

# 情報技術と航空の共進化： グローバルな航空 IT ネットワークの形成



写真：ボーイング 747-400 とそのコックピット



青山 幹雄

南山大学  
mikio.aoyama@nifty.com

## 航空における IT

1903年12月17日にWright兄弟が初飛行してから今年で100年目である。この間、航空技術は飛躍的に進化した。特に、過去50年間を見ると、航空における情報技術（IT）の進化は目覚ましい。旅客機を例にとれば、ジャンボジェットの名で知られているボーイング747は初飛行の1969年から最新の747-400型まで、外見に大きな変化はない。しかし、その内部の飛行制御の機構、とりわけ情報通信システムはまったく異なるといえるほど進化した<sup>1)・2)</sup>。

現在の航空機は機内LANで多数のコンピュータが連携する高度な分散処理システムである。さらに、機内のコンピュータシステムと地上の航空管制コンピュータシステム、航空会社のコンピュータシステムが連携してグローバルなコンピュータネットワークを形成している。航空機はこのネットワーク上を移動するコンピュータシステムといえる。

航空における主要なITの働きを図-1に示す。航空機メーカーにおける航空機的设计・製造・保守、予約から着陸に至る航空会社や航空交通管制と空港施設、利用後の顧客サービスに至るあらゆる場面でITは重要な役割を

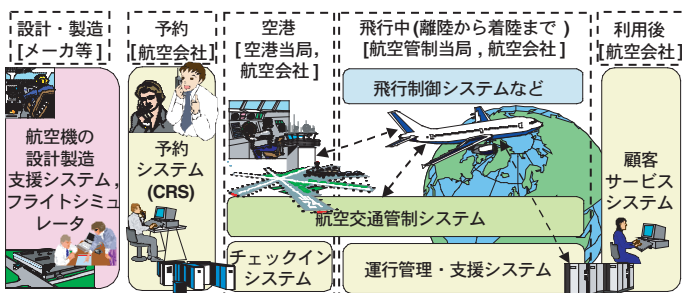


図-1 情報技術と航空の共進化：  
グローバルな航空 IT ネットワークの形成

果たしている。さらに、航空ではグローバルな連携が必須であるため、これらの情報通信システムも相互に連携し、世界に張り巡らされた情報通信ネットワークを形成している。

本稿では、航空におけるITの進化と現状を紹介する。

## 航空へのITの導入と共進化

### 航空へのITの導入

航空機は、列車や自動車と異なり、空という3次元空間を目に見えない航空路に沿って飛行する必要がある。現在の航空運輸の主流であるジェット旅客機では時速1,000kmの高速で、夜間や悪天候などの視界の悪い場合も安全に飛行する義務がある。この要求を満たすために、ITが不可欠となっている。

航空へのITの本格的な導入は、表-1に示すように、ジェット旅客機の出現による飛行速度の飛躍的向上と電子技術の急速な進化が軌を一にした1950年代に始

世代	第1世代	第2世代	第3世代	第4世代		
	ジェット旅客機誕生	中短距離機	大型化 (ワイドボディ)	デジタル化		
年代	50~	60~	69~	80~	85~	90~
代表機種	B707 DC-8	B727 B737 DC-9 (YS-11)	B747 DC-10 A300 (コンコルド)	B757 A310	B747-400 MD11 A320	B777 A330/ A340
航法	電波航法		慣性航法 (INS)	慣性航法 (IRS)		衛星航法
飛行制御ほか	ADC	性能アドバイザリシステム	性能管理システム	FMS, グラスコックピット	FBW	機内LAN
予約運用	電話受付	CRS	CRSの端末展開	FFP (マイルージ)	収益管理	E-Ticket
情報処理		IBM 7090	IBM 360/ IBM 9020	IBM PC		Web

表-1 ジェット旅客機におけるITの進化

まる。この頃、航空 (aviation) と電子 (electronics) を組み合わせたアビオニクス (avionics) という造語が生まれた。また、米国で航空管制システムやコンピュータ予約システム CRS (Computer Reservation System) の開発も始まった。以後、航空は IT の牽引役となり、また、IT は航空を支える基盤となり、不可欠なパートナーとしてともに進化してきた。

