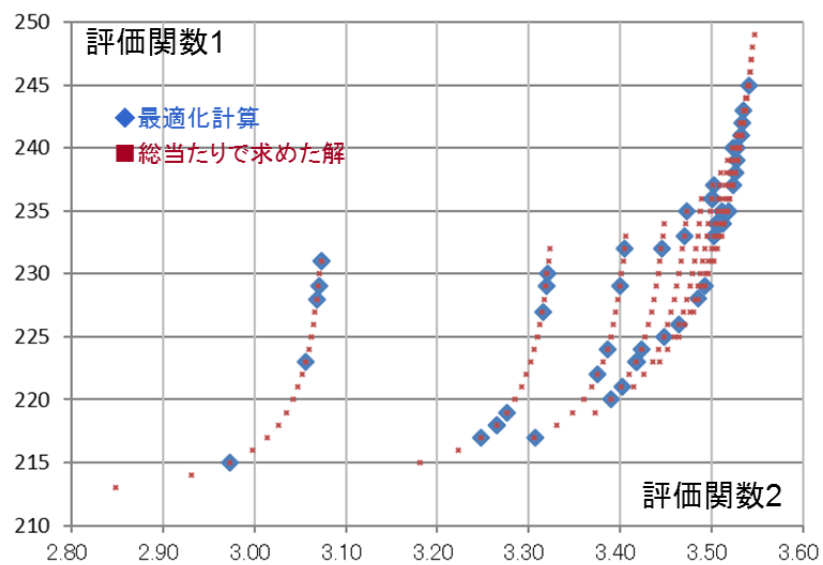


図 C.2-1 検証用解析 初期値

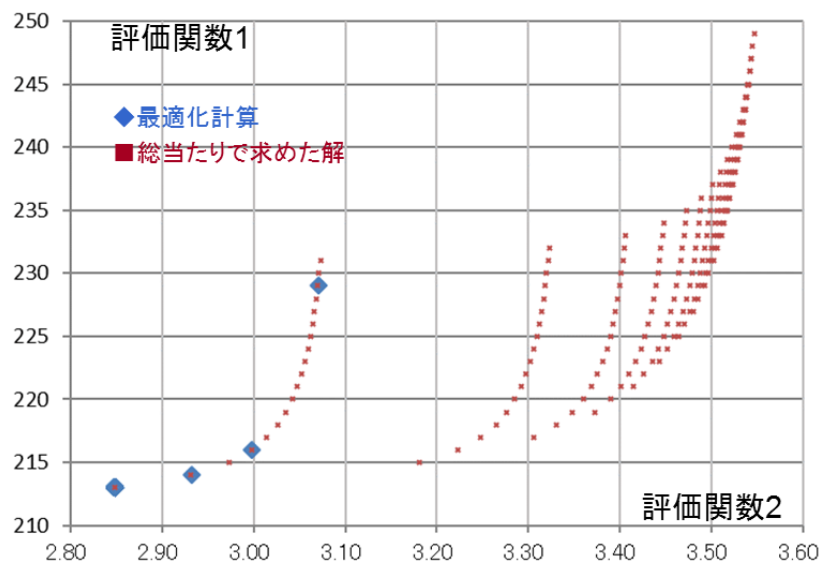


図 C.2-2 検証用解析 最適化計算結果(20 世代後)



## C.3 計算結果データ

Appendix C.3 では 4.6 章の最適化計算結果で得られた計算結果のデータをを記録として添付する。表 C.3-1～C.3-5 に初期世代 (初期乱数), 第 5 世代, 第 10 世代, 第 15 世代, 第 20 世代の計算結果を示す。なお, 表の見方は図 C.3-1 に示す。

