

国内長距離路線における風最適経路の成立性に関する一検討

A feasible study on Dynamic Weather Routing for Japanese long-distance flight

知能機械システム工学コース

機械・航空システム制御研究室 1205034 江崎 亨

1. はじめに

世界の中間所得層の割合は、特にアジアや新興国を中心に、世界的な経済成長を背景により増加している。また、中間所得者の増加による旅行回数と航空需要が増加している。また、格安航空会社（Low Cost Carrier : LCC）も増えてきており、日本においても将来の航空交通量は増加すると予想されている。¹⁾

この航空交通量の増加に対応するため国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization : ICAO）により 2025 年及びそれ以降を見据えた航空交通管理に関する概念が取りまとめられた。これに基づいて、米国では NextGen（Next Generation air transportation）²⁾、欧州では SESAR（Single European Sky ATM Research）³⁾といった長期ビジョンが策定され、日本においても 2010 年に将来の航空交通システムに関する CARATS（Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems）⁴⁾と呼ばれる長期ビジョンが策定され国内外で盛んに研究が行われている。

現在、日本上空を複数の空域に分割した空域ベース運用が行われているが、運航の全体を通した軌道の最適化が困難であるという課題がある。

CARATS では日本上空を一つの空域とし、航空機の出発から到着までを一体的に捉えたとともに時間管理も行う軌道ベース運用（Trajectory Based Operation : TBO）が提案されている。軌道ベース運用では、航空機はそれぞれの運航者（航空会社やパイロットなど）の方針により決められた理想の軌道を飛行することで運航効率が向上できるとともに、複数の航空機の飛行を空域全体で最適化することができる。TBO に関する研究では、最適軌道の設計に航空機の運航に大きな影響を与える風を考慮に入れた研究が多く行われている。また、すでに日本―米国間の国際線では風を考慮に入れた経路が実際に使用されている。

しかし、日本上空は自衛隊や米軍の訓練空域や飛行禁止空域が存在しおり効率的な運航が行われているとは言えず、また、過去の研究では制限空域を考慮に入れられていないものがほとんどである。

本研究では、国内の長距離路線において制限空域を考慮しつつ、風を考慮した風最適軌道と実際の運航について燃料消費量と飛行時間の比較を行い、風最適軌道（Dynamic Weather routing : DWR）より得られる便益を定量的に評価する。

2. 制限空域

日本上空における制限空域は、国土交通省が公表している航空路誌（Aeronautical Information Publication : AIP）⁵⁾を使用する。航空路誌には、航空路の詳細や空港の図面、計器飛行での使用に必要な情報や地上施設、業務に関わる航空情報を参照することができる。公表されている座標をもとに図 1 に日本上空の制限空域の現状を示す。

