

# ターミナル領域における速度管制方式（Ⅱ）

—解析と方式の評価—

水町守志・伊藤益敏・宮尾光生

## Linear Holding in Approach Control (II)

— Analysis and Evaluation —

By

Moriyuki MIZUMACHI, Masutoshi ITOH and Kosei MIYAO

**Abstract:** The bounds for  $T_D$  (the average delay) and  $P_a$  (the probability of losing the separation) are obtained through theoretical analyses applied to more simplified models of the air traffic control (ATC). Such results of simulations are certified to lie in reasonable regions that are mentioned in the foregoing paper "Linear Holding in Approach Control (I)". From the viewpoint of  $T_D$  and  $P_a$ , evaluation and comparison are made within different approach control procedures which differ from each other in applying the linear holding. There is also discussed how to employ the linear holding to the actual ATC.

### 概 要

ターミナル領域における速度管制方式について理論的解析と方式評価を行った。方式評価の項目としては管制間隔を割る確率を警報率として定義し、待ち時間とあわせ取りあげた。

この警報率および待ち時間について理論的解析を行い、シミュレーション結果と対比し理論的限界を示すと共に、各方式の得失を明らかにした。

### 1. ま え が き

空港の着陸問題に対する最初の研究は、Bowen, Percy (1948)にまでさかのぼる [1]。これらは空港の輻輳問題を待ち行列としてとらえ理論的に検討したものであり、その後この面にそっての研究が幾つか発表されて来た（例えば [2], [3]）。一方管制方式が管制官、パイロットなどの人的因子を含むことや方式が複雑となって来たこと、また、その後電子計算機が広く利用されるようになったことが相まって、この方面の研究にシミュレーションの手法が多くとり入れられるようになった [4], [5]。

Bowen の研究がなされた頃の到着率は、20分に1機という時代であったが、現在は2～3分に1機となっている。このように交通量が増大すればする程、管制としてはより積極的な考えが強くなり、飛行経路、速度などを細かく指示する傾向となり、制御の考えが強く打

出される状態となっている [6], [7].

翻って見るに管制の目的は航空機を円滑かつ安全に運航させる点にある。「円滑」に関しては待ち時間という尺度があり、これを減少させる努力がなされて来たと言えるが、しかし待ちを減少させることは航空機相互の間隔をつめることに他ならず、このことは安全性と相反するものである。

安全性に関する研究は比較的少ないが、これらは主として衝突の確率を論じたものである [8], [9].

本論文では、航空機相互の間隔が管制間隔以下になる確率を警報率と呼び安全性に関するパラメータとして取りあげ、待ち時間と併せ論ずることを試みた。

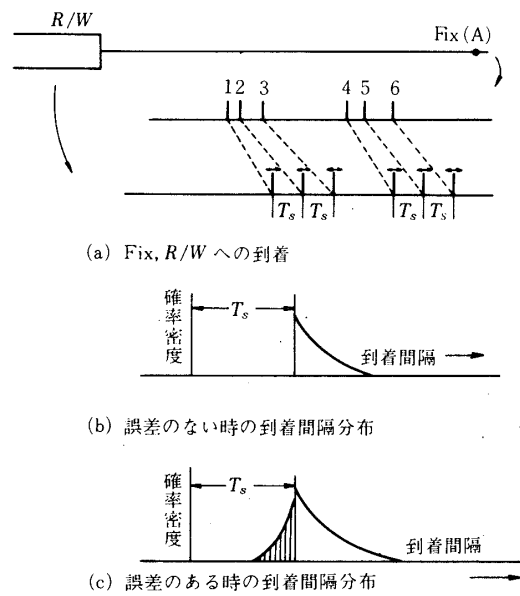
すなわち、ターミナル領域における速度管制方式を取りあげ、理論的解析を行うと共に、シミュレーション結果 [10] をもとに、各種の管制方式を「待ち時間」と「警報率」の2点より検討する。

## 2. 到着間隔分布

### 2-1 理論解析のモデル

到着間隔分布の理論解析のためにモデルを単純化し、管制指示を1回だけ行う最も基本的な管制方式を取りあげる。具体的には、以下のごときモデルを考える。

(i) 第1図 a に示す如く、Fix A に到着した航空機は管制を受け滑走路に着陸する。



第1図 滑走路における到着間隔

(ii) Fix A への到着はランダム到着である。到着間隔  $t$  の確率密度関数は次のように与えられる。

$$p_i(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

(iii) 着陸は、到着順に行われる。

(iv) 管制官は先行機と後続機の滑走路到着時間間隔  $T_{12}$  が一定の時間  $T_s$  以上あくよう、Fix A において一度だけ管制指示を与える。

(v) 管制指示は連続的な遅延が与えられる。

(vi) 各航空機の飛行には誤差が存在する。

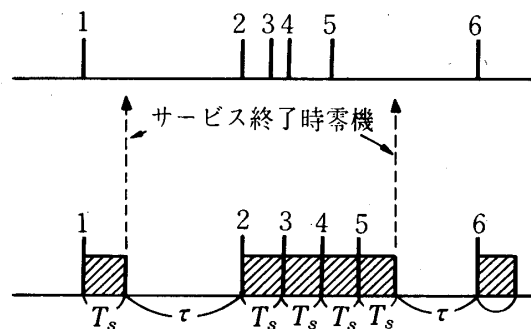
上記(i)より(v)迄の仮定のみによれば、滑走路における航空機の到着間隔の確率密度関数  $h(t)$  は、第1図bのように間隔が  $T_s$  以下となることはない。しかし(vi)の仮定を加えれば同図cのごとくなる。同図の斜線部分の面積が滑走路において間隔  $T_s$  を保てない確率であり、これを警報率と呼ぶことにする。

以下航空機が管制官の指示通り飛行した場合の到着間隔分布(誤差のない時と呼ぶ)および指示通り飛行したが飛行に誤差のある場合の到着間隔分布の二つにわけて検討を加える。

