

# ま え が き

電子航法研究所は、交通の安全の確保とその円滑化を図ることを目的に、電子航法（電子技術を利用した航法）に関する試験、調査、研究及び開発等を実施しています。当研究所は、昭和42年（1967年）7月に運輸省電子航法研究所として設立され、平成13年4月に「独立行政法人」として改組され、17年度まで第1期中期計画、18年度から22年度まで第2期中期計画、23年度から27年度まで第3期中期計画を実施してまいりました。平成27年4月からは、わが国の研究開発成果の最大化を目的とする「国立研究開発法人」となり、さらに、平成28年4月に運輸産業の国際競争力の更なる強化などの課題解決を技術面から支えるべく、国立研究開発法人海上技術安全研究所及び国立研究開発法人港湾空港技術研究所と統合し、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所として、新たな一步を踏み出しています。この統合に伴い、平成28年度からは、令和4年度までに達成すべき中長期目標が定められ、その達成をめざして国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所第1期中長期計画に沿った事業を行っております。

当研究所の研究活動は、社会ニーズに沿った研究課題を重点的に選定しています。特に、航空機運航の安全性とともに効率性や航空利用者の利便性の向上、航空交通量増大への対応、環境負荷低減等、航空交通の改善に資する研究を進めています。さらに、その成果を活用しつつ国の空港整備事業や国際民間航空機関等の国際標準策定作業を技術支援するなど、国内外において社会貢献の実績をあげています。それとともに、将来の技術需要を見通した基礎的、先導的な研究も実施し、電子航法に関する基盤技術の蓄積など学術への貢献にも努めています。

この電子航法研究所年報は、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所第1期中長期目標の5年目となる令和2年度に当研究所が行った業務の概要を収録したもので、研究所の運営に関する事項、各研究領域の研究業務を紹介しています。なお、別に刊行しております電子航法研究所報告及び電子航法研究所研究発表会講演概要には、より詳細な研究内容を記載しておりますので、あわせてご参照いただけますと幸いです。

当研究所は、国、産業界、大学等と連携し、国の担う航空交通管理に係る業務を支援する中核的な研究機関として、その使命を果たすべく努力してまいります。この年報を通じて当研究所の活動についてご理解いただき、あわせて忌憚のないご意見をいただけますよう、皆様をお願い申し上げます。

令和3年9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

所長 福田 豊

# 目 次

## 第1部 総 説

1. 沿 革	3
定員の推移	6
2. 組 織	7
3. 役職員数	7
4. 所 在	8
5. 建 物	8

## 第2部 試験研究業務

1. 航空交通管理領域	11
2. 航法システム領域	49
3. 監視通信領域	77
4. 研究所報告	135
5. 受託研究	136
6. 共同研究	137
7. 研究発表	140
8. 知的財産権	149

## 第3部 現 況

1. 令和2年度に購入した主要機器	155
2. 主要施設及び機器	156
3. 刊 行 物	158
4. 行 事 等	158
5. 職員表彰	159

第 1 部  
総 説



# 1 沿 革

我が国の航空技術研究再開の機運にのって昭和28年4月、運輸技術研究所に航空部が設置された。昭和33年に科学技術庁に長官の諮問機関として電子技術審議会が設けられ昭和34年8月、諮問第2号「電子技術に関する重要研究及びその推進措置について」に対する答申を行い、電子航法評価試験機関(Evaluation Center)の新設が必要なことを指摘した。次いで、同審議会は昭和35年9月に、諮問第1号「電子技術振興長期計画について」に対する答申を行い、それに沿って、昭和36年4月、当時の運輸技術研究所航空部に電子航法研究室(定員5名)が新設された。

電子技術審議会等の諸答申を背景として運輸省は昭和37年5月、運輸関係科学技術試験研究刷新要綱を決定した。これに基づき、船舶技術研究所、電子航法試験所などの新設組織ごとに設立準備室をつくり電子航法試験所設立計画の決定をみたが、最終的には、新設の船舶技術研究所の一つの部として電子航法部(2研究室14名)が設けられた。

昭和39、40両年度の予算において、電子航法評価試験のため試験用航空機の購入が認められ、ビーチクラフトスーパーH-18双発機を購入した。また、昭和40年度は飛行試験要員として、1研究室9名の増員が認められた。一方、昭和41年度には、航空交通管制の自動化に関連する試験研究に必要な電子計算機の借上げが認められた。

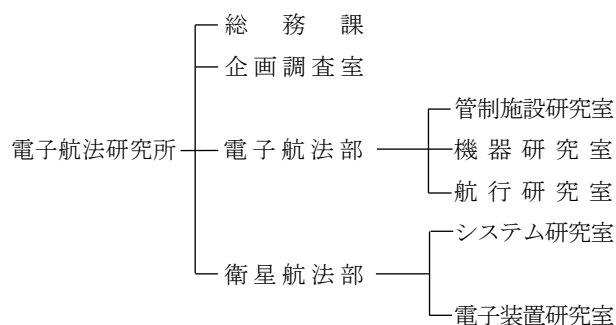
宇宙開発の一環として、人工衛星を航空機及び船舶の航法に利用しようとする開発研究は、我が国においても昭和38年に着手された。その結果をもとに、運輸省は昭和40年4月「人工衛星による航行援助方式の開発に関する基本方針」を決め、昭和41年度は衛星航法研究室(3名)が新設された。

電子技術審議会は昭和39年6月、電子航法評価試験機関の拡充強化を建議し、さらに、昭和41年6月の諮問第5号「電子技術に関する総合的研究開発の具体策について」に対し、研究機能と評価試験機能をもつ電子航法研究所の設置を答申した。また、運輸省の航空審議会においても昭和41年10月、諮問第12号「航空保安体制を整備するため早急にとるべき具体的方策について」に対して同様の答申があった。

昭和41年度予算要求において、運輸省は電子航法研究所の設立を要求したが、認められず、翌42年度予算において再度設立要求を行った結果、昭和42年6月からの10か月分の予算として電子航法研究所の新設が認められた。

しかし、運輸省設置法の一部改正が7月10日になったため、昭和42年7月10日付けで電子航法研究所として設立されることになった。

当時の組織は下記のとおりであった。



昭和43年度には、ATC実験棟を建設するとともに、昭和46年度までにATCシミュレータを整備した。

昭和45、46年度には、電波無響室を整備し、また、研究所発足以来、昭和44年度までは人員、組織とも変化がなかったが、昭和45年度に3名の増員が認められ、電子航法部を廃止し、電子航法開発部(機器研究室)と電子航法評価部(管制施設研究室、航行研究室)を設置し、総務課に総務係をおいた。

昭和46年度には、1名の増員が認められ、電子航法開発部に援助施設研究室を設置するとともに主任研究官3名(ILS、海上交通管制、データ処理)を発令した。

昭和47年度は、3名の増員が認められ、企画調査室を廃止して研究企画官をおき、総務課に人事係をおいた。また、電子航法開発部建屋、衛星航法研究棟を建設した。

昭和48年度には、3名の増員が認められ、電子航法評価部に管制システム研究室を設置し、同部に主任研究官1名(飛行実験)を発令し、総務課に企画係をおいた。

昭和49年度は、3名の増員が認められ、電子航法開発部に航法システム研究室を設置し、電子航法評価部に主任研究官1名(ATCシミュレーション)を発令し、総務課に会計係をおいた。さらに、同年度には、実験用航空機の更新が認められ、昭和50年10月にビーチクラフトB-99が引き渡された。

昭和50年度は、2名の増員が認められ、電子航法開発部に着陸施設研究室を設置した。

昭和51年度は、航空局からの要望研究、技術協力依頼等航空行政に直結する試験研究をさらに促進し、成果の活用をすみやかにするため、空港整備特別会計を導入するとともに所の定員・予算約1/4を特別会計に移管した。これに伴い、電子航法評価部を改組し、航空管制研究室、航空保安施設基準研究室及び海上交通管制研究室を設置した。また、飛行実験センターとして、宮城県岩沼市に岩沼分室を設置し、業務係をおき、飛行実験体制の整備に着手した。さらに、電子航法評価部に信頼性主任研究官をおいた。

昭和52年度は、4名の増員が認められ、電子航法評価部航空保安施設基準研究室を航空施設基準研究室と航空機器標準研究室の2研究室とした。また、アンテナ試験塔を整備し

た。

昭和53年度には、4名の増員が認められ、10月1日に電子航法評価部の航空施設基準研究室、航空機器標準研究室に新たに設置された運用技術研究室を加えて、航空施設部が発足した。さらに、昭和54年1月には岩沼分室に分室長をおいた。

昭和54年度には、東北財務局より土地8,943㎡の所管換を受け、岩沼分室を新築し、屋上にレーダー塔を設置した。

昭和55年度には、海上保安庁より格納庫（建坪825㎡）の所管換を受けた。

この年から、主任研究官の発令方法が変わり、従来例えば信頼性主任研究官と呼んでいたのが、単に主任研究官となった。

昭和56年度は、1名の増員が認められ、新システム（MLS）の調査研究体制に着手した。また、岩沼分室野外実験場の整備を行った。

昭和57年度は、1名の増員が認められ、新システム（MLS）の調査研究体制の強化を図った。

昭和58年度は、1名の増員が認められ、航空施設部に新着陸施設研究室を設置した。

昭和59年度は、1名の増員（専門官）が認められ、岩沼分室での研究支援業務の強化を図った。

昭和60年度は、1名の増員（研究企画官付専門官）が認められ、企画調整部門の強化を図った。

昭和61年度は、1名の増員が認められ、MLS研究体制の強化を図った。

昭和62年度は、1名の増員が認められ、衛星航法部に搭載装置研究室を設置した。また、管理庁舎兼衛星航法実験棟の建設工事に着手した。

昭和63年度は、管理庁舎兼衛星航法実験棟が竣工した。

平成元年度は、1名の増員が認められ、航空管制の研究体制の強化を図った。

平成2年度は、1名の増員が認められ、空地データリンクの研究体制の強化を図った。

平成3年度は、1名の増員が認められ、衛星データリンクの研究体制の強化を図った。

平成4年度は、1名の増員が認められ飛行場管制の最適手法の研究体制の強化を図った。

平成6年度は、1名の増員が認められ空港面航空機識別表示システムの研究体制の強化を図った。

また、仮想現実実験施設を整備した。

平成7年度は、1名の増員が認められVHFデジタルリンクの研究体制の強化を図った。

平成12年度は、国土交通省設置法等関係法令の施行により、平成13年1月6日をもって「国土交通省電子航法研究所」となった。

また、ATC シミュレーション実験棟が竣工した。

平成13年度は、中央省庁等改革推進本部決定及び関係諸法令の施行を受け、4月1日をもって「独立行政法人電子航法研究所」が成立となった。

所長・研究企画官が廃止され、役員として理事長・理事・監事が設置され、総務課に企画室を設置した。また、電波無響室が改装となった。

平成14年度は航空施設部、電子航法評価部、衛星航法部を航空システム部、管制システム部、衛星技術部と名称変更し研究室が廃止され研究グループを編成した。

平成15年度は、研究プロジェクトチーム設置を規定し、先進型地上走行誘導管制システム開発プロジェクトチーム及び高精度測位補正技術開発プロジェクトチームを設置した。

平成16年度は、関東空域再編関連研究プロジェクトチームを設置した。

平成18年度は、本所に研究企画統括を設置。企画室を廃止し、企画課を設置。4研究部制を廃止、3領域制（航空交通管理領域、通信・航法・監視領域、機上等技術領域）を導入、関東空域再編関連研究プロジェクトチームを廃止した。

平成19年度は、総務課に管財係を新設。会計第一係を経理係、会計第二係を契約係に変更。航空機安全運航支援技術研究プロジェクトチームを設置した。

平成20年度は、企画課に企画第三係を新設した。

また、6号棟（旧管制システム部研究棟）の建替工事に着手した。

平成21年度は、先進型地上走行誘導管制システム開発プロジェクトチームを廃止した。

平成22年度は、6号棟（旧管制システム部研究棟）の建替工事が完了した。また、高精度測位補正技術開発プロジェクトチーム及び航空機安全運航支援技術研究プロジェクトチームを廃止した。

平成23年度は、企画課に主査を新設した。また、4号棟（旧航空施設部研究実験棟）の改修工事が完了した。

平成24年度は、通信・航法・監視領域、機上等技術領域を廃止し、航法システム領域、監視通信領域を設置した。

平成25年度は、東日本大震災で被災したビーチクラフトB-99の後継機として、平成23年度第3次補正予算により購入したビーチクラフトB300（キングエア350）が、平成25年5月に引き渡された。

平成26年度は、平成25年12月24日に閣議決定された「独立行政法人等に関する基本的な方針」において講ずべき措置とされた「海上技術安全研究所」及び「港湾空港技術研究所」との統合について、平成26年8月29日に開催された行政改革推進本部で実施時期は平成28年4月と決定された。

平成 27 年度は、「独立行政法人通則法の一部を改正する法律」等関係諸法令の施行を受け、国立研究開発法人に移行し、「国立研究開発法人電子航法研究所」となった。

平成 28 年度は、平成 28 年 4 月 1 日に施行された「国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所法」により、国立研究開発法人海上技術安全研究所及び国立研究開発法人港湾空港技術研究所と統合し、「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」となった。

平成 29 年度は、本所に特別研究主幹を設置した。

令和元年度は、本所に国際標準化センターを設置した。

## 定員の推移

年 度	昭和42	43	44	45	46	47	48
定 員	31人	31	31	34	35	38	41
年 度	49	50	51	52	53	54	55
定 員	44	46	48 (13)	51 (16)	55 (19)	58 (21)	59 (22)
年 度	56	57	58	59	60	61	62
定 員	59 (22)	59 (23)	60 (24)	61 (25)	62 (26)	63 (27)	64 (27)
年 度	63	平成元	2	3	4	5	6
定 員	63 (26)	64 (27)	64 (28)	65 (28)	65 (28)	65 (28)	66 (29)
年 度	7	8	9	10	11	12	13
定 員	66 (29)	66 (29)	65 (28)	65 (28)	65 (28)	64 (28)	64 (28)
年 度	14	15	16	17	18	19	20
定 員	64 (28)	64 (30)	63 (29)	60 (27)	60 (27)	60 (27)	60
年 度	21	22	23	24	25	26	27
定 員	60	60	60	59	59	60	63
年 度	28	29	30	令和元	2		
定 員	60	57	57	57	56		

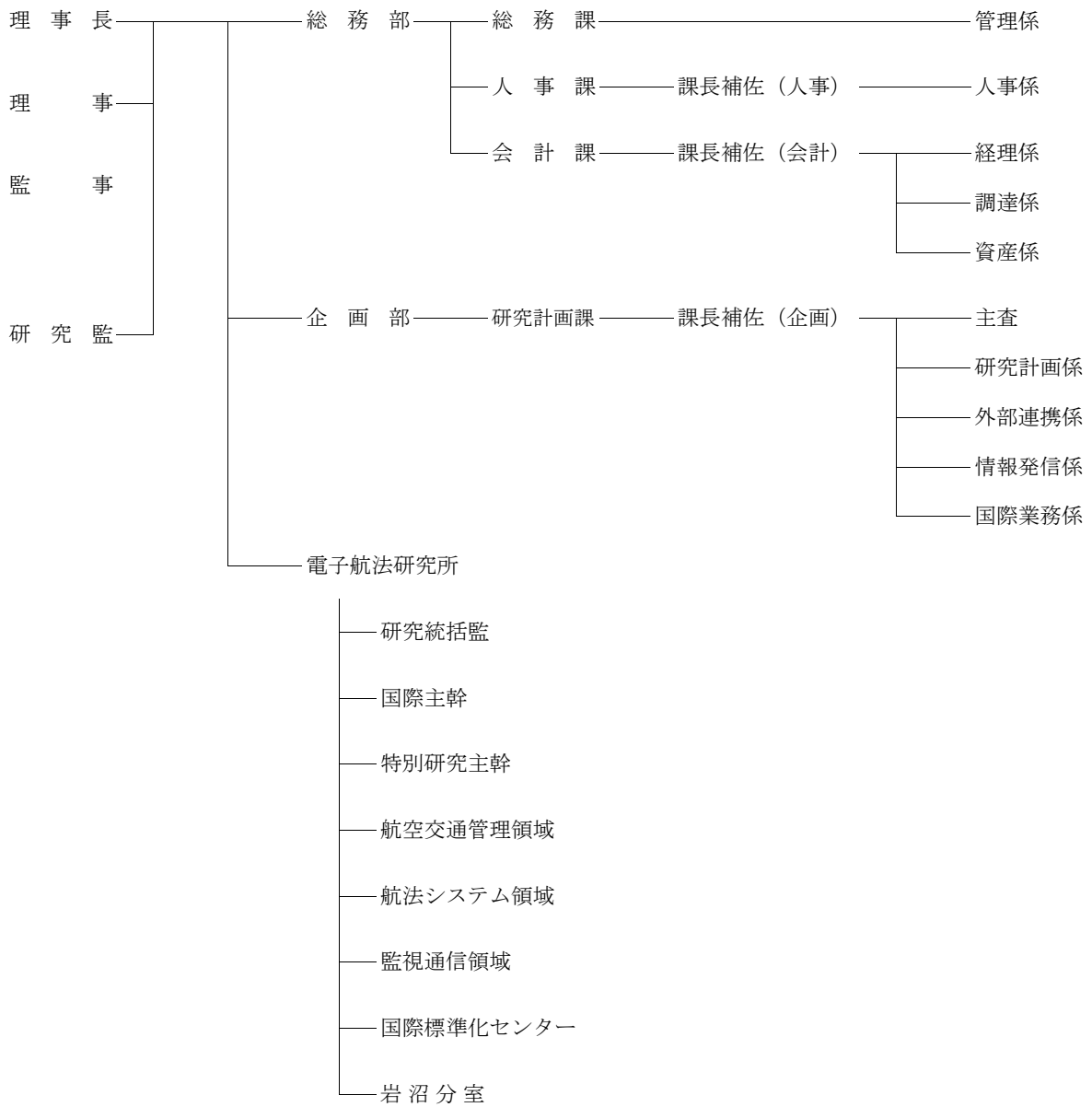
注1：（ ）内は、空港整備特別会計で内数。平成20年度以降は区分経理の廃止に伴い、特別会計の予算は一般会計へ移管された。

注2：平成18年度以降は年度末現在の職員数を掲載

注3：役員の数には含まない

## 2 組織 (令和3年3月31日現在)

※ 海上・港湾・航空技術研究所組織のうち、電子航法研究所に関する組織のみ掲載



## 3 役職員数

	一般勘定
理事	1
研究統括監	1
事務職	13
研究職	42
計	57

(令和3年3月31日現在)

※ 役職員数には監事は含まない



## 4 所 在

	所 在 地	電 話
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	0422-41-3165
岩沼分室	〒989-2421 宮城県岩沼市下野郷字北長沼 4	0223-24-3871

## 5 建 物

建 物	建 ・ 延 面 積	竣工年度
1号棟	鉄筋コンクリート2階建, 建面積390㎡, 延面積780㎡	昭和47年度 平成19年度改装 平成22年度改装
2号棟 (ATCシミュレーション実験棟)	鉄筋コンクリート2階建, 建面積569㎡, 延面積1,092㎡	平成12年度
3号棟	鉄筋コンクリート2階建, 建面積232㎡, 延面積465㎡	昭和43年度 平成22年度改装
4号棟	鉄筋コンクリート2階建, 建面積490㎡, 延面積980㎡	昭和53年度 平成23年度改装
5号棟	鉄筋コンクリート2階建, 建面積630㎡, 延面積1,160㎡	昭和63年度 平成22年度改装
6号棟	鉄筋コンクリート2階建, 建面積355㎡, 延面積653㎡	平成22年度
仮想現実実験棟	鉄筋コンクリート造一部鉄骨造2階建, 建面積480㎡, 延面積703㎡	平成6年度
電波無響室	鉄筋コンクリート2階建, 建面積590㎡, 延面積687㎡ 内装寸法: 奥行32m, 幅7m, 高さ5m	昭和45年度 昭和48年度増築 平成13年度改装
アンテナ試験塔	鉄筋造, カウンタポイズ直径25m, 奥行・幅13m, 高さ19.5m 実験準備室: 鉄筋造一部中2階建, 建面積160㎡, 延面積203㎡	昭和52年度 昭和53年度
岩沼分室建屋	鉄筋コンクリート2階建, 建面積287㎡, 延面積497㎡ 屋上にレーダー塔を設置	昭和54年度 平成24年度改修
岩沼分室格納庫	鉄骨造平屋建, 面積825㎡	昭和55年度所属換 平成24年度改修

(令和3年3月31日現在)

# 第 2 部 試験研究業務



# 1 航空交通管理領域

## I 年度当初の研究計画とそのねらい

令和2年度における研究は、社会・行政ニーズや技術分野の将来動向を考慮し、重点研究、指定研究、基盤的研究、萌芽的研究および競争的資金として承認された下記の項目を計画した。

1. フリールーティング空域における軌道ベース運用に関する研究
2. 気象要因による運航制約条件を考慮した軌道調整に関する研究
3. 航空機の拡張型到着管理システムの研究
4. ハザードの定量的評価によるリスク評価手法の研究
5. 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
6. 無人機の円滑運行のためのシミュレーション技術の構築に関する研究
7. 航空用データの管理手法に関する基礎研究
8. 進入時の運航性能向上に関する研究
9. 航空機の降下方式における機上・地上の機能向上に関する研究
10. 空港面の運用に資する交通分析とシミュレーション
11. 航空交通データの分析への機械学習の適用
12. 大規模災害時における海上・航空輸送に関わるボトルネック解析
13. 離陸機の運用最適化に関する研究
14. 航空管制官のための意思決定支援システムに関する研究

1から2は重点研究、3から5は指定研究、6から10は基盤的研究、11は萌芽的研究、12から14は競争的資金による研究である。

1は福岡飛行情報区（FIR: Flight Information Region）の高高度空域にフリールーティング運用コンセプトを提案する研究である。

2は悪天の航空機運航、航空交通への影響および空域容量に対する制約を可視化・定量化し、航空交通流管理および航空機の運航管理の高度化をめざす研究である。

3は将来の羽田空港への到着交通流を対象とし、航空機の到着順序づけと到着時刻のスケジューリングを自動化して管制官を支援する拡張型到着管理システムを提案する研究である。

4は提案するハザード解析手法の改良、ハザード解析支援ソフトウェアの構築および有効性の確認や定量的安全性評価に関する研究である。

5は航空交通管理における容量管理のために、自動化システムや管制支援機能がもたらす航空路管制の業務作業量を定量化する研究である。

6は将来、無人機運用の需要が増加すると考えられる低高度か

ら中高度における無人機と有人航空機の融合した安全かつ効率的な交通管理コンセプトにつなげるため、無人機・有人航空機の統合シミュレーション環境構築に必要な技術を検討する研究である。

7は航空交通データを利用した所内の様々な研究をより効率的に進めるため、電子航法研究所に航空局から提供されている航空交通に関する各種データを対象として、データ管理に関わる課題を抽出し今後の管理方法を提案する研究である。

8は進入時の運航に焦点をあて、羽田空港における滑走路選択効率向上、パイロットの不安定進入の要因推定、方式設定の自動化による効率向上に関する研究である。

9は継続降下運航（CDO: Continuous Descent Operations）の一種であるfixed-FPA降下方式の設計方法を確立し、空地連携を達成するために必要とされる機能要件を定義し、運用構想をまとめる研究である。

10はスポットの空き時間や空港レイアウトの制約を考慮した出発時刻管理の方策を提案し、空港運用の効率化をめざす研究である。

11は航空交通データの分析への機械学習の適用の一例として、飛行時間の予測と到着機の順序付けのモデル化を行い、機械学習の適用が有効な課題の条件を考察する研究である。

12は大規模災害時に発生し得る輸送システムの混乱について、ボトルネックを事前に発見できるようにシミュレーションを実施し、課題抽出を行う研究である。

13は離陸機における運用に焦点を当て、燃料消費量の削減方策を検討する研究である。

14は機械学習を利用して管制負荷を定量化し、管制官の意思決定を支援する研究である。

## II 試験研究の実施状況

1の「フリールーティング空域における軌道ベース運用に関する研究」では、福岡FIRと仁川FIRにおける初期的なフリールート空域（FRA: Free Route Airspace）運用コンセプトを立案した。また、軌道最適化アルゴリズムや便益バランス方式を改良した。

2の「気象要因による運航制約条件を考慮した軌道調整に関する研究」では、気象レーダーで観測されたエコー強度に基づく悪天回避経路の生成方法を検討するとともに、気象情報や航空交通情報などを表示する研究用評価システムの開発を進めた。

3の「航空機の拡張型到着管理システムの研究」では、拡張型到着管理システム（E-AMAN: Extended-Arrival Management）設計条件の有効性を定量的に検証した。

4の「ハザードの定量的評価によるリスク評価手法の研究」では、ハザードの定量的評価によるリスク評価手法の改良や、洋上航空路およびアカラコリドーの安全性解析を行った。

5の「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」では、管制支援情報や支援機能を調査し、定量化手法を検討した。また、管制業務作業量の計測手法の検討や管制支援機能のシミュレータ開発に着手した。

6の「無人機の円滑運行のためのシミュレーション技術の構築に関する研究」では、新たな飛行体の運航が低高度から中高度に及ぼす影響の調査や、低高度から中高度における無人機運行の部分的シミュレーションを行った。

7の「航空用データの管理手法に関する基礎研究」では、航空局のシステム移行に伴い変更となったデータから、各研究課題が必要とするデータを整理・作成するとともに、所内のデータ管理方法を整備した。

8の「進入時の運航性能向上に関する研究」では、羽田空港における滑走路選択の柔軟性に関するシミュレーション、不安定進入の要因推定、方式設定の自動化による効率向上を行った。

9の「航空機の降下方式における機上・地上の機能向上に関する研究」では、fixed-FPA降下の運航性能評価解析やfixed-FPA降下における到着管理アルゴリズムの開発、降下方式における環境負荷推定モデルの構築を行った。

10の「空港面の運用に資する交通分析とシミュレーション」では、局所的な交通状況が滑走路の順序・間隔付けに及ぼす影響の分析や、空港レイアウトが順序・間隔付けに及ぼす影響のシミュレーションを行った。

11の「航空交通データの分析への機械学習の適用」では、機械学習の複数の手法による飛行時間予測の比較や着陸のための順序間隔付けを含む飛行時間の予測、深層学習の画像認識による到着順序の予測を行った。

12の「大規模災害時における海上・航空輸送に関わるボトルネック解析」では、南海トラフ地震において大きな被害が想定される静岡県、高知県を対象に、大規模災害時における空港面運用シミュレータのフレームワークの検討と大規模災害時における空港面運用シミュレータの開発を行った。

13の「離陸機の運用最適化に関する研究」では、TOBT（スポット離脱可能時刻）の精度によるTSAT（スポット出発承認時刻）設定効率への影響やと上昇経路の最適化について検討した。

14の「航空管制官のための意思決定支援システムに関する研究」では、機械学習のためのデータを検討し、シミュレーション環境の構築に着手した。

本年度は、上記の14件の研究に加えて、以下に示す3件の受託業務を行った。これらは、上記の研究及びこれまで

の研究等で蓄積した知見や技術を活用したものである。

- (1) 洋上空域における衝突危険度推定に係る支援作業
- (2) 2020年度将来の航空交通システムに関する長期ビジョンの実現のための計画の策定等に関する調査分析支援
- (3) 関西空域における最適な業務形態等及び管制処理能力の算出に関する調査に関する検討支援

### III 研究の成果と国土交通行政、産業界、学会等に及ぼす効果の所見

当領域が実施している研究の成果は、新たな航空交通システムの導入や技術基準、運用基準の策定等への活用が期待できるものであり、国土交通行政と深く関わっており、航空局の主導する「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン(CARATS)」でも積極的に成果を発信している。特に重点研究の成果は航空行政に直接に反映されるもので、社会的貢献に繋がっている。

「フリールーティング空域における軌道ベース運用に関する研究」では、ICAO ATMRPP（航空交通管理の要件・能力検討パネル）会議に参加し、TBOやFF-ICEの議論に参加している。また、IPACG（日米太平洋航空管制調整グループ会議）でも洋上経路に関する検討に参加している。

「航空機の拡張型到着管理システムの研究」では、ASASを利用して前後機の間隔を確保するIM（Interval Management）のICAO国際規格策定を担当し、本研究成果をICAO監視マニュアル（Doc 9994）に反映した。

「ハザードの定量的評価によるリスク評価手法の研究」では、ICAO SASP（空域安全パネル）会議に参加し、短縮時間間隔の衝突危険度について、計算・報告をしている。

「無人機の円滑運行のためのシミュレーション技術の構築に関する研究」ではICAO RPASP（遠隔操縦航空機システムパネル）会議やJUTM、ISO TC20 SC16等において、有人機と小型無人機や空飛ぶクルマとの安全運航に関する議論に参加している。

これらの成果は、ICAO、IPACGなどの国際会議、日本航空宇宙学会、電子情報通信学会、日本航海学会、米国航空宇宙学会（AIAA）などの関連学会で積極的に発表している。

（航空交通管理領域長 福島幸子）

## フリールーティング空域における軌道ベース運用に関する研究【重点研究】

担当領域 航空交通管理領域

担当者 ○ブラウン マーク，平林 博子，ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル，  
虎谷 大地，村田 暁紀，蔭山 康太，青山 久枝，長岡 栄

研究期間 平成 29 年度～令和 2 年度

### 1. はじめに

航空交通管理（ATM: Air Traffic Management）では、国際交通量の増加に対して、安全性や定時性をはじめとする航空交通の効率を保つため、軌道ベース運用（TBO: Trajectory-Based Operations）概念が提案されている。TBO において、航空機は水平位置、高度と時刻で定義されている 4 次元の計画軌道に基づいて運航される。TBO には、各フライトの最大便益を図り、運航者が希望する軌道での飛行を可能とするために、飛行軌道の制限を少なくする「フリールーティング」が有効であり、混雑時の空域や空港での資源を効率よく割り当てるために「協調的意思決定」（CDM: Collaborative Decision Making）が必要である。このような、フリールーティングと CDM を取り入れた TBO に基づいた軌道管理方式を高高度空域に提供するコンセプトが必要である。

### 2. 研究の概要

本研究の目的は、フリールーティング及び CDM を取り入れた軌道ベース運用方式を福岡飛行情報区（FIR: Flight Information Region）の高高度空域に適用することを想定して、戦略的軌道管理コンセプトを提案するものである。福岡 FIR においては、国際交通量が継続的に増加する傾向にあり、FIR を通過する複数の軌道を「エンド・ツー・エンド」で管理する必要がある。また、軌道間干渉の解決や空港混雑時の交通流調整のために軌道変更が必要な場合は、各関係者への影響を客観的に示すパフォーマンス指標を用い、各関係者への利益・不利益を提示し評価し均衡を保つために CDM を支援する必要がある。本研究では、このフリールーティングのコンセプトと必要な要素技術を調査し、適用性の向上を目指す。

最終年度である本年度では以下を実施した。

- ・運用コンセプト提案
- ・軌道最適化アルゴリズムの改善
- ・軌道の ATM パフォーマンス指標の取りまとめ
- ・便益バランス方式の提案
- ・国際会議への活用

### 3. 研究成果

#### 3.1 運用コンセプト提案

韓国航空大学との共同研究により、仁川 FIR 及び福岡 FIR（レーダー空域及び洋上空域）における初期的なフリールート空域（FRA: Free Route Airspace）運用コンセプトを立案した。

本研究においては、初期 FRA として日本発着国際便及び FIR を通過する上空通過便に焦点をあてた。日本国内便は、特に主要空港間においてターミナル空域間の直行経路に近い経路が計画可能となっており、また交通量が多い区間においては双方向運用が実施されており効率的な運用がされている。なお、国内便は飛行時間が短いため、巡航フーズは比較的短く、到着管理とターミナル空域における最適化などはフリールーティングより効果的な運効率化方策であると考えられる。

韓国航空大学との共同研究により立案したコンセプトを基に、フリールート空域コンセプトでは、交通量に応じた段階的な FRA 導入を想定している。初期的なフリールート空域運用コンセプトを図 1 に示す。

1. 初期段階として、空域の制限と交通量が少ない運用環境（19 時～07 時（日本時間））を想定した。このような時間帯の段階的な FRA 導入はヨーロッパにも使われている。FRA の有効な時間帯を昼に延長するため、FUA（Flexible Use of Airspace）による空域割り当てが FRA の便益を与えるために効果的である。
2. FRA 空域の高度は FL310 以上を想定した。日本の高高度セクターは FL335 以上だが、多くの北米（アラスカとハワイを含む）行きの仁川国際空港発便は、福岡 FIR 境界線に着く時にまだ FL335 に上昇できないことからである。より多くの運航者に FRA の便益を与えるため、FRA の最低高度を FL310 に設定した。
3. 仁川 FIR との境界線上に最短飛行距離を可能とするウェイポイントの追加、及び洋上管制空域との境界線上において CNS/ATM の性能向上を有効に利用するよう横方向の短縮間隔を活用した空域／経路デザインを作成した。

4. 仁川 FIR/福岡 FIR 境界線及び洋上管制空域の入出域点間において直行経路による飛行が可能であると仮定し、仁川国際空港と北米間の航空交通流を対象に分析を行った。なお、洋上管制空域では監視・通信性能が国内空域と異なるため、本コンセプトでは入出域点のひとつを洋上管制空域の境界線上とした。
5. グリッド状に構成されたウェイポイントの提案により UPR (User Preferred Route) の効率的な生成を可能とした。
6. 洋上空域の入域において、上空通過便と日本出発便の間に巡航高度と入域時間の競争が発生する。現在の ATM 方式は First Come-First Served であるため、干渉が発生する場合日本出発機が遅延される、或いは希望の巡航高度より非効率的な巡航高度が割り当てられている。本研究では、ATM システムの全体効率を

考慮しより公平に便益を割り当てるため、最適トレードオフを計算する方法を提案した。将来にて CDM には利用できると考える。

7. FRA において航空管制セクターの典型的な交通流パターンが少なくなるため、航空管制の自動化ツールが必要となる。本研究において、軌道情報から空域の複雑性を計算する方式を開発した。

得られた結果から、年間 269,000NM の経路短縮効果が見込まれることが明らかになった。

次期研究においては、本コンセプトの適用範囲を拡大することにより、空域使用者の便益、航空管制の作業負荷への影響、及び国境を越えたシームレスな航空交通流管理 (ATFM) を実施予定である。



図1 仁川 FIR 及び福岡 FIR のフリールーティング空域 (FRA) 提案

### 3.2 軌道最適化アルゴリズムの改善

空域/経路構成の提案及び評価において、空域使用者

(運航者) が要求する現実的な経路を生成する必要がある。運航者指向飛行経路を生成するため、グラフ探索理論に基づく経路生成ツールを開発した。初期段階のアル

ゴリズムでは、巡航高度の選択肢は一つに限られていたが、本年度の機能追加により航空機の性能を考慮したステップクライムに対応可能となるようツールを改良した。本ツールは、次の研究などにも活用を予定する。

### 3.3 軌道の ATM パフォーマンス指標の取りまとめ

本研究で提案した「管制難度」指標は、一定の空域において航空機の計画軌道情報とレーダー航跡情報に基づいて時間の変動とともに航空管制官が感じる空域の管制難易度を計算し、0~1 の間の値で表す。管制難度の値を調整するため、実験で交通シナリオを航空管制官に見せ、交通状態の認識を測定した。管制難度の 0.25 閾値では、航空管制官が潜在的な干渉を検出し、0.5 の閾値になると航空管制官が干渉を解決するために指示を出す。この管制支援システムへの適用の可能性について調査を行い、とりまとめ、及び公表した。最終的なとりまとめの成果は研究所報告として公表される予定である。

### 3.4 便益バランシング方式の提案

NOPAC (North PACific: 福岡 FIR とアンカレッジ洋上 FIR を結ぶ 5 本の平行固定経路) から北米に向けた本邦出発便と上空通過機の平等性を保った巡航飛行を実現するため、遺伝的アルゴリズムを用いた便益バランシング手法を昨年度提案した。本年度は、前年度開発したアルゴリズムを多目的最適化手法として拡張した。複数のシミュレーションシナリオにおいてアルゴリズムを適用した結果、本邦出発機の遅延時間及び、要求高度と巡航高度の最小化によるトレードオフ解集合が獲得できることが明らかになった。ただし、上空通過機と本邦出発機の割合や機種、単位時間に対する航空機数の違いによりトレードオフ解集合が獲得出来ないケースが見られた。次期研究では解集合が獲得できないケースにおいても対応可能なように手法を改良するとともに、本研究成果の実際の運用への活用方を模索していく。

### 3.5 国際会議への活用 : ICAO ATM RPP, IPACG

ATMRPP (Air Traffic Management Requirements and Performance Panel) において、航空機の精密な軌道情報の通信・調整を可能とする次期の飛行計画である FF-ICE/R1 (Flight and Flow Information for a Collaborative Environment – Release 1) の基準作成に貢献した。また、IPACG (Informal Pacific ATC Coordinating Group) において、米国連邦航空局と日本の航空局が毎日計算する PACOTS (Pacific Organized Track System) 経路の航空機型

式の前提条件と気象予報の予測時間の影響を分析して、結果を発表した。

### 4. おわりに

令和 2 年度は、上空通過機を集中した福岡 FIR 上空フリールーティング空域の設計案を立案し、課題を洗い出した。本研究で作成した ATM パフォーマンス指標、最適経路作成ツールを次の研究に活用する予定である。

### 掲載文献

- [1] Hirabayashi, H., Simulation Study for the Examination of the Operational Effect of the Reduced Separation Application between in Ocean Control Airspace, IPACGG PM/19, April 2017.
- [2] ブラウン マーク, 平林 博子, 福岡 FIR における 2013 年から 2030 年の空港需要予測方法, 電子航法研究所研究発表会 2017 年.
- [3] 平林博子, ブラウン・マーク, 福島幸子, 洋上管制運用効率化のための経路設計に関する考察, 電子航法研究所研究発表会 2017 年.
- [4] Brown, M., and Hirabayashi, H. An Analysis of Major Cross-Border Air Traffic Flows in the Fukuoka FIR, APISAT 2017.
- [5] Brown, M., and Hirabayashi, H., An Analysis of ATM Resource Demand in Fukuoka FIR for 2030, Trans. JSASS Aerospace Tech Japan, Vol. 15, No. APISAT-2016, 2017.
- [6] Nagaoka, S., Hirabayashi, H. and Brown, M., Tuning the Temporal Parameter of ATC Difficulty Metrics Using Controllers' Cognitive Thresholds and Trajectory Change Point Information, APISAT2017.
- [7] 長岡栄, 平林博子, ブラウン マーク, 航空管制における航空交通の複雑性 指標複雑性の指標について, 日本航海学会 航空宇宙研究会, 2017 年.
- [8] 長岡栄, 平林 博子, ブラウン マーク, 管制官の近接認知閾値と飛行計画を用いた管制難度指標の比較, 電子情報通通信学会 信学技報 SSS2017-8.
- [9] Nagaoka, S. and Brown, M., Modeling an Air Traffic Control Difficulty Index Based on a Distance in Time-Space Domain of Aircraft Trajectory, IFORS2017.
- [10] Nagaoka, S. and Brown, M., Predicting Trajectories with Course Change Points for Calculating Proximity-based Air Traffic Control Difficulty Indices, 電子情報通通信学会 信学技報 SANE2017-79.
- [11] 航空交通管理(ATM)の性能指標に関する調査, 電子

- 情報通信学会 信学技報 SANE2017-103.
- [12] 長岡栄, 平林 博子, ブラウン マーク, 航空交通管理における航空交通の複雑性指標について, 日本航海学会誌「NAVIGATION」204号2018年4月.
- [13] 福岡 FIR NOPAC空域における飛行高度分布, IPACG PM/21, 平成30年3月.
- [14] Hirabayashi, H., Data Analysis of RNP 4 Capable Aircraft Ratio in NOPAC Airspace in Fukuoka FIR, IPACG PM/21, 平成30年3月.
- [15] ブラウン マーク, 平林博子, 福岡 FIR と隣接 FIR 間の交通流解析, 電子航法研究所研究発表会2018年
- [16] 長岡栄, ブラウンマーク, 航空管制における航空機の飛行軌道の予測方法について, 日本航海学会 AUNAR 2018.
- [17] Nagaoka, S., Hirabayashi, H. and Brown, M., Towards Automatic Suggestions of Aircraft Trajectory Change for Mitigating High Traffic Complexity Based on an Air Traffic Control Difficulty Index, EURO2018, July 2018.
- [18] Wickramasinghe, N. K., A Study on the influence of Weather Prediction Error upon DARP Operational Benefits Evaluation, IPACG/44 IP/13, San Diego, August 2018.
- [19] 平林博子, ブラウン マーク, ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル, 北太平洋上空域における効率的な飛行経路検討のための可変経路の傾向分析及び分類, 日本航空宇宙学会論文集 Vol. 67, No. 2, pp. 49-56, 2019年.
- [20] Brown, M., Lee, K., and Hirabayashi, H., Towards a Concept of Free Routing in the Northeast Asia/Pacific Region, in Proc. APISAT2018.
- [21] Brown, M., Hirabayashi, H., and Wickramasinghe, N. K., A Graph Search-Based Trajectory Optimizer for Practical Wind-Optimal Trajectories, in Proc. APISAT2018.
- [22] Wickramasinghe, N. K., Nakamura, Y., Hirabayashi, H. and Brown, M., BADA Application in Performance Assessment of Dynamic Airborne Reroute Procedure (DARP) Operations, BADA User Conference 2018.
- [23] Nagaoka, S., Hirabayashi, H. and Brown, M., A Concept of Automatic Trajectory Modification for Mitigating Complex Air Traffic Situations with a High Difficulty Index Value, 電子情報通通信学会 信学技報 SANE2018-80.
- [24] 長岡 栄, ブラウン マーク, デラエ ダニエル, 入力データの不確定性の航空管制難度指標値への影響, 電子情報通信学会 信学技報 SANE2018-104.
- [25] ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル, 航空機の運航における衛星搭載 ドップラーライダーの有効性検証技術支援, 電子航法研究所 報告書 (受託研究)
- [26] 平林博子, ブラウン マーク, NOPAC 経路及び PACOTS 経路の再編等に関する要件調査の技術支援, 電子航法研究所 報告書 (受託研究) .
- [27] Nagaoka, S., Brown, M. and Delahaye, D., Analyses on Error Propagation Characteristics of a Mathematical Model for Estimating Air Traffic Control Difficulty, EURO2019.
- [28] 長岡 栄, ブラウン マーク, モデルパラメータの感度解析と入力誤差の影響—航空管制の難度指標による例—, 日本航海学会 AUNAR 2019.
- [29] Brown, M. and Hirabayashi, H., A Simulation Study of Alternative Route Structures for NOPAC Airspace Reconfiguration, in Proc. APISAT 2019.
- [30] Nagaoka, S., Hirabayashi, H. and Brown, M., Towards Automatic Trajectory Modification for Reducing Air Traffic Complexity Using an ATC Difficulty Index, Proc. EIWAC 2019.
- [31] Brown, M., Brevik, K. and Liang, D., Flight Data Publication Service Use Cases and Requirements, ICAO ATMRPP WG/38.
- [32] 長岡 栄, ブラウン マーク, 管制難度値の推定のための航空機軌道と飛行計画情報の関連付方法の一考察, 電子情報通信学会 信学技報 SANE2019-94.
- [33] 長岡 栄, ブラウン マーク, 管制難度指標による近接状況の回避アルゴリズムの一考察, 第58回飛行機シンポジウム講演集, 2020.
- [34] Hirabayashi, H. and Brown, M., Evaluation of PACOTS, IPACG/46.
- [35] 長岡 栄, ブラウン マーク, 管制難度指標による近接状況の回避アルゴリズムの一考察, 第58回飛行機シンポジウム講演集 JSASS-2020-5169.
- [36] Lee, K., Brown, M., Hirabayashi, H., Kim, H. Y., Murata, A., Kim, H. W. and Park, S. E., An Analysis of Candidate Free Route Air Traffic between Incheon Airport and North America via Fukuoka FIR, 第58回飛行機シンポジウム, 2020年.
- [37] Brown, M., Lee, K., Hirabayashi, H., Kim, H. Y., Murata, A., Kim, H. W. and Park, S. E., A Free Routing Concept for Incheon FIR and Fukuoka FIR, 第58回飛行機シンポジウム, 2020年.



- [38] Brown, M., Hirabayashi, H., Murata, A., Lee, K., Kim, H. Y., Kim, H. W., and Park, S. E., 福岡 FIR および仁川 FIR におけるフリールーティング概念案について, CARATS Adhoc TBO 会議, 2021 年 1 月.
- [39] Nagaoka, S., Brown, M., and Delahaye, D., Effects of Input Data Uncertainties on an Air Traffic Control Difficulty Index, IECICE Transactions on Communications, 2021 年.
- [40] S. Nagaoka, H. Hirabayashi, M. Brown: Towards Automatic Trajectory Modification for Reducing Air Traffic Complexity Using an ATC Difficulty Index, Springer, Lect. Notes Electrical Eng., Air Traffic Management and Systems IV, Vol. 731, 2021.

## 気象要因による運航制約条件を考慮した軌道調整に関する研究【重点研究】

担当領域 航空交通管理領域  
担当者 ○瀬之口 敦, 平林 博子, 中村 陽一, 青山 久枝, 江口 昌広  
研究期間 令和2年度～令和5年度

### 1. はじめに

協調的な運航前の軌道調整を実現するにあたっては、天気図等から悪天域を読み取り、航空機運航や航空交通に及ぼす影響および空域容量に対する制約を判断する高度な能力が要求される。これを支援するために、現状では航空交通気象センターから悪天に係る一般的な気象情報とともに航空交通気象時系列予報が提供されている。しかしながら、それでもまだ航空機運航や航空交通に及ぼす影響および空域容量に対する制約を直感的かつ定量的に把握することは容易ではない。航空交通気象時系列予報等の気象情報に対して航跡データや航空交通流制御実績データ等から求めた航空機運航や航空交通に及ぼす影響との相関を調べる等、飛行経路の選択や航空交通流制御の実施判断に資する気象情報の意味付けを行う研究開発が必要とされている。

### 2. 研究の概要

本研究は4ヵ年計画であり、その目的は悪天の航空機運航、航空交通への影響および空域容量に対する制約を可視化・定量化し、航空交通流管理および航空機の運航管理の高度化を図ることである。

第1年次の令和2年度においては、以下の3項目を実施した。

- ①航跡データ、気象データ、航空交通流制御関連データの収集および分析
- ②国内外の動向調査および運用判断指標候補の評価
- ③研究用評価システムの開発

### 3. 研究成果

#### 3.1 航跡データ、気象データ、航空交通流制御関連データの収集および分析

気象レーダーで観測されたエコー強度に基づく悪天回避経路の生成およびその影響の解析を実施した。

図1に、気象情報から飛行制約条件への変換例として、レーダーエコーから飛行制約への変換例を示す。悪天を回避する飛行軌道の生成にあたっては、与えられた気象情報（図1の左図）から悪天の強度を抽出し（図1の中央図、ここでは2値化を実施）、飛行の制限される領域として同等の強度をまとめて指定する処理（図1の右図、ポリゴン化を実施）が必要であり、それぞれの処理における妥当な閾値や高度化を検討することが今後の課題である。

図2に、気象関連の飛行制約条件を用いた飛行軌道の生成の例として、実際に悪天回避経路を生成した結果を示す。黒の破点線は飛行制約を加味しない場合の燃料消費量最小となる飛行経路、桃色の実点線は飛行制約を加味した場合の悪天回避経路を表す。飛行制約に関しては前述の方法で求め、桃色の実線で囲む領域として示した。また、飛行軌道の生成においては、その領域を完全に回避した上で燃料消費量最小となる飛行軌道を求めた。

2値化やポリゴン化における閾値の違いにより、飛行の制限される領域の大きさは異なる。2値化の閾値を大きく、ポリゴン化の閾値を小さくした場合は図2の上図のように飛行の制限される領域は小さく、その影響も小さい。逆に、2値化の閾値を小さく、ポリゴン化の閾値を大きくした場合は図2の下図のように飛行の制限される領域が大

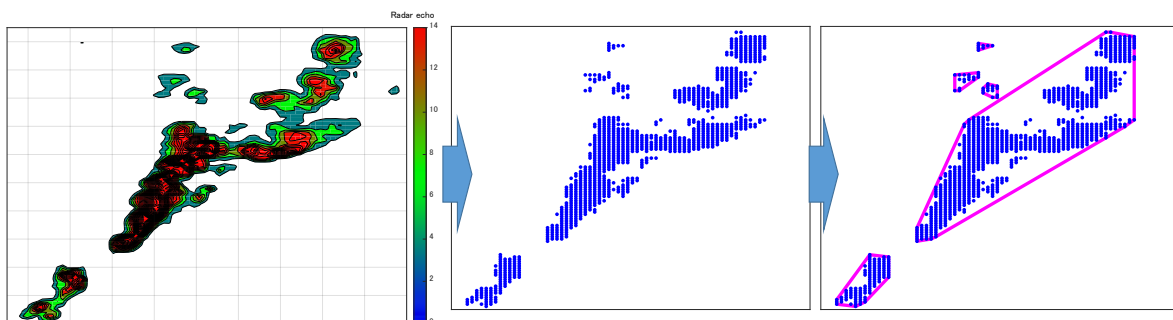


図1 レーダーエコーから飛行制約への変換例

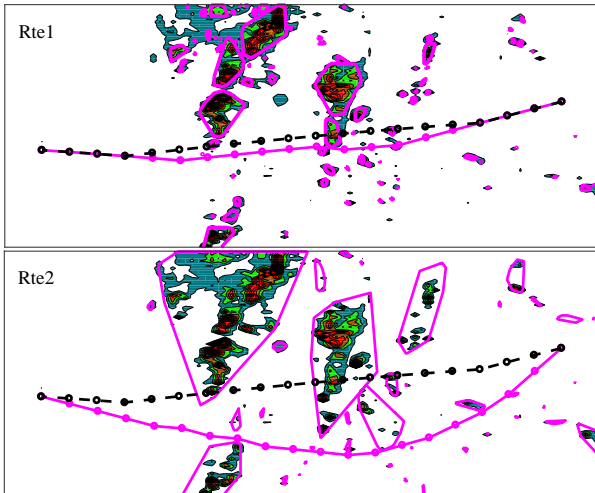


図2 悪天回避経路の生成例

きくなる。この場合、生成される飛行軌道は実際の悪天域に対して余裕のある回避経路となる。このように、前述の閾値によって変化する飛行制約条件や飛行軌道の生成に用いる評価関数の設定により、様々な飛行軌道が得られることが分かった。今後は、飛行制約とその回避に対する運航者の嗜好を考慮した悪天回避モデルの検討を継続する。

以上より、気象情報から飛行制約条件への変換およびそれを用いた飛行軌道の生成について、国内空域への適用を想定した具体例を交え、従来は単体で検討されがちであった気象情報の変換および飛行軌道の生成を一連の流れと

して処理、評価する手法を提案した。

### 3.2 国内外の動向調査および運用判断指標候補の評価

国内の動向について、航空路管制セクタにおける悪天対応の現状を把握するとともに、適正交通容量値への定量的な変換に関する解析手順を検討した。また、研究成果の還元（プロダクトイメージ）について航空局および気象庁の関係各位と意見交換を実施し、運航前の軌道調整に係る現行の運用状況および高度化の方向性や優先度をより明確に出来た（関係者間での共通認識が促進された）。ならびに、研究成果を関係者の参加する CARATS の場で報告する等、CARATS 施策である運航前の軌道調整に係る高度化の検討に貢献した。

### 3.3 研究用評価システムの開発

飛行計画経路を読み込み、実航跡および気象レーダーのエコー強度と同時に表示して解析できるように研究用評価システムを改修した（図3）。図3の白色の航空機シンボルは航空機位置、赤線は実航跡を示す。また、白線は飛行計画経路、カラースケール領域は全国合成レーダーGPVのエコー強度を示す。

また、各飛行経路における交通流密度の表示機能の追加（図4）および各機能のモジュール化やバッチ処理を可能とするプログラム改良を実施した。図4の線分は飛行計画

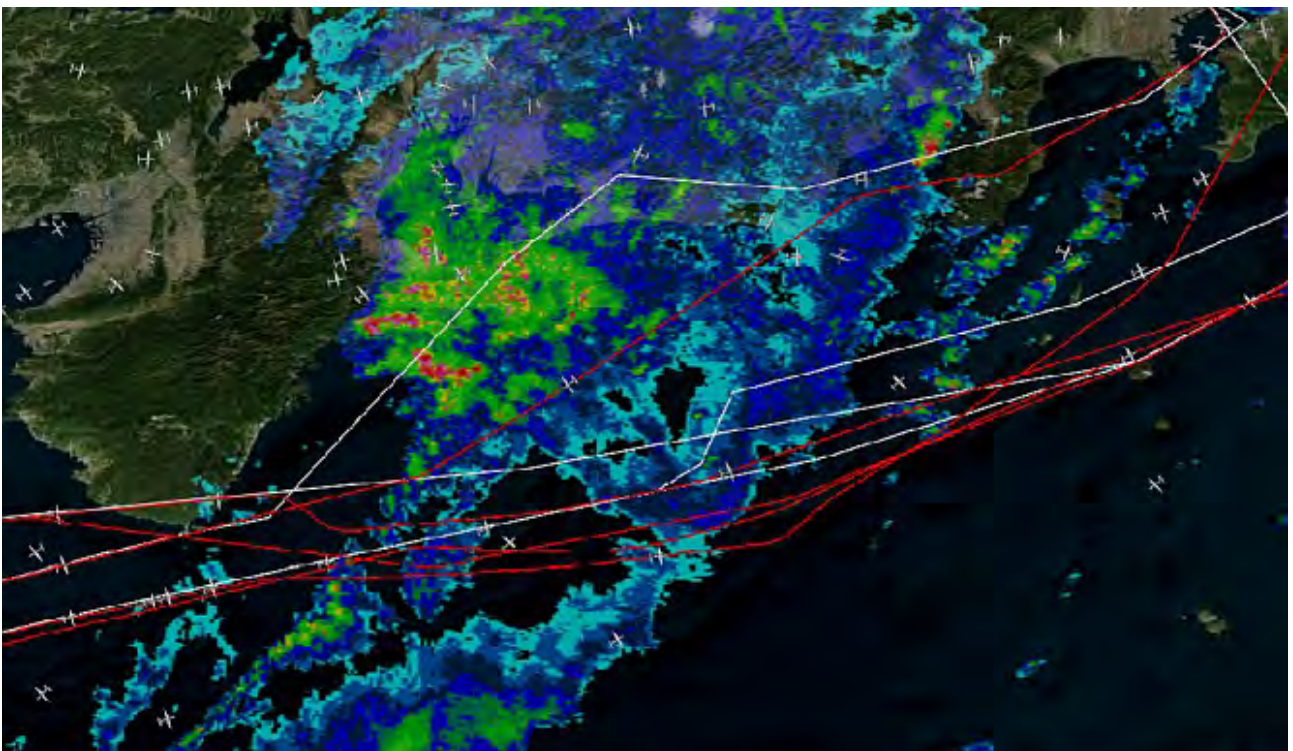


図3 飛行計画経路、実航跡および気象レーダーのエコー強度の同時表示例

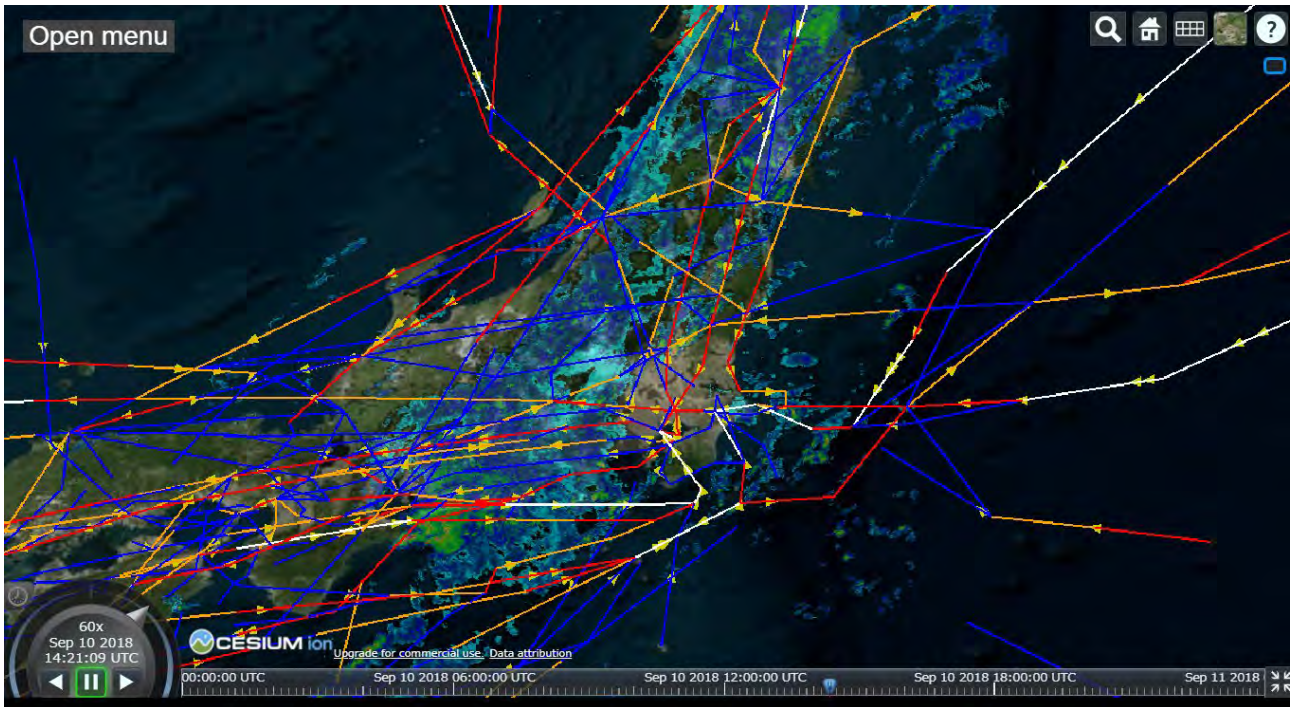


図4 各飛行経路における交通流密度の表示機能例

データから求めた飛行経路の交通流密度を表し、青く橙く赤く白の順で密度の大きい状態を示す。矢印シンボルは航空機位置、カラースケール領域は全国合成レーダーGPVのエコー強度を示す。

前者により悪天回避の予測と実績の比較解析が容易となり、また後者により気象以外の軌道調整要因である交通流の高密度箇所を気象状況と同時に把握し、分析することが可能となった。今後は、研究用評価システムを用いた事例解析を実施することで、悪天回避モデルの検討および運用判断指標候補の評価を促進する。

#### 4. まとめ

次年度は、航跡データと気象データを用いた解析について、事例を蓄積するとともに、他の気象データへの応用や航空交通流制御関連データを用いた解析への拡張を行う予定である。特に、気象情報から飛行制約条件への変換に関して、一般用のMSMと水平方向の格子や垂直面の間隔、含まれる要素が異なる航空用MSMの利用を検討する。また、国内外の動向調査を継続するとともに、飛行計画軌道／セクタと悪天域（飛行困難空域）の重なり具合および重なる部分に対してのデビエーション割合を過去のデータより統計的に求める予定である。加えて、研究用評価システムの操作性向上や気象予報データも取り扱えるように機能向上を図る予定である。

#### 掲載文献

- [1] 国土交通省航空局安全部航空事業安全室，“TCAS RAによる回避操作の状況及び対応,” 航空安全情報分析委員会, 2020年6月.
- [2] 中村陽一, 瀬之口敦, 平林博子, “悪天回避経路に関する研究の紹介,” 航空無線 105号 (2020秋号), 2020年9月.
- [3] 中村陽一, 瀬之口敦, 平林博子, “軌道予測の高精度化に向けた悪天回避経路生成に関する検討,” 2020年(第20回)電子航法研究所研究発表会, 2020年10月.
- [4] 瀬之口敦, 平林博子, 中村陽一, “CARATS 施策 EN-6 および OI-15 関連の ENRI 研究開発の進捗報告,” CARATS 第41回 ATM 検討WG/第42回航空気象検討WG 合同会合, 2020年10月.
- [5] 武里江子, 上野誠也, 瀬之口敦, 平林博子, 虎谷大地, “神戸空港の容量拡大に向けた進入復行経路の検討,” 第58回飛行機シンポジウム, 2020年11月.
- [6] 中村陽一, 瀬之口敦, “軌道予測の高精度化に向けた悪天回避経路生成に関する検討,” 第58回飛行機シンポジウム, 2020年11月.

航空機の拡張型到着管理システムの研究【指定研究】

担当領域 航空交通管理領域

担当者 ○伊藤 恵理, 天井 治, 蔭山 康太, 大津山 卓哉, 中村 陽一, 宮沢 与和

研究期間 平成 29 年度～令和 2 年度

1. 研究概要

ICAO は、今後 20 年間の世界の航空交通需要は約 2.5 倍に増加すると発表している。2020 年 5 月現在、COVID-19 の影響を受け、この需要予測は下方修正される可能性もあるが、長期的な視点にたてば、旅客と物の流れが途絶えることはない。このような状況を踏まえ、大規模空港に到着する航空機に対して、巡航・降下空域を含む広範囲にわたって、効率的な運用を実現するために、到着スケジューリングを行う拡張型到着管理システム (E-AMAN: Extended-Arrival Management) の研究開発が世界規模で現在進行中である。

そこで本研究は、東京国際 (羽田) 空港に到着する航空交通流を対象に、E-AMAN の研究を実施した。最終年度であった令和 2 年度は以下を実施した。

- ① データ解析、数理モデル、シミュレーション技術を組み合わせた分析と実験結果に基づき、E-AMAN の設計条件を明らかにした。
- ② E-AMAN と協働する新しい運航である IM (Interval Management) の ICAO 国際規格策定に参画し、研究成果を国際規格文書 にまとめた。
- ③ ASEAN 地域の到着流管理である LRATFM(Long-range Air Traffic Flow Management)の概念設計にも研究成果を応用した。

④ これらの研究成果を査読付き論文 7 本等にまとめた他、行政や学術機関において発表した。

代表的な研究成果を以下にまとめる。

2. 研究成果

2.1 E-AMAN 設計条件

前年度までに提案したデータ解析、数理モデル、シミュレーション技術を組み合わせた分析と実験手法に、2019 年 7 月以降から羽田の新ターミナル空域・経路において始まっている運用の具体的な条件を追加して提案する E-AMAN 設計条件の有効性を検証した。具体的には、RW34L と RW34R を対象に、想定したピーク時の交通量において 1 時間あたり 3 機程度の滑走路割り振りを行うとポイントマージ経路での遅延時間を 1 機あたり 1 分程度削減できること、RECAT を適用すると羽田空港の機材バランスにおいては到着順序を変更することなく滑走路容量を有効活用できること、さらに現状の空域容量を維持するとターミナル空域において遅延時間を 1 機あたり 11 秒程度削減すること等を示した。

前年度までに得られた研究成果と統合して、羽田空港の近傍における航空機の到着交通流の混雑を緩和し、遅延時間を削減するために、E-AMAN 設計に求められる条件をエンルート空域 (羽田空港から約 150NM 以遠の空域) およびターミナル空域に分類して、以下のように提案した。

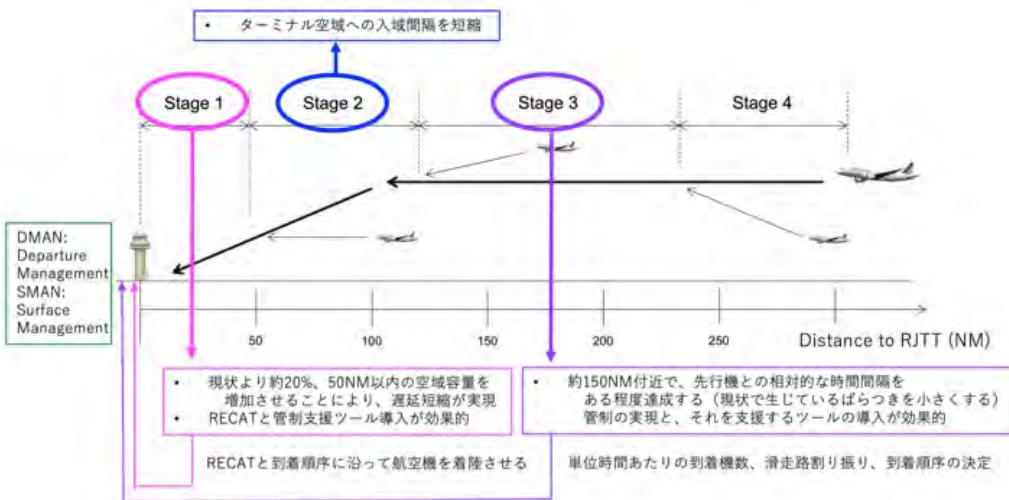


図 1 E-AMAN 設計条件

### エンルート空域 (図1における Stage 3)

- 羽田空港から約 150NM 以遠の空域で、到着順序と滑走路割り振りを決定する。
- 北風運用時は、RW34L 滑走路容量が 1 時間あたり 36 機以下であれば、先着順則に基づく到着順序づけを変更する必要はない。
- RW34L と RW34R の滑走路変更をエンルート空域において戦略的に決定する。
- 決定した到着順序に従って、到着間隔のばらつきを (速度制御により) 削減する。

### ターミナル空域 (図1における Stage 1 および Stage2)

- 移管地点におけるイントレイル間隔を見直し、運用に支障が出ない範囲で短縮できれば、Stage2 における遅延削減効果がある。
- RECAT 管制間隔を適用し、先行機との最小間隔を削減することで、現状の空域・滑走路容量においても、遅延削減と滑走路の有効活用に寄与できる。
- 空域容量を拡大できると、遅延削減効果が大きい。

## 2.2 国際規格の策定

本研手法を発展させ、ASEAN 地域を対象とした到着管理システムの拡充に貢献した。E-AMAN と協働する IM の ICAO 国際規格策定グループメンバーとして、羽田およびチャンギ空港に提案手法を適用して検証を行い、ICAO の国際規格文書 (図2 参照) に結果を掲載し、国際規格の策定に寄与した。



図2 ICAO 監視マニュアル (Doc 9994) 表紙

## 3. まとめ

本研究では、到着管理に注目し、空港の効率運用に寄与する E-AMAN 設計を提案したが、滑走路・ターミナル空域の容量拡大については、空港における出発管理 (DMAN: Departure Management) と空港面の管理 (Surface

Management) にも言及すべき課題がある。そこで本研究結果を発展させ、令和3年度より重点研究「AMAN/DMAN/SMAN 統合運用に関する研究」を実施し、より効率的な空港運用の実現を目指す。また、本研究では、ユーロコントロール実験研究所、東京理科大学らと連携し、レーダー卓を模擬する HITL (Human-In-The-Loop) シミュレータを導入した。次期重点研究において、実験評価を行う予定である。

### 掲載文献

- [1]伊藤恵理, “次世代到着管理システムの運用コンセプト,” 日本航空宇宙学会誌, 66 巻 7 号, pp.205-211, 2018.
- [2]Eri Itoh and Mihaela Mitici, “Queue-based Modeling of the aircraft arrival process at a single airport”, Aerospace, Topical Collection: Air Transportation-Operations and Management, 6(10), 103, 2019.
- [3]Timo Riedel, Masaki Takahashi and Eri Itoh, “Reducing Speed Commands in Interval Management with Speed Planning”, The Aeronautical Journal, Volume 124, Issue 1272, pp.189-215, 2020.
- [4]Timo Riedel, Masaki Takahashi, Tomoaki Tatsukawa and Eri Itoh, “Evaluating Applied Flight-deck Interval Management using Monte Carlo Simulations on the K-Supercomputer”, Transactions of JSASS, Volume 62, Issue 6, pp. 299-309, 2019.
- [5]Eri Itoh and Mihaela Mitici, “Evaluating the Impact of New Aircraft Separation Minima on Available Airspace Capacity and Arrival Time Delay”, The Aeronautical Journal, Volume124, Issue 1274, pp.447-471, 2020.
- [6]宮沢与和, 伊藤恵理, “東京国際空港における到着便の高密度な交通流制御に関する一考察”, 第 57 回飛行機シンポジウム講演集, 2019 年 10 月.
- [7]伊藤恵理, “羽田空港の遅延削減を目指した拡張型到着管理システムの研究開発”, 航空管制セミナー, 2019 年 10 月.
- [8]伊藤恵理, “羽田空港の遅延削減を目指した拡張型到着管理システムの研究開発”, 航空管制, 2020 年 3 月.
- [9]伊藤恵理, “航空機の拡張型到着管理システムと AMAN/DMAN/SMAN に関する検討状況”, 航空局講演会, 2020 年 2 月.
- [10]Eri Itoh and Takuya Otsuyama, “Designing Ground-based Interval Management (GIM) for aircraft arrival traffic at Tokyo International Airport”, ICAO Information Paper, SP-AIRB8-IP/05, September 2019.
- [11]Ichi Kanaya and Eri Itoh, “Design of Ad-Hoc Mach Network

- for Aircrafts; Wireless Mesh Networks – Security, Architectures and Protocols”, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen. 86510, May 2019.
- [12]Eri Itoh and Mihaela Mitici, “Evaluating the Impact of New Aircraft Separation Minima n Available Airspace Capacity and Arrival Delay”, The Aeronautical Journal, 124(1274), pp.447-471, April 2020.
- [13]Timo Riedel, Masaki Takahashi, Eri Itoh, Paul Frost, and Thomas Feuerle, “Pilot-Centered Evaluation of Flight-Deck Interval Management Control Laws Using an A320 Simulator”, Journal of Aircraft, 57(5), September 2020.
- [14]Eri Itoh and Mihaela Mitici, “Analyzing Tactical Control Strategies for Aircraft Arrivals Using Queue-based Modeling”, Journal of Air Transport Management, 89(101938), October 2020.
- [15]宮沢与和, 伊藤恵理, “確率モデルによる到着交通流の制御性能の解析と予測”, 航空技術, 68 巻 6 号, pp. 213-222, 2020.
- [16]Eri Itoh, Yoshikazu Miyazawa, Michael Finke, and Juergen Rataj, “Macroscopic Analysis to Identify Stage Boundaries in Multi-Stage Arrival Management”, Air Traffic Management and Systems IV, Springer nature, 2020.
- [17]Michael Schultz, Daniel Lubig, Judith Rosenow, Eri Itoh, Srinivas Athota, and VuDuong, “Concept of a Long-Range Air Traffic Flow Management”, SESAR Innovation Days, December 2020.
- [18]Eri Itoh, Michael Schultz, Srinivas Athota, and Vu Duong, “Devising Strategies for Aircraft Arrival Processes via Distance-based Queuing Models”, SESAR Innovation Days, December 2020.
- [19]宮沢与和, 伊藤恵理, “東京国際空港の到着便が使用する複数滑走路の効率的運用に関する一考察”, 第 58 回飛行機シンポジウム講演集, 2020 年 11 月.
- [20]伊藤恵理, 宮沢与和, “東京国際空港における多段階到着管理の戦略”, 第 58 回飛行機シンポジウム講演集, 2020 年 11 月.
- [21]伊藤恵理, “空の世界の往来に、デジタル変革をもたらす”, 学術の動向, 25(6), pp.90-95, 2020 年 6 月.
- [22]Eri Itoh and Takuya Otsuyama, “Designing Ground-based Interval Management (GIM) for aircraft arrival traffic at Tokyo International Airport”, International Civil Aviation Organization (ICAO) Information Paper, SP-AIRB8-IP/05, September 2020.
- [23]Eri Itoh, Michael Schultz, Srinivas Athota, and Vu Duong, “Ground-based Interval Management (GIM) related international collaborative research targeting arrivals at Singapore Changi International Airport” International Civil Aviation Organization (ICAO) Information Paper, SP-AIRB WG/10-IP/01, September 2020.
- [24]伊藤恵理 他, “東京国際空港を対象とした到着管理の研究開発と応用”, 2021 年度 電子航法研究所 研究発表会, 2021 年 6 月.

