

高度維持監視システムの研究

新井 芳雄* 高橋 賢**
渡辺 泰夫* 佐藤 裕喜*

Study on Altitude Surveillance System

Yoshio ARAI, Masaru TAKAHASHI,
Yasuo WATANABE and Hiroki SATO

Abstract

This paper presents the altitude surveillance system (ASS), i.e., its hardware specification, software design, performance evaluation and interim surveillance results using real SSR Mode-C data.

Steadily increasing air traffic in recent years is causing delays in several areas, therefore ICAO is planning to reduce the vertical separation from 2,000ft to 1,000ft between FL290 and FL410. It consequently increases usable cruising levels. Based on the collision risk assessment, ICAO RGCSP concluded in 1988 that application of a 1,000ft vertical separation minimum was technically feasible, on the condition of an introduction of system performance monitoring etc..

ASS is a super-mini-computer based height monitoring system. It checks assigned altitude deviations (AAD), bit-errors, level-offs and abnormally decoded Mode-C signals due to the multipath effect. AAD is detected as the difference between received Mode-C and assigned altitude when an aircraft cruises, or the differences between Mode-C and smoothed height trajectory when an aircraft climbs or descends. Level-off maneuvers are classified into anticipated types by a pattern matching method.

The screening parameters of monitor software are adjusted to meet the purpose of the system by its performance evaluation using real SSR Mode-C data. As an example of the result, it was found that an average of 12 among 833 aircraft deviate more than 300ft in one day.

1. はじめに

高密度交通空域を飛行する航空機間の垂直方向間隔の安全性は、航空機の高高度維持精度と関係するので、管制指示高度から大きく高度逸脱をおこなっている航空機に注意する必要がある。

1975年に開催されたICAO（国際民間航空機関）のRGCSPP（管制間隔検討パネル、Review of the General Concept of Separation Panel）の第3回会議で垂直間隔短縮の可能性が正式議題となり、各国が調査を始めた。これは増大する航空交通に対処するために、高度29,000ft以上での現在の垂直管制間隔2,000ftを1,000ftに短縮することで空域を一層有効に利用すること及び燃料の節約に伴う経済的効果をねらいとしている。RGCSPPでは、航空機搭載の気圧高度計、フライトレコーダ、地上レーダーなどによる各種の統計的調査に基づいて垂直管制間隔短縮が技術的には可能であると結論しているが、その条件として飛行高度の監視等が必要であるとしている。

そこで、当研究所では監視の一方法としてSSRモードCデータを用いることを考え、昭和61年

からデータを集集して航空機の巡航高度到達時（レベルオフ）の飛行特性を解析した。昭和62年からはこの基礎的なデータに基づいて、高度の自動監視のための高度維持監視システム（ASS：Altitude Surveillance system）の開発を行ったので、これについて報告する。

2. 高度維持監視システムの概要

高度維持監視システム（ASS）は航空機のSSRモードCデータを連続的に監視することにより、管制上問題のある高度異常の有無の検出を行う。高度異常は事前に行われた航空機のSSRモードCデータの解析¹⁾、海外文献調査などにより次の項目に分類される。

- (1) 水平飛行時の機上高度維持装置（PMS/FMS（注1）/ハイトロックなど）の誤差やパイロットの技量による管制指示高度との差

（注1） PMS：Performance monitoring system
FMS：Flight management system

高度異常指定機航跡（全体）

指示高度：370 追尾完了：90/09/19 03:39:32

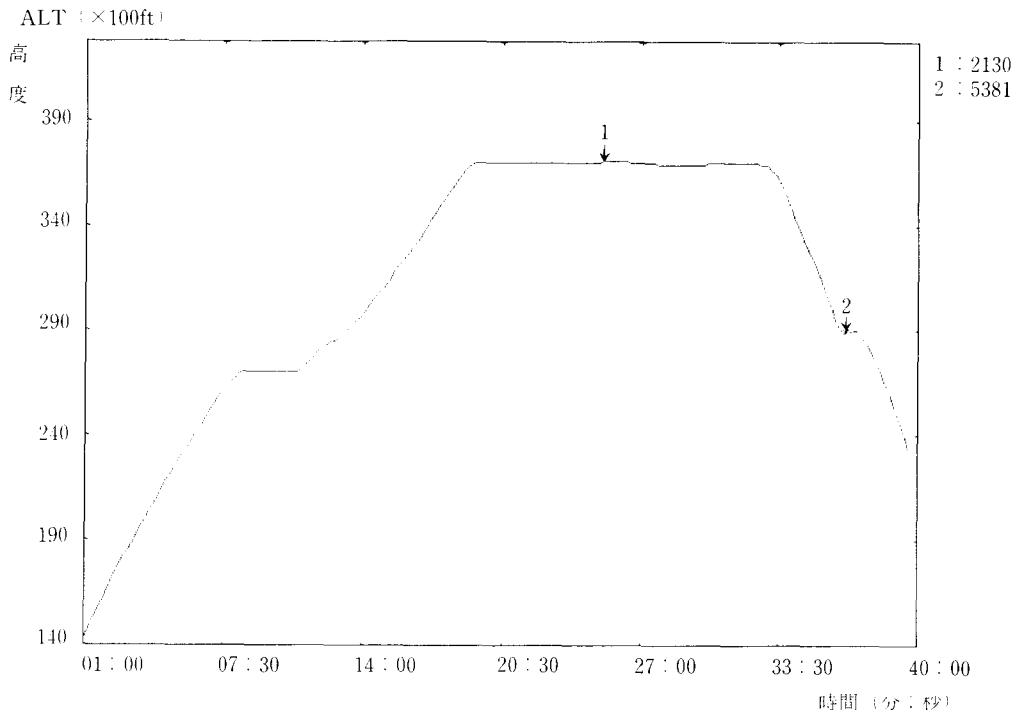


図1 航跡全体図

航 跡 情 報

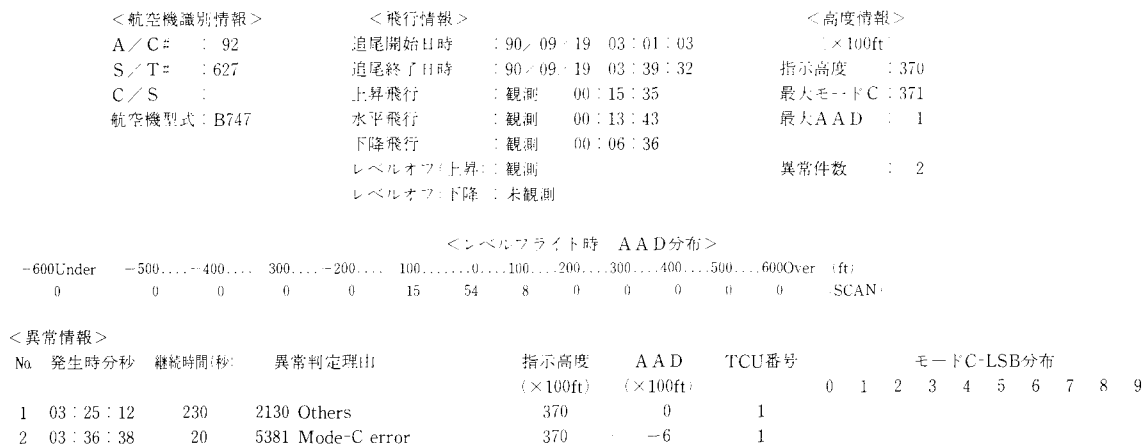


図2 航跡情報

- (2) レベルオフ時の機上の高度制御に起因するオーバーシュート、アンダーシュート等
- (3) トランスポンダのモードCビットエラー
- (4) 電波伝搬異常によるモードC符号誤り
(直接波とマルチパス波との位相干渉)

- (5) 上昇・下降時の高度異常

これらは原因別に大別すると、航空機が航法誤差により管制指示高度から実際に逸脱する場合と、モードC信号の伝送系にエラーが生じて見かけの上で指示高度からはずれる異常に分けられる。特に水平飛行中に生じる管制指示高度からの高度逸脱をAAD (Assigned Altitude Deviation) と呼ぶ。

ASSはこれらの高度異常を検出し、データ出力画面上に高度軌跡と重ねて、検出された高度異常を矢印で表示する(図1)。異常を検出された航空機の型式などの詳細な飛行情報、AADの大きさやその分布、高度異常の分類などは航跡情報画面に表示される(図2)。

検出された大きな高度逸脱、モードC異常はデータベースに登録され、航空機型式、飛行高度、季節、発生位置などをキー項目として、高度逸脱の種類、大きさ、発生頻度などの統計情報を得ることができる。

3. 監視システムの開発

3.1 事前調査

高度監視のための異常判定ロジックは、航空機

の飛行状態を判定した上で、各飛行状態で事前に発見されている高度逸脱パターンや予想される高度逸脱パターンに分類して検出する方法によっている。

SSRモードCの必要なデータ量はRGCSPPで航空機の高度維持精度を調査する際に必要とされている1万飛行時間以上を目標とした。1年間でこのデータ収集、データ解析を行う必要からコンピュータの処理速度や記憶容量を決めた。

