

令和4年度（第22回）

電子航法研究所研究発表会

# 講演概要

令和4年6月



国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

電子航法研究所



# 目 次

※印は講演者

[特別講演]

日本の空域における次世代エアモビリティのための運用環境前提の検討	航空交通管理領域 General Atomics Aeronautical Systems, Inc.	※ 虎 谷 大 地 小 手 川 達 也	1
1. 北太平洋上空のフリールーティング運用可能性の検討	航空交通管理領域 東京都立大学	※ 平 林 博 子 ブラウン マーク 武 市 昇	5
2. 気象予報データの利用者選択経路の導出に与える影響	航空交通管理領域	※ 中 村 陽 一 ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル 瀬 之 口 敦	11
3. 航空機内データ通信および電波高度計の電磁環境評価に関する研究開発	監視通信領域	※ ニ ッ 森 俊 一 森 岡 和 行 河 村 暁 子 米 本 成 人	17
4. SWIMによる軌道ベース運用に関する実証実験	監視通信領域 航空交通管理領域	※ 呂 暁 東 森 岡 和 行 金 田 直 樹 古 賀 禎 ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル 平 林 博 子 ブラウン マーク	21
5. ノルウェー・オスロにおけるQZSSから放送されたDFMC SBASの受信実験	航法システム領域	※ 高 橋 透 齋 藤 享 北 村 光 教 坂 井 丈 泰	29
6. RNP to xLsの経路設計と飛行実証	航法システム領域 航空交通管理領域	※ 齊 藤 真 二 福 島 荘 之 介 森 亮 太	34

ポスターセッション

39

令和4年度 新規研究課題

51



## [特別講演] 日本の空域における次世代エアモビリティのための運用環境前提の検討

航空交通管理領域 ※虎谷 大地

General Atomics Aeronautical Systems, Inc. 小手川 達也

### 1 はじめに

従来、航空機というと、操縦士が搭乗して操縦する旅客機やヘリコプタが主であった。しかしながら近年、無人航空機 (small unmanned aircraft systems: sUAS, ドローンとも呼ばれる) や、無操縦者航空機 (remotely piloted aircraft systems: RPAS) といった新しいタイプの航空機が登場しており、既に一部が実用化されている。また、空飛ぶクルマ (urban air mobility: UAM, electric vertical take-off and landing: eVTOL 等とも呼ばれる) の実現に向けた研究開発が活発に進められており、今後も新しいタイプの航空機が増えると予想されている。これらの新たな航空機は次世代エアモビリティとも呼ばれており、以下の特徴を有することがある点において、従来の航空機と異なっている。

- 操縦士が機体に搭乗しない
- 比較的低高度を飛行することがある
- 装備品が異なる
- その他、本稿の議論とは関連が薄いですが、電動のものがある、法律上の区分が異なる等の違いもある

従来の航空交通システムでは上記のような航空機は想定されていなかったため、既存の航空機の運用環境に次世代エアモビリティが混在すると、既存航空機と次世代エアモビリティ間、または次世代エアモビリティどうしの安全が担保できない可能性がある。そこで本稿では、次世代エアモビリティが混在した環境における空の安全、特に空中衝突に関するリスクである空中リスクを緩和することについて考える。特に、空中リスクを議論する上で必要な、運用環境前提 (operational services and environment definition: OSED) を構築することで、次世代エアモビリティと既存航空機が混在する環境の安全を保つことへの貢献を目的とする。

### 2 先行研究

既存航空機との空中リスクについては、特に RPAS において活発に議論されてきた。RPAS は地上からの遠隔操縦であるため、既存航空機では機上の操縦士の目視による見張りによって保たれていた周辺航空機との安全を、どのように担保するかが課題であった。米国の航空無線技術委員会 (Radio Technical Commission for Aeronautics: RTCA) では、操縦士の目視を代替する手段として、Detect and avoid (DAA) システムの標準化が行われてきた [1]。その過程において、DAA システムの性能要件を検討するために、システムが使用される前提条件 (想定される RPAS の飛行のしかた、RPAS が飛行する空域のシステム構成、空域内の他の航空機の交通密度の分布等) として OSED が作成された [2]。RPAS における検討では、作成した OSED を用いることで DAA システムに必要とされる検知範囲等が検討された。しかしながら、この OSED は米国の空域とその交通密度分布を前提としたものであるため、他の地域への RPAS 導入にあたっては対象地域を前提とした OSED を別途作成する必要がある。

同様の検討は sUAS に対しても試みられている。sUAS は次世代エアモビリティの中でも特に低高度を飛行するため、低高度の航空交通の特徴を特定する必要がある。しかしながら、低高度においてはレーダー覆域が狭くなり、またトランスポンダ等の装備品が不十分な航空機が多くなるため、低高度の航空交通を把握するのは容易ではない。そのため利用可能なデータとモデリング技術を組み合わせた、既存航空機と sUAS の接近遭遇モデルの構築方法等が提案されている [3]。

日本においては、筆者らが RPAS 導入に向けて OSED 構築に利用可能なデータの検討を行った [4]。その検討では、計器飛行方式

(instrument flight rules: IFR) で飛行する航空機に関しては、レーダーや統合管制情報処理システムのデータから十分な情報を得ることができたが、有視界飛行方式 (visual flight rules: VFR) で飛行する航空機に関する情報が不十分であった。前述したように、次世代エアモビリティは比較的低高度を飛行することが多く、同じく低高度を飛行する VFR 機と接近遭遇する可能性が高い。そこで本稿では、VFR で飛行する航空機の OSED 構築について検討する。

### 3 課題とアプローチ

先行研究では主に、レーダーデータを用いて交通密度分布を把握していたが、航空管制で主に用いられる二次レーダーのデータを用いた場合、トランスポンダ等の装備状況や覆域によって VFR の交通流を捕捉することが困難であるという問題点がある。そのため RTCA の OSED では、米空軍の一次レーダーのデータを用いることで低高度の交通流データを収集していた。低高度における網羅的な一次レーダーのデータを収集することは容易ではないので、本稿では飛行計画をベースとしたアプローチをとり、VFR で飛行する航空機のおおまかな分布を把握することとする。

また交通密度分布の把握に加えて、航空機の装備品状況も調査する。例えば、周辺を飛行する航空機が放送型自動従属監視 (automatic dependent surveillance-broadcast: ADS-B) , 特に ADS-B out を装備していれば、次世代エアモビリティが ADS-B in を装備することで周囲の航空機を把握することが可能となり、目視の代替の一助とすることができる。しかしながら、次世代エアモビリティが飛行することがある低高度においては、VFR で飛行することが多い一般航空 (ジェネラルアビエーション, 以降「ジェネアビ」と表記) が多く飛行している。ジェネアビは IFR で飛行する航空機に比べると装備品が充実していないことが多く、特に ADS-B の装備率は非常に低いとされている。一方、日本のジェネアビは欧米に比べるとトランスポンダの装備率は非常に高いとされている。そのため、空中衝突警報システム (traffic alert and collision avoidance system: TCAS) を装備し

た機体であれば、トランスポンダを装備した機体の接近を把握することができる。以上のように、空中リスクや目視の代替の観点からは、次世代エアモビリティの周辺を飛行する航空機の装備品も重要である。

交通密度分布と装備品状況をあわせることで、次世代エアモビリティが低高度において、他の航空機とどのように接近遭遇しうるかをモデル化するための前提を構築していく。

### 4 利用データ

VFR の交通密度分布と装備品状況を調べるために、文献 [5] で用いられた VFR 飛行計画を主に用いた。データの収集期間は 2018 年度の 35 日間で、軍用機等の飛行は除いた。諸外国では VFR の飛行計画を網羅的に収集していないことが多いが、日本においては出発地の半径 9km を超える飛行においては、原則として飛行計画を提出する必要がある。

### 5 装備品状況

装備品状況に関しては、日本航空機全集 [6] に記載のある航空機 (2021 年末日時点のデータ) から、大破や展示等により飛行の可能性が低い機体を除いたもののみを調査対象とし、飛行計画の第 10 項 b からトランスポンダと ADS-B の有無を調査した。参照した飛行計画の期間よりも後に登録された機体に関しては、Flightradar24 等の情報を用いて装備品を推定した [7]。

機体数ベースの装備品の状況を表 1 に示す。ここで、「N」は監視機器を搭載していないか使用不能の場合を表しており、「不明」は参照情報から機体が発見できなかった場合 (VFR 飛行計画の期間中に飛行がなかった、飛行計画の提出が必要無い飛行しかなかった等) を表している。表 1 より、N の機体が約 3% 存在するが、これらは全て滑空機であった。一方、全航空機の ADS-B の装備率は 20% 近くとなっているが、IFR で飛行する可能性の高いジェット機の機数が 625 機であり、ADS-B 装備機の大半は VFR で飛行しない機体であると考えられる。なお、表 1 で示した結果は機体数ベースであり、空中リスクの観点からは飛行数ベースの

結果の方が実態に即していることに注意されたい。

飛行数ベースの装備品の状況を表2に示す。この結果はVFR飛行計画から抽出したものであり、データ収集期間のVFRのみの結果となっている。表2より、表1と比べてADS-Bの装備機の割合が大きく下がっており、VFRで飛行する機体のADS-B装備率が非常に低いと考えられる。加えて、モードA、Nの割合も小さくなっており、これらの装備品が不十分な飛行の数は、飛行数ベースで見るとさらに小さくなることが分かった。

## 6 交通密度分布

VFR飛行計画の出発・到着地点、及び計画経路の各地点は、IFRの飛行計画と異なり、地点名と緯度経度によって共有される定義を持っておらず、地点名のテキストのみで記述されている。そのためVFR飛行計画からは、実際の航跡を一意的経路として推定することは容易ではない[8]。そこで本稿では、以下に示す方法で大まかな飛行範囲を推定した。

表1 機体数ベースの装備品の状況  
(全航空機)

	機数	割合 [%]
ADS-B	502	18.9
モードS	757	28.5
モードC	750	28.3
モードA	24	0.9
N	78	2.9
不明	543	20.5
計	2,654	100.0

表2 飛行数ベースの装備品の状況  
(VFRのみ)

	飛行数	割合 [%]
ADS-B	216	0.8
モードS	15,553	58.2
モードC	10,763	40.3
モードA	104	0.4
N	76	0.3
計	26,712	100.0

- i. 出発・到着地点をジオコーディングを用いて緯度経度に変換
- ii. 文献[5]の実際の飛行時間と計画速度から、最大飛行距離 $D_{max}$ を推定
- iii. 図1の方法で最大飛行範囲を推定

ここでジオコーディングとは、地名のようなテキストデータを特定の緯度経度に変換する機能である。本稿では、主に国土地理院のジオコーディングを用いた[9]。また、実際の飛行時間はデータが無い便も多く存在するため、その場合は、実際の飛行時間のデータが存在する便から求めた以下の係数を予定飛行時間に乗ずることで、実際の飛行時間を推定する。

飛行時間係数

$$= \frac{\text{実際の飛行時間の平均}}{\text{予定飛行時間の平均}} \quad (1)$$

なおこの係数は、滑空機、回転翼機、固定翼レシプロ機、固定翼ターボプロップ機、固定翼ジェット機という区分ごとに算出した。図1の方法は、最大飛行範囲を出発・到着地点を焦点とする楕円と仮定しており、出発・到着地点が同一の場合は円となる。実際の飛行は常に計画速度で飛行し続ける訳ではなく、かつ図1の青線のように直線的に飛行し続けるとは限らないため、ここで推定する飛行範囲は広めに見積もった値となる。

図2に、全飛行の最大飛行範囲を重ね合わせた交通密度分布を示す。色が濃い範囲が、最も交通密度が高いことを表す。この密度分布では図3に示したように、緯度経度を0.1度ごとに区切ったグリッドを作成し、図1の方法で推定

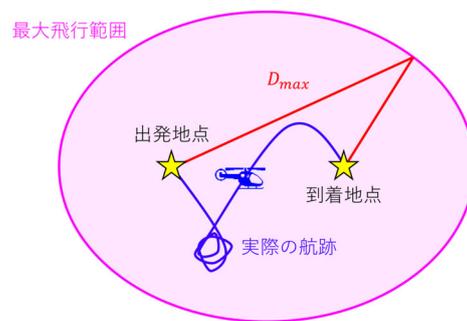


図1 最大飛行範囲の推定

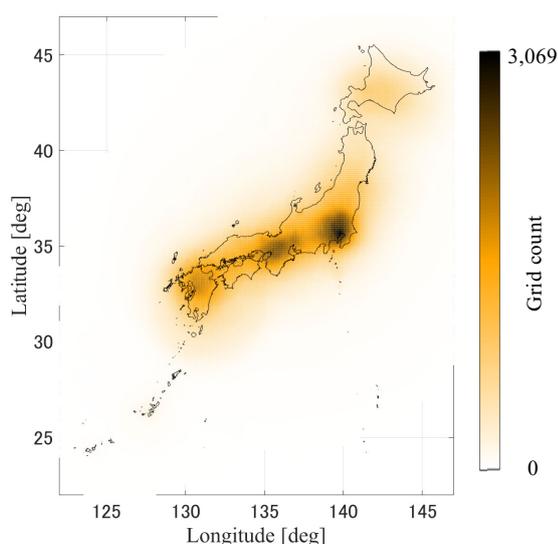


図2 VFRの交通密度分布  
(地図情報は [10] を参照)

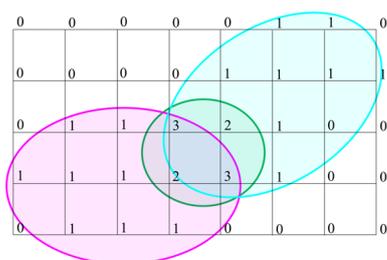


図3 交通密度分布の計算のしかた

した各便の飛行範囲の内側に入るグリッド数をカウントすることで交通密度分布とした。

図2より、東京を中心とした関東地方が最もVFRの交通密度が高く、次いで名古屋から神戸にかけてのエリア、そして九州北部の色が濃くなっている。図2は飛行範囲を広めに見積もった交通密度分布であるが、VFRの飛行範囲をおおまかに捉えることができると考えらる。そのため次世代エアモビリティを導入する際には、色が濃いエリアを飛行するとVFR機と遭遇接近する可能性が高くなることに注意が必要である。

## 7 まとめ

本稿では、次世代エアモビリティ導入に向けたOCEDの作成について検討を行った。VFR飛行計画等の情報を利用して、日本の航空機の装備品状況を調査し、VFR機の交通密度分布を作成した。

今後は作成した装備品状況や交通密度分布を

用いて、想定される次世代エアモビリティごとに空中リスクの算定を行い、必要であれば装備品を検討することで、定量的な空中リスク緩和について議論を行う予定である。

## 謝辞

運航管理データのご提供にご尽力いただきました、航空局運用課、及び航空交通管理センターの関係各位に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] RTCA, Inc. SC-228, “Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Detect and Avoid (DAA) Systems,” RTCA DO-365, 2017.
- [2] RTCA, Inc. SC-203, “Operational Services and Environmental Definition (OSED) for Unmanned Aircraft Systems (UAS),” RTCA DO-320, 2010.
- [3] A. Weinert, N. Underhill, and A. Wicks, “Developing a Low Altitude Manned Encounter Model Using ADS-B Observations,” Proc. IEEE Aerospace Conference, 2019.
- [4] 虎谷大地, 小手川達也, “無操縦者航空機の導入に向けた運用環境定義の検討,” 飛行機シンポジウム, 2021.
- [5] 平林博子, “運航管理データを用いた有視界飛行方式の飛行傾向分析,” 電子航法研究所報告, No. 133, 2020.
- [6] 鳳文ブックス, “日本航空機全集 2022 年版,” 2022.
- [7] Flightradar24 AB, “Flightradar24”, <https://www.flightradar24.com/> (accessed May, 2022)
- [8] 虎谷大地, 平林博子, “ドローンとの情報共有のための有視界飛行方式の飛行計画データ利用に関する一検討,” 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 2020.
- [9] 国土地理院ウェブサイト, “地理院地図,” <https://maps.gsi.go.jp/> (accessed May, 2022)
- [10] 国土交通省国土数値情報ダウンロードサイト, “国土数値情報, 海岸線データ,” <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-C23.html> (accessed May, 2022)

# 1. 北太平洋上空のフリールーティング運用可能性の検討

航空交通管理領域 ※平林 博子, ブラウン マーク  
 東京都立大学 武市 昇

## 1 はじめに

アジアと北米を結ぶ主要路線の多くは北太平洋上空域を飛行する。アラスカからカムチャッカ半島の南側を北限とする北太平洋上空域の飛行情報区 (FIR: Flight Information Region) は、福岡 FIR, アンカレッジ洋上 FIR 及びオークランド洋上 FIR で構成され (図 1), 日米の管制機関により航空管制等の航空交通業務が提供されている。太平洋等の大洋上空では、地上レーダー施設を整備することが困難であるため、航空機間に確保すべき最小間隔 (管制間隔) はレーダー監視環境下と比較すると大きくとる必要があり空域容量は小さい。太平洋上空での空域容量拡大及び航空交通の効率化を図るため、日米管制当局により、日米航空管制調整グループ (IPACG: Informal Pacific ATC Coordinating Group) 会議が 1989 年に設立された[1, 2]。IPACG では、1990 年代に国際民間航空機関 (ICAO: International Civil Aviation Organization) で策定された衛星を使用した将来の航空航法システム (FANS (Future Air Navigation system) 構想), それに引き継ぐ新 CSN/ATM (Communication, Surveillance, Navigation/Air Traffic Management) システム構想[3]を受け、航空管制分野における技術向上を活用した管制

間隔短縮の導入を積極的に進めてきた。現在北太平洋上空域で適用可能な管制間隔は航空機性能に応じ変化し、適用可能最小間隔は、縦/横方向はそれぞれ 30NM/30NM, 垂直方向は 1,000ft である[4]。IPACG 設立当初は各々 15 分/100NM, 2,000ft であったことから、大幅な管制間隔短縮が可能な環境が整備されてきたことがうかがえる。さらに、今後 Space-based ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) 等の将来の監視システムを想定すると、大洋上空でのさらなる管制間隔短縮の可能性がある[5]。

管制間隔短縮が可能となることで空域あたりに飛行可能な航空機数は増加し、現状よりも制約が少ない運航者設計経路 (UPR; User Preferred routes) など運航者の希望する飛行経路運用の可能性が高まる。現在 IPACG では、北太平洋上空域にある NOPAC と呼ばれる 5 本の平行固定経路の再構築が検討されている。NOPAC の南側空域 (図 1 に示す“CENPAC”空域) ではすでに UPR 運用が導入されており、NOPAC 再構築では経路間幅を短縮し、一部高度帯では航空機性能依存の専用経路とすることで、空域容量を増加させつつ UPR 運用空域拡大を目指すものである。NOPAC 再構築のイメージを図 2 に示す。

本研究では、NOPAC 再構築の先を見据えた空域/経路環境を想定する。NOPAC 経路を完全に排除し、NOPAC 空域 (現在の NOPAC 経路が設定されている空域のこと。以降「NOPAC 空域」とする。) を自由に設計可能なフリールーティング空域とした場合 (図 2 参照) の運用可能性について検討するものであり、本稿は、検討における評価指標, 評価手順, 及び評価結果[6]を概説するものである。

なお、本研究は東京都立大学法人 (東京都立大学) との共同研究の枠組みで実施している。

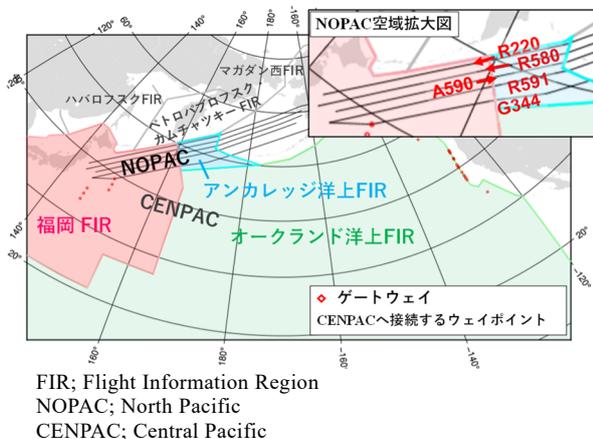
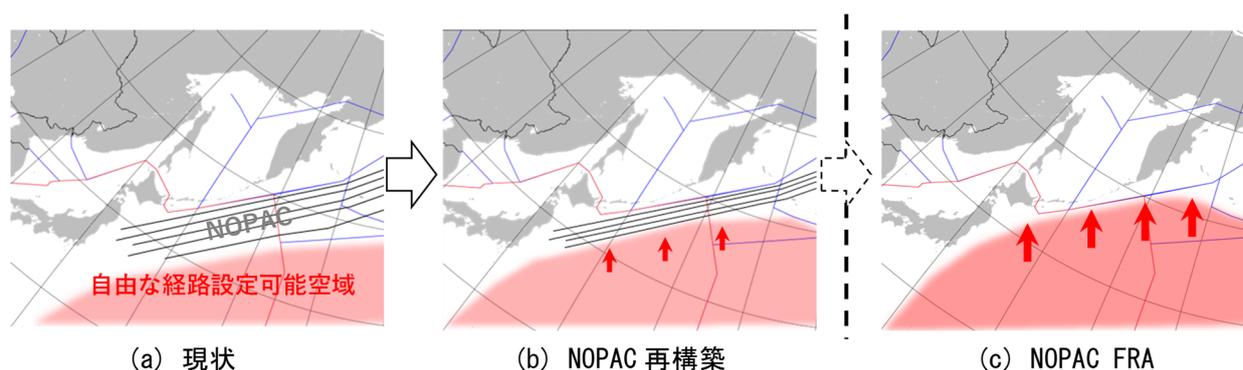


図 1 対象空域の FIR 構成



段階的な NOPAC 再構築により経路間隔は短縮され経路数は 5 本から 4 本へ縮小される(b)。本研究では自由な運航者経路設定可能空域のさらなる拡大を想定し、全ての NOPAC 経路を排除した空域/経路構成を検討する。

図2 NOPAC 再構築及び NOPAC FRA による自由な運航者経路設定可能空域の拡大 (イメージ)

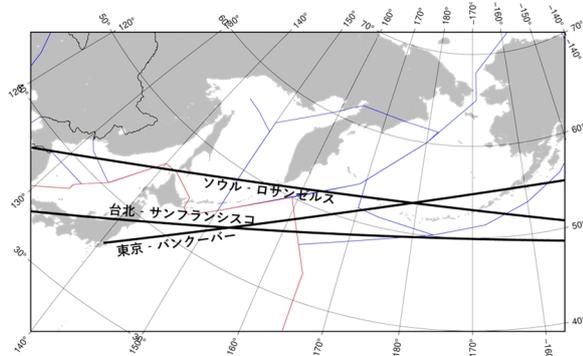
## 2 北太平洋上空域の現在の経路運用の概要

### 2.1 NOPAC

NOPAC 経路は、日本の東北沖からアラスカ半島までの空域に約 50NM の経路間隔で設定されている。日本を含む東アジア地域と北米大陸間の最短距離経路 (大圏経路) は NOPAC 空域周辺と重なることもあり (図 3 参照), NOPAC 空域は高需要空域である。円滑な交通流形成のために、図 1 拡大図に示すように NOPAC 経路の一部経路は一方通行運用を実施している。北から 2 本 (R220 及び R580) は西行専用経路, 3 本目 (A590) は東行専用経路である。

### 2.2 PACOTS 及び UPR

NOPAC 空域の南側である CENPAC に固定経路は存在しない。上層風を考慮し計算された経路が日ごとに設定され、日米航空局から公示される。この経路を PACOTS (Pacific Organized Track System) と呼ぶ。PACOTS は、複数の主



アジアと北米間の最短距離経路 (大圏経路) は NOPAC 空域周辺と重なる。

図3 最短距離経路 (大圏経路) 例

要都市間を想定し計算, 設計される。例えば、東京からシアトルを想定し計算されるのはトラック 1, 東京からサンフランシスコはトラック 2 として公示される。西行きのトラック名はアルファベットが付加される。シアトルから東京はトラック C, サンフランシスコから東京はトラック E 等である。CENPAC では PACOTS 運用に加え UPR の導入も進んでいる。UPR により飛行経路を計画する際は、PACOTS トラックとの関連でいくつかの制限があるが、その制限は管制間隔短縮可能性が進むにつれ緩和されてきている。

## 3 評価指標及び評価手順

### 3.1 評価指標

本件では、個々の飛行における評価指標に運航者経路データから飛行距離, 飛行時間, 及び消費燃料を算出し使用した。また、運用可能性を測る目的で、空域容量に影響のある航空機間の潜在的管制間隔喪失 (PLOS; Potential of Loss of Separation) も評価指標として使用した。PLOS は、欧州で導入されている FRA (Free Route Airspace) の評価時に、複雑性を示す指標として使用されている[7]。

### 3.2 評価手順

図 4 に本研究における評価手順を示す。まず、シミュレーションのために、シナリオ, ネットワーク, 気象データを準備する。シナリオは、ある一日に福岡 FIR 洋上管制空域を実際に飛行した飛行計画を基に、33 時間の間に 451 便

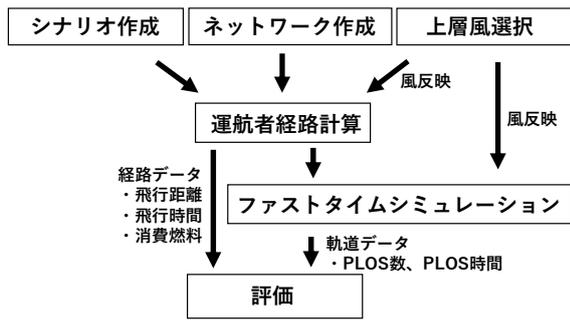
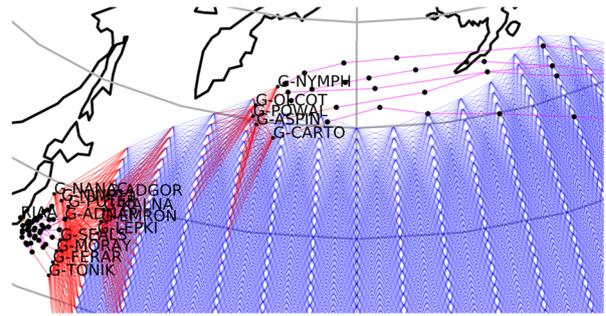


図4 本研究における評価手順

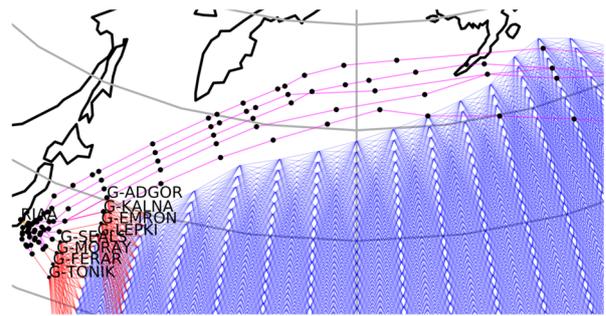
(178 シティペア) が飛行するシナリオを作成した。検討では、NOPAC 空域を自由に設計可能なフリールーティング空域と想定した空域設計（以降「NOPAC FRA」とする。）と、現行経路設計（以降「ベースライン」とする。）を比較することとし、NOPAC FRA 及びベースラインの2つのネットワークをシティペア毎作成した。図5に東京 - サンフランシスコ間のNOPAC FRA 及びベースラインネットワークを示す。シナリオは一日分の交通流を想定し作成していることから、反映させる上層風データは一回の経路計算及びシミュレーションでは一日分の気象データを使用した。気象データは、気象庁配信の全球数値予報モデル GPV 全球域 (GSM) のナウキャストを使用した。上層風選択手法及び日数については次章で説明する。