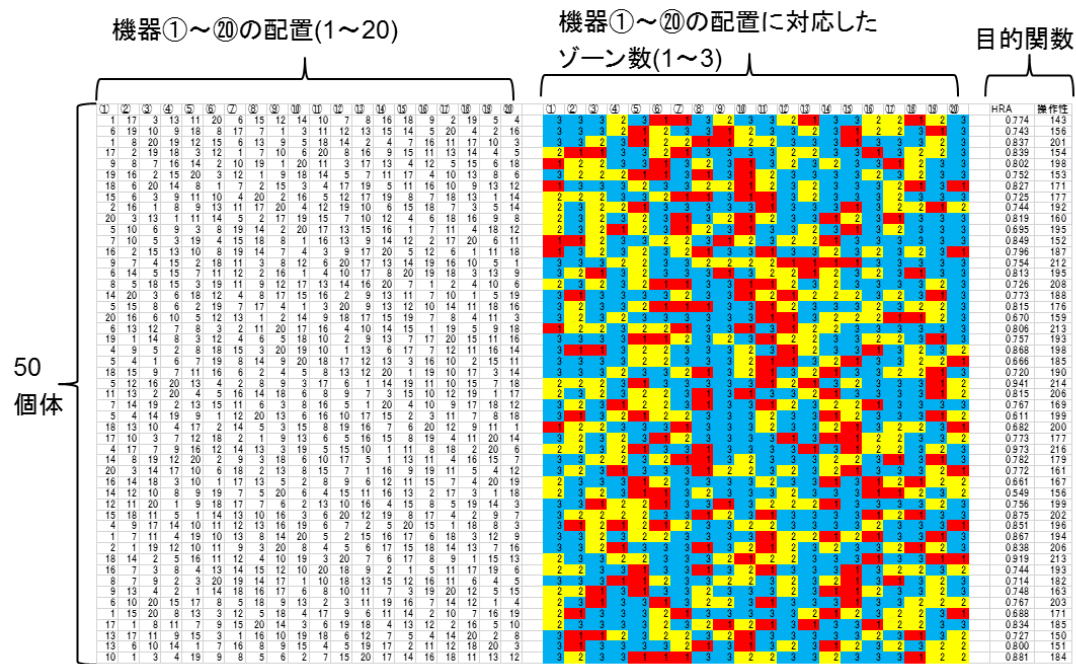


図 C.3-1 計算結果のデータ(表 C.3-1～C.3-5)の説明

表 C.3-1 最適化計算結果データ(初期世代)

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳	HRA	操作性
1	17	3	13	11	20	6	15	12	14	10	7	8	16	18	9	2	19	5	4	0.774	143
6	19	9	18	8	17	7	1	3	11	12	13	15	14	5	20	4	2	16	3	0.743	156
1	8	20	19	12	15	6	13	9	5	18	14	2	4	7	16	11	17	10	3	0.837	201
17	2	19	18	3	12	1	7	10	6	20	8	16	9	15	11	13	14	4	5	0.839	154
9	8	7	16	14	2	10	19	1	20	11	3	17	13	4	12	5	15	6	18	0.802	198
19	16	2	15	20	3	12	1	9	18	14	5	7	11	17	4	10	13	8	6	0.752	153
18	6	20	14	8	1	7	2	15	3	4	17	19	5	11	16	10	13	12	1	0.827	171
15	6	3	9	11	10	4	20	2	16	5	12	17	19	8	7	18	13	1	14	0.725	177
2	16	1	8	9	13	11	17	20	4	12	19	10	6	15	18	7	3	5	14	0.744	192
20	3	13	1	11	14	5	2	17	19	15	7	10	12	4	6	18	16	9	8	0.819	160
5	10	6	9	3	8	19	14	2	20	17	13	15	16	1	7	11	4	18	12	0.695	195
7	10	5	3	19	4	15	18	8	1	16	13	9	14	12	2	17	20	6	11	0.849	152
16	2	15	13	10	8	19	14	7	4	3	9	17	20	5	12	6	1	11	18	0.796	187
9	7	4	15	2	18	11	3	8	12	6	20	17	13	14	19	16	10	5	1	0.754	212
6	14	5	15	7	11	12	2	16	1	4	10	17	8	20	19	18	3	13	9	0.813	195
8	5	18	15	3	19	11	9	12	17	13	14	16	20	7	1	2	4	10	6	0.726	208
14	20	3	6	18	12	4	8	17	15	16	2	9	13	11	7	10	1	5	19	0.773	188
5	15	8	6	2	19	7	17	4	1	3	20	9	13	12	10	14	11	18	16	0.815	176
20	16	6	10	5	12	13	1	2	14	9	18	17	15	19	7	8	4	11	3	0.670	159
6	13	12	7	8	3	2	11	20	17	16	4	10	14	15	1	19	5	9	18	0.806	213
19	1	14	8	3	12	4	6	5	18	10	2	9	13	7	17	20	15	11	16	0.757	193
4	9	5	2	8	18	15	3	20	19	10	1	13	6	17	7	12	11	16	14	0.868	198
5	4	1	6	7	19	8	14	9	20	18	17	12	13	3	16	10	2	15	11	0.666	185
18	15	9	7	11	16	6	2	4	5	8	13	12	20	1	19	10	17	3	14	0.720	190