## ハザードの定量的評価によるリスク評価手法の研究【指定研究】

担当領域 航空交通管理領域

担当者 ○森 亮太, 天井 治, 住谷 美登里

研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度

### 1. はじめに

ICAO の安全管理マニュアル (SMS) で推奨されているハザード解析では、同定されたハザードに対してリスクマトリックスを作成して対応が必要かどうか等を判定する手法が推奨されている。しかし、この方式では、発生頻度や重大さに主観的要素が含まれる可能性が高いと考える。一方、欧米では航空もしくは航空管制に特化したヒューマンエラーの分類等が行われており、米国では Human Factors Analysis and Classification System (HFACS)、欧州では Human Error in ATM Technique (HERA-JANUS) が有名である。更に Computerized Operator Reliability and Error Database (CORE-DATA) を用いたヒューマンエラー確率も議論されている。

これらの状況を踏まえて、我々は同定されたハザードを定量的に評価してリスクを計算する手法を研究している。これまでの研究では、同定されたハザードに対してヒューマンエラーの種類を選択し、自動的にヒューマンエラー確率 (HEP) を与えるようにしている。同じ種類のヒューマンエラーでも状況の違いによってリスクが変わることを表現できるパフォーマンス・シェイピング・ファクター (PSF) も考慮して計算を行っている。ハザードの重大さに関しては、重大さを定量化している別の考え方 (保険) と比較し、リスクマトリックスで扱われる曖昧な表現を定量化できるようにしている。

これまでの研究でのハザードの定量的評価によるリスク評価手法はリスク評価に特化したものであった。しかし、ハザードが起こる前提条件を考える必要があることに気づき、現在はハザード同定の部分も含めた手法を開発している。尚、リスク値の高精度な推定には本手法のキーパラメータである HEP や PSF を最新値に更新する必要がある。

本研究では、更に、航空局から要望される幾つかの定量的安全性評価に関する研究を行う。現在要望されているものは、北太平洋の洋上 (North Pacific: NOPAC) ルートと福岡と上海を結ぶアカラコリドーの安全性評価、そして CARATS の OI-10 として、レーダー監視下の RNP 2 経路において安全と見なせる横間隔基準の推定である。

(RNP: Required Navigation Performance: 航法性能要件)

### 2. 研究の概要

#### 2.1 研究の目標

本研究では以下を実施する。

1. ハザードの定量的評価手法の見直し、および、ハザード解析支援ソフトウェアの開発、改良
2. RNP2 経路における横間隔及びGNSS喪失時のレーダーを用いたバックアップの検証のための手法の開発
3. 航空局から要望された安全性評価手法の開発等  
本年度の達成目標は以下とする。
1. ハザードの定量的評価によるリスク評価手法の構築および上記リスク評価手法の有効性の確認
2. RNP 2 運航に対する安全性評価の実施
3. 定量的安全性評価 (洋上航空路, アカラコリドー等) の依頼の実施

#### 2.2 本年度の研究

本年度は下記の項目を実施した。

1. ハザードの定量的評価によるリスク評価手法の見直し・改良
2. RNP 2 運航の安全性評価手法の開発
3. 安全性解析による管制課への協力および ICAO 会議等への参画による国際貢献

### 3. 研究成果

#### 3.1 ハザードの定量的評価によるリスク評価手法の見直し・改良

「事象 (条件)」と「出来事 (イベント, ストーリー)」とを定量化してハザードの発生確率を推定する方法を検討・提案した。提案手法はハザード一般に適用可能だと考えられるが、ここでは定期便の飛行中におけるハザードを題材に設定した。事象の発生確率は空域・季節・時間帯等が決まって初めて定まり、掛け合わせでは出来ない。更にその発生確率を文献等で調べる困難さを認識した。このため、発生確率値に「確度」を付与することを提案した。それらをデータベース化し一歩一歩確度を上げていく。確度の分類は「明確な根拠無し=1」, 「論理的推定または聞き取り=2」, 「文献値=3」等で示の際は色分けするなど、ひと目で分かるようにする。



図1に表示例を示す。

また、例えば「事象」に人的過誤に係わるものが含まれていた場合には、その確率を1にするなどして、発生確率のダブルカウントを防ぐ対策が必要となる。

発生率の背景色は確度(1低~3高)を表す	1 明確な根拠無し	2 例えば論理的推定または聞き取り調査	3 文献値				
空域季節	時間帯	事象1	出来事1	出来事2	PSF	人的過誤確率	ハザード発生率[1/フライト]
金沢	夏昼	気象-積乱雲	操縦士から積乱雲回避要求	管制官が要求を許可しない		誤判断	客室乗務員の負傷
発生率		0.1	0.02	0.01	1	0.001	2.0E-08
		上記数値はイメージで明確な根拠はないので要注意					

図1 発生確率等の表示例

### 3.2 RNP2 運航に対する安全性評価の実施

PANS-ATMにおける現行の15NM間隔設定時に適用された安全性評価は分布に基づく定常モデルであり、その仮定の見直しとともに、時間依存モデルを用いることで、横間隔の短縮を図った。時間依存モデルは、SASP(空域安全パネル)においてSpace-based ADS-B環境における間隔基準を計算するためのASEPS(Advanced Surveillance Enhanced Procedural Separation)衝突リスクモデルをもとに、エンルート環境に置き換えて計算を実施した。計算の結果、8NMの横間隔が達成できる見込みとなった。

### 3.3 安全性解析による管制課への協力およびICAO会議等への参画による国際貢献

航空局の要望に伴う洋上航空路およびアカラコリドールの安全性解析を行った。福岡と上海を結ぶA593経路は、日本、中国、韓国の3国に跨がる双方向飛行経路となっており、韓国のFIR(飛行情報区)内ではあるが、安全性の観点から日本と中国のみでの管制運用が実施されてきた。この空域では衝突リスクの高い状況が続いている。これに対し、経路を飛行方面別に一方通行化し、複線化することにより衝突リスクを軽減する案が示された。図2に複線化案の空域図を示す。

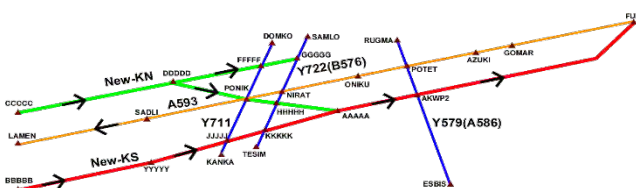


図2 アカラコリドー複線化案の空域図

案に従った場合の衝突リスクを運航状況のファストタイムシミュレーションにより推定した。シミュレーションプログラムは新たに独自に開発した。2019年12月の交通量の多いデータを用いてのシミュレーションの結果、推定された技術的衝突リスクは目標安全度を満たすことが分かった。尚、交差点でのリスクは反航/同航でのリスクより一桁高かった。現在、異なる複線化案によるシミュレーションが航空局から求められており、別研究課題で継続して取り組む。

また、ICAO会議に関しては、ICAO SASP会議に毎年参加しているが、今年度はコロナ禍の中、限定的な開催となり、会議への直接的な貢献は行わなかった。

### 4. まとめ

最終年度となる今年度は特に、ハザードの定量的リスク評価手法における事象・出来事の定量化とハザード発生確率の計算方法、RNP2運航での安全な横間隔基準推定手法を用いた実データによるパラメータ推定、ファストタイムシミュレーションによるアカラコリドールの衝突リスク推定を行った。

今後は、ハザードの定量的リスク評価手法については、別テーマにて引き続き検討・提案を行う。RNP2運航については、本研究の成果をもとに、現行よりも短縮した横間隔を国際標準とすべく活動を進めていく。

### 掲載文献

- [1] R. Mori. "Speed Error Analysis from Input-based Monitoring," ICAO SASP/2, May 2018.
- [2] R. Mori. "Speed Error Difference among Airlines," ICAO SASP/2, May 2018.
- [3] 天井 治, 住谷 美登里. "提案するハザード解析手法と支援ソフトウェアの課題," 電子情報通信学会ソサイエティ大会 A-13-1, 2018年9月.
- [4] R. Mori. "Difference of Speed Prediction Error," ICAO SASP-WG/31, Nov. 2018.
- [5] 天井 治. "混合運用においてRNP AR 進入方式で飛行する航空機の飛行時間の短縮効果について," 日本航空宇宙学会 第56回飛行機シンポジウム, 3C09, 2018年11月.
- [6] 天井 治. "アカラコリドーにおける衝突リスク低減効果の解析結果," 国土交通省航空局管制課空域調整整備室への報告書, 2018年12月.
- [7] 住谷 美登里, 天井 治. "航空管制関連ハザードの前提条件に関する一考察," 電子情報通信学会総合大会 A-

13-3, 2019年3月.

- [8] 天井 治, 住谷 美登里, 松岡 猛.“定量的ハザード解析のための前提条件等の定量化,”電子情報通信学会総合大会 A-13-4, 2019年3月.
- [9] T. Matsuoka, O. Amai. “Evaluating Human Error Data for Hazards in Air-Traffic Control and Deriving a Quantitative Safety Index,” *International Journal of Aviation Management*, Vol. 4, No. 3, Mar. 2019.
- [10] 天井 治, 住谷 美登里, 松岡 猛.“ハザード解析における事前確率の効率的な推定方法について,”2019年電子航法研究所研究発表会講演概要, 2019年6月.
- [11] 天井 治.“RNP-AR と従来方式が混在する運用方式の実現可能性に関する研究の概要と進捗状況 その6 ～関西国際空港に向けて RNP AR 進入方式で飛行する航空機の飛行時間の短縮効果の推定～,” CARATS 高規格 RNAV 検討 SG 会議, 2019年8月.
- [12] 天井 治, 住谷 美登里. “事象と出来事の内容を用いたハザードの前提条件の特定,”2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会 A-13-1, 2019年9月.
- [13] 天井 治.“アカラコリドーにおける複線化による衝突リスク低減策の効果の解析,” 航空局管制課への報告, 2019年9月.
- [14] 天井 治.“無人航空機と有人機との衝突に関するハザードの解析について,”日本航空宇宙学会 第57回飛行機シンポジウム, 2G16, 2019年10月.
- [15] R. Mori, “Analysis of Speed Prediction Error on Oceanic Flights”, *Journal of Navigation*, Vol.72, Nov. 2019.
- [16] R. Mori, “Calculation of collision risk for reduced time-based separation minima”, ICAO SASP-WG/33, Montreal, Nov. 2019.
- [17] 天井 治, 住谷 美登里. “インターネットを活用したハザード解析支援ソフトウェアの開発,”2020年電子情報通信学会総合大会 A-13-4, 2020年3月.
- [18] 天井 治. “アカラコリドーにおける複線化による衝突リスク低減策の効果の解析 –ファストタイムシミュレーションを用いた衝突リスクの推定–” 航空局管制課への報告, 2020年9月.
- [19] R. Mori, “Safety Analysis of Reduced Route Spacing for RNP 2 under Radar Environment”, *Transactions of the JSASS*, 64, 3, p. 165-173, May 2021
- [20] 森 亮太. “レーダー環境下 RNP2 の横間隔の検討結果”, CARATS PBN WG/高規格 RNAV SG, 2021年1月.

## 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【指定研究】

担当領域 航空交通管理領域

担当者 ○平林 博子, 瀬之口 敦, ビクラマシンハ ナヴィンダ, 虎谷 大地, 村田 暁紀

研究期間 令和2年度～令和5年度

### 1. はじめに

安全かつ効率的な航空交通流形成のためには、安全に航空管制業務（以下、管制業務）を遂行できる交通量を適切に管理していくことが必要であり、交通量が增大するほど航空交通の容量管理は重要となってくる。CNS（Communications Navigation and Surveillance）の発展により物理的な容量（例えば空域あたりの航空機数）は増加するが、安全に航空管制が遂行できるかどうかは管制業務のワークロードに依存する。管制業務は航空管制官の知識及び経験からの推測やそれに基づく判断に頼るところはあるが、円滑な管制業務のためにコンピューターによる自動化やシステム支援機能の活用は日々検討され導入されている。一方で、定期的なメンテナンスやシステム障害時等は、自動化や支援機能を活用することなく管制業務を遂行しなければならない。適切な容量管理のためにも、自動化や支援機能がもたらす管制業務の見える化（可視化、定量化）が求められている。

### 2. 研究の概要

本研究の目的は、容量管理のために、自動化や支援機能がもたらす管制業務作業量を定量化することである。支援機能の有無による相対的な管制業務作業量の差を求めることで、支援機能の効果の定量化を試みる。

管制業務作業量は使用システム及びシステムに含まれる支援機能に大きく依存する。また、我が国で採用されている航空路管制業務における容量管理では、管制業務作業量が考慮されている。以上のことから、まずは現状の航空路管制情報処理システム（TEPS; Trajectorized En-route Traffic Data Processing System）及び航空路管制業務の航空交通流制御アルゴリズムに関する調査・把握が基礎となる。また、作業量の計測のための管制経験者参加型の実験を想定した、計測機能を付加した管制支援機能模擬ソフトウェアの開発を進めている。令和2年度の研究においては、以下を実施した。

- ・管制支援情報及び支援機能の調査及び定量化の検討
- ・管制業務作業量の計測手法の検討及び開発
- ・管制支援機能を模擬するソフトウェアの検討・開発

### 3. 研究成果

3.1 管制支援情報及び支援機能の調査及び定量化の検討  
管制支援情報及び支援機能の調査においては、まずは行動観察による業務フローの整理が重要となってくる。当初予定していた運用現場における業務観察及びヒアリングに代わり、本年度は訓練シミュレーターを使用した業務を撮影し、映像データを解析することで、業務フローの整理及びTEPS支援機能の把握に努めた。また、定量化の検討においては、航空局から提供された管制卓（TEPS）からの入力情報を整理し、作業量抽出及び定量化の足掛かりを得た。図1は航空局提供データに含まれる58項目に及ぶ管制指示コマンドに関するデータ解析の結果の一例である。日本上空で色分けされている空域は航空路セクター（以下、セクター）であり、セクター毎に管制指示に関するコマンド入力数をカラースケールで表している。図2は横軸にセクターを示し、管制コマンド入力数を棒グラフで表し、当該セクターへ入力した交通量を折れ線グラフで表している。交通量がそれほど多くなくても入力数が多いセクターがあることがわかる（図2のF07）。これらは、交通量に依存するルーティン業務ではないところでTEPSの入力が多く発生していることを示す。また、交通量が多いところでは通信移管等のルーティン業務による入力数が増加することもわかった。これらの結果は、コンピューター支援が必要とされる管制業務及び自動化を進めるべき機能等の検討に役立てられる。

### 3.2 管制業務作業量の計測手法の検討及び開発

管制業務作業量の計測においては、人的要因の考慮も必要であることから、本項目は、公募型研究課題「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」において筑波大学と協力して進めている。本年度は、航空路管制業務におけるチームワークロードの概念構築が目的である。まずは訓練シミュレーターによる管制模擬業務から行動を時系列で明確化した。レーダー管制席と調整席管制官の特徴的な行動を抽出し、現在の容量管理で適用されている手法に反映されるタスクとそれ以外とに区別することで、反映しきれていないタスクを見極めることが可能

となると考えられる。また、業務の相互関係の理解度を上げるため、ヒューマンマシンシステムにおける全体構造を表現する MFM (Multilevel Flow Model) により、航空路管制業務をモデル化することを試みた。本年度の目標はセク

ターにおける全体業務のモデル化であった。ひとつのセクターをレーダー管制席と調整席に分けたモデル化等、引き続きモデルを発展させる計画である。

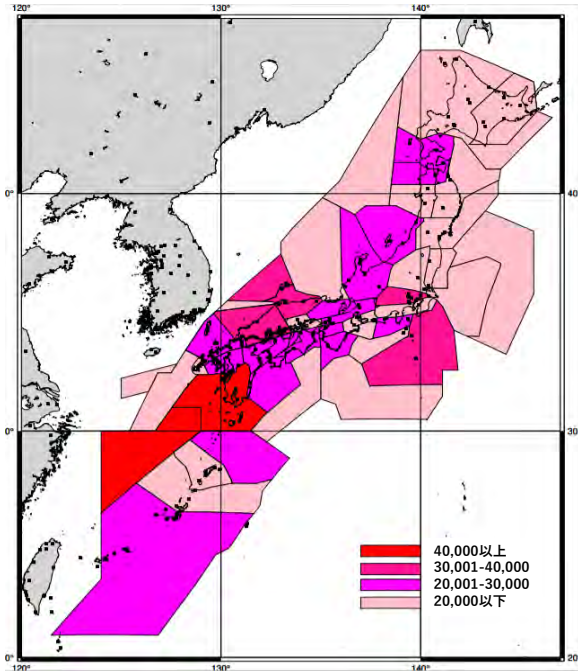


図1 セクター毎の管制指示入力数

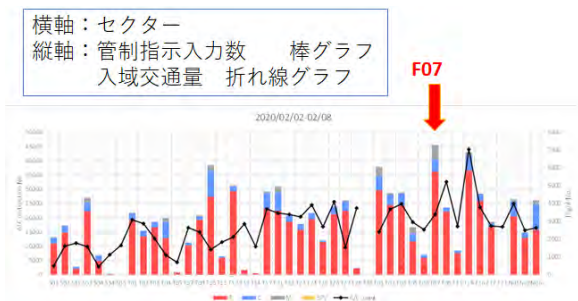


図2 セクター毎の交通量と管制指示入力数

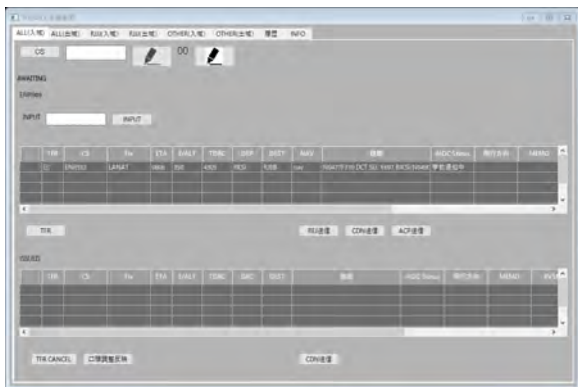


図3 AIDC 模擬画面

### 3.3 管制支援機能を模擬するソフトウェアの検討・開発

管制業務を計測するため、管制支援機能を模擬するソフトウェアの開発を進めた。図3は管制支援機能のひとつである AIDC ( Air Traffic Service Interfacility Data Communications) を実施するための画面模擬である。AIDC は異なる管制組織間において航空管制に必要な交通情報を交換する機能であり、特に交通流の多い境界線上で自動化が進んでいる機能であるが、システム障害時等は人が代わりにその作業をする必要が発生する。また通常時であったとしても、AIDC を使用した作業は現状の航空路管制業務の容量管理には含まれていないことから、まずはこの機能に関する定量化を試みる計画である。

### 4. まとめ

支援機能の定量化は的確な容量管理及び航空交通流制御アルゴリズムの高度化に資するものである。また、管制運用における自動化の促進はグローバルレベルでも図られており、管制運用の変化期であると言える。まずは管制運用の業務フローの整理が重要となってくることから、訓練シミュレーターを使用した解析に加え、本年度は MFM 等を使用したモデル化に取り組んだ。これらの結果は、今後の計測作業及び定量化の基礎となる。次年度は、管制業務のモデル化の向上及び開発を進めているソフトウェアを用いた管制業務計測の検討を計画している。

### 掲載文献

- [1] 平林博子, 瀬之口 敦, 虎谷大地: “航空路管制セクター交通流の地域特性に関する考察,” 第 58 回 飛行機シンポジウム, 3C-02, 2020 年 11 月.

## 無人機の円滑運行のためのシミュレーション技術の構築に関する研究【基盤的研究】

担当領域 航空交通管理領域, 監視通信領域  
担当者 ○平林 博子, 虎谷 大地, 河村 暁子  
研究期間 平成 29 年度~令和 2 年度

### 1. はじめに

無人航空機(無人機)の運用は,従来の農薬散布以外にも,測量,監視,インフラ維持・管理のための点検等,汎用の小型無人機の普及によりその活用が盛んになってきている。さらに,目視外の飛行を想定した輸送能力の活用に関して,その技術開発が本格的に開始されている。

上記のような無人機運用の需要空域は,管制空域とくらべ航空情報の管理があまり行われていない低高度の非管制空域にある。また,無人機の性能が向上するのに伴い,管制空域を含む中高度における需要も今後高まる可能性がある。低高度から中高度は有視界飛行方式(VFR; Visual Flight Rules)による有人の小型航空機等も飛行することから,無人機飛行空域との競合が発生する可能性があり,このような空域において多数の無人機が安全かつ円滑に運用されることが求められている。

本研究の目的は,低高度から中高度における無人機・有人航空機の統合シミュレーション環境を構築するにあたり必要な技術を検討することで,無人機と有人航空機の融合した安全かつ効率的な交通管理コンセプトにつなげることである。

### 2. 研究の概要

令和 2 年度が最終年度となる本研究は,低高度から中高度における無人機と有人航空機の融合した安全かつ効率的な交通管理コンセプトにつなげるため,様々な視点から低~中高度における無人機,航空機運用について調査し,必要とされるシミュレーション技術を構築することを目的とし進めてきた。特に VFR による小型機等が飛行する空域において小型無人機との競合が懸念されており,研究期間後半は VFR を対象とした研究を中心に実施した。

また,情報収集に関しては,当初想定したよりも低高度空域における国の施策等が重要視されてきていること(空の移動革命に関する官民協議会の開催等),さらに比較的大型の無人機が想定される遠隔操縦航空機システム(RPAS; Remotely piloted aircraft system)の運用が現実的になってきていること等から,低~中高度に限らず無人機に関する情報を広く収集した。

令和 2 年度の研究においては,以下を実施した。

- ・新たな飛行体の運航が低高度から中高度に及ぼす影響の調査
- ・低高度から中高度における無人機運行の部分的シミュレーション環境設計及び実行

### 3. 研究成果

#### 3.1 新たな飛行体の運航が低高度から中高度に及ぼす影響の調査

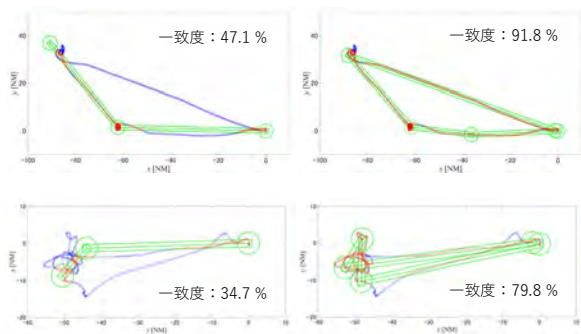
令和 2 年度発足の航空イノベーション推進協議会無操縦者航空機委員会(AIDA Japan RPAS expert committee)では,RPASだけでなく,空飛ぶクルマとも呼ばれる新たな飛行体の運航を検討している空域使用希望者が多く参加している。本会議に参加し,当所が所有する航空機飛行方式を含め現状の有人機運用に関する知見を提供するとともに,今まで航空に携わってこなかった無人機運用新規参入者の趣意を確認した。また,行政が主催する空の移動革命に関する官民協議会では,無人機等が飛行可能な空域管理のあり方に関する検討に参加し,国の制度設計及び環境整備に関するルール作りに携わってきた。

#### 3.2 低高度から中高度における無人機運行の部分的シミュレーション環境設計及び実行

空域運用シミュレーション時に必要とされる小型機飛行に関しては,原則飛行前に提出される現状の飛行計画では経路情報取得が困難である。初期段階としてジオコーディングによる推定手法を検討した結果,飛行計画に記載されている地名がジオコーディング登録地点を同じとは限らないケースは推定が外れることから,実際の航跡を用いた遺伝的アルゴリズムによる逆推定手法を開発し,経路推定アルゴリズムを向上させた。図 1 にジオコーディング推定と逆推定による経路推定の一致度の比較を示す。それぞれの推定経路を緑,実飛行経路を青と赤(推定経路内を赤)のプロットで示す。一致度は逆推定の経路の方が高いことがわかる。

### 4. まとめ

本研究内において統合シミュレーションに必要な複数の要素技術を確立し当初の目的は果たせたが,想定よりも,



ジオコーディング 逆推定

図1 推定経路の実飛行経路との一緻度

低高度空域における国の施策が重要視されてきたこともあり、無人機に関する研究の今後の方向性を見定めることも本年度は必要とされた。COVID-19の影響は、物流を目的とする無人機運用を促進する材料となり得るが、安全航行を確実にする冗長性の優れた機体の創出にはまだ至っていない現状もある。空域の有人航空機の安全維持の観点からも、無人機・有人航空機の情報基盤及び空域のリスク管理に関する研究が必要であると結論付けられた。

#### 掲載文献

- [1] 平林博子, “無人航空機と航空機運航の融合の可能性について,” 第22回GPS/GNSSシンポジウム, 2017年11月.
- [2] 中島徳頭, 平林博子, 虎谷大地, 保理江裕己, “無人航空機運行に必要な情報の検討,” 第55回飛行機シンポジウム, 2017年11月.
- [3] D. Toratani, H. Hirabayashi and A. Kohmura. “Simulation Techniques for Small Unmanned Aircraft Systems (sUAS) Trajectories including Signal Propagation,” ENRI Int. Workshop on ATM/CNS, 2017 Nov.
- [4] 虎谷大地, 平林博子, 河村暁子, “小型無人航空機と有視界飛行方式へリコプタが保つべき間隔に関する一考察,” 第49期年会講演会, 4月2018年.
- [5] 平林博子, 虎谷大地, 河村暁子, “小型無人機が飛行する空域における航空機運航に関する考察,” 第18回電子航法研究所研究発表会, 5月2018年.
- [6] Hiroko Hirabayashi, Daichi Toratani and Akiko Kohmura, “Simulation Study for VFR aircraft and Small Unmanned Aircraft Systems (sUAS) mixed Operations in Low Level Airspace”, 31st congress of the international council of the aeronautical sciences, belo horizonte, Brazil, September, 2018.
- [7] 平林博子, 虎谷大地, “低高度における救急医療用ヘリコプターの飛行傾向分析,” 第50期年会講演会 1D-05, 4月2019年.
- [8] 平林博子, “無人航空機の飛行が与える航空交通管理への課題,” 電子情報通信学会 安全性研究会, SSS2019-7, 6月2018年.
- [9] 虎谷大地, 平林博子, 河村暁子, “高度の計測方法の違いによる測定高度のずれと補正方法～有人航空機と小型無人航空機の位置情報共有の観点から～,” 電子情報通信学会 宇宙・航空エレクトロニクス研究会, SANE-2019-42, 8月2019年.
- [10] 福田豊, 中島徳頭, 平林博子, “低高度空域での運航管理技術,” 第57回飛行機シンポジウム 2C11, 10月2019年.
- [11] 中島徳頭, 平林博子, 河村暁子, 虎谷大地, ニッ森俊一, “電子航法研究所における無人航空機研究への取り組み,” 第57回飛行機シンポジウム 1A07, 10月2019年.
- [12] D. Toratani, T. Koga, H. Hirabayashi, A. Kohmura : “Altitude Reference System for Small Unmanned Aircraft Systems to Resolve Altitude Discrepancies with Manned Aircraft,” ICAO’s DRONE ENABLE/3, November 2019.
- [13] 平林博子, “運航管理データを用いた有視界飛行方式の飛行傾向分析 (詳細版),” 航空局運用課への報告書, 10月2019年.
- [14] 平林博子, “運航管理データを用いた有視界飛行方式の飛行傾向分析,” 電子航法研究所報告 No.133 pp.13-20, 7月2020年.
- [15] 虎谷大地, 平林博子, “ドローンとの情報共有のための有視界飛行方式の飛行計画データ利用に関する一検討,” 電子情報通信学会 宇宙・航空エレクトロニクス研究会 SANE2020-21, 8月2020年.
- [16] 虎谷大地, 平林博子, 河村暁子, “小型無人航空機(ドローン)運行の目標安全度検討手法に関する一検討,” 第58回飛行機シンポジウム 1A08, 11月2020年.
- [17] 森太郎, 平林博子, 虎谷大地, “有視界飛行方式による飛行の高度に関する統計分析,” 第58回飛行機シンポジウム 1A11, 11月2020年.
- [18] 虎谷大地, 平林博子, “遺伝的アルゴリズムを用いた有視界飛行方式のための飛行計画の逆推定に関する研究,” 第8回制御部門マルチシンポジウム 2B2-5, 3月2021年.
- [19] 木村紋子, 久保大輔, 虎谷大地, 武市昇, “ドローン統合情報利用プラットフォーム概念の提案,” 電子情報通信学会総合大会 B-14-36, 3月2021年.

## 航空用データの管理手法に関する基礎研究【基盤的研究】

担当領域 航空交通管理領域  
担当者 ○住谷 美登里  
研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度

### 1. はじめに

電子航法研究所（以下、当所）では国土交通省航空局（以下、航空局）の要望に基づいて、安全性を保ちつつより効率的な航空機運航を目指し様々な航空交通管理に関わる研究を行っている。

当所は、研究を進める上で実際の航空交通状況を把握するため、航空管制システムから出力される様々なデータの提供を受けている。各研究課題の担当者は、各課題の必要に応じて提供された航空交通に関するデータを個々に保存・管理するとともに、研究に必要なデータの抽出やデータベースの作成を行ってきた。これら一連のデータ管理に関する作業は、各研究課題の担当者が各々行っているため、研究の効率を低下させている可能性がある。

一方内閣府は平成 30 年に「国立研究開発法人におけるデータポリシー策定のためのガイドライン」を公表し、国立研究開発法人に対して令和 2 年度末までにオープンサイエンスのためのデータポリシーを策定することを推進した。今後、学術的な論文のオープンアクセス（公開）だけでなく、研究データの管理・利活用が必要となり、当所も対応が必要である。

これらのことから当所が航空局等から提供される航空交通に関する様々なデータについても、横断的に整理し、一元的に管理し、各研究課題が必要なデータを必要な時に利用できるようなデータ管理に関する検討が必要である。

本研究では、当所に航空局等から提供されている各種データを対象として、現状のデータの利用、管理方法を把握し、データ管理に関する課題を把握し今後のより効率的な管理方法を提案する。また航空局から提供されている航空管制システムから出力されたデータについては、システム移行が行われたため、システム移行等に伴う各種データに関する調査も併せて行う。

### 2. 研究の概要

本研究は 3 ヶ年計画で取り組んだ。今年度は最終年度として以下の項目を実施した。

- ・ システム移行等に伴うデータ情報に関する調査
- ・ データの管理方法の検討と提案

### 3. 研究成果

#### 3.1 システム移行等に伴うデータに関する調査

航空管制システムは、平成 27 年度より統合管制情報処理システムに順次移行され、システム全体の基盤となる飛行情報管理処理システム（FACE）および管制支援処理（ICAP）、航空路管制処理（TEPS）、空港管制処理（TAPS）、洋上管制処理（TOPS）、航空交通管理処理（TEAM）、管制データ交換処理（ADEX）の各処理システムから構成される。これらのシステムは、航空交通管理センター、4 つの航空交通管制部（福岡、東京、神戸、札幌）、5 つの空港事務所（仙台、東京、関西、福岡、那覇）に設置されている。当所では、これらのシステムから出力される複数の各種データの収集を依頼し、複数の研究課題で利用している。航空交通管制部ごとに収集される TEPS および空港事務所ごとに収集される TAPS のデータについては、各官署間でデータ保存形式が異なる場合があるためデータ形式を統一し、必要な情報（航空機の位置情報等）を抽出するツールを開発した。TEPS は航空路監視レーダ等の情報をもとに各航空機の位置情報等を統合処理しており、各航空機の 10 秒間隔の位置情報を出力している。図 1 に福岡航空交通管制部の TEPS のデータより当所で抽出したある日ある瞬間の各航空機の位置（航跡例）を図示する。TAPS はターミナルエリアの各航空機の 4 秒間隔の位置情報や空港エリアからの 1 秒間隔の位置情報等をもとに統合処理を行っている。図 1 の右下に東京空港事務所の TAPS のデータから東京国際空港エリアの各航空機の位置情報を当所で抽出し 1 日分を重ね合わせた図を示す。これらの統合管制情報処理システム間では各便に一意に振り分けられている FO（Flight Object）ID を利用することで、様々な情報を紐づけて把握できる。同一コールサイン（便名）であっても別の FOID で管理されるので、経由便や日跨ぎ便等の処理が容易になった。

#### 3.1 データの管理方法の検討と提案

複数の官署から提供される複数のデータを、複数の研究課題で共有利用する際のデータ管理に関する課題を検討し、データ収集依頼先である航空局担当者に提案し、調整を行い、課題を改善できた。

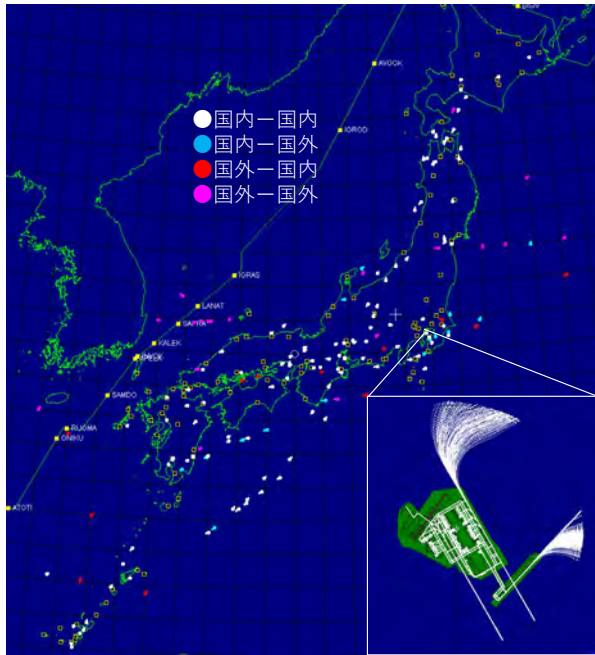


図1 TEPS および TAPS からの位置情報抽出例

まず複数の研究課題で複数のデータを共有する場合、研究課題別に各々データを管理する方法ではなく、データ管理責任者を設置し、複数のデータを一括して保存・管理することとした。そして各システムから出力されたデータは継続して収集を依頼し、当所で必要な情報を抽出して保存・管理することで各研究課題が必要な情報を必要な時に継続して利用できるような環境を整えた。これらによりデータ管理環境が整ったことでより効率的に研究が進められるようになる。

#### 4. まとめ

本研究は、航空局の航空管制システムから出力され提供を受けた航空交通管理に関する各種データについて当所での現状の利用・管理状況の課題を把握し、より効率的なデータ管理方法としてデータ管理責任者のもと一括で管理し各研究課題で必要な時に必要なデータを利用できるようにデータ管理環境を整えることを提案し改善した。

また航空管制システム移行に伴う出力データの調査を行い、各種データのデータ形式を統一し、各研究課題が必要な情報である位置情報等を抽出するツールを開発した。これにより航空交通状況の分析や、航空交通シミュレーションのシナリオ等様々な研究へ利用できるようになった。

さらに、本研究でのデータ管理に関する様々な検討等を当所のデータ管理 TF へ情報提供し、データポリシー

策定等の所のデータ管理および運用方針等の検討に寄与できた。

今後も当所で管理する様々な各種データを利用することで継続的に航空交通状況を分析、把握することができ、効率的な航空機運航に必要な航空交通管理に関わる様々な研究開発への貢献が期待される。

#### 掲載文献

- [1] 住谷美登里, “Data collection, storage and management at ENRI,” 韓国 KIASI との会合, May.2019.
- [2] 住谷美登里, “航空管制に関する安全性評価に用いるデータの管理について,” 電子情報通信学会 2019 年ソサイエティ大会基礎・境界/NOLTA 講演論文集 A-13-2, Sept.2019.
- [3] 住谷美登里, “新航空管制システム移行後のレーダデータ解析手法の検討,” 電子情報通信学会 2020 年ソサイエティ大会通信講演論文集 B-2-6, Sept.2020.
- [4] 住谷美登里, “統合管制情報処理システムのデータに関する調査,” 令和 3 年度 (第 21 回) 電子航法研究所研究発表会, June.2021.



## 進入時の運航性能向上に関する研究【基盤的研究】

担当領域 航空交通管理領域

担当者 ○森 亮太, 中村陽一, 虎谷大地

研究期間 令和2年度

### 1. はじめに

航空交通の増加とともに、航空機の運航効率化は喫緊の課題である。航空交通管理として、ゲート出発からゲート到着までのすべてのフェーズでの運航効率化が検討されているが、それぞれのフェーズにより、その効率化策は異なるため、それぞれのフェーズにおいて適した効率化策を選択した上で、研究を実施することが必要である。その一方で、効率化を追求すると、安全という視点が抜け落ちてくる傾向がある。安全性の向上も、効率化と同様に重要な課題であると言える。

本研究では、その中でも進入時の運航に焦点をあて、複数の観点からの研究を実施する。具体的には、1.羽田空港における滑走路選択効率向上、2.不安定進入の要因推定、3.方式設定の自動化による効率向上、である。

### 2. 研究の概要

#### 2. 1 羽田空港における滑走路選択効率向上

羽田空港は、4本の滑走路が存在し、離陸機、着陸機が各2本使用しているが、運用は相互に影響を与えるという特徴がある。(図1) 現行の運用においては、離着陸ともに使用する滑走路については、基本的に出発/到着方面別に分けて運用されている。離着陸数に関しては、平均的には各滑走路の処理容量を満たすように設定されているものの、実際には各航空機は日によって離着陸時間が前後するため、離着陸滑走路は柔軟に選んだ方が処理容量および滑走路待ちの時間は改善できるものと考えられる。本研究では、着陸機に関して滑走路を変更できた場合に、どの程度の改善効果があるかどうかを試算し、実際にそれを実現するための方策を考えることを目的とする。

#### 2. 2 不安定進入の要因推定

AIは近年注目を浴びているが、航空業界への適用事例は多くない。本研究では、その適用事例の一つとして、不安定進入の要因推定を行うこととした。**Stabilized approach**(安定進入)とは、着陸前に航空機を安定させ、安全な着陸を行うためのコンセプトである。過去に不安定であったことが原因のインシデントや事故も報告されており、現在ではほぼすべての航空会社が安定進入による運航を推奨している。しかしながら、状況によっては不安定進

入やそれに近い状況になることがあるため、本研究では不安定な状況とその他の要因との関連性を調べることで、不安定進入を減らすことを目的として実施する。



図1 羽田空港の滑走路運用(北風時)  
東京空港事務所パンフレットより抜粋

#### 2. 3 方式設定の自動化による効率向上

現行の飛行方式は国土交通省航空局にて設計を行っている。近年、**RNP AR**と呼ばれる柔軟な進入方式が本邦でも数多く導入され、また**RNP to xLS**と呼ばれる新たな進入方式の導入も今後期待される場所である。これらの方式は、設計ルールに基づき設計者が手動で設計されるものであるが、特に近年の飛行方式は設計の自由度が増してきており、例えば最短経路で設計するという場合でも、最適な設計が自明でないことも多い。そこで、本研究では方式設計を自動化することで、人間には設計が困難であるような方式設計を可能とし、さらなる運航効率の向上を行うことを目的とする。

### 3. 研究成果

#### 3. 1 羽田空港における滑走路選択効率向上

先に、滑走路は基本的に方面別運用が行われていると記したが、実際には一部の着陸機においては、本来の滑走路とは異なる滑走路に着陸させるような管制運用が行われている。そもそもの関心事として、滑走路選択を柔軟にすることで、高々どの程度の効果が見込めるか、ということがある。そこで、本研究ではその用途に適した羽田空港のシミュレーションモデルの構築を行い、滑走路選択を最適化問題としてとらえ、計算をおこなった。ここでは、簡単のためおおよそ空港から100NM地点における交通流をもとに評価を行っているため、それ以遠における交通流制御

の実態を加味すると、効果はさらに大きくなると期待される。逆に言えば、おおよそターミナル空域近辺から滑走路選択を行うことで期待される効果の最大量と言うことができる。図2にある日の一部時間帯を抜き出して、実績の交通状況をもとに、シミュレーションモデルにより最適化した結果を示す。横軸は、34Rへの割り当て機数、縦軸は待ち時間[分]を、離着陸別に表している。このケースでは実際には33機の着陸があり、34Rへ割り当てられたのはうち5機であった。点線は実績の待ち時間を示している。実際には140分程度の待ち時間があったのに対し、最適な割り振りを行うことで、60分程度の待ち時間、つまり80分程度待ち時間を減らせる可能性があることを示している。なお、34Rへの割り当てが5機の場合の計算結果は75分程度となっているが、実際には140分程度となっている。これについては、5機を割り当てる場合でも、どの航空機を割り当てるかによって結果が変わる。実際の5機の割り当てと最適な5機の割り当てが異なるため、このような結果になったものと思われる。

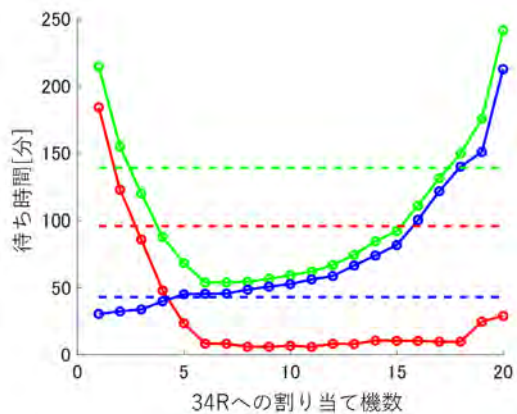


図2 航空機の待ち時間と34Rへの割り当て機数との関係  
(赤：着陸，青：離陸，緑：離着陸の和)

### 3. 2 不安定進入の要因推定

不安定進入は、様々な要因により発生し、環境要因によるもの(主に風など)、他に、パイロット要因など多岐にわたる。しかし、不安定進入の原因が風による場合はその回避が根本的に難しいのに対し、パイロット要因など改善可能な環境要因の場合は、その対策を講じることができる。本研究では、回避の難しい環境要因として風を取り上げ、風による影響を打ち消したうえで、相対的に安定なもの、不安定なものを同定する手法を、ニューラルネットワーク(NN)により開発した。

ここでは、不安定指標の提案を行い、フライトごとにNNによる指標値を推定する、といった方法をとることにした。その一例を図3に示す。1つのバーが1つのフライト

トに相当し、値が大きいほど他のフライトと比較して相対的に不安定度が高いことを示している。不安定度が高いフライトと他の要因の相関を見ることで、不安定要因分析につなげていく予定である。

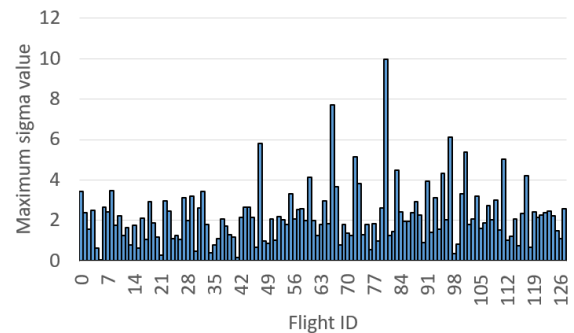


図3 フライトごとの不安定指標の値

### 3. 3 方式設定の自動化による効率向上

本研究は、本年度より開始したため、まず方式設計のルールについて勉強・確認を行った。その後、答えが自明な簡単なケースを想定し、遺伝的アルゴリズムと呼ばれる最適化手法を用いて、最適な経路の計算手法の開発を行った。図4にその一例を示す。この例では、左下から右上へ向かうルートでの設計で、何も制約を加えないと直線が最短となるが、旋回半径の制限や、初期および終端の経路角の制約を加えることで、図のように直線ではなく曲線を含んだ経路が最適となることを示している。

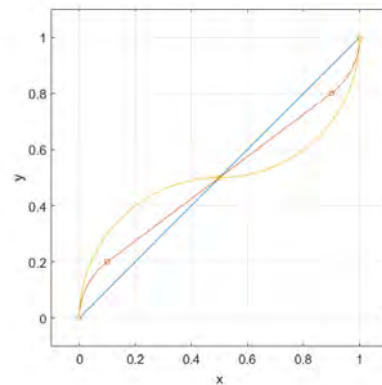


図4 最適な経路の確認

今後は、計算手法の改良とともに、いくつかの簡単なケースで期待通りの計算結果が得られることの確認を行った後、実際に既に設計が行われている空港において、どのような結果が得られるかの確認を行っていく予定である。掲載文献

- [1] R. Mori, "Anomaly detection and cause analysis during instrument landing system approach using recurrent neural network", Journal of Aerospace Information Systems, in press.

## 航空機の降下方式における機上・地上の機能向上に関する研究【基盤的研究】

担当領域 航空交通管理領域  
担当者 ○ビクラマシンハ ナヴィンダ, 虎谷 大地, 平林 博子  
研究期間 令和2年度~令和4年度

### 1. はじめに

航空交通量の増大に伴い、継続降下運航（CDO：Continuous Descent Operations）の検討・導入が我が国のみならず欧米等でも積極的に進められている。CDOは航空機の巡航状態からアイドル推力を維持しながら連続的に降下するため、燃料消費量及び環境負荷の低減につながる利点が挙げられる。一方、CDOにおける降下経路は航空機の飛行管理装置（FMS：Flight Management System）により航空機の性能や気象状況等を考慮して出力される降下プロファイル（FMS Profile Descent, 以下 FMS-PD と表記）である。そのため、複数の機種が混在した状況においては、降下パスのばらつきが大きくなることから、地上での軌道予測や間隔維持が困難になると懸念されている。さらに、航空管制官は、到着航空機が予測軌道から外れた際に経路延伸が発生しないよう航空機同士の間隔を通常よりも広く確保するため、空港における容量にも影響を及ぼす可能性がある。昨今の研究では、飛行軌道の地上予測精度の向上が、そのような効率低下を抑制するとの結果が示されている。

### 2. 研究の概要

電子航法研究所では、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 降下と表記）の研究を行っている。Fixed-FPA 降下では、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に従う余地が出てくることから、低高度での経路延伸等を低減することが可能になると考えられる。

本研究の目的は、fixed-FPA 降下方式の設計方法を確立し、空地連携を達成するために必要とされる機能（速度制御機能、最適な降下角の選定手法等）の要件を定義することである。また、機上における fixed-FPA 降下を支援するため、サポートシステムの開発及び実証実験を行い、fixed-FPA 降下方式における運用構想（ConOps, Concept of

Operations）をまとめることにも焦点を当てる。

令和2年度の研究においては、以下を実施した。

- fixed-FPA 降下の運航性能評価解析
- fixed-FPA 降下における到着管理アルゴリズムの開発
- 降下方式における環境負荷推定モデルの構築

### 3. 研究成果

#### 3.1 fixed-FPA 降下の運航性能評価解析

関西国際空港を対象にファストタイムシミュレーションによる fixed-FPA 降下の有効性を検証した。ここでは、モンテカルロシミュレーションを用いて、異なる運航条件にて FMS-PD と fixed-FPA 降下それぞれ 10,000 フライトを模擬し、燃料消費量等を比較した。図1では、それぞれの降下方式の降下開始点（TOD, Top of Descent）から fixed-FPA 降下終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、従来の CDO（図中の FMS-PD）は TOD 位置が大きくばらつくことがわかった（標準偏差：4.86NM）。一方、fixed-FPA 降下では、航空機の運航性能を考慮しつつ一定の降下角より降下パスが絞られることから、TOD 位置のばらつきが縮小されることが明らかになった（標準偏差：0.99NM）。その結果、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と考えられる。

また、他の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際の fixed-FPA 降下の有効性を定量的に検討した。図2は、指示された遅延時間に対してそれぞれ従来の CDO と fixed-FPA 降下に要する燃料消費量の差異を統計的に示した結果である。縦軸の正の値が fixed-FPA 降下が有効という意味を持つ。Fixed-FPA 降下ではアイドルに近い推力を保ちながら降下することで、推力を維持することにより経路延伸、騒音や燃料消費量の増加につながるスピードブレーキの使用を加えなくても飛行速度を調整することが可能という特徴がある。得られた結果から、120秒以上の遅延が必要とされる際に、fixed-FPA 降下が燃費消費量の観点から便益があることが示された。

#### 3.2 fixed-FPA 降下における到着管理アルゴリズムの開発

令和2年度は、主に独自開発のファストタイムシミュレータを用いて、周辺に他の到着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に焦点を当てた。

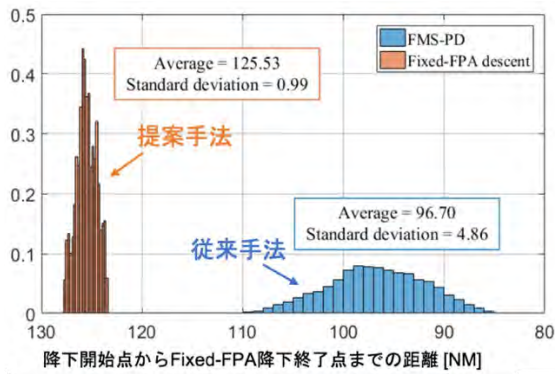


図1 FMS-PD と fixed-FPA 降下の比較結果

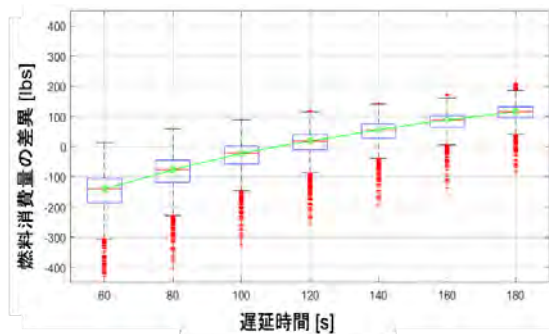


図2 遅延時間における運航性能の比較結果

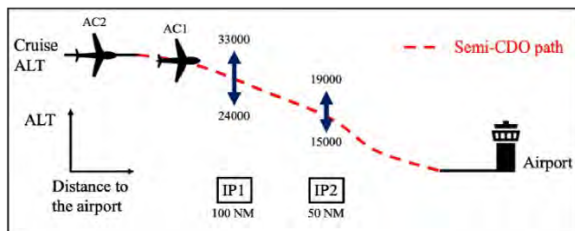


図3 semi-CDO アルゴリズムの概要図

その一環として、慶應義塾大学との共同研究として fixed-FPA 降下を用いた到着管理アルゴリズム「semi-CDO」を開発した。Semi-CDO 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リングすることにより高度制約を算出するアルゴリズムである。Semi-CDO アルゴリズムの概要を図3に示す。図において IP は高度制約指示点を表しており、2つのウェイポイントにおいて高度制約を付加している。

評価解析から、従来の降下方式と比べて、semi-CDO 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。比較的混雑の多い時間帯において関西国際空港の到着機を対象に従来の CDO と semi-CDO アルゴリズムそれぞれを適用して行ったシミュレーションでは、

- ・従来の CDO：周辺の到着機との干渉が発生したため、対象機の30%がCDO実施を中止した。

- ・Semi-CDO：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、対象機が100% semi-CDOを実施することができた。

という結果が得られた。

### 3.3 降下方式における環境負荷推定モデルの構築

令和2年度は、横浜国立大学との共同研究として到着方式における環境負荷モデルの構築を行った。本研究では、神戸空港の容量拡大に向けて提案された、淡路島上空を通過する進入復行方式による環境負荷について数値シミュレーションによる評価検討を行った。米国連邦航空局（FAA, Federal Aviation Administration）開発の AEDT（Aviation Environment Design Tool）を適用し騒音暴露量を、国際民間航空機関（ICAO, International Civil Aviation Organization）が提供する Aircraft Engine Emissions Databank と Boeing 社開発の Fuel Flow Method 2 を用いて排出ガス等を推定し、従来の飛行方式との特徴を比較した。シミュレーション結果と人口密集地区等のデータより、到着方式において排出される NOx、CO2 等環境影響物質並びに騒音の推定手法を確立した。この手法は fixed-FPA 降下提案時にも活用が可能である。

## 4. 終わりに

本年度は、fixed-FPA 降下の運航性能評価に焦点を当てると共に fixed-FPA 降下における到着管理アルゴリズムの開発および環境負荷推定モデルの構築を実施した。次年度は、機上および地上において fixed-FPA 降下の実施プロセスを支援する機能の研究開発に着目する予定である。

## 掲載文献

- [1] D. Toratani, N.K. Wickramasinghe, J. Westphal, and T. Feuerle: “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, December 2020.
- [2] ビクラマシンハ ナヴィンダ, 虎谷大地, 平林博子: “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, 2020年11月.
- [3] 和田真治, 井上正樹, 虎谷大地: “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講演集, 2021年3月.

## 空港面の運用に資する交通分析とシミュレーション【基盤的研究】

担当領域 航空交通管理領域  
担当者 ○山田 泉, 村田 暁紀, マーク ブラウン, 青山 久枝  
研究期間 令和2年度

### 1. はじめに

空港面における航空機の混雑は、円滑な地上走行の妨げとなるだけでなく、地上走行時間の不確かさにつながる。そのため、空港面において混雑しがちな出発便についてスポット出発（以下、出発と称する）の時刻を調整し、誘導路を走行する交通量を平準化することは、地上走行時間管理の有効な策と考えられている。現在、航空交通流管理において出発制御時刻（EDCT: Expected Departure Clearance Time）を発出される航空機数は少ないが、将来、軌道ベース運航の導入後は、スポット出発時刻や離陸時刻を指定される航空機が増加することが予想される。スポット出発時刻の調整は、滑走路付近の待ち行列に対する順序付け及び間隔付けとして作用する。しかしながら、羽田空港をはじめとする国内の混雑空港においては、スポットの使用スケジュールが密に設定されているため、出発時刻の調整幅に応じたスポットの空き時間が必ずしも得られない場合がある。よって、地上走行時間管理をより精緻に行い、空港の運用を効率化するためには、スポットの空き時間の制約および空港レイアウトの制約を考慮した出発時刻管理の方策を検討する必要がある。

### 2. 研究の概要

本研究は1年計画であり、令和2年度は下記を実施した。

- ① 局所的な交通状況が滑走路の順序・間隔付けに及ぼす影響等の分析
- ② 空港レイアウトが順序・間隔付けに及ぼす影響のシミュレーション分析

### 3. 研究成果

局所的な交通状況が滑走路の順序・間隔付けに及ぼす影響等の分析では、航空局から提供を受けている航空機の地上走行に関するデータおよびスポットの運用実績データ等（以下、空港面交通データと称する）を用いて、羽田空港のD滑走路の出発便を対象とした分析を行った。羽田空港では、出発便のスポット出発時刻と離陸時刻を計画的に割り当てる交通管理により、航空機の地上走行

の混雑緩和を図っている。この交通管理において計画される出発時刻をTSAT(Target Startup Approval Time)、算出される離陸時刻をCTOT(Calculated Take-Off Time)という。TSATおよびCTOTはさまざまな制約条件および優先度を考慮して空港における交通流を改善するために算出されるものであり、CTOTは離陸後の交通流の時間管理において離陸時刻の予定情報として用いられることが想定されているため、円滑な航空交通流を計画的に形成するためには、可能な限り多くの出発便がCTOTどおりに離陸することが望ましい。

空港面交通データをもとに、離陸時刻がCTOTどおりとならないケースについて分析したところ、主な要因として、TSATに対して実績の出発時刻(AOBT: Actual Off-Block Time)が出発の遅延などにより大きく乖離するほど、CTOTと実際の離陸時刻の乖離が大きくなることがわかった。加えて、AOBTとTSATの乖離は、離陸順においてCTOTの順からの乖離をもたらし、その結果として離陸時刻がCTOTから乖離する傾向となることを見出された。

そこで、CTOTになるべく近い離陸を達成するために、まず可能な限りCTOTの順に離陸させるのが適当であると考え、離陸順の調節のために地上走行中の順序付けを行う方策を検討することとした。

空港レイアウトが順序・間隔付けに及ぼす影響のシミュレーション分析では、羽田空港の空港面交通データをもとに交通流シナリオを作成し、北風運用のD滑走路出発便を対象として、CTOT順どおりの離陸ができるようにするための誘導路上の順序付けについてシミュレーションを行った。

羽田空港のD滑走路出発便の地上走行の経路においては、図1の赤丸印に示すように、異なるエプロンからの動線が合流する交差点が3か所存在する。シミュレーションでは、これらの交差点において、CTOT順の情報をもとに合流の順序付けを行うこととした。また、同じエプロンからの複数の出発便についても、CTOT順の情報をもとにエプロンから出る順を調節するため、プッシュバック経路の変更、および、プッシュバック後の停止時間の調節を行った。以下ではこれらの操作を「誘導路上

の順序付け」と称する。シミュレーションでは、誘導路上の順序付けを行うことで、CTOT 順に近い離陸順が達成されるかを試みた。

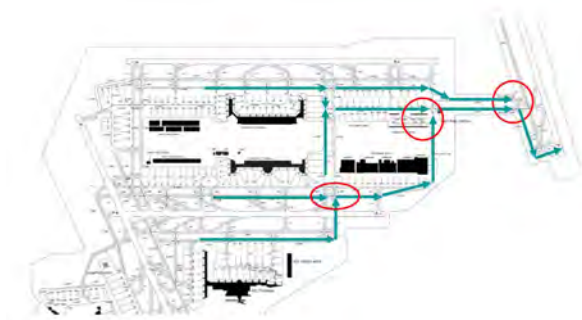


図1 羽田空港D滑走路出発便の動線と合流の交差点

誘導路上の順序付けの効果を評価するため、ある日の空港面交通データの TSAT, CTOT をもとにして、下記の2種類のシミュレーションを行い比較した。なお、AOBT に相当する出発時刻については、TSAT からの乖離を模擬するため、TSAT に乱数を付加して生成した。

- ① 現状模擬シミュレーション：生成した出発時刻どおりに出発し、途中の交差点等においては先着順で通過する
- ② 順序付けシミュレーション：生成した出発時刻どおりに出発し、CTOT 順に基づいて誘導路上の順序付けを施す

順序付けシミュレーションにおいては、出発時刻と TSAT の差が大きいほど、誘導路上の順序付けに伴う交差点等での待ち合わせの時間が長くなり、他機の交通の妨げとなる場合が生じるので、誘導路上の順序付けによる離陸順の調節幅は最大でも±4 便程度とした。この調節幅では、出発時刻と TSAT の±5 分までの差による離陸順のずれを吸収できた。

羽田空港において出発便が混雑する午前9時～11時30分に離陸した出発便70便について、シミュレーションにおける離陸順とCTOTの離陸順の差をヒストグラムにし、2つのシミュレーションを比較したものを図2に示す。図2から示されるように、誘導路上の順序付けを施すことにより、CTOT順に近い順で離陸する割合が増加した。以上より、羽田空港の北風運用のD滑走路出発便において、5分程度TSATからずれて出発しても4機程度までであれば誘導路上で順序を入れ替えることができ、CTOT順に近い離陸順での離陸が可能になることが分かった。

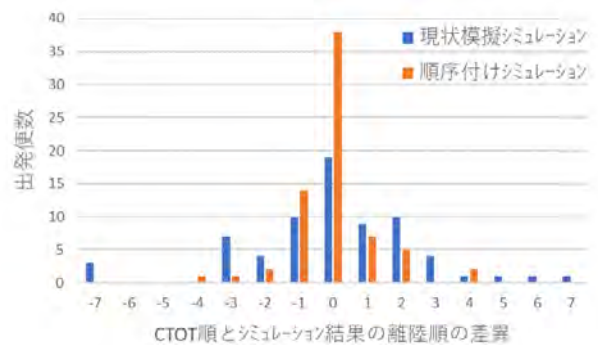


図2 2通りのシミュレーションにおける離陸順とCTOT順の差異の比較

#### 4. 今後の見通し

今年度は、羽田空港の北風運用におけるD滑走路出発便を対象として、誘導路上の順序付けの効果についてシミュレーション分析を行った。今後は、北風運用のC滑走路、および、南風運用の各滑走路についても同様に、順序付けを行う箇所、および順序付けの方法を検討する。また、離陸順だけでなく離陸時刻をCTOTに近づけるために、順序付けの適用条件について検討を進めることとしたい。

#### 掲載文献

- [1] “Japan’s Effort to A-SMGCS: Data-Driven and Simulation-Based Research Activities on Airport Surface Traffic Flow,” ICAO APANPIRG CNS SG/24 IP/16, 2020年12月.
- [2] 青山久枝, 山田泉, “東京国際空港における舗装の点検・補修計画の効率化に資する交通データの活用について,” 第21回空港技術報告会, 2020年12月

航空交通データの分析への機械学習の適用【萌芽的研究】

担当領域 航空交通管理領域

担当者 ○岡 恵, 蔭山 康太, 中村 陽一, 虎谷 大地

研究期間 平成 29 年度～令和 2 年度

1. はじめに

人工知能の一研究分野である機械学習は現在様々な研究がなされているが、現実の課題に対する適用については試行錯誤の段階であり、とりわけ航空交通に適用した実績は少ない状況である。一方で、研究に使用できる航空交通のデータは IT 技術の発達等により、ここ数年で格段に増加している。

本研究の目的は、課題の定義から改善案の策定までの一連の流れを想定した航空交通データの分析における機械学習の適用手法を開発する事である。適用の一例として、飛行時間の予測と到着機の順序付けのモデル化を行う。

また、航空交通データから ATM パフォーマンス指標値を算出し、諸外国の手法との比較などを行うことで指標の算出手法の検討を進める。さらに、運用方式の改善による効率性向上を検証するための、軌道生成技術を活用した実運航シミュレーション環境を構築する。

2. 研究の概要

本研究は 4 年計画である。令和 2 年度の研究においては、以下を実施した。

- ・機械学習の複数の手法による飛行時間予測の比較
- ・着陸のための順序間隔付けを含む飛行時間の予測
- ・深層学習の画像認識による到着順序の予測

3. 研究成果

3.1 機械学習の複数の手法による飛行時間予測の比較

複数の機械学習の手法を比較するため、特定の経路を飛行する便を対象に飛行時間の予測を行い、その誤差の比較を行った。

対象とした便は、中国・韓国方面から ONIKU という FIX で福岡 FIR に入域し、羽田空港に到着する便（主に上海、ベトナム便）である。想定した予測タイミングは、羽田空港手前の SPENS 通過予定時刻の 50 分前で、その時点での航空機位置や飛行計画は既知として予測に使用した。予測した区間は、SPENS 通過予定時刻 50 分前から降下開始地点付近である FLUTE までとした。飛行時間の予測は、機械学習での回帰を用い、図 2 に示す 12 種類の方法で行った。各便の実際の飛行時間を真値とし予測誤差を求めた。

機械学習を行うことにより、飛行時間予測の RMSE（Root Mean Square Error：二乗平均平方根誤差）は 153.3 から改善し、回帰手法により異なるが最も改善幅の大きかった指数 GPR（Gaussian Process Regression）という手法では 66.3 まで改善した。

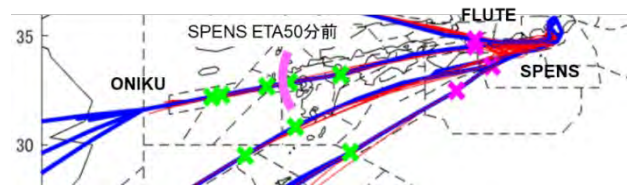


図 1. ONIKU 入域機の航跡例

線形回帰	ロバスト線形	ステップワイス線形
アンサンブルブースティング木	アンサンブルバギング木	二乗指数 GPR
決定木	線形 SVM	ガウス SVM
Matern5/2 GPR	指数 GPR	有理二次 GPR

図 2. 回帰による飛行時間予測の結果

(グラフ内数字は RMSE,

横軸は実飛行時間, 縦軸は予測値)

### 3.2 着陸のための順序間隔付けを含む飛行時間の予測

到着機は滑走路での間隔確保のために空港周辺空域で時間調整が行われる。そのため、空港周辺空域では混雑状況により飛行時間が大きく異なり、正確な予測が困難であるという特徴がある。

そこで、過去 30 分間の空域（図 3 セクタ 1 および 2）内部の航空機数やセクタ 1 入域時の高度、速度などを入力データとし、ニューラルネットワークによる実際の飛行時間の予測を試みた。空域内部の機数を用いて入域時点の混雑状況を考慮することにより、時間調整が行われる空域内の航空機に対する飛行時間の予測精度を向上できる可能性が示された（図 4）。

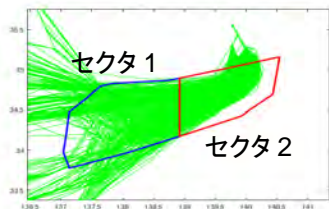


図 3. 対象とした空域と航跡

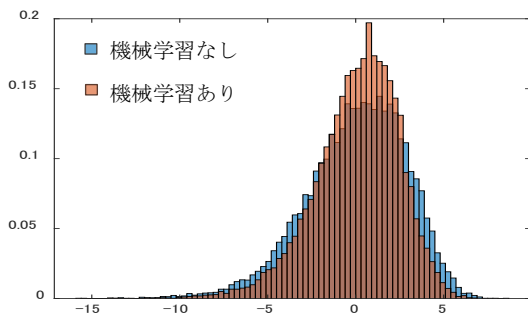


図 4. 予測誤差の比較

### 3.3 深層学習の画像認識による到着順序の予測

空港における到着機の航空交通流管理では、到着順序予測に基づき遅延が割り当てられるため、到着順序の予測精度向上は、効率の良い交通流管理へ寄与すると考えられる。一方、近年の人工知能技術の目覚ましい向上は、深層学習での画像認識技術の向上によるものである。そこで、空港への到着順序予測を深層学習による画像認識で行い、どの程度順序の入れ替わりを予測できるか確認した。

空港を中心とした 150NM 円内へ入域した時刻を便毎に抽出し、時間順に先頭から 2 便ずつ航空機対を作成した。次に、この航空機対の位置をドット絵として描画し、入力画像を作成した。その航空機対の到着順序の入れ替わりが、

実際に起こったかどうかを教師データとして、画像認識を行い、到着順序予測を行う試行モデルを作成した（図 5）。入力画像は、到着順序の入れ替わりが無い航空機対を約 1 万 5 千枚、到着順序が入れ替わる航空機対を約 5 千枚の、計 2 万枚用意した。試行モデルでの到着順序予測では、順序が入れ替わる航空機対のうち、約 7 割を検出することができた。

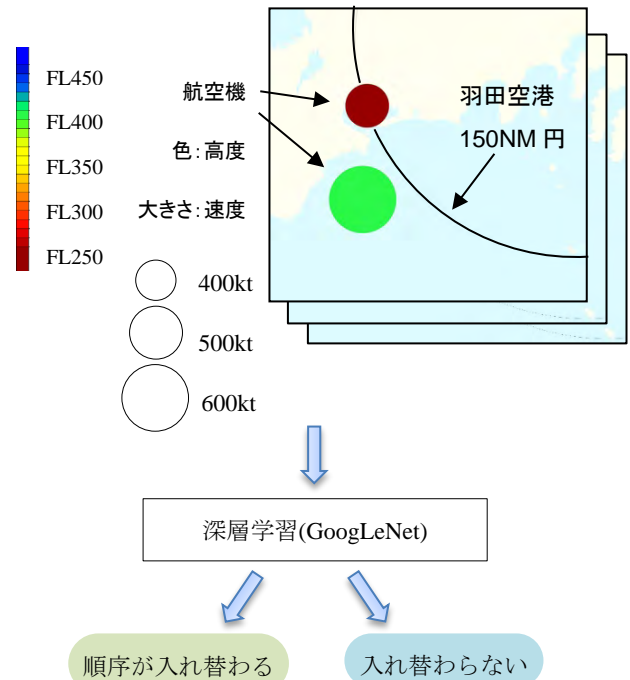


図 5. 深層学習の画像認識による到着順序の予測

## 4. まとめ

航空交通のデータ分析において機械学習の適用手法を検討するため、今年度は、機械学習の複数の手法による飛行時間予測の比較、着陸のための順序間隔付けを含む飛行時間の予測、深層学習の画像認識による到着順序の予測を行った。手法の違いによる予測誤差の違いや特徴量としての入力項目の選択、深層学習での画像認識による予測方法についての知見を得ることができた。機械学習を実際の運用で使用するためには、モデルの改良やデータの確保などまだ様々な課題があるが、機械学習を行うことにより予測精度の向上などの効果が得られる可能性が高いことがわかった。

### 掲載文献

- [1] M. Oka and K. Kageyama, "A Study for Additional-time in Japanese Terminal Airspace(KPI08)", Performance Benchmarking Work Group meeting, 2017.9
- [2] 岡, 武市, 蔭山, "航跡データを使用した羽田空港到



- 着機の飛行時間予測誤差の分析”，第 55 回飛行機シンポジウム，2017.11
- [3] 岡，福田，“航空交通のオープンデータとその活用”，電子情報通信学会 システム数理と応用研究会，2017.11
- [4] M. Oka and K. Kageyama, ” A Study for Additional-time in Japanese Terminal Airspace (KPI08) - Updated ” , Performance Benchmarking Work Group meeting, 2017.11
- [5] 岡，“CARATS オープンデータの概要説明”，CARATS オープンデータ活用促進フォーラム，2017.12
- [6] 岡，“CARATS Open Data を用いた機械学習による軌道予測”，CARATS オープンデータ活用促進フォーラム，2017.12
- [7] 岡，“航空交通分野における運用データの活用”，日本船舶海洋工学会 東部支部ワークショップ，2018.3
- [8] 岡，“軌道予測における誤差要因の検討”，CARATS 航空交通流時間管理検討 WG，2018.3
- [9] 岡，“地上システムにおける ETA 予測精度の分析方法の検討”，CARATS 航空交通流時間管理検討 WG，2018.7
- [10] 岡，福田，“CARATS Open Data の航跡から出発・到着空港および推奨経路を推定する方法について”，CARATS 研究開発推進分科会資料，2018.8
- [11] 岡，“CARATS オープンデータ概要説明”，CARATS オープンデータ活用促進説明会，2018.9
- [12] 岡，蔭山，“CFDT 枠の検討”，CARATS 航空交通流時間管理検討 WG，2018.10
- [13] M. Oka and K. Kageyama , ” Update for GANP KPIs(JANS) - Additional-time in Terminal Airspace(KPI08) - ” , Performance Benchmarking Work Group meeting, 2018.12
- [14] 岡，“CARATS オープンデータ概要説明”，CARATS オープンデータ活用促進フォーラム，2018.12
- [15] 岡，福田，中村，上島，“航空交通の運用データの一般公開と活用（その 3）”，日本航空宇宙学会 第 50 期年会講演会，2019.4
- [16] 岡，“航空交通データの提供と研究開発促進の取組について”，日本航海学会 第 140 回講演会，2019.5
- [17] 虎谷，武市，岡，“航空交通流管理と到着間隔づけの相互運用性の検討”，電子航法研究所研究発表会，2019.6
- [18] M. Oka, K. Kageyama, “Additional-time in Terminal Airspace (KPI08)”, Performance benchmarking work group, Bangkok, Thailand, Jun. 2019.
- [19] 中村，“ADS および ICAP の誤差に関する初期的解析”，CARATS 航空交通流時間管理検討 WG，2019.6
- [20] 岡，“SCAS 試行再開後の評価について”，CARATS 航空交通流時間管理検討 WG，2019.6
- [21] 岡，“Stream4 の CFDT 変更量”，CARATS 航空交通流時間管理検討 WG，2019.6
- [22] 中村，岡，“CARATS オープンデータ概要説明”，CARATS オープンデータ活用促進説明会，2019.9
- [23] D. Toratani, M. Oka, N. Takeichi, “Simulation Study on the Interoperability between Air Traffic Flow Management and Tactical Arrival Management”, EIWAC 2019, Tokyo, Japan, 2019.9
- [24] 岡，“CARATS オープンデータの概要説明”，CARATS オープンデータ活用促進フォーラム，2019.11
- [25] 虎谷，岡，武市，“ATFM と到着間隔づけの連結シミュレーション”，CARATS 航空交通流時間管理検討 WG，2019.12
- [26] M. Oka, K. Kageyama, “Additional time in Terminal Airspace(KPI08)”, Performance benchmarking work group, Brussel, Belgium, 2019.12
- [27] 岡，福田，上島，“航空交通データ(CARATS Open Data) の提供と研究開発への活用”，日本航空宇宙学会誌 第 68 巻 第 4 号，2020.4
- [28] 岡，“CARATS オープンデータの概要説明”，CARATS オープンデータ活用促進フォーラム，2020.12
- [29] 岡，“航跡データの一般への提供と ATM の研究開発への活用”，航空保安大学校 公務員教養 特別講義，2020.12
- [30] 虎谷，“システム思考に基づく TBO 実現に向けた航空交通管理のアーキテクチャ検討”，CARATS ATM 検討 WG TBO アドホック，2020.12
- [31] 中村，“時間予測における風の影響の解析”，CARATS 航空交通流時間管理検討 WG，2020.12
- [32] 虎谷，“CFDT シャドーループ解析方針の提案 最大可能調整幅の推定”，CARATS 航空交通流時間管理検討 WG，2020.12

