

2017（平成 29）年度 修士学位論文

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

2018 年 3 月 9 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻  
知能機械システム工学コース

1205034 江崎 亨

指導教員 原田 明德 講師  
岡 宏一 教授

# 目次

1章 序論 .....	6
1.1. 研究背景.....	6
1.2. 研究目的.....	10
1.3. 論文構成.....	10
2章 制限空域 .....	11
2.1. 日本における制限空域.....	11
2.2. 実際の運航経路と制限空域.....	12
3章 運航効率の評価 .....	14
3.1. 評価関数.....	14
3.2. 運動モデル.....	15
3.3. 空力モデル.....	16
3.4. 大気モデル.....	17
3.5. 航空機性能モデル.....	18
3.5.1 飛行可能領域.....	18
3.5.2 燃料消費モデル.....	19
3.5.3 比距離.....	20
3.6. 飛行状態推定.....	20
3.7. 軌道最適化.....	21
3.7.1 動的計画法による最適化.....	22
3.7.2 最適軌道における速度.....	24
4章 国内長距離路線への応用 .....	25
4.1. 航跡データ.....	25
4.1.1 データ形式.....	25
4.1.2 データ期間.....	25
4.1.3 データ特性.....	26
4.2. 気象データ.....	26
4.3. 日本国内における長距離路線.....	27
4.4. DWRによる便益.....	28

4.4.1	新千歳空港（CTS/RJCC）－那覇空港（OKA/RJOH） .....	28
4.4.2	新千歳空港（CTS/RJCC）－福岡空港（FUK/RJFF） .....	33
4.4.3	東京国際空港（HND/RJTT）－那覇空港（OKA/RJOH） .....	38
5章	結論 .....	42
5.1.	まとめ .....	42
5.2.	今後の課題 .....	43
	参考文献 .....	44
	謝辞 .....	46

# 図目次

図 1-1. 所得水準と外国旅行回数の関係（出所：日本航空機開発協会 [1]） .....	7
図 1-2. アジア・太平洋エアラインの需要予測（出所：日本航空機開発協会 [1]） .....	7
図 1-3. 飛行情報区（FIR）及び管轄空域 [5] .....	8
図 1-4. 空域ベース運用から軌道ベースへの移行 [4] .....	8
図 2-1. 日本上空の制限空域 .....	12
図 2-2. 平日の制限空域利用（2015/1/13 Tue） .....	13
図 2-3. 祝日の制限空域利用（2015/1/12 Mon 成人の日） .....	13
図 3-1. 航空機の力のつり合い .....	15
図 3-2. 方位角 .....	15
図 3-3. SR 線図 .....	20
図 3-4. 評価方法 .....	21
図 3-5. 探索回数 .....	21
図 3-6. $(\phi, \theta)$ と $(\xi, \eta)$ の関係 .....	22
図 3-7. 探索方法について .....	24
図 3-8. 速度ベクトルの関係 .....	24
図 4-1. 空港間の関係図 .....	28
図 4-2. 飛行時間と燃料消費量（制限空域考慮しない場合） .....	30
図 4-3. 飛行時間と燃料消費量（制限空域を考慮した場合） .....	30
図 4-4. 実際の軌道と最適軌道（飛行ケース(1), CTS to OKA, 制限空域なし, 2015/01/16） .....	31
図 4-5. 実際の軌道と最適軌道（飛行ケース(1), CTS to OKA, 制限空域あり, 2015/01/16） .....	31
図 4-6. 新千歳空港から那覇空港への飛行経路（2015/1/16） .....	32
図 4-7. 那覇空港から新千歳空港への飛行経路（2015/1/16） .....	32
図 4-8. 飛行時間と燃料消費量（制限空域考慮しない場合） .....	34
図 4-9. 飛行時間と燃料消費量（制限空域考慮する場合） .....	34
図 4-10. 最も飛行時間を短縮できるケース（CTS to FUK, 制限空域なし, B738, 2015/01/15） .....	35
図 4-11. 最も飛行時間を短縮できるケース（CTS to FUK, 制限空域あり, B738, 2015/01/15） .....	35
図 4-12. 最も燃料消費量を削減できるケース（CTS to FUK, 制限空域なし, B773, 2015/01/16） .....	36
図 4-13. 最も燃料消費量を削減できるケース（CTS to FUK, 制限空域あり, B773, 2015/01/16） .....	36

図 4-14. 新千歳空港から福岡空港への飛行経路 (2015/01/16) .....	37
図 4-15. 福岡空港から新千歳空港への飛行経路 (2015/01/16) .....	37
図 4-16. 飛行時間と燃料消費量 (制限空域考慮しない場合) .....	39
図 4-17. 飛行時間と燃料消費量 (制限空域考慮した場合) .....	39
図 4-18. 制限空域を考慮した場合の便益の変化 .....	39
図 4-19. 最も燃料消費量を削減するケース (HND to OKA, 制限空域なし, 2015/01/15) .....	40
図 4-20. 最も燃料消費量を削減できるケース (HND to OKA, 制限空域あり, 2015/01/15) .....	40
図 4-21. 東京国際空港から那覇空港への飛行経路 (2015/01/15) .....	41
図 4-22. 那覇空港から東京国際空港への飛行経路 (2015/01/15) .....	41

# 表目次

表 2-1. 制限空域の概要 .....	11
表 3-1. 評価関数における仮定 .....	14
表 4-1. CARATS Open Data の期間.....	25
表 4-2. CARATS Open Data の特性.....	26
表 4-3. 全球数値予報モデル GPV の概要 .....	27
表 4-4. 国内長距離路線について .....	27
表 4-5. 新千歳空港－那覇空港間の概要 .....	28
表 4-6. 新千歳空港－那覇空港の DWR の成立の可能性 .....	30
表 4-7. 新千歳空港－那覇空港間の 4 ケースの便益 .....	30
表 4-8. 新千歳空港－福岡空港間の概要 .....	33
表 4-9. 新千歳空港－福岡空港の飛行 3 ケースの便益 .....	34
表 4-10. 新千歳空港－福岡空港の DWR の成立の可能性 .....	34
表 4-11. 東京国際空港－那覇空港間の概要.....	38
表 4-12. 東京国際空港－那覇空港間の DWR の成立の可能性 .....	39
表 5-1. DWR の成立性.....	42

# 1章

## 序論

### 1.1. 研究背景

世界では、経済発展によって航空需要は近年増加の一途をたどっている。経済成長率の大きいアジアをはじめとする新興国では、年間所得が 5,000 ドルから 35,000 ドルの中間所得層の人口が年々増加している。図 1-1 のように、所得が増加すると海外旅行回数が増加していく。中間所得層の増加とともに航空需要も増加し、それに伴って世界のジェット旅客機の需要は増加していき、特にアジア・太平洋地域では図 1-2 のように、ジェット旅客機の数が増加すると文献 [1]によって予想されている。

このように世界の航空需要が増加していくことは、更なる経済成長につながると考えられる。しかし、航空機の運用には様々な規則や設備が必要となるが、航空需要の増加に対応した規則や設備が十分に整っていないのが航空管制の現状である。航空需要が高まっているにも関わらず新しい航空管制方式の導入が行われにくいのは、安全を確保するためであり仕方ない部分でもある。また航空機は、技術の向上とともに飛行性能は向上しているが、その性能を十分に活かすことができずに運用されているのが現状である。このような航空管制の運用では、旧式の機材や設備で運用することを前提としているためである。現在の航空管制において増加している航空交通量に伴って、安全性が低下しないように飛行経路の迂回や遅延が発生し、航空機の燃料消費量の増加につながり航空機の運航者にとっても、経済的に悪影響を及ぼしている。今後さらに航空交通量が増加すると、燃料消費量の増加や管制官のワークロードの増加に伴うヒューマンエラーを助長し、安全性が低下すると考えられる。このようなことから、航空機の運用をより効率的な航空交通システムにするために、国内外での研究が盛んに行われている。また、国際民間航空に関する原則の制定や技術の開発を行っている国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization : ICAO) は、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を取りまとめた。この概念の実現のために、米国では NextGen (Next Generation air transportation) [2]や欧州では SESAR (Single European Sky Atm Research) [3]と呼ばれる長期ビジョンが策定された。日本国内においても ICAO の概念をもとに 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) と呼ばれる長期ビジョンが策定された。 [4]

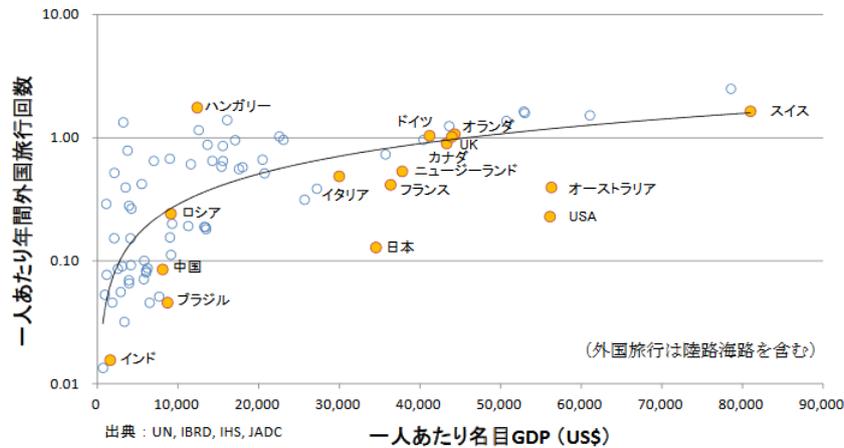


図 1-1. 所得水準と外国旅行回数の関係（出所：日本航空機開発協会 [1]）

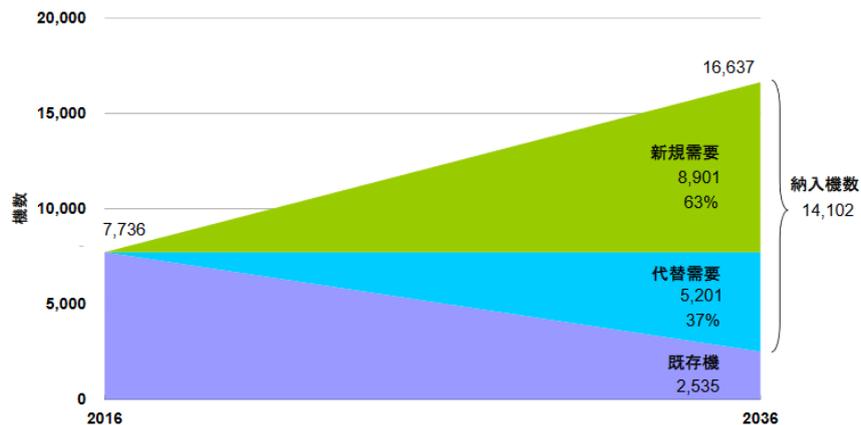


図 1-2. アジア・太平洋エアラインの需要予測（出所：日本航空機開発協会 [1]）

日本国内における現在の航空管制は、図 1-3 のように日本上空を複数の空域に分割した空域ベース運用方式が行われている。空域ベース運用では、空域ごとに航空管制官が配置されており決められた経路をもとに安全な航空管制が行われている。しかし、空域ベース運用方式では、航空交通量が増加するとある特定空域への交通流が集中し、航空機の迂回だけでなく管制官の業務負担が増加することから最も良い航空機の運用方式とは言えない。そこで CARATS では、図 1-4 のように軌道ベース運用 (Trajectory Based Operation : TBO) が提案されている。軌道ベース運用は、航空機を出発から到着まで一体的に捉えるとともに時間の管理も行うというものである。日本上空を一つの空域と捉えることで、それぞれの運航者 (航空会社、パイロットなど) の方針により決められた望みの軌道を飛行することで運航効率を向上させることができ、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。

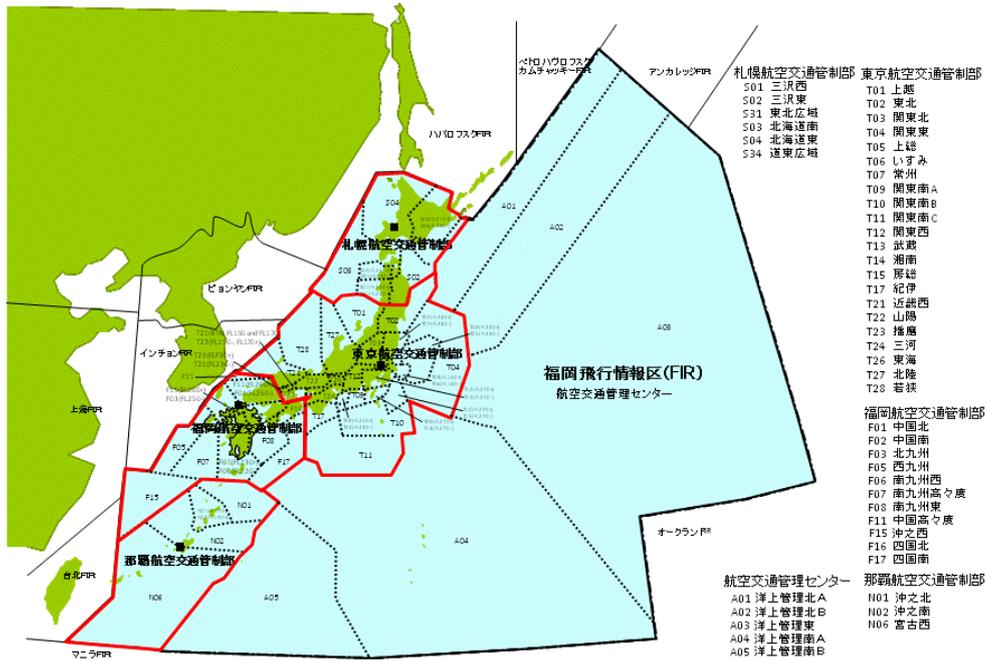


図 1-3. 飛行情報区 (FIR) 及び管轄空域 [5]

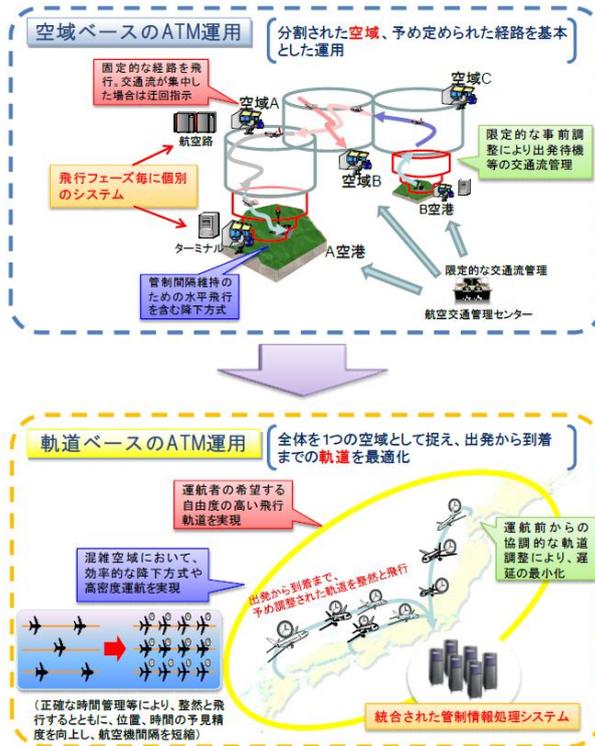


図 1-4. 空域ベース運用から軌道ベースへの移行 [4]

