

■11 群 (社会情報システム) -2 編 (電子航法・ナビゲーションシステム)

1 章 航空システム

(執筆著者: 長岡 栄) [2009 年 12 月 受領]

■概要■

電子航法・ナビゲーションシステムは移動体を目的地に導くものであるが、周知のとおり陸・海・空などの交通モードにより異なった特徴を有している。移動体のうち航空機は高速で中・長距離の輸送に用いられている。また、移動範囲が地球規模であるため、世界的に共通な基準 (国際標準勧告方式) に従って製造・運用される必要がある。

航空機の事故は悲惨な結果につながる可能性が高いため、そのシステムには高い精度や信頼性が求められる。このため、航空機には多くのシステムが装備されており、高度な自動制御システムが用いられている。そして、これらを安全で効率的に運航させるため、地上や宇宙空間には航空機の運航を支援するためのシステムが整備されている。現在では、GPS などの人工衛星を利用した航法や最新の情報通信技術を用いた通信・監視のシステムが重要な役割を果たしている。これに加えて、最近の航空需要の増大に対処するために、多くの航空機を安全で効率的に運航させる航空交通管理などのシステムが必要となってきた。

本章では、航空に関する電子航法・ナビゲーションシステムについて述べる。

【本章の構成】

まず、1-1 節では航空の航法の歴史にふれ、自立航法や電子航法のシステム、衛星航法システム、及び衛星航法の補強システムについて述べる。1-2 節では通信と監視のシステムについて地上側のシステムを中心に説明する。1-3 節では、航空機側のシステムについて、まず機上システムを概観し、飛行管理システムにふれ、次に飛行制御システム、機上の通信・監視システムなどを紹介する。1-4 節は航空交通管理システムに関するもので、ここでは航空交通管理、航空管制、航空交通流管理、管制支援システム、安全性及び交通工学的アプローチについて述べる。

■11 群-2 編-1 章

1-1 航法システム

1-1-1 航法の歴史

(執筆著者：田嶋裕久) [2008年8月 受領]

航法とは、航空機や船舶などの移動体がある地点から目的地点へ、安全にかつ効率的に移動する進路を与える技術である¹⁾。航空航法では、1903年のライト兄弟の初飛行による航空機以前の時代から気球や飛行船において、地上の景色と地図を見比べて自分の位置を知る天文航法が主な方法であった。航法計器として、気球の時代から気圧計は高度計として使用され、船舶用のコンパスも進行方向を知るために使用された。1911年には、航空機用のコンパスも発表され、欧州諸国は20万分の1の航空地図を標準とした。船舶用の六分儀による天体観測によって位置を知る天文航法も使用された。速度計として、現在も使用されている動圧と静圧の測定によるピトー管も使われるようになった²⁾。

第一次世界大戦中に、航空機用の無線機と方向探知機の開発が進んだ。また、自律航法の一種である推測航法も発達した。これは、ある確定された位置と、そこから飛行した後の風向風速を計ることによって位置を推定する方法である。1920年代に入ると欧州では数本の航空路を設定し、中心線の右側を飛行させることも始まった。米国でも航空路を設定し、航空灯台のほか、無線標識として航空機が電波のビームに乗って飛行するラジオレンジ、NDB (Non-Directional Beacon) などの施設も設置された。飛行場の管制塔も設置されるようになった。1930年代中期に航空機用に適する六分儀ができ、その後航空用の天測暦も刊行されるようになった²⁾。

気象条件に左右されない電波(無線)航法装置の開発が第二次世界大戦中に進んだ。米国はロランの無線局の設置を進め、大戦終了時には全世界の1/4をカバーするようになった。欧州ではデッキが普及した。中波のラジオレンジより性能が良いVOR (VHF Omnidirectional radio Range: 超短波全方向レンジ)は1949年にICAO (International Civil Aviation Organization)の標準方式となり、軍用のTACAN (Tactical Air Navigation)の測距方式を用いたDME (Distance Measuring Equipment)と組み合わせて世界の民間航空に普及した²⁾。そして、軍用に開発されたGPS (Global Positioning System)も、現在民間で主要な測位システムにならうとしている。

1-1-2 自立航法システム

(執筆著者：田嶋裕久) [2008年8月 受領]

自立(自律または自蔵)航法とは、地上や衛星など外部の施設の援助なしに、航空機搭載装置のみで自機位置などの航法データを得る方式であり、外的要因の影響を受けない。航空機の2次元位置を正確に求めるには、風による偏流角と対地速度を得る必要がある。

図 1-1 に示すドップラーナビゲータは、航空機搭載のドップラーレーダで対地速度を測定し、これを出発点から積分して自機位置を求める長距離自立航法装置として最初に確立された。1960年代後半から民間の大型機にINS (Inertial Navigation System: 慣性航法装置)が標準装備として登場した。この原理は、直交3軸に沿って設けられた3個の加速度計から得た加速度ベクトルを積分して速度を求め、更に積分して変位量を求め、既知の出発点にこの変位量を加えて位置を得る。

当初のプラットホーム型 INS はジャイロとジンバル機構により、**図 1・2** に示す自機位置の LVN (Local-Vertical North) 座標系を保つプラットホームに加速度計を載せていた。近年ジンバル機構を省いて機体に加速度計とリングレーザジャイロを固定したストラップダウン型 INS が主流となり、計算機内で LVN 座標に対する機体の向きを求めている³⁾。INS の位置誤差は積分により経過時間に比例して増加し、1 海里/時 (CEP : Circular Error Probable) が標準仕様である。このため、適切な間隔で他の航行援助システムにより誤差を補正する必要がある。

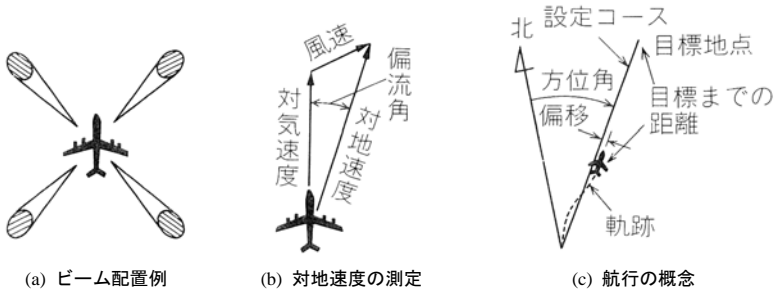


図 1・1 ドップラーナビゲータ概念図¹⁾

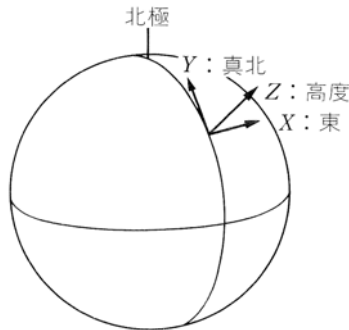


図 1・2 LVN 座標系¹⁾

1-1-3 電子航法システム

(執筆者：田嶋裕久) [2008 年 8 月 受領]

電波を利用した航行援助システムにおいては、電波を航空機と地上の航行援助施設または人工衛星との間で送受信して測位を行う。用途により長距離用 (ロラン C, GPS など)、短距離用 (NDB, VOR/DME, TACAN など)、進入着陸用 (ILS, 電波高度計など) に分類される。

VOR は VHF を用いて、30Hz の AM 信号と副搬送波の FM 信号の位相差によって、航空機に VOR 局から見た航空機の磁北を基準とする方位情報を提供する。CVOR (Conventional VOR) では AM 信号を毎秒 30 回転させている。これと互換性のある DVOR (Doppler VOR) では、**図 1・3** に示すようにサイドバンド信号を複数のアンテナを切り替えて等価的に回転させ、ドップラー効果による FM 信号を利用しているため、マルチパス誤差は CVOR より 1 桁

