

# 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

システム工学群  
機械・航空システム制御研究室 1190117 宮本 吉甫

## 1. 緒言

近年、航空機の利用数が増加しており、航空機の需要が高まっている。そこで、航空交通量増加への対応、運航の安全性・効率性の向上などから航空交通システムを改善する取り組みが行われている。日本では国土交通省により CARATS と呼ばれる航空交通システムに関する長期ビジョンが掲げられている。(1)(2)その中でも、混雑空域での燃料の消費を抑える効率的な方法として継続降下運航(Continuous Descent Operation, CDO)が提案されている。本研究では、混雑空域である関西国際空港、伊丹空港、神戸空港周辺の空域に注目し、CDO の実現に向けた提案を行う。

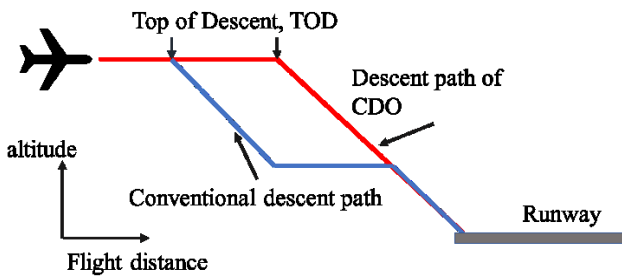


Fig. 1 Application of CDO

## 2. 解析

### 2.1 使用するソフトウェア、データ

本研究では、科学技術計算言語ソフトウェア、MATLAB を使用する。また、飛行データは CARATS Open Data の 2012 年から 2014 年のデータを使用する。CARATS Open Data には 覆域内全ての機体の時刻、仮便名、緯度、経度、気圧高度、型式のデータが格納されている。

### 2.2 現状分析

2014 年 5 月に関西国際空港(KIX)に到着する便の現状分析を行った。図 2 は 2014 年 5 月 12 日に KIX に到着した全ての便をプロットしたものである。赤い点が KIX であり、大変混雑していることが確認できた。別の日にちについても同様に混雑している様子が確認できた。

図 3 は、同日の KIX 到着便のうち初めの 7 便について高度も加えて、3 次元的に飛行経路を示したものである。降下途中に水平飛行を複数回行っていることが確認できた。この日の到着便は 382 便であったことから CDO の適用が可能になれば多くの燃料が削減できると考えられる。

### 2.3 CDO 軌道の設計

CDO の降下軌道設計を行った。降下軌道あるいは降下経路は水平面に投影した飛行距離に対する高度の軌跡を指す。パラメタとして巡航高度、降下経路角、較正対気速度 CAS

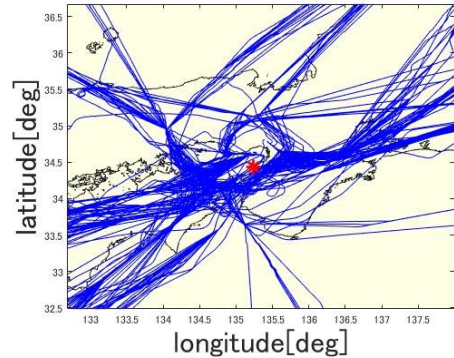


Fig. 2 Flight route of arrival aircraft to KIX

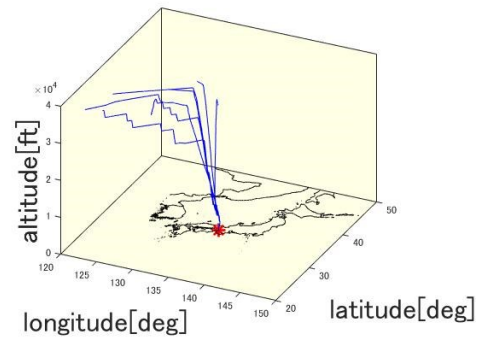


Fig. 3 Three dimensional flight route of arrival aircraft to KIX

(Calibrated Air Speed)を設定できる。これら 3 つのパラメタの組み合わせに対して燃料消費量、飛行時間を算出するプログラムを作成した。図 4 に一例として降下開始高度を 10000[m]、降下経路角を 3.0[deg]、CAS を 160[m/s]に設定した場合の降下経路を示す。ただし、無風状態を仮定している。

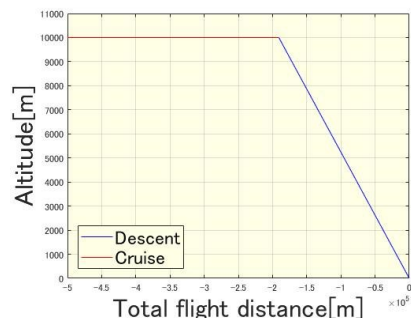


Fig. 4 An example of designed descent path

### 2.4 実際の飛行データの燃料流量、消費燃料の算出

実際の飛行の航跡データから燃料消費量を算出する方法について説明する。

各点の高度から温度、圧力、大気密度を算出し、緯度、経度から  $\Delta x$  [m] を算出する。経路角は、 $\gamma = \tan^{-1} \frac{\Delta H}{\Delta x}$  [deg]、対地速度は、 $V_{GS} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$  [m/s] でそれぞれ求められる。無風状態を仮定しているので対地速度と真対気速度は等しくなる。図 5 より、燃料流量の算出に必要な推力を算出する。推力  $T$  [N] は下記の式によって求められる。

$$T = D + mg \sin\left(\gamma \frac{\pi}{180}\right) + m \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

ここで、 $D$  [N]は抗力、 $m$  [kg]は機体質量、 $g$  [m/s<sup>2</sup>]は重力加速度、 $V$  [m/s]は速度である。空力モデルについては以下を用いる。

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$$

$$C_D = C_{D0} + K C_L^2$$

ただし、 $L$  [N]は揚力、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]は空気密度、 $S$  [m<sup>2</sup>]は翼面積、 $C_L$ は揚力係数、 $C_D$ は抗力係数、 $C_{D0}$ は有害抗力係数、 $K$ は誘導抗力係数ファクターである。燃料消費量 $f_c$  [kg]については燃料流量に関する係数、 $C_{f1}$ から $C_{f4}$ を用いて次のモデルにより求める。

$$f_{nom} = C_{f1} \left(1 - \frac{\Delta V}{C_{f2}}\right) T$$

$$f_{min} = C_{f3} \left(1 - \frac{H}{C_{f4}}\right)$$

$$f_{flow} = \text{MAX}(f_{nom}, f_{min})$$

$$f_c = \int_{t_0}^{t_f} f_{flow}(t) dt$$

この燃料流量モデルは欧州航空航法安全機構により開発された BADA<sup>(3)</sup>と呼ばれるモデルに含まれるものであり、係数は機種ごとに固有の値が与えられる。

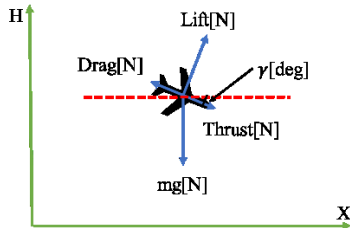


Fig. 5 Force acting on aircraft

## 2.5 CDO 軌道の最適 CAS と最適降下経路角を探る

高度一定の巡航飛行と CAS および経路角一定での降下飛行からなる CDO 軌道は無数に存在するが、経済効率を考慮して CAS および降下経路角の最適値を求めることで効率のよい CDO 軌道を設計する。CAS の設定値は 110 から 180[m/s] を 5[m/s]刻みで、降下経路角は-5.0 から-1.5[deg]まで 0.25[deg]刻みで与え、各組合せについて燃料流量と飛行時間を求める。両者は実運用において用いられるコストインデックス (CI) により、直接運航経費いわゆる運航にかかるコストとしてまとめることができる。このコストが最小となる CAS と降下経路角を効率のよい CDO 軌道の値、すなわち最適値とする。コストインデックスは次節に示すように時間コストと燃料コストの比で定義される。

以下に示す表 1、表 2 の各パラメタの単位は、CAS は[m/s]、降下経路角 $\gamma$ は[deg]である。図 6、7 は表 1、2 の燃料消費量と飛行時間の値を表面プロットで示したものである。

Table 1 Fuel consumption [kg] at each CAS and descent angle

$\gamma \backslash$ CAS	110	120	130	140	150	160	170	180
-5.0	1004.6	943.9	908.2	888.9	880.6	879.8	884.2	892.0
-4.5	978.5	919.0	883.7	864.3	855.6	854.1	857.7	866.6
-4.0	956.6	898.0	862.9	843.2	833.9	831.8	839.5	867.7
-3.5	926.8	869.4	834.6	814.6	804.6	816.2	848.4	887.2

-3.0	879.1	824.0	789.8	776.4	799.7	833.2	871.0	911.3
-2.5	838.9	804.0	801.0	816.6	844.0	878.8	918.2	960.3
-2.0	887.1	852.5	849.4	865.9	894.7	931.4	973.0	1017.4
-1.5	982.0	944.4	940.8	958.5	989.7	1029.6	1074.9	1123.5

Table 2 Flight Time [s] at each CAS and descent angle

$\gamma \backslash$ CAS	110	120	130	140	150	160	170	180
-5.0	2924.2	2692.9	2497.8	2331.2	2187.2	2061.6	1951.0	1853.0
-4.5	2946.1	2712.8	2516.0	2347.9	2202.6	2075.8	1964.3	1865.4
-4.0	2973.5	2737.7	2538.7	2368.8	2221.9	2093.7	1980.9	1880.9
-3.5	3008.7	2769.6	2568.0	2395.6	2246.6	2116.6	2002.2	1900.8
-3.0	3055.6	2812.2	2606.9	2431.3	2279.6	2147.2	2030.7	1927.3
-2.5	3121.3	2871.9	2661.3	2481.4	2325.8	2190.0	2070.5	1964.4
-2.0	3219.8	2961.3	2743.0	2556.4	2395.1	2254.2	2130.2	2020.1
-1.5	3383.9	3110.3	2879.2	2681.5	2510.5	2361.2	2229.6	2112.9

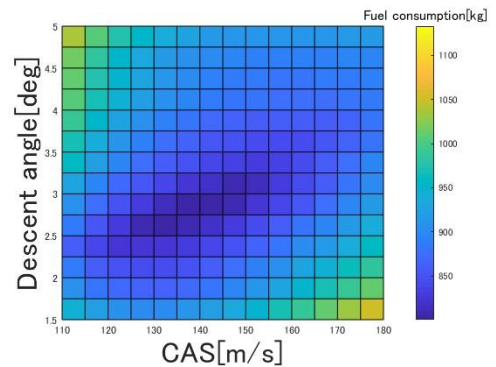


Fig. 6 Fuel consumption on the axes of CAS and descent angle

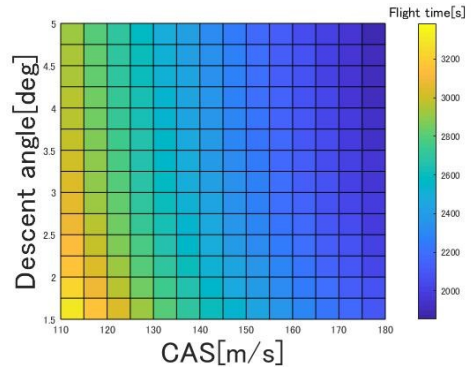


Fig. 7 Flight time on the axes of CAS and descent angle

図 6 において、CAS が小さく、経路角が深くなるほど燃料消費量が大きくなっているのは、速度が小さく飛行時間が長くなるためであり、一方、CAS が大きく、経路角が浅い領域でも燃料が増加しているのは降下経路角が小さいことに加え、速度が大きいためより大きな推力を要するためであると考えられる。

## 2.6 CDO 降下軌道の設計例

コストインデックスは下記の式で表される。(4)

$$CI = \frac{Cost_{time}[dollars/hour]}{Cost_{fuel}[cent/lb]} = 79.37a$$

$a$ : 時間の燃料消費量に対する重み[kg/s]