### 航空における IT の特質

航空における情報通信システムはきわめて厳しい要求を満たす必要がある。たとえば、航空機の情報通信システムは、温度や電磁波などの過酷な環境下で 1 飛行時間当たり  $10^{-9}$  未満の故障率という高信頼性が求められる<sup>10)</sup>。ボーイング 777 の設計では 1 飛行時間当たり  $10^{-10}$  未満の故障率を目標としている。これは、1,000 機の航空機が 30 年間毎日運行しても故障しないことを意味する。航空管制システムや CRS では、高信頼性に加えて高処理能力も求められる。このため、一般の情報通信システムではコストの点から採用されない高度な技術が開発・実用化されている。また、軍事・防衛や宇宙開発とも関係が深いことから、まず軍用として開発された後、民間へ移転された技術も多い。

このような中であって、旅客機は安全性が重視されることから、その飛行制御への IT の導入は慎重であった。しかし、1980 年代にマイクロコンピュータの急速な進化などにより、IT の本格的な導入が始まった。1987 年に初飛行したエアバスの A320 で、旅客機として初めて飛行制御の中核にデジタルコンピュータが導入された。以後、現在では、航空機のあらゆるシステムで IT が利用されている。

さらに、近年、安全性を確保しつつ運航の経済性の向上や環境への対応が求められていることから、IT の果たす役割は一層重要になっている。

一方、IT の進化によって航空機が高度な情報通信システムとなったことから、パイロットは操縦だけでなく情報通信システムの運用管理の役割も求められるようになった。そのため、コックピットの設計では、情報通信システムとパイロットとのインタフェースが重要な課題となっている<sup>14)</sup>。

## 航空機の IT

### 航空機の情報通信システムの構成

航空機の情報通信システムの構成を図-2 に示す。次のようなシステムからなる<sup>1), 7), 8)</sup>。

(1) 飛行制御システム：方向舵 (ラダー) などの制御翼とエンジンの推力を制御し、機体を安定に飛行させる。操縦操作が電気信号に変換され、機体のセンサか

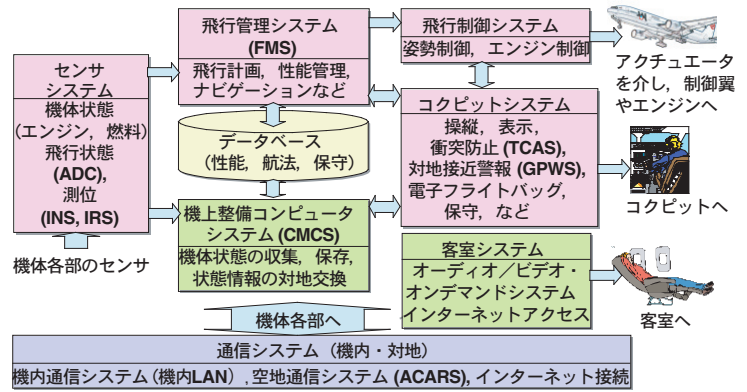


図-2 航空機の情報通信システムの構成

らのデータとあわせてコンピュータに入力される。これに基づいてコンピュータが計算した制御則を電気信号としてワイヤを介して送り、制御翼を動かすモータやエンジンを制御することからフライバイワイヤ (FBW: Fly By Wire) と呼ばれる。

(2) 飛行管理システム (FMS: Flight Management System)：パイロットに代わり航空機を操縦するシステムである。コックピットでパイロットが目的地とその通過点を飛行計画として設定し、それに従って飛行するように飛行制御システムを指示する。気象条件や搭載重量などに応じて最適な飛行を行うためには、上昇、巡航、降下のすべての局面で高度な操縦が求められる。これを人手で行うことはパイロットに大きな負担となる。FMSによって、パイロットの負担が軽減され、かつ最適な飛行ルートとなるよう制御できるので燃費も向上した。ちなみに、客室のディスプレイに離陸時から飛行ルートや着陸予定時刻を随時正確に表示できるのは、この FMS の情報を利用しているからである。

