



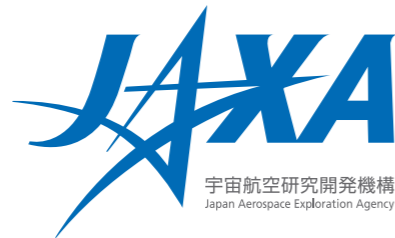
宇宙航空研究開発機構研究開発報告

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

米国CAPSTONEプログラムへの参加による次世代運航システムの評価飛行実験

CAPSTONE 飛行実験隊



JAXA-RR-07-043

2008年2月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

Abstract	1
概 要	1
略 語	2
1. はじめに	2
2. UAT データリンクの評価	6
2.1 目的	6
2.2 実験方法	6
2.2.1 飛行の方法	6
2.2.2 UAT の送受信シーケンス	7
2.2.3 実験システム	7
2.3 結果と考察	8
2.3.1 概要	8
2.3.2 航空機間のデータリンク切断発生位置	8
2.3.3 航空機間のデータリンク切断率	9
2.3.4 航空機地上間のデータリンク評価	10
2.3.5 考察	10
2.4 まとめ	10
3. パイロット・ディスプレイの評価	10
3.1 目的	10
3.2 Chelton EFIS	12
3.3 実験方法	12
3.4 結果	17
3.5 考察	19
3.6 まとめ	20
4. GPS/WAAS の評価	20
4.1 目的	20
4.2 実験方法	21
4.3 結果	23
4.4 まとめ	25
5. おわりに	25
謝 辞	25
文 献	26
付 録	
A1. CAPSTONE プログラムの詳細	26
A2. 実験機の仕様と運航体制	29
A2.1 母機	29
A2.2 主な改修内容	29

A2.2.1	CAPSTONE 対応アビオニクスを搭載	31
A2.2.2	操縦装置，無線装置の2重化	33
A2.2.3	計測用GPSアンテナ，機内電源の装備	34
A2.3	運航体制	34
A2.4	現地事務所	35
A3.	JAXA 操縦士の資格取得・訓練	35

CAPSTONE 飛行実験隊

又吉直樹 *1	現地責任者、機上・地上計測
石川 忠 *1	現地連絡員、機上・地上計測
船引浩平 *1	機上・地上計測
野嶋琢也 *1	機上・地上計測
津田宏果 *2	機上・地上計測
横山信宏 *1	機上・地上計測
諸隈慎一 *2	運航管理者（第1期）、機体操縦・システム評価
植竹保夫 *2	運航管理者（第2期）、機体操縦・システム評価
白水博文 *2	機体操縦・システム評価
相樂恭志 *2	整備状況確認

報告書執筆担当

1. はじめに	奥野善則 *1
2. UAT データリンクの評価	船引浩平 *1, 野嶋琢也 *1
3. パイロット・ディスプレイの評価	津田宏果 *2, 船引浩平 *1
4. GPS/WAAS の評価	又吉直樹 *1, 辻井利昭 *1
5. おわりに	奥野善則 *1

付録

A1. CAPSTONE プログラムの詳細	奥野善則 *1, 石川 忠 *1
A2. 実験機の仕様と運航体制	又吉直樹 *1, 石川 忠 *1
A3. JAXA 操縦士の資格取得・訓練	石川 忠 *1, 植竹保夫 *2

米国 CAPSTONE プログラムへの参加による 次世代運航システムの評価飛行実験*

CAPSTONE 飛行実験隊

Flight Test Evaluation of the CAPSTONE Advanced Aircraft Operation Systems*

CAPSTONE Flight Test Team

Abstract

Flight test evaluations of the CAPSTONE advanced aircraft operation systems have been conducted by JAXA in cooperation with the U.S. Federal Aviation Administration (FAA). Connectivity of the UAT (Universal Access Transceiver) data link was evaluated between two airplanes, measuring nearly 5%/0.05% disconnection of less/more than 3 sec duration, respectively. The Chelton EFIS system installed with the functions of TIS-B (Traffic Information Service - Broadcast) and FIS-B (Flight Information Service - Broadcast) was evaluated by JAXA research pilots. The 3-dimensional terrain and guidance display was also evaluated by comparing with the “tunnel-in-the-sky” display system developed by JAXA. Finally, flight test evaluation of accuracy and availability of GPS/SBAS (Satellite Based Augmentation System) was conducted and the advantage of applying ABAS (Aircraft Based Augmentation System), i.e., GPS/INS hybrid navigation technology was demonstrated to improve the protection level.

Key Words: CAPSTONE, UAT, ADS-B, TIS-B, FIS-B, SVS, GPS, SBAS, ABAS

概 要

米国連邦航空局（FAA）がアラスカ州で進めている次世代運航システムの運用評価プログラムである CAPSTONE に参加し、UAT（Universal Access Transceiver）データリンクを用いた ADS-B（Automatic Dependent Surveillance - Broadcast）の信頼性評価、TIS-B（Traffic Information Service - Broadcast）、FIS-B（Flight Information Service - Broadcast）、3次元地形表示・経路誘導等の機能に対応した統合型ディスプレイのパイロット評価、および GPS/SBAS（Satellite Based Augmentation System）の精度評価のための飛行実験を実施した。UAT 評価では、2機の航空機が近接して飛行する状態でのデータリンクの信頼性を定量的に評価し、JAXA で研究開発を行う自動間隔確保・衝突回避システムのアルゴリズム開発に必要なデータを取得した。ディスプレイ評価では、CAPSTONE で用いられている米 Chelton 社製の統合型ディスプレイの状況認識性とワークロードについてパイロット評価を行い、DREAMS における統合型ディスプレイの研究開発の指針を得た。GPS/SBAS の評価では、米国で実運用に供されているシステムの精度・信頼性を評価し、課題を明らかにするとともに、SBAS のみではなく ABAS（Aircraft Based Augmentation System）技術を併用した場合の有効性を示した。

* 平成 19 年 12 月 6 日受付 (Received 6 December 2007)

* 1 航空プログラムグループ 運航・安全技術チーム (Operation and Safety Technology Team, Aviation Program Group)

* 2 総合技術研究本部 飛行システム技術開発センター (Flight Systems Technology Center, Institute of Aerospace Technology)

略 語	
ABAS	Aircraft Based Augmentation System
ADC	Air Data Computer
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast
AHRS	Attitude and Heading Reference System
ATC	Air Traffic Control (航空交通管制)
CPDLC	Controller Pilot Data Link Communication
DME	Distance Measuring Equipment
DREAMS	Distributed and Revolutionary Efficient Air-traffic Management System (JAXA の研究開発計画の名称)
EFIS	Electronic Flight Instrument System (電子式飛行計器システム)
FAA	Federal Aviation Administration (連邦航空局)
FIS-B	Flight Information Service - Broadcast
GAIA	GPS Aided Inertial navigation Avionics (JAXA で開発を進めている GPS/INS 複合装置の名称)
GBAS	Ground Based Augmentation System
GBT	Ground Based Transceiver
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GNSS	Global Navigation Satellite System
HAL	Horizontal Alert Limit
HITS	Highway-in-the-Sky
IFR	Instrument Flight Rules (計器飛行方式)
INS	Inertial Navigation System (慣性航法装置)
LNAV/VNAV	Lateral Navigation/Vertical Navigation
LPV	Localizer Performance with Vertical guidance
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MFD	Multifunction Flight Display
MOPS	Minimum Operational Performance Standards
MSAS	MTSAT Satellite-based Augmentation System
MTSAT	Multi-functional Transport Satellite (運輸多目的衛星)
NOCTARN	New Operational Concept using Three-dimensional Adaptable Route Navigation (JAXA の研究開発計画の名称)
NPA	Non Precision Approach (非精密進入)
PFD	Primary Flight Display
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SART	Situational Awareness Rating Technique
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SSR	Secondary Surveillance Radar (2次監視レーダ)
SVS	Synthetic Vision System
TAWS	Terrain Awareness and Warning System (対地接近警報システム)

TIS-B	Traffic Information Service - Broadcast
UAT	Universal Access Transceiver
VAL	Vertical Alert Limit
VDL	VHF Data Link
VFR	Visual Flight Rules (有視界飛行方式)
VOR	VHF Omni-directional Radio Range
WAAS	Wide Area Augmentation System

1. はじめに

航空機の運航システムは、レーダによる監視、地上の航空保安無線施設による航法、無線電話による通信という従来の方式から、ADS-Bによる監視、GNSSによる航法、CPDLCによる通信という次世代システムへと移行しつつある。ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast) とは、航空機上で得た位置情報を放送型データリンクによって地上局に送信する方式で、地上のレーダによる監視に比べて精度が高く、また通信量を低減できるため電波資源をより有効に活用可能という利点を有している。GNSS (Global Navigation Satellite System) とは、米国の GPS、欧州の GALILEO、ロシアの GLONASS 等の測位衛星の総称であり、地上の航空保安無線施設 (VOR/DME 等) の覆域に依存せずに高精度な測位を行えることが特長である。GNSS の精度、信頼性を補強するシステムとして、静止衛星から補強情報を送信する SBAS (Satellite Based Augmentation System)、地上局を使用する GBAS (Ground Based Augmentation System)、航空機上で利用できる情報のみを使用する ABAS (Aircraft Based Augmentation System) がある。CPDLC (Controller Pilot Data Link Communication) とは、管制官とパイロットがデータ通信によって指示や確認を行う方式であり、従来の音声による方式に比べて信頼性の向上が期待される。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、これらの次世代運航システムを活用し、増大する航空交通需要に対応するために航空機をより高密度かつ安全に運航するための研究開発を推進している。独立行政法人電子航法研究所との共同で 2001 年から 5 ヶ年計画で実施した NOCTARN (New Operational Concept using Three-dimensional Adaptable Route Navigation, 3次元適応型経路を用いた次世代運航方式) の研究では、ADS-B、GNSS、CPDLC 等の技術を用いて自律的に間隔確保や着陸順位付けを行い、3次元的な曲線経路を用いて複数の航空機が高密度に進入する実証実験を実施した (文献 1.1)。これらの成果は、DREAMS (Distributed and Revolutionary Efficient Air-traffic Management System, 分散型高効率航空交通管理システム) と呼ばれる研究開発計画に引き継がれ、実用化を目指した研究が進められている (文献 1.2)。

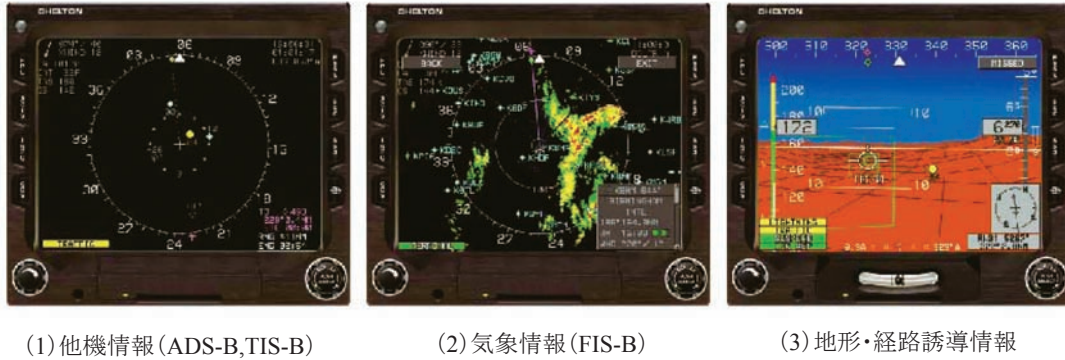


図 1.1 CASPTONE で用いられているパイロット・ディスプレイの例

一方、米国の連邦航空局（Federal Aviation Administration, FAA）がアラスカ州で実施した CAPSTONE プログラムでは、UAT（Universal Access Transceiver）と呼ばれるデータリンクを用いて、ADS-B、TIS-B、FIS-B 等の機能を実現し、この機能に対応したアビオニクス（図 1.1）を 300 機近い小型航空機に搭載して運用評価を実施した。TIS-B（Traffic Information Service - Broadcast）および FIS-B（Flight Information Service - Broadcast）とは、放送型データリンクによって、航空機に対して周辺を飛行する他機の位置情報や気象情報等を提供し、安全性を向上するシステムである。アラスカ州は陸上交通に代わって航空交通が発達しており、また気象条件が厳しいため、米国の中でも最も事故発生率の高い地域であるが、CAPSTONE システムの導入によって約 47% の事故率削減が達成されている（文献 1.3）。



図1.2 飛行実験の実施場所

JAXA は FAA と協力協定を締結し、CAPSTONE プログラムに参加して評価実験を実施した。実験の目的は主に以下の 3 点である。

- (1) UAT データリンクの飛行評価を実施し、DREAMS における分散型管制システムの研究開発に必要なデータリンクの性能・信頼性に関するデータを取得する。
- (2) CAPSTONE で用いられている次世代型アビオニクス（統合型ディスプレイ）の状況認識性やワークロードのパイロット評価を実施し、DREAMS における統合型ディスプレイの研究開発の課題、目標を明確化する。
- (3) 米国で実運用が行われている GNSS と SBAS（米国では Wide Area Augmentation System, WAAS と呼ばれている）の精度、信頼性を評価し、DREAMS で開発を進めている ABAS 技術の有効性を検証する。



図1.3 飛行実験に用いた航空機

飛行実験は、2006 年 7 月 12 日～8 月 4 日（第 1 期）および 9 月 14 日～10 月 9 日（第 2 期）に分けて計 35 回（約 50 時間）実施した。飛行実施記録を表 1.1 に示す。アラスカ州のアンカレッジ近郊にある Merrill Field Airport に実験拠点を設置し、一部の実験についてはアラスカ西部の Bethel 周辺でも実施した（図 1.2）。図 1.3 に実験に



図1.4 飛行実験に用いた航空機の計器板

表 1.1 (1) 飛行実施記録 (第 1 期)

飛行日	飛行番号	飛行目的	離陸時刻	着陸時刻	飛行時間	離陸飛行場	着陸飛行場	備考
7月15日	確認#1 F01	機能確認	15:15	16:15	1:00	Merrill	Merrill	
7月17日	慣熟#1 F02	JAXAパイロット慣熟	12:30	13:50	1:20	Merrill	Kenai	
7月17日	慣熟#2 F03	JAXAパイロット慣熟	15:05	16:25	1:20	Kenai	Merrill	
7月18日	試験#1 F04	地形情報評価	11:40	14:10	2:30	Merrill	Merrill	
7月19日	試験#2 F05	地形情報評価	12:05	14:05	2:00	Merrill	Kenai	本フライト以降、機上GPSデータを計測
7月19日	試験#3 F06	RNAVアプローチ評価	15:05	17:05	2:00	Kenai	Merrill	
7月20日	試験#4 F07	RNAVアプローチ評価	16:05	17:45	1:40	Merrill	Merrill	本フライト以降、機上UATシリアルデータを計測
7月21日	確認#2 F08	EFIS機能確認	15:15	15:30	0:15	Merrill	Merrill	本フライト以降、EFIS SoftwareはVer 6.0Aを使用(Restricted)
7月24日	試験#5 F09	航空機間のUATデータリンク評価	14:20	16:10	1:50	Merrill	Merrill	
7月24日	試験#5 F09	航空機間のUATデータリンク評価	14:15	16:10	1:55	Merrill	Merrill	機体はN3411S
7月26日	慣熟#3 F10	JAXAパイロット慣熟	11:25	13:05	1:40	Merrill	Kenai	
7月26日	試験#6 F11	低高度RNAVルート評価	15:00	15:25	0:25	Kenai	Merrill	AHRS不調のため、試験中止して帰投
7月27日	試験#7 F12	低高度RNAVルート評価	16:10	17:20	1:10	Merrill	Merrill	
7月28日	試験#8 F13	地形情報評価	11:05	13:05	2:00	Merrill	Kenai	計測用PC故障のため、機上UATシリアルデータ無し
7月28日	試験#9 F14	RNAVアプローチ評価	15:20	17:10	1:50	Kenai	Merrill	計測用PC故障のため、機上UATシリアルデータ無し
7月31日	移動#1 F15	Bethelへの移動	15:05	16:30	1:25	Merrill	Iliamna	
7月31日	試験#10 F16	Bethelへの移動	17:10	20:00	2:50	Iliamna	Bethel	Bethelへの移動中に、Aniak～St.Marys～Bethelの試験レグを飛行
8月1日	移動#3 F17	Merrillへの移動	15:25	17:35	2:10	Bethel	Iliamna	
8月1日	移動#4 F18	Merrillへの移動	18:05	19:25	1:20	Iliamna	Merrill	
8月3日	試験#11 F19	UATデータ取得／EFIS表示状況確認	14:55	15:30	0:35	Merrill	Merrill	
8月3日	試験#12 F20	GPS/WAAS評価	16:20	18:05	1:45	Merrill	Merrill	
計					31:05			

表 1.1 (2) 飛行実施記録 (第 2 期)

飛行日	飛行番号	飛行目的	離陸時刻	着陸時刻	飛行時間	離陸飛行場	着陸飛行場	備考
9月18日	確認#1 F21	機能確認	15:50	17:20	1:30	Merrill	Merrill	
9月19日	試験#1 F22	RNAVアプローチ評価	11:20	12:45	1:25	Merrill	Merrill	
9月19日	試験#2 F23	RNAVアプローチ評価	15:25	16:50	1:25	Merrill	Merrill	
9月20日	試験#3 F24	地形情報評価	14:45	17:05	2:20	Merrill	Merrill	
9月21日	試験#4 F25	地形情報評価	9:20	11:15	1:55	Merrill	Merrill	
9月25日	試験#5 F26	航空機間のUATデータリンク評価	14:45	16:15	1:30	Merrill	Merrill	
9月25日	試験#5 F26	航空機間のUATデータリンク評価	14:55	16:15	1:20	Merrill	Merrill	機体はN888YA
9月28日	試験#6 F27	航空機間のUATデータリンク評価	11:50	13:30	1:40	Merrill	Merrill	
9月28日	試験#6 F27	航空機間のUATデータリンク評価	12:20	13:35	1:15	Merrill	Merrill	機体はN888YA
9月29日	視察#1 F28	視察	10:40	11:05	0:25	Merrill	Merrill	
9月29日	視察#2 F29	視察	11:20	11:30	0:10	Merrill	Merrill	
9月29日	視察#3 F30	視察	11:45	12:00	0:15	Merrill	Merrill	
9月29日	視察#4 F31	視察	15:30	16:10	0:40	Merrill	Merrill	
9月30日	試験#7 F32	航空機間のUATデータリンク評価	13:55	15:20	1:25	Merrill	Chenega Bay	
9月30日	試験#7 F32	航空機間のUATデータリンク評価	13:55	15:30	1:35	Merrill	Chenega Bay	機体はN888YA
9月30日	試験#8 F33	航空機間のUATデータリンク評価	16:15	17:40	1:25	Chenega Bay	Merrill	
9月30日	試験#8 F33	航空機間のUATデータリンク評価	16:25	17:50	1:25	Chenega Bay	Merrill	機体はN888YA
10月4日	試験#9 F34	GBT覆域評価	14:15	17:25	3:10	Merrill	Merrill	
10月6日	試験#10 F35	GBT覆域評価	11:30	12:55	1:25	Merrill	Merrill	
計					20:40			

