



宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

研究開発用飛行シミュレータの開発

若色 薫，野田 文夫，村岡 浩治，飯島 朋子，
船引 浩平，野嶋 琢也

2005 年 2 月

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

目 次

概要

1. はじめに	2
1.1 目的	2
1.2 特徴	2
2. 固定翼機型可動コックピット・システム（FSCAT-A）	3
2.1 構成	3
2.2 機能	3
1) 模擬操縦装置と操舵反力装置	4
2) 模擬飛行計器類	4
3) リンケージ装置	4
4) ロータリー・エンコーダ制御装置	4
5) 周波数選択パネル制御装置	4
6) 模擬視界表示装置	4
7) 模擬音響装置	4
8) 制御卓と実験者席	5
9) ファンクション・スイッチ	5
10) 交話装置	5
3. 回転翼機型可動コックピット・システム（FSCAT-R）	6
3.1 構成	6
3.2 機能	6
1) 模擬操縦装置と操舵反力装置	6
2) 模擬飛行計器類	6
3) リンケージ装置	7
4) ロータリー・エンコーダ制御装置	7
5) 模擬視界表示装置	7
6) 模擬音響装置	8
7) 制御卓	8
8) ファンクション・スイッチ・ボックス	8
9) 座席振動装置	8
10) 交話装置	8
4. 固定翼機型固定コックピット・システム（FSCAT-F）	8
4.1 構成	8
4.2 機能	8
1) 模擬操縦装置	8
2) 模擬飛行計器類	8
3) リンケージ装置	9
4) ロータリー・エンコーダ制御装置	9
5) 模擬視界表示装置	9
6) 模擬音響装置	9
7) 制御卓	9
8) FSW ボックス	9
9) 交話装置	9
5. 固定翼機型実機コックピット・システム（FSCAT-E）	9

5.1	構成	10
5.2	機能	10
1)	模擬視界システム部	10
2)	搭載システム・インターフェース部	10
6.	操作室	11
7.	計算機システム	11
7.1	ホスト計算機	11
1)	計算機本体	11
2)	リンケージ・システム	12
3)	ネットワーク・システム	12
4)	航空機用データバス・システム	13
7.2	エミュレーション・システム計算機	13
1)	システム管理/運動演算部	13
2)	データ表示部	13
7.3	飛行計器表示用計算機	13
8.	模擬視界システム	15
8.1	PT2000SJ 模擬視界システム	15
1)	模擬視界映像発生	15
2)	模擬視界データベース	15
8.2	Onyx2 模擬視界システム	15
1)	模擬視界映像発生	15
2)	模擬視界データベース	16
9.	モーション・システム	16
9.1	油圧式6軸モーション・システム	16
9.2	電動式6軸モーション・システム	17
10.	通信システム	17
11.	実時間シミュレーション用ソフトウェア	18
11.1	MLEP	18
11.2	MSCP	18
11.3	Linux 版実時間シミュレーション用ソフトウェア	18
12.	性能評価	18
12.1	ホスト計算機	19
12.2	FSCAT-A	19
1)	時間遅れ	19
12.3	FSCAT-R	19
1)	ハーフドーム型ディスプレイ・システム	20
2)	電動式6軸モーション・システム	20
12.4	FSCAT-E	22
1)	時間遅れ	22
2)	視野角と映像輝度	22
13.	まとめ	22
	参考文献	23
	付録	24
1)	FSCAT 用建物の概要	24

研究開発用飛行シミュレータの開発*

若色 薫^{*1}、野田 文夫^{*2}、村岡 浩治^{*2}
飯島 朋子^{*2}、船引 浩平^{*1}、野嶋 琢也^{*1}

Development of flight simulator for research and development*

Kaoru Wakairo^{*1}, Fumio Noda^{*2}, Koji Muraoka^{*2},
Tomoko Iijima^{*2}, Kohei Funabiki^{*1} and Takuya Nojima^{*1}

ABSTRACT

In order to promote the development of aircraft, avionics and research on human factors, the Japan Aerospace Exploration Agency upgraded their research simulator complex. The new simulator complex called FSCAT (Flight Simulation Complex for Advanced Technology), consists of four cockpit systems, two sets of host computer systems with image generation capabilities, two 6 degree-of-freedom motion systems, and one image generator. This report describes simulation complex architecture, its functions and performance.

Keywords: Flight Simulator, Cockpit System, Visual System, Motion System

概 要

宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency：以下 JAXA と称する）では、航空機および機器類の開発や運航安全に関する研究を推進するため、これまで使用してきた汎用飛行シミュレータ設備（1963 年稼働開始）を更新し、航空宇宙技術研究センター飛行場分室（三鷹市）に新たな研究開発用飛行シミュレータ（Flight Simulation Complex for Advanced Technology：以下 FSCAT と称する）を整備した。

FSCAT は、4 台のcockpit・システム、模擬視界発生機能を備えた 2 台のホスト計算機システム、2 台の 6 軸モーション・システム（動揺装置）および 1 台の模擬視界発生装置から構成された飛行シミュレータ（図 1-1）である。本報告では、これらの機能および性能について述べる。

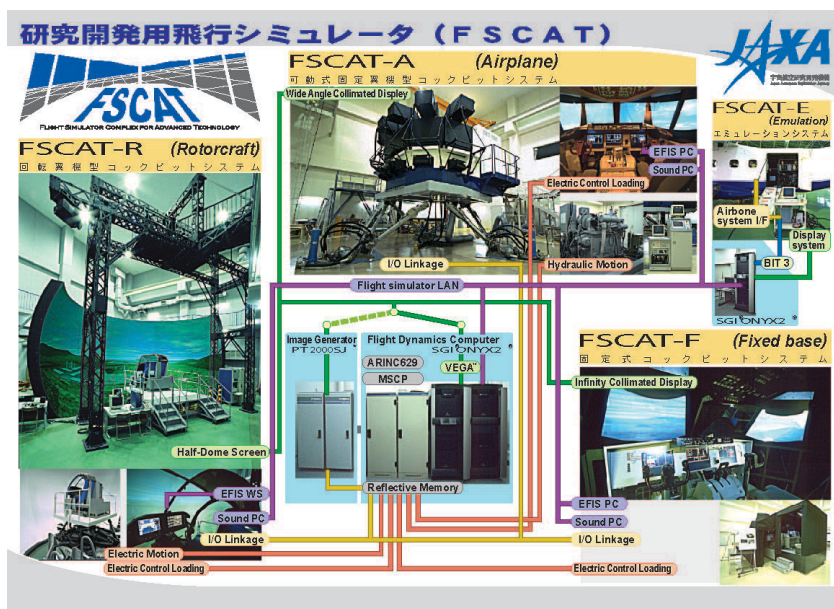


図 1-1 研究開発用飛行シミュレータの全体構成

* 平成 17 年 1 月 12 日 受付 (Received 12 January, 2005)

* 1 総合技術研究本部 飛行試験技術開発センター (Flight Test and Simulation Technology Center, Institute of Space Technology and Aeronautics)

* 2 総合技術研究本部 航空安全技術開発センター (Air Safety Technology Center, Institute of Space Technology and Aeronautics)

略語

ADF	: Automatic Direction Finder (自動方向探知機)
AI	: Analog Input (アナログ入力)
ANSI	: American National Standards Institute
AO	: Analog Output (アナログ出力)
ch	: Channel
CRT	: Cathode Ray Tube (ブラウン管)
DI	: Discrete Input (ディスクリート入力)
DO	: Discrete Output (ディスクリート出力)
DSP	: Display Select Panel
FBW	: Fly-By-Wire
FMS-CDU	: Flight Management System-Control Display Unit
ECAM	: Electronic Centralized Aircraft Monitor
EFIS	: Electronic Flight Instrument System (電子式飛行計器系統)
FSCAT	: Flight Simulation Complex for Advanced Technology
FSW	: Function SWitch
GPS	: Global Positioning System
GAIA	: GPS Aided Inertial-navigation Avionics
JAXA	: Japan Aerospace Exploration Agency (宇宙航空研究開発機構)
MCP	: Mode Control Panel
MIDI	: Musical Instrument Digital Interface
MLEP	: Multi Link and Edit Program
MSCP	: Multi Simulation Control Program
MuPAL	: Multi-Purpose Aviation Laboratory (多目的実証実験機)
ND	: Navigation Display
OS	: Operating System
PC	: Personal Computer
PFD	: Primary Flight Display
UDP	: User Datagram Protocol
USB	: Universal Serial Bus
VHF	: Very High Frequency (超短波)
VOR	: VHF Omni—directional radio Range (超短波全方向式無線標識)
WAC	: Wide Angle Collimated

1. はじめに

1.1 目的

FSCATは、2001年度の第2次補正予算により、JAXAの前身である独立行政法人航空宇宙技術研究所により施設整備が開始されたものである。

FSCATの開発にあたり、次の3点を目的として掲げた。

- 1) 文部科学省科学技術学術審議会の報告書において、「重点開発領域」として「安全運航に貢献する研究開発」が掲げられており、JAXAにおける航空技術研究の柱である「ヒューマンファクタ」や「次世代航法機器に関する研究」等の航空安全技術に関わる研究の促進に有効な施設であること。
- 2) 実験用航空機(固定翼機2機と回転翼機1機)とともに研究者・パイロット等の人的資源を全て含めた形で飛行シミュレータを活用できる施設であること。
- 3) 我が国における航空宇宙に関わる技術研究開発および航空宇宙産業振興への寄与を目的とした共同利用設備として運用するため、航空機製造会社および航空関連企業、大学等の関係機関が利用しやすい施設であること。

1.2 特徴

FSCATは、開発目的にあるようにハードウェア、ソフトウェア、人的資源等、全ての飛行実験関連設備資源の一元化による有効活用を考慮し製作した。

そのため、FSCATを設置する建屋(付図1、付図2)についても、単にFSCATを設置するだけの建築設計ではなく、人的資源を考慮した部屋割り、FSCATや実験用航空機へ往來を考慮した動線、FSCATや飛行実験関連機器の利用を考慮した電気設備や空調設備等、飛行実験関連設備資源の一元化による有効活用を考慮した建築設計を行った。

その結果、FSCATを単なる飛行シミュレータとして活用するだけではなく、実験用航空機とFSCAT、FSCATと他の飛行実験関連設備と組み合わせて活用することが可能となった。

また、FSCATは、その名の通り、複数のコックピット・システムや模擬視界発生装置、ホスト計算機等から構成された複合シミュレーション施設である。FSCATは、技術研究開発の対象となる航空機の種別に対応したコックピット・システムを基本単位として大別する。現在、FSCATのコックピット・システムには、次の4種類がある。

- 1) 固定翼機型可動コックピット・システム(FSCAT-A)
- 2) 回転翼機型可動コックピット・システム(FSCAT-R)

3) 固定翼機型固定コックピット・システム (FSCAT-F)

4) 固定翼機型実機コックピット・システム (FSCAT-E)

各コックピット・システムの概略を表 1-1 に示すが、詳細については2章以降で述べる。

2. 固定翼機型可動コックピット・システム (FSCAT-A)

2.1 構成

固定翼機型可動コックピット・システムは、FSCATの固定翼機型 (Airplane Type) という意味で FSCAT-A と略称する (図 2-1 参照)。

FSCAT-A のコックピット内部は、新しい機体や搭載機器、運航方式の開発や人間・航空機系の特性評価等、航空システムに関する様々な研究に活用するために2名乗務双発大型旅客機を模擬した構成を基本とする (図 2-2)。

コックピット内には、Side-By-Side 型操縦座席に加え、センターペダスタル後方と制御卓間において移動可能な実験者席を設置した。模擬操縦装置として、センター・コラム方式の操縦輪、双発用スラスト・レバー、スピードブレーキ・レバー、およびフラップ・レバーを設けた。

機体搭載システムや交信設定用の模擬操作機器は、センターペダスタル前部と後方、グレアシールド部、およびオーバーヘッドパネル部に配置した。

左右と中央の計器盤には、電子式飛行計器等を模擬するために17型液晶ディスプレイが3台設けられている。

また、FSCAT-A とドルニエ式 Do228-202 型機を母機に開発した多目的実証実験機 MuPAL- α とのコックピット実験レベルの連携性を高めるため、双発ターボプロップ機の模擬に必要な操縦装置も備える。

