

空港面航空機自動識別表示システムの開発

北 館 勝 彦* 加 来 信 之*

Development of Airport Surface Surveillance System

Katsuhiko KITADATE and Nobuyuki KAKU

Abstract

A number of major airport expansion projects are under way or planned to cope with air traffic growing in recent years. In such large-scale airports, maintaining safety and efficiency operation on the airport surface is a key consideration. Although Air Route Surveillance Radar (ARSR) and Airport Surveillance Radar (ASR) are already using the digital targets that carry a data block associated with aircraft call sign on the display, Airport Surface Detection Equipment (ASDE) radar uses raw video information.

The Airport Surface Surveillance System (ASSS) for Airport Control Service is the same system as Radar Data Processing system (RDP) for Area Control Service and Automated Radar Terminal System (ARTS) for Terminal Radar Control Service in displaying the digital targets. The main sensor of ASSS is ASDE radar. ASSS will greatly enhance the safety and efficiency of the airport surface operations, and reduce the workload of ground controller. Flight testing using the prototype system installed at Sendai airport is carried out since December 1994. This paper reports the outline of this system, the responses of controller questionnaire for new ASDE display and the results of the first tests at Sendai airport.

* 航空施設部

1 概要

近年航空交通量の増大に伴い空港の大規模化が進んでおり、我が国でも羽田空港の沖合い展開に見られるように三本の滑走路を有する大規模空港の完成が間近に迫ってきている。このような大規模空港においては、空港面の大型化・複雑化そして交通量の増大に対応するため、飛行場の管制処理能力の向上を図り、安全かつ効率的な航空交通の流れを維持することが重要な課題となっている。

飛行場の管制は、離着陸する航空機への管制許可・指示を行う飛行場管制（Local Control）、走行区域を航行する航空機及び車両等への管制許可・指示を行う地上管制（Ground Control）及び出発機に対して目的地までのクリアランスを伝達する管制承認伝達（Clearance Delivery）より成っている。これらの飛行場管制業務で 사용되는機器には、ARTS（ターミナルレーダ情報処理システム）／BD（ブライต์ディスプレイ）装置・ASDE（空港面探知レーダ装置）高輝度表示装置・無線電話があり、管制官はこれらの管制機器と目視により管制業務を行っている。ARTS／BD装置は空港周辺を航行する航空機を、ASDE高輝度表示装置は空港面を航行する航空機及び車両を監視するものである。

大規模空港においては、広大な空港面を一元的に監視できるASDE高輝度表示装置（以下ASDEレーダ表示装置という）が特に重要な管制機器になると考えられる。夜間及び霧発生時等の低視程時にあつては、目視による航空機の識別が困難であるため、空港の大規模化によりさらにASDEレーダ表示装置及び無線電話に負うところが大きくなる。また、空港面は航空機と車両が混在しており、これらが輻輳する領域での安全かつ効率的な航空交通の流れの維持には、ASDEレーダ表示装置の性能・機能が重要な要素の一つとして上げられる。しかしながら、ASDEは他の航空管制用レーダと異なり、SSR（二次監視レーダ）及びレーダ情報処理システムと連接されていないため、レーダ表示装置は一次レーダエコーのみの表示を行っており、管制業務の支援機器としては十分な機能を発揮していないのが現状である。既に航空路管制業務ではRDP（航空路監視レーダ情報処理システム）、ターミナルレーダ管制業務ではARTSによりレーダ表示装置のデジタル化がなされ、航空機の機影（若しくはシンボル）に航空機の情報がデータブロック表示（タグ付け）されており、航空機識別等の管制業務に役立っている。

空港面航空機自動識別表示システムは、これらRDP・ARTSと同様に、飛行場管制業務で使用するASDEレーダ表示装置のデジタル化を目的とするレーダ情報処理システムである。本システムの開発により、大規模空港における安全かつ効率的な航空交通の流れの維持と、そこで働く管制官のワークロードの軽減に寄与することができるものと考えられる。

航空管制の先進国である欧米の開発状況について目を向けると、我々の知る限りでは、ノルウェーのFornebu空港でASDEレーダ表示装置⁽¹⁾にタグ付けがなされていることが確認されている。ただし、ASDEレーダ表示装置は目視の補助として使用されており、出発機は手動でタグ付けを行っている。また、アメリカにおいては、ASTA（Airport Surface Traffic Automation）計画⁽²⁾⁽³⁾が進行中で、各空港に新型の空港面探知レーダASDE-3の整備が進められているが、ASDEレーダ表示装置にタグ付けがなされ運用に供されたとの情報は得ていない。このように欧米においても、ASDEレーダ表示装置のタグ付けについては、空港面上での航空機識別が技術的に難しいため完全な実用化には至っていないというのが現状である。注目すべき点としては、イギリスのHeathrow空港でGMR（欧州ではASDEをGMR（Ground Movement Radar）と呼ぶ）のブラインドエリア（不感領域）をITV（Industrial Television）カメラで監視していることと、一部の欧米のレーダ表示装置にGUI（Graphical User Interface）環境及びウィンドウ機能が導入されていることが上げられる⁽⁴⁾。これらは、本システムの開発を進める上での貴重な参考事例となった。

我が国においては、釧路空港、熊本空港においてILS-CAT III運航が始まり、低視程時における航空機の監視・誘導が一層重要な課題となつてきており、本システムの開発が強く望まれているところである。

本論文では、本システムの基本構成、レーダセンサの性能検討及びシステム開発に向けて実施した管制官アンケート調査⁽⁴⁾、並びに当所岩沼分室に構築した実験システムの基礎的な評価実験⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾の結果について報告をする。

2 空港面航空機自動識別表示システムの基本構成

本システムを開発する上での大きな障害は、空港面上ではSSRによる航空機識別が難しいということである。空港内にはハンガー・ターミナルビル等の空港施設

の他に多くの航空機・車両が存在し、現在の SSR システムでは電波のマルチパス（多重経路伝搬）等によるガブル（SSR 応答信号が時間軸上で重なり検出及び解読ができない状態）を回避するのが難しい。そこで本システムの航空機識別は、以下の方式で行うこととして開発を進めている。

到着機については、ASR（空港監視レーダ）／SSR と ASDE との覆域がオーバーラップ（重なる）する領域で、ビーコンコード（航空機識別情報）を ASR／SSR ターゲットから ASDE ターゲットに移管しスポットまで保持する。この場合タグ付けは自動的に行われる。一方、出発機については、航空機がスポットアウトするときにスポット管理システムからの航空機情報を ASDE ターゲットに移管し離陸まで保持する。しかしこの場合、スポット管理システムのスケジュール通りに航空機がスポットインしているか不明であるため、タグ付けに際して管制官の確認作業（クリック操作等）が必要になる。したがって、出発機のタグ付けは手動で行うことになる。また、ASDE で監視できない空港面上のブラインドエリアについては、光センサ（ITV カメラ）等により目標検出を補完し航空機の追尾を継続することとする。

図 1 に本システムの基本構成を示す。レーダセンサ（ASR／SSR 及び ASDE）を除く各構成装置の機能は以下のとおりである。（注：スポット管理システム及び FDP は既存のシステム）

- ・ ASR／SSR 目標検出装置

ASR 及び SSR のレーダ信号から、それぞれターゲットを検出して両者の相関をとり単一のターゲットとしての位置情報とビーコンコード（航空機識別情報）を出力する。

- ・ ASDE 目標検出装置

ASDE レーダ信号からターゲットを検出して位置情報と大きさ情報を出力する。

- ・ ブラインドエリア目標検出装置

ASDE ブラインドエリアから、光センサ等を用いてターゲットを検出し追尾を行う。ターゲットの情報を追尾処理装置と相互に移管する。

- ・ スポット管理システム

スポットの運用スケジュールを一元的に管理するシステム。

- ・ FDP（飛行計画情報処理システム）

航空機の飛行計画を管理する情報処理システム。

- ・ 追尾処理装置

各装置から入力されたターゲットを追尾する。FDP 及

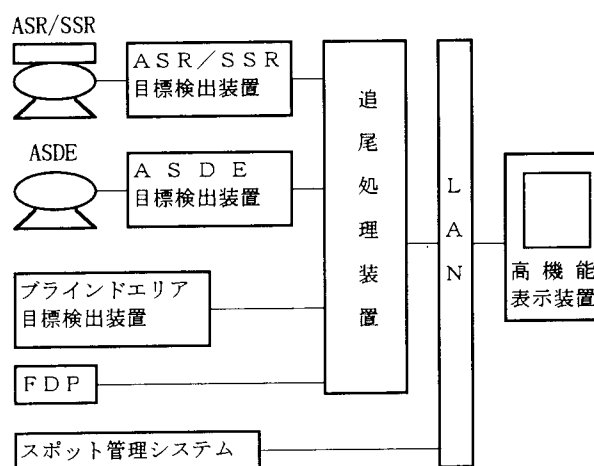


図 1 基本システム構成

びスポット管理システムから航空機情報を取得し、航空機の航跡データを高機能表示装置に出力する。

- ・ LAN（Local Area Network）

LAN により装置間のネットワークを構築する。複数の滑走路を有する大規模空港では、高機能表示装置を複数台運用するため LAN により資源（伝送路、航跡データ等）の共有化を図り、装置の接続を容易にする必要がある。

