

ISSN 0452-2982
UDC 629.7.072

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-667

ヒューマン・ファクタ研究のための
運航シミュレーション(Line Operational Simulation) 実験

船引浩平・田中敬司

1994年10月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

ヒューマン・ファクタ研究のための 運航シミュレーション (Line Operational Simulation) 実験*

船引 浩平^{*1} 田中 敬司^{*1}

A Line Operational Simulation for Human Factor Study

Kohei Funabiki and Keiji Tanaka

ABSTRACT

A line operational simulation (LOS) was conducted to investigate the human error mechanism. Through this preliminary simulation, knowledge and basic techniques for LOS was accumulated, and the capability of this operational simulation to investigate human error was evaluated. A twin-turboprop transport was chosen as the model airplane, and simulated flight after a flight plan from Chofu Airport to Haneda Airport was carried out by an experienced crew. The results of the time-line analysis of pilot behaviors provided guidelines for human error analysis. Also, the results suggested future improvement desirable for the simulation method and the hardware setup.

Key Words : line operational simulation, human error, time-line analysis

概要

ヒューマン・エラー発生のメカニズムを調べるための運航シミュレーション (Line Operational Simulation : LOS) 実験を実施した。今回の実験の目的は同シミュレーションのための準備と実験を通じて運航シミュレーション実験全般に関わる知見を得るとともに、同手法によるヒューマン・エラー研究の可能性を調べることである。対象として双発のターボ・プロップ機を選び、基本シナリオとして調布空港から大島を経て東京国際空港（以下、羽田空港と称する）にいたる航路を設定した。実験ではセットアップの確認を兼ねて通常の飛行を行った。この結果、コックピットの動作分析からヒューマン・エラー解析の指針が得られるなど、ヒューマン・エラー研究の可能性を確認した。また、実験手法および実験装置についての課題を抽出し、これらの成果に基づいて今後の運航シミュレーション技術向上方策についての検討を行った。

略語・用語表

ADF	: Automatic Direction Finder
APP	: Approach (進入管制)
ATC	: Air Traffic Control
c'k	: Check
CPU	: Central Processing Unit
CRM	: Crew Resource Management
CTL	: Control (航空路管制)

FAA	: Federal Aviation Agency
FMS	: Flight Management System
GND	: Ground (地上管制)
GP-IB	: General Purpose Interface Bus
HSI	: Horizontal Situation Indicator
IFR	: Instrument Flight Rules
ILS	: Instrument Landing System
LOC	: Localizer
LOFT	: Line Oriented Flight Training

* 平成6年7月13日受付 (received 13 July 1994)

*1 制御部 (Control Systems Division)

LOS	: Line Operational Simulation
MPD	: Multipurpose Display
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NDB	: Non-Directional Radio Beacon
OS	: Operating System
PF	: Pilot Flying
PNF	: Pilot Not Flying
RMI	: Radio Magnetic Indicator
RMS	: Root Mean Square
RWY	: Runway
SID	: Standard Instrument Departure
STAR	: Standard Terminal Arrival Route
T/O	: Take Off
TWR	: Tower (管制塔)
VFR	: Visual Flight Rules
VHF	: Very High Frequency
VOR	: VHF Omnidirectional Radio range

1. 緒 言

1.1 ヒューマン・エラー

航空機事故の原因の多くがヒューマン・ファクタによるものと言われている。訓練、整備などを含めた運航システムのなかで、人間オペレータが的確な操作を実施できず、いわゆるヒューマン・エラーとなってシステム全体に致命的な影響を及ぼす時、事故に至るとする考えである。このようなエラーを防止するためには、まずエラーの発生と伝搬の機構について理解する必要がある。

過去、一般的なヒューマン・エラーやメンタル・モデルについては数多くの研究例¹⁾があるが、それらの多くはアンケートや基礎的な実験に基づいていたり、比較的変動のゆっくりしたプラントを対象としたものであり、航空機システムを扱う場合の具体的データとしては十分といえるものは少ない。

本研究では、航空機におけるヒューマン・エラーを「定められた手順からの逸脱」として仮に定義した。航空機の操作においては、通常・非常のほとんど全ての状況について手順が明文化されており、操作手順が本来のものであるかどうかを判断するのは比較的容易である。本研究では、実験的にエラーを抽出し、エラーの機構を調べ、その発生や伝搬を阻止するための情報呈示方式を提案することを最終的な目的としている。今回の実験では、その最初の段階としてエラー抽出のための実験手法について検討を行う。

1.2 LOSについて

ヒューマン・エラーに係る問題は、そのメカニズムが複雑であり、かつ人間の思考プロセスという計測のきわめて

困難な要素を含む。このため、こういった問題を解く場合には、あらかじめそのメカニズムについて仮定したモデルを構築し、そのモデルを検証するための基礎的な実験を行うことがある。だが、今回のように現象そのものが不明確な事象については、モデルを構築することすら困難なため、この手法は不適当である。むしろ、航空機の運用という明確な背景を利用し、具体的な状況を再現模擬するなかで、事象の抽出を行うことから始めるべきであると考えられた。そこで、上記のような手法として、著者らは運航シミュレーション (LOS : Line Operational Simulation) に着目した。以下では、まず、LOS の発展の経過と現状について述べる。

(1) H. P. Ruffell Smith の飛行シミュレーション実験

Ruffell Smith が1976年に NASA Ames 研究センターで実施した実験は、当時大幅な進歩を遂げた飛行シミュレータを利用して実際の運航の模擬を図り、パイロットのワークロードとエラー発生等との関係を抽出しようとしたものである³⁾。この実験結果は、当時の航空機運航に関する重要な問題点を浮かび上がらせることに成功し、その後の新しい乗員訓練概念である CRM 訓練の開発の契機となった。実験と結果の概要を次に要約する。

広胴型の民間大型機による、ワシントン、ニューヨーク、ロンドン間の飛行（ブロック時間は4.5時間）を模擬した。前半のワークロードは低いが、後半は対照的に高いワークロードでの飛行となる。ニューヨークからの離陸時は最大離陸重量であり、滑走路長と風速は飛行制限内ぎりぎりで SID が複雑な状況を設定している。離陸後、No.2 エンジンのオイルフィルタが目詰まりを起こし、エンジンが空中停止し、緊急着陸のための燃料放出を行わざるを得なくなる。さらに No.3 油圧の喪失とオートパイロットの故障が発生し、非対称推力での湿潤滑走路への手動着陸を強制される中、乗客からの不平不満などが操縦席に寄せられる。このシナリオは実際にあった例に基づいたとしている。20 クルー（うち 2 クルーは実験のセットアップ）が実験に協力した。

