

## 空港 Extended Control System のシミュレーション モデルに関する研究

STUDY ON SIMULATION MODEL OF AIRPORT EXTENDED  
CONTROL SYSTEM

吉川 和広\*・木俣 昇\*\*

By Kazuhiro Yoshikawa and Noboru Kimata

### 1. 緒 言

国民生活の向上と技術革新の進展に伴って、航空輸送需要は増大の一途をたどっている。この需要に対処すべく、新東京国際空港を始めとして、既設、新設の空港整備計画が進行中である。

明らかに、計画は、その対象システムの構成要素および環境要素の時間的、技術的变化に対応して動的に変更されねばならない。いま航空輸送に注目すると、その構成要素、環境要素とも、近年著しく変化しつつある。その一つは国内線を中心とする航空需要の急増、それに伴う航空機の大型化、高速化である。レシプロ機全盛の 1950 年代より、DC-8、B-707 を主力とする 60 年代のジェット機時代を経て、70 年代はジャンボジェット機時代を迎えるに至った。ほかの重要なもう一つの変化は、電子器機を中心とする航空機、航行援助施設などに関する飛躍的な技術革新の進展である。これら技術革新は従来悪天候の対策手段であった IFR を一転させ、より積極的な高密度の航空交通管制 (ATC) を可能ならしめる技術的基盤を提供した。

加うるに、航空輸送を取りまく環境要素も、騒音問題を中心にして社会問題化し、新空港あるいは既設空港の拡張を困難ならしめる一つの原因となっている。

航空輸送計画は、現在このようにシステム内外の種々の変化に直面し、従来の方法論を根本的に再検討する必要にせまられている。

航空輸送システムは、空港を中心に図-1 に示すように、ランディングエリア（ターミナル管制空域を含む）、ターミナルエリア、空港一都心間アクセス、および航空交通管制システムの 4 つの主要なサブシステムによって構成されている。「空港の能力」はこれらサブシステム

の能力の相互関係によって規定される。

航空輸送システムの構成要素の変化は、これら複雑なシステムの構造を通して、その規定要因を変える。計画にとって重要な、構成要素のこの作用を把握するのに、システム分析が重要な役割を果たす。ここに計画にとって、システム分析の重要性がある。従来、滑走路では、着陸機に優先権が与えられているという理由で、滑走路の最大能力は、出発機の待ちによって規定されるとして、優先権のある待ち行列モデル、あるいはシミュレーションによって解析が進められてきた。AIL は、種々の分析を行なうことにより、滑走路 1 本、VFR 時の空港滑走路の最大能力は、45~60 機/時間であるという推定結果を発表している<sup>2)</sup>。

滑走路を中心とするこれら研究は、それが航空輸送の必須の機能施設であり、かつ巨額の社会資本の投下を必するものであるということによるであろう。また、航空交通においては、VFR を中心とし、IFR を悪天候時の補助的な航行規則とみなし、またその交通流が、量的にも、速度的にもあまりに大きくなり、いわゆる初期航空輸送段階では、滑走路が、計画の規定要因であったことにも起因しているであろう。

しかるに、現在の国際空港周辺空域における航空交通は、航空機相互の異常接近 (Near miss) による衝突の危険性がしばしば発生するほどの過密状態である。このような状態を回避し航空交通の安全性を確保していくためには従来の管制方式を根本的に再検討することが必要である。

このように航空交通が高密度、高速度の混合流であるということに起因して全空域内の全航空機を常時監視、誘導することが必要となってくる。このための方式として IFR のみに限定する Positive Control あるいは、管制を受ける VFR をも認める Extended Control System の制度化、強化が、強く要請されてくる。加うるに、住居地域における航空機騒音問題に関連して、空域

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 京都大学助手 工学部土木工学科

の利用が制約されるによよんで、ATC は有効な Holding fix, ATS 経路の再編成の必要性に直面している。これらの諸事態は、R. Horonjeff が指摘しているように limiting factor としての航空交通管制システムの問題<sup>1)</sup>をより明確に認識させるに至った。

本研究は、Extended Control System に従がう空港のターミナル管制圏を対象として、そこでの航空機動態をシミュレーションモデルに表現することにより、空港計画のための新しい知見を得ようとしたものである。すなわち本研究においては、Extended Control System の具体的な例として、複数航路型管制方式をとりあげ、その効果測定とそれにともなう問題点を明確にすることにより、今後の展望を得ようとしたものである。

## 2. 空港ターミナル管制と航空機動態

航空輸送は、輸送体系を構成する一つのシステムであり、航空機を主要な輸送手段として、出発地より目的地にいたる貨客の流れを円滑に処理するため、施設および機能を有機的に結合したものであり、図-1 のような構造をもっている。このようなシステムのなかでのわれわれの関心は、前節で述べたようにターミナル管制圏における航空機の動態とその管制方式にある。

ターミナル管制圏とは、空港より 60 カイリの ASS/SSR のレーダー網で覆われた空域であり、到着経路空域と出発経路空域に分かれる。到着経路空域には、他空港よりの航空機の到着・進入点 (Outer fixes), 待機地點 (Holding fixes), 着陸態勢に入る最終進入起点 (Gate of final approach) 等の各固定点 (Fixes) が設定されており、NDB, VOR, DME, TACAN などの航行援助施設が整備されている。

大阪、東京両空港の管制圏における到着経路、固定点および航行援助施設の配置は、図-2、図-3 のように

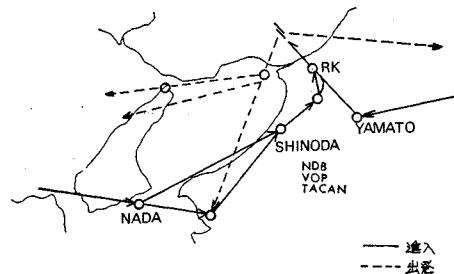


図-2 大阪国際空港ターミナル管制圏

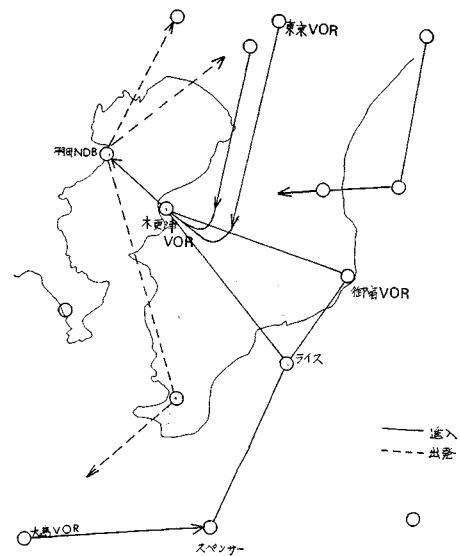


図-3 東京国際空港ターミナル管制圏

なっている。これらの図をみて明らかなように、出発経路空域と、到着経路空域は一般に分離されている。出発経路は、本研究にとっていわゆる周辺要素である。それは、航空交通では、着陸機に優先権が与えられていること、到着経路と着陸経路が分離されていること、さらに離陸機にとっては、滑走路が第一のボトル・ネックとな

っていることなどにより、出発経路は直接には本研究の対象とするシステムに影響をおよぼさない。もちろん滑走路本数が増し、離陸機が同時に離陸する場合には問題となる。本研究ではこのような理由で出発経路はシステム内に入れないとする。

