

基礎・基盤技術5 飛行システム技術

藤井 謙司 *

1. はじめに

航空機が交通手段としてより身近なものとなり航空産業が盛んになるためには、航空機の安全性や利便性をさらに向上させる必要があり、そのために宇宙航空研究開発機構（JAXA）航空技術部門では、飛行システム技術の研究を進めています。飛行システム技術、そのことばとおりの意味を考えると、飛行するシステムすなわち航空機の技術となり、航空技術全般を指しているようにも捉えられてしまいます。JAXAの基礎・基盤技術の一分野としての飛行システム技術は、システムとして統合された航空機が飛行するための基礎・基盤技術あるいは飛行するための要素技術を結び付ける技術であり、私の所属しておりますJAXA航空技術部門の飛行技術研究ユニットでは、基礎・基盤技術としての飛行システム技術の研究開発を担う部署として、先進飛行技術及び飛行試験・評価技術に係る研究開発に関すること、そして、飛行試験設備に係る業務及び研究開発に関することを業務として行っています。この記事では、この飛行技術研究ユニットが実施している業務について紹介します。

2. 飛行技術研究ユニットの業務について

航空宇宙産業の基幹産業化と国際競争力の強化のためには、飛行シミュレータによる地上試験や実験用航空機による飛行実証を経て、実用性のある技術に効率的に仕上げる手順の確立が必要です。JAXAは飛行実証を行うための基盤となる飛行試験設備（実験用航空機、飛行シミュレータ及び飛行実験基地）や、飛行試験技術を保有しています。これらの飛行実証に係る設備や技術の高度化

を図るとともに、それらを用いてJAXA内外からの飛行実証ニーズに对应していくのが、飛行技術研究ユニットの第一の役割です。

また、これらの設備や技術を活用しつつ、独自の飛行システム技術の研究開発を行い、行政機関やメーカ、運航者からの研究ニーズに对应たり、先端的研究あるいは基礎的なニーズに対応する研究を実施したりして、社会に貢献しています。航空機をより身近な存在にすることを目指し、飛行システム技術でより簡単、より安全、より便利を実現しようとしています（図1）。そのために飛行制御技術、航空人間工学、飛行性技術に注力しています。

飛行制御技術としては、新しいセンサやシステムの導入に伴い、高速 / 高空から離着陸までの広範な飛行領域をカバーできるあるいは緊急時や気象変化に応じた経路変更ができるなど、柔軟な運用が安全かつ簡単に可能となる飛行制御システムの実現を目指しています。また、JAXAでは、技術実証のための実験機等のシステム設計も行いますが、飛行制御系設計評価の効率化・高速化を図り、システ



図1 飛行システム技術研究イメージ

* Kenji FUJII

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
航空技術部門 飛行技術研究ユニット

ム設計へ効果的にフィードバックすることにより信頼性向上の実現を目指しています。

航空人間工学については、かつては操縦性評価がその主要な課題とされていましたが、航空機システムの発達や運航システムの発展に伴い、現在、その中心的課題は、複雑な自動化システムや運航環境でのパイロットの状況認識解明や、CRM (Crew Resource Management)、先進的コックピットインターフェースと人間の整合性などに移りつつあります。これらの運航・航空機製造現場での課題に取り組むとともに、ヒューマンエラー、疲労、状況認識、ノンテクニカルスキル等の様々な計測指標について横断的に矛盾無く計測するための指標体系を構築することを目的としています。

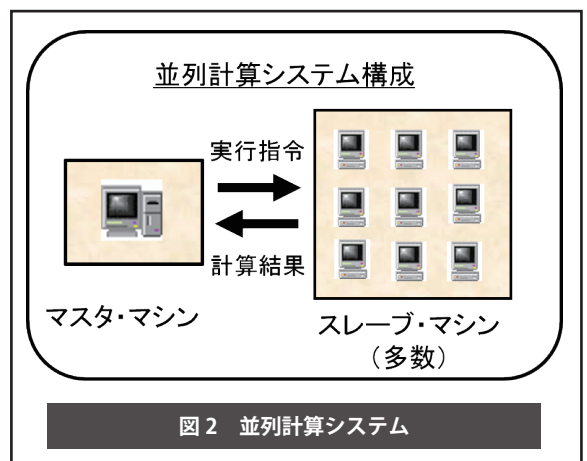
飛行性技術としては、無人機および有人機を用いた飛行による実証を効率化するための飛行シミュレーション・モデルや飛行データ解析システムなどの基盤ツールの適用や高度化および整備に関わる調査や研究を行っています。また、小型航空機の事故が増加傾向にあることに対応し、飛行データによる安全解析手法の研究・開発を行っています。