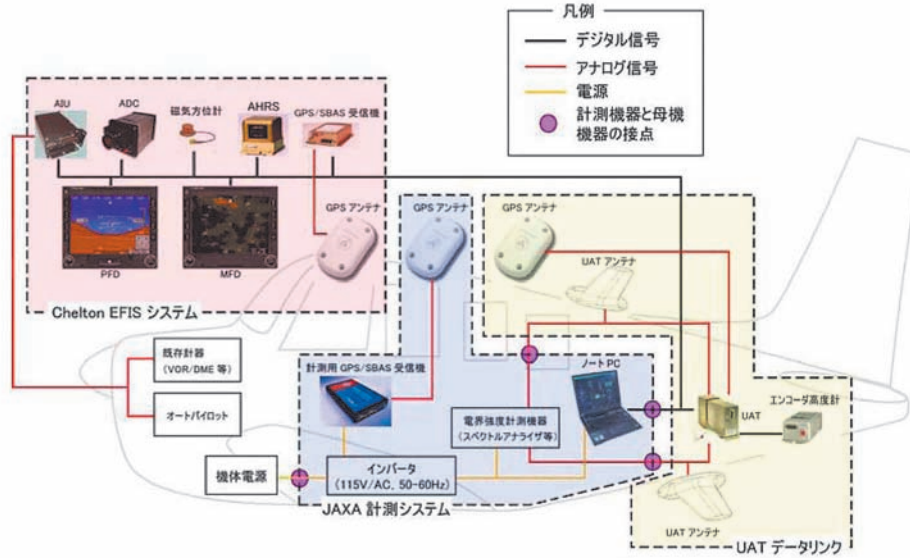


図1.5 実験システムの概要



図1.6 飛行実験における飛行軌跡の例

用いた航空機（ビーチクラフト式 A36 型機「ボナンザ」）を示す。計器板には米 Chelton 社製の統合型ディスプレイ 2 個が設置されている（図 1.4）。また、機体には計測用の GPS/WAAS 受信機や実験データ記録用の PC 等を搭載した（図 1.5）。図 1.6 に、飛行実験の主な内容と飛行経路の例を示す。本稿では、上記（1）～（3）の各実験結果についてそれぞれ第 2～4 章で報告するとともに、付録では、CAPSTONE プログラムの詳細、実験機の仕様と運航体制、および JAXA 操縦士の資格取得・訓練についてまとめる。

なお、本稿では一部に航空機で慣用されている単位表記を用いている。表 1.2 に SI 単位への換算値を示す。

表1.2 単位換算表

慣用単位	SI 単位
ft	0.3048 m
kt	0.5144 m/s
NM	1852 m
lb	0.4536 kg

2. UAT データリンクの評価

2.1 目的

従来のレーダに代わる航空機監視システムとして、ADS-B の本格的な導入が始まっている。ADS-B とは、航空機が機体の位置などの情報を定期的に放送するシステムであり、レーダサイトの覆域外の監視だけでなく、監視精度の向上や衝突回避のための通信量の低減にも有効である（文献 2.1）。一方、ADS-B が発信する情報は地上だけではなく航空機でも受信可能であることから、衝突回避や間隔確保に利用するための技術開発が盛んに進められている。ADS-B を実現するメディアとしては、現在、モード S 拡張スキッタ、VDL (VHF Data Link) Mode 4、UAT の 3 つが提案されている。このうち、UAT については、CAPSTONE において多くの小型機に搭載され、豊富な運用実績を重ねている（文献 2.2）。

JAXA と電子航法研究所では、これまでに小型機のための次世代運航方式の研究を進めてきており、その中で実験用のデータリンクを用いて ADS-B を構築し、航空機同士が自律的に着陸順位を設定し、間隔を確保しながら進入着陸を行う技術を開発した（文献 1.1）。このようなアプリケーションを実現するためには、想定するデータリンクが持つ信頼性や覆域などの特性を把握し、要すればデータリンク切断時などの対応を考慮してシステムを開発しなくてはならない。そこで、CAPSTONE 環境下において、UAT データリンクの評価のための飛行実験を実施した。本実験も JAXA と電子航法研究所との共同研究として実施しており、JAXA がデータリンクの伝達性の計測・評価、電子航法研究所が電波環境の計測・評価等を担当した。本章では、JAXA で実施したデータリンクの伝達性の計測・評価結果について報告する。

2.2 実験方法

2.2.1 飛行の方法

(1) 航空機間のデータリンク評価

2機の航空機が、どのような位置関係にある時にデータリンクの途絶が生じるかを調べた。ADS-B によって衝突回避および間隔確保を行うことが適用先であることから、距離としては、2～5NM 程度が適切であると考えられたが、実験の安全性の観点から常時相手機が目視できることが重要であること、100m 程度を超えれば機体による遮蔽効果は一定であることなどから、標準的な距離を 0.5NM とすることにした。図 2.1 に 2機の航空機の相対的な飛行パターンを示す。データリンクの切断が、自機あるいは相手機の機体による電波の遮蔽によって発生すると考えられることから、垂直面内、水平面内および機体軸垂直面内に矩形の飛行を行う 3つのパターンと双方が旋回しながら離れて再び会合するパターンを設定した。基本的には、自機が水平直進飛行し、その周囲を相対的な位置を変化させながら相手機が飛行する。データリンクの計測は自機のみで行う。すなわち、相手機から自機への信号によってデータリンクの切断を検出している。

(2) 航空機地上間のデータリンク評価

地上局 (Ground Based Transceiver, GBT) の覆域を評価するために、あらかじめ予測された各地上局の覆域 (図 2.2) の境界付近を飛行し、各地上局とのデータリンクの伝達性を計測した。この実験は、複数の地上局が設置されている Bethel 周辺で実施した。地上局で受信したデータは FAA から提供を受けた。

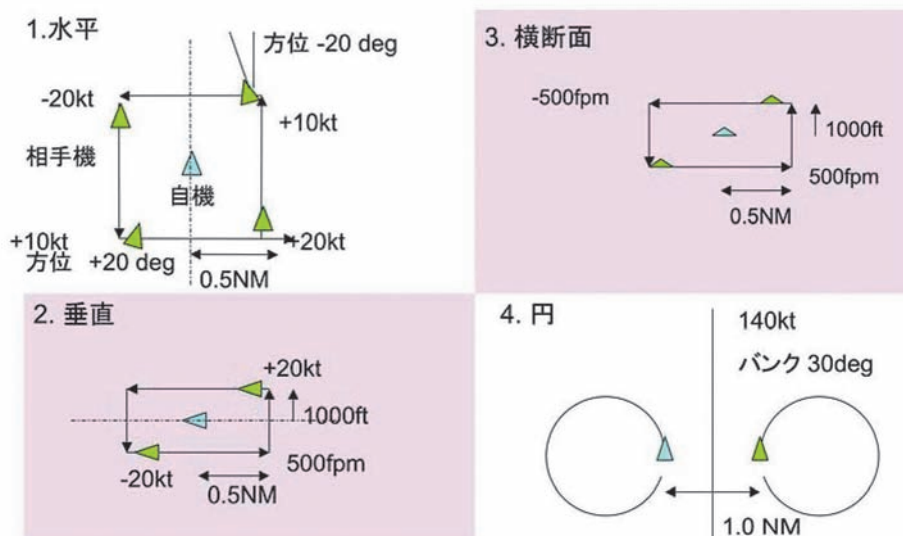


図2.1 UATデータリンク評価の飛行パターン

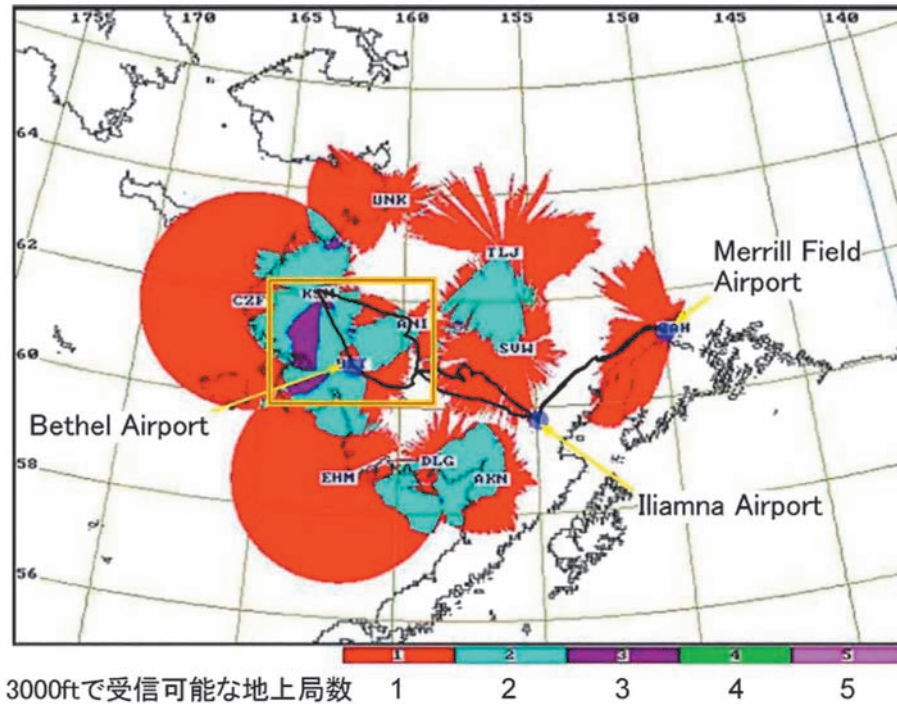


図2.2 地上局(GBT)の覆域(FAA資料)

2.2.2 UAT の送受信シーケンス

UAT の送受信は基本的に1秒周期で行われる(文献2.3)。その際、送受信はそれぞれ上下のアンテナのうち、いずれかを用いることになっている。送信については「上上下下」のパターンで、受信については「上下上下」のパターンが用いられる。地上走行時には下方アンテナからの送信が抑制されるが、今回の実験では考慮する必要がない。

れ1基ずつ配置されている。

A36に搭載した実験システムの構成を図2.5に示す。UATには2つの通信アンテナと1つのGPSアンテナが接続されている。UATはGPSセンサを内蔵しており、計測した位置情報などを自動的に放送するもので、単体で利用することができる。一方、対応した表示装置には、シリアル信号を入力することで他機情報や地上から得られ

2.2.3 実験システム

図2.3および図2.4に航空機間のデータリンク評価に用いた航空機を示す。ビーチA36、セスナC182、パイパーP-31の3機の航空機のうち、第1期の実験では、A36およびC182を、第2期の実験ではA36およびPA-31を用いた。UATのアンテナはいずれも機体の上下にそれぞれ



図2.4 データリンク評価実験に用いた航空機, C182



図2.3 データリンク評価実験に用いた航空機, A36(手前)とPA31(奥)

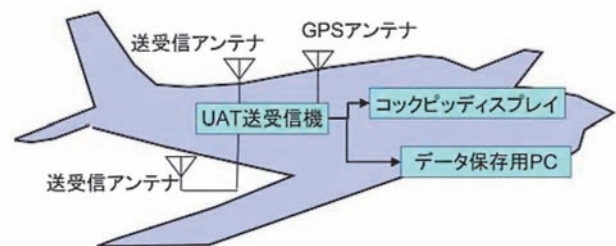


図2.5 データリンク評価実験の計測システム

る気象情報などを表示することができる。実験では、2つの出力ラインの内、1つをコックピットディスプレイに接続し、もう1つをノートPCに接続してデータの保存を行った。

2.3 結果と考察

2.3.1 概要

航空機間のデータリンク評価を5回、航空機地上間のデータリンク評価を2回実施した（詳細は表1.1参照）。航空機間のデータリンク評価のうち2回についてはデータ記録に不具合があり、有効なデータとしては3回分（Case 27, 30A, 30B）が得られた。これらのうち、Case27およびCase30Aについては前述の飛行パターンを実施しているが、Case30Bについては、主に自機が定常旋回飛行を断続的に行っている。Case 27はA36とC182を用いており、他のケースではA36とPA31を用いている。

2.3.2 航空機間のデータリンク切断発生位置

図2.6-8に上記3つのケースのデータリンク切断位置を示す。これらの図は、自機を中心として、データリンクの切断が起きた際の相手の相対位置をプロットしたものである。データリンクの切断は、データ補間が発生している位置を抽出して判定している。相対位置の色はある時点を基準として、4秒周期で赤緑白黄と仮に振っている。例えば図2.6のEの箇所では、機体の色が赤緑の繰り返しであることから、2秒おきに2秒連続の切断が繰り返されていることがわかる。

切断がどのような理由で起きているかを推定する。アンテナの送受信パターンから、相手機体によって信号が遮断された場合には2秒毎に受信と遮断が繰り返されることが推定できる。一方、相手機からの信号は届いているが、自機体によって遮断された場合には、1秒周期で受信と遮断が繰り返される。双方の機体の影響が組み合わさった場合には、4秒に1回のみ受信が行われる。このことから、4秒のうちのどのスロットで、自機と相手機が上下いずれのアンテナを使って送受信を行っていたかについて推定したものをそれぞれの図に示した。

図2.6では、切断の発生が機体の垂直面内に集中していることがわかる。Aの箇所では白のプロットのみが連続して現れていることから4秒に1回、Bの箇所では4秒に1回あるいは1秒おきの切断であり、自機体の遮蔽の影響が主であることが考えられる。一方、Cでは白と黄色、Eでは赤と緑であり、2秒連続切断であることから、相手機体の遮蔽の影響が大きいと推定される。

図2.7のGは黄色であることから4秒に1回、Fでは白と黄色であり、1秒置き切断であることから、自機側の遮蔽と推定される。また、Hでは白と黄色で2秒連

続の切断が見られることから、相手機体の遮蔽の影響が強いと考えられる。

UATの送受信アンテナ切り替えのシーケンスは、機体間の遮蔽が生じた場合にも4秒に1回はデータが到達することを想定している。今回の実験で飛行中に4秒以上データが途切れたケースとしては、図2.6のDおよび図2.8のIの2回が記録された。これらはいずれも推定バンク角約45度の比較的大きな機動を行っている最中であっ

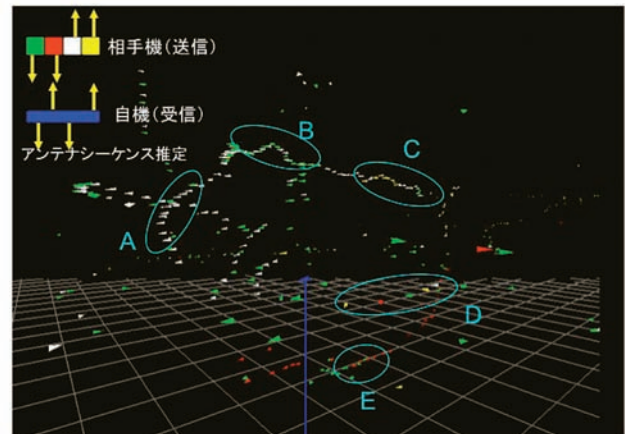


図2.6 Case27のリンク切断

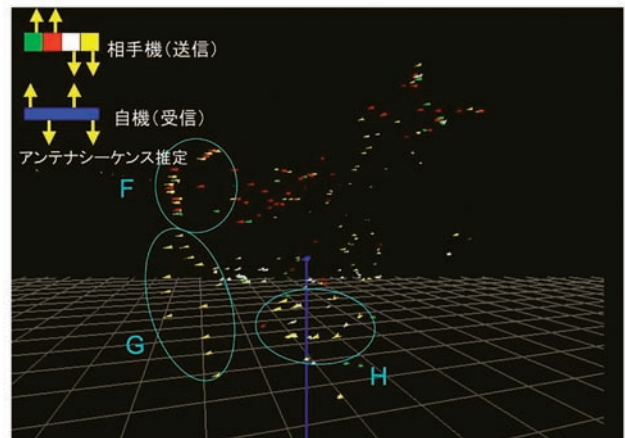


図2.7 Case 30Aのリンク切断

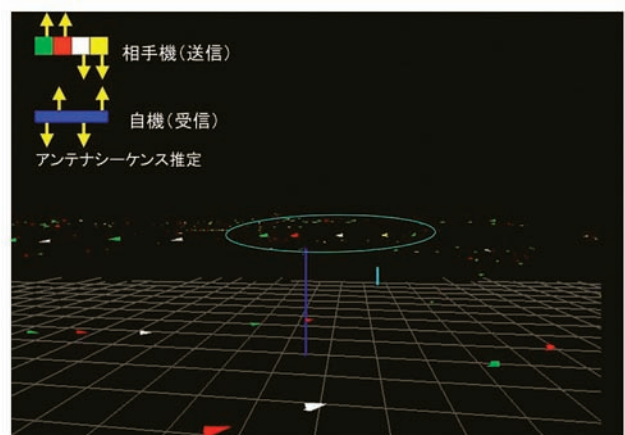


図2.8 Case 30Bのリンク切断

た。

2.3.3 航空機間のデータリンク切断率

図 2.9 に 3 回の実験に関するデータリンク切断の発生率を示す。記録されたデータのうち、2機の間隔が 10NM 以内のものを対象としている。全ての飛行を合計しても 4 秒以上の切断は 5.3 時間で 2 回のみであった。これらの 3 回の飛行毎の自機のバンク角と距離の平均値をそれぞれ図 2.10、図 2.11 に示す。なお、バンク角は速度と方位変化率から推定した値であり、精度は低い。また、それ

