航空機設計開発のためのフライト・シミュレータ試験について*

堀 川 勇 壮**

1. ま え が き

近年、世界各国において、航空機の設計開発にフライト・シミュレータの利用が盛んである^{1)~4)}。わが国においても、航空宇宙技術研究所⁵⁾を初めとして、航空機会社に研究開発用のフライト・シミュレータが設置されて以来、約10年を経過し、その技術もやっと定着した感がある。

フライト・シミュレータの利用の利点はあらためて云うまでもないが、まとめてみると次のものがある。

(1) 航空機の設計にシミュレータを利用することにより、設計段階において航空機を人間-機械系 (man-machine system) としての適合性をはかることができ、従来のシミュレータを使用しない場合に比べて、設計者は自信を持って設計を行なうことができる。さらに、このような方法によって設計された航空機はユーザであるパイロットからの信頼が得られる。

(2) シミュレータを利用しない方法では困難であった航空機の機体形状等の最終的決定を設計段階で行なうことができる。

(3) 設計開始から量産までの期間が短縮できる。従来の方法に比べて、シミュレータを用いることにより、特に飛行試験期間の短縮ができ、飛行試験中における問題点が少ない。

(4) 開発期間の短縮により、開発した航空機の商品価値の変動が少なく、商品としての航空機の寿命を永くすることができる。

(5) シミュレータ試験を十分に生かすことにより、航空機の開発費の減少が期待できる。

(6) 飛行試験時の機体、人命等への安全性の改善が期待できる、等である。

わが国において行なわれた航空機設計開発のためのフライト・シミュレータ試験の主なもの次は次のものである。

(1) 中型輸送機の操縦性に関するフライト・シミュレータ試験⁶⁾

(2) STOL 飛行艇 PS-1 機の設計開発のためのフ

ライト・シミュレータ試験⁷⁾ (リグ試験を含む)

(3) 中型ジェット輸送機 C-1 の設計開発のためのフライト・シミュレータ試験^{8), 9)} (リグ試験を含む)

(4) 超音速練習機 T-2 の設計開発のためのフライト・シミュレータ試験 (リグ試験を含む)

(5) PS-1 を水陸両用機 (UF-1) に改造するためのフライト・シミュレータ試験

(6) その他、次期対潜機 PX-L の初期設計のためのフライト・シミュレータ試験、航技研におけるフライング・テスト・ベッドの開発のための試験^{10)~16)}、航技研の自動着陸に関する研究におけるリグ試験^{17)~18)}、等がある。

これらのフライト・シミュレータ試験の内、ほとんどのものが航空宇宙技術研究所の汎用飛行シミュレータを使用して行なわれ、筆者もその計画に参加してきた。シミュレータ試験に11年余、わが国ではじめての本格的な研究開発用のシミュレータの建設計画から通算すると、15年余にわたって、この仕事に携わってきた。当初は全くの暗中模索の状態からスタートしたが、現在、シミュレータ試験法もほぼ固まってきた感じがする。浅学非才の身でありながら、あえて、これらの経験をシミュレータ試験技術としてまとめ、報告したいと思う。諸賢の御叱正をお願いする次第である。

2. 航空機の設計開発のためのフライト・シミュレータ

2.1 飛行性とフライト・シミュレータ 航空機を設計するということは、単に与えられた仕様を満足することだけでなく、より優れた航空機、すなわち、飛行性 (flying quality) の優れた航空機を設計しようということである。飛行性とは Mil の仕様¹⁹⁾にも規定してあるように、従来の安定操縦性よりも広い範囲の性能を定義するもので、航空機単体での良さに加えて、パイロットと航空機を組み合わせた新しいシステムとしてみた性能の良さを加えたものをいう。後者の性能は、初期に handling quality (操縦特性、適訳はないが、操縦性と云えば従来の安定操縦性 (stability and control) と混同されるので注意を要する) の用語が用いられていたが、飛行機の性能の良さを支配する要素をすべて含めて、飛行性という定義が一般的にな

* 昭和49年11月29日飛行機シンポジウムにおいて講演
昭和49年6月1日原稿受理 On the Flight Simulator Test for Design and Development of Aircraft

** 航空宇宙技術研究所 Yuso HORIKAWA

第1図 操縦特性に影響を与えるパイロット-航空機系の要素

第2図 フライトシミュレータの基本構成図

ってきた。研究および開発用のフライト・シミュレータとは、この飛行性を追求する道具である。

航空機の飛行性の内、特に操縦特性 (handling qualities) に影響を与えるパイロット-航空機系の要素を示すと、第1図のようになる。図はパイロットを中心とした制御ループの要素としての航空機システムを表わし、図の上段には操縦特性に影響を与える因子を示し、相互の関係を明らかにしてある²⁰⁾。この図から、操縦特性に影響を与える因子とパイロット-航空機系としての航空機の要素との関係がよく判る。この図で示したパイロット-航空機系の制御ループを地上で模擬再現することが、フライト・シミュレータの役割である。

