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	1
				河	村	暁	子	
				*	本	成	人	
				百長	吗 細	调	 	
				反	临	旧利	丧	
				占佐	藤	正	彦	
2.	ADS-B位置検証技術の性能概算	監視通信領域	*	長	縄	潤	<u> </u>	7
				宮	崎	裕	己	
				田	嶋	裕	久	
				古	望		禎	
				北	护	ŕ	潤	
				角	張	泰	之	
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	*	<u> </u>	ツ 森	後後	<u> </u>	13
				森	岡	和	行	
				河	村	暁	子	
				米	本	成	人	
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	7-	ーク	17
				平	林ラマ	博 · シ、	子	
				ナヴ	ィンダ	+	マル	
			*	村	田	暁	紀	
				虎 艹	谷毎	入	地	
5	航空 ない おいち マン マン マン マン マン マン マン マン マン かい	络油土业	*	开	赤		貝誠	26
э.	加工町目前未彷にわりるテムテラロ「の目例子仏	巩 似八十	*	げ	ля П	聞	ᇞ	20
				二孟	н Б	λ.	柱	
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	ノハ	30
				虎	129 谷	大	地	
				平	林	博	子	
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	*	吉	原	貴	之	38
				藤	井	直	樹	
		航空交通管理領域		瀬	之		敦	
				山	Ħ	3	泉	
				虎	谷	大	地	
				青	山	久	枝	

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	42
				北	村	光	教	
				毛	ţ	\$	敦	
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	*	齋	薡	泰	享	46
				吉	原	貴	之	
		拓殖大学		中	村	真	帆	

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に より、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。

ー方で、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	\sim 1200bps	数秒~	×	運用中
VDLm2	\sim 31.5kbps	数秒~	\bigtriangleup	運用中
AeroMACS	~約7Mbps	数100ms~	O	標準化済
LDACS	~約2Mbps	数100ms~	O	標準化中
現行SatCom	~数Kbps	数秒~	0	運用中
次世代SatCom	~数10Mbns	₩07秒~	0	煙進化由

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ネルエミュ レータに設定する。

チャ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使われる 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 近辺である約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 エ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 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。ハードウエ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]。



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エアが動作 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、インターネットを通っ 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- コンセプ トと基本動作確認 -," 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,二ッ森,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,二ッ森,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,二ッ森,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,二ッ森,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 法のみに限定する。

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

およびしきい値をそれぞれTおよび γ 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。

- 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。
- 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Na,覆域点番号をk=1…Na 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Nt,送信点 番号をl=1…Ntとする。
- 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γを計算した上で,検知率 P_D(k,l)を計算する。
- 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*σ*_tと時刻同期性能Δμ)
- 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 $\phi_{a,k}$ 、緯度 $\lambda_{a,k}$ 、高度 $h_{a,k}$ とする。送信点lの位 置は緯度 $\phi_{t,l}$ 、緯度 $\lambda_{t,l}$ 、高度 $h_{t,l}$ とする。i番目 の受信局位置について、緯度 $\phi_{r,i}$ 、緯度 $\lambda_{r,i}$ 、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($\phi_{a,l}, \lambda_{a,l}, h_{a,l}$)を直交座標系に変換した ものをそれぞれ($x_{r,i}, y_{r,i}, z_{r,i}$)、($x_{a,k}, y_{a,k}, z_{a,k}$)、 ($x_{t,i}, y_{t,i}, z_{t,i}$)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 γ 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 γ 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, γ を次式で決定できる。

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

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

1X I	
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
$v_{ m u}$	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 $\sigma_{t,\mathrm{u}}^2$ が TDOA の分散)
$\Delta \mu_{\rm H}$	受信局の時刻同期誤差

表1 しきい値計算のパラメータ

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 γ 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。

$$f_{i}(x, y, z) = \sqrt{\left(x - x_{r,i}\right)^{2} + \left(y - y_{r,i}\right)^{2} + \left(z - z_{r,i}\right)^{2}} \quad (2)$$
$$g(x, y, z) = \frac{f_{2}(x, y, z)}{c} - \frac{f_{1}(x, y, z)}{c} \quad (3)$$

