

2022 年度 学位論文（修士）

太平洋上空におけるフリールーティングの  
実現に向けた運航データの解析

2023 年 1 月 27 日

東京都立大学大学院

システムデザイン研究科 システムデザイン専攻

航空宇宙システム工学域 博士前期課程

21863625 水津 晴隆

指導教員 武市 昇 教授

## 目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	交通需要の増加	1
1.1.2	長距離便における運航方式：ステップクライム	1
1.1.3	空域設計の検討：フリールーティング	2
1.2	本研究の目的	3
1.3	本論文の構成	4
第2章	使用するデータ	5
2.1	解析対象	5
2.2	実運航データ	7
2.3	飛行計画データ・SDB	8
2.4	CPDLC 及び HF 音声通信の通信記録	8
2.5	数値気象データ(GSM 全球域)	8
2.6	航空機性能モデル(BADA)	10
第3章	リクエスト解析による現状評価	11
3.1	太平洋上の管制運用	11
3.1.1	洋上管制空域における必要管制間隔	11
3.1.2	ゲートウェイについて	13
3.2	上昇リクエスト承認率による現状評価	14
第4章	関連機の推定手法の開発&精度評価	17
4.1	関連機推定アルゴリズム：先行手法（CYLINDER_1, CYLINDER_2 アルゴリズム）	19
4.2	関連機推定アルゴリズム：従来手法（BOX_1, BOX_2 アルゴリズム）	20
4.3	関連機推定アルゴリズム：提案手法	22
4.4	推定アルゴリズムの精度評価	27
4.4.1	推定アルゴリズムの推定精度の評価方法	27
4.4.2	推定アルゴリズムの推定精度の結果区分	27
4.4.3	推定アルゴリズムの推定精度の評価結果	28
4.5	推定精度向上による今後の解析への寄与	32
第5章	空域指標の算出精度向上と適用例	33
5.1	関連機推定とコンフリクト (PLOS) 検出	34
5.2	PLOS の概要	35

5.3.	PLoS 検出アルゴリズム .....	36
5.4.	PLoS 検出アルゴリズムの適用例：高密度交通流を模擬したシミュレーション .....	38
5.4.1.	運航前：シナリオ作成 .....	39
5.4.1.1.	交通量モデル .....	39
5.4.1.2.	交通密度を増加させたシナリオの作成 .....	40
5.4.1.3.	最適軌道の計算 .....	46
5.4.2.	運航中：ファストタイムシミュレーション（FTS）の実施シナリオ作成 .....	51
5.4.3.	運航後：空域指標（PLoS）の算出 .....	54
5.5.	PLoS 検出手法の違いに伴う空域指標の算出結果の差異 .....	55
5.6.	交通密度の変化に伴う空域指標の変化 .....	60
第 6 章	結論 .....	70
	LICENSE AGREEMENT .....	71
	付録 .....	72
	参考文献 .....	73
	对外発表 .....	76
	謝辞 .....	77

# 第 1 章 はじめに

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 交通需要の増加

2020 年から 2022 年にかけて COVID-19 の影響による航空需要の減少に伴い、国際線の便数が減少している状態が継続しており、最も航空需要が低下した 2020 年夏季スケジュールでは、日本発着の運航予定便数は旅客便・貨物便合計で 876.5 便/週であった<sup>[1]</sup>。一方で、2022 年冬期スケジュールにおける日本発着の国際定期便の全体運航便数では、2644 便/週となっている<sup>[2]</sup>。COVID-19 の影響を受ける前の 2019 年冬季スケジュールの 5688 便/週<sup>[3]</sup>の値と比較すると依然として完全な航空需要の回復には程遠いものの、前年同期比 58.5% の増加となっており、航空需要は徐々に回復する傾向にある。2024 年までには COVID-19 による減便が生じる前の 2019 年と同水準の航空需要が回復することが見込まれている<sup>[4]</sup>。

長期的な観点では航空需要の拡大が見込まれている。世界的には、航空旅客需要は 2021 年から 2041 年までの 20 年間で、有償旅客キロ(RPK, Revenue Passenger Kilometers)ベースで 2.4 倍に拡大することが見込まれ、年平均成長率は 4.0%と予測されている<sup>[5,6]</sup>。とりわけ、アジア・太平洋地域は経済発展に伴う航空需要の増大が見込まれており、RPK の年平均成長率は 4.5%と世界平均よりも大きな成長が見込まれている<sup>[6]</sup>。

アジア-北米間の交通量の増加に伴い、日本が航空管制業務を担当する空域である福岡 FIR (Flight Information Region : 飛行情報区)を飛行する航空交通量の増加が予想される。とりわけ、中国や東南アジア各国では高い航空需要の成長率が見込まれる<sup>[6]</sup>。従って、福岡 FIR を通過し、中国や韓国・東南アジア各国などの日本よりも西に位置する国と北米方面の各国との間を飛行する、上空通過機が増加することが想定される。

### 1.1.2 長距離便における運航方式：ステップクライム

航空機の総重量は、飛行の経過に伴い燃料消費により次第に軽くなる。また、ジェット航空機における最も燃料消費率が少なく経済的な高度（最適飛行高度）は、機体が軽くなるに従い上がる特性がある<sup>[7]</sup>。一方で、航空機間に設定される最小間隔として管制間隔が定められており、飛行可能な巡航高度が 1000 ft または 2000 ft 毎に国際ルールとして規定されている<sup>[8]</sup>。最適高度推移に近い高度推移と、高度選択の制約との両立を図るべく、巡航時間が 5-6 時間を超える長距離便では、巡航高度を段階的に上げることが有効な飛行となる。このような段階的な上昇はステップクライムと呼ばれる<sup>[7]</sup>。

通常、ステップクライムの予定地点・予定高度は飛行計画に記載される。一方で実施は操縦士から管制官に対してリクエストを行い、航空管制官は現在から 1 時間程度先の予測交通流を考慮し、リクエストに応じたとしても必要な航空機間間隔（管制間隔）を維持可能であると判断された場合は管制指示を発出することで実施される。



### 1.1.3 空域設計の検討：フリールーティング

新たな空域設計のコンセプトとして、2008年に欧州航空航法安全機構（EUROCONTROL）によりフリールーティング（Free routing）が提案された<sup>[9]</sup>。現在の空域運用では、FIX間を結ぶ経路として予め公示された航空路を中心とする運用が行われている。一方フリールーティングでは既存の航空路によらず、運航者自身で経路の選択を行い、FIX間を自由に結ぶ運航経路の設定を行う。図1に既存の運用及びフリールーティングによる運用の概略図を示す。EU圏内を中心に運用空域が拡大されており、2019年末時点ではEU圏内の55のACC（Area Control Center：航空交通管制部）において、フリールーティングによる運用が行われている<sup>[10]</sup>。図2に2022年末時点におけるフリールーティングの導入空域（EU圏内）を示す<sup>[10]</sup>。レーダー管制空域におけるフリールーティングの導入によるメリットとして、経路の直行化に伴う運航効率の向上及びATC（Air Traffic Control：航空交通管制）ワークロードの減少が期待される。一方で福岡FIRを含むアジア・太平洋地域においても、フリールーティングの導入のに向けた検討が進められている<sup>[11-13]</sup>。洋上管制空域にフリールーティングを導入することにより、経路の柔軟な設定が可能になり、より風最適の経路の設定が可能になることに伴う運航効率の向上が期待される。図3に太平洋上の空域におけるフリールーティングを想定した経路ネットワークを示す。

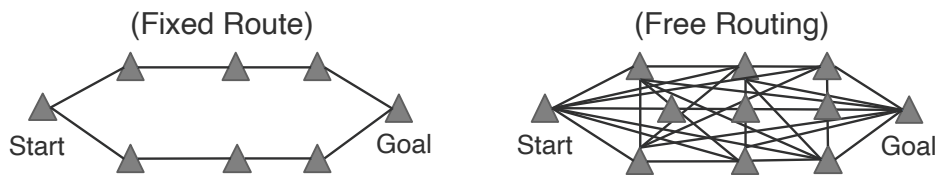


図1 既存の運用（固定経路）及びフリールーティングによる運用の経路の概略図

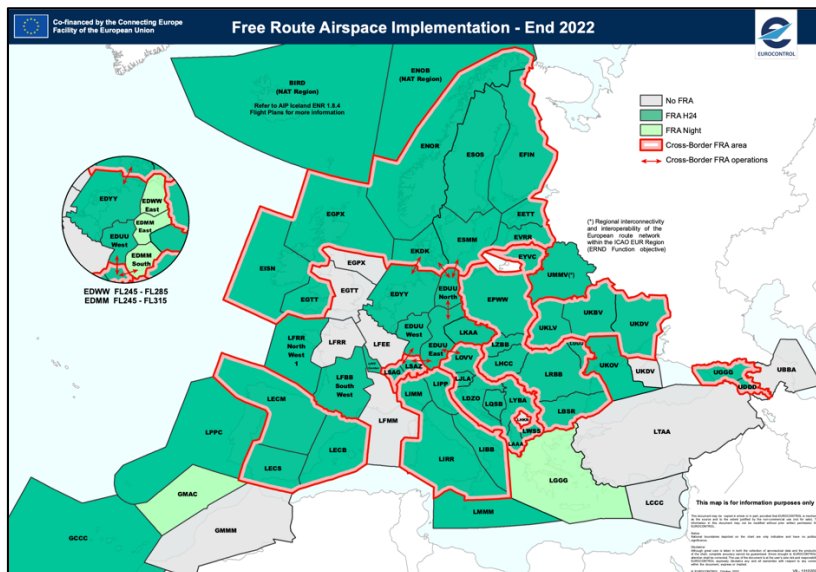


図2 EU圏内におけるフリールーティングの実施状況<sup>[10]</sup>（2022年末時点）  
（緑色：24時間実施、薄緑色：夜間のみ実施、灰色：実施なし）

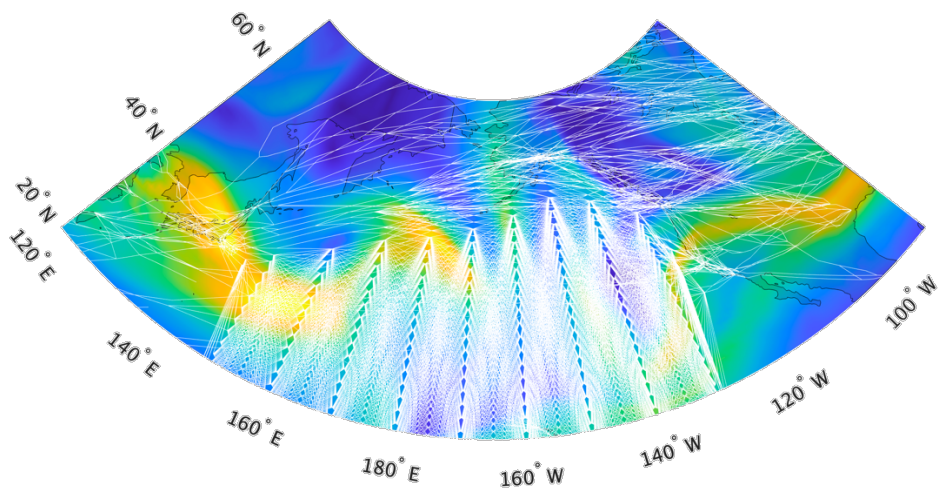


図 3 太平洋上空域における経路ネットワーク（フリールーティング）

## 1.2 本研究の目的

現在福岡 FIR を含むアジア・太平洋地域において、フリールーティングの導入が検討されている。一方でアジア・太平洋地域は RPK ベースで年平均 4.5 %と、航空需要の大きな成長が見込まれている。従って、アジア・太平洋地域におけるフリールーティングのコンセプト設計にあたり、現在の航空需要のみならず航空需要の増加も踏まえた評価を行うことが必要となる。航空需要の増加を踏まえた評価は、現状よりも増加した交通流を模擬した FTS (Fast Time Simulation: ファストタイムシミュレーション) により実施される。FTS とは想定される環境をシミュレーションにより模擬し、実時間よりも十分に短い時間で多くの回数のシミュレーションを行うことで評価を行う方法であり、より正確な評価を行うためには、空域指標のより正確な算出が必要となる。そこで、本研究では太平洋上空におけるフリールーティングの実現に向け運航データの分析を通じて現状分析を行うとともに、実際の管制運用に即した空域指標の算出方法の確立及び精度向上を図ることを目的とする。

### 1.3 本論文の構成

第2章では運航データの分析及びFTSの実施に使用したデータについて説明を行った。第3章では洋上管制空域におけるATC空対地通信記録の解析により、上昇リクエストの承認率を評価指標とした運航効率の現状評価を行った。第4章では洋上管制を行う管制官のタスクのモデル化として、ステップクライムに対して周辺交通として影響を及ぼす可能性がある便（関連機）を推定するアルゴリズムの提案を行った。また、洋上管制有資格者の結果と比較し、精度の検証を行った。第5章では関連機推定の応用として、シミュレーション内で航空機間の間隔が欠如している状態を意味するPLoS（Potential Loss of Separation：潜在的管制間隔喪失）検出精度の向上を図った。フリールーティングの導入後の将来的な航空需要の増加を踏まえたシミュレーションとして、高密度交通流を模擬したシミュレーションを実施した。考案手法を適用することで、将来的に想定される交通密度が増加した状況下でのPLoSの予測及びその要因の調査を行った。第6章ではこれまでの章で得られた結果を総括し結論を述べた。

## 第2章 使用するデータ

### 2.1 解析対象

解析対象とする便は、福岡 FIR の洋上セクターを經由して、アジアの各空港と北米・ハワイ間を飛行する便とする。なお、アジアの各空港及び北米・ハワイの空港は以下の条件で抽出を行った。

- ・アジアの各空港：日本・中国・韓国・東南アジアなど、アジアの各地の空港
- ・北米・ハワイの空港：ICAO4 レターコードで以下の文字で始まる空港

K\*\*\*, CY\*\*, M\*\*\*, PA\*\*, PH\*\*

解析対象期間は 2019 年 3 月 4 日から 10 日の計 7 日間とする。本研究は実際の管制運用に即した空域指標の算出方法の確立を目的とすることから、以下の 3 つの条件を満たすことが望ましい。

- (1) 飛行している便数が多いこと
- (2) 悪天域や乱気流を回避するための高度及び経路の変更が少ないこと
- (3) 経路の分岐や交差が存在していること

本研究では管制官のタスクのうち航空機間の間隔の管理を中心とする。悪天時には、悪天域や乱気流を回避するための高度及び経路の変更の承認や、それに関連した調整業務など、通常時と比較して管制負荷が増加する。通常の天候における管制業務を念頭に、気象による解析結果への影響を可能な限り少なくすることを目的として条件 2 を付した。また、洋上管制空域では、航空機相互間の方位角の差に応じて適用される管制間隔や航空機間の間隔の算出方法が異なる。条件 3 は空域指標の算出方法の提案や精度検証にあたり、より多様な便を含む交通流を解析対象とすることを目的とした条件である。

条件 1 及び条件 2 を満たす期間として 2019 年 3 月及び 11 月が該当する。両期間における東行き（アジア→北米）便の航跡を図 4 に示す。2019 年 11 月は交通流の分岐が多くを占める一方、2019 年 3 月は交通流の分岐及び交差が存在する。以上より、上記 3 条件を最も良く満たす 2019 年 3 月を解析対象として選定した。

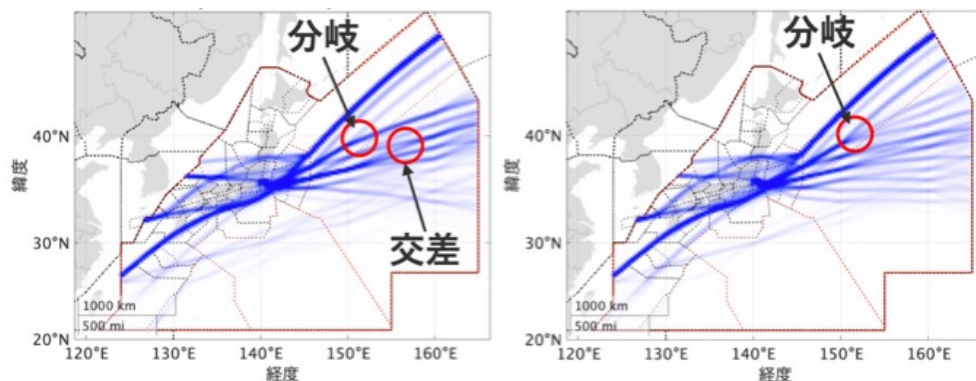


図 4 東行き（アジア→北米）便の航跡（左：2019 年 3 月、右：2019 年 11 月）

解析対象期間における東行き（アジア→北米）便及び、西行き（北米→アジア）便の解析対象とする便の内訳を以下の表 1 に示す。

表 1 解析対象とする便の内訳 [便]

	東行き（アジア→北米）	西行き（北米→アジア）
東京発着便 （成田・羽田）	459	431
日本発着便 （東京を除く）	130	107
海外空港発着便 （上空通過機）	1175	447
合計	1764	985

## 2.2 実運航データ

本研究では、国土交通省航空局提供の 2019 年 3 月の航跡データを用いる。航跡データには福岡 FIR 内を飛行する軍用機やジェネラルアビエーション以外の航空機の位置情報（時刻・緯度・経度・気圧高度）、当該便の運航に関する情報（出発空港・行先空港・便名・型式）が時系列に記録されている。

データソースはレーダー情報を基にした RDP (Rader Data Processing) システム並びに洋上を飛行する航空機から通報される位置情報を基にした TOPS (Trajectorized Oceanic Traffic Data Processing System：洋上管制処理システム)であり、データ間隔はそれぞれ約 10 秒間隔、約 30 秒間隔である。

TOPS における位置情報は主に ADS-C (Automatic Dependent Surveillance - Contract) による位置通報により取得している。ADS-C による位置通報は、定期的なポジションリポートの他に上昇や降下などのイベントが発生した時、管制機関から航空機に対して情報の送信要求 (Demand contract request) を行った時に実施され、定期的な通報間隔は RNP4 (Required Navigation Performance) では 12 分以内と規定されている<sup>[14]</sup>。また、ADS-C を装備していない航空機については HF 音声通信によって位置通報が行われる。位置通報では現在位置とともに次の位置通報点の到着予定時刻も併せて通報される。TOPS では位置通報の現在地と次の予定地点との間を 30 秒間隔で線形補間した情報が記録されている。本研究では、RDP システムに記録されたおよそ 10 秒ごとの位置情報と共に、TOPS から他システムに送信されたおよそ 60 秒毎に記録された位置情報を使用した。RDP システムをソースとしたデータと時間間隔を揃えるため、上記の情報をさらに 10 秒間隔に再度線形補間を行った情報を実運航データとして解析に使用した。解析対象とした便の軌道を図 5 に示す。なお、福岡 FIR の洋上管制空域を太線で囲って示す。

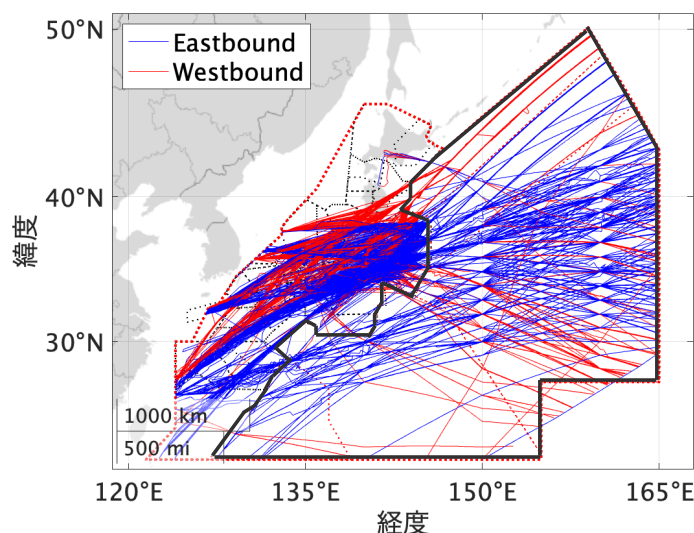


図 5 解析対象とした軌道

(青色：東行き（アジア→北米方面）、赤色：西行き（北米→アジア方面）)

## 2.3 飛行計画データ・SDB

出発前に予め飛行を予定するルートや高度、速度などが記載されている飛行計画が運航者から管制機関に対して提出される。本研究では国土交通省航空局提供の飛行計画データを用いる。飛行計画には要求初期巡航高度、予定初期大気速度（巡航時）、予定経路（通過ウェイポイント及び航空路で構成。高度及び速度の変更予定位置を含む）、CNS（Communication, Navigation, Surveillance）性能に影響する装備品（無線・データリンク・監視機器など）の種類や性能区分が記載されている。各便に適用される管制間隔は飛行計画から判別される CNS 性能及びデータリンク通信の接続状況により判断される。

また、SDB には各セクターにおける WP の実通過時刻（監視システムにより捕捉された時刻）及び承認高度（管制システムから入力された指示高度（承認高度））が記載されている。本研究では FTS のシナリオ作成にあたり、福岡 FIR 洋上管制空域の入出域 FIX を把握する際に SDB の情報を使用した。

## 2.4 CPDLC 及び HF 音声通信の通信記録

洋上管制空域においては、CPDLC（Controller Pilot Data Link Communication）データリンク通信及び HF 音声通信が管制官と操縦士との間の通信手段となる。本研究では、国土交通省航空局提供の CPDLC 及び HF 音声通信の通信記録を使用した。通信記録には通信を行った時刻、通信対象便の便名、通信対象便の機体番号、通信内容が記載されている。通信記録と実運航データ、飛行計画の3種類のデータの紐付けを行なったのち、便名や機体番号の匿名化処理を行ったデータを解析に使用した。

ステップクライムは操縦士が管制官に対して上昇のリクエストを行い、管制官がリクエストを承認することにより行われる。通信記録の解析を行うことで、上昇リクエストが承認されているか否か、承認の場合はリクエスト通りに承認されているか、非承認の場合は何に起因するかを把握することが可能になる。

## 2.5 数値気象データ(GSM 全球域)

航空機の飛行に影響を与える風や温度などの気象モデルとして、本研究では気象庁提供の全球数値予報モデル GSM (Global Spectral Model) を使用する。GSM 全球域は全球を対象としており、緯度 0.5 度間隔・経度 0.5 度間隔の格子点において、初期値を元に最大 264 時間先までの予報を 6 時間間隔で提供している<sup>[15]</sup>。なお、本研究では予報値は使用せず、初期値のみを使用した。本研究では、京都大学生存圏研究所 生存圏データベース<sup>[16]</sup>から取得した GSM の初期値に対して時空間的に線形補間を適用することで、任意の地点・時刻における風及び温度のデータを計算に使用した。表 2 に GSM 全球域の概要を示し、図 6 にデータの一例として、2019 年 3 月 5 日 16:00 JST の FL330 における風速の分布を示す。



表 2 GSM 全球域の概要

要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地表：海面更正気圧、地上気圧、風（東西風・南北風）、気温、相対湿度、積算降水量、雲量</li> <li>・ 1000hPa・925hPa・850hPa・700hPa・600hPa・500hPa・400hPa・300hPa 等圧面：高度、風（東西風・南北風）、気温、上昇流、相対湿度</li> <li>・ 250hPa・200hPa・150hPa・100hPa・70hPa・50hPa・30hPa・20hPa・10hPa 等圧面：高度、風（東西風・南北風）、気温</li> </ul>
初期値	00, 06, 12, 18UTC (1 日 4 回)
予報時間	264 時間 6 時間間隔
データ形式	国際気象通報式 FM92 GRIB 二進形式格子点資料気象通報式(第 2 版) ※ 略称：GRIB2
配信領域	全球
格子系	等緯度等経度 ・ 地表-100hPa：0.5 度×0.5 度 (格子数 720×361) ・ 70-10hPa：1.0 度×1.0 度 (格子数 360×181)

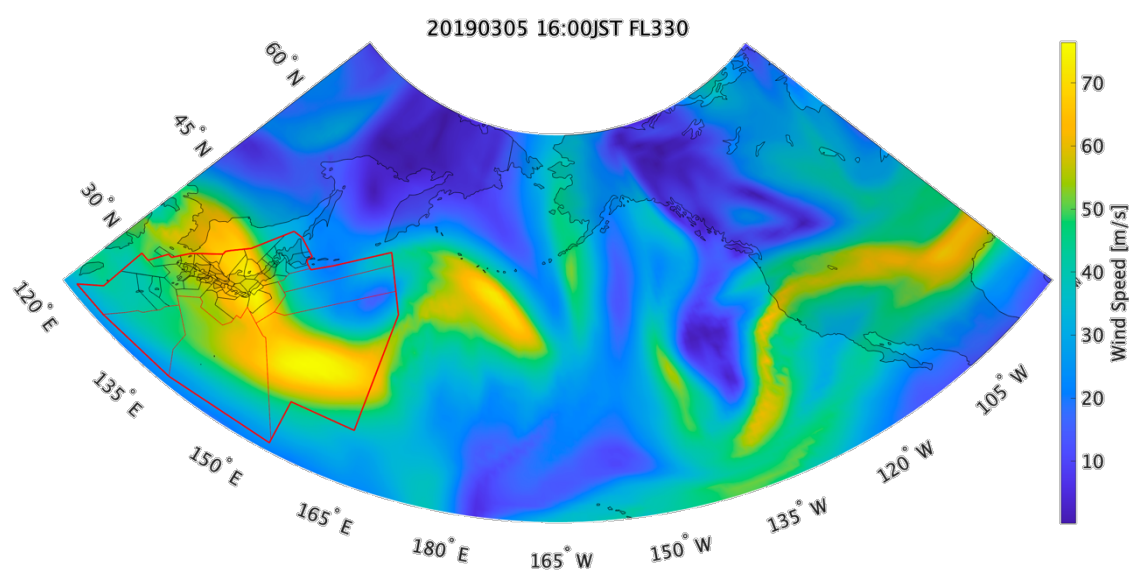


図 6 GSM 全球域のデータ例（風速の分布）：2019 年 3 月 5 日 16:00 JST FL330



## 2.6 航空機性能モデル(BADA)

航空機の飛行状態や諸量の評価を行うにあたり、航空機の性能モデルが必要となる。本研究では航空機の運動性能モデルとして、EUROCONTROL 提供の BADA ver.3.15<sup>[17]</sup> (BADA: Base of Aircraft Data)及び BADA4<sup>[18]</sup>を使用した。BADA では航空機の運航に関するパラメータが型式毎に格納されており、航空機を質点と仮定したエネルギー保存則に基づく物理現象として記載するモデルである。本研究では FTS の実施に必要なシナリオの作成にあたり、最適軌道の算出を行う際に BADA を使用した。

