

## 2. RNAV 出発・到着経路の航跡解析

航空交通管理領域 ※福田 豊、白川 昌之

### 1. はじめに

航空機の運航効率の向上と空域の有効利用のため、RNAV (Area Navigation : 広域航法) の導入が進められている。RNAV では、従来の地上に設置された航行援助施設 (VOR/DME など) を基準とした航法とは異なり、任意の地点を結んだ経路を引くことが可能となる。航空機は GPS (Global Positioning System : 全地球測位システム)、地上の航行援助施設、慣性基準装置 (IRS : Inertial Reference System) などから得られる位置情報に基づき、FMS (Flight Management System) に登録された任意のウェイポイントを結んで飛行することができる<sup>[1]</sup>。

わが国における RNAV の導入は 1992 年の羽田 - 福岡間および羽田 - 新千歳間の航空路の試行運用から始まった。その後、航空路、到着経路などに対して順次導入が進められてきた。国土交通省航空局では短期、中期、長期の達成目標を定めた RNAV ロードマップを作成して、この展開計画を進めている<sup>[2]</sup>。2007 年 9 月 27 日には、国際民間航空機関 (ICAO : International Civil Aviation Organization) の PBN (Performance Based Navigation) Manual の Final Draft に基づいた RNAV1 (出発・到着経路) および RNAV10 (RNP10) (洋上経路) を、2008 年 3 月 13 日に RNAV5 (航空路) を導入した<sup>[3]</sup>。

将来の航空交通量の増加に対応して、航空機の安全で効率的な運航を実現するため、航空機の 4 次元の飛行軌道を把握して管理するトラ젝トリ管理が検討されている。RNAV 経路上を飛行する航空機は、水平位置の予測性が向上するため、トラ젝トリ予測のモデル化が容易になる。RNAV 経路上を飛行する航空機が増加することにより、航空交通流全体の予測性が向上する。

このように、将来の ATM の構築には RNAV を有効に活用することが重要である。実際に RNAV 経路を飛行した航空機の航跡の解析は、今

後の RNAV 経路の設定に活用できる。これまでに、RNAV の安全性について、航空路と到着経路を対象とした解析が実施されている<sup>[4]</sup>。また、米国では RNAV 出発経路の飛行距離や上昇特性などの解析が実施されている<sup>[5]</sup>。

本報告は、RNAV 出発・到着経路を飛行した航空機の航跡を解析した結果を示す。レーダで測定された航空機の航跡から水平位置、高度、飛行距離、飛行時間の分布を調査した。また、将来のトラ젝トリ管理に RNAV を活用するため、トラ젝トリ予測に関する検討結果も示す。

### 2. 出発経路

#### 2.1 経路の構成

羽田空港から北日本方面に向かう航空機が飛行する標準計器出発方式 (SID : Standard Instrument Departure) を対象として航跡を解析した。航跡データは羽田空港のターミナルレーダ情報処理システム (ARTS : Automated Radar Terminal System) のデータを使用した。航跡の測定周期は 4 秒である。測定期間は、平成 20 年 12 月 15 日から 24 日、平成 21 年 1 月 5 日から 14 日、1 月 22 日から 31 日の合計 30 日間である。図 1 に航跡を示す。また、空港付近の拡大図を図 2 に示す。座標は空港の標点を原点として、真北を Y 軸とした。航空機は管制記録を参照して、レーダ誘導を実施していない便名を抽出した<sup>[8]</sup>。航空機数は 75 機である。航空機の型式は B737, B767, B747, B777 であり、さまざまな大きさの航空機が含まれている。航跡は、SID より先のウェイポイントである NZE までを示す。

初めに、航空機が飛行した SID (PLUTO FOUR RNAV DEPARTURE) を説明する<sup>[6]</sup>。空港を出発した航空機は緯度経度で定義されたウェイポイント PLUTO と SALLY を経由して SNE に向かう。滑走路 34R (北向き出発) からの出発機は高度 700ft (1ft = 0.305m) 以上の地点から右旋回して PLUTO に向かう。PLUTO と

