

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 旅客機事故

旅客機事故の変遷

1902年にライト兄弟が初の動力飛行を行って以来、航空機は時代と共に大幅な進歩を遂げた。エンジンや構造が強化され、高い性能を持った翼型が開発されてきた。その結果、飛行性能は向上し航空機は郵便貨物や旅客輸送などの実務に使用されるようになった。第2次世界大戦後は国際交流の活発化と共に旅客需要が急増していった。Fig.1.1, 1.2は1958年以降98年までの、1年間あたりの運航便数、運航時間数、輸送旅客数を記したものである^[1]。一時若干の落ち込み時期があるものの運航便数、運航時間数、輸送旅客数は順調に伸び続けており、今後もこの傾向は続くものと見込まれている。そのため世界各国、特にアジア地域では空港建設が活発化している。

このように航空輸送は好況を呈しているが、一方で航空機事故の人的・物的な損失は大型化している。特にBoeing 747型機（通称 ジャンボ）に代表されるワイド・ボディー（広胴型）の大型旅客機が竣工してからは単一の事故でもたくさんの人命が失われるようになった。1985年におきた日本航空123便の群馬県多野郡上野村山墜落事故は500人以上の人命が失われ、今でも遺族や航空関係者の心に深い爪あとを残している。旅客機の大型化の動きは今後も続くものと思われ、Airbus A3XXなどの600, 700人乗りの超大型旅客機の構想も始まっている。このような大型旅客機でひとたび事故が発生すると甚大な損失が発生することが予想される。

Fig.1.3は1960年以降95年までのジェット旅客機の全損事故率を示したものであり^[2]、1960年代に比べると近年全損事故率は大幅に減少していることが分かる。これはエンジンの信頼性の向上や、機体構造設計技術の向上、整備・管理技術の発展、安全技術の蓄積などによるものである。特に半導体技術の進展は機体の信頼性向上に大きな寄与をもたらした^[3]。半導体は寿命が長く、機械的な動作をするスイッチ類が電子回路に置き換えられることで、摩耗や固着などの心配が無くなり、機器は小型化し信頼性が大きく向上した。しかしながらFig.1.3は1970年代後半以降、全

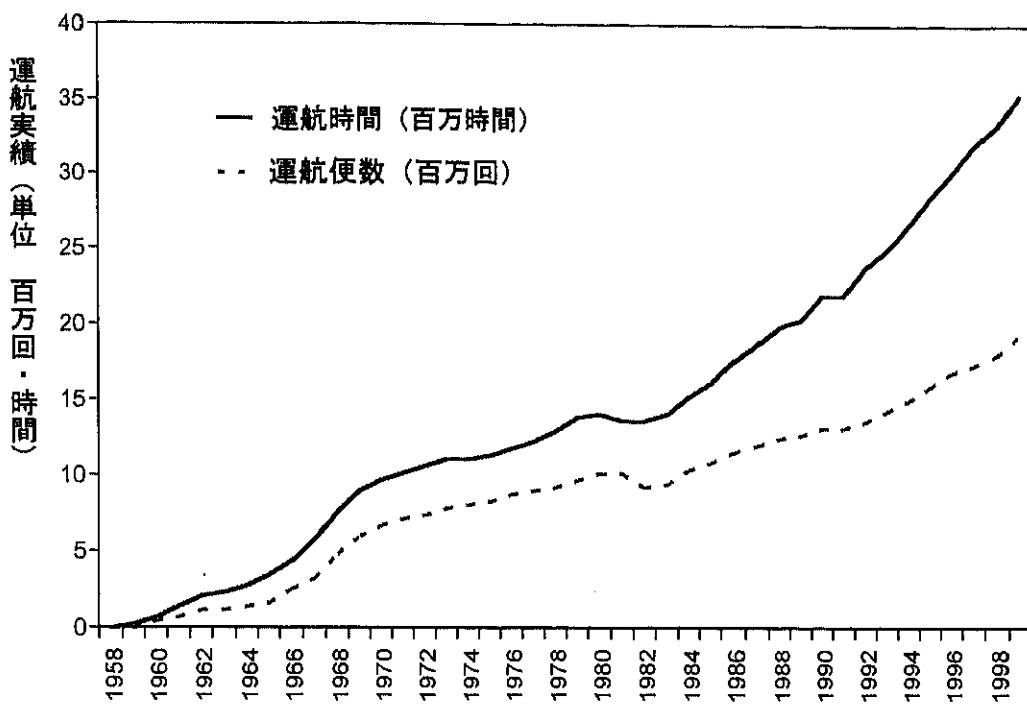


Fig. 1.1: 運航便数／運航時間数 (1958 – 1999) [1]

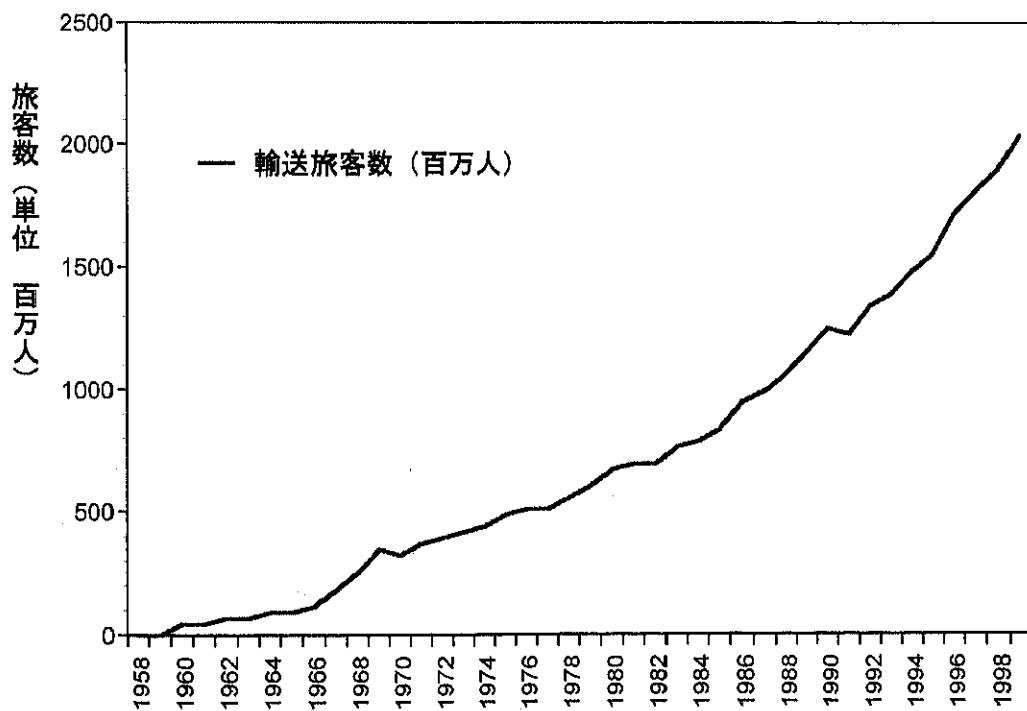


Fig. 1.2: 輸送旅客数 (1958 – 1999) [1]