## 2-2 誤差のない時の到着間隔分布

Fix にランダムに到着した航空機が管制を受け滑走路に到着した時の到着間隔の確率密度関数を  $h_0(t)$  とする。ここで「管制を受け」ということは、滑走路端ですくなくとも  $T_s$  だけ離れているよう「遅延(待ち)」が指示されることを意味する。

従って、滑走路における着陸を待ち行列理論の観点からみると(Fix A-R/W 間の飛行所要時間は無視し得て)、これはポアソン入力に対する一定サービス時間  $T_s$  の系である。以下、待ち行列の理論に従えば、 $h_0(t)$  を求めることは系の出力確率密度関数を求めることで



第2図 系にいる機の数と到着間隔

ある。

今サービス終了時に系の入力に  $n$  機の航空機が存在する確率を  $P(n)$  とする。第2図より明らかごとく、

(i) サービス終了時に系の入力に1機でも航空機が存在すれば、系の出力すなわち到着間隔は  $T_s$  である。

(ii) サービス終了時に系の入力为零機の場合は、サービス終了後  $t = \tau$  に航空機が Fix A 進入すれば到着間隔は  $\tau + T_s$  となる。

これより到着間隔が、 $t = T_s$ ,  $T_s < t \leq \tau + T_s$  である確率はそれぞれ次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} t = T_s \text{ である確率は} & \sum_{n=1}^{\infty} P(n) \\ T_s < t \leq T_s + \tau \text{ である確率は} & P(0) \times P_i(t \leq \tau + T_s | t > T_s) \\ & = P(0)(1 - e^{-\lambda\tau}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

従って、 $h_0(t)$  は次式となる。

$$h_0(t) = \left\{ \begin{array}{ll} \left( \sum_{n=1}^{\infty} P(n) \right) \delta(t - T_s) & t \leq T_s \\ P(0) \lambda e^{-\lambda(t - T_s)} & t > T_s \end{array} \right\} \quad (2)$$

上式の  $P(n)$  すなわち系の入力に航空機が  $n$  機いる確率は次式で与えられる [11]。

$$\left. \begin{aligned} P(0) &= 1 - \rho \\ P(1) &= (1 - \rho)(e^{\rho} - 1) \\ &\dots \\ P(n) &= (1 - \rho) \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-\rho i)^{n-i}}{(n-i)!} e^{\rho i} - \sum_{i=2}^{\infty} \frac{e^{\rho(i-1)} (-\rho(i-1))^{n-i}}{(n-i)!} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ ,  $\lambda$ : 到着率,  $\mu$ : サービス率

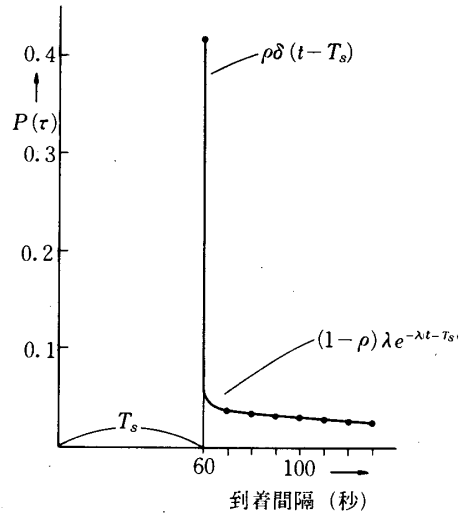
上の結果から  $\sum_{n=1}^{\infty} P(n) = \rho$  (4) が得られる。

よって (2) の  $h_0(t)$  は、次のごとく与えられる。

$$h_0(t) = \left\{ \begin{array}{ll} \rho \delta(t - T_s) & t \leq T_s \\ (1 - \rho) \lambda e^{-\lambda(t - T_s)} & t > T_s \end{array} \right\} \quad (5)$$

### 2-3 誤差のある場合の到着間隔

前節で求めたのは、各航空機が管制官の指示通り誤りなく飛行した場合の到着間隔の確率密度である。ここでは、各航空機が管制官の指示通り飛行しようとしても、その飛行に誤差

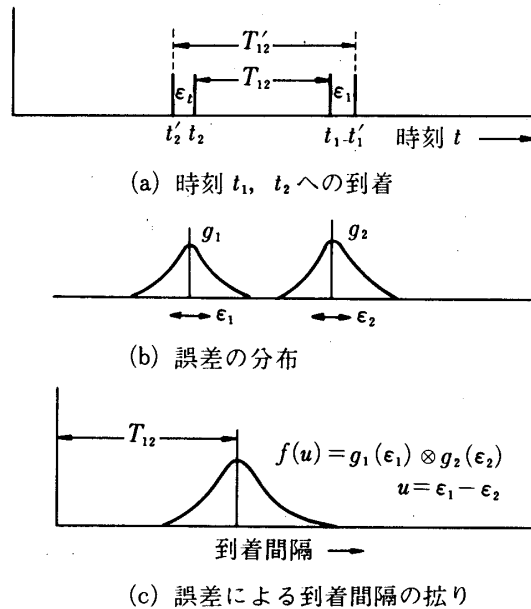


第3図 誤差のない時の到着間隔

のある場合の到着間隔について考察する。

今特定の相隣る2機に着目し、それぞれの航空機が時刻  $t_1, t_2$  に滑走路に到着する指示がなされたものとする。

この時両者の到着間隔 ( $t_1 - t_2$ ) を  $T_{12}$  とすれば、誤差がない時特定の2機の時間間隔が



第4図 特定の2機に着目した時の誤差による到着間隔の拡がり

$T_{12}$  である確率密度は、(5) より  $h_0(T_{12})$  である。

しかし、第4図に示す如く、誤差により  $t_1, t_2$  に到着する予定が実際には  $t'_1 = t_1 + \epsilon_1$ ,  $t'_2 = t_2 + \epsilon_2$  に到着する。

