

2017（平成 29）年度 修士学位論文

混雑空域における
継続降下運航の実現に向けた飛行解析

Flight analyses for realization of
Continuous Descent Operation in the congested airspace

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

1205063 和賀山 智晃

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	関西3空港の運航の特徴	11
2.1.	関西3空港の開港背景と位置づけ	11
2.1.1.	関西国際空港	12
2.1.2.	大阪国際空港	13
2.1.3.	神戸空港	15
2.2.	関西3空港の運航の現状分析	16
2.2.1.	ADS-Bデータの概要	16
2.2.2.	ADS-Bデータ記録装置の概要	18
2.2.3.	関西3空港到着機の現状	19
2.2.4.	関西国際空港への到着機の水平飛行部分	22
2.2.5.	関西国際空港の到着機と出発機	23
2.2.6.	関西国際空港の標準到着チャート・標準出発チャート	24
2.3.	理想的な降下方式	27
2.3.1.	継続降下運航 (Continuous Descent Operation, CDO)	27
2.3.2.	テイラードアライバル (Tailored Arrival, TA)	28
3章	飛行軌道の最適化	29
3.1.	運動モデル	29
3.2.	空力モデル	31
3.3.	大気モデル	31
3.4.	航跡データ	33
3.5.	気象データ	37
3.6.	航空機性能モデル	38
3.6.1.	燃料消費モデル	38
3.7.	飛行状態推定	39
3.8.	動的計画法による軌道最適化	40
3.8.1.	評価関数	41
3.8.2.	Cost Index	41

3.8.3.	計算方法と解析条件	42
3.8.4.	解析対象.....	45
3.9.	解析結果.....	47
4 章	結論	57
4.1.	まとめ	57
4.2.	今後の課題	58
参考文献	59
謝辞	61

図目次

図 1.1.	2015 年の全世界航空路線地図	7
図 1.2.	協調的かつ段階的な軌道調整のイメージ ⁶⁾	9
図 2.1.	関西 3 空港の旅客数推移 ¹⁰⁾	11
図 2.2.	関西国際空港滑走路図	13
図 2.3.	大阪国際空港滑走路図	14
図 2.4.	神戸空港滑走路図	15
図 2.5.	ADS-B 装置の概略図 ¹³⁾	17
図 2.6.	Flightradar24 ¹⁴⁾ (2016.12.19)	18
図 2.7.	ADS-B データの受信アンテナ	18
図 2.8.	関西 3 空港への到着機の飛行経路	20
図 2.9.	関西国際空港到着機の時刻と高度	21
図 2.10.	大阪国際空港到着機の時刻と高度	21
図 2.11.	神戸空港到着機の時刻と高度	21
図 2.12.	関西国際空港到着機の高度 4000[ft]での飛行経路	22
図 2.13.	関西国際空港の到着機と出発機の飛行経路	23
図 2.14.	関西国際空港の到着機と出発機の LILAC-MAYAH 上での高度の分離	24
図 2.15.	関西国際空港の標準到着チャート ¹⁵⁾	25
図 2.16.	関西国際空港の標準出発チャート ¹⁵⁾	26
図 2.17.	航空機の降下イメージ	28
図 3.1.	航空機の力の釣り合い (非慣性座標系)	29
図 3.2.	地球固定の座標系の緯度経度	30
図 3.3.	日本におけるレーダ覆域 ²⁰⁾	34
図 3.4.	関西 3 空港における 1 日の到着機と出発機	36
図 3.5.	飛行状態推定の手順	40
図 3.6.	燃料消費と飛行時間のトレードオフ	42
図 3.7.	動的計画法による軌道最適化	45
図 3.8.	33 機の関西国際空港への飛行経路	46
図 3.9.	33 機の関西国際空港への到着機の飛行高度	46
図 3.10.	飛行時間の差と燃料消費量の差	48
図 3.11.	関西国際空港からの距離に対する高度と燃料流量	49
図 3.12.	国内線と国際線 1 ケースの飛行経路	50
図 3.13.	飛行状態の比較 (国内線)	52

図 3.14. 飛行状態の比較（国際線）	54
図 3.15. 航空機の垂直管制間隔.....	55
図 3.16. CDO 軌道の LILAC 通過時の高度	56

表目次

表 1.1. 将来の航空交通システムの目指す目標 ⁶⁾	8
表 2.1. 関西国際空港の基本情報	12
表 2.2. 大阪国際空港の基本情報	14
表 2.3. 神戸空港の基本情報	15
表 2.4. ADS-B により得られるデータ	17
表 2.5. 記録した ADS-B データ諸元	19
表 3.1. CARATS Open Data の概要	35
表 3.2. 使用した CARATS Open Data の概要	36
表 3.3. 全球数値予報モデル GPV (全球域) の概要	37
表 3.4. 各種解析条件	43
表 3.5. 33 機の関西国際空港への到着機の出発空港	47

1 章 序論

1.1. 研究背景

民間航空機の需要はここ数十年で急激に増加しており、民間航空機市場はこれから先も成長が予想されている（図 1.1）。ジェット旅客機の運航機数は、2016 年末では 21,597 機であるが、2036 年末には 38,866 機となり、今後 20 年において新規納入機数は 33,296 機である。地域的には欧州（22%）、中国（20%）、北米（18%）で世界の 60%を占めているが、アジア・太平洋地域の新規納入機数は 39%であり最も成長が著しい地域となっている¹⁾。我が国日本においても、2027 年までには 2005 年の約 1.5 倍²⁾の航空機需要に達する見込みとなっている。このような民間航空機のニーズへの対応が、近年の航空機ビジネスにおける課題として注目されている。

アジア・太平洋地域における民間航空機需要の成長の背景には、格安航空会社（Low Cost Carrier, LCC, 以下 LCC と記述する）の台頭による影響が大きい。近年多くの LCC 便が日本とアジア・太平洋地域間で就航しており、我が国日本における国際航空市場の成長を牽引している。2016 年冬季ダイヤ（2016 年 10 月 30 日～2017 年 3 月 25 日）において日本を発着する国際旅客便を分析した資料³⁾によると、週間便数について、LCC の 88%を韓国、台湾、中国及び香港との間の路線が就航している。日本の空港において、LCC が堅調となっているのは、成田国際空港、関西国際空港、福岡空港、新千歳空港等である。これらの空港は LCC 国際線の拠点として今後も発展していく見込みとなっている。三大都市圏において、関西国際空港は LCC の就航便数が最も多く、2016 年冬季ダイヤの週間便数では 17 社 369.5 便となっており、これは 2016 年冬季における関西国際空港の週間発着総旅客便数の 34%となっている。このように LCC を筆頭に世界的な民間航空機市場は拡大の一途を辿っている。

航空機の安全な運航は航空管制によってなされており、3 次元空間を 800km/h ほどの速さで飛行する航空機同士は、航空管制によって衝突しない間隔を保たれている。この空を飛行する航空機の数が増加するに連れて、航空機同士が空中で衝突する危険性や空中衝突を防止するために航空機をコントロールしている航空管制官の負担は増加することが予期されている。現在、全地球測位システム（Global Positioning System, GPS）や航法衛星の精度の向上や無線・通信技術の進歩によってより高精度の航空機の位置を知ることができるようになってきている。そのため衛星を使用した広域航法（Area Navigation, RNAV）の航法システムによる航空機同士の間隔生成方法が導入されるようになった。しかしながらこのような航空管制技術の発展や航空機自体の性能向上だけでは、今後見込まれている航空機需要に対し管制官のみでの対応は、航空機の運航の効率低下を引き起こし、そしてなにより

管制官への負担増大に繋がる。管制官の負担増大は航空機事故に直結する恐れがある。さらには、航空機の需要増加に向け社会インフラの整備が必要となる。人やモノがより多く効率的に移動するための環境づくりが課題となっている。特に、航空交通量の集中する首都圏をはじめとする混雑空域では早急かつ大胆な変革が望まれている。

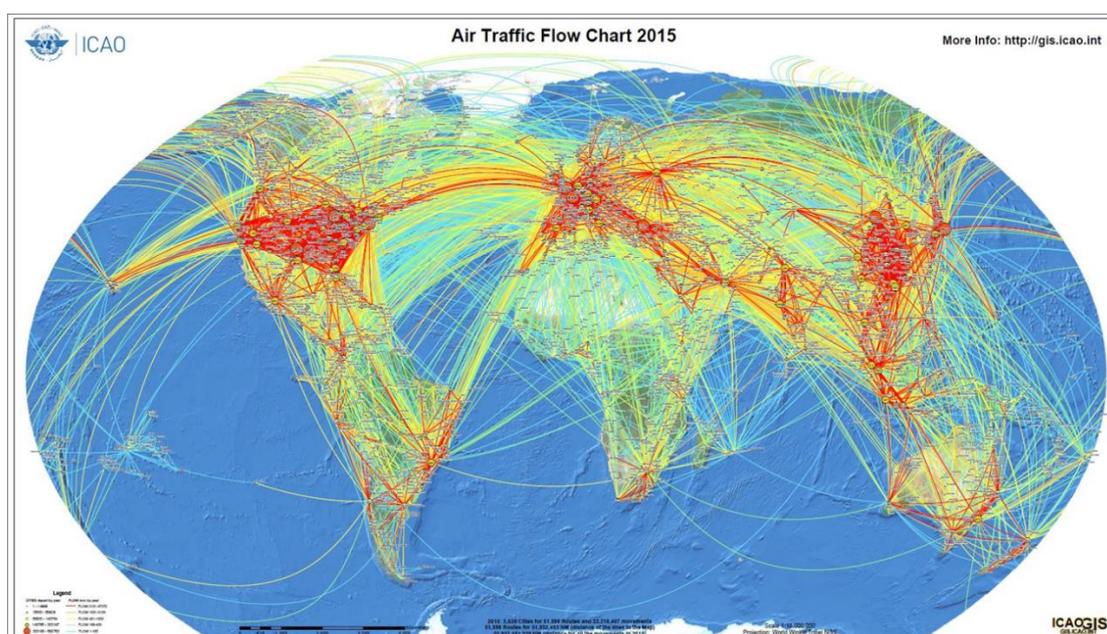


図 1.1. 2015 年の全世界航空路線地図
(出展：ICAO, <https://gis.icao.int>)

このような問題意識から、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世界的な航空交通管理（Air Traffic Management, ATM, 以下 ATM と記述する）に関する基本方針が取りまとめられ、欧州では SESAR（Single European Sky ATM Research）⁴⁾、米国では NextGen（Next Generation Air Transportation System）⁵⁾ と呼ばれる長期ビジョンを策定し様々な活動が行われている。欧米を追いかける形で我が国日本でも、現行の航空交通システムに替わる将来の航空機ニーズに対応可能な新たな航空交通システムを実現すべく、国土交通省航空局は「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン」として将来航空交通システムの変革に向けた協調的行動（Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems, CARATS, 以下 CARATS と記述する）を掲げ、航空交通システム改善へ向けた取組みが実施されている⁶⁾。CARATS において、2025 年を想定し表 1.1 に示すような具体的目標を設定している。これらの目標設定は日本の航空交通の特徴や社会情勢を踏まえた上で設定されている。

表 1.1. 将来の航空交通システムの目指す目標⁶⁾

項目	数値目標
安全性の向上	安全性を 5 倍に向上
航空交通量増大への対応	混雑空域における管制の処理容量を 2 倍に向上
利便性の向上	サービスレベル（定時性、就航率及び速達性）を 10%向上
運航の効率性の向上	1 フライト当たりの燃料消費量を 10%削減
航空保安業務の効率性の向上	航空保安業務の効率性を 10%以上向上
環境への配慮	1 フライト当たりの CO ₂ 排出量を 10%削減
航空分野における我が国の国際プレゼンスの向上	(国際会議の開催, 国際協力の案件等で評価)

現行の ATM 運用における最たる問題として空域ベースによる運用課題が存在する。現行の ATM 運用では、分割された空域及び予め定められた経路を飛行することを基準として航空管制が行われ、空域管理によって航空交通量をコントロールしてきた。しかし管制処理容量を超える航空交通量が想定される場合には航空機に対し出発待機や迂回ルートの飛行（ベクタリング）、上空待機（ホールディング）が指示される。そのような場合、航空機の運航効率は著しく低下する。この問題を解決する大胆な方法として、軌道ベース運用（Trajectory Based Operation, TBO）が提案されている。これは日本の飛行情報区（Flight Information Region, FIR）全体を一つの空域として捉え、全ての航空機の出発から到着までの全フェーズを時間管理するという、いわゆる 4 次元軌道による ATM 運用の導入が提唱されている。現在の空域ベースと将来要求されている軌道ベース運用の軌道のイメージを図 1.2 に示す。このように、航空交通システムには変革が求められている。

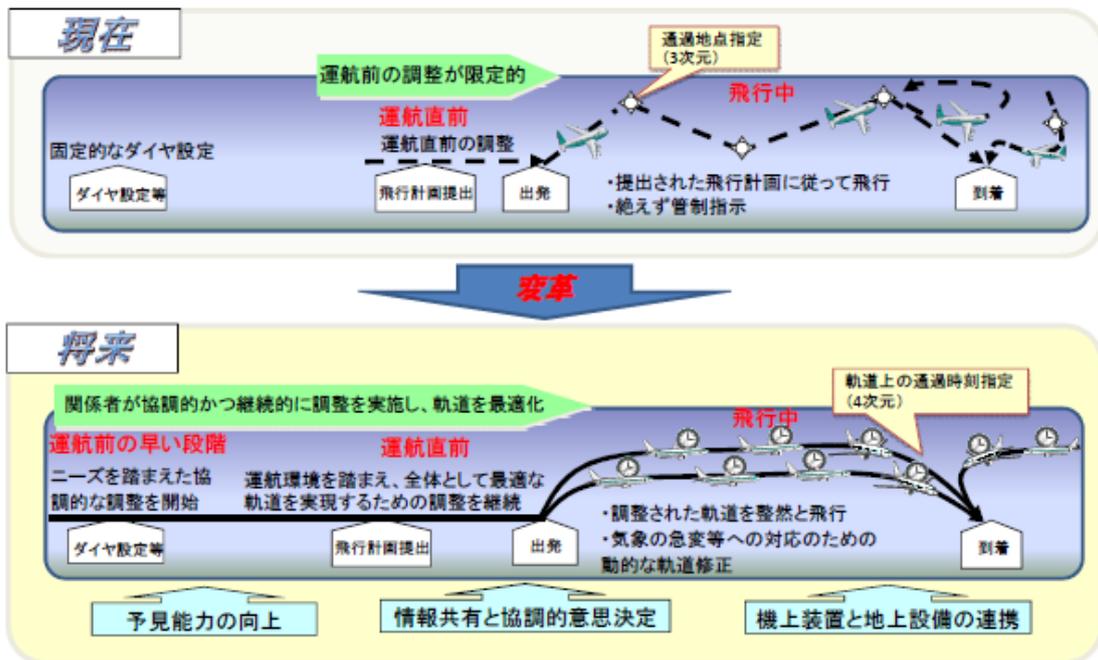


図 1.2. 協調的かつ段階的な軌道調整のイメージ⁶⁾

混雑空域では管制の処理能力の限度により現在効率の低下が生じつつある。混雑空港へは多くの到着機が集中しており、到着機の到着順番管理のために迂回飛行や上空待機が指示される。また多くの航空機が集中することによって、出発機と到着機や到着機同士等のコンフリクトの回避のための非効率な飛行をしたりするなどの問題が発生している。そこで混雑空域を飛行する到着機を効率的に運航させることができれば、1フライトごとにかかる燃料の削減が可能であり経済性の向上が期待されている。