次に、シナリオ、ネットワーク、気象データを使用し、運航者経路を計算する。経路計算では、当所が所有するグラフ探索理論に基づく経路計算ツール[8]により、最短飛行時間経路を算出し運航者経路とした。そして、計算された運航者経路に基づき、AirTOP を使用したファストタイムシミュレーションを実施した。評価で使用する PLOS に影響を与える要素の一つに、シナリオにおける出発時刻があることから、AirTOP の出発時刻をランダムにシフトさせる機能を使用し（標準偏差 15 分の正規分布で設定）、オリジナルのシナリオに加え出発時刻をシフトした 5 パタンのファストタイムシミュレーションを実施した。

評価では、経路計算で得られた運航者経路から飛行距離、飛行時間並びに消費燃料、及びファストタイムシミュレーションにより得られた各飛行の軌道データより得られた PLOS を使



(a) NOPAC FRA ネットワーク



(b) ベースラインネットワーク

図5 東京 - サンフランシスコ間の経路計算のためのネットワーク

用した。PLOS は、対象空域での間隔欠如航空機対の数 (PLOS 数) 及び間隔欠如持続時間 (PLOS 時間) を3つの管制間隔を想定し検討した。想定した管制間隔は、現在最も使用されている水平方向 50NM 及び 30NM に加え、将来のさらなる管制間隔短縮を想定した 15NM を検討対象とした。垂直間隔はいずれの場合も Reduced Vertical Separation Minimum を想定し 1,000ft を使用した。

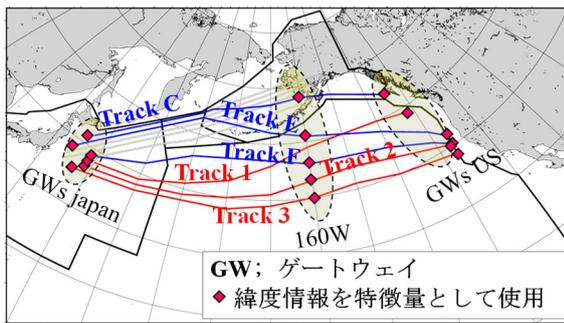
#### 4 上層風選択手法

今回対象とする空域は強い偏西風であるジェット気流が優位であり飛行経路に大きな影響を与えることから、経路計算に上層風を考慮する必要がある。ジェット気流は季節によって風況が変化することから、季節を通じた影響を検討するためには対象空域におけるできるだけ多くの上層風パターンを考慮することが望ましい。しかし、経路計算及びファストタイムシミュレーションに費やす時間等、または検討におけるスピード感を考慮すると、実用的な上層風反映日数は 10 日程度である。実用的な選択日数で対象空域の季節を通じた傾向を表現するため、

本研究では、上層風選択においてクラスタリング手法を応用することを試みた。

上層風反映日を過去の数日分を選択することとし、数日分の組み合わせのために上層風を分類した。上層風の分類では、気象データそのものではなく過去の約7年分(2011年~2017年, 2,533日分)のPACOTS経路データを対象にクラスタリングを実施した。

図6にクラスタリングで使用した特徴量について示す。上層風は経路の南北の広がりに影響を与えることから、特徴量としてPACOTSの南北成分である緯度情報を使用した。非階層的クラスタリングであるX-means法を実施し、2,533日を6グループに分類した。それぞれのグループの割合を図7に示す。この割合に応じて上層風反映日を選択する。実用的な日数は10日程



【特徴量】

南北成分(緯度 $\varphi$ )を特徴量に使用する。

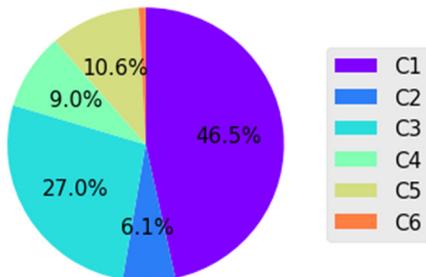
トラック $k$ から $F_k$ を作成する。

$$F_k = (\varphi_{GW_{Japan}}, \varphi_{160W}, \varphi_{GW_{US}})$$

特徴量 $F_{day}$ は一日のトラック $k$  ( $k = C, E, F, 1, 2, 3$ )

の $F_k$ とする。  $F_{day} = [F_C, F_E, F_F, F_1, F_2, F_3]$

図6 特徴量の説明



C1, C2, ..., C6は各クラスタリンググループ  
C6は1%未満

図7 クラスタリンググループの割合

度であると考えることから、最も少ない割合のグループから少なくとも1日を選択し、他のグループからは割合に応じた日数を選択することとした。クラスタリング対象期間のより最近(2017年)を中心に、11日上層風反映日として選択した。なお、1%未満であるグループ6からの選択は除外した。

ここではPACOTS東行トラック及び西行トラックの緯度情報の特徴量としたX-means法によるクラスタリングを実施したが、その後の特徴量及びクラスタリング手法を数パターン試行した検討結果から、ジェット気流の様相をより表している東行トラックのみを使用し、階層型クラスタリングであるウォード法の並びから一定間隔で選択する手法が、季節を通じた包括的評価時の上層風選択に最も適していることが示唆された[9]。

## 5 結果概要及び考察

### 5.1 個々の飛行経路

個々の飛行における提案空域/経路構成の優位性を測るため、NOPAC FRA 飛行経路から得られる各指標(飛行距離, 飛行時間, 及び消費燃料)から、ベースラインネットワーク飛行経路から得られる各指標を減じた値を使用した。マイナスの値は、NOPAC FRA 飛行経路の方がベースライン飛行経路と比較し、短い飛行距離, 短い飛行時間, または少ない消費燃料で飛行可能な経路であったことを示す。表1に示す各値の平均値はマイナス値を示し、全体としてNOPAC FRA の空域/経路構成はより便益のある飛行経路設定が可能であることを示した。

図8に消費燃料においてマイナス傾向の高い飛行を示す。NOPAC FRA では、NOPAC 空域とCENPAC 間の境界がなくなり、NOPAC 空域の南側を有効に使用することにより、便益の高い飛行経路設定が可能となる。一方で、プラス値となる飛行便もある。図9はプラス傾向の大きい経路例である。従来のNOPAC 経路はFIR 境界線に沿うように経路が設定されているが、今回、NOPAC 空域にネットワークを作成した際、ネットワークとFIR 境界線間及びNOPAC 経路間に隙間が発生した。一部の飛行においては、この隙間が影響しプラス値となった。

表1 個々の飛行経路における指標値に関する統計値

飛行距離 $f_d$ 、飛行時間 $f_t$ 、及び消費燃料 $f_c$ を比較する。

NOPAC FRA 経路値からベースライン経路値を減じる。 $f_{NOPAC FRA} - f_{ベースライン}$

マイナス値は NOPAC FRA 経路はベースライン飛行経路と比較し、短い飛行距離、短い飛行時間、または少ない消費燃料で飛行可能な経路であったことを示す。

	$\Delta f_d$ (NM)		$\Delta f_t$ (minutes)		$\Delta f_c$ (kg)	
	東行	西行	東行	西行	東行	西行
最大値	239	261	23	31	2053	4119
75%値	0	4	0	0	0	0
中央値	0	0	0	-1	0	-154
25%値	-3	-18	-2	-5	-194	-662
最小値	-645	-663	-47	-120	-7362	-12136
平均値	<b>-6.9</b>	<b>-14.3</b>	<b>-1.6</b>	<b>-3.6</b>	<b>-242.6</b>	<b>-468.5</b>
標準偏差	34.6	58.2	3.7	7.5	565.8	908.1

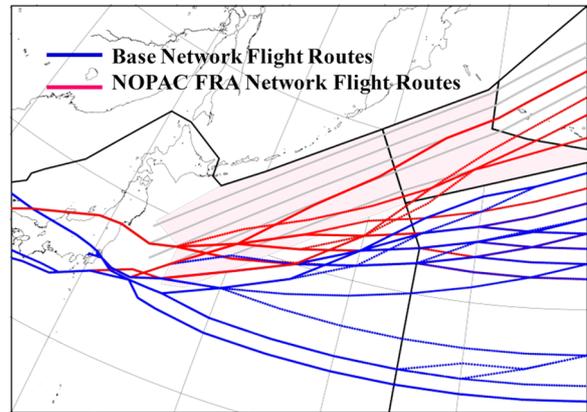
東行  $N = 3384$ , 西行  $N = 2028$

IPACGのNOPAC再構築では、現在のNOPAC経路を構成しているウェイポイントを残す方向で検討が進められている。今回のシミュレーション結果から、IPACGでの検討の方向性は効率的な運航者経路設計の観点から有効であり、今後の研究に反映させていきたいと考えている。

### 5.2 NOPAC FRA 運用可能性 - PLOS

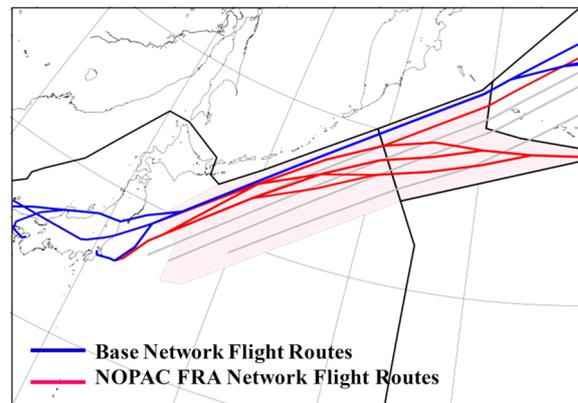
表2にPLOSに関する結果を示す。PLOS数はベースラインと比較しNOPAC FRAの方が多かった。PLOS数が多くなると、間隔維持のため各飛行は垂直方向へ回避することが考えられ、結果、個々の飛行において理想高度での飛行が不可能となる可能性が高まると言える。PLOS数が高いことは、効率的な飛行経路運用の点から望ましいことではない。しかし、今回のシミュレーション結果では、適用管制間隔が小さくなると、NOPAC FRAとベースラインのPLOS数の差は小さくなること示された。さらに、PLOS時間においては、全ての管制間隔において、NOPAC FRAの方が短い結果であった。これは、同一飛行経路を飛行する飛行時間が短いことが影響を与えている。NOPAC FRAにおいては、PLOS数が高いことから各飛行経路は一旦近接するが、航空機対はすぐに離れていく傾向があり、結果、NOPAC FRAの方がPLOS時間は短くなった。

空域容量の観点では、現状の管制間隔においては、NOPAC FRA空域/経路構成は現状と比較し効率的な運用が可能であるとは言いが、将来、さらなる管制間隔短縮が可能とな



ベースライン飛行経路と比較しNOPAC FRA飛行経路の方が2,000kg以上の消費燃料削減効果のある飛行経路例

図8 消費燃料においてマイナス傾向の高い飛行経路例



ベースライン飛行経路と比較しNOPAC FRA飛行系の方が1,000kg以上燃料を必要とする飛行経路例

図9 消費燃料においてプラス傾向の高い飛行経路例

表2 PLOS数及びPLOS時間のベースライン及びNOPAC FRAそれぞれの平均値

	50NM		30NM		15NM	
	ベースライン	NOPAC FRA	ベースライン	NOPAC FRA	ベースライン	NOPAC FRA
PLOS数	108	115	66	70	37	37
PLOS時間(分)	11893	11664	6796	6587	3264	3054

N = 72

ることで、効率的運用可能性が高まることが示唆された。運用可能性を検討する際は、管制官が監視可能な交通流であるかの判断も必要となると考えられ、支援機能、自動化、及び空域複雑性も視野にいれつつ、引き続き検討を続けていく予定である。

## 6 おわりに

北太平洋上空へフリールーティング運用を導入し自由な運航者設定経路運用が可能な空域を拡大した際の、飛行経路の優位性及び運用可能性についてシミュレーションを実施し評価した結果について紹介した。個々の飛行経路の優位性を測る目的とした評価指標として、飛行距離、飛行時間及び消費燃料を使用した結果は、全体としてNOPAC FRAの空域／経路構成はより便益のある飛行経路設定が可能であることを示した。一方、空域容量を測る目的として使用した評価指標である潜在的管制間隔喪失(PLOS)の結果は、現状の管制間隔においては、NOPAC FRA空域／経路構成は現状と比較し効率的な運用が可能であるとは言い切れない結果を示した。しかし、将来、さらなる管制間隔短縮が可能となることで、効率的運用可能性が高まることが示唆された。

## 謝辞

運用実績データのご提供をいただきました国土交通省航空局の関係各所の各位のご協力、及びIPACGメンバー各位のご助言に深く感謝いたします。

## 参考文献

[1] “Informal Pacific ATC Coordinating Group (IPACG),” FAA website, [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/mission\\_support/ato\\_intl/ipacg](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/mission_support/ato_intl/ipacg), (参照 Mar. 29 2022).

[2] “第29回日米航空管制調整グループ会議の開催及び日米航空管制当局間の協力に関する共同声明の採択,” 国土交通省航空局報道発表資料, 平成20年10月27日.

[3] ICAO, “Global Air Navigation Plan for CNS/ATM Systems,” ICAO Doc 9750.

[4] 国土交通省航空局, “航空保安業務処理規定第5管制業務処理規定,” 国空制第236号, 令和2年10月8日.

[5] “Global ATS Surveillance,” Aireon website, <https://aireon.com/products/global-ats-surveillance/>, (参照 Mar. 29 2022).

[6] Hiroko Hirabayashi, Mark Brown, Noboru Takeichi, “Feasibility study of free routing airspace operation over the North Pacific airspace,” ATM Seminar (2021), paper ID 23, Sept. 2021.

[7] Cesar 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, Oct. 2018.

[8] Mark Brown, Hiroko Hirabayashi, Navinda K. Wickramasinghe, “A Graph Search-Based Trajectory Optimiser for Practical Wind-Optimal Trajectories,” The Proceedings of the 2018 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2018), pp. 2201-2208, 2019.

[9] 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講演集, JSASS-2021-5041-1D04, Nov. 2021.

## 2. 気象予報データの利用者選択経路の導出に与える影響

航空交通管理領域 ※中村 陽一, ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル, 瀬之口 敦

### 1 まえがき

利用者選択経路 (User Preferred Route, UPR と表記) は、固定経路ではなく、その日の気象状況等を考慮した経路を飛行するものであり、航空機運航の効率化や CO2 削減などの環境への配慮に向けた方策の一つである。2050 脱炭素社会の実現に向けた取り組みも進められており、その中で航空機運航分野における CO2 削減も推進されている[1]。UPR など気象条件等を考慮した飛行経路については多くの研究がなされており [2]、一般に長距離便における効果が高いと考えられているため、洋上空域が主な検討対象であった。一方、国内空域においても効果は見込まれると考えられ、実際の運航者側のシステムにおいて導出される経路や利用する気象データも考慮した便益の推定が必要である。

本稿では、まず実運航のシステムと計算結果を比較することにより計算方法の妥当性について確認する。その後、予報を含む異なる気象データを利用し、気象データの違いにより生じる経路差および飛行時間、燃料消費量の差について報告する。

### 2 利用データおよび計算手法

#### 2.1 飛行計画システムのデータ

本稿では、日本航空株式会社にて、飛行計画作成に利用されている飛行計画システム (Flight Plan Manager, FPM と表記) [3]のデータを利用した。FPM は指定した区間での UPR 経路を生成する機能を有している。図1に示すように羽田空港 (RJTT) から那覇空港 (ROAH) までの飛行のうち、IBENO から PRIUS までの区間を UPR 区間と想定し、FPM により生成された経路を利用した。導出された UPR に加え、Aeronautical Information Circular (AIC)により公示された経路 (以下 AIC 経路と表記)、およびそれぞれの経路に沿って飛行した場合の飛行時間、燃料消費量について同システムにより導出されたデータについてもあわせ

て利用した。表1に利用データの一部を示す。経路上の各ウェイポイント (WP) 通過時の累積時間や残燃料が参照可能である。ただし、時間は分単位、燃料は 100lbs 単位である。また、FPM による UPR の経路の緯度経度は整数値であり、便により WP 数は2または3点で異なる。

2021年6月から8月までの3か月の間、毎日11時 (JST) に RJTT を離陸することを想定して導出された経路および各種データのうち、90便を解析に利用した。厳密には PRIUS の10分ほど手前から降下局面にはいつているが、一定高度の飛行とみなして解析を実施した。

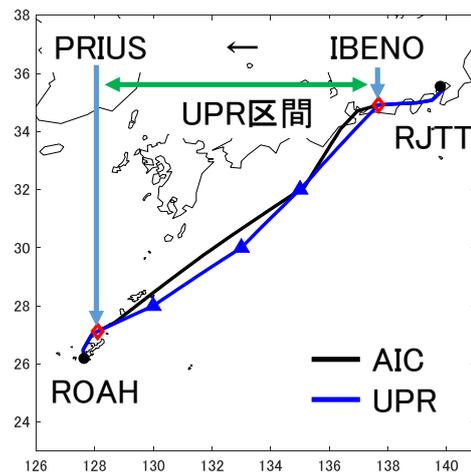


図1 対象とする経路

表1 データ例 (一部抜粋)

FL	WP	緯度経度	累積時間 [min]	残燃料 [klbs]
400	IBENO	N34548 E137405	22	24.4
400	SHIMA	N34183 E136353	32	23.9
400	LAXEL	N32056 E135095	52	19.9
400	TONAR	N29491 E131487	81	15.6
DS	PRIUS	N27072 E128065	113	11.6

## 2.2 気象データ

気象庁より提供されるメソ数値予報モデル GPV (MSM) [4]を利用した。MSM では、日本域内の 5km メッシュの格子点における風向、風速、気温等の気象データが提供される。3 時間ごとの数値予報の初期値に対して、39 時間先の予報データが利用可能である。本稿では、初期値のデータに加えて、15 時間先までの予報データを利用した。

## 2.3 飛行の模擬

航空機の飛行は巡航高度、速度、気象など様々な要素により影響を受け、飛行時間や消費燃料などはそれらに伴い変化する。本稿では、ユーロコントロールにより開発・維持されている Base of Aircraft Data (BADA) family 3[5]を用いて航空機の飛行を模擬する。BADA では型式に応じた質量や推力などの性能データが与えられるとともに、航空機の上昇、巡航、降下の局面ごとに、高度に応じた標準的な飛行速度が定義されている。これらを組み合わせることにより、異なる経路を飛行した場合の航空機の飛行時間や消費燃料等を計算し、それらの定量的な比較が可能となる。

## 2.4 飛行経路の最適化

動的計画法[6]と呼ばれる手法により最適経路を導出する。本稿では2種類の格子点を利用した。一つ目は、計算手法の妥当性の確認のために FPM の条件に近い格子 (FPM-base) である。FPM の経路では、格子点の緯度経度は全て整数値であり、また便によって WP の数が 2 または 3 点で異なる。そこで図 2 左図に示すように FPM で導出された UPR と同じ経度の位置に格子点を配置し、最適な経路を探索した。

二つ目は図 2 右図に示すように大圏経路を基準に設定した格子である。従来は進行方向 (x 軸方向) に計算を進める中で一つ前の格子点列からの接続のみを考慮していた。例えば図 3 に示す  $x=3$  の点に関しては、 $x=2$  の点列からの接続のみを探索していた。本稿では、 $x=2$  の点列に加えて、計算開始地点や  $x=1$  の点列から直接  $x=3$  への接続も探索し、最適経路を導出した。結果として、図 3 右図に示すように、WP

の数は必ずしも格子点の進行方向の数と同一とはならない。計算量が若干増加する一方で、格子点間隔等の配置に依存し辛く、より最適な解が得られる。

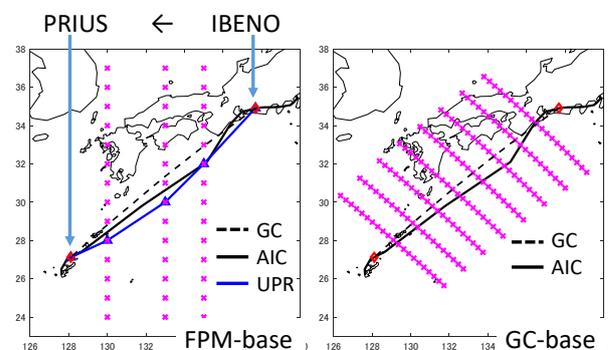


図 2 2種類の計算格子

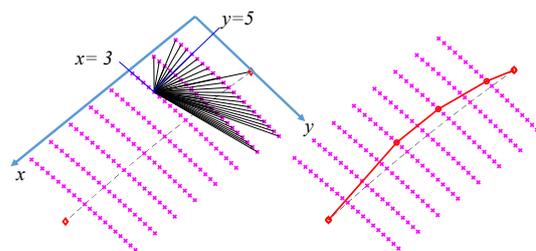


図 3 最適経路探索イメージ

## 3 最適経路導出方法に関する検証

### 3.1 計算条件

IBENO から PRIUS までの飛行を計算した。FPM のデータは 2.1 で示すように 6 月から 8 月のうち 90 日について、11 時 (JST) に RJTT 離陸を仮定して導出されたものである。一方で、本解析では計算の都合上 IBENO を 11 時 (JST) に通過したものとみなし、また IBENO から PRIUS の区間を一定高度 40,000ft、一定マッハ数 0.85 で飛行するものと仮定した。また、FPM での初期重量から IBENO までの消費燃料分を差し引いた値を初期重量とした。本計算方法との主な差異は、利用する気象データ、初期時刻、巡航速度、および PRIUS 手前からの降下の部分である。

計算の妥当性の確認のため、3.2 では上記の仮定に基づき同一の AIC 経路に対して MSM の気象データ、BADA の計算式により計算した飛行時間および燃料消費量と FPM より得ら

れた値との比較を行った。また、3.3 においては、同仮定のもとで最適経路を導出し、FPM により導出された UPR との比較を行った。

### 3.2 AIC 経路における時間および燃料の比較

AIC 経路に沿った飛行について計算した結果と表 1 に示す FPM のデータから取得した値を比較した結果として、図 4 に飛行時間および燃料消費量の差（計算値-FPM）のヒストグラム、表 2 に平均および標準偏差を示す。飛行時間については 95%以上が±2 分に収まっており、IBENO から PRIUS まで平均 98 分ほどの飛行であること、FPM のデータが 1 分単位であることを考慮すると比較的近い結果が得られた。燃料についても、降下局面を無視していることから若干正の方向に平均値がずれているが、おおむね近い値が得られた。

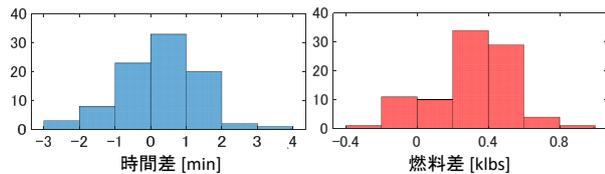


図 4 飛行時間および燃料消費量の差

表 2 時間および燃料消費量の差

	平均	標準偏差
時間差[min]	0.25	1.12
燃料差[klbs]	0.31	0.21

### 3.3 FPM の UPR と最適経路との比較

図 2 左図に示す FPM-base の格子点を利用して求めた最適経路と FPM より取得した UPR について比較を行った。図 5 に FPM の UPR 経路および最適経路を示す。最適経路は FPM の仕様にあわせて整数値の緯度経度のみを探索した。90 便のうち、28%は同一の経路が導出された。他の経路についても、図 5 右図に示すように、緯度方向の誤差は最大でも 1 度であり、それ以上に誤差の大きい経路は導出されなかった。

また、FPM で導出された経路(UPR)と本手法で導出した経路(Opt)に対する便益を比較した。UPR, Opt および AIC 経路の 3 つに対して、同

じ計算条件（MSM の気象データ、BADA による飛行模擬）にて計算し、UPR, Opt のそれぞれと AIC との差分を便益とみなした。結果を図 6 に示す。1 便のみ AIC-UPR の結果が負の値であり、UPR よりも AIC の経路の方が時間および燃料が短かったことを意味する。これは、FPM による UPR の導出の際に想定した気象データが計算に利用した MSM の気象と異なっていることが一つの要因と考えられる。AIC-Opt については、MSM の気象を利用して最適化を行っているため、すべてが正の値となり、また AIC-UPR よりも多少便益が大きい、概ね近い傾向が示された。

これらにより、本手法によりある程度システムの出力と近い結果を得られることを確認した。

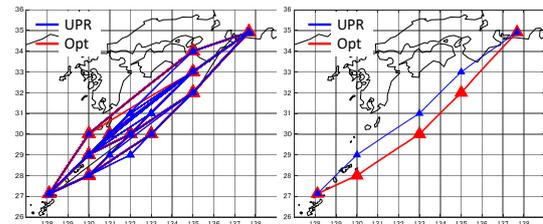


図 5 UPR (FPM) および最適経路

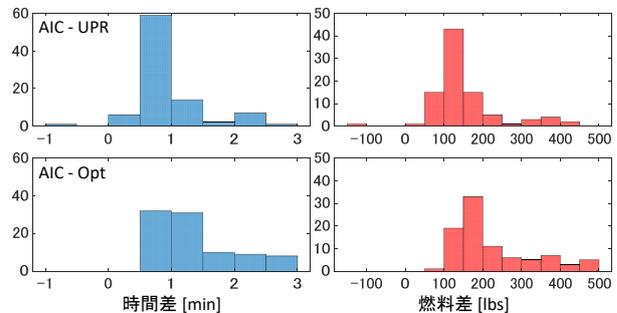


図 6 UPR の便益における差分

## 4 経路最適化に関する風の影響

### 4.1 計算条件

経路最適化における風の影響を調べるため、図 2 右図に示す GC-base の計算格子を利用して、2021 年の 1 年間 365 日分の気象に対する最適経路を導出した。IBENO から PRIUS まで、一定高度 40,000ft、一定マッハ数 0.84 とし、11 時 (JST) を初期時刻、初期重量は BADA の標準重量とした。気象データについては、表 3 に示す初期時刻、予報時間の異なる 9 種類の組み合わせを利用した。表中の数値は利用データの

時刻を表し、括弧の中は予報時間である。すなわち、9(0)は9時の初期値であり、3(+6)は3時の時点での6時間先の予報であり、ともに9時の気象データである。今回の条件では2時間程度の飛行となるため、11時から13時までの気象データが必要となる。MSMは3時間ごとであり、T0およびTPの種別においては、任意の時刻の気象データをその前後の二つのデータから補間して用いるため、一つの飛行に3つのデータを利用した。T0が最も実際の気象に近いデータである一方で、飛行時点では利用できない将来のデータが含まれる。TP4のデータであれば、11時間前の0時（厳密にはデータが利用できるまでの時間差の考慮が必要）の時点で利用可能である一方で、予報であるために誤差が生じることが懸念される。TFの種別では、補間を利用せずにその瞬間の気象のみを利用して計算を実施した。本稿では、各組合せにおいて、結果に与える影響を調べた。

表3 利用した気象データの時刻 (JST)

種別	データ時刻 (予報時間)
T0 (真値と仮定)	9(0), 12(0), 15(0)
TP1	9(0), 9(+3), 9(+6)
TP2	6(+3), 6(+6), 6(+9)
TP3	3(+6), 3(+9), 3(+12)
TP4	0(+9), 0(+12), 0(+15)
TF1	9(0)
TF2	6(0)
TF3	3(0)
TF4	0(0)

