

空港容量について

林 光夫・横田 藤太郎

1. はじめに

航空機の運航に係る空港の基本施設は滑走路、誘導路、エプロン(ゲート)に大別され、これらの施設の規模は航空機の大きさ(種類)、路線距離、離着陸回数および離着陸の集中率等から決定される。

空港容量は上記各基本施設の容量のうち最小のもので決定されるので、空港は各施設の容量がバランスのとれた形で計画されることが必要である。そのためには各施設の容量が数量的に把握されていなければならない。

米国連邦航空局 (U. S. FAA; FEDERAL AVIA-

TION ADMINISTRATION) は1960年以來、空港計画のための滑走路容量の算出方法の開発を進めてきており、1966年に実用的な処理能力、すなわち実用年間処理能力 (PANCAP; PRACTICAL ANNUAL CAPACITY) という一定の遅延許容限度内で取り扱うことのできる運航回数の算出方法を発表した [1]。この算出方法は約10年間にわたり使用されてきたが、現在ではこの考え方により算出された PANCAP を越える交通量を処理している空港が図1のようにあり、PANCAP という考え方を見直す必要が生じた。また、近年大型機が

はやし みつお, よこた とうたろう ㈱日本空港コンサルタンツ 社会経済室

ひとくちコメント

この事例は空港の基本施設たる滑走路、誘導路、エプロン等の最適規模を求め、空港のキャパシティーを決定するモデルの解説である。モデルの基本は FAA (米国連邦航空局) によって開発されたものであるが、林らによってわが国の空港に適用すべく改訂が行われた。モデルは、

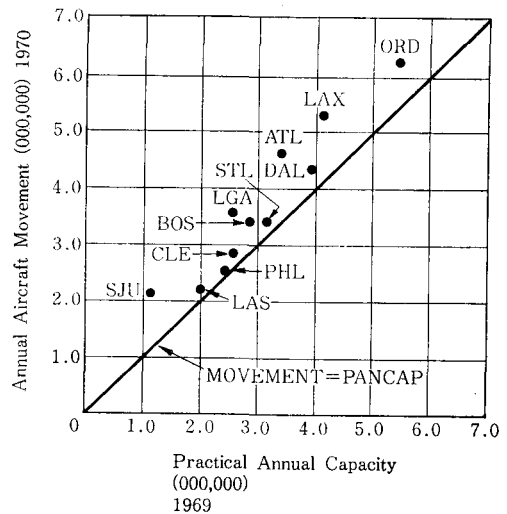
①滑走路容量モデル

②年間遅延モデル

に分けられ、それぞれが FORTRAN IV でステップ数4500~5700の大型シミュレーションである。このモデルはすでに実用に適用され、関西新空港の規模決定に活用されている。

今後、関西新空港、新東京国際空港、羽田空港等の新設・拡張、地方空港の整備に当って、空港の適正規模を求めることは、財政上からも必要であり、そのためこのモデルはきわめて有効である。

(早稲田大学 太田正樹)



ORD = Chicago O'Hare
 LAX = Los Angeles Int'l.
 ATL = Atlanta Hartsfield Int'l.
 DAL = Dallas Love Field
 STL = St. Louis, Lambert
 LGA = N.Y. LaGuardia
 BOS = Boston Logan Int'l.
 CLE = Cleveland Hopkins Int'l.
 PHL = Philadelphia Int'l.
 LAS = Las Vegas, McCarron Int'l.
 SJU = San Juan Int'l.

図1 PANCAPと年間交通量 [4]

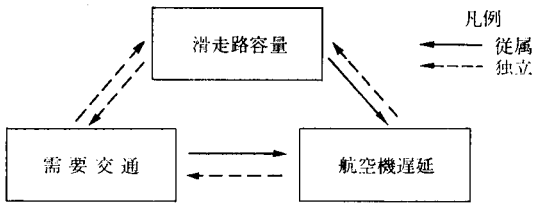


図2 容量と遅延の関係

多くなり、これらの大型機による後方乱気流が問題となり、これに関する管制方式基準が設定されたため1972年6月からその見直し作業を行ない、容量や遅延の定義およびその算出方法等について全面的な改訂が行なわれた[2].