ここで、 $a$ は直接運航経費を[kg]の単位で表す場合の時間の重みに該当する。本稿では、直接運航経費[kg]を評価関数 $J$ として定め、これが最小となる CAS と経路角の組み合わせを複数の CI に対して求めることとする。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} f_{flow}(t)dt + at_f$$

本稿では、巡航高度は10,000 [m]に固定する。

### CI = 0の場合

$a = 0$ となるので、時間コストを無視し、燃料コストのみを評価することとなる。つまり、燃料最小の軌道が得られる。この時の CAS と降下経路角はそれぞれ、CAS=140[m/s],  $\gamma=3.0$ [deg]となった。

### CI = 40の場合

$a = 0.504$ となり、燃料コストのみでなく、時間コストも考慮された軌道が得られる。CI = 0の場合と比較すると、燃料は増加するが飛行時間は短縮される。この時の CAS と降下経路角はそれぞれ、CAS=180[m/s],  $\gamma=4.5$ [deg]であった。上記2通りの CI による最適な CDO 降下軌道を図 8 に示す。

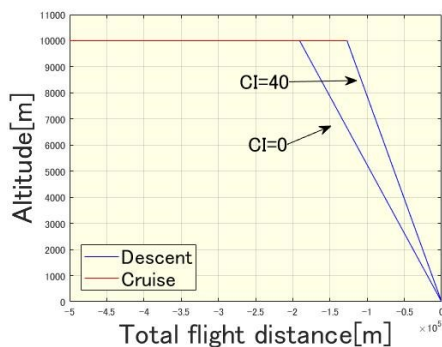


Fig. 8 Economically efficient CDO descent path

CI=0, 40 の場合の最適 CAS, 最適降下経路角の値を図 6, 7 で比較してみると、CI=0 では、燃料消費量が低い位置に存在しており、飛行時間は比較的長い位置に存在している。

一方で、CI=40 では、CI=0 の時と比べて燃料消費量が増加し、飛行時間が短くなる位置に存在している。

図 8 より、CI=0 の時、空港から遠い位置から降下し始めているのが確認できる。これは燃料消費を抑えるために、空港から遠い位置から、推力を抑えて滑空に近い飛び方をするためである。一方で CI=40 では、より大きな速度で、空港に近い位置から降下を始めている。CI が増加すると時間をより重く評価するようになるので、飛行時間を短縮するために巡航区間が増え、より大きな速度が算出されたと考えられる。

## 3. 結言

経済効率のよい CDO 軌道の設計方法として、コストが最小となる最適 CAS と最適経路角の組み合わせを算出する方法を提案した。この方法は従来の軌道最適化手法に比べ、簡易的に、かつ短時間で CDO 軌道を作成可能である。

今後の課題としては、実際の飛行データについて消費燃料を算出し、設計した最適な CDO 軌道の燃料消費量と比較することで CDO によるコスト削減の効果について調べる。この際、風の影響も考慮する。また、複数の機体が存在する混雑空域において、機体同士の干渉も考慮しつつ CDO を導入可能であるか検討する。

## 謝辞

本研究は国土交通省航空局が公開する CARATS Open Data および欧州航空航法安全機構が維持・管理する BADA モデルを使用した。これらの機関が提供する便宜に謝意を表す。

## 文献

- (1) 国土交通省：“将来の航空交通システムに関する推進協議会”  
URL: [http://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_fr13\\_000006.html](http://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr13_000006.html)
- (2) 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  
URL: <http://www.mlit.go.jp/common/000123890.pdf>
- (3) Eurocontrol Experimental Center, User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.14: EEC Technical/Scientific Report No. 17/05/29-143.
- (4) Miyazawa, Y., Wickramasinghe, N.K., Harada, A., and Miyamoto, Y., “Dynamic Programming Application to Airliner Four Dimensional Optimal Flight Trajectory,” AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA 2013-4969, Boston, US, 2013.