1.2. 研究目的

本研究では混雑空域における到着機の運航効率の改善を目指し、実飛行データを用いることによって飛行解析を行う。本研究で対象とした混雑空域は大阪湾周辺の空域及びそこに隣接する関西3空港（関西国際空港、大阪国際空港、神戸空港）である。これら3空港の中でも関西国際空港は、国内で最も人気の高いLCCであるピーチ（Peach）の拠点として急成長しており、またLCC専用の第2ターミナルを所有していることから今後益々重要となる空港の一つとされている。そこで本研究では関西国際空港を中心に大阪湾周辺の空域及び関西3空港を離発着する航空機に対し運航効率の現状を分析し、航空機の燃料消費量を削減できる降下方法として提案されている運航方式の潜在便益とその運航方式導入の可能性を評価することを目的とする。

1.3. 論文構成

本論文の構成は、2章でまず大阪湾を中心とした関西3空港の運航の特徴・現状について述べる。ここではそれぞれの空港がどのような運航をしているのか、相互にどのような影響を及ぼしているのかをまとめる。

3章では飛行軌道の最適化について述べており、関西国際空港において、旅客機の航跡データより実際の飛行状態を推定し、飛行のモデルを設計しシミュレーションして継続降下運航を行った場合に得られる便益を求め評価する。

4章では本研究の結論であり、混雑空域における継続降下運航の実現の可能性についてまとめ、今後の課題と展望を述べる。

2章 関西3空港の運航の特徴

2.1. 関西3空港の開港背景と位置づけ

関西3空港とは、関西国際空港、大阪国際空港および神戸空港の日本の京阪神に位置する主要な3空港のことを指し、これらの空港は関西と日本全域並びに世界の航空交通を担う重要な拠点となっている。

大阪国際空港は1936年1月に開港し、関西地方における航空交通は大阪国際空港が一手に担っていた。しかし高度経済成長に伴う航空機の需要増加やジェット機の乗り入れによる騒音・振動、排気ガス等による公害問題が浮上し、周辺自治体から大阪国際空港の運用をめぐる訴訟が相次いだ。この訴訟における申請人は2万人を超え、マンモス事件となった⁷⁾。このような背景のもと大阪国際空港における負担や公害問題軽減のために1994年9月に開港した。その後2006年2月に国内線専用の地方空港として神戸空港が開港した。2012年には「新関西国際空港株式会社」が設立され、関西国際空港と大阪国際空港の経営統合が行われた。その後2016年にこれら両空港の運営は関西の有力な企業30社が出資する「関西エアポート株式会社」に空港運営権が譲渡された⁸⁾。

こうして関西3空港時代を迎え、関西国際空港は西日本を中心とする国際線の拠点空港および関西圏における国内線の基幹空港として、大阪国際空港は国内線の基幹空港であると共に環境と調和した都市型空港として、神戸空港は神戸及びその周辺地域の国内需要に対応した地方空港として位置づけられそれぞれ重要な役割を担っている⁹⁾。中でも図2.1からわかるように関西国際空港の旅客数推移は著しく今後日本の経済成長にとって重要な空港となっていくことがわかる。

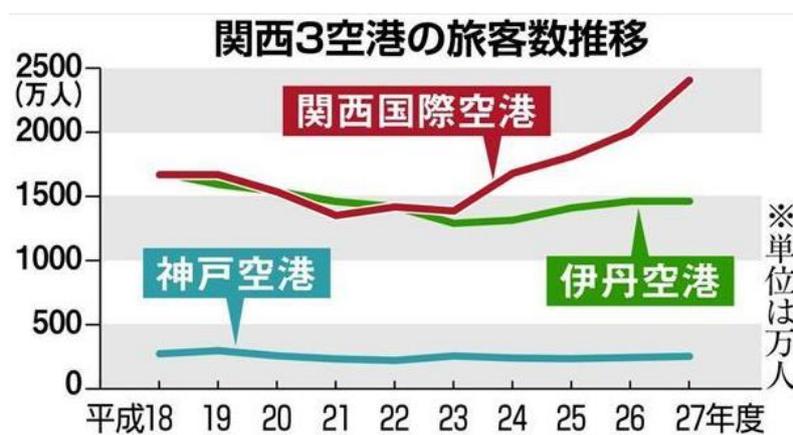


図 2.1. 関西3空港の旅客数推移¹⁰⁾

2.1.1. 関西国際空港

関西国際空港における基本情報について表 2.1 に、滑走路図について図 2.2 にそれぞれ示す。関西国際空港は大阪湾内泉州沖に作られた海上空港であり、全てが人工島からなる世界的にも珍しい空港である。日本を代表する拠点空港（ハブ空港）であり、西日本における世界との玄関口としての役割を担う空港である。そのため第 2 ターミナルビルは LCC の国際線専用となっている。

関西国際空港は 2 本のオープンパラレルの並列滑走路を 2 本持っており、その規模は西日本最大である。また、関西国際空港は関西 3 空港の中で唯一 24 時間運用されている空港であり、深夜でも貨物便等を中心としたフライトが行われている。さらに関西 3 空港の中で唯一 1 日の発着便数の運用制限が課せられていない空港であるという特徴もある。

表 2.1. 関西国際空港の基本情報

開港年月日	1994 年 9 月 4 日
運営者	関西エアポート株式会社
空港コード	KIX, RJBB
滑走路方向	06R/24L (A 滑走路) 06L/24R (B 滑走路)
滑走路幅 (長さ × 幅)	3500m × 60m (A 滑走路) 4000m × 60m (B 滑走路)
標高	5.30m (17.4ft)
管制業務の運用時間	24 時間
発着便数制限	運用制限等は課せられていない



図 2.2. 関西国際空港滑走路図

2.1.2. 大阪国際空港

大阪国際空港の基本情報について表 2.2 に、滑走路図について図 2.3 にそれぞれ示す。大阪国際空港は京阪神都市のほぼ中心に位置する空港である。また国内線専用の空港として運用されており国際線の旅客便および貨物便は就航していない。

大阪国際空港はクロス・パラレルの長短 2 本の滑走路を有しており、運用時間は 7 時から 21 時であり関西 3 空港の中で最も運用時間が短い 14 時間となっている。また 1 日の発着便数制限は、370 便であり、そのうち 200 便がジェット機枠、170 便がプロペラ機枠となっている⁹⁾。この運用時間と発着便数は 2.1 節で述べたような騒音等の公害問題に配慮したものであり、高騒音機材の就航も禁止されている⁹⁾。

表 2.2. 大阪国際空港の基本情報

開港年月日	1939年1月17日（前身である大阪第二飛行場）
運営者	関西エアポート株式会社
空港コード	ITM, RJOO
滑走路方向	14L/32R（A滑走路） 14R/32L（B滑走路）
滑走路幅 （長さ × 幅）	1828m × 45m（A滑走路） 3000m × 60m（B滑走路）
標高	12m（39ft）
管制業務の運用時間	7:00 ~ 21:00
発着便数制限	1日370便



図 2.3. 大阪国際空港滑走路図

2.1.3. 神戸空港

神戸空港の基本情報について表 2.3 に、滑走路図について図 2.4 にそれぞれ示す。神戸空港は兵庫県神戸市中央区に位置する地方管理空港であり、本空港は海上空港である。定期便は国内線のみであるが、チャーター便やビジネスジェットの乗り入れも行われている。

神戸空港は1本の滑走路を持っており、管制の運用時間は7時から22時である。また発着便数の制限は国土交通省により1日30往復までと規制されているが、需要の増加より運用制限の見直し・規制緩和が検討されている¹¹⁾。

表 2.3. 神戸空港の基本情報

開港年月日	2006年2月16日
運営者	神戸市
空港コード	UKB, RJBE
滑走路方向	09/27
滑走路幅 (長さ × 幅)	2500m × 60m
標高	5m (15ft)
管制業務の運用時間	7:00 ~ 22:00
発着便数制限	1日60便



図 2.4. 神戸空港滑走路図

2.2. 関西 3 空港の運航の現状分析

本節では関西 3 空港における運航の現状を分析することを行う。関西 3 空港に到着する航空機の経路の詳細を得るために ADS-B データを用いて記録・分析する。まず ADS-B データや記録装置の概要について述べ、その後 ADS-B データにより明らかとなった関西 3 空港の到着機の現状について述べる。

2.2.1. ADS-B データの概要

ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) とは、航空機が GPS から得た高精度の位置情報データを放送型データリンクによって送信するシステムである。ADS-B により得られるデータの概要について表 2.4 に示す。また ADS-B 装置の概略図を図 2.5 に示す。

ADS-B は地上局や他の航空機も受信が可能であり、一次レーダ (Primary Surveillance Radar, PSR) 装置や二次レーダ (Secondary Surveillance Radar, SSR) 装置の届かない範囲の洋上においても航空機の現在の位置情報を知ることができる。そのためあらゆる空域におけるシームレスな監視が可能になると期待されているシステムである。しかし、ADS-B 装置の搭載率の低さが課題としてあり、装置を搭載していない航空機からは情報を得られないという問題がある。2016 年の ADS-B OUT (自機から ADS-B 情報を送信する装置) 搭載率は、関東上空で 70%、仙台空港で 22% であり、ADS-B IN (周辺機から ADS-B 情報を受信する機能) 対応率は DELTA 航空の数機となっている¹²⁾。

ADS-B の使用例として Flightradar24 というウェブサイトならびにアプリケーションがあり、飛行中の民間航空機の位置情報等をリアルタイムで地図上に表示することが可能となっている。この仕組みは世界各地に設置された ADS-B 受信機によって受信した電波を Flightradar24 のサーバに転送し地図上に表示するといったものである。Flightradar24 を用い、2016 年 12 月 19 日における航空機の位置情報を表示したものを図 2.6 に示す。また Flightradar24 のウェブサイトよりこれらの ADS-B データをダウンロードすることも可能となっている。

ADS-B データの特筆すべき特徴は、GPS により位置情報データを得ているため位置精度が高いことと、時刻の最小分解能が小さい (約 0.5 秒) ことである。そのため、今後航空機に運用効率向上に大いに役に立つと期待されている。

表 2.4. ADS-B により得られるデータ

1.	航空機カテゴリ情報
2.	機体識別番号
3.	時刻
4.	緯度
5.	経度
6.	気圧高度
7.	対気速度
8.	機種方位

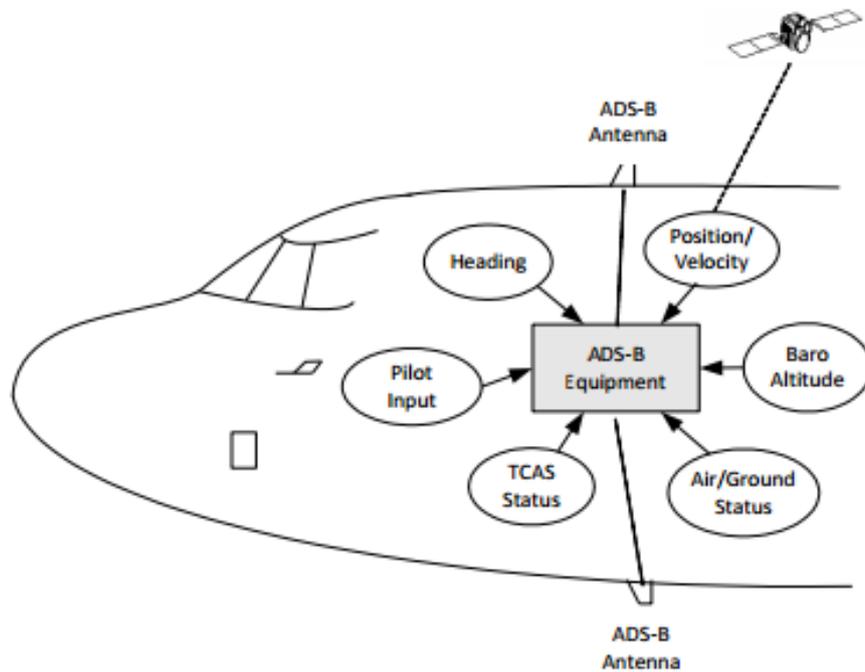


図 2.5. ADS-B 装置の概略図¹³⁾



図 2.6. Flightradar24¹⁴⁾ (2016.12.19)

2.2.2. ADS-B データ記録装置の概要

本研究において使用する ADS-B データの受信アンテナを図 2.7 に示す。図 2.7 からわかるように、受信アンテナは非常に小型であり持ち運びが容易である。これは携帯用の地上デジタル TV 受信 USB スティックであり、本アンテナを PC に接続し記録ソフトを使用することによって ADS-B データを記録する。ADS-B データの記録ソフトは、電子航法研究所 (Electronic Navigation Research Institute, ENRI) が開発したものを使用した。



図 2.7. ADS-B データの受信アンテナ

2.2.3. 関西 3 空港到着機の現状

関西 3 空港へ到着する航空機から送信されている ADS-B データを 2.2.2 項にて説明した装置を用いて記録する。また記録したデータ諸元について表 2.5 にまとめる。記録日は 2016 年 6 月 22 日、記録場所は兵庫県の淡路島の北側に位置する公園である「兵庫県立あわじ花さじき」の駐車場である。

表 2.5. 記録した ADS-B データ諸元

記録日	2016 年 6 月 22 日
記録場所	兵庫県立あわじ花さじき 駐車場
記録時間	14:35~16:40 (125 分間)
記録データ	機体識別番号, 機種, 時刻, 緯度, 経度 気圧高度, 対気速度, 機首方位
データ周期	約 1 秒
記録機体数	414 機

淡路島にて記録した関西 3 空港への到着機の飛行経路を図 2.8 に示す。飛行経路はデータ記録開始点を始点とし、最終進入点 (Final Approach Fix, FAF) を終点としている。この時間帯において ADS-B 装置を搭載しており関西 3 空港への到着機は、関西国際空港で 19 機、大阪国際空港 7 機、神戸空港で 6 機であった。ここで ADS-B データのデータ数が少なかった便は 3 空港への到着機であっても数から除外している。図 2.8 より、関西国際空港への到着機は全て淡路島上空で集められ、大阪湾内を迂回飛行し関西国際空港に着陸している。東の方向から関西国際空港へ到着している便も必ず淡路島上空を經由し大阪湾に向かっていくことがわかる。大阪湾を 1 周する軌跡を描いている便があるが、これは何らかの理由でホールディングを行い、着陸をやり直したものと考えられる。大阪国際空港への到着機は北、東、南西の 3 方向から飛行してきた便が合流し、南東方向から滑走路に向かっていくことがわかる。また神戸空港への到着機は、全て明石海峡大橋の上空を飛行し滑走路に向かっていくことがわかる。