15	12	16	20	13	4	2	8	9	3	17	6	1	14	19	11	10	15	7	18	0.941	214
11	13	2	20	4	5	16	14	18	6	8	9	7	3	15	10	12	19	1	17	0.815	206
7	14	19	2	13	15	11	6	3	8	16	5	1	20	4	10	9	17	18	12	0.767	169
5	4	14	19	9	1	12	20	13	6	16	10	17	15	2	3	11	7	8	18	0.611	199
18	13	10	4	17	2	14	5	3	15	8	19	16	7	6	20	12	9	11	1	0.682	200
17	10	3	7	12	18	2	1	9	13	6	5	16	15	8	19	4	11	20	14	0.773	177
4	17	7	9	16	12	14	13	3	19	5	15	10	1	11	8	18	2	20	6	0.973	216
14	8	19	12	20	2	9	3	18	6	10	17	5	1	13	11	4	16	15	7	0.782	179
20	3	14	17	10	6	18	2	13	8	15	7	1	16	9	19	11	5	4	12	0.772	161
16	14	18	3	10	1	17	13	5	2	8	9	6	12	11	15	7	4	20	19	0.661	167
14	12	10	8	9	19	7	5	20	6	4	15	11	16	13	2	17	3	1	18	0.549	156
12	11	20	1	9	18	17	7	6	2	13	10	16	4	15	8	5	19	14	3	0.756	199
15	18	11	5	1	14	13	10	16	3	6	20	12	19	8	17	4	2	9	7	0.875	202
4	9	17	14	10	11	12	13	16	19	6	7	2	5	20	15	1	18	8	3	0.851	196
1	7	11	4	19	10	13	8	14	20	5	2	15	16	17	6	18	3	12	9	0.867	194
2	1	19	12	10	11	9	3	20	8	4	5	6	17	15	18	14	13	7	16	0.838	206
18	14	2	5	16	11	12	4	10	19	3	20	7	6	17	8	9	1	15	13	0.919	213
16	7	3	8	4	13	14	15	12	10	20	18	9	2	1	5	11	17	19	6	0.919	213
8	7	9	2	3	20	19	14	17	1	10	18	13	15	12	16	11	6	4	5	0.744	183
9	13	4	2	1	14	18	16	17	6	8	10	11	7	3	19	20	12	5	15	0.714	182
6	10	20	15	17	8	5	18	9	13	2	3	11	19	16	7	14	12	1	4	0.748	163
1	15	20	18	13	3	12	5	18	4	17	9	6	11	14	2	10	7	16	19	0.767	203
17	1	8	11	7	9	15	20	14	3	6	19	18	4	13	12	2	16	5	10	0.688	171
13	17	11	9	15	3	1	16	10	19	18	6	12	7	5	4	14	20	2	8	0.834	185
13	6	10	14	1	7	16	8	9	15	4	5	19	17	2	11	12	18	20	3	0.727	150
10	1	3	4	19	9	8	5	6	2	7	15	20	17	14	16	18	11	13	12	0.800	151
																				0.881	184

