

9. 大規模空港における継続降下運航の運用拡大に関する研究

航空交通管理領域 ※平林 博子, ビクラマシンハ ナヴィンダ, 虎谷 大地,
瀬之口 敦, 岡 恵, 江口 昌広, 福島 幸子

1 まえがき

航空機運航の降下過程において、エンジン推力を最小の状態連続的に降下する継続降下運航（CDO; Continuous Descent Operations）は、消費燃料が節減される効率的な降下であると同時に騒音低減にも効果があり、国際民間航空機関（ICAO; International Civil Aviation Organization）の世界航空交通計画（GANP; Global Air Navigation Plan）において優先的に導入が勧められている降下方式である^[1,2]。

我が国では平成25年3月に関西国際空港においてCDOの正式運用が始まり、その後那覇空港、鹿児島空港で試行運用が継続されているが、CDO運用時間は交通量の少ない時間帯に限られている^[3-5]。航空交通量増大、運航者及び利用者の多様化するニーズに的確に対応し、かつ効率的、安全、環境にやさしい航空サービスを実現するため、我が国において必要とされる航空交通システムの変革が将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS; Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems）で示されている。CARATSでは、さらなるCDOの拡大が目指されており、最終段階として、時刻指定を伴うCDOの実現について2022年度に意思決定することとなっている^[6]。

2 研究の概要

本研究においては、CDO実施機をできるだけ増加させることを目的に、CDO拡大に対する課題を整理し、運用拡大へ有効な方策を次のとおり検討した。

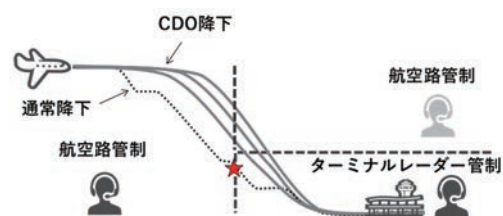
最初に、なぜCDO拡大は容易にできないのか、に対して三つの課題を想定した。「軌道予測の不確かさ」、「他機との間隔維持」、そして「管制官ワークロード」である。

まず、軌道予測の不確かさは、CDOが自由な降下を可能とすることから生じる課題である。

図1に通常降下及びCDO降下の高度プロファイルを示す。通常降下においては、航空路管制からターミナルレーダー管制への業務移管は、あらかじめ決められた地点及び高度で実施されることが多い。また、高度指示、速度指示等により、地上側での軌道予測が立てやすい。一方、CDOは各飛行が各々の降下開始点から継続的に降下を実施するため、飛行毎にばらつきが生じる。高度プロファイルだけでなく速度に関してもばらつきが生じるため、飛行高度、飛行時間に関する予測の不確かさが発生する。

次に、空港の規模が大きくなるほど交通量が多くなり、他機との間隔を維持する必要性が高くなることが挙げられる。図2にCDO降下機に対する競合機のイメージを示す。レーダーデータ航跡とCDO実績記録を使用した解析結果から、CDO要求に対して航空路管制内で非承認または中止される割合は約4%、ターミナルレーダー管制内での中止は約16%と、ターミナルレーダー管制内でCDOが中止される割合の方が高かった。中止されるほとんどの要因は競合機の存在であり、航空路管制内ではCDO経路と交差する経路を飛行する通過機及び先行機、ターミナルレーダー管制内では、相反する方向に飛行する出発機、異なる地点からの到着機、または複数の後続機が競合機となっていた^[7]。

最後の課題は管制官ワークロードである。通



★ 移管点 航空路管制からターミナルレーダー管制への業務移管点

図1 通常降下とCDO降下の高度プロファイル

常降下と異なり CDO 降下では、航空路管制において CDO 承認が発出されれば進入開始地点まで管制承認を発出する必要がなく、交信量という点では管制官のタスクは軽減される。しかし、不確実性の高い予測軌道を考慮し CDO が可能かどうかを判断すること、降下中に他機との安全間隔が維持されているかどうか監視すること等、CDO によって新たな管制官ワークロードが生じる。また、CDO 到着機の軌道予測の不確かさは、到着機同士の縦間隔を大きくとる必要があると考えられる。通常運用の間隔よりも大きな間隔を設定するため、管制処理容量の低下が発生する。なお、本研究におけるフルフライトシミュレータ（通常パイロットの訓練に使用するシミュレータ）を使用した実験結果から、CDO 到着機同士に必要な間隔として、ある移管点において通常降下機同士は 10 NM 間隔で移管されているところ、約 40NM あれば安全間隔維持が可能であると試算された^[8,9]。