本研究において、上述の大坂・東京空港の例および国際民間航空

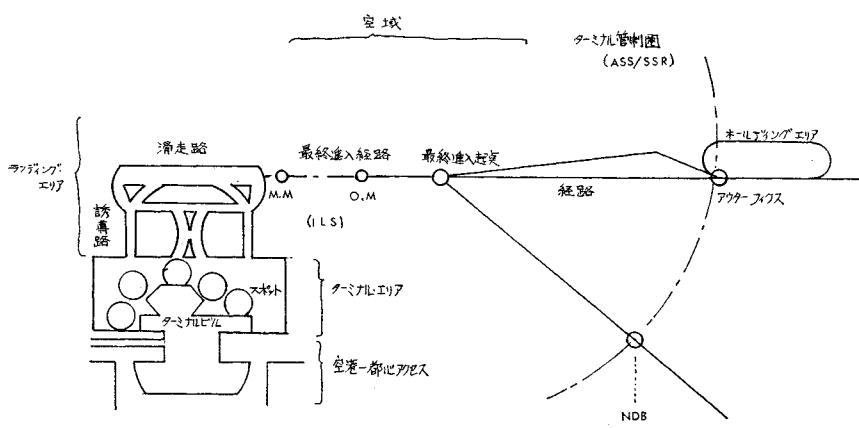


図-1 航空輸送システムの構造

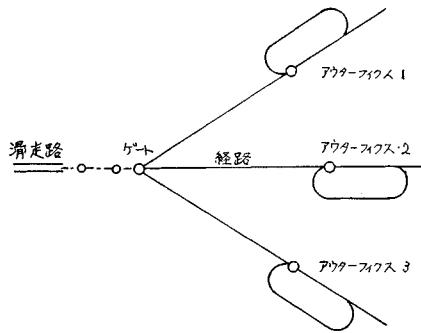


図-4 航路型ターミナル管制圏

条約第11付属書、別添A「空域の構成一管制空域の決定および設定に関する資料<sup>5)</sup>」をもとにして図-4のような3箇所のOuter fixをもつ航路型のターミナル管制圏を設定することとした。

次に航空交通規則は大きくVFRとIFRとに分類される。VFR運行とは、飛行視程5マイル、雲高1500フィート以上の気象条件の場合において許可される飛行形態であり、これ以下の気象条件になると航空交通は航空規則により、IFR運航に制限される（有視界飛行規則）<sup>5)</sup>。

しかし、現在では、航空交通量の増大、航空機の高速化、大型化および航行援助施設の改良とともに、国際空港のターミナル管制圏では、天候に関係なくExtendedあるいはPositive Control Systemが採用されるようになってきた。わが国においても、大阪国際空港は図-5に示すような、パリのオルリー空港に次ぐ世界で2番目に大きなPositive Control圏をとっているが、現在さらにその範囲の拡大が検討されている。これは前節でも述べたように航空交通の増大、高速化とともに、ターミナル空域内の航空機同志の異常接近の危険性が増大してきたため空域内の全航空機を監視、誘導することがますます重要になってきたためである。大阪空港においては図-5に示す範囲、高度の航空機はす

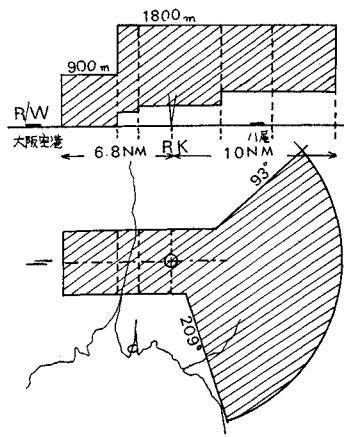


図-5 大阪特別管制区

べて IFR で飛行することを義務づけられている。そして ILS 等の機材を搭載していない小型機は八尾空港で離着陸することになっている。

本研究においては、概念的には、管制を受ける VFR をも認める Extended Control の場合を取り扱うこととする。しかし現実の問題としては、小型機に関してまだ技術的にも、経済的にもその実現に若干の問題が残されていることを指摘しておきたい。

次にターミナル管制圏における航空機の動態と管制について説明することとする。他空港を出発した航空機は、航空路（Air way）上で他機とのセパレーションを確保するため、航空路管制を受けつつ目的空港のターミナル管制圏のアウターフィックスに到着する。ここで航空機管制業務は、航空路管制室よりターミナル管制室にひきつがれる。

管制塔の IFR 室は、5つの管制席があり、到着機、出発機のターミナル管制圏における誘導および航空路管制機関との移管業務を行なっている。

アウターフィックスへの到着機はまず入域管制席で二次レーダー（SSR）によるレーダー識別の確認、他関連航空交通との管制間隔、進入方法、待機の決定、および進入許可を得る。

入域機は、次に経路管制席で、管制空域内の先行機、後続機との管制間隔の確保、最終進入起点までの監視、誘導を受ける。

進入できない場合、あるいは管制間隔が確保できない場合は、指定された待機地点で図-6に示すような方式にしたがって旋回飛行し待機するか、あるいは、ATS-経路を飛行しなければならない。

最終進入起点に到着した航空機は、着陸管理制度によるPAR業務に従って、ILS搭載機は、ILSによって滑走路の接地点までの距離、規定降下角度、および進入コースからのずれ等の情報を受ける。ILSを搭載していない

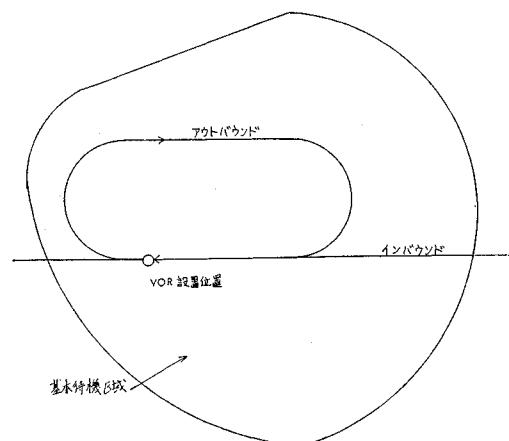


図-6 基本待機方式

機に対しては、PAR 業務により滑走路の中心延長線に對しての針路修正角度と高度修正の情報が刻々送られ、安全着陸に誘導される。

着陸した機は、滑走路より誘導路を経て、スポットに入り、貨客の乗降、給油および整備を行ない出発を待つ。

出発機は管制官に通知し、スポット出発許可を受け、誘導路を通ってホールディングエプロンに行く。

滑走路が、離着陸混合使用の場合は、着陸機に優先権が与えられているから、出発機は、着陸機との安全確認を受けた後、離陸許可を受け離陸する。

出発機は離陸直後、管制塔から出域管制席に引き継がれ、そこでレーダー識別を受け、巡航高度への上昇飛行の指導を受ける。

もう一つの連絡調整席はレーダーによらない ILS 方式による管制ならびに IFR 室の管制席相互間および他の管制機関との連絡調整を行なう。

これら航空交通業務は、「航空業務方式一航空機の運航」(PANS-ORS)<sup>6)</sup>として法的に規定されている。

### 3. 複数航路型航空交通管制方式の概要

前節ではターミナル管制圏における航空機の流れと管制について説明し、航空機相互間の管制間隔が確保できない場合には、ホールディングあるいは、ATS 経路を飛行することによって間隔調整を行なうということを述べた。本節では航空管制の基本である「管制間隔の物理的確保」という問題に注目し、Extended Control の一方式としての複数航路型管制方式について考察を進めることとする。

