

7. 航空用 VHF データリンクの伝送遅延解析と予測

監視通信領域 ※住谷 泰人、北折 潤、石出 明

1. はじめに

国内外における円滑な航空交通の実現に向けた航空交通システムの運用改善の一方法として、トラジェクトリベース運用(TBO：Trajectory Based Operation)が検討されている。TBOでは、航空交通管制(ATC：Air Traffic Control)における航空機の運航時間を綿密に管理、調整する[1]。

日本では TBO の検討に際し、国土交通省航空局による「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン(CARATS：Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)」の取組が進められている[1]。CARATS では 2013(平成 25)年度の航空通信関連の取組みとして、「データ通信を用いた管制運用施策の導入」に関する通信性能評価検討が行われている。

当所では以前より通信プロトコルモデルを適用した数値解析シミュレータを開発し、これに基づく性能解析を実施している。また、空地間の意思疎通のための音声及び航空用のデータ通信システム(以下、データリンク)の性能は、データ更新の頻度や情報共有等と密接に関係する。このため、現在の通信トラフィック状況に基づき統計分析された航空機の数や航空機からのメッセージの長さ及び間隔を、シミュレーション解析のパラメータに適用することが望ましい。

本稿では、日本の陸域上空でトラフィックが最も混雑しているエリアの統計値を用い、性能

評価指標の一つである伝送遅延時間を予測解析した結果について報告する。

2. CARATS の取組と VHF データリンク

2.1 CARATS の通信関連の取組

CARATS の取組みでは、2025 年に向けて我が国が目指すべき目標、変革の方向性等が記述されている[1]。また CARATS の各作業部会(WG)及びアドホック会合(Adhoc)では、様々な管制サービス施策の実現に向けた検討が進められている。この検討における通信関連の取組には、ATC 利用を考慮した通信手段の確保や、その通信性能の検討が挙げられる。

CARATS ATM WG の下部組織である通信 Adhoc では、VHF データリンク(航空専用の VHF 帯の周波数を用いたデータリンク)を取扱う EN(Enabler)14 と、将来の通信装置を取扱う EN15 が検討されている。図 1 に EN14 及び EN15 と 2013 年度に意思決定を予定していた関連 OI(Operational Improvement)を示す。EN14 では、FMS と親和性が高いアプリケーションの FANS-1/A+と共に、現存する実現可能な高速メディアである VDLM2(VHF Digital Link Mode 2 System)の導入に関する施策の意思決定が 2013 年度に行われる。2013 年度の施策を意思決定するためには、現在の VHF データリンクの通信性能を解析し、現状を理解した上で、VHF データリンクにおける新たな ATC 通信のアプリケー

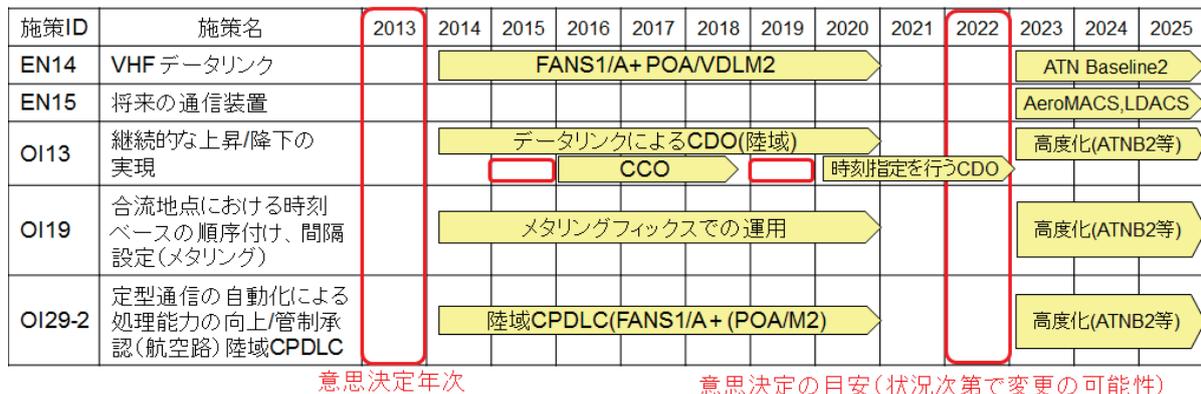


図 1 2013(平成 25)年度の CARATS 通信 Adhoc に関連する EN と OI [1]