データ解析と並行して監視ロジックの評価を行い、評価結果を監視ロジックやパラメータにフィードバックしていくことにより、人間の判断に近い監視を行うようにした。

3.2 高度維持監視の方法

高度異常の検出方法は各航空機の高度軌跡を解析して、「上昇」、「レベルオフ」、「水平飛行」、「下降」の4状態に分けて、それぞれの状態に応じた監視ロジック、監視パラメータを用いて行う。図3に監視プログラムのフローチャートを示す。

入力SSRデータはレーダー局で受信された航空機の応答信号が時間順に記録されているので、これから各航空機の軌跡を得るために、データを並べ変えて追尾処理を行う。

次に、コースト、ヴォイド(注2)の多いデー

(注2) コースト: SSRが受信できないこと。

ヴォイド: SSRモードAは受信できるが、モードCは受信できないこと。

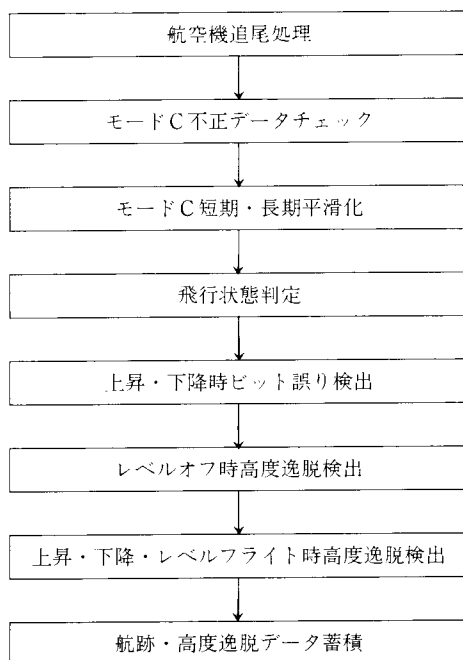


図3 データ処理フローチャート

タや軌跡から異常に大きく離れているデータを除いた航跡データに対して、時間軸方向に順次移動していく一次直線最小二乗法近似で航跡を連続的に平滑化する。この平滑線の傾きとその変化から飛行状態の遷移点を決め、遷移点間の飛行状態を判定する。

航空機のレベルオフ時にFMSの許容誤差やパイロットの操縦技量等によりオーバーシュートやアンダーシュートを起こすことがある。このアンダーあるいはオーバーシュートの大きさが300ftを超える場合を高度逸脱として検出することにした。

また、航空機がレベルフライトしている時に機上の高度維持システムに不具合がある場合、高度逸脱を生じ、このAADが300ftを超える場合を高度逸脱として検出することにした。

トランスポンダ等の異常でSSRモードCの特定ビットが故障している場合には、上昇、下降時の高度軌跡に独特の周期的異常パターンを示す。下位ビット（Cビット）が故障すると、表示される高度の最下位桁に、ある特定の数字が現れなくなる。この現象からトランスポンダの異常ビットを推定できるので、ビットエラーを検出処理することにした（後述）。

符号誤りはマルチパスフェージング等の電波伝搬上の異常に起因すると考えられ、この場合には受信モードC値に不連続が生じ、平滑化高度との間に大きな差が生じるので、モードC異常として検出することにした。

表1 ASSハードウェア諸元

中央処理装置	
基本語長	32ビット
主記憶容量	8 Mバイト
プロセッサ・サイクル・タイム	220ns
メモリバンド幅	18.1Mバイト／S
I／Oバンド幅	14.0Mバイト／S
コンソールターミナル	12インチ
漢字リモートプリンタ	24×24ドット
通信制御部	1.2K～19.2K ビット／S
磁気テープ装置	
トラック数	9トラック、1／2インチ幅
記録密度	800、1,600bpi
転送速度	120Kバイト／S
データ転送装置	
トラック数	9トラック、1／2インチ幅
記録密度	1,600、6,250bpi
転送速度	469Kバイト／S
磁気ディスク装置 1	
記憶容量	354Mバイト
データ転送速度	1.68Mバイト／S
磁気ディスク装置 2	
記憶容量	662Mバイト
データ転送速度	1.8Mバイト／S
グラフィック・ワーク・ステーション (GWS)	
画面	19インチ
表示色	16色
解像度	900×700ドット
レーザー・ビーム・プリンタ	
印刷方式	半導体レーザー
印刷速度	13ページ／分 (B4)
解像度	240ドット／インチ
エディタ端末	
メモリ容量	640Kバイト
ディスプレイ	10インチ
解像度	640×400ドット

3.3 ハードウェア設計

3.3.1 構成

高度維持監視システム（ASS）は、

- (1) 監視データ処理装置本体（CPU、磁気テープ装置、磁気ディスク装置、コンソール端末、エディタ端末等）

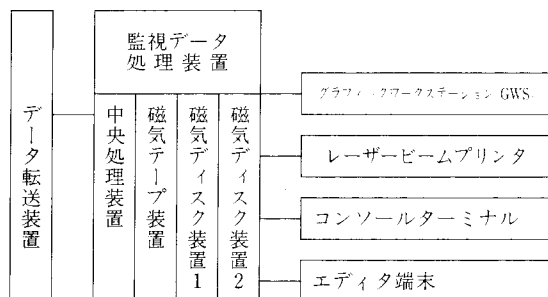


図4 高度維持監視システム構成図

- (2) SSRデータをASSに転送するためのデータ転送装置

- (3) 航空機の高度軌跡や監視結果を表示するグラフィックワークステーション

- (4) 航空機の高度軌跡や統計解析結果を作画するレーザービームプリンタ

から構成されている。

表1にハードウェアの諸元を、図4に本システムの構成図を、図5に概観図を示す。

3.3.2 データ容量

データ収集対象を、東京航空交通管制部で管制する空域を高度29,000ft以上で航行する航空機とした場合、20日間のデータを調べた結果、1日の平均取扱機数は約833機であり、1機あたりのレーダーカバレッジ内での平均飛行時間は58分である。この数値から必要なメモリ容量、磁気ディスクの容量が決められた。

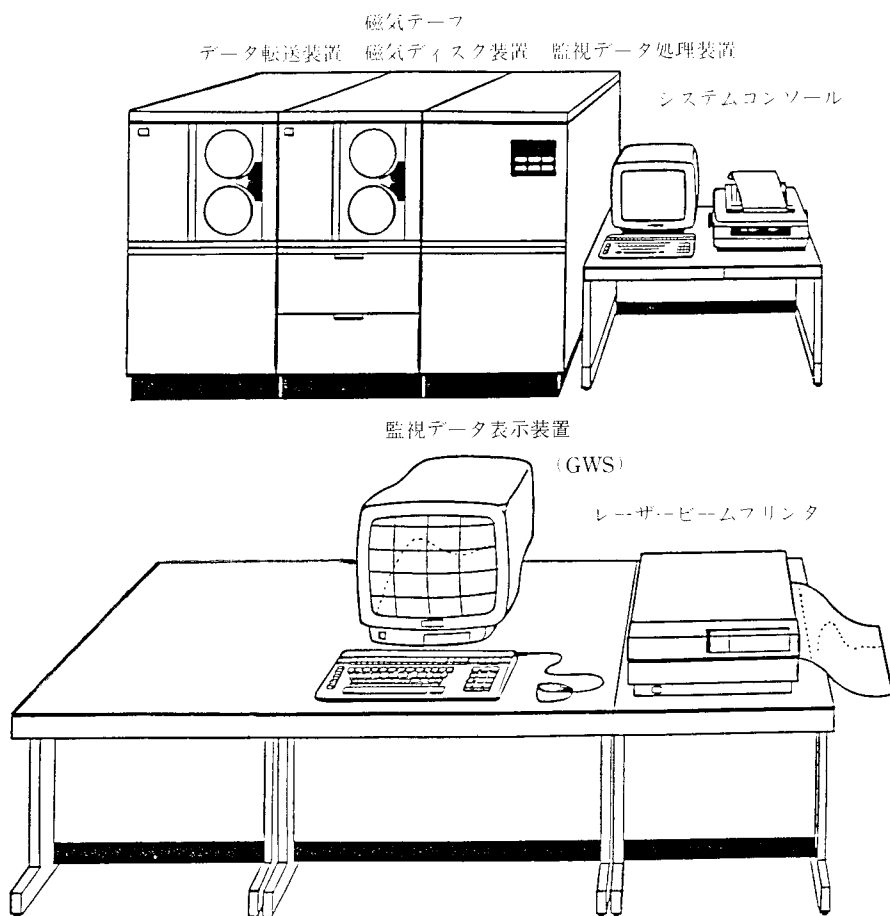


図5 高度維持監視システム概観図

さらに、解析結果をデータベース化して利用するために、1日分のSSRデータをファイル単位として磁気ディスクに記録しておくことにした。本研究のために東京航空交通管制部で50日分のデータが収集され、このデータは磁気ディスクに蓄積されて、データベースソフトウェアにより検索できる。

なお、データベースを構築するためのツールはSQL（注3）であり、検出された高度異常はすべてSQLによって記録、管理される。アプリケーションプログラムはSQLと磁気ディスク上のSSRデータをアクセスすることにより、異常航跡の統計的解析に必要な情報を提供する。