そこで本稿では、容量や遅延の定義および算出方法についてFAAの基本的考え方を紹介する。

2. 容量および遅延

FAAは滑走路容量を「滑走路が1時間に処理できる最大運航回数」と定義している。

すなわち、この滑走路容量は図2に示すように、需要交通の大きさや変動そして遅延とは独立した限界容量で

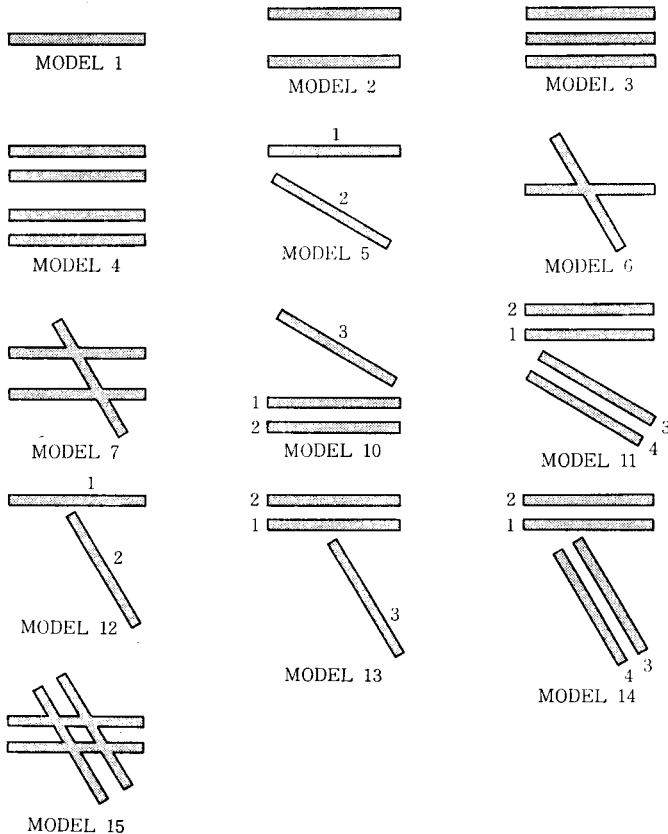


図3 滑走路配置

あり、連続的な需要交通があるという条件のもとで算出される。

航空機遅延は「実際の所要時間と他の航空機の影響を受けずに運航した場合の標準所要時間との差」と定義されており、到着機遅延、出発待ち遅延、誘導路遅延、滑走路横断遅延、ゲート遅延などがある。この滑走路遅延は滑走路容量と需要交通によって決まり、滑走路容量と等しい需要交通がある場合、その需要交通の発生状況によって異なるが、実際には1機当たり2~4分またはそれ以上の遅延を生ずるとしている。

3. 滑走路容量モデル (BCM)

FAAが開発した滑走路容量を算出するためのバッチ計算プログラムの概要を説明する。

このプログラムは、使用言語 FORTRAN IV、モジュール数31、総ステップ数約4300、必要記憶容量210KBの規模をもち、図3に示す13の滑走路配置の容量を計算することができる。

3-1 入力パラメーター

このバッチ計算プログラムは、以下に示すパラメーターを入力することによって、滑走路容量が計算される。

- ① 滑走路使用形態
- ② 航空機ミックス
- ③ 到着機の比率
- ④ 航空機の運航状態 (VMC, IMC, PV C)
- ⑤ 脱出誘導路の種類と位置
- ⑥ 航空機間隔
- ⑦ 航空機の運航性能

①の滑走路使用形態は、図3の各滑走路配置においてどの滑走路を着陸専用、離陸専用または離着陸混合で使用するか、または平行滑走路の場合、滑走路中心線間隔はどのくらい離れているか、交差滑走路の場合どこで交差しているか等を考慮し、これらに適合したモデルを選択する。

②の航空機ミックスは、表1のように分類されている航空機クラスの比率を入力する。(表1)

③の到着機の比率は通常50%である。到着機の比率を入力しないと同一滑走路を離着陸混合で使用する場合、着陸機優先で滑走路容量は計算されるため、出発機の容量が不足することとなる。そこで、到着機の比率を入力

