

## 理想的な航空交通システムの実現に向けて

## ～気象条件を考慮した最適経路設計～

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1180110 永栄 賢也

## 用語の説明

$c$	=	燃料流量係数
$C_{D0}$	=	有害抗力係数
$C_D$	=	抗力係数
$D$	=	抗力
$g$	=	重力加速度
$H$	=	高度
$J$	=	評価関数
$K$	=	誘導抗力係数
$L$	=	揚力, ラグレンジアン
$m$	=	機体質量
$R_0$	=	地球半径
$R_H$	=	地球中心から航空機までの距離 ( $R_0 + H$ )
$S$	=	翼面積
$t$	=	時間
$T$	=	推力
$u$	=	制御変数ベクトル
$V_{TAS}$	=	真対気速度
$V_{GS}$	=	対地速度
$W_x$	=	東西風
$W_y$	=	南北風
$x$	=	状態変数ベクトル
$X$	=	垂直面の飛行距離
$\gamma$	=	飛行経路上昇角
$\eta$	=	横のずれ角
$\theta$	=	経度
$\mu$	=	燃料流量
$\xi$	=	ダウンレンジ角
$\rho$	=	空気密度
$\phi$	=	緯度
$\varphi$	=	終端における評価関数値
$\psi_a$	=	機首方位角

## 1. 緒言

## 1.1 背景

世界の航空交通量は、人口増加や航空サービスの継続的な需要、低コストキャリア (LCC) の積極的な参加などにより増加を続けている。アジア地域は経済成長が著しいこともあり、今後 10 年間の航空交通量の増加が世界で最も高いと予測されている。ANSP (Air Navigations Service Provider)、航空会社、パイロット、乗客等の共通の問題として次のことが挙げられる。まず 1 つは、航空交通量の増加による燃料消費量と排出ガスの増加である。混雑空港や空域では迂回などによる無駄な燃料消費が発生する。燃油価格が高止まりしていることから運航効率の向上を図る必要があり、燃料消費量の削減が運航コストの低減につながる。また環境への配慮とし

て、CO<sub>2</sub>排出量は今後航空交通量の増加に伴うため、積極的に削減を考えなければならない。そしてもう 1 つは、航空交通量の増加による安全性の低下である。航空保安業務に係る衝突、ニアミス等の航空機事故および重大インシデントの発生件数をゼロに近づけなければならない。このような背景から、日本の航空交通システムには革新的な変化が強く求められている。

## 1.2 Dynamic Airborne Reroute Procedure (DARP) について

前節で述べた航空交通量の増加による燃料消費量と排出ガスの増加および安全性の低下という問題に対する解決方法の 1 つとして、気象を考慮した最適経路設計 (Dynamic Weather Routing, DWR) が挙げられる。DWR とは、悪天候において、時間と燃料を節約できる地上ベースの自動化システムである。航行中の航空機を継続的かつ自動的に解析し、気象回避経路を選択することができる。これはアメリカ航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) によって開発された。太平洋上では、DWR をベースにした太平洋編成経路システム (Pacific Organized Track System, PACOTS) や利用者設定経路 (User Preferred Route, UPR) が積極的に運用されている。PACOTS は日本-アメリカ間の北太平洋の空域において設定される洋上国際航空路であり、運航者の要望、天候、空域の運用状況等を勘定した上で 1 日単位に飛行経路が設定される。UPR では、さらなる運航効率改善のため運航者が飛行毎に最新の気象状況をもとに最適な経路を設計する<sup>(1)</sup>。近年では、新たに動的飛行経路変更方式 (DARP) の導入が考えられている。これは、運航者が最新の気象状況等に基づき燃料消費の少ない効率的な新ルートを計算し、飛行中の航空機の経路変更を行う方式である<sup>(2)</sup>。PACOTS および UPR は離陸前に経路設計を行っているが、DARP は離陸後に気象データを更新して経路設計を行うため正確性が見込まれる。しかしまだこの DARP は正式に導入されていない。

## 1.3 目的

本研究では、国際線に DARP を適用し、これにより得られる潜在的な便益を明らかにすることを目的とする。燃料消費量の計算を行うために必要なパラメータの推定には、リアルタイムの航跡データ、気象庁の客観解析数値予報気象データおよび欧州航空航法安全機構 (EUROCONTROL) の BADA (Base of Aircraft Data) 性能モデルを用いる。DARP の計算においては、高度および大圏コースからの横ずれ角 (経路) を変数とし、風の影響を考慮して飛行時間を最小にする最適化を行う。また、最適化された飛行時間と燃料消費量の値を実際の値と比較することで、DARP による便益を定量的に評価し有効性を明らかにする。本研究を段階的に進めるため本稿では、まず高度および速度を一定と仮定し、潜在的な便益

