

巡航高度到達時の航空機の高度保持特性

高 橋 賢* 新井 芳雄* 吉岡栄治郎*

Analysis of Height Holding Performance in Level-off manoeuvres at Various Flight Levels

Masaru TAKAHASHI, Yoshio ARAI and Eijiro YOSHIOKA

Abstract

This paper describes a study on height holding performance of aircraft in level-off manoeuvres at various flight levels above FL290. SSR Mode-C data collected at Tokyo ACC were examined for surveying assigned altitude deviations(AAD)which may cause aircraft mid-air collision risks. The analysis shows that:

- 1) Height holdings were properly conducted by 70% of the aircraft examined.
- 2) Nearly 20% of the aircraft was associated with altimeter system error of $\pm 100\text{ft}$ or $\pm 200\text{ft}$.
- 3) Maximum deviation by overshoot was 400ft, and the probability was 4.9×10^{-4} .
- 4) The most subtle Mode-C tracks discovered in the analysis was abnormal discontinuity of Mode-C data.

* 電子航法評価部

1. まえがき

最近の航空機の高度維持精度は、従来のものに比較してかなり向上している。一方、航空交通量は今後も増大の傾向にある。そこで、これに対応した空域の有効利用を図るため、高度 29,000 ft 以上の空間で航空機間の衝突防止のため適用される 2,000 ft の垂直間隔を 1,000 ft に短縮することが、ICAO 管制間隔検討会議 (RGCS P) *1 で検討されている。

この垂直間隔が短縮されると、大型ジェット機が飛行するのに最も適した高度帯で利用可能な巡航高度を増設することができ、航空機の運航効率や燃費など経済的な面でも大幅な改善が期待できる。この新しい間隔基準は、近い将来導入されることが予想されており、その安全性の評価とこの計画を実現するための方法について各国の研究は現在最終段階にある。

当所では、主として測高レーダ (NAMS) *2 を用い航空機の巡航時における航法精度を観測し、この解析結果を RGCS P などて報告してきたが、東京航空交通管制部の協力を得て航空機の運航票の調査を、また航空会社の協力を得て DFDR *3、の解析を行い、これらについても報告してきた。

ところで垂直間隔が短縮された場合、巡航時の大きな高度逸脱は当然安全上重要な問題になるが、航空機が上昇または下降して、巡航高度に達する (以ドレベロフという) ときに起こすオーバーシュートやアンダーシュートも安全上問題である。また旋回時の高度維持誤差 (HKE) *4 によっても高度間隔が失われる可能性がある。これらによる間隔の喪失が大きいときは、隣接高度を飛行する航空機との間に衝突を起こす危険性を生ずる (図 1 参照)。したがって、巡航時の高度維持精度の調査に加えて、これらについての調査も早くから求められていた。

筆者らは、1986 年の初めより東京航空交通管制

部において、問題の研究に必要なデータを収集し、その解析を行った。本報告では、このデータ収集の方法とその解析方法並びに結果について述べる。

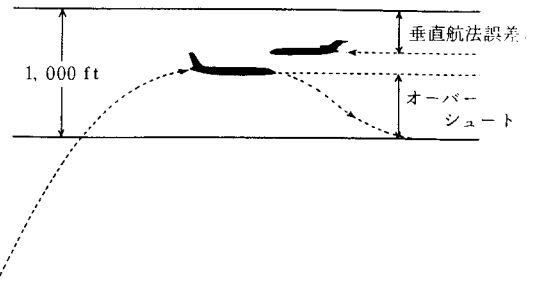


図 1 高度逸脱による衝突危険性

2. データ収集方法

この解析に必要なデータは航空管制部の FDP (Flight Data Processing System) および RDP (Radar Data Processing System) から得られるが、我が国全土を覆う SSR の全領域を対象とすると、その情報量は膨大な量となる。また空域によって交通密度が異なる。そこで、データ収集および解析を効率良く行うための一つの方法として、データ抽出エリアを設定することとした。

このエリアで収集できる情報量の関係より、データ収集は昭和 61 年 8 月より約 4 カ月間にわたって実施することになり、約 1 万フライト分のデータが収集できた。これらの作業の流れを図 2 に示す。

2.1 データ収集方法の検討

2.1.1 航空交通量の調査

FDP/RDP システムから得られる SSR モード C データ *5 および関連する飛行計画データの処理を効率良く行うため、事前に東京管制部における航空交通量の調査を行った。飛行計画統計情報より管制セクター別の交通量を調べ、レーダ覆域内で次の各条件を満足する空域をデータの抽出エリアとして設定することとした。

* 1 RGCS P: Review of the General Concept of Separation Panel

* 2 NAMS: Navigation Accuracy Measurement System

* 3 DFDR: Digital Flight Data Recorder

* 4 HKE: Height Keeping Error

* 5 SSR モード C データ: 二次レーダ方式で、地上の質問信号に対して機上のトランスポンダから返送される気圧高度情報。100 ft 単位で符号化されている。

- 1) 空域内で交通密度が高いこと。
- 2) 高々度 29,000 ft (以下, フライトレベル (FL) 290 という: 飛行高度を 100 ft 単位で表現したもの) 以上で多くの航空機が観測されること。
- 3) 民間機と共に軍用機も観測されること。
- 4) レベルオフが効率的に観測されること。

2.1.2 データ抽出エリア

東京管制部のレーダ覆域を図 3 に示す。また交通量の調査結果に基づき、最終的に設定されたデータ抽出の対象エリアを太線枠で示す。これは東京管制部の関東東、関東南 A/B、関東西セクタ

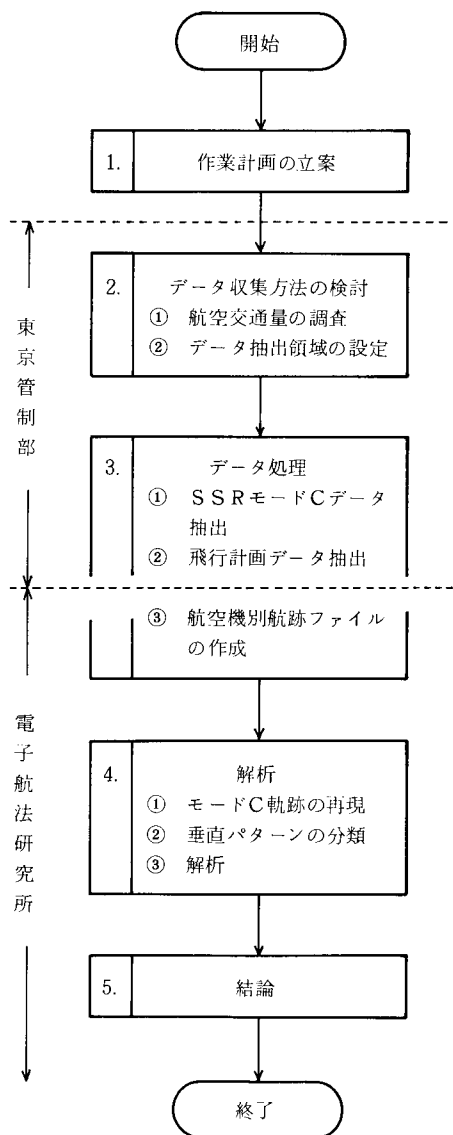


図 2 作業行程流れ図

ー, 中部北陸及び近畿東セクター (一部) の管轄空域に該当する。このデータ抽出エリアでは, 民間機として羽田, 成田, 名古屋および大阪空港の離発着便, また軍用機では, 主に横田, 入間, 厚木および百里飛行場の離発着便のレベルオフが観測できる。

レーダ覆域が重複しているところでは, 同一航空機に対し二つ以上のレーダデータが得られる。図中の座標は, 航空機の位置認識を行うため, 各レーダサイトで捕捉された位置を各々の固有座標系から統一された座標系に変換するために設けられた共通座標 (システム座標) である。この座標は, 多重相関処理で被相関トラックの範囲を限定するために用いられる RSB (Radar Sort Box) の単位 (一辺 32 NM の正方形) で示してある。