上記の三課題に対処すべく、本研究においては次の方策を講じた。軌道予測の不確かさに対しては、予測軌道生成アルゴリズムの開発を進めた。より高精度な予測軌道生成技術の確立を目指したものである。他機との間隔維持及び管制官ワークロードに対しては、初期的な到着管理により管制官の CDO 実施判断をサポートすること及び管制運用の工夫が有効と考え、CDO 実施判断支援ツールの開発を進めた。



図2 CDO 降下機に対する競合機の存在

3 日本で運用されている CDO の概要

3.1 CDO 運用時間

日本においては、交通量の少ない深夜・早朝において CDO が運用されている。関西国際空港における CDO 運用時間帯は、到着予定時刻が日本時間 23 時から翌 7 時までの間、那覇空港では入域地点の通過予定時刻が 1 時半から 5 時 55 分まで、鹿児島空港では到着予定時刻が 19 時半から運用終了時刻まで、となっている。図3は平成25年から29年までの各年6月の10分毎の平均着陸機数である。CDO 運用時間帯は交通量が10分あたり1機程度以下であり、そのような時間帯だからこそ CDO 運用が可能であることがわかる^[10]。

3.2 CDO の流れ

日本の CDO は、標準計器到着方式 (STAR; Standard Instrument Arrival) に接続するよう設計された CDO 経路に沿って運用される。基本的な CDO 運用の流れは図4に示すように、パイロットからの CDO 要求をきっかけとして開始する。CDO 要求を受けた管制官は、CDO が実施可能であると判断したら CDO の承認を発出する。

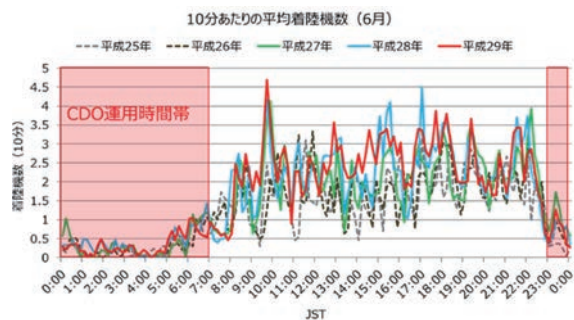


図3 10分あたりの平均着陸機数

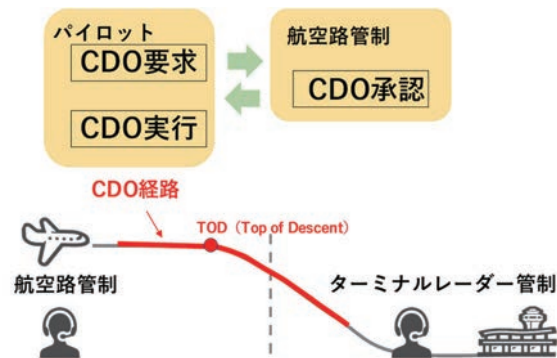


図4 CDO の流れ

4 CDO 予測軌道生成アルゴリズムの開発

4.1 CDO 降下軌道の数値シミュレーション

CDO 降下軌道を予測する手法としては、CDO 降下軌道を、EUROCONTROL で開発された Base of Aircraft Data (BADA) を用いた数値計算が有効である。軌道のばらつきの原因となる航空機型式の違い、航空機重量の違い等を反映することで、軌道のばらつきを表現できる。**図5**に CDO 降下のシミュレーション計算の流れを示す。一定マッハ数で巡航中の航空機は推力をアイドルに保ち一定マッハ数で降下を開始、クロスオーバー高度を通過後、速度制御を較正対気速度 (CAS; Calibrated Air Speed) 一定に切り替え降下し続ける。降下過程におけるいくつかの制限を満たしつつ、減速しながら降下または必要に応じた水平飛行を行う。この計算は現行の飛行管理装置 (FMS; Flight Management system) を模擬し進入開始点から巡航中へと逆方向に行く^[11]。シミュレーションモデルの妥当性については、フルフライトシミュレーションの結果と比較することで確認した^[12, 13]。