を評価することを目的とする。本研究の意義としては、我が国での DARP 導入の検討材料にするため、機体の性能を最大限に発揮できる運航の実現を目指すことである。

## 2. 航跡データによる軌道の導出

この章では実際の飛行の導出過程を示す。

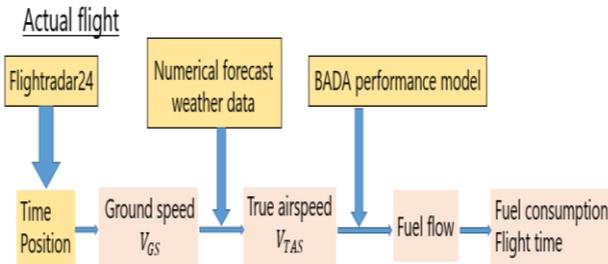


Figure 1 Derivation of actual flight

### 2.1 航空機の航跡データ

世界中の何千もの航空機に関するリアルタイムの情報を提供する Web サービスとして Flightradar24 が知られている<sup>(3)</sup>。データは現在の日付から 1 年分記録されており、この論文では 2017 年から 2018 年のものを使用する。概要を Table 1 に示す。Flightradar24 は、ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast), MLAT (Multilateration), レーダーデータを含むいくつかのソースからデータを統合している。Airbus, Boeing, Embraer を含む大手航空会社や航空業界の他の航空会社で使用されるほど信頼性の高いものである。

Table 1 Overview of Flightradar24<sup>(3)</sup>

Period	2017~2018
Object	Civilian plane, Military aircraft Government-specific machine Experimental machine Balloon, Airport vehicle
Record item	Flight number, Departure/Destination Aircraft, Registration, Mode S, Altitude Vertical Speed, Speed, Track Latitude/Longitude, Radar, Squawk, Wake
Recording cycle	Occasionally
Source	ADS-B, MLAT, Radar data

### 2.2 飛行パラメタの再計算

実際の燃料消費と飛行時間は、最適化された飛行によって得られる潜在的な便益を定量的に評価する上で不可欠である。対気速度データと大気データは飛行性能の解析において重要であり、対気データ等の飛行状態を推定するには、適切なモデルに基づいた計算が必要となる。燃料消費量を計算する一連の過程は、飛行状態推定と呼ばれ、九州大学の研究グループによって開発された<sup>(4)</sup>。文献<sup>(5)</sup>では、飛行中の航空機キャビン内で記録された航空機の位置と時間から飛行状態推定により燃料消費量を推定し、最適軌道の比較対象として用いている。

飛行状態推定の具体的な流れについて説明する。気象庁 (Japan Meteorological Agency, JMA) 発表の数値予報気象データ (Grid Point Value, GPV)<sup>(6)</sup>を用いて、較正対気速度 (Calibrated airspeed, CAS) と真対気速度 (True airspeed, TAS), マッハ数などの対気速度と、気温および風速を推定する。次に、EUROCONTROL によって開発・維持されている BADA 性能モデル<sup>(7)</sup>より、抗力、推力、揚抗比、燃料流量などの機体性能を表すパラメタを計算することができる。これらのパ

ラメタの推定精度は、気象の GPV データおよび BADA 性能モデルの精度に直接影響を受ける。これらの精度に関して行われた 3 つの研究<sup>(8)-(10)</sup>では、航空会社から提供を受けた機上で記録された飛行データとの比較により、BADA 性能モデルと気象データは航空交通に関する飛行解析を行う上で良好な精度を有することが示されている。

飛行軌道とは対気速度や燃料流量等の各パラメタの時間履歴を意味するが、これらは対象とする便の位置データに飛行状態推定を適用することによって計算できる。気象データと性能モデルに起因する誤差は燃料消費量の推定精度に影響を与えるが、便益の評価結果の妥当性を欠くほどではない。