3. データ処理

データ処理は, FDP/RDP から SSR モード C データと飛行計画データを得て, 航空機のレベルオフ時の高度保持特性を目視で調査できるよう作図することである。

3.1 航空管制情報処理システム

東京管制部には航空管制業務に直接関与する中

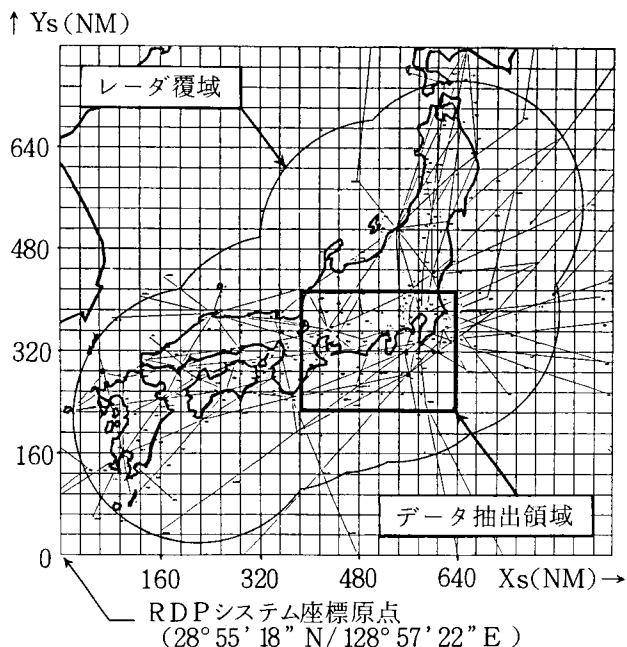


図 3 レーダの覆域とデータ抽出エリア

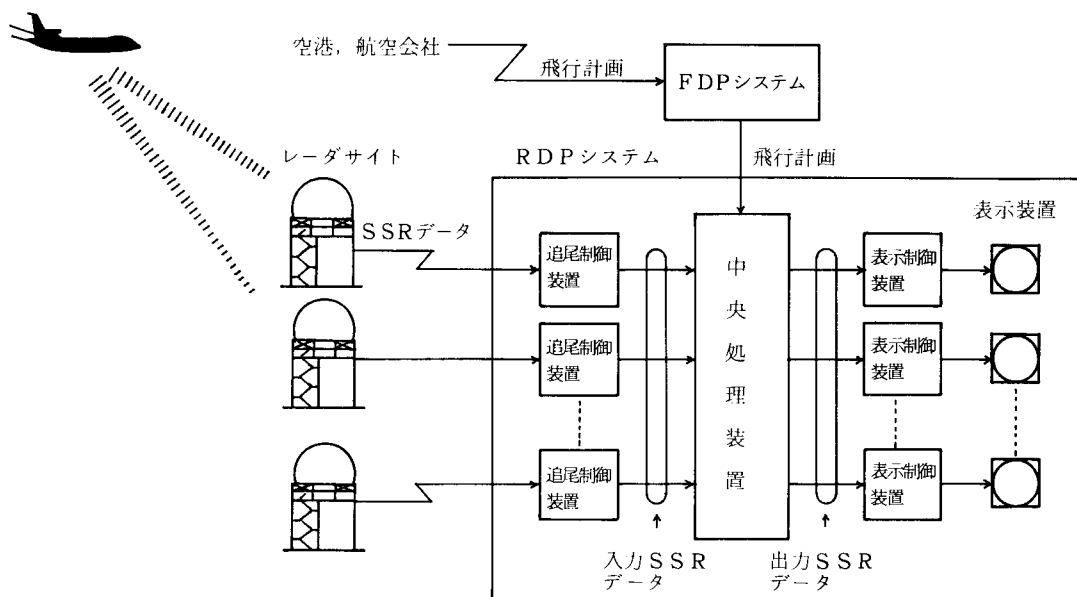


図4 FDP/RDPシステムの概略構成

心的なシステムとして、FDP/RDPシステムが設置されている。これらのシステムは、互いに有機的に結合され情報交換を行っている。

FDPは、国内外の各空港および航空会社から通信回線を経由して送られてくる飛行計画情報を集中処理し、管制に必要な運航票を作成する。また飛行計画情報を必要とするRDPなど他システムへ情報の転送を行う。

RDPは、航空路監視レーダ（ARSR）から送られた航空機の手データ信号の中から航空機を識別し、その飛行位置を追尾する。またFDPからの飛行計画とレーダデータをリンクし、管制席のディスプレイ上に航空機の便名、高度など必要な管制情報を表示する。FDP/RDPの概略の構成を図4に示す。

3.1.1 SSRデータの抽出

レベルオフ時における高度保持特性の解析に必要なモードCデータは、管制用ディスプレイに送られる表示用データ（出力SSRデータ）から抽出した。

抽出エリアから収集されるSSRの手データ量は、東京管制部の全SSRの手データの45%以上に相当する。

3.1.2 航跡ファイルの作成

抽出エリアから収集したSSRの手データは、時系列データとして複数のファイルに収録した。収録

されたデータからモードCの航跡図（図5参照）を効率よく出力するため、

- 1) 巡航高度FL 290以上のSSRの手データを選別
- 2) 航空機別にSSRの手データの並び換え(sort)
- 3) ファイルの併合(merge)

を行い、各航空機毎の航跡（トラック）ファイルを作成した。

3.1.3 飛行計画データの抽出

SSRの手データの解析に必要な情報を補うためFDPから飛行計画データを取得することにした。

飛行計画についてもデータ抽出作業の効率化を

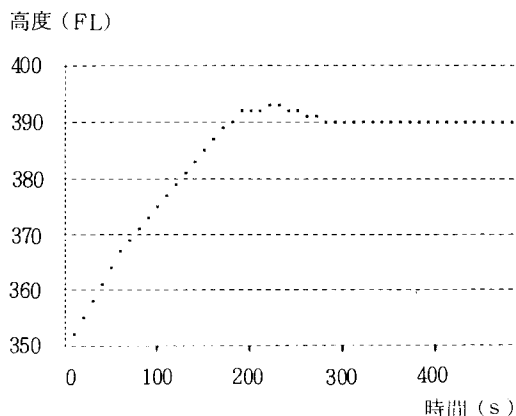


図5 モードC航跡作図例

表 1 飛行計画データベース検索例

YYMMDD	CALLSIGN	TYPE	DEP	ATD	DES	ETA	ROUTE
861115	AC091	DC87	PANC	0000	VHHH	0000	N0466F350 SGA J501 BET/M080F370 R220 GOC W18 KCC V52 KEC A1
861115	AF273	B747	RJAA	1214	PANC	0000	M084F350 CVC OTR11 KAGIS A590
861115	AF273	B747	RJ00	0944	RJAA	1024	N0490F250 XMC G97 XA ADN A1 JPT
861115	AF274	B747	PANC	0000	RJAA	0507	N0491F310 ANC9. ANC J501 BET/M084F330 R220 NANAC OTR10 CVC
861115	AF275	B747	RJAA	0302	LFPG	0000	N0490F270 SYE V15 GTC R11 SQUID/K902S0960 UR22
861115	A1306	B747	VHHH	0000	RJAA	0524	N0499F330 A1 HLG DCT LU DCT OSTAR A1 JPT
861115	A1315	B747	RJAA	0717	VHHH	0000	N0505F310 DCT UNL DCT MJE A1 KEC/N0499F350 A1
:	:	:	:	:	:	:	:

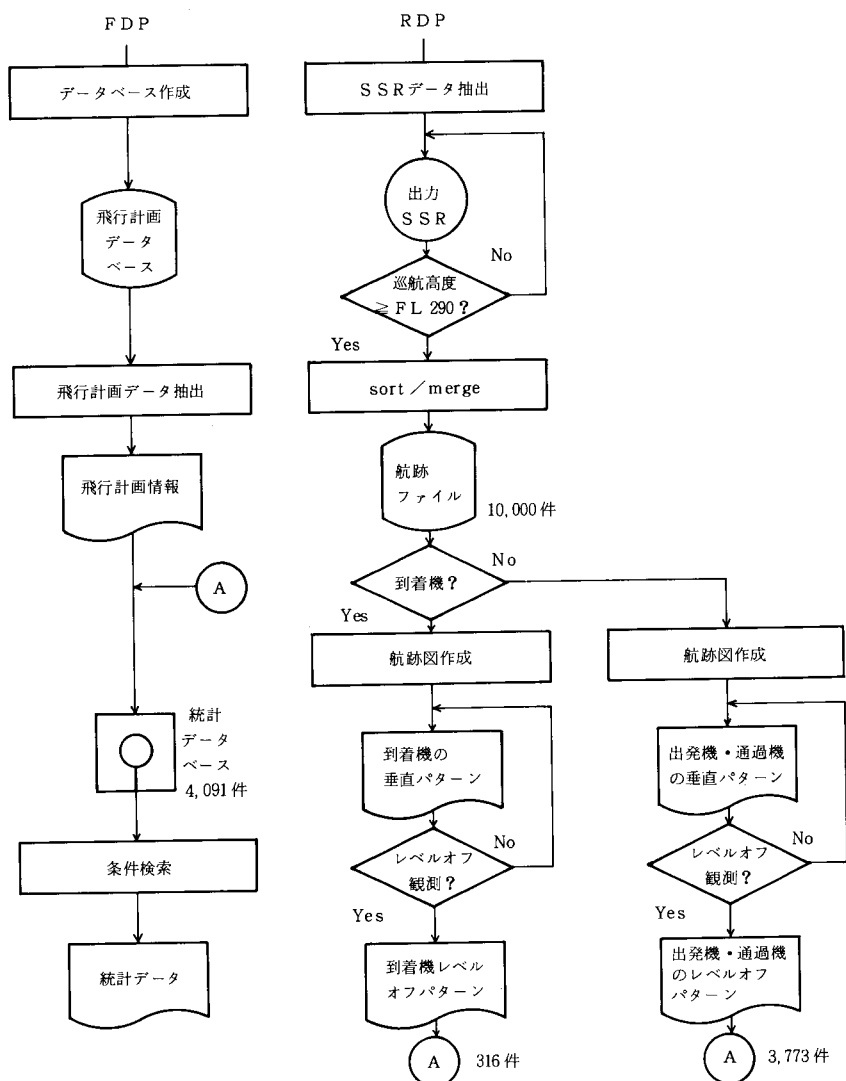


図 6 データ処理流れ図

図るため、調査対象の全飛行計画（数十万件）を磁気ディスクに格納し、「飛行計画データベース」として続く処理を行うことにした。

必要な飛行計画は、次の各条件でデータベースを検索することにより、短時間（数秒）で出力可能となった。

- 1) 飛行年月日
- 2) 飛行方式（I F R / V F R の別）
- 3) 緯経度で指定する飛行空域
- 4) 巡航高度

表 1 は飛行計画データベースから一部の情報を検索した例である。左から、

- 1) 飛行年月日

- 2) 航空機呼出符号
- 3) 航空機の型式
- 4) 出発空港名
- 5) 出発時刻
- 6) 目的空港名
- 7) 到着予定時刻
- 8) 巡航速度 / 指定高度
- 9) 経路情報

を表す。なお、このデータベースの検索にはエンドユーザ言語 N L II を使用した。

図 6 に原データからモード C データ、飛行計画を抽出し解析した流れ図を示す。

高度（F L）

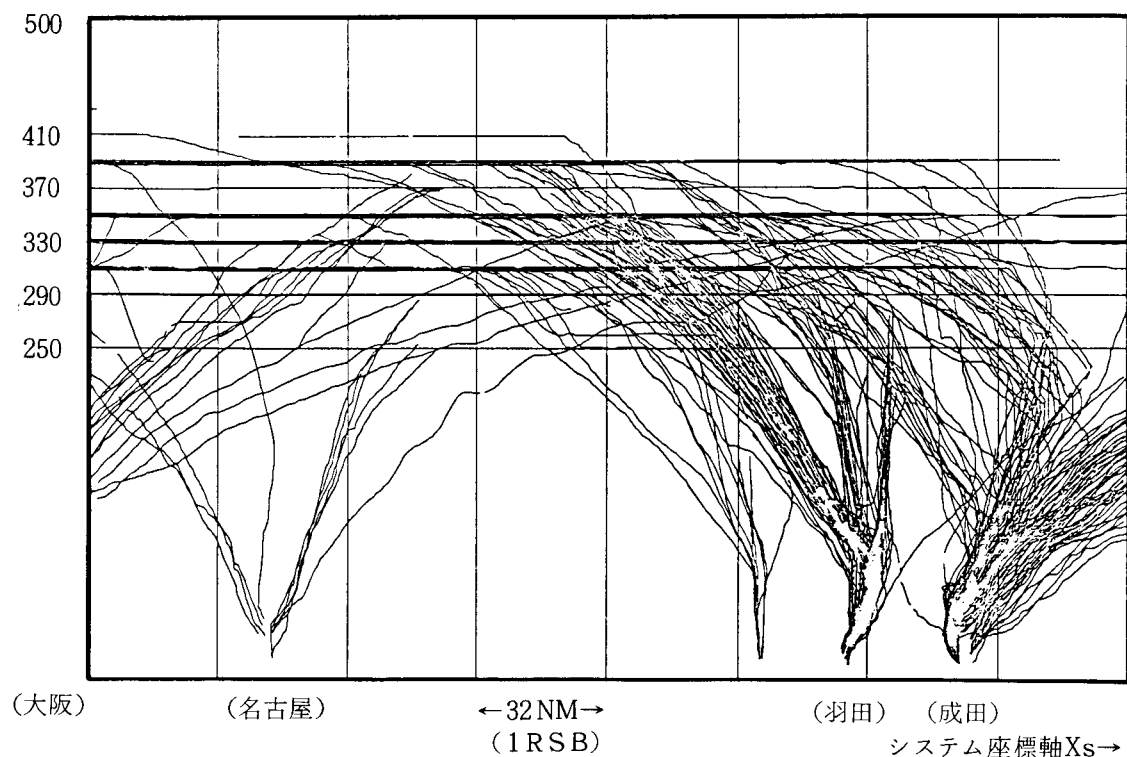


図 7 出発機・通過機の航跡（H別）

4. データ解析

データ解析の目的は、レベルオフ時において空中衝突を起こすような大きな高度逸脱が実際に存在するかどうかを確かめることである。この調査により、高々度（F L 290 以上）で、1,000ft の垂直間隔を適用する場合の安全性を予備的に評価することができる。この解析のため調査した項目は、次の通りである。

- 1) レベルオフ時の航空機の高度に関する航跡（以下「垂直パターン」とも呼ぶ）の分類
- 2) レベルオフ時に生じたオーバーシュート、アンダーシュートの大きさと頻度の分布
- 3) レベルオフ時に大きな高度逸脱を観測した航空機の型式と巡航高度との相関など

4.1 モードCによる航跡

レベルオフ時の高度逸脱を調べるため、航跡ファイルをもとに次の二種類の航跡図を作成した。

- 1) レベルオフの状態を総括的に把握するために一日単位で航空機のモードC航跡をまとめて再現したもの
- 2) 航空機ごとの特性を調査するためレベルオフの状態を個別にプロットしたもの

図7に、ある一日の航跡表示例（出発機・通過機の航跡）を示す。この図は、モードCデータ抽出エリアを南側から透視したもので、左より大阪、名古屋、羽田、成田空港等からの出発便（指定高度 $\geq$ F L 290 のもの）およびこの空域をレベルフライトで通過した航空機の軌跡である。

4.2 垂直パターンの分類

4.2.1 大分類

各航空機のモードCデータを、巡航高度に達する前後約10分間にわたりプロットし航跡を調べたところ、オーバーシュート／アンダーシュートを起していると考えられる時間は、指定された巡航高度に達したと考えられる点から長いものでも3分程度であった。ほとんどのものが1分以内にレベルフライトに移行することを確認した。