## 大規模災害時における海上・航空輸送に関わるボトルネック解析【競争的資金研究】

担当領域 航空交通管理領域  
担当者 ○山田 泉, 青山 久枝  
研究期間 令和元年度～令和3年度

### 1. はじめに

わが国は災害大国である。近年で言えば、2011年に発生した東日本大震災をはじめ、2016年熊本地震、2018年西日本豪雨など地震に限らず、水害や台風等あらゆる災害が起きている。過去に発生した大規模災害では、自衛隊をはじめ消防や警察、海上保安庁などあらゆる組織が被災自治体に入り、救援活動を行っている。特に東日本大震災のように被災範囲が広域に及んだ場合、傷病者・孤立者等の救援需要に対して供給が追いつかない状況が発生する。そのため、陸・海・空が連携をして救助・救援活動に当たる必要がある。

本研究は、過去の災害の教訓を活かせるように、大規模災害時に発生し得る輸送システムの混乱など様々なシナリオ群を事前に確認して知見を蓄積し、将来への備えが十分か、どのようなボトルネックが発生しそうかを事前に発見できるシミュレータの開発を目的とする。これを基に、訓練担当者等と意見交換を通じて、検討すべき要件、課題や問題点について整理を行い、防災計画に反映させることを最終目標とする。

### 2. 研究の概要

本研究は、海上技術安全研究所が代表機関となり、海上技術安全研究所、港湾空港技術研究所、当所が連携して行うプロジェクトである。当所は分担機関として、大規模災害時における防災ヘリコプター等に関する空港運用のシミュレーション評価を担当する。

対象は、南海トラフ地震において大きな被害が想定される静岡県および高知県とする。

本研究は3年計画であり、令和2年度は下記を実施した。

- ① 大規模災害時における空港面運用シミュレータのフレームワークの検討
- ② 大規模災害時における空港面運用シミュレータの開発

### 3. 研究成果

本年度は電子航法研究所が開発した空港面運用シミュレータを用いて、「南海トラフ地震における具体的な応

急対策活動に関する計画」の中で「大規模な広域防災拠点」あるいは「航空機用救助活動拠点」として位置付けられている静岡空港および高知空港を対象として大規模災害時の空港運用のシミュレーションを行った。

まず、大規模災害時における空港面運用シミュレータのフレームワークの検討において南海トラフ地震等の大規模災害時に対応した航空輸送体制や医療救護計画等の文献調査を行い、空港施設や防災ヘリコプター等の離発着などのシミュレーション条件を検討した。

現地担当者へのインタビュー調査を実施することはできなかったが、国土交通省大阪航空局高知空港事務所に協力いただきメールで調査を行った結果や昨年度行われた静岡県の図上訓練での資料などに基づいて、大規模災害時に想定される臨時駐機場や走行可能な誘導路等を抽出し、空港面運用シミュレータに設定した。

静岡空港は静岡県広域受援計画（図1）を参考に多目的用地を臨時駐機場とし、既存の誘導路と繋いだ（図2）。



図1 静岡県広域受援計画における静岡空港の防災機能

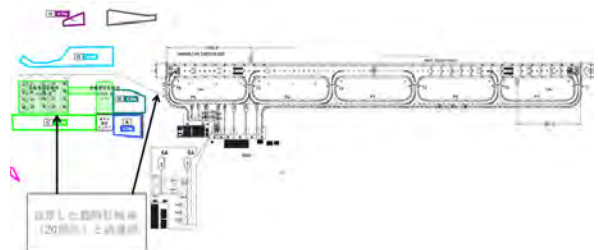


図2 静岡空港のシミュレーション設定画面

また、高知空港については図 3 に示される駐機場所を設定し、使用可能な誘導路等を制限した（図 4 参照）。

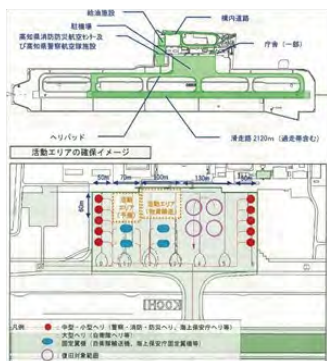


図 3 緊急物資・人員等輸送受入れ機能の確保（回転翼・固定翼機）のための復旧施設



図 4 高知空港のシミュレーション設定画面

また、過去に発生した大規模災害である東日本大震災時の花巻空港における回転翼機・固定翼機の離発着や駐機状況等運用を模擬したシナリオを作成した。離発着機のはほとんどは回転翼機であった。

空港面運用シミュレータについては、大規模災害時から復旧に至る過程で固定翼機と回転翼機が混在する運用について模擬できるように改修を行った。

両空港について、大規模災害時は非常時であることから離発着時はすべて滑走路あるいはヘリパッドをすることを前提とし、1つのシナリオで2つの滑走路運用方向のシミュレーションを実施した。

静岡空港のシミュレーション結果から、臨時駐機所への出入りが可能な誘導路が1本であること、また出入りに関する制限事項があることから交通量の多い時間帯には到着機によって臨時駐機場への出入りする航空機が走行を一旦停止することがある。これに伴い後続の航空機も走行を停止するため誘導路上に滞留がみられた（図 5 参照）。ただし、この制限は空港設置管理者の承認によって解除される可能性もあるため現地担当者へ確認が必要である。



図 5 滞留の状況（静岡空港）

高知空港のシミュレーション結果から、固定翼機に関してはエプロン内で走行方向に制限があるため、固定翼機の駐機場所が効率的に使用できないケースも見られた。さらに、誘導路の復旧状況によって対応可能な交通量も変化することもあるが、確保可能な駐機場所の数や設置位置による航空機の走行への影響を検討する必要がある。

どちらの空港においても交通量の多い時間帯に滑走路の運用方向によって出発機の走行時間が異なることもわかった。図 6 および図 7 に滑走路運用方向による出発機および到着機の走行時間の違いを表した例（高知空港）を示す。

30分毎の出発機および到着機の機数を積み上げ棒グラフで表した。また、各時間毎に離発着した出発機および到着機の走行時間の合計を求めた。これらの航空機がすべて滑走路を使用して走行途中で待機することなく走行した場合に要する時間（標準時間）を100%として、シミュレーション結果で得られた走行時間の合計の割合を折れ線グラフで表した。ただし、滑走路を使用せずヘリパッドを使用して離着陸した航空機の走行時間は100%未満の場合となる。

どちらの図においても、各時間帯に到着機はほぼ100%となっている。出発機については、図 6 では出発機が300%を超える時間帯があったが、図 7 では最大でも200%程度であり走行途中で待機があまり見られないことを意味している。

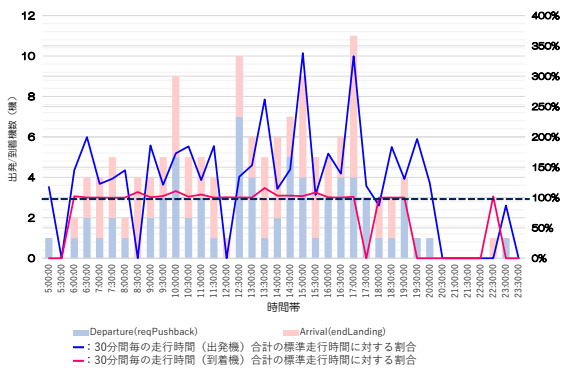


図 6 Runway14 運用時の走行時間 (高知空港)

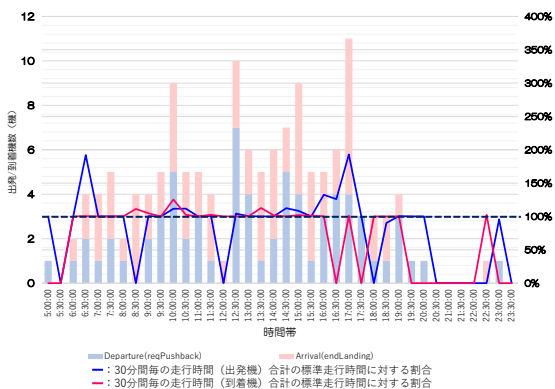


図 7 Runway32 運用時の走行時間 (高知空港)

における海上・航空輸送に関わるボトルネック解析，”令和 2 年度交通運輸技術開発推進制度研究成果報告書，2021 年 3 月。

#### 4. 今後の見通し

現地担当者へのインタビュー調査およびシミュレーション結果の評価とともに，シミュレーションの設定条件や想定している離発着機数等の確認を行いたい。また，その結果を反映させたシミュレーションを行い，より現実的な観点からボトルネックの抽出を行いたい。

#### 謝辞

本研究は国土交通省の交通運輸技術開発推進制度（採択番号 19192255）の助成を受けたものです。

#### 掲載文献

- [1] 荒谷太郎，間島隆博，小濱英司，山田泉，大矢陽介，青山久枝，松倉洋史，“マルチエージェントシステムによる傷病者輸送シミュレータの開発，”土木計画学研究・講演集，Vol.62，2020 年 11 月。
- [2] 荒谷太郎，間島隆博，松倉洋史，山田泉，青山久枝，小濱英司，青山万丈，大矢陽介，“大規模災害時に

## 離陸機の運用最適化に関する研究【競争的資金研究】

担当領域 航空交通管理領域

担当者 ○森 亮太

研究期間 令和元年度～令和3年度

### 1. はじめに

世界の航空交通量は、今後も増大が見込まれており、それに伴い燃料消費量の削減は喫緊の課題となっている。本研究では、離陸機における運用に焦点を当て、燃料消費量の削減方策についての検討を行う。

### 2. 研究の概要

#### 2. 1 離陸機の燃料消費削減

地上走行時の離陸機の燃料消費削減を行うためには、タキシング時間削減を行うことが有効である。離陸機は通常出発準備ができ次第スポットを出発し、滑走路手前まで地上走行(タキシング)を行う。滑走路が離着陸機で混雑している場合には、滑走路付近に着いても地上で待たされ、タキシング時間が通常より長くなり、必要以上の燃料消費を行うこととなる。これを避けるために、一定時間スポットで待機することでタキシング時間を削減する試みが行われており、各航空機に設定されたスポット出発時刻をTSAT(Target Start-up Approval Time:スポット出発承認時刻)と呼ぶ。しかしながら、実際には不確実性が存在し、事前に想定したシナリオ通りに事がすべて進むわけではない。そのため、不確実性を考慮した上でTSATを適切に設定しなければ、タキシング時間を減らすだけでなく、同時に本来離陸できた時間よりも離陸時刻が遅くなってしまいうリスクが伴う。そのため、TSATをどのように設定すればよいかという点を本研究で取り扱うこととする。

#### 2. 2 上昇経路の最適化

上昇時においては、一般にできるだけ早く巡航高度に辿り着くことが燃料削減につながると言われており、上昇中にできるだけ水平飛行をなくす取り組みが行われている。このような運航をCCO(Continuous Climb Operation)と呼んで、国際民間航空機関(ICAO)においてもCCOによる運航が推奨されている。CCOが運航できない背景にあるのは、他の航空機との干渉であったり、管制・空域の問題であったりするケースが多く、これらの制約がない場合には、現状でもCCOによる運航は実施されている。現行の航空機は、巡航開始点(TOC/Top of Climb)に至るまでは、航空機に搭載されているFMS(Flight Management System)によ

り計算された上昇プロファイルを飛行するが、その際TOCまで最大上昇推力を使用する。最大上昇推力による上昇は、最適解に近い上昇ではあるが、厳密に最適ではない。本研究においては、現行の最大上昇推力による上昇が純粋な最適解と比較してどの程度の乖離があるのかを明らかにし、現行の上昇より効率的な上昇手法の提案を行う。

またこれに関連し、航空機重量を航空機の飛行履歴から推定する手法についても同時に検討を行う。

### 3. 研究成果

#### 3. 1 離陸機の燃料消費削減

昨年度の研究において、TSATの設定アルゴリズムの改善のみでは限界があり、TOBT(航空会社提供のスポットアウト可能予想時刻)の精度向上が必要なことが示唆された。本年度は、TSATの設定を効率よく行うため、既に発出されたTOBTの履歴をもとにAOBT(実際のスポットアウト時刻)の分布推定を行った。その結果、同じようにTOBTが設定された場合でも、そのTOBTが更新されない場合は時間が経つとともにTOBTの精度が向上することがデータから示された。また、TOBTが複数回過去に更新されている場合は、そうでない場合に比べてTOBT精度が劣ることが示された。今後は、TOBTを分布推定したことにより、TSATの設定パフォーマンスがどの程度向上するかを検証する予定である。

#### 3. 2 上昇経路の最適化

本年度においては、上昇中の推力設定をどのように行えば、より運航者が簡便に提案手法を実施可能かということの検討を行った。その結果、先行研究で提案したV/Sモード(Vertical Speed/上昇率の設定モード)を使用するのではなく、FMC(Flight Management Computer)の推力設定モードを変更することにより、よりワークロードが少なく実施できることが示唆された。

本研究はJSPS 科研費 JP 19K15119 の助成を受けたものです。

[掲載文献]

- [1] R. Mori, (2019) "Evaluation of Departure Pushback Time Assignment Considering Uncertainty Using Real Operational Data," 9<sup>th</sup> SESAR Innovation Days.
- [2] R. Mori, (2020) "Fuel-Saving Climb Procedure by Reduced Thrust Near Top of Climb," *Journal of Aircraft*, Vol. 57, No. 5, pp. 800-806.

担当領域 航空交通管理領域  
 担当者 ○村田 暁紀  
 研究期間 令和2年度～令和3年度

1. はじめに

近年、航法装置の発展により、航空機は柔軟に経路を飛行することが可能となりつつある。柔軟な経路選択は運航効率向上に寄与する一方、航空管制官にとって交通流の複雑さが増すことで、作業負担増加が懸念される。この問題に対応するため、管制官に最適な管制指示を提案する、支援システムが求められる。

先行研究では最適手法を用いた支援システムが提案されていたが、出力される管制指示は一意であった。しかしながら管制官は航空機へ指示を出す際、様々な状況を加味した上で複数の実施可能な指示の中から、経験に基づいた適切な指示を選択している。また、最適化を行う際には定量的な計算が必要となるが、管制負荷を評価指標とするには、管制負荷を燃料消費量や飛行時間のように、定量的に定義する必要がある。

2. 研究の概要

本研究では、1年半の計画で以下の機能を有する管制支援システムの開発を行う。

- i. 機械学習による管制作業量の定量化
- ii. 多目的最適化アルゴリズムの開発

i. はデータ処理、特徴量生成・推定モデルの構築により推定を行う。図1は管制負荷量推定のアプローチ概略を示す。航空機の動態情報と管制指示データにより特徴量を生成しこれを学習モデルの入力データとする。学習モデルを構築するために正解データは航空交通流モニタリング指標に基づき推定モデルを構築する。これをニューラルネットワークにより実現を目指す。

ii. は、管制官に提示するトレードオフ関係を持つ解集団を獲得するため、最適化手法を並列化するアプローチを採用する。この場合に均一な解集合の獲得が困難であるため、最適化の途中で解同士情報を共有する。図2は提案手法の情報共有例を示す。グラフの縦軸横軸はそれぞれ飛行時間、管制負荷の評価値を表し、評価が大きいほどそれぞれの値が低くなる。(飛行時間、管制負荷量をそれぞれ最小化することを表す。) 5つの黒いシンボルはそれぞれ最適化途中の解を表す。右吹き出しは解の一例を示す。左から2つ目と3つ目の解は解同士が近い関係にあるため、似たような情報を持つ。この二つが情報共有を行

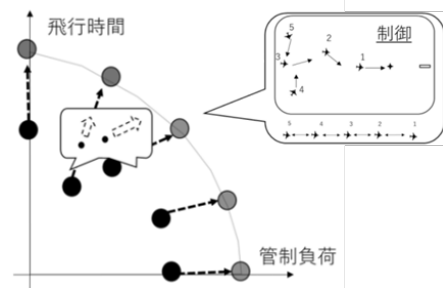


図2 多目的最適化における解共有法

う際に、解全体として均一に分布するような方向(例では離れる方向)へと解更新する。この時、3つ目の解は最適化の進行が2つ目と比べて早いため、2つ目の解は3つ目の解の情報を利用し、2つ目の進行を早めるよう作用させる。

3. 本年度の成果

令和2年度においては、二つのテーマの目標を達成するべく、i. においては機械学習のためのデータ形式の検討及び整理、ii. においてはシミュレーション環境の構築及び多目的最適化へ拡張するための、単一目的における最適化アルゴリズムの改良に取り組んだ。

具体的には、学習データとして利用する軌道データのノイズ処理、抽出条件整理等の元データの処理を行った。次に、このデータに基づいて同時刻における交通流の特徴量の一部を生成した。多目的最適化アルゴリズム構築においては、アルゴリズム評価に必要な羽田空港周辺における経路等のシミュレーション環境の構築および交通流シナリオの検討を行った。

4. 今後の展望

i. においては、航空機の軌道情報に加えて、管制官の指示データも利用した特徴量生成を行う。ii. においては概要で説明した方法論を実装する。本研究はJSPS 科研費 JP 20K22438 の助成を受けたものです。

掲載文献  
なし

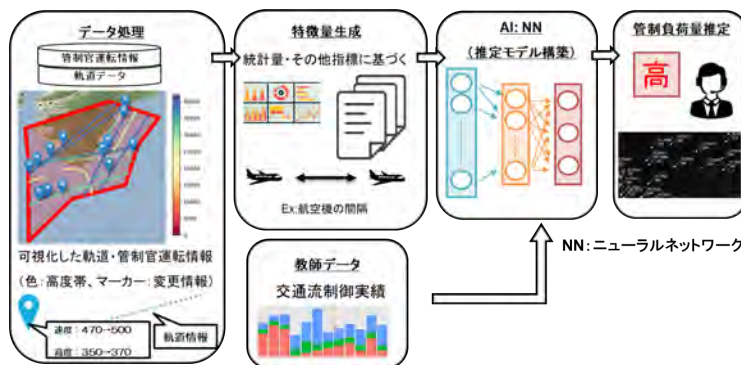


図1 負荷量推定アプローチ

## 2 航法システム領域

### I 年度当初の試験研究計画とそのねらい

令和2年度においては、当所の長期ビジョンを基に行政当局などの要望を考慮しながら下記の研究を計画・実施した。

1. PBN と GBAS を活用した高度な計器進入方式に関する研究
2. 新しい GNSS 環境を活用した進入着陸誘導システムに関する研究
3. 地上型衛星航法補強システムの設置環境条件に関する研究
4. 気象及び空港・空域条件に対応した後方乱気流間隔に関する研究
5. GNSS 代替 (APNT) のための地上系航法システムのインテグリティ保証
6. 我が国における高カテゴリーGBAS (GAST-D) 導入のための技術開発
7. 多地点からの地上大気光観測を用いたプラズマバブル成長過程の解明
8. レーダー観測網・複数衛星・モデル計算を総合した赤道域電離圏変動特性の国際共同研究
9. 多数ロケットと地上観測に基づいた電離圏擾乱生成メカニズムの研究
10. 衛星測位精度改善に向けた電離圏擾乱の発生予測: マルチスケール観測の実現
11. スワンナプーム空港 GBAS 実証実験に向けた「電離圏調査及び電離圏脅威モデルの構築」の技術支援
12. 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
13. 令和2年度「測位補強サービスの性能評価に係る評価手法の指導及び検証」
14. 令和2年度「準天頂衛星システムの性能評価支援」
15. 準天頂衛星を利用した SBAS による LPV 提供に関する整備の認証作業に係る技術支援
16. 令和2年度における CNS 性能管理業務に係る支援作業における MSAS サービスの性能保証に係る作業支援

1 及び 2 は重点研究, 3 から 6 は指定研究, 7 から 10 は競争的資金, 11 から 16 は受託による研究である。

1 は, RNP の RF レグと GLS/ILS の最終進入セグメントを接続した RNP to xLS 方式に関して, 空港環境におけ

る制約等の条件と導入便益を明確にするとともに, 衝突危険度モデルを改良する研究である。

2 は, 次世代規格であるマルチコア・複数周波数の SBAS 及び GBAS を活用した進入着陸誘導システムについて, 導入における課題に対応するための研究である。

3 は, GBAS 基準局の離着陸機等による GPS 信号の遮蔽の影響を緩和する方策を提案し, 剰余敷地の少ない空港における整備候補地を拡大して, 我が国空港への GBAS の円滑な導入への貢献を目指す研究である。

4 は, 後方乱気流に関する最低距離間隔の見直し (RECAT) により混雑空港の着陸容量の拡大に資するため, 時間ベースの管制間隔運用を我が国の混雑空港に導入する際の課題と要件を明確にし, 将来のダイナミック・ペアライズや同一滑走路に複数着地点を設定するコンセプトの実現可能性の検討を目的とする研究である。

5 は, GNSS の短期代替システム (APNT) を構築する DME/DME 測位を RNP 運航に適用するため, マルチパス誤差や地上 DME 装置のモニタロジックを検討しインテグリティ (完全性) を保証する。また, 欧州と連携して中～長期的 APNT の実現を検討する研究である。

6 は, GBAS (GAST-D) 特有の技術要件を取り入れた効率的な総合性能評価手法を開発し, 我が国における諸環境を考慮し GAST-D の総合性能評価を実現することを目標とする研究である。

7 は, 小型暗視カメラを用いた大気光イメージャを磁気低緯度地域に多数設置し, プラズマバブルの空間構造の成長過程などの解明を目指す研究である。

8 は, 衛星航法に影響を与えるプラズマバブルに関する研究であり, 大気変動から電離圏へのミッシングリンクを明かにし, プラズマ発生予測を目指す研究である。

9 は, 日本学術振興会海外特別研究員としてノルウェー王国オスロ大学において行った研究であり, 電離圏擾乱をロケット観測する研究である。

10 は, 電離圏擾乱のメカニズムを解明するため, VHF シンチレーションを定常観測する装置を開発・設置して観測する研究である。

11 は, GBAS の国際展開を支援するためタイ国の電離圏調査及び電離圏脅威モデルの構築を目的とする研究である。

12 は, 我が国の GBAS 電離圏調査の経験を生かし, 低磁気緯度に位置するアジア諸国の電離圏環境を調査するための研究である。

13 は, 準天頂衛星システム「みちびき」のサービス品



質を維持・改善するため、運用主体から独立した組織で行われる品質評価の一部であり、サブメータ級測位補強サービス（SLAS）及びセンチメータ級測位補強サービス（CLAS）の測位誤差を評価するための研究である。

14 から 16 は、同様に準天頂衛星システム及び SBAS に関わる評価を支援するための研究である。

## II 試験研究の実施状況

4 ヶ年計画の 3 年度にあたる「PBN と GBAS を活用した高度な計器進入方式に関する研究」では、昨年度までに選定したモデル空港で新たな飛行方式を設計し、航法データベースを構築してフルフライトシミュレータ検証を実施した。また飛行実験のために可搬型 GBAS プロトタイプシステムを開発した。併せて、飛行データを活用して ICAO 衝突危険度モデルを改良し、その妥当性を検証した。

5 ヶ年計画の初年度にあたる「新しい GNSS 環境を活用した進入着陸誘導システムに関する研究」では、次世代 GBAS の運用コンセプトを国際会議に出席し、二周波化しても課題となる電離圏シンチレーションの特性を調査した。また、石垣島実験施設のデータから各衛星系（GPS・GLONASS・Galileo・BDS・QZSS）の信号特性を評価した。併せて、GNSS のセキュリティ対策に取り組みデジタル署名技術の実装について検討した。また、ノルウェー・オスロにて準天頂衛星の受信実験をおこない、北欧地域にて L5S 信号が受信できることを確認した。

4 ヶ年計画の 2 年度にあたる「地上型衛星航法補強システムの設置環境条件に関する研究」では、GBAS 基準局等の設置環境条件の緩和を提案するため、新千歳空港の GBAS 基準局データから、着陸機通過に伴う GPS 信号瞬断の発生回数を分析し、計算機シミュレーションによって必要な離隔距離を求めた。

4 ヶ年計画の 2 年度にあたる「気象及び空港・空域条件に対応した後方乱気流管制間隔に関する研究」では、時間ベースの管制間隔運用の安全評価の指針を示すため、先行導入された英国ヒースロー空港について調査した。また、便益を評価するためターミナル空域における到着交通流のシミュレータを用いて導入評価を行い、潜在便益の存在を確認した。

3 ヶ年計画の 2 年度にあたる「GNSS 代替（APNT）のための地上系航法システムのインテグリティ保証」では、GPS 障害時のバックアップ体制の強化のため、欧州で提案されたマルチ DME による RNP 運航（短期 APNT）の国内での実現性を検討した。本年度は、DME インテグリ

ティ保証のためのモニタロジックを 5 コンポーネントで解析して定量化した。また飛行検査データを利用して旋回時の誤差発生について課題を抽出した。

2 ヶ年計画の初年度にあたる「我が国における高カテゴリ GBAS（GAST-D）導入のための技術開発」では、既存の GAST-D シミュレーションアルゴリズムの調査を実施し、シミュレータの基礎設計を実施して、GAST-D アベイラビリティ計算ツールを開発した。

5 ヶ年計画の 4 年度にあたる「多地点からの地上大気光観測を用いたプラズマバブル成長過程の解明」では、プラズマバブルの成長・伝播過程観測網（石垣、大宜味、タイ・Chumphon、台湾・台南、フィリピン・Iroio 島）を用いた観測を実施した。太陽活動は極小期にあたり、プラズマバブルの観測例は少なかったが、2020 年 2 月 20 日には石垣島において、複数の大気光現象領域が東進するプラズマバブルが観測された。

5 ヶ年計画の初年度にあたる「レーダー観測網・複数衛星・モデル計算を総合した赤道域電離圏変動特性の国際共同研究」では、複数衛星系・複数周波数（MC/MF）対応受信機によるシンチレーション観測をタイ・バンコクとインドネシア・赤道大気レーダーサイトにおいて実施し、赤道大気レーダー観測と比較して、MC/MF GNSS 信号におけるシンチレーションとプラズマバブル 3 次元構造と比較解析した。

2 ヶ年計画の最終年度にあたる「多数ロケットと地上観測に基づいた電離圏擾乱生成メカニズムの研究」では、オスロ大学が実施したロケット観測実験に参加すると共に、過去のロケット観測実験のデータから電離圏擾乱の生成・成長メカニズムを分析した。実験では、スピッツベルゲン島から打上られカस्पオーロラ上空を飛翔したロケットで電子密度と電場変動から電離圏擾乱を観測し、オーロラ発光強度との相関を考察した。

4 ヶ年計画の初年度にあたる「衛星測位精度改善に向けた電離圏擾乱の発生予測・マルチスケール観測の実現」では、VHF シンチレーション受信機と観測プログラムを開発した。

単年度計画のスワンナプーム空港 GBAS 実証実験に向けた「電離圏調査及び電離圏脅威モデルの構築」の技術支援では、タイ・モンクット王工科大学ラカバン（KMITL）、タイ航空局（CAAT）協力して構築したバンコック国際空港周辺の GNSS ネットワークを活用して電離圏データを収集した。また、電離圏データ解析訓練（3 回）を実施し、解析方法の技術指導をして静穏時電離圏パラメータを導

出した。

単年度計画の「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」では、ICAO アジア太平洋地域における GBAS 電離圏脅威モデル構築に関連して、アジア各国の GBAS 電離圏環境調査を実施することとし、令和 2 年度はベトナム科学アカデミー・地球物理研究所 (IGP-VAST) と協力してデータ収集環境を構築した。

単年度計画の令和 2 年度「測位補強サービスの性能評価に係る評価手法の指導及び検証」では、評価期間 (2020 年 4 月から 2021 年 3 月) において全国の代表的な電子基準点 (24 局) を選定して、SLAS と CLAS の測位誤差 (95% 値) を評価し有効性を示した。

### Ⅲ 試験研究の成果と国土交通行政、産業界、学会に及ぼす効果の所見

当領域の研究は、航空行政での活用などを通じて、航空

交通の安全性、航空利用者の利便性向上、環境負荷の軽減などの達成に向けて行われている。

航空に使われる技術は国際的な調和が必要であるために、国際機関である ICAO、RTCA 及び EUROCAE において基準の作成、改訂のための活動が行われている。SBAS 相互運用性検討ワーキンググループ会議 (IWG)、国際 GBAS ワーキンググループ (I-GWG) 会議などにおいても検討がなされている。当領域では、これらの国際会議に参加し、技術資料を提出して基準作成等の国際的な活動に寄与している。

当所の数多くの研究成果は、今後設置・運用する航空保安システムの技術基準、運用基準の策定等に必要な技術資料として、国土交通行政に直接貢献するとともに、米国航法学会 (ION)、電子情報通信学会、日本航空宇宙学会、測位航法学会等における査読論文や講演発表として周知され、活用されている。

(航法システム領域長 福島 莊之介)

## PBN と GBAS を活用した高度な計器進入方式に関する研究【重点研究】

担当領域 航法システム領域

担当者 ○齊藤真二，福島荘之介，森亮太，中西善信（客員研究員），  
藤田 雅人（客員研究員），上島一彦（客員研究員）

研究期間 平成30年度～令和3年度

### 1. はじめに

ICAO（国際民間航空機関）は、PBN（性能準拠型航法）概念による航法を促進し、GBAS（地上型衛星航法補強システム）等の新しい進入着陸システムを導入して、安全で効率的な進入方式を実現し、運航の最適化を図る計画である。このため、現在 RNP の RF レグ（円弧旋回）による中間進入と GLS（GBAS Landing System）等による最終進入経路を接続する新しい進入方式（RNP to xLS）の国際基準が検討されている。

近年、我が国では PBN による RNAV/RNP 進入方式が多く空港に展開され、RF レグを使った RNP AR 進入が普及段階にある。また、東京国際空港へ GBAS の導入が進んでいる。このような状況で、近い将来 RNP to xLS の国内展開が期待され、我が国の空港環境をふまえた実現可能性と将来の便益の明確化が要望されている。併せて、航法機器の高性能化に対応して障害物評価表面を緩和するため、衝突危険度モデルの改善が国際的な課題となっている。

### 2. 研究の概要

本研究の目的は、RNP の RF レグと GLS/ILS の最終進入セグメントを接続した RNP to xLS 方式に関して、実現性と導入便益を明確にするため、飛行方式設計の空港環境における制約や要求等の条件を明かにすることである。また、衝突危険度モデルを改良して、新たな障害物間隔高度の評価手法を考案することである。

このため、(1) 国内空港の経路設計を調査してモデル空港を選定し、将来の飛行方式を設計する。さらに、飛行方式に基づいて航法データベースを構築して、フルフライトシミュレータ（FF シミュレータ）検証を実施し、(2) 可搬型 GBAS プロトタイプ装置を開発して、実験用航空機による飛行実証を実施する。さらに、(3) 飛行データを活用して ICAO の衝突危険度モデルを改良し、妥当性を検証する。

### 3. 研究結果

#### (1) モデル空港の方式設計とフライトシミュレータ検証

現在、RNP の RF レグを使った航法には、RNP AR 方式が

あり、国内ではこれまで 30 空港に導入されている。RF レグの利用は、保護区域の狭い自由度の高い経路を設計できることにあり、これまで複数の空港で経路短縮による燃料消費や環境負荷低減の便益が報告されている。これに対して RNP to xLS 方式は、この RF レグを中間進入セグメントに使い GLS または ILS の最終セグメントに接続する精密進入方式である。RNP to xLS は、RNP AR 方式が APV（Approach Procedure with Vertical guidance）に区分され、非精密進入と同様な最低気象条件となることに対して、最終進入の限界点の高度を低く設定して低視程時の着陸を可能とし、加えて RF レグによる便益を享受できる。ただし、現在の GLS/ILS 装備は、中間進入セグメントから最終進入セグメントへの会合動作を必要とするため、RNP AR 方式よりは最小経路長が数 NM 長い設計基準となる予定である。本研究では RNP to xLS 方式を国内空港へ適切に展開するため、空港周辺の山岳など障害物件の制約を考慮して国内空港へ導入した場合の導入効果を検討し、将来の飛行方式を設計して検証する計画である。

本年度は、研究初年度に選定したモデル空港（3 空港）に設計した 4 方式について、民間航空機と同等の機能を高い忠実度で再現したフルフライトシミュレータ（操縦士訓練用途で利用される）を用いた検証実験を継続し行った。

この結果、モデル空港に設計した経路は、十分なフライアビリティを有し、オートパイロットや GPWS（対地接近警報装置）などが正常に動作し、併せて操縦士のワークロ



図 1：フライトシミュレータによる検証実験

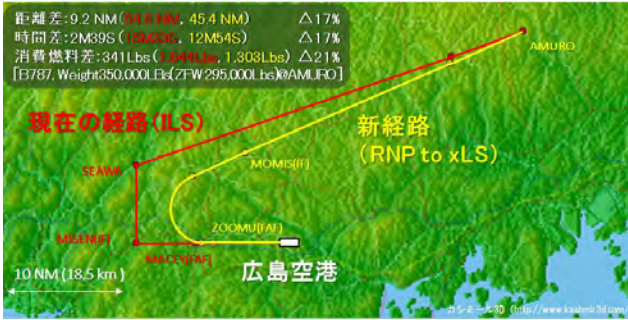


図 2: 研究用 RNP to xLS 進入方式の経路短縮・環境負荷軽減効果

ードが過大とならず、横風や低視程下など不利な条件でも安定に飛行可能であることがわかった。

さらに、燃料流量を計測したところ、現行の ILS 経路と比較して 20%以上の燃料削減効果があることがわかった。これは B787 で計算すると年間ドラム缶 3,000 本（百万ポンド）以上の燃料削減、年間 3,000 トン以上の CO2 削減に相当し、カーボンニュートラル実現への貢献が期待される。



(上) 計測車両と VDB 送信アンテナ  
(下) GBAS 機器

図 3: 飛行実証時の可搬型プロトタイプ装置の搭載イメージ

## (2) 可搬型プロトタイプ構築と飛行実証準備

選定したモデル空港において RNP to xLS 飛行方式の飛行実証実験を行い技術的な実現性や課題を検証する計画である。この実現のため、技術成熟度レベル (TRL: Technology readiness levels) が高く、実用型 GBAS 装置と等価な機能を有する (冗長系を除く) 可搬型プロトタイプの開発に着手した。プロトタイプは、遠隔地の複数の国内空港において短い準備期間で飛行実験を実現するため、実験用車両内に機材を搭載した可搬型とする。実験用車両を空港内等に移動し、GNSS アンテナなどを展開すれば、VHF アップリンク (VDB) により GBAS による最終進入経路 (FAS: Final Approach Segment) が実現可能となる。

本年度は、昨年度までに開発した可搬型プロトタイプ装置のソフトウェア部とハードウェア部のシステムインテグレーションを行い、実験室環境での動作検証を実施した。また、2 箇所のモデル空港において実施する RNP to xLS の飛行実証に備え、総合通信局の無線局落成検査を受検して免許を取得し、移動局の実験試験局として VDB 信号の送信が可能となった。

## (3) 衝突危険度モデルの改善提案

本研究においては、衝突危険度モデルの構成要素のうち、現状に比べてより正確な衝突確率を求めることができる数学モデルの開発に取り組む。昨年度までに、現行の計算モデルをもとに、新たな数学的に定式化を行い、その効果の検証を行った。今年度は、実際に提案手法を適用するため、検証時に用いた仮定を実データにより確認する方法について検討をはじめた。

データを大量取得するためには、ADS-B を用いる手法

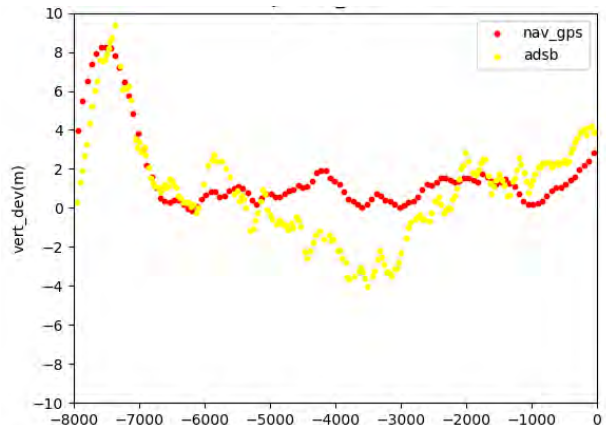


図 4: ADS-B と機上データの比較の例

が簡便だと考えられる一方、ADS-B から必要なデータが取得できるかどうかは別問題である。その確認にあたり、GBAS を試行運用しているデータを取得し、相当する ADS-B データからどの程度の精度でデータが取得できるかの検証を開始した。その結果、ADS-B データは機上データとは精度が異なることがわかり、何らかの補正が必要であることが示唆された。

#### 4. おわりに

本年度の主な成果は、(1) 選定したモデル空港に対し設計した研究用の飛行方式によるフルフライトシミュレータ検証を実施し、経路削減効果等を示したこと、(2) 飛行実証のための可搬型プロトタイプシステムインテグレーションを行い実験室環境で動作検証を行ったこと、(3) 飛行データを活用して ICAO の衝突危険度モデルを改良するため、複数の障害物が近く配置される場合の改良案を定式化したことである。

#### 掲載文献

- [1] R. Mori, M. Fujita, “Accurate Estimation of Ground Obstacle Collision Probability During ILS Approach,” IEEE Access, Vol. 8, pp. 66662-66671, 2020.
- [2] 福島, “RNP to xLS 進入方式の設計と検証,” CARATS GNSS アドホック会議, 2020 年 8 月.
- [3] S.Saito, et.al, “Status of GBAS Related Studies of ENRI,” International GBAS working group (I-GWG)-LAT034, Sept. 2020.
- [4] 齊藤真, 福島, “可搬型衛星航法補強装置について,” 第 58 回飛行機シンポジウム, 2020 年 11 月
- [5] 齊藤真, “可搬型 GBAS プロトタイプ装置の開発,” 日本航海学会航空宇宙研究会, 2020 年 11 月
- [6] R. Mori, “OAS Software Development”, ICAO Instrument Flight Procedure Panel (IFPP/15-3), WP1-005, 2021.
- [6] R. Mori, “OAS Software Development”, ICAO Instrument Flight Procedure Panel (IFPP/15-3), WP1-005, 2021.

## 新しいGNSS環境を活用した進入着陸誘導システムに関する研究【重点研究】

担当領域 航法システム領域  
担当者 ○坂井 丈泰, 齋藤 享, 吉原 貴之, 毛塚 敦, 渡邊 浩志, 北村 光教, 高橋 透  
研究期間 令和2年度～令和6年度

### 1. はじめに

航空機の航法には衛星航法システムGNSSの導入が進められており、日本では平成19年度から運用されているMSAS (SBAS)に加えて、令和2年度には一部の空港でGBASが稼働を開始した。これら現行のSBAS及びGBAS規格はGPSのみしか対応していないが、いずれも次世代規格の策定が進められており、GPS以外のコアシステムに対応するとともに複数の周波数を使用可能となる。これら次世代規格に対応した次世代GNSS補強システムによれば電離圏活動の影響を受けにくいロバストな航法が可能となり、低磁気緯度地域にあり電離圏活動の影響を受けやすい我が国においてはメリットが大きい。一方、今後は次世代GNSS補強システムが各国において実装されることとなるが、それらについては相互運用性の確保がきわめて重要な課題となっている。

本研究は、このような新しいGNSS環境を活用した進入着陸誘導システムについて、導入における課題に対応するために実施することとしたものである。令和2年度は、5ヶ年計画の初年度であった。

### 2. 研究の概要

新しいGNSS環境を活用した進入着陸誘導システムの導入における次のような課題について、本研究において検討する。

第一に、GNSSによる進入着陸システムGBASの次世代GNSS環境への対応である。近年は衛星航法システムの変革期であり、既存システム(米国のGPS及びロシアのGLONASS)については信号数の追加などの改良が、また一方では欧州(Galileo)や中国(BeiDou)による独自システムの構築が進められている。静止衛星による補強システムSBASについてはこれらに対応した次世代規格が策定されたことから、今後はGBASに関する規格化活動が本格化する見込みであり、これに対応する必要がある。

第二に、補強システム間の相互運用性の確保である。SBASやGBASといった補強システムはサービスプロバイダ各国により開発されることになるが、標準規格

にもとづいて実際の開発を行うとその解釈に齟齬を生じる場合がある。アビオニクス機器も含めていかなる組合せにおいても所定の動作をすることが標準規格により保証されているわけではないことから、相互運用性を確認し、必要に応じて標準規格にガイダンスを与えることが考えられる。

いま一つの課題は、GNSSにおけるセキュリティ対策技術の開発である。GNSSについては主に無線信号を使用することによる脆弱性が指摘されており、認証機能を付与することで対策することが検討されている。また、GNSSに対する影響が大きい電離圏の様相を観測できるレーダ等の外部センサを活用することで補強システムの性能を改善できることから、その具体的な方策及び期待できる効果について検討する必要がある。

本研究では、これらの検討対象について、コンセプト及び技術的要件の検討とともに研究開発を実施する。研究の実施にあたり、ICAOにおける検討状況を常に把握し、GNSS及び航空システムの国際性に十分配慮することとしている。

### 3. 実施内容と成果

#### 3.1 次世代GBASの運用コンセプト開発

次世代GBASについてはICAO NSP(航法システムパネル会議)にて運用コンセプト及び基本的事項の検討が行われ、隔週のオンライン会議に参加して対応した。新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の影響により会議の進捗に遅れがあり、また航空需要の減退により次世代システムを早期に規格化する機運が後退したことから、次世代システムについて時間をかけて議論すべきとの方向性となり、今年度までに結論は出なかった。

一方、二周波数化をした場合であっても問題となる電離圏シンチレーションについてGNSS及びレーダによる観測結果を比較することでその特性を調査し、対策として次世代GBASにおいてはGNSS衛星数の増加が効果的であることを明らかにした。図1はその一例であり、レーダエコーの範囲内ではL1周波数及びL5

周波数で同時にシンチレーションを生じている例がある一方、信号経路がレーダエコーの範囲外となっているGNSS衛星があることがわかる。

### 3.2 次世代GNSS環境の信号特性評価

石垣島実験施設の受信データを使用して、各衛星系（GPS・GLONASS・Galileo・BDS・QZSS）の信号特性を評価した。図2はその例であり、従前より使用されているL1信号に比べて、新しく送信されているL5信号は雑音小さいことがわかる。

### 3.3 GNSSにおけるセキュリティ対策技術の開発

ICAO NSPに参加し、SBASを使用したセキュリティ対策について議論した。具体的な方式としてはデジタル署名技術を応用する方向であり、実現性について検討した。十分な暗号耐性をもたせるにはSBASで現在は使用されていないL5 Q-chを使用する必要があるが、この場合は信号干渉の程度について追加の検討を要することが明らかとなった。

### 3.4 SBAS相互運用性検証実験のための予備実験

欧州との間で計画しているSBAS相互運用性検証実験の予備実験として、ノルウェー・オスロにて準天頂衛星L5S信号の受信実験を行った。この結果、北欧地域にてL5S信号を受信できることを確認し、検証実験のフィージビリティを確認した。図3は結果の一例で、仰角が7度程度以上の時間帯に十分なC/N<sub>0</sub>をもって信号を受信できたことがわかる。

## 4. まとめ

本研究では、新しいGNSS環境を活用した進入着陸誘導システムについて導入における課題に対応することを目指しており、令和2年度は次世代GBASの運用コンセプト開発に参画するとともに次年度以降に計画している実験等の準備作業を行った。次年度は次世代GBASの方式提案を行うとともに、プロトタイプを使用した飛行実験等を開始し、また研究活動の国際的な展開を充実させることとしたい。

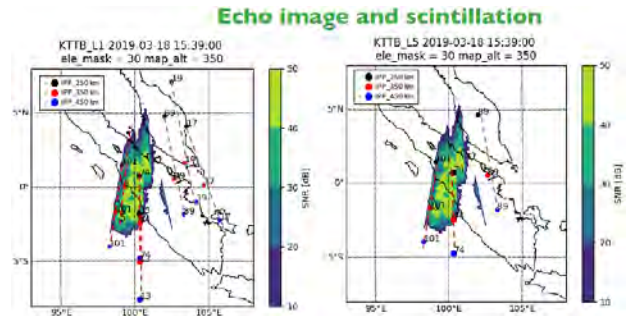


図1 GNSS及びレーダによる電離圏シンチレーションの同時観測の例  
レーダエコーと重なる領域で、L1帯(左)及びL5帯(右)で同時にシンチレーションを生じている

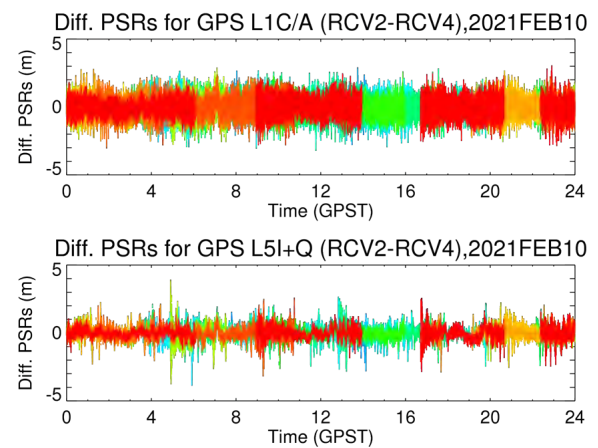


図2 信号特性評価の例  
(上)L1信号に比べ、(下)L5信号は雑音小さい

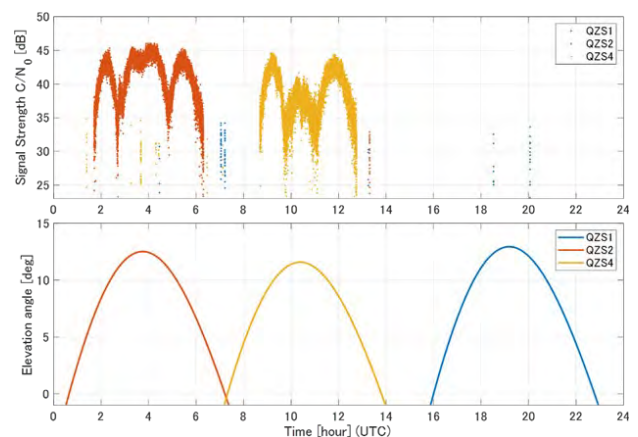


図3 SBAS相互運用性検証実験のための予備実験  
(下)仰角が7度程度以上の時間帯に、(上)十分なC/N<sub>0</sub>でL5S信号を受信した(QZS-1衛星はL5S信号を送信していない)

掲載文献

- [1] 松田国幸, 北村光教, 井下亨, “Doppler shift of QZS-7 satellite,” ICAO NSP GSSVWG, April 2020.
- [2] 細川敬祐, 坂井純, 富澤一郎, 齋藤享, 津川卓也, 西岡未知, 石井守 (July 2020), “A monitoring network for anomalous propagation of aeronautical VHF radio waves due to sporadic E in Japan,” Earth, Planets and Space, 72:88.
- [3] Acharaporn Bumrungrit, 齋藤享, Pornchai Supnithi, “A study of equatorial plasma bubble structure using VHF radar and GNSS scintillations over the low-latitude region,” JpGU-AGU Joint Meeting, July 2020.
- [4] 北村光教, 渡邊浩志, 坂井丈泰, “準天頂衛星システムサブメータ級測位補強サービスにおけるシステム間バイアスの推定,” 測位技術振興会第2回研究発表講演会, Sept. 2020.
- [5] 齋藤享, 福島荘之介, “Status of GBAS related studies of ENRI,” 第34回EUROCONTROL Landing and Take-Off Task Force, Sept. 2020.
- [6] 齋藤享, Acharaporn Bumrungrit, Pornchai Supnithi, “Study of the ionospheric scintillation and plasma bubble structure by using EAR and MC/MF GNSS receiver,” 第14回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, Sept. 2020.
- [7] 齋藤享, 細川敬祐, 坂井純, 富澤一郎, “Study of structures of the sporadic E layer by using dense GNSS network observations,” ION GNSS+, Sept. 2020.
- [8] 齋藤享, 吉原貴之, Le Huy Minh, Pornchai Supnithi, “GBAS海外展開のための電離圏環境評価,” 電子航法研究所研究発表会, Sept. 2020.
- [9] 坂井丈泰, 北村光教, 渡邊浩志, “L5 SBASによるGNSS信号認証メッセージ,” 第64回宇宙科学技術連合講演会, Oct. 2020.
- [10] 吉原貴之, 北村光教, 渡邊浩志, 坂井丈泰, 麻生貴広, “SBASを利用した鉄道車両測位のためのGNSS受信信号の品質監視手法の検討,” 第64回宇宙科学技術連合講演会, Oct. 2020.
- [11] 坂井丈泰, “国際標準補強システムSBASの現況,” GPS/GNSSシンポジウム, Oct. 2020.
- [12] 齋藤享, 細川敬祐, 坂井純, 富澤一郎, “Study of Sporadic E layer characteristics by using ROTI maps,” 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, Nov. 2020.
- [13] 坂井丈泰, “Japanese GNSS Future System Evolution in the 2020-2030 Perspective,” European Navigation Conference, Nov. 2020.
- [14] 齋藤享, “Update to the NSP Job Card NSP.007.02,” ICAO NSP/6, Nov. 2020.
- [15] 細川敬祐, 木村康拓, 坂井純, 齋藤享, 富澤一郎, 西岡未知, 津川卓也, 石井守 (Jan. 2021), “Visualizing Sporadic E using Aeronautical Navigation Signals at VHF Frequencies,” Journal of Space Weather and Space Climate, vol.11, no.6.
- [16] 齋藤享, 吉原貴之, 福島荘之介, “Status of GBAS related studies of ENRI,” 第35回EUROCONTROL Landing and Take-Off Task Force, March 2021.
- [17] 齋藤享, 細川敬祐, 坂井純, 富澤一郎, “Es層の発生メカニズム解明に向けたGNSS観測網を用いた構造解析,” GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)研究会, March 2021.
- [18] 渡邊浩志, “L5 SBASメッセージ,” 航空無線, Spring 2021.



## 地上型衛星航法補強システムの設置環境条件に関する研究【指定研究】

担当領域 航法システム領域  
担当者 ○齊藤 真二, 毛塚 敦, 齋藤 享, 吉原 貴之  
研究期間 令和元年度～令和4年度

### 1. はじめに

地上型衛星航法補強システム (GBAS) の CAT-I 地上装置は複数の国々で導入が開始されている。我が国においても羽田空港への設置が開始され、今後、各地の空港への導入が見込まれている。我が国の空港においては、諸外国の空港に比較して滑走路周辺に十分な剰余敷地が存在しておらず、周辺障害物や離着陸航空機等の影響によるアベイラビリティの劣化を避けて GBAS 基準局を最適に配置することが難しいことが懸念されている。これまで、電子航法研究所において空港内で取得した GPS 信号の解析結果からも、滑走路近傍における GPS 信号の受信において、離着陸航空機の影響があることが判明している (図1)。欧米においても、滑走路延長上に設置した GBAS 基準局での上空通過機の影響が報告され、航空機を用いた評価等も行われている。

本研究は、GBAS の基準局等の地上機器の設置環境条件の緩和方策を提案することで、滑走路近傍に十分な剰余敷地が存在しない空港における GBAS 整備候補地の拡大を目的として開始した。

### 2. 研究の目的と実施項目

本研究の目的は、基準局等の設置環境条件の緩和方策を検討し、GBAS 設置空港における整備候補地の拡大を実現することである。

具体的には、離着陸機による GPS 衛星信号の遮蔽等の影響を軽減する地上処理アルゴリズムの開発、空港環境で



図1：新千歳空港 GBAS の基準局配置と離着陸機による影響 (2dB 以上の変動箇所)

- ・ 2018年6月の1ヵ月の基準局 GPS データの解析結果
- ・ 赤線のエリア：19L 着陸機が遮る範囲
- ・ 青線のエリア：19R 着陸機が遮る範囲
- ・ 青円のエリア：01L 離陸機の影響と考えられる変動

取得したデータによる検証、基準局等の GBAS 地上機器の実現可能な設置環境条件の検討、基準局配置に対するアベイラビリティの評価などを実施する計画である。

### 3. 実施概要

令和2年度は、評価ツール群の整備を行い、実験用 GBAS 装置で取得したデータを基に改良アルゴリズムを施した補正情報を生成し、ユーザ測位を行う一連の GBAS 処理が可能となった。さらに、現状アルゴリズムにおける着陸機による GPS 信号瞬断の影響の計算機シミュレーションを行い、滑走路と受信点の配置と、信号瞬断の発生頻度、捕捉衛星数の変化の関係を算出した。また、滑走路における VDB 強度分布について新たな解析手法を提案した。

### 4. 研究成果

滑走路中心線からの GPS 基準局の距離と GPS 受信信号への影響の関係性を計算機シミュレーションで検討した。着陸機は3度パスで新千歳空港 19L に進入すると仮定し、時刻と機種は CARATS オープンデータから 2018年5月29日を利用した。GPS 衛星の方向は、同日の衛星軌道情報 (エフェメリス) から、24 時間分を計算する。GPS 信号を受信する基準局位置は、滑走路中心線から ±600m、滑走路進入端から 0~600m の範囲で変化させる。着陸機の影響は、GPS 信号の電波伝搬から第1フレネルゾーンが着陸機により遮られた場合に影響すると判定した。搬送波平滑化処理の時定数は 100 秒とし、開始までの待ち時間 (200 秒) は衛星を測位に利用しない。

図2は、シミュレーションの結果であり、基準局位置と着陸機が GPS 受信信号に影響を与える回数を示す。横軸は GBAS 基準局の滑走路進入端からの距離、縦軸は滑走路中心線からの距離である。GBAS 基準局を滑走路中心線や滑走路末端に近くに設置するほど発生回数は多く、特に ±50m に設置した場合に頻度が高い。また滑走路中心線からの距離に応じて発生頻度は低下する。図3は、同様に基準局位置と測位に利用する衛星数が 6 機以下となる割合を示す。図から 99% 以上の時間に 6 機以下とならないためには、GBAS 基準局を滑走路中心線から、少なくとも 100m 離隔する必要があることが分かる。

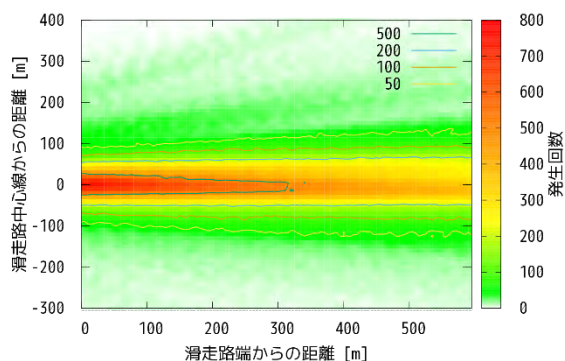


図 2：着陸機による GPS 信号受信への影響の発生回数

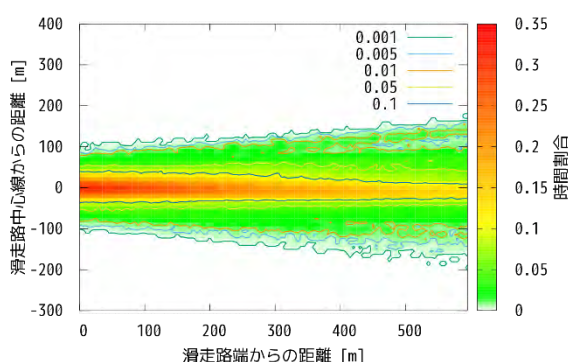


図 3：捕捉衛星数が 6 機以下となる割合

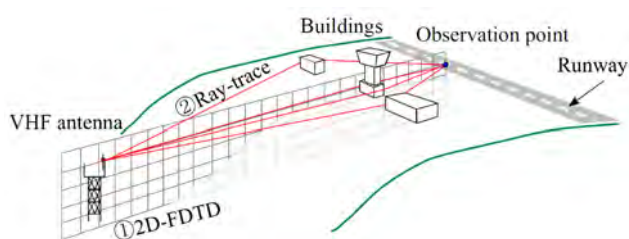


図 4：提案手法の概略

VDB 送信アンテナの設置環境条件に関しては、滑走上での電力分布の解析手法について提案した。提案手法の概略を図 4 に示す。日本の空港の多くは滑走路付近に斜面や崖が存在する。空港面など波長に対して広大な領域に適した電磁界解析手法として Ray-tracing 法が知られているが、同図に示す様な任意形状の斜面がフレネルゾーン内に存在し、解析精度の低下が懸念される。そこで、地形による電力変動を 2D-FDTD 法で、建物による回折波を Ray-tracing 法を用いてそれぞれ解析し、両者を乗算することで滑走路上の電力分布を解析する手法を提案し、有効性について初期検討を行った。

## 5. おわりに

着陸機の通過と基準局における GPS 信号受信への影響を検討するため、計算機シミュレーションを行った。その結果、基準局を滑走路中心線から  $\pm 50\text{m}$  に設置した場合に影響が生じる頻度が高く、測位利用衛星数が 99%以上の時間に 6 機以下とならないためには、滑走路中心線から、少なくとも 100m 離隔する必要があることが分かった。

今後、改良アルゴリズムを組み込んだ地上処理評価ツールにより、アルゴリズム改良効果の検証を行う予定である。

## 掲載文献

- [1] 毛塚 敦, 齊藤 真二, “GBAS VDB の覆域劣化とシステムへの影響評価,” 信学論 C, Vol. J103-C, No.05, 2020 年 5 月
- [2] 須賀 良介, 黒田 哲史, 毛塚 敦, “Validation Measurement of Hybrid Propagation Analysis Suitable for Airport Surface in VHF Band and Its Application to Realistic Situations,” 信学論 C, Vol.E103-C, No.11, 2020 年 11 月
- [3] 橋本 真輝, 渡邊 恵, 須賀 良介, 毛塚 敦, 橋本 修, “2D-FDTD 法と Ray-tracing 法を併用した空港面電磁界解析手法の提案,” 信学総大, 2021 年 3 月

## 気象及び空港・空域条件に対応した後方乱気流管制間隔に関する研究【指定研究】

担当領域	航法システム領域
担当者	○吉原 貴之, 藤井 直樹, 瀬之口 敦*, 山田 泉*, 虎谷 大地* (*航空交通管理領域)
研究期間	令和元年度～令和4年度

### 1. はじめに

先行機によって発生する後方乱気流が後続機の安全運航に影響を与えないようにするため、管制方式基準では航空機を最大離陸重量によって航空機区分（Category）を定義し、その先行機と後続機の組合せに応じた最低離隔間隔を設定する後方乱気流管制方式を規定している。空港周辺において、このような最低離隔間隔は滑走路占有時間等とともに時間あたりの離着陸回数（空港処理容量）と密接な関係にあることから、これら航空機区分と最低離隔距離を見直して、新たな後方乱気流管制方式を導入する動きが世界的に進展している。

具体的には、従来、最大離陸重量で4つに分類している航空機区分をさらに細分化することにより、最低離隔間隔を短縮可能な航空機の組み合わせを創出する。これにより、安全性を従来と同等に担保しつつ、滑走路処理容量の向上を図り、混雑時間帯における遅延や待ち時間の解消といった効果を期待している。この新たな後方乱気流管制方式については、ICAO（国際民間航空機関）のPANS-ATM（The Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management, Doc 4444）で航空機の最大離陸重量と翼幅で分類される新しい7つの航空機区分と、それら組合せ毎の最低離隔間隔が追加され、各国の航空交通管制当局が承認した場合に適用できるように改訂された（2020年11月）。なお、この新たな基準（RECAT-ICAO）は、日本においても東京国際空港、成田国際空港に導入され、他の混雑空港等への導入も期待されている。

ICAOの将来構想であるGANP（Global Air Navigation Plan）においては、さらなる後方乱気流管制方式の高度化についてASBU（Aviation System Block Upgrades）として記述されている。具体的には、TBS（Time-based Separation）と呼ばれる航空機の最低離隔間隔を時間で保つようにする運用の導入が期待されている。これは、英国ヒースロー空港で既に導入されているが、向い風が強い場合において距離で最低離隔間隔を保つようにすると、単位時間あたりの離着陸数が減少するといった影響が生じ、滑走路処理容量が低下する。しかし、先行機の後方乱気流の消滅時間を考慮した安全な最低離隔間隔を時間で保つようにすることで、向い風が強い条件下でも滑走路処理容量の低下を防

ぐ効果が期待される。また、後方乱気流管制方式の最終形態としては時々刻々と変化する周囲の気象条件に応じて、空港・空域の条件を考慮しつつダイナミック・ペアワイズ（D-PWS）と呼ばれる航空機機種毎の最低離隔間隔を設定する管制方式が期待されている。そのため、後方乱気流の特性のリアルタイムの計測技術、ダイナミックな離隔間隔の設定手法、管制間隔の自動指示情報の特定や運用を中断した場合の対処手法のガイダンス等の提示手法等も重要な検討事項となる。

### 2. 研究概要

これら新しい後方乱気流管制方式の実現のためには、導入空港の就航機種や割合、空港面レイアウト及びターミナル空域との接続や交通流の特徴を踏まえた最適化と導入効果の評価、安全性評価が必要である。本研究では、4年間の研究期間の前半及び後半に分けて2つの課題に取り組むこととしている。1つ目の課題は、前半2年間においてTBS運用を東京国際空港や成田国際空港といった我が国の混雑空港に導入する際の課題と要件の明確化である。具体的には、後方乱気流特性から導出される安全な最低離隔間隔の評価に加えて、離着陸間隔の制約となっている滑走路占有時間、周辺空域での管制間隔（レーダー性能も検討）などの要因に着目して現状の航空機間隔を定量解析し、滑走路配置、空港内交通流及び空域条件との関係も考慮した上で、TBSの導入効果を得るための諸条件を明確化することを目的としている。

一方、本研究期間の後半で取り組む2つ目の課題としては、周囲の気象条件に応じたD-PWSによる運用や、近年、GBAS等の新しい着陸システムを活用した先進的な運航コンセプトとして着目されている、同一滑走路に複数着地点を設定した運用を対象とした技術検討を行う。具体的には、安全性評価の視点から後方乱気流の特性のリアルタイムの計測及び監視技術、ダイナミックな最低離隔間隔の設定手法の手順、管制間隔の自動指示情報の特定、及び運用を中断した場合の対処手法のガイダンス等を提示するとともに、それら新方式の導入効果を評価するためのシミュレーション解析を行う。また、それらの先進的な運用を支援するために要求される通信・航法・監視装置の性能要件

や、航空管制官への支援情報の信頼性も評価対象として、管制間隔指示の自動化コンセプトなどのトップレベルから末端までの概念的な安全性設計評価を行う。

### 3. 研究成果

本年度は2年度目にあたり、TBS運用を東京国際空港、成田国際空港に導入する際の課題と要件導出に向けた研究項目を実施した。まず、TBSにおける管制間隔設定における要件の明確化と安全性評価については、東京国際空港におけるLIDAR観測データの蓄積を継続するとともに、後方乱気流の残存時間が長い観測事例を抽出してその特性調査を行った。また、TBSが先行導入された英国ヒースロー空港に関連した文献調査を行い、TBS導入効果の定量評価に用いる最低離隔間隔の設定値として参照するとともに、日本に導入する際に必要となる安全性評価の概略と項目を抽出した。なお、後方乱気流管制間隔の段階的な見直しという観点から、RECAT-ICAO導入後の安全性モニタリング活動に協力するなど、国土交通省航空局交通管理部への技術協力を継続している。

次に、TBS導入効果の定量評価については、東京国際空港、成田国際空港のアプローチ経路上の風速場の特徴調査に着手し、2017年、2018年について到着機の交通流との比較が可能な強い風が強い事例を特定した。それらの中から、成田国際空港の南風運用時（2018年8月16日）を解析対象としてターミナル空域と、空港面交通管理の視点に分けて到着交通流を模擬した計算機シミュレーション実験を実施することとした。前者については、令和元年度に開発したターミナル空域における到着交通流のシミュレータを用いてTBSの導入評価を実施し（図1）、TBS導入の潜在的な便益があることを確認した。また、後者については空港面交通流を模擬する計算機シミュレータ（GRACE）に向い風の強さ等の気象条件を反映したTBS評価が可能であるように機能追加の改修を行い、同日の空港面交通流についてTBS導入後と比較するためのTBS導入前の空港面交通流の模擬まで実施した。今後、GRACEを用いたTBS導入後の模擬を行うとともに、ターミナル空域と接続した評価を実施する予定である。

また、TBS導入にあたり、到着及び出発経路上の風速情報も重要となる。そのため、これら情報の信頼性を担保しつつリアルタイムに得るための有望な手段として航空機監視装置によるDAPs（Downlink Aircraft Parameters）データに着目して、その特性を調査した。今後は、得られた誤差特性からリアルタイム補正手法を開発する予定である。

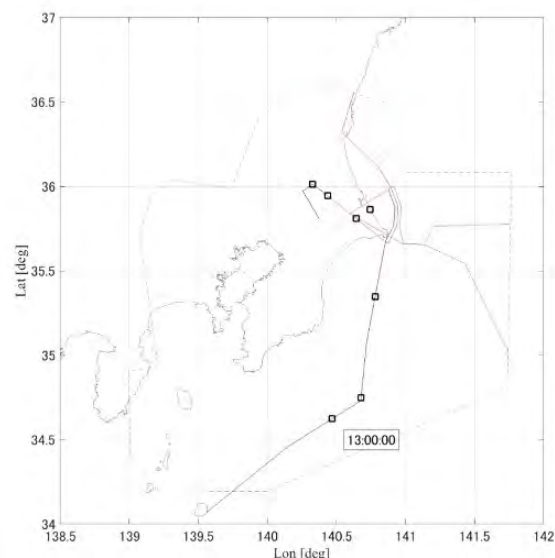


図1. 成田国際空港のターミナル空域における到着交通流についての計算機シミュレータの実験例（2018年8月16日南風運用時）。

### 4. まとめ

本年度は2年度目にあたり、東京国際空港、成田国際空港といった日本の混雑空港にTBSを導入する際に必要となる安全性評価の指針と導入効果の評価についてとりまとめを行うことを目的として実施してきた。前者については、TBSが先行導入された英国ヒースロー空港に関連した文献調査を行い、その概略と必要な項目を抽出した。また、後者についてはターミナル空域における到着交通流のシミュレータを用いてTBSの導入評価を実施し、潜在的な便益があることを確認するとともに、空港面交通流を模擬するGRACEを改修し、TBS導入後と比較するための導入前を模擬する結果を得た。今後は、GRACEを用いたTBS導入後の模擬を行うとともに、ターミナル空域と接続した評価を実施する予定である。また、これら知見をもとに、D-PWS等のさらに高度な後方乱気流管制方式の導入検討を目的とした技術的要件及び課題の明確化に着手する。

最後に、共同研究を実施した三菱電機株式会社の関係各位、LIDAR設置場所や航跡データをご提供いただきました航空局交通管理部の関係各位に感謝の意を表します。

### 掲載文献

- [1] 吉原ほか，“複数の航空機監視装置で受信される高頻度気象情報のMUレーダー観測との比較検証,” 第14回MUR/EARシンポジウム, 2020年9月.
- [2] 吉原ほか，“CARATS航空気象WG EN-6 (OI-26: RECAT3関連),” 第42回CARATS航空気象検討WG, 2020年2月.