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。

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

$$\mu_{1} = g(x_{t,l}, y_{t,l}, z_{t,l}) - g(x_{a,l}, y_{a,l}, z_{a,l})$$
(4)
+ Λu

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 (μ_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。

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

$$P_{\mathrm{D,avrg}} = \frac{1}{N_a N_t} \sum_{l}^{N_t} \sum_{k}^{N_a} P_D(k, l)$$
(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。

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

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東に離した地点とした。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° 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°,経度0.0115°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)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

測定精度(σ_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	10 km, 30 km, 100 km
(半径)	

表2変化時のパラメータ

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。

$$P_{\mathrm{D,avrg}}(l) = \frac{1}{N_t} \sum_{l}^{N_t} P_D(k, l)$$
(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



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。

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

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

$$\frac{\gamma + \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_t} < -2.3263 \tag{11}$$

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,avrg}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

- 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はなく,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 の後に,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	Ξ	IJ	波レ	~ーダ仕様
-----	-----	-----	---	----	----	-------

周波数带	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

これまでに開発し,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

IL V ~ v	測定	探知	探知率
	数	数	(%)
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2 MASPS 対象物の探知率(距離 350 m)

表3 MASPS 寸法比 50 %対象物の探知率

(距離 350 m)						
サンプル	測定	探知	探知率			
9 2 9 70	数	数	(%)			
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350m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体物(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 minimizsed, 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 commonlyfiled flight plan routes between the targeted airport pairs for domestic flights, and between radarcontrolled 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_2 (assuming 3.16 kg CO_2 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-ofdescent 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.



7 Oceanic airspaces Figure over the North Pacific Ocean. Fukuoka FIR is bounded by the red line, with its oceanic airspace as a red shaded shown area. Anchorage Oceanic FIR is shown as the blue area, and Oakland Oceanic FIR is the green The NOPAC ATS routes are shown as area. 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 50 NM longitudinal separation and 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 windoptimised 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 Mav 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

- EUROCONTROL, "Free route airspace." https://www.eurocontrol.int/concept/freeroute-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 3nd 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 58th 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 58th 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 Inter-

national 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)," 16th 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-routeairspace-fra. Retrieved 1 Mar 2023.
- [18] ICAO, "Progress of User-Preferred Route (UPR) Implementation in Indonesia," 33rd 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

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(Trajectorized 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 筑波大学 ※伊藤誠,西田開飛,孟成柱

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)。

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

表1 実験シナリオ

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)。

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

表2 各シナリオの MMBB 値(30 分値)

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ロ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 席がお互い 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、 全体を通し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	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	作業や課題が発生する頻度や速度にどの程度時
レッシャー	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	作業中に不安感,落胆,イライラ,ストレス,
レーション	不快感をどの程度感じましたか。

	表 4 Team workload
尺度名	説明
л 11 11	話し合い、交渉、意見の受け取り及びフィード
ケーション	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	担当セクターで設定された課題をどの程度達成で
感	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

	÷ •	8
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	負担を感じましたか。
チーム不満	R 席, C 席チームネ	舌動中に不安感,落胆,イライ
	ラ、ストレス、不恃	央感をどの程度感じましたか。
サポート	チームメンバーフ	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	ったか。

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 おいての関係を最もよく表すイメージに丸 (〇)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,全体を通した負担感 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





(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[1], 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^[2]。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^[3, 4]。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CO₂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^[5]。 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との理解が得られている^[6]。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



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

- 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。
- 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^[7]。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^[8]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^[9]。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。他機種のフルフラ 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^[10]。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。



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^[10]。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^[11]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 CO₂, H₂O, NO_x においても排 出が低減可能であることがわかった。

	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
NOx (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
SOx(g)	451	480	508	464	778	829	915	823
CO ₂ (kg)	1,688	1,798	1,901	1,734	2,909	3,102	3,421	3,079
H ₂ O (kg)	661	702	744	679	1,139	1,215	1,340	1,206

