

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

航空宇宙工学コース

機械・航空システム制御研究室 1235099 岩本 由香

記号の説明

a	: 時間の重み係数	K	: 誘導抗力係数
C_{D0}	: 有害抗力係数	L	: 揚力
C_D	: 抗力係数	m	: 機体質量
C_L	: 揚力係数	S	: 翼面積
D	: 抗力	t	: 時間
f	: 燃料流量	T	: 推力
f_c	: 燃料消費量	V_{TAS}	: 真対気速度
g	: 重力加速度	W	: 進行方向 水平風
H_P	: ジオポテンシャル高度	γ	: 経路角
J	: 直接運航経費	ρ	: 空気密度

1. 緒言

旅客の移動や物資輸送において航空需要が高まっており、航空交通量が増加している。航空機が集中する混雑空域では迂回や速度調整等が行われており、燃料消費量や排出ガスが増加し、運航効率の低下が発生する。これらの問題に対応すべく世界で航空交通システムの改善が必要とされている。

日本では航空交通システムの改革に向けた協調的行動 CARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic System) と呼ばれる長期ビジョンが 2010 年に国土交通省航空局によって策定された。運航の安全性、効率性の向上、航空交通量増加への対応等を目標とし、実現に向けた取り組みが行われている⁽¹⁾。

CARATS では、燃料消費量削減目標達成のための効率的な降下方法として継続降下運用が提案されている。本研究では混雑空域における到着機の運航効率改善の実現を目的とし、実データを用いた飛行解析を行う。また、降下経路角と速度の組み合わせを用いた簡易的な CDO 軌道の設計法を提案し、混雑空域である関西国際空港への導入の可能性を検討するために統計的な評価を行う。

2. 関西国際空港到着機の現状

2.1 CARATS Open Data

今回使用する CARATS Open Data は国土交通省航空局が公開しているレーダデータであり、仮想便名、型式、時刻、緯度、経度、気圧高度が格納されている。GPS データより位置精度や時間分解能が劣るが、日本上空を飛行する全ての航空機のデータが得られるという特徴がある。

本研究では、2018 年 1 月 14 日に関西国際空港に到着した航空機のデータを使用する。また、速度のデータは格納されていないので、緯度、経度、時刻から導出し、飛行解析に用いる。

2.2 到着機の現状分析

関西国際空港は 2 本のオープンパラレル滑走路を持ち、規模は西日本最大であり、日本を代表する拠点空港（ハブ空港）である。また 24 時間運用のため深夜でも貨物便等のフライトが行われている。また、付近には滑走路を 2 本持つ大阪国

際空港と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があり、大阪湾周辺の空域は混雑している。この関西 3 空港の混雑空域に対して、降下時の燃料消費が少ない効率的な降下方式を探る。

対象日の 2018 年 1 月 14 日に関西国際空港に到着した航空機は 249 便であった。一部の到着便の経路を図 1 に示す。複数の便が降下途中で水平飛行を行っている様子が分かる。

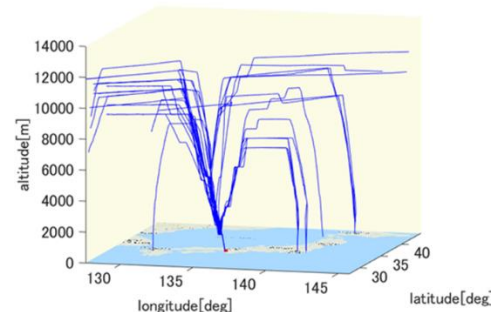


Fig. 1 Flight path of arrival aircraft to Kansai International Airport

3. 経路設計

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

継続降下運航 (CDO) は航空機の降下時に燃料消費を抑える効率的な運用方法として提案されている。従来の降下と CDO による降下のイメージを図 2 に示す。CDO は降下途中の低高度で水平飛行を行わないため、燃料消費量や騒音の削減等の便益が得られる。現在、関西国際空港で交通量の少ない時間帯 (23 時から 7 時) のみ CDO 運用が許可されているが、CDO の実施回数は約 1.5 機/日と少ないのが現状である。原因として CDO は航空管制官が軌道予測しづらく管制が困難であることが考えられる。

