

令和5年度（第23回）

電子航法研究所研究発表会

# 講演概要

令和5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

1. 次世代マルチリンク航空無線システムに関する検討状況	監視通信領域	※ 森 岡 和 行 河 村 暁 子 米 本 成 人 呂 暁 東 長 縄 潤 一 宮 崎 則 彦 佐 藤 正 彦	1
2. ADS-B位置検証技術の性能概算	監視通信領域	※ 長 縄 潤 一 宮 崎 裕 己 田 嶋 裕 久 古 賀 禎 北 折 潤 角 張 泰 之	7
3. 羽田空港での滑走路異物監視システムの評価計画	監視通信領域	※ ニ ッ 森 俊 一 森 岡 和 行 河 村 暁 子 米 本 成 人	13
4. フリールート空域の設計、潜在便益、及び評価について	航空交通管理領域	ブラウン マーク 平 林 博 子 ビクラマ シン ハ ナヴィンダ キトマル ※ 村 田 暁 紀 虎 谷 大 地 井 無 田 貴	17
5. 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	筑波大学	※ 伊 藤 誠 西 田 開 飛 孟 成 柱	26
6. 固定飛行経路角降下の運用構想に関する一検討	航空交通管理領域	※ ビクラマ シン ハ ナヴィンダ キトマル 虎 谷 大 地 平 林 博 子	30
7. 気象条件に対応した後方乱気流管制方式と効果	航法システム領域 航空交通管理領域	※ 吉 原 貴 之 藤 井 直 樹 瀬 之 口 敦 山 田 泉 虎 谷 大 地 青 山 久 枝	38

8. SBAS信号認証機能の概要とプロトタイプの開発	航法システム領域	※ 坂 井 丈 泰 北 村 光 教 毛 塚 敦	42
9. 東南アジアにおけるGBAS導入のための電離圏環境評価	航法システム領域 拓殖大学	※ 齋 藤 享 吉 原 貴 之 中 村 真 帆	46

令和5年度 新規研究課題

## 次世代マルチリンク航空無線システムに関する検討状況

監視通信領域 ※森岡 和行, 河村 暁子, 米本 成人, 呂 暁東,  
長縄 潤一, 宮崎 則彦, 佐藤 正彦

### 1 はじめに

将来的な航空交通量の増加が想定される中、効率的な航空交通管理を実現するため SWIM (System Wide Information Management) によるグローバルな情報共有システムが必要とされている。しかし、現在の航空無線通信システムで SWIM による空地情報共有を行うためには、通信速度、セキュリティ、IP(Internet Protocol)未対応等の観点から実現が困難である。特に、IP 通信に対応した新しい航空無線システムの実現が必要不可欠である。

そこで、ICAO (International Civil Aviation Organization) では、航空用 FCI (Future Communication Infrastructure) の必要性が議論され、IP に対応した次世代航空用高速データ通信システムとして、空港面用の AeroMACS (Aeronautical Mobile Airport Communications System)、陸域用の LDACS (L-band Digital Aeronautical Communications System)、洋上用の次世代衛星通信システムの検討が開始された。

図1に、シームレスな空地 SWIM アクセスの概念図を示す。将来的には、これらの航空無線通信システムが複数同時につながり(マルチリンク)、飛行区域や飛行フェーズ、通信覆域を考慮しつつ、シームレスに切り替わることで、いつでもどこでも、パイロットが意識することなく地上の SWIM システムに繋がっている状態をめざしている。

一方で、新しいシステムへの移行には相当な時間がかかると考えられ、現行システムと次世代システムの共存を考慮したシステム検討が必要となる。電子航法研究所では、令和2年度より、Aeronautical Telecommunications Network (ATN)/Internet Protocol Suite (IPS)に関する重点研究を開始している。本稿では、IPS に対応した、次世代マルチリンク航空無線システムについての検討状況を報告する。

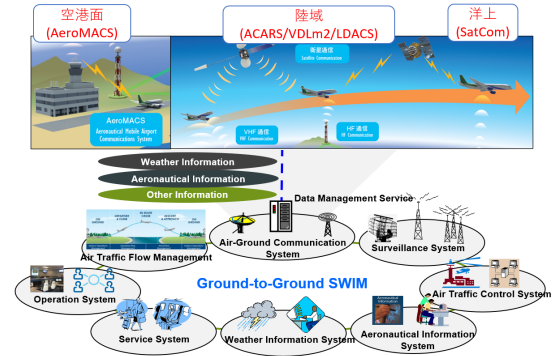


図1. シームレスな空地 SWIM アクセスの概念

### 2 航空無線システム概要

図2に航空用無線通信システムの概要を示す。Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS)と VHF Data Link (VDL) mode 2 はすでに運用中であり、VDL mode 2 の IP 対応に関するドキュメント改定が今後検討されていく予定となっている。

AeroMACS は ICAO での標準化が 2016 年に終了しており、LDACS と次世代衛星通信システムに関しては ICAO での標準化が進行中である。これらのうち ACARS のみが IP 通信に対応していない。そこで本研究開発では、ACARS の IP 化についても検討する。

メディア	通信速度	遅延	IP対応	標準化
ACARS	~1200bps	数秒~	×	運用中
VDLm2	~31.5kbps	数秒~	△	運用中
AeroMACS	~約7Mbps	数100ms~	◎	標準化済
LDACS	~約2Mbps	数100ms~	◎	標準化中
現行SatCom	~数Kbps	数秒~	○	運用中
次世代SatCom	~数10Mbps	数秒~	◎	標準化中

図2. 航空用無線通信システム概要

### 3 エミュレータの開発・評価

実航空（無線）機を用いた評価はコストと時間がかかるため、その前段階として、シミュレーションやエミュレーションによる評価を実施することが有効である。ここでは、エミュレータを用いた次世代マルチリンク航空無線システムの評価について述べる。

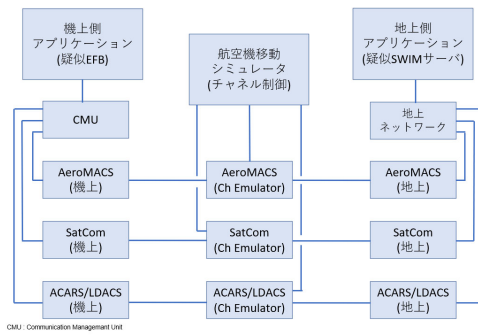


図3. マルチリンクエミュレータのブロック図

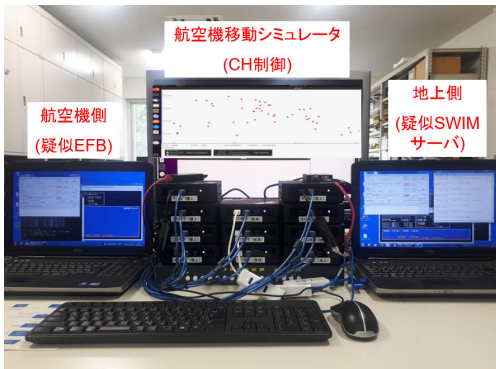


図4. マルチリンクエミュレータの外観

図3、図4に開発したマルチリンクエミュレータのブロック図と外観を示す。このマルチリンクエミュレータは現行と次世代通信システムの両方に対応している。図3中の各々のブロックは市販のPCを用いて実現している。機上側アプリケーション(疑似 EFB: Electronic Flight Bag)で生成されたデータは、機上のCommunication Management Unit (CMU)に送られる。CMUでは、現在利用可能な無線システムの中から、最適な無線システムを選択し、あるいは、複数並行にデータを送信する。

航空機移動シミュレータは、フライトレーダ24から取得した実航空機の10秒ごとの位置に基づき以下の計算を行う。

まず、航空機と地上局の位置関係及び送信電力、送受信アンテナゲイン等各無線システム仕様から各時刻の信号強度を計算する。次に、信号強度とパケットロス率等の関係から、無線システムごとの特性(パケットロス率、遅延、スループット)を計算する。最後に、計算した特性値を実際の時間スケールでチャンネルエミュレータに設定する。

チャンネルエミュレータでは、設定された値に

応じ、入力されたパケットを対向側へ出力するまでの間に設定された量の遅延やパケットロスを挿入する。

まずは、エミュレータの基本動作確認として、AeroMACS、現行衛星通信(SatCom)、ACARSの3種類の航空無線システムを想定し、仙台空港を出発後、高度3000フィート、時速800kmで一直線に海上沖へ移動するシナリオを実施した。疑似 EFB から疑似 SWIM サーバへネットワーク疎通の確認に用いられる ping パケットを送信し、往復にかかる遅延時間を測定した[1]。

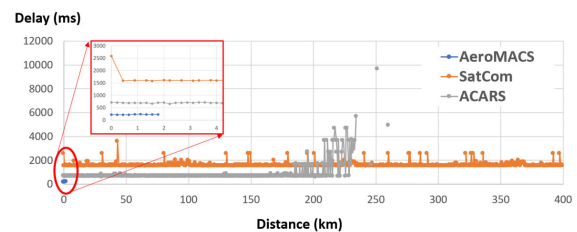


図5. マルチリンクエミュレータの評価例

図5にマルチリンクエミュレータの評価例を示す。縦軸は遅延で横軸は空港からの距離を示している。空港を出発後 AeroMACS 覆域境界付近である約2kmの地点で AeroMACS の接続が切れ、ACARS 地上局から約200km離れた地点から ACARS の遅延特性が悪化していく様子が分かる。また、衛星通信は定常的な2秒程度の遅延があり、他のメディアに比べて大きいものの、洋上へ出ても継続して使用可能である様子が再現できている。

本エミュレーションは航空機が1機という前提で実施している。実際には、複数の航空機が無線チャンネルを共有するため、近辺を飛行している航空機の数によって1つの航空機が利用できる帯域やパケットロス率等の特性が変化する。現在、フライトレーダ24から取得した実際の航空機の航跡情報をもとに、近辺の航空機数を考慮したチャンネル制御を実装することで、より現実に近い評価を進めている。

#### 4 プロトタイプの開発・評価

プロトタイプを用いた評価では、実環境での特性を取得することができ、より現実的な評価を実施可能である。また、プロトタイプを用いた評価により、航空規格で要求する仕様の実現

可能性について検証することができる。さらに、実環境で取得した無線特性をシミュレータやエミュレータにフィードバックすることでシミュレーションやエミュレーションの精度を向上することができる。

AeroMACS については、これまでに地上局および移動局のプロトタイプを用いた多くの実証実験を実施してきた[2-5]。衛星通信については、すでに製品化されている非運航用の市販品を実験用航空機に搭載し評価していく予定である。ここでは、ACARS の IP 化と LDACS に関するプロトタイプ開発・評価について述べる。

#### 4.1 ACARS の IP 化

実際に運航している航空機の中には ACARS しか搭載されていない航空機も多く、ソフトウェアのアップグレードのみで ACARS 上で IP パケットを送受信(IP-ACARS)できると効果的である。例えば、SWIM 等の IP ネットワーク上で動作するアプリケーションを利用することが可能になる。また、ACARS の弱点であるセキュリティを強化することにより、通信の機密性、完全性、正当性が高まり、ACARS では防ぐことの難しい、盗聴・改竄・なりすましを防ぐことができる。

ACARS ではテキストデータしか送受信ができないため、ACARS 上で IP データを扱うには、バイナリデータをテキストデータに変換する必要がある。Media Independent Aircraft Messaging (MIAM) プロトコル(ARINC841) [6]には、通信メディアに依存しない航空用データのやり取りが規定されており、その中でバイナリデータをテキストデータに変換する手法として Base85 エンコーディングが規定されている。

本稿では、IP パケットを MIAM プロトコルでカプセル化することにより IP パケットを ACARS 上で送受信する方法の実現可能性や問題点などを検討する。

図6に本検討で使用使用するプロトコルスタックを示す。SWIM 等のアプリケーションデータを含む IP パケットは MIAM ヘッダが付与された後、Base85 エンコーディングによりテキスト文字列に変換され、ACARS プロトコルへ渡される。Base85 エンコーディングにより、元の

データサイズは 5/4 倍となる。認証情報の付与、暗号化の処理については、現在検討中であり、今回の評価では考慮していない。

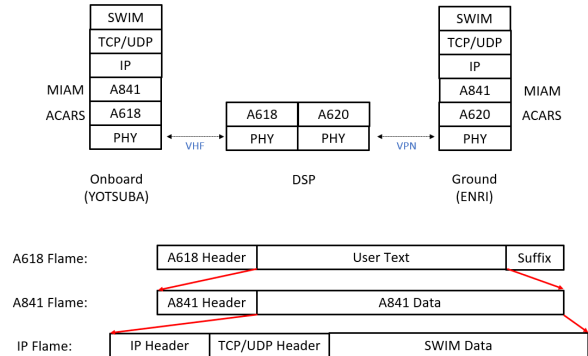


図 6. IP-ACARS プロトコルスタック

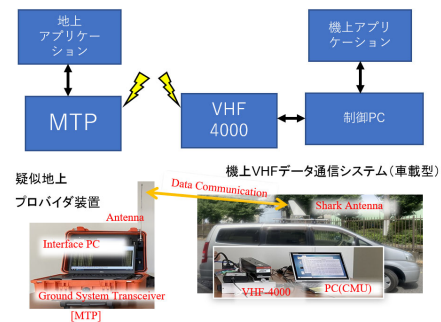


図 7. IP-ACARS 検証機と実験構成

図7に開発した IP-ACARS 検証機と実験構成の外観を示す。機上局として、実際の航空機で使用される Collins 社製の VHF-4000 を用いた。実際のシステムでは VHF-4000 は前章に述べた CMU に接続されるが、本構成では汎用の PC を接続し、PC 上で動作する制御ソフト上に MIAM プロトコルを実装した。

地上局として、Airtel 社製の Multi Test Platform (MTP)を用いた。MTP は地上局と地上ネットワークをエミュレートし、VHF-4000 とは無線で接続される。

図8に研究所構内で実施した地上走行試験結果を示す。図中黄色の三角(▲)印の位置に地上局を設置し、構内を走行しながら機上アプリケーションと地上アプリケーションの間でネットワーク疎通の確認に使われる ping パケットを送受信した。赤色は受信電力の高かった位置を示し、青色は受信電力が低かった位置を示している。また、黒色はデータが受信できなかった位置を示している。



図 8. 構内地上走行試験結果

図より、見通しの良い場所では受信電力が高く、建物や木の陰になっている場所では受信電力が低くなっている様子が分かる。構内においてはほとんどの場所で送受信できたが、建造物によるシャドーイングやマルチパスの影響等により信号品質が劣化し、地上局に近く受信電力の高い場所において受信に失敗する場合もあった。

実際の飛行環境ではほとんどが見通し内になるが、移動速度が速いことによりドップラーシフトの影響が出てくることも考えられるため、次のステップとして実験用航空機に搭載して、飛行中の評価を実施する予定である。

## 4.2 LDACS

現在、ICAO において次世代陸域航空無線システム LDACS の標準化が進められている。電子航法研究所では、これまでに LDACS の研究開発を実施し、標準化活動に貢献してきた [7]。本研究開発では、これまでに開発した物理レイヤ評価システムを発展させ、リアルタイムに IP パケットを送受信することのできる LDACS プロトタイプを開発した。

図 9 に、開発した LDACS プロトタイプの外観と基本性能評価のための試験構成を示す。開発した LDACS プロトタイプは地上局：Ground Station (GS)と航空機局：Airborne Station (AS)から構成される。ハードウェア構成は共通であり、設定ファイルによって GS/AS それぞれの動作を切り替えて使用することができる。

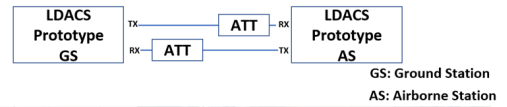


図 9. LDACS プロトタイプと試験構成

まずは、GS と AS を RF ケーブルで直接接続する構成で基本性能を評価した。GS の Tx ポートを AS の Rx ポートに、AS の Tx ポートを GS の Rx ポートに RF ケーブルで直接接続した。各ポート間には 50dB のアッテネータを挿入している。

図 10 にフォワードリンク：Forward Link (FL), つまり、地上局から航空機局方向のスループット評価結果を示す。図より、信号対雑音比(SNR: Signal to Noise Ratio)が十分に高い場合、1.4Mbps のスループット(64QAM-3/4 の場合)が実現できており、規格通りに動作していることが確認できた。その他、本プロトタイプを用いて LDACS の検証試験を行い、ICAO での標準化活動に対して検証結果を報告した[8]。

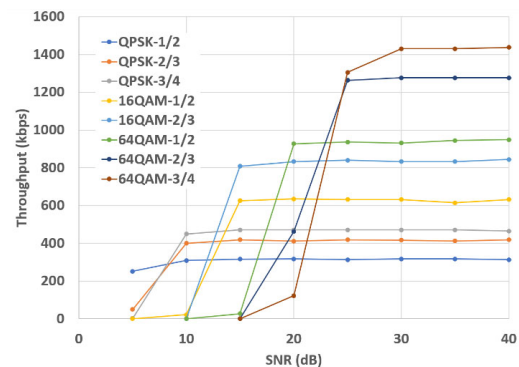


図 10. FL のスループット評価結果

LDACS の基本性能評価後、2022 年 4 月から 12 月にかけて著者の一人が LDACS の設計・開発・標準化をけん引してきたドイツ航空宇宙センター(DLR)に滞在し、開発したプロトタイプを用いて国際間で相互評価を行うこととなった。ヨーロッパでは Single European Sky ATM



Research (SESAR)プロジェクトのもと LDACS のプロトタイプが開発されており、DLR の実験用航空機を用いた飛行実証試験は 2022 年 7 月に実施された [9]。

飛行実験の際中に、SESAR プロトタイプの送信する LDACS 信号を ENRI プロトタイプで受信復号する試験を実施した。これは、通信システムの国際標準化において重要なインタオペラビリティ（相互運用性）試験の一つである。

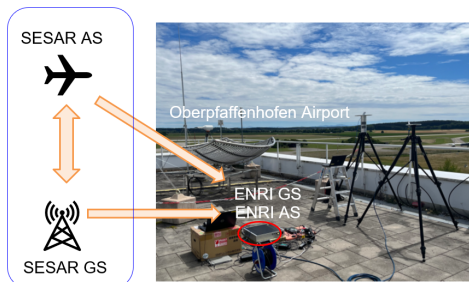


図 11. SESAR プロトタイプとのインタオペラビリティ試験構成

図 11 に SESAR プロトタイプとのインタオペラビリティ試験の構成を示す。DLR 建屋の屋上に L バンドアンテナを設置し、ENRI プロトタイプに RF ケーブルで接続している。SESAR GS の送信する LDACS 信号を ENRI プロトタイプ AS でリアルタイムに受信・復号し、SESAR AS の送信する LDACS 信号を ENRI プロトタイプ GS で受信・記録した。

図 12 に飛行実験中に SESAR GS からの信号を ENRI プロトタイプ AS でリアルタイムに受信・復号している様子を示す。図より、QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)信号が復調され、ネットワークプロトコル解析ソフト Wireshark のログより、GS からのメッセージが正常に復号されていることが確認できる。

このように、独立に開発されたプロトタイプ間での信号の送受信に成功し、2 つのプロトタイプ間のインタオペラビリティが示された。本試験における検証の結果見つけられた、誤り検出符号の計算方法に関する記述等、仕様書の曖昧性や誤記については ICAO の標準化活動へフィードバックを行い[10]、LDACS 仕様書に反映されることとなった。

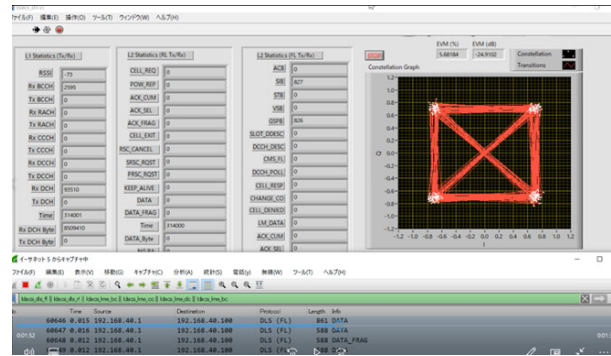


図 12. SESAR GS からの LDACS 信号をリアルタイムに復号している様子

## 5 実験用航空機よつば搭載状況と今後の展望

最後に、令和 5 年度に予定している飛行実験の準備状況について報告する。飛行実験では、これまでに研究開発を実施し、すでにプロトタイプを所有している AeroMACS, 4.1 節で述べた IP-ACARS, 新たに実験用航空機に搭載した非運航用の衛星通信システム(インマルサット)を想定する。VDL mode 2, LDACS については、実験用航空機へ搭載可能なプロトタイプがないため今回の飛行実験システムには組み入れていない。これらの通信システムについては、3 章で述べたマルチリンクエミュレータを用いて評価予定である。

図 13 にマルチリンクの飛行実験構成を、図 14 に実験用航空機内の機材の搭載状況を示す。EFB を模擬するタブレットは機内 WiFi に接続される。機内 WiFi は疑似 CMU に接続されており、CMU 内で各リンクを管理するための CMU-MIAM クライアントソフトウェアが動作している。CMU-MIAM クライアントは適切な通信リンクを選択し、あるいは並行してデータを送出する。

送出されたデータは、インターネットを介して電子航法研究所本所に設置される ENRI-MIAM サーバへ送られ、研究所内の SWIM ネットワークへ接続される。今年度中に、本実験構成を用いて、次世代航空用マルチリンクシステムの飛行実験を行い、有効性や課題について評価する予定である。

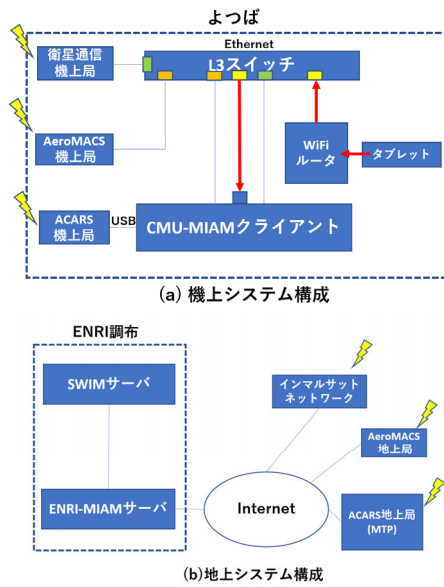


図 13. マルチリンクの飛行実験構成



図 14. 実験用航空機よつばの搭載状況

## 6 おわりに

本稿では、次世代マルチリンク航空無線システム実現に向けた検討状況を報告した。まず、マルチリンクエミュレータの概要と基本評価結果を報告した。実際の航空機の移動や、周囲に複数の航空機が存在し通信の衝突がある状況を考慮に入れた評価は今年度実施予定である。次に、航空無線機のプロトタイプを用いた評価では、IP-ACARS の地上走行実験結果と LDACS プロトタイプを用いた基本評価及びインタオペラビリティ評価結果を報告した。最後に、今年度実施予定の実験用航空機を用いた飛行実験の準備状況について述べた。これらの評価システムを活用し、多角的な視点から次世代マルチリンク航空無線システムの評価を実施していく予定である。

## 参考文献

- [1] 森岡, 米本, 河村, “航空無線通信用マルチリンクエミュレータの開発ーコンセプトと基本動作確認ー,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2021年9月.
- [2] 森岡, 金田, ニッ森, 本田, 河村, 米本, 住谷, “実環境下における AeroMACS 試験信号解析,” 電子航法研究所研究発表会 (第14回), pp.31-34, 平成26年6月.
- [3] 森岡, 金田, ニッ森, 河村, 富田, 米本, 住谷, “AeroMACS プロトタイプシステムの基本性能評価,” 電子航法研究所研究発表会 (第15回), pp.65-68, 平成27年6月.
- [4] 森岡, 長縄, 本田, 金田, ニッ森, 河村, 富田, 米本, 住谷, “AeroMACS の基地局配置及びハンドオーバーに関する検討,” 電子航法研究所研究発表会 (第16回), pp.112-115, 平成28年6月.
- [5] 森岡, 住谷, 呂, 長縄, 金田, ニッ森, 米本, 河村, “次世代航空通信システム AeroMACS 研究の展望,” 電子航法研究所研究発表会 (第18回), pp.67-70, 平成30年6月.
- [6] ARINC , “MEDIA INDEPENDENT AIRCRAFT MESSAGING (MIAM) , ” ARINC SPECIFICATION 841-3, July 2016.
- [7] 北折, 住谷, 石出, “将来の航空用高速データリンクに関する研究,” 電子航法研究所報告, No.132, 2015.
- [8] K. Morioka, et al. , “ENRI Technical Validation Report (ENRI TVALR) ”, ICAO CP-DCIWG PT-T/20, Sep, 2022.
- [9] T. Gr`aupl, et al., “LDACS Flight Trials: Demonstration of ATS-B2, IPS, and Seamless Mobility,” in Proc. Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS), Herndon, VA, USA, Apr 2023.
- [10] K. Morioka, et al., “Feedback from ENRI Technical Validation”, ICAO CP-DCIWG PT-T/20, Sep, 2022.

