

## 16. 気象による軌道予測の不確定性の研究

早稲田大学 ※手塚 亜聖、東山 侑司

### 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。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<sup>[2]</sup>。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軌道を生成し、コンフリクトや悪天の回避などに対応した修正を行い、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できる。

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ックの飛行を行い、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。降下時の経路は、なるべくアイドルパスに近づけることが、燃料消費の最適化を図る上で望ましい。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)。

このようなコンセプトによる運航に影響する気象の要因としては気温と風向・風速が考えられる。本研究では、国際標準大気(ISA)モデルに対する気温の影響を調べると共に、気象庁MSM数値予報モデルによる気象条件での軌道計算を調べる。また、その結果を踏まえ、軌道計算に対する風向・風速の影響を、より精度良く調べる方法として、MSMとmode Sデータの対地速度の比較により到達時間を調査する手法を提案する。

### 2. 研究方法

#### 2.1 SSR mode S システムの分析データ

電子航法研究所から提供頂いたSSR mode Sシステムにより取得されたデータを分析する。提供されたデータ内容を以下に示す。

時間、緯度・経度(レーダ測位値)、気圧高度、対地速度(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(True Track Angle)、機首磁方位(Magnetic Heading)、大気圧の設定状態および設定値

解析したデータは表1に示されるように、夏季と冬季の違いを明らかにする目的で提供された最初のデータ(初回データ)、及び、気象の年間を通した違いを明らかになる目的で追加し、1月から11月の上旬、中旬、下旬のうち関東周辺に低気圧が通過する日を含むように選択したデータ(追加データ)である。

#### 2.2 フライト毎のデータへの変換

データを識別番号でソートし1日分のデータを集計する。SSR mode S 実験局は調布に所在し覆域は250NMである。覆域内を飛行する航空機に対し約10秒間隔にて信号を送信してデータを取得する。航空機が実験局から離れて覆域から外れた場合や、航空機が建築物や山脈などの陰に入ると通信が途絶える。空港に着陸する航空機はある程度の高度以下で通信が途絶え、離陸後ある程度の高度以上で通信が再開する。空港でのターンアラウンドには20分以上かかることを考慮して、20分以上間隔が空いているデータは別のフライトとみなして整理した。

#### 2.3 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。一番確からしい値として、この初期値を使用し、指定の緯度・経度・時間における気温・風速の予測値を算出するため、緯度・経度・時間に対して線形補間を行う。

## 2.4 航空機の運航モデル

航空機の軌道計算にはユーロコントロールのBADA<sup>3)</sup>を利用する。BADAには各航空機の性能モデルが定義され、計算に必要な関係式、各航空機の性能データや運航データが用意されている。また、標準的な運航のモデルとして Airline Procedure Model (APM)が定義されている(図2)。APMによる軌道を Total-Energy Model (TEM)を使用して計算することで到達時刻予測に対する気象の影響を調べる。

## 3. 研究結果

### 3.1 ISA、Non-ISA モデルの比較による気温の影響の調査

国際標準大気(ISA)及び海面上の気温を変化させた Non-ISA モデルを使用し、海面上での国際標準大気との温度差  $\Delta T$  を  $\Delta T=0$  (ISA condition)、 $\pm 10$ 、 $\pm 20K$  と変化させ、APMの到達時刻がどのように変化するかを比較する。計算を簡略化するため、CASの変化は瞬間的に行うが、降下率についてはCASが変化する部分の前に減速すると仮定した。風は無風とし、航空機の型式はB777-300、重量はBADAの参照重量である237.6tとした。

海面上の気温の違いによる飛行時間と高度の関係を図3に示す。気温の影響は、約1300秒の飛行時間に対して最大で17.6秒差、約225kmの飛行距離に対して最大で9.8km差となった。

東京湾における年間の海水面温度変化は、海上保安庁東京湾リアルタイム水質データによると、2012年8月の最低温度は約8℃、2012年8月の最高温度は約30℃である。年間変動を考慮しても $\Delta T=\pm 20K$ の範囲内に収まり、飛行時間に与える影響は $\pm 1\%$ 未満である。1日単位での気温予測を考えると、約300Kの気温に対して不確かさは数度程度と考えられ、気温の違いによる到達時刻予測への影響はほとんどないと考えられる。