ションを実施する余力と利用可能性を関係者と共に検討する必要がある。

VHF データリンクは、VDLM2 と POA(Plain Old Aircraft Communications Addressing and Reporting System)に分類される。近年、VDLM2 は、VGS(VDLM2 用の地上局)が設置できる陸域において利用可能な航空通信システムとして、新型旅客機の登場に伴い、搭載率が向上している。VDLM2 は現存する ATC 通信が実現可能な高速メディアであり、今後、全世界的に普及する可能性も高い。なお、POA は VDLM2 よりも前に開発された VHF データリンクである。VHF データリンクの特徴を表 1 に示す。

EN15 では現在国際標準規格を策定中の空港面用高速移動通信システム(AeroMACS: Aeronautical Mobile Airport Communication System)や現在の VHF データリンクの後継候補である LDACS(L-band Datalink Aeronautical Communication system)を検討する[2]。

2.2 VHF データリンクと性能解析

VHF データリンクは、AOC(運航管理通信)、及び ATC(航空管制)通信の双方を利用可能な規格を有しているが、現在日本では AOC のみが運用されている。VHF データリンクは、AOC と ATC 通信で同じ空中線を用いるため、新たな ATC 施策を導入する際には、ATC 施策に基づき発生する ATC 通信と AOC を一体で扱う必要がある。しかし、データリンクは通信容量に上限があるため、上限を超えた場合に通信の輻輳が発生し、伝送遅延の急激な増加が起こる。このため、現状の AOC に ATC 通信を加えた通信量が通信容量の上限を超過しないことを事前に確認する必要がある。

表 1 VDLM2 と POA の特徴

| | VDLM2 | POA |
|--------------------|---------|-------------------------------|
| 周波数(MHz) (日本国内) | 136.975 | 131.450 131.250 131.950 |
| 帯域幅 | 25kHz | |
| 変調方式 | D8PSK | AM-MSK |
| 伝送速度(bps) | 31500 | 2400 |
| 伝送単位 | ビット | キャラクタ |
| 誤り訂正 | あり | なし |

当所は、これまでも TBO と航空通信システム及びデータリンクの検討に基づく解析結果を報告している[3]。また、当所は航空通信用のプロトコルモデルを適用した数値解析シミュレータを保有し、静止衛星を利用した航空衛星通信システムや各種 VHF データリンクシステムの性能解析を行っている[4],[5],[6],[7]。このシミュレータは Riverbed 社製のネットワークプロトコル数値解析ソフトウェア OPNET をベースとし、2013 年度後半には OS 及び OPNET Ver17.5 に対応するための VDLM2 モデル改修を行っている。

3. VHF データリンクの性能解析

3.1 通信プロトコルシミュレータ

データ通信性能を解析する上で、実機を製作して予測する場合には、長期間の傾向分析が必要である。通常、短時間での予測解析には待ち行列やシミュレータ等が用いられる。待ち行列の場合、簡易な通信プロトコルでその傾向を予測できることが望ましい。しかし、VHF データリンクや衛星通信等の航空通信システムは通信プロトコルが簡易ではなく、シミュレータを用いた検討が一般的である。このため、当所のシミュレータを用い、VHF データリンクにおける通信性能の解析及び予測を行った。

当所のシミュレータを用いた場合、航空機から地上のシステムに送信する航空通信データの長さ(以下、メッセージ長)やデータの送信間隔(以下、メッセージ間隔)、航空機の総数(以下、航空機数)などが主なシミュレーションパラメータに該当する。これらのパラメータに、現在の VHF データリンクの通信状況に近い値を用いることで、プロトコルモデルに即した理想環境下での通信状況を模擬し、性能予測できる。