## 第3章 リクエスト解析による現状評価

### 3.1 太平洋上の管制運用

#### 3.1.1. 洋上管制空域における必要管制間隔

航空機の日本を含むアジア各地域から北米方面へと飛行する便の多くは、福岡 FIR のレーダー管制空域を経由して日本列島の東側で洋上管制空域に入域し、北米方面へと飛行する。図7に陸上に設置された ARSR (Air Route Surveillance Data: 航空路監視レーダー) 及び ORSR (Oceanic Route Surveillance Data: 洋上航空路監視レーダー) の覆域<sup>[19]</sup>を、図8に福岡 FIR のレーダー管制空域及び洋上管制空域<sup>[20]</sup>を示す。日本列島から離れた洋上管制空域は、陸地に設置されたレーダーや VHF 通信の覆域外となる。それに伴い洋上管制空域では人工衛星を用いた高性能通信、航法、監視 (CNS: Communication, Navigation, Surveillance) 技術や HF 通信の位置通報を元にした間隔設定が行われ、位置情報の更新間隔が広がる。従って、洋上管制空域では、レーダー管制空域と比較してより大きな管制間隔が必要となる。

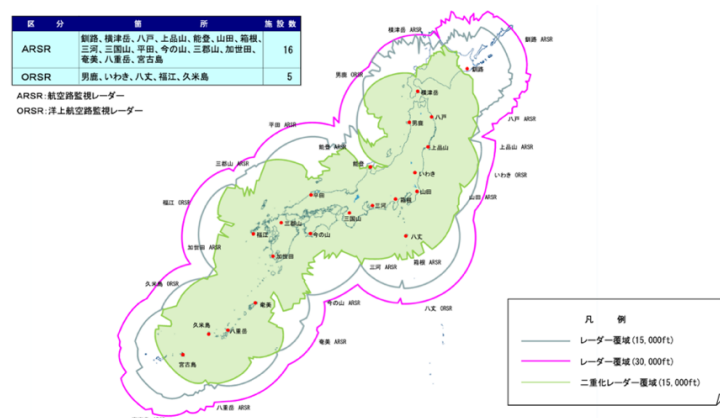


図7 ARSR 及び ORSR の覆域<sup>[19]</sup>

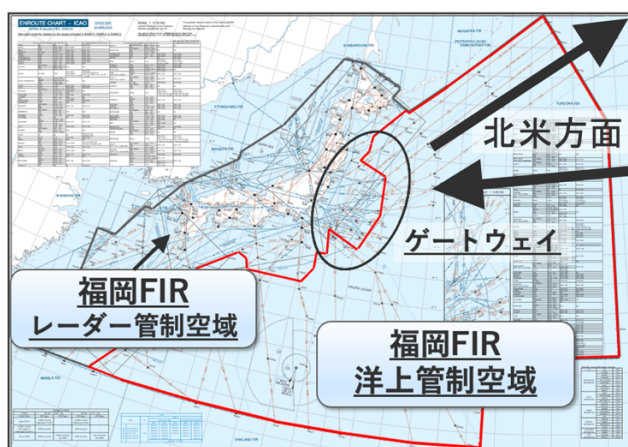


図8 福岡 FIR のレーダー管制空域及び洋上管制空域<sup>[20]</sup>

管制間隔は3次元（縦/横/垂直）で定義され、3種類の管制間隔のうち少なくとも1つが満たされている必要がある（図9）。レーダー管制空域における管制間隔は水平方向5NM、FL290以上においては垂直間隔2000ftである。なお、垂直間隔はRVSM（Reduced Vertical Separation Minimum）適合機であれば1000ftとなる。一方で洋上管制空域においては2018年3月29日を基点として、航法性能に加えて監視・通信性能も加味した管制間隔が設定されている<sup>[21]</sup>。福岡 FIR 洋上管制空域において適用される管制間隔を表3に示す。垂直間隔については2000ft、RVSM 適合機であればレーダー管制空域と同等の1000ftとなる。一方、CPDLC（Controller Pilot Data Link Communication）機能及びADS-C（Automatic Dependent Surveillance - Contract）機能を有するFANS-1/A（FANS：Future Air Navigation System）対応<sup>[22]</sup>の航空機において、以下の5つの条件を満たす場合、縦30NM、横30NMの管制間隔（短縮間隔）が適用される<sup>[23]</sup>。

- ✓ RNP（Required Navigation Performance）4
- ✓ RCP（Required Communication Performance）240
- ✓ RSP（Required Surveillance Performance）180
- ✓ ADS-C 監視下であること
- ✓ CPDLC による人工衛星データリンク通信を行なっていること

以上より、洋上管制空域における管制間隔はCNS性能やデータリンク通信への接続状況に依存することから便毎に異なり、航空機対のCNS性能に応じて表3に示した値となる。

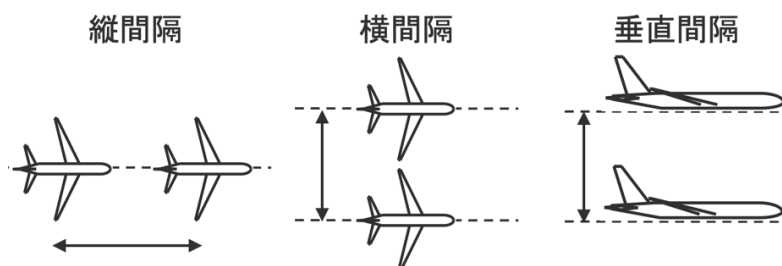


図9 縦 / 横 / 垂直間隔

表3 洋上管制空域における管制間隔（縦間隔 / 横間隔）<sup>[14]</sup>

航空機2 航空機1	RNP4, RCP240 RSP180	RNP10, RCP240 RSP180	その他
RNP4, RCP240 RSP180	30NM / 30NM	50NM / 50NM	15 (10) 分 / 100 (50) NM
RNP10, RCP240 RSP180	50NM / 50NM	50NM / 50NM	15 (10) 分 / 100 (50) NM
その他	15 (10) 分 / 100 (50) NM	15 (10) 分 / 100 (50) NM	15 (10) 分 / 100 (50) NM

### 3.1.2. ゲートウェイについて

レーダー管制と洋上管制の接続ポイントをゲートウェイと呼ぶ。ゲートウェイとは、洋上経路の起点・終点となる通過地点（ウェイポイント）で、レーダー管制空域から洋上管制空域へと飛行する際にはレーダー管制空域側の最後のウェイポイントとなる。アジアから北米方面へと飛行する東行きの便の場合、ゲートウェイを通過後洋上管制空域に入域すると必要な管制間隔が変化し、また、ゲートウェイを目安に各国からの便と日本から出発した便の交通流が合流する。図 10 はゲートウェイ周辺の交通流を表しており、青印の FIX がゲートウェイとなる。

ゲートウェイにおいて複数の航空機が同じ時間帯に通過する場合、垂直間隔を保つために巡航高度の割り当てが行われる。一方で、高度の割り当ては first-come first-served で行われている。したがって日本発の便・上空通過機ともに、希望の巡航高度で巡航飛行を行うためには、レーダー管制空域内で航空機間の間隔が適切に確保されている必要がある。

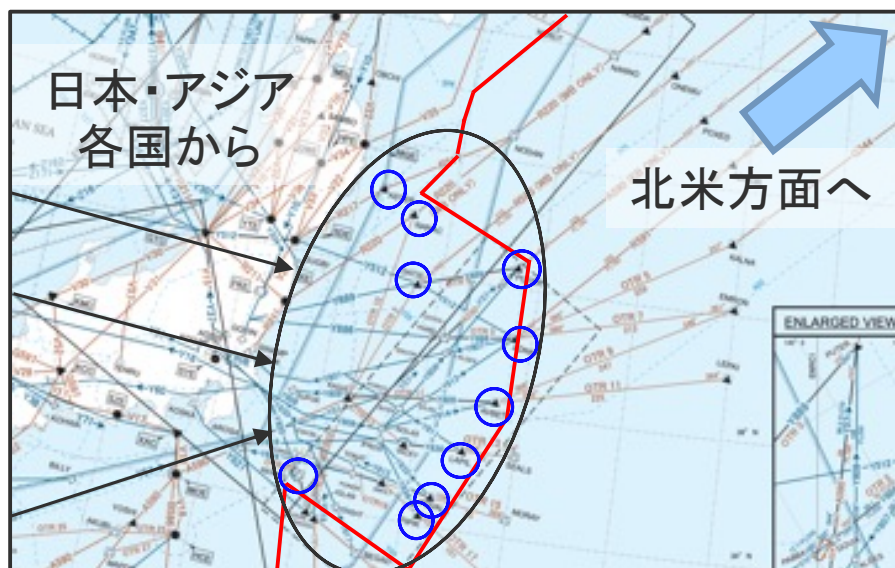


図 10 ゲートウェイ周辺の交通流（青印：ゲートウェイ）

### 3.2 上昇リクエスト承認率による現状評価

運航者にとって理想的な運航である条件の 1 つに、リクエスト通りの高度で巡航飛行が行えていること、とりわけ上昇リクエストが承認されていることが挙げられる。一方で、複数の航空機が同じ時間帯に通過する場合、垂直間隔を保つために巡航高度の割り当てが first-come first-served の原則で行われるため、希望高度に既に関連機が飛行している可能性がある。希望高度に既に関連機が飛行しており管制間隔が確保されない場合には上昇リクエストは承認されない。

福岡 FIR を出域するまでに操縦士が管制官に対して行った上昇リクエストのうち、リクエストが承認された割合を評価指標として、運航者における理想的な運航の実現度について評価を行った。本項では、操縦士が管制官に対して明示的に上昇のリクエストを行っている、以下の 3 形式に即したリクエストを上昇リクエストと判定した。

- (1) REQUEST FL \*\* / REQUEST CLIMB TO FL \*\*
- (2) REQUEST BLOCK FL \*\* TO FL \*\*
- (3) AT \*\*\*, REQUEST CLIMB TO FL \*\*

(\*\* : 高度、\*\*\* : 時刻またはウェイポイント)

操縦士が行った上昇リクエストに対して、10 分以内に管制官により要求高度への上昇が承認された場合を「リクエスト通りの承認」、10 分以上経過後に要求高度への上昇が承認された場合や要求高度以外への高度への上昇が承認された場合を「条件付き承認」、その他リクエストが承認されなかった場合を「非承認」とする。全上昇リクエストに対し、リクエスト通りの承認となった割合を、上昇リクエスト承認率と定義する。図 11 に操縦士が管制官に対して上昇リクエストを行い、そのリクエストが管制官により承認される / 非承認となるまでの流れを示す。

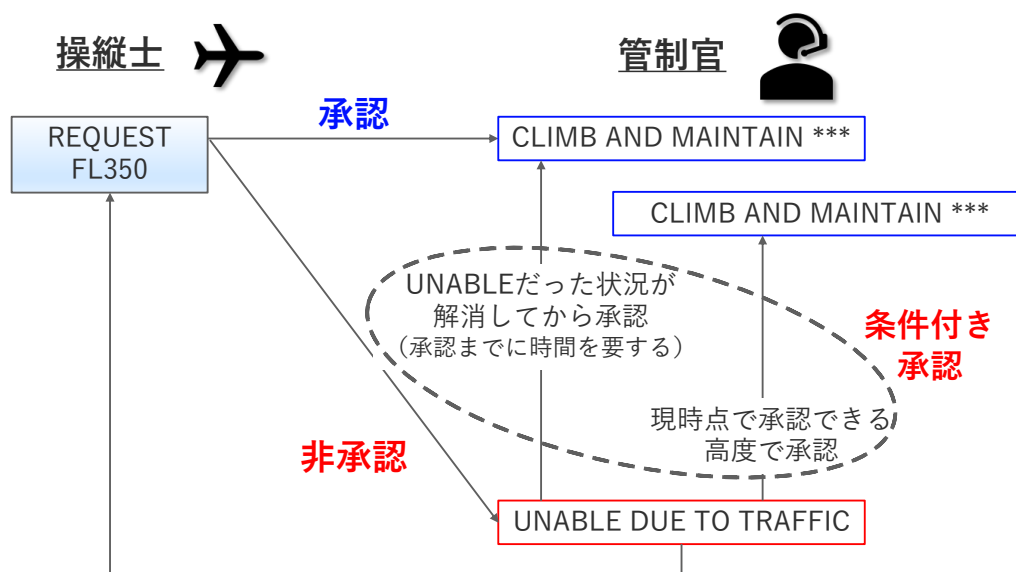


図 11 操縦士の行った上昇リクエストが管制官により承認 / 非承認となる流れ

CPDLC 及び HF 音声通信の通信記録には、操縦士と管制官との間の交信が記録されている。通信記録の解析を行うことで、リクエストの承認状況の把握が可能になる。本項では、目的地に到着するまでの飛行時間が長く、上昇リクエストが承認されないことによる運航効率への影響がより大きいと推察される東行き（アジア→北米方面便）便を対象とする。なお、日本を出発する東行きの便のうち関西国際空港や中部国際空港など、東京（成田・羽田）以外を出発する便については、レーダー管制空域内を飛行する便の影響を大きく受けることが想定されるため、第3章及び第4章の解析からは除外した。

リクエストの承認状況に着目し、東京出発便及び上空通過機について分類を行った結果を表4に示す。

表4 上昇リクエストに対する応答

(a) 東京出発便：全 279 件

東京出発便	リクエスト通りの承認	条件付き承認	非承認	Total
件数	203	28	48	279
%	72.8	10.0	17.2	100

※ 上昇リクエスト承認率：72.8 %

(b) 上空通過機：全 541 件

上空通過機	リクエスト通りの承認	条件付き承認	非承認	Total
件数	382	42	117	541
%	70.6	7.8	21.6	100

※ 上昇リクエスト承認率：70.6 %

東京出発便、上空通過機ともに上昇リクエスト承認率は 70%程度となり、リクエスト通りに承認されなかった割合は 30%程度となった。また、東京出発便と上空通過機のリクエスト承認率について有意水準を 0.05 とした母比率の差の検定を行った結果、有意差は認められなかった。

一方で、上空通過機のリクエスト承認率は東京出発便と比較して低くなる結果が得られた。東京出発便は全便が洋上北及び洋上東セクター（以下洋上北/東セクター）内を經由して北米方面へと飛行する反面、上空通過機は洋上南セクターを經由して北米方面へと飛行する便も一定数存在する。福岡 FIR 洋上管制空域における洋上北/東セクター及び洋上南セクターを図 12 に示す。上空通過機の全リクエスト 541 件のうち、洋上北/東セクターにおけるリクエストは 435 件、洋上南セクターにおける件数は 106 件であった。上空通過機について、洋上北/東セクター及び洋上南セクターにおける上昇リクエスト承認率を表5に示す。上空通過機の洋上北/東セクターにおけるリクエスト承認率は東京出発便のリクエスト

承認率と同程度の 76.1%である一方、洋上南セクターにおける承認率は 50%を下回っている。これは、洋上南セクターにおける交通流が、東南アジアから北米方面へと飛行する東西流と、韓国や日本を出発しグアム及び大洋州方面へと飛行する南北流が交差していることに加え、洋上北/東セクターにおいてハワイ方面へと飛行する交通流と交差していること、更には洋上北/東セクターを飛行する便との間隔を加味して高度の割り当てが行われていることに起因すると考えられる。

以上のことから、東京出発便並びに上空通過機において、共に 30%程度の上昇リクエストが承認されておらず、運航効率の悪化が生じている現状が確認された。2019 年時点では運航者の希望通りに上昇できていない便が存在する一方で、東京出発便と上空通過機との間に、ステップクライムのリクエストの承認のされやすさにおいて有意な差は確認されず、リクエスト承認率は東京出発便も上空通過機も同程度であることが確認された。一方で周辺交通の特性によりリクエスト承認率が大きく変化することが確認され、航空機の上昇リクエストに対する周辺交通の影響の評価にあたり、上昇を阻害している便（関連機）の推定を行う必要がある。

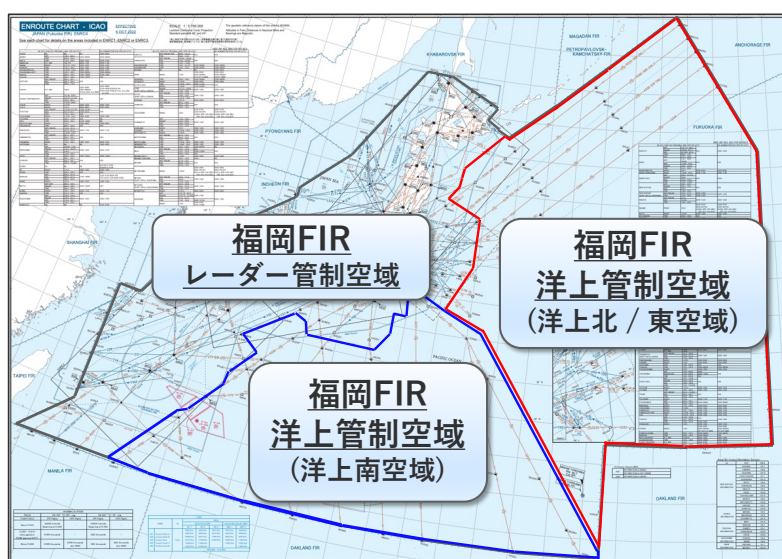


図 12 福岡 FIR 洋上管制空域の洋上北/東セクター及び洋上南セクター<sup>[20]</sup>

表 5 上空リクエスト承認率（セクター別）

	東京出発便 (洋上北/東)	上空通過機 (洋上北/東)	上空通過機 (洋上南)
リクエスト件数	279	435	106
承認件数	203	331	51
承認率 [%]	72.8	76.1	48.1



## 第4章 関連機の推定手法の開発&精度評価

先行研究では洋上管制空域におけるコンフリクト検出として、航空機を中心とする円筒状の仮想保護領域による検出を行っていた<sup>[24]</sup>。先行研究はコンフリクト検出を目的とする一方で、コンフリクト検出と関連機の推定はどちらも管制間隔を下回る便の航空機対の検出を行うことから、仮想保護領域の設定方法はそのまま関連機の推定に適用される。関連機の推定手法の初期検討として、上昇リクエストを行った便（以下「対象機」という）を中心とする仮想保護領域による推定手法を作成した。先行研究に基づく手法では上昇リクエストが行われた時刻（以下「リクエスト時刻」という）において、対象機を中心とする保護領域を模擬して設定された、円筒状の仮想保護領域により関連機の推定を行う。一方で洋上管制空域はレーダーの覆域外であり位置情報の更新間隔が広くなることから、円筒状の仮想保護領域ではなく直方体の仮想保護領域を想定した運用が行われている。そこで、先行研究に基づく手法を応用した従来手法として、リクエスト時刻において、対象機を中心とする保護領域を模擬して設定された直方体の仮想保護領域により関連機の推定を行う。

一方で実際の管制運用では、リクエストが行われた時点の周辺交通のみを加味して承認/非承認を判断するのではなく、リクエスト時刻から1時間程度先の予測交通流を考慮し、安全性を判断してリクエストを承認する。従って、関連機の推定手法と実際の管制運用との乖離が大きく、推定精度に改善の余地が残されていた。そこで、本研究では推定精度の向上を図るべく、管制支援ツールにおける“what-if”機能を参考に新たな関連機推定アルゴリズムの提案を行った。管制画面上では現在時刻での航空機の位置情報が表示される。一方で、“what-if”機能とは経路や高度などの特定のパラメータを変更したフライトプロファイルを模擬する機能であり、予測される変更後の経路などを表示することで、管制官のコンフリクト検出をサポートする<sup>[25,26]</sup>。提案手法ではリクエスト時刻を起点として、現在位置から次の飛行計画上のFIXに向けて飛行計画に記載された予定速度で飛行することを仮定した予測軌道を作成し、予測軌道を基に一定時間間隔で航空機間の距離を算出し<sup>[27,28]</sup>関連機の推定を行う。従って、提案手法においてリクエスト時刻以前は実軌道、リクエスト時刻以降は飛行計画に基づいた仮想的な予測軌道となる。なお、提案手法における関連機の推定閾値は、管制業務処理規定に即した値を用いる。

以下では、先行手法として「対象機を中心とした円筒状の仮想保護領域による推定」、従来手法として「対象機を中心とした直方体の仮想保護領域による推定」、提案手法として「飛行計画に基づく予測軌道による推定」の関連機の推定アルゴリズムを示す。各手法における変数を表6に定義する。本項では、先行手法、従来手法及び提案手法における関連機の推定手順及びその精度評価の結果を示す。



表 6 関連機推定手法における変数

$FL_{now}^{\text{対象機}}$	: 対象機の飛行高度
$FL_{req}^{\text{対象機}}$	: 対象機がリクエストを行った高度
$FL^{\text{関連機}}$	: 関連機候補の飛行高度
$t_{req}^{\text{対象機}}$	: 対象機がリクエストを行った時刻
$t_{170E}^{\text{対象機}}$	: 対象機の予測軌道が東経 170 度に達した時刻
$t_{50NM}^{\text{対象機}}$	: 関連機の予測軌道が到着空港から 50NM 以内に達した時刻
$t_{start}^{\text{関連機}}$	: 関連機候補各便の航跡の初期時刻
$t_0$	: 特定の便の予測軌道の作成開始時刻
$t_{end}$	: 特定の便の予測軌道の作成終了時刻
$Sep$	: 水平方向の推定閾値 (円筒状)
$Sep_{lon}$	: 縦方向の推定閾値 (直方体)
$Sep_{lat}$	: 横方向の推定閾値 (直方体)

#### 4.1. 関連機推定アルゴリズム：先行手法（Cylinder\_1, Cylinder\_2 アルゴリズム）

##### 1) 関連機候補の抽出（時刻・垂直方向）

対象機がリクエストを行った時刻に飛行しており、かつ飛行高度が以下の条件を満たす便を関連機候補として抽出する（図 13）。なお、ブロック高度として複数高度にわたる高度帯としてリクエストを行うことがある。従って、関連機候補の抽出にあたり、高度方向の上限はリクエスト高度の最大値とした。

$$FL_{now}^{\text{対象機}} < FL^{\text{関連機}} \leq \max(FL_{req}^{\text{対象機}}) \quad (1)$$

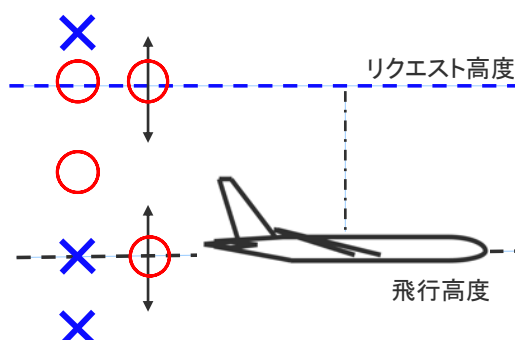


図 13 関連機として推定を行う領域（垂直方向）  
（○の高度を飛行する便が関連機候補）

##### 2) 対象機を中心とする円筒状仮想保護領域を設定

関連機の推定を行う領域として、リクエスト時刻における対象機の位置を中心とした仮想保護領域を定める。関連機として推定を行う領域は予め設定した推定閾値を半径とする円筒状領域として定義する（図 14）。水平方向の推定閾値（Sep）として管制業務処理規定<sup>[14]</sup>を参考に、50NM（以下 Cylinder\_1 アルゴリズム）、30NM（以下 Cylinder\_2 アルゴリズム）の 2 通りのアルゴリズムを作成した。

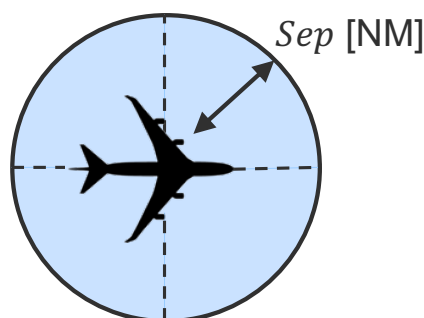


図 14 関連機として推定を行う領域（水平方向）

##### 3) 関連機の推定

対象機がリクエストを行った時刻に、前項で定義した対象機を中心とする仮想保護領域内を飛行している便を、関連機と推定する。

#### 4.2. 関連機推定アルゴリズム：従来手法（Box\_1, Box\_2 アルゴリズム）

##### 1) 関連機候補の抽出（時刻・垂直方向）

先行手法と同様に、対象機がリクエストを行った時刻に飛行しており、かつ飛行高度が以下の条件を満たす便を関連機候補として抽出する（図 13）。

$$FL_{now}^{\text{対象機}} < FL^{\text{関連機}} \leq \max\left(FL_{req}^{\text{対象機}}\right) \quad (2)$$

##### 2) 対象機を中心とする仮想保護領域を設定

関連機の推定を行う領域として、リクエスト時刻における対象機の位置を中心とした仮想保護領域を定める。関連機として推定を行う領域はリクエスト時刻の前後 50 秒の平均方位角方向で、縦間隔/横間隔の推定閾値の幅を持つ矩形状領域として定義する（図 15）。縦間隔/横間隔の推定閾値（ $Sep_{lon}$  /  $Sep_{lat}$ ）として、115NM/30NM（以下 Box\_1 アルゴリズム）、45NM/30NM（以下 Box\_2 アルゴリズム）の 2 通りのアルゴリズムを作成した。縦間隔の推定閾値について、洋上管制空域における縦間隔として規定された時間間隔は距離にして 80~100NM と想定し、また距離間隔は 30NM と規定されている。上記の値に少なくとも 15NM のバッファを加えた値として、115NM 及び 45NM として、縦間隔の推定閾値を設定した。また横間隔の推定閾値を 30NM とした。

