

18. トラジェクトリ予測の誤差要因解析

航空交通管理領域 ※福田 豊、白川 昌之、瀬之口 敦

1. はじめに

将来の航空交通管理（ATM：Air Traffic Management）の主要な要素として、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またはトラジェクトリ管理が検討されている。航空機の軌道は、空中および地上両方での 3 次元位置と時間を含む 4 次元の運動の記述である^[1]。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、危険事象の回避などに対応して修正される。トラジェクトリ管理により、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、運航の効率性などを向上することができる。

電子航法研究所は、トラジェクトリ管理を実現するために必要となる航空機の軌道を精密に生成する予測モデルを開発している。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ている^{[2]~[4]}。

本報告では、航空機の軌道予測に影響する誤差要因について検討する。航空機が通過するウェイポイントの通過時刻の予測には、航空機の対地速度の正確な算出が重要である。航空機の対地速度は、高層風の影響を受ける。そこで、軌道予測モデルで算出した軌道と実運航の軌道を比較し、気象予報に起因する誤差と航空機の世界モデルに起因する誤差を解析する。

2. 軌道予測方法

航空機の軌道を予測する方法について述べる。航空機が経路上のウェイポイントを通過する時刻を算出するためには、現在位置から当該ウェイポイントまでの経路に沿った距離とその区間を飛行する速度を使用する。RNAV（Area

Navigation：広域航法）経路上の飛行を想定すると、ウェイポイントまでの距離を正確に求めることができる。所要時間は、（距離／速度）で求まるので、速度を正確に算出することが重要となる。気象の変化などにより航空機の速度は変化するため、ウェイポイントまでの距離が長い場合には、小区間に分割して、各区間の飛行時間を求め、それを累積する方法により全体の飛行時間を算出する。

航空機は、飛行操作に使用される指示対気速度またはマック数を一定にして飛行することが多い。軌道予測モデルもこの考え方に従って、指示対気速度またはマック数から真対気速度に変換し、高層風の影響を考慮して対地速度を算出する。

真対気速度 V_{TAS} と指示対気速度 V_{CAS} の関係を示す^[5]。

$$V_{TAS} = \left[\frac{2P}{\mu\rho} \left\{ 1 + \frac{(P_0)_{ISA}}{P} \left[\left(1 + \frac{\mu}{2} \frac{(\rho_0)_{ISA}}{(P_0)_{ISA}} V_{CAS}^2 \right)^{\gamma/\mu} - 1 \right] \right\}^{\mu} - 1 \right]^{1/2} \quad (1)$$

ここで P は気圧、 ρ は密度、 $\mu = (\gamma - 1)/\gamma$ とし、 γ は比熱比とする。ISA は国際標準大気モデルを表し、 $(P_0)_{ISA}$ は海面上の標準気圧で 101,325 Pa、 $(\rho_0)_{ISA}$ は海面上の密度で 1.225 kg/m³、比熱比 γ は 1.4 とする。気圧 P と密度 ρ はそれぞれ外気温の関数となる。

$$P = (P_0)_{ISA} \left[T/T_0 \right]^{-\frac{g}{K_T R}} \quad (2)$$

$$\rho = \rho_0 \left[T/T_0 \right]^{-\frac{g}{K_T R} - 1} \quad (3)$$

ここで T は外気温（単位：K）、 T_0 は海面上の気温、 ρ_0 は海面上の密度、 R は気体定数、 g は重力加速度、 K_T は標準大気の高さに対する気温勾配であり、 $-g/K_T R$ を 5.25583 とする。

次に、真対気速度 V_{TAS} とマック数 M の関係を示す。

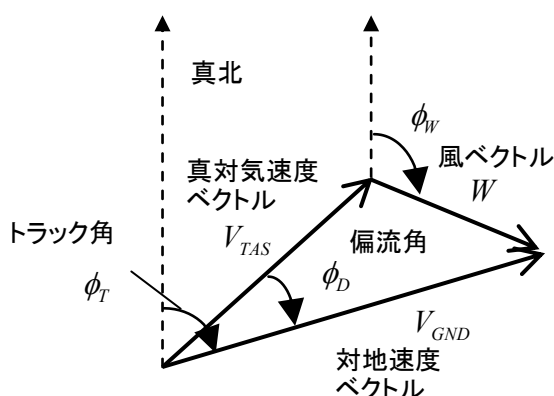


図 1 航空機進行方向と風の関係

$$V_{TAS} = M \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \quad (4)$$

ここで M はマック数、 γ は比熱比、 R は気体定数、 T は外気温である。指示対気速度設定による運航とマック数設定による運航の境界である遷移高度を求め、それより下の高度を飛行する場合は指示対気速度、遷移高度よりも上の高度を飛行する場合はマック数から真対気速度を求める。