航空交通管制でいう間隔には垂直間隔と水平間隔があり、さらに水平間隔には縦間隔、横間隔がある。航路型ターミナル管制について考察する場合には管制圏内の各経路は、それら相互の横間隔および垂直間隔が確保されるように設定されているので縦間隔の確保が最重要事項となる。

現在この縦間隔はレーダーによる管制では 3 マイルが最小であるとされている<sup>1), 7)</sup>。次に航空交通管制の特徴を列挙すると、すべての航空機飛行経路は最終進入起点で 1 個所に收れんするということ、また最終進入起点を通過して着陸態勢に入った航空機は着陸速度に減速して最終進入経路を飛行するため航空力学上その間隔制御は困難であるということである。したがってすべての航空機は最終進入起点に到着するまでに、この経路上で他機とのセパレーションが確保されているように管制されなければならない。

最終進入経路上での航空機の速度すなわち着陸速度は

航空機の失速度の 1.3 倍以上といわれており、当然航空機の機種、大きさ、性能によって異なる。したがって、先行機がレシプロ機またはターボプロップ機で遅く、後続機がジェットで速い場合には最終進入経路上で 3 マイルのセパレーションを確保できない事態が発生する。このような現象は当然最終進入経路の長さ、利用航空機の着陸速度差によって異なってくるので経路が長ければ長いほど、また速度差が大きいほど、最終進入起点での航空機相互のセパレーションは大きくしなければならない。したがって容量の面からは、この長さは短い方が望ましい。しかし一方この長さは経路を飛行中の航空機が着陸態勢を整えるのに十分なだけは最小限必要である。現在、その値は 6 マイルであるといわれている<sup>1)</sup>。大阪国際空港の場合には、6.8 マイルとなっている。

このようにみると最終進入経路上での航空機相互の縦間隔を確保することができるよう、最終進入起点に到着するまでの航空機に必要な制御を行なうことが着陸航空交通管制といえる。

いま、図-4 のようにアウターフィックスと最終進入起点が 1 本の経路で結ばれているとする。先行機と後続機のセパレーションが確保できず、後続機を遅延させる必要が生じた場合、後続機は最終進入起点、アウターブイックスあるいは適当な旋回地点で旋回し、待機しなければならない。航空機の待機方式には、標準タイプ、L-タイプ、U-タイプ等の Single stack system、あるいは Dual stack system 等が考えられている。いずれにしても図-6 のアウターパウンドにおける時間調節は 1 分あるいは 1 分 30 秒が適当とされている<sup>6)</sup>ので、それに旋回時間を加えると、1 回の旋回に要する時間は 3~4 分となる。いま最終進入経路長を 6 マイルとし、レシプロ機の着陸速度を 120 mph、ジェット機のそれを 150 mph とすれば、着陸時に後続機とのセパレーション 3 マイルを確保するためには、もし先行機がレシプロ機で後続機がジェット機の場合、最終進入起点で約 2 分のセパレーションがあればよいということになる。したがって最終進入起点でセパレーションが確保できない場合でも後続機の遅延は 1~2 分で十分であることが多い。

われわれは、そこでアウターフィックスから最終進入起点へ至る経路を図-7 のように周周経路を中心に複数個配置し、各経路の所要時間差で後続航空機の遅延を調節する複数航路型のターミナル管制方式を提案する。

これら経路の実効的な設定には、現在の航行援助施設を VOR, DME 等へ更新すること、さらにそれらを追加新設することが必要である。この場合当然のことながら経路間の横間隔は相互に確保されていかなければならぬが、管制官にも、高速度で航行する航空機相互の管制間隔についてきびしい監視が要求される。そのため管制

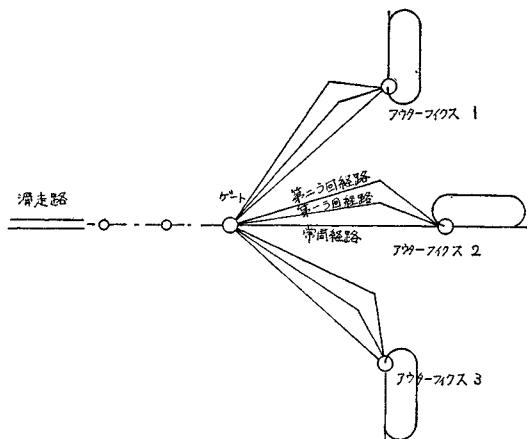


図-7 複数航路型ターミナル管制圏

の補助システムとして高精度のレーダーの整備と管制の情報処理の自動化が必須となってくるであろう。現在、これら諸条件は徐々に整備されつつあるので、複数航路型航空交通管制方式の採用は十分可能となりつつある。たとえば、そのような補助システムとして米航空局では、コンピューターを使った新しい自動航空管制システム「ARTS III」を開発、シカゴのオヘア国際空港に設置し、運用を開始している。また、現在すでに、東京、大阪両国際空港においては、複数航路型航空交通管制方式に似た航空交通管制方式が採用されているといわれている。

本研究は、現在強く要請されている空港の Extended Control System を具体的に把握し、検討するために、技術的に実用可能な複数航路型管制方式について、シミュレーションモデルを作成し、航空機運航上の問題、空港の離着陸処理能力の推定の問題等を取り扱うことにより空港計画上必要な情報に関する新しい知見を得ようとするものである。

#### 4. シミュレーションモデルの作成

本節では、2., 3. 節で明らかにしたターミナル管制圏における航空交通の動態をもとにして、そのモデル化を行なう。われわれの対象とする航空交通システムは、待ち合わせ系の構造を有している。

まず、モデル化のために、この系の待ち構造の特徴を待ち行列理論を援用して明らかにする。待ち行列理論は衆知のように客、窓口およびサービス方式を主要概念として構成されており、それらの特徴の組み合わせにより Kendall 記号表示のように、その系の特徴が分類されている。まずこの系では、客はジェット、レシプロ機の 2 種類の航空機であり、アウターフィックス、最終進入起点、滑走路、およびスポットの各窓口が、経路、最終進

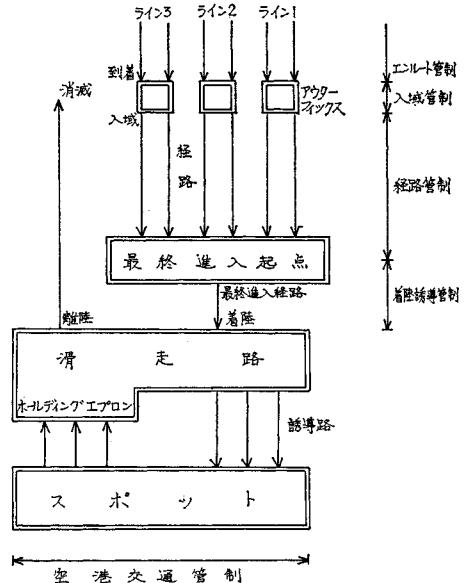


図-8 ターミナル管制の待ち合せ構造

入経路および誘導路により、図-8 のように結合されたタンディム型の待ち合せ構造を有している。

また、この系は空域あるいは地上施設に制約があるため有限のホールディングポイント、あるいは、ホールディングエプロンを有する有限待ち合せ系でもある。さらにタンディム型の内容を詳しく述べると、この系は安全確保のため最終進入経路上では待ちが許されない。したがって窓口アウターフィックスにおいては、最終進入起点での航空機相互の管制間隔をあらかじめチェックしておくことが必要になる。一方、アウターフィックスへの航空機到着は、一般にランダム到着とみなされている。また滑走路では安全確保のために着陸機に優先権が与えられているので、いわゆるプライオリティのある待ち合せ (Priority Queues) となっている。シミュレーションの基本となる待ち状態のモデル化は、アウターフィックスおよび滑走路でそれぞれ次のようになされる。記号は、図-9 および表-1 に示した表示に従う。大文字は、インプットを示す。