## GNSS 代替(APNT)のための地上系航法システムのインテグリティ保証【指定研究】

担 当 部 航法システム領域  
担 当 者 ○毛塚敦, 斉藤真二, 吉原貴之, 田嶋裕久, 藤井直樹  
研究期間 令和元年度～令和3年度

### 1. はじめに

GNSS は航空航法において広く用いられているが、干渉等により利用できなくなった事例が多数報告されている。このような場合においても、航空の安全と効率化を維持するためにバックアップが必要であり、APNT (Alternate Positioning, Navigation and Timing) と呼ばれ、ICAO 航法システムパネル (NSP) で検討されている課題の一つとなっている。近年、欧州では、短期的 APNT として、これまで GNSS 機上装置のみでしか飛行できなかった RNP1 および RNP2 経路を DME/DME 測位により飛行可能とすることが検討されており、EUROCAE において 2017 年から WG-107 として標準化活動が開始され、2020 年度も活動を継続中である。欧州では大規模空港の出発・到着経路への RNP1 の導入が計画されているが、日本国内においても RNP 経路の拡大が検討されており、我が国においても DME/DME 測位による RNP1 および RNP2 運航が導入されれば、GNSS 障害時のバックアップ体制を強化することが可能となる。

### 2. 研究の概要

RNP1 および RNP2 経路の飛行には、航法装置を使用すべきでない場合にパイロットへその旨を通知する能力(インテグリティ)が要求される。このため、RNP1,2 を飛行可能な GNSS 機上装置は異常時に警報を发出する機上性能監視警報 (OPMA) 機能を有する。一方で、現在運用中の DME 機上装置にはこの機能が備えられていない。しかし、地上 DME 局には装置の異常を検出するモニタが備えられているため、地上の DME 局のインテグリティを保証することで RNP1 および RNP2 経路に適用することが考えられており、EUROCAE WG-107 では具体的なインテグリティの保証方法が議論されている。

DME の誤差要因の最も大きなものとしてマルチパス誤差があり、インテグリティ保証における検討課題の一つである。また、現行の地上 DME 局はデュアルモニタで異常検出が行われるが、諸外国で利用可能な OR 方式と国内で使用している AND 方式の違いによるインテグリティ実現性能の差を明らかにする必要がある。上記課題を中心に、本研究では国際標準化活動を通じて欧州と連携しながら検討を進めている。

本研究3年計画であり、本年は2年目である。

### 3. 本年度の研究成果

DME の地上局のモニタロジックの違いによるインテグリティ性能の差について、昨年度は3コンポーネント(トランスポンダ+モニタ×2)で解析を行ったが、実際の DME 地上装置には、各モニタをチェックする機能が付加されている。そこで、モニタチェック×2を追加した5コンポーネントで解析を行った。インテグリティリスクを評価する時刻までの機材の故障シーケンス(順番)は325通り存在し、故障中にも関わらず運用状態となり得るシーケンスを抽出した。また、インテグリティリスクを評価する時刻において単位時間内に発生する故障のシーケンスは243通りとなり、同様に影響のあるシーケンスの抽出を行った。計算の結果、要求インテグリティを $10^{-7}/h$ とした場合、End to End テスト(シャットダウンを伴うメンテナンス)の周期は OR モニタが50,000時間であるのに対し、AND モニタは5,000時間(208日)となることが分かった。次年度は AND モニタ方式でインテグリティリスクを改善する方法を検討する。

マルチパス誤差については、飛行検査センターへの協力依頼の下、RNAV1 STAR/SID における飛行検査データを用いて解析を行った。その結果、多くの STAR 経路において機体旋回に伴い大きな DME 誤差が発生していることが分かった。EUROCAE WG-107 にて公表したところ、トラッキングモードを調べるよう助言を頂いたため、機体旋回時のトラッキングモードと DME 誤差の関連性を調べた。その結果、図1に示すように旋回時に一部発生する大きな DME 誤差はトラッキングが失われたことが原因であることが分かった。しかし、トラッキングが消失していない時でも大きな DME 誤差が発生する場合があり、次年度はトラッキングが失われていない場合での誤差発生メカニズムを明らかにするとともに、その対策方法を検討する。

これまで飛行検査データを用いてマルチパス解析を行ってきたが、同一経路を複数回飛行することによる再現性の確認や、インテグリティ保証で問題となる大きな DME 誤差発生の有無を調査する必要があるため、DME パルス

アナライザ（ローデシュワルツ社製 EDS300）を弊所実験用航空機“よつば”へ搭載した。DME アナライザは機上 DME と同様な測距機能があり、同時に受信パルス波形も観測できる機能を有する。図 2(a)に示すように DME パルスアナライザを前方ラックへ取り付け、図 2(b)のような配線を行い、修理改造検査を 2021 年 4 月に完了した。インタロゲーションは機上から電波を発射するため、東北総通へ無線局の申請を行い、修理改造検査完了と共に実験試験局として開局した。本年度はさらに、図 2(c)に示すような DME パルスアナライザのデータ取得・制御ソフトを作成した。本 DME パルスアナライザは 10 局同時に測距ができるため、中～長期 APNT としてのマルチ DME アルゴリズム検証にも利用可能である。

掲載文献

- [1] 毛塚敦, “DME Multipath Error on STAR,” EUROCAE WG-107 15<sup>th</sup> Meeting, オンライン, 2020 年 9 月
- [2] 毛塚敦, 齊藤真二, “GNSS 代替のための DME 地上局のインテグリティ保証,” 第 20 回電子航法研究所研究発表会, 2020 年 9 月
- [3] 毛塚敦, “GNSS 代替のための DME 地上局のインテグリティ保証,” 航空無線第 106 号, 2020 年 12 月
- [4] 毛塚敦, “GNSS 障害に備えたバックアップ航法 (APNT) の構築,” 第 13 回港湾空港技術講演会, 横浜, 2020 年 12 月
- [5] 毛塚敦, 齊藤真二, “GNSS 障害時の代替航法に関する欧州標準化課題,” 第 58 回飛行機シンポジウム, IB-08, オンライン, 2020 年 12 月

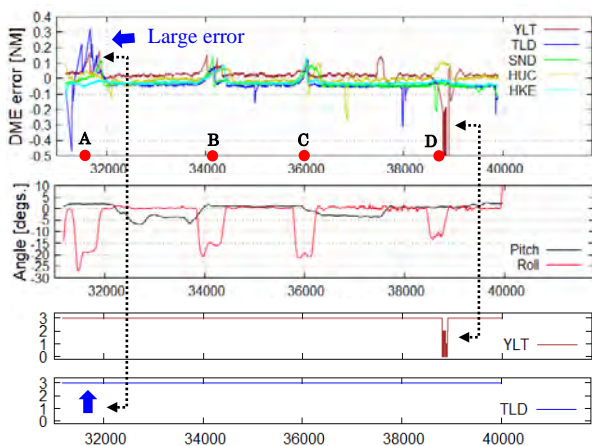


図 1 羽田 STAR における旋回時に発生する DME 誤差

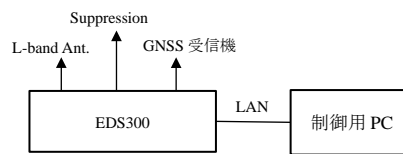
4. まとめ

DME インテグリティ保証におけるモニタロジックの違いによるインテグリティ実現性能の差を 5 コンポーネントで解析を行い、実機に近い形で定量的に算出した。また、飛行検査データを利用して旋回時の DME 誤差発生について課題を抽出した。さらに、DME パルスアナライザの実験用航空機への搭載を完了し、実験試験局として開局した。

次年度は、AND モニタ方式でインテグリティリスクを改善する方法の検討および機体のアンテナパターン解析等を実施して旋回時の誤差発生メカニズムを明らかにするとともに、対策方法を立案する。また、DME アナライザを用いた飛行実験を行うことによりインテグリティ保証に影響する大きなマルチパス誤差発生の有無を確認する。



(a) EDS300 の実験用航空機への搭載



(b) 機内配線



(c) データ取得ソフト (Python)

図 2 DME パルスアナライザのよつば搭載

## 我が国における高カテゴリ-GBAS (GAST-D)導入のための技術開発 [指定研究]

担当領域	航法システム領域
担当者	○齋藤 享, 吉原 貴之, 毛塚 敦
研究期間	令和2年度～令和3年度

### 1. はじめに

我が国ではCARATSにおいてGBAS導入が意思決定され、日本の電離圏環境に対応したGBAS装置を平成28～30年度に整備し、令和2年度に運用評価を行った後にカテゴリ-I運航が開始される予定である。高カテゴリ-GBAS (GAST-D)については、ICAOにおける国際標準の策定において、新石垣空港におけるGAST-D実験装置を用いた研究開発などを用いて参画してきており、平成30年11月にGAST-Dを含むICAO SARPsが発効したところである。我が国のGAST-D導入の意思決定は令和2年度に行われる予定である。

GAST-Dは、カテゴリ-III運航に必要とされる安全性要件を満足するため、カテゴリ-I GBASとは異なる技術コンセプトが導入されている。さらにGAST-D SARPsの検証過程において技術要件に関する大きな修正が加えられている。加えてICAO航法システムパネル(NSP)においては、磁気低緯度地域において性能を最大化するための検討が継続して進められている。

当所では、重点研究(平成23～26年度)「カテゴリ-III着陸に対応したGBAS (GAST-D)の安全性設計および検証技術の開発」としてGAST-D検証用プロトタイプの開発を行ったが、GAST-D SARPsの最終版については研究期間のずれからインターフェースのみの対応となっており、詳細な技術検討は行われなかったため、日本におけるGAST-D導入に向けた技術検討課題として残されている。

また、ICAOにおいて継続されている磁気低緯度地域におけるGAST-D性能の最大化については、磁気低緯度地域におけるGBASと電離圏に関する知見を有する日本の技術貢献が期待されているところである。

### 2. 研究の概要

本研究では、GAST-D特有の技術要件を取り入れた、効率的な総合性能評価手法を開発し、我が国における諸環境を考慮した、我が国の空港環境におけるGAST-Dの総合性能評価を実現することを目標とする。

GAST-D特有の技術要件を取り入れたGAST-D総合性能評価シミュレータを開発し、日本の空港・電離圏環境

の中でGAST-Dの性能評価を行う。シミュレータは、電離圏脅威モデルと空港環境(GBAS基準局設置場所と滑走路配置)、GAST-Dインテグリティモニタ性能及びGNSS衛星稼働状況を入力とし、保証されるレンジ誤差( $E_{IG}$ )を導出し、期待されるアベイラビリティを算出することができるものである。磁気低緯度地域の電離圏環境に対応した技術を取り入れるため、拡張性、柔軟性に優れた設計とする。開発した技術は、日本の空港におけるGAST-D導入時の期待性能評価に必須の技術となり、航空局における日本におけるGAST-D導入の意思決定に不可欠の情報を提供できるものと期待される。

開発した技術および知見は、ICAO NSPにおいて行われているGAST-D SARPs及びガイダンス文書の磁気低緯度地域向け改訂に寄与することができる。また、同様の電離圏環境を共有するアジア太平洋地域においてGAST-D導入のための知見を共有し、日本の技術のアジア太平洋地域への展開につなげていく。

### 3. 研究成果

本年度は、GAST-D総合性能評価シミュレータの基礎検討のため、既存のGAST-Dシミュレーションアルゴリズムの調査を実施した。これをもとに、シミュレータの基礎設計を実施するとともに、GAST-Dアベイラビリティ計算ツールを開発した。アベイラビリティ計算ツールは、レンジ誤差保証値( $E_{IG}$ )が決まった時に、ある場所におけるGAST-Dアベイラビリティを計算できるものであり、総合性能評価シミュレータの一部を成すものである。

図1, 2は、東京において、GPS 24衛星系の場合(最小限の衛星数)の場合のGAST-Dアベイラビリティの計算結果である。 $E_{IG}$ を3.25m(現行のICAO SARPsの範囲を超えているが次期改訂により可能となる磁気低緯度を想定した値)では、多くの時間帯でGAST-Dは使用可能であるが、一部の時間帯において航空機の最大許容垂直誤差( $\max E_v$ )の制限により使用できない場合が発生している。 $E_{IG}$ を現行SARPsの最大値である2.75mとした場合においては、 $\max E_v$ による制限は発生しないが、垂直保護レベルが10mをわずかに超過する時間帯が発生し、アベイラビリティが損なわれている。これは軌道以上に仮

定する GPS 衛星の数が最低の 24 としていることに加え、磁気低緯度地域においては静穏時電離圏勾配パラメータ ( $\sigma_{\text{vig}}$ ) が中緯度地域に比べ大きく、保護レベルをかさ上げしていることが理由である。現状の GPS は 31 機が軌道上にあり、衛星配置は格段に良いことから、 $E_{\text{IG}}$  が 2.75m 以内であれば十分なアベイラビリティが期待できると考えられる。 $E_{\text{IG}}$  が 2.75m を超える場合においても、多くの GPS 衛星が軌道上にあることから、 $\text{maxEv}$  の制限も受けにくくなるが、 $E_{\text{IG}}$  の値が大きくなるほど  $\text{maxEv}$  の制限を受けやすくなるため、安全性を保った上で  $E_{\text{IG}}$  を最小限の値に設定できるようにする必要がある。

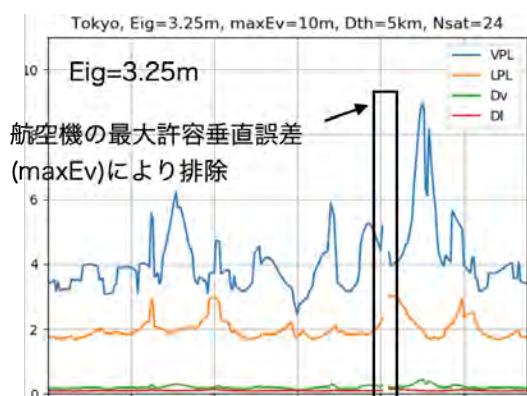


図 1.  $E_{\text{IG}}=3.25\text{m}$ , GPS 24 衛星系とした場合の東京における GAST-D 保護レベル (m) の計算結果。横軸は 24 時間。

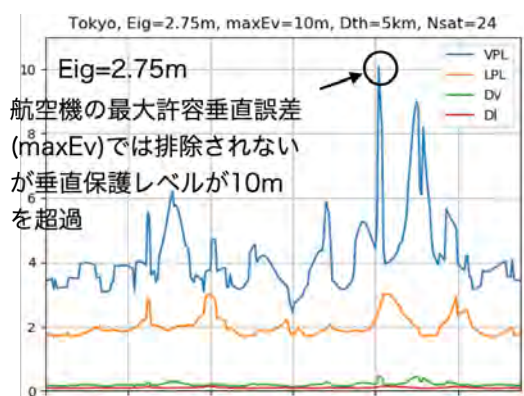


図 2.  $E_{\text{IG}}=2.75\text{m}$ , GPS 24 衛星系とした場合の東京における GAST-D 保護レベル (m) の計算結果。横軸は 24 時間。

また、成果を国際基準に反映し普及させるため、ICAO NSP の GBAS Working Group (GWG) 電離圏アドホック (IGM ad hoc) に継続的に参加し、GAST-D SARP の磁気低緯度地域向け改訂のために取り組んだ。上にも述べたとおり、現行 SARP では  $E_{\text{IG}}$  の上限は 2.75m と定められているが、IGM ad hoc の議論により、磁気低緯度地域における GAST-D 導入の自由度を向上させるため、 $E_{\text{IG}}$  の上限を撤廃する改正案が、2020 年 11 月の NSP/6 会議で

承認された。今後の検討では、 $E_{\text{IG}}$  の上限を大きくとってシミュレーション検討を進めていく。

アジア太平洋地域における GAST-D 導入のための情報共有のためには、ICAO アジア太平洋地域における枠組みを活用した。2019 年のアジア太平洋地域航空航法計画実施会議 (APANPIRG) において、アジア太平洋地域における GBAS 及び SBAS の導入促進のため、技術課題について情報共有と議論を行うための ICAO APAC GBAS/SBAS Implementation Task Force (ITF) 設立が決定され、その第 1 回、及び第 2 回会議がオンラインで 2020 年 6 月及び 9 月に行われた。ここでは、GBAS/SBAS 導入全般に関わる議論と課題抽出が行われ、アクションプランが策定された。GBAS/SBAS ITF には、当所の職員 (齋藤) が co-chair に選出されることとなった。これは、これまでの日本の活動が認められたことであるとともに、本研究の重要なアウトプット先を確保したといえる。

#### 4. 考察等

令和 3 年度は、GAST-D 総合性能評価シミュレータを基礎設計に従い実装を進め、高速計算機を調達し、大量計算を実施する。シミュレーション結果については、ICAO NSP GWG IGM ad hoc を通じて他のシミュレーション計算結果の比較・評価を行う。

ICAO NSP GWG IGM ad hoc における活動としては、電離圏シンチレーションの GAST-D に対する影響の取り入れを行い、必要に応じて GAST-D SARP の改訂案の作成、ガイダンス文書の作成を行う。ICAO APAC GBAS/SBAS ITF についてはその活動を主導し、アジア太平洋地域における GBAS 導入のための諸課題の解決に努力するとともに、ICAO NSP GWG IGM ad hoc と連携して、当所が中心となって 2016 年に策定した APAC 地域における電離圏対策に関するガイダンスの改訂などを行う予定である。

#### 掲載文献

- [1] 齋藤, ICAO NSP GWG IGM ad hoc activities, ICAO APAC GBAS/SBAS Implementation Task Force/2, 2020 年 9 月
- [2] J. Budtho, P. Supnithi, S. Saito, Single-Frequency Time-Step Ionospheric Delay Gradient Estimation at Low-Latitude Stations, IEEE Access, 8, doi: 10.1109/ACCESS. 2020. 3035247, 2020.
- [3] 齋藤, 吉原, G. McGraw, M. Harris, Variation of tropospheric scale height representations, Landing and Take-off (LATO)/35, 2021 年 3 月



## 多地点からの地上大気光観測を用いたプラズマバブル成長過程の解明 [競争的資金研究]

担当領域 航法システム領域  
担当者 ○齋藤 享  
研究期間 平成 29 年度～令和 3 年度

### 1. はじめに

本研究は、電気通信大学細川敬祐准教授が代表者の科学研究費補助金基盤 B 研究に、研究分担者として参画して行うものである。

近年の冷却 CCD カメラの普及により、磁気低緯度地域の衛星航法に深刻な影響を与えるプラズマバブルの微弱な夜間大気光を用いた 2 次元観測が精力的に行われているが、観測視野の制限、気象条件による観測の制限により、広域観測を地上観測で実現することは難しかった。しかし、市販の小型暗視カメラを活用した安価な大気光イメージャシステムが実現され、多地点での観測が可能となり、広域撮像、気象条件に対する空間冗長性の確保が可能となると期待されている。

プラズマバブルは、基本的な生成の物理過程はわかっているが、その発生の日々変動を支配する物理過程、発生後の時間発展を支配する成長過程、小スケールプラズマ不規則構造の成長過程など、未解明問題が多く残されている。プラズマバブルを広域撮像観測することにより、その発生に至る電離圏大規模構造の解明や、成長過程の詳細な時間追尾による解明が可能できると期待される。

### 2. 研究の概要

本研究では、市販の小型暗視カメラを用いた安価な大気光イメージャを磁気低緯度地域に多数設置し、プラズマバブルの空間構造の成長過程、小スケール電離圏不規則構造の成長過程を解明する。観測点は当所の石垣観測点を含む南西諸島、台湾、東南アジアに設置し、広域観測を行う。得られたデータを総合し、プラズマバブルの空間構造の成長過程を明らかにする。また、GNSS 観測と合わせて、プラズマバブルの詳細な空間構造と衛星航法への影響の関係を明らかにする。

さらに、小型イメージャシステムを統合した広域観測システムへ発展させるとともに、小型、安価、簡易な機器である特性を生かし、理科教育用や環境モニタリング用としての普及のための情報発信を行う。

これにより、プラズマバブルに関わる物理過程のうち、プラズマバブルの発生・成長に関わる未解明の問題の解明、プラズマバブルの詳細構造と衛星航法信号への影響

の性能評価、プラズマバブルの広域監視情報の衛星航法に役立つ宇宙天気情報としての利用、小型大気光イメージャの理科教育機材、環境モニタリング機材への応用とそれを用いた超多点観測への道が開ける。

当所においては、南西諸島における観測とデータの解析、海外への機器設置(台湾、東南アジア)とプラズマバブル広域撮像データの解析、プラズマバブルの広域監視システムの構築、及びイメージャシステムの開発・運用に関する情報提供・発信について担当する。

### 3. 研究成果

本年度は、平成 29～令和元年度に設置した 5 ヶ所(石垣、大宜味、タイ・Chumphon、台湾・台南、フィリピン・Iroio 島)からなるプラズマバブルの成長・伝播過程観測網(図 1)を用いた観測を実施した。取得されたデータについては、電気通信大学によるウェブ公開システムによりリアルタイムデータがウェブ上で確認できるようになっている

太陽活動は極小期にあたり、プラズマバブルの観測例は少なかった。しかしながら 2020 年 2 月 20 日には石垣においてプラズマバブルが観測され、複数の大気光現象領域が東進する様子を見ることができた(図 2)。同時期に準天頂衛星の信号に障害が見られており、信号障害の原因が観測されたプラズマバブルによる可能性が高いことを確認することができた。



図 1. 小型イメージャ観測網

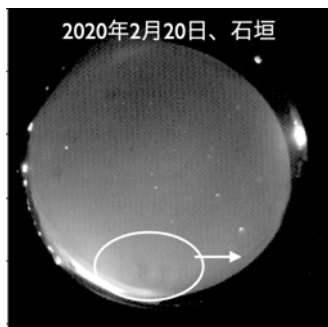


図 2. 2020 年 2 月に石垣で観測されたプラズマバブル画像

#### 4. 考察等

太陽活動は極小期を過ぎ、上昇傾向にあり、令和 3 年度にはこれまで以上のプラズマバブルが観測できると期待される。小型イメージャ観測網による連続観測を継続するとともに、これまでに観測されたデータを用いたプラズマバブル画像の合成解析を進めるとともに、石垣では、当所が同時に行っている電離シンチレーション観測との比較解析を進め、複数衛星系・複数周波数 GNSS の観点から、GNSS への影響解析を行う予定である。さらに、研究の最終年度として、観測手法に関する情報提供・発信を行っていく。具体的には、手軽に観測を行うための観測方法のマニュアル化と、一般、教育へのアウトリーチ活動を行っていく予定である。

#### 掲載文献

[1] K. Hosokawa, K. Takami, S. Saito, Y. Ogawa, Y. Otsuka, K. Shiokawa, C.-H. Chen, J.-H. Lin, Observations of equatorial plasma bubbles using a low-cost 630.0-nm all-sky imager in Ishigaki Island, Japan, *Earth, Planets and Space*, 72:56 <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01187-1>, 2020.

担当領域 航法システム領域  
 担当者 ○齋藤 享  
 研究期間 令和2年度～令和6年度

## 1. はじめに

本研究は、京大生圏研究所山本衛教授が代表者の科学研究費補助金基盤 A 研究に、研究分担者として参画して行うものである。

プラズマバブルは磁気低緯度電離圏に発生する泡状のプラズマ空乏域であり、プラズマ不規則構造により満たされており、衛星航法電波、衛星通信電波の伝播の障害となる。プラズマバブルの発生の基礎過程は知られているが、その発生の日々変動を支配する物理過程は未解明であり、発生予測の障害となっている。発生の日々変動を支配する過程の有力な仮説として、東西方向数 100km の大規模構造が提唱されており、これまでの赤道大気レーダー、衛星ビーコン等の観測により検証が進められてきている。

近年、下層大気から電離圏までの統一的に解く全球大気モデルの開発が九州大学を中心に進み、観測と組み合わせることによりプラズマバブル発生に至る物理過程の検証が可能となりつつある。また、情報通信研究機構によるタイ・チュンポンにおける VHF レーダーの設置、米国、台湾による低軌道衛星の打ち上げにより、地上・衛星観測が飛躍的に充実してきている。これらを利用することにより、プラズマバブル発生の日々変動を解明するための研究環境が充実してきている。

## 2. 研究の概要

本研究は大気変動から電離圏へのミッシングリンクを含めて明らかにし、プラズマ発生予測の開発を目指す。地上と宇宙からの複合観測と、地表から電離圏までの全大気モデル、プラズマバブルシミュレーションの組合せによって、大気と電離圏の相互作用について定量的な研究を進め、発生モデルの精密化を目指す。本研究によって、国際協力の下で、地上観測・衛星観測・大気モデルからなる研究協力体制が構築される。波及的にプラズマバブル発生予測の開発に取り組むことで社会に貢献する。当所としては、プラズマバブルが衛星航法に与える影響の評価を進めるとともに、プラズマバブルの発生予測に基づく影響回避策を提案する。当所では、プラズマバブルの発生と電離圏東西構造、下層からの大気波動の関連の解明と、プラズマバブル発生予測の開発と社会貢献を担当する。

## 3. 研究成果

本年度は、複数衛星系・複数周波数(MC/MF)対応受信機によるシンチレーション観測をタイ・バンコクとインドネシア・赤道大気レーダーサイトにおいて実施し、赤道大気レーダー観測と比較することにより、MC/MF GNSS 信号におけるシンチレーションとプラズマバブル 3 次元構造との比較解析を実施した(図 1)。これにより、L1 信号よりも L5 信号の方がシンチレーションの影響を受けやすい傾向があること、高度 250~350km の間のプラズマバブルがシンチレーション発生に寄与していたことがわかった。

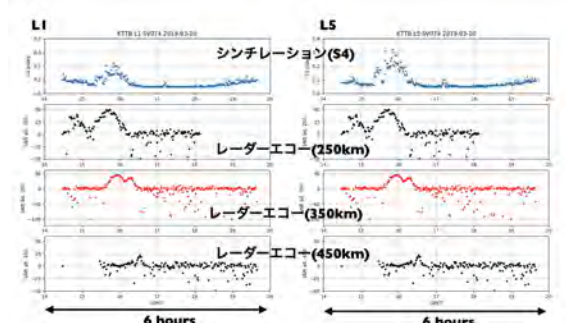


図 1. L1/L5 におけるシンチレーション指数と衛星-受信機パス上のレーダーエコー強度

## 4. 考察等

MC/MF GNSS 観測と赤道大気レーダー観測に加え、情報通信研究機構がタイ・モンクット王工科大学ラカバン(KMITL)協力してタイ・チュンポンに設置した VHF レーダーが稼働を開始し、当所も共同研究を通じて協力を行っている。KMITL とも新たに VHF レーダーに関する共同研究を開始した。今後、太陽活動の上昇に伴い、プラズマバブルの発生も増加すると考えられる。令和3年度は強化観測キャンペーンが計画されており、データ収集と解析を引き続き行っていく予定である。

## 掲載文献

[1] A. Bumrungrkit, S. Saito, P. Supnithi, A study of equatorial plasma bubble structure using VHF radar and GNSS scintillations over the low-latitude region, JPGU-AGU Joint Meeting 2020, 東京, 2020年7月

担当領域	航法システム領域
担当者	○高橋透
研究期間	令和元年度～令和2年度

### 1. はじめに

本研究は日本学術振興会海外特別研究員としてノルウェー王国・オスロ大学において行った研究である。

高度 60 km 以上に広がる電離圏は、太陽からの極端紫外線によって中性大気が部分的に電離された領域で、衛星通信を行う上での経路としての役割を果たす。この電離圏内で、時として電子密度の粗密構造が発達する電離圏擾乱と呼ばれる現象が、数 m から数 km の様々なスケールで発生する。特に、100 m スケールの電離圏擾乱は測位衛星 (GPS 衛星など) の電波を大きく屈折・回折させ、測位誤差を生じさせることが知られている。従って、電離圏擾乱の発生メカニズムを解明することで、その発生予測が可能になり、自動運転・航法などに必要な高精度な位置情報を提供できるようになる。

電離圏擾乱は全地球的に発生する現象ではあるが、カस्प領域と呼ばれる昼間付近の高緯度領域で特に多く発生する。これまで、このカस्प領域においてレーダーや高感度カメラを用いたリモートセンシングによる電離圏擾乱の観測研究が進められてきた。リモートセンシングは定常的な観測が可能であるという一方で、観測することができる電離圏擾乱のスケールが限られていることや、観測精度の制約により、電離圏擾乱の生成及び成長メカニズムの調査に限界があった。

ロケット観測は長期の準備期間と膨大な予算が必要な観測ではあるが、電離圏内を直接飛翔することにより、高精度な電離圏擾乱のデータを取得することができる。本研究では、オスロ大学が実施したロケット観測に参加すると共に、過去に実施されたロケット観測データから電離圏擾乱の生成・成長メカニズムを明らかにすることを目的とした。

### 2. 研究の方法

カस्प領域は太陽風が直接流入する特異な領域で、流入したエネルギーは地球大気を電離し、カस्पオーロラとして可視化される。この局所的な電離やエネルギー流入に起因して、電離圏擾乱が発生する。カस्पオーロラ内部で電離圏擾乱が生成されていた場合、地球磁力線に沿ってロケット高度まで電離圏擾乱が伝搬するため、ロ

ケットで観測された電離圏擾乱成分と、高感度カメラによって観測されたカस्पオーロラの発光強度を比較することで、電離圏擾乱の発生メカニズムの調査を行った。

### 3. 研究成果

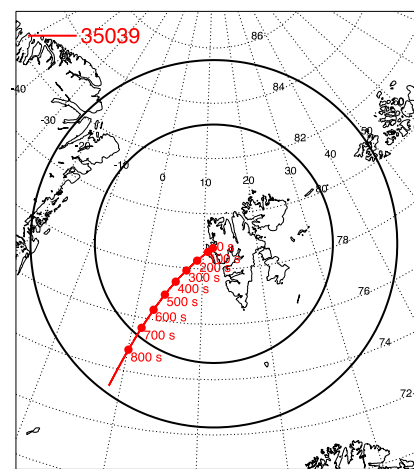


図 1. VISIONS-2: 35039 の発射からの時間 (Time of Flight) (赤点) とロケットの飛跡 (赤線)。内側の黒線が 557.7 nm, 外側の黒線が 630.0 nm の高感度カメラの視野である。

2018 年 12 月 7 日に Visualizing Ion Outflow via Neutral Atom Sensing-2 (VISIONS-2: 35039) がスピッツベルゲン島ニーオーレスン (Ny-Ålesund) から南西方向に打ち上げられた (図 1)。このロケットは高度 806 km まで到達し、カस्पオーロラの上空を飛翔した。

VISIONS-2: 35039 には Multi Needle Langmuir Probe(m-NLP) と Double Probe が搭載されており、6250 Hz で電子密度と電場をそれぞれ観測することができる。これらの高速で観測された電子密度、電場データから 10 m から 1000 m スケールの電子密度及び電場変動を導出した (図 2a, b, c)。また、ロケットの位置から同一地球磁力線で発光していた 557.7 nm と 630.0 nm のオーロラの発光強度を図 2g に示す。電子密度、電場の時間変動共に、400 s 及び 600 s で増大しており、これは電離圏擾乱を観測していたものと考えられる。この時間帯は 630.0 nm のオーロラの発光強度の増大した時間とほぼ一致していた。

その一方で、557.7 nm のオーロラとの顕著な相関は見られなかったが、370-400 s で見られた発光強度が増大した時間帯には電離圏擾乱の振幅に減少が見られた。

オーロラの発光強度と電離圏擾乱の振幅の比較を図 3 に示す。図 3(a)は 557.7 nm との比較、図 3(b)は 630.0 nm との比較を示す。前述のように図 3(a)から 557.7 nm とのオーロラの発光には顕著な相関は見られないものの、発光強度が小さい (4.5 kR 以下) では電離圏擾乱の幅広いレンジで観測されていたが、発光強度が大きくなると電離圏擾乱の振幅と 557.7 nm のオーロラの発光強度との関係はフラットまたは、減少傾向が見られた。

図 3b から、630.0 nm の発光強度と電離圏擾乱の振幅の間には良い相関が見られ、630.0 nm のオーロラの発光強度の増大に伴って、電離圏擾乱の振幅が大きくなっている。本実験のデータのみでは断定することはできないが、630.0 nm のオーロラは高度 250 km 付近で発光するため、この高度領域付近で電離圏擾乱は生成されていたと本研究では考えている。

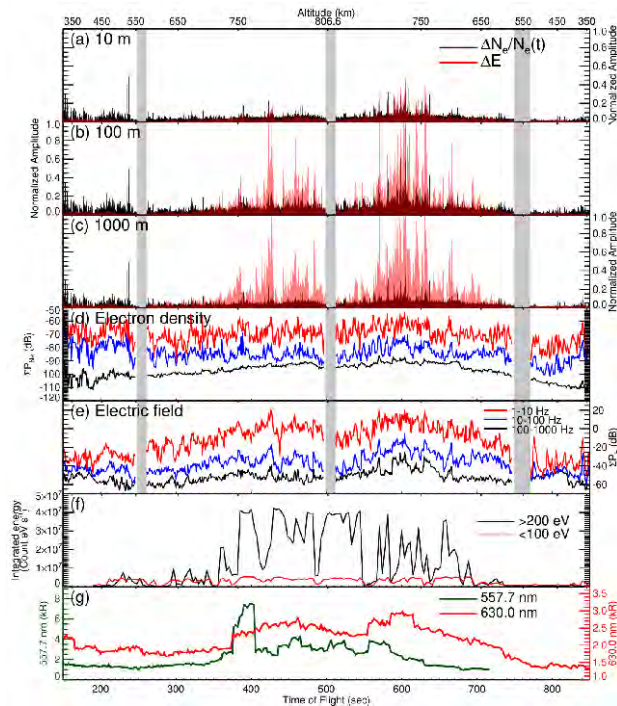


図 2. ロケット観測データ。(a) 10 m, (b) 100 m, (c) 1000 m スケールの電場 (赤), 電子密度 (黒) の変動成分。(d) 電子密度と (e) 電場の Integrated Power (本文章では取り扱わない) の時間変化。(f) オーロラ降下粒子のフラックス (本文章では取り扱わない)。(g) ロケットと同一磁力線上で発光する 557.7 nm と 630.0 nm のオーロラ発光強度の時間変化。

#### 4. 考察

上記の観測データ中で興味深い点は、電離圏擾乱の振幅は 630.0 nm のオーロラの発光と相関していたものの、557.7 nm の発光強度が増大すると、電離圏擾乱の振幅に減少又は増加しないという傾向が見える点である。

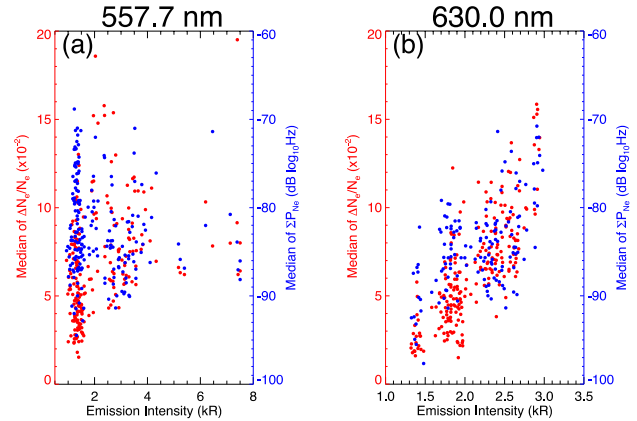


図 3. 電離圏擾乱の振幅と (a) 557.7 nm, (b) 630.0 nm のオーロラ発光強度との比較。赤点は電離圏擾乱の振幅。青点はパワースペクトルから導出された電離圏擾乱の振幅 (本文章では取り扱わない)。

557.7 nm のオーロラの発光強度が低い時と高い時 (4.5 kR 以上と以下で場合分け) に観測された電離圏擾乱の電子密度成分と電場成分の比 (Ratio) を表 1 に示す。比が 1.00 以上である場合は 557.7 nm のオーロラの発光強度が増大した際に、電離圏擾乱に減衰が見られたことを意味する。1000 m スケールの電子密度成分以外は 557.7 nm のオーロラの発光強度が増大した際に電離圏擾乱が減衰することを示した。また、電子密度成分では 10 m スケールの電離圏擾乱が最も大きく減衰することが示されており、これは小さいスケールの電離圏擾乱は早く減衰することを示した先行研究と整合的である。

表 1. 557.7 nm の発光強度が 4.5 kR 以下と以上の時に観測された電離圏擾乱の電子密度成分 ( $\Delta N_e/N_e$ ) と電場成分 ( $\Delta E$ ) の振幅の比較。

Scale	Ratio (A/B)	
	$\Delta N_e/N_e$	$\Delta E$
10 m	1.29	1.74
100 m	1.09	1.72
1000 m	0.91	1.74

最後に、557.7 nm のオーロラ発光強度が増大すると電離圏擾乱が減衰するメカニズムについて考察する。557.7

nm と 630.0 nm のオーロラはそれぞれ高度 150 km と 250 km で主に発光する。上述の通り、630.0 nm のオーロラの発光強度が増大することに伴い電離圏擾乱の振幅が増大していたことから電離圏擾乱は 250 km 付近で生成されていたものと考えられる。557.7 nm のオーロラの発光強度が低い時 (図 4a), 150 km 付近の電離度は低い。250 km 付近に生成された電離圏擾乱は図 4a に示す通り、 $J_{\parallel}$  で示される磁力線に沿った電流によって、より高高度に伝搬する。この場合、低高度は中性大気と電離大気の衝突頻度が上昇することから伝導度が低いいため、低高度には電離圏擾乱は伝搬しにくい。高高度に伝搬した電離圏擾乱はロケットによって観測されたと考えられる。

557.7 nm のオーロラの発光強度が増大した場合 (図 4b), 150 km 付近の中性大気は電離される。この電離によって高度 150 km 付近では電気伝導度が上昇する。地球磁力線は電気伝導度が極めて高いので、図 4b で示される 150 km 付近の電気伝導度が上昇した場合、150 km と 250 km の電離圏を繋ぐ回路が生成されると考えられる。この回路は 250 km で生成された電離圏擾乱を成長させる分極電場を弱める働きをする。最終的にはロケット高度で観測された電離圏擾乱に減衰が見られたと考えられる。

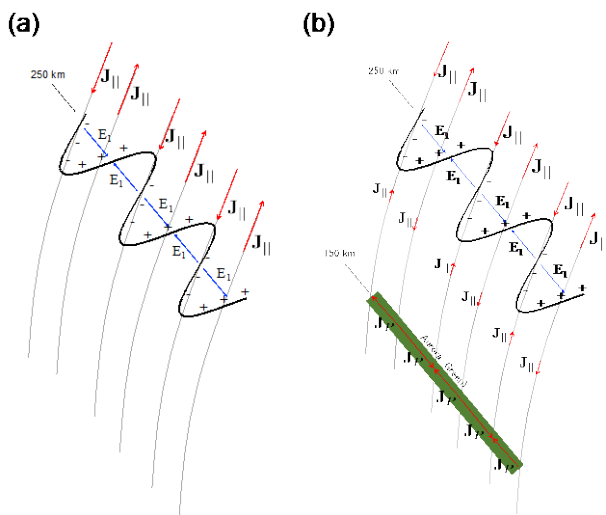


図 4. 電離圏擾乱減衰メカニズム。(a)557.7 nm のオーロラの発光強度が低い時、(b)557.7 nm のオーロラの発光強度が高い時。 $J_{\parallel}$  は沿磁力線電流を示す。

## 5. まとめ

2018 年 12 月に実施されたロケット観測によって得られた電子密度・電場から電離圏擾乱成分を抽出し、同時に観測されたオーロラの発光強度との比較を行った。

電離圏擾乱の振幅は電子密度、電場共に 630.0 nm のオ

ーロラの発光強度と良い相関を示し、発光強度の増大に伴って電離圏擾乱の振幅も増大していた。一方、557.7 nm のオーロラの発光強度とは良い相関を見せず、発光強度が増大しても、電離圏擾乱の振幅は増大しないばかりか、減少傾向も見られた。このことから、250 km で主に発光する 630.0 nm のオーロラに伴って電離圏擾乱が生成され、高度 150 km で主に発光する 557.7 nm のオーロラの発光が強くなった時に、150-250 km を繋ぐ回路が生成され、この回路によって 250 km の電離圏擾乱の振幅が減少、または増大が見られなかったと考えられる。

## 掲載文献

1. Takahashi, Toru, Andres Spicher, Francesca Di Mare, Douglas E. Rowland, Robert F Pfaff Jr., Lasse Boy Novock Clausen and Joran Moen (2021) Decay ionospheric irregularity correlate with the green line auroral emission enhancement, Submitted to Journal of Geophysical Research. (査読中)
2. Moser, C., J. LaBelle, S. Hatch, J. I. Moen, A. Spicher, T. Takahashi, C. A. Kletzing, S. Bounds, K. Oksavik, F. Sigernes, and T. K. Yeoman (2021) The Cusp as a VLF Saucer Source: First Rocket Observations of Long-Duration VLF Saucers on the Dayside, Geophysical Research Letters, 48, e2020GL090747. <https://doi.org/10.1029/2020GL090747>.
3. Viswanathan Lakshmi Narayanan, Satanori Nozawa, Shin-Ichiro Oyama, Ingrid Mann, Kazuo Shiokawa, Yuichi Otsuka, Norihito Saito, Satoshi Wada, Takuya D. Kawahara, and Toru Takahashi (2020) Formation of a bottomside secondary sodium layer associated with the passage of multiple mesospheric frontal systems, Atmospheric Chemistry and Physics, <https://doi.org/10.5194/acp-2020-803>.

担当領域 航法システム領域  
担当者 ○高橋透  
研究期間 令和2年度～令和5年度

## 1. はじめに

本研究は科学研究費補助金若手研究を取得し、遂行中の研究である。

高度 60 km 以上に広がる電離圏は、太陽からの極端紫外線によって中性大気が部分的に電離された領域で、衛星通信を行う上での経路としての役割を果たす。この電離圏内で、時として電子密度の粗密構造が発達する電離圏擾乱と呼ばれる現象が、数 m から数 km の様々なスケールで発生する。特に 100 m スケールの電離圏擾乱は測位衛星 (GPS 衛星など) の電波を大きく屈折・回折させ、測位誤差を生じさせることが知られている (Basu et al., 2008)。従って、電離圏擾乱の発生メカニズムを解明することで、その発生予測が可能になり、自動運転・航法などに必要な高精度な位置情報を提供できるようになる。

## 2. 研究概要

近年、北極域でロケット観測によって衛星測位に最も影響を与える 100 m スケールの電離圏擾乱は、より大きい 1 km スケールの電離圏擾乱が崩壊する際に発生している可能性が示された (Moen et al., 2012)。つまり、1 km スケールの電離圏擾乱が密度勾配不安定によって初期的に発生し、その後 100 m スケールの電離圏擾乱へと遷移していた可能性がある。これは同時に、上記の仮説を実証し、遷移時間を明らかにすることで、電離圏擾乱による衛星測位への影響を予測することができる、ということの意味する。しかし、ロケット観測のように長期の準備期間と膨大な予算を要する観測を頻繁に行うことはできず、両スケールの電離圏擾乱の関連性については未知な部分が多い。気象衛星が送信する VHF 帯の電波は 1 km スケールの電離圏擾乱に屈折・回折され、シンチレーションが起こることが知られている。本研究では、電波干渉計技術を用いた VHF シンチレーションの定常観測システムを開発する。さらに、VHF シンチレーション観測と既存の GPS シンチレーション観測、短波レーダー観測を同時に実施する電離圏擾乱のマルチスケール観測により、1 km スケールの電離圏擾乱から 100 m スケールの電離圏擾乱が発生していたのか否か、及びその遷移時間を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究成果

2020 年度はノルウェー・オスロ大学に滞在し、VHF シンチレーション受信機を開発を行なった。人工衛星から放送される電波強度を見積もり、必要なアンプ、フィルタ、アンテナの選定を行い、購入した。プロトタイプの実験機を使って、調布にて受信実験を行なった。また、観測プログラムの開発も平行して行い、観測、データ保存、解析までを自動で行えるプログラムの開発を進めている。

本年度中にスピッツベルゲン島ロングイヤビンに受信機を設置する予定であったが、新型コロナウイルスの感染拡大により、設置が難しくなったため、2020 年度はロングイヤビンに観測所を所有するスバルバル大学の研究者と設置について議論を行なった。

## 4. 今後の展望

VHF シンチレーション受信機は最終的には低緯度から高緯度に設置し、全地球的に電離圏擾乱の発生メカニズムを明らかにする予定である。高緯度のみは海外観測所に設置しなければならず、数年は設置の目処が立たない。そこで、まずは電子航法研究所が位置する調布にて実証実験を行い、2021 年度後半を目処に地磁気緯度が低緯度に位置する石垣島に設置する。その後、中緯度に位置する陸別に設置したのちに、スピッツベルゲン島に設置する予定である。



図 1. 開発中の VHF シンチレーション受信機。USRP N210 (右下)、制御 PC (右上)。

担当領域 航法システム領域  
 担当者 ○齋藤 享, 吉原 貴之  
 研究期間 令和2年度

1. はじめに

本研究は、総務省による「地上型衛星航法補強システム(GBAS)の海外展開を通じた周波数の国際協調利用促進に関する調査の請負」に関し、航空保安無線システム協会からの受託研究として行うものである。

総務省においては、我が国の周波数の有効利用に資する新しい技術の国際展開を支援しており、一つのシステムで複数の滑走路端をサービス可能である GBAS は、その対象とされる。2019 年度はベトナム・ハノイを対象とした GBAS 実証実験計画が進められていたが、ベトナムの情勢の変化により延期となったため、タイから実証実験の受け入れ表明を受けて、実証実験をバンコクにおいて実施することとなった。

2. 研究の概要

本研究では、タイにおける電離圏調査及び電離圏脅威モデルの構築を目的とし、タイ側と協力して電離圏データ収集を行い、タイ側への GBAS のための電離圏評価技術の移転を目的として電離圏データ解析を共同で実施する。

3. 研究成果

タイ・モンクット王工科大学ラカバン(KMITL)との研究協力協定を更新締結し、タイ航空局(CAAT)および航空航法サービスプロバイダである AEROTHAI とも協力して電離圏データ収集と解析を行った。

電離圏データ収集には、これまでに KMITL, AEROTHAI とともに構築してきた、バンコク国際空港周辺の GNSS 観測ネットワーク (図1) を活用した。



図1. GNSS 受信機の配置

電離圏データ解析については、KMITL, CAAT, KMITL に対して 2021 年 1 月～2 月に 3 回にわたって電離圏解析

訓練をオンラインで実施し、当所で開発した電離圏解析ツールを用いた解析方法の指導を行うとともに、それを用いたタイ側の解析結果を共同で検討、議論して理解を深めた。図2は、2019年3月のデータを用いた静穏時電離圏パラメータの解析結果である。ここでは、観測値をオーバーバウンドする  $\sigma_{\text{vig}}$  として、2.32mm/km が得られた。2019 年は太陽活動極小期であり、太陽活動極大期には背景電離圏密度が 3 倍程度になりうることを考えると、2.32mm/km を 3 倍した 6.96mm/km 程度が妥当な値と言える。電離圏擾乱時については、2019 年 3 月に 4 日の擾乱を検出し、当所が開発したツールを用いて解析を行い、最大電離圏勾配約 40mm/km、速度 50～300m/s、幅 10～150km、勾配方向 (北から時計回り) 45～120° を得た。これらは磁気低緯度地域における電離圏擾乱の主な原因のプラズマバブルに伴うものとして、太陽活動極小期の値としては妥当である。

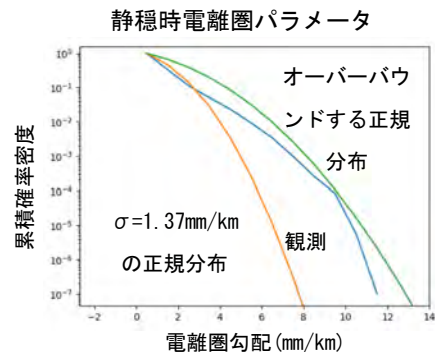


図2. 2019 年 3 月の静穏時電離圏パラメータ解析結果

4. 考察等

本研究には当所との研究協力を行ってきたタイ研究者・技術者が多数参画し、当所のこれまでの研究協力関係がタイにおける GBAS 導入に向けて有効に活用されている。

今回の解析で用いたデータは限られた期間のデータのみであり、引き続きデータ収集と過去に遡ったデータ解析を行う必要がある。令和3年度には GBAS 実証実験が引き続き実施される予定であり、実証実験の中でさらなる電離圏データ収集と解析が行われる見込みである。



掲載文献

- [1] 齋藤, Characterization of the ionosphere for GBAS, タ  
イ GBAS 電離圏脅威モデル技術訓練, 2021 年 1~2 月

担当領域 航法システム領域  
担当者 ○齋藤 享, 吉原 貴之, 中村 真帆, 藤井 直樹  
研究期間 令和2年度

## 1. はじめに

総務省, 我が国の周波数の有効利用に資する新しい技術の国際展開を支援しており, 一つのシステムで複数の滑走路端をサービス可能である GBAS はその対象とされる。

GBAS の運用においては電離圏の空間・時間変動に伴う誤差が重要であり, 電離圏変動に関わるパラメータ (電離圏脅威モデル) を設置場所に合わせて決定する必要がある。

ICAO アジア太平洋地域では, 日本の主導により共通 GBAS 電離圏脅威モデルが策定されているが, 採用する電離圏脅威モデルを含む安全性の確保は各国の責任である。しかし, GBAS のための電離圏評価には, 衛星航法, 航空航法, 電離圏の知識が必要であり, 技術的な難易度は高い。そのため, 我が国が持つ GBAS 導入のための電離圏環境調査の経験と技術優位性をアピールし, GBAS の海外展開を支援するべく, 磁気低緯度地域における電離圏環境調査を実施することとなった。

## 2. 研究の概要

本研究では, まず電離圏調査計画の策定及びデータ収集環境の構築を行う。全体としての電離圏調査計画を立案し, 令和2度に電離圏環境調査を実施する国 (対象国1) を選定するとともに, 令和3年度に電離圏環境調査を実施する国 (対象国2) の調査を行う。対象国1においては, 電離圏データ収集環境を構築し, データ収集と解析を現地研究者・技術者とともに実施する。対象国2においては, 電離圏データ収集環境構築のための調査と技術セミナーを実施し, GBAS 導入における技術課題について理解を深める。

## 3. 研究成果

電離圏調査計画としては, 1ヶ国3ヶ年ずつ, 1年ずつ開始時期をずらして実施する計画とした。対象国1には, これまでに GBAS 導入に関連した電離圏研究において協力関係があるベトナムを選定した。ベトナム科学アカデミー・地球物理研究所(IGP-VAST)と協力し, 既存の電離圏データ収集ネットワークを更新することでデータ収集環境 (図1) を構築した。このデータ収集環境を用いて取得されたデータを解析し, 静穏時電離圏パラメータ, 擾乱時電離圏パラメータの評価を行った。



図1. ベトナムにおける電離圏データ収集環境

対象国2としては, 当所が電離圏と衛星航法に関する共同研究を実施しているインドネシア航空宇宙庁(LAPAN)があるインドネシアを選定した。LAPAN の協力により, LAPAN の Bandung 研究所周辺に観測候補地を複数選定することができた (図2)。さらに, LAPAN と共同で GBAS と電離圏に関する技術セミナーをオンラインで開催した。技術セミナーには, インドネシア側からは航空局, エアライン等航空関係者を含む12機関(LAPAN の招待によるマレーシアの2大学を含む)から40名の参加があり, 関心の高さが感じられた。加えて日本から17名, 対象国1であるベトナムから3名の参加があり, 計4ヶ国60名が参加する国際会議とすることができた。



図2. インドネシアにおける観測候補地

## 4. 考察等

当所が培ってきた研究協力関係を活用し, 速やかに調査, データ収集を実施することができた。コロナウイルス蔓延の影響で, 実地調査や現地でのセミナー開催はできなかったが, 次年度以降に繋がる十分な成果が得られた。

### 掲載文献

- [1] 齋藤, 吉原, 中村, Ionosphere Monitoring Project for GBAS, インドネシア GBAS 電離圏技術セミナー, 2021年3月
- [2] 齋藤, 中村, 吉原, 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, 2021年3月

担当領域	航法システム領域
担当者	○北村 光教, 坂井 丈泰
研究期間	令和2年度

### 1. はじめに

我が国の衛星測位システムである準天頂衛星システム（QZSS）の開発・整備・運用事業において、2018年11月1日より衛星4機体制による準天頂衛星システム「みちびき」のサービスが行われている。当該サービスは、将来の7機体制構築を含む準天頂衛星システム事業全体の成否を左右する重要なものであって、サービスの実施主体である内閣府から独立した組織が品質評価を行い、サービス品質を維持・改善する計画である。

### 2. 研究の概要

内閣府による令和2年度「測位補強サービスの性能評価支援」は上記品質評価のための業務であり、その一部として電子航法研究所では一般財団法人日本宇宙フォーラムから本研究を受託した。

本受託研究では、QZSSの測位補強サービスにおけるサブメータ級測位補強サービス（SLAS）及びセンチメータ級測位補強サービス（CLAS）の性能を評価する。評価期間は2020年4月1日から2021年3月12日である。

### 3. 研究成果

#### 3.1. サブメータ級測位補強サービス（SLAS）性能評価

SLASは13局の地上監視局を有し、その周辺におけるGNSS測位の測位精度を向上させる補強情報を放送する狭域Differential GPS（DGPS）サービスである。本研究における評価では、日本全域の代表地点として24局の電子基準点を選定し、測位精度評価を行った。その結果、測位誤差の95%値として水平：0.51m、垂直：0.73mという結果が得られ、SLASの有効性が示された。図1はSLASを用いた測位の水平測位誤差と垂直測位誤差の1年間のト

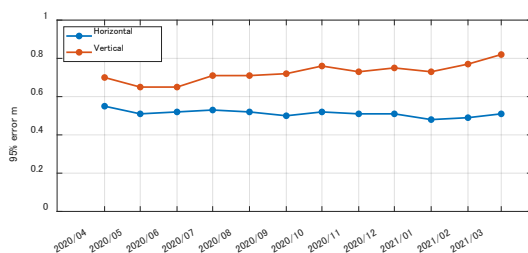


図1 SLAS年間の95%測位誤差（24局合計）

レンドである。

#### 3.2. センチメータ級測位補強サービス（CLAS）性能評価

CLASはPPP-RTKと呼ばれる高精度測位補強情報を放送するサービスである。日本全域に対して13評価局を選定し評価を実施したところ、静止体測位モードにおける95%誤差は水平：1.8cm、垂直：4.0cm、移動体測位モードにおける95%誤差は水平：4.6cm、垂直：9.7cmという結果が得られた。図2及び図3は、CLASを用いた静止体及び移動体測位モードにおける測位誤差である。電離圏活動が活発化する夏季に測位精度の劣化が見られるが、全体を通してセンチメータ級の測位精度を有していることがわかる。また、12月以降の新フォーマットの補強情報配信にも対応しており、特に移動体測位において、測位精度の改善効果が見られる。

#### 4. おわりに

本研究では、準天頂衛星システムの衛星補強サービスにおけるSLAS及びCLASの評価を実施し、いずれも有用なサービスであることを示した。本研究期間中は太陽活動が比較的静穏であったため、電離圏活動の影響は大きく現れなかったが、今後の増大によるサービスへの影響も予想される。そのため、今後も継続的な評価の実施が必要である。

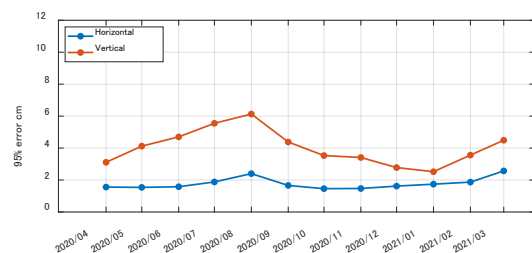


図2 CLAS年間の95%測位誤差（静止体測位モード）

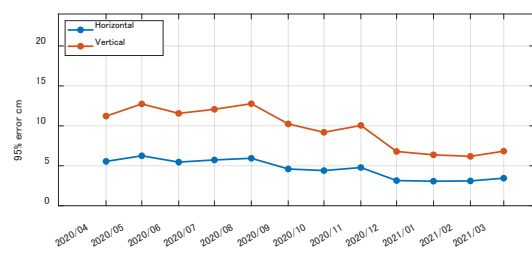


図3 CLAS年間の95%測位誤差（移動体測位モード）

### 3 監視通信領域

#### I 年度当初の試験研究計画とそのねらい

令和 2 年度の研究は、社会・行政ニーズや技術分野の将来動向を考慮し、重点研究、指定研究、基盤的研究等として承認された下記の項目を計画した。

1. SWIM のコンセプトによるグローバルな情報共有基盤の構築と評価に関する研究
2. 遠隔型空港業務支援システムの実用化研究
3. 滑走路異物監視システムの高度化に関する研究
4. 航空通信基盤の高度化に関する研究
5. 従属監視補完技術に関する研究
6. 空港面及び空港近傍の独立非協調監視システムに関する研究
7. 航空機内データ通信 (WAIC) における電磁環境評価に関する基礎研究
8. ADS-B を用いた監視能力向上の研究
9. 航空分野に適用可能な電磁界シミュレーション手法に関する研究
10. 受動型レーダを用いた近接航空機測位システムの研究
11. 無人航空機を含む飛行環境形成の要素技術に関する研究
12. ヘリコプタ全周監視支援技術に関する研究
13. 監視信号環境と性能要件に関する研究
14. 3 次元形状測定のための高精度距離測定技術に関する基礎的研究
15. 地上監視装置を用いたトランスポンダ装置の性能推定手法の研究
16. セキュリティ強化に向けた移動物体高度認識レーダー基盤技術の研究開発
17. 遠隔からの機体識別および有人航空機との空域共有に関する研究開発
18. 簡易類似コンテキストを用いたチーム協調レジリエンス推定に関する実験的研究
19. 次世代ヘリコプタ前方障害物探知センサに適用するミリ波 MIMO レーダ要素技術の研究
20. 3 次元ミリ波マルチホップネットワークによる洋上気象情報共有システムに関する研究
21. 位置検証と位置推定の融合：受信信号強度を例として

1~4 は重点研究、5~9 は指定研究、10~15 は基盤的研究、16~21 は競争的資金による研究である。

1 は、異なる SWIM (System Wide Information

Management) システム間でシームレスな情報交換と異種サービス連携を実現する技術を提案するとともにその技術の評価する SWIM の情報共有テストベッドを構築する研究である。

2 は、光学センサ (カメラ)、監視センサや気象センサ等を空港に設置し、これら機器から得られる情報を高速ネットワーク経由でリモートセンターに送り、センターに設置されたシステムで、従来の管制塔に代わり、空港の管制を実施するリモートタワーシステムの実用化に向けたプロトタイプ構築や技術開発、評価を実施する研究である。

3 は、滑走路上の異物を監視・探知するシステムの実用化と高度化および導入に際して、空港環境や悪天候時に対応し、低い電波反射量の対象物の探知技術を中心とした探知率向上および確実性に対する課題を踏まえた技術開発を行う研究である。

4 は、複数の通信システムを含む航空用高速通信ネットワークの検証システムを構築し、飛行中の接続切替えによる接続率の低下や通信の秘匿・優先度選択技術の実証評価を行う研究である。

5 は、将来 ADS-B/WAM (Wide Area Multilateration) による航空機監視を運用する際、ADS-B (航空機従属監視) の運用に必要な脆弱性対策と WAM を補完監視センサとして利用するための技術を開発・検証する研究である。

6 は、航空用及び航空用途以外の信号を活用して、空港面及び空港近傍における移動体を検出する独立非協調監視システムの開発を行い、高い検出率を達成するマルチスタティックレーダに求められる性能要件を明らかにする研究である。

7 は、4 GHz 帯を用いた航空機内データ通信 (WAIC; Wireless Avionics Intra- Communications) 機器と電波高度計および隣接帯域の機器との相互運用性を確保するための共用条件を検討する研究である。

8 は、ADS-B データの信頼性情報を用いた監視性能評価及び安全性評価を実施する研究である。

9 は、航空分野に適用可能な各種電磁界問題について、適切な電磁界解析のプログラミングを行い、視覚的に理解しやすいシミュレーションソフトの解析エンジンを開発する研究である。

10 は、受動型二次監視レーダ (PSSR; Passive Secondary Surveillance Radar) と無指向性 SSR とを組み合わせることで、楕円測位原理によるレーダ近接地域を対象とした航空機測位システムを構築する研究である。

11 は、有人航空機と無人航空機の調和がとれた飛行を

実現するために、無人航空機の位置の把握方法の要素技術を開発する研究である。

12 は、ヘリコプタの機体全周の近距離障害物をリアルタイムで検出する機上搭載用複数送受信レーダシステムを開発する研究である。

13 は、監視システムで使用する信号環境について継続的に測定・蓄積し、将来の運航方式に必要な監視システムの性能要件を明らかにする研究である。

14 は、冬季に積雪の多い空港の安全性、運用効率の向上のために、将来的な 3 次元積雪モニタリングシステムを検討する研究である。

15 は、運航中の航空機に対する ATC トランスポンダの応答遅延特性や ADS-B レイテンシの計測手法を開発し、実際に計測した統計データから監視性能の定量的な指標を提示する研究である。

16 は、公共スペースのセキュリティ対策強化のため、人が隠し持つ危険物の遠方からの可視化や不審物認識システムの基盤となるセンシング・イメージング技術を複数の W 帯周波数を用いて開発する研究である。当所は、センシング・イメージング技術のうち 2 周波対応アクティブ型イメージャの研究開発を分担している。

17 は、多数の機体が高密度に飛行する際、無人航空機と有人航空機の空域共有に必要な安全確保を図るための情報共有システムについて開発する研究である。当所は、マルチラレーション技術を応用した有人航空機の位置探知システムの研究開発を分担している。

18 は、航空交通や医療などの高度な安全が求められる業務領域を想定し、タスク要求や作業条件の変化などの外乱に対する作業チームの適応度（チーム協調レジリエンス）をチーム協調プロセスの変動の監視によって推定する方法を開発し、そのために必要な理論・技術開発、基礎知見を獲得し蓄積することを目的とする研究である。

19 は、ヘリコプタ等に搭載するためのミリ波レーダについて、送電線等の線状障害物を高頻度で検出可能な小型平面アンテナ構築技術、MIMO アンテナアレーによるアンテナ開口面合成技術、MIMO データを用いた長距離からの洗浄障害物探知技術について実験と数値解析の両面から進める研究である。

20 は、機上・船上システムからのみ構成できる低コスト・ローカル情報共有システムを実現するため、長距離ミリ波通信技術、遅延耐性無線マルチホップ通信技術、ローカルデータベース統合・共有・更新技術の開発を目指し、シミュレーションによる提案システムの有効性を確認する研究である。

21 は、位置の取得や無線信号を用いる共通点があり、直感的には類似性があるものの独立して研究が進められていた位置検証と位置推定の 2 つの技術を融合、発展させるための理論を導出する研究である。

## II 試験研究の実施状況

「SWIM のコンセプトによるグローバルな情報共有基盤の構築と評価」では、国際連携実証実験と国内飛行実証実験による総合評価を実施し、SWIM に基づいた FF-ICE 運用方式に対して提案技術の有効性を確認した。また、国際連携により、APAC 地域における FF-ICE サービス検証実験を行い、地域 SWIM 導入の技術基準の策定や地域 SWIM 基盤の連携によるシームレススカイの実現に貢献した。

「遠隔型空港業務支援システムの実用化研究」では、リモートタワーの運用を想定したシステムとして 360° のパノラマ映像表示システムを構築し、映像システムに加えて監視センサ情報の統合や支援機能等について表示性能、品質や様々な環境対応（夜間、雨、雪等）性能を評価した。また、航空局の依頼に基づき、実験用航空機を用いてライトガンの視認性評価及び光度レベルの飛行評価も実施した。

「滑走路異物監視システムの高度化に関する研究」では、レーダセンサの感度を 20 dB 以上改善するための信号処理技術を実装した改良版 FOD 探知システムを構築し、2020 年 12 月に仙台国際空港での追加試験を実施し、低 RCS 対象物の探知率が向上した。また、異物回収端末ユーザインターフェース（UI）に地図表示切り替え機能等の視認性改善と異物位置の認識性改善改修を実施した。

「航空通信基盤の高度化に関する研究」では、複数の通信システムおよび通信経路の基礎調査を実施した。また、今後開発する航空用高速通信ネットワークの検証システムのうち、航空用無線機の調達と開発を実施し、PC から操作が可能とする航空機用 VHF 無線機と航空通信プロバイダの振舞いを忠実に模擬できる地上システムの間で ACARS 通信が行えることを確認した。

「従属監視補完技術に関する研究」では、誤位置・偽位置（以下、不正位置）の脆弱性に対しては信号到達時間差（TDOA: Time Difference of Arrival）による位置検証、妨害電波に対しては受信局冗長配置やセクタアンテナによる対策を提案して実験装置を改修し、2 つの検証試験（ADS-B 脆弱性対策技術（不正位置、妨害電波）、補完用 WAM 技術（時刻同期、受信局削減））を実施し、有効性を確認した。

「空港面及び空港近傍の独立非協調監視システムに関する研究」では、パッシブレーダで有効な要素技術の開発として、実験用パッシブ監視システムで得られた飛行実験による測位実験データに対して処理方法の開発と実データによる検証を行った。また、地上デジタル放送波および一次監視レーダを使用したリアルタイム処理可能な MSPSR 実験システムを構築し、所要の性能が得られることを確認した。

「航空機内データ通信 (WAIC) における電磁環境評価に関する研究」では、大学との共同研究の上で、WAIC 機器、電波高度計、隣接帯域を用いる通信機器との共用条件検討に必要な数値解析推定として、航空機を中心とした球面上の詳細な全周放射特性の評価を実施している。また、空港内でビーチクラフト B300 型機を用い、隣接帯域を使用する 5G モバイルシステム周波数帯を含めた放射電磁界測定および IPL 測定も実施した。

「ADS-B を用いた監視能力向上の研究」では、当所で収集中の在空機の ADS-B データに含まれる信頼性情報を評価した。また、ADS-B 方式高度基準面の判別に際し、航空局が運用中の HMU(Height Monitoring Unit)の幾何高度情報を用いることで、判別率を向上させた。

「航空分野に適用可能な電磁界シミュレーション手法に関する研究」では、電磁界シミュレーション用のプログラミングの改良及び ILS 解析エンジンを開発と改良を実施した。

「受動型レーダを用いた近接航空機測位システムの研究」では、時刻同期精度実験により、航空機監視の有効性を確認した。また、円形配置アレーアンテナ方探機能について計算機シミュレーションにより推定方法を検証した。

「無人航空機を含む飛行環境形成の要素技術に関する研究」では、WiFi 波やドローン向けのテレメトリ信号を対象とした機体位置推定手法と精度について、電波無響室で実験検討した。また、小型無人機向けの超小型トランスポンダと ADS-B の機能に関する調査の実験測定を行うなど技術的な課題も検討した。

「ヘリコプタ全周監視支援技術に関する研究」では 24 GHz 帯準ミリ波レーダを用いた基本機能確認モデルを用いた試験、および 76 GHz 帯デジタルビームフォーミングミリ波レーダの実現に向けた要素技術開発を実施した。

「監視信号環境と性能要件に関する研究」では、飛行実験による信号環境測定を行い、質問/応答信号量や質問信号数、信号占有率等の統計的な解析評価を実施した。また、仙台空港に展開した光ファイバ接続型受動監視シ

ステム(OCTPASS: Optically Connected Passive Surveillance System)を活用し、既存の監視システムを使った信号環境評価について検討を開始した。

「3次元形状測定のための高精度距離測定技術に関する基礎的研究」では、可視光が利用できない空港環境における高雪面等の高精度測定技術の検討において空間光距離測定システムを開発し、赤外線レーザー光とカメラを用いた測定手法がリモート計測に適していることを実証した。

「地上監視装置を用いたトランスポンダ装置の性能推定手法の研究」では、光ファイバ接続型受動監視システム (OCTPASS) 装置を活用し、運航中の航空機における ATC トランスポンダの応答遅延特性を継続的に取得した結果について解析した。

「セキュリティ強化に向けた移動物体高度認識レーダー基盤技術の研究開発」では、受信機を複数制作し、アクティブセンシングによる各種危険物のイメージ画像を取得した。

「遠隔からの機体識別および有人航空機との空域共有に関する研究開発」では、モード S トランスポンダ搭載機の位置を探知する実験システムによる実験を実施し、無人機のリモート識別システムとの接続試験も行った。

「簡易類似コンテキストを用いたチーム協調レジリエンス推定に関する実験的研究」では、状況の理論的な形式化と共に有用性を実践的に検証するため、遠隔地にいる運航情報官(運情官)が空港に離着陸する航空機のパイロットに対して実施する情報提供の RAG 業務について、レジリエンス分析を行った。この結果、離陸時と着陸時でのタスクのタイミングの差異やマニュアルには記載されていない適応的行動が示された。

「次世代ヘリコプタ前方障害物探知センサに適用するミリ波 MIMO レーダ要素技術の研究」では、高圧送電線等のヘリコプタ前方障害物のミリ波帯 RCS (Radar Cross Section) 特性評価を評価し、ミリ波帯平面回路アンテナの基本設計、およびミリ波 MIMO アンテナアレイによるアンテナ開口合成法および信号処理法の分析調査を実施した。

「3次元ミリ波マルチホップネットワークによる洋上気象情報共有システムに関する研究」では、遅延耐性無線マルチホップ通信技術の開発にむけたシミュレーションの準備を実施した。また、長距離大容量ミリ波通信技術の開発に関する物理層のシミュレーション結果を資料論文としてまとめた。

「位置検証と位置推定の融合：受信信号強度を例とし

て」では、位置検証と位置推定を統合した理論の導出と次年度に向けたプログラムの準備等を進めた。

本年度は、以上の21件の研究・調査に加えて、以下に示す受託研究を行った。これらは上記の研究やこれまでの研究で蓄積した知識・技術を活用している。

1. 全機地上 IPL 試験委託作業
2. MVR 受託研究
3. 高高度無人機による制御用通信中継技術に関するアドバイザー
4. IPL 測定支援及び機器サポート
5. 電波解析シミュレーション支援業務  
ほか1件

### Ⅲ 試験研究の成果と国土交通政策、産業界、学会等に及ぼす効果の所見

当領域が行う研究は、航空交通の安全性や航空利用者の利便性向上等に関連して航空行政を支援するための基盤技術が多く、ICAO, EUROCAE, RTCA をはじめとする技術・運用基準や国際標準策定等に携わる活動が多く、航空局への技術アドバイザーなどとして参加している。

通信、情報系では「SWIM のコンセプトによるグローバルな情報共有基盤の構築と評価」において、ICAO APAC SWIM Task Force を主導しアジアの標準化作業に参加し、APAC 地域に FF-ICE/R1 (離陸前の飛行計画の調整) を導入するための技術課題や実現方法について TF から高く評価されている。「航空通信基盤の高度化に関する研究」では AeroMACS-SWIM 連携による IP データリンク接続実験や LDACS 無線機の開発状況等も公表する等、ICAO CP (通信パネル) の DCIWG (データリンク通信インフラ作業部会) や、ICAO FSMP (周波数管理パネル)、ICAO RPASP (遠隔操縦航空機システムパネル) の WG (作業部会) に積極的に参加している。また、「航空機内データ通信 (WAIC) における電磁環境評価に関する基礎研究」では、EUROCAE WG-96/RTCA SC 236 Joint Plenary や ICAO FSMP に参加し、WAIC の基準策定に貢献している。また、RTCA/EUROCAE で公表してきた文章 (ビーチクラフト B300 型機の IPL 測定結果) は RTCA SC-239 の 5G 電磁干渉レポートにも引用されることとなった。一方、監視系では「従属監視補完技術に関する研究」や「空港面及び空港近傍の独立非協調監視システムに関する研究」、「監視システムの信号環境と将来予測に関する研究」における実験結果を取りまとめ、ICAO SP (監視パネル) に参加し、傘下の各種 WG 等において ICAO 技術マニュアルへの反映や改訂作業を行っている。特に ADS-B 脆弱性対策

の評価結果は、ICAO APANPIRG に WP を提出し、アジア地域における ADS-B 整備・運用のガイダンス文書の改訂に貢献した。また、空港近傍で使用可能な光ファイバ接続型パッシブ一次レーダの優位性をまとめて ICAO 関連会議に提案した内容は、航空機監視マニュアル (Doc 9924) の改訂提案に反映されることとなった。「ADS-B を用いた監視能力向上の研究」では、ICAO の RMACG (地域監視機関調整グループ会議) の高度監視に関する監視システム標準サブグループ (Monitoring Systems Standards Subgroup) に参加し、高度監視システム間の差異について情報交換している。「3次元形状測定のための高精度距離測定技術に関する基礎的研究」では、EUROCAE WG-109 に出席し滑走路気象情報システムの MASPS 作業班に参加している。「遠隔型空港業務支援システムの実用化研究」では、EUROCAE WG-100 においてエディタやコアチーム等の主要メンバーとして参加や情報提供を現在も継続しており、ED-240A Ch.1 発行に向けた活動に貢献している。

このように、各研究課題の研究成果は、今後の新たな航空保安システムの技術基準や国際標準等の技術資料として、システムの性能向上や方針策定に貢献している。また当所の研究発表会、電子情報通信学会や日本航空宇宙学会等の国内各種学会、IEEE 等の国際学会や研究集会等においても、積極的な公表を継続している。

(監視通信領域長 住谷 泰人)

## SWIM のコンセプトによるグローバルな情報共有基盤の構築と評価【重点研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○呂 暁東, 森岡 和行, 古賀 禎, 北折 潤, 小菅 義夫

研究期間 平成 28 年度～令和 2 年度

### 1. はじめに

近年、国際民間航空機関（ICAO）では、SWIM（System Wide Information Management）という次世代の情報共有基盤の概念を提案、推進している。SWIMの導入により、運航に係る多種多様な情報を、様々なユーザで提供・利用・管理が可能となる。CARATSでも、情報共有基盤の導入は重要なミッションとしてあげられている。

しかし、SWIMに求められる効率性、信頼性、安全性及び環境は国や地域によって異なる。例えば、各SWIMシステムの構造、ネットワークインフラ、メッセージングインフラなどは、各地域によって異なる。このため、異種SWIMシステム間を連携する技術が必要とされている。

### 2. 研究概要

本研究では、運用面や技術面での課題を明らかにした上で、異なるSWIMシステム間でシームレスな情報交換と異種サービス連携を実現する技術を提案する。さらに、SWIMの情報共有テストベッドを構築し、提案技術を評価する。これにより、将来の航空交通管理の運用における情報共有と協調的意思決定を支援する技術の開発を目指す。本年度は5ヶ年計画の最終年度であり、主に以下の研究開発や国際活動を行った。

- ・ 国際連携実証実験と国内飛行実証実験による総合評価の実施
- ・ 国際連携による地域SWIMの導入検討や国際標準化への取り組み

### 3. 研究成果

#### 3.1 総合評価について

今まで提案した技術を組み込んだSWIMテストベッドを用いて、国際連携実証実験と国内飛行実証実験により総合評価を行った。まず、米国航空局（FAA）と連携して、SWIMに基づいたFF-ICE（Flight and Flow - Information for a Collaborative Environment）運用方式に対して、離陸前の地上間の情報共有による飛行計画の調整、ならびに離陸後の空地間の情報共有による飛行軌道の管理の両方の運用を統合した世界初の国際実証実験を実施した（図1）。これ

により、既存航空管制システムとの情報共有や連携の仕組みを検討することができた。さらに、標準情報交換モデルを用いて異なるシステム間でシームレスな情報共有を実現できるSWIM構築技術の有効性も確認することができた。このような国際連携実験の取り組みと成果により、航空局が「FF-ICE/R1導入検討会」を立上げ、実用化を推進している。

また、空地統合SWIMアーキテクチャの有効性を評価するため、電子航法研究所で開発した空港面高速無線通信システムAeroMACSを用いて、仙台空港において飛行実証実験を実施した。有効性評価のため、今までの実験システムを改良して地上管制システム（ATC）と機上飛行管理システム（FMS）間のデータ通信（CPDLC）をほかの関連システムと共有できるIP Data Linkサービスを開発した。これにより、離陸後においても高精度な空地飛行軌道の同期や調整を可能にした。これらの評価実験により、SWIMに基づいたFF-ICE運用方式に対して提案技術の有効性を確認することができた。

#### 3.2 国際活動について

ICAO APAC SWIM Task Force（SWIM TF）において既存国際航空通信ネットワーク（ATFN/AMHS）との相互運用性を実現するため、今までの研究成果を踏まえ、アジア太平洋地域に導入される共通IP通信基盤（CRV）に取り入れられることが考えられる地域SWIMアーキテクチャと構築方法を提案した。SWIM TFの第4回会合では、この提案について参加者との検討結果により、APAC SWIM Architectureとして採用される予定で進めることとなった。

また、中国と韓国と連携して、提案した地域SWIMアーキテクチャに基づいてSWIMコアサービスと運用支援サービスを検証できる共通検証基盤を構築し、地域の状況に合わせていくつかの検証実験を実施した（図2）。SWIM TFの第4回会合では、FF-ICEサービス検証実験の実施により、APAC地域にFF-ICE/R1（離陸前の飛行計画の調整）を導入するための技術課題や実現方法の提案と検討結果が高く評価された。ICAO ATMPPにも航空局と共に本検証実験の結果を報告し、FF-ICE Implementation Guidanceの



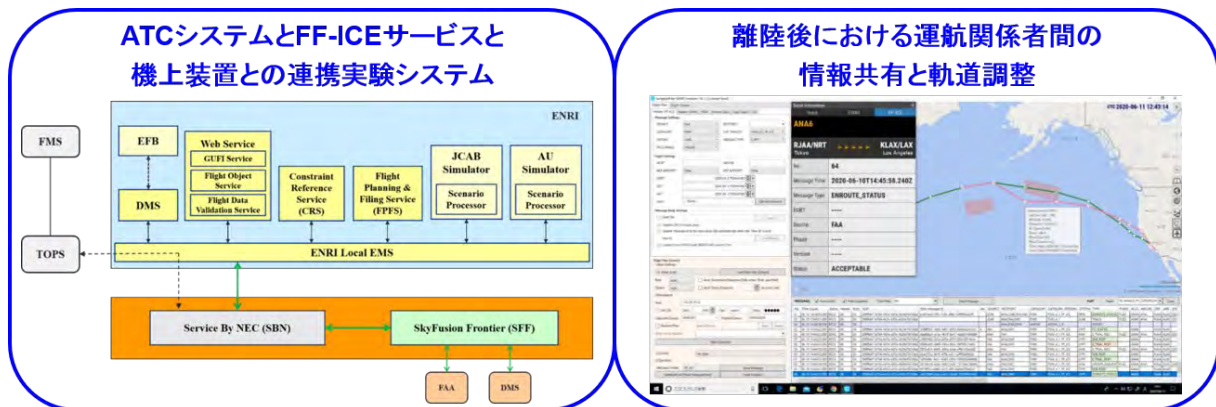


図1 国際連携実証実験

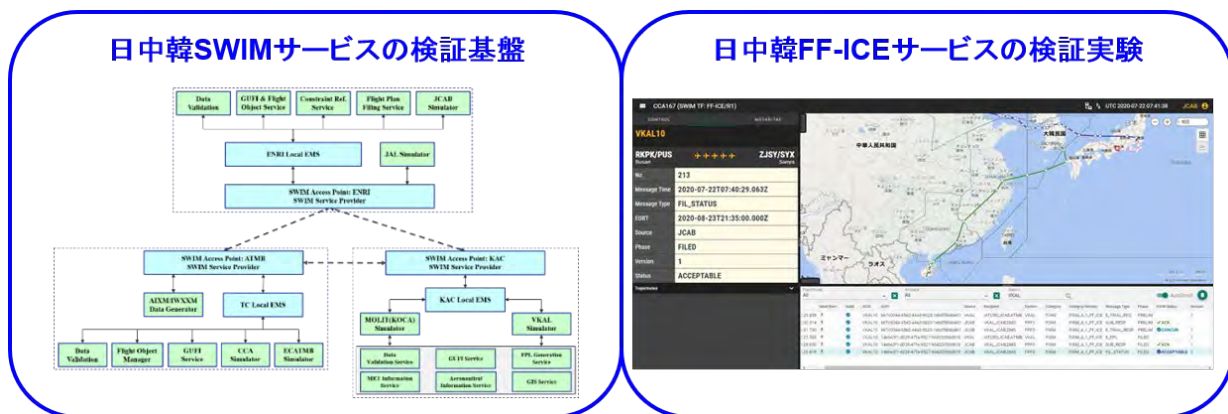


図2 地域におけるSWIMサービス検証基盤と検証実験

改善に貢献することができた。

これらの研究活動により、地域SWIM導入の技術基準の策定、及び地域SWIM基盤の連携によるシームレスカイの実現に貢献した。

さらに、FAAと共同で、SWIMに基づいた運用方式を検証するためのいくつかの検証実験も実施している。また、2020年7月からはカナダ、シンガポールやタイを加えた「Multi-Regional TBO（多地域軌道ベース運用）の実証実験」を実施し、軌道ベース運用に向けた具体的なSWIMサービスや運用プロセスの検討を進めている。

#### 4. まとめ

本研究においては以下の研究成果により、当初の研究目標を達成することができた。

- 標準情報交換モデル（運航情報交換モデル、航空

情報交換モデル、気象情報交換モデル）に基づいたデータ変換モデル、情報統合モデルとサービス連携モデルを開発した。

- 運用上の基本機能と技術面の性能要件の分析により、4次元軌道に基づいた空地情報交換技術と異種サービス連携技術を提案した。
- 空地軌道同期によるオンライン評価技術を提案し、サービス要件に応じたパフォーマンスを評価できるSWIMテストベッドを開発した。
- 国際連携実験や飛行実証実験により、総合評価を実施し、SWIMに基づいたFF-ICE運用方式に対して提案技術の有効性を確認することができた。

これらの研究成果により、CARATSにおける地対地SWIMとFF-ICE/R1導入の意思決定に貢献した。また、今までの国際活動により、アジア諸国と連携してICAO

APAC SWIM Task Forceを設置し、タスクリーダーとして地域に適用できるSWIM基盤の構築を行っている。さらに、今までの国際連携実験により、ICAO SWIM ManualやFF-ICE Implementation Guidanceの作成に貢献し、SWIMに関する国際標準化への取り組みも進めている。

今後、運用レベルが異なる環境において情報の信頼性や運航の安全性などを保証できる技術とSWIM情報サービスに関する検討、また、実運用に適用できるSWIMサービス検証基盤の構築について新たな研究課題として取り組む。

#### 掲載文献

平成28年度：

- [1] X.D. Lu, "Technical Overview and Lessons Learned of JCAB," Mini Global Demonstration II, NexGen Test Bed, USA, April 2016.
- [2] X.D. Lu, "The Research and Development of SWIM in ENRI," ICAO SWIM Workshop, Bangkok, Thailand, May 2016.
- [3] 呂曉東, 古賀禎, 住谷泰人, 塩見格一, "SWIM実証実験の報告と分析," 電子航法研究所研究発表会, 2016年6月.
- [4] 呂曉東, "ミニグローバルデモンストラーション2への参加報告," CARATS第23回情報管理検討WG, 2016年6月.
- [5] X.D. Lu and T. Koga, "System Wide Information Management for Heterogeneous Information Sharing and Interoperability," IEEE Proc. of ISADS, Bangkok, Thailand, Mar. 2017.

