

2.2. RNP 進入と GLS を接続する進入方式の 気圧高度差に関する検討

航法システム領域 福島 荘之介, ※齊藤 真二, 山 康博
航空交通管理領域 森 亮太

1 まえがき

GNSS による進入着陸システムである GBAS (Ground-Based Augmentation System) [1]を利用したカテゴリ-I の GLS (GBAS Landing System) 運航が欧米を中心にはじまった。初期の GLS 運航は、全進入方向への直線進入であり、ILS が未設置または制約のある進入方向に有効となる。さらに様々な GLS の運航が各国で検討されており、特に RF レグ (Radius to Fix: 円弧旋回) を有する RNP 進入と GLS または ILS (xLS と総称される) の直線最終進入セグメントを接続して精密進入を実現する RNP to xLS 進入方式の開発が期待されている[2]。

一方、現在までに GNSS を用いた RNAV による計器進入は、国内に約 40 方式が導入されている。また、特別許可に基づく RNP AR (Authorization Required) 進入方式の導入が進展しており、ここ数年間で 20 方式以上が実現された。RNP AR 進入の特徴は、RF レグが使用可能で、保護空域の狭い自由度の高い経路を設定して計器進入ができることにあり、これまで複数の空港で経路短縮による便益が報告されている[3-5]。RNP AR 進入による運航が APV (垂直ガイダンス付き進入方式) に区分されるのに対し、RNP to xLS は精密進入であるため、RNP-AR 進入の長所に加え、ILS と同様に精密進入の最低気象条件や進入限界高度の適用が期待できる。

これまでの RNP to xLS 方式の検討では、気温変動による気圧高度の差が、xLS のグライドパスへの正常な会合を妨げる主要因であることが指摘されていた[6]。このため、本研究では、航空会社のフライトシミュレータによる検証を通じて、進入経路を適切に設計する方法を検討している。本稿では、始めにこれまでの RNP to xLS 進入の検討状況をレビューする。次に、気温変動に依存せず正常に会合可能な経路設計

法の検討例を示し、RNP to GLS 経路の航法データベースを構築して実施した B787 フライトシミュレータによる検証実験の結果を報告する。

2 RNP to xLS 進入の検討状況

2.1 海外での研究

初期に RNP AR の RF レグから ILS の最終セグメントへの接続経路の設計方法を検討したのは、FAA の諮問委員会である PARC (Performance-based Operation Aviation Rulemaking Committee) である。その目的は、現存する AFDS (Autopilot Flight Director System) の ILS 最終コースへのキャプチャ基準から、経路設計の条件を導くことにあった。報告は、RF レグを直接 ILS の最終進入セグメントに接続する経路を前提に、気温による気圧高度の変化を重視して、複数の FMS ベンダーのキャプチャ基準から、RNP 値と最終セグメントの最小距離、気温とキャプチャ可能な VNAV パス角の関係などを初期検討している[6]。その後 PARC は、FACF (Final Approach Course Fix) と PFAF (Precise Final Approach Fix) 間に浅い (Shallow) 角度のレグを挿入する手法を提案した[7]。

最近、飛行方式設定の基準である ICAO (国際民間航空機関) PANS-OPS (Procedure for Air Navigation Services - Aircraft Operations) を策定する計器飛行方式パネル (IFPP, Instrument Flight Procedure Panel) は、RF transition to final approach として議論を始めており、欧州では SESAR の研究課題としても取り組まれている [8-9]。

2.2 初期検討

現在、国内に導入されている RNP AR 経路は、RNP 0.3 以下の航空機を対象に、RF レグ半径約 2 NM、最終進入セグメント長 3 NM など、

経路短縮効果の高い経路が多い。RF レグを GLS の最終進入経路に接続できれば、これらと同様の経路が実現できる。このため、我々も最初は主に課題の抽出を目的として、実験用の標準的な飛行経路の設計を試み、RF レグを直接最終進入セグメントに接続する経路を設計しフルフライトシミュレータによる検証実験を実施した。しかし、高温時には飛行高度が高くなり GLS のローカライザ (LOC) とグライドスロープ (GS) のキャプチャがほぼ同時に生じ、GS が先にキャプチャされるケースもあった。この場合、AFDS は GS を維持するようにピッチを制御し、LOC コース外で GS パスを降下する。ILS の GS には LOC コース外で保証がなく、先に GS にキャプチャすることは認められていない。GLS においては保証があるが、現状では ILS と同様の運航が望まれる。

