

固定飛行経路角降下の運用構想 に関する一検討

令和5年度（第23回）
電子航法研究所研究発表会

※ビクラマシンハ ナヴィンダ、虎谷大地、平林博子
(航空交通管理領域)



研究背景



- 近年航空業界において、航空交通量の増大に伴い主要な空港の容量拡大が強く望まれている。
 - 2022年の世界航空輸送量：2019年の水準の約7割まで回復（IATA, 2023）

- 将来の航空交通量に柔軟に対応するため、世界的に様々な研究開発が進められている。
 - 航空分野における脱炭素化に向けて**グリーンイノベーション**等取り組みが促進
 - 潜在的な飛行方式：**継続降下運航**（CDO、Continuous Descent Operation）（Clarke他 2004、Sopjes他 2011、平林他 2017）
 - アイドル推力を用いて連続的に降下
 - ✓ 消費燃料の節約
 - ✓ CO₂削減による環境負荷の軽減

国内CDOの現状

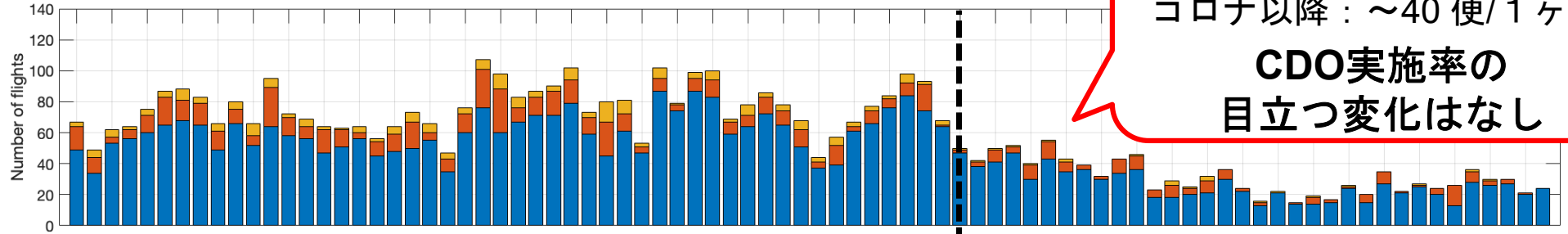


日本においては、現在 3 空港にてCDOの運用が実施されている。

空港	CDO運用 (開始)	CDO運用時間
関西国際 (RJBB)	2009年5月	到着予定時刻 2300(JST) – 翌日0700 (JST)
那覇 (ROAH)	2013年9月	決められた入域地点の通過時刻 0130(JST) – 0555(JST)
鹿児島 (RJFK)	2015年10月	到着予定時刻 1900(JST) – 運用終了時刻

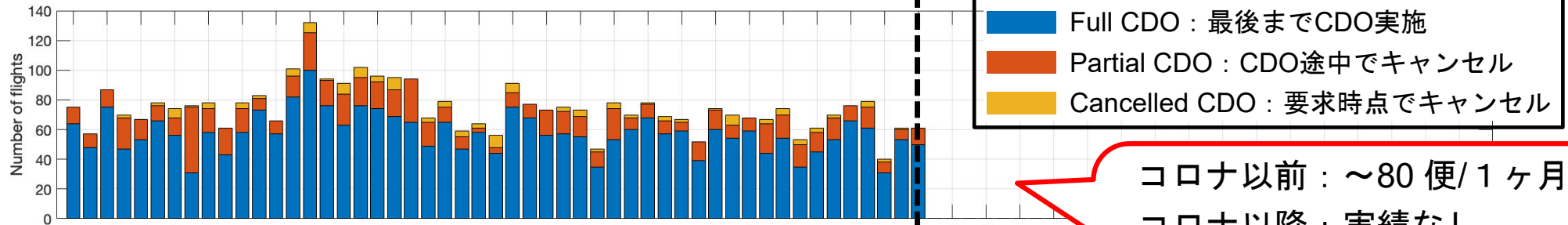
国内CDOの現状

RJBB



コロナ以前：～100 便/1ヶ月
 コロナ以降：～40 便/1ヶ月
**CDO実施率の
 目立つ変化はなし**

ROAH



■ Full CDO : 最後までCDO実施
 ■ Partial CDO : CDO途中でキャンセル
 ■ Cancelled CDO : 要求時点でキャンセル