対地速度は図 1 のとおり真対気速度と風のベクトル和で算出する。定常状態では、入手可能な観測値からは以下の式で算出できる^[4]。

$$V_{GND} = V_{TAS} \cos \phi_D + W \cos(\phi_W - \phi_T) \quad (5)$$

ここで V_{GND} は対地速度、 V_{TAS} は真対気速度、 W は風速、 ϕ_W は風ベクトルの方向、 ϕ_T は真トラック角である。 ϕ_D は偏流角で以下の式で求められる。

$$\phi_D = \sin^{-1} \left(\frac{W}{V_{TAS}} \sin(\phi_W - \phi_T) \right) \quad (6)$$

航空機の上昇と降下時の運動計算には、航空機を質点としたエネルギー保存則に基づくモデルを使用する。

$$(T - D)V_{TAS} = mg \frac{dh}{dt} + mV_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt} \quad (7)$$

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。これは、航空機に作用する力（推力と抗力）の仕事率が、機体の位置エネルギーと運動エネルギーの増加率と等しくなるモデルである。ここで、

表 1 気象モデルの比較

名称	GSM グローバルスケール	MSM (GPV) メソスケール
範囲	全域	日本周辺域 北緯 22.4 - 47.6 度 東経 120 - 150 度
更新 間隔	6 時間	3 時間
水平 間隔	緯度 0.5 度 経度 0.5 度	緯度 0.1 度 経度 0.125 度
高度 間隔	GSM と MSM に共通 1,000hPa (364 ft), 925hPa(2,500 ft), 850hPa(4,781 ft), 700hPa(9,882 ft), 600hPa(13,801ft), 500hPa(18,289 ft), 400hPa(23,574ft), 300hPa(30,065 ft), 250hPa(33,999ft), 200hPa(38,662 ft), 150hPa(44,647 ft), 100hPa(53,083 ft)	
	MSM (共通部に加えて) 975hPa(1,061 ft), 950hPa(1,773 ft), 900hPa(3,243 ft), 800hPa(6,394 ft)	

位置エネルギーは高度、運動エネルギーは速度に対応する。例えば、アイドル推力による定速の降下では、推力、抗力、速度から降下率を算出することができる。

軌道予測モデルが使用するデータには、航空機性能データ、運航データ、航法データベース、気象予報データなどがある。航空機性能データは、航空機の型式毎のフライトエンベロップ（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。また、運航データは、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。これらは、欧州ユーロコントロールが公開している BADA(Base of Aircraft Data) を使用する^[5]。航法データは、経路やウェイポイントの位置データである。

気象予報データは、大気の 3 次元（緯度、経度、高度）の格子点の風向、風速、気温のデータである。気象庁の GSM (Global Scale Model : 全球数値予報モデル) と MSM (Meso Scale Model : メソ数値予報モデル) を使用する。気象業務支援センターから配信されるデータについて、両者の特徴を表 1 に示す。また、図 2 に両者の格子点の

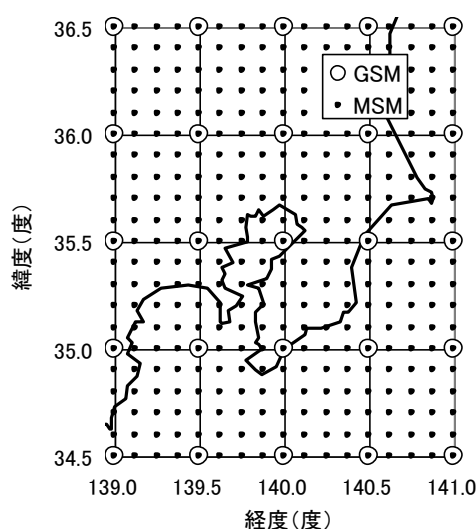


図 2 気象予報データの格子点

水平位置を東京付近の地図上に表示する。黒点が MSM の格子点、白丸が GSM の格子点を示す。MSM が格子点が詳細で予報更新間隔も短いので、気象の局所的な空間変化が大きいとき、また、時間変化が早いときに、有効と考えられる。但し、MSM は洋上空域を含んでいない。そこで、MSM の対象範囲を飛行する国内便には MSM、国際便は GSM の使用を検討している。