3. からは、JAXAの飛行システム技術の研究と、実験用航空機および飛行シミュレータの概要を紹介します。

3. 飛行システム技術の研究

3.1 飛行制御技術

将来の航空機には、新しいセンサ、情報システムが次々と導入されると考えられます。それに伴い、飛行制御系も、これらから得られる情報を有効に利用して安全性や飛行性能などを向上していくことが期待されます。また、超音速機や極超音速機など高速で飛行するようになると速度領域が広範におよび、飛行環境がより大きく変化する航空機に対しても対応可能な制御技術が必要になっています。このように多様化する制御対象および制御要求に対応するための高性能でロバストな飛行制御系設計手法の確立が重要です。このため、制御対象の特性を把握するための飛行特性を推定する技術の研究開発と非線形システムに対応するロバストな制御則の



設計技術の研究開発を行っています。

飛行システムの開発では、設計サイクルを短期化する効率的な開発が志向されています。そのため、飛行制御系設計評価の時間短縮を図り、システム設計へ効果的にフィードバックすることによる信頼性向上を目指しています。そこで、不確実性を取り込んだ飛行シミュレーションにより、制御パラメータを最適化する設計 / 評価技術を研究しています。これにより、不確実性に強いシステムが実現できます。多数のシミュレーション計算を行うための並列計算システム（図2）の整備およびアルゴリズムの改良についても取り組んでおり¹⁾、JAXAのD-SEND #2プロジェクト²⁾などに適用されました³⁾。

3.2 航空人間工学

航空事故の主要因の半分以上をヒューマンエラーが占めており、安全性の向上のために航空人間工学の研究が必須です。近年の我が国においては特に小型機や防災ヘリコプタの事故が目立っており、事故防止のための国家的な取り組みが開始されています。JAXAでは各種の委員会を通じてこれらの活動に積極的に関与しています。研究活動としては、航空機の安全性向上を目的とし、これまで蓄積された航空人間工学の基盤技術をもとに、飛行データ分析によるリスク抽出技術、CRM訓練プログラムの向上技術、先進的ディスプレイやコックピット設計に関する研究を進めています。さらに、これらのディスプレイ技術をもとに、各種の飛行実証プログラムを支援してきました。

飛行データ分析によるリスク抽出技術の研究では、コックピット映像からパイロットの行動を再構築する技術や、脳波などからパイロットのエラーを抽出する技術の研究を行っています。“Normal”な状況から“Non-Normal”な行動を自動的に抽出することができれば、事故に至るかもしれないリスクを抽出することができるため、これらの技術の早期実用化を目指しています。

CRM はエアラインを中心として、現在では航空機使用事業にも広く普及してきました。JAXA では、これまで二地点間の輸送任務とは異なる任務を主体とする、自衛隊や海上保安庁、操縦士養成組織などへの CRM 訓練の導入に協力してきました^{4), 5), 6)}。現在は、従来の CRM では十分に対処できていなかった、適切な判断を下すためのスキルに特に着目し、新しい評価ツールの創出を含めた研究活動を進めています。

災害の時などに遭難者の捜索や救出で活躍するヘリコプタには、夜間や悪視程などの DVE (Degraded Visual Environment) と呼ばれる条件下でも安全に任務を実施することが求められます。パイロット視覚情報支援技術 (SAVERH : Situation Awareness and Visual Enhancer for Rescue Helicopter) の研究^{7), 8), 9), 10), 11)}では、赤外線カメラや暗視カメラなどの画像データと、地形データとを組み合わせ、必要な情報を HMD (Helmet Mounted Display) に表示することで、視覚情報が十分に得られないような状況下でも、パイロットの負担を減らし運航の安全を高めるシステムを開発してきました (図 3)。現在は、早期の実用化をめざして、実験用ヘリコプタを用いた飛行実証を進めています。