## 3. 飛行軌道最適化

この章では最適な飛行の導出過程を示す。

### Optimum flight

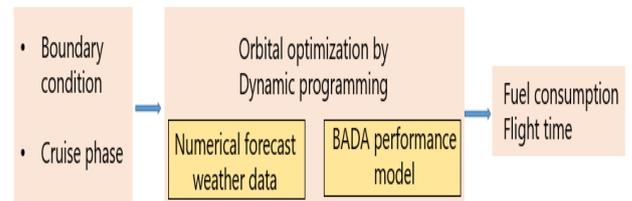


Figure 2 Derivation of optimal flight

本研究では、Dynamic Airborne Reroute Procedure を風の影響を考慮した経路設計と定義し、そのために飛行軌道最適化問題を解く。最適化手法は種々存在するが、直接法に分類される動的計画法 (Dynamic Programming, DP) を用いる。本手法は格子点データの適用が容易であり、収束のための繰り返し計算が不要で大域的最適解が得られるという特長を持つ。

### 3.1 性能指標

最適化計算では、まず最小あるいは最大とすべき指標を定義する必要がある。最適化の対象とするのは、巡航フェーズのみとする。運航効率において、評価の良し悪しを決めるのは燃料消費量および飛行時間である。そこで本稿では、評価関数  $J$  を以下のように定義する。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} dt = t_f - t_0 \quad (1)$$

### 3.2 支配方程式

航空機の運動は、一般に 6 自由度 (6 Degree of Freedom, 6DOF) の運動方程式によって記述されるが、軌道最適化問題ではしばしば航空機は質点として近似される。3DOF の質点近似方程式を式 (2) から式 (7) に示す。

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{(R_0 + H) \cos \phi} [V_{TAS} \sin \psi_a(t) + W_x(\phi, \theta)] \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{R_0 + H} [V_{TAS} \cos \psi_a(t) + W_y(\phi, \theta)] \quad (3)$$

$$m \frac{dV_{TAS}}{dt} = T - D - mg \sin \gamma \quad (4)$$

$$m V_{TAS} \frac{d\gamma}{dt} = L - mg \cos \gamma = 0 \quad (5)$$

$$-\frac{dm}{dt} = \mu = cT \quad (6)$$

$$\frac{dH}{dt} = V_{TAS} \sin \gamma \quad (7)$$

一般的な空力モデルとして以下の 2 次式で表される抗力係数を使用する。

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{TAS}^2 S C_L \quad (8)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{TAS}^2 S C_D \quad (9)$$

$$C_D = C_{D0} + K C_L^2 \quad (10)$$

空気密度、気温、風速などのデータは気象庁の数値予報気象データより得ることができる。

### 3.3 動的計画法による軌道最適化

Richard Ernest Bellman によって提案された動的計画法は、式 (11) に示される Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) の 1 次の非線形偏微分方程式にもとづく最適化理論である。

$$-\frac{\partial J_{opt}}{\partial t} = \min_u H \left( x, \frac{\partial J_{opt}}{\partial x}, u, t \right) \quad (11)$$

動的計画法は、状態空間に量子化された格子点の中から HJB の最適性の原理に基づいて最適解を探索する方法である。動的計画法の解は大域的最適性を満たし、かつ最適なフィードバック制御則を構成する。

最適制御問題を動的計画法で解く場合、状態変数の数と制御変数の数は同じであることが望ましい。本問題では、Figure 3 に示すように極座標系  $(\phi, \theta)$  をダウンレンジ角、横ずれ角  $(\xi, \eta)$  に座標変換することで最適化変数の数を減らすことができる。

