

ゆとりある空港における離着陸分布と 経済的容量算出の試み *

藤原 啓史 **

竹内 伝史 ***

A physical capacity of aircrafts operation on a runway is discussed usually under the condition of continuously landing and taking-off. But this condition forces aircrafts to wait sometime before landing or taking-off. If it was required to reduce these waiting times, it will influence the capacity of a runway.

In this paper, firstly the time distributions of landing and taking-off were analyzed for major airports in the world. Secondly the simulation model of aircrafts operation on a runway was developed. And using these results, the relation of the capacity of a runway to the level of waiting time was discussed.

1. はじめに

現在のわが国の貧弱な国際空港整備の状況を打破するために、いくつかの国際空港プロジェクトが動きつつある。中部新国際空港構想もその一つで、21世紀にふさわしい、わが国のゲートウェイシステムの一環を担おうとするものである。21世紀にふさわしい空港サービス水準とは一体何か。それは単に大規模な空港をつくることなく、いつでもどこからでも来ることができ、どこへでも行くことができる待ちのない空港というのも、21世紀型サービスの一つの基準たりうるだろう。

待ちのない空港とは、24時間運用可能で常に滑走路が空いていることが必要である。従来、滑走路の容量は航空機が離着陸も待っている状態で滑走路が空けば直ちに次が入ってくる状況を基に算出されて

きた(物理的容量という)。しかし、実際は航空機の到着はランダムであり、かつ時刻変動が著しい。したがって、航空機が路線側の事情により自由に着陸・離陸する時、待ちの発生を全く零にするのは難しい。そして、許容される総待ち時間によって滑走路の処理可能離着陸回数は変わってくる(経済的容量)。しかも、それが時間単位に算出されるのであれば、1日の容量の算出には離着陸の時刻変動に関する分析が必要である。

そこで本研究では、世界の大規模空港(33空港)における離着陸時刻分布の現況を時刻表から分析し、24時間運用で需要が潜在しない場合の時刻分布を推測する方法を考えるとともに、滑走路離着陸シミュレーションを用いて、許容待ち時間と処理可能離着陸回数の関係を分析した。この両者の結果を合わせることによって、一定のサービス(待ち時間)水準下における仮想路の年間処理可能回数を求めることができる。

* キーワード: 空港、滑走路、経済的容量、離着陸時刻分布

** 正会員 国際開発コンサルタンツ

*** 正会員 中部大学工学部土木工学科教授

2. 対象空港の選択とその利用実態

本研究においては離着陸時刻分布の特性を調べるために、世界の空港の中から空港を抽出して分析していくのであるが、その抽出にあたっては夜間空港規制のあまりみられない空港、できれば24時間開港している空港を抽出したいということであった。しかし24時間開港しているかどうかについては多くの空港についてははっきりとしなかった。そこで世界的にも知れ渡っており国際的に利用されている空港も考慮した。また地域的にもあまり偏らないように空港先進国に行き渡るように考慮した。さらに日本の空港も成田と名古屋を取上げてとりあげてみた。以上より抽出された空港は、表1に示すように北米16空港、ヨーロッパ10空港、アジア・オセアニア7空港となった。なおスリーレーターコードとは国、都市、空港等をアルファベット3文字で表す略記号のことであり、本研究ではデータのもととなった資料にそったコードを使用しており、おそらく世界共通の表記方法であろう。本研究では今後対象となる33空港についてはこのスリーレーターコードを用いて著すこととする。その対象空港の位置は後記の図で確認されたい。またその利用実態として1987年ICA0統計による年間発着回数、年間旅客数、年間貨物取扱量を調べ表示した。なおANCとMEMのものについてはデータを入手することができなかった。

さらに本研究では空港がどのくらい混雑しているのかを知ることが重要であるが、これらの利用実態だけでは混雑度を判断するのは不可能である。そこでFAAの離着陸処理基準をもとに、滑走路の配置から