2.2 フライト・シミュレータの基本構成 前節で述べたように、フライト・シミュレータとは、一般に航空機の飛行状態を地上で模擬再現する装置であり、飛行運動等を実時間で模擬演算を行なう計算機と模擬操縦席などから構成される。計算機は、飛行運動の計算のほか、エンジン、操縦装置の特性、計器指示、外

部視界装置等のための計算を、試験研究目的に見合った精度で演算を行なう。模擬操縦席は、操縦装置、計器などが実機同様に製作され、体感 (kinesthetic information) を与えるための、機体姿勢および併進運動を与える可動装置 (motion system) と、さらに、外部視界情報 (visual information) を与えるための模擬視界装置 (visual display) 等が併用される。これらの諸装置によって試験パイロットはまったく実機に乗って飛行しているのと同じ感覚を得ることができる。これらの構成図を第2図に示す。

研究および開発用のフライト・シミュレータと訓練用のフライト・シミュレータとは、機能的には同一とみてよい。しかし、訓練用のものは、たとえば DC-8 なら DC-8 の専用のシミュレータであるが、研究開発用のものは、一般にどのような機体特性でも容易に模擬できる必要がある。したがって、計算機はデータを入れかえ、またはプログラムを変更することによって自由に所望の機体特性の運動を模擬することができるように作られている。研究開発用のシミュレータの模

第3図 航技研の汎用飛行シミュレータ全体構成図

擬操縦席については、どのような場合にも汎用というわけにもいかないが、試験目的の機体の操縦装置に付け換えたり、計器配列を変えたりすることによって、ほとんどの場合、目的を達することができる。特殊な操縦席が必要な場合は、操縦席を作りなおして可動装置に乗せかえて行なう場合もある。

2.3 航技研の研究開発用のフライト・シミュレータ わが国における研究開発用のシミュレータの代表例は、航空宇宙技術研究所の汎用飛行シミュレータ⁵⁾である。本シミュレータの全体構成図を第3図に示す。このシミュレータの主要構成は航空機の運動を実時間で模擬演算を行なう航空機動特性模擬装置、人間工学研究用模擬操縦席装置、模擬視界装置および実物の慣性センサを含めたシミュレーションのためのフライト・テーブル装置である。

3. 設計開発におけるシミュレータ試験

航技研で行なってきた航空機の設計開発におけるシミュレータ試験を、設計開発段階別に整理して示せば第1表となる。この表には試験目的、試験内容も合わせて示してある。以下、これらの試験段階について説明する。

(1) 初期計画段階：より新しい性能を持つ航空機、たとえば V/STOL 機、SST 等の開発において、第1段階の設計資料を得るための試験は必須のものである。ただし、通常の航空機の開発では、設計資料が十分あるので、一般に省略される。

(2) 基礎設計段階：第2段階の基礎設計段階では基本的な安定操縦性、操縦特性の検討が行なわれ、基礎設計としての妥当性、問題点の明確化が行なわれ、それをもとにして詳細設計が進められる。

(3) 詳細設計段階：フライト・シミュレータを航空機の設計開発に利用する最大の利点は、基礎設計、詳細設計段階のシミュレータ試験を行なうことによって、従来のシミュレータを用いない方法では、飛行試験をしなければ航空機パイロット系としての適合性が判らなかつた点が、このような設計段階で判り、設計にただちに反映でき、まがきにも述べたように、開発期間の短縮などの多くの利点が生ずる。とりわけ第3段階の詳細設計段階では、最終的な機体の形状の決定ができる、といった利点がある。

(4) リグ試験段階：リグ試験段階は、近年の航空機は何らかの機力操縦装置を含めて自動安定装置、自動飛行制御装置を搭載しているので、欠かせないものになってきている。

(5) 初飛行試験前段階：初飛行試験前の試験は主として、テストパイロットの訓練を行なうことによって、飛行試験の安全性と試験能率の向上が期待できるほか、その機体個有の操縦法の確立をはかるために行なわれる。

(6) 飛行試験後の問題点の検討段階：飛行試験後の問題点の検討の必要性は、シミュレータを利用すれば、従来の利用しない方法に比べて非常に減少してくるのが特徴である。また、もし、検討が必要な場合に