3. CARATS Open Data

CARATS Open Data は国土交通省航空局が公表する実際の飛行の航跡データであり、2012 年、2013 年、2014 年、2015

年度のデータが使用できる。今回は 2014 年度のデータを使用し解析を行う。以下の表 1 に CARATS Open Data 2014 の概要を示す。⁶⁾

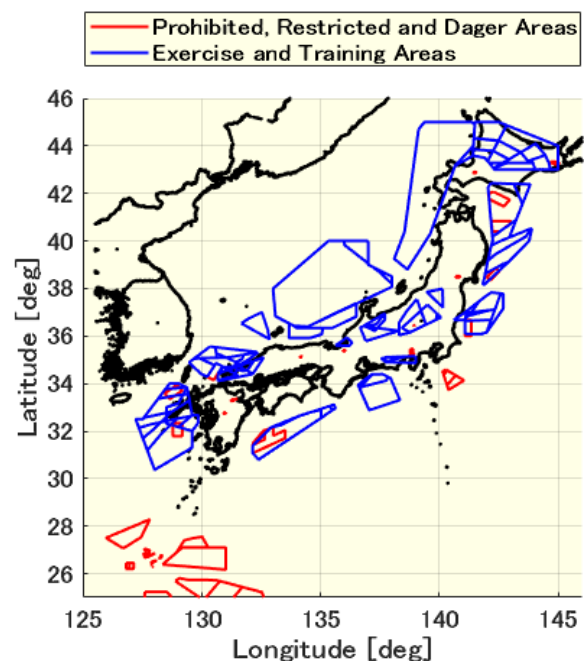


Fig. 1 Restricted airspace in Japan

Table 1 Overview of CARATS Open Data 2014

Record period	2014	May. 12 th (Mon)	to 18 th (Sun)
		Jul. 14 th (Mon)	to 20 th (Sun)
		Sep. 15 th (Mon)	to 21 th (Sun)
		Nov. 10 th (Mon)	to 16 th (Sun)
	2015	Jan. 12 th (Mon)	to 18 th (Sun)
		Mar. 9 th (Mon)	to 15 th (Sun)
Objective	Airliner flying in IFR		
Flight	Approx. 3600 per day		
Items	Time, Virtual flight number, Latitude, Longitude, Pressure altitude, Aircraft type		
Record cycle	Approx. 10 seconds		
Source	Radar Data Processing System data and Flight Data Processing Section data in 4 Area Control Centers (ACCs)		

4. 運航効率評価

運航効率の評価手順を図 2 に示す。本研究では、航空機が巡航している区間の運航効率の評価を行う。実際の飛行と最適軌道を飛行した場合の燃料消費量と飛行時間を比較する。

4.1. 評価関数

本研究で航空機は巡航区間を水平飛行しているとし、高度一定であるので経路角 γ は 0 である。また、マッハ数は実際の飛行の平均をとり一定とし、高度一定であり温度一定となるので真対気速度はほぼ一定となる。以下のように仮定する

ことで、最小燃料消費量問題が最短飛行時間問題と等しくなり評価関数 J は式(1)のように簡単にすることができる。

仮定(1) 最適化を行うのは、巡航区間
高度 $H = \text{Const.}$ 経路角 $\gamma_a = 0$

仮定(2) マッハ数は実際の運航の平均マッハ数とする
真対気速度 $V_{TAS} \approx \text{Const.}$ 温度 $\tau \approx \text{Const.}$

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

t_f は巡航終了時刻, t_0 は巡航開始時刻。

4.2. 運動モデル

航空機の運動は、一般的に 6 自由度の方程式で表現されるが、ここでは、質点近似の運動モデルとすることで以下のように 3 自由度の方程式で表すことができる。

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{(R_0 + H)\cos\phi} (V_{TAS}\sin\psi + W_x) \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{R_0 + H} (V_{TAS}\cos\psi + W_y) \quad (3)$$

$$m \frac{dV_{TAS}}{dt} = T - D - mg\sin\gamma_a = 0 \quad (4)$$

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

$$\frac{dm_{fuel}}{dt} = -\mu \quad (6)$$

各記号の定義は以下の通りである。

θ : 経度	ϕ : 緯度
t : 時間	L : 揚力
V_{TAS} : 真対気速度	D : 抗力
R_0 : 地球半径	γ_a : 経路角
H : 幾何高度	ψ : 方位角
T : 推力	g : 重力加速度
m : 機体質量	W_x : 東西風
W_y : 南北風	μ : 燃料流量

4.3. 飛行状態推定

飛行状態の推定では、まず航跡データから対地速度を求める。次に求めた対地速度と気象データで真対気速度を推定する。気象データは、気象庁が公表する全球予報モデル (Global Spectral Model : GSM) ⁷⁾ の格子点データ (Grid Point Value : GPV) を使用し、航空機の位置に対して内挿を行うことで風を求め真対気速度を推定する。燃料流量は推定した真対気速度と機体性能モデルである BADA モデル ⁸⁾ (Base of Aircraft Data) を用いることで求めることができる。燃料流量を実際の飛行時間で積分することで、実際の飛行の燃料流量を求める。

