

## 1 2. TBO の軌道予測に向けた羽田空港アプローチ軌道の風況モデル化

早稲田大学 ※手塚 亜聖  
航空交通管理領域 瀬之口 敦

### 1. はじめに

将来の航空交通システムに関する長期ビジョンである CARATS<sup>[1]</sup>において、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。位置と時間を含む4次元の航空機の軌道を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し、航空機の出発から到着までを一元的に管理することにより、TBO は運航の効率性などを向上させることが可能になる<sup>[2]</sup>。

高空における巡航状態では、効率の良い巡航マッハ数で飛行することが望ましい。機種別に異なる巡航速度に応じた複数の航路が設定され、管制間隔を一定にとったマックナンバーテクニクの飛行を行い、ジェット気流を利用することで、気象条件による不確かさは積分されるが、燃料消費は抑えられる。連続降下方式での降下経路に、迂回・ショートカットが可能な冗長性を持たせることで時間調整が可能であれば、生じた不確かさが解消され、目的空港手前に設定したウェイポイントを定時に通過して、管理された到達時刻に目的地に到達可能になると考えられる(図 1)。

本発表では、はじめに、気象庁 MSM 数値予報モデルを用いた軌道予測が、気温と風の不確かさの影響で、到達時間にどの程度の不確かさが生じるかを明らかにする目的で、SSR Mode S システムの実飛行データとの比較を行った結果<sup>[3]</sup>を報告する。つづいて、TBO の軌道予測に向けた羽田空港アプローチ軌道の風況モデルとして、SSR モード S システムから得られる対気速度ベクトルと対地速度ベクトルの差から算出される風のデータを用いモデル化することを検討した。空間と時間の異なる離散化されたデータに対し、高度と時間の重み付き平均を行うことで、平滑値と揺らぎに分類した結果を報告する。

### 2. 研究方法

#### 2.1 SSR Mode S システムの分析データ

電子航法研究所の SSR Mode S システムにより取得したデータを分析する。データ内容を以下に示す。

時間(日本時間)、緯度・経度(レーダ測位値)、気圧高度、対地速度(GS: Ground Speed)、真対気速度(TAS: True Airspeed)、指示対気速度(IAS: Indicated Airspeed)、マッハ数、真航跡角(TTA: True Track Angle)、機首磁方位(Magnetic Heading)、ロール角(Roll Angle)、トラック角変化率(Track Angle Rate)、気圧高度変化率(Barometric Altitude Rate)、垂直慣性速度(Inertial Vertical Velocity)、大気圧設定値、MCP/FCU 選択高度。

2013年の年間データのうち約3分の1程度を季節の偏りが生じないように抽出し解析した。

#### 2.2 気象庁メソ数値予報モデル MSM の利用

国際標準大気より実運航に近いデータとして気象庁メソ数値予報モデル(MSM)を利用する。気象庁は3時間間隔でMSMの予報を行っており、初期値は3時間毎に更新される。軌道予測には初期値を使用し、0.1秒のステップで、計算中の時刻を挟む2つのMSMに対し機体の緯度、経度、高度および時間の4次元で線形補間を行う。

#### 2.3 航跡データの修正

SSR Mode S システムの緯度経度情報にはレーダ測位誤差が含まれる。航跡が本来の軌道に対して揺らいでいる場合、実際の軌道より距離が長くなると考えられる<sup>[4]</sup>。そこで、以下に示す方法で航跡を平滑化する。

実運航データ内の TTA の変化率を前の時間ステップでのデータとの差から計算し、TTA が 3 点以上連続して変化している区間を巡回区間、そ

れ以外を直線区間に分類する。直線区間を最小二乗法で直線近似し、曲線区間と直線区間が滑らかに接続するよう 3 次ベジェ曲線を用いて補間する。各時間ステップにおける航跡との距離が最小となる軌道を描く曲線を検索し、修正後の緯度経度データとする。

航跡データの修正により、飛行時間の予測値がどのように変わるかを調べる目的で、SSR Mode S システムの測位による航跡、および、緯度経度修正後の航跡に対して実運航データの GS を用いて飛行時間を計算した。レーダ測位時刻の差から求めた飛行時間と比較し、修正により約 83% のフライトが実測値に近づくことを確認している。