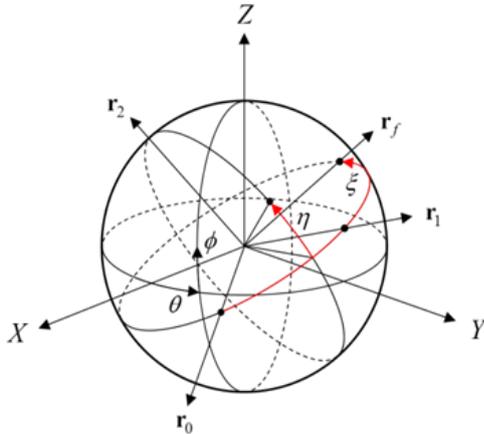


Figure 3 Relationship between  $(\phi, \theta)$  and  $(\xi, \eta)$

この座標変換により、式 (2) および式 (3) を以下のように書き換えることができる。

$$R_H \frac{d\xi}{dt} = \frac{dX}{dt} = V_{GS} \quad (12)$$

ダウンレンジの格子点は、初期位置  $r_0$  および終端位置  $r_f$  を結ぶ  $\xi$  軸すなわち大圏コース上に与えられる。この  $\xi$  軸上のそれぞれの格子点において大圏コースに直交するように横ずれ角  $\eta$  を設定する。今回は高度  $H$  を変数に加えているので、2 地点  $(\phi_k, \theta_k, H_k)$  と  $(\phi_{k-1}, \theta_{k-1}, H_{k-1})$  の間の飛行時間  $\Delta t$  は、式 (2) と (3) の有限差分近似によって得られる式 (13) から計算される。

$$\begin{cases} c_0 x^2 + c_1 x + c_2 = 0 \\ c_0 = (\Delta\phi^2 + \cos^2 \phi \Delta\theta^2) V_{TAS}^2(H) \\ c_1 = -2(\cos \phi \Delta\theta W_x(\phi, \theta, H) + \Delta\phi W_y(\phi, \theta, H)) V_{TAS}(H) \\ c_2 = W_x^2(\phi, \theta, H) + W_y^2(\phi, \theta, H) - V_{TAS}^2(H) \end{cases} \quad (13)$$

ただし、 $x = \frac{R_H}{V_{TAS} \Delta t} > 0$

ただし、 $\Delta\phi = \phi_k - \phi_{k-1}$ ,  $\Delta\theta = \theta_k - \theta_{k-1}$ ,  $\Delta H = H_k - H_{k-1}$ ,  $\phi = \frac{\phi_k + \phi_{k-1}}{2}$ ,  $\theta = \frac{\theta_k + \theta_{k-1}}{2}$ ,  $H = \frac{H_k + H_{k-1}}{2}$  である。最適経路の探索方法は以下の最適性の原理に従う。

$$J_{opt}(\eta(i_k), H(j_k), \xi(k)) = \min_{i_k} [\Delta t(i_k, i_{k-1}) + J_{opt}(\eta(i_{k-1}), H(j_k - 1), \xi(k - 1))] \quad (14)$$

$\xi$  の  $k$  番目の点における最適値は、 $(\phi_k, \theta_k, H_k)$  から  $(\phi_{k-1}, \theta_{k-1}, H_{k-1})$  までの飛行にかかる時間と、 $\xi$  の  $(k-1)$  番目の点から始点までの最適な飛行時間を足し合わせた値が最小となる経路を選択することで得られる。本研究では機体質量も考慮して最適化するため、最適性の原理にもとづいて始点から終点に向かって計算を進めることとする。よって、最適化問題は、始点固定・始点状態量固定の条件に対する 2 変数最適化問題と定義される。

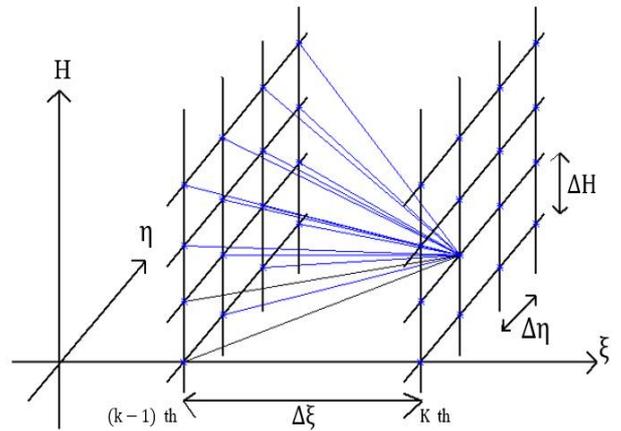


Figure 4 Dynamic programming

### 3.4 潜在的な便益の評価方法

実際の飛行では、まず Flightradar24 より時間と位置を抜き出して対地速度  $V_{GS}$  を求める。数値予報気象データより風を考慮して真対気速度  $V_{TAS}$  を求める。そして BADA 性能モデルを用いて燃料流量を算出し、燃料消費量を求める。最適な飛行では、境界条件として始点と終点を定め、最適化する区間は巡航フェーズのみとする。数値予報気象データおよび BADA 性能モデルを用いて動的計画法による軌道最適化を行い、燃料消費量および飛行時間を求める。そして実際の飛行と最適な飛行を比較することによって潜在便益を評価するという流れである。