表 1 航空機の種類

Aircraft Classification	Types of Aircraft
Class A	Small single-engine aircraft weighing 12,500 lbs. or less (e.g., PA18, PA23, C180, C207)
Class B	Small twin-engine aircraft weighing 12,500 lbs. or less and Lear jets (e.g., BE 31, BE 55, BE 80, BE99, C310, C402, LR25)
Class C	Large aircraft weighing more than 12,500 lbs. and up to 300,000 lbs. (e.g., CV 34, CV 58, CV 88, CV 99, DC4, DC6, DC7, L188, L49, DC8-10, 20 series, DC9, B737, B727, B720, B707-120, BA11, S210)
Class D	Heavy aircraft weighing more than 300,000 lbs. (e.g., L1011; DC8-30, 40, 50, 60 series; DC10; B 707-300series; B747; VC10; A300; Concorde; IL62)

することによって、到着機がこの比率以上に多くなったら到着機の流れを一時止めて離陸優先で滑走路を使用することとなる。

④の航空機の運航状態は気象条件によって決定される。すなわち、このモデルにおいては視程 3 NM, 雲高 1000 FT 以上を有視界気象状態 (VMC) とし、それ以外を計器気象状態 (IMC) としている。また、一部の滑走路配置においては空港の最低気象条件に近い状態を低視程状態 (PVC; POOR VISIBILITY CONDITIONS) として分類している。

そして、VMCにおいては視認進入を、IMCにおいて

は目視間隔が設定された計器飛行を、PVC においては最も厳しい運航条件をもとに滑走路容量が計算される。

⑤の脱出誘導路には直角誘導路と高速脱出誘導路の 2 種類があり、それぞれ滑走路末端からの距離、航空機クラスおよび滑走路の表面状態 (DRY または WET) によって着陸機の滑走路占有時間が異なる。

⑥の航空機間隔には、出発機間隔、到着機間隔等があり、大型機 (航空機クラス D) の後方乱気流を考慮する必要がある。また、このモデルでは表 2 に示すようにレーダー管制を基本とするが、将来の管制システムに対応した滑走路容量も算出することができる。(表 2)

表 2 将来の管制システム

DESCRIPTION OF FUTURE ATC SYSTEMS (JULY 1975)	
P : (1975)	PRESENT ATC WITH ARTS III
F1 : (1977-1982)	METEOROLOGICAL ADVISORY SYSTEM
F2 : (1978-1983)	WAKE VORTEX PREDICTIVE SYSTEM BASIC METERING AND SPACING
G3 : (1980-1990)	WAKE VORTEX PREDICTIVE SYSTEM BASIC METERING AND SPACING DISCRETE ADDRESS BEACON SYSTEM (DABS) MICROWAVE LANDING SYSTEM (MLS)
H4 : (1981-1990)	WAKE VORTEX PREDICTIVE SYSTEM ADVANCED METERING AND SPACING DISCRETE ADDRESS BEACON SYSTEM (DABS) MICROWAVE LANDING SYSTEM (MLS) REDUCED MISSED APPROACH/DEPARTURE ZONES HIGH SPEED EXITS

滑走路容量の計算に使われる滑走路末端における平均到着機間隔 (AASR) は次式で計算される。

$$AASR(i,j) = \frac{3600 \times DLTAIJ(i,j)}{V(j)} + SIGAA \times FPV + \text{MAX}(0, GAMMA(j) \times (IV(j) - IV(i)))$$

ただし, $DLTAIJ(i,j)$; 最低到着機間隔(NM)
 $V(i)$; 先行機 の速度 (KT)
 $V(j)$; 後続機 の速度 (KT)
 $SIGAA$; 到着機間隔の標準偏差 (SEC)
 FPV ; 最低到着機間隔以下になる確率 (%)
 $GAMMA$; 共通進入径路長 (NM)
 $IV(i) = 1/V(i)$
 $IV(j) = 1/V(j)$

滑走路容量に近い状態で滑走路が運用されている場合の到着機の間隔を FAA が実地に調査した結果, 管制方式基準に示されている到着最低間隔は定期便の場合, $DLTAIJ$ というよりも $AASR$ とみなせる傾向があるとされている。

⑦の航空機の運航性能には滑走路占有時間, 平均進入速度などがあり, それぞれ各航空機ごとに入力する。

3-2 基本算出式

滑走路容量の基本算出式は, 単一滑走路を例にとると次のとおりである。

- 到着機または出発機 のみの場合

$$\text{滑走路容量} = \frac{3600}{ATS} \text{ (機/時)}$$

ただし, ATS ; 到着機または出発機 の平均時間間隔 (秒)