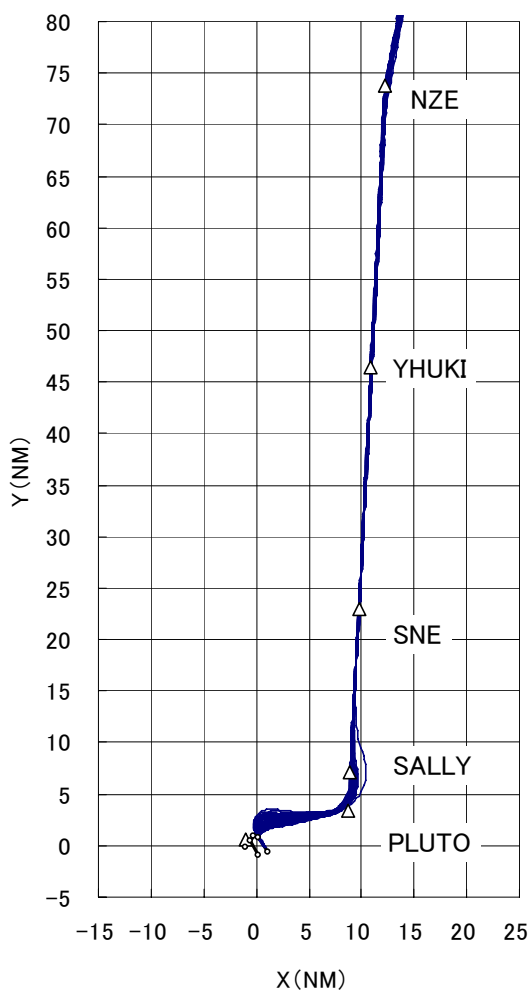


図1 出発機の航跡図

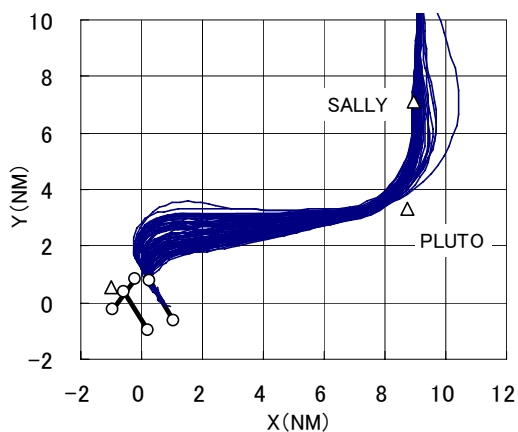


図2 出発機の航跡図（拡大）

SALLY はフライバイ・ウェイポイントであり、航空機はその地点の直上を通過する必要はなく、手前から次のコースに向けて旋回することができる。

出発経路の設定では、関連する航空交通流との間隔確保、騒音などの環境への影響の低減、飛行

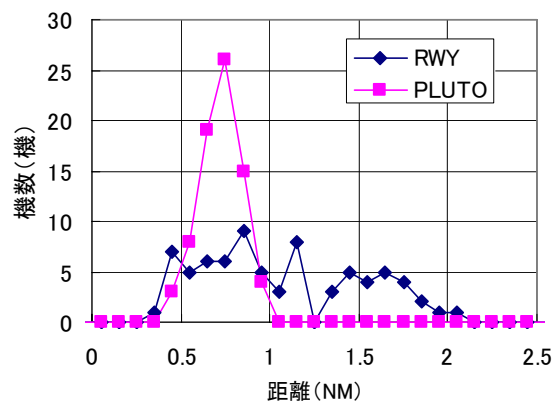


図3 出発機の距離分布（1）

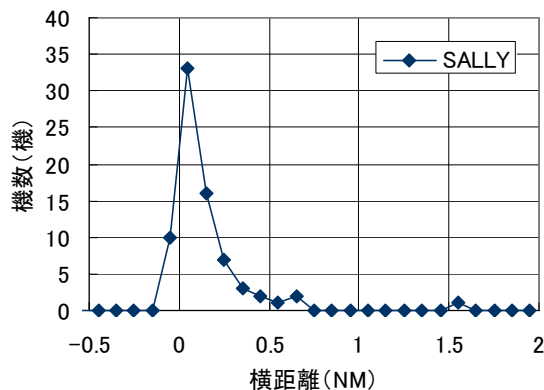


図4 出発機の距離分布（2）

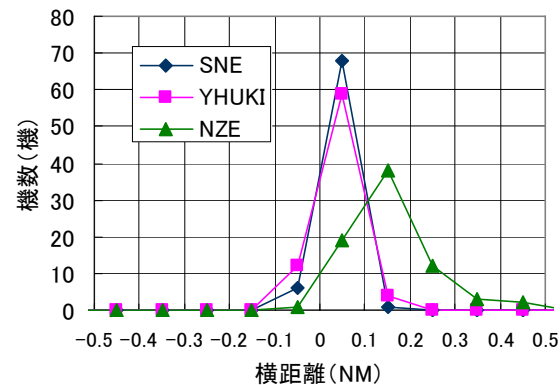


図5 出発機の距離分布（3）

距離の短縮が考慮されている。

今回解析した出発経路の付近を通過する航空交通流として、羽田空港への到着機と成田空港からの出発機がある。

羽田空港からの出発機が滑走路 34R を使用する場合は、通常、到着機は滑走路 34L を使用する。この場合は出発経路と到着経路の交差はない。

成田空港からの西行の出発機は、この付近のさらに上空を通過する。また、成田空港から欧州方面へのお発機は、SNE の南側付近を低い高度で通過する。羽田空港のお発機はこれらのお発機の

