

## 安全・安心シリーズ

## 航空機における安全・安心への取り組みとこれからの方向

Concept of Aircraft Safety and Suggestion about Flight Control

炭田 潤一郎

Sumita Junichiro

航空機は安全な乗り物という評価を受けているがその実情を紹介し、航空機における設計、製造、整備、運用等を通じた安全の基本的概念とともに、基本的には製造の段階から運用に至るまで法的制約のもとに構築されていることと、その成り立ちと取り組みの現状を概述する。特に機体設計の観点から信頼性設計にも指針があることに言及する。また航空機ではその利用の大幅な増加傾向もあり、常にさらなる安全を求めた諸活動が行われているが、故障を抱えても安全に機能させていこうとする耐故障概念の中で新しい飛行制御に対しての提案を行う。

An aircraft is appreciated as one of the safest means of traffic. The general concept of reliability and safety in phases of aircrafts such as design, manufacture, maintenance, and operation is expressed. There are regulations, even for the reliability design. Those are backed up by the accident history of aircrafts, and by the processes to follow and improve them as the industry structure. The specific proposal for fault tolerant flight control as one of perpetual activities to approach further safety transport is presented.

**キーワード：航空機，安全，信頼性，飛行制御，反射反応，最適制御，サクセス・パス**

## 1 はじめに

航空機は一般的な輸送システムであり、安全と安心が最も強く求められる乗り物である。機体そのものも軽量・高強度の機体構造と高い作動要求を持つ各種構成システムから成る複雑な複合体だが、その航空機の設計・製造のみならず、整備、運用、航空交通管制等の各分野からなる航空機全体システムは、各々の分野におけるハードウェア、ソフトウェア、及びそれぞれでの構築、運用段階で人が関与したのになっている。一般的に全体システムは、作動信頼性・機能安全性を備えた高信頼性システムの集合体と、それを如何に安全に間違いなく動かせるかというヒューマン・エラー対策を基本とする運用体とから構成されており、人的要因を含め、故障対策が高信頼性システム構築の一つの柱ともなっている。

最も安全な乗り物といわれる航空機における安全の求め方と、安心への取り組みをその方法論と現状から述べるとともに、より高い安全性追求の方向を提言する。

## 2 航空機の安全・安心

## 2.1 航空機の製造と整備

航空機の開発設計は日本では航空法上の耐空性審

査要領に基づくことが義務付けられている。機体製造では航空機製造事業法等があり、行為者に対しての資格の認証とともに製造の過程や工程を規定している。新規開発機に対しての型式証明、及び試作機を含め量産機に対しての耐空性証明は国土交通省が発行する。そして運用規定も航空法の範疇になる。

システム信頼性設計に関しては、人命にかかわるクリティカル事象の発生に対しその発生率が $10^{-9}$ （回／飛行時間）以下、すなわち10億時間の飛行で1回の故障以下とするよう要求されている。設計思想としては故障してもシステムは作動を続け得るフェール・オペレーションや、安全側に故障させるフェール・セーフを基本として、同時故障は必要以上に想定しないものの、部品単位からシステムにボトムアップする故障事象解析であるFMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis；部品故障様態のシステムへの影響とその程度の解析) や、全体システム故障からトップダウンでのFTA (Failure Tree Analysis；システム故障状況解析) で考えられる故障様態を網羅的に、また数値的に検討して対応する方法等が取られる。

結果的には個々の部品の信頼性を高めていくことと、複数の部品を並列配置して信頼性を高める冗長構成 (redundancy structure) を含めた高

信頼性システム設計が図られている。操作する人との関連では作業量の軽減と操作の簡単化の観点からの自動化も進められているが、例えばCFIT (Controlled Flight into Terrain; 無意識下での墜落) のように機体システムは完全でも、いわばパイロットの勘違いみたいなもので墜落に至る事故例も観察されており、そういった過誤の可能性を持つ人間を中心に据えた設計も進められている。

