

2. 気象予報データの利用者選択経路の導出に与える影響

航空交通管理領域 ※中村 陽一, ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル, 瀬之口 敦

1 まえがき

利用者選択経路 (User Preferred Route, UPR と表記) は、固定経路ではなく、その日の気象状況等を考慮した経路を飛行するものであり、航空機運航の効率化や CO2 削減などの環境への配慮に向けた方策の一つである。2050 脱炭素社会の実現に向けた取り組みも進められており、その中で航空機運航分野における CO2 削減も推進されている[1]。UPR など気象条件等を考慮した飛行経路については多くの研究がなされており [2]、一般に長距離便における効果が高いと考えられているため、洋上空域が主な検討対象であった。一方、国内空域においても効果は見込まれると考えられ、実際の運航者側のシステムにおいて導出される経路や利用する気象データも考慮した便益の推定が必要である。

本稿では、まず実運航のシステムと計算結果を比較することにより計算方法の妥当性について確認する。その後、予報を含む異なる気象データを利用し、気象データの違いにより生じる経路差および飛行時間、燃料消費量の差について報告する。

2 利用データおよび計算手法

2.1 飛行計画システムのデータ

本稿では、日本航空株式会社にて、飛行計画作成に利用されている飛行計画システム (Flight Plan Manager, FPM と表記) [3]のデータを利用した。FPM は指定した区間での UPR 経路を生成する機能を有している。図1に示すように羽田空港 (RJTT) から那覇空港 (ROAH) までの飛行のうち、IBENO から PRIUS までの区間を UPR 区間と想定し、FPM により生成された経路を利用した。導出された UPR に加え、Aeronautical Information Circular (AIC)により公示された経路 (以下 AIC 経路と表記)、およびそれぞれの経路に沿って飛行した場合の飛行時間、燃料消費量について同システムにより導出されたデータについてもあわせ

て利用した。表1に利用データの一部を示す。経路上の各ウェイポイント (WP) 通過時の累積時間や残燃料が参照可能である。ただし、時間は分単位、燃料は 100lbs 単位である。また、FPM による UPR の経路の緯度経度は整数値であり、便により WP 数は2または3点で異なる。

2021年6月から8月までの3か月の間、毎日11時 (JST) に RJTT を離陸することを想定して導出された経路および各種データのうち、90便を解析に利用した。厳密には PRIUS の10分ほど手前から降下局面にはいっているが、一定高度の飛行とみなして解析を実施した。

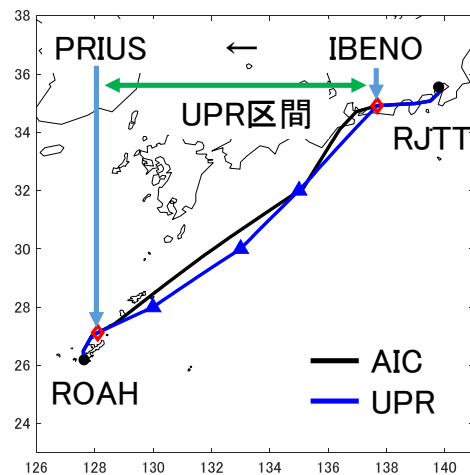


図1 対象とする経路

表1 データ例 (一部抜粋)

FL	WP	緯度経度	累積時間 [min]	残燃料 [klbs]
400	IBENO	N34548 E137405	22	24.4
400	SHIMA	N34183 E136353	32	23.9
400	LAXEL	N32056 E135095	52	19.9
400	TONAR	N29491 E131487	81	15.6
DS	PRIUS	N27072 E128065	113	11.6

2.2 気象データ

気象庁より提供されるメソ数値予報モデルGPV (MSM) [4]を利用した。MSM では、日本域内の 5km メッシュの格子点における風向、風速、気温等の気象データが提供される。3 時間ごとの数値予報の初期値に対して、39 時間先の予報データが利用可能である。本稿では、初期値のデータに加えて、15 時間先までの予報データを利用した。