コロナ以前：～80 便/1ヶ月
 コロナ以降：実績なし

**CDO運用時間帯
 対象の到着便が欠航**

RJFK



**2022年以降：CDO運用
 時間帯の到着便の増加**

新型コロナウイルス
 特別措置の開始

研究目的



- 飛行管理装置 (FMS) による運航状態に特化した降下プロファイル
(FMS-PD、FMS-Profile Descent)
 - ✦ 降下パスにおけるばらつきが大きい → 地上による軌道予測が困難
 - ✦ 日本におけるCDOの運用拡大が課題



運航性能と地上による軌道予測のトレードオフに着目した降下方式

固定飛行経路角 (Fixed-FPA、Fixed flight-path angle) 降下方式

Fixed-FPA降下の運用構想の構築にあたり

- Fixed-FPA降下の有効性の評価
- Fixed-FPA降下の機能拡張の検討

Fixed-FPA降下方式

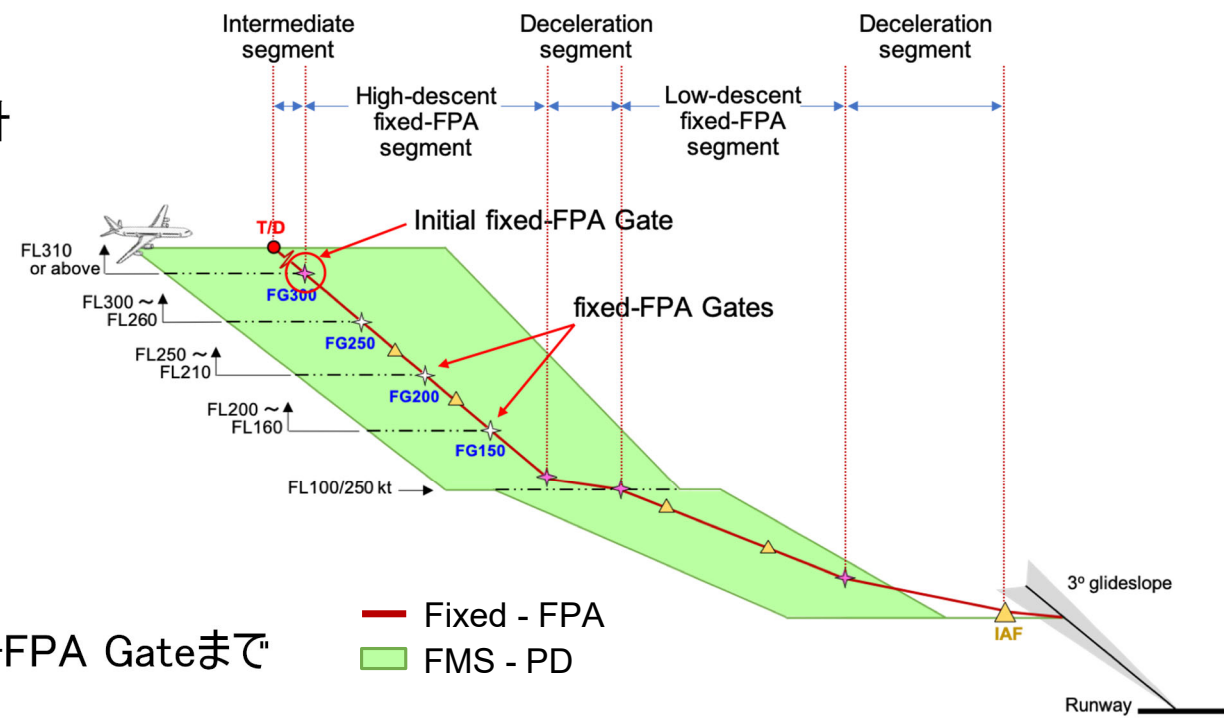


- 「Fixed-FPA Gate」ウェイポイントによる高度を指定した一定降下角の飛行経路
 - 既存の標準到着経路 (STAR) を基準に設計
 - VNAV PATH / Managed Descent の使用
 - アイドルに近い推力による降下

- Fixed-FPA降下開始点：
初期Fixed-FPA Gate
Fixed-FPA降下終了点：
初期進入フィックス (IAF)