- 離着陸混合の場合 (到着機比率未入力)

$$\text{滑走路容量} = [\text{到着機 のみの滑走路容量}] + [\text{到着機間に離陸可能な出発機々数}]$$

到着機は出発機より優先され, 到着機間に離陸可能とは具体的に次の条件により判断している。

- ①到着機が滑走路に在る場合は離陸滑走できない。
- ②到着機が滑走路末端から特定の距離に近づいた場合または到着機が滑走路末端を通過する前に出発機が滑走路をクリアできない場合には離陸滑走できない。
- ③連続して出発機が離陸する場合は出発機間隔を満足しなければならない。

4. ANNUAL SERVICE VOLUME (ASV)

前述の滑走路容量はいわゆる飽和容量であり, 航空機遅延とは独立し連続的な需要交通量があるという条件のもとで算出されているため非常に大きい値である。したがって, この滑走路容量まで需要交通量を処理できると

して空港計画をすると相当量の航空機遅延が発生することとなるため, 空港計画に使用することは実際のでない。

ここで FAA は空港のサービスレベルという概念を取り入れ, この ASV を算出する計算プログラムを開発した。

この ASV は空港の年間容量の計画尺度であり, 空港のサービスレベル, すなわち年間平均航空機遅延, 需要交通量の時間ピークや日ピーク, さらに低容量時の航空機遅延の影響等を考慮して算出される。

この ASV の基本算出式は次のとおりである。

$$ASV = \frac{C_W \cdot ATD \times 100}{DTD \times H}$$

ただし, C_W ; 加重滑走路容量(機/時)

H ; ピーク時交通量の比率 (%)

ATD ; 年間需要交通量

DTD ; ピーク月の平均日の需要交通量

ここで加重滑走路容量 (C_W) は, 滑走路容量の小さい滑走路使用形態の比率が小さくても航空機遅延に与える影響は大きいとして加重するものであり, 次式で計算される。

$$C_W = \frac{\sum_{i=1}^N C_i \cdot W_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^N W_i \cdot P_i}$$

ただし, P_i ; C_i の年間比率

C_i ; 滑走路容量

W_i ; 加重 (表3)

この ASV と年間需要交通量の比と年間平均航空機遅延の関係は図4のようになる。すなわち, 年間需要交通量がこの ASV に近づくと航空機遅延の年間平均値は交通量の増加に比較して急激に増加しはじめ, 年間需要交通量が ASV に等しくなると1~4分程度の航空機遅延が発生するとしている。したがって, 空港計画においては年間需要交通量をこの ASV 以下に保つ必要があり, さらに, 年間需要交通量が ASV の1/2に達すると航空機遅延によって生ずる費用とそれを低下させるための空港整備費とがバランスするであろうとしている。

表3 加重 W_i

Percent of Maximum Capacity	VFR	Weight W_i IFR Mix Index		
		0-20	21-50	51-300
90-100	1	1	1	1
81-90	5	1	3	5
66-80	15	2	8	15
51-65	20	2	12	20
0-50	25	4	16	25

なお、この ASV は簡略的な計算手法であり、より精度の高い需要交通量と航空機遅延との関係を推定するには後述する年間遅延モデルや遅延シミュレーションモデルを使用する必要がある。

5. 年間遅延モデル (ADM)

この年間遅延モデル (ADM; ANNUAL DELAY MODEL) は、1年365日の各1時間に発生する遅延 (到着機遅延と出発待ち遅延) を計算し、総計する手法である。

5-1 入力パラメーター

この ADM は、以下に示すパラメーターを入力することによって、航空機遅延の年間平均値が計算される。

- ① 交通量分布 (月別, 日別, 時間帯別)
- ② デマンド プファイル ファロクター (DPF)
- ③ 滑走路容量
- ④ 滑走路利用率

①の交通量分布は年間需要交通量とその月別変化、1週間の日別変化、そして1日の時間帯別変化をそれぞれ比率で入力する。

②の DPF は1時間内のピークの15分間に発生する交通量の比率 (%) として定義されており、1時間内の交通量の集中度を表わす指数である。この DPF は通常25から50%の範囲で変化し、DPF が25%の場合1時間内の交通量分布は平均的に発生し、50%の場合1時間の交通量の50%がある15分間に集中していることを表わしている。DPF は各時間帯ごとに変化するが、このモデルでは混雑時の平均的な値を入力することとしている。