小さくできる¹⁾。

ILS (Instrument Landing System : 計器着陸装置) は、精密進入着陸援助施設の ICAO 標準として普及している。ILS のローカライザは、進入滑走路終端先に設置し、VHF で水平方向のコース偏移を示す。グライドパス (GP : Glide Path) は、滑走路着陸点の側方に設置し、通常 3° のグライドパスに対する上下方向の偏移を示す信号を UHF で空間に形成する。

例としてグライドパスの原理を **図 1・4** に示す。高さ h のサイドバンドアンテナは、地面反射によるイメージによってグライドスローブ角度で位相反転するローブを発生する。高さ $h/2$ のキャリアアンテナはこれを覆うローブを発生する。スローブ上側で 90 Hz, 下側で 150 Hz の変調度が高くなることを利用して、航空機上の受信機で偏移を示す¹⁾。

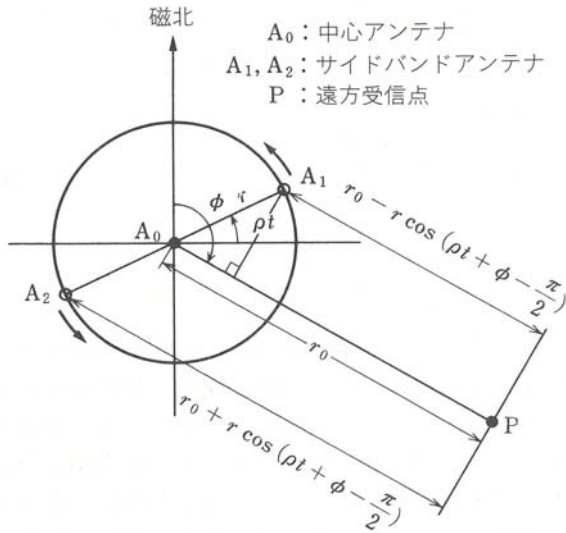
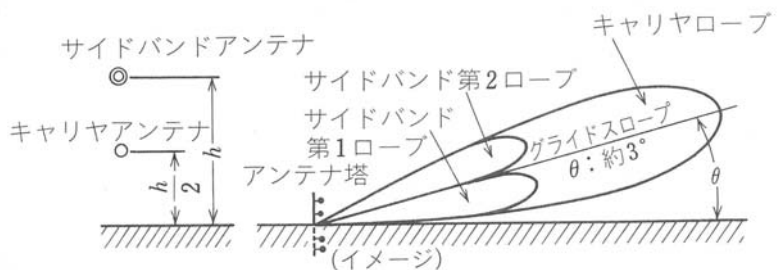


図 1・3 DVOR 原理図¹⁾



(a) アンテナ素子の配置 (b) 空間パターンの発生

図 1・4 ILS グライドパス概念図¹⁾

■参考文献

- 1) 電子情報通信学会(編),“電子情報通信ハンドブック,” オーム社, 1988.
- 2) 石川好美,“空の旅いまむかし,” 森谷トラベルエンタプライズ, 1982.
- 3) 航空宇宙電子システム編集委員会(編),“航空宇宙電子システム,” 日本航空技術協会, 航空保安無線システム協会, 1995.

1-1-4 衛星航法システム

(執筆者：坂井丈泰) [2008年5月 受領]

人工衛星を使用する航法のことを、衛星航法 (Satellite Navigation) という。地上の航行援助施設による無線航法では広い範囲をカバーするには多数の施設を要し、また陸地のない大洋上には施設を設置することができないが、人工衛星によればこうした問題を解決できる。1957年に世界初の人工衛星スプートニクが打ち上げられたが、この時点ですでに無線通信と無線航法への応用が考えられていた。

初めて実用化された衛星航法システムは、米海軍による NNSS (Navy Navigation Satellite System) であった (1964年)。これはトランシット (Transit) とも呼ばれ、元来は軍用システムであったが、1967年から民間にも開放されている。NNSSは衛星から送信される無線信号のドップラー周波数を測定して位置を算出する方式で、測位に時間がかかることから高速の移動体では使えないという制約があり、主に船舶の測位に利用された。

NNSSの実用化後ただちに、航空機も使用可能な衛星航法システムとして、空軍が中心となって GPS (Global Positioning System : 全地球測位システム) の開発が進められた。いくつかの研究用衛星に続き、GPS衛星のプロトタイプ (ブロック I) 初号機が1978年2月に打ち上げられ、1989年からは運用型のブロック II 衛星が打ち上げられた。1993年に初期運用 (IOC)、1995年には完全運用 (FOC) を宣言し、以来、安定した運用が続けられている。GPSは衛星-受信機間の距離を測定することで受信機位置を計算するもので、航空機を含む高速移動体でも使用でき、また高い測位精度が得られる。

なお、米国の NNSS 及び GPS に対応する衛星航法システムとして、旧ソビエト連邦により TSICADA、GLONASS がそれぞれ開発されている。

現用の衛星航法システムとしては GPS や GLONASS が一般的といえるが、そのほかにも特殊用途向けに開発されたシステムがある。渡り鳥や鯨類の生態計測などには NOAA 衛星による ARGOS システムが使用されており、小型の送信機を取り付けるだけで動物の移動状況を長期間・長距離にわたって知ることができる。また、船舶・航空機用の救難捜索を目的とする COSPAS-SARSAT システムは、EPIRB と呼ばれるブイが発信する信号を衛星が受信し、遭難の発生を検知するとともに、その位置を把握するものである。これらはいずれも送信機には測位機能はなく、地上基地側での計算により送信機の位置を求める点が共通しており、衛星は送信機が発信する信号を地上に中継する役割を担う。

民間航空機における利用

ICAO (International Civil Aviation Organization : 国際民間航空機関) は衛星航法システムの導入を進めており、1984年に発表した FANS (将来航空航法システム) 構想でその方針を表明した¹⁾。ICAOは民間航空機の航法に使用可能な衛星航法システムを GNSS (Global Navigation Satellite System) と称しており、これには GPS や GLONASS が含まれている。

衛星航法システムが民間航空機の航法に有効であることは当初より認識されていたが、主

要な問題はインテグリティ (Integrity: 完全性) にあった。インテグリティとは、航法システムに誤りがないことを保証し、異常がある場合には迅速に警報を与える能力のことである。GPS や GLONASS の測位精度は航空路を航行する場合には十分であるが、例えば GPS は世界中にモニタ局を 5 局しかもっていないことから、衛星に不具合があった場合でもそれをただちに検出することができないのである。また、民間航空機の航法手段を提供するのは各国の航空局 (ないしはそれに準じる機関) による業務であることから、米国による航法システムに全面的に依存することが難しいとの事情もある。

このため、民間航空機の航法に GPS を利用する場合は、補強システム (Augmentation System) (本章 1-1-5 参照) を併用するか、あるいは GPS 受信機に RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) 機能をもたせることと規定されている²⁾。RAIM 機能とは、GPS 受信機の内部で各 GPS 衛星の信号を比較・検査するか、あるいは機上に搭載された他の航法センサと GPS による位置情報を比較・検査することにより、GPS 衛星の異常を検出するものである。

現在のところ、我が国では RAIM 機能を備えた GPS 受信機を航空路から非精密進入までの航法モード及び一部の垂直誘導付進入モードに利用できるが、垂直方向の航法は気圧高度によることとされている。今後は、MSAS の性能向上や GBAS の実用化により、衛星航法システムによる精密進入が可能となるものと思われる。

■参考文献

- 1) 大沼正彦, “衛星と将来の航空航法,” 日本航海学会衛星と航法シンポジウム, pp.49-69, 1992.
- 2) 坂井丈泰, 福島荘之介, 工藤正博, 藤井直樹, “航空用 GNSS の種類と対応受信機,” 信学技報, vol.108, no.366, pp.25-30, 2008.

