

固定飛行経路角降下の運用構想に関する一検討

航空交通管理領域 ※ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル, 虎谷 大地, 平林 博子

1 まえがき

2022年の世界の航空輸送量は、新型コロナウイルスの前となる2019年の水準の約7割まで回復しており^[1]、今後も各国のコロナ禍対策の緩和により著しく増え続けると想定される。また、航空分野における脱炭素化に向けて世界的にグリーンイノベーションの取り組みが促進され、日本においても様々な施策が進められている^[2]。これに対応できる一つの飛行方式として継続降下運航（CDO, Continuous Descent Operations）が知られている^[3,4]。CDOは、航空機の降下フェーズにおいてアイドル推力により巡航高度から予め決められた地点まで継続的に降下することにより、燃料の節約とともに騒音やCO₂等環境負荷の削減にも効果がある飛行方式であり、的確な空域及び方式設計と降下過程において機上パイロットと地上航空管制との緊密な連携により実現可能な飛行方式である^[5]。従来の方式では、航空管制官の指示により段階的に航空機を降下させ、その過程で円滑な到着交通流を形成していた。一方CDOでは、個々の航空機が、飛行管理装置（FMS, Flight Management System）が出力する航空機の性能や気象条件に特化した降下プロファイル（FMS-Profile Descent, 以下FMS-PDと呼称）に従って降下する。そのため複数の機種が混在した状況においては、各航空機の降下パスのばらつきが大きくなり、地上での軌道予測や間隔維持が困難になるという懸念がある。その結果、航空管制官が通常よりも到着機同士の間隔を大きく確保する必要があり、低高度でのレーダー誘導、空中待機など低効率な運用につながる可能性がある。

昨今の研究により、降下パスのばらつきを絞ることが飛行軌道における地上予測精度の向上につながるのと理解が得られている^[6]。著者らはCDOの一種として、一定の飛行経路角（FPA, flight-path angle）で連続的に降下する、固定飛行経路角降下（Fixed-FPA descent, 以下

Fixed-FPA 降下と呼称）について研究を実施しており、本稿では、得られた知見を考慮しながらFixed-FPA降下の有効性及び運用構想の構築に向けて開発した機上及び地上の支援機能について紹介する。

2 CDOとFixed-FPA降下

2.1 日本におけるCDO運用

日本では関西国際空港（RJBB）、那覇空港（ROAH）及び鹿児島空港（RJFK）の3つの空港においてCDOが運用されている。それぞれの運用時間帯は、

- RJBB：到着予定時刻が2300(JST)から翌日0700(JST)まで
- ROAH：決められた入域地点の通過時刻が0130(JST)から0555(JST)まで
- RJFK：到着予定時刻が1900(JST)から運用終了時刻まで

となっている。基本的にCDOを希望する運航者は降下開始点（TOD, Top of Descent）の10分前までに管制機関に対して（希望のCDO経路名、TOD位置及び空港によって定められた移管点の通過予定時刻の情報を含め）CDOを要求する必要がある。図1では2016年から2022年まで3つの空港におけるCDO要求件数及びCDO承認件数を月毎に示す。管制からのCDO承認後、最後までCDOが実施できたフライトは“Full CDO”、途中でCDOがキャンセルされたフライトは“Partial CDO”、そして要求時点でキャンセルされたフライトは“Cancelled CDO”と表記する。

コロナ禍の以前は関西国際空港及び那覇空港では一ヶ月当たり40便～100便の要求件数があり、Full CDO実施率は約8割を占めた。コロナ禍の影響を受け、2020年3月以降関西国際空港におけるCDO要求件数が一ヶ月当たり50便前後となり、2021年2月以降は40便未満に留まった。しかし、コロナ禍前の水準では一日あたり19～20便であったCDO運用時間帯の着陸便数がコロナ禍の影響で一日あたり11～12便