3.3 飛行性技術

将来の航空輸送の運用性向上や利便性向上をもたらさうる V/STOL (Vertical/Short Take-Off and Landing) 機の開発に必須となる、飛行性 (運動特性、飛行性能などの総合的な飛行特性)・安全性設計に関わる基盤技術の研究・開発を行ってきました。V/STOL 機は垂直にあるいは短い滑走距離で離着陸できる航空機です。V/STOL 機は速度ゼ

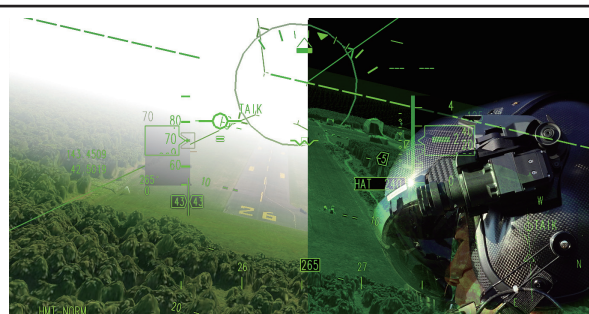
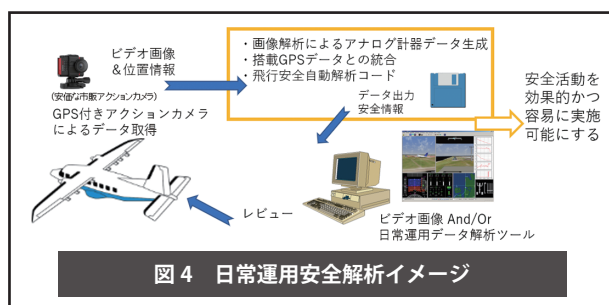


図 3 SAVERH : DVE 下での安全な運航を目指す研究

ロから高速までのさまざまな速度域を飛行し、また形態を変えながら飛行することもあるため、その飛行特性は大きく変化します。このため、機体特性の正確なシミュレーション環境およびそれに基づく飛行性・安全性評価手法の開発を行い、設計や解析プロセスの効率化を図っています。また、飛行特性が大きく変化する V/STOL 機の安全な飛行を実現するための制御則設計手法を開発するとともに、これらを小型の無人実験機を用いて飛行実験し評価、検証しています。

3.2 項でも述べたように小型航空機の事故が増加傾向にあり、簡易型飛行記録装置の搭載による安全性向上活動 (FDM : Flight Data Monitoring) の導入が検討されています^{12), 13)}。多くの小型機のコックピットはまだアナログ計器で構成され、FDR (Flight Data Recorder) の搭載義務もありません。現在、後付けの記録装置 (認証品) の販売が

始まっていますが、これによる計測は、画像および搭載 GPS 及び内蔵する加速度計による位置・姿勢のみで、対気速度など安全上重要なパラメータは取得・記録できません。また、価格もあまり安くはありません。一方で、近年の IT 技術や小型機器技術の発展により、小型・軽量・安価な簡易画像記録機器が一般市場に出てきています。そこで、これらの市販機器はレジャー用途であることが多く、航空機向けではありませんが、これらで記録できるデータに JAXA が培ってきた飛行データ解析技術を活用して、(1) 簡易画像記録を用いた日常運用安全解析手法や(2) 飛行データ記録を用いた不安全要素自動抽出手法を開発できないか、検討を始めています。図 4 にイメージを示します。



4. 実験用航空機

JAXA では、旧航空宇宙技術研究所 (NAL) の時代から飛行実証の重要性を認識し、そのための実験用航空機を導入し飛行実証業務にあたってきました。

最初はプロペラ機のみでしたが、我が国ではヘリコプタの需要が非常に高く、ヘリコプタに関する技術研究開発・実証も必要である、との認識で、実験用ヘリコプタを 1999 年度に導入しました。さらに、近年の航空輸送ではジェット機が主流であり JAXA でもジェット機に関する研究開発を行っていますが、それを飛行実証する手段を有しない状況であったため、これを解消する目的で JAXA 実験用航空機として初のジェット機となる「飛翔」を 2012 年に導入しました。これによりジェット機、プロペラ機、ヘリコプタという特性の異なる 3 種類の機体が揃いました。JAXA 実験用航空機の歴史を図 5 に示します。ここでは、JAXA 実験用航空機の概要を紹介します。