#### 4.2 最適経路による効果

まずは想定した区間におけるUPRの潜在的な効果を調べるため、T0の気象データを用いて365日分の気象条件のもと、最適経路の計算を行った。結果として、図7に得られた最適経路を示す。図8に飛行時間、燃料消費量、飛行距離についてAIC経路と比較した削減量を示し、同図には参考のためAIC経路と大圏経路を比較した削減量を緑線にて示す。また表4に平均および標準偏差を示す。計算した365便のうち、60便は最適経路が大圏経路と一致して

おり、表4から大圏経路を飛行することにより平均1.6分、252.9lbsの削減が可能となる。風を考慮した最適な経路を飛行することにより、平均1.9分、302.2lbsの削減が可能となる。概ね2分程度の削減効果であるが、10分程度の大きな効果が得られる気象条件も観測された。

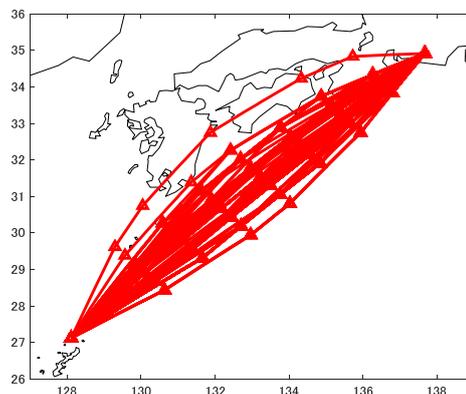


図7 最適経路 (365経路)

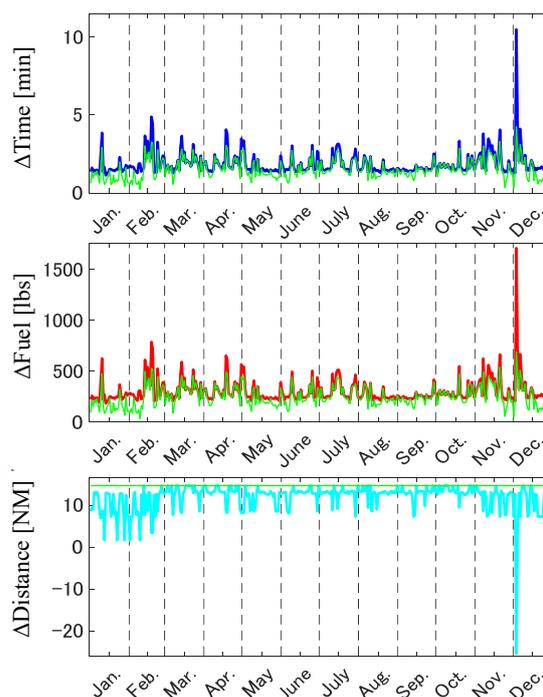


図8 AIC経路からの削減量 (緑は大圏経路)

表4 最適経路の時間、燃料、距離削減量 (括弧内は大圏経路)

	平均	標準偏差
時間[min]	1.9 (1.6)	0.8 (0.6)
燃料[lbs]	302.2 (252.9)	124.2 (101.4)
距離[NM]	12.0 (14.8)	3.3 (0)

### 4.3 異なる気象データを用いた予測

前節の T0 に加えて、表 3 に示す他の 8 種類を加えた 9 種類の気象データの組み合わせを利用して 365 日分の最適経路を導出した。結果の一例として、図 9 に異なる気象データを利用した場合の経路の差異を示す。あわせて、T0 の最適経路と同じ経路が導出された割合を図 10 に示す。TP1 の条件であれば半分以上は同じ経路が導出され、予報時間が長くなるほど同一の経路が導出される割合が低下する。補間を利用しない場合には更にその割合が低下した。一方で、図 9 に示す経路の差異は 365 便のうちでも比較的大きな差が見られたケースであり、気象データのみの差異ではそこまで大きな経路の差にはつながらないことが示された。経路の横方向の差は、TP のケースで最大 40NM (格子 2 点分) であり、TF のケースで最大 60NM (格子 3 点分) の差が見られた。

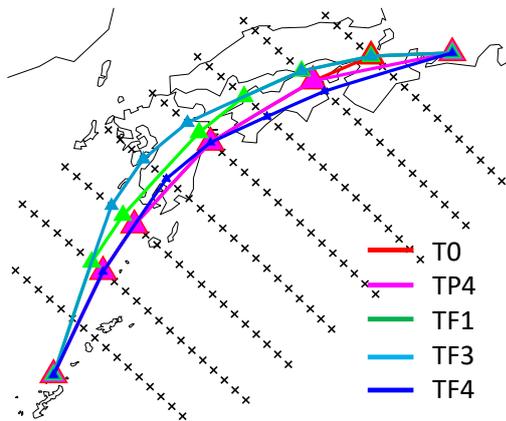


図 9 異なる気象による最適経路の変化例

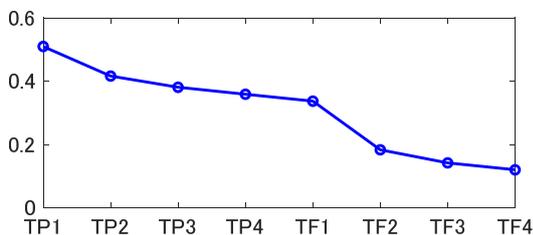


図 10 T0 と同一の経路の割合

図 11 に異なる気象データの組み合わせを用いて計算した飛行時間および燃料消費量の予測値と、真値とみなす T0 の値との誤差を示す。予報値の補間を利用した場合、11 時間前の

TP4 の時間、および燃料差の標準偏差はそれぞれ 34 秒、92lbs 程度であり、誤差の大きいケースでも 2 分程度であった。一方で、補間を利用しない場合、11 時間前の TF4 の時間、燃料差の標準偏差はそれぞれ 162 秒、444lbs であり、5 分以上ずれる誤差の大きいケースもみられた。結果として、経路そのものは、11 時間前の気象データを利用しても、実際の最適経路に近い経路が導出されることが示された。飛行時間や燃料消費量についても、11 時間前のデータであっても、予報データを利用して計算した場合には比較的誤差は小さいといえる。一方で、補間を利用しない場合においては、TF1 であってもその誤差は予報データを利用した場合よりも精度は落ち、将来の軌道ベース運用等を考えると無視できない程度に大きくなることが示唆された。

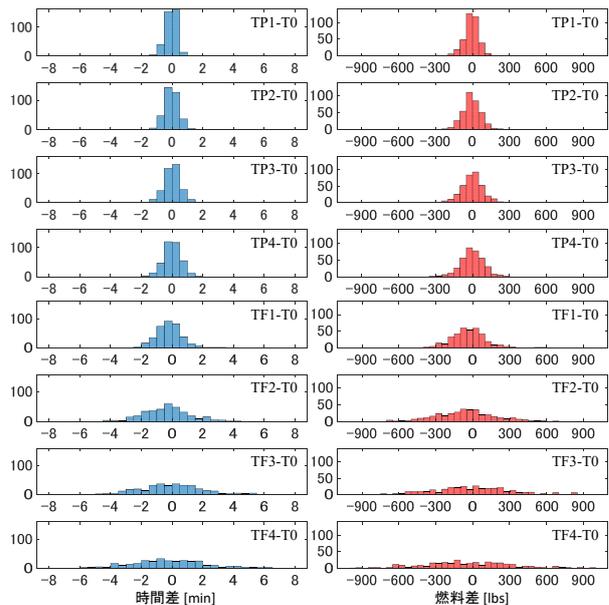


図 11 予測時間および燃料消費量の誤差

### 4.4 経路の予測誤差の与える影響

最後に、異なる気象データを用いて導出された最適経路を飛行計画の経路と仮定し、実際に計画した経路を飛行した場合の飛行時間および燃料消費量への影響について調べた。前節で示した 9 種類の各最適経路に対して、同一の T0 の気象データを用いて飛行時間および燃料消費量を計算した。結果として T0 の気象に基づき計算した最適経路との差を表 5 にまとめる。

前節で示した通り，導出された経路そのものの差は比較的小さい。したがって，11時間前の気象(TF4)をもとに導出した経路であっても，その飛行時間差は最大で85秒であった。特に，予報データで補間した場合においては，TP4の条件であっても20秒程度の誤差であった。これにより，11時間前の気象データであっても，最適な経路の導出に関しては大きな誤差は発生しないことが示された。

表5 T0の経路との比較

	Time[sec]			Fuel[lbs]		
	Ave.	S.D.	max	Ave.	S.D.	max
TP1	0.64	1.61	13.23	1.83	4.53	38.54
TP2	0.97	2.22	15.95	2.7	6.19	45.52
TP3	1.09	2.4	17.3	3.02	6.51	45.52
TP4	1.33	2.84	16.53	3.66	7.69	45.31
TF1	1.85	3.85	23.61	5.04	10.45	65.44
TF2	3.95	6.84	53.7	10.71	18.48	146.69
TF3	6.38	10.96	73.13	17.26	29.66	195.06
TF4	8.11	13.02	85.92	21.98	35.34	231.79

## 5 むすび

本稿では，利用者選択経路の導出にあたり，気象予報データが与える変化について調べた。計算に先立ち，FPMシステムの計算結果との比較により，計算方法の妥当性について確認した。次に，想定した羽田空港から那覇空港のうちの一部区間をUPRと設定した場合の効果として，1年分の気象条件に対する最適経路を求めた。AIC経路と比較して，平均1.9分，302lbs程度の削減効果が示された。最後に，異なる気象データを活用して最適経路を導出することにより，気象データの差が計画時の経路に対して与える影響について示した。MSMの初期値を利用した最適経路を真値と仮定したとき，予報時間が長くなるほど異なる最適経路が導出されることが示されたが，その差異は軽微であることを確認した。一方で，将来的には通過時

刻や燃料消費量などをより高精度に導出し，それらに基づき航空交通管理を実施していくことが求められる。このような時，実際に飛行する気象条件とは異なる気象データを想定すると，無視できない程度の誤差が生じるため，直前の気象データの利用や，予報データの活用など，実際に近い条件で計算することが肝要である。

## 謝辞

本研究にあたり飛行計画システムの詳細データおよび様々な知見を提供いただいた日本航空株式会社の方々には感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 国・地方脱炭素実現会議，“脱炭素ロードマップ,” [https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/datsutanso/pdf/20210609\\_chiiki\\_roadmap.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/datsutanso/pdf/20210609_chiiki_roadmap.pdf) [cited 2022].
- [2] Hiroko Hirabayashi, et al, “Feasibility Study of Free Routing Airspace Operation over the North Pacific Airspace,” Fourteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2021.
- [3] 木下，松本，渡利，杉山，“飛行計画システムを用いた国内空域におけるUPR導入の効果分析,” 第58回飛行機シンポジウム, 2020年11月.
- [4] 気象庁情報基盤部，“配信資料に関する技術情報第575号メソ数値予報モデルGPVおよびMSMガイダンスの予報時間延長について,” 令和3年12月.
- [5] Eurocontrol Experimental Centre, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.15,” EEC Technical/Scientific Report No. 19/03/18-45, May 2019.
- [6] Navinda Kithmal Wickramasinghe, et al, “Flight Trajectory Optimization for Modern Jet Passenger Aircraft with Dynamic Programming,” Volume 290 of the series Lecture Notes in Electrical Engineering, pp. 87-104, Feb. 2014.

### 3. 航空機内データ通信および電波高度計の電磁環境評価に関する研究開発

監視通信領域 ※ニッ森 俊一, 森岡 和行, 河村 暁子, 米本 成人

#### 1 はじめに

2015年に開催された世界無線通信会議(WRC-15)において、電波高度計に割り当てられている4GHz帯(4.2GHz-4.4GHz)を航空機内データ通信(Wireless Avionics Intra-Communications, WAIC)にも配分することが決議された。WAIC機器は航空機内の配線を無線化することで航空機の重量低減を図り、運航の効率化を目指すことを主な目的の一つとしている。一方で、既存の電波高度計と同一の周波数を用いることから、WAIC機器と電波高度計との共用条件の策定が必要である。

RTCA(米国航空無線技術委員会)およびEUROCAE(欧州民間航空装置機構)では、WAIC機器の実現に向けて、特別委員会236(SC-236)および96作業班(WG-96)を設立し、2016年9月から合同でMASPS(最低性能要件)およびMOPS(最低運用要件)を策定する活動が行われている。さらに、ICAOのFSMP(周波数管理パネル)では電波高度計とWAIC機器に関する共用条件に関するSARPs(標準および勧告方式)の策定作業が実施されている。上記の活動の中で、WAIC MASPS RTCA DO-378 [1]/EUROCAE ED-260が2019年7月に発行されたが、電波高度計への干渉影響を避けるため、現在、WAIC機器の最大放射電力値の見直しを検討中である。

本稿では、WAIC機器および電波高度計の電磁環境評価に関する研究について概要を述べる。まず、大型航空機においてWAIC機器からの詳細電磁界放射特性を評価可能な、大規模電磁界数値解析の結果例を示す。次に、小型航空機を用いて実施した、電波高度計およびWAIC機器放射特性試験の結果例を示す。さらに、電波高度計への干渉経路損失(Interference Path Loss, IPL)測定結果および電波高度計の電磁干渉特性測定について概要を述べる。

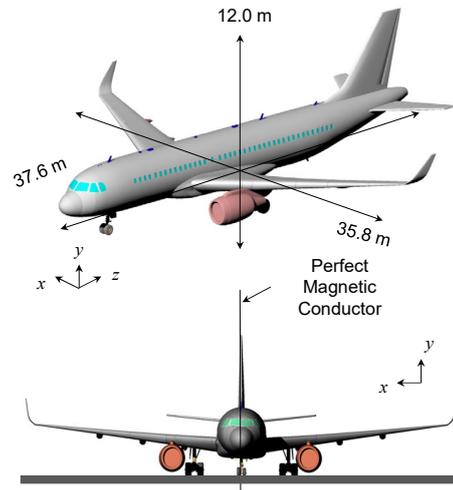


図1 エアバス A320-200 型機の 3次元数値モデル

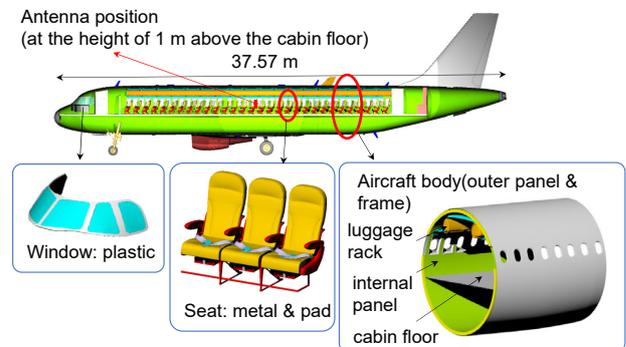


図2 エアバス A320-200 型機の機内モデル

#### 2 WAIC 周波数帯電磁干渉推定技術の開発

WAIC 周波数帯において適用可能な航空機電磁界電波伝搬特性の推定技術として、大規模電磁界数値解析技術を用いた推定法を開発する。数値解析を用いて航空機電波高度計や WAIC 機器の詳細な電波伝搬推定を行うことが可能である。時間領域差分法(Finite-Difference Time-Domain method, FDTD)を用い、図1および図2に示すエアバス A320-200 型機の3次元数値モデルを用いた電磁界数値解析を行う。送信

表1 FDTD 数値解析パラメータ

解析空間 (mm <sup>3</sup> )	20,100 × 20,100 × 40,660
セルサイズ (mm)	5
解析セル数	4,020 × 4,020 × 8,132
周波数 (GHz)	4.4
吸収境界条件	Convolutional perfectly matched layer (10 layers)
解析ノード数	40
必要解析メモリ	12,800 GB
アンテナ	1/2 dipole (0.1 W input power)

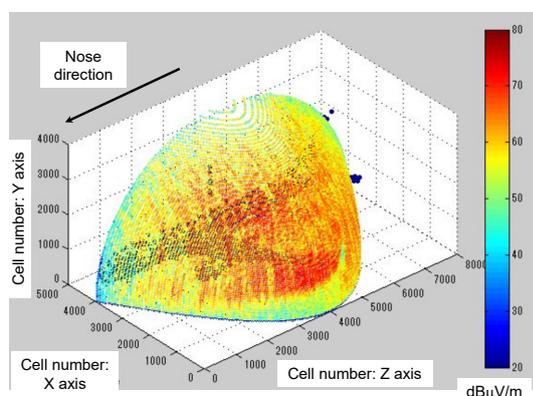


図3 航空機を中心とした半球上における電界強度解析結果例

アンテナは機内通路中央部、高さ 1 m に設置した 2 分の 1 波長ダイポールアンテナである。表 1 に、FDTD 数値パラメータを示す。全領域に対して 5 mm<sup>3</sup> の均一立方体セルを用いて解析を行う。解析に必要な主記憶容量を減らすため、胴体中央部に磁気壁を設置する。この解析領域は 40 個のエリアに分割して計算され、吸収境界を含むセル数は合計で 4,020 × 4,020 × 8,132 である。また、解析に必要な主記憶容量は約 12.8 TB である。

図 3 に、航空機を中心とした半球上における電界強度解析結果例を示す。航空機を取り囲む半球上における電磁界強度値の評価は WAIC MASPS[1]で規定され、実機での評価試験が必要となるが、開発した大規模電磁界数値解析法では、世界で初めて数値解析により詳細な球面評価を実現しており、電磁環境評価での活用が期待されている。



図4 WAIC 機器を想定した航空機地上放射特性評価試験状況概観

表2 送受信アンテナ仕様および測定条件

受信アンテナ	ログペリオディックアンテナ
受信アンテナ利得	5.2 dBi (4.3 GHz)
受信アンテナ偏波	垂直および水平
送信アンテナ	標準ダイポールアンテナ
送信アンテナ偏波	垂直
測定周波数	4.2–4.4 GHz

### 3 電波高度計および WAIC 放射特性評価

航空機電波高度計と WAIC 機器の周波数共用検討を実施するための基礎データとして、電波高度計および WAIC 機器を想定した地上放射特性評価を、小型航空機を用いて実施した。例として、電子航法研究所所有の小型航空機ビーチクラフト製 B300 型機 (King Air B350) を用いた、WAIC 機器を想定した地上放射特性評価結果例を述べる。図 4 に、WAIC 機器を想定した送信アンテナ設置状況の一例を示す。ここでは、右翼端灯部分に WAIC 機器の設置を想定し、標準ダイポールアンテナを垂直偏波で設置している。アンテナ設置高さは地面から 1.92 m である。表 2 に、評価に用いた送受信アンテナ仕様および測定条件を示す。

WAIC MASPS[1]に記された電界強度測定法に基づき、航空機周辺における放射特性を取得する。機体の最大寸法の 1.5 倍を半径 (26.5 m) とする円周上において、異なる高さ (航空機窓高さ、航空機窓高さ ± 1 m) と両偏波 (垂直および水平) で電界強度測定を実施する。

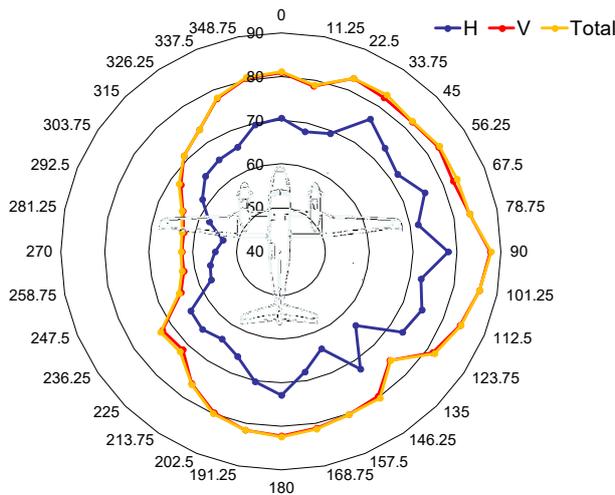


図5 航空機周囲の電界強度特性  
(測定高：航空機窓高さ，単位：dB $\mu$ V/m)

また、上記円周上を 11.25 度間隔で 32 点において測定を行う。図 5 に、測定高を航空機窓高とした場合の電界強度特性を示す。なお、ここでは送信アンテナ入力電力を 0 dBm に規格化した場合の値を示している。測定結果から、送信偏波と同一の垂直偏波が支配的であること、および送信アンテナ設置位置に最も近い 90 度方向で電界強度が最大値となっていることが確認できる。

WAIC MASPS[1]では、WAIC 機器の設置箇所に拘わらず、他の航空機の電波高度計への干渉を避けるため、航空機周辺からの全放射電力測定結果に基づき、航空機中心における点波源電力値を計算し、その値が制限値以下であることが求められる。例えば、図 5 では、90 度方向で電界強度値が 87.7 dB $\mu$ V/m となり、航空機中心の点波源電力は、11.4 dBm となる。この場合、WAIC 機器が翼端に設置されていることにより、機体中心における点波源電力値が、アンテナ入力電力値より大きく計算される。

#### 4 電波高度計への干渉経路損失測定

航空機電波高度計とその隣接および同一周波数帯を用いる機器の周波数共用検討を実施するための基礎データとして、小型固定翼機およびヘリコプタを用いて、電波高度計への IPL の測定評価を実施する。小型固定翼機は、図 6 に示す前述の電子航法研究所所有のビーチクラフト



図6 電波高度計の干渉経路損失測定状況  
(ビーチクラフト B300)

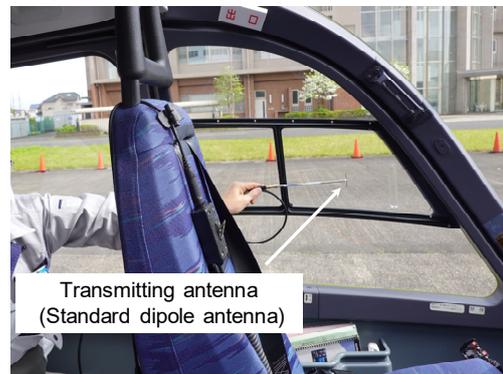


図7 コックピット左席窓における  
送信アンテナ設置状況 (川崎 BK117C-2)

製 B300 型機である。また、ヘリコプタは、図 7 に示す宇宙航空研究開発機構所有の川崎重工業製 BK117C-2 であり、共同研究の一部として測定評価を実施する。IPL は、航空機の電磁干渉耐性を評価するための値の一つとして用いられ、航空機に設置もしくは持ち込まれている機器のアンテナから放射された電磁波が空間を伝搬し、航空機のアビオニクスアンテナ端子に伝わる電力損失量を示す。本測定では、実際の航空機を用いて被干渉のアビオニクスを航空機電波高度計、与干渉機器を機体内外に存在する通信機器と想定し、IPL 測定評価を実施する。なお、IPL の測定評価には、RTCA DO-307A[2]に基づく測定を実施する。

航空機内外の複数箇所に WAIC 機器等の通信機器を想定した送信アンテナを設置し、場所を変えながら電波高度計アンテナ端子に伝わる電力量を測定し、基準値との差を計算する。送信アンテナは標準ダイポールアンテナを用い、3 軸に変化させ、各偏波で測定を実施する。こ

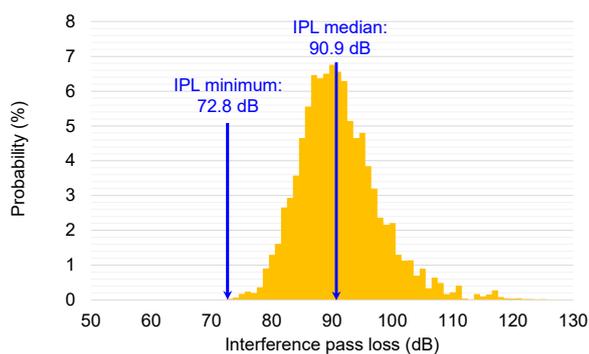


図8 小型固定翼機における機内送信アンテナ設置時の IPL 値ヒストグラム (ビーチクラフト B300)

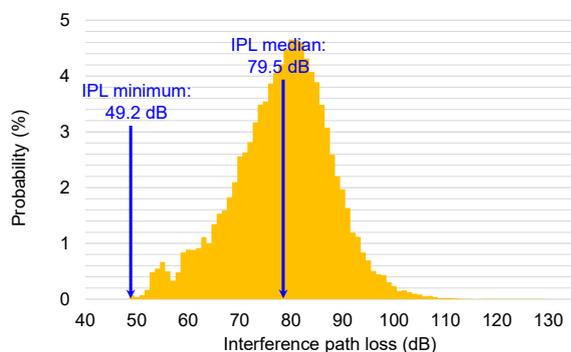


図9 ヘリコプタにおける機内送信アンテナ設置時の IPL 値ヒストグラム (BK117C-2)

ここでは例として航空機内部に送信アンテナを設置した場合の、IPL 測定結果を示す。図8および図9は、それぞれ小型固定翼機およびヘリコプタの機内送信アンテナ設置時の IPL 値ヒストグラムである。小型固定翼機およびヘリコプタの IPL 最小値は、それぞれ 72.8 dB および 49.2 dB である。

## 5 電波高度計の電磁干渉特性測定

被干渉側となる航空機電波高度計の電磁干渉特性を詳細に評価するため、電磁干渉評価測定を行う。本測定は、令和4年度から実施している指定研究「電波高度計と同一隣接周波数利用システムの周波数共用に関する研究」に先行して実施するものであり、代表的な電波高度計の電磁干渉特性を取得して、課題抽出を行う。図10に、RTCA DO-155[3]の測定評価系に基づく電波高度計の電磁干渉特性の測定状況を示す。これまでに延べ7台の電波高度計の測定評価を実施しており、代表例の報告と結果取りまとめ

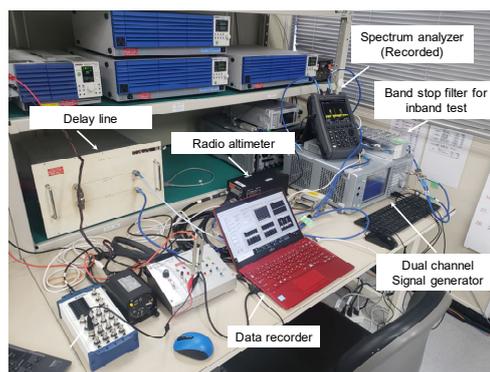


図10 電波高度計の電磁干渉特性測定状況

を実施中である[4]。今後、後継研究において、WAIC 機器および隣接周波数帯を用いる Sub-6 5G モバイルシステムの電磁干渉評価のために活用する予定である。

## 6 まとめ

WAIC 機器および電波高度計の電磁環境評価について、WAIC 機器と電波高度計を共用する条件を明らかにするために実施した研究項目の概要を述べた。WAIC 機器の電磁界放射特性を詳細に評価可能な電磁界数値解析技術を開発した。また、航空機電磁環境評価および IPL 測定結果例を述べた。さらに、電波高度計の電磁干渉特性測定の概要を記した。

## 参考文献

- [1] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA), “DO-378 - Minimum Aviation System Performance Standard (MASPS) for Coexistence of Wireless Avionics Intra-Communication Systems within 4200-4400 MHz,” Jul. 2019.
- [2] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA), “DO-307A - Aircraft Design and Certification for Portable Electronic Device (PED) Tolerance,” Dec. 2016.
- [3] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA), “Minimum Performance Standard for Airborne Low-Range Radar Altimeters,” DO-155, Nov. 1974.
- [4] S. Futatsumori, “Interference Susceptibility Evaluations of Pulsed Radio Altimeters Due to 5G Mobile Base Station Signal,” ICAO Frequency Spectrum Management Panel, WG12, Oct. 2021.