2.3 飛行の模擬

航空機の飛行は巡航高度、速度、気象など様々な要素により影響を受け、飛行時間や消費燃料などはそれらに伴い変化する。本稿では、ユーロコントロールにより開発・維持されている Base of Aircraft Data (BADA) family 3[5]を用いて航空機の飛行を模擬する。BADA では型式に応じた質量や推力などの性能データが与えられるとともに、航空機の上昇、巡航、降下の局面ごとに、高度に応じた標準的な飛行速度が定義されている。これらを組み合わせることにより、異なる経路を飛行した場合の航空機の飛行時間や消費燃料等を計算し、それらの定量的な比較が可能となる。

2.4 飛行経路の最適化

動的計画法[6]と呼ばれる手法により最適経路を導出する。本稿では2種類の格子点を利用した。一つ目は、計算手法の妥当性の確認のために FPM の条件に近い格子 (FPM-base) である。FPM の経路では、格子点の緯度経度は全て整数値であり、また便によって WP の数が 2 または 3 点で異なる。そこで図 2 左図に示すように FPM で導出された UPR と同じ経度の位置に格子点を配置し、最適な経路を探索した。

二つ目は図 2 右図に示すように大圏経路を基準に設定した格子である。従来は進行方向 (x 軸方向) に計算を進める中で一つ前の格子点列からの接続のみを考慮していた。例えば図 3 に示す $x=3$ の点に関しては、 $x=2$ の点列からの接続のみを探索していた。本稿では、 $x=2$ の点列に加えて、計算開始地点や $x=1$ の点列から直接 $x=3$ への接続も探索し、最適経路を導出した。結果として、図 3 右図に示すように、WP

の数は必ずしも格子点の進行方向の数と同一とはならない。計算量が若干増加する一方で、格子点間隔等の配置に依存し辛く、より最適な解が得られる。

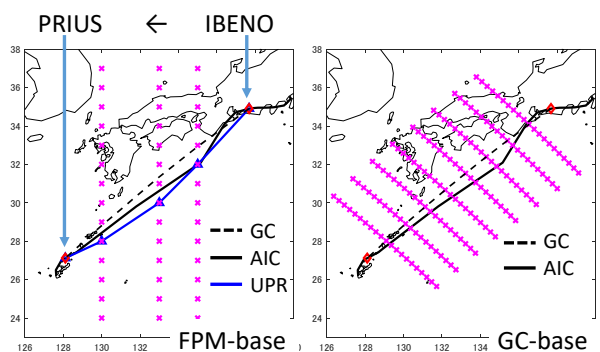


図 2 2種類の計算格子

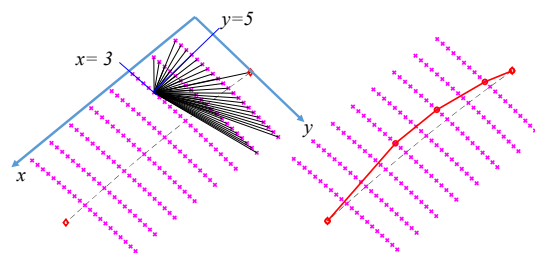


図 3 最適経路探索イメージ

3 最適経路導出方法に関する検証

3.1 計算条件

IBENO から PRIUS までの飛行を計算した。FPM のデータは 2.1 で示すように 6 月から 8 月のうち 90 日について、11 時 (JST) に RJTT 離陸を仮定して導出されたものである。一方で、本解析では計算の都合上 IBENO を 11 時 (JST) に通過したものとみなし、また IBENO から PRIUS の区間を一定高度 40,000ft、一定マッハ数 0.85 で飛行するものと仮定した。また、FPM での初期重量から IBENO までの消費燃料分を差し引いた値を初期重量とした。本計算方法との主な差異は、利用する気象データ、初期時刻、巡航速度、および PRIUS 手前からの降下の部分である。

計算の妥当性の確認のため、3.2 では上記の仮定に基づき同一の AIC 経路に対して MSM の気象データ、BADA の計算式により計算した飛行時間および燃料消費量と FPM より得ら

れた値との比較を行った。また、3.3 においては、同仮定のもとで最適経路を導出し、FPM により導出された UPR との比較を行った。

3.2 AIC 経路における時間および燃料の比較

AIC 経路に沿った飛行について計算した結果と表 1 に示す FPM のデータから取得した値を比較した結果として、図 4 に飛行時間および燃料消費量の差（計算値-FPM）のヒストグラム、表 2 に平均および標準偏差を示す。飛行時間については 95%以上が±2 分に収まっており、IBENO から PRIUS まで平均 98 分ほどの飛行であること、FPM のデータが 1 分単位であることを考慮すると比較的近い結果が得られた。燃料についても、降下局面を無視していることから若干正の方向に平均値がずれているが、おおむね近い値が得られた。