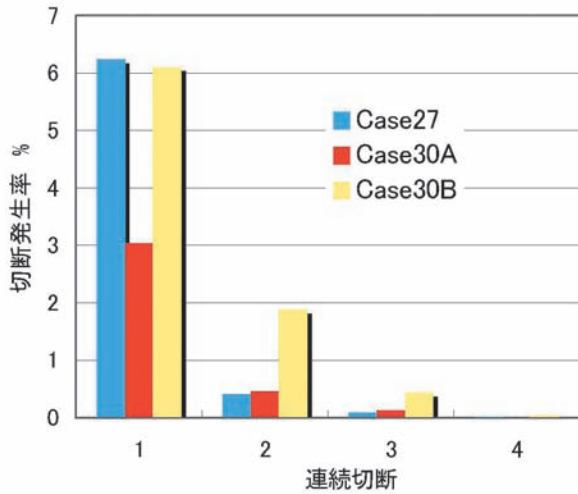


図2.9 飛行毎のデータリンク切断の発生率

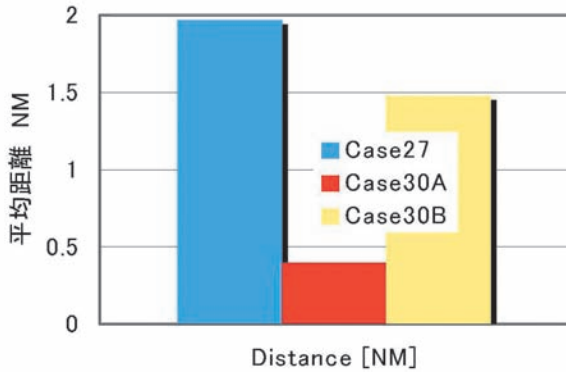


図2.10 飛行毎の平均相対距離

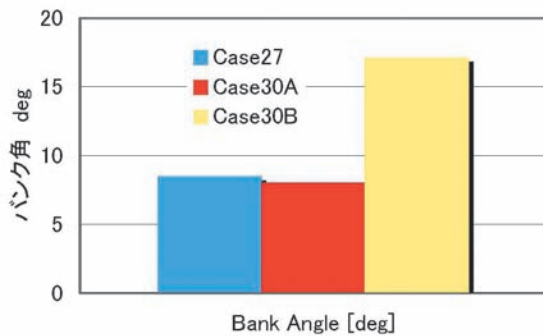


図2.11 飛行毎の平均バンク角

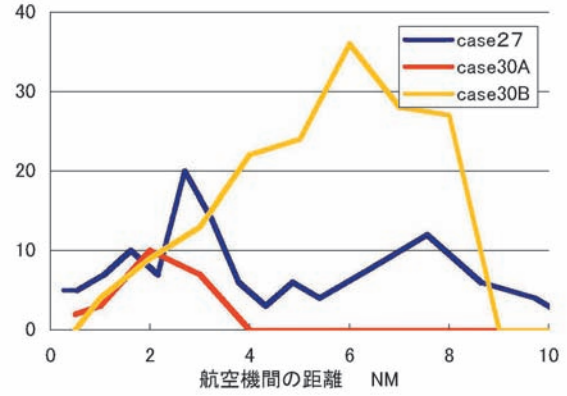


図2.12 航空機間隔毎の切断発生率

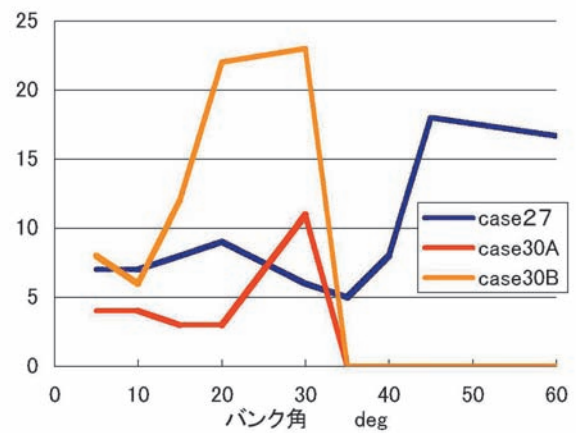


図2.13 バンク角毎の切断発生率

ぞれのケースについて、航空機間隔毎の切断率を図 2.12 に、バンク角毎の切断率を図 2.13 に示す。図 2.12 から航空機の間隔が増大するにつれて切断率が高くなっていることが分かる。ただし、図 2.10 に示すようにいずれのケースでも平均間隔は 2NM 以下であり、4NM 以遠のデータはサンプル数も少ないことから、これらの傾向はおよそ 4NM 以下でのみ確認できる。このことから、図 2.10 で Case27 および Case30B が Case30A に比べて距離が大きいことが図 2.9 での切断率の高さに繋がっていると考えられる。また、図 2.13 からバンク角についても同様に 10 度を越えて以降の切断率の増加が見られる。なお、ここでも 30 度を越えたバンク角のサンプル数は特に Case 30A, 30B では少なく、このバンク角の領域で傾向の判断は難しい。これを考慮すると、大きなバンク角が切断率の増大に影響していると考えられる。他方、Case 30B では 27, 30A と異なり、相手機に対して 2〜4NM の距離を置いて定常的な旋回を繰り返していることから、図 2.13 での Case 30B の高い切断率（約 22%）には距離の影響も含まれていると考えることができる。

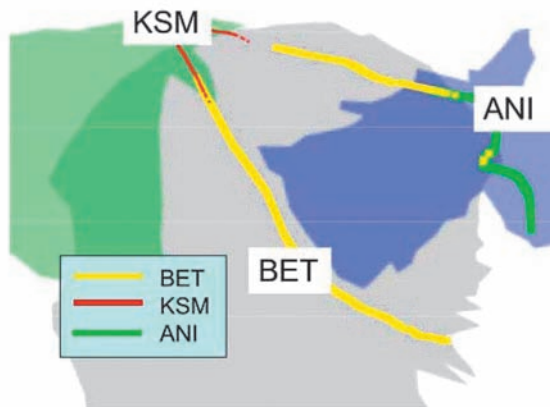


図2.14 地上局(GBT)による受信結果

2.3.4 航空機地上間のデータリンク評価

図 2.14 に地上局で受信された実験機の位置を示す (図 2.2 の黄色い四角で囲んだ部分を拡大した図)。この飛行では、実験機は Bethel - St. Mary's - Aniak - Bethel と飛行した。ここで、地上局 (GBT) は、Bethel (GBT 名称 BET), St. Mary's (同 KSM), Aniak (同 ANI) にそれぞれ配置されている。図中、3000ft を飛行した場合の BET, KSM, ANI のそれぞれの計算上の到達範囲を灰色、緑、青で示した。航空機の位置を示すプロットの色は、受信

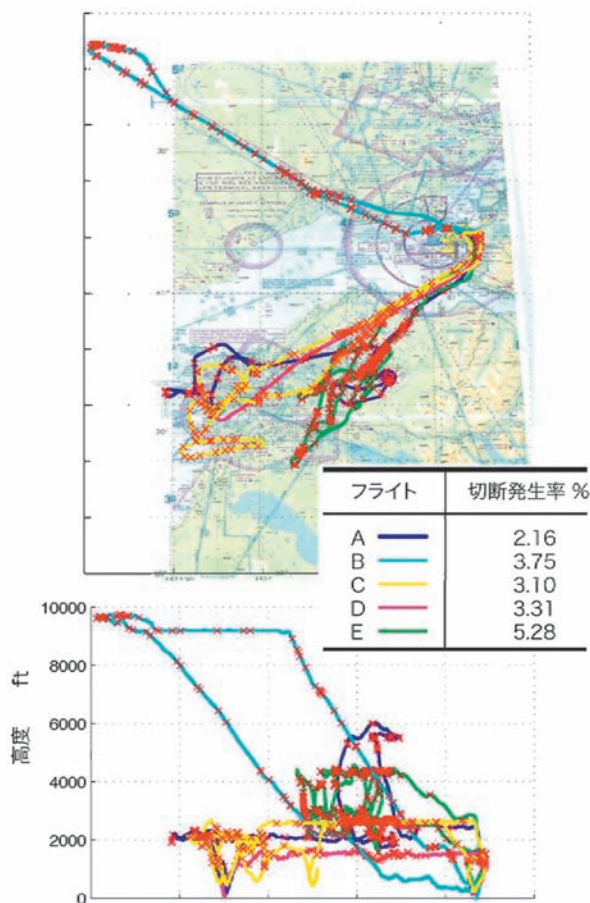


図2.15 航空機地上間(アップリンク)データ切断率

された GBT に対応しており、BET, KSM, ANI がそれぞれ黄、赤、緑で示されている。実験機の飛行高度は雲底の制限によって 2000ft 程度 (最大で 2500ft) であった。

この図によれば、3つの GBT の実際の受信範囲と計算上の受信範囲はほぼ一致しており、計算による到達範囲の妥当性が確認された。

次に、地上局から航空機へのデータリンク (アップリンク) の切断発生率の評価結果を示す。図 2.15 に GBT からの信号を航空機で受信した際に切断が発生した位置を×で示した。5回の飛行の記録を実線で示し、それぞれの飛行の切断発生率を求めた。それぞれの飛行は高度などに差があるが、切断発生率は 2~5% であった。5% 台の飛行は、航空機間データリンクの計測試験であり、多数の旋回が含まれているために切断発生率が高くなったと考えられる。

2.3.5 考察

航空機間データリンク評価の 2 回の飛行を集計した結果、4秒に 1 回の連続しない切断は 10NM 以内で 5% 程度発生するが、4秒以上の切断が発生する確率は希であり、しかも機動中に発生している。距離が大きくなることで、連続しない切断は増加するが、連続した切断にはあまり影響がみられない。機体のバンクおよび旋回によって切断の発生は増加する。

以上のことから、4秒に 1~3 回の切断は常に生じうるものとして想定しておく必要があるが、4秒以上の連続的な切断に対しては、別の種類の対策を取れば良いことがわかった。例えば、このデータリンクを用いてメッセージなどの不連続な情報をやりとりする場合には、少なくとも 4秒間は同じメッセージを繰り返し、そのメッセージが到達しなかった場合にはメッセージを再送するという手順が有効であると考えられる。

2.4 まとめ

UAT データリンクによる ADS-B を用いて 2 機の航空機間でのリンク切断率の計測を行い、切断の発生の傾向、発生率およびその要因を明らかにすることができた。このような実験は FAA でも実施されておらず、取得したデータは FAA に提供した。また、航空機地上間のリンク切断率および到達範囲の計測を行った。これらのデータから、今後、衝突回避や間隔確保などのアプリケーションを開発する際に想定すべき切断発生率の指針を得ることができた。

3. パイロット・ディスプレイの評価

3.1 目的

CAPSTONE プログラムに参加する航空機には、他機

表示や地形表示、3次元経路表示などの機能をもつディスプレイシステムが搭載されている。GPS やデータリンクによって得られる情報を基にしたこれらの機能によって、パイロットの状況認識が向上し、CAPSTONE プログラムの導入による事故率の低減につながっていると考えられる。計器飛行を対象とした CAPSTONE Phase II で標準的なディスプレイシステムとされているのが米 Chelton

Flight Systems 社 の FlightLogic EFIS (Electronic Flight Instrument System) (以降 Chelton EFIS) である。このディスプレイシステムは3次元地形表示およびトンネル型経路誘導表示 (Highway-in-the-sky, HITS) などいわゆる Synthetic Vision System (SVS) を初めて実用化しており、2005 年時点では当該機能をもつ唯一の製品である。さらにバージョン 6.0B では、データリンクによって得られる

表3.1 PFD/MFDに呈示した情報一覧

名称	呈示内容	評価試験時に表示したディスプレイ
自機シンボル (3D)	自機の位置姿勢	PFD
自機シンボル (2D)	自機の位置姿勢	MFD
地形 (3D)	地形表示。地形がグリッド線入りで三次元表示される。描画は茶色一色。 	PFD
地形 (2D)	Map 式による地形表示。接近するにつれ、茶色、黄色、赤色と表示色が変化する。 	MFD
他機 (3D)	他機表示。TIS-B および ADS-B により獲得。自機シンボル (3D) に対し位置が相対的に 3D 表示される。	PFD
他機 (2D)	他機表示。TIS-B および ADS-B により獲得。高度・速度情報とともに、シンボル形状によりその機体の通信方式も表示する。	MFD
Highway-in-the-sky(HITS)	3D 経路表示。緑色の四角形枠を連続して表示 (前後の枠同士は線で結ばれてはなし) し、経路を示す。	PFD
気象情報	気象レーダ情報および METER 情報。FIS-B により獲得。	MFD

他機の情報 (TIS-B) や気象情報 (FIS-B) などの表示に対応している。これらの情報は、衛星航法とデータリンクによる情報共有技術を中心とした次世代の運航システムにおいて新たに主要な技術となることは間違いなく、実運航環境において有用性を評価し課題を抽出することが、次世代の運航システムの構築のために重要である。これらのパイロットに呈示される情報のうち、地形表示や気象情報についてはアラスカ固有の厳しい地勢や運航環境が、また他機表示については特に高密度で小型機が飛行している環境が、有用性評価のために効果的な実験環境となると考えられた。そこで、CAPSTONE 環境において、特に地形表示、気象情報表示、他機表示および3次元経路表示についてのパイロット評価を行い、主に状況認識性とワークロードの観点からこれらの情報の有用性評価と課題の抽出を実施した。本章ではこれらの実験について述べる。

3.2 Chelton EFIS

図 1.4 に本試験で用いた航空機に搭載されたディスプレイシステム (Chelton EFIS) を示す。2 個のディスプレイのうち左側が Primary Flight Display (PFD)、右側が Multifunction Flight Display (MFD) である。左右のディスプレイに呈示する情報はいずれも切り替え可能であり、PFD/MFD はそれぞれ左右のどちらにも表示可能である。飛行試験では、左席を評価パイロット (JAXA のリサーチパイロット)、右席を安全パイロット (現地運航会社のパイロット) とした。評価のため、PFD および MFD に呈示した主要情報を表 3.1 に挙げる。

3.3 実験方法

評価飛行試験の実施概要を以下に示す。

実施時期： 7/12 ~ 8/4 (第 1 期), 9/14 ~ 10/9 (第 2 期)

飛行空域： Merrill Field Airport, Lake Clark Pass (地形情報評価), Bethel Airport (気象情報評価), Kenai Airport (Simulated IFR による HITS 評価)

評価パイロット： JAXA リサーチパイロット 3 名

地形表示、気象情報、他機表示、HITS のそれぞれについて、実験の手順を以下に述べる。

(1) 地形情報表示

PFD および MFD に呈示される地形表示に関し、パイロット評価を実施した。本実験には 3 名のパイロットが参加した。本評価は主に Lake Clark Pass と呼ばれる空域にて実施した。当該の空域は狭隘な谷間であり、常に雲の高度が低いことから対地高度 500ft 前後での飛行が要求される。図 1.6 に経路の概略図を示す (図中赤線で示さ

表3.2 地形表示評価の実験ケース表

	PFD	MFD	外視界	
1	○	○	○	基本ケース (通常)
2	○	○	OFF	PFD と MFD は使用可、外視界は使用不可
3	○	OFF	OFF	PFD のみ使用可
4	OFF	○	○	MFD と外視界は使用可



図3.1 MFD自体をOFF(左)、フード代わりの帽子着用で外視界をOFF(右)

れた経路)。起点から終点までを 1 つのケースとし、往復でそれぞれ 1 ケースずつを実施した。実施したケースの組み合わせを表 3.2 に示す。外部視界を用いないケースでは簡易なフードを用いた。PFD を用いないケースでは、地形表示のみを消去し、MFD を用いないケースでは MFD 自体をオフとした (図 3.1)。すべてのケースが終了した後、色や形状の見やすさなどの視認性、直感的な認識性、情報取得の容易性、有用性について No Good から Good までの 5 段階、PFD と MFD の画面を見た割合については NotUse, Seldom, Often, VeryOften の 4 段階でパイロットが主観的に評価した。詳細は図 3.2 に示すパイロット評価シートその 2 の項目 2 を参照されたい。

(2) 気象情報表示

MFD に呈示される気象情報に関し、パイロット評価を実施した。本評価は Merrill Field Airport から Bethel Airport への飛行の間において実施した。飛行中にパイロットは適宜ディスプレイを操作し、気象情報を取得する操作を行った。2 名のパイロットが参加した。フライト後に、総合的に視認性、認識性、容易性、有用性について地形表示評価と同様に 5 段階での主観評価を行った。詳細は図 3.2 に示すパイロット評価シートその 2 の項目 3 を参照されたい。

(3) 他機情報表示

PFD および MFD に呈示される他機情報の視認性等を評価した。本評価のための固有の実験フライトは設定せず、個々のフライト毎にパイロットによる総合的な評価

CAPSTONE飛行実験@アラスカ パイロット評価シート

CAPSTONEにおける飛行実験において、運航環境およびディスプレイシステムに関するヒューマンファクタ関連のデータを取得する。

●記入項目

- 各シートについて、まず最初に、下記項目を記入してください。
 - ・日付
 - ・評価者の氏名
 - ・FLT(フライト)番号
 - ・気象

●評価項目

- 評価シートは全部で2枚あります。各フライトごとに評価記入してください。
 - ・Situational Awareness(青シート)
 - ・Workload(赤シート)

●Situational Awarenessで用いるSARTについて

Situational Awareness = Understanding - (Demand - Supply)

			Low/High, 7scale
Demand	Instability of Situation	Likelihood of situation to change suddenly	//
	Variability of Situation	Number of variables which require one's attention	//
	Complexity of Situation	Degree of complication (number of closely connected parts) of situation	//
Supply	Arousal	Degree to which one is ready for activity (sensory excitability)	//
	Spare Mental Capacity	Amount of mental ability available to apply to new variables	//
	Concentration	Degree to which one's thoughts are brought to bear on the situation	//
	Division of Attention	Amount of division of attention in the situation	//
Understanding	Information Quantity	Amount of knowledge received and understood	//
	Information Quality	Degree of goodness or value of knowledge communicated	//
	Familiarity	Degree of acquaintance with situation experience	//