すなわち、到着間隔は  $T_{12}$  を中心に分布する。この拡がりの具合は、誤差に対応する確率変数  $\epsilon_1$  および  $\epsilon_2$  の差  $u = \epsilon_1 - \epsilon_2$  として表わされる。従って、確率変数  $u$  の確率密度関数を  $f(u)$  とすれば、 $f(u)$  は  $\epsilon_1$  および  $\epsilon_2$  の確率密度関数  $g_1(\epsilon_1)$ , および  $g_2(\epsilon_2)$  の畳み込み積分

$$f(u) = g_1(\epsilon_1) \otimes g_2(\epsilon_2) \quad (u = \epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (6)$$

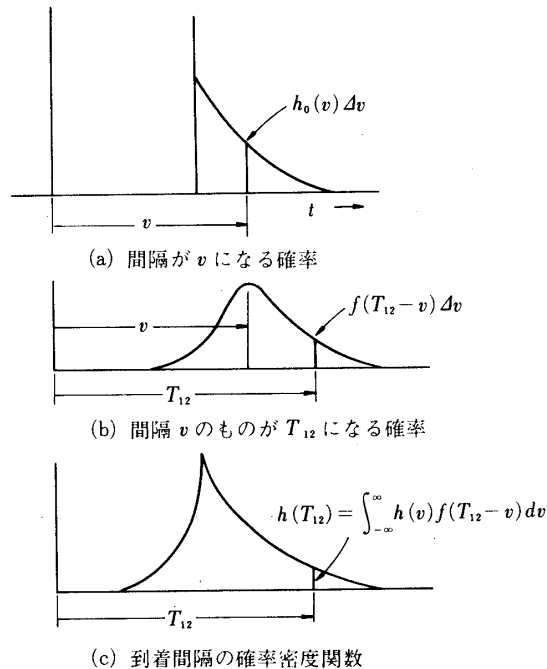
と表わされる。

以上は或る特定の2機に着目した場合であるが、 $g_1(\epsilon_1) = g_2(\epsilon_2) \equiv g(\epsilon_i)$  ( $i=1, 2$ ) つまり誤差による各到着時刻の拡がりは、同一の確率的性質を有し、各航空機が確率的に独立であると仮定すれば全体としての到着間隔の確率密度関数  $h(T_{12})$  は  $h_0(t)$  と  $f(u)$  の畳み込み積分すなわち次式で与えられる。

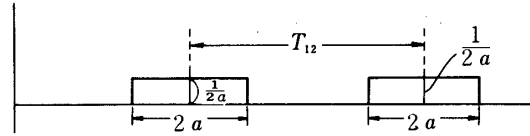
$$h(T_{12}) = \int_{-\infty}^{\infty} h_0(v) f(T_{12} - v) dv \quad (7)$$

誤差の分布の典型的なものとして一様分布および正規分布について  $h(t)$  を求める。

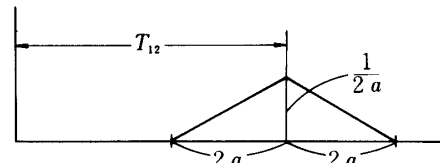
(a) 誤差を一様分布とした場合：第6図に示す如く、予定到着時刻  $t_1, t_2$  を中心に幅  $2a$  の一様分布を仮定すれば、到着間隔  $T_{12}$  の確率密度  $f(u)$  は同図bに示す三角分布となる。



第5図 誤差のある時の到着間隔の確率密度関数



(a) 誤差分布が一様分布

(b) 到着間隔の拡がり  $f(v)$ 第6図 誤差が一様分布の場合の  $f(v)$ 

$$f(u) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{u}{4a^2} + \frac{2a - T_{12}}{4a^2} & T_{12} \geq u \geq T_{12} - 2a \\ \frac{-u}{4a^2} + \frac{T_{12} + 2a}{4a^2} & T_{12} + 2a > u > T_{12} \end{array} \right\} \quad (8)$$

したがって(5)および(8)を(7)に代入すれば到着間隔分布  $h(t)$  が求められる。

$$h(T_{12}) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{4a^2} \left\{ 2a - T_s + T_{12} + \frac{(1-\rho)}{\lambda} (e^{-\lambda(2a-T_s+T_{12})} - 1) \right\} \\ \qquad \qquad \qquad T_s - 2a < T_{12} < T_s \\ \frac{1}{4a^2} \left\{ 2a - T_s + T_{12} + \frac{(1-\rho)}{\lambda} (e^{-\lambda(2a-T_s+T_{12})} - 2e^{-\lambda(T_{12}-T_s)} + 1) \right\} \\ \qquad \qquad \qquad T_s \leq T_{12} \leq T_s + 2a \\ \frac{(1-\rho)e^{\lambda(T_s-T_{12})}}{4a^2} (e^{2a\lambda} + e^{-2a\lambda} - 2) \qquad T_{12} > T_s + 2a \end{array} \right\} \quad (9)$$

又、到着間隔が  $T_s$  を切る確率すなわち警報率  $P_a$  を求めておく。

$$P_a = \int_{-\infty}^{T_s} h(t) dt$$

$$= \frac{1}{2} \rho + \frac{(1-\rho)}{2} \left\{ 1 - \frac{4a\lambda - 2(1 - e^{-2a\lambda})}{(2a\lambda)^2} \right\} \quad (10)$$

(b) 誤差を正規分布とした場合：この場合の  $g(\varepsilon_i)$  は正規分布であるから、その畳み込み積分により得られる確率密度関数  $f(u)$  も正規分布であって次式で与えられる。

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(u-T_{12})^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