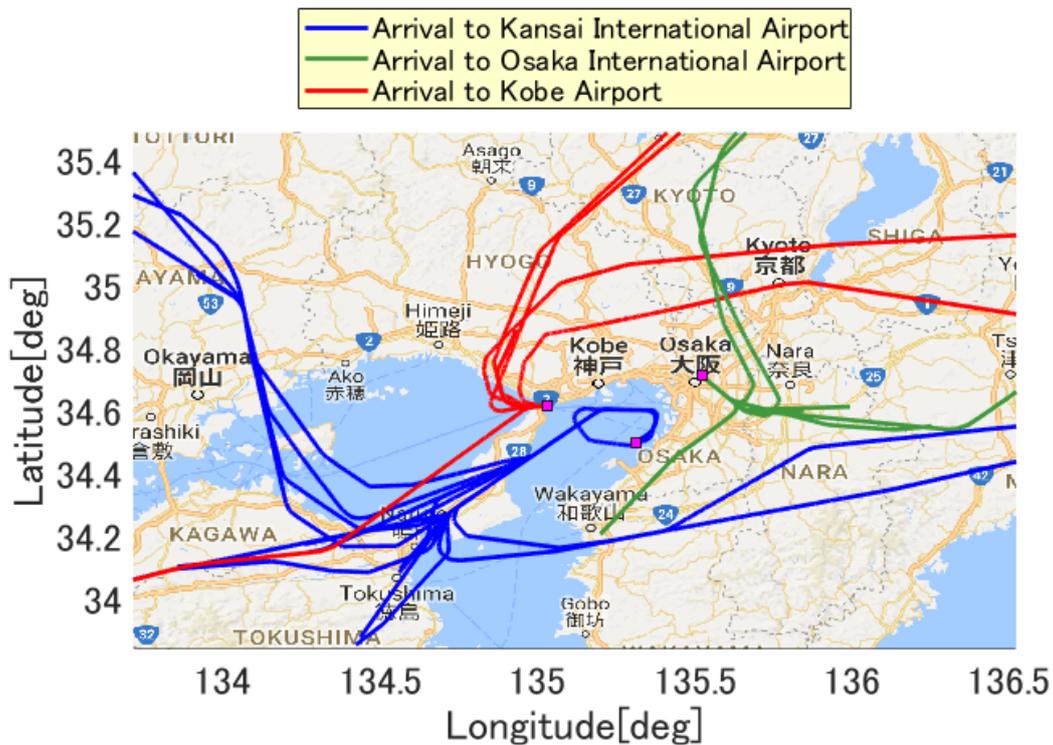


図 2.8. 関西 3 空港への到着機の飛行経路

3 空港それぞれの到着機の飛行時刻と高度を表した図を図 2.9, 図 2.10, 図 2.11 にそれぞれ示す. 図 2.9 より関西国際空港への到着機は降下の途中に様々な高度において水平飛行を行っている. そして高度 4000[ft]においてはほとんどの到着機が水平飛行を行っていることが読み取れる. この低高度における到着機の水平飛行は使用燃料の増大といった運航効率の低下を生じるものと考えられる. 図 2.10 より, 大阪国際空港への到着機はほとんど水平飛行をすることなく降下している. 図 2.11 より, 神戸空港への到着機も水平飛行をすることなく降下していることがわかる. 図 2.11 において 1 機のみ低高度で長い距離水平飛行を行っている機体があるが, これはプライベート機であったのでこれは運航効率の現状分析対象から除外する. このように, 関西 3 空港においてこの運用方式に限ってはあはるが, 関西国際空港への到着機にのみ降下途中に水平飛行を行っている部分があることがわかった. この時の関西国際空港の滑走路の運用方式は RWY24L/24R である. この水平飛行部分について詳しく見ていく.

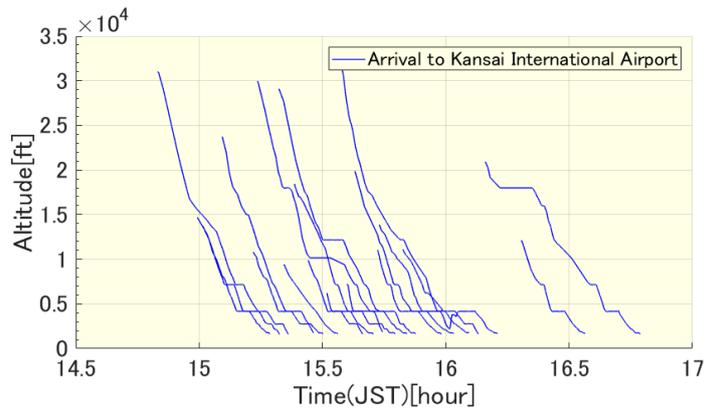


図 2.9. 関西国際空港到着機の時刻と高度

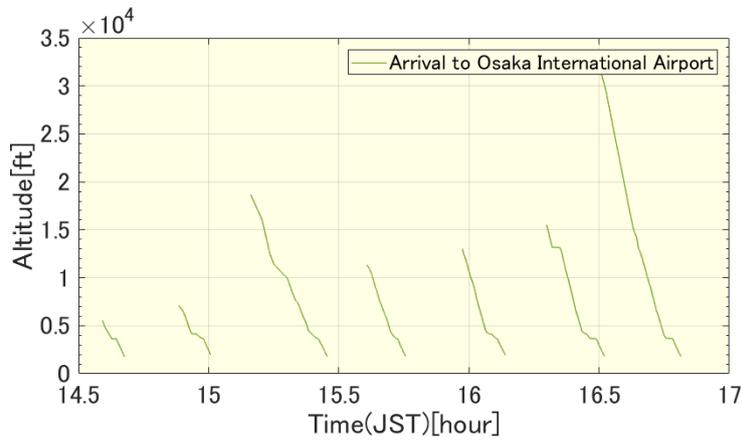


図 2.10. 大阪国際空港到着機の時刻と高度

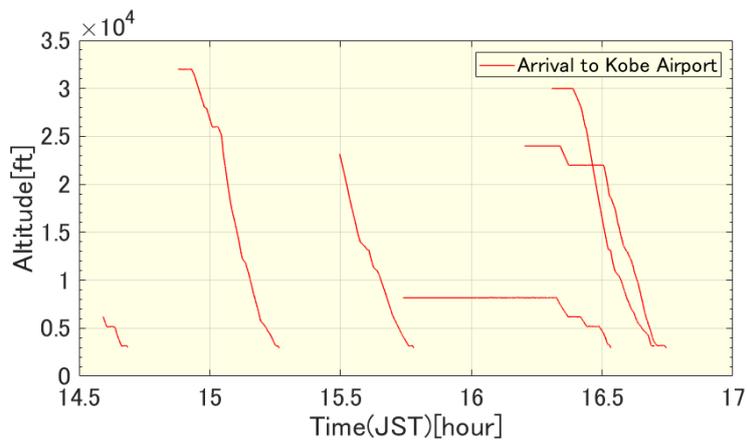


図 2.11. 神戸空港到着機の時刻と高度

2.2.4. 関西国際空港への到着機の水平飛行部分

図 2.9 において高度 4000[ft]で水平飛行していた部分のみ抽出しその飛行経路を地図に表示したものを図 2.12 に示す。図内に示した 4 つの点はウェイポイントである。ウェイポイントとは、航空機のナビゲーションにおける航路上の特定の位置を示すものであり、様々な固有名が付けられている。図 2.12 には関西国際空港への到着機が通過する空港周辺のウェイポイント 4 つを地図上にプロットしている。空港に近い方から BLOND, MAYAH, LILAC, AWAJI である。この内、BLOND は最終進入点 (Final Approach Fix, FAF), MAYAH は初期進入点 (Initial Approach Fix, IAF) と呼ばれる点であり航空機が滑走路に侵入する上で非常に重要な経路位置である。図 2.12 より、関西国際空港への到着機が高度 4000[ft]での水平飛行ウェイポイントの LILAC-MAYAH の区間において行われていることがわかった。



図 2.12. 関西国際空港到着機の高度 4000[ft]での飛行経路

2.2.5. 関西国際空港の到着機と出発機

次に、関西国際空港への到着機と関西国際空港からの出発機を記録した ADS-B データから抽出し、地図上に表示したものを図 2.13 に示し、図 2.13 の視点から LILAC-MAYAH を結んだ直線に対し直交した面を表し、関西国際空港の到着機と出発機の LILAC-MAYAH 間での高度の分離を表したものを図 2.14 に示す。図 2.13 より関西国際空港への到着機が高度 4000[ft] で水平飛行している LILAC-MAYAH 間の部分で、到着機と出発機は二次元平面上で交わっていることがわかる。このことから、到着機の高度 4000[ft] での水平飛行は到着機とのコンフリクトの回避のための間隔確保によるものであると考えられる。また、図 2.14 より LILAC-MAYAH 間を飛行する到着機と出発機の高度がわかる。到着機は高度 4000[ft] で飛行しているのに対し、出発機はその上空をおよそ高度 12000[ft] で通過していることが読み取れる。つまり 8000[ft] 程度の高度の分離があることがわかる。次項にて詳しく説明するが、この LILAC-MAYAH 付近での出発機の最低要求高度は 8000[ft] であったので、現在の運用では最低分離高度の 2 倍の高度を取っていることがわかった。これは安全性と効率性のトレードオフにおいて安全側に取り過ぎていると思われる。

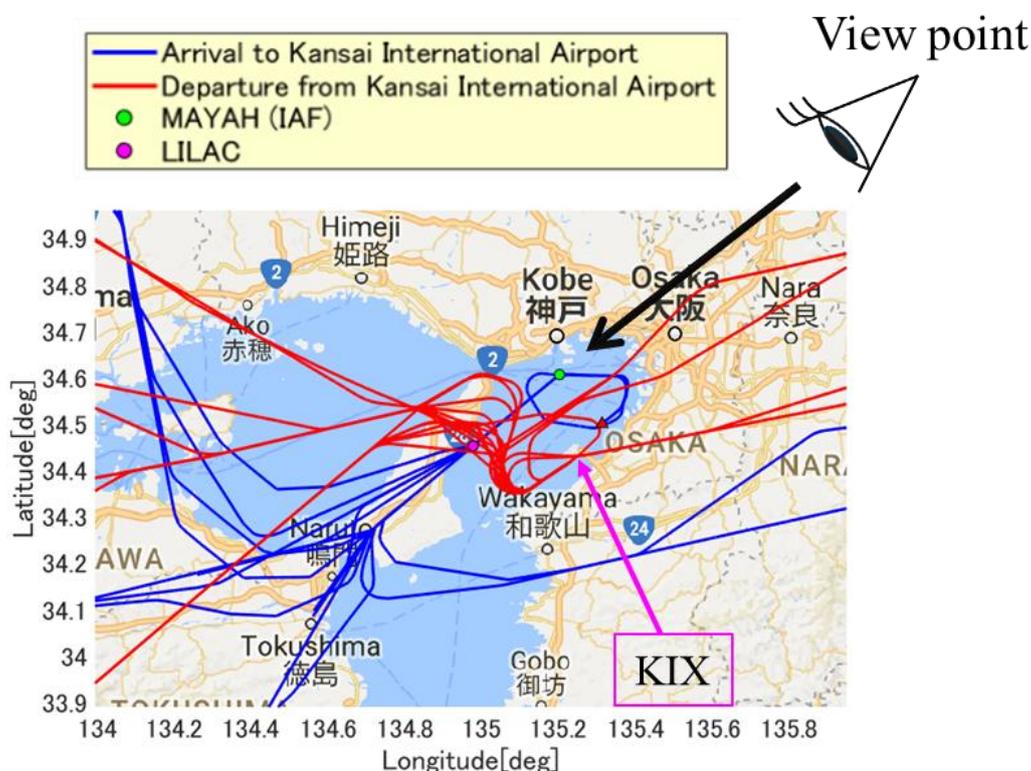


図 2.13. 関西国際空港の到着機と出発機の飛行経路

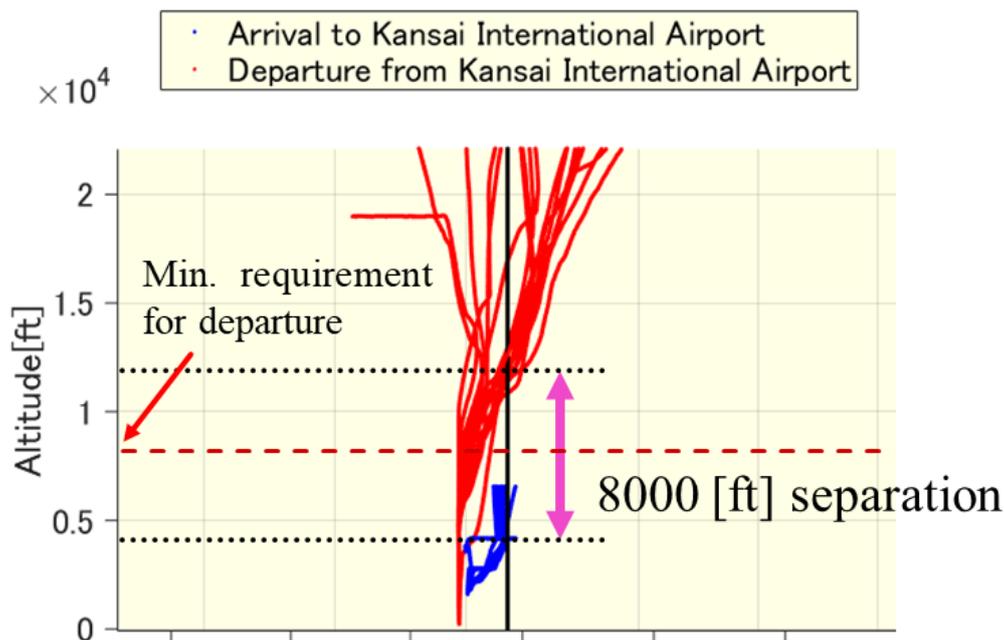


図 2.14. 関西国際空港の到着機と出発機の LILAC-MAYAH 上での高度の分離

2.2.6. 関西国際空港の標準到着チャート・標準出発チャート

いくつかある関西国際空港の標準到着チャートの内の 1 つを図 2.15 に、標準到着チャートの内の 1 つを図 2.16 にそれぞれ示す。このチャートは、国土交通省が管理している AIS JAPAN というホームページより誰でもダウンロードが可能なデータである。図 2.15 によれば、関西国際空港への到着機はウェイポイントの MAYAH の位置において高度 4000[ft]以上で通過しなければならないと記されている。しかし現状ではウェイポイントの LILAC の位置の時点ですでに高度 4000[ft]となっている。つまり航空機の運航の規則上、MAYAH の位置までは降下し続けても良いということがわかる。また、標準出発チャートである図 2.16 によれば、関西国際空港からの到着機はウェイポイントの JULIA の位置で高度 8000[ft]以上に達さなければならないとされている。JULIA の位置は LILAC の少し北側に位置しているため、LILAC 付近では 8000[ft]近い高度となれば良いと思われるが、しかし現状では LILAC-MAYAH 間の上空を通過時に、すでに高度 12000[ft]に到達している。よって、現在の関西国際空港への到着機は出発機とのコンフリクト回避のために早い段階で高度 4000[ft]まで降り、水平飛行をしていることがわかった。しかし、低高度での水平飛行は消費燃料の増大に繋がるため、このような運航は避けたい。そのため将来の航空交通システムでは、降下時に一切の水平飛行を行わない運航方式が理想とされている。