③の滑走路容量は前述の滑走路容量モデルによって計算した値を入力する。

④の滑走路利用率は、③に対応した滑走路使用形態の利用比率を気象データ (視程・雲高, 風向・風速) から計算する。

5-2 計算方法

年間需要交通量とその分布から日交通量, 時間交通量を計算し、この時間交通量と滑走路容量との比 (DELAY FACTOR) および DPF から図5および図6を使用して平均航空機遅延を決定し、週, 日, 気象および滑走路使用形態等の組み合わせにしたがって遅延を合計する方法である[3]。

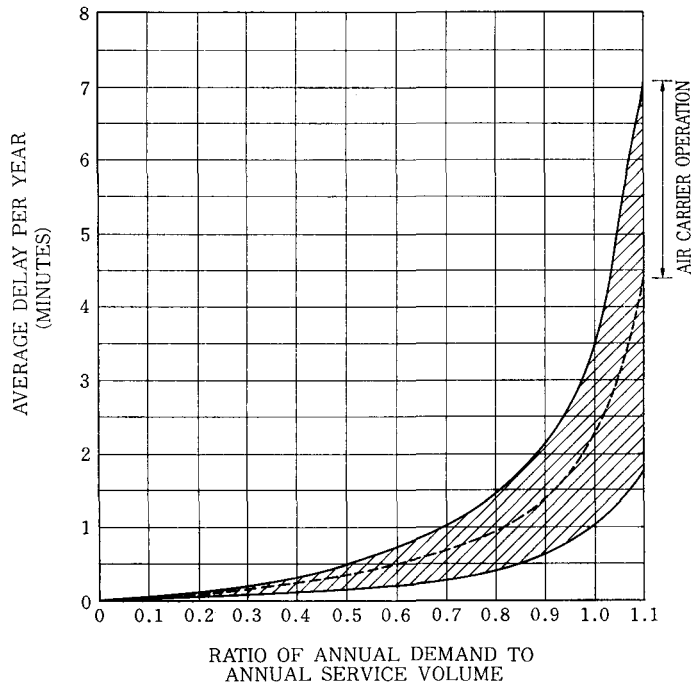


図4 年平均航空機遅延

6. 遅延シミュレーションモデル (DSM)

この遅延シミュレーションモデル (DSM; DELAY SIMULATION MODEL) は FAST TIME CRITICAL EVENT MODEL であり、このプログラムは使用言語 FORTRAN IV, モジュール数36, 総ステップ数約5700, 必要記憶容量430KBの規模である。

前述の BCM や ADM は空港の基本施設を滑走路, 誘導路, エプロン・ゲートに分割し解析しているが、この DSM はこれらの基本施設を分割せずに、空港内の航空機の動きを総合的に解析できる汎用計算プログラムである。

6-1 入力パラメーター

この DSM は以下のパラメーター入力することによってシミュレーションが行なわれる。シミュレーションは同一入力パラメーターにおいて乱数を変化させて最大10回の平均値を求めることができる。