## ADS-B 位置検証技術の性能概算

監視通信領域 ※長縄 潤一，宮崎 裕己，田嶋 裕久，古賀 禎，北折 潤，角張 泰之

### 1 まえがき

我が国では次世代の航空機監視システムとして自動位置情報伝送・監視機能 ADS-B (Automatic Dependent Surveillance—Broadcast)の導入が計画されている。ADS-B は航空機が自身の位置などを自発的に放送し、それを地上側で受信することで航空監視を実現するものである。ADS-B は地上側設備を簡素化できる一方で、監視情報を航空機からの自己申告に頼っていることから、なりすまし等による不正な位置情報への対策が求められる[1]。

これまでに電子航法研究所では ADS-B の位置情報を検証する技術（位置検証技術）に取り組んできた。具体的な手法としては信号到達時間差（TDOA: Time Difference of Arrival）を用いた手法（以下、TDOA 法）[2-13]や信号到来角（AOA: Angle of Arrival）を用いた手法などである[12-14]。これら手法に関して、理論の構築、実験的な評価、システム設計法による性能概算などを行ってきた。

本稿ではこれまでの取り組みのうち、システム設計法[11,12]について研究成果を報告する。本手法はシステム計画段階における性能概算や性能に影響を与える要因を分析するために利用できる。本手法による性能概算手順を説明し、計算例の分析結果を報告する。なお、紙面の都合上 TDOA 法のみ限定する。

### 2 TDOA 法による位置検証

#### 2.1 判定の動作

2局以上の受信局により TDOA を測定できる。TDOA を利用して ADS-B 信号に含まれる位置情報の正当性を確かめるのが TDOA 法である。ここでは簡単化のため2局のみを考える。

具体的な手順としては、まず、受信局2局により ADS-B 信号を受信し、受信時間を精密に測定する。受信時間の差が TDOA である。TDOA の実測値は送信源と受信局の位置関係で決まるものである。一方、信号に格納された

ADS-B 位置を読み出し、ADS-B 位置と受信局の位置関係から TDOA の予測値も計算できる。ADS-B 位置が正しい場合、すなわち送信源位置に十分に近い場合、TDOA の予測値は実測値と一致するはずである。予測値と実測値の差を検定量とし、事前に決めたしきい値と比較することで、正当性を判定できる。本稿では検定量

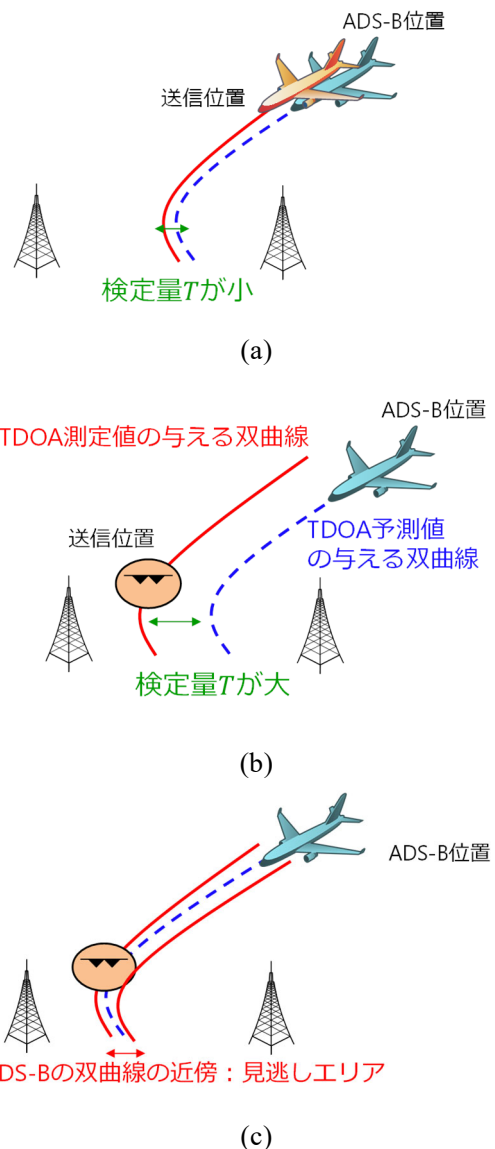


図1 TDOA 法による判定の様子：(a) 正当な位置を検証できる場合，(b) 不正な位置を検知できる場合，(c) 不正な位置を見逃す場合

おおよびしきい値をそれぞれ $T$ および $\gamma$ と書くことにする。

図1ではTDOA法による判定の原理をより詳しく説明する。TDOA実測値は送信源の存在する双曲線を示す。一方、ADS-B位置から計算されたTDOA予測値はADS-B位置を通る双曲線を示す。検定量 $T$ は双曲線間の最小距離差に相当する。図1(a)のようにADS-B位置が正当なときは双曲線の差が小さくなる。同図(b)のようにADS-B位置が不正のときは双曲線の差が大きくなって検知が成功する。しかしながら、同図(c)のように予測値と実測値が一致する位置関係も稀に存在し、その場合は検知が失敗する。本稿で述べるシステム設計法は位置関係を網羅的に調べることで、検知が成功する確率（検知率）を概算するものである。

## 2.2 性能指標：検知率・誤報率

位置検証システムで重要となる性能指標としては前述した不正の検知率のほかに、誤報率も挙げられる。検知率は不正な位置を不正だと検出する確率であり、高いほど良い。一方、誤報率は正当な位置を不正だと誤って判定する確率であり、低いほど良い。一般的に、検知率と誤報率にはしきい値で決まるトレードオフの関係がある。なお、ADS-Bの位置検証における検知率と誤報率に関する国際的な性能要件は現在のところ決められていない。また、本稿では確率の0%~100%を0~1の数値範囲で表現する。

## 3 性能概算のためのシステム設計法 [11,12]

### 3.1 概要

位置検証の性能指標である検知率と誤報率は、受信局の位置、監視覆域（ADS-Bを取得する位置）、送信源の位置に応じて変化する。したがって様々な組み合わせを計算することが必要である。また、送信源については事前に特定の位置を想定することは難しい。そこで提案するシステム設計法では、送信源の発生確率は想定された範囲内で一様だと仮定し、平均的な検知率（平均検知率）を計算する。計算方法としては、まずADS-B監視が求められる覆域範囲、不正な送信源が想定される範囲を与えておき、それらを細かく刻むことで、覆域点と送信点の

集合（点群）を得る。そして、覆域点と送信点の組み合わせ全てに検知率を計算し、その平均を取ったものを平均検知率とする。なお、誤報率はしきい値の設定において織り込む。計算の流れを書き出すと以下の通りとなる。

1. 計算条件の設定  
覆域範囲、不正な送信源の想定範囲、受信局位置などを与える。
2. 覆域点群・送信点群の生成  
覆域を覆域点の集合（点群）に刻む。覆域点の数を $N_a$ 、覆域点番号を $k = 1 \dots N_a$ とする。同様に、送信源の想定範囲を送信点群に刻む。送信点の数を $N_t$ 、送信点番号を $l = 1 \dots N_t$ とする。
3. しきい値・検知率計算  
ある覆域点 $k$ と送信点 $l$ の組み合わせ $(k, l)$ に対して、所望の誤報率を達成するようなしきい値 $\gamma$ を計算した上で、検知率 $P_D(k, l)$ を計算する。
4. 平均化  
 $(k, l)$ に関する全ての組み合わせにわたって平均を取り平均検知率 $P_{D,avrg}$ を計算する。

各ステップの詳細は以降で解説する。

### 3.2 ステップ1（計算条件）

計算条件として設定するのは以下のパラメータである。

1. 受信局位置
2. 覆域範囲
3. 不正な送信源の想定範囲
4. 点群生成ための刻み幅
5. 受信局性能（精度 $\sigma_t$ と時刻同期性能 $\Delta\mu$ ）
6. しきい値計算に必要なパラメータ（誤報率等、後述）
7. 平均化での除外範囲等（後述）

### 3.3 ステップ2（覆域点群・送信点群の生成）

与えられた範囲を緯度・経度上で等間隔に刻むことで格子状の点群を生成する。高度は一定とし、覆域点は飛行中の高度、送信点は地上とする。このように生成した覆域点群と送信点群の一例を図2に示す。

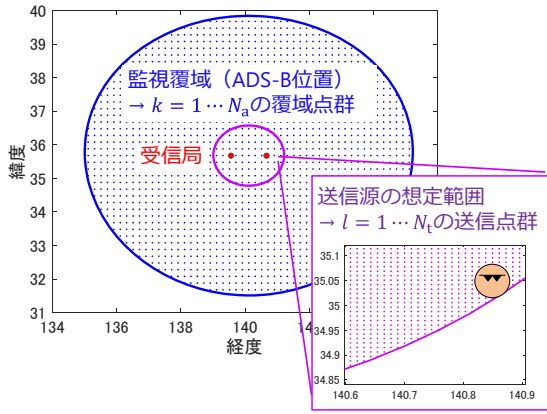


図2 覆域点群と送信点群の例

なお、後述する計算で利用するため、数式上の記号を導入しておく。覆域点 $k$ の位置は緯度 $\phi_{a,k}$ 、経度 $\lambda_{a,k}$ 、高度 $h_{a,k}$ とする。送信点 $l$ の位置は緯度 $\phi_{t,l}$ 、経度 $\lambda_{t,l}$ 、高度 $h_{t,l}$ とする。 $i$ 番目の受信局位置について、緯度 $\phi_{r,i}$ 、経度 $\lambda_{r,i}$ 、高度 $h_{r,i}$ とする。また、検知率の計算にあたって直交座標系への座標変換が必要である。本稿では、受信局間の中間点を座標系中心としたENU(East-North-Up)座標系を利用するとし、受信局位置 $(\phi_{r,i}, \lambda_{r,i}, h_{r,i})$ 、覆域点 $(\phi_{a,k}, \lambda_{a,k}, h_{a,k})$ 、送信点 $(\phi_{t,l}, \lambda_{t,l}, h_{t,l})$ を直交座標系に変換したものをそれぞれ $(x_{r,i}, y_{r,i}, z_{r,i})$ 、 $(x_{a,k}, y_{a,k}, z_{a,k})$ 、 $(x_{t,l}, y_{t,l}, z_{t,l})$ と書く。

### 3.4 ステップ3（しきい値・検知率計算）

覆域点 $k$ と送信点 $l$ の組み合わせごとにしきい値と検知率を計算する。

まず、しきい値 $\gamma$ を誤報率が所望の値 ( $P_{FA,u}$  とする) より小さくなるように決定する。正当な ADS-B 位置に対する検定量 $T$ の分布をもとに $\gamma$ を決定すればよい。例えば受信局の精度のみを考える場合、TDOA 誤差の分散 $2\sigma_t^2$ および正規分布 $N$ を使って、 $T \sim N(0, 2\sigma_t^2)$ と書けるため、 $\gamma$ を次式で決定できる。

$$\gamma = \sqrt{2}\sigma_t Q^{-1}\left(\frac{P_{FA,u}}{2}\right) \quad (1)$$

しかしながら、実際には正常な ADS-B 位置が含む誤差も考慮する必要がある。どのように $T$ の分布を取得するかは、導入のフェーズに応じて、理論式、数値シミュレーション、測定を

表1 しきい値計算のパラメータ

変数	意味（全て最悪値）
$P_{FA,u}$	所望の誤報率
$\mu_{l,u}$	ADS-B 遅延の平均
$\sigma_{l,u}$	ADS-B 遅延の標準偏差
$v_u$	飛行速度
$\mu_{x,u}$	測位誤差のバイアス成分（平均）
$\sigma_{x,u}$	測位誤差のばらつき成分（標準偏差）
$\sigma_{t,u}$	受信局の測定誤差 ( $2\sigma_{t,u}^2$ が TDOA の分散)
$\Delta\mu_u$	受信局の時刻同期誤差

使い分けることが望ましい。本稿では、事前検討に適する理論式をベースにした方法[7,11,12]を取る。この方法は、表1に示すパラメータのように、各種 ADS-B 位置の誤差要因について最悪値を仮定するものである。受信局の位置関係を考慮しつつ、所望の誤報率を達成するしきい値を計算できる。詳細については[7,11,12]を参照されたい。なお、受信局の時刻同期誤差について[7,11,12]では受信局ごとに与えたが、本稿では1項にまとめている。

しきい値 $\gamma$ を決定できたら、検知率を計算する。準備として、 $i$ 番目の受信局からの距離を与える関数 $f_i$ 、TDOA を与える関数 $g$ を次式で定義する。

$$f_i(x, y, z) = \sqrt{(x - x_{r,i})^2 + (y - y_{r,i})^2 + (z - z_{r,i})^2} \quad (2)$$

$$g(x, y, z) = \frac{f_2(x, y, z)}{c} - \frac{f_1(x, y, z)}{c} \quad (3)$$

ここで $c$ は伝搬速度である。ADS-B 位置が不正のとき検定量 $T$ は次式のようにモデル化できる。

$$T \sim N(\mu_1, 2\sigma_t^2) \quad (4)$$

$$\mu_1 = g(x_{t,l}, y_{t,l}, z_{t,l}) - g(x_{a,l}, y_{a,l}, z_{a,l}) + \Delta\mu$$

ここで $2\sigma_t^2$ は受信局の TDOA 精度、 $\Delta\mu$ は受信局間の時刻同期誤差の効果を表す。式(4)の意味するところは、測定誤差によるばらつきのた

め $T$ は正規分布に従うが、その中心位置 ( $\mu_1$ ) は主に ADS-B 位置と真位置の差によって 0 ではない値になる（したがって不正が検知可能）ということである。 $|T|$ がしきい値を超える確率が検知率となり、正規分布の上側の裾である CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) を  $Q$  としたとき次式で計算できる。

$$P_D(k, l) = Q\left(\frac{\gamma - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_t}\right) + Q\left(\frac{\gamma + \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_t}\right) \quad (5)$$

この計算を全ての覆域点 $k$ と送信点 $l$ の組み合わせに対して行う。

### 3.5 ステップ4 (平均化)

$P_D(k, l)$ について送信点群・覆域点群にわたって平均を取る。これは次式で表現できる。

$$P_{D,avrg} = \frac{1}{N_a N_t} \sum_l \sum_k P_D(k, l) \quad (6)$$

しかしながら、必ずしも全ての $k, l$ を組み入れることが適切ではない場合もある。例えば、受信局から見通し外の覆域点は除外する必要がある。また、ADS-B 位置と送信源が一致する場合は原理的に除去できないほか、必ずしも不正な位置情報とも言い切れないため、計算から除外する考え方もありうる。送信源と ADS-B 位置が一定距離以上離れたものを検知対象とするなら、そのような $k, l$ の組み合わせだけが計算対象となる。上記の点を考慮して得られた $k, l$ の組み合わせの集合を $C$ とすれば、平均化は次式のように書ける。

$$P_{D,avrg} = \frac{1}{|C|} \sum_{l, k \in C} P_D(k, l) \quad (7)$$

## 4 計算例と分析結果

本節では提案したシステム設計法による結果例を紹介したのち、これまでに得られた分析結果を報告する。

### 4.1 基本条件

まず、基本となる計算条件を述べる。受信局のうち一方は電子航法研究所にあるとし、他方を 50 km 東に離れた地点とした。この離隔距離は航空路 WAM の状況を念頭に設定した。受信

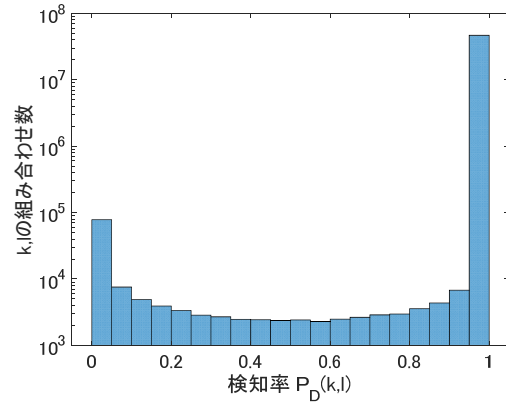


図3 基本条件での $P_D(k, l)$ の分布

局間の中心を座標原点とし、監視覆域は中心から 250 NM とした。覆域内の緯度・経度を  $0.2^\circ$  刻みで分割し、 $N_a = 1675$  の覆域点群を得た。高度は巡航中を想定し 40,000 ft とした。受信局の精度については  $\sigma_t = 30$  nsec とした。しきい値計算に必要なパラメータとしては [7, 11, 12] と同様にした。所望の誤報率は 0.05 とした。

不正な送信源が発生すると想定した範囲は中心から 半径 100 km の円形範囲とした。送信源範囲を緯度  $0.009^\circ$ 、経度  $0.0115^\circ$  刻みで分割し  $N_t = 30225$  の送信点群を得た。前述した図 2 はこのように生成した送信点群・覆域点群である。

なお、説明の分かりやすさ等を改善するため [7, 11, 12] からパラメータを調整しているが結果の傾向は同じである。

### 4.2 基本条件の計算結果

4.1 で述べた条件での計算結果を説明する。まず検知率  $P_D(k, l)$  の分布は図 3 のようになった。縦軸のスケールが対数となっていることに注意されたい。大多数の組み合わせで  $P_D(k, l)$  は 0.9 以上となった。すなわち、TDOA 法は送信源位置と ADS-B 位置に関する特定の条件下を除き、ほとんどの場合で不正を検知できることが分かる。式 (7) によって、見通し内の平均を取ると  $P_{D,avrg} = 0.998$  となって高い性能を確認できた。

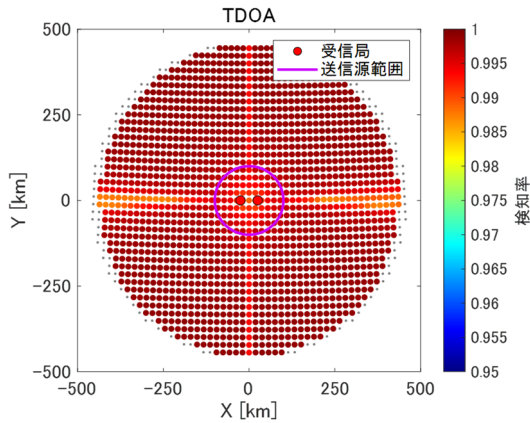


図4 基本条件での検知率空間分布

表2 変化時のパラメータ

測定精度( $\sigma_t$ )	30 nsec, 300 nsec
受信局間距離	0.5 km, 1.0 km, 5.0 km, 10.0 km, 50.0 km, 100.0 km, 150.0 km
所望の誤報率	0.05, 0.01, 0.005, 0.001
高度	5,000 ft, 10,000 ft, 20,000 ft, 30,000 ft, 40,000 ft
送信源の範囲 (半径)	10 km, 30 km, 100 km

また、計算結果を可視化する一手法として、各覆域点 $k$ に対して送信点 $l$ にわたる平均を取ったもの（検知率の空間分布）を次式で計算した。

$$P_{D,avrg}(l) = \frac{1}{N_t} \sum_l P_D(k,l) \quad (8)$$

図4には基本条件における検知率の空間分布を示し、全体的に0.98以上の値となっていることが分かる。

### 4.3 性能の支配的要因

平均検知率を決める支配的な要因は受信局間の距離、測定精度である。それ以外のパラメータ、具体的には送信源範囲、所望の誤報率、高度は前述の2要素と比較して影響の度合いが少ない（ただし、極端に変化させない場合に限る）。具体的な例として、パラメータを表2の

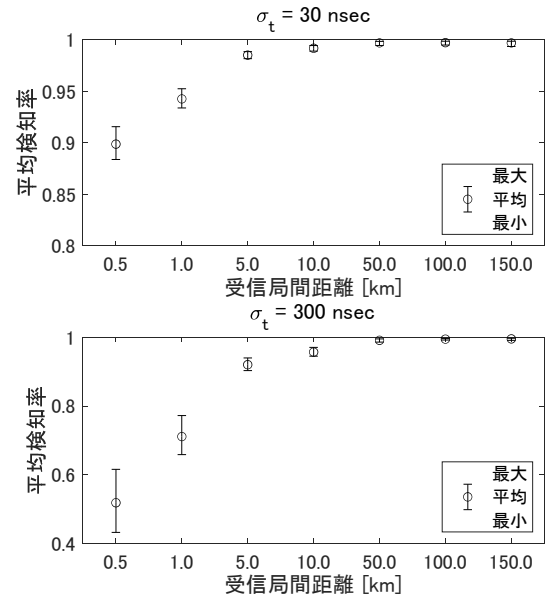


図5 パラメータを変化させたときの平均検知率

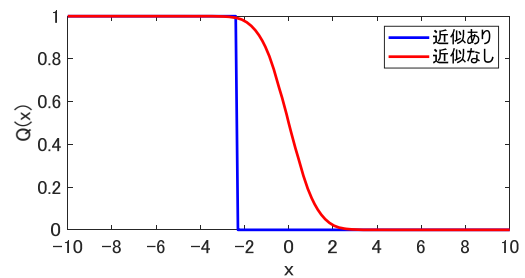


図6 関数Qの近似

ように変化させた結果を図5に示す。様々な条件下での計算結果を受信局間の距離および測定精度でグループ分けし、各グループの最小・平均・最大をエラーバー形式で表示している。全体的な傾向を見ると、受信局間距離と精度に応じて平均検知率が大きく変化することが分かる。特に、受信局間距離が小さく、かつ測定精度が悪いとき検知率が顕著に低下している。どちらか一方の場合は低下量が限定的である。また、バーの幅は所望の誤報率・高度・送信源範囲を変化させたときの振れ幅を示している。バーの幅は精度と距離による変化量に比べて狭い。したがって、所望の誤報率・高度・送信源範囲の影響度合いは相対的に小さく、受信局間距離と測定精度が決まれば、おおよその性能が決まる。

#### 4.4 実装の簡単化

式(5)は関数 $Q$ を利用しているが、実装を容易にするための単純化も検討した。具体的には以下の近似を試みた。

$$P_D(k,l) = \begin{cases} 1 & \text{(10)または(11)が成立} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{\gamma - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_t} < -2.3263 \quad (10)$$

$$\frac{\gamma + \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_t} < -2.3263 \quad (11)$$

式(9)~(11)は関数 $Q$ を図6のように近似することで得たものである。 $-2.3263$ は関数 $Q$ がほぼ1とみなせる0.99となる数値である。

近似の妥当性を検証するため、基本条件において式(5)と式(9)を用いた結果を比較した。 $P_{D,avg}$ は近似なしで0.998、近似ありで0.997となり、実用上は一致とみなせる結果が得られた。

#### 5 むすび

本稿では ADS-B 位置検証のための TDOA 法についてシステム設計法による性能概算を説明し、その分析結果を報告した。システム設計法は平均検知率を計算するもので、その性能は精度と受信局間距離によっておおむね決まることが明らかになった。また、実装の簡単化として関数の近似が有効であることを示した。

#### 謝辞

本研究にご協力を頂いている関係者の皆さまに深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- [1] M. Strohmeier, et al (2015), "On the security of the automatic dependent surveillance-broadcast protocol," IEEE Commun. Surveys & Tuts., vol.17, no.2, pp. 1066-1086.
- [2] 長縄, 宮崎, "TDOA を用いた ADS-B 位置検証における遅延の考慮," 信学技報, SANE2018-44, pp.1-6, 2018年10月.
- [3] 長縄, 宮崎, 田嶋, "ADS-B 位置検証技術の評価," 令和元年度(第19回)電子航法研究所研究発表会 講演概要, pp.16-24, 令

和元年6月.