### 4. 最短時間飛行による便益

#### 4.1 国内長距離線に DWR を適用した場合の便益

まず国内の長距離路線において風の影響を考慮した場合の便益を評価する。今回は新千歳空港 (CTS) - 福岡空港 (FUK) 間に着目し、巡航マッハ数および高度を一定として解析を行った。その結果を以下に示す。

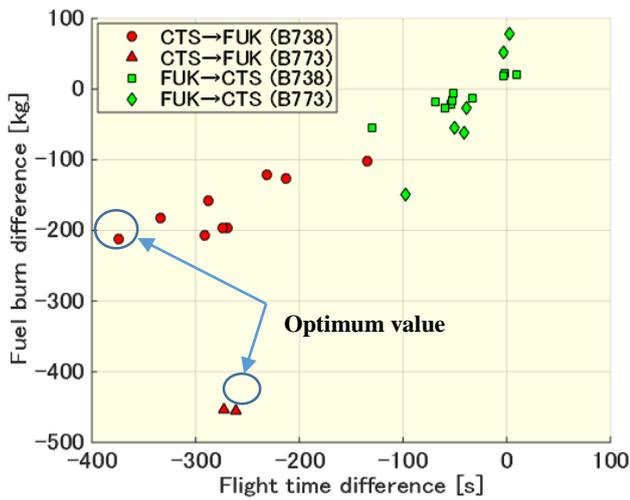


Figure 5 Difference in fuel consumption and flight time

Figure 5 は縦軸を燃料消費量の差，横軸を飛行時間の差として 27 ケースプロットしたものである。赤色のプロットは向かい風を受けている飛行，緑色のプロットは追い風を受けている飛行を表している。飛行時間と燃料消費量の差は，最適な飛行の値から実際の飛行の値を差し引いたもので定義している。燃料消費量の差と飛行時間の差の値が負の方向に大きくなるほど DWR により削減できる時間および燃料が増えるため，得られる便益が大きいと言える。本解析において最も燃料消費量を削減できたケースは 454[kg]，最も飛行時間を短縮できたケースは 374[s]であった。最適な経路は実際の経路よりも向かい風成分を抑えるように飛行していた。よって，日本国内の長距離路線に対しても，風の影響を考慮した経路の最適化による便益が示された。

#### 4.2 国際線に DARP を適用した場合の便益

次は国際線に DARP を適用することで風の影響を考慮した最短時間飛行により得られる便益を評価する。解析対象とする飛行の概要を Table 2 と Figure 6 に示す。今回は国際線としてロサンゼルス国際空港 (LAX) - 成田国際空港 (NRT) 間に着目した。

Table 2 Flight using DARP

Source	Flightradar24
Date, Time	2017~2018 UTC 17h - 05h
Airport section	LAX - NRT
The number of data	5 cases



