

定期運航便の高精度軌道予測のための飛行解析

An analysis of current flight operation for fixed point passing time prediction of scheduled flight

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1190168 山中 春菜

1. はじめに

現在、航空交通の需要は世界的に見て増加の傾向にある。日本においても、格安航空会社 (Low-cost carrier, LCC) の就航により航空旅客数は増加しており、新たな航空需要を創出している⁽¹⁾。航空交通量の増加により、運航者、利用者の多様化、利便性の向上、運航効率の向上、地球温暖化対策など、複数の問題に的確に対応していくことが求められている。そこで日本では、「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 Systems) を策定し、ATM (Air Traffic Management) 運用概念や通信 (Communication) ・航法 (Navigation) ・監視 (Surveillance) (CNS) 基盤技術の変革に向けた活動を行っている⁽²⁾。そのために「軌道ベース運用 (Trajectory Based Operations, TBO)」への移行を中核に捉えている。TBO の実現に向けて、近年様々な研究が行われている。

これまでの研究で、到着時刻制御は、現在ほぼすべての便で使用されている飛行管理システム (FMS, Flight Management System) を地上で精度良く再現することで管制方式基準を満たし、かつ効率を向上させることが可能であると示されている⁽³⁾。複数機の到着時刻を正確に予測でき、混雑が事前に予測できるようになることで、状況を調整し、各機体を適切に割り当てること出来る。

そこで本研究は、機上で使用されている FMS を地上で再現し、経路と巡航高度を与えると、飛行前に正確な定点通過予測時刻を与える解析ツールを確立することを目的とする。本稿では、FMS のコマンドを再現するため、速度や高度などについて現状分析を行った。

2. 実運航データ

本論文ではウェブサービス、Flightradar24 からダウンロードした定期便の実際の航跡データを使用する。Flightradar24 は世界中の航空機の運航情報をリアルタイムで提供するウェブサイト並びにスマートフォン・タブレット向けアプリケーションであり、ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) や MLAT (Multilateration)、レーダーデータを含むいくつかのデータソースからのデータを結合したものである。ADS-B, MLAT, レーダーデータは、航空会社や空港からのスケジュールとフライトステータスデータとともに集約されている⁽⁴⁾。以下の表 1 に本論文にて使用するデータの概要を示す。本論文では、2018 年 1 月と 7 月、各月 3 日分のデータを使用する。

Table 1 Overview of object data

Record period	2018 Jan. 1 st , 15 th , 31 th Jul. 1 st , 15 th , 31 th
Objective	Airliner flying in IFR
Record items	Flight number, Departure/Destination Aircraft, Registration, Altitude, Track angle, Latitude/Longitude, Vertical Speed, Speed, Radar, Squawk, Wake
Source	ADS-B, MLAT, Radar data
Company	ANA, JAL, Skymark, Starflyer

3. 解析対象

3.1 航空路

定期運航便の航法は主に無線航法と広域航法の 2 つに大別される。無線航法とは、VOR (VHF Omnidirectional Range) や DME (Distance Measurement Equipment) 等の航空保安無線施設を結んだ航空路の直上を定められた高度で飛行する方法である⁽⁵⁾。近年では全地球測位システム GPS や航空機搭載センサの発達に伴い、緯度、経度で指定されるウェイポイントをつないだ比較的直線に近い航空路 (aRea NAVigation 航空路) を飛行する広域航法が一般的である。

本論文では、福岡発羽田行きの便を解析対象とする。対象とする便は主に RNAV 航空路 Y23 上を飛行しており、標準計器飛行方式 (Standard Instrument departure, SID) 経路と航空路をつなぐ転移経路は複数設定されている。これらの経路上のいくつかのウェイポイントを通過せずにショートカットして飛行するものもあるため、図 1 に示す 7 通りの参照経路を定めた。

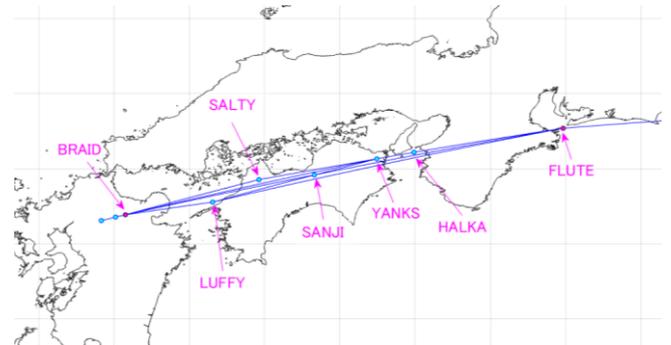


Fig. 1 Reference route

Table 2 Overview of reference route

Route number	RJFF TRANSITION		Y23			
1	BRAID	SALTY	YANKS	HALKA	FLUTE	
2						
3			LUFFY	SANJI		
4		SANJI				
5						
6		LUFFY		SANJI		
7						