この実験でのエラー抽出は、実験者と観察者のデブリーフィング時のメモ、乗員の報告、観察者のコメントを時間記録と比較、特に操縦技量に関して航空機パラメータから特定するなど、種々の方法によった。抽出されたエラーは航法、通信、システム操作、飛行（エンジン操作、速度限界等）、状況判断、乗員の統合、飛行技量、オートパイロットの使用、その他に分類された。抽出されたエラーの全体 450 件のうち、後半で発生したものは 324 件であり、飛行の安全に重要なエラーの大部分は航法、システム操作、飛行、状況判断に係るものである。また、乗員の心拍数を記録し、ワークロードとエラー発生頻度の対照を行っている。

実験の結果に基づき、一部の課題はマニュアルやコックピットデザインに関するものであるが、特に人間と機械資源の管理に関連する問題が多く、後者の方が重要であるとしている。すなわち、機長のリーダーシップ、コーディネーション、コミュニケーション、意思決定についてクルー間で大きなばらつきがあることから、これらに関して特別の訓練が有効としている。それはフルミッション・シミュレーションで、種々の問題に対し迅速な決定と安全な解答を見つけなければならない状況を発生するものである。なお、本手法が事故調査や飛行マニュアルの作成にも有効である可能性も指摘した。

(2) CRM 訓練

Ruffell Smith の実験以降の CRM の発展は文献 4 の序文に示されるとおりであるが、現在は多くの航空会社の訓練に取り入れられて一層普及しつつある。CRM に関する FAA のサーチュラーが 1993 年に発行されている⁵⁾。また、この CRM を効果的に訓練するために、フルミッション・シミュレーションによる LOFT がある。現在では CRM 評価を目的とした LOE (Line Operational Evaluation)，及びエリア慣熟を主目的とした SPOT (Special Purpose Operational Training) を総合して LOS (Line Operational Simulation) と称される^{6), 7)}。

わが国においては、1980 年代の終わりから、日本航空、全日空、日本エアシステムの各社が CRM 訓練ならびに LOFT の導入を開始した。これらの訓練は、年に一度、1 日から数日の期間で定期的に実施されるほか、昇格時などにも実施している会社もある。CRM は定められたテーマに沿ったセミナー形式が主である。LOFT は、各機種毎に開発されたシナリオに基づくシミュレーションと、その過程で撮影されたビデオを見ながらの客観的批評及び議論によって行われる。

1.3 研究的 LOS の試み

ヒューマン・ファクタ研究のための LOS のほとんどは、訓練用シミュレータか訓練用シミュレータをベースとした装置によって実施してきた。これらは、数学モデルやパイロット・インターフェースが実機そのままに模擬されている反面、システムやインターフェイスに柔軟性が乏しいといえる。例えば、訓練用シミュレータでは、FMS を模擬するために、実機の FMS のプログラムをそのままシミュレータのコンピュータに移植することがあるが、この方法では FMS はブラックボックスとなり、プログラムにバグが存在した場合のシミュレーションなどを行うことはできない。筆者らは、研究的に LOS を行うためには、全てのシステムが研究者に対して透明であることが有効であるとの観点から、システムのソフトウェアをソースから作成する方針とした。

また、当初、そのハードウェアおよびシステムは、訓練用シミュレータと同じく、ある特定の機種を忠実に模擬することが重要であると思われた。一方、その場合には他の機種の模擬を行う場合に制限が生じることになる。今回試みようとした実験は初期段階であり、この時点では模擬対象を特定し、実機そのもののコックピットを導入することは時期尚早であるとの考え方があった。そこで、航技研の所有する汎用シミュレータ設備を用い、これを拡張する形でセットアップを行った。

このような実験装置の制約上、模擬できる機能にも制限が生じる。しかし、どのような機能を優先的に模擬すべきかについて現時点で明確にすることができないため、電気系統やエンジン起動系統などの運航に直接関わりのあるものについて実機をモデルとして忠実に模擬することにした。

今回の実験では、このようなセットアップがヒューマン・ファクタを取り扱う研究に使用できるか、どのレベルまでの模擬が必要か、どのようなシステムを優先的に模擬すべきなのか等について知見を得ることを目指した。また、ヒューマン・エラーの発生あるいはその兆候の観察が可能かどうかについても併せて検討した。本稿では、LOS のセットアップの詳細と実験の内容について述べ、それらの過程で得られた成果に基づいて行った検討について報告する。なお、この検討の結果、後述するように、LOS の実験手法について新しい構想をまとめることができた。

なお、今回の実験では、パイロットは被験者ではなくむしろ実験者の位置づけであり、評価のコメントのみならずシナリオの作成や実験の手法に関する議論にも携わっている。

また、本稿においては、運航の現状に準じて、高度および速度について、それぞれ [ft] および [kt] 表記を原則とし、数値が工学的に重要な意味を持つと思われる場合には [m] 表記を併記した。

2. 目 的

本研究の目的は下記の 2 項目である。

- (1) 研究開発用シミュレータを用いた運航シミュレーション実験を実施し、その手法について検討する。
- (2) 運航シミュレーションによってヒューマン・エラーの発生が観察できることを確認する。また、エラーの伝搬の観察や解析手法について検討する。

3. 実験方法

3.1 実験条件

- (1) パイロット

模擬対象機の豊富な操縦経験を持つパイロット 2 名が操縦と評価を担当した。

- (2) 実験回数

セットアップの評価およびシナリオの評価について合計3回のフルミッションのフライトを実施した。

(3) 実験場所

航空宇宙技術研究所飛行シミュレーション・センター

3.2 実験装置

模擬対象航空機として双発の19人乗りターボ・プロップ機を、航路としては調布から大島を経て羽田に至るコースを選び、運航を模擬するためのセットアップを行った。模擬機は、資料の入手が容易であること、パイロットが慣れていることなどを理由に選択した。また、実験に使用したシミュレータの模擬視界データベースには羽田と調布のモデルが用意されていたため、上記のようなコースを設定した。これらの模擬対象については、数学モデルとの整合やインターフェースの大きさの限界などから、すべてのシステムを模擬することはできない。そこで実験のセットアップ作業では、ある固有の機体のシステムから、架空の機体システムを想定し、さらに可能な範囲内でその架空の機体を模擬するという方法を探ることにした。管制についても同様である。たとえば調布から羽田へコンピュータ機が IFR 飛行することは現実的ではなく、航法のための電波標識にしても VOR と ILS のみであり、それ以外の NDB 等は装備していないという状況を仮定している。さらに、模擬したシステムの中には、一定レベルの論理とインターフェースを用意したものと、論理やインターフェースの模擬はしていないが、それが存在するものとして操作を行うものの 2 種類がある。これらの模擬レベルについて、代表的な例を表 3.1 に示す。表中、記号 A で表したものはセットアップで模擬されている。B は模擬されていないが、チェックリスト等には含まれている。C は存在しないものとして扱う。