軌道ベース運用の実現のため空域全体で最適化を行う研究はすでに文献 [6] [7] [8] で気象条件や航空機の性能を考慮して最適な飛行経路を飛行することで得られる便益が評価されている。これらの研究では、軌道ベース運用の実現に向けて理想的な空域の状況を仮定して大きな便益が得られることが示されている。すでに、日本とアメリカ間の北太平洋上の空域には上空の風を考慮に入れ飛行経路を変える大洋可変経路が設定されている。大洋可変経路には、国土交通省航空局と米国連邦航空局 (Federal Aviation Administration: FAA) の両者間で決定される経路 (Pacific Organized Track System: PACOTS) と運航者のニーズによって決定される経路 (User Preferred Route: UPR) がある。PACOTS では、北太平洋上を飛行する航空機の運航者の要望や天候、空域の運用状況等を勘定した上で一日単位に設定される。UPR では、運航者がフライトごとに時刻や重量、航空機の性能に合わせて経路を設定されるため、PACOTS より航空機を効率的に飛行することができる。UPR の経路では航空機ごとに飛行経路が異なり安全性が PACOTS よりも劣ってしまうため、現在は PACOTS の経路が主に使用されている。UPR の経路は、安全性などを考慮した上で部分的に使用されている。しかしながら、国内線では地上施設を結んだ航空路と呼ばれる経路を使用し、実際の飛行ではあらかじめ決められた経路が使用される。

これまで研究されてきた軌道ベース運用に関する研究では、日本上空には制約がない空域とし風を考慮した最適軌道を設定し、その軌道から得られる便益が大きなものであった。しかし、実際には日本上空には自衛隊の演習・訓練空域や米軍の制限・禁止空域といった制約がある。この制限空域の中には完全に進入できない空域と自衛隊や米軍との調整によって飛行可能な空域があり、航空機は効率的な飛行を妨げられている。また、このような制限空域は政治的な面や国防のためにはすぐに変更することは難しいと考えられる。

このように日本上空は、多数の制限空域があり制約が多いが、現在の空域ベース運用でのあらかじめ決められた経路を飛行する運航では、今後の航空交通量の増加に対応できない可能性と航空機の性能を十分に発揮できないと考えられる。本研究では、制限空域を受けやすい国内の長距離路線に焦点を当て、制限空域も考慮に入れた風最適経路を設定する必要があると考えた。

## 1.2. 研究目的

本研究では、風最適経路に制限空域を考慮した場合の成立性に関して検討を行う。本論文では、日本国内の長距離路線での制限空域と風を考慮した最適な経路（Dynamic Weather Routing：DWR）を適用することで得られる便益と成立性を評価することを目的としている。

## 1.3. 論文構成

2章では、日本上空の空域について述べるとともに、実際の運航で制限空域の平日と土日祝日の利用の違いを述べる。

3章では、航跡データによる航空機の性能評価や飛行状態推定を行う。また、動的計画法による最適軌道と実際の飛行との比較方法について述べる。

4章では、制限空域を考慮しない場合と考慮する場合の動的計画法による最適軌道と実際の飛行とを比較を行う。また、制限空域を考慮していないときの便益との比較を行い、制限空域を考慮した場合により得られる便益の評価を行う。

5章では、本研究の結論であり、国内長距離路線に風最適経路の成立性と今後の検討課題について述べる。

## 2章

### 制限空域

日本上空には、制限空域が存在することは前章で既に述べたが、ここでは制限空域について詳しく述べる。

#### 2.1. 日本における制限空域

本論文で使用する制限空域のデータは、国土交通省が ICAO の推進する「航空情報業務 (Aeronautical Information Services : AIS) から航空情報管理 (Aeronautical Information Management : AIM) への高度化」の一環として平成 21 年 8 月 27 日から提供されている電子航空路誌 (electronic Aeronautical Information Publication : eAIP) [9]を使用する。この eAIP は AIS Japan のサイト [9]より参照することができる。AIS Japan では、日本中の航空路の詳細、空港の図面、計器飛行での使用に必要な図面や地上施設、業務、方式や危険などの状態や変更といった航空情報であるノータム (Notice To Airmen : NOTAM) を参照することができる。以下に制限空域の概要について示す。

表 2-1. 制限空域の概要

禁止、制限及び危険空域	エリアの名前
	エリアの座標 (緯度 (度分秒), 経度 (度分秒))
	上限高度 (ft), 下限高度 (ft)
	制限タイプ
	占有時間 (UTC)
	備考
演習及び訓練空域	エリアの名前
	エリアの座標 (緯度 (度分秒), 経度 (度分秒))
	占有時間 (UTC)
	上限高度 (ft), 下限高度 (ft)
	管制部隊

(Coordinated Universal Time : UTC, 協定世界時)

電子航空路誌(eAIP)により公示されている制限エリアは以下の図2-1のようになる。

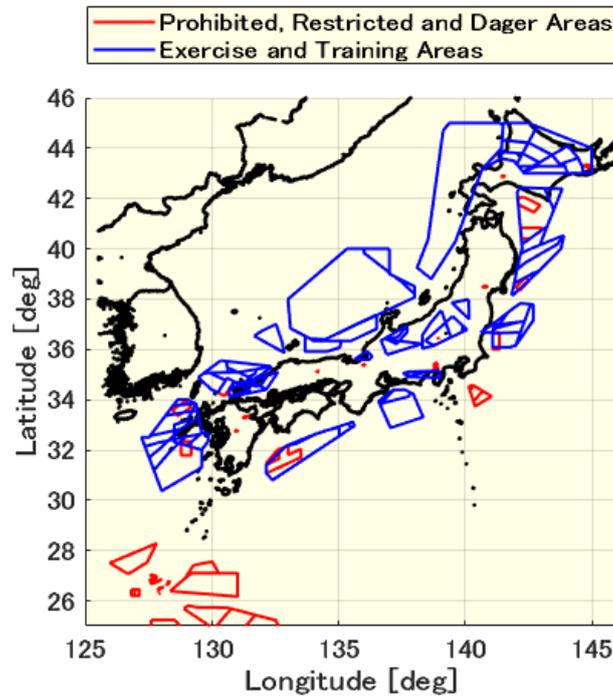


図 2-1. 日本上空の制限空域

## 2.2. 実際の運航経路と制限空域

制限空域は、図 2-1 でも示したように日本上空全体にわたって存在している。航跡データである CARATS Open Data より、本論文で示す国内長距離路線の 1 つである新千歳空港—福岡空港間の平日と土日祝日の運航経路をそれぞれ図 2-2, 図 2-3 に示している。

平日は、制限空域を避けるように飛行しているが、土日祝日は制限空域に高度の上限がない空域の中を飛行している。休日は、制限空域を考慮しない風最適経路で飛行可能であると考えられるが、平日では制限空域を考慮する必要がある。本論文で制限空域を考慮する場合は、平日の飛行との比較を行う。

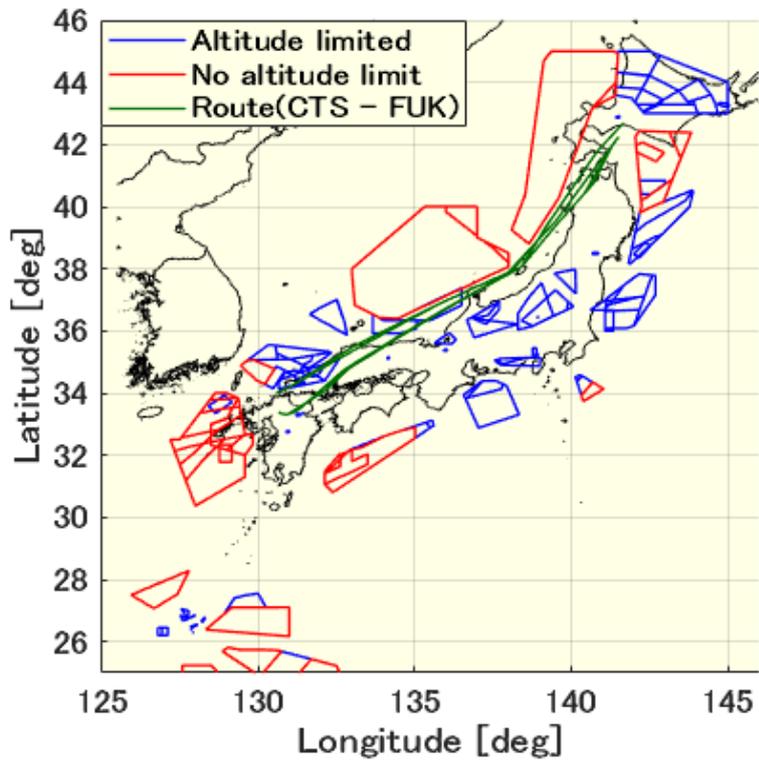


図 2-2. 平日の制限空域利用 (2015/1/13 Tue)

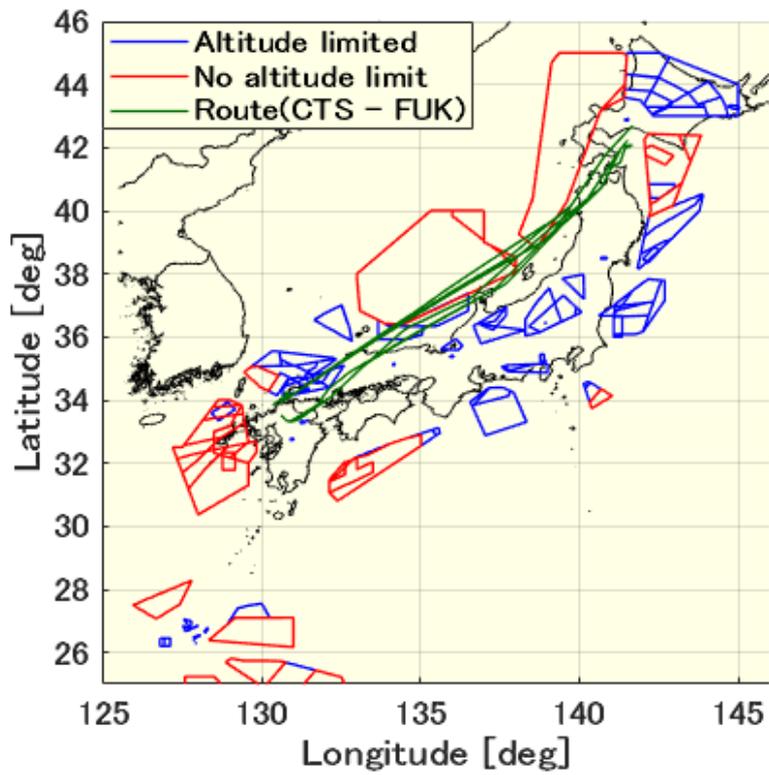


図 2-3. 祝日の制限空域利用 (2015/1/12 Mon 成人の日)

## 3章

### 運航効率の評価

ここでは運航効率の評価方法について述べる。航空機の運航において最適な軌道を飛行することは、運航者の燃料消費量の削減や運航コストの削減だけでなく、航空機を利用する私たちにも航空券が安くなるといった恩恵をもたらすことができる。そのため、航空機の効率的な運航を実現させるためには、飛行軌道の最適化は重要である。本研究では、軌道最適化の研究において多く用いられている動的計画法 (Dynamic Programming: DP) と呼ばれる方法を用いて、運航効率の評価を行う。

#### 3.1. 評価関数

出発空港から到着空港までの航空機の飛行には大きく分けて 3 つの状態が存在するが、本研究では巡航区間のみの評価を行う。本論文での巡航区間では定常飛行を行い高度一定し経路角  $\gamma = 0$  となる。また、マッハ数は実際の運航の平均値とし一定とし、高度一定であるので温度が一定となり、式に示す関係より真対気速度はほぼ一定である。仮定の概要を表に示す。

$$V_{TAS} = M \times a \quad (3.1)$$

$$a^2 = kRT \quad (3.2)$$

表 3-1. 評価関数における仮定

---

仮定 1.	最適化は、巡航フェーズ $H = Const., \quad \gamma = 0, \quad \dot{\gamma} = 0$
仮定 2.	実際の運航より、マッハ数は一定とする。 $V_{TAS} \simeq Const., \quad \because \text{Temperature } T \simeq Const.$

---

仮定 1. 2 より最小燃料消費量の問題は、最短飛行時間の問題とすることができる。そのため、評価関数  $J$  は以下の式で定義できる。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} dt = t_f - t_0 \quad (3.3)$$

### 3.2. 運動モデル

航空機の運動は以下の運動方程式に従うとする。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、非慣性座標系（航空機と共に動く動座標系）における質点近似の運動モデルである。よって、航空機の運動は式から式に示すように 3 自由度の方程式で表す。

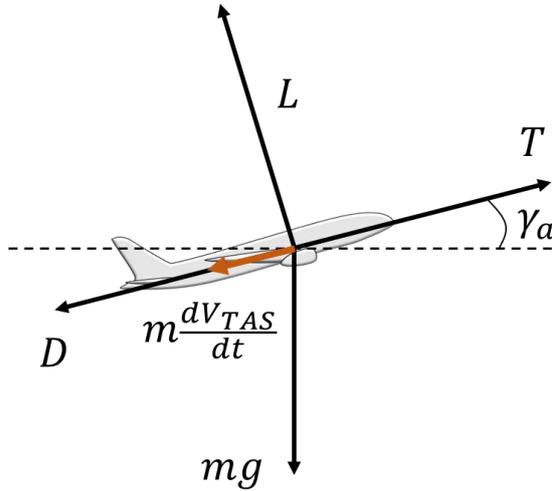


図 3-1. 航空機の力のつり合い

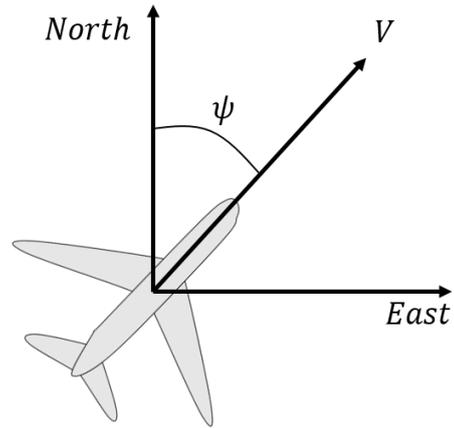


図 3-2. 方位角

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{(R_0 + H)\cos\phi} (V_{TAS}\cos\gamma_a\sin\psi + W_x) \quad (3.4)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{R_0 + H} (V_{TAS}\cos\gamma_a\cos\psi + W_y) \quad (3.5)$$

$$m\frac{dV_{TAS}}{dt} = Thr - D - mg\sin\gamma_a \quad (3.6)$$

$$mV_{TAS}\frac{d\gamma}{dt} = L - mg\cos\gamma_a \quad (3.7)$$

$$\frac{dH}{dt} = V_{TAS}\sin\gamma_a \quad (3.8)$$

$$\frac{dm_{fuel}}{dt} = -\mu \quad (3.9)$$

前節の仮定を考慮すると式 (3.4) ~ (3.8) は以下の式のように書き直すことができる。

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{(R_0 + H)\cos\phi} (V_{TAS}\sin\psi + W_x) \quad (3.10)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{R_0 + H} (V_{TAS}\cos\psi + W_y) \quad (3.11)$$

$$m \frac{dV_{TAS}}{dt} = Thr - D - mgsin\gamma_a = 0 \quad (3.12)$$

$$mV_{TAS} \frac{d\gamma}{dt} = L - mgcos\gamma_a = 0 \quad (3.13)$$

$$\frac{dH}{dt} = V_{TAS}sin\gamma_a = 0 \quad (3.14)$$

各記号の定義は以下の通りである.