このため、検証実験の結果をパイロットなど複数の関係者と検討し、意見交換を行った。この結果、RF レグの後に直線レグを挿入して最終進入セグメントに接続する方式（現在の ILS に近い）が望まれるなどのコメントがあった。また、現在の ILS 方式とは GS 偏移指示（ポインタ）の挙動が異なることから、高温時においても GS に会合可能な経路の検討が課題であった[10]。

3 実験シナリオ

3.1 実験経路の設計

前回実験で生じた気温による気圧高度差による課題を解決するため、新たな RNP to GLS 標準経路の設計法を検討し、航法データベース (NAV database) を作成した。シミュレータは、電子航法研究所が GBAS 地上プロトタイプ装置を設置する関西国際空港に GLS 経路を設定可能としている。実験経路は、従来作成した研究用 GLS RWY24R 進入方式 (図 1) をベースとし、飛行方式設定基準を参考として設計した [11]。設計経路は、航法データベース供給者により ARINC424 仕様[12]でコーディングされ、FMS ベンダーによる品質チェック後、FMS データとしてパッキングされた。

図 2 に、RF レグの後に TF (Track to Fix) レグを挿入して、直接最終進入セグメントに接続

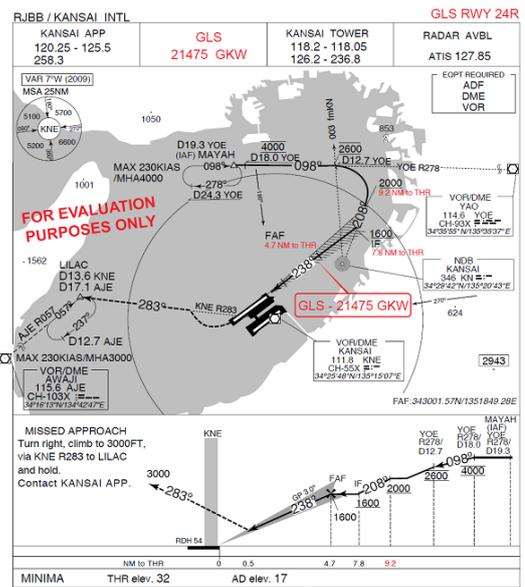


図 1：関西国際空港 GLS RWY24R（研究用）

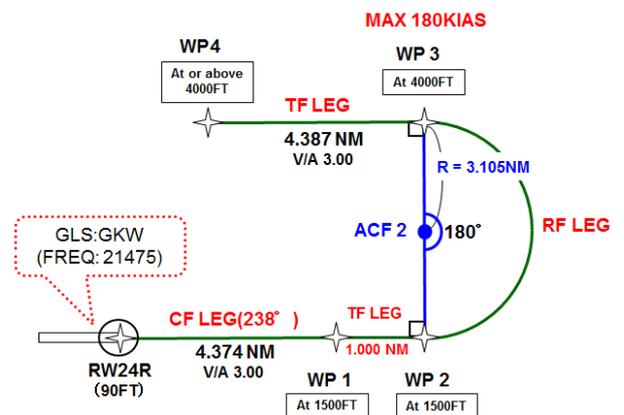


図 2 RF レグの後に TF レグを挿入する標準経路

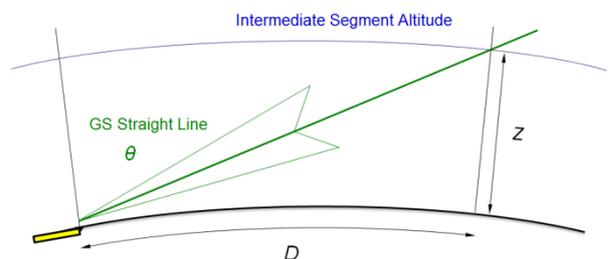


図 3 気圧高度と GS の関係

する標準経路の設計例を示す。RF レグの半径は、WP (Waypoint) 3 の速度を指定して定めた。RW24R から降下角 3 度のパスで、地球の

丸みを考慮して海拔が 1,500 ft となる点を WP1 とし, RW24R から WP1 までの球面上の距離 (4.374NM) を計算する。次に, RW24R の緯度経度, WP1 への方位, 距離から WP1 の緯度経度を計算し, 順に次の WP の緯度経度を求めた。WP1 と WP2 の距離は 1.0NM, 高度は同じ 1,500 ft とした。この手順では, FAA で推奨されている以下の計算ツールを使った。

