

# ターミナル領域における速度管制方式 (I)

—管制のモデル化とシミュレーション—

水町守志・伊藤益敏・宮尾光生

## Linear Holding in Approach Control (I)

— Modeling and Simulation —

By

Moriyuki MIZUMACHI, Masutoshi ITOH and Kosei MIYAO

**Abstract:** The mathematical model is devised to investigate the air traffic control of the terminal area, especially the approach control. Simulations are performed to examine different types of control procedures utilizing the linear holding (delay adjustment by velocity control). Such numerical data are obtained as the average delay, the probability of losing the separation etc., for every control procedure, using parameters the traffic rate, the velocity error etc. Results show that the linear holding can be effective and realizable through some kinds of ATC procedures.

### 概 要

航空交通管制のターミナル領域における速度管制方式を検討した。すなわち、ターミナル進入管制をモデル化し、ランダムに進入する航空機を円滑に滑走路へ導く手段として階層的に速度管制を行う各種方式を提案している。これら速度管制方式をシミュレーションにより実行し、平均遅延時間、各種の誤差により管制間隔を保てない割合などを数量的に明らかにした。

### 1. ま え が き

航空交通において渋滞を生ずるのは主としてターミナル領域である。ターミナル領域における渋滞を緩和し遅延を減少させるには滑走路を効率よく使用することが緊要であり、それにはランダムに進入する航空機を順序よく円滑に最終進入経路へ導く必要がある。この際の時間調整の手段としての速度管制の有効性をシミュレーションにより確かめた。航空路においては速度管制による時間調整は一部で現実に行われているが、ターミナル領域では飛行時間が比較的短く時間調整の有効性に疑問が持たれ実行されていない。

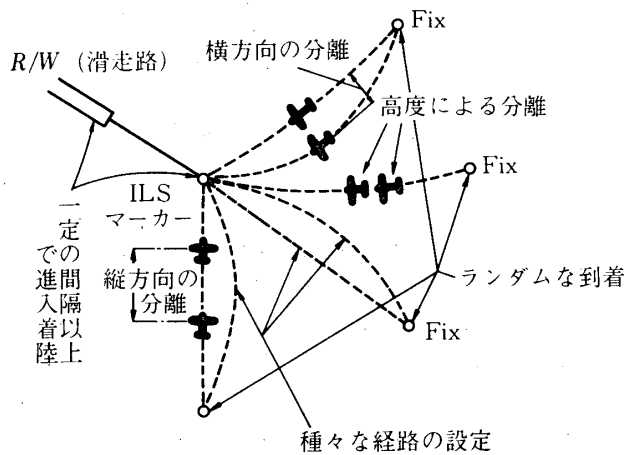
本論文ではターミナル領域の進入管制をモデル化し、段階的に複雑となる多種の速度管制方式をシミュレーションにより実行している。モデル化および速度管制方式の提案に際しては、現実のターミナル管制に容易に導入し得るように配慮した。

## 2. 管制方式のモデルと評価パラメータ

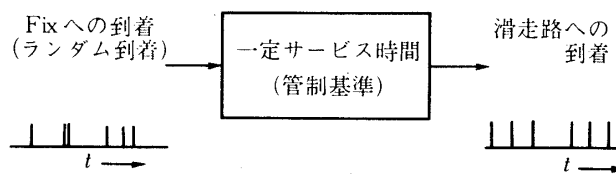
### 2-1 管制の基本モデル

ターミナル領域における進入管制の目的は、その領域の幾つかの（航空路終端に当る）地点 (Fix) にランダムに到着する航空機を、安全且つ迅速に滑走路端 (R/W) まで導くことである。

この際、航空機相互に一定時間間隔以上の分離を保ちつつ着陸させることが安全上必要であり、このため、適宜遅延を与えることにより調整が行われる。この点より言えば管制は、第2図に見る通り「待ち行列」のモデルによりあらわされる。待ち行列として管制を見た場



第1図 ターミナル領域の管制



第2図 待ち行列として管制

合、多数窓口、多段の系であり、サービス時間は一定サービス時間である。この際対象が航空機であり、任意の待ち時間を得ることが實際上困難な点も特徴である。

一方、管制を管制官の指示とそれに従って運航される航空機という観点より見れば、これは第3図に示す制御系をなしている。又、管制官は当該機の位置(運動)を観測するだけでなく対象空域にいるすべての航空機の状態を観測し、現時点の安全を確認すると共に将来時点における安全をも考慮し、必要に応じて適宜指示を与えている。

従って、この限りにおいて管制官は予測制御(予測時間は必ずしも一定ではない)を行っていると言える。又管制官の指示を聞いてパイロットが操作するという人間的な要素が介在する点、更にはこの制御が必ずしも連続的に行われない点(管制官の指示は必要最少限で行われると考えてよく、制御誤差が連続的にフィードバックされているとは考えにくい)などが特徴的である。

## 2-2 管制方式の評価

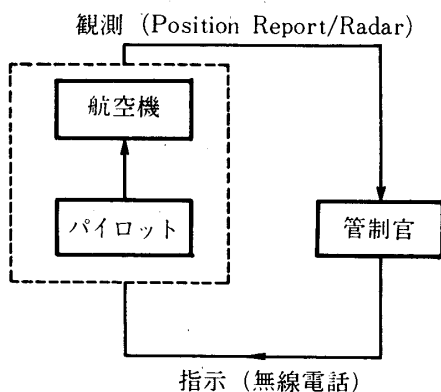
従来管制方式の提案、採用は管制熟練者の経験によって来た。方式の定量的な評価は余り行われておらず、評価する場合も「待ち行列」としてのみとらえられていた。しかし、航空交通にとって重要な事柄は、安全性と定時性の二点であると言える。後者に着目した場合の評価パラメータとしては「待ち時間」で良いが、安全性に着目した場合には、他の評価パラメータを考慮すべきであるが、これについての配慮は従来行われていなかった。

本論文では、安全性と密接な関係を持つ「到着間隔」を取りあげることとした。具体的には到着間隔分布が評価パラメータとなる。

待ち時間と安全性とは管制を実行する際の実際的なパラメータである管制間隔との関係において相似た傾向を有している。すなわち管制間隔を大きくとればとる程安全性は増大するが、同時に待ち時間も増大する。なお、管制間隔の他、現実のパラメータである到着機数、機種別の混在比なども二つの評価パラメータに影響を与える。

したがってこれらの影響を含め、上述の関係を把握しておくことが重要である。

(1) 到着間隔分布：管制下の航空機は通常航空機相互間に一定の間隔(管制間隔)以上



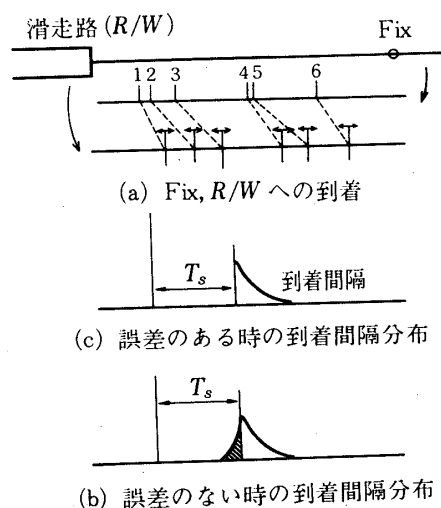
第3図 制御ループとしての管制システム

を保ちつつ航行する。この管制間隔の大きさは、航空機の回避動作の性能、パイロットの特性、観測機器の精度、航行援助装置および計器の精度などを総合的に含むものとして定められていると言える。管制において航空機相互の間隔がこの管制間隔以下になれば回避の処置が必要となる。

なお、第1図に示したように、分離には垂直方向、横方向、縦方向の三つがある。しかし、ターミナル領域においては、最終的に単一の最終進入航路をとって滑走路に着陸するのであって、滑走路では縦方向分離すなわち時間間隔だけとなる。そこで本論文では、以下縦方向分離だけを考慮する。

管制を制御系として考えた場合、これは、時系列を入力とする制御系であって、間隔がランダムである時系列を間隔が一定値以上あいた系列へとならべなおすものと考えられる。管制は、2-1で述べたように予測制御系であり、予測の誤差、制御の誤差など存在する上に時間離散的な制御で時定数が極めて大きいことが特徴であり、誤差が完全に零になる制御が行われるわけではない。すなわち、本来なら到着間隔の分布は第4図(b)にみるように管制間隔以下になることはない制御が理想であるが、実際には、誤差のため同図(c)のように管制間隔以下になる場合を生ずると考えられる。この管制間隔以下になる割合を、安全性に関する評価パラメータである警報率として取り扱うこととする。ここに言う警報率とは、あくまでも管制間隔を保てない確率であって、これが直ちに衝突の確率を表すものではない。なお、到着間隔分布が得られれば、これは警報率なども含み管制の総合的に確率特性を示すものと言える。

(2) 待ち時間：空港周辺に到着した航空機は、他に航空機がまったくいないとすれば、ただちに着陸することができる。これに反し他の航空機がいる場合には、前述の管制間隔が



第4図 滑走路における到着間隔

保てるかどうかを判定し、必要に応じてホールド、経路延長、減速などの指示により「待ち」が与えられる。この待ち時間は管制方式、現実の管制パラメータの値などによって変わり、システムのパフォーマンスを示す量、すなわち評価パラメータとして取り扱える。もちろん待ちは小さい程望ましい。

なお待ち時間としては、他の航空機が全く存在しないとした場合の到着時刻と管制を受けた結果の実際の到着時刻との差と定義する。

### 3. 速度管制を用いる管制方式

#### 3-1 対象とする管制方式

管制方式は管制に利用できる施設（機上操作も含め）によって制限を受ける。施設の利用方法としては、地上の航行援助施設による航空機自身による定点位置確認と無線通報、レーダの使用、更にはレーダと計算機の結合へと進んでいる。これに伴って管制方式も運行票のみによる所謂マニュアル管制、レーダ管制、自動化レーダ管制へと移っており、現状は空港によって異なるが、上記の3種の管制方式が混在している。

レーダ管制あるいは自動化レーダ管制方式では、時々刻々の航空機の位置が判明しており、各航空機間の分離も判定できる。従ってそれぞれの航空機に適当な飛行をさせ、危険が予測される場合のみ指示を与えることも可能である。又、指示の内容としてもレーダベクタリングと呼ぶ微少な経路変更も行える。

しかし、このような管制方式でも、逃避経路の判断、時間の調整方法の判断、航空機との通信などに時間を要するなどの点から現実には、標準的な進入経路を複数設定（マルチパス）するなど、ある程度定形化された手続きによっている。

そこで本論文では時間の調整手段として、マルチパスとホールドおよび速度管制を用いるマニュアル管制方式を対象としてとりあげ、特に速度管制の有効性を数量的に明らかにすることを旨とした。この場合速度管制の指示を与える方法や回数の組合せにより種々の方式が考えられ、レーダ管制方式も——遅延を与える点では速度管制もレーダベクタも同一であり——等価的にこれらに含まれる。速度管制の方式については3-2で述べるが、これら各種方式についてシミュレーションを行った。

結果は以下の観点、

- (i) 速度管制の有効性（待ち時間）
- (ii) 制御誤差と管制間隔（安全性）

の二点より取りまとめ、各種速度調整方式の限界、妥当性などを数量的に明らかにしたい。

#### 3-2 着陸順位の決定と管制間隔

(1) 着陸優先順位の決定 ターミナル進入管制は、ターミナル空域に進入する航空機を安全に且つ円滑に滑走路に着陸させる業務である。ここで言う円滑にとは到着機に対する順序づけ（優先順位の決定）の問題として扱われる。

すなわち一般に、待ち行列では到着順が基本的な優先順位となるが、種々の速度の到着機を扱う管制業務の場合、どの地点における到着順を取るかによって差異を生ずる。ここでは速度管制の検討が主目的であるので管制下に入る以前に優先順位の与えられる順序づけが行

われる時点を仮想し Initial Point (I. P.) と呼ぶこととする。すなわち本論文では、滑走路の到着予定時刻に基づいて優先順位が決定されるものとし、I. P. は滑走路到着予定時刻の20分前とする。

(2) 時間調整の方法 時間調整の方法として、基本的に二つの方法がある。その一つは経路を調整する方法であり、他の一つは速度を調整する方法である。

経路の調整方法としては、ホールド (又はサークル) と呼ばれ一周4分 (又は2分) で長円 (又は円) を描いて飛行する方法、あらかじめ長さの異なる幾つかの経路を設定して置き適宜選択指示する方法 (マルチパスと呼ぶ)、それとレーダ像をみながら機首方位を指示し、経路を延長する (レーダ・ベクタリングと呼ぶ) 方法などがある。

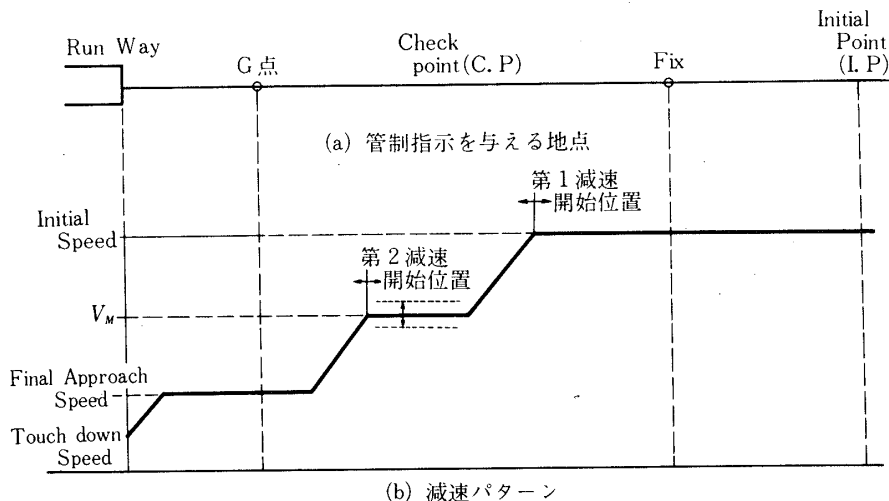
次に速度による調整であるが、これは減速パターンを指示することにより行われる。一般にターミナル領域への到着機は、Fix 到着時はほぼ巡航速度であるが、これを漸次減速して最終進入ゲート通過時には、最終進入速度 (機種によるがほぼ一定) となり、滑走路には着陸速度で着地する。この減速パターンは、運航会社、空港の状況などにより異なるが、この減速する位置、減速の量などを指示することにより、所要時間を調整することができる (速度管制)。

実際の管制では、これらを組み合わせて時間調整を行う訳であるが、本論文ではマルチ・パス (ホールドを含む) と速度調整を組み合わせて時間調整を行う管制方式を対象としている。

### 3-3 速度管制を用いる各種管制方式

前節で述べたごとくシミュレーションの対象とするのは、マルチパスと速度指示を併用する方式であり、以下に指示の与え方により異なる各種方式について述べる。

判断を行う、または指示を与える場所としては、I. P., Fix, check point (以下 C. P. と



第5図 管制指示を与える地点と減速パターン

記す), 最終進入ゲート (G点として示す) の4か所を考える (第5図 a).

まず I.P. は前述した通り優先順位を確定することに意味があり, この点でとりあえず, パスと Fix でのホールド回数を予定する. なお, この点は当該航空機の初期情報の与えられる時点, すなわち滑走路到着予定時刻の20分前の時点であって地図上の定点を意味しない.

I.P. でパスとホールドの予定を与えることは, 方式1を除きすべての方式に共通である.

方式1はこれが予定でなく, 決定であり以下何の指示も与えない. すなわち, 実際には何らの調整も行わない方式であるが, 比較のためとりあげた方式である.

次に Fix を通過する際に改めてパスの選択とホールド指示を行う (方式2). ただし, 厳密に言えば Fix を出発する時が最終決定で, Fix でホールドを行う場合にはホールドを終了する時点で最終決定が行われる.

更に Fix での時間調整手段として上述のホールド, パス選択以外に速度指示を併用する方式3~8).

速度指示としては, 第5図 b の減速パターンを考え, 減速開始位置と  $V_M$  の値 (すなわち減速量) を指示する. この場合, 減速開始位置は2か所を想定しているが,  $V_M$  と第一減速開始位置のみを指示する方法 (速度調整①) と  $V_M$  と第一, 第二減速開始位置とを指示する方法 (速度調整②) とを考えた (前者が方式3, 後者が方式4).

速度調整①と②の差異は, 次に述べる C.P. での調整手段を多く残すかどうかであると言える.

C.P. は第一減速を終了した時点でありここでは制御誤差を吸収するための指示を与えるが指示は, 第二減速開始位置のみである. C.P. で指示を与える方式のうち, Fix での速度調整が①の場合を方式5, ②の場合を方式6とする.

最終進入ゲートG点では, 本来時間調整の手段としてはホールドのみが可能である.

ここでも方式5に加うるにG点ホールドを行う方式を方式7, 方式6にG点ホールドを加えたものを方式8とする.

このG点におけるホールドは, Fix に到着する航空機には影響を与えない. 何となれば, 分離の判定は直近の優先順位を有するすなわち直前の航空機 (先行機) との間で行うため, G点と Fix の間に航空機が存在するとG点ホールドの情報は Fix にいる機に伝わらないこととなる. このことは, もしG点でホールドがあったという情報が伝わってれば, Fix においてできるホールドをG点に持ち込むこととなり混雑を助長すると考えられる.

そこで, G点でホールドが生ずると, この情報を Fix に帰還し, 後続機の予定をすべて4分ずらす方式を考える (方式9は方式7に帰還を加えたもの, 方式10は方式8に加えたもの).

すでに述べたようにG点における時間調整手段は, ホールドしかないため, わずかな誤差を吸収するためにも4分という大きな待ちを与えることとなる. もしこれが零から任意に与えられるとすれば, という方式を対比のため取りあげた (方式18).

方式18は, 一つの仮定であるが, もう少し実際的な方式として, ホールド1回は止むを得ないとして, しかし4分+任意 (1分以内) のホールドができると考えた方式を取りあげた

第1表 各種方式と時間調整の手段

手段 方式	I.P.	Fix	C.P.	G点
1	パスの選択 Fix でのホールド回数			
2	パスの選択 Fix でのホールド回数	パスの選択 ホールド		
3	同上	速度調整① パスの選択・ホールド		
4	同上	速度調整② パスの選択・ホールド		
5	同上	3に同じ	第2減速位置	
6	同上	4に同じ	第2減速位置	
7	同上	3に同じ	5に同じ	ホールド
8	同上	4に同じ	6に同じ	ホールド
9	方式7においてG点ホールドがあった時、その情報を Fix の判断に利用 (帰還と呼ぶ)			
10	方式8	"	"	"
11	方式7でG点の時間調整が4分+任意(1分)可能とする		帰還有 帰還無	
12	方式8	"	帰還有 帰還無	
13	方式1	"	帰還有 帰還無	
14	方式2	"	帰還有 帰還無	
15	方式3	"	帰還有 帰還無	
16	方式4	"	帰還有 帰還無	
17	方式7でG点の時間調整が任意			
18	方式8	"		

(注)

速度調整 { ① は第1減速位置のみ用いる。  
② は第1, 第2減速位置共に用いる。

(方式11~16). この場合4分より少し大きい時間調整が必要な場合に8分(ホールド2回)という待ちを与えずに済むこととなる。

以上述べた各方式を一覧表として第1表に示す。



4. 速度管制方式のシミュレーション

4-1 モデルと評価パラメータ

(1) 空域と経路 対象とする空域と経路の構成を第6図に示す. 図中 I. P. は前述の Initial point であって, 現実の管制移管点ではない. 具体的には, 滑走路到着予測時刻の20分前から航空機の着陸順が決定されてシミュレーションが開始されるので, I. P. は地理的な定点ではなく滑走路からの時間的な定点であり, 航空機の初期速度により滑走路からの距離は異なる. 修正指示を与える C. P. (check point) は第一減速が終了した時点としているため, これも地理的な定点ではない. 他の図中の点  $F_i (i=1, 2)$ , G, R/W は地理的な定点である.

(2) トラヒックの性質 トラヒックすなわち進入する交通流の性質として次の仮定を置く.

(i)  $F_i (i=1, 2)$  を経て進入するトラヒックはポアソン過程とする. すなわち進入する航空機の時間間隔の確率密度は指数関数となる.

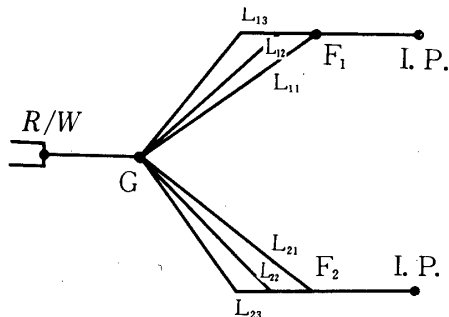
(ii) 進入する航空機の速度は3種類とする. 機種としては, 高速 Jet, 低速 Jet, Turbo-prop とし3種は一定の比率を有するが進入機の生起はランダムとする.

(3) シミュレーション・データ 管制手順 (4-2 参照) をシミュレーションにより実行し以下の結果を求める.

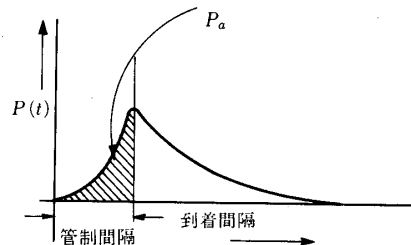
(i) R/W 到着時刻の遅延の分布 遅延は他に航空機がないとした場合の最も早い到着予定時刻と管制手順を経て実際に到着した時刻との差と定義する.

(ii) R/W への到着時間間隔の分布 R/W における先行機と後続機との到着時間間隔の分布 (第7図).

(iii) 評価パラメータ 上記データと併せて, 次の評価パラメータを求める.



I. P. : Initial point  
 $F_1, F_2$  : Fix  
 $L_{ij}$  : 所要時間の異なる進入経路  
 $(i=1, 2, 3)$   
 $(j=1, 2, 3)$   
 G : ILS 進入点  
 R/W : 滑走路



第6図 空域と経路

第7図 到着間隔の分布

- (a)  $P_a$ : 警報率
- (b)  $\bar{T}_d$ : 平均遅延時間 (平均待ち時間)
- (c)  $\sigma_d$ :  $\bar{T}_d$  の標準偏差

#### 4-2 管制手順とパラメータ

(1) 優先順位 「I.P. 時刻の順序に従って優先順位がある。」とする。なお予定到着時刻は (トラヒックの性質に無関係に) 一定の飛行パターン (最短時間とする) を持って求める。

(2) 時間調整の手段 次の三つの手段によるものとする (手段の選択順序については 4-3 参照)。

- (a) 速度の指示
- (b) パス (経路) の指示 ( $F_i$  に対し  $L_{ij}$  ( $i=1, 2$   $j=1, 2, 3$ ) の決定)
- (c) ホールドの指示
- (3) 各パラメータの具体的な数値

(i) 速度の指示

(a) 機種と速度の範囲 機種の比率および各機種の速度範囲を第2表に示す。

(b) 速度可変範囲 (第8図参照)  $V_M$  のみ可変とし, かつ第2表の範囲内で遅延を生じさせる方向にのみ変える。

(c) 減速開始位置の可変範囲 減速開始地点は可変とし, 減速は 2 knot/sec で行う。

(d) 制御誤差 速度指示に対し誤差があると仮定し, 指示値に対し  $\pm 5$  knot,  $\pm 10$  knot,  $\pm 20$  knot の範囲で一様分布をなす場合を取扱った。又, 減速開始位置, ホールド時間についても誤差を仮定した場合を取りあげた (夫々  $\pm 0.5$  NM,  $\pm 5$  秒で一様分布)。

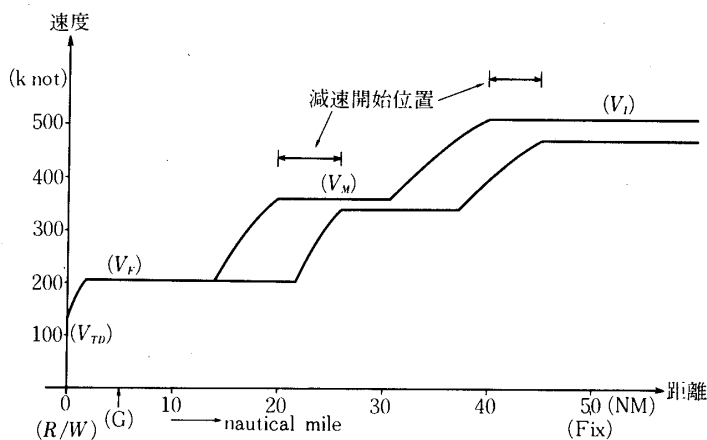
(ii) パスの変更 各 Fix について3本の経路 (パス) を設定し, 夫々の長さを第3表のごとく定めた。所要時間の例も併せ示した。なお, 上記 (i) および (ii) による時間調整の範囲の例を第9図に示す。

(iii) ホールド ホールドは1回4分の遅延を与える。

(iv) 平均到着率 平均到着率は 10, 15, 20, 25 機/時間を基本とし, 他に 5, 7, 8, 13 機/時間や 30 ~ 40 機/時間なども一部取りあげた。

第2表 機種の比率と速度の範囲

機種 (混存比)	速度範囲 (knot)			
	$V_I$	$V_M$	$V_F$	$V_{TD}$
高速 Jet (70%)	510	360	200	130
	470	330	200	130
低速 Jet (20%)	440	310	170	120
	410	290	170	120
Turbo prop (10%)	240	190	140	100
	220	175	140	100

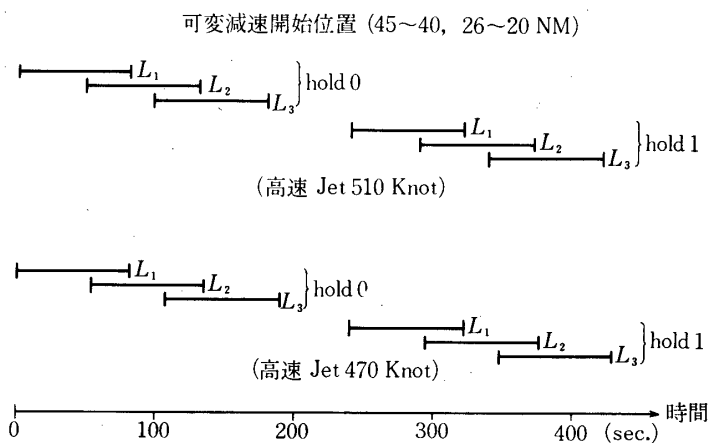


第 8 図 高速 Jet の減速パターン

第 3 表 経路の長さと所要時間

パス (i = 1, 2)	$L_{i1}$	$L_{i2}$	$L_{i3}$
経路長	50 NM	57 NM	64 NM
所要時間 (高速 Jet)	610 秒	670 秒	720 秒
所要時間 (Turbo prop)	1 060 秒	1 170 秒	1 290 秒

(所要時間は飛行パターン一定として Fix から R/W 迄のもの)



第 9 図 時間調整の範囲

(v) 管制間隔 時間によるものとし R/W およびG点で1分なる場合を主たる対象とし他に1.5分, 2分も採用した.

(4) その他の管制手続

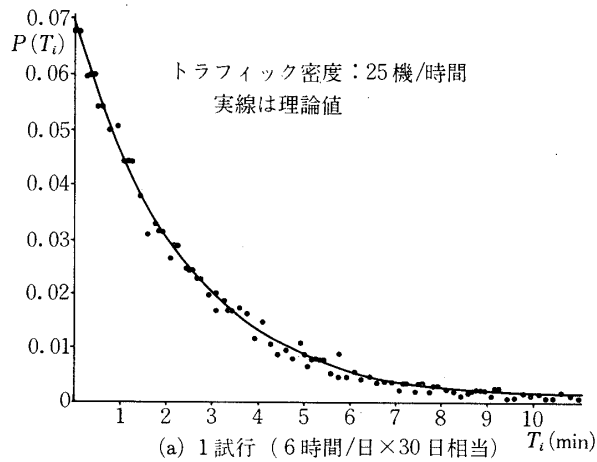
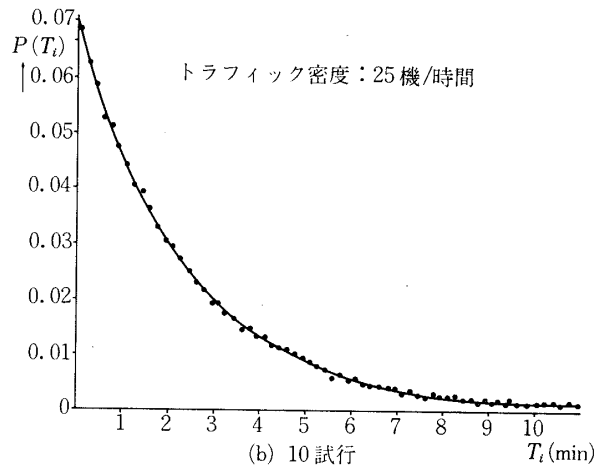
モデルを現実の管制に近いものとするために以下の拘束条件を付した.

- (i) R/W およびG点で上述の管制間隔だけ離れていること.
- (ii) R/W, G点間に3機以上存在しないこと.
- (iii) G点13 NM 以遠では, 異なるパスでも追越し禁止.
- (iv) 同一パスでの追越し禁止.

### 5. シミュレーション結果

シミュレーションは第1表に示した各方式について行った. 以下幾つかの項目にわけて, シミュレーション結果を示す.

シミュレーション結果は特にことわらないかぎり, 12 試行ずつ行っている. なお1 試行とは, 1回6時間分のシミュレーション (20機/時間の到着率なら120機前後) 30回をさす.



第10図 発生させたトラヒックの時間間隔の確率密度

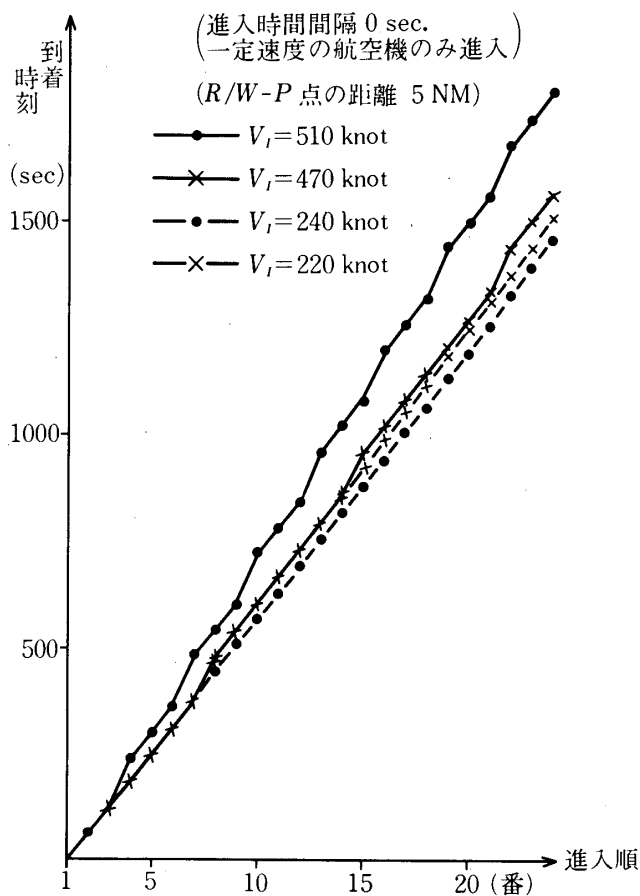
又、機種比率は第2表に示した値であり、管制間隔は滑走路端で1分、G点で1分を基準とした(1分-1分と示す)。誤差の表示は、例えば5-0.5-5は速度 $\pm 5$  knot, 減速開始位置 $\pm 0.5$  NM, ホールディング $\pm 5$  秒の範囲の一様分布に従う誤差を意味する。

### 5-1 テスト・シミュレーション

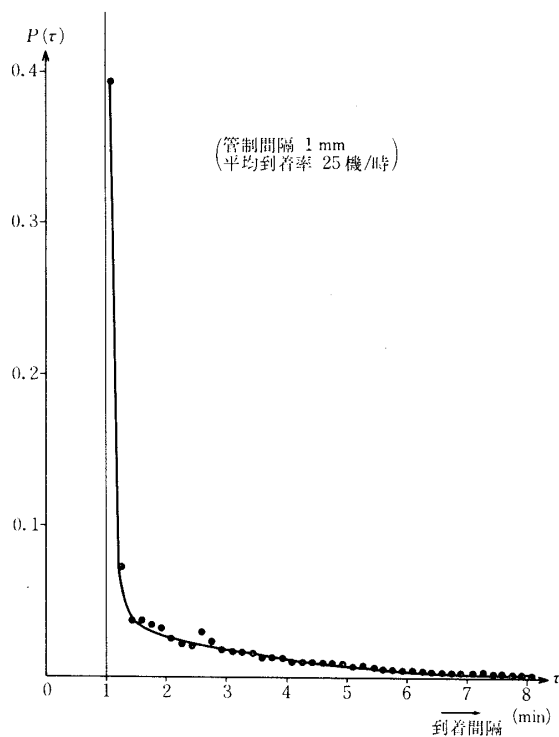
(1) 試行回数について シミュレーションでは、使用する乱数の性質が問題となるため、その度数検定および連の検定を行い良好なことを確認した。又、シミュレーションの試行回数も解の精度と計算機の使用時間との関係で問題となる。此处では、前述の通り6時間/回 $\times 30$ 回/試行 $\times 12$ 試行ずつの試行を行っているが、1つの目安として試行回数を変えた場合の発生トラヒックの到着間隔分布を第10図に示す。

(2) テストデータによる試行 シミュレーション・プログラムのデバッグは、トラヒックの状況を示す出力リストを出し、手計算でチェックするなどかなり綿密に行ったが、その一つとして行ったテストデータ(規則的進入トラヒック)に対する応答を第11図に示す。

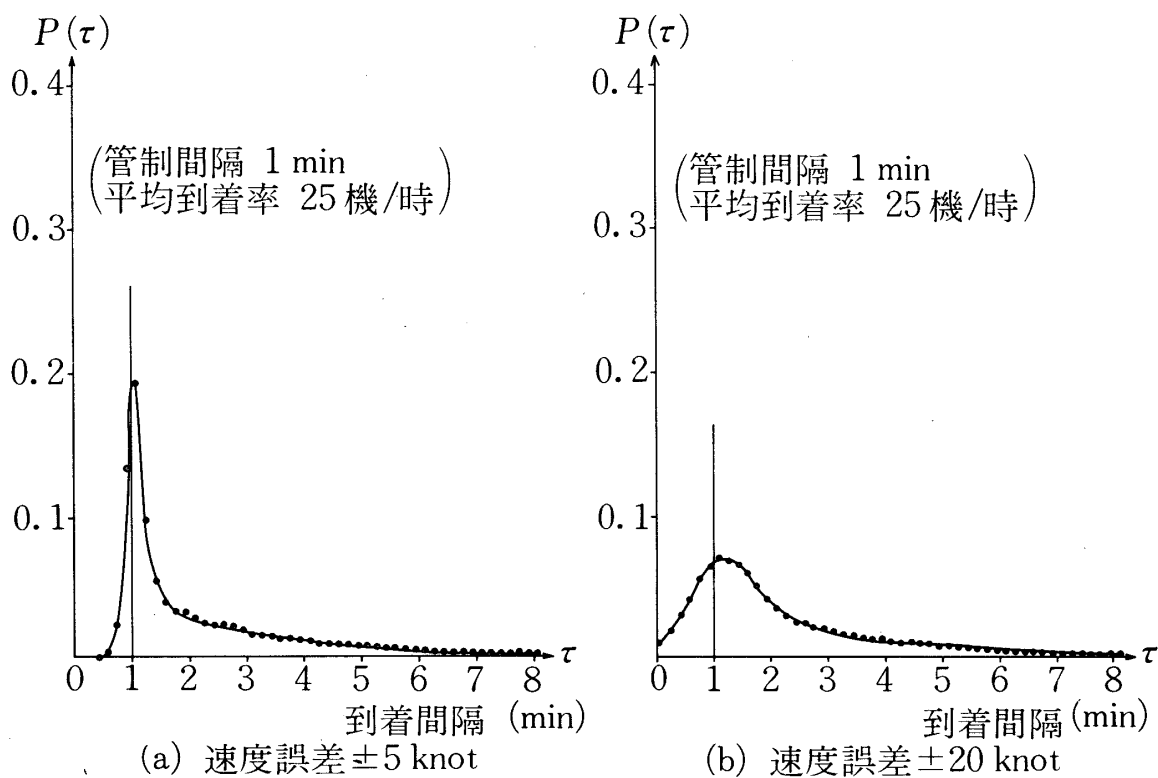
同図は同時に多数の機が到着した場合で、3本の経路により3機が1分間隔で入り、ついで



第11図 規則的進入に対する到着時間間隔



第12図 到着間隔分布 (方式4, 誤差なし)



第13図 到着間隔分布 (方式4, 誤差あり)

で1回のホールドと3本の経路で3機が、という形で着陸していく様子がわかる。

### 5-2 分布の型

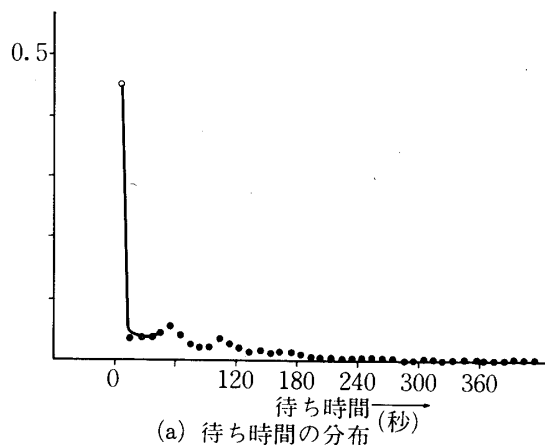
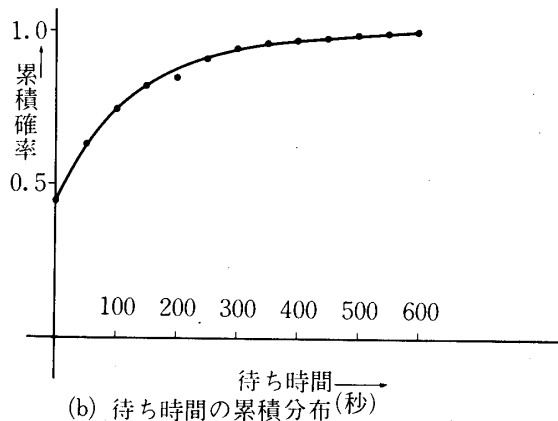
(1) 到着間隔分布 誤差のない時の到着間隔分布を第12図に示す。この時1分(管制間隔)以下の到着はなく、トラヒック密度が多くなると1分の到着間隔が増大する。次に誤差のある場合の到着間隔分布を第13図に示す。

この場合には、誤差の影響で到着間隔が1分を切る場合が出て来て居り、それは誤差の増加と共に、1分付近にあった山をつぶす形で増加している。

(2) 待ち時間分布 待ち時間の分布とその累積分布とを第14図に示す。待ちの分布にある山は、待ちが連続的に与えられず約1分毎の経路によっているためと考えられる。

### 5-3 平均待ち時間と警報率

到着間隔および待ちの分布は、5-2に示すごとくであるが、到着間隔については、管制間隔を切る割合(警報率)を、待ちについてはその平均値を求めることとし、方式1から8について、到着機数10機/時~25機/時に対する値を第4表に示した。又そのうちから方式2, 6を選び、結果を図示した(第15, 16図)。