$\theta$ : 経度 [deg]	$\phi$ : 緯度 [deg]
$t$ : 時間 [s]	$L$ : 揚力 [N]
$V_{TAS}$ : 真対気速度 [m/s]	$D$ : 抗力 [N]
$R_0$ : 地球半径 [m]	$\gamma_a$ : 経路角 [rad]
$H$ : 幾何高度 [m]	$\psi$ : 方位角 [rad]
$Thr$ : 推力 [N]	$g$ : 重力加速度 [m/s <sup>2</sup> ]
$m$ : 機体質量 [kg]	$W_x$ : 東西風 [m/s]
$W_y$ : 南北風 [m/s]	$\mu$ : 燃料流量 [kg/s]

### 3.3. 空力モデル

本論文で使用する空力モデルは、抗力係数が2次の関数で表される空力モデルを使用する.

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{TAS}^2 S C_L \quad (3.15)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{TAS}^2 S C_D \quad (3.16)$$

$$C_D = C_{D0} + C_{D2} C_L^2 \quad (3.17)$$

$\rho$ : 密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	$S$ : 翼面積 [m <sup>2</sup> ]
$C_L$ : 揚力係数	$C_D$ : 抗力係数
$C_{D0}$ : 有害抗力係数	$C_{D2}$ : 誘導抗力係数 (BADA より)

### 3.4. 大気モデル

ここでは本論文で用いる大気モデルについて述べる。大気モデルは国際標準大気 (International Standard Atmosphere : ISA) である。高度方向における大気の状態は、以下の式により支配されている。ただし  $H$  はジオポテンシャル高度である。また、添え字 0 は海面を基準とする。

$$p = \rho RT \quad (3.18)$$

$$\frac{dp}{dH} = -\rho g \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} p & : \text{大気圧 [hPa]} & \rho & : \text{空気密度 [kg/m}^3\text{]} \\ T & : \text{大気温度 [K]} & R & : \text{気体定数} \end{aligned}$$

ジオポテンシャル高度に対して温度勾配  $b$  が一定であると仮定すれば、以下の関係が成り立つ。

$$T = T_0 + b(H - H_0) \quad (3.20)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{g_0}{bR}} \quad (3.21)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{T}{T_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{g_0}{bR}-1} \quad (3.22)$$

温度勾配が 0 である場合には次式が成立する。ただし添え字 1 は等温層の最低高度を表す。

$$\frac{p}{p_1} = \exp\left(-\frac{g_0}{RT}(H - H_1)\right) \quad (3.23)$$

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \frac{p}{p_1} = \exp\left(-\frac{g_0}{RT}(H - H_1)\right) \quad (3.24)$$

国際標準大気では、高度が 0 - 11000 [m]の間は一定温度勾配の対流圏、高度が 11000 - 20000 [m]は等温である成層圏において以下の値が与えてある。

海面上標準温度	$T_0 = 288.15$	[K]
海面上標準圧力	$p_0 = 1013.25$	[hPa]
海面上標準密度	$\rho_0 = 1.225$	[kg/m <sup>3</sup> ]
重力加速度	$g_0 = 9.80665$	[m/s <sup>2</sup> ]

対流圏気温逓減率	$b = -0.0065$	[K/m]
空気の比熱比	$\kappa = 1.4$	
気体定数 (空気)	$R = 287.05287$	[J/(K·kg)]
成層圏界面温度	$T_1 = 216.65$	[K]
成層圏界面圧力	$p_1 = 226.55$	[hPa]
成層圏界面密度	$\rho_1 = 0.3643$	[kg/m <sup>3</sup> ]

### 3.5. 航空機性能モデル

航空機の軌道最適化計算には機体の性能モデルが必要であるが、そのモデルとして欧州航空航法安全機構 (European Organization for the Safety of Air Navigation : EUROCONTROL) [10]が維持・管理し提供されている BADA (Base of Aircraft Data) モデル [11]を用いる。ここでは、BADA モデルで与えられている燃料消費量モデルについて述べる。

#### 3.5.1 飛行可能領域

- 高度上限

高度の上限には実用上昇限度と運用高度限界 (上昇率が 300 [ft/min]となる高度) がある。機種ごとに BADA モデルでは高度の上限が与えられる。

$$h_{max/act} = \min \left[ h_{MO}, h_{max} + G_t \times (\Delta T - C_{TC4}) + G_w \times (m_{max} - m_{act}) \right] \quad (3.25)$$

以下に BADA モデルより与えられるパラメタを示す。

$h_{MO}$	:	標準平均海面からの最大運航高度 [ft]
$h_{max}$	:	最大離陸重量での標準平均海面からの最大高度 [ft]
$G_t$	:	最大高度における温度勾配 [ft/K]
$G_w$	:	最大高度における質量勾配 [ft/K]
$\Delta T$	:	標準大気での温度勾配
$m_{ref}$	:	基準質量 [kg]
$m_{act}$	:	実際の質量 [kg]

- 速度上限

速度の上限値は、BADA モデルにより以下のパラメタが与えられる。

$V_{MO}$	:	最大運用速度 (CAS) [kt]
$M_{MO}$	:	最大運用マッハ数

- 速度下限

速度の下限値は BADA モデルより以下のようにパラメタが与えられる。

$V_{stall}$  : 最大運用速度 (CAS) [kt]

また、較正対気速度 (Calibrated Airspeed : CAS) と真対気速度 (True Airspeed : TAS) の間には以下の関係式が成り立つ。

$$V_{TAS} = \left[ \frac{2p}{\mu\rho} \left\{ \left( 1 + \frac{p_0}{p} \left[ \left( 1 + \frac{\mu\rho_0}{2p_0} V_{CAS}^2 \right)^{\frac{1}{\mu}} - 1 \right] \right)^{\mu} - 1 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.26)$$

ただし、比熱比  $\kappa = 1.4$  とすることにより

$$\mu = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \quad (3.27)$$

### 3.5.2 燃料消費モデル

BADA モデルでは、通常時に使用する燃料流量  $f_{nom}$  とアイドル時に使用する燃料流量  $f_{min}$  があり、それぞれ以下の式 (3.29)、式 (3.30) ように定義されている。  $C_{f1}$ 、  $C_{f2}$ 、  $C_{f3}$ 、  $C_{f4}$ 、  $C_{fcr}$  は、BADA モデルにより与えられる係数である。

推力燃料係数

$$\eta = C_{f1} \times \left( 1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}} \right) \quad (3.28)$$

燃料流量

$$\text{通常時:} \quad f_{nom} = \eta \times Thr \quad (3.29)$$

$$\text{アイドル時:} \quad f_{min} = C_{f3} \times \left( 1 - \frac{H_p}{C_{f4}} \right) \quad (3.30)$$

ただし、

$V_{TAS}$  : 真対気速度 [kt]  
 $\eta$  : 推力燃料係数 [kg/(min · kN)]  
 $H_p$  : ジオポテンシャル気圧高度 [ft]

飛行中の燃料流量は式 (3.29)、式 (3.30) のうち大きいものを使用する。

$$f = \max(f_{nom}, f_{min}) \quad (3.31)$$

また，巡航中の燃料流量は以下の式とする．

$$f = f_{nom} \times C_{fcr} \quad (3.32)$$

### 3.5.3 比距離

ここでは，BADA モデルより計算した燃料流量 $FF$  (Fuel Flow) と真対気速度 $V_{TAS}$ により単位燃料あたりの飛行距離である比距離 (Specific Range : SR) [m/kg]を求めた．図にはその一例を示す．図より航空機は高度が高高度になるほど比距離がよくなることが分かる．

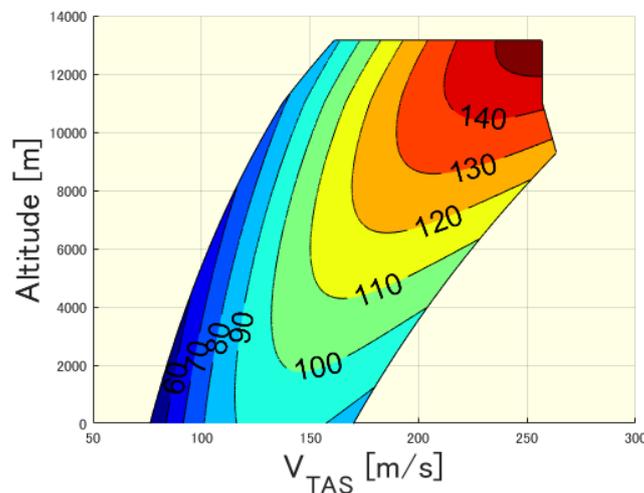


図 3-3. SR 線図

## 3.6. 飛行状態推定

飛行状態の推定方法と最適軌道による便益の評価方法については図に示す．飛行状態の推定では，まず航跡データの位置データ (緯度, 経度) と時間より対地速度を求める．次に気象データの風データ (東西風, 南北風) を考慮することで真対気速度の推定を行う． [12]また，航跡データのある高度における気温や密度も求めることができる．真対気速度と BADA モデルを使用し，燃料流量や推力を求めることができ，実際の飛行の燃料消費量を求めることができる．航跡データと気象データの詳細は 4 章で述べる．

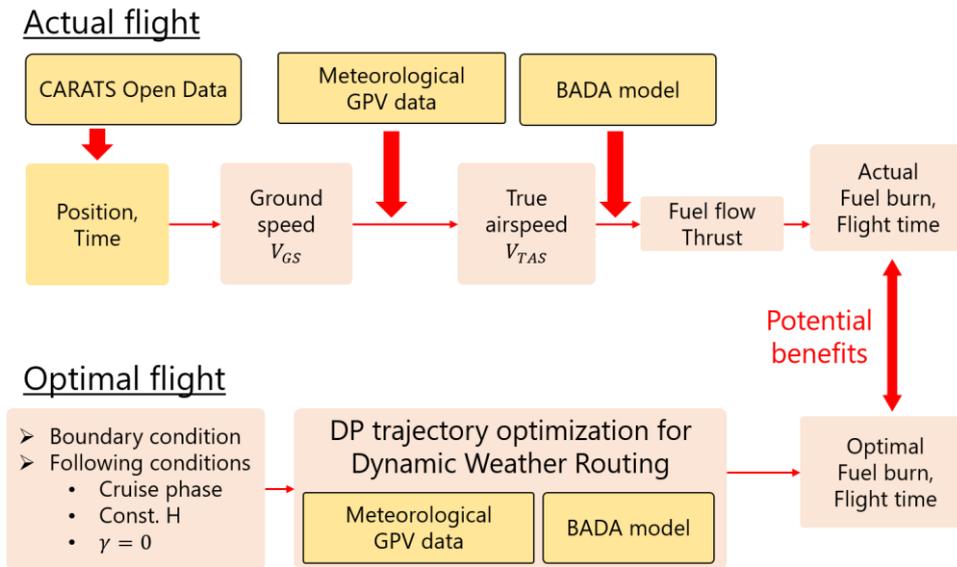


図 3-4. 評価方法

### 3.7. 軌道最適化

本研究では、動的計画法（DP 法）と呼ばれる手法を用いる。動的計画法では、状態変数を量子化し、それらの遷移の最適な組み合わせを最適性原理に基づいて探索していく。大域的解を得ることができ、非線形な問題も解くことが可能であり、航空機の軌道の最適化に適応され多くの研究で用いられている。動的計画法では量子化した点においてすべての組み合わせを探索するよりも少ない探索回数で行うことができる。しかし、状態変数の数が増え次元が増えると探索回数が爆発的に増加する（次元の呪いと呼ばれる）。本研究では高度一定であるため横のずれだけを考えればよい。よって計算回数は以下のようになる。

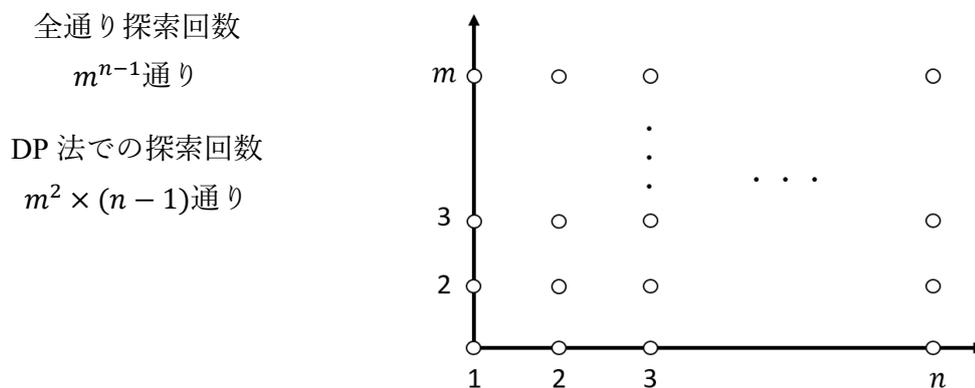


図 3-5. 探索回数

### 3.7.1 動的計画法による最適化

動的計画法はRichard Ernest Bellmanによって提案され式(3.33)に示すHamilton-Jacobi-Bellman (HJB) の一次の非線形偏微分方程式にもとづく最適化理論である.

$$-\frac{\partial J_{opt}}{\partial t} = \min_{\mathbf{u}} H\left(\mathbf{x}, \frac{\partial J_{opt}}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{u}, t\right) \quad (3.33)$$

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のがよい. 本研究では, 図に示すように極座標系  $(\phi, \theta)$  をダウンレンジ角と横のずれ角  $(\xi, \eta)$  に座標変換することにより最適化変数の数を減らすことができる.