3.3.3 処理時間

ASSは当初オンラインリアルタイムシステム

（注3） Structured Query Language
（構造化照会言語）

として計画されていたため、CPUの処理速度が速く、拡張性、接続性のあるスーパーミニコンピュータを採用した。また、監視プログラムも高速処理を念頭において設計された。しかし、ASSが最終的に研究のためのオフラインシステムとして開発されることになったため、高度逸脱判定ロジックを当初の方針の範囲内で考えられる限り改良することができ、目視による判定とほぼ同程度に検出できるようになった。

3.4 ソフトウェア設計

3.4.1 高度異常判定処理

3.4.1.1 モードC平滑

SSR信号は一般にコーストまたはヴォイドによるデータ抜けや電波伝搬の問題による異常データを含み、高度逸脱判断を誤らせる可能性があるため、これらを除去するプリチェックを行う必要がある。図6にその例を示す。この図は受信モー

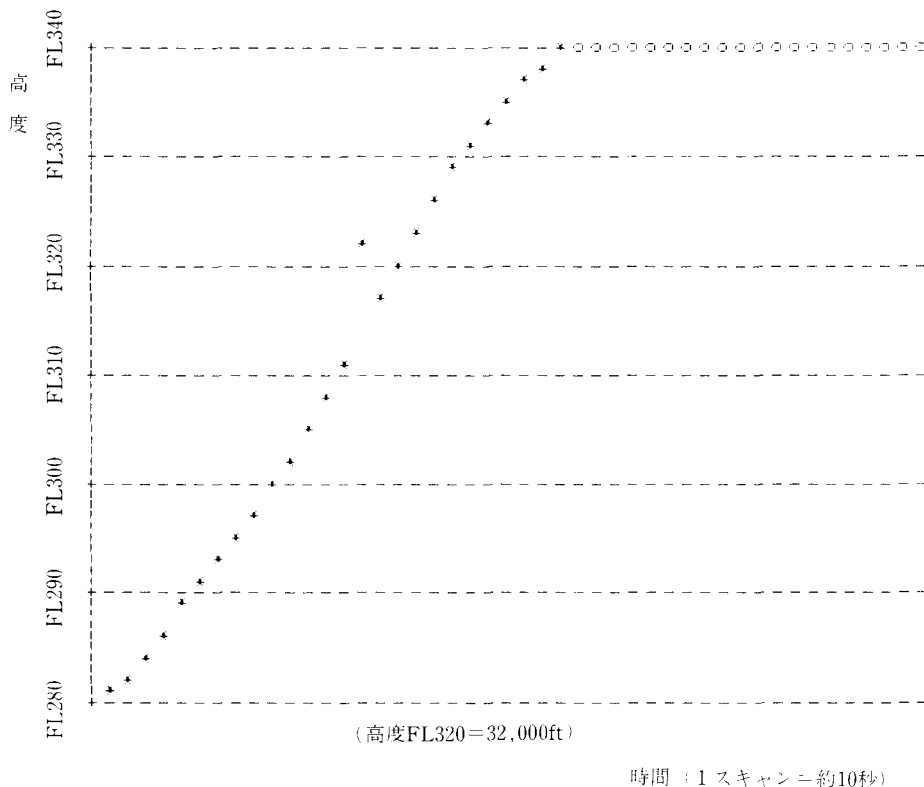


図6 上昇状態における符号誤りの例

ドC値をレーダーの1スキャン毎にプロットしたものであり、モードC符号の誤読解が起きていることを示している。

コースト、ヴォイドがKサンプル中L回発生した場合は異常検出を行わずにコースト、ヴォイド多発と判断する（ASSでは $K=9$ 、 $L=5$ とした）。また、信号伝送系による異常データを除去する方法として高度軌跡を1スキャンずつ時間を進めた $2N+1$ 個のサンプルを使用して最小二乗法によって平滑し、 $N+1$ 個めの受信データと内挿値との差が ΔZ_1 より大きいとき異常データとして判断した（ASSでは $N=4$ 、 $\Delta Z_1 > 1,500\text{ft}$ とした）。また、 $2N+2$ 個目の受信データと外挿値 ΔZ_2 が $\Delta Z_2 > 800\text{ft}$ であるときも異常データとした。最小二乗法はスプライン関数などに比べてアルゴリズムが簡単なので処理時間が短くメモリをあまり使用しなくてすむ長所がある。

飛行状態を判定するためには、 $N=5$ とした長期区間を使って平滑化した高度軌跡の傾きを参照しているが、詳しい判定方法は次項で説明する。上昇・下降時の一時的な高度異常を検出するため

には、 $N=3$ とした短期区間を使って平滑化した高度軌跡と受信データの差 ΔZ_3 をみて、 $\Delta Z_3 > 200\text{ft}$ である場合を高度異常とした。

3.4.1.2 飛行状態判定

モードC平滑直線の傾きと管制指示高度などから航空機の飛行状態が次のいずれであるか判定する。

- (1) 上昇飛行
- (2) 水平飛行
- (3) 暫定維持高度飛行
- (4) 下降飛行

上昇飛行状態の開始点は、長期平滑直線の傾き A_1 が $A_1 > 10\text{ft}/\text{スキャン}$ になった時に、それより以前のデータの短期平滑直線の傾き A_2 が連続して $10\text{ft}/\text{スキャン}$ 以下である最初の時刻とした。

下降飛行の開始点は同様に、長期平滑直線の傾き A_1 が $A_1 < -10\text{ft}/\text{スキャン}$ になった時に、それより以前のデータの短期平滑直線の傾き A_2 が連続して $-10\text{ft}/\text{スキャン}$ 以上である最初の時刻とした。

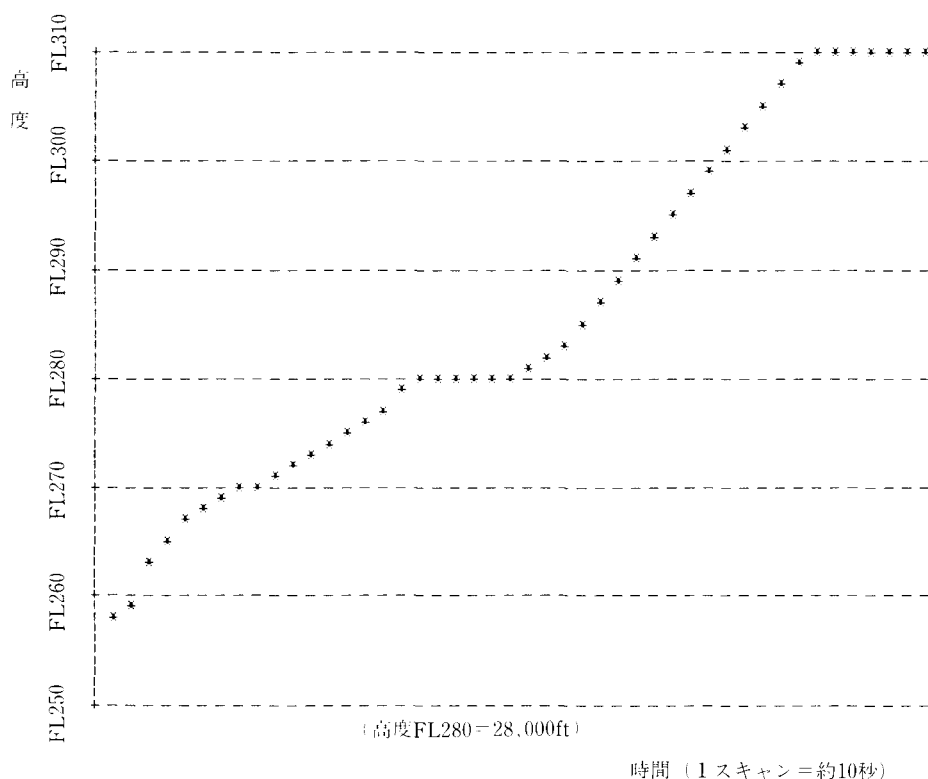


図7 上昇状態における暫定維持高度の例

水平飛行状態の開始点は、長期平滑直線の傾き $A1$ が $|A1| < 1\text{ft}/\text{スキャン}$ になり、かつ、受信モードCが管制指示高度から6スキャン連続して $\pm 200\text{ft}$ 以内であるとき、その第1番目の受信時刻とした。ただし、管制指示高度は飛行中に変更されることがあるため、そのタイミングを考慮する必要がある。

暫定維持高度飛行状態は、交通流の都合上、管制官が上昇・下降時の航空機の高度を一時的に抑えるときに見られるものである(図7)。この状態は、長期平滑直線の傾き $A1$ が $|A1| < 1\text{ft}/\text{スキャン}$ になり、かつ、受信モードCが巡航高度において6スキャン以上連続して $\pm 300\text{ft}$ 以内であるときとした。暫定維持高度飛行状態は1分から2分間位の継続時間であると仮定しているが、継続時間がさらに短い可能性もある。しかし、その場合は一時的な気流の乱れによるとも解釈できるので判定不能とすることにした。

3.4.1.3 ビットエラー検出

SSRモードC信号は9ビットのグレイコードで航空機のトランスポンダから送られてくるが、このうち下位ビット(C1, C2, C3)にエラーが発生すると、10進数に変換した場合、最下位桁の数字(LSB: Least Significant Bit)のうちに現れない数値がでてくる⁽²⁾(表2)。最下位桁の数値のヒストグラムからエラーを起こしているビットを推定することができる。