- (A) 球面上の 2 地点の座標 (緯度・経度) を与え, 地点 A から地点 B への真方位・距離を求める。
- (B) 球面上の地点 A の座標 (緯度・経度) と真方位・距離を与え, 地点 B の座標を求める。

3.2 気温変化による気圧高度差の計算

海面気温を考慮して設計経路の高度プロファイルと 3 度の GLS の GS の関係を検討するため, 経路上の高度を計算するツールを作成した。図 3 に示す GS と交わる WP の高度 (球面上) Z は,

$$Z = \frac{(r + LTP + TCH) \times \cos \theta}{\cos\left(\frac{D}{r} + \theta\right)} - r \quad (1)$$

と計算した[13]。ここで

LTP = 滑走路末端の海面高 (ft)

TCH = GSが滑走末端を通過する高さ (ft)

θ = GS角(rad)

r = 地球半径 : 20890537(ft)

D = LTPからフィックスまでの距離(ft)

である。また, WP までの距離 D は

$$D = r \times \left(\frac{\pi}{2} - \theta - \text{asin} \left(\frac{\cos \theta \times (r + LTP + TCH)}{r + alt} \right) \right) \quad (2)$$

と計算できる。ここで

alt = 中間進入高度 (ft)

である。

図 4 は, 本ツールにより求めた RF レグに沿った距離と高度の関係である。GS 上の高度は, 起点からの直線距離に比例するため, 標準

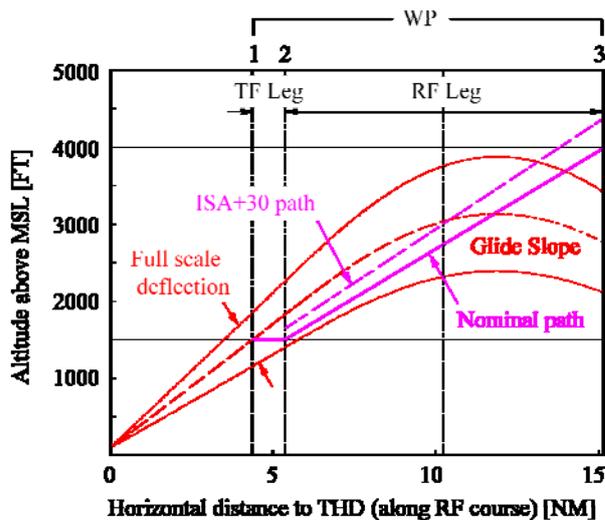


図 4 設計経路の高度 (GS と RF レグの関係)

経路に沿った GS パス (赤破線) は, 起点からの直線距離が短いほど高度が低い。GS 偏移指示のフルスケール (赤点線) は, 3 ± 0.75 度である。GS に下から正常に会合するためには, RF レグの降下角が重要である。このため, 国際標準大気モデル (ISA : International Standard Atmosphere) により, 気温が変化する場合の気圧高度の補正值 C を

$$C = H \times \frac{15 - t_0}{273 + t_0 - 0.5 \times L_0 \times (H + H_{SS})} \quad (3)$$

と計算し, 高温の場合にも GS に会合可能な RF レグの降下角を求めた。ここで,

H = H_{SS} 上の高度 (ft)

t_0 = 海面上の気温(°C)

L_0 = 0.00198(°C/ft)

H_{SS} = 高度計設定源の海拔 (ft)

である[14]。ISA は海面上の基準気温が+15°C であり, 高度の上昇に伴い気温が低下する。

GS 偏移指示は, WP3 と WP2 の中間地点において最初に表示される。このため, 基準気温が+45度 (ISA+30) のパス (マゼンタ破線) においても, GS 高度を超えない (すなわち GS 偏移指示がセンターより上側に表示される) ことを条件とし, ノミナルの RF レグ (マゼンタ実線) の降下角を 2.4 度とした。