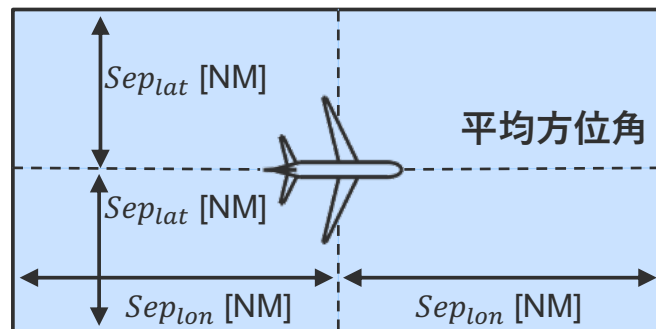


図 15 関連機として推定を行う領域（水平方向）

### 3) 関連機の推定

対象機がリクエストを行った時刻に、前項で定義した対象機を中心とする仮想保護領域内を飛行している便を、関連機と推定する。従来手法による関連機の推定結果の一例を図 16 に示す。

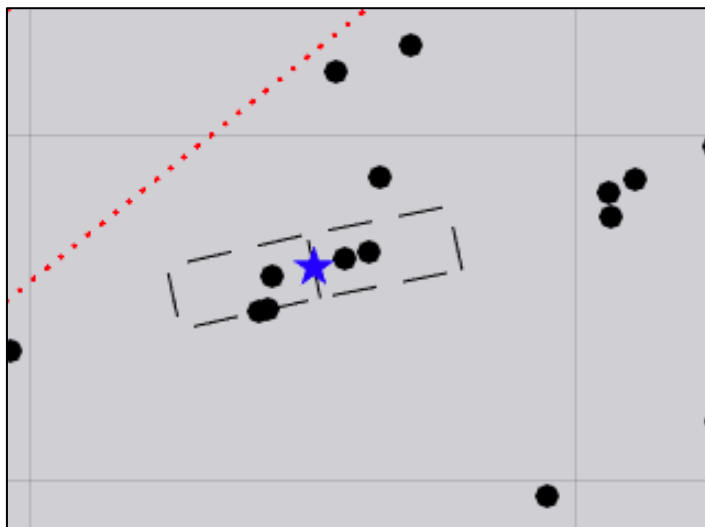


図 16 従来手法による関連機の推定結果の例

矩形形状領域の内側を飛行している便が、縦間隔及び横間隔が共に確保されていない便と判定

(関連機として推定)

#### 4.3. 関連機推定アルゴリズム：提案手法

##### 1) 関連機候補の抽出（時刻・垂直方向）

従来手法では対象機がリクエストを行った時刻に飛行している便を時刻による関連機候補の抽出対象とした。一方で、提案手法では対象機と飛行時間帯が重複しており、かつリクエスト時刻に飛行している便または航跡の記録がリクエストを行った時刻以降に開始された便を時刻による関連機候補の抽出対象とする（図 17）。

$$FL_{now}^{\text{対象機}} < FL^{\text{関連機}} \leq \max(FL_{req}^{\text{対象機}}) \quad (3)$$

なお、対象機がリクエストを行った時刻において上昇/降下を行なっている便は、飛行高度帯の変更が終了し、次に巡航を開始した高度を飛行高度 ( $FL^{\text{関連機}}$ ) とみなして抽出を行った。

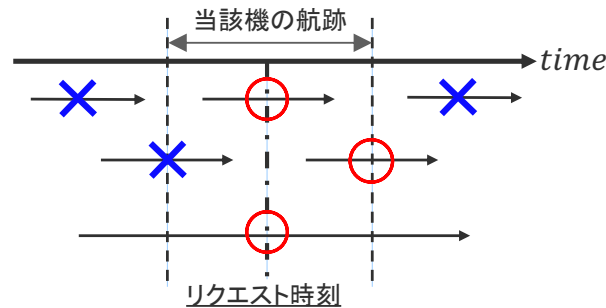


図 17 時刻による関連機候補の抽出

矢印 (→) は各便の航跡記録時刻であり、リクエスト時刻を基準に○を関連機候補として抽出する。

##### 2) 飛行計画に基づく予測軌道を作成（対象機）

対象機について、現在位置から次の飛行計画上の FIX に向けて飛行計画に記載された予定速度で飛行することを仮定し、対象機の予測経度が東経 170 度に達するまで、予定軌道の作成を行う。予定軌道の作成は以下の手順で行われ、概略図を図 18 に示す。

- ① 1 ステップ目の座標をリクエスト時刻の緯度・経度とする
- ② GSM 全球域のデータから、予測位置での東西風及び南北風の風速を取得する
- ③ 飛行計画より予測位置での予定対気速度を取得する
- ④ 風速及び予定対気速度から、対地速度が算出される
- ⑤ 飛行計画より次の FIX までの方位角を取得する
- ⑥ 更新時間間隔 ( $\Delta t = 120$  [s]) の秒数の間、④、⑤ で算出した方位角方向に対地速度で飛行したと仮定し、 $\Delta t$  経過後の座標を取得する
- ② - ⑦ を繰り返し行い、予測経度が東経 170 度に達した時点で終了とする。

なお、以降では方位角及び 2 地点間の距離は測地線上に沿って算出されるものとする<sup>[29,30]</sup>。測地線とは、地球を回転楕円体と見なし、回転楕円体の曲面上の 2 地点間を最短距離で結ぶ曲線を意味する。

対象機については、初期時刻はリクエスト時刻、終了時刻は対象機の予測軌道が東経 170 度に達した時刻となる。従って、対象機の予測軌道の初期時刻および終了時刻は式(4)として記述される。

$$\begin{cases} t_0 = t_{req}^{\text{対象機}} \\ t_{end} = t_{170E}^{\text{対象機}} \end{cases} \quad (4)$$

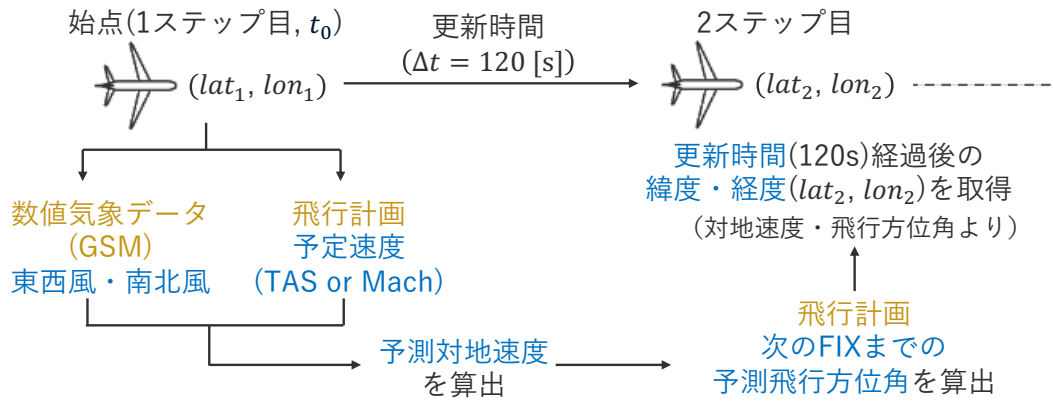


図 18 予測軌道の作成手順の概要

### 3) 飛行計画に基づく予測軌道を作成（対象機）

関連機候補の便についても同様の手順により、予測軌道を作成する。対象機のリクエスト時刻以降に実運航データにおける航跡の記録が開始された便については、航跡の記録が開始された時点を中心として予定軌道の作成を行う。また、日本の各空港へ到着する便については、各到着空港から 50NM 以内に予測軌道が達した時点で予測軌道の作成を打ち切る。従って、関連機の予測軌道の初期時刻および終了時刻は式(5)として記述される。

$$\begin{cases} t_0 = \max(t_{req}^{\text{対象機}}, t_{start}^{\text{関連機}}) \\ t_{end} = \min(t_{170E}^{\text{対象機}}, t_{50NM}^{\text{対象機}}) \end{cases} \quad (5)$$

### 4) 当該機と関連機候補の便の間の距離の算出

前項までに当該機及び関連機候補となる便の予測軌道の作成を行った。予測軌道には、当該機及び関連機候補となる便についてリクエスト時刻以降の 120 秒毎の予測位置が記録されている。対象機が上昇のリクエストを行ってから予測軌道が東経 170 度に達するまでに、対象機及び関連機候補の便の予測軌道における航空機ペア間の縦間

隔/横間隔が推定閾値を下回った場合、該当する関連機候補の便が関連機であったと推定する。従って、関連機の推定にあたり、当該機及び関連機候補となる便について縦間隔/横間隔の算出を行う必要がある。

航空機ペア間の縦間隔/横間隔の算出方法は、航空機相互間の方位角の差に応じて、(a) 同方向、(b) 交差、(c) 対面の3種類に分類される。第5管制業務処理規定<sup>[22]</sup>を参考に、以下の通り航空機ペア間の縦間隔/横間隔の算出を行い、関連機の推定を行った。

a) 同方向 (方位角の差が0度以上45度未満)

縦間隔は、航空機相互間の距離により算出される (図 19 左) ほか、同一の位置通報点で位置通報を行ったのち同方向経路を飛行する際の縦間隔は 10 分 (図 19 右) となる。横間隔は、両機の経路の中心線間距離により算出される (図 19 下)。

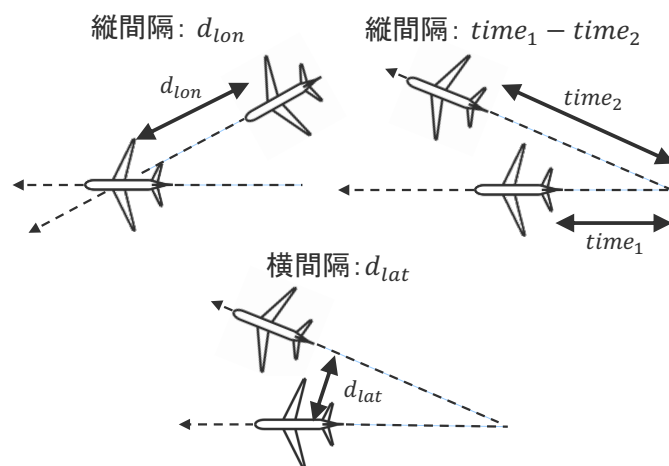


図 19 同方向経路における縦間隔/横間隔

b) 交差 (方位角の差が45度以上135度未満)

縦間隔については同方向経路における算出方法と同様である。一方、飛行経路が交差する場合について、相互の飛行経路の中心から両機の保護空域の片側の幅を加えた地点以遠において横間隔が設定されたものとみなす (図 20)。

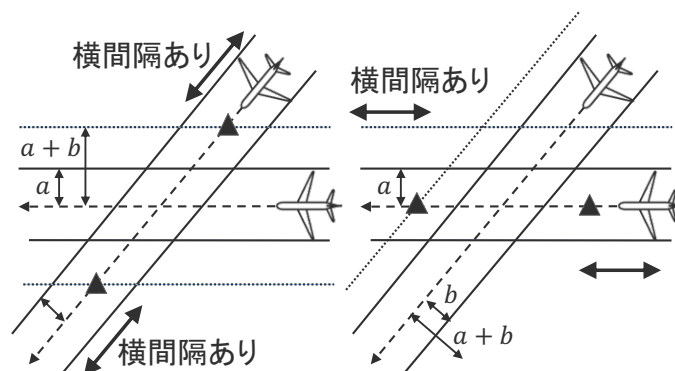


図 20 交差経路における横間隔

c) 対面 (方位角の差が 135 度以上 180 度未満)

横間隔については、同方向経路における算出方法と同様である。また、対面経路を飛行する航空機相互間について、擦過予定時刻の前後 15 分間垂直間隔が確保されている必要がある (図 21)。なお、同じ経路の対面方向を飛行し、途中の FIX から別の航空路を飛行する場合 (図 22) など、予測軌道から擦過予定時刻を求めることが困難なケースも含まれるため、本研究では前後 15 分間の時間間隔を、航空機相互間の距離 300NM の距離間隔で近似することにより関連機の推定を行った。

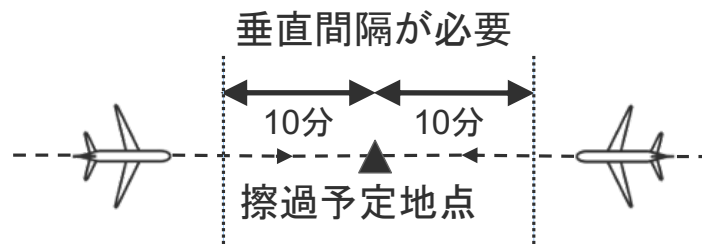


図 21 対面経路における縦間隔

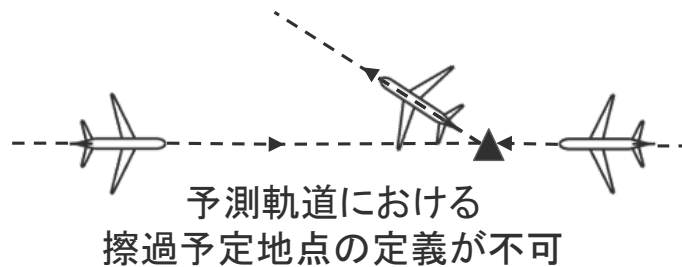


図 22 予測軌道において擦過予定地点の算出が行えない状況

5) 関連機の推定

垂直方向については既に手順 1 で関連機の絞り込みを行なっているため、算出された縦間隔及び横間隔の値が共に閾値を下回っていれば、当該機の上昇リクエストが承認されない要因である関連機として推定される。洋上管制空域では、CNS 性能により適用される管制間隔が異なる。本研究では、飛行計画に記載される RNP, RCP, RSP の仕様から、管制業務処理規定<sup>[14]</sup>に基づき表 7 の通り管制間隔が適用されるものとして判別を行った。一方で実際の管制運用では、規定された管制間隔の丁度の値によって上昇リクエストの承認可否の判断が行われるのではなく、その時々周辺の交通や気象条件などの状況に応じたバッファを加味した判断が行われる。そこで、本研究では洋上管制有資格者へのヒアリング結果を参考に、適用される管制間隔の値にバッファを加えた値として推定閾値は設定した (表 8)。手順 4 において対象機及び関連機候補の便の航空機ペア間の縦間隔/横間隔の算出を行い、表 7, 8 に示した対象機との間隔が縦/横/垂直間隔いずれも推定閾値を下回る便が関連機として推定される。提案手法による関連機の推定結果の一例を図 23 に示す。

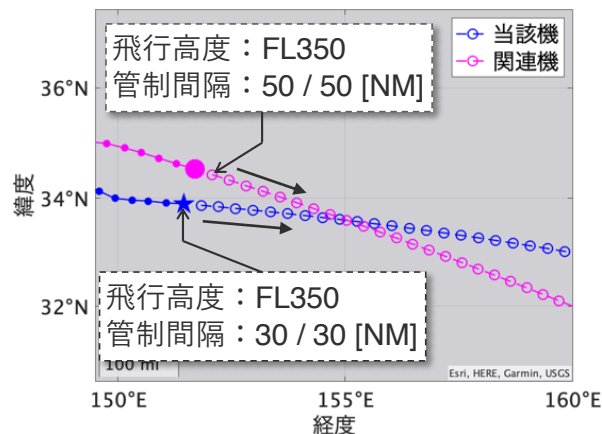


表 7 洋上管制空域における管制間隔（RNP, RCP, RSP 仕様）

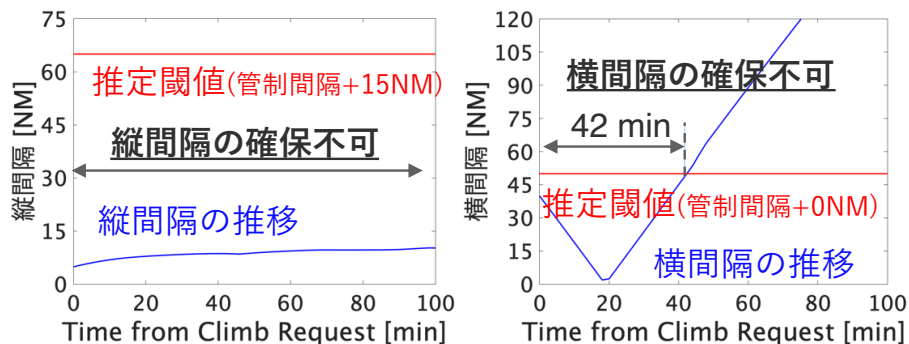
RNP4	RNP10	RCP240	RSP180	適用管制間隔 (縦間隔/横間隔)
○		○	○	30NM / 30NM
	○	○	○	50NM / 50NM
○		-	-	10min / 50NM
	○	-	-	10min / 50NM

表 8 推定閾値に加味するバッファ（推定閾値 = 適用管制間隔 + バッファ）

	バッファ
縦間隔（距離）	+15 [NM]
縦間隔（時間）	+30 [s]
横間隔	±0 [NM]



(a) 当該機と関連機の関係にある航空機対の例



(b) 縦間隔（左）及び横間隔（右）の時間変化

図 23 提案手法による関連機の推定結果の一例

リクエスト時刻後から 42 分後までの 26 分間、縦間隔及び横間隔が共に確保不可。

(関連機として推定)

#### 4.4. 推定アルゴリズムの精度評価

##### 4.4.1 推定アルゴリズムの推定精度の評価方法

推定アルゴリズムにより、上昇リクエストが承認されなかった場合における関連機の推定結果が出力される。上昇リクエストに対する周辺交通の影響の評価に向け、本研究で作成した推定アルゴリズムの推定精度の評価を行うべく、洋上管制有資格者が実際の管制運用と同様に手動で関連機の推定を行った結果と推定アルゴリズムによる関連機の推定結果との比較を行った。手動による関連機の推定には電子航法研究所の航跡再生ツールを使用し、実運航データをアニメーション化することにより関連機の推定を行った。なお、提案手法は実際の管制運用と同様にある程度先まで（本研究では東経 170 度に達するまで）関連機の推定を継続する一方で、洋上管制有資格者による推定は実運航データの存在する福岡 FIR 内に限定される。従って、本項では推定アルゴリズムの出力についても関連機並びに当該機が福岡 FIR 内を飛行している場合に限定した推定結果の比較により、推定精度の評価を行った。

推定結果の比較にあたり、洋上東及び洋上北セクターにおいてリクエストが行われ、条件付き承認及び非承認となった、東京出発便における 76 件のリクエスト並びに上空通過機における 101 件のリクエスト、全 177 件を対象とした。

##### 4.4.2 推定アルゴリズムの推定精度の結果区分

推定アルゴリズムによる関連機の推定結果と、洋上管制有資格者による関連機の推定結果の比較を行った結果は、以下の 6 種類に分類される（表 9）。

表 9 関連機の推定結果の比較（○は関連機の検出あり / -は検出なし）

パターン	推定アルゴリズム	洋上管制有資格者
A	○	○
B	-	-
C	福岡 FIR 出域まで 20 分以内	
D	○	-
E	両者で異なる便を推定結果として出力	
F	-	○

パターン A は推定アルゴリズムによる推定結果に、洋上管制有資格者の判定結果と同じ関連機が含まれるケースである。洋上管制有資格者による関連機の推定は、1 便でも上昇を阻害する位置関係に飛行していれば、その便を関連機として推定し関連機の推定を終了する。従って、最終的に関連機の推定結果として出力されるのは 1 リクエストあたり 1 機または 0 機である。一方で、関連機推定手法では推定結果として複数便が出力されることも想定される。

パターン B は、推定アルゴリズム及び洋上管制有資格者共に関連機として推定した便が存在しないケースである。実運航データには記録されていない便や隣接 FIR との調整を含む管制運用上の都合に起因してリクエストが承認されなかったと推測される。

パターン C は FIR 出域直前であったことにより上昇リクエストが承認されなかったと推測されるケースである。関連機の検出がなく、リクエストを行った時点で福岡 FIR 出域まで 20 分未満であった場合をパターン C とした。隣接 FIR に対象機を移管するにあたり、事前に調整を行う必要がある。従って、高度変更に関わる調整に必要な時間が移管までに十分確保できない場合はリクエストが非承認となる。

パターン D は洋上管制有資格者の推定結果では関連機として推定した便が存在しないとされる一方で推定アルゴリズムでは関連機ありとして推定されたケース、パターン E は推定アルゴリズム及び洋上管制有資格者が異なる便を関連機として推定したケースである。両ケースについて、洋上管制有資格者が推定できなかった関連機を検出している可能性がある一方、推定アルゴリズムの誤検出の可能性もある。

パターン F は推定アルゴリズムでは関連機として推定した便が存在しないとされる一方で、洋上管制有資格者は関連機ありとして推定したケースである。

#### 4.4.3 推定アルゴリズムの推定精度の評価結果

東京出発便並びに上空通過機について、従来の対象機を中心とした仮想保護領域による推定手法である Cylinder\_1 及び Cylinder\_2、Box\_1 及び Box\_2 アルゴリズム、新たに作成した飛行計画に基づく予測軌道による推定手法である提案手法について、洋上管制有資格者による推定結果との比較を行った。比較結果を図 24、表 10 に示す（数表は付録に添付する）。

比較結果の評価指標として、洋上管制有資格者の推定結果とアルゴリズムの結果が一致した割合を示す「合致率」、推定アルゴリズムが関連機の推定を行えた割合を示す「推定率」、洋上管制有資格者が関連機の推定を行なった割合を示す「推定率\_洋上管制有資格者」、洋上管制有資格者は関連機ありとして推定した一方で推定アルゴリズムでは検出されず検出漏れとなった割合を示す「未検出率」を以下に定義する。

$$\left( \text{合致率} \right) = (A + B + C) / \text{total} \quad (6)$$

$$\left( \text{推定率} \right) = (A + C + D + E) / \text{total} \quad (7)$$

$$\left( \text{推定率}_{\text{洋上管制有資格者}} \right) = (A + C + E + F) / \text{total} \quad (8)$$

$$\left( \text{未検出率} \right) = F / \text{total} \quad (9)$$

Box\_1 アルゴリズムにおける検出閾値は、非短縮間隔適用機の縦間隔を参考に 115NM と

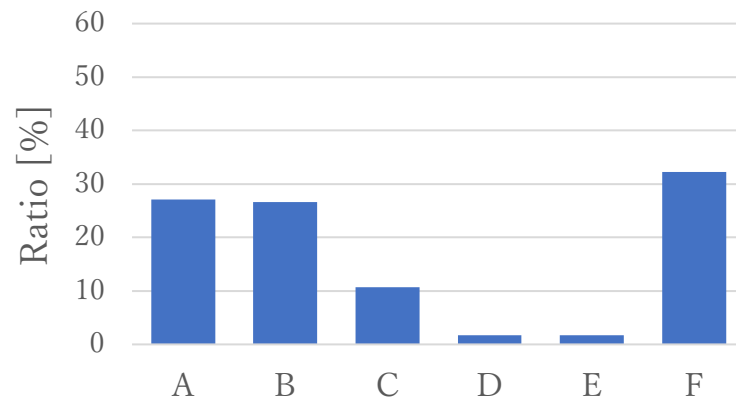
した。しかし、実際には短縮間隔適用機（縦間隔 30NM）も多く存在する。従って Box\_1 アルゴリズムにおけるパターン A には、実際には関連機ではない便も推定結果に含まれ、関連機の誤検出が生じている。また、Box\_2 アルゴリズムにおける検出閾値は、短縮間隔適用の縦間隔を参考に 45NM とした。従って Box\_2 アルゴリズムにおけるパターン A は誤検出となる推定結果は含まないものの、関連機として推定されるべき便が推定結果として出力できていないことにより、関連機の未検出が生じる。以上より、検出閾値を小さくすると推定精度は向上するが推定率は低下し、閾値を大きくすると推定率は向上するが推定精度は低下することから、従来手法において推定精度と推定率はトレードオフの関係にある。一方、提案手法における推定閾値は、CNS 性能に依存する便毎の管制間隔の値を用いる。従ってより適切な関連機の推定が可能になり、推定精度と推定率は従来手法と比較して共に高い値となっている。

実際の管制運用では本研究で使用した実運航データには含まれていない軍用機やジェネラル・アビエーションの航跡情報の他、高度や隣接 FIR を含む空域の運用制限に関する情報など幅広い情報を使用することで安全な運航を達成している一方で、本研究では実運用と比較して限られた情報で関連機の推定を行なった。本研究で用いた情報のみにより洋上管制有資格者が関連機の推定を行った結果、洋上管制有資格者の推定率は 71.7 % となった。

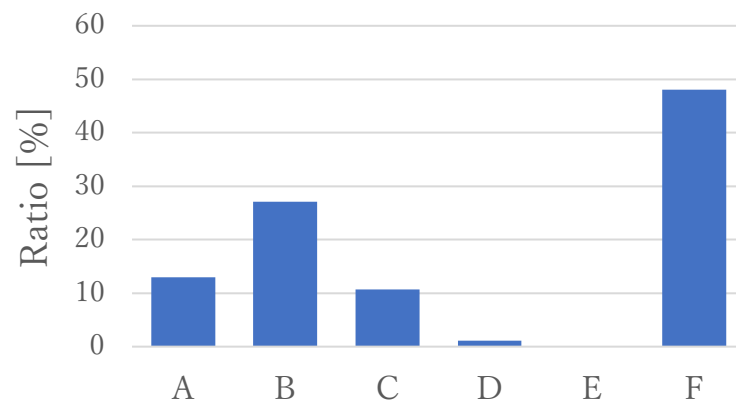
従来手法における推定率は 63.8 % もしくは 33.8 % となり、洋上管制有資格者の推定率 71.7 % と比較して低い値となる。一方、提案手法における推定率は 66.6 % となり、洋上管制有資格者の推定率よりは低いものの、従来手法よりは高い推定率が実現された。また、提案手法における推定精度は 84.7 % となり、従来手法と比較して高い値が実現された。以上のことから、提案手法では従来手法と比較してより精度良く関連機の推定が可能であることが確認された。

なお、提案手法におけるパターン D (図 24 (e)) について、提案手法では関連機ありとした一方で洋上管制有資格者の推定結果では関連機なしとしたケースである。相違の要因として、洋上管制空域における位置情報の更新間隔が広く、その位置情報を補間して得られた実運航データでは航跡をプロットしても連続的な直線・曲線にならないことが挙げられる。洋上管制有資格者は上記の特徴を持つ実運航データをもとに関連機の推定を行った一方で、提案手法ではリクエスト時刻における位置を初期値とした連続的な予測軌道をもとに関連機の推定を行うことから、両方で推定結果の相違が生じたと考えられる。

