

いろいろな航法 —いろいろな運用—

3.

福島 幸子
(独) 電子航法研究所

航空機の運航のために

航空機が目的地まで予定の経路で飛行するには、常に自機の現在位置を測定し、目的地までの距離や方向を把握する必要がある。これらの測定を行い、測定結果に基づき正しく経路上を飛行する方法を航法 (Navigation) という。

航空管制では安全性を保ちつつ、より効率のよい運航を目指している。そして、安全のために管制間隔が規定されている。これは2機の航空機間に安全のために最低限確保すべき「距離」、あるいは同一経路上で最低限確保すべき「時間差」である。管制間隔は監視性能や航空機の搭載機器の性能などによって規定される。管制間隔が短縮できると空域容量が増加するため、より効率のよい管制運用が期待される。

航空管制は通信 (Communication)、航法 (Navigation) および監視 (Surveillance) の3つの技術の上に成り立ってきた。これらの技術はそれぞれの頭文字をとって、CNS技術と呼ばれている。ICAO (International Civil Aviation Organization : 国際民間航空機関) はFANS委員会 (Future Air Navigation System 委員会 : 次世代航空システム特別委員会) で衛星システムや自動化システムを含む新しい航空航法システム技術のあり方について検討しFANS構想をまとめ、1991年9月にICAO本部で開催された第10回航空会議で承認された。航空管制に加え、航空交通流管理、空域管理といった

ATM (Air Traffic Management : 航空交通管理) の実現のためには、これまでのCNS技術に加えて、データリンク、静止衛星によるAMSS (Aeronautical Mobile Satellite Service : 航空移動衛星通信)、GNSS (Global Navigation Satellite System : 全地球的航法衛星システム) およびADS (Automatic Dependent Surveillance : 自動従属監視) などの技術の導入が必要であり、新CNS/ATM構想と呼ばれている。

本稿では航法に重点を置きつつ、通信や監視の話題も含め、いろいろな管制運用について述べる。

運航のための機器

航法装置により、パイロットは自機の位置を把握できる。また、監視装置により管制官は多くの航空機の位置関係を把握できる。そして、通信装置により、これらの情報の授受を含め互いに情報を共有できる。

航法装置

航法装置はパイロットに自機の位置を知らせるとともに、航行を支援する。通常、地上施設あるいは人工衛星と機上装置が組み合わされて使用される。かつては、VOR (VHF Omnidirectional Radio Range : 超短波全方向式無線標識施設) やDME (Distance Measuring Equipment : 距離測定装置)、TACAN (TACTical Air Navigation system : 戦術航法装置) といった航法装置が主流であったが、GNSSやSBAS (Satellite Based Augmentation System : 静止衛星型衛

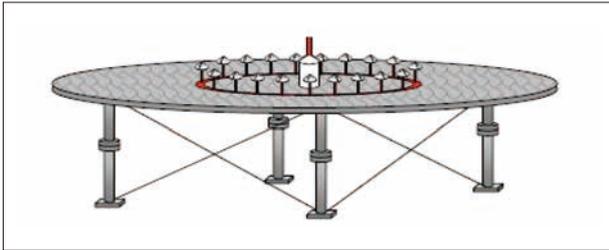


図-1 VOR/DME の例²⁾

星航法補強システム) といった、衛星利用の航法が発展しつつある。

■ 地上施設

地上に設置している代表的な航空保安無線施設として、VOR、DME などの航行援助施設があり、全国に展開されている¹⁾。VOR と DME は併設されていることが多く、その例を図-1 に示す。

中心部の赤いアンテナが DME であり、基地局から航空機までの距離が分かる。また、中心部の白いアンテナと周りの複数のアンテナが VOR である。中心部のアンテナは参照信号を放射し、周囲のアンテナは方向によって位相の異なる信号を放射する。航空機はそれらの位相差から基地局からの磁方位が分かるので、基地局へ向かう飛行ができる。

保安無線施設は覆域の関係から日本全国をカバーするために多くの基地局が全国展開された。通常の航空路は航行援助施設を結んで約 500 本が設定されている。これらは直線ではなく、折れ線状の経路になることが多い。

空港への着陸については多くの空港で ILS (Instrument Landing System : 計器着陸方式) が使われている。ILS は、精度によってカテゴリ 1 (CAT-I)、CAT-II、CAT-III a、CAT-III b、CAT-III c と分類され、より大きな数値のカテゴリほど低い DH (Decision Height : 決心高度) に対応できる。また、a、b、c となるに従い、悪い視程に対応できる。パイロットは DH で滑走路が視認可能かどうかで着陸を判断する。現在 CAT-III b が成田空港などの 5 空港に導入されている。