- ・ 高機能表示装置

航跡データ及び到着機・出発機の航空機情報を表示する高機能化した ASDE レーダ表示装置。

3 レーダセンサの性能検討

3.1 覆域

航空機を識別するためのビーコンコードを、ASR／SSR ターゲットから ASDE ターゲットに移管するためには、両者の覆域がオーバーラップしていることが望ましい。航空機が ILS（計器着陸装置）電波に乗って降下した場合、ILS Reference Datum（滑走路末端垂直上空）における高度は 50ft（15m）である。仮にこの地点でビーコンコードの移管を行うものとして検討してみる。図 2 は SSR、ASDE の垂直面放射パターン及び ILS Reference Datum の概略図である。

先ず SSR の有効覆域であるが、SSR 空中線として代表的なオープンアレーアンテナの垂直面放射パターンを見ると、主ビームノーズ方向を 0°としたときの相対利得は下方 5°まで -5 dB 以上となっている⁽⁸⁾。この値はアンテナのチルト角及び設置高を考慮したとしても、アン

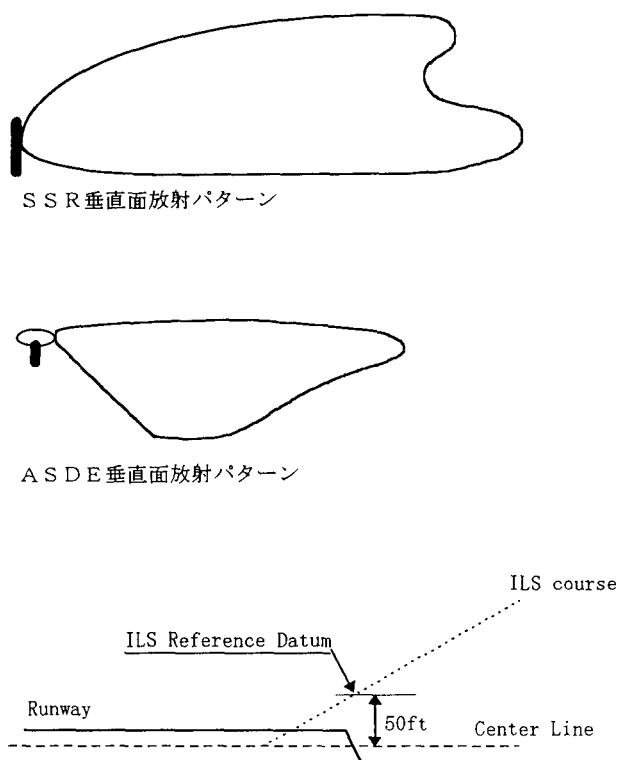


図2 レーダ覆域の概略図

テナ近傍を除く空港面がSSRの有効覆域であることを示している。つまり ILS Reference Datum では、ビーコンコードを得ることが可能である。一方、ASDEの有効覆域であるが、垂直面における半値電力幅は 1.8° で下側半値電力点より -15° までが有効覆域である。ASDEのチルト角は、主ビームが最も遠方の滑走路端に照射されるように通常設定されていて、最大探知距離は3km(降雨強度 16mm/h のとき)保証されている。したがって ILS Reference Datum はASDEの有効覆域に入っており、ビーコンコードを移管することは可能である。

問題点としては、ATCトランスポンダのアンテナの取付け位置が機体の下部の場合コースト(ATCトランスポンダが応答しない状態)が発生する可能性があることである。着陸前にATCトランスポンダが切られることも考えられる。また、ASDEのデータレート(1秒に一回)とSSRのデータレート(4秒に一回)は一致しておらず、両者の位置検出精度にも大きな違いがあるため、ビーコンコードの移管は予測計算により補強する必要があると考えられる。

表1 ASDE-91(日本)諸元

項 目	定 格 等
空中線電力	30kW(尖頭電力)
周波数範囲	24.25GHz-24.75GHz
パルス幅	20ns $\pm$ 5ns
パルス繰返し周波数	14,000pps $\pm$ 10%
受信機雑音指数	5dB以下
空中線回転数	60rpm $\pm$ 10%
電波の偏波面	円偏波
垂直面指向特性(半値電力幅)	$1.8^\circ \pm 0.2^\circ$
水平面指向特性(半値電力線)	$0.3^\circ \pm 0.05^\circ$

3.2 性能

現在航空局で運用に供されているASDE-91は、当電子航法研究所において昭和61年から3ヶ年計画で「ASDE性能向上の研究」⁽⁹⁾として研究を行い、試作評価試験を行ったものである。主要諸元を表1に示す。性能向上の概要は以下のとおりである。

① 探知性能

受信機高周波段に低雑音増幅器、中間周波増幅器に対数増幅器を採用して、受信機雑音指数、ダイナミックレンジを改善。

② 視認性

ラストスキャン(TV走査)による表示装置の高輝度化。デジタル走査変換装置を設けることにより地図情報表示、背景抑圧機能(サブレス)、航跡表示(トレイル)、スラントレンジ補正、積分処理の機能を付加。

③ 信頼性

導波管加圧装置(導波管内水滴付着による障害を防止)、自動電圧調整器(送信パルス・マグネトロン安定化)、空中線レドームを採用。

これ以前に使用されていたASDEは、表示装置がPPI(Plan Position Indicator)方式のため輝度が低く、管制塔内では周囲光を遮蔽するフード無しでは使用が困難であり、また強い雨が降ると降雨クラッタのため使用できなくなるといった問題点があった。性能向上により、探知性能、視認性及び信頼性の向上が図られている。

一方、アメリカの各空港に整備されつつある新型の空港面探知レーダASDE-3の主要諸元を表2に示す。一世代前のASDE-2は真空管を使用した構成で26GHz

表2 ASDE-3 (アメリカ) 諸元

項 目	定 格 等
空中線電力	3 kW (尖頭電力)
周波数範囲	15.7GHz—17.7GHz
パルス幅	40ns±5ns
パルス繰返し周波数	16,384 or 16,000pps
受信機雑音指数	4.8dB
空中線回転数	60rpm±5%
電波の偏波面	円偏波
垂直面指向特性 (半値電力幅)	1.6°
水平面指向特性 (半値電力幅)	0.25°±0.025°

帯の周波数を使用していたため、低信頼性・雨天時の性能低下が問題であった。そこで ASDE-3 は、装置の半導体化により信頼性の向上を図り、16GHz 帯の周波数を使用することにより降雨対策を行っている。

表1、2を比較すると、ASDE-91とASDE-3の主な相違点として、空中線電力・周波数範囲・パルス幅が上げられる。ASDE-91は、24.5GHz 帯の周波数を使用しているため、大気中での水蒸気・酸素による電波の減衰及びウェザクラッタ (雨・雪等) による影響が大きい。一方 ASDE-3 は、16GHz 帯の周波数を使用しているため、これらの影響は比較的小さくこの点では ASDE-3 の方が性能が良いといえる。パルス幅及び空中線の水平面指向特性は、レーダの分解能を左右する。航空機をレーダ信号から検出して追尾するためには、航空機の正確な中心位置を得る必要から分解能は小さい値が望ましく、距離を R 、ビーム幅 (半値電力幅) を θ 、光速を C 、パルス幅を τ としたときの方位分解能 D 及び距離分解能 R_{res} は次式で示される⁽¹⁰⁾。

方位分解能

$$D = 2 \left(R \tan \frac{\theta}{2} \right)$$

距離分解能

$$R_{res} = \frac{C \tau}{2}$$

表3に示すように、ASDE-91とASDE-3を比較し

表3 分解能の比較

	ASDE-91	ASDE-3
方位分解能 (0.5NM 地点)	4.8 m	4.0 m
距離分解能	3.0 m	6.0 m

$$C = 2.997925 \times 10^8, 1\text{NM} = 1,852\text{m}$$

た場合、ASDE-91の方が距離分解能が小さく方位分解能との差も小さい。分解能の値は小さい方が航空機の位置を正確に得ることができ、クラッタ (航空機以外のエコー) との分離も容易であるため、ASDE-91の方が航空機の検出・追尾に有利であると考えられる。

3.3 レーダエコーの特徴

航空機及び車両のエコーは、走行する場所、ASDE 空中線との相対角度及びその他の要因により様々に変化する。現在、航空局で運用に供されている ASDE 高輝度表示装置で、空港面を走行する航空機・車両のレーダエコーがどのように表示されるか調査を行った。図3は実際の空港面の状況と ASDE 高輝度表示装置の画面を同一時刻に撮影したものの一例である。レーダエコー調査の結果次のことが判った。

・滑走路

レーダ電波の主ビームが照射されていることと周囲に電波に影響を与える建物等がないため、航空機エコーの形状は比較的是っきりしている。ただし、ASDE 空中線方向に面していない機体の反対側は、レーダ電波が照射されないため、半身のエコーが表示されることがあった。

・誘導路及びその周辺

誘導路を形成している芝生のエコーが強くでているが、航空機エコーの形状には影響を与えていない。芝生に航空機の翼が重なると、芝生と航空機の翼のエコーを判別できないことがある。