1-1-5 航空のための補強システム

(執筆者: 福島荘之介) [2008年5月受領]

従来、航空分野の GPS (単独測位) の利用は航空路での運航に限られ、垂直誘導を必要とする進入着陸は可能でなかった。このため、ICAO (国際民間航空機関) は、性能の不足する GPS など (コア衛星) に、補強システム (Augmentation System) を導入し、すべての運航に衛星航法を導入する方針とした。ICAO の定義する補強システムは、SBAS (Satellite-Based Augmentation System: 静止衛星型補強システム), GBAS (Ground-Based Augmentation System: 地上型補強システム), ABAS (Aircraft Based Augmentation System) である。このうち ABAS は、RAIM (受信機自律型インテグリティ監視) など機上に要求される機能である。ICAO の要求性能は、精度 (Accuracy) とシステムの信頼性である完全性 (Integrity), 連続性 (Continuity), 有効性 (Availability) で規定される (表 1・1)。

(1) 静止衛星型補強システム (SBAS)

SBAS は、静止衛星から補強情報を送信し、大陸規模の広範囲にわたって GPS の補強を行う広域ディファレンシャル GPS (DGPS) を原理とする。具体的なシステムは、米国の WAAS (Wide Area Augmentation System: 広域補強システム), 欧州の EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), 我が国の MSAS (MTSAT Satellite-Based Augmentation System) であり、インドの GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation) が計画中である。このうち最初に運用を開始したのは WAAS で、2003 年 7 月 10 日に初期運用段階 (Initial Operation

Capability) を宣言した。MSAS は MTSAT-1R (PRN 129) と MTSAT-2 (PRN 137) を使い、2007 年 9 月に正式運用を開始した。SBAS は、航空路から CAT-I 精密進入相当の運航に適用することを目的とする。SBAS の特徴は、GPS と同様の L1 周波数 (1575.42 MHz) を使い、補強メッセージ (250 bps) を放送し、ディファレンシャル補正・インテグリティ情報を提供する。このため、ユーザは DGPS チャンネル用の受信機・アンテナを必要としない。また、航空以外の利用も無償で可能なため、SBAS 機能をもつ船舶・車両・レジャー用の受信機も普及しつつある。

(2) 地上型補強システム (GBAS)

GBAS は、進入着陸する航空機を経路に誘導するために、空港内に設置された基準局から VDB (VHF Data Broadcast, 108~117.975 MHz) により補強情報を放送し、局所的に GPS を補強する狭域 DGPS を原理とする。この具体例は、米国の LAAS (Local Area Augmentation System: 狭域補強システム) である。GBAS の補強情報は、2 Hz の衛星ごとの補正值 (Pseudo Range Correction), 補正レート (Range Rate Correction) を基本に、インテグリティ情報、進入着陸経路の情報などで構成される。

GBAS の目的は、CAT-I から CAT-III の精密進入、ターミナル空域での運航 (曲線パスの設定が可能) であり、進入復行、出発経路の誘導、空港内での地上走行の誘導なども可能とする。CAT-I は、進入着陸する航空機が悪天候で滑走路が視認できない場合、滑走路視程が 800 m 以上のとき、200 ft (決心高度) まで降下可能とする基準である。最も厳しい CAT-IIIc では、滑走路視程 0 m のとき、決心高度 0 m を可能とする。

表 1・1 ICAO の要求性能 (空間信号)

運航形態	水平精度 (95%値)	垂直精度 (95%値)	完全性	警報時間	連続性	有効性
航空路	3.7 km	N/A	$1-1 \times 10^{-7}/h$	5 min	$1-1 \times 10^{-4}/h$ to $1-1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
航空路, ターミナル	0.74 km	N/A	$1-1 \times 10^{-7}/h$	15 s	$1-1 \times 10^{-4}/h$ to $1-1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
初期中間進入 非精密進入, 出発	220 m	N/A	$1-1 \times 10^{-7}/h$	10 s	$1-1 \times 10^{-4}/h$ to $1-1 \times 10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
APV-I ^(*)	16.0 m	20 m	$1-2 \times 10^{-7}$ per approach	10 s	$1-8 \times 10^{-6}$ in any 15 s	0.99 to 0.99999
APV-II ^(*)	16.0 m	8.0 m	$1-2 \times 10^{-7}$ per approach	6 s	$1-8 \times 10^{-6}$ in any 15 s	0.99 to 0.99999
CAT-I 精密進入	16.0 m	6.0 m to 4.0 m	$1-2 \times 10^{-7}$ per approach	6 s	$1-8 \times 10^{-6}$ in any 15 s	0.99 to 0.99999

(*) approach operations with vertical guidance (垂直誘導付き進入)

■参考文献

- 1) ICAO, "International standards and recommended practices, Annex10, Aeronautical telecommunications," vol.1, amendment 1-81, p.3-70, 2006.
- 2) RTCA SC159, "Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area

- augmentation system airborne equipment,” DO-229D, 2006.
- 3) RTCA SC159, “Minimum aviation system performance standards for the local area augmentation system (LAAS),” DO-245A, 2004.

■11 群-2 編-1 章

1-2 通信・監視システム

(執筆者：小瀬木 滋) [2008年6月 受領]

航空機の運航を安全かつ円滑にする目的で、航空分野に特化した通信・監視システムが使用されている。特に、航空管制業務には国際標準方式が定められているため、これに対応できる監視システムや通信システムが必要とされる。また、航空管制以外にも、円滑な航空機運航を支援する情報交換のために通信システムを必要とする。

航空機は多くの国の空域で運用され得るため、これらの機器は国際民間航空機関 ICAO により標準化されている。更に、RTCA など規格団体は、航空機搭載品などの MOPS (Minimum Operational Performance Standard) に運用性能や試験方法などを規定している。

航空関連の通信業務と使用される機器は、表 1・2 のように分類される。

表 1・2 航空通信システム

業務	航空固定業務	航空移動業務		航空放送業務
		航空管制業務	対空通信業務	
応用	管制機関間調整 航空会社間調整	航空管制通信	運航管理通信 (OCC)	運航支援 情報提供
機器	DTAX, AFTAX, ATS Direct Speech Circuit, 航空通信企業 体の商用回線	航空無線電話 (VHF, UHF, HF), RCAG, Radio Telephony Network, SELCAL, 航空衛星通信	航空無線電話 (VHF, UHF, HF), ACARS, VDL	ATIS, AEIS, VOLMET

航空固定業務は、航空機運航を支援する地上の関係機関の間の業務通信である。テレタイプ通信網が拡充・高機能化され、現在は情報処理装置間の通信になった。航空機の出発前に作成される飛行計画情報は、DTAX (Domestic Telecommunication Automatic eXchange) や AFTAX (Aeronautical Fixed Telecommunication Automatic eXchange) を通して管制情報処理システムに入力される。AFTAX は、ICAO が標準化した AFTN (Aeronautical Fixed Telecommunication Network) の一部でもある。このほか、ATS Direct Speech Circuit (直通電話回線) などが隣接する管制機関との調整に使用される。また、航空会社間の運航調整通信には、航空通信企業が敷設する商用回線などが使用されている。

航空移動業務は、航空管制通信や運航管理支援のための業務通信である。プレストーク方式の航空無線電話が標準の通信方式であり、空域内の全操縦者と担当管制官に通話内容が同報 (同時に通報) される。操縦者は、同報される通話内容を常に聴取して空域の運用状況を推測する。覆域の限界を克服するため、管制官は RCAG (Remote Center Air/Ground Communication: 遠隔対空通信施設) を用いて空域近くの VHF/UHF 通信設備を遠隔操作しながら通信する。一方、洋上航空管制のために、HF 無線電話通信網 (Radio Telephony Network) が主要な洋上航空路に設定されている。また、SELCAL (Selective Calling System) を用いて、長時間の通信聴取による操縦者の負担を軽減する。近年、管制通信のデータリンク化が進められており、VDL (VHF Digital Link) や航空衛星通信システムを用いて CPDLC (Controller-Pilot Data Link Communication) が試験されている。