その他、FSCAT-A コックピットには、飛行シミュレータとして必要なリンケージ装置、模擬音響装置、模擬視界表示装置、操舵反力装置、制御卓等を設けた。

なお、FSCAT-A コックピット自体は、油圧式6軸モーション・システムの上に搭載され、機体運動に伴う動揺発生が可能な構成を有する (図 2-3)。

図 2-4 に主要機器の構成および接続を示す。これら構成要素の機能および性能については、次節にて記す。

表 1-1 FSCAT コックピット・システムの概略

コックピット名	主要な模擬対象	コックピット形態	動揺装置
FSCAT-A	固定翼機	双発ジェット／プロペラ	有り
FSCAT-R	回転翼機	小型タービン	有り
FSCAT-F	固定翼機	双発ジェット	無し
FSCAT-E	固定翼機	MuPAL- α (実機)	無し



図 2-1 FSCAT-A のコックピット外観



図 2-2 FSCAT-A のコックピット内部

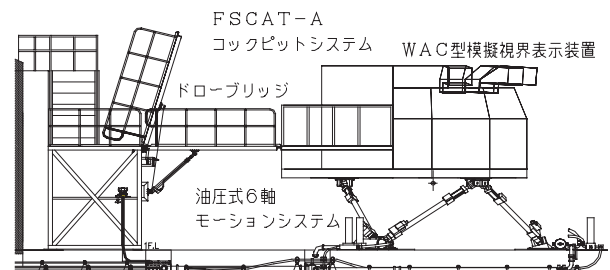


図 2-3 FSCAT-A 側面図

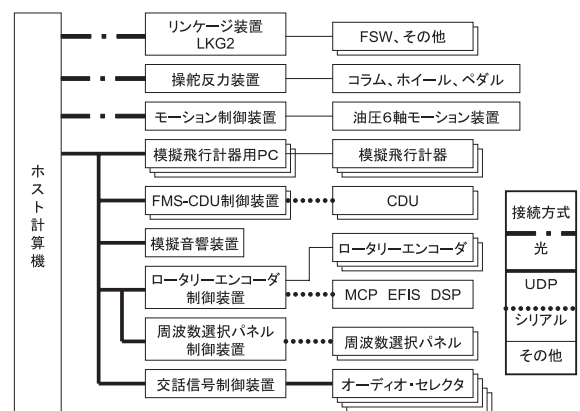


図 2-4 FSCAT-A 主要機器構成図

2.2 機能

1) 模擬操縦装置および操舵反力装置

航空機の操縦に用いる模擬操縦装置には、前述したようにコラム、ホイール、ラダーペダル、スラスト・レバー、スピードブレーキ・レバー、フラップ・レバー、トリム・ホイール、およびステアリング・ホイールを設けた。

FSCAT-A コックピットの原型となったボーイング式 777 型機では、コントロール・スタンドのスピードブレーキ・レバー左部にはピッチトリム・レバーが配置されている。しかし、FSCAT-A では MuPAL- α 等のプロペラ機の模擬が必要なため、その際はピッチトリム・レバーをスピード・レバーへ転用する。そのため、コントロール・スタンドの両側にトリム・ホイールを設けた。

コラム・ホイール、およびラダーペダルには、電動アクチュエータを用いた操舵反力装置を設け、操縦感覚を任意に模擬できる。操舵反力装置は、イーサネットを介してホスト計算機と接続され、ブレーク・アウト・フォース等の操舵感覚設定や操縦装置の位置設定等、ホスト計算機から設定できる。

また、スラスト・レバー、スピードブレーキ・レバー、およびトリム・ホイールには、電動サーボ機構が組み込まれ、レバーやホイールの位置制御機能を有する。

なお、ステアリング・ホイールに関しては、バネ反力により操縦感覚の付与を行う。

2) 模擬飛行計器類

航空機の飛行状況を表示する飛行計器には、コンピュータ・グラフィックスによる模擬電子式飛行計器を採用した。模擬飛行計器および FMS-CDU の表示部は、市販の液晶ディスプレイ・パネルを用い、それぞれに直結した Linux-PC 等の計算機を用いて、飛行計器映像等の生成と表示を行う方式を採用した。

FMS-CDU のキーパッド部の出力信号には、PC の標準仕様である PS/2 キーボード出力を採用し、Linux-PC 等との接続を容易にした。

3) リンケージ装置

FSCAT-A のリンケージ装置（以下、LKG2 とする）は、コックピット左後方のラック内に収納され、アナログ入出力（AI:128ch、AO:128ch）とディスプレイ入出力（DI:384ch、DO:384ch）を有する。

リンケージ装置は、計器盤や操縦装置等に設けた各種スイッチ入力処理やランプ点灯処理を行う他に、ファンクション・スイッチ・ボックス（以下、FSW ボックスと称する。）に設けた照光型プッシュ式スイッチの入力処理やランプ点灯処理、ロータリー・エンコーダにあるプッシュ式スイッチの入出力制御を行う。

4) ロータリー・エンコーダ制御装置

ロータリー・エンコーダ制御装置は、左右の計器盤と制御卓上の FSW ボックスの 3 カ所に設けた合計 18 個のロータリー・エンコーダ（回転式入力装置）とホスト計算機を接続する装置である。ロータリー・エンコーダの回転量検出には、リンケージ装置が持つサンプリング周波数（100Hz）の数 10 倍以上のサンプリング周波数が必要であり、ロータリー・エンコーダ制御装置が必要となる。

ロータリー・エンコーダ制御装置は、ロータリー・エンコーダ用インターフェイス・ボードを内蔵した Windows PC から構成する。ロータリー・エンコーダで検出した回転量は、ロータリー・エンコーダ制御装置で物理量変換され、イーサネットを介してホスト計算機に UDP 転送される。

MCP、EFIS、DSP の各パネルからの入出力処理にはシリアル信号が用いられる。ロータリー・エンコーダ制御装置では、これらパネルとホスト計算機との UDP 転送によるデータ交換に必要な中継動作とシリアル信号の物理量変換を行う。

また、ロータリー・エンコーダ制御装置は、周波数選択パネル制御装置とホスト計算機との UDP 転送によるデータ交換に必要な中継機能も有する。

5) 周波数選択パネル制御装置

センターベデスタル後方上にある 2 つの周波数選択パネルの入出力処理にはシリアル信号を用いる。周波数選択パネル制御装置は、Windows PC で構成され、ロータリー・エンコーダ制御装置の中継機能を利用した UDP 転送によるホスト計算機とのデータ交換とシリアル信号の物理量変換を行う。

6) 模擬視界表示装置

コックピット窓外の視界映像をパイロットに呈示するために用いる模擬視界表示装置の光学系には、3 チャンネル（3 台）の無限遠表示装置が 1 組となった WAC 型無限遠表示装置（米国、GMO 社製）を正副操縦席用として 2 組採用した。1 組の WAC 型無限遠表示装置が 1 つの操縦席に対する模擬視界映像の呈示を受け持ち、水平 200 度、垂直 30 度の視野角を実現する。

模擬視界表示装置のディスプレイ部分には、3 管 CRT 式背面投写型プロジェクタ方式を使用した Model 5058 MRP（ベルギー、Barco 社製）を採用し、高精細な映像呈示が可能である。

図 2-1 に示す FSCAT-A のコックピット前方の黒い部分が模擬視界装置であり、上部の飛び出た部分が Model 5058 MRP プロジェクタ部分である。

7) 模擬音響装置

エンジン音や風切り音等、飛行シミュレータで必要となる各種音響の発生を行う模擬音響装置は、模擬音響制御部と音響発生部から構成する。

Windows PC で構成した模擬音響制御部は、イーサネットを介してホスト計算機と接続し、UDP 転送により制御データの授受を行う。

デジタルサンプリングで構成した音響発生部は、模擬音響制御部から MIDI 信号で制御を行う。音響発生部は、6 種の音源を有し、同時に 6 種の模擬音響を発生できる。

8) 制御卓と実験者席

FSCAT-A では、コックピット内の操縦席右後方に制御卓と実験者席を設けた。

制御卓には、5 台の模擬飛行計器用 Linux-PC の制御に必要な機器類（キーボード、マウス、ディスプレイ）と、それを共用するための切替器、交話装置類を設けた。

実験者席（図 2-5）は、ボーイング式 727 型機の航空機関士席用回転座席を用い、制御卓とセンターペダスタル後方間の移動（約 85cm）ができるよう座席レールの延長とテーブルの取り付けを行った。実験者席テーブル（図 2-6）には、飛行シミュレータプログラムの開発や実行時には実時間システム制御用端末となるノート型 Linux-PC とファンクション・スイッチ・ボックスを設けた。

9) ファンクション・スイッチ

ユーザーが任意に使える照光式スイッチとロータリー・エンコーダから構成されたファンクション・スイッチ（以下、FSW とする）には、FSW ボックスと FSW パネルの 2 つのタイプがある。

FSW ボックスは、16 個の照光式押しボタンスイッチと 6 個の押しボタンスイッチ付きロータリー・エンコーダから構成される。

FSW パネル（図 2-7）は、左右の操縦席正面にある液晶ディスプレイ隣接部の各 1 カ所、計 2 カ所に配置し、8 個の照光式押しボタンスイッチと 4 個の押しボタンスイッチ付きロータリー・エンコーダから構成する。

FSW にある照光式押しボタンスイッチとロータリー・エンコーダの押しボタンスイッチ出力はリンケージ装置の DI チャンネルに、照光式押しボタンスイッチのランプ入力にはリンケージ装置の DO チャンネルに、ロータリー・エンコーダはロータリー・エンコーダ制御装置に接続され、ユーザーがソフトウェアにより自由に制御できる。

10) 交話装置

交話装置は、パイロットとコックピット内外の実験者

との通話に用いる装置であり、ヘッドセット、プレス・トーク・スイッチ、ジャック・ボックス（またはジャック・パネル）、オーディオ・セレクト・ボックス（またはオーディオ・セレクト・パネル）等から構成する。



図 2-5 実験者席と制御卓（右側）



図 2-6 ノート PC と FSW ボックス



図 2-7 FSW パネル（左操縦席用）

ヘッドセットを接続するジャック・パネルは、正副パイロット席の両横と後方、制御卓の計5カ所に設けた。

また、オーディオ・セレクトは、センターペダスタルに2カ所、制御卓に1カ所の計3カ所に設けた。

3. 回転翼機型可動コックピット・システム(FSCAT-R)

3.1 構成

回転翼機型可動コックピット・システムは、FSCATの回転翼機型（Rotorcraft Type）という意味でFSCAT-Rと略称する。

FSCAT-Rのコックピットは、FSCAT-Aと同様に新しい機体や搭載機器、運航方式の開発や人間・航空機系の特性評価等、回転翼機を対象とした航空システムに関する様々な研究に活用するために小型回転翼機を模した構成を基本とする。その外観を図3-1に、内部を図3-2に示す。

座席配置には、一般的な回転翼機の操縦座席配置であるSide-By-Side型を採用した。右パイロット席の座部には、平面スピーカーを用いて振動を発生するボディソニック式座席振動装置を設けた。

操縦装置には、回転翼機の操縦装置であるサイクリック・スティック、アンチ・トルク・ペダル、およびコレクティブ・ピッチ・レバーを設けた。

操作パネル類としてセンターペダスタル上には、エンジンや電気系統のスイッチやランプ類を設け、座席の中央部分にはオーディオ・セレクト等の交信装置を設けた。

正面計器盤には、電子式飛行計器等を表示する横長17型と14型の2つの液晶ディスプレイを設けた。

コックピット自体は、電動式6軸モーション・システムに搭載され、さらに模擬視界表示装置（ハーフドーム型ディスプレイ・システム）の球心位置（視点位置）にコックピットの標準視点位置が近付くよう配置した（図3-3、図3-4）。

また、図3-1に示すようにコックピット外後方右側には、操舵反力装置、電動式6軸モーション・システム用制御装置、模擬音響装置、リンケージ装置等を収納した4つのラックが配置され、コックピット外後方左側には制御卓を設け、計器表示用計算機を2台配置した。

図3-5に主要機器の構成および接続を示す。これらの構成要素の機能性能等については、次節で詳述する。

3.2 機能

1) 模擬操縦装置と操舵反力装置

回転翼機の操縦に必要な模擬操縦装置として、前述したようにサイクリック・スティック、アンチ・トルク・

ペダル、およびコレクティブ・ピッチ・レバーを設けた。

これらの模擬操縦装置には、FSCAT-Aと同様な電動アクチュエータを用いた操舵反力装置を設け、回転翼機特有の操縦感覚を任意に模擬できる。

2) 模擬飛行計器類

正面計器盤上の右側に設けた横長17型液晶ディスプレイは、1600×1024の解像度を持ち、Windows NT-PC（日本SGI製SGI320）に接続される。このPCには、MH2000A型機の通常型飛行計器を模擬するプログラムがあり、ホスト計算機からUDP転送を用いて制御を行うことで、飛行計器の表示と駆動が行える。

