

ISSN 0452-2982
UDC 629.7.072:
621.397.332

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-467

視界模擬における無限遠表示装置の試作

川原弘靖

1982年8月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. はじめに	1
2. 航技研における各種視界模擬方式	1
2.1 スライド・プロジェクタ方式	1
2.2 23インチモニタ方式	2
2.3 テレビーム方式	3
2.4 アイド・ホール方式	4
3. 無限遠表示装置の概念	5
3.1 基本構成	5
3.2 組 立	5
4. 無限遠表示装置の基礎実験	6
4.1 実験目的	6
4.2 実験装置	6
4.3 実験方法	6
4.4 評価パイロット	7
4.5 基礎実験装置に対する事前検討	7
4.6 実験結果および考察	13
5. 無限遠表示装置の試作	13
5.1 設 計	14
5.2 製 作	18
6. 試作無限遠表示装置の評価	21
7. あとがき	22
参考文献	22
付録 1. 無限遠表示装置の原理とその特長	23
付録 2. テレビーム, アイドホールの概要	25

視界模擬における無限遠表示装置の試作*

川原 弘 靖**

1. はじめに

航技研汎用飛行シミュレータ設備¹⁾は昭和38年に設置以来、我が国で計画設計されたYS-11(中型旅客機)、XC-1(中型ジェット輸送機)、PS-1(哨戒用飛行艇)、US-1(救難用飛行艇)、VSA(可変特性研究機)、低騒音STOL実験機等の開発に使用されて来た。

本装置のうち、人間工学研究用可動模擬操縦席装置は大別して

- 1) 操縦席本体
- 2) モーション駆動部
- 3) 視界模擬装置

から構成されるが、製作当初視界模擬装置は¹⁾はスライド・プロジェクタ方式を採用していたため空中における角運動(ピッチ、ロール、ヨー)のみを模擬する視界に過ぎなかった。

一般に航空機の設計開発又は改修等で必要とされる飛行シミュレーション試験においては、離着陸時の飛行性・操縦性の評価が中心となる。従って外部視界としては滑走路を含む空港周辺の視界が必要である。そこで昭和41年度に閉ループTV/地形模型方式の視界模擬装置²⁾を整備し、飛行シミュレータ設備として臨場感の高い前方外部視界が呈示できる

視界模擬装置を備えたものとし、離着陸時の有視界飛行の模擬を可能とした。

しかしながら、視界映像の投写方法については、次章で述べるようにいくつかの変遷を経て改良を試みたが、いずれも現実感の十分な視界が得られず、先に述べた各種シミュレーション試験の実施担当者並びにテスト・パイロットから、「より鮮明で、明るく、より本物らしく、より臨場感があり、より視野の広い視界」への改善希望が常に出されていた。

そこで、最近の視界模擬装置、とりわけCGI(Computer Generated Image)による映像呈示に多く採用されている無限遠表示方式に着目し、この方式による視界投写装置を試作した。

以下に当研究所における視界模擬方式の技術的変遷と新たに試作した無限遠表示装置の設計、製作及び評価の内容について報告する。

2. 航技研における各種視界模擬方式

2.1 スライド・プロジェクタ方式

(昭和38年~41年)

スライド・プロジェクタによる視界投写の方法には、文献1)で紹介しているように、大別して

- 1) 反射方式
- 2) 透過方式

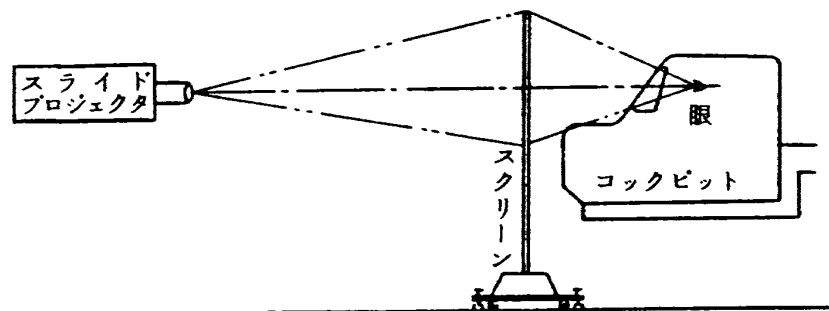


図1 透過式スクリーン方式

* 昭和57年7月13日受付

** 計測部

の2種の方式がある。

航技研の汎用飛行シミュレータ設備で当初に整備したのは後者の透過方式であり、その構成を図1に示す。

投写される映像は簡単な風景（雲海など）とか滑走路パターン（線画）などで、その視界情報は航空機の角運動情報に限られた。従って模擬の範囲も空中における飛行に限られ、シミュレーション試験で最も重要な離着陸試験においては使用できなかった。

かつ使用した透過スクリーンの材質上の欠点から、スクリーン中央部に光源スポット（中央部が部分的に明るい）が目立って、画質を全体的に低下させて

いた。

なお本方式におけるパイロットの目の位置とスクリーンまでの距離は図2に示す如く1.5mであり、視野角は水平115°、垂直35°である。

画面の明るさは画面中心部で数LUXである。^{脚注1)}

2.2 23インチモニタ方式（昭和41年～48年）

VTOL（垂直離着陸）実験機の有視界離着陸飛行を模擬するために、昭和41年度に標準方式のITVカメラと空港周辺の地形模型による模擬視界装置²⁾を整備し、

1) 23インチモニタ方式

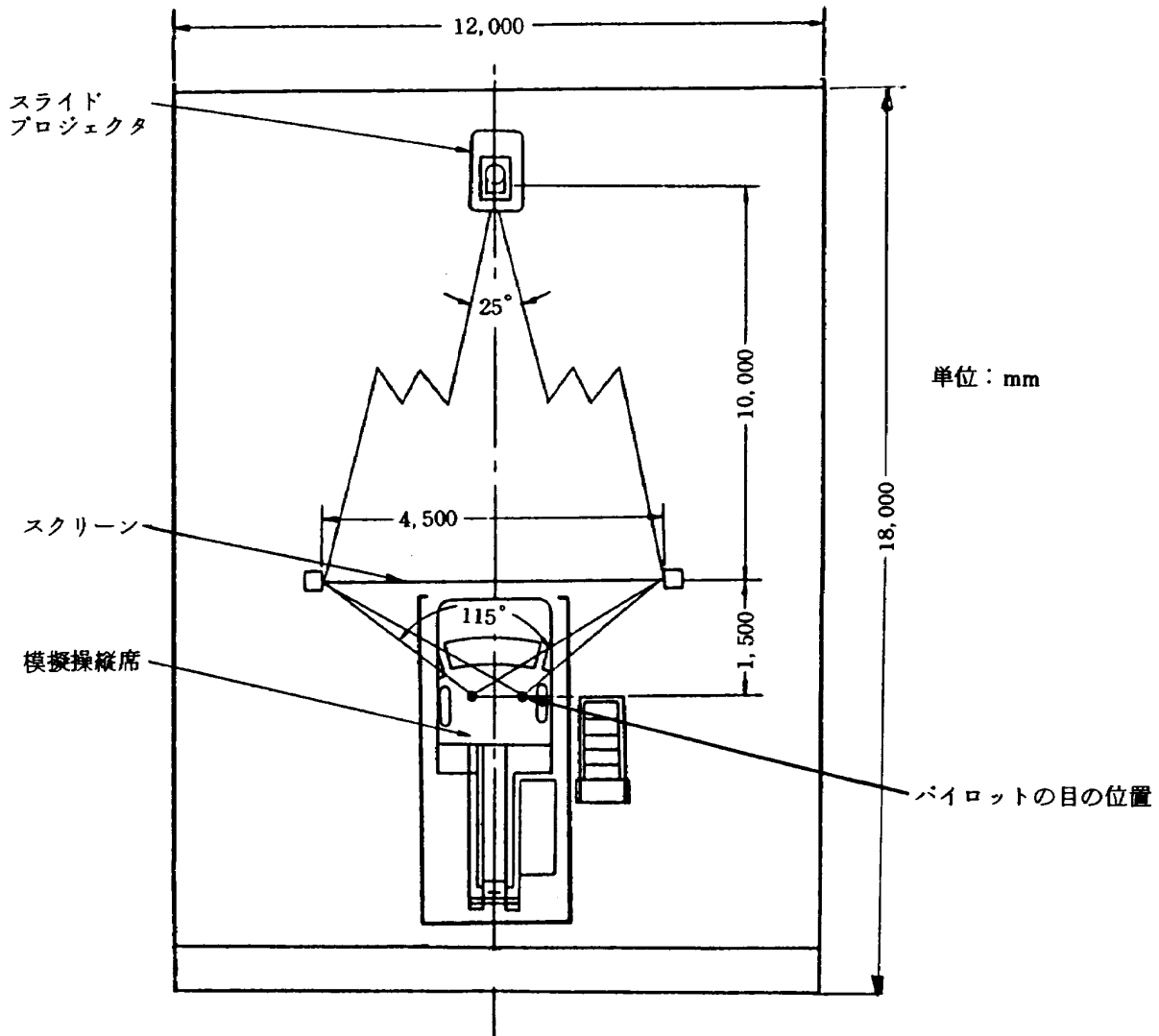


図2 模擬視界配置図

脚注1 以後明るさについていくつかの単位が出て来るので、それらの関係を明らかにすると、⁸⁾

1 FL = 10.76 LUX (FL: Foot-Lambert)

1 FL = 1 FC (FC: Foot-Candle)

となり、一般的には面の照度はLUX、テレビジョンの画面などの輝度をFLで表わす。

2) テレビーム方式

の2通りの投写方法を導入した。

ここではまず、23インチモニター方式について説明する。模擬操縦席と23インチモニターの外観を図3に示す。

この方式は映像の明るさ、鮮明さにおいて優れているが、パイロットの目の位置からモニターまでの距離が0.8～1.0mの至近距離となるため、目に悪影響を及ぼす恐れ(通常モニターサイズの5倍の距離が最適な視距離：23インチでは約3m)があるのと、のぞき窓から視界を見ている感じがあり、実際の航空機のウィンドから見ている外界視界のように見えない(現実感に欠ける)という欠点がある。

この点、第二の方式であるテレビ映像拡大投写方式による視界表示の方が優れているといえる。

23インチモニターを用いた場合のパイロット視野角は水平 26.5° 、垂直 20° であり、画面の明るさは約50FLである。

ここで、カメラの写角と視野角との関係について考察する。

撮像カメラの写角を測定すると図4に示すように水平 20.2° 、垂直 17° であり、写角と視野角が1対1に対応することが最適な条件といえる。この条件を満たさない場合、地物の大きさ、高度、距離感覚等に誤差が発生することになる。本システムの場合、図3のモニター位置を現在より後方へ約50cmずらすことによりこの関係を保つことができる。従ってモニターの視距離との関係は改善できるが、小窓を覗いている感覚は拭えず、さらに現実感から遠ざかることになるので広視野と適当な視距離を備えた視界表示装置が必須となった。

2.3 テレビーム方式(昭和41年～48年)

ビデオ映像を拡大投写する簡易な装置としてシュミット・レンズを使用したテレビーム(商品名)がある。



図3 23インチモニターとVTOL操縦席

テレビームについての原理，性能は付録 2.1 に示した通りであり，テレビームを用いた投写方式は図 5 に示した通りである。反射スクリーンをパイロット前方約 4m の位置に設置し，操縦席上部後方位置より投写する。

映像は操縦席の窓枠越しに見えるため，モニタ方式よりは臨場感の高いものとなった。

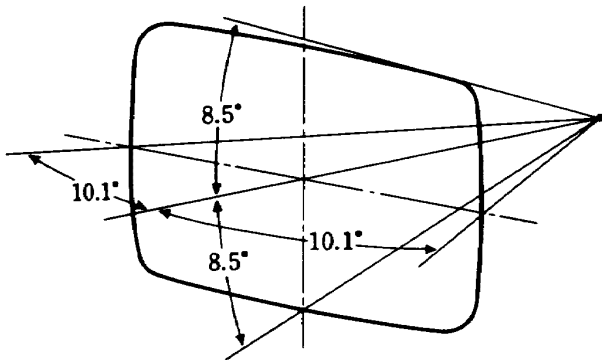


図 4 カメラモニター系の写角

しかし，映像の明るさ，鮮明度はモニタ方式に比べ格段に低下した。

テレビーム方式の視野は水平 33°，垂直 25°となったが，本方式でも先の写角と投写された視界の視野角との関係は保たれていない。

画面の明るさは 3～4 FL であり，この明るさは通常の室内では暗すぎ，室内を暗くしてシミュレーション試験を行なわねばならぬ不便さがあった。

2.4 アイド・ホール方式（昭和 49 年～ 54 年）

テレビーム方式では，パイロットと映像スクリーンまでの距離が近いことと，映像の鮮明度が不十分のため，ビデオ映像拡大投写装置としてアイド・ホール装置を導入した。アイド・ホールの原理，性能については付録 2.2 に示す。アイド・ホールを用いた投写方式を図 6 に示す。本方式の採用により画面サイズは縦 6 m × 横 8 m とテレビームに比べて面積