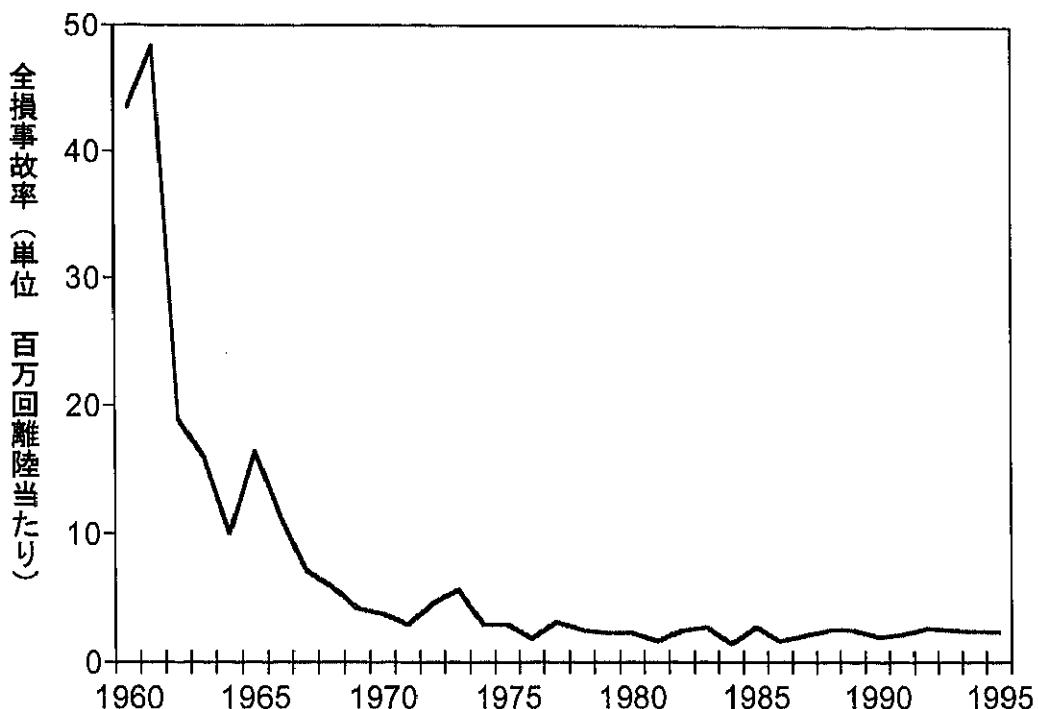


Fig. 1.3: 世界の商用ジェット旅客機の全損事故率（100 万回離陸当たりの発生件数） [2]

損事故率に大きな変化がないことを示している。Fig.1.1 が示唆するように運航便数は今後も伸び続けることが予想されるため、このままでいくと将来は年間の事故発生件数は現在よりも増えることが予想される。21世紀前半には現在の倍以上の全損事故が発生するとの予想もある^[4]。ひとたび航空機事故が発生すると、多くの人的物的な損失が発生し、人々の航空輸送に対する不信感が増大する。このような状況が繰り返されると航空輸送に対する社会の受容性をも揺るがしかねない。従って停滞している全損事故率の減少を図らなければならない。

人的因子

世界の航空機全損事故の事故原因は Fig.1.4 に分類される^[4]。Fig.1.4 によれば、1959 年以降からの事故原因の割合と、最近の 10 年間（1985 – 1994）での事故原因の割合には大きな違いがないことが分かる。両者共に事故原因の第 1 位はパイロットのエラーによるものである。このような人間の誤判断に起因する事故要因を人的因子（Human Factor）という^[4]。第 2 位は機体設計の失敗やエンジン故障など航空機側の問題に起因した原因である。この調査結果は事故率を減少する上で、パイロットのエラーを防止することが有効であることを示している。

しかしながら、このような結果からパイロットの注意不足、資質不足を問題視し、パイロットに

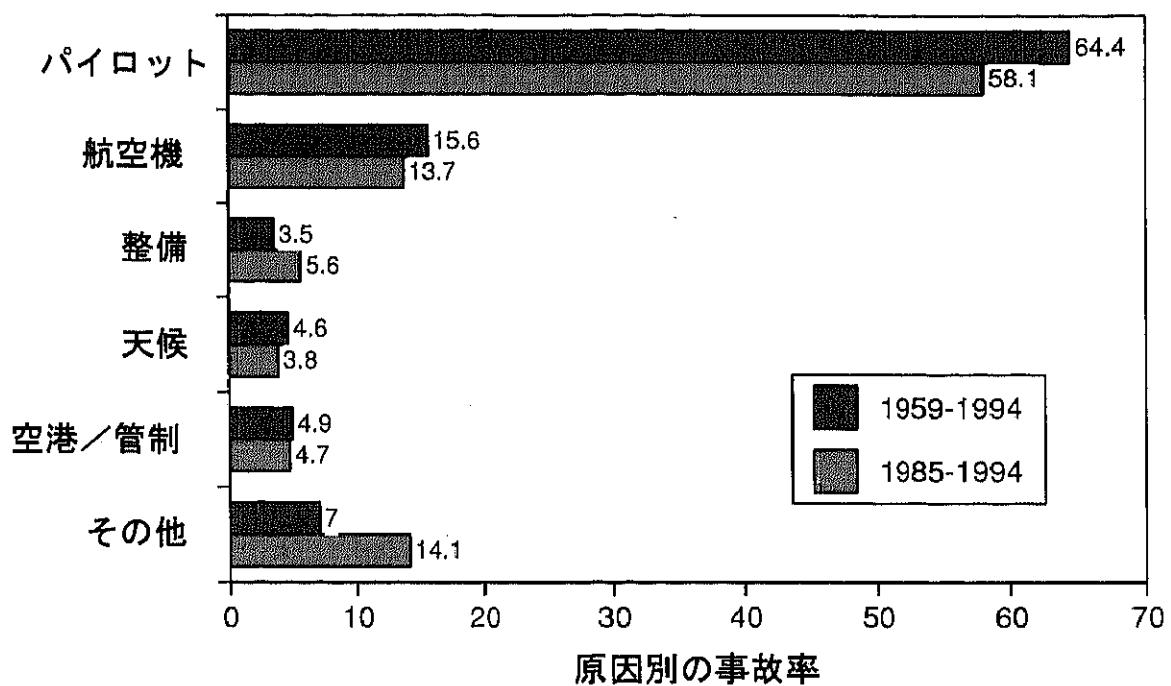


Fig. 1.4: 世界の航空機全損事故の事故原因 [4]

責任を帰着するだけでは問題の本質的な解決にはならない。なぜなら我々人間は日常的にエラーを犯しており、たまたま事故に至る事象の連鎖（Chain of Events）が重なったとき、事故が発生するからである。特に近年の航空機は大規模複雑なシステムの中で運航されており、単純に事故の原因をパイロットに帰着することはできない。例えば、旅客機は増大する旅客需要に応えるため、緻密に組まれたスケジュールのもとで運航される。しかし天候が悪化した場合、ダイヤに乱れが生じることがある。こうした要因がパイロットの精神状態にプレッシャーやストレスなどの影響を及ぼす。また旅客機を構成するシステムは旅客機の大型化と共に増えており、結果としてハードウェアやソフトウェアに起因する問題は多様化している。こうした大規模複雑化した旅客機のシステム管理をパイロットは求められている。更に旅客機はパイロット一人で運航されているわけではなく、運行乗務員、客室乗務員、管制官など多人数が協調して運航にあたっている。この運航チーム内の人間関係は不变ではなく、それが各クルー同士で相互作用を及ぼしあっている。こうした多様な要因が絡み合った結果、問題が発生したとき、通常の状況であれば行えた対処がなされず、事故になることがある。そこで人的因子に関わる要因を詳細化する。

シェルモデル 人的因子にかかる様々な要因を明確にすべく、意思決定・行動の主体者であるパイロットを中心として、パイロットに関わる様々な要因との関連をモデル化したものとして「SHEL

モデル」が提唱されている^[5]。SHEL モデルは Fig.1.5 のように描かれる。各セルはそれぞれ L:

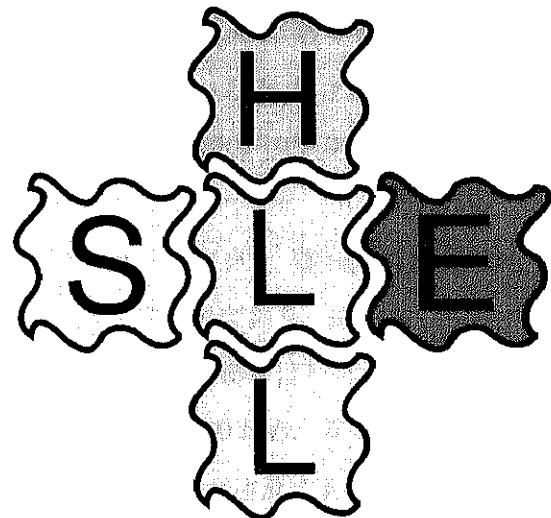


Fig. 1.5: SHEL モデル概念図^[5]