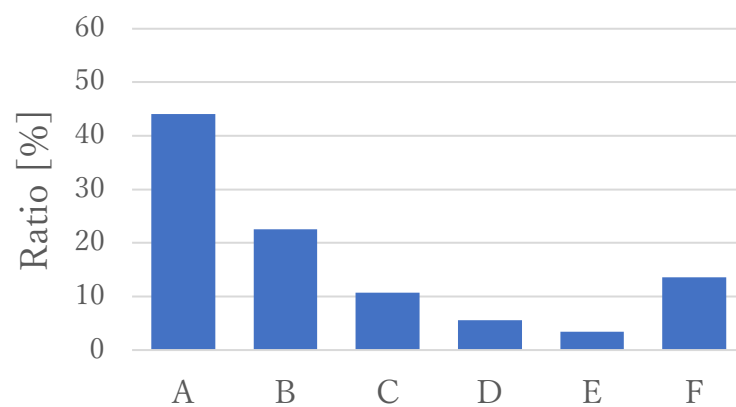
一方で、提案手法におけるパターン F (図 24 (e)) について、洋上管制有資格者の推定結果では関連機ありとした一方で提案手法では関連機なしとしたケースである。洋上管制有資格者と提案手法の推定閾値におけるバッファの相違に起因すると考えられる。洋上管制有資格者は航空機相互間の速度差など、状況に応じたバッファを設定することで関連機の推定を行う一方で、提案手法では表 8 に示した一意の値としてバッファを設定する。状況に応じたバッファの設定を検討することが、提案手法の高精度化に向けた更なる改善の余地として挙げられる。



(a) Cylinder\_1 アルゴリズム (水平方向検出閾値：50NM)

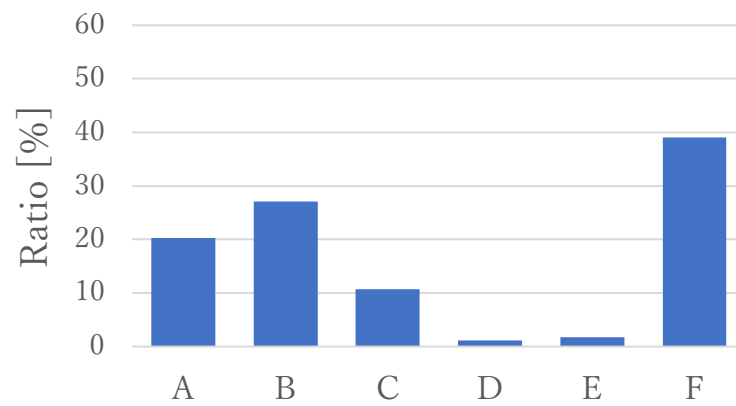


(b) Cylinder\_2 アルゴリズム (水平方向検出閾値：30NM)

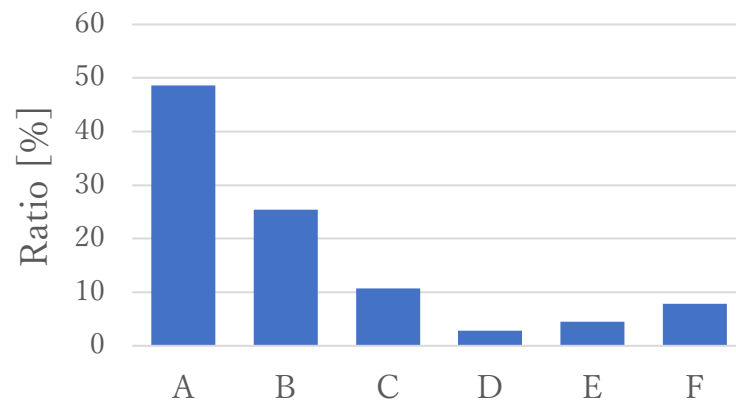


(c) Box\_1 アルゴリズム (縦/横検出閾値：115NM/30NM)

図 24 各手法の推定結果と洋上管制有資格者による推定結果との比較



(d) Box\_2 アルゴリズム (縦/横検出閾値：45NM/30NM)



(e) 提案手法

図 24 各手法の推定結果と洋上管制有資格者による推定結果との比較

表 10 各推定手法における評価指標

	Cylinder_1	Cylinder_2	Box_1	Box_2	提案手法
合致率	64.4 %	50.8 %	77.4 %	58.1 %	84.7 % ↑
推定率	41.2 %	24.8 %	63.8 %	33.8 %	66.6 % ↑
未検出率	32.2 %	48.0 %	13.6 %	39.0 %	7.9 % ↓

(参考：洋上管制有資格者の推定率 … 71.7 %)

#### 4.5. 推定精度向上による今後の解析への寄与

今回新たに作成した飛行計画に基づく予測軌道による推定手法は従来の仮想保護領域による推定手法と比較して、推定精度（合致率 / 未検出率）・推定率共に向上されたことが確認された。推定精度と推定率双方ともに向上された要因として、2 つの要因が考えられる。

1 点目の要因は、CNS 性能に依存する便毎に異なる管制間隔の値をもとに推定閾値を設定し、関連機の判別を行ったことである。従来手法では、非短縮管制間隔及び短縮管制間隔のいずれか片方の管制間隔に基づき推定閾値を定めたため、推定精度と推定率がトレードオフの関係になっていた。一方提案手法では、実際の管制運用で使用される便毎の管制間隔の値で関連機の推定を行うことが可能になり、推定精度と推定率の双方の向上に繋がった。

2 点目の要因は、飛行計画に基づき作成した予測軌道により関連機の推定を行うことで、リクエストを行った時刻のみならず、実際の管制運用と同様にある程度先まで（本研究では東経 170 度に達するまで）関連機の推定を継続することが可能になったことである。リクエストを行った時刻において上昇を阻害する位置関係に関連機が飛行していなかったとしても、将来的に上昇を阻害する位置関係に関連機が飛行することが見込まれる場合には上昇リクエストは承認されない。そのような交通流の一例として、航空機相互の航跡が互いに交差するケースが挙げられる。固定経路である NOPAC 経路を除く洋上管制空域では、PACOTS（Pacific Organized Track System）や UPR（User Preferred Route）といった可変経路による運航が行われている。可変経路は緯度 1 度、経度 10 度毎の経路ネットワーク（図 25）に従い作成される<sup>[31,32]</sup>ことから、航空機相互の経路が交差することが想定される。従来手法では、関連機の検出は同方向に限られる一方、提案手法では継続的に関連機の推定を行うため、交差・対面交通流に属する関連機の検出が可能となる。

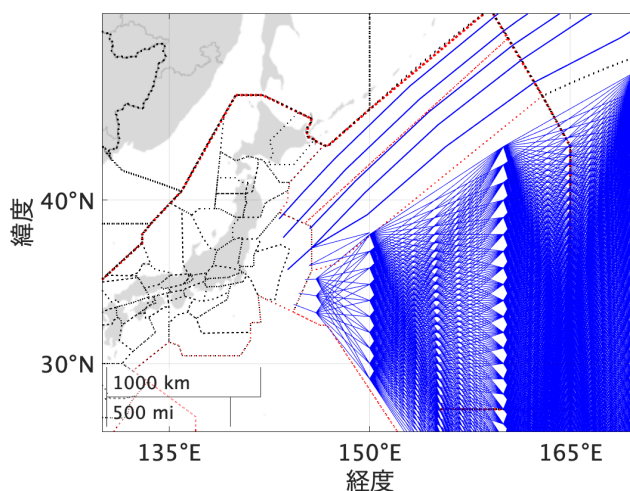


図 25 洋上管制空域における経路ネットワーク

## 第 5 章 空域指標の算出精度向上と適用例

上昇リクエストを行った時刻において上昇を阻害する位置関係に関連機が飛行していなかったとしても、将来的に上昇を阻害する位置関係に関連機が飛行することが見込まれる場合には上昇リクエストは承認されない。第 3 章では、福岡 FIR の洋上管制空域における上昇リクエストの承認率を評価指標とした運航効率の現状評価を行った。そこでは、東京出発便並びに上空通過機において、共に 30%程度の上昇リクエストが承認されておらず、運航効率の悪化が生じている現状が確認され、周辺交通の特性によりリクエスト承認率が大きく変化することが確認された。

一方で、第 4 章では上昇リクエストに対して周辺交通として影響を及ぼす関連機の推定を行う手法の提案を行った。提案手法では飛行計画に基づく予測軌道を作成し、更新時間間隔毎に対象機及び関連機候補となる便の航空機ペア間の縦間隔/横間隔の算出を行うことで、関連機の推定を行った。提案手法は従来手法と比較して、推定精度・推定率共に向上されたことが確認された。提案手法では、CNS 性能に依存する便毎に異なる管制間隔の値をもとに推定閾値を設定し関連機の判別を行った他、継続的に関連機の推定を行うため、同方向に加えて交差・対面交通流に属する関連機の検出が可能となった。

現在福岡 FIR を含むアジア・太平洋地域において、フリールーティングの導入が検討されている。一方でアジア・太平洋地域は航空需要の大きな成長が見込まれているため、アジア・太平洋地域におけるフリールーティングのコンセプト設計にあたり、現在の航空需要のみならず将来的な航空需要の増加も踏まえた評価を行う必要がある。航空需要の増加を踏まえた評価は現状よりも増加した交通流を模擬した FTS により実施され、より正確な評価を行うためには、空域指標のより正確な算出が必要となる。そこで本項では、関連機推定手法をコンフリクト (PLoS) 検出に応用することで、PLoS の算出精度の向上を図った。提案手法の適用例として、現状よりも増加した交通流を模擬した FTS により、フリールーティングの導入後の将来的な航空需要の増加を踏まえた交通流のシミュレーションを行った。シミュレーションにより生成された軌道に対して、既存の PLoS 検出手法及び提案手法を適用することにより、算出された空域指標を比較することで精度評価を行うとともに、考案手法を適用することで将来的に想定される交通密度が増加した状況下での PLoS の予測及びその要因の調査を行った。



### 5.1. 関連機推定とコンフリクト (PLoS) 検出

関連機推定手法を応用することでコンフリクトの検出が行われる。関連機推定アルゴリズムの提案手法は、実軌道を元に設定した初期位置から次の飛行計画上の FIX に向けて飛行計画に記載された予定速度で飛行することを仮定した予測軌道の作成を行う（図 26 上）。予測位置に基づき、管制業務処理規定に基づき縦/横/垂直間隔を継続的に算出し、予測軌道の作成が終了するまでに、閾値を下回る便が関連機として推定される。一方でコンフリクト検出は、実軌道上の位置に基づき特定の時刻における縦/横/垂直間隔を算出し、特定の時刻に閾値を下回る便を検出することで行われる（図 26 下）。従って、ある一点の時刻のみの航空機同士の位置関係で判定されるため、関連機推定アルゴリズムでは初期時刻以降は予測軌道に基づき連続的に行っていた判定を、初期時刻の実際の飛行位置のみに限定して判定を行うことで、コンフリクトの検出が行われる。

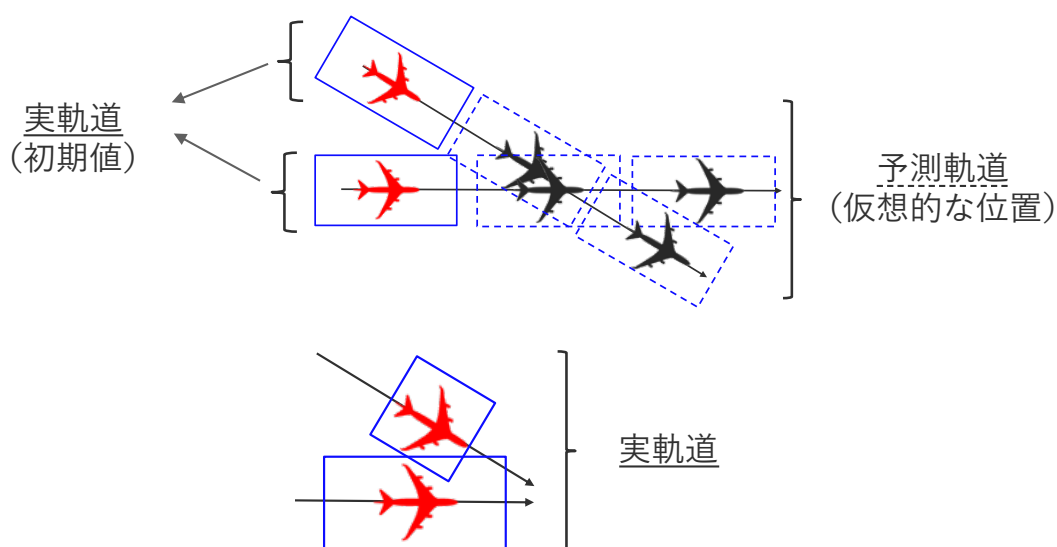


図 26 関連機推定手法（上）とコンフリクト検出（下）

## 5.2. PLoS の概要

空域容量に影響する評価指標として、PLoS（Potential Loss of Separation：潜在的管制間隔喪失）を用いる。PLoS とはシミュレーション内で航空機間の間隔が欠如している状態を意味する。図 27 に洋上管制空域において発生する PLoS の例を示す。

航空機が他の航空機と接近し、水平方向及び垂直方向ともに規定された管制間隔を確保することができない状況はコンフリクトと呼ばれる。安全性の観点から実際の管制運用ではコンフリクトが発生することはあってはならず、将来的にコンフリクトが発生することが予測される場合には、管制官は航空機間の間隔が適切に維持されるべく管制指示を発出する。従って、実運用では管制官によりコンフリクトの回避が行われているため、コンフリクトの発生はない。一方でファストタイムシミュレーションでは、各便がシナリオの条件のみに従って飛行した時の時系列の座標情報が生成されているため、シミュレーション内では航空機同士のコンフリクトの影響は加味せずに軌道の生成が行われている。従って、ファストタイムシミュレーションにより生成された軌道に従って運用が行われたとしても、実際には管制官によりコンフリクト回避が行われるためコンフリクトは生じないが、シミュレーション内ではコンフリクトが生じているといった状況が発生する。実運用とシミュレーション内との間の乖離から、シミュレーション内における管制間隔の欠如は、“潜在的”に発生しているものと考えられることからコンフリクトではなく PLoS として空域指標が定義される。

実際の管制運用では管制官によってコンフリクトの回避が行われる。従って、PLoS が多いほど管制官が解消すべきコンフリクトが多いことを意味し、管制官のワークロードの増加に直結する。また、コンフリクトの回避に伴い最適軌道とは異なる軌道での運航が必要となる。従って、PLoS が多いほど運航効率の悪化にもつながる。PLoS は FRA (Free Route Airspace) の導入における便益評価に際し、評価指標として用いられている<sup>[33,34]</sup>。

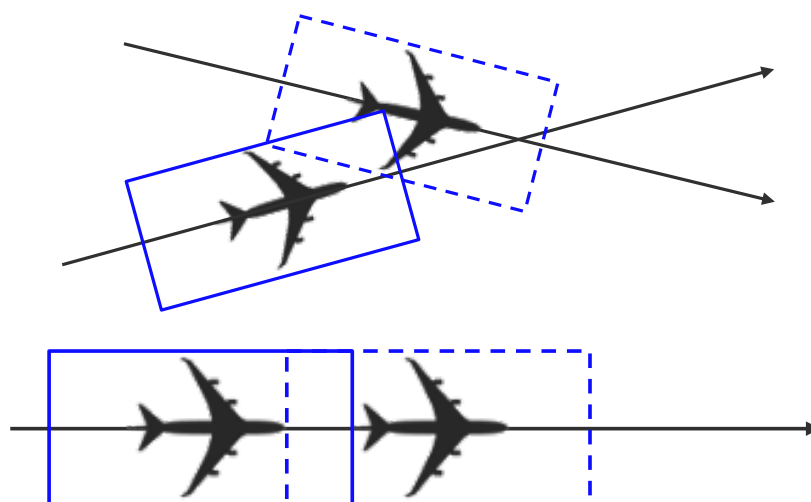


図 27 洋上管制空域において発生する PLoS の例（実線：当該機、点線：関連機）

航空機同士の保護領域が重複しており、縦間隔並びに横間隔の値が管制間隔を下回っている。

### 5.3. PLoS 検出アルゴリズム

第 4 章より、上昇リクエストが非承認となった場合における関連機推定アルゴリズムの提案手法では、以下の 4 つのステップにより推定を行った。

- ① 飛行計画に基づく予測軌道の作成
- ② 航空機間の距離（縦間隔/横間隔）を算出
- ③ CNS 性能により決定される推定閾値を決定
- ④ 推定閾値を下回れば関連機として推定

関連機の推定ではリクエスト時刻から判定を終了する時刻まで 120 秒ごとに継続的に推定を行った一方で、PLoS であるか否かは判定時刻のみでの位置関係により決定される。従って、本項における PLoS の判定では“航空機間の距離（縦間隔/横間隔）を算出”以降をシミュレーションにより生成された軌道について適用する。PLoS 検出アルゴリズムのフローを図 28 に示す。

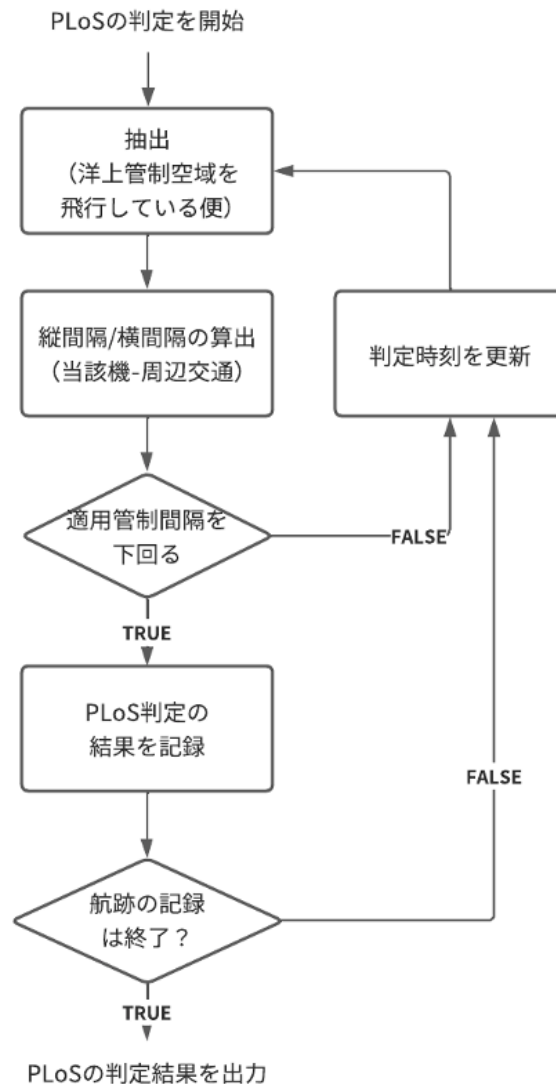


図 28 PLoS 検出アルゴリズムのフロー

先行研究では対象機を中心とした円筒状の保護領域により PLoS 検出を行っており、検出閾値は固定値を使用していた（以下「先行手法」という）<sup>[24]</sup>。一方で、本研究における提案手法では対象機を中心とした直方体の保護領域により検出を行っており、検出閾値は CNS 性能に依存する、便毎の管制間隔の値を参考に設定される（以下「提案手法」という）。同方向を例とした、先行研究及び本研究における PLoS 検出手法の相違を図 29 に示す。両者の関係は、関連機推定の先行手法・提案手法の対応関係に一致し、提案手法では実際の管制手順に近い方法での PLoS の検出が実現される。

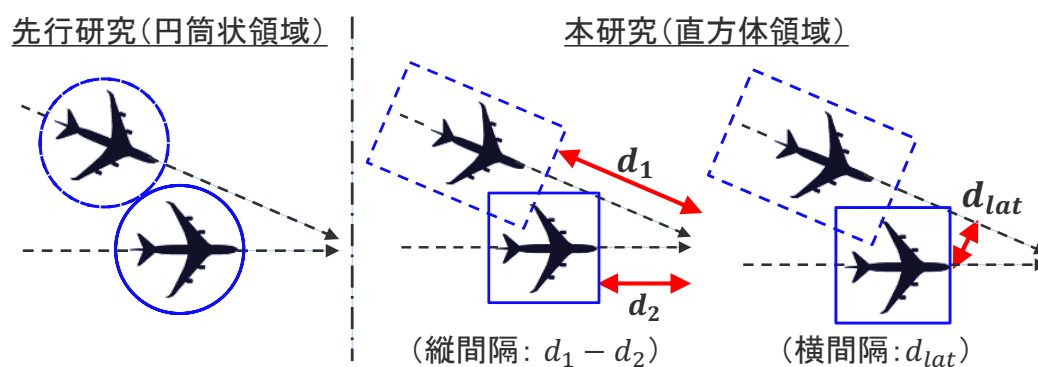


図 29 先行研究及び本研究における PLoS 検出手法の相違（同方向を例とする）

#### 5.4. PLoS 検出アルゴリズムの適用例：高密度交通流を模擬したシミュレーション

実際の航空機の運航では運航前に飛行計画が作成され、管制機関に対して提出される。また、運航を通じて記録されたレーダー情報や QAR (Quick Access Recorder) データなどの実運航データを取得し、運航後解析に使用する。一方で、本研究では将来的な交通流を想定したシミュレーションを実施するため、実際には運航を行っていない状態での解析となる。本研究におけるシミュレーションを実施するにあたり必要な手順は、高密度交通流を想定したシナリオの作成 (運航前)、軌道生成 (運航中)、PLoS 解析 (運航後) の 3 つのステップに分かれる (図 30)。実運航と本研究におけるシミュレーションとの運航フェーズ毎の対応を表 11 に示す。

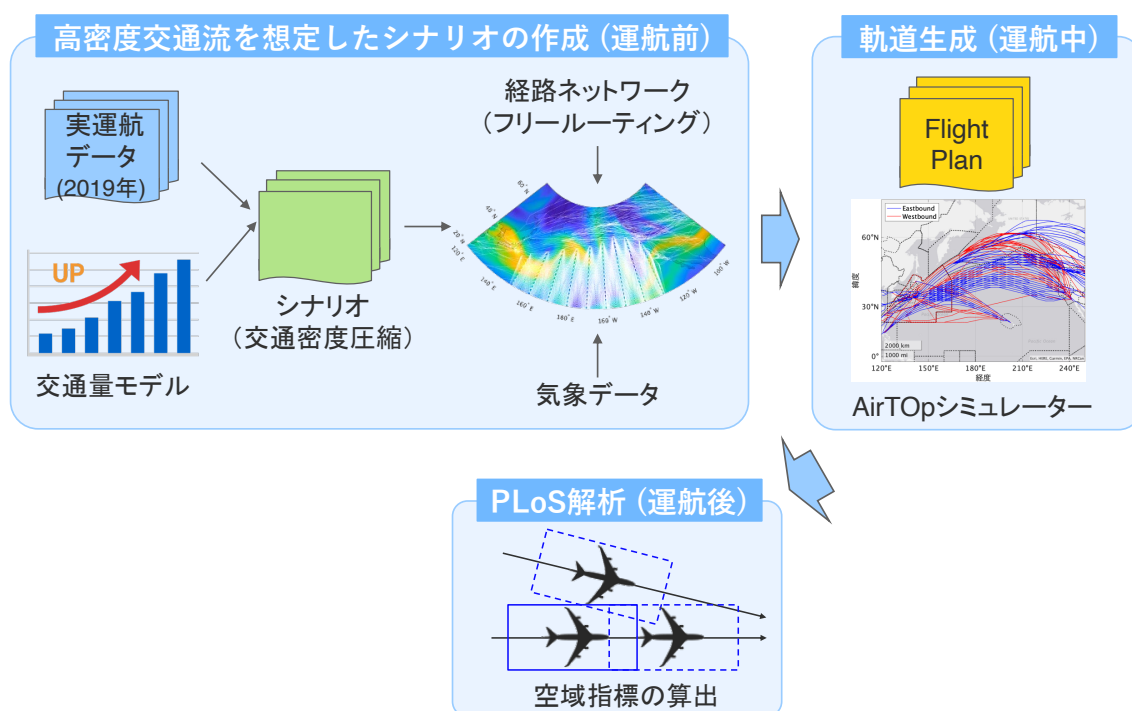


図 30 本研究において実施したシミュレーションの流れ

表 11 実際の航空機の運航と本研究における運航フェーズ毎の対応

	実際の航空機の運航	本研究 (シミュレーション)
運航前	飛行計画の作成	シナリオの作成
運航中	実運航データの記録	シミュレーションの実施
運航後	運航後解析	空域指標の算出

#### 5.4.1. 運航前：シナリオ作成

##### 5.4.1.1. 交通量モデル

将来的なアジア・太平洋地域における航空需要の増大に伴う、福岡 FIR の洋上管制空域内における交通量が増加した状況を想定したシミュレーションを行った。アジア・太平洋地域における航空需要は、RPK ベースで以下の2点が予想されている<sup>[5,6]</sup>。

