

国際交通流に関するフリールート空域概念と予測精度

ブラウン マーク, 村田 暁紀, 平林 博子, ビクラマシンハ ナヴィンダ, 井無田 貴





福岡FIRにおいてはCovid-19の影響から回復国際線は増加の見通し

国際ATFMを通じた遅延管理に基づく混雑緩和の必要性

2025年3月で4カ年の重点研究である国際交通流の円滑化は終了
本研究で*フリールート空域のコンセプト利用を検討

研究の目標

FRA運用概念の導入を推進のため、運航手順を具体化・運航者への便益を明確化

将来の航空交通管理手法として、国際交通流管理の方策を定義

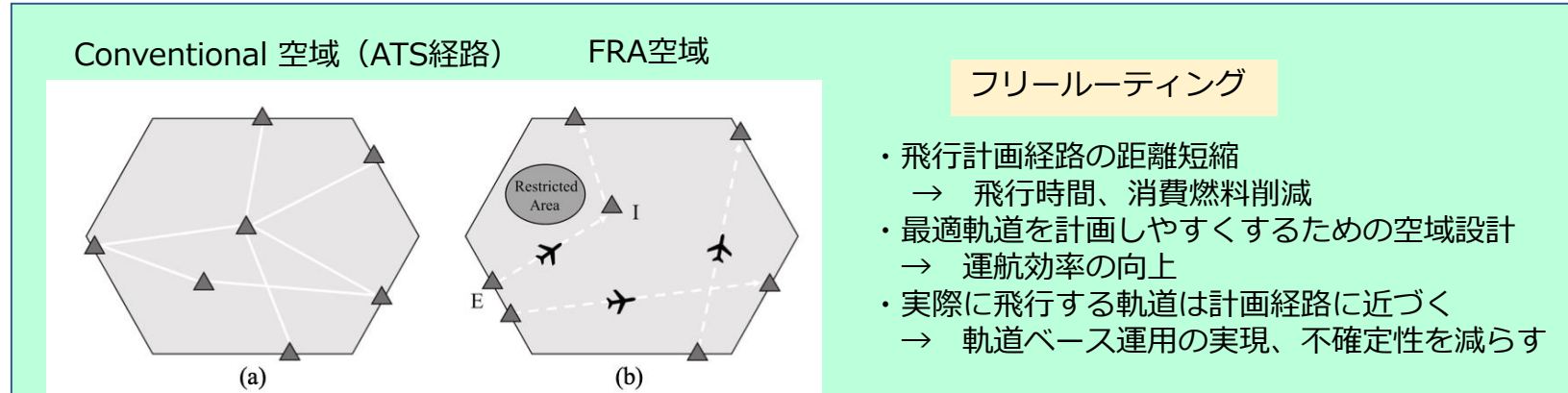
FIR : Flight Information Region