## 2.4 重み付き平均による風データの平滑化

MSM 数値予報は 3 時間毎に更新されるが、気象条件が急変すると、TBO の軌道予測による飛行時間がどのように変化し、着陸機のセパレーションコントロールに、どのように影響するか、などを検討する上では、時間解像度が高いモデルが必要である。風速データを、平均値とゆらぎ、に分類する解析は、流れの線形安定解析で用いられる手法である。tanh 型の速度分布はケルビンヘルムホルツ不安定であることが知られ、速度勾配の変曲点を中心とした渦構造が形成される。このため、ウインドシアは、平均風速の変化に加えて大きな速度変動を伴う。ウインドシアに伴う気象条件の急変を分析できれば、航空機運航の安全性向上に貢献すると期待される。

風洞実験では、風速計を空間に固定した計測から平均値と揺らぎを求めることが可能であるが、Mode S で取得可能なデータ量では、同様の平均値と揺らぎを求めるのは困難である。そこで、Mode S で取得されたデータを空間・時間方向で平滑化し、平滑値とそれに対する揺らぎ、に分類することを考えた。

アプローチ軌道では、高度に応じてほぼ同じ緯度・経度を通過する。滑走路の運用形態で到着経路が異なるが、運用の変更が多頻度に行われることはなく、時間帯が近い場合は同一の軌道であることがほとんどである。そこで、緯度・経度の違いは考慮せず、高度と時間のみをパラメータとし

て平滑化を行う。

風速に重み付け関数としてガウス関数  $\exp(-d^2)$  を乗じて平滑化した。現在値と各データとのノルムである  $d$  は、気圧高度  $H$  ・ 時間  $t$  の差をスケール変換のパラメータ  $H_{\text{ref}}$ 、 $t_{\text{ref}}$  で割り以下のように算出する。

$$d = \sqrt{\left(\frac{H - H_i}{H_{\text{ref}}}\right)^2 + \left(\frac{t - t_i}{t_{\text{ref}}}\right)^2}$$

## 3. 研究結果

### 3.1 MSM 数値予報モデルを用いた軌道予測に対する気温と風の不確かさの影響調査

気象庁 MSM 数値予報モデルを用いた軌道予測が、気温と風の不確かさの影響で、到達時間にどの程度の不確かさが生じるかを明らかにする目的で、Mode S の風・気温を用いた飛行時間の予測値と、実飛行データの飛行時間を比較した。

羽田アプローチ軌道の Mode S データのうち、緯度経度修正により飛行時間の差が、約 660 秒の平均飛行時間に対して 1 秒以内となった 1013 例を使用した。航空機の軌道計算にはユーロコントロールの BADA<sup>5)</sup> を利用した。以下の 3 つの方法により求めた飛行時間を比較した。

- I. 実運航データの GS を用い、修正した航跡に沿って計算した飛行時間。
- II. 実運航データの TAS に対し、数値予報の風を用いて予測した GS を用い、修正した航跡に沿って計算した飛行時間。
- III. 実運航データの IAS を CAS とみなし、数値予報の気温を用いて TAS を計算し、数値予報の風速を用いて予測した GS を用い、修正した航跡に沿って計算した飛行時間。

はじめに、I と II により求めた飛行時間の比(= II/I)を計算すると、平均値は 1.006 となり標準偏差は 0.009389 となった。次に、I と III により求めた飛行時間の比(= III/I)を計算すると、平均値は 1.007 となり標準偏差は 0.009415 となった。この結果は、降下軌道において数値予報と実運航の対地速度比から求めた飛行時間比が 1 より大きく、標準偏差の分布が  $1\sigma \sim 1\%$  に収まるという傾向<sup>6)</sup>に一致する。風のみ为数値予報値を用いて

軌道予測した場合と、気温と風に数値予報値を用いて軌道予測した場合では、予測精度に大きな違いが見られないことが確認できる。

そこで、数値予報における気温の影響のみを調べる目的で、CAS から TAS への変換において生じる差を評価した。実運航の TAS と、実運航の CAS から数値予報の気温を用いて求めた TAS の比の平均は 0.999 で、標準偏差の平均は 0.00351 であった。この結果から、気温の数値予報の不確かさが TAS に与える影響は  $1\sigma \sim 0.35\%$  となった。

数値予報値を用いた到達時間予測の不確かさとして、気温の不確かさの影響は小さく、風速の不確かさが大きな要因であることが示された。

### 3.2 羽田空港アプローチ軌道の風況モデル化

羽田アプローチ軌道の風況をモデル化する目的で、Mode S データを用い風速値を算出し、重み付き平均を行うことで風の平滑値を求めた。平滑化にあたり、スケール変換のパラメータは、 $H_{ref}=500[ft]$ 、 $t_{ref}=1800[sec]$  に設定した。図 2 に 2013 年 3 月 7 日の結果を示す。各高度帯では、気圧高度が  $\pm 250ft$  のデータを表示している。