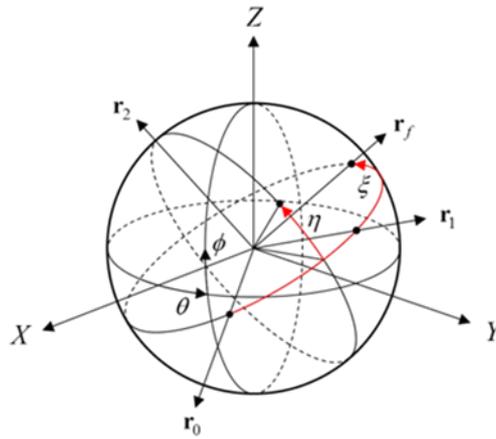


図 3-6.  $(\phi, \theta)$  と  $(\xi, \eta)$  の関係

これらの座標変換により, 式 (3.10) と式 (3.11) は以下のようにすることができる.

$$R_H \frac{d\xi}{dt} = \frac{dX}{dt} = V_{GS} \quad (3.34)$$

ただし,

$$R_H : \text{地球中心からの距離 [m]} (= R_0 + H)$$

ダウンレンジ角の格子点は, 始点位置  $\mathbf{r}_0$  と終点位置  $\mathbf{r}_f$  を結ぶ大圏コース上に設定された  $\xi$  軸上である.  $\xi$  軸上のそれぞれの点において大圏コースと垂直になるように横のずれである  $\eta$  軸を設定する. 2 地点  $(\phi_k, \theta_k)$ ,  $(\phi_{k+1}, \theta_{k+1})$  の距離が十分小さく, その間の風と方位角が一定とすると, 式 (3.10) と式 (3.11) より以下の関係が導くことができ, 機首方位  $\psi$  と飛行時間  $\Delta t$  を求めることができる.

$$\theta_{k+1} - \theta_k = \frac{\Delta t}{R_H \cos \phi} \{V_{TAS} \sin \psi_k + W_x(\phi, \theta)\} \quad (3.35)$$

$$\phi_{k+1} - \phi_k = \frac{\Delta t}{R_H} \{V_{TAS} \cos \psi_k + W_y(\phi, \theta)\} \quad (3.36)$$

式 (3.35) と式 (3.36) を変形し,

$$\sin \psi = \frac{R_H}{V_{TAS} \Delta t} \cos \phi \cdot (\theta_{k+1} - \theta_k) - \frac{W_x(\phi, \theta)}{V_{TAS}} \quad (3.37)$$

$$\cos \psi = \frac{R_H}{V_{TAS} \Delta t} (\phi_{k+1} - \phi_k) - \frac{W_y(\phi, \theta)}{V_{TAS}} \quad (3.38)$$

$\sin^2 \psi + \cos^2 \psi = 1$  の関係から次式が得られ, 飛行時間  $\Delta t$  と式 (3.37), 式 (3.38) より方位角  $\psi$  を求めることができる.

$$\begin{aligned} a_2 x^2 + a_1 x + a_0 &= 0 & x &= \frac{R_H}{V \Delta t}, \text{ ただし, } x > 0 \\ a_2 &= (\phi_{k+1} - \phi_k)^2 + \cos^2 \phi \cdot (\theta_{k+1} - \theta_k)^2 \\ a_1 &= \left( -2(\phi_{k+1} - \phi_k) W_y(\phi, \theta) - 2 \cos \phi (\theta_{k+1} - \theta_k) W_x(\phi, \theta) \right) / V_{TAS} \\ a_0 &= \left( W_x^2(\phi, \theta) + W_y^2(\phi, \theta) \right) / V_{TAS} - 1 \end{aligned} \quad (3.39)$$

ただし,

$$\begin{aligned} \phi &= (\phi_{k+1} + \phi_k) / 2 \\ \theta &= (\theta_{k+1} + \theta_k) / 2 \end{aligned}$$

である.

最適経路の探索方法は以下の最適性の原理にしたがう.

$$J_{opt}(\xi(k), \eta(i_k)) = \min_{i_{k+1}} [\Delta t + J_{opt}(\xi(k+1), \eta(i_{k+1}))] \quad (3.40)$$

$(\xi(k), \eta(i_k))$  の点における最適値は, 図のように  $(\xi(k), \eta(i_k))$  から  $(\xi(k+1), \eta(i_{k+1}))$  にかかる飛行時間と  $(\xi(k+1), \eta(i_{k+1}))$  から終点までの最適な飛行時間を合わせた値が最小値となる値である. これにより最適な経路を求めることができる. 本研究では終点から始点に探索を行っていく. この最適化は, 両端固定の 1 変数最適化問題である.

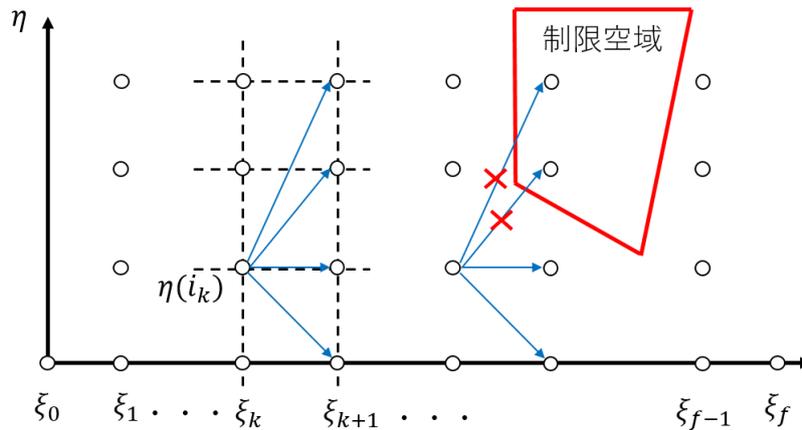


図 3-7. 探索方法について

### 3.7.2 最適軌道における速度

最適軌道での対地速度の計算には、与えられた対気速度 $V_{TAS}$ に対して前節で求めた最適な $\Delta t$ と2地点間の距離を用いることで簡単に計算できるが、本研究では求めた最適な方位角 $\psi$ を用いて計算を行う。図 3-8 に示すような速度ベクトルの関係を用いて求めることが可能である。

$$\mathbf{V}_{GS} = \mathbf{V}_{TAS} + \mathbf{V}_{wind} \quad (3.41)$$

$$V_{GS} = \sqrt{V_{GS,x}^2 + V_{GS,y}^2} \quad (3.42)$$

ただし、

$$\begin{aligned} V_{GS,x} &= V_{TAS} \sin \psi + V_{wind,x} \\ V_{GS,y} &= V_{TAS} \cos \psi + V_{wind,y} \end{aligned}$$

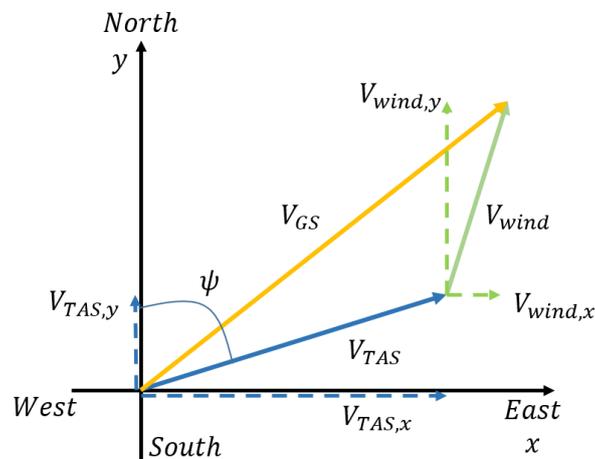


図 3-8. 速度ベクトルの関係

## 4章

# 国内長距離路線への応用

### 4.1. 航跡データ

本論文で使用する航跡データは、国土交通省が作成している CARATS Open Data を使用する。当データは、大学等公的研究機関における航空交通分野の研究を促進するために国土交通省が公開しているデータである。また、国土交通省航空局が保有しているエンルート管制用のレーダーデータを基にして作成されている。以下に CARATS Open Data の概要を表す。（一部、文献 [13]より抜粋）

#### 4.1.1 データ形式

データには、時刻、便名、緯度（度）、経度（度）、高度（ft）、型式が CSV 形式で格納されている。

- 時刻は日本標準時（JST）である。
- 便名は仮想便名に変換し、1日の中で重複する便名が発生しないようにしています。また、連続する2日間で日またがりの航空機は同じ便名とする。
- 型式は国際民間航空機関（ICAO：International Civil Aviation Organization）の「DOC 8643 Aircraft Type Designators」の略号である。

#### 4.1.2 データ期間

CARATS Open Data は、2012年、2013年、2014年、2015年のデータを使用することができる。本論文では、CARATS Open Data 2014を使用し解析を行った。以下に2014年度における CARATS Open Data の記録期間を表 4-1 に示す。

表 4-1. CARATS Open Data の期間

2014 年	5 月 12 日（月）	から	18 日（日）
	7 月 14 日（月）	から	20 日（日）
	9 月 15 日（月）	から	21 日（日）
	11 月 10 日（月）	から	16 日（日）
2015 年	1 月 12 日（月）	から	18 日（日）
	3 月 9 日（月）	から	15 日（日）

### 4.1.3 データ特性

航空機の飛行方式には、計器飛行方式（Instrument Flight Rules：IFR）と有視界飛行方式（Visual Flight Rules：VFR）がある。計器飛行方式は、パイロットの目視と航空機に搭載されている計器の両方を使用し、常に航空管制官の指示に従って飛行する方式である。有視界飛行方式は、離陸後からパイロットによる目視により自機の位置を判断する飛行方式である。CARATS Open Data 2014 のデータでは、計器飛行方式で飛行している航空機を対象としており、有視界飛行方式による飛行、エンルート空域を通らない飛行、軍用機・自家用機などは含まない。また、以下のようなエラーデータが含まれている。

- 位置が大きく外れたデータ
- 高度が 0 や負の値となっているデータ
- 飛行開始前や飛行終了後に現れる、あたかも飛行しているかのように見える数十秒のデータ

また、航空管制部の接続部分では航跡が滑らかに連続しない場合があり、レーダーの回転周期は 10 秒間隔でデータが記録されているが、正確に 10 秒ではない。CARATS Open Data の精度に関しては、すでに文献 [14] で評価されている。CARATS Open Data 2014 のデータ特性を表 4-2 に示す。

表 4-2. CARATS Open Data の特性

対象	IFR で飛行している定期便
格納データ	時刻, 仮想便名, 緯度 (度), 経度 (度), 高度 (ft), 型式
記録間隔	約 10 秒

## 4.2. 気象データ

ここでは、本論文で使用する気象データについて述べる。本論文で飛行状態推定と軌道最適化に用いる気象データとして、気象庁の地球全体と大気を対象とした数値予報モデル（Global Spectral Model：GSM）の格子点値（Grid Point Value：GPV）データである全球数値予報モデル GPV（GSM）を用いる。また、気象庁の気象データの精度については文献 [15] で比較評価されている。以下の表 4-3 に、概要を示す。（一部、一般財団法人 気象業務支援センターHP [16]より抜粋）

表 4-3. 全球数値予報モデル GPV の概要

要素	地上： 海面更生氣圧，地上気圧，風（2 要素），気温，相对湿度， 積算降水量，雲量（4 要素） 1000・925・850・700・600・500・400・300 hPa： 高度，風（2 要素），気温，上昇流，相对湿度 250・200・150・100・70・50・30・20・10 hPa： 高度，風（2 要素），気温，上昇流
初期値	00, 06, 12, 18 UTC（1 日 4 回）
予報時間	84 時間予報（初期時刻：00, 06, 12, 18 UTC）：6 時間間隔 96～264 時間予報（初期時刻：12 UTC）：12 時間間隔
データ形式	国際気象通報式 FM92 GRIB 二進形式格子点資料気象通報式（第 2 版）
配信領域	全球
格子系	等緯度等経度 地上～100 hPa：0.5 度×0.5 度（格子数 720×361） 70～10 hPa：1.0 度×1.0 度（格子数 360×181）

### 4.3. 日本国内における長距離路線

本論文で解析対象とする日本国内の長距離路線は，以下の 3 つとする．また，概要を以下に示す．空港名の後は，国際航空運送協会（International Air Transport Association：IATA）により定められた空港コード（3 レターコード） [17] と ICAO により定められた空港コード（4 レターコード）である．解析期間は，東西風の影響が大きいい 1 月を選び，自衛隊の演習が行われていない平日のみを選んだ．図 4-1 は各空港間の位置関係を示した．

表 4-4. 国内長距離路線について

空港区間	新千歳空港（CTS/RJCC） — 那覇空港（OKA/ROAH） 新千歳空港（CTS/RJCC） — 福岡空港（FUK/RJFF） 東京国際空港（HND/RJTT） — 那覇空港（OKA/ROAH）
解析期間	2015 年 1 月 13 日—16 日（CTS—OKA, CTS—FUK） 2015 年 1 月 15 日（HND—OKA）
飛行フェーズ	巡航

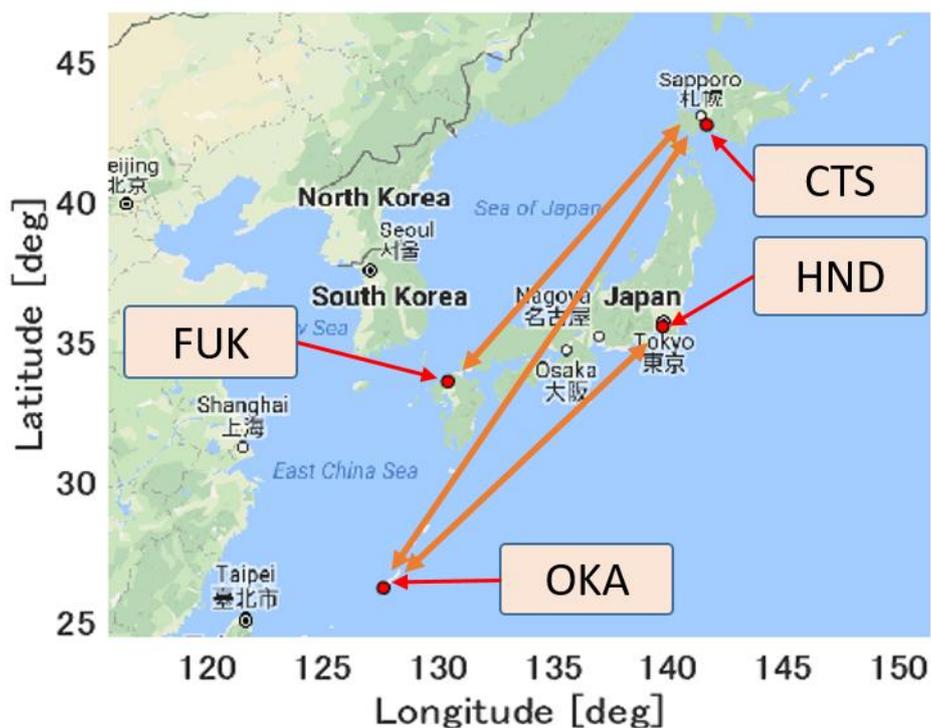


図 4-1. 空港間の関係図

#### 4.4. DWR による便益

ここでは、制限空域を考慮しない場合と考慮した場合の両方における Dynamic Weather Routing により得られる便益を各空港間において示す。

##### 4.4.1 新千歳空港（CTS/RJCC）－那覇空港（OKA/RJOH）

まず、運航されている空港間で一番長い新千歳空港－那覇空港間について述べ、表 4-5 には新千歳空港－那覇空港間の概要を示す。

表 4-5. 新千歳空港－那覇空港間の概要

空港区間	新千歳空港－那覇空港
解析期間	2015 年 1 月 13 日－16 日
解析対象機種	Boeing 737-800
飛行数	全飛行数：13 ケース 高度一定飛行数：4 ケース