ただし、 $\sigma = \sqrt{2}\sigma_0$ 、 $\sigma_0 =$  誤差  $\varepsilon_i$  の標準偏差

(a) と同様にして  $h(t)$  および  $P_a$  が次のように求められる。

$$h(t) = \rho \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(T_{12}-T_s)^2}{2\sigma^2}} + \frac{(1-\rho)\lambda}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\lambda(T_{12}-T_s) - \frac{\sigma^2\lambda^2}{2}\right) \times (1 - \text{Erf}(T_s - T_{12} + \sigma^2\lambda)) \quad (12)$$

$$P(a) = \frac{1}{2} \rho + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{T_s}^{\infty} (1-\rho)\lambda e^{-\lambda(v-T_s)} \text{Erf}(v-T_s) dv \quad (13)$$

$$\text{ただし、} \text{Erf}(x) = \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx$$

### 3. 待ち時間

#### 3-1 待ち行列として見た管制方式の特徴

待ち行列として管制方式を考えた場合、ポアソン到着、一定サービス時間のいわゆる M/D/1 型 (Kendall の記号) の系である。しかし、詳細に考察すると次のような特徴を持っている。

その一つは、待ち時間に制限がある点である。すなわち一般の待ち行列理論では、待ち時間は必要とするだけ任意にとれると仮定している。航空機に待ち(遅延)を与える手段としては、ホールド、複数径経の選択(マルチパス)、レーダベクタリング、速度管制などがあるが、前二者の方法の場合には、待ち時間が離散的にしかとれない。レーダベクタリング、速度管制の場合には連続的な待ちを与えることができるが実際上可変範囲が制限される。したがって、これらを組み合わせて、任意の待ち時間を得るような努力がなされる。

第二は、複合判定を要する特殊な窓口という点である。この系は、R/W、G点のそれぞれにおいて管制間隔だけ離れていることが要求されるが、一定サービスの窓口が単に直列になっている系とみなすことができない。すなわち、一つの窓口(G点)を出てから、次の窓口(R/W)に行き着くまでの所要時間が航空機によって異なっており、この間での追越しが禁止されているため、余分な遅延が必要となる場合を生ずるためである。なお、この種の拘束



条件は他にも幾つか加わっている。

以上のように管制方式は待ち行列として見た場合、幾つの特徴を有しており、これらをすべてモデル化して解析的に解くことは困難であるが、以下にモデルを単純化して、理論的に求められる限界値を示す。

### 3-2 平均待ち時間

3-1で述べた通り、待ち行列として見た管制方式は、基本的には M/D/1 として扱われる。この最も単純化した場合の平均待ち時間はよく知られているように次式で与えられる〔11〕。

$$T_d = \frac{\rho}{2\mu(1-\rho)} \quad (14)$$

ただし、 $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ 、 $\lambda$ ：到着率、 $\mu$ ：サービス率

一方、待ち時間が離散的にしか与えられない場合の待ち時間は、解かれており次式で与えられる〔12〕。(これはホールドおよびマルチパスのみによる管制に相当する。)

$$W = - \frac{m\tau \{ 2 \exp(-(d-(m-1)\tau)\lambda) - (m-1)(1 - \exp(-\lambda\tau) - 2) \}}{2 \{ \exp(-d-(m-1)\tau)\lambda - m \{ 1 - \exp(-\lambda\tau) \} \}} \quad (15)$$

ただし、待ち時間は  $\tau$  の整数倍で与えられるものとし、管制間隔を  $T_s$  としたとき、整数  $m$  は次式を満足するように選ばれる。

$$(m-1) \times \tau < T_s \leq m\tau \quad (16)$$

実際の速度管制方式の待ち時間は、(14)式と(15)式で与えられる値の範囲に含まれると言える。

## 4. 速度管制方式の評価

本章では、シミュレーション結果と前章までの解析結果を用いて、各種の速度管制方式(第1表および〔10〕参照)について「待ち時間」および「警報率」の面より検討を加える。

### 4-1 警報率より見た各方式

(1) 到着間隔分布と警報率の関係 まず最初に、到着間隔分布と警報率の関係について調べておくことが、後の議論を進める上で参考となろう。

到着間隔分布について誤差のない場合の解析結果を式(5)、第3図に示したが、これは当然任意の待ち時間が得られるものとして求めてある。そこで、これに対応するシミュレーション結果として方式4を取りあげ第7図aに示す。方式4は速度管制を用いており、ほぼ任意の待ち時間を与えることができると考えられる。事実、図に見る如く理論値(第3図)と良い一致を示している。又、対比のため待ちが離散的にしか取れない方式(2)の結果を同図bに示したが、この場合は待ちが任意に取れないため誤差の有無にかかわらず60秒の所への集中がなく、そのかわりに間隔の大きい部分が增大している。

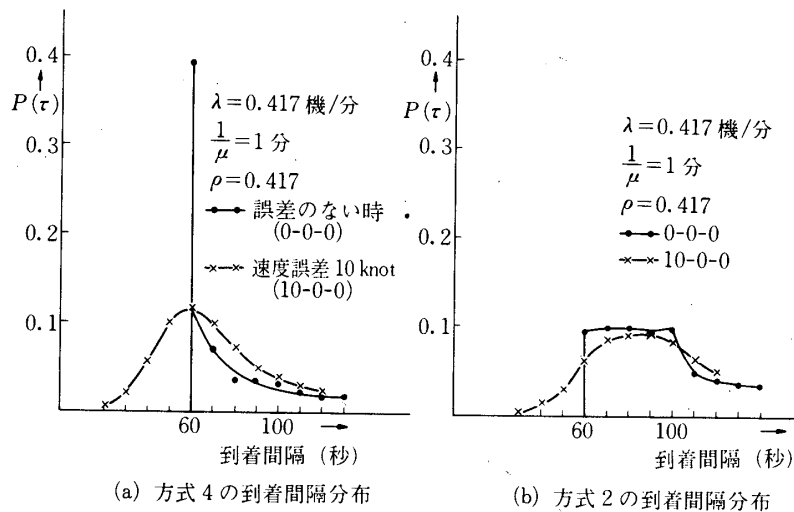
第1表 各種方式と時間調整の手段

方式	手段	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 } 予定	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.