シミュレーション実験のセットアップの概略を図 3.1 に示す。今回の実験では、主に飛行運動に関しては飛行シミュレータのコンピュータで、そのほかのシステムに関しては UNIX-OS を搭載したワークステーションで模擬した。両者間は GP-IB によって通信を行った。また、コックピットにタッチパネルを備えたグラフィック端末である X-Window ターミナルを設置し、天井パネル等のインターフェースを模擬した。さらにワークステーションのコンソールには航空機の状態をモニタするためのインターフェースを表示した。ここでは、X-Window 上のインターフェースを多目的表示装置 (Multipurpose Display : MPD)、ワークステーション上のそれを模擬管制卓と称する。ただし、模擬管制卓のプログラムには航空機のシステム模擬が含まれる。MPD と模擬管制卓は同じ CPU 上で時間分割で動作しており、両者間は共有メモリによって通信が行われる。また、X-Window ターミナルとワークステーションは高速ネット

表3.1 機体システムの模擬レベル例

システム	模擬レベル
バッテリ	A
バッテリバス	A
サーキットブレーカー	B
電源バスとシステム	A
電源バスと計器類	B
IRU	C
FMS	B
オートパイロット	B
油圧装置	B
除氷装置	B

A: 模擬されている
B: 模擬されていない
C: 模擬対象としていない

ワークである Ethernet によって結ばれている。

ここで、実験に使用した主なハードウェアは以下の通りである。

(1) 飛行シミュレータ

航技研が所有する汎用飛行シミュレータ^{8),9)}を用いた。コックピットは 4 発の中型ジェット輸送機のものであるため、左側 2 本のエンジンレバーを模擬対象機のパワーレバーに充てた。ただし、右側のエンジンレバーは飛行運動とは関係のないダミーである。エンジンを除く計器類についてはそのまま使用した。モーション模擬装置は使用していない。

(2) ワークステーション

航空管制模擬や航空機のシステムの模擬のために UNIX ワークステーションとして日本電算機製 SS-10M51 を用了。また、コンソールには模擬管制卓を表示した。外観を図 3.2 に示す。

(3) X-Window ターミナル

天井パネル等のインターフェースを表示するために 14 インチ液晶ディスプレイを備えた X-Window ターミナルとして日本電算機製 X-face C をコックピット正面に配置した。設置の状態を図 3.3 に示す。

また、実験のために用意したソフトウェアは以下の通りである。

(1) 航空機の数学モデル

模擬機の風洞試験データに基づく数学モデルを、汎用飛行シミュレーション・プログラム FSPK-II¹⁰⁾に組み込んで使用した。ただし、このモデルはエンジン・レバーが一本であること、エンジンの片発停止時に非対称運動を生じないなどの簡略化が行われている。また、基本となる FSPK-