(3) コックピットシステム：コックピットは IT により著しく進化した。多数の機械式計器が少数の CRT / カラー液晶ディスプレイに集約された。これをグラスコックピット (glass cockpit) と呼ぶ。必要な情報を必要に応じてディスプレイに表示できるのでパイロットの負担を軽減した。

図-3 (a) はボーイング 747-100 のコックピットである。計器だけで 132 個、スイッチとランプを加えると 1,000 個近くある。そのため、手前の席に航空機関士が乗務する。図-3 (b) のエアバス A320 では 2 名のパイロットの前に操縦用のディスプレイが 2 面ずつある。さらに、さまざまな計器をまとめて表示するために中央に 2 面、合計 6 面のディスプレイがある。計器は 10 個余りとなり、操縦桿はジョイスティックとなった。ボーイング 777 もディスプレイは同様であるが、操縦には操縦桿を使う。旅客機では機種ごと



(a) ボーイング 747-100 のコクピット



(b) エアバス A320 のグラスコクピット

図-3 コクピットの進化

に操縦資格を取得する必要があるため、異なる機種でも同じ配置となるよう設計している。操縦や整備に関する膨大なマニュアルをHTMLとPDFで電子化し、参照するシステムも導入されつつある。

- (4) センサシステム：速度、高度など航空機を取り巻く環境を測定する。データは風速や気圧などの外部環境に応じた補正が必要であるため、センサシステムはエアデータコンピュータ（ADC：Air Data Computer）と呼ばれる。
- (5) 機上整備コンピュータシステム（CMCS：Central Maintenance Computer System）：機内の各機器にはセンサや組み込み型故障検出装置が装備され、飛行中も常時監視されている。CMCSは、これらのセンサや検出装置からの情報を収集・保存し、異常があればパイロットに通知し、原因調査を支援する。後述する対地通信システムを介してこの情報を航空会社の整備部門などに送信する。
- (6) 安全性を高めるシステム：地表や他の航空機との異常な接近や衝突の可能性を検出し、パイロットに警告する。この中には、次のようなシステムがある。
  - (a) 衝突防止システム（TCAS：Traffic alerting

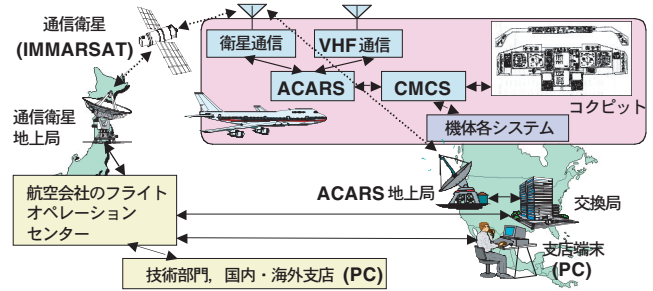


図-4 対地通信システム

and Collision Avoidance System）：航空機相互で位置を監視し、衝突の危険がある場合、パイロットに警告や回避指示を行う。

(b) 対地接近警報システム（GPWS：Ground Proximity Warning System）：航空機が地面や海面などに異常接近した場合、パイロットに警告や回避指示を行う。機能強化型GPWSでは、全世界の地形データベースを持ち、高精度の警報を行う。GPWSは航空機の事故防止に寄与し、我が国を含む多くの国で装備が義務付けられている。

(7) 客室システム：乗客がオフィスや居間と同等なサービスが利用できるようにITを用いたシステムが開発されている。音楽、ビデオなどをオンデマンドで利用できる娯楽システムに加え、インターネットの利用も予定されている。