## 4. SWIMによる軌道ベース運用に関する実証実験

監視通信領域 ※呂 暁東, 森岡 和行, 金田 直樹, 古賀 禎  
航空交通管理領域 ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル, 平林 博子, ブラウン マーク

### 1. INTRODUCTION

Global harmonization of Air Traffic Management (ATM) systems is envisioned and described in the International Civil Aviation Organization (ICAO) Global ATM Operational Concept (GATMOC) [1]. The GATMOC presents a holistic vision to improve the safety, operating economics, environmental sustainability, and security of civil air transportation. Trajectory-Based Operations (TBO) is fundamental to realizing the benefits anticipated from the GATMOC concept. An underlying premise of TBO is “ATM considers the trajectory of a manned or unmanned vehicle during all phases of flight and manages the interaction of that trajectory with other trajectories or hazards to achieve the optimum system outcome, with minimal deviation from the user requested flight trajectory, whenever possible”.

This idea of TBO outlined in the GATMOC is not new, but it is maturing as the advancement of concept development and standardization of System Wide Information Management (SWIM) [2] and Flight and Flow Information for a Collaborative Environment (FF-ICE) [3] make its implementation more feasible. Based on the definition and the scope of TBO described in the ICAO Global TBO Concept [4], it is therefore now an appropriate time to discuss technical solutions and approaches for TBO implementation.

There are several current limitations preventing the requirements of GATMOC being fulfilled. Lack of information sharing between Airspace User (AU) and ATM Service Provider (ASP), both within ASP systems and between ASPs, leads to inconsistent and inaccurate trajectory predictions. As air traffic control (ATC) voice clearances might not be input into automation and systems might not share known

information of relevance to trajectory prediction, no consistent view of an expected trajectory is maintained using the best-known information. Moreover, decision-making is either not informed by a trajectory or is based on trajectories that are managed locally within systems, rather than a shared and collaboratively-obtained reference.

The TBO concept aims to coalesce the GATMOC components during tactical, planning and flight operations in the ATM system by coordinating the view of the trajectory between different actors in a collaborative environment, ensuring consistency between the trajectory and restrictions that originate from the various GATMOC components and actors that shape this trajectory. TBO represents a shift from present operations towards the use of a shared, collaboratively-developed trajectory which more closely meets AU objectives and serves as the basis for decision-making across ATM system actors. It thus provides an opportunity to increase the predictability of flight operations, with flight-impacting decisions being coordinated across concept components [4]. The TBO concept also incorporates the dynamic and flexible operational demands of real-time information exchange between AUs and ASPs necessary for Collaborative Decision Making (CDM) and Performance Based Navigation (PBN).

In order to validate this concept and promote the shift from current voice-based operation to TBO, the Multi-Regional TBO Demonstration (MR TBO) project has been conducted by the Federal Aviation Administration (FAA) cooperating with international partners (NAV CANADA, AEROTHAI, the Civil Aviation Authority of Singapore (CAAS) and the Japan Civil Aviation Bureau (JCAB)) through tabletop exercises and technical interchanges. This

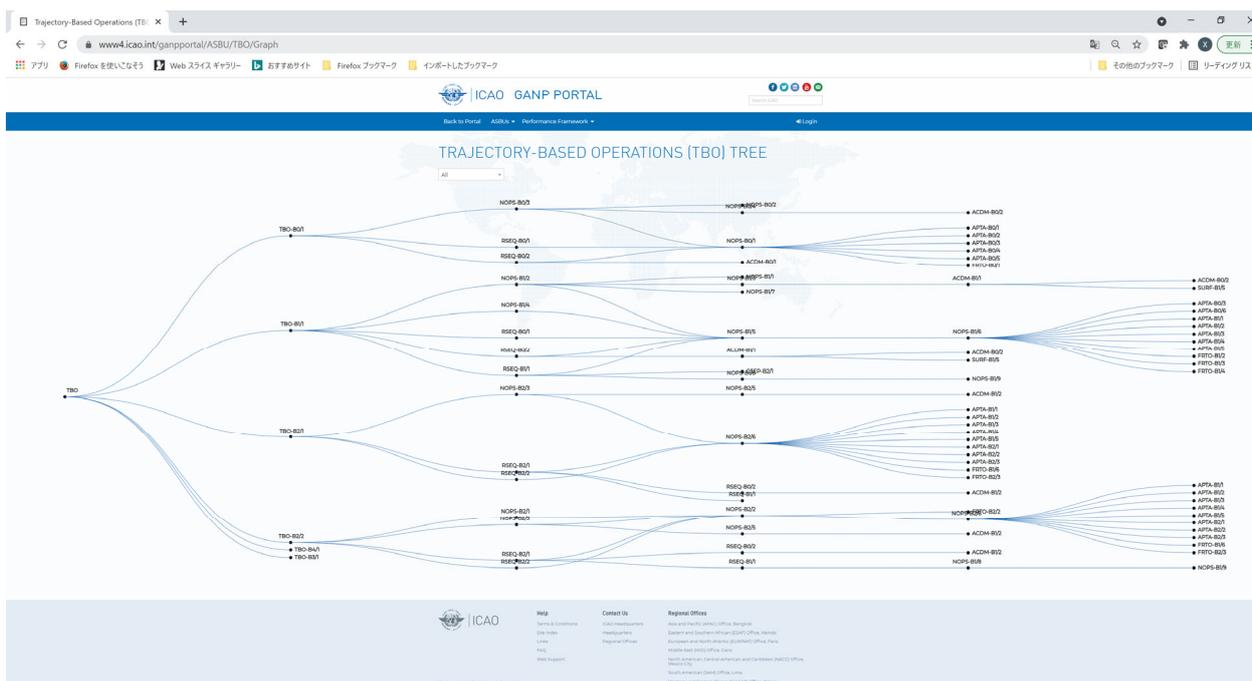


Figure 1: TBO Tree (<https://www4.icao.int/ganportal/ASBU/TBO/Graph>)

collaborative effort explores the impacts of TBO related to post-departure flight operations, with various levels of equipage and crew capabilities, within the context of ATM system modernization initiatives, supporting the development of data exchange standards and relevant ICAO provisions, standards and guidance materials.

As a technical supporter of JCAB, the Electronic Navigation Research Institute (ENRI) has developed a test facility environment that provides simulation capabilities for TBO demonstration in collaboration with NEC Corporation. In this paper, the observations and analyses of MR TBO demonstrations consisting of scenario discussion and function development for TBO implementation is reported. Moreover, the coordination method and information exchange between SWIM-based services in the post-departure phase of flight for how to use managed trajectories is discussed. Finally, the lessons learned and challenges for trajectory sharing, management, and utilization are discussed.

The paper is structured as follows. In the next section, the roadmap of Global Air Navigation Plan (GANP) for full TBO implementation is introduced. In

section 3, discussions of scenarios and operational values of TBO are presented. In section 4, the development and analysis of the ENRI test system for TBO demonstrations are presented. The paper is concluded in section 5.

## 2. SWIM, FF-ICE AND TBO

### 2.1 GANP

Figure 1 shows the roadmap towards the full implementation of TBO published in the ICAO GANP [5]. The GANP identifies necessary capabilities and technologies and breaks them down using the Aviation Systems Block Upgrade (ASBU) framework to provide a roadmap of incremental ATM system upgrades that will allow the global ATM community to more efficiently move into the TBO future. It provides a comprehensive understanding of the intent of, and delivery mechanisms for, the ATM system envisioned in the GATMOC. The ASBUs are divided into temporal Blocks to guide the ATM community’s implementation of these new capabilities.

Flowing from the GANP are more focused individual concepts called threads, and threads are

comprised of elements. Threads are distinct from each other; for example FF-ICE and SWIM are two threads that have dependencies upon one another at the element level as well as sharing common enablers in other threads.

## 2.2 Relationship

SWIM provides a digital data-sharing infrastructure that facilitates the data sharing required by TBO. SWIM consists of standards, infrastructure and governance enabling the management of ATM-related information and its exchange between qualified parties via interoperable services [2]. SWIM delivers integrated digital aeronautical information, weather information, constraint information while enabling the data collection and data sharing necessary for user collaboration and improved management of flight constraints. This will enable increased common situational awareness and improved ASP agility to deliver the right information to the right people at the right time.

Building on SWIM, FF-ICE provides a globally harmonized process for planning and sharing consistent flight information. The FF-ICE concept is split into two development cycles: provisions, standards and guidance for the first FF-ICE development cycle (FF-ICE/R1) focus on flight planning and trajectory negotiation from submission of a flight plan or up to the flight's departure. The initial concept for the second FF-ICE development cycle (FF-ICE/R2) focuses on the execution of the flight and post-departure trajectory negotiation. FF-ICE relies on the mutually-agreed 4 Dimensional Trajectory (4DT) of an aircraft from gate to gate to allow ASPs and AUs an improved understanding of operational expectations.

TBO relies on a globally standardized exchange of data via SWIM. The SWIM Global Interoperability Framework consists of information exchange models such as the Flight Information Exchange Model (FIXM) [6], Aeronautical Information Exchange Model (AIXM) [7] and ICAO Weather Information

Exchange Model (IWXXM) [8]. Moreover, the operational and data frameworks for flow management, flight planning, and trajectory management provided by FF-ICE are also necessary for TBO implementation.

## 3. SCENARIO AND OPERATIONAL VALUES

To explore the primary characteristic of TBO that includes trajectory sharing, management and utilization, we consider a scenario with multiple flights in a trajectory-managed environment. Both eASPs (FF-ICE-capable ASPs) and eAUs (FF-ICE-capable AUs) benefit from this process by collaboratively establishing a mutually acceptable 4D trajectory for a flight not only prior to departure but also during the flight itself. Trajectory negotiation is conducted between eASPs and eAUs through the timely exchange of flight constraints and traffic flow information. This real time information sharing and trajectory negotiation support common situational awareness across stakeholders, creates more accurate demand predictions, and improves the safety, efficiency and capacity of operations.

### 3.1 Scenario

The scenario shown in Figure 2 consists of three flights: UAL5 and UAL7 departing from Denver International Airport (KDEN) and Houston International Airport (KIAH) respectively to Narita International Airport (RJAA), and JAL9 departing from San Francisco International Airport (KSFO) also to RJAA. Data exchanges include the participation of two eAUs (United Airlines (UAL) and Japan Airlines (JAL)) and three eASPs (FAA, NAV CANADA and JCAB). The eAUs are able to publish FF-ICE Flight Plan and related messages to share and negotiate the trajectory of the flight with the eASPs. FAA, NAV CANADA and JCAB are able to provide FF-ICE services and SWIM-enabled applications for pre-departure and post-departure trajectory negotiation with all downstream and upstream FIRs (Flight Information Region). This scenario focused on the post-departure phase with the integration of technical

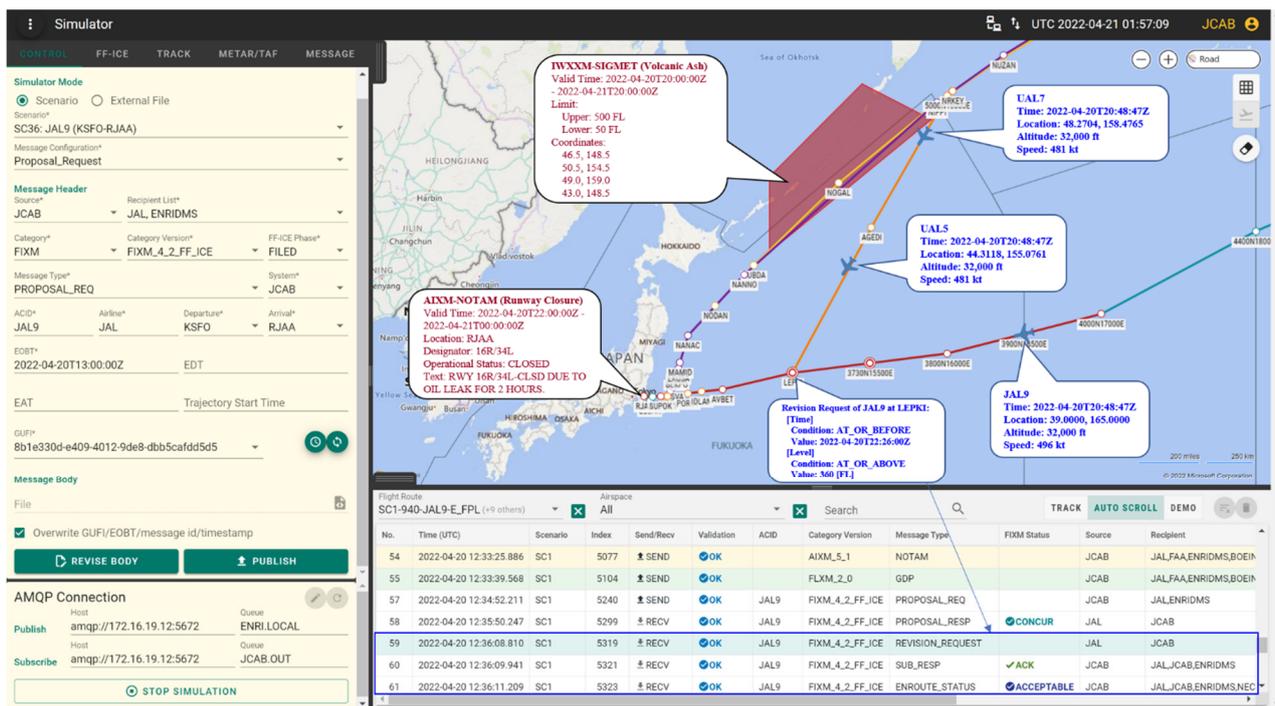


Figure 2: Trajectory Based Multiple Flights Operation

actions and strategic plan by cooperating with Air Traffic Flow Management (ATFM) services. The operational flow of this scenario using FF-ICE services over SWIM is as follows:

- 1) At approximately four hours prior to scheduled departure, the UAL dispatcher submits Filed Flight Plans for UAL7 and UAL5 to the FAA, NAV CANADA and JCAB, and receives a response of “Acceptable” from all three.
- 2) Four hours prior to departure, the JAL Flight Operations Center (FOC) submits a Filed Flight Plan to the FAA and JCAB for JAL9, and also receives a response of “Acceptable” from both.
- 3) When UAL5 is 90 minutes from the Fukuoka FIR boundary, the FAA sends an ABI (Advance Boundary Information) message for UAL5 to JCAB. At 30 minutes from the boundary, the FAA sends a CPL (Current Flight Plan) message for UAL5 to JCAB and receives an ACP (Accept) response. (The FAA also sends an ABI for UAL7 to JCAB 90 minutes before the FIR boundary.)
- 4) Shortly after the CPL message has been sent, the crew of UAL5 observes volcanic ash (VA) ahead on its flight planned route, so requests 100nm left deviation to KZAK. Since this deviation will also affect the trajectory in Fukuoka FIR, the FAA sends a CDN (Coordination) message to JCAB to respond to the urgent request. Fortunately, there is no other traffic affected, and JCAB responds with an ACP message to the FAA.
- 5) JCAB publishes a SIGMET message regarding the VA, which imposes a constraint that flights should not enter the affected area (Figure 2). This triggers the re-evaluation of FF-ICE Filing service to send an Enroute Status message with Not-Acceptable to UAL7, indicating that its current flight plan route is no longer acceptable.
- 6) The crew of UAL7 discuss the situation with the UAL FOC on “company” frequency and they agree to negotiate a new route to avoid the restricted area to the south. The UAL FOC then sends a Trial Request message to FAA and

- JCAB, and receives a “Concur” response from both, indicating that the proposal is possible to be acceptable.
- 7) The UAL FOC sends a Revision Request to the FAA to “lock in” the proposal as a formal update to the agreed trajectory, and receives an “Acceptable” response. To notify the revised trajectory to downstream eASPs, the FAA then publishes the Agreed Trajectory to JCAB.
  - 8) UAL7 is cleared to execute the agreed trajectory by the KZAC controller. The FAA then sends a CPL message for UAL7 to JCAB and receives an ACP response.
  - 9) After UAL7 and JAL9 cross the boundary into Fukuoka FIR, a runway (16R/34L) at RJAA is closed for two hours due to an oil spillage, and a corresponding NOTAM (Notification To Airmen) of the runway closure is published via SWIM (Figure 2).
  - 10) After issuing this NOTAM, JCAB initiates GDP (Ground Delay Program) for domestic departures to reduce the traffic flow into RJAA and updates the CLDTs (Calculated Landing Time) of affected flights that are already airborne. JCAB then submits a GDP message in FLXM (Flow information Exchange Model) format to UAL5, UAL7 and UAL9 to negotiate the updated landing time [9].
  - 11) According to the agreed 4D trajectories of UAL7 and JAL9, there is a potential conflict at the waypoint LEPKI. To avoid this potential risk, JCAB sends a Proposal Request specifying a revised CTO (Calculated Time Over) and altitude (FL360) at point 37N/150E to JAL9. After evaluating the operational viability of the proposal of JCAB, JAL FOC responds with a Proposal Response of “Concur” to JCAB to indicate that the proposal is acceptable. Finally, JAL FOC amends the planned trajectory by submitting a Revision Request message with the same parameters to JCAB, and receives an Enroute Status response of “Acceptable” (Figure 2).
  - 12) Similarly, JCAB then sends a Proposal Request with a revised CTO at LEPKI to UAL7. After evaluating the proposal, UAL FOC responds to JCAB with “Concur”. As this is a minor change to the trajectory that does not require a new clearance, the UAL FOC then sends a Trajectory Update message to JCAB with agreed condition and receives a Submission Response of “ACK”.
  - 13) After receiving Enroute Status of Acceptable for its proposal to JAL9, JCAB issues clearance to JAL9 for step climb to FL360 at 37E/150E.
  - 14) When UAL5, UAL7 and JAL9 cross the waypoint LEPKI, JCAB’s ATFM service sends a Object Update message with ATO (Actual Time Over) to its AMAN (Arrival Manager) service to initiate their arrival handling processes.
- Note that in some urgent situations, shorter-term tactical interventions and actual clearances to modify the flight path or speed will still be coordinated between ATC systems using AIDC and handled between the air traffic controller and the flight crew using voice or CPDLC via data link services. How to integrate these tactical actions with SWIM based strategic trajectory management is a future reaserch topic for us.

### 3.2. Operational Values

In a current environment, it is difficult to precisely calculate and predict the crossing time at certain waypoints for arrival management. Moreover, the labor is required to address constraints for runway closure and optimal flight level requests once an aircraft is in flight. A runway closure at a hub airport may affect hundreds of flights. With the opportunity for early information exchange, trajectory sharing and negotiation among stakeholders that FF-ICE and ATFM services provide, problems in all phases of flight that can exact a high cost in both financial and

workload terms can be solved more efficiently and expeditiously. This improvement offers enhanced predictability to both ASPs and AUs. Even when airborne, the flight crews can initiate strategic negotiation to request a better route or flight level depending on actual flight conditions. As a result, the following operational values can be considered to be improved through TBO:

- Enhanced Predictability
- Alignment of Tactical Actions and Strategic Plan
- Increased Reliable Flexibility
- Improved Strategic Planning
- Decreased Uncertainty

#### 4. TBO DEMONSTRATION

##### 4.1. Test System

The ENRI SWIM test system used by JCAB in the MR TBO demonstrations provides a basic technical infrastructure, information services, and some SWIM-enabled applications to support the development, validation and demonstration of SWIM concepts and services built on its infrastructure [10]. Figure 3 shows the high-level system architecture (blue box in the figure) and international system connections (orange box) of the JCAB system in the MR TBO demonstrations. NEC is a Asian GEMS (Global Enterprise Messaging Service) provider who provides connectivity between Local SIWM test systems and SkyFusion Frontier (SFF), which connects to the FAA and NAVCANADA test systems. The communication between the SFF and NEC Corp. uses TCP/IP with Transport Layer Security (TLS). An IPsec VPN is used for the network connection within Asian GEMS between AEROTHAI, CAAS and JCAB.

To ensure the interoperability of the exchanged information, GEMS providers enforce the use of the standardized aeronautical, flight and weather exchange models (AIXM, FIXM and IWXXM) with the updated versions for each of their SWIM users.

The ENRI facility contains the simulation and test

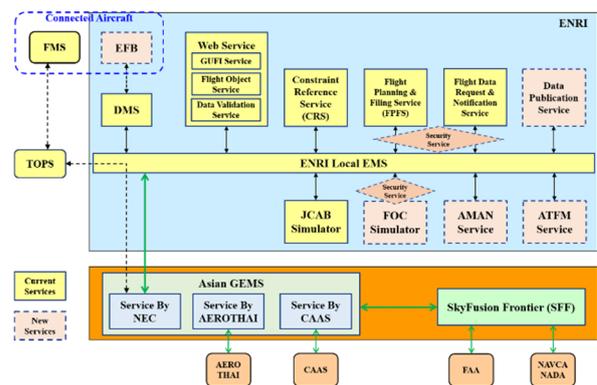


Figure 3: Test System Architecture

environment that allows the MR TBO demonstrations to carry out the required exchanges of information between all actors for both pre-departure and post-departure phases of flight. The test system as a whole provides not only Ground/Ground (G/G) SWIM information services but also Air/Ground (A/G) SWIM information exchange between an Electronic Flight Bag (EFB) on each aircraft and ground-based Data Management Services (DMS) [11]. In addition, a trust framework and security service have been developed to enable secured information exchange between trusted identities [10]. Moreover, data exchange between the surface/enroute/oceanic Air Traffic Control (ATC) systems in Japan and the aircraft onboard Flight Management Systems (FMS) can be simulated by the Trajectorized Oceanic Traffic Data Processing System (TOPS) provided by NEC.

##### 4.2. Trajectory Management

In the post-departure phase, the eASP and the eAU may have to manage three sets of trajectories associated with a flight created by different operational processes: the Aircraft Trajectory (i.e., without ATC involvement), ATC Trajectory (i.e., with ATC involvement) and Agreed Trajectory (with FF-ICE services), and mismatches may arise between them. It is difficult to make large changes to well-established ATC systems and procedures in the short or medium term. It will become necessary to understand how to work with current ATC systems to reflect the least modifications of tactical actions in strategic plans. An

approach to share the updated trajectory and assure trajectory consistency between different stakeholders and systems is therefore necessary in a TBO environment.

In some situations, circumstances such as urgency will make it difficult to perform strategic negotiation between stakeholders before a tactical action is required, and it will be necessary to notify the updated 4DT following a tactical intervention to a flight to related systems and downstream eASPs. In the demonstration, if an amended clearance was issued by ATC system or the sector controller, the Agreed Trajectory was updated with current ATC Trajectory and the updated Agreed Trajectory was disseminated to relevant downstream eASPs via the FF-ICE Notification Service.

Trajectory management will consist of two functions to evaluate an Agreed Trajectory. The first function is expected to involve a re-evaluation process to confirm the effect of new constraints on the Agreed Trajectory. The second function is expected to involve a monitoring process to align the Aircraft Trajectory with the Agreed Trajectory.

The re-evaluation process of FF-ICE Filing Service will be triggered when a new constraint is issued by Constraint Reference Service (CRS). If this constraint affects currently managed Agreed Trajectories, an updated Filing Status of “Not-Acceptable” and information on the constraint (in AIXM or IWXXM formats) will be published to relevant eAUs. However, not all Limitations/Restrictions/Constraints used in current operations should be considered as a “constraint” on flight planning or execution. For example, because of dynamic time property, it is difficult to allow forecast airspace congestion to trigger the re-evaluation process and be returned as an airspace entry constraint. To enable the eASP to allocate the access to resources and allow eAUs to swap access to airspace between flights, coordination between FF-ICE and ATFM has been implemented in the demonstration system.

Moreover, in the ENRI test system, to assure

trajectory consistency of in-flight aircraft, a ATFM trajectory monitoring service has been developed by cooperating with surveillance service. If the discrepancy of position and/or time between a flight’s surveillance-derived position and a 4D point included in the Agreed Trajectory is more than a certain threshold, a notification will be published from the ATFM service to the aircraft and eAU. When the aircraft’s EFB receives such a notification from the DMS, a re-calculation of current Aircraft Trajectory will be triggered via trajectory synchronization process.

## 5. CONCLUSIONS

This paper presents an operational view of the capabilities and services supporting TBO and introduces the development of the demonstration for MR TBO international project based on the ENRI SWIM Test Bed. Through the scenario discussion, the operational values of TBO and potential operational feasibility challenges between eASPs and eAUs are clarified. Moreover, additional functional capabilities of service and application required to support TBO are identified. Finally, the coordination approaches between ATFM and FF-ICE to achieve trajectory management of TBO is discussed and the efficiency is shown by the scenario-based demonstration.

## REFERENCES

- [1] Global Air Traffic Management Operational Concept, ICAO Doc. 9854, 1st Edition, 2005.
- [2] Manual on System Wide Information Management (SWIM) Concept, ICAO Doc 10039, ICAO, 2015.
- [3] Manual on Flight and Flow - Information for a Collaborative Environment, ICAO Doc. 9965, ICAO, 2012.
- [4] Global TBO Concept, ICAO ATMRPP, V0.11.
- [5] Global Air Navigation Plan Portal, <https://www4.icao.int/ganpportal/>.
- [6] AIXM - aeronautical information exchange model, <http://www.aixm.aero/>.

- [7] FIXM - flight information exchange model, <http://www.fixm.aero/>.
- [8] Manual on the Digital Exchange of Aeronautical Meteorological Information, ICAO Doc.10003, 2014.
- [9] FAA, Development of the Flow Information Exchange Model (FLXM), ICAO ATMRPP-WG/39.
- [10] X.D Lu, K. Morioka, T. Koga and Y. Sumiya, "Air-Ground System Wide Information Management to Achieve Safe Flight Operation," IEEE HASE2019, January 2019.
- [11] X.D. Lu, K. Morioka, T. Koga and Y. Sumiya, "Collaborative Flight and Flow Information Exchange to Achieve Seamless Air Traffic Management Operation," IEEE ISADS2019, April 2019.