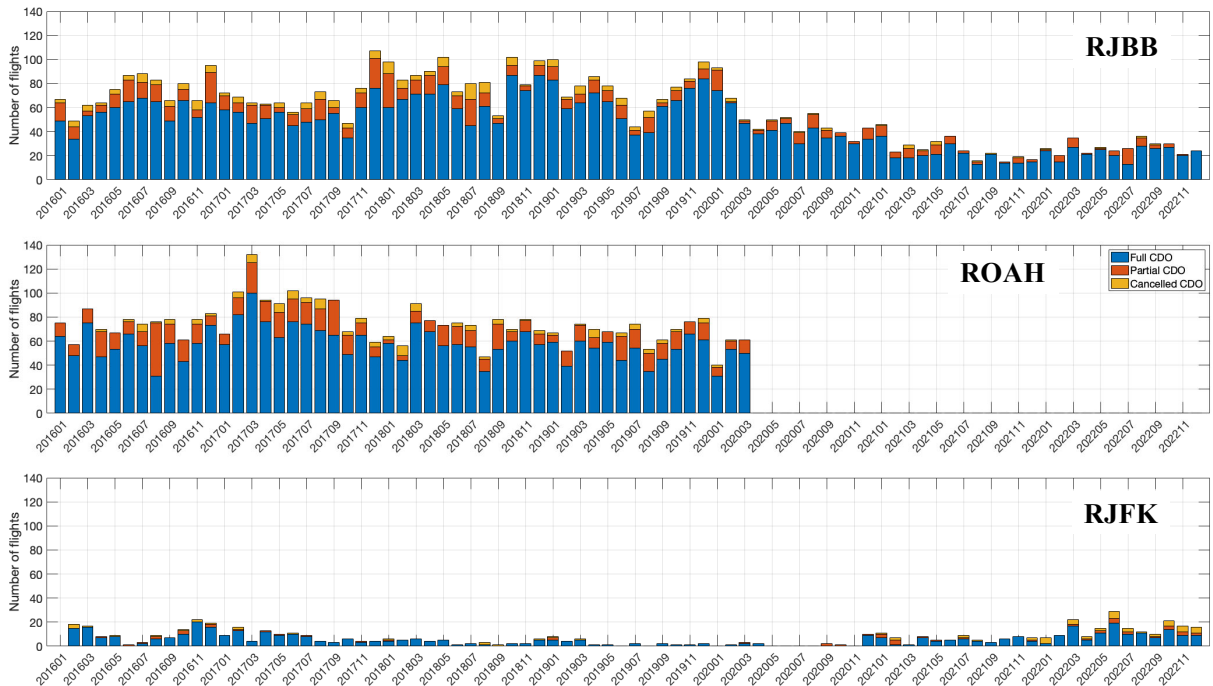


図1 各空港におけるCDO要求件数とそれに対する承認の可否数

まで減少していたため、CDOの実施率に目立つ変化はない。那覇空港では、2020年3月以降CDO運用時間帯に到着する便がなかったため、CDOが実施されていない。鹿児島空港においては、通常のCDO要求件数が少なく、減少傾向であったが2020年12月頃から要求件数が繰り返し増加し、2022年以降はコロナ禍前の水準よりも増加傾向であることが見受けられる。理由として、過去に比べて2022年CDO運用時間帯に到着する便の増加が考えられる。

2.2 Fixed-FPA 降下

CDOの運用拡大が望まれているが、軌道予測が難しく、CDO実施機と非実施機が混在する場合は通常よりも大きめの間隔を維持する必要があるため、CDOの実施が困難になるという管制運用上の課題がある。本研究で提案するFixed-FPA降下は、固定された降下角により航空機の降下パスが定められるため、地上での軌道予測が容易になる。また、アイドルに近い推力を保ちながら降下するように経路を設計することで、FMS-PDと比べて燃料消費量が少し増える一方、降下パスを変更せずに管制官の速度指示等に対応できる余地が出てくるため、低高度での経路延伸等を低減することが可能となる。

2.2.1 Fixed-FPA 降下方式の概念

Fixed-FPA降下経路は、航空法で定められている制約を満たしつつ、汎用的な設計を可能とするため、既存の標準計器到着方式（STAR, Standard Instrument Arrival）を基準に設計する。使用するSTARの条件を考慮し、通常のフィックスに加えて高度指定のフィックスをSTAR上に追加することで降下角を固定する。目的空港またはフライトの条件に合わせてFixed-FPA降下経路を設定することができ、降下開始点（ToD, Top of Descent）とFixed-FPA降下開始点間は、FMSによって計算されるパスに沿って降下することとする。また、到着における制約条件（通過速度及び高度の指定等）に対応できるよう減速フェーズを設けている。それによって航空機が与えられた降下パスから逸脱することが低減できると考えられる。