平成29年度：

- [6] X.D. Lu, "International and Regional Coordination for FF-ICE/1 Validation," ICAO APAC SWIM TF/1, Bangkok, Thailand, May 2017.
- [7] 呂曉東, 古賀禎, 住谷泰人, 塩見格一, "SWIMのコンセプトによる監視情報ドメイン構築に関する検討," 電子航法研究所研究発表会, 2017年6月.
- [8] 呂曉東, "FF-ICE/1検証実験の進捗状況," CARATS第27回情報管理検討WG, 2017年7月.
- [9] X.D. Lu, "IIH&V Validation #1 Lab Exercise - Report from Japan," IIH&V Validation #1 Lab Exercise, NexGen Test Bed, USA, Aug. 2017.
- [10] 呂曉東, "FF-ICE/1検証実験の報告," CARATS第28回情報管理検討WG, 2017年9月.

[11] X.D. Lu and T. Koga, "SWIM Concept-Oriented Information Integration for Air Traffic Surveillance," IEEE Proc. of GCCE2017, Nagoya, Japan, Oct. 2017.

[12] X.D. Lu, T. Koga and Y. Sumiya, "Coordinated Validation for SWIM Concept-Oriented Operation to Achieve Interoperability," EIWAC 2017, Tokyo, Japan, Nov. 2017.

[13] T. Nakada and X.D. Lu, "R&D Challenges Toward Integrated ATM Information Management," GANIS 2017, Montreal, Canada, Dec. 2017.

[14] 呂曉東, "SWIMによる航空交通情報システムの研究開発について," NEC出前講座, 2017年12月.

平成30年度：

[15] X.D. Lu, "Discussion of Asia/Pacific Regional SWIM Architecture," ICAO APAC SWIM TF/2, Bangkok, Thailand, April 2018.

[16] X.D. Lu and K. Morioka, "Lab Exercises for FF-ICE/1 and A/G SWIM Validation," ICAO APAC SWIM TF/2, Bangkok, Thailand, April 2018.

[17] 呂曉東, 古賀禎, 住谷泰人, "FF-ICE検証実験の報告と分析," 電子航法研究所研究発表会, 2018年6月.

[18] X.D. Lu, "Approaches for APAC Regional SWIM Implementation," FATS/24, June 2018.

[19] X.D. Lu, "Lab Exercises and Technical Discussion for FF-ICE Operation," FATS/24, June 2018.

[20] 呂曉東, "IIH&V国際連携実験の報告(電子航法研究所)," CARATS第30回情報管理検討WG, 2018年6月.

[21] X.D. Lu and K. Morioka, "JCAB Test System Implementation and Scenario for ASEAN SWIM Demo," ICAO APAC SWIM TF-ASEAN Demo TIM/2, Singapore, September 2018.

[22] X.D. Lu, T. Koga and Y. Sumiya, "SOA-based Air-Ground Information Exchange for High-assurance Operation," IEEE GCCE2018, Nara, Japan, October 2018.

[23] 呂曉東, 住谷泰人, "航空交通情報共有基盤に関する研究," 航空管制誌, 平成30年10月.

[24] X.D. Lu, K. Morioka, T. Koga and Y. Sumiya, "Air-Ground System Wide Information Management to Achieve Safe Flight Operation," IEEE HASE2019, Hangzhou, China, January 2019.

- [25] 小菅義夫, 古賀禎, 宮崎裕己, 呂曉東, 秋田学, 稲葉敬之, “ドップラー観測値を併用するTDOAにおける速度推定精度の改善,” 電子情報通信学会論文誌B, Vol. J101-B, No.10, pp.857-866, 2018年10月.
- [26] 小菅義夫, 古賀禎, 宮崎裕己, 呂曉東, 稲葉敬之, “レーダと受信時刻を観測値とする複数パッシブレーダのデータ融合,” 電子情報通信学会論文誌B, Vol. J102-B, No.1, pp.23-31, 2019年1月.
- 令和元年度:
- [27] X.D Lu, K. Morioka, T. Koga and Y. Sumiya, “Collaborative Flight and Flow Information Exchange to Achieve Seamless Air Traffic Management Operation,” IEEE ISADS2019, April 2019.
- [28] X.D. Lu, “Asia/Pacific Regional SWIM Implementation Options,” ICAO APAC SWIM TF/3, Bangkok, Thailand, May 2019.
- [29] X.D. Lu, “Report of Status and Activities for Task 2-1-3,” ICAO APAC SWIM TF/3, Bangkok, Thailand, May 2019.
- [30] 呂曉東, 森岡和行, 住谷泰人, 長縄潤一, 米本成人, “空地統合SWIMに関する研究開発,” 電子航法研究所研究発表会, June 2019.
- [31] 江上周作, 呂曉東, 古賀禎, 住谷泰人, “オントロジー技術を用いた航空交通情報共有の高度化,” 人工知能学会 第48回セマンティックウェブとオントロジー(SWO)研究会, August 2019.
- [32] 江上周作, 呂曉東, 古賀禎, 住谷泰人, “航空交通情報共有の高度化に向けたオントロジーの構築と応用,” JAWS2019, September 2019.
- [33] S. Egami, X.D Lu, T. Koga and Y. Sumiya, “Enriching Geospatial Representation for Ontology-based Aviation Information Exchange,” IEEE GCCE2019, Osaka, Japan, October 2019.
- [34] X.D. Lu, K. Morioka, S. Egami, T. Koga, Y. Sumiya, J. Naganawa, and N. Yonemoto, “Air/Ground SWIM Integration to Achieve Information Collaborative Environment,” EIWAC2019, Tokyo, Japan, October 2019.
- [35] 小菅義夫, 古賀禎, 宮崎裕己, 呂曉東, 秋田学, 稲葉敬之, “マルチパス環境下の距離とドップラーを観測値とするTaylor級数推定法による位置及び速度推定,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J102-B, No.11, pp.936-947, November 2019.
- [36] 小菅義夫, 古賀禎, 宮崎裕己, 呂曉東, 稲葉敬之, “Taylor級数推定法によるTOA測位における初期値,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J102-B, No.11, pp.926-935, November 2019.
- [37] X.D Lu, “Development Overview and Discussion for FF-ICE/Execution,” FF-ICE/X Tabletop Meeting, FTB, USA, January 2020.
- [38] S. Egami, X.D Lu, T. Koga and Y. Sumiya, “Ontology-Based Data Integration for Semantic Interoperability in Air Traffic Management,” IEEE ICSC2020, San Diego, USA, February 2020.
- 令和2年度:
- [39] X.D Lu, “FF-ICE Execution Demonstration”, FF-ICE/X Project Demonstration 2, June 2020.
- [40] X.D Lu, “Report of Task 1.8 and Task 2.1.3 Status”, ICAO APAC SWIM Task Force Team Leaders Coordination Meeting, June 2020.
- [41] X.D. Lu, “Preparation for TBO Demo”, Multi-Regional TBO Demonstration Kickoff Meeting, July 2020.
- [42] 呂曉東, “日本・中国・韓国によるSWIM実証実験について(電子航法研究所),” CARATS第42回情報管理検討WG, 2020年8月.
- [43] 小菅義夫, 古賀禎, 宮崎裕己, 呂曉東, 稲葉敬之, “レーダと複数の距離と計測センサによる目標位置推定誤差の解析,” 電子情報通信学会論文誌B, Vol. J103-B, No.9, 2020年9月.
- [44] X.D. Lu, “Gate-to-Gate Trajectory Based Operation Scenario”, Multi-Regional TBO Demonstration - Guided Discussion 1, September 2020.
- [45] 住谷泰人, 呂曉東, “航空交通情報共有基盤(SWIM)への挑戦,” 航空管制誌, 2020年10月.
- [46] X.D. Lu, “An Approach for APAC Regional SWIM Implementation”, ICAO APAC SWIM Task Force/4, November 2020.
- [47] X.D. Lu, “FF-ICE/R1 Service Validation and Implementation,” ICAO APAC SWIM Task Force/4, November 2020.
- [48] X.D. Lu, “FF-ICE/R1 Validation Demo,” ICAO APAC SWIM Task Force/4, November 2020.
- [49] 呂曉東, 江上周作, “SWIMオントロジーの構築と応用に関する研究,” 航空無線, 2020年12月.
- [50] 小菅義夫, 古賀禎, 宮崎裕己, 呂曉東, 稲葉敬之, “Taylor級数推定法による距離バイアス誤差ありの

TOA測位における初期値，”電子情報通信学会論文誌B，Vol. J103-B，No.12，2020年12月.

- [51] 江上周作，呂曉東，古賀禎，住谷泰人，“航空交通管理における意味的な相互運用性のためのオンロジーの構築と応用，”人工知能学会論文誌，Vol.36，No.1，pp.WI2-F\_1-12，2021年1月.
- [52] 呂曉東，“SWIM R&D in ENRI，”電子航法研究所講演会，2021年1月.
- [53] X.D. Lu, K. Morioka, S. Egami, T. Koga, Y. Sumiya, J. Naganawa, and N. Yonemoto, “Air/Ground SWIM Integration to Achieve Information Collaborative Environment”, Air Traffic Management and System IV, pp.301-314, 2021.

## 遠隔型空港業務支援システムの実用化研究【重点研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○井上 諭, 角張 泰之, ブラウン マーク (航空交通管理領域), 古賀 禎, 米本 成人

研究期間 平成 29 年度～令和 2 年度

### 1. はじめに

新たな空港の管制システムとして研究開発が進んでいるリモートタワーは従来の管制塔に代わり、光学センサ（カメラ）、監視センサや気象センサ等を空港に設置し、これら機器から得られる情報を高速ネットワークを介してリモートセンターに送り、センターに設置されたシステムで管制を実施する。これにより、従来の管制塔と同様に空港の交通状況の監視や管制指示や情報提供等の業務を遠隔地の管制センターから実施できる。また、従来の管制塔からの視界に加え、オペレータの業務を主に視覚的に支援する機能と合わせ安全性の向上や、効率的な運用が可能なシステムの開発を目指している。本研究では、リモートタワーの実用化に向けて、実験用のプロトタイプシステムを構築し、技術開発と試験システムでの評価を実施している。

### 2. システムの概要

本研究は 4 か年計画で実施し、今年度は最終年度である。構築したシステムでは、空港側に設置が必要なカメラや監視センサ等の機器は仙台空港に隣接する岩沼分室に設置し、運用室側の表示や制御システムを調布の実験室に設置した。これらの機器は光回線で結ばれリアルタイムに制御ができるシステムとなっている。リモートタワーではシステムのベースとなる 360° の視界はパノラマディスプレイ上に表示される。これに特定のターゲットや場所を見るための PTZ カメラと監視センサや気象センサ等の情報が統合され、さらに業務支援機能が組み込まれたシステムとなっている。業務支援機能の一つである視覚支援では、拡張現実 (Augmented Reality : AR) 型のラベル表示によって、オペレータの業務負荷の軽減、

安全性の向上や運航効率の向上にも寄与できるものを目指した。

### 3. システムの開発と評価

#### 3. 1 360° パノラマシステム

リモートタワーの運用を想定したシステムとして 360° のパノラマ映像表示システムを構築し (図 1)、表示性能、品質や様々な環境対応 (夜間, 雨, 雪等) 性能の評価を行った。EUROCAE の技術要件を満足するとともに、運用に供するための仕様を検討した。また、仕様を実現するために必要な独自の技術開発 (360° シームレス映像とするための映像キャリブレーション技術 (スケールリング, 歪曲補正, ステッチング)、映像の効率的な表示手法 (表示のレイヤー構造,ハウジングの反射対策構造等) も行った。

#### 3. 2 動体検知システムの性能評価

リモートタワーのシステムではカメラを使った映像情報を活用することで、オペレータの視覚を支援するための機能を提供できる。その仕組みの一つが、映像内の航空機や車両等の動体を検知する仕組みである。動体検知の基本的な仕組みは、映像中のフレーム間の差分を検出することで行う。ただし、画像フレームの差分だけをただ検出して表示するだけだと、ノイズなど余計な情報が表示されたり、逆に障害物や背景によって検知が不正確になることがあり、連続的な検知ができず誤表示や情報の欠損などが発生してしまう。このような事象はかえってオペレータの業務の邪魔になってしまうため回避する必要がある。そこでいくつかの検出手法を組み合わせ、



図1 360° 表示のプロトタイプシステム

表 1 シチュエーション別の検知結果の例

No	シチュエーション	開始時刻	終了時刻	評価対象時間	検知時間(合計)	検知率(%)	検知可能距離(NM)
1	海側からの着陸	15:59:12.930	16:01:26.386	0:02:13.456	0:02:01.889	91.33	5.903
2	山側への離陸	11:36:18.474	11:36:33.309	0:00:14.835	0:00:14.835	100	—
3	滑走路でのターン	13:57:07.698	13:58:08.119	0:01:00.421	0:00:38.663	63.99	—
4	エプロン	15:14:03.901	15:15:44.586	0:01:40.685	0:01:37.498	96.83	—
5	航空機交差	15:46:31.371	15:47:01.684	0:00:30.313	0:00:27.620	91.12	—
6	走行中の停止	16:20:03.877	16:20:17.703	0:00:13.826	0:00:10.929	79.05	—



図 2 評価実験で用いた検知手法の適用ゾーン

カルマンフィルタ等の予測処理やベクトルの移動量を計算し、フィルタリングなどのテクニックを組み込むことによってこれらの問題に対処する仕組みを処理に導入している。図 2 及び表 1 は、評価実験結果の一例について示した結果で、仙台空港 RWY27 での検知率を評価したものになる。

今回の評価では誤検知や検知の欠落を減らすために、映像全体をスキャンする手法に加え、図 2 に示すようなゾーン毎にそれぞれのゾーンの状況にあった検知手法を導入している。例えば、手法 2 が適用されているゾーンは海側から着陸してくる航空機を検出する必要がある。ここでは対象となる航空機は非常に小さな点として見えるが、このような小さな物体を誤検知しないような仕組みである。表 1 は検知評価結果の一例である。検知は視程や環境条件によっても変化するため、この結果が検知率を保証しているものではなく、ケーススタディでの結果であることも予め述べておく。表 1 の項目別のシチュエーションでは、検出率が 90%を超えた高い部分もある一方で、ノイズの除去や判定をしにくい場面があるところでは検出率が下がる場合もあり、映像解析処理だけでは検出率の向上が難しいところも見受けられた。検知結果が比較的良かった上空の場合、例えば項目 No. 1 では航空機をパノラマ映像上で約 6NM の地点からとらえることができ、管制塔の管制圏の距離 5NM をカバーできている。一方で滑走路上でも検知できなかった場面や誤検知が生じた部分の改善に向けて、今後は映像解析だけでなく、知識処理等の別手法と組み合わせることで検知精度の改善、向上を検討していく。



図 3 監視センサ情報の活用ためのシステムキャリブレーションの概要

### 3. 3 映像システムへの監視センサ情報の活用

タワーオペレーションの弱点は環境や気象条件によって視程が悪くなる際の監視であるが、監視センサ情報の活用は、条件に関係なく的確にターゲットの位置を把握できる点にある。リモートタワーの映像システムに監視センサ情報を導入するためには、監視センサそのものの情報の更新頻度や精度に加え、それらを映像情報と誤差なく組み込むための技術が必要となる。本研究では監視センサとして MLAT (マルチラテレーション) のシステムを組み込みのための最適化キャリブレーション技術の開発を行った (図 3)。

キャリブレーションではパノラマ映像の 2 次元座標、PTZ カメラの回転角空間座標と監視センサの 3 次元 (緯度、経度、高度) 空間の 3 つの異なる座標系をそれぞれ変換したときに生じる誤差を修正する。例えば、監視センサ情報を利用して PTZ カメラで航空機を自動追尾する場合は、P 回転角空間座標と 3 次元空間のマッピングのためのキャリブレーションが必要となる。また、監視センサ情報をパノラマ映像上のターゲットにラベル付けするためには、3 次元座標を 2 次元座標上に変換するうえでキャリブレーションを使って誤差を補正する。今年度は、この 3 つの座標変換のためのキャリブレーション手法を開発し、補正精度の評価を実施した。

### 3. 4 リモートタワー用ライトガン光度試験

リモートタワーではライトガンは遠隔操作で行うために、ターゲットとなる航空機を連続追尾しながら照射するシステムとなる。そのため PTZ カメラにライトガンを

組み込み、PTZの自動追尾機能を活用した評価用システムを構築した。図4はPTZカメラに組み込まれた評価用ライトガンシステムで、光源をLEDで作成しており、図4の右側は点灯試験をした時の様子である。PTZライトガン点灯テスト既存の管制塔内で点灯するライトガンと比べると光の減衰が少ないため、ICAO基準（6000cd以上）を満たすことに加え、実運用に向けて航空機からの視認性を考慮し、リモートタワー用の新たな仕様を検討することとなった。そこで、今年度は、実験用航空機を用いてライトガンの視認性評価及び光度レベルの飛行評価を実施した。今回の実験は国土交通省航空局交通管制部航空灯火・電気技術室および仙台空港の管制の協力のもと行われ、光度レベルと距離の違いによる視認性の違いについての評価を実施した。試験結果の詳細は、今後の運用基準の策定に活かされる。



図4 PTZカメラに組み込まれたライトガン(左)と夜間ライトガン点灯試験の様子(右)

#### 4. まとめ

本研究ではリモートタワーの実用化に向けてシステムの研究開発を実施してきた。研究の最終年度である今年度は、映像システムに加えて、監視センサ情報の統合や支援機能等について運用を想定したシステムの機能構築ができ、それらの性能評価を実施した。評価により生じた新たな課題については、機能や精度の向上を引き続き実施していく。

#### 掲載文献

- [1] S. Inoue, Y. Fukuchi and K. Yamazaki “Designing the Remote Aerodrome Flight Information Service Systems Interface base on Human Centred Design Approach” International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics and the Affiliated Conference (AHFE2017), L.A., USA, July, 2017.
- [2] 井上 諭, ブラウン マーク, 角張 泰之, 遠隔型空港業務支援システムの開発, 日本機械学会 交通部流部門大会 Translog2017
- [3] S. Inoue, K. Yamazaki and T. Kanno, “Task Analysis based

on User Centered Approach for Designing the Remote Aerodrome Flight Information Service Systems”, International Conference on Human System Engineering and Design 2018, Champagne-Ardenne, France , October 2018.

[4] S. Inoue, K. Yamazaki & T. Kanno, “User Interface Design for Remote Small Airport Operation” Proceedings of the 1st International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies (IHET 2019), pp.124-129, Nice, France, August 22-24, 2019.

[5] S. Inoue and T. Kanno, “Cooperative Work Analysis in Case of Aerodrome Flight Information Services”, International Conference on Human-Computer Interaction 2020, CCIS, volume 1294, pp 568-574

[6] 井上 諭, ブラウン マーク, 画像情報を用いた動体検知の効率化に関する研究, 日本機械学会 交通・物流部門大会 Translog2020

[7] 井上 諭, 角張 泰之, 上野 晃司, デジタルタワー管制のための映像情報と監視センサ情報の合成表示, 電子情報通信学会総合大会 2021

## 滑走路異物監視システムの高度化に関する研究【重点研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○ニッ森 俊一, 米本 成人, 河村 暁子, 森岡 和行

研究期間 令和元年度～令和3年度

### 1. はじめに

2000年に仏国シャルルドゴール空港で発生した、直前に離陸した航空機から脱落した金属片を原因とするコンコルドの事故以来、滑走路等上の異物（FOD）は非常に重要な空港安全の課題の一つとして認識が高まっている。また、バードストライクなどの突発的な事象は、異物の除去や滑走路の安全確認までに多大な手間と点検時間を発生させることになる。こうした事態は、安全上の問題に加え、航空機の離着陸を制限することから、空港の処理能力や運用効率を低下させる重大な要因となっている。このような背景の下、電子航法研究所では、主に金属物体を対象に滑走路異物検出システムの研究開発を実施しており、FOD探知システムの探知性能の基準となる滑走路上の1インチ程度の金属片を450 m程度離れたところで検出できる性能を達成したところである。

### 2. 研究の概要

本研究の目的は、FOD探知システムのR2年度以降の空港滑走路への導入に向けて、実運用に向けた未検知率の低減、探知困難形状FODへの対応、悪天候時の対策等のための研究開発を行うことである。このため、本研究は非金属材料等の低レーダ反射断面積（RCS）対象物および探知困難形状を有する対象物について、反射特性の評価およびこれまでに実証試験を実施しているリニアセル方式レーダシステムに実装する検出技術を提案・開発する。

また、FOD探知システムの運用基準策定に向けた空港環境における探知状況の評価および悪天候時の性能変化評価を実施し、環境が理想的でない条件においても探知能力を確保可能な技術の開発・システム実装を行う。

本研究はこれらに対応する新たな要素技術を開発する必要があり、下記3つの項目を達成目標としている。

- (1) FOD探知システムの導入に向けたFOD探知率向上および確実性に対する課題を踏まえた実用化・システム高度化を実現する。
- (2) 低RCS対象物探知技術、空港環境および悪天候時対応技術を実現し、システム実装を行う。
- (3) 空港環境および悪天候状況における性能評価を行い、運用要件策定に寄与する。



図1. 改良版 FOD 探知システムの概観

3ヶ年計画の2年目である令和2年度においては、主として下記の4項目について検討を行った。

- ・低RCS対象物探知技術の試験評価
- ・異物回収端末ユーザインターフェース（UI）の改善
- ・空港環境および悪天候時の性能評価（測定・特性定量化）
- ・評価システムの構築および試験実施

### 3. 研究成果

#### 3.1 低RCS対象物探知技術の試験評価

滑走路上的様々な異物の中には、従来のFOD探知システムの性能では探知不可能な場合がある。探知困難な異物を探知するための技術として、レーダセンサの感度を20 dB以上改善するための信号処理技術を実装した改良版FOD探知システムを構築し、2020年12月に仙台国際空港で試験を実施した。図1および図2に、それぞれ改良版FOD探知システムの概観および感度改善状況を示す。レーダ探知性能の改善により、低RCS対象物の探知率の増加が見込める。

#### 3.2 異物回収端末ユーザインターフェース（UI）の改善

空港運用者が滑走路において異物を効率よく回収可能となる仕組みである異物回収端末UIについて、より利用しやすいUIの実現を目指し、改修を実施した。昨年度に実施した成田国際空港での実証試験における空港運用者による異物回収デモンストレーションに基づき改善項目を調査し、図3に示す地図表示切り替え機能等のUI視認性改善および異物位置の認識性改善を行った。

#### 3.3 空港環境および悪天候時の性能評価

成田国際空港の旧評価用FOD探知システムを用いた空



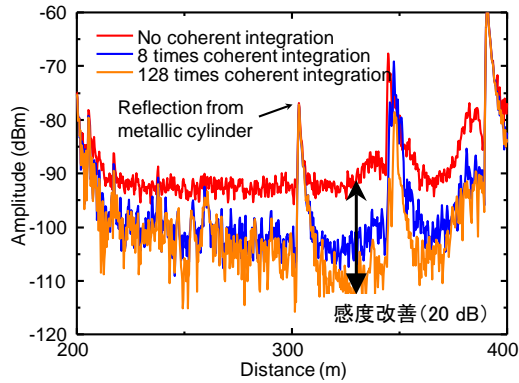


図2. 改良版 FOD 探知システムの感度改善状況



図3. 異物回収端末 UI への地図表示切り替え機能の追加

空港環境試験のデータ分析を行い、探知性能改善前後の探知距離と探知率の関係を定量化した。さらに、クアラルンプール国際空港の改良版FOD探知システムが、COVID-19のため稼働が遅れたため、仙台国際空港で追加試験を実施した。探知試験では、成田国際空港での旧評価用FOD探知システムで探知不可能だったFODは全て探知できた(表1)。

### 3.4 評価システムの構築および試験実施

上記項目の感度改善や異物回収端末UI等の機能追加を実施した最新の改良版FOD探知システムの構築を完了し、東京国際空港の設置準備をした。また新たに、覆域および探知確率が推定可能なFOD監視システム設計ツールを開発した。今後、開発したツールをFOD探知システムの空港配置計画検討およびシステム設計等に活用する。

## 4. まとめ

令和2年度は、FOD探知システム高度化に向けたシステム構築・改善と空港環境評価、設計ツール構築等を並行して実施した。改良版FOD探知システムは大幅な感度改善が達成可能であることを実験確認した。

### 掲載文献

[1] ニッ森 俊一, 森岡 和行, 河村 暁子, 米本 成人, 柴

表1. FOD探知システム評価結果の比較

FOD種類 /測定場所	仙台国際空港 (2020年12月) 距離300 m	成田国際空港 (2019年12月) 距離300 m	成田国際空港 (2019年12月) 距離200 m
アスファルト片	○(1個のみ)	×	○(複数個)
つぶればね	○	×	×
ねじ小	○(ねじ中:4 cmも○)	×	×
モンキーレンチ	○	×	×(向きによって○)
タイヤ片	○	×	×(複数個で○)
ラグナット	○	○	×
M10ボルト+ナット	○(ナットのみでも○)	×	×(向きによって○)
燃料キャップ	○	×	×
歪んだ金属片	○	×	○

垣 信彦, 佐藤 洋介, 加島 謙一, “滑走路異物監視システムの高度化に向けた研究開発,” 電子航法研究所研究発表会, 2020年10月

- [2] S. Futatsumori, N. Yonemoto, N. Shibagaki, Y. Sato, and K. Kashima, “Reflection Angle Dependency Evaluations of Typical Foreign Object Debris on Airport Runway Using Optically-Connected 96 GHz Millimeter-Wave Radar System”, Proceedings of the 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2020), pp.1-2, Nov. 2020.
- [3] ニッ森 俊一, 米本 成人, 柴垣 信彦, 佐藤 洋介, 加島 謙一, “96 GHz帯ミリ波レーダを用いた滑走路異物探知システムの各種異物探知率推定 -空港環境測定およびレーダ反射断面積測定による探知率推定-,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 120, no. 350, SANE2020-53, pp. 78-83, 2021年1月.
- [4] ニッ森 俊一, 宮崎 則彦, “光ファイバ接続型96 GHz帯広帯域ミリ波レーダにおけるFMCW信号源位相雑音の影響評価測定,” 電子情報通信学会光応用電磁界計測研究会報告, PEM2020-13, pp. 21-25, 2021年1月.
- [5] N. Yonemoto, S. Futatsumori, A. Kohmura, and K. Morioka, “Standardization Activities on Foreign Object and Debris Detection System for Airport”, Proceedings of the 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2020), pp. 665-666, Jan. 2021.
- [6] S. Futatsumori, N. Yonemoto, N. Shibagaki, Y. Sato, and K. Kashima, “Reflection Angle Dependency Evaluations of Typical Foreign Object Debris on Airport Runway Using Optically-Connected 96 GHz Millimeter-Wave Radar System”, Proceedings of the 15th European Conference on Antenna and Propagation (EuCAP 2021), pp.1-4, Mar. 2021.
- [7] ニッ森俊一, 柴垣 信彦, “空港滑走路の安全確保のための滑走路異物探知システムの研究開発,” 日本信頼性学会誌vol. 43, no. 2, pp. 73-78, 2021年3月.

## 航空通信基盤の高度化に関する研究【重点研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○河村 暁子, 森岡 和行, 呂 暁東, 長縄 潤一, 米本 成人

研究期間 令和2年度～令和5年度

### 1. はじめに

近年、航空システムから取得した様々な情報を関係者間で共有し、より安全かつ効率的な運用を行うSWIM (System Wide Information Management) が検討されている。このような次世代の航空情報共有のために、通信速度が速く大容量を扱え、IP (Internet Protocol) 化に対応できる次世代航空通信システムの導入が近づいている。ICAOの標準規格策定が終了しているAeroMACS (Aeronautical Mobile Airport Communications System) をはじめとした次世代航空通信システムの航空機への搭載がすすむと、その後しばらく世代の異なる航空通信システムを用いる機体が混在することが予想される。現在の航空データ通信は、機体の受信状況等に応じて搭載無線機を選択し使用しているが、飛行中の無線メディアの切替えなどによる接続率の低下が問題となっている。一方、ICAO Doc.9869 “Performance-based Communication and Surveillance (PBCS) Manual” は航空管制データ通信について高い接続率を要求しており、あらゆる飛行フェーズの航空機が通信接続率の要件を満足できる高度な航空通信基盤を実現するため、複数の通信システムおよび通信経路を用いた接続率の評価開発が必要とされている。さらに通信のIP化に伴い、通信の秘匿・優先度選択技術の評価実証や新しい規格の標準化も必要となる。

本研究では、前述の課題の解決のため、将来の航空交通の安全、効率、定時性向上に資する評価開発を行う。具体的には、複数の通信システムを含む航空用高速通信ネットワークの検証システムを構築し、飛行中の接続切替えによる接続率の低下や通信の秘匿・優先度選択技術の実証評価を行うことを目的とする。

### 2. 研究の概要

本研究では、まず飛行中の通信の切替えなどによる接続率の低下や通信の秘匿・優先度選択技術を評価するプラットフォームとして複数の通信システムを含む航空用高速通信ネットワークの検証システムを構築する。初段階では、検証システムにおける通信システム(無線機)と通信経路

はPCで表現する。次に、この航空用高速通信ネットワークの検証システムの一部のPCを実際に航空機で使用できる通信システムに置き換え、通信評価を行う。最後に、通信システムを実験用航空機に搭載して飛行しながら実証評価を実施する予定である。この流れを図1に示す。

本年度は4か年計画の初年度であり、以下の内容を中心に実施した。

- 複数の通信システムおよび通信経路の基礎調査および検証システム開発
- 航空通信システムの規格策定活動

### 3. 研究成果

#### 3.1 複数の通信システムおよび通信経路の基礎調査および検証システム開発

今年度は研究初年度であることから、まず接続率の現状の適切な把握のため、複数の通信システムおよび通信経路の基礎調査を実施した。ICAO Doc.9869では、航空管制データ通信のパフォーマンスをRCP (Required Communication Performance), RSP (Required Surveillance Performance) で定義している。通信に関するRCPについては、Transaction time が240秒、400秒のいずれの場合の継続性 (Continuity), 可用性 (Availability) も99.9%を満たすことを求めている。各国が毎年発表しているPBCS Monitoring Report によれば、現状の航空データ通信 (CPDLC (Controller - Pilot Data Link Communications) 通信) においてVHF通信、衛星通信いずれも単独の利用では99.0%を越えるが99.9%は満たしていない。さらに、VHF通信から衛星通信またはその逆の切替え時には99.0%を割りRCP値が悪化することがわかった。なお、HF通信のRCP値は70.0%弱でVHF通信、衛星通信と比べ極めて低い。HF通信以外のメディアへの切替え時はRCP値が良い他のメディアへ引き上げられる形で若干RCP値が改善される傾向がみえる。RCP値は、メディアの切替えのほかに、特定の運航者(運航/搭載機材)や衛星通信に関しては特定の衛星の不具合など様々な要因に依存しているが、本研究で改善策に取り組むのは切替え時である。

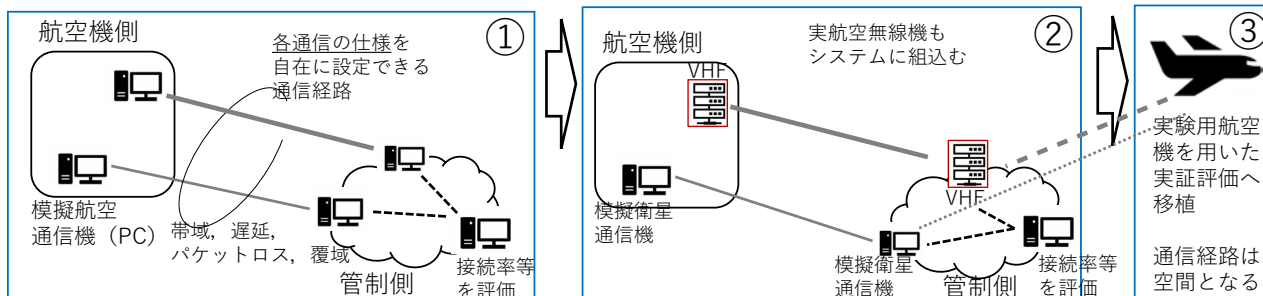


図1 航空用通信ネットワークの検証システムの構築ステップ

航空用高速通信ネットワークの検証システムについては、3つの通信システムと通信経路を含む図2に示す構成で開発を実施した。今後、本検証システムを用いて様々な航空通信の切替え、複数線路の平行利用や秘匿・優先度選択のシナリオを実施し研究を行っていく。

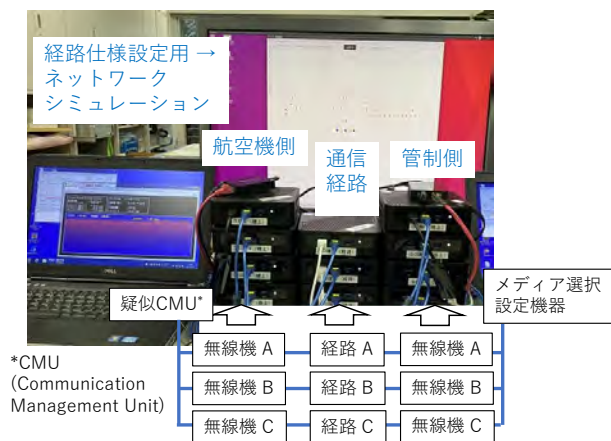


図2 本年度開発した航空用通信ネットワークの検証システム(図1の①に相当)

さらに、本年度は検証システムの構築ステップ2(図1②)で用いる予定の、検証システムに組み込む航空用無線機の調達と開発も時期を前倒して実施した。図3に開発したVHF通信の機上システムと地上システムを示す。機上システムは、一般の航空機用VHF無線機(Collins Aerospace社製VHF-4000)を機体に搭載しCMU(Communication Management Unit)と接続しなくてもPCから操作が可能とした。また、地上システムには航空通信プロバイダの振舞いを忠実に模擬できるAirtel ATN社製MTP(Multiple Test Platform)を導入し、機上-地上両装置間でACARS(Aircraft Communications Addressing and Reporting System)通信が行えることを確認した。



図3 実験用VHF無線機システム

### 3.2 航空通信システムの規格策定活動

航空通信システムの国際標準規格策定会議であるICAO FSMP(周波数管理パネル)、CP(通信パネル)、RPASP(遠隔操縦航空機システムパネル)等の技術作業部会に参画し、昨年度の実験用航空機を用いたAeroMACS-SWIM接続飛行試験(機内での無線LANによるEFB(Electronic Flight Bag)利用を含む)に関する解析結果についてICAO CP WG-I-WP(Working Paper)で報告した。また、上記検証システムに導入するため製作中のLDACS(L-band Digital Aeronautical Communications System)無線機の開発状況についてもICAO CP PT-TでIP(Information Paper)にて話題提供し標準化へ貢献すると共に、様々な航空通信システムについての技術及び運用上の課題や現状について議論した。

### 4. おわりに

令和2年度は本研究の初年度として、課題の的確な抽出のため、複数の通信システムと通信経路の基礎調査の実施および、上記システムと経路から成る航空通信ネットワークの検証システムの構築を行った。今後、この検証システムを用い、様々な通信シナリオの検証を実施して

いく予定である。また並行して、航空通信システムの規格策定活動に参画し、研究成果の共有や規格動向の情報収集を行った。

#### 掲載文献

[1] N. Yonemoto et al., “A/G connectivity tests for SWIM through Wide-area AeroMACS system”, ICAO CP WG-I32 Working paper, September, 2020.

[2] 森岡和行他, “AeroMACSの覆域拡大に関する実証実験 ～仙台空港から福島上空における飛行実験～” 電子情報通信学会SANE研究会技術報告, 2021年1月.

[3] 河村暁子他, “SWIM-AeroMACS接続飛行試験及び機内WiFi-EFB実証試験報告”, 航空局CARATS第11回通信アドホック会議, 2021年1月.

[4] K. Morioka et al., “Current status of development of ENRI LDACS prototype and test results for forward link channels”, ICAO Communication Panel (CP) Project Team - Terrestrial Data Link (PT-T), March, 2021.

[5] 森岡和行他, “次世代陸域航空無線通信システムのプロトタイプ開発 ～フォワードリンク基本性能評価～”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2021年3月.

## 従属監視補完技術に関する研究【指定研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○長縄 潤一, 宮崎 裕己, 田嶋 裕久, 三木 幸寿

研究期間 平成 29 年度～令和 2 年度

### 1. はじめに

我が国では、次世代の航空路監視システムとして広域マルチラテレーション（WAM: Wide Area Multilateration）の整備が進められており、将来的にはGPS等の衛星航法システムをベースとした自動位置情報伝送監視（ADS-B: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast）の導入も計画されている。しかしながら、ADS-B導入に向けては、意図的な偽位置情報の送信（成りすまし）、機上装置不具合等による誤位置情報の発生、妨害電波の送信といった脆弱性への対策が必要である。また、GPS障害によりADS-Bが利用不可となった際に、WAMを補完センサとして動作させるには、GPS障害時のWAM時刻同期技術が必要となる。さらに、補完センサとしての位置づけの場合、WAMの受信局数削減も望まれている。

### 2. 研究の概要

本研究は平成29年度から4ヶ年計画でADS-B脆弱性対策技術と補完用WAM技術を開発・評価する。

#### 2.1 ADS-B脆弱性対策技術の開発・評価

WAMを今後ADS-Bに活用することを想定し、誤位置・偽位置（以下、不正位置）の脆弱性に対しては信号到達時間差（TDOA: Time Difference of Arrival）による位置検証、妨害電波に対しては受信局冗長配置やセクタアンテナによる対策を提案する。これら技術を開発・評価するほか、評価結果のICAO技術資料への反映を目指す。

#### 2.2 補完用 WAM 技術の開発・評価

GPS 障害時に WAM の時刻同期を継続する技術として、本研究ではルビジウム（Rb）発振器を利用した同期技術を開発・評価する。また、WAM 受信局削減に向け、信号到来角（AOA: Angle of Arrival）と TDOA を併用した測位技術を開発・評価する。

### 3. 研究成果

最終年である令和 2 年度は実験装置改修と検証試験を実施した。

#### 3.1 ADS-B 脆弱性対策技術の実験装置改修

本年度は脆弱性対策のうち、位置検証に関する改修として「しきい値」の調整機能を追加した。しきい値はADS-B 信号が正当か不正かの判定基準となるもので、性能を最適化するために重要かつ必要である。これにより、しきい値を変化させた検証試験が可能となった。

#### 3.2 ADS-B 脆弱性対策技術の検証試験（不正位置）

検証試験では、しきい値を変化させながら、不正な信号を不正だと判定できる「検出率」、正当な信号を誤って不正だと判定する「誤検出率」を測定した。

まず、検出率の試験では、成りすましを模擬する送信源を用意し、生成した不正信号と在空機の信号を実験システムに入力し、正当性の判定を行った。その結果、不正信号を不正と判定できたほか、在空機の信号は正当と判定できた。不正信号のうち、判定に成功した割合を検出率として測定した。しきい値を変化させながら測定を行い、しきい値と検出率の関係を取得した（図 1）。一例では、985.4 ns（在空機に対する誤検出率の事前測定により決定）において、99.8%となった。この結果は、仮に 100 機の成りすましが行われたとしても、成りすましが成功するのは平均的に 1 機未満ということを意味する。したがって、脆弱性対策の有効性を確認できた。

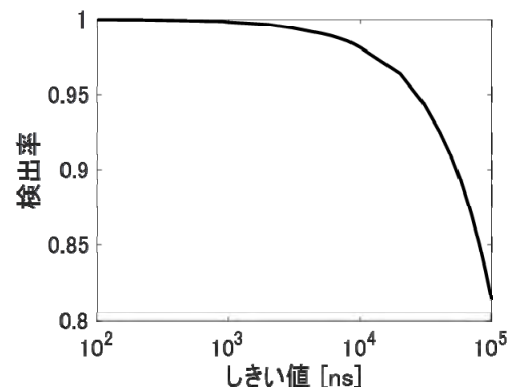


図 1 脆弱性対策（不正位置）の試験結果（検出率）

誤検出率の試験では、試験対象として在空機よりも信頼性の高い実験用航空機を用いた。実験用航空機の ADS-B 信号のうち不正だと判定した割合を誤検出率として測定した。しきい値を変化させながら測定を行い、しきい値と誤検出率の関係を取得した(図 2)。一例では、955 ns において 0.1% となった。この結果は ADS-B 信号が 1000 回放送されたときに、平均的には 1 回のみが誤って除去されるということの意味する。したがって、脆弱性対策を導入することによる ADS-B 受信性能への影響は限定的である。

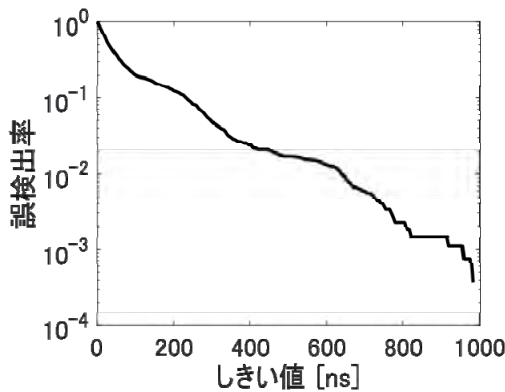


図 2 脆弱性対策（不正位置）の試験結果（誤検出率）

検証試験の結果、しきい値を調整することで検出率と誤検出率が変化することを明らかにした。一方の性能を向上させると他方の性能が低下するトレードオフの関係となっている。すなわち、しきい値を調整することで性能の最適化が可能である。本試験結果は、実システム導入において性能最適化に活用できる。

さらに、試験結果を踏まえて、実用化を見据えたシステム設計法を開発した。図 3 には計算例を示す。受信局位置、送信源位置、しきい値といった条件を与えることで、各覆域地点において期待される検出率が図示される。今後、実際の条件を入力し、性能を事前に見積もることで、実導入の検討に役立てることができる。

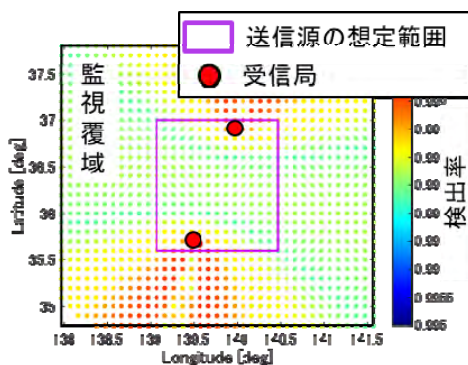


図 3 システム設計法による検出率の計算例

### 3.3 ADS-B 脆弱性対策技術の検証試験（妨害電波）

昨年度までに、妨害電波と ADS-B 信号を実験システムに入力し、妨害電波に対する受信性能を取得している。その結果を踏まえ、本年度は各種対策の効果を評価した。例えば、セクタアンテナを用いると、セクタ外からの妨害電波の影響を低減できるほか、受信局配置を冗長にすることで運用を継続できる可能性が高まる。図 4 にはこれら対策の試験結果を示す。受信局と妨害電波の送信源を仮定し、覆域内の ADS-B 受信性能（位置更新確率：指定の時間内に位置情報を取得できる確率）を色付けして表示している。ADS-B で求められる 97% (5 秒間の値) を満たす面積の割合について、セクタ化の場合は 67.2%、セクタ化と冗長配置を併用した場合は 99.8% となり、妨害電波の影響を十分に低減できた。

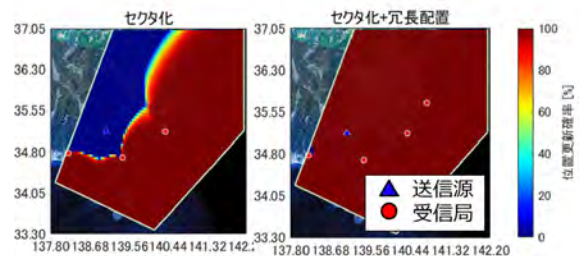


図 4 脆弱性対策（妨害電波）の検証試験結果

### 3.4 補完用 WAM 技術の実験装置改修

補完用 WAM 技術のうち、時刻同期に関する改修として Rb 発振器を増設することで、改修済み受信機が 2 台となる構成を実現した。この構成を活用し、実験では 1 台を GPS に同期し、1 台を GPS から同期解除した（障害を模擬）。同期解除後のデータを収集し、後述する検証試験に利用した。

### 3.5 補完用 WAM 技術の検証試験（時刻同期）

Rb 発振器による WAM の動作継続時間を評価した。具体的には、国際的な性能要件 ED-142 において求められている精度 350m、検出率 97% (WAM の場合、指定時間内に測位できる確率)、誤検出率 0.1% (WAM の場合、誤差の大きい測位結果の確率) を維持できる時間を評価した。図 5 には例として精度と誤検出率の評価結果を示す。時間経過とともに性能が悪化しており、GPS 障害の発生後、時刻同期誤差が徐々に累積していく影響が分かる。しかしながら、性能要件(図中赤線)を満たす時間が継続している。同様の評価を、Rb 発振器を用いない場合に対しても実施した。動作継続時間を比較したと

ころ、Rb 発振器を用いた場合は 11 時間、Rb 発振器を用いない場合は 1 時間未満であった。すなわち、Rb 発振器により 10 倍以上の時間で動作継続が可能となり、提案する時刻同期手法が有効であることを確認した。

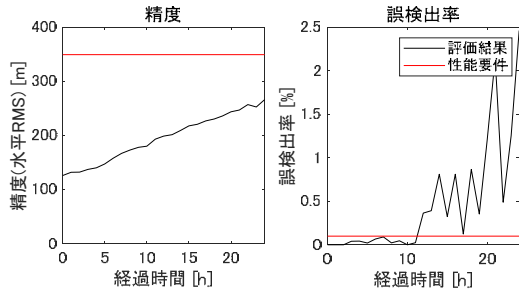


図 5 時刻同期に関する検証試験結果

### 3.6 補完用 WAM 技術の検証試験（受信局削減）

受信局を削減するため、削減対象以外の受信局には AOA を測定するセクタアンテナまたはアレーアンテナを設置すると想定した。AOA により WAM 測位に必要な TDOA を一部代替できる。AOA 測定に関する性能として、昨年度までの評価結果から、AOA 精度  $0.5^\circ$ （セクタアンテナ）および  $0.05^\circ$ （アレーアンテナ）を設定した。なお、これら数値について補足すると、セクタアンテナは位相情報を利用した場合、アレーアンテナはマルチパスの影響が無い条件下（電波無響室）となっている。また、受信局配置や航空機位置を図 6 とし、1 局 (Rx #1) を削減するとした。本条件において、性能要件 ED-142 で求められる精度、検出率、誤検出率の評価を行った。AOA 精度  $0.5^\circ$  の場合は配置外側（位置#3）を除いて要求性能を満足した。さらに到来角精度  $0.05^\circ$  の場合は配置外側（位置#3）においても、要求性能を満足することを確認できた。すなわち、AOA により受信局削減が可能であることを確認した。

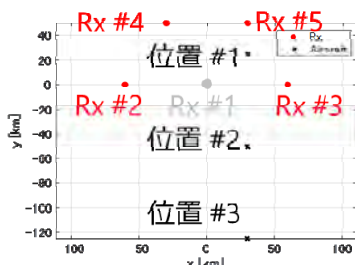


図 6 受信局削減に関する検証試験の条件

### 3.7 国際標準化活動

ADS-B 脆弱性対策の評価結果は ICAO APANPIRG 関連会合である SURICG (Surveillance Implementation and

Coordination Group) に WP として提出した。WP では本研究で取り組んでいる位置検証技術の原理および試験結果を説明した。試験において高い性能を示したことが評価され、アジア地域における ADS-B 整備・運用のガイダンス文書 (AIGD: ADS-B Implementation and Operation Guidance Document) の改訂作業において提案技術が有効な脆弱性対策として記載された。

### 4. おわりに

ADS-B 脆弱性対策と補完用 WAM 技術について開発・評価を行い、その有効性を確認できた。特に、本研究で提案した技術は、航空路 WAM を活用して効果的に実現できるため今後の活用が期待される。また、脆弱性対策については、評価結果を ICAO 関連会合に提出することで、ガイダンス文書の改訂にも貢献した。

### 謝辞

実験装置の設置及び評価試験の実施にご協力を頂いている国土交通省の関係各位に感謝の意を表します。

### 掲載文献

- [1] J. Naganawa, H. Miyazaki, H. Tajima, "Detection Probability Estimation Model for Wide Area Multilateration," Integrated Communication Navigation and Surveillance Conference 2017, pp. (2B1-1)-(2B1-15), Herndon, VA, Apr. 2017.
- [2] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, 田嶋 裕久, "WAM 受信局配置設計に向けた検出率予測モデル," 平成 29 年度 (第 17 回) 電子航法研究所研究発表会講演概要, pp.1-4, 2017 年 6 月.
- [3] H. Miyazaki, "Evaluation Results of Passive Acquisition Technique," ICAO APANPIRG SURICG/2, SURICG/2-IP24, Ulaanbaatar, Mongolia, Jun. 2017.
- [4] H. Miyazaki, T. Otsuyama, "Status Update on Measurements Based on RF Measurement Guidance Material," ICAO SP ASWG TSG/5, ASWG TSG WP05-13.2, Paris, France, Jun. 2017.
- [5] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, 田嶋 裕久, "広域マルチラテレーションにおける信号検出状況を考慮した測位誤差分布のモデル化," 信学技報, vol. 117, no. 182, SANE2017-36, pp.43-48, 2017 年 8 月.
- [6] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, 田嶋 裕久, "WAM 受信局配置設計に向けた性能予測モデル," 航空保安シ

ステム技術委員会 航空交通管制システム小委員会, (一財)航空振興財団, 2017年8月.

- [7] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, 田嶋 裕久 (2017年), “WAM 受信局配置設計に向けた性能予測モデル,” 航空無線, 第93号, pp.26-32.
- [8] 長縄 潤一, 田嶋 裕久, 宮崎 裕己, 古賀 禎, “セクタ型アンテナを用いた測角によるADS-B偽航跡対策の検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-2-12, 2017年9月.
- [9] 宮崎 裕己, 小菅 義夫, 田中 俊幸, “バイアス誤差を同時推定するTDOA測位方式の評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-2-24, 2017年9月.
- [10] H. Miyazaki, T. Otsuyama, “Update on Measurements Based on RF Measurement GM,” ICAO SP ASWG/6, SP-ASWG6-WP11, Montreal, Canada, Oct. 2017.
- [11] C. Chomel, J. Naganawa, T. Koga, H. Miyazaki, Y. Kakubari, “Jamming and Spoofing Protection for ADS-B Mode S Receiver through Array Signal Processing,” ENRI International Workshop on ATM/CNS, Tokyo, Japan, Nov. 2017.
- [12] J. Naganawa, H. Tajima, H. Miyazaki, T. Koga, and C. Chomel, “ADS-B Anti-Spoofing Performance of Monopulse Technique with Sector Antennas,” 2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications, pp.87-90, Tsukuba, Japan, Dec. 2017.
- [13] 宮崎 裕己, 小菅 義夫, 田中 俊幸, “TSOA及びTDOA測位間での監視覆域拡大の比較,” 信学技報, vol. 117, no. 403, SANE2017-98, pp.71-76, 2018年1月.
- [14] H. Miyazaki, T. Otsuyama, J. Naganawa, “Investigation of RF Measurement Methods Which Should Be Included in GM,” ICAO SP ASWG TSG/6, ASWG TSG WP06-20, Fort Lauderdale, FL, Jan. 2018.
- [15] 宮崎 裕己, 小菅 義夫, 田中 俊幸, “バイアス誤差を同時推定するTDOA測位方式,” 電子情報通信学会論文誌B, vol. J101-B, no. 3, pp. 264-275, 2018年3月.
- [16] H. Miyazaki, K. Matsunaga, A. Senoguchi, T. Koga, “SSR Mode-S DAPs Validation and Evaluation conducted by ENRI,” ICAO APANPIRG SURICG Mode-S DAPs WG/1, DAPs WG/1-IP/10, Chendgu, China, Mar. 2018.
- [17] J. Naganawa, H. Miyazaki, T. Koga and H. Tajima, “ADS-B Security Consideration in Japanese Airspace from a Technical Perspective,” Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference 2018, Apr. 2018.
- [18] H. Miyazaki, J. Naganawa and T. Otsuyama, “Investigation of RF Measurement Methods Which Should Be Included in GM,” ICAO SP ASWG/7, SP-ASWG7-WP19, Montreal, Canada, Apr. 2018.
- [19] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, 古賀 禎, 田嶋 裕久, “信号検出を考慮した配置設計を実現するための広域マルチラテレーション測位精度モデル,” 信学技報, vol. 118, no. 28, SANE2018-8, pp. 41-46, 2018年5月.
- [20] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, 田嶋 裕久, 古賀 禎, 角張 泰之, “ADS-B/WAM機能強化に向けたアレーアンテナ技術の検討,” 平成30年度(第18回)電子航法研究所研究発表会講演概要, 2018年5月.
- [21] H. Miyazaki, J. Naganawa and T. Otsuyama, “Investigation of RF Measurement Methods Which Should Be Included in GM,” ICAO SP ASWG TSG/7, ASWG TSG WP 07-13.2, Paris, France, Jun. 2018.
- [22] H. Miyazaki and M. Sundell, “Updating Surveillance Material in Doc 9830 A-SMGCS Manual,” ICAO SP ASWG TSG/7, ASWG TSG WP 07-11, Paris, France, Jun. 2018.
- [23] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, “TDOAを用いたADS-B成りすまし検出の理論的検討,” 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-2-24, 2018年9月.
- [24] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, “TDOAを用いたADS-B位置検証における遅延の考慮,” 信学技報, vol. 118, no. 239, SANE2018-44, pp.1-6, 2018年10月.
- [25] J. Naganawa and H. Miyazaki, “Performance Model of ADS-B Position Verification by TDOA,” International Symposium on Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications, Berlin, Germany, Oct. 2018.
- [26] J. Naganawa, H. Miyazaki and H. Tajima, “Localization Accuracy Model Incorporating Signal Detection Performance for Wide Area Multilateration,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 55, no.4, pp.1957-1971, Nov. 2018.
- [27] J. Naganawa and H. Miyazaki, “A Theory of Aircraft Position Verification using TDOA,” 2018 Asia-Pacific Microwave Conference, Kyoto, Japan, Nov. 2018.
- [28] 宮崎 裕己, 小菅 義夫, 田中 俊幸, “基準局での



- 目標距離観測値を使用した TDOA 測位, ” 信学技報, vol. 118, no. 418, SANE2018-101, pp.65-70, 2019 年 1 月.
- [29] J. Honda and ENRI Surveillance group, “Potential Change for Common Clock System of MLAT in Doc 9924,” ICAO SP ASWG/9, SP-ASWG9-WP24, Mar. 2019.
- [30] H. Miyazaki, “Mode S DAPs Implementation and Operations Guidance Document (Section 6.4, 6.5) V0.4,” ICAO APANPIRG SURICG Mode-S DAPs WG/2, DAPs WG/2-WP/04 Attachment, Singapore, Mar. 2019.
- [31] H. Miyazaki, “Performance of Surveillance System Depending on the Signal Environment,” ICAO APANPIRG SURICG/4, SP204, Apr. 2019.
- [32] O. Shloosh, H. Miyazaki, “Update of Surveillance Material in Doc 9830 A-SMGCS Manual,” ICAO SP ASWG TSG/9, ASWG TSG WP 09-02, Jun. 2019.
- [33] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, 田嶋 裕久, “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, 2019 年 6 月.
- [34] H. Miyazaki, “Update Status of SMGCS Standards,” ベトナム国との MLAT 連携会議, Jul. 2019.
- [35] 長縄 潤一, K. Wangchuk, Sangay, 宮崎 裕己, “在空中機を利用した覆域シミュレータ検証法の基礎検討,” 信学技報, vol. 119, no. 174, SANE2019-36, pp.7-12, 2019 年 8 月.
- [36] O. Shloosh, H. Miyazaki, “Update of Surveillance Material in Doc 9830 A-SMGCS Manual,” ICAO SP ASWG/10, SP-ASWG10-WP05, Sept. 2019.
- [37] J. Naganawa, H. Miyazaki, H. Tajima, “A Research Activity on ADS-B Vulnerability Countermeasures,” ENRI International Workshop on ATM/CNS, Tokyo, Japan, Oct. 2019.
- [38] 長縄 潤一, 宮崎 裕己 (2019 年), “ADS-B 位置検証の技術,” 航空無線, 第 101 号, pp.18-21.
- [39] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, “TDOA を用いた航空機位置検証法の実験的評価,” 信学技報, vol. 119, no. 316, SANE2019-75, pp.29-34, 2019 年 11 月.
- [40] 宮崎 裕己, 小菅 義夫, 田中 俊幸, “目標距離観測値の使用による TDOA 測位誤差の改善,” 信学技報, vol. 119, no. 405, SANE2019-88, pp.21-26, 2020 年 1 月.
- [41] H. Miyazaki, O. Shloosh, “Update of Surveillance Material in Doc 9830 A-SMGCS Manual,” ICAO SP ASWG TSG/10, ASWG TSG WP 10-10, Feb. 2020.
- [42] J. Naganawa, H. Miyazaki, T. Otsuyama, “Example of Position Error for WAM and ADS-B,” ICAO SP ASWG TSG/10, ASWG TSG WP 10-27, Feb. 2020.
- [43] 宮崎 裕己, 小菅 義夫, 田中 俊幸, “目標距離観測値を使用した TDOA 測位精度の改善,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J103-B, no.7, pp.258-269, 2020 年 3 月.
- [44] J. Naganawa and H. Miyazaki, “Experimental Evaluation on TDOA-based Aircraft Position Verification,” 14th European Conference on Antennas and Propagation, Copenhagen, Denmark, Mar. 2020.
- [45] 長縄 潤一, 田嶋 裕久, 宮崎 裕己, “航空監視用広域マルチラテレーションにおける GPS 障害対策と評価法,” 信学技報, vol. 120, no. 6, SANE2020-2, pp. 7-12, 2020 年 4 月.
- [46] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, “信号到達時間差を用いた航空路監視システムにおける到来角併用の検討,” 信学技報, vol. 120, no. 98, SANE2020-19, pp. 17-22, 2020 年 7 月.
- [47] 伊藤 岬, 山田 寛喜, 長縄 潤一, 古賀 禎, “円形仮想アレーを用いた航空機 ADS-B 信号の 2 次元方位推定精度向上に関する実験的検討,” 信学技報, vol. 120, no. 148, SANE2020-22, pp. 7-12, 2020 年 8 月.
- [48] J. Naganawa, H. Miyazaki, “Example of ADS-B Position Verification Performance,” ICAO APANPIRG SURICG/5, SURICG/5-WP/07, Sep. 2020.
- [49] 長縄 潤一, 宮崎 裕己, “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.
- [50] H. Miyazaki, A. Senoguch, H. Seko, “Utilization of mode-S DAPs data for weather forecast,” All India Aviation Seminar, AAOA-I, Nov. 2020.
- [51] J. Naganawa, H. Miyazaki, “Theory of Automatic Dependent Surveillance - Broadcast Position Verification using Time Difference of Arrival,” in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Dec. 2020.
- [52] 宮崎 裕己, 長縄 潤一, 田嶋 裕久, 小菅 義夫, 田

中 俊幸, “広域マルチラテレーションにおける GPS 障害対策の改善,” 信学技報, vol. 120, no. 350, SANE2020-56, pp. 96-101, 2021 年 1 月.

- [53] K. Wangchuk, Sangay, J. Naganawa, D. Adhikari, K. Gayley, “ADS-B Coverage Design in Mountainous Terrain,” Air Traffic Management and Systems IV - Selected Papers of the 6th ENRI International Workshop on ATM/CNS, pp. 327-336, Springer, 2021.
- [54] H. Miyazaki, “Update of Surveillance Material in Doc 9830 A-SMGCS Manual,” ICAO SP ASWG TSG/12, SP TSG/12-WP03, Feb. 2021.
- [55] 長縄, 宮崎, 田嶋, 古賀, “AOA と TDOA を併用した航空機位置検証の検討,” 電子情報通信学会 2021 年総合大会, B-1-110, 2021 年 3 月.