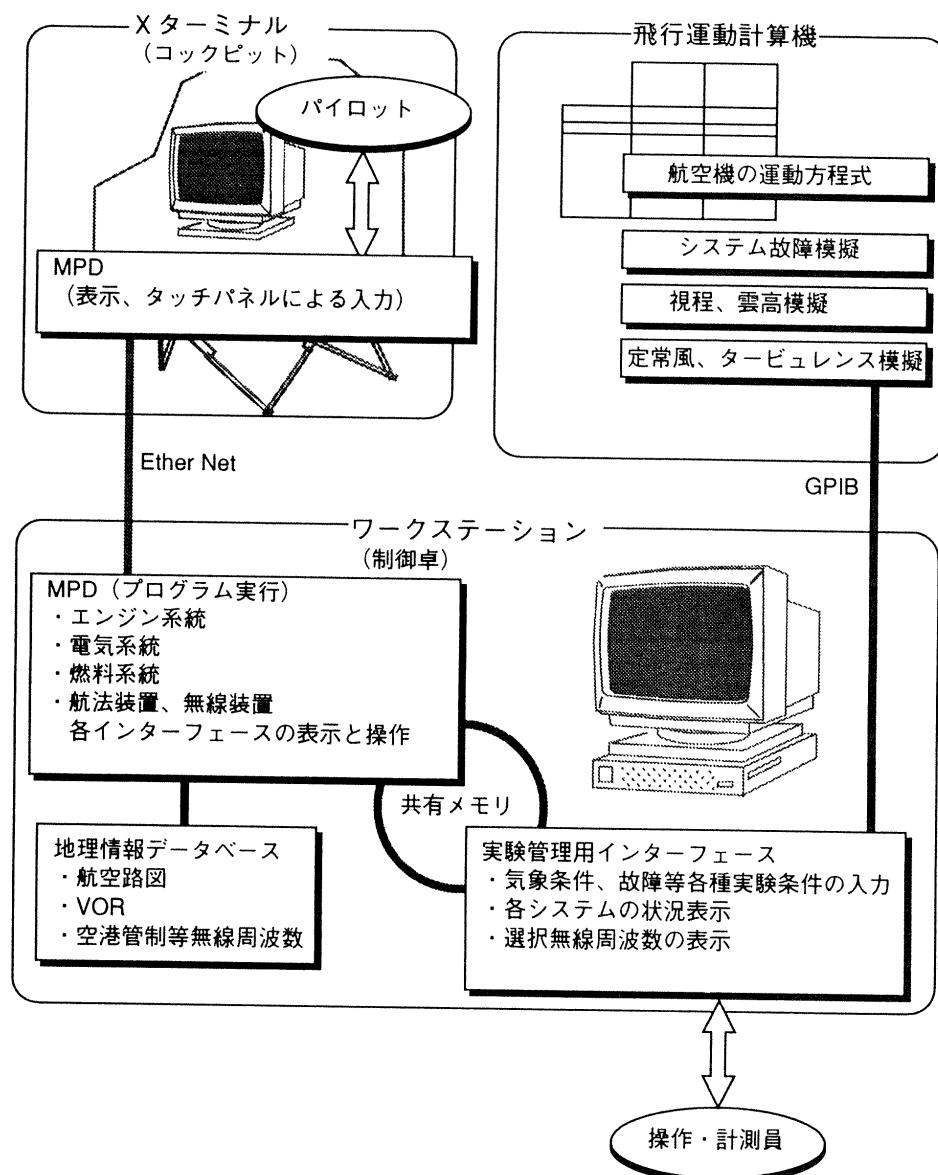


図3.1 実験システム図



図3.2 ワークステーション外観

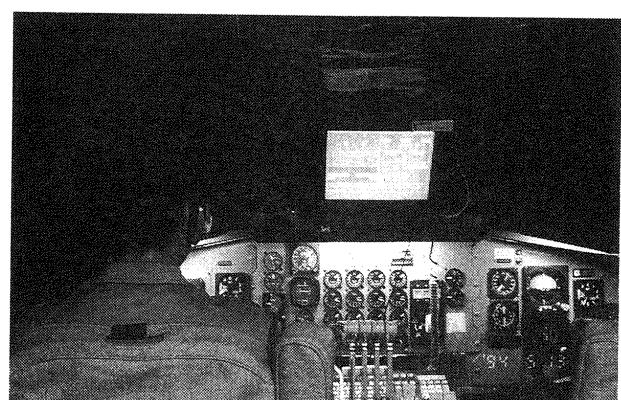


図3.3 X ターミナル設置状況

IIが飛行性解析に重点をおいているため、低速での地上滑走時の方向制御が十分に模擬されていないなどの限界を有している。

(2) シナリオ

一例として、実験で用いたシナリオを図3.4に示す。基

本的なシナリオは、Z-フライトプラン（VFRで離陸後、飛行方式を変更する）に基づいて調布を離陸し、IFRに変更した後、横須賀、大島を経て羽田に向かうコースである。ただし、現実の STAR では、大島から東に回り込んで羽田に進入する経路となる。実験では地上管制の模擬が十分

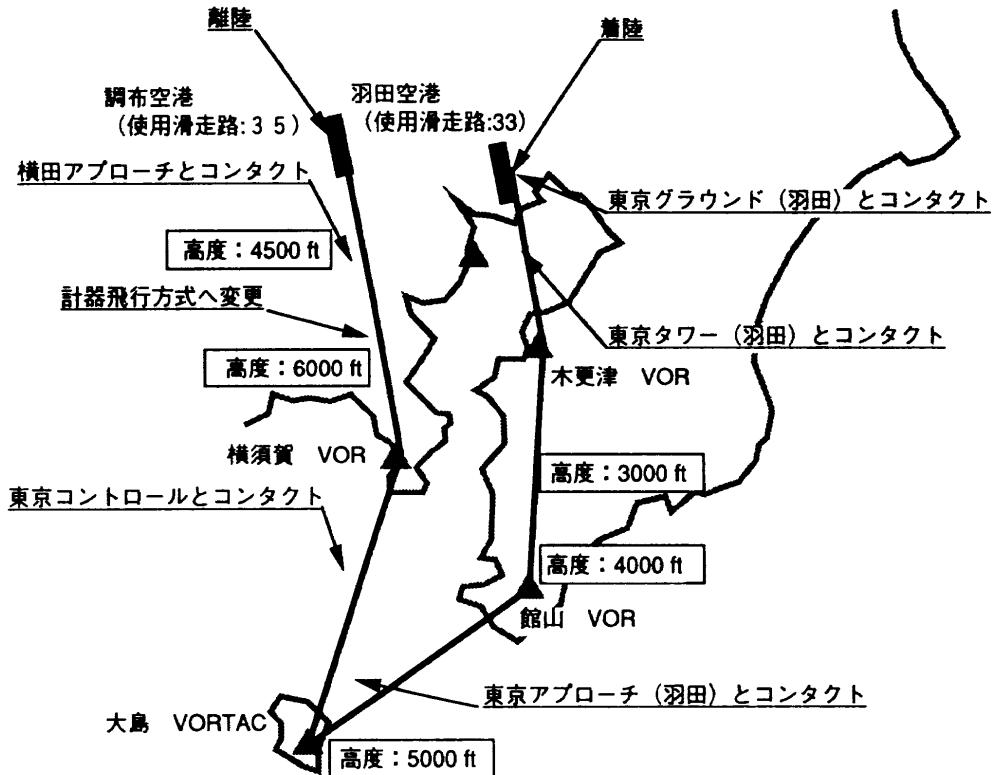


図3.4 シナリオ

でない他、STARでは時間が多くかかるため、木更津VORを最終進入フィックスとして想定し、大島、館山、木更津の任意の経路を設定した。風は常に296度方向に6kt(3m/sec)であるとし、RMS=1.0mのタービュレンスを付加した。視程は調布では6.0km、羽田で2.0kmとし、高度1,500ft(500m)以上では1.0kmになるように勾配を設けた。ただし、これらは今回の実験環境について較正されたものではなく、実験ではパイロットは羽田で滑走路端から約1.8kmの地点で滑走路を目視している。

(3) 航空機システムの模擬

今回の実験装置では、数学モデルとの整合やインターフェースの大きさの限界などから、主要な機能を全て模擬することはできなかった。そこで、天候などの外部環境条件によらず常に使用するもの、使用頻度が多いものを優先的に選択し、エンジン始動、燃料、電気系統などの基本的な論理について模擬した。これらのルールは合計で60種である。一方、地上でのブレーキやステアリングに使われる油圧系など地上走行に関わる機能については比較的使用頻度が高いものであるが、簡略化のため今回は模擬していない。また、エンジン始動時の立ち上がりなどについては一次遅れ関数によって近似した。この他、トルク・リミッタ・スイッチなど、インターフェースにスイッチのみを配置し、機能を有しないものも存在する。

(4) 模擬管制卓

これは航空機システムの動作状況や選択されている周波

数の監視、システム不具合や気象条件の制御などを行うインターフェースである。表示の例を図3.5に示す。これはUNIXのグラフィックライブラリであるX-libとX-Viewを用いてC言語によって作成した。

(5) コックピット・インターフェースの模擬(MPD)

MPDによって模擬の対象としたのは実機の天井パネル上にある電気系、燃料系、エンジン始動系の各操作パネルと警告灯等、音声通信、航法通信の各装置である。表示の例を図3.6に示す。警告灯と通信装置を除くパネルは、操作を容易にするためにパネル名の部分を触ることで二倍の大きさに拡大できるようにした。この状態を図3.7に示す。これらはX-libを用いてC言語によって作成した。

(6) 航法・管制システムの模擬

音声と航法装置用のチャンネルをそれぞれ1つずつ設定した。音声は、調布タワー、横田アプローチ、東京コントロール、東京アプローチ、東京タワー、東京グラウンドの6局を、航法援助装置は、横須賀、大島、館山、木更津、羽田の各VOR局と羽田のILSを用意した。実験では、パイロットがMPD上で周波数を設定し、実験者が模擬管制卓上で周波数の設定を確認した時点で通信が確保されたものとみなす方法で通信の切り替えを模擬した。交信の内容はあらかじめ定められた内容を読み上げる形を基本とした。また、VORのコース偏差およびベアリング情報をHSIに、さらにベアリングのみをRMI上に表示した。なお、今回は他機の模擬は行わなかった。