図5 フライトシミュレータ検証実験の様子

4 シミュレータによる検証実験

4.1 フライトシミュレータ設備

検証実験には、ビジュアルおよびモーション制御を装備する全日本空輸（株）訓練センターのフルフライトシミュレータ（B787）を利用した。本装置は、通常パイロットの操縦訓練などに利用される。本シミュレータは、実際の航空機システムの飛行特性を再現することが可能であり、FMS など実際の機上装備の動作を忠実に模擬する。このため、実際の航空機と同様の FMS データが利用される。また、風や気温など気象状況を設定可能である。この他、本シミュレータは、速度、姿勢など設定したパラメータをファイルに保存する機能、プライマリフライトディスプレイ（PFD）、ナビゲーションディスプレイ（ND）の動画を保存する機能を持つ。

検証実験では、風の設定を無風とし、速度、フラップは実際の環境と同様に操縦した。実験は、関西空港 B 滑走路を 24 方位への離陸後、WP4 から経路上を飛行して DA（決心高度）までを 1 試行とし、再び上昇して試行を繰り返した。高度、ILS 偏移、キャプチャタイミングなどの他、速度、飛行姿勢などのパラメータを記録した。図 5 にシミュレータによる検証実験の様子を示す。

4.2 検証結果

図 6 に基準気温を -30°C （ISA-45） $\sim +45^{\circ}\text{C}$

（ISA+30）まで変化させた各試行の飛行高度（青実線）を示す。検証結果の高度と計算値（マゼンタ実線）は、よく一致した。GS 偏移指示は WP2 と WP3 の中間位置において白色（中抜き）で表示され、キャプチャと同時にマゼンタ色（中塗り）に変化する。

各試行における気温とキャプチャの位置の関係を表 1 に示す。操縦者は、GS 偏移指示がセンターより上側にある WP2 へ 2.0 \sim 3.5 NM の

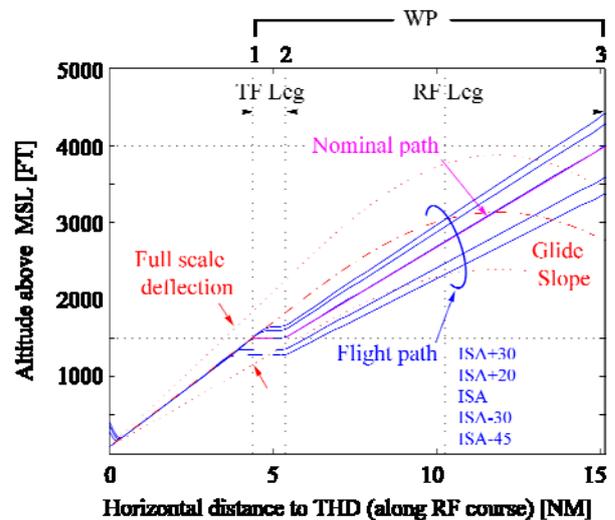


図6 飛行検証結果（海面気温を可変）

表 1 気温とキャプチャした位置

Atmosphere Model	MSL Temp [$^{\circ}\text{C}$]	APP Push Timing Distance to WP2[NM]	LOC Capture Distance to WP2[NM]	GS Capture Distance to WP1[NM]
ISA	15	3.5	1.0	0.3
ISA+20	35	3.0	1.0	0.6
ISA+30	45	2.0	1.0	0.7
ISA-30	-15	3.5	1.0	-0.2
ISA-45	-30	3.0	1.0	-0.5

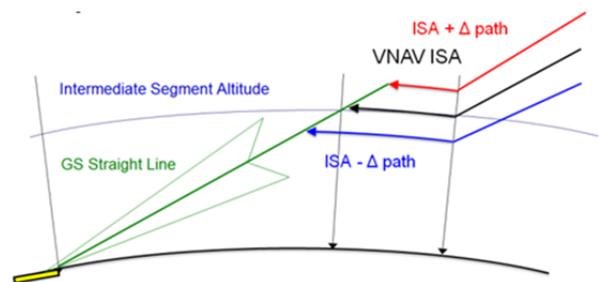


図7 気温による気圧高度差とGSの関係

位置で Approach Switch (APP) を押し、APP mode を設定した。LOC キャプチャは気温に依存せず、全ての試行で WP2 へ 1.0NM の位置で生じている。図 7 に示すように GS と中間進入の高度が交わる位置は、気温により変化し、キャプチャに影響する。検証の結果、+15°C (ISA) ~ +45°C (ISA+30) であっても GS キャプチャは、WP1 と WP2 間 (TF レグ上) で生じた。また、-15°C (ISA-30)、-30°C (ISA-45) では、予想どおり WP1 の先で GS キャプチャした。