- ① 基本施設の配置
- ② 航空交通管制
- ③ 航空機性能
- ④ スケジュール・データ

①の基本施設の配置は滑走路, 誘導路, エプロン・ゲートなどの各施設をリンクで結びネットワークを作る。図7にその一例を示す。

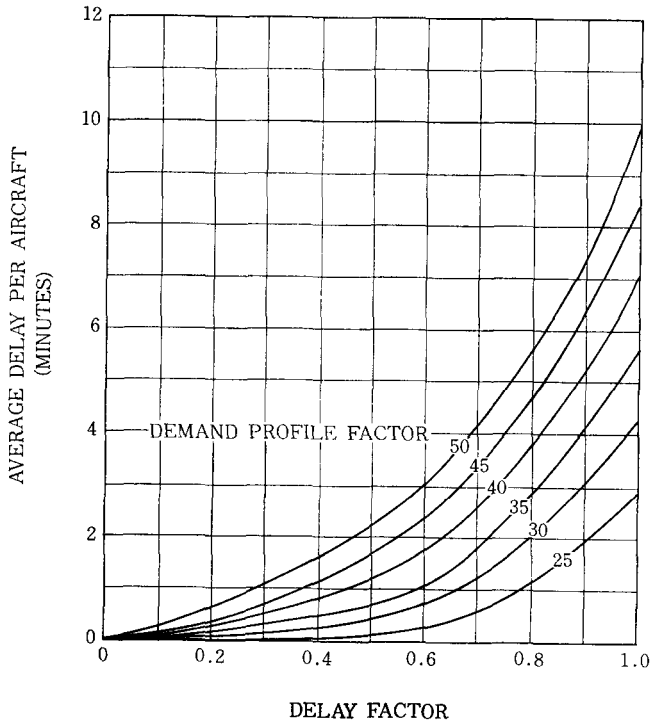


図 5 平均航空機遅延

②の航空交通管制は進入方式，管制方式，管制間隔*，航空機の地上の動線計画からなる。

(特に大型空港のように複数の動線が考えられる場合その計画は重要となる。)

③の航空機性能は進入速度*，地上走行速度，滑走路占有時間*，脱出誘導路の利用比率*，ゲートサービス時間*等である。

④のスケジュール・データは到着予定時刻，出発予定時刻，使用ゲート，使用滑走路を各航空機ごとに想定する。

なお，これらの入力パラメーターのうち*印を付したものはモンテカルロサンプリング法によって各航空機ごとに乱数によって決定される。

このようにDSMは滑走路の配置や運用形態は任意に設定できるが，表4に示す制約がある。

6-2 航空機の動き

このDSMにおける航空機の主な動きを示したのが図8である。

このモデルでは航空機を計算機内部の時計にしたがって順次移動させ，それぞれの航空機が実際に通過した時刻と他機の影響を受けない場

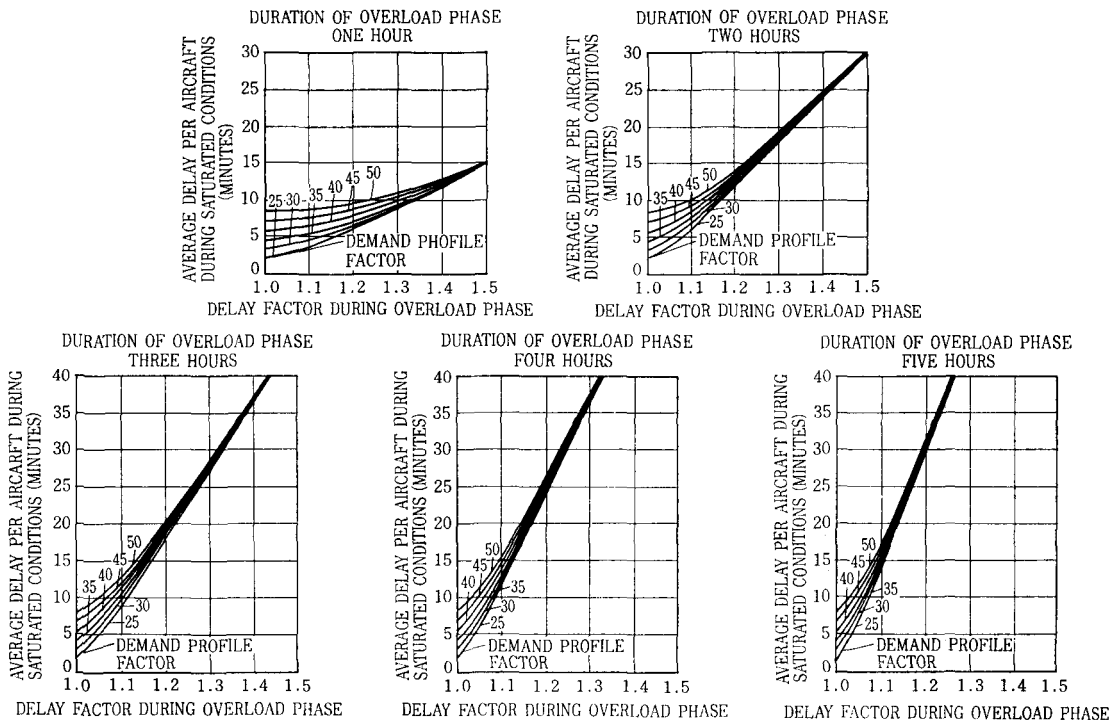


図 6 平均航空機遅延 (需要交通が滑走路容量以上の場合)