ATFM : Air Traffic Flow Management

*Free Route Airspace: FRA

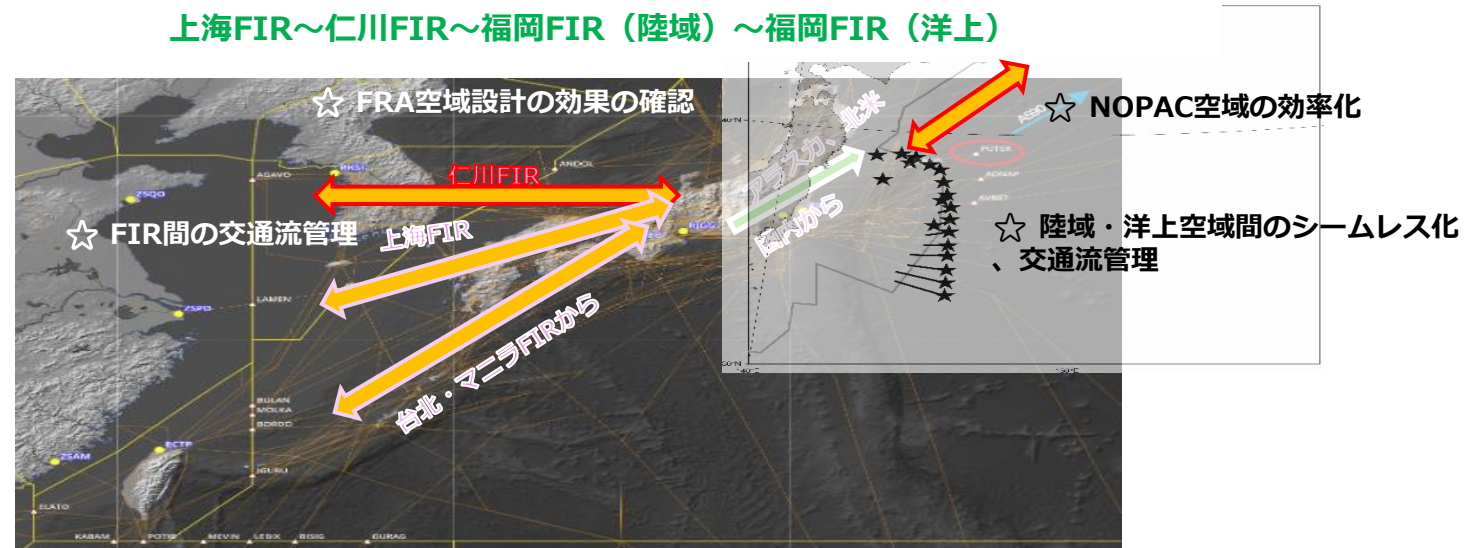
FRAと本発表での紹介項目

フリールート空域(FRA)とは？



研究の焦点

上海FIR～仁川FIR～福岡FIR（陸域）～福岡FIR（洋上）



FRAと本発表での紹介項目

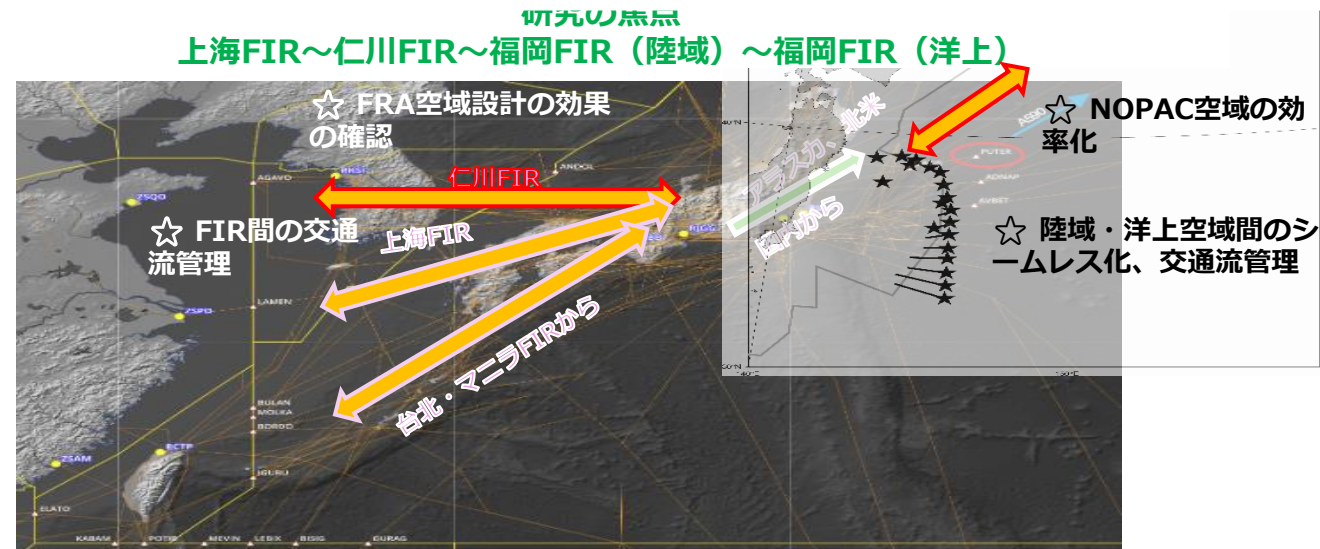


フリールートとは？

研究発表会における紹介内容

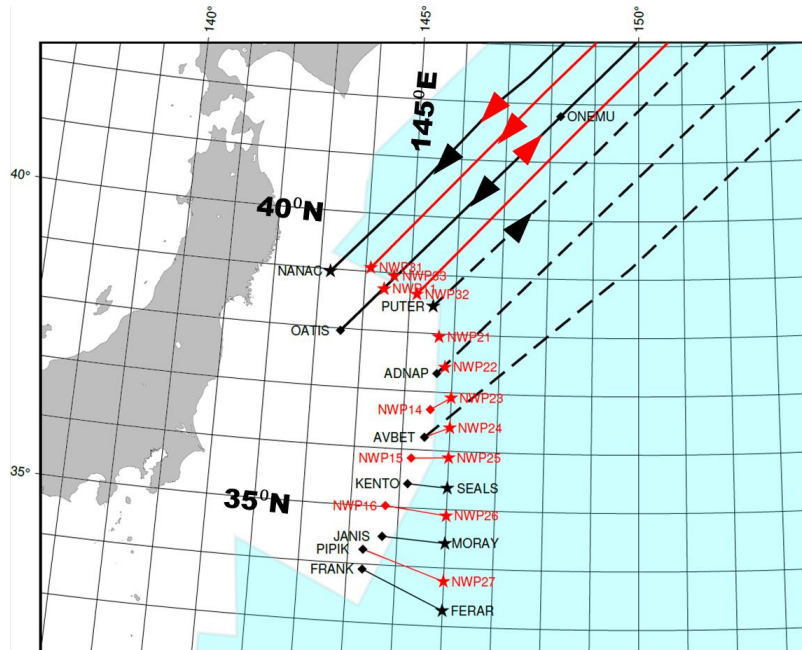
- 交通需要が高いNOPAC洋上空域の効率化、洋上・陸域空域間のシームレス化
- 本邦発の国際便の予測精度の向上