表1 対象33空港とその利用実態

国名	都市名	空港名	スリーレーターコード	年間発着回数 (千回)	年間旅客数 (千人)	年間貨物取扱量 (千ト)
アメリカ	アタラント	アタラント	ANC	573.5	47,649	363.9
アメリカ	アトランタ	ハーツフィールド	ATL	373.1	23,283	284.6
アメリカ	ボストン	ローガン	BOS	695.9	56,281	678.9
アメリカ	シカゴ	オヘア	ORD	562.0	41,875	325.4
アメリカ	ダラス・フォートワース	ダラス・フォートワース	DFW	566.3	44,873	909.9
アメリカ	ロスアンゼルス	ロスアンゼルス	LAX	566.3	44,873	909.9
アメリカ	メンフィス	メンフィス	MEM	302.1	24,925	506.4
アメリカ	マイアミ	マイアミ	MIA	130.1	9,977	23.4
アメリカ	ニューオーリンズ	ニューオーリンズ	MSY	259.5	30,192	1,072.7
アメリカ	ニューヨーク	J. F. ケネディ	JFK	308.4	24,225	49.1
アメリカ	サンフランシスコ	サンフランシスコ	SFO	456.9	29,768	432.2
アメリカ	シアトル	シアトルタコマ	SEA	274.9	14,445	133.3
カナダ	モントリオール	ミラベ	YMX	23.8	1,968	80.5
カナダ	トロント	ピアソン	YYZ	248.7	18,303	241.5
カナダ	バンクーバー	バンクーバー	YVR	146.3	7,323	90.3
オランダ	アムステルダム	スキポール	AMS	174.9	10,286	513.3
デンマーク	コペンハーゲン	カストラップ	CPH	188.1	10,754	147.5
ドイツ	フランクフルト	アムマイン	FRA	235.2	22,321	348.1
スイス	チューリッヒ	コアントラン	GVA	81.3	4,925	47.9
スイス	チューリッヒ	クロテン	ZRH	136.8	10,114	229.5
イギリス	ロンドン	ヒースロー	LHR	308.0	34,743	674.2
イギリス	ロンドン	ガトウィック	LGW	173.8	19,360	191.1
フランス	パリ	シャルル・ド・ゴール	CDG	155.0	16,944	546.3
イタリア	ローマ	フィウミ	FCO	144.0	13,838	192.3
ソビエト	モスクワ	シェレメチエボ	SVO	90.2	7,354	118.0
オーストラリア	シドニー	キングスフォード	SYD	155.1	10,537	192.8
シンガポール	シンガポール	チャンギ	SIN	79.0	12,589	511.5
イギリス	香港	香港	HKG	74.1	12,687	810.6
韓国	台北	中正	TPE	37.0	8,039	345.1
韓国	ソウル	金浦	SEL	61.6	8,680	420.4
日本	成田	成田	NRT	94.1	15,047	1,061.7
日本	名古屋	名古屋	NGO	38.8	3,614	24.5

各空港の年間離着陸可能回数を求め、それで年間発着回数を割ることで、混雑度をみる混雑率を求めた。また各空港の年間離着陸可能回数を単一滑走路の年間離着陸可能回数で割ることで単一滑走路何本分の処理能力があるのかという滑走路換算本数を求めた。それらを表2に示した。これを見ると、アメリカの空港は処理能力は多いが混雑もしており、アジアではその逆の傾向がみられる。

3. 離着陸データベースと集計

(1) データファイルについて

本研究では離着陸の実際の時刻分布を調べるために、まず離陸空港別にまとめられたABC時刻表(1989.5)と着陸空港別にまとめられたOAC時刻表(1990.6)を用い、火曜日と土曜日について相手側の空港名と国名、離着陸の現地時刻、便名、機種、ストップオーバーの数をデータファイル化した。

(2) 離着陸時刻分布の集計

まず各空港における1日の離陸便と着陸便を火曜日と土曜日について集計したものが表3である。ここで全体としては離着陸時刻の分布にどのような傾向があるのかを、各空港の1時間毎の便数を調べ、それを各空港合計してみていく。まず土曜日と火曜日について離陸便と着陸便との傾向をみたものが図1である。これより離陸便と着陸便が山と谷の裏返し