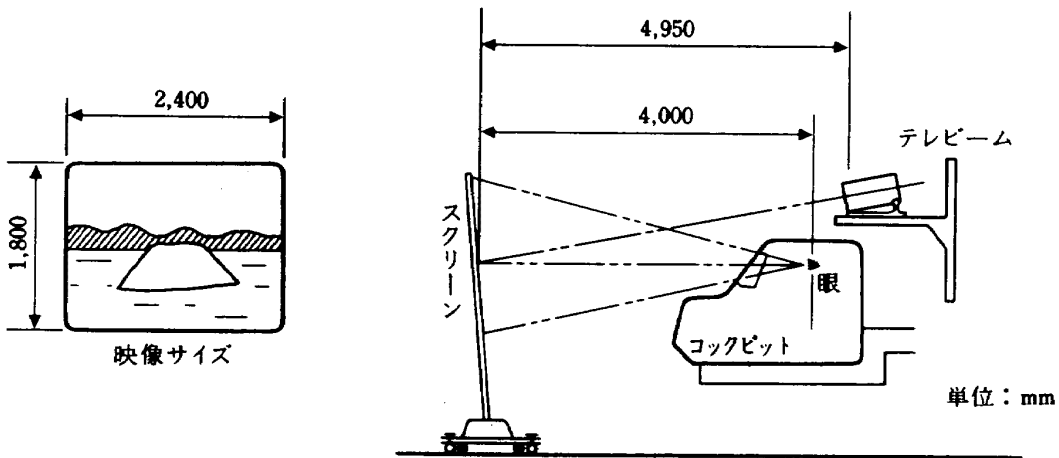


図 5 テレビームによる投写方式と映像サイズ

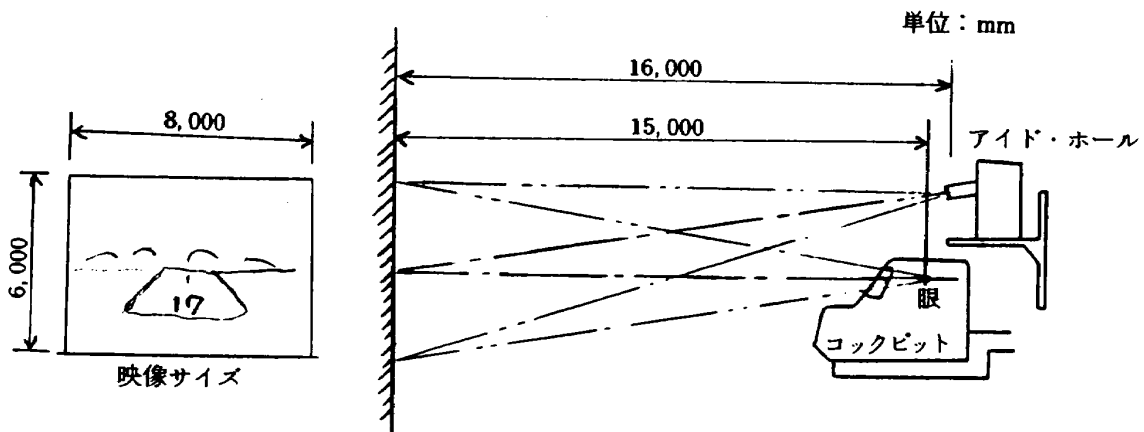


図 6 アイド・ホールによる投写方式と映像サイズ

にして11倍もの広さを得ることができ、投写スクリーン(壁面)もパイロットから15m程度離すことができ、より現実感を高めることができた。

しかし、依然として鮮明度、明るさ等の問題を解決するには至らなかったが、これら問題を残しているものの従来の投写方式に比べて現実感の大きい視界の模擬を実現することができ、その後各種シミュレーション試験に有効に使用されてきた。

アイド・ホールによる視野界は水平 30° 、垂直 22.6° 、映像の明るさは0.5LUXであり、画質・明るさ共に現実の視界に較べて不十分ではあったが、この時点の表示技術レベルでは満足する外なかった。

3. 無限遠表示装置の概念

第2章で述べたように視界投写方式は逐次改善されてはきたが、それでもシミュレーション試験実施にあたっては十分満足できる視界とはいえず、前述の様に試験実施担当者ならびに試験パイロットから強く改善希望が常に出されていたが、それを実現できる無限遠表示装置(インフィニティ・ディスプレイ)の試作が可能となった。

無限遠表示の方法には凸レンズを用いた方法と凹面鏡を用いた方法がある。これらの原理、特徴については付録1で説明する。

本試作では、CGI(計算機作画)方式で広く採用されている後者の凹面鏡を用いた方式を採用した。以下にその概要を説明する。

3.1 基本構成(付録1参照)

(1) 表示画面

無限遠表示装置を使用すればスライド、映画、CRT(ブラウン管)などの静止画、動画などいかなる映像でも原理的には拡大投写が可能である。最近のシミュレータ用視界として多く採用されているのはCRTの映像が殆んどである。

CRTは一般に約25~26インチの大型サイズのものが採用されている。

(2) 凹面鏡

日常我々が目にする凹面鏡の例としては卓上式拡大手鏡がある。本試作で使用したのは曲率半径1,276mmの大凹面鏡で、大きさは横1,016mm、縦635mmのものを使用することができた。

(3) ビーム・スプリッタ

付図5に示すように凹面鏡の前面に物体(映像)を置いた場合、手前からその虚像を観測しようとしてもその物体に遮えぎられ、虚像を見ることはできない。

そこでビーム・スプリッタ(ハーフ・ミラー)を間に置いて、間接的に映像を凹面鏡の前に置くようにした。

3.2 組立

ウィンドシールド前方の視距離約1,276mmの位置に凹面鏡の皿部を設置した。

CRTモニタの映像はビーム・スプリッタ側が天、

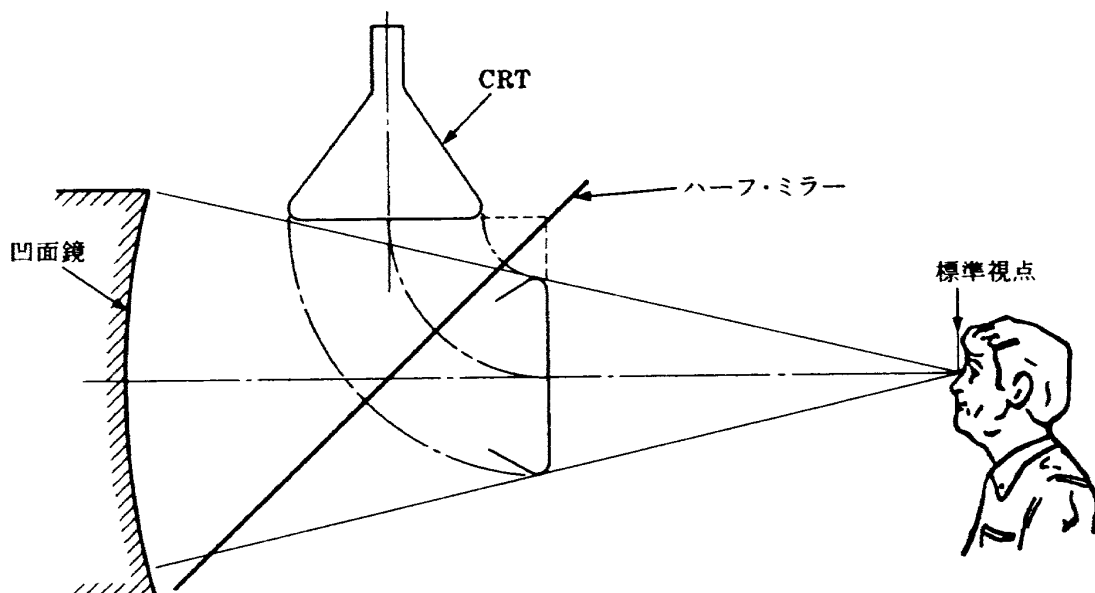


図7 パイロット、CRT面、凹面鏡との関係

凹面鏡側が地となる。

図 7 に表示装置とパイロットとの位置関係を示す。

4. 無限遠表示装置の基礎実験

今日、フライト・シミュレータの視界表示装置として、凹面鏡方式による無限遠表示装置が広く用いられるようになった。⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾

当研究所においても汎用飛行シミュレータ設備の模擬視界投写部に、本方式による無限遠表示装置を導入することにより、画質ならびに飛行・操縦に関する模擬の忠実度を向上させることが可能となった。以下に試作装置による基礎実験の概要を述べる。

4.1 実験目的

閉ループ TV 映像による無限遠表示の試みは、2 章で述べた投写等による方式と根本的に異なった視界投写方式であるため多くの未知の視感覚上の技術課題を含んでいる。これらの問題を解明するために：

- 1) 無限遠表示方式は観察者に視覚的にどのような感じを与えるかを明らかにする。
- 2) 従来の投写方式との優劣を比較する。
- 3) シミュレータの視界表示装置としての実用性等を実験的に評価検討をする。

の 3 つを実験の目的とした。

4.2 実験装置

第 3 章において無限遠表示装置の基本構成品について述べた。ここでは本実験に使用した装置について説明する。(基本構成については図 7, 8 参照)

(1) CRT モニタ

標準型 NTSC 方式の 17 インチモノクロームモニタを使用した。モニタ面上の標準的な明るさは 50 FL であるが、ビーム・スプリッタを通して画面を見るため、映像の明るさはほぼ 1/4 の約 12 FL となる。次に示す凹面鏡サイズからみれば、17 インチモニタより 12 インチ位のサイズのモニタの方が適しているが、本実験では 17 型を使用した。

(2) 凹面鏡

半径 800mm、断面直径 800mm の皿状ミラーを凹面鏡として使用した。CRT モニタの映像面を凹面鏡半径の 1/2 の距離の位置(焦点)にセットする。

標準アイ・ポイント(視点)は凹面鏡の球心の位置となる。

凹面鏡の材質、表面処理、反射率、精度は表 1 に示す通りである。

(3) ビーム・スプリッタ

凹面鏡の前に直接物体を置くと正立虚像を視ることができないため、ビーム・スプリッタ(ハーフ・ミラー)を間に置いて間接的に映像を置くようにする。ビーム・スプリッタのサイズは 600mm(たて) × 600mm(よこ) × 10(厚さ)である。

ビーム・スプリッタの材質、表面処理、透過率は表 2 に示す通りである。

組上がった基礎実験装置の外観を図 8 に示す。

4.3 実験方法

2.4 で説明したアイド・ホールによる視界を用いたシミュレーション試験実施時に、同じ映像(滑走路ならびに空港周辺)を 4.2 で述べた無限遠表示方式の基礎実験装置にも投写した。

図 9 に本実験で用いた映像系統図を示す。

視界評価の手順として、シミュレータ搭乗パイロットがアイド・ホール視界の評価を行い、基礎実験装置の評価は待機中のパイロットが行うこととし、

表 1 基礎実験用凹面鏡の諸特性

項目	特性
材質	青板ガラス
表面処理	アルミ・コーティング(全反射)
反射率	90 (%)
表面研磨精度	100φニュートンリング 2~3本

表 2 基礎実験用ビーム・スプリッタの諸特性

項目	特性
材質	青板ガラス
表面処理	アルミ・ハーフ・コーティング SiO ₂ 保護膜
透過率/反射率	45/45 (%)

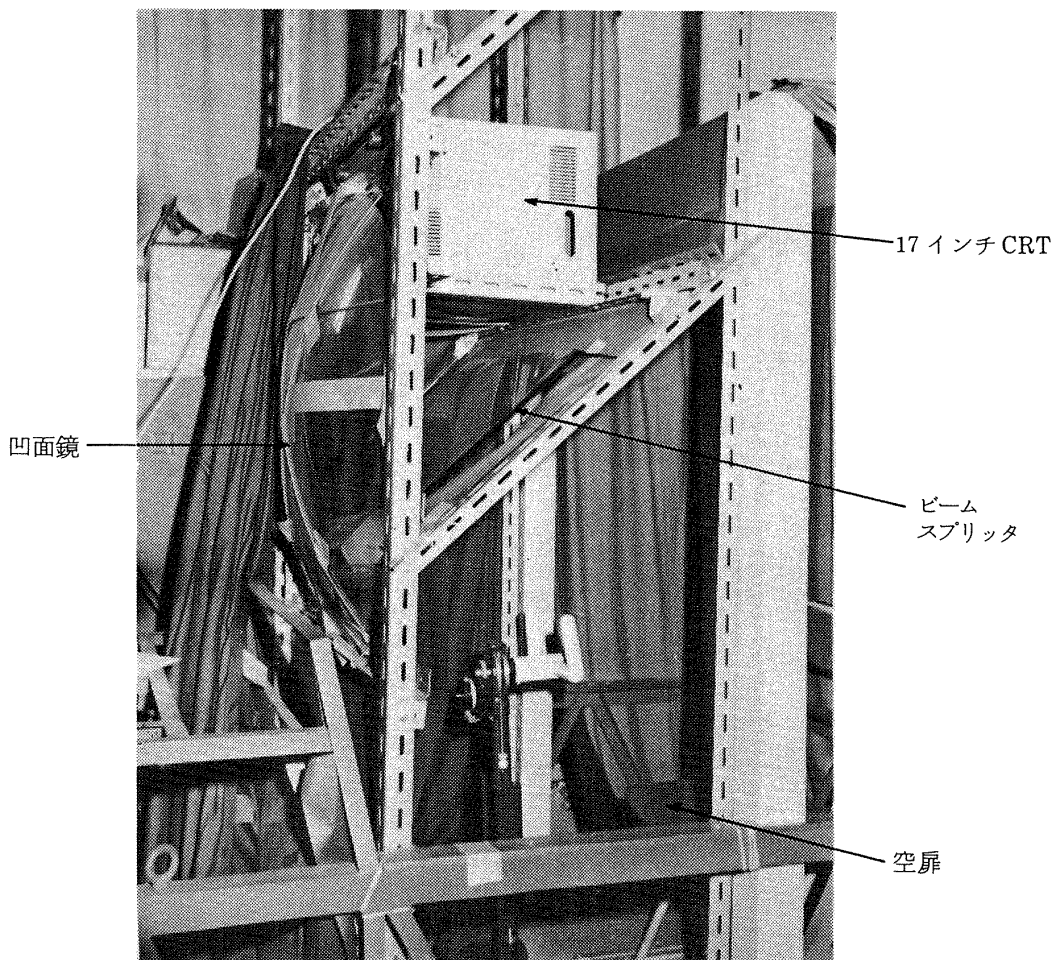


図8 基礎実験装置外観図

4.4で示す4名のテストパイロットが交互にそれぞれの視界の評価を行った。

評価方法は評定尺度法によった。表3に示す評価表の項目毎に評価パイロットの感覚スケール上の最高点を10点として評定し、同時に評価パイロットは関連するコメントを記述した。

4.4 評価パイロット

基礎実験乃至試作装置完成時における評価パイロットのフライト・シミュレータおよび視界装置使用に関する経験等を表4に示す。

評価パイロット全員が航技研におけるシミュレーション試験の経験者であり、その中1名は航技研フライト・シミュレータ設備の歴代の視界表示システムを経験したパイロットである。

しかし無限遠表示装置を経験したパイロットは2名のみであった。尚、その映像は計算機画像による夜景映像であって、本実験装置の如き地形模型によ

るビデオ映像に関する経験は初めてであった。

4.5 基礎実験装置に対する事前検討

4.5.1 視野角と映像ひずみについて

本実験装置に使用した17インチモニタの画面サイズを図10に示す矩形として、実験装置の視野角を図12に従って計算すると水平 47° 、垂直 36° となる。この視野角は図11に示す通り、視点を1点(単眼)として計算した数値で複眼での計算では水平視野が約 1° 増す。

以下視野角には単眼での計算値を適用する。

次に、ここで得られた視野角と実際の航空機の視野角との関係を図12に示す。ここで引用した航空機は現在航技研が開発を進めている低騒音STOL実験機の機長席前方風防での視野角を示している。この図から実験装置の視野角はほぼ実機の視野角を満足しているといえる。