- [4] 長縄, 宮崎, "ADS-B 位置検証の技術," 航空無線, 第101号, pp.18-21, 令和元年9月.
- [5] 長縄, 宮崎, "TDOA を用いた航空機位置検証法の実験的評価," 信学技報, SANE2019-75, pp. 29-34, 2019年11月.
- [6] 長縄, 宮崎, "ADS-B 位置検証技術の実用化に向けた考察," 令和2年(第20回)電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 19-24, 2020年9月.
- [7] J. Naganawa and H. Miyazaki, "Theory of automatic dependent surveillance-broadcast position verification using time difference of arrival," IEEE TAES, vol. 57, no. 3, pp. 1387-1404, June 2021.
- [8] 長縄, 宮崎, "複数 TDOA を用いた航空機位置検証法に関する理論検討," 信学技報, SANE2022-6, pp. 27-32, 2022年5月.
- [9] J. Naganawa and H. Miyazaki (2022), "Comparison of ADS-B verification methods: direct TDOA and MLAT," IEEE Access, vol. 10, pp. 97276-97288.
- [10] 長縄, 宮崎, 田嶋, 古賀, 北折 (2023年3月), "無線信号特徴量を使った航空機位置情報(ADS-B)の検証," 日本 AEM 学会誌, 31 巻 1 号 p. 25-29.
- [11] 長縄, 宮崎, 田嶋, 古賀, 北折, "ADS-B 位置検証技術に関する研究," 第60回飛行機シンポジウム, 2022年10月.
- [12] 長縄, 宮崎, 古賀, 田嶋, 角張, "TDOA と AOA を用いた航空機位置検証法のシステム設計に関する検討," 信学技報, SANE2021-14, pp.29-34, 2021年6月.
- [13] J. Naganawa, et al, "TDOA and AOA measurement system for investigating aircraft position verification," in ICSANE2021, Nov. 2021.
- [14] J. Naganawa, et al, "ADS-B anti-spoofing performance of monopulse technique with sector antennas," in 2017 IEEE CAMA, Tsukuba, Japan, Dec 2017.



## 羽田空港での滑走路異物監視システムの評価計画

監視通信領域 ※二ッ森 俊一，森岡 和行，河村 暁子，米本 成人

### 1 まえがき

滑走路異物（Foreign object debris, 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、CO2 排出削減が期待できる。電子航法研究所らの研究グループでは、実用化に向けた FOD 監視システムの開発を実施し、国際技術基準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[1]。

本稿では、東京国際空港（以下、羽田空港）で令和5年3月から開始した、FOD 監視システム評価装置を用いた試験計画について議論を行う。本評価では、実用化に先立ち、最適なシステム動作パラメータを取得するため、滑走路における FOD 監視環境の変動評価および対策を行う予定である。加えて、システム信頼性評価および将来的なシステム低コスト化に向けた検討を行う。まず、FOD 監視システム評価装置の概要および仙台国際空港において実施した探知性能評価結果について述べる。次に、羽田空港に設置した FOD 監視システム評価装置の概要を述べ、今後実施予定の誤検知、未検知、環境変動および信頼性確認等の評価項目について議論を行う。最後に、ミリ波レーダセンサおよびカメラからなる滑走路センサのデータ取得例を紹介する。

### 2 FOD 監視システム用レーダセンサの概要

提案している FOD 監視システムでは、まずミリ波レーダセンサを用いて異物を探知し、その後、レーダセンサで得られた位置情報に基づき、FOD のカメラ画像を取得する。表 1 に、

表 1 FOD 探知用ミリ波レーダ仕様

周波数帯	92 GHz – 100 GHz
送信帯域幅	最大 8 GHz
送信電力	18 dBm
アンテナ利得	43 dBi

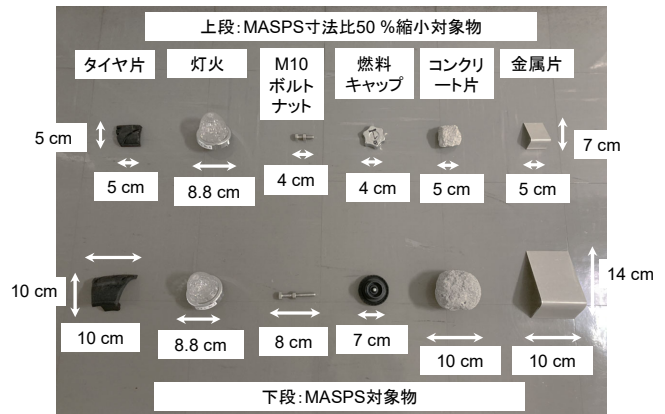


図 1 EUROCAE ED-235 MASPS 探知率試験における評価対象物

これまで開発し、評価システムに適用している、FOD 探知用ミリ波レーダ仕様を示す。90 GHz 帯を用いた広帯域ミリ波レーダであり、最大 8 GHz の送受信帯域幅を有する。90 GHz 帯ミリ波レーダを用いることで、ライダーや特定小電力ミリ波レーダ等を利用した他の FOD 探知センサと比較し、高い探知性能と悪天候への耐候性を両立することができる。また、最大 8 GHz の広信号帯域幅を活用し、高分解能かつ高い滑走路面クラッタ除去性能を実現している。

羽田空港での評価システム設置に先立ち、仙台国際空港において、複数回の性能評価試験を実施した。夜間の滑走路閉鎖時間帯において、高所作業車を用いて仮設でレーダセンサを設置し、滑走路上の異物を設置し、探知率評価を行う。FOD 監視システムの最低性能要件として、アメリカ連邦航空局（Federal Aviation Administration, FAA）から発行された FAA AC150/5220-24 [2]（2009 年 9 月発行）および

表2 MASPS 対象物の探知率（距離 350 m）

サンプル	測定数	探知数	探知率 (%)
タイヤ片	117	117	100
灯火	117	117	100
M10 ボルトナット	117	116	99.1
燃料キャップ	117	117	100
コンクリート片	117	117	100
金属片	117	112	95.7

表3 MASPS 寸法比 50 %対象物の探知率  
（距離 350 m）

サンプル	測定数	探知数	探知率 (%)
タイヤ片	117	117	100
灯火	117	117	100
M10 ボルトナット	117	114	97.4
燃料キャップ	117	117	100
コンクリート片	117	117	100
金属片	117	116	98.3

欧州民間航空機器機構（European Organisation for Civil Aviation Equipment, EUROCAE）から発行された EUROCAE ED-235 [3]（2016年3月発行）の2種がある。ここでは、ED-235における晴天時探知率 95%以上の確認を実施する。図1に、EUROCAE MASPS 探知率試験における評価対象物を示す。EUROCAE ED-235では、基準対象物として、タイヤ片（10 cm 以下）、灯火、M10 ナット・ボルト（8 cm 以下）、燃料キャップ（7 cm 以下）、コンクリート片（10 cm 以下）、歪んだ金属片等の6種が定められている。今回の試験では、上記6種の対象物について、ED-235 対象物および寸法比 50%の対象物について評価を実施した。なお、測定回数 100 回以上が求められているため、起伏の異なる滑走路上の複数地点に対象物を設置し、設置角度等についても様々な条件での評価を行う。

表2および表3に、それぞれ、覆域端である距離 350 m で評価した MASPS 準拠対象物および MASPS 寸法比 50%対象物の探知率を示

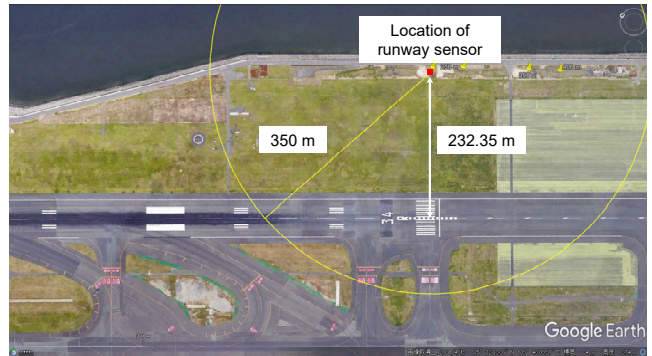


図2 羽田空港における FOD 監視システム評価装置の設置場所

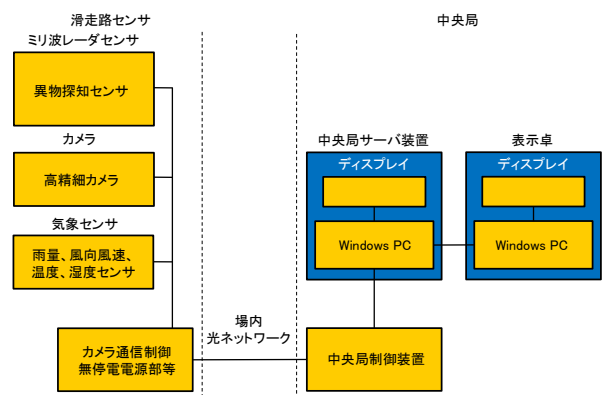


図3 FOD 監視システム評価装置の系統図

す。いずれの対象物においても晴天時探知率 95%以上を満たすこと、また寸法を 50%に縮小しても探知率 95%以上を維持することを明らかにした。

### 3 羽田空港へ設置した FOD 監視システム評価装置の概要

FOD 監視システムでは、滑走路上の探知覆域を、複数の滑走路センサで分割して FOD 探知を行う。評価装置では、その中の1つの監視覆域を対象として、滑走路脇に設置した1局の滑走路センサと東京空港事務所庁舎内に設置した中央局の構成で評価を実施する。図2に、滑走路センサの設置場所を示す。C 滑走路 34L 側の GS シェルタ付近に、各種センサを搭載した FOD 監視システム評価装置鉄塔を設置した。滑走路中心から鉄塔までの距離は、約 232 m であり、センサから 350 m の範囲を FOD 探知覆域としている。また、図3に、FOD 監視システム評価装置の系統図を示す。今回の評価装

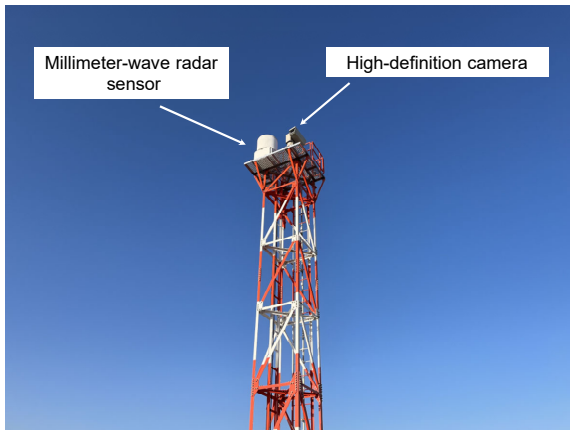


図4 FOD監視システム評価装置  
滑走路センサ鉄塔の概観

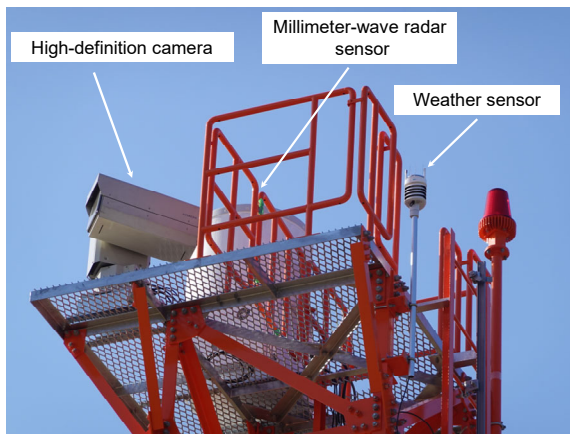


図5 FOD監視システム評価装置  
滑走路センサ鉄塔上部の概観

置は、滑走路センサ1局の構成であるが、実用システムでは、監視覆域に応じて、必要な局数に設定することを想定している。滑走路センサと中央局間は光ファイバケーブルで接続し、機器制御および監視情報の伝送を行う。天候影響評価も実施するため、雨量、風速、温度、湿度等のデータを取得するための気象計を設置している。図4および図5に、それぞれ滑走路異物監視システム評価装置滑走路センサ鉄塔および鉄塔上部の概観を示す。鉄塔の塔頂部踊り場の滑走路対面方向にミリ波レーダセンサおよび高精細カメラを設置している。反対側には気象センサを設置する。高精細カメラは旋回台を有し、FOD探知時のFOD自動撮影およびFOD探知時以外のプリセット位置の自動撮影に対応している。

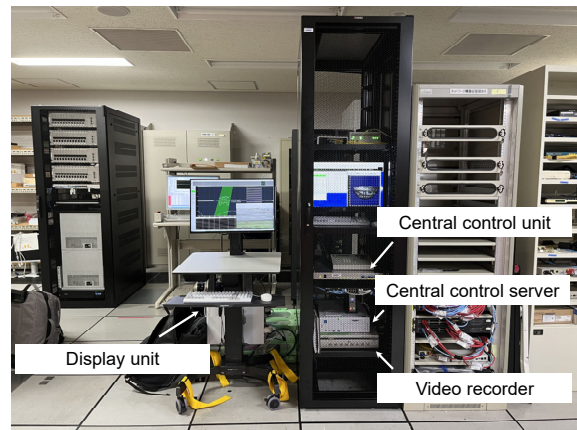


図6 中央局装置の概観（左側：表示卓，右側：中央局制御装置およびサーバ装置）

図6に、中央局装置の概観を示す、中央局装置は、主として中央局制御装置、サーバ装置、および表示卓から構成される。評価装置では、レーダセンサ、カメラ映像、システム動作状態、気象センサの情報を記録・分析する。具体的には主として、次の項目を評価する。

- ・ 滑走路周辺環境および動物物（鳥など）に起因する誤検知の検証、評価を行う。検知結果の記録・分析を実施し、誤検知を発生し得る探知対象物の発生頻度、場所、時間帯等を評価する。
- ・ 未検知の検証、評価を行う。探知エリア内で滑走路点検等によりFODが回収された場合、前回定時点検以降の検知結果を分析することにより、未検知原因を評価する。
- ・ 環境変動（クラッタ・温度・天候変化・メンテナンス）および長期信頼性評価を行う。気象変化（雨天、雪、霧など）および滑走路周辺のメンテナンスによる滑走路環境の変動が探知結果に及ぼす影響（降雨量、降雪量、視程量に対するクラッタ増加および対象物反射電力低下等）を評価する。また、アンテナ回転数・レーダ送受信信号強度・環境および機器温度の記録・分析により機器信頼性評価を実施する。

#### 4 滑走路センサデータ例

令和5年3月に評価システムを設置後、機器調整およびデータ取得を実施している。図7に、滑走路センサ設置位置における滑走路方向の見

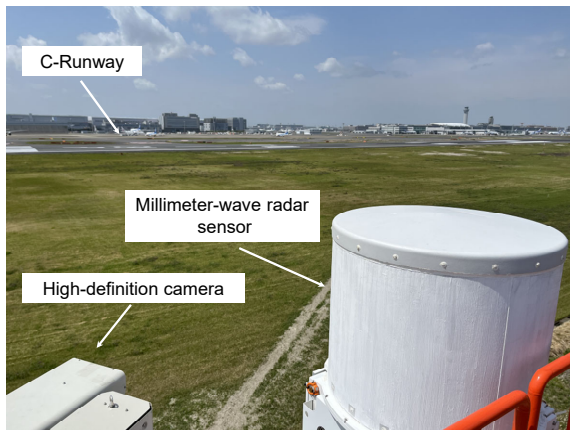


図7 滑走路センサ設置位置からの滑走路の見通し状況

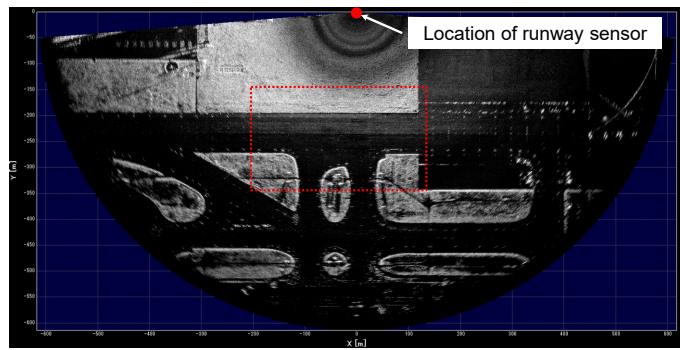


図8 カメラ画像例（距離220 m滑走路灯）

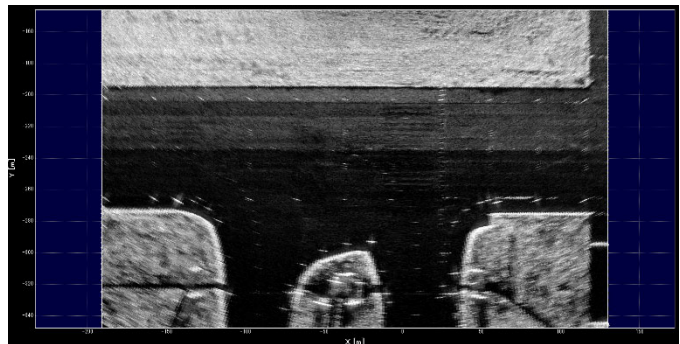
通し状況を示す。図8に、高精細カメラで220 m先の滑走路灯を撮影した映像を示す。図から灯火の細部まで明瞭に撮影可能であることが確認できる。また、図9(a)および(b)に、ミリ波レーダセンサのスコープ表示例を示す。図9(a)からレーダ覆域全体において、広帯域信号を用いた高分解能特性が確認できる。また、図9(b)から覆域を拡大表示しても、滑走路灯火や地形情報等、細部まで詳細な情報を取得できることが明らかである。

## 5 まとめ

FOD監視システム評価装置の概要および探知性能について述べた上で、羽田空港設置状況および評価計画について述べた。今後、評価結果に基づき、最適なシステム動作パラメータを明らかにし、本装置を用いた検証を実施する。



(a) レーダ覆域全域表示



(b) 一部拡大表示（赤線範囲内）

図9 ミリ波レーダセンサのスコープ例

## 謝辞

評価装置の設置および試験実施にご協力頂いている国土交通省航空局、東京航空局、東京空港事務所の方々を始めとした関係各所の皆様に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] S. Futatsumori et. al., “Performance evaluations of airport runway foreign object detection system using a 96 GHz millimeter-wave radar system based on international standard”, Proc. of the 47th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, pp.1-2, Sept. 2022.
- [2] FAA, “Airport Foreign Object Debris (FOD) Detection System”, Advisory Circular AC150/5220-24, September 30, 2009.
- [3] European Organization for Civil Aviation Electronics, “Minimum Aviation System Performance Specification for Foreign Object Debris Detection System”, ED-235, Mar. 2016.

# フリールート空域の設計、潜在便益、及び評価について

航空交通管理領域 ブラウン マーク, 平林博子, ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル  
 ※村田暁紀, 虎谷 大地, 井無田 貴

## 1 Introduction

Area navigation (RNAV) removes the need for aircraft to fly between ground-based radio navigation aids, enabling “free route operations” that allow airspace users to plan routes that are closer to their ideal trajectories. Figure 1 shows the Free Route Airspace (FRA) concept. In conventional airspace, flights plan to fly between waypoints (triangles) along Air Traffic Service (ATS) routes (white). With Free Route Airspace, flights may plan a direct route between entry points (E) and exit points (X) at the edges of the airspace, or via one or more intermediate points (I), for example to avoid restricted airspaces or weather.

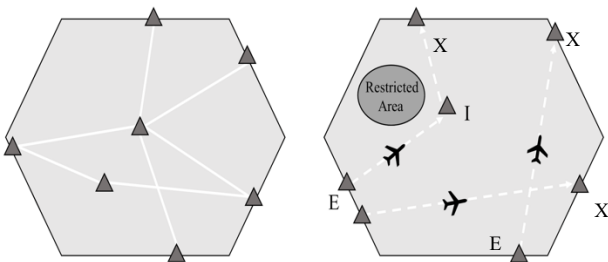


Figure 1 Conventional airspace (left) and Free Route Airspace (right).

FRA has been adopted by the International Civil Aviation Organization (ICAO) as an Aviation System Block Upgrade (ASBU), and implementation is being planned regionally. FRA has been implemented in much of European upper air space, as shown in Figure 2 [1], and greater benefits are obtained by creating FRA blocks that span Flight Information Region (FIR) boundaries (shown by red outlines in Figure 2). In Asia/Pacific, it has been identified in the regional Seamless ANS Plan as a Priority 2 implementation item, following Direct Routes, UPR, and Flexible Routing as intermediate steps [2], and the AFI region has produced a concept of operations [3].

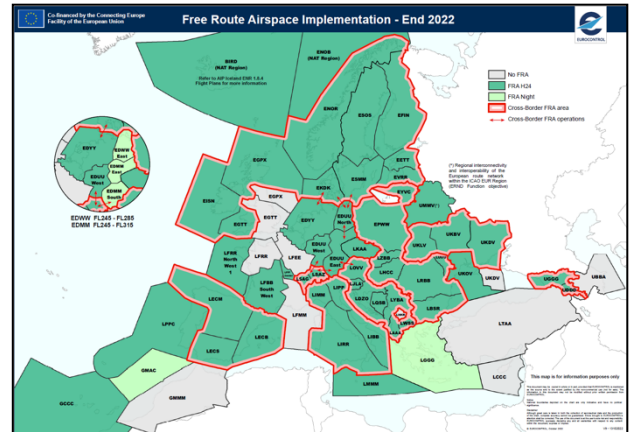
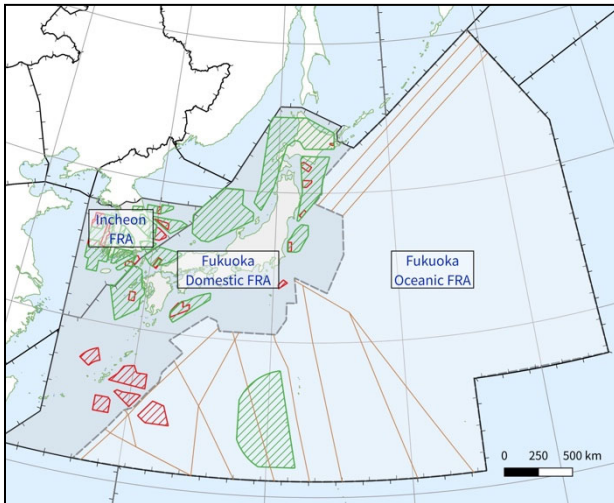


Figure 2 Free Route Airspace (FRA) Implementation in Europe at End 2022 [1].

ENRI and the Korea Aerospace University (KAU) have been collaborating in joint research, and have proposed introducing FRA into the Asia/Pacific region [4], developed a concept of operations [5, 6], and conducted airspace design studies [7, 8, 9]. In this paper, we summarise the results of these studies, discuss benefits, and identify topics for further research.

## 2 Free Route Airspace Concept in NE Asia

The ENRI/KAU concept for FRA proposed three maximally-sized blocks of FRA shown in Figure 3: the airspace of Incheon FIR (Incheon FRA), Fukuoka FIR radar-controlled airspace (Fukuoka Domestic FRA), and Fukuoka FIR oceanic airspace (Fukuoka Oceanic FRA). The base altitude of FRA was set at FL310 or higher based on an analysis of initial cruise altitudes of flights from Incheon airport to North America [6]. Following this concept proposal, ENRI then examined airspace design to implement FRA in Fukuoka FIR radar-controlled airspace and oceanic airspace. These studies were supported by development of a tool to create optimum user trajectories in a free route environment [10].



**Figure 3** Initial proposed maximum-sized FRA blocks for Republic of Korea and Japan [5]. Hatched areas indicated restricted use airspaces at FL310 and above: green indicates training areas and red indicates military restricted areas. Brown lines in oceanic airspace indicate ATS routes retained in the initial proposal.

## 2.1 Radar-Controlled Airspace

Two cases were considered for FRA design in Fukuoka FIR radar-controlled airspace: domestic traffic (flights departing from and arriving at airports in Fukuoka FIR), and overflight traffic (flights crossing Fukuoka FIR). As case studies, we examined the 10 domestic city pairs with the greatest traffic [8], and overflights between Incheon FIR and oceanic airspace [7, 9]. The following were considered in FRA design:

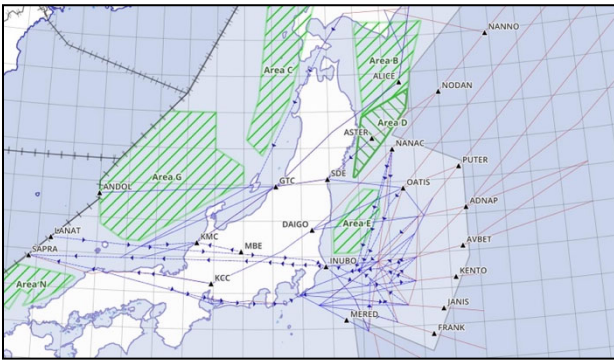
- (1) The maximum-size FRA block (i.e. covering the whole of radar-controlled airspace) was considered initially to avoid inefficiencies due to airspace fragmentation.
- (2) For initial implementation, changes to existing airspace should be minimized, and the dimensions and availabilities of civil and military training airspaces were assumed as fixed.
- (3) Horizontal entry and exit points are designated at the edges of the FRA, denoted as

‘E’ (entry), ‘X’ (exit) or ‘EX’ (entry and exit), determined by the directions of the existing ATS routes that pass through those points.