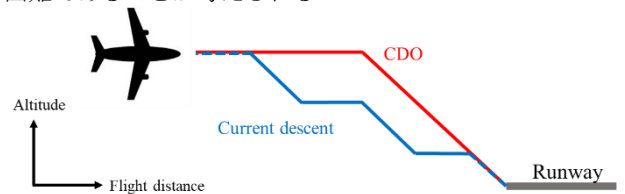


Fig. 2 Aircraft descent method

3.2 最適 CDO 設計

本研究では、降下時の速度と経路角を一定とした簡易的な CDO の軌道設計方法を提案する。この時の航空機の速度は較正対気速度 (Calibrated Air Speed: CAS) を指す。CAS と経路角の組み合わせは無数に存在するが、CAS を 130~180[m/s] で 5[m/s] 刻み、経路角を 2.7~3.2[deg] で 0.05[m/s] 刻みと設定する。燃料消費量最小と飛行時間最小の CAS と経路角の組み合わせは異なるため、評価関数 J : 直接運航経費を式(1)のように定め、両者を一つの指標にまとめる。燃料消費量と飛行時間はトレードオフの関係であるので a を時間の重み係数

として導入する。直接運航経費が最小となる CAS と経路角の組み合わせを探し最適 CDO の経路設計を行う。

$$J = f_c + a \cdot t_f \quad (1)$$

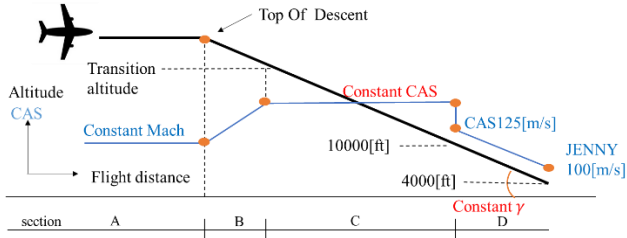


Fig. 3 CAS and Altitude displacement on CDO

図 3 に CDO を行う機体の高度と速度の変化の様子を示す。航空機は降下開始ポイントから一定の経路角で連続的に降下し、図内の C 区間を CAS 一定で飛行する。航空法により高度 10000[ft]以下では速度 250[kt] (約 125[m/s]) 以下と速度制限が設けられているので高度 10000[ft]の手前で減速し D 区間は CAS125[m/s]以下で飛行する。終了点は最終進入フィックス (final approach fix : FAF) である JENNY とし、その高度は 4000[ft]、速度 100[m/s]とする。巡航高度はあらかじめ設定しておく。

4. 実際の飛行データの燃料消費量の導出

4.1. 飛行状態推定

実際の飛行における燃料消費量と飛行時間を比較し、CDO の便益を評価する。図 4 に飛行状態推定の手順を示す。

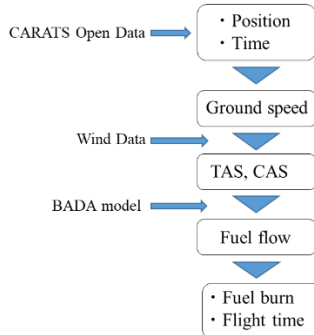


Fig. 4 Overview of flight state estimation

飛行状態推定はまず CARATS Open Data より得られる航空機の位置の時間変化から対地速度 (Ground Speed : GS) を求める。これに風速、気温等の気象データを適用し真対気速度 (True Air Speed : TAS), CAS を求める。その後、機体の性能モデルを用いて推力、燃料流量等を導出する。気象データには気象庁の数値予報実況値を使用する。このデータは緯度、経度、気圧高度の 3 要素で定義されるグリッドの格子点値を格納している。機体性能モデルには欧州航空航法安全機構が維持、管理する航空機ごとの BADA (Base of Aircraft Data) モデルを使用する。

4.2. 空力モデル

降下中の航空機の力の関係を図 5 に、空力モデルの導出に使用する式を以下の式(2)から式(5)に示す。

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

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{TAS}^2 S C_D \quad (3)$$

$$C_D = C_{D0} + K C_L^2 \quad (4)$$

$$C_L = \frac{mg \cos \gamma}{\frac{1}{2} \rho V_{TAS}^2 S} \quad (5)$$

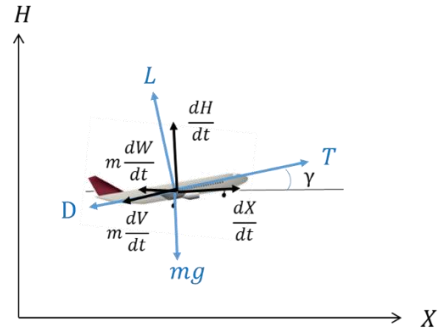


Fig. 5 Force acting on aircraft

4.3. 燃料流量モデル

燃料流量の算出に必要な推力は以下の式(6)で求められる。

$$T = D + mg \sin \gamma + m \frac{dV_{TAS}}{dt} + m \frac{dW}{dt} \cos \gamma \quad (6)$$