2.2.2 Fixed-FPA 降下の手順

本研究では、Fixed-FPA降下を実現するためにパイロット志向と管制官志向の二つのアプローチを提案してきた。しかしながら、現行の航空交通管理システムとの整合性をとるためには、管制官志向のアプローチが有効であると考えられる。図2において、管制官志向のFixed-FPA降下の手順を簡単に説明する。

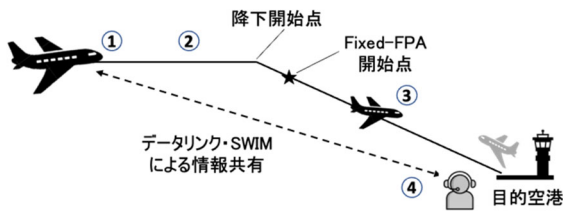


図2 Fixed-FPA 降下の手順

- ① 巡航中のパイロットは、降下開始点から決められた時間前に管制官へ Fixed-FPA 降下をリクエストする。
- ② 目的空港に応じて予め設定された複数の Fixed-FPA 降下の経路から、パイロットとの調整を基に、管制官が Fixed-FPA 降下を承認する。
- ③ パイロットは、承認された Fixed-FPA 降下の経路情報を FMS に入力し、降下を実施する。
- ④ 管制官は、必要に応じて周辺の到着機との安全間隔を維持するため Fixed-FPA 降下を実施する航空機に対して速度調整を指示しながら交通流を監視する。

基本的に、Fixed-FPA 降下は VNAV (Vertical Navigation) PATH モード (ボーイング機) または Managed Descent モード (エアバス機) で実施する。水平面の飛行プロファイルにおいては、従来の運用と同様に LNAV (Lateral Navigation) モードを適用する。パイロットは、与えられた高度プロファイルから航空機が逸脱しないことを監視する役目を果たす。

本提案のような降下方式を効率良く実施させるためには、運用支援ツールや関係者間の情報共有が極めて重要になる。将来の航空交通システムを支えるプラットフォームである情報共有基盤 (SWIM, System Wide Information Management) の高度化により、地上・地上間及び地上・機上間の情報共有が進み、早い段階で降下軌道の調整が可能となり、飛行プロファイルの更なる改善が期待される。また、最新型航空機に搭載されている Vertical Situation Display (VSD) といった可視化ツールを用いることによって、パイロットの状況認識が向上し、本提案のような新たな飛行方式を円滑に実施できると考えられる。

2.2.3 Fixed-FPA 降下の軌道生成技術

本研究では、従来及び Fixed-FPA 降下の軌道を生成する手法として、ファストタイムシミュレーションをベースとした軌道生成ツールを開発した^[7]。このツールを用いることにより、様々な気象状況、及び型式・離陸重量による異なる航空機特性を反映した降下軌道を生成することができる。図3に軌道生成手法のモデルの概要を示す。

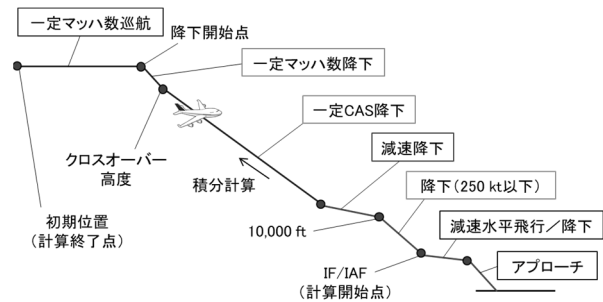


図3 Fixed-FPA 降下軌道のモデル

航空機は降下開始点より、一定のマッハ数で降下を開始し、クロスオーバー高度にて速度を一定の較正対気速度 (CAS, Calibrated Airspeed) に切り替えて降下を続ける。減速降下フェーズにおいて高度 10,000ft で速度 250kt 以下の条件を満たした後、CAS を 250kt 以下に保ちながら降下を続け、二つ目の減速フェーズより着陸体制に入るといった仕組みである。数値計算を行うため必要な航空機性能情報は EUROCONTROL が開発した BADA (Base of Aircraft Data) モデル^[8]より入手し、気象データは気象庁発表の数値予報 GPV (Grid Point Value) データを使用している^[9]。ここでは、FMS の計算ロジックを模擬するため IF (Intermediate Fix) または IAF (Initial Approach Fix) から与えられた巡航フェーズの任意の点まで、進行方向と逆方向に数値積分を行うことで軌道が生成される。