●ワークロード指標の定義および説明

ワークロード指標		
ワークロード指標項目	端点	説明
OP(Operational Performance) 達成度 目標達成における成績と満足度	Good/Poor 良い/悪い 満足/不満足	・指定されたタスクについて、どの程度達成されたと思うか ・目標達成における成績について、どの程度満足したか (タスクに対するエラーの程度と満足度)
MD(Mental Demand) 精神的負荷 思考・考察の程度(予測,観察,判断,集中など)	Low/High 低い/高い	・運航に必要な諸元を保持するために、どの程度の思考的考察を要したか 例：予測、観察、記憶、判断、意思決定、精神集中、精神的負担
PD(Physical Demand) 身体的負荷 身体的活動の程度	Low/High 低い/高い	・運航に必要な諸元をほじるために、どの程度の身体的活動を要したか 例：3舵やスロットルの操舵、モード切換え、スイッチ操作等の動作が容易であったか、あるいは困難であったか
TP(Time Pressure) 時間的圧迫感 時間的圧迫の程度(タスクのペース)	Low/High 低い/高い	・運航に必要な諸元を保持するために、どの程度、時間的圧迫感を感じたか ・タスクを遂行するペースには余裕があったか、あるいは急速で大変であったか
Effort(Effort) 努力 精神的・身体的な努力の程度	Low/High 低い/高い	・タスクを遂行するために、どの程度、精神的および身体的努力が必要であったか
FR(Frustration Level) 不満度 不満の程度(不安,苛立ち,ストレスなど)	Low/High 低い/高い	・タスクの遂行中、どの程度、不安・苛立ち・ストレス・不愉快を感じたか

●ワークロード評価で用いる100点評価の目安

評点	説明
100	最高・制御不能・Missed Approach
90	基準より極度に高い
80	基準より相当高い
70	基準より割と高い
60	基準よりやや高い
50	基準と同等
40	基準よりやや低い
30	基準より割と低い
20	基準より相当低い
10	基準より極度に低い
0	ワークロードなし

図3.2 パイロット評価シート(その1)

2006 /氏名 /FLT番号 /気象

Situational Awareness

■ 各フライトごとに、離陸から着陸までを通して、評価してください。

1 SART		Low	1	2	3	4	5	6	7	High	
(1) 複雑さ、変数の数、変化率			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
(2) 精神的・身体的余裕、集中度合い、注意分散			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
(3) 理解レベル(認識した情報量・質、とっつきやすさ)			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
2 Terrain Awareness											
(1) 視認性	・ 色の見やすさ ・ 形状の見やすさ ・ 更新レートは適切か ・ 情報量は適切か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
(2) 認識性	・ 垂直方向のクリアランスは直感的に理解可能か ・ 水平方向のクリアランスは直感的に理解可能か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
(3) 情報の取得しやすさ(ディスプレイ操作の容易性)		Difficult-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Easy	
P F D	(4) 各飛行フェーズにおける有用性	Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
	・ Climb		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
	・ Cruise		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
	・ Approach ・ Landing		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
(5) 画面を見ていた割合	・ PFD ・ MFD	<input type="radio"/> NotUse	<input type="radio"/> Seldom	<input type="radio"/> Often	<input type="radio"/> VeryOften						
(6) 実際の地形との一致度		Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
(7) 今後の予測をたてる際に有効かどうか		Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
M F D	(1) 視認性	・ 色の見やすさ ・ 形状の見やすさ ・ 更新レートは適切か ・ 情報量は適切か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good
	(2) 認識性	・ 垂直方向のクリアランスは直感的に理解可能か ・ 水平方向のクリアランスは直感的に理解可能か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good
	(3) 情報の取得しやすさ(ディスプレイ操作の容易性)		Difficult-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Easy
	(4) 各飛行フェーズにおける有用性	・ Climb	Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High
	・ Cruise			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	・ Approach ・ Landing			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	(5) 画面を見ていた割合	・ PFD ・ MFD	<input type="radio"/> NotUse	<input type="radio"/> Seldom	<input type="radio"/> Often	<input type="radio"/> VeryOften					
(6) 実際の地形との一致度		Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
(7) 今後の予測をたてる際に有効かどうか		Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
3 WX情報											
(1) 視認性	・ 色の見やすさ ・ 形状の見やすさ ・ 更新レートは適切か ・ 情報量は適切か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
(2) 直感的に理解可能かどうか		NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
(3) 情報の取得しやすさ(ディスプレイ操作の容易性)		Difficult-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Easy	
P F D	(4) 各飛行フェーズにおける有用性	・ Climb	Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
	・ Cruise			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
	・ Approach ・ Landing			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
	(5) 画面を見ていた割合		<input type="radio"/> NotUse	<input type="radio"/> Seldom	<input type="radio"/> Often	<input type="radio"/> VeryOften					
4 物標情報											
(1) 視認性	・ 色の見やすさ ・ シンボルの大きさは見やすいか ・ 形状の見やすさ ・ 更新レートは適切か ・ 情報量は適切か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
(2) 認識性	・ 垂直方向のクリアランスは直感的に理解可能か ・ 水平方向のクリアランスは直感的に理解可能か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
(3) 情報の取得しやすさ(ディスプレイ操作の容易性)		Difficult-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Easy	
P F D	(4) 各飛行フェーズにおける有用性	・ Climb	Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
	・ Cruise			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
	・ Approach ・ Landing			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
	(5) 画面を見ていた割合	・ 使用していた割合	<input type="radio"/> NotUse	<input type="radio"/> Seldom	<input type="radio"/> Often	<input type="radio"/> VeryOften					
(6) 実際の地形との一致度		Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
(7) 今後の予測をたてる際に有効かどうか		Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
(8) NOCTARNと比較して	・ 見やすさ ・ 理解しやすさ ・ 有用性 ・ 情報取得の容易性	Poor-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
P F D	(1) 視認性	・ 色の見やすさ ・ シンボルの大きさは見やすいか ・ 形状の見やすさ ・ 更新レートは適切か ・ 情報量は適切か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good
	(2) 認識性	・ 垂直方向のクリアランスは直感的に理解可能か ・ 水平方向のクリアランスは直感的に理解可能か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good
	(3) 情報の取得しやすさ(ディスプレイ操作の容易性)		Difficult-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Easy
	(4) 各飛行フェーズにおける有用性	・ Climb	Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High
	・ Cruise			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	・ Approach ・ Landing			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	(5) 画面を見ていた割合	・ 使用していた割合	<input type="radio"/> NotUse	<input type="radio"/> Seldom	<input type="radio"/> Often	<input type="radio"/> VeryOften					
(6) 実際の地形との一致度		Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
(7) 今後の予測をたてる際に有効かどうか		Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
(8) NOCTARNと比較して	・ 見やすさ ・ 理解しやすさ ・ 有用性 ・ 情報取得の容易性	Poor-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
5 Highway-in-the-sky											
(1) 視認性	・ 色の見やすさ ・ シンボルの大きさは見やすいか ・ 形状の見やすさ ・ 更新レートは適切か ・ 情報量は適切か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
(2) 認識性	・ 垂直方向のルート表示は直感的に理解可能か ・ 水平方向のルート表示は直感的に理解可能か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
(3) 各飛行フェーズにおける有用性	・ Climb	Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
・ Cruise			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
・ Approach ・ Landing			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
(4) 画面を見ていた割合	・ 使用していた割合	<input type="radio"/> NotUse	<input type="radio"/> Seldom	<input type="radio"/> Often	<input type="radio"/> VeryOften						
(5) 今後の予測をたてる際に有効かどうか		Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
(6) NOCTARNと比較して	・ 見やすさ ・ 理解しやすさ ・ 有用性 ・ 情報取得の容易性	Poor-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
6 Highway-in-the-sky											
(1) 視認性	・ 色の見やすさ ・ シンボルの大きさは見やすいか ・ 形状の見やすさ ・ 更新レートは適切か ・ 情報量は適切か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
(2) 認識性	・ 垂直方向のルート表示は直感的に理解可能か ・ 水平方向のルート表示は直感的に理解可能か	NG-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	
(3) 各飛行フェーズにおける有用性	・ Climb	Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
・ Cruise			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
・ Approach ・ Landing			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
(4) 画面を見ていた割合	・ 使用していた割合	<input type="radio"/> NotUse	<input type="radio"/> Seldom	<input type="radio"/> Often	<input type="radio"/> VeryOften						
(5) 今後の予測をたてる際に有効かどうか		Low-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→High	
(6) NOCTARNと比較して	・ 見やすさ ・ 理解しやすさ ・ 有用性 ・ 情報取得の容易性	Poor-	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	→Good	

図3.2 パイロット評価シート(その2)

2006. /氏名 /FLT番号 /気象

Workload

- 各フライトごとに、離陸から着陸までを通して、評価してください。
- 1~6の項目ごとに100点評価を記入し、その点数となった主な要因欄にチェックしてください。

1 達成度：目標達成における成績と満足度		
> 指定されたタスクについて、どの程度達成されたと思うか > 目標達成における成績について、どの程度満足したか > (タスクに対するエラーの程度と満足度)		<input type="checkbox"/> 手順：手順の組み立て <input type="checkbox"/> 管制(ATC) <input type="checkbox"/> 航法：NAV情報の取得・操作 <input type="checkbox"/> 操縦 <input type="checkbox"/> Terrain <input type="checkbox"/> 他機状況 <input type="checkbox"/> WX状況 <input type="checkbox"/> 操作：ディスプレイ操作
2 精神的負荷：思考・考察の程度(予測、観察、判断、集中など)		
> 運航上必要な諸元を保持するために、どの程度の思考的考察を要したか > 例：予測、観察、記憶、判断、意思決定、精神集中、精神的負担		<input type="checkbox"/> 手順：手順の組み立て <input type="checkbox"/> 管制(ATC) <input type="checkbox"/> 航法：NAV情報の取得・操作 <input type="checkbox"/> 操縦 <input type="checkbox"/> Terrain <input type="checkbox"/> 他機状況 <input type="checkbox"/> WX状況 <input type="checkbox"/> 操作：ディスプレイ操作
3 身体的負荷：身体的活動の程度		
> 運航上必要な諸元を保持するために、どの程度の身体的活動を要したか > 例：3舵やスロットルの操舵、モード切換え、スイッチ操作等の動作が容易であったか、あるいは困難であったか		<input type="checkbox"/> 手順：手順の組み立て <input type="checkbox"/> 管制(ATC) <input type="checkbox"/> 航法：NAV情報の取得・操作 <input type="checkbox"/> 操縦 <input type="checkbox"/> Terrain <input type="checkbox"/> 他機状況 <input type="checkbox"/> WX状況 <input type="checkbox"/> 操作：ディスプレイ操作
4 時間的圧迫感：時間的圧迫の程度(タスクのペース)		
> 運航上必要な諸元を保持するために、どの程度、時間的圧迫感を感じたか > タスクを遂行するペースには余裕があったか、あるいは急速で大変であったか		<input type="checkbox"/> 手順：手順の組み立て <input type="checkbox"/> 管制(ATC) <input type="checkbox"/> 航法：NAV情報の取得・操作 <input type="checkbox"/> 操縦 <input type="checkbox"/> Terrain <input type="checkbox"/> 他機状況 <input type="checkbox"/> WX状況 <input type="checkbox"/> 操作：ディスプレイ操作
5 努力：精神的・身体的な努力の程度		
> タスクを遂行するために、どの程度、精神的および身体的努力が必要であったか		<input type="checkbox"/> 手順：手順の組み立て <input type="checkbox"/> 管制(ATC) <input type="checkbox"/> 航法：NAV情報の取得・操作 <input type="checkbox"/> 操縦 <input type="checkbox"/> Terrain <input type="checkbox"/> 他機状況 <input type="checkbox"/> WX状況 <input type="checkbox"/> 操作：ディスプレイ操作
6 不満度：不満の程度(不安、苛立ち、ストレスなど)		
> タスクの遂行中、どの程度、不安・苛立ち・ストレス・不愉快を感じたか		<input type="checkbox"/> 手順：手順の組み立て <input type="checkbox"/> 管制(ATC) <input type="checkbox"/> 航法：NAV情報の取得・操作 <input type="checkbox"/> 操縦 <input type="checkbox"/> Terrain <input type="checkbox"/> 他機状況 <input type="checkbox"/> WX状況 <input type="checkbox"/> 操作：ディスプレイ操作
7 NOCTARNとの比較		
(1) ワークロード (2) 追従操縦 (3) ディスプレイ操作 (4) ストレス (5) 疲労	<input type="checkbox"/> 増加 <input type="checkbox"/> 減少 <input type="checkbox"/> 変化なし <input type="checkbox"/> 増加 <input type="checkbox"/> 減少 <input type="checkbox"/> 変化なし <input type="checkbox"/> 増加 <input type="checkbox"/> 減少 <input type="checkbox"/> 変化なし <input type="checkbox"/> 増加 <input type="checkbox"/> 減少 <input type="checkbox"/> 変化なし <input type="checkbox"/> 増加 <input type="checkbox"/> 減少 <input type="checkbox"/> 変化なし	

図3.2 パイロット評価シート(その3)

表3.3 Chelton EFISとNOCTARNの他機表示の比較

	Chelton	NOCTARN
表示形状	シェブロン	シェブロン
相対高度	有	無
速度ベクトル	有	無
経路情報、着陸順位	無	有
接近警報（色による識別）	距離等で判断	経路情報から判断
用途	他機位置把握、接近回避	他機位置、着陸順位の把握と先行機との間隔確保

を取得した。3名のパイロットが参加した。他の項目と同様、色や形状の見やすさなどの視認性、直感的な認識性、情報取得の容易性、有用性等を No Good から Good までの5段階で評価した。これに加えてJAXAが中心となって実施したNOCTARN（文献3.1）において開発された他機表示（文献3.2）との比較についても5段階（画面を見た割合については4段階）で評価した。ただし、これは今回実験に参加したパイロットが全員NOCTARNの評価実験に参加していることから、パイロットが過去に経験したNOCTARNの実験での印象を想起して比較したものであり、他機の出現頻度を含む実験環境に大きな違いがあることに留意する必要がある。他機表示についてNOCTARNとの比較を表3.3に示す。Chelton EFISでは他機情報として現在の状態を表示するのに対し、NOCTARN

は自律的に着陸順位付けを行って進入着陸を行うための表示であることから、機能や目的は異なっている。詳細は図3.2に示すパイロット評価シートその2の項目4を参照されたい。

(4) Highway-in-the-sky

PFDに呈示される3次元経路誘導表示HITS（図3.3）に関し、パイロット評価を実施した。実験では模擬GPS進入をHITSを用いて複数回行い、これらを総合して1つのフライトにつき1回の評価を行った。3名のパイロットが参加した。視認性、認識性、有用性について5段階の評価を行った。また、他機情報と同様にNOCTARNにおける経路表示との比較も5段階で実施したが、やはり同じ条件での比較評価ではないことに留意する必要

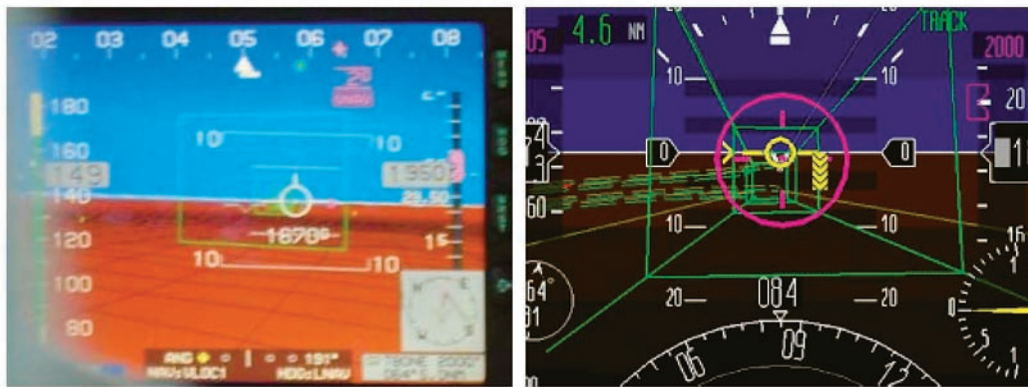


図3.3 Chelton EFISのHighway-in-the-sky(左)とNOCTARNのTunnel-in-the-sky(右)

表3.4 Chelton EFISとNOCTARNの経路表示の比較

	Chelton	NOCTARN
経路の幅	80m（要確認）	100m
Frame（四角の部材）	有	有
Contour（長手方向の部材）	無	有
フライトパス表示	現在のベクトル	5秒後の予測位置
経路内目標位置	無	有
経路の次数	直線と円弧を直結	直線から円弧へ3次曲線で遷移
実施した飛行例	エンルート、直線進入（最終直線部 5.0NM）	曲線進入（最終直線部 1.0NM）

がある。表 3.4 に Chelton EFIS に表示された経路表示と NOCTARN で用いた経路表示の比較を示す。詳細は図 3.2 に示すパイロット評価シートその 2 の項目 5 を参照されたい。

(5) ワークロード

NAL-TLX (文献 3.3) を用いてパイロットワークロード評価を行った。これは、達成度、精神的負荷、身体的負荷、時間的圧迫感、努力、不満度の計 6 項目について 0 から 100 までの点数付けを行う主観評価である。さらに、これら 6 項目に加え、パイロットが過去に経験した NOCTARN による飛行時との比較も行った。NOCTARN との比較では、ワークロードが増加/減少/変化なしの 3 段階による評価とした。評価項目の詳細は図 3.2 に示すパイロット評価シートその 3 を参照されたい。本評価は 1 フライトにつき 1 回の割合で実施した。

(6) 状況認識

PFD/MFD の各種情報呈示による状況認識への影響を調査するため、状況認識評価手法である SART (Situational Awareness Rating Technique, 文献 3.4) を使用した。SART とは、1989 年に開発された (文献 3.5)、状況認識に関する 10 項目について評価者が 7 段階の評点付けを行い、その点数の加算・減算により状況認識度を算出する主観評価法である。評価する 10 項目を表 3.5 に示す。表 3.5 に示した定義に基づき、SART のスコアは次式にて算出される。

$$\text{Situational Awareness} = \text{UNDERSTANDING} - (\text{DEMAND} - \text{SUPPLY})$$

評点付けは、1 (Low) ~ 7 (High) の 7 段階である。

本評価試験では、上記の SART の定義を日本語に置き換えたものを用いて、10 項目評価ではなく 3 大分類の

3 項目について評価を行った。7 段階評価は同じである。なお、評価は 1 フライトにつき 1 回の割合で実施した。評価項目は図 3.1 に示すパイロット評価シートその 2 の項目 1 を参照されたい。

3.4 結果

(1) 地形表示

図 3.4-6 に評価結果の一部を示す。これらの結果は、1 (No Good) ~ 5 (Good) あるいは 1 (Not Use) ~ 4 (Very Often) の個々のパイロットの評点を平均したものである。視認性、認識性、実際の地形との一致度および予測への有用性すべてにおいて、PFD よりも MFD は高い評価であった。特に、実際との一致性と予測への有用性に関して MFD は良好である。一方、PFD の地形表示に関しては、実際の地形と比べて平坦な印象を受けるとのコメントも得られた。ディスプレイへの注視割合に関し、外視界あり/なしに関わらず MFD への注目頻度が高いとの結果であった。PFD および MFD の両方使用可の下で外視界をなしとした場合でも、外視界ありの場合と比較して MFD

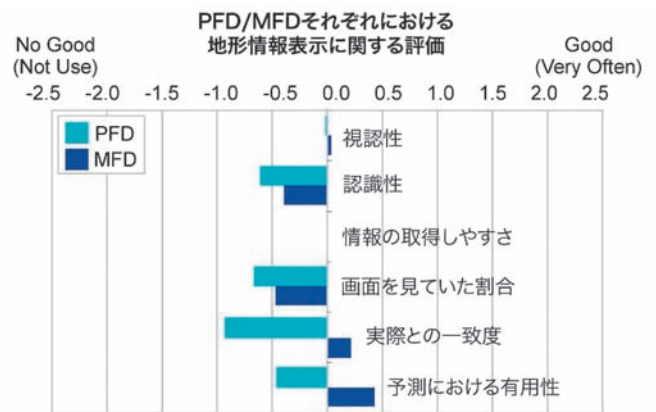


図3.4 地形情報表示に関する評価(一部)

表3.5 SART定義

DEMANDA	Instability of Situation	Likelihood of situation to change suddenly.
	Variability of Situation	Number of variables which require one's attention.
	Complexity of Situation	Degree of complication (number of closely connected parts) of situation.
SUPPLY	Arousal	Degree to which one is ready for activity (sensory excitability).
	Spare Mental Capacity	Amount of mental ability to apply to new variables.
	Concentration	Degree to which one's thoughts are brought to bear on the situation.
	Division of Attention	Amount of division of attention in the situation.
UNDERSTANDING	Information Quantity	Amount of knowledge received and understood.
	Information Quality	Degree of goodness or value of knowledge communicated.
	Familiarity	Degree of acquaintance with situation experience.