- 巡航からの降下開始点 (T/D) から初期Fixed-FPA Gateまで
中間セグメント: FMSによる飛行

- 低高度における高度・速度制限の緩和のため、減速フェーズの追加



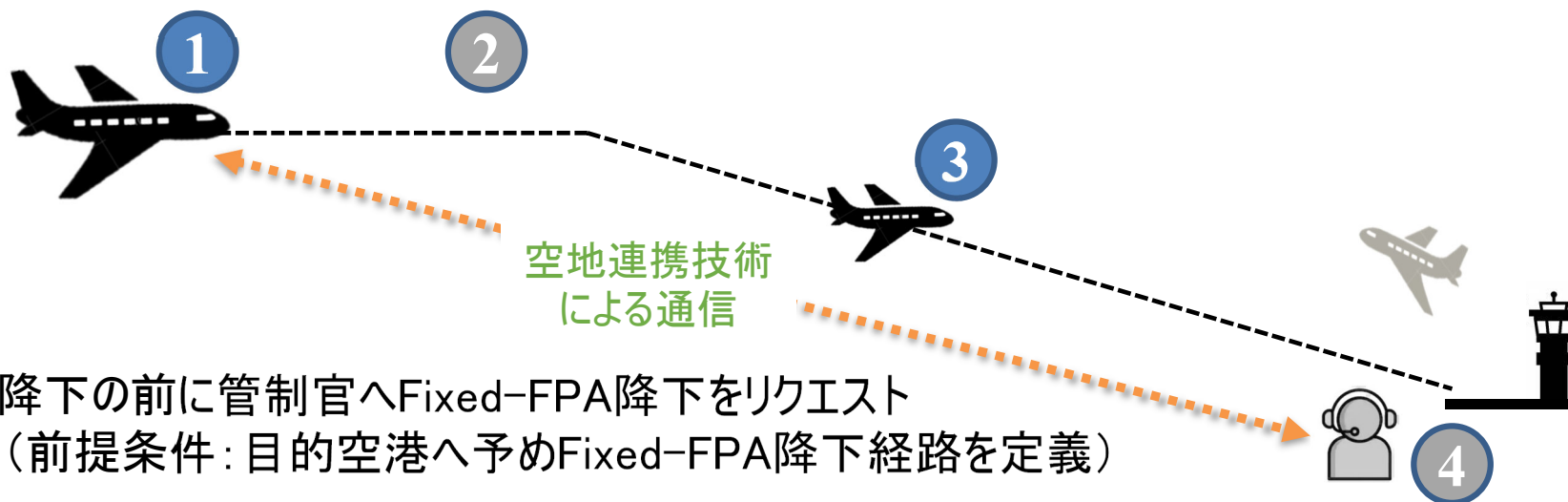
Fixed-FPA降下方式



- Fixed-FPA降下の実現に向けての2つの手順を提案

管制志向システム(戦術的)

↔ パイロット志向システム(戦略的)



- ① パイロット → 降下の前に管制官へFixed-FPA降下をリクエスト
(前提条件: 目的空港へ予めFixed-FPA降下経路を定義)
- ② 管制官 → パイロットとの調整を基に、予め設定されたFixed-FPA降下経路から
運航状況に適した経路を承認
- ③ パイロット → 承認されたFixed-FPA降下を実施
- ④ 管制官 → 安全間隔を維持するためFixed-FPA実施機に対して速度調整の指示