表 C.3-2 最適化計算結果データ(第5世代)

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳	HRA	操作性
130	3	2	2	3	1	1	3	3	1	3	3	3	2	2	2	2	3	2	3	1	0.717	130
130	3	2	2	3	1	1	3	3	1	3	3	3	2	2	2	2	3	2	3	1	0.689	130
131	3	2	2	3	1	1	3	3	1	3	3	1	2	3	3	2	3	2	3	2	0.643	131
136	3	1	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	3	3	0.630	136
136	3	1	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	3	3	0.630	136
137	3	2	2	3	1	1	3	3	1	3	3	2	2	3	2	2	3	2	3	2	0.612	137
139	3	2	2	3	1	1	3	3	1	3	3	2	2	3	2	2	3	3	2	3	0.611	139
166	3	1	1	3	1	2	2	2	2	2	2	1	3	2	3	2	3	2	3	3	0.589	166
166	3	1	1	3	1	2	2	2	2	2	2	1	3	2	3	2	3	2	3	3	0.589	166
184	1	1	1	3	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	3	2	3	2	3	0.542	184
131	3	3	2	3	3	3	1	3	3	3	3	3	2	2	2	3	2	2	3	1	0.773	131
131	3	3	2	3	3	3	1	3	3	3	3	3	2	2	2	3	2	2	3	2	0.747	131
136	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	1	1	3	2	3	2	3	0.657	136
136	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	2	3	3	2	3	3	3	3	3	0.633	136
138	3	1	2	3	1	1	3	3	1	3	3	2	3	2	2	3	3	3	3	3	0.615	138
138	3	1	2	3	1	1	3	3	1	3	3	2	3	2	2	3	3	2	3	2	0.615	138
166	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	2	2	3	2	3	3	3	0.589	166
136	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	3	1	3	2	3	2	3	0.657	136
136	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	3	2	2	3	2	3	2	0.657	136
138	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	2	2	3	3	2	3	2	0.642	138
138	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	2	2	3	3	2	3	2	0.640	138
138	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	2	2	3	3	2	3	2	0.615	138
167	3	2	1	3	1	2	2	2	2	2	3	2	3	2	3	2	3	3	3	3	0.611	167
168	3	1	1	3	1	1	3	3	1	3	3	2	3	2	3	3	2	3	3	3	0.594	168
130	3	2	2	3	1	1	3	3	1	3	3	2	2	2	2	2	3	2	3	1	0.717	130
130	3	2	2	3	1	1	3	3	1	3	3	2	2	2	2	2	3	2	3	1	0.690	130
129	3	2	2	3	1	1	3	3	1	3	3	2	2	2	2	2	3	2	3	1	0.629	129
131	3	2	2	3	1	1	3	3	1	3	3	2	2	2	2	2	3	2	3	2	0.617	131
136	3	1	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	3	3	3	3	0.630	136
131	3	3	2	3	2	2	3	3	1	3	3	2	2	2	2	2	3	2	3	2	0.746	131
136	3	2	2	3	1	1	3	3	1	3	3	2	3	2	2	2	3	2	3	2	0.644	131
136	3	1	2	3	1	1	3	3	1	3	3	2	3	2	2	2	3	2	3	3	0.631	136
138	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	3	0.588	138
139	3	2	2	3	1	1	3	3	1	3	3	2	2	2	2	2	3	2	3	3	0.611	139
149	3	2	2	3	1	1	3	3	2	2	3	3	1	2	3	2	3	2	3	2	0.596	149
136	3	2	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	2	3	2	3	2	3	2	0.671	136
136	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	2	2	2	3	3	3	3	0.657	136
138	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	2	2	2	3	3	3	3	0.668	138
139	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	2	2	2	3	3	3	3	0.621	139
138	3	1	2	3	1	1	3	3	2	2	2	3	3	2	2	2	3	2	3	2	0.694	138
148	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	3	0.690	148
147	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	3	0.629	147
138	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	3	0.682	138
138	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	2	0.675	138
158	3	1	2	3	1	3	3	2	2	2	2	3	3	2	2	2	3	2	3	3	0.641	158
147	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	3	2	3	3	0.677	147
152	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	3	0.774	152
152	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	3	0.747	152
153	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	2	0.701	153

表 C.3-3 最適化計算結果データ(第 10 世代)

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳	HRA	操作性	
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	3
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	3
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	18	11	16	13	7	3	2	3
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	3
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	3
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	3
17	1	9	19	2	3	20	15	5	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	1	2
17	1	9	19	2	3	20	15	5	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	1	2
17	1	9	19	2	3	20	11	8	10	14	6	4	12	5	7	13	16	15	18	3	1	2
3	2	1	20	13	6	9	5	15	10	4	16	8	14	19	7	11	17	12	18	3	1	1
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	6	18	4	8	14	13	7	11	12	16	10	3	2	2
17	1	9	19	2	3	20	11	8	5	6	16	4	13	10	15	14	12	7	18	3	1	2
17	1	7	19	2	3	20	11	8	10	14	6	4	12	5	9	13	16	15	18	3	1	2
17	1	9	19	2	3	20	11	8	10	14	6	4	12	5	7	13	16	15	18	3	1	2
3	2	1	20	13	6	5	9	15	10	4	16	11	14	19	7	8	17	12	18	3	1	1
3	2	1	20	13	6	5	9	15	10	4	16	8	14	19	7	11	17	12	18	3	1	1
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	18	14	6	7	11	16	13	8	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	18	11	16	13	7	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	1	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	1	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	1	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	1	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	12	8	14	6	7	11	16	13	18	3	2	2
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	8	14	12	7	11	16	13	18	3		

表 C.3-4 最適化計算結果データ(第 15 世代)