しかしながら、本実験装置では比較的小曲率の凹

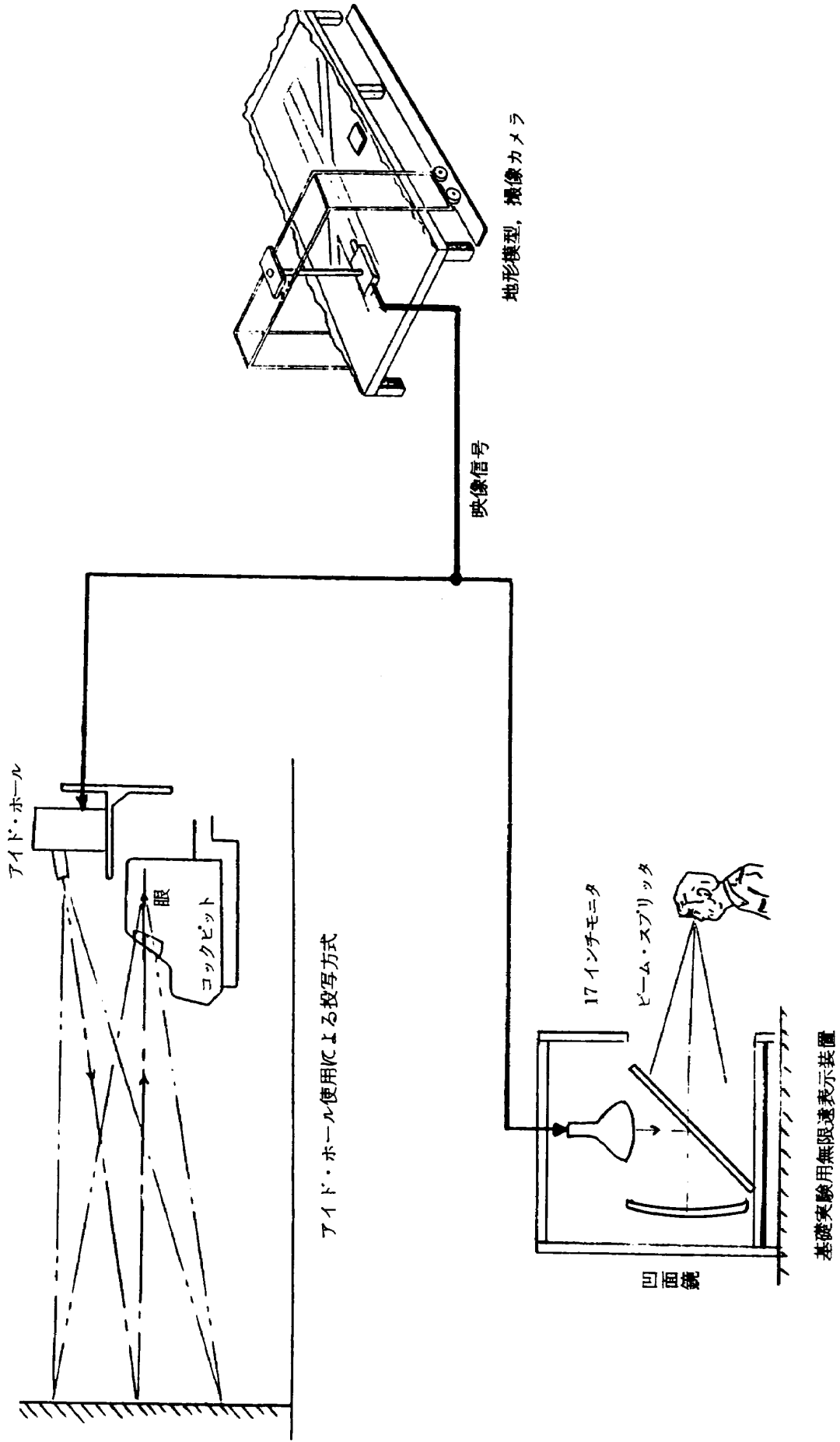


図 9 基礎実験映像系統図

表3 無限遠表示装置 評価表

1. パイロット名 _____ フライト・シミュレータの経験 有 無
 ・シミュレータの機種 _____ ・VISUAL は 有 無 どのような _____
 ・MOTION は 有 無 自由度は _____
 ・過去に無限遠表示による視界装置の経験は 有 無 ・何処で _____
 ・どのような _____
2. アイド・ホールと無限遠表示装置について、以下の項目について10点満点で評価して下さい。
 また、御気付の点をコメント欄に御記入下さい。

項 目	アイドホール	無限遠表示装置	コ メ ン ト
1 画像の明るさ			
2 " 鮮明さ			
3 " 広がり具合			
4 " 遠近感			
5 滑走路までの距離感			
6 " の幅, 長さ			
7 パイロットの頭の位置関係は			前後 ___ 左右 ___ 上下 ___
8 目の疲れ具合は			
9 シミュレータの視界表示装置としては			

3. 無限遠表示装置および視界装置全般について、御意見をお聞かせ下さい。(良い点, 悪い点)

表4 テスト・パイロットのシミュレータ経歴表

パイロット	フライト・シミュレータの経験	Visual system
A	P2V-7, PS-1, KM-2 NAL SIM	投写方式
B	NAL SIM	"
C	C-1, NAL SIM	" INF方式
D	P2V-7, PS-1, KM-2, B747, DC-10, NAL	" "
E	B737, B727, DC-10, C-1, NAL SIM	" "
F	PS-1, NAL SIM	"
G	C-1, T-2, NAL SIM	" INF方式

INF：無限遠表示

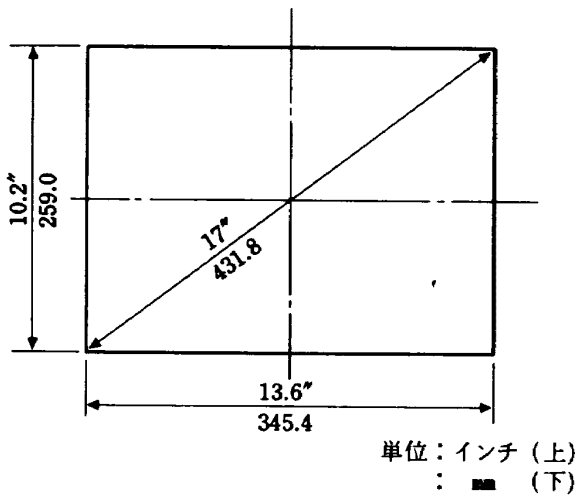


図10 17インチモニタの画面サイズ

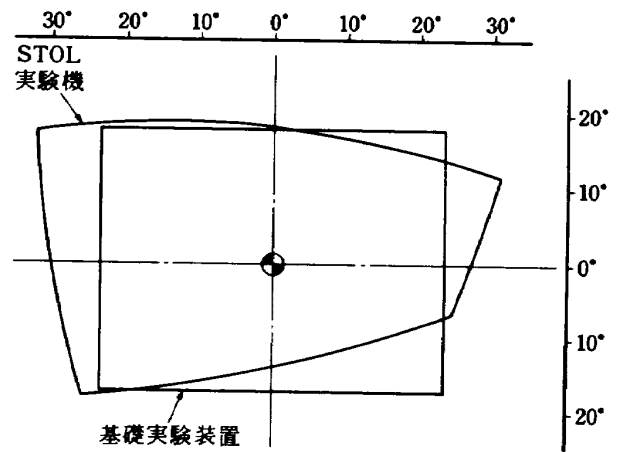


図12 実験装置とSTOL実験機の前方視野角の関係

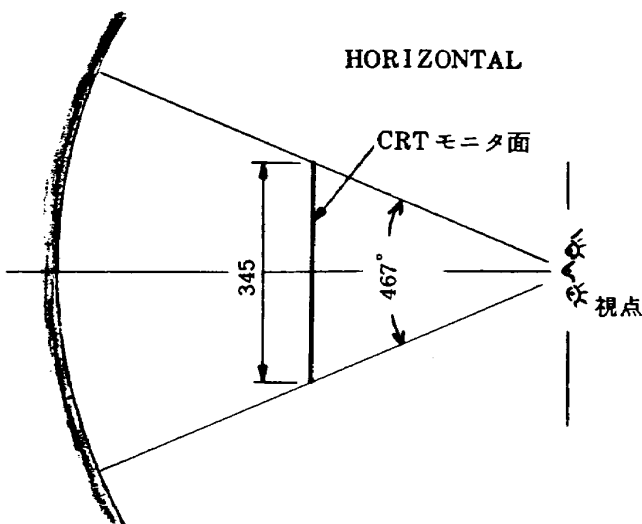
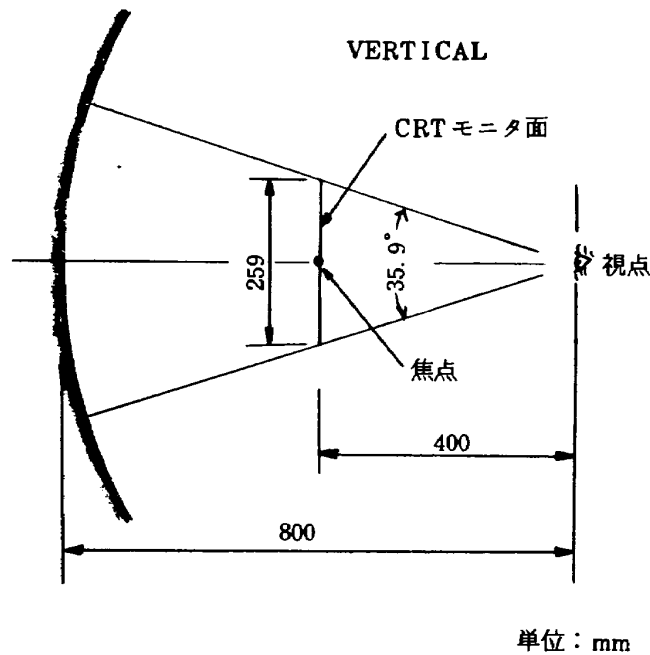


図11 基礎実験装置の視野角(写角)

面鏡に、大画面映像を投写しているため、若干の映像ひずみ等を生ずるのは止むを得ない。これを避けるためには凹面鏡の曲率を投写する画面サイズにマッチングさせることが重要となる。

凹面鏡の曲率と画面の曲率とに差があると図13-aに示すような糸巻形のひずみが発生する。CRT管面を平面と見做した場合、凹面鏡曲率の大きい方が映像ひずみが少なくなる。

従って本方式による無限遠表示装置においては構造上凹面鏡諸元を基準にとると、それに投写される画面サイズが制限されることになる。この関係を図14に従って説明する。

いま凹面鏡の半径をRとするとCRT面、ビーム・スプリッタは図の関係となる。標準視点を0に固定し、画面を上下均等とした場合、画面の大きさはa~a'を見込むサイズとなる。

次に許容される視点可動範囲(次節で説明)を1~2の範囲とした場合、それぞれA~A'の画面サイズを見込むことができる。

ここでR=1,276mmとした場合、D_{MAX}=28.5インチとなる。実際には28.5インチのCRTは現存しないため、26インチのサイズが多く使用されている。

本実験装置では凹面鏡半径が800mmである。これに比して17インチのモニタは相対的に大きすぎるため、周辺歪みの発生は黙認せざるを得なかった。次に映像歪みと視覚的な感覚について考察する。

図13-bのように格子様線画が、糸巻型又は樽

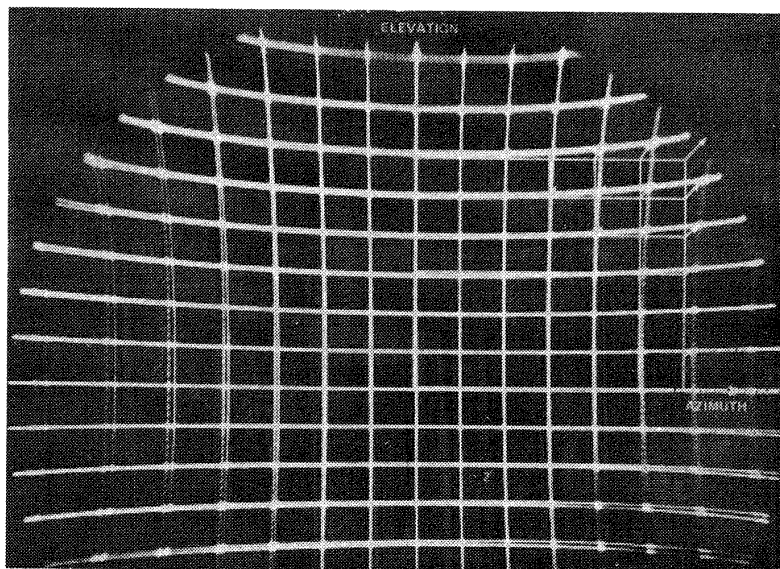
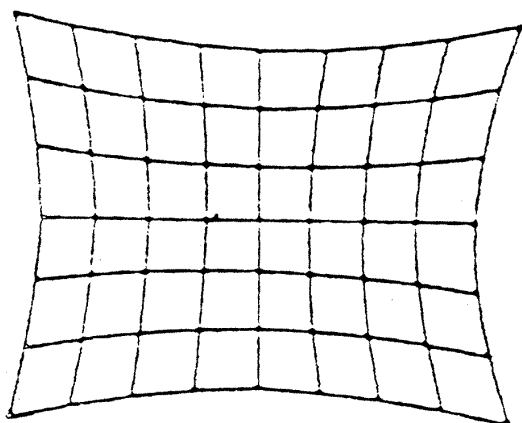
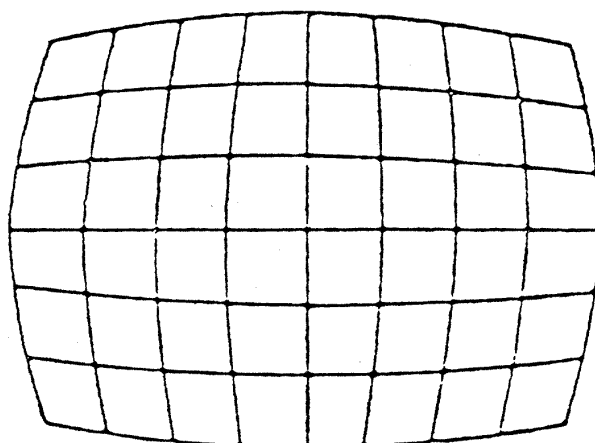