表2 対象空港の物理的容量と混雑率

	年間 離着陸 可能回数 (千回)	混雑率	滑走路 換算本数
ANC	195.0		1.77
ATL	284.9	2.013	2.59
BOS	195.0	1.913	1.77
ORD	330.0	2.021	3.00
DFW	405.0	1.363	3.68
LAX	284.9	2.104	2.59
MEM	202.5		1.84
MIA	240.0	1.259	2.18
MSY	127.5	1.020	1.16
JFK	258.8	1.003	2.35
LGA	127.5	2.576	1.16
SFO	255.0	1.788	2.32
SEA	185.0	1.486	1.68
YMX	135.0	0.219	1.23
YYZ	240.0	1.036	2.18
YVR	127.5	1.163	1.16
AMS	258.8	0.676	2.35
CPH	195.0	0.862	1.77
FRA	202.5	1.280	1.84
GVA	110.0	0.739	1.00
ZRH	195.0	0.862	1.77
LHR	240.0	1.283	2.18
LGW	110.0	1.580	1.00
CDG	240.0	0.646	2.18
FCO	240.0	0.600	2.18
SVO	185.0	0.488	1.68
SYD	127.5	1.216	1.16
SIN	240.0	0.329	2.18
HKG	110.0	0.674	1.00
TPE	305.0	0.121	2.77
SEL	185.0	0.353	1.68
NRT	110.0	0.855	1.00
NGO	110.0	0.334	1.00
平均		1.086	
標準 偏差		0.613	

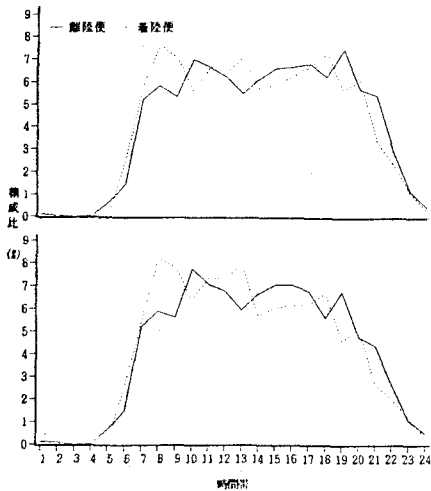


図 1 曜日別離着陸時刻分布

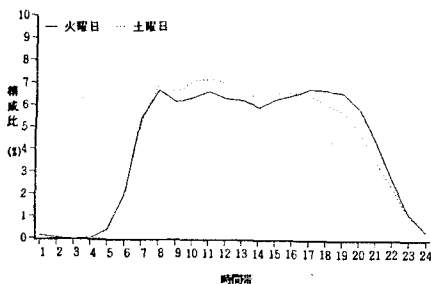


図 2 離着陸合計した離着陸時刻分布

の関係があることがわかる。また離陸便は6時より急激に立ち上がっており、朝の定時的要求が強いといえる。この離陸便と着陸便を合計したものが図2である。これより7時から21時位までに離着陸需要がみられ、24時から6時まではほとんど離着陸需要がない事がわかる。なお火曜日と土曜日については土曜日のほうが午前中から午後にかけて需要が多く、夕方から少なくなる傾向がみられ、検定の結果、差があることもわかった。さらに離着陸時刻は1時間の中でもどのあたりに集まっているのかを調べた。そのため1時間を5分毎に分け(以下これを5分間集中タイプと呼ぶ)。その離着陸分布をみたものが図3である。これより航空機の離着陸需要はクォーターごとに多くなっていることがいえる。またここでも離陸便のほうが定時的要求が強いことがわかる。

(3) 国内便率、オーシャンフライト率の集計

全便数に対する国内のみのフライトの割合を国内率とし、それに対して大陸の間でのフライトの割合をオーシャンフライト率として集計を行った。これによりその空港には長距離便が多いのか、それとも

表 3 対象空港の曜日別離着陸数

	離陸便		着陸便	
	火曜	土曜	火曜	土曜
ANC	182	132	178	159
ATL	728	691	1023	957
BOS	553	361	615	435
ORD	1082	970	1116	1001
DFW	924	858	957	909
LAX	789	684	876	772
MEM	262	224	269	241
MIA	354	372	560	551
MSY	118	104	154	130
JFK	357	365	421	442
LCA	461	360	507	402
SFO	555	468	563	489
SEA	415	340	530	453
YMX	15	20	21	28
YYZ	412	242	430	279
YVR	306	220	290	220
AMS	245	173	272	187
CPH	155	176	286	195
FRA	351	304	366	339
CNA	121	96	142	120
ZRH	204	181	226	209
LHR	474	388	517	446
LOW	169	131	191	153
CDC	237	184	349	232
SFO	211	193	232	217
SVO	62	71	111	115
SYD	238	183	224	167
SIN	110	104	116	115
HKG	98	108	98	112
TPE	60	63	59	62
SEL	103	105	131	130
NRT	107	120	127	132
NGO	45	46	49	52
合計	10652	9039	12005	10451