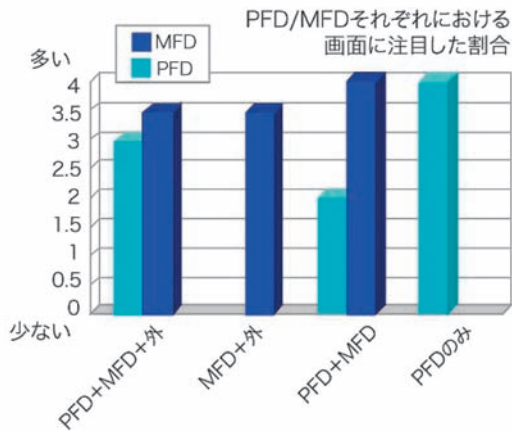


図3.5 PFDおよびMFDに注目した割合

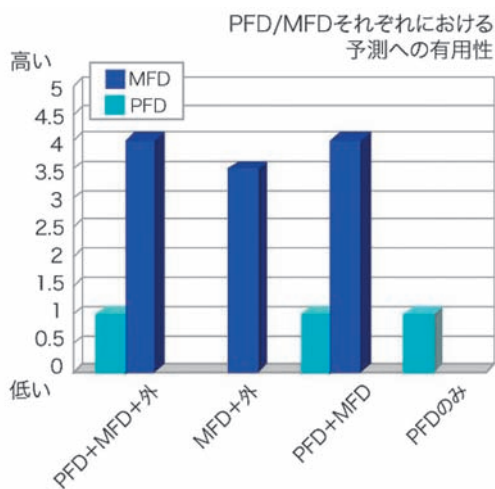


図3.6 PFDおよびMFDの状況予測への有用性

への注視割合は増加しているが、PFDを見る割合は逆に減少している。状況予測への有用性に関する評価においても、PFDと比較してMFDの評価が高い結果となった。パイロットコメントとしては、MFDに呈示される地形情報によってエリア（現在飛行している空域）が確認できる、この先の地形予測ができる、等が得られた。

(2) 気象情報

気象情報表示に関する評価結果を図3.7に示す。色の見やすさ、形状の見やすさといった視認性の評価は低く、また、飛行中の活用割合も低い評価であった。というのも、このCAPSTONE飛行試験が晴天時を前提としており、気象情報を利用する必要がなかったためである。一方でBethelへの長距離フライト時には度々使用したとのコメントが得られた。

(3) 他機情報

視認性、認識性ともに良好であった。特にMFDに表示されるMap式の他機表示は、NOCTARNでの他機表示

との比較においても視認性、認識性ともにやや良好であった。評価結果を図3.8に示す。視認性、認識性、情報の取得しやすさ（操作の容易性）ともに良好な結果となっており、それに反するように画面を見ていた割合は低い結果となっている。

PFDやMFDに表示される他機情報は、相手機が何らかのシンボル（矩形や円形など）で表され、その脇に高度や速度等が表示されるため、初見で相手機の状態を知ることが可能であるが、特にMFDでの他機表示では相手機の方が即座に認識でき、非常に有効であったとのコメントが得られた。一方で、本来は3次元空間上に位置する相手機を2次元で表示するPFDの他機表示は、相手機との前後間隔が把握しづらいとのコメントが出された。

NOCTARNのTunnel-in-the-sky（TIS）との比較に関しては、そもそもNOCTARNがアプローチフェーズを対象としている所為もあるが、大量の情報が表示されるTISに比べHITSの情報量は少なく、結果、ディスプレイ表示がシンプルになり、見やすいとのコメントが得られた。一方で、今回のフライトは基本的にVFRであり他機監視は外視界を見て行なうのが殆どであった、ATCにて他機情報が得られ、目視で確認できた場合には改めてPFDやMFDから他機情報を得ることはしなかった、等のコメントが得られた。



図3.7 気象情報表示に関する評価 (一部)

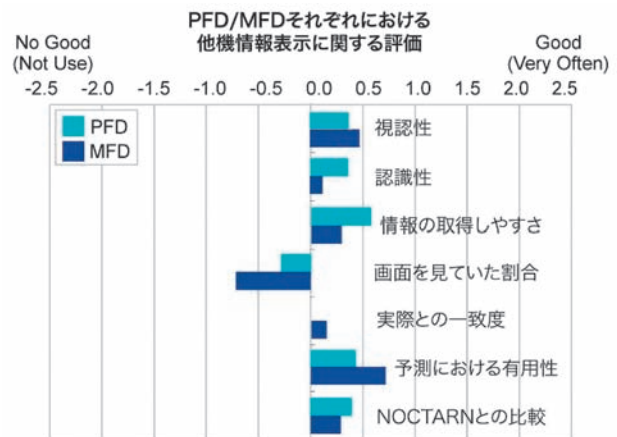


図3.8 他機情報表示に関する評価 (一部)

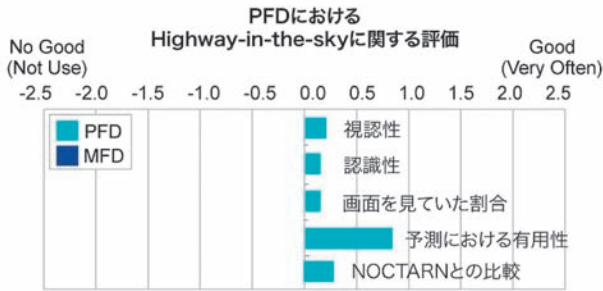


図3.9 Highway-in-the-skyに関する評価(一部)

(4) Highway-in-the-sky

視認性、認識性は良好で、直感的に理解可能であるとの評価であった。HITS に関する評価結果を図 3.9 に示す。一方で、経路を意味する四角形の枠が不連続で表示されるため、上昇/下降/旋回等の経路変化を把握するのが困難であるとのコメントが得られた。

(5) ワークロード

ワークロードに関するパイロット評価は、1フライトにつき1回の割合で実施した。そのため、1フライトにおいて複数の実験ケースを実施した場合のケースごとの評価を得ることができなかった。さらに、飛行試験時の空域や他機状況、風など気象条件によりワークロード評価結果が大きく影響を受けたこと、タスク設定が明確でなかったことなどから、全体を通してNAL-TLXによるワークロード評価を実施することができなかった。

(6) 状況認識

SARTを実際の飛行実験によるパイロット評価に適用するのは今回が初めてであり、評価手法そのものに課題があることが明らかとなった。SART定義(表3.5)の解釈と日本語訳に一部明確でない部分があったこと、および、ワークロード評価の場合と同じく、飛行の都度、飛行空域や他機状況、気象状況が異なるため、評価結果もそれらの影響を受けたこと、等の理由により、適切な評価を行うことができなかった。

3.5 考察

以上の結果を踏まえ、以下に考察を述べる。

(1) 地形表示

地形表示に関してはPFDと比較してMFDの評価が一樣に高い結果であった。その理由として最大の要因は、パイロットコメントより、地表面への接近に伴う表示色の変化である。自機と同レベルの高度は黄色、自機よりも高い高度については赤色になるという色変化をさせることで、直感的に認識可能となっていると考えられる。

さらに、MFDには地形がMapで表示されるため、PFD

と比べて広域情報が得られ、見通しがきかない状況下でも先の経路計画や状況予測が可能になることも重要な要因である。パイロットからも同様のコメントが得られている。

PFDの地形表示は、表示色が変わらないことに加え、メッシュが粗く、3D表示されてはいるものの直感的に認識できない点が厳しい評価へつながっていると考えられる。

(2) 気象情報

本飛行試験においては活用頻度が少なく、必要性も低い評価であった気象情報だが、活用した場合でも、画面表示が見づらく視認性、認識性ともに低い評価であった。

(3) 他機情報

MFDに表示される他機情報への有効性評価が良好であった理由として、パイロットコメントより、自機と他機との位置関係は3D表示よりもMap表示の方が認識が容易であるためと考えられる。特にPFDでの3D位置表示では、他機との間隔が把握しづらいことが指摘された。

NOCTARNにおける他機表示と比較した場合でもMFDにおける他機表示は評価が高く、その理由として、同様にパイロットコメントから、表示のシンプルさによるものと考えられる。

また、画面を見ていた割合は少なくなっている。これは、良好な外視界やATCからの情報が得られる状況下では、他機監視は目視中心となるとのコメントが得られたが、機体による機器搭載状況の差異により他機全てがディスプレイに表示されるわけではないことも、その要因の1つであると考えられる。

(4) Highway-in-the-sky

Chelton EFISによるHighway-in-the-sky(HITS)は、全体的には良好な評価結果であったものの、アプローチ時における旋回や降下等の経路変化の把握が困難であるとの結果であった。これは、NOCTARNで用いられていた経路表示と異なり、四角の枠(frame)が不連続で表示されており、曲線部の認識性が低下するためと考えられる。一方、エンルートにおいては、Chelton EFISの方が圧迫感が少なく、ワークロードも減少するとのコメントが得られた。アプローチ時とは逆に、NOCTARNの表示では、厳密にその経路を維持しなければならないとの意識が生じ、PFDを注視し続けることになり、精神的/身体的に負担が大きくなるとのコメントであった。

つまり、アプローチのように厳密な飛行経路維持が求められるフェーズにおいてはNOCTARN型、厳密さは要求されないが長距離に及ぶ飛行フェーズにおいては

Chelton 型が望ましいと考えられる。

3.6 まとめ

CAPSTONE 飛行試験において、実験機に搭載された Chelton EFIS を対象に、状況認識およびワークロード等に関するパイロットによる有効性評価試験を実施した。その結果、パイロット評価およびコメントより、以下の結果を得ることができた。

- 地形表示に関しては、PFD と比較して MFD の方が地表面認識 (Terrain Awareness) 向上に有効である。
- 気象は、今回のフライトにおいてはあまり利用される機会がなく十分な評価ができなかったが、長距離に及ぶフライト前には状況予測や計画において有効であると考えられる。
- 他機表示は、PFD よりも MFD の方が有用である。また、
- 従来 JAXA にて研究開発を行ってきた NOCTARN の他機表示と比較して、表示がシンプルであり、直感的に理解しやすい。
- Highway-in-the-sky は、フライト全般において有用であるが、NOCTARN で用いた経路表示システムに比べて、縦部材 (Contour) が欠如しており、経路変化を把握しづらい一方で、経路維持の圧迫感は減少する。
- 状況認識性を評価する手法である SART を飛行実験に初めて適用したが、評価手法に課題があることが明らかとなった。今後、改良を進めて、JAXA における統合型ディスプレイの開発評価に適用する。

4. GPS/WAAS の評価

4.1 目的

GPS/WAAS 評価では、JAXA で開発中の ABAS 技術である GPS/SBAS/INS 複合航法装置 GAIA (GPS Aided Inertial navigation Avionics) の有用性について検討するため、飛行評価時点で世界で唯一実運用されていた SBAS である米国 WAAS 環境下での GPS 進入の利用性、およ

び GPS 信号遮蔽の影響を評価した。以下に個々の評価目的を述べる。

(1) GPS 進入の利用性

SBAS 衛星から放送する GPS 補正情報は、地上局で GPS 信号の誤差をモニタした結果に基づいて生成するため、地上局群の端部では補正情報の精度が劣化し、測位誤差の最大値を保証する保護レベル (Protection Level, GPS 進入の場合は 10^{-7} /approach の確率で発生しうる誤差) が増大する傾向がある。GPS 進入方式は、決心高度の違い等によって幾つかのカテゴリに分けられており、FAA では非精密進入 (Non Precision Approach, NPA), LNAV/VNAV (Lateral Navigation/Vertical Navigation), および LPV (Localizer Performance with Vertical guidance) の 3 方式を既に運用している (図 4.1)。それぞれのカテゴリに対して許容される保護レベルの最大値がアラートリミット (Alert Limit) として定義されており、3 方式の内でも最も決心高度を低く設定可能な LPV の場合は、水平/鉛直方向のアラートリミット (HAL/VAL) が、それぞれ 40/50m (決心高度 200ft の場合は VAL 35m) に設定されている。(表 4.1)。進入方式の利用性は、保護レベルがアラートリミット以下となる確率として定義される。

CAPSTONE プログラムが実施されている米国アラスカ州は、図 4.2 に示すように WAAS 地上局群の端部に位置し、米国本土に比べて GPS 進入 (特に LNAV/VNAV および LPV) の利用性が低いという問題が指摘されていた (文献 4.1)。WAAS を運用する FAA は、補正情報の精度改善策としてアラスカ州に WAAS 地上局を 4 局増設し、今回の飛行評価期間中である 2006 年 8 月 4 日から増設した地上局の運用を開始した。FAA の事前解析では、この増設により、増設前後で LPV の利用性が 75% 以下から 95% 以上に改善すると予測されている (図 4.3, 文献 4.1)。

今回の飛行評価では、この地上局増設前後の米国アラスカ州における GPS 進入の利用性を評価した。地上

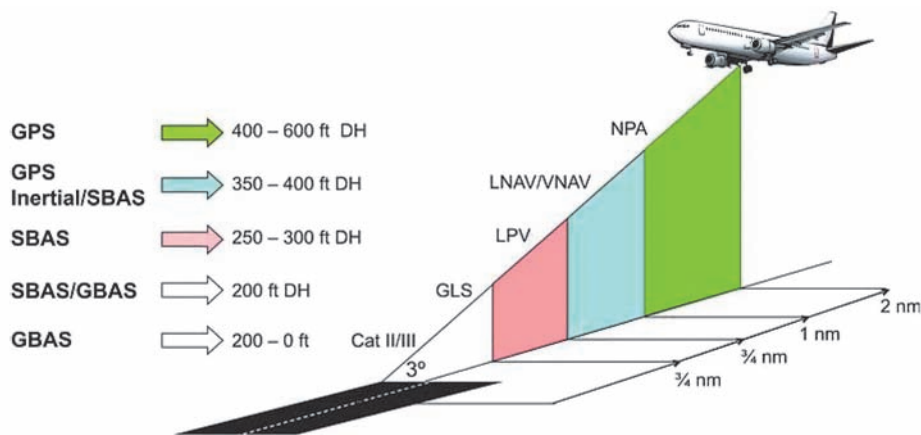


図4.1 GPS進入方式のカテゴリ

表4.1 主なGPS進入方式のアラートリミット

進入方式	決心高度 [ft]	HAL [m]	VAL [m]
NPA (非精密)	≥ 400	556	—
LNAV/VNAV	≥ 350	556	50
LPV	≥ 250/200	40	50/35



図4.2 WAAS地上局の配置と飛行実験実施地域 (文献4.1の図に加筆)

局増設による利用性の改善効果が大きければ、我が国のMSASにおいても、同様の地上局の増設により、地上局群の端部地域（北海道や九州）におけるGPS進入の利用性を改善できる可能性がある。一方、地上局の増設でGPS進入の利用性が十分確保できない場合は、ABAS等