第1表 航空機的设计開発におけるシミュレータ試験段階

も、従来の方法よりも有効に問題点の解決が可能である。

4. シミュレータ試験法

シミュレータ試験の手順としては、(1)シミュレータ試験計画段階、(2)シミュレータ試験準備・実施段階、(3)シミュレータ試験検討段階の3段階に大別することができる。これらの試験段階における手順および内容を第2表に示し、以下、これらについて述べる。

4.1 シミュレータ試験計画段階

(1) 試験目的、要求事項の決定 試験計画を立てる最初のステップとして、試験目的、および要求事項を決定する。この概要は、すでに第1表に示してあるが、設計開発する試験機体の特徴に合わせて、より詳細に決定する。

(2) **Task** の決定 どのような飛行状態で、どのような仕事(task)をパイロットに課するかを決定しなければならない。全飛行領域にわたって、飛行段階とtaskの種類を第4図に示す。試験にあたっては、これらのtaskの中から、各試験段階に適したtaskを選び、効率よく試験を行なうことが重要である。taskの選び方としては、初期設計段階では、特に問題点となる事項に焦点を絞り、詳細設計段階では、仕様に合格することに重点を置き、設計解析時に確認された事項は省略し、効率向上をはかる必要がある。最終的には全飛行領域のtask全部にわたって試験確認を行なうことが望ましい。

(3) シミュレーションの内容の決定 試験目的、taskにあったシミュレーション内容をシミュレートすることが必要である。初期設計段階では、必ずしも正確なデータが得られていないのが普通であり、このよ

第2表 各試験段階における試験手順および内容

試 験 段 階	試 験 手 順 お よ び 内 容
(Phase 1) シミュレータ試験計画段階	① 試験目的・要求事項の決定 ② Task の設立 ③ シミュレーションの内容の決定 (シミュレーション数学モデルの決定) ④ シミュレーション・チームの編成 ⑤ テスト・パイロットの選定 ⑥ 評価法の決定 ⑦ シミュレータ試験全体計画の決定
(Phase 2) シミュレータ試験準備・実施段階	① シミュレータ用計算機のプログラミング ② シミュレータ用計算機のセット・アップ ③ 模擬操縦席の改造 ④ シミュレータ全体のセット・アップ ⑤ ブリーフィング・シートおよび評価表の作成 ⑥ シミュレータ試験の実施 ⑦ シミュレータ試験の結果, 評価の記入
(Phase 3) シミュレータ試験検討段階	① 結果の全体的なまとめ ② 総合検討および実機的设计への反映

FLIGHT PHASES	Ground/deck	Takeoff	Climb	Cruise	Special phase determined by role	Descent	Approach	Landing
SUB PHASES (TYPICAL)	Taxiing, (ground or water) Catapult positioning Confined area positioning	Accel- V_1 V_1-V_R V_R-V_{LO} Aborted takeoff	1st Segment 2nd Segment Other segments as required	VOR tracking Enroute climb Altitude holding Altitude change	Air-air tracking Dive bombing Low level bombing Refueling	Enroute descent Emergency descent	Terminal area hold Localizer capture Glide path capture ILS tracking Wave off	Flare to touchdown Offset correction Crosswind landing Ground deceleration
TASK	The actual work assigned a pilot which is to be performed in designated flight phases							

第4図 飛行状態と Task の関係

第5図 シミュレータ計算機による模擬演算内容

うな場合には, 空力データ等についてはパラメトリックに変化させて試験を行なうことによって基礎設計資料を得る。このような場合, 運動方程式は線形方程式または主要な空力特性のみを非線形としたもので十分である。設計が進むにつれて, 厳密な運動方程式が必要となり, また, 設計が進めば, 厳密な運動方程式を

得ることができる。さらに, 模擬操縦席の改造の有無, 可動装置の付加の有無, 模擬視界の使用等についても, 試験目的および task によって決定する。シミュレータ計算機の模擬演算内容の代表的例を第5図に示す。

(4) シミュレーション・チームの編成 シミュレ

ーション・チームと機体設計チームが同一メンバーであると、試験結果がチームに与えるストレスが強過ぎることと、テスト・パイロットから、改良すべき意見がでた場合に、事実より強調された意見がでやすい欠点がある。一方、設計チームとは別のチームで試験を行なうと、設計チームと試験チームとの間の情報伝達を十分考慮しなければ試験は円滑に進められない。一般に、シミュレータ試験の専門家チームと設計チームが一体となったチームを編成して行なうことが、試験を円滑に進める道である。