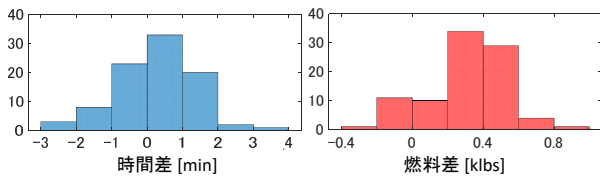


図 4 飛行時間および燃料消費量の差

表 2 時間および燃料消費量の差

	平均	標準偏差
時間差[min]	0.25	1.12
燃料差[klbs]	0.31	0.21

3.3 FPM の UPR と最適経路との比較

図 2 左図に示す FPM-base の格子点を利用して求めた最適経路と FPM より取得した UPR について比較を行った。図 5 に FPM の UPR 経路および最適経路を示す。最適経路は FPM の仕様にあわせて整数値の緯度経度のみを探索した。90 便のうち、28%は同一の経路が導出された。他の経路についても、図 5 右図に示すように、緯度方向の誤差は最大でも 1 度であり、それ以上に誤差の大きい経路は導出されなかった。

また、FPM で導出された経路(UPR)と本手法で導出した経路(Opt)に対する便益を比較した。UPR, Opt および AIC 経路の 3 つに対して、同

じ計算条件（MSM の気象データ、BADA による飛行模擬）にて計算し、UPR, Opt のそれぞれと AIC との差分を便益とみなした。結果を図 6 に示す。1 便のみ AIC-UPR の結果が負の値であり、UPR よりも AIC の経路の方が時間および燃料が短かったことを意味する。これは、FPM による UPR の導出の際に想定した気象データが計算に利用した MSM の気象と異なっていることが一つの要因と考えられる。AIC-Opt については、MSM の気象を利用して最適化を行っているため、すべてが正の値となり、また AIC-UPR よりも多少便益が大きい、概ね近い傾向が示された。

これらにより、本手法によりある程度システムの出力と近い結果を得られることを確認した。

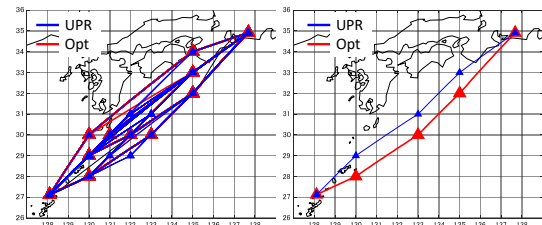


図 5 UPR (FPM) および最適経路

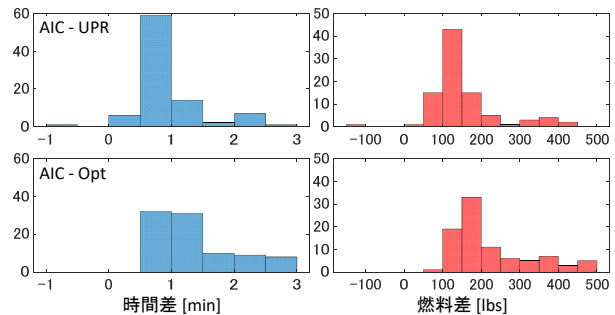


図 6 UPR の便益における差分

4 経路最適化に関する風の影響

4.1 計算条件

経路最適化における風の影響を調べるため、図 2 右図に示す GC-base の計算格子を利用して、2021 年の 1 年間 365 日分の気象に対する最適経路を導出した。IBENO から PRIUS まで、一定高度 40,000ft、一定マッハ数 0.84 とし、11 時 (JST) を初期時刻、初期重量は BADA の標準重量とした。気象データについては、表 3 に示す初期時刻、予報時間の異なる 9 種類の組み合わせを利用した。表中の数値は利用データの