の別のGPS補強手段が必要となる。

(2) GPS 信号遮蔽の影響

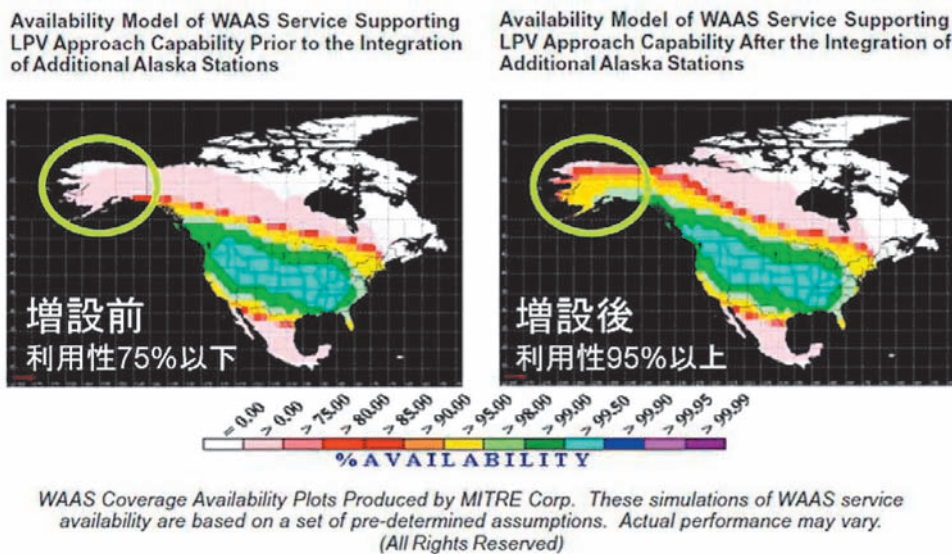
小型航空機の場合、GPSアンテナを設置可能な場所は限られており、良好なGPS受信環境を実現することが難しい。特に近年は、GPSを用いる機器が増え、複数のGPSアンテナを設置する必要があり、全てのGPSアンテナを適切な位置に配置することが困難になっている。今回使用した実験機はその典型的な例であり、EFIS用、UAT用、および計測用の計3つのGPSアンテナを装備しているが、最後に取り付けた計測用のGPSアンテナは、既存のGPSアンテナや無線局のアンテナとの干渉を避けるため、図A2.2(4)に示すように左にオフセットし、約9度傾いた状態で設置されている。この設置状態では、バンク角が大きくなる旋回時（特に左旋回時）に低仰角のGPS衛星の信号が遮蔽される可能性がある。今回の飛行評価では、飛行中にGPS信号遮蔽を意図的に起こし、保護レベルに対するGPS信号遮蔽の影響を評価した。WAAS補正適用下においても保護レベルの変動量が大きければ、ABAS等の別のGPS補強手段が必要となる。

4.2 実験方法

評価に際しては、フライト中の各GPS衛星のシュードレンジと搬送波位相、およびSBASメッセージを専用の機材で記録し、オフラインで保護レベルを含むSBAS測位解の算出を行った。

(1) 計測機材

データ計測用のGPS/SBAS受信機として、Septentrio社PolaRX2(図A2.7)を使用した。同受信機は、48チャンネル(内SBAS衛星用は6チャンネル)を同時に捕捉し、各GPS衛星のシュードレンジと搬送波位相(L1/L2の2



WAAS Coverage Availability Plots Produced by MITRE Corp. These simulations of WAAS service availability are based on a set of pre-determined assumptions. Actual performance may vary. (All Rights Reserved)

図4.3 アラスカ州でのWAAS地上局増設前後のLPV利用性の予測(文献4.1の図に加筆)

表4.2 GPS進入の利用性評価結果

(1) 地上局増設前

飛行番号	飛行日／飛行時間帯	飛行内容／飛行空域	捕捉 GPS 衛星数／GDOP (括弧内は地上での理論値) ^{*1}	保護レベル ^{*3} (HPL/VPL) [m]	利用性 [%]		
					NPA	LNAV/VNAV	LPV
#1	2006/07/19 12:05～14:05	地形情報評価／Anchorage-Lake Clark Pass	7.1 / 3.2 (10.2 / 1.8)	45.6 / 49.9	98.9	50.3	47.1
#2	2006/07/19 15:05～17:05	RNAV アプローチ／Anchorage-Kenai	5.3 / 4.6 (10.7 / 2.1)	33.4 / 50.7	100.0	60.1	39.6
#3	2006/07/20 16:05～17:45	RNAV アプローチ／Anchorage-Kenai	7.3 / 5.3 (10.6 / 2.0)	46.7 / 81.1	97.1	76.6	67.8
#4	2006/07/24 14:20～16:10	データリンク評価／Anchorage-Kenai	6.8 / 3.6 (10.3 / 1.7)	49.5 / 54.2	99.4	46.3	44.8
#5	2006/07/26 11:25～13:05	パイロット慣熟／Anchorage-Kenai	5.2 / 3.7 (10.0 / 1.9)	51.7 / 59.2	99.3	47.7	42.8
#6	2006/07/27 16:10～17:20	RNAV ルート評価／Anchorage-Rainy Pass	7.2 / 2.3 (10.7 / 1.9)	33.1 / 48.3	100.0	67.7	58.5
#7	2006/07/28 11:05～13:05	地形情報評価／Anchorage-Lake Clark Pass	7.4 / 3.1 (10.0 / 1.9)	42.3 / 50.6	99.7	55.1	43.4
#8	2006/07/28 15:20～17:10	RNAV アプローチ／Anchorage-Kenai	6.6 / 2.9 (11.0 / 1.9)	31.3 / 54.4	99.5	75.2	67.0
#9	2006/07/31 15:05～16:30	フェリー／Anchorage-Iliamna	7.4 / 2.7 (11.0 / 2.0)	27.3 / 42.7	99.1	82.2	82.2
#10	2006/07/31 17:10～20:00	GBT 覆域評価／Iliamna-Bethel	7.6 / 2.5 (9.7 / 2.0) ^{*2}	42.8 / 67.7	97.0	29.2	21.8
#11	2006/08/01 15:25～17:35	GBT 覆域評価／Bethel-Iliamna	6.0 / 6.2 (10.6 / 2.0) ^{*2}	43.7 / 80.5	99.9	50.2	46.0
#12	2006/08/01 18:05～19:25	フェリー／Iliamna-Anchorage	6.1 / 4.8 (9.6 / 2.0)	37.8 / 54.1	99.2	44.1	44.1
#13	2006/08/03 16:20～18:05	GPS 信号遮蔽評価／Anchorage-Kenai	6.4 / 4.6 (9.8 / 2.1)	36.3 / 45.1	99.6	76.4	75.0
上記 13 フライトの平均値			6.7 / 3.9 (10.2 / 1.9)	41 / 59	99	55	49

(2) 地上局増設後

飛行番号	飛行日／飛行時間帯	飛行内容／飛行空域	捕捉 GPS 衛星数／GDOP (括弧内は地上での理論値) ^{*1}	保護レベル ^{*3} (HPL/VPL) [m]	利用性 [%]		
					NPA	LNAV/VNAV	LPV
#14	2006/09/18 15:50～17:20	RNAV アプローチ／Anchorage-Kenai	7.8 / 4.4 (9.6 / 1.7)	45.1 / 60.3	100.0	53.4	47.3
#15	2006/09/19 11:20～12:45	RNAV アプローチ／Anchorage-Kenai	9.1 / 2.3 (10.3 / 1.9)	13.5 / 23.8	100.0	100.0	100.0
#16	2006/09/19 15:25～16:50	RNAV アプローチ／Anchorage-Kenai	7.7 / 3.4 (9.6 / 1.7)	50.3 / 33.2	99.8	64.9	48.0
#17	2006/09/25 14:45～16:15	データリンク評価／Anchorage-Kenai	7.6 / 3.0 (10.0 / 1.8)	25.3 / 40.0	99.6	73.5	73.0
#18	2006/09/28 11:50～13:30	データリンク評価／Anchorage-Kenai	7.0 / 4.2 (9.8 / 1.8)	32.8 / 42.7	96.6	73.1	73.1
#19	2006/09/30 13:55～15:20	データリンク評価／Anchorage-Chenega Bay	5.8 / 6.5 (9.3 / 2.1)	104.8 / 75.5	99.6	29.5	24.3
#20	2006/09/30 16:15～17:40	データリンク評価／Chenega Bay-Anchorage	8.1 / 4.8 (10.3 / 2.2)	35.2 / 58.5	94.6	82.4	79.8
#21	2006/10/04 14:15～17:25	GBT 覆域評価／Anchorage-Rainy Pass	5.9 / 3.3 (9.2 / 1.8)	42.8 / 46.7	96.9	54.8	28.4
上記 8 フライトの平均値			7.3 / 4.1 (9.7 / 1.9)	45 / 48	98	65	57

*1 飛行当日の GPS 衛星軌道情報を用いて、Anchorage において仰角 5 度以上の GPS 衛星が全て可視として算出。

*2 飛行当日の GPS 衛星軌道情報を用いて、Bethel において仰角 5 度以上の GPS 衛星が全て可視として算出。

*3 WAAS 補正適用下での平均値。

周波), および SBAS メッセージを記録可能な能力を持つ。

(2) SBAS 測位解の算出

SBAS 測位解, および保護レベルの算出には, Euro-control が配布している解析ソフト (Pegasus Ver.4.2) を使用した。同ソフトは, 航空機搭載用 SBAS 受信機の最小運用性能規準 (MOPS, Minimum Operational Performance Standards) である RTCA/DO-229C に準拠している。

(3) 評価フライト

利用性評価は, 特定のフライトを設定せず, データリンク評価や表示方式評価のフライトと兼行して実施した。即ち, アラスカ州で実施したほぼ全ての実験フライトにおいて, SBAS 測位解を算出し, 利用性評価を行った。GPS 受信障害の評価は, バンク角を変えて左右定常旋回を行い, 旋回中の保護レベルの変動を評価した。

4.3 結果

(1) GPS 進入の利用性評価

GPS 進入の利用性評価結果を表 4.2 に, 評価フライト中の WAAS 衛星の測位への利用状況を表 4.3 に示す。評価フライトは, 主にアンカレッジ周辺空域 (飛行番号 #10, 11 は Bethel 周辺空域で実施) で地上局増設前に 13 フライト (飛行時間: 約 22 時間), 増設後に 8 フライト (飛行時間: 約 11 時間) の計 21 フライト実施した。非精密進入 (NPA) は, 地上局増設前後ともに, 平均で 98 ~ 99% の利用性が確保できている。LNAV/VNAV および LPV の利用性は, 地上局増設により 8 ~ 10% 改善し, 増設後の平均値は 65% および 57% である。WAAS 補正適用下の鉛直方向の保護レベル (VPL) の平均値も, 地上局増設により約 11m 改善されている (水平方向の保護レベル (HPL) はほぼ同等)。しかし, FAA による事前予測値 (LPV の利用性が 95% 以上, 図 4.3) ほどの利用性の改善は確認できなかった。保護レベルの改善幅が, LNAV/VNAV および LPV のアラートリミットに比べて十分でないことが主要因と考えられる (増設後の VPL の平均値は約 48m で, LNAV/VNAV および LPV の VAL50m とほぼ同等)。その理由の一つとして, GPS/WAAS 信号

遮蔽の影響が考えられる。FAA の事前予測値は, 地上局における理想的な GPS/WAAS 信号の受信状態を仮定しているが, フライト中は姿勢変化等に伴う GPS/WAAS 信号遮蔽により, 測位に使用可能な GPS 衛星数が減少する傾向がある。評価フライト中の捕捉 GPS 衛星数の平均値は約 7 個と, 飛行地域で仰角 5 度以上 (本仰角マスク角の設定は機上データ計測用の GPS/SBAS 受信機の設定と対応) の GPS 衛星が全て可視として算出した値約 10 個に比べて少なくなっており, GPS 測位の幾何学的精度低下率を示す GDOP (Geometric Dilution of Precision) の平均値も, それに伴い大きくなっている (表 4.2)。この GDOP 増大の影響により, 保護レベルの値が全体的に大きくなり, GPS 進入の利用性を下げている可能性がある。また, 評価フライト実施期間中に, 飛行地域で主に利用可能な WAAS 衛星の 1 つ (衛星番号 122) の補正情報が一時的に不正の値となっていた期間があったため, 表 4.3 に示すように同衛星は測位にほとんど利用されず, 利用された際も保護レベルの値が大きくなっていた。このことが, 評価フライト中の保護レベルの値を増大させ, GPS 進入の利用性を下げた可能性も考えられる。

また, 評価フライトの飛行内容や地域によって, 保護レベルの値が変動している。2 機体間の相対位置を変えるために姿勢変化が多く生じるデータリンク評価のフライトの一部 (飛行番号 #19, 20) や, アプローチ間のコース変更時に姿勢変化が生じやすい RNAV アプローチ評価のフライトの一部 (飛行番号 #3,14) では, 保護レベルの値が大きくなっており, 飛行中の平均 GDOP 値が大きいため, GPS/WAAS 信号遮蔽による影響が強く現れていると考えられる。飛行地域でみると, アンカレッジよりさらに地上局群の端部に位置する Bethel 周辺空域でのフライト (飛行番号 #10, 11) では保護レベルの値が大きくなっており, 同地域では WAAS 補正情報の精度が劣化している可能性がある。飛行番号 #11 のフライトでは, フライト中の平均 GDOP 値も大きくなっているが, 同フライトでは悪天候域を迂回するためにコース変更を繰り返しており, その結果として姿勢変化が多く生じ, GPS/WAAS 信号遮蔽の影響を強く受けたと考えられる。

以上の結果から, 評価フライト実施時点では, WAAS 地上局群の端部に位置する評価フライト実施空域において LNAV/VNAV および LPV の利用性を十分に確保できていない状況が明らかとなった。同様に, 我が国の MSAS においても, MSAS 地上局群の端部に位置する北海道では LNAV/VNAV および LPV の利用性が十分確保できていない (利用性が 50 ~ 70%) ことが, 当機構の実験用ヘリコプタを用いた飛行評価により明らかとなっている (文献 4.2)。

なお, 2006 年 10 ~ 12 月 (評価フライト実施後) に

表 4.3 評価フライト中の WAAS 衛星の測位利用状況

WAAS 衛星番号	測位に利用された割合 *	利用時の HPL/VPL
122	8.7%	79.7 / 66.5
134	52.9%	30.7 / 43.7
135	16.9%	59.1 / 79.9
138	14.0%	43.3 / 63.5
計	92.5%	—

* 利用性評価フライト全 21 フライトの全飛行評価時間に対する割合

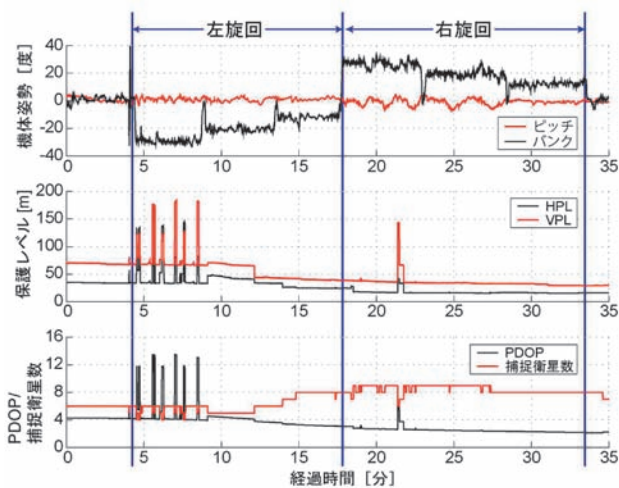


図4.4 旋回中の保護レベルの変動

FAA が地上局を用いて実施した利用性評価（文献 4.3）では、アンカレッジ周辺における LPV の利用性が 99.9% 以上、HPL/VPL の平均値が約 21/36m となっており、本フライトの評価結果より改善されている。この相違の要因としては、先に述べた実フライト環境下における GPS 信号遮蔽の影響が FAA の評価には含まれないこと、評価フライト実施期間中の一部の WAAS 衛星の不具合の影響、評価フライトの実施後に WAAS 補正情報が改善されたこと（FAA は補正情報の改善を随時実施している）、解析環境の相違、等が考えられる。評価フライト実施後に、アラスカ州での LNAV/VNAV および LPV の利用性は改善されている可能性があるが、本稿執筆時点で実フライト環境下での評価結果は得られていない。

(2) GPS 信号遮蔽の影響

旋回中の保護レベルの変動を評価した結果を図 4.4 に示す。計測用 GPS アンテナが左に傾いた状態で取り付けられているために、特に左旋回で低仰角の GPS 衛星の信号が遮蔽され、測位に利用可能な衛星数が減り、保護レ

ベルの値が大きくなっている。評価事例では、WAAS 補正適用下でも、GPS 信号遮蔽による保護レベルの増加量が約 100m に達し、LNAV/VNAV や LPV のアラートリミットを逸脱していることが明らかとなった。

この GPS 信号遮蔽の問題は、GPS アンテナの取り付け可能な位置が限られている小型航空機一般に共通する技術課題である。現状の GPS 進入では、最終進入フェーズが直線経路であるため、機体の姿勢変化が小さく、GPS 信号遮蔽の影響は小さいと考えられるが、将来的により航法要件の厳しい精密進入や最終進入フェーズに旋回を含む曲線進入においては、姿勢変化に伴う GPS 信号遮蔽が問題となりうる。対策としては、① GPS アンテナの電波受信環境に対する定量的な基準を設定し、機体設計時点から GPS アンテナ設置位置を確保する、②慣性航法装置との複合化による GPS の補強、等が考えられる。

(3) 慣性航法装置との複合化による保護レベルの改善事例

今回の評価では、既に WAAS が実運用されている米国においても、① WAAS 地上局群の端部における、GPS 進入、特に決心高度の低い LPV の利用性の不足、②機体姿勢変化に伴う GPS 信号遮蔽による保護レベルの増大、という技術課題が存在していることが明らかとなった。ここでは、GAIA による保護レベルの改善事例により、その有効性を示す。

GAIA は、①マルチセンサー複合技術（GPS、INS（ジャイロ、加速度計）、②高精度化・高信頼化アルゴリズム、③ GPS/SBAS 複合技術、の 3 つの技術的特長を有する。具体的には、基本となる航法情報は INS で作り、その航法誤差を SBAS 補正で精度の向上した GPS 観測量（シェードレンジおよび搬送波位相）を用いたカルマンフィルタで推定し、除去する複合航法を行っている。この結果、ダイナミクス追従性が高いという INS の特長を損なうことなく、GPS の高精度測位機能のみが付加された航法システムとなっている。GAIA は、無人機の自動離着陸飛

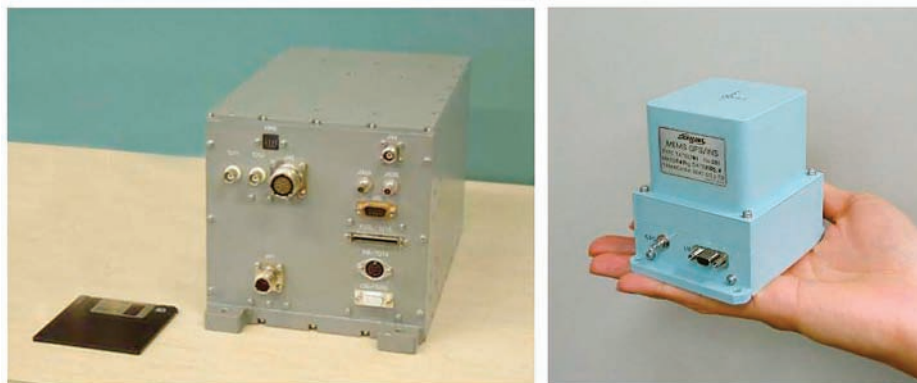


図4.5 JAXAで開発中のGPS/SBAS/INS, GAIA
(左:中／大型航空機向けのGAIA, 右:小型航空機向けのMicro-GAIA)