■ 人工衛星

航空に利用できる衛星としては GPS (Global

Positioning System : 全地球的衛星測位システム) や GLONASS (GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema : 全地球測位システム) などの GNSS がある。時間的に同期した複数の衛星からの電波を受け、距離を測ることで、航空機により精密な位置を把握することができる。GNSS による測位精度は高く、また地上の施設の利用が必要ないため広い範囲で利用可能である。

さらに精度のよい精密測位のためには SBAS による補強情報の利用が必要である。SBAS の補強情報とは GNSS 衛星の位置誤差や電離層補正量などで、これらにより測位精度や安全性、信頼性を向上できる。日本上空では MTSAT (Multi-functional Transport SATellite : 運輸多目的衛星) による運輸多目的衛星用衛星航法補強システム (MSAS : MTSAT-based Satellite Augmentation System) の SBAS がある。

監視装置

地上からの監視装置としてレーダ (Radar) が設置されている。初期のレーダは基地局から電波を発信し、航空機からの反射波を測定し、基地局から航空機までの距離や方向を求める装置で、これを 1 次レーダという。

2 次レーダはトランスポンダを搭載している航空機の情報 (高度など) を取得することができる。現在は 2 次レーダが主体である。応答用の DBC (Discrete Beacon Code : ビーコンコード) は 4 桁の 8 進数から構成され、パイロットが手動で設定する。レーダサービスを行うときに管制機関から割り当てられる。この情報は飛行計画と結びつけられ、管制官が使用する画面に航空機の位置や便名、高度などの情報が表示される。

主なレーダとしては、ASR (Airport Surveillance Radar : 空港監視レーダ)、ASDE (Airport Surface Detection Equipment : 空港面探知レーダ)、SSR (Secondary Surveillance Radar : 二次監視レーダ)、ARSR (Air Route Surveillance Radar : 航空路監視レーダ)、ORSR (Oceanic Route Surveillance Radar : 洋上航空路監視レーダ) などがある。図-2 に



図-2 ARSR 基地局とアンテナ²⁾

ARSR の基地局とアンテナを示す。左図の白いドームの中に右図のアンテナが入っている。

なお、レーダは電波を全方向に発信するが、その1周の周期（1 スキャン）は滑走路に近いものほど短く、空港面では1秒、ターミナル（空港周辺）では4秒、航空路では10秒である。

洋上空域まではレーダの電波が届かない。衛星測位はレーダの届かないところ（洋上や遮蔽物のある地域）でも利用可能であり、航空機側で測定した測位情報をデータリンクにより共有する自動従属監視（ADS：Automatic Dependent Surveillance）であるADS-C（ADS-Contract）により洋上の航空機の位置を正確に把握できる。ADSを搭載していない場合、パイロットは定められた位置通報点で通過時刻や高度の情報の通報を後述するHF通信で報告する。

ADS-B（ADS-Broadcast）には自機の位置や速度等の情報を定期的に放送する機能がある。さらに、ADS-Bにはinとoutがある。ADS-outは出力のみに限定されているが、ADS-inは出力機能に加え他機の位置情報を入力として得ることができる。

通信装置

洋上空域では従来の音声によるHF（High Frequency：短波）通信から、CPDLC（Controller-Pilot Data-Link Communications：管制官パイロット間データ通信）が多くなった。CPDLCの利点はデータ通信によるため、聞き間違いなどのエラーがなくなることである。反面、通信相手はすぐに応答するとは限らないので、急を要する内容には向かない。また、音声通信と異なり他機のパイロットと管制官

の通信内容を傍受することができず、パイロットは他機への管制内容は把握できない。

陸域では、管制官とパイロットはVHF（Very High Frequency：超短波）かUHF（Ultra High Frequency：極超短波）により音声通信を行っている。CPDLCの導入も検討されているが、このためにはメディアとしてVHF帯のデータリンクの導入が必要である。