時刻を表し、括弧の中は予報時間である。すなわち、9(0)は9時の初期値であり、3(+6)は3時の時点での6時間先の予報であり、ともに9時の気象データである。今回の条件では2時間程度の飛行となるため、11時から13時までの気象データが必要となる。MSMは3時間ごとであり、T0およびTPの種別においては、任意の時刻の気象データをその前後の二つのデータから補間して用いるため、一つの飛行に3つのデータを利用した。T0が最も実際の気象に近いデータである一方で、飛行時点では利用できない将来のデータが含まれる。TP4のデータであれば、11時間前の0時（厳密にはデータが利用できるまでの時間差の考慮が必要）の時点で利用可能である一方で、予報であるために誤差が生じることが懸念される。TFの種別では、補間を利用せずにその瞬間の気象のみを利用して計算を実施した。本稿では、各組合せにおいて、結果に与える影響を調べた。

表3 利用した気象データの時刻 (JST)

種別	データ時刻 (予報時間)
T0 (真値と仮定)	9(0), 12(0), 15(0)
TP1	9(0), 9(+3), 9(+6)
TP2	6(+3), 6(+6), 6(+9)
TP3	3(+6), 3(+9), 3(+12)
TP4	0(+9), 0(+12), 0(+15)
TF1	9(0)
TF2	6(0)
TF3	3(0)
TF4	0(0)

4.2 最適経路による効果

まずは想定した区間におけるUPRの潜在的な効果を調べるため、T0の気象データを用いて365日分の気象条件のもと、最適経路の計算を行った。結果として、図7に得られた最適経路を示す。図8に飛行時間、燃料消費量、飛行距離についてAIC経路と比較した削減量を示し、同図には参考のためAIC経路と大圏経路を比較した削減量を緑線にて示す。また表4に平均および標準偏差を示す。計算した365便のうち、60便は最適経路が大圏経路と一致して

おり、表4から大圏経路を飛行することにより平均1.6分、252.9lbsの削減が可能となる。風を考慮した最適な経路を飛行することにより、平均1.9分、302.2lbsの削減が可能となる。概ね2分程度の削減効果であるが、10分程度の大きな効果が得られる気象条件も観測された。

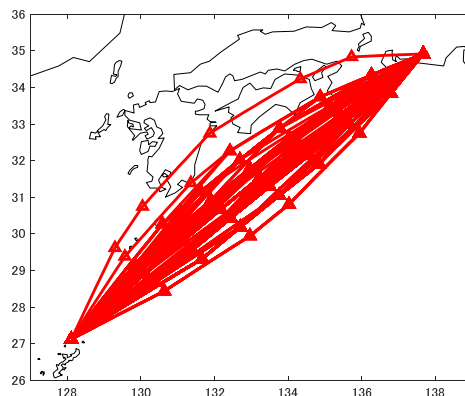


図7 最適経路 (365経路)

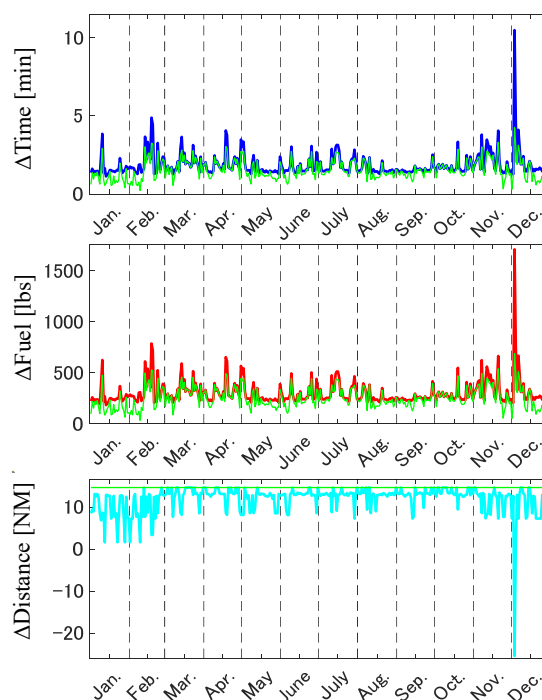


図8 AIC経路からの削減量 (緑は大圏経路)

表4 最適経路の時間、燃料、距離削減量 (括弧内は大圏経路)