5 考察

フルフライトシミュレータによる検証実験により得られた飛行高度とツールで計算した経路上の高度はよく一致する。さらに、海面気温が +45°C の場合にも WP1 と WP2 間の TF レグ上で GS にキャプチャすることが検証できた。気温変動による GS への会合という点では、この挙動は操縦可能な範囲と思われる。このため、本ツールにより RF レグの降下角を決定すれば、海面気温の変化による気圧高度差によらず GS を LOC より先にキャプチャすることを回避して経路設計することができる。今回、条件とした気温は、国内の最高気温以上として設計したが、最高気温を公示することにより、さらに低くする方法も考えられる。

TF レグの挿入については、GS への会合という意味では必ずしも必要でなく、TF レグがない場合にも RF レグの降下角をさらに浅く設計すれば、高温でも GS 偏移指示を意図する位置に表示させることは可能である。ただし、最適な降下角の検討にあたっては、GS との会合以外に、例えば燃料消費との関連も考えられる。

6 まとめ

将来の RNP to GLS 進入について、ISA モデルを用いて海面気温から気圧高度差を計算し標準経路を設計するツールを作成し、フルフライトシミュレータによる検証実験を実施した。この結果、RF レグの降下角を決定して GS に会合可能な経路の設計が可能となった。

本検証実験での航法データベースの作成において、ARINC424 コーディングとベンダーの品

質チェックに関する制約を検討する必要があることが分かった。特に、RNP to ILS については、RNP to GLS より制約が強いため、今後の課題となる。また、本研究の範囲外であるが実用化にあたっては、パイロットの操作手順やワークロードを考慮した検討も必要となる。

謝辞

設計経路のコーディングとパッキング、B787 フルフライトシミュレータの利用にあたっては、全日本空輸 (株) の藤原直樹様、笈田翔平様を始めご関係の皆様にご多大なご支援を頂いた。また、飛行方式の設計については、長崎大学の中西善信様 (前 NTT データアイ)、NTT データアイの甲田直美様に貴重なご助言を頂いた。ここに深く感謝致します。

参考文献

- [1] ICAO, International Standards and Recommended Practices, Annex10, Aeronautical Telecommunications, Vol. I, Radio Navigation Aids, July 2006.
- [2] 国土交通省, “将来の航空交通システムに関する推進協議会 PBN 検討 WG 平成 25 年度 活動報告書,” 2014 年 3 月.
- [3] 赤木宣道, “RNP AR 進入の導入および進捗について,” 日本航空宇宙学会誌, Vol.62, 2014 年 7 月.
- [4] 赤木宣道, “RNP AR 進入の進捗について (JAL),” 第 14 回 CARATS 高規格 RNAV 検討 SG 会議, 2013 年 4 月.
- [5] 大島睦実, “RJSR RNP AR の運航実績 (ANA),” 第 14 回 CARATS 高規格 RNAV, 2013 年 4 月.
- [6] PARC, “RNP to ILS Action Team Report,” March 2010.
- [7] PARC, “RNP to xLS Recommendations,” Aug. 2014.
- [8] ICAO Instrument Flight Procedure Panel, PBN and New Criteria Working Group, “WGal Status Report,” March 2014.
- [9] De Smedt, D. Robert, E. and Behrend, F., “RNP to Precision approach transition flight simulations,” Digital Avionics Systems Conference

(DASC), IEEE/AIAA 33rd, Oct. 2014.

- [10] 福島荘之介, 齊藤真二, 森亮太, 山康博,
“RNP から xLS に接続する進入方式のシ
ミュレータによる検討,” 日本航空宇宙
学会第 52 回飛行機シンポジウム, 1B13,
2014 年 10 月.
- [11] 国土交通省航空局, 飛行方式設定基準, 鳳
文書林, 国空制第 111 号, H18 年 7 月 7 日,
追録: 国空制第 348 号, H24 年 1 月 11 日.
- [12] Aeronautical Radio Inc., ARINC Specification
424-20 Navigation System Database, Dec.
2011.
- [13] FAA, The United States Standard for Area
Navigation (RNAV), ORDER 8260.54A, July
2007.
- [14] ICAO, Procedure for Air Navigation Services
Aircraft Operations, Vol. I, Flight Procedures,
DOC8168, Nov. 2010.