Fixed-FPA降下の軌道生成ツールの開発



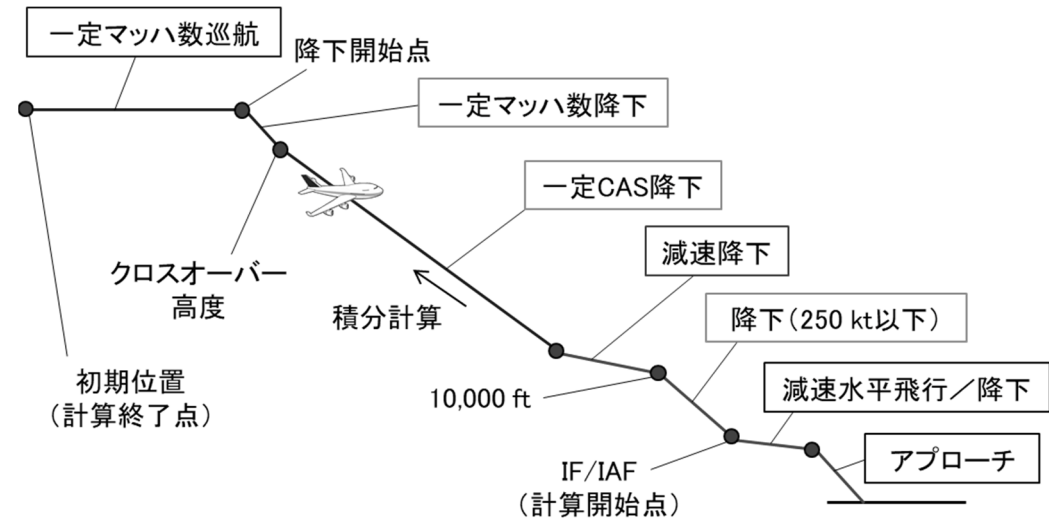
軌道計算モデルの定式化

- ✓ 質点近似方程式による航空機の運動をモデリング
- ✓ 目的空港による運航の制約条件および航空法で定められた制限等

FMSを模擬した軌道計算

- ✓ 進行方向の逆方向に数値積分
- ✓ 決められた気圧面による気象条件の配慮

Base of Aircraft Data (BADA)による機体性能データ、気象庁提供の数値予報データによる運航条件の設定



Fixed-FPA降下の軌道計算モデル

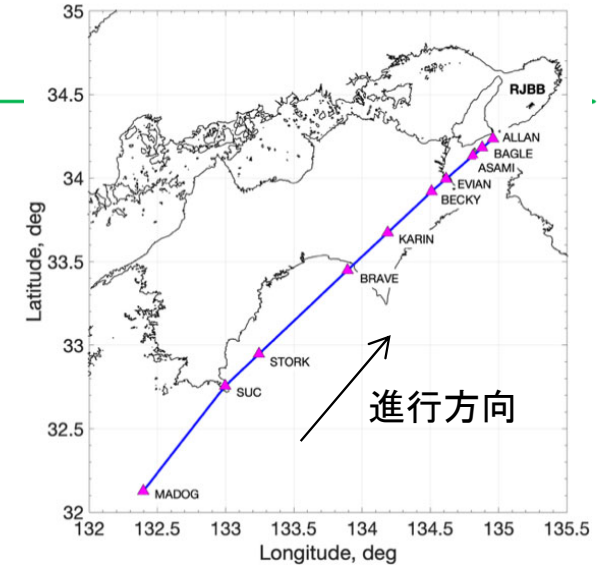
Fixed-FPA降下の軌道生成ツールの検証

- 運航会社所有のフルフライトシミュレータを用いた比較検証
 - 対象機種: B787-8, B777-200ER, A320ceo
 - 対象空港: 関西国際空港 (RJBB)
- ツールから算出された経路をフルフライトシミュレータより再現
 - 経路情報をFMSより手動入力
 - 同一の気象条件
FMS入力(予報)と
システム設定(実際)の風・外気温