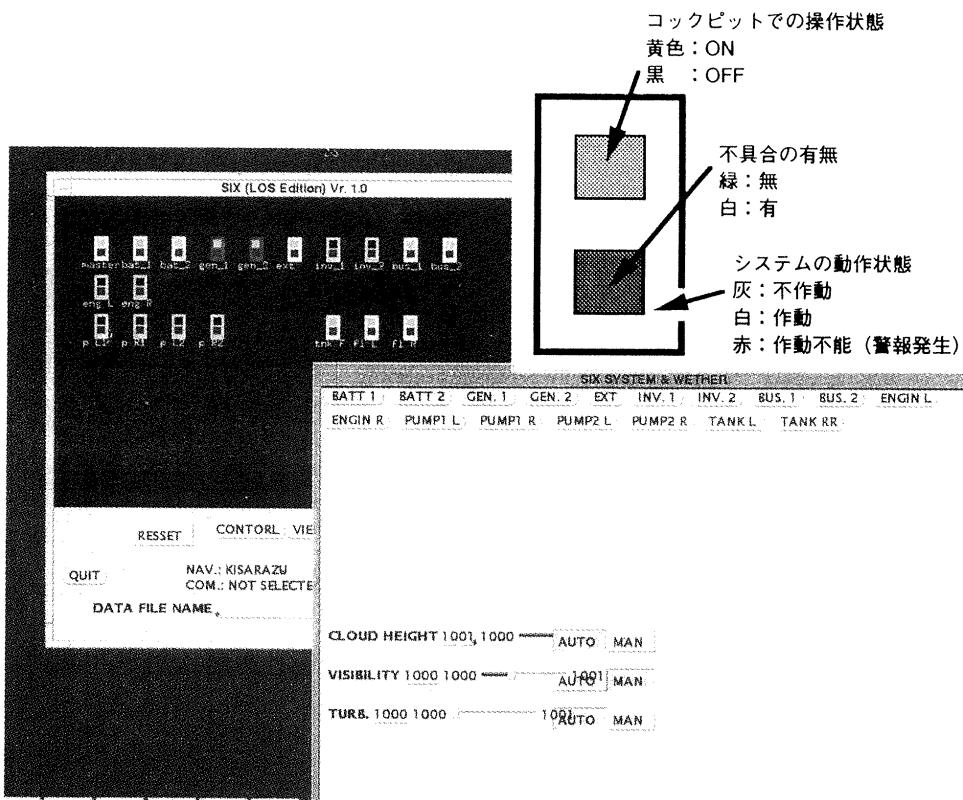


図 3.5 模擬管制卓表示例

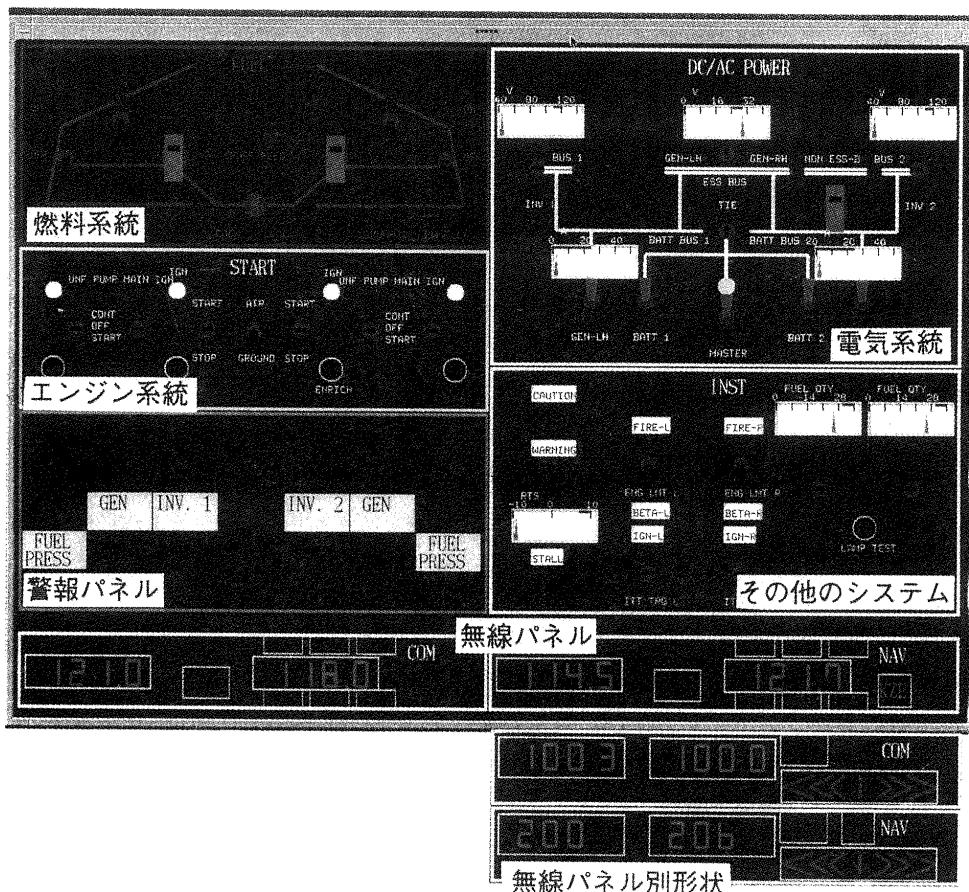


図 3.6 MPD 表示例 (その 1)