4.2 条件付き CDO

完全に自由な降下ではないが、条件 (制約) を付加しつつも継続降下を維持することで、**図1**に示す通常降下よりは運航効率の良い降下方式として、条件付き CDO の可能性について検討した。条件を付加することで、軌道予測の精度が向上するとともに、飛行毎のばらつきが減るため管制官にとっても管理しやすい状況となる。

4.2.1 OPD

米国では、OPD (Optimized Profile Descents) の導入を積極的に進めており、すでに多くの主要空港において整備されている^[14]。OPD は、巡航からの降下開始を可能とするような降下プロファイルを RNAV (Area Navigation) による STAR として公示するものである。完全に自由な降下ではないが、従来の降下と比較すると低高度での水平飛行が低減される。RNAV STAR の経路上に Altitude Window と呼ばれる高度幅、及び速度を指定する方式であり、新たな機材の追加等の必要がなく、現行の FMS を搭載した航空機で運用可能である利点がある。本研究においても、Altitude Window を考慮した降下軌道

シミュレーション技術を開発した^[15]。実際に運用するためには、設計に当たって対象とする空港を利用する航空機型式の傾向や気象条件等を考慮し、関係者間での十分な調整が必要であることに留意したい。**図6**に Altitude Window のイメージを示す。

4.2.2 固定飛行経路角降下

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 (Fixed-FPA) 降下が注目されている。**図7**に Fixed-FPA 降下の概要を示す。Fixed-FPA 降下の実施では、アイドルに近い推力で一定の経路角で降下する。Fixed-FPA 降下の降下経路等方式設計、パイロット手順、及びシミュレーション技術について検討を実施した。検討では、フルフライトシミュレータによる検討及び実機による実証実験を行った。得られた結果から、従来の航空機性能を基に Fixed-FPA 降下の実現が可能であることが分かった。さらに、従来の運用制限を考慮するためには、減速フェーズを設けた Fixed-FPA 降下の提案が有効であることが示された^[16, 17]。また、Fixed-FPA 降下に速度制御を付加して実施する方が、CDO を途中で中止する場合と比較すると消費燃料が少ないことが示され、交通量が多い環境での Fixed-FPA 降下の導入効果が示唆された^[18]。

4.3 高精度化へ向けた大学との連携

上記以外にも、本研究では予測軌道の高精度化を様々な側面から検討した。これらの検討では、大学との連携を積極的に活用した。

横浜国立大学との共同研究においては、数値シミュレーションにおいて反映させる風の工夫に取り組んだ。数値シミュレーションにおいては飛行環境として気象を考慮する必要がある。本研究では主に気象庁配信の数値予報 GPV (Grid Point Value) データを計算に使用した。軌道予測における飛行時間では、特に風の影響を強く受ける。風の最大値を使用し保守的な予測軌道を求めることも可能であるが、予測軌道の幅が大きくなり実用性に欠ける。そこで、風の影響を飛行に要する時間の確率分布で表現し、予測軌道の幅を狭めることが可能であることを示した^[19]。

慶應義塾大学との共同研究では、CDO 到着

機の飛行に要する時間に関する予測で、機械学習の応用を試みた。CDO を実施した実機の QAR（Quick Access Recorder）データ 49 飛行分を使用した学習結果を用いたモデルから得られた飛行時間、飛行時間の平均値、のそれぞれを実際の飛行時間と比較し RMSE 値を計算すると、モデルを使用した方が高精度な予測が可能であることがわかった^[20]。

降下軌道だけではなく、CDO 降下軌道に対して干渉のない上昇軌道に関する検討を、公募研究で横浜国立大学が実施した。上昇軌道に関する検討では計算の高速化及び CDO 降下機との間に安全間隔を維持した上昇機の離陸判定について検討した。高速化に関しては、少ない機数で CDO 降下機をモデル化することで高速化が実現可能であることを示した。また、離陸判

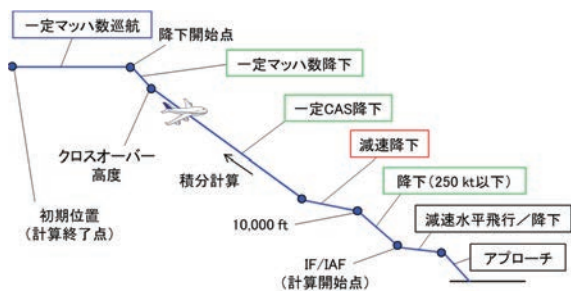


図5 CDO 予測軌道の計算の流れ

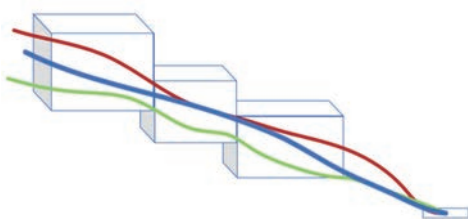


図6 Altitude Window のイメージ

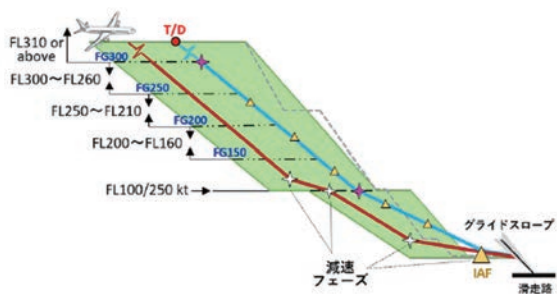


図7 Fixed-FPA 降下

定では、確率密度関数を考慮した上で最適制御問題として解くことで、CDO 降下機に対して安全間隔を確保した上昇機の離陸判定が可能であることを示した^[21, 22]。

5 CDO 実施判断支援ツールの製作及び管制経験者による評価

他機との間隔維持及び管制官ワークロードへの方策として、初期的な到着管理により管制官の CDO 実施判断をサポートすること及び管制運用の工夫が有効と考え、CDO 実施判断支援ツールの開発を進めた。

5.1 CDO 実施判断支援ツール

本研究において開発した CDO 実施判断支援ツールは、支援情報を提供し、管制指示を模擬できる機能を有するものである。図8にツールの全体像を示す。レーダー模擬画面と支援情報提供画面で構成され、管制経験者による評価実験のために、管制官役がコマンド入力により管制指示を反映させることで航空機間に必要な安全間隔を確保することが可能である。

本研究において提案する支援情報として、マトリックス画面及びタイムライン表示を用意した。いずれも、他機との間隔を可視化することで、安全間隔の確保を確認する CDO 承認の判断に役立てることを目指したものである。マトリックス画面では、他機との垂直方向の間隔を可視化したもので、縦軸に高度、横軸に時刻を示し、CDO 降下軌道に対する競合機の存在を時系列に示すものである。タイムラインは縦間隔の可視化であり、初期的な到着管理システムに相当する。指定する通過地点及び滑走路における航空機間の間隔を示すことで、到着機同士の縦間隔確保に役立てることを目的としている。図9に各支援画面を示す。

5.2 評価実験

CDO 実施判断支援ツールを使用し、管制経験者によるヒューマンインザループシミュレーション実験を実施した。シナリオの範囲は、関西国際空港のターミナルレーダー管制空域とその周辺の航空路管制空域とした。評価実験では、いくつかのシナリオを用意し、管制官役は各シナリオにおいて規定の間隔を維持するよう管制指示を発出する。途中、ツールの機能拡張を挟

み平成30年度及び令和元年度に、合わせて15日間、4名の管制経験者が実験に参加した。実験の様相を図10に示す。

関西国際空港到着機の交通流について、使用滑走路を変える、時間帯を変える、増便する等、7つのシナリオを用意した。また、実験では、降下方式を変えたシミュレーションを実施した。通常降下、降下経路途中に高度制限がある降下、及びCDO降下等である。トータルで約40試行実施した。

管制経験者による評価実験では、主に支援情報画面の評価、管制運用手法の評価を実施した。支援情報画面の有効性については、実験後に参加者より次の評価を得た。タイムラインに関しては、出発機情報をタイムライン上で得られることは有効であるとの感想を得た。全体の流れを把握した上での順序付けの決定のために、管制運用卓ではなく、全体の交通の流れを管理する席における活用が有効であるとの意見であった。また、シミュレーション上では出発機はタイムラインで示す時刻どおりに出発するが、実際は出発時刻の調整はまだ難しいと思われる。A-CDM（Airport Collaborative Decision Making）が発展することが効果的であると推察する^[23, 24, 25]。