これらの格子点のデータに基づき、緯度、経度、高度、時間で補間することで 4 次元連続空間を構成する。補間にはスプライン補間を使用する。このように 4 次元の場を作ることで、任意の時刻、任意の場所での高層風や気温の予報値を取り出すことができる。

3. 予測値と実測値の比較

3.1 気象データの比較

気象の予測値と航空機で測定された実測値を比較する。図 3 から図 5 に航空機の 1 フライトにおける風速、風向、外気温の予測値と実測値の例を示す。また、図 6 に高度プロファイルを示す。ここで、横軸は飛行時間とする。予測値は、その航空機が出発前に取得可能な GSM の数値予報データから補間して算出した。長時間飛行における高層風の影響を正確に予測するためには、離陸後に配信される逐次の気象予報による修正が有効になるが、ここでは計算の煩雑さを避けるため当初の予報値のみに基づいて予測する。

風速、風向、外気温ともに予測値と実測値がよく一致している。風速は飛行位置により 5 kt (1 kt = 0.514 m/s) から 160kt までの変化がある。飛行時間に対する風速の時間変化率の最大値は、7 時付近において約 1.4 kt/分となる。これを 30 分の飛行に換算すると約 43 kt である。この 30 分間の飛行距離は約 210 nm (1 nm = 1.852 km) である。高層風はこうに変化するため、対地速度の正確な予測には高層風の予報を反映することが重要である。また、軌道予測の累積区間の分割方法には、気象の変化の傾向を解析して検討する予定である。

風向において、途中大きく上下しているところは、角度が 360 度を越えたところである。

外気温において、国際標準大気モデルでは、成層圏の気温は -56.5 度の一定値であるが、実際は 10 度程度の変動が見られる。音速は式(4)のとおり外気温の関数となる。巡航中のマック数一定の運航においても、外気温 10 度の変化により、真対気速度が約 14 kt 変化する。そのため、正確な速度の算出には、気象予報の外気温の反映が有効である。

3.2 速度の比較

同じ航空機の速度の予測値と実測値を比較する。図 7 から図 10 に対地速度、真対気速度、マック数、指示対気速度の予測値と実測値の飛行時間に対する変化を示す。予測値の算出では、初めに、BADA の運航モデルの速度設定に基づき、指示対気速度またはマック数を求める。次に、気象予報の外気温により真対気速度に変換する。さらに気象予報の高層風を用いて対地速度を算出する。

全体的に予測値と実測値がよく一致している。巡航時の対地速度は 100 kt 程度の変動があるが、高層風の影響を除いた真対気速度はほぼ一定値となる。巡航時はマック数の設定で飛行しており、マック数がほぼ一致している。また、上昇時と降下時は、指示対気速度の設定で飛行する。指示対気速度は、部分的に予測値と実測値に差がある。

経路が既知であったと仮定した場合の時間予測誤差を図 11 に示す。時間予測誤差は、航空機の軌道の微小区間の区間距離と対地速度の予測値と実測値から、その区間の両者の飛行時間を算