### 通信システム

航空機の通信システムには、機内の通信と対地、あるいは他の航空機との間の通信の2種類ある。

- (1) 機内通信システム：音声とデータの2種類ある。音声では、乗務員間の連絡に用いるインターホンと乗客へ案内を行う放送システムが装備されている。一方、機内の各情報システムが高度化するに従ってシステム間で交換するデータ量も増大している。そのため、機内のコンピュータシステム間でデータ通信を行う機内LANが装備され、デジタルデータバスと呼ばれている。ボーイング777では、10Mbpsと100Mbpsの機内LANが導入されている。
- (2) 対地通信システム：図-4に示すように、パイロットと管制官、あるいは、航空会社の運航管理センターなどとの音声通信に加え、CMCSと航空会社のコンピュータシステムが直接データ交換を行うACARS（Aircraft Communication, Addressing and Reporting System）が導入されている。これを利用して、航空会社のフライトオペレーションセンターでは自社のすべての航空機の運行状況を常時リアルタイム

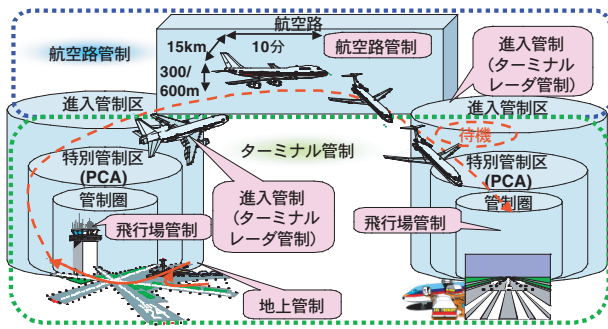


図-5 航空交通管制の枠組み

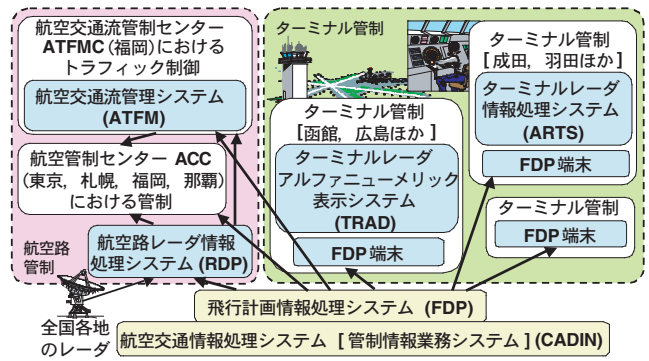


図-6 航空交通管制システムの構成

ムで監視している。

(3) インターネットの利用：通信衛星を介して航空機からインターネットを利用するサービスが2003年から試行されている<sup>5)</sup>。地上からは20Mbps、地上へは1Mbpsのデータ通信を提供する。客室で有線もしくは無線LANを用いて電子メールの送受信、Webページの閲覧などができる。我が国の航空会社も2004年から運用を予定している。これを用いて、機内の急病人の遠隔診断や機内の状況を地上からモニタする方法も研究されている。

## 航空交通管制のIT

### 航空交通管制の枠組み

航空交通管制の枠組みを図-5に示す<sup>9), 11)</sup>。

安全な飛行には、パイロットと管制官の協調が必要である。しかし、航空機の飛行範囲は広大であるので図-4に示すように、飛行場とその離着陸を担当する空港のターミナル管制と航空路管制に分け、その間で管制官が1機ずつ情報を引継ぎながら管制する。

航空路では、世界中どこでも、どの国の航空機も安全に飛行できる必要があるため、世界の空を分割して国ごとに管制範囲を分担する。これを飛行情報区 (FIR: Flight Information Region) と呼ぶ。我が国が管轄する飛行情報区は東京 FIR と那覇 FIR に分けられている。東京 FIR は、さらに3分割され、札幌、東京 (所沢)、福岡にある航空交通管制センター (ACC: Area Control Center) で分担して管制を行っている。那覇 FIR は那覇 ACC が管轄する。航空路の過密化により、これらの ACC 全体にわたるトラフィック制御を福岡にある航空交通流管理センター (ATFMC: Air Traffic Flow Management Center) で行っている。

### 管制情報処理システム

我が国の航空交通管制を支援する情報通信システムの構成を図-6に示す。

航空交通管制は、航空会社が提出する飛行計画 (flight plan) に基づき、離陸から着陸まで1機ずつ追尾しながら行われる。飛行計画情報処理システム (FDP: Flight Data Processing system) は、飛行計画に基づき、航空機の現在の飛行状態を一元管理するコンピュータシステムである。