3.2 データの抽出

前節で述べた SID 経路上のウェイポイント BRAID と FLUTE を通る経路のうち、図 1 に示した 7 通りの参照経路の詳細を表 2 に示す。

この 7 通りの経路のうちいずれかを通り、かつ上昇後 FLUTE まで巡航高度一定で飛行しているものを抽出した。なお、BRAID-FLUTE 間以外は迂回していることが多いため、評価の対象外とする。表 3 は解析対象の便数を日および機種ごとにまとめたものである。解析対象とする便数の合計は 199 便である。また、1 月と 7 月の合計がそれぞれ 121 便、78 便である。

Table 3 Number of flights to be analyzed

Objective data	B772	B773	B763	B768	B789	B738	A320
Jan. 1 st	15	2	6	1	0	10	7
Jan. 15 th	12	3	5	2	1	11	6
Jan. 31 th	17	0	5	2	0	10	6
Jan. total	44	5	16	5	1	31	19
Jul. 1 st	12	0	3	1	0	6	4
Jul. 15 th	12	1	5	0	0	7	5
Jul. 31 th	9	2	3	0	0	4	4
Jul. total	33	3	11	1	0	17	13
total	77	8	27	6	1	48	32

4. 現状分析

4.1. 定点通過までの飛行時間の分析

特定のウェイポイントを通過するまでの飛行時間を算出する。表 2 に示した通り、7 通りの経路で通過するウェイポイントの数や場所が異なるため、東経 135 度線と交差する点を定点とした。図 2、図 3 は、1 月と 7 月のそれぞれの便について、BRAID (東経 131.1531 度) から定点までの飛行時間 t [s] をヒストグラムとしてプロットしたものである。また、表 4 に全 199 便の定点までの飛行時間の平均値と標準偏差を示した。定点通過までの飛行時間の計算は以下の式を使用した。

$$t = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}(x - x_1) + t_1 \quad (1)$$

$$x = 135^\circ\text{E}, \quad x_1 = 131.1531^\circ\text{E}$$

図 2、3 のように、1 月と 7 月で比較を行った結果、最頻値が 1 月は 1250~1300[s]、7 月は 1450~1500[s] となり、1 月の方が 7 月に比べ飛行時間が早い傾向に出た。冬季は、ジェット気流と呼ばれる中緯度 (30~50 度) の対流圏上部あるいは成層圏下部に環状に見られる、非常に強い西風の影響により、最も強く西風が吹く⁽⁶⁾。そのため 1 月は西からの追い風が強くなるので、飛行時間が早まったと考えられる。

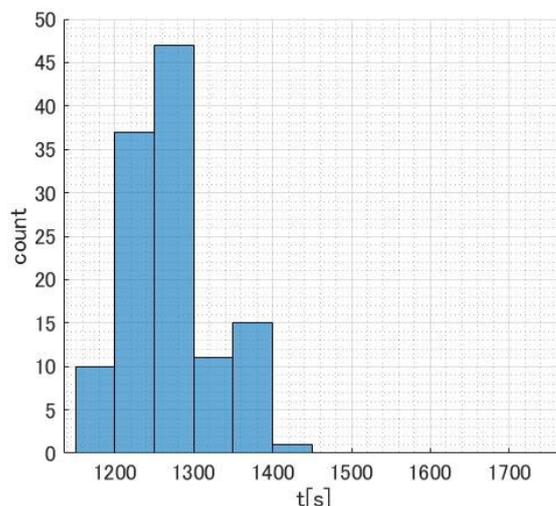


Fig. 2 Histogram of flight time from BRAID to 135°E in January

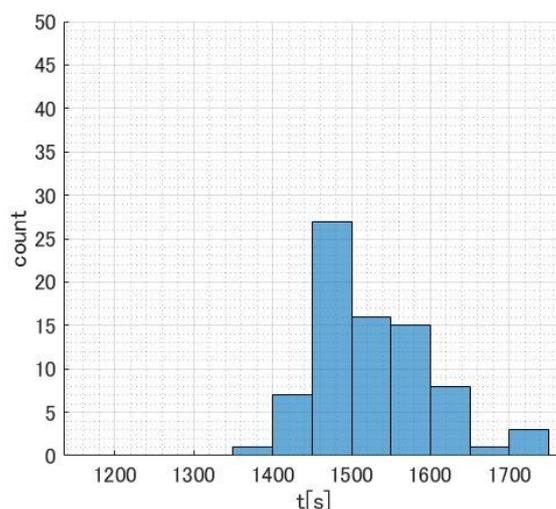


Fig. 3 Histogram of flight time from BRAID to 135°E in July

Table 4 Mean value and standard deviation of passing time [s]

