

# 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

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 1205063 和賀山 智晃

### 記号の説明

$a$	: 時間に対する重み係数
$c$	: 燃料流量係数
$C_{Do}$	: 有害抗力係数
$C_D$	: 抗力係数
$C_L$	: 揚力係数
$D$	: 抗力
$g$	: 重力加速度
$H$	: 高度
$J$	: 評価関数
$K$	: 誘導抗力係数
$L$	: 揚力
$m$	: 機体質量
$R_0$	: 地球半径
$S$	: 翼面積
$t$	: 時間
$T$	: 推力
$\mathbf{u}$	: 制御変数
$W$	: 進行方向風
$W_x$	: 東西風
$W_y$	: 南北風
$V$	: 真対気速度
$\mathbf{x}$	: 状態変数
$X$	: 鉛直面内飛行距離
$\gamma_a$	: 飛行経路角 (対気成分)
$\theta$	: 経度
$\mu$	: 燃料流量
$\rho$	: 空気密度
$\phi$	: 緯度
$\psi_a$	: 機首方位角 (対気成分)

### 1. 緒言

世界的な民間航空機の需要はここ数十年で急速に増加しており、民間航空機市場は今後も成長が予想されている。特にアジア・太平洋地域における成長は著しく、その背景には格安航空機 (Low Cost Carrier, LCC) の台頭による影響が大きい。近年日本でも多くの LCC 便が就航しており、我が国における国際航空市場の成長を牽引している。航空交通量が集中する混雑空域では管制官の処理容量を超えると、航空機は迂回や速度調整等を指示される。その結果、航空機の運航効率は低下する傾向がある。このような問題意識から将来を見据えた世界的な航空交通管理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)、米国では NextGen (Next Generation Air Transportation System) 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。我が国日本でも将来航空交通システムの変革に向けた協調的行動 CARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems) と呼ばれる長期ビジョンを掲げ、日本の空域を一つとした軌道ベース運用 (Trajectory Based Operation, TBO) を実現等に向けた取り組みが行われている<sup>(1)</sup>。

本研究では混雑空域における到着機の運航効率改善を目的とし、実飛行データを用いることによって飛行解析を行う。運航効率改善の対象とする混雑空域は、LCC や貨物便のハブ拠点として急成長している関西国際空港を含んだ大阪湾周辺の関西 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 空港に対する到着機の運航の現状を調べ、降下時の燃料消費が少ない効率的な運航方式により得られる便益とその運航方式導入の可能性を評価する。

### 2. 関西 3 空港の運航現状

#### 2.1 ADS-B データによる現状分析

関西 3 空港の運航の現状を知るために ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) データを使用した。ADS-B 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。GPS により取得した位置情報を使用するため位置精度が高いという特徴がある。今回、淡路島にて記録用アンテナを使用し、ADS-B データを実際に記録した。記録した ADS-B データ諸元を表 1 示す。

Table. 1 Information of recorded ADS-B data

Record period	2016 June 22nd 14:35~16:40(JST)
Record location	Parking place at AWAJI HANASAJIKI park
Item	Aircraft registration, Aircraft type, Time, Latitude, Longitude, Pressure altitude, Ground speed, Heading
Record cycle	Approx. 1 seconds
Flight	Approx. 400

記録した ADS-B データから関西 3 空港への到着機への到着機のみを抽出し飛行経路を地図上に表示したものを図 1 に示す。図 1 の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。図 1 より、関西国際空港への到着機は、全て淡路島上空を經由して 1 箇所に集められ滑走路へ向かっていることがわかる。大阪国際空港への到着機は、3 方向からの到着機が空港南東の位置で集められ滑走路へ向かっていることがわかる。また神戸空港到着機は、全て明石海峡大橋の上空を經由して滑走路に向かっていることがわかる。

図 2 に関西国際空港到着機の時刻と高度を示す。図 2 より

関西国際空港到着機はほぼ全ての便において高度 4000[ft]で水平飛行を行っていることがわかった。この高度 4000[ft]において、水平飛行している部分の飛行経路と到着時に航空機が飛行中に目印としている位置であるウェイポイントから4つを抜き出し、それぞれを地図上に記したものを図3に示す。その結果、関西国際空港到着機はウェイポイントのLILAC-MAYAH間で水平飛行していることがわかった。この水平飛行により無駄な燃料消費が生じていると考えられる。