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳	HRA	操作性
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	17	14	11	6	7	12	16	13	18	0.620	126
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	16	14	11	6	7	12	17	13	18	0.620	126
7	5	9	19	2	3	20	15	1	10	8	12	4	14	6	17	11	16	13	18	0.575	127
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	7	12	4	14	6	17	11	16	13	18	0.575	127
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	7	6	4	14	12	17	11	16	13	18	0.551	128
7	5	9	19	2	3	20	15	1	10	8	6	4	14	12	17	11	16	13	18	0.551	128
7	9	1	19	2	3	20	15	1	10	8	6	4	14	12	17	11	16	13	18	0.551	128
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	14	17	12	6	18	11	16	13	7	0.506	135
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	14	17	12	6	18	11	16	13	7	0.623	126
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	17	14	11	6	7	12	16	13	18	0.620	126
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	14	11	17	7	12	16	13	18	0.596	127
7	9	5	19	2	3	20	15	1	10	8	12	4	14	6	17	11	16	13	18	0.575	127
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	7	6	4	14	12	17	11	16	13	18	0.551	128
7	1	5	19	2	3	20	15	1	10	7	6	4	14	12	17	11	16	13	18	0.529	136
7	1	5	19	2	3	20	15	1	10	8	6	4	14	12	17	11	16	13	18	0.529	136
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	14	11	17	8	12	16	13	18	0.596	127
7	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	6	14	11	17	8	12	16	13	18	0.596	127
7	9	5	19	2	3	20	15	1	10	8	6	4	14	12	17	11	16	13	18	0.551	128
7	1	9	19	2	3	20	15	1	10	8	6	4	14	12	17	11	16	13	18	0.529	136
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	16	14	11	12	7	6	17	13	18	0.623	127
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	15	14	17	12	6	18	11	16	13	7	0.580	128
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	14	6	4	11	17	7	12	16	13	18	0.554	129
7	1	9	19	2	3	20	15	1	10	8	12	4	14	6	17	11	16	13	18	0.553	135
8	5	9	19	2	3	20	15	1	15	10	7	6	4	14	12	17	11	16	13	0.551	146
3	2	1	20	13	6	9	5	15	10	4	16	8	19	14	7	11	17	12	18	0.542	184
7	5	6	19	2	3	20	15	1	10	8	12	4	14	6	17	11	16	13	18	0.575	127
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	14	17	12	6	18	11	16	13	7	0.623	126
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	16	14	11	6	7	12	17	13	18	0.620	126
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	17	14	11	6	13	12	16	7	18	0.619	126
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	7	12	4	14	6	17	11	16	13	18	0.575	127
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	17	14	11	12	7	6	16	13	18	0.623	127
7	1	9	19	2	3	20	15	1	10	4	17	14	11	6	7	12	16	13	18	0.598	134
7	1	9	19	2	3	20	15	1	10	8	12	4	14	6	17	11	16	13	18	0.553	135
8	5	9	19	2	3	20	15	1	15	10	7	6	4	14	12	17	11	16	13	0.551	146
8	5	9	19	2	3	20	15	1	15	10	7	6	4	14	12	17	11	16	13	0.575	145
7	5	9	19	2	3	20	15	1	10	8	12	4	14	6	17	11	16	13	18	0.575	136
8	5	9	19	11	3	20	15	1	10	4	17	14	2	6	7	12	16	13	18	0.677	148
7	5	9	19	11	3	20	15	1	10	8	12	4	14	6	17	2	16	13	18	0.633	149
8	5	9	19	11	3	20	15	1	10	7	6	4	14	12	17	2	16	13	18	0.809	150
17	5	9	19	2	3	20	15	1	6	18	4	8	14	13	7	11	12	16	10	0.817	131
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	14	17	12	13	18	11	16	6	7	0.825	127
3	2	1	20	13	6	5	9	15	10	4	16	11	14	19	7	8	17	12	18	0.568	184
3	2	1	20	13	6	5	9	15	10	4	16	11	14	19	7	8	17	12	18	0.568	184
8	1	9	19	2	3	20	15	5	10	4	16	14	11	7	7	12	16	13	18	0.574	135
8	1	9	19	2	3	20	15	5	10	4	16	14	11	6	7	12	17	13	18	0.597	134
8	1	9	19	2	3	20	15	5	10	4	14	17	12	6	18	11	16	13	7	0.800	134
17	5	9	19	2	3	20	15	1	10	8	6	4	14	12	7	11	16	13	18	0.811	130
8	5	9	19	2	3	20	15	1	10	4	17	14	11	12	7	6	16	13	18	0.623	127
3	2	1	20	13	6	9	5	15	10	4	16	8	14	19	7	11	17	12	18	0.541	184
3	2	1	20	13	6	9	5	15	10	4	16	8	19	14	7	11	17	12	18	0.542	184



## Appendix D 操作性評価計算詳細

Appendix D では 3 章および 4 章の操作性評価(ゾーン 1, 2, 3 等)に用いた検討用フライトデッキおよび操作可能範囲の設定根拠を示す。本研究では検討例として、以下に示すように公共文書等に表示される値を用いてフライトデッキの各種寸法を定めた。