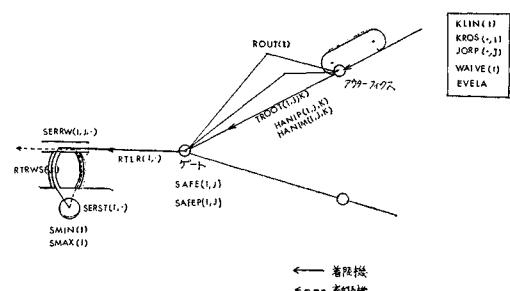


図-9 航空機動態とシミュレーション記号

表一 シミュレーション入力とその特性

変数名	次元	内容	要素分類	
RWSYS ( $I$ )	4	滑走路本数と使用形態	計画手段 地勢的制約	滑走路運用形態
NRW ( $I$ )	3	ライン別使用滑走路名	計画手段 ATC の制約	
LOWST ( $I$ )	3	ライン別使用ゲート名	計画手段 ATC の制約	
ROUTL ( $I$ )	3	ライン別経路本数	計画手段 ATC の制約	
TROOT ( $I, J, K$ )	3, 2, 3	経路所要時間 $\left\{ \begin{array}{l} I: \text{経路} \\ (+) \quad J: \text{機種} \\ (-) \quad K: \text{ライン} \end{array} \right.$	環境要素	空域、およびランディングエリアの構造
HANIP ( $I, J, K$ )	3, 2, 3	同調節範囲 $\left\{ \begin{array}{l} (+) \\ (-) \end{array} \right.$		
HANIM ( $I, J, K$ )	3, 2, 3			
RTLR ( $I, \cdot$ )	2	機種別最終進入経路所要時間	環境要素 確率変数	
SERRW ( $I, J, \cdot$ )	2, 2	滑走路占有時間 $\left\{ \begin{array}{l} I: \text{離着陸別} \\ J: \text{機種} \end{array} \right.$	"	
RTRWS ( $\cdot, J$ )	2	機種別滑走路ースポット所要時間	"	
SMIN ( $I$ )	3		計画手段	
SMAX ( $I$ )	3			
SERSP ( $I, \cdot$ )	2	機種別スポットサービス時間	確率変数	
SAFE ( $I, J$ )	2, 2	着陸時最小安全間隔	管制能力、空域、最終進入経路長	管制(ATC)
SAFEP ( $I, J$ )	2, 2	離陸時最小安全間隔 $\left\{ \begin{array}{l} I: \text{先行機種} \\ J: \text{後続機種} \end{array} \right.$	着陸速度、RW-TW システム	
KLIN ( $I$ )	3	ライン別到着機数の比率	環境要素	運航形態
KROS ( $I$ )	3	ライン別路線構成比率	航空輸送構造	
JORP ( $J$ )	4	路線別機種別構成比率		
WAIVE ( $T$ )	15	時間帯別到着パターン		
EVELA		到着数レベル EVELA+WAIVE( $T$ ) : 到着機数		

(1) アウターフィックスでのサービスは、単一航路型、複数航路型に対して次のようにシミュレーションされる。単一航路型では、ROUT( $I=1$ ,  $I=1,2,3$ )である。action time TROOT ( $I, J, K$ ) は、 $J=1$ 以外は0である。アウターフィックスへの航空機の到着時刻を $t_e(i, k)$ とする。ここに、 $i$ は到着フィックス名、 $k$ は機種である。

GPSS 体系では、時間を進行させるために、future event chain と current event chain を定義する。

最終進入起点への航空機の到着予定時刻  $t_e^{\text{Gate}}$  は、それが飛行する経路の action time TROOT ( $i, 1, k$ ) を用いて、

$$t_e^{\text{Gate}} = t_l(i, k) + \text{TROOT}(i, 1, k) \dots \dots \dots (1)$$

$$l=1, 2, \dots$$

として求められ、future event chain に登録される。プライオリティのない到着順サービス(first-come, first service)の場合は、各アウターフィックスにおいて最終進入起点への最早到着機が選ばれる。先行機と当該機との間隔が最小安全間隔 SAFE ( $I, J$ ) より大きいかどうかが比較検討される。検討結果安全間隔が確保されていれば、その機は進入許可され、current event chain に登録される。そうでない場合は、待機に入り、queue リストに登録され、待機時間を加算し、future event chain が更新され、再度進入の検討が行なわれる。SAFE ( $I, J$ ) は最終進入起点から滑走路までの距離、航空機の着陸速度、滑走路および誘導路の配置、ILS 等の施設および有効離脱空域の有無によって異なる。また管制官の能力、持続時間にも影響されるが、本研究では、レーダー間隔3マイルを最小間隔とし、着陸速度および最終進入

起点から滑走路までの距離を所与として SAFE ( $I, J$ ) を求めた。

複数航路型管制では、アウターフィックスから最終進入起点への経路が複数個あり、TROOT ( $I, J, K$ ) は、飛行する経路  $J$  によって異なる。この場合、各経路へ調節時間の配分の仕方が問題となる。一つは常周経路とショートカット、迂回経路とする場合で、他の一つは所要時間順に常周、第1、第2迂回経路とする方法などが考えられる。

基本的には、前述の単一航路型管制と同様であるが、航空機相互の縦間隔の判定で十分なセパレーションが獲得できない場合は、必要な遅延時間に応じて next block として ATS 経路が指定され、その経路を飛行する場合の最終進入起点到着予定時刻を求め、再度安全間隔のチェックを行なう。

すなわち、単一航路管制の場合は、ホールディングによる遅延のみ検討すればよかつたが複数航路型管制では、TROOT ( $I, J, K$ ) ;  $J=1,2,3$ 、およびホールディングの4種類の遅延についての検討が必要となる。

(2) 次に滑走路上でのサービスのシミュレーションについて述べる。上述したように、滑走路上では、着陸機に優先権が与えられている。したがって、current event chain では着陸機に高いプライオリティが記されている。いま、着陸機、離陸機の予定行動時刻を、 $t^L(k), t^{T.O}(l)$  とする。ここに、 $k, l$  は、機種である。いま、最早時刻を  $t^{T.O}(l)$  とすれば、まず先行機とのチェックを受け、次いで着陸機の予定時刻  $t^L(k)$  との間隔について、

$$t^L(k) - t^{T.O}(l) \geq \text{SAFEP}(k, l) \dots \dots \dots (3)$$

が検討され、離陸許可が与えられる。SAFE $(k, l)$  も SAFE $(i, j)$  と同様、種々の条件によって、変化するであろう。ここでは、AIL の調査<sup>2)</sup>を基準にして決定した。さらに滑走路のサービスは、滑走路の数、配置、さらには有効空域の有無によって異なる。