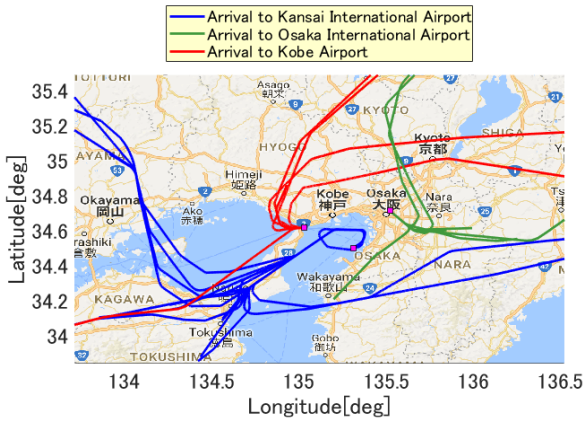


Fig. 1 Flight path of arrival aircraft in 3 airports

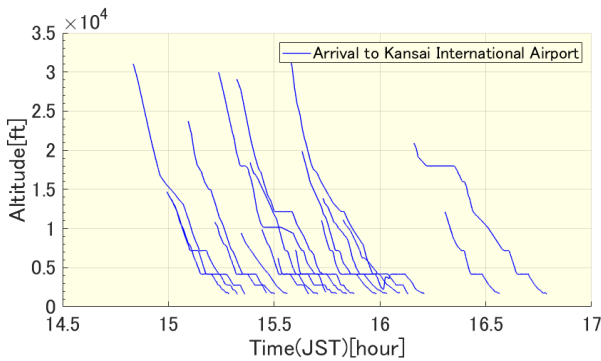


Fig. 2 Time and altitude of arrival aircraft to Kansai International Airport



Fig. 3 Flight path of arrival aircraft to Kansai International Airport at a constant altitude of 4000[ft]

## 2.2 CARATS Open Data による現状分析

航空機の運航効率を改善するに当たり、ADS-B データは位置精度が高いため航空機の運航の詳細を知る目的には適するが、ADS-B 装置を搭載していない機体からは航跡データを取得できないという問題がある。そこで今回解析に使用する航跡データには国土交通省が公表しているレーダデータで

ある CARATS Open Data を使用する。CARATS Open Data は ADS-B データに比べ位置精度や時間分解能が劣るが、レーダデータであるため日本上空を通過する全ての航空機のデータを使用できるというメリットがある。今回使用した CARATS Open Data の概要を図2に示す。CARATS Open Data には年度ごとに 42 日分の航跡データが格納されているが、今回の解析では対象とする日を無作為に選び、2014 年 9 月 15 日とした。

Table. 2 Information of used CARATS Open Data

Record period	2014 September 15th 00:00~24:00(JST)
Item	Virtual flight number, Time, Latitude, Longitude, Pressure altitude, Aircraft type
Record cycle	Approx. 10 seconds
Number of flight	3959

1 日分の航跡データには約 4000 機にも及ぶ膨大な数の航空機の航跡データが格納されているため、その中から関西国際空港の到着機かつ ADS-B データを記録した時と同じ滑走路 RWY24L/24R を使用する到着機を選び、さらに機体数を減らすため関西国際空港において最も多く運用されているエアバス A320 のみの航跡データを抽出した。抽出した全 33 機の飛行経路を図4に示す。図4において赤線で示した位置すなわち紀伊半島の西部において、関西国際空港到着機はおよそ 10000[ft]で水平飛行していることもわかった。これは東方向からやってくる航空機にのみ見られる運航効率低下箇所である。以下 CARATS Open Data より抽出したこれら 33 機の到着機において軌道最適化を行う。

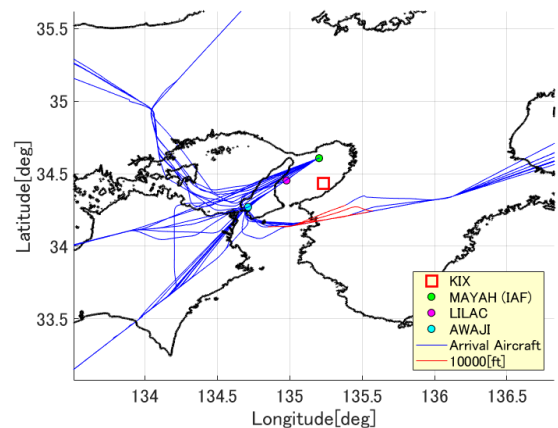


Fig. 4 Flight path of arrival aircraft to Kansai International Airport (RWY24L/24R,A320, all 33 flight)

## 3. 軌道最適化

### 3.1 継続降下運航 (Continuous Descent Operation, CDO)

本研究において航空機の理想的な降下方式として継続降下運航 (Continuous Descent Operation, CDO) を使用する。CDO は航空機の燃料消費量を抑える効率的な運航方式として提案されており、将来あらゆる空域における導入が期待されている。航空機の現在の降下と CDO による降下のイメージ図を図5に示す。CDO は降下する到着機が低いエンジンラスト設定を維持したまま FAF (Final Approach Fix) まで継続的に降下する運航方式である<sup>(2)</sup>。現在の降下は降下途中に水平飛行を含むことが多いが、CDO による飛行では水平飛行が一切ない。関西国際空港においても現在、23時から7時の間でのみ CDO の運用が許可されている。しかし運用が許可されているにもかかわらず、実際に CDO を行っている機体

は約 1.5 機/日という実績である<sup>(3)</sup>。本研究では夜間だけでなく昼間でも到着機に CDO を導入可能であるのかを動的計画法による軌道最適化によって評価する。

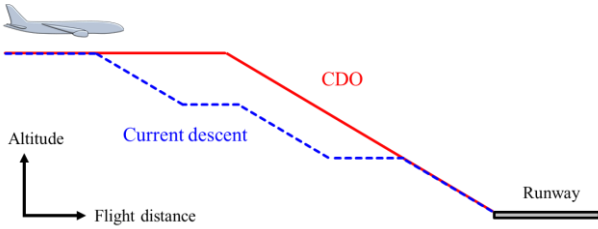


Fig. 5 Aircraft descent method

### 3.2 支配方程式

今回解析において使用した航空機の 3 自由度の運動方程式を式(1)～式(7)に示す。

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

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{(R_0 + H)} V \cos \gamma_a \sin \psi_a + W_y \quad (2)$$

$$m \frac{dV}{dt} = T - D - mg \sin \gamma_a - m \frac{dW}{dt} \cos \gamma_a \quad (3)$$

$$mV \frac{d\gamma_a}{dt} = L - mg \cos \gamma_a + m \frac{dW}{dt} \sin \gamma_a \quad (4)$$

$$\frac{dX}{dt} = V \cos \gamma_a \quad (5)$$

$$\frac{dH}{dt} = V \sin \gamma_a \quad (6)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\mu = -cT \quad (7)$$

また、抗力係数を 2 次の関数で表す基本的な空力モデルを以下の式(8)～式(10)に示す。

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

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

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

### 3.3 飛行状態推定

実際の飛行における航空機の飛行状態は航跡データである CARATS Open data を使用することにより推定することが可能である。飛行状態推定を行う手順を図 6 に示す。まず航空機の位置の時間変化により対地速度が計算できる。真対気速度、較正対気速度、マッハ数等は気象データを使用することにより求められる。ここで使用した気象データは、気象庁が公表している数値予報の実況値を使用する<sup>(4)</sup>。このデータは格子点データ (Grid Point Value ,GPV) として保存されており、これを空間・時間方向に内挿することによって真対気速度を求める。その後、欧州航空航法安全機構 (European Organisation for the Safety of Air Navigation, EUROCONTROL) が維持・管理している航空機ごとの機体性能モデルである BADA (Base of Aircraft Data) モデル<sup>(5)</sup>を使用し、BADA モデル内に記されている航空機の計算式を用い燃料流量を推定する。式(7)における係数  $c$  は燃料消費率であり、この値も BADA モデルより得られる。このような過程で得られた燃料流量を飛行時間で積分することにより燃料消費量を求める。

この飛行状態推定により求めた実際の飛行の燃料消費量

及び飛行時間と、動的計画法により求めた CDO による飛行の燃料消費量及び飛行時間を比較することにより CDO の潜在便益を評価する。

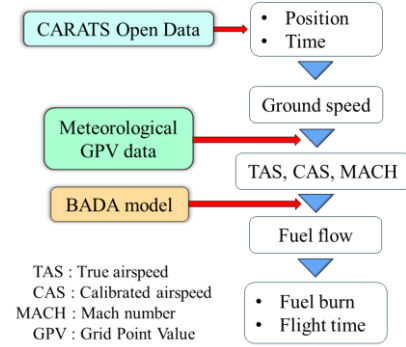


Fig. 6 Overview of flight state estimation

### 3.4 動的計画法による軌道最適化

全節で示した気象データと BADA モデルを用いて、任意に作成した飛行軌道における燃料消費と飛行時間を推定することが可能である。軌道最適化には、非線形システムや不等式拘束条件の取り扱いが容易な動的計画法 (Dynamic Programming, DP 法) を使用する。DP 法による軌道最適化の概要図を図 7 に示す。軌道最適化において、飛行経路は CARATS Open Data から得た実際の飛行と同じ経路を飛行するものと仮定する。そして鉛直面内の飛行距離を 20[km]ごとに分割し、各位置での最適な高度と速度を計算する。従って、最適化すべき状態変数は高度と速度の 2 つであり、最適解を得るためにこれらの格子点を作成する。始点と終点の水平面位置は実際の飛行と同一であり、本解析では、始点は高度 10000[ft]以上の位置を使用し、終点はウェイポイント MAYAH を通過する位置とする。

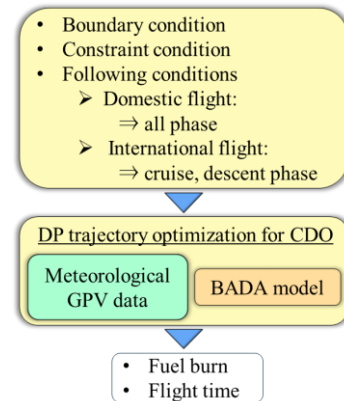


Fig. 7 Overview of Dynamic Programming trajectory optimization

飛行効率 は燃料消費と飛行時間によって評価することができ、両者の間にはトレードオフの関係がある。そのため軌道最適化のための評価関数は式(11)のように設定する。

$$J = \int_{t_0}^f \mu(t) dt + at_f \quad (11)$$

式(3), (6)を式(5)で割ることにより以下の式(12), (13)を得る。

$$\frac{dV}{dX} = \frac{T - D - mg \sin \gamma_a}{mV \cos \gamma_a} - \frac{dW}{dX} \cos \gamma_a \quad (12)$$

$$\frac{dH}{dX} = \tan \gamma_a \quad (13)$$

状態変数と制御変数は以下である。

$$\mathbf{x} = [H, V]^T, \mathbf{u} = [\gamma_a, T]^T \quad (14)$$

量子化された格子点から  $\Delta H, \Delta X, \Delta V, \Delta W$  が与えられるので、未知量である  $\gamma_a, T$  は式(15), (16)より求められる。

$$\gamma_a = \tan^{-1} \frac{\Delta H}{\Delta X} \quad (15)$$

$$T = mV \cos \gamma_a \left( \frac{\Delta V}{\Delta X} + \frac{\Delta W}{\Delta X} \cos \gamma_a \right) + D + mg \sin \gamma_a \quad (16)$$

また、飛行時間を調整する重み係数  $a$  は、0 から 1 の間を 0.05 刻みで変更し、実際の飛行時間と最も近い値となるものを使用する。

#### 4. 結果

関西国際空港へ滑走路 RWY24L/24R に着陸する 33 機全てのエアバス A320 に対し、国際線は巡航から降下区間、国内線は上昇から降下の全区間を対象として、DP 法を用いて軌道最適化を行った。33 機全てに対し、燃料消費量と飛行時間の差を国際線と国内線に色分けしてプロットしたものを図 8 に示す。ここでの差とは、最適な飛行での値から実際の飛行での値を引いたものである。図 8 より、全ての到着機に対し燃料消費量を削減することが可能であるということがわかった。国内線の方が国際線よりも削減可能な燃料消費量が大きいという結果となった。また、これは国内線の方が最適化する範囲が広いためと考えられる。33 機の平均ではおよそ 250[kg]の燃料消費量を削減可能であるとわかった。飛行時間の差においては、国際線と国内線のどちらもおよそ 100[sec]以内に収まるという結果となった。