各航空機には24ビットの識別コードが付与されている。これを利用して航空管制レーダは1機ずつ航空機を認識する。レーダデータを処理して管制室のレーダ画面に表示するコンピュータシステムとして、各ACCにRDP (Radar Data Processing system) が、各空港のターミナル管制にはARTS (Automated Radar Terminal System) もしくはTRAD (Terminal Radar Alphanumeric Display system) が設置されている。

管制官は1機ごとの飛行状態の情報を運航票 (flight strip) として受け取り、レーダ画面を参照し、パイロットと交信しながら一定間隔をおいて飛行するよう指示する。

航空交通流管理システム (ATFM: Air Traffic Flow Management system) はFDPと連携してACC間でトラフィック制御を支援するコンピュータシステムである。

このような管制情報処理システムは、米国で1960年代に開発され、1972年にIBM9020で運用が始まった。IBM9020は航空管制システムのために開発されたといわれ、IBM360を3台多重化したシステムである。

### 航空管制通信ネットワーク

我が国のACCやATFMC、各空港などの航空交通管制システム間の情報交換と管理を行うネットワークシステムを航空交通情報システム (CADIN: Common

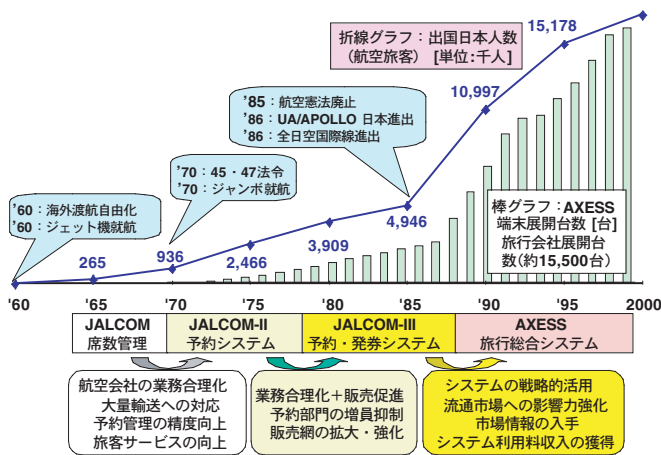


図-7 日本航空における CRS の進化

Aeronautical Data Interchange Network) と呼ぶ。CADIN は海外の航空交通管理との通信ネットワークを始め、気象庁、防衛庁などの関係システムとも接続され、必要な情報をリアルタイムで交換する。

### 航空管制システムへの衛星航法システムの導入

現在の航空管制は電波航法が中心である。ボーイング 747 では、地上の電波航法施設に頼らず機内に設置した機械式ジャイロだけで位置を計算する慣性航法装置 (INS: Inertia Navigation System) が実用化された。その後、レーザジャイロを用いて精度を高めた IRS (Inertia Reference System) が用いられてきた。

近年では、GPS (Global Positioning System) の利用が普及し、衛星航法システム (GNSS: Global Navigation Satellite System) の導入が CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management) 計画として世界的に進められている。GNSS では、まず、洋上の管制精度の向上が期待できる。さらに、最もリスクの高い着陸において、地上施設の電波誘導による計器着陸システム (ILS: Instrument Landing System) に代わる GLS (GNSS Landing System) が研究されている。我が国でも、GPS の精度を向上し航空管制で利用できるようにするための運輸多目的衛星 (MTSAT: Multi-functional Transport SATellite) を打ち上げ、推進する予定となっている。

### 予約と運航管理の IT

最初のコンピュータ予約システム (CRS) は 1950 ~ 60 年代にアメリカン航空と IBM によって 4,000 万ドルを費やして開発された<sup>1)・3)・6)</sup>。SABRE (Semi-Automatic Business Research Environment) と

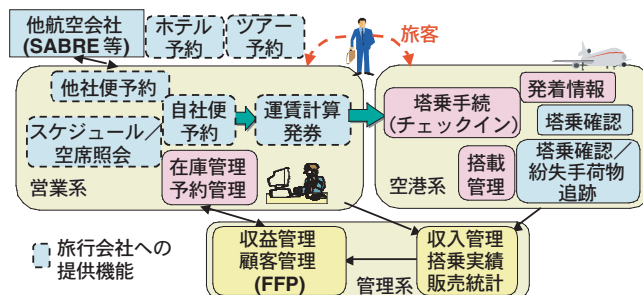


図-8 AXESS とそれを取り巻くシステム

命名され、1960 年代初めに IBM7090 上で稼働した。CRS は競争力の鍵としてただちに航空会社にとって不可欠となった。IBM は CRS をパッケージ化して主要航空会社へ売り込んだ。SABRE は、その後、IBM 360 へ移植され、進化を続けた。現在、400 社以上の航空会社の予約を扱う世界最大の CRS である。

我が国では、1964 年に日本航空が JALCOM として CRS の稼働を開始した。その後、図-7 に示すように、現在の AXESS に至る 4 世代にわたり進化してきた<sup>2)</sup>。

CRS は世界中から利用されるため、オンラインランザクションシステムの中でもきわめて高い処理能力を必要とする。さらに、24 時間 365 日稼働を前提とする。このため、CRS の開発は、防衛システムと並びハードウェアから OS、アプリケーションに至るさまざまな情報処理技術の進化を促した。IBM は CRS 用 OS として TPF (Transaction Processing Facility) を開発したが、これは、証券業務やクレジットカード処理のシステムにも利用されている。

CRS の機能も進化した。1981 年にマイレージと呼ばれる FFP (Frequent Flyers Program) が、1986 年には価格を変え売り上げを最大にする収益管理システム (yield management system) が追加された。対象も、ホテルやレンタカーなどに拡張された。AXESS も、図-8 に示すように、さまざまなシステムが統合されている。他社の便も予約する必要があることから、グローバルな連携も実現している。

1990 年代になって、インターネットの普及により、Web を介して直接予約するサービスや、国内ではチケットレスと呼ばれる E-Ticket など、システムと利用の両面で進化している。このようなインターネット上での IT の進化は、逆オークションなどの新たなビジネスモデルも生んだ。現在、CRM (Customer Relationship Management) やデータウェアハウスを用いた顧客情報を活用するサービスの開発、あるいは Web サービス技術を用いた相互運用性の高いシステムの開発が行われている。

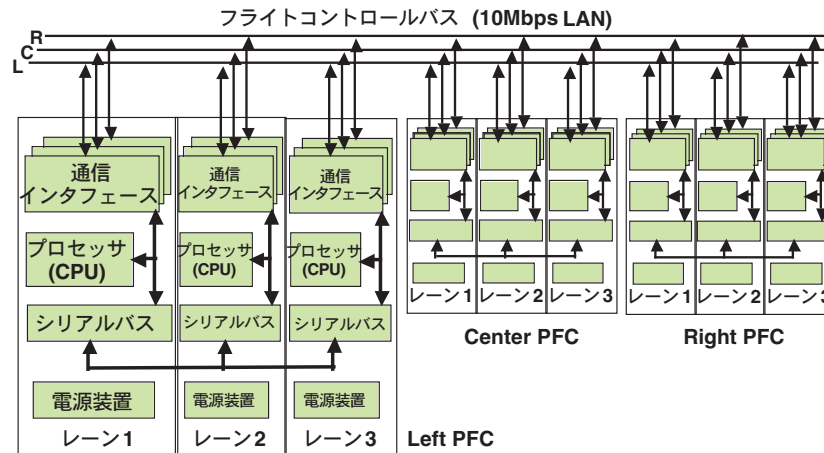


図-9 ボーイング 777 の飛行制御システムの冗長構成

CRS は航空会社と旅行産業のビジネスを変革した<sup>2)</sup>。SABRE も 1996 年にアメリカン航空から独立し、独自で新ビジネスを創出している。このように独立して複数の航空会社やホテルなどの旅客サービスを提供するシステムを GDS (Global Distribution System) と呼んでいる。

### 空港における IT

空港は航空機へのゲートウェイとして、効率と安全性という、相反する要求が求められる。効率面では、E-Ticket の普及とあいまって、自動チェックイン発券機が普及し、効果をあげている。一方、セキュリティに対する要求は厳しくなっている。成田空港では、e-エアポート構想の下にバイオメトリクスによる個人認証の実証実験が行われている。

空港での滞在時間は比較的最長いことから、さまざまな IT サービスの提供が期待されている。たとえば、無線 LAN やインターネットカフェが普及しつつある。

### 安全で安心できるフライトを支援する IT

#### 安全性が第一の課題

航空機の情報通信システムの障害は人命にかかわるリスクがある。また、管制情報処理システムの障害は広い地域にわたって大きな影響を及ぼすリスクがある。安全性は航空における IT の最重要課題である。このため、ハードウェアとソフトウェアの両面で最高の技術が開発されてきた。

安全性を確保するためには、一般に、システムに障害が発生するリスクを分散し、必要であればシステムを再

構成する方法がとられる。しかし、実現方法は要求される信頼度やシステム構成により異なる。

#### 航空機の安全性

安全性の中核となる飛行制御システムは最も高信頼性が要求されるため、高度な冗長構成をとる。たとえば、ボーイング 777 では 3 台の異機種コンピュータを用いて同一の処理を並行して行い、その結果を照合し、多数決する異種冗長構成をとる。さらに、図-9 に示すように、3 重化システムを 3 系統持つ 9 重化構成をとる。

信頼性はシステム全体で考える必要があるため、センサ、通信システムなどの各サブシステムも冗長構成をとる。これらのシステムを駆動する電源装置は重要なサブシステムであり、ボーイング 777 ではジェットエンジンの発電機に加えて 3 段階の異なるバックアップ機構を備えている。

一方、これらのシステムで利用されるソフトウェアは大規模かつ複雑となっている。図-10 はエアバスの主要機種のソフトウェア規模の増大を示す<sup>12)</sup>。ボーイング 777 の FMS などのソフトウェアの規模は全体として 250 万行に達する。このため、ソフトウェアの信頼性がきわめて重要な課題となっている。エアバスの A320 の飛行制御ソフトウェア開発では、CPU の異種冗長構成に加え、異なるプログラミング言語で実装する Nバージョンソフトウェア開発を採用した。

#### 航空管制システムと CRS

航空管制システムや CRS は大規模なネットワークを形成しているため、信頼性に加え、厳しい性能要求を満たす必要がある。米国の航空管制システムと SABRE は、いずれも、1960 ~ 70 年代当時に最高の処理能力と信

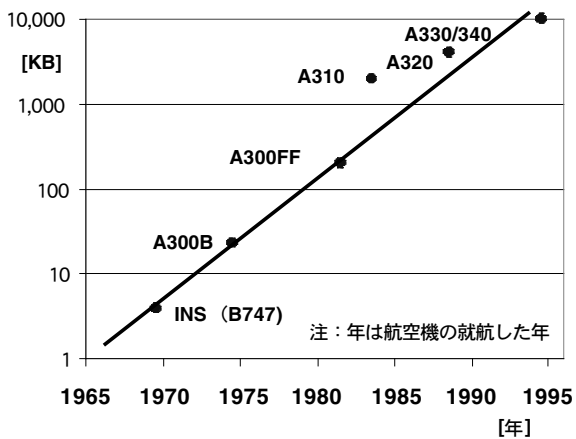


図-10 飛行制御ソフトウェアの規模増大

頼性を持つシステムとして稼働した。しかし、その後、航空需要は急速に増大し、システムの進化が求められた。CRSは需要の増大に対応して性能だけでなく機能面でも進化し、ビジネスとして成功した。

一方、米国の航空管制システムは1981年に10年の期間と25億ドルの予算で全面的刷新が計画された。しかし、この開発は破綻し、1994年に全面見直しとなった<sup>4)</sup>。米国会計検査院(GAO)の調査では、2004年までに総額450億ドルを費やすと予測されている。ソフトウェア開発史上で最大規模の破綻であろう<sup>4)</sup>。