	平均	標準偏差
時間[min]	1.9 (1.6)	0.8 (0.6)
燃料[lbs]	302.2 (252.9)	124.2 (101.4)
距離[NM]	12.0 (14.8)	3.3 (0)

4.3 異なる気象データを用いた予測

前節の T0 に加えて、表 3 に示す他の 8 種類を加えた 9 種類の気象データの組み合わせを利用して 365 日分の最適経路を導出した。結果の一例として、図 9 に異なる気象データを利用した場合の経路の差異を示す。あわせて、T0 の最適経路と同じ経路が導出された割合を図 10 に示す。TP1 の条件であれば半分以上は同じ経路が導出され、予報時間が長くなるほど同一の経路が導出される割合が低下する。補間を利用しない場合には更にその割合が低下した。一方で、図 9 に示す経路の差異は 365 便のうちでも比較的大きな差が見られたケースであり、気象データのみの差異ではそこまで大きな経路の差にはつながらないことが示された。経路の横方向の差は、TP のケースで最大 40NM (格子 2 点分) であり、TF のケースで最大 60NM (格子 3 点分) の差が見られた。

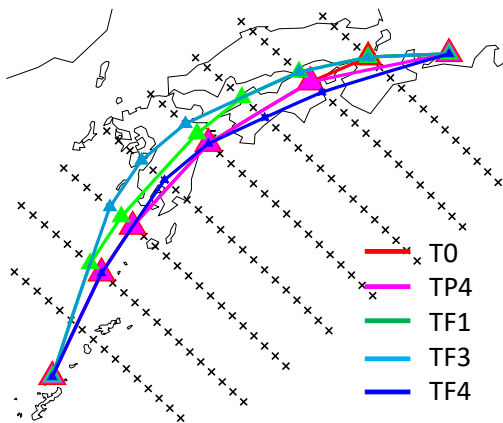


図 9 異なる気象による最適経路の変化例

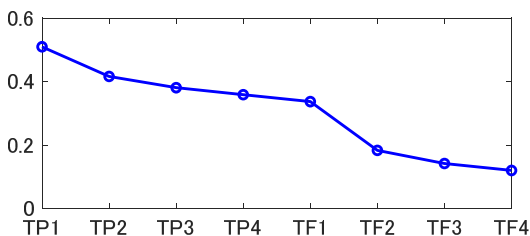


図 10 T0 と同一の経路の割合

図 11 に異なる気象データの組み合わせを用いて計算した飛行時間および燃料消費量の予測値と、真値とみなす T0 の値との誤差を示す。予報値の補間を利用した場合、11 時間前の

TP4 の時間、および燃料差の標準偏差はそれぞれ 34 秒、92lbs 程度であり、誤差の大きいケースでも 2 分程度であった。一方で、補間を利用しない場合、11 時間前の TF4 の時間、燃料差の標準偏差はそれぞれ 162 秒、444lbs であり、5 分以上ずれる誤差の大きいケースもみられた。結果として、経路そのものは、11 時間前の気象データを利用しても、実際の最適経路に近い経路が導出されることが示された。飛行時間や燃料消費量についても、11 時間前のデータであっても、予報データを利用して計算した場合には比較的誤差は小さいといえる。一方で、補間を利用しない場合においては、TF1 であってもその誤差は予報データを利用した場合よりも精度は落ち、将来の軌道ベース運用等を考えると無視できない程度に大きくなることが示唆された。