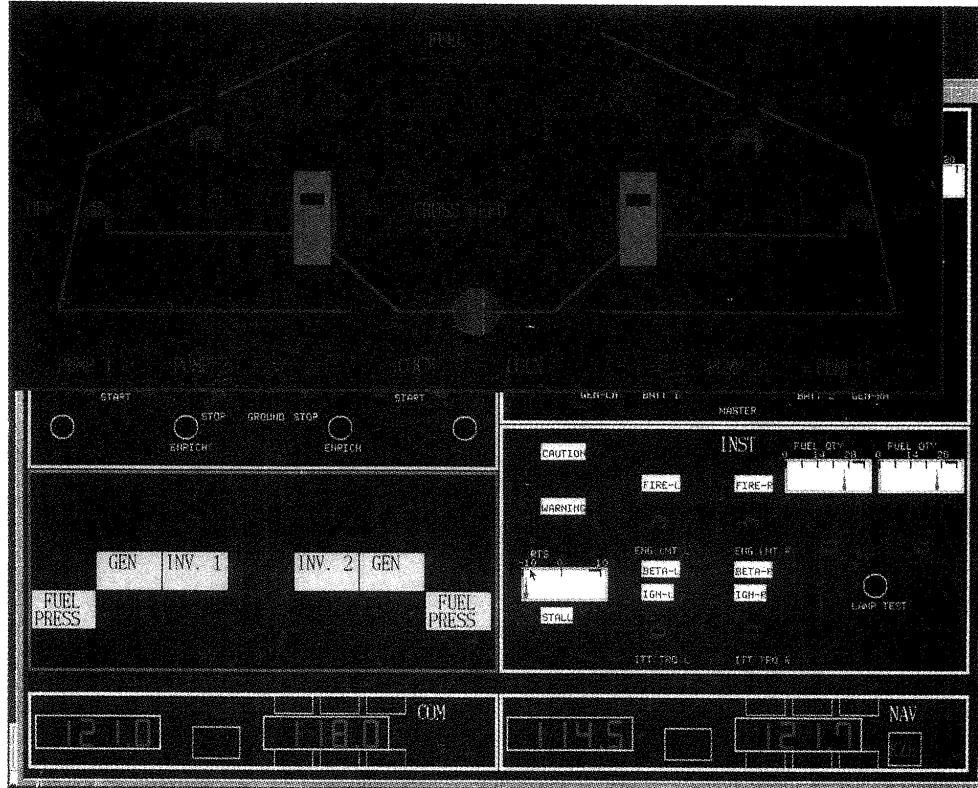


図3.7 MPD表示例（その2）

(7) チェックリストの扱い

使用したチェックリストは模擬対象機のそれに準拠している。ただし、資料を得た機体が一般的な装備に加えて、CRT計器等の特殊装備をしているため、それらに対応する項目を削除した。また、本来装備されているべきであるが模擬していない機能の操作項目については、マーキングを施して他と区別し、模擬的にチェックを実施できるようにした。

3.3 実験記録

コックピット動作および通信、会話の内容をビデオに記録した。また、システムのセットアップや操縦性などの運航と関係のない事項に関するコメントは手記した。

3.4 実験手順

エンジン始動前チェックリストの読み上げから操作を始めた。低速度での地上滑走の運動模擬が十分でないため、機体の初期位置は離陸開始滑走路端とした。接地後は滑走路から出たところで駐機し、エンジン停止までの手順の操作を行った。

実験中、パイロットはインターフェースの不具合や操縦性などの運航と関係しないコメントも述べる。また、セットアップの不備か故障かが判然とせず、状況が不明確な場合にも実験者に対して質問を行うことができる。一方、実

験者は必要に応じて不具合の発生などの情報を口頭でパイロットに伝えるほか、セットアップに関するコメントを要求することもある。

4. 実験結果と考察

4.1 インターフェースの評価

実験で用いた拡張インターフェースは静電式のタッチパネルを備えた14インチのディスプレイにスイッチ、ダイヤル、メータ等を仮想的に表示したものであった。このインターフェースに関するコメント等を列挙する。なお、下記の様な不具合等はあるものの、全般的には十分に実験に使用できるとの評価を得た。

(1) 二点を同時に押さえる、あるいは二人で同時にパネルを操作することができない：

実際のオペレーションでは、あるスイッチを押しながら、隣の指ですぐ下のスイッチを押すような操作がある。タッチパネルでは、このような操作を行っても、スイッチが正常に動作しないという限界があるが、連続的に2つのスイッチを押すという形で代替することは、今回の評価でも可能である。

一方、大型輸送機では二人のパイロットの操作範囲は基本的に定められているが、非常操作においては二人が同時に一人のパネルにアクセスすることもあり得る。一人がアクセスしている間はもう一人の側にランプを点灯させる等

して誤操作を防ぐ必要があると思われる。ただし、操作の進行を非操作者がモニターできる手段を講じない限り、乗員間の協調動作を含んだヒューマン・インターフェースの問題を扱うのは困難である。このようなスイッチに関しては实物を用意する必要がある。

(2) 反応が遅れる：

たとえば、ランプテストボタンのように即座に反応すべきものについて1秒程度の遅れが生じた。これは、MPDと模擬管制卓が一つのCPUを時刻分割で使用したために生じた現象である。この遅れを回避するためには2つ以上のCPUを備えたワークステーションを用いるか、タスクを1元化する必要がある。

(3) 絵が小さい：

今回の実験では一つの小さなディスプレイに天井パネルのほとんどの機能を詰め込もうとした。その結果、表示が読みにくく、スイッチによっては隣のスイッチの干渉も発生した。今回用いたパネル拡大の機能により、これらの問題点は回避できるが、全体の操作量が増大することは避けられない。複数の大型のディスプレイが必要である。

(4) スイッチの操作性について：

すべてのスイッチの操作には慣熟が必要であったが、予備評価での合計3時間程度の慣熟によって所望の操作が問題なくできるようになった。すべてのスイッチは、ある範囲内で触ることでON-OFFを制御するように作成されており、範囲外でパネルを触った後、範囲内にずらしていく場合には検知しないようになっている。しかし、実験では後者の方法でスイッチを操作しようとする場合が多く見られた。また、トグルスイッチなどでは、実物と同じように一度触った後、所望の方向にずらすような動作も多く見られた。今後はこのような実際の操作傾向に合致するように、スイッチの動作条件を改良する方針である。

また、当初、通信機の周波数の設定はダイヤルを模擬したスイッチを用いていた。これは、図3.6に示すように長方形の箱の右を触ると周波数が上がり、左を触ると下り、触る位置が端の方であるほど変化量が大きくなるものであった。このスイッチでは、前述のタスクの時刻分割のために値の変化量が一定にならないことが問題として明らかになった。そのため、今回は改修を行い、各桁ごとに上げと下げのスイッチを設け、これによって数値を変化できるようにした。スイッチパネルを仮想的に実現するためにはダイヤルのような操作部品をうまく模擬するための工夫が必要である。

4.2 航法システムの評価

(1) 時計がない：

シミュレータのコックピットの機長側には時計が装備されていなかった。他の実験の目的で他の計器に置換されて

いたためである。計器航法のためには、左右両方にアナログ時計を装備することが望ましい。

(2) 航法装置について：

今回の実験では、航法装置として1チャネルのVORのみを用意した。しかし、実際の運用では、複数の局を同時にモニタする事が多い。特に着陸復行を行う場合をはじめとして、シナリオで設定された航路から逸脱する場合には1局だけでは不十分である。模擬範囲を拡大するために、第2のチャネルを用意すべきである。