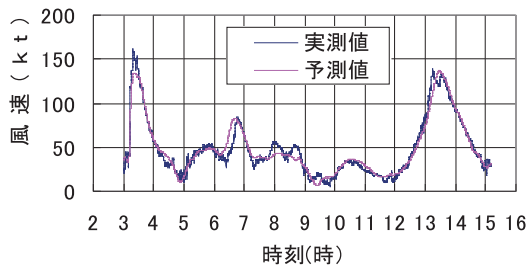


図3 風速の比較

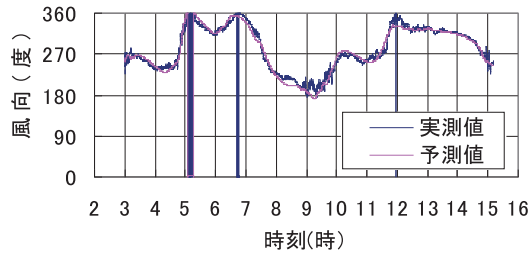


図4 風向の比較

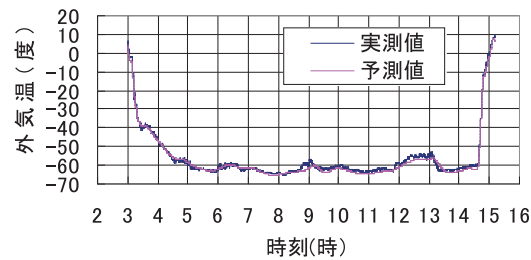


図5 外気温の比較

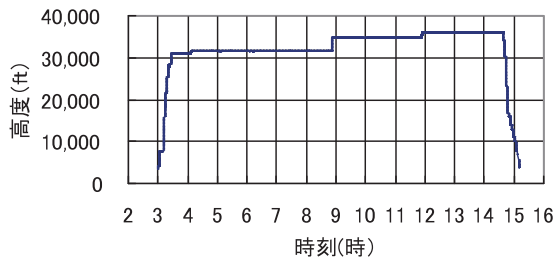


図6 高度

出し、その時間差を累積した。飛行時間に対する予測誤差の変化率は、9時から12時の区間では、約1分/時間である。この区間のマック数の平均は、予測値が0.840、実測値が0.831である。この差が累積されて一定変化の時間誤差となっている。