STANDARD ARRIVAL CHART - INSTRUMENT

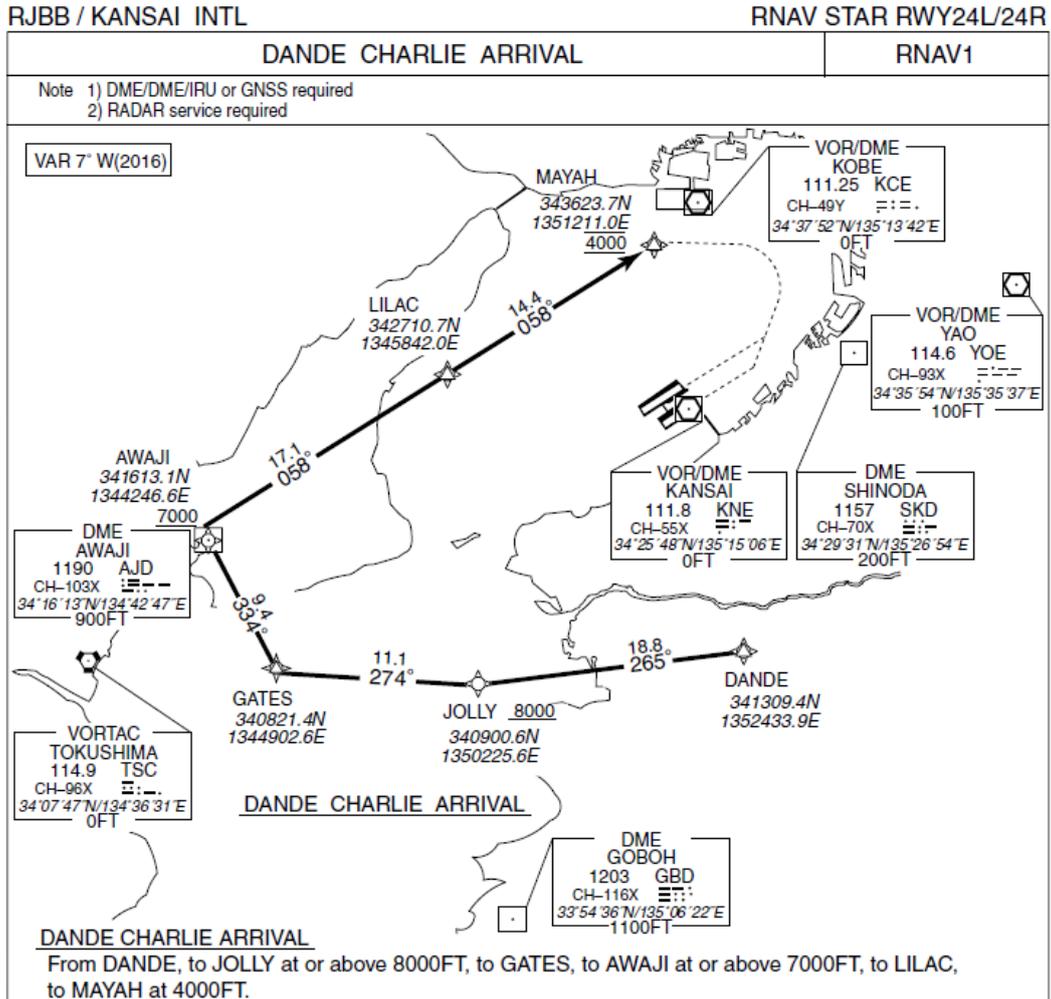


図 2.15. 関西国際空港の標準到着チャート¹⁵⁾
(DANDE CHARLIE ARRIVAL)

STANDARD DEPARTURE CHART - INSTRUMENT

RJBB / KANSAI INTL

RNAV SID

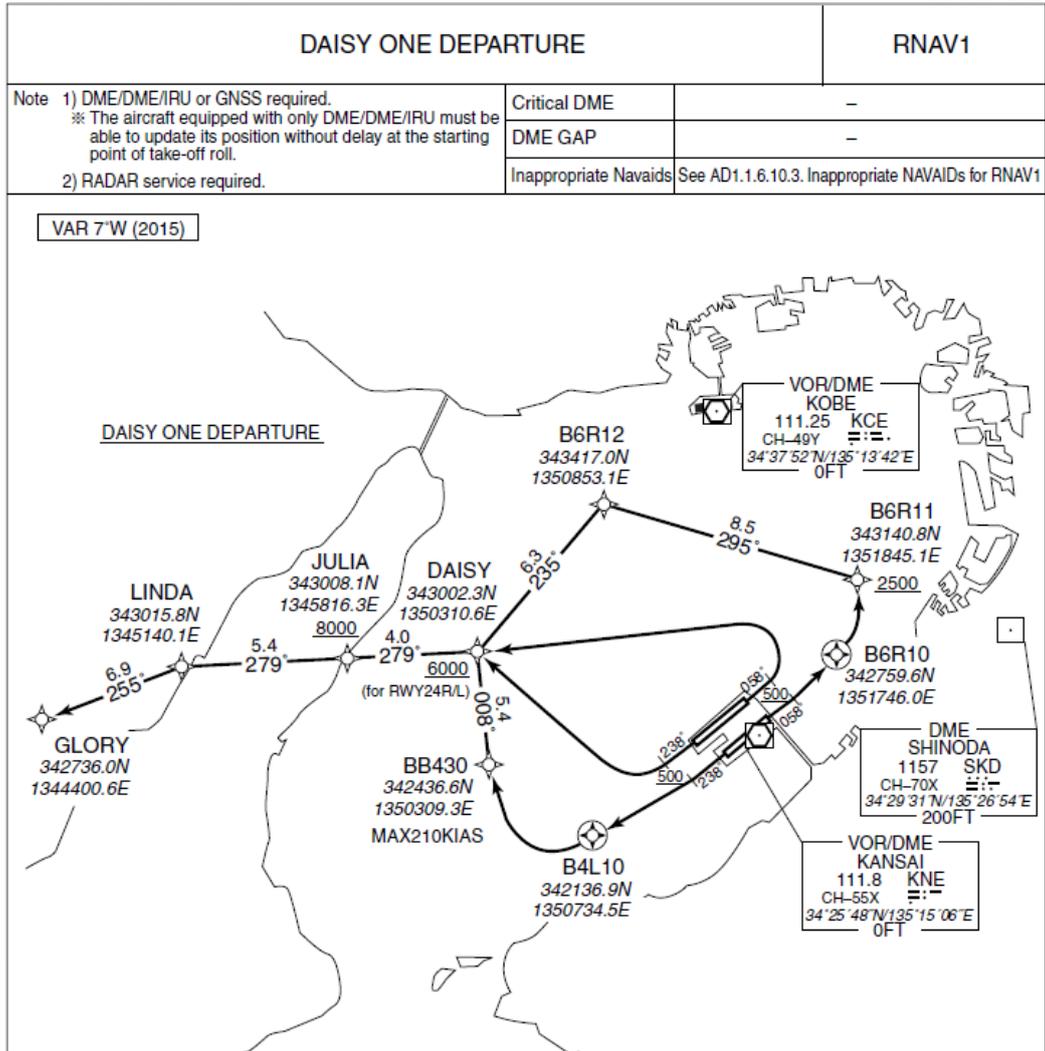


図 2.16. 関西国際空港の標準出発チャート¹⁵⁾
(DAISY ONE DEPARTURE)

2.3. 理想的な降下方式

本節では将来の航空交通システムにおいて必要とされる燃料消費量の少ない理想的な降下方式について述べる。航空機の飛行は大きく分けると、上昇フェーズ、巡航フェーズ、降下フェーズの3つのフェーズに分けられる。その中でも降下フェーズは、降下開始高度こそ違っても長距離・短距離の飛行において大差のない飛行距離となるとされており、降下フェーズにおける運航効率の非効率箇所を改善することは航空機の1フライトごとの便益を大幅に増加させられると期待されている。

2.3.1. 継続降下運航 (Continuous Descent Operation, CDO)

継続降下運航 (Continuous Descent Operation, CDO) とは、適切な空域と手順の設計と適切な管制承認によって支援された航空機の操縦時術であり、航空機の運転能力に最適化された飛行プロファイルを、最小エンジン推力設定を維持したまま継続的に降下する運航方式である。そのため降下時の航空機の燃料の燃焼量や排出量を減らすことが可能となっている。また最適な垂直プロファイルは連続的に降下する経路を取り、着陸に向けて減速する最低限レベルでの飛行セグメントでのみでしか水平飛行を行わない運航方式となっている¹⁶⁾。航空機の現在の降下とCDOによる降下のイメージ図を図2.17に示す。このように現在の運航では、降下の途中にステップ上に水平飛行を行いながら飛行しているが、CDOによる降下では連続的な降下経路を水平飛行することなく滑走路に向けて飛行する。

最適な垂直経路角は、航空機の種類、そのときの重量、風、気温、大気圧、氷結条件その他動的条件等によって異なる。CDOはコンピュータ生成の垂直飛行経路のサポートの有無にかかわらず、固定された横方向の経路の有無にかかわらず飛行することができる。しかし、最適な降下地点に達するまで航空機を高高度に保つことで、個々の飛行の最大の便益を得ることができる。これは機体に搭載されたFMS (Flight Management System) によって容易に決定することが可能である¹⁶⁾。つまり航空機をより高高度で長距離巡航させCDOで継続的に一気に降下させるという運航方式が最大便益を生むとされていると言える。

CARATSとしても、将来の航空交通システムにおける運航の効率性の向上のため、到着機にCDOを導入していこうとする流れがある。そのような経緯から、関西国際空港で平成21年5月から夜間にのみCDOを許可する試験的な運用が開始された。そして試験運用期間を経て、平成25年3月7日から関西国際空港でCDOが正式運用となった。現在関西国際空港においてCDOが許可されているのは23時から7時の間のみである。また、関西国際空港に続いて平成25年9月19日には那覇空港において、平成27年10月15日には鹿児島空港においてCDOの試験運用が開始された。しかしCDOが許可されているにもかかわらず、関西国際空港では日に0~6機程度、平均すると1.5機/日程しか実施されていな

いという実績となっている¹⁷⁾。

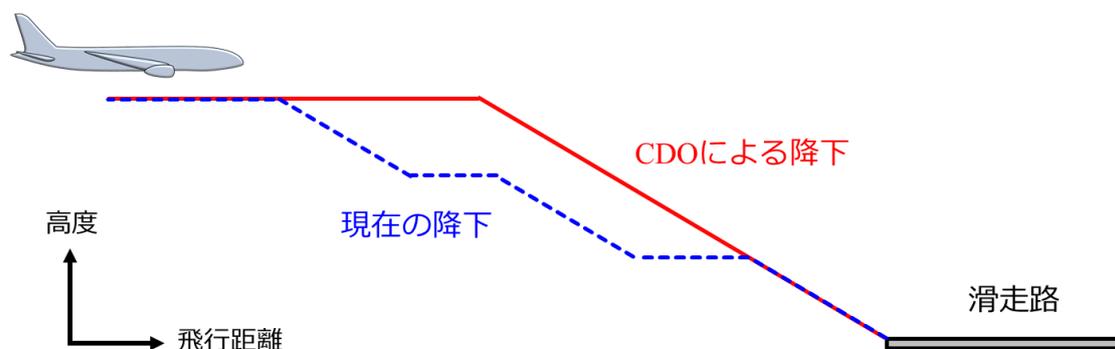


図 2.17. 航空機の降下イメージ

2.3.2. テイラードアライバル (Tailored Arrival, TA)

テイラードアライバル (Tailored Arrival, TA) とは、航空機が空港へ進入する際に巡航高度からエンジンスラストを下げたまま連続的に降下し着陸する運航方式のことであり、これは継続降下運航 CDO の一種として分類される。NextGen により米国のいくつかの州において試験的に運用がされており、現在まだ開発中であり、将来導入が期待されている。

3章 飛行軌道の最適化

航空機の運航における飛行効率の向上において、飛行軌道の最適化というのは非常に重要な技術である。航空交通管理における研究において、軌道最適化には様々な手法があるが、航空機の軌道最適化には動的計画法（Dynamic Programming, DP）と呼ばれる手法を応用した技術が提案されており、運航効率の評価に用いられている¹⁸⁾。そこで本章では使用した運動モデル等の各種モデルについて説明し、現状の飛行と最適な飛行における燃料消費量と飛行時間の比較によって評価する。現在の飛行の評価値は航跡データ、気象データ、機体性能モデルを用いることによって飛行状態推定により算出する。最適な飛行の評価値は動的計画法により算出する。これらの算出方法及びアルゴリズムについて述べる。

3.1. 運動モデル

航空機の運動は以下の支配方程式に従うものとする。ここで扱う運動方程式は、非慣性座標系（風と共に移動する動座標系）における質点近似の運動方程式である。ただし経路角の変化は小さいものと仮定した準定常飛行状態とする。また、ここでは縦の垂直面内における運動を扱い、横・方向の運動は考慮しないものとする。ここでの添字 a は対気成分を表す。

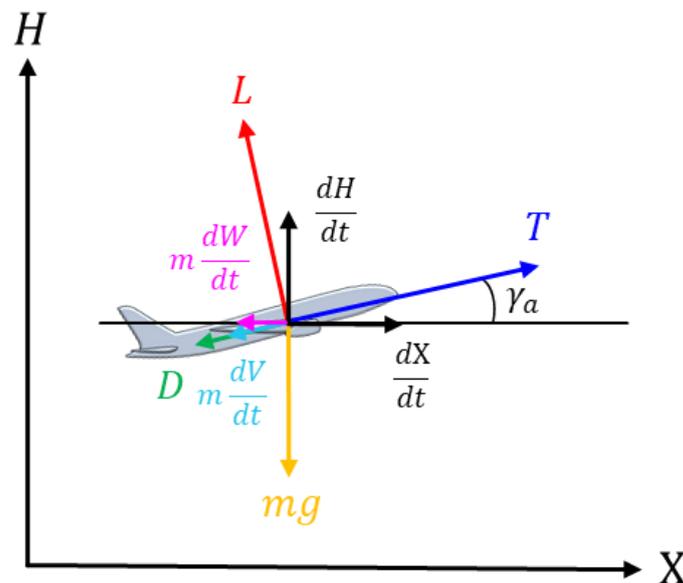


図 3.1. 航空機の力の釣り合い（非慣性座標系）

$$m \frac{dV}{dt} = T - D - mg \sin \gamma_a - m \frac{dW}{dt} \cos \gamma_a \quad (3.1)$$

$$mV \frac{d\gamma_a}{dt} = L - mg \cos \gamma_a + m \frac{dW}{dt} \sin \gamma_a \quad (3.2)$$

$$\frac{dX}{dt} = V \cos \gamma_a \quad (3.3)$$

$$\frac{dH}{dt} = V \sin \gamma_a \quad (3.4)$$

各記号の定義は以下の通りである。

D : 抗力[N]	T : 推力[N]
g : 重力加速度[m/s ²]	W : 進行方向水平風[m/s]
H : 高度[m]	V : 真対気速度[m/s]
L : 揚力[N]	X : 鉛直面内飛行距離[m]
m : 機体質量[kg]	γ : 経路角[deg]
t : 時間[s]	

また，地球固定座標系を移動する航空機の位置は以下のように示す。

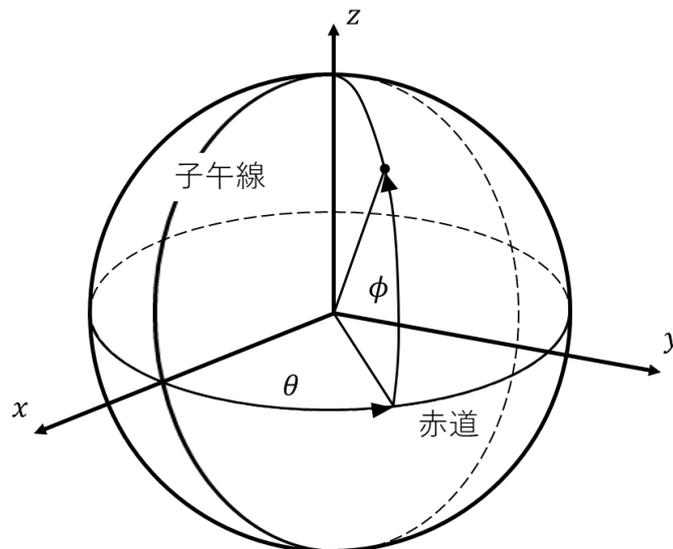


図 3.2. 地球固定の座標系の緯度経度

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{(R_0+H)\cos\phi} V \cos\gamma_a \sin\psi_a + W_x \quad (3.5)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{(R_0+H)} V \cos\gamma_a \sin\psi_a + W_y \quad (3.6)$$

R_0	: 地球半径[m]	θ	: 経度[deg]
W_x	: 東西風[m/s]	ϕ	: 緯度[deg]
W_y	: 南北風[m/s]	ψ	: 方位角[deg]

3.2. 空力モデル

空力モデルには以下に示すような, 抗力係数を2次の関数で表す基本的な式を使用する.