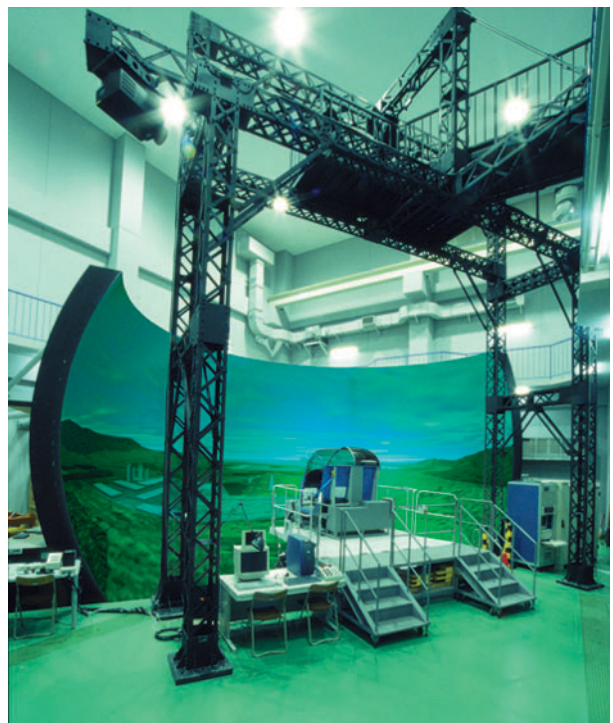


図3-1 FSCAT-Rのコックピット外観



図3-2 FSCAT-Rのコックピット内部

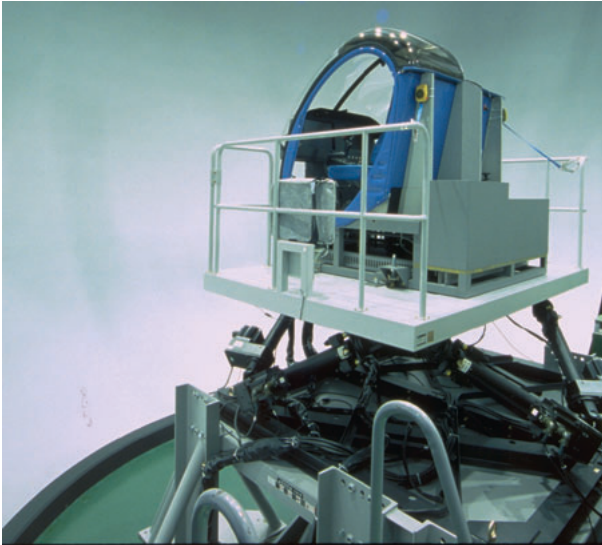


図 3-3 コックピット部分と 6 軸モーション・システム

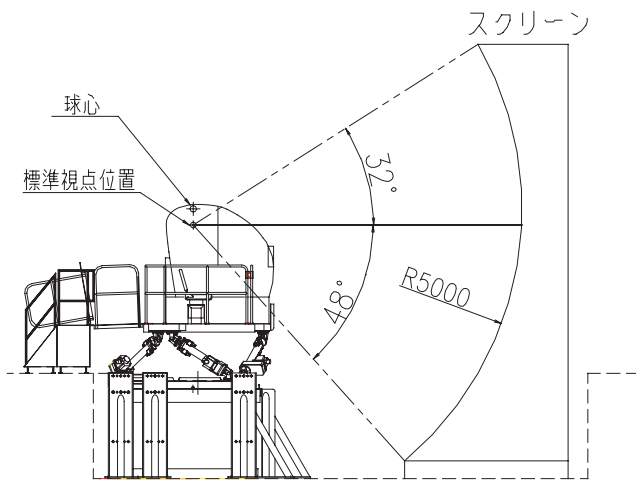


図 3-4 FSCAT-R の側面図

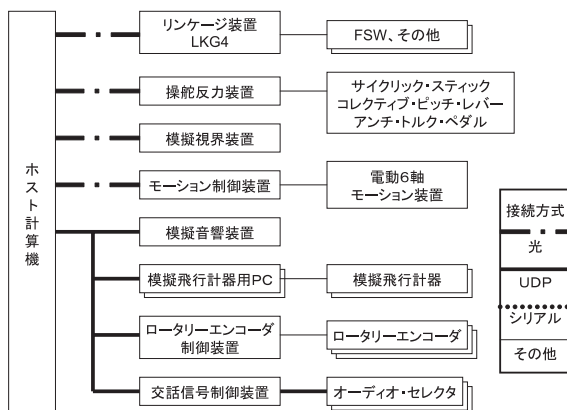


図 3-5 FSCAT-R の主要機器構成図

正面計器盤上の左側に設けた 14 型液晶ディスプレイは、最大 SXGA の解像度を持ち、ユーザーが任意の表示を行える。通常は、日本 SGI 製計算機 (Octane) に接続し、計器画像の表示や実験データのテキスト表示等に用いる。

いずれの液晶ディスプレイも、これ以外の計算機に接続し、任意の画像表示が可能である。

3) リンケージ装置

FSCAT-R のリンケージ装置 (以下、LKG4 とする) は、コックピットの外右後方に設けたラック内に収納され、アナログ入出力 (AI:64ch、AO:32ch) とディスクリート入出力 (DI:128ch、DO:64ch) を有する。

LKG4 も FSCAT-A の LKG2 と同様に各種のスイッチ入力処理やランプ点灯処理、FSW ボックスの入出力制御を行う。

4) ロータリー・エンコーダ制御装置

FSCAT-A のロータリー・エンコーダ制御装置と同様の機能を有し、コックピット外左後方に設けた制御卓上の FSW ボックス用ロータリー・エンコーダと Host 計算機を接続する装置であり、リンケージ装置と同じラックに収納される。

5) 模擬視界表示装置

回転翼機の窓外視界をパイロットに呈示する FSCAT-R 用模擬視界表示装置は、その構造からハーフドーム型ディスプレイ・システムと称する。

ハーフドーム型ディスプレイ・システムは、映画館と同様な投影方式のディスプレイ・システムであり、スクリーン部とプロジェクタ部から構成される。

スクリーン部は、半径 5m の球体を縦に 2 等分した半球の上部を約 5 分の 1、下部を約 10 分の 1、水平に切り取った形状を有する。その視野角は、回転翼機の飛行形態に合わせ、水平 180 度、上方約 30 度、下方約 50 度の下方視界を重視した仕様である。

なお、図 3-3 では、電動式 6 軸モーション・システムが停止状態のため、コックピットが最低位置にあり、球心と標準視点に差が生じている。この差は、モーション・システムが動作し、コックピットが中立位置に移動すると解消する。

プロジェクタ部は、6 台の液晶プロジェクタとプロジェクタ用架台から構成する。使用する液晶プロジェクタは、飛行シミュレータ用 (Barco 社製 SIM6) であり、ひずみ補正や重ね合わせ補正等、ドーム・スクリーンに多チャンネルの映像を投影するために不可欠な機能を有する。

図 3-1 の黒色門型トラス構造物がプロジェクタ用架台である。高所にあるプロジェクタ設置場所には、プロジ

ェクタの保守作業効率を考慮し、ヘリシミュレータ室2階回廊部から直接移動できる構造を採用した。

6) 模擬音響装置

FSCAT-Aの模擬音響装置と同様の機能性能を有する装置であり、FSCAT-R用として主に回転翼機特有の模擬音響発生を行う。

7) 制御卓

制御卓は、図3-1中にあるようにコックピット外後方左側に配置され、制御卓上にはFSWボックス、交話装置、計器表示用計算機を設けた。

なお、計器表示用計算機の1台（日本SGI社製Octane）は、飛行シミュレータプログラムの開発や実行時には実時間システム制御用端末を兼ねる。

8) FSWボックス

FSCAT-AのFSWボックスと同様の機能性能を有する。

9) 座席振動装置

座席振動装置は、平面スピーカーを使用したボディソニック方式を採用しており、リンケージ装置からのアナログ出力信号を用い、座席振動の周波数と振幅の設定が可能である。これにより、機体の高周波振動等、モーション・システムでは実現できない体感をパイロットに付与できる。

10) 交話装置

FSCAT-Aの交話装置と同様の機能性能を有し、ヘッドセットを接続するジャック・パネルを正副操縦座席の間に2カ所、制御卓に1カ所の計3カ所に設けた。

また、交話を切り換えるためのオーディオ・セレクトを、正副操縦座席の間に2カ所、制御卓に1カ所の計3カ所に設けた。

4. 固定翼機型固定コックピット・システム(FSCAT-F)

4.1 構成

固定翼機型固定コックピット・システムは、FSCATの固定コックピット型（Fixed-base Cockpit Type）という意味でFSCAT-Fと略称する（図4-1）。

FSCAT-Fのコックピット内部は、FSCAT-Aと同様に新しい機体や搭載機器、運航方式の開発や人間・航空機系の特性評価等、固定翼機を対象とした航空システムに関する様々な研究に活用するためにFSCAT-Aと同様なSide-By-Side型操縦座席を有する（図4-2）。

操縦席後方は、ユーザーが自由に使用できる実験用作業区域であり、中央部には制御卓を設けた（図4-3）。

操縦装置には、センター・コラム方式の操縦輪、双発用スラスト・レバー、スピードブレーキ・レバー、およびフラップ・レバーを設けた。

図4-4に主要機器の構成および接続を示す。これらの構成要素の機能性能等については、次節で詳述する。

4.2 機能

1) 模擬操縦装置

FSCAT-Aと同様に、コラム、ホイール、およびラダーペダルには、電動アクチュエータを用いた操舵反力装置を設け、操縦感覚を任意に模擬できる。

また、スラスト・レバーとスピードブレーキ・レバーには、電動サーボ機構が組み込まれ、これらレバーの位置制御機能を有する。

2) 模擬飛行計器類

FSCAT-Aと同様に、模擬飛行計器やFMC-CDUの表示部は、液晶ディスプレイ・パネルを用い、それぞれに直結したLinux-PC等の計算機によって画像生成と映像表示を行う。

また、FMS-CDUのキーパッド部出力信号にもPS/2キーボード出力を採用した。

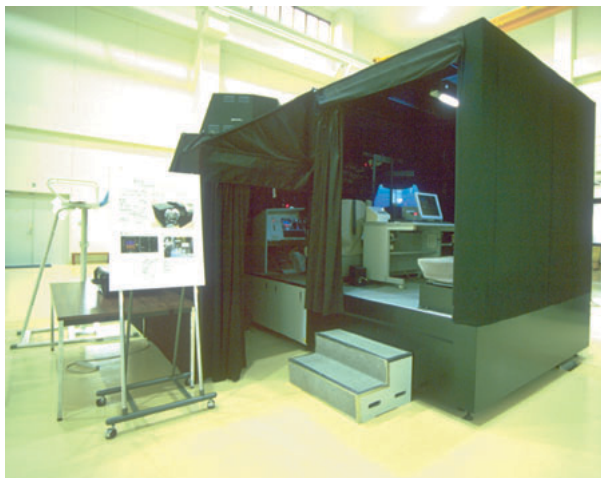


図4-1 FSCAT-Fのコックピット外観



図4-2 FSCAT-Fのコックピット内部

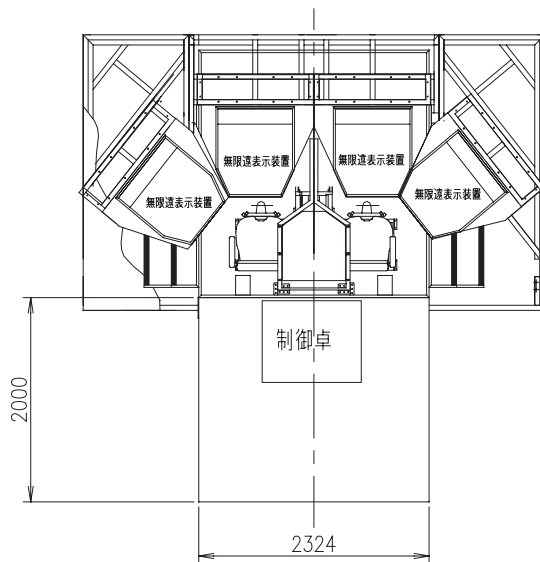


図 4-3 FSCAT-F 平面図

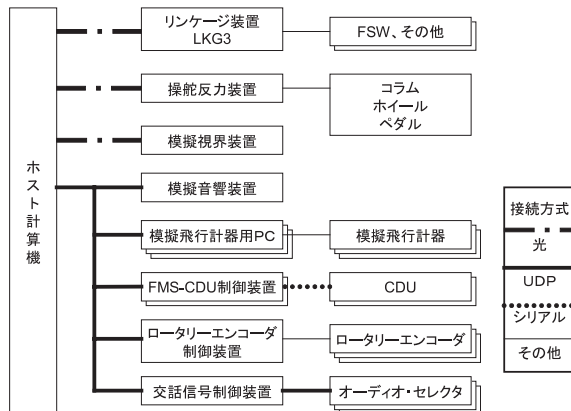


図 4-4 FSCAT-F 主要機器構成図

3) リンケージ装置

FSCAT-Fのリンケージ装置（以下、LKG3とする）は、コックピットの前方に配置した5つのラック内、中央部のラックに収納され、アナログ入出力（AI:64ch、AO:64ch）とディスクリット入出力（DI:384ch、DO:384ch）を有する。リンケージ装置は、計器盤や操縦装置等に設けた各種スイッチ入力処理やランプ点灯処理を行う他に、FSWボックスに設けたFSW入力処理やランプ点灯処理、ロータリー・エンコーダに設けたプッシュ式スイッチの入出力制御を行う。