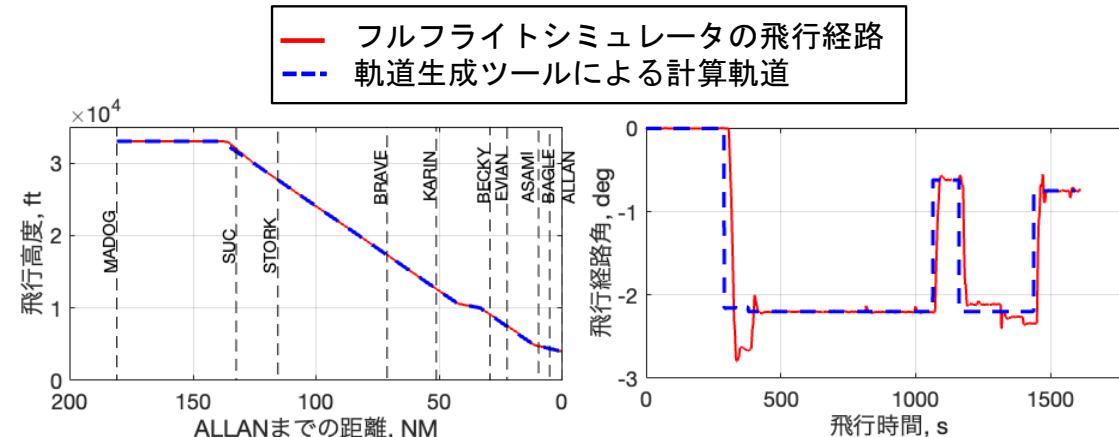


実験結果より、同様な挙動が確認できた。

軌道計算ツールが十分な精度を持つ



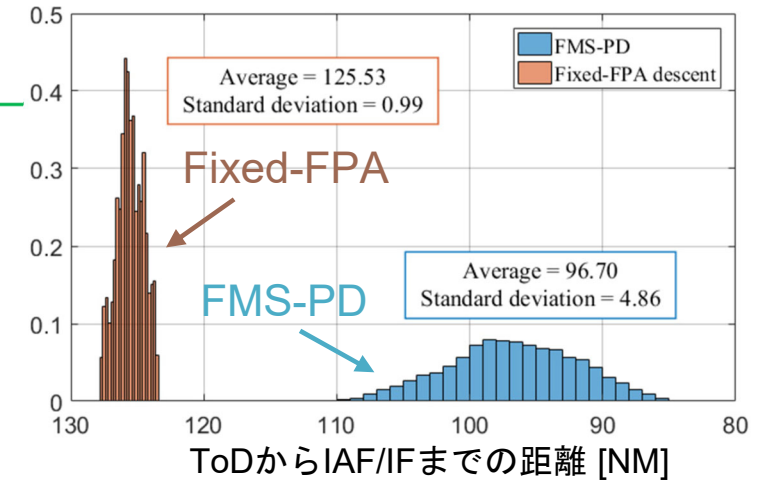
CDO Number 1 (関西国際空港)



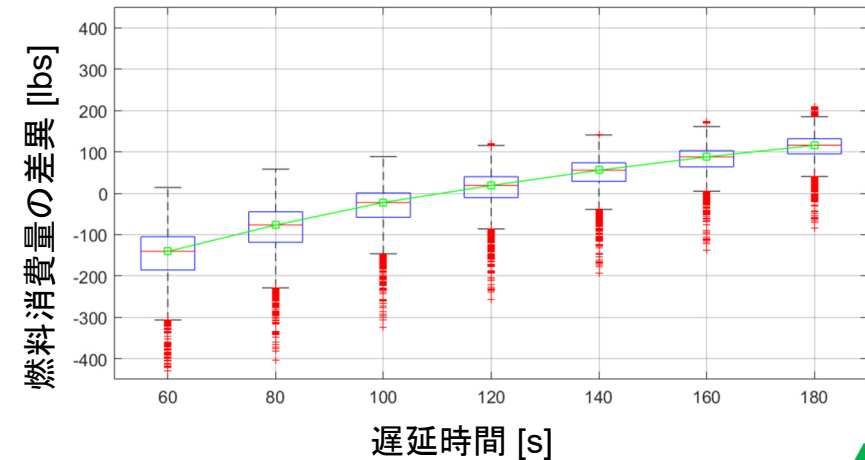
検証の比較結果 (一例)

Fixed-FPA降下の運航性能評価

- 異なる運航条件（機体重量、風速・風向）によりFMS-PDとFixed-FPA降下の挙動を比較検討
 - FMS-PD: ToD位置はIAF/IFに近く、ばらつきが大きい（標準偏差: 4.86）
 - Fixed-FPA降下: ToD位置はFMS-PDより遠く、ばらつきが小さい（標準偏差: 0.99）
- 到着遅延を模擬した環境においてFixed-FPA降下の有効性を検討
 - 120(s)~180(s)の遅延が要求された場合は、Fixed-FPA降下の方が燃料効率が良いという結果が得られた。