上昇状態中または下降状態中のモードCの20サンプル以上のLSB分布を求め、ビットエラーチェックを行う。信号伝送系の偶発的なモードCエラーが起こることがあるので、出現率1%未満

のLSBのカウントは0回とする。

また、ビットエラーは連続して発生し続けるとは限らずに、数分間程度の一時的な現象で終わることもある。この場合の検出には一般に軌跡の不連続が生じることを利用して、平滑処理を行ったときに異常と判断された($\pm 200\text{ft}$ 以上平滑線から離れた)ポイントを起点とした20サンプルのLSBチェックを行うことにした。

データ数が少ないとビットエラーではないものをエラーと判断したり、その逆に判断したりするので、この方法はさらに検討を要する。

3.4.1.4 レベルオフ時高度逸脱検出

レベルオフ時の飛行状態は、ノーマル、オーバーシュート(図8)、アンダーシュート(図9)、振動型の4種類に分類することができる。航空機が手動操縦されているか、自動操縦されているかによってレベルオフ時の挙動が異なる。自動操縦で制御されているときでも乗り心地を優先させると100ft程度のオーバーシュートが許容される。逆に航空機の性能限界までの高々度の巡航レベルに到達するとき、アンダーシュートを起こし易い。このようにレベルオフ時の高度逸脱は複雑なので特別に判断ロジックを設けている。管制指示高度付近で水平飛行を開始した前後3分間の高度軌跡から、その傾きと、高度軌跡が管制指示高度を超えているかどうかをみて、3種類のパターンに分類する。このとき、レベルオフ逸脱継続時間と最大AADを記録している。300ftを超える逸脱は管制規則上、危険とされるので問題のあるケースと判断される。

飛行状態の遷移は、他に下降飛行から水平飛行への移行時にもあるが、それらの場合に対してもレベルオフ時の高度逸脱検出を行っている。

3.4.1.5 上昇・下降時高度逸脱検出

航空機が離陸してからレベルオフするまでは一般にフルスロットル状態で上昇するため、高度軌跡は滑らかな上昇曲線となると考えられるので、傾きが逆転している場合は異常と判定する。ただし、暫定維持高度を飛行していて、そこから300ftを超えて逸脱しない限りは高度逆転があっても正常である。また、上昇軌跡が滑らかでなく、平滑線から $\pm 200\text{ft}$ 以上離れている場合も異常としている。

航空機は水平飛行を終え着陸するまでは一般に

表2 ビットエラーパターン

ビットエラー			モードC最下位桁									
C1	C2	C3	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0				×		×	×					
1			×					×	×		×	×
	0		×	×			×	×	×			×
	1				×	×				×	×	
		0							×		×	×
		1	×	×		×	×	×				

(注1) ビットエラーの0, 1は故障状態を示す。

(注2) 最下位桁の×はその数字が出現しないことを表わす。

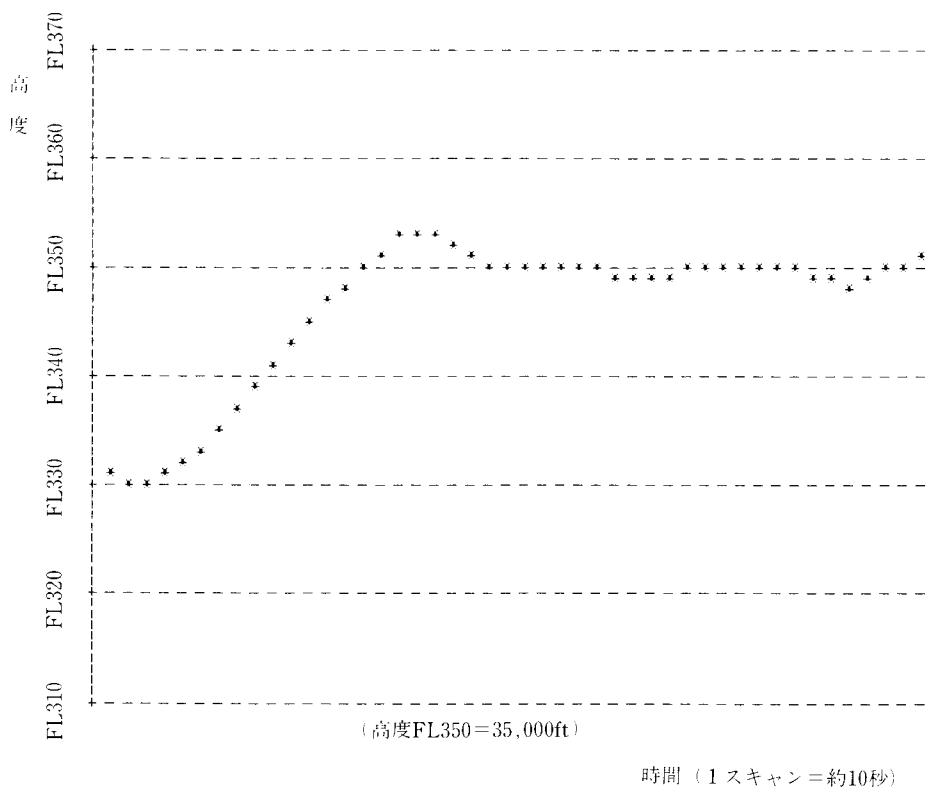


図8 オーバーシュートの例

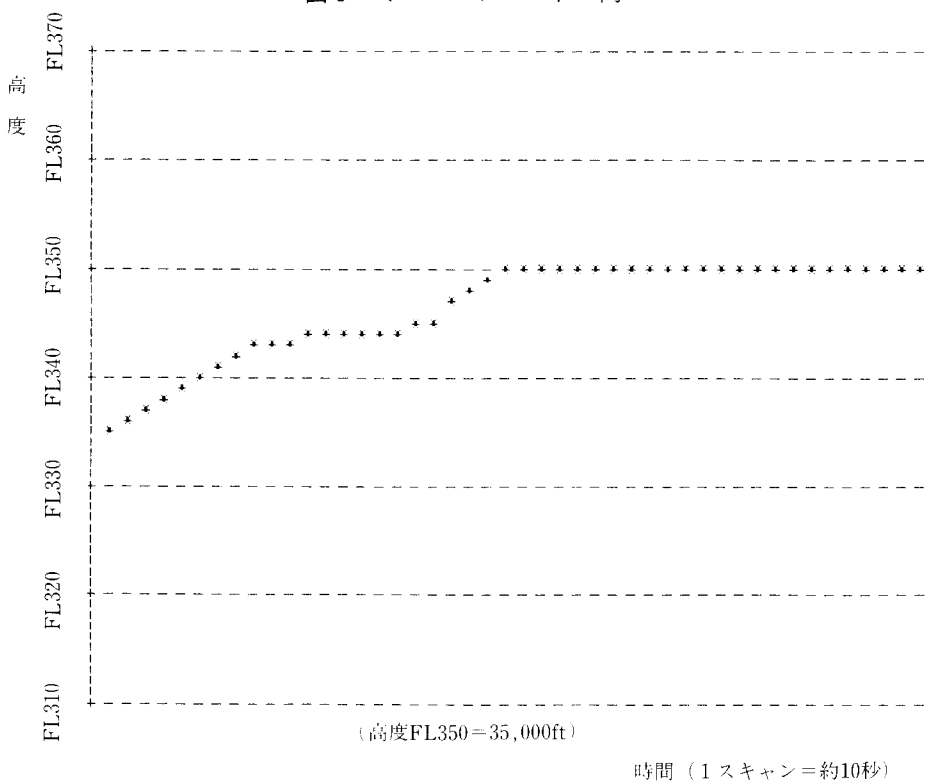


図9 アンダーシュートの例

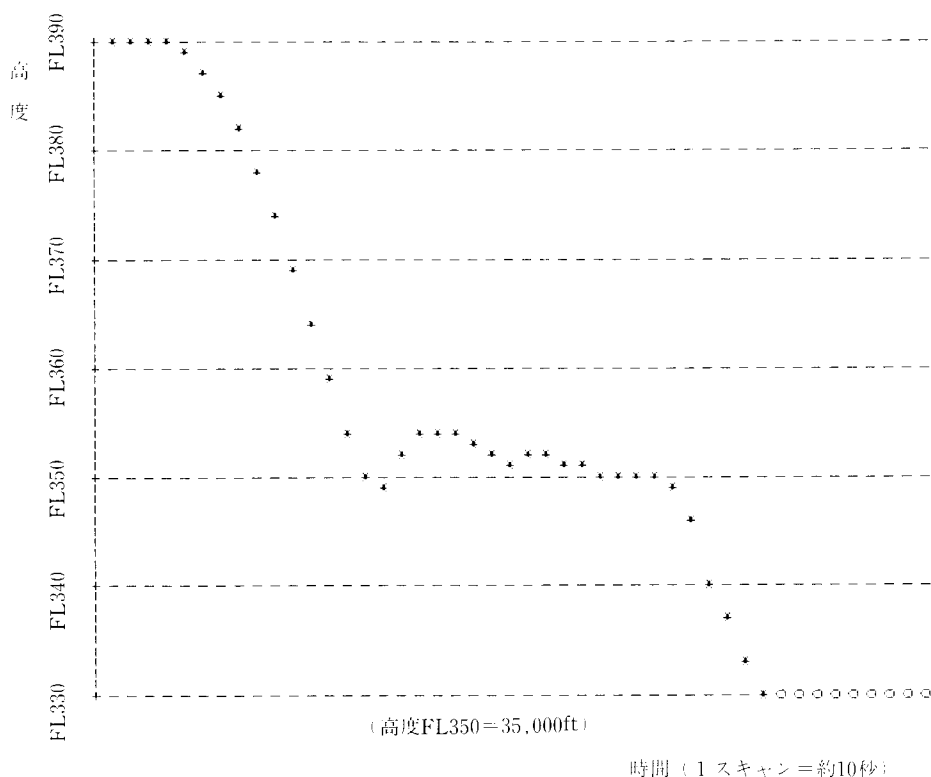


図10 下降状態において暫定維持高度を逸脱する例

プロファイルディセントという方式で降下していく。また、上昇時以上に管制官により高度やヘディングの変更指示を受ける。この指示は入力ジャーナルに記録されることがないので、プログラムで暫定維持高度飛行状態と判断しなければならない。この場合も飛行高度から±300ftを超えて離れると高度異常とする(図10)。下降時にも高度軌跡が逆転すると異常と判断する。