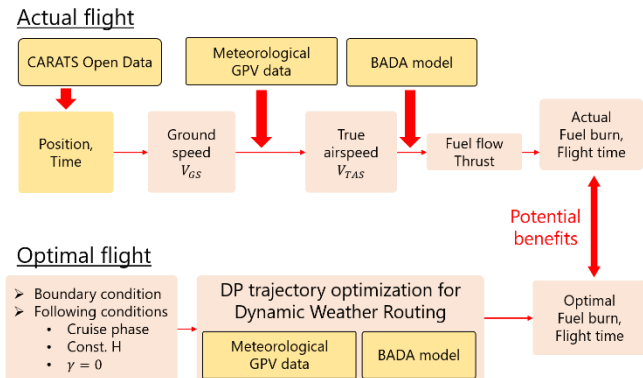


Fig. 2 Potential benefits evaluation method

4.4. 最適化手法

本研究では最適化手法の 1 つであり文献 ⁹⁾¹⁰⁾ で用いられている動的計画法 (Dynamic Programming : DP) ¹¹⁾ を用いる。動的計画法では与えられた状態変数を量子化し、状態空間において格子点の組み合わせに対して計算量を少なくし解を探索する最適化手法である。本論文では、図 3 に示すように (ϕ, θ) から (ξ, η) に変換し、大圏コースに対して横のずれを定義する。 ξ は、開始点 r_0 から最終点 r_f により定義される。

(ϕ_k, θ_k) と $(\phi_{k+1}, \theta_{k+1})$ の間の飛行時間は有限差分近似によって得られる式(7)から計算する。

$$\begin{aligned} a_2 x^2 + a_1 x + a_0 &= 0 \\ x &= R_H / V \Delta t, \text{ ただし, } x > 0 \\ \left[\begin{aligned} a_2 &= (\phi_{k+1} - \phi_k)^2 + \cos^2 \phi \cdot (\theta_{k+1} - \theta_k)^2 \\ a_1 &= (-2(\phi_{k+1} - \phi_k)W_y(\phi, \theta) \\ &\quad - 2\cos\phi(\theta_{k+1} - \theta_k)W_x(\phi, \theta)) / V_{TAS} \\ a_0 &= (W_x^2(\phi, \theta) + W_y^2(\phi, \theta)) / V_{TAS}^2 - 1 \end{aligned} \right. \quad (7) \\ \text{ただし, } \phi &= (\phi_{k+1} + \phi_k) / 2, \\ \theta &= (\theta_{k+1} + \theta_k) / 2 \end{aligned}$$

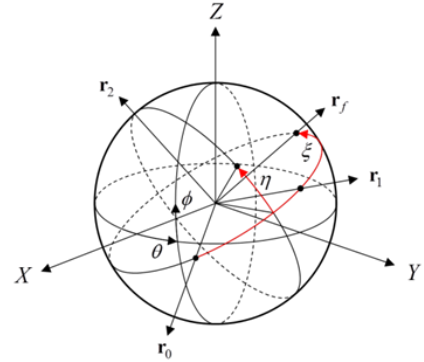


Fig. 3 Definition of (ϕ, θ) and (ξ, η)

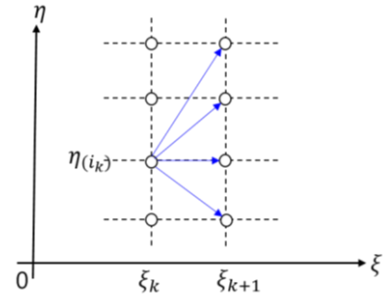


Fig. 4 search algorithm

$$J_{opt}(\xi(k), \eta(k)) = \min_{\psi} \left[\Delta t_{i_k}^{i_{k+1}} + J_{opt}(\xi(k+1), \eta(i_{k+1})) \right] \quad (8)$$