機上搭載電子機器（Avionics）

航空機には通信機器、航法システム、自動操縦装置、飛行管理装置（FMS：Flight Management System）などが搭載されている。また、対地接近警報装置（GPWS：Ground Proximity Warning System）や航空機衝突防止装置（TCAS：Traffic alert and Collision Avoidance System）といった警報装置も搭載されている。航空機のさまざまな情報はFMSで管理されており、FMSのコンピュータによって燃料消費や気象（特に風速度）、地上の通過点や訓練空域などの制限を踏まえた飛行プランが計算される。VNAV（Vertical NAVigation）機能やLNAV（Lateral NAVigation）機能もその代表的な機能で、与えられた条件のなかで最良のプランが計算される。

性能準拠型航法（PBN：Performance Based Navigation）

管制官は運航情報により航空機の搭載機器を把握しており、航空機の性能上可能な管制指示を判断し、発出している。機上にはGPSや高度計といった自機の位置を監視する装置、FMSといった飛行を管理する機器がある。機上に搭載される機器は同機種でも機材によって異なるため、各航空機の航法能力を示す指標がある。ICAOでは「PBNマニュアル」³⁾を規定し、世界的な基準の統一を図った。

航空機の性能が高くても（たとえば、管制間隔の短縮可）、関連機の性能が低い場合は低い性能による基準が適用されるため、性能の高さが活かせず、空域あるいは時間を無駄にしたり（出発遅延）、経済的な高度を飛行できない場合がある。PBN運航とは、航空機の性能によって運航できる航空路や空域を分

離する（高性能の航空機に限定する）ことである。これにより空域全体の管制効率の向上が期待できる。

RNAV

通常の航空路は航空無線施設を結んだ経路で、基地局への磁方位を基準に設定している。RNAV (Area Navigation) とは、広域航法のことで、RNAV 経路は地上の航行援助施設に依存せず、任意の地点を結んで設定できる。目的地と直線で結ぶような経路も設定できるので、飛行経路の短縮が可能となる。GPS を利用することで、RNAV 経路を飛行できる。

RNAV の次に数値がきて、RNAV10, RNAV5, RNAV2, RNAV1 といった表現をする。この数値はたとえば RNAV10 は飛行の 95% が ± 10NM^{☆1} の誤差範囲に前後左右のずれを収めることができる精度の証明（資格）を示す。また、RNAV0.3 などさらに高い精度の基準もあり、滑走路への進入など、より精密さが求められる場合に用いられる。

現在は、航空路用に 49 本の RNAV 経路が設定されている。また、RNAV (GPS) 進入方式は GPS を補助的に利用する方式で現在函館空港などの 5 空港に導入されている。将来さらなる増加が検討されている。

RNP

RNP (Required Navigation Performance) は航法性能要件といい、RNAV と同様に RNP の次に数値がきて、RNP4, RNP1 といった表現をする。RNAV と数値の意味は同じだが、RNP は RNAV と異なり、Performance Monitoring and Alerting (性能監視と警報) 機能を機上に搭載する必要がある。より小さい値の RNP 値が、管制間隔も短くなる。関連機の RNP 値が異なるときは、精度の劣る方の基準が適用される。

RNP4 の運用のイメージを図-3 に示す。RNP10 運用だと、縦間隔、横間隔とも 50 海里 (NM) 以上確保する必要があるが、RNP4 運用ではそれぞれ 30 海里 (NM) と短縮される。図中の 4 分は 450knot^{☆2} で 30NM を通過するのにかかる時間である。

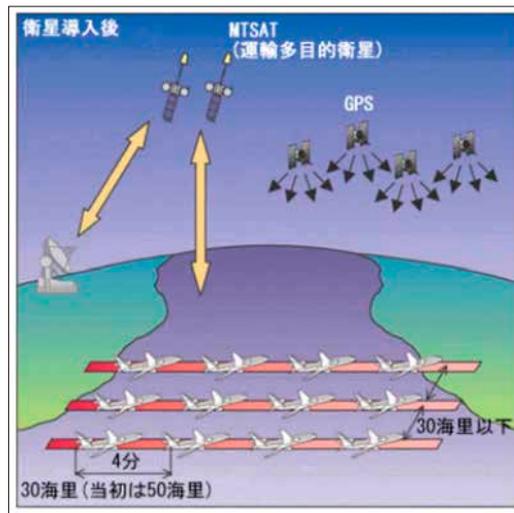


図-3 RNP4 運用のイメージ^{☆2}

RVSM

かつては、飛行高度の垂直安全間隔は FL290 (Flight Level : FL290 は高度 29,000ft^{☆3} を示す) 以下は 1,000ft, FL290 以上は 2,000ft であった。高度計を 2 系統搭載するなどの条件のもと、RVSM (Reduced Vertical Separation Minima : 垂直間隔短縮) 運航ができるようになった。これは、1,000ft 垂直間隔の適用基準を FL290 以下から FL410 以下までに拡張するものである。経路の交差が少なく、東西交通量に時間的に偏りがある洋上空域から導入された。