レベルオフ時の垂直パターンは航空機の型式、巡航高度、気象状況、運行条件等によっても異なると考えられるので、次に航跡の変化に着目し、すべての航跡データを幾つかの種類に分類するこ

とを試みた。初めに、次のように大きく4つの型に分類した。

- 1) ノーマル型：
レベルオフフライトが正常なもの
- 2) オーバーシュート型：
指定高度を越える一時的な高度逸脱を伴ったもの
- 3) アンダーシュート型：
指定高度に達する手前で一時的な高度上昇の停滞を伴ったもの
- 4) 振動型：
高度が指定高度の上下に変動したもの

4.2.2 小分類

前節（4.2.1）の項目を更に次の四つの小項目に分類した。

- a) 高度偏位誤差（垂直方向の航法誤差）の無かったもの
- b) レベルオフから水平飛行（レベルフライト）に移った後も、指定高度からプラスの高度偏位誤差を伴って飛行したもの
- c) b)と同様で、マイナスの高度偏位誤差を伴って飛行したもの
- d) 大分類にも小分類にも属さない、モードCの航跡としては異常なもの

これらを表にまとめたものが表2である。

表3は、同様に下降時の垂直パターンを分類したものである。

4.2.3 パターン観測数

表2、3の間で対応するパターン観測数を調べたところ各パターンのフライト件数の割合は、いずれの場合もノーマル型1)が約7割を占め、各パターンの分布の仕方にはかなり良く似た傾向がみられた。これは言い替えるとレベルオフ時の航空機の動特性が、上昇時、下降時ともに、ほぼ同様の傾向を持つことを示している（図8参照）。

上昇時のデータに対して、下降時のレベルオフのデータ件数は、約1/10しか観測されなかった。これは設定したデータ抽出エリア内で、ほとんどの出発機はレベルオフが観測されるのに対し、到着機はかなり低い高度まで、ほぼ一定の率で連続的に降下して行き、ステップダウンなどの高度変更によるレベルオフの機会がF L 290 以上においては少ないためと考えられる。

表2 垂直パターン（上昇時）

指定高度逸脱 (AAD)*	上昇→レベルオフ : 3,773件				
	ノーマル	オーバー シュート	アンダー シュート	振動型	その他
AAD=0	1]	4] (153件) 10%	7]	10]	13]
AAD>0	2]	5]	8]	11]	
AAD<0	3]	6]	9]	12]	

*AAD:Assigned Altitude Deviation

表3 垂直パターン（下降時）

指定高度逸脱 (AAD)	下降→レベルオフ : 316件				
	ノーマル	オーバー シュート	アンダー シュート	振動型	その他
AAD=0	1]	4]	7]	10]	13]
AAD<0	2]	5]	8]	11]	
AAD>0	3]	6]	9]	12]	

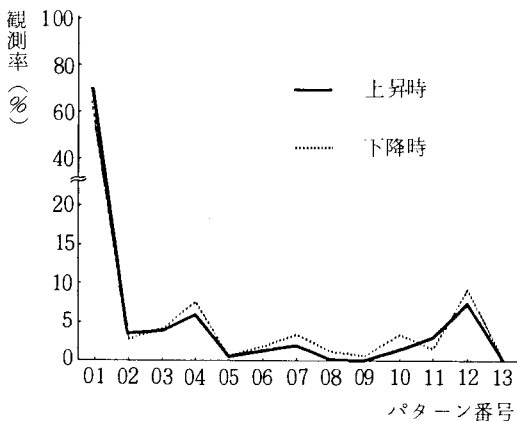


図8 パターン番号別レベルオフ観測率

4.2.4 オーバーシュート／アンダーシュートと管制間隔

飛行の安全性という観点から見ると、洋上管制区などマニュアル管制のもとではレベルオフ時のアンダーシュートはオーバーシュートほど衝突を起こす危険な要因とはならない。これはある飛行ルートに沿って飛んでいる航空機がその高度を変更する時、離脱した高度から新たに指定された巡航高度に到達するまでの間の空域は、新しい高度に着いたことが確実になるまでは確保される場合が多く、他の航空機との間の管制間隔は保たれていることになるからである。一方、オーバーシュートは指定高度からの逸脱量が大きいはど危険である。

レーダ管制では航空機の高度変更はレーダにより常時監視され、その安全性は確保されているが、航空機が高度変更によりある承認高度を離脱したことが明らかとなった場合は、当該高度を他の航空機に指定することがあるので、オーバーシュートと共に大きなアンダーシュートの存在も問題となる。

4.3 逸脱の大きさと頻度の分布

4.3.1 オーバーシュート

オーバーシュートの傾向を持つ垂直パターンを取り上げ、高度逸脱量の分布とその頻度を上昇時および下降時に分けて表4、5に示した。

表2、3のパターン番号(2)、(4)、(5)、(6)、(8)、(10)および(11)はオーバーシュートに相当する。これらの合計620件は、レベルオフの観測数全体(4,089件)の15%に該当する。このうちの約9割(88.5%)は100ftの逸脱を伴うもので、200ft以上の逸脱が見られたものは73件あった。これは全体の1.8%である。

図9はオーバーシュートによる高度逸脱の大きさとその頻度（発生確率）の関係をグラフに示したものである。図9より、オーバーシュートによる逸脱量が大きくなるに従い、その発生する頻度は、ほぼ指数関数的に減少している。垂直方向の最大逸脱量は400ftが2件観測され、レベルオフ総観測数に対するこの確率は、 4.9×10^{-4} に相当する。

また、レベルオフ時に観測されたすべてのオーバーシュート（100ft以上）の発生件数を上昇時

表 4 パターン別逸脱量と頻度（上昇時）

パターン番号	オーバーシュートの大きさ			
	100	200	300	400 (ft)
2	123	10	1	0
4	214	7	3	0
5	7	11	1	0
6	4	3	1	0
8	6	0	0	0
10	49	9	1	0
11	101	13	2	2
合計（件）	504	53	9	2

表 5 パターン別逸脱量と頻度（下降時）

パターン番号	オーバーシュートの大きさ			
	100	200	300	400 (ft)
2	9	0	0	0
4	21	2	1	0
5	0	1	1	0
6	0	0	0	0
8	4	0	0	0
10	5	3	0	0
11	4	1	0	0
合計（件）	43	7	2	0

表 6 巡航高度別逸脱量と頻度（上昇時）

巡航高度 F L	オーバーシュートの大きさ			
	100	200	300	400 (ft)
430	1	0	1	0
410	1	0	0	0
390	83	13	3	1
370	12	0	0	0
350	219	22	3	1
330	18	4	0	0
310	158	10	2	0
290	12	4	0	0
合計（件）	504	53	9	2

と下降時と比較すると、それぞれの観測総数に対し、15%および16%となり、いずれの場合もほぼ同じ頻度で発生していることが明らかになったが200～300ftの大きな逸脱の割合は、下降時の方がやや高くなることがわかった。

4.3.2 アンダーシュート

レベルオフ時にアンダーシュートを起こしているものは、合計で101件観測され、これらは表2、3のパターン番号(7), (8), (9)に該当する。全観測数に対する割合は2.5%となり、これはオーバーシュートの観測件数と比較して少なく、その頻度は1/6以下であることがわかった。なおアンダーシュートによる最大逸脱量は400ftであった。

4.3.3 巡航高度と逸脱量の相関

巡航高度が高くなるほど空気の密度が小さくなることから、気圧高度計の測高誤差も増加する。そこで次に、上昇時に起きたオーバーシュートによる逸脱量とその頻度を巡航高度別に分けて調べた結果を表6に示した。また高度逸脱量をパラメータとして、巡航高度とオーバーシュートの発生確率の関係を図10のグラフに示す。