また特徴的な飛行を示した 10 機について関西国際空港からの飛行距離に対する実際の飛行と最適な飛行の高度と燃料流量の関係を図 9 に示す。図 9 において、青線が CARATS Open Data から得た実際の飛行、赤線が DP 法によって軌道最適化を行った最適な飛行を示している。まず図 9 上の高度の図より、降下時において実際の飛行では降下の途中に高度 10000[ft], 7000[ft], 4000[ft]において水平飛行を行っていたが、最適な飛行では降下の途中に水平飛行を一切行っておらず継続的に降下している。よって最適な飛行は CDO となるがことわかる。また国内線においては、最適な飛行の方がより早く上昇し、より長い距離を巡航していることがわかる。次に図 9 下の燃料流量の図において、最も CDO による効果が出ているのは降下時の水平飛行を行っている部分であることが読み取れる。実際の飛行では降下時の水平飛行部分において燃料流量が増大しているが、最適な飛行では水平飛行がなく最小エンジンスラストで降下しているため、降下時の燃料流量は最低限となっている。これらの定量的評価の結果から、CDO による降下が燃料消費量を削減する有効な方法であり多くの便益を得ることができると言える。

#### 5. 結言

今回関西 3 空港到着機における運航効率の改善を目的に ADS-B データによる現状分析を行い、関西国際空港到着機において顕著な運航効率低下箇所を見つけた。そして CARATS Open Data を用い、DP 法による軌道最適化を行うことで関西国際空港到着機に対し CDO を導入した場合に得られる便益を定量的に評価した。その結果解析対象とした到着機全てにおいて燃料消費量の削減が可能であり、その削減量は平均 250[kg]となることがわかった。しかし、飛行時間にはおよそ 100[sec]以内に収まる結果となった。混雑空港において CDO を導入するには到着時間のずれは空港の容量低下を引き起

こしかねない。そのため空港の発着容量を低下させないような、到着時間管理を含んだ CDO による最適軌道の設計が今後の課題である。

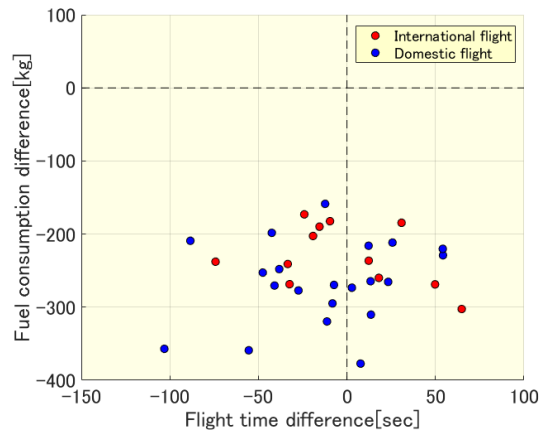


Fig. 8 Flight time difference and fuel consumption difference of international and domestic flights (RWY24L/24R, A320, all 33flights)

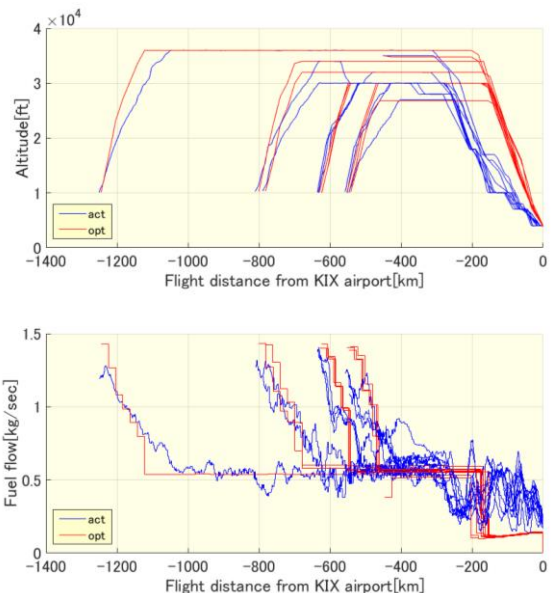


Fig. 9 Altitude and fuel flow of actual and optimal flight (RWY24L/24R, A320, characteristic 10 flights)

#### 文献

- (1) 国土交通省, “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”, 2010
- (2) ICAO, Continuous Descent Operations Manual, ICAO Doc 9931(2010)
- (3) 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, “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
- (4) 京大大学生存圏研究所, 気象庁データ, URL: <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/index-e.html>
- (5) 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