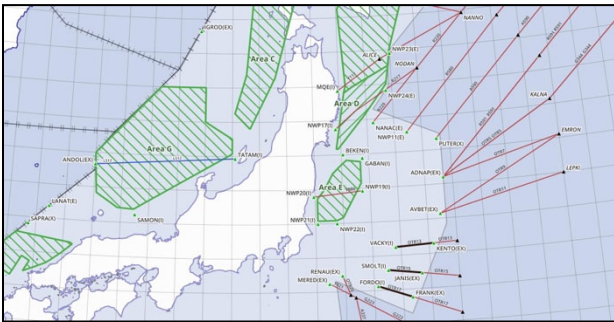
(4) Vertical entry and exit points are set around airports to allow traffic to transition between terminal airspace and FRA. These are denoted as ‘A’ for exit points (where A stands for arrival) or ‘D’ for entry points (where D stands for departure). This was achieved by analysis of radar tracks as well as the instrument departure and arrival procedures (SID and STAR) to determine at what points traffic would enter or leave FRA by ascent and descent.

(5) The most common restriction preventing flights from routing directly between FRA entry and exit points is the presence of restricted use airspaces (shown as red and green polygons in Figure 3). FRA intermediate points, denoted as ‘I’, were established around these airspaces to allow flights to plan to bypass them with minimum buffer distance when active. The buffer distance was set nominally at 10 nautical miles (NM), although the actual distance should be determined by a safety analysis. Where crossing the training airspace is permitted by a Conditional Route or fixed ATS route, those routes were retained but terminated by ‘I’ points at the minimum buffer distance from the airspace boundary.

To support airspace design, the most commonly-filed flight plan routes between the targeted airport pairs for domestic flights, and between radar-controlled airspace entry/exit points for overflight traffic, were analysed. Traffic and flight plan data were selected from 2019 to reflect traffic levels prior to the COVID-19 pandemic. The airspace designs were evaluated mainly in terms of changes in flight plan route distance; that is, the difference between the length of flight plan routes in the baseline airspace (with ATS routes) and in the FRA airspace.



**Figure 4** Simplified diagram of airspace across northern Honshu in mid-2019 showing RNAV ATS routes between Incheon FIR and oceanic airspace (blue) and conventional ATS routes (brown). Training areas are shown as green hatched polygons.



**Figure 5** Example of FRA design of the airspace in Figure 4 considering traffic between Incheon FIR boundary and oceanic airspace.

As an example of airspace design, Figure 4 shows a simplified diagram of the airspace over northern Honshu in around mid-2019, and Figure 5 shows an FRA design of the airspace considering traffic between the Incheon FIR boundary and oceanic gateway points following the principles outlined above. The difference in flight plan distance for 2019 traffic following the most common flight plan routes between the Incheon FIR boundary and oceanic gateways via the ATS routes in Figure 4 and routes between the same entry and exit points planned through the FRA in Figure 5 is on the order of 150,000 NM per year. This is approximately equivalent to 300 hr flight time, 3,000,000 lb of fuel (assuming a twin-engined

widebody aircraft consuming fuel at 10,000 lb/hr) or 4,300 tonnes CO<sub>2</sub> (assuming 3.16 kg CO<sub>2</sub> per 1 kg of fuel).

One design parameter that remain unresolved in the airspace design in Figure 5 was the FRA base altitude. En route radar-controlled air space is currently being restructured, with upper air space established at and above FL335. However, our studies indicate that approximately half the traffic originating from Seoul bound for North America via Fukuoka FIR enters at ANDOL and LANAT at FL310 or below. It may be desirable to consider different FRA floor altitudes in different airspace sectors depending on the traffic characteristics.



**Figure 6** Flight tracks (grey lines: below FL310, red lines: above FL310) and most common flight plan route (dashed black line) of flights from Hiroshima airport (RJOA) and Tokyo Haneda airport (RJTT) during a week in 2019.

Regarding setting FRA(A) and FRA(D) points around airports, our study [6] showed cases where this may not so straightforward. Figure 6 shows radar tracks and the most commonly filed flight plan route of flights from Hiroshima airport (RJOA) to Tokyo Haneda (RJTT) airport during a week in May 2019. Departures from RJOA ascend

above FL310 at MOMOT, which could therefore be designated as an FRA(D) point. However, the designation of a suitable FRA(A) point for RJTT for this traffic stream is less easy. Traffic descends below the FRA base altitude around SHOOT (changing from red to grey in Figure 6), but radar vectoring starts from around SHTLE during congested periods, and it is undesirable that vectoring should be handled in FRA, which is considered as en route airspace in our concept. Alternatively, setting the FRA(A) point at SHTLE or GAKKI could force traffic to be descended before its optimal top-of-descent point and reduce flight efficiency. In such cases, a cost-benefit analysis may be necessary, and a loss of flight efficiency due to vertical profile changes associated with FRA may be possible.

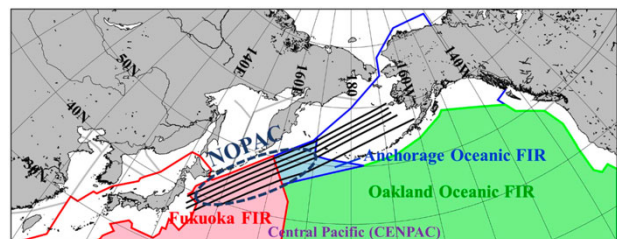
ATS routes are used to manage high volume traffic flows by imparting structure, and some fixed routes may be required to reduce traffic complexity in an FRA environment. In Japan and Korea, major bidirectional traffic flows are structured using pairs of opposite-direction ATS routes, and these routes give close to great circle flight distances between terminal areas for the highest demand city pairs while separating traffic in each direction and increasing ATC manageability. In FRA, a similar effect could be achieved without fixed routes by the design of the airspace geometry and the locations of entry and exit points considering the traffic demand. Structuring traffic flows by such means is less flexible or easy to change than by the use of mandatory routes or ATS routes, however.

Our study also raised a concern that free routing might reduce a degree of flexibility used by air traffic controllers (ATCOs) for control. In Figure 6 it is observed that departures from RJOA are often appear to be given a “direct to” towards SHTLE on the flight plan route leg between MOMOT and IKUNO, but the timing varies; in fact, in some cases, flights are required to extend the leg beyond IKUNO. This traffic flow crosses another traffic flow between MOMOT and SHTLE, and we speculate that ATCOs use flown distance along the MOMOT-*IKUNO* leg as a control to allow traffic to

cross that flow without conflicts. In a simple FRA airspace, such flights would be able to fly direct from the FRA(D) point at MOMOT to the FRA(A) point for RJTT (SHOOT, GAKKI or SHTLE, as discussed previously), which might reduce this flexibility. The FRA sector controller would have to coordinate with the terminal controller if it was desired for a flight to maintain its present heading after MOMOT, which would increase coordination workload. On the other hand, a mandatory route could be added between MOMOT and IKUNO to allow short cuts.

## 2.2 Oceanic Airspace

Figure 7 shows North Pacific Oceanic airspaces. Flight planning is dominated by westerly jet stream winds, with the optimal routes between city pairs varying from day-to-day and having seasonal trends according to the winds. For flights across the central North Pacific area (CENPAC in Figure 7), PACOTS (Pacific Organized Track System) tracks are published daily that are designed to give minimum flight time between certain key city pairs considering forecast winds, adjusted for mutual separation. Airspace users may also plan User-Preferred Routes (UPR), which have restrictions based on the PACOTS tracks to avoid conflicts.



**Figure 7** Oceanic airspaces over the North Pacific Ocean. Fukuoka FIR is bounded by the red line, with its oceanic airspace shown as a red shaded area. Anchorage Oceanic FIR is shown as the blue area, and Oakland Oceanic FIR is the green area. The NOPAC ATS routes are shown as black lines between Japan and Alaska.

There is a region of high traffic demand between Japan and Alaska parallel with Russian Federation FIR boundaries. Traffic from North America to Asia



tends to select routes through this region to avoid strong headwinds, and the region is also crossed by routes between the North American central and east coast areas and Asia. There is also high demand by cargo traffic between Asian cargo hubs and Anchorage. To deal with this demand, a set of five approximately parallel ATS routes around 50 NM apart, called NOPAC (North Pacific), has been established. Other routes such as PACOTS and UPR may also partially overlap with NOPAC routes.

ATC in oceanic airspace is procedural due to communication, navigation and surveillance (CNS) performance limitations, and flights are admitted into oceanic airspace on trajectories that are conflict-free for several hours ahead. Oceanic operations have changed, however, as CNS performance has improved. Most aircraft that operate through Fukuoka FIR oceanic airspace have at least RNAV10 navigation performance and are equipped with FANS-1/A (Future Air Navigation System-1/A) avionics with satellite communication-enabled ADS-C (automatic dependent surveillance-contract) and CPDLC (controller-pilot data link communication), which enable 50 NM longitudinal separation and 50 NM lateral separation on parallel or non-intersecting tracks to be applied. These separation distances may be reduced to 23 NM between aircraft that meet RNP4, RCP240 and RSP180 requirements for navigation, communication and surveillance performance, respectively, in PBCS (Performance-Based Communications and Surveillance)-monitored airspace (see table 5-2 of PANS-ATM [11]). In Fukuoka FIR, 30 NM longitudinal separations have been applied in oceanic airspace between PBCS-compliant aircraft since 2018. Taking advantage of PBCS capabilities, over the next few years the NOPAC routes are being restructured to reduce their spacing to 25 NM and their number from five to three, increasing the area available for free routing. A study by ENRI to investigate NOPAC restructuring proposals has shown that enlarging the free route area will give a fuel reduction benefit to operators, particularly in summer when optimal routes are

further north due to the position of the jet stream [12].

Looking beyond the current NOPAC restructuring plans, we have conducted a fast-time simulation study of the effect of removing the NOPAC ATS routes entirely, permitting free routing throughout the whole of North Pacific oceanic airspace [9]. The study included the effects of seasonal wind tendencies, and showed a potential average benefit of 849 kg reduction in fuel burn for eastbound flights and 532 kg for westbound flights. The effect on ATC workload was estimated by examining Potential Loss of Separation (PLOS) between the simulated flight trajectories. Removal of the NOPAC routes resulted in a tendency for PLOS to increase with current separation standards, but this was suppressed by further reducing minimum separation to 15 NM, as could be achieved by using space-based ADS-B.

While these studies have shown benefits of increasing flight planning flexibility through free routing and reduced separation distances, another cause of loss of efficiency is aircraft being unable to step climb to higher altitudes as planned due to conflicts with other traffic. Such conditions may persist for long periods of time in oceanic airspace because of the greater separation margins required and limitations of procedural control. ENRI has been analysing ATC rejection of step climb requests in Fukuoka FIR oceanic airspace due to traffic to determine their causes [13], and with Tokyo Metropolitan University has developed an algorithm that can automatically identify blocking traffic in such cases with performance comparable to that of a human expert [14]. It was found that traffic concentrations near the oceanic gateway points along the boundary between radar-controlled and oceanic airspace can block step climbs. We have proposed creating additional oceanic gateways between the existing gateways, reducing the interval from approximately 60 NM to approximately 30 NM as enabled by PBCS, and potentially using gateway assignment as an air traffic flow management (ATFM) measure to

disperse traffic concentrations and deconflict traffic. Although this may result in slightly less than optimal routes for some traffic, it may allow more opportunities for step climb that increase overall airspace efficiency. We are continuing to study this proposal.

### 3 FRA Benefits and Metrics

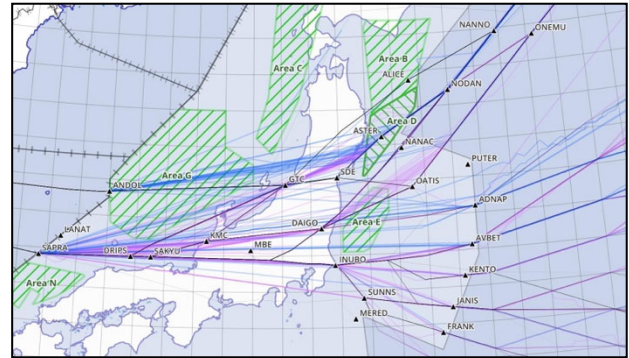
We now briefly discuss FRA potential benefits and ways of evaluating it. Potential benefits of FRA can be viewed from the point of view of each stakeholder in the air traffic management (ATM) system: (1) is benefit to the operator, (2) concerns air traffic control and (3) concerns the ATM system as a whole.

#### 3.1 Operator Benefit

For air transportation flights, the optimum route typically minimises a trade-off between flight time and fuel burn, and for flights of up to a few hours, is approximated by a direct route between the terminal exit and entry points of the departure and arrival airports most aligned with the great circle between those airports. As flight time exceeds perhaps 3-4 hours, however, the benefits of a wind-optimised route over a great circle may start to become significant, and calculating operator benefit for airspaces in which flight planning is dominated by winds aloft is not straightforward due to varying wind patterns, although ENRI has studied how to do this in a way that reduces bias [15].

Operator benefit of FRA is therefore often quantified in terms of reduced flight plan distance due to more direct routes being possible than with ATS routes. Concomitant benefits include reduced flight time and fuel burn, which translates to operating cost and environmental impact reductions, and reduction in planned fuel, which can allow a greater payload capacity or lower fuel burn. However, while reductions in theoretical flight plan route distance and associated benefits are relatively easy to calculate, they might overestimate the actual reduction gained in practice. One reason is that in radar-controlled airspace, ATCOs tend to offer “short cuts” when the air traffic situation and controller workload allow. The resulting trajectories

may be close to direct routes, so the delivered benefit in terms of actual reduction of flown distance might therefore be less than the theoretical benefit.



**Figure 8** Radar tracks and flight plan routes of westbound flights between oceanic airspace and Incheon FIR during 20-26 May 2019. Blue lines indicate flights during the night period (crossing ANDOL or SAPRA between 00:00 and 07:00 local time), magenta lines indicate flights during the day (between 07:00 and 24:00 local time). Thin black lines indicate flight plan routes during 1-31 May 2019.

Figure 8 shows a sample of surveillance tracks of flights between oceanic airspace and Incheon FIR, with night tracks (crossing ANDOL and SAPRA between 00:00 and 07:00 local time) shown as blue lines and day tracks shown as magenta lines. Flight plan routes are shown as black lines and generally follow the ATS route structure shown in Figure 4. The effect of “short cuts” that bypass inflections in the planned routes is clearly seen, and some of the tracks are close to the direct routes that could be planned in the proposed FRA in Figure 5. Particularly at night, some flights fly directly between the radar airspace entry and exit points (e.g. ADNAP and AVBET to SAPRA), while during the day there is evidence of “direct to” via one intermediate waypoint (e.g. DAIGO or INUBO). Traffic across this area has to pass through multiple sectors, and at night when traffic and workload are low and sectors tend to be combined, a “direct to”

from the entry point to the exit can be coordinated more easily than during the day. This implies that inter-sector coordination workload may be an issue in FRA implementation.

### 3.2 Air Traffic Control

Evidence for FRA benefit regarding ATC has been less concrete than those of potential operator benefit. This may be due to difficulties of defining, forecasting and measuring it. It could be said, however, that FRA implementation would not be so beneficial if it reduced airspace capacity. Airspace capacity is determined by the workload that ATCOs can sustain with an acceptable level of collision risk, and ATCO workload depends on the density and complexity of the traffic.

It has been claimed that FRA can lead to a better spread of conflicts [1] or fewer conflicts [17]. However, since initial FRA implementations tend to use existing significant points as entry and exit points, we consider that the fundamental traffic flow patterns through an airspace in which the majority of traffic is scheduled air transportation flights would remain essentially unchanged by the introduction of FRA, although the locations of conflict “hot spots”, for example due to intersecting traffic flows, might shift. Whether this would be “better” from an ATCO workload point of view, however, depends on for example where these hotspots occur relative to sector boundaries. It is therefore necessary to evaluate the capacity and safety of proposed FRA designs with realistic traffic demand scenarios by using fast-time simulation, modelling, and/or real-time human-in-the-loop simulation.

Since most airspace safety metrics are *post priori* and can only be obtained during actual operations, airspace studies using fast-time simulation or modelling tend to use simpler metrics that are correlated with workload. One method is potential loss of separation (PLOS) of the flight planned trajectories of the traffic demand, which we have used in our oceanic airspace studies. Another indicator is complexity, but there is a need to correlate complexity with actual ATCO workload. We have in previous work also created a novel

index of air traffic control difficulty based on complexity [16], and are currently studying correlating airspace metrics used for sector capacity management, such as MMBB (modified Messerschmitt-Bölkow-Blohm method), with workload measured using human-in-the-loop experiments and traffic analysis.

It has been claimed that FRA implementation has slightly reduced ATCO workload due to a decrease in R/T transmissions, monitoring and coordination [17], but it is noteworthy that FRA implementation has not included areas of high traffic density and complexity such as over the southern part of the United Kingdom and the Reims Area Control Centre which covers Paris. An exception is the airspace managed by Maastricht Upper Area Control Centre, which has continually developed and implemented advanced ATC support tools and systems. If FRA promotes flown trajectories that better conform to the planned trajectory, it should improve the performance of trajectory-based controller assistance tools that can reduce workload. However, such advanced tools change ATC working practices. It would not be clear how much ATCO workload reduction is due to traffic brought about by FRA itself, and how much is due to controller tools.

### 3.3 Uncertainty

FRA should theoretically increase conformance of the flown trajectory with the planned trajectory, partly by reducing the scope for ATC “short cuts”. This should in turn improve flight trajectory predictability, which should benefit the quality of air traffic flow management (ATFM) measures. A degree of uncertainty will remain, for example due to unplanned weather avoidance. In Fukuoka FIR, we speculate that even greater uncertainty may be caused on certain routes by short cuts across training airspaces, which cannot be planned but are coordinated between ATC and the user of the training airspace while the aircraft is in flight approaching the area. Concepts such as Flexible Use of Airspace (FUA) and improved coordination between ATC and training airspace users could reduce this uncertainty, allow more planned crossings of training

airspace, and improve training airspace utilization by civil traffic as well as military users.

#### 4 Discussion and Conclusions

In accordance with the Asia/Pacific Seamless ANS Plan [2], to increase airspace user flexibility to plan routes that are closer to their desired optimum trajectories, direct routes and UPR are now being implemented in the Asia/Pacific region (e.g. [18]) as an intermediate step towards FRA, which has been implemented in Europe but has yet to be deployed in Asia/Pacific. This paper has introduced the Free Route Airspace concept, summarized ENRI's research activities, and discussed its implementation and potential benefits based on its studies.

Regarding operator benefit, in radar-controlled airspace we consider that reduced flight plan route distance benefits may be obtained in some cases, but not in all cases due to the already highly optimized ATS route network in Japan. Metrics based on comparing planned flight route distances in ATS route and FRA airspaces risk overstating actual operator benefit due to ATC short cuts in an ATS route environment. Reduction of flight uncertainty is an expected benefit, but it is difficult to quantify what impact it would have on ATFM and operators' desires to adhere to schedule, which can override flight direct cost concerns. Oceanic airspace benefits are harder to quantify due to daily variations of the optimal routes with winds, but since strict adherence to the cleared route is required in oceanic airspace, may be more likely to be actually realized. High demand for wind-optimal routes causes traffic concentrations that may require ATFM measures to reduce blocking of step-climb, such as traffic dispersion via closer-spaced oceanic gateways enabled by improved CNS performance.

One identified issue regarding the location of vertical entry/exit points raises an issue of the management of upper airspace and lower airspace, if FRA is assumed to correspond to the former, as in this concept; e.g. whether arrival radar vectoring should be handled in upper or lower airspace. Forcing arrival traffic to descend prematurely for

vectoring could lead to loss of efficiency, and suggests that trade-off studies are required when considering FRA(A) placement.

Optimising training airspaces, for example using Flexible Use of Airspace (FUA) concepts and more fine-grained allocation and usage to allow more planned access by civil flights, however, could lead to significant reductions in flight plan route distances, and should be pursued alongside free route initiatives.

Removal of ATS route constraints on flight planning may cause conflict hotspot areas to shift, which may affect sector coordination workload. PLOS and complexity may be used as surrogates for workload estimation in fast-time simulation and airspace modelling studies, but complexity metrics need to be correlated with workload. Although FRA has been implemented successfully in Europe, doubts linger regarding the application of FRA to the highest density and most complex airspaces without advanced controller automation support or traffic flow structuring.

#### Acknowledgements

The authors would like to thank Japan Civil Aviation Bureau for the flight plan and radar track data in Fukuoka FIR, to the staff at the JCAB Headquarters, Fukuoka Air Traffic Management Center and Fukuoka Air Traffic Control Center for discussions on oceanic control and airspace design, and to Professor Keumjin Lee and his colleagues and students at Korea Aerospace University for fruitful discussions on FRA and insights into airspace and flight operations in the Republic of Korea.

#### 参考文献

- [1] EUROCONTROL, "Free route airspace." <https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace>. Retrieved 1 Mar. 2023.
- [2] ICAO, "Asia/Pacific Seamless ANS Plan," 2019.
- [3] ICAO, "Draft CONOPS for Free Route Airspace (FRA) Implementation in the AFI Region," Report of the 3<sup>rd</sup> meeting of the APIRG Airspace and Aerodrome Operations

- Sub-Group, Appendix 5. AAO Sub-group meeting, 3–5 Aug. 2020 (online meeting).
- [4] M. Brown, K. Lee, H. Hirabayashi (2019), “Towards a Concept of Free Routing in the Northeast Asia/Pacific Region,” Proc. 2018 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2018), Springer Lecture Notes in Electrical Engineering 459, Ed. X. Zhang, pp.2187–2200.
- [5] M. Brown, K. Lee, H. Hirabayashi, H. Y. Kim, A. Murata, H. W. Kim, S. E. Park, “A Free Routing Concept for Incheon FIR and Fukuoka FIR,” JSASS 58<sup>th</sup> Aircraft Symposium, 25–28 Nov 2022 (online conference). JSASS-2020-5165-3C08.
- [6] K. Lee, H. Hirabayashi, H. Y. Kim, A. Murata, H.W. Kim, S.E. Park, M. Brown, “An Analysis of Candidate Free Route Air Traffic between Incheon Airport and North America via Fukuoka FIR,” JSASS 58<sup>th</sup> Aircraft Symposium, 25–28 Nov. 2022 (online conference). JSASS-2020-5165-3C09.
- [7] M. Brown, H. Hirabayashi, K. Lee, “An Analysis of Flight Routes and Considerations for Free Route Airspace Implementation in Fukuoka FIR,” 2021 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2021), 15–17 Nov. 2021, Jeju, Korea.
- [8] M. Brown, H. Hirabayashi, “Free Route Airspace Design for Fukuoka FIR: A Case Study of Overflight Traffic between Northeast Asia and North America,” 2022 Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2022), 12–14 Oct. 2022, Niigata, Japan.
- [9] H. Hirabayashi, M. Brown, N. Takeichi (2022), “Feasibility Study of Free Routing Airspace over the North Pacific,” AIAA Journal of Air Transportation, Vol. 30, No. 2, Apr.–Jun. 2022, DOI: 10.2514/1.D0291.
- [10] M. Brown, H. Hirabayashi, N.K. Wickramasinghe (2019), “A Graph Search-Based Trajectory Optimiser for Practical Wind-Optimal Trajectories,” Proc. 2018 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2018), Springer Lecture Notes in Electrical Engineering 459, Ed. X. Zhang, pp.2201–2209.
- [11] ICAO Doc 4444 “Procedures for Air Navigation Service – Air Traffic Management (PANS-ATM),” 16<sup>th</sup> edition.
- [12] M. Brown, H. Hirabayashi, “A Simulation Study of Alternative Route Structures for NOPAC Airspace Reconfiguration,” Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT) 2019, Gold Coast, Australia, 4–6 Dec. 2019.
- [13] H. Hirabayashi, M. Brown, N.K. Wickramasinghe, H. Suizu, N. Takeichi, “Effect of step-climb operation on long-haul flight over the Pacific Ocean,” 2022 Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2022), Niigata, Japan, 12–14 Oct. 2022.
- [14] 水津 晴隆, 平林 博子, ブラウン マーク, 武市 昇, “洋上経路を飛行する航空機の上昇位置の分析,” 第 59 回 飛行機シンポジウム, 11 月 30 日～12 月 2 日, 新潟. JSASS-2021-5049-1D12.
- [15] H. Hirabayashi, M. Brown, N. Takeichi (2022), “Study of a representative wind selection method using track data to evaluate Pacific flight operations.” In preparation for publication.
- [16] 長岡 栄, 平林 博子, ブラウン マーク (2023), “航空管制の難度指標に関する研究,” 電子航法研究所報告, No.136 (印刷中)
- [17] SKYbrary, “Free route airspace,” <https://skybrary.aero/articles/free-route-airspace-fra>. Retrieved 1 Mar 2023.
- [18] ICAO, “Progress of User-Preferred Route (UPR) Implementation in Indonesia,” 33<sup>rd</sup> Meeting of the Asia/Pacific Air Navigation Planning and Implementation Regional Group (APANPIRG/33), Bali, Indonesia, 22–24 Nov. 2022. Information paper APANPIRG/33 – IP/04.