燃料流量は式(7)と式(8)の 2 つのうち大きい方を飛行中の燃料流量として使用し、式(11)で燃料消費量を求める。ただし、巡航時の燃料流量は式(10)を用いて計算する。

$$f_{nom} = C_{f1} \times \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}}\right) \times T \quad (7)$$

$$f_{min} = C_{f3} \times \left(1 - \frac{H_p}{C_{f4}}\right) \quad (8)$$

$$f(t) = \max[f_{nom}, f_{min}] \quad (9)$$

$$f(t) = f_{nom} \times C_{fcr} \quad (10)$$

$$f_c = \int_{t_0}^{t_f} f(t) dt \quad (11)$$

式中の係数 C_{f1} から C_{f4} , C_{fcr} は BADA モデルで指定されている機種ごとに固有の値である。

5. 結果

最適 CDO の設計結果を示す。機体をエアバス 320 とし巡航高度は 35000[ft], 36000[ft], 37000[ft] の 3 つ場合で設計した。また、比較対象も同じ条件で実際に飛行していた 25 機を抽出し、巡航高度が一致する CDO と比較を行った。巡航高度別機体数は 35000[ft] : 8 機, 36000[ft] : 6 機, 37000[ft] : 11 機である。

最適 CDO は巡航高度 37000[ft] のとき飛行時間 2159 秒 (約 36 分)、燃料消費量 759[kg] となった。図 6 から図 8 に最適 CDO と比較対象便の高度を示す。最適 CDO は実際の飛行より巡航距離が長くなっている。図 9 に実際の飛行 25 機に対する飛行時間の差と燃料消費量の差を示す。このときの差は (差) = (最適 CDO) - (実際の飛行) である。全 25 機で CDO によって飛行時間を削減できるといった結果となった。燃料消費量については 23 機で削減できた。25 機の平均削減可能量は飛行時間 243 秒、燃料消費量 48.9[kg] であった。