VDLM2 の解析の場合には Windows 7 と OPNET Ver.17.5 を組合せた改修後のシミュレータを用いた。POA の解析の場合には、モデルを改修していないため、以前のままの Windows XP と OPNET Ver11.5 の組合せで行った。図 2 に VDLM2 のシミュレータ画面例を示す。

3.2 通信データの分析とパラメータ化

主要なシミュレーションパラメータを求めるため、航空機のトラフィック状況に基づき統計分析した。この分析は ATC 通信と AOC を一体で扱う必要があるため、日本国内の同一期日の

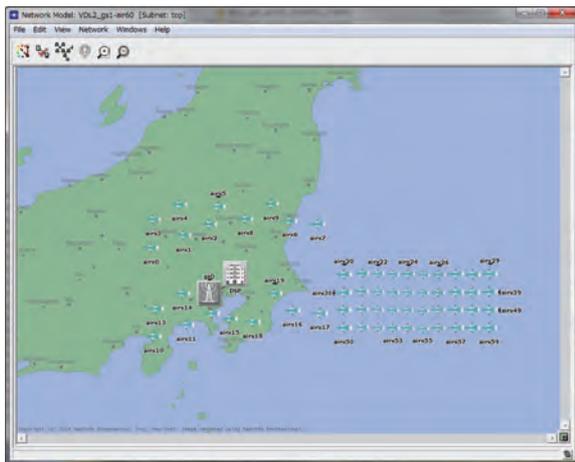


図2 シミュレータ画面例(航空機数 60機)

ATC 通信及び AOC について、CARATS 通信 Adhoc の取組みのもと行った。

3.2.1 データ分析エリアの設定

日本における VDLM2 の最悪ケースとして、VDLM2 の通信量が最大の国内 VGS 局を求めた。この VGS 局を中心に、半径約 200NM の覆域内に該当するセクタを通過する航空機数と通信量を算出し、最大通信量の時間帯の性能解析を行った。200NM は VHF 帯通信を行う上で計算される通信到達距離から設定した。

この結果、羽田 VGS 局のダウンリンク、アップリンクの通信量が最大で、全通信量の 1/3 前後であることがわかった。また、データ解析可能な任意の期間(7月8日～14日)の羽田 VGS 局において、最多ダウンリンク回数の時間帯が 7月10日9時(UTC)台であることが判明した。

3.2.2 AOC の通信状況分析とパラメータ

現在利用中の AOC の通信状況を調査し、シミュレーションパラメータを求めた。調査の結果、データ分析エリアの航空機数 110 機のうち、53 機の航空機が VDLM2 を搭載し、807 ブロックを利用して 374 発のメッセージを送信していた。VHF データリンクでは、メッセージが 220byte よりも長い場合、220byte を 1 ブロックとして分割送信する。図 3 にブロック毎のメッセージ数と割合を示す。図 3 で、前の数字がメッセージ数、カンマの後ろが全ブロックに占める割合である。1～2 ブロックの場合が多い。この結果より、平均メッセージ長を 1 メッセージあたりの平均ブロック数に 220byte を乗算し、

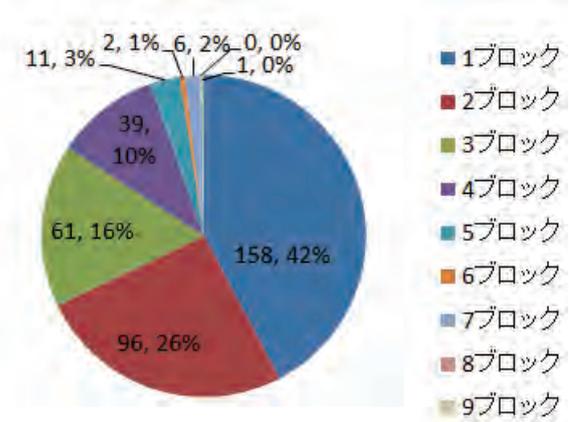


図3 ブロック毎のメッセージ数と割合

求めた。航空機数は、VDLM2 にログオン済みの航空機数を適用した。ログオンとは、VDLM2 を利用するために行われる事前の通信リンク手続である。また、全航空機による平均メッセージ間隔を 1 時間あたりの総メッセージ数から求めた。