FMSによる従来飛行(青)とFixed-FPA降下(黄)の降下開始点分布



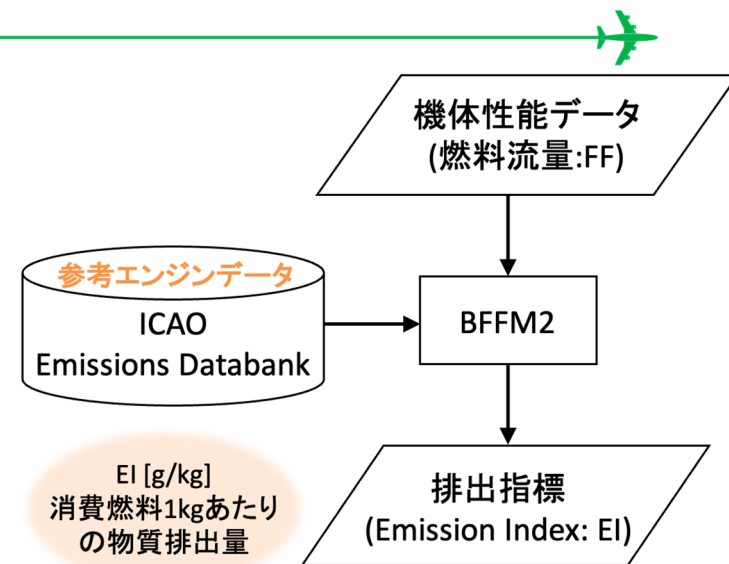
遅延させた場合の従来FMS-PDとFixed-FPA降下の運航性能比較

Fixed-FPA降下における環境負荷の検証

- Boeing Fuel Flow Method 2 (BFFM2) を使用
- フルフライトシミュレータで再現した経路による比較評価



✓ 運航性能（燃費・環境負荷）の観点から、
Fixed-FPA（時刻調整） < FMS-PD（時刻調整）



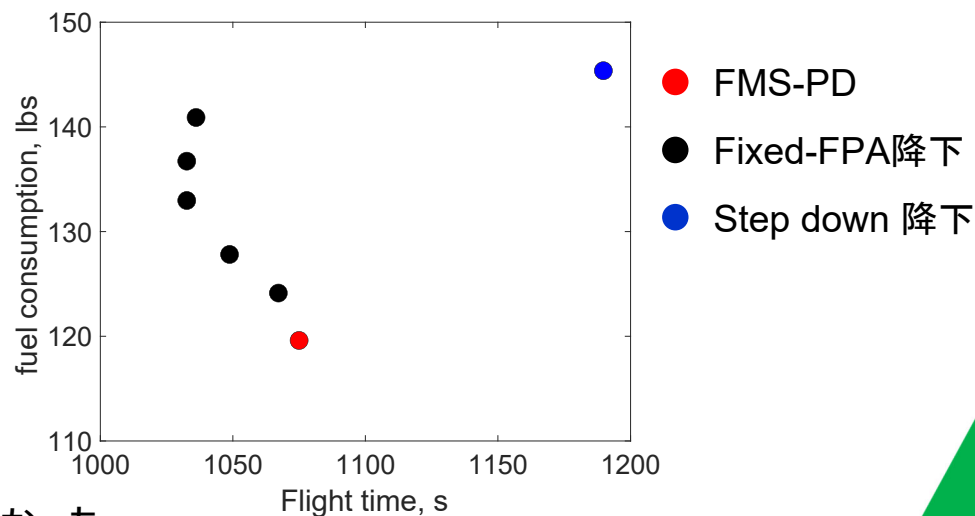
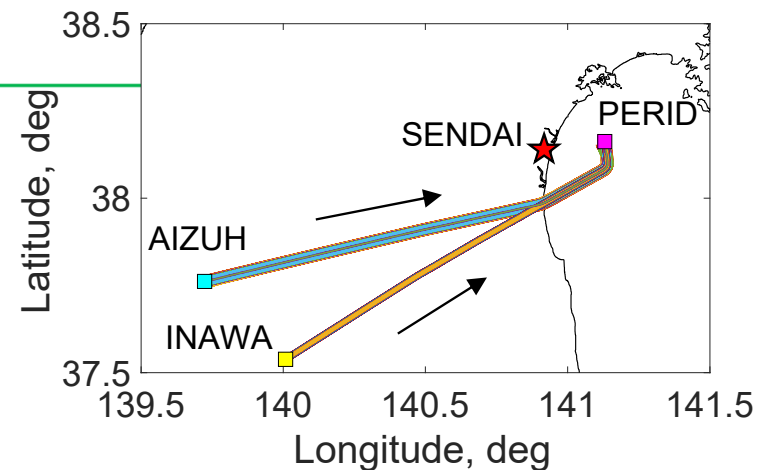
	中型機				大型機			
	FMS-PD	Fixed-FPA	FMS-PD (時刻調整)	Fixed-FPA (時刻調整)	FMS-PD	Fixed-FPA	CDO (時刻調整)	Fixed-FPA (時刻調整)
飛行時間 (s)	1,509	1,576	1,647	1,661	1,508	1,606	1,672	1,640
燃料消費量 (lbs.)	1,185	1,260	1,335	1,218	2,043	2,178	2,402	2,162
CO ₂ (kg)	2,815	2,991	3,169	2,894	2,098	2,497	2,586	2,325
NO _x (g)	7,317	7,422	8,168	7,095	22,039	20,744	24,705	20,950