研究の焦点



NOPAC FRAにおける設計案

- NOPAC及び洋上空域におけるCNSの高度化（柔軟な運用が可能なことを仮定）
- NOPACの固定経路を取り除きゲートウェイの数を増やすFRAの可能性を検討
 - フレキシブルトラックエリアをNOPAC地域に拡大
 - ゲートウェイ間の距離を約30NMに縮める



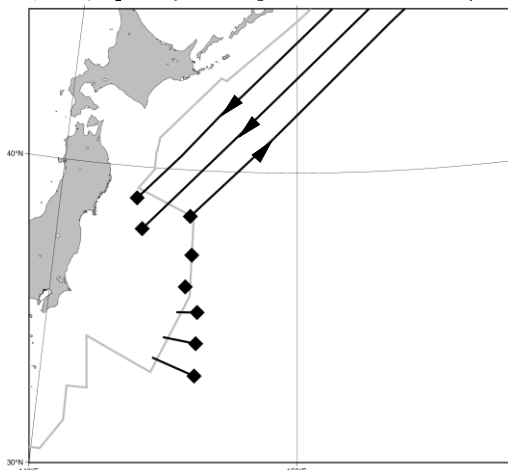
管制部国内セクタと洋上セクタ（水色）の間のゲート案

- 黒線はNOPAC経路（2023年時）
- 矢印は単方向経路
- 最終的なFRA案は経路を削除
- 赤点は現在のゲートウェイから追加

検証・実験設定

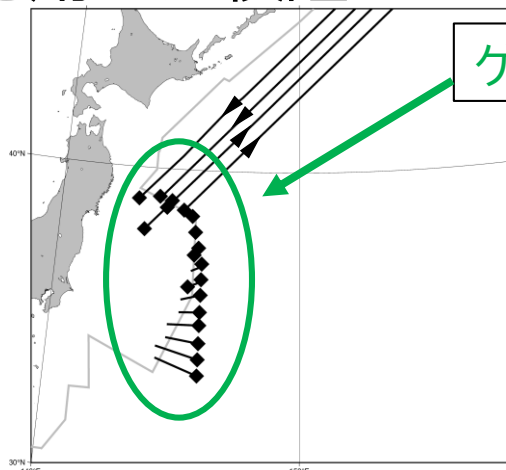


- 提案NOPAC FRAおよびゲートウェイの空域構成（構成M3）を、元のNOPACルート（M1）および中間的なNOPAC再編成（M2）を比較
- ファストタイムシミュレータを用いた検証



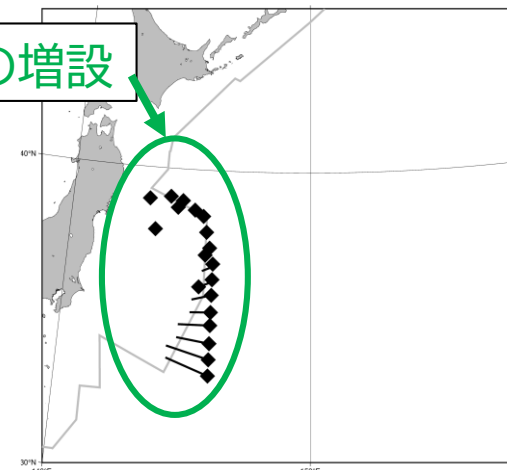
M1(本研究におけるベースライン)

- 2023年2月時点のNOPAC経路構成
- 三本のNOPAC経路、約50NM間隔
- 最北の二本は西行き便専用
- 三本目は東行き便専用
- ゲートウェイは約60NM間隔



M2

- NOPAC再編の最終型
- 約25 NM間隔で四本のNOPAC経路
- 北から二本が西行き便専用
- 南側二本が東行き専用
- 新たに約30 NM間隔でゲートウェイを追加