図 4-2, 図 4-3 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. また, 図 4-2 は制限空域を考慮しない場合であり, 図 4-3 は制限空域を考慮したものである. 差は最適な飛行から実際の飛行を引いたものである. 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, 本研究では, 高度一定と仮定し DWR を行っているが, プロットしている 13 ケースには実際の運航で高度変化をしているケースもあるため, 高度一定で飛行している 4 ケースを丸で示している. 表 4-7 には高度一定である 4 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, それぞれにおける飛行時間の差と燃料消費量の差をまとめた. 図 4-4 には新千歳空港から那覇空港に向かう飛行ケース(1)の制限空域を考慮しない場合, 図 4-5 には飛行ケース(1)の制限空域を考慮した場合の飛行経路と燃料流量, 対地速度・真対気速度, 高度を示す. また, 図 4-6, 図 4-7 には新千歳空港から那覇空港への飛行と, 那覇空港から新千歳空港への飛行の実際の飛行と制限空域を考慮しない DWR の飛行経路と制限空域を考慮した DWR の飛行経路をプロットしたものである.

これらの結果から, 新千歳空港—那覇空港間では制限空域を考慮したことにより飛行時間と燃料消費量の得られる便益が減少または変わらない飛行があることが分かった. 制限空域を考慮したことによる便益の減少は, 燃料消費量は最大で 60.5014[kg], 飛行時間は最大で 96.0437[s]減少するケースがあることが分かった. この飛行ケースは新千歳空港から那覇空港に向かって飛行する飛行ケース(1)である. また, 制限空域を考慮しても得られる便益に変化がない飛行が飛行ケース(2)と飛行ケース(4)であった.

飛行ケース(1)の制限空域を考慮しない DWR では, 巡航開始後に東西風の影響を受けるにもかかわらず機首方向を実際の飛行よりも西に向けて飛行し, 巡航区間の中間では東西風の影響が小さくなるように実際の飛行よりも機首方向を南に向けて飛行している. また, 図 4-4 の速度の図を見ると, 時間が約 3000[s]から約 8000[s]の区間において DWR の対地速度が実際の対地速度よりも速くなっていることから, 東西風の影響は小さいといえる. 制限空域を考慮した DWR では, 制限空域があり大圏コースに近い経路を飛行しており DWR の対地速度と実際の飛行の対地速度は近い値である. 実際の飛行の飛行時間が DWR の飛行時間より長くなっているのは, 実際の飛行では能登半島から西向きに機首を向けて経路変更が行われており, 大圏コースよりも飛行距離が伸びたことで飛行時間が長くなっているからであると考えられる.

また, 図 4-6, 図 4-7 から新千歳空港から那覇への飛行では制限空域を考慮することで DWR の飛行経路が変化するが, 那覇から新千歳空港への飛行では制限空域を考慮しても DWR の飛行経路にあまり変化がないことが分かる. このことから路線の間でも東西風と制限空域の影響により DWR が成立しない場合があることが分かる. 表 4-6 に新千歳空港—那覇空港の DWR の成立性をまとめる.

表 4-6. 新千歳空港－那覇空港の DWR の成立の可能性

路線 (方向)	成立の可能性
新千歳空港 → 那覇空港	成立する
那覇空港 → 新千歳空港	成立しない

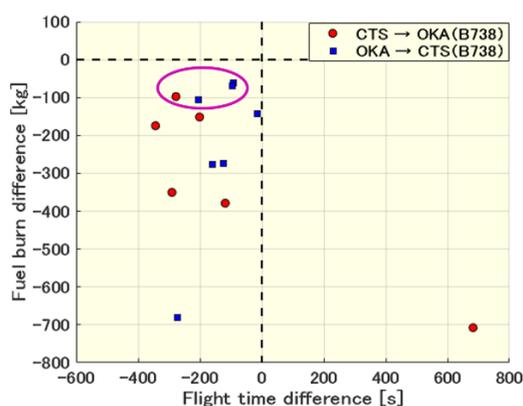


図 4-2. 飛行時間と燃料消費量  
(制限空域考慮しない場合)

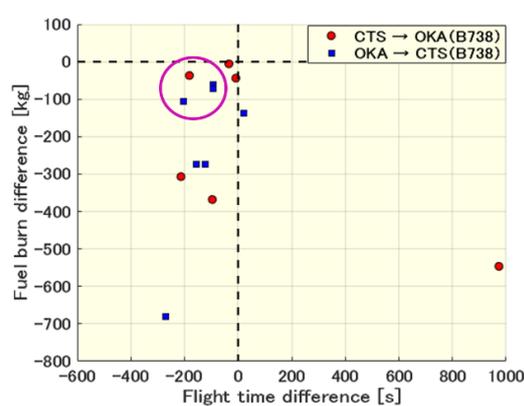


図 4-3. 飛行時間と燃料消費量  
(制限空域を考慮した場合)

表 4-7. 新千歳空港－那覇空港間の 4 ケースの便益

飛行ケース	制限空域なし		制限空域あり	
	飛行時間の差 [s]	燃料消費量の差 [kg]	飛行時間の差 [s]	燃料消費量の差 [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

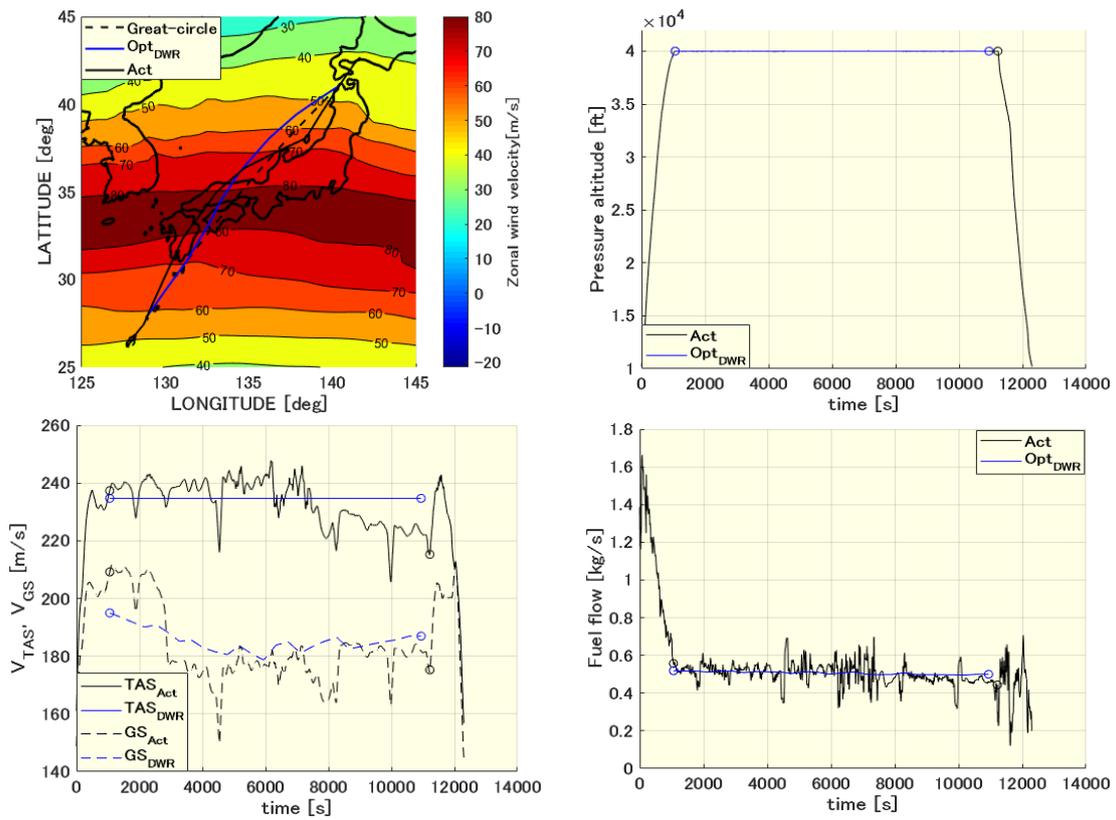


図 4-4. 実際の軌道と最適軌道 (飛行ケース(1), CTS to OKA, 制限空域なし, 2015/01/16)

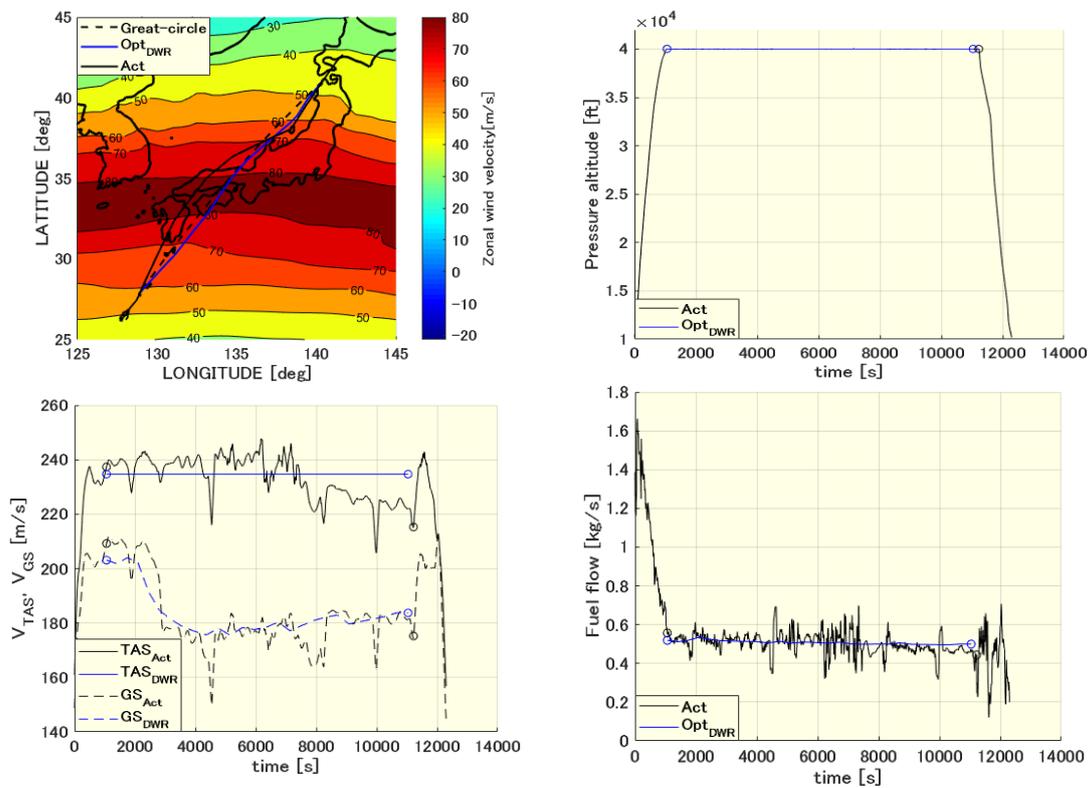


図 4-5. 実際の軌道と最適軌道 (飛行ケース(1), CTS to OKA, 制限空域あり, 2015/01/16)

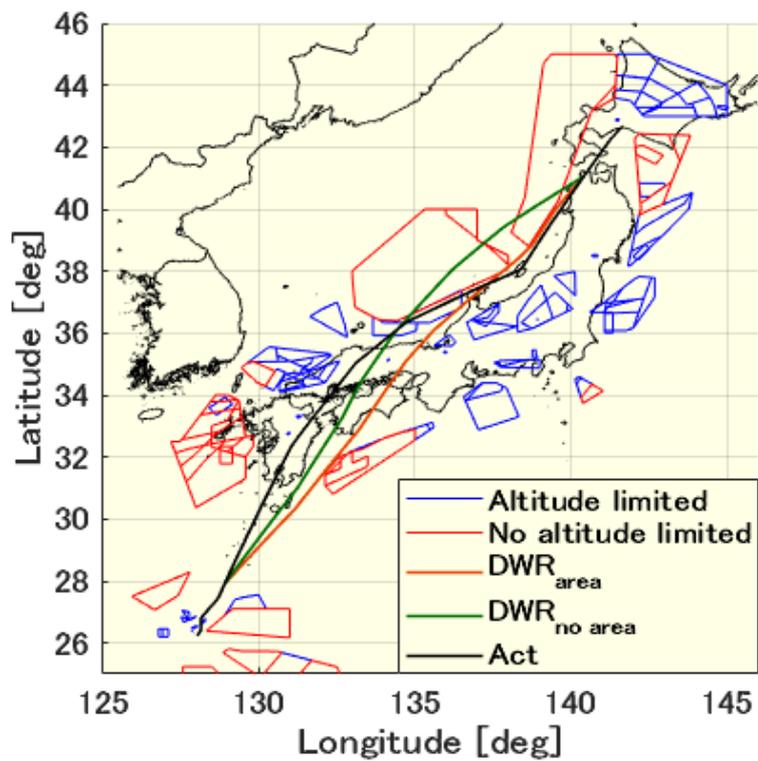


図 4-6. 新千歳空港から那覇空港への飛行経路 (2015/1/16)