次に, このような到着間隔分布が誤差のあった場合, どのように変化するかを見る. すでに2-3式(9), (10)に示したごとく, まず丁度管制間隔(この例では60秒)の所にある部分の1/2は管制間隔を切ることになる. すなわち管制間隔以下の所に拡がって分布する. 次に, 管制間隔より大きい部分からのもれ込みについても, それぞれの区間に誤差分布を乗じて加え合せそれが管制間隔を切る部分を求めればよい.



第7図 到着間隔分布 (シミュレーション結果)

誤差のある分布の例を第7図 (a) (b) に×印で示したが、上に述べたことが確認できる。ただし、管制間隔より大きい部分からの落ち込みは、誤差が比較的小さいため無視し得る程度である。

(2) 到着率と警報率 到着率と警報率の関係を見るために、幾つかの方式を取りあげ結果を図示した (第8図)。

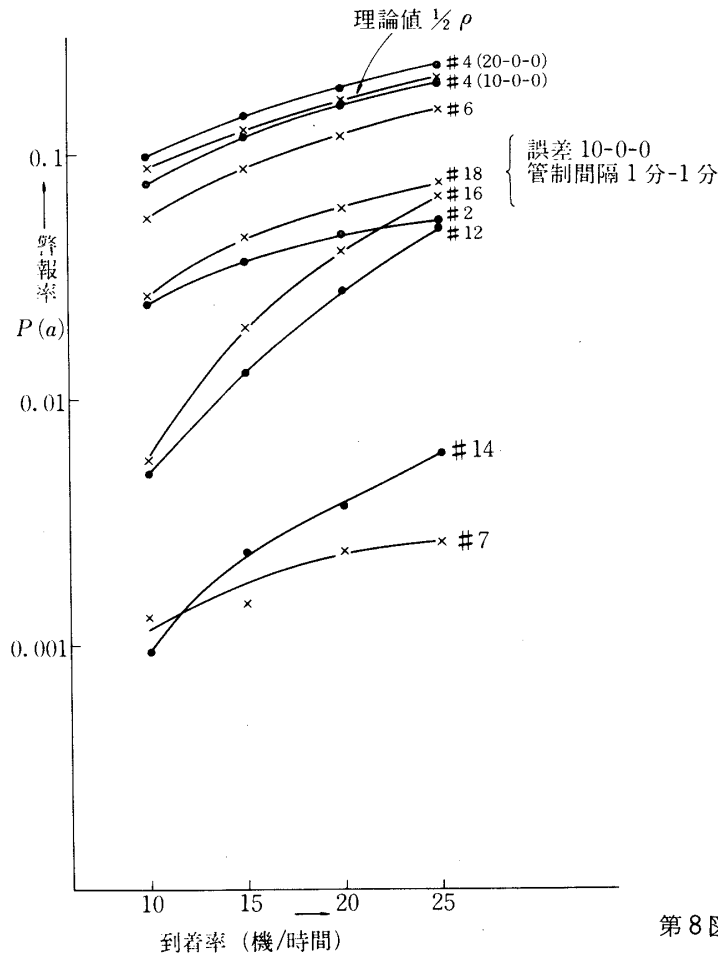
まず、最も基本的な速度管制方式の方式4については、(1)で述べた通り理論値( $1/2\rho$ )と極めてよく一致している。しかし、この場合理論式(式(10)または(13))の第1項である $1/2\rho$ と同じ傾きであって、 $\lambda$ と比例関係になっている。このことは、方式4, 6, 18に共通であって、これらは、いずれも任意の時間調整ができる方式である。換言すれば、いずれも途中の調整を行う度に、管制間隔の所に山が来るような分布となり、再びその半分が管制間隔を切ると考えられる。従って順に警報率は小さくなる。

これに反し方式2は、(1)で示した通りその分布には集中した所がなく、到着率が增大すれば、分布全体が広がるため(待ちが任意にとれないから)誤差があった場合警報率が到着率と共に増加する模様は、上述のグループに比べ若干ゆるやかとなっている。

なおこの点は方式7も同様である。

上記二つのグループとは別に、到着率と共に警報率が大きく変化するグループとして方式12, 14, 16がある。

これらはいずれも、G点でのチェックを行うが、その際の時間調整の手段が、4分+任意となっている。したがって、到着率の小さい間は、4分のサークルしか使えず、方式7に近づき、到着率が增大した場合には、任意の部分が有効となり、方式18と等価になる。すなわち、到着率の変化に伴って方式7から18へ移るものと考えれば図の変化が理解される。ただし方式14は、もともとの分布に山がないため(方式2)、他の二つ程警報率が增大すること



第8図 到着率と警報率

がない。

(3) 警報率より見た各方式 ここで簡単に、各方式の警報率について整理しておく。

方式1~4は、チェックをしない方式、すなわち Initial point または Fix において一度指示を与えただけで、後は指示通り飛行する場合であって、マニュアル方式のモデルと言えよう。この場合、方式2と3、4をくらべると、3、4の方が警報率が高い。これはすでに(1)で述べたように、方式2がマルチパスだけであるのに対し、3、4では速度管制を用いてできるだけ待ちを少くしたため、換言すれば間隔をつめてしまったため、誤差があると、それだけ管制間隔を切る割合も大きくなることを示している。

次に、チェックポイントを設け、途中で誤差を吸収する方式5、6は、若干警報率を減少させることができる。

方式7、8はG点においてホールドを用いて誤差を吸収するため、大きく警報率を減少させることができる。

方式11、12は上記7、8のG点ホールドを4分+任意としたものであるから、既に述べたように、到着率の多い所では、後述の方式18に近づく。

方式13~16は、方式1~4に、G点におけるホールドを4分+任意としたものであって、もっともマニュアル管制に近い方式と言えよう。すなわち指示は一度だけであるが、途中で