4) ロータリー・エンコーダ制御装置

FSCAT-Aのロータリー・エンコーダ制御装置と同様の機能を有し、コックピット内に設けた各種ロータリー・エンコーダとホスト計算機を接続する装置であり、リンケージ装置と同じラックに収納される。

5) 模擬視界表示装置

コックピット窓外の視界映像をパイロットに呈示するFSCAT-Fの模擬視界表示装置は、4台の無限遠型表示装置から構成する。無限遠型表示装置は、左右操縦座席それぞれの前方に2台、左右に1台ずつ設置した。

無限遠型の視野角は、WAC型とは異なり水平方向は連続せず、次の様になる。垂直視野角は上方13.25度、下方15.19度。左席水平視野角は左右23度、左28度～左74度。右席水平視野角は左右23度、右28度～右74度。

6) 模擬音響装置

エンジン音や風切り音等、飛行シミュレータで必要となる各種音響の発生を行う模擬音響装置は、模擬音響制御部と音響発生部から構成する。

Windows PCで構成した模擬音響制御部は、イーサネットを介してホスト計算機と接続し、UDP転送で制御データの授受を行う。

デジタル・シンセサイザから構成した音響発生部は、音響発生にプロペラの枚数やエンジン数等をパラメータとした音響モデルを用いるが、ホスト計算機からも音響モデルのパラメータを制御できる。

7) 制御卓

制御卓上には、FSCAT-Aと同様に飛行シミュレータプログラムの開発や実行時に実時間システム制御用端末として使用するLinux-PC、模擬視界計器表示用Linux-PCを制御するキーボード、マウス、ディスプレイおよび、その切替器、FSWボックスを設けた。

8) FSW ボックス

制御卓上には、FSCAT-AのFSWボックスと同様の機能性能を有するFSWボックスを設けた。

9) 交話装置

FSCAT-Aの交話装置と同様の機能性能を有し、ヘッドセットを接続するジャック・パネルをセンターベデスタル上に1ヶ所、制御卓に1ヶ所の計2ヶ所に設けた。

また、交話を切り換えるオーディオ・セレクタは、センターベデスタルに2カ所、制御卓に1ヶ所の計3カ所に設けた。

5. 固定翼機型実機コックピット・システム(FSCAT-E)

固定翼機型実機コックピット・システムは、FSCATとして再構成する以前は、エミュレーション・システムとして単独で使用されていた。

エミュレーション・システムは、MuPAL-αの飛行実験を安全かつ有効に実施するため、地上支援設備の1つとして開発¹⁾された。

そのため、固定翼機型実機コックピット・システムは、FSCATのエミュレーション型（Emulation Type）とい

う意味でFSCAT-Eと略称する。

FSCAT-Eは、MuPAL- α に搭載されたFBWシステムとエミュレーション・システムを結合し、飛行シミュレータとして構成したもので、通常の飛行シミュレータと異なり、実物のコックピットと操縦システムを使用した飛行シミュレーションが実施できる。

5.1 構成

FSCAT-Eは、他のFSCATシステムとは異なり、実時間管理や飛行運動計算、外視界映像発生に用いるホスト計算機に相当したシステム管理／運動演算部を専有し、飛行シミュレータとして独立した構成を有する。

FSCAT-Eは、模擬飛行計器表示機能や実時間システム制御用端末機能を有するデータ表示部、機体側のFBWシステムとシステム管理／運動演算部とのデータ交換を行う搭載システム・インターフェース部、外視界映像の表示を行う模擬視界システム部から構成される(図5-1)。

なお、システム管理／運動演算部とデータ表示部は7章で、搭載システム・インターフェース部と模擬視界システム部は次節で詳述する。

5.2 機能

1) 模擬視界システム部

模擬視界システム部は、MuPAL- α のコックピット前方に置かれた3台の背面投影型ディスプレイ(図5-2)、および映像信号伝送装置から構成される。

背面投影型ディスプレイは、エミュレーション・システム専用の模擬視界映像表示装置として製作された。ディスプレイ単体の仕様を表5-1に示す。

現在、システム管理／運動演算部は、FSCAT用建物内の計算機室に設置され、模擬視界システム部がある



図5-2 模擬視界システム部(背面投影型ディスプレイ)

表5-1 背面投影型ディスプレイの仕様

項目	仕様・性能等
筐体サイズ	2004W×3134H×1580D【mm】
スクリーンサイズ	2004W×1604H【mm】
スクリーン材質	アクリル製ハードスクリーン
スクリーンゲイン	1.0
スクリーン透過率	60%
視野角	水平36.9度、垂直30.0度
プロジェクタ	DLA-S10(日本ビクター製)
光出力	1,000ANSIルーメン
光源	630W

表5-2 搭載システム・インターフェース部入出力数

チャンネル名称	チャンネル数
アナログ入力(AI)	12
アナログ出力(AO)	9
ディスクリート入力(DI)	5
ディスクリート出力(DO)	1
ARINC429入力	1
ARINC429出力	2
ARINC629入力	2
ARINC629出力	2
RC-232C入力	2

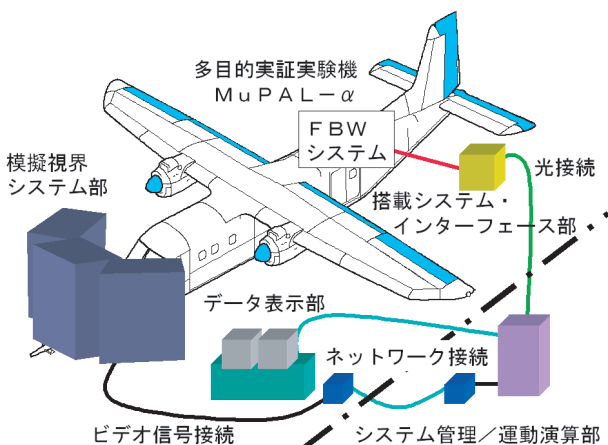


図5-1 FSCAT-Eの構成

MuPAL- α の格納庫とは、直線距離で70m程離れている。そのため、システム管理／運動演算部で発生した模擬視界映像信号は、イーサネットケーブルを用いた映像信号伝送装置によって伝送する。

2) 搭載システム・インターフェース部

搭載システム・インターフェース部は、MuPAL- α のFBWシステム用計算機とFSCAT-Eのシステム管理／運動演算部を結合するリンケージ装置の一種である。

搭載システム・インターフェース部(図5-3)は、FBWシステムの入出力仕様に対応した入出力チャンネル(表5-2)を有し、機体内部の後方ラックにあるFBWシステムとは4本の専用ケーブルで結合する。

また、搭載システム・インターフェース部とシステム管理／運動演算部の間も70m程の距離があり、光接続による共有メモリを介してデータ交換を行う。



図 5-3 搭載システム・インターフェース部

6. 操作室

FSCATの監視、ホスト計算機の制御、および模擬視界システムの操作を行う場所として操作室を設けた。

電子計算機室に隣接（付図2）した操作室には、制御卓システム、コックピット内モニタ・システム、模擬視界モニタ・システム、模擬視界データベース開発システム、およびホスト計算機用マスターコンソールを設けた。

制御卓システム（図6-1）には、実時間システム制御用端末として用いる計算機端末（日本SGI社製O2、他）、FSWボックス、交話装置、汎用ジョイスティックを設けた。汎用ジョイスティックは、汎用ジョイスティック制御用Windows PCにUSB接続され、ホスト計算機とはUDP転送によりデータ交換を行う。

コックピット内モニタ・システムは、FSCAT-A、-R、-Fの各コックピット・システムに設けた監視用カメラを用い、実験状況の監視等を行う。

模擬視界モニタ・システムは、6台1組のCRTディスプレイ（図6-2）と単独のCRTディスプレイの計7台を用い、模擬視界システムの映像監視等を行う。FSCATでは、3台の模擬視界システムから最大15チャンネルの映像出力が発生する。そのため、模擬視界モニタ・シ



図 6-1 操作室用制御卓システム



図 6-2 模擬視界モニタ・システムの一部

ステムでは、映像信号切替器を用いて15チャンネルの映像出力を7台のCRTディスプレイに選択表示する。

模擬視界データベース開発システムは、模擬視界システムに不可欠な模擬視界データベースの製作を行う装置であり、詳細は8章で述べる。

ホスト計算機用マスターコンソールは、ホスト計算機に対する全制御を行う端末であるが、ホスト計算機が模擬視界システムとして稼働する際は、模擬視界シーンの制御や視界データベースの更新等を行う模擬視界制御用端末となる。

7. 計算機システム

7.1 ホスト計算機

1) 計算機本体

FSCATでは、実時間管理と飛行シミュレーションプログラムの開発実行、外視界映像発生等を行うホスト計算機には、日本SGI製のOnyx2/IR計算機を用いる。表7-1に性能を、図7-1に外観を示す。

2) リンケージ・システム

リンケージ・システムは、前述の通り3つのコックピット・システム（FSCAT-A、R、F）と操作室における入出力処理を行う4台のリンケージ装置から構成する。4カ所に設置されたリンケージ装置は、ホスト計算機を中心にしたループ型光ファイバーネットワークを用いた共有メモリで相互接続され、ホスト計算機と高速なデータ交換を行う。

リンケージ・システムのうち、操作室に設けたFSWボックス等の入出力機器に用いるリンケージ装置（以下、LKG1とする）は、ホスト計算機システムに併設し、図7-1の右から3つめのラックに収納する。各コックピット・システムで用いるリンケージ装置（LKG2、LKG3、LKG4）は、入出力チャンネルに対するノイズ等の影響を考慮して、各コックピット・システムに併設する。

3) ネットワーク・システム

ホスト計算機には、構内LANへの接続に用いる100Base-Tネットワーク・ポートとは別に、4ポートのデータ交換専用100Base-Tネットワーク・ポートを設けた。飛行シミュレーション時には、このデータ交換専用

表7-1 ホスト計算機本体の性能

項目	仕様・性能等
計算機名称	日本SGI製Onyx2/IR
CPU数	8
CPU性能	MIPS R12000 300MHz
語長	64bit
システムメモリ	2GB
グラフィック性能	1100万ポリゴン/秒
グラフィック出力	8チャンネル
OS	IRIX 6.5
実時間管理ソフト	MSCP、MLEP
外視界映像発生ソフト	Vega
模擬視界データベース作成	MultiGen Creator