3.2.3 ATC の通信状況分析とパラメータ

導入可能性のある新たな ATC 通信として、タイムクリティカルではない状況下で、周波数移管、STAR(Standard Terminal Arrival Route)/CDO (Continuous Descent Operations)発出、合流地点におけるメタリング、経路変更指示、高度変更指示、FIX 通過時刻指定等の追加施策を行った場合のシミュレーションパラメータを求めた。飛行情報やレーダ情報に基づき、AOC の場合と同一期日時間帯の平均メッセージ長、航空機数、メッセージ間隔を分析した。

調査の結果、周波数移管は必要なメッセージ長が 40 バイト、それ以外の複数の追加施策のメッセージ長は各々 20 バイトであることがわかり、メッセージ長のパラメータとして定義した。ATC 施策で対象となる航空機は、羽田 VGS より 200NM 範囲に属するセクタを飛行する航空機数に基づき、VFR を除く FL150 以上の航空機を抽出して 266 機と求め、民航機の割合を約 80%として 213 機と仮定した。以上より、前項と同様に全航空機による平均メッセージ間隔を求めた。また、周波数移管に関するメッセージ数は 1 時間に 452 発、周波数移管以外の複数の追加施策に関するメッセージ数は 1 時間に 332

発であることがわかった。なお、これらの結果については、レーダデータと飛行情報の双方を比較し、数値の妥当性を検討し、問題は見られないことを確認した。

周波数移管と追加施策をまとめて、各パラメータを集計した結果、航空機数 213 機で 1 時間に 782 発を送信していた。また、この時の平均メッセージ長は、450 発×40byte と 332 発×20byte の和を 782 発で除算した結果で求められる。

3.2.4 AOC+ATC 混在下のパラメータ

AOC に ATC 通信が加わった混在環境 (AOC+ATC)でのシミュレーションパラメータを検討するにあたり、航空機数は ATC に関するすべての航空機が該当すると仮定した。このため、航空機数は ATC と同一とし、ATC の 213 機分のメッセージ数と AOC の 53 機数分のメッセージ数が比例関係にあると仮定した。この結果、比例換算した AOC のメッセージ数 $374 \times 213/53=1503$ 発を ATC のメッセージ数に加算し、メッセージ数を 2285 発と求めた。また、AOC と ATC 通信のメッセージ長を平均化し、平均メッセージ長を $(31.5 \times 782 + 474 \times 1503)/2285=323$ バイトとした。

3.2.5 POA のパラメータ

POA は、VDLM2 のようなログオンの概念がなく、対象機数等のパラメータ算出手法が、VDLM2 と同様にはできない。POA の航空機数は、飛行情報をもとに VDLM2 と同一の比率で POA の航空機が存在すると仮定した。ログオンされた総航空機数 53 機に対し、飛行情報より求められる VDLM2 の搭載機数は 48 機であった。一方、飛行情報から求められる POA のみを搭載した航空機数は 20 機であったため、POA の航空機数を $20 \times 53/48=22$ 機と仮定した。また、ブ

ロック長の平均値は 2.5 ブロック、アップリンク数が 234 発であることがわかった。

表 2 に、VDLM2 における AOC、ATC、AOC+ATC 混在環境の各シミュレーションパラメータと、POA における AOC シミュレーションパラメータを示す。