Fixed-FPA降下の実証実験

- 国内初となるFixed-FPA降下の実証実験を実施
 - 対象空港：仙台空港
 - 対象機種：よつば（Beechcraft KingAir 350）
- 管制機関と予め降下経路・手順を調整
 - AIZUH → PERID, INAWA → PERID
2つの経路を生成
 - 通常のstep down 降下, FMS-PD, FIXED-FPA
(異なる降下角) を検証



得られた結果より、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FMS-PDより燃料消費量が若干増える一方、step down降下より燃費が良いことが明らかになった。



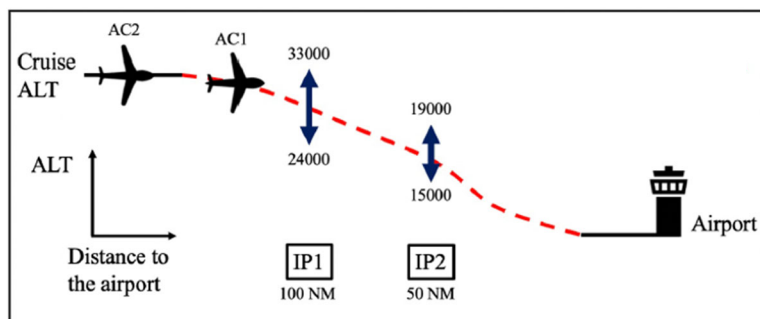
実証実験による運航性能の比較評価

step down降下：交通量の多い環境で管制官が管理しやすい方式

Fixed-FPA降下の機能拡張

到着管理アルゴリズムの開発

(慶應義塾大学との共同研究)



到着管理アルゴリズムの概念図

- 管制支援機能として、Fixed-FPA降下の概念を用いた到着機間の間隔維持が可能とするアルゴリズム
- 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の算出
 - 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
- ✓ 関西国際空港への交通流を模擬したシミュレーションよりアルゴリズムの有効性を評価

Fixed-FPA降下専用のEFBアプリの開発

(BGS社・TUBS大学との共同研究)



アプリの一部の機能(入力画面と算出経路の表示画面)

- パイロット支援機能として、Fixed-FPA降下を実施するため必要な情報を提供する手法
- 巡航中にパイロットが運航状況及び意図(燃費重視もしくは時間重視)を入力
 - 入力値に応じて適切なFixed-FPA降下経路の出力
 - 目的空港に合わせて作成された経路のデータベースより選択される異なる降下角の経路
- ✓ Fixed-FPA降下実証実験にてアプリの適用性を検証

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さらなる研究開発・評価が必要
 - 情報共有基盤 (SWIM) により軌道生成に必要な最新データ(気象や交通状況等)の共有が可能
 - データリンク等通信システムの有効活用により、地上と機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降下の実施が可能

まとめ

本稿では、

- 日本のCDO運用拡大に向けて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
 - Fixed-FPA降下軌道生成ツールの開発, フルフライトシミュレーションよりツールの妥当性の検証
 - 定量的数値シミュレーション及び実機を用いた実証実験により降下方式の有効性の評価
 - 機能拡張において、地上および機上支援機能の検討

CDOの一つの選択肢として次世代到着管理システムの統合へ貢献する



謝辞

本研究を実施するにあたり
データ提供にご協力いただきました国土交通省航空局、航空会社の関係者様
共同研究でご協力いただきましたBGS社、TUBS大学、慶應義塾大学の関係者様
に深く感謝いたします。



ご清聴ありがとうございました。

Mail : navinda@mpat.go.jp