(5) テスト・パイロットの選定 テスト・パイロットの選定は試験の結果に直接影響する。シミュレータ試験におけるパイロットは、パイロット・レーティングなどの評価法に習熟したテスト・パイロットであると同時に、設計技術者対話のできるエンジニア、すなわち、エンジニアリング・テスト・パイロットであることが必要である。

(6) 評価法の決定 評価法については、次章で詳しく述べるが、評価をどのように設計に反映するか重要なので、あらかじめ、どの task のときにはどのような評価法を用いるか検討しておいて進めることが望ましい。

また、評価試験にあたって、テスト・パイロットの人数と試験回数を決定することも重要である。一口にテスト・パイロットといっても、各個人の年齢、経験によって評価が異なる場合もあるので、年齢、経験などの異なる多人数のテスト・パイロットによって多数回の試験を行なうことが望ましい。人数と試験回数によって、得られた結果について統計的な評価を加えることができる。しかし、人数と試験回数が多過ぎると試験に要する日数が増加する。

その他、試験にあたって留意すべきことは、パイロットの先入観、予断、経験の連続性による評価への影響などを取除くために、十分な考慮を払う必要がある。

(7) シミュレータ試験全体計画の決定 以上述べた検討より、日程、詳細計画を含めて全体計画としてまとめることによって、計画段階の作業は終了する。

4.2 シミュレータ試験準備・実施段階 試験準備段階としては、前項の計画に従って、

(1) シミュレータ用計算機のプログラミングを行なう。

(2) シミュレータ用計算機のセットアップと試算とデジタル・シミュレーションによる検算を行なう。

(3) 必要があれば模擬操縦席の改造を行なう。

(4) シミュレータ全体のセットアップと試運転

を行なうことによって、準備段階は終了し、実施段階に入る。

(5) ブリーフィング・シートおよび評価表の作成

試験目的、内容について、評価に影響を与えない範囲で、試験実施前にテスト・パイロットに情報を与えることが、試験を円滑に進める上で必要である。情報をあまり与えないと、パイロットに不必要な精神的ストレスを与え、それが評価に悪影響を与える。情報を与え過ぎると、先入観や予断が入って悪影響を与える。そのため、適切なブリーフィングを行なう必要があり、このブリーフィング・シートの作成は念入りにしても、過ぎるということはない。HARPER, COOPER 両氏も、これを重視して、ブリーフィング・シートの案を呈示している¹⁹⁾。

評価表も試験項目に合わせて作り、試験実施前のブリーフィング時に手渡すことにしている。

(6) シミュレータ試験の実施 ブリーフィングが終わると、試験を実施する。必要な機体運動等のデータはペン書きレコーダ、XY レコーダ、磁気テープレコーダ等に記録される。記録データ数は試験目的によって異なるが、通常 32 チャンネル位である。試験は十分な慣熟飛行を行なった後、開始する。試験を始めると、パイロットから直接、その時点、時点で有益な意見がでるので、これを筆記もしくはテープ・レコーダに採取、整理し、試験終了後、パイロットが評価表に評価および意見を記入した後に、これらの疑問点を質しておくことが望ましい。試験はあらかじめ決められたスケジュールに従い、また必要があれば試験中にパラメータの変更を行ないながら試験を実施していく。

(7) シミュレータ試験結果、評価の記入 1 人のテスト・パイロットの試験が終わると、評価、意見を評価表に記入してもらう。これらの試験結果については、試験の実施中、テスト・パイロット間で情報交換を行なうことを禁止する。一般に情報交換が行なわれると、試験を実施していくにつれて、地位、階級の高い人の意見に近づく傾向があり、先入観、予断が入りやすい。また、試作機と利害関係のあるパイロットはどうしても評価がきびしくなったり、逆に甘くなったりし勝ちであるが、情報交換を禁止することによって、この傾向は防止できる。

(8) 結果のまとめ 情報交換の禁止は、テスト・パイロットに非常に高い精神的負担を与えるので、できるだけ早く、結果のまとめを行ない、その負担から解放すべきである点も忘れてはならない。結果のまとめの検討の後、必要があれば、再度の試験を行なうこともある。これは意見が分かれる結果がでた場合に行なう。

4.3 シミュレータ試験の検討段階 この試験段階では、主として以下に示すような検討を行なう。

(1) 結果の全体的なまとめ: 全体的なまとめのほか、記録されたデータより、目視および統計的データ処理を行なう。

(2) 総合検討および実機的设计への反映: 結果の総合的検討を行ない、実機的设计への反映を行なう。これについては、次章の終わりに詳述する。

5. シミュレータ試験評価法

シミュレータ試験の結果を、どのような形に表現し、または評価し、設計に反映させるかということは極めて重要なことである。このような評価法として、第3表に示すように分類することができる。以下、これらについて述べる。