# 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

筑波大学 ※伊藤誠, 西田開飛, 孟成柱

## 1 まえがき

航空交通の増大・複雑化と、航空路管制処理システム（Trajectory-based En-route traffic data Processing System: TEPS）などの支援機能の介在による業務の変質が、航空管制官のワークロードに従前とは異なる影響を与えている可能性がある。航空交通管理を適切に行っていくためには、今日の航空管制業務における管制官のワークロードを適切に評価できることが必要と考えられる。

MBB 法[1]に代表される従来のワークロード評価方法は、航空管制業務にかかる客観的な量として算出され、結果系として表れる心的負担ではなく、人間の心身に影響を与える原因系としての心的負荷に相当する。このため、与えられた負荷に応じてどの程度管制官のエラーが生じやすくなるか MBB 法ではわからない。

また、現在の航空路管制業務では、空域セクター単位において、原則、レーダー管制席（TEPS の R 席）と調整席（TEPS の C 席）の二人一組で業務を遂行している。MBB 法はレーダー管制席（R 席）のタスクのみを考慮しているが、実業務においては、C 席は、共通の状況認識を通して、助言を与えるなどにより、R 席のエラーを抑える役割も担っている。このように今日の航空管制業務はチームとして運用されていることから、チームとしてのメンタルワークロードを適切に評価する方法論の確立が重要な課題である。

チームとしてのメンタルワークロードを評価するためには、個々のチームプレイヤーが自身のタスクで生じるワークロードのみならず、協調・コミュニケーションにかかる負担も考慮すべきである。いくつかの試みはすでに存在している([2]など)が、現在の航空路管制業務においてチームのワークロードを適切に評価する方法は確立しているとは言えないのが現状である。

本研究は全体では3か年計画として取り組み、初年度は航空路管制業務におけるチームワーク

ロードの概念の検討[3]、2年目は航空路管制業務チームワークロードの評価手法の基礎的な評価[4]を実施した。これらの成果を踏まえて、本稿では、航空路管制業務チームワークロードの評価手法を実環境レベルで検証することに取り組んだ結果を報告する。

## 2 実験方法

### 2.1 参加者

本実験における参加者は、航空管制業務に日ごろ従事している12名である（年齢：平均41.5歳、標準偏差7.1、経験年：平均16.7年、標準偏差6.9、性別：女性5名、男性7名）。1回の実験において参加者から2名を選び、R席とC席の役割を担当させた。なお、実験補助者がパイロット役及び対象セクターと隣接するセクターのC席役を務めている。

### 2.2 実験装置

今回の実験では、東京航空交通管制部訓練室のTEPSシミュレーターを用いた。TEPSシミュレーターは現役管制官の訓練及び慣熟のために使用されているツールであり、実際のTEPSとほぼ同等の操作性を保持している。

### 2.3 実験計画

本実験では、セクターと交通量の異なる6つのシナリオを設定した（表1）。

表1 実験シナリオ

シナリオ	セクター	交通量（機）
17-1	T21 & T48(近畿西)	32
17-2	T03(関東北)	33
17-3	T09(関東南 A)	24
18-1	T21 & T48(近畿西)	31
18-2	T03(関東北)	30
18-3	T09(関東南 A)	23

なお、これらのシナリオについて、現在航空交通管理で使われている負荷評価（Modified MBB: MMBB）に相当する値は表2の通りとなっている（実業務では百分率を使用するが、ここでは全体を1として表す）。

表2 各シナリオのMMBB値(30分値)

scenario	MMBB
17_1	1.26
17_2	0.66
17_3	1.40
18_1	1.56
18_2	0.69
18_3	1.25

## 2.4 タスク

本実験においては、通常の訓練におけるシミュレーションと同様に、現実における業務と同様の管制業務を行わせている。すなわち、実際の規定類に則り管制間隔を維持するため適宜管制指示を発出する管制業務（R席）及び調整が必要な場合は隣接セクター等と適宜調整を実施する業務（C席）を行わせている。一つのシナリオを完了するには、それぞれ約30分を要する。

## 2.5 実験の手順とシナリオ

本実験を実施するにあたり、事前に実験の目的並びに方法について説明し、実際に担当するシナリオについての割り当てを行った。

実験の前に、実施する内容、主観評価の方法について実験者から口頭にて確認を行った。

実験実施中、R席、C席の参加者双方に対して、実験開始直後を含めて5分毎に現時点での負担感を0から100の間の数値として口頭にて答えさせた。また、シナリオ終了後に、R席、C席の参加者双方に対して、チームワークロード評価指標であるTeam Workload Questionnaire(TWLQ)と、R席とC席が互いどれだけ協力したと感じたかを測定するためのIOSスケールのアンケートを記入させた。

## 2.6 評価指標

### 2.6.1 Team Workload Questionnaire

Sellers et al. [5]は、NASA-TLXを基盤とし、チームの作業負担を主観的に評価するに当たり、Task Workload, Team workload, Task-Team Balancing, 3つの要素を特定し、Team Workload Questionnaire (TWLQ)を開発した。

今回、日本語版NASA-TLXの訳語を参考にして、各要素の日本語訳を行った(表3~5)。今回は文献[5]の文言から、管制業務に対応するようにアレンジを加えている。

なお、NASA-TLXにおいては、6つの下位尺度の重みを一対比較で決定し、重みづけ平均としてトータルのワークロードを評価する。

Task Loadについては、今回はこの一対比較による重みづけを行わず、重みなし平均によってトータルのワークロード(AWWL)を算出した。なお、Team Workload, Task-Team Balancingの二つについて全体を踏まえた総合負担(「さまざまな負荷要因、負荷原因、部分部分の課題内容を総合すると、全体としてどの程度の作業負担を感じましたか。')を別途質問したので、下位尺度に基づく平均は算出しない。

なお、本実験では、3つの次元を踏まえた、全体を通じた負担感についても別途評価させた。さらに、シナリオ実施中も5分毎に全体の負担感も評価させている。

表3 Task Workload

尺度名	説明
知的負荷	どの程度の知的、知覚的活動(考える、決める、計算する、記憶する、見るなど)を必要としましたか。
身体的負荷	どの程度の身体的負荷(身体を動かす、制御するなど)を必要としましたか。作業は身体面ではラクでしたか、キツかったですか。
タイムプレッシャー	作業や課題が発生する頻度や速度にどの程度時間的切迫感を感じましたか。ペースはゆっくりとして余裕があるものでしたか。それとも早くて余裕のないものでしたか。
達成感	設定された課題の目標をどの程度達成できたと思いますか。目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足していますか。
努力	自分自身の作業達成レベルを達成・維持するために、精神的・身体的にどの程度一生懸命に作業しなければなりませんでしたか。
フラストレーション	作業中に不安感、落胆、イライラ、ストレス、不快感をどの程度感じましたか。

表4 Team workload

尺度名	説明
コミュニケーション	話し合い、交渉、意見の受け取り及びフィードバックなど、R席及びC席間のコミュニケーションにおいてどの程度コミュニケーションを必要としましたか。
調整業務	計画変更、修正等に対応するために、R席とC席間での調整にどの程度の作業負担を感じましたか。
チーム達成感	担当セクターで設定された課題をどの程度達成できたと思いますか。R席(またはC席)としての作業成績にどの程度満足していますか。

表5 Task-Team Balancing

尺度名	説明
時間管理	個人で行う仕事とチームで行う仕事の時間配分や管理はどの程度負担を感じましたか。
チーム不満	R席, C席チーム活動中に不安感, 落胆, イライラ, ストレス, 不快感をどの程度感じましたか。
サポート	チームメンバーからのサポート（指導, 手助け, 指示など）を行うこと, 受けることは, どの程度負担を感じましたか。

### 2.6.2 Inclusion of Other in the Self (IOS) Scale

本研究では、他の人やグループとどれだけ親密に感じているかを測定する Inclusion of Other in the Self (IOS) スケール[6]を用いて、TWLQが航空路管制業務に使える評価指標であるか、また、R席とC席がお互い感じる協力傾向を調べた。「あなたとチームメンバーのタスクにおける関係を最もよく表すイメージに丸(○)を付けてください。」という質問と一緒に7つのスケールを提示した。なお、本稿では紙面の都合上IOSに関する分析は省略する。

### 3 結果と考察

図1に、Task Workload (AWWL), Team Workload と Task-Team Balancing の総合負担 (team 負担感総合) と、全体を通じた負担感との関係を示す。個人の作業にかかる負担 (AWWL) よりも、チームとしての負担 (team 負担感総合) の方が全体として、より整合するものであるといえる。このことは、TWLQ を評価することの意義を裏付けるものといえよう。

図2に、MMBB 値とメンタルワークロードの主観評価値との関係を示す。図2(a)から、R席とC席の間では主観評価に大きな差異はない。このことは、主観評価は当てにならないという(よくある)批判に対する反論の材料となりうるデータである。プロの管制官の場合、ワークロードの主観評価における個人差は想像よりもはるかに小さいというべきであろう。

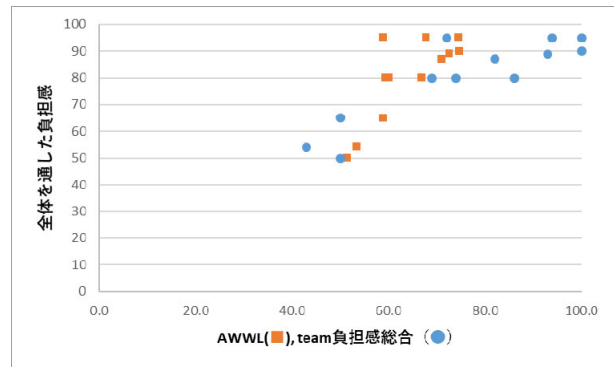


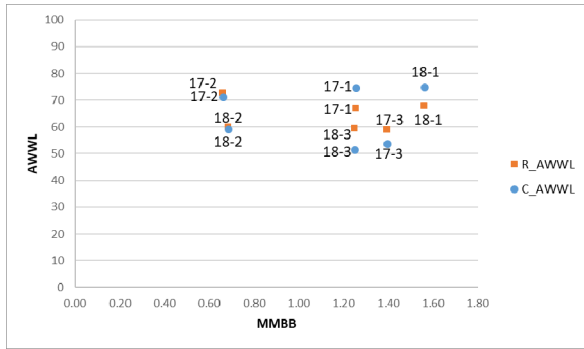
図1 個人のタスク、チームとしての活動のワークロードと全体のワークロードとの関係

また、MMBB と Task Workload との間には相関が認められないという点が興味深い。シナリオ 1, 3 のように MMBB が変わっても Task Workload がほとんど変わらないものもあれば、シナリオ 2 のように MMBB の値はほとんど変わらないのに Task Workload に大きな影響を与えるものもある。

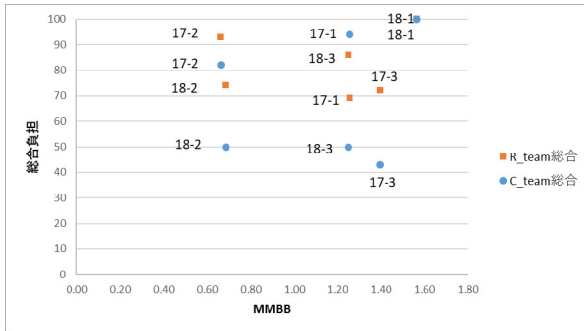
他方、図2(b)の team 負担感総合の方では、R席とC席との間で主観評価値に大きな違いがみられる。Task Workload で見たように主観評価自体が信用ならないというわけではないと考えられることから、図2(b)におけるR席とC席の評価値の差異はチームにおけるコミュニケーションにかかる負担の差異の現れとみるべきであろう。シナリオ1ではC席の方が負担を高く感じる傾向があるのに対し、シナリオ2, 3ではC席の方がR席よりも負担を小さく感じる傾向がある。なぜこれらの傾向が得られるのかについては、シナリオの特性と合わせて考察を深める必要がある。

図3に、10分単位で、1分毎にスライドさせた MMBB 値と、5分毎の全体の負担感自己評価との関係を示す。紙面の都合上、特徴的な二つのシナリオに限定して示す。なお、MMBB 値の算出にあたり、到着機 (a), 出発機 (d), 通過機 (o) に分けて示してある。図3から伺われるように、MMBB 値とトータルの負担感がよく整合するケース (図3(a)) と、両者が整合しないケース (図3(b)) とがある。現在、MMBB 値と負担感のずれをもたらす要因の特定を試みているところであるが、それがうまくいけば、チームワークロードを考慮に入れた客観的ワークロード評価の計算方法の改善につながると期待される。



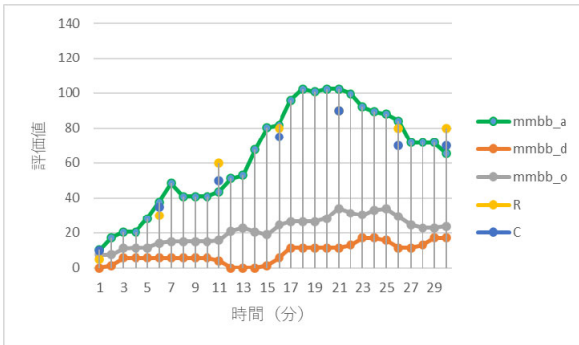


(a) MMBB と個人のタスクの負担感



(b) MMBB とチームワークロードの総合負担

図2 MMBB と主観的メンタルワークロード



(a) 18-1



(b) 18-3

図3 10分毎のMMBBと5分毎のワークロード主観評価

#### 4 まとめ

本研究では、航空路管制業務チームワークロードの主観評価評価手法を、現実の航空管制業務にあたっている管制官を対象として適用、分析を行った。

実験の結果、個人の作業にかかるワークロードの評価は個人によらず安定した評価が得られる見込みが得られた。本実験の結果を踏まえた、MMBBの改善が今後の課題である。

#### 謝辞

本研究は、公募型研究「管制支援機能が管制業務作業量に及ぼす影響に関する研究」（令和2-4年度）として行われたものです。

#### 参考文献

- [1] ICAO (1984), “Doc. 9426 - Air Traffic Services Planning Manual,” The International Civil Aviation Organization (ICAO), Montreal, Canada.
- [2] W.L. Bedwell et al. (2014), “Team workload: A multilevel perspective,” *Organizational Psychology Review*, vol.4, no.2, pp.99-123.
- [3] 伊藤誠, 孟成柱(2021), 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報告書, 令和2年度 電子航法研究所公募型研究
- [4] 伊藤誠, 孟成柱(2022), 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報告書, 令和3年度 電子航法研究所公募型研究局
- [5] J. Sellers et al. (2014), “Development of the team workload questionnaire (TWLQ),” *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, vol.58, no.1, pp.989-993.
- [6] A. Aron et al. (1992), “Inclusion of other in the self scale and the structure of interpersonal closeness,” *Journal of personality and social psychology*, vol.63, no.4, pp. 596-612.

## 固定飛行経路角降下の運用構想に関する一検討

航空交通管理領域 ※ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル, 虎谷 大地, 平林 博子

### 1 まえがき

2022年の世界の航空輸送量は、新型コロナウイルスの前となる2019年の水準の約7割まで回復しており<sup>[1]</sup>、今後も各国のコロナ禍対策の緩和により著しく増え続けると想定される。また、航空分野における脱炭素化に向けて世界的にグリーンイノベーションの取り組みが促進され、日本においても様々な施策が進められている<sup>[2]</sup>。これに対応できる一つの飛行方式として継続降下運航（CDO, Continuous Descent Operations）が知られている<sup>[3,4]</sup>。CDOは、航空機の降下フェーズにおいてアイドル推力により巡航高度から予め決められた地点まで継続的に降下することにより、燃料の節約とともに騒音やCO<sub>2</sub>等環境負荷の削減にも効果がある飛行方式であり、的確な空域及び方式設計と降下過程において機上パイロットと地上航空管制との緊密な連携により実現可能な飛行方式である<sup>[5]</sup>。従来の方式では、航空管制官の指示により段階的に航空機を降下させ、その過程で円滑な到着交通流を形成していた。一方CDOでは、個々の航空機が、飛行管理装置（FMS, Flight Management System）が出力する航空機の性能や気象条件に特化した降下プロファイル（FMS-Profile Descent, 以下FMS-PDと呼称）に従って降下する。そのため複数の機種が混在した状況においては、各航空機の降下パスのばらつきが大きくなり、地上での軌道予測や間隔維持が困難になるという懸念がある。その結果、航空管制官が通常よりも到着機同士の間隔を大きく確保する必要があり、低高度でのレーダー誘導、空中待機など低効率な運用につながる可能性がある。

昨今の研究により、降下パスのばらつきを絞ることが飛行軌道における地上予測精度の向上につながるのと理解が得られている<sup>[6]</sup>。著者らはCDOの一種として、一定の飛行経路角（FPA, flight-path angle）で連続的に降下する、固定飛行経路角降下（Fixed-FPA descent, 以下

Fixed-FPA 降下と呼称）について研究を実施しており、本稿では、得られた知見を考慮しながらFixed-FPA降下の有効性及び運用構想の構築に向けて開発した機上及び地上の支援機能について紹介する。

### 2 CDOとFixed-FPA降下

#### 2.1 日本におけるCDO運用

日本では関西国際空港（RJBB）、那覇空港（ROAH）及び鹿児島空港（RJFK）の3つの空港においてCDOが運用されている。それぞれの運用時間帯は、

- RJBB：到着予定時刻が2300(JST)から翌日0700(JST)まで
- ROAH：決められた入域地点の通過時刻が0130(JST)から0555(JST)まで
- RJFK：到着予定時刻が1900(JST)から運用終了時刻まで

となっている。基本的にCDOを希望する運航者は降下開始点（TOD, Top of Descent）の10分前までに管制機関に対して（希望のCDO経路名、TOD位置及び空港によって定められた移管点の通過予定時刻の情報を含め）CDOを要求する必要がある。図1では2016年から2022年まで3つの空港におけるCDO要求件数及びCDO承認件数を月毎に示す。管制からのCDO承認後、最後までCDOが実施できたフライトは“Full CDO”，途中でCDOがキャンセルされたフライトは“Partial CDO”，そして要求時点でキャンセルされたフライトは“Cancelled CDO”と表記する。

コロナ禍の以前は関西国際空港及び那覇空港では一ヶ月当たり40便～100便の要求件数があり、Full CDO実施率は約8割を占めた。コロナ禍の影響を受け、2020年3月以降関西国際空港におけるCDO要求件数が一ヶ月当たり50便前後となり、2021年2月以降は40便未満に留まった。しかし、コロナ禍前の水準では一日あたり19～20便であったCDO運用時間帯の着陸便数がコロナ禍の影響で一日あたり11～12便

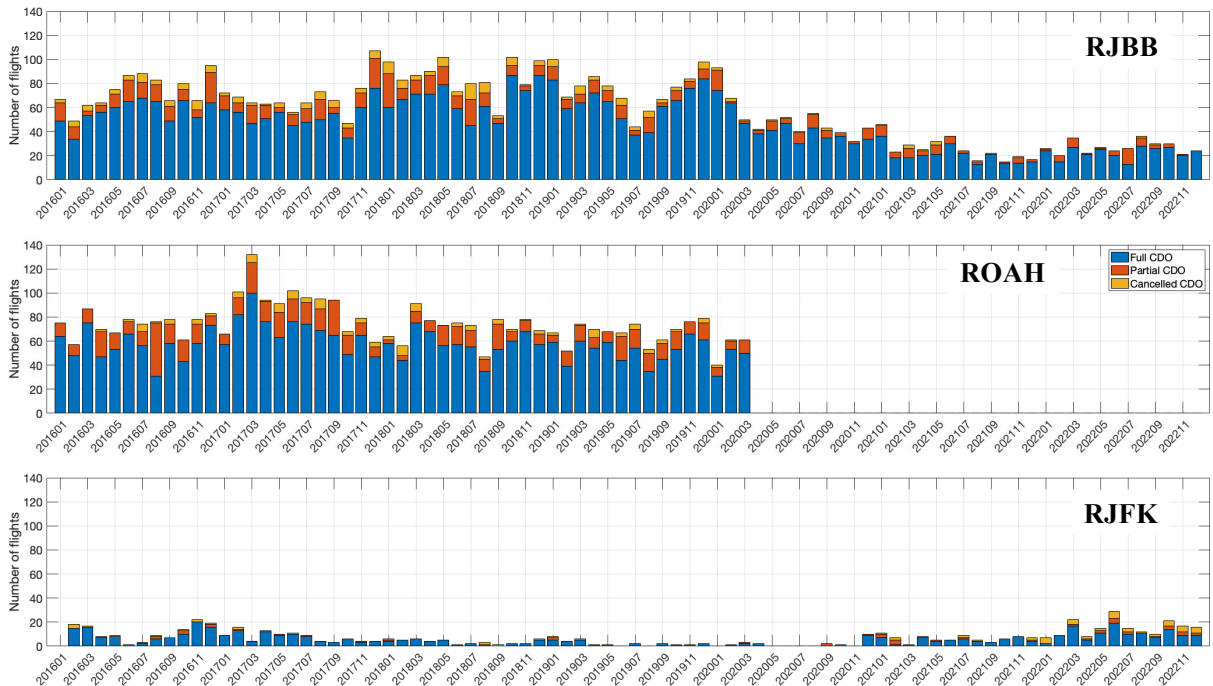


図1 各空港におけるCDO要求件数とそれに対する承認の可否数

まで減少していたため、CDOの実施率に目立つ変化はない。那覇空港では、2020年3月以降CDO運用時間帯に到着する便がなかったため、CDOが実施されていない。鹿児島空港においては、通常のCDO要求件数が少なく、減少傾向であったが2020年12月頃から要求件数が繰り返し増加し、2022年以降はコロナ禍前の水準よりも増加傾向であることが見受けられる。理由として、過去に比べて2022年CDO運用時間帯に到着する便の増加が考えられる。

## 2.2 Fixed-FPA 降下

CDOの運用拡大が望まれているが、軌道予測が難しく、CDO実施機と非実施機が混在する場合は通常よりも大きめの間隔を維持する必要があるため、CDOの実施が困難になるという管制運用上の課題がある。本研究で提案するFixed-FPA降下は、固定された降下角により航空機の降下パスが定められるため、地上での軌道予測が容易になる。また、アイドルに近い推力を保ちながら降下するように経路を設計することで、FMS-PDと比べて燃料消費量が少し増える一方、降下パスを変更せずに管制官の速度指示等に対応できる余地が出てくるため、低高度での経路延伸等を低減することが可能となる。

### 2.2.1 Fixed-FPA 降下方式の概念

Fixed-FPA降下経路は、航空法で定められている制約を満たしつつ、汎用的な設計を可能とするため、既存の標準計器到着方式（STAR, Standard Instrument Arrival）を基準に設計する。使用するSTARの条件を考慮し、通常のフィックスに加えて高度指定のフィックスをSTAR上に追加することで降下角を固定する。目的空港またはフライトの条件に合わせてFixed-FPA降下経路を設定することができ、降下開始点（ToD, Top of Descent）とFixed-FPA降下開始点間は、FMSによって計算されるパスに沿って降下することとする。また、到着における制約条件（通過速度及び高度の指定等）に対応できるよう減速フェーズを設けている。それによって航空機が与えられた降下パスから逸脱することが低減できると考えられる。

### 2.2.2 Fixed-FPA 降下の手順

本研究では、Fixed-FPA降下を実現するためにパイロット志向と管制官志向の二つのアプローチを提案してきた。しかしながら、現行の航空交通管理システムとの整合性をとるためには、管制官志向のアプローチが有効であると考えられる。図2において、管制官志向のFixed-FPA降下の手順を簡単に説明する。

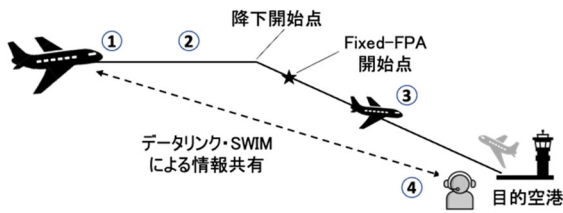


図2 Fixed-FPA 降下の手順

- ① 巡航中のパイロットは、降下開始点から決められた時間前に管制官へ Fixed-FPA 降下をリクエストする。
- ② 目的空港に応じて予め設定された複数の Fixed-FPA 降下の経路から、パイロットとの調整を基に、管制官が Fixed-FPA 降下を承認する。
- ③ パイロットは、承認された Fixed-FPA 降下の経路情報を FMS に入力し、降下を実施する。
- ④ 管制官は、必要に応じて周辺の到着機との安全間隔を維持するため Fixed-FPA 降下を実施する航空機に対して速度調整を指示しながら交通流を監視する。