図 13 - a 映像歪みの例（糸巻型歪み）



糸巻型



樽型

図 13 - b 糸巻型，樽型歪み

型に歪んだ場合，樽型歪みの映像は中央が膨らんで見え，糸巻型歪みの場合は凹んで見えることが多い。

先に述べた通り，本基礎実験装置の場合，糸巻型歪みは避けられず，仮に中央部が凹んで見えるとした場合，格子様線画から滑走路のような風景に置き替えると，あたかも遠近感（奥行き）を感じることができ，副次的に有利な効果が期待できる。

4.5.2 視点（頭）の可動範囲について

凹面鏡の曲率が小さくなればなる程，視点の可動範囲が狭くなる。厳密には視点は凹面鏡中心（球心）の一点のみであるが，凹面鏡が平面に近く（曲率が大きく）なるほど，視点の可動範囲を事実上ある程

度広くとることが可能となる。

通常，訓練用シミュレータに使用されている表示装置の凹面鏡半径は約 50 インチ（1,270mm）のものが多く用いられており⁴⁾⁵⁾⁶⁾映像のひずみ等を考慮して許容している視点の可動範囲は基準視点を中心とする 300mm 球の範囲としている。これから単純比例によって外挿すると約 200mm（800/1,270）の範囲が許容される可視範囲となる。しかし，先にも述べたように映像の周辺ひずみが通常より大きいことを考慮すれば可視範囲はより狭くなることが予想できる。

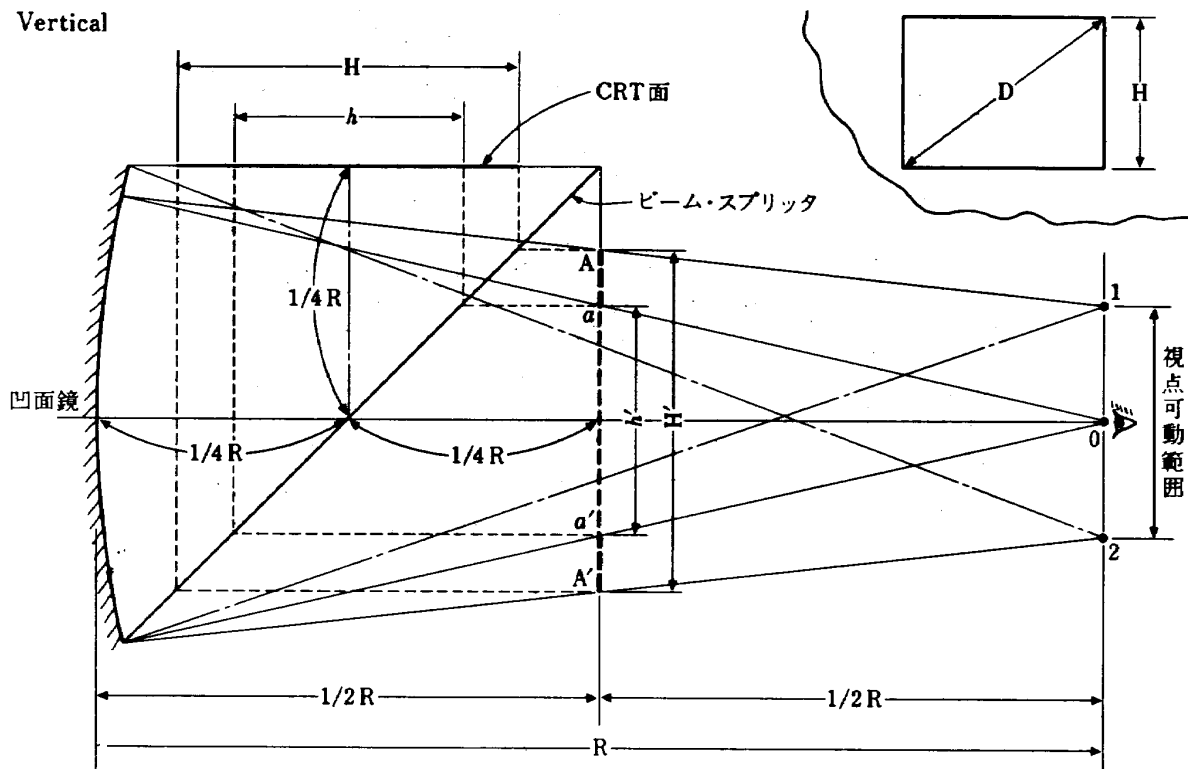


図 14 凹面鏡サイズと CRT の大きさとの関係

4.5.3 走査線の影響について

日常生活でテレビジョンを見る場合、その視距離は CRT の大きさの 5 倍が適当といわれている。例えば 17 インチのテレビジョンの場合、約 2m 離れて見るのが良い。この最適視距離は走査線の影響を考慮した結果の値である。つまり至近距離で見ると走査線の間隔が粗く、非常に見難く目が疲れることは経験的に知られている通りである。

通常明るい白い線と黒線との縞模様を弁別する最小の視角は $1'$ ($1/60^\circ$) 以下とされている。⁸⁾

標準方式のテレビジョンの有効走査線（画面に現われている走査線）は 485 本程度であり、上記の最適視距離で走査線の間隔を計算すれば $0.85'$ となり走査線の影響を十分避けていることが分かる。

次に本実験装置の垂直視野角は 36° であるので、走査線の間隔は $4.48'$ ($360/485$ 本) となり弁別閾を 4.5 倍も越えており、明らかに走査線の粗さが目につき映像の見難さと目の疲労が大きくなることは十分予想できる所である。

4.5.4 映像の明るさ、鮮明度について

アイド・ホールのスクリーン上の明るさは 0.5 LUX

程度であるのに対し、本実験装置の輝度はそれよりはるかに明るく 10 FL (予測値) である。また映像のコントラスト (明暗比) および像の鮮明度についても通常のテレビジョンと同等の性能を持っている。

アイド・ホールによる拡大投写映像の鮮明さについて付録 2 の付図 8 に従って説明する。

ビデオ映像は 7 の中の四角い枠の中に描かれ、8 の投写レンズを通して拡大投写される。映像の原寸と拡大寸との比が大きいため鮮明度が劣下することは当然と考えられる。

本実験装置の場合、モニタのフォーカスの影響が鮮明度に直接関係するので、通常の可視状況で焦点ぼけが感じられなければ得られた映像の鮮明度は十分確保されていると見做して良い。

以上、本実験装置について予想されるいくつかの事項について検討したが、従来方式 (アイド・ホール方式) と比較して長所としては：

- 1) 視野が広い
- 2) 映像が明るい
- 3) 映像が鮮明でコントラストが大きい
- 4) 遠近感がある。

5) 無限遠映像のため、遠方実視界の模擬の効果がある。

等を挙げることができ、また短所としては：

- 1) 周辺視野の映像ひずみが大きい
- 2) アイポイントの許容可動範囲が狭い
- 3) 走査線が粗く、映像が見難く疲れ易い

等がある。

上記の短所の3項目はシミュレータ装置の視界投写装置としてはやや不適當と思われる装置ではあるが、本基礎実験装置を使用して行う評価実験の結果はむしろ安全側(装置が改善されれば、より良い評価結果が期待できる。)の評価ということもできるので、これら装置の不備にもかかわらず評価試験の供試体として使用することとした。

4.6 実験結果および考察

基礎実験の評価結果を表5に示す。この結果から分かるように、映像の明るさ、鮮明度、視野の広さ、距離感覚、遠近感等については、平均的に従来方式より高い評価点を得ている。特にランウェイまでの距離、巾、長さ、遠近感のように感覚的な項目につ

いて、このような不完全とも思える実験装置でも従来方式より優れていることが分かった。

しかし、視点可動範囲、目の疲労度については、事前検討の過程で予測した通りの結果となり、さらにパイロットのコメントからも

- 1) 頭(視点)が固定され、操縦に差し支える
- 2) 走査線が目につき、目が疲れる。
- 3) 正常な目の人が眼鏡を使用したような感じがある。

などの指摘があり、さらに本実験装置の段階での総合評価では、アイド・ホール方式の方が僅かに優位な評点を得ている。

従って、試作設計では上述の不具合項目を解決する方策が必要となった。

5. 無限遠表示装置の試作

基礎実験で指摘されたように実用化にあたっては幾つかの改良すべき点がある。それらは

- 1) 曲率の大きい凹面鏡を採用する
……前項1)、3)の改善
- 2) 走査線本数を増す

表5 基礎実験装置採点結果

項 目		A		B		C		D		平 均	
		EID	INF	EID	INF	EID	INF	EID	INF	EID	INF
1	画像の明るさ	5	8	3	5	3	7	5	8	4	7
2	鮮明度	5	4	3	6	1	5	5	4	3.5	4.75
3	広がり具合	5	6	3	4	3	8	5	6	4	6
4	遠近感	5	6	3	4	2	8	5	6	3.75	6
5	ランウェイまでの距離感	5	5	3	3	3	6	5	5	4	4.75
6	の幅、長さ	5	5	3	3	3	7	5	5	4	5
7	パイロットの頭の位置関係は	5	2	3	2	8	2	5	2	5.25	2
8	目の疲労度は	5	3	3	6	7	1	5	2	5	3
9	シミュレータの視界表示装置としては	5	2	3	1.5	2	8	5	3	3.75	3.65

EID：アイド・ホール

INF：基礎実験装置(無限遠表示装置)

：評価点で特に劣った項目

……同、2)の改善

3) 視野角に対応する写角を持ったレンズ系の採用

……光学系と表示系とのミスマッチングの改良

これらの改善によって前述の不具合点を解消し、かつ無限遠表示方式の長所を生かして、実用可能な装置を実現する見通しを得たので以下に述べる試作を行った。

5.1 設計

5.1.1 凹面鏡、ビーム・スプリッタ

本装置の心臓部と言うべき凹面鏡は、本装置試作当時（昭和 54 年）国内では製作されておらず、訓練用シミュレータの CGI 視界表示部に使用されている外国製品のみが入手可能であった。

また、ビーム・スプリッタについては国産が可能であったが、凹面鏡の形状に対しペアとなっているため同時に輸入した。

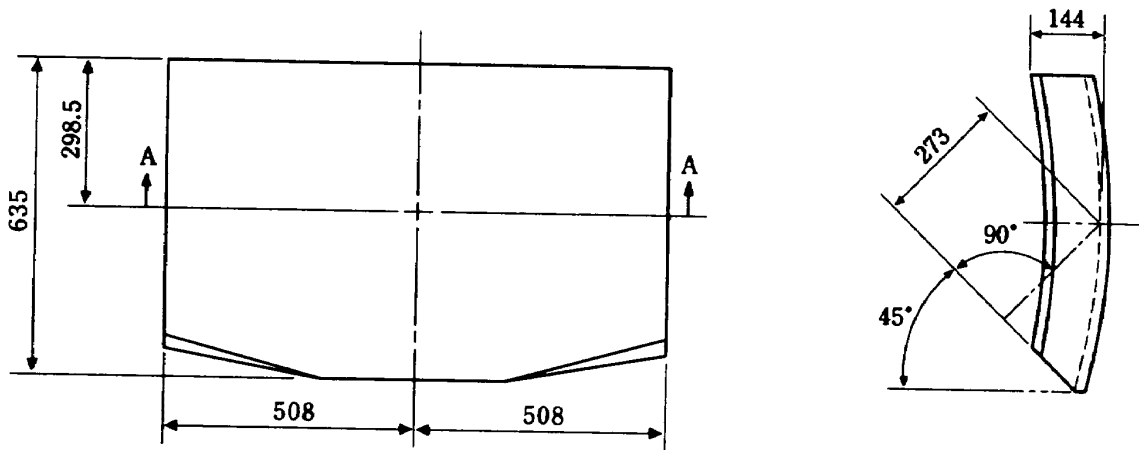
入手した凹面鏡、ビーム・スプリッタの諸要目を表 6.7 にまたそれぞれの外形図を図 15, 16 に示す。

表 6 試作装置用凹面鏡の諸特性

項目	特性
材質	MIL-G-174 FLOAT GLASS
表面処理	アルミ蒸着, $S_i O_2$ 保護膜
反射率	86%以上
表面研磨精度	1"φでニュートンリング7本

表 7 試作装置用ビーム・スプリッタの諸特性

項目	特性
材質	MIL-G-174 FLOAT GLASS
表面処理	アルミ・ハーフ・コーティング $S_i O_2$ 保護膜
透過率/反射率	波長 450 ~ 650nm の 45% 入射光に対し 50 ± 5%



単位：mm

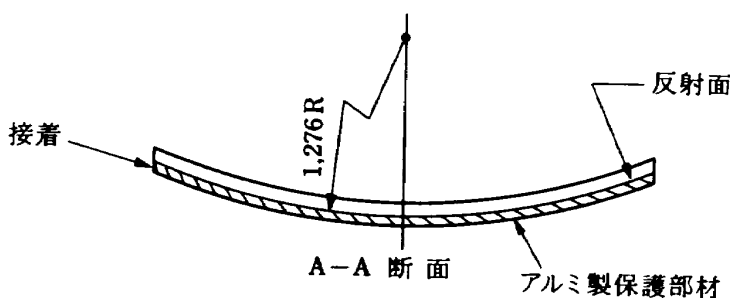


図 15 試作装置凹面鏡外形図

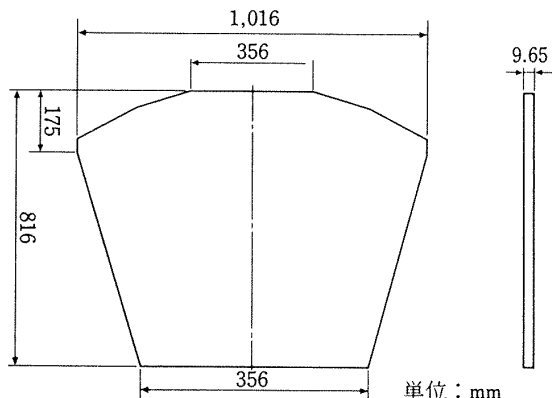


図 16 試作装置用ビーム・スプリッタ外形図

5.1.2 テレビ・モニタの選択と改修

視界の広さ（視野）は凹面鏡のサイズと使用するテレビ・モニタのサイズによって決定される（図11参照）。

凹面鏡サイズを一定としたら、モニタ・サイズが大きい程視野が広がる。輸入する凹面鏡（半径 1,276mm）に適合するモニタは 4.5.1 で述べたように 21～26 インチサイズが適している。

国産の高解像度白黒モニタ（走査線本数：1,000本）で最大サイズは 20 インチであり、それを採用することにした。

このモニタに次項で述べる撮像カメラの電氣的仕様に合わせて、電氣的改修を施した。またモニタ筐体についても次項で述べるディスプレイ・ユニットに取付ける構造に改修を施した。

使用した 20 インチモニタの外観を図 17 に示す。

5.1.3 撮像カメラの選択と改修

20 インチモニタの画面サイズを図 18 に示す。本装置に使用した曲率半径 1,276mm の凹面鏡と 20 インチのモニタを組合わせた場合の視野を図 19 に示す。図から水平視野 35°、垂直視野 27°となり、前述の STOL 実験機の前方向視野との関係は図 20 となる。この視野は基礎実験装置のそれと比較すれば約 3/4 となるが、2 章で述べた視界装置と較べると十分な視野が確保された。

次に走査線の弁別度を 1' として走査線本数を計算すると約 1,600 本となる。これだけの性能を保持した国産 ITV カメラは現在においても存在しない。又モニタにもこれだけの性能を持った国産モニタは存在しない。

そこで市販されている高解像度ならびに高感度 ITV カメラを改修して使用することにした。

一般に走査線本数と毎秒当りの画面数（フレーム・レート）とは相関があり、標準型のそれは 525 本、60 枚（30 枚飛越走査）である。フレーム・レートが減少すれば“チラツキ”が増す。フレーム・レートを 50 枚（ヨーロッパ標準）を目標に入手可能機器を検討した処、フレーム・レート 49 枚、走査線 729 本が可能であることが分かった。

図 21 に撮像カメラの同期信号チャートを示す。同図に従って、フレーム・レートを計算すると、2)

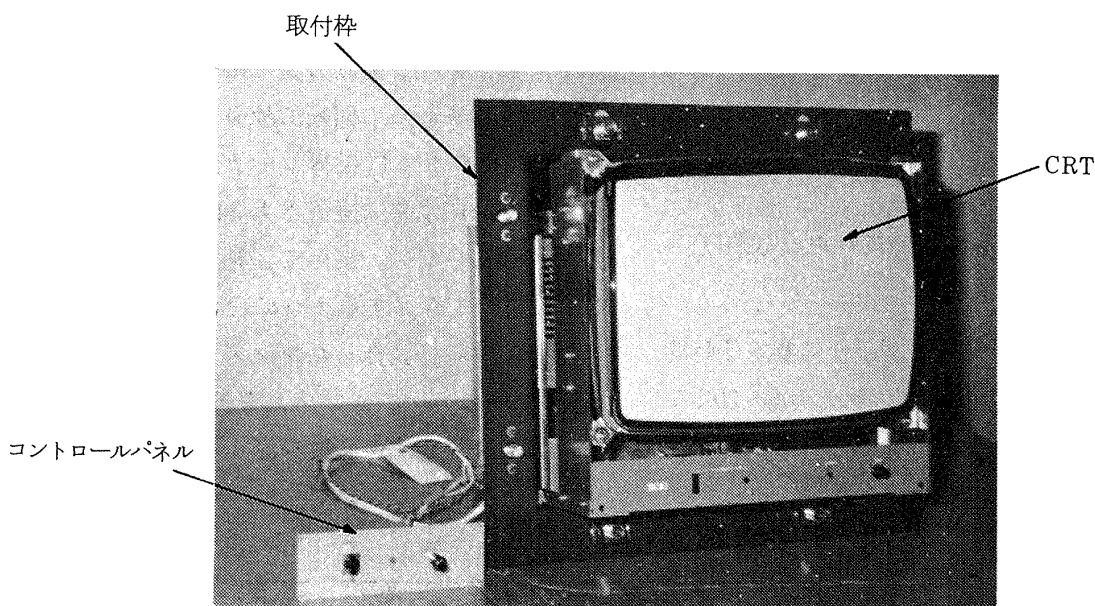


図 17 20 インチモニタ外観図

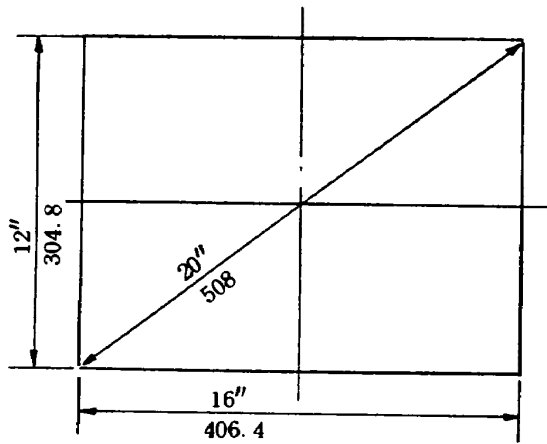


図 18 20 インチモニタの画面サイズ

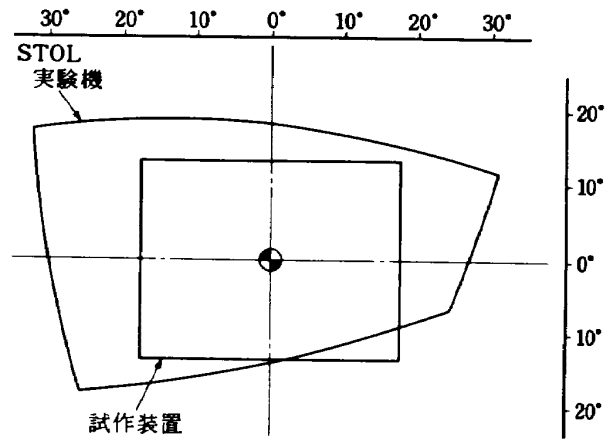
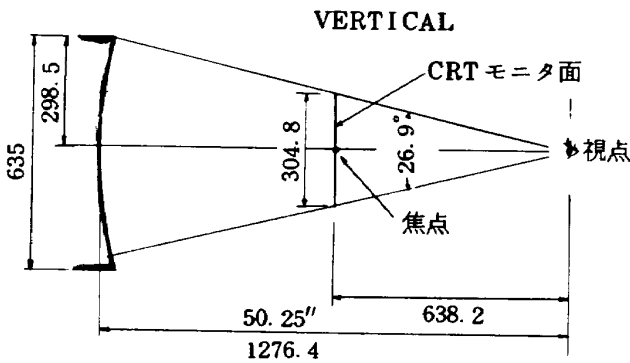


図 20 試作装置と STOL 実験機の前方視野角の関係



単位：mm

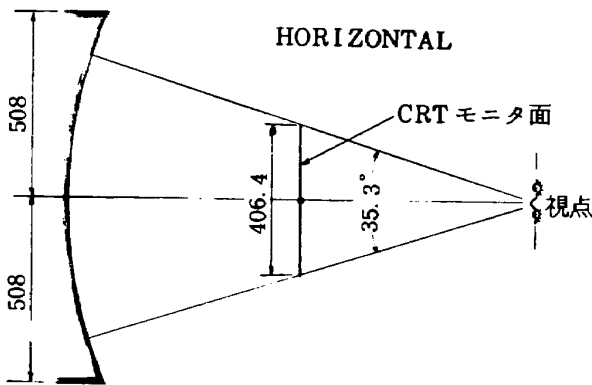


図 19 試作無限遠表示装置の視野角（写角）

の垂直関係の 1 フィールド（1 画面）に要する時間（364.5H）は^{脚注3)}20.375 msec であり、 $1000/20.375 = 49.08$ （24.5 枚飛越走査）となる。

次に 1 画面に表示される走査線本数は、同じく 2) 垂直関係に示す表示時間 d の 344H つまり 344 本で

あり、走査方式が飛越走査であるため 688 本表示されている。

次に走査線間の角度を計算すると $27^\circ/688 \text{ 本} \approx 2.35'$ となる。この間は設計目標の $1'$ よりはるかに大きい。基礎実験装置の場合の約 1/2、現用 CGI システムの走査線 750 ~ 800 本と同等であり、解像力は基礎実験装置のほぼ 2 倍に改善される見込みが得られた。

5.1.4 レンズ、プリズム系の改修

本実験に使用した既設視界撮像部のレンズ・プリズム系の写角は図 4 に示すように水平 20.2° 、垂直 16° であり、視界の実角表示を実現するためには視野写角が狭少であるため、試作装置の持つ視野に合わせて改修する必要が生じた。即ち、試作投写装置は実角表示であるため、撮像部のレンズ系もそれぞれ 35° 、 27° の写角を確保せねばならない。

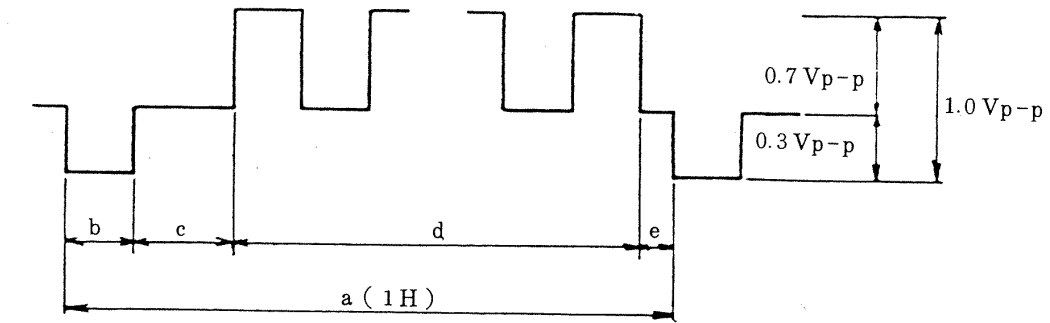
さらに、カメラ駆動方式で機体のバンク角模擬をカメラ光軸まわりの回転で模擬しているため（図 22）、図 23 に示すように視界コーナー部の視界外れを防止するために水平、垂直とも 44° の範囲を撮影可能とせねばならない。従って、レンズ写角 35° 、プリズムは 44° を確保するように設計した。

新たに設計、製作したレンズ・プリズム系の外形図を図 24 に、その光学諸元を表 8 に示す。

なお、映像の焦点深度を深くとるため、撮像カメラを高感度形とし、レンズ絞りを $F: 22$ とした。

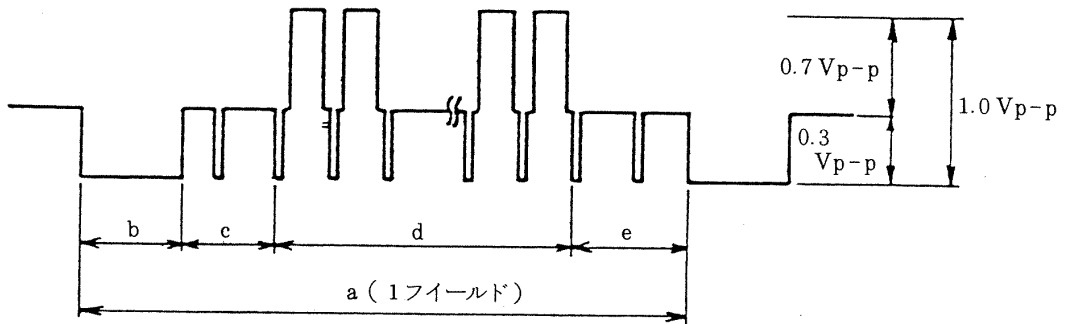
脚注 3) 1 H とは水平同期時間（走査線 1 本を引くのに割当てられた時間）で、全ての同期関係の扱いは、この 1 H が基本単位となっている。

1) 水平関係 (1H)



a. 水平同期信号周期	55.9 μ sec	d. 表示時間	44.9 μ sec
b. 水平同期信号パルス幅	4.0 μ sec	e. フロントポーチ	1.3 μ sec
c. バックポーチ	5.7 μ sec		

2) 垂直関係 (1フィールドを示す)



a. 垂直同期信号周期	364.5 H	d. 表示時間	344 H
b. 垂直同期信号パルス幅	3 H	e. フロントポーチ	3 H
c. バックポーチ	14.5 H		

図 21 撮像カメラおよび 17, 20 インチモニタの同期信号チャート

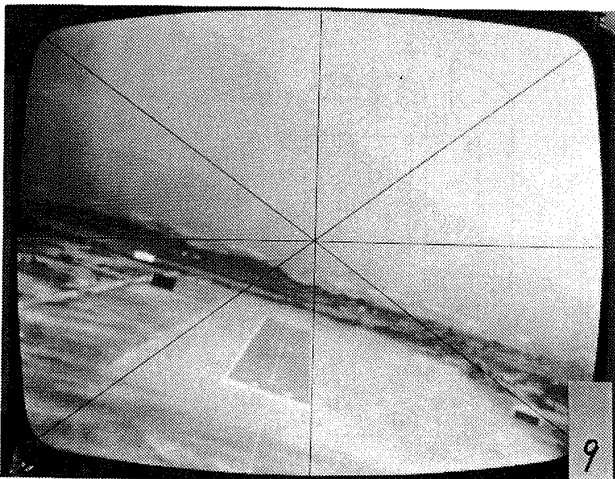


図 22 機体のバンク角と撮像カメラのバンク角

表 8 レンズ特性表

項目	諸元
焦点距離 f	15.6mm
明るさ F	1:22
レンズ構成	4群4枚
プリズム口径	20mm
撮影可能範囲	44°
重量	105g

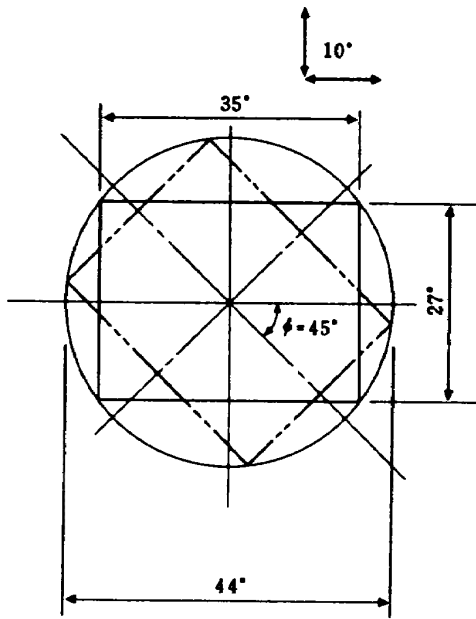


図 23 レンズの必要写角

5.2 製作

5.2.1 ディスプレイ・ユニットの製作

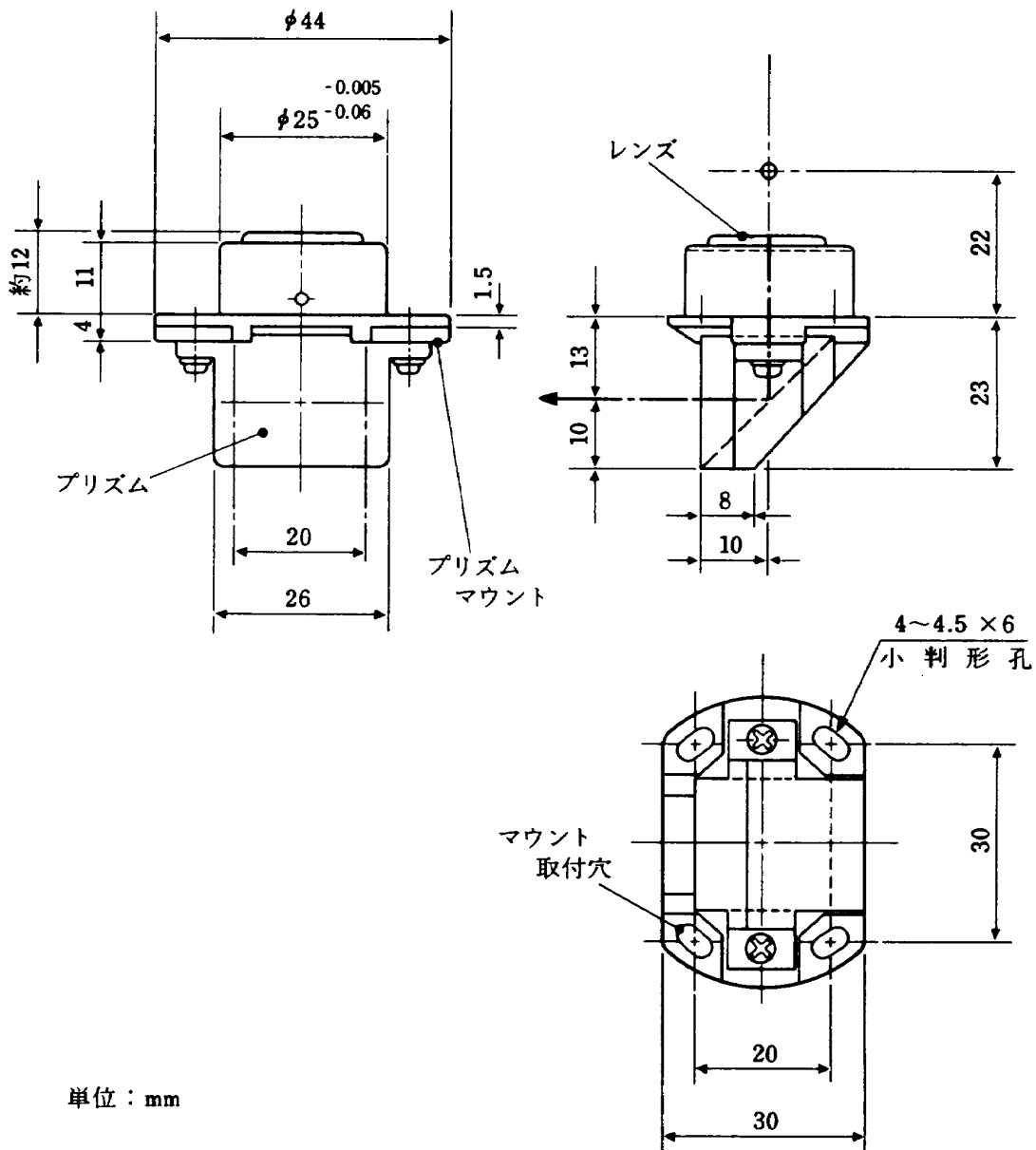
凹面鏡，ビーム・スプリッタ，CRTモニタを図 8 の関係で組上げ，かつ防塵のための覆いを設けた。

全体組立図を図 25 に示す。図中，凹面鏡と CRT の管面の位置を無限遠表示の関係を確認するために調節可能とした。

5.2.2 架台製作

ディスプレイ・ユニットを操縦席前部に設置するために図 26 に示す架台を製作した。架台にはキャスタならびにレベリング・ブロックを設けた。

模擬操縦席に組込んだ表示装置の全景を図 27 に示す。またパイロットの視点で撮影した映像を図 28 に示す。



単位：mm

図 24 プリズム-レンズ寸法図

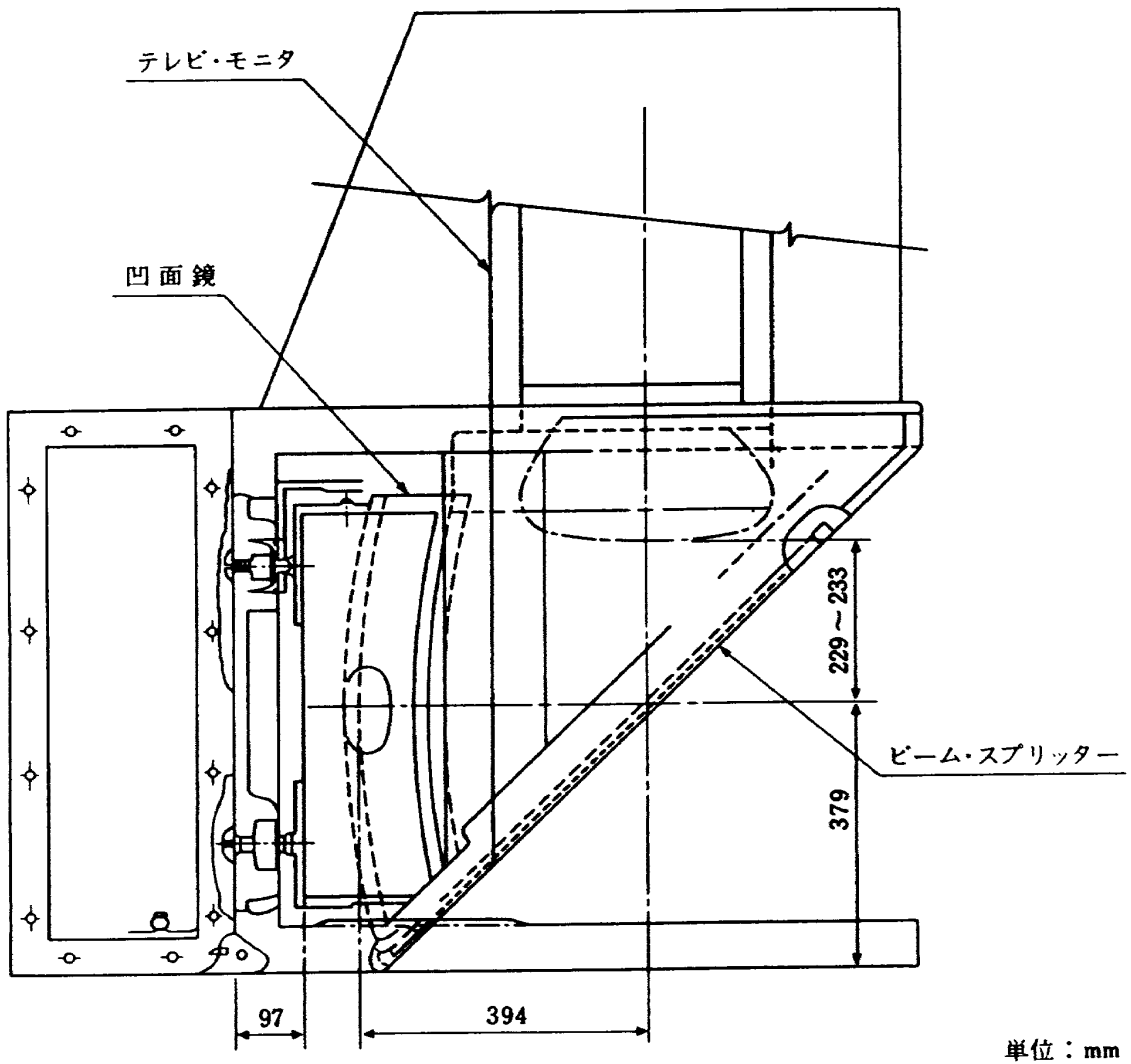


図 25 試作装置全体組上図

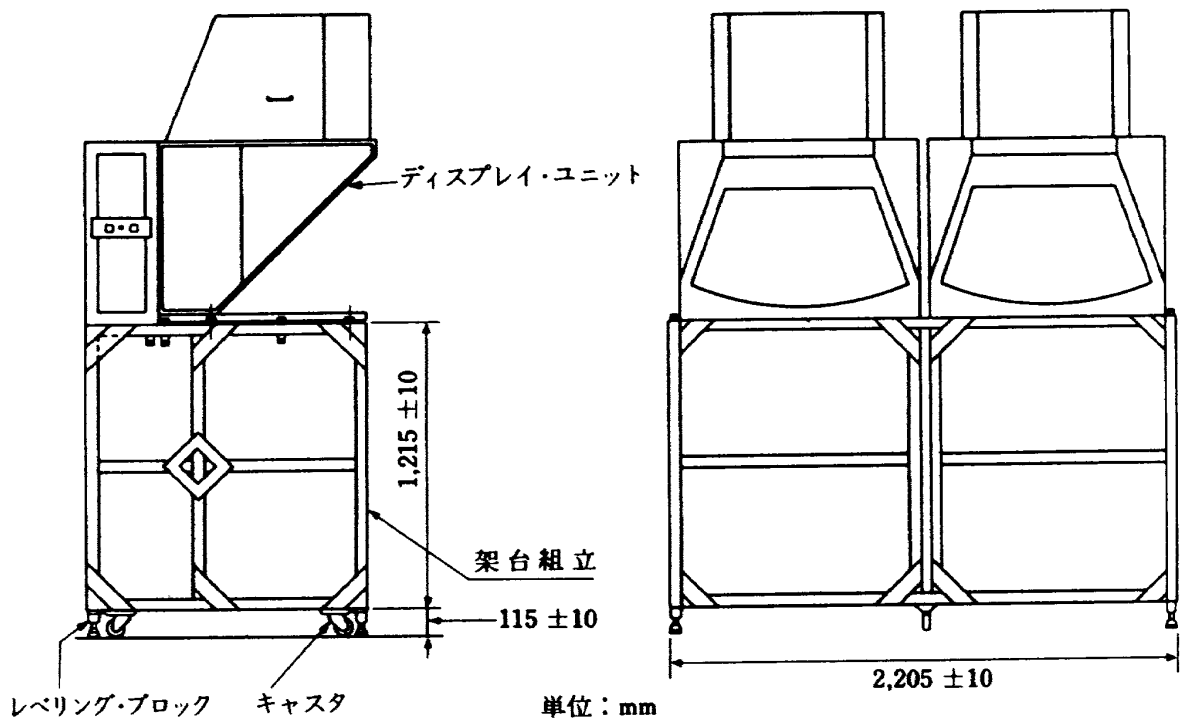


図 26 ディスプレイ・ユニット支持架台

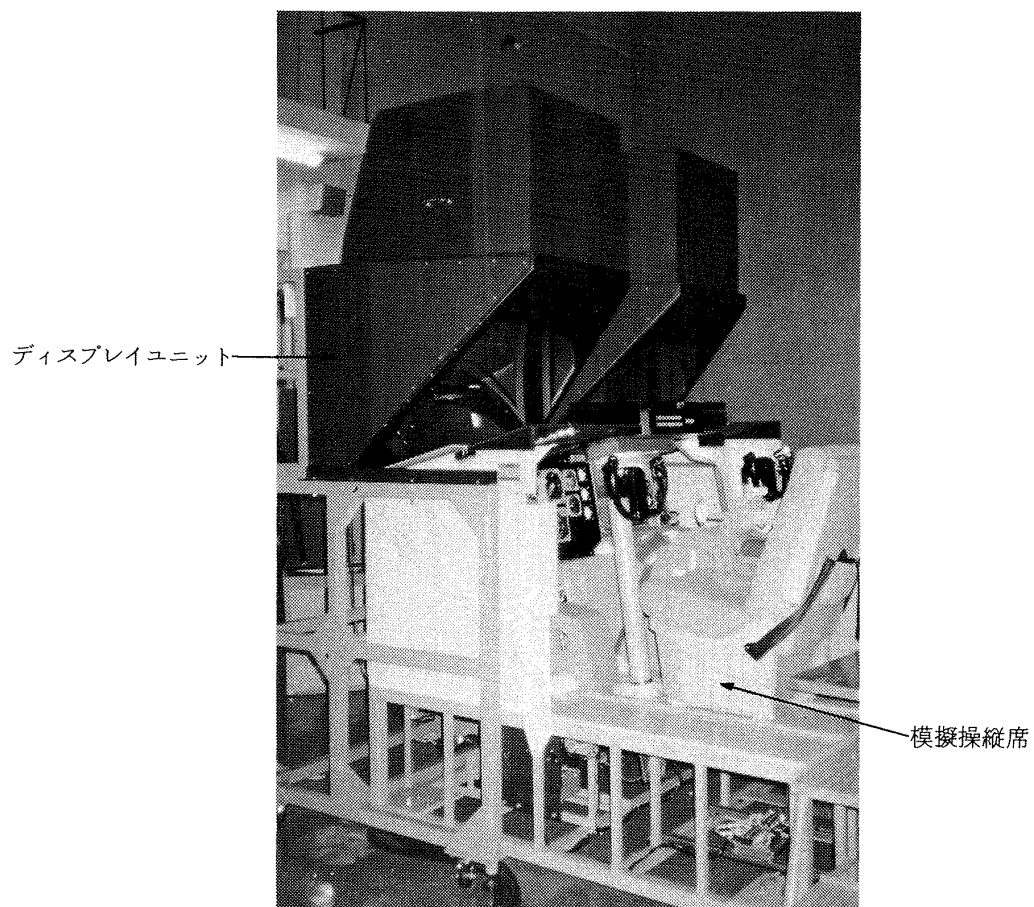


図 27 試作ディスプレイ・ユニットと簡易型模擬操縦席

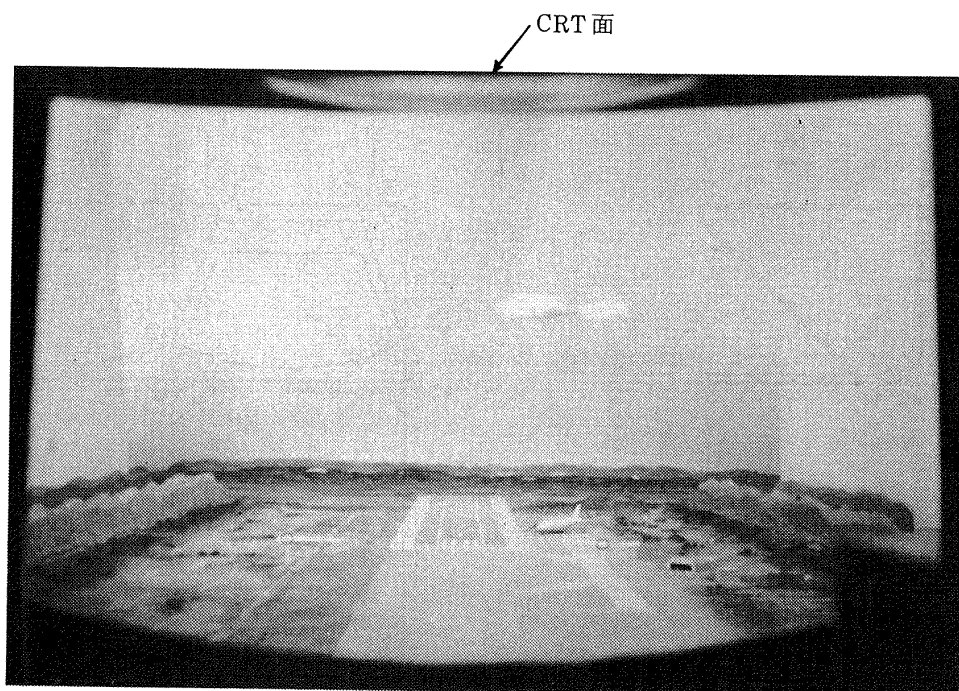


図 28 機長席側からの視界

この視界は滑走路端より手前 2,250m, 高度 240m の位置から見た前方視界である。

なお、参考までに撮影したカメラの焦点は∞である。

6. 試作無限遠表示装置の評価

図 27 の操縦席および試作無限遠表示装置を用いてシミュレーション試験を実施し、この試験に参加した C, E, F, G の 4 名のテストパイロットが視界表示装置の評価を行った。

評価は基礎実験装置の場合と同じ 10 点任意尺度上に評点する方式によって得た。

その結果、従来の投写方式および基礎実験装置と較べて以下の諸点全てにおいて優れていると評価された。

- 1) 画面の明るさ
- 2) コントラスト
- 3) 鮮明さ
- 4) 遠近感
- 5) 高度感、距離感

評価結果を表 9 に示すが全項目にわたって 8～9

点(平均)が得られたこと、特に基礎実験装置で評価点の低かった項目 7 および 8 の可視許容範囲、目の疲労度については最高評価点を得る程に改善されたことは、実用に十分耐え得るものと思われる。

さらにパイロット・コメントから、従来方式では聞くことの出来なかった

- 1) 高度、距離感が正確に得られるようになった
- 2) 遠近感(立体感)が生まれた
- 3) 実機の外界視界と計器板との対応がとれた

等のコメントを得ることができた。

さらに改善要望項目として

- 1) 前方水平視野の拡大
- 2) 側方視野の確保

などのコメントが出された。

これらの要求を満足する視界としては、


- 1) ドーム型スクリーンによる広視野視界装置
- 2) オーロラ・ビジョン^{脚注2)}(商品名)等の採用
- 3) CGI 方式による視界投写部を各風防毎に設置

脚注 2) アメリカのアストロドーム(野球場), 後楽園球場等に設置されている TV 拡大表示装置

表 9 試作無限遠表示装置採点結果

項目		パイロット				平均	参	考
		C	E	F	G			
						EID	基礎実験装置	
1	画像の明るさ	8	10	10	7	8.75	4	7
2	鮮明度	6	10	10	7	8.75	3.5	4.75
3	広がり具合	6	10	8	7	7.75	4	6
4	遠近感	9	10	8	7	8.5	3.75	6
5	ランウェイまでの距離感	9	10	7	7	8.25	4	4.75
6	の幅, 長さ	7	9	10	8	8.5	4	5
7	パイロットの頭の位置関係は	9	10	10	8	9.25	5.25	2
8	目の疲労度は	7	10	10	8	8.75	5	3
9	シミュレータの視界表示装置としては	8	9	8	6	8.25	3.75	3.65

EID: アイド・ホール

 : 著じるしく評価点が向上した項目

等が考えられる。視界映像として現システムのような地形模型-撮像カメラ方式の場合、前方視界用カメラ、側方視界用カメラのように複数個のカメラとカメラ駆動機構を設けることは構造上困難である。従って、前方視界用カメラに広角レンズを取り付け、広角投写装置を用いて1)のドーム型スクリーンに投影する方法が考えられる。他の方法としてはポイント・ライトプロジェクター^{脚注3)}を用いた影絵をドーム・スクリーンに投影する方法もある。いずれの方法によっても、画面全体の明るさ、鮮明度に問題があり、特に後者のポイント・ライト・プロジェクターによる方法では、離着陸の模擬は全くといって良い程困難である。又、2)のオーロラビジョンの場合、映像としては前方視界用カメラと広角レンズは同じものとしても、視距離、表示管サイズ、表示管本数、電力等で現時点ではフライト・シミュレータへの採用は困難なようである。

従って、地形模型-撮像カメラ方式による広視野視界には限界があり、3)のCGI方式による視野拡大が現状では最も有力な手段といえる。CGI方式では、予め用意した地形データと、パイロットから見た視野毎の視界を計算し、それぞれの表示ユニットに映像を呈示する。表示チャンネルと表示ユニットを増すことにより広視野を得ることが可能であり、パイロット訓練用のシミュレータ(トレーナー)の多くは前方2ウインド(表示ユニット)、側方2ウインド、合計4ウインドを設置して、広視野視界を得ている。

7. あとがき

地形模型-閉ループTV方式での模擬した視界映像を用いて、本邦初の試みとして無限遠表示方式による視界投写装置を試作し、評価を行った。その結果、従来のアイド・ホール装置による投写方式に較べて

- 1) 明るい映像
- 2) 鮮明な映像
- 3) 遠近感のある映像

4) 高度感、距離感のある映像
等、従来方式の視界より優れた視界が得られた。

本試作装置は現在航技研が開発中のSTOL実験機のフライト・シミュレーション試験において有視界離着陸シミュレーションを実現するため、稼動中であり、その有効性が高く評価されている。

長年に亘って、シミュレーション試験実施の立場から視界装置の改善に対し御助言、御指導を賜りました新明和工業(株)技師長徳田晃一氏に、又本試作にあたり評価試験に御協力頂いた試験パイロットの各氏に、製作に協力を得た三菱プレジジョン(株)、日立電子(株)、中央無線(株)、(株)ナックの方々へ心より謝意を表します。

終りに、当所計測部 岡部正典人間工学研究室長、坂東俊夫飛行シミュレーション研究室長の指導と操縦席関係の製作について管理部 青木一男工作課長、同課 井上育三氏に協力を得たことを附記する。

参 考 文 献

- 1) 松浦陽恵他：「汎用飛行シミュレーション設備の計画・構造及び特性」、航技研報告TR-70、(1965)。
- 2) 樋口一雄他：「VTOL機操縦研究設備」、航技研報告TR-169、(1968)。
- 3) 池本義夫：物理、千代田書房、(1962)。
- 4) Redifon社：NOVOVIEW SP-2、(1979)。
- 5) Singer社：DIG SYSTEM。
- 6) VITAL社：VITAL SYSTEM。
- 7) Bruce C. Ganzler：Virtual Image Display for Flight Simulation, NASA TMX-2327(1971)。
- 8) 和田陽平他：感覚+知覚ハンドブック、誠信書房、(1969)。
- 9) C. Statler他：Characteristics of Flight Simulator Visual System, AGARD-AR-164、(1981)。

脚注3) 透明のボールに地形、空等の色分けをし、ボールの中心部に点光源を用意すると外側のスクリーンにはそれらの絵が影絵のように映る。シミュレータ機の運動に合わせてボールを駆動し、外部視界を得る。

付録1 無限遠表示装置の原理とその
特長

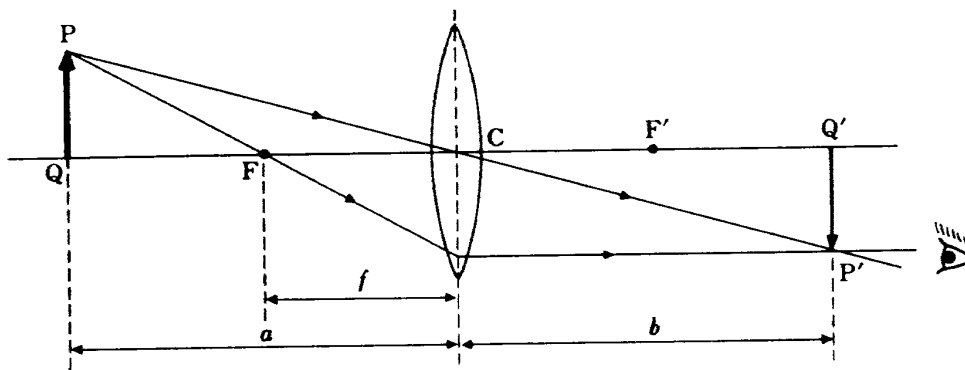
無限遠表示の方式には先にも述べた通り凸レンズを用いた方式と凹面鏡を用いた方式とがある。以下にそれぞれの方式についてその原理、特長を説明する。

1.1 凸レンズを用いた無限遠表示方式

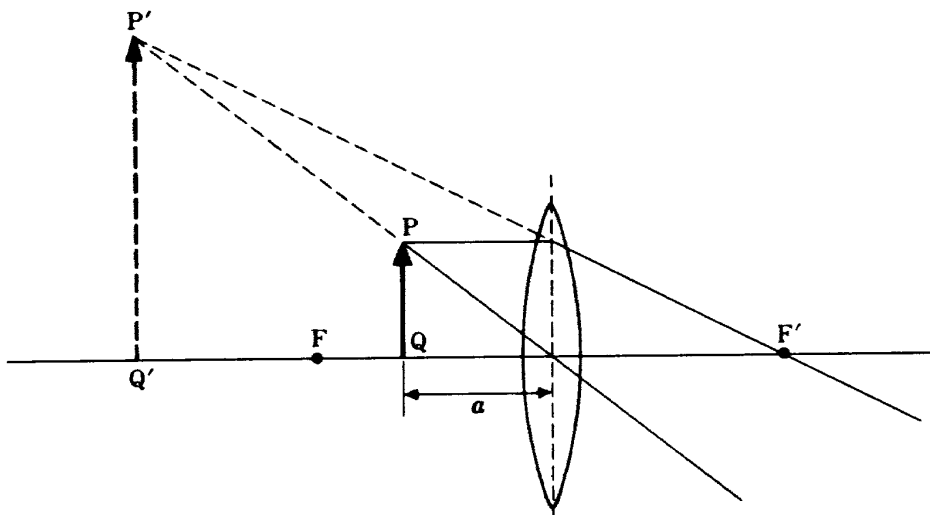
付図1に凸レンズの一般公式³⁾を示し、この図に従って以下の説明を行う。

レンズの焦点をF、その距離をf、物体をPQ、その距離をa、像P'Q'までの距離をbとするとレンズの公式が1.1式になることは周知である。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1.1)$$



付図1 凸レンズによる像の作図



付図2 凸レンズによる虚像 a < f

また、この時の像の大きさP'Q'は1.2式で表わされる。

$$\frac{P'Q'}{PQ} = \frac{f}{a-f} \quad (1.2)$$

ここで物体の位置を $a < f$ に置くと1.1式から $b < 0$

となり、bが負の値をとるときは、像は物体と同じ側にでき、正立の虚像となる(付図2)。

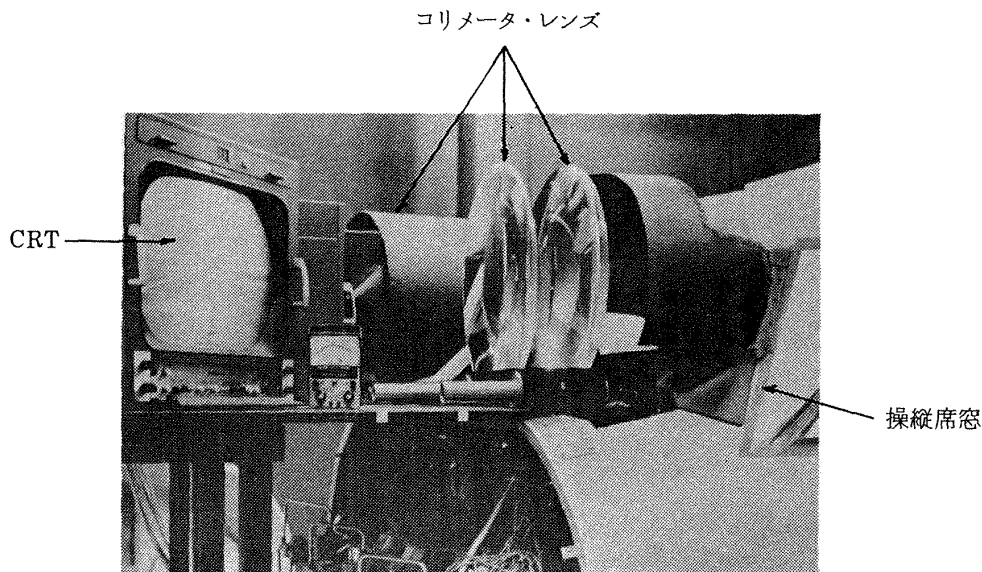
次に、像の大きさは1.2式から

$$\frac{|P'Q'|}{|PQ|} = \frac{f}{|a-f|} > 1 \quad (1.3)$$

となり正立虚像の場合には像は常に物体より大きくなる事が分かる。

ここでaを(極めて)fに近づけると1.1式から $b \rightarrow \infty$ となる事が分かる。

本方式は後に述べる凹面鏡方式が普及するまで無



付図3 NASA AMES研究所におけるコリメータ・レンズによる
視界表示装置

限遠表示装置として広く採用されていた。付図3に本方式による使用例としてNASA AMESリサーチ・センタの例を示す。

本方式の特長を以下に述べると

- 1) レンズ1～2枚の構成であるため構造が簡単である。
- 2) レンズの直径が大きく厚さが厚い(例えば付図3の例では直径84cm, 厚さ6.35cm)ため重い。
- 3) 最近のプラスチックレンズの採用で軽量化が期待できる。
- 4) カラー映像の場合, 色収差が発生し易い。などが上げられる。

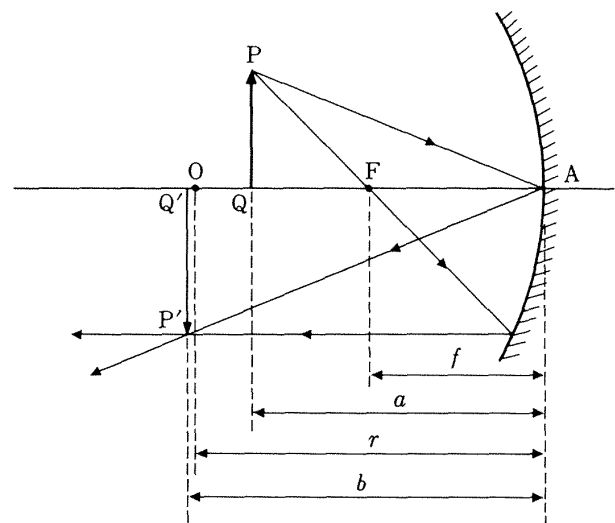
1.2 凹面鏡を用いた無限遠表示方式

凹面鏡による作像の一般公式図を付図4に示す。この図に従えば凹面鏡の公式は以下の通りとなる。

凹面鏡の焦点(半径の1/2)を F , その距離を f , 物体を PQ としその距離を a , 像を $P'Q'$ とし, の距離を b とすると

まず, $a > f$ の場合は

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1.4)$$



付図4 凹面鏡による像の作図

$$b = \frac{af}{a-f} \quad (1.5)$$

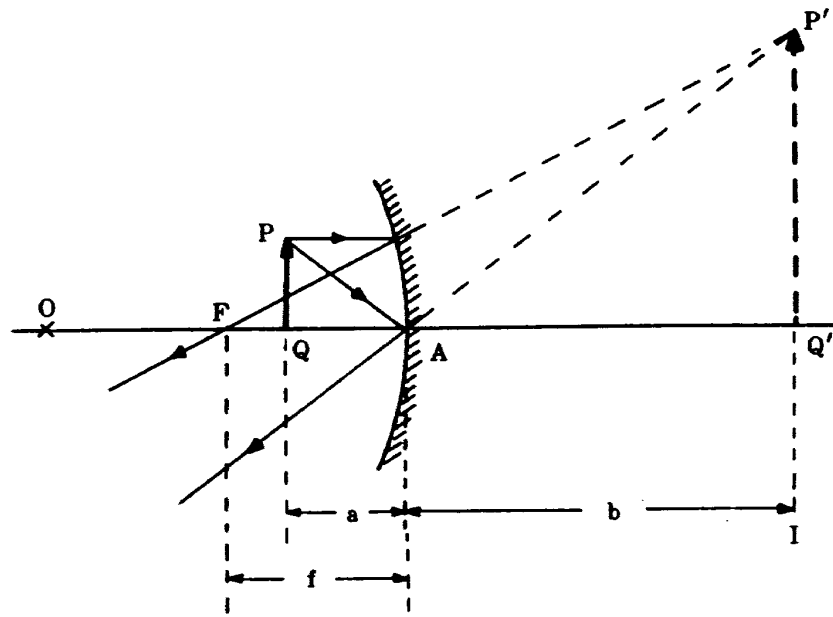
となり $a > f$ で b が正の場合, 像は倒立実像となる。

次に $a < f$ とすると1.5式から b は負となり付図5に示すように像は正立虚像で凹面鏡の向う側にできる。

さらに1.5式で a を(極めて) f に近づけると $b \rightarrow \infty$ となることが分かる。

この時の像の大きさは

$$\frac{P'Q'}{PQ} = \frac{|f|}{|a-f|} > 1 \quad (1.6)$$



付図5 凹面鏡による虚像 $a < f$

$$\therefore |P'Q'| > PQ \quad (1.7)$$

となり、このことは虚像は常に物体より大きくなる。

しかし付図5からも分かるように虚像 $P'Q'$ は物体 PQ の影になり見る事ができない。そこで物体を PQ をビーム・スプリッタ上に投影して、それを通して見せる方式が今日多く採用されている。

本方式の特長を以下に述べると

- 1) プラスチックを採用した凹面鏡や薄いガラス凹面鏡の採用により、重量的に軽量化が可能である。
- 2) 色収差がない。
- 3) ビーム・スプリッタを必要とし、構造が複雑になる。
- 4) 映像の明るさが約1/4に減衰しまう。
- 5) 表示装置に直接入光する光は、反射してパイロットの目に見えてしまう。従ってこれら光源を排除する必要がある。

などが揚げられる。

付録2 テレビーム, アイドホールの概要

2.1 テレビーム(商品名)

放物形凹面鏡と高輝度ブラウン管を用いて付図6のように組上げる。高輝度ブラウン管のテレビ映像は図4に従って倒立実像となる。ブラウン管の輝

度(明るさ)と予め天地、左右を逆にした映像を用意すればスクリーン上に正立実像を結像することができる。

テレビームはこの方式を利用して商品化したテレビ拡大投写装置である。

映像の大きさと明るさは6ft(182cm)×8ft(244cm)の大きさに投写した時、3~4フット・カンデラ(約30~40 LUX)の明るさの映像が得られる。

付図7にテレビームの外観を示す。

2.2 アイド・ホール(商品名)

アイド・ホールの原理を付図8に従って説明する。

凹面鏡の中心部に薄い油膜面を作り、その油膜面に向けてテレビ画面と同様な電子ビームを発射する。

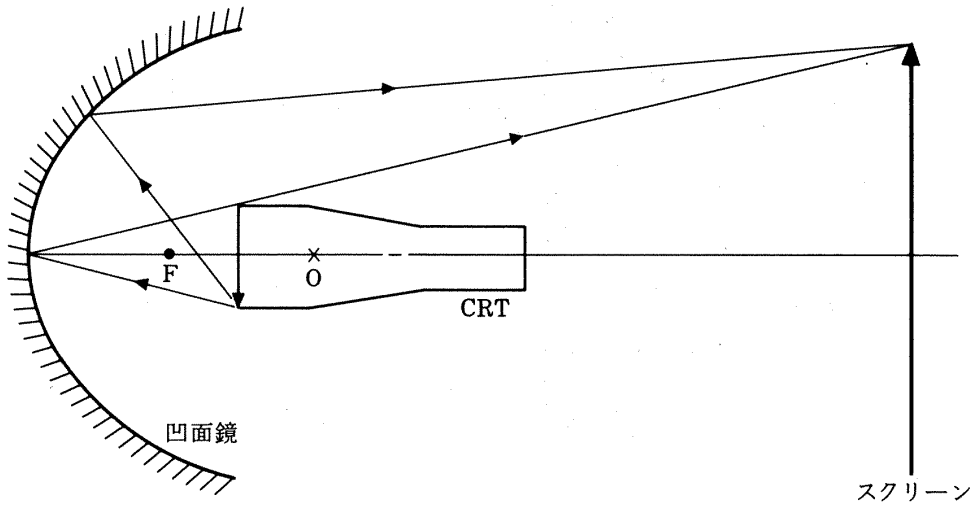
油膜面におつかった電子は蓄電器に蓄えられた電子のように帯電し、その結果薄い油膜は電子の吸引力により膜面が凸凹となる。この凸凹は丁度テレビ画面の明暗に対応する。

さて、アイド・ホールの光源1にはクセノンランプを用い、集光レンズ2, ミラー3, 画面枠4を通過して6のパーミラーで反射した後、凹面鏡面で焦点を結ぶ。

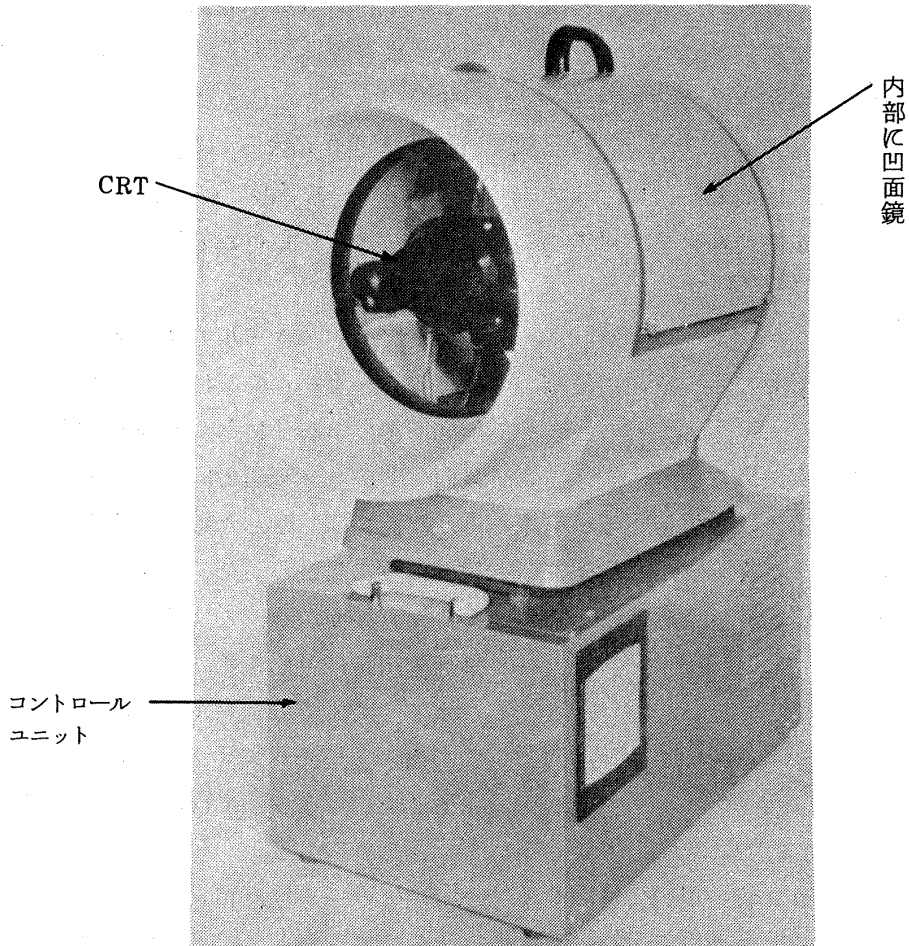
パーミラーと凹面鏡とは付図9に示すシュリーレン光学系を構成している。凹面鏡で反射した光は再びどれかのパーミラーに結像する。アイド・ホール

油膜に凸凹があり、凹面鏡で反射した乱れた光はパーミラーを通り抜けてレンズ 8 に到達する。この通り抜けた光がテレビ画面の明るい部分に対応する。

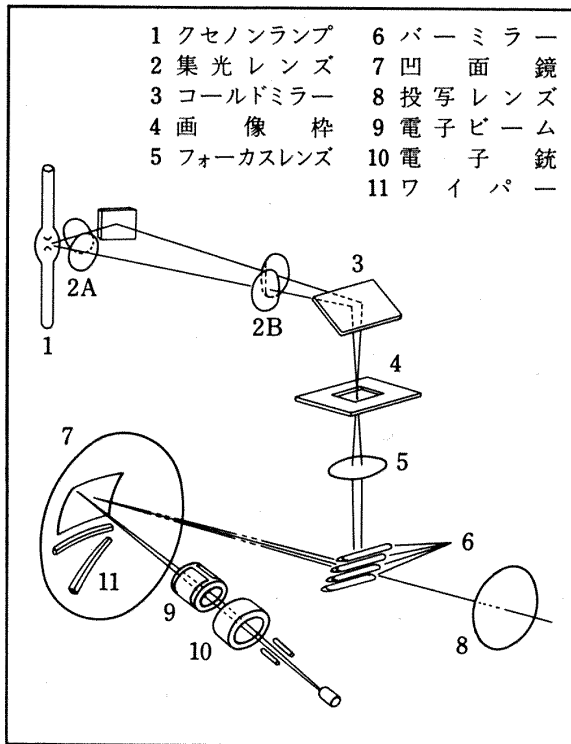
凹面鏡の油膜面の下部にはワイパーが付いており、毎秒 30 回の早さで電子ビームで出来た凸凹をならしている。アイド・ホールの外観を付図 10 に示す。



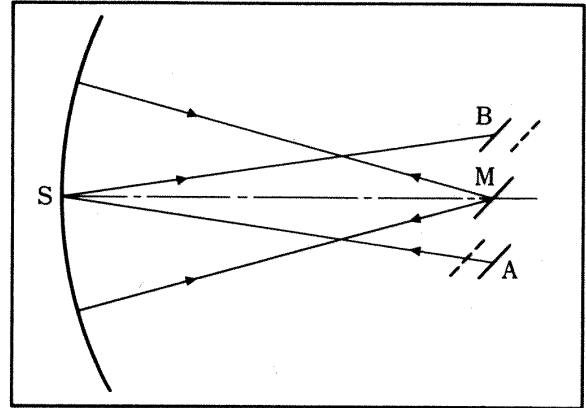
付図 6 テレビーム構成図



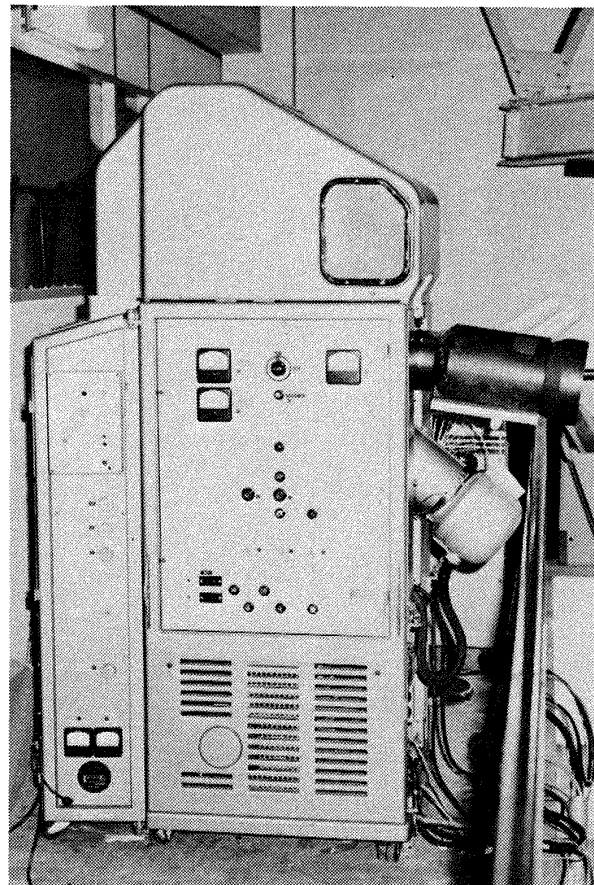
付図 7 テレビーム外観



付図8 アイドホール原理図



付図9 シュリーレン光学系



付図10 アイドホール外観

航空宇宙技術研究所資料467号

昭和57年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12