管制間隔を保てないと判明したら、G点のホールドを用いる方式のモデルと考えられるからである。

この場合の警報率は、上述の方式11, 12と同じような傾向を示すが、13, 14は速度管制を用いていないため、トラヒックが増大した場合でも、15, 16ほどには増大しない。

方式18は、方式8のG点ホールドのかわりに、G点で任意の待ちが与えられるとしたものであって、一つの仮想的な方式と言える。別の見方をすれば、方式6にG点におけるチェックをつけ加えたもので、チェック方式の極限(警報率から見て)の方式とも言える。

(4) 管制間隔と警報率 到着機数を一定として、管制間隔を増大させれば警報率は増大する。このことは既に述べて来たように、警報率の定義が「管制間隔を切った割合」であり、その主な原因が、管制間隔の所に集中したトラヒックのもれ込みによるもので、集中の割合はトラヒック密度  $\rho \left( \rho = \frac{\lambda}{\mu} \right)$  に比例することからも明らかである。

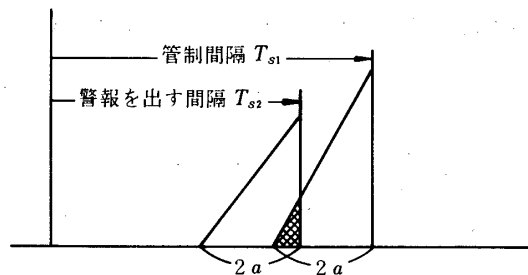
ここで運用上管制間隔に余裕を持たせることについて、若干検討を加えて置く。すなわち管制間隔  $T_{s1}$  で運用して  $T_{s2} (T_{s2} < T_{s1})$  を切った場合に警報を出すとした場合を考える。誤差に三角分布を仮定した場合を例にこの修正した警報率  $P'_a$  を求めれば、次のようになる。

$$P'_a = \frac{\rho_1}{8a^2} (2a - (T_{s1} - T_{s2}))^2 \quad (17)$$

ただし、 $\rho_1 = T_{s1}$  で運用した時のトラヒック密度。

なお、この場合には  $T_{s2} \leq T_{s1} - 2a$  の時警報率  $P'_a$  は零となる。

方式5について、管制間隔を1.5分および2分としてシミュレーションを実行したが、これらについて本来の警報率  $P_a$  と上述の警報率  $P'_a$  とを求め第2表に示す。到着機数10機の場合を例にとれば、 $T_{s2} \equiv 1$ 分に対する警報率  $P'_a$  は  $T_{s1}$  をそれぞれ1分、1.5分、2分とかえると0.044, 0.0015, 0.00004と減少している。



第9図 管制間隔と警報を出す間隔とを別に考えた場合

第2表 管制間隔と警報率 (方式5, 10-0-0)

		5	7	8	10	13	15	17	20
管制間隔 2分	到着機数 (機/時間)								
	警報間隔 2分	0.039	/	0.060	0.073	0.093	/	/	/
	警報間隔 1分	0	/	0	0.00004	0	/	/	/
管制間隔 1.5分	警報間隔 1.5分	/	0.042	/	0.061	0.09	/	0.10	/
	警報間隔 1分	/	0.0005	/	0.0015	0.0015	/	0.0019	/
管制間隔 1分	警報間隔 1分	/	/	/	0.044	/	0.071	/	0.094

#### 4-2 待ち時間より見た各方式

(1) 速度管制の効果と機種混在の影響 まず最初に、待ち時間の理論値について考える。3章で述べた通りマルチパスのみによる管制方式では、待ち時間は(15)式で与えられる。又、完全に連続的な待ちが得られるならば  $M/D/1$  のモデルとなり、待ち時間は(14)式で計算される。

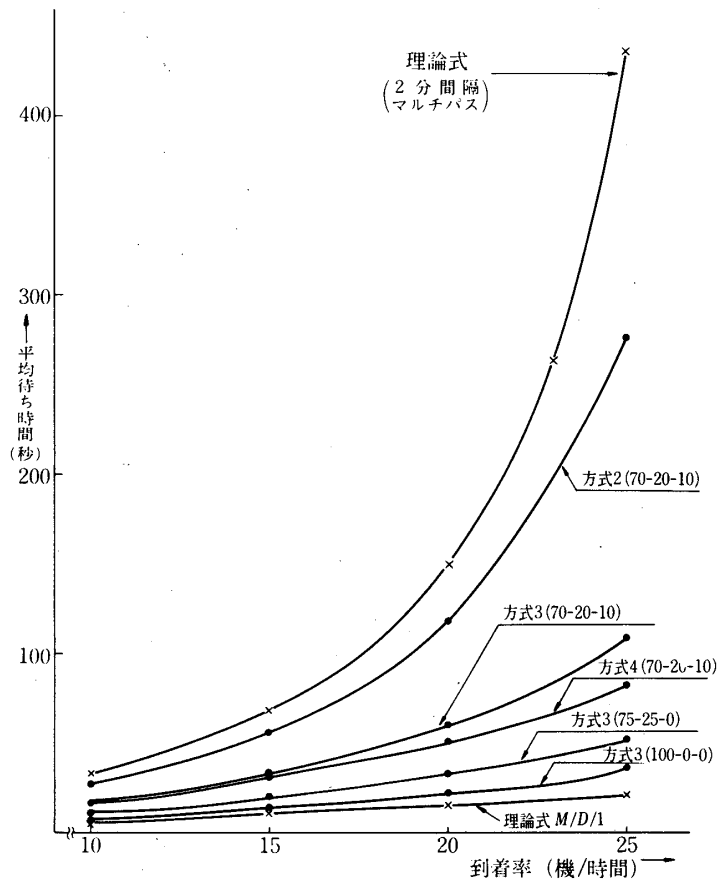
そこでまず、この両者について計算した結果を第10図の×印で示す。この場合管制間隔は1分とし、マルチパスの間隔は2分として計算してある。マルチパスは実際は1分差のものとホールド4分との組み合わせとなっており具体的にマルチパスおよびホールドにより取り得る遅延は1分、2分、4分、5分、6分、8分…となるが、最大2分のギャップがあるため、理論式(15)に用いる固定遅延として2分を用いた。

