

# 1. 運航速度データベースに基づく軌道予測の評価

航空交通管理領域 ※瀬之口 敦，白川 昌之，平林 博子

## 1 まえがき

我が国の将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS：Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic System）では，変革の方向性として軌道ベース運用（TBO：Trajectory-Based Operation）の実現が挙げられている[1]。TBOは，航空機の出発から到着までの3次元位置と時刻で表現される4次元軌道を計画段階から関係者間で協調的に調整し，運航中は調整された軌道に沿って飛行しているかどうかの監視を主とし，必要に応じて軌道を微修正する戦略的な運用である。これによって空港面や空域の混雑緩和，運航者や航空管制官の作業負荷軽減が見込まれ，航空交通の安全性を維持したまま効率性や定時性を向上させる等，将来の航空交通需要の増加に対応できるものと期待されている。

TBOの実現にあたっては，航空機の4次元軌道を高精度に予測することが鍵となる。特に各通過地点における到着予定時刻の予測精度が重要である。これまでの研究より，軌道予測における到着予定時刻の誤差要因は予測に用いる航空機性能モデルおよび気象予報データの実際からのズレであることがわかっている[2]。

現在，航空機性能モデルに関しては，EUROCONTROLにより開発・維持されているBADAモデルが広く一般に用いられている[3]。BADAは多くの型式を網羅しており，航空機性能に関する各種パラメータの他，航空機の標準的な運航速度や標準重量の値が提供されている。このようにBADAは汎用性の面で優れている一方，航空機運航や管制運用の地域特性による標準値からのズレを十分に表現できていない可能性がある。

本稿では，レーダデータから国内空域を飛行する航空機の運航速度を推定し，BADAと同様の運航速度のデータベースを構築した結果について報告する[4]。また，構築した運航速度

データベースを参照して軌道予測を行った場合の飛行時間誤差の低減程度について評価した結果を示す。

## 2 運航速度データベースの構築

### 2.1 運航速度の推定

航空機は，コストインデックスの設定値に基づいて最適な較正対気速度（CAS：Calibrated Air Speed）またはマッハ数を一定に保ち，運航することが多い。SSRモードSのダウンリンク機能などを使用すればCASやマッハ数をリアルタイムに機上側から取得できるが，現在の地上局および機体側の整備状況を考慮すると十分なデータ量の収集には至らない[5]。そこで，国内空域を飛行する航空機のほぼ全てを含むレーダデータを用いてCAS/マッハ数を推定した。

- ① レーダデータから1便毎に航跡を取り出して平滑化補間し，4次元（時刻，緯度，経度，高度）の連続関数を求める。
- ② 連続関数を微小時間単位（0.002時間＝7.2秒）でサンプリングし，当該時点の対地速度を計算する。
- ③ また，気象予報データである全球数値予報モデル（GSM：Global Spectral Model）の解析初期値を空間的かつ時間的に補間して，当該時点における風のベクトル成分と外気温の値を求める。
- ④ 対地速度と風のベクトル成分から真対気速度を求め，さらに外気温を用いることでCAS/マッハ数へ変換する。
- ⑤ 1便毎のCAS/マッハ数の数列を得る。

### 2.2 データベースの構成

1便毎のCAS/マッハ数の数列からBADAの定義区分に応じた区分毎で平均を求め，1便毎の各パラメータ値とする。BADAでは飛行

段階を上昇、巡航、降下の3つに分けており、さらに高度帯でも区分している。10,000 ft 以上では次のとおりである。

- (a) 上昇： $V_{cl2}$ ,  $M_{cl}$
- (b) 巡航： $V_{cr1}$ ,  $V_{cr2}$ ,  $M_{cr}$
- (c) 降下： $V_{des2}$ ,  $M_{des}$

$V$  は CAS,  $M$  はマッハ数を意味しており、外気温で変化する遷移高度を境にして高度が低い場合は  $V$ , 高い場合は  $M$  が用いられる。また、巡航の CAS は 14,000 ft より低い場合  $V_{cr1}$ , 高い場合  $V_{cr2}$  である。一方、飛行段階の定義に関しては BADA に記述されていないため、ここでは高度変化率が 300 ft/min 以上の場合を上昇、-300 ft/min 以下を降下、それ以外を巡航とした。

そして、1 便毎の各パラメータ値を航空機の型式毎にまとめてその内でまた平均を求めること、運航速度データベースを構築した。

### 2.3 構築結果

データベースの構築に際しては、2012 年 11 月～2013 年 9 月の 2 か月毎の 1 週間分ずつが記録された計 6 週間分のレーダデータを使用した。一例として、B738 に関する運航速度データベースを表 1 に示す。表 1 には各パラメータ区分における平均値および標準偏差を示した。データ数は 20,682 便分であった。また、参考のために BADA の各パラメータ値をあわせて示した。

