

# 7. フルフライトシミュレータによる継続降下運航の効果の検討

航空交通管理領域 ※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 キトマル

## 1 はじめに

航空機が降下・着陸するときは、エンジンラストをアイドル（推力最小）の状態でも連続的に降下することが、燃料節減の面で望ましい。また、より高高度を飛行する方が騒音も低減できる。消費燃料や騒音を低減するために、世界的に多くの空港で継続降下運航（CDO; Continuous Descent Operation）<sup>[1]</sup>が検討・導入されてきている。我が国でも、国土交通省の「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS）」では、CDOを3段階にわけて導入する予定である<sup>[2]</sup>。まず、関西国際空港（以下、関西空港）ではCDOの試行運用を経て、平成25年3月7日からCDOが正式運用となった。さらに、那覇空港では平成25年9月19日からCDOが試行運用されている（現在は両空港とも第1段階）<sup>[3]</sup>。

混雑地域を飛行する航空機に対して、他機との安全間隔を確保するために、航空管制ではレーダー誘導や水平飛行を指示する場合がある。CDOは航空機にとって最適な降下であるため機種や重量、気象条件による差が大きいので、管制官にとっては予測精度の低い運用である。CDO機前後の間隔を確保するには通常よりも広めの間隔を確保する必要があり、現在は交通量の少ない深夜に限定されている。

東京国際空港（以下、羽田空港）は夜間の発着回数も多く、将来さらなる需要の増加が予想されている。そのため、羽田空港にCDOを導入するためには、他機との間隔維持を検討する必要がある。具体的にはCDO実施機の軌道予測、CDO実施機の到着時刻の微調整およびその影響の検討が不可欠である。

そこで本研究では、航空会社のフルフライトシミュレータを使用して、CDOに関するシミュレーション実験を行った。本稿では、5試行分のフルフライトシミュレータ実験結果に基づ

き、継続降下運航の効果を検討する。

まず検証に用いた羽田空港への到着経路および、降下に関するシミュレーションの条件を述べる。シミュレーション結果より、現在の管制運用で間隔設定のための消費燃料の増加例を示すとともに、減速のみによる時間調整の消費燃料と時間調整の精度の解析結果を報告する。さらに、将来のCDOの降下と課題について述べる。

## 2 シミュレーションの概要

### 2.1 前提条件

CDOを実施するには管制承認時に通信する内容が多く、無線通信時間が長い。しかし定型文を使用することが可能でありデータリンク通信に向いている。現在、洋上管制では管制官パイロットデータリンク通信（CPDLC; Controller-Pilot Data Link Communication）を利用している。そこで、羽田空港に洋上空域から到着する経路として北米やハワイから到着する経路に着目し、交通量の少ない深夜帯の経路での実施を想定した。シミュレーションでの条件を表1に示す。

表1 シミュレーション条件

機種	B777-200
エンルートでの経路	深夜の経路
	SMOLT-SUNNS-SHOES-PQE
到着経路	北風運用 ILS Y RWY34L
	PQE- UMUKI (6000above)- KAIHO (IAF; 4000above)- AVION - ALLIE - AZURE(FAF; 1500) - RJTT
巡航高度	FL380*
重量	SMOLT直前で約413,000lbs

\*: フライトレベル, FLxは高度x×100フィート

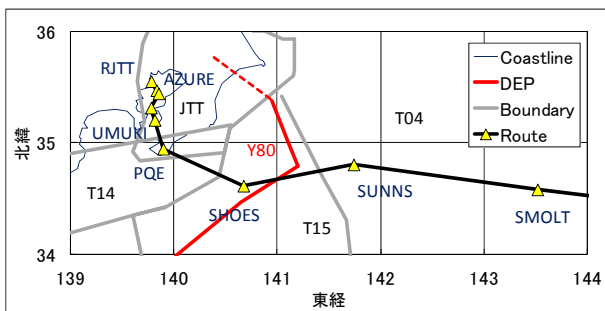


図 1 シミュレーションでの飛行経路及び管制空域

飛行予定経路及び管制空域を図 1 に示す。到着経路は深夜帯の経路を想定した。関東東セクタ (T04), 房総セクタ (T15), 湘南セクタ (T14), 羽田進入管制区 (JTT) という順番に飛行していく。T15 の上限高度は FL340, T14 の上限高度は FL270 である。図中黒線が飛行経路であり、図中赤実線 (Y80) は 2.2 で後述する成田空港の出発経路の 1 つである。

