

次世代マルチリンク航空無線システムに関する検討状況

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

1 はじめに

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

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

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

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

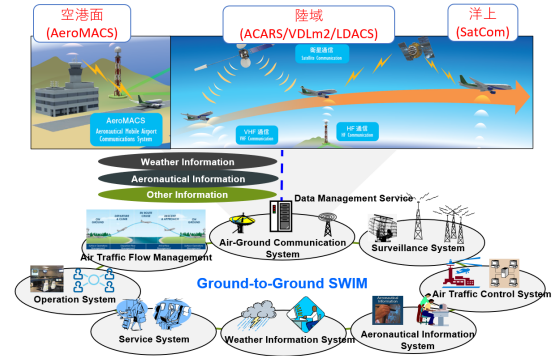


図1. シームレスな空地 SWIM アクセスの概念

2 航空無線システム概要

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

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

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

図2. 航空用無線通信システム概要

3 エミュレータの開発・評価

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

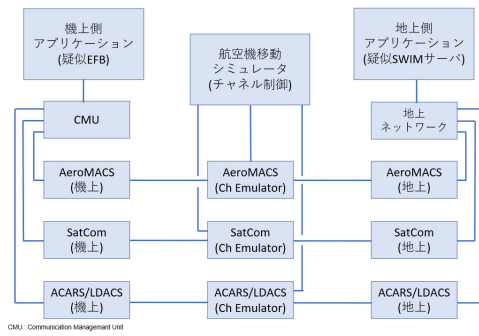


図3. マルチリンクエミュレータのブロック図

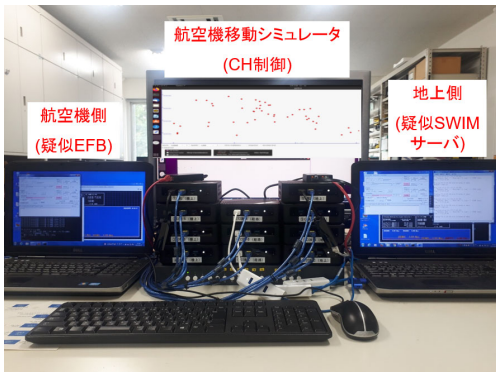


図4. マルチリンクエミュレータの外観

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

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

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

チャンネルエミュレータでは、設定された値に

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

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

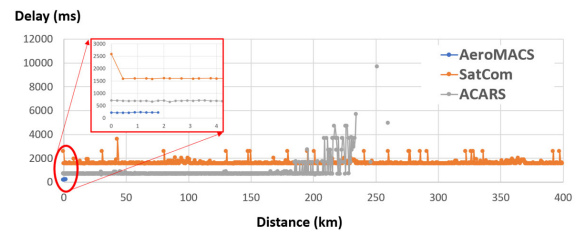


図5. マルチリンクエミュレータの評価例

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

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

4 プロトタイプの開発・評価

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

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

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

4.1 ACARS の IP 化

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

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

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

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

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