表 1 B738 の運航速度データベース

パラメータ区分	平均値	標準偏差	BADA 参考値
$V_{cl2}$ [kts]	285.3	17.2	300
$M_{cl}$	0.758	0.034	0.78
$V_{cr1}$ [kts]	249.1	36.4	250
$V_{cr2}$ [kts]	289.4	22.2	280
$M_{cr}$	0.766	0.030	0.78
$V_{des2}$ [kts]	279.1	18.5	290
$M_{des}$	0.753	0.036	0.78

表 1 より、構築した B738 の運航速度データベースにおいては、BADA の値よりも全体的に少し低い平均値となっていることがわかる。これは、国内空域を飛行する B738 が BADA の標準値よりもやや遅い CAS/マッハ数で運航していることを意味する。

B772, B763, A320 等の他の型式についてもデータベースを構築し、BADA の値と比較した結果、同様の傾向が見られた。

## 3 運航速度データベースを参照する軌道予測手法の評価

### 3.1 評価方法

構築した運航速度データベースを参照して軌道予測を行った場合の飛行時間誤差の低減程度に関して、BADA の運航速度データベースを参照して軌道予測を行う場合と比較した。飛行時間誤差は次の方法で求めた。

- ① レーダデータから 1 便毎に航跡を取り出して平滑化補間し、4 次元（時刻、緯度、経度、高度）の連続関数を求める。
- ② 連続関数の初期時点において、運航速度データベースを参照し、当該区間における CAS/マッハ数を求める。
- ③ また、GSM の 6 時間予報値を空間的かつ時間的に補間して、当該区間における風のベクトル成分と外気温の値を求める。
- ④ CAS/マッハ数と外気温から真対気速度を求め、さらに風のベクトル成分を加味することで対地速度を計算する。
- ⑤ 0.002 時間（7.2 秒）の内に④で求めた対地速度で進む距離を求め、4 次元の連続関数における次の時点を算出する。
- ⑥ ②～⑤を繰り返し、4 次元の連続関数における初期時点から最終時点までを求める。初期時点および最終時点については、福岡発羽田行の運航における高度が約 10,000 ft 以上の飛行区間を解析対象としたため、地点 YOKAT および ADDUM に対する最接近時点とした。
- ⑦ ②において、構築したデータベースを用いた場合および BADA のデータベースを用いた場合の初期時点と最終時点の飛行時

間差をそれぞれ計算し、実際の YOKAT-ADDUM 間の飛行時間の差に対する割合を求めて比較する。

### 3.2 評価結果

評価対象として、データベースの構築に使用した期間のレーダデータから福岡発羽田行の B738 の運航 399 便を抽出した。

図 1 に、構築した運航速度のデータベースを参照して軌道予測を行った場合の飛行時間（赤点）と BADA の運航速度データベースを参照して軌道予測を行った場合の飛行時間（青点）を示す。また、実際の YOKAT-ADDUM 間の飛行時間を横軸にとった。したがって、緑線上に各点が乗ることは予測した飛行時間と実際の飛行時間が一致する場合を意味する。

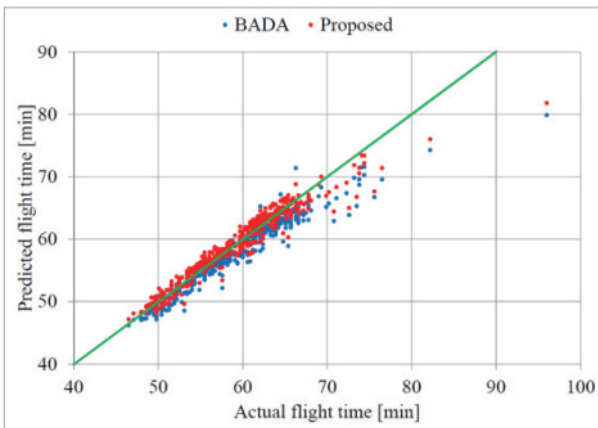


図 1 飛行時間の予測と実際（B738）

図 1 をみると、赤点は青点に比べて直線付近に集まっていることがわかる。直線近似した場合の傾きは赤点：0.886 ( $R^2$  値：0.936)、青点：0.861 ( $R^2$  値：0.932) であることから赤点の方が緑線に乗っていることがわかる。これは、BADA の運航速度データベースを参照して軌道予測を行うよりも、構築した運航速度データベースを参照して軌道予測を行う方が実際の飛行時間に一致することを意味している。