- ✓ 年平均 4.5%の成長率
- ✓ COVID-19 の影響により、当初の需要予測から 2-3 年程度の遅れ

実際の航空需要には旅客便のみではなく貨物などの需要も含まれ、また航空需要の成長の予測には各国の GDP (Gross Domestic Product：国内総生産) の成長など多種多様な要素が影響する。本研究では簡易的な交通量モデルとして、交通量が RPK に成長すると仮定した。以上2点の航空需要の予測を踏まえ、2019 年を基準とした福岡 FIR の洋上管制空域内における交通量が式(10)で表されるものとしてモデル化を行った。本研究で利用した、2019 年を基準としたアジア-北米間の交通量のモデルを図 31 に示す。

$$Ratio = 1.045^{year-2019-3} \quad (10)$$

本研究では、基準となる 2019 年の他、2025 年から 2040 年まで 5 年間隔の計 5 パターンについて交通量を変化させたシナリオの作成を行った。

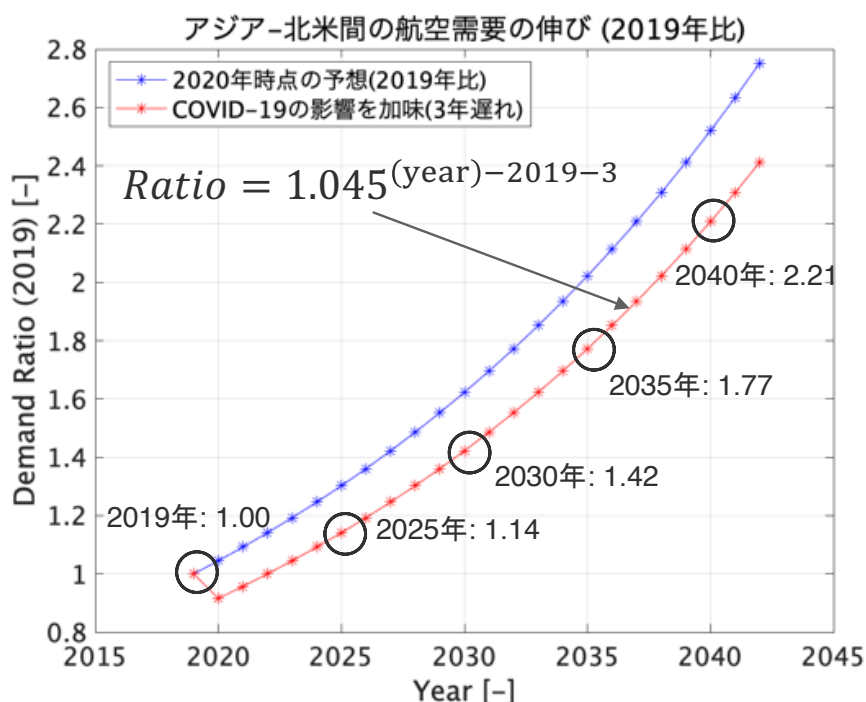


図 31 本研究で利用したアジア-北米間の交通量の増加モデル

#### 5.4.1.2. 交通密度を増加させたシナリオの作成

前項より、2019 年を基準とした福岡 FIR の洋上管制空域内における交通量の割合の時系列の変化がモデル化された。この時、対象領域である福岡 FIR の洋上管制空域の大きさは一定であるため、交通量の増加は交通密度の増加と同義である。交通密度([便/km<sup>2</sup>])は単位面積あたりに飛行している便数として定義されるため、単位時間あたりに福岡 FIR の洋上管制空域に入域する便数 ( $\lambda$  [便/min])に比例する。また、単位時間あたりの入域便数 ( $\lambda$  [便/min])は平均入域間隔 ( $1/\lambda$  [min/便])の逆数となる。従って、交通密度は平均入域間隔 ( $1/\lambda$  [min/便])の逆数に比例した値となる。

以上のことから、福岡 FIR の洋上管制空域における交通密度を定義するには、対象領域への入域間隔を調べる必要がある。福岡 FIR の洋上管制空域は、東行き・西行きともに飛行する。従って、東行きについてはゲートウェイの通過時刻又は隣接 FIR から福岡 FIR 洋上管制空域へと入域した時刻、西行き便については隣接 FIR から福岡 FIR 洋上管制空域へと入域した時刻を福岡 FIR 洋上管制空域へ入域した時刻として定義する (図 32)。便毎の福岡 FIR 洋上管制空域への入域時刻を時系列順にソートした時、福岡 FIR 洋上管制空域への入域間隔 ( $\Delta t$ ) は平均入域間隔 ( $1/\lambda$  [min/便]) をパラメータとする指数分布に従うものとした (図 33)。指数分布は下式で記述され、平均値は  $1/\lambda$  [min/便] となる。従って、入域間隔が圧縮されると  $1/\lambda$  の値は小さくなる。

$$p(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (x \geq 0) \quad (11)$$

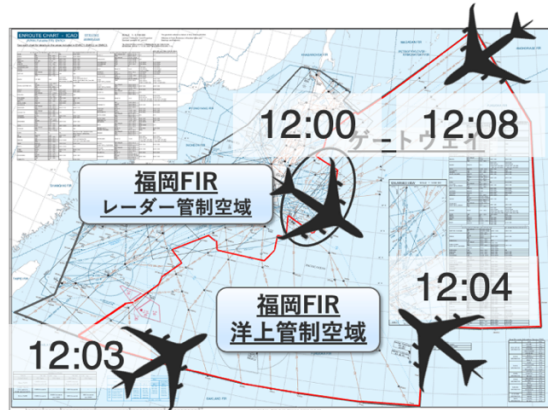
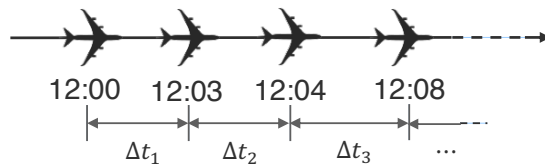


図 32 福岡 FIR 洋上管制空域への入域地点及び入域時刻の例



$$\Delta t \sim \text{Exp}(\lambda) \quad \text{注) } \lambda \text{ は平均入域間隔 [min]}$$

図 33 福岡 FIR 洋上管制空域への入域間隔の定義



以降ではシミュレーションの対象期間を 2019 年 3 月 5 日 0:00 UTC-3 月 6 日 0:00 UTC とする。シミュレーションの対象期間（2019 年）の入域間隔の分布を図 34 に示す。なお、原則として入域時刻は実運航データから取得する一方で、実運航データにはジェネラルアビエーションなど一部の便の航跡が記録されていない。その場合は SDB に記録された福岡 FIR 洋上管制空域への入域地点の通過時刻を使用した。

2019 年の入域間隔の分布は、平均入域間隔（ $1/\lambda_{2019}$ ）を用いて、式(12)として記述される。

$$1/\lambda_{2019} = 4.114 \text{ [min/便]} \quad (12)$$

2025 年以降についてのシミュレーションでは、上記の値を基準として交通密度を変化させる。例として 2030 年時点での交通密度は、図 31 のモデルより 2019 年の交通密度の 1.4221 倍と予測されている。平均入域間隔( $1/\lambda$  [min/便])は交通密度の逆数に比例することから、2030 年の入域間隔の分布は、平均入域間隔（ $1/\lambda_{2030}$ ）を用いて、式(13)として記述される。

$$1/\lambda_{2030} = (1/\lambda_{2019})/1.4221 = 2.893 \text{ [min/便]} \quad (13)$$

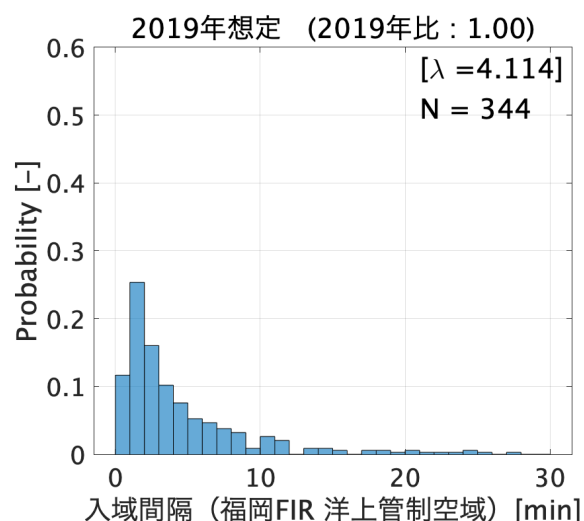


図 34 入域間隔の分布（2019 年…1.00 倍）

以上より交通密度を変化させた場合の所望の平均入域間隔( $1/\lambda$  [min/便])の値が算出された。入域間隔を時間方向で圧縮し<sup>[35, 36]</sup>、所望の平均入域間隔（ $1/\lambda$ ）を満たすシナリオを作成する手順を以下に示す。



- 1)  $\alpha$  は入域間隔の圧縮パラメータであり、 $\alpha = 1.000$  として初期化する。なお、本研究では入域間隔を圧縮したシナリオを作成するため、 $\alpha$  は 1 以上の値となる。
- 2) 2019 年 3 月 5 日 0:00 UTC を過ぎて最初に福岡 FIR の洋上管制空域に入域する便を時間圧縮の起点とする ( $Time_0$ )。
- 3) 時間方向の圧縮処理として、入域間隔 ( $\Delta t_i$ ) を  $\alpha$  で除した値を圧縮後の入域間隔 ( $\Delta t'_i$ ) とする (式 14)。

$$\Delta t'_i = \Delta t_i / \alpha \quad (14)$$

- 4) 圧縮後の入域間隔 ( $\Delta t'_i$ ) より、圧縮後の福岡 FIR 洋上管制空域への入域時刻 ( $Time'_i$ ) を算出する (式 15)。なお、圧縮前後の福岡 FIR 洋上管制空域への入域時刻のタイムラインを図 35 に示す。

$$Time'_i = \begin{cases} Time_0 & (\text{if } i = 0) \\ Time_{i-1} + \Delta t'_i & (\text{if } i > 0) \\ Time_{i+1} - \Delta t'_i & (\text{if } i < 0) \end{cases} \quad (15)$$

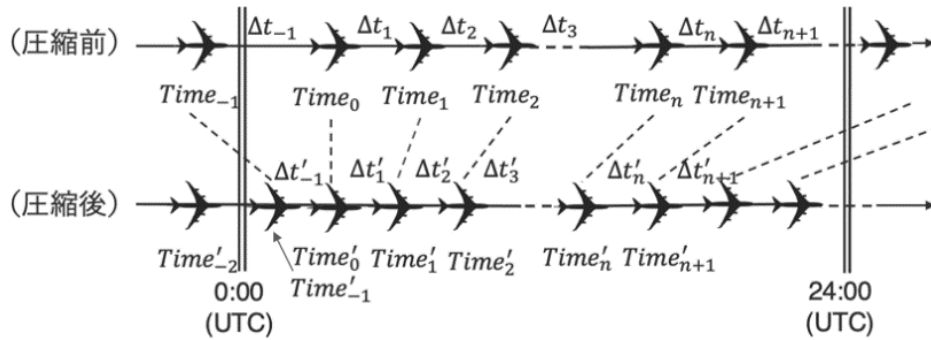


図 35 圧縮前後の福岡 FIR 洋上管制空域への入域時刻のタイムライン

- 5) 圧縮後の福岡 FIR 洋上管制空域への入域時刻 ( $Time'_i$ ) が、シミュレーションの対象期間である 2019 年 3 月 5 日 0:00 UTC-3 月 6 日 0:00 UTC の間となる便の抽出を行う。抽出された便について、平均入域間隔 ( $1/\lambda$ ) を算出する。
- 6) 算出された平均入域間隔 ( $1/\lambda$ ) を、所望の平均入域間隔 ( $1/\lambda_{2030}$  など) と比較する。両者の差が 0.01 以下の場合、入域間隔の圧縮により所望の倍率に交通密度を増加させたシナリオが得られたものとする。一方で、両者の差が 0.01 を超える場合、 $\alpha$  に 0.001 を加えて値を更新し、手順 3 に戻る。

上記で示したシナリオ作成のフローを図 36 に示す。また、上記の手順により作成された交通密度を増加させたシナリオにおける入域間隔の分布を図 37 に示す。

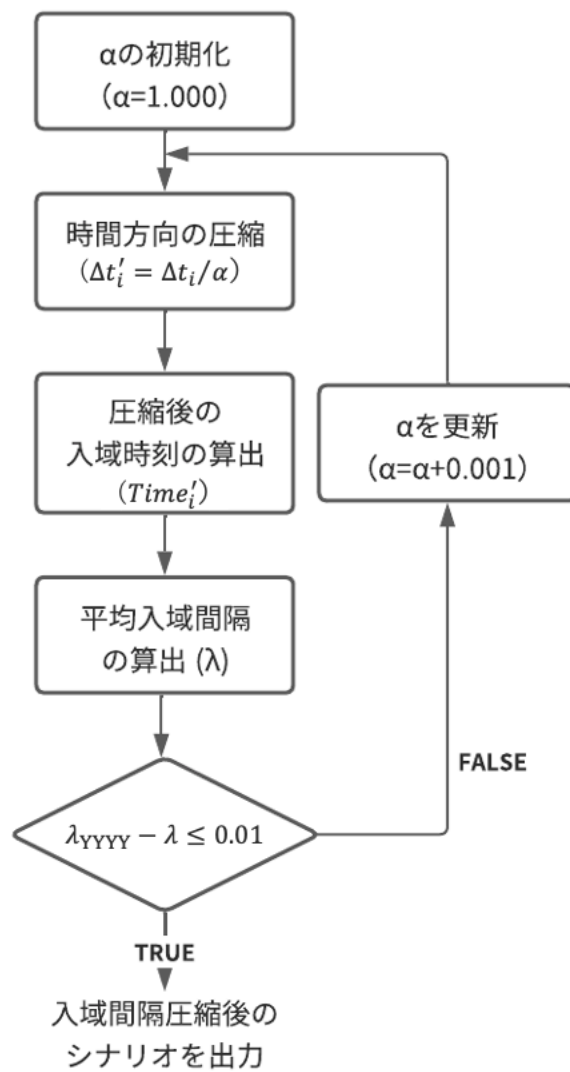
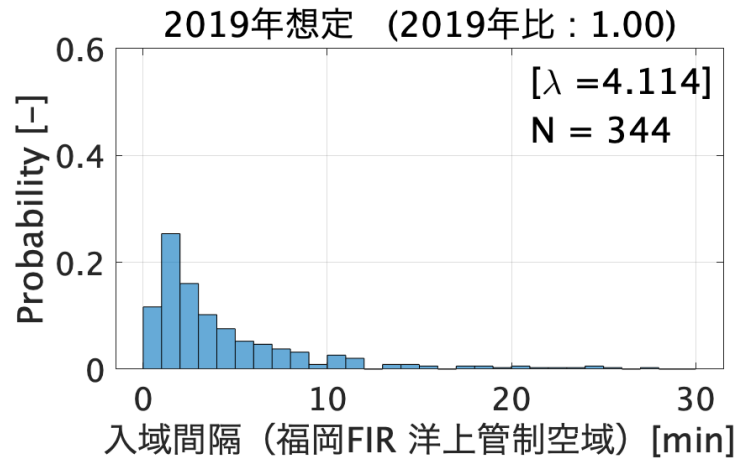
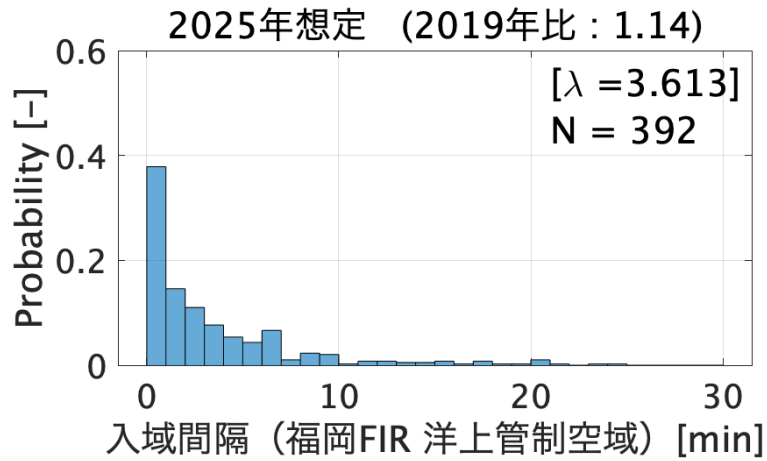


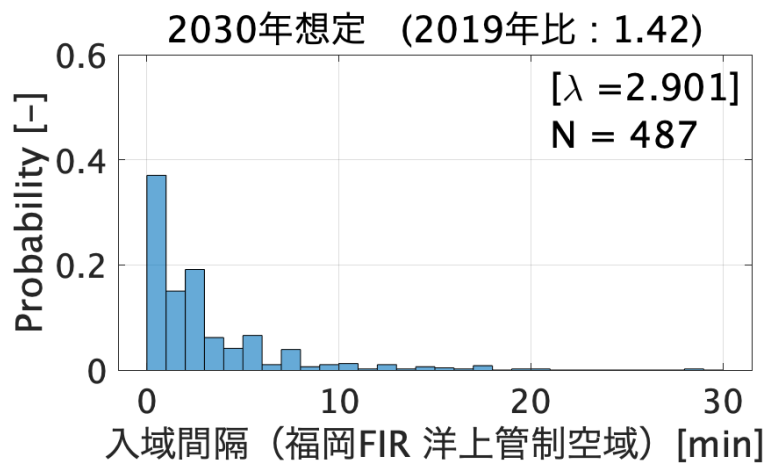
図 36 入域間隔を圧縮したシナリオ作成のフロー



(a) 2019 年実績

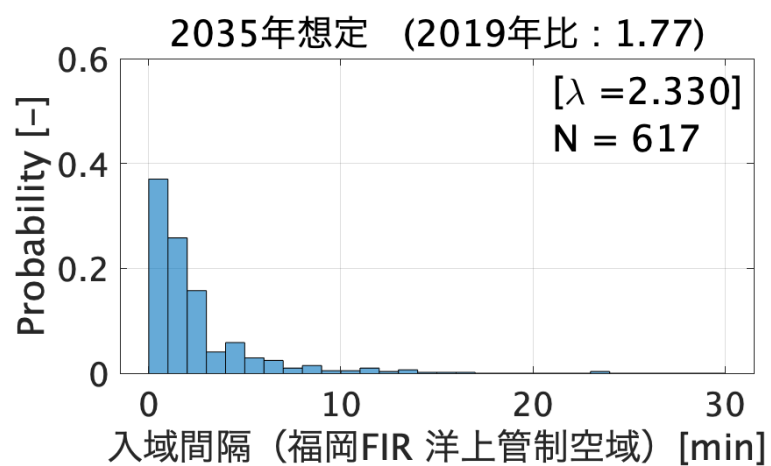


(b) 2025 年想定

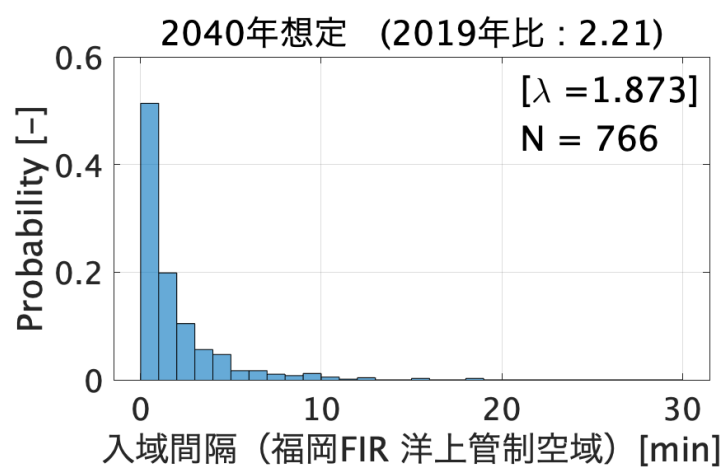


(c) 2030 年想定

図 37 各シナリオにおける福岡 FIR 洋上管制空域への入域間隔の分布



(d) 2035 年想定



(e) 2040 年想定

図 37 各シナリオにおける福岡 FIR 洋上管制空域への入域間隔の分布

#### 5.4.1.3. 最適軌道の計算

実際の航空機の運航では運航前に飛行計画が作成され、管制機関に対して提出される。飛行計画は一般に、運航を行う条件のもとで最も経済的または合理的となる軌道として設計される。とりわけアジアと北米方面との間を結ぶ便については、ジェット気流の影響を大きく受ける。従って、最適軌道の設計にあたり風の影響を大きく受ける。従って、必ずしも最短距離を飛行する経路（大圏経路）が最も運航コストが少ない経路となるとは限らない。本研究においても同様にシミュレーションの実施にあたり、飛行計画の代わりとなる最適軌道の計算を行う必要がある。本研究における最適軌道とは、出発空港・到着空港・出発時刻・初期質量を条件として与えた上で、航空機の運航コストを最小とする二次元経路並びに高度の履歴を求めることとする。最適化変数は3次元座標（緯度・経度・高度）とし、目的関数は運航コストとして、風の影響も加味した最適経路の設計を行った。運航コストは燃料消費量と飛行時間の和として下式(16)として定義される。

$$J = \int_0^t \mu(t) dt + \frac{CI}{79.4} t \quad (16)$$

$J$  [kg]は運航コスト、 $\mu$  [kg/s]は燃料流量、 $t$  [s]は飛行時間、 $CI$  は飛行時間と燃料消費量の重み付けを行うコストインデックスである。 $CI = 0$  とした場合は燃料消費量が最小となるべく経路が出力され、 $CI = 9999$  など十分に大きな値とした場合は飛行時間が最小となる経路が出力される。なお、 $CI$  の単位は式(17)として定義される。式(16)における 79.4 は  $CI$  の単位を [kg/s] に揃えることを目的とした値である。

$$CI \left[ \frac{[\$/h]}{[\text{cents/lb}]} \right] = \frac{CI}{79.4} [\text{kg/s}] \quad (17)$$

本研究では参考文献<sup>[37,38]</sup>や運航者へのヒアリング結果を参考に、機種毎に表 12 に示す値を最適軌道の計算に用いるコストインデックスとして設定した。

表 12 最適軌道の計算にあたり設定したコストインデックス

型式	コストインデックス
B747	40
B767	60
B777	80
B787	80
A330	80
A350	80
A380	40

最適軌道の計算にあたり、出発時刻及び初期質量を前提条件として与える必要がある。先ず出発時刻について、飛行計画に EOBT（Estimated Off Block Time：移動開始予定時刻）が記載されている。また、日本出発便については ATD（Actual Time of Departure：実出発

時刻)の情報が得られている。実運航データから福岡 FIR 洋上管制空域への実入域時刻が取得される一方で、前項で作成した入域間隔圧縮後のシナリオにおいて、洋上管制空域への入域時刻の設定を行った。以上より、EOBT または ATD の時刻に対して、洋上管制空域への実入域時刻とシナリオにおいて設定した入域時刻との差を反映した値を最適軌道の計算における出発時刻として使用した。次に、初期質量は BADA4 PTF (Performance Table Format)に記載されている `mass_low` から `mass_high` の間を  $6\sigma$  とする正規分布に従い、ランダムに与えた (図 38)。ここで、`mass_low` とは OEW (Operational Empty Weight) の 1.2 倍の質量で、`mass_high` とは MTOW (Maximum Take Off Weight : 最大離陸重量)である。また、最適軌道の計算にあたりマッハ数一定と仮定した。マッハ数は、BADA4 PTF に記載されている標準マッハ数の値を使用した。

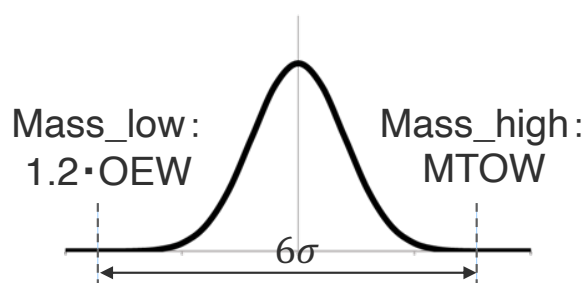


図 38 初期質量として仮定した分布

ダイクストラ法に基づくグラフサーチによって、最短経路問題に落とし込むことにより最適軌道の探索が行われる<sup>[32]</sup>。本項では“グラフ”とは、辺で連結された頂点集合を意味するものとする。この時、ノードは FIX、エッジは飛行経路、エッジの重みは運航コストとする。運航コストは BADA4 に基づき算出される。最適軌道は 3 次元の軌道 (緯度・経度・高度) として記述される一方で、先行研究により、巡航高度一定で最適化を行ったとしても水平プロファイルの妥当性は失われないことが確認されている<sup>[39,40]</sup>。そこで、本研究では以下の 2 つのステップに分けて最適化を行った。なお、Step 1, Step 2 共にダイクストラ法に基づくグラフサーチによって最適経路の探索を行う<sup>[32]</sup>。

- ✓ Step 1…水平プロファイル：巡航高度一定で探索
- ✓ Step 2…高度プロファイル：Step1 で得られた軌道の下、高度方向のみ探索

Step 1 では、巡航高度一定と仮定して水平プロファイルの最適化を行う。ここで、巡航高度は当該便の飛行計画に記載されている最初の巡航高度とする。水平プロファイルの最適化を行うにあたり、グラフサーチにおいて選択可能である経路を示すグラフを作成する必要がある。図 39 に例として、東京 (羽田) 発ロサンゼルス行きを対象とした水平プロファイルの探索グラフの一例を示す。初めに、解析対象期間に出発空港・到着空港を飛行する便についての飛行計画から固定経路部分を展開し、グラフを作成する。固定経路には、NOPAC 空域 (図 39 黒色領域) を経由する便及び出発空港からゲートウェイ、ゲートウェイから到

着空港が該当する（図 39 赤色経路）。次に、可変経路部分についてグラフを作成する。本研究では北緯 15 度以北の NOPAC 空域を除く空域において、緯度方向 1 度毎、経度方向 5 度毎にノードを作成し、ノード間をメッシュ上に結ぶ経路としてグラフ化を行った（図 39 青色経路）。なお、シナリオ作成にあたり Step 1 については電子航法研究所作成の最適化ツールを使用した。水平プロファイルの最適化の結果の例として、2019 年 3 月 5 日 16:00 JST に東京（羽田）を出発しロサンゼルスへと飛行する、ある大型機について最小コストとなる結果として出力された軌道を図 40 に示す。