図7-1 ホスト計算機Onyx2（右側の2つの黒いラック）

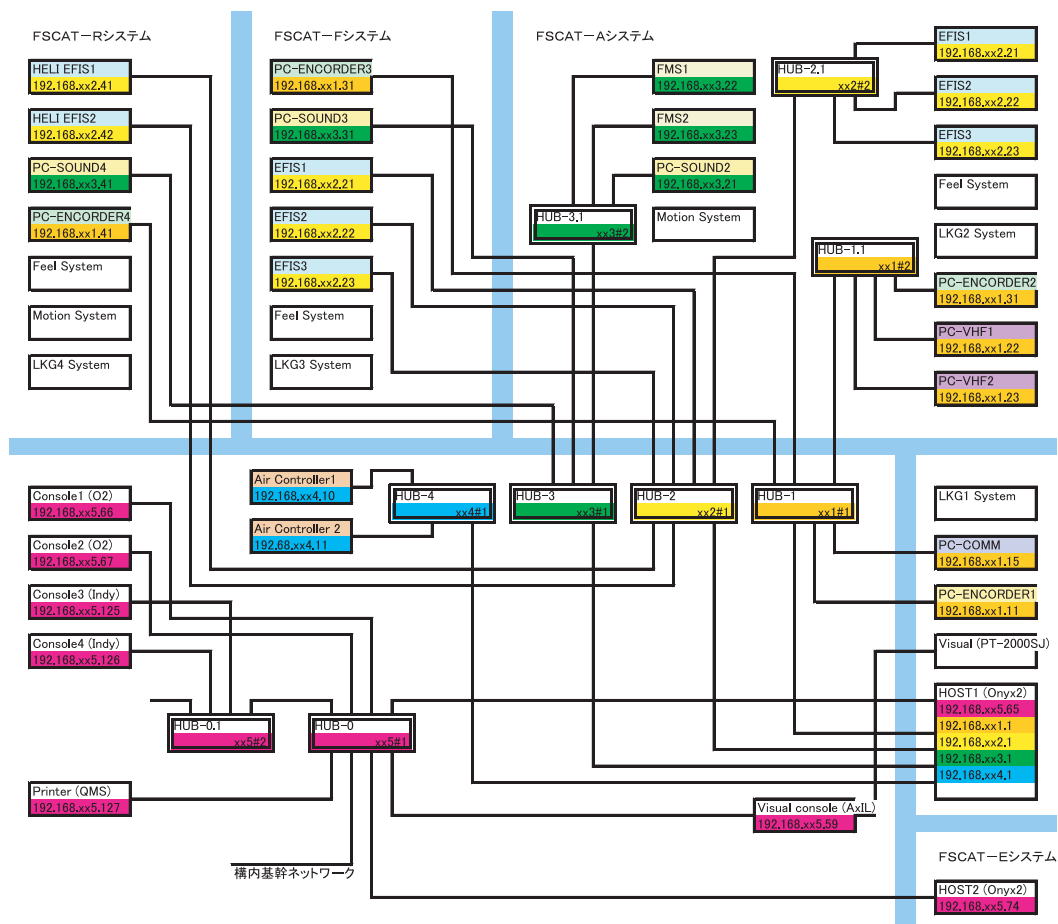


図7-2 FSCATのネットワーク系統

ネットワーク・ポートを用いてUDP転送によるデータ交換を行う。FSCATにおけるネットワーク系統を図7-2に示す。

4) 航空機用データベース・システム

ホスト計算機には、MuPAL- α 等で使用中のARINC-629航空機用データベース・システムに対応した入出力チャンネルが設けられ、対応機器を接続したハードウェア・イン・ザ・ループの飛行シミュレーション実験が可能である。

7.2 エミュレーション・システム計算機

1) システム管理／運動演算部

FSCAT-Eのホスト計算機に相当するシステム管理／運動演算部は、実時間管理、飛行運動計算、センサー信号模擬、および外視界映像発生を行う。システム管理／運動演算部は、FSCATのホスト計算機と同機種の計算機（日本SGI製Onyx2/IR）から構成される。

システム管理／運動演算部で使用するソフトウェアは、FSCATのホスト計算機で使用するソフトウェアと互換性を有し、FSCATにおけるソフトウェア資源の有効活用を図った。表7-2に性能を、図7-3に外観を示す。

2) データ表示部

データ表示部は、日本SGI製O2計算機（図7-4）から構成される。

FSCAT-Eは、付録にあるようにシステム管理／運動演算部とコックピット部分が70m程離れており、FSCAT-Eを使用する際には、データ表示部の計算機端末を実時間システム制御用端末として使用する。

また、データ表示部には、模擬飛行計器表示システム機能があり、模擬飛行計器表示により飛行状況の監視が行える。

7.3 飛行計器表示用計算機

FSCATで使用する電子式飛行計器は、ハードウェアおよびソフトウェアのメンテナンス性を考慮し、JAXAで開発したものが多数である。

計器表示用ソフトは、全てOpen GLを用いたグラフィック・インターフェースを採用し、ソフトウェアの互換性と移植性の向上を図った。

また、飛行計器表示用計算機として、FSCAT-RではWindows NT-PCとUNIX計算機を採用し、それ以外ではLinux-PCを採用した。

なお、ホスト計算機とのデータ交換には、全てUDP転送を採用した。

図7.5から図7.9に代表的な計器表示例を示す。



図7-3 システム管理／運動演算部

表7-2 システム管理／運動演算部の性能

項目	仕様・性能等
計算機名称	日本SGI製Onyx2/IR
CPU数	4
CPU性能	MIPS R10000 250MHz
語長	64bit
システムメモリ	512MB
グラフィック性能	1100万ポリゴン／秒
グラフィック出力	8チャンネル
OS	IRIX 6.5
実時間管理ソフト	MSCP、MLEP
外視界映像発生ソフト	Vega
模擬視界データベース作成	MultiGen Creator



図7-4 データ表示部

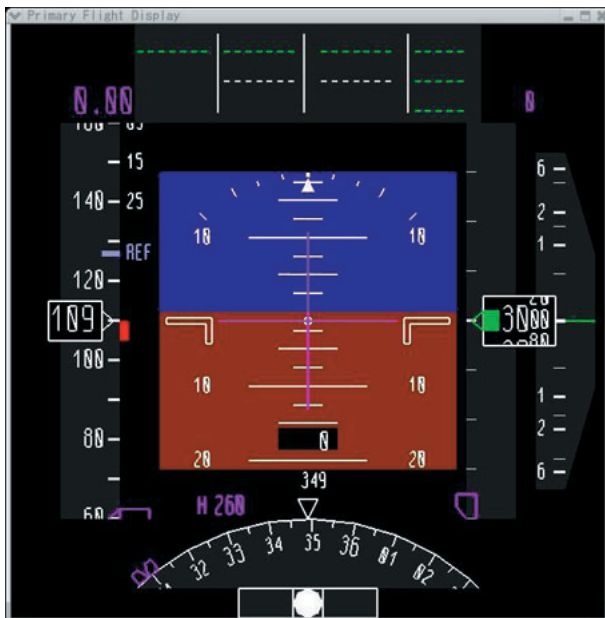


図 7-5 PFD 表示

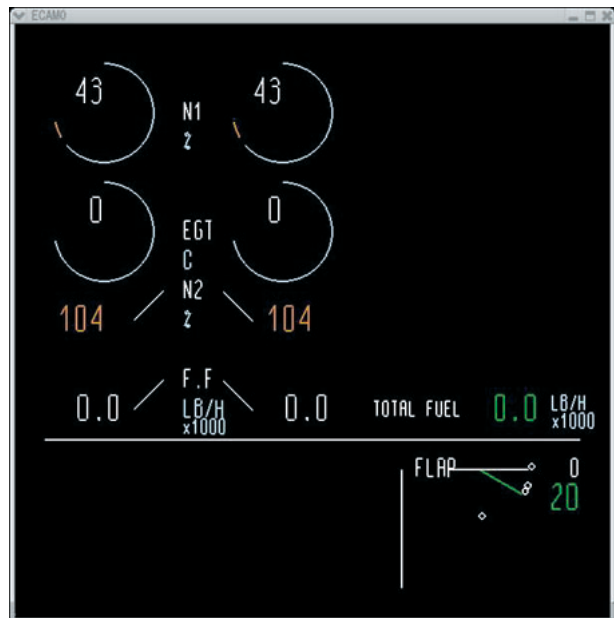


図 7-7 ECAM 表示



図 7-6 ND 表示



図 7-8 トンネル・イン・ザ・スカイ表示



図 7-9 回転翼機用アナログ計器表示

8. 模擬視界システム

FSCATの模擬視界システムは、模擬視界映像発生にPT2000SJ（図8-1）を用いたものが1式、Onyx2を用いたものが2式の計3式がある。以下にその概要を述べる。

8.1 PT2000SJ 模擬視界システム

1) 模擬視界映像発生

PT2000SJ 模擬視界システムは、模擬視界映像の発生を専用のハードウェアを用いて行うシステム（イメージ・ジェネレータとも称する）である。

PT2000SJ 模擬視界システムは、ホスト計算機からの制御データを記録し、模擬視界システム単体で再生できる他、視点位置や視線方向だけではなく、視野の切り出し位置や視野画角の制御が動的に可能である。PT2000SJ 模擬視界システムの仕様を表8-1に示す。



図8-1 PT2000SJの外観

2) 模擬視界データベース

模擬視界システムは、予め作成した模擬視界データベースをもとに模擬視界映像の発生を行う。PT2000SJ 模擬視界システムにおいても飛行シミュレーションに対応した模擬視界データベースが整備されている。

PT2000SJ用模擬視界データベースには、架空の空港や地形により構成された汎用モデル、羽田空港モデル、三次元波浪モデルが追加された伊豆大島周辺海域の島嶼モデルがある。図8-2に模擬視界データベース（汎用モデル）の1シーンを示す。

8.2 Onyx2 模擬視界システム

1) 模擬視界映像発生

ホスト計算機とFSCAT-E用システム管理／運動演算部に用いる2台のOnyx2計算機は、飛行運動計算等の実時間システム演算と並行して模擬視界生成プログラム（MultiGen-Paradigm社製Vega）を実行することで模擬視界映像の発生を行う。

2台のOnyx2 模擬視界システムの主な違いは、映像出力チャンネル数の差である。ホスト計算機システムでは6チャンネル、FSCAT-E用システム管理／運動演算部では3チャンネルの映像出力チャンネル数がある。表8-2に

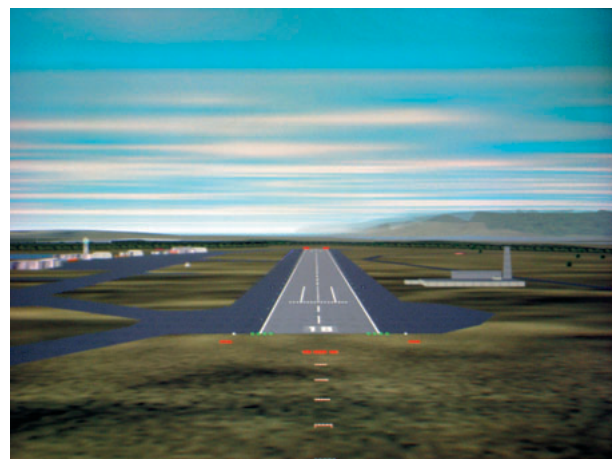


図8-2 模擬視界表示の例

表8-1 PT2000SJ 模擬視界システムの仕様

項目	仕様
名称	PT2000SJ (東芝電波プロダクツ製)
表示チャンネル数	6チャンネル
最大表示ポリゴン数	2000ポリゴン
テクスチャ容量	50MB
解像度	1,024 × 960 ピクセル
画像更新レート	30Hz
描画遅延時間	50ms

表 8-2 Onyx2（ホスト計算機）模擬視界システムの仕様

項目	仕様
名称	SGI Onyx2
映像出力チャンネル数	6チャンネル
ポリゴン描画速度	210M ポリゴン/秒
テクスチャ容量	64MB×4
解像度	1,280×1,024 ピクセル
画像更新レート	60Hz
描画遅延時間	25ms



図 8-3 視界データベース作成システム

ホスト計算機による Onyx2 模擬視界システムの仕様を示す。

2) 模擬視界データベース

Onyx2 模擬視界システム用視界データベースには、業界標準の模擬視界データベース・フォーマットである OpenFlight フォーマットを用いて、移植性と汎用性の向上を図っている。

模擬視界データベースの作成には、Windows NT-PC (図 8-3) 上で稼働する模擬視界データベース作成ソフトウェア (MultiGen-Paradigm 社製 MultiGen Creator) を用いる。Onyx2 模擬視界システム用模擬視界データベース映像の表示例を図 8-4 から図 8-6 に示す。

9. モーション・システム

FSCAT では、モーション・システムに油圧式 6 軸モーション・システムと電動式 6 軸モーション・システムの 2 方式を用いる。

9.1 油圧式 6 軸モーション・システム

FSCAT-A 用の油圧式 6 軸モーション・システムには、

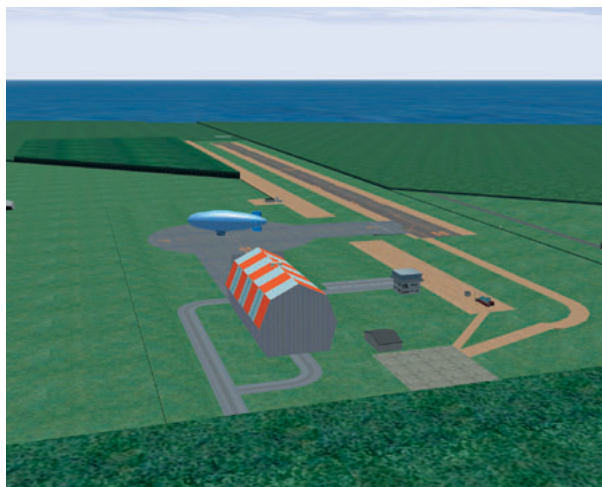


図 8-4 模擬視界表示の例 (大樹町多目的航空公園)