高度14,000ft以下の軌跡は高々度の高度維持精度との関係が明らかでなく、また、気圧高度計の補正值がエリアQNHからQNE(注4)に変わることや、管制官の指示が頻繁になることから、監視は行っていない。

3.4.1.6 水平飛行時高度逸脱検出

管制高度と受信モードCとの差であるAADが±300ft以上である場合は管制規則上危険であ

り、ASSの航跡情報画面上(図2参照)の異常判定理由に管制上問題ありという意味のメッセージが現れる。ただし、管制指示高度はしばしば変更され、その変更指示のRDP(Radar Data Processor)入力時刻とパイロットの高度変更の開始時刻は1分程度のタイミングのずれが起こり得る。

また、信号伝送系の問題によりモードCが誤読された場合をAADと誤認識しないように、受信値が前後の軌跡から不連続に±500ft以上離れた場合はAADでないとしている。

3.4.2 IN-SSR表示処理

RDPに入力されるレーダーサイトからの原データをIN-SSRと呼び、RDPは複数サイト間のデータの相関処理を行い管制卓に表示する。ASSで使用するSSRデータはこの出力データから抽出している。

一方、異常航跡が検出された場合に、原因として機上機器の不具合、航空機が旋回中にアンテナが機体の影になる場合、電波伝搬に問題がある場合や地上局に問題がある場合が考えられる。原因

(注4) 気象学で使用するQ符号の種類。高度計のセットは離陸時には出発地の気圧(QNE)に、14,000ft以上では標準大気圧(QNH、1013.2ヘクトパスカル)に合わせる。

追求には同一のサイトで受信されたデータの比較を行うことが望ましい。しかし、監視に使用する入力データは複数レーダーサイト間の相関処理を行った結果であるので、単一サイトからの原データであるIN-SSRデータを解析表示する機能がある。

3.4.3 高度異常統計処理

収集解析された航跡は、飛行時間の範囲、管制指示高度、航空機型式、目的空港別に分類され、データベースに蓄積される。

また、各航跡について、次の項目が調べられデータベースに蓄積される。

- (1) 上昇飛行時間
 - (2) 水平飛行時間
 - (3) 下降飛行時間
 - (4) レベルオフ時パターン別AADとその継続時間
 - (5) レベルフライト時のAADとその継続時間
 - (6) コースト多発、モードC急変発地点
- 構築されたデータベースによって、レベルフライ

ト時／レベルオフ時の、高度別／目的空港別（飛行方向別）／航空機型式別のAAD分布を求めることができる。その結果はすべての組合せについて各種のグラフに表示される。また、コースト多発地点、モードC急変多発地点は地図上に発生頻度に比例した濃淡で表示される。

このデータベース解析によって、高度異常を起しやすい要因を推定することができる。

3.4.4 異常航跡表示処理

異常航跡表示処理は、検出された高度逸脱航跡を人間の目でみて、逸脱の傾向の把握、ASSの検出結果の評価、ASSの検出結果の修正を行うものである。これは次の一連の処理からなっている。

- (1) 検索条件入力
- (2) 航跡作図処理（図1参照）
- (3) 時間拡大航跡作図処理（図6参照）
- (4) データベース修正処理
- (5) 位置推移作図処理
- (6) 複数航跡作図処理

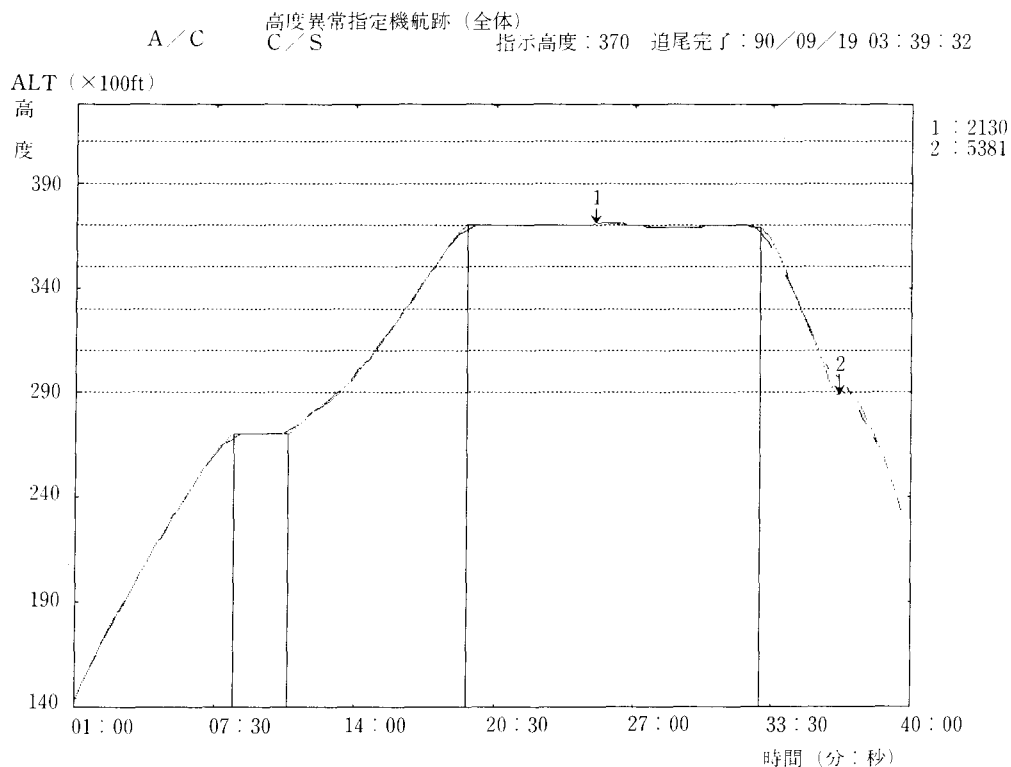


図11 航跡全体図中に平滑線、状態遷移点を重ねた様子

(1)は、表示する航跡の飛行時間範囲や高度逸脱パターンなどを入力し、それを条件としてデータベースから該当するフライト情報を検索し、航跡ファイルから航跡を引き出す処理である。

(2)は、航跡図を表示し、高度逸脱箇所と異常判定理由を付与する処理である。コースト多発点は点線で表わされ、1,000ft以上のモードC急変は軌跡が切断され、±300ft以上の高度逸脱は注意を喚起するために赤線で表示される。高度航跡上に平滑線と飛行状態遷移点を重ねることができる。(図11)

(3)は、高度異常箇所を詳細に観察するために(2)の航跡図中での指示した箇所を、1 スキャン毎に、100ft単位で拡大表示する機能である。

(4)は、高度逸脱判断の修正、追加、削除を行う機能で、プログラムで判定しきれない微妙な逸脱判定を人間が行うものである。

(5)は、航跡を三次元的にとらえて高度異常の原因の推定に役立てるものである。また、コースト多発地点の傾向をつかむためにも利用される。

(6)は、交通流全体からみたときの高度逸脱の傾向を把握するために表示するものである。

4. 監視結果の評価

現在までに得られた20日分の監視の中間結果を表3に示す。この結果は絶対的なものではなく、監視ロジック・パラメータによって変わり得るものである。監視ロジックは当初いかなる逸脱も検出する方針で設計したので、正常にみえる軌跡も異常判定されるケースが多かった。そのうち、いくつかのケースは検出パラメータが厳しすぎるためによるもので、パラメータを緩やかにすることで対処した。なお、1日分のSSRデータを実際に監視処理すると約2.5時間で終了する。

4.1 上昇・下降飛行状態時

上昇、下降飛行状態時の高度逸脱判定の問題点は、微少な高度の停滞やV字型、W字型の微少な傾きの逆転の原因が、符号誤り・短時間の暫定維持高度飛行・気流の乱れのいずれによるのか区別できないことである。上昇、下降軌跡の逆転の原因は不明であるが、ASSでは疑わしい軌跡はすべて検出している(図12、13)。