4. 誤差要因の検討

4.1 時間予測の誤差要因

飛行経路上のウェイポイントの通過時刻の予測に影響する誤差には、飛行距離誤差と速度誤差

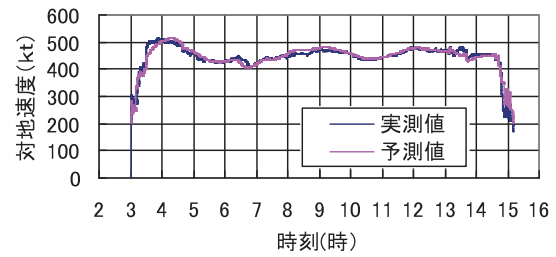


図7 対地速度の比較

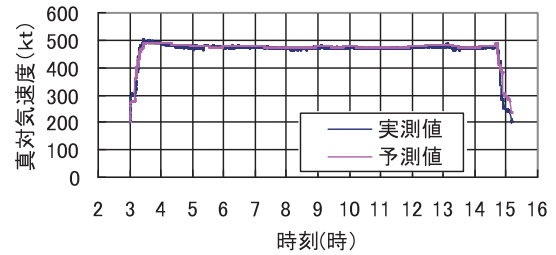


図8 真対気速度の比較

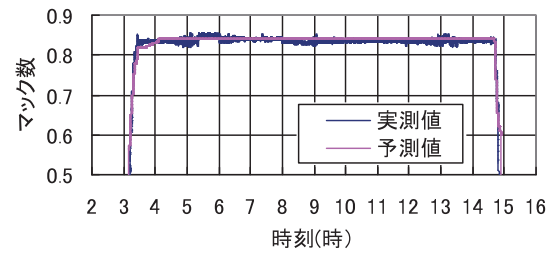


図9 マック数の比較

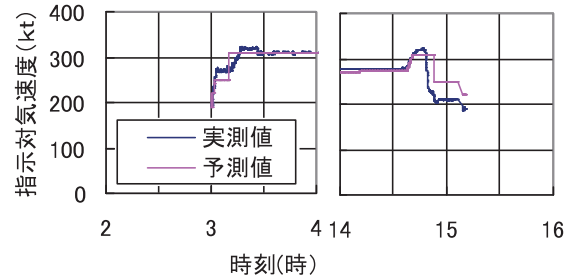


図10 指示対気速度の比較

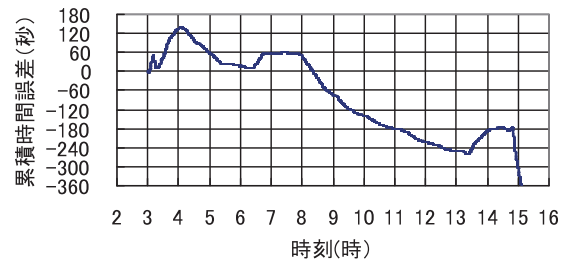


図11 累積時間誤差

がある。飛行距離誤差の上昇段階の要因としては、出発空港の離陸滑走路の違いによる出発経路の飛行距離差、レーダ誘導による標準出発経路との

飛行距離差がある。巡航段階では、レーダ誘導による経路との飛行距離差がある。降下段階では、目的空港の着陸滑走路の違いによる経路の飛行距離差、レーダ誘導による標準到着経路との飛行距離差がある。速度誤差の要因については、速度モデルの差と気象予報の差に区分して、以下に詳しく述べる。

4.2 対地速度予測の誤差要因

軌道予測モデルの対地速度の誤差要因を解析する。対地速度を算出する式(5)の全微分を求めると各要素の寄与分との関係は式(8)となる。

$$dV_{GND} = \frac{\partial V_{GND}}{\partial W} dW + \frac{\partial V_{GND}}{\partial \phi_W} d\phi_W + \frac{\partial V_{GND}}{\partial V_{TAS}} dV_{TAS} + \frac{\partial V_{GND}}{\partial \phi_T} d\phi_T \quad (8)$$

式(8)において、例えば dW は風速の誤差、偏微分係数 $\partial V_{GND} / \partial W$ は風速の誤差の対地速度の誤差に対する影響度を意味する。この偏微分係数は風ベクトルと対地速度ベクトルの位置関係により変化し、両者が平行な場合は風速の誤差による対地速度の誤差への影響が大きく、垂直の場合は影響が小さい。

真対気速度を外気温と指示対気速度で表すと式(8)は式(9)となる。また、外気温とマック数で表すと式(10)となる。

$$dV_{GND} = \frac{\partial V_{GND}}{\partial W} dW + \frac{\partial V_{GND}}{\partial \phi_W} d\phi_W + \frac{\partial V_{GND}}{\partial T} dT + \frac{\partial V_{GND}}{\partial V_{CAS}} dV_{CAS} + \frac{\partial V_{GND}}{\partial \phi_T} d\phi_T \quad (9)$$

$$dV_{GND} = \frac{\partial V_{GND}}{\partial W} dW + \frac{\partial V_{GND}}{\partial \phi_W} d\phi_W + \frac{\partial V_{GND}}{\partial T} dT + \frac{\partial V_{GND}}{\partial M} dM + \frac{\partial V_{GND}}{\partial \phi_T} d\phi_T \quad (10)$$

これらの式では、誤差の主要要素を、風速誤差、風向誤差、外気温誤差、トラック角誤差、指示対気速度誤差またはマック数誤差に区分する。前の 3 項目は気象に関する予報誤差であり、後の 2 項目は運航に関する誤差である。

4.3 各誤差要因の対地速度への寄与

表 2 に 4 機の予測値と実測値について、誤差要因の数値計算結果を示す。ここで、実測値の測

定精度は分からないが、実際にその場で計測と計算されている値であるため、実測値を真値と仮定して予測値と比較参照する。上昇と降下段階では、航空機毎の高度変化率の違いによる予測値と実測値の高度差が影響するが、今回は速度の解析が主目的であるため、高度は実測値を使用して、各速度の予測値を算出した。

表の中で積平均および積標準偏差は各誤差要因と偏微分係数との積の平均値と標準偏差である。ここで、偏微分係数は飛行状況によって変化する。式(1)から式(10)で求めた数値により数値偏微分して求めた。数値偏微分は式を陽関数で表現し、各変数をわずかに変化させ、変化の比を計算した。表のサンプル R2 の風速積平均が 0.32 kt というのは、R2 のサンプルにおいて風速の誤差が対地速度に平均的に寄与するのは 0.32 kt の速度誤差であることを示す。平均値は全区間における平均的な予測誤差への影響の大きさを示し、標準偏差は部分的な影響の大きさを示す。

各誤差要因の数値を比較すると、ほとんどのサンプルで気象に関する誤差より、運航に関する誤差の平均値と標準偏差が大きい。サンプル R100 では、部分的に風速の予報値と実測値に差があったため、風速積平均の絶対値が大きくなっている。気象に関する誤差の中では、風速と風向の誤差の影響が大きく、外気温の影響は小さい。