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (3.7)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D \quad (3.8)$$

$$C_D = C_{D0} + K C_L^2 \quad (3.9)$$

C_{D0}	: 有害抗力係数[-]	K	: 誘導抗力係数[-]
C_D	: 抗力係数[-]	S	: 翼面積[m ²]
C_L	: 揚力係数[-]	ρ	: 空気密度[kg/m ³]

3.3. 大気モデル

本研究において使用する大気モデルには国際標準大気をしようする. 以下, 国際標準大気の概要について述べる. 高度方向の大気状態は, 以下の式により支配されている. この節で扱う H はジオポテンシャル高度, T は大気温度を表している. また, 添字 0 は海面上を表す.

$$p = \rho R T \quad (3.10)$$

$$\frac{dp}{dH} = -\rho g \quad (3.11)$$

p : 大気圧[hPa] R : 気体定数[J/(K・kg)]	T : 大気温度[K] ρ : 空気密度[kg/m ³]
--	--

ジオポテンシャル高度の対する温度勾配 b が一定であると仮定した場合, 以下のような関係が成り立つ.

$$T = T_0 + b(H - H_0) \quad (3.12)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{g_0}{bR}} \quad (3.13)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p}{p_0} / \frac{T}{T_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{g_0}{bR} - 1} \quad (3.14)$$

温度勾配が0の場合には以下の式が成り立つ. ここでの添字1は等温層の最低高度を表す.

$$\frac{p}{p_1} = \exp\left(-\frac{g_0}{RT}(H - H_1)\right) \quad (3.15)$$

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \frac{p}{p_1} = \exp\left(-\frac{g_0}{RT}(H - H_1)\right) \quad (3.16)$$

国際標準大気では, 高度0~11000[m]が一定温度勾配の対流圏, 高度11000~20000[m]が等温層の成層圏において以下の諸量を与えている.

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	ρ_0	=	1.225	[kg/m ³]
重力加速度	g_0	=	9.80665	[m/s ²]
対流圏気温逓減率	b	=	-0.0065	[K/m]
気体定数 (空気)	R	=	287.05287	[J/(K · kg)]
空気の比熱比	κ	=	1.4	[-]
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	ρ_1	=	0.3643	[kg/m ³]

3.4. 航跡データ

今回解析において使用した実際の飛行の航跡データには国土交通省が公表している CARATS Open Data を使用する。当データは将来の航空交通システムを発展させ、航空サービスの量的な拡大や質の継続的な向上を目的とし、研究開発促進の一環として公表されているエンルート管制用のレーダ（一次レーダ）データである¹⁹⁾。日本におけるレーダ覆域を図 3.3 に示す。図内の一次レーダ覆域内を飛行するデータが当データ内に格納されている。当データは国土交通省に申請を行うことにより使用することができる。

本データは ADS-B データと比較すると、記録時間の分解能は劣るが ADS-B データよりも広範囲の航跡データが記録されており、国内線は出発から到着まで、国際線はレーダ覆域内から到着までが記録されている。ADS-B データは ADS-B 装置を搭載していない機体からの航跡データは取得できないため、航空機同士の到着時間間隔等が得られない。そのため、本研究における軌道最適化には ADS-B データではなく CARATS Open Data を使用する。

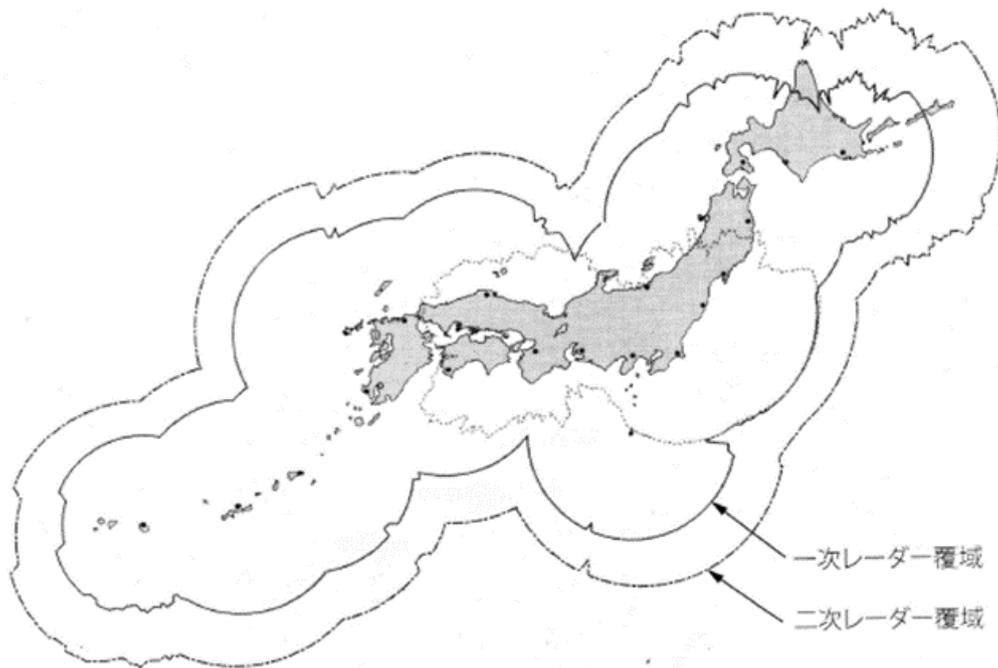


図 3.3. 日本におけるレーダ覆域²⁰⁾

CARATS Open Data は 2012 年度から 2015 年度の 4 年間で公開されている。各年度の奇数月における 1 週間分（合計 6 週間分）、つまり 42 日分のデータがあり、記録されている時間は終日の航跡データである。現在所有している CARATS Open Data は 2012 年度、2013 年度、2014 年度の 3 年間であり、それらの概要を表 3.1 に示す。

データ形式は、まず記録されている時刻は日本標準時（JST）となっている。便名は仮想便名に変換されており、1 日で重複する便名が発生しないようにされている。型式は ICAO の「DOC 8643 Aircraft Type Designators」の略である。また、データ特性は文献¹⁹⁾に詳細が記されている。

表 3.1. CARATS Open Data の概要

データ期間	2012 年	5 月 7 日 (月) から 13 日 (日)
		7 月 9 日 (月) から 15 日 (日)
		9 月 3 日 (月) から 9 日 (日)
		11 月 5 日 (月) から 11 日 (日)
	2013 年	1 月 7 日 (月) から 13 日 (日)
		3 月 4 日 (月) から 10 日 (日)
		5 月 6 日 (月) から 12 日 (日)
		7 月 8 日 (月) から 14 日 (日)
		9 月 2 日 (月) から 8 日 (日)
	2014 年	11 月 4 日 (月) から 10 日 (日)
		1 月 6 日 (月) から 12 日 (日)
		3 月 3 日 (月) から 9 日 (日)
		5 月 12 日 (月) から 18 日 (日)
		7 月 14 日 (月) から 20 日 (日)
	2015 年	9 月 15 日 (月) から 21 日 (日)
		11 月 10 日 (月) から 16 日 (日)
1 月 12 日 (月) から 18 日 (日)		
	3 月 9 日 (月) から 15 日 (日)	
対象	計器飛行方式による飛行便	
データ項目	仮想便名, 型式, 時刻, 緯度, 経度, 気圧高度	
データ周期	約 10 秒	

本解析において、この CARATS Open Data の中から任意の 1 日を選択し、非道の最適化を行う。今回解析にて使用した CARATS Open Data 概要を表 3.2 に示す。使用した航跡データは CARATS Open Data 2014 内に格納されている 2014 年 9 月 15 日を選択した。この航跡データにより解析を行う。

表 3.2. 使用した CARATS Open Data の概要

記録日	2014 年 9 月 15 日
記録時間	00:00~24:00 (JST)
記録データ	仮想便名, 型式, 時刻, 緯度, 経度, 気圧高度
データ周期	約 10 秒
記録機体数	3959 機

この 1 日分の航跡データから、関西 3 空港の到着機と出発機を抽出し地図上に飛行経路を示したものを図 3.4 に示す。この日の関西国際空港の到着機は 193 機、出発機は 193 機であり、大阪国際空港の到着機は 177 機、出発機は 175 機であり、神戸空港の到着機は 30 機、出発機は 27 機となっていた。

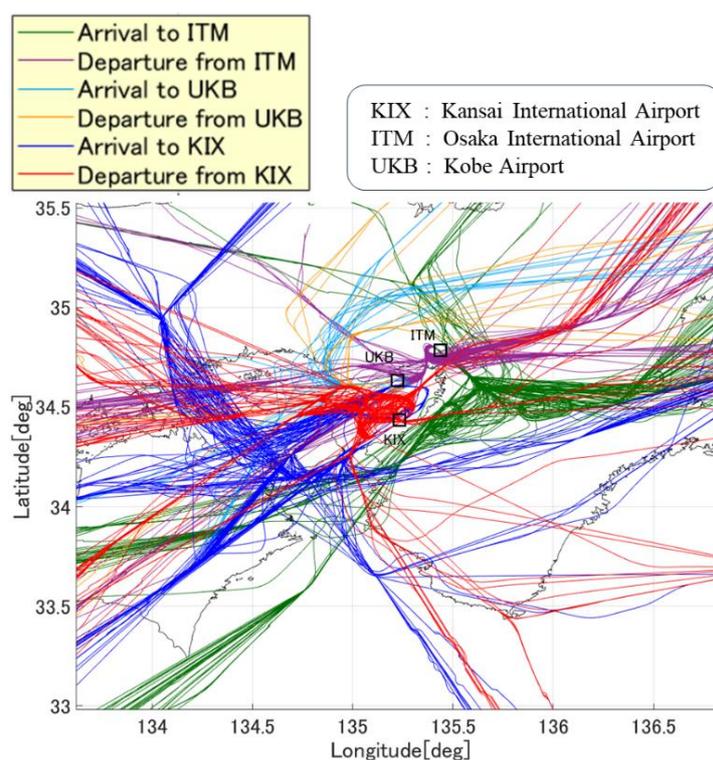


図 3.4. 関西 3 空港における 1 日の到着機と出発機

3.5. 気象データ

飛行状態の推定や軌道最適化を行うためには実際の気象条件を使用することが重要となる。そこで本解析では、気象データとして気象庁の全球数値予報モデル GPV (Grid Point Value) を使用する²¹⁾。使用した気象データ概要について以下の表 3.3 に示す。

表 3.3. 全球数値予報モデル GPV (全球域) の概要

	地上： 海面較正気圧，地上気圧，風 (2 要素)，気温 相対湿度，積算降水量，雲量 (4 要素)
要素	1000/925/850/700/600/500/400/300 hPa： 高度，風 (2 要素)，気温，上昇流，相対湿度 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
予報時間	84 時間予報 (初期値：00, 06, 12, 18 UTC)：6 時間間隔 96～264 時間予報 (初期値：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	等緯度等高度 地上～100hPa：0.5 度 × 0.5 度 (格子数 720 × 361) 70～10hPa：1.0 度 × 1.0 度 (格子数 360 × 181)

ただし，巡航時の燃料流量には次式を採用する．

$$\dot{m} = C_{fc} \times \dot{m}_{nom} \quad (3.20)$$

C_{fc} : BADA モデルより得られる係数[-]

このようにして各飛行フェーズにおける燃料流量を計算し，その値を飛行時間で積分したものを燃料消費量の評価値とする．

3.7. 飛行状態推定

航空機の飛行を軌道最適化する前に，現在の飛行がどうなっているのかを知る必要がある．本節では現在の飛行状態を推定する方法について述べる．これまで説明してきた航空機の航跡データ，気象データ，機体性能モデルを組み合わせることで航空機の燃料消費量を推定することが可能である．飛行状態推定の手順の概略図を図 3.5 に示す．航跡データである CARATS Open Data には緯度，経度，高度の位置情報データが時系列データとして格納されているため，位置データの時間変化によって対地速度や経路角が計算される．その後気象データを使用することにより，真対気速度や較正対気速度，マッハ数等の対気データを得ることができる．さらに航空機の機体性能モデルである BADA モデルを用いることによって，推力や燃料流量が推定することができる．このような手順で評価値である燃焼消費量と飛行時間を得ることが可能である．

しかし，航跡データには所々にデータの欠落や誤差等が含まれており，このようなデータは解析上不都合となる．そのため，本解析では航跡データを用いる計算過程で平滑化処理を施すことで対応した．

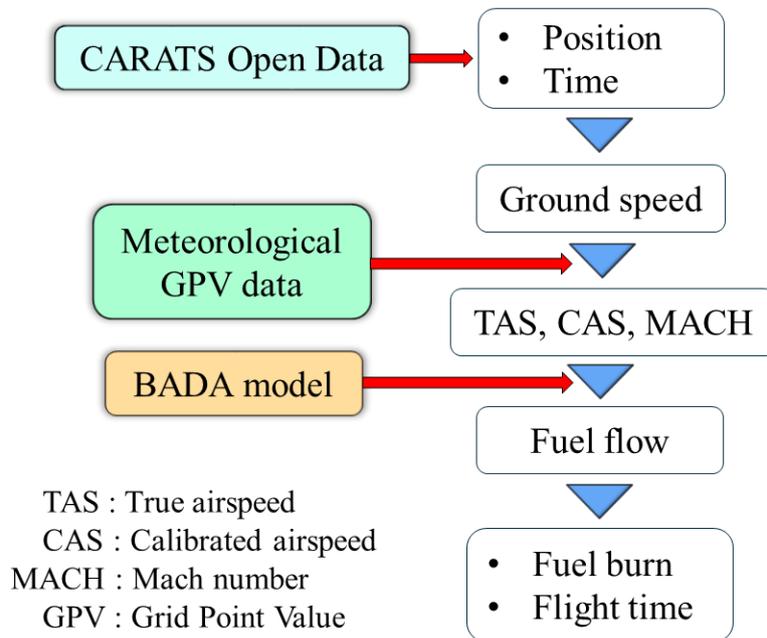


図 3.5. 飛行状態推定の手順

3.8. 動的計画法による軌道最適化

動的計画法 (Dynamic Programming, DP) とは最適制御問題において使用される手法であり、解法アルゴリズムの分類の 1 つである。動的計画法では、まず部分問題を解き、その結果を利用して問題全体を解く。また、部分問題の計算結果を再利用して計算を行うアルゴリズムとなっている。状態を量子化し、その遷移における最適な組み合わせを最適性の原理に基づいて探索する。対象となる問題を帰納的に解く場合にくり返し出現する小さな問題を記録しておき、冗長な計算を省略していく。大域的最適解が保証されているため、非線形システムへの適応や不等式拘束条件の取り扱いが容易なため、航空機の軌道最適化問題に応用されている²³⁾。

本研究ではこの動的計画法を用い、関西国際空港への到着機に対し軌道最適化を行っていく。本節ではその方法について述べる。

3.8.1. 評価関数

航空機の飛行の最適化では、燃料消費と飛行時間が重要とされており、これら 2 つを評価値と定め、それらの値を比較し飛行効率の良し悪しが決定される。そこで本解析の最適化では評価関数 J として以下の式を設定する。ここで、 a は時間に対する重み関数であり、これは次項で説明する Cost Index (CI) に対応した値となっている。また、 $t_f - t_0$ は飛行時間を表す。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \mu(t) dt + at_f \quad (3.21)$$

a : 時間に対する重み係数[kg/s] t_0 : 初期時間[s]
 μ : 燃料流量[kg/s] t_f : 終端時間[s]