気圧高度 3000ft 付近の図 2(a)では、8 時から 17 時の平滑値(緑点)は分散が余りみられないが、17 時から 23 時では平滑値の分散がみられる。時間と高度をパラメータとした平滑値が同一の時間帯で分散していることから、高度に応じて風速が変化していることが示される。23 時前後の風速(赤点)は、平滑値に対するゆらぎが相対的に大きい。この時間帯では、気圧高度 3000ft 付近から 5000ft 付近(図 2(c))に上昇すると風速が約 20kt 程度減少する。気圧高度 4000ft 付近(図 2(b))が一番風速のゆらぎが大きいように見える。高度により風速が大きく変化するウインドシェアにより風速のゆらぎが大きくなったと考えられる。また、気圧高度 4000ft 付近では、18 時前後の時間帯で風速のゆらぎが大きい。この時間帯でも、高度が 3000ft 付近から 4000ft 付近に上昇すると風速が約 10kt 程度減少する。

このように、風速を平滑化して、各データの風速値と比較することで、高度により風速が大きく変化するウインドシェアと、それに起因すると考

えられる風速のゆらぎの関係を示すことが可能になる。しかしながら、各高度帯別の図では、図の数が多くなる。1 日の風況データを 1 枚の図で表す方法を考案することで、風況を把握しやすくなる。図 3 は、時間間隔 10 分毎、気圧高度 100ft 毎にメッシュを切り、各メッシュで風速の平滑値を算出し表示した。また、各メッシュを中心とする領域内の風速データに対し平滑値に対するゆらぎの二乗平均平方根求め、中心のメッシュの点の色で表示した。

この図から、18 時から 23 時にかけて、高度と共に風速が減少するウインドシェアがあり、ウインドシェアがみられる領域では、風速のゆらぎが大きいことが読み取れる。図 3 のように結果をまとめることで、1 日の風況データを 1 枚の図で示すことが可能である。この結果を風況のモデルとすることにより、ウインドシェアとそれに伴う風速のゆらぎを模擬した運航のシミュレーションが可能になると考えている。

## 4. まとめ

SSR Mode S システムの緯度経度を修正した航跡に対し、実運航データの GS を用いて飛行時間を求めたところ、実測値の飛行時間に近づいた。約 660 秒の平均飛行時間に対して両者の差が 1 秒以内であった 1013 例を使用し、MSM 数値予報の風・気温を用いて軌道予測した結果、飛行時間の不確かさが大きくなる要因は主に風速の不確かさであることが示された。

重み付き平均により風データを平滑化する方法を考案した。風速を平滑化し、各データの風速値と比較した。高度により風速が大きく変化するウインドシェアと、それに起因すると考えられる風速のゆらぎと見られる結果を示した。

1 日の風況を把握しやすくする目的で、時間と高度で変化する風況データの平滑値とゆらぎを 1 枚の図で示す方法を考案した。この結果を風況のモデルとすることで、ウインドシェアによる風速のゆらぎを模擬することが可能となり、風速の急変が、着陸機の運航に、どのように影響するか、などのシミュレーションが可能になると考えている。

参考文献

- [1] 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～戦略的な航空交通システムへの変革～”，2010.
- [2] ICAO, “Global Air Traffic Management Operational Concept”, ICAO Doc 9854AN/458, 2005.
- [3] 山本佑一郎, 手塚亜聖, “メソ数値予報モデルを用いた羽田空港アプローチ軌道の月別時間帯別による到着時間の変化”, 日本機械学会関東学生会第 53 回卒業研究発表講演前刷集, 710, 2014.
- [4] 東山侑司, 手塚亜聖, “標準運航モデルと実運航データを用いた降下時の軌道に対する気象の及ぼす影響”, 日本航空宇宙学会第 44 期年会講演会講演集, A05, 2013.
- [5] Eurocontol Experimental Center, "User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA), Revision 3.9", EEC Technical/Scientific Report No. 11/03/08-08, April 2011.
- [6] 手塚亜聖, “メソ数値予報モデルを用いた軌道予測の予報時間による不確かさの分析”, 日本航空宇宙学会第 51 回飛行機シンポジウム講演集, 2D8, 2013.