滑走路の配置、運用の基本型は、図-10

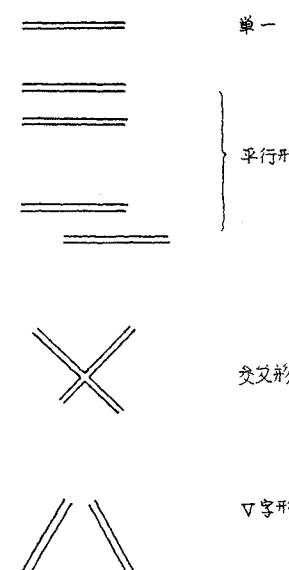


図-10 滑走路の典型的な形

に示すような種々の場合がある。滑走路 2 本の場合は、到着(Landing) 離陸 (Take off) の混合使用、着陸、離陸別使用の場合、これに機種別、路線別などの複合された使用形態が考えられる。また、この場合、2 本の滑走路の間隔  $S$  が 4 500 フィート以上の場合に初めて独立、同時使用が可能とされている。最後に本モデルのインプット、アウトプット、およびその構造について説明することにより、本モデルの特色をあげてゆくこととする。これはシミュレーションモデルの Validation<sup>5)</sup> のための一つの手続である。

図-9 に本システムの構造とそのシミュレーション記号を示した。これらの詳しい説明が表-1 である。

表-1 に示した本モデルのインプットは、それを規定する状態によって、分類されている。われわれは、まず、対象によるシステム構成要素名によって大きく分類し、それら要素の相互の関連性を明らかにした。次いで、シミュレーションの目的に関連する分類として、内部要素、あるいは計画要素と環境要素の区別を明らかにした。また、これら要素を規定する関係を物理的制約関係、物理的因果関係、あるいは社会的制約関係として区分し、シミュレーションのために設定されたインプットデータの Validation を行なう手掛を明らかにした。

この分類表より、本モデルは、物理的に先決され、所与として考えられなければならない要素を多数もち、かつそれらが相互に関連しあっている。一つのデータの変更にともなって、他のデータもシステムとしての整合性が保たれるように、修正されなければならないことが明らかである。

また人間要素として管制官の信頼性に対する判断が、SAFE $(I, J)$ , SAFEP $(I, J)$  にインプリシットに含ま

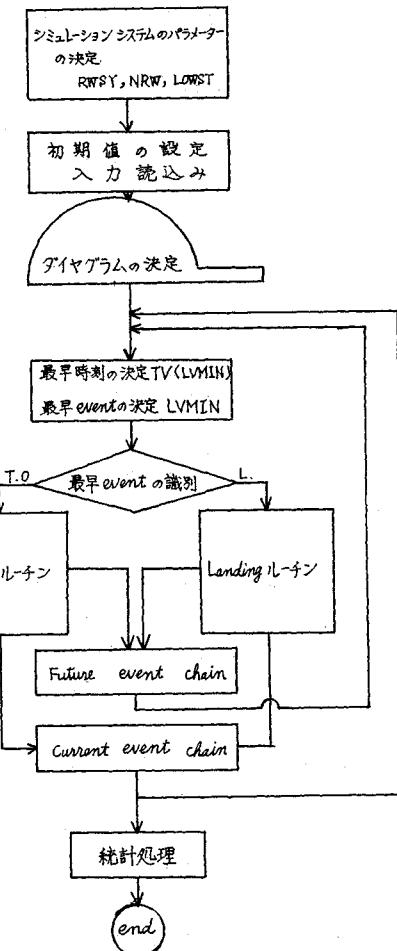


図-11 シミュレーションシステムのブロック・ダイヤグラム

れているので、その分析も必要になるであろう。

本モデルは、GPSS III の概念を用いて、システム化し、FORTRAN によってプログラミングを行なった。そのブロックダイヤグラムは、図-11 に示した。また、本モデルは Extended Control System を具体的に検討するために平均待ち時間などの静的なアウトプットの他に、システムのダイナミズを分析できるようにするために、瞬時のシステム状態をアウトプットできるようにした。

使用乱数は、FACOM-230-60 組み込み関数 KUNIRN (R, IR, K) である<sup>18)</sup>。

1 日分 (15 時間) 当りのシミュレーション時間は 4~5 分程度であった。

## 5. モデルの Validation と若干の考察

われわれは空港における Positive Control System あるいは Extended Control System の一方式として複数

航路型航空交通管制をとりあげシミュレーションモデルを作成したが、ここではまず、目的とモデルの「確立の度合」<sup>16)</sup>について若干の考察を加えておくこととする。

一般にシミュレーションによって問題の考察を進める場合、そのモデルの Validation が確立されていなければならぬ。しかしこの問題は最適な手段というものが確立されているわけではなく problem-dependent であるとされている<sup>15), 16)</sup>。本研究の目的は Positive あるいは Extended Control System による空港の離着陸処理能力の推定、System の安定性の検討および航空交通管制としての問題点の検討などを行なうことである。

本研究では、現実の空港の離着陸処理に関する経験的な情報を手掛にして本モデルの Validation を行なうこととする。まずモデルのインプットデータについて検討しておく。

本モデルの重要なパラメータは管制における先行機  $I$  と後続機  $J$  との最小縦間隔 SAFE( $I, J$ ), SAFEP( $I, J$ ) である。これは、レーダー間隔 3 マイル、航空機の着陸速度および最終進入経路長 (Common glide path length) を与えることにより、理論的に求められる。

レーダー間隔 3 マイルについては、IATA 第 7 回技術会議でも確認されている。最終進入経路長は航空機の着陸態勢の安定のために最小 6 マイルが必要であるとされている。したがって SAFE( $I, J$ ), SAFEP( $I, J$ ) の設定は、もっぱら空港の利用航空機の着陸速度と管制官の信頼性に依存する。本研究では、着陸機に関しては、最終進入起点で離陸機に関しては滑走路端で安全確認を行なうこととし、ジェット機、レシプロ機の着陸速度を 150 mph, 120 mph として<sup>19)</sup>、計算により求めた。この定義の異なりを考慮して、両者を比較し表-2 のように設定した。AIL の調査によると着陸機相互では滑走路への接地時間間隔 (over threshold, O.T.)、着陸機と離陸機相互では O.T. と離陸許可 (clearance) との時間間隔をとっている<sup>2)</sup>。

ほかの物理的なデータも、AIL の調査および大阪空港の実測値をもとにして設定した。運用に関するデータは、現状の大阪空港の時刻表を参考にした。以上のインプットデータは表-2 に示すとおりである。ここに、いままで得られた経験的ないしは理論的な空港離着陸処理に関する知識を整理しておくこととする。

AIL の報告書によれば、滑走路 1 本、IFR 時の容量として、40~60 回/時間を推定している<sup>1), 2)</sup>。これは、3 つの待ち合わせモデルによる分析結果

に基づくものである。この場合、航空機の平均待ち時間を 6 分としているが、Horonjeff もいっているように、これらの値は、厳密なものではない。また、文献 3) によれば、経済分析の結果 4~6 分が妥当な航空機の待ち時間であろうとしている。

一方、現実の空港では経験的離着陸処理機数が設定されている。たとえば、大阪、東京両国際空港は、表-3 のような 3 つの値にその上限が規制されている。この値は、現場の管制官の要請と騒音問題による制約とにより設定されているもので、経済的分析結果得られる値より

表-2 インプットデータの一例

		経路 1			経路 2			経路 3		
LINE	機種	M	TROOT	P	M	TROOT	P	M	TROOT	P
1	JET	0.0	10.0	0.6	0.0	11.0	0.6	0.0	12.0	0.6
	PROP.	0.0	15.0	0.6	0.0	16.0	0.6	0.0	17.0	0.6
2	JET	0.0	10.0	0.6	0.0	11.0	0.6	0.0	12.0	0.6
	PROP.	0.0	15.0	0.6	0.0	16.0	0.6	0.0	17.0	0.6
3	JET	0.0	10.0	0.6	0.0	11.0	0.6	0.0	12.0	0.6
	PROP.	0.0	15.0	0.6	0.0	16.0	0.6	0.0	17.0	0.6