最適解のアルゴリズムは式(8)で与えられる。図 4 のように $(\xi_k, \eta(i_k))$ から ξ_{k+1} 番目の点までの飛行時間と ξ_{k+1} から終点までの最適飛行時間を足し合わせこれらの中から最小となる飛行時間と方向を $(\xi_k, \eta(i_k))$ に保存する。この計算を終点から始点まで行う。

4.5. 軌道最適化

DWR を行うために境界条件が必要である。境界条件は巡航区間の巡航開始点と終了点を CARATS Open Data より決める。軌道の最適化は、気象データと BADA モデルを使用し動的計画法によって行う。また、制限空域を考慮する場合は、制限空域の座標を計算格子に設定する。設計された最適軌道

から最適な燃料消費量と飛行時間を得る。

5. 制限空域を考慮した DWR による便益

ここでは、国内の長距離路線である新千歳空港（CTS）—那覇空港（OKA）間の路線で制限空域を考慮した場合としない場合の燃料消費量と飛行時間を比較した結果を示す。以下に新千歳空港—那覇空港間の概要を示す。

Table 2 Overview of CTS - OKA

Airports		CTS - OKA		
Analysis period	2015	Jan. 12 th (Mon)	to 18 th (Sun)	
Aircraft type	Boeing 737-800 (738)			
Number of flights	CTS	→	OKA	: 6
	OKA	→	CTS	: 7

図 5, 図 6 は、新千歳空港—那覇空港間の 13 ケースを、縦軸に燃料消費量の差、横軸に飛行時間の差をとりプロットしたものである。差は最適軌道から実際の飛行を引いたものである。そのため、図の左下に向かうほど得られる便益が大きくなることを示している。また、結果には高度変化する飛行も含むが、本論文では風と制限空域による影響を評価したので、高度一定であるプロット（4 ケース）を丸で示した。表 3 に、高度一定の各飛行ケースにおける制限空域を考慮した場合としない場合の飛行時間と燃料消費量の差を示す。

これらの結果より、制限空域を考慮することにより最適軌道での燃料消費量と飛行時間が増加し得られる便益が小さくなっていることが分かる。また、那覇空港から新千歳空港に向かう飛行ケースのうち 2 ケースが、制限空域の有無に関わらず燃料消費量の差と飛行時間の差が変わらない飛行であり飛行経路も同じであった。しかし、新千歳空港から那覇空港に向かう飛行ケースでは、燃料消費量の差と飛行時間の差が制限空域を考慮することで小さくなっており得られる便益が減少したことが分かる。

図 7 から図 10 は新千歳空港から那覇空港に向かって飛行するケースの制限空域を考慮しなかった場合と考慮した場合の飛行経路と東西風の強さと、真対気速度 V_{TAS} と対地速度 V_{GS} を表している。制限空域を考慮しない DWR では、東西風の強い区間で実際の経路より機首を南に向けることで対地速度の低下を抑えているが、制限空域を考慮した DWR では東西風が強い区間を実際の経路と同じ機首方向で飛行するので対地速度が実際の対地速度と近い値をとっている。また、制限空域を考慮しない飛行経路は大圏コースからの横のずれが小さく飛行距離が短くなり飛行時間が短くなったと考えられる。

Table 3.

Fuel and flight time difference of without/with restricted areas

Flight case	Without restricted areas		With restricted areas	
	Δt [s]	$\Delta fuel$ [kg]	Δt [s]	$\Delta fuel$ [kg]
(1) CTS to OKA	-277.5703	-97.3887	-181.5266	-36.8873
(2) OKA to CTS	-92.7205	-62.436	-92.7205	-62.4360
(3) OKA to CTS	-96.1281	-68.9991	-93.5914	-71.2121
(4) OKA to CTS	-205.0242	-107.1163	-205.0242	-107.1163