Liveware (パイロット, 人間), H: Hardware, S: Software, E: Environment を示している。各セルの境界線が波打っているのはその接面 (Interface) に不具合があることを示す。中心にある「L」が主体のパイロットを示す。パイロットと周囲のセルが良好な関係を築いていき、接点を滑らかにしていくことが人的因子の改善につながる。航空電子工学 (Avionics)^[6]、コンピュータの進歩により旅客機に自動化が取り入れられてきた。そしてコンピュータ上に実装されているソフトウェアに組み込まれた論理 (Logic) が旅客機の様々なシステムを動かしている。ところが近年、このソフトウェア（自動化システム）とパイロットの不整合に起因した事故が見られるようになってきた。そしてこれが近代化した旅客機における人的因子として注目されるようになった^[7, 8, 9]。すなわち SHEL モデルにおける中央の「L」と「S」との接合面がうまくかみ合っていないことが、自動化に起因した様々な問題を引き起こしている。そこでパイロットと自動化システムの関係を明らかにするために、旅客機自動化の変遷を俯瞰してみる。

1.1.2 旅客機の自動化

旅客機は第2次世界大戦後、より高い安全性、就航性、経済性を確保すべく自動化が推進されてきた。自動化機能の増加とその機能同士の結合具合により、旅客機は現在までに4つの世代に分類される^[10, 11]。

第1世代

1950年～60年に竣工した旅客機が属するのが第1世代機である。代表的な機体としては De Havilland Comet や Boeing 707, Douglas DC8 などがある。これらの機体はジェットエンジンを搭載し与圧されたキャビンを持つ。自動化システムはパイロットや計器着陸装置 (Instrument Landing System: ILS) の指示をもとにエレベータ（昇降舵）やラダー（補助翼）を動かし、機体の姿勢を保持する機能がライト・ディレクター（Flight Director）として実現された。しかし自動化システムで運用できる状況はごく限られており、依然としてパイロットが操縦の主体であった。またエンジンの点火や出力制御、燃料流量制御等はパイロットや航空機関士（Flight Engineer）が手動で行っていた。機体状態の監視や制御のため、第1世代のコックピットの中は多くの計器によって埋め尽くされた。航空計器は機械式が主流であり故障も多かった。

第2世代

第2世代機は1960年～70年代前半に竣工した Boeing 727, B737-100, B747, Douglas DC9, Lockheed L-1011, Airbus A300 に代表される。自動化システムの導入が第1世代よりも更に進み、ダッチ・ロールを防止するためのヨー・ダンパー（Yaw Dumper）やマッハ数増加に伴い発生する機首下げ運動（タック・アンダー）を防止するためのマッハ・トリム（Mach Trim）など、航空機の安定性を人工的に改善する自動化システムが導入された。また着陸時に計器着陸装置と併せて、引き起こし（Flare Out）を自動制御することで完全自動着陸が可能になった。更に航法システム（Navigation System）とリンクしたオート・パイロット（Auto Pilot）が導入されパイロットの負荷はより軽減されるようになった。このような自動化が機体の巨大化、航路の長大化を支え、Boeing 747 のように500人以上の乗客を輸送することが可能になった。またこうした大量輸送が可能になったことが旅客運賃の引き下げにも寄与することになり、航空輸送の大衆化が進んだ。第2世代機は第1世代機よりも自動化が多く取り入れられており、自動化システムへ指示を与えるノブ等がコックピット内に追加されたが、全体的なコックピットの様子は第1世代機のものと大きな差はない。

第3世代

1970年代後半～80年代前半に登場した McDonnell Douglas MD80 や Boeing B767, Airbus A310 が第3世代に属する。自動化が日常運航の大部分に浸透し、飛行状態に適したエンジン出力

を自動的に調整するオート・スロットル（Auto Throttle）や着陸復行（Go Around）の自動化などが取り入れられた。その結果、自動化システムは飛行の状態に合わせて様々なモード（Mode）を備えるようになった。ただしオート・パイロットは機体の姿勢制御のみの機能を有し、オート・スロットルは所定のモードに応じた動作をするのみであり、機体の運航状態に応じた自動化システム同士の連携はなされてはいなかった。従ってオート・パイロットとオート・スロットルが望ましくないモードでの組み合わさり、発生した事故事例もある^[12]。また航法の自動化システムであるフライト・ディレクターの機能もオート・パイロット、オート・スロットルからは完全に独立したものとなっていた。エンジン制御の自動化が進んだことにより航空機関士の搭乗が不要となり、A310ではパイロット2人の運航が可能となった。第3世代機では従来の機械式計器に代わってCRT（Cathode Ray Tube）による統合化された計器情報の表示法が取り入れられた。その結果としてコックピット内の計器の数は、それ以前の世代のものに比べ大幅に減少した。また計器の電子化により信頼性が向上した。第3世代機では多くの自動化が取り入れられた結果、パイロットの仕事はそれまで四肢によって操縦することから「Plan Do See」（計画し、実行し、モニターすること）へと変わっていった。

第4世代

1980年代後半から現在までに登場した機体でAirbus A320、Boeing B747-400、B777等が第4世代に属する。第4世代機ではオート・スロットルはエンジン故障などの異常事態を除き全ての飛行フェーズにおいて使用が可能な能力を有しており、パイロットはエンジン操作をしなくとも良い。またオート・パイロットは離陸時を除く、上昇下降を含む全てのフェーズで使用が可能となった。更に飛行管理システム（Flight Management System: FMS）が効率的な航路を決定しオート・パイロットやオート・スロットルと連携して航行することが可能になった。第4世代機は飛行管理システムを頭脳としたオート・パイロット、オート・スロットル等下位レベルの自動化システムを統合する階層型の制御形態として記述される。パイロットはキーボードやボタンやノブを介して飛行管理システムに指示を与える、自動化システムが任務を遂行するのを監視することが主な任務となった。このような技術をAirbus社は「Push Button Technology」と呼んでいる。また機械式計器はコックピットからほとんど姿を消し、CRT、液晶画面による統合化された計器情報表示が主流となった。こうしたコックピットを持つ航空機はグラス・コックピット機と呼ばれる^[6]。昇降舵や方向舵等の舵面操作はそれまではパイロットの人力を油圧によって増強することで行われていた。しかしA320やB777では操縦機器への入力を電気信号に変え、ケーブルを介して舵面

付近にあるアクチュエータに送り、舵面を動かすフライ・バイ・ワイヤー (Fly by Wire: FBW) 方式が導入された [13]。フライ・バイ・ワイヤー方式は軍用機では以前から採用されていたものの、民間機では安全性の面からそれまで採用されなかった。これはコンピュータの誤作動などが発生した場合、人力を介さない操縦では機体が制御不能になる恐れがあるからである。しかしコンピュータの信頼性向上により安全面の不安が許容されるレベルにまで下がった。このように最新の第4世代機では電気信号による機体の制御と情報技術が随所に取り入れられている。

旅客機の自動化と事故の関係

旅客機の世代毎の事故率を示したのが Fig.1.6 [11] である。どの世代も運用年数が経つにつれ、事故率が低減していく傾向にある。古い第1、2世代機の事故率は第3、4世代機よりもかなり高い。これは第1、2世代機は第3、4世代機よりも技術的には古く、機器の信頼性が低かったことが原因であると思われる。新しい世代の旅客機では機器の信頼性が上がり、故障が発生しにくくなつたことで事故の発生件数は少なくなるものと思われるが、第4世代機は高度に自動化され高い安全性をうたわれて登場したにもかかわらず、第3世代機よりも未だに全損事故率が高く、安定状態に入っていない。このことは単に自動化が多く取り入れられているだけでは事故を低減するのに不十分ではないか考えられる。そこで次に旅客機の自動化がパイロットのタスクをどのように変化させたのかを考える。