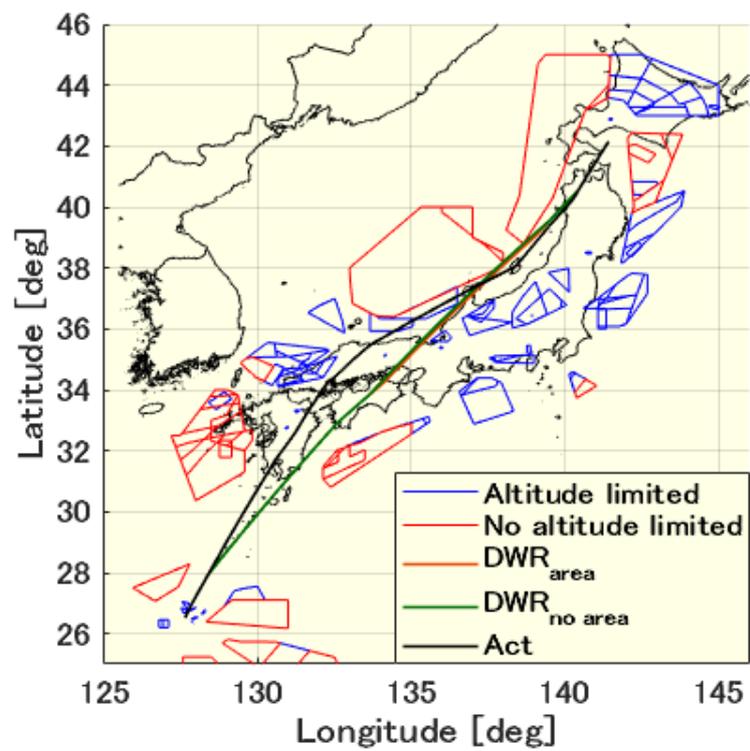


図 4-7. 那覇空港から新千歳空港への飛行経路 (2015/1/16)

#### 4.4.2 新千歳空港（CTS/RJCC）－福岡空港（FUK/RJFF）

ここでは、新千歳空港－福岡空港間の解析結果について述べ、表 4-8 には新千歳空港－福岡空港間の概要を示す。

表 4-8. 新千歳空港－福岡空港間の概要

空港区間	新千歳空港－福岡空港
解析期間	2015 年 1 月 13 日－16 日
解析対象機種	Boeing 737-800 Boeing 777-300
飛行数	全飛行数：32 ケース 高度一定飛行数：24 ケース

図 4-8、図 4-9 には新千歳空港－福岡空港間の 32 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。図 4-8 は制限空域を考慮せず、図 4-9 は制限空域を考慮したものである。図 4-10、図 4-11 には制限空域を考慮しない場合に飛行時間を最も短縮できる飛行ケースと最も燃料消費量を削減できる飛行ケースを示す。また、図 4-13 には制限空域を考慮した場合の最も飛行時間と燃料消費量を減らすことができる飛行ケースの軌道を示す。図 4-14、図 4-15 には新千歳空港から福岡空港への飛行と、福岡空港から新千歳空港への飛行の実際の飛行と制限空域を考慮しない DWR の飛行経路と制限空域を考慮した DWR の飛行経路をプロットしたものである。

これらの結果から、制限空域を考慮しないときに最も飛行時間を短縮できる飛行は、新千歳空港から福岡空港に向かう飛行であった。このとき機種は B737-800、飛行時間は約 361[s]、燃料消費量は 230[kg]の便益を得ることができる。また、燃料消費量で最も得られる便益が大きい飛行は、新千歳空港から福岡空港に向かう飛行であった。このとき、機種は B777-300、飛行時間では約 292[s]、燃料消費量は約 570[kg]の便益を得ることができる。制限空域を考慮する場合では、飛行時間と燃料消費量の両方で最も便益が得られる飛行があり、新千歳空港から福岡空港に向かう飛行であった。そのとき機種は B777-300 で飛行時間は約 78[s]、燃料消費量は約 167[kg]の便益が得られる。また、制限空域を考慮することにより得られる便益が減少することが分かる。図より制限空域を考慮しない場合は、飛行経路は東西風の影響が少ないところを飛行しているとともに、風の影響を受けにくいように機首方位を実際の飛行よりも南に向け東西風の影響を小さくし、DWR の対地速度が実際の飛行よりも速くなっていることが分かる。一方、制限空域を考慮した場合の飛行経路は DWR の飛行経路は実際の飛行経路とほぼ等しい経路となっており、制限空域の影響が大きいと言える。以下の表 4-9 に 3 つの飛行ケースをまとめる。飛行ケース（1）は、制限空域を考慮しない場合において、最も飛行時間を

短縮することができるケースである。飛行ケース（2）は、制限空域を考慮しない場合において、最も燃料消費量を削減できるケースである。飛行ケース（3）は、制限空域を考慮した場合において最も飛行時間と燃料消費量を減らすことができるケースである。

また、図 4-10～図 4-13 から制限空域を考慮しない場合と制限空域を考慮する場合の DWR は両者とも実際の飛行の飛行経路とほぼ同じ経路となった。このことから制限空域を考慮した場合、DWR が成立する可能性が低い路線であると言える。表 4-10 には新千歳空港－福岡空港間における DWR の成立性をまとめる。

表 4-9. 新千歳空港－福岡空港の飛行 3 ケースの便益

飛行ケース	制限空域なし		制限空域あり	
	飛行時間の差 [s]	燃料消費量の差 [kg]	飛行時間の差 [s]	燃料消費量の差 [kg]
(1) CTS to FUK	-360.7722	-230.3560	-73.2680	-68.4887
(2) CTS to FUK	-292.4642	-570.3739	-58.7667	-164.0695
(3) CTS to FUK	-277.2267	-524.9333	-78.2154	-167.1218

表 4-10. 新千歳空港－福岡空港の DWR の成立の可能性

路線（方向）	成立の可能性
新千歳空港 → 福岡空港	成立しない
福岡空港 → 新千歳空港	成立しない

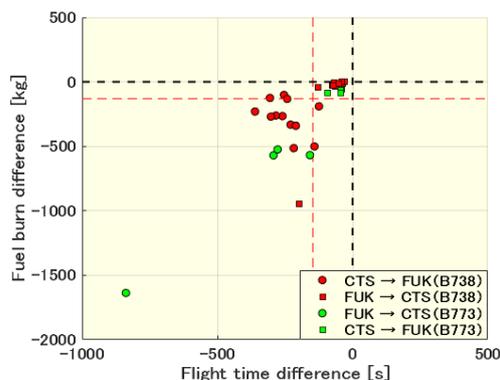


図 4-8. 飛行時間と燃料消費量  
(制限空域考慮しない場合)

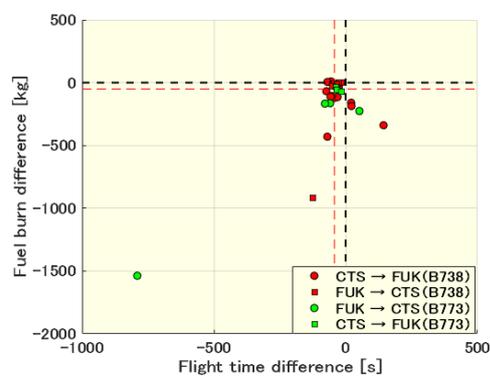


図 4-9. 飛行時間と燃料消費量  
(制限空域考慮する場合)

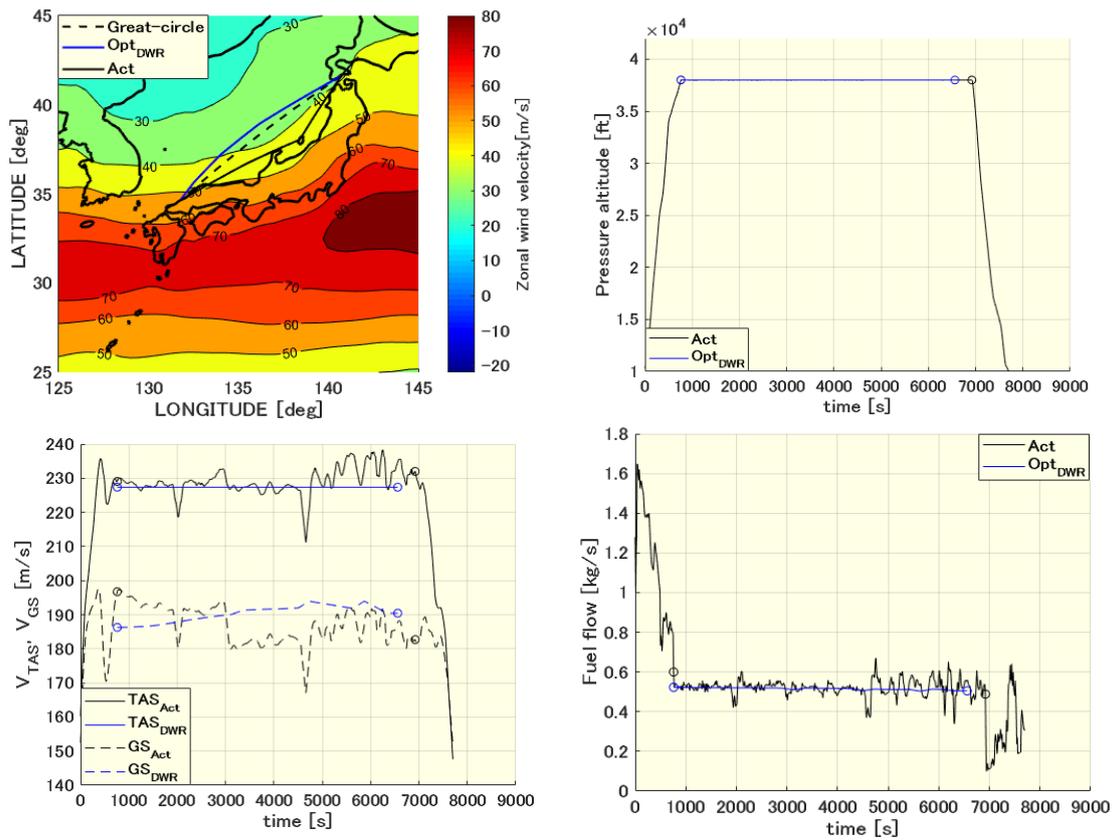


図 4-10. 最も飛行時間を短縮できるケース (CTS to FUK, 制限空域なし, B738, 2015/01/15)

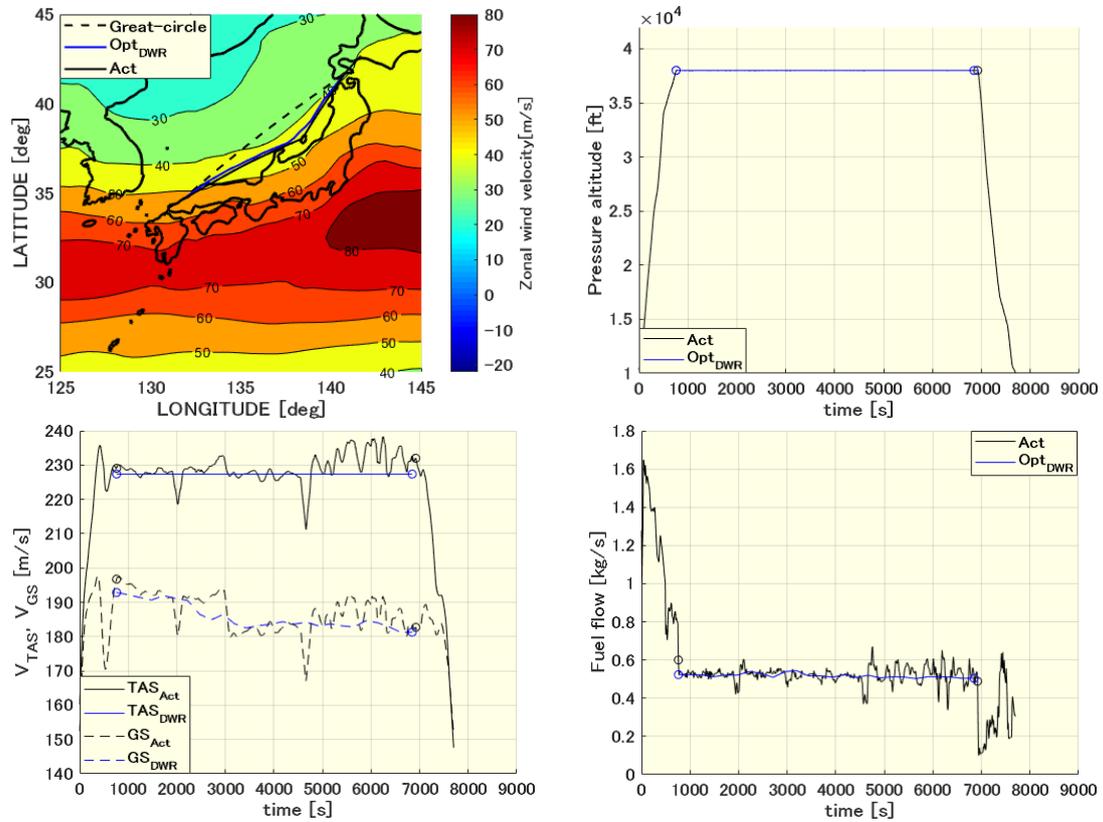


図 4-11. 最も飛行時間を短縮できるケース (CTS to FUK, 制限空域あり, B738, 2015/01/15)

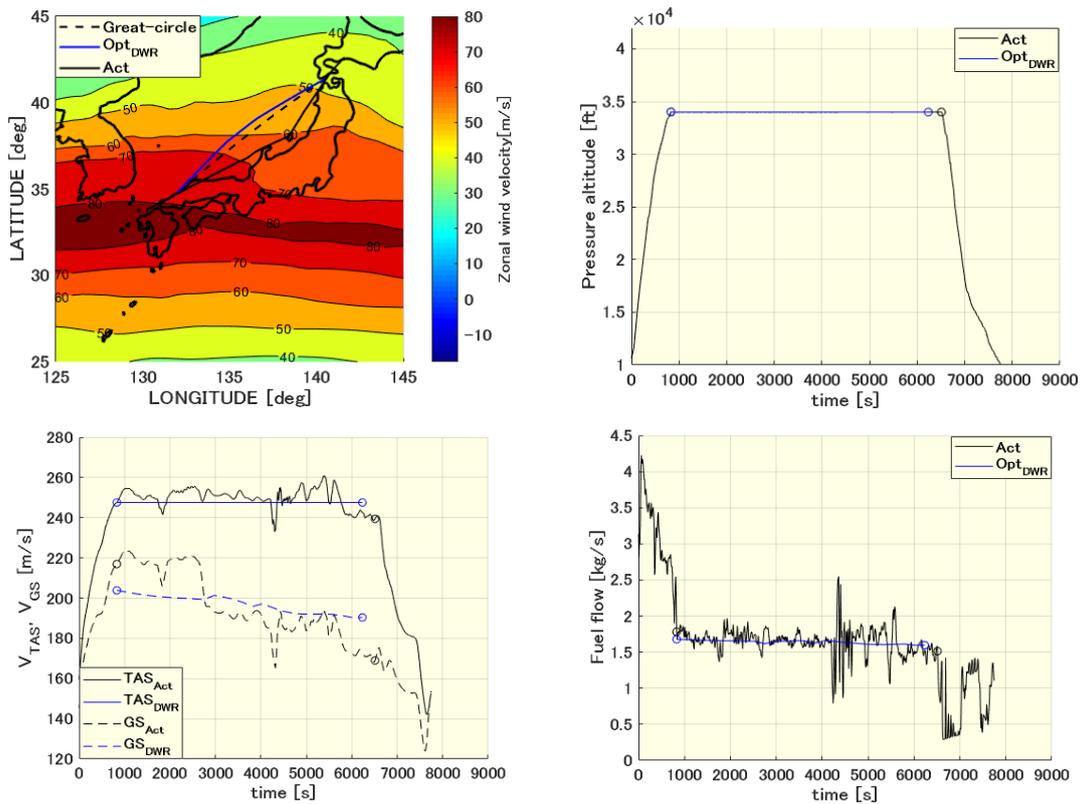


図 4-12. 最も燃料消費量を削減できるケース (CTS to FUK, 制限空域なし, B773, 2015/01/16)