運航管理通信 (OCC: Operational Control Communication) は、航空機の安全で効率的な運

航のために、航空機と地上の運航管理支援者の間で行われる。航空無線電話のほか、ACARS (ARINC Communications Addressing and Reporting System) など運航管理用の VHF データリンクが使用されている。ICAO も VDL モード 2 (VDL mode 2) を標準化した。

航空放送業務は、航空機の安全で効率的な運航を支援する情報提供のために使用される。操縦者は、VHF 無線電話を用いて ATIS (Automatic Terminal Information Service : 飛行場情報放送業務) や AEIS (Aeronautical En-route Information Service : 航空路情報提供業務) の音声放送を聴取し、空港や航空路設備の運用状況、飛行空域の気象など、最新情報を得ている。洋上や大陸の一部などでは、主に HF 帯域を用いる VOLMET (航空気象放送システム) が使用される。近年、これらのサービスをデータリンク化するため、FIS-B (Flight Information Service-Broadcast) として各種の同報式データリンクの応用も研究されている。

航空関連の監視システムは、空域や空港面利用者のための航空交通状況の情報源である。監視システムは、表 1・3 のように分類される。

表 1・3 航空監視システム

監視者	独立非協調監視	独立協調監視	従属協調監視
管制官	PSR (ASR, ARSR, ASDE), PAR, 監視カメラなど	SSR, MLAT, WAM などの距離方位測定	SSR, MLAT, WAM などの高度情報など, ADS-B 地上局, ADS-C 地上局
操縦者		ACAS/TCAS の距離方位測定	ACAS/TCAS の高度情報など ADS-B-IN
搭載品		ATC トランスポンダ	ATC トランスポンダ ADS-B-OUT, ADS-C 機上局

監視方式は、位置などの監視情報を監視側が測定する独立監視方式 (Independent Surveillance)、被監視側が測定する従属監視方式 (Dependent Surveillance) に分類される。更に、独立監視は、監視側のみの装置で測定が可能な非協調監視方式 (Non-Cooperative Surveillance)、被監視側の装置が監視動作に関与する協調監視方式 (Cooperative Surveillance) に分類される。

独立非協調監視方式は、航空機側の搭載品に依存することなく航空機の位置を測定できるため、航空機搭載品の故障や保安上の問題に対応できる。ARSR (Air Route Surveillance Radar : 航空路監視レーダ)、ASR (Airport Surveillance Radar : 空港監視レーダ)、ASDE (Airport Surface Detection Equipment : 空港面監視レーダ) などの PSR (Primary Surveillance Radar : 一次監視レーダ) が使用されている。軍用空港では着陸進入経路の誘導管制のため PAR (Precision Approach Radar : 精測進入レーダ) も使用されることがある。

独立協調監視方式では、航空機搭載装置が送信する十分な強度の信号を受信するため、レーダ受信機による距離と方位の測定精度や信号検出の信頼性を向上できる。特に、SSR (Secondary Surveillance Radar : 二次監視レーダ) を質問装置 (Interrogator)、ATC トランスポンダを応答装置 (Transponder) とする方式は、現在の航空管制の主要な監視手段である。SSR は、軍用 IFF (Identifier of Friend or Foe : 敵味方識別装置) と共用性を保ちながら分離発展した。モノパルス (Monopulse) 方式の導入により方位測定精度が向上し、更に ATC トランスポンダの選択呼び出し機能やデータリンク機能をもつ SSR モード S (SSR mode S) へと発展した。ACAS (Airborne Collision Avoidance System : 航空機衝突防止装置または TCAS :

Traffic alert and Collision Avoidance System) も, SSR モード S と共用性がある質問装置である。SSR 以外にも, 複数の受信局における信号受信時刻を比較処理して航空機位置を測定する MLAT (Multilateration: マルチラテレーション) 方式も, 主に空港面管制用に実用化された。空港周辺や航空路管制にも使用可能な WAM (Wide Area Multilateration: 広域マルチラテレーション) も開発されている。

従属協調監視方式は, データリンクを用いて監視情報を監視者に伝送する。航空機の識別情報のほか, 地上より航空機側で正確な測定が容易な飛行速度や飛行高度, 航空機しか知り得ない進路の意図 (Intent) などの監視情報が容易に得られる。ただし, 航空機側がこれらの情報を監視者側に提供する手段をもつ必要がある。ATC トランスポンダの応答信号はその一例であり, 気圧高度や識別情報などの監視情報の伝送媒体でもある。また, 衛星通信回線を用いて洋上空域など遠隔地を覆域とする ADS-C (Automatic Dependent Surveillance-Contract または ADS) も実現された。同報機能をもつデータリンクを用いる ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) では, 監視者が多数でも信号送受信回数を大幅に減少できる。ADS-B 用データリンクとして, モード S 拡張スキッタ, UAT (Universal Access Transceiver), VDL モード 4 (VDL mode 4) などが試験評価されている。

将来の航空管制や運航管理として, 運用時刻を含む飛行経路 (Trajectory) について航空機運航者の要望に対応する必要がある。このため, 航空機運航の計画から飛行終了までの各段階で, 運航管理, 管制, 操縦など関係者の意思疎通を円滑にし, 更に, 飛行中の状況認識を共有する手段が求められている。このため, 通信については, 多様な通信媒体を統合する ATN (Aeronautical Telecommunication Network) や IP 通信網の応用のほか, 新しい高速データリンク媒体や運航調整システムが研究されている。また, 監視については, 航空機密度の増加や飛行時間管理に対応するため, 速度情報の精度向上, 更新周期と更新遅延の短縮などが求められる。

通信・監視システムの実装は各空域の事情に応じて多様化傾向にあり, ICAO は将来の運用方式に応じた RCP (Required Communication Performance: 通信性能要件) や RSP (Required Surveillance Performance: 監視性能要件) など性能要件ベースの標準化を進めている。

航空監視・通信のための無線周波数は, 国際的に共通な帯域が保護されている。しかし, 多様な移動体通信の普及により周波数資源が逼迫しているため, 通信チャンネルの狭帯域化や多重化, 信号環境への負荷が小さい方式の研究開発が進められている。

■参考文献

- 1) ICAO, "ANNEX 10 - Aeronautical Telecommunications," 2006.
- 2) RTCA, 規格文書 website : <http://www.rtca.org/doclist.asp>
- 3) 岡田 実(監修), "航空電子装置," 日刊工業新聞社, Jan. 1978.
- 4) 岡田 実(監修), "航空電子システム," 日刊工業新聞社, Dec. 1983.
- 5) 吉田 孝(監修), "改訂レーダ技術," 電子情報通信学会, Oct. 1996.
- 6) M. C. Stevens, "Secondary Surveillance Radar," Artech House, 1988.
- 7) ICAO, "Global Air Traffic Management Operational Concept," Doc.9854, 2005.

■11 群-2 編-1 章

1-3 航空機のシステム

(執筆者：岡田 肇) [2008年8月 受領]

1-3-1 機上システム概要

民間の航空機に装備されているシステムは多岐にわたっている。操縦系統や着陸装置を動かす油圧系統、膨大な搭載燃料を各エンジンに順序正しく供給する燃料系統、高高度を飛ぶため機内環境を安全・快適に維持する空気調整系統のほか、航法・通信系統や電気・計器の系統がある。特に航法や自動飛行制御に関するシステムにおいては、最近の機体ではコンピュータをフルに活用した自動制御システムが導入されており、パイロットは離着陸操作のほかは、それぞれセットされた各システムが正常に運用しているか否かを監視することに重点が置かれてきた。本節では、飛行制御システム、飛行管理システム、通信・監視システム、その他のシステムにそれぞれ分けて解説する。

1-3-2 飛行制御システム (Flight Control System)

パイロットの負担の軽減と安全性を向上させるため、設定したルートを自動的に飛行することを目的とした飛行制御システムのことを自動飛行システムという。この自動飛行システムを構成する機上装置として、自動操縦装置、自動推力調整装置、自動着陸装置がある。

(1) 自動操縦装置 (Autopilot System)