行実験に使用され、カテゴリ III 精密進入相当の航法精度を実証しているほか（文献 4.4）、MEMS センサを用いて超小型化した小型航空機向けの Micro-GAIA の開発も進めている（図 4.5）。

GAIA のような GPS と慣性航法装置を複合化した航法装置（GPS/INS）は、それに対する MOPS が非精密進入までしか規定されておらず、現時点では LNAV/VNAV および LPV や精密進入に使用することはできない（文献 4.5）。ただし、複合化により GPS/SBAS 単独に比べて保護レベルを小さくできる可能性があり、研究開発が盛んに行われている。ここでは、正規化解分離法（文献 4.6）を用いて非精密進入における水平方向の保護レベルを算出した事例を示す（文献 4.7）。

GAIA を当機構の実験用航空機に搭載し、バンク角変動を含む評価フライトを、MSAS 地上局群端部に位置する北海道にて実施した。実施時期は、MSAS の正式運用直前の 2007 年 7 月であり、本事例では MSAS のレンジング機能は使用していない。図 4.6 に飛行中のバンク角および保護レベルを示す。保護レベルは、GPS/SBAS 単独と INS との複合化の場合を比較している。INS との複合化の場合、保護レベルが 10～20m 改善されるとともに、バンク角変動に伴う保護レベルの変動も小さくなっており、複合化の効果が大きいことが示された。今後は、鉛直方向の保護レベルも含めた保護レベル算出法を確立し、GAIA の実用化、およびそれに必要な諸規格の制定に向

けて技術提案を進める予定である。

4.4 まとめ

実運用環境下での GPS/WAAS の精度、信頼性を評価した。その結果、① WAAS 地上局群の端部に位置するアラスカ州において、GPS 進入、特に決心高度の低い LPV の利用性が不足する、②機体姿勢変化に伴う GPS 信号遮蔽によって保護レベルが増大する、という技術課題が明らかとなった。DREAMS で研究開発を進める ABAS 技術である GAIA が、これらの技術課題の解決に有効であることを示した。

5. おわりに

JAXA が米国 FAA との協力により実施した CAPSTONE プログラムへの参加による次世代運航システムの評価飛行実験結果について報告した。得られた主な結果は以下の通りである。

- 2006 年 7 月 12 日～8 月 4 日および 9 月 14 日～10 月 9 日の間に計 35 回（約 50 時間）の飛行を実施し、計画通り全ての実験を終了した。
- UAT データリンクの評価では、2 機の航空機が近接して飛行する状態でのデータリンクの信頼性を定量的に評価し、またデータリンクの切断が発生する要因を明らかにした。DREAMS で研究開発を行う自動間隔確保・衝突回避システムのアルゴリズム開発に必要なデータを取得することができた。
- データリンク地上局の覆域評価では、受信範囲が計算値とほぼ一致することを確認した。
- パイロット・ディスプレイの評価では、CAPSTONE で用いられている Chelton EFIS の地形・気象・他機情報表示や 3 次元経路誘導表示の有用性評価と課題の抽出を行い、DREAMS における統合型ディスプレイの研究開発の指針を得ることができた。
- GPS/SBAS の評価実験では、米国で実運用に供されているシステムの精度・信頼性を評価し、課題を明らかにするとともに、DREAMS で研究開発を進める ABAS 技術の有効性を示した。

謝 辞

今回の実験は、（独）電子航法研究所との共同研究として、また米国 FAA との協力協定に基づいて実施したものである。実験の実施、ならびにその後のデータ解析に際しては、FAA アラスカ支局ならびに CAPSTONE Program Office、米 ADS-B Technologies 社、米 MITRE 社の多大なご支援をいただいた。また、実験の準備においては、国土交通省航空局、ならびに FAA 日本代表、アラスカ大学の協力と支援を得た。関係各位に深く感謝の意を表する。

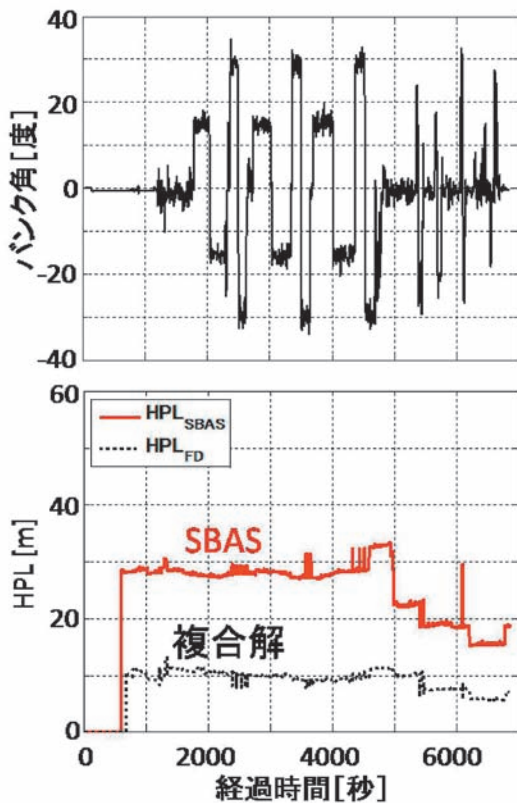


図4.6 GAIAによる保護レベルの改善例

文献

- 1.1 船引, “NOCTARN: 適応型飛行経路を用いた運航方式の研究について,” 日本航空宇宙学会誌, 第 642 号, 2007.
- 1.2 張替, “次世代運航システム DREAMS の研究 — 最新の成果 —,” 日本機械学会第 15 回交通・物流部門大会, 2006.
- 1.3 Anon., “The Impact of CAPSTONE Phase I Program,” University of Alaska Anchorage, 2005.
- 2.1 Lee, Y. C., Moody, J. C., and Reagan, J. K., “Effectiveness of the Ground-Based Transceiver (GBT) parrot System for Monitoring GPS Integrity for Alaska ATC ‘RADAR-Like Services’ Using ADS-B,” 23rd Digital Avionics Systems Conference, 2005.
- 2.2 Stapleton, D. V. and Cieplak, J. J., “Alaska’s CAPSTONE Program – Systems Engineering for Communication Navigation and Surveillance,” 23rd Digital Avionics Systems Conference, 2005.
- 2.3 “Minimum Operational Performance Standards for Universal Access Transceiver (UAT) Automatic Dependent Surveillance – Broadcast,” DO-282A, 2006.
- 3.1 Funabiki, K., Iijima, T. and Nojima, T., “Summary of NOCTARN Research Project,” 25th International Congress of the Aeronautical Science, 2006.
- 3.2 Funabiki, K., Iijima, T. and Nojima, T., “CDTI Design in a Trajectory-based Operations Concept for Small Aircraft,” 23rd Digital Avionics Systems Conference, 2004.
- 3.3 Iijima, T., Funabiki, K. and Nojima, T., “Pilot Workload Assessment Method in a New CNS/ATM Environment,” System Man and Cybernetics Conference, 2004.
- 3.4 Endsley, M. R. and Garland, D.J., “Situation Awareness Analysis and Measurement,” SA Technologies Inc., 2000.
- 3.5 Taylor, R. M., “Situational Awareness Rating Technique (SART): The Development of a Tool for Aircrew Systems Design,” 1989.
- 4.1 FAA, “SATNAV News,” Vol.30, Nov 2006.
- 4.2 又吉, 奥野, “ヘリコプタによる GPS/MSAS 測位精度評価,” 日本航空宇宙学会誌, 第 643 号, 2007.
- 4.3 FAA, NTSB, “WAAS Performance Analysis Report #19,” 2007.
- 4.4 富田, 張替, 辻井, 西澤, 関谷, “高速飛行実証における GPS 補強型慣性航法システムの飛行実験結果,” 第 20 回誘導制御シンポジウム, 2003.
- 4.5 SC-159, “MOPS for GPS/WAAS Airborne Equipments: Appendix R,” RTCA, RTCA-DO-229D, 2006.
- 4.6 Young, R. S. and McGraw, G. A., “Fault Detection and Exclusion Using Normalized Solution Separation and Residual Monitoring Methods,” Navigation, Vol. 50, No.3, 2003.
- 4.7 辻井, 富田, 藤原, 張替, “GPS/INS によるインテグリティ監視機能の予備的試験について,” 第 24 回誘導制御シンポジウム, 2007.

A1. CAPSTONE プログラムの詳細

CAPSOTNE で用いられている UAT は, 米 MITER 社が開発した小型機に適したデータリンクシステムで, 機上のアビオニクスや地上局 (Ground Based Transceiver, GBT) が小型・低コスト (図 A1.1), 通信容量が大きい, 等の特長を有している。表 A1.1 に ICAO で国際標準化されている 3 種類のデータリンク, および参考として JAXA が NOCTARN の実証実験で使用したデータリンクの仕様を示す。SSR モード S 拡張スキッタは, 既にモード S トランスポンダを搭載している航空機は小規模な改修で対応が可能のため, 大型機での普及が期待されている。VDL Mode 4 は, 北欧やロシア等で開発が進められたが, 通信容量が小さく, VHF 帯で周波数の確保が困難等の理由により普及には至っていない。UAT は, モード S 拡張スキッタと同等に高速であり, かつ基本周期 1 秒の内約 200ms が地上局用に割り当てられている (各航空機は残



(1) UAT機上局

(2) GBT

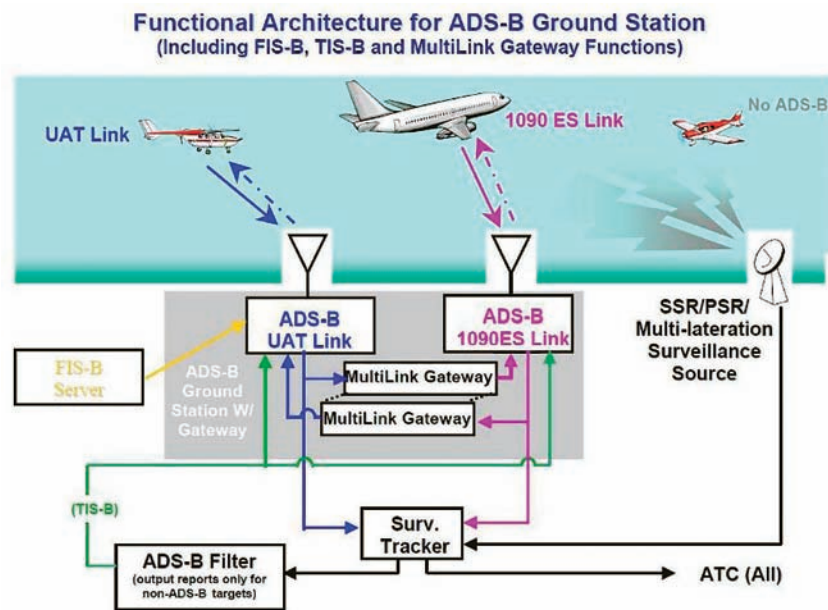
図A1.1 UAT(機上局)とGBT(地上局)

表A1.1 ADS-B用データリンクの比較

	SSR モード S 拡張スキッタ	VDL mode 4	UAT	(参考) NOCTARN
周波数	1090MHz	VHF (118 ~ 137MHz)	978MHz	295.6MHz
ビットレート	1 Mbps	19.2 Kbps	1 Mbps	19.2 Kbps
送信周期	2 回 /1 秒	1 回 /5 秒	1 回 /1 秒	1 回 /1 秒
送信出力	70 ~ 500W	5 ~ 25W	7 ~ 250W	5W



図A1.2 CAPSTONEのADS-B地上局(GBT)の整備状況(FAA資料)



図A1.3 CASPTONEにおけるADS-Bのシステム構成図(FAA資料)

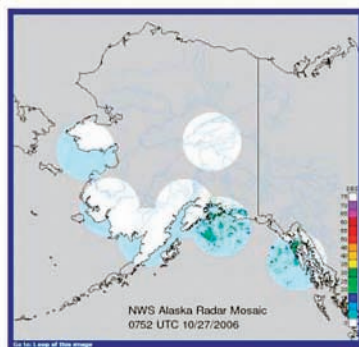
りの約 800ms でランダムに送信を行う) ため、地上局から大容量のデータを放送できることが特長である。

CAPSTONE プログラムは、1999 年から開始され、まず Phase I として、アラスカ州の南西部に地上局が整備され(図 A1.2)、ADS-B、TIS-B、FIS-B のサービスが開始された。UAT の機上局や対応するアビオニクス一式は FAA によって提供され、約 200 機の小型航空機(事業機)に搭載さ

れた。TIS-B とは、航空機に対して周辺を飛行する他機の情報を提供するサービスで、UAT のみではなく、大型機に搭載されるモード S 拡張スキッタによる ADS-B とデータが共有され、ADS-B 非対応機については 2 次レーダ(SSR) による信号を用いて位置情報を得ることが可能である(図 A1.3)。ADS-B の情報は、管制機関のみではなく、運航会社にも提供される。図 A1.4 に示すような運航管理



図A1.4 ADS-Bの情報を用いた運航管理ソフトウェア

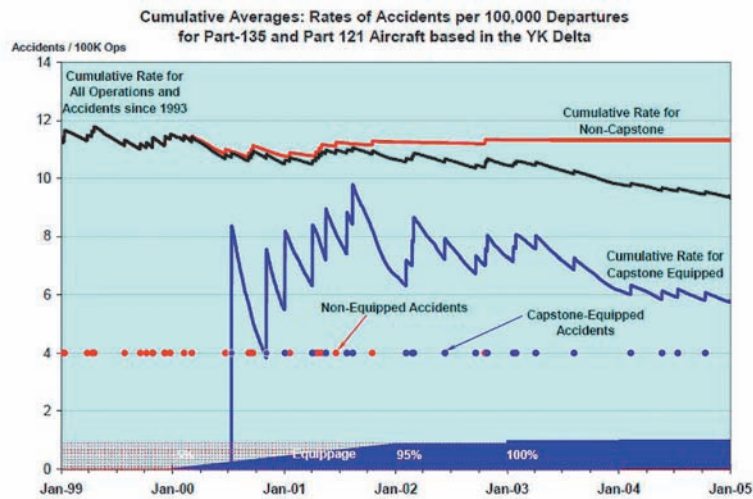


(1) 気象レーダの覆域



(2) 自動気象観測装置

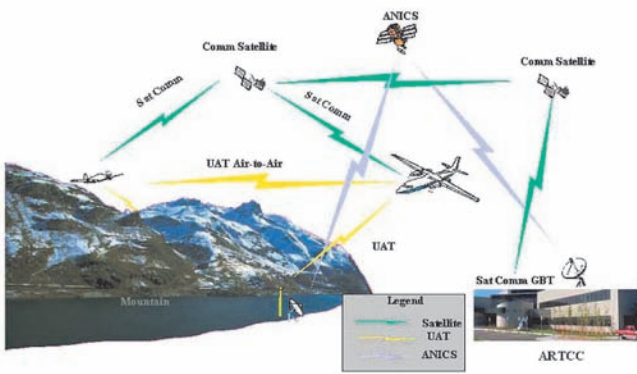
図A1.5 FIS-Bの情報ソースの例



図A1.6 CAPSTONE導入による事故率削減効果(文献1.3)

ソフトウェアが運航会社に配布され、インターネットを通じて自社機の運航状況を把握することができる。FIS-Bとは、航空機に対して気象等の情報を提供するサービスで、情報のソースとしては、気象レーダ網のエコーイメージの画像データ、および自動気象観測装置 (Automated Weather Observation System, AWOS) で観測された風向・

風速、気圧、視程等の情報がテキストデータで送信される(図A1.5)。大型機は自ら気象レーダを搭載しているが、小型機はコストや搭載スペースの制約から気象レーダが搭載されていない機体も多いため、FIS-Bは特に小型機にとって有用である。また、航空機搭載気象レーダに比べて、自機の進行方向前方のみではなく、飛行経路周辺

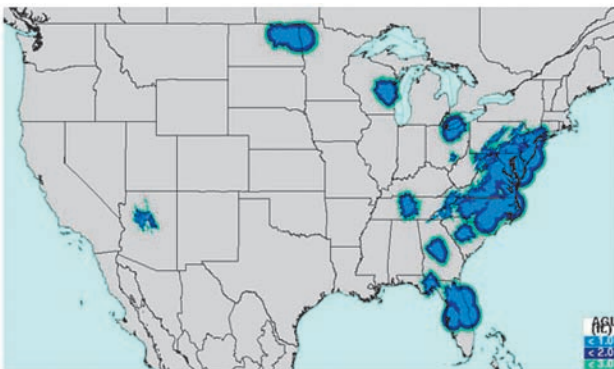


図A1.7 CASPTONEにおけるUATと衛星通信の役割

の広範囲にわたって気象状況が把握できることも利点となる。

2003年からは、CAPSTONE Phase IIとして、南東部にもADS-Bの環境が構築されるとともに(図A1.2)、GPS/WAASによる低高度IFRの実現によって利便性を向上する一方で、今回の実験で用いたChelton EFISのようにSVS(Synthetic Vision System)を実現した高機能アビオニクスを開発によって安全性(状況認識性)を向上した。対応機は約300機に拡大した。図A1.6にCAPSTONEシステムの導入による事故率削減効果を示す(文献1.3)。2005年時点で、CAPSTONE対応機(青線)は、非対応機(赤線)に比べて事故率が47%低減しており、全体(黒線)でも事故率が18%低減している。

地上局が設置されていないアラスカ州北部では、衛星通信による監視の評価実験も実施された(図A1.2, A1.7)。2006年からは、Phase IIIとして、サービスエリアをアラスカ州全域に拡大する予定であったが、その後計画が変更され、ADS-Bを米国全土に展開する計画に統合、2007年をもってCAPSTONEプログラムは発展的に解消した。米国では、大型機用にモードS拡張スキッタ、小型機用にUATを採用し、2025年までに米国全土にADS-B環境を整備し、小型機についても搭載を義務化する方針が明らかにされた。2006年現在、既に東海岸を中心に地上局



図A1.8 米本土における地上局(GBT)の整備状況 (FAA資料)