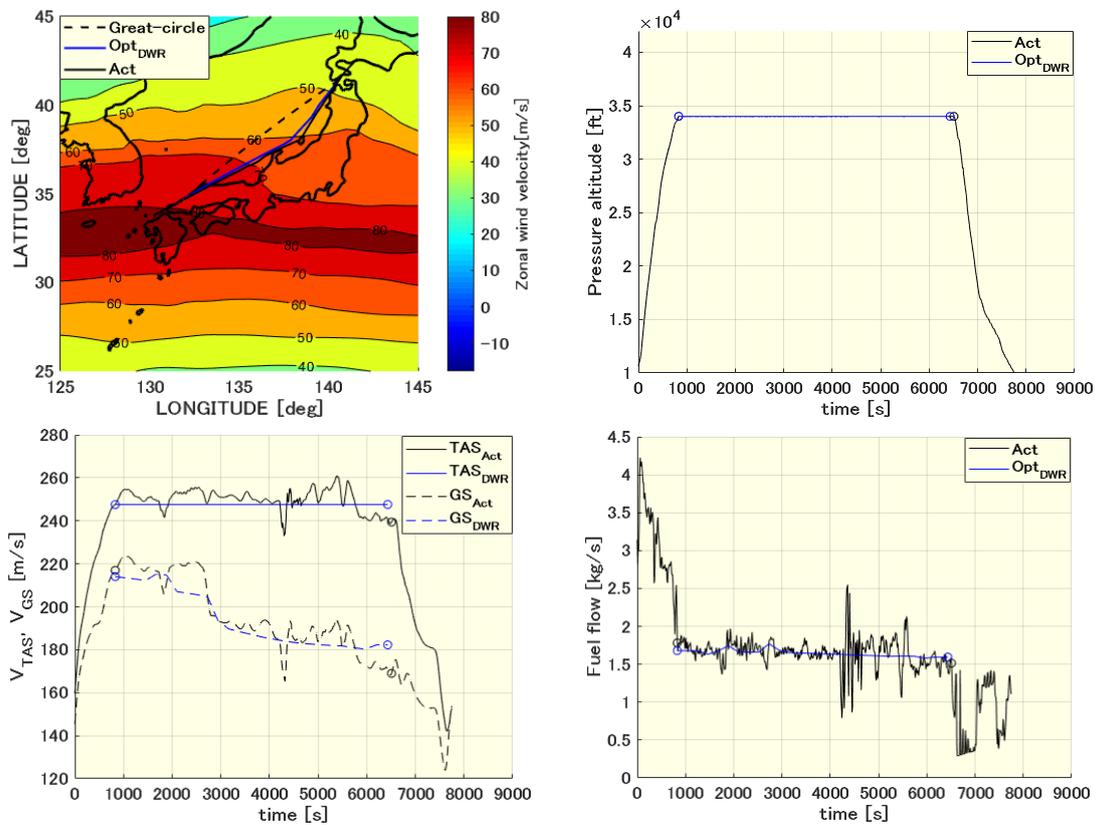


図 4-13. 最も燃料消費量を削減できるケース (CTS to FUK, 制限空域あり, B773, 2015/01/16)

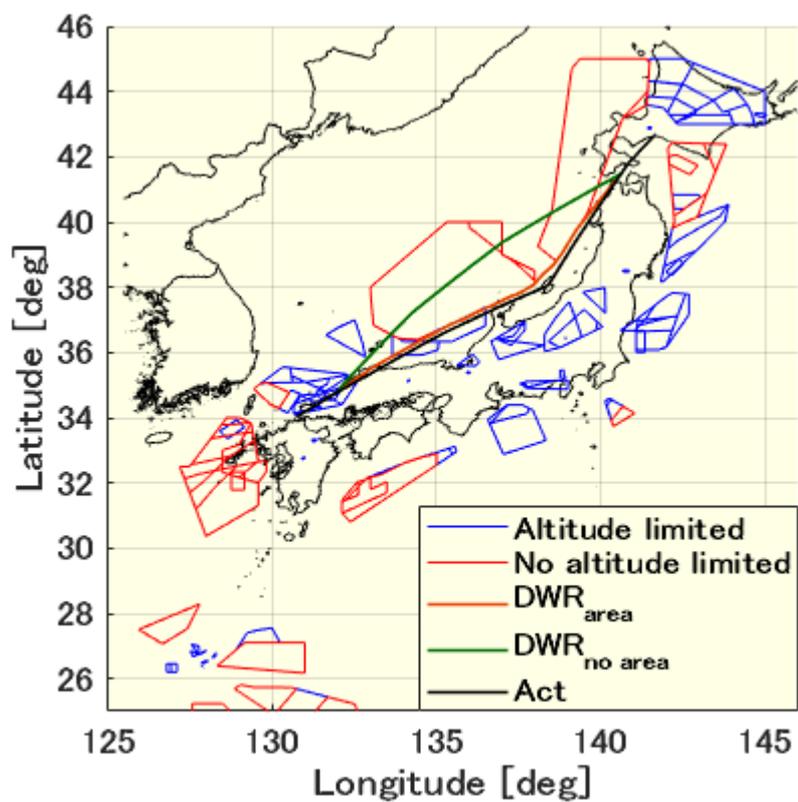


図 4-14. 新千歳空港から福岡空港への飛行経路 (2015/01/16)

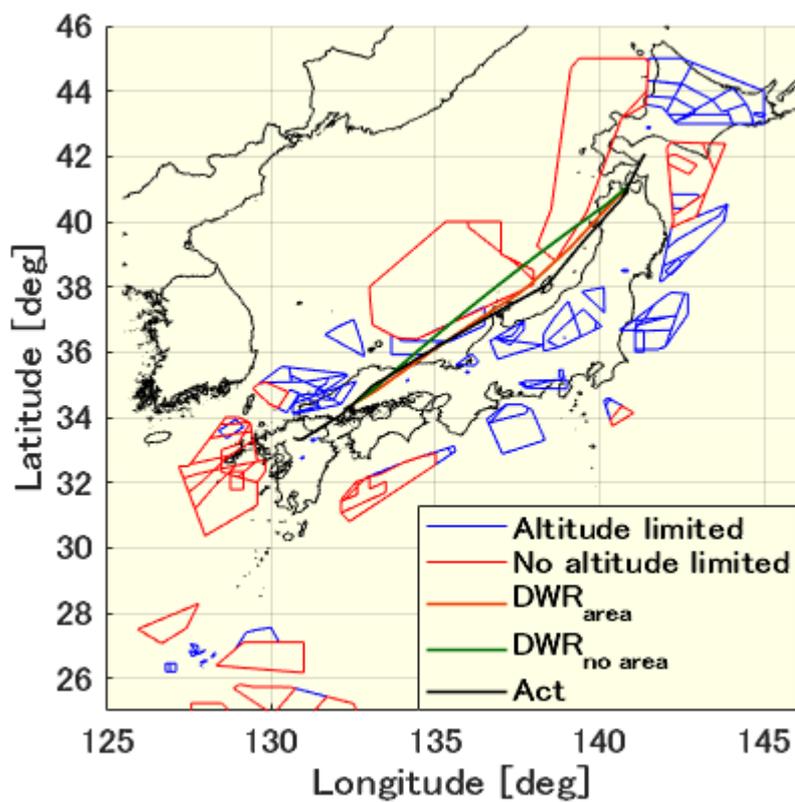


図 4-15. 福岡空港から新千歳空港への飛行経路 (2015/01/16)

### 4.4.3 東京国際空港（HND/RJTT）－那覇空港（OKA/RJOH）

ここでは、東京国際空港－那覇空港間の解析結果について述べ、表 4-11 には新千歳空港－福岡空港間の概要を示す。

表 4-11. 東京国際空港－那覇空港間の概要

空港区間	東京国際空港－那覇空港
解析期間	2015 年 1 月 15 日
解析対象機種	Boeing 737-800 Boeing 767 Boeing 777-200 Boeing 777-300 Boeing 787-8
飛行数	全飛行数：59 ケース 高度一定飛行数：13 ケース

図 4-16, 図 4-17 には東京国際空港－那覇空港間の高度一定で飛行している 13 ケースを、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。また、それぞれ制限空域を考慮しない場合と制限空域を考慮した場合である。また、図 4-18 には制限空域を考慮しない場合の便益（赤色、青色）から制限空域を考慮する場合の便益（マゼンタ、シアン）への便益の変化を示す。図 4-19, 図 4-20 に東京国際空港から那覇空港に向かう飛行の燃料消費量の便益が大きい飛行ケースの制限空域を考慮しない場合の DWR の軌道と制限空域を考慮した場合の DWR の軌道を示す。また、表には東京国際空港－那覇空港間の制限空域を考慮することによる DWR の成立性をまとめる。また、図 4-21, 図 4-22 には東京国際空港から那覇空港への飛行と、那覇空港から東京国際空港への飛行の実際の飛行と制限空域を考慮しない DWR の飛行経路と制限空域を考慮した DWR の飛行経路をプロットしたものである。

これらの結果より、制限空域の有無に関わらず燃料消費量の得られる便益が大きい東京国際空港から那覇空港に向かう飛行で、制限空域を考慮しない場合の便益は飛行時間が約 87[s]短縮でき、燃料消費量は約 311[kg]削減できることが分かった。また、制限空域を考慮した場合は、飛行時間は約 73[s]短縮でき、燃料消費量は約 301[kg]削減できることが分かった。また、図 4-18 より飛行全体を見ると制限空域を考慮したことによる便益の減少があることが分かるが、影響は少ないと言える。図 4-19 より制限空域を考慮しない DWR では、東西風の影響が大きい区間で実際の飛行よりも南に機首を向けて飛行し風の影響を減らしており、実際の飛行よりも対地速度が速くなっていることが分かる。図 4-20 の制限空域を考慮した DWR は高知県南側にある制限空域の北側を通っており東西風の影響を受けやすい西側に機首を向けて飛行しているが、東西風の影響が

強い区間では、東西風の影響を受けにくように機首を南側に向けて飛行している。このことで実際の飛行の対地速度と制限空域を考慮しないDWRの対地速度よりも速くなっている。

これらより、東京国際空港－那覇空港間では制限空域の有無に関わらずDWRが成立すると思われる。

表 4-12. 東京国際空港－那覇空港間の DWR の成立の可能性

路線 (方向)	成立の可能性
東京国際空港 → 那覇空港	成立する
那覇空港 → 東京国際空港	成立する

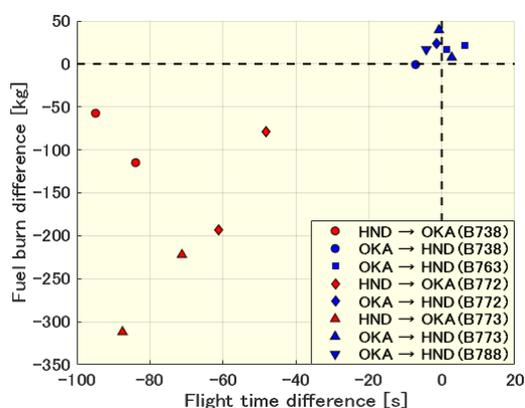


図 4-16. 飛行時間と燃料消費量  
(制限空域考慮しない場合)

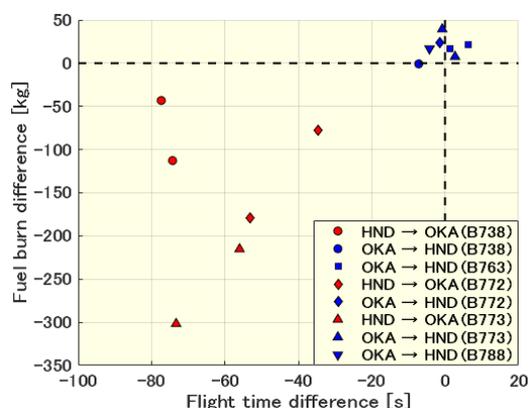


図 4-17. 飛行時間と燃料消費量  
(制限空域考慮した場合)