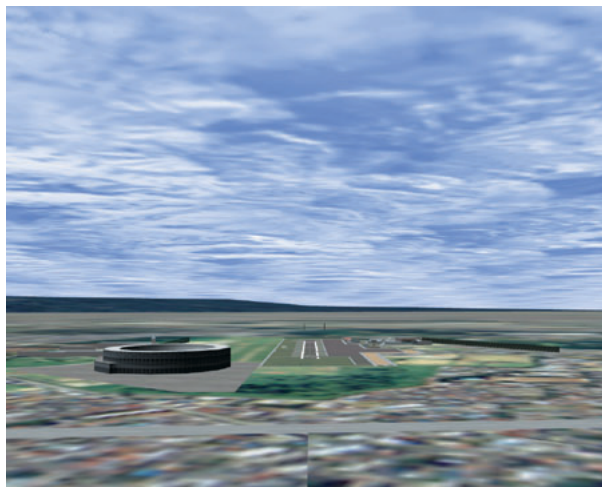


図 8-5 模擬視界表示の例 (調布飛行場)

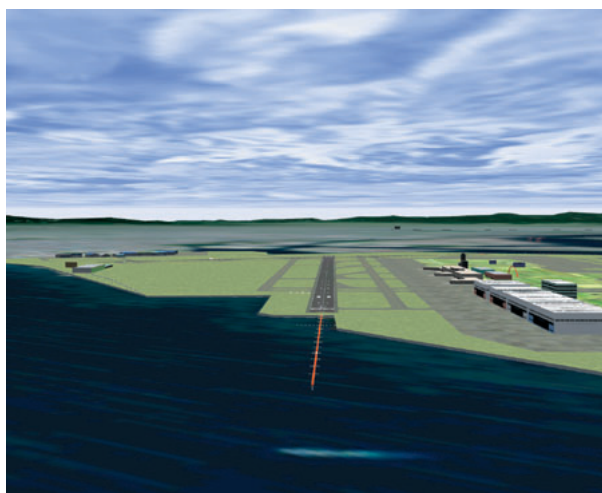


図 8-6 模擬視界表示の例 (羽田空港)

表 9-1 油圧式 6 軸モーション・システム仕様・性能等

項目	仕様・性能等
動揺範囲	前後方向 : ± 1.065 [m] 横方向 : ± 1.12 [m] 上下方向 : $-0.8 \sim 0.96$ [m] ロール方向 : ± 0.384 [rad] ピッチ方向 : $-0.367 \sim +0.506$ [rad] ヨー方向 : ± 0.489 [rad]
静的特性	前後方向加速度 : ± 10.8 [m/s^2] 横方向加速度 : ± 9.8 [m/s^2] 上下方向加速度 : ± 11.8 [m/s^2] ロール速度 : ± 0.7 [rad/s] ピッチ速度 : ± 0.8 [rad/s] ヨー速度 : ± 0.5 [rad/s]
積載重量	10,800 [kg]

表 9-2 電動式 6 軸モーション・システム仕様・性能等

項目	仕様・性能等
動揺範囲	前後方向 : $-0.20 \sim +0.18$ [m] 横方向 : ± 0.19 [m] 上下方向 : $-0.19 \sim +0.23$ [m] ロール方向 : ± 0.209 [rad] ピッチ方向 : $-0.192 \sim +0.209$ [rad] ヨー方向 : ± 0.192 [rad]
静的特性	前後方向加速度 : ± 4.9 [m/s^2] 横方向加速度 : ± 4.9 [m/s^2] 上下方向加速度 : ± 4.9 [m/s^2] ロール速度 : ± 0.349 [rad/s] ピッチ速度 : ± 0.349 [rad/s] ヨー速度 : ± 0.349 [rad/s]
積載重量	1,500 [kg]



図 10-1 通信システムの一部

STOL 実験機飛鳥プロジェクト等で 80 年代後半から使用している油圧式 6 軸モーション・システム²⁾を転用した。

FSCAT-A 用として使用するために、製造会社におい

てシリンダーやピストン、ユニバーサル・ジョイント、油圧発生装置等のオーバーホールを実施した後、設置を行った。

20 年以上を経た部品類も数多くあり、サーボ弁や圧力センサー類等の機能部品については、最新の製品を使用して、性能向上とともに信頼性の向上を図った。

表 9-1 に油圧式 6 軸モーション・システムの仕様・性能等を示す。

9.2 電動式 6 軸モーション・システム

FSCAT-R 用モーション・システムとして、電動式 6 軸モーション・システムを設けた。

電動式 6 軸モーション・システムは、油圧式 6 軸モーション・システムの基本特許が消滅したのに伴い、90 年代後半から製造販売が急増されたもので、国内においても航空機用をはじめとして、自動車用シミュレータ等で数多く使用されている。

FSCAT-R 用電動式 6 軸モーション・システムは、ハーフドーム型ディスプレイ・システム内で使用する研究開発用のモーション・システムとして、各種定数の変更やプラットホーム位置の逆計算等の機能を有する。

表 9-2 に電動式 6 軸モーション・システムの仕様・性能等を示す。

10. 通信システム

通信システムは、被験者であるパイロットとコックピット内外の実験者との通話に用いるもので、ヘッドセット、プレス・トーク・スイッチ、ジャック・ボックス（またはジャック・パネル）、オーディオ・セクタ・ボックス（またはオーディオ・セクタ・パネル）、交話信号制御装置等から構成される。図 10-1 にヘッドセット、プレス・トーク・スイッチ、ジャック・ボックス、およびオーディオ・セクタ・ボックスを示す。

交話信号制御装置は、デジタル式の音声信号処理装置であり、13 カ所に配置したオーディオ・セクタとイーサネットケーブルを用いて接続される。交話信号制御装置とオーディオ・セクタ／ヘッドセット（ジャック・ボックス）間でのチャンネル制御信号と音声信号は、このイーサネットケーブルを用いて伝送される。

各オーディオ・セクタには、受信系 10 チャンネル、送信系 10 チャンネル、VOR 系 2 チャンネル、ADF 系 2 チャンネルの通信系切替スイッチがあり、任意のチャンネルを選択できる。交話信号制御装置は、オーディオ・セクタからのチャンネル設定を受け、音声信号を切り換えて返送する。

また、ホスト計算機から交話信号制御装置に UDP 転

送により制御コマンドを送ることで、音声チャンネルの変更等の制御が可能である。この機能を用いて、周波数選択パネルからの設定周波数データをホスト計算機により処理し、オーディオ・セレクタのチャンネルを制御することで航空局や航空機局の模擬も可能である。

11. 実時間シミュレーション用ソフトウェア

FSCATの実時間シミュレーション用ソフトウェアは、JAXAの前身である航空宇宙技術研究所の汎用飛行シミュレータ設備で稼働していた実時間シミュレーション用ソフトウェア（MLEPとMSCP）³⁾の仕様や機能を継承した。

汎用飛行シミュレータ設備は、1963年の設置以来、航空機シミュレーションの変遷に伴い、機能の改善に努めてきた。実時間シミュレーション用ソフトウェアに関しても、1973年にホスト計算機³⁾としてミニコンを導入して以来、2002年にFSCAT移行化に伴って解体されるまで、その改善を図ってきた。

これまで蓄積されて来たソフトウェア資源の有効活用を図るために、汎用飛行シミュレータ設備で使用してきた実時間シミュレーション用ソフトウェアをもとにFSCAT用としての機能拡張を図った。以下に、その概要を述べる。

11.1 MLEP

MLEPは、あらかじめユーザーが作成したタスク・プログラム（飛行シミュレーションプログラムなど実時間演算プログラムの最小単位）と、その実時間演算処理に必要な実時間演算管理プログラム（MSCP）等を結合して実行プログラムにまとめるプログラムである。

基本機能には、実時間演算管理プログラムとユーザーが作成したタスク・プログラムのリンク、使用するサブシステム（リンク装置やモーション・システム、操舵反力装置等の周辺装置）の選択と設定、タスク・プログラムの実行・非実行と実行周期・レベルの設定等がある。

11.2 MSCP

MSCPは、ユーザーが作成したタスク・プログラムの実時間演算管理、サブシステムの管理等、実時間シミュレーションに必要な実時間シミュレーション管理を行うソフトウェアである。

基本機能には、基本演算周期の変更、ユーザ・タスク実行周期の変更、プログラム制御モード [LINK]、[READY]、[OPERATE]、[HOLD] の変更、シンボル名参照による変数値の変更、実時間データ保存、保存データの印字、サブシステムの結合と解除、プレイバック

機能等がある。

11.3 Linux 版実時間シミュレーション用ソフトウェア

FSCATでは、目的の1つに「利用しやすい施設」として整備することを掲げており、ノートパソコンでも動作可能な飛行シミュレーションプログラムの開発・実行環境を実現し、利用者への「利便性」提供の1つとした。

FSCATにおいて実時間管理等を行う実時間シミュレーション用ソフトウェア（MLEPとMSCP）は、Onyx2のOSであるIRIXのもとで実行するソフトウェアとして開発した。IRIXがUNIXに準拠したOSということもあり、UNIX準拠のOSであるLinuxを用い、ノートパソコンでも稼働するLinux版実時間シミュレーション用ソフトウェア（MLEPとMSCP）を開発した（図11-1にLinux版MSCPの実行例を示す）。

このLinux版実時間シミュレーション用ソフトウェアは、入出力デバイスの違いを除き、FSCATで稼働しているIRIX版実時間シミュレーション用ソフトウェアと互換性を有し、利用者が開発した飛行シミュレーションプログラムの移植がLinux版とIRIX版との間で簡単に行える。

これにより、利用者は、予め自分のLinux-PCで飛行シミュレーションプログラムの開発とデバッグを行い、完成したプログラムをFSCATのホスト計算機にネットワークを介して転送することで、FSCATを利用した飛行シミュレーションが簡単に実行できる。

12. 性能評価

飛行シミュレータの性能として、極めて重要な項目が実時間性である。実時間性とは、例えば1秒間で起こる事象が1秒間の事象として模擬できることである。



図 11-1 Linux 版 MSCP の実行例

次に重要な項目が、飛行シミュレータの持つ時間遅れである。先の例で、1秒間の事象が1秒間の事象として模擬できたとしても、1秒間の入力信号が1秒間の出力信号として出力されるまでに、信号の伝達遅れや変換遅れにより、一定時間以上の遅延が発生すると操縦が困難な飛行シミュレータと判定される。

今回は、実時間性や時間遅れに加え、模擬視界表示装置の視野角や輝度、モーション・システムの基本特性等の性能も評価した。

12.1 ホスト計算機

ホスト計算機における実時間性能評価として、次のような手法を用いた。

まず、一定周期で計算結果が変化するプログラムを複数作成し、実時間で同時に実行させる。次にリンケージ装置のアナログ出力（AO）とディスクリット出力（DO）から、それらの計算結果を出力として取り出し、ペン書きレコーダに記録させる。記録結果に基づき、ホスト計算機の実時間性能を判断する。

図12-1に基本周期を30msecとし、基本周期毎と基本周期の2倍毎、4倍毎、8倍毎に出力を変化させた場合の記録結果を示す。

リンケージ装置の周波数特性により、ディスクリット出力に比べて、アナログ出力は若干出力波形に歪みが見られるが、30、60、120、240msec毎に出力が正確に変化していることが認められ、実時間性が確認できた。

12.2 FSCAT-A

1) 時間遅れ

FSCAT-Aを用いて、実時間処理系の持つ時間遅れを測定した。

FSCAT-Aの実時間処理系の一例として、模擬視界システムにPT2000SJを用いた場合、次のような順序になる。

パイロット操舵→操縦輪→リンク機構→A/D変換→操舵反力装置→伝送装置（BIT-3）→ホスト計算機（Onyx2：飛行運動計算）→伝送装置（BIT-3）→模擬視界システム（PT2000SJ）：模擬視界映像発生→映像信号→ディスプレイ・システム（模擬視界映像呈示）

なお、模擬視界システムにOnyx2を用いると次のような順序になる。

パイロット操舵→操縦輪→リンク機構→A/D変換→操舵反力装置→伝送装置（BIT-3）→ホスト計算機（Onyx2：飛行運動計算／模擬視界映像発生）→映像信号→ディスプレイ・システム（模擬視界映像呈示）

また、操舵信号による機体姿勢変化を電圧値等のアナ

ログ量で出力した場合には、次のような順序になる。

パイロット操舵→操縦輪→リンク機構→A/D変換→操舵反力装置→伝送装置（BIT-3）→ホスト計算機（Onyx2：飛行運動計算／物理量変換）→伝送装置（共有メモリ）→リンケージ装置（D/A変換）→アナログ出力（AO）