4.1 MuPAL- α

現在運用されているプロペラ機は MuPAL (Multi-Purpose Aviation Laboratory: 多目的





図 6 MuPAL- α

実証実験機) - α と呼ばれ(図 6)、ドイツのドルニエ社製 19 人乗り(他に操縦士 2 名)双発ターボプロップ機 Dornier 228-202 型を改造した実験用航空機で、1988 年に旧 NAL に導入されました。MuPAL- α は、母機の機械式操縦システムに併設された実験用フライ・バイ・ワイヤ(Fly-By-Wire, FBW)操縦システムならびに機体運動や機体位置を高精度で計測できる各種センサを搭載しています^{14), 15)}。

MuPAL- α の FBW 操縦システムの特徴は、研究者が実験目的に合わせて誘導制御則やパイロットに対する計器表示を自由に設計できることです。飛行中に制御パラメータや表示シンボルを変更することもできます。FBW 操縦システムを用いて飛行実験を行う時には、実験を行う評価パイロットの他に安全パイロットが搭乗し、いつでも安全かつ確実に安全パイロットが母機の機械式操縦システムで操縦を引き継ぐことができるようにしました。

2000 年 4 月の FBW システムの完成以来、MuPAL- α は、空中で他の航空機の飛行特性を模擬するインフライト・シミュレーションや故障した航空機を安全に着陸させるための誘導制御を始めとする様々な先進飛行制御の飛行評価等の研究に利用されてきました。

4.2 飛翔

JAXA は、高空・高速に対応した飛行実証能力を獲得するため、実験用航空機として初のジェット機を導入しました。新造のセスナ式 680 型(サイテーション・ソプリン)を改造母機として、計測機器の搭載のための改造を行った後、2012 年 2 月に JAXA に納入され、一般公募によって「飛翔」



図 7 実験用航空機「飛翔」

と命名されました(図 7)。その後、訓練や機能確認を経て、同年 7 月から実験運用を開始しました。

「飛翔」には、飛行状態を記録するためのネットワークベース飛行データ計測システム¹⁶⁾をはじめとして、飛行状態をリアルタイムモニタするためのモニタ用 PC、舵角センサ、位置や姿勢を高精度に計測する GPS/INS 航法装置 MSAS-GAIA、実験用電源など研究飛行に共通するような基本的な機器が標準装備として整えられています。

「飛翔」は、導入から現在 2019 年に至るまで、途切れることなく数多くの研究飛行を行ってきました。最近行った主な飛行試験としては、機体騒音低減技術の飛行実証(FQUROH)¹⁷⁾、光ファイバひずみ分布センサの飛行実証(HOTALW)¹⁸⁾、表面摩擦抵抗低減コーティング飛行試験(FINE)¹⁹⁾、感圧塗料(PSP)による主翼衝撃波位置可視化²⁰⁾、そして飛行試験ではありませんが構造振動計測²¹⁾などが挙げられます。詳細はそれぞれ本誌で既に紹介されていますので、参考文献をご参照下さい。

飛行実験では、導入時に米国及び国内で装備した計測システムを使用するとともに、ほとんどの場合で実験内容に合わせた一時的な改造を行っています。その場合は、航空法第 11 条ただし書の規程により、国土交通省航空局から試験飛行の許可を受けて飛行します。機器ラックの増設やノーズブーム装備については、機体の導入時に想定されていて、取り付け部や電源が用意されています。一方、導入後に構想された実験も多く、その都度様々な工夫をして改造を行っています。



図 8 実験用ヘリコプタ BK117C-2

4.3 実験用ヘリコプタ

ヘリコプタは狭い場所でも離着陸できるため日本の国土事情に適しており、航空機の中でのヘリコプタの占める割合が海外と比較して突出して高くなっています。ヘリコプタの利用拡大、安全性の維持向上に向けた技術開発に活用するため、JAXAでは実験用ヘリコプタを整備・運用してきました。MuPAL-ε（三菱式 MH2000A 型）が 1999 年度から活躍してきましたが²²⁾、2013 年 2 月に退役し、後継機として川崎式 BK117C-2 型を導入しました（図 8）。この機体には愛称をつけていないので、実験用ヘリコプタと称しています。