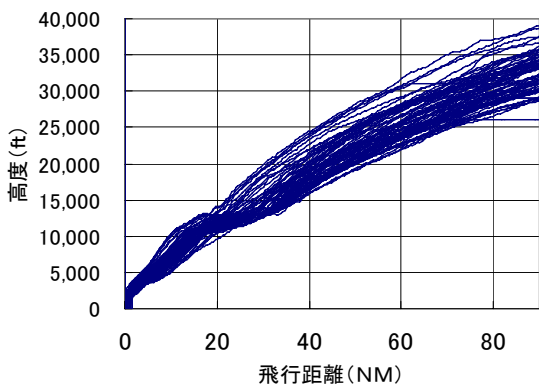


図6 出発機の飛行距離と高度

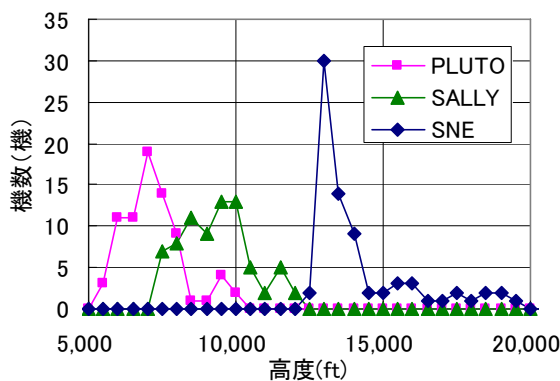


図7 出発機の高度

中間の高度帯を飛行して交差する。

環境問題への対応として、羽田空港の周辺地域の騒音を低減するため、航空機の低高度の飛行は、陸域を避け、海上域が望ましい。滑走路 34R の出発機は、早い段階で右旋回して、海上域で高度を上昇してから、北に向かう経路となっている。

## 2.2 水平位置

航跡の広がり測定するため、図3に滑走路からの最遠点と PLUTO への最接近点の距離を示す。滑走路から最遠点の距離は、航跡点を垂直に滑走路の延長線上へ投影した地点と滑走路端の距離である。SID の最初のウェイポイントが PLUTO であり、離陸後の右旋回は、高度での条件設定のため、滑走路からの最遠点の距離は 2NM (1NM = 1.852 km) 程度の差がある。また、PLUTO はフライバイ・ウェイポイントであり、左旋回角度が約 90 度と大きいため、最大 1NM 程度離れて飛行している。

図4に SALLY, 図5に SNE, YHUKI, NZE の Y 座標に最接近した航跡点について、これらのウェイポイントからの X 座標の偏差を示す。

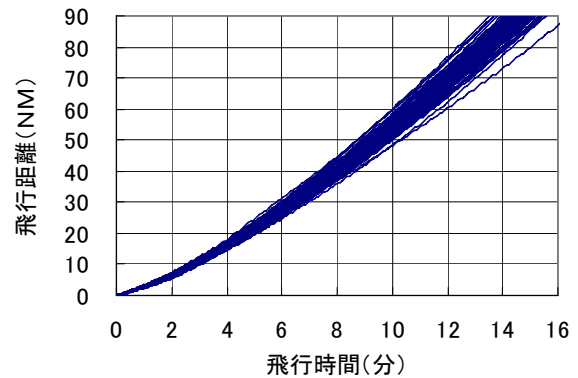


図8 出発機の飛行時間と飛行距離(1)