3.3 シミュレーションによる性能解析

今回用いた情報は特定の時間帯や 10 分間の累積値であり、送受信の詳細時刻分布等が不明である。このため、メッセージ間隔は平均値をもとにしたランダムな分布であると仮定した。また、メッセージ長は平均値で一定と仮定した。表 2 中の太字のパラメータを適用し、以上の仮定のもと、60000 秒のシミュレーション時間で、10 回のシミュレーション解析を行った。

本稿の伝送遅延時間の解析で求めた通信品質に相当する性能要件には、陸域 CPDLC (Controller-Pilot Datalink Communication)に関する米国 RTCA DO-290/欧州 EUROCAE ED-120 の規定を準用した。この規定では、管制通信に求められる DSP 内の往復の伝送遅延時間 (Round-trip Time)が 95%値で 10 秒以内、99.9%値で 12 秒以内となっている。本解析は、実システムの細部までは反映させていないプロトコルモデルのみのシミュレータで行っている。パラメータに誤差が含まれることも考慮し、伝送遅延時間 95%値のみで評価した。

図 4 に AOC シミュレーションの解析結果例を示す。図 4(a)は VDLM2 で航空機数 60 機の場合、図 4(b)は POA で航空機数 20 機の場合である。図 4 の青●は 10 試行のうちの 1 試行において、各航空機からの伝送により生じた各遅延時間を示している。図 4 に示す航空機数は、パラメータ化する際の統計分析結果より、現在運航していると考えられる航空機数にほぼ等しい。

表 2 シミュレーションパラメータ

| | VDLM2/ AOC | VDLM2/ATC | | | VDLM2/ AOC+ATC | POA/ AOC |
|--------------|---------------|------------|------|-------------|-------------------|-------------|
| | | 周波数移管 | 追加施策 | 同時 | | |
| メッセージ長(バイト) | 474 | 40 | 20 | 31.5 | 323 | 550 |
| 航空機数(機) | 53 | 213 | | | | 22 |
| メッセージ数(発/時) | 374 | 452 | 332 | 782 | 2285 | 234 |
| メッセージ間隔(秒/時) | 9.6 | 8 | 10.8 | 4.6 | 1.6 | 15.4 |

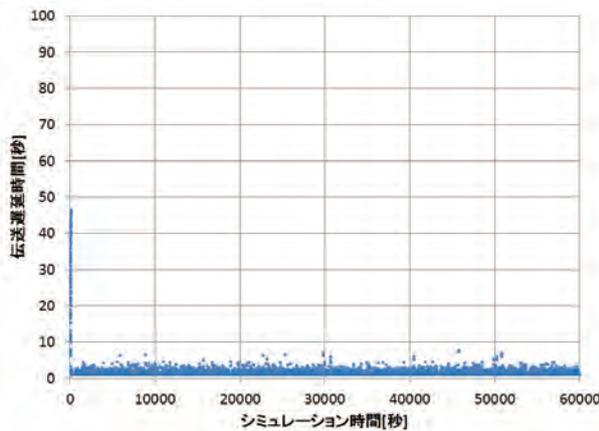
※同時：周波数移管と追加施策をまとめて実施した場合

図 4(a)をみると、シミュレーション開始時点では空地間のデータリンクを確立するための非定常の伝送遅延が生じている。しかし、それ以降、伝送遅延時間 95%値は 10 秒よりも短い伝送遅延時間で安定している。シミュレーション開始時点は、航空機が一斉に通信を行い始めた状態である。この状態はシステムが寸断された後、復旧する場合の一斉通信以外にはない状況であると考えられる。よって、今回想定している性能評価では、通常状態の解析を行うため、シミュレーション時間を 10000 秒～60000 秒の定常状態下を抽出して検討することとした。また、図 4(b)をみると、最高 50 秒程度までの遅延がばらついて発生していることがわかった。