2013 年の導入後に実験機能の整備を順次進めて、2016 年度に実験システムは概ね完成しました。実験用ヘリコプタに必要とされる実験機能として、MuPAL-εを用いた過去の実績と今後の飛行実験ニーズを踏まえて、①母機アビオニクスデータの収集・記録機能、②コックピット・ディスプレイへの画像表示機能、③機外への機器取り付け用ハードポイント（機首部等）を整備しました。図 9 に実験シス

テムの概要を示します。

データ収集・記録機能は、母機装備として搭載されたエアデータコンピュータ、AHRS（姿勢方位基準装置）やディスプレイ装置間で入出力される ARINC429 形式のデータを分岐し、取得します。これらのデータはネットワークを介して、記録装置と画像表示用ノート PC に共有します。本機能は、「飛翔」に装備したネットワークベースの飛行データ計測システム¹⁶⁾と共通の技術を用いています。

画像表示用ノート PC で生成した画像は、コックピット・ディスプレイに入力可能な信号形式に変換され、計器盤のナビゲーション・ディスプレイに表示されます。

5. 飛行シミュレータ

飛行シミュレータは、現実の航空機の操縦と等価な感覚、及び操縦のための情報をパイロットに対して与えるための装置です。

JAXA では、「FSCAT-A（固定翼機型コックピットシステム）」（図 10）と「FSCAT-R（回転翼機型コックピットシステム）」（図 11）を組み合わせることで目的に応じた実験環境を構築しています²³⁾。飛行シミュレータを利用することで、実際に航空機を使用する場合に比較して高い安全性を確保しつつ、より少ないコストで航空機に関するさまざまな実験や評価研究を行うことが可能になります。風などの外界環境を一定に保った状態での評価が行えるの