・エプロン地区

著しく航空機エコーの形状が損なわれており、航空機と車両のエコーの形状から判断することは困難である。また、エコーのスプリット (分離)、ロスト (消失)、ゴースト (偽像) が発生しており、ASDE 空中線近傍のブラインドエリアにかかって監視できないスポットもある。

・その他



(a) 実風景



(b) ASDE 画面

図3 実風景と ASDE 画面

電波の伝搬に影響を与える物体（フェンス等）が近傍にあるとエコーの形状が損なわれる。また、滑走路延長上に設置している進入灯のエコーに、着陸のため進入してくる航空機のエコーが重なり判別することが困難である。地上の建物等により ASDE レーダ電波が遮蔽され監視できないシャドウエリアも存在する。

3.4 レーダ信号処理の問題点

(1) ターゲットの検出

航空機として目標検出し追尾するためには、航空機としてのエコーの形状の妥当性若しくは動態特性、信号レベルの強度等から他のエコーと区別しなければならない。

現在、ARSR・ASR で用いられている目標検出方法は、スライディングウィンドウ方式と呼ばれるもので、ターゲットヒット検出出力の方位方向の連続性（ランレンジング）を評価することにより、航空機としての妥当性を判断する方式である。ARSR・ASR は空域を監視するレーダであるため、航空機以外のエコーとしてはウェザクラッタ（雨滴、雨雲等）、エンジェルエコー（鳥、大気の揺らぎ等）が考えられる。これらのエコーは、その形状、移動速度が航空機のエコーと大きく異なるため、ランレンジング検定、MTI（Moving Target Indicator）等により目標検出は比較的容易と思われる。しかし、ASDE の場合空港面を監視するため、グランドクラッタ（芝生、建物等）及びマルチパスによる偽像・エコーの形状変化

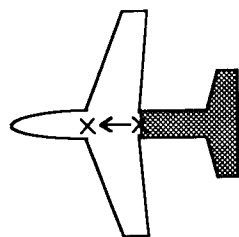
を考慮する必要がある。また、停止している航空機・車両を監視する必要から MTI 処理機能がなく、範囲を指定して STC（Sensitivity Time Control）のレベルを設定できるエリア STC の機能もないためクラッタを抑圧することができない。（ASDE-91 では視認性を向上させるため、走査変換装置において PPI スキャンをラスタスキャンに変換した後、背景抑圧機能により滑走路・誘導路等以外の不用エリアからのレーダエコーを抑圧し表示させないようにしている。）以上の理由から、ASDE レーダビデオ信号からのターゲットの検出は極めて難しいと考えられる。

(2) ターゲットの識別

ASDE のレーダエコーは、ターゲット（航空機・車両）の他に多くのクラッタを含んでいる。空港面を移動する際に、これらのクラッタとエコーが一体化を生ずる場合があるためこれを分離・識別する必要がある。このエコーの一体化は、エプロンで航空機に車両（トローリング車等）が接続されたときにも生じ、航空機が移動するときその航空機情報（コールサイン等）がクラッタ及び車両に乗り移らないようにしなければならない。

(3) ターゲットの中心位置

ターゲットの追尾処理及び表示装置でのシンボル化を行うためには、ターゲットの中心位置を求めなければならない。この中心位置が変動すると、ターゲットの追尾処理が正確に行われず表示装置上のシンボルが不自然な動きになる。他の航空機と接近した場合、航空機情報が



B747-200 全長 70.51m

図4 ターゲット中心位置の変動

乗り移ることも考えられる。ターゲットの中心位置を、ターゲットの方位方向及び距離方向の長さの中間点に設定した場合の、中心位置の変動の一例を図4に示す。B747-200がASDE空中線に向かって移動しているとき、エコーの後ろ半分（黒塗り部）が欠落すると、その中心位置（×印）は17.6m前方に移動することになる。

4 高機能表示装置の要件調査

実験システムの高機能表示装置の仕様を決めるため、ワークステーションを使用して図5のシミュレーション画面を表示させ、羽田空港及び成田空港において管制官を対象にアンケート調査を行った。調査方法は、空港事務所にワークステーションを数日間設置し、管制官に実際に操作してもらうことにより意見を収集する方法とし、調査対象管制官（回答者）については、できるだけ多くの管制官の意見を収集したいという趣旨を伝えて空港事務所側に一任した。

高機能表示装置は本システムのマンマシンインターフェースとして位置付けられ、その操作性、視認性及び表示情報について実際に使用する管制官の意見を反映させることが重要である。シミュレーション画面は、航空機のシンボル化及び空港面のマップ化による視認性の向上、並びにウィンドウ機能を持たせることによる操作性の向上を図ったものである。



図5 シミュレーション画面

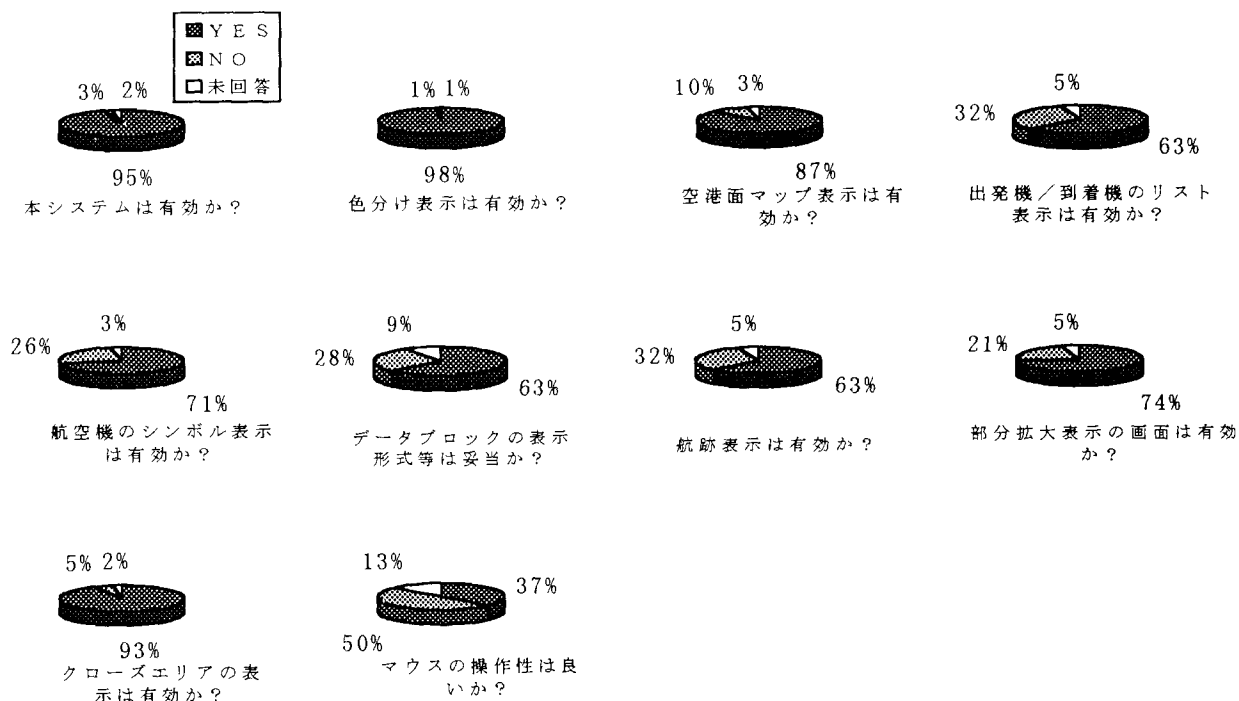


図6 アンケート調査（改修前）

4.1 シミュレーションプログラムの仕様・機能

シミュレーションプログラムは、ワークステーションの性能上の制限から以下の仕様・機能とした。

- ① 羽田空港をレイアウトしたシミュレーション画面上で、運用時と同等な航空機の移動状況を模擬。
- ② 出発機と到着機の別が画面上で視認でき、同時移動可能処理機数は10機以上。
- ③ 表示方法は、マップ化した空港面上をシンボル化した航空機が移動するデジタル表示形式。
- ④ 画面上の指定した部分を任意の場所でウィンドウとして表示、ウィンドウ表示部は拡大表示が可能、同時表示ウィンドウは4つ。
- ⑤ 滑走路延長 (ILS コース) 上の航空機をウィンドウ操作により表示。
- ⑥ 到着機は自動的なタグ（データブロック）付け、出発機は手動によるタグ付け。
- ⑦ タグの内容は、コールサイン（航空機呼出符号）、タイプ（航空機型式）。
- ⑧ 航空機移動時に航跡（トレイル）を表示。
- ⑨ フライトプラン情報をリスト形式で表示。
- ⑩ クローズエリア設定

工事等で使用不可能な滑走路・誘導路をクローズエリアとして設定、航空機がこのエリアに進入しようとし

たとき警告音を発生。

⑪ 表示レンジ変更

表示する範囲を任意に設定。

4.2 調査結果

アンケート調査の結果を図6に示す。この調査結果は羽田空港（86名）と成田空港（66名）を合計したものである。本システムの有効性については「YES」が95%あった。