の整備が進められている(図A1.8)。米国以外では、中国が2006年に試験的にUATを導入し、約200機の小型機に搭載している。

A2. 実験機の仕様と運航体制

CAPSTONE 飛行実験に使用した実験機の仕様と運航体制についてまとめる。

A2.1 母機

実験機の母機としてビーチクラフト式A36型機を選定し、米国内で中古機を調達した。図A2.1に実験機の外観、表A2.1に主要諸元を記す。

A2.2 主な改修内容

母機の調達後、CAPSTONE 対応アビオニクスの搭載、操縦装置および無線装置の2重化、計測用GPSアンテナと機内電源の装備、の3点について機体の改修を実施した。これらの改修は、Major AlternationとしてFAAのFORM337(日本の修理改造検査に相当)に基づいて実施した。以下に搭載機器等の詳細を示す。



図A2.1 飛行実験に使用した航空機 (ビーチクラフト式A36型)

表A2.1 飛行実験に使用した航空機の主要諸元

型式	ビーチクラフト式 A36 型
発動機	コンチネンタル式 IO-550-B 型 × 1 基 (300 馬力)
最大離陸重量	1,655kg
最大搭乗者数	6 名 (操縦士を含む)
全長/全幅/全高	8.4 m / 10.2 m / 2.6m
最大速度	376km/h
航続距離	1,550km (巡航高度 3,050m, 標準大気)
航続時間	5.1 時間 (巡航高度 3,050m, 標準大気)
実用上昇限度	4,880m
製造年	1984 年

表A2.2 Chelton Flight Systems社FlightLogic Synthetic Vision EFISの主要構成部品

	メーカー名, 型番	寸法	重量	消費電力	適合規格	搭載場所
PFD/MFD 	Chelton EFIS SVS	6.25" w 5.50" h 4.50" d	4.0 lbs	10-28V DC 1.4 Amps @ 28V DC 2.8 Amps @ 14V DC	TSO-C2d, C4c C6d,C8d,C10b C106,C110a, C113,C145/14 6,C147, 151a DO-160D,178B (Level A)	計器板 図 1.4
Air Data Computer (ADC) 	Shadin ADC 2000	3.9" w 4.3" h 7.5" d	2.8 lbs	14-28V DC 0.9 Amps @ 14V DC 1.3 Amps @ 28V DC	TSO-C44a, C88a, C106 DO-160B	後部アビオニクスラック 図 A2.2(1)
Attitude and Heading Reference System (AHRS) 	Crossbow AHRS500GA	4.66" w 4.86" h 5.91" d	4.6 lbs	9-30V DC 0.14 Amps	TSO-C4c, C6d DO-160B	後部アビオニクスラック 図 A2.2(1)
Remote Magnetometer 	Crossbow CRM500GA	2.03" w 3.00" ϕ	0.5 lbs	12-30V DC 55 mA @ 28V DC 110 mA @ 14V DC	TSO-C6d DO-160D, 178B	右主翼端 図 A2.2(2)
Analog Interface Unit (AIU) 	Chelton AIU-1	5.05" w 3.08" h 8.12" d	2.2 lbs	10-34V DC 0.5 Amps	DO-160D	計器板裏 図 A2.2(3)
GPS/WAAS 受信機 	Free Flight 1201	4.13" w 1.60" h 6.50" d	1.2 lbs	12-28V DC 0.25 Amps @ 28V DC 0.5 Amps @ 14V DC	TSO-C145a (Beta 1) DO-160D, 178B (Level C)	後部アビオニクスラック 図 A2.2(1)
GPS アンテナ 	Free Flight Aero 81194	3.0" w 0.5" h 4.7" d	0.375 lbs	5V DC	TSO-C144	胴体上面 図 A2.2(4)

A2.2.1 CAPSTONE 対応アビオニクス搭載

(1) EFIS

CAPSTONE プログラムで提供される UAT データリンクに対応したアビオニクスとして、Chelton Flight Systems 社の FlightLogic Synthetic Vision EFIS を装備した。主要構成機器の一覧を表 A2.2 に、搭載状況を図 A2.2 に示す。

Chelton EFIS の主な特徴は以下の通りである。

- UAT を用いた各種サービス (ADS-B, TIS-B, FIS-B) に対応
- トラフィック・気象・空域情報, トンネル形式の経路誘導表示 “Highway in the sky (HITS)”, および地形表示 (Class C TAWS (Terrain Awareness and Warning System, 対地接近警報システム) 機能対応) を統合した 3 次元統合表示が可能
- GPS/WAAS を用いた IFR (Instrument Flight Rules, 計器飛行方式) 運航が可能
- 主要飛行データ (表 A2.3) を 1Hz の周期で記録可能ただし、TIS-B, FIS-B に対応するには、EFIS のソフトウェアを FAA 未承認のバージョンに変更する必要がある

り、今回は FAA の特別の許可の下にソフトウェアを変更し、飛行実験を行った。この状態では、実験機に以下の運航制限が課された。

- 飛行目的は研究・開発目的に限定する。
- 飛行は昼間の VFR (Visual Flight Rules, 有視界飛行方式) に限定する。
- 飛行地域は、予め申請された地域に限定し、人口密集地の上空は飛行しない。
- 搭乗者は、飛行目的上、必要不可欠な人員に限定する。

(2) UAT データリンク装置

UAT データリンク装置は、改修時点で入手可能な唯一の製品であった Garmin 社の GDL-90 を装備した。同装置には、ADS-B での自機位置通報に用いる GPS/SBAS 受信機が内蔵されている。主な仕様を表 A2.4 に、搭載状況を図 A2.3 に示す。さらに、UAT で取得したトラフィック情報 (ADS-B, TIS-B) の計測、および UAT データリンク電波の受信電界強度の計測を行うために、以下の改修を実施した。



(1) ADC, AHRS, GPS/SBAS 受信機の装備 (後部アビオニクスラック)



(2) Remote Magnetometer の装備 (右主翼端)



(3) AIU の装備 (計器板裏)



(4) GPS アンテナの装備 (胴体上面)

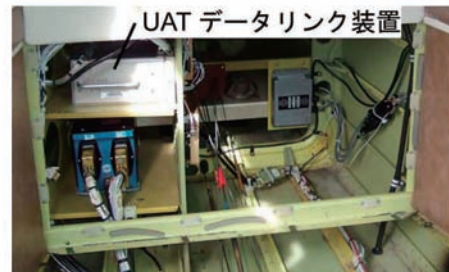
図A2.2 EFIS関連機器の搭載状況

表A2.3 実験機の計測項目

計測項目	単位	計測レート [Hz]	データ出力元
機体位置 (緯度, 経度)	度	1	Chelton EFIS
機体高度 (MSL)	ft		
機体姿勢 (ピッチ, ロール)	度		
機首磁方位	度		
トラック角	度		
指示対気速度 (IAS)	kt		
真対気速度 (TAS)	kt		
対地速度	kt		
昇降率	fpm		
経路角	度		
上下加速度	G		
風速	kt		
風向	度		
外気温	°F		
密度高度	ft		
燃料消費量	Gal		
燃料流量	Gal/hr		
機体位置 (緯度, 経度)	度	最大 10Hz	計測用 GPS 受信機 (Septentrio PolaRX2)
機体高度 (楕円体高)	m		
対地速度 (NS, EW, 上下)	m/s		
プロテクション・レベル	m		
フィギュア・オブ・メリット	m		
シュードレンジ	m		
位相情報 (L1/L2)	—		
WAAS メッセージ	—		
UAT 機上局送信データ一式	—	—	UAT (Garmin GDL 90)

表A2.4 Garmin社GDL-90の主な仕様

周波数	978.00MHz (99% band width=1.3MHz)
送信出力	50W
データレート	1.04Mbps
変調方式	Continuous Phase FSK, h = 0.6, Raised Cosine shaping, a = 0.5
受信感度	-96dBm for 90% MSR
内蔵 GPS/SBAS 受信機	GPS: 12Ch, SBAS: 3Ch, Position Update Rate: 5Hz
寸法	3.5" w / 7.4" h / 12.6" d
重量	6.4 lbs
消費電力	10-40V DC, 0.75Amps@28V DC
適合規格	TSO-C145a (GPS/SBAS 受信機部), TSO-C154 (UAT 部)



(1)UATデータリンク装置本体の装備(後部アビオニクスラック)



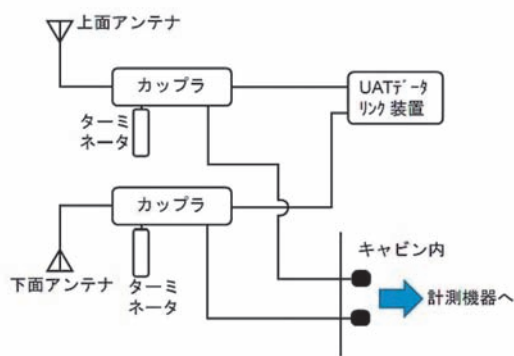
(2)UATデータリンクアンテナの装備(後部胴体上下面)

図A2.3 UATデータリンク装置の搭載状況

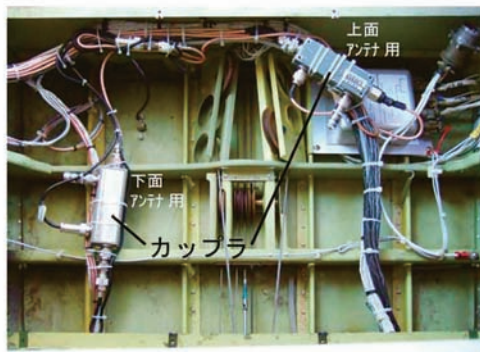


図A2.4 UATデータリンク装置のRS422データケーブルの分岐・計測

- RS422 データケーブルの分岐
UAT から EFIS への RS422 データケーブルを分岐し、分岐した先をキャビン内に引き込んだ。飛行実験では、分岐した系統に持ち込み品扱いのノートパソコンを接続し、トラフィック情報を含んだシリアルデータを計測した (図 A2.4)。
- UAT アンテナケーブルの分岐
胴体上下の UAT アンテナから UAT 本体へのアンテナケーブルを分岐し、分岐した先をキャビン内に引き込んだ (図 A2.5)。飛行実験では、分岐した系統に持ち込み品扱いの計測機器 (電子航法研究所の所有品) を接続し、受信電界強度を計測した。



(1) ケーブル分岐のブロック図



(2) カップラの装備状況



(3) UATアンテナおよび計測用GPSアンテナのキャビン内端子(キャビン後部の荷物室前部)

図A2.5 UATデータリンク装置のアンテナケーブルの分岐

A2.2.2 操縦装置, 無線装置の2重化

実験機のコックピットは、2名のパイロットが左右に搭乗可能なレイアウトであるが、機体調達時は、機長席である左席のみで操縦が可能な状態であった (図 A2.6



(1) 改修前



(2) 改修後

図A2.6 改修前後の実験機コックピットの状態

(1)。左右両席での操縦を可能とするために、操縦装置、無線装置の2重化の改修を実施した(図A2.6(2))。主な改修内容は以下の通りである。

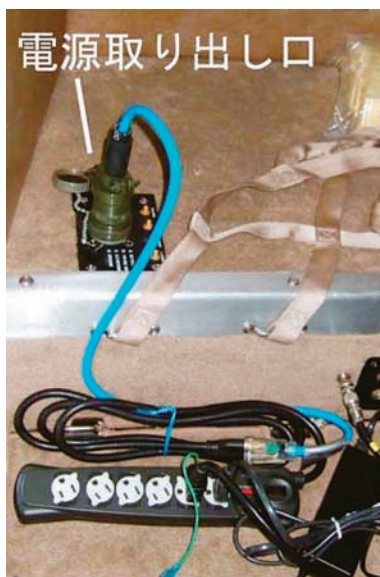
- ・ 右席にラダーペダルを追加。
- ・ 右席操舵輪に無線スイッチを追加。
- ・ 左席計器板上へのEFISのPFD/MFD搭載に合わせて、左席計器板上に既設の飛行計器を右席計器板上に移設。さらに、一部不足していた飛行計器を追加し、IFR運航に必要な飛行計器を2重化。
- ・ 無線装置(VHF NAV/COMM)を2台装備。

A2.2.3 計測用GPSアンテナ、機内電源の装備

GPS/WAASデータの計測用に専用のGPSアンテナを別途装備した。アンテナは、当機構の実験用航空機で使用実績のある2周波(L1/L2)対応GPSアンテナ(Aero-Antenna社AT2775-41W-TNCF-000-RG-40-NW)を使用した。設置位置は前部胴体上面であるが、胴体中心線上に



図A2.7 計測用GPS/SBAS受信機(Septentrio社PolaRx2)



図A2.8 キャビン内の電源取り出し口(キャビン後部の荷物室床面)

はEFISおよびUATデータリンク用のGPSアンテナが位置しているため、左にオフセットして設置している(図A2.2(4))。このため、計測用GPSアンテナはロール方向左に約9度傾いた状態となっている。アンテナケーブルはキャビン内に引き込み、接続端子を設けた(図A2.5(3))。飛行実験では、持ち込み品扱いでGPS/SBAS受信機(Septentrio社PolaRx2, 図A2.7)を本端子に接続し、GPS/WAASデータ(表2.3)を取得した。

キャビン内の持ち込み品扱いの計測機器に電源を供給するため、115V/ACを供給可能なインバータを装備した。供給可能な電力は約220Wである。電源取り出し口は、キャビン後部の荷物室床面に備えられている(図A2.8)。

A2.3 運航体制

実験機の運航・整備は、米国アラスカ州アンカレッジの運航会社Nelson Air社に委託して実施した。当機構の研究飛行専門職(リサーチ・パイロット)および整備専門職の職員が現地に駐在し、同社が適切な作業を行うよう、運航・整備記録等に基づいて監督を行った。また、航空機間のUATデータリンク評価試験で、実験機以外の航空機が必要な場合には、同社から航空機を一時的にチャータした。

安全を確保するため、以下の基本方針の下に飛行実験を実施した。

- ・ 米国連邦航空法および関連法令、飛行規程、マニュアル等を遵守する。
- ・ 昼間に視界気象状態での飛行に限定する。
- ・ 全フライトに、飛行実験期間中に有効なFAAの事業用操縦士、計器飛行証明の操縦資格を有する米国アラスカ州での飛行に精通したNelson Air社のパイロットが搭乗する。特に、当機構のパイロットが飛行する場合は、必ずNelson Air社のパイロット1名が同乗し、パイロット2名体制で飛行する。
- ・ フライト中は、現地連絡員として少なくとも1名が地上で待機する。衛星携帯電話を実験機用に1台(ただし飛行中は使用不可)、現地連絡員用に1台用意し、連絡手段を確保する。

飛行実験に参加する当機構のパイロットは、飛行実験期間中に有効なFAAの自家用操縦士、計器飛行証明の操縦資格を新たに取得するとともに、米国アラスカ大学アンカレッジ校(UAA)が実施するCAPSTONE訓練課程および航空無線通信英語訓練課程を受講し、CAPSTONEプログラム対応アビオニクスおよび現地での飛行に対する理解を深めた上で、飛行実験に臨んだ(詳細はA3章参照)。また、飛行実験参加者には、飛行場内への立ち入りおよび航空機の取り扱い等に関する安全講習を徹底した。



図A2.9 Merrill Field Airport内に設置したJAXAの現地事務所

A2.4 現地事務所

実験期間中は、アラスカ州アンカレッジの郊外にある Merrill Field Airport 内に事務所を設置し（図 A2.9）、JAXA の実験隊と共同研究相手先である電子航法研究所の研究者、計 10 名程度が滞在した。Merrill Field Airport はアンカレッジ国際空港から北東に 5NM 程離れた場所にある小型機専用の飛行場で、常時 800 機以上の小型機が駐機されている（この数は我が国における小型機の総数にはほぼ等しい）。

実験期間中、9月29日に、現地事務所で開催されたセレモニーが行われた（図 A2.10）。日本から、JAXA 航空プログラムグループ統括リーダー他数名、および文部科学省、航空機メーカー、アビオニクスメーカー等からの視察者を迎え、FAA CAPSTONE Program Manager らに試験実施の支援に対して感謝の意を表すとともに、今後も JAXA と FAA が



図A2.10 現地セレモニーの様子
(2006年9月29日)

民間航空分野の技術協力を積極的に進めることを確認した。

A3. JAXA 操縦士の資格取得・訓練

米国での飛行試験の実施に際し、JAXA のリサーチパイロット 3 名の操縦士資格の取得・切り替え、ならびに CAPSTONE 対応アビオニクスの講習、現地での慣熟飛行訓練等を実施した。米国では、2001 年に発生した同時多発テロ事件以降、国外のライセンスからの切り替えに対して厳しくなっているという事情があり、手続きに数ヶ月を要した。以下にその概要を示す。

(1) 計器飛行証明学科試験

計器飛行証明の切り替えには学科試験を受験する必要があった。FAA が実施する学科試験を受験し（2006 年 6 月 7 日、米軍横田基地において）、合格した。なお、有視界飛行方式の飛行のみであれば学科試験を受験する必要は無い。

(2) 操縦士ライセンスの切り替え

操縦士ライセンスの切り替えに際し、アンカレッジの FSDO (Flight Standards District Office) において FAA 試験官による口頭試問を受け（2006 年 6 月 26 日）、合格した。英会話能力（ヒアリング、スピーキング）や航空機の操作手順に関する知識・理解度を調べる口頭試問が操縦士毎に約 10 分間実施された。

(3) 日本国内でのシミュレータを用いた訓練

Chelton EFIS の操作方法およびアンカレッジ周辺の空



図A3.1 CAPSTONEシミュレータ



(1) 飛行シミュレータ

港・空域に関する習熟を目的に、CAPSTONE シミュレータ（図 A3.1）を調達し、訓練を行った。

(4) 米国での訓練

米国アラスカ州での実飛行環境における Chelton EFIS の操作方法習熟、および管制官との英会話能力向上を目的として、アラスカ大学アンカレッジ校（UAA）で講習を受講した（2006年6月19日～30日）。講習の内容は、Chelton EFIS の各機能の説明（座学）と飛行シミュレータ（図 A3.2 (1)）での操作実習（12時間）、実機（セスナ 172RG, 図 A3.2 (2)）による慣熟（1人1時間程度）、管制官との無線交信等を想定した英会話の学習（25時間）等。



(2) 実験による慣熟

図A3.2 米国での訓練環境