## 5. ノルウェー・オスロにおける QZSS から放送された DFMC SBAS の受信実験

航法システム領域 ※高橋 透, 齋藤 享, 北村 光教, 坂井 丈泰

### 1 まえがき

北極域の海氷面積の減少により、航空及び海洋活動が活発になっている。最近のシミュレーションでは2030年から2080年には夏季において海氷が無くなる“ice free”となる期間が訪れることが予想されている[1, 2, 3, 4]。従って、今後も北極の航空・海洋活動は活発化し続けると考えられる。

新航路の開拓、地下資源調査やインフラの乏しい北極域に位置する空港への安全な離着陸を実現するためには Global Positioning System (GPS)に代表される Global Navigation Satellite System (GNSS)による2周波測位とそれを補正する Dual Frequency Multi Constellation (DFMC) Satellite Based Augmentation System (SBAS) [5]を利用することが有効であると考えられている[7]。しかし、現況のSBASは静止衛星から放送されている。図1aに示すように静止衛星の電波は緯度72度以上では受信することができないため、極域では現在SBASを利用することはできない。

北極域で2周波数測位の補正メッセージが受信できるように静止軌道ではない Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO)からDFMC SBASを放送することが検討されている。日本の準天頂衛星 (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) の軌道はIGSOの一種でQZSSから放送される電波は極域で受信することができる(図1b)。電子航法研究所はDFMC SBASのプロトタイプを開発し、QZSSから試験的に放送している[8]。従って、本研究では北極域でQZSSの受信実験を行い、その測位・補強精度の検証を行うことを目的とする。

本研究ではノルウェー・オスロに受信機を設置し、観測を行なった。オスロはQZSSから放送される電波が観測可能なことに加え、SBASで、静止衛星である European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)からの電波も受信でき、そのデータを検証に用いることができる。

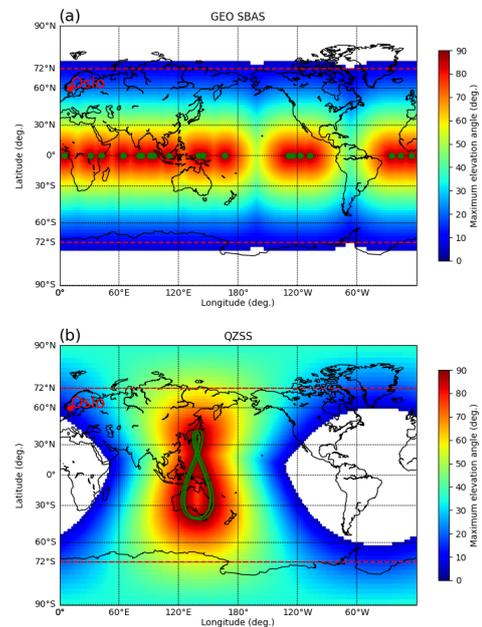


図1. (a)静止衛星と(b)QZSSの仰角。赤の点線は北緯及び南緯72度を示す。緑点と緑線は静止衛星の位置とQZSSの軌道を示す。

### 2 オスロにおける衛星配置

図2にオスロにおける衛星配置を示す。GPS及びGNSS衛星の1つであるGalileo衛星は仰角およそ80度程度まで上がり、常に15から20機は見えている。QZSSは北東方向に現れ、最大仰角はおよそ13度で1日およそ15時間程度その電波が受信できることが見込まれる。EGNOSは南から南東方向に見られ、仰角は8から20度である。

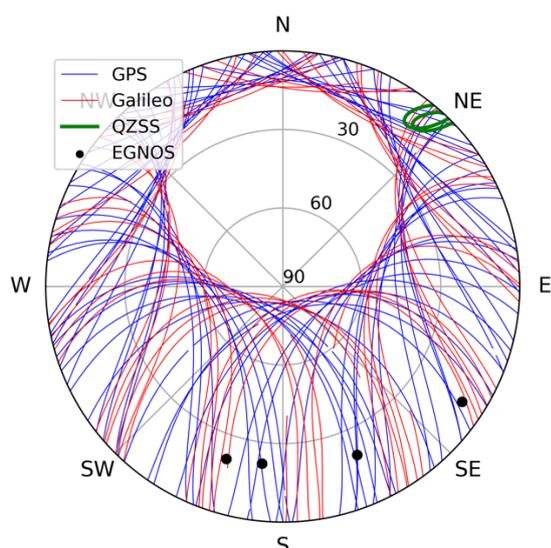


図 2. オスロにおける GPS（青線），Galileo（赤線），QZSS（緑線），EGNOS（黒点）の衛星軌道の全天プロット。

### 3 観測

GNSS 受信機とアンテナをノルウェー・オスロに位置するオスロ大学の屋上に設置した（図 3）。アンテナの位置は Precise Point Positioning (PPP) により計測し， $10.71701346^\circ$  E,  $59.937564229^\circ$  N,  $133.8838$  m であった。アンテナは L1/L5, E1/E5a が受信可能な JAVAD GrAnt-G3T を使用した。受信機は 2 機使用し，JAVAD DELTA と Furuno prototype DFMC SBAS（以下，Furuno）受信機によって，それぞれ GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou からの信号と DFMC SBAS メッセージの受信を行なった。JAVAD DELTA のデータ保存は 1 Hz で行われた。これらの受信機はパソコン（Panasonic Let's note）によって受信機の制御及びデータ保存が行われた。

この観測は 2021 年 2 月 24 日 9:10:17 UT から 2021 年 3 月 17 日 18:44:31 UT まで連続して行われ，GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou と QZSS から放送された DFMC SBAS メッセージの受信に成功した。観測期間中，3 月 2 日，3 月 12 日，3 月 17 日にパソコンがハングアップした。このため，これら 3 日間のデータは本研究の解析には使用していない。



図 3. (a) オスロ大学の俯瞰図とアンテナ設置位置。(b) アンテナ外観。(c) 受信機とパソコン。

### 4 観測結果

本研究では GPS 及び Galileo から放送された L1/E1 と L5/E5a の 2 周波を使って最小二乗法と 100 秒のキャリアスムージングを用いて測位を行なった。Horizontal Protection Level (HPL), Vertical Protection Level (VPL) は DFMC SBAS のメッセージを ICAO2018[9]に基づいて計算した。また，測位と補正に用いた衛星の軌道情報であるエフェメリスと補正メッセージは放送されたデータを使った。

本研究では海洋や航空での受信機周りの障害物が少なく，マルチパスの影響を比較的受けにくい状況での利用を想定しているが，図 3a に示すようにアンテナ設置場所の北東側に建物が

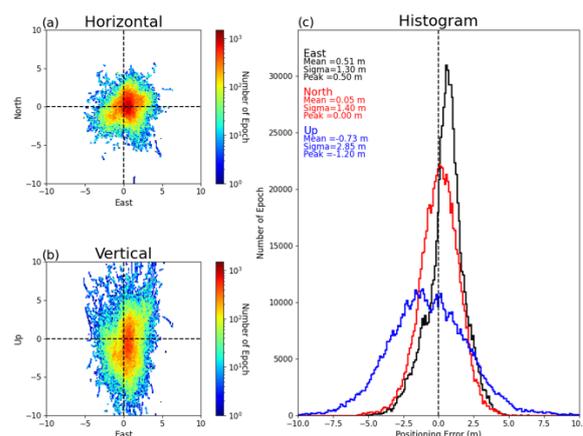


図 4. (a) 東方向-北方向，(b) 東方向-鉛直方向の測位結果，(c) 測位結果のヒストグラム。東方向を黒線，北方向を赤線，鉛直方向を青線で示す。測位には補正メッセージは使用していない。

あり、マルチパスによる影響を受ける可能性がある。従って、

$$|\rho_{i,code} - \rho_{i,carrier}| > 6.18 \sigma_{i,airDF} \quad (1)$$

となる衛星の観測データは排除した。ここで、 $\rho_{i,code}$ 、 $\rho_{i,carrier}$ は衛星*i*に対して観測された2周波線形結合及びキャリアスムージングされたコード擬似距離と位相擬似距離であり、 $\sigma_{i,airDF}$ は衛星の仰角と受信機ノイズから求められるマルチパス・ノイズ誤差である[9]。

図4に補正メッセージを利用せずに測位した結果を示す。東方向、北方向、鉛直方向の測位のPPPからの差の平均はそれぞれ、0.51, 0.05, -0.73 m、測位の標準偏差( $\sigma$ )は1.30, 1.40, 2.85 mとなった。

図5に補正メッセージを利用して測位した結果を示す。東方向、北方向、鉛直方向の測位のPPPからの差の平均はそれぞれ、0.25, -0.16, -0.83 m、測位の $\sigma$ は2.74, 2.38, 4.76 mとなった。

北方向以外の測位は補正メッセージを利用することで改善がみられたが、 $\sigma$ が大きくなった。これはオスロにおいて、補正される衛星数が観測された衛星数に対して少ないため、それに伴って測位計算で使用した衛星数が減ったためである。

次に、HPLの計算を行なった。本研究では海洋と航空で共通して重要になる水平方向のProtection Level (PL)であるHPLを用いて議論するが、参考のためにVPLの計算を行なった。

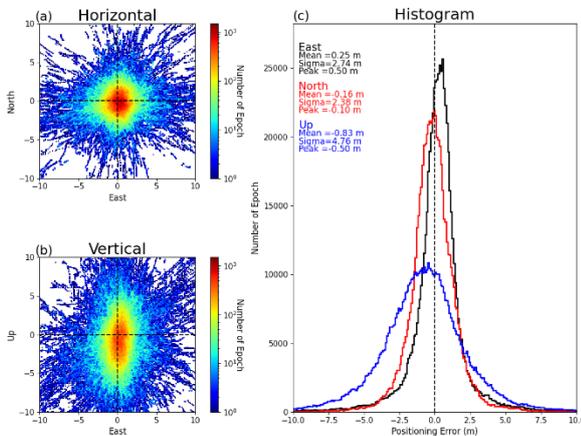


図5. 補正メッセージを用いた測位結果。図4と同じフォーマットで示す。

図6にHPLとPPPからの測位の差であるHorizontal Positioning Error (HPE)を比較したスタンプードチャートを示す。本研究ではLocalizer Performance with Vertical Guidance (LPV)での利用を想定して、水平警報限界(HAL: Horizontal Alert Limit)を40 mに、垂直警報限界(VAL: Vertical Alert Limit)を50 mに設定した。多くの場合、HPLがHALを下回る結果となったが、時折、HALを超えるHPLが観測された。HPLを超えるHPEは観測されなかった。

PLがAlert limitを下回る割合であるAvailabilityを求めると、水平方向と鉛直方向でそれぞれ83.17, 81.54%となった。

### 5 議論とまとめ

ここでは、原因と将来的にAvailabilityが極域において改善するか否かについて議論する。前

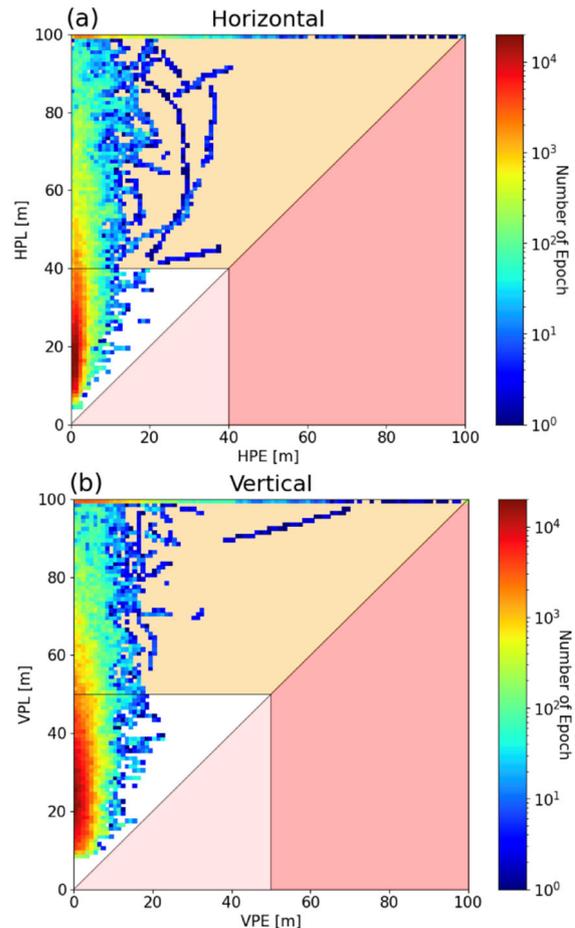


図6. (a)水平、(b)鉛直のスタンプードチャート。

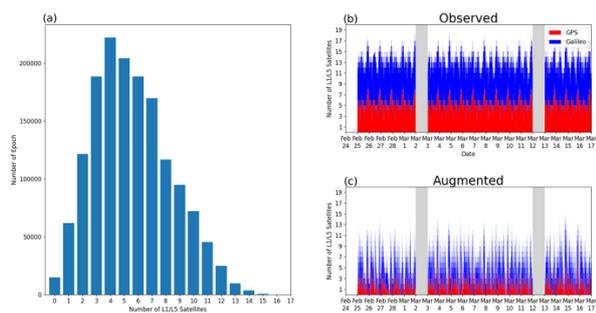


図7. (a)補正された衛星数のヒストグラム。(b)観測された衛星数の時間変化。(c)補正された衛星数の時間変化。赤で GPS，青で Galileo を示す。

述の通り，観測された衛星数に対して補正された衛星数は少ない。図7に補正された衛星数のヒストグラムと観測された衛星数と補正された衛星数の時間変化を示す。L1/L5, E1/E5a を放送している衛星はおよそ，11機から17機で観測されているが，補正された衛星は数機から11機で，2周波測位では6機以上の衛星を用いることが望ましいが，6機以上の衛星が補正される時間は全体のおよそ半分程度しかない。

補正された衛星が少ないことから，HPEだけでなくHPLも大きく算出されている。表1に補正された衛星数ごとに算出されたAvailabilityを示す。補正された衛星数の増加に伴ってAvailabilityが増加する。補正された衛星数が11機ある場合，水平方向のAvailabilityが100%に達し，LPVによる離着陸に利用可能となる。しかし，11機の補正された衛星が観測できるのは全体の5.48%の時間であり，極めて稀である。

表1. 補正された衛星数ごとのAvailability

補正された衛星数	全時間に対する割合 [%]	水平方向 Availability [%]	鉛直方向 Availability [%]
6	47.18	83.17	85.50
7	34.93	91.34	90.12
8	23.89	97.09	93.75
9	16.32	98.74	95.86
10	10.16	99.53	97.46
11	5.48	100.0	98.85

補正された衛星数が少ない最も大きい原因は基準局の配置である。QZSSは日本において主に利用されることが想定されているため，基準局が日本の緯度帯に集中して配置されている。図8aに示すように北欧地方には基準局が希薄である。これによってオスロでは補正された衛星数が少なくなっている。

将来的にすべてのGPS, Galileo衛星はL1/L5, E1/E5a信号を放送する予定である。従って，本研究では以下の2つCase1とCase2の条件で将来的にAvailabilityがどの程度改善されるか見積もりを行なった。

Case 1

- 2021年3月1日時点ですべてのGPSとGalileo衛星がL1/L5, E1/E5a信号を放送していたとする。
- 衛星位置は2021年3月1日のAlmanacを使って計算する。
- 基準局は図8aに示される2021年3月1日現在のものを利用する。
- 衛星が7つの基準局から監視されていた場合その衛星は補正されたとする。

Case 2

- Case1に加え，基準局がノルウェー・オスロ，イタリア・ミラノ，アイスランド・レイキャビクに仮に新設されたとする。

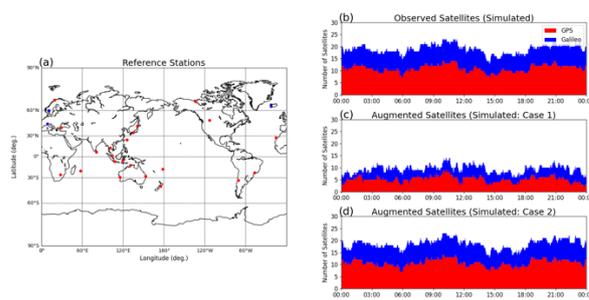


図8. (a)基準局の配置。2021年3月1日現在の基準局を赤点，Case2で仮定した基準局を青点で示す。(b)見積もられた観測される衛星。(c)Case1で見積もられた補正された衛星数。(d)Case2で見積もられた補正された衛星数。

計算した見積りの結果を図8に示す。観測される衛星数は多くの時間帯で20機程度である。Case1の条件で、11機以上の補正された衛星が観測される時間は全体の25.56%であり、十分とは言えない。一方でCase2では11機以上の補正された衛星がすべての時間で観測される。従って、現況ではすべての衛星からL1/L5, E1/E5aが放送されたとしても北極域でQZSSを用いた離着陸か海洋での精密な測位を行うことは限られた時間しか実現できず、実用は難しいが、もし、今後基準局をその配置が希薄な欧州地方に3地点以上配置されたならば、QZSSが観測されている時間では補正メッセージを使った測位が航空・海洋分野で利用可能であると考えられる。

#### 参考文献

- [1] Miller, A. W. and Ruiz, G. M. (2014). Arctic shipping and marine invaders. *Nature Climate Change*, 4(6):413–416.
- [2] Cavalieri, D. J. and Parkinson, C. L. (2012). Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *The Cryosphere*, 6(4):881–889.
- [3] Kacimi, S. and Kwok, R. (2022). Arctic snow depth, ice thickness, and volume from icesat-2 and cryosat-2: 2018–2021. *Geophysical Research Letters*, 49(5):e2021GL097448. e2021GL097448 2021GL097448.
- [4] Overland, J. E. and Wang, M. (2013). When will the summer arctic be nearly sea ice free? *Geophysical Research Letters*, 40(10):2097–2101.
- [5] Walter, T., Blanch, J., and Enge, P. (2012). L1/L5 sbas mops to support multiple constellations. In *Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, pages 1287–1297, Nashville, TN. Institute of Navigation.
- [6] Blanch, J., Walter, T., Enge, P., Pervan, B., Joerger, M., Khanafseh, S., Burns, J., Alexander, K., Boyero, J. P., Lee, Y., Kropp, V., Milner, C., Macabiau, C., Suard, N., Berz, G., and Rippl, M. (2014). Architectures for advanced RAIM: Offline and online. In *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014)*, pages 787–804, Tampa, Florida, USA. Institute of Navigation.
- [7] Reid, T., Walter, T., Blanch, J., and Enge, P. (2016). GNSS integrity in the arctic. *NAVIGATION*, 63(4):469–492.
- [8] Kitamura, M. and Sakai, T. (2019). DFMC SBAS prototype system performance using global monitoring stations of QZSS. In *Proceedings of the ION 2019 Pacific PNT Meeting*, pages 382–387, Honolulu, Hawaii, USA. Institute of Navigation.
- [9] ICAO (2018). DFMC SBAS SARPS - Baseline draft for validation, NSP\_5 Report on Agenda Item 2. APPENDIX A2. International Civil Aviation Organization.

## 6. RNP to xLS の経路設計と飛行実証

航法システム領域 ※齊藤 真二, 福島 荘之介  
航空交通管理領域 森 亮太

### 1 はじめに

ICAO (International Civil Aviation Organization: 国際民間航空機関) は, PBN (Performance Based Navigation: 性能準拠型航法) 概念による航法を促進し, GBAS (Ground-Based Augmentation System: 地上型衛星航法補強システム) 等の新しい進入着陸システムの導入により, 安全で効率的な進入方式を実現し, 運航の最適化を図る計画である。このため, RNP (Required Navigation Performance: 航法性能要件) 進入の RF (Radius to Fix: 円弧旋回) レグによる中間進入と ILS (Instrument Landing System) や GLS (GBAS Landing System) による最終進入経路を接続する新しい進入方式 (RNP to xLS) が検討された。

我が国では PBN による RNAV/RNP 進入方式が多く空港に展開され, RF レグを使った RNP AR 進入が普及段階にある。また, 東京国際空港へ GBAS が導入され, 運用評価が行われているところである。このような状況で, 近い将来 RNP to xLS の国内展開が期待され, 我が国の空港環境をふまえた実現可能性と将来の便益の明確化が要望されている。

そこで, 当研究所では, RNP to xLS の設計条件や導入効果を評価するため, 便益が見込まれる空港をモデル空港として選定し, 方式設計を行い, フルフライトシミュレータによる検証 [1,2] と実験用航空機による飛行実証を実施した。本稿では, 飛行方式設計の考え方と飛行実証の結果について述べる。

### 2 RNP to xLS 方式について

RNP to xLS 方式は RNP の RF レグと GLS または ILS の最終進入セグメントを接続する方式である。RNP の RF レグを使った航法には, RNP AR 方式もあり, 国内ではこれまで 30 以上の空港に導入されている。RF レグの利用は, 保護区域の狭い自由度の高い経路を設計できることにあり, これまで複数の空港で経路短縮による燃

料消費や環境負荷低減の便益が報告されている。これに対して RNP to xLS 方式は, RF レグを中間進入セグメントに使い GLS または ILS の最終セグメントに接続する精密進入方式である。RNP AR 方式が APV (Approach Procedure with Vertical guidance) に区分され, 非精密進入と同様な最低気象条件となることに対して, RNP to xLS 方式は, 精密進入となるので決心高度を低く設定し, 低視程時の着陸を可能とすることに加え, RF レグによる便益を享受できる特長がある。さらに, RNP AR 方式のような特別許可は必要ない。ただし, 現在の GLS および ILS 装備は, 中間進入セグメントから最終進入セグメントへの会合動作を必要とするため, RNP AR 方式よりは最小経路長が数 NM 長い設計基準となる。図 1 に RNP to xLS と既存の ILS 精密進入および RNP AR 方式の比較イメージを示す。最終進入コースへの会合点からグライドパス会合点までの最短長は最終進入コースへの会合角度により決定される。既存の ILS 精密進入で用いられている 30 度の場合には 2.0NM, RF レグからの会合の場合には ILS では 1.5NM, GLS では 1.0NM とされている [3]。この 0.5NM の差異は, GLS のパス形成に関わる誤差が無視できることから, 航空機のパスアライメント誤差が ILS より小さくなるためである。

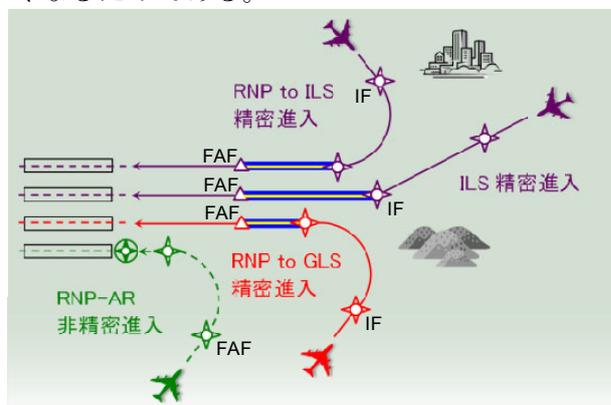


図 1: RNP to xLS 方式と既存の ILS 精密進入および RNP AR の比較

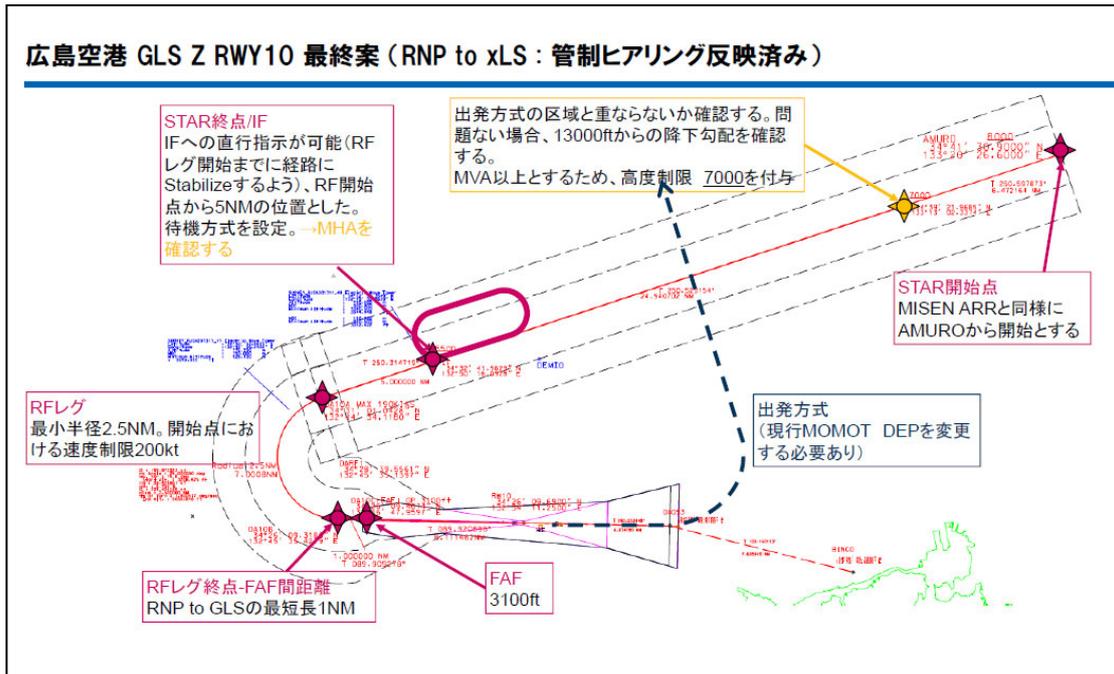


図 2：設計した RNP to GLS 方式（広島空港 RWY10）[研究用]

### 3 RNP to xLS 方式の設計

#### 3.1 モデル空港の選定と期待される導入効果

典型的な RNP to xLS 方式の進入経路により経路短縮効果が見込まれる進入のモデル空港として広島空港 (RWY 10) を選定した。障害物回避、ミナマ・気象条件の緩和の効果が見込まれる空港として、高松空港 (RWY08) を選定した。

選定したモデル空港や方式設計の関係官署を訪問し、現地管制官へのヒアリングを行い、空港環境における制約（出発機・小型機経路との交差など）、設計条件を調査し、便益が高い新しい飛行方式を設計した。

#### 3.2 広島空港 RWY10

設計した広島空港 RWY10 の RNP to GLS 方式を図 2 に示す。現地管制官のヒアリングの結果、出発方式との間隔が確保できる位置にウェイポイントを追加する等の修正を行っている。現行の RNAV STAR (Standard Terminal Arrival Route: 標準到着経路)+ILS 進入とした場合の AMURO (起点となるウェイポイント) から RWY10 THR (滑走路末端) までの経路長は 54.6NM である。RNP to GLS 方式での経路長は 45.4NM となり、9.2NM の短縮となる。経路が短縮されることから、飛行時間、燃料使用量の削減が期待される。

#### 3.3 高松空港 RWY08

滑走路延長上に山岳があり、ILS 進入が設定されていない進入である。GLS の特長を活用したオフセットかつ高降下角経路による山岳回避が見込まれる。ILS RWY26 からの周回進入と比較した場合、経路長は伸びるものの、GLS による直線進入として当該滑走路への計器進入方式設定が可能となるため、ミナマおよび気象条件の改善が期待される。

図 3 に設計した高松空港 RWY08 の RNP to GLS 方式の図を示す。管制官のヒアリングの結果、IF の位置の変更、出発方式との間隔を確保するための高度制限の付加等を行った。また、障害物となる山岳等を回避するため、当初、グライドパスの降下角を 3.5 度、ローカライザ (LOC) のオフセット角を 4.4 度としていたが、オフセット角について緩和策を検討した。

GLS の OAS (Obstacle Assessment Surface: 障害物評価表面) は ILS と同一のものが使われている。進入経路直下の OAS を構成する W 表面の幅および X 表面の立ち上がり角度は滑走路長 (LOC から THR までの距離) に依存し、長いほど W 表面の幅は狭くなり X 表面の立ち上がりは急になり、W 表面と X 表面を合わせた幅も狭くなることが確認できた。そこで、LOC 位置

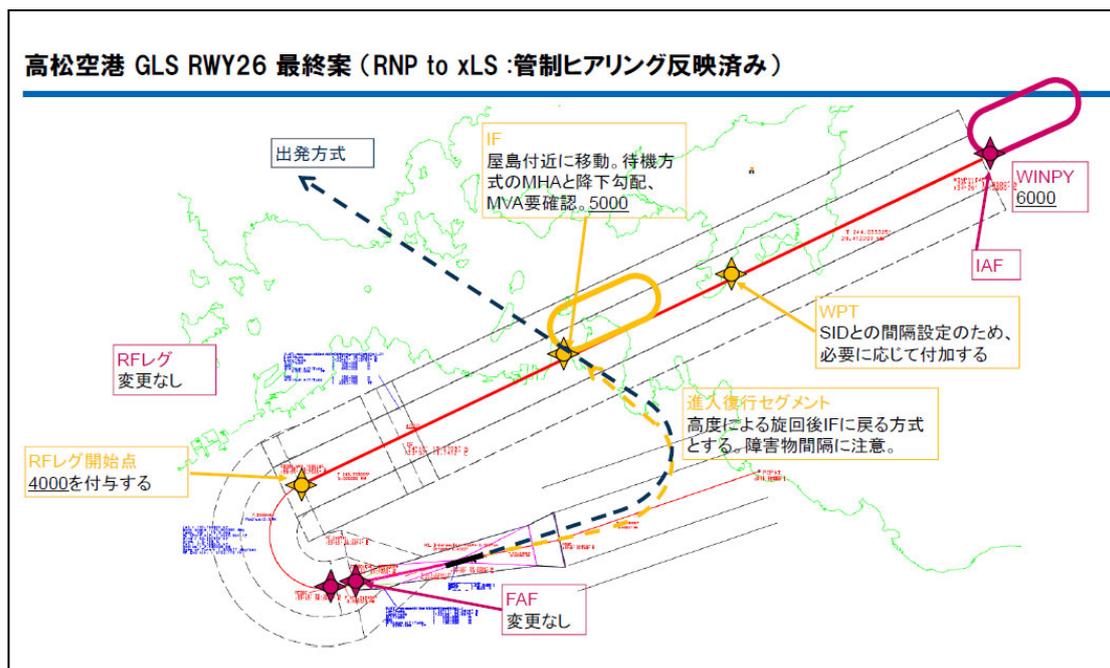


図 3 : 設計した RNP to GLS 方式 (高松空港 RWY08) [研究用]