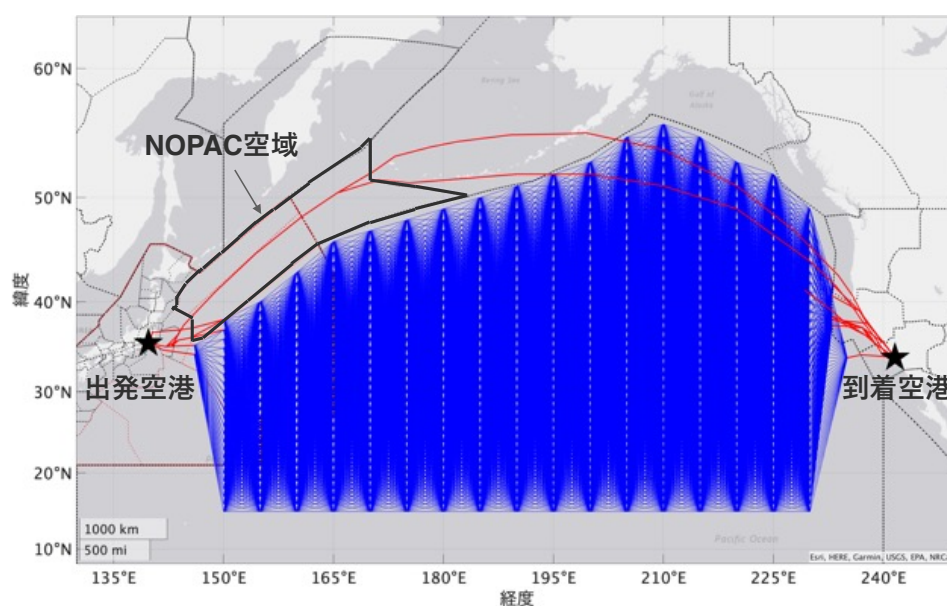


図 39 水平プロファイルの最適化におけるグラフの例（羽田→ロサンゼルス）

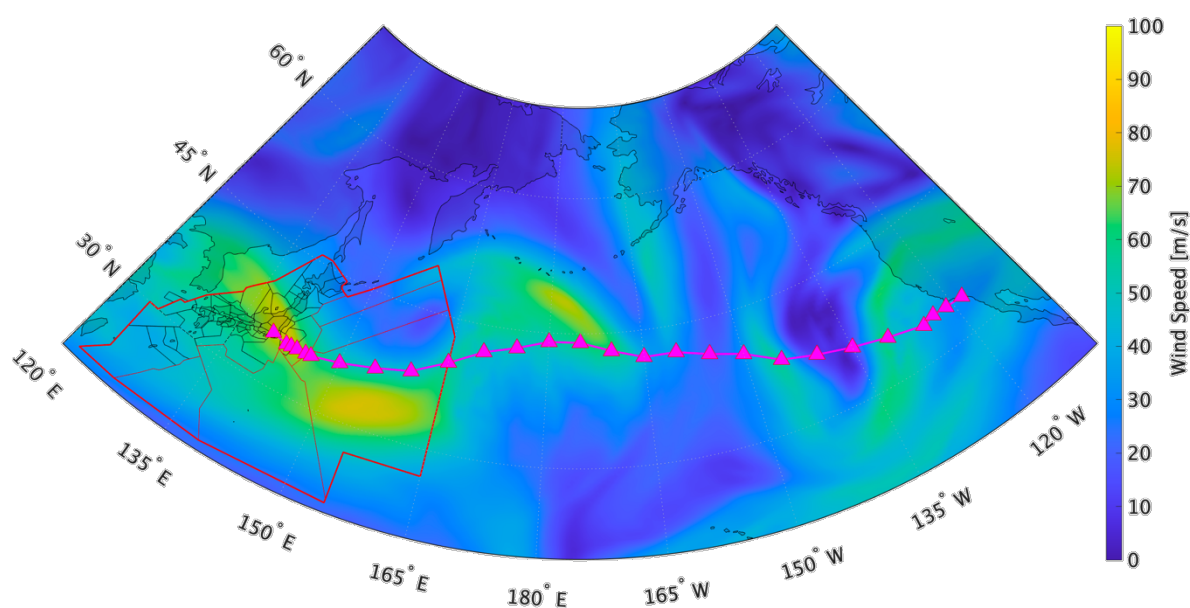


図 40 水平プロファイルの最適化の結果の例（羽田→ロサンゼルス）

Step 2 では、Step1 で得られた軌道のもと高度プロファイルの最適化を行う。Step1 では固定経路部分を除き経度 5 度間隔でグラフが形成されていた。一方で、実際には操縦士の判断により上昇リクエストが行われるため、特定の箇所で上昇リクエストが行われているのではなく、リクエストを行った位置にばらつきが生じることが想定される。そこで、Step 2 では洋上管制空域における上昇リクエストを模擬するべく、ノードの間隔が 150NM を超えない範囲で Step1 により得られた軌道を進行方向に分割した。また、PACOTS では使用可能な巡航高度が東行き・西行きでそれぞれ規定されている（表 13）。本研究でも表 13 の方向別の巡航高度が適用されるものとして、各ノードにおいて上昇する方向についてもエッジを追加したグラフを作成した<sup>[41]</sup>（図 41）。

表 13 方向別の使用可能な巡航高度

東行き (アジア→北米)	FL290、310、330、350、370、390、410、430、450
西行き (北米→アジア)	FL300、320、340、360、380、400、410、430、450

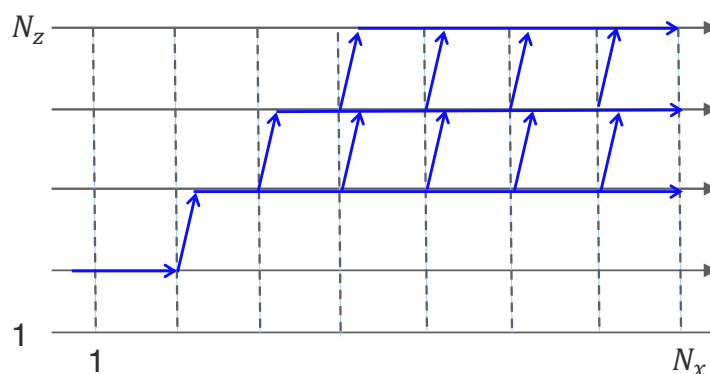


図 41 高度プロファイルの最適化におけるグラフの例

図 40 で得られた水平プロファイルの最適軌道（二次元軌道）について、高度プロファイルの最適化を行った結果として出力された軌道を図 42 に示す。赤い三角印の点は、水平プロファイルの最適化の際に設定された経度 5 度毎のノード、白い丸印は高度プロファイルの最適化にあたり、150NM を超えない範囲で Step1 により得られた軌道を進行方向に分割した際に設定されたノードである。図 42 の結果として得られた軌道における離陸後の初期巡航高度は FL330 であり、西経 170 度に達した時点で FL330 から FL350 へ 1 回目のステップクライムを行う。その後 FL350 で巡航を行い、西経 138 度付近に達した時点で FL350 から FL370 へ 2 回目のステップクライムを行う。



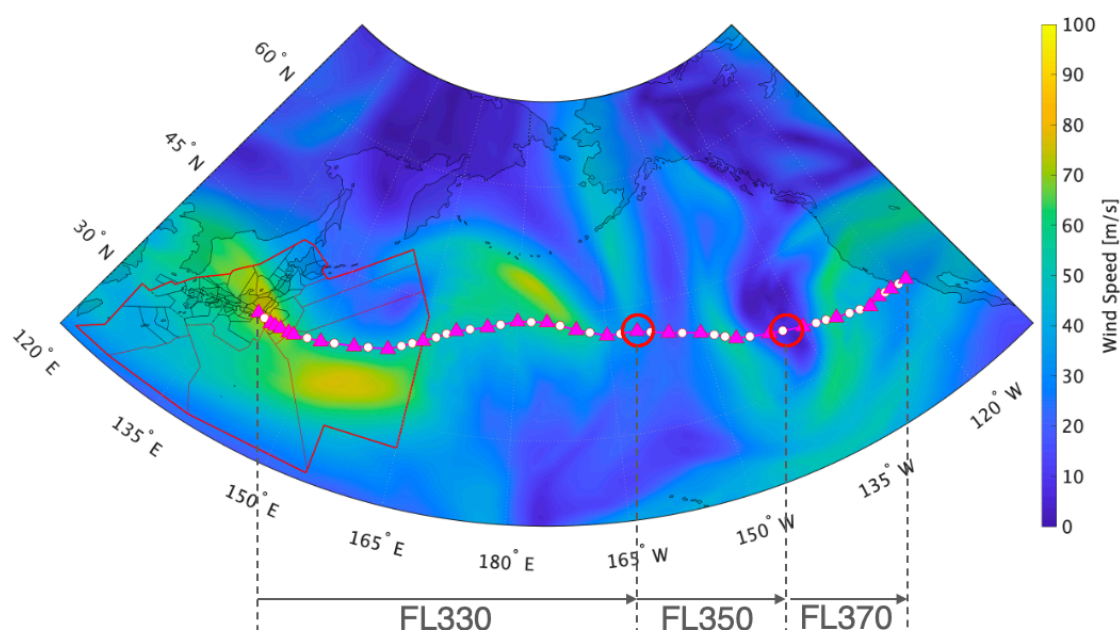


図 42 水平及び高度プロファイルの最適化の結果の例（羽田→ロサンゼルス）

以上より、ステップクライムも加味した最適軌道の生成が実装され、前項における交通密度を増加させたシナリオの各便について同手法を適用することで、シミュレーションを行うにあたり必要となるシナリオが作成される。一方で、前項におけるシナリオにおける福岡 FIR 洋上管制空域への入域地点と、本項で生成された最適軌道における入域地点とが異なるケースがある。そのようなケースではシナリオにおける福岡 FIR 洋上管制空域への入域時刻は変更せず、入域地点のみ生成された最適軌道における入域地点に置き換えるものとする。

また、最適軌道を生成した結果、福岡 FIR の洋上管制空域を経由しないとの結果が得られた場合がある。これは、本研究では運航コストを時間コストと燃料コストの 2 点のみで定義している一方で、実際の運用では各国の上空を通過する際に必要となる航行援助施設の利用料などその他のコストを加味していないことにより生じるものと推定される。例えば、実際には多額の航行援助施設の利用料を要するため運航経路として選択されないが、時間コストと燃料コストの 2 点のみで考えた場合には最小コストとなる経路があったと仮定する。この場合、実際にはトータルのコストが最小となる福岡 FIR 洋上管制空域を経由する経路が選択されるが、本研究では時間コストと燃料コストの 2 点のみを考慮するため福岡 FIR 洋上管制空域を経由しない経路としてシナリオが作成される。以上のような状況では、交通密度の定義に必要となる福岡 FIR 洋上管制空域への入域時刻を把握することができないため、シナリオから除外するものとする。

#### 5.4.2. 運航中：ファストタイムシミュレーション (FTS) の実施シナリオ作成

前項までにシミュレーションを行うにあたり必要となるシナリオが作成された。本研究では将来的な交通流を想定したシミュレーションを実施するため、実際には運航を行っていない状態での解析となる。交通密度を増加させたシナリオをもとにファストタイムシミュレーションを行うことで軌道を生成する。作成したモデルによるシミュレーションのソフトウェアとして、カナダ Transoft Solutions 社の製品である AirTOp を使用した<sup>[42]</sup>。AirTOp には、シミュレーションにあたり特定の FIX の通過時刻を指定することができる機能がある。本研究では前項までに作成されたシナリオにおける福岡 FIR 洋上管制空域への入域地点を、シナリオで指定した入域時刻で通過するものとして設定を行い、シミュレーションを行った。AirTOp のファストタイムシミュレーションにより生成された軌道の一例を図 43 に示す。生成された軌道における、位置情報の更新間隔は 10 秒となっている。

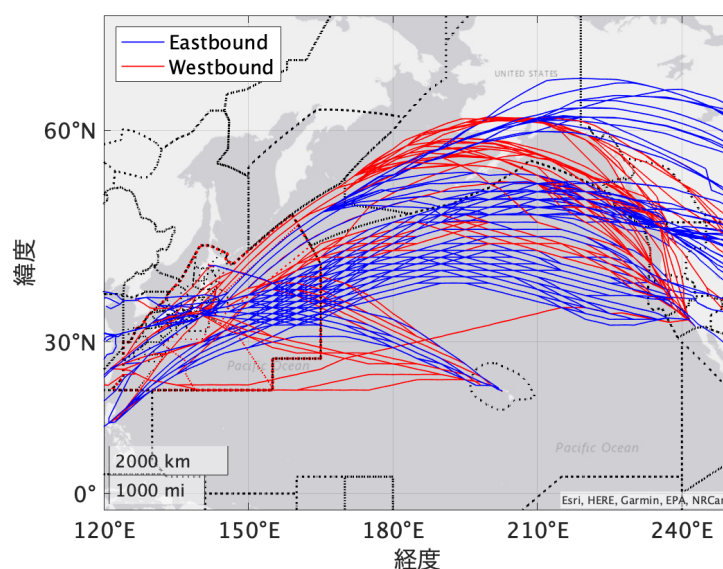
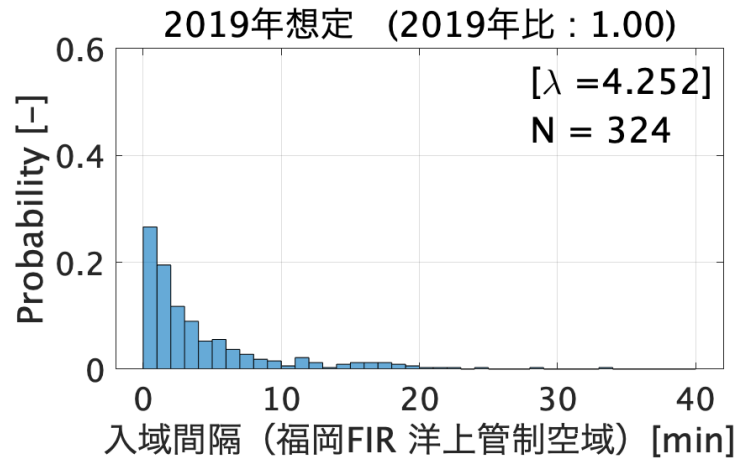
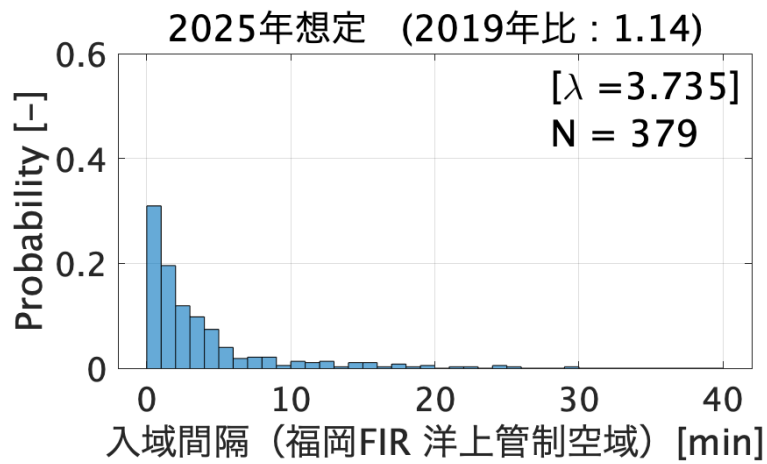


図 43 AirTOp により生成された軌道の一例 (2030 年想定)

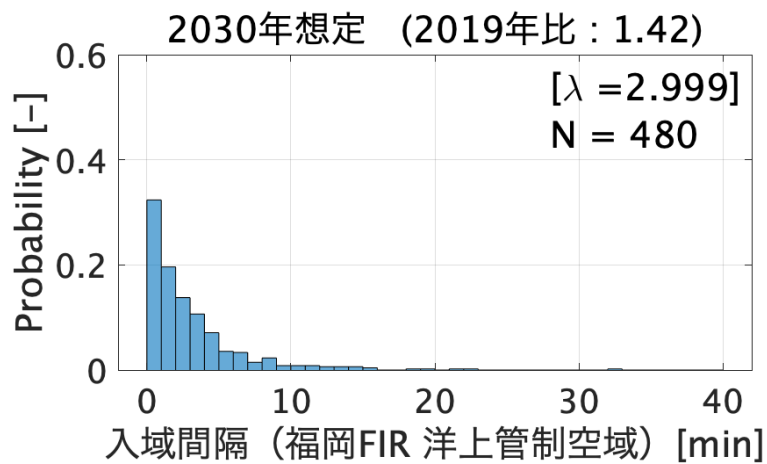
なお、前項で福岡 FIR 洋上管制空域を経由しない経路として最適軌道が生成されたケースはシナリオから除外した。また、AirTOp にはシミュレーションにあたり特定の FIX の通過時刻を指定することができる機能が実装されている一方で、指定時刻と生成された軌道における通過時刻（指定地点の再接近時刻）との間に最大 3 分程度の誤差が生じる。従って、AirTOp によって生成された軌道の生データでは、各データの平均入域間隔が交通密度を増加させた各シナリオに基づく交通密度の倍率に一致しないことから、補正処理が必要となる。2019 年想定データを基準として、5.4.1 項と同様に再度福岡 FIR 洋上管制空域への入域時刻の指定を行う。そして、各便について指定した入域時刻と生成された軌道における通過時刻が一致するよう各便の出発時刻を補正する。以上の流れにより補正が施された軌道データを、以降ではファストタイムシミュレーションによって得られた軌道として使用する。最終的に生成された軌道における入域間隔の分布を図 44 に示す。



(a) 2019 年想定



(b) 2025 年想定



(c) 2030 年想定

図 44 各シナリオにおける福岡 FIR 洋上管制空域への入域間隔の分布 (補正後)

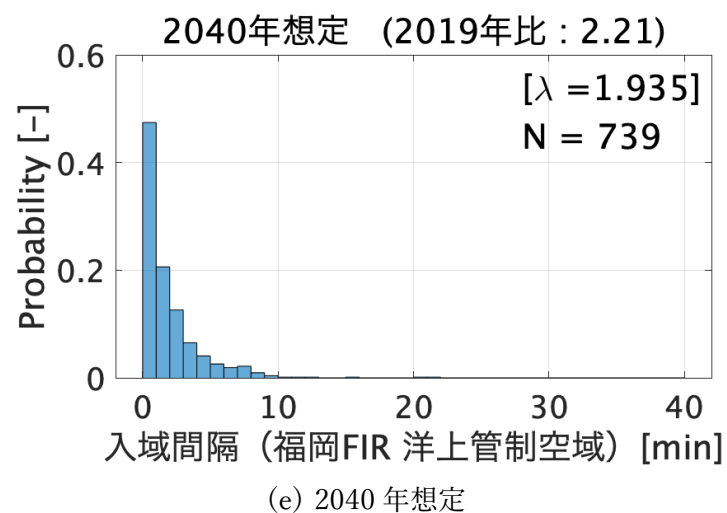
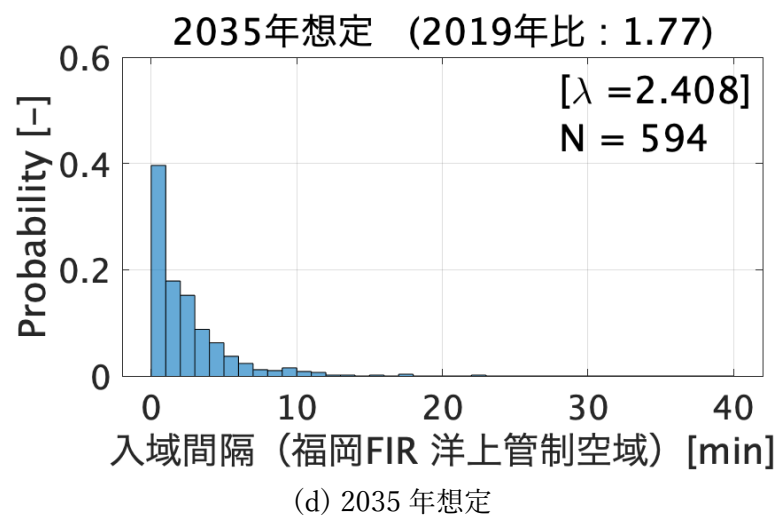


図 44 各シナリオにおける福岡 FIR 洋上管制空域への入域間隔の分布 (補正後)

#### 5.4.3. 運航後：空域指標（PLoS）の算出

前項までにシミュレーションを行うにあたり必要と

前項までにフリールーティングの導入後の将来的な航空需要の増加を踏まえた交通流を想定し、交通密度を増加させたシナリオをもとにファストタイムシミュレーションを行うことで軌道の生成を行った。本項では交通密度の変化に伴う便益評価を行うべく、生成された軌道に対して 5.3 項で作成した PLoS 検出アルゴリズムを適用することで空域指標の算出を行う。

PLoS を空域指標として使用するにあたり、PLoS 数 (PLoS count) 及び PLoS 時間 (PLoS duration) を定義した。PLoS 数は航空機間の間隔が欠如している航空機対の数を意味する。ある時刻において航空機同士が図 45 の位置関係で飛行していると仮定した時、実線で示した当該機に対して、点線で示した 2 機の周辺交通について管制間隔が欠如している。従って、図 39 の状況における PLoS 数は 2 となる。一方で、PLoS 時間は航空機間の間隔が欠如している状態の累積継続時間として算出される。

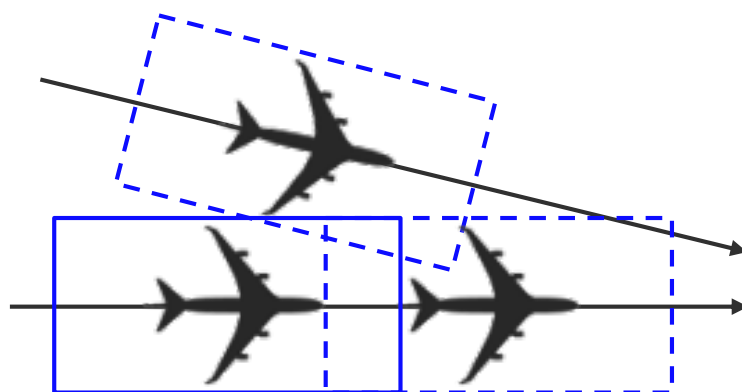


図 45 PLoS 数のイメージ図（実線：当該機、点線：周辺交通）  
2 機の周辺交通について管制間隔が欠如。PLoS 数は 2。

### 5.5. PLoS 検出手法の違いに伴う空域指標の算出結果の差異

前項までに将来的な航空需要の増加を想定したシナリオ作成及びシミュレーションを行った。シミュレーション対象期間内に福岡 FIR 洋上管制空域へと入域する便数は、交通密度の変化に伴い図 46 のように変化する。

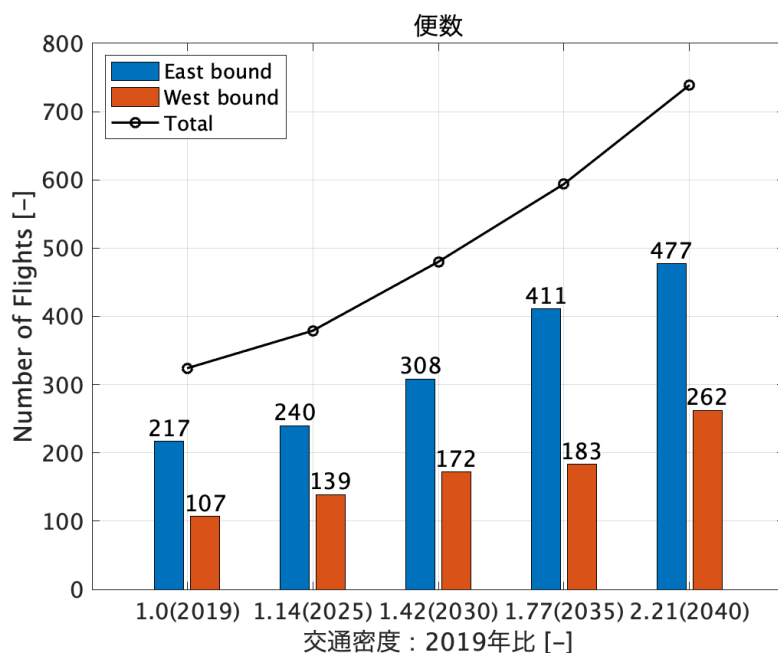


図 46 交通密度の変化に伴う福岡 FIR 洋上管制空域の飛行便数の推移

この時、飛行便数が増加すると、PLoS 数及び PLoS 時間の合計値が増加するのは明らかであるため、以降では 1 便あたりの空域指標の変化として便益評価を行う。

各シナリオにより生成された軌道について、先行手法及び提案手法双方により PLoS 検出を行い、交通密度の変化に伴う 1 便あたりの空域指標の変化として PLoS 数 / Flight、PLoS 時間 / Flight を算出した (図 47、図 48)。その結果、先行手法及び提案手法により出力される空域指標 (PLoS 数、PLoS 時間) に乖離が生じることが分かった。例として、2019 年比 1.00 倍(2019 年)のシナリオについて、提案手法による PLoS 検出結果を基準 (T/F) とした時、先行手法の PLoS 検出結果 (+/-) は混同行列として表 14 として記述される。PLoS の検出結果は 10 秒毎に出力され、特定の時刻において複数便が PLoS の状態にあると判定されることが想定される。従って、表 14 では 1 便あたりの延べ PLoS 時間[min/flight]として、提案手法と先行手法の PLoS 検出結果の比較を行った。なお、延べ PLoS 時間として比較評価を行っているため、表 14 の 2 つの表の合計は必ずしも一致しない。

PLoS 検出の閾値を 30NM とした先行手法では、提案手法により算出される空域指標と比較して 40-50%程度小さな値が出力されており、PLoS の過小評価が生じている (図 47、図 48)。表 14 より、提案手法と先行手法 (検出閾値 : 30NM) の PLoS 検出結果が一致す

る (T/+) 状況は 1 便あたり延べ 18 分である一方で、提案手法では PLoS として検出されたものの先行手法では検出されなかった (T/-) 状況は 1 便あたり延べ 28 分となったことから、PLoS の過小評価が生じていることが確認された。その要因として、管制間隔は便毎の CNS 性能に依存することが挙げられる。図 49 にシミュレーション対象日にアジア-北米間を飛行した各便における、飛行計画に記載されている CNS 性能についての情報から適用されたと推定される管制間隔の内訳を示す。シミュレーション対象便のうち 78%は縦間隔/横間隔 30NM/30NM の短縮間隔適用機である一方で、22%は 10 分/50NM 適用となっており、100NM 程度の縦間隔が必要となる。図 50 のような状況が生じた場合、先行手法では保護領域は重複しないため PLoS ではないものとして判定される一方で、実際には保護領域は重複するため PLoS として判定されるべき状況である。従って、PLoS として判定されるべき状況を検出できておらず、PLoS の過小評価が生じる。