Figure 6 Route between LAX and NRT

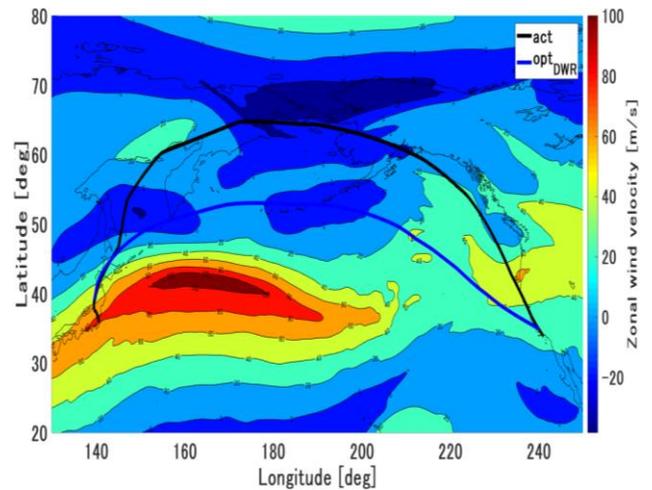


Figure 7 Flight path

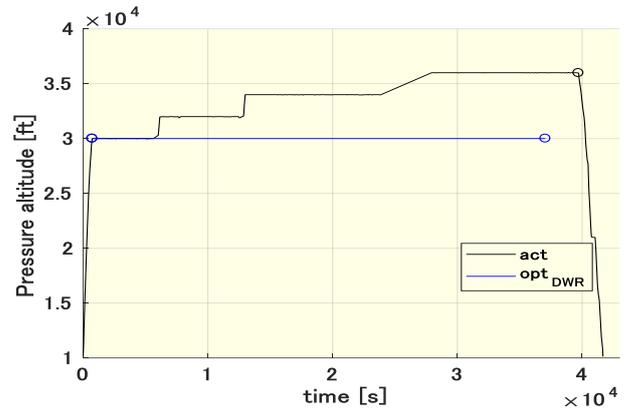


Figure 8 History of pressure altitude

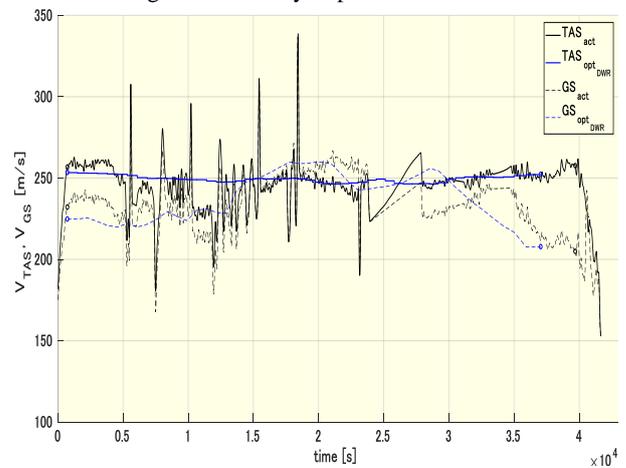


Figure 9 History of speed

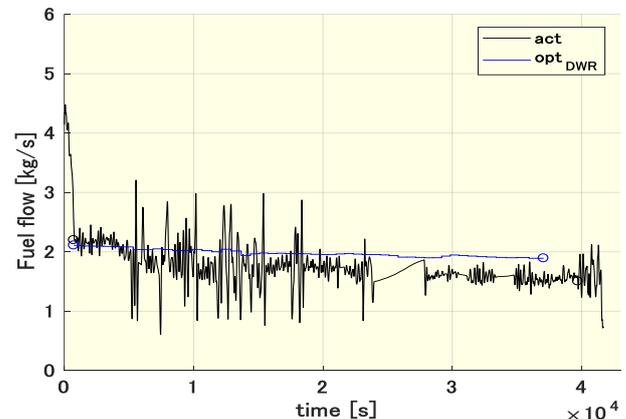


Figure 10 History of fuel flow

Figure 7~10 は、飛行経路、気圧高度の履歴、速度の履歴、燃料流量の履歴を示している。グラフの黒線が実際の飛行で、青線が最適な飛行を示している。この最適な飛行では、飛行時間が約 2528[s]短縮させることができ、これは 5 ケースのうち最も飛行時間が短縮できたケースである。しかし今回は燃料消費量が約 4051[kg]と大きくなった。飛行経路については、どちらも西風の弱い領域を飛行していることが分かる。最適な飛行の方が飛行時間を短くするため最短距離の大圏コースに近い軌道を飛行している。気圧高度の履歴では、実際の飛行は機体重量の減少に伴ってステップアップ巡航をしている。これによって比距離を伸ばし燃料消費量を少なくしているため、今回高度を一定とする最適な飛行と大きな差があらわれた。

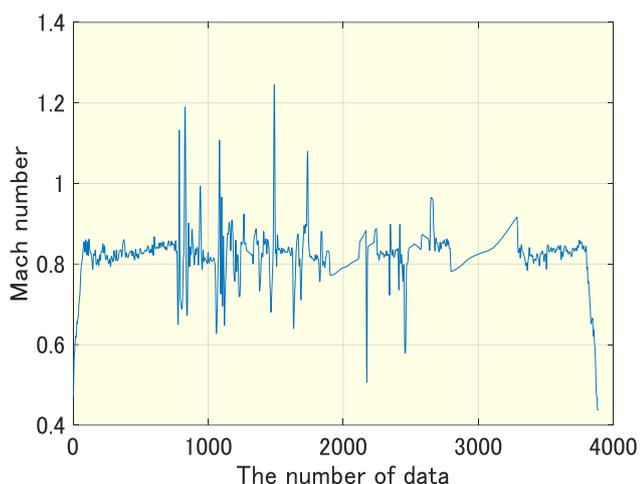


Figure 11 History of Mach number

Figure 11 は実際の飛行のマッハ数が示されている。今回最適な飛行を求める上で、マッハ数  $M$  は実際の飛行を参考にして一定とした（対象区間で平均した値）。そのため最適な飛行の真対気速度  $V_{TAS}$  が大きくなり、燃料流量の値が全体的に大きく出てしまった。しかし結果としては燃料を多く使ったものの最短時間飛行を行ったと言える。