M3

- NOPAC FRA
- ゲートウェイはM2と同様の増設ゲートウェイ



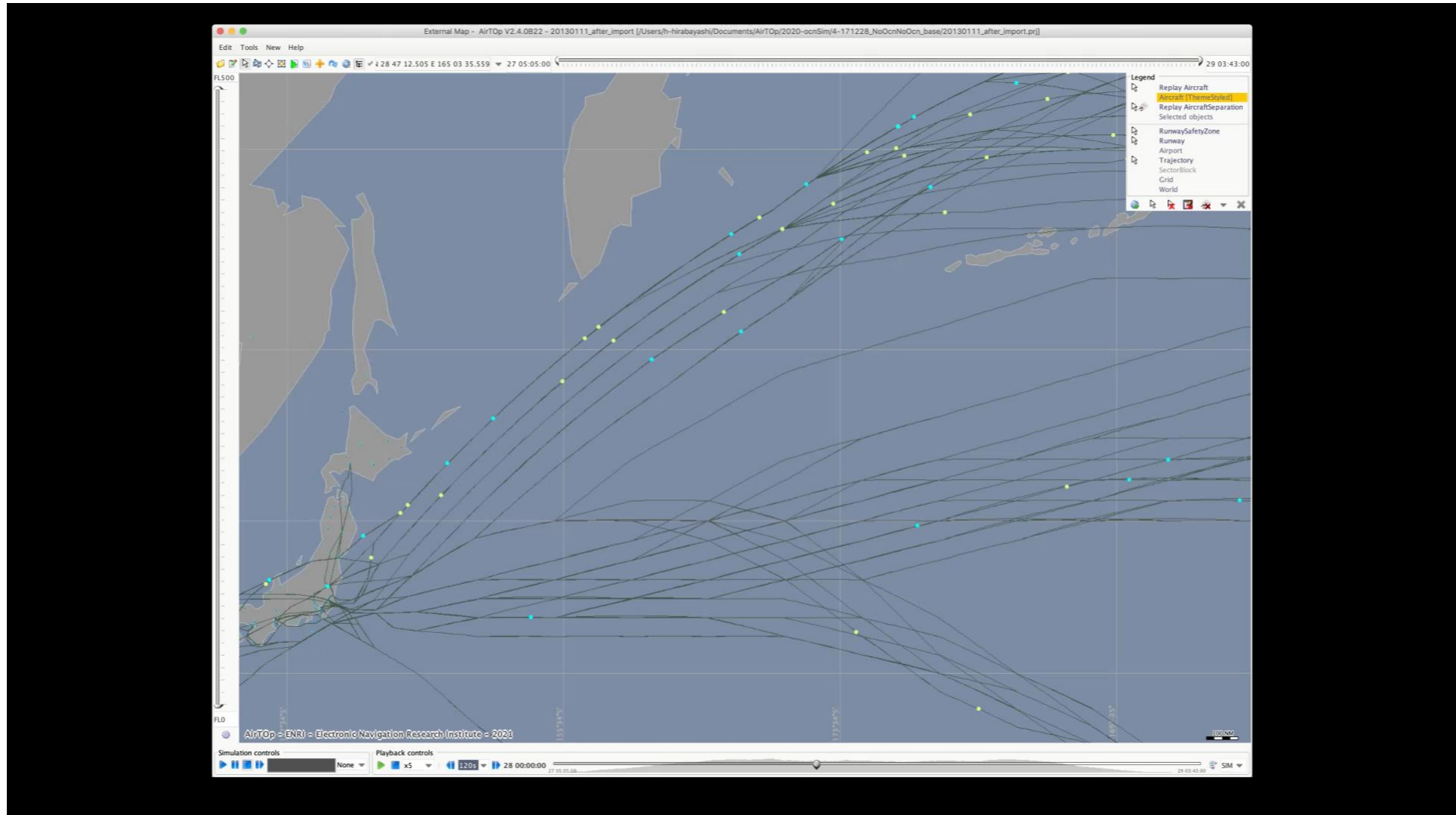
ファストタイムシミュレーションのシナリオ

- 2019年のアジアと北米のフライトスケジュールに基づく
 - 1年間の季節的傾向を表すように選択された複数候補日の風を使用
 - 各風況について、ステップクライムを考慮した最小飛行時間のルートを算出
 - 燃料消費量と飛行時間は、予測される風と気温の条件が与えられたルートに従う

評価指標

- 個々の飛行ルートと性能
- 航空交通の複雑さの変化への影響

ファストタイムシミュレータ例 : AirTOP



評価指標 経路効果とPLOS損失



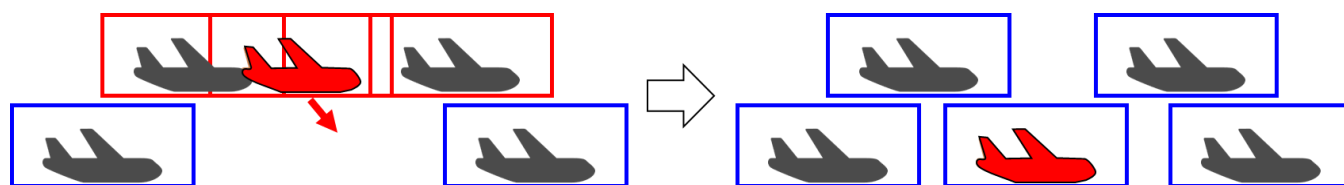
PLOSに（Potential Loss of Separation）とは潜在的間隔損失
PLOSによる航空機運航の効率性低減（運航損失）を燃料損失に換算