(注) P : HANIP( $I, J, K$ ) M : HANIM( $I, J, K$ )

		SAFE ( $I, J$ )		SAFEP ( $I, J$ )			
後続機種	先行機種	JET	PROP.	後續機種	先行機種		
	JET	1.4	1.3		JET	1.4	1.4
	PROP.	1.8	1.5		PROP.	1.3	1.3

		SERRW			
		JET	PROP.		
着陸	離陸	N(0.9, 0.01)	N(0.7, 0.01)		
		N(1.5, 0.01)	N(1.0, 0.01)		

表-3 発着制限回数

	1 時間当たり	連続 3 時間当たり	1 日当たり	備考
東京国際空港	34 回	86 回	460 回	
大阪国際空港	36 回	93 回	480 回	着陸機 225 機 E-58

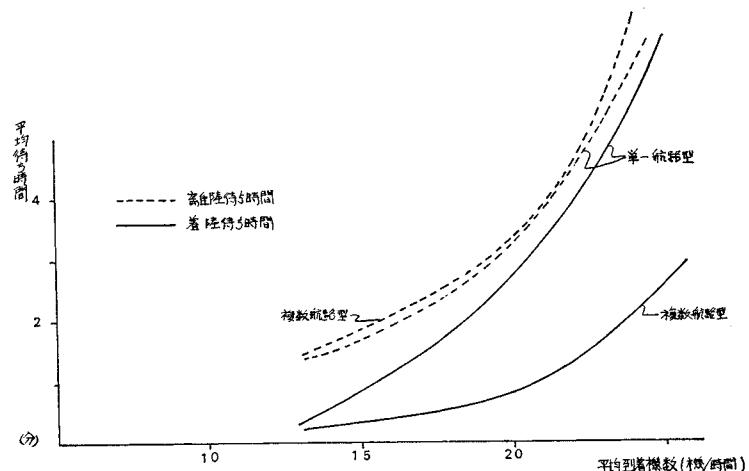


図-12 離陸、着陸待ち時間

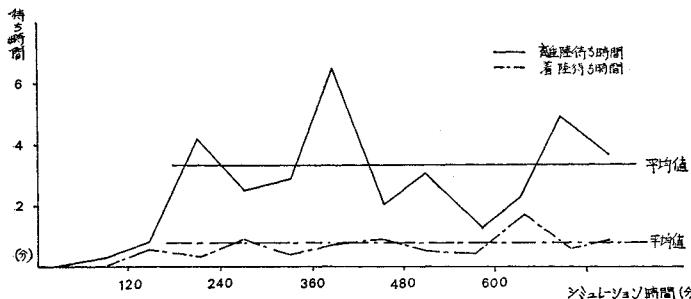


図-13 複数経路型システムの出力の変動（到着機数 20 機/時間）

小さいものと思われる。そこで本研究では、モデルの Validation の方法として、これらの経験知識をもとにして、シミュレーション結果を考慮してみることとする。

まず空港離着陸処理能力に関する検討を行なうこととする。図-12 は、単一航路型、複数航路型管制による航空機の出発待ち時間と着陸待ち時間を到着率との関係で求めたものである。

インプットデータは、表-2 に示したもの用い、到着パターンを、定常とし、到着率を 12 機/時間より 2 機きざみで増大させ、それについて、約 15 時間分のシミュレーションを行なった。そしてシミュレーション後半の 4~6 個の時間帯について平均待ち時間求め、それを資料として採用した。図-13

は上述のシミュレーション結果の定常性を一応確認するために、到着率が 20 機/時間のときのシミュレーションの結果得られた待ち時間の時間的变化をグラフにしたものである。もちろん厳密な意味での検討には種々の分析が必要であることはいうまでもない。いま、前述した経済分析の結果を用いて、離着陸機の処理能力を許容待ち時間を 4 分と設定して、本モデルの離陸待ち時間より推定してみると経路 1 本の場合、3 本の場合、容量はそれぞれ約 21 機/時間、42 (回/時間) 前後の値となる。これは、前述したようにわれわれが有している知識と大差ない。次に着陸機の待ち時間の面より考察を進めてみることにする。図より明らかのように、離陸待ち時間の方が大きくなっていることより、空港の離着陸処理能力は、離陸待ち時間を規定されることがわかる。

また離陸待ち時間では、差異の少なかった両管制方式も着陸機の待ち時間

では、2 倍以上も違っており、複数経路型管制の効果がうかがえる。

空港の離着陸処理能力は上述したように離陸待ち時間で規定されるのであるが、この離陸待ち時間は特に高密度航空交通の場合 SAFE<sub>(I, J)</sub> と SAFEP<sub>(I, J)</sub> との大きさの相対的な差によって大きく変化するので、その設定には十分な注意が必要である。このことは、AIL 報告にも述べられているが特に SAFE

<sub>(I, J)</sub> の設定は、非常に困難である。そこで SAFEP<sub>(I, J)</sub> の影響を調べるために本研究では SAFEP<sub>(I, J)</sub> を少し変更して、シミュレーションを行ない、その結果の比較を行なうこととした。表-2 の値に対して、レシプロ機の離陸安全間隔を 0.1 分大きくした場合を検討した。図-14 は、平均到着機数が、図のように時間的に 16~24 (機/時間) と変動するときの複数経路型管制システムの場合の比較である。この図より、SAFEP<sub>(I, J)</sub> の変化は、高密度航空交通の場合には、予想以上の影響をもつことがわかる。それは単に待ち時間の量的な増大のみならず、累積効果をともなってシステムに作用している。

単一航路型システムと複数航路型システムを比較する

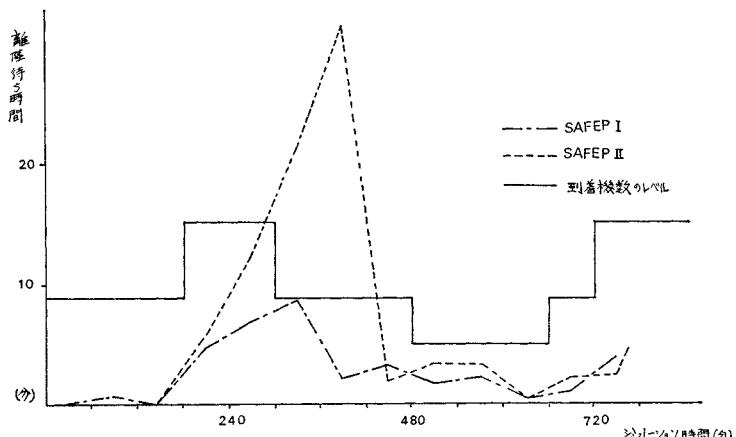
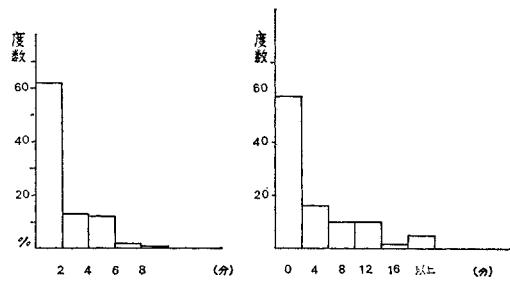
図-14 SAFEP<sub>(I, J)</sub> の離陸待ち時間に及ぼす影響（到着機数 16~24 機/時間）