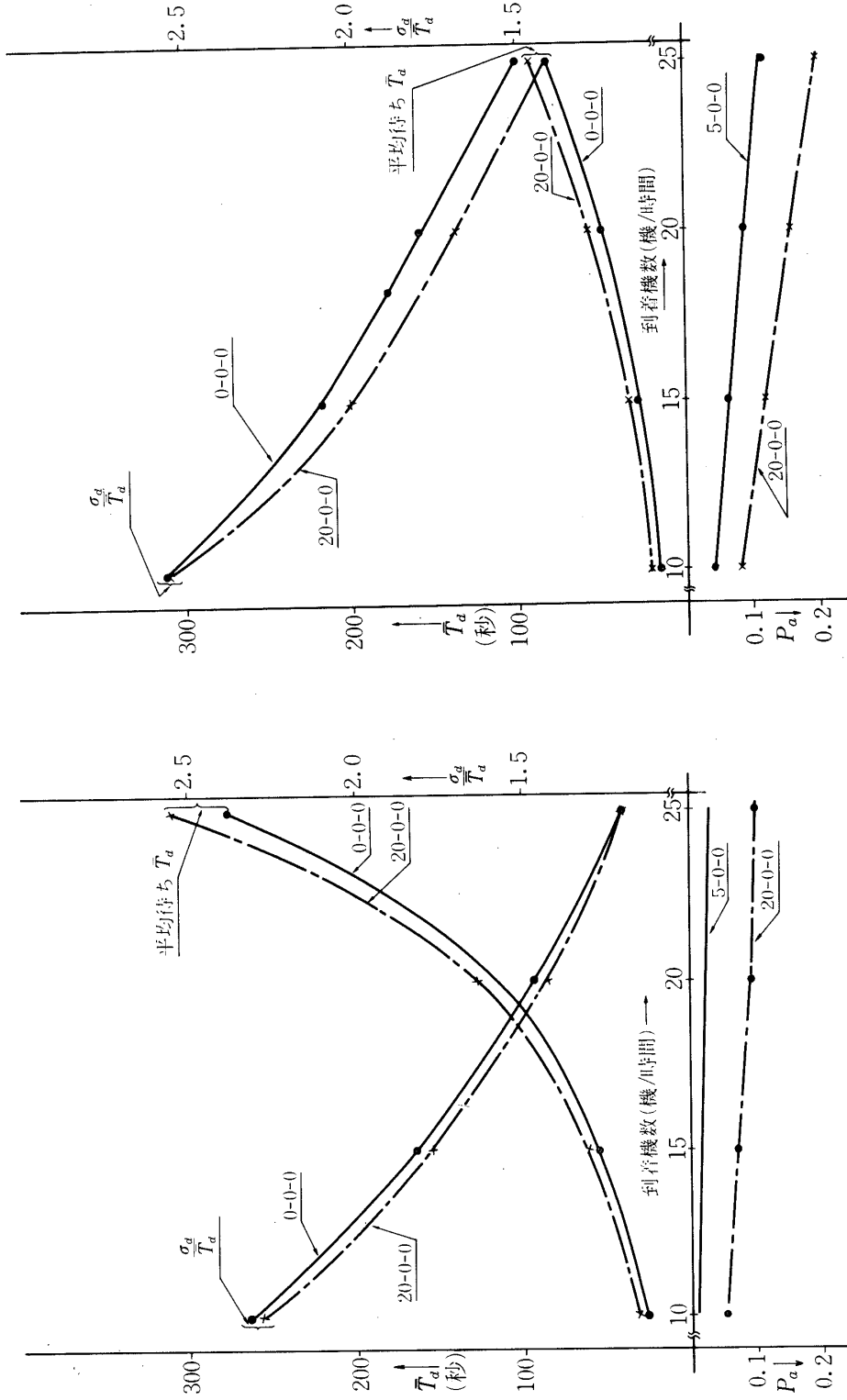
第14図 待ち時間の分布 (方式4, 25機/時間)  
0-0-0

第4表 平均待ち時間と警報率 —その1—

			10機/時間	15機/時間	20機/時間	25機/時間
方式 1	待ちの平均 $\bar{T}_d$	0-0-0	26.7 (秒)	55.9	118.5	297.0
		5-0-0	26.9	56.1	118.7	297.0
		10-0-0	27.3	56.4	119.0	297.5
		20-0-0	28.6	57.5	120.1	298.6
		5-0.5-5	26.9	56.0	118.7	297.2
	警報率 $P_a$	0-0-0	/	/	/	/
		5-0-0	0.0176	0.0253	0.0321	0.0376
		10-0-0	0.0353	0.0511	0.0639	0.0780
		20-0-0	0.0692	0.0991	0.1256	0.1465
		5-0.5-5	0.0180	0.0270	0.0349	0.0445
方式 2	待ちの平均 $\bar{T}_d$	0-0-0	26.7	55.6	117.5	276.1
		5-0-0	27.9	55.2	114.2	281.4
		10-0-0	28.0	58.4	121.9	293.1
		20-0-0	31.0	62.1	126.3	310.7
		5-0.5-5	29.4	58.9	121.0	284.8
	警報率 $P_a$	0-0-0	/	/	/	/
		5-0-0	0.0121	0.0180	0.0232	0.0297
		10-0-0	0.0248	0.0363	0.0467	0.0539
		20-0-0	0.0536	0.0730	0.0937	0.1067
		5-0.5-5	0.0137	0.0201	0.0268	0.0329
方式 3	待ちの平均 $\bar{T}_d$	0-0-0	17.4	33.9	58.4	107.9
		5-0-0	18.2	33.3	60.0	108.9
		10-0-0	18.2	34.9	60.2	109.2
		20-0-0	19.3	35.8	63.7	113.0
		5-0.5-5	17.6	32.0	60.9	108.4
	警報率 $P_a$	0-0-0	/	/	/	/
		5-0-0	0.0531	0.0777	0.1014	0.1273
		10-0-0	0.0709	0.1042	0.1334	0.1625
		20-0-0	0.0926	0.1351	0.1747	0.2102
		5-0.5-5	0.0544	0.0816	0.1094	0.1316
方式 4	待ちの平均 $\bar{T}_d$	0-0-0	16.4	29.2	51.0	80.2
		5-0-0	16.2	29.6	47.3	83.6
		10-0-0	16.4	30.3	50.7	83.7
		20-0-0	19.0	31.5	52.9	87.0
		5-0.5-5	16.3	29.8	49.2	80.5
	警報率 $P_a$	0-0-0	/	/	/	/
		5-0-0	0.0649	0.0977	0.1265	0.1620
		10-0-0	0.0768	0.1196	0.1577	0.1943
		20-0-0	0.0985	0.1454	0.1846	0.2292
		5-0.5-5	0.0676	0.1037	0.1343	0.1673



			10機/時間	15機/時間	20機/時間	25機/時間
方式 5	待ちの平均 $\bar{T}_d$	0-0-0	17.3	33.4	58.6	109.9
		5-0-0	18.3	34.9	60.4	108.9
		10-0-0	18.9	35.7	63.1	113.4
		20-0-0	23.2	40.1	67.4	130.0
		5-0.5-5	18.6	34.3	62.6	116.5
	警報率 $P_a$	0-0-0	/	/	/	/
		5-0-0	0.0308	0.0452	0.0622	0.0785
		10-0-0	0.0441	0.0707	0.0937	0.1188
		20-0-0	0.0733	0.1091	0.1399	0.1747
		5-0.5-5	0.0359	0.0515	0.0670	0.0835
方式 6	待ちの平均 $\bar{T}_d$	0-0-0	16.4	29.6	49.1	80.8
		5-0-0	17.2	30.1	51.3	83.9
		10-0-0	17.5	31.8	54.8	86.5
		20-0-0	21.1	35.3	58.3	92.0
		5-0.5-5	17.5	30.2	53.1	87.2
	警報率 $P_a$	0-0-0	0.0002	0.0003	0.0002	0.0004
		5-0-0	0.0416	0.0644	0.0891	0.1208
		10-0-0	0.0551	0.0888	0.1195	0.1537
		20-0-0	0.0795	0.1227	0.1622	0.2033
		5-0.5-5	0.0445	0.0671	0.0946	0.1243
方式 7	待ちの平均 $\bar{T}_d$	0-0-0	17.3	34.0	59.1	109.3
		5-0-0	39.8	92.1	231.9	741.2
		10-0-0	51.2	124.3	365.7	1081.7
		20-0-0	70.8	169.3	592.6	1808.6
		5-0.5-5	44.3	95.8	273.3	974.5
	警報率 $P_a$	0-0-0	/	/	/	/
		5-0-0	0.0014	0.0023	0.0032	0.0037
		10-0-0	0.0013	0.0015	0.0024	0.0027
		20-0-0	0.0009	0.0012	0.0014	0.0017
		5-0.5-5	0.0013	0.0019	0.0028	0.0029
方式 8	待ちの平均 $\bar{T}_d$	0-0-0	16.3	28.9	48.5	83.1
		5-0-0	46.6	109.2	340.6	1161.0
		10-0-0	56.4	142.1	502.8	1705.3
		20-0-0	72.7	201.6	730.9	2360.2
		5-0.5-5	49.2	125.1	411.5	1478.6
	警報率 $P_a$	0-0-0	/	/	/	/
		5-0-0	0.0020	0.0028	0.0040	0.0039
		10-0-0	0.0012	0.0022	0.0021	0.0026
		20-0-0	0.0005	0.0012	0.0014	0.0015
		5-0.5-5	0.0014	0.0023	0.0029	0.0028



第16図 方式6の待ち時間および警報率

第15図 方式2の待ち時間および警報率

方式9, 10は, 期待した効果がないため, 1試行を行ったにとどめた. 方式11以下については結果を第5表に示し, そのうち方式16の結果を図に示した(第17図).