PLOS発生

- 管制間隔維持のために管制官の介入
- 理想ではない軌道での飛行による運航効率の低下

洋上空域では、コンフリクトは“高度”により回避
PLOS durationの間、一つ下（2,000 ft）の高度で飛行すると仮定
BADA PTFの各高度での燃料流量を使用

ここではPLOS損失と定義



高度変更によるコンフリクト回避のイメージ

燃料損失または燃料削減効果はCO₂△
換算可能

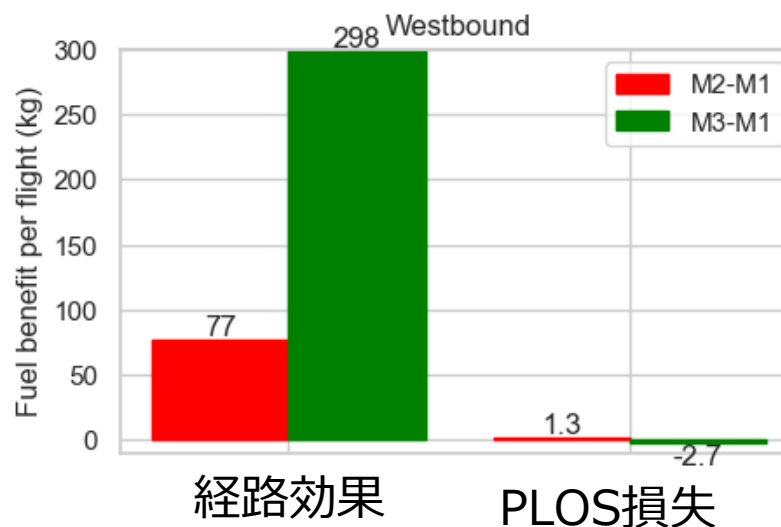
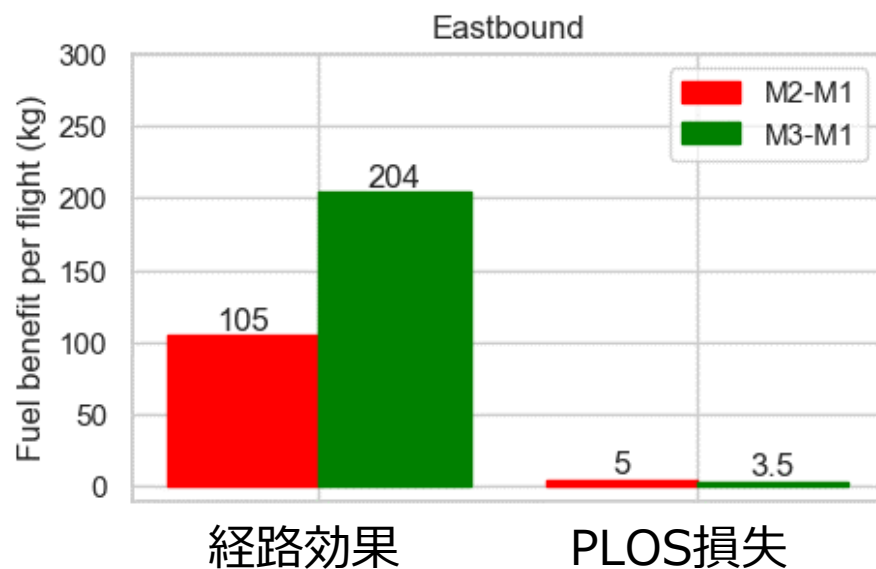
▶▶ 現在航空業界での大きな関心毎である
CO₂等温室効果ガス削減の取り組みへの参考

経路効果

経路設計の柔軟性が向上し風最適経路に近い航行が可能となる効果のことを指す

結果

M1と比較したM2及びM3の燃料消費量効果(一便あたり)



ゲートウェイ増設は特に東行き便に経路効果をもたらし、NOPAC FRAは西行き便の経路効果を高める
経路効果が高いほどPLOS損失も大きくなる **トレードオフの関係**
経路効果がPLOS損失を大きく上回る

CO₂に換算すると、例えばM3西行便で一便あたりで933 kgの削減効果
2022年の日本の鉄道を除く運輸部門(船舶・航空)の一日の総排出量73,973 t
シナリオ便数を乗じ一日あたりに換算すると、M2で約0.3 %、M3で約0.8 %に相当