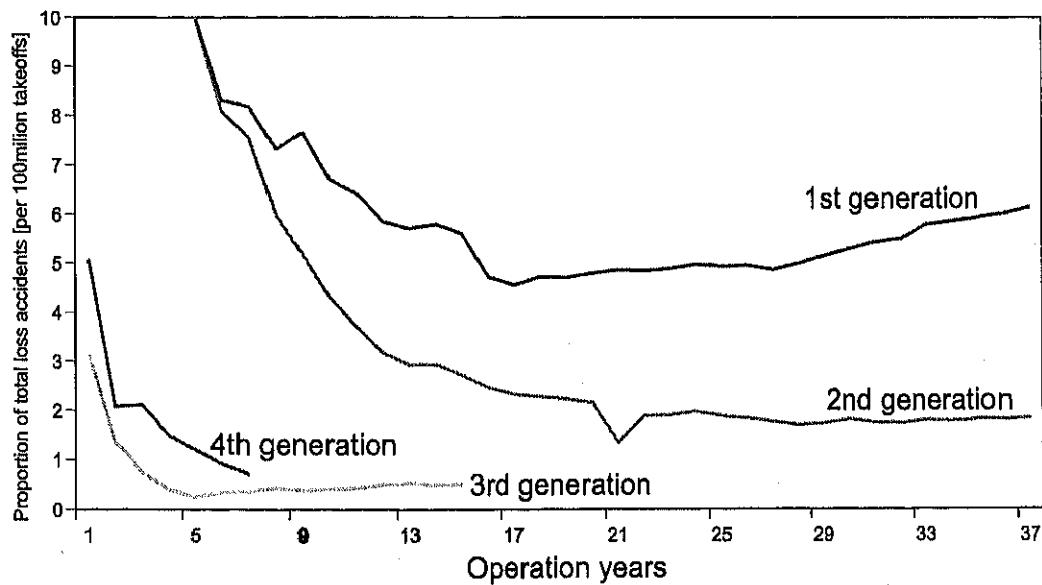


Fig. 1.6: ジェット旅客機の世代別全損事故率 (100万回離陸当たりの発生件数) [11]

パイロットのタスク

第3世代機まではパイロットは、油圧による倍力装置の関与はあるものの、基本的に自分の力によって舵面を制御していた。そのため舵面から伝わる気流の流れが操縦輪を通してパイロットの触覚を刺激し、計器情報以外の情報をパイロットは得ることができた。このような直接操作によりパイロットは機体を制御していた。また各種の自動化システムが取り入れられているものの、第3世代機まではそれらは結合されておらず、パイロットが機体の状態に合わせて適切なモードを選択する必要があり、自動化システムへの積極的な介入が必要であった。更に自動化システムの運用性、信頼性も低かったため、自動化システムを解除（Disengage）するためには、解除スイッチを押すほかに、操縦輪に一定値以上の力を加えることでも操縦権限をパイロット側に簡単に移行できるようになっていた。自動化システムの信頼性が向上した現在でもBoeing社の機材はこのような解除方式を実装している。

第4世代機になると、飛行管理システムを頂点とする階層制御が実現された。パイロットは飛行管理システムに達成すべきタスクを指示した後、飛行管理システムは下位レベルの自動化システムに指示を与える^[14]。パイロットの役目はタスク指示後、機体が正常にタスクを遂行していることを監視することである。もし運行計画に変更が生じた場合や、異常事態が発生した場合は、パイロットは飛行管理システムに新しい指示を与えたり、あるいは自動化システムを解除してマニュアルで機体を制御する。このような制御形態を監視制御（Supervisory Control）^[15, 16]という。監視制御システムにおける人間の役割は、SheridanによればFig.1.7のように5項目に分類される^[17]。

1. 機械系に与える任務を計画する
2. 適切な目標、考慮すべき条件、取るべき行動の系列、観測すべき項目、人に制御を返すべき異常事態などをコンピュータに教示する
3. タスクの自動的実行を監視し、異常の有無を調べる
4. 制御を取り戻す必要が生じた場合や、コンピュータへの教示をやり直す必要が生じた場合には制御に介入する
5. 経験から将来のための教訓を学習する。

環境を完全に統制できる自動工場のような例を除いて、現代の先端技術を活用したシステムのほとんどは監視制御システムになっている。旅客機の監視制御化によりパイロットの役割は操縦者から監視者へと変化した。そのためパイロットは操縦だけでなく、システム・マネージャーとして

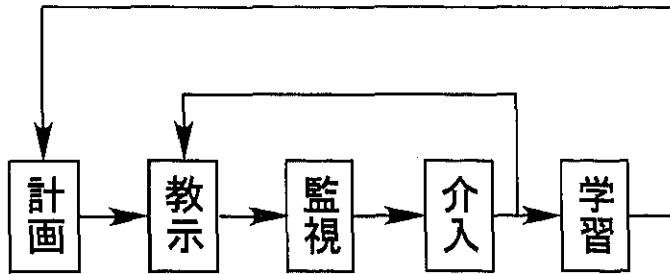


Fig. 1.7: 監視制御システムにおける制御ループ [17]

の資質も求められるようになった。

自動化の皮肉

高度に自動化された現在の旅客機でもコックピット内は無人ではない。たとえ最新の第4世代機でも自動化システムで運航中、設計時に想定され対処がプログラム化されているのは現実に起ころる事態の一部に過ぎず、実際には自動化システムで対応できない正常運航からの逸脱は頻繁に発生する [11]。そこで事故にならずに済むのは、自動化システムを監視するパイロットが適宜介入し、手動操縦を行うことで対処しているためである。従って自動操縦が運航の大半で可能であつても、現実に起ころる事態との整合性を保つ上で、運行の安全にとってパイロットの柔軟な判断能力が不可欠である。また設計者が生み出し運航まで見つけられなかったシステムの潜在する人的エラー（コンピュータ・ソフトウェア作成時における Bug の混入など）に対処する役目さえもパイロットは期待されている。このような役目を総してパイロットは「安全の最後の砦」と呼ばれる [11]。特に旅客機は代替の効かない「人間」を運ぶ使命を有するため、単に経済的な理由だけで自動化すべきではなく、パイロットが旅客機の運航安全を直接担わなければならない。高い信頼性を有するとはいえない人間を超える能力と信頼性を期待して導入されてきた自動化システムは、監視者でありオペレータである人間の存在を仮定しなければ実運行することができない。これは自動化の皮肉 (Ironies of Automation) [18] である。

自動化のパラドックス

初期のジェット旅客機では、操縦士、副操縦士の他にエンジンを管理する航空機関士、航法を担当する航法士が搭乗していた。しかし自動化により旅客機乗務員の省力化が進み、第3世代機 Airbus A310, Boeing 767 以降は操縦士、副操縦士の 2 メン・クルート体制が一般的になつた。これ

はエンジン管理、航法を自動化することでより効率的な運行が可能になったためである。しかし自動化が進んでもコックピットに残った2名のクルーの仕事が楽になったわけではない。航空機関士の役目がエンジンの自動制御システム FADEC (Full Authority Digital Electronic Control) [19, 20] に移行し、あるいは航法士の役目が飛行管理システムや航法システムへと移行した結果、残されたパイロット達に対して以前よりも厳しく高度な要求がされるようになった。それはエンジン管理にしろ、航法にしろ自動化システムへ指令を与えるためにはパイロットはそのシステムの概要を把握しておかねばならず、しかも自動化システムは柔軟に判断するわけではないので、指令を与えるための正しい手順を記憶しなければならない。また自動化システムへの指令の入力はキーボードやノブなどのボタンを操作することによって行われるが、入力手順や命令を間違えると自動化システムは正しく指令を受けない。それどころかもし誤ってはいるものの存在する別の命令が入力され、パイロットが過ちに気づかなかった場合、機体はパイロットにとって予期せぬ挙動を取ることになる。自動化によりパイロットの肉体的な負担は軽減された一方で、自動化システムへの監視監督が求められるようになり、精神的な負担すなわちメンタル・ワークロード (Mental Workload) は増加した。アプローチから着陸までは管制官とのやり取りや着陸準備、様々な機器の操作などでもともとワークロードが高かった。自動化によって一部の操縦は自動化システムにゆだねられたものの、パイロットのすべきことは依然として多く、更に自動化システムのモードの選択や監視という任務が加わった結果、着陸時のワークロードが一層高まる場合が出てきた [21]。航空機は巡航状態から着陸するまでに様々な自動化システムのモードを選択しなければならないことがあり、それがモード・エラー [22] を犯す原因にもなる。人間の関与を減らして信頼性や効率を上げるべく自動化されたにもかかわらず、監視している人間がかえってエラーを誘発する環境ができた。これは「自動化のパラドックス」 [21] と言われる。