### 3.2 MSM 数値予報による気象条件での軌道計算

気象庁の数値予報(MSM)データの気象条件のもとでSSR mode Sシステムから取得した実運航データと同様の航跡となるよう軌道計算を行い、実際の気象と数値予報の違いが飛行時間に及ぼす影響を調査する。解析したデータは表1の初回データのうち降下中の機体のみを抽出したもので、計算対象としたデータ数は1139である。

フライトごとのデータの最初の位置を航空機の初期位置し、時刻、緯度、経度、気圧高度、CAS、真航跡角を計算の初期値として与える。図4に示すようにSSR mode Sシステムのレーダ測位による緯度・経度は真値からのずれが考えられるため、軌道計算においては航跡角を与えて積分する。そのため、実運航の航跡とずれが生じ、数値予報の参照位置にわずかに違いが出る可能性があるが、同じ飛行距離を計算しているため飛行時間の結果に与える影響は小さいと考えた。

実運航データのCAS、距離に対する高度変化率、真航跡角のパラメータを初期位置からの飛行距離の関数とし、軌道計算における飛行距離に応じて使用する値を変化させる。軌道計算における航跡角を実運航データと一致させるため、風の影響を考慮し、対地速度ベクトルが実運航の航跡角と同じ向きになるよう対気速度ベクトルの向きを定める。また、降下角が等しくなるよう対地速度に応じて降下率を変更する。

実運航データは約10秒間隔のため、線形補間により10分割したデータを用意した。更に、時間刻みは0.1秒とし、微小時間に進んだ距離を累積することにより、飛行距離を求め、実運航データから計算された飛行距離に達したとき計算を終了した。

図5は飛行時間比の度数分布図であり、横軸の飛行時間比(計算/実運航データ)は実際の飛行時間に対し、数値予報を用いた軌道計算から求まる飛行時間がどの程度の割合となっているかを表している。約95%のデータが実運航に対して $\pm 3\%$ の範囲内にある。なお、平均値が1.012であり、全体的な傾向としても数値予報を用いた軌道計算の方が飛行時間は長くなっている。この傾向が今回対象としたデータの気象の影響によるも

のか、計算方法によるものかを検討する必要がある。

### 3.3. 対地速度の比較による風速の影響の調査

mode S システムのレーダ計測により得られた緯度・経度を繋いだ軌道に沿ってフライトを積分していく場合、計測の不確かさにより緯度・経度の値はゆらぐため、滑らかな軌道に対して経路長が長くなってしまう。このような問題を回避する方法として、対地速度(GS)の逆数を距離で積分したものが所要時間となることから、mode S システムで得られた実運航の飛行距離は、対地速度  $GS_{modeS}$  を飛行時間で積分することにより緯度・経度の情報を用いることなく推算される。

ここで、MSM 気象モデルによる到達時間は、対地速度  $GS_{MSM}$  の逆数に、 $GS_{modeS}$  をかけたものを飛行時間で積分することで求められる。MSM のデータによる対地速度と mode S データの対地速度の比  $GS_{modeS}/GS_{MSM}$  は、気象データに基づく到達時間と、実運航での到達時間の比となる。

全解析データのフライトは、常に気圧高度が 14000ft 以上のデータを巡航飛行(Cruise)、気圧高度の最小値が 14000ft 未満のデータの内、高度の変化率が正のものを上昇飛行(Climb)、高度の変化率が負のものを下降飛行(Descent)、と分類した。MSM の気象データは等気圧面で与えられるため、14000ft 未満の気圧高度でも QNH 気圧補正は行わずに気圧高度のままとした。