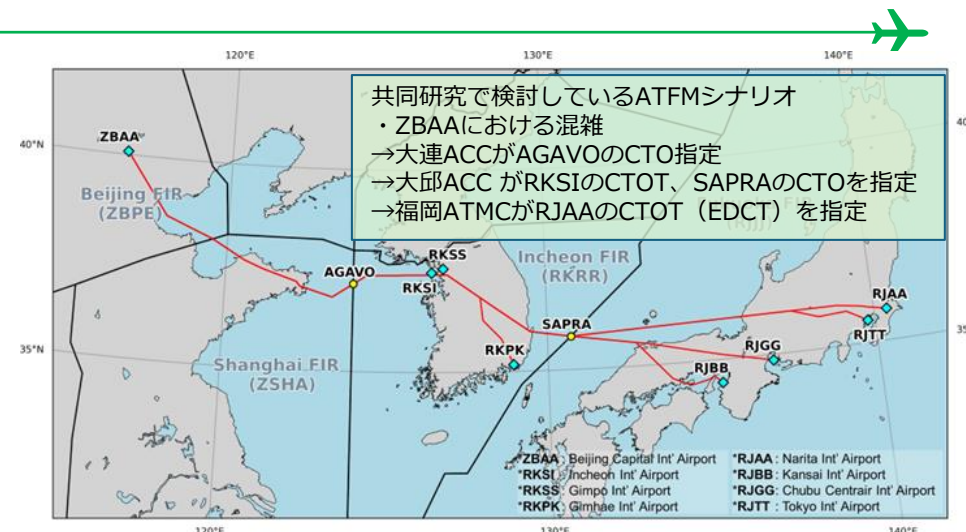
需要増を加味すると、**実社会へもたらす効果は大**

国際ATFMと予測精度

国際ATFMとは？

- 遅延方法：出発制御、セクタ内入域への制御等
- 本邦周辺空域では地域のATFM機能を一元化していない
 - 国際ATFMはFIR間で分散して行う必要がある

*共同研究で、アジア太平洋地域における国際ATFMを調査



容量に制約のあるFIRは、FIR境界で境界通過時刻Calculated Time Over (CTO)を割り当てることでフライトを遅らせることが可能

シミュレーションのケーススタディでは、このようなCTO/CTOT (Calculated Take Off Time) はMIT/MINIT(Miles-in-trail/Minutes-in-trail)よりも効果的であることを確認

通過時刻の精度が国際ATFMにおいても重要



*Korea Aerospace University(KAU)、Korea Aerospace Research Institute (KARI) 、Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA)

[1]Brown, M., Kim, H., Wang, Y., Lee, K., Hirabayashi, H., Wickramasinghe, N. K., Murata, A., Jeon D., Eun Y., Oh, E., Lee, S., and Gray, N. H., "International Air Traffic Flow Management in North and East Asia," 2022 Asia Pacific International Symposium Aerospace Technology (APISAT2022), Oct. 2022, Niigata, Japan.