これらより、一般的に航空機の巡航高度が高いほど、レベルオフ時に大きなオーバーシュートを起こす傾向がみられる。しかしながら、本調査で設定されたモードCデータの抽出エリア内では南西方向出発便が多く観測されるため、データの分布は西方向に向かう航空機に対して承認される巡航高度（特に、F L 310, F L 350, F L 370）にかなり偏る結果となった。またF L 410以上の高度を飛ぶ航空機の数極めて少なかったことを考

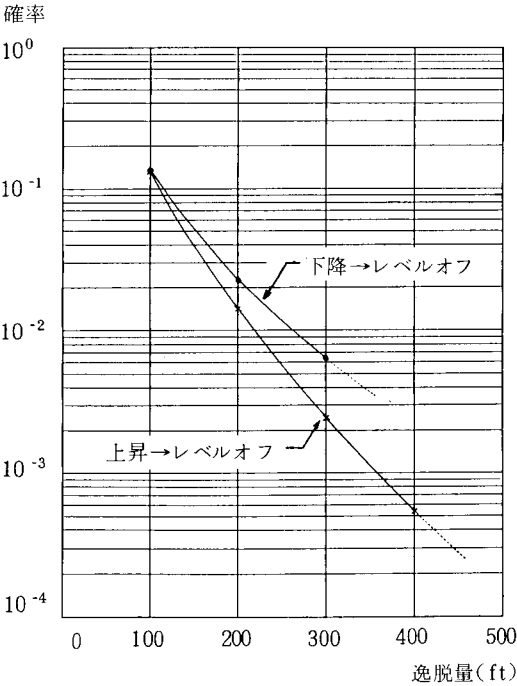


図 9 オーバーシュートによる高度逸脱量と頻度

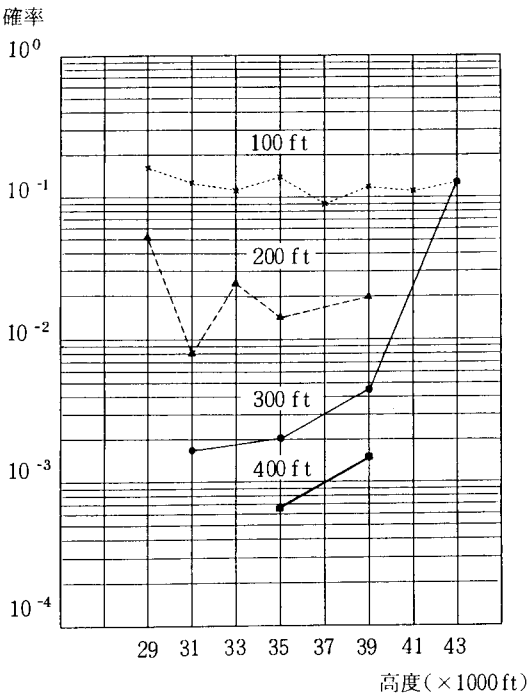


図10 巡航高度別逸脱量（上昇時）

慮すると、これらの情報からは、巡航高度と逸脱量の間に特に密接な相関関係を見いだすことはできなかった。

4.3.4 機種別逸脱量

航空機の機種により、その大きさ、運航性能は

表7 機種別逸脱量（上昇時）

逸脱量	型式	オーバーシュートの件数 ／（型式別飛行件数）	
200 ft	B 747	35／（ 1747）	2.00％
	L 1011	3／（ 233）	1.29％
	T 39	3／（ 11）	
	B 767	2／（ 647）	0.31％
	C 141	2／（ 66）	3.03％
	DC 8	2／（ 84）	2.38％
	A 300	2／（ 364）	0.55％
	DC 9	1／（ 12）	
	C 1 CA	1／（ 10）	
	MHT 2	1／（ 1）	
300 ft	S 3	1／（ 3）	
	B 747	5／（ 1747）	0.29％
	DC 10	2／（ 363）	0.55％
	A 4	1／（ 1）	
400 ft	C 141	1／（ 66）	1.52％
	B 747	2／（ 1747）	0.11％

表8 民間・軍用機別逸脱量（上昇時）

民・軍別	逸脱量	オーバーシュート			計／ （飛行件数）
		200 (ft)	300 (ft)	400 (ft)	
日 本	民間機	8	0	0	8／（ 2463）
	軍用機	2	0	0	1／（ 13）
外 国	民間機	37	7	2	46／（ 1162）
	軍用機	6	2	0	8／（ 135）

表9 航空会社別逸脱量（上昇時）

会社名	逸脱量	オーバーシュート			計／ （飛行件数）
		200 (ft)	300 (ft)	400 (ft)	
A		4	2	2	8／（ 232）
B		8	0	0	8／（ 102）
C		5	1	0	6／（ 128）
D		4	1	0	5／（ 74）
E		4	0	0	4／（ 119）

それぞれ異なっている。また同型機種であっても新型、旧型など、タイプの違いや装備の違いによって、その動特性は異なる。

表7は上昇時に200ft以上の大きなオーバーシュートを起こしていた航空機を取り上げ、逸脱量の大きさとその頻度を航空機の型式別に調べたものである。

本調査で飛行件数が最も多く見られたのは、ボーイング社のB 747型機で、同型機の総飛行件数1747機の2.4％に高度逸脱が観測された。一方、同社の新型機B 767型では0.31％、またエアバス社のA 300型機では0.55％であった。表7で、航空機の型式別飛行件数が50件を越えるものについては、オーバーシュートが発生した割合を百分率（％）で示したが、明らかに新しい機種の方が逸脱を起こす頻度の低いことがわかった。

4.3.5 民間機・軍用機別逸脱量

データ抽出エリアでレベルオフが観測された航空機は全部で4089機であった。これらのほとんどは民間機で、その総数は3934機であった。また国籍別にみると、民間機のうち日本国籍のものが69％を占めていた。一方、軍用機の総数は155機であったが、その内訳は日本国籍機が9％に対し、外国籍が91％であった。

次に、民間機と軍用機のレベルオフ特性を比較

した。200 ft 以上の大きな逸脱を起こした航空機を民間・軍用に分け、さらに国籍別に逸脱量と頻度をまとめたものを表 8 に示す。これより高度逸脱を起こした頻度は民間機よりは軍用機の方が、また国籍別にみると、我が国の航空機より外国機の方が高かったことがわかる。

ところで、FL 290 以上の高々度を飛行する民間機は、そのほとんどを旅客用定期便が占めており、貨物便は少ない。これに対し、軍用では輸送機が最も多く観測されている。軍用機としては、この他に小型のジェット練習機（単座または複座の垂直機）、艦載用偵察機および攻撃機なども高々度を飛行しており、その用途により機種は異なり、機体の大きさ、運航性能などが多種多様である。

民間機では、通常オートパイロット、ハイトロックが使用されるが、軍用機では、その目的上マニュアル操縦による飛行回数も多いと推測する。したがって、このような違いが航空機のレベルオフ時の動特性に現れたのかも知れない。

なお、下降時に起こったオーバーシュートに関しても上昇時と同様の傾向が観測された。

参考として大きな高度逸脱を観測した航空機の数を経営会社別に調査したものを表 9 に示す。

4.4 異常なモード C データ

4.4.1 モード C データのジャンプ

モード C データの航跡が異常であると考えられる例がいくつか観測された。これらはパターン番号 (13) “その他” に分類されているもので、例えば、10 秒 (ARSR の 1 スキャンの時間間隔) 以内に 1,000 ft 以上も高度情報がジャンプするように変化している現象である。これは、航空機の実際の動きとは考えられないものである。具体的な観測図を図 11 に示す。この例では、上昇中に高度情報がスタック（途中でつかえる）しているように見える。異常と思われるデータが観測されていた時間は約 2 分間 (12 スキャン) であった。

図 12 は同様に高度がジャンプする観測例であるが、この場合、連続して上昇中を示していたモード C 観測値の傾きが、1 スキャンの間に突然下降に反転しているところに特徴がある。これらは地上の電算機により SSR データ自体の時間的連続性が確認され、また同一時間帯における他機のモード C データ処理結果に異常が見られないことか