この表の例は代表値である。同様にして 100 機を越える実測値を解析した結果、いくつかのサンプルでは大きな予測誤差が見られた。この原因を解析すると対地速度誤差への影響が大きいのは、①マック数もしくは指示対気速度の実測値がモデル値と離れている場合、②気象予報の高層風のデータが実測値と大きくずれている場合であり、ほとんどが①の理由であることが分かった。

初期的なトラジェクトリ管理をまとめた「初期 4D トラジェクトリデータリンクの運用コンセプト」では、今後の解析と検証が必要とあるが、時間予測精度の要件は航空路区間が 30 秒、ターミナル区間が 10 秒と述べられている⁶⁾。各速度の比較結果から、航空機は速度計画を軌道予測モデルに反映できれば、航空路区間の予測精度 30 秒が実現可能であると考えられる。

航空機は速度設定は、型式、機体重量、燃料コスト、天候、遅延の有無などのさまざまな条件を

表 2. 誤差要因毎の平均値と標準偏差の比較

サンプル番号	R2	R3	R20	R100
風速積平均(kt)	0.32	1.28	1.48	-3.56
風速積標準偏差(kt)	5.21	4.29	7.77	8.20
風向積平均(kt)	-0.05	0.93	-1.19	1.05
風向積標準偏差(kt)	4.89	4.63	4.06	5.02
外気温積平均(kt)	-0.60	0.03	-0.03	-0.07
外気温積標準偏差(kt)	1.28	0.53	0.17	0.21
真対気速度積平均(kt)	-4.38	-6.99	-3.52	1.43
真対気速度積標準偏差(kt)	10.12	9.35	6.84	17.26
マック数積平均(kt)	-2.41	-4.32	-1.81	0.58
マック数積標準偏差(kt)	10.41	9.27	7.00	17.06
指示対気速度積平均(kt)	9.20	-2.90	-8.11	-11.75
指示対気速度積標準偏差(kt)	14.16	9.67	8.18	16.49
全体平均(kt)	1.51	4.59	2.30	1.19
全体標準偏差(kt)	14.25	12.60	11.21	19.37

考慮して決められている。フライト毎の速度計画を出発前に取得して軌道予測に反映することが望ましいが、その環境が実現するまでは全体的な速度設定の傾向を解析して、運航モデルに反映する方法が有効と考えられる。また、飛行中の航空機のマック数と指示対気速度の現在値については、SSR (Secondary Surveillance Radar) モード S のデータ通信機能により地上側で取得することが可能である。このような監視情報を軌道予測に取り込むことも有効と考えられる。

5. おわりに

航空機の軌道予測に対する誤差要因について検討した。初めに、気象予報（風向、風速、外気温）と航空機の速度について、予測モデルで算出した予測値と航空機で測定した実測値の比較例を示した。次に、対地速度予測の誤差要因について、航空機の速度モデルに起因する誤差と気象予報に起因する誤差を解析した。その結果、気象予報に起因する誤差より、航空機の速度モデルに起因する誤差が大きく、対地速度誤差が大きい場合は、航空機のマック数や指示対気速度がモデル値と差がある場合が多いことがわかった。

今後は、気象の予測値が実測値と異なる部分についての詳細な解析、気象の空間と時間変化を考慮した補間方法の検討、上昇と降下区間での予測誤差の解析、誤差要因を低減する方法の検討を進

める予定である。

謝辞

本研究にご協力頂きました関係各位に感謝致します。

参考文献

- [1] ICAO, “Global Air Traffic Management Operational Concept ” , ICAO Doc 9854AN/458, 2005.
- [2] 白川, 福田, 瀬之口, “航空機性能モデルを用いた航空機軌道予測”, 信学技報 SANE 2008-99, 2009 年 1 月
- [3] 白川, 福田, 瀬之口, “航空機性能データを用いた軌道モデル誤差推定, 電子航法研究所研究発表会講演概要”, 2009 年 6 月
- [4] 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 SANE 2009-167, 2010 年 2 月
- [5] Eurocontrol Experimental Center, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA), revision 3.7 ” , EEC Technical/Scientific Report No.2008-0003, March 2009.
- [6] “Initial 4D □ 4D Trajectory Data Link (4DTRAD) Concept of Operations ” , EUROCONTROL, Dec. 2008.