#### 5-4 平均待ち時間と警報率(特殊なケース)

5-3に示したのは, 標準的なパラメータに対する, 平均待ち時間と警報率を求めたものであるが, 各パラメータの影響を調べるため, 幾つかの特殊なケースについてもシミュレーションを行った.

(1) 過密トラヒック 到着機数が40機迄増加した場合を方式3について求め, 第18図に示す. 待ち時間は急激に増大している. ちなみに40機/時間の場合の待ちの確率は97%前後であり, 略発散に近い.

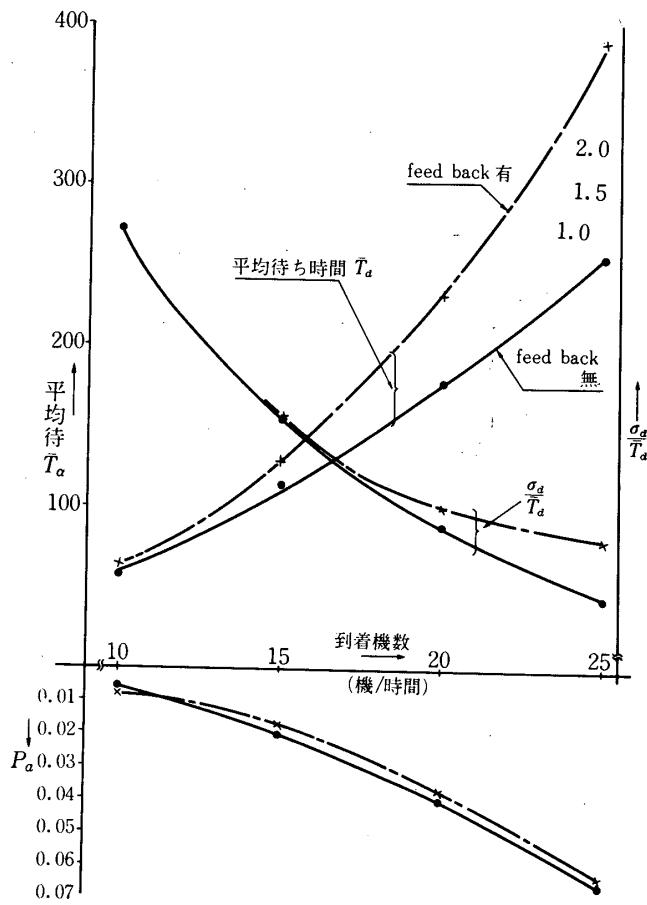
(2) 機種比率 速度の異なる航空機が混在していることは, 待ちの増大につながるが, この影響を見るため, 単一機種(高速Jetのみ, 100-0-0)の場合と, Jetのみ(75-25-0)

第5表 平均待ち時間と警報率 - その2 -

		誤差	10機/時間	15機/時間	20機/時間	25機/時間
方式11 (帰還なし)	$\bar{T}_d$	10-0-0	47.7 (秒)	94.0	161.0	249.6
	$P_a$	10-0-0	0.0041	0.009	0.0205	0.0349
方式11 (帰還有)	$\bar{T}_d$	10-0-0	48.0	104.0	189.0	311.0
	$P_a$	10-0-0	0.0021	0.0082	0.0187	0.0326
方式12 (帰還なし)	$\bar{T}_d$	10-0-0	48.9	95.6	161.5	240.4
	$P_a$	10-0-0	0.005	0.0132	0.0282	0.0505
方式12 (帰還有)	$\bar{T}_d$	10-0-0	51.3	107.5	190.2	296.6
	$P_a$	10-0-0	0.0052	0.0121	0.0281	0.0523
方式14 (帰還有)	$\bar{T}_d$	10-0-0	45.0	102.3	255.9	697.4
	$P_a$	10-0-0	0.0009	0.0024	0.0037	0.0061
方式15 (帰還なし)	$\bar{T}_d$	10-0-0	57.1	109.9	182.7	264.2
	$P_a$	10-0-0	0.0057	0.015	0.0322	0.0512
方式15 (帰還有)	$\bar{T}_d$	10-0-0	59.3	131.4	263.3	520.0
	$P_a$	10-0-0	0.0046	0.0139	0.0290	0.0482
方式16 (帰還なし)	$\bar{T}_d$	10-0-0	59.0	113.9	176.8	254.5
	$P_a$	10-0-0	0.0057	0.0259	0.0409	0.0673
方式16 (帰還有)	$\bar{T}_d$	10-0-0	63.8	129.5	230.7	386.6
	$P_a$	10-0-0	0.0077	0.0169	0.0370	0.0647
方式18 (帰還なし)	$\bar{T}_d$	0-0-0	16.3	28.1	49.7	80.4
		10-0-0	18.0	31.7	56.3	88.9
	$P_a$	0-0-0	0.0	0.0	0.0	0.0
		10-0-0	0.0266	0.0432	0.0615	0.0784

第6表 平均待ち時間と警報率 —その3—

(1) R/W-G 10NM 10-0-0									
方式	入	15機/時間		20	25				
3	$\bar{T}_d$	41.3		75.4	141.9				
	$P_a$	0.100		0.134	0.161				
5	$\bar{T}_d$	43.3		78.2	145.6				
	$P_a$	0.069		0.093	0.115				
7	$\bar{T}_d$	151.0		498.0	1773.1				
	$P_a$	0.0014		0.0022	0.0018				
(2) 管制間隔 1.5分-1.5分 10-0-0									
方式	入	7	10	13	17				
3	$\bar{T}_d$	18.5	30.0	48.6	84.9				
	$P_a$	0.0653	0.095	0.116	0.256				
5	$\bar{T}_d$	19.5	32.1	50.0	89.9				
	$P_a$	0.042	0.061	0.081	0.098				
管制間隔 2.0分-2.0分 10-0-0									
方式	入	5	8	10	13				
3	$\bar{T}_d$	18.4	34.3	50.5	86.9				
	$P_a$	0.0639	0.0905	0.113	0.138				
5	$\bar{T}_d$	19.9	37.2	52.6	86.0				
	$P_a$	0.040	0.060	0.073	0.093				
(3) 機種混在比と過密トラフィック 10-0-0									
方式	混在比	入	10	15	20	25	30	35	40
3	70-20-10	$\bar{T}_d$	18.2	34.9	60.2	109.2	217.5	412.0	1015.9
		$P_a$	0.071	0.104	0.133	0.163	0.190	0.212	0.230
5	70-20-10	$\bar{T}_d$	18.9	35.7	63.1	113.4	214.0	471.0	999.0
		$P_a$	0.044	0.071	0.094	0.119	0.137	0.155	0.169
3	75-25-0	$\bar{T}_d$	10.3	18.3	31.3	52.0		168.6	387.2
		$P_a$	0.072	0.106	0.135	0.165		0.213	0.234
5	75-25-0	$\bar{T}_d$	11.1	19.4	33.6	57.4			
		$P_a$	0.045	0.064	0.088	0.111			
3	100-0-0	$\bar{T}_d$	7.7	12.9	22.1	34.2		105.9	224.7
		$P_a$	0.079	0.111	0.151	0.181		0.237	0.261
5	100-0-0	$\bar{T}_d$	8.8	15.6	24.2	40.9			
		$P_a$	0.046	0.076	0.097	0.119			