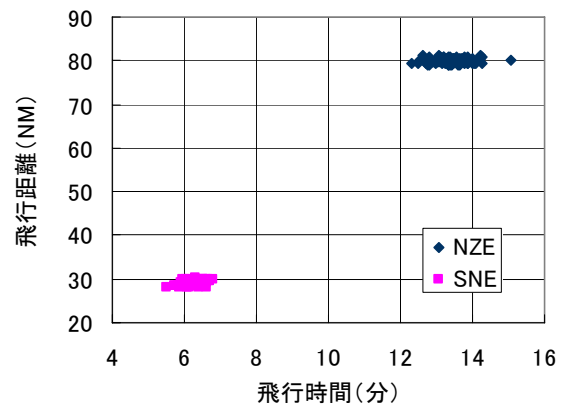


図9 出発機の飛行時間と飛行距離(2)

これらの点は経路からの偏差が右側と左側の方向を持つため、距離の代わりにこのような測定方法とした。SNE, YHUKI, NZE のウェイポイントはほぼ直線上にあるため、偏差の平均値は 0.2NM 以内であり、旋回時に比べて小さい。SALLY は PLUTO に近いため、旋回の影響があり偏差が他に比べて大きい。NZE で偏差が大きくなっているのは、NZE が右に曲がる地点であることとレーダからの距離が遠いことによる測定誤差が要因であることも考えられる。

## 2.3 高度

図6に飛行距離と高度の関係を示す。飛行距離は滑走路端から航跡に沿って測定した。20NM から 30NM 付近では、関連する交通流との間隔を確保するため、13,000ft で上昇を中断して水平飛行をし、その後再び上昇する場合がある。

図7にウェイポイントの最接近点高度を示す。PLUTO から SALLY へは、高度のばらつきが増加しているが、SNE で再び集約されている。これは上記の影響である。

## 2.4 飛行距離と飛行時間

図8に飛行時間に対する飛行距離の関係を示

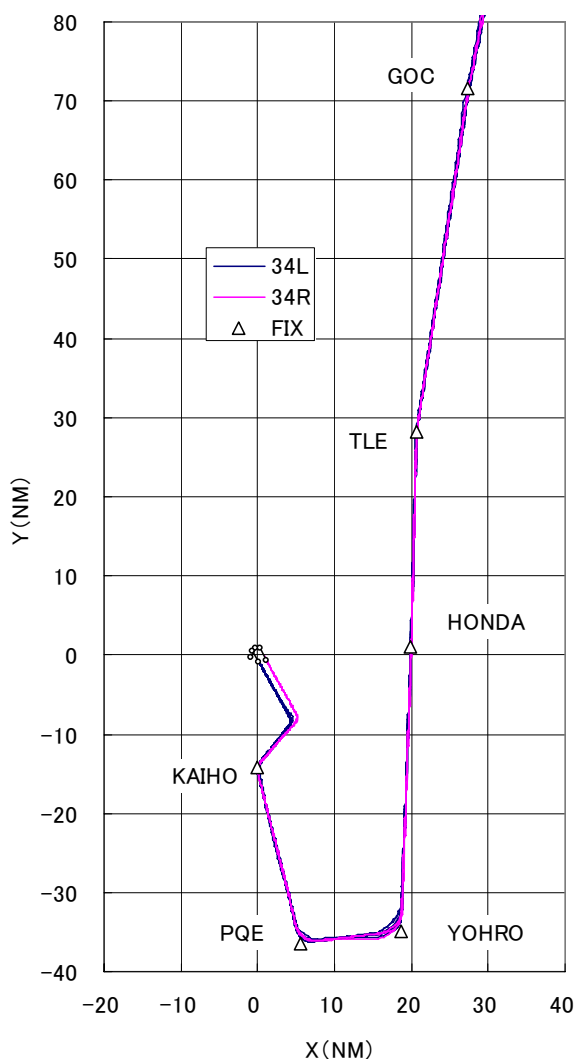


図 10 到着機の航跡図

す。飛行時間が長くなるほど、飛行距離のばらつきが大きくなる。このばらつきは、飛行速度の違いによる。また、飛行時間が長くなり、高度が上昇するにつれて、速度が増加するため、曲線の傾きが大きくなる。

図 9 に NZE と SNE の最接近点までの飛行時間と飛行距離の関係を示す。飛行距離はほぼ等しいが、飛行時間は1分 (SNE) から2分 (NZE) 程度の違いがある。トラジェクトリの予測では、航空機毎にウェイポイントの通過時刻を正確に予測することが求められる。