2.2.4 軌道生成ツールの検証

ファストタイムシミュレータで計算した Fixed-FPA 降下軌道の妥当性を検証するため、航空会社が所有するフルフライトシミュレータを用いて計算軌道を飛行させる実験を行った。図4に表す CDO Number 1 を通り、関西国際空港の RWY06R に着陸する双発の大型航空機を

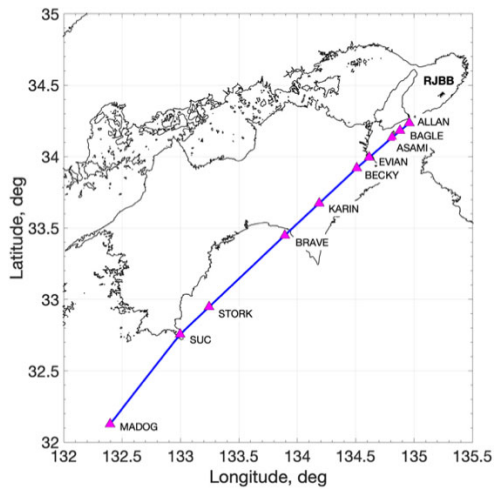


図4 Fixed-FPA 降下軌道のモデル

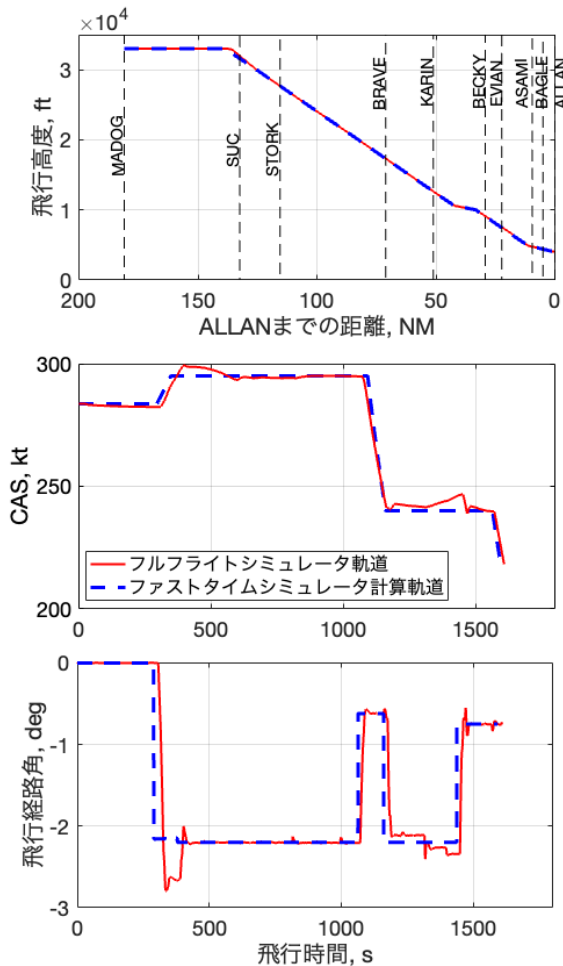


図5 Fixed-FPA 降下軌道のモデル

実験対象とした。航空路上の MADOG を飛行開始点、IF の ALLAN を飛行終了点と設定した。Fixed-FPA 降下及び減速フェーズにおける降下角は、実際に CDO を行った同型式の航空機か

ら取得した飛行データと、ファストタイムシミュレーションの結果を基に設定している。検証の比較結果を図5に示す。

図5では、計算した軌道と再現された軌道の高度プロファイルがよく一致していることが分かる。速度と飛行経路角のプロファイルの比較でも、Fixed-FPA 開始前と終了前に現れる若干のズレはあるものの、特性が良く一致している。このズレは、図3に示した降下軌道のモデルのモデル化誤差によるものであると考えられる。ファストタイムシミュレータで計算した軌道と、フルフライトシミュレータで飛行した軌道の燃料消費量と飛行時間の差異は、それぞれ7%と1%という結果が得られた。他機種フルフライトシミュレータで実施した実験からも同様な結果が得られており、開発したファストタイムシミュレータが航空機の降下軌道を予測するため、十分な精度を持っていることが明らかになった。