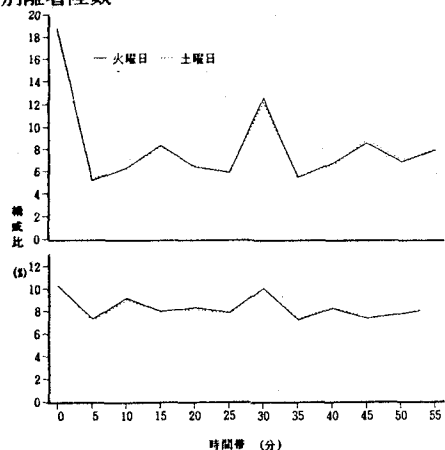


図 3 5分間集中タイプ

近距離便が多いのかがわかる。国内率のヒストグラムが図4である。これより国内率は極端に多いか、または極端に少ないかのどちらかに分かれることがわかる。これはその国の地理的大きさによるものが大きく関係しているだろう。特にアメリカの空港が極めて高い値を示しており、アジアは少ないところが多い。また火曜日のほうが土曜日より全体的には高い値を示しており、ウィークディのほうが国内でのフライトの需要が多いことがわかる。

オーシャンフライト率のヒストグラムが図5である。アメリカにおいてはJFK、MIAが、カナダにおいてはYMXが、アジアにおいてはNRTが海外にむけての玄関口となり、ヨーロッパにおいてはまんべんなくそれなりに海外のフライトがあることがわかった。また火曜日と土曜日では土曜日の値が多くなっており、これより週末は海外へのフライトの需要が多いといえる。

(4) ピーク率、深夜率の集計

ピーク率とは1日の便数に対する1時間の離着陸便数が最も多い時間における便数の割合のことである。そのヒストグラムは図6に示した。その値の分布は7~12%に集中する。そしてアメリカの空港はピーク率が低いものが、アジアは高いものが多くなっている。また火曜日と土曜日では火曜日のほうがピーク率が低くなっている。次に深夜率であるが本研究ではこの深夜率については深夜率、深夜率、夜間便数の3種類について求めている。以下にそれぞれの説