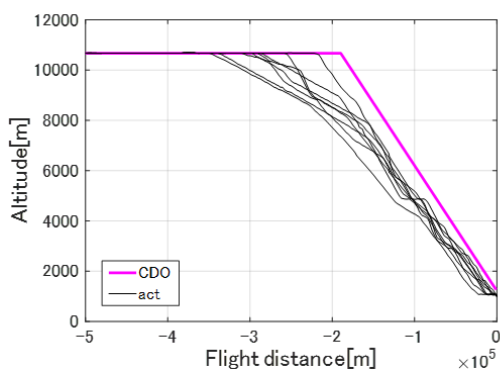


Fig. 6 Altitude(CDO and act),cruise 35000ft

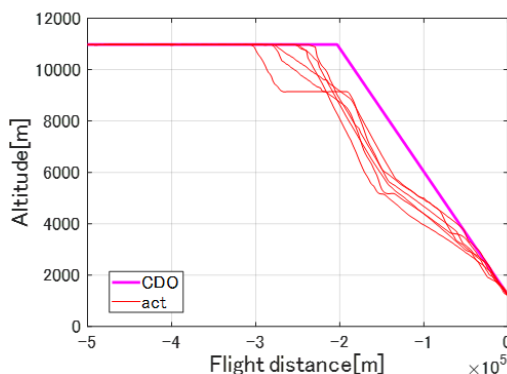


Fig. 7 Altitude(CDO and act),cruise 36000ft

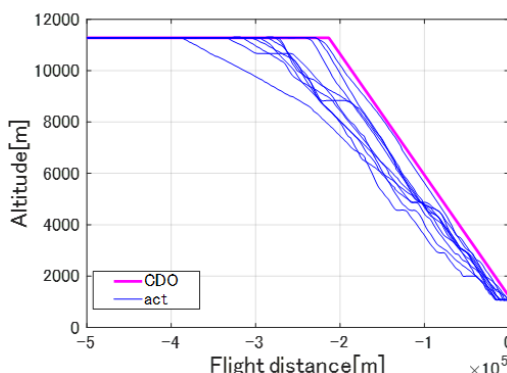


Fig. 8 Altitude(CDO and act),cruise 37000ft

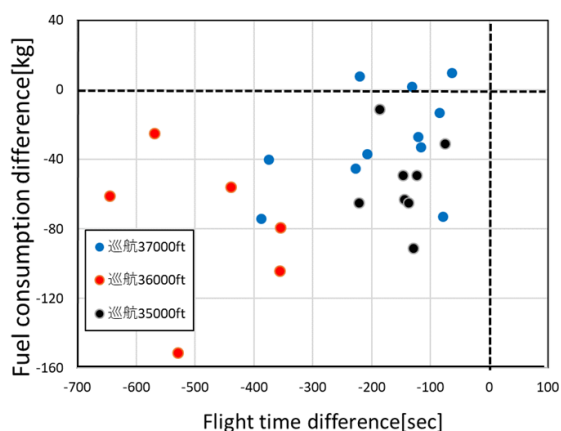


Fig. 9 Difference between CDO and actual Flight (Fuel consumption and Flight time)

比較対象機の中でも降下時に水平飛行を大きく行っていた特徴的な機体を抽出し最適 CDO の飛行と比較する. この機体の飛行時間は 2238 秒 (37 分), 燃料消費は 832[kg]であった. 図 10 に最適 CDO と比較対象機 1 機の高度を示す. 図 11 に GS,TAS,CAS, 図 12 に燃料流量を示す. 実際の飛行では TAS が増加すると CAS も増加していることや, 降下時で水平飛行を行っているところで燃料流量が大きくなっていることが分かる. また最適 CDO の降下時に燃料流量を小さくすることができている.

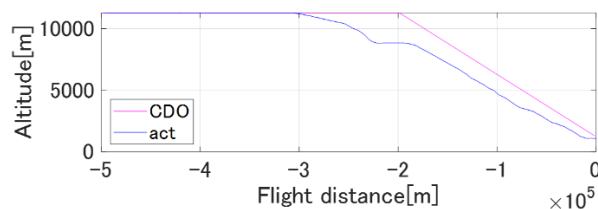


Fig. 10 Altitude

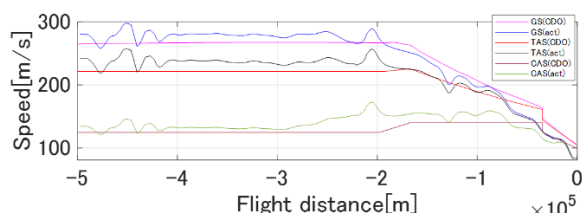


Fig. 11 Speed(GS,TAS,CAS)

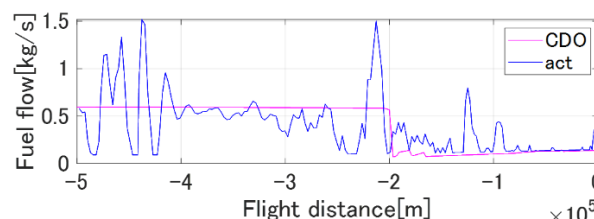


Fig. 12 Fuel flow

6. 結言

燃料消費量を抑えるために効果的な継続降下運航の高度および速度を降下経路角と CAS の組み合わせを用いて簡易的に設計する方法を提案した. また, 実際に関西国際空港へ到着した機体 25 機について解析を行い, 最適 CDO 飛行と比較を行った. 最適 CDO 飛行により平均で飛行時間 243 秒, 燃料消費量 48.9[kg]の削減が可能という結果が得られた. これらは実際の飛行に対して飛行時間が 10%, 燃料消費量 6% の大きさである. 燃料消費量が増加した機体が 3 機あったがその量は 10[kg]以下と小さく, CDO により得られる便益は大きいと考えられる. しかし, CDO は実際の飛行より高高度を飛行しているなど高度変位が異なるので実際の現場への導入には他機との干渉などを考慮する必要がある.

謝辞

本研究に国土交通省航空局が公開する CARATS Open Data, 欧州航空航法安全機構が維持, 管理する BADA モデル, 気象庁が提供する数値予報気象データ GPV を使用しました. これらの機関に謝意を表します.

文献

- (1) 将来の航空交通システムに関する研究会 2010, “将来の航空交通システムに関する長期ビジョン”