5.1 パイロット・レイティング パイロットによる飛行性、操縦特性の評価として、10点尺度法による評価法、すなわち、パイロット・レイティング法 (pilot rating system) が広く用いられてきて、最近、

MIL の仕様 (MIL-8785 B) にも一部加えられるに至った^{19), 21)}。

この評価法の最初の提案は、1957年、NACA, Ames Research Center の G. E. COOPER 氏である²²⁾。これを Cooper Rating といい、第4表に示す。この Cooper Rating はパイロットの意見を定性的なものから、定量的なものにした功績は大きい。しかし、(a) normal operation では satisfactory 1, 2, 3 しかなく、emergency operation では, unsatisfactory 4, 5, 6 しかない点等が実状と一致しない。(b) primary mission と着陸の可否などの判定評価基準が Yes, No が重複して不明確であること等が評価を困難にしている。そのため、Cornell Aeronautical Laboratory の HARPER 氏は第5表に示すような簡化した評価尺度を提案した²⁰⁾。

我々も、初期のシミュレータ試験において、Cooper Rating を用いていたが、この評価法は、この評価法の訓練を十分受けたテスト・パイロットのほか評価を行なうことが困難であった。その理由も前述の理由と

第3表 評価法の種類

第4表 Cooper Rating Scale

	Adjective rating	Numerical rating	Description	Primary mission accomplished	Can be landed
NORMAL OPERATION	Satisfactory	1	Excellent, includes optimum	Yes	Yes
		2	Good, pleasant to fly	Yes	Yes
		3	Satisfactory, but with some mildly unpleasant characteristics	Yes	Yes
EMERGENCY OPERATION	Unsatisfactory	4	Acceptable, but with unplesant characteristics	Yes	Yes
		5	Unacceptable for normal operation	Doubtful	Yes
		6	Acceptable for emergency condition only*	Doubtful	Yes
NO OPERATION	Unacceptable	7	Unacceptable even for emergency condition*	No	Doubtful
		8	Unacceptable-Dangerous	No	No
		9	Unacceptable-Uncontrollable	No	No
	Unprintable	10	"Motions possibly violent enough to prevent pilot escape"		

* Failure of stability augmenter

第5表 CAL Rating Scale

Category	Adjective description within category	Numerical rating
Acceptable and satisfactory	Excellent	1
	Good	2
	Fair	3
Acceptable but unsatisfactory	Fair	4
	Poor	5
	Bad	6
Unacceptable	Bad*	7
	Very bad**	8
	Dangerous†	9
Unflyable	Unflyable	10

* Requires major portion of pilot's attention

** Controllable only with a minimum of cockpit duties

† Aircraft just controllable with complete attention

第6表 日本式 Pilot Rating Scale

Category	Adjective decision within category	Pilot Rating Scale
優	上	1
	中	2
	下	
良	上	3
	中	
	下	4
可	上	
	中	5
	下	6
不可		7
		8
		9
		10

同様の理由である。そのため、第6表に示すような日本式評価法を併用し、評価における困難さを乗り切ったこともある²³⁾。この評価法について10点尺度法との対応を同表中に示す。

その後、COOPER 氏と HARPER 氏が協力して、さらに改良を加えたものを第7表に示す²⁰⁾。この評価法は、表に示されるとおり、パイロットの評価の手順を示し、評価がしやすくなったことに特徴がある。この評価法は中型ジェット輸送機の詳細設計以降の試験にはすべて使用され、評価法の経験の少ないパイロットでも、比較的容易に評価できることが実証されている。

5.2 パイロットの意見 pilot comments (パイロットの意見) は、パイロットによる操縦の難易、問題点を具体的な意見として得られるもので、設計に直接反映できる点で、特に有用である。指摘された問題点を証明するための試験を行なうことによって、詳細設計時の設計点を決めたり、設計変更内容を決めることができる^{8), 9), 23)}。

一般に、設計を行なっている段階では、pilot rating よりも、pilot comment の方がより重要であり、総合評価の段階で、pilot rating が用いられる。

5.3 パイロットの心身反応による評価 各種の飛行ミッション時に、飛行ミッションの難かしさに応じて、パイロットの心身反応として心拍数、呼吸数等に変化が生じる。これらの心身反応は、定性的に pilot rating と強い相関がある²⁴⁾。このような評価法は、この評価法単独で評価に使用することは困難である、他の評価法のバックアップとして利用することが考えられる。