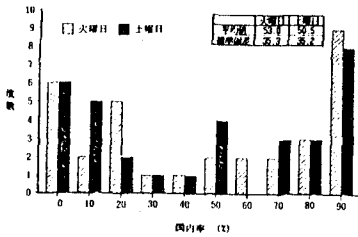


図 4 国内率のヒストグラム

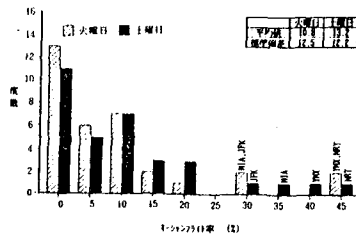


図 5 オーシャンフライト率のヒストグラム

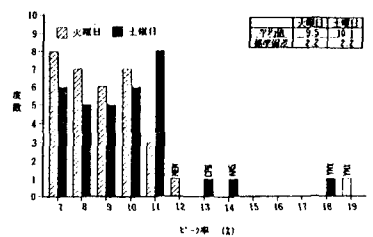


図 6 ピーク率のヒストグラム

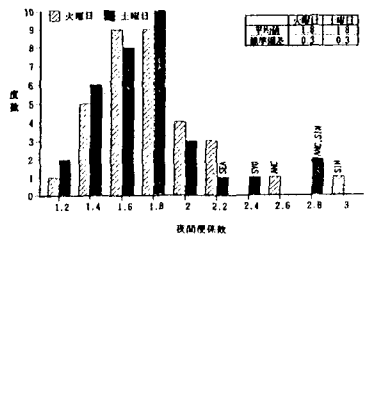
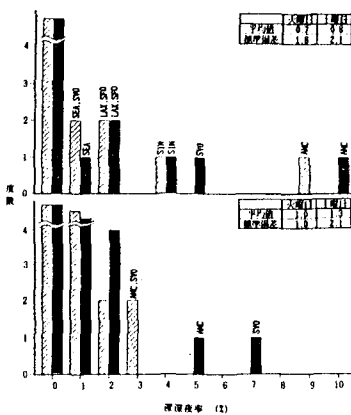
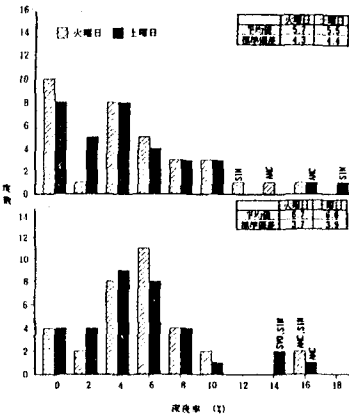


図 7 夜間便に関するヒストグラム

明を行う。

・深夜率：前述の離着陸時刻分布の中でほとんど離着陸の見られなかった24時～6時までの便数の割合である。

・深夜率：WECPNL (Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level：荷重等価平均感覚騒音レベル)において騒音の重みが昼間の1に対して10とみなす22時～7時の便数の割合である。

・夜間便係数：1日の便数でWECPNLに用いた換算係数(7時～19時, 19時～22時, 22時～7時の係数がそれぞれ1, 3, 10)を割った値である。

それぞれヒストグラムは図7に示した。この深夜に関する値はANC, SVO, SINの3空港の値が突出して大きくなっている。また北アメリカは全体的に夜間の離着陸が他地域の空港より多く(特にDFW, LAX, SEA)、逆にアジアは低い傾向がある。

4. 離着陸分布の分析

(1) ピーク率、深夜率の分析

ここではこれまで求めたものの中から、離着陸分布特性を現すらわす指標としてピーク率、深夜率、深夜率、夜間便係数を取上げ、それを目的変数として火曜日について相関分析を行った。説明変数としては以下のものを考える。

1) 国内率：集計で求めた国内率の離陸便と着陸便の構成比を平均したもの(%)

2) オーシャンフライト率：集計で求めたオーシャンフライト率の離陸便と着陸便の構成比を平均したもの

の(%)

3) 平均フライト時間：各空港ごとに全フライト時間を平均したもの

4) 滑走路換算本数：対象空港の算出した年間処理可能回数を単一滑走路の年間離着陸可能回数で割ったもの(本)

5) 混雑率：年間処理可能回数を年間発着便数で割ったもの。

6) 年間発着便数：1987年ICAO統計によるもの(千便)

7) 年間旅客数：1987年ICAO統計によるもの(千人)

8) 年間貨物取扱量：1987年ICAO統計(千トン)

これらの目的変数と説明変数それぞれの単相関係数を求めたものが表4である。なお混雑率、年間発着便数、年間旅客数、年間貨物取扱量についてはANCとMEMのデータがないので、その2空港を除いて31空港で計算している。これを見るとどれもあまり強い相関が見られず、最も相関が高いものでもピーク率と混雑率との0.635である。この値を始めこの表の中ではピーク率に相関の高いものが多くみられる。

表 4 目的変数と説明変数の単相関係数

変数	説明変数	目的変数			
		ピーク率	深夜率	夜間便係数	滑走路換算本数
国内率	国内率	0.585	0.245	0.235	0.192
オーシャンフライト率	オーシャンフライト率	0.464	0.118	0.187	0.203
平均フライト時間	平均フライト時間	0.343	0.060	0.060	0.000
滑走路換算本数	滑走路換算本数	0.347	0.173	0.225	0.233
混雑率	混雑率	0.635	0.173	0.273	0.234
年間発着便数	年間発着便数	0.597	0.308	0.325	0.313
年間旅客数	年間旅客数	0.571	0.230	0.060	0.272
年間貨物取扱量	年間貨物取扱量	0.173	0.149	0.044	0.094