国内空域では交差経路も多くあり、導入検討は洋上空域よりも時間を要した。RVSM 適合機と非適合機が混在する場合は管制の効率性が低下すると予測されるため、基本的に非適合機は FL290 以下しか飛行できないことになった。

FMS の機能

FMS (Flight Management System) にはいろいろな機能がありオプションとなっているものも多い。その中でも航法に直接関係のある代表的な例を以下に挙げる。

• VNAV (Vertical NAVigation)

航法データベースに登録された降下経路情報により垂直方向のガイドを利用することで一定の降下角

☆1 1 NM = 1.852km
 ☆2 1 knot = 1.852 km/h
 ☆3 1 ft = 0.3048m

での進入を可能とする機能である。VNAV 進入や CDO (Continuous Descent Operation : 継続降下運航方式) を行うにはこの機能が必要である。

• RF (Radius to Fix) 旋回

経路の地点間を結ぶ円弧を FMS が計算し、旋回時にも経路中心線を飛行する旋回である。この旋回により曲線での航跡のばらつきを抑えることができる。

空港や洋上での運用

後方乱気流

航空機の飛行に伴い、翼から渦が発生するため、これが後続機に乱流となって影響する。これを後方乱気流といい、後続機は安全のために先行機と間隔を確保する必要がある。この間隔は航空機の重量の組合せによって規定される。

最近では、滑走路上で横風が強いときは気流の減衰が早いことに着目した間隔短縮の研究もされている。

視程

進入では、視程が悪く DH で滑走路が視認できないときは進入復行を行うことになっている。ILS のカテゴリが高度化されるに従って DH が低くなり、低視程時でも進入できる。地理的な条件で ILS が滑走路の片方にしか設定できない場合もあり、就航率の低下を招く場合がある。

全天候型の進入方式は就航率の改善にも寄与する。GNSS を用いた GBAS (Ground Based Augmentation System : 地上型衛星補強システム) により、ILS 設置の難しい場所でも精密進入ができるように研究が進められている。

洋上経路の自由度

洋上を飛行するとき、自由に緯経度の羅列で予定経路を設定していた頃もある。しかし、交通量の高まりとともに、効率的経路を複数設定し、航空機はどれかの経路を選択して飛行している。現在、太平洋上では固定経路のほかに毎日の気象予報をもとに設定される可変経路である PACOTS (PACific

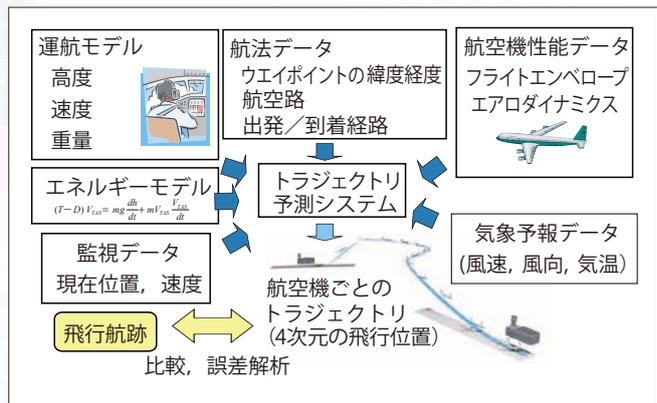


図-4 TBO のイメージ図⁴⁾

Organized Track System) が運用されている。これらの経路は管制横間隔を確保して設定され、1日に1回公示される。しかしそのため、PACOTSは最適経路ではない場合もある。

管制間隔が短縮されていく中で、より多くの共通の経路を設定可能となるが、それよりも、本来航空会社が望む UPR (User Preferred Route : 利用者設定経路) の飛行が要望されてきた。UPRは航空会社が飛行便ごとにそれぞれ最適な経路として設定したもので、機種や重量、乗り継ぎ便の状況、経営方針などによって異なる。

UPRは交通量の少ない空域から試行を経て導入されていった。最近ではアジア-北米間などの交通量の多い空域でも、制限(主にある経路との横間隔維持や運用時間)を設けることで、順次UPRの飛行が検討・導入されてきている。