3 Fixed-FPA 降下の運航性能評価

3.1 Fixed-FPA 降下の有効性

ここでは、前節で紹介した軌道生成モデルを基に、ファストタイムシミュレーションを用いて Fixed-FPA 降下の有効性を検討した。モンテカルロシミュレーションを行い異なる運航条件と気象条件で、FMS-PD と Fixed-FPA 降下をそれぞれ 10,000 フライト模擬し、降下軌道の特性や運航性能を比較した^[10]。図6にそれぞれの降下方式の ToD から降下終了点までの距離のばらつきを示している。

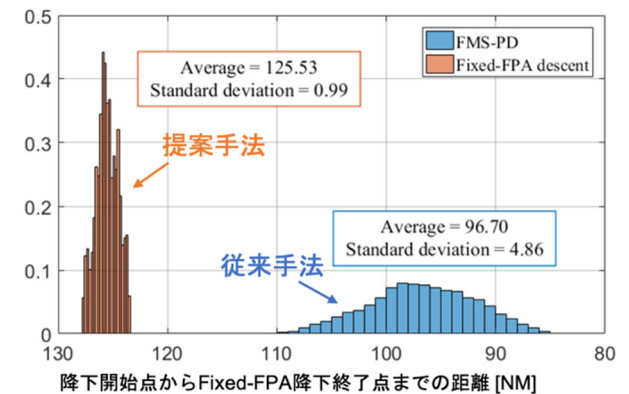


図6 FMS-PD と Fixed-FPA 降下の比較結果

得られた結果から、FMS-PD の ToD 位置は大

きくばらつくことが分かった（標準偏差：4.86）。一方、Fixed-FPA 降下では、ToD 位置のばらつきが小さくなっていることが確認できた（標準偏差：0.99）。降下プロファイルのばらつきを抑えることが地上における航空機の高度プロファイルの予測精度の向上につながることから、Fixed-FPA 降下が有効な降下方式であることが示された。

こちらの解析では、周辺到着機との間隔付けのために到着を遅らせる管制指示を模擬したシミュレーションも行い、Fixed-FPA 降下の有効性を定量的に検討した。図7は、管制指示により到着を遅らせる時間（以下、遅延時間と呼称）に対してそれぞれ FMS-PD と Fixed-FPA 降下に要する燃料消費量の差異を箱ひげ図で示した結果である^[10]。縦軸の正の値が大きくなるにつれ、遅延時間に対する Fixed-FPA 降下の有効性が高くなることを意味する。実線は、シミュレーションにおいて各遅延時間における中間値を表す。得られた結果から、120 秒以上の遅延

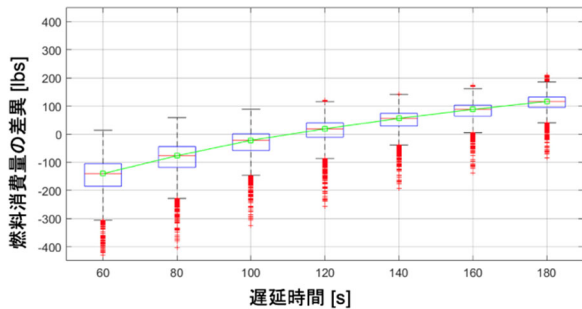


図7 遅延時間における運航性能の比較結果

が必要とされる際に Fixed-FPA 降下が燃費の観点からも有効であることがわかった。

3.2 Fixed-FPA 降下における環境負荷の検証

Fixed-FPA 降下における環境負荷を評価するため、Boeing Fuel Flow Method 2 (Eurocontrol Modified, BFFM2 ECM) 計算手法^[11]に基づいて排出ガスの推定モデルを構築した。表1では、CDOとFixed-FPA降下における時刻調整の有効性を検証するため行ったフルフライトシミュレータ実験における、中型機と大型機の排出ガスの推定結果を示す。ある程度の交通量の空港では、到着間隔を保つために到着時刻調整を行うことがある。表中の「時刻調整」は、管制から間隔維持のため到着時刻を指示したシナリオを模擬した結果である。CDO（時刻調整）では、従来の運用のようにCDOを途中でキャンセルし、ベクタリングを用いて到着時刻を調整しており、Fixed-FPA（時刻調整）では速度調整を用いて到着時刻を調整した。得られた結果から、通常の到着方式としてはCDOの運航性能が最も有効である一方、管制指示による到着時刻の調整が行われた場合においてはCDO（時刻調整）の運航性能が低下したのに対し、Fixed-FPA（時刻調整）では降下パスを保ちながら速度調整ができるため、運航性能の変化がわずかであり、運航性能の観点から有効であることが確認できた。従って、環境負荷に支配的な影響を及ぼすCO₂、H₂O、NO_xにおいても排出が低減可能であることがわかった。