一方、PLoS 検出の閾値を 50NM とした先行手法では、出力される空域指標の値の提案手法との乖離は大きくても 10-20%と比較的小さくなっている。一方で、先行手法の結果は誤判定により PLoS として判定された結果も含まれており、正確な空域の評価は実現されない。表 14 より、提案手法と先行手法(検出閾値:50NM)の PLoS 検出結果が一致する (T/+) のは 1 便あたり延べ 34 分である一方で、提案手法では PLoS として検出されたものの先行手法では検出されなかった (T/-) 状況は 1 便あたり延べ 8 分となったことから、先行手法(検出閾値:30NM)と比較すると軽減されたものの、提案手法と比較すると PLoS の過小評価が生じていることが確認された。また、先行手法では PLoS として検出されたものの提案手法では検出されなかった (F/+) 状況は 1 便あたり延べ 12 分となっており、先行手法(検出閾値:50NM)では一定の割合で PLoS の誤判定が生じていることが確認された。図 51 のような状況が生じた場合、先行手法では保護領域は重複しないため PLoS ではないものとして判定される一方で、実際には保護領域は重複しないため PLoS として判定されるべき状況である。従って、PLoS として判定されるべき状況を検出できておらず、PLoS の過小評価が生じている。図 50 のような状況が生じた場合、先行手法では保護領域は重複するため PLoS として判定される一方で、実際には保護領域は重複しないため PLoS として検出されるべきでない状況である。従って、PLoS として判定されるべきでない状況の誤判定が生じる。

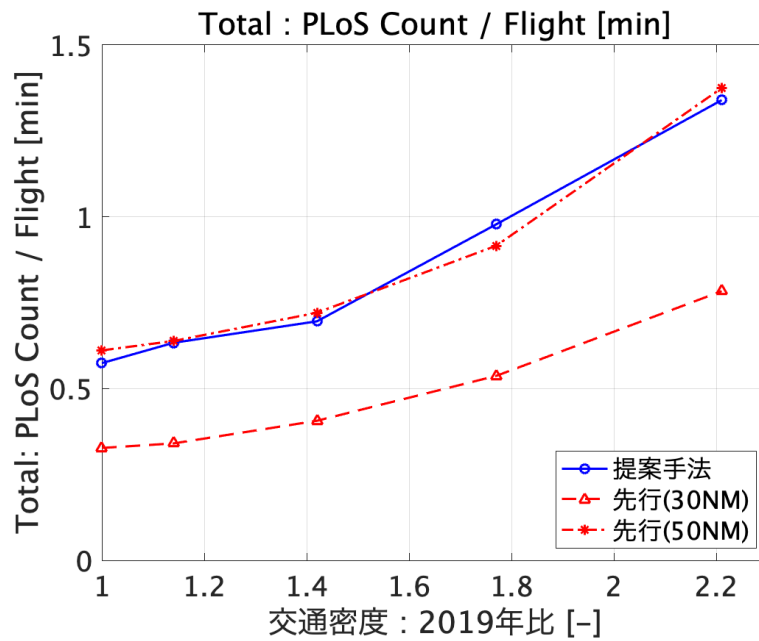


図 47 交通密度の変化に伴う 1 便あたりの PLoS 数の推移  
(青色：提案手法、赤色：先行手法)

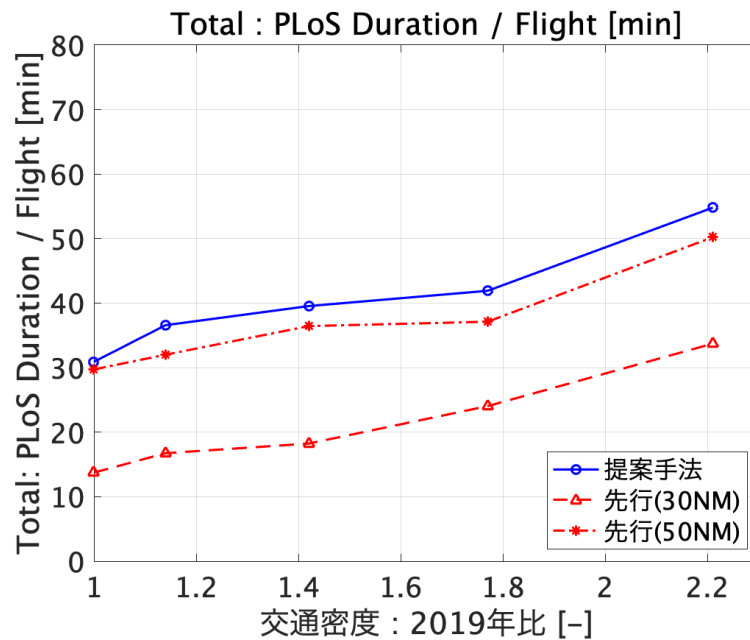


図 48 交通密度の変化に伴う 1 便あたりの PLoS 時間の推移  
(青色：提案手法、赤色：先行手法)



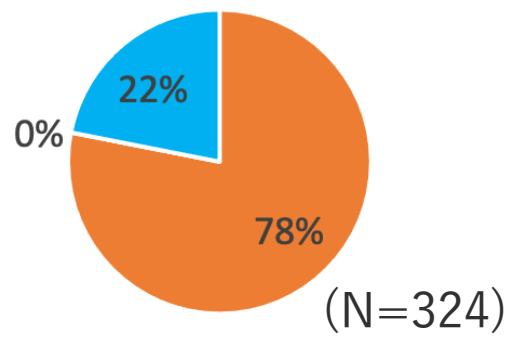
表 14 提案手法の PLoS 検出結果を基準とした、先行手法の検出結果の分類  
(1 便あたりの延べ PLoS 時間[min/flight] : 2019 年想定)

(a) 提案手法 – 先行手法 (検出閾値 : 30NM)

		先行手法	
		+	-
提案手法	T	18	28
	F	1	576

(b) 提案手法 – 先行手法 (検出閾値 : 50NM)

		先行手法	
		+	-
提案手法	T	34	12
	F	8	569



■ 30NM / 30NM ■ 50NM / 50NM ■ 10分\* / 50NM\*\*

図 49 シミュレーション対象便において適用されたと推定される管制間隔

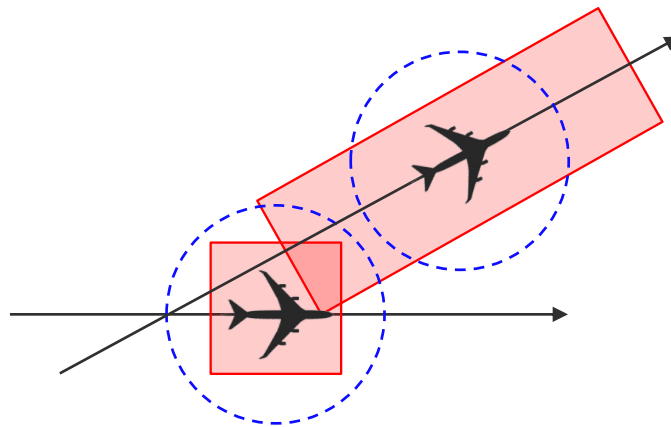


図 50 先行手法で PLoS が過小評価される状況の例（先行手法：30NM、50NM）

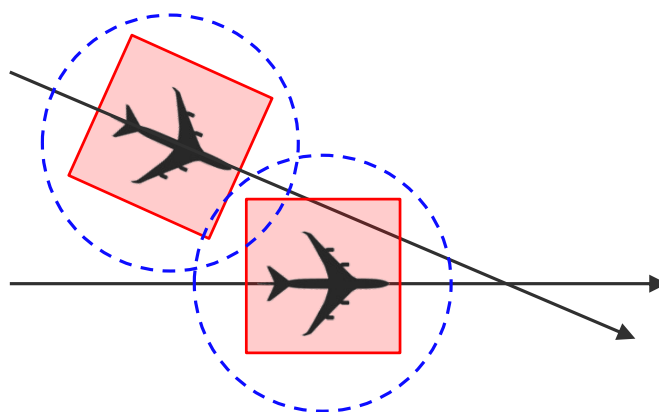


図 51 先行手法で PLoS が誤判定される状況の例（先行手法：50NM）

## 5.6. 交通密度の変化に伴う空域指標の変化

### 5.6.1. PLoS 関連機の飛行方位角の差による分類

第 4 章における関連機推定アルゴリズムの提案手法より、当該機と周辺交通との飛行方位の差に応じて、異なる方法で縦間隔及び横間隔が算出される。管制業務処理規定においては、2 機の飛行方位の差が 0-45 度の場合を同方向、45-135 度の場合を交差方向、135-180 度の場合を対面方向として定義されている（図 52）。そこで、PLoS の要因となる周辺交通として出力された便について飛行方位別に分類を行った。内訳を表 15 に示す。その結果、いずれの交通密度のシナリオにおいても 95%以上の PLoS は同方向（2 機の飛行方位の差が 0-45 度）に飛行する周辺交通により生じる傾向にあることが分かった。これは、洋上管制空域を飛行する便の時刻特性及び経路の方向別特性に依存している。

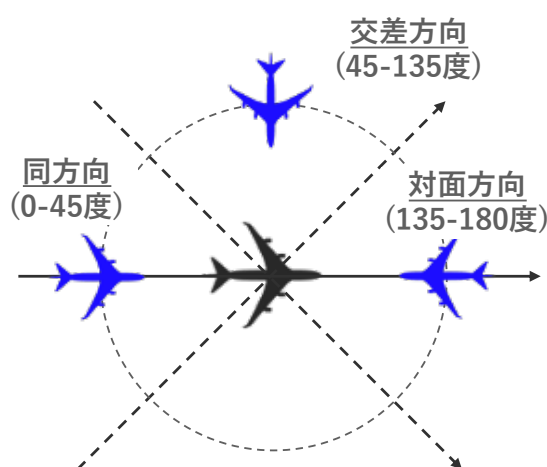


図 52 飛行方位角の差による周辺交通の分類

先ず、時刻特性として東行きと西行きの便で交通量のピークが異なっていることが挙げられる。国際線では利用者にとっての利便性が高い時間に目的地の空港に到着するように時刻設定が行われるため、1 日の中でも飛行便数が偏在している。2019 年を想定したシミュレーションにおける、1 日の中での福岡 FIR 洋上管制空域内を飛行する便数の時系列変化(UTC)を図 53 に示す。以上から、1 日の中でも飛行便数が偏在しておりかつ東行きと西行きの便で交通量のピークが異なっていることが確認された。また、交通密度を変化させたシミュレーションにおける、福岡 FIR 洋上管制空域内を飛行する便数の時系列変化(UTC)を図 54 に示す。入域間隔の時間圧縮をおこなっているため、ピークの時刻や長さは変化しているものの、東行きと西行きの便で交通量のピークが異なる時刻特性は変わらず現れていることが確認された。

次に、経路の方向別特性として東行きと西行きの便で選択される経路が異なっていることが挙げられる。年間を通じて日本周辺では西から東に向かってジェット気流が吹いている。従って、アジアから北米方面へと飛行する東行き便ではジェット気流を追い風の影響を受けられるような経路、北米からアジアへと飛行する西行き便ではジェット気流

の向かい風の影響をなるべく軽減するような経路を選定する傾向にある。なお、ジェット気流の風速、風の軸の位置には季節差や日毎の差があるため、方位別特性の影響の度合いは日によって異なる。2019 年を想定したシミュレーションにおける東西方向別の飛行経路を図 55 に示す。本シミュレーションの対象日はジェット気流の軸が北緯 30 度付近となっていた。そのため、東行き便では最短経路となる NOPAC 経路のほか、目的地に応じて CENPAC (Central Pacific) 空域における北緯 30 度から 50 度付近と幅広く最適経路が選択される傾向にあった。一方で、西行き便については東行きと同様に最短経路となる NOPAC 経路のほか、ジェット気流の向かい風の影響を軽減するべく CENPAC 空域の北寄りである北緯 40 度から 50 度付近が最適経路として選択されるケースが多く見受けられた。また NOPAC 経路について、ほとんどの便は飛行方向が一方に規定された経路を飛行するため、PLoS の要因となる周辺交通は同方向に飛行する便となる。

以上のことから本シミュレーションの対象日について、NOPAC 経路並びに CENPAC 空域の北緯 40 度以南の経路は洋上管制空域を飛行する便の時刻特性及び経路の方向別特性により、CENPAC 空域の北緯 40 度から 50 度付近の経路は洋上管制空域を飛行する便の時刻特性により、PLoS のほとんどが同方向に飛行する周辺交通に起因する。

表 15 PLoS の要因となる周辺交通の内訳

(a) 東行き（アジア→北米方面）

東行き	交通密度（2019 年比）				
	1.00 (2019 年)	1.14 (2025 年)	1.41 (2030 年)	1.77 (2035 年)	2.21 (2040 年)
同方向 (0-45 度)	98.22 %	99.23 %	98.17 %	98.45 %	98.32 %
交差方向 (45-135 度)	0.24 %	0.01 %	0.09 %	0.17 %	0.13 %
対面方向 (135-180 度)	1.54 %	0.76 %	1.74 %	1.38 %	1.54 %
Total [min]	9248	10605	17483	31192	51862

(b) 西行き（北米→アジア方面）

西行き	交通密度（2019 年比）				
	1.00 (2019 年)	1.14 (2025 年)	1.41 (2030 年)	1.77 (2035 年)	2.21 (2040 年)
同方向 (0-45 度)	97.86 %	99.16 %	96.85 %	96.08 %	96.38 %
交差方向 (45-135 度)	0.02 %	0.05 %	0.30 %	0.40 %	0.36 %
対面方向 (135-180 度)	2.12 %	0.79 %	2.85 %	3.53 %	3.26 %
Total [min]	8877	13750	16281	17354	33527

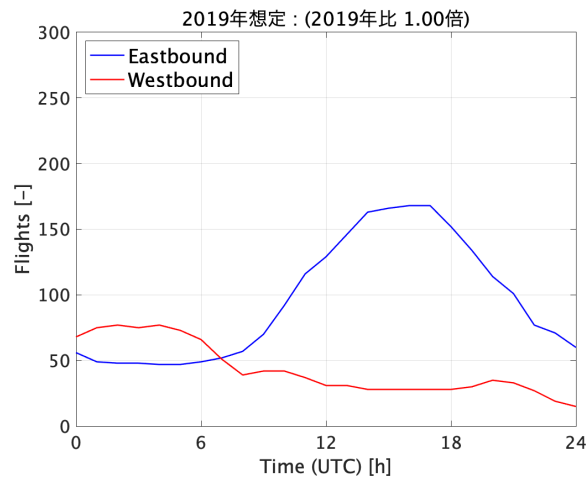
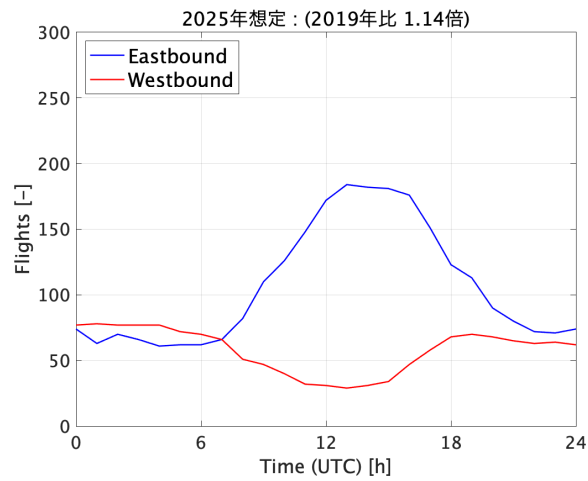
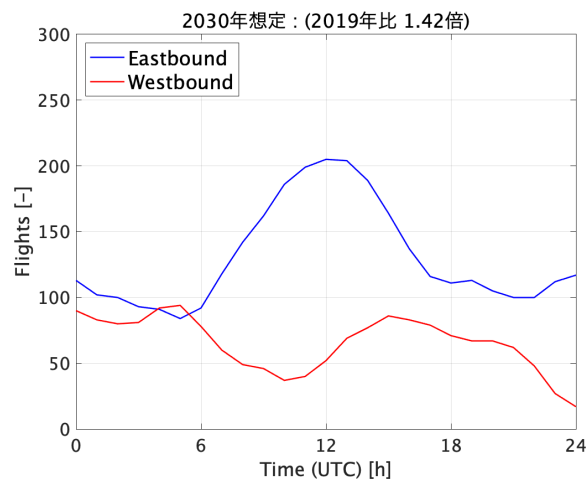


図 53 福岡 FIR 洋上管制空域内を飛行する便数の時系列変化 (2019 年想定)

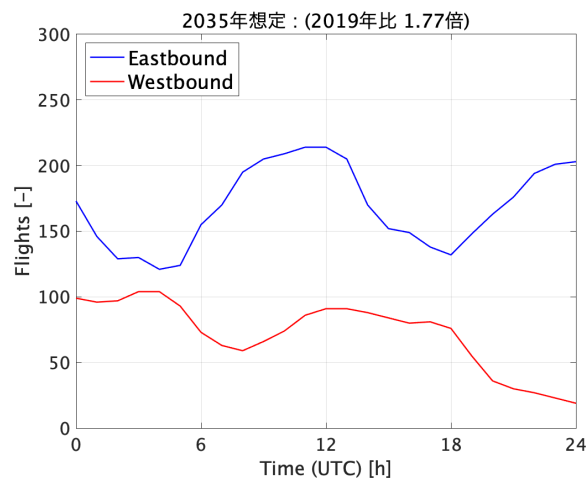


(a) 2025 年想定

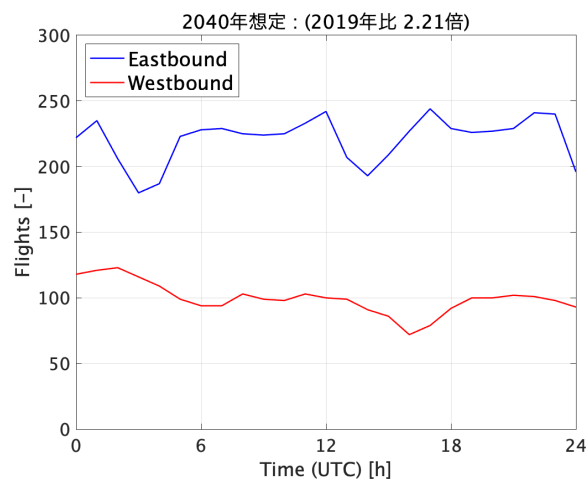


(b) 2030 年想定

図 54 福岡 FIR 洋上管制空域内を飛行する便数の時系列変化



(c) 2035 年想定



(d) 2040 年想定

図 54 福岡 FIR 洋上管制空域内を飛行する便数の時系列変化

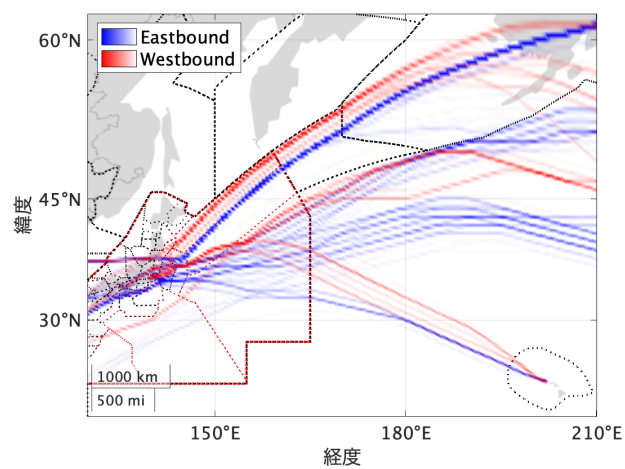


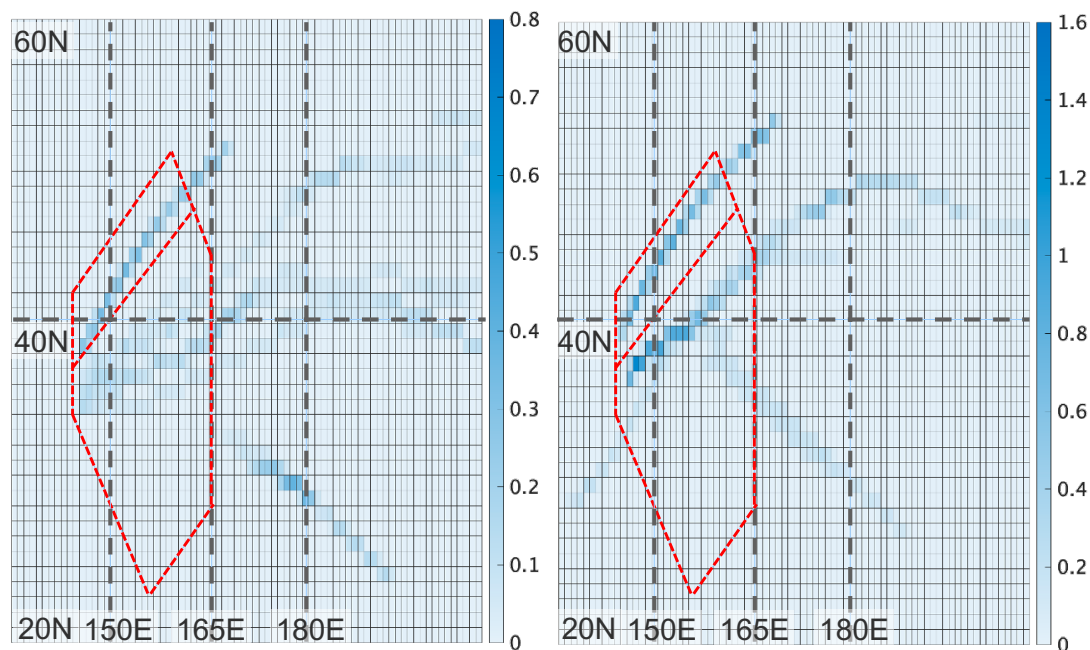
図 55 東西方向別の飛行経路 (2019 年想定)

### 5.6.2. PLoS の発生場所（ホットスポット）

空域設計への PLoS 検出手法の活用として、PLoS ホットスポット検出が挙げられる。空域設計を行うにあたり、交通密度が増加したときの各地点における PLoS の発生数の変化を把握することが必要となる。そこで、本項では以下の手順に従って、交通密度増加シナリオ毎の PLoS ホットスポットの検出を行なった。

1. 緯度方向 1 度×経度方向 1 度のメッシュを作成
2. PLoS として判定された時刻における当該機の位置を記録し、メッシュ毎に要素数をカウントする
3. 各メッシュの要素数を 1 便あたりの PLoS 時間に換算する（要素数/60/シナリオ内の飛行便数）

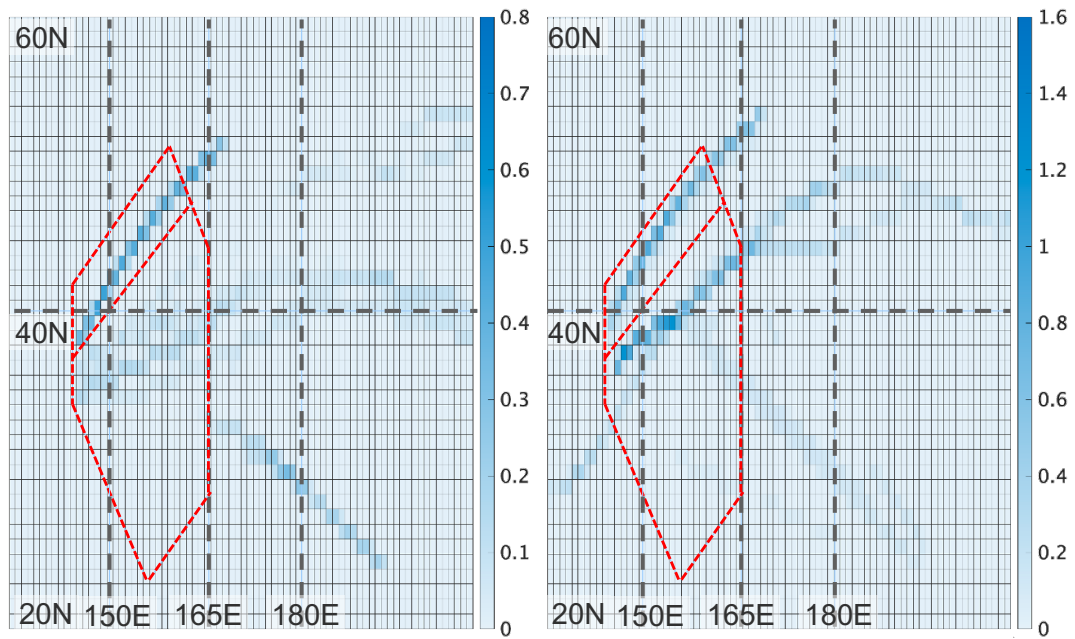
各メッシュに記録された値は、当該領域内における 1 便あたりの PLoS 時間となり、メッシュに記録された値の総和は図 42 の値と一致する。各交通密度増加シナリオにおける地点ごとの 1 便あたりの PLoS 時間の分布を図 56 に示す。なお、表示領域は東経 135 度から西経 150 度の範囲に限定しており、赤色点線の領域は福岡 FIR 洋上管制空域を示す。以上より、交通密度が増加するとアジアから北米方面へと飛行する東行きでは飛行経路に沿って満遍なく PLoS が増加するとの結果が得られた。一方で北米からアジアへと飛行する西行きについて、交通密度が 2019 年比 1.77 倍よりも小さいシナリオでは、シナリオごとに変動はあるものの PLoS が東経 155 度付近の合流地点以西に集中する傾向にあるとの結果が得られた。また、2019 年比 2.21 倍のシナリオにおける PLoS は東経 155 度付近以西に集中する傾向に加え、飛行経路に沿っても満遍なく増える傾向にあるとの結果が得られた。