通年にわたる全データの  $GS_{modeS}/GS_{MSM}$  の平均の度数分布を図 6 に示す。この結果から、全データのうち 80.36% のフライトは、到達時間の比が  $\pm 1\%$  以内に収まり、95.91% のフライトは、到達時間の比が  $\pm 2\%$  以内に収まる結果となった。到達時間の比の分布の標準偏差は概ね  $1\sigma \approx 1\%$  と読み取れる。また、Descent の  $GS_{modeS}/GS_{MSM}$  の平均の分布は 1 より少し大きい値に偏っており、3.2 節での議論同様に気象データによる飛行時間が実運航に比べて長くなる傾向が見られる。一方、Climb の  $GS_{modeS}/GS_{MSM}$  の平均の分布は 1 より少し小さい値に偏っており、全体としては中心が 1 に近い分布となっている。

日付毎の度数分布は概ね同様の分布となり、図

7 に示される 2 月 23 日は、 $\pm 1\%$  以内のデータが 6 割弱とデータの分散が一番大きくなった。この日は発達中の低気圧が通過し全国で雨や雪となった。

## 4. まとめ

ICAO 標準大気モデルに対する気温の影響を調べるため、ISA モデル及び Non-ISA モデルにおける軌道計算を行った。 $\Delta T = \pm 20K$  の海面上での気温の違いにより、約 1300 秒の飛行時間に対して最大で 17.6 秒差、約 225km の飛行距離に対して最大で 9.8km 差となった。年間変動を考慮しても  $\Delta T = \pm 20K$  の範囲内に収まることから、飛行時間に与える影響は  $\pm 1\%$  未満である。

気象庁の数値予報(MSM)を用いて軌道計算を行い実運航データと比較した。SSR mode S システムから取得したデータの中から抽出した降下中の 1139 機に対し、同様の航跡となるように計算した結果、約 95% のデータは実運航に対しする飛行時間が  $\pm 3\%$  の範囲内となった。

軌道計算に対する風向・風速の影響を、より良い精度で調べる方法として、MSM と mode S データの対地速度の比により到達時間比を調査する手法を提案した。通年にわたる全データの度数分布を求めた結果、80.36% のフライトは、到達時間の比が  $\pm 1\%$  以内に収まり、95.91% のフライトは、到達時間の比が  $\pm 2\%$  以内に収まる結果となった。到達時間の比の分布の標準偏差は概ね  $1\sigma \approx 1\%$  となった。日付毎の度数分布も概ね同様の分布となり、1 月から 3 月にかけて分散の大きいデータが見られた。2 月 23 日は、 $\pm 1\%$  以内のデータが 6 割弱とデータの分散が一番大きくなった。

## 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 9854 AN/458, 2005.

[3] Eurocontrol 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.

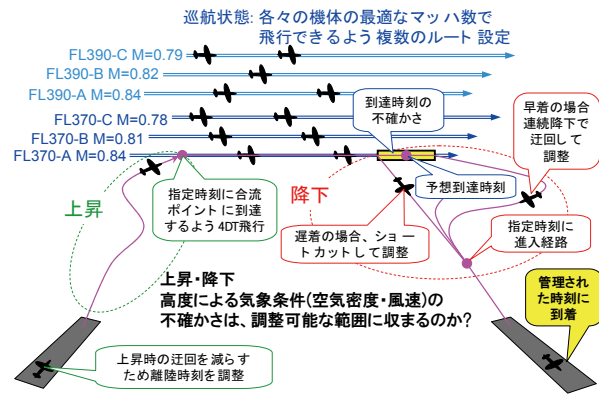


図1 気象による不確定性を考慮した軌道ベース運用のイメージ

表1 解析した mode S データの日時(2012年)

初回データ (JST 以下同)	
2月20日0時~2月24日17時	2月27日10時~2月29日24時
8月22日0時~8月29日24時	
追加データ	
1月 5~8, 13~16, 22~24	7月 1~4, 13~14, 16, 28~31
2月 1, 3~4	8月 9
3月 5~8, 21~24, 28~31	9月 1~4, 17~20, 27~30
4月 2~4, 9~12, 25~28	10月 1~4, 16~19, 27~30
5月 1~4, 9~12, 25~28	11月 1~4, 19~20, 25~28
6月 5~8, 18~20, 27~30	