表1 CDOとFixed-FPA降下における環境負荷影響の比較結果

	中型機				大型機			
	CDO	Fixed-FPA	CDO (時刻調整)	Fixed-FPA (時刻調整)	CDO	Fixed-FPA	CDO (時刻調整)	Fixed-FPA (時刻調整)
飛行時間 (s)	1,509	1,576	1,647	1,661	1,508	1,606	1,672	1,640
燃料消費量 (lbs)	1,185	1,260	1,335	1,218	2,043	2,178	2,402	2,162
NO _x (g)	7,317	7,422	8,168	7,095	22,039	20,744	24,705	20,950
CO(g)	1,531	1,432	1,604	1,890	1,658	1,427	1,515	1,624
SO _x (g)	451	480	508	464	778	829	915	823
CO ₂ (kg)	1,688	1,798	1,901	1,734	2,909	3,102	3,421	3,079
H ₂ O (kg)	661	702	744	679	1,139	1,215	1,340	1,206

4 Fixed-FPA 降下の機能拡張

4.1 到着管理アルゴリズムの開発

Fixed-FPA 降下において、地上における軌道予測精度を高度化することにより、管制官にとっては Fixed-FPA 機と非 Fixed-FPA 機の調整を柔軟に行うことができ、CDO の利便性が向上できると考えられる。そこで、本研究では周辺に他の航空機が飛行している交通流において Fixed-FPA 降下を実施する方法を検討しており、その一環として、Fixed-FPA 降下を用いた到着管理アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムでは、Fixed-FPA 降下を用いた航空機間の間隔維持をフィードバック制御問題として扱い、航空機の到着時刻と高度制約の関係をモデル化することにより高度制約を計算している^[12]。この高度制約は、降下開始前に決められる通過点であるため、制約が発生した際に降下軌道に及ぼす影響を事前に予測しやすくなる。関西国際空港を対象に行った評価解析から、従来の降下方式と比べて提案のアルゴリズムの方が周辺の航空機との干渉を回避しつつ、燃料消費量を減少させる降下を実施することが確認できた。また、関西国際空港へ到着する 30 機の内 10 機を対象に本アルゴリズムを適用して行ったシミュレーションでは、

- ・ FMS-PD：周辺の到着機との干渉が発生したため、10 機の内 3 機の CDO 実施が中止された。
- ・ Fixed-FPA 降下：速度調整により、周辺の到着機との安全間隔を保持できたため、10 機とも Fixed-FPA 降下を実施することができた。

という結果が得られた^[13]。次のステップとして、異なる方向から目的空港に向かう到着機及び目的空港から出発する航空機との安全間隔が維持できるようにアルゴリズムを改善することを目指している。

4.2 Fixed-FPA 降下専用の EFB アプリ開発

これまでに実施した Fixed-FPA 降下の実験では、パイロットが予め計算された軌道情報を手動で FMS に入力し降下飛行を行う、という手順で実施した。次のステップとして、地上管制支援向けの到着管理アルゴリズムと同様に機上パイロットの支援を目的に Fixed-FPA 降下を実

施のため必要な情報を提供する手法として電子フライトバッグ (EFB, Electronic Flight Bag) 専用の模擬アプリを開発した。EFB アプリ開発の専門家である Boeing Global Services 社 (元 Jeppesen 社) と現役パイロットへヒアリングを行い、Fixed-FPA 降下経路における地図の表示や降下経路の位置データ・実施に係る性能データの算出について得られたフィードバックを初期設計に反映した。