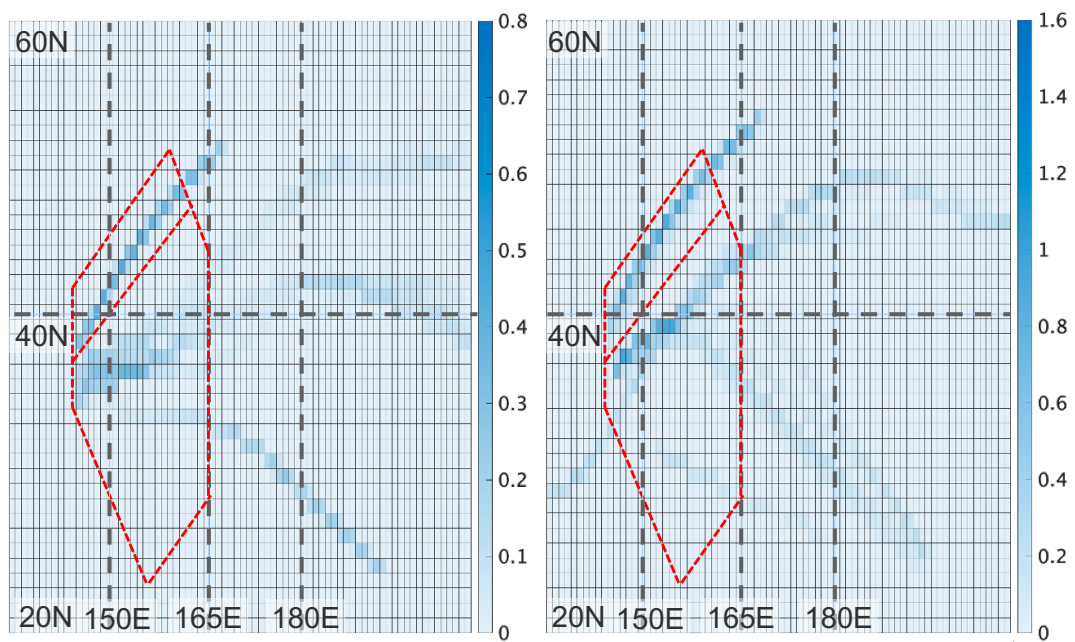
(a) 2019 年実績：1.00 倍（左：東行き、右：西行き）

図 56 1 便あたりの PLoS 時間[min/flight]の分布



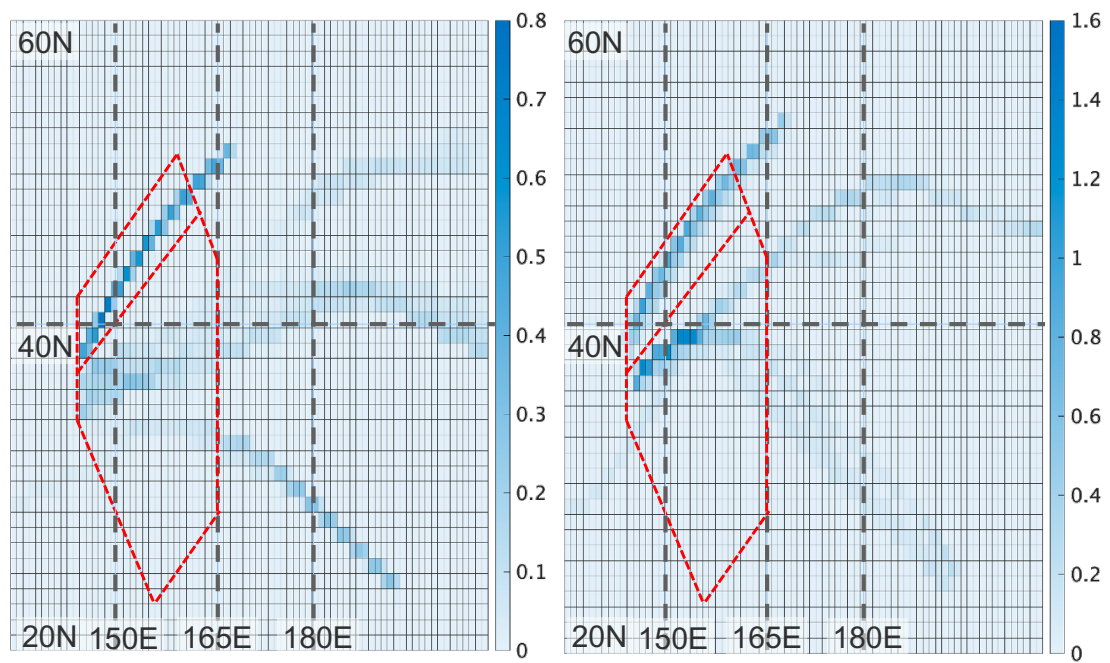


(b) 2025 年想定 : 1.14 倍 (左 : 東行き、右 : 西行き)

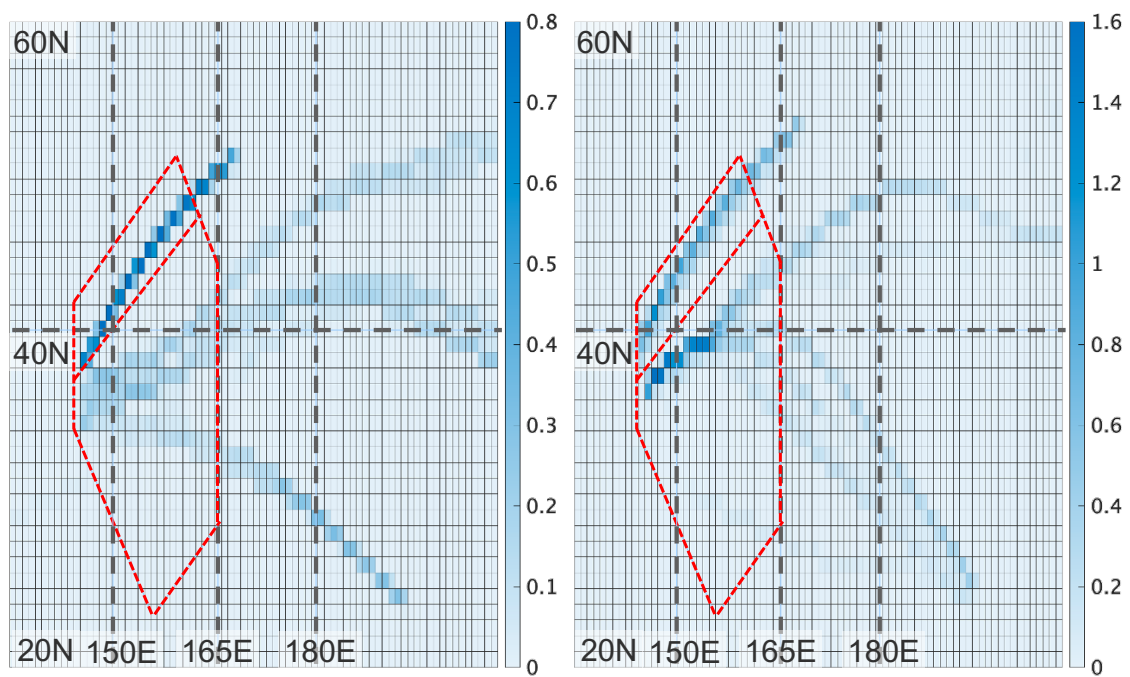


(c) 2030 年想定 : 1.42 倍 (左 : 東行き、右 : 西行き)

図 56 1 便あたりの PLoS 時間[min/flight]の分布



(d) 2035 年想定 : 1.77 倍 (左 : 東行き、右 : 西行き)



(e) 2040 年想定 : 2.21 倍 (左 : 東行き、右 : 西行き)

図 56 1 便あたりの PLoS 時間[min/flight]の分布

### 5.6.3. PLoS の増加メカニズムと経路設計

本項では、5.6.1 及び 5.6.2 で得られた交通密度の変化に伴う PLoS の増加メカニズムについて考察を行う。前項までに、東行き・西行き問わず 1 便あたりの PLoS 数は交通密度に比例することが分かった。1 便あたりの PLoS 時間は、北米発アジア方面の西行きの便では交通密度が 1.14 倍付近を境に上昇が緩やかになる一方、アジア発北米方面の東行きの便では交通密度の増加に伴い大きな値を取る傾向にあることが分かった。更に、PLoS 関連機の飛行方位角の差による分類より、いずれの交通密度のシナリオにおいても PLoS の 95% 以上が同方向に飛行する周辺交通に起因するとの結果が得られた。また、図 47 の 1 便あたりの PLoS 時間の分布より、交通密度が増加するとアジアから北米方面へと飛行する東行きでは飛行経路に沿って満遍なく PLoS が増加する。一方で北米からアジアへと飛行する西行きについて、交通密度が 2019 年比 1.77 倍よりも小さいシナリオでは NOPAC 経路で多く PLoS が発生するほか、PLoS が東経 155 度付近の合流地点以西に集中する傾向にある。また、交通密度が 2019 年比 2.21 倍のシナリオでは同様の傾向に加えて、飛行経路に沿って満遍なく増える傾向が得られた。

PLoS の増加について上記の傾向が得られた要因として、福岡 FIR 洋上管制空域周辺における経路の特性が考えられる。シミュレーション対象日における経路は、図 57 の通り模式化される。

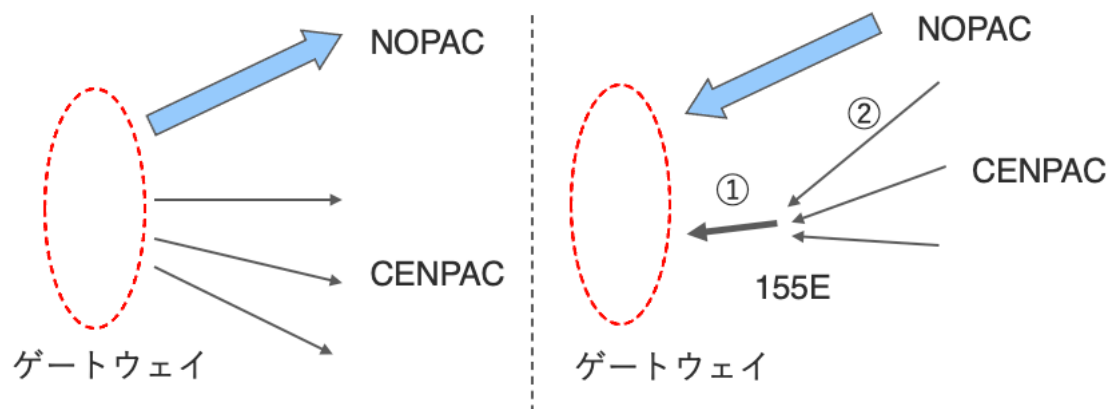


図 57 シミュレーション対象日における経路の模式図

（左：アジア発北米方面…東行き、右：北米発アジア方面…西行き）

東行きの経路では、NOPAC 経路と共に CENPAC における経路が選択される。NOPAC 経路について、福岡 FIR 洋上管制空域への入域間隔を時間圧縮することで交通密度を増加させると、航空機同士の間隔が狭くなるため PLoS 数及び PLoS 時間は増加する。また、CENPAC における経路では、日本から東経 180 度付近に近づくにつれて経路が広がるため、出発空港と目的空港の組み合わせによって経路に幅がある。また、洋上管制空域を飛行する便の時刻特性及び経路の方向別特性により PLoS は主に同方向に飛行する周辺交通により

生じ、交通密度の増加に伴い飛行経路に沿って満遍なく PLoS が増加するとの結果が得られている。従って 2019 年比 2.21 倍の交通密度における東行きについては、先行機または後続機との間隔が管制間隔を下回る便は増加する一方で、全ての便で管制間隔を下回る状態までは至っていないと推定される。以上のことから、2019 年比 2.21 倍の時点では便益は悪化するものの空域は完全には飽和していないと考えられ、PLoS 数及び PLoS 時間は継続して増加していると考えられる。

西行きの経路についても同様に NOPAC 経路と共に CENPAC における経路が選択される。NOPAC 経路を飛行する便については、東行きと同様に交通密度の増加に伴い飛行経路に沿って満遍なく PLoS が増加するとの結果が得られている。一方で、CENPAC における経路では、日本に近づくにつれて経路は GW に収束するほか、東経 155 度付近でハワイ方面からの交通流と北米各地からの交通流の計 3 本の交通流が合流する。従って、東経 155 度付近からゲートウェイに至るまでの区間（図 57 ①）がボトルネックとなり、CENPAC を飛行する西行き便における PLoS 時間における同区間が占める割合が大きくなる。CENPAC を飛行する西行き便における PLoS 時間は、同区間における PLoS 時間の大きさが支配的となることから同区間はほとんど飽和していると考えられ、交通密度が 2019 年比 1.77 倍よりも小さいシナリオでは PLoS 数及び PLoS 時間の増加は NOPAC 経路及び出発空港から東経 155 度付近に到達する以前の区間（図 57 ②）に限定される。以上の要因から、図 42 で示された 1 便あたりの PLoS 時間の増加が緩やかとなる傾向が生じると考えられる。

一方で 2019 年比 2.21 倍のシナリオにおける西行き便では、同様の傾向に加えて、飛行経路に沿って満遍なく増える傾向が確認された。これは、2019 年比 1.77 倍よりも小さいシナリオと同様に CENPAC を飛行する西行き便における PLoS 時間について東経 155 度付近からゲートウェイに至るまでの区間（図 57 ①）が占める割合が大きいに加え、NOPAC 経路及び出発空港から東経 155 度付近に到達する以前の区間（図 57 ②）においても、一つあたりの経路に飛行する便数が増加した結果航空機同士の間隔が狭くなり、図 47 及び図 48 で示された通り PLoS 数及び PLoS 時間が増加したと考えられる。

以上のことから現状の管制方式や経路の設定方式を前提として洋上管制空域のフリールーティングを行い交通密度が増加した場合、特定の経路において飛行便数が集中する可能性が示唆された。従って、フリールーティング化の検討とともに、ゲートウェイの数を増やすなど、ゲートウェイの最適配置についての検討も同時に行うことが有効であると考えられる。1 つの経路あたりに飛行する便数を分散させることで、最適軌道との乖離が生じてしまう。一方で、PLoS の減少に伴う管制ワークロードの軽減や運航効率の向上に伴うメリットが最適軌道との乖離による運航効率の悪化を上回るならば、本シミュレーションにおける東経 155 度付近からゲートウェイに至るまでの区間（図 57 ①）のようなボトルネックによる運航効率の悪化を軽減することができる可能性があると考えられる。

## 第6章 結論

本研究ではフリールーティングの実現に向け運航データの分析を通じて現状分析を行うとともに、太平洋上空におけるフリールーティングの実現に向け運航データの分析を通じて現状分析を行うとともに、実際の管制運用に即した空域指標の算出方法の確立及び精度向上を図ることを目的として、PLoS 検出アルゴリズムの提案を行なった。

福岡 FIR の洋上管制空域における上昇リクエストの承認率を評価指標とした運航効率の現状評価を行った。東京出発便並びに上空通過機において、共に 30%程度の上昇リクエストが承認されておらず、運航効率の悪化が生じている現状が確認され、周辺交通の特性によりリクエスト承認率が大きく変化することが確認された。また、上昇リクエストに対して周辺交通として影響を及ぼす関連機の推定を行う新たな推定手法を考案し、PLoS 評価へと応用を行なった。洋上管制有資格者の結果と比較することで精度評価を実施し、従来手法よりも高い精度であることが確認された。PLoS 評価手法の適用例として、高密度交通流のシミュレーションを実施した。提案手法は実際の管制手順に近い方法で PLoS の検出を行うことから、既存手法における PLoS の過小評価・誤判定の減少に繋がる。また、提案手法を適用することで PLoS ホットスポットの把握が可能となり、実運用に即した方法で算出された空域指標に基づく空域設計が可能となった。

本研究の課題として、シミュレーションを行った対象が 2019 年の 3 月に限定されていることが挙げられる。季節差などにより風の状況が異なれば、本研究のシミュレーションで得られた軌道とは異なる経路を飛行し、他の季節では異なる傾向が得られる可能性がある。従ってフリールーティングの実運用への導入に向けて、風の選択方法<sup>[43]</sup>などシナリオ作成のバリエーションを増やすことや、PLoS のみならず管制官のワークロードも踏まえた評価を行うなど、より多角的な便益評価を行うことが本研究の今後の課題となる。

## License Agreement

この論文は、EUROCONTROL が東京都立大学に提供している Base of Aircraft Data (BADA) Family Release 4 を使用して作成されたか、その要素を含んでいます。EUROCONTROL は BADA に関連する著作権を含むすべての権利を有しています。EUROCONTROL は、BADA に起因する、または BADA に関連する、いかなる直接的、間接的、偶発的、または結果的損害に対しても責任を負わないものとします。本論文に関連して発生した直接的、間接的、偶発的または結果的な損害について、EUROCONTROL は責任を負わないものとします。BADA の使用に関しても同様です。

## 付録

関連機推定アルゴリズムの精度評価にあたり、推定アルゴリズムの推定結果と洋上管制有資格者の推定結果との比較を行い、表 9 に示す A-F の 6 パターンに分類を行った。以下にはそれぞれの手法について比較を行い、分類を行った結果を示す。

### A 各手法の推定結果と洋上管制有資格者による推定結果との比較

#### (a) Cylinder\_1 アルゴリズム（水平方向検出閾値：50NM）

	A	B	C	D	E	F	total
Num.	48	47	19	3	3	57	177
%	27.1	26.6	10.7	1.7	1.7	32.2	100

#### (b) Cylinder\_2 アルゴリズム（水平方向検出閾値：30NM）

	A	B	C	D	E	F	total
Num.	23	48	19	2	0	85	177
%	13.0	27.1	10.7	1.1	0.0	48.0	100

#### (c) Box\_1 アルゴリズム（縦/横検出閾値：115NM/30NM）

	A	B	C	D	E	F	total
Num.	78	40	19	10	6	24	177
%	44.1	22.6	10.7	5.6	3.4	13.6	100

#### (d) Box\_2 アルゴリズム（縦/横検出閾値：45NM/30NM）

	A	B	C	D	E	F	total
Num.	36	48	19	2	3	69	177
%	20.3	27.1	10.7	1.1	1.7	39	100

#### (e) 提案手法の推定結果の比較

	A	B	C	D	E	F	total
Num.	86	45	19	5	8	14	177
%	48.6	25.4	10.7	2.8	4.5	7.9	100

## 参考文献

- [1] 国土交通省航空局, “各期の国際定期航空便の主な動向 2020 年夏期スケジュール”,  
<https://www.mlit.go.jp/koku/content/001337959.pdf> , 最終閲覧日 : 2023 年 1 月 20 日
- [2] 国土交通省航空局, “各期の国際定期航空便の主な動向 2022 年冬期スケジュール”,  
<https://www.mlit.go.jp/koku/content/001519918.pdf> , 最終閲覧日 : 2023 年 1 月 20 日
- [3] 国土交通省航空局, “各期の国際定期航空便の主な動向 2019 年冬期スケジュール”,  
<https://www.mlit.go.jp/koku/content/001315585.pdf> , 最終閲覧日 : 2023 年 1 月 20 日
- [4] IATA, “Air Passenger Numbers to Recover in 2024”, IATA Press Release No: 10, 2022,  
<https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/> ,  
最終閲覧日 : 2023 年 1 月 20 日
- [5] 日本航空機開発協会, “民間航空機に関する市場予測 2020-2040”, 2021 年 3 月
- [6] 日本航空機開発協会, “民間航空機に関する市場予測 2022-2041”, 2022 年 3 月
- [7] 日本航空宇宙学会, “航空宇宙工学便覧”, 丸善出版, 2005, pp.772-774
- [8] ICAO, “Procedures for Navigation Services - Air Traffic Management”, ICAO Doc 4444, 2016.
- [9] EUROCONTROL, “Free Route Airspace Concept”,  
<https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace> ,  
最終閲覧日 : 2023 年 1 月 20 日
- [10] EUROCONTROL, “Free Route Airspace Concept”,  
<https://www.eurocontrol.int/publication/free-route-airspace-fra-implementation-projection-charts>,  
最終閲覧日 : 2023 年 2 月 17 日
- [11] Mark Brown, Hiroko Hirabayashi, Keumjin Lee, “An Analysis of Flight Routes and Considerations for Free Route Airspace Implementation in Fukuoka FIR”, APISAT2021, November 2021.
- [12] Mark Brown, Hiroko Hirabayashi, “Free Route Airspace Design for Fukuoka FIR: A Case Study for Overflight Traffic between Northeast Asia and North America NOPAC Route System Redesign”, APISAT2022, October 2022.
- [13] Hiroko Hirabayashi, Mark Brown, Navinda Kithmal Wickramasinghe, Harutaka Suizu, Noboru Takeichi, “Effect of step-climb operation on long-haul flight over the Pacific Ocean”, APISAT2022, October 2022.
- [14] 国土交通省航空局, “第 5 管制業務処理規定 (R4.2.24 適用)”, 国空制第 412 号, 2022 年 2 月
- [15] 気象業務支援センター, “全球数値予報モデル GPV”,  
<http://www.jmbssc.or.jp/jp/online/file/f-online10100.html#gl> ,  
最終閲覧日 : 2023 年 1 月 21 日



- [16] 京都大学生存圏研究所, “生存圏データベース(GSM)”
- [17] EUROCONTROL Experimental Center, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) REVISION 3.15”, EEC Technical/Scientific Report No. 19/03/18-45, 2019.
- [18] EUROCONTROL Experimental Center, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Family 4”, EEC Technical/Scientific Report No.12/11/22-58, Version 1.3, 2016.
- [19] 国土交通省航空局, “航空路監視レーダー(ARSR)等の配置及び覆域図”  
<https://www.mlit.go.jp/koku/content/001358862.pdf> , 最終閲覧日：2023 年 1 月 21 日
- [20] 国土交通省航空局, “AIS JAPAN (航空路誌 2022/12/29) ”, 2022 年 12 月
- [21] 国土交通省航空局, “第 5 管制業務処理規定 (H30.3.29 適用) ”, 国空制第 629 号, 2018 年 3 月
- [22] ICAO, “Global Operational Data Link Document”, ICAO Doc 10037, 2013.
- [23] ICAO, “PBCS Operational Authorization Guide”, Operational Data Link Specific Working Group of the Communications Panel, January 2018.
- [24] 平林博子, ブラウン・マーク, 武市昇, “北太平洋上空のフリールーティングの運用可能性の検討”, 第 22 回電子航法研究所研究発表会, 東京, 2022 年 6 月
- [25] 平林博子, 瀬ノ口敦, 白川昌之, “中期コンフリクト検出技術の必要性と課題”, 第 16 回電子航法研究所研究発表会, 東京, 2016 年 6 月
- [26] Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, “ERATO Electronic Environment”, January 2022,  
<https://www.ecologie.gouv.fr/en/node/2176> , 最終閲覧日：2023 年 1 月 22 日
- [27] Fedja Netjasov, ”Framework for airspace planning and design based on conflict risk assessment Part 2: Conflict risk assessment model for airspace tactical planning”,  
 Transportation Research Part C, Vol. 24, pp.213-226, October 2012.
- [28] Fedja Netjasov, Dušan Crnogorac, Goran Pavlović, ”Potential safety occurrences as indicators of air traffic management safety performance: A network based simulation model”,  
 Transportation Research Part C, Vol. 102, pp.490–508, May 2019.
- [29] 長坂直彦(海上保安庁), “回転楕円体上の測地線及び航程線の算出について”, 海洋情報部研究報告第 50 号, pp.37–57, 2013 年 3 月.
- [30] 国土地理院, “距離と方位角の計算”,  
<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html>,  
 最終閲覧日：2023 年 1 月 22 日
- [31] 平林博子, ブラウン・マーク, 福島幸子, “洋上管制運用効率化のための経路設計に関する考察”, 第 17 回電子航法研究所研究発表会, 東京, 2017 年 6 月
- [32] ブラウン・マーク, 平林博子, ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル, 虎谷大地, “グラフ探索理論に基づいた軌道最適化について”, 第 19 回電子航法研究所研究発表会, 東京, 2019 年 6 月

- [33] César Antonio, Nava Gaxiola, Cristina Barrado, Pablo Royo, Enric Pastor, “Assessment of the North European free route airspace deployment”, Journal of Air Transport Management, Volume 73, pp.113-119, October 2018.
- [34] Hiroko Hirabayashi, Mark Brown, Noboru Takeichi, “Feasibility Study of Free routing Airspace Operation over the North Pacific Airspace”, ATM seminar 2021, September 2019.
- [35] 東福寺則保, “航空路管制ダイナミック・シミュレーションのための実験シナリオ作成 (その 1) ”, 電子航法研究所報告第 63 号, pp.1-12, 1989 年 12 月.
- [36] 東福寺則保, “航空管制ダイナミック・シミュレーションと交通容量の推定”, 航海 103 (0), pp.48-55, 1990 年.
- [37] Bill Robertson, “Fuel Conservation Strategies, Cost Index Explained”, Boeing Aero Quarterly Vol.02, No. 7, 2007.
- [38] AIRBUS, “getting to grips with the cost index ”, Flight Operational Support & Line Assistance, pp.10-13, May 1998.
- [39] Florent Vergnes, Judicael Bedouet, Xavier Olive, Junzi Sun, “Environmental Impact Optimization of Flight Plans in a Fixed and Free Route network”, ICRAT2022, June 2022.
- [40] Stanley Förster, Judith Rosenow, Martin Lindner, “A TOOLCHAIN FOR OPTIMIZING TRAJECTORIES UNDER REAL WEATHERCONDITIONS AND REALISTIC FLIGHT PERFORMANCE”, Greener Aviation 2016, October 2016.
- [41] Olga Rodionova, Mohammed Sbihi, “North Atlantic Aircraft Trajectory Optimization”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 15(5):2202-2212, October 2014.
- [42] Transoft Solutions Inc., “AirTOp (RULE-BASED AIRPORT AND AIRSPACE FAST-TIME SIMULATION)”, <https://www.transoftsolutions.com/airport-airspace-fast-time-simulation/>, 最終閲覧日： 2023 年 1 月 24 日
- [43] 平林博子, ブラウン・マーク, 武市昇, “洋上航空交通運用評価のための経路データを用いた代表風選択”, 第 59 回飛行機シンポジウム, オンライン, 2021 年 11 月

## 対外発表

- [1] 水津晴隆, 平林博子, ブラウン・マーク, 武市昇, “洋上経路を飛行する航空機の上昇位置の分析”, 第 59 回飛行機シンポジウム, オンライン, 2021 年 11 月
- [2] 水津晴隆, 平林博子, ブラウン・マーク, 武市昇, “洋上経路を飛行する航空機の上昇リクエストに対する周辺交通の影響”, 第 60 回飛行機シンポジウム, 新潟, 2022 年 10 月

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である武市昇教授にご多忙の中、研究方針や研究内容についてご指導いただいたこと深く感謝申し上げます。マーク・ブラウン様、平林博子様をはじめとする電子航法研究所の皆様には、日々の研究活動におけるディスカッションや些細な疑問に対しても真摯に向き合ってくださいましたこと、深く御礼申し上げます。洋上管制に関するデータを提供してくださった、国土交通省航空局の関係者皆様に感謝いたします。また、学会活動を通じて一緒に精力的に取り組んだ後輩方にも御礼申し上げます。頑張っている後輩方がいたからこそ、自らが“真っ直ぐ立とう”と努めることができました。最後に、両親をはじめとするこれまで自分を支えてくださった方々に御礼申し上げます。