	Mean value [s]	Standard deviation [s]
January	1.2713×10^3	54.8741
July	1.5263×10^3	72.2924

4.2. 巡航高度

図 4、図 5 は、前節と同様に巡航時の高度をヒストグラムとしてプロットしたものである。データの抽出時に条件として東経 137 度以降の巡航区間において高度一定であることとしたため、その高度を巡航高度とした。また、表 5 に巡航高度の平均値と標準偏差を示した。

1 月と 7 月を比較すると、1 月は 38000[ft]~39000[ft]、7 月

は 37000[ft]~38000[ft]が最頻値となり、季節による巡航高度の差はあまりないことが分かる。また、7月に比べ、1月が高高度での飛行が多かった理由として、ジェット気流が最大となる高度が 36000[ft]~42000[ft]の範囲内に存在していたことが考えられる。通常、飛行計画では燃料効率をよくするため、追い風を利用し、向かい風を避けるような高度が指定されるため、強い西風を利用できるこの範囲を巡航する便が多くなったと推察される。

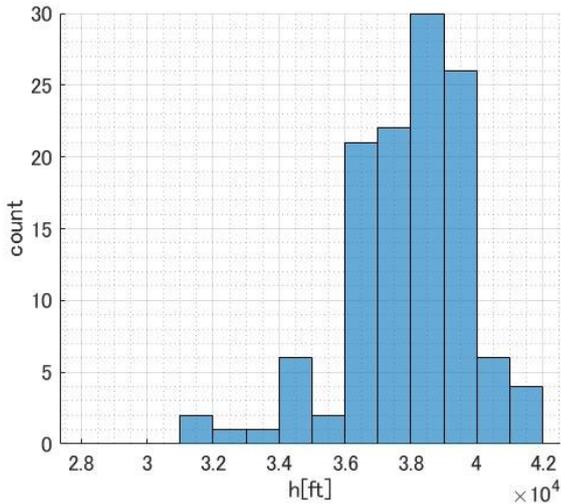


Fig. 4 Histogram of cruise altitude in January

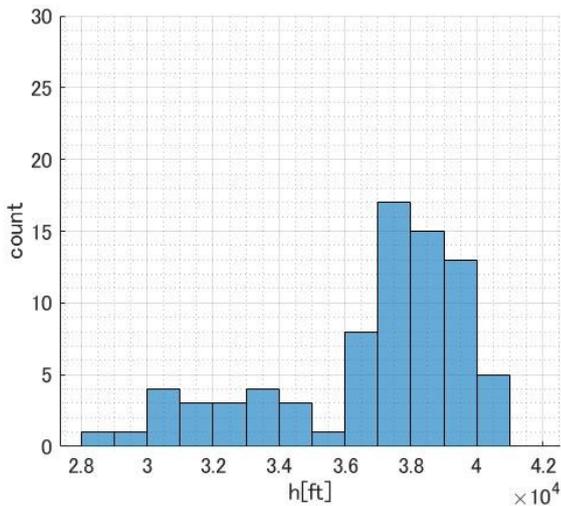


Fig. 5 Histogram of cruise altitude in July

Table 5 Mean value and standard deviation of cruise altitude[ft]

	Mean value [ft]	Standard deviation [ft]
January	3.7949×10^4	1.8428×10^3
July	3.6763×10^4	3.0034×10^3

4.3. 対地速度

図 6、図 7 に、巡航区間における対地速度 (ground speed) の平均値 V_{gs} [kt] のヒストグラムを、表 6 にその平均値と標準偏差を示す。1月 は 7月に比べ、速度が速い便が多いことが分かる。ここで、対地速度とは飛行中の地表面に対する相対的な水平速度のことで、真対気速度に風速成分を加味して求められる。4.1 節で述べたジェット気流の影響で 1月 は西風が強くなるため、同じマッハ数で飛行しても、対地速度は大きくなる。したがって 1月の方が、対地速度が大きくなる便が多くなったと考えられる。