5.4 記録データの目視 データの目視は一番簡単

第7表 Harper and Cooper Pilot Rating Scale

な方法である割に、価値があり、離着陸時等の特殊なタスクに対して、直接評価を行なうことができる場合が多いだけでなく一般にも、pilot commentをバックアップするものとして有用である。すなわち、パイロットの意見はこうだが、ほんとうにそうなのかといった疑問に対して、データの目視による検討によって、それを証明することができる。

5.5 記録データの統計的解析 各飛行ミッションごとに、記録データを統計的に解析することによって、設計資料あるいは pilot rating, pilot comment に対するバックアップ・データを得ることができる。この方法は、一般にデータが大量のため、取扱いが面倒なので、解析法およびデータ処理法に工夫を要する点が多い。しかし、情報量としては、記録データの種類、量も豊富であり、今後、これらの情報処理、解析法の工夫によって、より優れた定量的な評価法の開発が望まれる。

5.6 評価から設計への反映 前節までに述べた評価法により、設計の確認を含めて、設計へ反映する必要がある。以下に、評価データ例とともに、その概要について述べる。

(1) **パイロット・レイティング** 空力係数をパラメータとして、パイロット・レイティングによる評価を行なった例を第6図(a)に示す⁶⁾。このような方法によって、最適設計を行なうことができる。その際、真の最適値はいくつかの空力微係数が関係し、また、飛行条件によっても異なるので、実験計画にあたっては、OR的手法もとり入れて能率よく行なうことが重要である。

広い速度範囲にわたって試験を行なった例を第6図(b)に示す⁷⁾。この試験の場合のパラメータは突風の大きさ、ASE(自動安定装置)のON、OFFおよび片発動機(critical engine)の停止である。このような試験によって、仕様の合格および運用性能がわかる。

パイロット・レイティングの主要な価値は機体の飛行性に対する総合判断であると云える。

(2) **パイロットの意見** パイロットの意見は、初期設計時に、設計上の問題点は何であるかということ、最初に示すものとして有用である。これによって、どのような設計上のパラメータに注目すれば良いか、また、何を改良すれば、さらにより良い航空機が得られるか、といったことが判る。

一般に安定性に関する意見と、操縦性に関する意見に大別でき、特に操縦性に強く影響する操縦系統は直接パイロットが手足で操作するので、操縦系統の最適設計への意見が強い。この関連の試験で、MILの規格は日本人の体格に必ずしも適合しないこともあることが判った。

パイロットの意見の例を第8表に示す⁸⁾。

(3) **データ解析** 飛行運動、飛行経路の統計的解析により、直接、運航規定、仕様などの可否を決める算定資料を得ることができるほか、操縦系統の操作量、操縦量の統計的解析より、安定操縦性の評価のバックアップ・データおよび機力操縦の場合の油圧装置の容量等の設計資料を得ることができる。

一般的にみて、シミュレータ試験は、まえがきに述べたように、設計中に機体形状の最終的決定ができる唯一の方法としての価値がもっとも高い。

6. ま と め

現代までの工学は、どちらかと云えば、事象を細分化し、microscopicに物を眺めて発展してきた。しかし、近年に至って、個々の学問体系が確立してくるとともに、また、時代の要請もあって、事象をもっと大きく眺める傾向が生まれてきた。すなわち、個々の事象を1つの“システム”としてとらえ、“システム”として合理的な発展をうながそうとする動きである。

航空工学におけるその例の一つが、航空機を“航空

(a) 空力パラメータ変化に伴う飛行性の変化
(b) 広い速度範囲にわたっての飛行性の変化
第6図 パイロット・レイティングによる評価例

第8表 パイロットの意見の例

項 目	試 験 No.	飛 行 状 態 1	飛 行 状 態 2	飛 行 状 態 3
1	直線飛行時の安定性	横が“フラフラ”する	大きく変化しないが(1と比較して)良い方に行っている	良くなった“フラフラ”しない
2	直線飛行時の操縦性	δw 小舵によるロール軸まわりの制御ができない	同 上	同 上
3	旋回飛行時の操縦性	同 上	同 上	同 上
4	旋回飛行時の三舵の効き重さの BALANCE	エレベータが重い	エレベータが重い	エレベータを少し軽くする必要有り
5	定常横滑り時の操縦性	良くない C_{ng} が強い	少し変化した(1と比較して)	良 好
6	定常横滑り後操縦論及びペダルを FREE にした場合の安定性	まあまあ	YAW が少ない 方向安定大	良 好
7	$\delta w, S_r$ のステップ応答	悪い, δ_r の初期に ϕ が無い	S_r が少ない	良 好
8	縦の安定性 (長周期, 短周期のダンピング)	悪い, 問題有り	1と比較して少し良い	良 好
9	縦の操縦性	悪い, 動きが大き過ぎる	同 上	良 好
10	総合評価 (パイロット・レイティング)	良くない 良の下 (4)~(5)	良の中 (3)~(3.5)	良の上又は優の下 (2)~(3)