Complacency

直接制御から監視制御へと移ったパイロットの任務は、機体が正常に任務を遂行していることを計器類を通して監視することである。新しい世代の旅客機になるに従い、自動化システムの信頼性、運用性は高くなった。その結果、自動化システムに対する警戒心 (Vigilance) が薄れ、自動化システムへの過信 (Overtrust) が生じ易い環境になった。自動化システムへの過信とは、自動化システムの能力、信頼性に対して持つオペレータの信頼感 (Trust) が適切なもの以上の状態をいう。自動化システムに対する過信からオペレータの警戒心が欠如する状態は Complacency^[23] と呼ばれている。Complacency が発達すると積極的なモニタリング意欲が低下し、パイロットに

本来求められている柔軟な判断力を奪い去ることにつながる。

Automation Surprise

Complacent なパイロットは計器情報や風防から得られる外界情報に対して感度が鈍くなる。一方で自動化システムは休み無く働き続ける。もし機体の状態がそれまでのモードで対応しきれなくなると、上位の自動化システムがモードを変える（Mode Reversion）ことがある。このようなモード変化は PFD (Primary Flight Display) 等にテキスト・メッセージとして通知される^[24]。もしパイロットがこの通知を見逃した場合、自動化システムの行動が予期せぬ挙動となってパイロットを驚かせる。このような自動化システムの予期せぬ挙動に人間が混乱することを Automation Surprise^[25, 26, 27, 28] という。また現在の自動化システムのモードが分からなくなり混乱することをモード・コンフュージョン（Mode Confusion）という^[29]。Automation Surpriseを受けたパイロットは、場合によっては正常な判断能力を喪失する。その結果、誤った自動化システムの解除法に執着したり、不適切な自動化システムのモードを選択して機体の回復が遅れる事態が生じる。

- 中華航空 Airbus A300-600R, 名古屋空港, 1994^[30]

手動操縦でアプローチの最中、副操縦士が誤って着陸復行のゴー・レバーを作動させた。このためゴー・アラウンド・モードが起動し、推力が増加し機首上げが生じた。乗員はゴー・アラウンド・モードを解除しないまま着陸経路に戻るべく、着陸（LAND）モードに変えようとしたが、ゴー・アラウンド・モード作動中はこれは無効な操作であった。パイロットは着陸モードが有効にならない理由が理解できないまま、操縦桿を倒し機首下げ操作を行った。その結果、自動化システムはパイロットの機首下げ入力を外乱とみなし、機首上げすべく水平安定板を操作した。水平安定板の機首上げ効果は強力で、パイロットは機体の姿勢を適正なものにすることことができなかった。ゴー・アラウンド・モード起動中は、パイロットが操縦桿を動かすことは危険であることが以前から警告されていたが、パイロットはその事に気づかなかった。その後パイロットは自動化システムを解除したが、機体の状況はすでに危険な状態にあり、失速して墜落した。

もし機体に異常が発生していても自動化システムが巧みに操縦していた場合、パイロットは異常の重大さに気づかないことがある。このことはパイロットからすれば、自動化システムによる異常の隠蔽とも取れる事態になる。このような状態でパイロットが自動化システムから操縦権限を引き継いだ（Takeover）場合、パイロットはその制御の困難さから機体が一気に危険な状態に

陥ることになる (B747, サンフランシスコ沖, 1985 等)。

現在のパイロットと自動化システムの情報のやり取りは十分ではなく、人間－自動化システムのインターフェースの改善が望まれる。このことは CRM (Crew Resource Management) [31] の改善という立場からも論ずることができる。すなわちコックピットにおける操縦士、副操縦士、航空機関士、航法士などのチームが協調することによって、異常事態が発生してもチーム全体が協調し合うことで危険を回避する能力が高くなる。このことが近代的なコックピットにおける操縦士、副操縦士、そして自動化システムのチームにおいても成立することが望まれる。

Controlled Flight Into Terrain

機体が正常運航からの逸脱時に、パイロットと自動化システムの協調がうまくいかないと危険に陥ることがある。

- アメリカン航空 B757、コロンビア・カリ空港、1995 [32, 33]

南米コロンビアへむけてマイアミを出発したアメリカン航空の事故機は、コロンビア、カリ空港に着陸予定であった。この付近は標高四千メートル級の山が連なる山岳地帯である。事故機は指定された VOR (VHF Omni-directional Ratio Range beacon, 超短波全方向式無線標識) を結ぶコースを辿って、自動航法モードで飛んでいた。コンピュータに入力されていた飛行計画では、カリの南 14 km にあるカリ VOR を通過して南側から回り込んで着陸する予定であった。しかし管制によりカリ北 57 km のツルア VOR と北 17 km のロゾ NDB (Non-Directional radio Beacon, 無指向性無線標識) を結ぶ進入ルートを通って北から滑走路に進入することになった。通常アメリカン航空は前者の飛行ルートを使用していたのであるが、後者のルートを取ると直接滑走路に進入できるため、出発時の遅れを取り戻せると機長は考え、それを承諾した。進入ルートを変えるために、パイロット達はコンピュータへの再入力を行わねばならなかった。しかしその作業に手間取り結局、ツルア VOR を機は通り過ぎてしまった。そこでロゾ NDB に直行すべく「DIRECT TO R」をコンピュータに入力した。ところがこの「R」は、コンピュータのデータベースではカリの遙か東にあるボゴタ空港のロメオ・ポイントに対応しており、ロゾ NDB に行くには「ROZO」と入力しなければならなかった。この誤った入力を受け、機は東へ向かうため左に旋回をし始めた。また目標地点を変更したため、現在地点からカリまでの途中の通過データが全て消えてしまい、パイロットは自機の位置が確認できなくなった。理由が分からずに機体が左に旋回したため、パイロットは機首方位を修正すべく右旋回を行ったがこの時、機は山岳地帯に入り込んだ。

ここで GPWS (Ground Proximity Warning System, 地面接近警報装置) が警報を出したが、直接進入ルートを取るための減速に使用したライト・スポイラー (Flight Spoiler) を収納し忘れたため、失速して山腹に激突した。

この事故では進入手順の変更から、パイロットが飛行管理システムへの指令を変更しなければならなかった。そこへ着陸準備のためワーカロードが高まったことが飛行管理システムへの入力ミスに気づくことを困難にした。自動化システムは誤った目的地へ進路を向けたが、パイロットは予期しない針路変更によって機位を喪失してしまった。このように機体に構造的な欠陥を持たないのに墜落する事故は CFIT (Controlled Flight Into Terrain) [34, 35, 36, 37] と呼ばれている。

状況認識

CFIT に至る事象の連鎖において、パイロットの状況認識 (Situation Awareness: SA) の喪失が一因として指摘されている [25]。Endsley は人間の状況認識の過程を次の 3 つの段階、レベル 1：何かが起こっていることに気づくこと、レベル 2：その原因を同定できること、レベル 3：これから的事態の推移が予測できること、によってモデル化している [38]。状況認識の上位段階への円滑な移行が阻害されると、その後の適切な意思決定に支障をきたす恐れが出てくる。

人間の自動化システムへの信頼

CFIT を防止するため 1975 年以降、米国籍の民間大型機では GPWS の搭載が義務づけられており、わが国でも同様の対応が取られている [39]。GPWS は機体が地面と衝突する危険が高まると判断された場合に警報を出す。もし GPWS が警報を発した場合、パイロットは直ちに機体を上昇させなければならない。しかしながら GPWS の登場初期は誤報が多く、「狼少年」的な GPWS に対して、パイロットの信頼は低かった [40, 41]。そのため正報が出されてもパイロットは適切な対応をせず、墜落する事故が発生した。これは度々誤報を出す GPWS に対するパイロットの不信 (Distrust) に由來した人間—機械系の協調失敗の例である。

Trust (信頼感) は主に社会科学の立場から研究されてきた [42, 43] 概念であるが、人間 (オペレータ) の自動化システムに対する Trust が、監視制御系において重要な役割を果たすことが指摘されている [9]。

Muir は Trust の諸理論をまとめ、人間のシステムに対する Trust の動的な性質を説明した [44, 45, 46]。Muir によれば、Trust は経験によって 3 つの段階を踏んで育まれる性質を持つ、と

している。

1. 第1段階 (Predictability)

対象の過去の挙動から、今後の挙動に対する予測や期待を持つことが可能になる

2. 第2段階 (Dependability)

対象の挙動を支配する原理を理解するようになり、安心して今後の振る舞いが予想できるようになる

3. 第3段階 (Faith)

対象の動機や意図が理解されるようになると、対象に対する確信 (Faith) が生まれる

このような Trust の発達は我々の日常生活におけるシステムの使用においても実感されるものである。初めは良く理解されないままに使っていたシステムも、長く接している内に使い方が慣れてきて、どのような操作をすれば目的が達せられるかが理解できるようになる。やがてそのシステムの仕組みが理解されるようになると、故障した場合でも適切な処置を取れるようになる。更に長く使い込まれる内に、「こいつ（自動化システム）はいい奴だ^[47]」と感じるような、強い信頼感を持つようになる。

また Lee 等は Trust を 4つの側面 (Dimension) から捉えることを提案している^[48, 49]。

1. 基礎 (Foundation)

自然法則や社会秩序に合致していること

2. 能力 (Performance)

将来にわたって安定した振る舞いを予期できること

3. 方法 (Process)

行動原理や制御則、規則が理解できること

4. 目的 (Purpose)

根底にある動機や目的が理解できること

高度な能力を持つに至った自動化システムは、道具というよりはむしろ人間のパートナーとして考えられる。このような状況において、従来の人間一機械論だけではなく、Trust という新しい側面からの人間一機械系の議論が必要であると思われる。

技術中心の自動化

人間と自動化システムが適切に協調できない問題は航空の分野に限らず、自動化が取り入れられている様々な分野で事故やインシデントとして顕在化している^[50]。自動化の導入は人間が行うには危険で不向きな作業を機械に担当させるという側面もあるが、人間の関与を減らしてシステム全体の信頼性や経済性を高めることが強い動機付けとしてある^[51]。人間は柔軟な判断力を持つ反面、様々な局面でエラーを犯すことがある^[3, 52]。離陸の可否を判断する局面において、事故に至った要因のうち約8割が人的エラーによるものである^[53]。もしこのようにエラーを犯すパイロットをシステムの低信頼要素として捉えると、生産性という圧力によりパイロットをシステムから排除する方向に向かうことになる。従来の機械化・自動化では、いかに人間の機能を機械で代替して生産性を上げるかが求められていた。人間が手や足で、あるいは頭脳で行ってきた労働を機械化・自動化するのは生産効率や経済性を高める上で自然な流れであった。このような自動化は「技術中心の自動化（Technology-Centered Automation）」と言われる^[7, 8, 51]。技術中心の自動化はTable 1.1に示す特徴を持つ^[54]。

Table 1.1: 技術中心の自動化の特徴^[54]

-
- ・ 人間と機械を同等扱いする
 - ・ 機械に任せると高くつくか、あるいは困難な仕事を人間に割り当てる
 - ・ 人間の機能を機械に代行させる試みによってシステム上の問題解決を図る
 - ・ 人間はしばしば便利で安価な、機械の操作役あるいは監視役として扱われる
 - ・ 人間の役割は設計者の欠陥を穴埋めすることである
-

システムの脆弱要因として人間を排除する技術中心の自動化が、逆に機械の論理と現実の多様性から生ずる不整合を解決する上で、人間の存在を仮定しなければならなくなつたのは自動化の皮肉^[18]である。技術中心の自動化による弊害としてTable 1.2の指摘がある^[21]。

Airbus A320は「電子の繭（Electric Cocoon）」によってパイロットの誤操作を防ぎ、機体を安全な状態に留めておく試みがなされている^[55]。Airbus社はこれを「Flight Envelope Technology」と呼んでいる。このようなアプローチはパイロットを信頼性の低いサブシステムと見なした上で、旅客機全体の安全性を高めようとするものである。もしパイロットが繭の外に出ようとすれば自動化システムによって安全な領域内に押し戻されてしまう。このような防御法は「ハード・プロテ

Table 1.2: 技術中心の自動化の誤り [21]

-
- ・ 状況認識の喪失
 - ・ 注意力の減退、退屈
 - ・ 自動化システムの状況把握の欠如
 - ・ 自動装置のモードに関する錯覚
 - ・ 自動化システム故障時のテイク・オーバーへのためらい
 - ・ 基本技量の低下
 - ・ システム・エラー発見の難しさ
 - ・ 任務中におけるワークロードの格差が広がり、パイロットにより厳しい対応を求めるようになった
-

クション」と言われる。このような防護システムが構築可能になったのは電子制御系の信頼性が高まり、誤作動が起きにくくなつたからに他ならない。しかし、それでもなお設計時には想定していなかつた不具合が現実に露呈することがある。

- Airbus A330、フランス ツールーズ、1994 [56]

試験飛行中の A330 が離陸に失敗して墜落した。これは試験飛行における事故で、離陸直後のエンジン故障を模擬した内容であった。事故当時、右エンジンは最大出力で、左エンジンをアイドルにしていた。パイロットは Yawing を制御しつつ、一定の速度を維持する自動操縦モードを起動 (Engage) し、設定された高度まで上昇することになつていていた。この飛行で副操縦士が非常に早いローテーションを行つたため、25 度のピッチ角になつた。この状態で自動操縦のスイッチが入れられた。このとき操縦モードは高度獲得モードになつていて、設定値が空白のままこのモードを入れると、モード活動開始時点での上昇率を記憶し、その上昇率を維持して上昇する。この時テスト飛行のため、乗客が乗つておらず機体が軽かつたため、通常の 4、5 倍の上昇率になつた。片方のエンジンをアイドルに絞つてあり、推力が不足していたので、設定された上昇率を維持するために自動操縦システムは運動エネルギーを上昇に使うべくピッチ角を上げた。その結果、機速を失い、また失速防止装置の運用領域外の飛行であつたため機は失速し墜落した。

また現実において必要な融通性を自動化システムが持つていなつたために、次のようなインシデン

トが発生した。

- タロム航空 A310、パリ オルリー空港、1994 [11]

悪天候下、フラップを展開してオルリー空港へアプローチ中、突風で一時的に機体がフラップ展開限界速度を僅かに超過した。短時間の僅かな速度超過であればフラップが即座に壊れることはないが、コンピュータは直ちに自動操縦のモードを降下率を保持するモードから高度を上げるレベル・チェンジ・モードに切り替え、機は急上昇を始めた。パイロットはこのモードの変化に気づかず、驚いて降下を継続しようとエレベータをスタビライザ（水平安定板）とは逆に機首下げ側に操舵した。このことにより尾翼はへの字型になった。スタビライザの効果の方が強く、ピッチ角 59 度、高度 1200 m まで上昇して失速し、高度 250 m まで落下した。パイロットは自動操縦とは別系統の電気モータでスタビライザを操作して尾翼への字状態を解消できたので事故には至らなかった。