基本的に、Fixed-FPA 降下は VNAV (Vertical Navigation) PATH モード (ボーイング機) または Managed Descent モード (エアバス機) で実施する。水平面の飛行プロファイルにおいては、従来の運用と同様に LNAV (Lateral Navigation) モードを適用する。パイロットは、与えられた高度プロファイルから航空機が逸脱しないことを監視する役目を果たす。

本提案のような降下方式を効率良く実施させるためには、運用支援ツールや関係者間の情報共有が極めて重要になる。将来の航空交通システムを支えるプラットフォームである情報共有基盤 (SWIM, System Wide Information Management) の高度化により、地上・地上間及び地上・機上間の情報共有が進み、早い段階で降下軌道の調整が可能となり、飛行プロファイルの更なる改善が期待される。また、最新型航空機に搭載されている Vertical Situation Display (VSD) といった可視化ツールを用いることによって、パイロットの状況認識が向上し、本提案のような新たな飛行方式を円滑に実施できると考えられる。

### 2.2.3 Fixed-FPA 降下の軌道生成技術

本研究では、従来及び Fixed-FPA 降下の軌道を生成する手法として、ファストタイムシミュレーションをベースとした軌道生成ツールを開発した<sup>[7]</sup>。このツールを用いることにより、様々な気象状況、及び型式・離陸重量による異なる航空機特性を反映した降下軌道を生成することができる。図3に軌道生成手法のモデルの概要を示す。

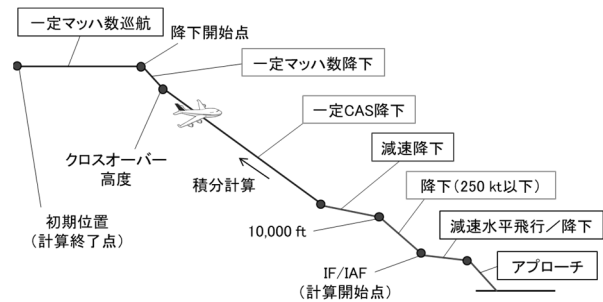


図3 Fixed-FPA 降下軌道のモデル

航空機は降下開始点より、一定のマッハ数で降下を開始し、クロスオーバー高度にて速度を一定の較正対気速度 (CAS, Calibrated Airspeed) に切り替えて降下を続ける。減速降下フェーズにおいて高度 10,000ft で速度 250kt 以下の条件を満たした後、CAS を 250kt 以下に保ちながら降下を続け、二つ目の減速フェーズより着陸体制に入るといった仕組みである。数値計算を行うため必要な航空機性能情報は EUROCONTROL が開発した BADA (Base of Aircraft Data) モデル<sup>[8]</sup>より入手し、気象データは気象庁発表の数値予報 GPV (Grid Point Value) データを使用している<sup>[9]</sup>。ここでは、FMS の計算ロジックを模擬するため IF (Intermediate Fix) または IAF (Initial Approach Fix) から与えられた巡航フェーズの任意の点まで、進行方向と逆方向に数値積分を行うことで軌道が生成される。

### 2.2.4 軌道生成ツールの検証

ファストタイムシミュレータで計算した Fixed-FPA 降下軌道の妥当性を検証するため、航空会社が所有するフルフライトシミュレータを用いて計算軌道を飛行させる実験を行った。図4に表す CDO Number 1 を通り、関西国際空港の RWY06R に着陸する双発の大型航空機を

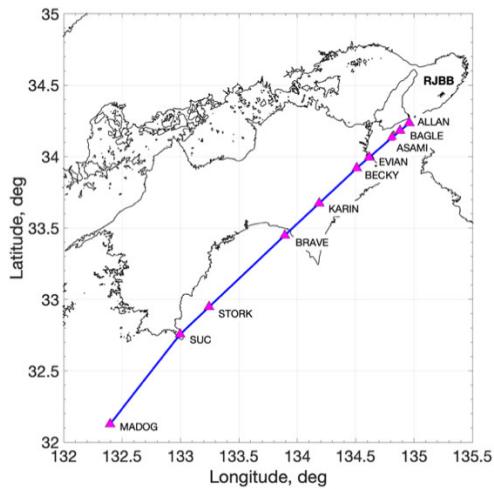


図4 Fixed-FPA 降下軌道のモデル

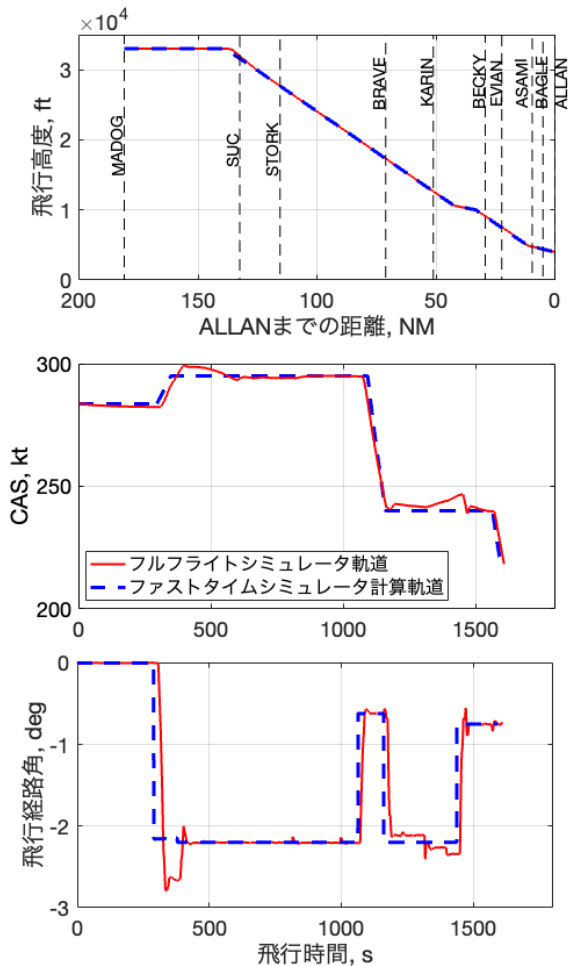


図5 Fixed-FPA 降下軌道のモデル

実験対象とした。航空路上の MADOG を飛行開始点、IF の ALLAN を飛行終了点と設定した。Fixed-FPA 降下及び減速フェーズにおける降下角は、実際に CDO を行った同型式の航空機か

ら取得した飛行データと、ファストタイムシミュレーションの結果を基に設定している。検証の比較結果を図5に示す。

図5では、計算した軌道と再現された軌道の高度プロファイルがよく一致していることが分かる。速度と飛行経路角のプロファイルの比較でも、Fixed-FPA 開始前と終了前に現れる若干のズレはあるものの、特性が良く一致している。このズレは、図3に示した降下軌道のモデルのモデル化誤差によるものであると考えられる。ファストタイムシミュレータで計算した軌道と、フルフライトシミュレータで飛行した軌道の燃料消費量と飛行時間の差異は、それぞれ7%と1%という結果が得られた。他機種フルフライトシミュレータで実施した実験からも同様な結果が得られており、開発したファストタイムシミュレータが航空機の降下軌道を予測するため、十分な精度を持っていることが明らかになった。

### 3 Fixed-FPA 降下の運航性能評価

#### 3.1 Fixed-FPA 降下の有効性

ここでは、前節で紹介した軌道生成モデルを基に、ファストタイムシミュレーションを用いて Fixed-FPA 降下の有効性を検討した。モンテカルロシミュレーションを行い異なる運航条件と気象条件で、FMS-PD と Fixed-FPA 降下をそれぞれ 10,000 フライト模擬し、降下軌道の特性や運航性能を比較した<sup>[10]</sup>。図6にそれぞれの降下方式の ToD から降下終了点までの距離のばらつきを示している。

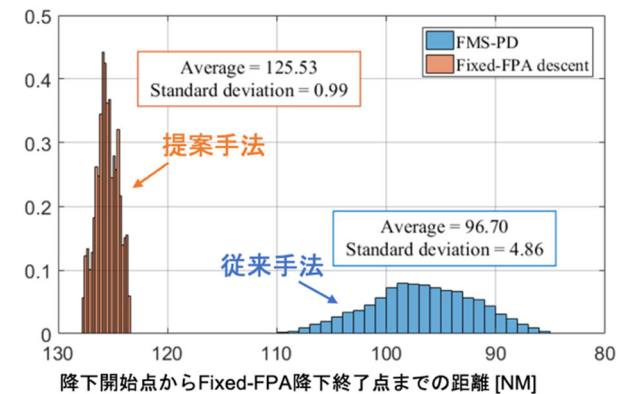


図6 FMS-PD と Fixed-FPA 降下の比較結果

得られた結果から、FMS-PD の ToD 位置は大

きくばらつくことが分かった（標準偏差：4.86）。一方、Fixed-FPA 降下では、ToD 位置のばらつきが小さくなっていることが確認できた（標準偏差：0.99）。降下プロファイルのばらつきを抑えることが地上における航空機の高度プロファイルの予測精度の向上につながることから、Fixed-FPA 降下が有効な降下方式であることが示された。

こちらの解析では、周辺到着機との間隔付けのために到着を遅らせる管制指示を模擬したシミュレーションも行い、Fixed-FPA 降下の有効性を定量的に検討した。図7は、管制指示により到着を遅らせる時間（以下、遅延時間と呼称）に対してそれぞれ FMS-PD と Fixed-FPA 降下に要する燃料消費量の差異を箱ひげ図で示した結果である<sup>[10]</sup>。縦軸の正の値が大きくなるにつれ、遅延時間に対する Fixed-FPA 降下の有効性が高くなることを意味する。実線は、シミュレーションにおいて各遅延時間における中間値を表す。得られた結果から、120 秒以上の遅延

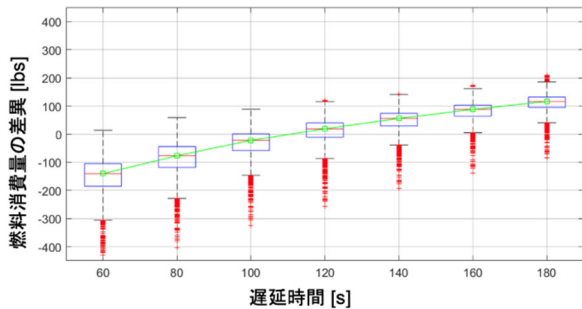


図7 遅延時間における運航性能の比較結果

が必要とされる際に Fixed-FPA 降下が燃費の観点からも有効であることがわかった。

### 3.2 Fixed-FPA 降下における環境負荷の検証

Fixed-FPA 降下における環境負荷を評価するため、Boeing Fuel Flow Method 2 (Eurocontrol Modified, BFFM2 ECM) 計算手法<sup>[11]</sup>に基づいて排出ガスの推定モデルを構築した。表1では、CDOとFixed-FPA降下における時刻調整の有効性を検証するため行ったフルフライトシミュレータ実験における、中型機と大型機の排出ガスの推定結果を示す。ある程度の交通量の空港では、到着間隔を保つために到着時刻調整を行うことがある。表中の「時刻調整」は、管制から間隔維持のため到着時刻を指示したシナリオを模擬した結果である。CDO（時刻調整）では、従来の運用のようにCDOを途中でキャンセルし、ベクタリングを用いて到着時刻を調整しており、Fixed-FPA（時刻調整）では速度調整を用いて到着時刻を調整した。得られた結果から、通常の到着方式としてはCDOの運航性能が最も有効である一方、管制指示による到着時刻の調整が行われた場合においてはCDO（時刻調整）の運航性能が低下したのに対し、Fixed-FPA（時刻調整）では降下パスを保ちながら速度調整ができるため、運航性能の変化がわずかであり、運航性能の観点から有効であることが確認できた。従って、環境負荷に支配的な影響を及ぼすCO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、NO<sub>x</sub>においても排出が低減可能であることがわかった。

表1 CDOとFixed-FPA降下における環境負荷影響の比較結果

	中型機				大型機			
	CDO	Fixed-FPA	CDO (時刻調整)	Fixed-FPA (時刻調整)	CDO	Fixed-FPA	CDO (時刻調整)	Fixed-FPA (時刻調整)
飛行時間 (s)	1,509	1,576	1,647	1,661	1,508	1,606	1,672	1,640
燃料消費量 (lbs)	1,185	1,260	1,335	1,218	2,043	2,178	2,402	2,162
NO <sub>x</sub> (g)	7,317	7,422	8,168	7,095	22,039	20,744	24,705	20,950
CO(g)	1,531	1,432	1,604	1,890	1,658	1,427	1,515	1,624
SO <sub>x</sub> (g)	451	480	508	464	778	829	915	823
CO <sub>2</sub> (kg)	1,688	1,798	1,901	1,734	2,909	3,102	3,421	3,079
H <sub>2</sub> O (kg)	661	702	744	679	1,139	1,215	1,340	1,206

## 4 Fixed-FPA 降下の機能拡張

### 4.1 到着管理アルゴリズムの開発

Fixed-FPA 降下において、地上における軌道予測精度を高度化することにより、管制官にとっては Fixed-FPA 機と非 Fixed-FPA 機の調整を柔軟に行うことができ、CDO の利便性が向上できると考えられる。そこで、本研究では周辺に他の航空機が飛行している交通流において Fixed-FPA 降下を実施する方法を検討しており、その一環として、Fixed-FPA 降下を用いた到着管理アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムでは、Fixed-FPA 降下を用いた航空機間の間隔維持をフィードバック制御問題として扱い、航空機の到着時刻と高度制約の関係をモデル化することにより高度制約を計算している<sup>[12]</sup>。この高度制約は、降下開始前に決められる通過点であるため、制約が発生した際に降下軌道に及ぼす影響を事前に予測しやすくなる。関西国際空港を対象に行った評価解析から、従来の降下方式と比べて提案のアルゴリズムの方が周辺の航空機との干渉を回避しつつ、燃料消費量を減少させる降下を実施することが確認できた。また、関西国際空港へ到着する 30 機の内 10 機を対象に本アルゴリズムを適用して行ったシミュレーションでは、

- ・ FMS-PD：周辺の到着機との干渉が発生したため、10 機の内 3 機の CDO 実施が中止された。
- ・ Fixed-FPA 降下：速度調整により、周辺の到着機との安全間隔を保持できたため、10 機とも Fixed-FPA 降下を実施することができた。

という結果が得られた<sup>[13]</sup>。次のステップとして、異なる方向から目的空港に向かう到着機及び目的空港から出発する航空機との安全間隔が維持できるようにアルゴリズムを改善することを目指している。

### 4.2 Fixed-FPA 降下専用の EFB アプリ開発

これまでに実施した Fixed-FPA 降下の実験では、パイロットが予め計算された軌道情報を手動で FMS に入力し降下飛行を行う、という手順で実施した。次のステップとして、地上管制支援向けの到着管理アルゴリズムと同様に機上パイロットの支援を目的に Fixed-FPA 降下を実

施のため必要な情報を提供する手法として電子フライトバッグ (EFB, Electronic Flight Bag) 専用の模擬アプリを開発した。EFB アプリ開発の専門家である Boeing Global Services 社 (元 Jeppesen 社) と現役パイロットへヒアリングを行い、Fixed-FPA 降下経路における地図の表示や降下経路の位置データ・実施に係る性能データの算出について得られたフィードバックを初期設計に反映した。

このアプリは、巡航中にパイロットがフライトと機体の状況 (機体重量、巡航高度・速度、外風の状況など) 及び意図 (燃費重視もしくは時間重視) を入力すると、状況と意図に応じて適切な Fixed-FPA 降下経路 (予め目的空港に合わせて計算された経路のセットから選択される異なる降下角の経路) を出力する。出力された降下経路を地上の管制官と共有することで、パイロットが希望する降下経路を管制官と共有することができる。図 8 では、アプリの一部の機能を表示する。

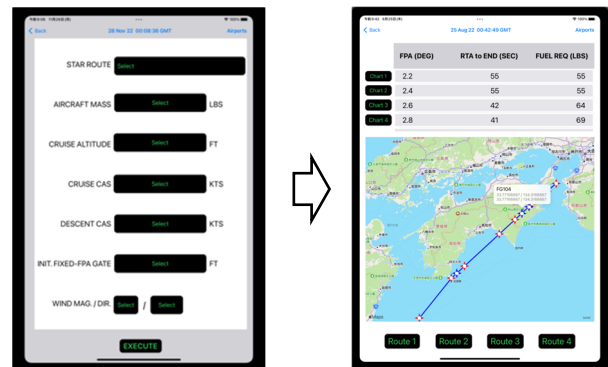


図 8 (アプリの一部の機能) パイロットの入力画面及び Fixed-FPA 降下経路群の表示画面

実運用の環境における Fixed-FPA 降下のフィジビリティ及び EFB 模擬アプリの有効性を検証するため、弊所が所有する実験航空機を用いて仙台空港にて国内初となる Fixed-FPA 降下実験を実施した。実験では、管制機関と予め調整した Fixed-FPA 降下経路をアプリのデータベースとして格納し、各フライトにおいて実際の降下経路とアプリから出力される降下経路の比較を行った。また、異なる降下角による Fixed-FPA 降下と、FMS-PD 及び従来から用いられているステップダウン降下 (交通量の多い環境で管制官が管理しやすい方式) を実施し、

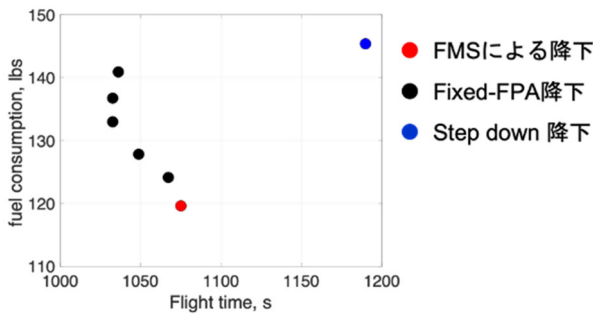


図9 Fixed-FPA 降下検証実験による運航性能の比較評価

Fixed-FPA 降下の有効性を評価した。図9では、検証実験より得られた様々な降下方式の運航性能結果を示す。横軸が飛行時間、縦軸が燃料消費量となっており、赤点は航空機のFMSによる降下（通常のCDO）、青点はステップダウン降下、黒点は複数の降下角によるFixed-FPA降下の結果を表している。なお、この結果は降下開始点から降下終了点の飛行セグメントによるものである。実証実験より得られた結果は、シミュレーション解析から推定される傾向と同様であり、降下角を固定することによってCDOより燃料消費量が若干増える一方、通常のステップダウン降下より燃費が良いことが明らかになった。環境に及ぼす負荷は燃費に比例することから、Fixed-FPA降下により環境負荷軽減のポテンシャルが示された。

実験の実施プロセスから、Fixed-FPA降下のような新たな運航方式において、実際の運航環境とEFBアプリの連携による以下のような課題点を洗い出すことができた。

- ・ 目的空港におけるローカルルール（管制官における交通流管理の考え方や到着経路の扱い等）を反映する必要性
- ・ 実施対象機におけるアプリの機能のチューニング等

## 5 今後に向けて

将来の航空交通システムにおけるFixed-FPA降下の実現に向けて上記の有効性の検証や提案機能のさらなる開発・評価が必要である。例えば、従来のFMSで軌道生成に使用する気象予報データに対して、将来の航空交通システムを支えるSWIMによる航空情報交換モデル（AIXM, Aircraft Information Exchange Model）

や気象情報交換モデル（IWXXM, ICAO Meteorological Information Exchange Model）等を導入することにより、軌道生成に最新の気象状況を反映することが可能となる。一般的に運航者が使用する気象データ（GSM, Global Spectral Model）を、より高頻度かつ詳細な局地モデル（LFM, Local Forecast Model）にすることで、高精度な降下軌道を生成することができる<sup>[4]</sup>。また、データリンク等通信システムの有効活用により、機上と地上の連携が強化され、協調的意思決定により高効率なFixed-FPA降下方式を実施することが可能になると考えられる。

## 6 まとめ

本稿では、日本のCDO運用拡大に向けて降下角を固定したFixed-FPA降下方式を提案し、運用構想を構築するため必要と思われる要件を検討した。そのため、まずFixed-FPA降下軌道生成ツールを開発し、ファストタイム及びフルフライトシミュレーションよりツールの妥当性を検証した。また、定量的評価の結果、異なる運用条件においてもFixed-FPA降下は管制指示に従いつつ与えられた降下パスが保てることを確認できた。また、提案の降下方式は120秒以上の遅延が必要とされる際に燃費の観点から有効であることがわかった。さらに、Fixed-FPA降下の適用範囲を拡大するため、地上管制支援および機上パイロット支援機能を提案した。開発した到着管理アルゴリズムでは、地上管制の高度指示を行う地点を設けることによって、安全間隔を維持しながら与えられた降下パスから逸脱せずFixed-FPA降下を実施できることが明らかになった。提案したEFB模擬アプリでは、SWIMインフラを有効活用する前提で地上管制官と緊密に連携しながらFixed-FPA降下を実施するため必要な機能を検討した。実機を用いたFixed-FPA降下実証実験において、本アプリの有効性の初期検証を行い、将来の実現に向けて解決すべき課題を洗い出すことができた。このようにFixed-FPA降下の妥当性を確立することは、最終目標であるFixed-FPAと次世代アプローチシステムの統合へ大きく貢献すると考えられる。



## 謝辞

飛行航跡及び CDO 実績に関するデータ提供及び Fixed-FPA 降下実証実験へ協力をいただきました航空局関係者各位に深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] “Passenger demand recovery continued in December 2022 & for the full year,” IATA <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-02-06-02/> (参照, Mar. 2023)
- [2] “航空機分野における脱炭素化の取り組みの進捗について,” 国土交通省航空局 <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001488343.pdf> (参照, Mar, 2023)
- [3] J-P.B. Clarke et al. (2013), “Optimized Descent Arrivals at Los Angeles Airport,” AIAA Journal of Aircraft, vol.50, no. 2, pp.360-369.
- [4] M.G. Wu, S.M. Green, and J. Jones (2015), “Strategies for choosing descent flight-path angles for small jets,” AIAA Journal of Aircraft, vol.52, no.3, pp.847-866.
- [5] ICAO, “Continuous Descent Operations (CDO) Manual,” ICAO Doc 9931.
- [6] L. Stell (2010), “Analysis of flight management system Predictions of idle thrust descents,” IEEE/AIAA 29<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference.
- [7] 虎谷大地, ビクラマシンハ ナヴィンダ, 平林博子 (2018), “継続降下運航の運用拡大検討のためのシミュレーション技術,” 第18回電子航法研究所研究発表会
- [8] “Base of aircraft data” <https://www.eurocontrol.int/model/bada> (参照, Apr. 2023)
- [9] 京大生存圏研究所気象庁データベース <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-original.html> (参照 : Apr. 2023)
- [10] D. Toratani, N.K. Wickramasinghe, J. Westphal, and T. Feuerle (2020), “Feasibility study on applying continuous descent operations in congested airspace with speed control functionality: fixed flight-path angle descent,” Aerospace Science and Technology, Elsevier, 107, 106236.
- [11] D. DuBois, and G.C. Paytner (2006), “Fuel flow method 2 for estimating aircraft emissions,” SAE Transactions, vol.115, pp.1-14.
- [12] 和田真治, 井上正樹, 虎谷大地 (2021), “Semi-CDO: 航空機の新たな降下運航方式の提案と到着管理アルゴリズム,” 第8回制御部門マルチシンポジウム
- [13] ビクラマシンハ ナヴィンダ, 虎谷大地, 平林博子 (2020), “固定飛行経路角効果方式における運航性能評価に関する一考察,” 第58回飛行機シンポジウム講演集
- [14] N.K. Wickramasinghe, Y. Nakamura, and A. Senoguchi (2021), “Evaluating the influence of weather prediction accuracy on aircraft performance estimation,” 2021 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2021).