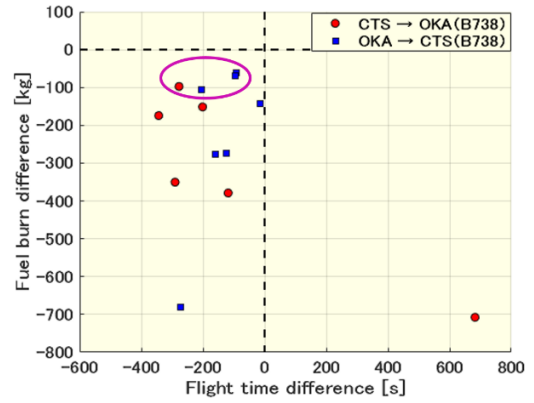


Fig. 5 Fuel and flight time difference of the optimal trajectories relative to actual flights without restricted areas

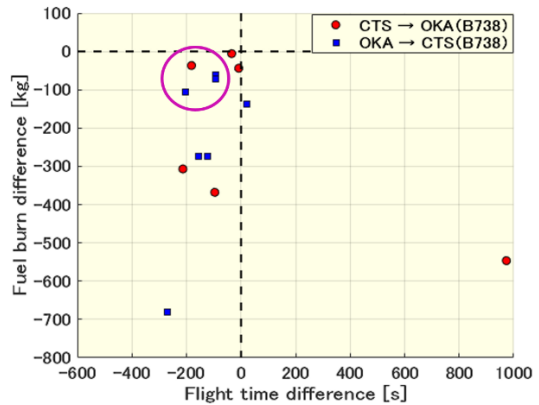


Fig. 6 Fuel and flight time difference of the optimal trajectories relative to actual flights with restricted areas