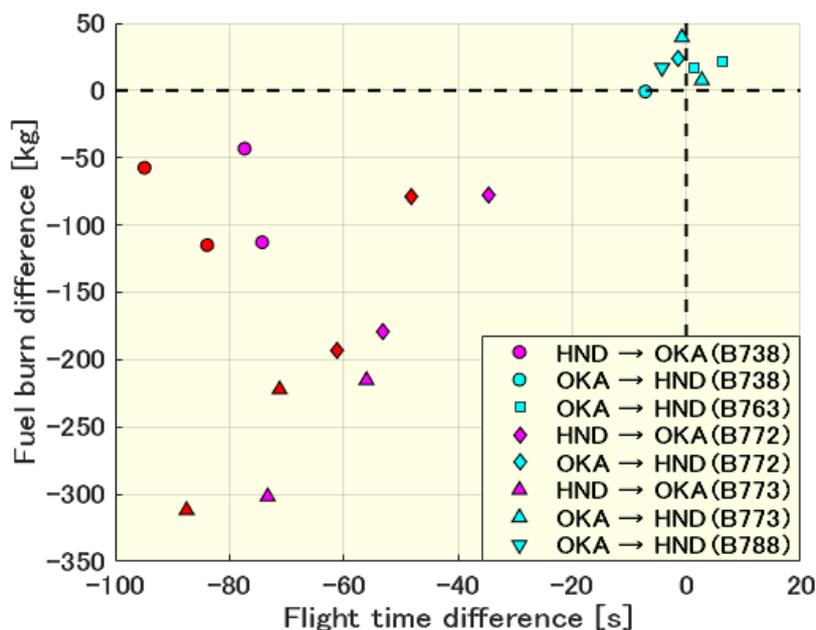


図 4-18. 制限空域を考慮した場合の便益の変化

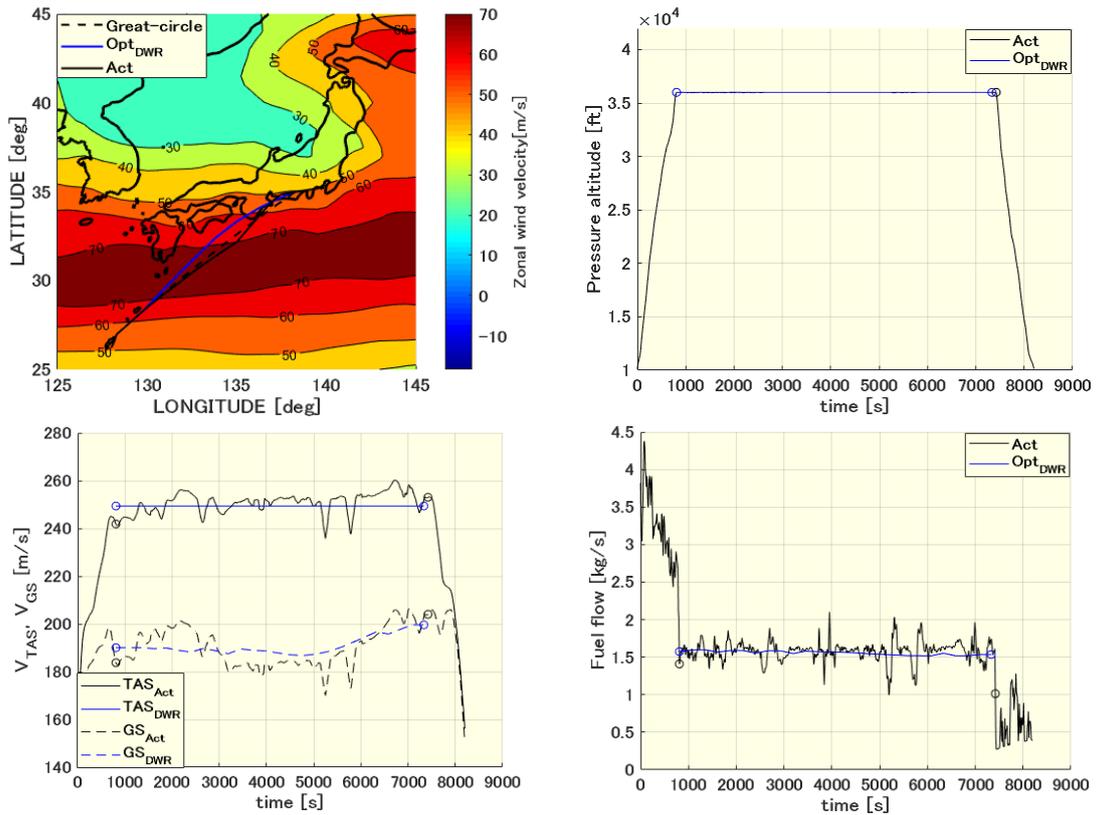


図 4-19. 最も燃料消費量を削減するケース (HND to OKA, 制限空域なし, 2015/01/15)

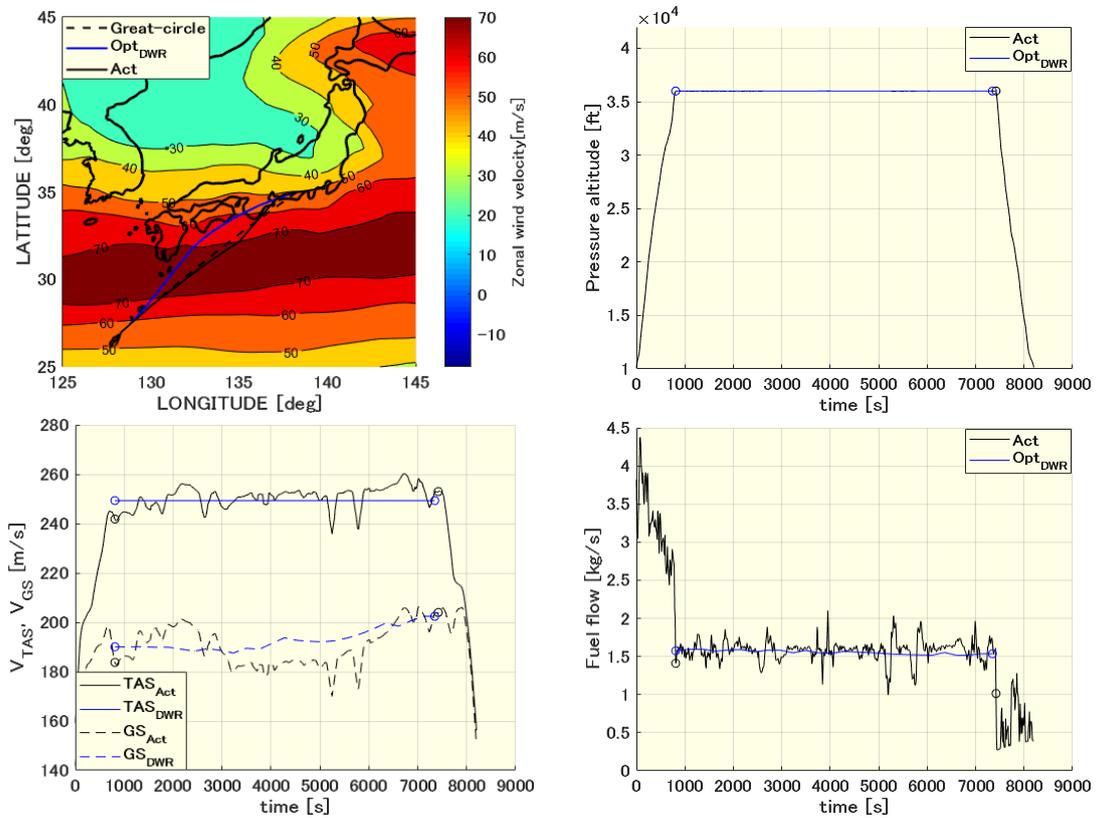


図 4-20. 最も燃料消費量を削減できるケース (HND to OKA, 制限空域あり, 2015/01/15)

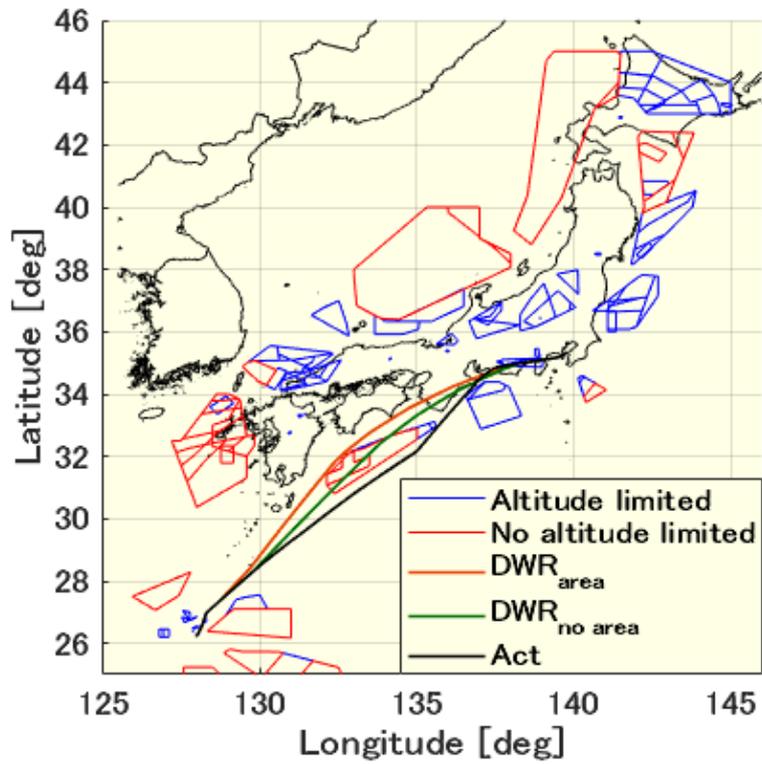


図 4-21. 東京国際空港から那覇空港への飛行経路 (2015/01/15)

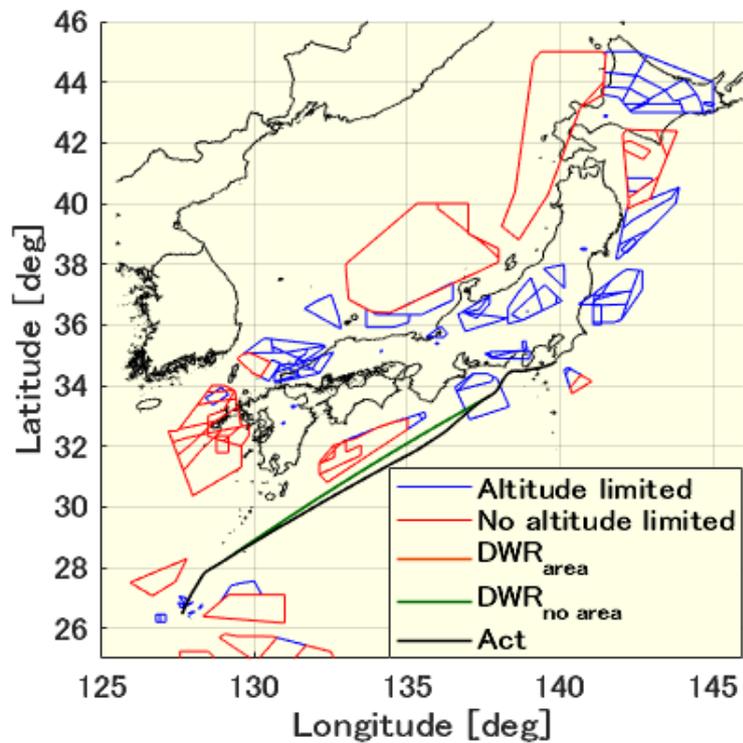


図 4-22. 那覇空港から東京国際空港への飛行経路 (2015/01/15)

# 5章

## 結論

### 5.1. まとめ

本論文では、国内の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、新千歳空港－福岡空港間、東京国際空港－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。以下に得られた知見をまとめる。

- 新千歳空港－那覇空港間と新千歳空港－福岡空港間において巡航区間に多くの制限空域が存在する飛行では、制限空域の影響により得られる便益が減少することが分かった。
- 制限空域による得られる便益の減少は追い風の時は小さく、向かい風の時は大きくなることが分かった。
- 東京国際空港－那覇空港間での飛行では、制限空域の有無に関わらず得られる便益の減少は小さくことが分かった。

また、本論文で得られた DWR が成立・不成立する路線を以下の表にまとめる。

表 5-1. DWR の成立性

路線（東西風の影響）	DWR の成立の可能性
新千歳空港 → 那覇空港（向かい風）	成立しない
那覇空港 → 新千歳空港（追い風）	成立する
新千歳空港－福岡空港	成立しない
東京国際空港－那覇空港	成立する

以上の結果は、長距離路線においても路線や追い風の場合には DWR が成立する可能性があると言える。

## 5.2. 今後の課題

今後の課題としては以下にまとめる。

- 本研究では高度一定としたため解析対象が限られてしまったが、高度変化を行う飛行も解析対象に入れる必要がある。
- 更に解析対象・解析期間を広げて解析を行う必要がある。

これらを行うことで統計的にも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。

## 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, 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～戦略的な航空交通システムへの変革～”, 国土交通省, 2010.
- [5] 国土交通省, “飛行情報区 (FIR) 及び管轄空域”, 2014年4月1日, URL: <http://www.mlit.go.jp/common/001148889.pdf>. (アクセス日:2018年1月25日).
- [6] 原田明德, 小塚智之, 宮沢与和, “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.
- [7] 原田明德, 小塚智之, 宮沢与和 (九州大学大学院), ナヴィンダ・ビクラマシンハ, マーク・ブラウン, 福田豊 (電子航法研究所), “国内定期旅客便の運航効率の客観分析に関する研究”, 第52回飛行機シンポジウム, 2014年10月.
- [8] 宮本侑斗, 原田明德, ナヴィンダ・キトマル・ビクラマシンハ, 宮本与和, 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.
- [9] 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”, URL: <https://aisjapan.mlit.go.jp/>. (アクセス日: 2018年1月29日).
- [10] EUROCONTROL, “EUROCONTROL,”URL: <https://www.eurocontrol.int/>. (アクセス日: 2018年2月3日).
- [11] EUROCONTROL, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.11” EEC Technical/Scientific Report, No.13/04/16-01.
- [12] 十時寛典, ビクラマシンハ・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 データからの飛行情報の推定”, 航空宇宙技術, Vol.11, pp.43-50, 2012.
- [13] 国土交通省航空局交通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”, 2014年7月.
- [14] 重富貞成, 松田治樹, 小塚智之, 宮沢与和, “CARATS Open Data の精度に関する一検討”, 航空宇宙技術, Vo.15, pp.15-21, 2016.

- [15] 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数値予報 GPV データとの比較評価”, 航空宇宙技術, Vol.12, pp.57-63, 2013.
- [16] 一般財団法人 気象業務支援センター, “全球数値予報モデル GPV (GSM 全球・日本域)”, URL: <http://www.jmbasc.or.jp/jp/online/file/f-online10100.html>. (アクセス日: 2018 年 1 月 29 日).
- [17] IATA, “IATA”, URL: <http://www.iata.org/Pages/default.aspx>. (アクセス日: 2018 年 2 月 9 日).

## 謝辞

本論文は、筆者が高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻修士課程知能機械システム工学コースに在学中の研究成果を、まとめたものである。本研究を進めるにあたり、直接のご指導を戴いた高知工科大学システム工学群講師・原田明徳先生には指導教官として、終始熱心なご指導を戴きました。ここに深謝の意を表します。高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻知能機械システム工学コース教授・岡宏一先生には、本研究へのご助言を戴くとともに研究室配属からご指導を戴きました。ここに深謝の意を表します。

研究を進めるにあたり、航跡データを提供して戴きました国土交通省関係者の皆様、気象データの提供をして戴きました京都大学生存圏研究所、航空機の性能モデルを提供して戴きました欧州航空航法安全機構の方々に感謝の意を表します。

研究室において、様々な場面において叱咤激励して戴きました機械・航空システム制御研究室の皆様には感謝いたします。研究の遂行のために日常の議論を通じて多くの知識や示唆を戴きました同研究室修士2年・和賀山智晃君と、同研究室学士4年・永栄賢也君には謝意を表します。

最後に、大学院まで進学させて頂き、大学から大学院の6年間もの間生活面等において、ご支援して頂いた家族に深く感謝いたします。