図-15 着陸待ち時間の度数分布（平均到着機数 21 機/時間）

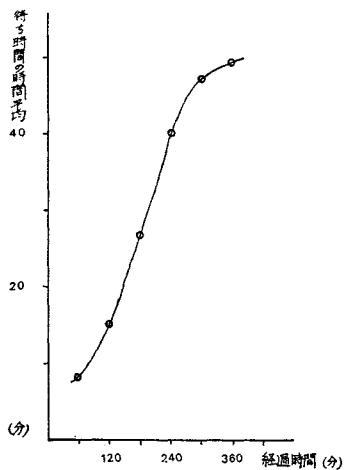


図-16  
離着待ち時間の  
累積効果（到着機  
数 25 機/時間）

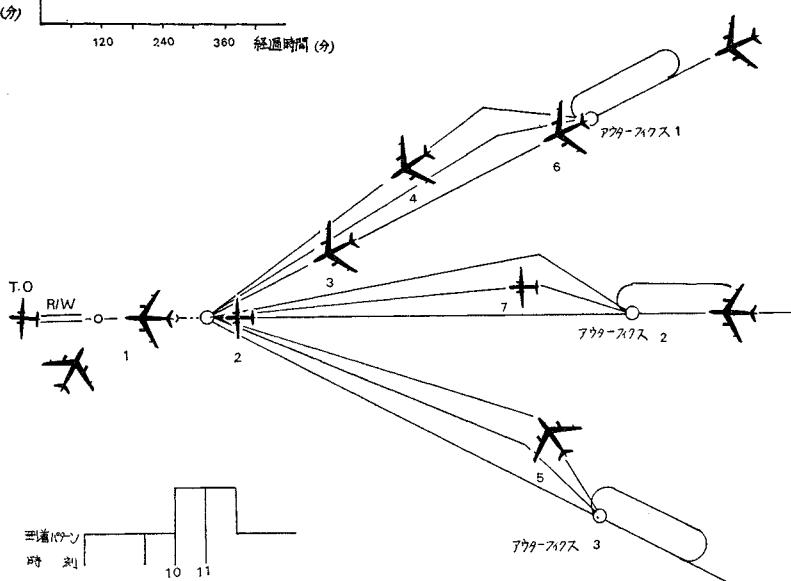


図-17 ターミナル管制システムの状態図(11時)

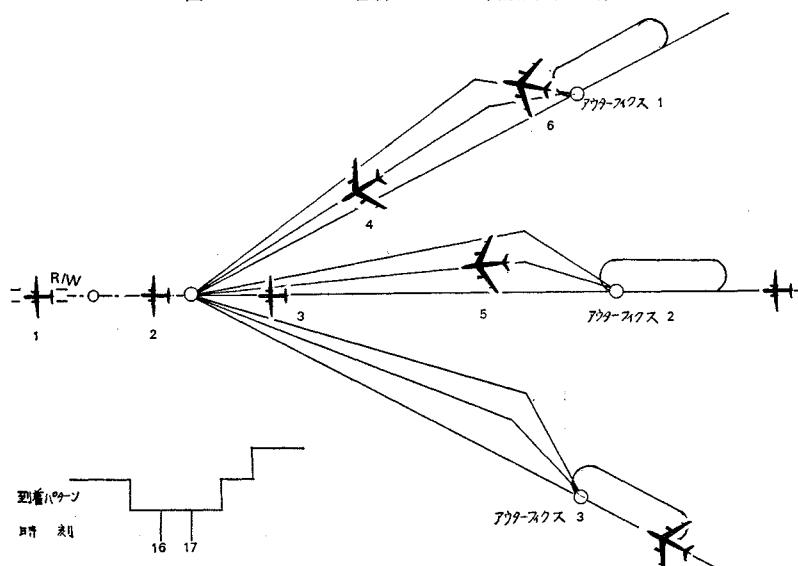


図-18 ターミナル管制システムの状態図(17時)

と図-12 からも予想されていたが、着陸機については図-15 の着陸待ち時間の分布をみて明らかのように、前者には、待ち時間 12 分以上、すなわち、3 回以上ホールディングする機が多数認められるが、後者では、待ち時間は 10 分以内であり、3 回以上ホールディングする機は、皆無である。このことより複数航路型システムの優位性が推測される。しかし複数航路型システムでは、滑走路を 1 本とすると、到着率が増大して高密度航空交通になれば最終進入起点を次々と着陸機が最小間隔で通過することになり、優先権のない離陸機の待ち時間は図-16 に示すように急激に、かつ累積的に増大することになる。一方、単一航路型では、到着率が増大するとホールディング機数が急速に増大し、着陸機の最終進入起点通過が制限されるので、逆に離陸機は離陸しやすくなる。たとえば、到着機数が 36 機/時の場合、シミュレーションによると、複数航路型では、離陸機が 9 機/時にまで減少している。このように、複数航路型システムの検討には滑走路の本数、運用形態をも合せて考察することが必要であろう。

以上の分析は、モデルの平均値的アウトプットをもとにしてシステムの静的な特性を考察したものである。次に、われわれは、空港ターミナル管制図での航空機の動態を分析し、システムのダイナミズムの問題について考察を進めることとする。本モデルは、この目的のために、統計値以外にシステムの瞬時の状態を記述することができるような変数を定義している。

図-17、図-18 は、複数航路型管制方式によるシステム内の航空機の状態を示したものである。

これらの図は、現在の大坂国際空港のように、1 日に 2 回、朝、夕にピークのあるダイヤグラムで、時間当たり 32~42 回程度の離着陸のある場

合のシミュレーション結果をもとにして作成したものである。図-17, 18 は、それぞれシミュレーション開始後 240 分、600 分の 11 時、および 17 時の時点におけるシステム状態のアウトプットである。

まず図-17 は、ナイトスポットしていた航空機の離陸が済み、朝の到着ラッシュを迎えた 10~11 時の時間帯の状況である。システム内には、18 機の航空機が観察される。この図は、離陸機に引き続いて、ジェット機が、すでに着陸態勢に入り、最終進入経路上を飛行していることを示している。そして、滑走路端のホールディングエプロンには、航空機が 1 機離陸待ちをしている。各アウターフィックスより最終進入起点へ飛行中の航空機が、6 機経路管制を受けている。その状況は、アウターフィックス 2 より常周経路を飛行してきたレシプロ機 2 が、最終進入起点に入ろうとしている。この図に記入されている番号は、最終進入起点を通過する順序である。この地点での航空機相互の縦間隔を調べてみると、航空機 3 と 4, 5 と 6 との縦間隔は、1.4 分となっている。これは、5 と 6 の間は最小安全間隔ぎりぎりであることを意味する。ところが、5, 6 は、それぞれ異なったアウターフィックスより進入し、さらに第 2 迂回経路を飛行していることより、管制官が、この方法によって最終進入起点での両機の安全間隔を確保したことがわかる。

さらに、現在アウターフィックス接近中の航空機が 2 機いる。この時間帯の統計データをみると、着陸機 20 機、離陸機 17 機となっており、時間当たり 37 回の離着陸が観察されている。これは、表-3 に示した大阪国際空港の限界値 36 に近い。このような情報と出力形式を有効に用いれば、直接経験者の判断をモデルの Validation に利用することが可能となる。