担当領域 監視通信領域

担当者 ○大津山 卓哉, 本田 純一

研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度

## 1. はじめに

空港面及び空港近傍の航空機監視に利用される二次監視レーダ (SSR) やマルチラテレーション (MLAT) 等は、高精度、高検出率かつ高更新率を備えた監視システムである。しかし、監視対象にトランスポンダを必要とし、トランスポンダが搭載されていない、もしくは正常に動作していない場合の監視はできない。そのため、トランスポンダに依存しない一次監視レーダ PSR(ASR, ASDE 等)は、監視対象空域における航空交通の安全性を担保する上で重要な役割を果たす。しかし、PSR 等は大型の回転型空中線及び高出力送信機を必要とするため、整備及び維持コストの面で課題を有する。このような観点から PSR の代替もしくは覆域拡張のため、新しい監視システムの導入が期待されているが、新たな周波数帯の割り当ては困難であるため、既存の周波数資源を有効活用した新しい監視システムが求められている。

本研究では、航空用信号だけでなく航空用途以外の信号も活用して、空港面及び空港近傍における移動体を検出する独立非協調監視システムの開発を行う。そして、既存の空港面および空港監視レーダに比べて高検出率、高更新率を達成するマルチスタティックレーダ (MSPSR) に求められる性能要件を明らかにする。

## 2. 研究の概要

本研究は 3 カ年計画であり、最終年度の令和 2 年度は次のことを行った。

- ① ICAO 等への技術資料提供、MSPSR 動向調査
- ② MSPSR に必要な要素技術の開発
- ③ 実験システムの検証

## 3. 研究成果

令和 2 年度は ICAO 監視パネル等に提出された、MSPSR 関係の文献を調査するとともに、MSPSR 関連技術について ASWG (Aeronautical Surveillance Working Group) に報告した。また、本研究に先行する重点研究にて整備を行った MSPSR 実験システムによる航空機の測位実験データを使用して、リアルタイム処理システムの性能検証を行った。

### 3.1. MSPSR の要件・動向調査

COVID-19 の影響で、ICAO 監視パネルの会議はオンラインでの対応になり会議時間が短くなった。そのため規定改訂案の議論が中心となり、各国の開発状況等は提出されなかった。また、国際学会においても、投稿し採録されていた会議が次年度に変更になったため、動向調査は非常に困難であった。

### 3.2. MSPSR に必要な要素技術の開発

仙台空港内に構築した MSPSR 実験システムは、送受信機それぞれを光ファイバ無線技術(RoF: Radio over Fiber)を使って接続する OFC-PPSR(Optical-Fiber Connected Primary Surveillance Radar :光ファイバ接続型パッシブ一次監視レーダ)となっている。この RoF を使った監視システムについて、既存システムに対する技術の優位性をまとめ、航空機監視マニュアル(Doc 9924)の改訂提案として ASWG に報告し、提案内容がマニュアルに反映された。

また、一般的にパッシブレーダに用いられる受信機用アンテナには無指向性アンテナを使用することが多く、受信機単独で高精度・高分解能な測位を行うことは難しい。この問題を解決するために多くの信号処理手法が提案されている。空港周辺での移動体検出が可能となるようなパッシブレーダでの信号検出技術として、リニアアレーアンテナやビーム走査型アンテナで用いられている電波到来方位測定技術を適用し高精度・高分解能を達成するための技術開発を JAXA との共同研究として行った。JAXA ではモ

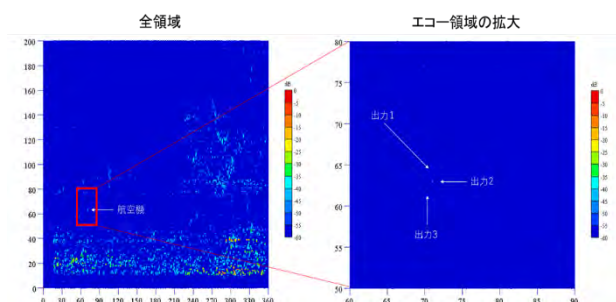


図 1 : 開発したパッシブレーダに対する高分解能処理の検証結果。表示処理の都合で拡大図では出力が 3 点に分かれているが、これまでのレーダ信号処理に比べて角度分解能が飛躍的に向上している。

ノスタティックレーダに対して畳み込み積分の結果として得られるレーダの受信信号を計算処理によって分解し、高分解能レーダとして使用する技術を開発している。この技術をパッシブレーダに適用し高分解能化の可能性を探るため、実験用パッシブ監視システムで得られた飛行実験による測位実験データに対して処理方法の開発と実データによる検証を行った(図1)。

### 3.3. 実験システムの検証

運用を見据えたレーダ実験システムの評価を行うために、リアルタイム処理が可能な MSPSR 実験システムを SDR (Software Defined Radio:ソフトウェア無線機) を使って構築した。先行研究で構築した MSPSR 実験システム上で検証した信号処理手法等もリアルタイム実験システム上に構築し、リアルタイム処理においても同等の性能が得られることを目標とした。令和2年度は COVID-19 により実環境における実験が出来なかったため、過去の検証実験の時に記録したレーダ信号波形を再生し、リアルタイム実験システムに入力することによって、性能確認を行った。図2に検証結果の一例を示す。既存の MSPSR 実験システムでは全波形を記録保存し、処理速度を無視して取得後の信号処理等について検討を行っていたが、そこで得られたパラメータ等をリアルタイム実験システムに適用し、保存信号を実験システムに入力することによって同等の性能を得られることが確認できた。ここで検出された移動体は仙台空港の西側にある高速道路付近から得られたものである。

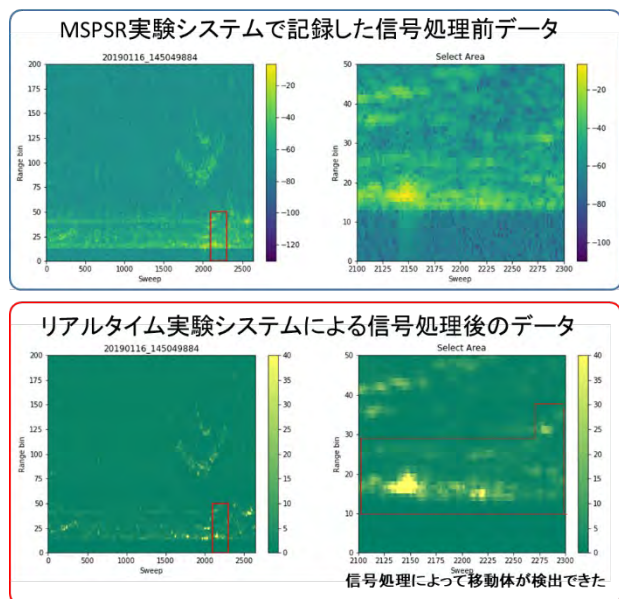


図2：リアルタイム実験システムによる移動体の検出例。信号再生データによる実験結果。

### 4. まとめ

本研究では、地上デジタル放送波および一次監視レーダを使用した MSPSR 実験システムを構築し、パッシブレーダで有効な要素技術の開発を行ってきた。本研究で開発・検証を行っているパッシブレーダは、捕捉性能の向上やブラインドエリアの解消が期待される。本研究の成果が、既存のレーダより安価で且つ測位精度や更新頻度が向上した高性能レーダシステムの構築検討に資すると期待される。

### 掲載文献

- [1] M. Watanabe, J. Honda, and T. Otsuyama, “Experimental Prototype for MSPSR based on Optical Fiber Connected Passive PSR”, ICNS 2018, Apr, 2018.
- [2] T. Otsuyama and S. Marquard, “Status Update on MSPSR Development”, ICAO SP-ASWG/7, Apr, 2018.
- [3] J. Honda, T. Otsuyama, M. Watanabe, and Y. Makita, “Study on Multistatic Primary Surveillance Radar using DTTB Signals Delays,” Proc. Int. Conf. Radar (Radar 2018), ID:182, Brisbane, Australia, Aug. 2018.
- [4] J. Honda, Y. Kakubari, T. Koga, H. Miyazaki, and T. Otsuyama, “Application of Radio-over-Fiber to Multilateration,” ICAO SP3-ASWG/8, Sep. 2018.
- [5] 渡邊優人, 本田純一, 大津山卓哉, “Sバンドパッシブレーダにおける空港周辺のクラッタ特性”, 電子情報通信学会 SANE 研究会, 2018年10月
- [6] J. Honda, T. Otsuyama, M. Watanabe, and Y. Makita, “Aircraft and Vessel Surveillance System by DTTB Signal Delays,” Proc. Int. Symp. Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications (ESAVS 2018), Berlin, Germany, Oct. 2018.
- [7] J. Honda, Y. Kakubari and T. Otsuyama, “Activities Regarding Application Technologies for Primary and Secondary Surveillance Radars in Japan,” ICAO Surveillance Workshop, Nov. 2018
- [8] 大津山卓哉, 本田純一, 渡邊優人, “光ファイバ接続型一次監視レーダの開発”, 電気学会論文誌 C, Vol. 138, No. 12, pp 1573-1579, 2018年12月
- [9] M. Watanabe, J. Honda, and T. Otsuyama (Feb. 2019), “Moving Target Detection and Two-Receiver

- Setup using Optical Fiber Connected Passive Primary Surveillance Radar”, IEICE Trans. on Comm., Vol. E102-N, No. 2, pp 241-246.
- [10] J. Honda, H. Miyazaki, Y. Kakubari, T. Koga and T. Otsuyama, “Multilateration System Employing Radio-over-Fiber Technology,” ICAO SP-ASWG/TSG/8, Feb. 2019
- [11] J. Honda, H. Miyazaki, Y. Kakubari, T. Koga and T. Otsuyama, “Draft Doc 9924 CP for a New Common Clock Architecture,” ICAO SP-ASWG/TSG/9, June 2019.
- [12] 渡邊優人, 本田純一, 大津山卓哉, “OFC-PPSR におけるバイスタティッククラッタに関する一検討”, 電子情報通信学会和文誌, Vol. J102-B, No. 8, pp. 627-630, August, 2019
- [13] 渡邊優人, 本田純一, 大津山卓哉, “OFC-PPSR を用いた空港近傍監視に関する実験的検討～一次監視レーダとのレンジプロファイル比較～”, 電子情報通信学会 SANE 研究会, 2019 年 8 月
- [14] 渡邊優人, 本田純一, 大津山卓哉, “空港近傍および空港面監視型 OFC-PPSR 実験システム”, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2019 年 9 月
- [15] J. Honda, H. Miyazaki, Y. Kakubari, T. Koga and T. Otsuyama, “Draft Doc 9924 CP for a New Common Clock Architecture, ” ICAO SP-ASWG/10, September 2019.
- [16] J. Honda, H. Miyazaki, Y. Kakubari, T. Koga and T. Otsuyama, “Draft Doc 9924 CP for a New Common Clock Architecture,” ICAO SP-ASWG/TSG/10, February 2020.
- [17] 大津山卓哉, 渡邊優人, 本田純一, “地デジ信号を使ったパッシブレーダによる移動体検出”, 電子情報通信学会 総合大会, 2020 年 3 月
- [18] J. Honda, H. Miyazaki, Y. Kakubari, T. Koga and T. Otsuyama, “Draft Doc 9924 CP for a New Common Clock Architecture,” ICAO SP-ASWG/ASWG/11, Apr. 2020
- [19] J. Honda, H. Miyazaki, Y. Kakubari, T. Koga and T. Otsuyama, “Draft Doc 9924 CP for a New Common Clock Architecture,” ICAO SP-ASWG/ASWG/TSG/11, June 2020
- [20] 大津山卓哉, 本田純一, “地デジ信号の遅延プロファイルを使った移動体検出”, 電子情報通信学会 宇宙航行エレクトロニクス研究会, 2020 年 7 月
- [21] J. Honda, H. Miyazaki, Y. Kakubari, T. Koga and T. Otsuyama, “Draft Doc 9924 CP for a New Common Clock Architecture,” ICAO SP-ASWG/ASWG/12, Sep. 2020
- [22] 大津山卓哉, 本田純一, 角張泰之, “光ファイバ無線技術を応用した航空機監視技術”, 電子情報通信学会 総合大会, 2021 年 3 月

## 航空機内データ通信（WAIC）における電磁環境評価に関する研究【指定研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○ニッ森 俊一，米本 成人，河村 暁子，森岡 和行

研究期間 平成30年度～令和3年度

### 1. はじめに

2015年に開催された世界無線通信会議（WRC-15）において、電波高度計に配分されている4 GHz帯（4,200 MHz-4,400 MHz）を航空機内データ通信（Wireless Avionics Intra-Communications, WAIC）に配分することが決議された。これを受け、WAIC機器間およびWAIC機器と電波高度計間で混信を与えないよう、EUROCAE WG-96/RTCA SC-236では国際標準規格の策定が、また、ICAO周波数管理パネル（FSMP）においてはWAICの標準および勧告方式（SARPs）の作成が進められている。これらの活動には航空機製造メーカーおよびアビオニクスメーカー等も参加して、WAIC機器の通信方式やネットワーク方式に関する議論が行われている。

我が国ではWAIC機器と電波高度計との相互運用性の検討において、電波環境特性に関する有効な評価技術に基づく測定評価法および解析評価法の確立が求められている。一方、国際的には4,200 MHz-4,400 MHz帯の隣接周波数を次世代携帯電話システム等に割り当てる検討が行われており、それらの周波数帯に携帯電話システムが導入された場合、隣接雑音および相互変調ひずみ等の発生により、より厳しい条件にてWAIC機器及び電波高度計の運用を強いられる可能性がある。

### 2. 研究の概要

研究の目的は、WAIC周波数帯における電波環境評価技術を実現することで、WAICに係る国際規格化およびSARPsの作成に寄与し、円滑なWAIC機器の導入と電波高度計および隣接帯域を用いる通信機器との相互運用性の確保を行うことである。

本年度は4カ年計画の3年目であり、次の3項目について並行して研究を進めた。

- (1) WAIC機器、電波高度計、隣接帯域を用いる通信機器との共用条件の検討のための航空機干渉経路損失（IPL）の数値解析評価法の詳細解析
- (2) WAIC機器の搭載を想定した航空機の通信特性測定の実施
- (3) WAICおよび航空機電磁干渉に関する国際標準化活動の実施

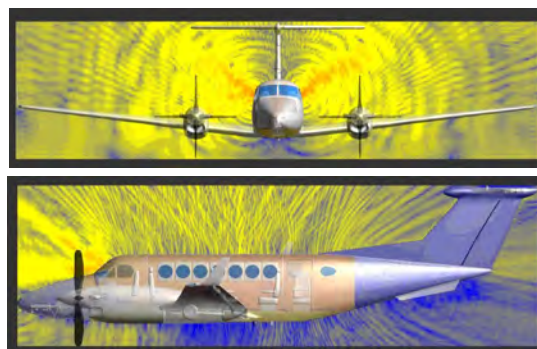


図1. ビーチクラフト B300 型機  
WAIC 周波数帯放射電磁界数値解析結果例



図2. ビーチクラフト B300 型機  
放射電磁界測定状況

### 3. 研究成果

3.1 WAIC機器、電波高度計、隣接帯域を用いる通信機器との共用条件の検討のための航空機干渉経路損失（IPL）の数値解析評価法の詳細解析

北海道大学との共同研究において、電波高度計および隣接帯域通信機器とWAIC機器間における干渉経路損失（IPL）の数値解析推定を実施した（図1）。また、WAIC機器を搭載した航空機を中心とした球面上における詳細な全周放射特性を評価した。仙台空港においては、ビーチクラフトB300型機を用いた隣接帯域を使用する5Gモバイルシステム周波数帯を含めた放射電磁界測定およびIPL測定も実施した（図2）。さらに、2021年3月に、電波高度計の実機干渉試験を実施し、帯域内干渉信号と帯域外干渉信号に対する代表的な電波高度計の電磁干渉感受性評価試験を実施した（図3）。

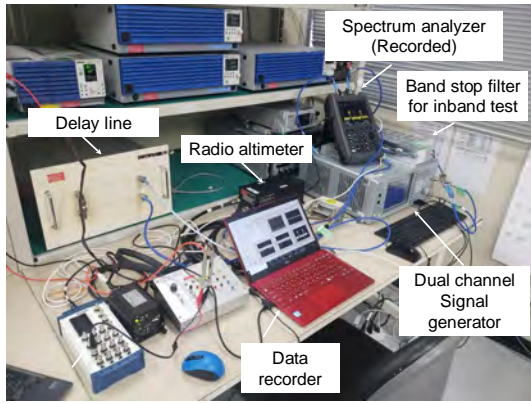


図 3. 電波高度計電磁干渉特性の実機試験状況

### 3.2 WAIC機器の搭載を想定した航空機の通信特性測定の実施

電波伝搬特性評価・通信特性評価が可能なCOTS製品を用いた測定系（ソフトウェア無線機を利用）を構築し、測定準備を実施した。ソフトウェア無線機では、IEEE 802.11規格に準拠した物理層を有する通信信号での信号強度、エラーベクトル振幅、通信速度等の評価が可能である。

### 3.3 WAICおよび航空機電磁干渉に関する国際標準化活動の実施

ICAO FSMP, EUROCAE WG-96/RTCA SC-236に参加し、当所における研究成果を国際標準策定に反映した。ICAO FSMP WG10およびWG11において寄与文書を公表した。WG10で公表した文章（ビーチクラフトB300型機のIPL測定結果）はSC-239の5G電磁干渉レポートに引用されている。なお、2020年5月から電波高度計のMOPSを策定予定のEUROCAE WG-119/RTCA SC-239に参加している。

## 4. まとめ

令和2年度は、WAIC周波数帯において、航空機の詳細な電磁界特性の解析評価、および放射電磁界/IPLの測定評価を実施した。さらに、代表的な電波高度計の電磁干渉特性を明らかにするための実機試験を実施した。これらの結果について、EUROCAE /RTCA, ICAO等で公表し、積極的な国際標準化活動を実施した。

### 掲載文献

[1] S. Futatsumori, K. Morioka, T. Hikage, T. Sekiguchi, M. Yamamoto, and T. Nojima, "Height and Angle Characteristics of Point Source Transmitting Power of Wireless Avionics Intra-Communication Systems Based on FDTD Analysis", Proceedings of the 35th International

Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics (ACES 2020), pp.1-2, July, 2020.

- [2] ニッ森 俊一, 宮崎 則彦, 関口 徹也, 日景 隆, 野島 俊雄, "航空機内データ通信周波数帯における航空機電界強度特性評価-ビーチクラフト B300 型機を用いた地上放射特性測定-", 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-2-5, p.143, 2020年9月.
- [3] S. Futatsumori, N. Miyazaki, T. Sekiguchi, T. Hikage, "Interference Path Loss Measurements of Beechcraft B300 Aircraft at 4 GHz Wireless Avionics Intra-Communication Band," proc. of 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe, 364, Sep. 2020.
- [4] S. Futatsumori, "Interference Path Loss measurement at Wireless Avionics Intra-Communication Band using Beechcraft B300 Aircraft," ICAO Frequency Spectrum Management Panel, WG10, IP05, Sep. 2020.
- [5] 関口 徹也, 日景 隆, 山本 学, ニッ森 俊一, 森岡 和行, 河村 暁子, 米本 成人, "FDTD 解析を用いた WAIC 周波数帯の機外漏洩波特性推定", 令和元年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2020年10月.
- [6] S. Futatsumori, K. Morioka, T. Hikage, T. Sekiguchi, M. Yamamoto, and T. Nojima, "Height and Angle Characteristics of Point Source Transmitting Power of Wireless Avionics Intra-Communication Systems Based on FDTD Analysis," Applied Computational Electromagnetics Society Journal, vol. 35, no. 11, pp.1274-1275, Nov. 2020.
- [7] 佐藤 亜衣, 吉田 総希, 日景 隆, ニッ森 俊一, 河村 暁子, 米本 成人, "FDTD 解析を用いた 5G Sub-6GHz 周波数帯の機内-機外伝搬特性推定", 電子情報通信学会技術研究報告, vol.120, no.350, SANE2020-38, pp.6-9, 2021年1月.
- [8] N. Yonemoto, A. Kohmura, S. Futatsumori, K. Morioka, "The compatibility study between 5G base stations and radio altimeters in Japan and update of the result of measurement campaign," ICAO Frequency Spectrum Management Panel, WG11, WP30, Mar. 2021.
- [9] ニッ森 俊一, 宮崎 則彦, 佐藤 亜衣, 尾崎 龍之介, 日景 隆, 野島 俊雄, "小型航空機における航空機電波高度計の干渉経路損失 -ビーチクラフト B300 型機を用いた隣接周波数帯を含む測定評価-", 2021年電子情報通信学会総合大会, B-2-8, p.173, 2021年3月.

ADS-B を用いた監視能力向上の研究【指定研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○松永 圭左, 宮崎 裕己, 金田 直樹

研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度

1. はじめに

近年、航空交通でのADS-B（自動位置情報伝送監視）の利用に関して、豪州において2009年に航空機監視への運用が開始され、米国および欧州空域においても2020年に搭載義務化されており、国際的に利用が拡大されている。我が国においてADS-Bの航空機監視での利用は、CARATS（将来の航空交通システムに関する長期ビジョン）において令和3年度に意思決定を行う予定とされ、現時点での検証・評価が必要な段階である。

ADS-Bデータを航空機監視に利用する場合は、その位置情報について信頼性等を検証する必要がある。ADS-Bデータには、位置情報に加え、その精度・信頼性情報が含まれており、これらの情報の評価を行った上で利用を検討すべきである。

ADS-Bの利用に関しては、航空機監視用途とは別に、短縮垂直間隔（RVSM; Reduced Vertical Separation Minimum）空域を飛行する航空機の安全性評価の一環で、本邦において航空局が地域監視機関（RMA; Regional Monitoring Agency）として高度維持性能監視を実施している。このため、高度監視システム（HMS; Height Monitoring System）にADS-Bデータを用いたHMS（ADS-B方式HMS：AHMS）の導入に向けた評価が求められている。

2. 研究の概要

本研究は3ヶ年計画で、今年度は最終年である。ADS-Bデータに含まれる信頼性情報を用いた監視性能評価、SBAS（Satellite-based Augmentation System）を利用したADS-Bデータの監視性能評価、およびADS-B方式HMSの追加評価を行った。

3. 研究の成果

3.1 ADS-Bデータに含まれる信頼性情報を用いた監視性能評価

令和2年度は、前年度に開発したADS-B信頼性評価プログラムを用いて、電子航法研究所（以下、当所とする）で収集している在空機のADS-Bデータの信頼性情報の評価を実施した。

評価では、米国および欧州での性能要件の対象であるNIC（Navigation Integrity Category; 航法インテグリティ）値、およびNACp（Navigation Accuracy Category for Position; 航法位置精度）値について統計処理を行った。米国の航空路における要求値（管制間隔3NM）は、NIC値が7以上、NACp値が8以上である。

表1に、当所の本所（調布市）で2019年10月（1箇月）に収集したバージョン2のADS-Bデータの評価結果と米国の同時期の評価結果を示す。NIC値が8以上の割合は、米国より日本が高く、NACp値が9以上の割合も日本の方が高いため、日本での管制間隔3NMでの導入においても米国の要求値で問題ないと考えられる。NIC値が0の割合およびNACp値が8未満の割合は、日本の方が高いが、装備義務化により改善が見込まれると考えられる。なお、

表1 ADS-B信頼性情報評価結果

NIC値			
Radius of Containment (Rc)	NIC	米国 2019年 10月-11月	日本 2019年 10月
Rc unknown	0	0.02%	0.12%
Rc < 20 nm	1	0.00%	0.00%
Rc < 8 nm	2	0.00%	0.00%
Rc < 4 nm	3	0.00%	0.00%
Rc < 2 nm	4	0.00%	0.00%
Rc < 1 nm	5	0.00%	0.00%
Rc < 0.6 nm	6	0.23%	0.02%
Rc < 0.2 nm	7	7.30%	1.51%
Rc < 0.1 nm	8	92.39%	95.80%
Rc < 75 m	9	0.06%	1.73%
Rc < 25 m	10	0.00%	0.82%
Rc < 7.5 m	11	0.00%	0.00%
データ数		1,063,000,000	45,979,919
航空機数		8,286	2,385
	NIC<7	0.25%	0.14%
NACp値			
Est Position Uncertainty (EPU)	NACp	米国 2019年 10月-11月	日本 2019年 10月
EPU >= 10 nm	0	0.01%	0.12%
EPU < 10 nm	1	0.00%	0.00%
EPU < 4 nm	2	0.00%	0.00%
EPU < 2 nm	3	0.00%	0.00%
EPU < 1 nm	4	0.00%	0.00%
EPU < 0.5 nm	5	0.00%	0.00%
EPU < 0.3 nm	6	0.00%	0.00%
EPU < 0.1 nm	7	0.01%	0.03%
EPU < 0.05 nm	8	13.16%	3.83%
EPU < 30 m	9	60.36%	84.61%
EPU < 10 m	10	25.27%	11.41%
EPU < 3 m	11	1.19%	0.00%
信号数		1,063,000,000	50,144
航空機数		9,121	2,385
	NACp<8	0.01%	0.16%



NACp値が10以上の割合は米国が高いが、米国では装備義務化によりSBAS対応機が多いことによる影響の可能性がある。

### 3.2 SBASを利用したADS-Bデータの監視性能評価

本項目の評価には、計画当初、当所の実験用航空機のADS-Bデータを用いる予定であったが、現時点ではSBAS対応化が遅れているため、代替手法として、在空中機のADS-Bデータ（NIC値とNACp値）について、NACp値が10以上のデータを1回以上放送している航空機をSBAS対応機として、SBAS対応機とSBAS非対応機を比較した。表2に、当所の本所で2019年7月（1箇月）に収集したバージョン2のADS-Bデータについての結果を示す。SBAS対応により、NIC値については若干の向上（NIC値=7,8の割合が減少し、9,10の割合が増加）、NACp値については向上（NACp値=8,9の割合が減少し、10の割合が増加）が確認された。

表2 SBAS対応機と非対応機のADS-B信頼性情報の比較

NIC値			
Radius of Containment (Rc)	NIC	SBAS対応 A/C with NACp >= 10	SBAS非対応 A/C without NACp >= 10
1month 2019-Jul			
Rc unknown	0	0.01%	0.04%
Rc < 20 nm	1	0.00%	0.00%
Rc < 8 nm	2	0.00%	0.00%
Rc < 4 nm	3	0.00%	0.00%
Rc < 2 nm	4	0.00%	0.00%
Rc < 1 nm	5	0.00%	0.00%
Rc < 0.6 nm	6	0.03%	0.02%
Rc < 0.2 nm	7	1.31%	1.81%
Rc < 0.1 nm	8	95.20%	97.08%
Rc < 75 m	9	2.86%	1.04%
Rc < 25 m	10	0.59%	0.00%
Rc < 7.5 m	11	0.00%	0.00%
信号数		4,817,015	33,963,310
航空機数		440	1,549
	NIC<7	0.04%	0.06%
NACp値			
Est Position Uncertainty (EPU)	NACp	SBAS対応 A/C with NACp >= 10	SBAS非対応 A/C without NACp >= 10
1month 2019-Jul			
EPU >= 10 nm	0	0.31%	0.13%
EPU < 10 nm	1	0.00%	0.00%
EPU < 4 nm	2	0.02%	0.00%
EPU < 2 nm	3	0.00%	0.00%
EPU < 1 nm	4	0.00%	0.00%
EPU < 0.5 nm	5	0.00%	0.00%
EPU < 0.3 nm	6	0.05%	0.00%
EPU < 0.1 nm	7	0.23%	0.02%
EPU < 0.05 nm	8	1.99%	5.62%
EPU < 30 m	9	47.47%	94.22%
EPU < 10 m	10	49.92%	0.00%
EPU < 3 m	11	0.00%	0.00%
信号数		9,276	37,878
航空機数		440	1,549
	NACp<8	0.61%	0.16%

### 3.3 ADS-B方式HMSの追加評価

平成27～29年度に実施した先行研究（ADS-B方式高度維持性能監視の研究）の結果、ADS-Bの幾何高度情報については、航空機により高度の基準面が異なる2種類の高度（ジオイド高（HAG）／楕円体高（HAE））があり、高度維持性能監視において主要な誤差の要因であることが分かっており、航空機毎に基準面を判別する必要がある。先行研究での判別手法では、約8割の航空機が判別不能となる結果が得られた。

このため、航空局が運用中のHMU（Height Monitoring Unit）の幾何高度情報とADS-Bの幾何高度を比較する手法で、基準面を判別するプログラムを開発し、評価を実施した。本手法では、航空機維持性能監視において用いられる航空機タイプグループ毎に、HMUとADS-Bの同一航跡におけるそれぞれの幾何高度の平均の差（幾何高度差）の度数分布を求め、ベイズ情報量基準（BIC）により分布数を決定し、確率分布を最尤推定した。推定した確率分布が、HAG/HAEいずれのADS-B幾何高度によるものかを判定し、幾何高度差と推定した確率分布から、各航跡がHAG/HAEである確率を求め、航空機毎に集計して各航空機のADS-B幾何高度基準面を判別した。

2020年1月20日から2月20日の期間における当所の岩沼空室（岩沼市）で収集したADS-Bデータと航空局から提供いただいた仙台HMUのデータを用いた解析を実施した。推定した確率分布のHAG/HAE判定の結果、HAEのみの航空機タイプグループはB744-10, B748, B787, A330, A350, HAG/HAEが混在している航空機タイプグループは、B737NX, B767, B772, B773, A320であった。推定した確率分布の例として、B773の幾何高度差の度数分布および推定した確率分布を図1に示す。緑色の線がHAG、青色の線がHAE、赤色の線がそれらの混合確率分布である。解析対象期間における全航空機の幾何

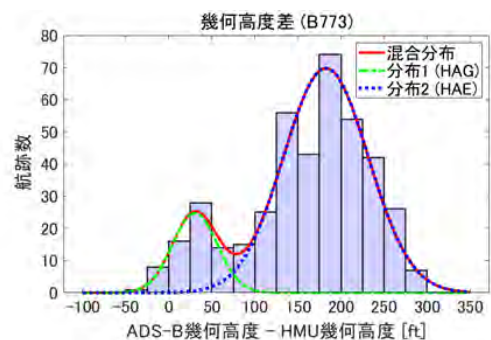


図1 幾何高度差の度数分布と推定した確率分布の例（航空機タイプグループ：B773）

高度の判別結果を表3に示す。全航空機967機の判別結果は、HAEが659機（68.15%）、HAGが17機（1.76%）、判別不能が291機（30.09%）で、約7割の航空機の判別結果が得られた。ただし、標本数が少ないため、さらなる解析が必要である。

#### 4. まとめ

本研究において、ADS-Bデータに含まれる信頼性情報を用いた監視性能評価として在空機のADS-BデータのNIC値とNACp値の評価を行い、米国の状況と比較した結果、我が国の航空路にADS-Bを管制間隔で導入する場合に、米国の要求値でも問題ないと考えられる結果が得られた。

SBASを利用したADS-Bデータの監視性能評価については、在空機のデータを用い、SBAS対応によりNIC値およびNACp値の向上が確認できた。

表3 航空機のADS-B幾何高度基準判別結果

グループ 機数計	分布	判別結果 機数 (%)		
		HAG	HAE	判別不能
B744-10 47 機	HAE (2 分布)	0	46	1
		0.0%	97.9%	2.1%
B748 52 機	HAE (1 分布)	0	52	0
		0.00%	100.00%	0.00%
B787 110 機	HAE (1 分布)	0	103	7
		0.00%	93.64%	6.36%
A330 26 機	HAE (1 分布)	0	24	2
		0.00%	92.31%	7.69%
A350 62 機	HAE (2 分布)	0	62	0
		0.00%	100.00%	0.00%
A380 15 機	HAE (1 分布)	0	15	0
		0.00%	100.00%	0.00%
B737NX 131 機	HAG/ HAE 混在	6	84	41
		4.58%	64.12%	31.30%
B767 50 機	HAG/ HAE 混在	1	0	49
		2.00%	0.00%	98.00%
B772 127 機	HAG/ HAE 混在	2	90	35
		1.57%	70.87%	27.56%
B773 160 機	HAG/ HAE 混在	0	153	7
		0.00%	95.63%	4.38%
A320 81 機	HAG/ HAE 混在	8	30	43
		9.88%	37.04%	53.09%
その他*				71
不明				35
合計 967 機		17	659	291
		1.76%	68.15%	30.09%

\*その他：航跡数不足（32航跡未満）の航空機タイプグループの計

ADS-B方式HMSの追加評価に関しては、航空局が運用中のHMUの幾何高度情報とADS-B幾何高度を比較して高度の基準面を判別する手法を用い、判別可能な航空機の割合が、先行研究での判別手法の結果よりも大幅に向上した。ただし、標本数が少ないため、さらなる解析が必要である。

#### 掲載文献

- [1] 金田 直樹, 松永 圭左, 宮崎 裕己, “ADS-B 方式高度監視システムについて,” 日本航海学会航空宇宙研究会, November 2019.
- [2] 金田 直樹, 松永 圭左, 宮崎 裕己, “HMU との比較による ADS-B の幾何高度基準面判定,” 2020 年信学総大 B-2-6, March 2020.
- [3] 金田 直樹, 松永 圭左, 宮崎 裕己, “ADS-B で放送される幾何高度の基準面について”, 第 58 回飛行機シンポジウム, 1B06, November 2020.
- [4] 金田 直樹, 松永 圭左, 宮崎 裕己, “ADS-B 幾何高度基準に応じた HMU と ADS-B の幾何高度差の分布推定” 電子情報通信学会 SANE 研究会, January 2021.

担当領域 監視通信領域

担当者 ○本田 純一, 松永 圭左, 毛塚 敦, 田嶋 裕久

研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度

## 1. はじめに

民間航空分野で利用される無線システムは、建物や移動体及び複雑な地面からの散乱波（反射波や回折波）によって性能が低下する場合がある。これらは外的要因によるものだが、その原因が明らかになれば問題解決策を打ち出すことができる。また無線システムを開発する前に使用する電波環境を推定することができれば、個々の電波環境に合わせた最適システムの設計にもつながる。一方、空港開発や新しい航空機の就航に合わせて発生する電波問題については、シミュレーションにより、運用に関わる改善策の提案や更に効果的な運用方式を検討することにもなる。このような電波問題については、2018 年の Annex 10 Vol.1 の SARP 改訂において、計器着陸装置（ILS）の制限エリアの拡大に対して最終判断は各国に委ねられることが明記されるとともに、改定のプロセスの中でシミュレーションの重要性が述べられている。しかし、海外ではソフトウェアが整備されている中、日本は後塵を拝している。そのため、各種電波問題に対応できる ILS シミュレーションの整備が強く求められており、実運用に寄与できる機能の実装が期待されている。

本研究では、航空分野に適用可能な電磁界解析用のアルゴリズムの開発とプログラミングを行い、特に ILS については電波の専門知識がなくとも視覚的に理解することが可能な解析エンジンを開発することを目的とする。

## 2. 研究の概要

本研究は 3 ヶ年計画で、最終年度は下記を実施した。

- ① 電磁界シミュレーション用のプログラム改良
- ② ILS シミュレーション解析エンジンの開発・改良

## 3. 研究成果

本研究は、航空分野で利用される無線システムへの電磁界解析の応用を念頭に、特に ILS ソフトウェアの実現を目指した解析エンジンの開発を行った。最終年度は、解析エンジンへの実装を念頭に、電磁界シミュレーション用のプログラムの改良を行った。開発したプログラムを ILS 解析エンジンへ実装し、動作検証を行うと共に解析エンジンのバグ対応や機能追加を実施した。

### 3.1. 電磁界シミュレーション用のプログラミング

電磁界の解析ソフトウェアはすでにいくつも商用化されており、それらにはフルウェーブ解析や高周波近似解法などの計算手法が採用されている。正しく扱うことができればこれらのソフトウェアで得られた結果から、航空分野で利用されている各種電波問題への適用も可能であるが、そのためには電磁界に関する知識が必要不可欠である。本研究では、各種航空用無線機材で発生する電波干渉などの問題に適用するための電磁界解析手法を用意し、必要に応じて電子航法研究所内の各研究や空港毎の課題に対応できる体制を整えることを目的とする。また用意する電磁界解析手法については独自性も考慮しつつ、計算メモリの削減や計算アルゴリズム拡張の容易性、開発者以外の者が利用する場合の設定の簡便性などを考慮した。電磁界の解析から航空分野で必要とされる最終データまでを一貫して処理できるアルゴリズムを提供できるよう作業を行った。

令和 2 年度は、これまでに開発したレイ・トレーシング法(RTM)に基づいたハイブリッドの数値解法について、アルゴリズムの改良とエラーの対応を実施した。また、ILS 解析エンジンへの実装を念頭に、各種計算モジュールを用意した。開発したアルゴリズムは、複数の障害物や凹凸のある地面からの散乱波の解析に対応可能である。

### 3.2. ILS シミュレーション解析エンジンの開発

実運用機材に関連する電磁界シミュレーションとして最も現場からの要望が大きいものに ILS が挙げられる。本研究では、ILS の電波干渉について電磁界に関する専門知識がなくとも視覚的にその特徴を把握することができる解析エンジンの開発に着手した。令和 2 年度は、開発した解析エンジンへの機能追加とバグ対応をメインに進め、一通りの形とした。図 1 にメイン画面を示す。三次元の建物モデルを実空港に見立てて解析環境を設定することができる。また、ローカライザ(LOC)とグライドスロープ(GS)の 2 つのシミュレーションを一つで兼ね備えている。メイン画面では、解析対象となる空港のレイアウトの表示や視点の切り替え、拡大縮小など、全体の構成が示される。図 2 は、LOC から放出された電波が受信点までどのように到達するのかを、光線(レイ分布)として示している。このよ

うに、障害物からの電波の反射波や回折波がどのように受信点に到達するか視認することができる。図3と図4はLOCを例にアプローチとオービットの飛行パターンを想定した計算結果である。計算画面上にはICAOの規定値の表示やカーソルを使って計算値の確認をすることができる。これらの図では、障害物からの散乱波が波形を乱していることが分かる。また、ILSの性能指数を示す変調度の差(DDM)と受信強度を切り替えることも可能で、画像の保存などにも対応している。図5は、LOCのキャリア電波の放射を可視化した図である。設定した受信範囲内を対象に計算された電界強度もしくはDDMをメイン画面上に重ね書きすることで、どの場所で干渉波が発生するのかを視覚化し、電波の専門的知識が十分でなかったとしても現象を理解しやすくするための工夫が本解析エンジンには盛り込まれている。

#### 4. 考察等

本研究では、航空分野における各種電波問題に適用するための電磁界シミュレーションのためのアルゴリズム開発及びプログラミングとILSを対象とした解析エンジンの開発を実施した。電磁界シミュレーションにはRTMをベースとしたハイブリッド計算アルゴリズムを採用した。開発したアルゴリズムは、ILS解析エンジンに実装した。本資料で示したように、ユーザの使い勝手や理解がしやすいように、モデル設定や結果の表示方法を工夫した。

本研究の当所の目的は概ね達成した。しかし、開発した解析エンジンは複数の構造物や凹凸のある地面に対して適用が可能であるものの、複雑な地面の解析については更に検証が必要であり、また計算手法の選択は今のところできない。また機能の追加やバグの対応もわずかに残っている。これらについては、今後必要に応じて検証し、アルゴリズムを改良することで対応する。

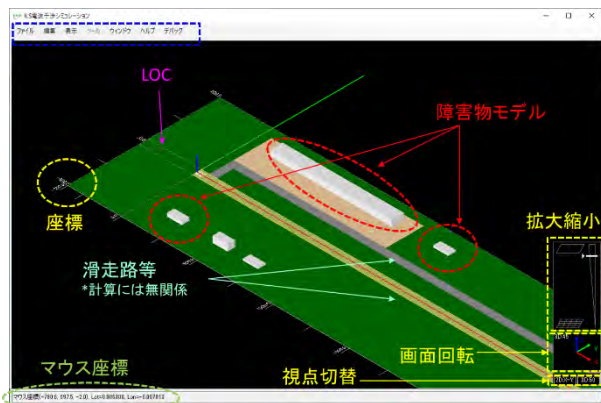


図1: メイン画面

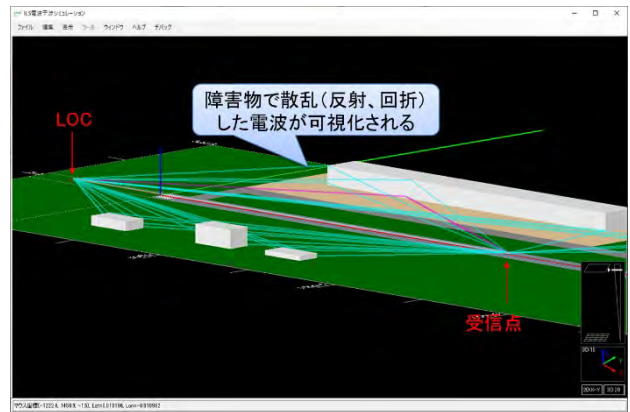


図2: レイ分布

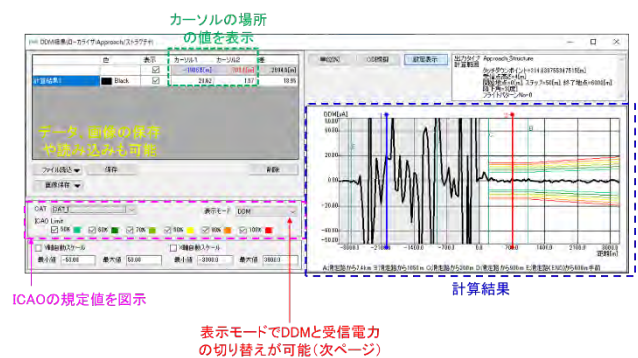


図3: アプローチの計算結果 (DDM)

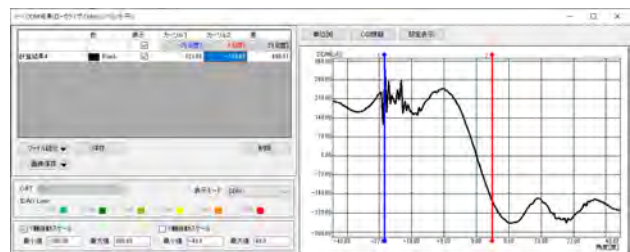


図4: オービットの計算結果 (DDM)

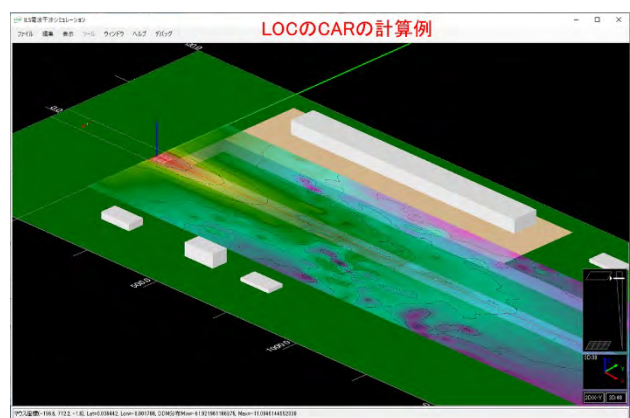


図5: LOCのキャリアの電界強度分布

掲載文献

- [1] 本田純一, 松永圭左, 毛塚敦, 田嶋裕久, “ILS ローカライザー信号における干渉波の実験結果,” 2019 信学総大講演論文集, B-2-8, p.173, March 2019
- [2] J. Honda, K. Matsunaga, A. Kezuka, and H. Tajima, “Numerical Simulation of ILS Signal Interferences and Software Development,” Proc. ENRI Int. Workshop on ATM/CNS, EN-A-58, pp.1-7, Tokyo, Oct. 2019.
- [3] 本田純一, 松永圭左, 毛塚敦, 田嶋裕久, “ILS 信号干渉シミュレーターの開発,” 2020 信学総大講演論文集, B-2-5, p.163, Mar. 2020.
- [4] 本田純一, 松永圭左, 毛塚敦, 田嶋裕久, “ILS 信号干渉シミュレーターの開発,” 2020 年(第 20 回)研究発表会, Sep.-Oct., 2020.
- [5] R. Geise, A. Weiss, B. Neubauer, T. Fritzel, R. Stauß, H. Steiner, F. Faul, T. Eibert, and J. Honda, “Nearfield Inspection of Navigation Systems with UAVs -First Results from the NAVANT Project,” Air Traffic Management and Systems IV -Selected Papers of the 6<sup>th</sup> ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019), pp.337-351, Springer, 2021.
- [6] 本田純一, 松永圭左, 毛塚敦, 田嶋裕久, “ILS 信号干渉シミュレーターの開発—LOC—,” 2021 信学総大講演論文集, B-2-9, p.174, March 2021.

## 受動型レーダを用いた近接航空機測位システムの研究【基盤的研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○北折 潤, 井上 諭, 塩見 格一 (客員研究員)

研究期間 平成 29 年度～令和 2 年度

### 1. はじめに

Passive Secondary Surveillance Radar (PSSR: 受動型二次監視レーダ) は, 自らは電波を発することなく, 近傍にある SSR (二次監視レーダ) からの質問信号及びトランスポンダからの応答信号を受信することによって, 航空機を識別し測位できるシステムである。PSSR 第 1 号機が 1990 年代初頭に電子航法研究所で試作されて以降様々な改良を重ねられ, 現在ではモード A/C 受信であれば消費電力 3W 程度の PSSR が実現している。PSSR は安価に設置・運用できるため, 航空機騒音等の空港環境評価の際に航空機測位センサとして用いられており, またドローン監視等の様々な用途への活用が期待されている。

現在, 飛行場対空援助業務が実施されている交通量の少ない空港 (レディオ空港) 等は SSR が未設置のため, アプローチ時の航空機の監視を目視に頼らざるをえない。これを遠隔地からの監視システムに置き換えられれば, 安全性の維持・向上とともに地上施設の集約等による業務の効率化が期待できる。一方, 現在我が国でも検討がなされている類似の遠隔業務構想としてリモートタワーが挙げられるが, その航空機測位システム候補としては, 精密な時間計測, 双曲線測位・楕円測位の組み合わせ, 大規模なネットワーク構成等により, 周辺受信局の外側でも航空管制に十分な測位精度を提供するマルチラテレーションが考えられており, 国内外において活発に研究・開発が行われている。しかし, 飛行場管制業務を行う空港に比べてレディオ空港は離着陸回数が少ないことから, 運用者側としては空港周囲半径約 30NM 以内にあるターゲットを監視できる簡易な技術方策を模索, 検討している。

本研究では, 既開発の PSSR 技術をさらに発展させるべく, 無指向性質問信号送信局と PSSR 受信局を組み合わせることで, 楕円測位原理によるレーダ近接地域を対象とした (安価な) 近接航空機測位システムを構築し, 実験等によりその効用について検証する。また, 既に実用化されている PSSR から得られる航跡データの処理方法についても研究する。

### 2. 研究の概要

従来, マルチラテレーションのように一対多の送受信局

で構成される監視システムは, 設置各局で囲まれた範囲の内側で精度良く測位するために双曲線測位原理を用いてきた。近年では楕円測位原理も併用することで, 同様の局配置でも設置各局の周辺目標物を精度良く測位できる可能性が示されている。

本システムもマルチラテレーションの一種だが, 他のシステムと異なる特徴としては, i) モード A/C 信号を測位に利用する, ii) 楕円測位を基本とする, iii) 小型の送受信局を用い半径 30NM 程度の狭い範囲の監視に特化している, 等が挙げられる。

今日においてもモード A/C のみに応答するトランスポンダ搭載航空機は多く, このため幾つかの条件下での実験により本システムがこれらの航空機の監視に妥当ないし有効であることを示してゆく必要がある。

本研究は 4 年計画である。今年度は最終年度にあたり, 主に以下の項目について実施した。

- ・送信局無線局免許申請・取得
- ・円形配置アレーアンテナ方探機能の検討
- ・時刻同期精度実験

### 3. 研究成果

#### 3. 1 送信局無線局免許申請・取得

本システムは送信局と受信局を独立に設置する。各局とも時刻同期用に GPS 時刻を利用し, 特に送信局では事前に決めた送信タイミングで質問信号を送信する仕様である。同仕様を満足する送信局自体は昨年度までに製作しており, 今年度実験試験局の無線局免許を取得した。

#### 3. 2 円形配置アレーアンテナ方探機能の検討

円形配置アレーアンテナによる方探機能について調査し, 計算機シミュレーションで信号到来方向の推定方法を検証した。図 1 にシミュレーション結果の例を示す。方探機能を本システムに適用することで, 必要送受信局数の削減に有効と考えられる。

#### 3. 3 時刻同期精度実験

本システムは送受信局の位置を既知として, 「質問信号送信時刻」～「応答信号受信時刻」の差を正確に求め楕円

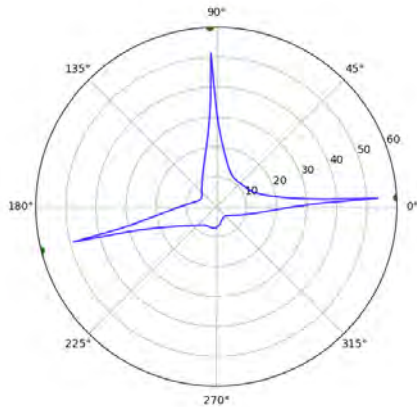


図 1 信号到来方向シミュレーション結果例

体を計算する必要がある。各局が独立して GPS 時刻を取得する構成のため、それぞれの参照時刻にわずかながら差が生じ楕円体計算結果に影響を及ぼす可能性がある。そこで、「質問信号送信時刻」～「応答信号受信時刻」差が実際の航空機位置に対してどの程度正確に得られるかについて仕様に準拠した機材で検証することにした。

送信局は事前に決めた送信タイミング(GPS 時刻に基づいた同一送信パターン)でモード A/C 質問を交互に送信する。受信局では監視範囲に相当する遅延時間以内に受信した信号から「質問信号送信時刻」～「応答信号受信時刻」差を求め距離換算した。ADS-B 位置情報から得られる信号往復距離を参照値として、これに対する換算距離との距離差(ずれ)を統計的に求めた。図 2 に実験で求めた距離差ヒストグラムを示す。

その結果、正確な航空機位置に対して時刻差から求まる距離は概ね±0.4km 以内に収まり、モード A/C 信号だけの測位でも近距離の航空機監視に有効である見通しが得られた。

#### 4. まとめ

研究期間中に得られた主な成果としては、ADS-B 等に比べ測位精度は劣るものの、近接航空機測位システムで航空機のおよその位置を把握できる目途が立った。本システムを構成する送受信局は通常の SSR に比べ小型であり、周囲半径約 30NM 以内にあるターゲットを安価・簡易に監視可能なシステムとして有用と考えられる。

付随する成果としては、PSSR 受信データから特定の航空機の航跡を抽出する技術を開発した。また、円形配置アレーアンテナによる方探機能を利用すれば、本システムの送受信局数の削減が見込まれる。

本システムを実用化するには、さらに改善すべき技術的

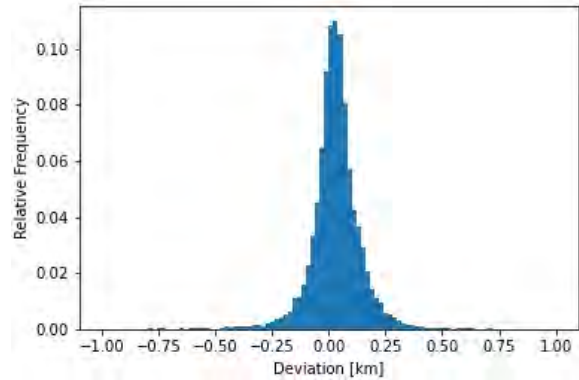


図 2 距離差ヒストグラム

課題が多い。例えば各局の時刻同期精度の改善や、各受信局での同時受信率の向上等が挙げられ、これらの達成により実用システムとなり得ると考えている。

#### 掲載文献

- [1]北折潤, 塩見格一 (Jan. 2018), “受動型二次監視レーダ受信データからの航跡抽出法,” 電子情報通信学会技術研究報告 SANE, vol.117, no.403, SANE2017-102, pp.95-100.
- [2]北折潤, 塩見格一 (Jun. 2018), “受動型 SSR の ADS-B に対する位置誤差解析,” 第 18 回電子航法研究所研究発表会.
- [3]北折潤 (Dec. 2019), “近接航空機監視システム LASS の開発状況,” 航空無線, vol.102, pp.31-35.
- [4]北折潤, 塩見格一 (Jan. 2020), “近接航空機監視システムの原理と航空機監視精度,” 電子情報通信学会技術研究報告 SANE, vol.119, no.405, SANE2019-89, pp.27-32.

## 無人航空機を含む飛行環境形成の要素技術に関する研究【基盤的研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○河村 暁子, ニッ森 俊一, 森岡 和行, 米本 成人, 角張 泰之

研究期間 平成 29 年度～令和 2 年度

### 1. はじめに

近年の急速な小型無人航空機の利用拡大に伴い、国内外で小型無人航空機と有人航空機のニアミス事案が多数発生している。こうした背景から、有人航空機と無人航空機の調和がとれた飛行を実現する技術として、同一空域を飛行する有人/無人航空機の位置を一元的に把握できる技術に期待が集まっている。本技術は、世界的に研究が進められている、UTM (Unmanned Aircraft System Traffic Management: 無人航空機運航管理) の概念を実現するためにも有効である。

### 2. 研究の概要

本研究の目的は、従来の有人機システムに親和性の高い無人航空機向け技術を開発することにより、無人航空機と有人航空機の安全で調和した飛行環境の実現に資することである。具体的には以下の 2 課題を柱とし、無人航空機的位置を把握する方法の要素技術の開発検討を実施する。

#### (a) 無人航空機が発するテレメトリ信号を用いた機体位置把握技術の開発

先行研究から、無人航空機が操縦者へ発する機体のセンサ情報であるテレメトリ信号を利用することが有効である可能性が明らかになっている。本研究では、当該信号波形の特徴解析等を通し位置把握技術の高度化およびさらなる開発検討を行う。対象とする手法は、機体運航の関係者以外も、無人航空機が発する信号の波形を受信することで復調せずに位置を推定できるため、空港等の重要施設の保護に効果が見込まれる。

#### (b) 既存の監視技術を無人航空機へ応用した際に生じる技術課題の検討

前述の UTM を実現する技術の候補として、有人航空機向け監視システムである ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast ; 放送型自動位置情報伝送・監視機能) を無人航空機へ応用することへの期待が一部の小型無人航空機関係者に広がっている。しかしながら、ADS-B の小型無人航空機における利用の効果や、特に有人航空へ与える影響について、これまで全く検証が行われておらず

明らかでないため、総合的な検討を行う。

また、無人航空機を取り巻く世界情勢は急速に変化していることから、上記の研究課題と並行して、機体の大きさに関わらず無人航空機全般の情報収集・分析に努める。

本研究は 4 ヶ年計画で、今年度が最終年となることから研究全体について報告する。

### 3. 研究成果

#### 3.1 無人航空機が発するテレメトリ信号を用いた機体位置把握技術の開発

本研究では、ドローンをはじめとする無人航空機が操縦者へ発するテレメトリ信号の到来時間差を基本とした位置推定を行う。無人航空機が発するテレメトリ信号波を、地上の同期した複数点で受信し、その時間差から双曲線測位計算をすることで機体の位置が求まる。受信測定構成は、コリニアアンテナを四方の角となる部分に垂直偏波で設置する。受信側アンテナ直下にて受信波を E/O 変調器で光信号に変換し、光ケーブルを介し、受信機として用いるオシロスコープへ入力直前でフォトダイオードにより電気信号へ戻す。4 つの受信アンテナからオシロスコープまでのケーブル長は同一である。このような、光ファイバーを用いた RF 信号の伝送を、RoF (Radio over Fiber) と呼ぶ。これにより複数の受信点間の受信データを正確に同期することができる。受信した信号は、それぞれの受信アンテナと送信点の距離に従い遅延し、各チャンネルの時刻差が求まる。

まず初期検討のため、電波無響室内で測定を行い、無人航空機 1 機を模擬した送信機 1 台が発する信号から、その

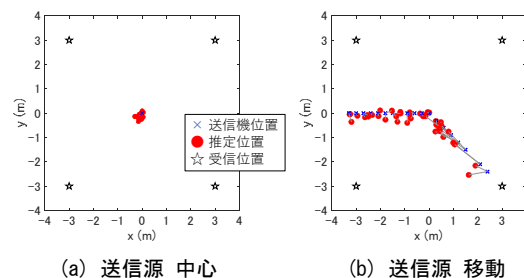


図 1 WiFi 波を対象とした位置推定結果



2 次元的な位置を推定した。対象となる信号波には 2.4 GHz WiFi 波を用いた。時刻差の検出は、4 ヲ所の受信点で受信した信号の包絡線をヒルベルト変換で抽出し、遅延・減衰比較法（通称 DAC 法）により行った。図 1 に(a) 送信機が座標中心にあるときの 20 回測定結果のばらつき、(b) に送信源を移動させたときの推定位置を示す。各受信アンテナからの距離のバランスが崩れると精度が下がる（図 1(b)右下あたり）が、おおむね 1m 以下の精度であることがわかった。

次に、ドローン向けに一般に普及しているテレメトリ信号として、DJI 社製 Phantom 4 の 2.4 GHz 映像信号波を対象とした測定を電波無響室内で行った（図 2）。この映像信号波は WiFi 波に比べて波形の立ち上がりが緩慢で時刻差の検出に DAC 法を応用できなかったことから、包絡線の相関を取る手法を用いた。図 3 に、ドローンが固定位置でホバリング時の位置推定結果を示す。ドローンの画像認識および高度計による飛行位置固定機能を利用し、ホバリング位置を固定した。位置精度はかなり低下するが位置の推定が可能であることが分かった。また、屋外等の雑音環境においても対象信号波を適切に抽出するために、受信側回路に周波数変換やフィルタ等の工夫を加えた。



図 2 DJI 社製ドローンの位置推定実験の様子

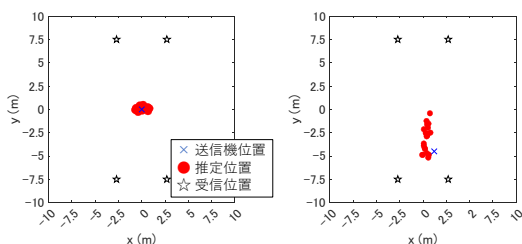


図 3 DJI 社製ドローン映像伝送波を対象としたホバリング時の位置推定結果

今後の課題として、より雑音の多い屋外環境での測定、複数の機体からのテレメトリ信号を同時に受信した際の処理などが挙げられる。

### 3.2 既存の監視技術を無人航空機へ応用した際に生じる技術課題の検討

前節の無人航空機の位置推定は、機体が監視とは別の用途で発する信号波を利用した。一方、無人航空機に有人航空機と同様の監視装置であるトランスポンダや ADS-B を搭載し自ら情報を発することへの期待も高まっている。そこで、2017 年に発売された小型無人機向けの超小型トランスポンダと ADS-B の機能に関する調査を行った。

対象とする 2 つの装置は、日本国内での電波法における技術適合証明が無く、また GPS 信号の受信無しに動作しない仕様になっていることから、電波無響室内に屋外から GPS 信号を引き込んで測定を行った。スペクトラムアナライザによる出力とスプリアスの測定、オシロスコープによる時間波形の測定、アビオニクスを検査に用いるランプテストによる送受信情報の解析を実施した。

この結果、いずれの機器も最大出力が 20 W でスプリアス等は FAA TSO-C199 Class A 基準を満たしていること、トランスポンダに関しては Mode A/C/S それぞれの波形が通常のトランスポンダと同様に送信でき（図 4）、さらに 24 bit address やスコークを任意で設定できることを確認した（図 5(a)）。また ADS-B に関しては DF（Downlink Format）18 にて 24 bit address に加え機体種別や Flight ID 等を任意に設定できる（図 5(b)）。ADS-B 装置には送信の OUT 機能だけでなく周囲の期待からの信号を受信する IN 機能も備わっており、送信を止めた状態で屋外にて近傍の旅客機からの ADS-B 信号を受信できることも確認した。

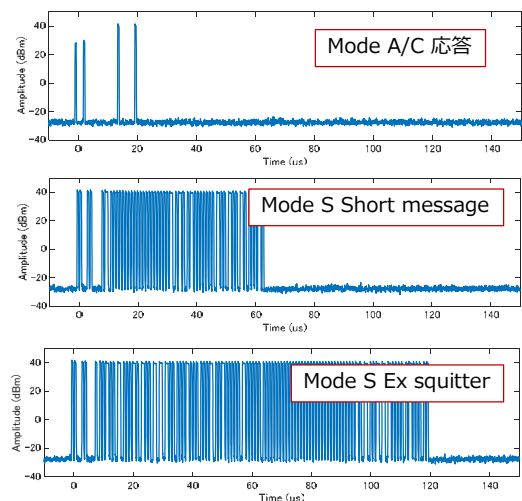
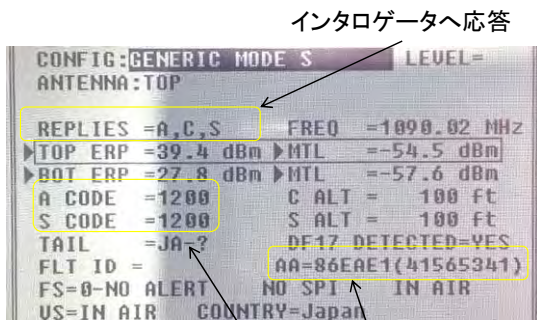
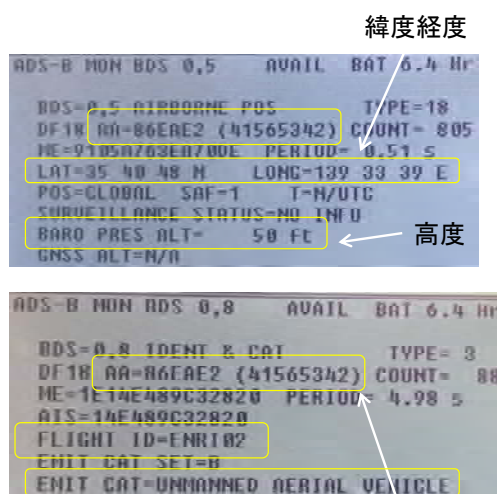


図 4 無人航空機向けトランスポンダの波形



任意に設定できるスコークと24 bit address

(a) 無人航空機向けトランスポンダ



任意に設定できるID, カテゴリ, 24 bit address

(b) 無人航空機向けADS-B

図5 ランプテストの応答

無人航空機にこのような装置を搭載することで、当該機の監視が容易になるという利点がある一方、24 bit addressの枯渇問題、1090 MHz 信号環境の悪化による有人航空機への影響が不明確であること、低高度における高度の不正確さや測位精度の問題、悪意ある成りすまし行為への懸念などの課題がある。また、特にADS-Bについては、小型無人航空機と衝突ニアミスの可能性が最も高い低高度を飛行する小型航空機やヘリコプタのADS-B搭載率が極めて低いため、お互いを監視できるという効果を得にくい状況にあるといえる。

#### 4. まとめ

本研究は無人航空機と有人航空機の調和がとれた飛行に資する技術開発を目的とし、平成29年度より4ヵ年計画で無人航空機が発するテレメトリ信号を用いた機体位

置把握技術の開発および既存の監視技術を無人航空機へ応用した際に生じる技術課題の検討を実施した。

この4年間は、ドローンの目視外飛行にかかる審査要領の改訂、各種法制度の整備、空飛ぶクルマに関する社会的議論の開始など無人航空機に関する世の中の動きがさらに加速した時期であった。よって、前述の研究と並行して無人航空機の国内外における情報収集や動向分析も広く行い、特に国内産業界、国外の法整備を担当する行政機関との情報交換を密に行った。この間に委員として参画した無人航空機に関する公的会議体は10以上にのぼり、研究結果や有人・無人航空に関する知見をもって各種会議への貢献に努めた。

本研究の後継研究は存在しないが、今後は航空交通管理領域における無人航空機に関する課題の一部にてリモートIDの監視への活用に関する研究を行う予定である。

#### 掲載文献

- [1] 河村暁子, ニッ森俊一, 森岡和行, 米本成人, “小型無人航空機の現状と監視通信における今後の展望,” H29年度 電子航法研究所発表会, 2017年6月.
- [2] 河村暁子, 角張泰之, 森岡和行, ニッ森俊一, 米本成人, “小型無人航空機の RoF を用いた位置推定の基礎検討,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, A-9-10, Sept. 2017.
- [3] A.Kohmura, T. Otusyama, “Status of ADS-B In/Out Transceiver Product for Small UAS ,” ICAO ASWG WP07-17.2, June 2018.
- [4] A.Kohmura, T. Otusyama, “Status of Transponder Product for small UAS,” ICAO ASWG WP07-17.3, June 2018.
- [5] 河村暁子, ニッ森俊一, 森岡和行, 米本成人, 大津山卓哉, “小型無人航空機向け ADS-B の技術検証と課題,” 日本航空宇宙学会 第56回飛行機シンポジウム, 3D04, Nov. 2018.
- [6] 中島徳顕, 平林博子, 河村暁子, 虎谷大地, ニッ森俊一, “電子航法研究所における無人航空機研究への取り組み,” 日本航空宇宙学会 第57回飛行機シンポジウム, 1A05, Oct. 2019.
- [7] 河村暁子, 角張泰之, 森岡和行, ニッ森俊一, 米本成人, “市販マルチコプタの RoF による位置推定の基礎検討,” 電子情報通信学会 総合大会, B-5-169, Mar. 2020.
- [8] 河村暁子, 角張泰之, 森岡和行, ニッ森俊一, 米本成人, “ホバリング中のマルチコプタの RoF による位置推定の基礎検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-01-122, Sept. 2020.

## ヘリコプタ全周監視支援技術に関する研究【基盤的研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○ニッ森 俊一, 米本 成人, 河村 暁子, 森岡 和行

研究期間 平成29年度～令和2年度

### 1. はじめに

近年、自動車事故防止のための安全システムへの適用を中心に、ミリ波レーダ等を用いた運輸安全技術に関する議論や関連する安全システムの研究開発が国内外で活発に行われている。航空機の中でも比較的低高度を有視界飛行するヘリコプタの場合、気象や周囲構造物の影響で障害物等の発見に支障が生じ、事故等の危険な状況が発生する恐れがある。最近の機種別事故統計によれば、ヘリコプタは全体に占める事故割合が高く、それらの事故原因のうち、乗員の周囲の障害物に対する状況認識に起因すると考えられるケースが少なくはない。これら障害物等の事前察知及び周囲監視のための操縦者支援システムとして、可視・赤外カメラやレーダ等の様々なセンサを組み合わせたシステム等の研究がこれまで行われている。さらに、近年では、送電線鉄塔等の障害物データベースと自機位置のGPS情報に基づき接近警報を発生するシステムも検討されている。

### 2. 研究の概要

本研究の目的は、ヘリコプタの運航安全に資するため、これまでの研究成果を踏まえ、ヘリコプタ運用者側のニーズに沿った性能および機能を有する航空機周辺状況監視システムを研究開発することである。具体的には次の3項目である。

- (1) 低高度においてヘリコプタの機体周辺の全周を監視することで、パイロットの死角を減少させ、障害物認知度を向上する。
- (2) 死角を減少させるために、3次元移動を行うヘリコプタでは全周を覆域とする必要があるため、高速ビーム走査技術やミリ波信号処理技術等を新たに適用し、機上搭載用レーダに適したシステムを開発することにより、従来にない優れた安全運航支援監視技術を提供する。
- (3) 上記2点を達成することで、航空局のCARATS研究開発ロードマップで示されている研究開発テーマ(OI-12, OI-31)に対して適切な研究開発成果を提供し、今後の我が国における航空安全技術や安全施策の検討に資する。



図1. 全周監視基本機能確認モデルを用いた試験  
(実験用ドローンを用いた飛行試験)

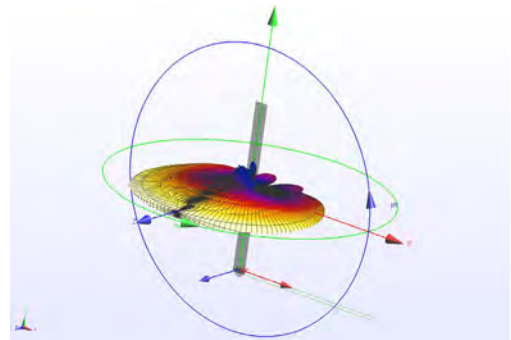


図2. 電磁界数値解析ソフトウェアを用いた設計例  
(32素子アレイアンテナの3次元放射特性)

4か年計画の最終年度である本年度は、次章に示す成果が得られた。

### 3. 研究成果

24 GHz帯準ミリ波レーダを用いた基本機能確認モデルを用いた試験(図1)および76 GHz帯デジタルビームフォーミングミリ波レーダの実現に向けた要素技術開発を実施した。また、複数送受信機能を有する76 GHz帯ミリ波レーダ用フロントエンド回路の原理確認結果を踏まえ、レーダ用フロントエンド回路の設計を実施した。さらに、アンテナ指向特性を機体全周障害物監視に適した高利得化および放射特性制御を行うため、電磁界数値解析ソフトウェアを用いた設計および試作評価を実施し、ミリ波アンテナの基本特性を明らかにした(図2)。

JAXA・北海道放送との共同研究においては、飛行試験や探知した障害物の表示法に関する研究開発を実施した。また、レドームおよび内部回路の改善(図3)を行い、2019

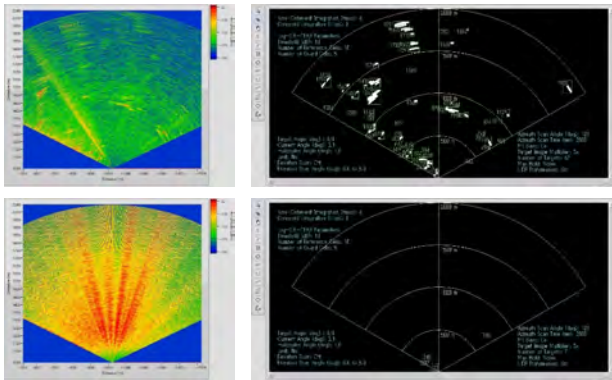


図3. 従来レドーム有無時におけるPPI スコープおよび対象物抽出画面の反射影響比較  
(レドーム有り：上段，レドーム無し：下段)

年3月に実施した飛行試験の解析も実施した。この結果、送電線鉄塔および送電線の最大探知距離は、約3,950 mおよび約2,860 mであり、これまでで最長の探知距離を達成した。さらに、障害物表示地図では、送電線鉄塔データベースと探知した障害物をリアルタイムで描画可能であり、機上における障害物情報の充実（CARATS OI-31）に活用可能となる成果を得た。

#### 4. まとめ

当初の研究目的を達成するとともに査読付学会誌3件、査読付国際会議論文6件、技術研究報告等その他論文9件、講演発表等12件、受賞4件の予定以上の成果を達成した。今後、全周監視支援用システムの飛行試験用プロトタイプ構築に向けた研究予算獲得およびヘリコプタ障害物監視支援システムの実用化に向けた活動を実施予定である。

#### 掲載文献

- [1] ニッ森 俊一, 森岡 和行, 河村 暁子, 米本 成人, 小林 啓二, 桂 信生, “ヘリコプタ前方障害物監視用ミリ波レーダの研究開発”, 平成29年度(第17回)電子航法研究所研究発表会講演概要集, pp.1-4, Jun. 2017.
- [2] ニッ森 俊一, 森岡 和行, 河村 暁子, 坂本 信弘, 曾我 登美雄, 米本 成人, “3Dプリンタを用いて構築するW帯ミリ波レーダ用高利得リフレクタアレイアンテナの電磁界数値解析および特性評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, EST2017-26, pp. 95-100, Jul. 2017.
- [3] ニッ森 俊一, 森岡 和行, 河村 暁子, 宮崎 則彦, 米本 成人, “ミリ波レーダ技術を用いたヘリコプタ障害物監視支援システムの研究開発”, 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会, BI-1-3, pp. SS41-SS42, Sept. 2017.

- [4] S. Futatsumori, C. Amielh, K. Morioka, A. Kohmura, N. Miyazaki, and N. Yonemoto, “Investigation of circular polarization for 76 GHz helicopter collision avoidance radar to improve detection performance of high-voltage power lines”, Proceedings of the 14th European Radar Conference 2017 (EuRAD2017), pp. 295-298, Oct. 2017.
- [5] ニッ森 俊一, 森岡 和行, 河村 暁子, 塩地 誠, 米本 成人, “準ミリ波レーダを用いたヘリコプタ全周監視支援技術の基礎実験”, 第55回飛行機シンポジウム講演集, 1F12, JSASS-2017-5087, Nov. 2017.
- [6] S. Futatsumori, K. Morioka, A. Kohmura, N. Miyazaki and N. Yonemoto, “Fundamental investigations on helicopter all-around obstacle detection using quasi millimeter-wave radar system -experiments based on a low-transmitting power radar system and a multicopter -,” Proceedings of the International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2017 (ICSANE2017), SANE2017-82, vol. 117, no. 321, pp. 101-104, Nov. 2017.
- [7] ニッ森 俊一, 森岡 和行, 河村 暁子, 宮崎 則彦, 米本 成人, “76 GHz小電力ミリ波レーダを用いた森林環境における超高压送電線の反射電力特性測定”, 2018年電子情報通信学会総合大会, B-2-32, p. 191, Mar. 2018.
- [8] S. Futatsumori, K. Morioka, A. Kohmura, N. Sakamoto, T. Soga and N. Yonemoto, “Feasibility evaluations of three-dimensional-printed high-gain reflectarray antenna for W-band applications”, IEICE Communications Express, vol. 7, no. 6, pp. 230-235 Apr. 2018.
- [9] S. Futatsumori, K. Morioka, A. Kohmura, N. Sakamoto, T. Soga and N. Yonemoto, “Feasibility evaluations of three-dimensional-printed high-gain reflectarray antenna for W-band applications”, IEICE Communications Express, vol. 7, no. 6, pp. 230-235 Apr. 2018.
- [10] Kazuyuki Morioka, Norihiko Miyazaki and Shunichi Futatsumori, “Estimation of high-voltage powerline detection performance in rainfall conditions by 76 GHz helicopter obstacle detection millimeter-wave radar system,” Proceedings of Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation 2018 (VJISAP2018), May 2018.
- [11] ニッ森 俊一, 森岡 和行, 河村 暁子, 米本 成人, 小林 啓二, 桂 信生, “ヘリコプタ前方障害物監視用ミリ波レーダの飛行試験”, 平成30年度(第18回)電子

- 航法研究所研究発表会講演概要集, pp.63-66, Jun. 2018.
- [12] ニッ森 俊一, “ミリ波レーダを用いたヘリコプタ障害物探知技術の研究開発”, 日本航海学会 第138回講演会・研究会, Jun. 2018.
- [13] Shunichi Futatsumori, “Research progress and performance evaluation of helicopter obstacle detection based on 76 GHz millimeter-wave radar systems,” Proceedings of Asian Workshop on Antennas and Propagation 2018 (AWAP2018), July 2018.
- [14] ニッ森 俊一, “ヘリコプタ前方障害物監視用ミリ波レーダの飛行試験概要”, 航空無線 (第97号), pp.31-35, Sep. 2018.
- [15] ニッ森 俊一, 坂本 信弘, “3Dプリンタを用いて構築するW帯ミリ波レーダ用ABS樹脂製反射型レンズアンテナの電磁界数値解析”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 209, EST2018-54, pp. 63-67, Sep. 2018.
- [16] Shunichi Futatsumori, Capucine Amielh, Norihiko Miyazaki, Keiji Kobayashi, and Nobuo Katsura, “Helicopter flight evaluations of high-voltage power lines detection based on 76 GHz circular polarized millimeter-wave radar system”, Proceedings of the 15th European Radar Conference 2018 (EuRAD2018), pp. 218-221, Sep. 2018.
- [17] ニッ森 俊一, “民間航空分野におけるミリ波レーダ技術の研究開発”, マイクロウェーブ展ワークショップ, TH5B-02, Nov. 2018.
- [18] ニッ森 俊一, “ヘリコプタ前方障害物監視用ミリ波レーダの研究開発について”, 航空技術 (第766号), pp.41-43, Jan. 2019.
- [19] ニッ森 俊一, 宮崎 則彦, 小林 啓二, 桂 信生 “76 GHz帯特定小電力円偏波ミリ波レーダを用いたヘリコプタ前方障害物探知飛行試験 -高圧送電線鉄塔および高圧送電線の探知性能評価-”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 441, SANE2018-115, pp. 31-36, Feb. 2019.
- [20] ニッ森 俊一, 坂本 信弘, “3Dプリンタを用いて構築するW帯ミリ波レーダ用ABS樹脂製反射型レンズアンテナの設計および特性推定”, 2019年電子情報通信学会総合大会, B-1-70, pp. 70, Mar. 2019.
- [21] S. Futatsumori, N. Sakamoto and T. Soga, “Three-Dimensional-Printed W-Band High-Gain Reflector Fresnel Lens Antenna Based on Acrylonitrile Butadiene Styrene Plastic,” IEICE Communications Express, vol. 8, no. 7, pp. 275-280, May 2019.
- [22] ニッ森 俊一, 坂本 信弘, 曾我 登美雄, “3Dプリンタを用いて構築するW帯ミリ波レーダ用ABS樹脂製反射型フレネルレンズアンテナの設計および試作評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 119, no. 129, EST2019-15, pp. 41-45, Jul. 2019.
- [23] ニッ森 俊一, “電子航法研究所におけるヘリコプタ障害物監視支援用ミリ波レーダ技術の研究開発”, 回転翼航空機運航安全研究会, Jul. 2019.
- [24] ニッ森 俊一, 宮崎 則彦, “航空機前方監視用76 GHz小電力ミリ波レーダにおけるレドーム影響測定評価”, 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-2-18, p. 166, Sep. 2019.
- [25] 中島 徳顕, 平林 博子, 河村 暁子, 虎谷 大地, ニッ森 俊一, “電子航法研究所における無人航空機研究への取り組み”, 第57回飛行機シンポジウム講演集, 1A05, JSASS-2019-5005, Oct. 2019.
- [26] S. Futatsumori and N. Miyazaki, “Performance Degradation Investigations of Helicopter Forward-Looking 76 GHz Millimeter-Wave Radar Due to Radome,” Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA2019), pp. 1-2, Oct. 2019.
- [27] ニッ森 俊一, 曾我 登美雄, “3Dプリンタを用いて構築するW帯ABS樹脂製反射型フレネルレンズアンテナの誘電体材料定数パラメータ感度特性評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 119, no. 407, EST2019-92, pp. 67-71, Jan. 2020.
- [28] ニッ森 俊一, 宮崎 則彦, “ヘリコプタ前方障害物監視用76 GHz小電力ミリ波レーダを用いた実環境における高圧送電線からの反射電力測定-陸上および海上に設置された高圧送電線の探知性能評価-”, 電子情報通信学会無線端末・アンテナシステム測定技術研究会, AMT2020-04, pp. 17-21, Aug. 2020.
- [29] ニッ森 俊一, 宮崎 則彦, 小林 啓二, 桂 信生, “76 GHz帯特定小電力円偏波ミリ波レーダを用いたヘリコプタ前方障害物探知試験-異なる飛行条件における高圧送電線鉄塔および高圧送電線の探知性能評価-”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 120, no. 250, SANE2020-35, pp. 48-53, Nov. 2020.
- [30] S. Futatsumori and N. Miyazaki, “Ground Reflection Power Measurements of Thin High-Voltage Power Lines Using 76 GHz Helicopter Forward-Looking

Low-Transmitting Power Millimeter-Wave Radar”,  
Proceedings of the 2020 International Symposium on  
Antennas and Propagation (ISAP2020), pp. 219-220, Jan.  
2021.