飛行状態を計器で把握し、航空機の姿勢変化に応じコンピュータを使って航空機の補助翼、昇降舵、方向舵の3舵を自動的に操作し、航法装置を結合することにより、所定の方向に飛行を続けさせる働きをもっている。姿勢の変化量についてはジャイロや加速度計が用いられ、電気的な信号に変えてコンピュータに送り、舵面の動きを計算して動力で舵面を動かす。B767やA310以降に開発された航空機の場合、FMSコンピュータと組み合わせることで、前もってプログラムされた目的地までのコース上を自動操縦で飛び続けることができる。



図 1・5 B777 の自動操縦システムと計器類

(2) 自動推力調整装置 (Autothrottle System)

離陸推力などの最大推力や速度の維持に必要な推力をコンピュータが計算し、エンジンのスロットルレバーをサーボモータで駆動し、適切に推力を調節する装置である。この装置を備えることにより自動着陸が可能となるだけでなく、推力調節も自動化される。

(3) 自動着陸装置 (Automatic Landing System)

進入及び接地操作まで自動で行えるようにしたもので、自動操縦系統の機能の一つとなっている。自動着陸は、計器着陸装置、自動操縦装置、自動推力調整装置、電波高度計などが密接に関連して作動することにより可能となる。

1-3-3 飛行管理システム (Flight Management System)

このシステムは、離陸から着陸までの全飛行領域にわたって、飛行管理（航法、操縦、推力調整、誘導など）を自動的に行うシステムである。その中心となるシステムが FMS コンピュータである。FMS コンピュータは、記録保存されているデータベース（航法用及びエンジン性能用）、外部センサからの燃料量、エアデータ、エンジン制御装置などからの信号、及び、CDU (Control Display Unit) を介してのパイロットからの飛行プランのインプットに基づき、最適な航空機の種類、速度、高度、位置、性能の計算を行う。

パイロットは、飛行計画に沿って離陸滑走路からの出発方式を含む到着地までの飛行コースを設定すると、水平面内の航法 (L-NAV : Lateral Navigation) に関する情報が提供される。これらの航法情報は、飛行経路に合わせて FMS コンピュータが、各種情報を基に機を誘導していくようになっている。これに必要な VOR-DME 局などの選局も飛行計画に沿って自動的に選局される。また、これらの航法情報は CDU 上に文字で表示されるだけでなく、電子飛行計器システムの CRT 上の地図として表示されるため、自機の位置関係が容易に把握できる。FMS は B767, A310 以降に開発された大型航空機では標準装備となっている。

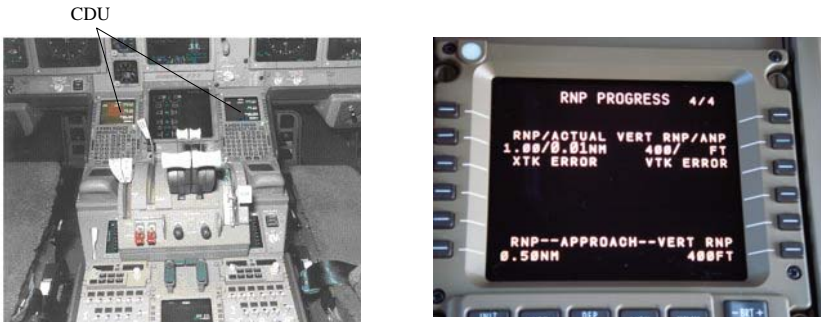


図 1・6 B777 のセンターコンソール (左) 及び CDU 画面 (右)

1-3-4 通信・監視システム

ナビゲーションに関する主要な航空機の通信・監視システムには以下のものがある。

(1) VHF 通信システム

(2) 衛星通信システム

(3) ACARS (Aircraft Communication Addressing and Reporting System)

(1) VHF 通信システム

VHF 帯 (118 MHz~136 MHz) の電波を使用した近距離通信システムである。VHF 帯の電波は非常に安定した通信が可能であり、アンテナシステムも小型化できる利点がある。大型機では通常 VHF システムは 3 系統装備されており、2 系統を音声通信、1 系統をデータ通信に利用している。

(2) 衛星通信システム

衛星を利用した通信システムである。これまで利用されてきたインマルサット衛星に加えて、日本独自の運輸多目的衛星である MTSAT 衛星も近年利用可能となっている。

VHF 通信圏外の洋上ルートを飛行中でも、安定した音声通信及びデータ通信を確保できるため、多くの国際線機材に装備されている。

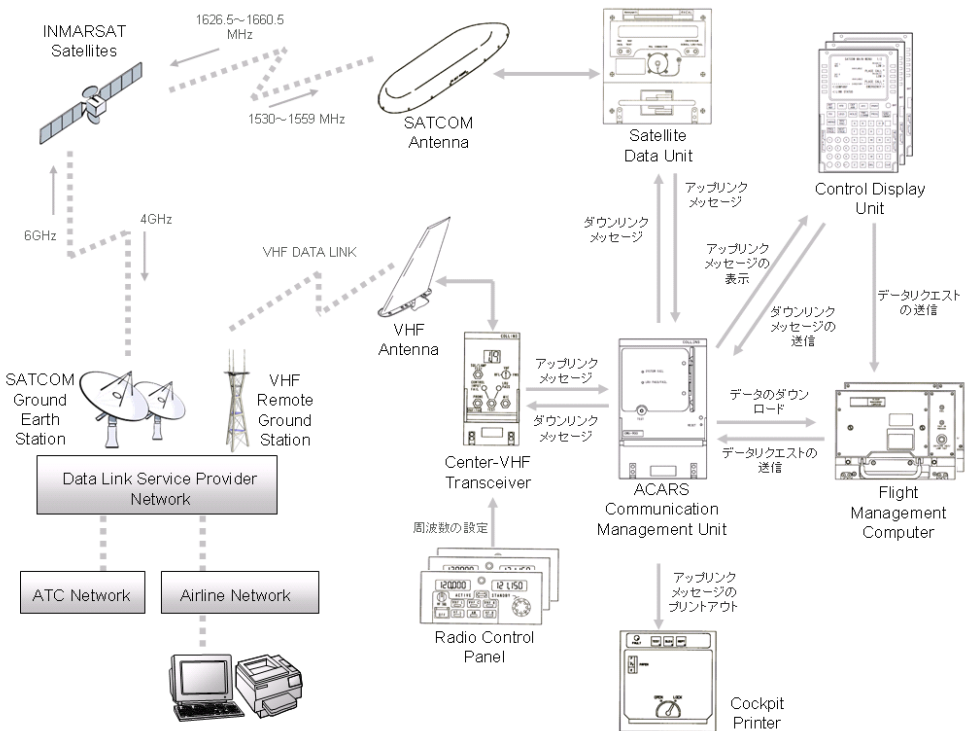


図 1・7 機上通信システム及び地上システムの相關図

(3) ACARS (Aircraft Communication Addressing and Reporting System)

VHF 通信または衛星通信を利用して空地間のデータ通信を行うシステムである。ナビゲーション関連では主として以下のように活用されている。

(a) CPDLC (Controller Pilot Data Link Communication) の活用

管制官とパイロットの間で実施されるデータ通信。これまで音声通信で実施されていた通信をデータ通信で実施することで、パイロットの負荷の軽減及び聞き間違いの防止が図れる。

(b) 気象データの入手

航空会社の運航管理システム内の最新気象情報を、飛行中の必要なときに取得することができる。

(c) FMS へ入力するデータの入手

ACARS は FMS ともインタフェースをもっており、飛行ルートの情報や航路上の風の情報といった FMS が必要とするデータを、ACARS を介して地上からアップロードすることができる。