- ・デザイン・アイ・ポイント(DEP: Design Eye Point)やシート・レファレンス・ポイント(Seat Reference Point)に基づく操縦機器配置やオーバーヘッドパネルまでクリアランス等の主要寸法は ARP4101[89]に示される推奨値を適用した。
- ・パイロットシートの寸法や左右の座席間隔については ARP4101/1[90]および MIL-STD-1333B[30]に示される推奨値を適用した。
- ・コントロールパネルの大きさは MIL SPEC MS25212C[91]に示される推奨値を適用した。
- ・パイロットの手足の長さ等のヒューマン・スケールは、最も厳しい条件として日本人女性 5%[10]の値を適用した(表 D-1 参照)。
- ・デザイン・アイ・ポイントからの内部視界については、主要な計器が容易に見えるよう配置することが求められており、AC25-11B[6]に示される推奨値を適用してディスプレイの位置を設定した(図 D-1 参照)。
- ・デザイン・アイ・ポイントからの外部視界については、運用限界内の全てのマヌーバが安全に遂行できるよう十分広い視界を確保することが要求されており、AC25.773-1[92]に示される推奨値を適用した(図 D-2 参照)。また、Human Factors Design Standard[93]に示される表示系までの最小値をグレアシールドまでの距離として適用した。

以上の前提条件より設定した検討用フライトデッキの寸法を図 D-3 に示す。また、図 D-4 にゾーン 1, 2, 3 の条件における腕の到達範囲の計算結果と根拠を示す。図 D-4 に示す計算結果(各パネル上の代表点に対して操作可能範囲を計算)から、図 3.6-2 のパイロットの操作範囲を定め、図 4.6-1 に示す各ゾーンの位置と個数を設定した。

表 D-1 ヒューマン・スケール ([10]より作成)

Dimension[mm]	寸法[mm]	Western Male		Western Female		Japanese Male		Japanese Female	
		5th%	95th%	5th%	95th%	5th%	95th%	5th%	95th%
Stature	身長	1675	1897	1543	1744	1560	1750	1450	1610
Sitting eye height	座面から目線までの高さ	785	882	699	799	735	835	690	780
Acromial height	座面から肩までの高さ	571	677	520	612	545	635	510	600
Vertical functional reach	座面から上方に伸ばした拳までの距離	1284	1481	1147	1324	1105	1265	1030	1160
Forward functional reach	背中から前方に伸ばした拳までの距離	730	854	680	804	630	750	570	670

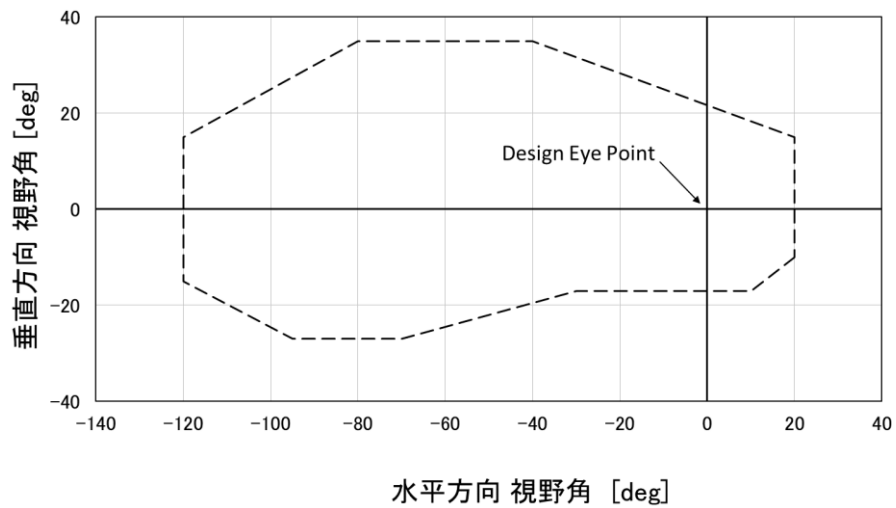


図 D-1 外部視界要求([92]より作成)