実際の風と飛行管理システム (FMS; Flight Management System) に入力された風との誤差による差を測るために FMS に入力する予報風と機外大気風のデータに誤差を持たせた。FMS に入力する値は気象庁が発表している全球モデルの 6 時間前の値を元にした 6 時間後予報値、機外大気は 0 時間の値を用いた。2 種類の風を想定を表 2 に示す。

表 2 の風は飛行途中で受ける風の方向変化が大きい西風の強い冬の日の風を選択した。

シミュレータの操作は航空会社の熟練パイロ

表 2 風の想定

高度	FMS (予報風)		機外風	
	風向*	風速	風向*	風速
FL380	267 度	93knot	287 度	74 knot
FL250	272 度	75knot	275 度	72knot
10,000ft	272 度	35 knot	291 度	21 knot
6,000ft	263 度	14 knot		
0ft			258 度	7 knot

\*:方向は真北を 0 度として右回り

ットが行った。管制指示については管制通信は使用しなかったが、管制指示相当の指示を適宜口頭でパイロットに伝達した。

消費燃料と飛行時間の関係を設定するコストインデックス<sup>[4]</sup>の設定は燃料最小よりも若干飛行時間短縮を優先する数値とし、5 試行とも同じ数値を用いた。

## 2.2 シミュレーションの内容

現在、羽田空港への到着には他機との関連、空域条件などを考慮した制限がある。本試行では、OPD (Optimized Profile Descent) として、最も効率的な降下の状態を比較するために、空域上の制限をなくし、全試行での最低条件は、

- 10,000ft 未満では 250knot 未満
- 最終進入点を 1,500ft で通過するのみとした。

現在の管制運用上の条件である、

- T14 境界線を FL270 未満で通過する
- PQE 付近で 11,000ft に降下する
- UMUKI までは 6,000ft 以上で飛行するという条件は試行によって付加した。

5 種類のシミュレーションの内容を表 3 に示す。このシミュレーションに参加したパイロットは 3 人であり、それぞれの操作を行ったパイロットを P1~P3 で区別した。

OPD は比較のために理想的な降下を行った。現在交通量の少ない時間帯ではこのような降下を行えることがある。

表 3 シミュレーションの内容

試行名	パイロット	内容
OPD	P1	理想的降下
ATC_OPT	P2	空域条件を考慮した降下
RTA+2	P3	SUNNS 通過後に RTA の指示を想定
VECTOR1	P2	低高度で若干の誘導を想定
VECTOR2	P3	通過機との管制間隔維持のための早めの降下とその後のレーダ誘導を想定

ATC\_OPT は、他機との間隔維持の必要がなく、管制官が最大限に空域条件と航空機の性能を考慮して降下指示をだしたことを模擬した。

RTA+2 は T04 セクタで、PQE での通過予定時刻を管制官が質問し、その 2 分後の通過を指示した場合を模擬した。RTA (Required Time of Arrival) 機能は FMS の機能の 1 つで特定地点の通過時刻を満足するように自動的に機体を制御して速度を調整する機能である<sup>5)</sup>。機種によって精度や適用可能な飛行フェーズ（巡航、降下など）に差がある。質問する位置としては洋上空域ではなく、レーダ覆域内であり、かつ次の空域の混雑具合を把握できる位置として、SUNNS 付近を想定した。100NM で 2 分飛行時間を延長する内容である。

VECTOR1 はほぼ理想的な降下を行っていたが先行機との間隔維持のために PQE を過ぎて、10,000ft から 6,000ft あたりまでの降下区間でレーダ誘導を行い、若干飛行距離を伸ばして間隔を確保することを模擬した。現在の管制運用では微調整程度の誘導として一般的に行われている。