表3 高度異常発生頻度(20日間のデータより、1日平均833機取扱)

高度異常の種類	1飛行あたり発生件数	1日あたり発生件数
上昇時高度異常	0.0085	7
下降時高度異常	0.0078	6
水平飛行時符号誤り	0.0273	23
水平飛行時高度逸脱	0.0147	12
上昇→水平時オーバーシュート	0.0013	1
上昇→水平時アンダーシュート	0.0036	3
上昇→水平時振動型	0.0002	0.2
下降→水平時オーバーシュート	0.0001	0.1
下降→水平時アンダーシュート	0.0001	0.1
ビットエラー	0.0029	2
コースト多発	0.4316	359

4.2 レベルオフ時

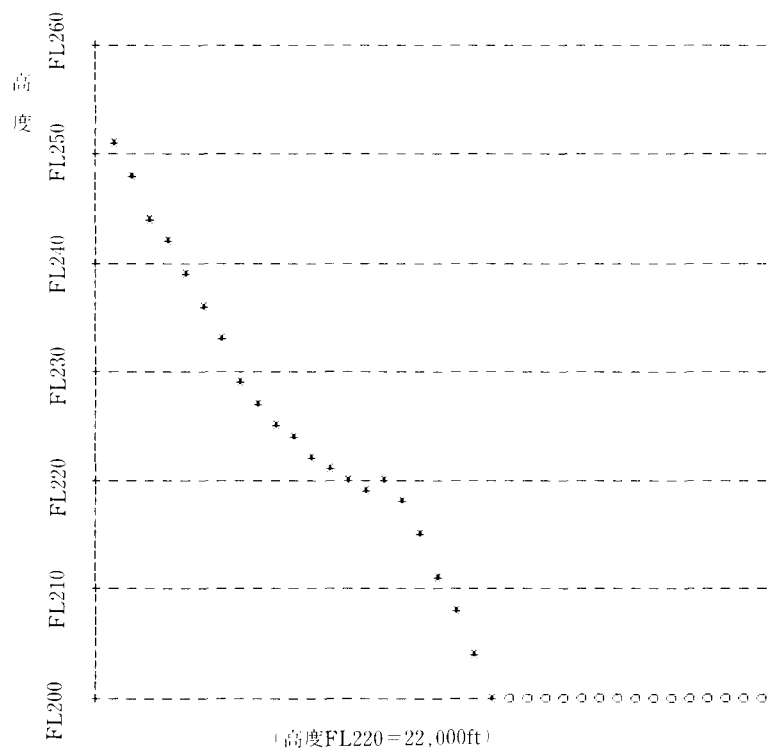
オーバーシュートに関しては事前に細かくパターンを想定していたので問題なく判定している。逸脱が危険かどうかについても、設計通りに判断している。アンダーシュートに関しては航空機が燃料効率を良くするためにできるだけ高高度を飛行しようとして指示高度前で上昇率が鈍り、監視ロジック上アンダーシュートに分類されられると思われることも多く、実際は特に危険でないケースが多い(図14)。また、コーストが多発しているときにはパターン識別は困難であるので行わないこととした。

4.3 水平飛行状態時

水平飛行状態時の高度逸脱は、

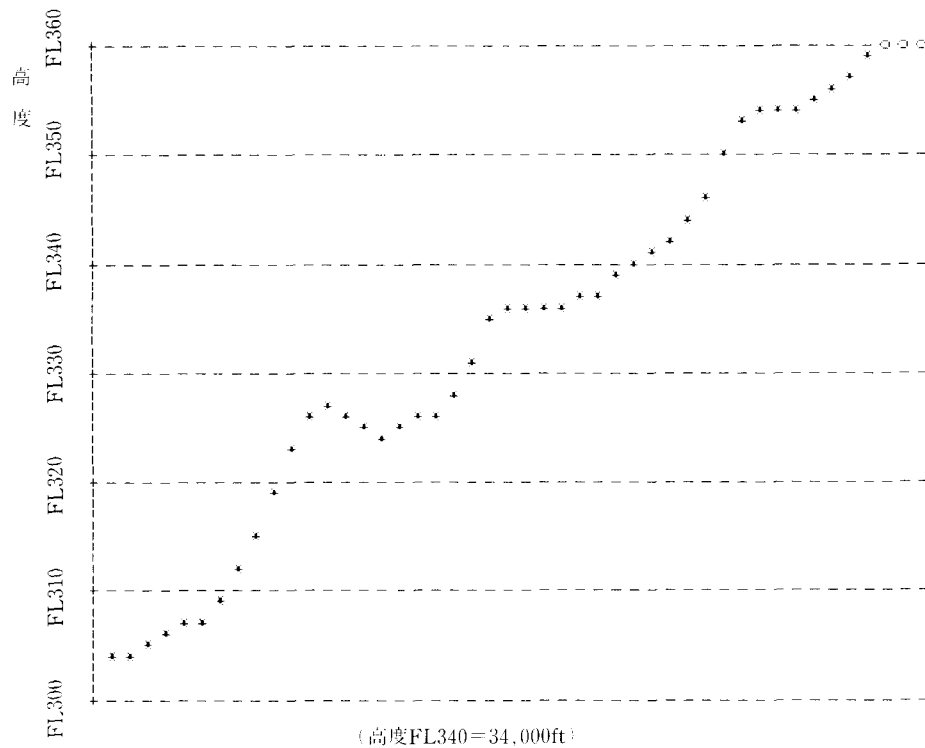
- (1) 単発的に起こる場合(図15)
 - (2) 水平飛行中、短周期で起こる場合(図16)
 - (3) 水平飛行中、長周期で起こる場合(図17)
- に分けられる。

水平飛行時の監視の問題の一つは、符号誤りが小さいときには実際に指示高度から逸脱した場合と区別できないことである。また、非常に小さな高度変化率で巡航高度を離れていくときや、コー



時間 (1 スキャン=約10秒)

図12 下降状態において一時的に傾きが逆転する例



時間 (1 スキャン=約10秒)