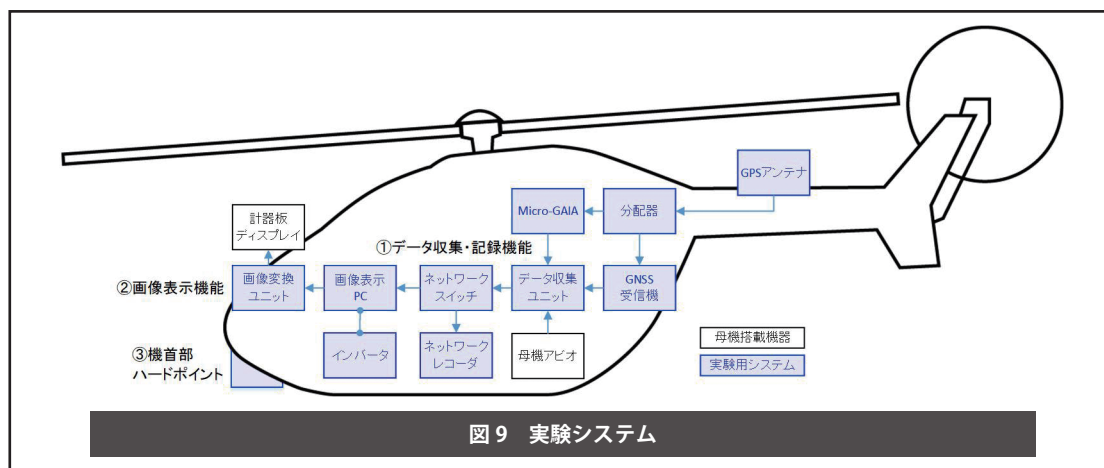


図 9 実験システム

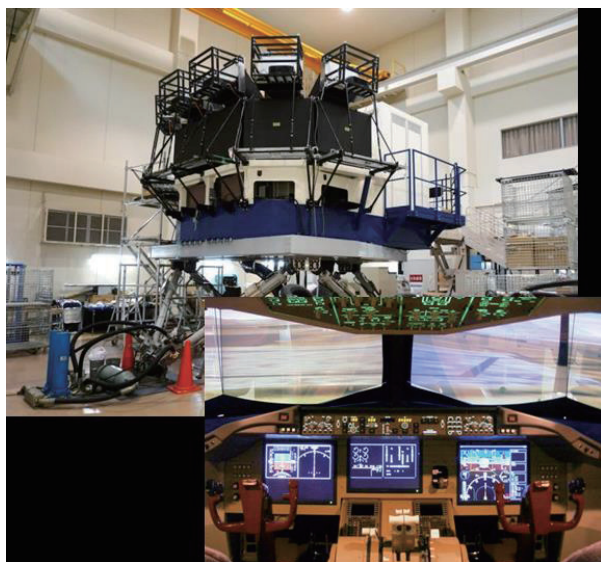


図 10 FSCAT-A

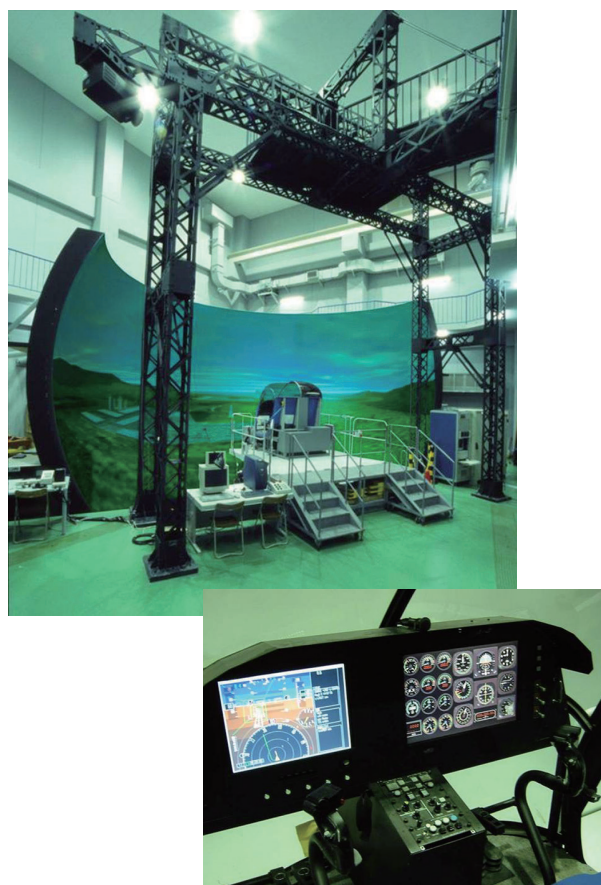


図 11 FSCAT-R

も、シミュレータの特長のひとつです。

本飛行シミュレータで利用されているデータ処理ソフトウェアや計器表示プログラムは、実験用航空機と共通となっており、飛行シミュレーションと実機による飛行実験とを併せた総合的な実証実験を行っています。

飛行シミュレータと実験用航空機との連携という観点では、通常と異なる飛行方法や操縦を要求される飛行実験を実施する際に、飛行シミュレータが有効に利用されます。例えば、「飛翔」を用いた機体騒音低減技術の飛行実証（FQUROH）¹⁷⁾の飛行実験においては、地上に設置したマイクアレイの直上を極めて高い精度の位置、速度及び指定されたエンジン出力で通過することが要求されました。そこで固定翼機シミュレータ FSCAT-A を用いて誘導表示を試作し、実験を担当するパイロットが参加して、この誘導表示と実験手順の確認と慣熟を実施しました（図 12）。これにより、実験の安全性と効率性を確保することができました（図 13）。

実験用ヘリコプタによる飛行実験についても、例えば 3.2 航空人間工学で紹介した SAVERH の飛行実験に先立って、回転翼機シミュレータ FSCAT-R を用いた機能確認と慣熟を実施しています。

6. おわりに

JAXA 飛行技術研究ユニットで取り組んでいる飛行システム技術の研究開発と、実験用航空機および飛行シミュレータの概要を紹介しました。技術開発の成果は、実使用環境における評価・実証を経て初めて実用性のある技術として認知されます。航空機の飛行環境は大気温度、気圧、パイロット視界、速度・加速度等が大きく変化し、突風などによる風の変化等にも遭遇するため複合的であり、これら実使用環境における評価・実証には実際に飛行させてみるのが重要です。航空機技術の開発における最後のフェーズとなる飛行システム技術として飛行実証することで、航空技術の成熟度を引き上げ、日本の航空産業の発展につなげていきたいと考えています。