一方、VECTOR2 は降下開始点 (TOD; Top Of Descent) よりもかなり手前の位置から他機 (Y80 を飛行する成田の出発機を想定) との間隔維持のために降下し、さらに到着機同士の間隔維持の為に、長めのレーダ誘導を行う例である。これも混雑時間帯では現実的な運用である。

### 3 シミュレーション結果

#### 3.1 消費燃料と飛行時間

5 試行の SMOLT—AZULE 間の消費燃料と飛行時間を左から飛行時間の少ない順に図 2

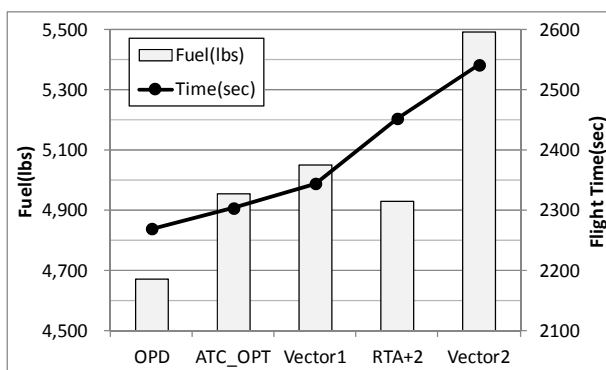


図 2 消費燃料と飛行時間

に示す。

ATC\_OPT は OPD よりも 34 秒, 281lbs 多く飛行した。

Vector1 は ATC\_OPT よりも 41 秒, 95lbs 多く飛行した。

RTA+2 は OPD よりも 3 分以上飛行時間が長かったが、消費燃料は ATC\_OPT よりも 23lbs 少なかった。2.1 で前述したコストインデックスの指定では、ATC\_OPT での速度自体が燃料を最小とする速度よりも若干速い。減速幅が大きすぎると消費燃料は増加するが、本試行での減速は消費燃料を増加させるほどの減速ではなかった。

Vector2 は飛行時間、消費燃料とも OPD を大幅に上回り、4.5 分以上、800lbs 以上増加した。

#### 3.2 飛行高度と消費燃料

各試行の飛行高度と 1 秒あたりの消費燃料を図 3 に示す。グラフ中の△、▲は各試行での T04—T15 境界通過点及び PQE 再接近点 (Vector2 は PQE を通過していない) である。ATC\_OPT 及び Vector1 は PQE まで OPD とほぼ同様の降下をした。

ATC\_OPT は 6,000ft のところで消費燃料が多い。これは管制官からの 6,000ft への降下指示に従い降下したら UMUKI 手前で 6,000ft に到達し、UMUKI を通過するまで次の 4,000ft への降下を指示されないことを模擬したためである。グラフでは分かりにくいですが 40 秒程度 (約 2NM)、6,000ft で水平飛行を行っている。消費燃料が多くなっているのはその部分である。また 4,000ft 未満のところでも ATC\_OPT は燃料が多くなっている。OPD と ATC\_OPT はパイロットが異なるため、SMOLT-KAIHO 間のみで比較すると、消費燃料の差は 146lbs のみとなる。