に相当する GARP (GBAS Azimuth Reference Point) の座標を変更することで、GLS データ上の仮想的な滑走路長を変更し、障害物回避が可能なオフセット角の再評価を行った結果、滑走路長を 4,500m とすることで、オフセット角を 3.8 度に緩和できることが分かった。飛行実証は、降下角 3.5 度、オフセット角 3.8 度で実施した。

#### 4 飛行実証

##### 4.1 航法データベース構築と取得データ

設計した飛行方式に基づいて ARINC424 形式の航法データベースを構築し、当所所有の実験用航空機 (Beechcraft B300 KingAir350, JA35EN) の FMS にインストールし、飛行実証を実施した。飛行中は実験用航空機の ARINC429 バス出力データを記録し、航空機の位置や燃料流量等を取得し、飛行時間、燃料消費量を算出した。

##### 4.2 可搬型 GBAS

GBAS 未設置空港において GBAS による飛行実験を実施するために可搬型 GBAS を開発した [4]。実験用車両に搭載し運用を行うため、移動先で GBAS 基準局を展開すれば短期間に運用開始できる特長を持っている。さらに、GBAS 基準局に ROF (Radio over Fiber: 光ファイバ無線)



図 4 : 可搬型 GBAS の外観と広島空港における飛行実証の様子

を採用したことにより、車外に設置する基準局機材の軽量化を図り、より短時間での設置を可能としている。図4に可搬型GBASの外観を示す。この可搬型GBASを用いて、広島空港および高松空港において飛行実証を実施した。

### 4.3 広島空港における飛行実証

広島空港における飛行実証を2021年4月および12月に実施した。RNP to GLS方式と既存のILS進入方式で取得したデータを比較し、経路短縮による燃料消費量の削減と飛行時間の短縮を検証した。飛行実証では、連続した試行によりできるだけ同じ条件でRNP to GLS方式と既存のILS進入方式でのデータを取得した。

2021年4月に実施した飛行実証では、RNP to GLS方式で11回分、既存のILS進入方式で5回分のデータを取得した。飛行航跡を図5に示す。起点となるAMUROを通過してから滑走路進入末端(RWY 10 THR)を通過するまでの、飛行時間、燃料消費量を取得データから算出した。この結果を表1に示す。飛行時間は通過時刻の差分、燃料消費量は燃料流量を積算し求めている。既存のILS進入方式と比較してRNP to GLS方式では、飛行時間が155秒(約15%)短

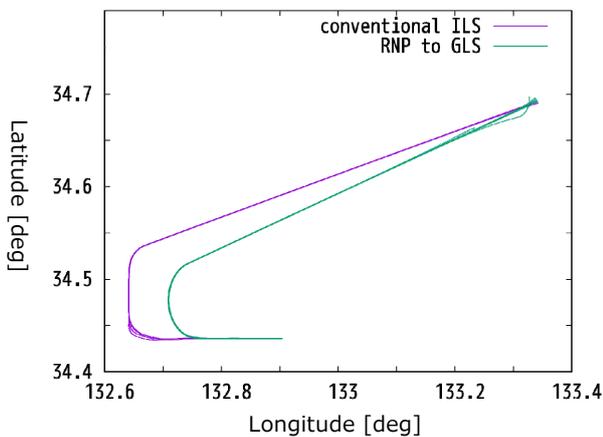


図5：RNP to GLS方式と既存のILS方式の飛行航跡

表1：飛行時間、燃料消費量の比較

	飛行回数	平均飛行時間[s]	平均燃料消費量[lbs]	経路長[NM]
既存 ILS	5	1010	158.6	54.6
RNP to GLS	11	855	134.6	45.4
削減量		155	24.0	9.2

縮され、燃料消費量は24lbs(約15%)削減できたことが分かった[5]。

### 4.4 高松空港における飛行実証

高松空港における飛行実証を2021年11月に実施した。ILS装置が設置不可、ILS進入が設定不可となる進入方向にRNP to GLS方式によるオフセットかつ高降下角による障害物回避となる経路を設定し飛行実証を行った。

最終進入経路のオフセットと高降下角という飛行方式としての難易度と、最終進入経路への会合後の降下開始時に視認できる経路右下側の障害物(高鉢山)について参加者から以下のようなコメントを得た。

- 最終進入経路のオフセットについて、当初設計した4.4度と飛行実証での3.8度の違いは天候がよい場合は、ほぼないと考えられる
- 視程が悪く決心高度直前まで滑走路や進入灯火が視認できない場合には、特に大型機ではアラインするのが難しいと考えられる
- Baro-VNAVは気温によって降下パスの幾何高度が変わるが、GLSは気温に依存しないため、より信頼できる

また、FMSによる飛行を行い、マニュアル操作によりオンセット近くまで会合点をずらさない限りEGPWS(Enhanced Ground Proximity Warning System: 強化型対地接近警報装置)が作動することが無いことが確認できた。

## 5. まとめ

モデル空港に対して設計したRNP to xLS方式について実験用航空機により以下について飛行実証した。

- 経路短縮による飛行時間および燃料消費量の削減
- ミニマ及び最低気象条件の改善を目的とするオフセットかつ高降下角による障害物回避の進入方式のワークロード・EGPWS動作などのフライアビリティ

併せて、方式設計、飛行実証を通して、管制官・エアライン・方式設計者などの関係者間の合意を形成し、新しい方式の有効性を確認することができた。

### 謝 辞

飛行実証の実施において、多大なご協力を頂いた国土交通省大阪航空局高松空港事務所および広島空港事務所の関係各位に感謝致します。

### 参考文献

- [1] 福島 荘之介, “RNP to xLS 進入方式の設計と検証,” CARATS PBN 検討 WG GNSS アドホック, 2020.
- [2] 福島 荘之介, 齊藤 真二, 森 亮太, “RNP to xLS 進入方式の研究 フライアビリティと飛行実証,” ATEC 新たな進入・出発方式導入に向けた調査・研究 WG 会議, 2021.
- [3] ICAO, “Procedures for Air Navigation Services Aircraft Operations (PANS-OPS),” Doc. 8168, Vol. II, 7<sup>th</sup> Edition, 2020.
- [4] 齊藤 真二, 福島 荘之介, “可搬型衛星航法補強装置について,” 日本航空宇宙学会第58回飛行機シンポジウム, 1B07, Nov. 2020.
- [5] 齊藤 真二, 福島 荘之介, “可搬型衛星航法補強装置による RNP to xLS 飛行評価について,” 日本航空宇宙学会第59回飛行機シンポジウム, 2A06, Dec. 2021.

## ポスターセッション

		※印は講演者	
監視システム技術性能要件の研究開発状況	航空交通管理領域	※ 大 津 山 卓 哉	40
航空路管制業務におけるチームワークロードの計測手法の研究	筑波大学	※ 孟 成 柱 伊 藤 誠	41
航空路管制における悪天候の影響の初期的な分析	航空交通管理領域	※ 瀬 之 口 敦 平 林 博 子 中 村 陽 一	42
滑走路異物監視システムの実用化に向けた研究開発動向	監視通信領域	※ ニ ッ 森 俊 一 森 岡 和 行 河 村 暁 子 米 本 成 人	43
ADS-B 性能指数の変化に関する初期検討	監視通信領域	※ 本 田 純 一 松 永 圭 左 角 張 泰 之	44
量子鍵配送の民間航空分野への適用に関する検討	航空交通管理領域 監視通信領域	大 津 山 卓 哉 ※ 金 田 直 樹 宮 崎 裕 己	45
ADS-B 位置検証の補強技術	監視通信領域	※ 長 縄 潤 一 宮 崎 裕 己 田 嶋 裕 久 古 賀 禎 北 折 潤	46
次世代DFMC GBAS の標準化の動向	航法システム領域	※ 齋 藤 享 吉 原 貴 之	47
電離圏シンチレーションの広域監視手法の開発	電気通信大学 千葉大学	※ 細 川 敬 祐 坂 井 純 富 澤 一 郎 中 田 裕 之	48
空港面におけるマルチパス誤差低減技術に関する研究	台湾成功大学 キングモット工科大学ラカバン校 東京海洋大学	Charles Lin Pornchai Supnithi ※ 久 保 信 明 尾 関 友 啓 小 林 海 斗 小 松 大 生	49
準天頂衛星システムを利用した小型実験船による自動運航試験	海上技術安全研究所	※ 平 田 宏 一 澤 田 涼 平	50

# 監視システム技術性能要件の研究開発状況

## 航空交通管理領域 ※大津山 卓哉

CHAPTER 1 PERFORMANCE-BASED SURVEILLANCE (PBS) CONCEPT  
 CHAPTER 2 INTRODUCTION TO RSUR SPECIFICATIONS  
 CHAPTER 3 RSUR SPECIFICATIONS  
 CHAPTER 4 APPLYING A RSUR SPECIFICATION  
 CHAPTER 5 IMPLEMENTING A SURVEILLANCE SYSTEM BASED ON A RSUR SPECIFICATION

APPENDIX A - SECONDARY SURVEILLANCE RADAR (SSR) REFERENCE  
 APPENDIX B - ASSESSMENT OF ADS-B SURVEILLANCE  
 APPENDIX C - ASSESSMENT OF WAM SURVEILLANCE  
 APPENDIX D - OPERATIONAL SCENARIOS USED TO VERIFY RSUR SPECIFICATIONS  
 APPENDIX E - NON-COOPERATIVE SYSTEM CONSIDERATIONS  
 APPENDIX F - RELATIONSHIP BETWEEN RSUR SPECIFICATIONS AND ADS-B APPLICATION SPR REQUIREMENTS  
 APPENDIX G - VERIFICATION OF ACTUAL RSUR

図1:RSURマニュアルの目次

DATA	RSUR specification 5NM-SEP_TIER-B							
	Coherence		Integrity		Time		Reliability	
3D Horizontal Position (HP)	Update Interval UI	Probability of Update	Core Error	Tail error	Integrity	Age	Delay	
Pressure Altitude (PA)	DAT <sub>UI</sub> ≤ 8s	PoU ≥ 97%	HPE <sub>RMS</sub> ≤ 940m	HPE <sub>CTE</sub>	HP <sub>INT</sub>	HP <sub>EDA</sub> = 24s	-	-
Mode A code Identity (ID)				HPE <sub>95%</sub> ≤ 940m		PA <sub>INT</sub> < 0.1%	PA <sub>EDA</sub> = 30s	-
Flight Status (emergency status, SPT = FS)					ID <sub>INT</sub> < 0.1%	ID <sub>EDA</sub> = 32s		
Time of applicability	With HP					F <sub>Start</sub> = 16s		
Horizontal Velocity			VEL <sub>MAX</sub> =					
Vertical rate								
Flight status ground/airborne						F <sub>Start</sub> = 16s		
Aircraft Identification						ID <sub>INT</sub> = 32s		
ACAS capability					CAP <sub>INT</sub> < 10 <sup>-7</sup>			
ADS-B version number					CAP <sub>INT</sub> < 10 <sup>-7</sup>			
Service	In defined OCV	HP <sub>EDT</sub> < 0.3s	FCI <sub>TRN</sub> = 0.005%	SRV <sub>TRN</sub> < 10 <sup>-6</sup> per report		SRV <sub>INT</sub> = 0.9999 floor		

図2:エンルート5NM TIER-BIにおける性能要件

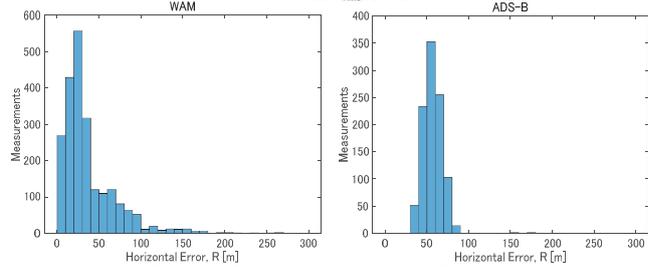
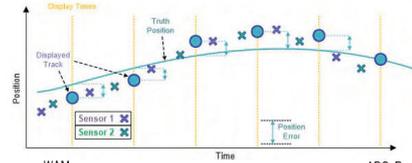


図4:測位誤差の考え方と実際の誤差分布例

	5NM-TIER-A	5NM-TIER-B	5NM-TIER-C	5NM-TIER-A	5NM-TIER-B	5NM-TIER-C
Radar azimuth error (std deviation)	0.0603	0.0603	0.0603	0.0603	0.0603	0.0603
Radar range for 95% error (R3)	57	150	231	32	82	135
	57	150	231	32	82	135
	57	150	231	32	82	135
	57	150	231	32	82	135
HP error 95% requirement in m without latency	810	810	1350	410	440	510
$\sigma_{HP}$ - Sigma measurement 1D (1/2.45 as Rayleigh)	125.7	330.6	551.0	69.8	179.6	296.7
$HP_{95\%}$ - 95% latency $\sigma_{HP} \cdot 1D \cdot \sqrt{\ln(2)}$	177.8	467.6	779.3	98.7	254.6	419.6
mean <sub>HP</sub> - latency mean	0.3	0.7	1.5	0.3	0.7	1.5
Max <sub>HP</sub> - latency max 95%	0.6	1.5	3.0	0.6	1.5	3.0
$\sigma_{HP}$	0.15	0.41	0.81	0.15	0.41	0.81
RMS <sub>HP</sub> - latency	0.336790346	0.810306887	1.620613774	0.33679	0.810306887	1.620613774
Speed (aircraft speed in kts)	600	600	600	300	300	300
$\sigma_{HP}$ error in m due to latency	104.0	250.1	410.1	52.0	125.1	205.1
$\sigma_{HP}$ - Sigma measurement 1D	125.7	330.6	551.0	69.8	179.6	296.7
$\sigma_{HP}$ error in m due to latency RMS error latency x with 45deg	73.5	176.9	287.0	36.8	88.4	144.4
$\sigma_{HP}$ compensation error distributed between X and Y at 45deg	70.0	170.0	280.0	35.0	87.5	143.7
HPE RMS 1D	161.6	381.4	625.8	100.5	212.1	337.4
HPE RMS 2D with latency $\sigma_{HP} \cdot 1D \cdot \sqrt{\ln(2)}$ (HPE <sub>RMS</sub> )	232	582	954	141	353	572
HPE 95% $\sigma_{HP} \cdot 1.45$ (HPE <sub>95%</sub> )	396	938	1473	254	619	1000

図3:マニュアル作成時に使用した、性能要件を求めるための計算テーブル

### 1. はじめに

近年、航空機監視でも性能要件に基づくシステムが求められている。ICAO監視パネルではこれに対応したマニュアルの整備を進めており、ドラフトの初版が完成したところである。本報告では監視システム技術性能要件マニュアルの開発状況について報告する。

### 2. RSURとRSP

新しいマニュアルでは性能要件をRSUR(Required Surveillance Performance)と命名している。通信や航法における同様の要件はRCP,RNPと名付けられているが、RSPはICAO PBCSマニュアルで既に定義がされており、混乱を避けるために新たな名前を作成した。RSPは監視システムに関する要件ではなく、ADS-Cによるデータリンクを扱っているものであり、航空機位置の水平誤差といった監視システムの性能として重要な要件が含まれていないことに注意する必要がある。

### 3. 進捗状況

ICAOでのマニュアル作成は2017年から始まった。以降、現在までに20回以上会議が行われ、現在100ページを超えるマニュアル案となっている。図1に現時点での構成を示す。監視性能要件は様々な場面で必要とされるものであるが、現在作成中のマニュアルではエンルートおよびターミナルエリアにおける、5NMおよび3NM管制に必要な監視システムの要件についても取りまとめを行った。その他のエリアについても将来的には性能要件を取りまとめる予定となっている。今回作成したマニュアルにおい

て、性能要件は3つのレベルで検討を行った(Tier-C:低密度、非複雑空域における最低限の運用、Tier-B:ベストプラクティス、Tier-A:将来的な監視システムの展望)。図2にTier-Bにおけるエンルート5NM管制での監視システム性能要件を示す。このうち性能要件としてもっとも重要な値である水平方向の誤差精度については、PANS-ATM等に記載されている運用要件や過去に監視パネルで議論されてきた各監視装置の性能要件と、各国で検証が行われてきた実際の監視システム性能を基に図3のような計算テーブルをつかって値を決定した。これらの検討には電子航法研が報告した日本の環境における監視性能結果も含まれている。図4は電子研より提出した監視性能の実測値である。精密測位用のGNSS受信機を搭載した実験用航空機の位置と、ADS-BおよびWAMで測位した航空機位置との誤差分布を示している。GNSS受信機による航空機位置は毎秒毎(1秒おき)に出力されるのに対してADS-BやWAMの位置は異なる時刻で求められるため、取得時刻による誤差が必ず含まれる。示した分布は位置情報を補間して作成しているが、若干のオフセットが見られる。マニュアルに記載された性能要件では、これらの取得時間誤差も考慮して検討が行われている。

### 3. まとめ

現在、最後の取りまとめを行っている性能要件監視マニュアルは、来年行われるパネル会議にて承認された出版される予定である。また、今回のマニュアルに含まれなかった空港面等についても今後議論が行われる見通しである。

# 航空路管制業務におけるチームワークロードの計測手法の研究

筑波大学 ※孟 成柱、伊藤 誠

## 1. はじめに

今後の航空需要成長の見込みから航空交通量増加が予想され、それに伴い管制官のタスク需要が増加する。タスクの需要が管制官のキャパシティを超えるとパフォーマンスが減少し、ヒューマンエラーが発生する可能性が高まる。そこで、航空管制における安全性と効率性を保つためには、航空管制官のワークロードを適切に管理する必要がある。

現状、航空路管制業務は2人の管制官がレーダ対空席(R席)とレーダ調整席(C席)に役割を分担し、協業しながら行われていることから、航空路管制業務におけるチームワークロード計測を検討することにした。そこで、実験装置を開発し主観評価を実施した結果について報告する。

## 2. 実験方法

交通量はチームワークロードに影響を与える、また、チームワークロードはセクターによって異なる様相を呈すると仮説を設定した。航空管制業務の非専門家である一般人(男:24、女:16、年齢:25±6.37歳)が2名ずつ参加し、R席とC席の役割を担当した。実験ではTEPSを模擬して開発したウェブシミュレータを使用した(図1)。

管制業務傾向の異なる実在するT01及び統合T25、T09を実験対象セクターとして選定した。交通量を変えた各シナリオ(図2のTrial)の終了後に主観的チームワークロード評価値であるTWLQと協力傾向を見るIOS(図3)のアンケートを取得した。



図1. 実験の様子とシミュレータのレーダ画面の例(T01)

TWLQ 要素	項目
Task Workload	知的・知覚的負荷、身体的負荷、タイムプレッシャー、作業成績、努力、フラストレーション
Team Workload	コミュニケーション、協業・調整、チームの作業成績
Task Team Balancing	時間共有、チーム活動でのフラストレーション、チームサポート

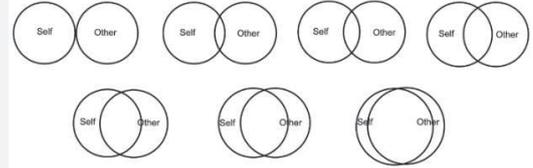


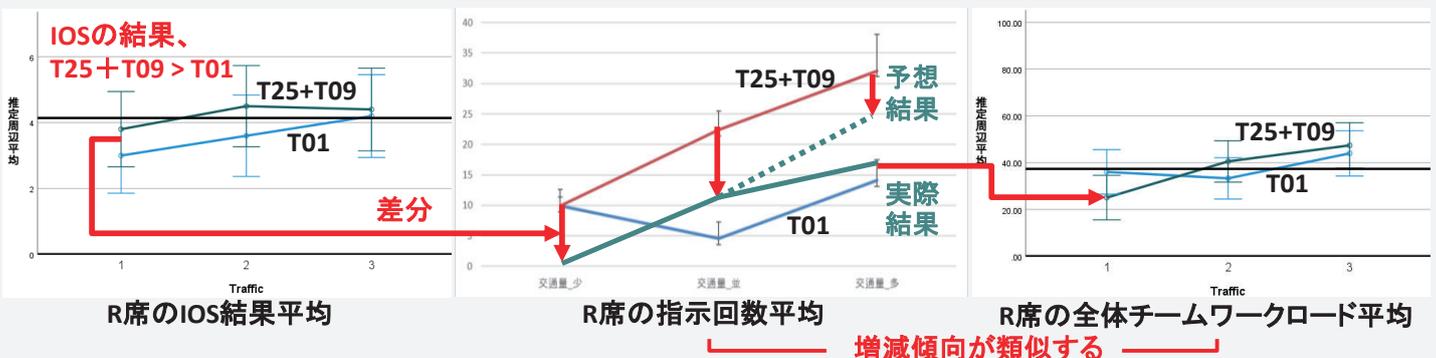
図3. TWLQの三つの要素とその項目、IOS Scale (1-7)



図2. 実験シナリオ

## 3. 実験結果

協力傾向を確認するIOSの集計結果から、セクター内取り扱い機の特性とR席のタスク特性により協力傾向が変わることが確認された(下図左)。セクターと交通量ごとのパイロットへの指示回数平均の増減傾向とチームワークロードの増減傾向が類似していることが確認された(下図右)。全交通量に対し統合T25、T09の協力傾向が高い分、統合T25、T09のR席のチームワークロードは指示回数から予想された結果より相対的に低減された(下図中)。交通量(多)では予想を外れさらに少ないチームワークロードであった。統合T25、T09の実験参加者への最終インタビューから、交通量(多)の場合、C席と会話をする余裕がなくなるほど指示しなければならない状況となり協力を得られなくなったとの回答を得た。



## 4. 考察と今後の課題

航空管制官が感じる協力傾向とパイロットへの交通量によりチームワークロードを計測できるという仮説が考えられる。また、協力傾向はセクターに応じR席に与えられるタスクの特性に従う。しかし、交通量が管制官の処理可能なキャパシティを超えると、協力傾向が作用しなくなり、チームワークロードを計測するためには追加で考慮する変数が必要となる。

TEPS; Trajectorized En-route traffic data Processing System, TWLQ; Team Workload Questionnaire, IOS; Inclusion of Other in the Self

# 航空路管制における悪天候の影響の初期的な分析

航空交通管理領域 ※瀬之口 敦, 平林 博子, 中村 陽一

## 1. はじめに

CARATSの施策の1つにMET-4「気象情報から運航情報、容量への変換」がある[1]。航空機は悪天候との遭遇が予想される場合、管制機関と調整の上、高度変更や飛行経路からの逸脱により悪天候を回避して安全な運航を行っている。一方、航空交通管理では前述の状況に対応するため、例えば運航前の段階で多数の航空機の悪天候回避が予想された場合には航空交通流制御に係るセクタの適正交通容量値(処理容量)よりも小さな値を設定することで安全を確保するような運用が行われている。現場には前述の運航・運用に関する相応の経験値が蓄積されていると思われるが、将来の軌道ベース運用の実現に向けて、悪天候が空域容量に及ぼす影響の定量化および空域容量のさらなる適正化が求められている。

そこで、本発表では航空路管制における悪天候の影響について定量的な観点から初期的な分析を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 分析方法

航空路管制のセクタにて悪天候に起因する管制指示を受けた航空機の割合(以下「デビエーション率」という)および当該セクタにおける悪天候の占める割合(以下「悪天率」という)を求め、分析した。分析の対象期間は2021年5月～2022年1月の日中時間帯(9～21時)とし、その内の有効日数は245日であった。また、今回の分析では羽田空港からの出発機を主に扱う関東西セクタ(T12)および武蔵セクタ(T13)を対象とした。両セクタはしばしば統合的に運用されるため、デビエーション率および悪天率の算出においては両セクタを1つとみなして分析した。

デビエーション率については、TEPS(航空路管制処理システム)の管制官運転情報から分析対象の日中時間帯における悪天起因の管制指示を抽出し、対象セクタを飛行した航空機に対して指示を受けたものの割合として求めた。

悪天率については、気象観測データである気象庁の全国合成レーダーエコーGPVを用いた[2]。算出にあたっては高

度方向を加味した体積で比較しており、対象セクタの上限高度が定められていない場合はFL450までを計算領域とした。また、悪天候の算出は、エコー強度の閾値を4mm/h以上(Moderate相当)とした場合および10mm/h以上(Severe相当)の場合について求めた[3]。なお、全国合成レーダーエコーGPVは10分毎のデータであるため、後述の結果では分析対象の日中時間帯における最大値で検討した。

## 3. 分析結果

下図に2021年5月～2022年1月のT12およびT13におけるデビエーション率および悪天率を示す。横軸が日付、左縦軸がデビエーション率(棒グラフ)、右縦軸が悪天率(折れ線グラフ)を表す。また、左下図にエコー強度の閾値が4mm/h以上の場合、右下図に10mm/h以上の場合を示す。

図より、デビエーション率と悪天率の間の増減傾向はエコー強度の閾値にかかわらずほぼ同様の変化に見える。相関係数を求めると、エコー強度閾値が4mm/h以上の場合は0.562、10mm/h以上の場合は0.594と正の相関があると言えるが、強い相関ではない。これより、実際の航空機運航ではModerate相当以上の降水域を回避しているとともに、他の悪天現象に伴う回避の可能性も考えられる。

今後は、日単位ではなく時間単位での分析や他の悪天現象との相関、悪天起因の管制指示の内訳などを検討していきたい。

## 参考文献

- [1] “CARATS新ロードマップ”, 第12回将来の航空交通システムに関する推進協議会, 資料1-4, 2022年3月.
- [2] 気象庁観測部, “1kmメッシュ全国合成レーダーGPVの提供等について”, 配信資料に関する技術情報(気象編)第162号, 2004年4月.
- [3] WMO, “Aviation | Hazards | Precipitation,” <https://community.wmo.int/activity-areas/aviation/hazards/precipitation>, accessed 20th May 2022.