そこでピーク率について変数減少法を用いて重相関分析をおこなったところ、重相関係数は、説明変数が3つ以上になるとほとんど変わらなくなるので、そのときの式をみてみると

$$Y = 0.125X_2 - 1.20X_3 - 0.00307X_4 + 10.5$$

Y: ピーク率, X_2 : オーシャンフライト率

X_3 : 混雑率, X_4 : 年間貨物取扱量

となり、オーシャンフライト率が増加するとピーク率は増加し、混雑率、年間貨物取扱量が増加すると、ピーク率は減少する結果となった。

4. シミュレーションモデルによる1時間の離着陸便数と待ち損失との関係

(1) シミュレーションモデル

ここで離着陸の待ち時間を算出するシミュレーションモデルについて考えてみる。基本的な考え方としては「土木学会編 新体系土木工学 69 空港」より抜粋した図8に示す仮想タイムスケジュールを用いた。本研究のシミュレーションモデルにおける根本的な制約条件は下記に記す。

- 1) 滑走路は1本とする
- 2) 滑走路の両端とも制約なく進入方向が設定しうると仮定し、風向きにより滑走路処理能力は影響を受けないとする
- 3) 待ちが生じている場合は交互離着陸とする。
- 4) 航空機発着の発生回数は一般にはポアソン分布とされているので、離陸機と着陸機それぞれの発生間隔は指数分布に準ずるものとする。

初期設定条件としては 滑走路占有時間(秒)、着陸機の進入速度(m/秒)、ウェークタービュランスのための間隔(機種は考慮せず一律) (m)、離陸クリアランスのための着陸機リミット(m)、着陸クリアランスリミット(m)、離陸機と着陸機の比率を最初に入力するものとする。

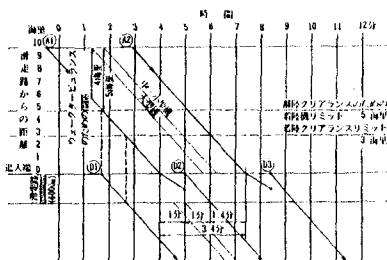


図8 仮想タイムスケジュール

(2) 標準集中タイプでの演算

まず5分間集中タイプに全体的に平均的なタイプを考えることにした。その分布型は図9である。これをここではAタイプということにする。シミュレーションを行った結果、平均便数が3便から41便までの2便おきにおける待ち損失を求めた。その離着陸便数

と待ち損失との関係について図10に示した。離陸と着陸を合計したものについて滑らかな曲線でつないでみると、平均便数31便のあたりで曲線の立ち上がり方が急になっているようである。この時の待ち損失時間は約9000秒であり、空港において常に2.5機の待ちがあるということである。

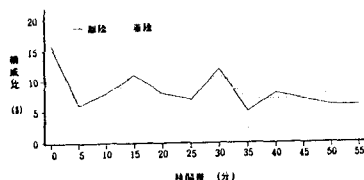


図9 Aタイプの分布型

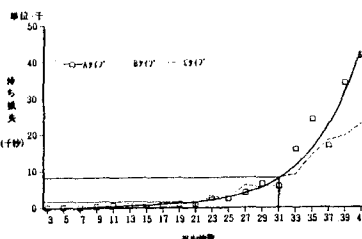


図10 平均便数と待ち損失との関係

(3) 日交通容量への換算

この1時間当たりの平均便数31便について、WECPLの深夜を除いた15時間を空港の利用時間として年間の離着陸便数を求める方法が考えられる。また、急激ではないが待ち損失が増え始めるのが平均便数21便のあたりであり、これがあまり待ちのない、ゆとりある便数であると考え、「飛行場概論」に記載されている年間離着陸処理能力 $Y = 365kx$ (K : 1日の全離陸回数とピーク時の離着陸回数の比, x : 1時間当たりの最大離着陸可能回数)の式にあてはめる方法が考えられる。

前者の方法での年間離着陸可能回数は

$$31(\text{便}) \times 15(\text{時間}) \times 365(\text{日}) = 169,725(\text{便})$$

となり、FAAの単一滑走路における年間容量の上限140,000便よりやや大きくなるがこれに対応するものといえるだろう。さらに一般に空港計画において単一滑走路における年間離着陸可能回数は170,000便と言われており、この値と極めて近くなる。

また後者の方法では k はピーク率の集計の火曜日の平均値9.5%を用い

$$K = 100/9.5 = 10.5, x = 21 \text{より}$$

$$Y = 365 \times 10.5 \times 21 = 80,482(\text{便})$$

となり、これはFAAの単一滑走路における年間容量の下限である80,000便に極めて近い値となる。一般に余裕を持って空港を使用する場合の1時間の離着陸便数は20便位、ピーク時でも30便位だといわれている。本研究において、待ち損失の面からみた場合においても従来いわれていた空港の容量が妥当なものであるといえるだろう。

この31便と21便という値について、より細かく求めた場合、ピーク時の離着陸便数は31.6便、一方強いと言えば特に待ちの無い自由な運行のできる便数の上限は21.0便であることがわかった。

また33空港それぞれについて5分間集中タイプの構成比の分布型の中で典型と思われる分布型について待ち損失を求めていくこととする。その5分毎の離着陸の分布は図11である。Bタイプは前半に離陸便が多く後半に着陸便が多くなるタイプであり代表的な空港はATL, ORD, DFWなどである。Cタイプは5分毎に離陸便と着陸便が交互に多くなるタイプであり、代表的な空港としてはここまで極端な分布にはならないが、MSY, MEM, YVR, などである。このBタイプ、Cタイプの離着陸タイプにおける平均便数と待ち損失の関係も図10に示した。両タイプとも急激に立ち上がるのが31便あたりであり、やや増え始めるのが21便あたりと見てよく、これはAタイプと同じ傾向である。それ以上になって各タイプにばらつきがみられるようになる。これは離着陸便数がある程度増大していくと離着陸の発生間隔の少しの違いで待ち損失の量は大きく変化するためであって、このようになったと思われる。

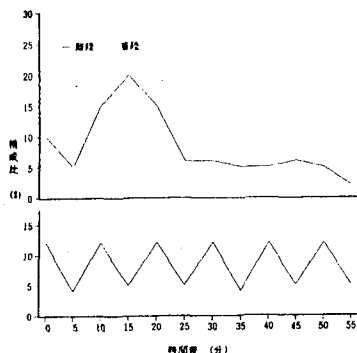


図 11 Bタイプ、Cタイプの分布型

これまで行ったのは離着陸便の比率が5:5のものであるが、ここではそれに対しての比率が3:7と7:3のものについての待ち損失も算出して、離陸便と着陸便の比率の違いによってどのような差が見られるのか、その比較分析も行った。離着陸について各比率のものを重ね合わせたものが図12である。これより着陸便の多いものが待ち損失が多く、その立ち上がりも早くからみられる。次いで離陸便の多いもの、離陸便と着陸便の比率が等しいものの順に待ち損失の立ち上がりが遅くなる。やはり5:5が最も効率が良く、着陸便が多いものが待ち損失が一番多くなるという結果になった。

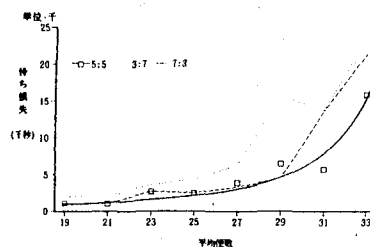


図 12 平均便数と待ち損失（離陸便と着陸便の比率による比較）

5. まとめ

空港容量はよく日交通容量によってあらわされる。本研究で求めた1時間当たりの平均離着陸便数が31便の場合は $169,725/365=465$ 便 21便の場合は $80,482/365=220$ 便となる。したがってゆとりのある空港における滑走路1本当たりの日交通容量は220便くらいと思われる。もちろんこのときに全く待ちが無いわけではないが、急に待ちが増える便数がこのあたりであるということである。本来はこの場合の待ちによる損失を金銭的に求めたいのであるが、そのデータはわからなかったので、待ち時間を求めた。今後は待ち時間がどの位になるかを、経済的、心理的ロスを比べながらどの位の容量とみていかなくてはならないのか、あるいはどの位離着陸便数が増えてきたら滑走路を増やさなくてはならないのかを考えていく必要がある。もちろん滑走路だけでなくターミナルも考慮していく必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会編 新体系土木 69 空港
- 2) 飛行場概論 1988.4 航空ニュース社