今後、航空のあらゆる情報通信システムでソフトウェアの生産性と品質の向上が一層重要となるであろう。

## 航空を取り巻くITと他産業への波及

設計・製造支援システムやフライトシミュレータなど、航空を取り巻くさまざまな領域で新技術が開発・実践されている。たとえば、ボーイング777の開発では3次元CADシステムが全面的に導入され、生産性と品質の向上で効果を挙げた<sup>13)</sup>。設計に加え、製造の容易性も設計段階で検証した。

航空で培われたITが他の運輸産業でも活用されている。たとえば、自動車では、ドライブバイワイヤ(Drive By Wire)と呼ばれるコンピュータによる運転支援機能が導入されている。走行中に前方の障害物を検出しブレーキをかける機能や、車載機器の異常を検出し、その情報をネットワークを介して送信する機能がある。また、3次元CADは自動車の設計・製造に導入され、効果をあげている。今後、航空で開発されたITがさまざまな分野で応用されるであろう。

## グローバルな航空ITネットワークの形成

航空全体をITの視点から横断的に見ると、グローバルな航空ITネットワークが浮かびあがってくる。さらに、企業や家庭からインターネットを介して予約や電子メールの交換が直接できるようになって、航空と世界中の人や企業を結ぶ社会に浸透したネットワークとなっている。

100年前に誕生した航空機は、急速に飛翔した。航空とITの共進化が、人、モノ、情報の交通を通して社会のグローバル化を推進したといっても過言ではない。あわせて、航空は厳しい要求を課してITの進化を促し、CRSなどの新ビジネスを生み、ひいては情報産業の発展に寄与した。

今後、航空運輸の需要は増大すると予想されていることから、航空におけるITの一層の進化が望まれる。次の100年で、このグローバルな航空ITネットワークがどのように進化し、どのようなビジネスを創出するか期待したい。

最後に、本稿の執筆にあたりご教示いただいた(株)日本航空システムを始めとする関係機関の各位に感謝します。

### 参考文献

- 1) 青山幹雄(編著): 航空とIT技術, 共立出版(2001), <http://www.seto.nanzan-u.ac.jp/~amikio/NISE/jp/AviationIT.html>
- 2) 青山幹雄: ITによる航空の変革, Currents, 日本航空システム, No.91, pp.19-25 (2003).
- 3) Campbell-Kelly, M.: From Airline Reservations to Sonic the Hedgehog, MIT Press (2003).
- 4) Britcher, R. N.: The Limits of Software, Addison Wesley (1999).
- 5) Connexion by Boeing: <http://www.connexionbyboeing.com/>
- 6) Copeland, D.G., et al.: SABRE: The Development of Information-Based Competence and Execution of Information-Based Competition, IEEE Annals of the History of Computing, Vol.17, No.3, pp.30-57 (1995).
- 7) Gormley, M.: Aviation Computing Systems, McGraw-Hill (1997).
- 8) 加藤昭英: 航空電子・電気装備, 航空工学講座, Vol.10, 日本航空技術協会(2002).
- 9) 国土交通省: 航空保安業務の概要, [http://www.mlit.go.jp/koku/04\\_hoan/index.html](http://www.mlit.go.jp/koku/04_hoan/index.html)
- 10) Littlewood, B. and Strigini, L.: Validation of Ultrahigh Dependability for Software-Based Systems, CACM, Vol.36, pp.69-80 (Nov. 1993).
- 11) 中辻吉郎ほか: 航空管制入門, 航空交通管制協会(1995).
- 12) Potocki de Montalk, J. P.: Computer Software in Civil Aircraft, Microprocessors and Microsystems, Vol.17, No.1, pp.17-23 (Jan./Feb. 1993).
- 13) Sabbach, K.: 21st-Century Jet, Scribner (1996).
- 14) Wiener, E. L. and Nagel, D.C. (eds.): Human Factors in Aviation, Academic Press (1988).

(平成15年11月11日受付)