(3) ILSマーカ・ビーコンの通過音がない：

(4) その他：

VOR局の場所が外部視界と一致しないところがあるなどの問題点が指摘された。これについては、模擬視界データベースの確認が必要である。また、コックピット内に地図やチェックリストの書類を置くためのポケットが必要であるとの指摘があった。

4.3 気象模擬に関する評価

(1) 風の変化が感じられない：

低高度と高高度で風向、風速の差を設けることで現実性が増し、より現実に即したワーキングロードが発生すると考えられる。

(2) 低高度時、着陸時の視程が確保されていない：

シナリオの状況とシミュレーションで実現された視程が一致していないことによる問題があった。調布を離陸後、上空でIFRに切り替える前後までは外部視界を用いて飛行できるように視程をセットすべきであること、また、進入復行を想定しない着陸では、決心高度までに滑走路が視認できるように設定することが妥当である、などのコメントを得た。

4.4 機体システムに関する評価

前述のように、今回のセットアップでは油圧系や空調装置をはじめとする多くのシステムが模擬対象から外れており、チェックリストの読み上げでも、操作の形だけをする項目が多数存在する。しかし、評価としては、より厳密なシステムの模擬は必ずしも必要ではないということであった。例えば、ある装置の不具合が発生しても、処理としては単にそのシステムが切り放されることが多く、エラーの発生する余地は少ない。操作自体を行わせることに意味があるならば、ロジックを持たないスイッチや紙のパネルでも機能を満足し得る。また、後で述べるような機体の一般化をおこなう場合には、一つ一つの操作は単純である方がよいと考えられる。

また、燃料消費量などについて実機と一致しない点があることの指摘があった。

4.5 今後のセットアップ方針

(1) 機体システムについて

以上の議論を踏まえて、今後の LOS セットアップについて検討したところ、次の 2 つの異なる方向がありうることがわかった。

- (a) 特定機種について、模擬程度を高度化する。
- (b) 単純で一般的なシステムを持った架空の機体システムをつくる。

ここで、(b)の長所としては以下のものが挙げられる。

- i) 特定機種に限らず、それ以外の多くの機種のパイロットを実験の参加者とすることができます。
 - ii) 機体固有のシステムに関するパイロットの慣れや経験の要素を排除することができます。
 - iii) 機体システムの高度化のための準備作業が軽減される。
 - iv) 実機のシステムにとらわれず、柔軟な実験環境を構築できる。
- 一方、短所は以下のようない点である。
- i) 特定機種の問題を扱うことができない。
 - ii) 実験の現実性が薄くなり、パイロットの臨場感を損なう恐れがある。
 - iii) 実験に参加する全てのパイロットについて、慣熟のための時間が多く必要になる。

実験に参加できるパイロットの数が増えることは大きな利点である。単純なシステムをつくることで、パイロットの慣熟に要する時間が削減できれば、試みる価値のある手法であるといえる。また、本研究の範囲内では、機体個別の問題を扱うことを考えていない。残る問題は現実感の低下であるが、これが実験の目的にどの程度影響するかについては、現時点では明らかでない。以上の得失を検討した結果、今後は(b)の架空の機体を作成する方向で実験のセットアップを進めてゆくことにした。

(2) シナリオについて

機体システムと同様に、基準となる航路についても、例えば名古屋—羽田などのより一般性のあるコースを選ぶべきであるとの議論があった。航路や空港に固有の事項に関するパイロットの経験は、このようなコースを選ぶことで共通化されることが予想される。ただし、これはシミュレータの空港の模擬視界データベースとの関連で、更に多くの準備作業が発生することになる。一方、(1)と同様に全く架空の航路を設定したり、極度に簡略化された空港を用意することは妥当といえるかどうか判断が困難である。この点については、今後、検討を進めてゆきたい。

4.6 エラーの抽出

今回の実験では、特に不具合の発生をシナリオに組み込んでいたわけではないが、セットアップの不備やパイロッ

トの実験装置に対する不慣れ、地上側管制官を模擬した実験員の不慣れなどからいくつか予期しない事象が生じ、結果として以下に例示されるように、設定された手順からの逸脱が見られることがあった。

実験での操作の流れを表4.1に示す。ここでは、旋回や降下などの操縦自体に関する操作や脚上げなどのチェックリストに含まれる操作は記述していない。この表の中では、2つの点に注目する。

第1の事象は、離陸後の 0:22 で climb チェックリスト作業の最中に起きた。当該のチェックリストの後半にはアビオニクスのチェックが含まれているが、ここで横田アプローチの周波数をセット後、そのまま交信を開始しており、以降のチェックリストの読み上げは省略されている。このとき、PNF は、残った項目を単独でチェックすることにより、チェックリストの再開を要求しなかった。ただし、チェックリスト等の作業中に通信を行うこと自体は実運航でも頻繁に発生することである。たとえば、1:05にも類似の現象が発生している。before landing チェックリストの最中に東京タワーと交信をおこない、チェックリストが中断したが、このときは交信終了後に PF が PNF にチェックリスト再開を要求している。

第2の事象は 0:35 前後に生じている。このとき、横田アプローチと交信中であり、東京コントロールへの周波数切り替えを指示された直後であった。きっかけは、X-Window ターミナルの画面焼き付き防止のためのスクリーンセーバーの起動である。この機能を不作動状態にしていなかったのは実験準備作業上での不備である。しかし、この結果、画面が一時的にブラックアウトし、回復操作、周波数の再設定などで東京コントロールの呼び出しが遅延した。これから、およそ 4 分後、東京コントロールから、模擬機を呼び出している。ただし、模擬機側の周波数はブラックアウト直後に東京コントロールに設定されていたために東京コントロール側から呼び出すことができ、結果として大きな問題にはなっていない。また、大きな航路のズレもなかった。なお、このとき PNF が航法装置のスタンバイ側周波数を設定し直す際に間違いがあったが、2 分後に PF の指摘により修正している。

以上の事象について、その要因として考えられる点について以下に述べる。

- (1) 第1の事象については、かなり低高度から視程が悪化して計器気象状態となり、管制とのコンタクトを急いでいた。
- (2) 低い視程と実機に比べて悪い操縦性によってパイロットのワークロードが高かった。
- (3) インターフェースの不便さがワークロードを増加させた可能性は高い。インターフェースに関しては、セットアップ段階で使用可能であるとの評価を得ているものの、

表 4.1 実験記録

時刻	位置	交信局	交信内容	操作内容	備 考
0:00				interior c'k before start c'k	
0:10				start engine c'k after start c'k	
0:20	調布	CHOFU TWR	滑走許可 離陸許可	c'k complete before T/O c'k T/O c'k	
		YOKOTA APP	交信確立 大島までの許可	離陸 after T/O c'k climb c'k cruise c'k	climb c'k の avionics set 以降が省略
0:30	横須賀VOR	TOKYO CTL	と交信せよ TOKYO CTL		スクリーンセーバー作動 TOKYO CTLの呼び出し遅れ 次の周波数の設定ミス
0:40	大島VORTAC		木更津までの許可 高度 5000 ft		周波数修正
0:50	館山VOR	TOKYO APP	高度 4000 ft 現在位置報告	descend c'k	
			高度 3000 ft		
1:00	木更津VOR	TOKYO TWR	現在位置報告 TOKYO TWR と交信せよ	LOC capture before landing c'k	c'k の途中で TOKYO TWR とコンタクト
	羽田	TOKYO GND	現在位置報告 着陸許可 滑走路目視 滑走許可	着陸 エンジン停止	
1:10					

実機に比べて使いづらいものであったため、エラーの発生しやすい状況になったと考えられる。

(4) 残されたチェック項目は今回の飛行条件では重要性が低く、また、セットアップでも機能が模擬されていなかった。

(5) 運航模擬の対象が厳密に設定されておらず、守るべき運航手順が明確でなかった。たとえば、今回用意したチェックリストはパイロット 1 名乗務で可能なものに基づいて作成しており、PF と PNF の業務分担がない。そのため、チェックリストを声に出して読み上げることを実験では手

順上明確には定めておらず、第1の事象のような状況を逸脱としてとらえるかどうかは議論の余地がある。そもそも、正規の手順が明確でなければ、パイロットにそれを遵守する意識や逸脱の意識が発生しない。

上記のように、今回の手順からの逸脱は実験条件の不備がもたらした事象によるものではあるが、逆にこれらの事象を意図的に発生させることで手順からの逸脱を誘導することが可能であると思われる。これらは現時点では一つの事例として定性的な議論に留まらざるを得ないが、今後のシナリオ作成の指針になると考えられる。

実験全体を省みて、エラーの発生と抽出について得られた知見を以下にまとめる。

(1) 運航の状況設定やチェックリスト、運航規定などによって正規の手順を明確に定める必要がある。逆に、不明確な手順やあいまいな状況設定によって手順の逸脱を誘発することができる。

(2) 今回のようにパイロットにとって不慣れな環境では、手順からの小さな逸脱は生ずる。また、それらを観察し、抽出することもできる。

(3) クルー・コーディネーションによって、手順からの逸脱は修正される。修正を観察することもできる。逆に、例えば PNF が不適当な処置を行えば、逸脱が修正されず、逆に拡大ないし伝搬することも考えられる。

(4) 標準的な手順以外の不具合が発生した場合、それが手順からの逸脱の発生に影響を及ぼす可能性がある。

これらのことから考えると、シナリオ上に不具合などを用意しておいて手順の逸脱の発生を誘導し、これが伝搬する過程を観察することは可能である。

5. 結 言

本実験によって得られた成果は以下の通りである。

- (1) 研究用飛行シミュレータを用いてコピュータ機をベースとした運航シミュレーション実験を試み、運航模擬が可能であるとの評価を得た。
- (2) 実験の結果およびセットアップの評価をもとに議論した結果、今後は現実の航空機の固有のシステムを忠実に模擬するよりも、より一般的で柔軟性のある航空機モデルを作成すべきである。ただし、この手法は特定機種の特定の事象の再現・検討等を目的としたものではない。
- (3) コックピットにおけるパイロットの動作分析を行った結果、手順からの逸脱およびクルー・コーディネーションによるエラーの修正を観察することができた。これは今後のエラー抽出実験に指針を与えるものである。

実験手法に関しては、今回、当所においてこれまで主に実施されてきた飛行性能評価中心のシミュレーションとは異なる方法論が必要であった。今後さらなる検討および試行を行い、ヒューマン・ファクタに関する研究を目的とした運航シミュレーション手法を確立してゆく予定である。

本研究は、科学技術庁の平成5年度科学技術振興調整費による「システムと人間の調和のための人間特性に関する基礎的・基盤的研究」の一環として行われたものである。本研究を開始するにあたり、研究の進め方等について御助言を頂いた同研究推進委員会の方々に感謝する。

なお、本実験で用いた機体の数学モデルは航技研飛行実験部飛行試験研究室岡田典秋主任研究官により作成されたものであることを付記する。

文 献

- 1) Reason, J. : *Human Error*, Cambridge University Press, 1990.
- 2) Goodstein, L. P., Anderson, H. B. and Olsen, S. E. : *Task, Errors and Mental Models*, Taylor & Francis, 1988.
- 3) Ruffell Smith, H. P. : *A Simulator Study of the Interaction of Pilot Workload With Errors, Vigilance, and Decisions*, NASA TM 78482, 1979.
- 4) Wiener, E. L., Kanki, B. G. and Helmreich, R. L. : *Cockpit Resource Management*, Academic Press, 1993.
- 5) Crew Resource Management Training, FAA Advisory Circular, AC-120-51A, 1993.
- 6) Line Operational Simulations : *Line-Oriented Flight Training, Special Purpose Operational Training, Line Operational Evaluation*, FAA Advisory Circular, AC-120-5B, 1990.
- 7) 航空安全におけるヒューマン・ファクターの調査研究報告書, 航空振興財団, 1994.
- 8) 川原他 : 飛行シミュレーション試験設備, 模擬操縦席装置の構成及び機能性能, 航技研資料 TM-577, 1987.
- 9) 川原他 : 飛行シミュレーション試験設備, 模擬視界装置の構成及び機能性能, 航技研資料 TM-581, 1988.
- 10) 坂東, 渡辺 : 汎用飛行シミュレーション・プログラム (FSPK-I) 第1部 : プログラムの内容, 航技研報告 TR-702, 1982.
- 11) Airman's Information Manual JAPAN 第19号, 連輸省航空局監修, 日本航空機操縦士協会, 1993.

航空宇宙技術研究所資料 667号

平成 6 年 10 月 発行

発行所 航 空 宇 宙 技 術 研 究 所
東京都調布市深大寺東町 7 丁目 44 番地 1

電話 三鷹 (0422) 47-5911 (大代表) 〒182

印刷所 株 式 会 社 三 興 印 刷
東 京 都 新 宿 区 西 早 稲 田 2-1-18