このアプリは、巡航中にパイロットがフライトと機体の状況 (機体重量、巡航高度・速度、外風の状況など) 及び意図 (燃費重視もしくは時間重視) を入力すると、状況と意図に応じて適切な Fixed-FPA 降下経路 (予め目的空港に合わせて計算された経路のセットから選択される異なる降下角の経路) を出力する。出力された降下経路を地上の管制官と共有することで、パイロットが希望する降下経路を管制官と共有することができる。図 8 では、アプリの一部の機能を表示する。

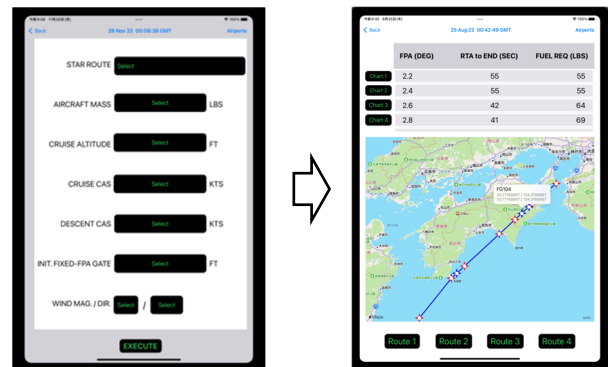


図 8 (アプリの一部の機能) パイロットの入力画面及び Fixed-FPA 降下経路群の表示画面

実運用の環境における Fixed-FPA 降下のフィジビリティ及び EFB 模擬アプリの有効性を検証するため、弊所が所有する実験航空機を用いて仙台空港にて国内初となる Fixed-FPA 降下実験を実施した。実験では、管制機関と予め調整した Fixed-FPA 降下経路をアプリのデータベースとして格納し、各フライトにおいて実際の降下経路とアプリから出力される降下経路の比較を行った。また、異なる降下角による Fixed-FPA 降下と、FMS-PD 及び従来から用いられているステップダウン降下 (交通量の多い環境で管制官が管理しやすい方式) を実施し、

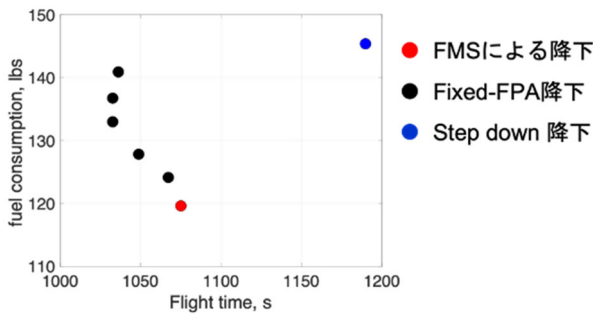


図9 Fixed-FPA 降下検証実験による運航性能の比較評価

Fixed-FPA 降下の有効性を評価した。図9では、検証実験より得られた様々な降下方式の運航性能結果を示す。横軸が飛行時間、縦軸が燃料消費量となっており、赤点は航空機のFMSによる降下（通常のCDO）、青点はステップダウン降下、黒点は複数の降下角によるFixed-FPA降下の結果を表している。なお、この結果は降下開始点から降下終了点の飛行セグメントによるものである。実証実験より得られた結果は、シミュレーション解析から推定される傾向と同様であり、降下角を固定することによってCDOより燃料消費量が若干増える一方、通常のステップダウン降下より燃費が良いことが明らかになった。環境に及ぼす負荷は燃費に比例することから、Fixed-FPA降下により環境負荷軽減のポテンシャルが示された。

実験の実施プロセスから、Fixed-FPA降下のような新たな運航方式において、実際の運航環境とEFBアプリの連携による以下のような課題点を洗い出すことができた。

- ・ 目的空港におけるローカルルール（管制官における交通流管理の考え方や到着経路の扱い等）を反映する必要性
- ・ 実施対象機におけるアプリの機能のチューニング等

5 今後に向けて

将来の航空交通システムにおけるFixed-FPA降下の実現に向けて上記の有効性の検証や提案機能のさらなる開発・評価が必要である。例えば、従来のFMSで軌道生成に使用する気象予報データに対して、将来の航空交通システムを支えるSWIMによる航空情報交換モデル（AIXM, Aircraft Information Exchange Model）