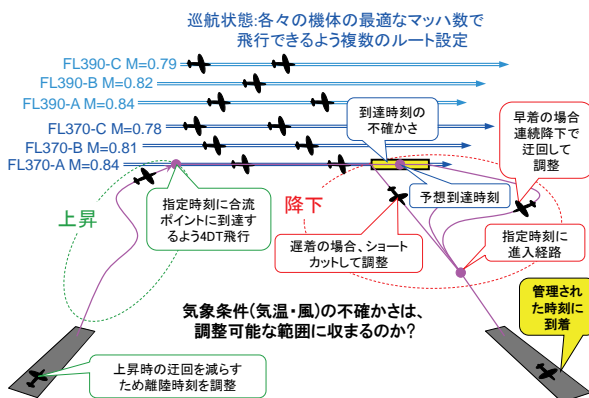
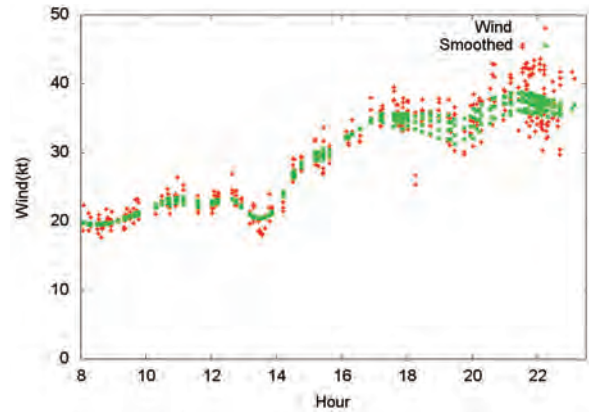
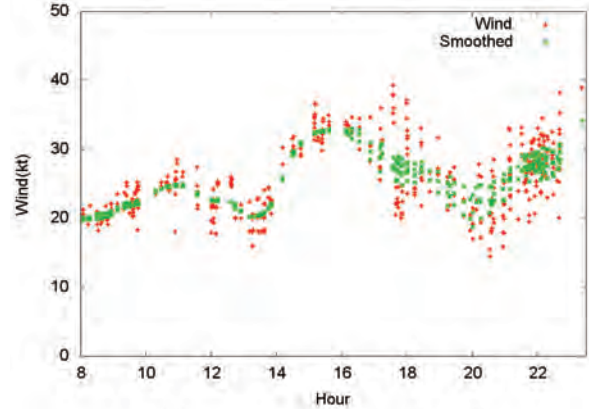


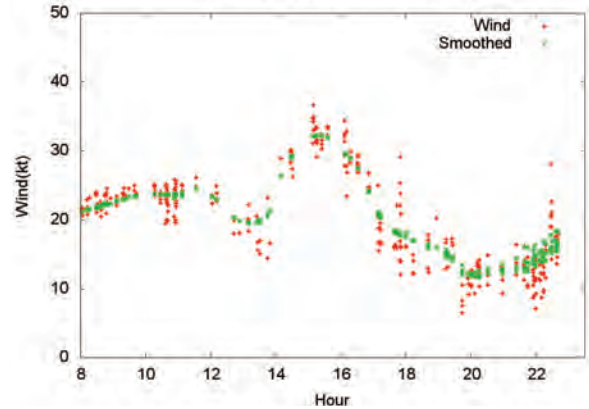
図 1 気象による不確実性を考慮した軌道ベース運用のイメージ



(a) 気圧高度 3000ft 付近



(b) 気圧高度 4000ft 付近



(c) 気圧高度 5000ft 付近

図 2 各高度帯での時間による風速の変化

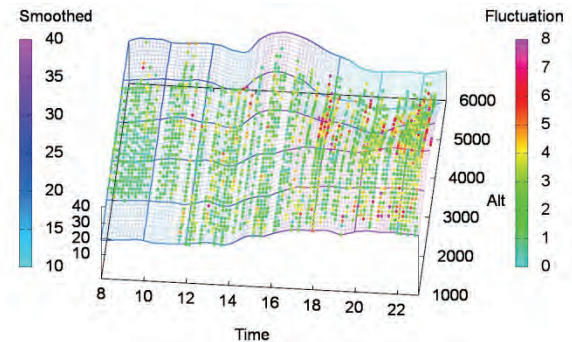


図 3 時間と気圧高度で平滑化した風速と平滑値に対する風速のゆらぎ