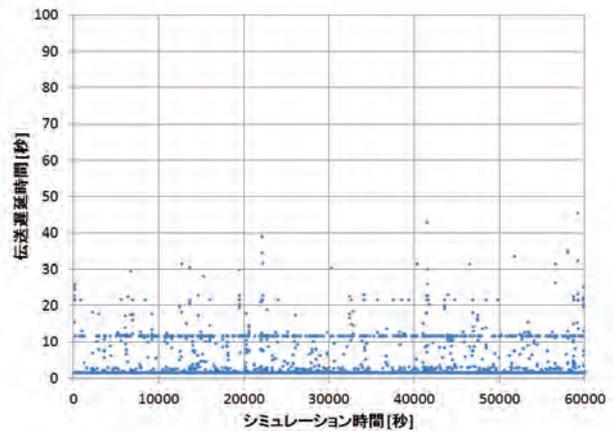
図 5 に各航空機数における伝送遅延時間 95% 値とその平均値を示す。図 5(a)は VDLM2、図 5(b)は POA の場合である。図 5(a)において、青

●は ATC、黒●は AOC、緑●は、AOC+ATC の伝送遅延時間 95% 値の 10 試行分を各々示している。また、赤線は ATC、AOC、AOC+ATC における伝送遅延時間 95% 値の平均値を示している。紫線は、伝送遅延時間 95% 値の基準である 10 秒を表している。図 5(a)より、10 秒以内を満足する航空機数は、ATC で 240 機、AOC で 210 機、AOC+ATC で 150 機程度である。特に、航空機数が 60 機程度の場合、AOC で 3 秒程度の遅延であり、要件を満足している。また、この要件とは別に、航空機数が 220 機を超えるあたりで伝送遅延時間が急増する結果が得られた。

図 5(b)は POA における AOC のシミュレーション結果であり、航空機数 15 機程度で既に 10 秒以上遅延している。現状の航空機数である 22 機での利用を考えると、伝送遅延時間 95% 値の基準である 10 秒を満足しない。

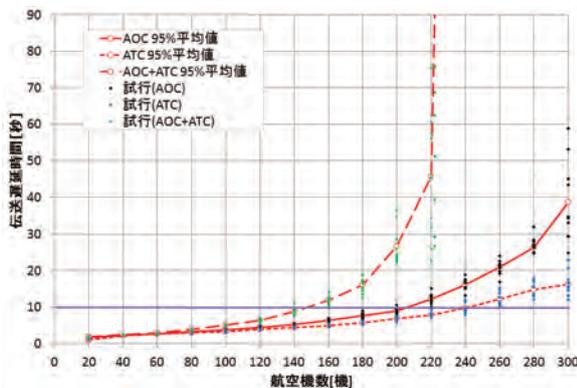


(a) VDLM2 60 機

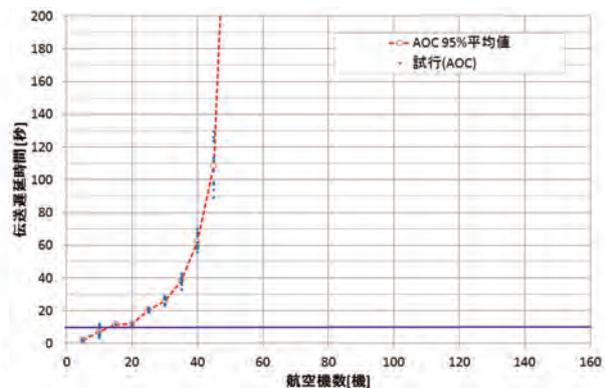


(b) POA 20 機

図 4 AOC シミュレーション例



(a) VDLM2



(b) POA

図 5 伝送遅延時間 95% 値と航空機数の関係

4. 考察

POA の場合、米国 RTCA DO-290/EUROCAE ED-120 の規定である「DSP 内の往復伝送遅延時間が 95%値で 10 秒以内」は、現時点の航空機数で既に満足せず、新たな ATC 施策におけるデータ量の増加には将来的に対応できない。このため、POA では ATC 通信は追加しないことが適当であると考えられる。