表彰・受賞等

- [1] 奨励賞・日本航空技術協会・ヘリコプタ前方障害物ミリ波レーダの開発に対して（2018年6月）
- [2] 電子情報通信学会ソサイエティ論文賞（ComEX Best Letter Award）・電子情報通信学会通信ソサイエティ・優秀論文表彰として（2019年5月）
- [3] 電子情報通信学会ソサイエティ功労賞・電子情報通信学会通信ソサイエティ・査読委員の活動功労として（2019年9月）
- [4] 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会優秀論文発表賞・電子情報通信学会EST研究会・優秀論文表彰として（2020年3月）

担当領域 監視通信領域

担当者 ○大津山 卓哉, 本田 純一, 長縄 潤一, 宮崎 裕己

研究期間 平成 30 年度～令和 3 年度

### 1. はじめに

現在の監視システムのほぼすべてがランダムアクセス方式のパルス通信を使っており、監視システム性能は帯域内信号量に依存する。新たな運航のための監視システム導入とその評価には、現在使われているトランスポンダ等の信号使用量を把握する必要がある。ICAO 監視パネルでは、信号環境に関する各国の状況報告やこれら进行评估する手法を検討しているほか、監視システムの技術性能要件を基準とする運航方式の検討が進められている。

本研究では、監視システムの安定運用による航空監視性能の維持・向上に資するために、監視システムで使用する信号環境について調査するとともに、将来の運航方式に必要な監視システムの性能要件を明らかにする。

### 2. 研究の概要

本研究は 4 カ年計画であり、3 年目である令和 2 年度は昨年度に引き続き以下の内容を行った。

- ① 監視システム動向調査
- ② 測定実験による信号環境取得・評価
- ③ 監視信号環境のモデル化

### 3. 研究成果

令和 2 年度は ICAO の監視パネル等に提出されている 1030/1090MHz 信号環境関係の文献を調査するとともに、飛行実験による監視信号環境の測定を行った。また、既存の信号環境測定装置等の調整・改良や新たな手法の検討を行い、実験結果に基づく信号環境の現状を ICAO 監視パネルに報告した。さらに仙台空港に設置した OCTPASS の取得データを活用し空港面における信号環境の現状を解析した。この結果を査読論文にまとめ採録された。

#### 3.1. 監視システム動向調査

ICAO 監視パネル等に提出された信号環境、トランスポンダ関係の文献調査を行った。昨年度までと同様に実験結果に基づく日本の信号環境の現状を報告した。さらに性能要件に基づく監視システムのあり方について設置されたサブグループに参加し、性能要件ベースの監視システムに関する新たなマニュアル作成を行っている。また、信号環

境の考慮が監視システムにとって非常に重要になっていることから、1030/1090MHz の監視信号環境に関する専門グループが WG 内に新しく作られた。そこに参加し監視システムに対する信号環境の影響等の議論を行っている。

#### 3.2. 測定実験による信号環境取得・評価

監視システム性能はその帯域内信号量がシステム性能に影響を及ぼす。信号量の評価手法にはさまざまな提案があり、求めたい指標によって必要な手段をとる必要がある。先行研究に続いて本研究においても国内のほぼすべての空域を対象とした監視信号環境データを取得するための飛行実験を行っている。

今年度も引き続き、航空路の信号環境を測定した。飛行実験においては、実験用航空機に搭載された信号環境記録装置を使って 1030/1090MHz の波形をすべて記録し、実験後にこれらの取得したデータを疑似トランスポンダによる 1030MHz 質問信号評価装置や ADS-B 受信機を使いデータ処理を行った。現在、信号環境の評価として 1030/1090 MHz 帯の受信データから質問/応答信号量と質問信号数の評価を行っている。図 1 に飛行実験中に得られた Mode S 応答種別毎の信号量変化を示す。これらの情報から航空機に搭載されたトランスポンダの挙動を推測することが可能となる。

また、仙台空港に展開した光ファイバ接続型受動監視システム(OCTPASS: Optically Connected Passive Surveillance System)を活用し、既存の監視システムを使った信号環境評価について検討を始めた。OCTPASS では光ファイバ無線を用いて各受信機で得られた信号を中央処理部に集約

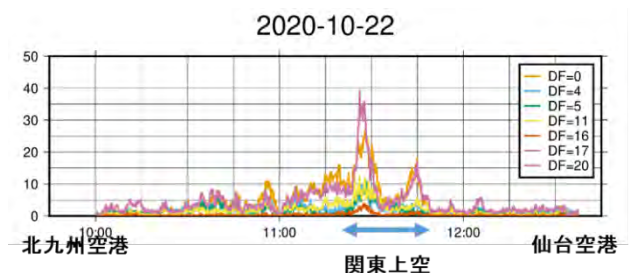


図 1 : Mode S 応答信号のフォーマット別信号量変化

して処理することにより、従来の MLAT であれば破棄されて測位に用いられなかった信号も使用することで、検出率の向上を図っている。この能力を活用して仙台空港内の信号環境推定を試みた。図 2 に仙台空港において、空港内で受信した総信号数に対して、信号を受信した受信局数ごとの信号数変化を示す。多くの場合で MLAT 処理に使われる 3 局以上の受信局で信号が得られているが、1 局のみで受信している信号も多く発生している事が分かる。このように得られたデータの解析結果から空港内で受信される信号の少なくとも 20%程度は測位計算に利用されないということが明らかになった。測位計算に利用されない信号には、信号の衝突やマルチパスによって大きく信号の形状が崩れている可能性がある。これらの解析結果を査読論文としてまとめ、論文誌に採録された。

### 3.3. 監視信号環境のモデル化

これまでの航空交通管理およびそれに必要となる監視システムは機器単体の性能を基に運用が定められてきたが、近年、欧州を中心に運航方式に必要な監視性能要件からシステム設計を行うことが主流になり、ICAO でもそのために必要なマニュアル等の作成を行っている。監視性能要件の基準を検討するためには、測位性能等のデータが必要であり、詳細な測位データを多くもっている研究所の積極的な寄与が求められている。

過去の飛行実験で取得したデータや地上のレーダサイト数や付近の航空機数から推測される信号環境評価とこれらの解析結果を比較し、信号発生源のモデルおよび受信環境のモデルについて検討を始めた。一般的に質問信号に使われる 1030MHz は地上設備に依存し、応答信号やスキッタに使われている 1090MHz は周辺航空機数に比例して信号量が増えることが解っている。ただし質問や応答の内容によってこれらの信号数は大きく変化するため、レーダサイトの種類や対象となる場所での運用状況等考慮すべき項目は多い。データ解析を引き続き行い、作成したモデルの検証を行っていく。

## 4. まとめ

本年度は 1030MHz 質問信号環境および 1090MHz 応答信号環境の評価装置を使用し監視信号環境の統計的な解析を行った。また、空港面での信号環境測定についても検討を始めた。質問および応答信号環境はトランスポンダ占有率の推定に適用可能であると考えられており、今後、トランスポンダ占有率の推定とこれらの情報を用いた監視性能要件の導出へとつなげていく予定である。

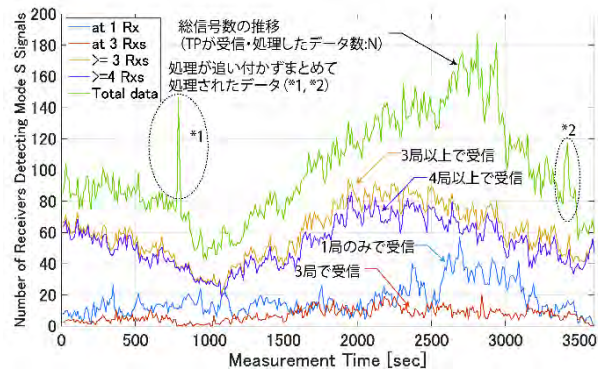


図 2: OCTPASS における受信局数の時間変化

### 掲載文献

- [1] T. Otsuyama, H. Miyazaki, and J. Honda, “Analysis of the 1030-1090 Signal Environment in Japan”, ICAO SP-ASWG/11 Working Paper, April, 2020.
- [2] T. Otsuyama, H. Miyazaki, and J. Honda, “Analysis of the 1030-1090 Signal Environment in Japan”, ICAO SP-ASWG/TSG/11 Working Paper, June, 2020.
- [3] T. Otsuyama, H. Miyazaki, and J. Honda, “Analysis of the 1030-1090 Signal Environment in Japan”, ICAO SP-ASWG/12 Working Paper, September, 2020.
- [4] 本田純一, 角張泰之, 大津山卓哉, “空港内のモード S 信号環境とマルチラテレーションの検出率について,” 信学論(B), Vol. J104-B, No. 1, pp. 10-22, Jan. 2021. DOI:10.14923/tanscomj.2020JBP303
- [5] T. Otsuyama, H. Miyazaki, and J. Honda, “Analysis of the 1030-1090 Signal Environment in Japan”, ICAO SP-ASWG/TSG/12 Working Paper, February, 2021.



### 3次元形状測定のための高精度距離測定技術に関する基礎的研究【基盤的研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○米本 成人, 河村 暁子, ニッ森 俊一, 森岡 和行

研究期間 平成30年度～令和2年度

#### 1. はじめに

近年、爆弾低気圧等の異常気象により、短時間で厚い積雪が発生する頻度が増えてきている。このような積雪時には、滑走路面に設定された滑り係数を下回ると、除雪を行うことで空港の安全を確保している。滑走路表面の積雪状況をリアルタイムに3次元的に計測することが可能であれば、冬季の空港の円滑な運用が保たれる。しかしながら、従来の積雪測定設備はポール下の1点において増加する積雪量を測定しているが、面的な情報を取得することはできない。電波を使用したレーダーや光波を利用したライダーなどがcm級の測定精度のため精度が不足し、精度のよい短パルスライダーでは測定範囲は非常に短いという問題があった。これらの背景の中、新しい計測技術に対するニーズが高まっている。

本研究では、冬季に積雪の多い空港運用に係る安全性の向上、処理能力の維持、運用効率の向上等に資するため、新しい3次元計測技術の検討を行うことを目的としている。また、欧州民間航空装置機関（EUROCAE）において、滑走路気象情報システムに関する作業班（WG-109）が設立され、mm級の厚さの雪、水の膜がある場合のセンシングが必要であることが示された。残念ながら、そのような薄い膜を滑走路面の広い範囲で測定する技術は存在しない。そこで、mm級の水や氷層の厚さを測定する技術を優先的に開発する方針へ転換した。研究の初期段階であるため、方式を限定せず、様々な計測手法において得られる情報の精度を評価し、将来的な3次元積雪モニタリングシステムに最適な方式を導き出す。

#### 2. 研究の概要

本研究は平成30年度から令和2年度までの3年計画であり本年度は3年目である。年度別の主たる実施事項は以下のとおりである。

平成30年度 光空間走査装置の試作

令和元年度 レーザー+カメラによる形状測定

令和2年度 各種測定手法の性能比較・評価

#### 3. 研究成果

令和2年度は、赤外線レーザー光を用いて、適切な波長

の選定と水・氷等における赤外光の散乱を測定した。各種赤外波長を比較した結果、レーザーとカメラの幾何学的配置が変わらなければ、その3角比でレーザー線の移動量が確定し、線が細いほうが明瞭に移動を識別できることが示された。氷を室温に放置して溶融する段階における表面形状を780nmのレーザーで計測した結果を図1に示す。3mm厚さになるように水を入れて作成した氷の表面は、膨張により、数mm単位で厚くなっている。その厚みに合わせてレーザー線の移動量が大きくなることが確認できた。また、氷の比率が多い時は、氷部分やクラック等により乱反射が発生し、氷の内部構造が撮影できることが示された。

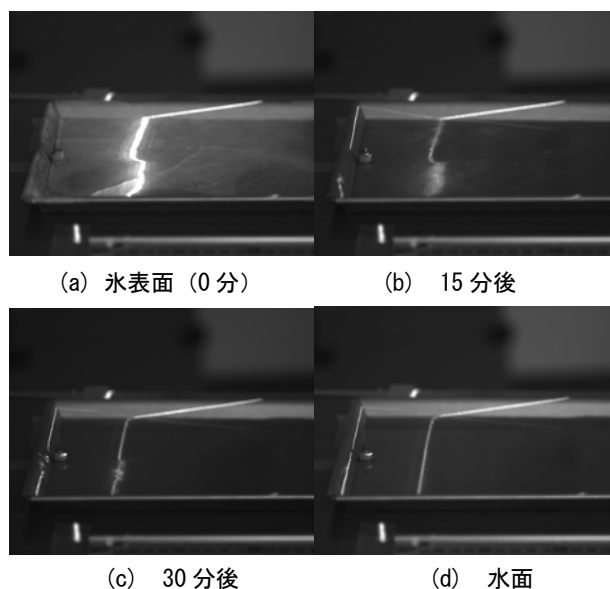


図1 溶融する氷の表面形状の測定結果

レーザーに距離を測定する機能を付加するため、照射する赤外線に変調をかけて反射光を検出するライダーシステムも検討した。波長1550nmで直接変調できるレーザー送信機を試作した。バイアス電圧-1~-1.4Vの範囲で調整すると波長が変化し、193.5THz付近で約120GHzの変調範囲が得られた。この素子を用いて変調をかけたレーザー信号を、試作した光検出器で検出した時の光周波数特性例を図2に示す。周波数が高くなると、レーザー素子に加わる交流電圧が低下し、光変調波成分が9GHz付近で急に小さくなる傾向が示された。また、無線信号9GHzで光信号を分析したところ、レーザーに加える無線信号を強くすると、

高次の光スプリアスにより信号が分散されることが確認された。これにより、レーザーへの変調を素子単体で行うには、レーザー素子のバイアス線路の周波数特性が限界となることが示された。さらに光領域で広い変調帯域を得るには、バイアス電圧の時間変動の周波数成分が該当の帯域制限を超過しないように制御する必要性が示された。

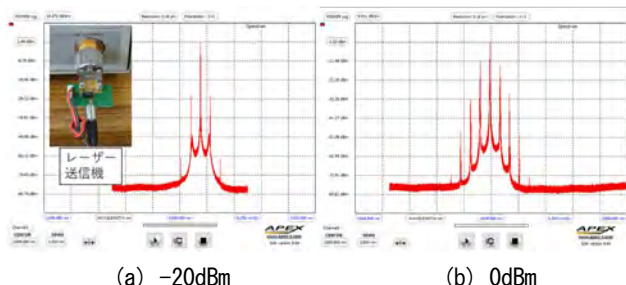


図2 試作したレーザー送信機に9GHzの無線信号を重畳した時の光スペクトル

最後に、開発した各種測定手法を元に、その測定分解能を比較した。これらの電波帯域のうち、無線標定（レーダー）として連続して使用できる帯域は数GHzであるため、cm級の距離分解能となり必要とされる分解能に足りない。また、複数の無線帯域を使用して合成しても、数十GHzにとどまることから、期初のcm級の測定は可能であっても、それを超越する分解能を得ることは難しい。現在の電波による測定で、比較的安価に構築できる周波数帯は100GHz付近であり、それよりも高いTHz級の周波数帯域を利用できれば、距離分解能を向上できる可能性がある。

変調レーザーによる測距機能も、レーザーに印加する電子回路の周波数に制限されるため、仮に外部変調器等を付加して広帯域化しても、上記の無線回路の上限の影響を受ける。よって、光を含む電磁波による測定についても同様の範囲の測距精度となり、電子回路のさらなる広帯域化、高周波化が必要となる。

レーザー光とカメラを用いた測定手法では、測定物の厚さの変化により、表面反射点が移動することで、mm級の測定が可能となる。この時の移動量はレーザーの高さと測定箇所までの距離の比率によって変換される。高い精度を得るには、太いレーザー線では移動量が判別できないため、細いレーザー線を使用することでmm級の測定が可能となる見通しが得られた。

#### 4. まとめ

本研究では可視光が利用できない空港環境における高雪面等の高精度測定技術の検討を行った。赤外線レーザーと赤外線カメラを用いたシステムの有効性を示した。

#### 掲載文献

- [1] Sugang Xu, Goshi Sato, Masaki Shiraiwa, Katsuhiro Temma, Yasunori Owada, Toshiaki Kuri, Yoshinari Awaji, Naruto Yonemoto, Naoya Wada, "Field-Trial of the Recovery of Fiber Networks C/M-Plane via an IoT-based Narrow-band and Lossy Links System (FRENLL)", 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), Fukuoka, Japan, July 7-11, 2019
- [2] Naruto Yonemoto, "Realtime Remote Sensing of Water/Ice layer on the Runways (invited talk) ," 3rd Photonic-applied Electromagnetic Measurement International Workshop in Ise (PEM2019), Ise, Mie, Nov. 2019
- [3] Sugang Xu, Goshi Sato, Masaki Shiraiwa, Katsuhiro Temma, Yasunori Owada, Noboru Yoshikane, Takehiro Tsuritani, Toshiaki Kuri, Yoshinari Awaji, Naruto Yonemoto, and Naoya Wada, "IoT-based Fiber Networks C/M-Plane Early Disaster Recovery via Narrow-band and Lossy Links System (FRENLL): A Field-Trial Experiment in Metro Area," 電子情報通信学会 2020 年総合大会 講演論文集, B-5-169, 2020 年 3 月
- [4] Sugang Xu, Goshi Sato, Masaki Shiraiwa, Katsuhiro Temma, Yasunori Owada, Noboru Yoshikane, Takehiro Tsuritani, Toshiaki Kuri, Yoshinari Awaji, Naruto Yonemoto, and Naoya Wada, "Field-Trial Experiments of an IoT-based Fiber Networks Control and Management-plane Early Disaster Recovery via Narrow-band and Lossy Links System (FRENLL)," IEICE Transactions on Communications, Vol. E103.B (2020), No. 11 pp. 1214-1225, 2020

担当領域 監視通信領域  
 担当者 ○角張 泰之, 古賀 禎  
 研究期間 令和元年度～令和2年度

### 1. はじめに

マルチラレーション(MLAT)やADS-Bなど二次監視レーダシステム(ATCRBS)の派生技術を用いた航空機監視システムの認知や普及が進んでいる。SSRやMLATによる空港周辺監視などの質問・応答を原理とする監視では、ICAO Annex10で規定されているATCトランスポンダ装置に対する応答遅延時間の許容誤差が潜在的な位置誤差として存在する(図1)。例えばモードS応答ではその許容誤差は±250nsと規定されているが、これは電波の速さでは75mに相当する時間である。運航中の航空機における実際の応答遅延時間誤差を広く正確に計測し、許容値と比較することができれば、監視性能をより定量的な指標として得ることが可能となり、監視システムの利用者にとって有益な情報となる。例えば、現状ではSSRは勿論のこと、MLATベースで検討されているトラフィック監視センサ等もトランスポンダの応答遅延時間の許容値を勘案して性能を想定する必要があるが、指標値を得ることで監視性能をより詳細に見積もることが可能になる。またリアルタイムの計測・判断が可能であれば指標値ではなく、個別の機体毎・フライト毎に監視性能値を見積もることも可能である。

ADS-Bにおけるレイテンシもまた位置精度誤差を生む原因であるが、実際のレイテンシが把握できれば、これもまた同様に有益な情報となる。

本研究は2ヶ年計画であり、運航中の航空機を対象としたATCトランスポンダの応答遅延特性やADS-Bレイテンシの計測手法の開発、および実際に計測したこれらのデータを統計的に得ることによる、監視性能の定量的な指標の提示を目的とする。

### 2. 研究の概要

電子航法研究所では、従前のMLATの課題であった空港内エプロン近傍等におけるマルチパス信号干渉の改善と整備・維持管理コストの低廉化を図る高性能MLATとして光ファイバ接続型受動監視システム(OCTPASS)の開発・実用化をこれまでの研究で推し進めており、仙台空港にその評価装置を設置している。OCTPASSは受信した信号の時刻を非常に正確(数ナノ秒レベル)に計測できる特徴を有しており、これを活用し、適切な計測・処理手法を開発する。

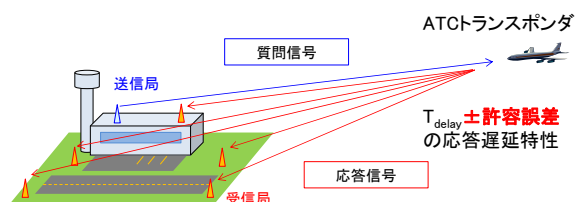


図1 ATCトランスポンダにおける応答遅延

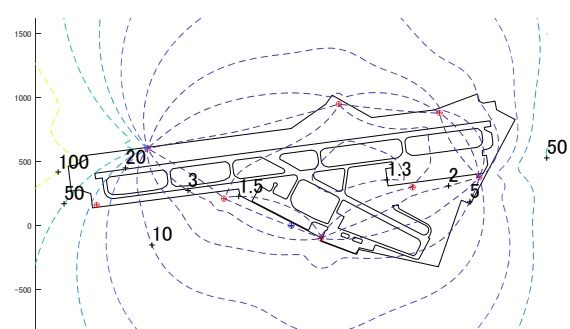


図2 仙台空港 OCTPASS 配置に対する時刻推定精度劣化指数(TDOP)の分布

具体的な方法としては、当該応答信号または当該ADS-B信号を用いてOCTPASSで受動監視(双曲線測位)により算出すると、「位置」の他に「当該信号の送信時刻」が推定できることを利用する。得られた推定データとOCTPASS送信機からの質問送信時刻やADS-B位置等との比較により、トランスポンダ内での遅延時間やADS-Bレイテンシを求める。トランスポンダが電波を送信した時刻を推定するにあたり、その推定精度を表す指数である時刻推定精度劣化指数(TDOP)の分布が、図2に示すように受信局の配置に対応して得られる。比較データを精密に得るためにはDOPの良い、即ちこの値が小さいエリアを計測エリアとして設定する。

開発する計測手法は、航空機が運航状態のまま計測を行うため、仙台空港を離着陸する様々な複数の航空機からデータを取得することで、統計的なデータを得ることが可能となり、結果として、監視性能の定量的な指標を得ることを想定している。

### 3. 研究成果

最終年度である本年度はOCTPASS送信処理部および信

号処理部から必要なデータを継続的に取得するためのソフトウェアの作成を行い、得られた数値から計算を行った。

応答遅延特性については、1ヶ月程度のデータ取得期間中、TDOPの値が良好な計測エリアを走行した全158機の航空機のデータを取得した。図3は、1ヶ月分のデータを航空機毎にプロットしたものの一部である。計測期間において、同じ航空機が何度も計測エリアを走行するため、複数のフライト分が連続的にプロットされている。上段の機体(BE58)は若干遅延が大きい傾向が見えるが、1ヶ月のデータを通して、傾向の変化は見られない事が分かる。下段(CRJ7)は、フライト毎に応答遅延特性が変動する様子が伺える。

図4は、収集した158機のデータを、機種毎・運航者毎・登録番号(モードSアドレス)順にソートし、応答遅延時間の平均値と中央値をプロットしたものである。158機全てにおいて許容誤差を大きく逸脱した航空機はいなかったが、機体毎・運航会社毎等の分類により、特性に特徴が見られることが分かった。搭載しているトランスポンダの種類や機種毎の同軸配線長等がその特性に影響しているものと考えられる。

一方、ADS-Bレイテンシを計測する手法については、高速移動する航空機において、有意な位置差を検出する必要があるが、仙台空港のOCTPASS配置では、TDOPが良好な計測エリア内で十分有意な位置差が得られないことが判明し、継続的なデータ取得には至らなかった。

#### 4. まとめ

MLATやADS-Bなどの航空機監視システムについて、

運航中の航空機における監視性能指標を提示することを目的とし、ATCトランスポンダの応答遅延特性の計測手法を開発した。この成果は、ATCトランスポンダに依存した監視システム全般における精度指標となることに加え、今後、リアルタイムの計測・判断機能がシステム実装されれば、機体毎・フライト毎の位置精度推定機能若しくは位置補正機能、またトランスポンダの早期不具合検出機能として活用できると考えている。

#### 掲載文献

- [1] 角張 泰之, 古賀 禎, 米本 成人 (Jan. 2020), “光ファイバ無

線技術を用いた航空機監視システム,” レーザー研究, vol.48, no.1, pp.32-36.

- [2] J. Honda, H. Miyazaki, et al., “Draft Doc 9924 CP for a New Common Clock Architecture,” ICAO SP ASWG10, Canada, Sep. 2019.
- [3] 角張 泰之 (2021), “空港内で地上走行する航空機の位置を把握するパッシブ・レーダ,” トランジスタ技術, 第57巻, 10号, pp.133-140.

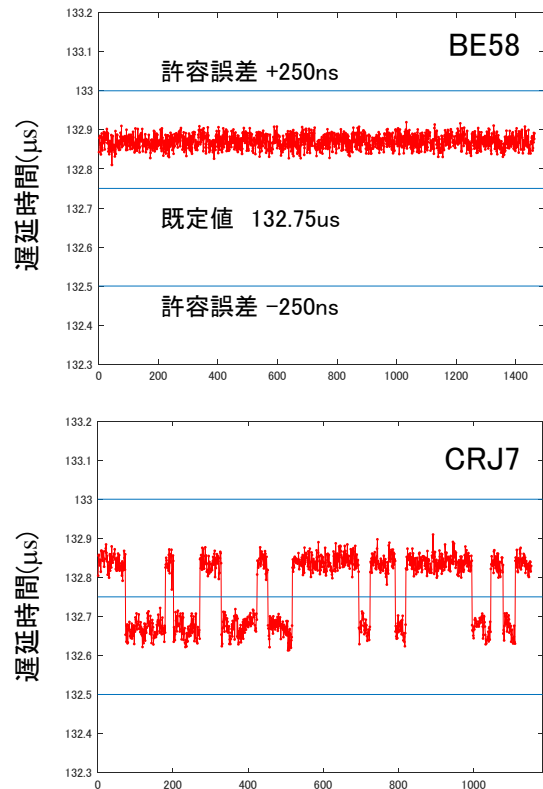


図3 モードSトランスポンダの応答遅延特性計測例

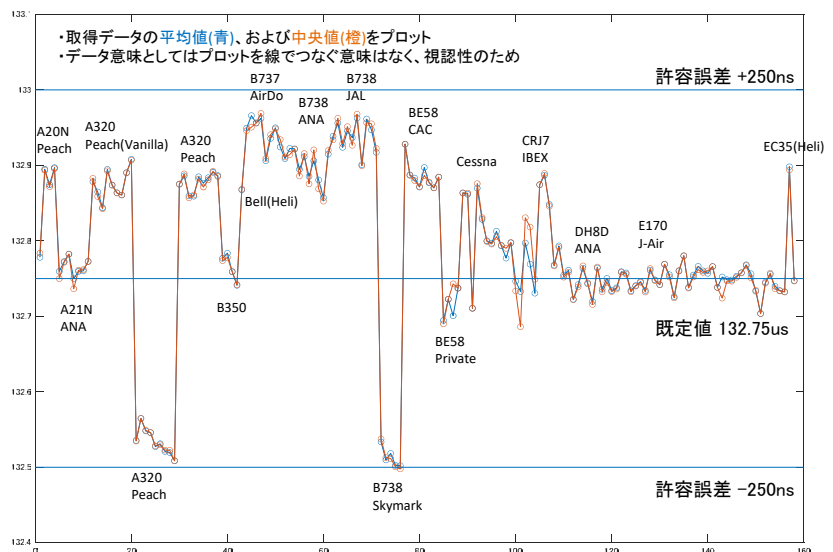


図4 全158機の応答遅延特性(機種毎・運航者毎・登録番号順にソート)

## セキュリティ強化に向けた移動物体高度認識レーダー基盤技術の研究開発【競争的資金研究】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○米本 成人, 河村 暁子, ニッ森 俊一, 森岡 和行

研究期間 令和元年度～令和3年度

### 1. はじめに

近年、世界各地にテロの脅威が拡散し、極めて深刻な状況の中、特に不特定多数の人が集まり警備が比較的緩やかな地下鉄や空港ロビー、大規模集客施設（ショッピングモール、コンサート会場）等のいわゆる「ソフトターゲット」を標的としたテロが増加し、セキュリティ対策の強化が喫緊の課題となっている。我が国も2025年大阪万博の開催を控えるなどセキュリティ対策の強化が喫緊の課題であるが、現在の技術では人が隠し持った危険物を遠方から検知することができない。

このため、本研究開発では、公共スペースのセキュリティ対策を強化するため、W帯における複数の周波数帯でのセンシング/イメージング技術を開発し、人が隠し持った危険物を遠方から可視化することで、不審物を認識するシステムの基盤技術を確立する。また、レーダー技術をW帯に適用することで高い周波数帯の利用を促進し、電波の有効利用を図ることを目的とする。

具体的な開発目標として、検知距離2～5mを目標に人が所持する不審物を衣服の上からイメージング画像を取得するハイブリッドイメージャ、及び、検知距離15mを目標に人の位置及び不審物からの反射特性情報を取得するレーダーシステムから構成された数センチ程度の解像度を持つ不審物特定用のWUO (W-band Unidentified Object Detection)イメージャを開発し、センシング・イメージング技術を確立する。

本研究開発は公募によって2つのプロジェクトチームが分担して受注することとなり、電子航法研究所は課題A「W帯を使用したセンシング・イメージング技術」のうち、(a)センシング・イメージング技術の研究開発の中の「2周波対応アクティブ型イメージャの研究開発」を担当する。その中で、W帯の電波で無線標定に割り当てられている2周波帯（70GHz帯、90GHz帯）を活用して、より高精度な距離分解能を達成するとともに、3次元的なイメージ画像を取得することのできるアクティブイメージャを開発する。

### 2. 研究の概要

本研究は総務省の「電波資源拡大のための研究開発」(JPJ000254)の一環として実施され、3年計画の2年目であ

る。年度別の主たる実施事項は以下のとおりである。

令和元年度	広帯域パッシブ受信技術の確立 広帯域符号変調技術の確立 機械走査によるW帯イメージ画像の取得
令和2年度	広帯域複数パッシブ受信アレイの構築 2周波広帯域符号変調信号生成技術の構築 2次元機械走査によるW帯イメージ画像の生成の高速化
令和3年度	機械走査によるW帯イメージ画像の生成の高速化 ネットワーク化の研究開発 不審物認識システムの統合評価実証試験評価

### 3. 研究成果

令和2年度は、アクティブ機能による各種異物の映像化を行うとともに、広帯域受信機を4つ並列に稼働させて信号を合成する技術の開発、2周波広帯域符号変調信号生成技術の構築を行った。

昨年度構築した2次元走査型イメージャを用いて、装置からミリ波を照射し、その反射波を映像化するアクティブ機能の検証を行った。各種異物は-10dBmの電波を照射するとき、10kサンプルの干渉積分計算を行うと、約5mから危険物の反射波を検出可能であり、各種異物の形状を映像化できることを示した(図1)。

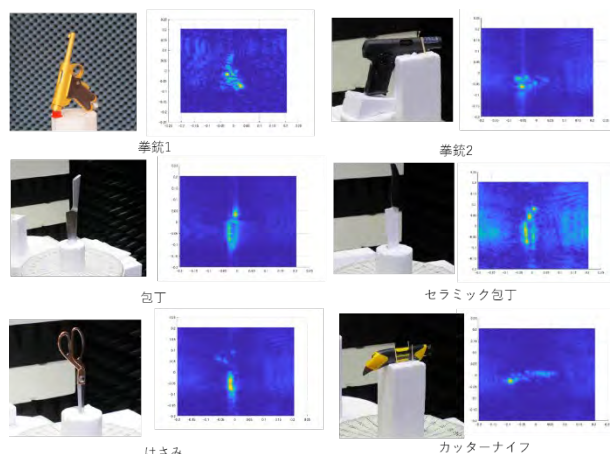
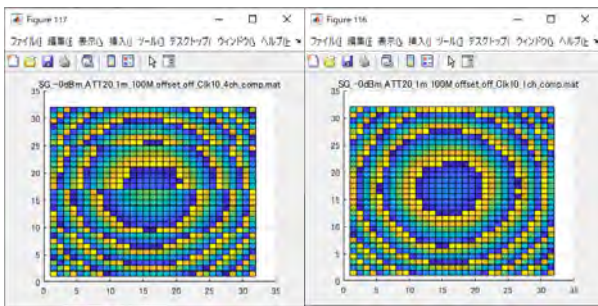


図1 アクティブセンシングによる各種異物の映像

測定の高速化のため、受信機を4台並列に動作させて合成させるシステムを構築した(図2)。4台の受信機の振幅・位相の測定値がアンテナ走査平面で連続となるよう補正するアルゴリズムを構築した(図3)。これにより、1台当たり4分の1のエリアを測定すればよいため、測定時間が1/4に削減された。



図2 4ch 並列電波イメージャの外観



(a) 補正前 (b) 補正後

図3 4chの受信機で測定された電界の位相補正の効果

また、アクティブ機能の時に複数周波数の送信機を固有符号で弁別するため、78GHz帯、94GHz帯の2つの周波数帯の送信信号と同期して同時に受信機で検波するための86GHz帯の局部発振信号を発生する同期信号発生回路を構築した。図4に示すように、999 $\mu$ s送信し、1 $\mu$ s休止するチャープ信号を、3周波帯で送信した。ミリ波帯の送信信号と受信機信号を掛け合わせて、8GHzの差周波数成分が安定して取り出せることにより、チャープ信号の傾きが同期していることを確認した。

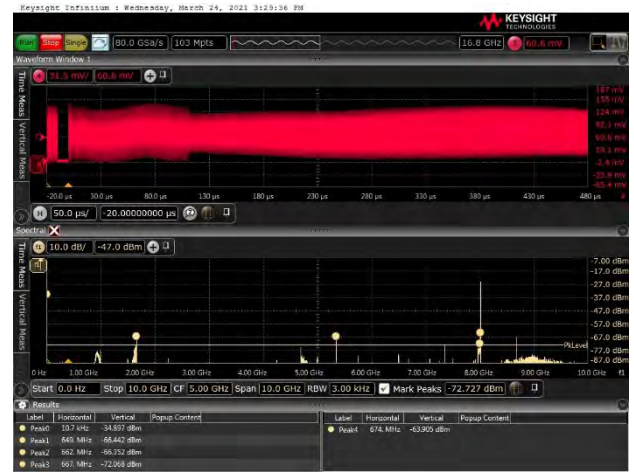


図4 78GHz 送信用のLO信号生成

本研究は三重大学、アルウェットテクノロジー株式会社他との共同研究として実施された。

掲載文献

- [1] 米本 成人, 河村 暁子, ニッ森 俊一, 森岡 和行, 牧田 芳男, “セキュリティ検査用ハイブリッドイメージングシステムのためのパッシブ電波イメージング技術の基礎検討,” 信学技報, vol. 120, no. 8, MW2020-1, pp. 1-5, 2020年4月
- [2] 米本 成人, 河村 暁子, ニッ森 俊一, 森岡 和行, 牧田 芳男, “セキュリティ検査用ハイブリッドイメージングシステムのための合成開口処理による電波イメージングの基礎実験,” 信学技報, vol. 120, no. 101, MW2020-31, pp. 89-93, 2020年7月
- [3] 米本 成人, 河村 暁子, ニッ森 俊一, 森岡 和行, 牧田 芳男, 能美 仁, 能美 陽, 宮脇正典, “ミリ波レーダーによる隠された危険物検出の試み討,” 信学技報, vol. 120, no. 250, SANE2020-30, pp. 19-24, 2020年11月.
- [4] Naruto Yonemoto, Akiko Kohmura, Shunichi Futatsumori, Kazuyuki Morioka, Yoshio Makita, “Passive Radio Imaging of Hybrid Radar System for Security Inspections,” the 17<sup>th</sup> European Radar Conference 2020, January 2021

遠隔からの機体識別および有人航空機との空域共有に関する研究開発【競争的資金研究，NEDO】

担当領域 監視通信領域

担当者 ○古賀 禎，呂 暁東，角張 泰之，河村 暁子，平林 博子，長縄 潤一，虎谷 大地

研究期間 令和元年度～令和3年度

1. はじめに

無人航空機の普及に伴い2020年代に1時間1平方kmあたり100機といったレベルで多数飛行する世界となることが想定される。このように多数の機体が高密度に飛行することが想定された世界を実現するために，無人航空機と空域を共有して飛行する有人航空機との安全確保を図り，無人航空機の飛行計画情報・機体情報・運航者情報を共有，また有人航空機の飛行位置情報を収集し共有するための情報共有システムの研究が必要となる。これらの大規模システムを構築するためには，有人機の位置を探知する要素システムが必要である。

電子航法研究所では，前述の課題を検討するため，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託研究を令和元年度～令和3年度までの3ヶ年の計画で開始した。本研究開発は9つの機関が分担して実施する。[1]

2. 研究の概要

本研究開発全体では，福島ロボットテストフィールド(RTF)に無人航空機の機体識別および位置情報を共有するための通信システムのプラットフォームを整備する。機体識別や位置情報共有のための通信機を搭載した無人航空機を飛行させ，通信システムの実証をする。また，複数の有人航空機と無人航空機の空域共有に必要な情報共有のための技術および試験システムを開発し，有人航空機の飛行情報に関する仮想情報シミュレータ等を用いた運航管理システムとの相互接続性の評価を実施する。通信機および地上局や相互接続性は，2019年度に各々要件定義と設計，2020年度に通信機および地上局の試験システムの開発とともに，相互接続性評価のための情報共有システムを実装し，2021年度に各々RTFでの実証実験を実施する。

さらに，これらの情報共有を補完・補強する通信システム及び情報共有システムを運航管理システムに統合するためのアーキテクチャ設計を実施し，空域シミュレーションによってシステムワイドの安全性を評価する。各

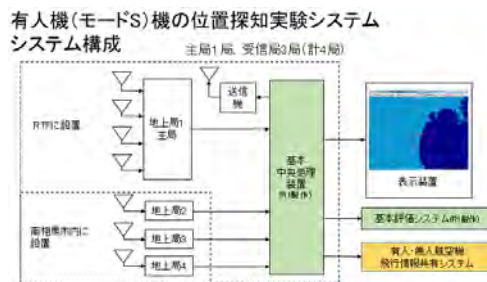


図1. システム構成



図2. 受信局の配置（南相馬市）

システムの仕様及び共通インターフェース等の策定においては，国内外の関係者を構成員とする委員会を構成し，要件などの検討及び策定を行った上で，通信システム及び情報共有システムの開発及び各種試験に反映させる。

電子航法研究所は無人航空機と有人航空機の空域共有に必要な技術として，航空管制等に用いられるマルチラレーション技術を応用した有人機位置探知システムを開発する。

3. 研究成果

令和2年度は，令和元年度に構築したモードSトランスポンダ搭載機的位置を探知する実験システムを用いた実験を実施した。また，無人機のリモート識別システムとの接続試験を行った。有人機と無人機的位置情報を同一画面上で表示できることを確認した。さらに，モードA/Cトランスポンダ搭載機的位置を探知する機能を実装した。図1にシステムの構成を示す。システムは，福島ロボットテストフィールドを主受信局とし，南相馬市内3か所に受信局を設置している。図2に南相馬市内にお

ける配置を示す。

#### 4. まとめ

電子航法研究所は、無人航空機と有人航空機の空域共有に必要な技術として、RTFおよび南相馬市内に地上局を用いて、有人機位置の探知実験を行った。また、マルチラレーション技術を利用したモードA/C機の位置探知機能を実装した。

#### 掲載文献

[1] 古賀 禎, “RTF/南相馬における有人機位置探知システムの研究開発について”, 超異分野学会 福島ロボットテストフィールド 開所記念フォーラム 2020



担当領域 監視通信領域  
担当者 ○井上 諭  
研究期間 令和元年度～令和3年度

## 1. はじめに

航空交通や医療、大規模プラント運用など高度な安全が求められる多くの業務がチームによってなされているが、安全を実現するためには、“チーム協調”における適応性に関する実験研究や、特に、現場指向かつ十分なデータに基づく信頼性、汎用性へのアプローチが重要であるが、これらの研究例や研究手法の提案は少ない。そこで、本研究では、航空交通業務への適用を目指したチーム協調プロセスを監視、評価するための認知行動指標（チームレジリエンス指標）開発とそれに必要な基盤技術開発を目指している。現実の「安全」とは、状況の変化に対する適応能力（レジリエンス）を有する個体が集合し連関することで実現される総体的な成果であるといえる。レジリエンス工学[1]は上記の観点を基盤とし、実務者の日常的な適応を分析して、システムの総体的な安全を実現する方策を探る学問であるが、この目的を達成するには、マニュアルなどの理想化された業務過程を研究するだけでは不十分であり、実務の行動観察研究を重点的に行う必要がある。観察研究の多くは対象を撮影、録音した動画、音声を紹介して行われる。従来、分析は対象となる行動や発話のラベリングを行い発生頻度などの統計量を評価する質的研究のアプローチがとられることが多い。一方レジリエンス工学の観察研究では、実務者がどのような状況の変化に対し、どのように対処し、結果としてどのような状況を形成したか記録する必要がある。単純なラベリングと統計量だけでは、状況や行動の連関を分析することは困難である。この問題に対処するためには、まず「状況」とは何かについて理論的に考察し、状況の構成要素と構造を形式化する必要がある。形式に従って状況と行動を記録することで、従来手法よりも客観的かつ効率的に実務者のレジリエンスを記述、分析、考察できることが期待される。本研究では、状況の理論的な形式化を行い、それらの有用性を実践的に検証するために、RAG業務をケーススタディとして実業務のレジリエンス分析を行った。本研究は東京大学、東北大学、電力中央研究所と共に3か年計画で実施し、今年度は第2年度である。

## 2. 状況の形式化

人間が認識し得るものはすべて状況たり得るが、人間が認識し得ないものはすべて状況たり得ないという仮説を立てる。この仮説から、状況の記述形式は人間の認識の記述形式と一致することが推論される。よってここでは、人間の認識がどのような形式に従うかを考えればよい。本研究では、状況/認識を構成する要素を次の六つの概念であると理論だてる。まず Kant に従い、第一に「空間」第二に「時間」を基本概念とする。そして、第三に空間を充填する「実体」、第四に時空間を充填する「事象」を基本概念とする。第五に実体や事象が持つ特徴である「状態」を基本概念とする。最後の基本概念は認識が持つ「様相」である。様相とは「～だった（記述的様相）」「～だろう（予述的様相）」「～べきである（規範的様相）」「～が可能である（可能的様相）」という認識の方向性を指す。

## 3. RAG 業務のレジリエンス分析

RAG業務（Remote Air-Ground Communication）とは航空保安業務の一つであり、遠隔地にいる運航情報官（運情官）が空港に離着陸する航空機のパイロットに対して行う情報提供業務である。RAG業務を対象としてレジリエンス分析を行った。具体的には①研修に用いられる交信要領と②運情官 A による通常業務の映像（8260 秒間分）を用いて、実務者の適応的行動を発見した。なお①は規範様相、②は記述様相の性質を持つデータである。図 1-3 はデータ②における事象の移動時率（ある時点の前後 250 秒間に当該事象が生起していた時間の割合）を示した結果である。図 1 は運情官の行為事象の移動時率である。発話/筆記/画面操作と処理機数との積率相関係数はそれぞれ 0.70, 0.51, 0.29 であり、特に画面操作の係数値が低い。これは作業負荷が高い時に優先度の低い画面操作行動を省略する適応的行動だと解釈できる。図 2,3 はそれぞれ着陸、離陸する機体のパイロットが参加した発話の移動時率である。離陸時の方がタスクのタイミングの差異が大きい。これは、着陸機はアプローチに入った際に通常、形式的にプロセスが流れるのに対し、離陸機は状況によってプロセスの停止や待機が起りやすい特徴があるた

めである。運情官は、遅延の発生に際してパイロットへの事情説明や管制との調整を行っている。これらの行動はマニュアルには記載されていない適応的行動と言える。

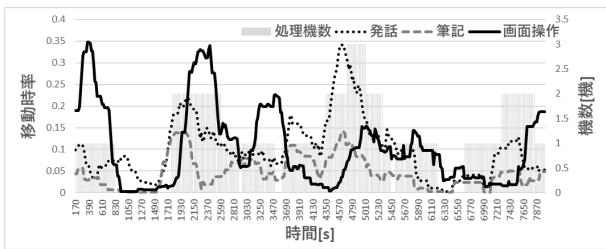


図1 運情官Aの行為

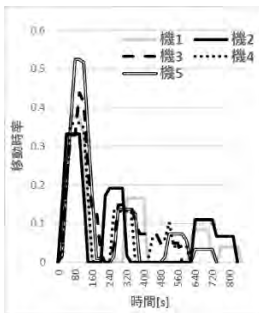


図2 着陸時発話

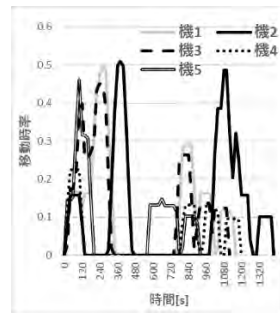


図3 離陸時発話

#### 4. まとめ

本研究では状況を形式化する理論を提案し RAG、業務における適応的行動の発見とその有用性を実践的に検証した。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19H02384 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] Hollnagel, E., et al.: “Resilience Engineering: Concepts and Percepts”, 2006.

担当領域 監視通信領域

担当者 ○ニッ森 俊一

研究期間 令和2年度～令和4年度

## 1. はじめに

近年、自動車事故防止のための安全システムへの適用を中心に、ミリ波レーダ等を用いた運輸安全技術に関する議論や、関連する安全システムの研究開発が国内外で活発に行われている。自動車分野においては低コスト化に伴い、実用化が進み安全システムの装備率も年々増加している。

こうした背景の中、提案者らの研究グループでは、これまで76 GHz帯ミリ波レーダを中心センサデバイスとして、ヘリコプタの前方2マイル程度に存在する送電線等の障害物を探知するための前方監視用ミリ波レーダを開発している。従来の前方監視用ミリ波レーダの最も大きな課題の一つとして、探知対象物の探知率向上の課題と小型化の要求がある。送電線等から反射波を取得するため、パラボラ反射板等の3次元構造を有するアンテナを機械走査することで、高利得のペンシルビームを得ていた。一方、パラボラアンテナは容積が大きくなると同時に、機械走査となるため、探知対象物へのビーム照射率およびデータ更新頻度に制限がある。これらから、送電線等の低RCSの線状障害物を、1マイル以上の遠距離で高頻度に探知するための新たなレーダ技術が必要であることが明らかとなった。

## 2. 研究の概要

本研究の目的は、小型平面アンテナ構造かつ線状障害物を高頻度で検出可能な性能を有するミリ波レーダを、MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) レーダ技術に基づいて実現することである。具体的には、次の三項目を、実験と数値解析の両面から、3か年計画で研究を進める。

- (1) 送電線等の線状障害物探知に適したミリ波平面アンテナ構築技術：構造の異なる複数の送電線や鉄塔等のRCS特性を測定評価し、アンテナに求められる偏波特性等を明らかにする。
- (2) ミリ波MIMOアンテナアレイによるアンテナ開口面合成技術：線状障害物の探知に適したMIMO合成アンテナ特性を実現する。従来パラボラ反射板アンテナを用いて機械走査を行っていた方位角方向走査について、MIMO開口面合成技術によるアンテナアレイを用い、高速指向性電子制御を実現する。
- (3) MIMOレーダを用いた長距離からの線状障害物探知

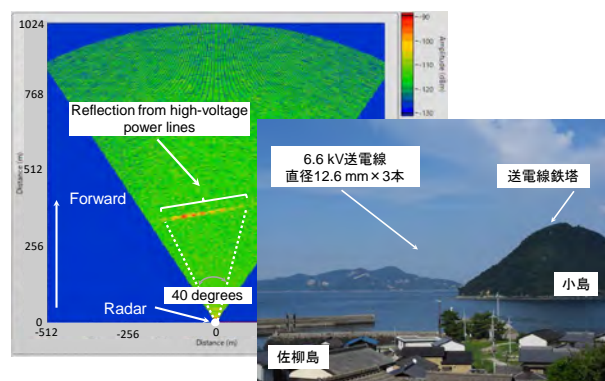


図1. 76 GHz 帯ミリ波レーダを用いた小線径高圧送電線の反射電力測定結果例

技術：線状障害物のRCS評価結果から、ミリ波MIMOレーダアンテナの方位角方向に必要な送受信アレイ数を明らかにする。

## 3. 研究成果

令和2年度は主として、高圧送電線等のヘリコプタ前方障害物のミリ波帯RCS (Radar Cross Section) 特性評価を評価した。図1に測定評価を実施した高圧送電線反射電力特性を示す。また、FDTD (Finite-difference time-domain method) 数値解析によるミリ波帯平面回路アンテナの基本設計、およびミリ波MIMOアンテナアレイによるアンテナ開口面合成法および信号処理法の分析調査を実施した。

## 4. まとめ

次世代ヘリコプタ前方障害物探知センサに適用するミリ波MIMOレーダを実現するための基礎検討を実施した。令和3年度は、アンテナ素子等の航空機用ミリ波MIMOレーダを実現するための要素技術検討を実施する。

本研究はJSPS科研費 JP20K04931の助成を受けたものです。

## 掲載文献

- (1) ニッ森 俊一 他, “ヘリコプタ前方障害物監視用76 GHz小電力ミリ波レーダを用いた小線径高圧送電線からの反射電力測定-実環境におけるBragg散乱等の反射特性評価-”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 120, no. 371, SANE2020-61, pp. 19-24, Feb. 2021.

担当領域 監視通信領域

担当者 ○森岡 和行

研究期間 令和2年度～令和5年度

## 1. はじめに

携帯電話システムの発展により今や陸上のどこにいてもインターネットにつながる世界が実現している。その中で未だに洋上のみが情報から隔絶されている状況にある。衛星通信の発展により改善されているものの、衛星通信システムは地上システム、宇宙システム、機上システムからなる大規模なシステムであり通信コストが高いことが欠点である。さらに、衛星通信の通信速度は低速であり、遅延も大きい。特に、現場のパイロットからは、洋上で航路上における乱気流等の気象情報を共有できるシステムが切望されている。航路上における広域な気象情報を共有することができれば、事前に最適な航路を選択でき燃費削減につなげることができる。本研究では、機上・船上システムからのみ構成できる、低コスト・ローカル情報共有システムの実現をめざし、物理層、MAC層、アプリケーション層の観点から要素技術の研究開発を行う。

## 2. 研究概要

物理層に関しては、長距離大容量ミリ波通信技術の開発を行う。本研究では、信頼性の要求される航空無線に適した通信方式として STBC-CPM (Space Time Block Coded - Continuous Phase Modulation) 方式のミリ波通信への適用について検討を行う。

MAC層に関しては、遅延耐性無線マルチホップ通信技術の開発を行う。航空機の移動に伴い、高速で変化する3次元トポロジー上において、いかに効率的にマルチホップ通信を実現するかについて検討する。

アプリケーション層に関しては、気象情報等のデータを効率的に統合・共有・更新するためのローカルデータベース管理技術に関する検討を行う。

本研究は4か年計画で実施する。

## 3. 研究成果

初年度である本年度は、MAC層に関して、シミュレーションにて提案システムの評価を行うための準備を実施した。ネットワークシミュレータ上に航空機の移動や通信モデル・電波伝搬モデルを構築して評価するため、「Flightradar24」と呼ばれる飛行中の民間航空機の現在位置をリアルタイム表示するウェブサービスを利用し、実際の航跡データを用いた航空機移動モデルをネットワ

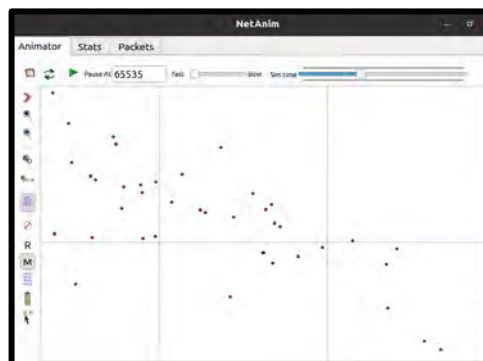


図1. 航空機移動モデル

ークシミュレータへ組み込んだ。図1にシミュレータの画面を示す。図中の小さな点が航空機であり、実際の航空機の動きを再現することができる。ネットワークシミュレータにはオープンソースの ns3 を用いた。次年度以降、本シミュレータを用いて具体的なプロトコル、アプリケーション等について検討していく予定である。

また本年度は、物理層に関するシミュレーション結果を資料論文としてまとめた[1]。さらにシミュレーションを実機評価するため、物理層の評価を行うための準備として、SDR (Software Defined Radio) プラットフォームの選定を行った。次年度以降この SDR 評価システムを用いて、航空無線に適した変調方式の開発・評価を実施していく予定である。

## 4. まとめ

本研究では、機上・船上システムからのみ構成できる、低コスト・ローカル情報共有システムの実現をめざし、物理層、MAC層、アプリケーション層の観点から要素技術の研究開発を行っている。次年度以降、具体的な方式検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究はJSPS科研費20K19795の助成を受けたものです。

掲載文献

[1] 森岡和行, 平野拓一, 山崎悟史, 武田茂樹, “進展するデジタル無線通信技術—マルチアンテナシステムの概要と動向—,” 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌), vol.141, pp.111-122, 2021.

## 位置検証と位置推定の融合：受信信号強度を例として【競争的資金研究】

担当領域 監視通信領域  
担当者 ○長縄 潤一  
研究期間 令和2年度～令和4年度

### 1. はじめに

「位置検証」とは移動体が報告した位置情報の正しさを検証するために、無線信号の特徴量との整合性を調べる技術である。比較的新しい技術であるため、基礎的な理論の確立が求められている。他方、「位置推定」は無線信号の特徴量から移動体位置を推定する技術で、多数の研究成果と応用例が蓄積されている。位置検証と位置推定の代表例として、ADS-B 成りすまし対策と広域マルチラレーションが挙げられる。両者は無線信号を用いるなどの共通点があり、直感的には類似性があるが、これまで独立して研究されてきた。位置検証の理論を確立し、位置推定と統合できれば、発展の基盤となることが期待される。

### 2. 研究の概要

本研究はJSPS科研費20K14743の助成を受けている。本研究では、位置検証の理論を位置推定と統合した形で確立することを目指す。これにより、位置推定の分野で蓄積された研究成果を位置検証に取り込むことができるようになり、飛躍的な発展が期待される。本目的を達成するために、以下項目を実施している。

- ① 位置検証と位置推定を統合した理論の導出
- ② 理論の活用による有用な知見の導出
- ③ ADS-B応用を通じた理論の実践的検証

なお、利用する特徴量として受信信号強度を想定しているが、ADS-B応用の際には信号到達時間差も検討予定である。本研究は3ヶ年計画であり、本年度は主に①に取り組み、次年度に②と③を実施するための準備を進めた。

### 3. 研究の成果

#### 3.1 理論の導出

図1に導出の枠組みを示す。まず、土台として、位置検証および位置推定に共通の前提条件（誤差分布など）を設定した。そして、位置検証と位置推定に対してそれぞれの性能を導出した。位置検証の性能は検定量分布・検出率・誤検出率である。受信信号強度から逆算した距離との比較により、位置情報の正しさを検証する。これを仮説検定の形で定式化し、性能を導出した。一方、位置

推定に対しては、従来よく知られた最小二乗法による定式化を利用して精度を導出した。

それぞれの性能を導出したのち、結果の相互変換を行った。例えば、位置推定から位置検証への変換は、推定された位置と移動体が報告した位置の比較に関する仮説検定となる。このように、共通の前提条件と結果の相互変換により、理論統合の枠組みを構築した。今後、数値計算や実験により理論の検証と改善を進める計画である。

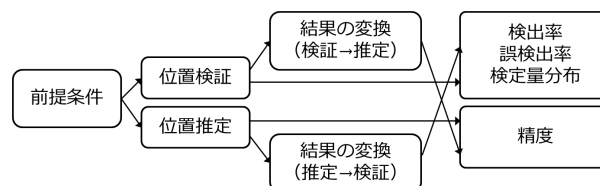


図1 理論導出の枠組み

#### 3.2 知見の導出および実践的検証に向けた準備

次年度以降、理論を様々な条件で数値計算するパラメータスタディにより、位置検証と位置推定を評価・比較する計画である。その結果から、性能向上に向けた知見として両者の最適な組み合わせを得ることが期待される。これに向け、本年度は計算プログラムの準備を進めた。

さらに、理論の前提条件や結果の妥当性の検証のため、ADS-Bへ応用する実験も計画している。これに向け、本年度は実験機材と解析用プログラムの準備を進めた。基礎的な試験により、受信信号強度から航空機までの距離を推定できることを確認した。

### 4. まとめ

本年度は、位置検証と位置推定を統合した理論の導出と次年度に向けたプログラムの準備等を進めた。次年度以降は、パラメータスタディおよび実験を通じて、理論の検証と改善を進める計画である。

#### 掲載文献

- [1] J. Naganawa, "Theoretical Analysis of Position Report Verification using Distance-based Localization," International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) 2020, Osaka, Japan, Jan. 2021.

## 4 研究所報告

当研究所の令和2年度における研究所報告は、下記のとおりである。

No	発行年月	論文名	領域名	著者
133	令和2年7月	[技術資料] ARAIM (Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring)のインテグリティ理論と故障衛星排除アルゴリズム	航法システム領域	麻生 貴広
		[技術資料] 運航管理データを用いた有視界飛行方式の飛行傾向分析	航空交通管理領域	平林 博子

## 5 受託研究

当研究所の令和2年度における受託研究は下記のとおりである。

件名	委託元	実施主任者
全機地上IPL試験 (TC) 委託作業 ※1	三菱航空機 (株)	米本 成人
(委託元からの指示により非公開)	(委託元からの指示により非公開)	坂井 丈泰
令和2年度「測位補強サービスの性能評価に係る評価手法の指導及び検証」	(一財)日本宇宙フォーラム	北村 光教
MVR受託研究 7及び8号機 特性試験	住友重機械工業 (株)	米本 成人
令和2年度におけるCNS性能管理業務に係る支援作業におけるMSASサービスの性能保証に係る作業支援	(一財)航空保安無線システム協会	北村 光教
スワップナーム空港GBAS実証実験に向けた「電離圏調査及び電離圏脅威モデルの構築」の技術支援	(一財)航空保安無線システム協会	齋藤 享
令和二年度高高度無人機による制御用通信中継技術に関するアドバイザ業務	(株)三菱総合研究所	米本 成人
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	総務省	齋藤 享
(委託元からの指示により非公開)	(委託元からの指示により非公開)	河村 暁子
洋上空域における衝突危険度推定に係る支援作業	(一財)航空交通管制協会	森 亮太
2020年度 将来の航空交通システムに関する長期ビジョンの実現のための計画の策定等に関する調査 分析支援	(株)三菱総合研究所	岡 恵
関西空域における最適な業務形態等及び管制処理能力の算出に関する調査に関する検討支援	(株)三菱総合研究所	平林 博子
準天頂衛星を利用したSBASによるLPV提供に関する整備の認証作業に係る技術支援	(一財)航空保安無線システム協会	渡邊 浩志
IPL測定支援及び機器サポート	ナビコムアビエーション (株)	河村 暁子
電波解析シミュレーション支援業務	(株)日本空港コンサルタンツ	長縄 潤一
MVR受託研究 9及び10号機 特性試験	住友重機械工業 (株)	米本 成人

※1は前年度からの継続案件。

## 6 共同研究

当研究所の令和2年度における共同研究は下記のとおりである。

実施領域	相手方	研究課題	契約期間
監視通信領域	日本無線（株）	光ファイバ接続型受動型監視システムの遠隔クロック同期技術の基礎的研究	H28.5.25 ~ R3.3.31
監視通信領域	（国研）情報通信研究機構	レーダー反射断面積の高精度測定に関する研究	H28.5.27 ~ R3.3.31
監視通信領域	（学）福岡工業大学	地上デジタル放送波を利用したバイスタティックレーダシステムに関する研究	H28.7.21 ~ R5.3.31
航法システム領域	日本電気（株）	準天頂衛星システムを用いた高精度衛星測位補強技術の開発及び実証実験	H28.10.31 ~ R3.3.31
航法システム領域	三菱電機（株）	後方乱気流検出装置による高頻度かつ複合的な観測データ収集に関する研究	H28.12.15 ~ R3.3.31
航法システム領域	古野電気（株）	準天頂衛星システムL5S信号に対応したGNSS受信装置に関する研究	H29.3.14 ~ R5.3.31
航空交通管理領域	（大）東京都立大学	機械学習を用いた航空交通データ分析の研究	H29.5.25 ~ R3.3.31
監視通信領域	（有）アイ・アール・ティー	ドローンの受動型検知技術に関する基礎研究	H29.7.24 ~ R2.8.31
監視通信領域	（学）金沢工業大学	導電性皮膜を施したプラスチック材料の電波特性の研究	H29.11.8 ~ R3.3.31
	（株）フジワラ		
監視通信領域	（大）はこだて未来大学	滑走路監視のための信号処理に関する研究	H29.12.7 ~ R3.3.31
監視通信領域	（大）高知工科大学	超広帯域光変調器を用いた計測システムの研究	H29.12.22 ~ R5.3.31
航法システム領域	（国研）情報通信研究機構	宇宙天気現象が航空航法に与える影響及び航空航法における宇宙天気情報の活用に関する共同研究	H30.4.1 ~ R5.3.31
	（大）京都大学		
	（大）名古屋大学		
監視通信領域	（国研）宇宙航空研究開発機構	ヘリコプタの送電線等障害物警報システムに関する研究（その3）	H30.7.1 ~ R3.3.31
	北海道放送（株）		
監視通信領域	（大）九州大学	クローズドパラレル空港における航空機運航に関する基礎的研究	H30.7.12 ~ R3.3.31
航空交通管理領域	（大）電気通信大学	便益バランスのためのアルゴリズム開発に関する研究	H30.7.25 ~ R3.3.31
監視通信領域	（大）新潟大学	バイスタティック測位による航空機の監視技術の実験的研究	H30.8.22 ~ R4.3.31
監視通信領域	（大）室蘭工業大学	無人航空機の監視通信システムの研究	H30.8.22 ~ R4.3.31
監視通信領域	（株）ワカ製作所	光ファイバー型無線機の接続を容易にする光ファイバー無線送受信機の研究開発	H30.8.31 ~ R5.7.31
監視通信領域	（国研）情報通信研究機構	LPWA/DTN環境における光網制御管理機能の再建技術の研究	H30.11.14 ~ R3.3.31
航法システム領域	ドイツ航空宇宙センター	次世代GBAS及び宇宙天気情報利用に関する共同研究	H30.12.20 ~ R3.12.20
監視通信領域	日本電気（株）	放送型自動位置情報伝送監視に関する共同研究	H31.3.13 ~ R3.3.31
監視通信領域	（大）東京都立大学	ADS-B/SSRモードS情報を用いた航空交通流の時間管理技術の研究	H31.4.1 ~ R5.3.31
航空交通管理領域	気象庁気象研究所	航空機の動態情報取得システムからの気象データによる数値予報の精度向上と航空機の安全運航に関わる気象予測情報の高度利用のための研究	H31.4.1 ~ R5.3.31
監視通信領域	（国研）宇宙航空研究開発機構	バイスタティックレーダシステムの高精度・高分解能化に関する研究	R1.6.11 ~ R3.3.31



実施領域	相手方	研究課題	契約期間
航空交通管理領域	(国研) 宇宙航空研究開発機構	航空交通流管理のための運航パフォーマンス評価指標の開発	R1. 7. 29 ~ R4. 3. 31
監視通信領域	(学) 武蔵野美術大学	リモートタワーシステムのユーザーインターフェースデザインに関する研究	R1. 8. 18 ~ R3. 3. 31
監視通信領域	(学) 金沢工業大学	飛行体から得られるリアルタイム情報を用いた飛行特性予測の研究	R1. 9. 9 ~ R5. 3. 31
監視通信領域	(大) 北海道大学	航空機データ通信 (WAIC) における電磁環境評価に関する研究	R1. 10. 7 ~ R4. 3. 31
監視通信領域	DSNA フランス航空局技術管理センター	航空機の衝突回避と無人航空機の空域統合に関する研究	R1. 11. 4 ~ R4. 11. 4
航法システム領域	(学) 立命館大学	積雪底面にあるGNSSアンテナのRTK/PPPによる測位	R2. 1. 17 ~ R3. 3. 31
	(国研) 防災科学技術研究所		
航空交通管理領域	(学) 慶應義塾大学	Semi-CDO方式と到着管理アルゴリズムの開発	R2. 4. 1 ~ R5. 3. 31
航空交通管理領域	(大) 横浜国立大学	関西三空港圏の空域容量拡大リスクに関する研究	R2. 4. 1 ~ R3. 3. 31
航法システム領域	(大) 電通通信大学	Es層によるVHF帯航空航法・通信電波の異常伝播の影響評価と監視に関する研究	R2. 4. 1 ~ R4. 3. 31
監視通信領域	日本電気 (株)	アジア太平洋地域におけるSWIM基盤の構築に向けた国際連携実験に関する研究開発	R2. 4. 1 ~ R3. 3. 31
航法システム領域	(大) 名古屋大学	オーロラパッチ内部の分極電場	R2. 4. 1 ~ R3. 3. 31
航空交通管理領域	(大) 東京都立大学	太平洋上空の運航者設計経路生成アルゴリズムの開発及び評価	R2. 4. 27 ~ R3. 3. 31
航法システム領域	三菱電機 (株)	日本周辺の高精度測位補強サービス (CLAS) の電離圏遅延量予測モデルの精度向上に関する検討	R2. 5. 18 ~ R3. 3. 31
航空交通管理領域	(学) 日本工業大学	数値シミュレーションモデルを用いた国際交通流の最適化	R2. 6. 15 ~ R3. 3. 31
航空交通管理領域	(大) 東京大学	大規模空港における到着・出発・空港面の航空交通管理の研究	R2. 7. 1 ~ R6. 10. 30
航法システム領域	東日本旅客鉄道(株)	GNSSを用いた列車位置検知における保護レベル算出手法の改良	R2. 7. 13 ~ R3. 2. 15
航法システム領域	ベトナム社会主義共和国科学技術アカデミー・地球物理研究所	ベトナムにおけるGBASのための電離圏観測及び監視に基づく技術支援	R2. 9. 1 ~ R3. 3. 31
航空交通管理領域	(学) 東京理科大学	航空交通流のシミュレーション評価に関する研究	R2. 9. 4 ~ R4. 3. 30
監視通信領域	(国研) 宇宙航空研究開発機構	無人機運航管理への応用を想定した小型有人航空機探知技術の基礎検討	R2. 9. 9 ~ R4. 2. 28
監視通信領域	(国研) 情報通信研究機構	リニアセルレーダーシステムの応用研究開発	R2. 10. 27 ~ R4. 3. 31
	(学) 早稲田大学		
	(株) 日立国際電気		
航法システム領域	タイ王国モンクット王工科大学	Ionospheric Effects Characterization Program	R2. 10. 29 ~ R7. 3. 31
監視通信領域	日本無線 (株)	RoF技術を用いたマルチラレーションシステムの海外展開を通じた周波数の国際協調利用促進に関する評価研究	R2. 12. 1 ~ R4. 3. 31
航空交通管理領域	(国研) 宇宙航空研究開発機構	無人航空機実運航データに基づくUTM飛行ルールと運航計画支援技術の研究	R2. 12. 9 ~ R3. 2. 28
	(大) 東京都立大学		
	TerraDrone (株)		
	(株) ウェザーニューズ		
	(株) ゼンリン		
監視通信領域	(株) KDDI総合研究所	レジリエンスエンジニアリングに基づくサービスデザインに関する共同研究	R3. 1. 12 ~ R3. 3. 31

実施領域	相手方	研究課題	契約期間
航法システム領域	(大) 東京大学	DFMC SBAS信号認証に関する研究・実証実験及びフィールドテスト	R3.2.1 ~ R4.3.31
監視通信領域	日本無線 (株)	光ファイバ接続型受動型監視システムの電波輻射域における性能実証	R3.2.12 ~ R4.3.31

## 7 研究発表

### (1) 第20回研究発表会（令和2年9月30日、10月1日）web開催

令和2年9月30日

1. 電子航法分野の国際標準化活動への取り組み  
国際標準化センター 福島 荘之介
2. 海上技術安全研究所の国際標準化活動への取り組み  
海上技術安全研究所 宮崎 恵子
3. 次世代SBASプロトタイプの航空機を用いた性能評価  
航法システム領域 北村 光教  
渡邊 浩志  
坂井 丈泰
4. GNSS代替のためのDME地上局のインテグリティ保証  
航法システム領域 毛塚 敦  
斉藤 真二
5. GBAS海外展開のための電離圏環境評価  
航法システム領域 齋藤 享  
吉原 貴之  
ベトナム科学技術アカデミー地球物理研究所 Le Huy Minh  
モンクット王工科大学ラカバン Pornchai Supnithi

令和2年10月1日

6. ADS-D位置検証技術の実用化に向けた考察  
監視通信領域 長縄 純一  
宮崎 裕己
7. 滑走路異物監視システムの高度化に向けた研究開発  
監視通信領域 ニッ森 俊一  
森岡 和行  
河村 暁子  
米本 成人  
(株)日立国際電気 柴垣 信彦  
佐藤 洋介  
加島 謙一
8. SWIMオンロジーの構築と応用に関する研究  
監視通信領域 江上 周作  
呂 暁東  
古賀 禎  
住谷 泰人  
森岡 和行  
北折 潤
9. 軌道予測の高精度化に向けた悪天回避経路生成に関する検討  
航空交通管理領域 中村 陽一  
瀬之口 敦  
平林 博子
10. 大規模空港における継続降下運航の運用拡大に関する研究  
航空交通管理領域 平林 博子  
ピクRAMシンハ ナヴィンダ  
虎谷 大地  
瀬之口 敦  
岡 恵  
江口 昌弘  
福島 幸子

#### ポスターセッション

- 1 アジア・オセアニア地域における準天頂衛星L5S 信号の性能評価  
台湾・国立成功大学 Shau-Shiun Jan
- 2 SBASによるGNSS信号認証に関する研究  
東京大学 Dinesh Manandhar
- 3 ILS電波干渉シミュレーターの開発  
監視通信領域 本田 純一  
松永 圭左  
毛塚 敦  
田嶋 裕久
- 4 実験用航空機を用いたAeroMACSの覆域拡大に関する実証検討  
監視通信領域 森岡 和行  
呂 暁東  
長縄 潤一  
江上 周作  
宮崎 則彦  
米本 成人  
住谷 泰人  
河村 暁子
- 5 UPR 環境下における空域編成への数理最適化の適用に関する研究  
筑波大学 猿渡 康文  
防衛大学校 鶴飼 孝盛  
中央大学 鳥海 重善  
航空交通管理領域 蔭山 康太