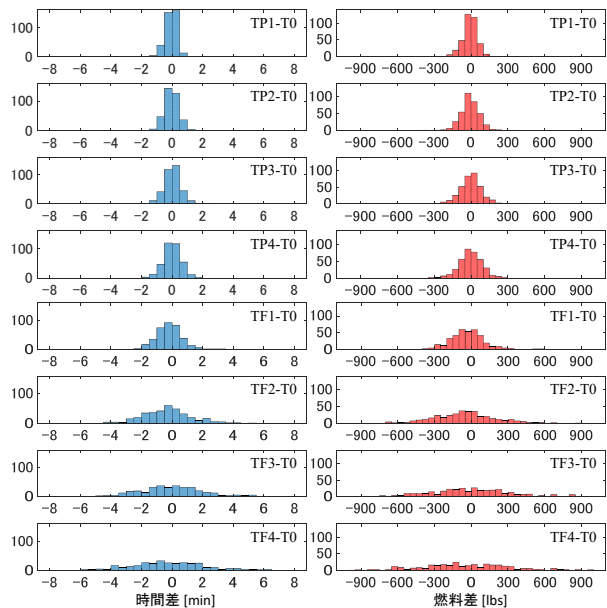


図 11 予測時間および燃料消費量の誤差

4.4 経路の予測誤差の与える影響

最後に、異なる気象データを用いて導出された最適経路を飛行計画の経路と仮定し、実際に計画した経路を飛行した場合の飛行時間および燃料消費量への影響について調べた。前節で示した 9 種類の各最適経路に対して、同一の T0 の気象データを用いて飛行時間および燃料消費量を計算した。結果として T0 の気象に基づき計算した最適経路との差を表 5 にまとめる。

前節で示した通り，導出された経路そのものの差は比較的小さい。したがって，11 時間前の気象 (TF4) をもとに導出した経路であっても，その飛行時間差は最大で 85 秒であった。特に，予報データで補間した場合においては，TP4 の条件であっても 20 秒程度の誤差であった。これにより，11 時間前の気象データであっても，最適な経路の導出に関しては大きな誤差は発生しないことが示された。

表 5 T0 の経路との比較

	Time[sec]			Fuel[lbs]		
	Ave.	S.D.	max	Ave.	S.D.	max
TP1	0.64	1.61	13.23	1.83	4.53	38.54
TP2	0.97	2.22	15.95	2.7	6.19	45.52
TP3	1.09	2.4	17.3	3.02	6.51	45.52
TP4	1.33	2.84	16.53	3.66	7.69	45.31
TF1	1.85	3.85	23.61	5.04	10.45	65.44
TF2	3.95	6.84	53.7	10.71	18.48	146.69
TF3	6.38	10.96	73.13	17.26	29.66	195.06
TF4	8.11	13.02	85.92	21.98	35.34	231.79

5 むすび

本稿では，利用者選択経路の導出にあたり，気象予報データが与える変化について調べた。計算に先立ち，FPM システムの計算結果との比較により，計算方法の妥当性について確認した。次に，想定した羽田空港から那覇空港のうちの一部区間を UPR と設定した場合の効果として，1 年分の気象条件に対する最適経路を求めた。AIC 経路と比較して，平均 1.9 分，302lbs 程度の削減効果が示された。最後に，異なる気象データを活用して最適経路を導出することにより，気象データの差が計画時の経路に対して与える影響について示した。MSM の初期値を利用した最適経路を真値と仮定したとき，予報時間が長くなるほど異なる最適経路が導出されることが示されたが，その差異は軽微であることを確認した。一方で，将来的には通過時

刻や燃料消費量などをより高精度に導出し，それらに基づき航空交通管理を実施していくことが求められる。このような時，実際に飛行する気象条件とは異なる気象データを想定すると，無視できない程度の誤差が生じるため，直前の気象データの利用や，予報データの活用など，実際に近い条件で計算することが肝要である。

謝辞

本研究にあたり飛行計画システムの詳細データおよび様々な知見を提供いただいた日本航空株式会社の方々には感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 国・地方脱炭素実現会議，“脱炭素ロードマップ,” https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/datsutanso/pdf/20210609_chiiki_roadmap.pdf [cited 2022].
- [2] Hiroko Hirabayashi, et al, “Feasibility Study of Free Routing Airspace Operation over the North Pacific Airspace,” Fourteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2021.
- [3] 木下，松本，渡利，杉山，“飛行計画システムを用いた国内空域における UPR 導入の効果分析,” 第 58 回飛行機シンポジウム, 2020 年 11 月.
- [4] 気象庁情報基盤部，“配信資料に関する技術情報第 575 号 メソ数値予報モデル GPV および MSM ガイダンスの予報時間延長について,” 令和 3 年 12 月.
- [5] Eurocontrol Experimental Centre, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.15,” EEC Technical/Scientific Report No. 19/03/18-45, May 2019.
- [6] Navinda Kithmal Wickramasinghe, et al, “Flight Trajectory Optimization for Modern Jet Passenger Aircraft with Dynamic Programming,” Volume 290 of the series Lecture Notes in Electrical Engineering, pp. 87-104, Feb. 2014.