図13 上昇状態において傾きが逆転する例

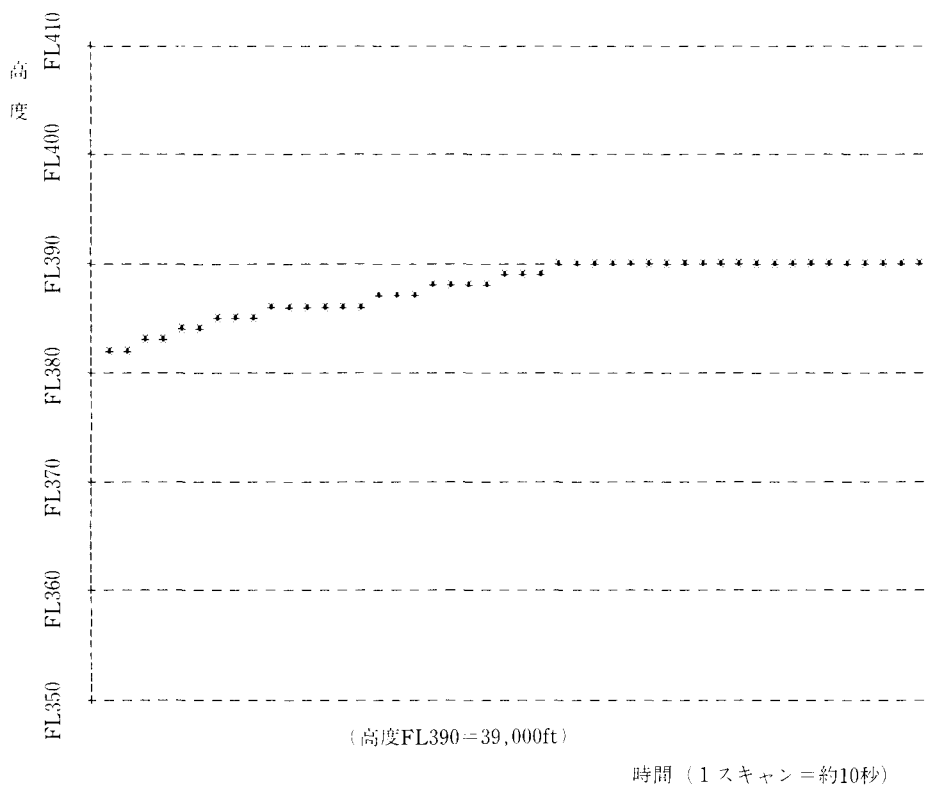


図14 上昇率が小さすぎてアンダーシュートに判定される例

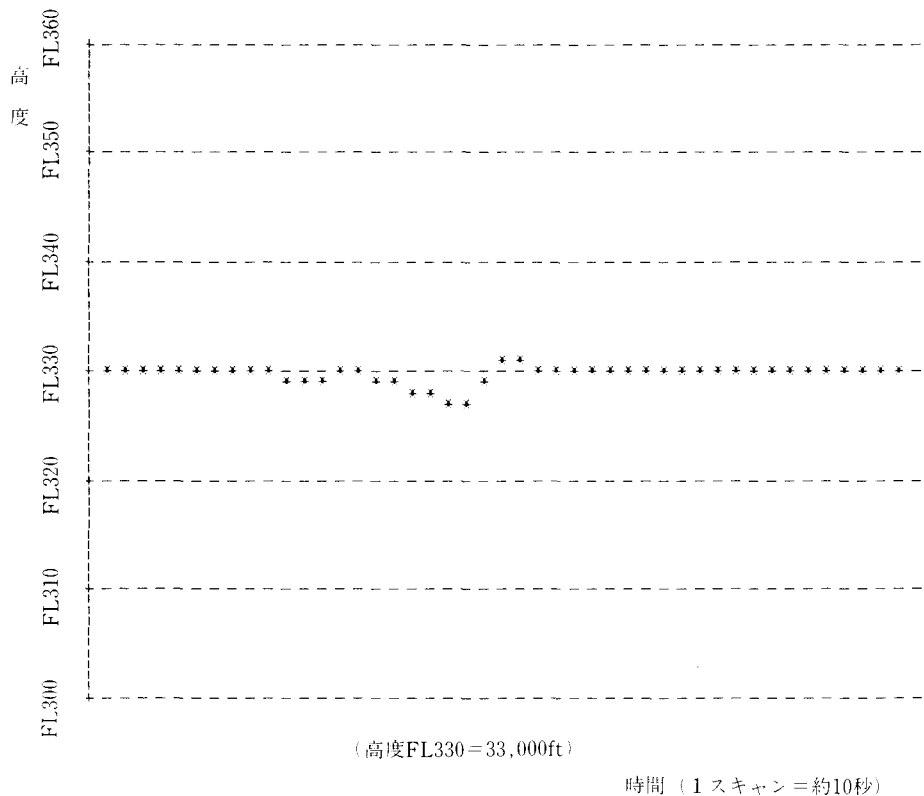


図15 水平飛行状態における高度逸脱の例(1)

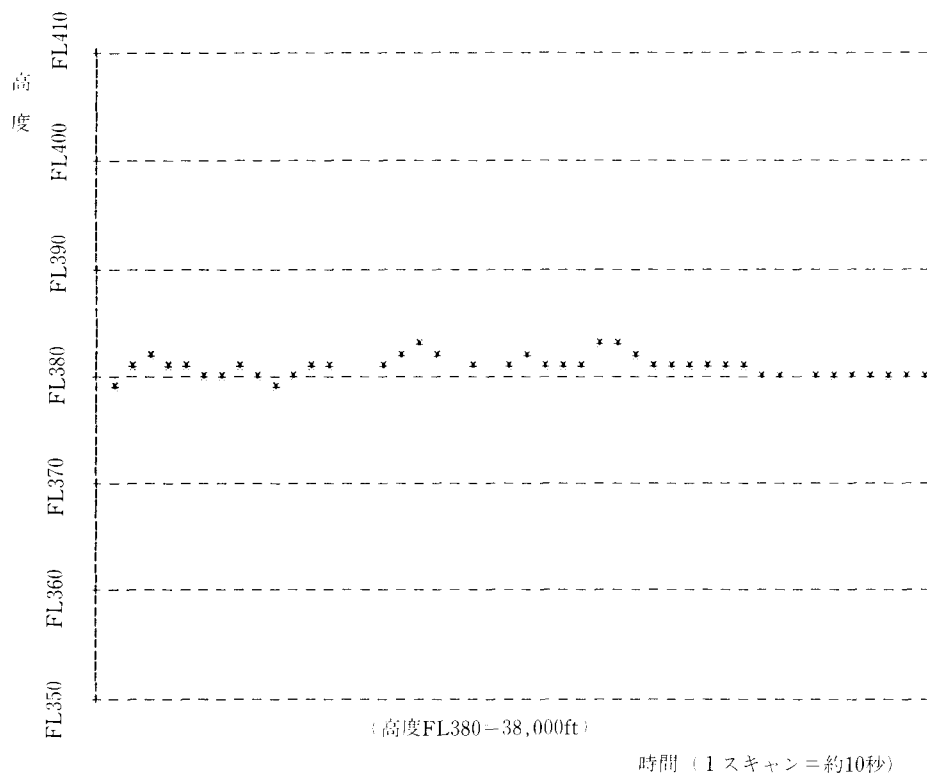


図16 水平飛行状態における高度逸脱の例 (2)

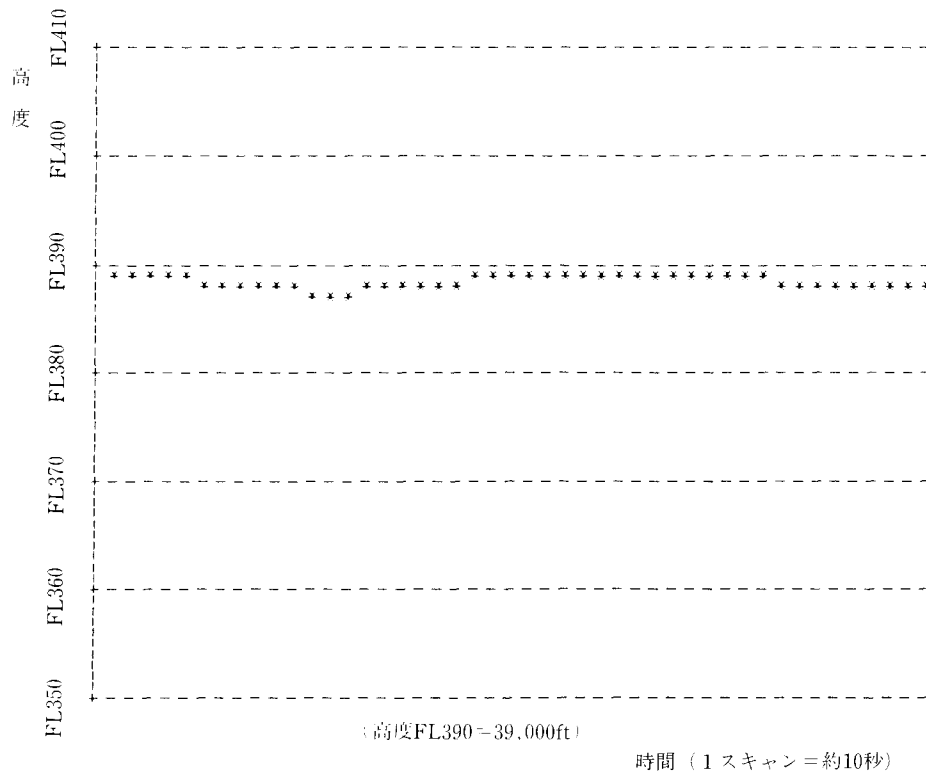


図17 水平飛行状態における高度逸脱の例 (3)