## 5. 結言

### 5.1 まとめ

本研究では、国際線における DARP 経路生成ツールの開発のため、国際線に DARP を適用し得られる潜在的な便益を評価した。その評価方法としては、風の影響を考慮した飛行経路の最適化を行い、実際の軌道と比較することで便益を評価した。今回はロサンゼルス国際空港-成田国際空港間を飛行する便を解析対象とし、5 ケースに対する評価の結果、最も飛行時間を短縮できたケースで約 2528[s]となった。実際の飛行と最適な飛行の経路を比較すると、どちらも西風の弱い領域を飛行しているが、最適な飛行の方が最短距離の大圏コースに沿って飛行していることが分かった。しかし解析条件として、最適軌道は高度およびマッハ数を一定とし巡航することを仮定している。そのためステップアップ巡航している実際の飛行の方が燃料消費量は少なくなった。やはり国際線のような長距離路線に対しては、高度および速度を変数に加え最適化を行う必要があると言える。

### 5.2 今後の課題

DARP 経路生成ツールは、航行中に最新の気象情報を更新し最適経路を設計するものである。しかし今回は現況の気象データを使用して DARP による潜在的な便益の評価を行っ

たため、本来のものとは少し異なる。今後の課題の 1 つは、気象予報データを使用し常に最新の気象状況を考慮した最適経路設計を行うプログラムの作成である。飛行軌道最適化の変数に、高度および速度を加えることも課題である。また、本研究では評価関数  $J$  を飛行時間として解析したが、次は燃料消費量を評価関数として解析することで今回の結果とどのような違いがあらわれるかを調べる。

## 謝辞

この研究では、気象庁発表の数値予報気象データ GPV と EUROCONTROL が維持・管理する BADA 性能モデルを使用した。Flightradar24 は、リアルタイムの航跡データとして使用した。これらの機関が提供する便宜に対し感謝の意を表す。

## 参考文献

- (1) 国土交通省 用語解説ページ,  
URL : <http://www.mlit.go.jp/yougo/e-p.html>, 2017/9/12
- (2) 日本航空インターナショナル 運航部 調査役  
吉田謙一: Tailored Arrival Dynamic Airborne Reroute Procedure, 2010 年 3 月  
URL : [https://www.enri.go.jp/news/osirase/pdf/H21\\_4DATALINK.pdf](https://www.enri.go.jp/news/osirase/pdf/H21_4DATALINK.pdf)
- (3) Flightradar24 AB : About-Flightradar24, 2018  
URL : <https://www.flightradar24.com/about>
- (4) 十時寛典, ピクラマシムハ・ナヴィンダ, 濱田達郎, 宮沢与和: 旅客機キャビン内で計測した GPS データからの飛行状態推定, 航空宇宙技術, **11** (2012) pp. 43-50.
- (5) Miyaza, Y., Wickramasinghe, N. K., Harada, A. and Miyamoto, Y.: Dynamic Programming Application to Airliner Four Dimensional Optimal Flight Trajectory, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, paper No. AIAA 2013-4969, Boston, August, 2013.
- (6) 京大大学生存圏研究所: 気象庁データ,  
URL:<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-original.html>
- (7) EUROCONTROL Experimental Center: User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.11, EEC Technical/Scientific Report, No.13/04/16-01, 2013.
- (8) 十時寛典, 小塚智之, 宮沢与和, 船曳孝三: 定期便フライトデータと気象庁数値予報 GPV データとの比較評価, 航空宇宙技術, **12** (2013), pp. 57-63.
- (9) Harada, A., Miyamoto, Y., Miyazawa, Y. and Funabiki, K.: Accuracy Evaluation of an Aircraft Performance Model with Airliner Flight Data, Trans. JSASS Aerospace Technology Japan, **11** (2013), pp. 79-85.
- (10) 田村恵一, 原田明徳, 樋口雄紀, 松田治樹, 宮沢与和: 貨物便の飛行データを用いた航空機の性能モデルに関する研究, 航空宇宙技術, **16** (2017) pp. 27-36.