視認性については色分け表示、空港面のマップ表示、航空機のシンボル表示、部分拡大（ウィンドウ）表示等良い結果を得た。ただし、文字の大きさ、表示色を選択できるようにとの意見があった。表示情報については、クローズエリア表示は良い結果を得たが、出発機／到着機のリスト表示、データブロックの表示形式、航跡表示等「NO」の比較的多い設問があった。これらのうち、出発機／到着機のリスト表示及びデータブロックの表示形式については、表示が不要ということではなく、シミュレーション画面における表示方法、表示内容について改善すべき点があるということであった。一方、航跡表示は現在のASDE高輝度表示装置でサポートされている機能であるが、必要性がないという意見もあった。

操作性については、ポインティングデバイスとして

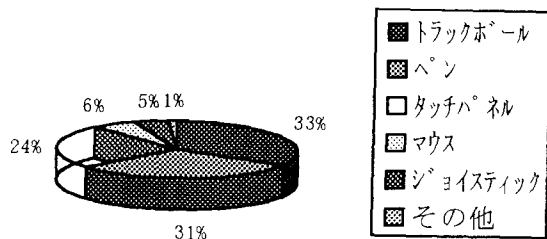


図7 ポインティングデバイス

ワークステーション付属のマウスを使用してもらったが操作に時間がかかる等の意見があった。本システムは出発機については手動でタグ付け操作を行う方針であり、到着機についてもコースト機（一定スキャン数の間連続して相関のとれなくなったターゲット）になった時は、同様の操作が必要となる。したがって、操作の簡便化を図るため、ポインティングデバイスの選択は十分に検討すべき課題の一つである。ポインティングデバイスのアンケート調査結果を図7に示す。トラックボール、ペンの順になっているが、羽田空港においてはペンが一番多かった。

初回のアンケート調査の結果をうけて、誤ったタグ付け操作を取り消す UNDO 機能等の要望事項について、シミュレーションプログラムの改修を行い再度アンケート調査を行った。調査対象は、初回のアンケート調査の回答者である。羽田空港（58名）と成田空港（23名）の合計結果を図8に示す。誤ったタグ付け操作を取り消す UNDO、操作パネルの表示／非表示、基本画面の回転表示、リストの時刻降順表示機能は良い結果を得た。また、タグを付け換えるときの CHANGE FP（Flight Plan）警告、タグの二重割り当てを防止する DUPULICATE FP 警告についても良い結果を得た。しかし、サスペンド機能（タグ付けを行わず、コールサイン等をサスペンドリストとして表示させる機能）、滑走路からスポットまでのルート表示、到着済みリスト表示の必要性については「NO」が多かった。

また、初回のアンケート調査時には、スポットアウトからスポットインまでの一貫した追尾による管制等のシステムの拡張機能についての有効性及び開発の優先順位についても調べた。結果を図9、10に示す。一貫した追尾による管制、空港面を走行する車両のタグ付け、滑走路への誤進入・衝突防止の警報機能については要求が高かったが、高機能表示装置への ARTS 情報表示については比較的要求が低かった。これは管制塔においては、既

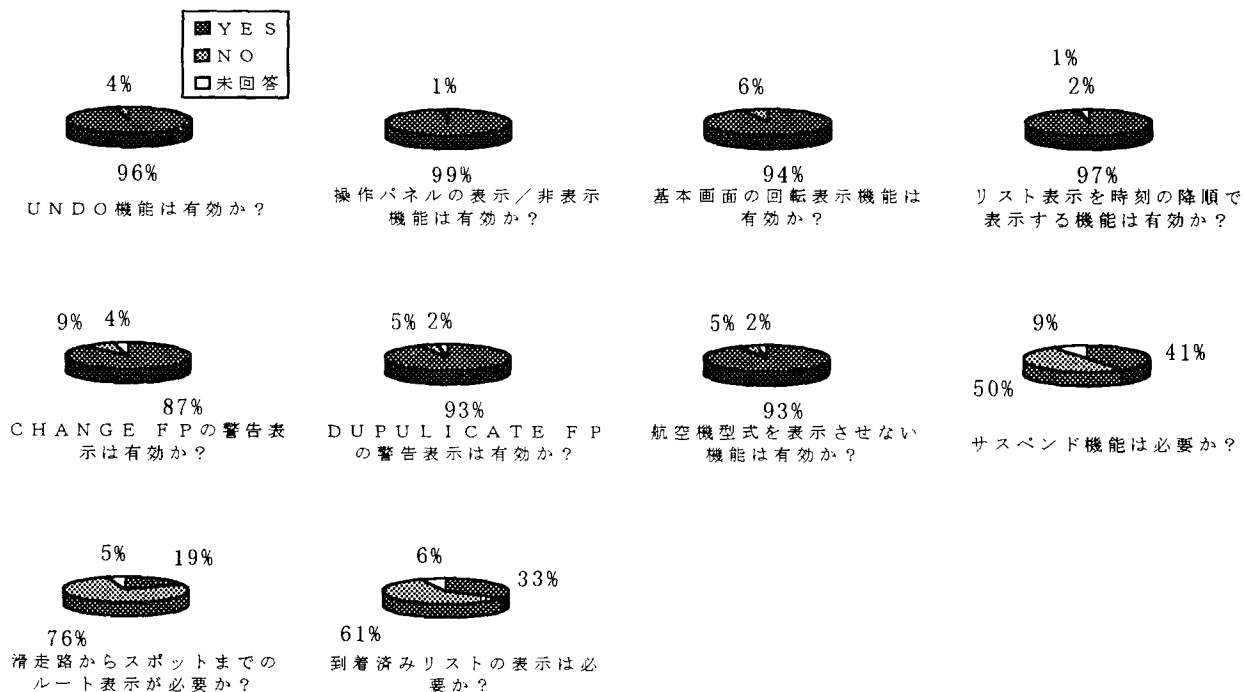


図8 アンケート調査結果（改修後）

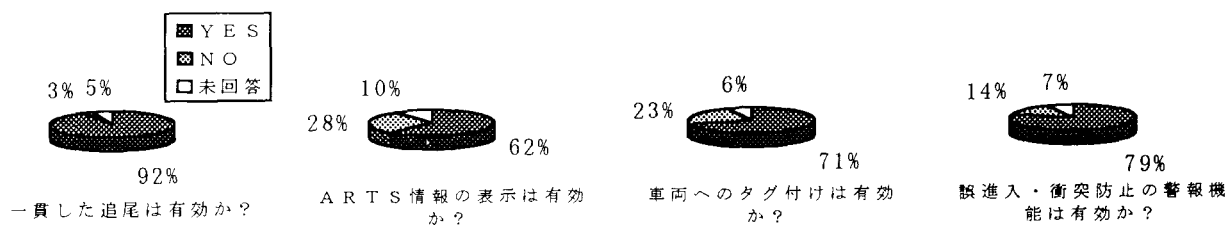
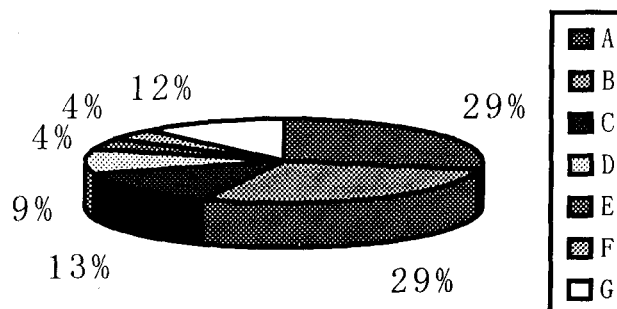


図9 システムの拡張機能



- A：スポット管理システム・ARTSシステムとの接続＞誤進入・衝突防止の警報機能＞車両のタグ付け
 B：スポット管理システム・ARTSシステムとの接続＞車両のタグ付け＞誤進入・衝突防止の警報機能
 C：車両のタグ付け＞スポット管理システム・ARTSシステムとの接続＞誤進入・衝突防止の警報機能
 D：車両のタグ付け＞誤進入・衝突防止の警報機能＞スポット管理システム・ARTSシステムとの接続
 E：誤進入・衝突防止の警報機能＞スポット管理システム・ARTSシステムとの接続＞車両のタグ付け
 F：誤進入・衝突防止の警報機能＞車両のタグ付け＞スポット管理システム・ARTSシステムとの接続
 G：未回答

図10 開発の優先順位

に ARTS / BD 装置があるため不要であろうとの判断が働いたものと思われる。高機能表示装置に ARTS 等の情報を提供するためには、表示装置に大型のディスプレイを採用しなければならず、限られた空間での配置場所を考慮すれば表示装置の統合化を図っていく必要もあると考えられる。システムの拡張機能の開発優先順位については、スポット管理システム、ARTS システムとの接続が一番多かった。つまり、出発機についても自動的なタグ付けがなされ、一貫した追尾による管制を管制官が望んでいることがわかった。

アンケート調査の結果、システム開発のための貴重な意見を多く得ることができ、空港面航空機自動識別表示システムの実験システムを構築する上で大いに役立った。

5 実験システム

レーダセンサの性能検討及びアンケート調査の結果を踏まえて、仙台空港の当所岩沼分室に実験システムを構築した。図11に現在の実験システムの構成図を示す。

今後、順次装置の整備を進める予定である。システムの概要については「2 空港面航空機自動識別表示システムの基本構成」の項を参照されたい。

5.1 構成装置の性能・機能

(1) SSR

航空局で運用に供されている SSR と同等の性能を持

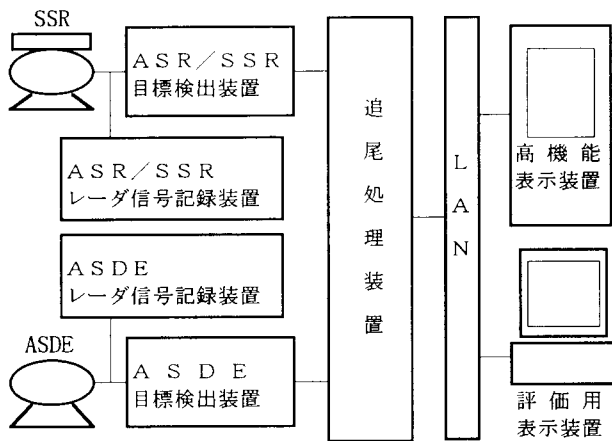


図11 実験システム構成図

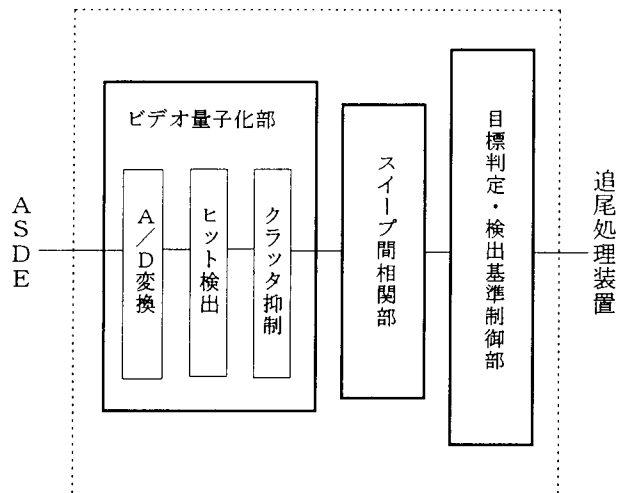


図12 ASDE 目標検出装置

つ実験局である。航空局では ASR と一体となって運用されているが、本実験システムでは単体で運用している。空中線地上高は19.2mで、ホグトラフアンテナを使用している。

(2) ASR / SSR 目標検出装置

ASR 及び SSR のレーダビデオ信号から航空機の目標検出を行いレポート形式（以下ターゲットメッセージという）で目標情報を出力する。航空局で運用に供されているものと同等の性能を持つ。本実験システムは、SSR 単体で運用しているため仙台空港での実験では ASR 目標検出部は不要であるが、ASDE 設置空港（羽田空港等）のレーダビデオ信号により実験システムを稼働させ性能評価を実施する必要があるため ASR 目標検出部を有する。

(3) ASR / SSR レーダ信号記録装置

ASR / SSR レーダビデオ信号の記録・再生を行う。

(4) ASDE

航空局で運用に供されている ASDE-91 と同等の性能を持つ実験局である。空中線地上高は29.47mである。

(5) ASDE 目標検出装置

ASDE のレーダビデオ信号を入力して航空機等の目標を検出し、目標の大きさ等の情報を付加したターゲットメッセージを出力する。

(6) ASDE レーダ信号記録装置

ASDE レーダビデオ信号の記録・再生を行う。

(7) 追尾処理装置

ASR / SSR 目標検出装置及び ASDE 目標検出装置からのターゲットメッセージを入力する。それぞれのターゲットを追尾して FP 情報と相関をとり、航空機の

航跡データを表示装置に出力する。

(8) LAN

伝送速度10Mbps のバス型 LAN である。

(9) 高機能表示装置

レーダビデオ信号のアナログ表示、デジタル表示、ミックス表示（アナログとデジタルを重畳表示）が可能である。航空機の航跡データにより航空機をシンボル表示する。フライトデータリストの表示・変更を行う。

(10) 評価用表示装置

高機能表示装置複数台運用を評価するための、ワークステーションを使用した評価用表示装置。レーダビデオ信号のデジタル表示のみ可能である。

5.2 信号処理方式

空港面航空機自動識別表示システムのために、新たに開発した ASDE 目標検出装置、追尾処理装置の信号処理について述べる。これらの装置は、目標検出率・追尾精度等の評価実験を行うため、各種パラメーターの変更が可能となっている。

(1) ASDE 目標検出装置

ASDE 目標検出装置の機能ブロックを図12に示す。ビデオ量子化部に入力された ASDE からのレーダビデオ信号は、サンプリング周期 $1/2048\text{NM}$ （約 6 ns）、分解能 8bit で量子化される。この $1/2048\text{NM}$ 毎の量子化信号は、比較器（1レンジセルが $1/2048\text{NM}$ ）においてヒット検出レベルと比較され、これを超えたものがヒットとして検出される。ここでヒット検出レベルは、CFAR（Constant False Alarm Rate）係数に検出対象セル前後の平均ビデオレベルの大きい方を乗じて得られたレベ

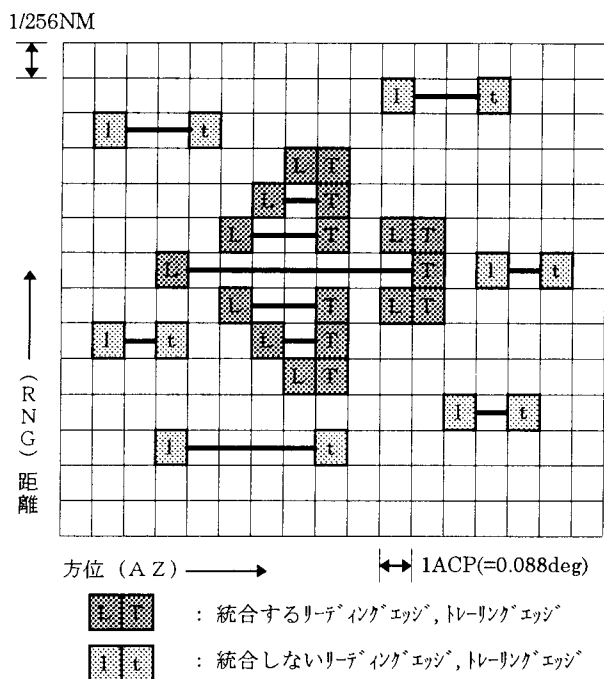


図13 統合概念図

ルと、プリセットスイッチで設定した最小量子化レベルとを比較したときの大きい方のレベルである。CFAR 係数は、検出基準制御部において単位エリア(1/8 NM, 360/128deg) 毎に計算された検出確率により設定される係数である。ヒット検出出力は、特定エリア(芝地等に設定したエリア)のビデオレベルに基づく出力制限、ブランクマップ(ヒット検出出力禁止エリアに設定するマップ)によるクラッタエリアでの出力禁止等により制限を受けて出力される。

スイープ間関連部では、ヒット検出出力をステアケースインテグレータ(階段積分)方式により、方位方向のヒットの連続性から目標のリーディングエッジ(方位方向前縁)、トレーリングエッジ(方位方向後縁)の判定を行う。ステアケースインテグレータ方式とは、ヒットの有無により目標の評価値を上昇・下降させ、その評価値がリーディング基準まで上昇したとき(ヒットに連続性があったとき)リーディングエッジ検出、トレーリング基準まで下降したとき(ヒットに連続性がなくなったとき)トレーリングエッジ検出とする方式である。

目標判定部では、これらのリーディングエッジ、トレーリングエッジを、距離方向・方位方向の連続性により統合し、単一の目標として出力する。統合概念図を図13に示す。図のように、統合により航空機の形状になることが予想される。統合された目標は、それぞれのリーディ

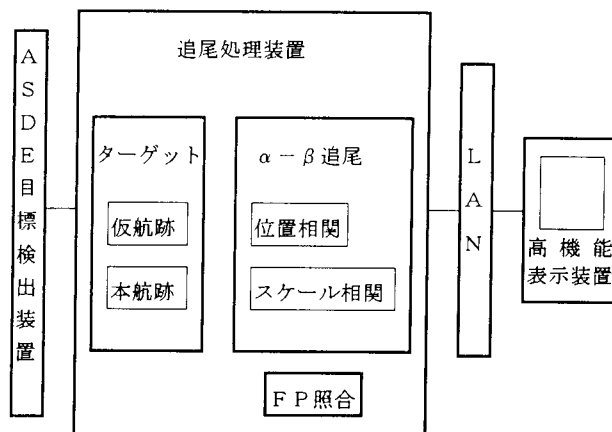


図14 ASDE ターゲット追尾処理

ングエッジからトレーリングエッジまでの長さの合計から目標の大きさを検出されて、検出対象目標の判定を受ける。この判定により、小目標・大目標は検出対象外となり、航空機としての大きさを持つ目標のみが位置・大きさ等の情報を付加され、ターゲットメッセージとして出力されることになる。目標の中心位置は、方位方向は目標の中で最も長いランレングスの中心方位、距離方向は目標の中間点としている。大きさ情報は、大・中・小の3種類である。

検出基準制御部では、CFAR 係数制御、ステアケースインテグレータ検出基準制御等、目標検出基準に係る制御を行う。

(2) 追尾処理装置

追尾処理装置は、ASR / SSR 目標検出装置、ASDE 目標検出装置からのターゲットレポートにより目標の追尾を行い、航空機の着陸直前にビーコンコードを SSR ターゲットから ASDE ターゲットに移管する。航空機の自動識別は、ASDE ターゲットが移管されたビーコンコードを空港面上で保持し続けることにより可能となる。図14に ASDE ターゲット追尾処理の系統を示す。

追尾のための関連処理は、SSR 監視区域では位置相関と SSR 相関(ビーコンコード・高度)、ASDE 監視区域(空港面)では位置相関とスケール(大きさ)相関である。スケール相関とは、ターゲットの大きさ情報(大・中・小)でスキャン間相関をとることである。SSR 監視区域での追尾は ARTS と同じであるが、ARTS は SSR から 2 NM 以内は追尾処理を行っていないのに対して、本システムでは 2 NM 以内の追尾処理を予測計算により補強しながら行っている。ASDE 監視区域での追尾は、ARTS・RDP と同様に $\alpha-\beta$ 追尾により行われてい

る。 α - β 追尾は、直線予測の定数として α (位置平滑係数)、 β (速度平滑係数) を用いた追尾方式である⁽⁷⁾。ASDE 目標検出装置からのターゲットは、 α - β 追尾による予測位置と観測位置 (実際のターゲットの位置) との差により選択される旋回ゲート (航空機が旋回している時使用する追尾ゲート)、直線ゲート (航空機が直進している時使用する比較的狭い追尾ゲート) を使用してスキャン間相関により α - β 追尾を受け、FP との照合により航空機情報を付加された航跡データとして高機能表示装置に出力される。ただし、これは繰り返し相関がとれ、基準以上の追尾品質 TQ (Track Quality) を有する本航跡の場合であり、芝地の揺らぎ等により突然現れた偽のターゲットは仮航跡として登録され、TQ 値が本航跡の基準を超えない限り追尾対象とはならない。偽のターゲットであるにもかかわらず、本航跡となってしまう誤目標については、ASDE 目標検出装置でのブランクマップ、高機能表示装置での NAI エリアの設定等により出力を制限する。(NAI エリア: Non Automatic Initiation area, 高機能表示装置から追尾処理装置に対して設定する仮航跡登録禁止エリア (0.088deg, 1/256NM 単位))

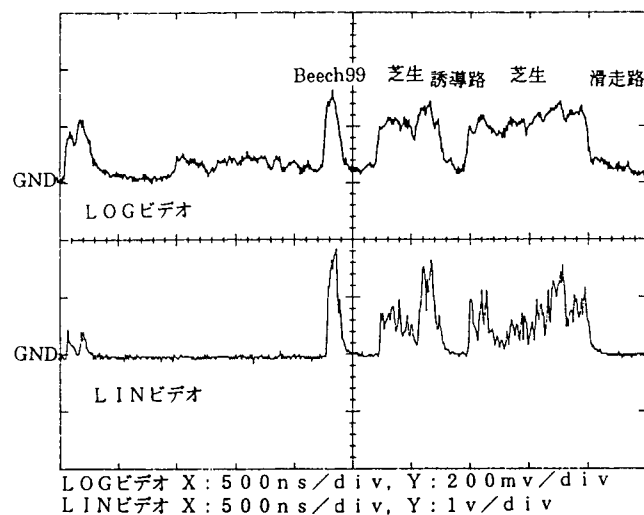
6 評価実験

6.1 ASDE レーダビデオ信号特性

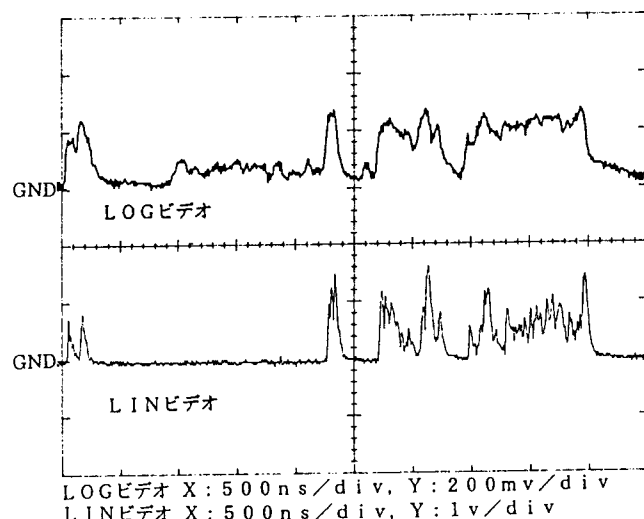
ASDE 実験局のレーダビデオ信号を A スコープ (距離を X 軸 (横方向) に、反射電波の強さを Y 軸 (縦方向) にとる表示方式) で観測した。ASDE のレーダビデオ信号出力としては、LOG (対数) ビデオと LIN (直線) ビデオの 2 種類があり、それぞれ STC 及び FTC (Fast Time Constant) の制御が可能である。STC は近距離からの強い信号に対しては感度を抑制し、遠距離にいくに従って感度を上げていくようにするものでクラッタの抑圧に効果がある。また、FTC はクラッタの中のターゲットを感知できるようにする微分回路である。

(1) 航空機・芝生のエコー

図15(a)は、当所実験用航空機 Beech99 (全長13.58m, 全幅13.98m, 全高4.38m) を ASDE 空中線から水平距離約330mの地点に置き、機首を空中線に対して正対させたときのレーダビデオ信号である。このときの芝生の丈は約50cmであった。LOG ビデオは、LIN ビデオでは信号レベルが低い滑走路・誘導路においても信号レベルが高くなり、LIN ビデオに比べて航空機対クラッタ (芝生等) 信号レベル比が小さくなっている。また、航空機エコー



(a) 空中線に正対



(b) 空中線との相対角度45度

図15 Beech99のレーダビデオ信号

のビデオ幅が広がっており、半振幅点でのビデオ幅は LIN ビデオより約28ns (4.2m) 広がっている。LIN ビデオは、エコーの立上がり立下がり急峻であるため、誘導路・滑走路、芝生、航空機を識別することは容易であるが信号レベルの変動が大きい。特に芝生のエコーはスパイク状になっており、風による揺らぎ等により変動が大きい。芝生の信号レベルは丈によって若干変動するが、丈が短く枯れている状態 (3月上旬) でも大きな信号レベルを返す。

図15(b)は、同一地点で機首を空中線に対して45度にしたときのものである。航空機のエコーの信号レベルが低

くなり、芝生と同レベルになっている。正対させたときに比べて、LIN ビデオで約1.8dB(電圧比)低下している。

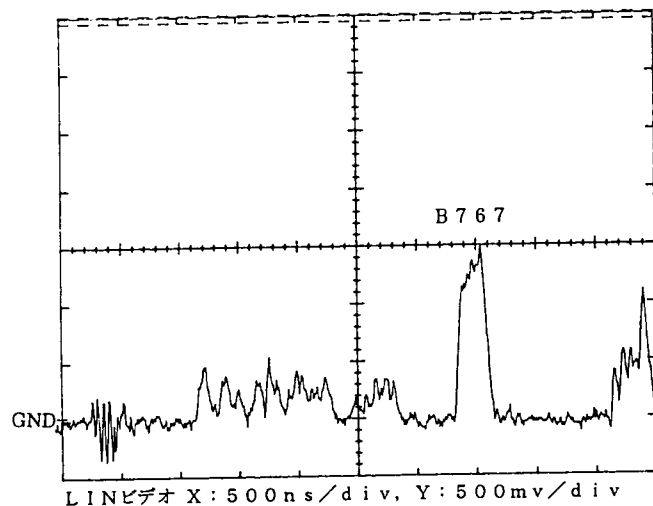
ASDE 高輝度表示装置における表示状態は、エコーの走査ごとの変動 (scan-to-scan fluctuation) が大きく、停止している航空機でも微妙に変動しているのが確認できた。また、二次エコーの発生も確認できた。二次エコーとは、レーダのパルス繰返周期を越える遠方の目標の反射波が、次のパルスが発射された後に受信されるため、あたかもレーダの近くにその目標があるように表示されるものである。二次エコーは、関西新空港でも設置調整時に確認されており、これは ASDE 空中線チルト角を変えることにより抑えることができる。ASDE 実験局の場合、空中線主ビームセンターは当初の設定では-1度方向であったが、これをさらに下側に1度傾けることにより二次エコーを抑えることができた。チルト角の変更にともない、高さ方向の ASDE 監視覆域について Beech99 搭載の電波高度計で確認したが、B 滑走路端直上 (ASDE 空中線からの水平距離約1080 m) で ASDE 空中線地上高とほぼ同高度の約100ft まで Beech99 の機影を確認できた。

図16(a)は、B767が誘導路を走行しながら ASDE 空中線に対して接近 (水平距離約540 m) しているときの LIN ビデオである。図16(b)は、機首を変えながらさらに約70 m 接近したときのもので、信号レベルの低下及びエコーのスプリットが発生している。これは航空機の翼・胴体等からの反射が互いに干渉しあい、生じたものと考えられる。スプリットによる半振幅点におけるエコーの欠落は約83ns (12.4 m) である。ASDE 実験局は、空中線地上高が低くレーダ電波が航空機に斜め方向から照射されることにより、このように航空機エコーの乱れが顕著に現れるものと考えられる。ASDE 高輝度表示装置上では、視認性を向上させる目的でレーダビデオ信号レベルを飽和寸前まで上げて調整しているため、このようなスプリットの発生を確認することは難しい。

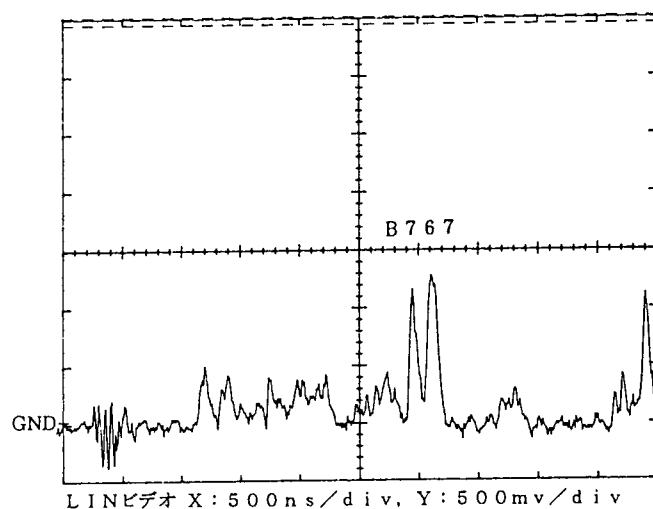
航空機の信号レベルは、以上のように ASDE 空中線との相対角度及び距離によって大きく変動する。特に Beech99 のように機体の小さい航空機の信号レベルは、芝生の信号レベルと同程度になるため、信号レベルの比較だけで航空機とクラッタを分離・識別することはできない。したがって、航空機エコーの広がり (大きさ)、形状及び動態特性等により、これを実現するアルゴリズムが必要になる。

(2) 降雨による影響

雨滴による電波の減衰及び反射は、降雨強度が強いほ



(a) 正常



(b) スプリット状態

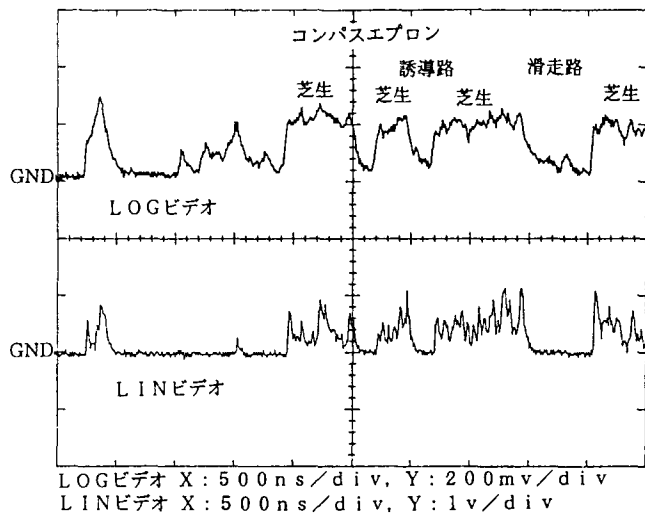
図16 B767のレーダビデオ信号

ど、また使用する周波数が高いほど大きくなることが知られており、ASDE は使用周波数帯が24.5GHz (波長1.22cm) と高いため、降雨による影響が非常に大きい。また、大気中の水蒸気は22GHz 付近に共鳴点があり、ASDE は大気による減衰も大きい⁽¹¹⁾。

現在運用に供されている ASDE-91は、有効反射面積3 m²の物標を降雨強度16mm/h のとき探知できる性能を持っている。しかし、この探知性能は航空機をデジタル信号として目標検出できることを保証するものではない。降雨の場合、ASDE 高輝度表示装置では ASDE 空中線位置を中心にして、降雨によるクラッタが距離方向に



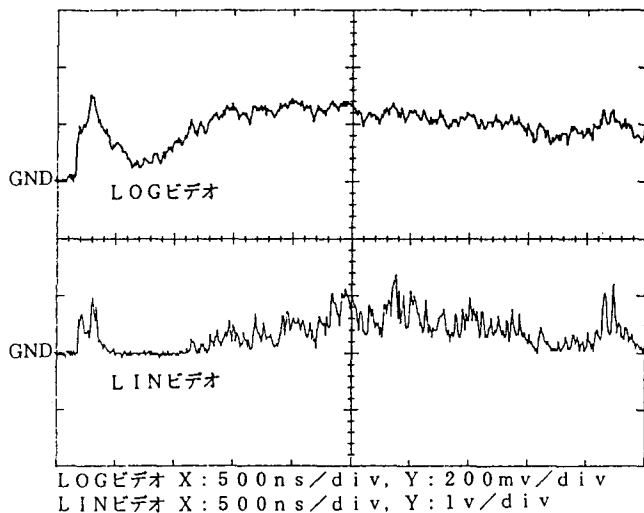
(a) 無降雨時



(a) 無降雨時



(b) 降雨時



(b) 降雨時

図18 降雨による影響

図17 ASDE 高輝度表示装置 (降雨時)

弱まりながら存在するのが確認され、航空機を確認するのが困難になる。図17に無降雨時と降雨時におけるASDE 高輝度表示装置画面の一例を示す。

図18に無降雨時及び降雨時における空港面のレーダビデオ信号を示す。(a)図の無降雨時と比較すると、(b)図は本来信号レベルの低い誘導路・滑走路が雨によるエコーで埋められた様に見える。これは雨滴により減衰を受けて到達した空港面のエコーと、雨滴の反射によるエコーが重なっている状態を示している。このように降雨の場合は、雨滴の減衰によるターゲットの信号レベルの低下と、雨滴の反射による信号レベルの上昇が問題となり、

目標検出率の維持が大きな課題である。

6.2 目標検出率・追尾精度

B767, MD81, Beech99を実験対象機として目標検出率、追尾精度を検証した。実験システムの各種パラメータ数値は、実験時において最適と思われる値を設定した。各航空機の大さを表4に示す。

(1) 目標検出率

目標検出率は、航空機が滑走路に着陸してからスポットに到着するまでの間に目標として検出された回数を計数し、それを航空機の移動に要した総スキャン数で除す

表4 航空機の大きさ

機種	全長	全幅	全高
B767	54.94 m	47.57 m	15.85 m
MD81	45.07 m	32.87 m	8.53 m
Beech99	13.58 m	13.98 m	4.38 m

ことにより求めた。目標検出回数をD、総スキャン数をTとすると目標検出率Pは次式で求められる。

$$P = \frac{D}{T}$$

目標検出率は、ヒット検出レベルの設定により変化する。ヒット検出レベルが高いと、エコー信号レベルが低い航空機は検出されず目標検出率は下がる。逆に低いと、航空機を検出すると同時にクラッタも検出するため、処理対象ヒットの増加によりASDE目標検出装置は処理オーバーフローとなってしまう。仮に目標処理可能機数を増やしたとしても、航空機エコーとクラッタの一体化の問題により、目標検出率を上げることは難しい。表5に各航空機の目標検出率の結果を示す。LOGビデオの場合、航空機対クラッタ信号レベル比がLINビデオより劣るため、Beech99は目標検出することができなかった。一

表5 目標検出率

ビデオ種別	B767	MD81	Beech99
LOG	96.7%	78.1%	—
LIN	99.1%	100.0%	90.3%

方、LINビデオは90%以上の目標検出率を得た。Beech99の検出率が低いのは、仙台空港の場合VOR/DME局後方に誘導路があり、機体が小さいためVOR/DME局の影でレーダ電波が照射されず目標検出できなかったことによる。このようなシャドウエリアは空中線の俯角が小さい場合発生するもので、ASDE実験局の場合空中線高が低いため特に顕著に現れる。図19にシャドウエリアの発生状況を示す。滑走路を航行する航空機及びVOR/DME局の後方にシャドウエリアが発生している。

(2) 追尾精度

図20は航空機が滑走路に着陸してから誘導路を走行してスポットに到着するまでの、LINビデオで検出した目標の航跡を空港の概略図(ASDE設置場所は座標(0, 0)の地点)の上にプロットしたものである。滑走路から誘導路に進入するときの航跡変動の原因は、旋回時に航空機のエコーの形状変化によりその中心位置も変動す

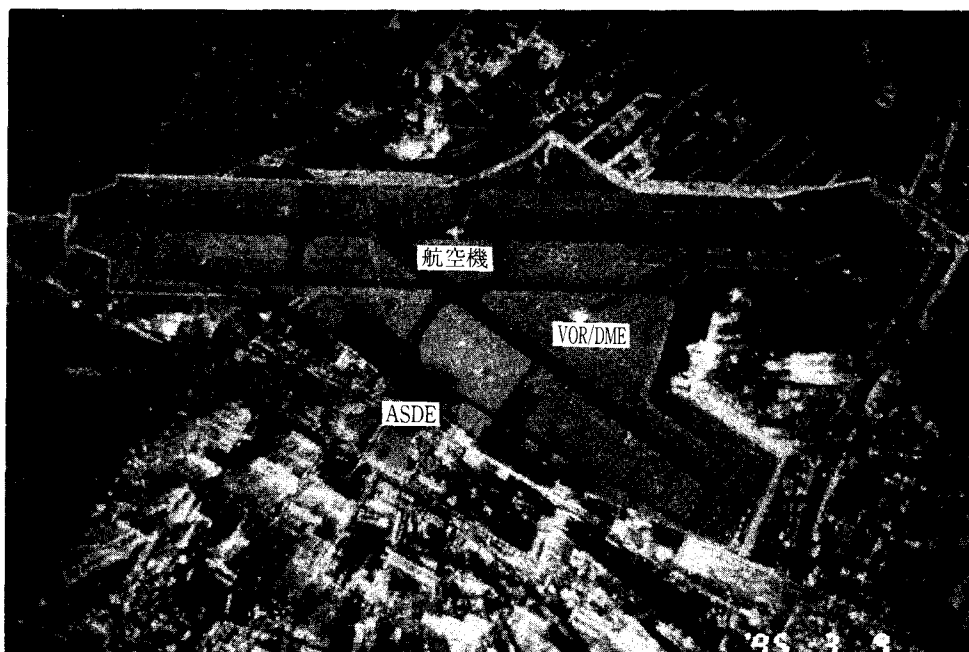
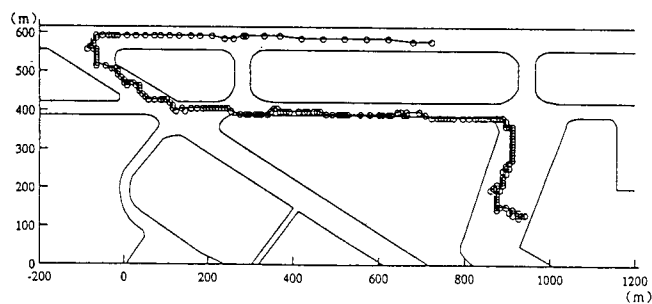
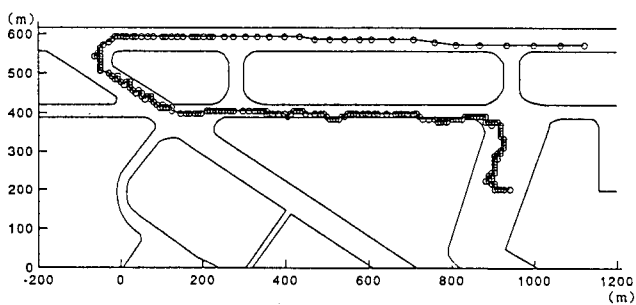


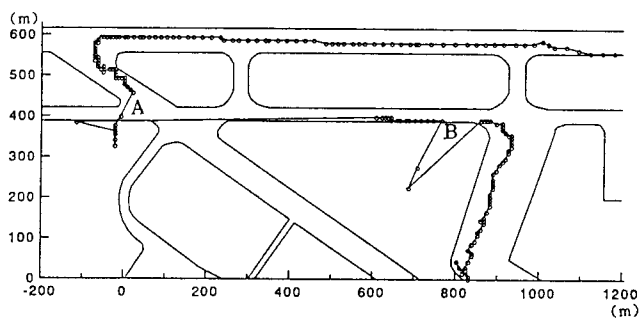
図19 ASDE 高輝度表示装置 (シャドウエリア)



(a) B767



(b) MD81



(c) Beech99

図20 追尾精度

るためである。追尾精度検証の結果、LIN ビデオの場合は B767・MD81の追尾は正常であったが Beech99は A・B 地点で誤目標への乗り移りが発生した。A 地点での乗り移りは、目標のコーストが発生したとき、大きさが同程度の近傍の誤目標と相関が成立したものである。B 地点は VOR / DME 局の影になる場所で、同様にコースト発生により乗り移りが発生した。LOG ビデオは目標検出率が悪く、B767でも乗り移りが発生した。

追尾方法は、まず、現在のターゲット（航空機）の位置・速度から次スキャンの予測位置を決定し、その予測位置を中心とする追尾ゲートを設定する。次に、次スキャ

ン時に追尾ゲート内に上がってきたターゲットの候補と位置相関・スケール（大きさ）相関をとりターゲットの位置を決定する。したがって航空機の中心位置が変動すると、追尾ゲートの範囲は滑走路・誘導路以外の芝生の区域に及ぶことになり、芝生内から発生する誤目標を真の目標と誤る可能性が高くなる。特にコースト時は、追尾ゲートの種類が直線ゲートから旋回ゲートに遷移し、旋回ゲートの範囲もコースト回数により徐々に広がるため乗り移りが発生しやすくなる。追尾精度を上げるためには、誤目標を抑圧することと追尾ゲート範囲を最適化して位置相関・スケール相関の精度を向上させることが必要である。

7 まとめ

電子航法研究所では、平成 5 年度に空港面航空機自動識別表示システムの研究に着手しており、平成 5 年度は、空港面航空機自動識別表示システムの基本システム構成を策定して、システムを開発するための基本的な調査・検討を行い、技術的な問題点について考察を行った。平成 6 年度は、平成 5 年度の研究成果に基づき実験システムを構築し、基礎的な評価実験を行って今後の実験の方向性を探った。

評価実験の結果、現段階では LOG ビデオより LIN ビデオの方が実験システムの目標検出・追尾処理に適していることがわかった。しかし、降雨時における飛行実験をまだ行っていないため、何れのビデオ信号で目標検出を行うかは今後の実験の結果によることとなる。また、これまでの実験では本来航空機の存在しない芝生等の区域も目標検出対象としているため、適正なヒット検出レベルを設定することができず期待通りの実験結果を得ることができなかった。これは予想以上に、芝生の信号レベルが大きかったことと、航空機の信号レベルの変化が大きかったことによる。（ASDE 高輝度表示装置上では、視認性を向上させる目的でビデオ信号レベルを飽和寸前まで上げているため、信号レベルの大きさ・変化を確認することができなかった。）例えば、信号レベルの大きい芝生からの誤目標を抑えるためヒット検出レベルを高く設定した場合、航空機エコーがスプリットしていると ASDE 目標検出装置では 2 目標として検出することがある。ヒット検出レベルが高いと、航空機エコーはスプリット間隔の広い部分でヒット検出され、ランレングスが二つに分離されるため 2 目標として検出される。これを防ぐためには、目標統合のパラメータ(図13参照：1 /

256NM, 0.088deg 単位)を大きく設定すればよいが、他の航空機・クラッタと一体化する恐れがあるため小さい値が望ましい。また、ヒット検出レベルが高いと小型航空機は目標検出できないこともある。したがって、今後の実験結果によっては、航空機の走行しない芝生等の区域は目標検出対象外区域とし、ヒット検出レベルを最適値に設定することにより誤目標を抑え目標検出率を向上させることが必要になると考えられる。

今後の予定としては、ASDE 設置空港のレーダビデオ信号による実験システムの稼動・性能評価、降雨時における実験システムの性能評価及びブラインドエリア目標検出装置の開発を考えている。

参考文献

- [1] 助航空交通管制協会：“空港面航空機自動識別表示システムに係わる調査報告書”，平成5年
- [2] 石橋，塩見：“空港面監視・誘導方式について”，電子情報通信学会技術研究報告 SANE91-64, pp. 15-21, 1991
- [3] “THE FUTURE AIRPORT SURFACE MOVEMENT SAFETY, GUIDANCE, AND CONTROL SYSTEM: A VISION FOR TRANSITION INTO THE 21st CENTURY”, U. S. Department

of Transportation Federal Aviation Administration, Oct. 1993

- [4] 北館，加来：“空港面航空機自動識別表示システムについて”，平成6年度（第26回）電子航法研究所研究発表会講演概要，平成6年5月
- [5] 加来，北館：“レーダによる空港面監視システムの試作・実験”，電子情報通信学会総合大会講演論文集通信1，pp.212, 1995年3月
- [6] 北館，加来：“空港面航空機自動識別表示システムの評価実験”，平成7年度（第27回）電子航法研究所研究発表会講演概要，平成7年5月
- [7] 加来，北館：“走行状態の航空機の検出と追尾”，計測自動制御学会第34回学術講演会予稿集 Vol. I, pp.161-162, 1995年7月
- [8] 加来信之：“新型オープンアレイアンテナの評価実験”，電子航法研究所報告, No62, pp.15-28, 1989.11
- [9] 篠原武三その他4名：“ASDE 性能向上の研究報告書”，電子航法研究所航空施設部，平成元年3月
- [10] 航空保安大学校岩沼分校編集：“一次レーダ理論”，pp.1-29, 航空振興財団，平成2年
- [11] 関根松夫：“レーダ信号処理技術”，pp.36, 電子情報通信学会，平成3年
(平成8年1月25日受付，8年3月25日再受付)