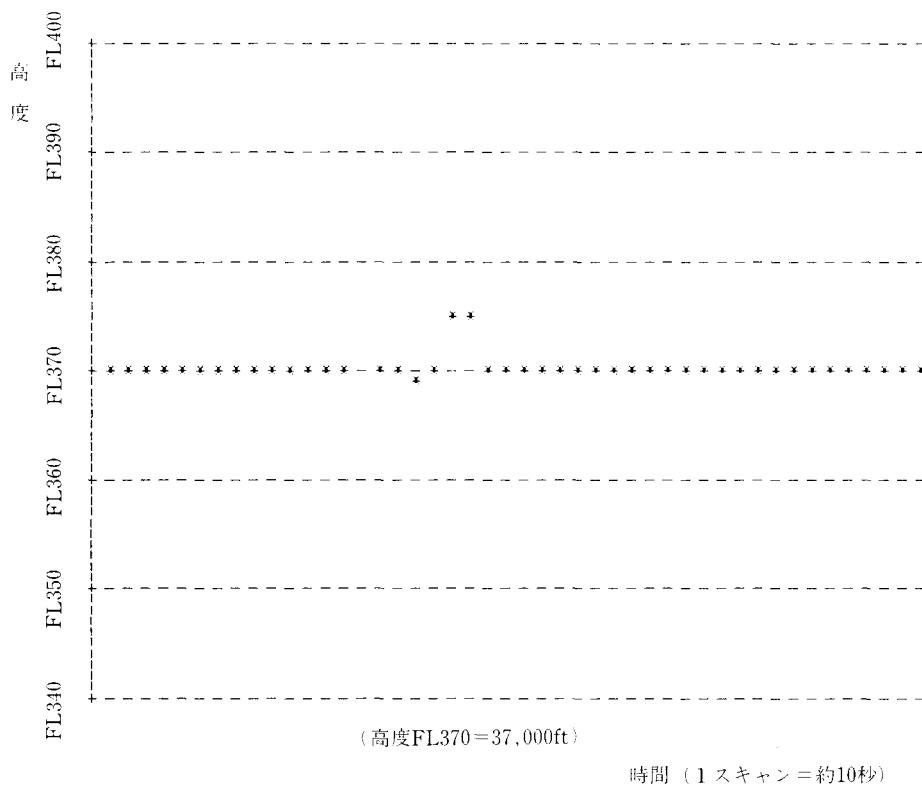


図18 水平飛行における符号誤りの例

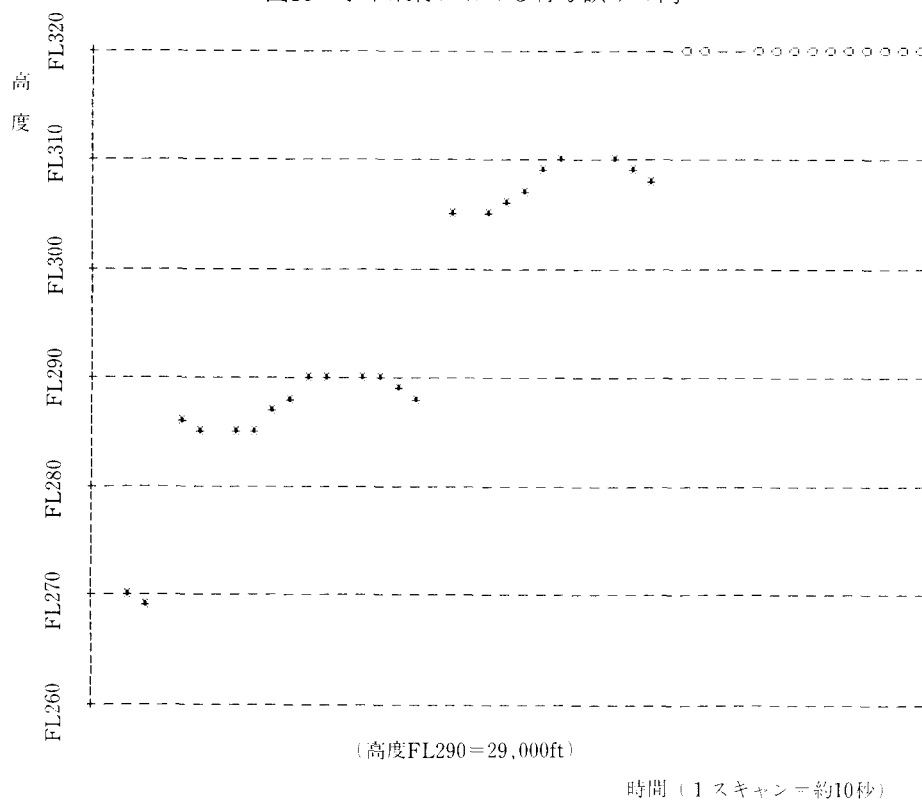


図19 ビットエラーの例

軌 跡 情 報

<航空機識別情報>

A/C# : 449
S/T# : 185
C/S :
航空機型式: B727

<飛行情報>

追尾開始日時 : 90/07/24 10:03:15
追尾終了日時 : 90/07/24 10:32:44
上昇飛行 : 観測 00:21:56
水平飛行 : 未観測 00:00:00
下降飛行 : 未観測 00:00:00
レベルオフ(上昇): 未観測
レベルオフ(下降): 未観測

<高度情報>

(×100ft)
指示高度 : 370
最大モードC : 365
最大A A D : 0

異常件数 : 12

<レベルフライト時 A A D分布>

-600Under -500....-400....-300....-200....-100....0....100....200....300....400....500....600Over (ft)
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 (SCAN)

<異常情報>

No.	発生時分秒	継続時間(秒)	異常判定理由	指示高度 (×100ft)	A A D (×100ft)	TCU番号	モードC-LSB分布									
							0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10:03:15	280	14BA C-bit errors	370	0	5	9	0	1	0	0	5	0	7	3	4
2	10:06:09	10	93D 0 Many void mode-C	370	0	5										
3	10:09:51	90	93D 0 Many void mode-C	370	0	3										
4	10:10:10	200	14BA C-bit errors	370	0	3	4	0	0	0	0	5	1	1	1	9
5	10:11:28	30	93D 0 Many void mode-C	370	0	3										
6	10:13:23	30	93D 0 Many void mode-C	370	0	3										
7	10:20:09	60	93D 0 Many void mode-C	370	0	3										
8	10:20:38	530	14BA C-bit errors	370	0	3	17	0	0	0	0	16	3	4	8	7
9	10:22:53	20	93D 0 Many void mode-C	370	0	3										
10	10:23:51	30	93D 0 Many void mode-C	370	0	3										
11	10:24:40	90	93D 0 Many void mode-C	370	0	3										
12	10:27:53	140	93D 0 Many void mode-C	370	0	3										

図20 ビットエラーの解析例

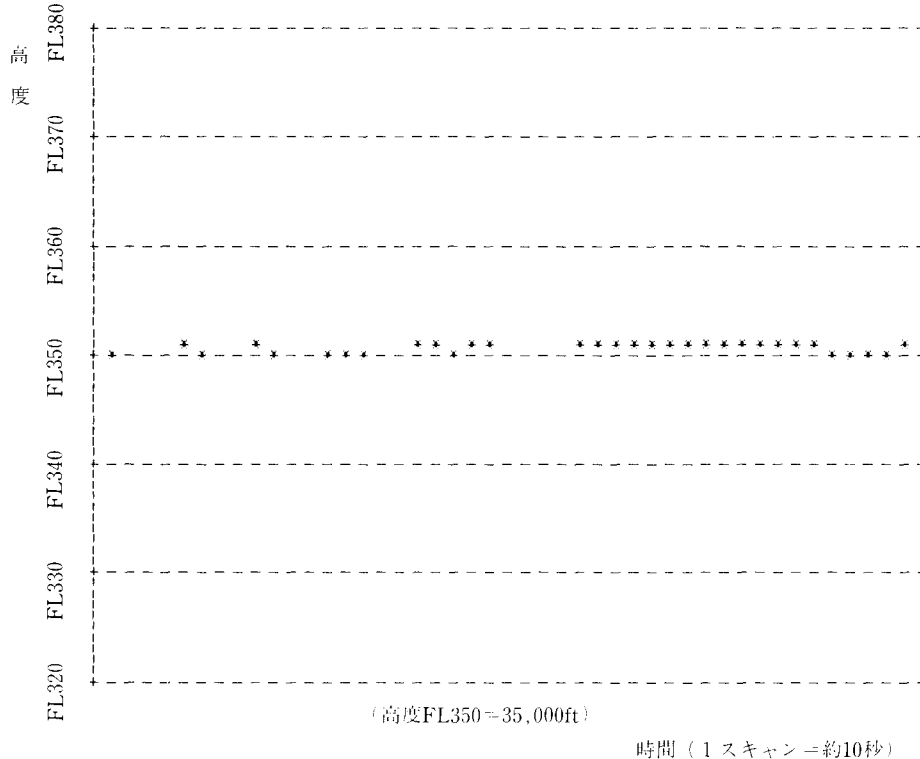


図21 コースト多発の例

ストが多発しているときには、高度変更指示が入力されなかった場合、状態遷移判定点が正確に求まらずに上昇・下降をAADと誤認識してしまうことがある。これは飛行状態遷移点を、平滑線の傾きを基準に判定しているため、前の水平飛行のデータに引きずられて判断が遅れるためである。軌跡の最後の数スキャンで巡航高度を離れていくときには高度逸脱とも状態遷移とも判断できないのでAADとは認識しなかった。符号誤りで注目されるのは原因不明の±500ftの誤りが多くみられることであり(図18)、今後、原因を解明することが必要である。

4.4 ビットエラー判定

検出されたビットエラーの発生率は0.29%であり、これは英国の調査結果の0.4%^{(3),(4)}と比較してやや少ない。ビットエラーの発生している航空機が1日に複数回飛行している場合、継続して同じビットのエラーを起こしていることがあった。一見正常と見える航跡もエラーチェックの結果、モードC異常と判断されることもあり、この場合、航跡を細かく観察すると、やや滑らかさに欠けていた。図19に明らかにビットエラーが起きている高度航跡例を示す。図20はその解析例で、モードC-LSB分布を見るとC 1ビットがオフになり続けたエラーだとわかる(表2参照)。

4.5 電波伝搬による異常の判定

コースト、ヴォイド、符号誤りは同時に連続して起きていることが多く、レーダーカバレッジの周辺部のほか、山岳地帯や海面反射を受ける限られた場所で発生することが多く見られた(図21)。

5. まとめ

SSRモードCを用いた高度維持監視システムの開発の概要、監視性能の評価および高度逸脱の発生頻度統計の中間結果について報告した。国内で高度情報を時間連続的に視覚的に表示解析するシステムを試作したのは初めてである。

今後の課題としては、さらに多量のデータを本システムにより解析し、同時に目視により監視結果を評価して、例えばレベルオフ時以外の飛行状態についても高度異常をパターン分類化するなどして、監視性能の向上を図らなければならない。

最後に、本研究を進める上で御協力を頂いた運輸省航空局管制保安部の関係各位、データを提供して頂いた東京航空交通管制部の関係各位に深く感謝する。

参考文献

- (1) 高橋, 新井, 吉岡: “巡航高度到達時の航空機の高度保持特性”, 電子航法研究所報告 No56, 1988.1
- (2) 高橋, 新井, 渡辺, 松島: “SSRモードCのビット誤りについて”, 第22回電子航法研究所研究発表会講演概要, 平成2年5月
- (3) M. P. McLaughlin: “Experimental Detection of Anomalous Mode-C Reports Using Radar Data”, 1986, IEEE, Trans. on Aerospace & Electronics Systems. AES-22
- (4) D. B. Jenkins, et. al: “Errors in aircraft height information telemetered by secondary surveillance radar systems”, 1987, Controller HMSO London