機—パイロット系”といった新しいシステムとしてとらえる考え方の出現であり, その代表的な手法が, フライト・シミュレータ試験であると考えられる。このフライト・シミュレータは, 電子計算機技術の発達を契機として出現したものであるが, 航空工学におけるシステム工学といった役割を果たしつつある。

現在, シミュレーション技術, 試験技術も相当確立されてきているが, 飛行試験技術, 空気力学およびエレクトロニク技術との強い連携を行ない, さらに, より良い航空機を設計するための資料 (例, 文献21) および設計法を確立する必要がある。

終わりに, 研究開発用のフライト・シミュレータとしては, ground simulator 以外に in flight simulator など各種のもの²⁵⁾が利用されているほか, 宇宙開発にも盛んに利用されていることを付記したい²⁶⁾。また, 紙数の関係で, シミュレーションの方法, 試験の具体的なデータ等を割愛せざるを得なかった。これらについては本特集号の別の執筆者によって, 十分カバーして頂けるものと思う。

参 考 文 献

- 1) Jacob EICHLER: Designing by Simulator, Space/Aeronautics, (1969/9), pp. 64-72.
- 2) J.B. SINACORI: Validation of Ground Based Simulation, J. American Helicopter Society, (1970/7), pp. 10-21.
- 3) P.G. DILLENSCHNEIDER and A.W. SHAW: Use of Ground Based Simulator in Aircraft Design, J. Aircraft, Vol. 8, No. 2, (1971/2), pp. 113-119.

- 4) 宮島克行: 欧米のフライト・シミュレータ, 日本航空宇宙学会誌, 第19巻, 第212号, 昭和46年9月, pp. 40-47.
- 5) 松浦ほか: 汎用飛行シミュレータ設備の計画および特性, 航空宇宙技術研究所報告, TR-70, (1965/1).
- 6) 堀川, 森ほか: 昇降舵の操舵力特性に関するシミュレータ解析, 航空宇宙技術研究所資料, TM-78, (1966/3).
- 7) 樋口, 堀川, 森ほか: STOL 飛行艇のフライト・シミュレーション試験, 航空宇宙技術研究所資料, TM-86, (1966/8).
- 8) 堀川, 森ほか: 中型輸送機のフライト・シミュレーション試験 (1) 安定操縦性の検討, 航空宇宙技術研究所資料, TM-201, (1971/4).
- 9) 堀川, 森, 渡辺: 中型輸送機のフライト・シミュレーション試験 (II) 離着陸特性の検討, 航空宇宙技術研究所資料, TM-215, (1972/2).
- 10) 機体1部, 計測部, 原動機部: 可動アイアン・バードの構造および機能, 航空宇宙技術研究所資料, TM-71, (1965/12).
- 11) 村上ほか: 操縦桿レート信号によるアイアン・バード制御の安定効果とパイロットのモデルについて, 航空宇宙技術研究所資料, TM-118, (1967/9).
- 12) 西村ほか: 可動アイアン・バードによる姿勢制御の実験, 航空宇宙技術研究所資料, TM-159, (1969/5).
- 13) 武田, 甲斐: フライイング・テスト・ベッドの高度制御 (I), 航空宇宙技術研究所報告, TR-114, (1966/8).
- 14) 武田, 堀川, 小川ほか: 航技研フライイング・テスト・ベッドの姿勢制御方式の検討, 航空宇宙技術研究所報告, TR-120, (1966/11).
- 15) 樋口ほか: VTOL 機操縦研究設備, 航空宇宙技術研究所報告, TR-169, (1968/12).
- 16) 堀川, 甲斐: フライイング・テスト・ベッドの高度制御システムの検討 (II) シミュレーションによる二, 三の問題点の検討, 航空宇宙技術研究所報告, TM-200, (1970/6).