なおハード・プロテクションに対して「ソフト・プロテクション [11]」がある。これは自動化システムのモード選択が不適切で飛行可能領域から機体が逸脱するような状況になったとしても、パイロットの入力を遮断するのではなく、自動化システムの入力にパイロットの入力を重ねるオーバーライド (Override) 機能を持たせたものである。これはパイロットの現場での状況判断を重視し、自動操縦への介入の余地を残したものであるといえる。Airbus A320 や中華航空機事故後の同社 A300-600R ではゴー・アラウンド（着陸復行）モードにおいてパイロットの過大な入力があった場合、自動化システムを切ることができ解除機能が設けられており、Airbus 社においても危険な着陸時におけるパイロットの判断を重視する動きが見られる。

自動化によって人間では能力的に困難であった作業が行えるようになったが、自動化が取り入れられた新しいシステムの中で、人間が果たすべき新しい役割を理解し、支援しようとせず、人間を機械の代替部品として考え、人間の持つ特質を無視してしまえば、そのシステムは脆弱なものとなってしまう。

人間中心の自動化

従来の技術本位な自動化に対する反省から S. Norman [54] は新しい人間と機械の関係を論ずべきであるとして、Table 1.3 に示す技術中心の自動化の反省点を挙げている。

現状ではシステムから人間を排除できず、また自動化システムを取り入れなくては大規模複雑なシステムを御せない。そこでいかに人間と自動化システムが協調してシステムを運営していくか、

Table 1.3: 技術中心の自動化の反省点 [54]

-
- ・ 自動化によってシステムの機能面における人間の役割は目に見えない形で変化した
 - ・ 自動化により人間のスキルをなくせるのではなく、人間に必要なスキルの種類を変えた
 - ・ 重要な人間の役割は予測せざる変化に順応することである
 - ・ 自動化に伴う新しいエラーやシステムの破綻への対応が必要である
-

に关心が持たれる。ここに至って自動化するかしないかが問題とされるのではなく、どのように自動化すべきかが問題とされるべきである [54]。人間を安全の最後の砦とする上で、人間の能力と役割を考慮した自動化を行うべきであるとして、「人間中心の自動化 (Human-Centered Automation) [7]」が模索されるようになった。この人間中心の自動化が具体的に指す内容や意味は研究者によって解釈が様々であり、例えば Woods, Billings, Sheridan の人間中心の自動化定義をそれぞれ Table 1.4, 1.5, 1.6 に示す。

様々な解釈や定義がなされている人間中心の自動化であるが、一つの原則としてほぼ認められているのは、人間が最終的な権限を持ち制御の中心に位置付けることである。人間中心の自動化は自動化の導入を是としつつ、技術中心の自動化において欠けていた人間の特性を考慮し、人間の果たすべき役割をシステム安全となるべく明確化した自動化原理である。この人間中心の自動化原理はテクノロジーの進歩に不安を感じている人々にとって、人間性回帰を支援する強力なスローガンのように思えるが、解釈の次第では「人間が最終的な権限と責任を持つ」ことが逆に人間にとて厳しいものを要求するという指摘がなされている [57, 9, 58]。すなわち人間をシステムのあらゆる状況における最高責任者とした場合、オペレータの人的エラーが発生すると、全責任がオペレータに帰着されることになる。それならばむしろ、人間の限られた情報処理能力の限界を認識した上で、人間の能力を超えるような状況においては機械や自動化システムによる支援を行うことを考慮すべきではないか、とする意見もある [57]。このような人間と機械の機能配分はまた、適用領域、技術の成熟度と共に基準も変わってくると思われる。

本論分においてはいまだパイロットに操縦が委ねられている離陸操作に焦点を当て、この飛行フェーズにおける人間中心の自動化が如何にあるべきかを論じていく。そこで次章から旅客機の離陸の問題を考えていく。

Table 1.4: Woods による人間中心の自動化定義 [7]

-
- ・ コントロールの本拠は人間にある
 - ・ 管理者としての人間は、低レベルの機械エージェントをモニターする。また高レベルの機械システムへの状況評価も行い、機械の作動状況全般をフォローする
 - ・ 人がエラー検出と回復を行えるよう支援をする
 - ・ 人間と機械の間のタスクを最適配分し、適正なワーカロード管理を行う
 - ・ 自動系への人間の介入を可能にする
-

Table 1.5: Billings による人間中心の自動化定義 [8]

-
- ・ 人は決定に直接関与していかなければならない
 - ・ 人には情報が適正に提供されなければならない
 - ・ 自動化システムの様子を人がモニターできるようになっていかなければならない
 - ・ 自動化システムも人間をモニターできるようになっていかなければならない
 - ・ 自動化システムの行動は人間にとて予測可能なものでなければならない
 - ・ 人間と自動化システムはお互いに相手の意図を知ることができなければならない
-

Table 1.6: Sheridan による人間中心の自動化定義 [15]

-
- ・ 人に合う仕事を人に、コンピュータにあう仕事をコンピュータにさせる
 - ・ 意思決定と制御のループから人が逸脱しないようにする
 - ・ 人に最終的な権限を持たせる
 - ・ 人がする仕事を、簡単で、楽しむことができ、満足できるものにする
 - ・ 人の能力を最大限に引き出す
 - ・ 人が自動化システムを適切に信頼できるようにする
 - ・ 人が必要としている情報を人に与える
 - ・ 人的エラーを軽減し、事象に与える人の反応の多様性を最小限にする
 - ・ 人間を、部下たる自動化システムの監督者とする
 - ・ 人間と自動化システムとの組み合わせを、システムの目的に関して最適にする
-

1.2 本論文の要約

以下に本論文第2章から第4章までの要約を述べる。

旅客機事故で特に事故発生頻度の高いのは離着陸時である。総飛行時間に占める離着陸時間の割合は約4%，時間にして十数分に過ぎない。それにもかかわらず全損事故の約7割がこのフェーズで発生している^[16]。このため離陸3分、着陸8分があわせて「魔の11分間（Critical Eleven Minutes）」と呼ばれる^[59]。離陸・着陸時は自機の準備や管制とのやり取り、他の航空機と適切な位置関係を保つために、パイロットの作業量（Workload）は巡航中に比べ急激に増加する。このことが離着陸時の時間的空間的に厳しい制約性と併せて、パイロットのエラーを犯しやすいものにしている。

離陸滑走中、一基のエンジン故障が発生したとする。このとき、パイロットはRTOか、離陸継続かの決断を行わなければならない。もし機体の速度が十分でない場合、残りのエンジンで滑走路内で飛行できる速度まで加速することはできない。また速度が高い状態でRTOを行うと機体は滑走路内で停止できず、滑走路逸脱（Overrun）してしまう。従ってこの場合はRTOをせずに離陸継続し上昇してから緊急着陸などの処置をとる。この判断の基準となる速度が離陸決心速度 V_1 である^[53]。離陸最大重量で離陸する場合、 V_1 付近での異常発生に対して、パイロットが何らかの対処をするために使える時間は約1秒しかない^[60]。

しかしながら離陸時にはエンジン故障だけではなく、タイヤのバースト（破裂）、鳥の衝突（Bird Strike）など様々な事態が発生する可能性があり、エンジン故障だけを想定していればよいというものではない^[61]。また V_1 を境として、パイロットはRTO／離陸継続と全く逆の判断をしなければならず、こうした要因がパイロットの正しい判断を一層難しくしている。

米国国家運輸安全委員会（National Transportation Safety Board: NTSB）の調査によれば、民間航空輸送において年間約6000回のRTOが行われ、6件のRTO事故が発生している^[62]。その中でもこれまでに発生したRTO事故のうち58%が V_1 を超えた速度でのRTOによるものであるとしている。結果として事故の80%は離陸継続を行うか、正しくRTO操作がなされば避けられたとされており^[53]。離陸時においてもパイロットのエラーが事故の主要因として挙げられている。ひとたびパイロットのエラーが事故原因とされると誤判断を犯したパイロットに非難が集中する^[63]。しかし離陸滑走中はパイロットが意思決定のために得られる情報は少なく、じっくりと考える時間的余裕は無い。このようなパイロットにとって厳しい状況である離陸時に、事故調査完了後にパイロットの誤判断から事故を招いたという結論が得られたからといって、パイロットの能力・注意不足を指摘するだけでよいのであろうか。「過ちは人の常である」という言葉にある