5.3 管制運用の工夫

ヒューマンインザループシミュレーション実験では、管制官役は到着機に対してできる限り変針することなく連続的な降下が可能となるよう、速度調整を実施した。なお、本研究におけるFixed-FPA降下の検討において減速フェーズの有効性が示されており^[16, 17]、また、ICAOのCDOマニュアルにおいても、CDO促進のために早い段階での小さな速度制限が低高度での順序付けのための誘導等を低減させるのに効果的であることが記述されている^[1]。なお、本研究において巡航過程において、約30分手前からの10%対地速度が変化することで2~3分程度の時間調整が可能であると試算されている^[26]。

通常、航空路管制からターミナルレーダー管制への移管時は、同一地点からの到着機同士に関しては縦間隔の設定を実施するが、異なる地点からの到着機同士の間には縦間隔を設定しない。実験では、通常の運用に加え、異なる地点

からの到着機間においても、航空路管制において到着順序の決定及び速度調整を実施することで交通流を均一にしてからターミナルレーダー管制に移管する工夫を実施した（図11参照）。その結果、ある程度の交通量においてもスムーズな降下が可能となるケースが増加した。この時、航空路管制とターミナルレーダー管制が同じタイムラインを共有し、共通の状況認識を持つことが調整業務においても効果的であるとのフィードバックを得た。評価実験は空港から約200NM以遠の範囲を対象とした。速度調整による対象範囲の飛行時間の延伸は、通常降下実施時は一機当たり平均0.6分、全到着機に対し

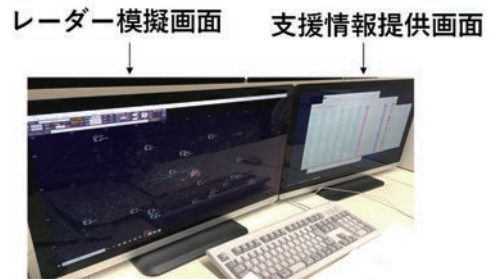
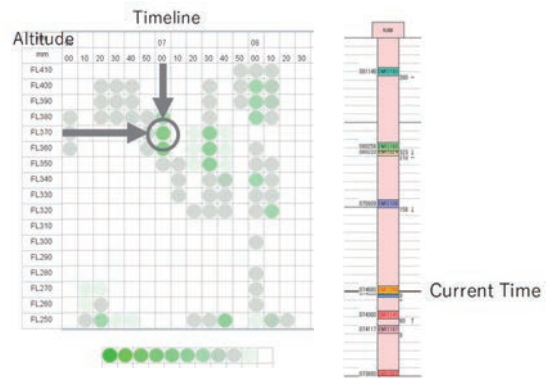


図8 CDO実施判断支援ツール



マトリックス画面 タイムライン画面

図9 支援情報画面



図10 管制経験者によるヒューマンインザループシミュレーション実験

CDO 降下を試みた場合は一機当たり平均 0.3 分であった。通常降下では巡航高度からの降下開始が早い段階で実施され、飛行時間がより延伸されたと推察される。

一方増便シナリオでは、航空路管制空域内で速度調整を実施してもスムーズな降下が出来ないケースが多く発生した。複数回実施した実験結果から、航空路管制空域内における速度調整が有効な条件として、到着機交通量は 10 分値 3 機、30 分値 7 機程度が上限値であることが示された。

6 まとめ

交通量の多い大規模空港において、より多くの航空機が効率的な降下方式である CDO を実施可能とさせることを目的に、CDO 拡大に対する課題を整理し、運用拡大へ有効な方策を検討した。三つの課題「軌道予測の不確かさ」、「他機との間隔維持」、そして「管制官ワークロード」を想定し、軌道予測の不確かさに対しては、予測軌道生成アルゴリズムの開発、他機との間隔維持及び管制官ワークロードに対しては CDO 実施判断支援ツールの開発を進めた。