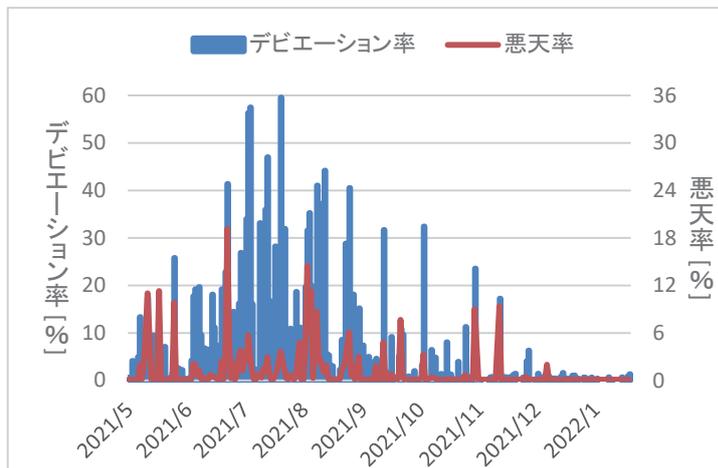
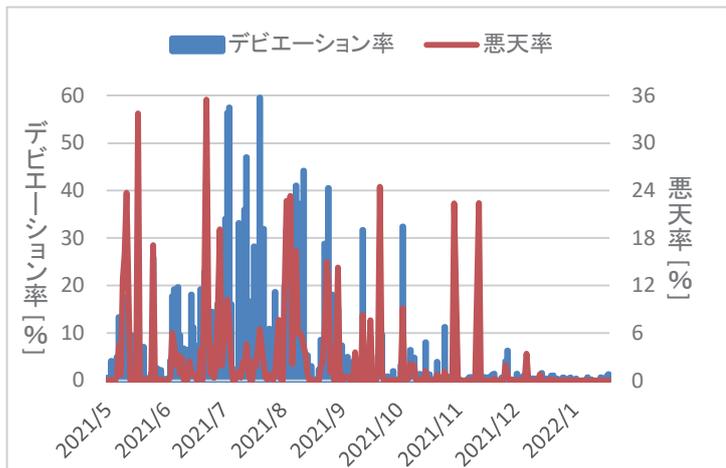


図 2021年5月～2022年1月の関東西セクタ(T12)および武蔵セクタ(T13)におけるデビエーション率と悪天率 (左:エコー強度閾値4mm/h, 右:エコー強度閾値10mm/h)

# 滑走路異物監視システムの実用化に向けた研究開発動向

監視通信領域 ※ニッ森 俊一、森岡 和行、河村 暁子、米本 成人



図1. 滑走路における試験状況



図2. 仙台空港におけるEUROCAE MASPS試験



図3. 雨天時測定状況

対象物	測定数	検知数	検知率(%)
タイヤ片 (高さ5 cm×幅5 cm)	117	112	95.7
灯火 (直径8.8 cm)	117	117	100
M10ボルト+ナット (長さ4 cm)	135	131	97.0
燃料キャップ (直径4 cm、高さ1.5 cm)	108	107	99.1
コンクリート片 (3片5 cm)	117	117	100
金属片 (高さ7 cm×幅5 cm)	117	116	99.1

表1. MASPS準拠対象物(寸法2分の1以下)探知率結果

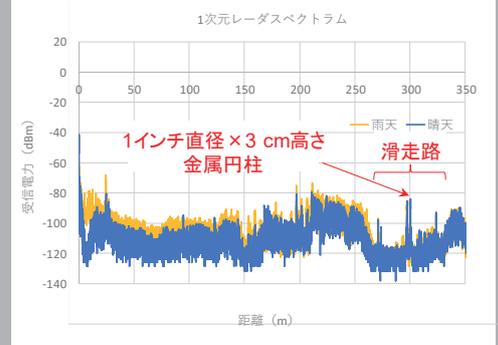


図4.雨天時(4 mm/h)における1次元ビートスペクトラム

## 1. はじめに

滑走路小異物(FOD)監視システムは、空港運用に係る安全性向上のために導入が進められている。FOD監視システムは、空港滑走路上のFODを自動的に探知し、空港運用者に情報を提供するシステムであり、空港運用を支える新しい監視システムである。FODに起因する事故を未然に防ぐだけでなく、空港滑走路を閉鎖して実施する滑走路点検の時間短縮を図ることが可能となる。これにより、滑走路利用効率の向上および空港滑走路閉鎖に伴う航空機の上空待機時間の低減が図れ、CO<sub>2</sub>排出削減が期待できる。

本研究では、今後のFOD監視システムの導入に向け、実用化に関する課題を踏まえた研究開発を実施する。

## 2. 研究の項目

実用化に向けたFOD監視システムの課題として、FOD未検知率の低減、探知困難形状FODへの対応、悪天候時の対策等のための研究開発を行う。具体的には下記の項目を目標として研究を実施した。

- ・FOD探知システムの導入に向けた、探知率向上および確実性に対する課題を踏まえた実用化・システム高度化を実現する。

- ・レーダの電磁波反射率の低い対象物(低RCS対象物)の探知技術、空港環境および悪天候時対応技術を実現し、システム実装を行う。

- ・空港環境および悪天候状況における性能評価を行い、FOD探知システムの運用要件策定に寄与する。

## 3. 研究の概要

大樹町多目的航空公園滑走路(図1)および仙台国際空港で評価試験を実施した。その結果、レーダ送信号広帯域化による最大10 dB以上のクラッタ低下効果を確認した。また、設置高の違いによる滑走路クラッタ変化およびFOD反射電力変化特性を取得した結果、クラッタを低減しつつ滑走路横断面勾配に対応可能となる最適なレーダセンサ高を明らかにした。

さらに、EUROCAE MASPS評価試験を実施し、6種のMASPS基準対象物について各辺を半分以下の寸法とした対象物の探知率が規格で定められた95%を超えることを確認し、世界トップレベルの探知性能を明らかにした(図2および表1)。雨天データについては、大樹町多目的航空公園滑走路の試験結果から降水量4 mm/h程度では滑走路クラッタ、異物反射電力とも大きな変化が無いことを確認した(図3および図4)。

EUROCAE WG-83、滑走路路面異物検知装置導入検討会、総務省海外展開事業、海外共同研究等に参加・協力した。本研究で得られた成果は、我が国のFOD監視システム導入・仕様策定のための基礎データとして社会実装に活用されると同時に、マレーシア側関係者と協力し、FOD監視システムの国際的な導入計画に寄与した。

## 代表的発表文献

[1] S. Futatsumori et. al, Proceedings of the IRMMW-THz2021, pp.1-2, Aug.2021.

[2] ニッ森 他, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 121, no. 323, SANE2021-96, pp. 72-75, Jan. 2021.

# ADS-B性能指数の変化に関する初期検討

監視通信領域 ※本田 純一, 松永 圭左, 角張 泰之  
 航空交通管理領域 大津山 卓哉

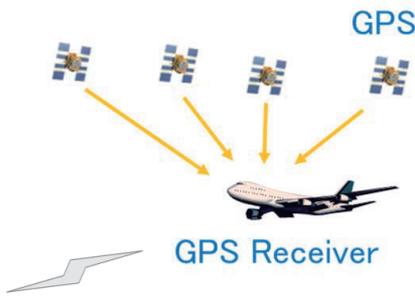


図1 ADS-Bの原理

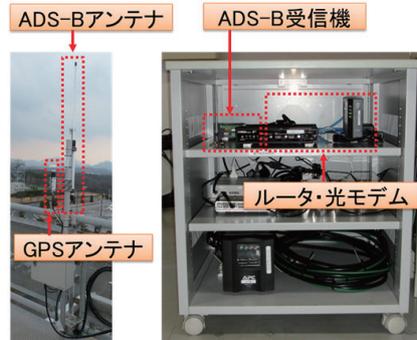


図2 ADS-B受信システム外観

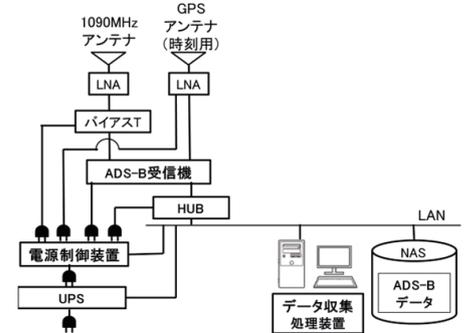


図3 ADS-B受信システム系統図

Feet	NIC=0	NIC=1	NIC=2	NIC=3	NIC=4	NIC=5	NIC=6	NIC=7	NIC=8	NIC=9	NIC=10	NIC=11	NIC=12	NIC=13	NIC=14	NIC=15
1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

NIC=8(Rc<0.1NM)が多数を占める

0	3648	220472	0
0	3835	245919	0
0	4101	283227	0
0	4349	310576	0
0	12645	1146809	0

図4 高度別のNIC値の分布

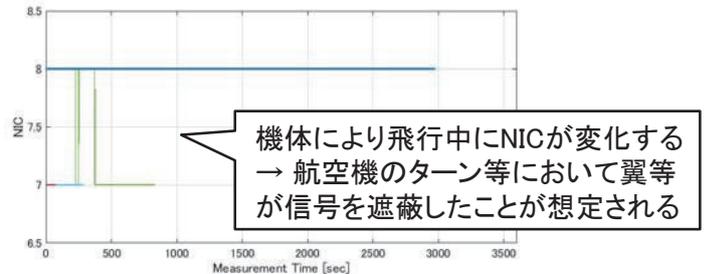


図5 NIC値の時間変化

## 1. はじめに

航空機監視として、放送型自動従属監視(ADS-B: Automatic Dependent Surveillance - Broadcast)の導入・検討が進められている。ADS-Bは、図1に示す通り、各航空機がGPSにより自機位置を推定し、その位置情報を周囲に放送することで、地上施設もしくは周辺の航空機にて発信源となる航空機の位置を把握する。

ADS-Bについては、全ての飛行フェーズにおいて利用が期待されているところ、その性能評価が終わっていない。位置情報はGPSに委ねられるため、航空路等の遮蔽物のないエリアについては本来のGPSの位置精度を担保することができる一方、空港面を中心とした空港近傍(「空港用」と称す)では、ターミナルビル等の障害物によりGPS信号の遮蔽やマルチパスによる信号劣化が生じ、結果として位置精度の低下につながる。この点は、最近FAAからも問題提起されている。

本研究では、空港用監視にADS-Bを活用するにあたり、実験による性能評価を実施したので、その初期検討結果を報告する。

## 2. 測定方法

図2及び図3に実験用ADS-B受信システムの外観と系統図を示す。本実験では、ADS-Bの高度監視に利用していた機材を活用した。ADS-B受信アンテナには、コリニアアンテナを用い、その利得は4.8dBiである。ADS-B受信機には、jetvision社のRadarcapexを採用し、受信された信号はネットワークを介して記録されると共に、データ収集処理装置によりデータが解析される。データ収集処理装置で解析された信号は、時間毎に主要な情報(Ver.情報、

位置情報、NICやNACp等の精度)をログとして記録する。

## 3. 解析結果

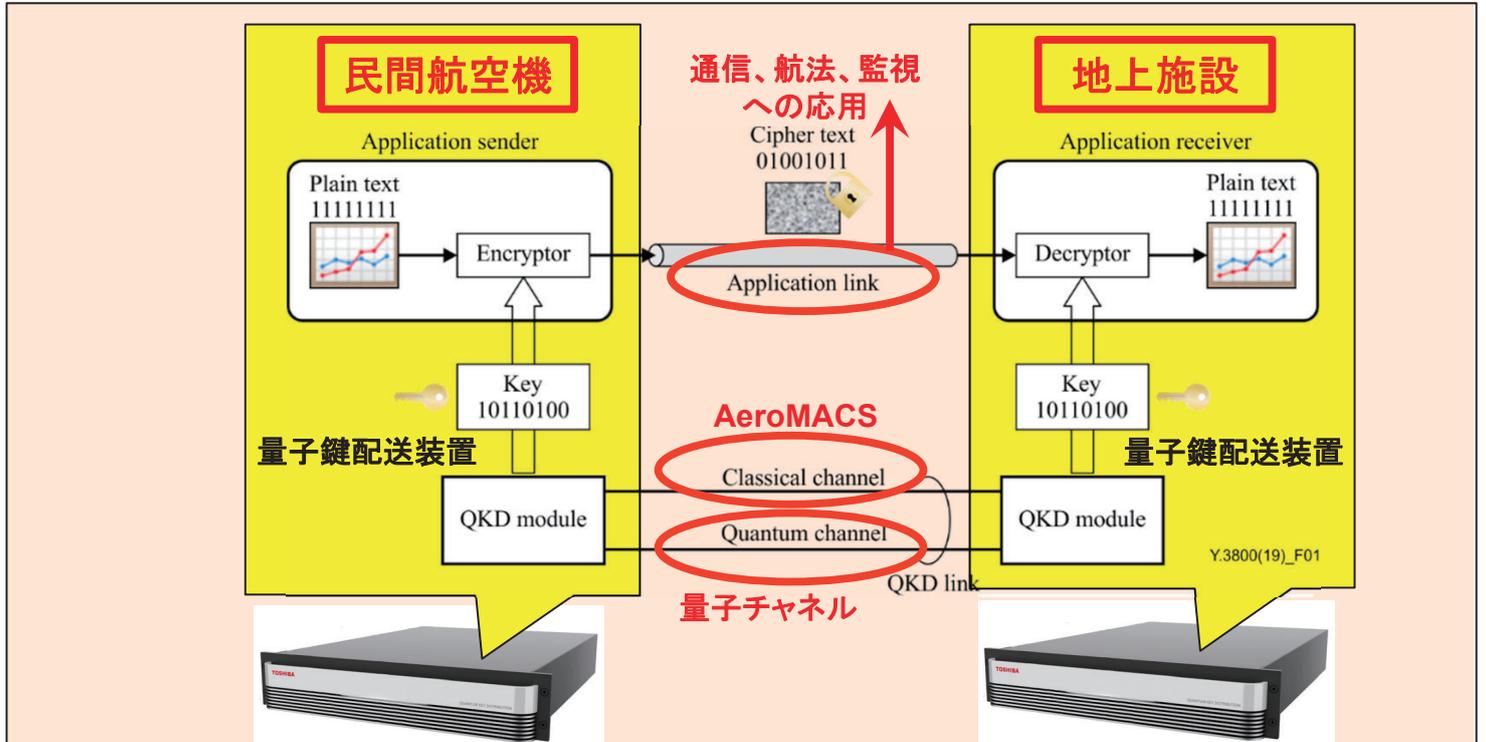
初期検討として、位置精度の検証を行った。解析対象はNIC及びNACpとする。NICはNavigation Integrity Categoryの略称でインテグリティを指し、NACpはNavigation Accuracy Category - positionの略称でADS-Bによる位置精度を示す。一例だが、航空路で管制間隔を5NMにするためには、(欧米における)要求値としてNIC $\geq$ 6、NACp $\geq$ 7が求められる。NIC=6とは、航空機の推定された位置が理論上0.6NM内に収まることを意味する。なお、NICとNACpは、数値が大きいほど精度が高くなる。先に述べたようにADS-Bの信頼性は、そのままGPS情報に基づくものである。よって、GPS位置精度の信頼性低下はそのままADS-Bの性能低下となる。

図4に最新のADS-B ver2を対象とした高度別(1000feet刻み)のNIC値の分布を示す。ここでは、仙台空港に展開したADS-B受信機を用い、24時間にわたりデータを収集した。本結果では、NICが7もしくは8となり、高度によらず高い性能が出ていることが分かる。なお、98%以上がNIC=8となった。図5は1時間に亘り取得されたデータのNIC値を機体毎にプロットしたものである。機体によっては、飛行中にNIC値が変化することが明らかになった。

残念ながら本発表では、空港用監視を想定したターミナルビル付近のデータが入っていない。今後は、空港用に絞ってNIC、NACpの値が変化する場所およびその原因について調査を行う予定としており、空港用監視にADS-Bが有用であるのか示したいと考えている。

# 量子鍵配送の民間航空分野への適用に関する検討

## 監視通信領域 ※金田 直樹、宮崎 裕己



民間航空機と地上施設間における将来的な量子鍵配送装置の利用例

### ◆背景

近年、私たちの生活と経済活動の基盤となる重要なインフラの情報セキュリティが重要となっています。航空交通もまた重要なインフラであり、安全な航空交通を実現するため、国際民間航空機関(ICAO)は重要な情報通信システムとデータに対するセキュリティ対策を行うよう求めています。情報セキュリティの重要な要素として「許可されていない人が情報を閲覧したり利用できない」という機密性があり、機密性は暗号により確保されています。無線通信のようにだれでも傍受できる通信でも機密性を確保するため、現在は公開鍵暗号が利用されています。公開鍵暗号を解読するにはスパコンでも数万年以上必要と見積もられ、事実上解読不可能と考えられています。コンピュータの計算速度は日々向上しており現在の公開鍵暗号は将来的に解読される懸念があります。

量子鍵配送は量子力学の基本原則を用いて、送信者と受信者の間で鍵と呼ばれる乱数を共有する技術です。このとき送信者と受信者が協力することで鍵が傍受されていないことを保証することができます。量子鍵配送で生成した鍵を用いた暗号が量子暗号です。量子力学の基本原則は将来にわたり覆りそうがなく、量子暗号は将来にわたり解読できないと考えられています。そのような長所を持つ量子鍵配送は民間航空における将来的なセキュリティ対策の一つとして有望と我々は考えました。

### ◆調査の概要と成果

本調査研究では、まず、量子鍵配送技術の動向、量子鍵配送に必要な素子などの要素技術に関する文献調査を行いました。また、国内外の量子情報技術政策に関する文献調査を行い、各国の研究開発の規模や目標などについて調査しました。その結果に基づき、量子鍵配送の民間航空分野への適用可能性について検討しました。

量子鍵配送は送信者と受信者が協力して鍵を生成しますが、実際に応用するには鍵生成速度に起因する通信速度の制限、伝送可能な距離が短いことなどが技術的な課題となっています。そこで、我々は航空会社による航空機の運航を前提として量子鍵配送を適用可能かどうかについて試算しました。

以下は、量子鍵配送の鍵生成速度を現時点で達成可能と考えられる 100 kbpsと仮定した事例です。拡張スキッタ方式のADS-Bを24時間動作させるのに必要な鍵を量子鍵配送で生成した場合、航空機の運航に支障を及ぼさない100秒未満と試算されました。この結果、量子鍵配送を民間航空分野に利用できる可能性があることがわかりました。

拡張スキッタ方式のADS-Bはなりすまし等が懸念されており、ICAO等で対策が検討されています。現在の技術で実現可能かつ長期的に安全な量子鍵配送は航空機の位置情報など、航空の安全のために重要なデータにおける新しいセキュリティ対策の一つとして有用と考えています。

# ADS-B位置検証の補強技術

監視通信領域 ※長縄 潤一、宮崎 裕己、田嶋 裕久  
古賀 禎、北折 潤

## 1. はじめに

現在、航空路監視システムとしてADS-B導入に向けた取り組みが進められている。ADS-Bは航空機がGPS等で得た自機の位置情報を放送し、それを地上側で受信するシステムである。高精度かつ高頻度な位置情報を取得できる一方、不正な位置情報を検知できることが望ましい。これまでに当所ではWAMの受信局を活用した信号到達時間差による位置検証技術(TDOA法)に取り組んできた。本発表では、TDOA法で十分な性能が得られない場合に補強する技術を2種類紹介する。

< 略語一覧 >

ADS-B: Automatic Dependent Surveillance—Broadcast, WAM: Wide Area Multilateration  
TDOA: Time Difference of Arrival, CPR: Compact Position Reporting, AOA: Angle of Arrival

## 2. CPR検証・レンジチェック

CPRとは緯度・経度をビット列に符号化(エンコード)する規格で、ビット数を節約するための工夫がなされている。そこで、ビット列から緯度・経度を復号(デコード)する際に、その工夫を活用した規格への適合性検証が国際的な技術文書であるRTCA DO-260Bに規定されている。不正検知は本来の目的ではないものの、検知に有効な場合がある。一例として、計算機シミュレーションの結果を図1に示す。正常な信号に途中から不正な信号を混合した場合に、不正な信号はCPR検証失敗となり、除去することができた。

< 手法の概要 >

CPRの2種類のデコード方法のうちLocally Unambiguous Decodingではデコードに使用した基準位置(過去位置)との差分が規定値以内かどうかを判定する。一方、Globally Unambiguous Decodingでは、ある信号を受信・デコードしたのち、さらに追加の信号を受信・デコードし、先の信号の検証に利用する。また、CPR検証にはADS-B位置が受信局の覆域内であることを確認するレンジチェックも含まれている。

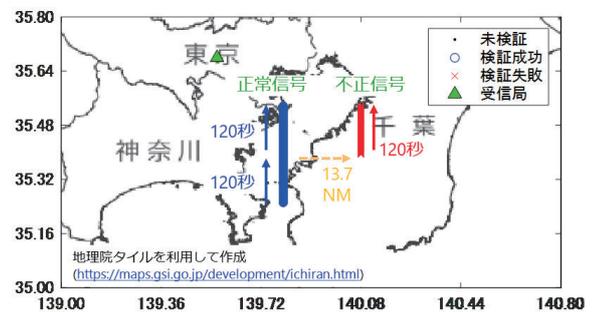


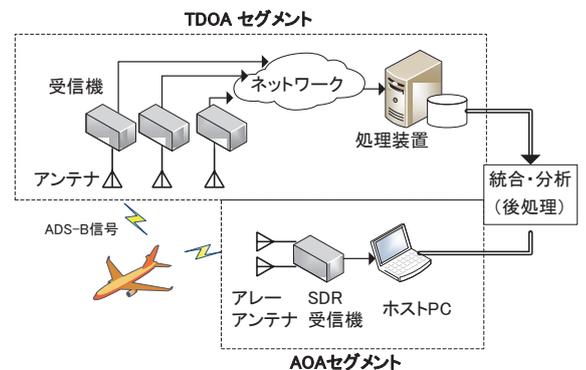
図1. CPR検証で不正信号が除去できる例 (計算機シミュレーションの結果)

## 3. TDOA法とAOA法の併用

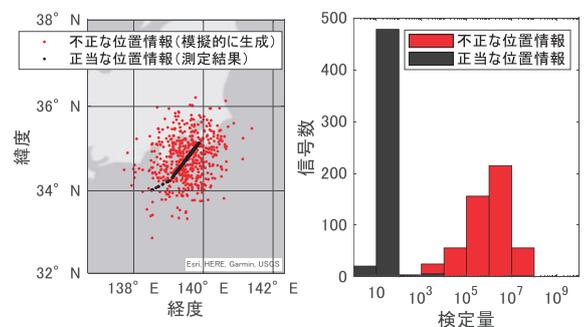
アンテナをセクタ型やアレー型とすることで、航空機からの信号到来角(AOA)を測定できる。AOAは航空機までの方位と一致するため、AOA法をTDOA法と組み合わせると、ADS-Bの位置情報をより強固に検証できる。

提案法の実験を図2(a)の構成で実施した。TDOA測定とAOA測定を同時に行い、後処理で統合・分析した。後処理では、判定の基準となる検定量を計算したほか、不正な位置情報を模擬的に生成した。図2(b)に結果を示す。位置情報が不正な場合には、検定量が大きくなり、正当な位置情報との判別が可能であった。

さらに、提案法の性能概算を行った。一様な航跡を仮定した平均的な検知率を測定精度や受信局配置を変えながら机上計算した。その結果、TDOA法が性能低下する場合にはAOA法により性能補強でき、AOA精度が粗い場合でも一定の効果が期待できることを確認した。



(a) 実験の構成



(b) 実験結果

## 4. まとめと今後の課題

ADS-B位置検証を補強する技術を2種類紹介した。このうち、TDOA法とAOA法の併用を実現するためにはAOA測定および周辺受信局との連携が必要となる。これはADS-BのみならずWAMやSSRにも有益な技術であり、航空路マルチセンサー向け高機能空中線の研究開発の一環として開発・評価を進める。

図2. TDOA法とAOA法の併用による位置検証

< 発表文献 >

信学技報, SANE2021-14, pp. 29-34, 2021年6月.  
信学技報, SANE2021-44, pp. 65-70, 2021年11月.

# 次世代DFMC GBASの標準化の動向

## 航法システム領域 ※齋藤 享、吉原 貴之



表1.平滑化方式と誤差

\*最良の場合

	SF (100秒)	Ifree (100 sec)	DFree (600 sec)
雑音 (SFを基準)	1.0	2.6	0.41*
電離圏誤差	$G*(x + 200*v)$	0	$G*x$

表2. SESAR GAST FとGAST Xの比較

	SESAR GAST F	GAST X
平滑化時定数	100 sec	600 sec (可変)
平滑化方式	SF/IFree併用	DFree/IFree併用
DFMC用GBASメッセージ	L5帯レンジ補正值(MT-42, 50)	基準局レンジ測定値(MT-23)
利点	GAST Dの自然な拡張、単純性	計算方式の柔軟性、位相測位への拡張性
欠点	拡張性が低い	機上計算複雑化、補強情報量大

### はじめに

GPS L1信号を用いてカテゴリIII着陸を実現するGAST D (GBAS Approach Service Type D)の技術標準が国際民間航空機関(ICAO)において策定された(2018年11月)。磁気低緯度地域など厳しい電離圏環境におけるアベイラビリティ向上、衛星系故障や電波干渉などの耐障害性の向上などのため、2周波複数衛星系(DFMC) GBASの標準化が始められている。

### DFMC GBAS方式

DFMC GBASをどのような方式に基づいて実現するかは現在検討中である。まず、コード擬似距離の平滑化方式として3種類が検討されている(表1)。方式の詳細は[1]を参照。これらを用いた補強方式として主に以下に示す2種類が提案されている(表2)。いずれにおいても、大半を占める電離圏静穏時の誤差を抑えるため、通常時は1周波(DFreeも同様)測位とし、電離圏異常が検出された場合のみIFree測位を用いる。

#### SESAR GAST F

欧州のSESAR (Single European Sky ATM Research)において検討された方式[2]。L5帯のレンジ補正值(平滑化時定数100秒)を追加。通常時はSF方式、電離圏異常が検出された場合にはIFree方式に移行する。GAST Dの自然な拡張であり、SESARにおいて既に検討が進んでいる。

#### GAST X

Boeingを中心に、RTK測位を参考に考案された方式[3]。レンジ補正值ではなくレンジ測定値を追加する。通常時はDFree方式、電離圏異常が検出された場合にはIFree方式に移行する。レンジ測定値を送信するため、機上における測位方式、平滑化時定数などを柔軟に設計できる。

SF: 1周波コード擬似距離測定値を位相測定値で平滑化  
 IFree: 電離圏遅延量の信号周波数依存性を用いてコード、位相擬似距離中の電離圏遅延誤差を消去  
 DFree: 1周波コード擬似距離を、2周波位相測定値のダイバーゼンスフリー結合を用いて平滑化  
 G: 電離圏勾配、x: 基準局と航空機の距離、v: 航空機速度

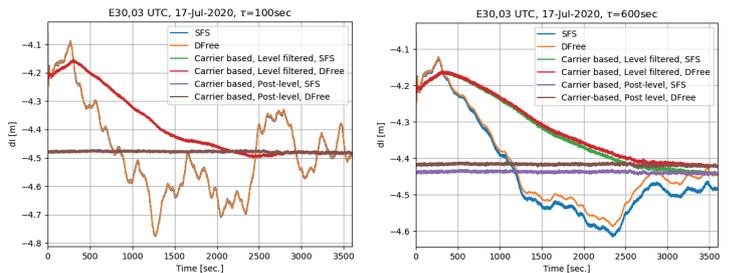


図1.DFMC GBAS電離圏モニタ方式の比較例[4]。左:平滑化時定数100秒、右:600秒

表3. DFMC GBAS標準化工程

方式決定	ベースライン SARP/MOPS	検証完了 SARP/MOPS	発効
2022年末	2024年末	2028年末	2030年

### DFMC GBASにおける技術課題

現在提案されている2方式いずれについても、機上装置側で動作する電離圏勾配モニタが必要である。方式によって利用できる情報が異なるため、方式ごとに電離圏異常検出性能を評価する必要がある。これは、DFMC GBASの方式選択において重要な要因となりうる。

その他、新信号の信号歪み特性、新衛星系の軌道情報誤差に関するモニタが新たに必要となる。

### 標準化の見通しと電子航法研究所における研究

2021年11月時点でのICAOにおけるDFMC GBAS標準化行程を表3にまとめた。これは、欧州などが求めるGAST DのGalileo、Beidou対応(GAST D+)との関連で変更される。

電子航法研究所では、新石垣空港に設置したDFMC GBASテストベッド[1]を用い、特に変動の大きい電離圏環境下における電離圏勾配モニタの検証に注力する。テストベッドは、SESAR GAST F、GAST Xのメッセージ生成に対応している。地上連続観測と、飛行実験により、DFMC GBASの方式の性能評価を進めていく予定である。

### 参考文献

- [1] 齋藤, 吉原, MC/MF GBAS実験用装置の開発、2019年度電子航法研究所研究発表会
- [2] ICAO Working Paper, NSP4 WP41, DFMC GBAS Conceptual Framework – SESAR Joint Undertaking.
- [3] Murphy, T. et al., Alternative Architecture for Dual Frequency Multi-Constellation GBAS, Proc. ION GNSS+ 2021, September 2021, pp. 1334-1374.
- [4] Murphy, T. et al., Ionospheric Gradient Monitoring for Dual Frequency Multi-Constellation GBAS, Proc. ION ITM 2022, 2022.