表 2 に各飛行時間の平均および標準偏差を示す。また、実際の飛行時間に対する予測した飛行時間の差の割合について、その平均および標準偏差を合わせて示す。

表 2 各飛行時間の平均および標準偏差（B738）

	実際	BADA	提案手法
飛行時間 [min] 平均	59.35	57.89	59.27
飛行時間 [min] 標準偏差	6.25	5.57	5.72
実際に対する予測の 飛行時間差の割合 [%] 平均		2.36	0.05
実際に対する予測の 飛行時間差の割合 [%] 標準偏差		2.39	2.38

YOKAT-ADDUM 間の実際の飛行時間は平均して 59.35 分、飛行距離の平均は 478.4 NM であった。一方、BADA の運航速度データベースを参照して軌道予測を行った場合は 57.89 分、構築した運航速度データベースを参照して軌道予測を行った場合の飛行時間の平均は 59.27 分であった。実際の飛行時間に対する予測した飛行時間の差の割合で言えば、2.36% および 0.05% に相当する。したがって、構築した運航速度データベースを参照して軌道予測を行う方がバイアス分だけ飛行時間誤差は小さくなることがわかった。しかしながら、標準偏差はどちらの運航速度データベースを参照する場合でもほとんど変わらないことから、個々の運航のバラつきは別の手法により低減を図ることが必要である。

B772, B763, A320 等の他の型式についても同様に福岡発羽田行の運航を抽出して評価した結果、数値の違いはあれども同様の傾向が見られた。

## 4 別期間のレーダデータを使用した場合の評価結果

経年変化を確認するために、別期間のレーダデータを使用して第 2 章および第 3 章の内容を再実施した。レーダデータの期間はちょうど 1 年後の 2013 年 11 月～2014 年 9 月、2 か月毎の 1 週間分ずつが記録された計 6 週間分を用いた。評価対象の福岡発羽田行 B738 の運航数は 320 便であった。

表3に、表2と同様の形で再実施した結果を示す。

表3 各飛行時間の平均および標準偏差  
(B738, 2013年11月～2014年9月)

	実際	BADA	提案手法
飛行時間 [min] 平均	57.75	55.83	56.99
飛行時間 [min] 標準偏差	8.00	5.73	5.84
実際に対する予測の 飛行時間差の割合 [%] 平均		3.00	0.98
実際に対する予測の 飛行時間差の割合 [%] 標準偏差		3.11	3.14

YOKAT-ADDUM 間の実際の飛行時間は平均して 57.75 分と、表2と比べて短くなっている。実際の飛行時間に対する予測した飛行時間の差の割合は、BADA の運航速度データベースを参照して軌道予測を行った場合 3.00%、構築した運航速度データベースを参照して軌道予測を行った場合 0.98%であった。どちらの値も表2より大きくなっているが、構築した運航速度データベースを参照して軌道予測を行う方がバイアス分だけ飛行時間誤差は小さくなるという傾向は同様であることが確認できた。

## 5 むすび

レーダデータから国内空域を飛行する航空機の運航速度を推定し、BADA と同様の運航速度のデータベースを構築した。構築した運航速度データベースを参照して軌道予測を行う場合の飛行時間誤差は、BADA の運航速度データベースを参照する場合と比較してバイアス分を低減させる効果があるとわかった。

運航速度データベースは国内空域を飛行する

航空機のほぼ全てを含むレーダデータから構築した一方、飛行時間誤差の評価は福岡発羽田行の運航便に限定して実施した。評価は限定的であったものの、型式別および経年変化の確認結果から同様の傾向が得られたため、構築した運航データベースを参照する軌道予測手法の一般的な効果と捉えることができる。また、個々の運航のバラつきは別の手法により低減を図ることが必要とわかった。

## 謝辞

本研究にご協力いただきました関係各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 国土交通省航空局 将来の航空交通システムに関する研究会，“将来の航空交通システムに関する長期ビジョン”，2010年2月.
- [2] 福田 豊，瀬之口 敦，白川 昌之，平林 博子，マーク ブラウン，“トラジェクトリ予測モデルの開発と評価”，第13回電子航法研究所研究発表会，2013年6月.
- [3] EUROCONTROL Experimental Centre, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.10”, EEC Technical/Scientific Report, no.12/04/10-45, April 2012.
- [4] 白川 昌之，瀬之口 敦，平林 博子，“レーダデータによる航空機運航速度パラメータ推定と軌道予測”，第46期年会講演会講演集，JSASS-2015-1024，2015年4月.
- [5] 瀬之口 敦，白川 昌之，平林 博子，福田 豊，“ダウンリンク情報を利用した航空機の標準運航速度の一検討”，第52回飛行機シンポジウム講演論文集，JSASS-2014-5004，2014年10月.