予測軌道生成アルゴリズムの開発においては、BADA を用いた数値計算による CDO 降下軌道の設計を実施し、モデルの妥当性については、フルフライトシミュレーションの結果と比較することで確認された。条件付き CDO についても検討した。一定の飛行経路角で連続的に降下する Fixed-FPA 降下において、速度制御を付加

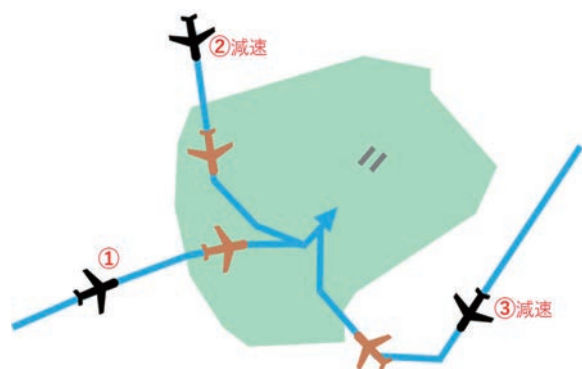


図 1 1 異なる地点からの到着機間での航空路管制空域からの速度調整のイメージ

して実施する方が、CDO を途中で中止する場合と比較すると消費燃料が少ないことが示され、交通量が多い環境での Fixed-FPA 降下の導入効果が示唆された。

CDO 実施判断支援ツールの開発では、支援情報を提供し、管制指示を模擬できる機能を有する CDO 実施判断支援ツールを製作し、管制経験者による評価実験を実施した。支援情報画面の有効性について、タイムラインに関しては、出発機情報をタイムライン上で得られることは有効であるとのフィードバックを得た。全体の流れを把握した上での順序付けの決定のために、管制運用卓ではなく、全体の交通の流れを管理する席における活用が有効であるとの意見であった。

CDO 実施判断支援ツールを使用した評価実験（ヒューマンインザループシミュレーション実験）では、管制官役は到着機に対してできる限り変針することなく連続的な降下が可能となるよう、速度調整を実施した。特に、航空路管制空域内での速度調整が CDO 実施に有効であったが、その有効性は到着機交通量に依存しており、複数回実施した実験結果から、10 分値 3 機、30 分値 7 機程度が上限値であることが示された。