シミュレーション結果として、まず方式2, 3, 4を考える。方式2は速度管制を用いていないため、マルチパスのみであって、(15)式の計算値とよく一致している。シミュレーション結果が若干よいのは、上述の通りマルチパスが正しく2分間隔でなく、1分差も使えることがあるからである。

次に方式3, 4はいずれも速度管制を用いており、本来なら  $M/D/1$  の値に近いはずであるが、かなりのへだたりがある。これは3-1で述べた通り、追越し禁止などの拘束条件が、速度の異なる航空機の存在により顕在化するためと考えられる。このため機種の混在比をJetのみ(75-25-0)および高速Jetのみ(100-0-0)とした場合のシミュレーションを行った。その結果も第10図に示した。これよりわかる通り単一速度の場合は、 $M/D/1$ の理論値に極めて近い結果となる。

以上より速度管制方式は、待ち時間減少の上で極めて有効な手段であることが理解される。特に取り扱う航空機の速度が一樣の場合には、ほぼ理論的限界値に近づく。

(2) G点-R/W間の距離 ここで取りあげたシミュレーションでは、G点-R/W間の距離として5NMを用いているが、これは空港によって若干異なっている。そして前述した



第10図 到着率と待ち時間

ような速度の異なる航空機を扱う場合の影響を調べるために行ったシミュレーション結果を第11図に示す。

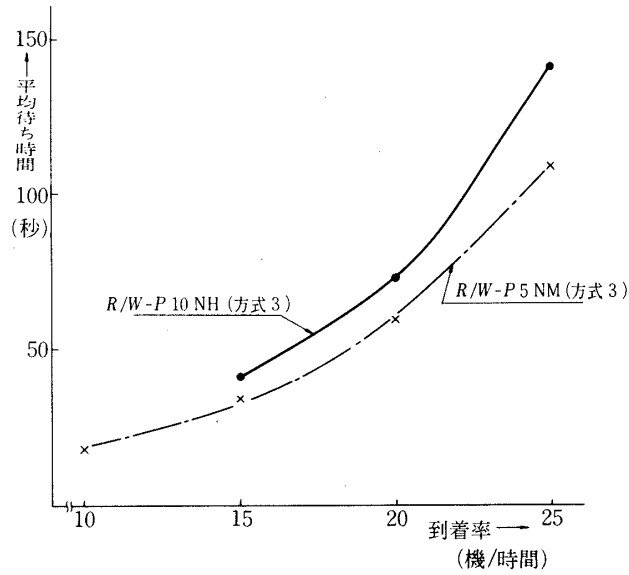
これより R/W-G点間の距離 5 NM と 10 NM とをくらべた場合 10~13% 待ち時間が増大することがわかる。勿論到着機数の増大に伴い、この影響はもっと増大する。

(3) 管制間隔 今迄述べて来たシミュレーションでは管制間隔を G 点および R/W 点でそれぞれ 1 分-1 分としたが、これ以外に 1.5 分-1.5 分、2 分-2 分の場合のシミュレーションも行った。その結果をトラフィック密度  $\rho$  に対して図示する。3 つのシミュレーション結果は比較的良好に一致していることから、待ちについての議論はほとんど 1 分-1 分に対して行っている。

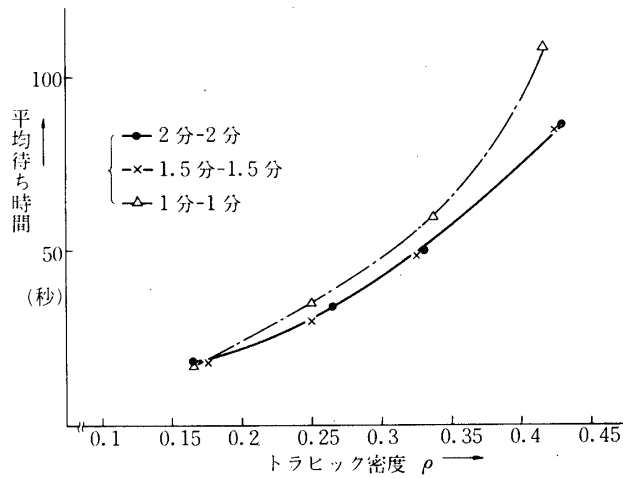
#### 4-3 警報率および待ち時間より見た各方式

前節までに待ち時間および警報率の観点より各方式を論じて来た。

しからば、この両者を総合して考えた場合にはどのようなことが言えるであろうか。このために各方式のシミュレーション結果を警報率-待ち時間の図上にプロットして第13図に示す。又同じ図に M/D/1 の理論値も併せ示した。



第11図 G点-R/W間の距離の影響

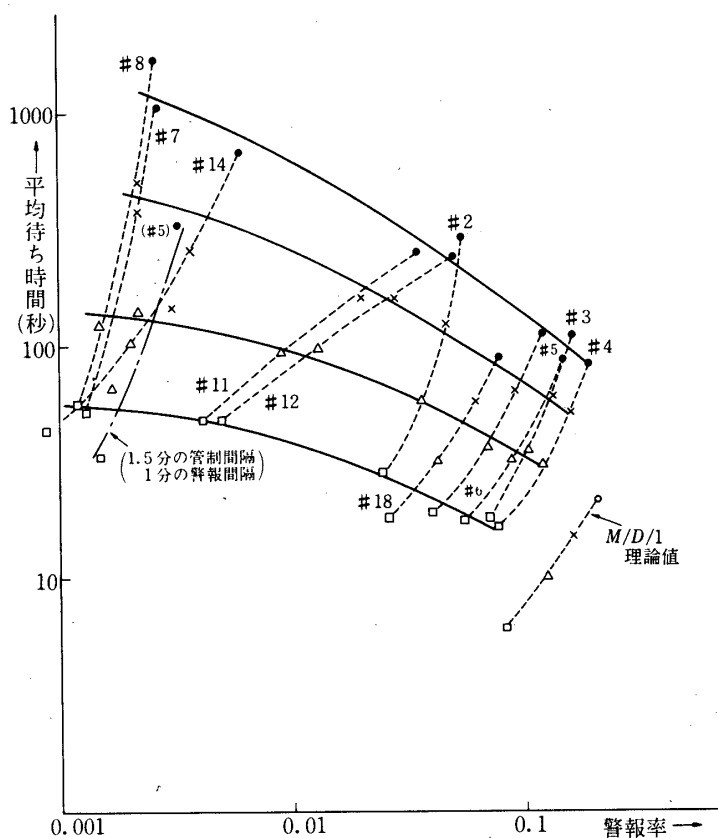


第12図 管制間隔の影響

この図から、次のようなことが言えよう。

- (1) 一つの方式を取りあげた場合、到着率の増大は待ち時間と警報率の増大をともにもたたらす。ただし、待ち時間の増加の方が著しい。このことは(10)、(14)式からも明らかである。
- (2) 同一の到着率を考えた場合、警報率を減少させようとするれば待ち時間の増大をまねく。そしてこれはトラヒック密度の大きい程著しい。
- (3) 速度管制方式は、同一速度の航空機のみを扱う場合には、待ち時間、警報率に関し





第13図 待ち時間—警報率(管制間隔1分, 誤差10-0-0)

M/D/1 の理論値にほぼ等しい値となる。

(4) 方式選択に関しては、次のようなことが言えよう。

(i) 待ち時間の観点からは、方式5が選ばれる。方式18はより望ましいが、これはG点においても任意の待ち時間が得られるとした点においてレーダベクタリングのモデルと考慮得る。

(ii) 警報率の点よりは、方式8(又は7)が選ばれる。

(iii) 待ち時間および警報率の両者を考慮した場合には、方式11が選ばれる。この場合の25機/時間における平均待ち時間は4分であるが、シミュレーションによれば全機数の95%程度が10分以内の待ちであり実際上は許容しうる値である。一方、警報率4%は、25機/時間のトラヒックが4時間続いた時、4回管制間隔を切る割合を生ずることであって常識的には大きい値と言えよう。しかし、ここに言う警報率はあくまで、管制間隔を切る割合であって衝突率ではないこと、又管制間隔に若干の余裕を持った運用を行うことを考慮すれば、この値は更に減少できる。

(iv) 上述の点に関する1つの例として、方式5について管制間隔を1.5分とし警報を出

す間隔を1分とした場合も第13図に示した。これも待ち時間、警報率を併せ考慮した時の一つの選択である。

## 5. あとがき

各種速度管制方式について、警報率と待ち時間の観点より検討を加えた。まず、警報率と待ち時間について理論的解析を行いその計算式を与え、シミュレーション結果の検討に当たっての理論的限界を示した。

すなわち、待ち時間に関しては、速度管制方式が極めて有効であり、同一機種を扱う場合にはほぼ理論値と一致させ得ることを示した。警報率については、チェックを行わない速度管制方式の場合、ほぼ理論値と一致すること、途中でチェックを行うことによりその値を減少させ得ることを示した。なお、警報率は、あくまで管制間隔を切る割合である所から運用上若干の余裕を持たせることにより警報率を減少させ得ることを論じた。

最後に各方式のシミュレーション結果を、警報率対待ち時間の図上に図示することにより警報率と待ち時間の両面より方式比較を行った。

以上の論議を通じて、マニュアル管制方式に関しての種々の具体的指針を得ることができた。又これらの結果は一部レーダ管制方式にも適用し得る。

1979年1月19日 計測部

## 参 考 文 献

- [ 1 ] E. G. Bowen and T. PEARCEY "De lays in the Flow of Air Traffic" J. Royal Aero. Soc., 52, 251~258 (1948).
- [ 2 ] G. E. Bell "Operational Research into Air Traffic control" J. Royal Aero. Soc., 53, 965~976 (1949).
- [ 3 ] Alfred Blumstein "The Landing Capacity of a runway" opns. Res., 7, 752~863 (1959).
- [ 4 ] J. R. Vander Veer and Louis J. Bona "Air Traffic control system-digital simulation facility" Simulation (January 1971).
- [ 5 ] Robert W. Simpson "Analytical Methods of Research into Terminal Area Air Traffic" J. Aircraft 2 No. 3 (1965).
- [ 6 ] Homer Q. LEE, John D. Mchean and Heing ErzBeryer "Guiclance and Control Techniques for Automated Air Traffic Control" J. Aircraft 9 No. 7 (1972).
- [ 7 ] David K Schmidt and Robert L. Swaim "An optional Control Approach to Terminal Area Air Traffic Control" J. Aircraft 10 No. 3 (1973).
- [ 8 ] J. M. Holt and G. R. Marner: "Separation theory in air traffic Control System design" proc. IEEE 58 P369 (1970).
- [ 9 ] 水町, 大室: "航空機の衝突危険度—管制と衝突モデル—" 信学論 (B) 60-B No.11 (1977)
- [10] 水町, 伊藤, 宮尾: "ターミナル領域における速度管制方式 (I)" 東京大学宇宙航空研究所報告, 15-1 (A) (1979)
- [11] 本間: "待ち行列の理論" 理工学社 1966
- [12] 水町, 中川: "航空交通の Flow Control について" 信学技法 SANE2-31 (1973-02)