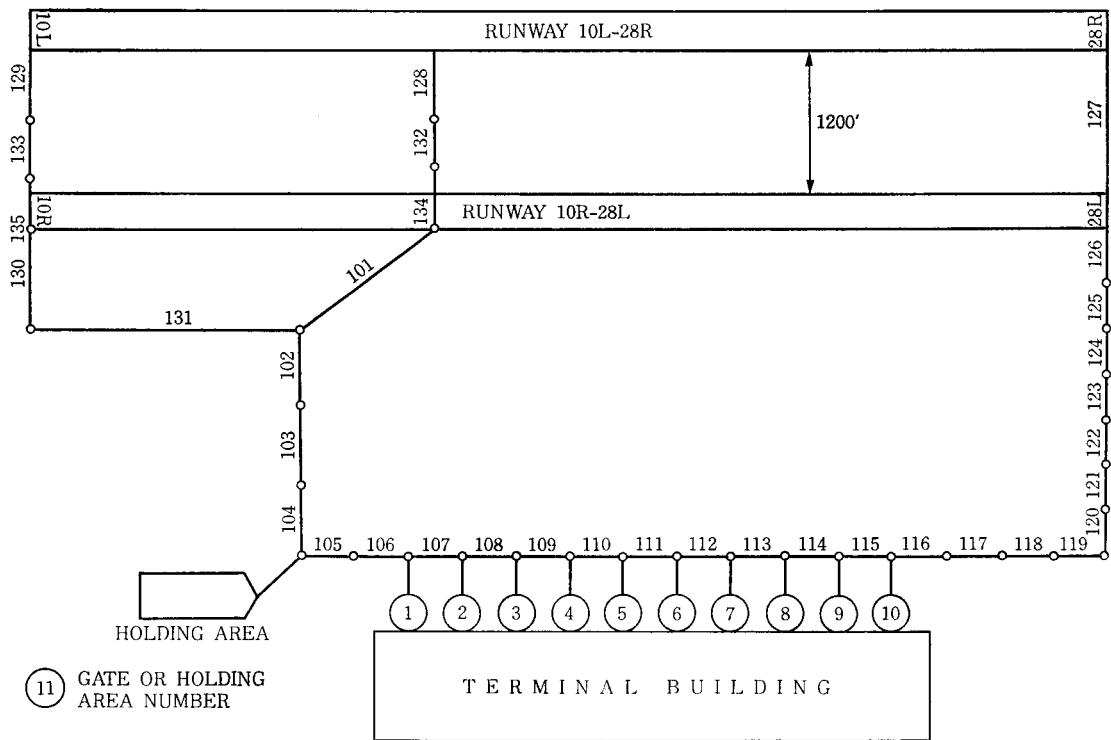


図 7 基本施設の配置の例

表 4 制約事項

項目	最大
滑走路の本数	4
航空機の分類	4
航空会社の数	20
シミュレーション時間	24
リンク数	599
動線の数	1400
一航空会社のゲート数	20
滑走路横断リンク数	10
脱出誘導路の数	200

合の予定の通過時刻との差を航空機遅延としている。

航空機の動きを到着機についてみると、到着予定時刻になると航空機はアウトマーカを通過することとなるが、最終進入経路上で先行到着機と十分な管制間隔があるかどうかチェックし、もし十分な管制間隔がない場合には後続機は予定時刻より遅れて着陸することとなり、ここで遅延が発生する。これは滑走路容量に係る遅延であるので滑走路遅延と称している。滑走路に着陸した航空機は脱出誘導路の使用比率の分布に従い滑走路を離脱し、動線計画にもとづいて誘導路をゲートに向かって走行することとなる。この場合、このモデルでは誘導路

を最大使用航空機の大きさで分割したリンクを順次走行することとなるが、このリンク内には1機しか入ることができず、もし他機が占有している場合はその手前のリンクで待たされることとなり遅延が発生する。これを誘導路遅延と称している。