今後は、降下軌道数値シミュレーションに関しては環境問題も考慮する必要があると考え、継続研究のひとつとして騒音等を考慮した降下軌道生成に関する研究を実施する計画である。また、管制運用に関しては、今回の実験から管制支援情報の有効性が明らかになったことから、システムの自動化、コンピューター支援の発展とともに変化していく管制支援機能に焦点をあてた研究をもうひとつの継続研究として実施する計画である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、データを提供していただいた国土交通省航空局、航空会社の関係各位に感謝いたします。また、本研究に協力いただいた大学の諸先生方に感謝いたします。管制経験者の派遣に協力いただいた管制協会関係各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] ICAO: “Continuous Descent Operations (CDO) Manual,” ICAO Doc9931, 2010.
- [2] ICAO: “Global Air Navigation Plan 2016-2030,” ICAO Doc9750 Fifth edition, 2016.
- [3] 国土交通省航空局: “継続降下運航方式,” AIP Japan RJBB AD 2 (2017年3月30日).
- [4] 国土交通省航空局: “那覇空港における継続降下運航方式 (Continuous Descent Operations (CDO)) の試行について,” AIC Nr 010/20 (2020年2月27日).
- [5] 国土交通省航空局: “鹿児島空港における継続降下運航方式 (Continuous Descent Operations (CDO)) の試行について,” AIC Nr 030/16 (2016年9月15日).
- [6] 国土交通省航空局: “CARATS ロードマップ (2018年度改訂),” 2019年3月14日.
- [7] 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: “関西空港への継続降下運航(CDO)の現状と改善点,” 第16回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp.44-49, 2016年6月.
- [8] S. Fukushima, H. Hirabayashi, M. Oka, D. Toratani: “A Review on the Expansion of Restricted Continuous Descent Operations at Kansai International Airport,” Asia Pacific International symposium on Aerospace Technology (APISAT2017), G2-4, October 2017.
- [9] 福島幸子, 平林博子, 岡恵, ビクラマシンハ ナヴィンダ, 虎谷大地: “継続降下運航実施に必要な間隔の設定方法の検討,” 第55回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2017-5038, 2017年11月.
- [10] 平林博子, 福島幸子, 岡恵, ビクラマシンハナヴィンダ, 虎谷大地: “航跡データ解析を用いた関西国際空港における継続降下運航運用拡大の可能性に関する一考察,” 第55回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2017-5037, 2017年11月.
- [11] 虎谷大地, ビクラマシンハ ナヴィンダ, 平林博子: “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講演集, pp.15-20, 2018年5月.
- [12] N. Wickramasinghe, D. Toratani, S. Fukushima, H. Hirabayashi: “A Study on Modeling Techniques for Fuel Burn Estimation based on Flight Simulator Experiment Data”, Winter Simulation Conference 2017 (WSC2017), December 2017.
- [13] D. Toratani, N. Wickramasinghe, S. Fukushima, H. Hirabayashi: “Design Methodology to Simulate Continuous Descent Operations at Kansai International Airport,” Winter Simulation Conference 2017 (WSC2017), December 2017.
- [14] FAA NextGen: “Performance Based Navigation (PBN) Implementation and Usage,” <https://www.faa.gov/nextgen/pbn/dashboard/#> (2020年3月参照).
- [15] D. Toratani, N. Wickramasinghe, H. Hirabayashi, “Simulation Techniques for Arrival Procedure Design in Continuous Descent Operation,” Winter Simulation Conference 2018 (WSC2018), December 2018.
- [16] ビクラマシンハ ナヴィンダ, 虎谷大地: “実験的アプローチによる固定飛行経路角降下の一検討,” 第19回電子航法研究所研究発表会講演集, pp.71-78, 2019年6月.
- [17] N. Wickramasinghe, D. Toratani, J. Westphal, T. Feuerle: “A Simulation Based Study for Performance Evaluation of Fixed Flight-Path Angle Descent,” The 6th ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019), EN-A-66, November 2019.
- [18] 虎谷大地, ビクラマシンハ ナヴィンダ, 平林博子: “固定降下角運用を用いた到着航空機の実験的速度制御,” 第7回 制御部門マルチシンポジウム, 2D1-2, 2020年3月.
- [19] M. Hasebe, D. Toratani, H. Hirabayashi, S. Ueno: “Study on Flight Time Variation of Continuous Descent Operation with Numerical Weather Prediction Wind Data,” Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2019), December 2019.
- [20] 川岡瑠奈, 齊藤有紀, 井上正樹, 虎谷大地, 平林博子: “継続降下運航のもとでの

- 航空機の到着時間予測,” 第 62 回自動制御
連合講演会, 2D1-05, 2019 年 11 月.
- [21] 大野暉宙, 上野誠也, 平林博子: “航空機
の軌道誤差を考慮した軌道最適化計算に関
する検討,” 第 56 回飛行機シンポジウム講
演集, JSASS-2018-5116, 2018 年 11 月.
- [22] 上野誠也 (横浜国立大学), 平林博子, 虎
谷大地: “安全間隔を考慮した CCO (継続
上昇運航),” 第 19 回電子航法研究所研究
発表会講演集, pp.79-82, 2019 年 6 月.
- [23] 平林博子, ビクラマシンハ ナヴィンダ,
虎谷大地: “管制経験者による CDO 運用拡
大に必要な要件の検討,” 第 19 回電子航法
研究所研究発表会講演集, pp. 63-69, 2019
年 6 月.
- [24] 平林博子, ビクラマシンハ ナヴィンダ,
虎谷大地: “航空管制官の管制指示判断を
支援するための情報提画面,” ヒューマン
インタフェースシンポジウム 2019, 5A2-1,
2019 年 9 月.
- [25] H. Hirabayashi, N. Wickramasinghe, D.
Toratani: “A Human-in-the-Loop Simulation
Study on the Requirements of Air Traffic
Control Operations for expanding Continuous
Descent Operations,” The 6th ENRI
International Workshop on ATM/CNS
(EIWAC2019), EN-A-14, November 2019.
- [26] 岡恵, 福田豊, 福島幸子, 瀬之口敦: “高
密度空域への CDO 導入拡大を目指した飛
行時間変動幅の分析,” 第 54 回飛行機シン
ポジウム講演集, JSASS-2016-5013, 2016
年 11 月.