3.8.2. Cost Index

Cost Index (CI) とは、時間コストと燃料コストの比によって表される値であり、航空機の運航効率を決定する重要な数値である。CI には前節で説明した時間に対する重み係数 a を用いると以下の式のような関係となる。運航者が飛行管理装置 (Flight Management System, FMS) の CI の値を選択すると、適切な巡航高度や速度、推力、ルート等を計算してくれる。航空機はこの FMS が生成したデータに基づいて飛行している。この CI の値を決めるのはそれぞれのエアラインであり、エアラインが種々の要素を考慮することにより CI を決定し、その CI を FMS から選択し、FMS 生成したデータに従って飛行している。

$$CI = \frac{\text{TimeCost}[\text{dollar/hour}]}{\text{FuelCos}[\text{cent/lb}]} \approx 80a \quad (3.22)$$

また、燃料消費と飛行時間にはトレードオフの関係があり、その完成を表した模式図を図 3.6 に示す。もし時間に対する重み係数 a の値が 0 となると、その飛行は燃料消費量が最小となる飛行方法となる。もしこの燃料消費最小点よりも右側で飛行すれば a の値は負とな

り、また CI も負の値となる。しかしこのときの飛行は燃料消費量も飛行時間も増加する。そのためこのような負の CI は使用不可となっている。そのため実際の飛行では a が正の値となる領域のみ使用し、 a が増加することによって燃料消費量が増大するが飛行時間が減少する関係となっている。軌道最適化では、時間に対する重み係数 a の値を変更することによって FMS における CI を再現できる。本解析では、 a をいくつか使用し、評価関数を最小とするような a を見つけその値を使用する。

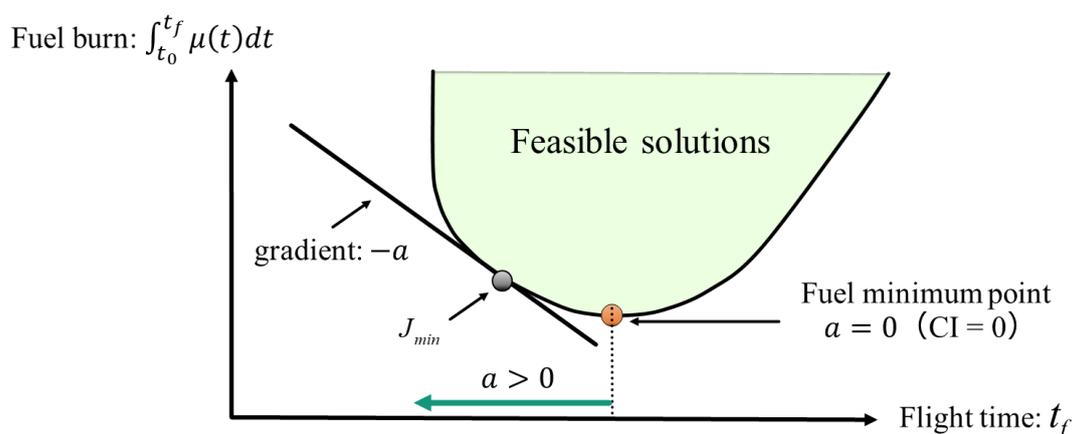


図 3.6. 燃料消費と飛行時間のトレードオフ

3.8.3. 計算方法と解析条件

本解析の最適化計算において、CDO は最適な飛行軌道によって実現できるものと仮定する。つまり、動的計画法によって生成された軌道が最適な軌道であるならその降下は最も効率の良い CDO となるということである。また、今回最適化する対象値は燃料消費量とする。今回の最適化計算における以下の条件によって行う。

- I. 最適な飛行の経路は、CARATS Open Data の実際の飛行と同一経路を飛行する
⇒ 「高度」と「速度」のみの最適化を行う
- II. 飛行時間は、時間に対する重み係数 a を 0 から 0.05 刻みで変化させ、実際の飛行と最も近い値となる a を採用する。
- III. 境界条件、拘束条件、評価区間は以下の表 3.4 に示す。境界条件は CARATS Open Data の実際の飛行から、拘束条件は CARATS Open Data の実際の飛行と BADA モデルからそれぞれ決定する。

表 3.4. 各種解析条件

境界条件	緯度 (始点, 終点), 経度 (始点, 終点), 高度 (始点, 終点), 時間 (始点, 終点), 較正対気速度 (始点, 終点), 機体質量 (始点)		
拘束条件	1. 最高巡航高度は実際の飛行の最高巡航高度と同値 2. 飛行性能等は BADA モデルに準拠		
		始点	終点
評価区間	国際線:	記録開始点	MAYAH
	国内線:	高度 10000[ft]	(Initial Approach Fix, IAF)

動的計画法による最適解を探索する方法について述べる。本解析における評価関数 (式 (3.21)) は以下の最適性の原理を満たす。終端における時刻を指定していないため独立変数として時刻を使用すると計算が非常に困難となるため、本解析における独立変数は航空機の鉛直面内飛行距離 X を使用する。

$$J_{opt,k} = \min(\Delta J + J_{opt,k+1}) \quad (3.23)$$

$$\Delta J = [\mu(X) + a]\Delta X \quad (3.24)$$

また、今回最適化される状態変数は高度 H と速度 V の 2 つとなる。最適化を行うため、時刻を示す t を式中から削除するために式(3.1), (3.4)を式(3.3)でそれぞれ除し、以下の式を得る。

$$\frac{dV}{dX} = \frac{T - D - mg \sin \gamma_a}{mV \cos \gamma_a} - \frac{dW}{dX} \cos \gamma_a \quad (3.25)$$

$$\frac{dH}{dX} = \tan \gamma_a \quad (3.26)$$

ここで、解析のために量子化を行う。量子化を行うのは状態変数の H 、 V 、また独立変数の X 、および進行方向水平風 W の 4 つの値である。 W は気象データより格子点として得られる。量子化された値は Δ を用いて表現する。解析においてこれらの値は既知量の格子点となる。未知値は経路角 γ_a と推力 T であり、解析においてこの 2 つの値を制御変数とする。これらは式(3.25)、(3.26)を変形することにより得られる。これらの値を用い動的計画法による軌道最適化を行っていく。

$$\gamma_a = \tan^{-1} \frac{\Delta H}{\Delta X} \quad (3.27)$$

$$T = mV \cos \gamma_a \left(\frac{\Delta V}{\Delta X} + \frac{\Delta W}{\Delta X} \cos \gamma_a \right) + D + mg \sin \gamma_a \quad (3.28)$$

式(3.28)における V は 2 地点の平均値を使用する。また本解析における状態変数 \mathbf{x} と制御変数 \mathbf{u} はまとめると以下の通りである。

$$\mathbf{x} = [H, V]^T \quad (3.29)$$

$$\mathbf{u} = [\gamma_a, T]^T \quad (3.30)$$

図 3.7 に動的計画法による航空機の軌道最適化の計算方法の概念図を示す。動的計画法における計算方法は、状態空間の格子点から最適解を求めていく方法であり、端末における最適なコストは独立変数 X の各段階での成立可能な格子点の組み合わせから導かれる。

始点 x_0 と終端 x_f の状態は境界条件により定まり、独立変数である鉛直面内飛行距離 X を n 分割すると、まず $x_f = n+1$ から計算を始め、 $k+1$ 段の各格子点の状態変数に対し、 k 段への遷移を考え、遷移に伴う評価関数 J_{opt} の変化量を計算する。その時の最適な評価関数 J_{opt} は式(3.23)により求められる。このように後ろから一つ前の独立変数の段に移りながら、同様な計算を x_0 まで繰り返すことにより最適軌道を求める。本解析において、独立変数 X は 20[km]ごとに分割している。

高度と速度の格子点の数をそれぞれ l 、 m 個としたとき、全通り計算した場合、 $(lm)^{n-1}$ 通り計算しなければならないが、動的計画法では $(lm)^2 \times (n-1)$ 通りの計算で済み、大幅な計算量の削減が可能となる。

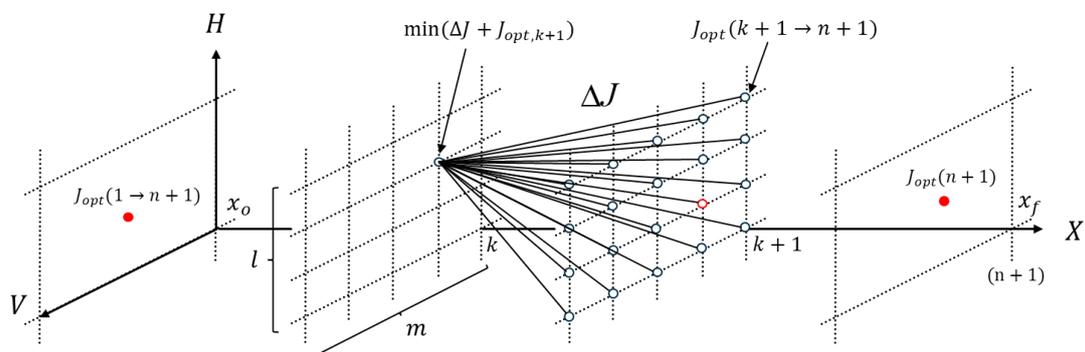


図 3.7. 動的計画法による軌道最適化

3.8.4. 解析対象

本解析では、表 3.2 に示した 1 日分の CARATS Open Data を使用している。その中から以下の条件を満たす便のみを解析対象とする。

- I. 関西国際空港への到着機
- II. エアバス A320 (関西国際空港への到着機で最も多く運用されていた機種)
- III. 滑走路 RWY24L/24R への到着機

以上の I ~ III を満たす航空機はこの日 33 機存在した。本解析ではこの 33 機を解析対象とする。

抽出した 33 機の飛行経路を図 3.8 に示す。やはり滑走路 RWY24L/24R に着陸する到着機は全て淡路島上空を經由して滑走路に向かっていくことがわかる。やはりほとんどの到着機が LILAC-MAYAH 間を高度 4000[ft] で水平飛行していることも CARATS Open Data から確認された。また、淡路島南部付近で高度 7000[ft] で水平飛行する機体も複数機確認された。さらに、紀伊半島の東部の部分で東からの到着機が高度 10000[ft] で長距離水平飛行していることが確認された。これは大阪国際空港への到着機とのコンフリクト回避のためである。

図 3.9 にはそれら 33 機の到着機の関西国際空港からの距離に対する飛行高度を示しており、図 3.9 内にはそれらの到着機が出発した空港の 3 レターコードで示している。表 3.5 にその 3 レターコードをまとめている。図 3.9 より、より遠くの空港から出発したの到着機のほうがより高い巡航高度で飛行していることがわかる。また、これらの 33 機の到着

機の多くは高度 4000[ft], 7000[ft], 10000[ft]で水平飛行を行っていることが図よりわかる。
 本解析では、これら 33 機に対し動的計画法を用いて軌道最適化を行う。

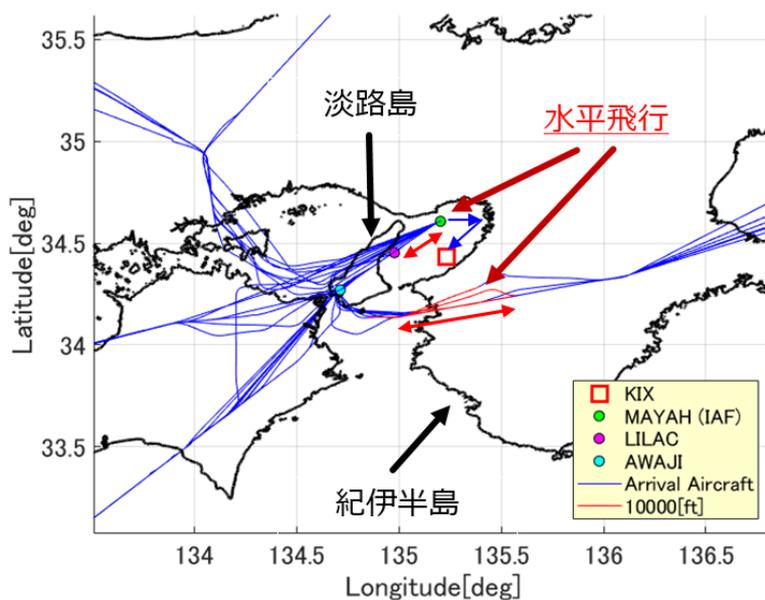


図 3.8. 33 機の関西国際空港への飛行経路
 (A320, RWY24L/24R, all 33flights)

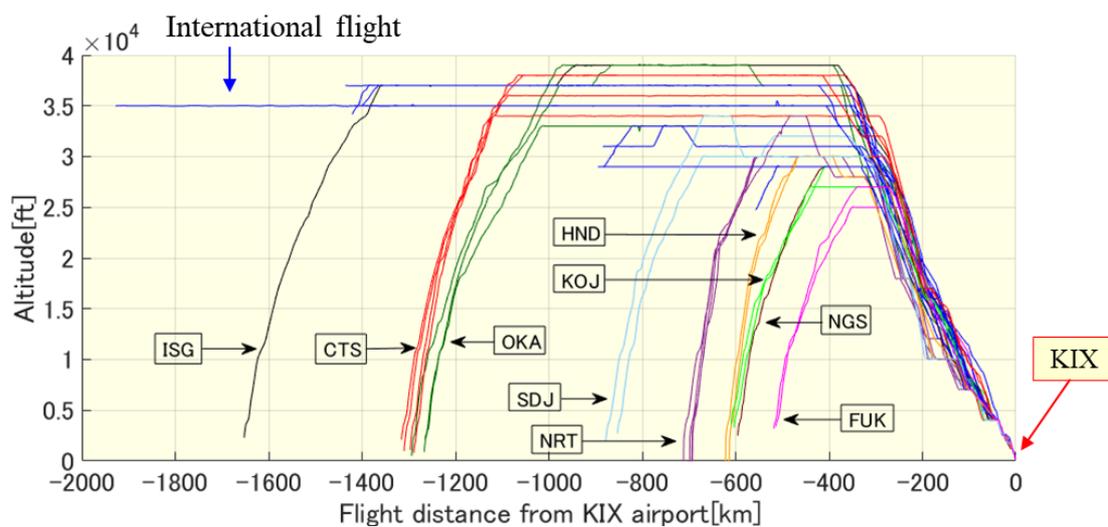


図 3.9. 33 機の関西国際空港への到着機の飛行高度
 (A320, RWY24L/24R, all 33 flights)

表 3.5. 33 機の関西国際空港への到着機の出発空港

3 レターコード	空港名
ISG	新石垣空港 (New Ishigaki Airport)
CTS	新千歳空港 (New Chitose Airport)
OKA	那覇空港 (Naha Airport)
SDJ	仙台空港 (Sendai Airport)
NRT	成田国際空港 (Narita International Airport)
HND	東京国際空港 (Tokyo International Airport)
KOJ	鹿児島空港 (Kagoshima Airport)
NGS	長崎空港 (Nagasaki Airport)
FUK	福岡空港 (Fukuoka Airport)

3.9. 解析結果

本節では解析対象とした 33 機の到着機に対し、動的計画法を用い軌道最適化を行った結果を述べる。33 機全ての到着機に対する燃料消費量の差と飛行時間の差を示したものを図 3.10 に示す。ここにおける「差」とは、シミュレーションにより得られた最適な飛行における燃料消費量と飛行時間から実際の飛行の燃料消費量と飛行時間をそれぞれ引いた値のことである。国際線と国内線でそれぞれ色分けしてプロットしている。国際線は 12 機、国内線は 21 機となっている。図 3.10 より、33 機全ての到着機において CDO により燃料消費量を削減できるという結果となった。国内線より国際線の方が削減可能な燃料消費量が大きいという結果となった。これは国内線の方が解析を行う評価区間が広く上昇フェーズも最適化を行っているためであると考えられる。CARATS Open Data の特性上、日本国内のレーダデータのみしか扱えないため国際線は日本のレーダ覆域内に入る巡航フェーズからしか解析が行えない。そのため国内線の方が消費燃料の削減量が大きいという結果となった。削減できる燃料消費量は 33 機の平均で約 250[kg]となった。つまり 33 機ではおよそ 8,250[kg]の燃料消費の削減が可能となる。次に飛行時間は、実際の飛行と比べて早くなっ