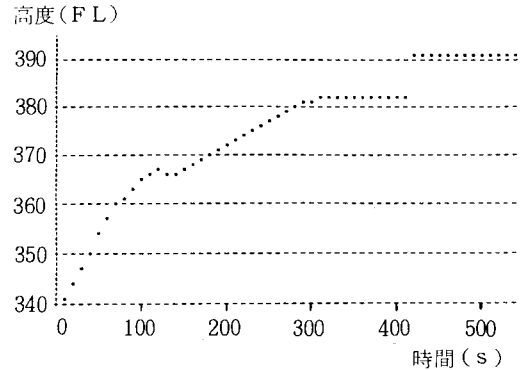


図 11 異常なモード C データ観測例（その 1）

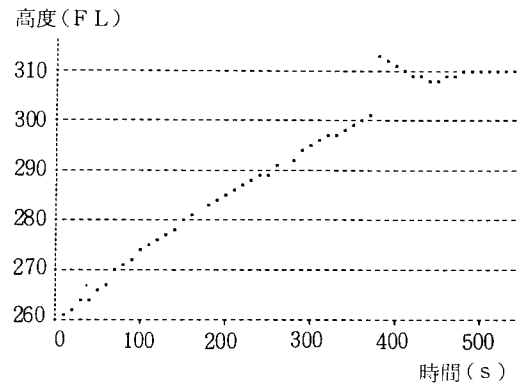


図 12 異常なモード C データ観測例（その 2）

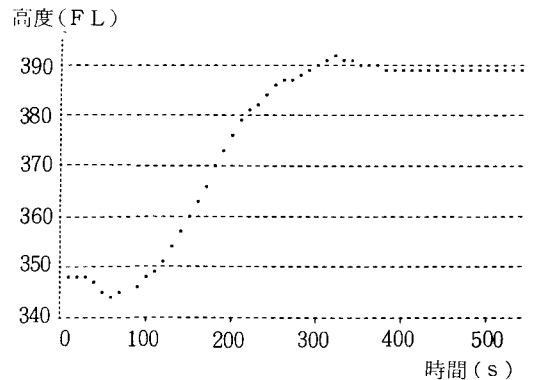


図 13 異常なモード C データ観測例（その 3）

ら電算機処理中のエラーではない。何等かの原因で機上の気圧高度計システム、トランスポンダおよびこの関連に一時的な過渡的变化が起こったものと考えられる。

4.4.2 異常な上昇・下降

別の顕著な例は、高度変更をする場合、新たな

高度に上昇する直前に、一旦500ftも異常に下降をしているケースである。このような例は、逆に水平飛行から高度変更により下降する場合にも観測された。観測の一例を図13に示す。

4.4.3 その他の異常例

このほかモードCの異常と考えられるケースとして、観測データの値が不安定で500ft以上の幅をもって離散的に変動する例(付録参照)、またSSRデータのうちモードA情報は連続的に受信されているが、モードC情報のみ間欠的に途切れたり、甚だしいときはある時点から全く受信されなくなる例などが観測された。このように、モードCデータの観測値が不安定であったり、受信状態が時間的に不連続になるような現象は、上昇および下降中だけで発生しているものでなく、ほとんどの場合レベルオフして水平飛行に移った後も引続いて同様な状態が発生していた。

これらは、その時点での詳細な追跡調査が行われていないので、ここでは観測されたデータからのみの推測は避けるが、いくつかの異常データは同一の航空会社の同一航空機から得られていることが特徴的であった。

4.5 レベルオフ時の動特性

本章では、航空機がある巡航高度にレベルオフするときの動特性を制御の面から考察し、オーバーシュートなどの原因について検討を行った。

4.5.1 制御面からみたモデル化

前章では、航空機がレベルオフする過渡期における挙動をモードCの軌跡より分類し、垂直パターンとして表2および表3に掲げた。これらの表で横の列は高度計の偏位誤差ともいえるセッティング誤差を表している。2および3列目(AAD>0, AAD<0)は、高度計の指示値は指定された巡航高度を示しているが、これと同一であるべき高度情報を地上に伝送する過程で高度情報に偏位誤差が混入し、その結果、レベルオフした後も垂直方向の航法誤差を伴っていると受け取られる場合である。または飛行の効率性を得るために、FMS/FPSで許容されている100ft程度の高度誤差は修正しないためであるとも推測される。別の原因として制御系の入力側に不感帯リレーがあるばあい、不感帯内で誤差を生じたまま安定しているとも推測される。

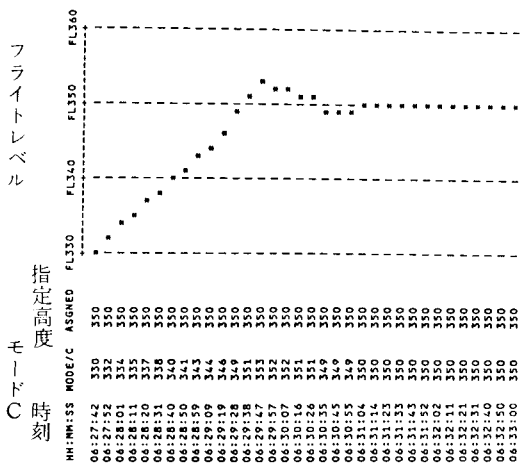


図14 航空機のオーバーシュート観測例

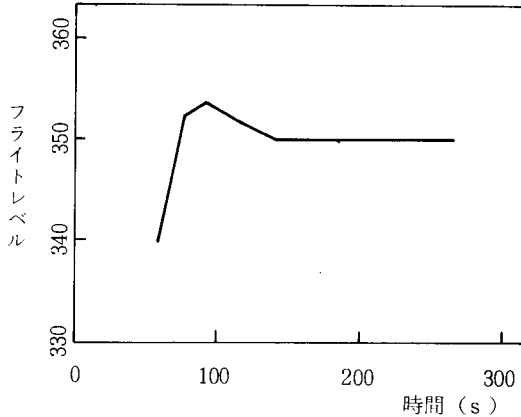


図15 航空機モデルのレベルオフ例

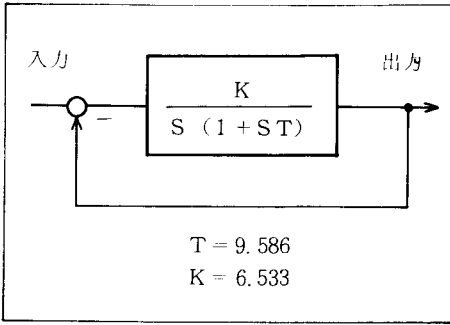


図16 モデルブロック線図

表2の縦の行は、航空機のレベルオフ時における動特性を表している。垂直パターン番号(1)は、レベルオフデータの約70%を占め、大部分の

航空機はレベルオフ時に適切な高度保持を行っていた。

オーバーシュートを起こした具体的な観測例を図14に示す。これを制御面からみると指定高度についた後減衰しながら、また縦振動を起こしていることなどから2次型モデルで近似できる。モデルのレベルオフ時の動特性を一例として図15に、モデルを図16に示す。ここでTは時定数、Kは比例ゲインであり入力として指定高度をステップ状に印加し、出力として高度応答を得ている。

アンダーシュートを起こした場合は、上昇後、巡航高度に移るまでに一時的に指定高度より低い高度に停滞してから水平飛行に移っている。原因としては指定高度につくときにオーバーシュートを避けるための何らかの操作によって生じたものか、あるいは悪天候、タービュランスを避けるために発生したとも推測される。制御面からみれば、むだ時間要素が入力側に接続された場合に相当し、応答が一定時間遅れる現象が引き起こされていることを示す。

振動型は指定高度についた後も高度の変動が持続する場合であり、一つには高度計を含む制御ループに不感帯+ヒステリシスがあるために高度を中心に正負の方向に往復し続ける（リミットサイクル）ことが推測される。また、気圧面が山岳の影響によって不規則に変化しているため、あるいは突風のため高度計の指示が振動状態を示しているとも推測される。さらにこの気圧の不規則振動に航空機の制御系が振動状態で反応してフゴイド振動を引き起こしているのではないかと推測される。