### 3. 到着経路

#### 3.1 経路の構成

北日本方面から羽田空港へ向かう航空機が飛行する標準到着経路 (STAR: Standard Terminal

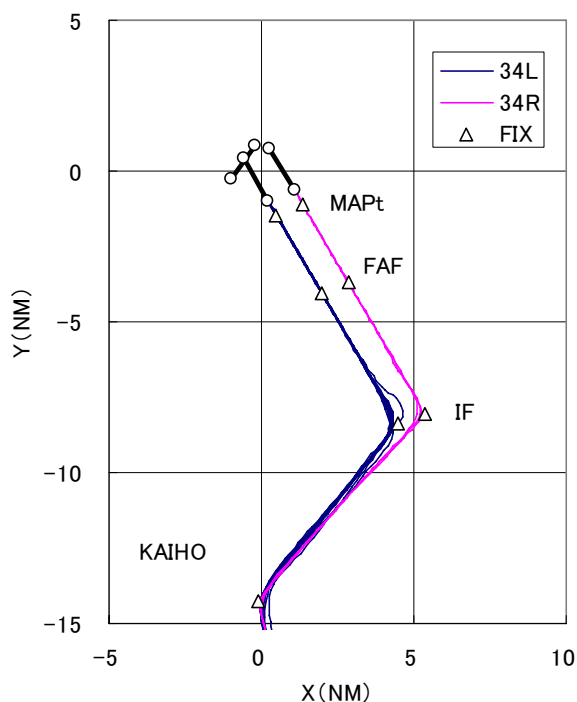


図 11 到着機の航跡図 (拡大1)

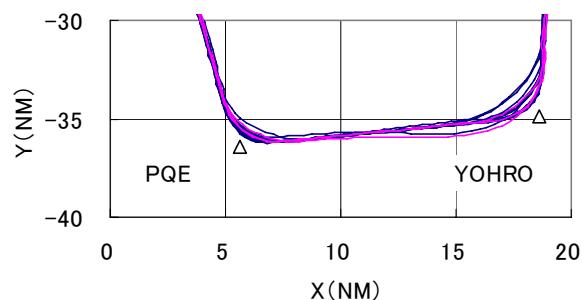


図 12 到着機の航跡図 (拡大2)

Arrival Route) を対象として航跡を解析した。図 10 に航跡を示す。また、滑走路付近と PQE, YOYRO 付近の拡大図を図 11 と図 12 に示す。青線が 34L, 赤線が 34R への到着機である。航跡の測定方法, 測定期間, 抽出方法は出発機と同様である。航空機数は、滑走路 34L が 16 機, 34R が 3 機である。型式は, A320, B737, B767 である。

初めに、航跡を測定した期間に利用されていた STAR (KAIHO NIGHT NORTH RNAV ARRIVAL) を説明する。騒音を低減するために、深夜に海上域を利用する経路である。高度の制約は、HONDA で 8,000ft 以上, PQE で 6,000ft 以上, KAIHO で 4,000ft 以上となっている。その先のアプローチは LOC W RWY34L, LOC W RWY34R に接続する。

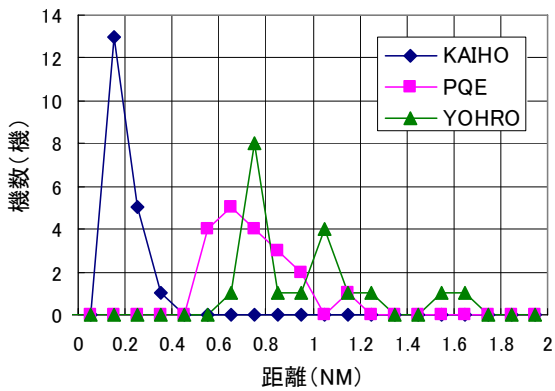


図13 到着機の距離分布 (1)

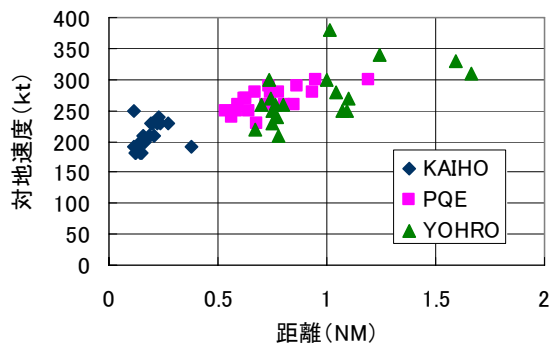


図14 到着機の距離と速度の関係

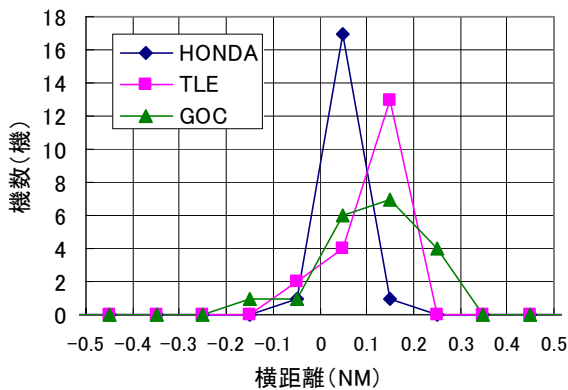


図15 到着機の距離分布 (2)

### 3.2 水平位置

図13に KAIHO, PQE, YOHRO に最接近した航跡点の各ウェイポイントからの距離を示す。図14にそれら距離と対地速度の関係を示す。フライバイ・ウェイポイントを通過する場合は、飛行速度が速いほど、距離が離れる傾向がある。これは、同じバンク角で旋回した場合、速度が速いほど旋回半径が大きくなることにも影響されると考えられる。旋回時の航跡のばらつきを低減するためには、フライバイ・ウェイポイントのかわりに、旋回中心を指定する RF (Radius to Fix)

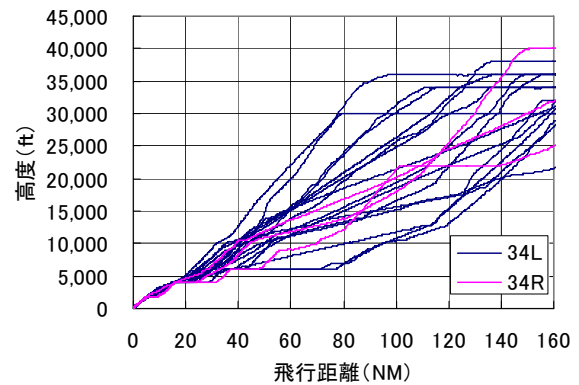


図16 到着機の飛行距離と高度

旋回を利用する方法がある。

図15に HONDA, TLE, GOC の Y 座標に最接近した航跡点について、これらのウェイポイントからの X 座標の偏差を示す。これらのウェイポイントはほぼ直線上にあるため、偏差の平均値は 0.2NM 以内であり、旋回時に比べて小さい。

### 3.3 高度

図16に飛行距離と高度の関係を示す。飛行距離は滑走路端までの距離を航跡に沿って測定した。青線が 34L, 赤線が 34R への到着機である。航空機毎にさまざまな高度を飛行している。現在はトラジェクトリの高度の予測のための航空機毎の情報がほとんど得られていない。このようにばらつきが大きい場合には、正確な予測が難しい。航空機のトラジェクトリ情報を航空機と地上の管制側で共有するためには、トラジェクトリの高度に関する情報交換書式の定義が必要である。

### 3.4 飛行距離と飛行時間

図17に飛行時間に対する飛行距離の関係を示す。飛行時間は滑走路端通過までの時間であり、飛行距離は滑走路端までの距離である。青線が 34L, 赤線が 34R への到着機である。飛行時間が長くなるほど、飛行距離のばらつきが大きくなる。これは、航空機の飛行速度の違いによる。

図18に GOC と TLE の最接近点からの飛行時間と飛行距離の関係を示す。飛行距離はほぼ等しいが、飛行時間で 5 分 (TLE) から 7 分 (GOC) 程度の違いがある。

図19に TLE の通過高度と滑走路端までの飛行時間の関係を示す。高高度を飛行している航空機が飛行時間が短くなる傾向がある。

航空機が同一経路を飛行する場合においても、風の状況や降下プロファイルの違いにより、飛行

時間が2割程度変化している。

電子航法研究所では、トラジェクトリ予測として、航空機の指示対気速度の予定値から、飛行高度、風の影響を考慮して対地速度を算出する方法の開発を進めている<sup>[7]</sup>。また、トラジェクトリ管理における到着時間の制御方法として、レーダ誘導で飛行距離を延伸する代わりに、同一経路上での降下プロファイルの修正による時間調整の実現性を検討している。今後、今回解析した航跡データを使用して、予測精度や制御の実現性の検討を進める予定である。

#### 4. まとめ

RNAV 出発・到着経路の航跡を解析した。航跡の水平位置、高度、飛行距離、飛行時間を示した。また、将来的なトラジェクトリ管理に RNAV を活用するための検討をした。

航跡の水平位置の経路から偏差は、ウェイポイントがほぼ直線上の場合は、非常に小さい。経路の曲がりが多い場合は、航空機によりばらつきがあり、その大きさは飛行速度との関係がある。高度についても、航空機毎のばらつきがあり、上昇時より降下時にばらつきが大きい。また、飛行時間のばらつきも同様の傾向がある。今後、これらのばらつきの傾向と要因の解析を続けると共に、トラジェクトリ予測モデルとの比較を実施したい。

#### 謝辞

国土交通省航空局関係各位、東京空港事務所からご協力を頂きました。関係各位に感謝致します。

#### 参考文献

[1] 古川, “エアラインから見た RNAV”, 日本航空宇宙学会第 39 期年会講演会, pp. 122-125, April 2008

[2] 国土交通省航空局, “2007 RNAV Rodamap Version 2”, 2007

[3] 国際民間航空機関, “Performance Based Navigation Manual Final Working Draft”, March 2007

[4] 天井, “日本における広域航法 (RNAV)”, 第 45 回飛行機シンポジウム, pp.581-588, Oct. 2007

[5] Mayer, Haltli and Klein, “Evaluation of RNAV Departure Operation at Dallas

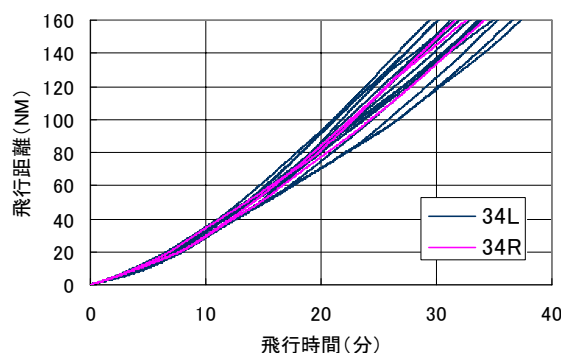


図 17 到着機の飛行時間と飛行距離

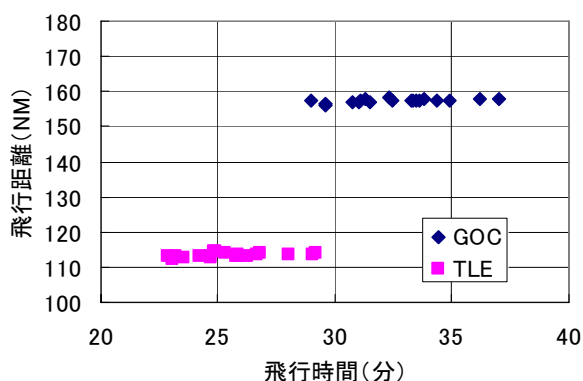


図 18 到着機の飛行時間と飛行距離

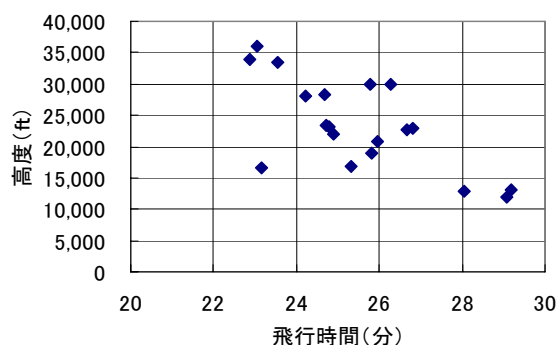


図 19 到着機の飛行時間と高度

Fort-worth International Airport”, 25th Digital Avionics Systems Conference, Oct. 2006

[6] 国土交通省航空局編集, “Aeronautical Information Publication”, 2009

[7] Fukuda, Shirakawa, Senoguchi, “Study on Trajectory Prediction Model”, pp. 61-64, Proceedings of ENRI International Workshop on ATM/CNS, EIWAC 2009, March 2009

[8] 国土交通省航空局, “東京国際空港新進入方式導入に係る地上障害物測量等 (その1)”, 2009