この実時間処理系を例に、操舵入力電圧値で5Vを

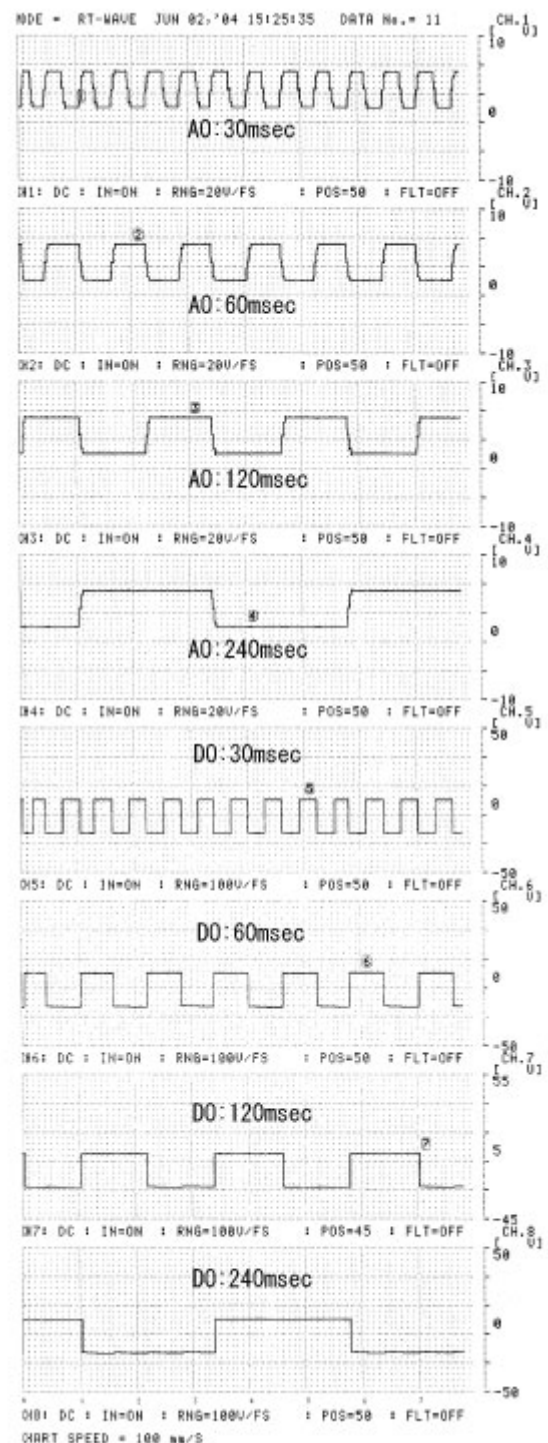


図12-1 実時間性の測定結果

越えると模擬視界映像出力が黒から白のように変化する計測用プログラムを作成し、操舵入力電圧値と映像信号電圧値をペン書きレコーダにより測定した。

また、操舵入力信号をそのままリンケージ装置(LKG2)のアナログ(AO)出力に転送し、リンケージ装置の時間遅れも計測した。

図12-2に示す測定結果を見ると操舵入力(5V)が印可された時からPT2000SJからの映像信号が変化するまでの時間は104msec、同様にOnyx2では88 msecである。Onyx2がPT2000SJより映像信号の変化が若干早いのは、模擬視界システム制御と模擬視界映像発生を並行して行うため、模擬視界システムへのデータ伝送と模擬視界映像発生による時間遅れが少ないためと考えられる。同様の処理系や模擬視界システムを有するFSCAT-RやFSCAT-Fの時間遅れも今回の結果とほぼ同様と考えられる。

また、リンケージ装置出力に関する時間遅れは、32 msecであり、模擬視界システムと比べて時間遅れが大幅に少ないことが認められた。

なお、訓練用飛行シミュレータの基準となっている模擬飛行装置等認定要項⁶⁾によると、模擬視界システムの時間遅れは、150msec以内とされており、FSCAT-Aは認定基準内と言える。

12.3 FSCAT-R

1) ハーフドーム型ディスプレイ・システム

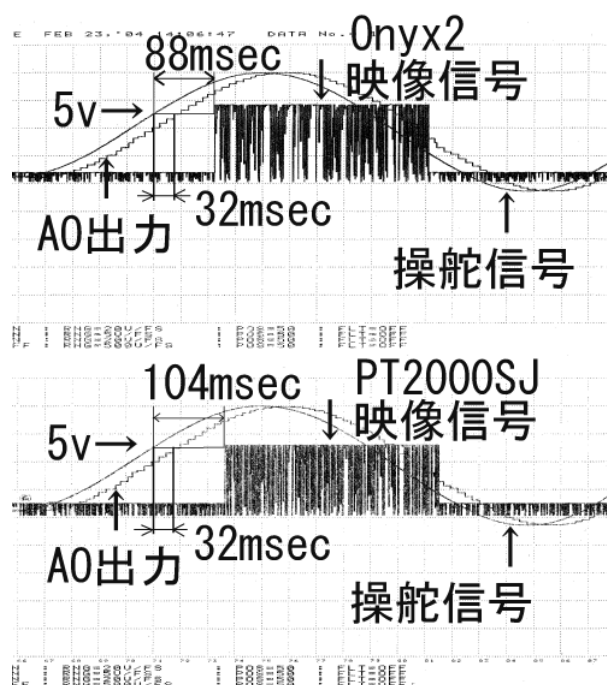


図12-2 FSCAT-Aの時間遅れ測定結果

ハーフドーム型ディスプレイ・システムは、飛行シミュレータ用では、世界的にも数少ない大型映像表示システムである。JAXAの前身である独立行政法人航空宇宙技術研究所の汎用飛行シミュレータ設備で用いたハーフドーム型ディスプレイ・システム⁴⁾、⁵⁾では3管式CRTプロジェクタを採用したのに対し、FSCAT-R用ハーフドーム型ディスプレイ・システムでは液晶プロジェクタを採用した。

プロジェクタを用いた映像表示の場合、CRT型と液晶型で異なる点の1つが輝度分布の差である。一般的にCRT型は中心部の輝度が高く周辺部が低くなる。液晶型はCRT型と比べて輝度分布の変化が少ない。

図12-3と図12-4にハーフドーム型ディスプレイ・システムにおけるCRT型と液晶型の実測結果を示すが、液晶型にはCRT型の様に顕著な輝度分布差は認められ

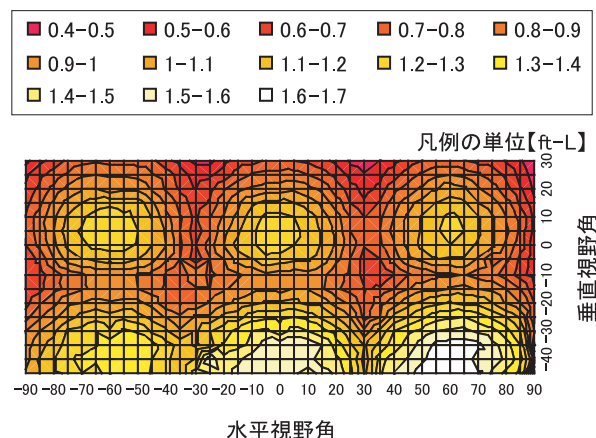


図12-3 輝度分布図 (CRT型)

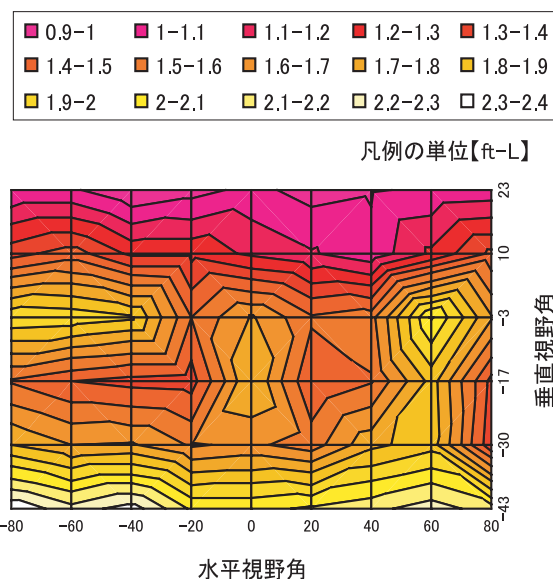


図12-4 輝度分布図 (液晶型)

ないが、ある程度の輝度分布差が認められた。

2) 電動式6軸モーション・システム

今回測定した電動式6軸モーション・システムの周波数特性を図12-5と図12-6に示す。

飛行シミュレータ用油圧式6軸モーション・システムのMIL規格であったMIL-STD-1558における仕様は、表12-1に示す通りであり、電動式6軸モーション・システムがこの仕様を満足することを確認した。

また、FSCAT-Rでは、電動式6軸モーション・システムを使用した場合、ハーフドーム型ディスプレイ・システム内でコックピットが動揺し、常に視点位置が変化する。このため、視点位置の変化に応じた模擬視界映像の補正が必要である。

模擬視界映像補正に伴う時間遅れ測定には、パルス入力により上下のモーション動揺発生、および模擬視界映像の補正と表示色変化（青／白）を行うプログラムを用いる。

パルス入力から動揺が発生するまでの時間と補正した模擬視界映像の表示色が変化するまでの時間をペン書きレコーダと加速度計により測定した。

測定結果（図12-7）によるとパルス入力後、約50msec後には動揺の開始が加速度計で検知された。動

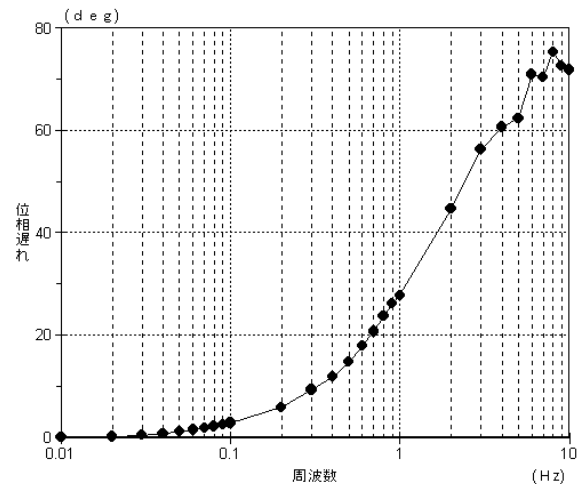


図12-6 周波数特性【位相遅れ】

表12-1 モーション・システムの周波数応答仕様

周波数	項目	MIL-STD - 1558 規定値	電動6軸 モーション計測値
0.5Hz	減衰比	± 2db	- 0.3475 db
	位相遅れ	15度以下	14.76度
1.0Hz	減衰比	± 4db	- 1.2095 db
	位相遅れ	40度以下	27.722度
1.7Hz	減衰比	± 8db	- 3.5125 db
	位相遅れ	90度以下	44.657度
5.0Hz	減衰比	体感として感 できること	- 9.042 db
	位相遅れ	※規定無し	62.35度

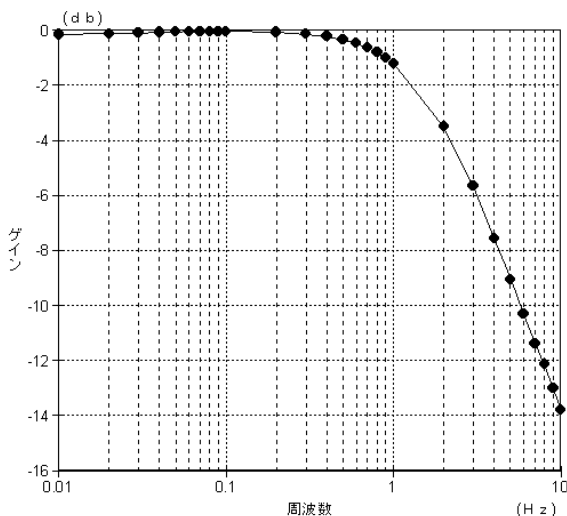


図12-5 周波数特性【ゲイン】

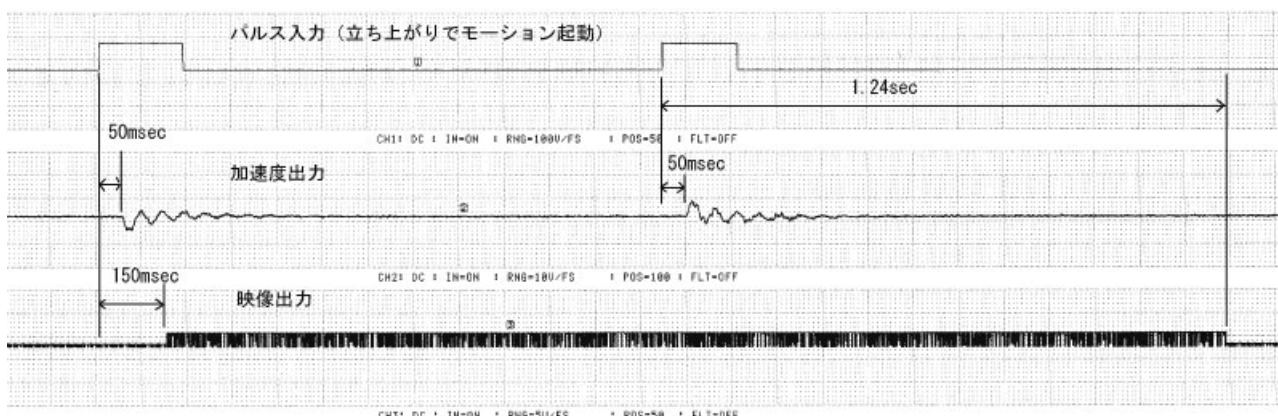


図12-7 電動式6軸モーション・システムと模擬視界映像補正に関わる時間遅れ測定結果

揺の開始後、約 100msec 後（ステップ入力から約 150msec 後）には映像信号が変化しはじめている。飛行シミュレータの認定要項⁶⁾によると、模擬視界システムの遅れは、150msec 以内とされ、測定結果からはモーション動揺による模擬視界補正を行っても基準内に入ることが認められた。