- 17) 堀川ほか: 自動着陸研究用テスト・リグについて, 航空宇宙技術研究所資料, TM-248, (1973/11).
- 18) 小川, 堀川ほか: 自動着陸用多重サーボ機構について, 航空宇宙技術研究所資料, TM-250, (1973/11).
- 19) Military Specification: Flying Qualities of Piloted Airplanes, MIL-F-8785 B (ASG), (1969/8).
- 20) George E. COOPER and Robert P. Harper, Jr.: The Use of Pilot Rating in the Evaluation of Aircraft Handling Qualities, NASA TN D-5153, (1969/4).
- 21) C. R. CHALK and R. K. WILSON: Airplane Flying Qualities Specification Revision, J. Aircraft, Vol. 6, No. 3, (1969/5-6), pp. 232-239, etc.
- 22) G. E. COOPER: Understanding and Interpreting Pilot Opinion, Aeron. Eng. Rev., Vol. 16, No. 3, (1957/3), pp. 47-51, 56.
- 23) 堀川: シミュレーション試験について, 第6回風洞研究会議資料, (1971/6).
- 24) 三好ほか: パイロットの心理負担に関する研究(1) 操縦時の脈と呼吸の変化, 航空宇宙技術研究所報告, TR-105, (1966/4).
- 25) 堀川: フライト・シミュレータについて, 電子通信学会, 宇宙・航空エレクトロニクス研究会資料, SANE 74-9, (1974/6), pp. 27-40.
- 26) 堀川: 事例研究(2) 航空機・宇宙船, 日科技連システム・人間工学シンポジウム報文集, (1970/11), pp. 97-114.

STOL 飛行艇の開発におけるシミュレータの利用について*

菅 原 治

1. ま え が き

STOL 飛行艇の開発が行なわれたのは, 今から10年余りも前のことである。動きの少ない戦後日本の航空技術にとってもこの歳月は決して短いとは言えない。それは同じころ航空宇宙技術研究所に設備された汎用 flight simulator が更新の時期に来ていることによっても明らかである。それ故当時の昔話を書いたところで何かの役に立つとは思えない。にもかかわらずここに拙文をつづらねばならないのは, この飛行艇が良かれ悪しかれ普通の飛行機とは少し違っており, そのため simulator との縁が深かったと目されるからであろう。この見方は当たっている所もありそうでない所もある。読者の期待には到底添うべくもないが, 本稿の前半では STOL 飛行艇の安定操縦性に関し設計の段階で取り上げた問題ないしは取り上げるべきであった問題となるだけ飛行試験の結果に即して述べる。筆者は simulator や simulation を専攻する者ではないのでそれらに供する題材の側から説明する方が好都合であるしまたこうすれば simulator が果たし得たはずの役割の輪郭を示すことになる。また後半ではこの輪郭のごく一部を埋めるにとどまった10年前の simulation について述べ若干の反省を付け加える。

2. STOL 機の安定操縦性

STOL 飛行艇と simulation の係わりは文献1)の

筆者が1959年に David Taylor Model Basin を訪れたとき, その風洞試験担当者が“高揚力の実現はさほど困難でない。しかしこれが問題だ”と言って pitching moment 曲線を指さしたときから始まる。そのあとこちらで行なわれた試験でも縦および横の静安定微係数 C_{ma} と C_{la} はかなり著しい不安定側の値になった。もっともこのことは別段驚くには当たらないとも言える。そもそも有限翼幅で π を越え 2π に近いような揚力係数が得られることが異常なので, 空気力および moment の無次元化手続きが当を失していることを示している。いわゆる powered lift は機体が前進しなくても働き, 揚力係数は無限大になる。この不都合を避けるために動圧を自由流でなく例えばプロペラ後流中での方法もあるが一般には通用しにくい。現に VTOL 機ではたとえ主翼がついていても離着時の揚力係数を問う者はいない。けれども STOL 機の場合は, 上記のようないかがわしさはありながら便利さの点でこれにかなうものがないため, 風洞試験のデータ整理や性能計算に在来の係数を使用する。これが高揚力の宣伝に好都合な反面, 人騒がせな安定微係数を招来することになったのである。

もちろん運動方程式の空力係数を有次元で書けば無用の誤解は生じない。さらに特性行列式を展開すれば M_α だけが縦安定を支配するのでないことが判る。 C_{ma} は風試成績の図上で陽に現われてよく目立つが同時に moment の推力による変化を見落としてはならぬ。プロペラ後流の偏向によって得られる揚力増分は重心の後方に働くから $\partial C_m / \partial T$ は負, M_α は正で4次方程式の定数項が負になるのを妨げる。あたかも bobweight や downspring が重心後退時の静安定不

* 昭和49年11月29日飛行機シンポジウムにおいて講演, 昭和49年5月16日原稿受理 Use of Flight Simulator in the Design Phase of an STOL Flying Boat

** 新明和工業株式会社 Osamu SUGAHARA