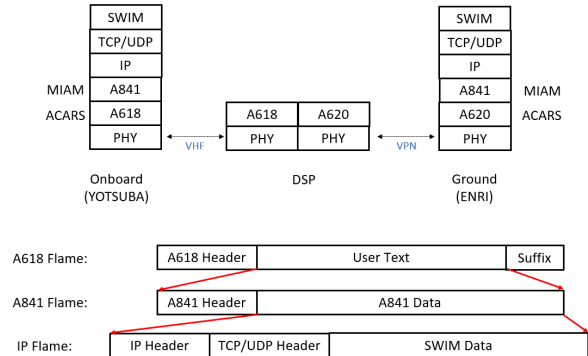


図 6. IP-ACARS プロトコルスタック

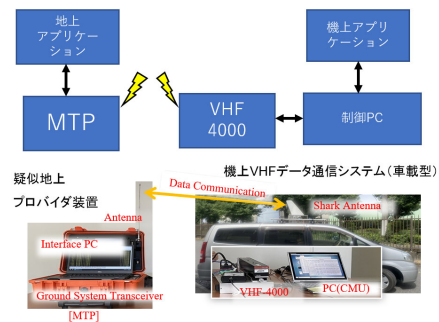


図 7. IP-ACARS 検証機と実験構成

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

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

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



図 8. 構内地上走行試験結果

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

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

4.2 LDACS

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

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

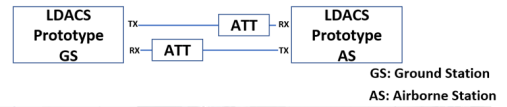


図 9. LDACS プロトタイプと試験構成

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

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

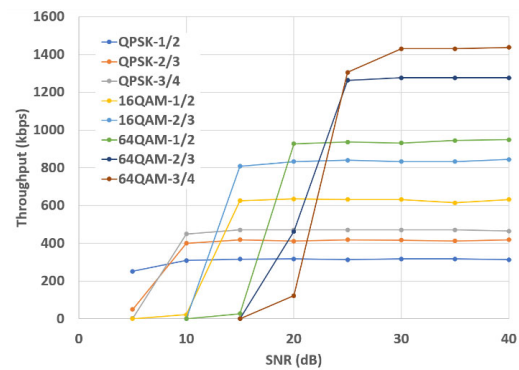


図 10. FL のスループット評価結果

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

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

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

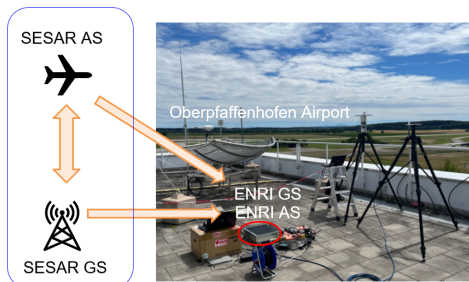


図 11. SESAR プロトタイプとのインタオペラビリティ試験構成

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

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

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

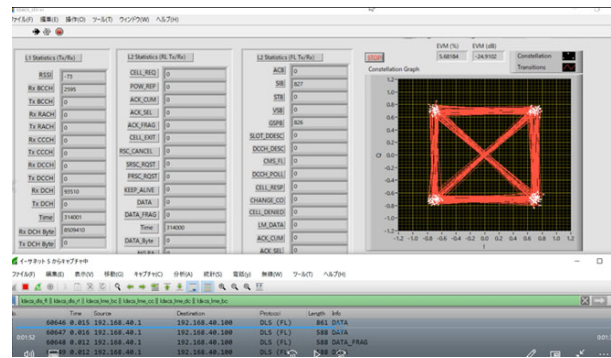


図 12. SESAR GS からの LDACS 信号をリアルタイムに復号している様子

5 実験用航空機よつば搭載状況と今後の展望

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

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

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

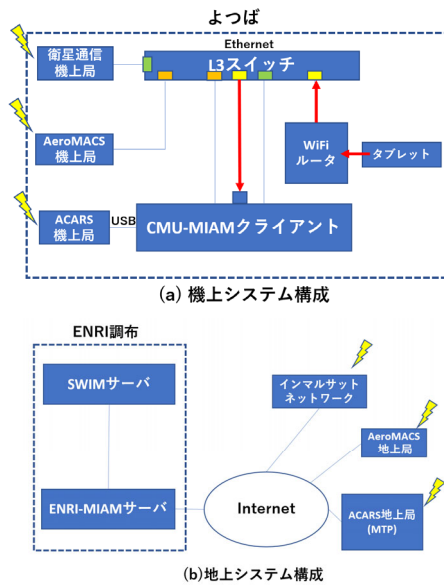


図 13. マルチリンクの飛行実験構成



図 14. 実験用航空機よつばの搭載状況

6 おわりに

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

参考文献

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