図 12 FQUROH の手順確認の様子



図 13 FQUROH 飛行実験時の様子

飛行試験の実施にあたっては、国土交通省航空局、防衛省自衛隊、各空港の管理者、飛行試験拠点の地元である愛知県、北海道大樹町等に多大なご協力をいただいています。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 元田敏和, 中川英治, 渡邊篤, MCS 並列計算システムの開発, 日本航空宇宙学会誌, 2019, 第 67 巻, 第 5 号, pp.167-pp.173
- 2) 牧野好和, スカイフロンティアプログラム 静粛超音速機統合設計技術研究, 航空技術, 2018 年, No.765, [18-12], pp.36-pp.50
- 3) 二宮哲次郎, 鈴木広一, 川口純一郎, D-SEND#2 の誘導制御系評価, 日本航空宇宙学会論文集, 2017, 第 65 巻, 第 1 号, pp.10-pp.16.
- 4) 飯島朋子, 野田文夫, 須藤桂司, 村岡浩治, 船引浩平, CRM スキル行動指標の開発, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1465, 2003 年
- 5) 津田宏果, 飯島朋子, 野田文夫, 行動指標を用いた CRM スキル計測手法の開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-09-001, 2009 年
- 6) Tsuda, H., Iijima, T. and Noda, F., DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CRM SKILLS MEASUREMENT, 25th International Congress of the Aeronautical Science, 2006
- 7) 津田宏果, 船引浩平, 清水昭彦, 多和田一穂, 長谷部要, パイロット視覚情報支援技術 (SAVERH) 第 6 報, 第 56 回飛行機シンポジウム, 2018 年
- 8) Funabiki, K., Tsuda, H., Iijima, T., Nojima, T., Tawada, K. and Yoshida, T., Flight experiment of pilot display for search-and-rescue helicopter, Proc. SPIE, 2008
- 9) Tsuda, H., Funabiki, K., Iijima, T., Tawada, K. and Yoshida, T., Flight Tests with Enhanced/ Synthetic Vision System for Rescue Helicopter, Proc. SPIE 80410H, 2011
- 10) Funabiki, K., Tsuda, H. and Tawada, K., Evaluation of Synthetic Terrain Display for Helicopter SVS, Proc. HCI-Aero, 2012
- 11) Funabiki, K., Tsuda, H. and Tawada, K., Flight

Test of Synthetic Terrain and FLIR Images on Helmet-Mounted Display, 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2014

- 12) 小型航空機等に係る安全推進委員会, http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000006.html
- 13) European Aviation Safety Agency, In-flight recording for light aircraft, Notice of Proposed Amendment 2017-03, RMT.0271 (MDM.073 (a)) and RMT.0272 (MDM.073 (b)), 2017
- 14) MuPAL- α 開発チーム, 多目的実証実験機 MuPAL- α の開発, 航空宇宙技術研究所資料 TM-747, 2000 年
- 15) 坂東俊夫, 塚野雄吉, 増位和也, 石川和敏, 稲垣敏治, 前川昭二, 辻本隆, 辻浩敏, 篠田直正, 多目的実証実験機 (MuPAL- α) の開発と運用, 日本航空宇宙学会第 34 期年会講演会講演集, 2003 年, pp.17-pp.24.
- 16) 富田博史, 増位和也, 穂積弘毅, 成岡優, 横山篤史, 角井晋一, 伊藤聖, 大島辰弘, 田中伸幸, JAXA 実験用航空機「飛翔」のネットワークベース飛行データ計測システム, 第 50 回飛行機シンポジウム, 2012 年
- 17) 山本一臣, 航空環境プログラム 機体騒音低減技術, 航空技術, 2018 年, No.758, [18-05], pp.32-pp.40
- 18) 中村俊哉, 航空環境プログラム 機体軽量化技術, 航空技術, 2018 年, No.757, [18-04], pp.34-pp.40
- 19) 郭東潤, 環境航空機システム研究 機体軽量化技術, 航空技術, 2018 年, No.756, [18-03], pp.38-pp.50
- 20) 浜本滋, 基礎・基盤技術 1 空力試験・計測技術, 航空技術, 2019 年, No.769, [19-04], pp.28-pp.40
- 21) 中村俊哉, 基礎・基盤技術 3 構造・複合材料技術, 航空技術, 2019 年, No.771, [19-06], pp.30-pp.35
- 22) Okuno, Y. and Matayoshi, N., Development and Flight Tests of a New Research Helicopter MuPAL, Proc. American Helicopter Society 57th Annual Forum, 2001
- 23) 若色薫, 野田文夫, 村岡浩治, 飯島朋子, 船引浩平, 野嶋琢也, 研究開発用飛行シミュレータの開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-04-015, 2005 年