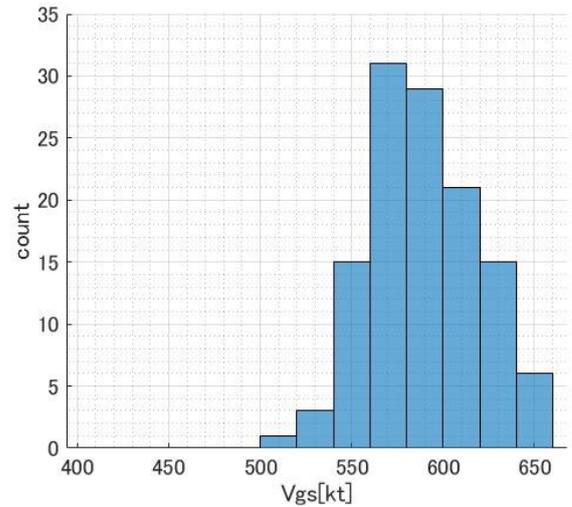


Fig. 6 Histogram of ground speed in January

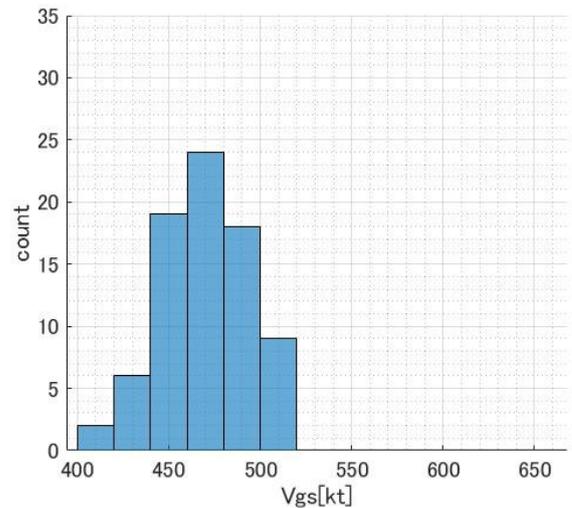


Fig. 7 Histogram of ground speed in July

Table 6 Mean value and standard deviation of V_{gs} [kt]

	Mean value [kt]	Standard deviation [kt]
January	588.7686	30.1261
July	468.8333	23.7478

5. まとめ

本研究では、飛行前に経路と巡航高度を与えると、正確な定点通過予測時刻を与える解析ツールを確立することを目的とし、FMS のコマンドに従って飛行していると判断される便を実運航データから抽出し、現状分析を行った。今回は Flightradar24.com のウェブサイトからデータをダウンロードし、解析対象とした全 199 便において、定点通過までの飛行時間や、巡航高度や対地速度について現状分析を行った。飛行時間については、1月と7月で差があり、偏西風の影響で冬季は西風が強くなるため 1月が短くなる傾向にあることが分かった。また、巡航高度については、1月 は高高度に集中する傾向が得られた。これはジェット気流が高高度に位置することが関係すると考えられる。対地速度についても、ジェット気流による追い風成分が大きくなったことにより、1月の方がより速い対地速度で飛行する便が多くなったと考えられる。

今後は軌道予測の新たな手法として FMS のコマンドを最適軌道により再現する方法を提案し、気象予報データ等を使用することで定点通過時刻の高精度な予測を目指す。

文献

- (1) 国土交通省航空局, 我が国における LCC の参入促進, 平成 31 年 1 月 19 日,
URL: <http://www.mlit.go.jp/common/001267338.pdf>
- (2) 将来の航空交通システムに関する推進協議会, CARATS 航空交通システムの長期ビジョン, 平成 31 年 1 月 19 日,
URL: <http://www.mlit.go.jp/common/001260394.pdf>
- (3) 原田明德, 武市昇, 岡宏一, 時間管理システムのための高精度軌道予測に関する一考察, 第 57 回土木計画学研
究発表会・春大会, (2018)
- (4) Flightradar24, How it works, 平成 31 年 1 月 20 日,
URL: <https://www.flightradar24.com/how-it-works>
- (5) 国土交通省航空局, 航空路と RNAV 経路の概要, 平成 31 年 1 月 20 日,
URL: http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000343.html
- (6) 日本航空広報部, 航空実用辞典, 平成 31 年 1 月 22 日,
URL: <http://www.jal.com/ja/jiten/index.html>