1-3-5 その他のシステム

ナビゲーションに関するその他の航空機システムとしては、慣性基準システム、GPS、VOR、DME などがある。

(1) 慣性基準システム

B767、A310 以降に開発された大型航空機では、従来の機械式のジャイロに変わって、レーザジャイロを使用したセンサを直接機体に取り付け、高速コンピュータの計算によって速度、移動距離求める方式が採用されている。この方式を用いたものが慣性基準装置 (IRS : Inertial Reference System) である。レーザジャイロには、従来のジャイロのような回転コマはなく、反対方向に回転する二つのレーザビーム間の周波数変化を測定することによって、機体の各軸まわりの角速度を検知する。このジャイロは回転部分が少なく、小型軽量で信頼性が高い。

(2) GPS 受信装置

GPS は航法用衛星を利用して、航空機の位置と時間を計算し、必要なシステムとパイロットに出力する装置である。通常、2 個の GPS アンテナが装備されている。GPS 衛星は、高度約 20000 km の六つの軌道上に予備を含めて合計 24 個が配置されており、地球上のどのような地点からも常に最低 4 個の衛星が捕捉できるようになっている。衛星は決められた軌道を周回しており、また、GPS 受信装置は、衛星の位置データをもっていることから、衛星の位置を捉えれば、電波の伝播速度から衛星までの距離計算することによって、自機の位置を計算することができる。GPS から得られる位置の精度は、従来の慣性基準システムより高い。

(3) 超短波全方向式無線標識 (VOR : VHF Omni-Directional Radio Range Beacon) 受信装置

機上の VOR 受信装置は VOR 局から発信される磁北を指す電波と、磁北から時計方向に回転する指向性のある二つの電波を受信し、自機からの VOR 局の位置を知ることができる。コックピット内のディスプレイには設定コースと VOR 局との位置関係が表示される。

(4) 距離測定装置 (DME : Distance Measuring Equipment)

航空機から地局までの距離を計算する装置である。航空機から特定の地上局に定められたパルスの質問信号電波 (インタローガータ) が特定間隔で発射され、地上局は受信と同時に異なる周波数のパルスの応答信号電波 (トランスポンダ) を送り返す。機上の DME 装置はこの二つの電波の時間差を測定して距離を計算する。

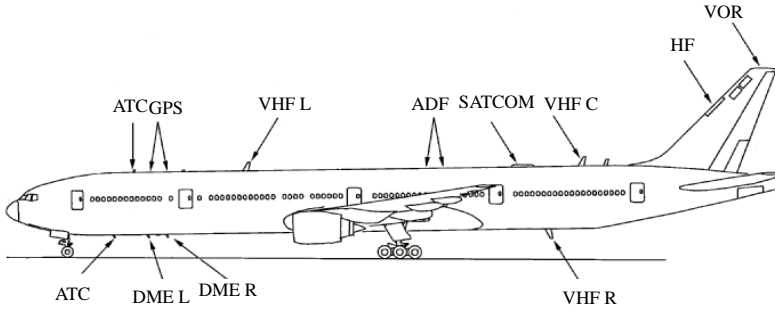


図 1・8 777 のアンテナ位置

■11 群-2 編-1 章

1-4 航空交通管理システム

1-4-1 航空交通管理の概要

(執筆者：長岡 栄) [2008年8月受領]

いまや航空機は私たちの生活に不可欠の交通機関である。私たちが利用する旅客機は計器飛行方式 (Instrument Flight Rules : IFR) で飛行している。言い換えれば、出発から到着まで航空交通管制 (Air Traffic Control : ATC) 機関の指示に従って飛行している。図 1・9 に航空システムの概念を示す。機能的に見れば、通信、航法、監視、そして情報処理などのサブシステムなどからなる。システムの構成としては、ハードウェア、ソフトウェア、環境、人、基準・規則などがある。これは大規模で複雑なシステムである。

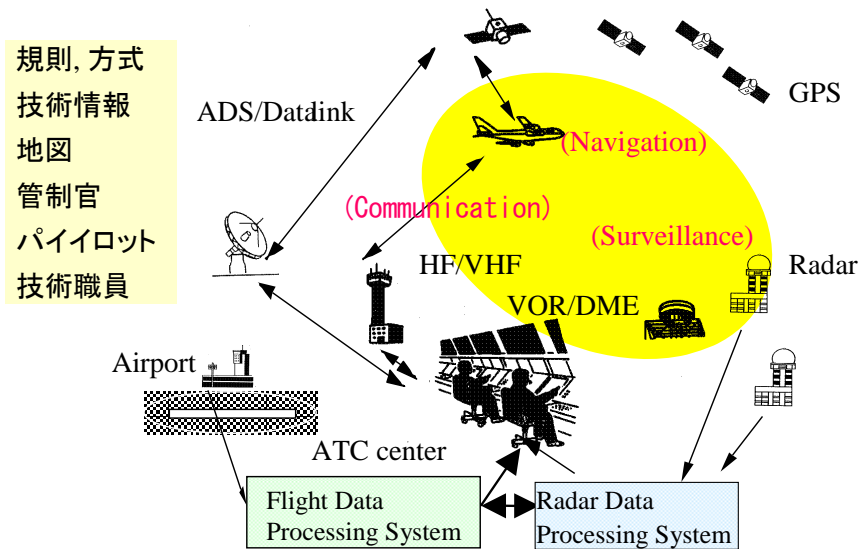


図 1・9 航空システム

航空機の衝突防止と航空交通の秩序ある流れの維持と促進のために行われているのが航空交通管制である。これは飛行場、空港周辺のターミナル空域、航空路などで個別に行われている。航空路の管制は幾つかのセクタごとに行われている。航空交通管制官は自分の担当セクタ内の航空機の管制をする。したがって、局所的かつ戦術的な管理である。あるセクタに入る航空機数が管制の能力を超えると渋滞などの問題が生じる。これが発生しないように航空機数とセクタの容量を考慮して大局的に管理するのが航空交通流管理 (Air Traffic Flow Management) である。このほかに空域構成や利用などを管理する空域管理 (Airspace Management) がある。

航空交通管理 (Air Traffic Management : ATM) は航空交通管制などのサービスに管理の概念を取り入れたものである。従来は、国際民間航空機関 (ICAO) の航空業務方式書¹⁾によ

る定義:「全飛行段階で航空機の安全で効率的な動きを確保するために要する機上及び地上の機能(航空交通業務, 空域管理, 航空交通流管理)の集合体」が一般的であった。しかし, 最近では将来の航空交通管理の概念である次の定義:「関係者間の協力の下での便宜の供与と切れ目のないサービスによる(安全, 経済的かつ効率的な)航空交通と空域の動的かつ統合的管理」がよく用いられている。これは ICAO の全世界的 ATM 運用概念²⁾に基づいている。この運用概念は 2025 年頃の ATM を想定している。ここでは, 航空機運航者, 管制機関などの ATM 関係者間の期待(安全性, 定時性, 効率性, 環境負荷軽減など)を最大限に実現するような運用がされる。これには, ATM 関係者による協調的意思決定(Collaborative Decision Making)や飛行軌道(トラジェクトリ)に基づく管理などが必要と考えられている。

欧米はこうした ATM 運用概念の実現に向けた研究・開発を進めている³⁾。欧州のそれは SESAR (Single European Sky ATM Research)⁴⁾, 米国のは NextGen (Next Generation Air Transportation)⁵⁾と呼ばれている。

■参考文献

- 1) Procedures for Air Navigation Services, “Air Traffic Management (PANS-ATM),” ICAO Doc 4444, 2001.
- 2) “Global Air Traffic Management Operational Concept,” ICAO Doc 9854-AN/485, 2005.
- 3) 長岡 栄, “航空交通管理(ATM)の動向,” 日本航空宇宙学会誌, vol.56, no.649, pp.35-39, Feb. 2008.
- 4) SESAR の URL: http://www.eurocontrol.int/sesar/public/subsite_homepage/homepage.html
- 5) NexGen の URL: http://www.faa.gov/regulations_policies/reauthorization/

1-4-2 航空交通管制

(執筆: 福田 豊) [2008年6月受領]