## 気象条件に対応した後方乱気流管制方式と効果

航法システム領域 ※吉原 貴之, 藤井 直樹  
航空交通管理領域 瀬之口 敦, 山田 泉, 虎谷大地, 青山 久枝

### 1 はじめに

航空機の飛行に伴って左右の翼端から後方に一对の向きが異なる渦が生じるが、これは後方乱気流と呼ばれ、生成時の強さは航空機の重量に比例し、速度に反比例することが知られている。一般に、後方乱気流は時間の経過に伴って下降し、減衰・消滅する特性をもつ。また、周囲の気象条件によっても変化し、例えば風が強い場合には減衰・消滅過程が早まったり、風下に流されたりする。そのため、複数の航空機が同一経路を飛行するような場合には、先行する航空機（先行機）の生成した後方乱気流が、後続する航空機（後続機）の安全運航に影響を与えない程度に減衰している、あるいは飛行経路上から十分離れた場所に移動していることが必要となるため、適切な間隔を設定する後方乱気流管制方式が適用される。

本発表では、滑走路の安全かつ効率的な運用に着目し、現在の後方乱気流管制方式の背景、課題、並びに将来構想とともに、国際的にも導入されつつある向い風が強い気象条件下での運航効率の改善が見込まれる TBS（Time-Based Separation）と呼ばれる時間に基づく管制間隔基準による運用について紹介する。また、国内の混雑空港を対象として気象条件および空港・空域条件を考慮した TBS 導入に関わる便益評価や、技術的要件の明確化、並びに必要な安全性評価の視点から検討したのでその結果を報告する。

## 2 後方乱気流管制方式と TBS の位置づけ

### 2.1 概要と将来構想

先行機の後方乱気流の影響を回避するための安全な離隔間隔は、先行機の生成する後方乱気流の強さとともに、後続機が許容可能な強さも関係する。そのため、航空機を主に重量によって区分し、先行機と後続機の航空機区分の組合せに応じた最低基準となる間隔を設定し、それ

表1 ICAO 航空機4区分

航空機区分	最大離陸重量 M (kg)
Super (J)	560,000 程度
Heavy (H)	$136,000 \leq M \leq 560,000$
Medium (M)	$7,000 < M < 136,000$
Light (L)	$M \leq 7,000$

表2 航空機4区分の最低基準 (単位: NM)

		後続機			
		J	H	M	L
先行機	J		5	7	8
	H		4	5	6
	M				5
	L				

を保つように交通制御することで、後続機の安全運航を確保する後方乱気流管制方式が、航空航法サービスの手順を示す文書である PANS-ATM (ICAO Doc 4444) [1] に定められている。具体的には、重量による4つの航空機区分を表1に、最低基準例として進入および出発フェーズの航空交通業務の監視サービス下での距離に基づいた最低基準を表2に示す。

この後方乱気流管制方式に関する今後の方向性については、ICAO がとりまとめている将来構想 GANP (Global Air Navigation Plan) [2] の ASBUs (Aviation System Block Upgrades) に WAKE-B2, B3 として記載があり、表3のように航空機区分の詳細化や最低基準の設定に関わるアイテムと、近接平行滑走路（滑走路中心線の間隔が 760m 未満）に関連したアイテムに分類できる。前者に関しては、本発表の主題である TBS 運用に加えて、航空機区分をさらに詳細化して安全性水準を維持しつつ後方乱気流管制間隔を短縮可能な組合せを検討する静的ペアワイズ (S-PWS: Static Pair-wise) 運用、並びに TBS と S-PWS を複合した運用が含まれる。一方、後者のアイテムに関しては、近接平行滑走路において滑走路進入端の水平位置にずれやそ

表3 ICAO ASBU の WAKE 関連

WAKE	概要	PANS-ATM 改訂
航空機区分と最低基準		
B2/1	7つの航空機区分と最低基準	2020年
B2/2	最終進入における時間に 基づく最低基準 (TBS)	2024年
B3/3	静的ペアワイズ (S-PWS) 運用	2030年
B3/6	出発機に対する S-PWS に 基づいた TBS	2030年
近接平行滑走路 (中心線間隔 760m 未満)		
B3/1	従属な平行進入	2028年
B3/2	独立な平行運用	2028年
B3/4	拡張された従属な平行進入	2030年
B3/5	拡張された独立な平行運用	2030年
B3/7	時間間隔に基づく従属な平行進入	2030年
B3/8	時間間隔に基づく独立な平行運用	2030年

それぞれの進入経路に高さ方向の差がある場合の計器進入を想定している。「従属な平行進入」は滑走路間で後方乱気流に関わる間隔付けが独立ではない運用を、「独立な平行運用」は後方乱気流が風に流される等の効果を利用してそれぞれの滑走路において出発機、到着機の間隔付けを行う運用をそれぞれ示している。また、「拡張された」については、主に航空機区分の詳細化等の要素が付加された運用を示している。

## 2.2 後方乱気流管制間隔の短縮と意義

混雑空港では周辺空域を含めて、航空機間の最低基準となる間隔が滑走路運用と密接な関係にあり、安全性水準を維持しつつ間隔の短縮を図ることは、効率化に寄与すると考えられる。この最低基準に関連する3つの主要な要素として後方乱気流管制方式における間隔、レーダー管制間隔 (MRS: Minimum Radar Separation)、並びに滑走路占有時間 (ROT: Runway Occupancy Time) が挙げられる。これら3つの要素のうち、最大のものが間隔として設定されるが、その値を小さくすれば滑走路運用の効率化につながると考えられる。表2の航空機4区分の後方乱気流管制方式における最低基準と他の要素を比較して考察すると、日本においては進入および出発フェーズのレーダー管制間隔が3NMであるため、空欄を除く間隔はいずれも後方乱気

流管制間隔が大きい。また、滑走路占有時間について先行研究によれば、成田国際空港を例にすると到着機の実測値 (平均値) は滑走路毎に異なっているが105~124秒程度である [3]。対地速度を75m/秒と仮定して距離に変換すると4.3~5.0NM程度となり、後方乱気流管制間隔の短縮によって、滑走路運用の効率化につながる可能性がある。

## 2.3 航空機区分の詳細化による短縮

表2における各航空機区分の組合せに対応した間隔については、先行機として生成する後方乱気流の強さはその航空機区分の中で最大のものを想定している。一方、後続機として許容できる後方乱気流の強さは、航空機区分の中で最小のものを想定している。そのため、航空機区分を細分化することで、安全水準を維持しつつ最低基準の短縮が期待できる。

航空機の重量と翼幅によって詳細化した7つの航空機区分を表4に、それら航空機区分の組合せに対して進入および出発フェーズの航空交通業務の監視サービス下での最低基準を表5に示す。橙色および水色のセルはそれぞれ細分化により短縮、および安全性の見直しで延長された組合せである。ただし、航空機区分 M から F になった航空機もある。この新たな基準は表3の ASBU WAKE-B2/1 に対応し、2020年11月に発効した PANS-ATM に盛り込まれており、本発表では RECAT (Re-Categorization) と呼ぶこととする。RECAT は日本においても PANS-ATM 改訂と同時に東京国際空港、並びに成田国際空港に導入された。将来的には、さらなる航空機区分の詳細化を進める WAKE-B3/3 に対応した S-PWS の検討もなされている [4]。

## 2.4 TBS の概要と国際動向

後方乱気流管制方式における最低基準の見直しとして TBS が注目されている。これは距離に基づく最低基準の間隔 (DBS: Distance-Based Separation) であると、図1のように向風が強い場合に対地速度が低下するため、同じ距離間隔でも飛行する時間が増加して時間あたりの処理機数の低下を招く。しかしながら、弱風時の DBS と同等な安全性水準とした TBS を強風時に導入することにより、この時間あたりの処理機数の低下を軽減できる。このように、TBS

表4 ICAO 航空機7区分

区分	最大離陸重量 M (kg)	翼幅 s (m)
A	136,000 ≤ M	74.68 < s ≤ 80
B		53.34 < s ≤ 74.68
C		38.1 < s ≤ 53.34
D	18,600 < M < 136,000	32 < s
E		27.43 < s ≤ 32
F		s ≤ 27.43
G	M ≤ 18,600	-

表5 航空機7区分の最低基準（単位: NM）

		後続機						
		A	B	C	D	E	F	G
先行機	A		4	5	5	6	6	8
	B		3	4	4	5	5	7
	C				3	3.5	3.5	6
	D							4
	E							4
	F							
	G							

の目的は、強風時における単位時間あたりの着陸機数低下の軽減、あるいは維持となっている。この TBS は英国のヒースロー空港に 2015 年 3 月に初めて導入され、2018 年 3 月には TBS と欧州の航空機区分と最低基準の見直しである RECAT-EU と複合した運用が開始されている。その後、TBS は 2022 年 5 月にカナダのトロント空港に、2023 年 1 月にはオランダのスキポール空港に導入されており、今後も国際的に導入空港が増加するものと考えられる。

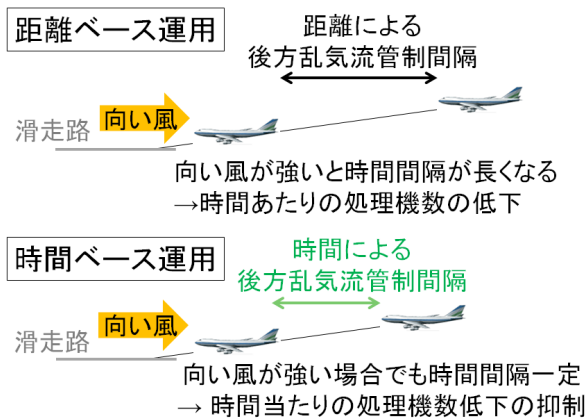


図1 後方乱気流管制間隔に関する距離ベース運用と比較した時間ベース運用の利点

この TBS は ASBU WAKE-B2/2 に対応しており、2024 年の PANS-ATM 改訂に盛り込まれることが想定されているが、航空機区分の組合せに対応した具体的な時間に基づく間隔は導入空港の気象条件や交通流の特性（機種構成や進入速度プロファイル等）に合わせて設定されるべきものである。また、滑走路進入端において先行機と後続機の安全な間隔を確保するため、航空管制官に対して予測および警報機能を持ったリアルタイム間隔付け支援システムが必要であり、導入前に安全性評価を行う必要がある。EUROCONTROL は、TBS に関わる安全性評価文書 [5]、導入にあたり検討すべき事項をまとめたガイドライン [6] を公開している。次の第3章では、これら文書を参考にしつつ、国内混雑空港への TBS 導入検討に必要な便益評価、航空管制官支援システムの要件と軌道予測に関する検討、および安全性評価の概要を述べる。

### 3 国内混雑空港への TBS 導入に関わる検討

#### 3.1 便益評価

TBS 導入効果の評価は、RECAT が導入された成田国際空港を対象として計算機上で交通流を模擬して検討した。実際の航跡データに基づいてシナリオを作成して解析を行うこととしたが、2020 年 4 月以降は新型コロナウイルスの影響により便数が減少したこと等を考慮して、RECAT 導入前の南風および北風運用のそれぞれについて、強風および弱風日を選定した。

これらの日について、空港面の交通流模擬とターミナル空域の交通流模擬とをそれぞれの計算機ツールで行い、それら結果を統合することとした。空港面に関しては、電子航法研究所で開発している GRACE と呼ばれるツールを用い、レーダー航跡に基づく現実模擬、RECAT 適用模擬、TBS 模擬の 3 つを実施したが、一例として強風時の模擬に用いた TBS 最低基準を表 6 に示す。桃色のセルは航跡データをもとに設定した強風時の滑走路占有時間（113 秒）が他の 2 つの要素、すなわち TBS とレーダー管制間隔よりも優位であることを示している。

この空港面とターミナル空域での交通流模擬との接続では、レーダー航跡によるターミナル空域への入域時刻に対して、最短経路と速度プ

ロファイルから滑走路進入端までの最短飛行時間を算出して、両者から最早滑走路進入端通過時刻を求め、表6の最低基準をGRACEで適用して先行機との間隔を短縮した滑走路進入端通過時刻に間に合う場合には早着可能な便として扱うこととした。現在、検証の最終段階にあり、結果については発表時に紹介することとしたい。

### 3.2 航空管制官支援システムの要件と軌道予測に関する検討

航空管制官に間隔付けの目安を示す支援ツールに関しては、先行研究等を参考に軌道予測に基づく支援情報として表示する簡単な計算アルゴリズムと表示手法を開発した [7]。また、実際のレーダー航跡に試作プログラムを適用し、計算されたインジケータがどの程度、滑走路末端において正確な間隔を示すことができているかを評価した。その結果、TBS支援ツールに要求される機能としては各航空機の状態取得、予測軌道計算、支援情報計算、支援情報の表示という4つの機能と実装への課題を特定した。

### 3.3 安全性評価の手順と解析結果

安全性評価においては、向い風が強い時に適用するTBSによる後方乱気流のリスクが弱風時におけるDBSと同等以下であることが担保されることを示す必要がある。そのため、後方乱気流が進入経路上に残存することによる遭遇リスク評価とともに、向い風条件下で航空機間隔が無風時の時間間隔分布から逸脱することに起因する後方乱気流との遭遇リスクの2つのリスク評価が必要となる。前者に関しては、東京国際空港におけるLIDARによる後方乱気流観測データを用いて乖離事例がないことを確認 [8]、後者に関しては東京国際空港でのADS-B受信データを中心とした事例解析を行っている。

## 4 まとめ

本稿では、滑走路の安全かつ効率的な運用に着目し、国際的にも導入されつつある向い風が強い気象条件下での運航効率の改善効果が見込まれるTBS運用を主題として、現在の後方乱気流管制方式の背景、課題、将来構想とともにTBS運用の概要と実施した主な検討項目について記載した。発表では、TBS運用を国内混雑空港に導入する際に必要となる便益評価、航

表6 強風時TBSの最低基準（単位：秒）

		後続機						
		A	B	C	D	E	F	G
先行機	A	113	113	130	135	160	170	210
	B	113	113	113	113	140	160	190
	C	113	113	113	113	113	113	170
	D	113	113	113	113	113	113	120
	E	113	113	113	113	113	113	120
	F	113	113	113	113	113	113	113
	G	113	113	113	113	113	113	113

空管制官支援システム要件の検討、および安全性評価の詳細を中心に報告する予定である。

## 参考文献

- [1] ICAO: The Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management (PANS-ATM), Doc 4444, 16<sup>th</sup> Edition, Amendment 9, November 2020.
- [2] ICAO: Global Air Navigation Plan, the 7<sup>th</sup> Edition, <https://www4.icao.int/ganpportal/>, (参照, May 2023).
- [3] 北河涉, 泊尚志, “「首都圏空港機能強化検討調査～成田国際空港について～」(第35回研究報告会報告)の補遺”, 運輸政策研究, Vol.18, No.2, pp.80-85, 2015.
- [4] EUROCONTROL: Approach and Departure Optimised Wake Turbulence Re-Categorisation and Pair-Wise Separation minima -RECAT-EU-PWS scheme-, Edition 1.0, May 2022.
- [5] EUROCONTROL: Time-Based Separation (TBS) Principles as Alternative to Static Distance-Based Separation for Final Approach, Edition 1.1, September 2020.
- [6] EUROCONTROL Guidelines on Time-Based Separation (TBS) for Final Approach, Edition 1.0, May 2021.
- [7] D. Toratani et al., “Investigation of Support Algorithm for Air Traffic Controllers’ Arrival Separation Management,” CTS, 2021.
- [8] 藤井ほか, “羽田空港における航空機の進入時の後方乱気流に対するLIDAR観測結果について”, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 2023年1月.

## SBAS 信号認証機能の概要とプロトタイプの開発

航法システム領域 ※坂井 丈泰, 北村 光教, 毛塚 敦

### 1 まえがき

GPS に代表される衛星航法システムは GNSS と総称され、従前より利用できる米国 GPS 及びロシアによる GLONASS のほか、最近では欧州の Galileo、中国の BeiDou、そして我が国による準天頂衛星システム（QZSS）を利用する環境が整ってきた。航空用途で GNSS を利用するには完全性（integrity：インテグリティ）を確保する機能の追加が必要とされ、これを行うのが補強システムである。ICAO（International Civil Aviation Organization：国際民間航空機関）は、人工衛星を経由して補強情報を伝送する SBAS（satellite-based augmentation system）を規格化しており[1]、米国 WAAS、我が国の MSAS、欧州 EGNOS、そしてインドによる GAGAN がすでに稼働している。単一の GNSS 及び単一の周波数を補強対象とする現行の L1 SBAS に対して、複数の GNSS 及び周波数に対応した L5 SBAS の規格化が最近完了したところである。

一方、GNSS 信号についてはかねてより脆弱性が指摘されており[2]-[4]、近年は無線デバイス技術の進歩により「なりすまし」（spoofing）による攻撃が容易になっていることが問題視されている。この対策として GNSS 信号の認証機能を SBAS に追加する方式が議論されており、本発表ではこのための SBAS メッセージの検討状況を述べるとともに、L1 SBAS による実装のためのプロトタイプを開発したので報告する。

### 2 GNSS 信号の認証

GNSS 信号に対する攻撃のうち、偽信号によるなりすましはとりわけ問題視されている。原理的に攻撃対象が絞られはするが、攻撃者が意図する位置情報を攻撃対象の GNSS 受信機に出力させることができるのであるから、航空機の航法をはじめとする多くのアプリケーションにおいて利用者を混乱させ、損害を与えるか、さらには安全を脅かす懸念がある。

なりすましの対策の一つとしては、GNSS 信号の認証情報をユーザ受信機に提供する方式が考えられる[5]。ICAO においてもこうした認証機能を SBAS に付与する方式が議論されている[6]-[8]。SBAS では警報時間 TTA=6 秒とされていることから、平均認証間隔 MTBA=6 秒を満たすことが要件とされた。

#### 2.1 基本的な仕組み

GNSS においてはユーザ受信機は GNSS 信号を受信するだけであるから、情報の流れは一方方向であり、ユーザ受信機から GNSS 衛星に向けて信号を伝送することはない。このような場合に、ユーザ受信機が受信した GNSS 信号が正当なものであることを確認する仕組みとして、デジタル署名技術を利用できる。

送信者に対応した公開鍵と秘密鍵の鍵ペアを用意しておき、通信内容のダイジェストに対して秘密鍵を適用した結果（これを認証符号 Message Authentication Code：MAC という）を署名情報として送信する。受信側では送信者の公開鍵でこれを復号し、受信した通信内容のダイジェストが一致すれば、送信者が正当であることを確認できる。これがデジタル署名方式の基本的な原理である。前提として、公開鍵から秘密鍵を推定することが実質的に（短時間では）不可能でなければならない。具体的なデジタル署名方式としては楕円曲線暗号による ECDSA（Elliptic Curve Digital Signature Algorithm）[9]を利用できる。

#### 2.2 伝送方式

SBAS による認証機能の実現については、当初は L5 SBAS の Q-ch を使用する案が考えられたが、干渉による雑音の増加が懸念されたことから I-ch による実現性が検討された。デジタル署名に用いる鍵は ECDSA 方式による一方、MAC の伝送にはハッシュ関数によるキーチェーンを用いる TESLA（Timed Efficient Stream Loss-Tolerant Authentication）[10]方式を採用する。これにより認証メッセージのサイズ

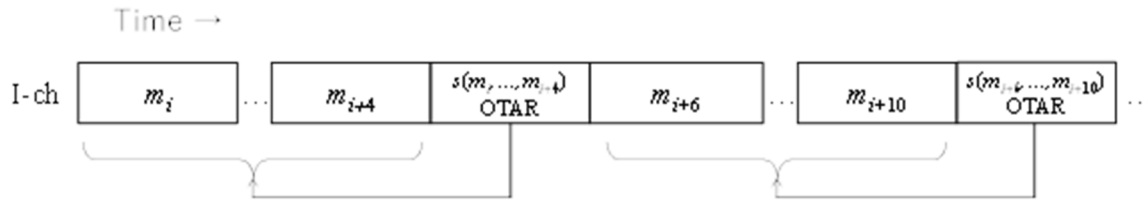


図1 メッセージ送信順：TESLA方式

を小さくでき、L5 I-chにより送信できる見込みが得られた。

さらに既存のL1 SBAS I-chへの適合性が検討され、一定の見込みがあることから、具体的なメッセージ構成が検討されている。SBASのデータ速度は毎秒250ビットであり、メッセージ長250ビットのメッセージが毎秒1個ずつ送信される。各メッセージに格納できるデータサイズは212ビット（L1 SBAS）又は216ビット（L5 SBAS）である。

認証情報としては、SBASメッセージに対するMACのほか、MACの検証に用いる公開鍵を送信する。後者はOTAR（Over-the-Air Rekeying）と呼ばれ、鍵ペアの安全性を確保するための措置である[7]。

### 2.3 TESLA方式による認証情報

TESLAでは、あるキーチェーンの*i*番目の鍵を $k_i$ としたとき、次の関係を満たすように所要数の鍵をあらかじめ生成し、生成順とは逆の順番で使用する。

$$h(k_i) \rightarrow k_{i-1}$$

$h(\cdot)$ は一方方向性ハッシュ関数である。受信側では、キーチェーンをたどっていくと必ずルートキー $k_0$ に到達する。このルートキー $k_0$ については公開鍵暗号により伝送する必要があり、これにはECDSAを使用する。所要の暗号強度を得るために、キーチェーンのハッシュ演算には128ビットのソルトを適用する。

TESLAでは認証すべき情報及びキーチェーン中の鍵からMACを生成し、鍵とともに送信する。受信側ではこのMACの正当性を検証すればよく、MAC生成鍵についてはハッシュ関数が、キーチェーンについては公開鍵暗号により送信されるルートキーが、それぞれ正当性を担保する。MACを16ビット長として、5メッセージ分の認証情報を1メッセージに収めて送

信できるように認証メッセージが設計されており、これが直前に送信された5メッセージ（5秒間）に対応する。TESLA方式における認証情報と認証されるSBASメッセージの関係を図1に示す。

### 2.4 鍵の更新

信号認証に使用する鍵ペアが危殆化した場合、これを更新する必要がある。この更新を手動で行うことは現実的ではないことから、OTAR（On-the-Air Rekeying）と呼ばれる仕組みを実装することが考えられている[7]。

すなわち、認証用の鍵ペア（レベル2）を更新する際には、公開鍵をECDSAによるデジタル署名とともに送信する。この署名には、OTAR用の鍵ペア（レベル1）を用いる。レベル1の公開鍵については、あらかじめ受信機に内蔵させる。レベル1及びレベル2の鍵ペアに対して、TESLAのルートキーはレベル3の鍵情報として送信される。

## 3 MSASへの適用

前章に述べた信号認証方式をSBASにより実装する場合、認証メッセージの送信頻度に制約があることが問題になり得る。以前の検討[11]によりもっとも厳しいのはL1 SBASのI-chによる場合であることがわかっており、現用のMSASについて実際の余裕帯域幅を求めるとともに、その拡大のための方策を検討した。

### 3.1 現状の空き伝送容量

現用MSASにおけるメッセージの送信状況を調べるため、2022年8月7～13日の1週間にわたりMSASメッセージを受信し、メッセージタイプ（MT：Message Type）別に伝送帯域幅全体に対する占有率を求めた結果を表2に示す。

有意な情報を含まないMT63（ヌルメッセージ）は、全体の17.18%を占めている。これを

表2 伝送容量の占有率（現用 MSAS）

MT	送信回数	平均間隔 (s)	占有率 (%)
2~4	302,431	2.00	50.01
1, 7~28	198,460	3.05	32.81
63（空き）	103,909	5.82	17.18
合計			100

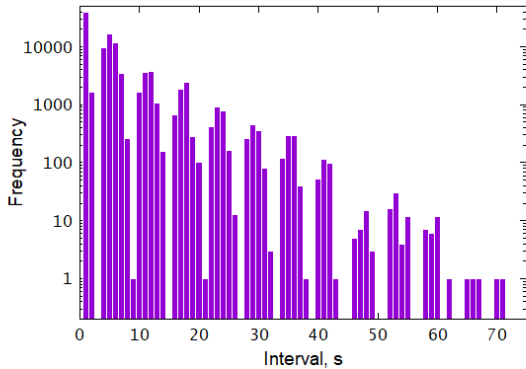


図2 MT63の送信間隔（現用 MSAS）

認証メッセージに置き換えれば6秒間に1メッセージ程度を送信できることになり、TESLA方式ではMTBA=6秒をおおよそ満たせる見込みがあるものといえる。ただし、送信間隔の度数分布は図2の通りで、最大値は71秒であった。従って、単純にMT63を認証メッセージに置き換えるだけでは、MTBA=6秒を満たせない時間帯が存在する。また、6秒毎に認証メッセージを送信することになると、OTARのための伝送容量は全体の0.5%しか割り当てられず、毎時18.5メッセージ程度にしかない。

### 3.2 必要な伝送容量

現在までに提案されているTESLAによる認証方式[8]において、認証情報の送信に必要な伝送容量を検討した結果を表3に示す。MT20は6秒毎に送信される認証メッセージ、MT21はルートキー及びOTARのための鍵情報を送信するメッセージとされている。

MSASの例にならう、MT21については最大送信間隔の半分の時間間隔で送信することになると、認証情報の伝送には28%程度の伝送容量が必要と見込まれる。現状の空き容量は表2の通り17%余りであるから、何らかの方法により空き伝送容量を増やす必要がある。

表3 認証メッセージの送信間隔

MT	鍵 レベル	所要数	送信間隔 (s)	占有率 (%)
20	—	1	6	16.67
21	1	1	9	11.11
	2	7		
	3	4		
合計			3.60	27.78