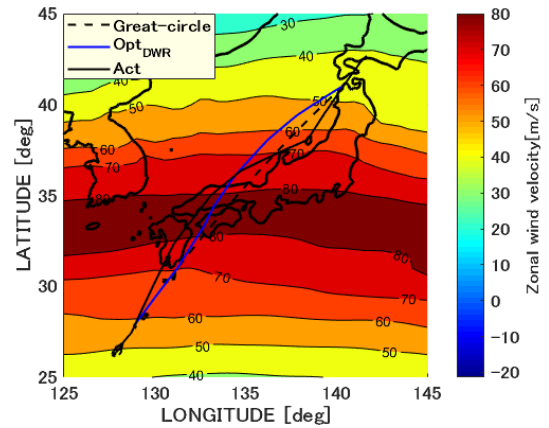


Fig. 7 Route of DWR without restricted areas

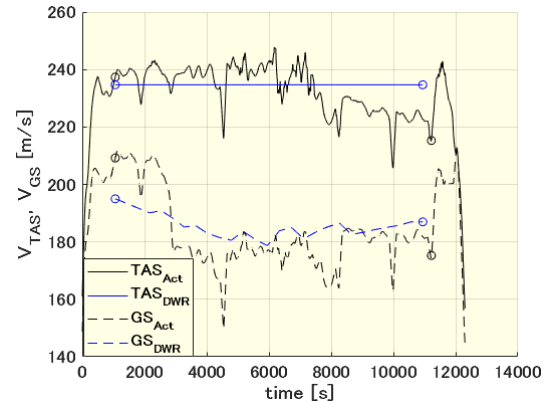


Fig. 8 V_{TAS} , V_{GS} of DWR without restricted areas

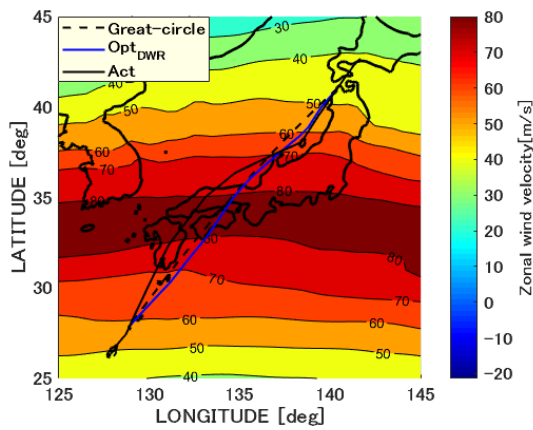


Fig. 9 Route of DWR with restricted areas

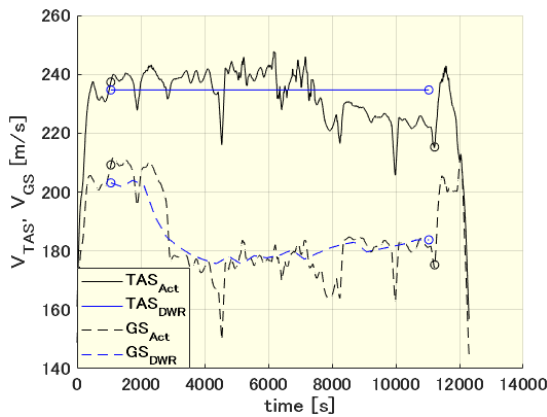


Fig. 10 V_{TAS} , V_{GS} of DWR with restricted areas

6. まとめ

本研究では、国内長距離路線における Dynamic Weather Routing の成立性を検討するために、2015 年 1 月の風の強い 7 日間において、新千歳空港－那覇空港間を飛行する便を対象に風の影響と制限空域を考慮した飛行経路の最適化を行い、実際の飛行と比較することで得られる便益の評価を行った。新千歳空港－那覇空港間の飛行ケースは 13 ケースであったが、高度一定である飛行ケースの 4 ケースに対する評価の結果、東西風が追い風となる飛行では制限空域を考慮した DWR は成立する。また、向かい風となる飛行では制限空域

を考慮することにより得られる便益は減るものの実際の飛行よりは便益が得られることから、制限空域を考慮しても成立すると考えられる。さらに解析数を増やし、妥当な結果を得ることができれば、空域の再構成や TBO の実現に向けて役に立つ知見がさらに得られると考えられる。

7. 参考文献

- (1) 一般財団法人 日本航空機開発協会, “民間航空機に関する市場予測 2017-2036”, 2017 年 3 月.
- (2) Federal Aviation Administration, “NextGen”, 2014.
- (3) SESAR Group for the Future Air Traffic System, “European Air Traffic Management Master Plan”, 2009.
- (4) 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 CARATS, Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic System”, 国土交通省, 2010.
- (5) 国土交通省航空局管制保安部運用課航空情報センター, “AIS JAPAN”, 国土交通省, URL : <https://aisjapan.mlit.go.jp/>, アクセス 1.29.2018
- (6) 国土交通省航空局管制部交通管制企画課 将来の航空システムに関する推進協議会事務局, “「CARATS Open Data」の利用について”, 7.7.2014
- (7) 一般財団法人 気象業務支援センター, “全球数値モデル GPV (GSM 全球・日本域)”, URL : <http://www.jmbasc.or.jp/jp/online/file/f-online10100.html>, アクセス 1.29.2018
- (8) EUROCONTROL, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.11”, ECC Technical/Scientific Report, No.13/04/16-01.
- (9) 宮本侑斗, 原田明徳, ナヴィンダ・キトマル・ピクラマシンハ, 宮沢与和, 船曳孝三, “BADA モデルを用いた旅客機の軌道最適化による運航効率の評価”, 航空宇宙技術, Vol.13, pp.1-10, 2014.
- (10) 原田明徳, 小塚智之, 宮沢与和, ピクラマシンハ・ナヴィンダ・キトマル, ブラウン・マーク, 福田豊, “国内定期旅客便の運航効率の客観分析”, 航空宇宙技術, Vol.14, pp.171-178, 2015.
- (11) Richard E. Bellman, “Dynamic Programing”, Princeton University Press, 1957