航空交通管制業務は, 航空機相互間の安全間隔を確保し, 円滑な航空交通流を形成するために航空交通の指示や許可, 情報提供を行う業務である¹⁾。主に, 飛行場管制, ターミナル管制, 航空路管制などの数種類に分けられる。航空路管制では, その範囲が広いので, セクタと呼ばれるいくつかの小さな空域に分割されている。これらの業務は航空管制官が実施している。

航空管制官は, 航空法, 航空保安業務規程などの規則, 管制機関間に航空機の受け渡しに関する規定を遵守し, 安全で効率の良い航空機の運航を目指している²⁾。民間機・軍用機にかかわらず計器飛行方式で飛行するすべての航空機について, 担当する空域内を飛行する複数の航空機を同時に取り扱っている。これらの航空機の飛行位置, 飛行計画, パイロットからの要求, 気象などの様々な情報を管制情報処理システム, 音声通信システムなどから入手し, 現在の交通状況の認識, 将来の交通状況の予測, その状況に対応する意思決定を行う。そして, その状況に適した管制指示のパイロットへの発出, 他の航空管制官への情報提供や調整を実施する。

安全で効率の良い航空機の運航を目指すため, 飛行経路や空域の設定手法, 航空管制の運用手法などの改善施策, ヒューマンファクタやパフォーマンス分析に基づく安全性や効率性の向上のための施策, 新しく開発された通信・航法・監視技術を活用するための施策などに関する研究開発が求められている。

■参考文献

- 1) 国土交通省航空局, 気象庁(監修), “Aeronautical Information Manual Japan,” 日本航空機操縦士協会,

2007.

2) 航空局, “管制方式基準,” 鳳文書林出版販売, 2006.

1-4-3 航空交通流管理

(執筆: 福田 豊) [2008年6月 受領]

航空交通流管理は、空域の適正な利用及び安全かつ円滑な航空交通の確保を図るため、空域における航空交通及び気象の状況を考慮して、航空交通量の監視及び調整、飛行経路の設定などを実施する¹⁾。航空路管制のセクタ、飛行場などには、管制機関が管制業務を提供することのできる能力を示す管制処理容量が定められている。航空交通量を管制処理容量に適合させることにより、管制処理容量を最大限活用し、安全で秩序正しく効率的な航空交通流を形成できる。航空交通量の超過が予測される場合には、出発空港での出発待機などの交通流制御により交通量を調整する。

図 1・10 に交通流制御に交通量の変化を示す。棒グラフが単位時間当たりの予測交通量、横線が管制処理容量を示す。左図には、管制処理容量を超過している時間帯がある。交通流制御の実施により、点線部の交通量が調整され、管制処理容量以上に抑えられる(右図)。なお、管制処理容量は天候、時間帯などにより変化する。

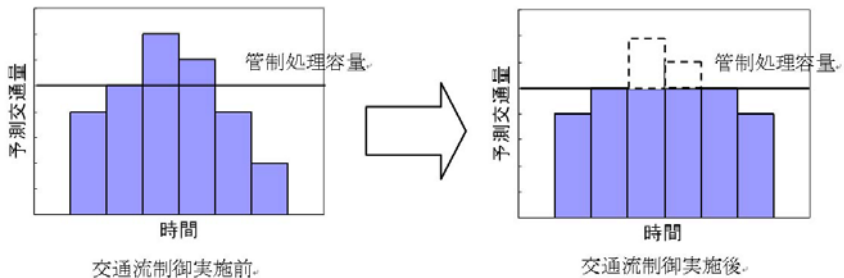


図 1・10 航空交通流管理

■参考文献

1) 福田 豊, “航空交通流管理手法の動向,” 日本航海学会誌 NAVIGATION, no.143, pp.123-129, 2000.

1-4-4 管制支援システム

(執筆: 福田 豊) [2008年6月 受領]

管制支援システムは、航空管制官の意思決定を支援する情報処理システムである。航空路管制の航空管制官が使用する管制卓には、異常接近警報、空域侵害警報などを表示する機能がある¹⁾。異常接近警報機能²⁾は、管制中の航空機に関して管制間隔が確保されない異常接近が予測されると、当該機にその旨の警報を表示する機能であり、空域侵害警報機能は、航空機の飛行が制限された空域内の飛行が予測される場合に表示される警報機能である。これらは、航空交通の安全性の向上に寄与する。また、ターミナル管制の管制卓には、到着機の順序・間隔付け支援機能などがある。これは、到着機の着陸時刻を予測し、着陸時の航空機間の最低間隔を確保するために推奨される着陸時刻を算出する。航空管制官は、到着機の集中度や必要となる空中待機時間を知ることができる。

将来的に増加する航空機の交通量に対応し、安全で効率的な航空機の運航を実現するため

には、管制支援システムの普及が必要であり、管制情報処理システムの性能向上として段階的に導入されている。管制支援システムの展開には、将来状況を予測する技術、関係者で協調した意思決定を実現する技術、人間中心の自動化技術の向上が不可欠である。航空機の将来状況を正確に関係者で把握し、管理するため、航空機の4次元(3次元位置と時間)の飛行軌道を示すトラジェクトリに関する情報を交換する情報処理システムの開発が検討されている³⁾。

■参考文献

- 1) “図説 RDP (航空路レーダ情報処理) システム,” p.110, 航空振興財団, 1997.
- 2) 福田 豊, “管制卓のコンフリクト警報機能,” 日本航空宇宙学会誌, vol.56, no.650, pp.82-85, 2008.
- 3) SESAR Consortium, “The ATM Trajet Concept D3,” pp.14-58, 2007.

1-4-5 安全性評価・管理

(執筆者：長岡 栄) [2008年8月受領]

(1) 安全の定義

航空交通管理において安全は維持すべき最優先の課題である。一般には安全とは危険のないことである。しかし、現実には危険が全くないことはあり得ない。そこで、リスクの概念に基づいて安全を定義することが多い。国際民間航空機関 (ICAO) の安全管理システムマニュアル^リでは、「安全とは人への危害または所有物への損害のリスクが、連続的なハザード同定とリスク管理の過程を通じて受容可能なレベル或いはそれ以下に軽減・維持される状態である」としている。ハザードとは潜在化した危険事象である。これが現実化する可能性とそのときの被害の程度の間関数をリスクと称している。

航空の分野では、受容可能なレベルは関係者の合意により設定されることが多い。通常は、現在の事故率と同等かまたはそれより小さな値が選ばれる。この値は安全の達成目標値でもあり、目標安全度 (Target Level of Safety : TLS) と呼ばれる²⁾こともある。実際のリスクを考察するシステムでは、リスクを軽減するのに膨大な費用がかかる場合が少なくない。そこで、まず、受容可能レベルと受容不可能レベルを設定する。次いで、その間を許容領域 (または耐えられる領域) として、リスクレベルを合理的な範囲でできるだけ低く (As Low As Reasonably Practicable : ALARP) 抑える方法などが用いられている。

(2) 安全管理

安全とはリスクを管理することでもある。ICAO では各国に対して、航空の安全について許容レベルを達成すべく安全計画 (Safety Program) の策定を義務化している。安全性を改善するための活動や規則などを統合したものの安全計画と呼ぶ。安全を管理するための組織的取り組みを安全管理体制 (Safety Management System)³⁾ という。2009年1月からは国は航空機運航者、保守・整備組織、航空交通業務提供者 (管制機関など)、空港運用者などに国により承認された安全管理体制の実施を義務付けている。安全管理体制では、

- ① ハザードの同定
- ② リスク/ハザードを緩和するのに必要な改善措置
- ③ 安全レベルの定期的評価と連続的なモニタリングの実施

を求めている。ここで、各組織は組織の管理者の直接の説明責任を含めた安全説明責任の仕組みを作らなければならない。我が国では、2006年10月から我が国の航空会社に対して安