4.5.2 検討結果

FL 290 以上において航空機が巡航高度にレベルオフする時の動特性を制御面から検討した。その結果、高度誤差は次の5つの原因による誤差の組合せによると推測される。

- (1) 高度計の定常的な設定誤差（不感帯内定常誤差を含む）
- (2) 航空機制御系が2次型で近似できるような場合のオーバーシュート
- (3) むだ時間要素
- (4) 高度センサーの不感帯、ヒステリシス性に起因する振動、気圧面の不規則性によるフゴイド振動誤差

- (5) 悪天候などによる大気圧環境

5. 結論及び今後の課題

東京航空交通管制部の協力により、高々度（FL 290）におけるレベルオフ時の高度逸脱について調査した。設定されたデータ抽出エリアを飛行した航空機約 10,000 フライトのモードCデータおよび飛行計画データを収集し、そのうち4,089件のレベルオフを観測し解析した。結果をまとめると次の様になる。

- (1) 調査した航空機のうち、約70%の航空機は極めて適切なレベルオフを行っているが、残り30%のものはレベルオフ時にオーバーシュートまたは、アンダーシュートを伴っていた。
- (2) 観測されたオーバーシュートによる逸脱量の最大値は+400 ft で、総観測数に対する確率は、 4.9×10^{-4} であった。
- (3) モードCデータの異常と考えられる例が十数件観測され、注目に値する。
- (4) 20%の航空機は、指定高度より ± 100 ft または、 ± 200 ft の偏位誤差を持っていた。
- (5) 高度の逸脱と巡航高度の間には、特に密接な関連性は見い出されなかった。

これらの結果より、レベルオフ時に限っていえば直接衝突に結び付くような危険な高度逸脱を伴った航空機の使用は少ないと判断される。しかし、モードCによる高度情報は、最大で ± 300 ft 程度の誤差（内訳は、静圧システム誤差 200 ft、飛行技術の誤差 200 ft、高度計器誤差 100 ft）を含む場合があることを考えると、 ± 200 ft を越える大きな高度逸脱は、1,000 ft の管制間隔適用のもとでは空中衝突を起こす危険性をもつことになる。

これらの危険を避けるため、高度計の仕様を改訂して許容誤差範囲を厳しくし、検査を頻繁に実施して信頼性を向上させることが検討されている。さらに高度逸脱の大きい航空機の使用を自動監視するなど、新高度間隔システムの性能基準履行の状態を地上や機上から監視することによって安全性を高める方法が考えられている。このほか交通密度の高い空域では、航空交通量を監視し単位時間当たりの飛行回数を制限することにより大きな高度誤差を伴っている航空機同士の出会いの確率を下げる必要がある。

本調査で観測された異常なモードCデータの発

生原因については、機会をみて調査したいと考えている。

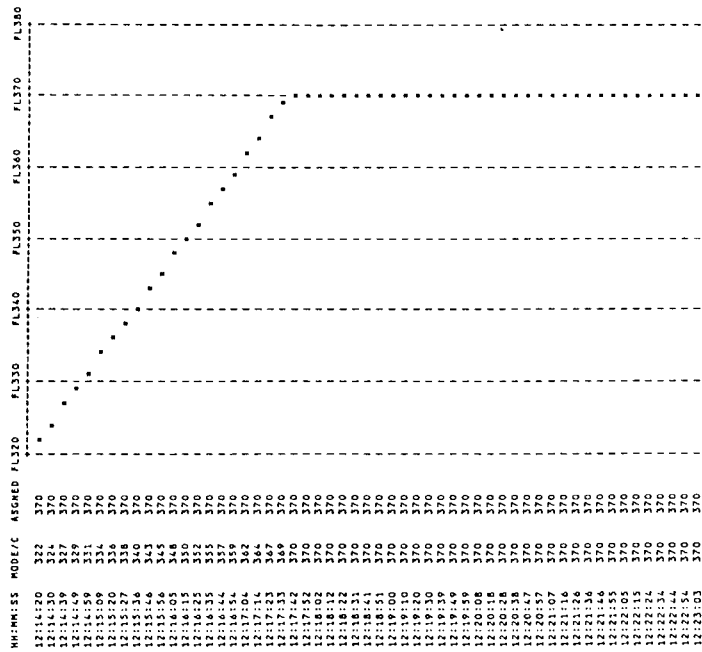
謝辞

本研究を進めるにあたり、資料の提供ならびにデータ収集の便宜をはかって頂いた航空局保安企画課、管制情報処理システム室の関係各位、またデータ処理、プログラム開発でご協力を頂いた東京管制部FDP、RDPシステム担当官および当研究所航空管制研究室東福寺室長に深く感謝します。

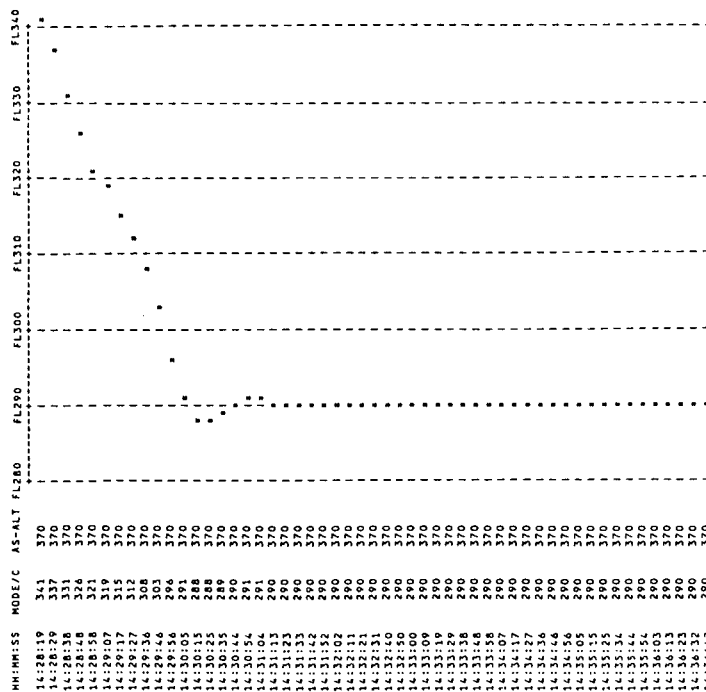
参考文献

- 1) 屋代清三郎, 吉岡栄治郎 “ICAO管制間隔検討会議 第5回会議報告書” 昭和60年5月
- 2) E. Yoshioka et. al RGCSP-WG/B-WP / 47, 1987. 1
- 3) 高橋 賢はか “SSRモードCによる高度維持精度の解析”, 第19回電子研発表会講演概要 昭和62年5月
- 4) 新井芳雄はか “レベルオフ時における航空機の動特性”, 第19回電子研発表会講演概要 昭和62年5月