ている便もあれば遅くなっている便もある。国際線と国内線のどちらにおいても同等な到着時間のずれが生じていることがわかる。これら最適化された33機全ての到着機の到着時間は、実際の飛行の到着時間と比べ前後およそ100[s]以内に収まるという結果となった。次ページよりこれら解析対象の33機について特徴的なフライトにおける飛行の詳細を述べる。

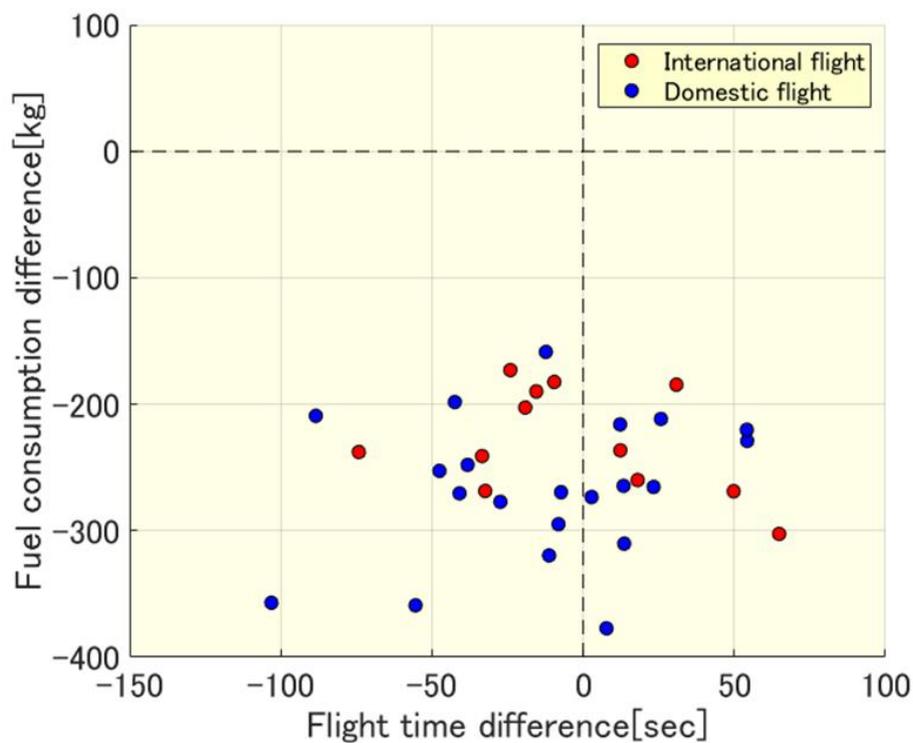
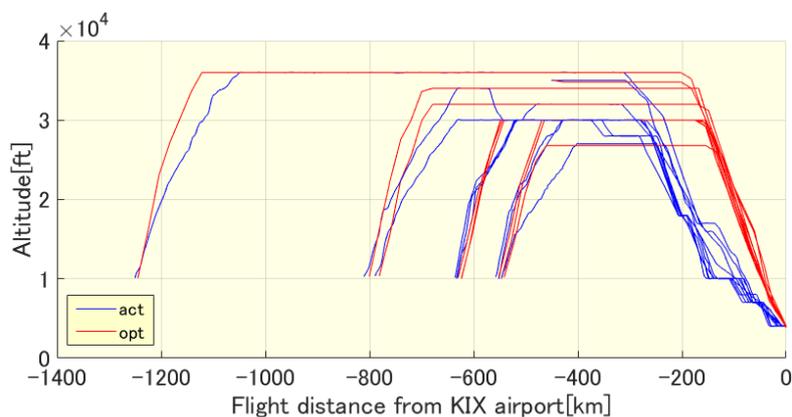


図 3.10. 飛行時間の差と燃料消費量の差
 (A320, RWY24L/24R, all 33 flights)
 ((差) = (最適の飛行) - (実際の飛行))

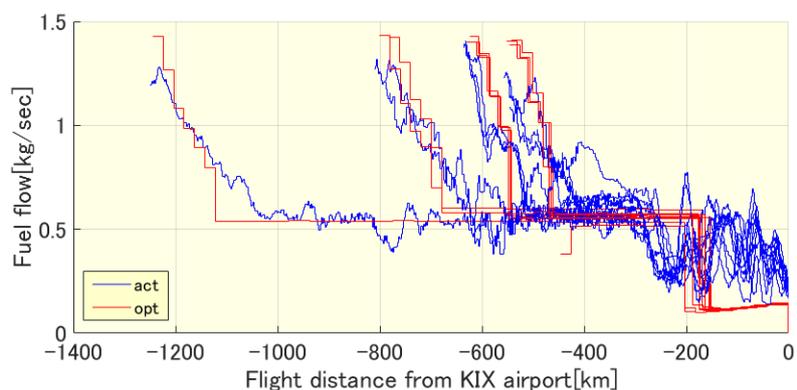
解析対象の 33 機から降下時に水平飛行を何度も行っていた特徴的な 10 機を抽出し、それら 10 機の高度と燃料流量を図 3.11 に示す。図内において、青は実際の飛行を、赤は最適な飛行を示す。(a) 高度、(b) 燃料流量 について以下のことがわかる。

- (a) 実際の飛行では、降下時に高度 10000[ft]、7000[ft]、4000[ft]の順に降下途中に水平飛行を行っていたが、最適化な飛行では降下の途中に水平飛行を行うことなく継続的に降下していることがわかる。このことから最適な飛行において CDO となっていることがわかる。また、国内線の上昇フェーズでは、最適な飛行の方が実際の飛行よりも早く巡航高度に達していることがわかる。
- (b) 実際の飛行では降下フェーズにおける低高度での水平飛行部分において燃料流量が増加していることがわかる。それに対し最適な飛行では、降下を開始してからの燃料流量は最低限となっている。

以上のことから CDO の導入により降下時の燃料流量の削減が可能であることがわかる。



(a) 高度



(b) 燃料流量

図 3.11. 関西国際空港からの距離に対する高度と燃料流量 (A320, RWY24L/24R, characteristic 10 flights)

また国内線と国際線についてそれぞれ 1 ケースのみ抽出し，それぞれの飛行状態の詳細評価データを見ていく. 今回任意に選択した国内線と国際線の飛行経路を図 3.12 に示す. 図 3.12 内における赤点のプロットは実際の飛行の経路に対し，鉛直面内飛行距離を 20[km]ごとに分割した点であり，これらの点は動的計画法による軌道最適化において独立変数 X として使用する格子点を示している.

今回示す国内線と国際線は以下の通りである.

- (1) 国内線：
新千歳空港 → 関西国際空港
- (2) 国際線：
北西方向 → 関西国際空港

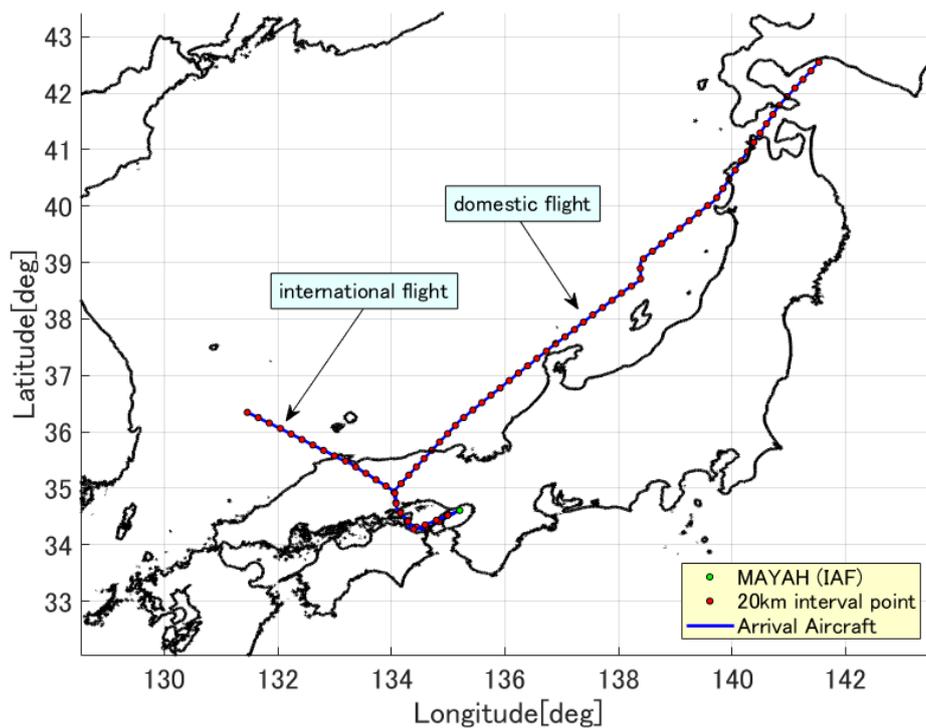


図 3.12. 国内線と国際線 1 ケースの飛行経路

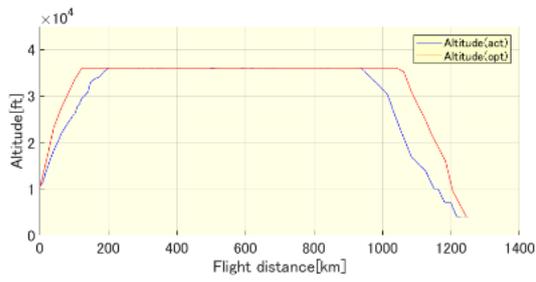
(1) 国内線：

新千歳空港 → 関西国際空港

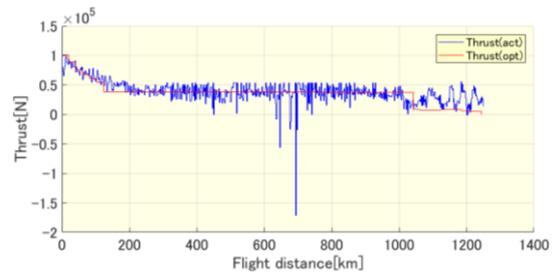
実際の飛行と最適な飛行における飛行状態のデータの詳細 (a) ~ (f) を比較することによって以下のことが言える。

- (a) 上昇フェーズにおいて、最適な飛行の方が実際の飛行より早く巡航高度まで上昇していることがわかる。最適な飛行はより長い距離を巡航しており、実際の飛行よりも遅い降下開始点となっている。また、最適な飛行は降下フェーズにおいて水平飛行を一切行っておらず CDO による降下となることがわかる。
- (b) 上昇フェーズにおいて、最適な飛行の方が早く上昇している分最適な飛行の方が大きな経路角を取って上昇している。また、降下フェーズの終盤に大きな経路角で降下を行っているが、これは飛行時間を実際の飛行に近づけるために生じたものである。
- (c) 上昇フェーズにおける真対気速度は、実際の飛行と最適な飛行でほとんど変わりがないという結果となった。また、上昇フェーズにおける較正対気速度は、実際の飛行の方が最適な飛行よりも高くなっているが、これは実際の飛行の方が低い上昇率となっているためである。
- (d) 降下フェーズにおいて、実際の飛行では降下時に水平飛行を行っている部分で推力が増加しているが、最適な飛行では推力は抑えられていることがわかる。最適飛行の方が早く上昇していたが、上昇フェーズにおける推力は上昇開始時以外ほとんど変わらない結果となった。
- (e) 最適な飛行のほうが早く上昇していたため、上昇開始時における燃料流量は最適な飛行の方が実際の飛行よりも大きくなっている。また、降下フェーズにおける燃料流量は、実際の飛行は水平飛行部分で増加しているが、最適な飛行では降下フェーズの燃料流量は最小値を維持したままである。
- (f) 上昇フェーズ、降下フェーズにおいて最適な飛行の方が実際の飛行よりも大きな揚抗比で飛行していることがわかる。最適な飛行は上昇フェーズでは経路角が実際の飛行より大きいため迎角も大きな値となっていると考えられ、そのため上昇時の揚抗比は最適な飛行の方が実際の飛行より大きな値となっていると予想される。

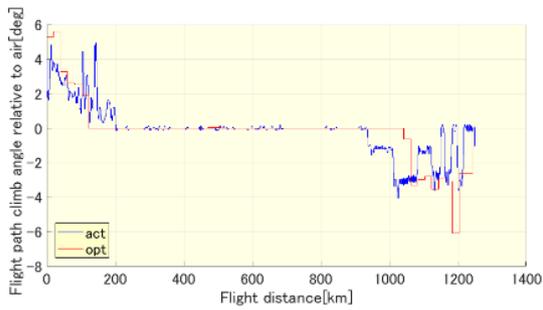
この飛行ケースにおける燃料消費量は、実際の飛行で 3,488.9[kg]、最適な飛行で 3,219.4[kg] という計算結果となった。よって、このケースにおける燃料消費量の削減量は 269.5[kg] となる。



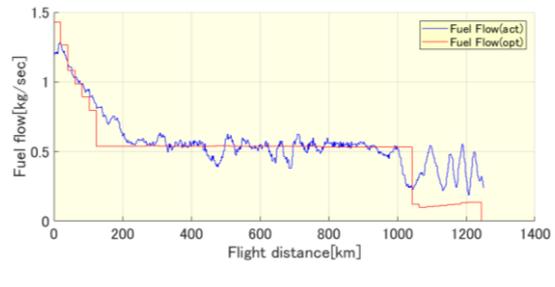
(a) 高度



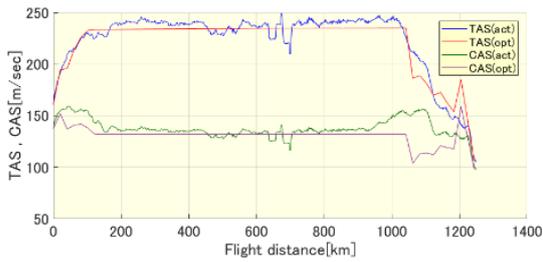
(d) 推力



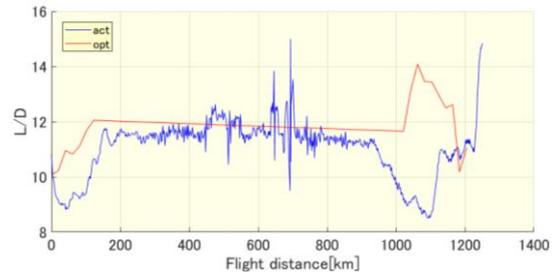
(b) 経路角 (対気)



(e) 燃料流量



(c) 真対気速度, 較正対気速度



(f) 揚抗比

図 3.13. 飛行状態の比較 (国内線)