ように、人間は誰もが間違いを犯す可能性を持っている。人間は柔軟な判断能力を持つが故に過ちを犯してしまうことがある。訓練は人間の能力を向上させるが、厳しい訓練をすればエラーがなくなるというわけではない。逆に訓練をし過ぎることで、異常時の判断・行動が手順（ルーチン）通りのものになってしまい、人間本来の持つ柔軟な判断能力を活用できなくなることも考えられる。従って、誤判断を犯したパイロットの責任のみ追求するのではなく、離陸安全を向上するための何らかの方策を建設的に考えていくことが必要である。

Boeing 777 型機や Airbus A320 型機など最近開発された旅客機は大幅な自動化が取り入れられている。自動化はコックピット・クルーの省力化などの経済性の観点から取り入れられてきた。同時に自動化はパイロットのミスが運航に及ぼす影響を防ぎ、機体を計画的に運航することを可能にし、旅客機の運用性が高められることとなった。現在では離陸時以外は自動化システムによる運航が可能であり、着陸操作も機体と空港側に然るべき施設があれば自動着陸装置（Automatic Landing System）による自動着陸が可能である。正常運航時であれば、もはや自動化システムは人間パイロットの助けを借りずに旅客機を巧みに操縦することが可能である^[12]。しかし離陸時はパイロットのエラーが発生しやすいにも関わらず、離陸操作は自動化されていないが、これは次のような理由による。空港内は新旧大小様々な航空機が移動や離発着を行っており、動的な環境に柔軟に対応できるパイロットの判断能力が必要である。また滑走中、機体にエンジンの故障やタイヤのバーストなど様々な異常事態が発生する可能性があり、こうした各々の異常事態に対して的確な判断・操作を行いうる自動化システムの構築は現在の技術レベル、機器の信頼性、コスト等の制約から困難である。仮に離陸を自動化した場合、自動化システムが不備を起こしても、時間的空間的に強い制約を受けている滑走中にパイロットがこれに対処することは困難であり、離陸操作の自動化は受け入れられざるものであると考えられる。

Inagaki の確率論的意意思決定モデルによる安全性評価^[64, 65]によれば、離陸時におけるパイロットと自動化システムの安全性の優劣は、離陸滑走を 4 つの Phase に分けると、離陸滑走初期の Phase 1 は人間が、ほぼ V_1 の速度域である Phase 4 に関しては自動化システムが操縦権限を持つことが安全性の観点から有利であることが示されている。また V_1 直前の速度域で、RTO を躊躇して行ったのでは RTO の操作開始が V_1 以降になる速度領域の Phase 2 及び、 V_1 以前に RTO を開始することが自動化システムにしかできない速度領域の Phase 3 では常に人間、自動化システム、どちらか一方の安全性が高いとは言えない結論が得られている。そこで離陸操作を「常に人間に任せる形態」、もしくは「常に自動化システムに任せる形態」のように権限の所在を固定する方式よりも、「状況に応じて人間と自動化システムが協調する形態」、すなわち状況適応自動化機

構 (Situation-Adaptive Autonomy: SAA) [57] を構築し、離陸時に導入することで離陸の安全性を高められる可能性を Inagaki は示唆した。

プラントなどの比較的時定数の高い系での SAA の有効性は以前の認知工学的研究によって示されている [66]。しかし離陸滑走時の人間と自動化システムとの間の急激な操縦権限移行を人間が受け入れられるかは明らかでなく、実際的な評価が必要である。また Phase 2, 3 における人間一自動化システムの協調形態に関する知見を得ることが SAA 導入に必要である。そこで第 2 章では、この Phase 2, 3 におけるエンジン故障発生に対し、状況適応的な自動化を取り入れた場合の安全性への寄与を調べた。同時に自動化システム介入に対する人間の心的影響を評価した。その結果、SAA が適切に操縦権限を移行することで、人間の誤判断によるオーバーランを防ぎ離陸安全を高めることが分かった。人間の判断と SAA の介入は 1 秒くらいのごく短い時間に行われる。従って人間が不適切な RTO の操作を行い、SAA による介入が行われた場合、人間はすぐには何が起こったのか理解できず混乱する様子が観察された。これは自動化が進んだ近代的なコックピットにおいて問題視されている Automation Surprise [25, 26, 27, 28] が本実験における SAA の操縦介入時にも発生したと考えられる。Automation Surprise の発生は自動化が多く取り入れられている旅客機やプラントなどの人間一自動化システムの関係において、状況認識 (Situation Awareness) [67] の喪失や自動化システムに対する不信感の発生 [25] など好ましくない事態を招く。従って SAA が実際に導入される上で、Automation Surprise の発生を緩和する方策が必要である。そこで第 3 章では自動化システムが今何を行っているのかを人間に報告することで、自動化システムの意図を透過 (Transparent) [50] なものにし、自動化システムの挙動に対する人間の理解を助け Automation Surprise の発生を緩和することを試みた。認知工学的実験を行った結果、自動化システムの意図を示すことにより操縦権限移行に伴う混乱を緩和することが確かめられた。

人間と自動化システムの関係を論じる上で、従来の技術本位な自動化に対する反省から「人間中心の自動化」が模索されるようになった。現在ほぼ受け入れられている人間中心の自動化原理 [7, 8, 54, 15] によれば自動化システムが人間の許可無く操縦主体になることは許されず、人間がシステム全体にわたる権限と安全の最高責任者であるべきとしている。しかし V_1 付近における時間的制約性から、SAA は人間が権限移行を許可することを待たずに自動化システムへの操縦権限移行を行う。従って SAA の実装は従来の人間中心の自動化原理に反することになる。もしこのような自動化が受け入れられざるものである場合、人間を最終的な意思決定者とする安全方策が必要である。

Inagaki の確率論的意思決定モデルによる安全性評価の結果 [64, 65] では、 V_1 以降の速度域において

てパイロットが誤りなく離陸継続の判断をすることができれば、Phase 4での安全性は自動化システムを導入した場合と同等になることが示されている。ところで確率論を基本とした意思決定理論では、常に人間が合理的に判断することが前提となる。しかし例えば全損事故原因の7割はパイロットのエラーが原因^[31]とされるように、常に人間が合理的に判断できるとは限らない。もしRTOをすべき状況でパイロットのRTOの意思決定を支援することができるならば、パイロットのエラーを減らすことができるものと期待される。そこでパイロットが取るべき行動を「GO/ABORT」メッセージを提示することで、パイロットのRTO／離陸継続の意思決定を支援することを試みる。第3章ではSAAの意図を示す実験と平行して、RTO／離陸継続の意思決定支援システムを構築し、被験者を用いた認知工学的実験を行うことで意思決定支援の有効性の評価と離陸安全への寄与を調べた。実験の結果、人間の正しい意思決定を支援する効果が確かめられた。しかし意思決定支援情報が持つ時間的な制約性から生じる支援メッセージの動的な変化が人間を混乱させることができ実験から確かめられた。これを支援情報の「時間的脆弱性 (Time-Fragile Characteristics)」^[68]と呼ぶ。

人間一機械系において操作の主体である人間が混乱することはシステムの不安全要因となりうる。これは機体に機能的損失が発生していないにもかかわらず、機体が墜落するのを避け得なかつたCFIT (Controlled Flight Into Terrain) 事故において、パイロットの混乱が一因となり得ることが指摘されていることからも明らかである^[34, 35, 36, 37]。そこで第4章では認知工学的実験を通じて、支援情報の時間的脆弱性に起因した人間の混乱を緩和する方策を議論した。具体的には支援情報の時間的側面に対する状況認識を支援することにより、支援情報の時間的脆弱性に起因した混乱を緩和することを考えた。そこで意思決定支援情報の時間的脆弱性を陽に人間に提示することを試みた。認知工学的実験の結果、意思決定支援情報の時間的脆弱性を人間が理解することで、意思決定支援システムに対する信頼感が安定したものとなり、支援情報への確信度を高めることが確かめられた。

なお、本論文の第2章は文献[69]、第3章は文献[70, 71]、第4章は文献[68]の成果に基づいている。