表4 空き伝送容量の検討（MT6を使用）

MT	送信回数	平均間隔 (s)	占有率 (%)
2~4	60,487	10.00	10.00
6	100,811	6.00	16.67
1, 7~28	198,460	3.05	32.81
63（空き）	245,042	2.47	40.52
合計			100

### 3.3 空き伝送容量を確保する方策

SBASのメッセージに含まれる情報のうちでもっとも高頻度に送信されるのはUDREIであり、MSASの場合はMT2~4で送信されている。MT2~4はUDREIと高速補正情報を含んでいるが、一方で補強対象の全衛星のUDREIのみを送信するMT6が用意されており、このメッセージを使用すればMT2~4の送信回数を減らせる可能性がある。

高速補正情報のタイムアウトは最大で120秒にでき、このとき他メッセージの例にならえば高速補正情報の送信間隔は30秒でよい。現状ではMT2~4を各6秒間隔で送信している（30秒間で15回）が、これを30秒間でMT2~4を各1回とMT6を5回のあわせて8回にできる。

MT6を使用する場合について空き伝送容量を検討すると、表4の通りとなる。高頻度に送信されているMT2~4の伝送回数を減らすことで、大幅に空き伝送容量を増やせることが分かる。

## 4 プロトタイプの開発

現用MSASでも認証メッセージを送信できる見込みが得られたことを踏まえ、認証機能のプロトタイプを開発した。実装した認証メッセ



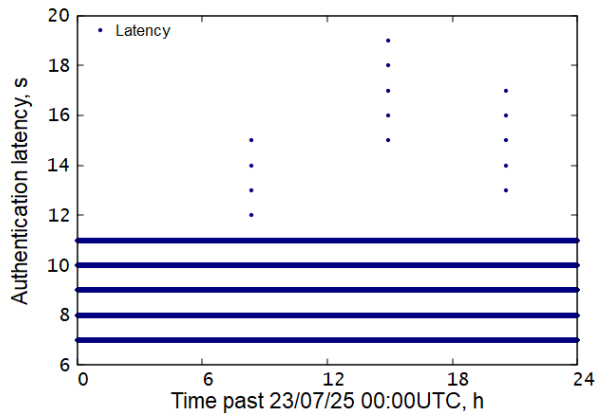


図3 認証処理の遅れ時間

ージは現在までに提案されている TESLA 方式によるもので、MSAS が送信したメッセージのうち、MT2~4 の一部を MT6 に置き換えたうえで、MT20 を 6 秒毎に付加する。また、MT63 を MT21 に置き換え、これにより鍵情報を格納することとした。

ECDSA による鍵ペア（レベル 1 及びレベル 2）はあらかじめ生成して使用する。また、TESLA のキーチェーンは 1 週間を単位として設定した。開発に際しては暗号ライブラリ Libcrypt を使用した。

MSAS が送信したメッセージに対して、プロトタイプを使用して実際に認証メッセージを生成し、認証遅れ時間（メッセージの受信後、認証されるまでの時間）を測定した結果を図 3 に示す。遅れ時間は設計通り 7~11 秒となるが、まれにアラートシーケンスの際には大きくなることが分かる。

## 5 むすび

SBAS による信号認証機能の実装について、ICAO における議論の状況を述べるとともに、L1 SBAS による実装の可能性を検討し、プロトタイプを開発した結果を報告した。現用 MSAS のメッセージ構成では伝送容量が不足するが、メッセージタイプ 6 を使用することで L1 SBAS でも認証機能を実現できる見込みである。引き続き、プロトタイプを使用して、雑音や攻撃に対する耐性を確認することとしたい。

## 参考文献

- [1] Aeronautical Telecommunications, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, International Standards and Recommended Practices, 7th Ed., ICAO, July 2018.
- [2] John A. Volpe National Transportation Systems Center: Vulnerability Assessment of the Transportation Infrastructure Relying on the Global Positioning System, Aug. 2001.
- [3] 水野勝成, “測位衛星への干渉・妨害, 安全対策,” GPS/GNSS シンポジウム, pp. 248-251, 東京, Oct. 2017.
- [4] T.E. Humphreys, P.M. Kintner, Jr., M.L. Psiaki, B.M. Ledvina, and B.W. O'Hanlon (2009), “Assessing the spoofing threat,” GPS World, 20, 1, pp. 28-38.
- [5] P. Enge and T. Walter, “Digital message authentication for SBAS (and APNT),” ION GNSS+ 2014, pp. 1328-1336, Tampa, FL, Sept. 2014.
- [6] E. Chatre: SBAS authentication, ICAO NSP JWGs/2-WP/10, Montreal, June 2016.
- [7] A. Neish, T. Walter, and J.D. Powell, “Design and analysis of a public key infrastructure for SBAS data authentication,” ION Pacific PNT, pp. 964-988, Waikiki, HI, April 2019.
- [8] J. Dennis, T. Walter, J. Anderson, L. Cowles, I. Fernandez-Hernandez, and M. Mabillean, “Preliminary look as SBAS data authentication requirements,” ICAO NSP JWGs/9-IP/20, Virtual, June 2022.
- [9] NIST: FIPS PUB 186-4 Digital Signature Standard (DSS), July 2013.
- [10] A. Perrig, R. Canetti, J. D. Tygar, and D. Song, “Efficient authentication and signing of multicast streams over lossy channels,” IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy, pp.56-73, Berkeley, CA, May 2000.
- [11] 坂井丈泰, 北村光教, 小田浩幸, “L5 SBAS による信号認証機能の基礎検討,” 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, 2G08, オンライン, 2021 年 11 月.

## 東南アジアにおける GBAS 導入のための電離圏環境評価

航法システム領域 ※齋藤 享, 吉原 貴之  
拓殖大学 中村 真帆

### 1 まえがき

GBAS (Ground-Based Augmentation System) GBAS とは, ICAO (International Civil Aviation Organization) で国際標準として規格化されている, GPS 等の測位衛星を利用した航空機の進入着陸システムであり [1], 現行の ILS (Instrument Landing System) の後継となる次世代の進入着陸システムと位置付けられ, 世界各国で導入が進められている。

GBAS の運用においては, 電離圏の空間・時間変動に伴う誤差にかかる安全性の確保が重要な課題であり, 電離圏変動に関わるパラメータ (これを電離圏脅威モデルという) を設置場所に合わせて決定する必要がある [2]。

アジア太平洋地域の磁気低緯度地域の電離圏脅威モデルは欧米等の磁気中緯度地域よりも厳しいことが分かってきており [3], 磁気低緯度地域における GBAS の運用のためには, 設置場所における電離圏脅威モデルが既存の電離圏脅威モデルに包含されるかどうかを調査する必要がある。

### 2 GBAS における電離圏脅威対策

GBAS では, 多くの場合を占める電離圏が静穏である場合と, 静穏時に比べて空間変動が 10~100 倍変動する擾乱時とを分けて取り扱う。そのため, 静穏時の電離圏空間変動を表す電離圏静穏時の電離圏勾配パラメータ ( $\sigma_{vig}$ ) と, 擾乱時の電離圏空間変動を表す電離圏脅威モデルの二つを, GBAS が設置される場所の環境に合わせて決定する必要がある。

電離圏勾配は無限に長い波面を持つ前線状の構造として近似できるので, 電離圏脅威モデルは図 1 に示すように 4 つのパラメータ (電離圏勾配のスロープ, 電離圏勾配の移動速度, 電離圏勾配の幅, および電離圏勾配による最大遅延量) で表されるので, 観測に基づいてこれらを決定する。

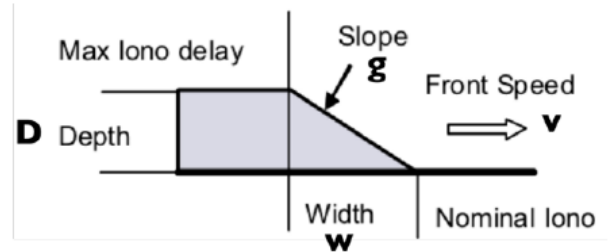


図 1. 前線状の電離圏勾配とそのパラメータ

### 3 観測環境の構築

ICAO アジア太平洋地域共通 GBAS 電離圏脅威モデルは, アジア太平洋地域の磁気低緯度地域の各国のデータを元に作成されており, 全域で一律の値を採用している。しかし, 磁気低緯度地域内においても電離圏環境は必ずしも一様ではなく, 磁気赤道を挟んで南北に赤道異常帯が存在し, 異常勾配の原因となる電離圏現象は同一 (プラズマバブル) であったとしても電離圏勾配の特性には地域内変動があることが予想できる (図 2)。地域内変動を考慮した電離圏脅威モデルを構築することにより, GBAS が設置される場所の環境に最適化し, GBAS の性能を最大限引き出すことができる。

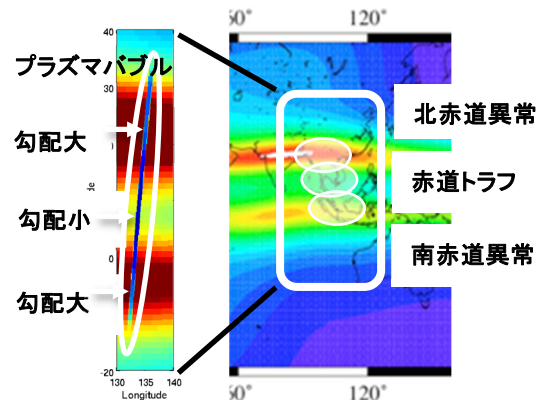


図 2. 磁気低緯度内の電離圏変動

#### 3.1 観測場所の選定

本研究では, 北赤道異常帯に位置するベトナム (研究協力先: ベトナム科学技術アカデミー

地球物理研究所), 南赤道異常帯に位置するインドネシア(研究協力先: インドネシア研究革新庁)の2ヶ所を選定した。このほか, 赤道トラフ帯に位置するタイでは, 別途日本との協力により GBAS のための電離圏環境調査が行われており, 合わせて磁気低緯度地域内の異なる3地域の電離圏環境を調べることができる。

### 3.2 観測ネットワークの構築

観測ネットワークは最低3式の観測装置からなり, それぞれGPSを含む航法衛星システムの2周波以上の信号を観測可能なGNSS受信機と空中線の組である。これらを10km程度の間隔で, 一直線上に並ばず, 正三角形に近い配置になるように設置する。

#### 3.2.1 ベトナム

ベトナムにおいては, 北赤道異常帯に近く, ベトナム科学アカデミー地球物理研究所があるハノイ周辺に観測ネットワークを構築した(図3)。ベトナム・ハノイでは, 2019年1月から観測を継続している。



図3. ベトナム・ハノイの観測装置配置

#### 3.2.2 インドネシア

インドネシアにおいては, 南赤道異常帯に近く, インドネシア研究革新庁の旧インドネシア航空宇宙庁が存在するバンドン市周辺に観測ネットワークを構築した(図4)。インドネシア・バンドンにおいては, 2022年5月から観測を継続している。

### 4 解析方法

解析は, 図5に示す手順で行う。まず, 全データについて, 電離圏変動指標を導出し, 電離圏擾乱発生日を検出する。電離圏擾乱発生日

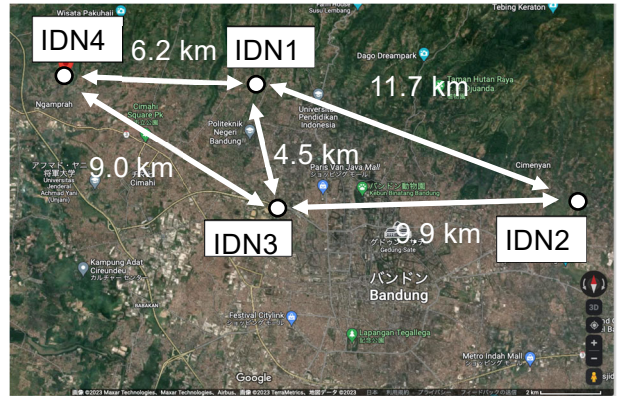


図4. インドネシア・バンドン観測装置配置

については, さらに電離圏現象タイプの同定を行い, プラズマバブルに伴う電離圏擾乱を検出し, 電離圏勾配パラメータを導出する。一方で, 電離圏静穏日のデータを用いて, 電離圏静穏時パラメータ( $\sigma_{vig}$ )を導出する。個々の手順については別途示す。

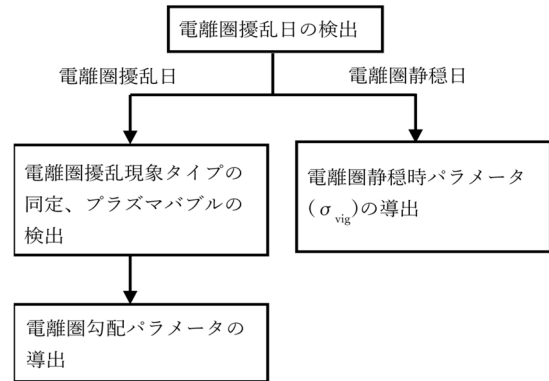


図5. 解析の流れ

#### 4.1 電離圏擾乱発生日の検出

電離圏擾乱発生日を検出するために, 電離圏変動指標として”Along-Arc TEC Rate (AATR)” [4]を用いた。AATRが観測ネットワーク内全ての観測点において上昇している時を電離圏擾乱の発生として検出する。反対に, 特定の観測点のみにおいてAATRが上昇する場合は, 観測点周辺の環境に起因するものと考えられるため, 電離圏擾乱の発生とは捉えない。

#### 4.2 電離圏擾乱時

電離圏勾配の導出においては, まず2受信機間の電離圏遅延量差を推定するために, 電子航法研究所で開発された”Single-frequency

carrier-based and code-aided (SF-CBCA)”法 [5] を用いる。さらに、3 受信機による 3 組の受信機ペアを用いて電離圏遅延量差を推定し、観測の冗長性を用いた推定値の検証(巡回和検査)を行う [6]。検証された電離圏遅延量差推定値を用い、電離圏勾配ベクトル(方向、傾きの大きさ)を求める [7]。求められた電離圏勾配ベクトルを用い、電離圏静穏時、擾乱時それぞれについて、GBAS において用いられる電離圏パラメータを決定する。

#### 4.3 電離圏擾乱時

電離圏静穏時に適用される電離圏パラメータは、垂直方向換算の電離圏勾配標準偏差 ( $\sigma_{\text{vig}}$ ) である [1]。 $\sigma_{\text{vig}}$  は、電離圏勾配の発生頻度分布の裾において、ガウス分布を仮定して  $10^{-7}$  程度以下の発生頻度をカバーするように、観測された垂直方向換算の電離圏勾配の標準偏差を保守的に大きくしたものとして設定する。具体的には、電離圏勾配の発生頻度の累積確率密度分布関数(CDF)を観測値から生成し、ガウス分布から導かれる CDF が  $10^{-7}$  以上の発生確率を包含するように、観測された電離圏勾配標準偏差に係数をかけて  $\sigma_{\text{vig}}$  を決定する [8]。標本数が  $10^{-7}$  の確率を再現するために不十分な場合は、CDF の裾全体を包含するように  $\sigma_{\text{vig}}$  を決定する。

#### 4.4 電離圏静穏時

図 1 に示す電離圏勾配を特徴付けるパラメータを決定するために、まず電離圏勾配の傾きの大きさ(g)を SF-CBCA 法を用いて推定された 2 次元電離圏勾配ベクトルの大きさとする。次に、各受信機の 2 周波観測を用いて導出した電離圏遅延量変動の相関を利用して速度(v)を推定する。さらに、推定された v と各受信機において電離圏遅延量が大きく変動する区間を用いて幅(w)と変動の総量(D)を求める。

### 5 結果

#### 5.1 静穏時電離圏パラメータ( $\sigma_{\text{vig}}$ )

図 6 は、ベトナム・ハノイにおいて 2022 年 3 月 12 日～2023 年 2 月 6 日のうち、明らかに電離圏異常ではなく受信環境等に起因すると考えられる異常データを含む日を排除した 128 日の

データから導出した、静穏時電離圏勾配の発生頻度の累積頻度分布(CDF)である。観測された電離圏勾配の傾きの大きさの標準偏差は 1.63 mm/km であった。観測された CDF の裾をすべて包含するためには、観測された標準偏差を 2.3 倍する必要がある、このことから  $\sigma_{\text{vig}}$  は 3.75 mm/km と決定された。 $\sigma_{\text{vig}}$  の値は、2019 年以降年々増加傾向にあり、太陽活動の上昇を反映しているものと考えられる。

インドネシア・バンドンでは、2022 年 5 月 26 日～2022 年 12 月 30 日のうち、電離圏静穏時と判定された 105 日のデータを  $\sigma_{\text{vig}}$  の導出に用いた。図 6 と同様の手法により、 $\sigma_{\text{vig}}$  は 4.58 mm/km と決定された。

今回得られた  $\sigma_{\text{vig}}$  は、インドネシア・バンドンの方がわずかに大きいものであった。これが南北半球間の何らかの違いを反映する有為なものであるかどうかを判断するためには、今後のデータの蓄積と解析が必要である。

#### 5.2 電離圏擾乱時の電離圏パラメータ

ベトナム・ハノイにおいては、2022 年 3 月 12 日～2023 年 2 月 6 日のうち 89 日においてプラズマバブルに伴う電離圏擾乱が検出された。2019 年には年間数例しか検出されなかったが、太陽活動の上昇に伴い発生頻度が急激に上昇していることがわかる。電離圏勾配のスロープ(g)については 200 mm/km を超える電離圏勾配が多数検出され、最大値は 300 mm/km に迫るものであった。これらは、ICAO アジア太平洋地域モデルの最大値(600 mm/km)に十分包含されているが、年々最大値が増加してきており、引き続き太陽活動極大期に向けてデータ収集と解析を行っていく必要がある。その他のパラメータについては、幅(D)について ICAO APAC 共通 GBAS 共通電離圏脅威モデルおよび GAST-D 検証用電離圏脅威モデルによって規定されている値の下限値(25 km)を下回るものが検出されており、下限値を引き下げる必要が示された。

インドネシア・バンドンにおいては、2022 年 5 月 26 日～2022 年 12 月 30 日のうち 53 日についてプラズマバブルに伴う電離圏擾乱が検出された。インドネシアにおいても、スロープ(g)について最大値は 250 mm/km を超えるもの

であった。これは反対半球のベトナムの値と同様であると言ってよい。

その他のパラメータ等、詳細な結果については、本研究の報告書[8]に詳しくまとめられている。

## 6 まとめ

これまでの活動により、ベトナム、インドネシアにおいて連続的に電離圏勾配データを収集する観測網を構築することができた。いずれもデータ収集と解析を現地研究者と共同で実施されており、現地研究機関における技術力の養成も進んでいる。

ベトナムにおいては、2018年に最初の電離圏勾配観測を開始して以来、現地研究機関との協力により連続してデータ収集が行われてきており、太陽活動周期(約11年)の半分程度に達するデータが収集できてきている。解析も随時行われており、近い将来のGBAS導入に対応した電離圏環境評価体制が整ってきている。

インドネシアにおいては、太陽活動が上昇してきている本年度から連続的にデータ収集と解析を始めることができた。

この成果をもとに、引き続き磁気低緯度地域における電離圏環境調査を効果的に行い、磁気低緯度地域におけるGBAS導入に貢献していきたい。

## 謝辞

本研究は、総務省による「周波数の国際協調利用促進に資する磁気低緯度地域における電離圏環境調査に関する請負」(2020~2022年度)として実施された。

## 参考文献

[1] Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I, Radio Navigation

Aids, Seventh Edition, July 2018.

- [2] International Civil Aviation Organization Asia and Pacific Office, GBAS safety assessment guidance related to anomalous ionospheric conditions, Edition 1.0, September 2016.
- [3] International Civil Aviation Organization Asia and Pacific Office, GBAS ionospheric threat model for APAC region, 31 January 2017.
- [4] J. Sanz, J. M. Juan, G. González-Casado, R. Prieto-Cerdeira, S. Schlüter and R. Orús, Novel Ionospheric Activity Indicator Specifically Tailored for GNSS Users, in Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), pp. 1173–1182, 2014.
- [5] S. Fujita, T. Yoshihara, and S. Saito, Determination of ionospheric gradients in short baselines by using single frequency measurements, J. Aero. Astro. Avi., A- 42, 269-275, 2010.
- [6] S. Saito, T. Yoshihara, and S. Fujita, Absolute gradient monitoring for GAST-D with a single-frequency carrier-phase based and code-aided technique, in Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), pp. 2184–2190, 2012.
- [7] S. Saito and T. Yoshihara, Evaluation of extreme ionospheric total electron content gradient associated with plasma bubbles for GNSS Ground-Based Augmentation System, Radio Sci., 52, 951-962, doi:10.1002/2017RS006291, 2017.
- [8] 周波数の国際協調利用促進に資する磁気低緯度地域における電離圏環境調査に関する請負報告書, 2023年3月



## 令和5年度 新規研究課題

指定	次世代航空モビリティの運用環境構築に関する研究	52
指定	飛行方式等に係る安全と効率に関する研究	52
指定	災害時のヘリポート運用についての初期的研究	53

## 次世代航空モビリティの運用環境構築に関する研究

航空交通管理領域 ※虎谷 大地，大津山 卓哉，  
平林 博子，瀬之口 敦，  
佐藤 岳  
監視通信領域 古賀 禎，河村 暁子

近年、次世代航空モビリティ\*を対象とした交通管理に関する議論が盛んに行われている。次世代航空モビリティはこれまでの航空機とは異なる飛び方をすることがある一方、既存の航空機と一部重複するエリアを飛行するため、次世代航空モビリティと既存の航空機が安全に共存する方法を構築する必要がある。本研究では特に、低高度における次世代航空モビリティの運用環境を議論することで、次世代航空モビリティと既存の航空機が、安全かつ円滑に共存することに貢献する。

将来的にどのような運用環境が適しているかを検討するためには、航空交通管理、通信・航法・監視といった幅広い観点からの検討が必要

であり、また、将来的に次世代航空モビリティがどのように飛行するかといった不確定要素の影響も考慮しなければならない。本研究では既存航空機の運用の観点から、次世代航空モビリティの運用環境の構成パターンを複数検討することで、実現性の高い運用環境を提案することを目指す。また、検討する運用環境を実現するために必要な要素技術について、特に低高度の交通管理と監視の技術の研究開発を行う。

\* ここでは、空飛ぶクルマ (AAM/UAM, eVTOL 等とも呼ばれる) や無人航空機 (sUAS, ドローン等とも呼ばれる) 等を含む、新たな航空機全般を指すものとする。

## 飛行方式等に係る安全と効率に関する研究

航空交通管理領域 ※井無田 貴，虎谷 大地，村田 暁紀，  
ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル

航空の安全と効率を追求するための業務のひとつに飛行方式設計業務がある。飛行方式設計業務は飛行方式設計の専門家が専用のツールを用いて実施している。飛行方式設計業務には特別な知識と経験が必要であり、PANS OPS (ICAO Doc8168) の基準に沿って対象空域に応じた飛行方式を設計する。その際、対象空域の地形や運用方式に対して基準を満たすよう、設計者が既存の設計ツールを用いて設計するが、条件の多い設計作業には多くの時間を要する。先行研究では、最適化手法の一種である遺伝的アルゴリズムを用いた進入方式最適化プログラ

ムを開発し、限定的な計算条件で既存の RNP AR 飛行方式と同等の結果が得られることを確認した。最適化とは、安全性を確保したうえでの最短距離算出等である。

本研究では、飛行方式設計の設計支援のためのアルゴリズムの高度化、特に、様々な条件に対応可能なアルゴリズムの開発や、ユーザビリティの向上など、汎用性の高い設計支援ツールの開発を行い、ICAO SASP 等を通じ、得られた知識・データを用いて国際基準策定に貢献する。



## 災害時のヘリポート運用についての初期的研究

航空交通管理領域 ※大津山 卓哉

わが国における社会情勢は刻々と変化しており、人口減少による労働力不足や自然災害の頻発等、限られた条件のもとで最大限資源を活用することが求められている。特に、災害時には複数の輸送機関を効率的に活用していくことが必要されている。災害時輸送を支援するための可視化技術や情報共有の高度化等、災害時輸送に関わる評価分析が求められている。

これまでに分野横断研究として海技研、港空研と連携して災害時の物資輸送に関する緊急支

援物資輸送システムや傷病者輸送シミュレータの開発を行ってきた。この中で電子航法研は航空管制に関連した範囲を担当している。

本研究では、災害時における航空交通、特に多くの利用が想定されるヘリポートの運用についてモデル化を行う。そして、この作成したモデルを水害孤立者救助シミュレータに適用することにより、災害時輸送における複数輸送機関の効率的な活用に寄与する。



令和5年度（第23回）

電子航法研究所研究発表会 講演概要

令和5年6月9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/>