VDLM2 の場合、110 機すべての航空機が VDLM2 搭載して運航したと仮定しても、遅延時間は 5 秒前後である。将来、全ての航空機が VDLM2 を搭載して、日本で最も混雑する羽田近傍を混雑時間帯内に飛行した場合、参考文献 [8]より 2025 年頃の航空交通量が現在の約 1.4 倍であると仮定すると、約 150 機程度の最大需要予測である。この場合でも、10 秒の伝送遅延時間 95%値をほぼ満足する結果が得られた。日本の VDLM2 では、AOC よりも優先通信機能がある ATC 通信の遅延は少なく、AOC の遅延が大きくなる。伝送遅延時間 95%値において、AOC 利用の目安である 60 秒以内を満足する航空機数は 220 機程度であることがわかった。

5. まとめ

国土交通省航空局の「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン(CARATS)」において、2013(平成 25)年度に航空通信関連の検討項目として実施した「データ通信を用いた管制運用施策の導入」に関する通信性能解析を報告した。この解析では、CARATS の取組で行われた現状の VHF 帯航空通信データの統計分析結果を、当所の VHF 帯通信性能解析シミュレータのパラメータに適用し、性能評価指標の一つである伝送遅延時間に基づき性能を予測した。性能要件には、陸域 CPDLC に関する米国 RTCA DO-290/EUROCAE ED-120 の規定である「DSP 内の往復伝送遅延時間が 95%値で 10 秒以内」を準用した。

日本の陸域上空で最も混雑している羽田近辺を対象に解析した結果、POA の場合、現状の AOC のみで性能要件を満足しなかった。VDLM2 の場合、現状の AOC のみで 3 秒程度の伝送遅延時間を生じた。今後、VDLM2 に周波数移管等の施策がタイムクリティカルではない状況下での ATC 通信として導入され、これと AOC が混在して通信を行った場合、150 機程度

の航空機数まで性能要件を満足した。

当所のシミュレータはトラフィック性能予測に利用可能なツールであると考えられる。なお、現在のシミュレータで取り扱える通信種類は 1 種類であるため、本稿では、AOC と ATC 通信を混在させた環境下での平均値に基づき解析した。このため、将来、複数の通信種類を取扱えるようシミュレータの改修を予定している。今後は、改修したシミュレータを用い、段階的な ATC 施策導入に基づく性能解析も試みる予定である。

謝辞

データ収集及び貴重なご意見等にご協力いただきました CARATS ATM WG 及び通信 Adhoc、並びに国土交通省航空局をはじめとする航空関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1]国土交通省航空局, “CARATS プログレスレポート 2011-2013”, https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr13_000006.html
- [2]住谷泰人, “航空用移動通信システムの動向”, (社)日本航空宇宙学会第 49 回飛行機シンポジウム講演会講演集 2E12, Oct. 2011
- [3]住谷泰人ほか, “TBO のためのデータリンク伝送遅延の解析”, (社)日本航空宇宙学会第 51 回飛行機シンポジウム講演会講演集 2D02, Nov. 2013
- [4]Jun Kitaori, “A performance comparison between VDL mode 2 and VHF ACARS by protocol simulator”, IEEE Digital Avionics Systems Conference 2009, October 2009
- [5]住谷泰人ほか, “洋上の航空衛星データ通信トラフィックの解析とシミュレーション予測”, 信学論 B Vol. J93-B No.12, pp.1666-1676, Dec. 2010
- [6]住谷泰人ほか, “VHF 帯航空通信システムの伝送遅延時間に関する予測解析”, 信学総大, Mar.2014
- [7]Y.Sumiya, et.al, “Analysis of Transmission Delay using Communication Protocol Simulator in VHF Datalink”, ICNS2014, Apr. 2014
- [8]国土交通省交通政策審議会航空分科会, “第 10 回基本政策部会資料～航空交通量の増大に対応した管制空域のあり方”, <https://www.mlit.go.jp/common/001017432.pdf>