軌道予測の候補となるアプローチ



候補となる 3 つのアプローチ

統計的算出: 過去のデータから平均値を算出; 単純な 1 点予測

物理モデルを仮定: ファストタイムシミュレータを用いた多点ベースでの予測

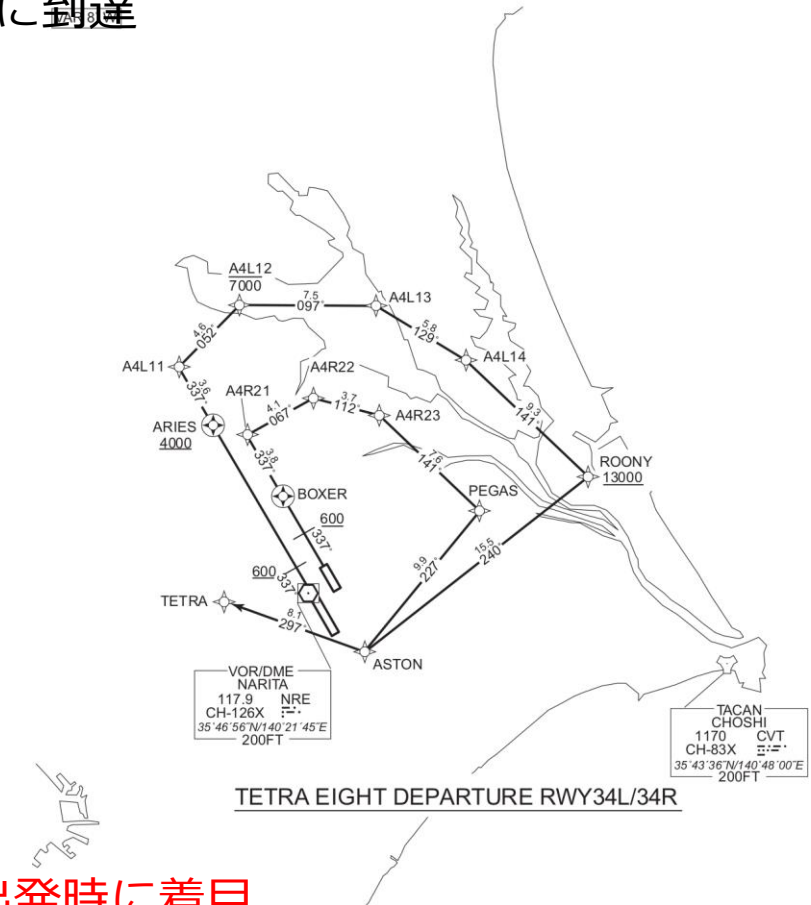
機械学習; 回帰モデルを用いた過去データに基づく学習と予測

- 過去のデータに基づく統計的モデリングが注目
- 特に、データから予測したい値と重要なパラメータ（特徴量）の値の関係を自動的に推測可能
- 機械学習技術が開発の目覚ましい発展
 - 他研究との差異：フライトプランのデータ及び軌道データを特徴量として活用

実験設定



- 成田国際空港（RJAA）における離陸から標準計器出発（SID）上の地点に到達するまでの飛行時間の機械学習回帰モデルを作成
 - レーダー監視記録から得られた過去のデータを利用
 - SIDは2方式を選定（GULBO、ENPAR）
 - 空港の気温と風，航空機の種類，推定巡航経路時間
*（旅行燃料の代用として）
 - 2020年12月ー2023年12月までのデータを利用
 - GULBO2:8,324, ENPAR:12,226
 - 回帰モデル：ヒストグラム勾配ブースティング
- 回帰モデルによる予測値を、単純な平均飛行時間と比較



* 弊所他の課題で地上走行時間に関する精度予測の研究も存在するため出発時に着目

おわりに



重点研究 4 カ年が終了

□ 福岡FIR内における国際交通流を円滑化する研究について紹介

□ 結果

□ FRA導入後の便益を確認し、リスクを削減する段階的な導入方法を明確化

□ SID飛行時間の予測方法を開発

□ 今後の展望

□ ATFMを改善するための機械学習の利用

□ 航空交通流全体の効果とエアライン等の個々のステークホルダーにおける便益のトレードオフ関係の提示

□ 令和 7 年度から新規重点研究（円滑な交通流のための柔軟な空域運用）を開始

□ 今後も国内・国際交通流に関する研究に取り組んで参ります

補足資料



Parameter type	ラベル名	詳細	Source
予測巡航時間	eetHr	Estimated En-route time as a surrogate index of fuel load. 予測巡航時間を離陸燃料の代替として利用	Flight plan EET.
機種	actype	ICAO type code. ICAOにおける機種コード	Flight plan.
エアライン	operator	Flight operating company. 航空機を運航する会社	Airline code as first three letters of aircraft callsign in flight plan. 航空会社の略字及びコールサイン
Traffic demand 交通需要	estDepCnt30min	出発空港における予測離陸時間の15分 前後の離陸航空機数	Flight plan EOBT and historical ATD-EOBT data. フライトプラン及び実軌道データを利用
風	wind10000ft_u wind10000ft_v wind20000ft_u wind20000ft_v wind30000ft_u wind30000ft_v	東西・南北のそれぞれの成分をu,vとして 10,000ft毎にラベル化	Japan Meteorological Agency Global Spectrum Model (GSM) numerical forecasts. 予測データを利用
地上温度	temp2m_K	地表から2m上空の温度	同上
Surface wind	wind10m_u wind10m_v	地表から10m上空における東西・南北 の風速成分	同上
Surface relative humidity 地上相対湿度	rh2m_pc	Relative humidity at 2m above the surface (%).	同上

SID Flight Time Estimation: Machine Learning



- **Regression problem.** Time is a complex function of various parameters, some of which may interact.
 - Aircraft type, temp. & wind, operator-specific procedures, takeoff weight, traffic congestion etc.
- *Use machine learning to build a regression model that learns relationships between parameters (features) and output (time), then use the model to make predictions.*
- Needs lots of data, feature engineering, selection of model & tuning hyperparameters. Experience and some trial-and-error needed.
 - Attempted three types of model: Random Forest, Deep Neural Network, Gradient-Boosting Machine (GBM). Only GBM actually gave significantly better predictive performance than using averages.
- Similar works: Xu *et al.* at NUAU. (We became aware of their work part-way through ours.)