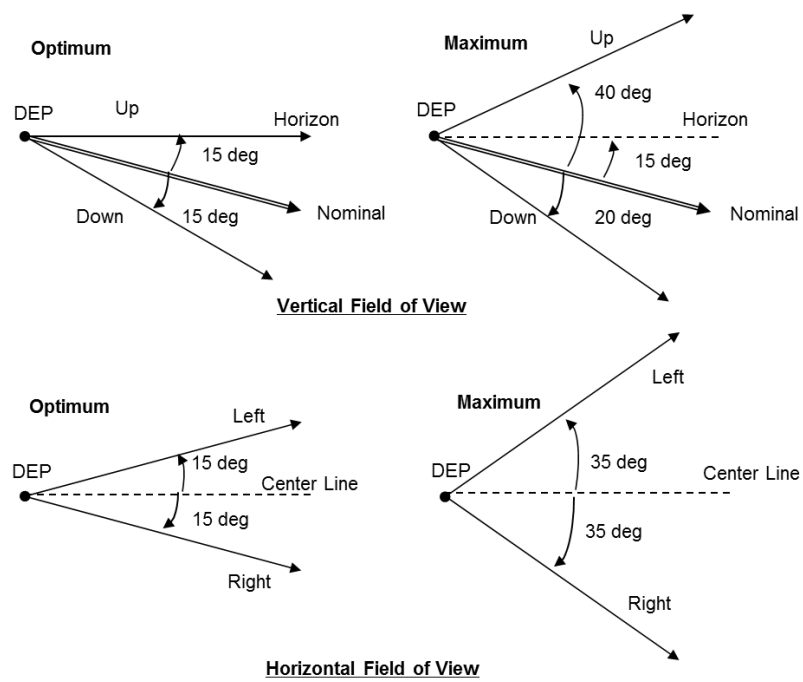


図 D-2 内部視界要求(Primary Field of View) ([6]より作成)