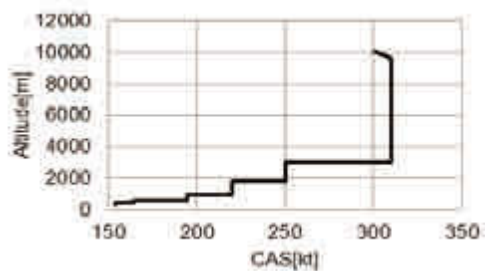


図2 BADA APMに基づく降下速度

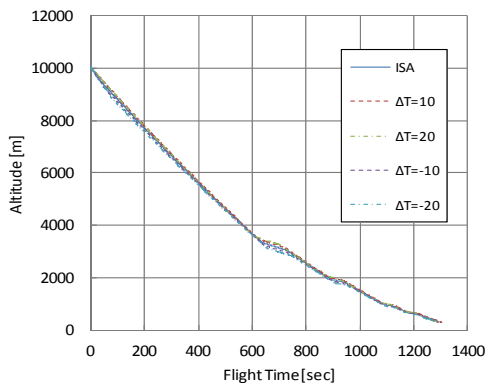


図3 海面上の気温の違いによる飛行時間の変化

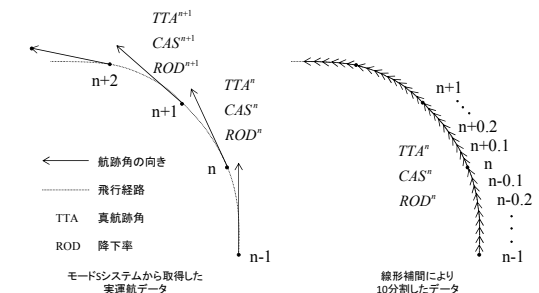
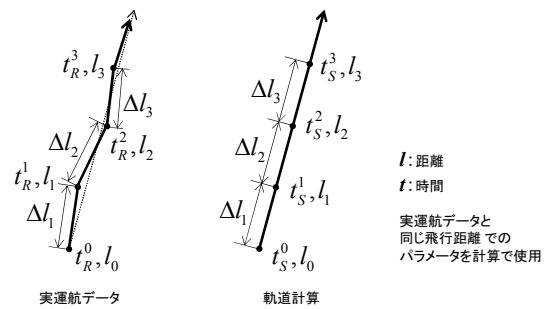


図4 MSM 数値予報を用いた軌道計算

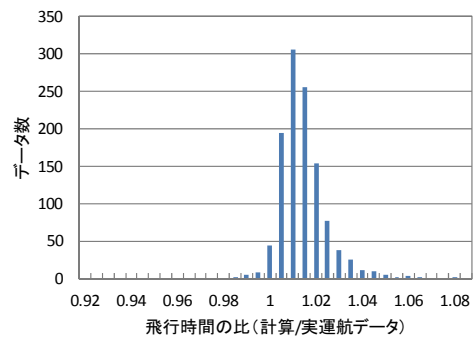


図5 MSM 数値予報を用いた軌道計算と実運航の飛行時間の比の分布

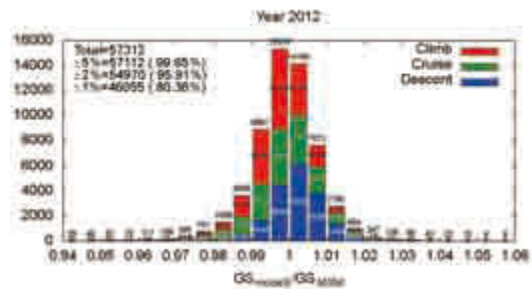


図6 実運航と MSM 数値予報を用いた対地速度の比の分布

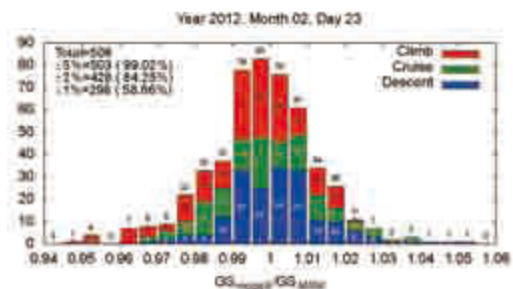


図7 対地速度の比の分散が最大となった日