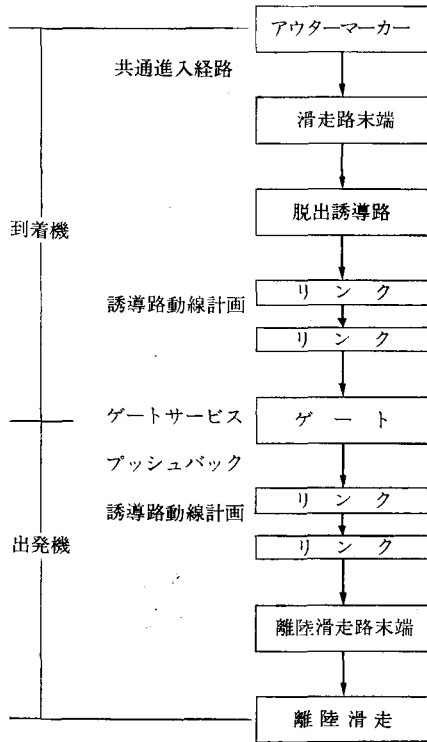
出発機についてみると出発予定時刻になった航空機はゲートからプッシュアウトし、動線計画にもとづいて誘導路を走行し、離陸滑走路末端に向う。この場合、次のいずれかの理由によって、プッシュアウトできずにそのままゲートに待たされて遅延が発生することがある。これを出発機のゲート遅延と称している。

- ① 誘導路への出入口を2つのゲートが共有し、かつ出発予定時刻が同一時刻の場合
- ② ゲートから離脱しようとした時にゲートの出口に係る誘導路上に他機がいる場合

離陸滑走路末端に到着した航空機は離陸滑走を開始する前に、滑走路が占有されていないか、後続着陸機や先行離陸機との間に十分な管制間隔があるかどうかのチェックを行ない、滑走路が占有されておらずまた十分な管制間隔がある場合に離陸滑走が許される。

また、航空機が使用中の滑走路を横断する場合、その手前で、滑走路が占有されているかどうか、また安全に滑走路を横断できるかどうかのチェックを行ない、その

(チェック項目)



- ・先行着陸機と充分管制間隔があるか？
- ・脱出誘導路は？
- ・ゲートは？
- ・他機が占有していないか？
- ・滑走路横断の場合
 - ・滑走路は占有されていないか？
 - ・離陸待ち機はいないか？
 - ・着陸機が滑走路末端を通過する前に滑走路を横断できるか？
- ・他機が占有していないか？
- ・滑走路横断の場合
同上
- ・滑走路は占有されていないか？
- ・後続着陸機と充分な管制間隔があるか？
- ・先行離陸機と充分な管制間隔があるか？

図 8 航空機の動き

横断が許可される。

6-3 出力項目

シミュレーションによって次のような計算結果が出力される。

- ① 航空機遅延に関しては到着・出発機の滑走路遅延、誘導路遅延そしてゲート遅延が各時間帯ごとに出力される。
- ② 誘導路遅延については、さらに各誘導路(リンク)ごとの遅延の発生状況も出力される。
- ③ 各時間帯ごとに実際に処理できた到着・出発機数が出力される。
- ④ 平均地上走行時間が出力される。

7. おわりに

以上空港容量のうち特に問題となる滑走路容量および航空機遅延について FAA の基本的考え方を紹介した。

これらのモデルは最適な空港計画(規模、配置、動線計画等)を作成するために利用することができ、特に DSM は複数の滑走路、誘導路、ゲート等をもつ大型空港においては有効な手法といえよう。

これらのモデルを使用した研究事例については紙面の都合により別の機会に紹介したいと考えている。

参考文献

- [1] U. S. DOT FAA : AIRPORT CAPACITY CRITERIA USED IN PREPARING THE NATIONAL AIRPORT PLAN, AC 150/5060-1, NOV. 10, 1966
- [2] U. S. DOT FAA : TECHNICAL REPORT ON AIRPORT CAPACITY AND DELAY STUDIES, FAA-RD-76-153, JUNE 1976
- [3] U. S. DOT FAA : TECHNIQUES FOR DETERMINING AIRPORT AIRSIDE CAPACITY AND DELAY, FAA-RD-74-124, JUNE 1976
- [4] U. S. DOT FAA : THE NATIONAL AVIATION SYSTEM CHALLENGES OF THE DECADE AHEAD
- [5] 航空交通管制協会 : 航空管制, No. 1 '80