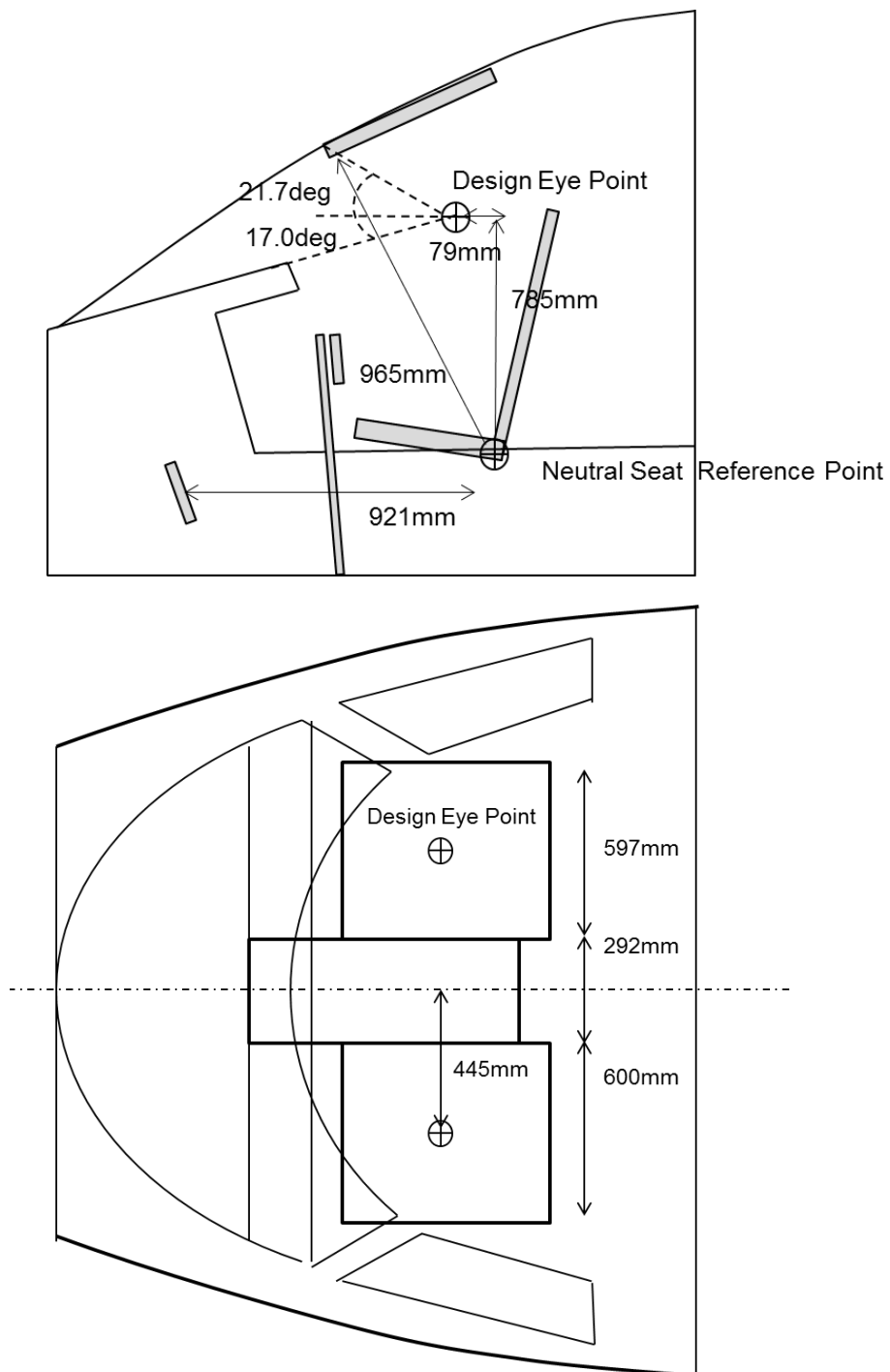


図 D-3 操作性評価用フライトデッキ寸法

フリディッキ上の計算ポイント		計算ポイント概要図		座標 [mm]		設定根拠/源泉資料		パイロット肩からの距離 [mm]		腕半径 [mm] (日本人女性5%)		到達ゾーン判定	
記号	名称	後方が正 X	側方が正 Y	前方が正 Z	高さ方向が正 Z			ゾーン1	ゾーン2	ゾーン3	ゾーン2.3		
	原点	0.0	0.0	0.0	0.0	機体中心線上で左腕DEP(Design Eye Point)に並行な点 445mm = 575mm(標準ハネルサイズ MS25212C[88]) +59.7mm(標準シート間隔 ARP4101/1[87]) / 2		520	599				
G1	DEP(Design Eye Point)(参考)	0.0	-445.0	0.0	0.0	ARP4101[86], ヒューマン-カー[10]							
G2	NSRP(Neutral Seat Ref Point)(参考)	79.0	0.0	-785.0	0.0	ARP4101[86]							
M1	フラットヘッド中心(参考)	-841.8	-445.0	-1039.0	-1039.0	ARP4101[86]							
M2	グレアシェルド DEP正面	-315.6	-445.0	-96.5	-96.5	HFD[90], AC25-11B[6], Zone3でのDEPとする		382				1	
M3	グレアシェルド 機軸上	-315.6	0.0	-96.5	0.0	HFD[90], AC25-11B[6]		409				3	
S1	主計器パネル DEP正面	-549.9	-445.0	-317.5	-317.5	HFD[90], AC25-11B[6]		601				3	
S2	主計器パネル 機軸上	-549.9	0.0	-317.5	0.0	上記より		618				2	
S3	主計器パネル 左端	-549.9	-743.0	-635.0	-635.0	サイドコンソール右端と同じとする		576				2	
O1	サイドコンソール 左端	-549.9	-743.0	-635.0	-635.0	センターベデスタル端とする		721				3	
O2	サイドコンソール DEP正面(参考)	0.0	-743.0	-635.0	-635.0	Xは主計器パネルと同じ。YはARP4101/1[87]		440				3	
O3	オーバーヘッドパネル 機軸上端	-279.1	0.0	-111.1	-111.1	MS25212C[88] パネル2枚		466				到達不可	
O4	オーバーヘッドパネル 下左端	-279.1	-292.0	-111.1	-111.1	AC25-11B[6] ARP4101[86], ヒューマン-カー[10]より		600				到達不可	
O5	オーバーヘッドパネル 下右端	-279.1	-292.0	-111.1	-111.1	上記を平行移動		449				1	
O6	オーバーヘッドパネル 上左端	-279.1	119.2	-292.0	-292.0	MS25212C[88] パネル2枚		473				2	
O7	オーバーヘッドパネル 上右端	-279.1	119.2	-292.0	-292.0	MS25212C[88] パネル2枚		461				2	
C1	センターベデスタル 機軸上端	-549.9	0.0	-635.0	-635.0	上記を対称		526				到達不可	
C2	センターベデスタル 機軸 DEP 並行	0.0	0.0	-635.0	-635.0	MIL-1333B[30]より UNSRP 高さ+150mmとする		740				到達不可	
C3	センターベデスタル 機軸 上左端	-549.9	-146.0	-635.0	-635.0	主計器パネルと同じとする		392				3	
C4	センターベデスタル DEP 並行左端	0.0	-146.0	-635.0	-635.0	MIL-MS25212C[88] パネル1枚		467				3	
C5	センターベデスタル 機軸 上右端	-549.9	146.0	-635.0	-635.0	上記より		700				3	
C6	センターベデスタル DEP 並行右端	0.0	146.0	-635.0	-635.0	上記より		673				3	
								712				到達不可	
								882				到達不可	
								755				3	
								537				3	
								721				3	
								440				3	
								466				3	
								601				3	
								581				3	
								601				到達不可	



図 D-4 操作性評価解析 結果詳細