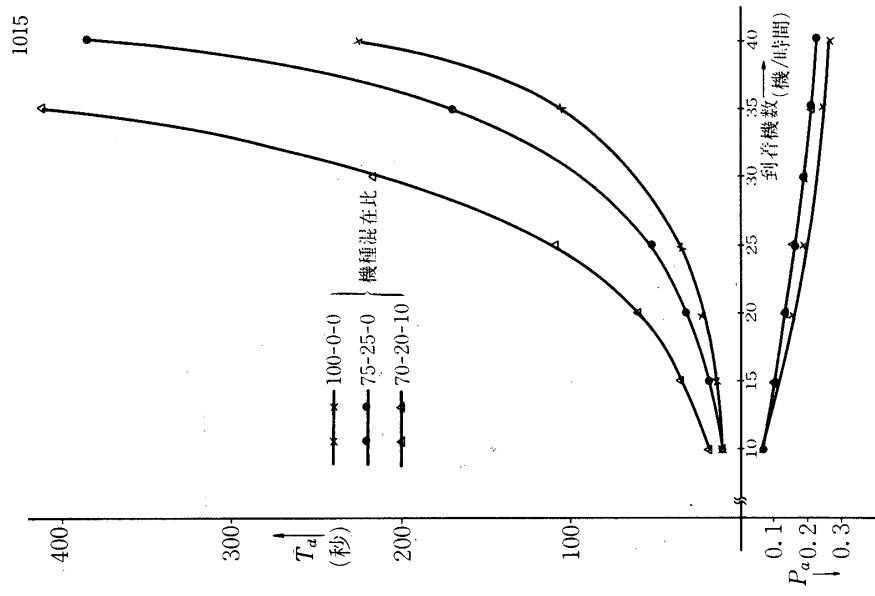
第 17 図 方式 16 の待ち時間および警報率

の場合のシミュレーション結果を方式 3 について示す (第 19 図). 待ち時間が大きく減少しているのがわかる.

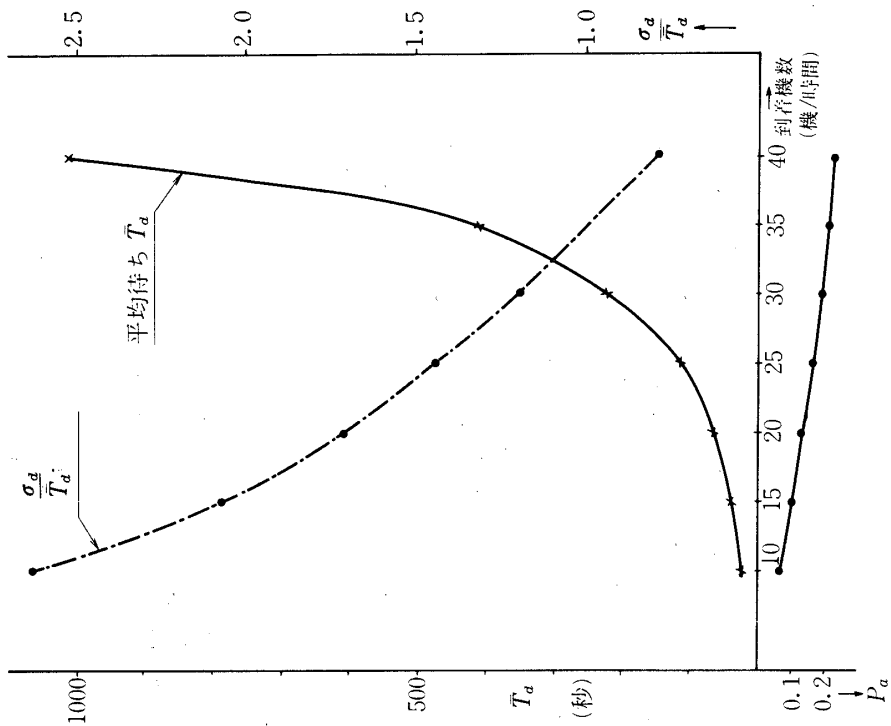
(3) R/W-G点間の距離 此处で扱っている管制方式では, 滑走路端 (R/W) における分離と ILS 進入点たる G 点における分離を夫々チェックし, 且つこの間に存在する航空機の数も制限している. したがってこの距離が長ければ, それだけ待ち時間が増大するはずである.

この影響を調べるため, R/W-G 点間を 10 NM として実行した.

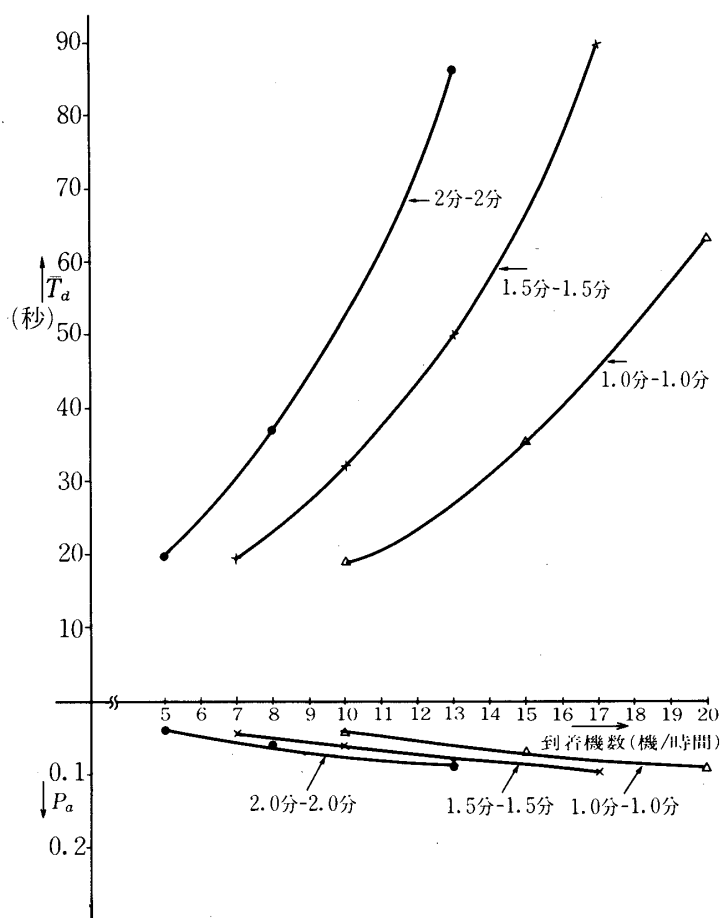
(4) 管制間隔 管制間隔が G 点および R/W で 1 分である 1.0 分-1.0 分を主としたが, 比較のために方式 5 について, 管制間隔を 1.5 分-1.5 分とした場合および 2 分-2 分とした場合を第 20 図に示す. 管制間隔が増せば当然待ち時間は増大する. 到着率 (単位時間当り機数) を一定にして管制間隔を増せば,  $T_s$  間隔を目標として着陸すべき航空機の比率が増大するので警報率は増大する.



第19図 機種比率と待ち時間 (方式3, 10-0-0)



第18図 過密トラヒック (方式3, 10-0-0)



第20図 管制間隔と待ち時間

## 6. あとがき

ターミナル進入管制をモデル化し、各種速度管制方式を提案しシミュレーションにより有効性を確かめた。すなわち、到着率に対する平均遅延時間、管制の誤差に対する警報率などが各種速度管制方式について数量的に明らかになった。これらの結果はターミナル管制に速度管制を導入する際に十分に貢献し得るものと思う。

1979年1月17日 計測部

## 参考文献

- [1] 河野, 加藤, 小池: "着陸順位決定に関するファストタイムシミュレーション", 信学技法 SANE 67-5 (1967-06)
- [2] 伊藤: "空港のトラヒックコントロールシミュレーション", 信学論 (B), 57-B, (1974-11)
- [3] 大沼: "航空管制シミュレーションに関する研究", 電子航法研報告 No. 13 (1975.9)