Vector1 は、PQE 通過後にレーダ誘導を行ったが水平飛行は行わず降下モードであったので、その分の増分は 95lbs 程度であった。

RTA+2 及び Vector2 は PQE までの降下プロファイルが OPD と大きく異なる。

RTA+2 は早めに減速したが緩やかに降下しているため時間当たりの消費燃料は OPD とほとんど同じである。減速により飛行時間が延長

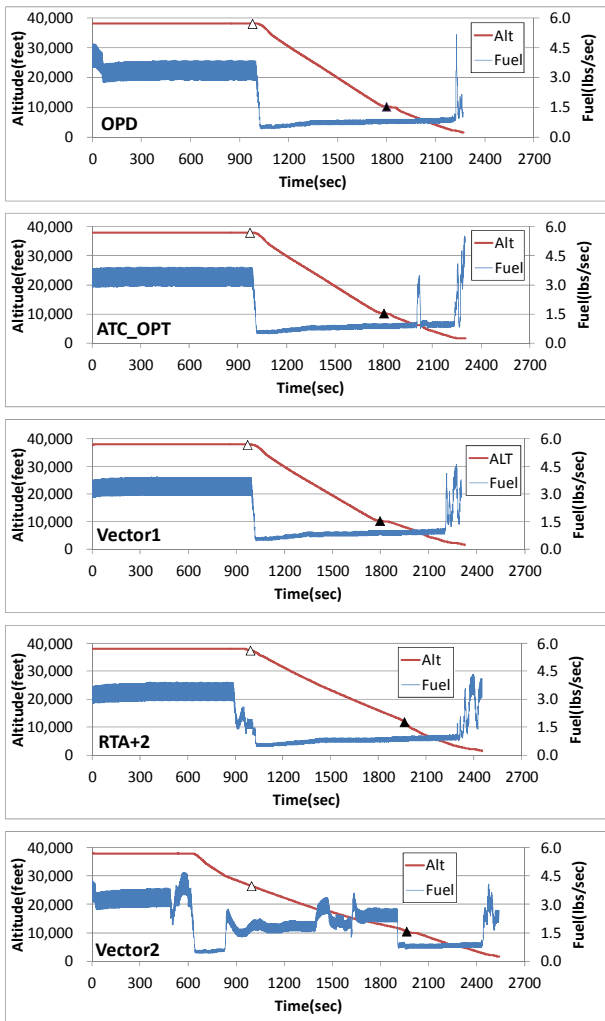


図 3 飛行高度と消費燃料

されたのでその分の燃料が総計として増加した。

一方、Vector2 も空域境界線（図中△）の 20NM 程度先の地点を FL260 以下で通過する指示を出された当初はアイドルで降下しており、そのときの消費燃料は少なく、OPD とあまり変わらなかった。しかし、レーダ誘導開始直後（△の 12NM 程度手前、FL290）から、PQE 付近を通過（10,000ft）するまでの間の消費燃料が多い。FMS の LNAV モードで飛行しているときは FMS が最適計算しながら降下や減速を行うが、経路をはずれレーダ誘導を行うと最適処理が行われなため、消費燃料が増加する。10,000ft を下回り 250knot 未満になり再び消費燃料は少なくなった。

## 4 考察

### 4.1 管制間隔の微調整

Vector1 は ATC\_OPT に対して 41 秒多めに飛行している。FAF である KAIHO に到達したときに、1.2NM の間隔がついている。この影響は 95lbs であった。実際の管制でも、レーダ誘導や速度調整で微調整を行っている。

### 4.2 通過時刻の調整

RTA+2 では通過予定時刻を 2 分先に延ばすように調整した。

パイロットコメントを以下に示す。

- もう少し早く指示されれば消費燃料の良い高高度（巡航時）での減速ができた
- もう少し早く指示されれば、長い時間をかけて減速できるため燃費の悪い速度まで減速せずにすんだ（一般的に巡航速度は最も燃費のよい速度よりも若干速い）
- FMS での調整は無理だったので少しずつ IAS を手動で変更しながら入力して 2 分の調整を行った。この IAS（試行では 250knot）は消費燃料を増加させる。

結果としては 2 分ではなく 3 分の調整となった。原因としては、以下が考えられる。

- FMS の風と機外風の誤差が大きい
- 秒単位ではなく分単位の調整を行った（FMS の性能に準拠）ので、誤差が大きい途中で増速することも可能であるが、それによる影響は次項で述べる。

### 4.3 速度調整による燃料増加

今回の 5 つの試行とは別に OPD と同経路で降下角を指定して速度の微調整（加減速）を行い、消費燃料の変化を調べた<sup>6)</sup>。このときの高度は 38,000ft から 15,000ft まで継続的に降下していた。1 分あたりの消費燃料、CAS、IAS (Target) の設定値を図 4 に示す。IAS (Target) とは目標とする IAS を設定した値を表す。IAS の設定のみでなくスロットルやスピードブレーキを使用して目標速度を達成するように調整した。

減速時は通常の降下時と消費燃料に大きな差はないが、増速時には多くの燃料を使う。特

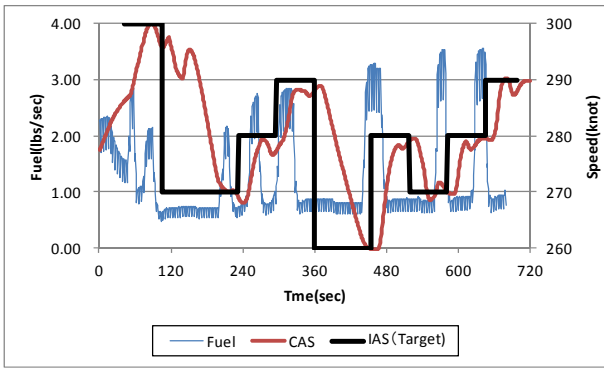


図 4 速度調整時の消費燃料

に高度が下がるにつれて、増速時の消費燃料が高いことがわかる。また同じ速度幅の調整でも減速に比べ増速は達成するまで時間が長かった。そのため時間調整を行うときに早めに減速してそのあとの微調整として増速するのは消費燃料を増加させるため望ましくない。

#### 4.4 TOD の位置と速度

OPD, RTA+2 と Vector2 について高度と速度 (CAS) を図 5 に示す。

RTA+2 では PQE の通過時刻の指示を受けてすぐに 250knot に減速し、しばらくしてから降

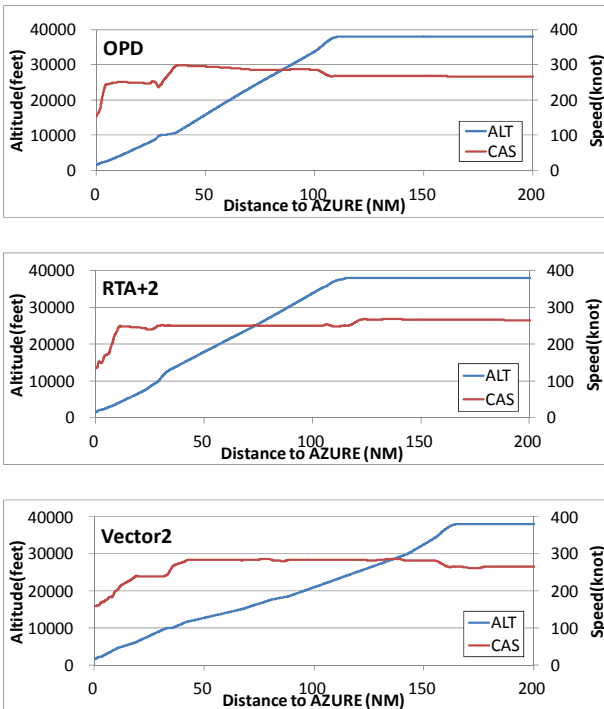


図 5 CAS と高度

下している。TOD の位置は OPD に比べて 5 NM 手前であった。降下角は途中までは OPD よりもやや浅いが、PQE 付近では OPD よりもむしろ深い。Vector2 は減速せずに降下しさらに降下・誘導されたため速度が速い。また降下角はレーダ誘導を開始するまで (FL260 に到達する頃) までは OPD とほぼ同じだったが、それ以降は浅い降下角で降下した。

#### 4.5 Vector2 での調整

Vector2 の消費燃料の増加分は 820lbs とかなり大きい。しかし、4.5 分の飛行時間の調整と成田出発機との管制間隔確保を実現するための高度プロファイルとして、速度調整のみで実現できるのかが問題である。

単純に 4.5 分が事前にわかるのであれば高高度で減速をすればよい。降下中は消費燃料の少ないアイドル推力を行なうものとした場合に、CAS を低減すると抗力が小さくなり飛行距離が長くなる<sup>[7]</sup>。

しかし、交差する成田の出発機との間隔確保が必要であった場合、減速により予定よりも 1 機後の出発機との交差も考慮する必要がある。しかし、交差後は浅い角度 (その場合速度も遅くなる) で CDO を行えば燃料は少なく押さえられる<sup>[7]</sup>。エンルート空域で交差後に CDO を行うには、ある程度到着機の交通量が少ない必要がある。

筆者らは今回検討した経路で、エンルート空域では他機との間隔を考慮せずに降下できる時間帯を解析し、成田空港の出発機と羽田空港の到着機両方が多い時間帯は、到着時刻の調整を行わない CDO は難しいことを示した<sup>[8]</sup>が、これは粗い予測精度を想定した解析である。エンルートで早めの降下を行うときの減速まで考慮すると、CDO 可能な時間帯は広がることになる。

## 5 まとめ

羽田空港での CDO 運用の可能性を推定するために、地点 SMOLT からの到着経路に着目し、フルフライトシミュレータを用いて 5 種類の降下のシミュレーションを実施した。

可能な限り理想的に降下 (ATC\_OPT) させ

ても、最適プロファイルの降下 (OPD) に比べて 100lbs 以上の燃料を消費することがわかった。また微調整程度の誘導であっても低高度での誘導 (VECTOR1) は 100lbs 程度消費燃料が増加することがわかった。

TOD 以前に調整時刻が解る場合 (RTA+2) には消費燃料が増えないことも解ったが、今回調整しなかった時間は 2 分であるが結果としては 3 分延ばしてしまった。滑走路使用時間が約 2 分/機であることを考慮すると、調整時刻の精度を向上させないと、結果として VECTOR1 のように低高度で再度誘導する必要性が出てきてしまう。

現在よく行われている、早めに降下を行いさらにレーダ誘導を行う場合には消費燃料をかなり多くすることがわかった。現在、羽田空港では ATFM による入域交通量の調整が行われているが進入管制区への入域時刻の調整までは行われていない。将来、各通過地点の到着予定時刻の予測精度や航空機の FMS の RTA 機能の精度が向上されると、燃費の良い降下ができるようになる。当面は微調整レベルで CDO が実施できる時間帯を予測し、CDO の運用可能時間帯を提案していきたい。

今回は B777-200 で試行を実施したが、異なる機種でも実施する予定である。また、異なる経路でも同様の検証を行う予定である。

## 謝辞

本シミュレーションの実施において多大なるご助言をいただいた日本航空運航部のパイロット各位及び技術部の技術者各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] ICAO: Continuous Descent Operations (CDO) Manual. ICAO Doc 9931, 2010.
- [2] 将来の航空交通システムに関する推進協議会: CARATS プロGRESS レポート 2011-2013. (<https://www.mlit.go.jp/common/000993373.pdf>)
- [3] AIP Japan.
- [4] Roberson, "Fuel Conservation Strategies: Cruise Flight", Boeing Aero Quarterly qtr\_04 | 07, 2007.

[5] 瀬之口敦, 福田豊, 白川昌之, マークブラウン, "フライトシミュレータによる RTA 機能検証結果", 第 12 回電子航法研究所研究発表会, pp.25-32, 2012 年 6 月.

[6] 伊藤恵理, "航空機監視応用システム(ASAS)とトラジェクトリ管理技術の連携", 平成 26 年度電子航法研究所講演会,

[http://www.enri.go.jp/news/osirase/pdf/kouenkai\\_2014.pdf](http://www.enri.go.jp/news/osirase/pdf/kouenkai_2014.pdf), p131, 2014 年 11 月.

[7] 福田豊, 白川昌之, 瀬之口敦, "飛行速度調整による時間管理の検討", 第 11 回電子航法研究所発表会, pp.63-68, 2011 年 6 月.

[8] 福島幸子, 平林博子, 岡恵, "混雑空港に近接する空港への継続降下運航の課題", 第 52 回飛行機シンポジウム講演概要, 2014 年 10 月.