補足資料 特徴量に関して

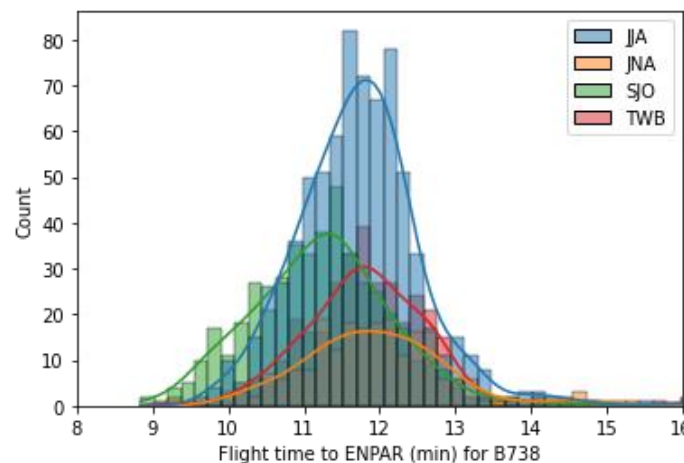
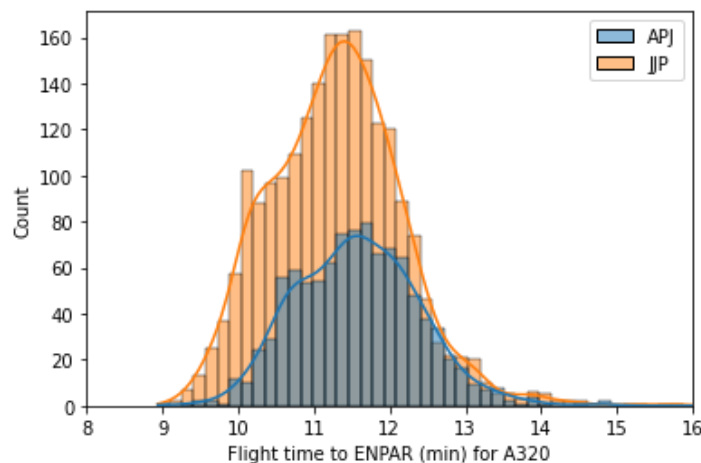


Departure Mass

- Affects climb performance, but is not known *a priori* and not released by operators.
- Xu *et al.* used distance to destination airport.
- We used flight plan EET as a surrogate for departure mass, since this correlates with trip fuel.

Aircraft Performance

- Some studies (inc. Xu *et al.*) use wake turbulence category (WTC), but very coarse and doesn't use ML potential.
- Some time distributions for different operators & aircraft types were statistically significant. ML could learn that.



- We used aircraft type and operator code (first 3 letters of callsign) as two features.
- Separate category for callsign=registration aircraft (mostly General Aviation).



1. ICAOに対してATMサービス提供におけるKPAバランシングの必要性についての認識を高め、可能な解決策としてCDMを提案し、議論促進に貢献した。
2. 洋上空域（NOPAC空域および洋上のフリールート空域）の入域条件をCDMで調整する運航手法を提案した。今後、国際共同研究でコンセプトを具体化し、有効性を評価する予定。
3. FRA導入後の便益を確認し、リスクを削減する段階的な導入方法を明確にした。日本における空域設計の議論に貢献する。
4. 国際ATFMのための国際研究体制を設立し、友好的な情報共有、課題洗い出しができ、今後も国際ATFMの研究への推進に貢献する。
5. 国際ATFMの研究により、時間ベース管理の有効性を確認し、アジア地域の二つの分散型国際ATFMモデルの特徴を洗い出した。今後の国際ATFMに関する議論に貢献できる見込み。

日本は、香港とCTOTを実施し、これからCTOTトライアル先を拡大予定

6. 時間ベース管理に影響する軌道予測精度を解析し、CTOT計算精度の改良に貢献するSID飛行時間の予測方法を開発した。
7. 軌道予測に機械学習技術のポテンシャルを示し、今後応用の拡大を期待できる。

考察



- ❑ NOPACを通過する固定ルートの廃止は、西向きの交通の流れに影響を与えた。NOPAC空域を通過する西行き便の最適飛行ルートは、ロシア連邦空域との境界に平行な、空域の西端に向かう傾向にある。
- ❑ 反対方向のNOPACルートを横切ることが禁止されているため、北太平洋のフレキシブルトラックを経由してNOPAC空域の東側境界から入ったフライトは、NOPACエリアの西側境界に到達することができず、最適よりも東にあるゲートウェイから福岡FIRのレーダー管理空域に入らなければならない
- ❑ NOPACルートを削除すると、このようなフライトがNOPACの西端に到達できるようになり、最西端のゲートウェイにトラフィックが集中し、交差トラフィックによって空域が複雑になる。



図 北米から日本、韓国への西行きフライトのルート傾向。
緑色の破線は、ジェットストリームコアエリアを回避し、NOPAC FRAで利用可能な理想的なルートを示す。
NOPACのルートが固定されている場合、フライトは**ピンクの線で示す**NOPACの東行き固定空路を横断することができないため、緑の実線のルートを使用しなければならない。