TBO

TBO (Trajectory Based Operation : 軌道ベース運用) とは、将来の管制運用のあり方で、経路だけでなく経路を結ぶ地点の通過時刻まで管理し、より効率的な管制運用を目指すものである。イメージ図を図-4に示す。

これには多くの技術が必要とされる。まずは気象予報や、FMSが計算する経路上の地点の通過予定時刻といった予測精度の改善である。また、地上・機上双方でこれらの情報が確実に更新・共有される

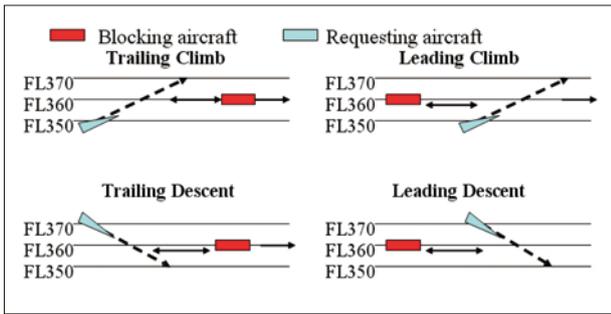


図-5 ADS-C Climb Descend Procedure⁵⁾

必要がある。管制側から指示された経路や通過時刻を実現する精度向上や誤差低減が課題である。

TBO をさらに高度化するための代表的な新しい技術として以下がある。

- ADS-B
- ASAS (Aircraft Surveillance Applications System : 機上監視応用システム) ADS-B の機能に加えて、機上側でも管制業務の一端を担うことができる。
- 陸域 CPDLC

洋上での管制間隔短縮

洋上では RNP4 の要件を満たしている航空機同士でも、30NM 以上の間隔を確保する必要がある。しかし、2 機のうち 1 機が巡航しており、他機が上昇もしくは降下するときは一時的に管制間隔を短くできる方法が提案されている。試行が行われた国もあるが、我が国ではまだ検討段階である。

これらには、ADS-C を用いた CDP (Climb and Descent Procedure : 上昇降下方式) と ADS-B を用いた ITP (In Trail Procedure : イントレイル方式) がある。CDP と ITP には意思決定が管制官かパイロットかの差があるが、コンセプトとしては、図-5 にあるように、高度変更機 (水色の△) は巡航機 (赤□) の高度を通過するときのみ、一定 (30NM

以上) の距離を保てば、その高度を通過してさらに 1,000ft 先の高度に上昇 (もしくは降下) できる。図中黒実線矢印の長さは本来なら 30NM 以上が必要であるが、この方式では、後続機が先行機を超えないときは 16NM 以上となる。

洋上空域で交通密度が高いときは、管制間隔確保のために燃料効率の悪い低高度での飛行や出発遅延が生ずるが、CDP や ITP は、低高度飛行を解消し理想的な飛行プロファイルの飛行に有効であり、また、出発遅延短縮にも寄与できる。このような運用を行うには、関連機が ADS-C もしくは ADS-B を搭載していることが必要である。効率的な飛行プロファイルを実現するために、RNP4 適合機の増加や ADS-C/B の搭載率の向上が望まれる。

また、将来システムとして考えられている ASAS の搭載率が向上すれば、空港までの安全間隔を航空機同士で保持しながら飛行することも可能である。しかし、ASAS の場合は管制の責任の一部をパイロットが負う運用もあるので、将来的にはパイロットと管制官の役割分担の検討も必要となる。

参考文献

- 1) 航空宇宙電子システム編集委員会：航空宇宙電子システム、日本航空技術協会、航空保安システム協会 (Aug. 1995).
- 2) 国土交通省 Web ページ (航空)、<http://www.mlit.go.jp/koku/index.html>
- 3) ICAO : Performance-Based Navigation Manual, Doc 9613 (2008).
- 4) 福田, 白川, 瀬之口 : 飛行速度調整による時間管理の検討, 電子航法研究所第 11 回研究発表会プレゼン資料, http://www.enri.go.jp/report/hapichi/pdf2011/H23_12p.pdf
- 5) FAA : Status Update for Development and Implementation of ADS-C Climb Descend Procedure, IPACG/34 IP3 (May 2011). (2012 年 2 月 8 日受付)

■ 福島 幸子 sachiko@enri.go.jp

電子航法研究所入所以来、航空管制および航空交通管理の研究に従事。現在 (独) 電子航法研究所航空交通管理領域上席研究員。