# 電離圏シンチレーションの広域監視手法の開発

電気通信大学 ※細川 敬祐, 坂井 純, 富澤 一郎

千葉大学 中田 裕之, 台湾成功大学 Charles Lin

キングモット工科大学ラカバン校 Pornchai Supnithi

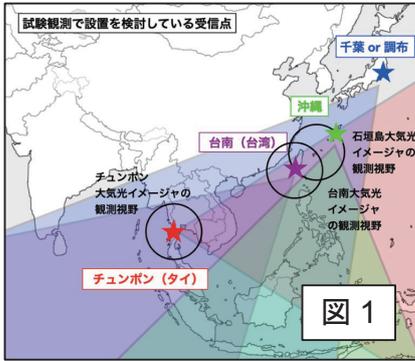


図 1

Event 05: Oct 2, 2021 12:08 UT (21:08 JST)

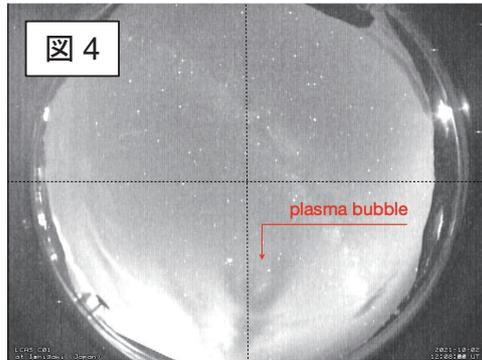


図 4

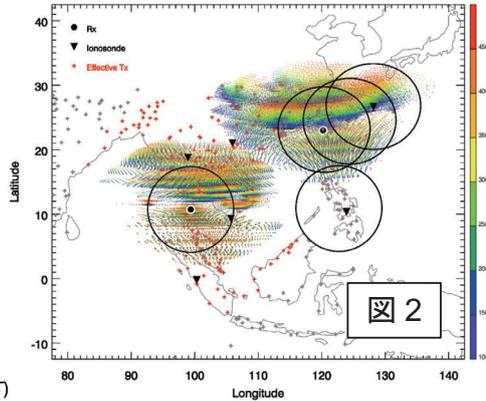


図 2

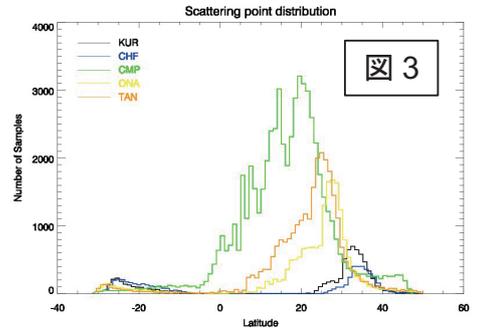


図 3

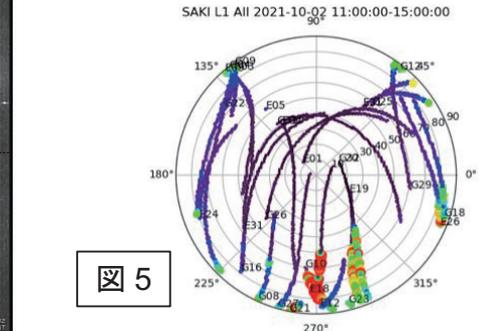


図 5

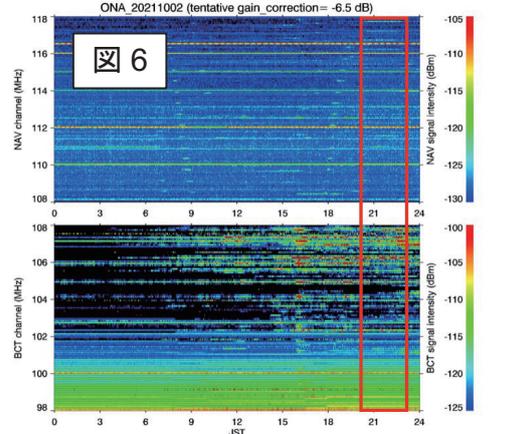


図 6

## 1. はじめに

低緯度域・赤道域における電離圏シンチレーションの主たる発生要因となる「赤道プラズマバブル(Equatorial Plasma Bubbles: EPBs)」の観測について、EPBs に伴う沿磁力線不規則構造によって、テレビ放送に用いられているVHF帯電波が前方散乱を受けることで長距離伝搬し、遠方で受信されることが指摘されている。しかし、このような VHF 帯電波の異常伝搬を、広域かつリアルタイムベースの EPBs 観測に用いることは試みられてこなかった。本研究では、国内および国外において、航空用航法電波の異常伝播のモニタリング観測を行い、電波伝播計算などの理論的検討も行うことで、航空用航法電波を用いた EPBs の広域モニタリングのフィージビリティを検証した。

## 2. 研究結果の概要

図 1 に示す 5 地点(調布, 呉, 沖縄, 台南, タイ)に受信機を設置した場合を想定して、電波の散乱点のシミュレーションを実施した。その結果、図 2 に示すような散乱点の空間分布を得ることができ、各受信点について、散乱点の緯度分布を見積もることができた(図 3)。コロナ禍および受信システムの輸出に時間を要したことで、海外における本格的な観測が実施できていないものの、2021 年秋に石垣島で EPBs が観測され(図 4)、シンチレーションも検出された(図 5)複数の事例について、沖縄の観測データを解析した(図 6)。

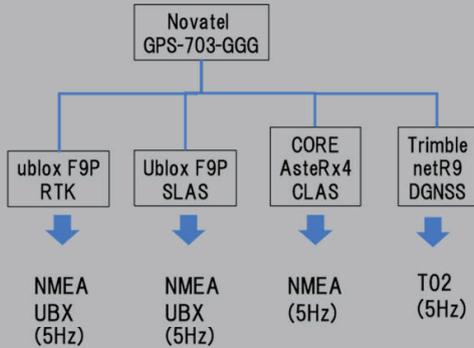
## 3. まとめと今後の課題

- 電波の散乱条件を計算した結果、沖縄, 台湾, タイに受信点を設置した場合に、EPBs が発生する低緯度・赤道域において電波を受信する可能性があることが確認された。本州に受信点を設置した場合は、太陽活動極小期に EPBs が到達すると考えられる低緯度・赤道域に散乱点が分布しないことも明らかになった。
- 沖縄において1年にわたってテスト観測を行ったものの、明らかに EPBs による異常伝播であると考えられる信号を受信することはできなかった。これは、太陽活動が依然として低い状態にあるために、プラズマバブルが高い緯度まで発達していなかったことによるものと考えられる。今後台湾, タイにおいて本格的な観測を行い、観測手法のフィージビリティを検証する予定である。
- 東アジア, 東南アジア域に受信点を設置した場合に観測できる可能性がある VOR の局は、東経 70-140 度, 南緯 10 度から北緯 30 度までの領域において 370 局存在する。これらの局のうち、同一の周波数チャンネルを用いている局は最大で 11 局程度である。本観測手法を用いてプラズマバブルの空間分布を導出するためには、同一の周波数チャンネルを使用している電波を同時に観測した場合に、他の観測手法と組み合わせるなどのアプローチによって、送信元の局を同定する手法を確立する必要がある。

# 空港面におけるマルチパス誤差低減技術に関する研究

東京海洋大学 ※久保信明、尾関友啓、小林海斗、小松大生

## 機器構成



## マルチパスデータ取得場所



## 測位結果 (地点②)

[m]	E_Average	N_Average	U_Average	E_STD	N_STD	U_STD
DGNSS	-0.261	-0.982	4.318	1.004	1.378	5.195
キャリアスムージング	-0.025	-0.956	4.213	1.032	1.449	5.388
cc_difference	-0.154	-0.999	3.781	0.979	1.475	5.336
信号強度による重み関数	-0.315	-0.386	3.150	0.610	0.488	1.874
カップリング	0.292	-0.659	3.130	0.534	0.693	2.457
残差異常	0.209	-0.152	1.208	0.355	0.272	0.804
DGNSS(L5)	-0.374	-0.718	1.831	0.908	1.064	2.610

※RTKのFix解を真値として算出

## 1. 背景と目的

マルチパスはGNSS補強システムに対して最後まで残る誤差である。SBAS(DGNSS)測位で利用している擬似距離は搬送波位相よりマルチパスの影響を受けやすく、搬送波位相を利用した高精度測位ではサイクルスリップによる再収束の問題が存在する。本研究では空港面におけるマルチパス発生状況及び誤差を低減するアルゴリズムの検討を行い、また空港における測位方式(CLAS,SLAS,DGNSS)ごとの測位精度を検証した。

本研究はR2年度からR3年度にかけて実施し、1年目のR2年度ではマルチパス環境におけるマルチパスの発生状況及び誤差低減のアルゴリズムについて検証した。検証したアルゴリズムは以下の6項目である。いずれのアルゴリズムも適応による精度改善を確認した。

- ・CC\_differenceのチェックによるマルチパス検出
- ・キャリアスムージングによる測位精度の改善
- ・信号強度による重み関数の検討
- ・残差異常衛星の排除による測位精度の改善
- ・ドップラー速度とのカップリング
- ・L5信号を使用した測位

2年目のR3年度では仙台空港において各測位方式の精度検証、マルチパスの発生状況及び低減方法を実際のデータを取得、検証した。

## 2. 仙台空港における実験概要

R3年度2月14日から16日にかけて、仙台空港の場周道路及びマルチパスが見込まれるターミナル脇でデータを取得した。上図右上はデータ取得に使用したバスとター

ミナル脇でのデータを取得した箇所の詳細場所である。ターミナル脇でのデータ取得では各地点5分停車し、データを取得した。上図の左上の機器構成の通りにデータを取得した。検証はR2年度検証したアルゴリズム適応前のDGNSS測位結果と適応後における平均誤差及び誤差標準偏差での評価を実施した。評価に使用した真値はRTK測位のFix解である。

## 3. 実験結果

上図右上で示したデータ取得場所、地点①～地点④ではRTK測位及びCLAS測位はFix解を出力しており、いずれの地点も搬送波位相測位には問題のない程度のマルチパス環境である。擬似距離測位結果に関しては、最も測位環境の厳しかった地点②における測位結果を上図下に示している。いずれのアルゴリズムも測位結果の改善に貢献している。L5信号を用いた測位に関しては、L5信号を送信している衛星が十分でなく、DOPが悪化している。そのため測位精度の改善度合いは見えにくい。

## 4. まとめ

今回の実験で実際の空港面におけるマルチパスの影響を評価した。マルチパスが見込まれるターミナル脇においてもRTK測位、CLAS測位はFix解を出力していることから分かるように、建物遮蔽によるDOP悪化による測位精度の劣化はあっても、マルチパスの影響は少ないと見込まれる。

最後に、本研究に携わって頂いた全ての関係者に感謝する。

# 準天頂衛星システムを利用した小型実験船 による自動運航試験

海上技術安全研究所 自動運航船PT ※平田 宏一、澤田 涼平

## ■概要

海上技術安全研究所では、小型実験船「神峰」を用いて、船員負荷低減のための運航支援技術および自動化技術に関する研究・開発を進めている。

本船の位置検出には準天頂衛星システム「みちびき」を使用し、あらかじめ設定した航路を自動で運航するウェイポイント運航システムや着桟までの経路を追従制御する自動着桟システムに活用している。

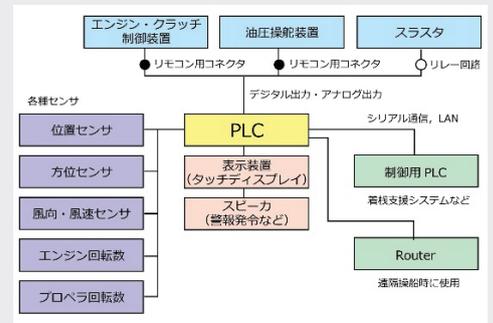
## ■小型実験船「神峰」

小型実験船「神峰」は、全長16.5 m、総トン数約17 GTの試験艇である。

船内または遠隔地より、PLCを介してエンジンや舵を制御する自動化システムを装備している。



小型実験船「神峰」の外観



自動化システムの概略

※PLC: Programmable Logic Controller

## ■準天頂衛星システム「みちびき」

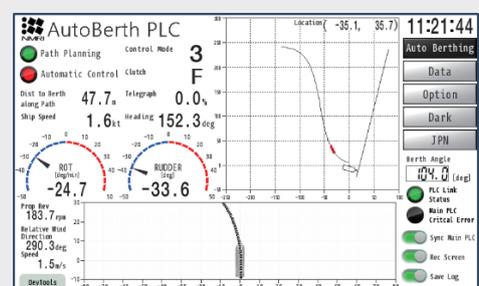
実船試験においては、複数のみちびき受信機を設置し、本船の位置を計測している。



ウェイポイント運航時の測位結果例

## ■実船試験結果の例

高精度な測位が必要な自動着桟においても、準天頂衛星システムは適切に機能している。



自動着桟時の表示画面例

## ■まとめ

自動化システムの実用開発においては、各種センサの計測精度の他、信頼性向上が重要である。今後、故障判断等のセンサ利用技術の高度化を目指す。

## 令和4年度 新規研究課題

重点	GBASを活用した着陸運用の高度化に関する技術開発	52
重点	空港用マルチ監視技術活用に関する研究	52
指定	固定翼無人機による海上・沿岸の自動監視観測に関する技術開発	53
指定	FOD検知装置の導入および滑走路維持管理の効率化に関する研究	53
指定	電波高度計と同一/隣接周波数利用システムの周波数共用に関する研究	54
指定	磁気低緯度地域におけるGNSS性能向上及び性能評価技術高度化に関する研究	54
指定	全飛行フェーズでのRNP化に向けた衛星航法のバックアップ(APNT)構築	55
萌芽的	セキュリティ検査のための画像化レーダー技術に関する基礎的研究	55

## GBAS を活用した着陸運用の高度化に関する技術開発

○吉原貴之，齊藤真二（航法システム領域），森亮太（交通交通管理領域）

全地球航法衛星システム（GNSS）による衛星航法の航空分野での利用が進んでおり，進入着陸フェーズでは従来の計器着陸装置（ILS）が担っていた精密進入及び着陸支援を GNSS 航法システムとして行う地上型補強システム（GBAS）が導入されつつある。GBAS は複数の進入方式を同時にサービス提供できるため，進入角の異なる進入経路や，滑走路離脱点に合わせた着地点（マルチエイミングポイント）を設定するといった活用策が考えられている。また，GBAS では ILS のような滑走路上の保護エリアを必要としないことから，より柔軟な進入経路の設定とともに，滑走路運用の効率化による空港処理容量の拡大，並びに燃料消費や騒音等の環境負荷の低減が期待される場所である。

本研究では，GBAS の利点を活かして進入経

路の選択から滑走路離脱までを一連の進入着陸として扱い，自由度の高い経路設定と個別の航空機の特長や進入フェーズに合わせてユーザがそれらから選択することにより，安全性を確保しつつ，環境に配慮した効率的な進入着陸を実現するための技術開発を行う。具体的には，異なる進入角やマルチエイミングポイントを設定した着陸運用の概念（CONOPS）構築とそれら運用条件（経路設計，管制方式，気象条件），安全性評価項目を明確にする。また，経路設計に必要となる衝突危険度モデル（CRM）の改良など，安全性評価のための技術開発を行うとともに，滑走路離脱を円滑にするためのパイロット支援ツールの具体化や各種シミュレーション実験をとおして，これら新しい着陸運用による効率化について評価を行う。

## 空港用マルチ監視技術活用に関する研究

○本田純一(監視通信領域)，大津山卓哉(航空交通管理領域)，松永圭左，角張泰之(監視通信領域)

監視技術は，航空管制において航空機の位置を提供するだけでなく，衝突防止等の観点からも極めて重要な役目を果たしている。監視技術は，利用される空域や必要となる情報の取得において，それぞれ異なる特徴も持っており，複数の監視技術を組み合わせるマルチ監視となる。一方，本来持ち合わせている特徴とは別に，空港面や空港近傍（「空港用」と称す）においては，建物等による電波の遮蔽やマルチパスによる性能低下が懸念される。これまで，航空路を中心とした監視性能の評価については研究が実施されてきたが，空港用監視にはまだ多くの課題が残されている。そこで，【どういった監視技術】が【どのような場所】で【どの程度の性能を有している】のか把握することが重要であり，そのためには監視性能をいかに評価するかが求められる。そのため，上述した複雑環境下において適切な監視技術の選択（最適な監視技

術の組み合わせ），導入のために，監視性能を評価する手法の開発も必要となる。

マルチ監視技術活用に関する研究では，各種監視技術及びマルチ監視における監視性能評価手法の開発を行う。この開発過程において，各種監視技術の性能も明らかになる。また，監視ができない航空機については監視可能な技術の提案やマルチ監視のための測位データの統合といった観点も踏まえて研究に取り組む。現行の監視において不足している技術例としては，モード A/C トランスポンダのみを搭載した航空機に対するマルチラレーションや車両等を対象とした独立非協調監視システムが挙げられる。その他，ADS-B の性能低下の要因として考えられる衛星からの電波の遮蔽や建物等によるマルチパスによる信号劣化等についても場所と位置精度の観点から，課題を明らかにする。

## 固定翼無人機による海上・沿岸の自動監視観測に関する技術開発

○古賀 禎（監視通信領域）、虎谷 大地（航空交通管理領域）

近年、監視や物流など様々な分野で無人機の利用が進んでいる。現在の無人機の運航は主として目視内におけるマニュアル運航（部分自動運航）である。このため、運航範囲が目視内の限られるほか、運航のために人員の確保が必要となる。将来における大規模・広範囲の安全で効率的な無人機の運航のためには、目視外においての完全自動運航が求められる。このためには、無人機の自動運航技術とともに、無人機の動態を常時管理する技術、有人機との協調的な空域利用および周辺状況に適応した運航技術な

どが必要となる。

本研究では、広範囲な監視が求められる海上・沿岸において、無人機が目視外完全自動運航を支援するシステムの開発を行う。さらに、福島ロボットテストフィールドを中核としたエリアに展開し、実環境下における実証実験を行うことで、実用性の高い技術の確立を目指す。なお、実証実験においては広範囲な監視が可能となる固定翼無人機を主として利用して実証を行う。これにより、海上・沿岸の風力発電施設等の自動監視の実現に資する技術を開発する。

## FOD 検知装置の導入および滑走路維持管理の効率化に関する研究

○ニッ森俊一、米本成人、河村暁子、森岡和行（監視通信領域）

滑走路小異物（FOD）監視システムは、FODを自動的に探知し、空港運用者に情報を提供するシステムであり、空港運用に係る安全性向上のために導入が進められている。FOD監視システムの導入は、FODに起因する事故を未然に防ぐだけでなく、滑走路を閉鎖して実施する滑走路点検の時間短縮を図ることが可能となる。これにより、滑走路利用効率の向上および空港滑走路閉鎖に伴う航空機の上空待機時間の低減が図れ、CO<sub>2</sub>排出削減が期待できる。

電子航法研究所では、実用化に向けたFOD監視システムの開発を実施し、EUROCAE MASPS ED-235を超える探知性能達成とレーダセンサ設置条件の明確化をしたところである。実運用に先立ち、空港滑走路における監視環境の変動（季節・交通）評価/対策および信頼性評価・低コスト化を行う必要がある。また、異物回収端末等による、FOD監視システムを使った滑走路維持管理方式の効率化提案が求められている。

本研究の目的は、

(i)FOD監視システムのR6年度以降の導入に向けて、実運用時に課題となる、滑走路周辺環境に起因する誤検知率の低減、FOD監視システムの信頼性向上および低コスト化に向けた検討  
(ii)システム運用開始時を想定し、FOD監視システムを使った滑走路維持管理方式の効率化提案である。

本研究では、これらに対応する新たな研究開発として、下記3つの項目を達成目標としている。

- (1) FOD監視環境変動を明らかにし、誤検知率低減を可能とするFOD探知アルゴリズムを実現する。
- (2) FOD監視システムの信頼性向上および低コスト化に向けた検討を行う。
- (3) FOD監視システムを使った滑走路維持管理方式効率化の向上に向けた技術提案を行う。

## 電波高度計と同一/隣接周波数利用システムの周波数共用に関する研究

○ニッ森俊一，米本成人，河村暁子，森岡和行（監視通信領域）

電波高度計（使用周波数：4.2 GHz～4.4 GHz）の隣接および同一周波数では、近年様々な電波利用システムの運用がされつつある。隣接帯域は世界各国で5Gモバイルシステムへ周波数割り当てがなされ、日本では3.6 GHz～4.1 GHz/4.5 GHz～4.6 GHzで運用されている。さらに、同一周波数帯域においては、Wireless Avionics Intra-Communication（WAIC）システムに割り当てられている。これらは、電波高度計設計時には存在せず、より厳しい条件で電波高度計の運用を強いられる可能性がある。これらの課題に対応するため、ICAO FSMP および RTCA/EUROCAE で国際規格を策定中である。

本研究の目的は、

(i)電波高度計の電波環境評価技術を実現するこ

とで、電波高度計の安全確保および周波数共用条件を明らかにする

(ii)電波高度計の干渉発生の可能性の評価と、干渉低減のための技術的検討の実施

(iii)5G モバイルシステムや WAIC システム等の干渉源評価の実施、の3点である。

本研究では、これらに対応する新たな研究開発として下記3つの項目を達成目標としている。

- (1) 干渉発生電力・周波数条件の取得・分析を行い、干渉発生条件を明らかにする。
- (2) 大規模電磁界数値解析技術を用い、電波高度計の干渉発生推定技術を実現する。
- (3) 国際標準化策定への寄与、航空当局/電波管理当局および運航者/通信事業者へ情報提供を行う。

## 磁気低緯度地域における GNSS 性能向上及び性能評価技術高度化に関する研究

○齋藤 享，吉原 貴之，高橋 透（航法システム領域）

我が国は地磁気的な低緯度に位置し、電離圏を含む宇宙天気諸現象は GNSS の性能を制限するものとなっており、宇宙天気が運航に与える影響分析能力の向上および宇宙天気情報を用いた地上装置の技術開発が望まれている。電離圏を含む宇宙天気諸現象は、性能劣化の要因の一つと位置付けられ、ICAO においても宇宙天気アドバイザーの配信が2018年11月より開始されたところである。

GBAS については、CARATS において導入が意思決定され、羽田空港においてカテゴリ-I 運航トライアルが行われている。高カテゴリ-GBAS については、検証過程で大幅な変更を経て2017年11月にGAST-Dを含むICAO SARPsが発効したところである。さらに、磁気低緯度地域における GAST-D の性能向上に向けた基

準策定・技術開発が ICAO において継続されている。これまでに、高カテゴリ-GBAS 特有の技術要件を取り入れた総合性能評価基礎技術を開発して来ており、我が国における環境を考慮した、我が国の空港環境における総合性能評価が必要とされている。

本研究では、宇宙天気情報等を活用した MSAS, GBAS 等 GNSS 航法システムの性能評価技術および性能向上技術の開発を行うとともに、電離圏擾乱と航空機航法性能の関係の評価、宇宙天気アドバイザー発出時の運航への影響評価を行う。また、GBAS 電離圏脅威モデルの維持管理・改良を行い、これを考慮した GAST-D 性能向上技術の開発と設置の技術課題の明確化を行う。

## 全飛行フェーズでのRNP化に向けた衛星航法のバックアップ（APNT）構築

○毛塚 敦，齊藤 真二，小田 浩幸（航法システム領域）

我が国では効率的な航空機の運航のため航空路・空港周辺ターミナル空域を含めたすべての飛行フェーズにおいてRNP経路の導入が進められている。RNP経路では、監視レーダに頼らず自律的に経路を飛行する能力が求められ、航空機上での性能監視警報能力を有するGNSSのみが航法装置として認められており、その能力を有しないDME/DME測位は現在使用することができない。しかし、GNSSには脆弱性に関する様々な問題があり、長期間使用できない事例が数多く報告されている。このため、RNP経路導入にあたってGNSSが使用できない場合に備えたバックアップ航法（APNT：Alternate Positioning Navigation and Timing）を構築しておく必要がある。

EUROCAE Working Group 107では短期的なGNSS航法のバックアップとして地上DME局

にインテグリティ性能を持たせてDME/DME測位でRNP経路を飛行可能とする標準化が進行中であり、我が国でも導入が検討されている（CARAT NAV-8）。EUROCAEでは最大のインテグリティ脅威であるマルチパスに対する対策基準が策定される見込みであるため、本研究において国内DME局の空間信号を飛行実験により評価し、マルチパス障害の有無を確認するとともにマルチパスを回避しながら効率的に地上DME局を配置する基準についての検討を行う。また、地上DME装置のインテグリティ性能を改善する手法の研究に加え、中長期的な視点でインテグリティ性能を向上させるためのマルチDME測位およびマルチパスの影響により異常となるDME局の検出・排除を行うRAIM（Range Autonomous Integrity Monitoring）アルゴリズムの開発と国内適合性検証を行う。

## セキュリティ検査のための画像化レーダー技術に関する基礎的研究

○米本成人，河村暁子，ニッ森俊一，森岡和行，塩野谷哲久（監視通信領域）

空港のように、乗客に対するセキュリティ検査を実施する場所では、検査に要する時間が検査効率を左右するため、高速に検査が可能となる機器の需要が高い。令和3年度まで競争的資金研究によって、レーダー技術を活用した電波を照射してのアクティブセンシング、人体から放射される熱雑音に含まれるミリ波成分を電波干渉計方式で受信して映像化するパッシブセンシングによる物体の映像化の基本的な原理を検証した。しかし、人体から放射される熱雑音を映像化した場合のコントラストが低く、高いコントラストの映像を取得するには数十テラサンプルのデータを積分する必要があるため、32x32の受信機アレイで1ギガサンプル/秒でデータを記録する場合は数十秒の積分時間が必

要であった。また、従来型の基盤目状の受信機配置で空間分解能を向上させるためには、映像の縦横の分割数の積で決まる画素の数だけ受信機が必要となる。このことから、取得されるミリ波画像の高精細化、高分解能化を求めるには、増加する受信機数の低減などの課題が残る。

本研究では、セキュリティ検査のための画像化レーダーシステムの撮像性能向上を図るため、熱雑音受信時のコントラスト向上、および積分計算の処理速度を向上させる手法を開発する。また、受信機の効率的な配置により得られる電波画像の空間分解能を向上させるための手法を開発する。加えて、これまでの研究活動において参画してきた国際規格化団体へのフォローアップについても実施する。



令和4年度（第22回）

電子航法研究所研究発表会 講演概要

令和4年6月16日 発行

編集兼発行人 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

電子航法研究所

発行所 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

電子航法研究所

〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7丁目42番地23

電話 0422-41-3168

ホームページアドレス <https://www.enri.go.jp/>