表1 CDOと Fixed-FPA 降下における環境負荷影響の比較結果

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^[12]。 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していることが確認でき 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^[13]。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 フィージビリティ及び 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 ような新たらしい運航方式において、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^[14]。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、先ず 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/2023releases/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/conten t/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 29th 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] 京都大学生存圏研究所気象庁データベース http://database.rish.kyotou.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 一対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、並びに必要となる 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)	$136,000 \le M \le 560,000$
Medium (M)	7,000 < M < 136,000
Light (L)	M ≤ 7,000

表 2	航空機 4	区分の最低基準	(単位:NM)

		後続機				
		J	Н	М	L	
	J		5	7	8	
丁機	Н		4	5	6	
先	М				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

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	ぃ未満)
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

表 3 ICAO ASBU の WAKE 関連

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3 NM 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のように向い風が 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

区分	最大離陸重量 M(kg)	翼幅 s(m)
Α		$74.68 < s \leq 80$
В	$136,000 \le M$	$53.34 < s \le 74.68$
С		$38.1 < s \le 53.34$
D		32 < s
Е	18,600 < M <136,000	$27.43 < s \leq 32$
F		$s \leq 27.43$
G	M ≤ 18,600	-

表 4 ICAO 航空機 7 区分

表 5 航空機 7 区分の最低基準(単位: NM)

		後続機						
		Α	В	С	D	Е	F	G
	А		4	5	5	6	6	8
	В		3	4	4	5	5	7
幾	С				3	3.5	3.5	6
行村	D							4
扺	Е							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 との連接では、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ーがどの程度、滑走路 末端において正確な間隔を示すことができてい たかを評価した.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						
		А	В	С	D	Е	F	G
	A	113	113	130	135	160	170	210
	В	113	113	113	113	140	160	190
幾	С	113	113	113	113	113	113	170
行	D	113	113	113	113	113	113	120
扺	Е	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

- ICAO: The Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management (PANS-ATM), Doc 4444, 16th Edition, Amendment 9, November 2020.
- [2] ICAO: Global Air Navigation Plan, the 7th Edition, <u>https://www4.icao.int/ganpportal/</u>, (参 照, May 2023).
- [3] 北河渉, 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(OZSS)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 augment- tation system) $\dot{\mathcal{E}}$ 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,L1SBAS 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 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, ディ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。これがディジタル署名方式 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。具体的なディ 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。ディジタ 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 Authen-tication) [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(·)は一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koに到達する。このルートキーko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 によるディジ 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

МТ	送信同粉	平均間隔	占有率
IVI I	区信回数	(s)	(%)
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

表2 伝送容量の占有率(現用 MSAS)



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すると,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らない。

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 の例にならい, 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す 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	所要数	送信間隔	占有率
	レベル		(s)	(%)
20		1	6	16.67
21	1	1		11.11
	2	7	9	
	3	4		
	合	計	3.60	27.78

表4 空き伝送容量の検討(MT6を使用)

私· 王飞齿还得重吵候的 (MIO E C/II)				
МТ	送信回数	平均間隔	占有率	
IVI I		(s)	(%)	
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 Libgcrypt 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, L1SBAS 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L1SBAS 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

- Aeronautical Telecommunications, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, International Standards and Recom-mended 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. Mabilleau, "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

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(σ_{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。 航法システム領域 ※齋藤 享, 吉原 貴之 拓殖大学 中村 真帆



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 域が存在し、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(σ_{vig})を導出する。個々の手順につ いては別途示す。



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 電離圈擾乱時

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 電離圈擾乱時

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(σ vig) である [1]。 σ 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 σ 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 σ 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(σvig)

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 倍する必要があり,このことから σ_{vig} は 3.75 mm/km と決定された。 σ_{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σ_{vig}の導出に 用いた。図 6 と同様の手法により、σ_{vig} は 4.58 mm/km と決定された。

今回得られた σ 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取集と解 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 singlefrequency 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 暁日	r.

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/