全管理体制の義務化が行われている⁴⁾。

(3) 安全性評価

国際民間航空機関 (ICAO) の航空交通管理に関する国際標準勧告方式 (国際民間航空条約第 11 付属書) によれば, 航空交通管制システムの安全にかかわる部分の変更には安全性評価を行い, リスクが受容可能レベル以下であることを示す必要がある。また, 安全管理には安全性評価が欠かせない。安全性はリスクで評価する。図 1・11 にリスク評価の流れ図を示した。

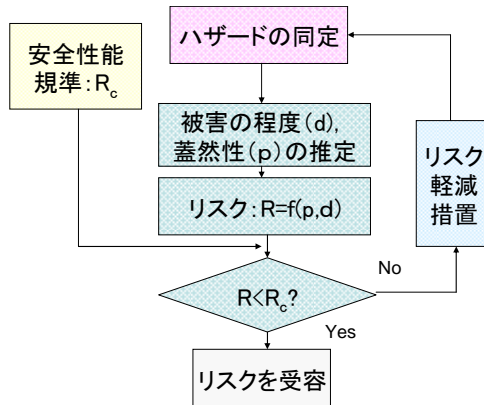


図 1・11 リスク評価の流れ図

図 1・11 では, まず, 考察するシステム内でのハザードを同定してリスク $R = f(p, d)$ を推定する。これを予め設定した最大許容リスクである安全性能規準 R_c と比較して安全 $R < R_c$ であることを確認する。 $R \geq R_c$ の場合はリスク軽減措置をとり, 安全な状態になるまでリスクの軽減に努める。

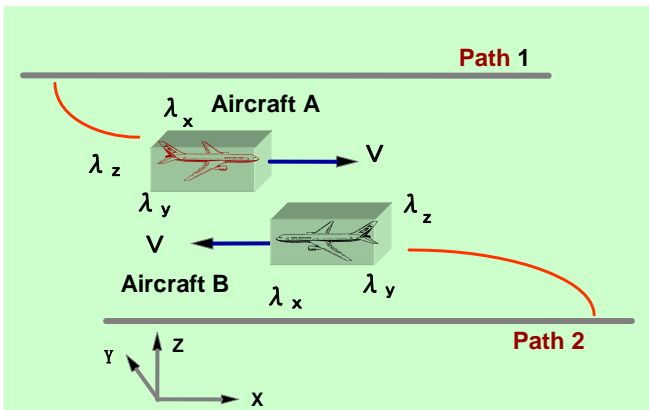


図 1・12 衝突モデルの考え方 (直方体は航空機。経路上を飛行しようとするが誤差により逸脱)

実際の航空交通管理のシステムでは、飛行中の危険事象としては空中衝突などを想定する場合が少なくない。この場合は空中衝突のリスクを推定するが、これは数学モデルなどによることが多い。1960年代に開発された Reich モデルはその代表例である。図 1-12 にその考え方を示す。図中の直方体は航空機の寸法を表す。航空機は与えられた経路上を飛行しようとするが、実際には何らかの原因により経路から逸脱するものと仮定している。二つの直方体が3次元空間で重なる場合に空中衝突が起こるものとしている。こうした数学モデルの応用例は様々であるが、ICAOの「管制間隔設定のための空域設計方法論マニュアル」⁵⁾には代表的例が示されている。

■参考文献

- 1) Safety Management Manual (SMM), ICAO Doc 9859 AN/460, 2006.
- 2) 長岡 栄, “航空交通管理における安全性管理と安全性評価,” 信学技報 SSS2007-22, Oct. 2007.
- 3) 長岡 栄, “航空システムの安全,” 電子情報通信学会誌, vol.88, no.5, pp.342-348, 2005.
- 4) “航空安全行政と安全マネジメント(上),” 航空技術, no.640, pp.25-32, Jul. 2008.
- 5) “Manual on Airspace Planning Methodology for Determination of Separation Minima,” ICAO Doc 9689, 1st Edition, 1998.

1-4-6 交通工学的アプローチ

(執筆者：長岡 栄) [2009年3月 受領]

航空機の運航を交通流として扱う交通工学的アプローチがしばしば用いられる。交通工学 (Traffic Engineering) は交通、すなわち物や人の移動に関する工学である。交通工学はもともと土木工学の一部で、道路交通の分野を中心に発展してきた¹⁾。後には海上交通の分野でも確立されている²⁾。最近では Internet などの通信のトラフィックにも適用されている。こうした工学的手法は航空交通の分野でも古くから応用されてきている^{3),4),5)}。

航空交通管理 (ATM) の分野では、多くの検討課題は安全で効率的、そして騒音や排出物などの環境負荷を軽減するような航空交通システムの実現にかかわるものである。システム設計・運用計画を策定する際は、安全性の問題ではリスクの定量化、効率を考慮する場合には費用対便益の効果や遅延の軽減効果などを評価する。住宅地に隣接した空港周辺では、いかに騒音の影響を少なくするような飛行経路を決定するかが課題となる。こうした問題では、安全性と効率のように相反しかねない要素を含んでいる。このため、幾つかの拘束条件の下で複数のパラメータを有する最適化問題の解法に関するものが少なくない。

航空の分野で対象とする交通具は、空中では航空機のみであるが、空港では航空機に加え走行車両などがある。交通路は3次元の航空路や空域である。空港内の航空機は2次元空間を移動する。出発空港から到着空港までを飛行する航空機の動きは、空港をノードとするネットワークフローで表現できる。

交通工学的手法の基礎は交通流の実態調査と解析である。次にはシステムのモデル化、そしてシミュレーションなどの手法が用いられる。交通流の実態調査では現場での観測、航空交通管制情報処理システムや機上システムから抽出したデータの解析が必要となる。システムのモデルには数理モデルがよく用いられる。通常、モデルの妥当性は実測データと比較して検証する。決定論的なモデルに加えて不確定要素を考慮した確率論的モデルが用いられる。空域や空港の容量、サービスの質、経済性に関するモデルや解析は文献 6) に詳述されている。また、例えば、最近の交通流の解析など⁷⁾では、

- ① 待ち行列ネットワーク
- ② 流体力学的交通流理論
- ③ セルオートマトン

などによるモデルが用いられている。航空交通管制の基準やシステムの設計などの問題では、シミュレーションによる解析を行うことが多い。簡単なファストタイムシミュレーションに加えて、必要に応じて、管制官やパイロットをシステム内に取り込んだ実時間シミュレーションなども行われる⁸⁾。

航空交通管理 (ATM) の研究に関する代表的な国際会議には、USA/Europe ATM Seminar⁹⁾ と ICRAT (International Conference on Research in Air Transportation)¹⁰⁾ などがある。双方とも約 2 年ごとに開催される。これらの会議には ATM における交通工学的論文が多く発表されている。

■参考文献

- 1) 大蔵 泉, “交通工学,” コロナ社, 1993.
- 2) 藤井弥平, “序説 海上交通工学,” 海文堂, 1973.
- 3) G. E. Bell, “Operational Research into Air Traffic Control,” J. Royal Aeronautical Soc., 53:965-976, 1949.
- 4) D. R. Cox, “The Statistical Analysis of Congestion,” Journal of the Royal Statistical Society. Series A, 118/3:324-335, 1955.
- 5) 長岡 栄, 武藤忠雄, 吉岡栄治郎, “出発機の地上滑走における走行速度と走行距離の関係,” 日本航空宇宙学会誌, vol.26, no.291, pp.188-191, 1978.
- 6) Malan Janic, “Air Transport System Analysis and Modelling,” Gordon and Breach Science Publishers, 2000.
- 7) C. Gwiggner, S. Nagaoka, “Recent Models in the Analysis of Air Traffic Flow,” 日本航空宇宙学会 飛行機シンポジウム講演論文集, 2B10, Oct. 2008.
- 8) 東福寺則保, “実時間ダイナミックシミュレーション実験による航空交通流管理手法の一検討,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J79-B II, no.1, pp.78-85, 1996.
- 9) USA-Europe ATM Seminar の URL: <http://www.atmseminar.org/>
- 10) ICRAT の URL: <http://www.icrat.org/>