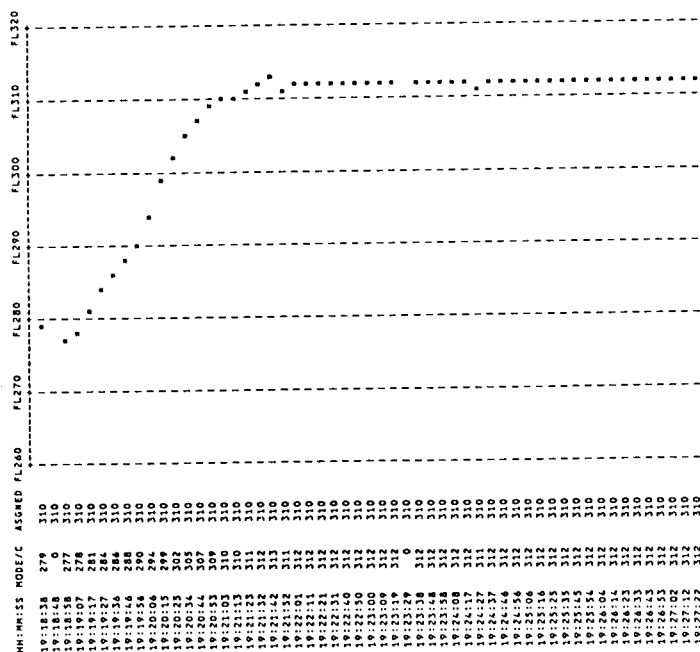
付録 SSRモードCデータ観測例



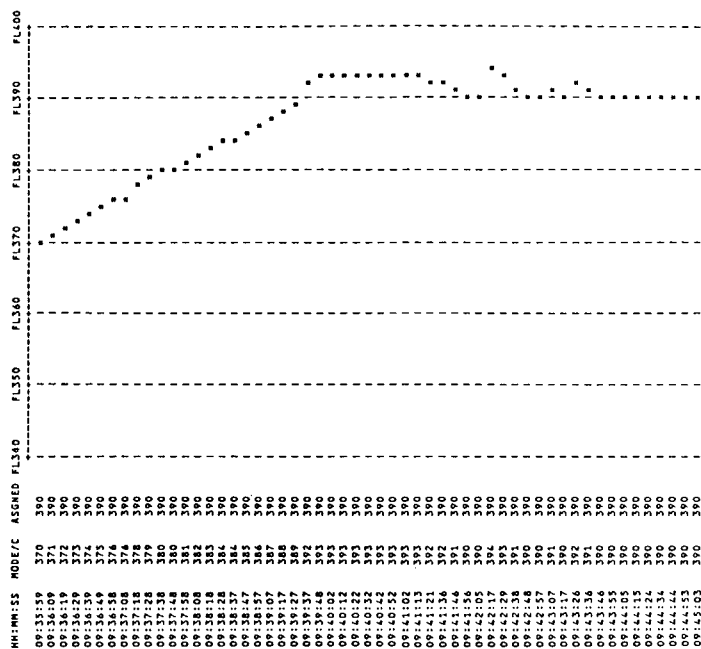
<ノーマル型：上昇→水平飛行>
付図 1. 正常なレベルオフ

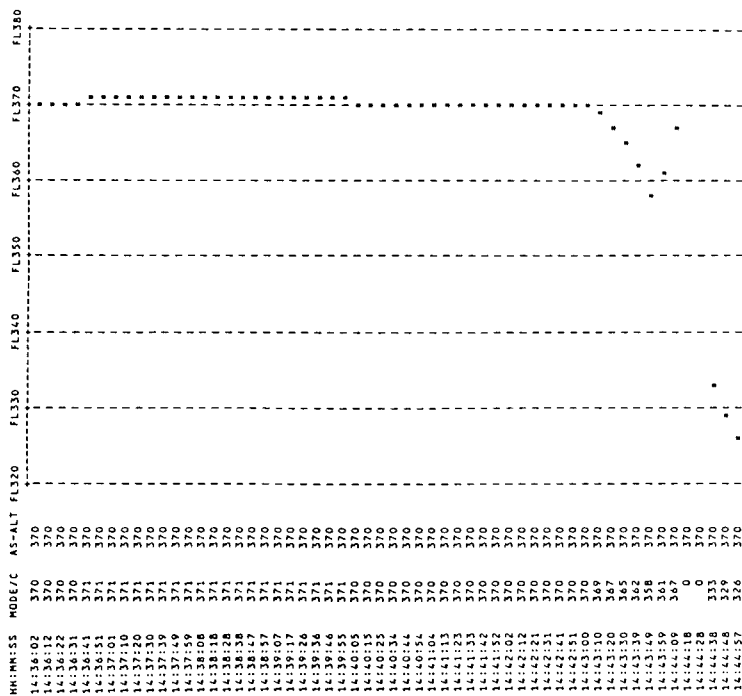


＜オーバーシュート型：最大逸脱高度＝200 ft，垂直偏位誤差＝0 ft＞
 付図 4. 高度変更により，降下して新たな指定高度にレベルオフする時オーバーシュートを起こした例



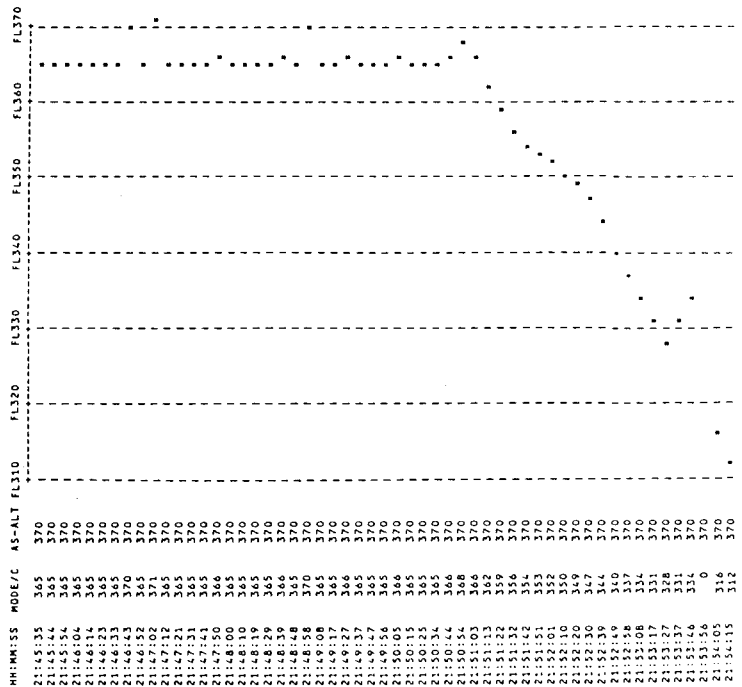
＜オーバーシュート型：最大逸脱高度＝300 ft，垂直偏位誤差＝200 ft＞
 付図 5. レベルオフ時にオーバーシュートを起こし，その後垂直偏位誤差を伴ったまま飛行している例





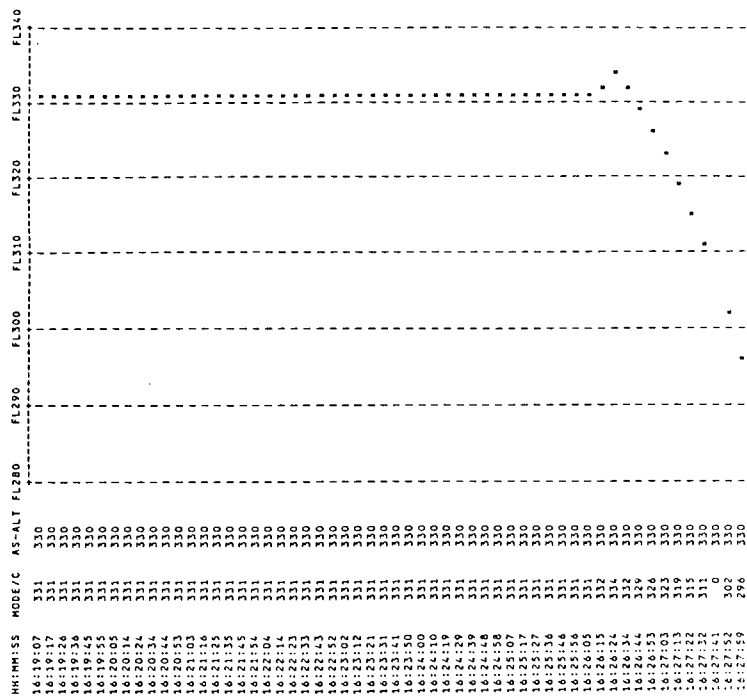
＜異常なモードCデータ：水平飛行→下降＞

付図 8. 水平飛行から降下を開始してまもなく、高度情報が異常となり観測値の傾向に反転がみられる。



＜異常なモードCデータ：水平飛行→下降＞

付図 9. レベルフライト中のモードC情報が、不規則に変動（500 ft）している例で、降下に転じた後、観測値の傾向に反転がみられる。



＜異常なモードCデータ：水平飛行→下降＞

付図10. 水平飛行から降下を開始する直前に異常な高度の上昇を示した観測例