なおこの場合の離陸待ち時間、着陸遅れ時間を記しておくと、それぞれ 4.9 分、1.45 分である。また、ホールディングは 2 回観測されている。

図-18 は、ピークを過ぎた状態のシステム図で、16 時~17 時の時間帯にあたる。この時間帯ではピーク時より、平均着陸機数は 5 機少なく、16 機/時間となっている。この図は、着陸機（レシプロ機）がまだ滑走路にあり、そのすぐ次に着陸機が続いている場合である。

図-19 は、システムの安定性を調べるために、離陸、着陸待ち時間の変動状態を示したものである。この図により、複数航路型方式は、単一航路型に比して、安定していることがわかるであろう。特に到着待ち時間は両システムで大きく異なり、複数航路型では 1 分程度であるが、単一航路型では、4 分以上の場合があり、複数航路型の効果が期待される。

しかしこの図は離陸待ち時間と着陸待ち時間とともに自己相関が存在するような様相を呈しているので、厳密

な議論には、もう少し検討を要するであろう<sup>17)</sup>。

複数航路型システムの時間調整機能がどの程度働いているかを見るために、各ラインの迂回経路使用状態を調べると図-20 のようなヒストグラムが得られた。各ラインとも、迂回経路が 30% 程度以上利用されている。もちろんこれは到着機数によっても変わるものである。また本研究では、迂回経路は 1 分きざみで設定しているが、これを変えることによって、利用率は大きく変わるものである。ただし、この値は航空交通管制の制御の精度との関係で設定されなければ無意味なものとなる。以上のような考察より、複数航路管制方式は、Extended Control System の方法の一つとして検討に値するものであるという結論を得た。

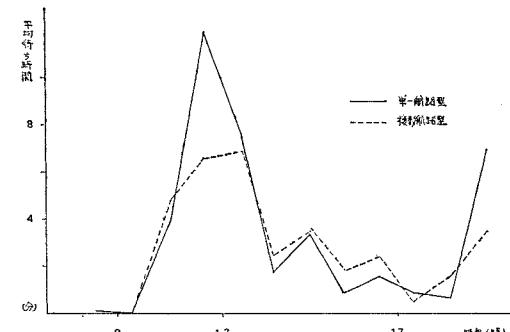


図-19(1) 離陸待ち時間の変化

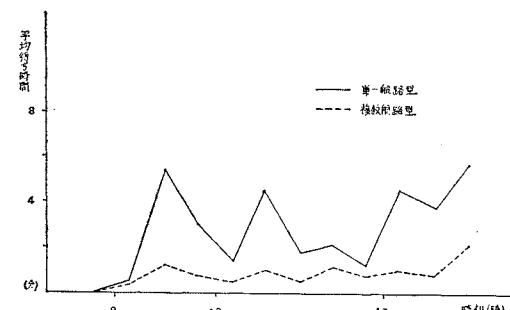


図-19(2) 着陸待ち時間の変化

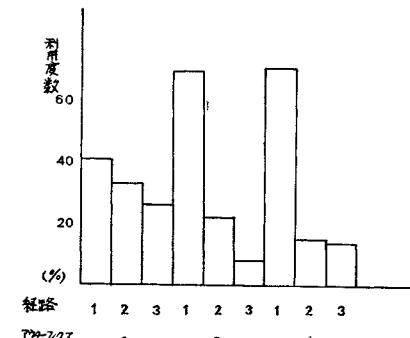


図-20 アウターフィックス別経路利用率  
(到着機数 18~24 機/時間)

## 6. 結 言

本研究は、現代の緊急課題の一つである空港の Extended Control System に対する検討手段として、そのシミュレーションモデルを開発することを目的としたものである。われわれは、Extended Control System を空港計画の観点より具体的に検討するために、複数航路型管制方式を提案し、そのシミュレーションモデルを作成した。そして、現在の空港の離着陸処理能力に関する経験的、あるいは理論的知識を用いて、モデルの Validation を行なうとともに、Extended Control System に関する若干の分析を行なった。

本システムを用いることにより、現在大阪空港の離着陸回数の限界といわれている 36 回/時間近傍の航空交通密度についてシミュレーションを実施し、種々の検討を行なった。分析の結果単一航路型システムは、非常に不安定であるのに比して、複数航路型システムは、到着率の変化に対して、特に着陸面で安定したダイナミズムをもつことが判明した。また、時間調節の方法として設定した迂回経路は、約 30% 利用され、十分その機能をはたしていることも確認できた。また、本モデルでは、この方式の実際の航空交通管制への移行の可能性を検討するため、システムの内部の状態、アウターフィックス到着後の航空機の管制の有無、その方法、また最終進入起点通過時の前後機の縦間隔等、管制に関する情報を出力できるように設計している。その一例として、システムの状態図を作成した。これらの図は、現場の経験者の参加を得て、より具体的な複数航路型管制方式の採用に有効な情報を提供するであろう。

本研究では、まだ十分な検討が行なわれたとはいえないが、初期の目的である複数航路型管制方式の効果の把握とその検討のための手段として本システムの実効性の確認はなし得たものと思う。

本研究でまだ十分に分析しえなかった問題を列挙すると、管制の情報変換量、あるいは最適な経路の構成法、また、滑走路が 2 本の場合についての検討等であり、こ

れらについては今後さらに研究を進めたいと思っている。

最後に、本モデル作成に当り、プログラミング、図面作成等に協力していただいた、KK 日建設 野村康彦君、京都大学工学部学生 杉原五郎君をはじめとして、京都大学工学部土木計画学研究室の各位に対して感謝の意を表する次第である。

### 参 考 文 献

- 1) Horonjeff, R. : Planning and Design of Airports, McGRAW-Hill, 1962.
- 2) Airborne Instruments Laboratory : Airport Runway and Taxiway Design, Report No. 7601-1, 1960.
- 3) Paul H. Stafford, Martin A. Warskow : Airport Design by Economic Analysis, ASCE No., 1961.
- 4) F.A.A : Airport Capacity, USA, 1963.
- 5) 航空振興財團：国際民間航空条約、第 2、第 6、第 11 および第 14 付属書
- 6) 航空振興財團：PANS-OPS 航空業務方式（運航編）、1967.
- 7) 梶田久春：空港整備の問題点、Airport & Ground Services, No. 3, 1968.
- 8) 米村節郎：ASR, PAR, SSR はこうして運用する、Airport & Ground Services, No. 2, 1967.
- 9) 平井磨哉夫：関西国際空港の建設計画について、Airport Review, No. 11, 1971.
- 10) 上松・山田・宇津木：航空気象学、地人書館、昭 42 年 9 月
- 11) 木村秀政編：航空学辞典、地人書館、昭 46 年 5 月
- 12) 航空振興財團：飛行場概論、昭 45 年 2 月
- 13) 中西俊男：システムシミュレーター、産業図書(株)、昭 44 年 12 月
- 14) Gafarian, A.V., C.J. Ancker, Jr : Mean Value Estimation from Digital Computer Simulation, M.S Vol. 15, 1968.
- 15) Naylor, T.H., Finger, J.M. : Verification of Computer Simulation Models, M.S Vol. 14, No. 2, 1967.
- 16) Richard L, Van Horn : Validation of Simulation Results, M.S Vol. 17, No. 5, 1971.
- 17) Fishman, George S. and Kiviat, P.J. : The Analysis of Simulation-Generated Time Series, M.S Vol. 13, No. 7, 1967.
- 18) 北川：乱数発生のためのサブルーチン KUNIRN について、京都大学大型計算機センター広報、Vol. 3, No. 1, 1970.
- 19) 航空情報：現用日本の航空機、AIREVIEW, No. 227. (1971.11.11・受付)