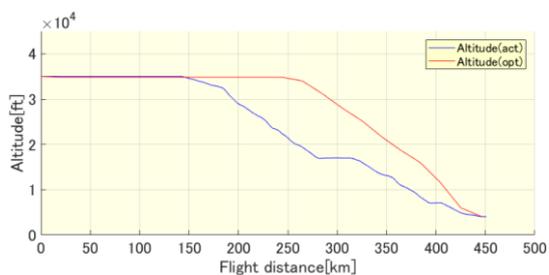
(2) 国際線：

北西方向 → 関西国際空港

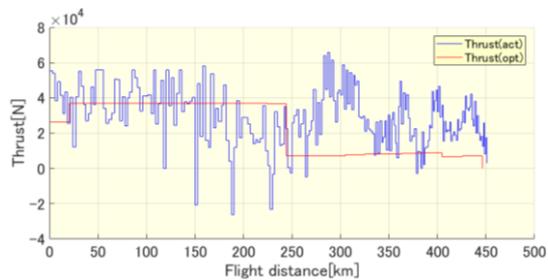
実際の飛行と最適な飛行における飛行状態のデータの詳細 (a) ~ (f) を比較することによって以下のことが言える。

- (a) CDO を行っている最適な飛行の方がより長い飛行距離を巡航していることがわかる。また、実際の飛行では降下時フェーズにおいて長距離を水平飛行しているが、最適な飛行では降下途中に水平飛行を行うことなく CDO によって継続的に降下していることがわかる。
- (b) 実際の飛行では、降下の途中に水平飛行を行っている部分では機首を上げているため、経路角は $0[\text{deg}]$ となっている。それに対し最適な飛行では、降下フェーズにおける経路角は負の方向の変位を維持しており、機首を上げることなく降下していることがわかる。また降下の最後には速度を落とすために機首を上げている。
- (c) 較正対気速度はほとんどの飛行区間において最適な飛行の方が実際の飛行より低くなっている。その中でも降下開始時における較正対気速度が最も低くなっている。
- (d) 実際の飛行では、降下途中の水平飛行時において推力が上昇しているが、CDO による最適な飛行では、降下フェーズの推力は最小の値となっており、ほとんど最小値のまま一定で降下している。
- (e) 燃料流量は推力に比例する推力モデルを使用しているため推力と同じ傾向となっている。実際の飛行では降下途中に低高度で長距離を水平飛行しているため、その部分における燃料流量は増大していることがこのケースではよくわかる。しかし最適な飛行では燃料流量は実際の飛行よりはるかに小さな値となっていることがわかる。
- (f) 巡航フェーズ、降下フェーズのどちらも最適な飛行の方が実際の飛行よりも高い揚抗比で飛行していることがわかる。また降下し始めの高高度で揚抗比が最も高くなっている。実際の飛行と最適な飛行で揚抗比が大きく異なっている要因は、経路角の差異による迎角の値が影響していると考えられる。

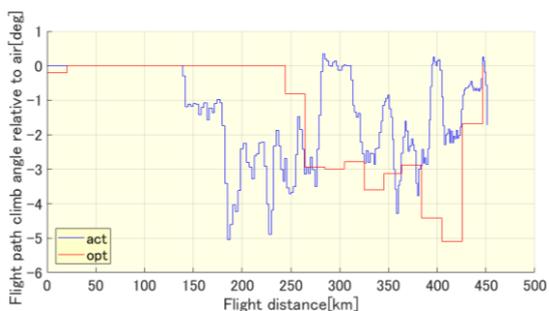
この飛行ケースにおける燃料消費量は、実際の飛行で $887.7[\text{kg}]$ 、最適な飛行で $619.1[\text{kg}]$ という計算結果となった。よって、このケースにおける燃料消費量の削減量は $268.6[\text{kg}]$ となる。



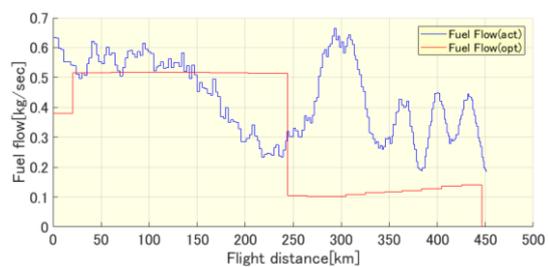
(a) 高度



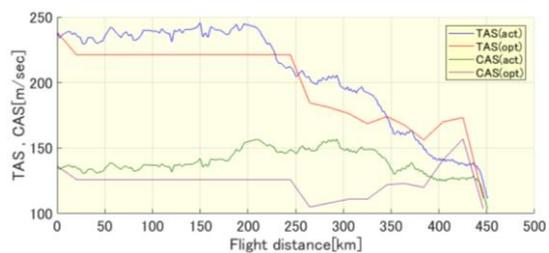
(d) 推力



(b) 経路角 (対気)



(e) 燃料流量



(c) 真対気速度, 較正対気速度



(f) 揚抗比

図 3.14. 飛行状態の比較 (国際線)

最後に、CDOによる降下軌道と出発機との高度間隔について述べる。図 3.15 に示すように、飛行中の航空機同士は垂直方向にそれぞれ 1000[ft]の管制間隔（セパレーション）を確保しつつ飛行しなければならない。2.2.5 節にて記述したように、関西国際空港からの出発機は、到着機が LILAC-MAYAH 間で高度 4000[ft]で水平飛行している上空を高度およそ 12000[ft]で通過していることがわかった。出発機の垂直管制間隔を考慮すれば、到着機は LILAC の位置で高度およそ 11000[ft]以下であれば出発機とのコンフリクトは生じないことがわかる。

軌道最適化により得られた解析対象 33 機の CDO による降下軌道を図 3.16 に示す。この図より、CDO による降下軌道は全て LILAC 通過時において、高度 8000[ft]以下となっていることが読み取れる。よって、関西国際空港へ CDO によって降下する到着機は関西国際空港からの出発機に対して 4000[ft]以上のセパレーションを確保できていることがわかる。これは到着機と出発機のコンフリクトが発生せず、また安全性の面からも十分な管制間隔となっている。このことから、CDO 導入により LILAC-MAYAH 間における水平飛行を取り除くことが可能であると言える。

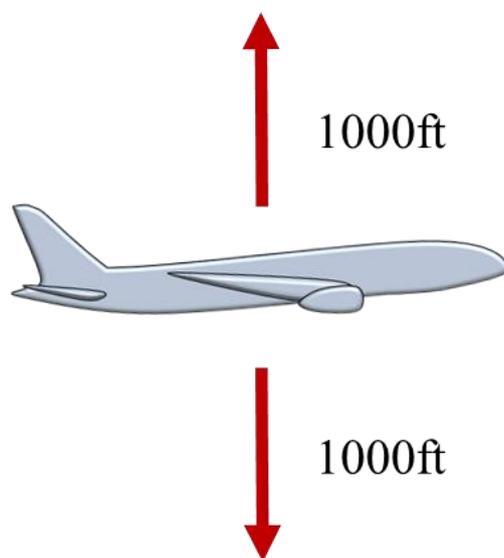


図 3.15. 航空機の垂直管制間隔

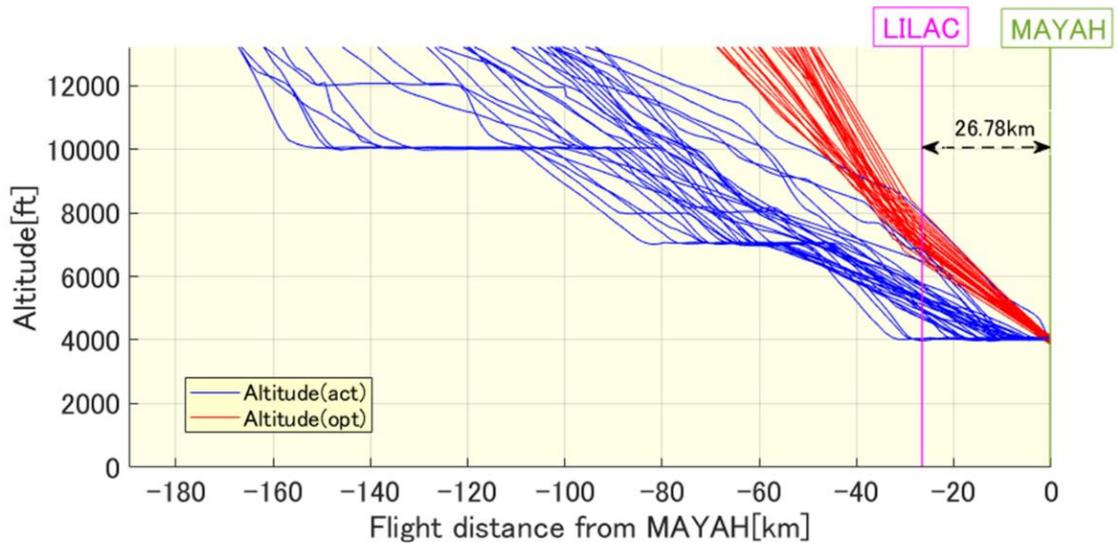


図 3.16. CDO 軌道の LILAC 通過時の高度

4 章 結論

4.1. まとめ

本論文では、混雑空域における到着機の運航効率の改善を行うために、降下時に水平飛行を行わず継続的に降下する CDO と呼ばれる運航方式を混雑空域への到着機に導入することが可能であるかを提案した。

CDO を導入するに当たり、まず混雑空域における到着機の運航効率の現状分析を行った。現状分析には主に時刻や位置の精度が高い ADS-B データを使用した。関西 3 空港（関西国際空港、大阪国際空港、神戸空港）の到着機の運航効率の現状分析を行った結果、関西国際空港へ滑走路 RWY24L/24R に着陸する到着機において、多くの到着機が降下途中に水平飛行を行っている部分が見つかった。水平飛行を行っている原因を分析した結果、関西国際空港からの出発機が水平飛行部分の上空を飛行していることがわかり、この水平飛行は到着機と出発機とのコンフリクトの回避のための高度間隔確保であることがわかった。しかし到着機と出発機のお互いの高度を調べた結果、運航上取るべき高度間隔のおよそ 2 倍の間隔を空けていることもわかった。

ADS-B では全ての航空機の航跡データを得られないため、レーダデータである CARATS Open Dara から任意の 1 日分の航跡データを用い、関西国際空港への到着機に対し、動的計画法を用いた軌道最適化を行った。解析対象としては、関西国際空港へ滑走路 RWY24L/24R に到着している航空機であり、なおかつ関西国際空港へ最も多く到着している機種であるエアバス A320 を選択した。このようにして選択した解析対象機体は 33 機となり、33 機の到着機を解析することにより得られた知見は以下のとおりである。

- I. 飛行経路を固定し、高度と速度のみの最適化を行った結果、CDO により到着機の燃料消費量を 1 機当たり約 250[kg]削減することが可能である。
- II. 最適化を行った飛行時間は実際の飛行と比較して、前後約 100[s]以内に収まる結果となる。
- III. 最適化によって得られて CDO による降下経路は全て、LILAC-MAYAH 間上空を通過する出発機に対して 4000[ft]以上のセパレーションを取れてことがわかった。

このような結果は、関西国際空港への到着機は CDO により降下時における燃料消費量を削減することが可能であることを示唆するものであると言える。しかし、航空機の到着時

間に 100[s]のずれが生じているため、CDO によって到着機の燃料消費量の削減をしても、空港を発着する航空機の容量を低下させてしまえば運航効率は損なわれてしまう。また、軌道最適化によって得られて CDO による降下軌道は LILAC-MAYAH 間上空を通過する出発機に対し十分のセパレーションを取れていたため、関西国際空港への到着機に CDO を導入することにより LILAC-MAYAH 間の水平飛行を排除できると言える。

4.2. 今後の課題

今回の解析結果を受けて、混雑空域に CDO を導入するに当たりいくつかの課題が生じている。それらの課題は以下のとおりである。

- 到着機の正確な到着時間管理を行う必要がある
- LILAC-MAYAH 間以外の水平飛行箇所における到着機と他機とのコンフリクトを考慮

これらを考慮した降下軌道の設計が実現すれば、現在許可されている夜間における CDO の実施機体も増加させることができるだけでなく、昼間の到着機に対しても CDO を導入することができ、混雑空域における到着機の燃料消費量を大幅に削減することが可能となると考えられる。

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,
http://www.jadc.jp/files/topics/118_ext_01_0.pdf
- [2] 平成 19 年度航空政策審議会航空分科会資料
- [3] 東京航空局長 山口勝弘：わが国の国際航空市場を牽引する LCC の動向,
<http://www.mlit.go.jp/pri/kikanshi/pdf/2016/63-5.pdf>
- [4] SESAR Group for the Future Air Traffic System: European Air Traffic Management Master Plan, 2009
- [5] Federal Aviation Administration: NextGen Update: 2014,2014
- [6] 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, 国土交通省, 2010
- [7] 大阪国際空港騒音調停申請事件,
http://www.soumu.go.jp/kouchou/activity/osakakuko61_12.pdf
- [8] 新関西国際空港株式会社, <http://www.nkiac.co.jp/>
- [9] 大阪国際空港における取組み, 豊中市都市活力部空港課, 2017.06,
<https://www.city.toyonaka.osaka.jp/machi/kukou/kankyotaisaku/gaiyou.files/2017all.pdf>
- [10] 関西国際空港「成長エンジン」最適利用者目指せ, 産経 WEST,
<http://www.sankei.com/west/news/161028/wst1610280009-n1.html>
- [11] 関西 3 空港の目指すべき姿, 国土交通省 兵庫県 第 5 回国土交通省成長戦略会議, 2009.12.14, <http://www.mlit.go.jp/common/000055207.pdf>
- [12] 平成 29 年度における CARATS の主要な活動～重点的に取り組むべき施策～, CARATS 事務局, 2017.03, <http://www.mlit.go.jp/common/001184275.pdf>
- [13] Airworthiness Approval of Automatic Dependent Surveillance - Broadcast OUT Systems, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2012.07.15,
https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_20-165B.pdf
- [14] flightradar24, <http://www.flightradar24.com/>
- [15] AIS JAPAN – Japan Aeronautical Information Service Center,
<https://aisjapan.mlit.go.jp/Login.do>
- [16] ICAO, Continuous Descent Operations (CDO) Manual, Doc 9931 AN/476, 2010
http://cfapp.icao.int/tools/ATMiKIT/story_content/external_files/102600063919931_en.pdf
- [17] 福島幸子, 平林博子, 岡恵, 伊藤恵理, ビクラマシンハ ナヴィンダ(電子航法研究所),

- 関西国際空港への継続降下運航の運用時間拡大の課題, 第 53 回飛行機シンポジウム,
2015.11.11-13
- [18] 宮沢与和, 動的計画法によるコンフリクトフリー最適軌道の生成に関する研究, 平成 24
年度公募型研究 成果報告, 2013.3.21,
<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/bitstream/a-is/16193/1/62292006.pdf>
- [19] 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, 2014.7.7
- [20] 園山耕司, よくわかる航空管制, 秀和システム, 2010
- [21] 京都大学生存圏研究所, 気象庁データ, <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/index-e.html>
- [22] 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
- [23] 宮沢与和, ビクラマシンハ ナヴィンダ, 原田明德, 宮本侑斗, 到着時間を指定した旅
客機の軌道最適化, 航空宇宙技術 VI.12,31-38, 2013.6

謝辞

本研究を進めるにあたりまして、終始丁寧かつ熱心なご指導・ご鞭撻を賜りました当研究室の原田明德講師に心から感謝の意を表します。また、研究について貴重なご意見を頂きました岡宏一教授にも深く感謝致します。

本研究の遂行に当たり、航跡データの提供していただきました国土交通省航空局の皆様、気象データの提供をしていただきました京都大学生存研究所、航空機の性能モデルを提供いただきました欧州航空航法安全機構、並びに、研究のあらゆる場面においてサポートしていただきました電子航法研究所の皆様、以上の方々に心からの謝意を表します。さらに、当研究室において研究のみならず様々な場面においてサポートしていただきました機械・航空システム制御研究室の皆様、本当にありがとうございました。

最後に、大学院まで進学させていただき、これまでの学生生活を温かく応援・支援していただいた両親に心から感謝致します。