12.4 FSCAT-E

FSCAT-E のコックピット・システムは、一般の飛行シミュレータとは異なり、模擬品ではなく実際の機体そのものである。

また、FSCAT-E は、他のコックピット・システムがホスト計算機を共有しているのに対して、専用のホスト計算機を持つため、単独で飛行シミュレータとして稼働できる。

FSCAT-E については、訓練用飛行シミュレータの認定要項⁶⁾を参考に、時間遅れ、視野角、および輝度を評価した。

1) 時間遅れ

認定要項では、操舵入力があったから、機体姿勢等が変化し、模擬視界映像が動き出すまでの時間としては、150msec 以内と規定している。

FSCAT-E においても、コラム入力操作により模擬視界映像が変化し、映像出力信号が変化するまでの遅れ時

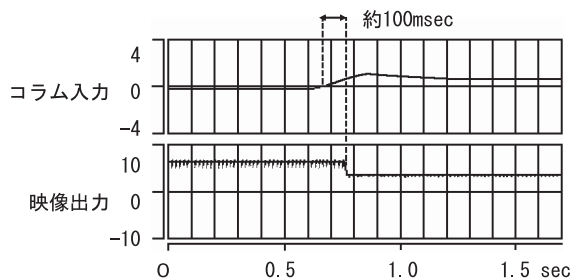


図 12-8 FSCAT-E の時間遅れ測定結果

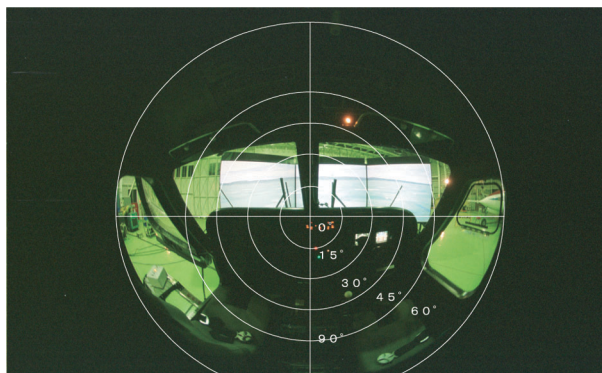


図 12-9 FSCAT-E の視野角測定結果

間を測定した。測定には、コラム入力信号が 0 以上になると模擬視界映像が白から黒に変化する飛行シミュレーションプログラムを用い、出力信号をペン書きレコーダで記録した。その結果は、約 100msec であった（図 12-8）。

2) 視野角と映像輝度

認定要項では、連続した 75 度以上の水平視野および 30 度以上の垂直視野となっており、FSCAT-E では、魚眼レンズによる写真撮影の結果、水平 105 度、垂直約 31 度であった（図 12-9）。

輝度に関しても認定要項では、 20.6cd/m^2 以上の輝度となっているが、FSCAT-E では、平均で 42cd/m^2 であった。

13. まとめ

性能評価からも FSCAT が有する基本性能は、飛行シミュレータとして問題ないことが認められた。

シミュレータ一般に言えることだが、いかに模擬対象を忠実に模擬するかということが、シミュレータ自体の 1 つの評価となっている。

訓練用飛行シミュレータの場合、模擬対象が当該航空機のみであるために完成目標が明確であり、実機の搭載機器の一部をそのまま利用する等、ある程度忠実度を上げることが可能といえる。

それに対して、研究開発に用いる飛行シミュレータでは、研究開発の目的が異なれば模擬対象も異なり、模擬対象を固定することができない。そのため様々な研究開発に利用できるよう汎用性も求められる。

つまり、研究開発に用いる飛行シミュレータは、あくまで研究開発のために使い勝手のよい『道具』であることが求められる。職人等技術者の世界において、よい『道具』とは、『汎用』品ではなく、使う人に合わせた『専用』品である。研究開発用飛行シミュレータを一言で表すと、『汎用』性を有する研究開発『専用』の飛行シミュレータと言える。

FSCAT では、個々の飛行シミュレータを研究開発目的にあわせて柔軟に対応させることにより『専用』性を向上させ、それらの飛行シミュレータを一箇所に集約し、複合的な施設とすることで『汎用』性をより追及した。

FSCAT の形態が「『汎用』性を有する研究開発『専用』の飛行シミュレータ」に対する 1 つの答えと考えている。先代の研究開発用飛行シミュレータであった汎用飛行シミュレータ設備においても、利用者が求める『専用』性に対応して、常に機能改善を行ってきた。

FSCAT においても、開発当初に定めた 3 つの目的をふまえ、研究開発用飛行シミュレータとしての定めとい

うべき改善を今後も続けていく考えである。

最後に、FSCATの製作にあたり、ご尽力を頂いた川崎重工株式会社航空宇宙カンパニー、東芝電波プロダクツ株式会社、三菱プレシジョン株式会社、並びにFSCAT用建物の建設にあたり、ご尽力を頂いた飛鳥建設株式会社、株式会社福永建築設計事務所、三建設備工業株式会社、富士通ネットワークソリューション株式会社に謝意を表する。

参考文献

- 1) 若色、稲垣、本宮：エミュレーション・システム（MuPAL用飛行実験用地上支援設備）の開発について、第38回飛行機シンポジウム講演集、pp.493～496、(2000)
- 2) 川原、岡部、渡辺、坂東、若色：汎用飛行シミュレーション試験設備、モーション模擬装置の構成及び機能、性能、航空宇宙技術研究所資料、TM-575、(1987)
- 3) Watanabe, Wakairo, Kawahara: NAL Flight Simulator Real - Time Computer System. AIAA Flight Simulation Technologies Conference And Exhibit (1989)
- 4) 若色、渡辺、川原：大型ハーフドーム視界表示装置の性能と評価について、日本機械学会第4回交通・物流部門大会講演論文集、pp.175～176、(1995)
- 5) 若色、渡辺：航技研の飛行シミュレータ用ハーフドーム表示部の三次元表現、可視化情報学会誌、Vol.17、No.67、pp.15～20、(1997)
- 6) 運輸省航空局：模擬飛行装置等認定要領、TCL-506-85、(1985)
- 7) 若色、野田、村岡、飯島、舩引、野嶋：研究開発用飛行シミュレータの開発、第41回飛行機シンポジウムアブストラクト集、pp.60、(2003)

付録

1) FSCAT用建物の概要

2001年度の第2次補正予算により、JAXAの前身である独立行政法人航空宇宙技術研究所によりFSCATの開発とはほぼ並行して、FSCATの設置場所となる建物（付図1）の建設が進められ、2003年7月に飛行システムC1号館（JAXA航空宇宙技術研究センター飛行場分室内）として落成した。建築規模は、鉄筋コンクリート造一部鉄骨造3階建て、建築面積1,388m²、延べ床面積2,584m²である。

3階建て建物の北側半分がFSCATの設置場所である。FSCAT設置部分は、1階から3階まで吹き抜け構造の2室である。北西（付図2の左上）部分にある半円部分がFSCAT-Rとハーフドーム型ディスプレイ・システムを設置したヘリシミュレータ室である。ここは、ハーフドーム型ディスプレイ・システムに対応して暗室構造を採用した。北東（付図2の右上）部分がFSCAT-Aを設置した固定翼機シミュレータ室である。FSCAT-Aへは、2階会議室からも内階段を利用して往来できる。固定翼機シミュレータ室の西側部分（FSCAT-AとFSCAT-Rに挟まれた部分）がFSCAT-Fの設置場所である。FSCAT-Fの設置場所の南側、建物の中央部分には、操作室、計算機室、油圧源室等を設けた。1階南側には、実験室や部

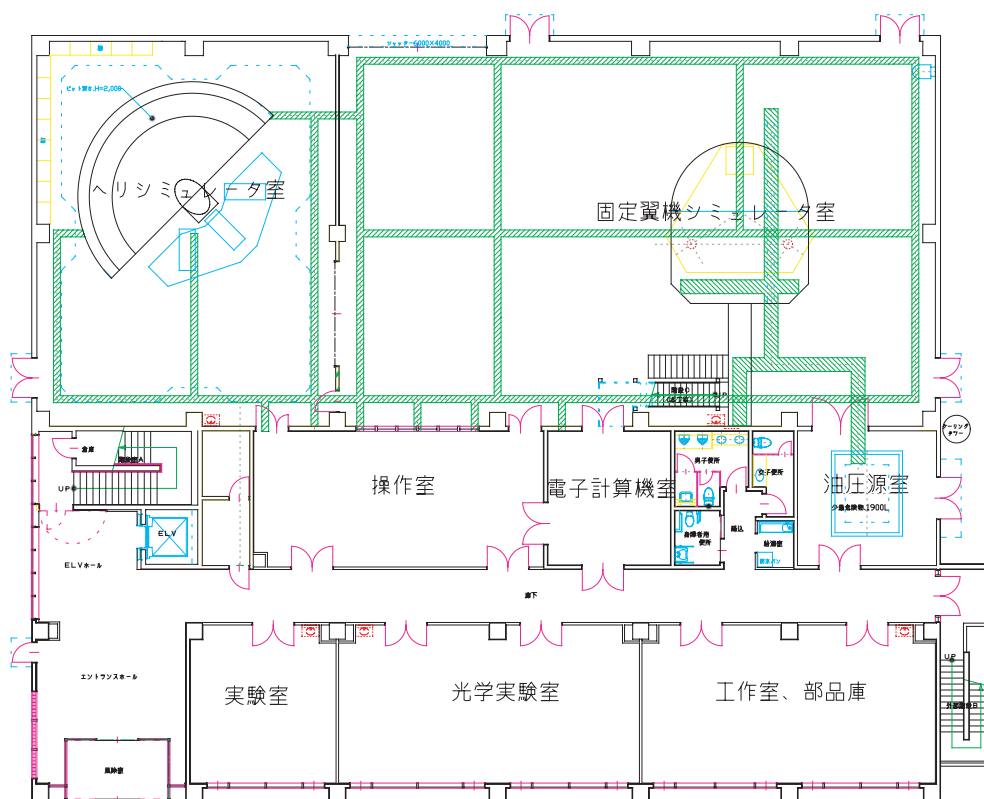
品庫・工作室を設けた（付図2）。FSCATの設置箇所については、セキュリティ区分に対応した安全対策を実施した。

2階・3階の南側には、研究室や事務室等の共用部分を設けた。屋上南西角にはGAIA関連実験に用いる実験用レドーム（半径5m）を設置した。屋上中央部分には、対空通信用VHF帯無指向性高利得アンテナ2基とデータ通信用UHF帯広帯域無指向性アンテナ2基を設けたアンテナ塔（地上高約35m）を設置した。

また、付図1に示す青い屋根の建物が実験用航空機の格納庫であり、FSCAT-Eに用いる実験用航空機MuPAL- α 等が格納される。



付図1 FSCAT用建物外観



付図2 FSCAT 設置場所平面図

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA-RM-04-015

発 行 日	2005年 2 月 1 日
編集・発行	独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町七丁目44番地 1 TEL 0422-40-3000（代表）
印 刷 所	株式会社 東京プレス 〒174-0075 東京都板橋区桜川 2 -27-12

©2005 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡下さい。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

〈本資料に関するお問い合わせ先〉

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター