

15. トrajekトリ予測モデルの開発と評価

航空交通管理領域 ※福田 豊、瀬之口 敦、白川 昌之、平林 博子、マーク ブラウン

1. はじめに

将来の航空交通管理（ATM：Air Traffic Management）の運用概念として、航空機のトラジェクトリ（軌道）を計画し、それに基づいて運航する軌道ベース運用（TBO：Trajectory Based Operation）が検討されている。航空機の軌道は、飛行中および地上走行中の両方での3次元位置と時間を含む4次元の運動の記述である。軌道は、運航者の希望に基づき、気象条件など運航に影響するさまざまな要素を考慮して生成され、コンフリクトや悪天の回避などに対応して修正される。TBOにより、航空機の出発から到着までを一元的に管理することができ、運航の効率性を向上することができる。

現在、航空管制に使用されている管制情報処理システムでは、航空機の将来位置を予測する機能が活用されている。例えば、飛行情報管理システム・管制情報処理部（FDMS・FDPS：Flight Data Management System・Flight Plan Data Processing Section）では、飛行計画上のウェイポイントの通過時刻を予測する機能があり、航空交通流管理（ATFM：Air Traffic Flow Management）などに活用されている。また、航空路レーダ情報処理システム（RDP：Radar Data Processing System）には、航空機の将来位置を予測し、航空機同士の接近を警告するコンフリクト警報の機能を持つ。これらの予測機能では、速度情報を時間で単純に積分することにより、将来位置を予測する。速度情報としては、FDPSでは飛行計画に記載された巡航速度情報、RDPでは追尾機能により計算された速度情報を利用する。

航空機の軌道予測に活用できる航空機の情報、将来的には航空管制機関や航空会社などを接続した情報ネットワーク SWIM（System Wide Information Management）やデータ通信により入手できると考えられる。そこで、TBOの実現のため、航空機の運動計算に機体重量、速度設定

などの航空機情報を反映することにより、より精密な軌道予測が可能なエネルギーモデルの利用が検討されている^[1]。

電子航法研究所は、TBOを実現するためのエネルギーモデルに基づいて航空機の軌道を精密に予測するモデルを開発した。軌道予測モデルは、航空機性能データ、気象予報データなどを使用して、航空機の4次元軌道を生成する。また、予測モデルで生成した軌道を実運航データと比較して、位置予測の誤差解析を実施した。

本報告では、開発したトラジェクトリ（軌道）予測モデルについて述べる。初めに、軌道予測モデルの概要を説明する。次に、予測した軌道を実際の航跡と比較した結果を示す。

2. 軌道予測モデル

図1に軌道予測モデルの概要を示す。航空機の運動モデルにはエネルギーモデルを使用する。エネルギーモデルは、航空機を質点としたエネルギー保存則に基づき、(1)式のとおり航空機に作用する力（推力と抗力）の仕事率が、機体の運動エネルギーと位置エネルギーの増加率と等しくなるモデルである。

$$(T - D)V_{TAS} = mg \frac{dh}{dt} + mV_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt} \quad (1)$$

ここで、 T は推力、 D は抗力、 V_{TAS} は真対気速度、 m は航空機重量、 h は高度、 t は時間を示す。エネルギーモデルで求めた推力に基づいて、後述する航空機性能データを用いて燃料消費量を算出することができる。

エネルギーモデルの従来の速度モデルに対する利点を以下に示す。

- ・ 上昇区間で、機体重量や推力設定を反映した上昇軌道を算出できる。
- ・ 巡航区間で、速度に対応した燃料消費量が算出できる^[2]。
- ・ 降下区間で、機体重量や速度を反映した降下

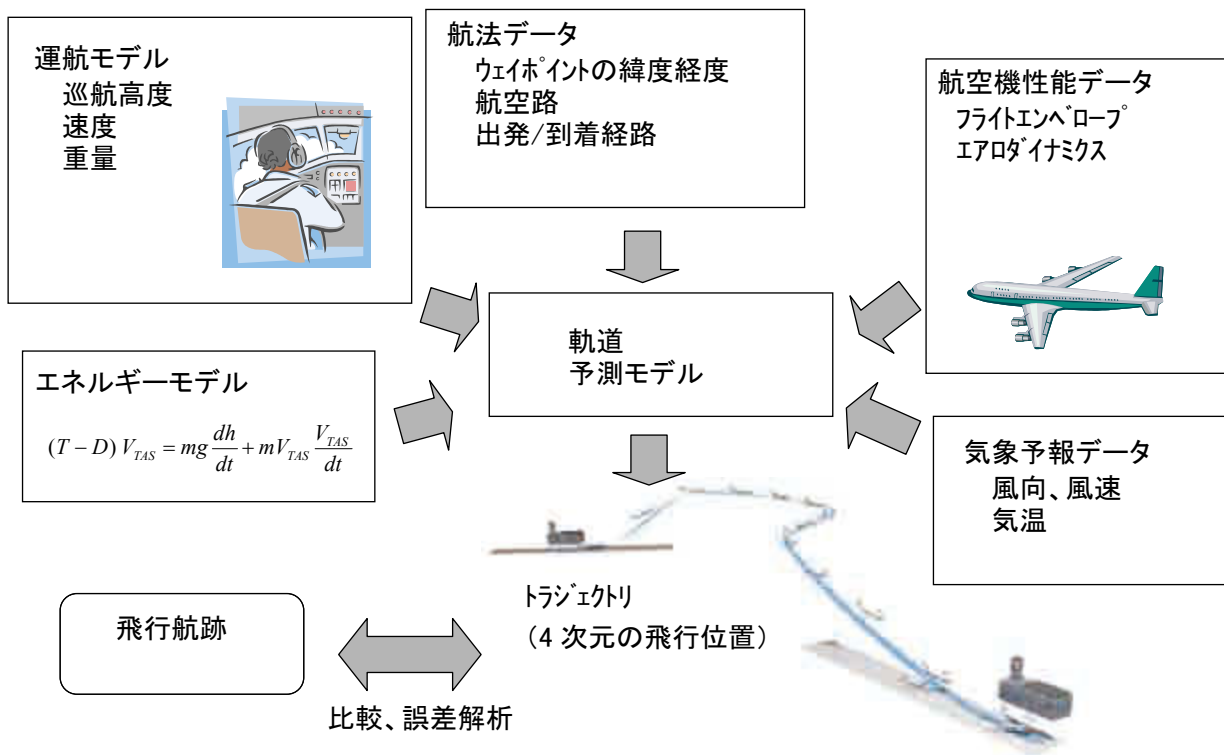


図1 軌道予測モデルの概要

開始点、降下軌道を算出できる²⁾。

軌道予測モデルで使用するデータについて説明する。航法データは、経路やウェイポイントのデータである。航空機性能データは、航空機のフライトエンベロープ（最高速度、最低速度など）、エアロダイナミクス（翼面積、抗力係数）、エンジン推力、燃料消費量などのデータである。これらの航空機の機種毎の性能データは、欧州ユーロコントロールが提供しているBADA（The Base of Aircraft Data）³⁾を使用する。運航モデルは、航空会社の上昇、巡航、降下時の標準的な飛行速度などのデータである。気象予報データは、大気格子点の風向、風速、温度のデータである。気象庁が提供している数値予報データを使用する。

3. 予測軌道の評価

軌道予測モデルでは、航空機の出発前に全飛行区間の軌道を予測することを想定する。これまでの研究で、航空機が飛行した実際の航跡とモデルで算出した軌道を比較し、予測性能の向上を進めてきた。

3.1 評価方法

予測した軌道の評価方法を以下の3種類に分類する。

- ・経路の縦方向誤差
- ・経路の横方向誤差
- ・高度誤差

縦方向誤差は、ウェイポイントの通過時刻を評価する。横方向誤差については、飛行管理システム（FMS：Flight Management System）による経路から逸脱しないRNP（Required Navigation Performance：航法性能要件）運航を想定し、本研究では評価しないこととした。高度誤差については、上昇率の分布を比較した。現在、TBOの初期段階としてのCFDT（Calculated Fix Departure Time：フィックス離脱時刻）の運用が開始されており⁴⁾、本研究ではそれに活用できる縦方向誤差を中心に評価を行った。

3.2 これまでの解析結果

ウェイポイントの通過時刻の予測では、航空機の対地速度の予測が重要である。対地速度の予測誤差には気象予報の誤差と運航モデルの誤差に分けられる。対地速度の算出式と運航実績データ

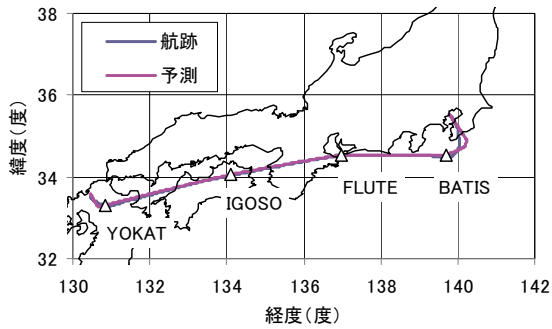


図2 予測と航跡の水平面の比較

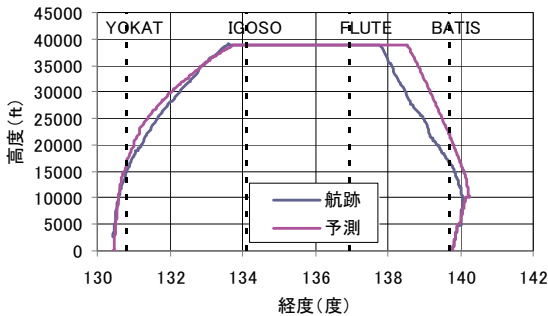


図3 予測と航跡の高度面の比較

の解析から、気象予報誤差より運航モデル誤差が大きいことがわかった⁵⁾。その後、さらに各要素について、誤差を解析した。

気象予報データについて、3時間予報の高層風の情報を利用した場合、95%以上において対地速度誤差が±8kt (1kt = 0.51 m/s) 以内に収まり、概ね利用できることが確認できた⁶⁾。部分的に軌道予測誤差が大きくなる気象現象として、台風通過時、積乱雲をともなう対流雲域、ジェット気流付近の乱気流域などがある。

運航モデルについて、航空会社が提出した飛行計画の真対気速度の情報と巡航区間の実際の運航時の速度差、上昇区間のBADAの標準速度と実際の運航時の速度差を調べた。その結果、巡航区間では、BADA標準速度に比較して、飛行計画の真対気速度を利用することにより、予測精度を改善できることがわかった^{7), 8)}。また、上昇区間では、飛行計画から速度情報を入手できないため、BADAの標準速度を利用することになるが、実運航では、BADAの標準速度より低い速度で運航する航空機が多いことがわかった。但し、これらの速度はフライト毎にばらつきがあり、このばらつきが予測誤差に影響を与える主要な要因

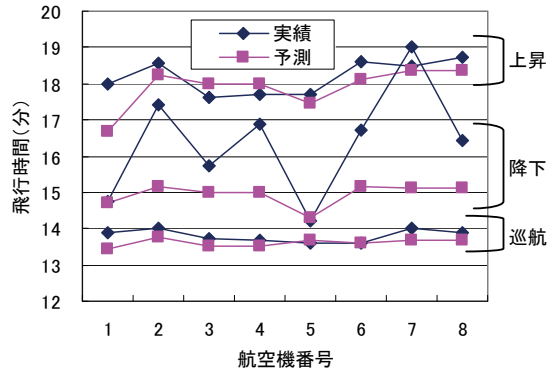


図4 予測と実績の飛行時間の比較

になる。将来的にデータ通信などで航空機の実時速度情報を航空管制機関が取得できれば、予測精度を向上することができる。現在は、そのような環境が実現できるまでの段階を想定して、過去の航跡の実績値の平均的な値を予測に利用するなどの予測精度の向上の方法を検討している。

3.3 評価結果

これらの結果を踏まえ、巡航区間の速度として飛行計画の真対気速度を使用し、上昇区間の較正対気速度 (CAS : Calibrated AirSpeed) としてBADA標準速度から20kt遅い速度を使用して軌道予測を実施した。図2に福岡空港から羽田空港までのフライトの予測軌道と実際の航跡の比較を示す。図3に高度の比較を示す。降下区間では、羽田空港の到着機同士の間隔確保のために管制官からレーダ誘導される航空機が多いが⁴⁾、この例では、比較的飛行計画どおりの航跡である。

上昇区間では、上昇終了点 (TOC : Top Of Climb) の位置はほぼ一致している。高高度での上昇率が予測値より実績値が大きくなっている。上昇率についての複数のフライトの解析の結果では、フライトによるばらつきがあるが、その分布はBADAの最大重量と最小重量の間、および、最大上昇推力と低減上昇推力の間の範囲内に入っている⁸⁾。上昇軌道には、重量、推力、速度が影響するので、これらの関係を解析し、上昇軌道の精度を向上することが今後の課題である。

降下区間では、降下開始点 (TOD : Top Of Descent) の位置の予測軌道と航跡の差が大きい。

高高度の降下率は予測値と実績値はほぼ同じであるが、25,000 ft から 10,000 ft の区間では、予測値より実績値の降下率が小さい。降下時の速度の減速や推力の増加などの予測モデルと実運航の差が考えられる。これらについては今後も引き続き解析を進める予定である。

図4に福岡空港から羽田空港への8フライトの飛行時間についての予測値と実績値の比較を示す。航空機の型式は番号1と5がB747-400、それ以外がB777-200である。日付は番号1から4が2010年12月21日、番号5から8が2010年12月22日である。気象状況は、21日から22日にかけて低気圧が発達しながら本州南岸を東進した。

飛行区間を上昇区間、巡航区間、降下区間で区分した。上昇区間は図2のYOKAT（東経130.83度）からIGOSO（東経134.1度）までの区間、巡航区間はIGOSOからFLUTE（東経136.97度）までの区間、降下区間はFLUTEからBATIS（東経139.7度）までの区間である。それぞれの区間の飛行時間の予測値と実績値を示す。

上昇区間の時間誤差の平均値は-16.7秒（1.3%）、標準偏差は31.3秒（2.4%）、巡航区間の時間誤差の平均値は-11.2秒（1.3%）、標準偏差は10.6秒（1.2%）、降下区間の時間誤差の平均値は-86.9秒（10.3%）、標準偏差は77.2秒（9.1%）である。カッコ内の数値は、飛行時間に対する誤差の割合である。巡航区間の誤差が他の区間に比べて小さい。これは、各フライトの真対気速度が飛行計画から取得でき、それを反映した予測ができたためである。上昇・降下区間の速度は取得できないので、SSRモードSにより航空機の情報を取得できるDAPs（Downlink Aircraft Parameters）情報などを利用して予測精度の向上を検討している。

降下区間の誤差が大きいのは、羽田空港への到着機の集中のため、管制官からのレーダ誘導により飛行計画経路から外れた空域を飛行したことや飛行速度の管制指示によりBADAの標準速度との差があることなどが考えられる。降下区間は、到着時間管理が実施される区間であり、航空機の希望どおりの軌道による飛行の実現が難しい。時

間制御した軌道を航空機側に指示し、それに沿った飛行をする運用方法を検討している。

4. おわりに

本報告では、電子航法研究所で開発した軌道予測モデルについて述べた。軌道予測モデルはエネルギーモデルに基づいて軌道を予測する。予測した軌道を実際の航跡と比較した結果、上昇区間と巡航区間の飛行時間誤差について、概ね良好な結果が得られた。

今後は、上昇区間および降下区間での実運航と予測軌道を比較・分析することにより、軌道予測モデルの精度向上を進める予定である。

参考文献

- [1] Li, Ru, Kim, Sivanathen, “4D Trajectory Determination and Prediction for NextGen”, ATCA 55th Annual Conference & Exposition, October. 2010
- [2] 福田, 白川, 瀬之口, “飛行速度調整による時間管理の検討”, 第11回電子航法研究所研究発表会, 2011年6月
- [3] EUROCONTROL Experimental Center, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.8”, EEC Technical/Science Report No.2010-003, April 2010
- [4] 瀬之口, 福田, ブラウン, 白川 “到着交通流の時間管理に関する一考察”, 第49回飛行機シンポジウム, 2011年10月
- [5] 白川, 福田, 瀬之口, “航空機軌道予測における誤差要因の解析”, 信学技報SANE2009-167, 2010年2月
- [6] 平林, 福田, “航空機軌道予測に対する高層風予報データの基礎的な分析”, 第50回飛行機シンポジウム, 2012年11月
- [7] 白川, 福田, 瀬之口, ブラウン, “飛行計画データを用いた軌道生成”, 日本航空宇宙学会第43期年会講演会, 2012年4月
- [8] 白川, 福田, 瀬之口, ブラウン, “レーダ測定値による対気速度推定”, 第50回飛行機シンポジウム, 2012年11月