運用に供されている機体システムに対しては定期的な整備や、故障に応じた不定期整備が法的にも求められている。この整備要求は機体開発時に設定が義務付けられ、機体の一生を通して実施される。現在では機体構造や、システム作動状況の実時間モニタ技術が進み、故障が予想されるようになればその前にその都度整備する“オン・コンディション”整備の傾向が強くなっていて、その体制、整備行為の実施者、及びその整備の過程が航空法施行規則の対象になっている。

## 2.2 システム運用

多くの機体ではその操作に3人を必要とする時代は終わり、資格をもった2人のパイロットで運用されているが、それを各航空会社の運航システム、整備システム等がバックアップしている。現在では1人パイロットも行き先に見え始めている。

ここは特に人の要因が大きからむ分野であることから、ヒューマン・エラーとその要因となる事象の根絶を期して人間関係の円滑化も目指したCRM (Crew Resource Management; 乗組員管理システム) 訓練が行われており、法的責任を問うことなく自由に事例報告をしてもらって日常業務の安全性向上に繋げようとするASRM (Aviation Safety Reporting System; 航空安全報告システム) も適用されている。これらは航空法上でも規定されているSMS (安全管理システム) として体系的な運航安全性管理が求められ、実施されている。

また国土交通省の責任下にある航空交通管制システムが、今日の増加し続けて錯綜する運航機体の交通管理を行っている。残念ながら今も管制官ミスによる事故の発生が時折報道されるが、気象条件を含めたいろいろな不確定要素が存在するなか、時間を含めた四次元マネジメントを、人に頼らずできるだけ自律的

に実施できる世界的なシステムの構築が進んでいる。日本におけるCARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Control; 航空交通システムの変革に向けた協動的行動) もそのひとつである。

## 2.3 民間機航空輸送の安全と安心の現状

ライト兄弟以来の航空機の100年は失敗学の典型であり、多くの事故経験と人命の犠牲に基づいてその発展の歴史を築いてきた。そしてその指針が確率的/統計的安全基準に基づいているだけに、いまだにその想定外の事象に遭遇することがある。500人以上の犠牲を出した日航の御巣鷹山事故は客室後部隔壁が破壊し、全油圧システムが不動作になった想定外の、一つの故障で全てのシステム機能が失われるワン・ポイント故障であった。

実績としての民間航空機輸送における事故の把握と分析、及びそれらの統計的整理については、専門機関はもとより、各大手航空会社も常に把握し、公表しているが、それによると人命にかかわる大事故発生は世界で100万飛行時間当たり0.1回、すなわちその事故率は $10^{-7}$  (回/飛行時間) 程度になっている。この統計値を先進国に限ると $10^{-8}$ に迫る勢いであり、設計指針の $10^{-9}$ に近づいてきているとともに、個々の事件事例分析に基づく改善を重ねてさらなる運用信頼性の向上を図っている現状である。この実情もヒューマン・エラーが事故要因の50%にも迫るとい実態に即しており、誤操作や勘違い等を発生しにくくして人との干渉を円滑にしたマン・マシーン設計が高度に留意されるとともに、システムの自動化をさらに進展させた自律性向上がより高度に図られる必要が出てきている。

航空機運用システムとしての実績は安全な乗り物の一つになりえていて、世界的な乗客獲得状況からもそれなりの安心を提供し得ているといえる。しかし、上記事故発生率自体には10年来あまり変化がみられていない。近年、航空輸送需要は年々急拡大しており、このクリティカル事故率を更に下げていかないと、このままでは、現状世界で月に一度くらいで発生している大事故が、例えば一週間に一度の頻度にもなってくるとして警鐘が鳴り始めている現状でもある。

### 3 耐故障飛行制御の概念

さらなる航空機の安全，安心を追求していくために，筆者は国際学会でも現状の設計要求  $10^{-9}$ （故障／飛行時間）を  $10^{-12}$  にすべきであると主張している。

機械系部品の信頼性が  $10^{-6}$ （故障／飛行時間）程度，電子部品ではせいぜい  $10^{-4}$  程度である現在の技術レベルではそれらを並列に用いる冗長設計がその手法となるが，度が過ぎるとその管理が複雑になりすぎたり，却って故障率が高くなったりする。 $10^{-12}$  に対しては仮想的な解析的冗長性も配慮して，現状でも適用されている3重程度の冗長性により十分な実現性を有しているが，それでも部品点数の増加と機能の高度化があつてコスト高にも直結し，一朝一夕にはなしえない面がある。