や気象情報交換モデル（IWXXM, ICAO Meteorological Information Exchange Model）等を導入することにより、軌道生成に最新の気象状況を反映することが可能となる。一般的に運航者が使用する気象データ（GSM, Global Spectral Model）を、より高頻度かつ詳細な局地モデル（LFM, Local Forecast Model）にすることで、高精度な降下軌道を生成することができる^[4]。また、データリンク等通信システムの有効活用により、機上と地上の連携が強化され、協調的意思決定により高効率なFixed-FPA降下方式を実施することが可能になると考えられる。

6 まとめ

本稿では、日本のCDO運用拡大に向けて降下角を固定したFixed-FPA降下方式を提案し、運用構想を構築するため必要と思われる要件を検討した。そのため、先ずFixed-FPA降下軌道生成ツールを開発し、ファストタイム及びフルフライトシミュレーションよりツールの妥当性を検証した。また、定量的評価の結果、異なる運用条件においてもFixed-FPA降下は管制指示に従いつつ与えられた降下パスが保てることを確認できた。また、提案の降下方式は120秒以上の遅延が必要とされる際に燃費の観点から有効であることがわかった。さらに、Fixed-FPA降下の適用範囲を拡大するため、地上管制支援および機上パイロット支援機能を提案した。開発した到着管理アルゴリズムでは、地上管制の高度指示を行う地点を設けることによって、安全間隔を維持しながら与えられた降下パスから逸脱せずFixed-FPA降下を実施できることが明らかになった。提案したEFB模擬アプリでは、SWIMインフラを有効活用する前提で地上管制官と緊密に連携しながらFixed-FPA降下を実施するため必要な機能を検討した。実機を用いたFixed-FPA降下実証実験において、本アプリの有効性の初期検証を行い、将来の実現に向けて解決すべき課題を洗い出すことができた。このようにFixed-FPA降下の妥当性を確立することは、最終目標であるFixed-FPAと次世代アプローチシステムの統合へ大きく貢献すると考えられる。

謝辞

飛行航跡及び CDO 実績に関するデータ提供及び Fixed-FPA 降下実証実験へ協力をいただきました航空局関係者各位に深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] “Passenger demand recovery continued in December 2022 & for the full year,” IATA <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-02-06-02/> (参照, Mar. 2023)
- [2] “航空機分野における脱炭素化の取り組みの進捗について,” 国土交通省航空局 <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001488343.pdf> (参照, Mar, 2023)
- [3] J-P.B. Clarke et al. (2013), “Optimized Descent Arrivals at Los Angeles Airport,” AIAA Journal of Aircraft, vol.50, no. 2, pp.360-369.
- [4] M.G. Wu, S.M. Green, and J. Jones (2015), “Strategies for choosing descent flight-path angles for small jets,” AIAA Journal of Aircraft, vol.52, no.3, pp.847-866.
- [5] ICAO, “Continuous Descent Operations (CDO) Manual,” ICAO Doc 9931.
- [6] L. Stell (2010), “Analysis of flight management system Predictions of idle thrust descents,” IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference.
- [7] 虎谷大地, ビクラマシンハ ナヴィンダ, 平林博子 (2018), “継続降下運航の運用拡大検討のためのシミュレーション技術,” 第18回電子航法研究所研究発表会
- [8] “Base of aircraft data” <https://www.eurocontrol.int/model/bada> (参照, Apr. 2023)
- [9] 京大生存圏研究所気象庁データベース <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-original.html> (参照 : Apr. 2023)
- [10] D. Toratani, N.K. Wickramasinghe, J. Westphal, and T. Feuerle (2020), “Feasibility study on applying continuous descent operations in congested airspace with speed control functionality: fixed flight-path angle descent,” Aerospace Science and Technology, Elsevier, 107, 106236.
- [11] D. DuBois, and G.C. Paytner (2006), “Fuel flow method 2 for estimating aircraft emissions,” SAE Transactions, vol.115, pp.1-14.
- [12] 和田真治, 井上正樹, 虎谷大地 (2021), “Semi-CDO: 航空機の新たな降下運航方式の提案と到着管理アルゴリズム,” 第8回制御部門マルチシンポジウム
- [13] ビクラマシンハ ナヴィンダ, 虎谷大地, 平林博子 (2020), “固定飛行経路角効果方式における運航性能評価に関する一考察,” 第58回飛行機シンポジウム講演集
- [14] N.K. Wickramasinghe, Y. Nakamura, and A. Senoguchi (2021), “Evaluating the influence of weather prediction accuracy on aircraft performance estimation,” 2021 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2021).