## (2) 所外発表

表題名	発表者	発表年月	発表学会/機関名/刊行物
ED-240A/Abis/B, Review by ENRI and Suggested Enhancements/Changes (ED-240A/Abis/B レビュー (ENRIからの追加および変更の提案))	ブライアン・マク 井上論	令和2年4月	EUROCAE WG-100
Doppler shift of QZS-7 satellite (準天頂衛星7号機のドップラーシフト)	松田国幸 (航空局) 北村光教 井下亨 (JRANSA)	令和2年4月	ICAO Navigation Systems Panel (NSP)-GNSS SARPS Working Group and Validation Working Group Meetings (GSSVWG)
Status of IM related research activities in Japan (日本のIM関連研究についての最新報告)	伊藤恵理 大津山卓哉	令和2年4月	ICAO Surveillance Panel (SP)-Airborne Surveillance (AIRB)/9
Doc 9924 CP for a New Common Clock Architecture (新Common Clock構成に関するDoc 9924の改定草案)	本田純一 宮崎裕己 角張泰之 古賀禎 大津山卓哉	令和2年4月	ICAO Surveillance Panel (SP)-Aeronautical Surveillance Working Group (ASWG)/11
Analysis of the 1030-1090 Signal Environment in Japan (日本の1030/1090MHz信号環境解析結果)	大津山卓哉 宮崎裕己 本田純一	令和2年4月	ICAO Surveillance Panel (SP)-Aeronautical Surveillance Working Group (ASWG)/11
Development of a Flight Time Uncertainty Model for 4D Trajectory Management (4次元軌道管理のための飛行時間の不確かさモデルの開発)	武市昇 (東京都立大学) 山田大輝 (東京都立大学) 瀬之口敦 古賀禎	令和2年4月	Journal of Air Transportation
位相平坦かつ軸対称なスポットを有する集束型誘電体レンズアンテナの実験的評価	橋本真輝 (青山学院大学) 黒田哲史 (青山学院大学) 須賀良介 (青山学院大学) 毛塚敦 橋本修 (青山学院大学)	令和2年4月	電気学会 電子デバイス研究会
航空監視用広域マルチラテレーションにおけるGPS障害対策と評価方法	長縄潤一 田嶋裕久 宮崎裕己	令和2年4月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
航空交通データ (CARATS Open Data) の提供と研究開発への活用	岡恵 福田豊 上島一彦	令和2年4月	日本航空宇宙学会誌 (解説)
航空機の地上走行情報の活用	青山久枝	令和2年4月	国土交通省
EUROCAE ED-240 MASPS用提案文書	ブライアン・マク 井上論	令和2年5月	EUROCAE WG-100
Utilization of Mode-S DAPs data for weather forecast (モードS DAPsデータの気象予測への活用)	宮崎裕己 瀬之口敦	令和2年5月	ICAO Asia/Pacific Air Navigation Planning and Implementation Regional Group (APANPIRG) Mode S Downlinked Aircraft Parameters (DAPs) Working Group ?
Field-Trial Experiments of an IoT-based Fiber Networks C/M-Plane Early Disaster Recovery via Narrow-band and Lossy Links System (FRENLL) (狭帯域かつ損失が多いリンクを経由したIoTに基づく光ネットワークの制御管理プレーン初期障害復旧の屋外実験)	Sugang Xu (情報通信研究機構) Goshi Sato (情報通信研究機構) Masaki Shiraiwa (情報通信研究機構) Katsuhiko Temma他 (情報通信研究機構) Takehiro Tsuritani (KDDI総合研究所) 米本成人	令和2年5月	IEICE TRANSACTIONS on Communications (電子情報通信学会 英文論文誌B)
Anomalous propagation of radio waves from distant ILS localizers due to ionospheric sporadic-E (遠方のILSローカライザ電波のEs層による異常伝播)	坂井純 (電気通信大学) 齋藤享 細川敬祐 (電気通信大学) 富澤一郎 (電気通信大学)	令和2年5月	Space Weather
GBAS VDBの覆域劣化とシステムへの影響評価	毛塚敦 齊藤真二	令和2年5月	電子情報通信学会 和文論文誌C
第2回ナレッジグラフ推論チャレンジ2020開催報告～説明性のある人工知能システムを目指して～	川村隆浩 (農業・食品産業技術総合研究機構) 江上周作 松下京群 (富士通研究所) 田村光太郎 (野村総合研究所/NRIデジタル) 角田充弘 (野村総合研究所) 外園康智 (野村総合研究所) 黒川茂莉 (KDDI総合研究所) 鶴飼孝典 (富士通研究所) 古崎晃司 (大阪電気通信大学)	令和2年6月	2020年度人工知能学会全国大会 (第34回)
Observations of equatorial plasma bubbles using a low-cost 630.0-nm all-sky imager in Ishigaki Island, Japan (石垣島における低コスト630.0nm全天イメージャによるプラズマバブルの観測)	細川敬祐 (電気通信大学) 齋藤享 高見晃平 (電気通信大学) 小川泰信 (国立極地研究所) 大塚雄一 (名古屋大学) 塩川和夫 (名古屋大学) Chia-Hung Chen (台湾・国立成功大) Chien-Hung Lin (台湾・国立成功大)	令和2年6月	Earth, Planets and Space
Doc 9924 Change Proposal for a New Common Clock Architecture (新Common Clock構成に関するDoc 9924の改定案)	本田純一 宮崎裕己 角張泰之 古賀禎 大津山卓哉	令和2年6月	ICAO Surveillance Panel (SP)-Aeronautical Surveillance Working Group (ASWG)-Technical Subgroup (TSG)/11
Analysis of the 1030-1090 MHz Signal Environment in Japan (日本における1030-1090MHz信号環境の解析)	大津山卓哉 本田純一 宮崎裕己	令和2年6月	ICAO Surveillance Panel (SP)-Aeronautical Surveillance Working Group (ASWG)-Technical Subgroup (TSG)/11
Report on the Sixth ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019) (第6回ENRI国際ワークショップ(EIWA2019)報告)	福田豊	令和2年6月	IEICE Communications Society - GLOBAL NEWSLETTER
Digital Transformation behind the Air Transport (空の世界の往来に、デジタル変革をもたらす)	伊藤恵理	令和2年6月	学術の動向 (特集「学術と社会の未来を考える」)
TCAS RAによる回避操作の状況及び対応	瀬之口敦 白川昌之 航空事業安全室 (国土交通省航空局安全部)	令和2年6月	航空安全情報分析委員会
ドイツでの在外研究報告	本田純一	令和2年6月	航空無線104号
航空分野における安全への取り組み	中島徳頼	令和2年6月	筑波大学 リスク・レジリエンス工学概論
レーダの仕組みと応用技術 第1回動作原理と基本特性	米本成人	令和2年6月	トランジスタ技術2020年7月号
航空ビジョン2040	麻生茂 (久留米工業大学) 伊藤一宏 (日本航空宇宙工業会) 伊藤健 (宇宙航空研究開発機構) 伊藤真 (防衛装備庁航空装備研究所) 大石勉 (IH) 小林哲也 (久留米工業大学) 鈴木真二 (東京大学) 谷泰寛 (崇城大学) 長嶋哲矢 (三菱重工業) 永森久幸 (川崎重工業) 西澤敏雄 (宇宙航空研究開発機構) 福田豊 宮川淳一 (名古屋大学)	令和2年6月	日本航空宇宙学会ホームページ

表題名	発表者	発表年月	発表学会/機関名/刊行物
機能共鳴分析手法による航空管制業務のモデル化	青山久枝 狩川大輔 (東北大学大学院工学研究科) 飯田裕康 (大原記念労働科学研究所)	令和2年6月	日本人間工学会第61回大会
日本における航空管制と交通ネットワークの現状と展望について 2020年4月6日事例解析 (ENRI取得データ)	古賀禎 吉原貴之 瀬之口敦 藤井直樹 丸塚康弘 (航空局 管制課 空域調整整備室)	令和2年6月	室蘭工業大学 生産システム工学概論 第7回RECAT導入検討WG会議
A monitoring network for anomalous propagation of aeronautical VHF radio waves due to sporadic E in Japan (日本における航空VHF電波のEs層による異常伝播の監視ネットワークについて)	細川敬祐 (電気通信大学) 坂井純 (電気通信大学) 富澤一郎 (電気通信大学) 齋藤孝 津川卓也 (情報通信研究機構) 西岡未知 (情報通信研究機構) 石井守 (情報通信研究機構)	令和2年7月	Earth, Planets and Space
Cooperative Work Analysis in Case of Aerodrome Flight Information Services (飛行場援助業務における協調業務分析)	井上諭 菅野太郎 (東京大学大学院)	令和2年7月	Human Computer Interaction International 2020
A study of equatorial plasma bubble structure using VHF radar and GNSS scintillations over the low-latitude region (VHFレーダーとGNSSシンチレーションを用いた磁気低緯度プラズマバブルの構造に関する研究)	Acharaporn Bumrungrit 齋藤孝 Pornchai Supnithi (タイ・モンクット王工科大学ラカバン)	令和2年7月	JpGU-AGU Joint Meeting 2020
Preparation for TBO Demo (TBO実証実験に向けて)	呂曉東	令和2年7月	Multi-Regional TBO Demonstration Kickoff Meeting
東京海洋大学大学院生に対する集中講義の資料	天井治	令和2年7月	東京海洋大学
レーダーの仕組みと応用技術 第2回超小型モジュールを例にしたレーダーの高周波回路	米本成人	令和2年7月	トランジスタ技術2020年8月号
海洋分野の点検におけるドローン技術活用に関する研究 8章 法制度面の動向調査	河村曉子 平林博子	令和2年7月	国土交通省技術政策課
GPS/GNSSの基礎と高精度測位技術	坂井文泰	令和2年7月	測位航法学会 全国大会セミナー
DFMC SBAS規格化の状況	坂井文泰	令和2年7月	測位航法学会ニューズレター
セキュリティ検査用ハイブリッドイメージングシステムのための合成開口処理による電波イメージングの基礎実験	米本成人 河村曉子 ニッ森俊一 森岡和行 牧田芳男	令和2年7月	電子情報通信学会 マイクロ波研究会
地デジ信号の遅延プロファイルを使った移動体検出	大津山卓哉 本田純一	令和2年7月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
信号到達時間差を用いた航空路監視システムにおける到来角併用の検討	長縄潤一 宮崎裕己	令和2年7月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
目標距離観測値を使用したTDOA測位精度の改善	宮崎裕己 小菅義夫 田中俊幸 (長崎大学大学院工学研究科)	令和2年7月	電子情報通信学会 和文論文誌B
RNP to xLS進入方式の設計と検証	福島荘之介	令和2年8月	CARATS推進協議会 PBN検討WG GNSSアドホック
日中韓実証実験の進捗状況	呂曉東	令和2年8月	CARATS推進協議会 情報管理検討WG
Interference Path Loss Measurement at Wireless Avionics Intra-Communication Band using Beechcraft B300 Aircraft (航空機データ通信 (WAIC) 周波数帯におけるビーチクラフトB300型機の干渉経路損失測定)	ニッ森俊一	令和2年8月	ICAO Frequency Spectrum Management Panel (FSMP)-Working Group (WG)
Measurement-based Analysis and Modeling of Multimode Channel Behaviors in Spherical Vector Wave Domain (測定によるベクトル球面波領域におけるマルチモードチャネルの振る舞いの分析とモデル化)	Yang Miao (トゥウェンテ大学) 羽田勝之 (アールト大学) 長縄潤一 金ミンソク (新潟大学) 高田潤一 (東京工業大学)	令和2年8月	IEEE Transactions on Wireless Communications
Pilot-Centered Evaluation of Flight-Deck Interval Management Control Laws using an A320 Simulator (A320型 シミュレーターにてパイロットを中心としたFlight-deck Interval Management用制御則を評価)	リーデ・ルファテ 高橋正樹 (慶応義塾大学) 伊藤恵理 Paul Frost (ブラウンシュヴァイク工科大学) Thomas Feuerle (ブラウンシュヴァイク工科大学)	令和2年8月	Journal of Aircraft
Optimization of Interval Management-Speed Planning using SMPSO (SMPSOにてInterval Management-Speed Planningを最適化)	リーデ・ルファテ 伊藤恵理 高橋正樹 (慶応義塾大学)	令和2年8月	The Aeronautical Journal
Evaluation of a Low-Cost ADS-B Receiver as a Tool for Investigating Air-Ground Propagation (空地伝搬検討ツールとしての低コストADS-B受信機の評価)	長縄潤一 宮崎裕己	令和2年8月	The XXXIII General Assembly and Scientific Symposium (GASS) of the International Union of Radio Science
円形仮想アレーを用いた航空機ADS-B信号の2次元方位推定精度の向上に関する実験的検討	伊藤輝 (新潟大学) 山田寛喜 (新潟大学) 長縄潤一 古賀禎	令和2年8月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
ドローンとの情報共有のための有視界飛行方式の飛行計画データ利用に関する一検討	虎谷大地 平林博子	令和2年8月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
ヘリコプタ前方障害物監視用76 GHz小電力ミリ波レーダーを用いた実環境における高圧送電線からの反射電力測定—陸上および海上に設置された高圧送電線の探知性能評価—	ニッ森俊一 宮崎則彦	令和2年8月	電子情報通信学会 無線端末・アンテナシステム測定技術研究会
航空機のEMC対策	米本成人	令和2年8月	月刊EMC企画編集部
Tables of Correspondence between Message Type definition of SARPs original 6-bits and Experimental 2-bit (次世代SBASにおけるメッセージタイプの放送実験用定義とSARPs定義との対応関係)	北村光敦 渡邊浩志 坂井文泰	令和2年8月	電子研ホームページ
Interference Path Loss Measurements of Beechcraft B300 Aircraft at 4 GHz Wireless Avionics Intra-Communication Band (4GHz帯WAIC周波数帯におけるビーチクラフトB300型機の干渉経路損失測定)	ニッ森俊一 宮崎則彦 日景隆 (北海道大学大学院情報科学研究科) 関口徹也 (北海道大学大学院情報科学研究科) 山本学 (北海道大学大学院情報科学研究科) 野島俊雄 (北海道大学大学院情報科学研究科)	令和2年9月	EMC Europe 2020
DME Multipath error on STAR (STARにおけるDMEのマルチパスエラー)	毛塚敦	令和2年9月	EUROCAE WG-107
Passive Radio Imaging of Hybrid Sensing Radar System for Security Inspections (セキュリティ強化に向けた移動物体高度認識レーダー—基盤技術の研究開発検査のためのハイブリッドレーダーシステムの受動電波イメージング)	米本成人 河村曉子 ニッ森俊一 森岡和行 牧田芳男	令和2年9月	European Radar Conference
ICAO NSP GWG IGM ad hoc activities (ICAO NSP GWG IGMアドホックグループの活動について)	齋藤孝	令和2年9月	ICAO Asia and Pacific (APAC) GBAS/SBAS Implementation Task Force 2
Example of ADS-B Position Verification Performance (ADS-B位置検証性能の例)	長縄潤一 宮崎裕己	令和2年9月	ICAO Asia and Pacific (APAC) Surveillance Implementation Coordination Group (SURICG) /5

表題名	発表者	発表年月	発表学会/機関名/刊行物
A/G connectivity tests for SWIM through Wide-area AeroMACS system (広域AeroMACSシステムを通じたSWIMの空地接続試験)	米本成人 森岡和行 長瀬潤一 河村暁子 宮崎則彦	令和2年9月	ICAO Communications Panel (CP) Working Group -Internet (WG-I) /32
Ground-based Interval Management (GIM) related international collaborative research targeting arrivals at Singapore Changi International Airport. (GIMに関連するシンガポールチャンギ国際空港への到着航空交通を対象とした国際連携研究)	伊藤恵理 Michael Schultz (ドレゲン工科大学) Srinivas Athota (南洋理工大学) Vu Duong (南洋理工大学)	令和2年9月	ICAO Surveillance Panel (SP)-Airborne Surveillance (AIRB)/10
Analysis of the 1030-1090 MHz Signal Environment in Japan (日本における1030-1090MHz信号環境の解析)	大津山卓哉 本田純一 宮崎裕己	令和2年9月	ICAO Surveillance Panel (SP)-Aeronautical Surveillance Working Group (ASWG)/12
Doc 9924 CP for a New Common Clock Architecture (新Common Clock構成に関するDoc 9924の改定案)	本田純一 宮崎裕己 角張泰之 古賀禎 大津山卓哉	令和2年9月	ICAO Surveillance Panel (SP)-Aeronautical Surveillance Working Group (ASWG)/12
Analyzing tactical control strategies for aircraft arrivals at an airport using queue-based modeling (待ち行列モデルを利用した到着機のタクトコントロールの戦略に関する分析)	伊藤恵理 Mihaela Mitici (デルフト工科大学)	令和2年9月	Journal of Air Transport Management
Gate-to-Gate Trajectory Based Operation Scenario (Gate-to-Gate軌道ベース運用シナリオ)	呂曉東	令和2年9月	Multi-Regional TBO Demonstration Guided Discussion #1
アカラコリドーにおける複雑化による衝突リスク低減策の効果の解析 -ファーストタイムシミュレーションを用いた衝突リスクの推定-	天井治	令和2年9月	国土交通省航空局
提言 人類の未来を開くフロンティア人工工学的展開のために	大和裕幸 他 (海上・港湾・航空技術研究所他)	令和2年9月	日本学術会議 (提言)
レーダと複数の距離和計測センサによる目標位置推定誤差の解析	小菅義夫 古賀禎 宮崎裕己 呂曉東 稲葉敬之 (電気通信大学)	令和2年9月	電子情報通信学会 和文論文誌B
レーダの仕組みと応用技術 第4回空港内で地上走行する航空機の位置を把握するパッシブ・レーダ	角張泰之	令和2年9月	トランジスタ技術2020年10月号
巻頭言	福田豊	令和2年9月	航空無線105号
悪天回避経路に関する研究の紹介	中村陽一 瀬之口敦 平林博子	令和2年9月	航空無線105号
ILSとマルチメディア放送の電波干渉に関する共用検討	福島荘之介 齊藤真二	令和2年9月	航空無線105号
準天頂衛星システム サブメータ級測位補強サービスにおけるシステム間パイアスの推定	北村光教 渡邊浩志 坂井丈泰	令和2年9月	測位技術振興会 第2回 研究発表講演会
複数の航空機監視装置で受信される高頻度気象情報のMUレーダー観測との比較検証	吉原貴之 瀬之口敦 毛塚敦 齋藤孝 古賀禎	令和2年9月	第14回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム
Study of the ionospheric scintillation and plasma bubble structure by using EAR and MC/MF GNSS receiver (赤道大気レーダーと複数衛星系・複数周波数対応GNSS受信機による電離圏シンチレーションとプラズマバブルに関する研究)	齋藤孝 Acharaporn Bumrungkit (タイ・モンクット王工科大学ラカバン) Pornchai Supniti (タイ・モンクット王工科大学ラカバン)	令和2年9月	第14回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム
Status of GBAS related studies of ENRI (電子航法研究所におけるGBAS関連研究について)	齋藤孝 福島荘之介	令和2年9月	第34回EUROCONTROL Landing and Take-Off Task Force会議
航空機内データ通信周波数帯における航空機電界強度特性評価・ピーククラフトB300型機を用いた地上放射特性測定 (Aircraft Electric Field Strength Evaluations at 4 GHz Wireless Avionics Intra-Communications Band)	ニッ森俊一 宮崎則彦 関口 徹也 (北海道大学大学院情報科学研究科) 日景 隆 (北海道大学大学院情報科学研究科) 野島 俊雄 (北海道大学大学院情報科学研究科)	令和2年9月	電子情報通信学会 ソサエティ大会
ホバリング中のマルチコプタのRoFによる位置推定の基礎検討	河村暁子 角張泰之 森岡和行 ニッ森俊一 米本成人	令和2年9月	電子情報通信学会 ソサエティ大会
新航空管制システム移行後のレーダデータ解析手法の検討	住谷美登里	令和2年9月	電子情報通信学会 ソサエティ大会
CARATS施策EN-6およびOI-15関連のENRI研究開発の進捗報告	瀬之口敦 平林博子 中村陽一	令和2年10月	CARATS推進協議会 ATM検討WG/航空気象検討WG合同会合
CARATS航空気象WG EN-6 (OI-26: RECAT3関連)	吉原貴之 瀬之口敦	令和2年10月	CARATS推進協議会 航空気象検討WG
国際標準補強システムSBASの現況	坂井丈泰	令和2年10月	GPS/GNSSシンポジウム2020
CLAS独立評価結果	北村光教	令和2年10月	GPS/GNSSシンポジウム2020
Evaluation of PACOTS (PACOTSの評価について)	ブランク・マウ 平林博子	令和2年10月	IPACG PM/25
航空交通情報共有基盤 (SWIM) への挑戦	住谷泰人 呂曉東	令和2年10月	機関紙「航空管制」
後方乱気流遭遇レポート解析資料	吉原貴之 藤井直樹	令和2年10月	第10回RECAT導入検討WG会議
SBASを利用した鉄道車両測位のためのGNSS受信信号の品質監視手法の検討	吉原貴之 北村光教 渡邊浩志 坂井丈泰 麻生貴広 (航空保安無線システム協会)	令和2年10月	第64回宇宙科学技術連合講演会
L5 SBASによるGNSS信号認証メッセージ	坂井丈泰 北村光教 渡邊浩志	令和2年10月	第64回宇宙科学技術連合講演会
宇宙天気現象の測位・航空への影響	齋藤孝	令和2年10月	第9回宇宙天気ユーザー協議会
Reflection Angle Dependency Evaluations of Typical Foreign Object Debris on Airport Runway Using Optically-Connected 96 GHz Millimeter-Wave Radar System (光ファイバ接続型96 GHz帯ミリ波レーダシステムを用いた代表的FODの反射角度依存特性評価)	ニッ森俊一 米本成人 柴垣信彦 ( (株) 日立国際電気) 佐藤洋介 ( (株) 日立国際電気) 加島謙一 ( (株) 日立国際電気)	令和2年11月	45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves
Height and Angle Characteristics of Point Source Transmitting Power of Wireless Avionics Intra-Communication Systems Based on FDTD Analysis (FDTD数値解析を用いた航空機内データ通信システムからの点波源放射電力の高さおよび角度特性推定)	ニッ森俊一 森岡和行 日景 隆 (北海道大学大学院情報科学研究科) 関口 徹也 (北海道大学大学院情報科学研究科) 山本学 (北海道大学大学院情報科学研究科) 野島 俊雄 (北海道大学大学院情報科学研究科)	令和2年11月	ACES Journal

表題名	発表者	発表年月	発表学会/機関名/刊行物
Utilization of Mode-S DAPs data for weather forecast (気象予測のためのモードS DAPSデータの利用)	宮崎裕己 瀬之口敦 瀬古弘 (気象研究所)	令和2年11月	Airport Authority Officers Association India
Statistical analysis of short-wave fadeout for extreme space weather event estimation (極端宇宙天気現象評価のための短波通信フェードアウトの統計解析)	埜千尋 (情報通信研究機構) 西岡未知 (情報通信研究機構) 齋藤享 塩田大幸 (情報通信研究機構) 渡邊恭子 (防衛大学校) 西塚直人 (情報通信研究機構) 津川卓也 (情報通信研究機構) 石井守 (情報通信研究機構)	令和2年11月	Earth, Planets and Space
Japanese GNSS Future System Evolution in the 2020-2030 Perspective (日本によるGNSSの発展と2020-2030年にわたる将来展望)	坂井丈泰	令和2年11月	European Navigation Conference 2020
An Approach for APAC Regional SWIM Implementation (アジア太平洋地域におけるSWIMの実現方法)	呂曉東	令和2年11月	ICAO Asia and Pacific (APAC) SWIM Task Force (TF)/4
FF-ICE/R1 Service Validation and Implementation (FF-ICE/R1に関するサービス検証と実現)	呂曉東	令和2年11月	ICAO Asia and Pacific (APAC) SWIM Task Force (TF)/4
JAPAN'S EFFORT TO A-SMGCS-DATA-DRIVEN AND SIMULATION-BASED RESEARCH ACTIVITIES ON AIRPORT SURFACE TRAFFIC FLOW (A-SMGCSにおける日本の取り組み：交通データ解析およびシミュレーションを基盤とした空港面交通流の研究)	山田泉 宮崎裕己 交通企画課国際業務室 (国土交通省航空局)	令和2年11月	ICAO Asia/Pacific Air Navigation Planning and Implementation Regional Group (APANPIRG) Communications/ Navigation and Surveillance Sub-group (CNS-SG) /24
GBAS VDB frequency compatibility for Tokyo Haneda (羽田GBAS VDB周波数共用に関する報告)	齋藤享	令和2年11月	ICAO Asia/Pacific Air Navigation Planning and Implementation Regional Group (APANPIRG) Communications/ Navigation and Surveillance Sub-group (CNS-SG) /24
Update to the NSP Job Card NSP.007.02 (NSP Job Card NSP.007.02の更新)	齋藤享	令和2年11月	ICAO Navigation Systems Panel (NSP) /6
Measurement Validation of Hybrid Propagation Analysis Suitable for Airport Surface in VHF Band and Its Application to Realistic Situations (VHF帯空港面伝播解析ハイブリッド手法の測定評価および実際の配置への応用)	須賀良介 (青山学院大学) 黒田哲史 (青山学院大学) 毛塚敦	令和2年11月	IEICE TRANSACTIONS on Electronics (電子情報通信学会 英文論文誌C)
Multi-static Millimeter Wave Radar Connected by Radio over Fiber for Foreign Object Detection on Runways (滑走路上の異物検出のためのファイバー無線によるマルチスタティックミリ波レーダー)	米本成人 二ッ森俊一 河村曉子 森岡和行 宮崎則彦	令和2年11月	International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)
Study of structures of the sporadic E layer by using dense GNSS network observations (稠密GNSSネットワーク観測を用いたスボラディックE層の構造に関する研究)	齋藤享 細川敬祐 (電気通信大学) 坂井純 (電気通信大学) 富澤一郎 (電気通信大学)	令和2年11月	International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+) 2020
可搬型衛星航法補強装置について	齊藤真二 福島荘之介	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
悪天回避経路のモデル化に関する一検討	中村陽一 瀬之口敦	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
有視界飛行方式による飛行の高度に関する統計分析	森太郎 平林博子 虎谷大地	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
東京国際空港の到着便が使用する複数滑走路の効率的運用に関する一考察	宮沢寿和 伊藤恵理	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
東京国際空港における多段階到着管理の戦略	伊藤恵理 宮沢寿和	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
固定飛行経路角降下方式における運航性能評価に関する一考察	ピクソン・ナグ・インク・キム 虎谷大地 平林博子	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
小型無人航空機 (ドローン) 運行の目標安全度検討手法に関する一検討	虎谷大地 平林博子	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
神戸空港の容量拡大に向けた進入復行経路の検討	武里江子 (横浜国立大学) 上野誠也 (横浜国立大学) 瀬之口敦 平林博子 虎谷大地	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
GNSS障害時の代替航法に関する欧州標準化と国内検討課題	毛塚敦 齊藤真二	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
An Analysis of Candidate Free Route Air Traffic between Incheon Airport and North America via Fukuoka FIR (フリールーティング候補の交通流 (仁川空港～北米間) の分析)	イ・ナムジン (韓国航空大学) キム・フヤ (韓国航空大学) キム・ヘク (韓国航空大学) パク・セウ (韓国航空大学) ブランク・マク 平林博子 村田暁紀	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
A Free Routing Concept for Incheon FIR and Fukuoka FIR (仁川FIRと福岡FIRにおけるフリールーティングの概念について)	ブランク・マク 平林博子 村田暁紀 イ・ナムジン (韓国航空大学) キム・フヤ (韓国航空大学) キム・ヘク (韓国航空大学) パク・セウ (韓国航空大学)	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
航空ビジョン2040における情報共有基盤の研究開発	福島幸子	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
航空路管制セクター交通流の地域特性に関する考察	平林博子 瀬之口敦 虎谷大地	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
管制難度指標による近接状況の回避アルゴリズムの一考察	長岡崇 ブランク・マク	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
ADS-Bで放送される幾何高度の基準面について	金田直樹 松永圭左 宮崎裕己	令和2年11月	第58回 飛行機シンポジウム
ミリ波レーダーによる隠された危険物検出の試み	米本成人 河村曉子 二ッ森俊一 森岡和行 能美仁 (アロエックテクノロジーズ) 能美陽 (アロエックテクノロジーズ) 宮脇正典 (アロエックテクノロジーズ)	令和2年11月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
76GHz帯特定小電力円偏波ミリ波レーダーを用いたヘリコプタ前方障害物探知飛行試験—異なる飛行条件における高圧送電線鉄塔および高圧送電線の探知性能評価	二ッ森俊一 小林啓二 (宇宙航空研究開発機構) 桂信生 (北海道放送株式会社)	令和2年11月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
無人機に関する意見交換会	福島幸子 古賀禎 平林博子 河村曉子 虎谷大地	令和2年11月	無人機に関する意見交換会
管制課との意見交換会資料	伊藤恵理 吉原貴之 山田泉 ブランク・マク 中村陽一	令和2年11月	国土交通省管制課との意見交換会
Study of Sporadic E layer characteristics by using ROTI maps (ROTIマップを用いたスボラディックE層の特性に関する研究)	齋藤享 細川敬祐 (電気通信大学) 坂井純 (電気通信大学) 富澤一郎 (電気通信大学)	令和2年11月	第148回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会

表題名	発表者	発表年月	発表学会/機関名/刊行物
日本GBASにおける電離圏脅威となる電離圏急勾配発生時の特性解析	中村真帆 齋藤孝 吉原貴之	令和2年11月	第148回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会
RTF/南相馬における有人機位置探知システムの研究開発について	古賀 慎	令和2年11月	超異分野学会 福島ロボットテストフィールド 開所記念フォーラム2020
画像情報を用いた動体検知の効率化に関する研究	井上 諭 ブライアン・マフ	令和2年11月	日本機械学会 TRANSLOG2020 (交通・物流部門大会)
可搬型GBASプロトタイプ装置の開発	齊藤真二	令和2年11月	日本航海学会航空宇宙研究会
Feasibility study on applying continuous descent operations in congested airspace with speed control functionality-fixed flight-path angle descent (混雑空域における速度制御可能な継続降下運航の導入に関する実現可能性検証: 固定飛行経路角降下)	虎谷大地 ビクラン・ハナガ イナダ・キヨマル Jendrick Westphal (Boeing) Thomas Feuerle (ブラウンシュヴァイク工科大学)	令和2年12月	Aerospace Science and Technology
Decay ionospheric irregularity correlate with the green line auroral emission enhancement (オーロラ発光に相関した電離圏イレギュラリティの減衰)	高橋 透 Andres Spicher (University of Oslo) Francesca Di Mare (University of Oslo) Douglas E. Rowland (NASA Goddard Space Flight Center) Robert F. Pfaff (NASA Goddard Space Flight Center) Michael R Collier (NASA Goddard Space Flight Center) Lasse Clausen (University of Oslo) Joran Idar Moen (University of Oslo, University Centre in Svalbard)	令和2年12月	AGU Fall Meeting 2020
航空交通流過密状態における着陸順最適化	村田 純 高玉圭樹 (電気通信大学)	令和2年12月	CARATSオープンデータ活用促進フォーラム
CARATSオープンデータの概要説明	岡 恵	令和2年12月	CARATSオープンデータ活用促進フォーラム
時間予測における風の影響の解析	中村 陽一	令和2年12月	CARATS推進協議会 航空交通流時間管理WG
CFDTシャドールベレーション解析方針の提案 最大可能調整幅の推定	虎谷大地	令和2年12月	CARATS推進協議会 航空交通流時間管理WG
福岡FIRおよび仁川FIRにおけるフリールーティング概念案について	ブライアン・マフ 平林博子 村田 純 Keunjin LEE (韓国航空大学) Hui Yang KIM (韓国航空大学) Hye Wook KIM (韓国航空大学) Se Eun PARK (韓国航空大学)	令和2年12月	CARATS推進協議会 ATM検討WG TBOアドホック
システム思考に基づくTBO実現に向けた航空交通管理のアーキテクチャ検討	虎谷大地	令和2年12月	CARATS推進協議会 ATM検討WG TBOアドホック
Theory of Automatic Dependent Surveillance - Broadcast Position Verification using Time Difference of Arrival (TDOAを用いたADS-B位置検証の理論)	長縄 潤一 宮崎 裕己	令和2年12月	IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems
Visualizing Sporadic E using Aeronautical Navigation Signals at VHF Frequencies (VHF帯航空航法信号を用いたスボラディックE層の可視化)	細川 敬祐 (電気通信大学) 木村 康拓 (電気通信大学) 坂井 純 (電気通信大学) 齋藤 孝 富澤 一郎 (電気通信大学) 西岡 未知 (情報通信研究機構) 津川 卓也 (情報通信研究機構) 石井 守 (情報通信研究機構)	令和2年12月	Journal of Space Weather and Space Climate
空域の種類と管制業務	平林博子	令和2年12月	航空イノベーション推進協議会 無操縦者航空機委員会 (JRPAS)
Devising Strategies for Aircraft Arrival Processes via Distance-based Queuing Models (空港からの距離に基づく待ち行列モデルを利用した航空機の到着プロセスのための戦略の考案)	伊藤 恵理 Michael Schultz (ドレスデン工科大学) Srinivas Athota (南洋理工大學) Vu Duong (南洋理工大學)	令和2年12月	SESAR Innovation Days 2020
Concept of a Long-Range Air Traffic Flow Management (LRATFMの概念)	伊藤 恵理 Michael Schultz (ドレスデン工科大学) Srinivas Athota (南洋理工大學) Vu Duong (南洋理工大學) Daniel Lubig (ドレスデン工科大学)	令和2年12月	SESAR Innovation Days 2020
Safety Analysis of Reduced Route Spacing for RNP 2 under Radar Environment (RNP2レーダー環境下における横間隔短縮に関する安全性評価)	森 亮太	令和2年12月	Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences (国際論文集)
東京国際空港における舗装の点検・補修計画の効率化に資する交通データの活用について	青山久枝 山田 泉 伊豆 太 (港湾空港技術研究所)	令和2年12月	第21回 空港技術報告会
レーダのしくみと応用技術 第6回複数のレーダとカメラを組み合わせた滑走路上異物検出システム	米本 成人	令和2年12月	トランジスタ技術2020年12月号
レーダのしくみと応用技術 レーダの歴史と進化	米本 成人	令和2年12月	トランジスタ技術2021年1月号
確率モデルによる到着交通流の制御性能の解析と予測	宮沢 和 伊藤 恵理	令和2年12月	日本航空宇宙学会論文集
GNSS障害に備えたバックアップ航法 (APNT) の構築	毛塚 敦	令和2年12月	港湾空港技術講演会 in 横浜
大規模空港における継続降下運航の運用拡大に関する研究	平林博子 ビクラン・ハナガ イナダ・キヨマル 虎谷大地 瀬之口 敦 岡 恵 江口 昌広 福島 幸子	令和2年12月	航空無線106号
WEB形式研究発表会の開催 (K係長の苦労話)	研究計画課 (宮崎裕己)	令和2年12月	航空無線106号
SWIMオントロジーの構築と応用に関する研究	呂曉東 江上 周作 (産業技術総合研究所)	令和2年12月	航空無線106号
GNSS 代替のためのDME 地上局のインテグリティ保障	毛塚 敦	令和2年12月	航空無線106号
航法システムのインテグリティと補強システムSBAS	坂井 丈泰	令和2年12月	内閣府 宇宙政策委員会 衛星測位に関するWG
Theoretical Analysis of Position Report Verification using Distance-based Localization (距離を基にした測位による位置報告検証の理論解析)	長縄 潤一	令和3年1月	2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2020)
Standardization Activities on Foreign Object and Debris Detection System for Airport (空港の異物検出システムの標準化活動)	米本 成人 ニッ森 俊一 河村 睦子 森岡 和行	令和3年1月	2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2020)
Ground Reflection Power Measurements of Thin High-Voltage Power Line Using Helicopter Forward-Looking Low-Transmitting Power 76 GHz Millimeter-Wave Radar (ヘリコプタ前方探知用小電力76 GHz帯ミリ波レーダを用いた小線径高圧送電線の地上反射電力測定)	ニッ森 俊一 宮崎 則彦	令和3年1月	2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2020)
バーチャル展示ページ (提出フォーマット)	米本 成人 河村 睦子 ニッ森 俊一	令和3年1月	2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2020)
SWIM-AeroMACS接続飛行試験及び機内WiFi-EFB実証試験報告	河村 睦子 森岡 和行 呂曉東 米本 成人	令和3年1月	CARATS推進協議会 ATM検討WG 通信アドホック
レーダー環境下RNP2の横間隔の検討結果	森 亮太	令和3年1月	CARATS推進協議会 PBN検討WG 高規格RNAV検討SG



表題名	発表者	発表年月	発表学会/機関名/刊行物
The Cusp as a VLF Saucer Source: First Rocket Observation of Long Duration VLF Saucers on the Dayside (VLFの発生源としてのカスプ: 昼間側長寿命VLF発生源の初ロケット観測)	C. Moser (Dartmouth College) J. LaBell (Dartmouth College) S. Hatch (University of Bergen) J. L. Moen (University of Oslo) A. Spicher (University of Oslo) 高橋透 C. A. Kletzing (University of Iowa) S. Bounds (University of Iowa) K. Oksavik (University of Bergen) F. Sigernes (University Centre in Svalbard) T. K. Yemon (University of Leicester)	令和3年1月	Geophysical Research Letters
ENRIでの研究 (ATM/CNS)	高橋健一	令和3年1月	航空技術産業持論 冬学期ZOOM講義
航空交通管理における意味的な相互運用性のためのオントロジーの構築と応用	江上周作 (産業技術総合研究所) 呂曉東 古賀禎 住谷泰人	令和3年1月	人工知能学会論文誌
AeroMACSの覆域拡大に関する実証実験～仙台空港から福島上空における飛行実験～	森岡和行 呂曉東 長瀬潤一 村田暁紀 江上周作 (産業技術総合研究所)	令和3年1月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
広域マルチラテレーションにおけるGPS障害対策の改善	宮崎裕己 長瀬潤一 田嶋裕久 小菅義夫 田中俊幸 (長崎大学)	令和3年1月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
ADS-B幾何高度基準に応じたHMUとADS-Bの幾何高度差の分布推定	金田直樹 松永圭左 宮崎裕己	令和3年1月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
96 GHz帯ミリ波レーダを用いた滑走路異物探知システムの各種異物探知率推定 —空港環境測定およびレーダ反射断面積測定による探知率推定—	二ツ森俊一 米本成人 柴垣信彦 (株) 日立国際電気 佐藤洋介 (株) 日立国際電気 加島謙一 (株) 日立国際電気	令和3年1月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
混雑空港での航空機群の遅延調整によるスループット改善に関する考察	松永博英	令和3年1月	日本経営工学会論文誌 Journal of Japan Industrial Management Association
滑走路面状況把握センサー技術の国際動向と積雪等の3次元形状測定のための高精度距離測定技術に関する基礎的研究の紹介 航空機電波高度計と5Gモバイルシステムの干渉影響調査動向について	米本成人	令和3年1月	国土交通省航空局
空港内のモードS信号環境とマルチラテレーションの検出率について	二ツ森俊一 福島荘之介	令和3年1月	国土交通省航空局管制技術課・航空機安全課、総務省基幹・衛星移動通信課への説明
Taylor級数推定法による距離バイアス誤差ありのTOA測位における初期値	本田純一 角張泰之 大津山卓哉	令和3年1月	電子情報通信学会 和文論文誌B
Formation of a bottomside secondary sodium layer associated with the passage of multiple mesospheric frontal system (中間圏Frontal systemの通過によるナトリウム層下部の副ピークの生成)	小菅義夫 古賀禎 宮崎裕己 呂曉東 稲葉敬之 (電気通信大学)	令和3年1月	電子情報通信学会 和文論文誌B
Statistical analysis of ionospheric total electron content (TEC) : long-term estimation of extreme TEC in Japan (電離圏全電子数 (TEC) の統計解析: 日本における極端TEC値の長期評価)	Viswanathan Lakshmi Narayanan (The Arctic University of Norway) Satoru Nozawa (Nagoya University) Shin-ichiro Oyama (Nagoya University) Ingrid Mann (The Arctic University of Norway) Kazuo Shiokawa (Nagoya University) Yuichi Otsuka (Nagoya University) Norihiro Saito (RIKEN) Satoshi Wada (RIKEN) Takuya D. Kawahara (Shinshu University) 高橋透	令和3年2月	Atmospheric Chemistry and Physics
Estimate of economic impact of atmospheric radiation storm associated with solar energetic particle events on aircraft operations (太陽高エネルギー粒子イベントに伴う大気圏内放射線嵐の航空機運航に対する経済影響の評価)	西岡未知 (情報通信研究機構) 齋藤享 埜千尋 (情報通信研究機構) 塩田大幸 (情報通信研究機構) 津川卓也 (情報通信研究機構) 石井守 (情報通信研究機構)	令和3年2月	Earth, Planets and Space
Update of Surveillance Material in Doc 9830 A-SMGCS Manual (Doc 9830 A-SMGCSマニュアルにおける監視マテリアルの更新)	齋藤享 ビクラマン・ナガ・インダ・ネタル 佐藤達彦 (日本原子力研究開発機構) 塩田大幸 (情報通信研究機構)	令和3年2月	Earth, Planets and Space
Analysis of the 1030-1090 MHz Signal Environment in Japan (日本における1030/1090 MHz信号環境の解析)	宮崎裕己	令和3年2月	ICAO Surveillance Panel (SP)-Aeronautical Surveillance Working Group (ASWG)-Technical Subgroup (TSG)/11
Free Route Airspace (FRA) Design Concept -Preliminary Analysis- (フリールーティング空域設計における初期解析)	大津山卓哉 本田純一 宮崎裕己	令和3年2月	ICAO Surveillance Panel (SP)-Aeronautical Surveillance Working Group (ASWG)-Technical Subgroup (TSG)/12
2周波SBASの最新動向	坂井丈泰	令和3年2月	KAU-NUAA 共同研究定例会
「航空機の地上走行情報の活用」の概要と今後の展開について	青山久枝	令和3年2月	第5回 首都圏空港の機能強化に貢献する研究開発の推進のための連携調整会議
Characterization of the ionosphere for GBAS	齋藤享	令和3年2月	タイGBAS用電離圏脅威モデル作成のための技術訓練
進展するデジタル無線通信技術 —マルチアンテナシステムの概要と動向—	森岡和行 平野拓一 (東京都市大学) 山崎悟史 (沼津工業高等専門学校) 武田茂樹 (茨城大学)	令和3年2月	電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌)
ヘリコプタ前方障害物監視用76 GHz小電力ミリ波レーダを用いた小径径高圧送電線からの反射電力測定 —実環境におけるBragg散乱等の反射特性評価— 有人航空機との空域共有に関する実験計画	二ツ森俊一 宮崎則彦 古賀禎 久保大輔 (宇宙航空研究開発機構他)	令和3年2月	電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
セキュリティ強化に向けた移動物体高度認識レーダー 基盤技術の研究開発 成果報告書 (3.3章分担執筆)	米本成人	令和3年3月	ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト 遠隔からの機体識別および有人航空機との空域共有に関する研究開発第5回有識者委員会 総務省成果報告書
Detection Probability Estimation of 96 GHz Millimeter-Wave Airport Foreign Object Debris Detection Radar Using Measured Radar Cross Section Characteristics (滑走路異物監視システムの高度化に関する研究)	二ツ森俊一 米本成人 柴垣信彦 (株) 日立国際電気 佐藤洋介 (株) 日立国際電気 加島謙一 (株) 日立国際電気	令和3年3月	15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)

表題名	発表者	発表年月	発表学会/機関名/刊行物
小型航空機における航空機電波高度計の干渉経路損失-ビーチクラフトB300型機を用いた隣接周波数帯を含む測定評価-	ニッ森俊一 宮崎剛彦 佐藤 亜衣 (北海道大学大学院情報科学研究院) 尾崎 龍之介 (北海道大学大学院情報科学研究院) 日景 隆 (北海道大学大学院情報科学研究院) 野島 俊雄 (北海道大学大学院情報科学研究院)	令和3年3月	2021年電子情報通信学会 総合大会
次世代陸域航空無線通信システムのプロトタイプ開発-フォワードリンク基本性能評価-	森岡和行 ニッ森俊一 米本成人 住谷泰人	令和3年3月	2021年電子情報通信学会 総合大会
ILS信号干渉シミュレーターの開発-LOC-	本田純一 松永圭左 毛塚敦 田嶋裕久	令和3年3月	2021年電子情報通信学会 総合大会
ドローン統合情報利用プラットフォーム概念の提案 (Concept of Mission Data Sharing Platform for Drone)	木村紋子 (宇宙航空研究開発機構) 久保大輔 (宇宙航空研究開発機構) 虎谷大地 武市昇 (東京都立大学)	令和3年3月	2021年電子情報通信学会 総合大会
光ファイバ無線技術を応用した航空機監視技術	大津山卓哉 本田純一 角張泰之	令和3年3月	2021年電子情報通信学会 総合大会
デジタルタワー管制のための映像情報と監視センサ情報の合成表示	井上諭 角張泰之 上野晃司 (フィックスターズ) 津田涼輔 (沖電気工業) 草間玄 (沖電気工業)	令和3年3月	2021年電子情報通信学会 総合大会
2D-FDTD法とRay-tracing法を併用した空港面電磁界解析手法の提案	橋本真輝 (青山学院大学) 渡邊忠 (青山学院大学) 須賀良介 (青山学院大学) 毛塚敦 橋本修 (青山学院大学)	令和3年3月	2021年電子情報通信学会 総合大会
AOAとTDOAを併用した航空機位置検証の検討	長縄潤一 宮崎裕己 田嶋裕久 古賀禎	令和3年3月	2021年電子情報通信学会 総合大会
Preface (序文)	古賀禎	令和3年3月	Air Traffic Management and Systems IV - Selected Papers of the 6th ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019)
Introduction to the Sixth ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019) (第6回電子航法研究所ATM/CNSに関する国際ワークショップの紹介)	小瀬木滋 福田豊 福島荘之介 古賀禎 坂井丈泰 伊藤忠理 ヒラマン・ハナグ・インダ・ネタル	令和3年3月	Air Traffic Management and Systems IV - Selected Papers of the 6th ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019)
Towards Automatic Trajectory Modification for Reducing Air Traffic Complexity Using ATC Difficulty Index (ATC難度指標を用いる航空交通複雑性軽減のための自動軌道修正に向けて)	長岡栄 平林博子 ブライアン・マク	令和3年3月	Air Traffic Management and Systems IV - Selected Papers of the 6th ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019)
Nearfield Inspection of Navigation Systems with UAVs - First Results from the NAVANT Project (UAVを用いた航法システムの近傍界測定におけるNAVANTプロジェクトの最初の試験)	Robert Geise (University of Braunschweig) Alexander Weiss (University of Braunschweig) Björn Neubauer (University of Braunschweig) Torsten Fritzel (Aerorex UG) Rüdiger Strauss (Aerorex UG) Hans Steiner (Aerorex UG) Fabian Faul (Technical University of Munich) Thomas Eibert (Technical University of Munich) 本田純一	令和3年3月	Air Traffic Management and Systems IV - Selected Papers of the 6th ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019)
Macroscopic Analysis to Identify Stage Boundaries in Multi-Stage Arrival Management (航空機の到着管理における複数階の境界を同定するための巨視的な解析)	伊藤忠理 宮沢和和 Michael Finke (ドイツ航空宇宙センター) Juergen Rataj (ドイツ航空宇宙センター)	令和3年3月	Air Traffic Management and Systems IV - Selected Papers of the 6th ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019)
Air/Ground SWIM Integration to Achieve Information Collaborative Environment (協調的な情報環境のための空地SWIMの結合)	呂曉東 森岡和行 江上周作 古賀禎 住谷泰人 長縄潤一 米本成人	令和3年3月	Air Traffic Management and Systems IV - Selected Papers of the 6th ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019)
ADS-B Coverage Design in Mountainous Terrain (山岳地域におけるADS-B領域設計)	Karma Wangchuk (Bhutan Civil Aviation Authority) Sangay (Department of Air Transport) 長縄潤一 D. Adhikari (Department of Communication Engineering, Vellore Institute of Technology) K. Gayley (Bhutan Civil Aviation Authority)	令和3年3月	Air Traffic Management and Systems IV - Selected Papers of the 6th ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019)
A Human-in-the-Loop Simulation Study on the Requirements of Air Traffic Control Operations for expanding Continuous Descent Operations (ヒューマンインザループシミュレーションによる継続降下運航の運用拡大に関する管制運用要件の検討)	平林博子 ヒラマン・ハナグ・インダ・ネタル 虎谷大地	令和3年3月	Air Traffic Management and Systems IV - Selected Papers of the 6th ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2019)
Es層の発生メカニズム解明に向けたGNSS観測網を用いた構造解析	齋藤孝 細川敬祐 (電気通信大学) 坂井純 (電気通信大学) 富澤一郎 (電気通信大学)	令和3年3月	GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy) 研究会
Mode S Downlink Aircraft Parameters Implementation and Operations Guidance document (モードSデータリンク (DAPs) の実装及び運用に関するガイダンスドキュメント)	宮崎裕己 瀬之口敦	令和3年3月	ICAO Asia/Pacific Air Navigation Planning and Implementation Regional Group (APANPIRG) Mode S Downlinked Aircraft Parameters (DAPs) Working Group/4
Towards a Free Route Airspace Concept for Fukuoka FIR and Incheon FIR (福岡FIRと仁川FIRのフリールート空域概念について)	ブライアン・マク 平林博子 イ・ナムソン (韓国航空大学) ホム・フイヤ (韓国航空大学)	令和3年3月	ICAO ATM Requirements and Performance Panel (ATMRPP) Working Group (WG)/4
Current status of development of ENRI LDACS prototype and test results for forward link channels (ENRI LDACSプロトタイプの開発状況とフォワードリンクチャネル評価結果に関する報告)	森岡和行 ニッ森俊一 米本成人 北折潤 住谷泰人	令和3年3月	ICAO Communication Panel (CP) Data Communications Infrastructure Working Group (DCIWG) Project Team - Terrestrial Data Link (PT-T)

表題名	発表者	発表年月	発表学会/機関名/刊行物
The compatibility study between 5G base stations and radio altimeters in Japan and update of the result of measurement campaign (日本における5G基地局と電波高度計の共用検討と測定結果の更新)	米本成人 河村純子 二ツ森俊一 森岡和行	令和3年3月	ICAO Frequency Spectrum Management Panel (FSMP)-Working Group (WG)/11
OAS SOFTWARE DEVELOPMENT (OASソフト開発)	森亮太	令和3年3月	ICAO Instrument Flight Procedure Panel (IFPP) 15-3
RTF/南相馬におけるMPATの研究開発について	古賀 隼	令和3年3月	RTFベンチャーキャピタルとのマッチングイベント
Ionosphere monitoring project for GBAS (GBASのための電離圏モニタリングプロジェクト)	齋藤 亨 吉原 貴之 中村 真帆	令和3年3月	インドネシアGBAS電離圏技術セミナー
GBAS safety case analysis and validation including the ionosphere (電離圏を含むGBASの安全性評価及び検証)	吉原 貴之 齋藤 亨	令和3年3月	インドネシアGBAS電離圏技術セミナー
次世代SBASプロトタイプ機の航空機を用いた性能評価	北村 光教	令和3年3月	航空無線107号
L5 SBASメッセージ	渡邊 浩志	令和3年3月	航空無線107号
遺伝的アルゴリズムを用いた有視界飛行方式のための飛行計画の逆推定に関する研究	虎谷 大地 平林 博子	令和3年3月	マルチ制御シンポジウム
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	和田 真治 (慶應義塾大学) 井上 正樹 (慶應義塾大学) 虎谷 大地	令和3年3月	マルチ制御シンポジウム
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	齋藤 亨 中村 真帆 吉原 貴之 藤井 直樹	令和3年3月	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
短波電波伝搬シミュレータ (HF-START) サービス	穂積 コニヤニヤット (情報通信研究機構) 齋藤 亨 中田 裕之 (千葉大学)	令和3年3月	情報通信研究機構ホームページ
Variation of tropospheric scale height representations (対流圏スケールハイトの表現方法について)	齋藤 亨 吉原 貴之	令和3年3月	第35回EUROCONTROL Landing and take-off (LATO/35) 会議
Status of GBAS related studies of ENRI (電子航法研究所におけるGBAS関連研究の現状について)	齋藤 亨 吉原 貴之 福島 壯之介	令和3年3月	第35回EUROCONTROL Landing and take-off (LATO/35) 会議

## 8 知的財産権

当研究所の令和2年度末(R3.3.31)において有効な知的財産権は下記のとおりである。

### (1) 登録済

#### ①日本国内

発 明 の 名 称	発 明 者	出願(国内)年月日	登録番号	登録年月日
無線ネットワークシステム	二瓶子朗 田中修一	H13.8.8	4716472	H23.4.8
無線通信ネットワークシステム	二瓶子朗 田中修一	H13.8.8	4716473	H23.4.8
無線ネットワークを利用した移動局測位システム	二瓶子朗 田中修一	H13.8.8	4640720	H22.12.10
無線ネットワークシステム	二瓶子朗 田中修一	H13.8.8	4640721	H22.12.10
航空管制用表示装置における航空機位置表示方法	塩見格一	H13.10.24	3579685	H16.7.30
目標検出システム	加来信之	H13.12.10	3613521	H16.11.5
誘電率の測定方法及び誘電率測定装置	横山尚志	H13.9.6	3680113	H17.5.27
I L S のグライドパスのG P 進入コース予測方法及び I L S のグライドパスのG P 進入コース予測装置	横山尚志	H13.9.6	3752169	H17.12.16
移動体測位方法及び移動体誘導方法	岡田和男 白川昌之 塩見格一 小瀬木滋 田嶋裕久 住谷泰人 米本成人	H14.3.29	3826191	H18.7.14
電波反射体を用いた測定装置	米本成人 塩見格一	H14.6.28	3623211	H16.12.3
画面情報表示方法、システム及びコンピュータプログラム	塩見格一	H15.1.24	4412701	H21.11.27
無線ネットワークシステム、移動局および移動局の制御方法	二瓶子朗	H14.11.19	4097254	H20.3.21
無線通信ネットワークシステム	二瓶子朗	H15.3.28	4141876	H20.6.20
無線通信ネットワークシステムおよび無線ネットワークシステムの制御方法	二瓶子朗	H14.11.19	4097133	H20.3.21
カオス論的指標値計算システム PCT出願（日本国内）	塩見格一	H15.12.26	4317898	H21.6.5
カオス論的指標値計算システム（日本国内分割）	塩見格一	H15.12.26	4989618	H24.5.11
移動局及び移動局側通信制御方法及び基地局及び基地局通信制御方法及び通信システム	金田直樹 塩見格一	H16.3.3	4107432	H20.4.11
電波装置	米本成人	H16.5.18	3845426	H18.8.25
航空管制用インタフェース装置、その表示制御方法およびコンピュータプログラム	塩見格一	H16.3.29	3888688	H18.12.8
大脳評価装置 PCT出願（日本国内）	塩見格一	H16.4.28	4500955	H22.4.30
航空管制業務支援システム、航空機の位置を予測する方法及びコンピュータプログラム	塩見格一 金田直樹	H18.10.13	4355833	H21.8.14
誘電率の測定方法及び誘電率測定装置（分割出願）	横山尚志	H13.9.6	3988828	H19.7.27
心身状態判定システム（分割出願）	塩見格一	H16.2.23	4505619	H22.5.14
電波反射体を用いた測定装置（分割出願）	米本成人 塩見格一	H14.6.28	3772191	H18.2.24
電波反射体を用いた移動体の航法方法（分割出願）	米本成人 塩見格一	H14.6.28	3840520	H18.8.18
全方向性を有する誘電体レンズ装置。	米本成人	H16.8.19	3822619	H18.6.30

発 明 の 名 称	発 明 者	出願(国内)年月日	登録番号	登録年月日
高周波信号のデジタルI/Q検波方法	田嶋裕久 古賀禎 小瀬木滋	H16.9.15	3874295	H18.11.2
誘電体レンズを用いた電磁波の反射器、発生器及び信号機	米本成人	H17.1.18	3995687	H19.8.10
移動体の測位方法及びその測位装置	古賀禎 田嶋裕久	H17.2.21	4736083	H23.5.13
航空管制システム及び航空管制システムで用いられる携帯情報端末	塩見格一 金田直樹	H17.6.21	4625954	H22.11.19
航空路管制用管制車における順序・間隔付けヒューマンインタフェース装置	塩見格一 金田直樹	H17.6.21	4590559	H22.9.24
音声中の非発話音声の判別処理方法	塩見格一	H18.3.30	4752028	H23.6.3
リフレクトアレイ及びミリメートル波レーダー PCT出願（日本国内）	山本憲夫 米本成人 山田公男	H18.10.27	5023277	H24.6.29
外部雑音改善型発話音声分析システム	塩見格一	H19.3.30	5050180	H24.8.3
ミリ波レーダ組み込み型ヘッドランプ	米本成人 河村暁子	H22.5.11	4919179	H24.2.10
衛星航法システムにおける電離層遅延量の補正方法及びその装置。	坂井丈泰	H19.9.25	4644792	H22.12.17
全方向性を有する誘電体レンズ装置を用いた電磁波の反射器を有するアンテナ。	米本成人 河村暁子	H20.10.28	4812824	H23.9.2
作業適正判定システム	塩見格一	H20.10.31	5035567	H24.7.13
作業監視システム	塩見格一	H20.10.31	4936147	H24.3.2
GPS衛星信号の品質監視機能を有するGPS衛星信号品質監視方法及びGPS衛星信号の品質監視機能を有するGPS衛星信号品質監視装置	齊藤真二	H21.6.4	5305395	H25.7.5
衛星航法システムにおける測位誤差の補正方法及びその装置。	坂井丈泰	H22.3.25	5305413	H25.7.5
衛星航法システムにおける電離圏異常を検出する方法及びその装置。	藤田征吾	H22.8.20	5305416	H25.7.5
直線偏波の制御方法及びその装置。	二ツ森俊一 米本成人 河村暁子	H23.4.26	5376470	H25.10.4
直線偏波の制御方法及びその装置（分割出願）	二ツ森俊一 米本成人 河村暁子	H23.4.26	5598879	H26.8.22
自律神経の状態評価システム	塩見格一	H23.7.20	5812265	H27.10.2
RTK測位計算に利用する衛星の選択方法及びその装置	山田英輝	H23.10.6	5013385	H24.6.15
衛星航法システムにおける測位誤差の補正方法及びその装置。	坂井丈泰	H26.1.25	5818178	H27.10.9
衛星航法システムにおける測位誤差の補正方法及びその装置	坂井丈泰	H28.1.23	6332874	H30.5.11
レーダー装置における相互干渉を回避する方法及びこの方法を用いた監視装置。	二ツ森俊一 森岡和行 河村暁子 米本成人	H27.6.11	6195278	H29.8.25
GNSSを用いて航法を行う機能を有する航空機の航法性能の推定方法及び推定装置、並びに航空機の航空性能の劣化を検出する方法及び航空機の航法性能の監視装置	麻生貴広	H29.4.7	6288745	H30.2.16
衛星航法システムにおける測位誤差の補正方法及びその装置。	坂井丈泰	H29.9.5	6440217	H30.11.30
遠隔型飛行場援助業務用情報表示機能付き電子計算機（意匠）	井上諭	H31.3.26	1648467	R1.11.29
航空機情報表示機能及び空港情報表示機能付き電子計算機（意匠）	井上諭	H31.3.26	1648468	R1.11.29
遠隔型飛行場援助業務用情報表示機能及び空港情報表示機能付き電子計算機（意匠）	井上諭	H31.3.26	1648469	R1.11.29

②海外

発 明 の 名 称	発 明 者	出願(国際)年月日	登録番号	登録年月日
航空管制用表示装置における航空機位置表示方法 PCT出願 (アメリカ国内)	塩見格一	H14. 10. 23	US 7030780	H18. 4. 18
航空管制用表示装置における航空機位置表示方法 PCT出願 (欧州)	塩見格一	H14. 10. 23	EP 1450331	H17. 12. 28
カオス論的脳機能診断装置 PCT出願 (アメリカ国内)	塩見格一	H14. 11. 12	US 7678047	H22. 3. 16
移動局及び移動局側通信制御方法及び基地局及び基地局側通信制御方法及び通信システム PCT出願 (アメリカ国内)	金田直樹 塩見格一	H16. 6. 1	US 7640014	H21. 12. 29
移動局及び移動局側通信制御方法及び基地局及び基地局側通信制御方法及び通信システム PCT出願 (イスラエル国内)	金田直樹 塩見格一	H16. 6. 1	IL 171970	H26. 2. 1
画面情報表示方法、システム及びコンピュータプログラム PCT出願 (アメリカ国内)	塩見格一	H16. 1. 26	US 7091994	H18. 8. 15
電波装置 PCT出願 (アメリカ国内)	米本成人	H17. 3. 9	US 7446730	H20. 11. 4
誘電体レンズを用いた装置 PCT出願 (アメリカ国内)	米本成人	H17. 7. 27	US 8471757	H25. 6. 25
ミリ波レーダ組み込み型ヘッドランプ パリルート (アメリカ国内)	米本成人 河村曉子	H22. 5. 11	US 8803728	H26. 8. 12
天頂対流圏遅延量の算出方法及び衛星測位信号の対流圏遅延量の補正方法 PCT出願 (アメリカ国内)	武市昇 坂井丈泰 福島荘之介 伊藤憲	H19. 7. 10	US 8665146	H26. 3. 4

(2) 出願中

①日本国内

発明の名称	発明者	出願(国内)年月日	出願番号
レーダーシステム及びレーダー探索方法（分割出願）	塩見格一	H28. 9. 19	2021-006191
端末制御信号の送信装置	米本成人 角張泰之	H29. 9. 28	2017-188308
積雪特性を測定する方法及びその装置及びこの積雪特性を測定する方法を利用した融雪災害の予測監視方法及びその装置	吉原貴之 齋藤 享 毛塚 敦	H30. 11. 8	2018-210796
質問信号送信システム及び質問信号送信方法	角張泰之 古賀 禎	R1. 9. 20	2019-171749
GNSSを用いた車両の測位に用いる擬似距離誤差の評価指標及び測位解の信頼性指標を求める方法及びサイクルスリップを検出し、波数バイアスを修正する方法、及びGNSSを用いた車両の測位方法及びその装置	麻生貴広 吉原貴之 北村光教	R2. 11. 5	2020-184967
衛星航法システムにおける測位誤差の補正方法、測位誤差を補正する情報処理装置及びプログラム	坂井丈泰	R3. 3. 25	2021-051650

②海外

無し

# 第 3 部 現 況





# 1 令和2年度に購入した主要機器

航法信号解析器アップグレード 1式
マイクロ波ファイバ光ファイバ 1式
準天頂衛星L5S信号対応受信機の機能向上 1式
光ファイバ接続型受動監視システム信号処理部等模擬装置の機能追加 1式
岩沼分室鉄塔から更新工事 1式
滑走路異物監視システム試験用アンテナ局から通信制御・気象センサ部 1式
ソフトウェア無線機 1式
航空機用VHF無線機 1式
高速NVMeデータストレージモジュール 1式
可搬型衛星航法補強装置 1式
サーマル・パワースペクトルセンサ 1式
複数衛星系・複数周波数対応GNSS受信機 2式
ACARS地上シミュレータ 1式
試験用滑走路異物監視システム改修 1式
ワークステーション 1式
バックアップサーバ 1式
小型航空機用衛星通信装置 1式
実験評価用SSRターゲット装置予備品 1式

## 2 主要施設及び機器

### 1 電波無響室

電子航法の分野では、電波を送受信するアンテナの性能や空間中の電波伝搬特性が機器の性能に大きく影響する。このため、アンテナおよび電波伝搬に関する試験研究が重要になっている。当研究所では、これらの試験研究のための実験施設として、電波無響室を整備した。

電波無響室はシールド壁内部を電波吸収材で被覆した構造を持っている。シールド壁により電波が遮蔽されるため、外来電波の影響を受けず研究所周辺への干渉を防止することができる。さらに、電波吸収材により電波の反射を抑制できるため、電波無響室内は広大な自由空間と同様な伝搬特性を実現できる。

電波無響室内では、アンテナの送受信特性測定や空港モデルを用いた着陸進入コースの電波伝搬特性測定などが行われてきている。また、各種の干渉妨害に関する測定実験も行われている。

〔要目概要〕

内装寸法： 32.0 m×6.2 m×4.2 m

周波数範囲： 1～110 GHz

無反射範囲： 23m 以上

反射減衰量： 50dB 以上

遮蔽減衰量： 90dB 以上

付属設備： 計測室、空調設備、空中線特性試験装置、  
アンテナ回転台移動装置、計測機器ピット、各種無線計測機器、非常照明

### 2 アンテナ試験塔

アンテナ試験塔は、昭和52年に建設され、VORの研究などで使用されてきた。

平成17年度には、二次監視レーダー（SSR）モードSの高度運用技術の研究で使用するため、レーダー設置台を設置するなどの改修を行った。平成19年度には、回転式アンテナを含むSSR装置が設置された。

このほかに、屋上には、実験などに利用するためのスペースが確保されており、GPSアンテナなどが設置されている。

〔要目概要〕

高さ： 19.15 m

### 3 ネットワークシステム

当研究所のネットワークシステムは、共用電子計算機システムの一部として昭和50年台に所内LANが整備されたものに端を発するが、当初は外部組織とのネットワーク接続はなかった。平成5年、研究を効率的に進める上での電子メールの必要性が研究所内で認識され、日本のインターネットの草分けであるJUNET(Japan University Network)に接続し、電子メール及びネットニュースの利用を開始した。その後、平成7年に当時の科学技術庁の管理下にあった省際研究情報ネットワーク(IMnet: Inter-Ministry Research Information Network)に光ケーブル専用線で接続し、電子メールとネットニュースの他、www や ftp, telnet 等の現在のインターネットの基礎となるサービスを楽しむようになった。当時の光ケーブル専用線のデータ転送帯域は、192kbps であった。現在は、国立情報学研究所が提供する学術情報ネットワーク(SINET: Science Information Network)を利用して、1Gbpsの帯域で外部とのネットワーク接続を行っている。

一方、所内LANの構成に目を向けると、IMnetに接続を始めた頃に所内の各建屋毎にサブネットを割り振る形態を採用した。現在はVLANという形で研究グループ毎にサブネットを分けているが、当時の形態が現在の所内LAN構成の基礎となっている。

現在の所内回線は、平成20年に実施した構内光ケーブル布設(増設)により、計算機室～各建屋間において10GBASE-LRのイーサネット通信を実現している(調布本所～岩沼分室間を除く)。また、各建屋内においては、各端末(パソコン)は主に1000BASE-Tのイーサネットにより所内LANに接続されている。

現在、ネットワークシステムを構成するサーバ群は、電子メール、www、ファイル共有、グループウェア、VPN、無線LAN等のサービスを提供し、研究及び事務に不可欠なシステムとして運用されている。

#### 4 実験用航空機

電子航法の実験や試験のために航空機をもつことは、当研究所の特色である。

昭和40年7月より、米国のビーチクラフトスーパーH-18型機を使用した。その後、使用10年を経過し、部品入手が困難になったため当機の更新を計画し、昭和49、50年度に米国のビーチクラフトB-99を購入し、昭和50年10月に当研究所に引き渡された。昭和51年1月から運用を開始したが、調布における運用制限のため、同年10月当研究所岩沼分室が宮城県岩沼市に設置されたことにより仙台空港を定置場とした。

ビーチクラフトB-99は、平成23年3月11日に発生した東日本大震災による津波にて被災、全損となったため、平成24、25年度にビーチクラフトB300を購入した。同機は平成25年5月に引き渡され、同年7月から運用を開始した。

[更新機の諸元・性能]

登録番号：JA35EN

型式：Beechcraft B300 (KingAir350)

全長：14.23 m

全幅：17.65 m

全高：4.36 m

全備重量：6.8 t

最大巡航速度：263 kt

最大航続距離：3,268 km

離陸滑走路長：1,006 m

着陸滑走路長：821 m

発動機：Pratt & Whitney Canada PT6A-60A

プロペラ：Hartzell HC-B4MP-3C

アビオニクス：Collins Pro Line 21

### 3 刊行物

当研究所の発行する刊行物は、下記のとおりである。

電子航法研究所報告（不定期刊行）  
電子航法研究所 研究長期ビジョン報告書（不定期刊行）  
電子航法研究所研究発表会講演概要（年刊）  
電子航法研究所年報（年刊）  
電子航法研究所要覧〈案内〉（年刊）

### 4 行事等

当研究所の令和2年度における行事等は、下記のとおりである。

研究施設一般公開〔Web公開〕

当研究所の各施設および実験風景をWeb上で公開した。

(<https://www.mpat.go.jp/virtual/index.html>)

研究発表会〔令和2年9月30日（水）～10月1日（木）Web開催〕

令和2年度（第20回）電子航法研究所研究発表会をオンラインセミナーで開催した。

（2日間接続者数延べ399名）

第90回出前講座〔令和2年12月10日（木）Web開催〕 航空保安大学校

1、電子航法研究所の概要

（研究計画課 課長 宮崎 裕己）

2、GBASによる計器進入の原理と研究開発

（航法システム領域 領域長 福島 荘之介）

3、航跡データの一般への提供とATMの研究開発への活用

（航空交通管理領域 主任 岡 恵）

第91回出前講座〔令和2年12月17日（木）〕 航空局管制技術課性能評価センター

GBAS出前講座

（航法システム領域 領域長 福島 荘之介）

講演会〔令和3年1月22日（金）Web開催〕

令和2年度電子航法研究所講演会をオンラインセミナーで開催した。

テーマ「航空情報共有基盤SWIMの現状とこれから」（接続者数307名）

1、日本におけるSWIM -CARATSの次のステージに向けて

（国土交通省航空局 龍 幸信）

2、FAAのSWIM活動 -導入から将来研究へ

（米国連邦航空局 Diana LIANG）

3、SWIM - エアライン視点

（国際航空輸送協会 John MOORE）

4、地域におけるSWIM関連活動について

（国際民間航空機関 Yi LUO）

5、ENRIにおけるSWIM研究開発

（電子航法研究所 呂 曉東）

第92回出前講座〔令和3年3月22日（月）〕 航空局管制技術課技術管理センター

GBAS出前講座

（航法システム領域 領域長 福島 荘之介）

令和2年度評議員会〔令和3年3月30日（火）〕

評議員会において下記課題に関する外部評価を実施した。

事後評価課題「フリールーティング空域における軌道ベース運用に関する研究」

「遠隔型空港業務支援システムの実用化研究」

「SWIMのコンセプトによるグローバルな情報共有基盤の構築と評価に関する研究」

事前評価課題「国際交通流の円滑化に関する研究」

「AMAN/DMAN/SMANの統合運用に関する研究」

「デジタル技術によるタワーシステム高度化に関する研究」

「SWIMによる協調意思決定支援情報サービスの構築と評価に関する研究」

「高機能空中線を活用した監視技術高度化に関する研究」

## 5 職員表彰

### ◎ 理事長表彰（令和2年7月25日）

永年勤続（30年）

松島 良一（総務部）

福島 幸子（航空交通管理領域）

永年勤続（20年）

米本 成人（監視通信領域）

特 別

福島 莊之介（航法システム領域）

齋藤 享（航法システム領域）

吉原 貴之（航法システム領域）

齊藤 真二（航法システム領域）

毛塚 敦（航法システム領域）

「地上型衛星航法補強装置（GBAS）安全認証活動への貢献」

国土交通省航空局が東京国際空港において我が国で最初のGBAS（カテゴリ-I）実用装置を国産開発し、設置運用するにあたり高度な技術が必要とする安全認証活動において、外部専門家として4年間にわたり技術レビューの中心的役割を果たし、当所の研究により得た成果と知見を活用して航空行政における新技術の導入に多大な貢献を行った。

二ツ森 俊一（監視通信領域）

電子情報通信学会Communications Expressにおいて主著として発表した論文「Feasibility Evaluations of Three-Dimensional-Printed High-Gain Reflectarray Antenna for W-band Applications, Vol. 7 (2018), No. 6, pp. 230-235」が、第14回電子情報通信学会通信ソサイエティ論文賞(ComEX Best Letter Award)を受賞。

電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会においても「3D プリンタを用いて構築するW帯ミリ波レーダ用ABS 樹脂製反射型フレネルレンズアンテナの設計および試作評価」及び「3D プリンタを用いて構築するW帯ABS 樹脂製反射型フレネルレンズアンテナの誘電体材料定数パラメータ感度特性評価」の主著2論文が、優秀論文発表賞を受賞。

電子情報通信学会通信ソサイエティ査読委員としての貢献として、電子情報通信学会通信ソサイエティ功労賞を受賞。

### ◎ 所長表彰（令和2年7月25日）

特 別

虎谷 大地（航空交通管理領域）

第6回制御部門マルチシンポジウムでの発表「障害物配置法を用いた航空管制のための到着軌道最適化手法」で技術奨励賞を受賞。

江上 周作（監視通信領域）

人工知能学会セマンティックウェブとオントロジー研究会において主著として発表した論文「Mapping Science-ナレッジグラフに基づく科学技術マップの高度検索と対話的操作の実現」について、2018年度人工知能学会研究会優秀賞を受賞。

第18回合同エージェンツワークショップ&シンポジウム2019 (JAWS2019)のポスター発表「航空交通情報共有の高度化に向けたオントロジーの構築と応用」においても、優秀ポスター発表賞を受賞。