しかし現状設計要求でもヒューマン・エラー対策を含めて作動信頼度を少しでも高めていく必要があり，耐故障設計概念が生じてきた。これは故障に対しての影響度を極力抑え，故障が発生してもシステムの作動状態を維持して，できるだけ安全に保とうとする考え方である。具体的にはシステムが作動できるサクセス・パスを増加して対応していくことを含めて，故障状態を的確に同定し，それに対しての最適な対応策を正常な時の構図から再構築して適用していくという概念になる<sup>1)</sup>。

特に飛行制御分野では，刺激信号を出してその反応から機体の故障状態を同定する適応制御の方法や，センサーを有したスマート構造によって機械的に故障状態を認知すること等が検討されてきているが，ニューラル・ネットワークといった人工頭脳による故障同定と，それに対して目標を定めた最適制御を行うことが，日本を含めて飛行実証の研究開発段階に入ってきている。

ここで対象とする故障は，例えば空力舵面の固着やフロートであつたり，翼そのものの損壊であるような空気力学的形状の変化に係るものになる。これは高信頼性設計されている各システムではそのシステムの中で，あるいは補完しあつて，そのハードウェア，ソフトウェアを動員して自らの故障を検知し，同定し，対応を取ることができ

るようにならされていることによつてい

る。ここでは，上記耐故障飛行制御の一つの先進的考え方を提案する。

### 4 耐故障飛行制御での一提案

#### 4.1 フレキシブル・アクチュエーション

航空機の飛行制御は，その三軸周りのモーメントを発生させ，機体に縦，横，方向の動きをさせるエレベータ，エルロン，ラダーの主空力舵面等によつてい

る。エンジン通常，速度コントロールにのみ使われている。しかし，エレベータも通常は左右同方向作動だが，左右別々に差動させればロール方向の制御舵面になりうるし，エンジン推力も左右の推力差も含めると縦は勿論，方向の制御にも貢献させうる。また舵面を分割すると機能分担を細分化もできる。このように固定的な役割分担を排した柔軟なイフェクタ（制御効果端）の作動によつて安全制御の自由度が増してくる。特にエンジンも飛行制御のイフェクタとして配慮していくことが重要になる。このフレキシブルな舵面機能を持ったフレキシブル・アクチュエーション・システムの構築が耐故障飛行制御の基盤になっていく。（図1）

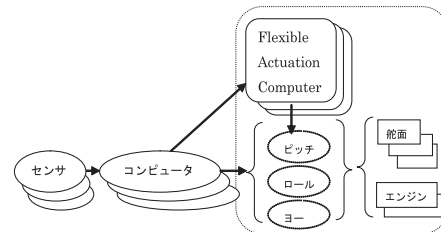


図1 フレキシブル・アクチュエーション

#### 4.2 反射反应的安定制御

フレキシブル・アクチュエーション機能がある機体においては，舵面損傷や，翼面損壊等による空気力学的影響が発生した場合，対応できる全てのイフェクタを反射反应的に作動させ得て，自律的な姿勢回復が起こり，安定飛行に移行させ得ることになる。（図2，図3参照）

図示したものはフライト・シミュレータを用いての実験結果であるが，機体の自律的な反応に，乗っているパイロットは問題なく対応できることも示された。

そして故障が発生してもパイロットが気づかないほどの機体反応しか出ない場合には，その次の時点で



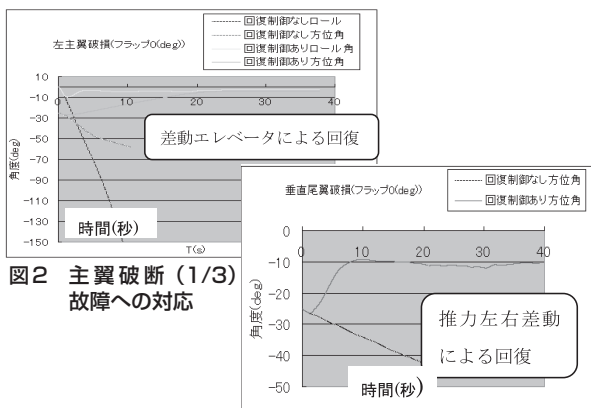


図2 主翼破断 (1/3) 故障への対応

図3 垂直尾翼破断故障への対応

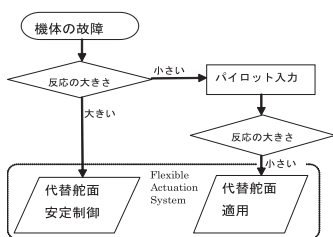


図4 反射応答的機体制御概念

4.3 最適飛行制御

4.2項の制御で一端安定した飛行姿勢を取れば、その後は有効性を残すイフェクタによる通常最適制御に移行する。これは緊急着陸を含めてその後の行動を設定した後、管制航法上の情報とともにその状態での最適解を求めてアクションが取られることとなる。

機体が正常運航しているときも、自力で行っている周辺観測情報と、交通管制システムからの情報によってルールに従った安全な航行を行っているが、航法上の大部分のやりとりは定型的なものも多く、予め設定した手順で処理できるものが多い。それからはみ出る場合において、行動目的と時間優先、径路優先等の評価関数を設定した最適制御が適用できる。これは航路上に他機があって回避運動を要求される場合も同じで、その状況を数学シミュレーションで計算した例を図5に示す。

ここで提案した耐故障再構成飛行制御概念はフライト・シミュレータ試験においてその機能を確認しているが、飛行実証試験を経てその有効性が確認される必要がある。これはこういった研究においても要求される基本的ステップになるが、この提案の概念によって現機体設計では対応ができない故障モ-

のパイロット入力に対して機体が無反応になり、そこからフレキシブル・アクチュエーション・システムが作動することによって全てをカバーする。(図4参照)

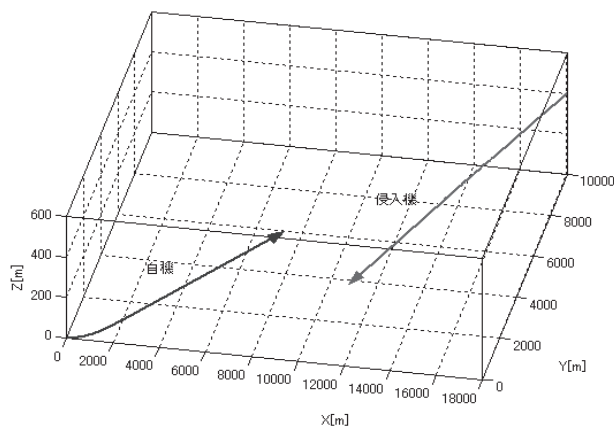


図5 対向機自動回避 ; Fuzzy-Expert

ドに対しても自律的に安全を確保できるようになり、システムの信頼性をより高度化できると考えている。

5 おわりに

ここでは航空機における安全と安心の現状と、そのなかで機体システム設計におけるこれからの方向に対しての提案を述べた。航空機はその開発設計段階から、製造、整備、運用の各ステップで安全性が法的にも規定され、色々な監査を受けパスしたものが基盤になっている。国際的協調の協定が大きな柱にもなっている。

そして各国の航空機事故調査委員会が機能して、現状への精査を行い、勧告を行って客観的にも航空機運用の全体システムの安全性を向上させていこうとしているし、産業内部においても各方面での高信頼化、高安全化の研究や、実践が行われており、さらなる安心が醸し出せるような努力が続けられている。われわれは法令の基盤となる指針のレベルを上げ、先端概念適用も探求しながら、それにきめ細かい実行を伴わせて、技術の限界を認識しつつ、“想定外”の事象がないような取り組みを続けていかなければならないと考える。

<引用文献>

1) 炭田潤一郎：おちない飛行機実現の検討，日本航空宇宙学会第19回飛行機シンポジウム，H19.11

炭田 潤一郎 (すみた じゅんいちろう) 技術士 (航空・宇宙部門)

(株) 航空システム研究 代表取締役 工学博士  
e-mail : sumita@kookuu-system.com  
URL : http://kookuu-system.com

